Sat. Oct 16, 2021

ROOM A

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

AM-1

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo)
9:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

[3A01-03-1add] Award ceremony
9:00 AM - 9:01 AM

[3A01-03-2add] President speech
9:01 AM - 9:04 AM

[3A01-03-3add] Award ceremony
9:04 AM - 9:19 AM

[S20-01] [Invited] Seismic Source Physics from Multiple Perspectives
○Naofumi ASO[1] (1.Tokyo Institute of Technology)
9:19 AM - 9:39 AM

[S20-02] [Invited] Earthquake cycle simulations toward an understanding of earthquake nucleation mechanisms and forecasting
○Makiko OHTANI[1] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)
9:39 AM - 9:59 AM

[S20-03] [Invited] Study of broadband variations inside the earth based on multi-station continuous seismic and geodetic observations
○Ryota TAKAGI[1] (1.Graduate School of Science, Tohoku University)
9:59 AM - 10:19 AM

[3A01-03-7add] Award ceremony
10:19 AM - 10:20 AM

[3A01-03-8add] Discussion
10:20 AM - 10:30 AM

Thu. Oct 14, 2021

ROOM A

Room A | Special session | S21. Seismic spectral analyses for earthquake source physics, earth structure estimation, and strong motion assessment

AM-1

chairperson:Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST), Kazuhiro Somei(Geo-Research Institute)
9:00 AM - 10:00 AM ROOM A (ROOM A)

[S21-01] [Invited] Introduction to the SCEC Community Stress Drop Validation Study
Annemarie Baltay[2], Rachel Abercrombie[3], ○Taka'aki Taira[1] (1.Berkeley Seismological Laboratory, 2.U.S. Geological Survey, 3.Boston University)
9:00 AM - 9:15 AM

[S21-02] Quantification of the Complexities in Rupture Processes of Small Earthquakes by Multiple Spectral Ratio Analyses
○Takahiko UCHIDE[1] (1.Geological Survey of Japan, AIST)
9:15 AM - 9:30 AM

[S21-03] Spatial pattern in frictional properties on the subducting Philippine Sea Plate off the east of Kyushu Island
○Takuji YAMADA[1] (1.Ibaraki University)
9:30 AM - 9:45 AM

[S21-04] Horizontal Site Amplification Factors and Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of S-wave Part and Whole Duration: Needs of Different Correction Function
○Hiroshi KAWASE[1], Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2] (1.Disaster Prevention Research Institute, 2.HAZAMA ANDO CORPORATION)
9:45 AM - 10:00 AM

Room A | Regular session | S19. Seismology, general contribution

AM-1

chairperson:Masumi Yamada(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)
10:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

[S19-01] Characteristics of earthquake swarm activity in central Nagano prefecture as seen from the time variation of background seismic activity estimated by the point process model
○Takao KUMAZAWA[1], Yosihiko Ogata[2] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.The Institute of Statistical Mathematics)
10:00 AM - 10:15 AM

[S19-02] Estimation of the source of the explosive sound on April 26, 2021 in Hokkaido, Japan
○Masumi YAMADA[1] (1.DPRI Kyoto University)
10:15 AM - 10:30 AM

Room A | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

AM-2

chairperson:Eri Ito(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University), Nobuyuki Morikawa(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
11:00 AM - 12:15 PM ROOM A (ROOM A)

©Seismological Society of Japan

[S15-01] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 3 -
- Powerful seismic difficult waves to record by a seismograph -
○Hiroshi MAEHARA[1] （1.Geosystem Research Institute）
11:00 AM - 11:15 AM

[S15-02] Expansion of Ground Motion Prediction Equation Based on Prototype Strong-Motion Database
○Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Asako Iwaki[1], Takahiro Maeda[1] （1.NIED）
11:15 AM - 11:30 AM

[S15-03] An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of S-waves in the layered structur
○Tomonori IKEURA[1] （1.Kajima Technical Research Institute）
11:30 AM - 11:45 AM

[S15-04] Characteristics of sPL and PL phase: Applicability to real-time source depth estimation
○Keishi OSUGA[1], Takashi Furumura[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）
11:45 AM - 12:00 PM

[S15-05] High-Resolution Immediate Fault Slip Estimation of Large Earthquakes Using Seismic Backpropagation
○Yugo SHIBATA[1], Takashi Furumura[1], Takuto Maeda[2] （1.Earth Research Institute, the University of Tokyo, 2.Hirosaki University）
12:00 PM - 12:15 PM

Room A | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

PM-1

chairperson:Atsushi Nozu(Port and Airport Research Institute), Shohei Yoshida(Ohsaki Research Institute, Inc.)
1:30 PM - 3:00 PM ROOM A (ROOM A)

[S15-06] Evaluation of ground motion by kinematic source model considering dynamic rupture process of branch fault for 1896 Rikuu earthquake
○Shuji KUMAGAI[1], Hiroaki MATSUKAWA[2], Yuta MITSUHASHI[2], Yusuke SAIJO[2] （1.Tohoku Electric Power Co.,Inc., 2.Kozo Keikaku Engineering Inc.）
1:30 PM - 1:45 PM

[S15-07] Complex Source Characterization of the 1944 Tonankai Earthquake from Simulated Collapse Ratios of Wooden Houses
○Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2], Haruko Sekiguchi[1], Hiroshi Kawase[1] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.HAZAMA ANDO CORPORATION）
1:45 PM - 2:00 PM

[S15-08] **Estimate of the rupture process of the 2021 off-Fukushima earthquake based on the finite-fault source inversion Inferred from strong motion records**
○Shohei Yoshida[1], Kenichi Tsuda[2], Chen Ji[3], Ralph Archuleta[3,4], Toshiaki Sato[1] （1.Ohsaki Research Institute, Inc. , 2.Shimizu Corporation, 3.University of California, Santa Barbara, 4.RJA Ground Motion Analysis, Inc.）
2:00 PM - 2:15 PM

[S15-09] Strong motion simulation with the SPGA model for the Onagawa Nuclear Power Plant
○Atsushi NOZU[1] （1.Port and Airport Research Institute）
2:15 PM - 2:30 PM

[S15-10] Strong motion simulation of a hypothetical M7-class intraslab earthquake in the Tokyo Bay region using MeSO-net observation data
○Wataru SUZUKI[1], Takeshi KIMURA[1], Hisahiko KUBO[1], Shigeki SENNA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）
2:30 PM - 2:45 PM

[S15-11] Study on correction of the rupture propagation effect of elemental earthquakes used in the empirical Green's function method.
○Junpei KANEDA[1], Shinya TANAKA[1], Yoshiaki HISADA[2] （1.Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., 2.Prof.,Kogakuin Univ.）
2:45 PM - 3:00 PM

Fri. Oct 15, 2021

ROOM A

Room A | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

AM-1

chairperson:Kimiyuki Asano(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University), Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute)
9:00 AM - 10:00 AM ROOM A (ROOM A)

[S15-12] Inhomogeneous structure in the crust of the

©Seismological Society of Japan

Kyushu region by seismic tomography

○Koji Yamada[1], Mitsuhiro Toya[1], Atsushi Okazaki[2]
（1.Hanshin Consultant's Co.,Ltd., 2.KEPCO）

9:00 AM - 9:15 AM

[S15-13] Difference of attenuation structure between Northeastern Japan and Hokkaido revealed by the earthquakes east off Aomori Prefecture

○Yasumaro KAKEHI[1] （1.Graduate School of Science, Kobe Univ.）

9:15 AM - 9:30 AM

[S15-14] Long-Period Ground Motion Amplifications in the Hakodate Plain Based on Ground Motion Simulations Using a New 3D Velocity Model

○Kimiyuki ASANO[1], Tomotaka IWATA[1], Kunikazu YOSHIDA[2], Naoto INOUE[2], Kazuhiro SOMEI[2], Ken Miyakoshi[2], Michihiro OHORI[3] （1.DPRI, Kyoto Univ., 2.Geo-Research Inst., 3.RINE, Univ. of Fukui）

9:30 AM - 9:45 AM

[S15-15] Joint analysis of receiver function and autocorrelation using strong motion for velocity structure profiling based on seismic interferometry

○Kosuke CHIMOTO[1] （1.Kagawa University）

9:45 AM - 10:00 AM

Room A | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

AM-1

chairperson:Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute), Kimiyuki Asano(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)
10:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

[S16-01] A theoretical basis for the applicability of seismic interferometry

○Yosuke NAGASAKA[1], Atsushi Nozu[1] （1.Port and Airport Research Institute）

10:00 AM - 10:15 AM

[S16-02] Long-period later phases in the east of Fukushima prefecture during the M7.4 off Fukushima earthquake on Nov. 22, 2016

○Tomiichi UETAKE[1] （1.Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.）

10:15 AM - 10:30 AM

Room A | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

AM-2

chairperson:Takumi Hayashida(IISEE, Building Research Institute), Kunikazu Yoshida(Geo-Research Institute)
11:00 AM - 12:15 PM ROOM A (ROOM A)

[S16-03] Seismic velocity structure at NB-1 boring site, Nara city

○Tomotaka IWATA[1], Koji YAMADA[2], Motoki SAWADA[2], Daisuke ISHIHARA[2], Shigeru OKAMOTO[2] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Hanshin Consultants, Co. Ltd.）

11:00 AM - 11:15 AM

[S16-04] Investigations of the 2020 seismic noise reductions in areas around Tokyo using MeSO-net seismic data traffic

○Takumi Hayashida[1], Masayuki Yoshimi[2], Haruhiko Suzuki[3], Shinichiro Mori[4], Takao Kagawa[5], Masayuki Yamada[6], Koji Ichii[7] （1.IISEE/BRI, 2.GSJ/AIST, 3.OYO Corporation, 4.Ehime Univ., 5.Tottori Univ., 6.NEWJEC Inc., 7.Kansai Univ.）

11:15 AM - 11:30 AM

[S16-05] Phase velocity of the Love wave estimated based on array-derived rotation from the microtremor array records observed in the Wakayama plain, Japan

○Kunikazu Yoshida[1], Hirotoshi Uebayashi[2], Michihiro Ohori[3] （1.Geo-Research Institute, 2.Kyoto University, 3.University of Fukui）

11:30 AM - 11:45 AM

[S16-06] Fundamental Study on Separation of Surface Waves and Application to Long-Period Ground Motions in the Kanto Plain

○Takuya Sato[1], Hirotoshi Uebayashi[2], Masayuki Nagano[1] （1.Tokyo university of Science, 2.Kyoto university）

11:45 AM - 12:00 PM

[S16-07] Equivalent linear method with complex frequency for site response analyses to near-fault fling-step displacements

○Shuanglan WU[1], Atsushi Nozu[1], Yosuke Nagasaka[1] （1.Port and Airport Research Institute）

12:00 PM - 12:15 PM

Room A | Regular session | S04. Tectonics

PM-1

chairperson:Atsushi Nakao(JAMSTEC), Shinji Yoneshima(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
1:30 PM - 2:45 PM ROOM A (ROOM A)

[S04-01] Exploring the Geometry of the Philippine Sea

©Seismological Society of Japan

Plate beneath Hokuriku region

○Kazuki MIYAZAKI[1], Junichi Nakajima[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[2,3] (1.Tokyo Institute of Technology, 2.Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3.Faculty of Science, Graduate School of Science, Kobe University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S04-02] Seismotectonics at off-Ibaraki region identified from dense earthquake source arrays and dense OBS arrays.

○Shinji YONESHIMA[1], Mochizuki Kimihiro[1] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

1:45 PM - 2:00 PM

[S04-03] 3-D seismic anisotropy structure of the Cascadia subduction zone

○Dapeng ZHAO[1], Y. Hua[1] (1.Research Center for Earthquakes &Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University)

2:00 PM - 2:15 PM

[S04-04] Regression analysis relating maximum earthquake magnitudes with subduction zone parameters

○Atsushi NAKAO[1], Tatsu Kuwatani[1], Kenta Ueki[1], Kenta Yoshida[1], Taku Yutani[1], Hideitsu Hino[2], Shotaro Akaho[3] (1.Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Department of Statistical Modeling, The Institute of Statistical Mathematics, 3.Human Informatics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

2:15 PM - 2:30 PM

[S04-05] Triggering mechanism of volcanic eruptions by large earthquakes

○Takeshi NISHIMURA[1] (1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University)

2:30 PM - 2:45 PM

Sat. Oct 16, 2021

ROOM A

Room A | Regular session | S01. Theory and analysis method

AM-2

chairperson:Akiko Takeo(ERI, University of Tokyo), Yuta Maeda(Nagoya University)
11:00 AM - 12:15 PM ROOM A (ROOM A)

[S01-01] Finite difference calculation of constant-Q seismic ground motion using Rayleigh damping

○Kazuki KOKETSU[1], Hongqi DIAO[2] (1.Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

11:00 AM - 11:15 AM

[S01-02] Dependency of a priori information for radiation-corrected empirical Green's function in waveform inversion

○Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2] (1.Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

[S01-03] Evaluating errors in autocorrelation functions for reliable estimates of a reflection profile

○Yuta MAEDA[1], Toshiki Watanabe[1] (1.Nagoya University)

11:30 AM - 11:45 AM

[S01-04] Passive seismic reflection imaging for local earthquakes: RTM application to MeSO-net data

○Kazuya SHIRAISHI[1], Toshiki Watanabe[2] (1.JAMSTEC, 2.Nagoya University)

11:45 AM - 12:00 PM

[S01-05] Three-dimensional shear-wave velocity structure and shallow very-micro earthquakes above sea level in the Showa-shinzan volcano

○Akiko TAKEO[1], Kiwamu Nishida[1], Motoko Ishise[1], Hiroshi Aoyama[2], Yosuke Aoki[1] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

12:00 PM - 12:15 PM

Room A | Regular session | S01. Theory and analysis method

PM-1

chairperson:Tomoya Takano(Hirosaki University)
1:30 PM - 2:15 PM ROOM A (ROOM A)

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms: a comparison with the wave model WAVEWATCH III

○Kiwamu NISHIDA[1], Ryota TAKAGI[2] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

©Seismological Society of Japan

[S01-07] Seismic velocity response to tidal deformation at shallow crust in Japan

○Tomoya TAKANO[1], Kiwamu NISHIDA[2] （1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

1:45 PM - 2:00 PM

[S01-08] Seismic noise observed by an ocean bottom seismometer revealed glacier sliding velocity in Greenland

○Yoshio MURAI[1], Evgeny A. Podolskiy[2], Naoya Kanna[3], Shin Sugiyama[4,2] （1.Faculty of Science, Hokkaido Univ., 2.Arctic Research Center, Hokkaido Univ., 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, 4.Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ.）

2:00 PM - 2:15 PM

Room A | Regular session | S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

2:15 PM - 3:00 PM ROOM A (ROOM A)

[S12-01] Regional stress field in the northern Kinki district investigated by dense seismic observation

○Toshio Tanaka[1], Yoshihisa Iio[2], Hiroshi Katao[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2] （1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction）

2:15 PM - 2:30 PM

[S12-02] In-situ stress at the basement under Osaka plain(3) -Re-evaluation using rock core samples with DCDA method-

○Kentaro OMURA[1], Akio Funato[2], Takatoshi Ito[3] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Fukada Geological Institute, 3.Institute of Fluid Science, Tohoku University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S12-03] Experimental evaluation under hydrous condition on thermal maturation of carbonaceous materials as a proxy of frictional heating in a fault during an earthquake

○Keita IWAGAKI[1], Tetsuro Hirono[1] （1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University）

2:45 PM - 3:00 PM

Thu. Oct 14, 2021

ROOM B

Room B | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

AM-1

chairperson:Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Hiromichi Nagao(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM B (ROOM B)

[S23-01] A Bayesian multi-model inference for slip distribution in slow slip events beneath the Bungo Channel: the effect of prior constraints

○Ryoichiro AGATA[1], Ryoko Nakata[2], Amato Kasahara[3], Yuji Yagi[4], Yukinari Seshimo[5], Shoichi Yoshioka[5], Takeshi Iinuma[1] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Independent researcher, 4.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 5.Graduate School of Science, Kobe University）

9:00 AM - 9:15 AM

[S23-02] Symplectic-adjoint-based exact uncertainty quantification method and its applications to seismology

○Shin-ichi ITO[1] （1.Earthquake Research Institute,The University of Tokyo）

9:15 AM - 9:30 AM

[S23-03] Coseismic fault model estimation using the Hamiltonian Monte Carlo method and its comparison with the Metropolis-Hastings method

○Taisuke Yamada[1], Yusaku Ohta[1], Keitaro Ohno[2] （1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Geospatial Information Authority of Japan）

9:30 AM - 9:45 AM

[S23-04] An earthquake tomography method for detecting of velocity discontinuities via structured regularization

○Sumito Kurata[1], Yohta Yamanaka[1], Keisuke Yano[2], Fumiyasu Komaki[1], Takahiro Shiina[3], Aitaro Kato[1] （1.The University of Tokyo, 2.The Institute of Statistical Mathematics, 3.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology）

©Seismological Society of Japan

9:45 AM - 10:00 AM

[S23-05] Detection of deep low-frequency earthquakes by matched filter technique using the product of mutual information and correlation coefficient

○Ryo KURIHARA[1], Aitaro Kato[1], Sumito Kurata[2], HIromichi Nagao[1,2] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo）

10:00 AM - 10:15 AM

[S23-06] l_1 trend filtering based detection of short-term slow slip events from a GNSS array in southwest Japan

○Keisuke YANO[1], Masayuki Kano[2] （1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University）

10:15 AM - 10:30 AM

Room B | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

AM-2

chairperson:Hiromichi Nagao(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

[S23-07] [Invited] Some problems associated with Bayesian inversion

○Yukitoshi FUKAHATA[1] （1.RCEP, DPRI, Kyoto University）

11:00 AM - 11:20 AM

[S23-08] [Invited] Nonlinear inversion of geodetic data based on Bayesian statistics

○Junichi Fukuda[1], Kaj M. Johnson[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University）

11:20 AM - 11:40 AM

[S23-09] [Invited] A Bayesian framework for Earthquake Early Warning

○Stephen Wu[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）

11:40 AM - 12:00 PM

[S23-10] Relative probability of ground motion level revealed from the extreme value statistics applied to a continuous seismogram obtained before and after a mainshock.

○Kaoru SAWAZAKI[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

12:00 PM - 12:15 PM

Room B | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

PM-1

chairperson:Keisuke Yano(The Institute of Statistical Mathematics), Hisahiko Kubo(NIED)

1:30 PM - 2:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S23-11] The research of spherical time-space ETAS model

○Ziyao Xiong[1], Jiancang Zhuang[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）

1:30 PM - 1:45 PM

[S23-12] Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression

○Kosuke Morikawa[1], Hiromichi Nagao[2], Shin-ichi Ito[2], Yoshikazu Terada[1,3], Shin'ichi Sakai[2], Naoshi Hirata[2,4] （1.Osaka Univ., 2.Univ. of Tokyo, 3.RIKEN, 4.NIED）

1:45 PM - 2:00 PM

Room B | Special session | S22. Advances in Seismology using AI

PM-1

chairperson:Hisahiko Kubo(NIED), Keisuke Yano(The Institute of Statistical Mathematics)

2:00 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S22-01] Construction of Convolutional Neural Network to Detect Deep Low-Frequency Tremors from Seismic Waveform Images

○Ryosuke KANEKO[1,2], Hiromichi NAGAO[2,1], Shin-ichi ITO[2,1], Kazushige OBARA[2], Hiroshi TSURUOKA[2] （1.Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

2:00 PM - 2:15 PM

[S22-02] Feature Extraction of Earthquake Time-Series Data by Dynamic Mode Decomposition

○Ryota Kikuchi[1], Hisahiko Kubo[2] （1.Kyoto University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

2:15 PM - 2:30 PM

[S22-03] Application of Bayesian Optimization to Black-Box Optimization Problem in Seismology: An Example of Centroid Moment Tensor Inversion

○Hisahiko KUBO[1], Keisuke YOSHIDA[2], Takeshi KIMURA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Tohoku University）

©Seismological Society of Japan

2:30 PM - 2:45 PM

[S22-04] **CMT Data Inversion Using Gaussian Processes**

○Tomohisa OKAZAKI[1], Yukitoshi FUKAHATA[2]
（1.RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2.Kyoto Univ. Disaster Prevention Research Institute）

2:45 PM - 3:00 PM

Fri. Oct 15, 2021

ROOM B

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

AM-1

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo), Tatsuya Kubota(NIED)
9:00 AM - 10:30 AM ROOM B (ROOM B)

[S08-01] Slip and stress drop distribution models of the Tohoku-Oki earthquake: A mechanical implication on the near-trench large slip

○Tatsuya Kubota[1], Tatsuhiko Saito[1]（1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

9:00 AM - 9:15 AM

[S08-02] Spatiotemporal change in the inelastic strain and displacement fields due to aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

○Ayaho MITSUOKA[1], Satoshi MATSUMOTO[2], Yuhei YUASA[3]（1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Japan Meteorological Agency）

9:15 AM - 9:30 AM

[S08-03] Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake

○Yoshihisa IIO[1], Satoshi Matsumoto[2], Kyoto Kyushu Tokyo（1.DPRI, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanoloty, Kyushu University）

9:30 AM - 9:45 AM

[S08-04] Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?

○Ryosuke ANDO[1], Yoshihiro Kaneko[2], Howell Andy[4,3], Andy Nicol[4], Robert Langridge[3], Ian Hamling[3]（1.School of Science, University of Tokyo, 2.School of Science, Kyoto University, 3.GNS Science, 4.Canterbury University）

9:45 AM - 10:00 AM

[S08-05] Quasi-dynamic earthquake sequence simulation of the Median Tectonic line Fault Zone

○Kazunori Muramatsu[1], So Ozawa[1], Ryosuke Ando[1]（1.Department of Earth and Planetary Science, The university of Tokyo）

10:00 AM - 10:15 AM

[S08-06] Investigation of scaling laws for earthquake source parameters using simulations of dynamic rupture with a hierarchical patch structure

○Kazuki Masuda[1], Yoshihiro Kaneko[1]（1.Graduate School of Science, Kyoto University）

10:15 AM - 10:30 AM

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

AM-2

chairperson:Akemi Noda(MRI), Kazutoshi Imanishi(AIST)
11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-07] Plate locking along the Nankai Trough: A scenario for coseismic and post seismic ruptures

○Tatsuhiko SAITO[1], Akemi Noda[2]（1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Meteorological Research Institute）

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-08] Spatial and temporal variations in interplate coupling along the Tohoku-Oki plate boundary deduced from a new method using off-fault earthquakes and geodetic data

○Kazutoshi IMANISHI[1], Akemi Noda[2]（1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Meteorological Research Institute）

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-09] Deep volcanic low frequency earthquakes induced by spatio-temporal stress distribution in northeast Japan

○Genki OIKAWA[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1]（1.Tokyo Institute of Technology）

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-10] Estimate of the stress field in the region of the 2017 southern earthquake

○Hikari Nogi[1], Yoshihisa Iio[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2]（1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

11:45 AM - 12:00 PM

[S08-11] Estimation of inelastic deformation using geodetic and seismic data: Application to

©Seismological Society of Japan

Niigata-Kobe Tectonic Zone

○Akemi NODA[1], Tatsuhiko SAITO[2] （1.Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

12:00 PM - 12:15 PM

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

PM-1

chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University), Junichi Nakajima(Tokyo Institute of Technology)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-12] **Repeating earthquakes and aseismic slip: Toward unified understanding of seismogenesis**

○Junichi NAKAJIMA[1], Akira Hasegawa[2] （1.EPS Department, Tokyo Tech, 2.Graduate School of Science, Tohoku University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-13] Detection of slip events amid the transitional regime between the unstable seismic and stable sliding regimes

○Yoshio FUKAO[1], Tatsuya Kubota[2], Hiroko Sugioka[3], Aki Ito[1], Takashi Tonegawa[1], Hajime Shiobara[4], Mikiya Yamashita[5], Tatsuhiko Saito[2] （1.JAMSTEC , 2.NIED, 3.Kobe Univ, 4.Univ Tokyo, 5.AIST）

1:45 PM - 2:00 PM

[S08-14] Longer than One-year Afterslip due to the 2016 Moderate Earthquakes along Chaman Fault: Noncomplementary Co- and Post-seismic Slip Distribution

○Masato FURUYA[1], Fumiko Matsumoto[2] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2.PASCO）

2:00 PM - 2:15 PM

[S08-15] Propagation velocity of detachment front along a seismogenic plate interface in a rate– state friction model

○Naoyuki KATO[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

2:15 PM - 2:30 PM

[S08-16] Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories

○Keisuke ARIYOSHI[1], Toshinori Kimura[1], Yasumasa Miyazawa[1], Sergey Varlamov[1], Takeshi Iinuma[1], Akira Nagano[1], Joan Gomberg[2,3], Eiichiro Araki[1], Toru Miyama[1], Kentaro Sueki[1], Shuichiro Yada[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[4], Shuichi Kodaira[1] （1.JAMSTEC, 2.USGS, 3.University of Washington, 4.NIED）

2:30 PM - 2:45 PM

[S08-17] Conditions for the existence of the propagation velocities for two forms of the slip fronts and their physical interpretations

○Takehito SUZUKI[1] （1.Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University）

2:45 PM - 3:00 PM

Sat. Oct 16, 2021

ROOM B

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

AM-2

chairperson:Keisuke Yoshida(Tohoku University), Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-18] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

○Takumi Aoki[1], Yoshihiro Kaneko[1], Jesse Kearse[2] （1.Kyoto University, 2.Victoria University of Wellington）

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-19] Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

○Takumi MOTOKOSHI[1], Satoshi Matsumoto[2], Yoshihisa Iio[3], Shin'ichi Sakai[4], Aitaro Kato[4] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.Earthquake Research Institute , the University of Tokyo）

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-20] Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

○Makoto NAOI[1], Keiichi IMAKITA[1], Youqing CHEN[1], Kazune YAMAMOTO[1], Rui TANAKA[1], Hironori KAWAKATA[2], Tsuyoshi ISHIDA[1], Eiichi FUKUYAMA[1], Yutaro ARIMA[3] （1.Kyoto Univ., 2.Ritsumeikan Univ., 3.JOGMEC）

11:30 AM - 11:45 AM

©Seismological Society of Japan

[S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

○Keisuke YOSHIDA[1], Hiroo Kanamori[2] （1.Tohoku University, 2.California Institute of Technology）

11:45 AM - 12:00 PM

[S08-22] Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

○Kantaro Kawai[1], Nobuki Kame[1] （1.ERI, UNIVERSITY OF TOKYO）

12:00 PM - 12:15 PM

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.)

1:30 PM - 2:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-23] Stochastic source time functions satisfying the ω^{-2}-model, the cube law, and the GR law

○Shiro HIRANO[1] （1.College of Sci. &Eng., Ritsumeikan Univ.）

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-24] **Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor**

○Satoshi IDE[1] （1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo）

1:45 PM - 2:00 PM

Room B | Regular session | S18. Education and history of seismology

PM-1

chairperson:Noa Mitsui(Nagoya University)

2:00 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S18-01] Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

○Satoko MUROTANI[1] （1.National Museum of Nature and Science）

2:00 PM - 2:15 PM

[S18-02] Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

○Noa MITSUI[1], Takeshi Sagiya[1] （1.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University）

2:15 PM - 2:30 PM

[S18-03] Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

○Yoshiaki ORIHARA[1] （1.Tokyo Gakugei University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S18-04] Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

○Hiroo NEMOTO[1] （1.Ritsumeikan Univ.）

2:45 PM - 3:00 PM

Thu. Oct 14, 2021

ROOM C

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson:Naofumi Aso(Tokyo Institute of Technology), Taku Ueda(University of Tokyo)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-01] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs**

○Thystere Matondo Bantidi[1], Takeshi Nishimura[1] （1.TOHOKU UNVERSITY）

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

○Jiancang ZHUANG[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-03] Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

○Naofumi ASO[1] （1.Tokyo Institute of Technology）

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-04] Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

○Taku Ueda[1], Aitaro Kato[1], Christopher W Johnson[2], Toshiko Terakawa[3] （1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Los Alamos National Laboratory, 3.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University）

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-05] Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

○Tomoaki NISHIKAWA[1], Takuya Nishimura[1] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

10:00 AM - 10:15 AM

©Seismological Society of Japan

[S09-06] Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

○Yuta MITSUI[1], Keiji UEHARA[1], Issei KOSUGI[2], Koji MATSUO[3] （1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Graduate School of Science, Shizuoka University, 3.Geospatial Information Authority of Japan）

10:15 AM - 10:30 AM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson:Shinji Toda(Tohoku University), Kota Fukuda(University of Tokyo)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-07] Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

○Hiroki TANAKA[1], Ken Umeno[1] （1.School of Informatics, Kyoto University）

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

○Shinji TODA[1], Ross S Stein[2] （1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Temblor, Inc.）

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-09] Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

○Takaki IWATA[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Prefectural University of Hiroshima, 2.Kanazawa University）

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-10] Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

○Satoshi MATSUMOTO[1], Ayaho Mitsuoka[2], Yoshihisa Iio[3], Shinichi Sakai[4], Aitaro Kato[5] （1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2.Graduate School of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

11:45 AM - 12:00 PM

[S09-11] Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

○Kota FUKUDA[1], Takahiro HATANO[2], Kimihiro MOCHIZUKI[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Space Science Osaka University）

12:00 PM - 12:15 PM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

PM-1

chairperson:Yuki Noda(Kyoto University), Masaru Nakano(JAMSTEC)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-12] Seismic activity around lake of Ryujin-ko

○Shin'ichi SAKAI[1,2], Takahiro Akiyama[2] （1.Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo）

1:30 PM - 1:45 PM

[S09-13] Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the ocuurrence factor

○Yuki NODA[1], Hiroshi KATAO[2], Yoshihisa IIO[2] （1.Kyoto University Graduate School of Science, 2.Kyoto University Disaster Prevention Research Institute）

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-14] Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

○Yuta Amezawa[1], Takuto Maeda[1], Masahiro Kosuga[1], Tomoya Takano[1] （1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University）

2:00 PM - 2:15 PM

[S09-15] Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

○Rina IKEDA[1], Keisuke Yoshida[1], Ryo Takahashi[3], Yo Fukushima[2], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Japan Meteorological Agency）

2:15 PM - 2:30 PM

[S09-16] DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

○Masaru NAKANO[1], Hiroko Sugioka[2], Eiichiro Araki[1],

©Seismological Society of Japan

Tomoya Nakajima[1], Aki Ito[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Takashi Yokobiki[1], Takashi Tonegawa[1], Yojiro Yamamoto[1], Toshinori Kimura[1], Gou Fujie[1], Satoru Tanaka[1] （1.IMG, JAMSTEC, 2.KOBEC, Kobe University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-17] Seismic activity (D>10km) around the summit of Mt. Ontake (1)

○Yoshiko YAMANAKA[1] （1.Univ. of Nagoya ）

2:45 PM - 3:00 PM

Fri. Oct 15, 2021

ROOM C

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson:Masashi Ogiso(MRI), Lina Yamaya(University of Tokyo)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-18] Correlation on Seismicity of Regular and Very-low Frequency Earthquakes in the Northern Ryukyu Region

○Youichi ASANO[1] （1.NIED）

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-19] Rapid tremor migration revealed by a dense seismic array in the western Shikoku, Japan

○Aitaro KATO[1], Akiko Takeo[1], Kazushige Obara[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-20] Spatiotemporal distribution of tectonic tremors at off the Kii Peninsula during the period from December 2020 to January 2021 inferred from spatial distribution of seismic amplitudes

○Masashi OGISO[1], Koji TAMARIBUCHI[1] （1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency）

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-21] Characteristics of secondary slip fronts detected from deep low-frequency tremor

○Takuya Maeda[1], Kazushige Obara[1], Akiko Takeo[1], Takanori Matsuzawa[2], Yusaku Tanaka[3] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University）

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-22] Comprehensive detection of shallow tremor activities in the Nankai subduction zone, Japan, based on the DONET seafloor seismic data

○Kazuaki OHTA[1] （1.The National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-23] Centroid moment tensor inversion using dense array of short-period OBSs at off Ibaraki region

○Lina Yamaya[1], Kimihiro Mochizuki[1], Takeshi Akuhara[1], Shunsuke Takemura[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

10:15 AM - 10:30 AM

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson:Ryosuke Azuma(Tohoku University), Satoru Baba(University of Tokyo)

11:00 AM - 12:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-24] Low-frequency tremors activity immediately after the 2003 Tokachi-oki earthquake (M 8.0) detected by offshore aftershock observation

○Susumu Kawakubo[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Hino[1], Hidenobu Takahashi[2], Kazuaki Ohta[3], Masanao Shinohara[4] （1.Tohoku University, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-25] eismicity around the subducting seamount in the Japan-Kuril trenches junction detected by a broad-band OBS array and S-net observatory

○Ryosuke AZUMA[1], Susumu Kawakubo[1], Hidenobu Takahashi[3], Yusaku Ohta[1], Ryota Takagi[1], Syuichi Suzuki[1], Makiko Sato[1], Ryota Hino[1], Shinichi Tanaka[2], Masanao Shinohara[2] （1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.ERI, University of Tokyo, 3.Central Research Institute of Electric Power Industry）

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-26] Quantification of characteristics of temporal change in very low frequency earthquake activity

○Satoru BABA[1], Kazushige Obara[1], Shunsuke Takemura[1], Akiko Takeo[1], Ryo Kurihara[1]

©Seismological Society of Japan

（1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-27] Fault geometry of M6-class outer-rise normal-faulting earthquakes in central Japan Trench from ocean bottom seismograph observations

○Koichiro OBANA[1], Tsutomu Takahashi[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1] （1.JAMSTEC）

11:45 AM - 12:00 PM

Room C | Regular session | S17. Tsunami

AM-2

chairperson:Ryosuke Azuma(Tohoku University), Satoru Baba(University of Tokyo)

12:00 PM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-01] Outer rise Normal Faulting Earthquakes and their Aftershock Activities

○Nobuo HAMADA[1] （1.non）

12:00 PM - 12:15 PM

Room C | Regular session | S17. Tsunami

PM-1

chairperson:Toshitaka Baba(Tokushima University), Satoshi Kusumoto(JAMSTEC)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-02] A New Calculation Method of Wet/Dry Boundary for Tsunami Inundation

○Masaaki MINAMI[1] （1.Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute）

1:30 PM - 1:45 PM

[S17-03] Comparison between tsunami hazard curves and exceedance rate estimated from historical tsunamis in the Nankai subduction zone

○Toshitaka BABA[1], Ryoichi YAMANAKA[2], Hiroyuki FUJIWARA[3] （1.Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2.Research Center for Management of Disaster and Environment, Tokushima University, 3.NIED）

1:45 PM - 2:00 PM

[S17-04] Tsunami source model of the 1854 Ansei-Tokai earthquake based on crustal deformation and tsunami trace height distributions

○Kentaro IMAI[1], Satoshi Kusumoto[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[2,1], Takashi Furumura[3] （1.JAMSTEC, 2.NIED, 3.ERI, The Univ. of Tokyo）

2:00 PM - 2:15 PM

[S17-05] The 1854 CE Ansei Tokai Earthquake and Tsunami Deposits at Iruma, Minami-Izu City, Shizuoka Prefecture

○Satoshi KUSUMOTO[1], Kentaro Imai[1], Takane Hori[1], Daisuke Sugawara[2] （1.JAMSTEC, 2.Tohoku University）

2:15 PM - 2:30 PM

[S17-06] Back-projection imaging of a tsunami source location using S-net ocean-bottom pressure records

○Ayumu MIZUTANI[1], Kiyoshi Yomogida[2] （1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Faculty of Science, Hokkaido University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S17-07] Interaction of tsunamis generated by successive Mw 7.4 and Mw 8.1 earthquakes on Kermadec Islands on March 4, 2021

○Yuchen WANG[1,2], Mohammad HEIDARZADEH[3], Kenji SATAKE[1], Kentaro IMAI[2], Takane HORI[2], Gui HU[4] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3.Department of Civil &Environmental Engineering, Brunel University London, 4.School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University）

2:45 PM - 3:00 PM

Sat. Oct 16, 2021

ROOM C

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

AM-2

chairperson:Daisuke Ishimura(Tokyo Metropolitan University), Yoshiki Shirahama(AIST)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-01] Averaged left-lateral slip rate of the Shufukuji fault revealed by surface exposure dating

○Yoshiki SHIRAHAMA[1] （1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan (GSJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)）

11:00 AM - 11:15 AM

[S10-02] An examination on interconnectedness between the southern part of the Lake Biwa Western Coast Fault system and Oubaku Fault, northern part of the Eastern Margin Fault system of the Nara Basin, central Japan.

©Seismological Society of Japan

○Taku KOMATSUBARA[1], Akihito Nishiyama[2]
（1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）
11:15 AM - 11:30 AM

[S10-03] Paleo-seismic events on the Futagawa fault, Futa, Nishihara Village, Kumamoto Prefecture

○Daisuke ISHIMURA[1], Yoshiya Iwasa[2], Naoya Takahashi[3], Ryuhei Oda[1], Ryuji Tadokoro[4] （1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.Hiroshima Univ., 3.Tohoku Univ., 4.Chiba Univ.）
11:30 AM - 11:45 AM

[S10-04] Impact of tsunami on Hokkaido due to the 1780 Urup earthquake

○Yutaka HAYASHI[1] （1.Meteorological Research Institute）
11:45 AM - 12:00 PM

[S10-05] Damage seismic intensity distribution and damage due to the 1944 Tonankai earthquake in Suwa area

○Karan Okuyama[1], Kotoe Uchiyama, Daisuke Hirouchi[2] （1.Shinshu University Education grad school, 2.Shinshu University）
12:00 PM - 12:15 PM

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

PM-1

chairperson:Yoshiki Shirahama(AIST)
1:30 PM - 2:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-06] Analysis of earthquake activity in southern Miyagi prefecture in the 18th century derived from the Takano family records

○Sunao Urushibara[1], Yasuyuki Kano[1], Junzo Omura[1] （1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）
1:30 PM - 1:45 PM

[S10-07] Analysis of aftershock activity of the Ansei-Edo Earthquake using historical documents in Kanto-Koshinetsu

○Michito Baba[1], Yasuyuki Kano[1] （1.University of Tokyo, Earthquake Research Institute）
1:45 PM - 2:00 PM

Room C | Regular session | S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

PM-1

chairperson:Takehi Isse(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
2:00 PM - 2:30 PM ROOM C (ROOM C)

[S07-01] Slow anomalies atop the 410-km discontinuity oceanward of the Kurile slab

○Masayuki OBAYASHI[1], Junko Yoshimitsu[1], Yoshio Fukao[1] （1.IMG, JAMSTEC）
2:00 PM - 2:15 PM

[S07-02] Impact of anisotropic thermal conductivity on the thermal structure of the Tohoku subduction zone, Northeast Japan

○Manabu MORISHIGE[1], Miki TASAKA[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Shizuoka University）
2:15 PM - 2:30 PM

Thu. Oct 14, 2021

ROOM D

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-1

chairperson:Ayako Nakanishi(JAMSTEC)
9:00 AM - 10:30 AM ROOM D (ROOM D)

[S06-01] Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku

○Shun FUKUSHIMA[1], Masanao SHINOHARA[2], Tomoaki YAMADA[2], Kiwamu NISHIDA[2], Akiko TAKEO[2], Kiyoshi YOMOGIDA[3] （1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 3.Hokkaido University,Graduate school of Science,Department of Natural History Sciences）
9:00 AM - 9:15 AM

[S06-02] Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net

○Takashi Tonegawa[1], Ryota Takagi[2], Kaoru Sawazaki[3], Katsuhiko Shiomi[3] （1.JAMSTEC, 2.Tohoku Univ., 3.NIED）
9:15 AM - 9:30 AM

[S06-03] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling

○Takaya IWASAKI[1], Hiroshi Sato[2,3], Eiji Kurashimo[2], Hirokazu Ishige[4], Hidehiko Shimizu[4], Tatsuya Ishiyama[2], Takashi Iidaka[2], Masanao Shinohara[2], Shinji

©Seismological Society of Japan

Kawasaki[4], Susumu Abe[4], Naoshi Hirata[5,2]
（1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4.JGI, Inc., 5.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）
9:30 AM - 9:45 AM

[S06-04] Lithosphere– asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions
○Takeshi AKUHARA[1], Kazuo Nakahigashi[2], Masanao Shinohara[1], Tomoaki Yamada[1], Hajime Shiobara[1], Yusuke Yamashita[3], Kimihiro Mochizuki[1], Kenji Uehira[4]
（1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Tokyo University of Marine Science and Technology, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）
9:45 AM - 10:00 AM

[S06-05] A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave
○Motoko ISHISE[1], Aitaro Kato[1], Shin'ichi Sakai[1], Shigeki Nakagawa[1], Naoshi Hirata[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）
10:00 AM - 10:15 AM

[S06-06] Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan
○Makoto MATSUBARA[1], Katsuhiko Shiomi[1], Hsatoshi Baba[2], Hiroshi Sato[3], Takahito Nishimiya[4] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Department of Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency）
10:15 AM - 10:30 AM

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-2

chairperson:Motoko Ishise(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)
11:00 AM - 12:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S06-07] Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan
○Ryou HONDA[1], Yuki Abe[1], Motoko Ishise[2], Shin'ichi Sakai[3,2], Yohei Yukutake[2], Ryosuke Doke[1] （1.Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo）
11:00 AM - 11:15 AM

[S06-08] Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough
○Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[1], Gou Fujie[1], Katsuhiko Shiomi[2], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[1,2], Takeshi Nakamura[3], Toshiya Fujiwara[1]
（1.JAMSTEC, 2.NIED, 3.CRIEPI）
11:15 AM - 11:30 AM

[S06-09] Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough
○Gou FUJIE[1], Ryuta Arai[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Shuichi Kodaira[1], Yuka Kaiho[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1] （1.JAMSTEC）
11:30 AM - 11:45 AM

[S06-10] Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity
○Ryuta ARAI[1], Seiichi Miura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Yuka Kaiho[1], Shuichi Kodaira[1], Kimihiro Mochizuki[2], Rie Nakata[2], Kyoko Okino[3] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo）
11:45 AM - 12:00 PM

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions
○Yanxue Ma[1], Rie Nakata [1], Kimihiro Mochizuki[1], Seiichi Miura[2], Yasuyuki Nakamura[2], Ryuta Arai[2], Gou Fujie[2], Yuka Kaiho[2], Shuichi Kodaira[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）
12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

PM-1

chairperson:Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1:30 PM - 2:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S06-12] **Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal**

○Chintan Timsina[1], James Mori[2], Masumi Yamada[2]

（1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-13] **Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion**

○Admore Phindani MPUANG[1,2], Takuo SHIBUTANI[2]

（1.Graduate School of Science, Kyoto University , 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

1:45 PM - 2:00 PM

Room D | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

PM-1

chairperson:Tomokazu Kobayashi(Geospatial Information Authority of Japan), Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

2:00 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S03-01] Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Satoshi FUJIWARA[1]（1.Geospatial Information Authority of Japan）

2:00 PM - 2:15 PM

[S03-02] Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

○Yusaku TANAKA[1], Takeshi Sagiya[1]（1.Nagoya Univ.）

2:15 PM - 2:30 PM

[S03-03] Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

○Satoshi ITABA[1], Kazuaki OHTA[2], Hiroshi HASEGAWA[3]（1.AIST, 2.NIED, 3.JMA）

2:30 PM - 2:45 PM

[S03-04] Slow-slip events of one-hour duration

○Akio KATSUMATA[1], Kazuki Miyaoka[3], Takahiro Tsuyuki[5], Satoshi Itaba[4], Masayuki Tanaka[5], Takeo Ito[6], Akiteru Takamori[2], Akito Araya[2]（1.Univ. of Toyama, 2.ERI, Univ. of Tokyo, 3.JMA, 4.AIST, 5.MRI, JMA, 6.Nagoya Univ.）

2:45 PM - 3:00 PM

Fri. Oct 15, 2021

ROOM D

Room D | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

AM-1

chairperson:Fumiaki Tomita(IRIDeS, Tohoku University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM D (ROOM D)

[S03-05] Spatial and temporal characteristic of the early afterslip following the 2011 Tohoku-Oki earthquake deduced from onshore and offshore geodetic data

Putra MAULIDA[1], ○Yusaku OHTA[1], Ryota HINO[1], Takeshi IINUMA[2], Ryoichiro AGATA[2]（1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.JAMSTEC）

9:00 AM - 9:15 AM

[S03-06] Spatio-temporal evolution of the slow slip event in Kumano-nada occurred during December 2020 to January 2021

○Takeshi Iinuma[1], Eiichiro Araki[1], Ryoichiro Agata[1], Yojiro Yamamoto[1], Toshinori Kimura[1], Yuya Machida[1], Keisuke Ariyoshi[1], Tsuyoshi Ichimura[2], Takane Hori[1], Syuichi Kodaira[1]（1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

9:15 AM - 9:30 AM

[S03-07] Seafloor crustal deformation off the east coast of Izu-Oshima volcano using the Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder

○Yuya MACHIDA[1], Shuhei Nishida[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Eiichiro Araki[1]（1.JAMSTEC）

9:30 AM - 9:45 AM

[S03-08] Application of a method for detections of slow slip events in Nankai region using ocean bottom pressure recorded by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)

○Tomohiro Inoue[1], Yoshihiro Ito[2], Tatsuya Kubota[3], Katsuhiko Shiomi[3], Kazuaki Ohta[3]（1.Division of earth and planetary sciences, Graduate school of science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research

©Seismological Society of Japan

Institute, Kyoto University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
9:45 AM - 10:00 AM

[S03-09] GNSS-Acoustic observations using a Wave Glider and the recent seafloor crustal deformation off Tohoku
○Fumiaki TOMITA[1,2], Takeshi Iinuma[2], Motoyuki Kido[1], Chie Honsho[3], Yusaku Ohta[3], Tatsuya Fukuda[2] (1.IRIDeS, Tohoku University, 2.JAMSTEC, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)
10:00 AM - 10:15 AM

[S03-10] Time stability of sound speed structure affecting the GNSS-A seafloor geodetic observation and observation accuracy
○Yusuke YOKOTA[1], Shun-ichi Watanabe[2], Tadahi Ishikawa[2], Yuto Nakamura[2] (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)
10:15 AM - 10:30 AM

Room D | Regular session | S11. Various phenomena associated with earthquakes

AM-2

chairperson:Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada(Tohoku University)
11:00 AM - 11:15 AM ROOM D (ROOM D)

[S11-01] Turbidity current associated with 2003 Tokachi-oki earthquake recvisited
○Ryoichi IWASE[1] (1.JAMSTEC)
11:00 AM - 11:15 AM

Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

AM-2

chairperson:Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada(Tohoku University)
11:15 AM - 12:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S02-01] **An investigation of mechanical characteristics of energy source in seismic reflection survey using underwater speaker**
○Kazuki Takanaka[1], Rema Kurosawa[1], Tetsurou Turu[1] (1.Tokyo university of Marine science and Technology)
11:15 AM - 11:30 AM

[S02-02] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor off Boso Peninsula 2
○Hajime SHIOBARA[1], Toshinori Sato[2], HyeJeong Kim[1], Yuki Kawano[1], Haruka Nagai[1], Aki Ito[3], Masanao Shinohara[1], Hiroko Sugioka[4] (1.ERI, Univ. Tokyo, 2.Chiba Univ., 3.JAMSTEC, 4.KOBEC, Kobe Univ.)
11:30 AM - 11:45 AM

[S02-03] To what extent can stationary seismic observation network detect small landslides using short-period seismic waves?
○Issei DOI[1], Takuto MAEDA[2], Aitaro KATO[3], Tetsuya TAKEDA[4], Hidehiko MURAO[5] (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 3.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5.Murao Chiken)
11:45 AM - 12:00 PM

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (1)
○Shigeki NAKAGAWA[1], Hiroshi AOYAMA[2], Hiroaki TAKAHASHI[2], Takuto MAEDA[3], Naoki UCHIDA[4], Mare YAMAMOTO[4], Kazuo OHTAKE[5], Hiroshi TSURUOKA[1], Yosuke AOKI[1], Yuta MAEDA[6], Shiro OHMI[7], Haruhisa NAKAMICHI[7], Makoto OKUBO[8], Takeshi MATSUSHIMA[9], Hiroshi YAKIWARA[10], Katsuhiko SHIOMI[11], Kenji UEHIRA[11], Hideki UEDA[11], Kazuki MIYAOKA[12], Koji TAMARIBUCHI[13], Ryou HONDA[14], Shutaro SEKINE[15] (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Hokkaido University, 3.Hirosaki University, 4.Tohoku University, 5.Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6.Nagoya University, 7.Kyoto University, 8.Kochi University, 9.Kyushu University, 10.Kagoshima University, 11.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12.Japan Meteorological Agency, 13.Meteorological Research Institute, JMA, 14.Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15.Association for the Development of Earthquake Prediction)
12:00 PM - 12:15 PM

Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

PM-1

chairperson:Satoshi Katakami(Center for Railway Earthquake Engineering Research)
1:30 PM - 2:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S02-05] Seafloor seismic observation using long-distance DAS technology
○Hiroyuki MATSUMOTO[1], Eiichiro Araki[1], Takashi

©Seismological Society of Japan

Yokobiki[1], Kinzo Kishida[2], Daiji Azuma[2] （1.JAMSTEC, 2.Neubrex Co., Ltd.）
1:30 PM - 1:45 PM

[S02-06] Long-period noise reduction on fiber optic distributed acoustic sensing (DAS)
○Eiichiro ARAKI[1], Takashi Yokobiki[1] （1.JAMSTEC IMG）
1:45 PM - 2:00 PM

[S02-07] Long term DAS acquisition using Toyohashi-Oki seafloor cable
○Toshinori KIMURA[1], Eiichiro Araki[1], Takashi Yokobiki[1], Koshun Yamaoka[2], Shuhei Tsuji[2], Toshiki Watanabe[2] （1.JAMSTEC IMGFEAT, 2.Nagoya University）
2:00 PM - 2:15 PM

Room D | Regular session | S14. Earthquake prediction and forecast

PM-1

chairperson:Fuyuki Hirose(Meteorological Research Institute)
2:15 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S14-01] Application of weighted likelihood method to the Brownian Passage Time model for recurrent earthquakes with uncertain origin times and an analytical soluton of the maximum likelihood estimate
○Masajiro IMOTO[1], Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）
2:15 PM - 2:30 PM

[S14-02] Trial calculation of long-term probability for crustal earthquakes using GNSS data
○Takuya NISHIMURA[1] （1.DPRI, Kyoto Univ.）
2:30 PM - 2:45 PM

[S14-03] **Modified estimation of the HIST-ETAS model for earthquake catalogs possessing long- and short-term incomplete data**
○Yosihiko OGATA[1], Koichi Katsura[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）
2:45 PM - 3:00 PM

Thu. Oct 14, 2021

ROOM P1

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P1 (ROOM P)

[S03P-01] Continuous estimation of the transition process from coseismic rupture to initial postseismic slip based on the PTS analysis
○Yusuke TANAKA[1], Yusaku Ohta[2], Shin'ichi Miyazaki[3] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Kyoto University）
3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-02] Details on crustal deformation and gravity-inferred density structures at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake
○Tomokazu KOBAYASHI[1], Koji MATSUO[1], Ryosuke ANDO[2], Takayuki NAKANO[1] （1.Geospatial Information Authority of Japan, 2.University of Tokyo）
3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-03] Application of an objective detection method for long-term slow slip events to Hyuga-nada
○Akio KOBAYASHI[1] （1.Meteorological Research Institute）
3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-04] Systematic-detection of short-term slow slip events in the Alaska subduction zone
○Yutaro OKADA[1], Takuya NISHIMURA[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University , 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）
3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-05] Long-term SSE along the Nankai trough since 2018
○Shinzaburo Ozawa[1], Hisashi Suito[1], Hiroshi Munekane[1] （1.Geospatial Authority of Japan）
3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-06] Decadal postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake observed with the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)
○Shun-ichi WATANABE[1], Tadashi Ishikawa[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo）
3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-07] Temporal variation in slip deficit rate at Nankai trough observed by the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

©Seismological Society of Japan

○Tadashi ISHIKAWA[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, the University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-08] Evaluation of the effects of underwater sound speed structure on GNSS-A observation using numerical simulation

○Yuto NAKAMURA[1], Yusuke Yokota[2], Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P2

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S06. Crustal structure

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P2 (ROOM P)

[S06P-01] Preliminary report on seismic reflection survey off the southeastern coast of Hokkaido, Kuril trench

○Tetsuo NO[1], Shuichi Kodaira[1], Gou Fujie[1], Yasuyuki Nakamura[1], Kazuya Shiraishi[1], Ryo Muira[1], Hiroto Yamaguchi[2,1], Yuka Kaiho[1], Jin-Oh Park[3], Yue Sun[3], Fan Yu[3], Masao Nakanishi[4], Megumi Fujimoto[5,6], Ryoya Kobayashi[5] （1.JAMSTEC, 2.Kobe Univ., 3.AORI, Univ. of Tokyo, 4.Graduate School of Science, Chiba Univ., 5.Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 6.SOEST, Univ. of Hawaii at Manoa ）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-02] Measurement of seismic velocity anisotropy in the Tohoku region, NE Japan by shear wave splitting analysis (4)

○Tatsuya MIZUTA[1], Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ryota TAKAGI[1], Keisuke YOSHIDA[1], Shin'ichi SAKAI[3], Kei KATSUMATA[4], Mako OHZONO[3,4], Masahiro KOSUGA[5], Takuto MAEDA[5], Yoshiko YAMANAKA[6], Hiroshi KATAO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Takashi NAKAYAMA[1], Satoshi HIRAHARA[1], Toshio KONO[1], Toru MATSUZAWA[1], Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake （1.Univ. of Tohoku, 2.Victoria University of Wellington, 3.Univ. of Tokyo, 4.Univ. of Hokkaido, 5.Univ. of Hirosaki, 6.Univ. of Nagoya, 7.Univ. of Kyoto, 8.Univ. of Kyushu, 9.Univ. of Kagoshima）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-03] Philippine Sea plate structure inferred from SP converted waves: Preliminary analysis in the southwestern Tokyo metropolitan area

○Kazuo YOSHIMOTO[1] （1.Yokohama City University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-04] Three-dimensional velocity structure beneath Hakusan volcano estimated by double-difference tomography

○Rin Miura[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-05] Detailed seismic reflection structure mapping in the western Nankai Trough

○Yasuyuki NAKAMURA[1], Yuka Kaiho[1], Tetsuo No[1], Kazuya Shiraishi[1], Gou Fujie[1], Shuichi Kodaira[1], Gaku Kimura[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1], Ayako Nakanishi[1] （1.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-06] The characteristics of small normal faults developed on the subducting Philippine Sea Plate along Nankai Trough

○Mikiya YAMASHITA[1,2], Ayako Nakanishi[2], Seiichi Miura[2], Shuichi Kodaira[2], Yoshiyuki Kaneda[3,2] （1.Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3.Kagawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-07] Effects of insufficient back-azimuth coverage on the estimation of a dipping velocity discontinuity

○Katsuhiko SHIOMI[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-08] Random velocity inhomogeneity at the western

©Seismological Society of Japan

part of the Nankai subduction zone

○Tsutomu TAKAHASHI[1], Koichiro OBANA[1], Yasushi ISHIHARA[1], Seiichi MIURA[1], Shuichi KODAIRA[1], Yoshiyuki KANEDA[2] （1.JAMSTEC, 2.Kagawa Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P3

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P3 (ROOM P)

[S09P-01] Relation between activity of repeating earthquakes and slip-rate deficit under the Ryukyu Trench– Nanakai Trough

○Akinori HASHIMA[1], Hiroshi Sato[2], Tatsuya Ishiyama[2], Toshihiro Igarashi[2] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-02] Swarm earthquake activity in the northeastern Noto Peninsula

○Yoshihiro Hiramatsu[1] （1.Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-03] Numbers and duration of aftershocks for inland earthquake in Japan as a function of their size

○Taichi Honda[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-04] Relevance of Seismic activity near Wakayama City to the earth tides

○Funa Iizuka[1], Yasuhiro Yoshida[2] （1.Sapporo Regional Headquarters, JMA, 2.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-05] A trial digitization and spectral analysis of analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network for the analysis of tectonic tremor

○Takanori MATSUZAWA[1], Tetsuya TAKEDA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-06] Comparison of the regional characteristics of the magnitude-frequency distribution of earthquakes with interplate slip phenomena along Japan Trench

○Kohei Nagata[1], Koji Tamaribuchi[1], Fuyuki Hirose[1], Akemi Noda[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-07] Urgent ocean bottom seismic observation of earthquake swarms in the Tokara Islands initiated in April 2021

○Yukihiro NAKATANI[1], Hiroshi Yakiwara[1], Yusuke Yamashita[2], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1] （1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-08] Seismicity pattern before and after the 2016 Kumamoto earthquakes

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Jun Izutsu[4], Yoshiaki Orihara[5], Masashi Kamogawa[1] （1.Univ. of Shizuoka, 2.Shizuoka Univ., 3.Inst. of Stat. Math., 4.Chubu Univ., 5.Tokyo Gakugei Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-09] A preliminary study on low-frequency earthquakes below Mt. Fuji: Creation of an earthquake catalog using the Matched Filter method and quality evaluation of the catalog

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Yohei Yukutake[4] （1.Univ. of Shizuoka, 2.Inst. of Stat. Math., 3.Shizuoka Univ., 4.Univ. of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-10] Anomalous seismic activity including shallow low-frequency events near Hakodate: hypocenter distribution and characteristics of waveforms derived by dense seismic observation

○Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Masahiro Kosuga[2], Takuto Maeda[2] （1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Hirosaki University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-11] Stress field in the Tohoku region, Japan and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

○Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Shin'ichi Sakai[2], Mako Ohzono[2,3], Kei Katsumata[3], Masahiro Kosuga[4], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Shu'ichiro Hori[1], Toru Matsuzawa[1], . Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific

©Seismological Society of Japan

coast of Tohoku Earthquake （1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 4.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5.Graduate School of Encironmental Studies, University of NAGOYA, 6.Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 8.Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-12] Performance comparison of hash-based methods for similar waveform detection

○Yuki Takayama[1], Shiro Hirano[1], Hironori Kawakata[1]（1.Ritsumeikan University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-13] Along-strike variation of shallow very low frequency earthquake activity in the Nankai subduction zone

○Shunsuke TAKEMURA[1], Satoru Baba[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Katsuhiko Shiomi[4], Takanori Matsuzawa[4]（1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.Tohoku University, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-14] Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude

○Koji TAMARIBUCHI[1], Masashi OGISO[1]（1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-15] Aftershocks and shear strain energy changes caused by inland earthquakes in Japan

○Sachiko TANAKA[1]（1.NIED）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-16] Three-dimensional tectonic stress field inferred from long-term data of seismicity with prior information

○Toshiko TERAKAWA[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2]（1.Nagoya Univ., 2.ISM）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-17] Spatio-temporal distribution of the very-low frequency earthquake at Kumano-nada — Activity between Dec. 2020 and Jan. 2021—

○Yojiro Yamamoto[1], Keisuke Ariyoshi[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Takane Hori[1]（1.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-18] Controling factors of along-dip segmatation of mega-thrust earthquakes in subduciton zones

○Kiyoshi YOMOGIDA[1]（1.Earth Planetary Dynamics, Grad Sch Sci, Hokkaido University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-19] Visualization of seismic activity anomalies - comparison of multiple methods

○Sumio YOSHIKAWA[1]（1.No affiliation (JMA, retired)）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-20] Scaling relations of moment magnitude and rupture area for intraslab earthquakes

○Xuelei Zhang[1], Makoto Nemoto[1], Nobuyuki Morikawa[2], Yuji Dohi[2], Kenji Hirata[2], Hiroyuki Fujiwara[2]（1.OYO corporation, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P4

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S13. Crustal fluids and earthquake

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P4 (ROOM P)

[S13P-01] Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan

○Tsuyoshi WATANABE[1], Shinya Hiratsuka[1], Koji Shimada[1]（1.Japan Atomic Energy Agency）

3:30 PM - 5:00 PM

[S13P-02] Crustal anisotropy structure around Mt Ontake derived from shear-wave splitting analysis

○Osamu MURAKAMI[1], Tsuyoshi Watanabe[1]（1.Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P5

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S15. Strong ground motion

©Seismological Society of Japan

and earthquake disaster

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P5 (ROOM P)

[S15P-01] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of earthquakes around Fukushima Prefecture based on Block Inversion analysis using S-net data

○Yusuke TOMOZAWA[1], Tomoki Hikita[1], Tomonori Ikeura[1], Kentaro Kasamatsu[1] (1.Kajima Technical Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-02] **Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites**

○Yadab Prasad DHAKAL[1], Atsushi Wakai[1], Hiroaki Yamanaka[2], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-03] Modeling of a three-dimensional shallow S-wave velocity structure based on numerous microtremor arrays: A case study in and around Nishio City, Aichi Prefecture

○Ikuo CHO[1] (1.Geological Survey of Japan, AIST)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-04] Strong motion very close to the surface rupture during the 2016 Kumamoto earthquake

○Asako IWAKI[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1.NIED)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-05] Source Process of the Off Fukushima Earthquake of February 2021
- Analysis considering 3D subsurface structure -

○Kazuhito HIKIMA[1] (1.Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-06] Applicability of the strong ground motion prediction method to the 2021 Fukushima-oki earthquake (Mj7.3)

○Kiyoshi IRIE[1], Shohei YOSHIDA[1], Yasuo OKADA[1], Ken MIYAKOSHI[2], Kazuhiro SOMEI[2], Haruhiko TORITA[1] (1.Ohsaki Research Institute, Inc., 2.Geo-Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-07] Re-examination of scaling relationships of source parameters of the interplate earthquakes in Japan

○Ken MIYAKOSHI[1], Yujia GUO[1], Kunikazu YOSHIDA[1], Kiyoshi IRIE[2] (1.Geo-Research Institute, 2.Ohsaki Research Institute, Inc.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-08] Concept of Earthquake Disaster Prevention Infrastructure Simulator for the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

○Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Takahiro MAEDA[1], Yuji DOHI[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Harumi ISHIMARU[3] (1.NIED, 2.OYO RMS Corporation, 3.Mitsubishi Space Software Co.,Ltd.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-09] Long-duration and broadband ground motion simulation for the great earthquakes along the Nankai Trough

○Takahiro MAEDA[1], Asako IWAKI[1], Shin AOI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Kosuke SEKI[2], Ryuta IMAI[3] (1.NIED, 2.Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3.Mizuho Research &Technologies, Ltd.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-10] Tsunami Inundation Simulation Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough
- For Effective Use of Tsunami Hazard Information -

○Yuji DOHI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Katsuya YAMORI[2], Takashi SUGIYAMA[2] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-11] A trial of conditional hazard assessment based on Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

Hiromitsu NAKAMURA[1], ○Yoshinori Tokizane[2], Hiroyuki FUJIWARA[1], Satoshi SHIMIZU[2], Miki ASO[2] (1.NIED, 2.OYO RMS Corp.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-12] Number of earthquakes from seismic activity model of the probabilistic seismic hazard map for Japan starting from 2020

○Jun'ichi MIYAKOSHI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Hiroyuki FUJIWARA[2] (1.Ohsaki Research Institute, Inc., 2.National Research Institute for Earth Science

©Seismological Society of Japan

and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-13] **Nonergodic Ground Motion Prediction Model Using Artificial Neural Networks**

○Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Asako IWAKI[2], Hiroyuki FUJIWARA[2], Naonori UEDA[1]

（1.RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-14] Analysis and numerical modeling of local earthquake records obtained by the AN-net

○Hisashi NAKAHARA[1], Shutaro Sekine[2] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P6

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S19. Seismology, general contribution

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P6 (ROOM P)

[S19P-01] Picking of P and S waves and hypocenter determination of the Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake

○Katsuhiro Takasaki[1], Masanao Komatsu[2], Tomotsugu Watanabe[2], Hiroshi Takenaka[3], Mitsutaka Oshima[4] （1.Department of Earth Sciences, Okayama University (Current Affiliation: Japan Meteorological Agency), 2.Department of Earth Sciences, Okayama University, 3.Department of Earth Sciences, Okayama University, 4.Shimizu Corporation）

3:30 PM - 5:00 PM

[S19P-02] Research Project for Disaster Prevention on the great Earthquakes along the Nankai trough: Result and plan

○Shuichi KODAIRA[1], Hiroyuki Fujiwara[2], Narumi Takahashi[1,2] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P7

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S21. Seismic spectral analyses for earthquake source physics, earth structure estimation, and strong motion assessment

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P7 (ROOM P)

[S21P-01] Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

○Noriko KAMAYA[1], Masashi OGISO[1]

（1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S21P-02] Rupture propagation effects of moderate-sized earthquakes off Fukushima prefecture derived from source spectra

○Toshimi SATOH[1] （1.Shimizu Corporation）

3:30 PM - 5:00 PM

[S21P-03] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Spatial heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

○Tsukasa Masuda[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki University）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P8

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S22. Advances in Seismology using AI

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P8 (ROOM P)

[S22P-01] Validation of Seismic Phase Picking Using Deep Learning Models Trained by Hakone Volcanic Earthquake Data

○Ahyi KIM[1], Yuji Nakamura[1], Umi Hatakeyama[1], Hiroki Uematsu[1], Yohei Yukutake[2], Yuki Abe[3]

（1.Yokohama City University, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Hot Springs Research Institute, Kanagawa）

3:30 PM - 5:00 PM

[S22P-02] Automatic reading of P-wave first motion amplitudes of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory using a deep learning technique

○Makoto NAOI[1], Youqing CHEN[1], Rui TANAKA[1], Yutaro ARIMA[2] （1.Kyoto Univ., 2.JOGMEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S22P-03] Improvement of the Single Station Algorithm in Earthquake Early Warning Using Machine

©Seismological Society of Japan

Learning Technique

○Shunta NODA[1], Masato UKAI[1] （1.Railway Technical Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P9

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P9 (ROOM P)

[S23P-01] Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for understanding the current state of postseismic deformation and its short-term prediction following the 2003 Tokachi-oki earthquake

○Masayuki KANO[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Yoichi Ishikawa[3], Kazuro Hirahara[4,5] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Faculty of Science, Kyoto University, 3.JAMSTEC, 4.Riken, 5.Kagawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S23P-02] Estimation of depth-dependent variations in seismic velocity in the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake based on the MCMC approach

○Takahiro SHIINA[1], Masayuki KANO[2], Sumito KURATA[3], Aitaro KATO[4] （1.Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 4.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

Fri. Oct 15, 2021

ROOM P1

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S01. Theory and analysis method

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P1 (ROOM P)

[S01P-01] Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust

○Kazuki Kidoguchi[1], Jun Kawahara[1], Takahiro Shiina[2] （1.Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2.Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-02] Numerical test for imaging oceanic slab based on a passive-source reverse time migration

○Takashi FURUMURA[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-03] Numerical simulation of seismoacoustic wave propagation on and beneath the sea surface: Evaluation of deamplification effect due to a seawater layer

○Takeshi NAKAMURA[1], Hiroshi TAKENAKA[2] （1.Central Research Institute of Electric Power Industry, 2.Okayama University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-04] Migration-based event location method applicable to local earthquakes recorded in Ocean Bottom Seismograph.

○Shinji YONESHIMA[1], Kimihiro Mochizuki[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-05] Study on the wavefield for the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Taro OKAMOTO[1], Hiroshi Takenaka[2], Takeshi Nakamura[3] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth Sciences, Okayama University, 3.Geology and Geotechnical Engineering Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-06] Extraction of P-s converted wave of mantle discontinuities beneath Japan from ambient seismic noise

○Shota KATO[1], Kiwamu Nishida[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-07] How to interpret vertical-CLVD moment tensor solution at active calderas with ring faults? — Case studies at Sierra Negra in the Galá pagos Islands and Kilauea in Hawaii

○Osamu SANDANBATA[1,2], Hiroo Kanamori[3], Luis

©Seismological Society of Japan

Rivera[4], Zhongwen Zhan[3], Kenji Satake[5], Shingo Watada[5], Voon Hui Lai[6] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.JSPS Research Fellow (PD), 3.California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 4.Université de Strasbourg, CNRS, ITES UMR 7063, Strasbourg F-67084, France, 5.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 6.Australian National University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-08] The observability of seismic radial anisotropy parameters using MCMC and a reconstruction of thinly layered structure under a volcano

○Junpei MARUYAMA[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Nozomu Takeuchi[1] (1.Earthquake research institute, The university of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-09] A study on the Application of 3-D Travel-Time Prediction to the Bayesloc multiple-event lolation

○Yuko Kondo[1], Hiroko Sugioka[1], Masayuki Obayashi[2] (1.Kobe University, 2.JAMSTEC)

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-10] Symplectic numerical integration method for normal mode computation of the spherically symmetric Earth

○Shingo WATADA[1] (1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P2

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P2 (ROOM P)

[S02P-01] Hypocenter determination in 3-dimensional velocity structure based on the travel-times calculated by the shortest path method

○Shoji SEKIGUCHI[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-02] Examination of centroid moment tensor analysis using S-net

○Hisanori KIMURA[1], Youichi ASANO[1] (1.NIED)

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-03] Development of a realtime monitor system for WIN system using the MQTT protocol

○Hiroshi TSURUOKA[1] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-04] Seismic activity in the central-southern part of Tohoku District - a preliminary report

○Tomomi OKADA[1], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Shigeki Horiuchi[9], Kei Katsumata[2], Mako Ohzono[2,4], Masahiro Kosuga[3], Takuto Maeda[3], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Group for the aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1.Tohoku University, 2.Hokkaido University, 3.Hirosaki University, 4.ERI, University of Tokyo, 5.Nagoya University, 6.Kyoto University, 7.Kyushu University, 8.Kagoshima University, 9.Homeseismo)

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-05] Real-Time Calculation Method of Seismic Intensity Applicable to Low-Rate Sampled Acceleration Record

○Takashi Hirai[1], Yuki Yoshioka[2] (1.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-06] Seismic reflection survey using seafloor optical cable and DAS measurement off Sanriku

○Hiroki Takano[1], Masanao Shinohara[2], Rie Nakata[2], Eiji Kurashimo[2], Tatsuya Ishiyama[2], Kimihiro Mochizuki[2] (1.Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-07] A coupling degree of optical fiber cable on seafloor using earthquake travel time recorded by distributed acoustic sensing (DAS)

○Satoshi KATAKAMI[1], Eiichiro ARAKI[2], Narumi TAKAHASHI[3], Shunta NODA[1], Naoyasu IWATA[1], Masahiro KORENAGA[1], Yasutomo YAMAUCHI[1] (1.RTRI, 2.JAMSTEC, 3.NIED)

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P3

©Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S04. Tectonics

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P3 (ROOM P)

[S04P-01] Relationship between tectonic tremors and 3D distributions of thermal structure and dehydration in the Alaska subduction zone

○Kaya IWAMOTO[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[2,1] （1.Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2.Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P4

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P4 (ROOM P)

[S07P-01] The location of the inner core hemispherical boundary in the north polar region

○Tadashi Iwasaki[1] （1.kyoto university ）

3:30 PM - 5:00 PM

[S07P-02] Surface wave fitting for Vs structure of the oceanic crust and upper mantle
- Development of the initial model using shorter period waveforms -

○Haruka NAGAI[1], Nozomu Takeuchi[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Hajime Shiobara[1], Takehi Isse[1], Hiroko Sugioka[2], Aki Ito[3], Hisashi Utada[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Kobe University, 3.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P5

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S08. Earthquake physics

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P5 (ROOM P)

[S08P-01] Similar aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake

○Emana Mori[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-02] Estimating the shape of the source spectrum of regular and low-frequency earthquakes in the inland area of Japan

○Masaki Orimo[1], Keisuke Yoshida[1], Taka'aki Taira[2], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1], Kentaro Emoto[3] （1.Research center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University , 2.Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, 3.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-03] The characteristics of source parameters of interplate earthquakes occurring in and around the Raukumara Peninsula in the North Island, New Zealand

○Kazuya TATEIWA[1], Calum Chamberlain[2], Martha Savage[2], Tomomi Okada[1] （1.Tohoku University, 2.Victoria University of Wellington）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-04] Source process of volcano tectonic earthquakes during the earthquake swarm off the east of Izu Peninsula in 2006

○Yukako Tanaka[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-05] Seismic radiation process of the 2011 Tohoku earthquake inferred from ocean bottom pressure records above its source region

○Hisahiko KUBO[1], Tatsuya KUBOTA[1], Tatsuhiko SAITO[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-06] Initiation of the M~9 earthquake cycle: the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition

○Keisuke YOSHIDA[1], Toru Matsuzawa[1], Naoki Uchida[1] （1.Tohoku University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-07] Preparation process for a Miyagi-Oki earthquake following the 2011 Tohoku-Oki earthquake

○Ryoko NAKATA[1], Ryota Hino[1] （1.Tohoku University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-08] Investigation of multi-segment earthquake on

©Seismological Society of Japan

the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

○Yuko KASE[1], Yumi URATA[1] （1.Geological Survey of Japan）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-09] Simulation of dynamic earthquake sequence in a linear poroelastic medium

○Hiroyuki NODA[1] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-10] The influence of fault-strength heterogeneity on earthquake cycle in a viscoelastic medium

○Makoto Yamamoto[1], Hiroyuki Noda[1] （1.Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-11] Temporal evolution of b-values in rate-and-state fault models with frictional heterogeneities

○Ryo Ito[1], Yoshihiro Kaneko[1] （1.Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-12] Large-scale earthquake sequence simulations on 3D geometrically complex faults with lattice H matrices

○So OZAWA[1], Akihiro Ida[2], Tetsuya Hoshino[3], Ryosuke Ando[1] （1.Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Information Technology Center, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-13] Steady-state pore pressure based on a hydraulic model considering changes in P-T conditions and clay dehydration due to plate subduction

○Shunya KANEKI[1], Hiroyuki NODA[1] （1.DPRI, Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-14] Estimation of parameter values for a slip- and time- dependent law using slip-stress relations of the Boso slow slips

○Reo Uchida[1], Toshinori Sato[1], Takuma Kobayashi[1,2] （1.Chiba University, 2.Asia Air Survey Co.,Ltd.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-15] Estimating Effective Normal Stress During Slow Slip Events From Slip Velocities and Shear Stress Variations

○Toshinori SATO[1], Takuma Kobayashi[1,2] （1.Graduate School of Science, Chiba University, 2.Asia Air Survey CO., LTD）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-16] Frictional properties of metagabbro gouge in centimeter scale
-Toward understanding scale dependence of rock friction-

○Futoshi Yamashita[1], Kazuo Mizoguchi[2], Sachiko Iizuka[3] （1.NIED, 2.CRIEPI, 3.CERES Inc.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-17] Calibration of AE sensor by wave propagation modeling on a 4-meter-long biaxial friction apparatus

○Kurama Okubo[1], Futoshi Yamashita[1], Fukuyama Eiichi[2,1] （1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate school of engineering, Kyoto university ）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-18] Microstructure in the gouge layer developed by large-scale velocity step change experiments

○Shun Watanabe[1], Futoshi Yamashita[2], Sumire Maeda[2], Akihiro Shimoda[3], Eiichi Fukuyama[1,2] （1.Kyoto University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3.Nippon Life Insurance Company）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-19] Friction and wear properties of Indian sandstone with increasing work rate and generation and destruction of the fault mirror

○Sumire MAEDA[1], Futoshi Yamashita[1], Kurama Okubo[1], Eiichi Fukuyama[1,2] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience , 2.Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-20] Existence of Weak Zones: Enhancing Dynamic Rupture or Not?

○Koji UENISHI[1,2], Kunihiro NAGASAWA[2] （1.Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Engineering, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-21] On the Dynamic Stability of a Granular Slope

○Koji UENISHI[1], Dongyun XI[1] （1.Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

[S08P-22] Physical Properties of Core Samples Recovered from a seismogenic zone and the host rock of a M5.5 Earthquake

○Kensuke Sakaguchi[1], Shunsuke Yoshida[2], Mitsuya Higashi[3], Yuki Yokoyama[4], Koichiro Suzuki[1], Yasuo Yabe[5], Dakalo Ligaraba[6], Nandipha Masondo[6], Tetsuro Hirono[7], Yuji Yamamoto[8], Takuya Matsuzaki[8], Hiroshi Ogasawara[9], Seiya Ohba[9], Masaya Wakimoto[9]
（1.Graduate School of Sci. Eng., Ritsumeikan Univ., 2.Japan Mint, 3.Mazda Motor Corporation, 4.TechnoPro, Inc., 5.Graduate School of Science, Tohoku Univ., 6.Graduate School of Geoscience, University of the Witwatersrand, 7.Graduate School of Science, Osaka Univ., 8.Center for Advanced Marine Core Research, Kochi Univ., 9.College of Sci and Eng., Ritsumeikan Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P6

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P6 (ROOM P)

[S10P-01] Gravity anomaly analyses of the Chojagahara and Yoshii faults

Yuki Matsui[1], Akihiro Sawada[1], ○Yoshihiro Hiramatsu[1] （1.Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S10P-02] Damages of stonewalls and seismic intensity distribution of the 1914 Sakurajima earthquake in Kagoshima city, Japan

○Reiji KOBAYASHI[1] （1.Kagoshima University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S10P-03] Verification of the doubtful damaging earthquake in the late Edo period by using historical diary records (1)

○Tomoya HARADA[1], Akihito NISHIYAMA[2], Akihiko KATAGIRI[3], Rei MIZUNO[4], Seiya YOSHIOKA[4]
（1.Independence, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recover, Niigata University, 4.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P7

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P7 (ROOM P)

[S12P-01] **Development of the photoelastic experimental system using gel medium to observe induced earthquakes caused by water injection**

○Nana YOSHIMITSU[1], Eiichi FUKUYAMA[1,2], Shiro HIRANO[3], Masato OSAKI[1] （1.Kyoto Univ., 2.NIED, 3.Ritusmeikan Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S12P-02] Calibration of broadband ultrasonic transducers with sensitivity up to about 4 MHz

○Hironori KAWAKATA[1], Tomohiro Ohuchi[2]
（1.College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 2.Geodynamics Research Center, Ehime University）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P8

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S14. Earthquake prediction and forecast

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P8 (ROOM P)

[S14P-01] Efficiency of earthquake forecast models based on the information of the earth tidal correlation of background seismicity along the Tonga-Kermadec trench

○Fuyuki HIROSE[1], Kenji MAEDA[2], Osamu KAMIGAICHI[3] （1.Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2.Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency, 3.Japan Meteorological Business Support Center）

3:30 PM - 5:00 PM

[S14P-02] Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

○Hironobu KAMIKUBO[1] （1.Hamamatsu Hokusei Jhs）

3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P9

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

©Seismological Society of Japan

P
3:30 PM - 5:00 PM ROOM P9 (ROOM P)

[S16P-01] Estimation of shallow shear-wave velocity structure from vehicle-induced surface waves on DAS records along Route 4
○Katsuhiro YABU[1], Hisashi NAKAHARA[1], Kentaro EMOTO[1], Takeshi NISHIMURA[1] (1.Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-03] Microtremor Survey near the Yoshioka Fault Caused by the 1943 Tottori Earthquake - Case of Miyadani and Ohtsuka area, Tottori City -
○Tatsuya NOGUCHI[1], Ryo Ashida[1], Kazuki Kobayashi[2], Isamu Nishimura[3], Nao Yoshikawa[1], Takao Kagawa[1] (1.Tottori University, 2.Aratani Civil Engineering Consultants CO.,LTD., 3.Graduate School of Engineering, Tottori University)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-04] Microtremor Observation for Numerical Modeling of Subsurface Velocity Structure in the Kochi Plain
○Nobuyuki YAMADA[1] (1.Kochi University)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-05] Modeling of subsurface velocity structures from seismic bedrock to ground surface for Yamanashi region
○Shigeki Senna[1], Atsushi Wakai[1], Tadashi Satou[2], Atsushi Yatagai[2], Hisanori Matsuyama[2], Hiroyuki Fujiwara[1] (1.NIED, 2.OYO Corporation)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-06] Attempt to search the caldera boundary by microtremor H/V on Satsuma-Iwojima Island
○Masayuki YAMADA[1], Yoshihiro ITO[1], Yosuke NAGASAKA[2], Atsushi NOZU[2], Takashi NAGAO[3], Hisashi OIWANE[4] (1.NEWJEC Inc., 2.Port and Airport Research Institute, 3.Kobe Univ., 4.Musuhi LLC.)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-07] Dynamic deformation characteristics in the shatter zone of the Mino Fault of Median Tectonic Line
○Takao KAGAWA[1], Kazunari Kimura[2] (1.Tottori Univ., Faculty of Engineering, 2.Naiba Co. Ltd.)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-08] Estimation of Subsurface Structures and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground from Microtremor Observations – Case of Kitazono, Tottori City –
○Isamu Nishimura[1], Nazuna Nishimura[2], Tatsuya Noguchi[2], Takao Kagawa[2] (1.Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, Tottori University, 2.Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-09] A study on the de-convolution waveform based on seismic interferometry using the data observed at MeSO-net
○Kenichi Nakano[1], Hirotoshi Uebayashi[2] (1.HAZAMA ANDO CORPORATION, 2.Kyoto University)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-10] Evaluation of characteristics of spatial variation at adjacent points based on 3-D ground motion simulation and coherence model
○Ryoichi Tokumitsu[1], Yu Yamamoto[1], Yasuo Uchiyama[1], Susumu Ohno[2] (1.Taisei Corporation, 2.Tohoku Univ.)
3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-11] Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (2)
○Tadashi YAMASHINA[1], Makoto OKUBO[1], Takao TABEI[1], Muksin UMAR[2], Nazli ISMAIL[2] (1.Kochi University, 2.Syiah Kuala University, Indonesia)
3:30 PM - 5:00 PM

ROOM P10

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S17. Tsunami

P
3:30 PM - 5:00 PM ROOM P10 (ROOM P)

[S17P-01] A Fundamental Study on the Probabilistic Analysis Method for Landslide-induced Tsunamis Triggered by Earthquakes
○Masanobu KOBA[1], Satoru Tsuchiya[2], Tatsuto Kimura[3], Masafumi Matsuyama[4], Katsuhide Kato[5] (1.EGC, 2.Unic, 3.TEPSCO, 4.CRIEPI, 5.CEPCO)
3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-02] Tsunami database type tsunami inundation prediction using different optimization methods
○Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[2] (1.Graduate

©Seismological Society of Japan

School of Frontier Sciences, Tokushima University, 2.Graduate School of Social Science and Engineering, Tokushima University)
3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-03] Two-Layer Flow Model Tsunami Calculation with Non-hydrostatic Pressure Effect under the Assumption of Submarine Landslide in the Northern Part of Tosa-Bae off Shikoku
○Masahiro Kurozumi[1], Toshitaka Baba[1] (1.Tokushima univ)
3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-04] A Preliminary Examination on Characteristics of Submarine Landslide Tsunami along the Nankai Trough
○Kentaro IMAI[1], Yasuyuki Nakamura[1], Toshiya Fujiwara[1], Yuichiro Tanioka[2] (1.JAMSTEC, 2.Hokkaido Univ.)
3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-05] Attenuation of the 2006 and 2007 Kuril islands tsunamis
○Keiji Akai[1], Naoko Shinmoto[2], Toshitaka Baba[1] (1.Tokushima graduate school, 2.Tokushima univ.)
3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-06] Later tsunami wave of the 1952 Kamchatka earthquake
○Hiroaki TSUSHIMA[1], Takeyasu YAMAMOTO[1] (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)
3:30 PM - 5:00 PM

Thu. Oct 14, 2021

Introduction of committee activities

Poster session (Oct. 14th) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

S24
3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities (ROOM P)

[S24P-01] Public Relations Committee
○佐藤 利典[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-02] Newsletter Editorial Board
○豊国 源知[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-03] Strong Ground Motion Committee
○干場 充之[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-04] Committee for School Education
○加納 靖之[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-05] Disaster Investigation Committee
○吾妻 崇[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-06] Committee on Summer School for Kids
○佐藤 明子[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-07] Geoparks Assistance Committee
○松原 誠[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-08] Committee for Seismology Outreach
○久田 嘉章[1] (1.The Seismological Society of Japan)

Fri. Oct 15, 2021

Introduction of committee activities

Poster session (Oct. 15th) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

S24
3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities (ROOM P)

[S24P-01] Public Relations Committee
○佐藤 利典[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-02] Newsletter Editorial Board
○豊国 源知[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-03] Strong Ground Motion Committee
○干場 充之[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-04] Committee for School Education
○加納 靖之[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-05] Disaster Investigation Committee
○吾妻 崇[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-06] Committee on Summer School for Kids
○佐藤 明子[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-07] Geoparks Assistance Committee
○松原 誠[1] (1.The Seismological Society of Japan)

[S24P-08] Committee for Seismology Outreach
○久田 嘉章[1] (1.The Seismological Society of Japan)

©Seismological Society of Japan

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

AM-1

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo)

Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

[3A01-03-1add] Award ceremony

9:00 AM - 9:01 AM

[3A01-03-2add] President speech

9:01 AM - 9:04 AM

[3A01-03-3add] Award ceremony

9:04 AM - 9:19 AM

[S20-01] [Invited] Seismic Source Physics from Multiple Perspectives

○Naofumi ASO[1] (1.Tokyo Institute of Technology)

9:19 AM - 9:39 AM

[S20-02] [Invited] Earthquake cycle simulations toward an understanding of earthquake nucleation mechanisms and forecasting

○Makiko OHTANI[1] (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:39 AM - 9:59 AM

[S20-03] [Invited] Study of broadband variations inside the earth based on multi-station continuous seismic and geodetic observations

○Ryota TAKAGI[1] (1.Graduate School of Science, Tohoku University)

9:59 AM - 10:19 AM

[3A01-03-7add] Award ceremony

10:19 AM - 10:20 AM

[3A01-03-8add] Discussion

10:20 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

9:00 AM - 9:01 AM (Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A)

[3A01-03-1add] Award ceremony

9:01 AM - 9:04 AM (Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A)

[3A01-03-2add] President speech

9:04 AM - 9:19 AM (Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A)

[3A01-03-3add] Award ceremony

©Seismological Society of Japan

[Invited] Seismic Source Physics from Multiple Perspectives

*Naofumi ASO[1]

1. Tokyo Institute of Technology

地震現象は、断層すべりという一見単純な現象として知られているが、実際には複雑で多様な現象である。そうした中にも普遍性を見出し、物理的な理解を目指すのが震源物理学である。私はこれまで、データ解析・シミュレーション・物理モデリング・臨時観測といった多様なアプローチにより、狭義の地震現象を主たる研究対象としながらも、広義の地震波動源の物理的理解に取り組んできた。

火山型深部低周波地震は、地殻下部での唯一の地震波動生成現象であり、その物理メカニズムの解明は、地殻深部からの流体供給過程等の理解に必要不可欠である。私は、このような特殊な地震を対象として、震源メカニズムや地震活動という観点から普遍的な特徴を探り［Aso et al., 2013; Aso and Ide,2014］、そうした特殊な地震の発生を駆動する物理モデルとして、マグマの冷却による熱応力の影響を提唱した［Aso and Tsai, 2014］。

また、断層破壊力学分野において、確率論的な考え方の導入を進めた。地震発生に関わる物理量や物理法則をすべて厳密に決定することは不可能で、決定論的議論には限界がある。こうした不確定性を確率論的な擾乱として考慮することで、より現実的な地震のモデル化手法を提案した［Aso et al.,2019］。シンプルなモデルながらも、クラック的・パルス的な通常地震のほか、スロー地震の細かな特徴まで再現することができ、断層破壊力学の常識を一変させる可能性を秘める。

多様な対象やアプローチを取り扱う中で、意識しつづけていることは、従来の固定観念にとらわれない多角的な視点である。例えば、アクティブなマグマティズムに起因する地震現象ではなく、マグマが冷える過程で地震が発生する可能性を提唱したり、決定論的な運動方程式が用いられ続けてきた断層破壊力学において、確率論的な運動方程式を導入したりするなど、従来の固定観念にとらわれずに、新たな方向性を切り開こうとしてきた。

今回の発表では、上記の研究内容を初めての方にもわかりやすく紹介したい。また、これまでの研究生活を取り巻いてきたエピソードに加え、私の考える研究像や研究者像についてもお話することで、特に学生をはじめとした若手の研究者にとって、研究の方向性や研究への取り組み方について考えるきっかけとなれば幸いである。

© The Seismological Society of Japan

[Invited] Earthquake cycle simulations toward an understanding of earthquake nucleation mechanisms and forecasting

*Makiko OHTANI[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

断層面上では、様々なサイズの地震やゆっくりすべり(SSE)を含む多様な時空間スケールのすべり現象が密に分布し、これらのすべり現象の相互作用を通して巨大地震がどのような発生過程を辿るかを調べることは、地震発生予測に繋がる可能性がある。実験できない地震の発生機構を調べるには、数値計算が強力な研究手段である。著者は、巨大地震発生領域近傍の様々な断層すべり活動から巨大地震の発生を予測することを目指して、地震の繰り返しを計算機上で模擬する地震発生サイクルシミュレーション(Earthquake Cycle Simulation; ECS)を行ってきた。本講演では、著者がこれまで行ってきた、ECS計算手法の高度化、地震発生機構の解明とそれに基づく地震発生予測に関する取り組みを紹介する。

１．計算手法の高度化
異なるすべり現象の相互作用を考慮したECS計算の実施には、計算の大規模化が問題であり、現実的な計算コストの新手法開発が必要であった。著者は応用数理分野で提案された密行列圧縮手法であるH行列法(Hackbush, 1999)を導入することにより、ECSの計算時間・メモリ量を離散小断層数Nに対してO(N^2)からO(N)～(Nlog$N$)へと大幅に削減することに成功した (Ohtani et al., 2011)。
また、この大規模ECSに地表面形状を導入する新たな手法の構築を行った。全無限媒質を仮定し、地表面の位置に地表境界条件を満たす仮想的な断層を配置することで、任意の地表面形状下でのすべり応答関数を数値的に求める(Ohtani and Hirahara, 2015)。本手法は上記H行列の適用を妨げず、沈み込み帯の現実的な幾何形状を考慮した大規規模ECSが実施可能である。

２．地震発生機構の解明と地震発生予測
著者はこれまでECSモデルの構築を通して、特に巨大地震とその近傍で発生する長期的SSEとの関係を明らかにし、巨大地震発生予測に繋がる知見が得られないか調べる研究を行なってきた。2011年東北地方太平洋沖地震(M9)に関する研究では、SSEを含む断層すべりの時系列を定性的に説明するモデルを構築し、本震発生に至る過程を調べた(Ohtani et al., 2014)。SSEは地震のサイクル後半に発生するが、M9地震の発生タイミングは震源域内大すべり域の固着状態が最終状態に近いかどうかに強く支配され、SSE発生が巨大地震の前兆現象とは言えない結果となった。本研究はH行列を適用したECSによって初めて実施可能となったものである。
また1946年昭和南海地震で観測された可能性のある顕著な前駆的すべりについて、カットオフ速度以上のすべりで摩擦強化する摩擦則を用いて深部SSEと巨大地震が自発的に発生するECSモデルを構築した。このモデルでは、カットオフ速度の脆性延性遷移域での深さ変化が原因となり深部SSEが巨大化し、巨大地震の発生に至る前駆すべりとなった(Ohtani et al., 2019a)。ここでも、深部巨大SSEは必ずしも直後の地震を誘発するとは限らない結果となったが、網羅的な事例計算に基づき算出した巨大SSE後の地震発生確率は、SSE直後3日間は警報レベルに高いがそれ以後定常載荷レベルに戻ることがわかった。この数字を直接現実に当てはめることはできないが、本研究は地震の物理モデルに依拠した地震発生警報の発出・解除の仕方の一つの方向性を示すものではないかと考えている。
SSEの周期性に注目した研究では、同期現象と呼ばれる非線形物理現象が現れることが見出された(Ohtani et al., 2019b)。近傍の周期的に発生するSSEによって周期的に変化する応力載荷レート下で発生する大地震のタイミングを一自由度モデルで調べたところ、地震の発生間隔が応力載荷のリズムに支配され、地震周期がSSE周期の丁度整数倍に同期する現象(同期現象)が観察された。一定応力載荷レート下では地震発生間隔は摩擦強度に比例するが、周期的応力載荷下では少しの摩擦強度の変化よりも、載荷のリズムが優先される。このような現象が現実でも起きている可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

[Invited] Study of broadband variations inside the earth based on multi-station continuous seismic and geodetic observations

*Ryota TAKAGI[1]

1. Graduate School of Science, Tohoku University

はじめに

近年の高密度地震・地殻変動観測網における連続観測データは，新たな解析手法の開発や発展を促し，また新現象の発見につながるなど，地震学の発展の基礎となっている．筆者は，地球内部構造の時空間変化やプレート境界における非地震性すべりなどの地球内部における変動現象の解明のため，多点連続観測データに基づく解析手法の開発や高度化，およびそれらを大量の実データへ適用した研究を行ってきた．講演では，これまでの研究で得られた知見に加えて研究の背景や経緯についても紹介したい．

地震波干渉法の高度化と地球内部構造の時空間変化に関する研究

地震波干渉法は，多点連続観測データを有効利用し地球内部構造の時空間変化を明らかにするための有力なツールである．地震波干渉法の利点は地球内部構造の時間変化の検出である．筆者らは，地震波干渉法を用いて2008年岩手・宮城内陸地震と2011年東北地方太平洋沖地震よる地震波速度低下を検出するとともに，地震波速度変化の空間分布や強震動と相関から速度低下の原因として強震動の寄与が大きいことを示した（Takagi & Okada 2012; Takagi et al. 2012）．地震波干渉法のもう一つの利点は構造解析周波数の広帯域化であるが，短周期地震計を用いた稠密観測では観測記録に含まれるコヒーレントな機器ノイズが解析上の問題となる．筆者らは，ノイズの精査と理論的な考察に基づき機器ノイズの効果的な除去手法の開発し，地震波干渉法の適用範囲を拡大させることに成功した（Takagi et al. 2015; 2021）．さらに，筆者らによる波動理論に基づく実体波と表面波の分離手法の開発（Takagi et al. 2014）や脈動の指向性推定手法の開発（Takagi et al. 2018）も，地震波干渉法をさらに発展させ，今後の地球内部構造の時空間変化のさらなる理解につながると期待される．

スロースリップイベント活動様式に関する研究

スロー地震は，地震・地殻変動の多点連続観測による最大の発見の一つである．筆者らは，地殻変動データの観察から，スロー地震の中でも数ヶ月から数年程度と最も時間スケールの長い長期的スロースリップイベント（長期的SSE）が四国中部の微動発生域と固着域の間の領域において繰り返し発生すること示した（Takagi et al. 2016）．また，長期的SSEを系統的に検出する新たな手法を開発し，南海トラフにおける詳細な長期的SSE活動様式を明らかにした（Takagi et al. 2019）．これまで一部の領域でのみ検出されていた長期的SSEが普遍的な現象であることを示すとともに，長期的SSEと固着分布の空間相関性および長期的SSEの大規模移動現象を発見した．これらは巨大地震と長期的SSEとの関連性を示唆する結果である．また，長期的SSEの活動は，隣接領域で発生する深部低周波微動や繰り返し地震活動の時間変化を理解する上でも重要である（Takagi et al. 2016; Uchida et al. 2020）．

おわりに

多点観測ではシグナルの空間的相関性を用いることで普通では見えない微小なシグナルを捉えることが可能になる．また，観測研究の最先端では必然的にノイズとの戦いになることも多いため，大量の観測データを上手く，有効に，効率的に使う手法が必要である．S-net等の海域における新たな観測網やDASに代表される新技術を用いた観測，超多点稠密観測等の発展が進む中で，観測データのもつ情報を可能な限り引き出し，地球内部の様々な変動現象の解明に貢献できるような研究を今後も行なっていきたいと考えている．

謝辞

防災科学技術研究所，国土地理院，気象庁，東北大学のデータを用いました．観測網の構築・維持・管理に関わる皆様に記して感謝致します．

© The Seismological Society of Japan

10:19 AM - 10:20 AM (Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A)

[3A01-03-7add] Award ceremony

10:20 AM - 10:30 AM (Sat. Oct 16, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM A)

[3A01-03-8add] Discussion

©Seismological Society of Japan

Room A | Special session | S21. Seismic spectral analyses for earthquake source physics, earth structure estimation, and strong motion assessment

AM-1

chairperson:Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST), Kazuhiro Somei(Geo-Research Institute)
Thu. Oct 14, 2021 9:00 AM - 10:00 AM ROOM A (ROOM A)

[S21-01] [Invited] Introduction to the SCEC Community Stress Drop Validation Study

Annemarie Baltay[2], Rachel Abercrombie[3], ○Taka'aki Taira[1] （1.Berkeley Seismological Laboratory, 2.U.S. Geological Survey, 3.Boston University）

9:00 AM - 9:15 AM

[S21-02] Quantification of the Complexities in Rupture Processes of Small Earthquakes by Multiple Spectral Ratio Analyses

○Takahiko UCHIDE[1] （1.Geological Survey of Japan, AIST）

9:15 AM - 9:30 AM

[S21-03] Spatial pattern in frictional properties on the subducting Philippine Sea Plate off the east of Kyushu Island

○Takuji YAMADA[1] （1.Ibaraki University）

9:30 AM - 9:45 AM

[S21-04] Horizontal Site Amplification Factors and Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of S-wave Part and Whole Duration: Needs of Different Correction Function

○Hiroshi KAWASE[1], Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2] （1.Disaster Prevention Research Institute, 2.HAZAMA ANDO CORPORATION）

9:45 AM - 10:00 AM

©Seismological Society of Japan

[Invited] Introduction to the SCEC Community Stress Drop Validation Study

Annemarie Baltay[2], Rachel Abercrombie[3], *Taka'aki Taira[1]

1. Berkeley Seismological Laboratory, 2. U.S. Geological Survey, 3. Boston University

We introduce a community stress drop validation study using the 2019 Ridgecrest earthquake sequence, in which researchers are invited to use a common dataset to estimate earthquake stress drop. Earthquake stress drop is a key parameter in many ground motion, rupture simulation, and source physics problems in earthquake science. In theory stress drop relates the average slip on a fault to rupture area, and, in practice, it quantifies the higher frequency ground motions of an earthquake. We seek to understand the physical controls and methodological reasons for similarity or differences in stress drop estimates, so that they can be used more reliably by the earthquake science community. The common dataset consists of 2 weeks of earthquakes following the 2019 Ridgecrest M6.4 earthquake, including nearly 13,000 earthquakes of M1 and greater, recorded on stations within 100 km. This dataset and related information are available from the Southern California Earthquake Center (SCEC) Web site: https://www.scec.org/research/stress-drop-validation. We are soliciting stress drop estimates from community participants on any subset of these events, using a variety of methods. We are correlating and comparing these resulting stress drops as they are made available in a meta-analysis, to understand why similarities or differences arise. We will examine which earthquakes or methods generate grossly similar or different results in the first round of analyses. We will then share the findings and encourage individuals and groups to revisit their analyses and investigate the principal sources of discrepancies and uncertainties. We will present an overview of the study, and preliminary results. As a community study, all are invited to join!

© The Seismological Society of Japan

Quantification of the Complexities in Rupture Processes of Small Earthquakes by Multiple Spectral Ratio Analyses

*Takahiko UCHIDE[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

震源過程は、解像度に限界はあるものの、断層すべりインバージョン解析やバックプロジェクション解析といった地震学的なデータ解析によって、その特徴が明らかにされてきている。主に一方向に破壊が伝播する場合もあれば、逆方向の明瞭な破壊伝播を伴う場合もある。破壊が始まってから、一度収まるとそのまま終わって、単一の破壊域を持つというものもあれば、複数の場所を次々に破壊するという場合もある。このような多様性を生む原因として、破壊される断層にかかる応力や摩擦特性などが考えられるが、それらを直接知ることは容易ではない。破壊過程の複雑性は、そのような断層の物理的条件を知る手掛かりとなりうるものと考えられる。

多数の地震の破壊過程の特徴を定量化する方法として地震波スペクトル解析がある。観測波形のスペクトルから伝播特性やサイト特性を除去して、オメガ2乗モデルなどのスペクトルモデルに合わせることで、震源過程の特徴を地震モーメントやコーナー周波数といったパラメータに落とし込む。円形クラックモデル（e.g., Brune, 1970）を仮定することで、地震モーメントとコーナー周波数を応力降下量に変換する。

伝播特性とサイト特性を除去する方法として、解析対象の地震のスペクトルと、その近傍で発生したより小さい地震のスペクトル（経験的グリーン関数（EGF））との比を取るスペクトル比法がある。解析対象地震とEGF地震との伝播経路が似通っていることを利用したものであるが、伝播経路のわずかな違いが誤差の要因となってしまう。そこで、EGF地震として選ぶことができる地震が多数存在する場合、それらの結果を統合すれば、EGF地震の選択に伴う誤差を低減させることができると考えられる。Uchide and Imanishi (2016)が提案した多重スペクトル比法はそのような考え方で開発された解析法である。各EGF地震について、解析対象地震との間のスペクトル比をオメガ2乗モデルで合わせた際の残差を求める。その残差スペクトルを中央値スタッキングすることで、EGFの選択に依らない残差スペクトルが得られる。この残差スペクトルは解析対象地震の震源スペクトルに起因すると考える。そのため、残差スペクトルをオメガ2乗モデルに重ね合わせたものが解析対象地震の震源スペクトルであると考える。

多重スペクトル比法を日本各地の内陸の20 km以浅で発生した地震に適用する。残差スペクトルがほぼ平坦で、オメガ2乗モデルがよく成り立つ例もあれば、残差スペクトルが起伏に富んでいて、震源スペクトルがオメガ2乗モデルから大きく外れて、コーナー周波数が2つあるように見えるような場合もある。同様の傾向は2019年米国カリフォルニア州リッジクレスト地震の余震でも見られる。このような複雑性の地域性が、その原因を知るための手掛かりの一つになると考えられる。

The earthquake source processes have been characterized by seismological data analysis such as finite-fault slip inversion analyses and back-projection analyses, although the resolution is limited. Some earthquakes are unilateral, while some others are bilateral. Some have single rupture patches, while some others multiple ones. Such diversity may be due to the stress and frictional properties of the fault being ruptured, but it is not easy to measure them directly. Nevertheless, the complexity of the rupture process may provide a clue to the physical properties of such faults.

Seismic spectral analyses quantify characteristics of the rupture process of many earthquakes. By removing propagation and site effects from the observed spectra and fitting them to a spectral model

© The Seismological Society of Japan

(e.g., the omega-square model), the characteristics of the earthquake source process are reduced to parameters such as seismic moment and corner frequency, which can be converted into stress drops by assuming a circular crack model (e.g., Brune, 1970).

The spectral ratio method removes propagation and site effects by taking the ratio of the spectrum of the target event to that of a nearby smaller earthquake (empirical Green's function (EGF)). This method takes advantage of the fact that the propagation paths of the target event and the EGF event are similar. However, slight differences in the propagation paths produce errors. The errors cause by the selection of EGF event will be reduced by integrating such errors in analyses using different EGF events. The multiple spectral ratio method proposed by Uchide and Imanishi (2016) was developed based on this idea. We fit the EGF and target events' spectral ratios by the omega-square model and then obtain the residuals. By median-stacking the residual spectra, we can obtain the residual spectra independent of the choice of EGF. We consider that this residual spectrum is due to the source spectrum of the target event. Therefore, the residual spectrum superimposed on the omega-square model is considered the source spectrum of the earthquake to be analyzed.

We applied the multiple spectral ratio method to inland earthquakes that occurred at depths greater than 20 km in Japan. In some cases, the residual spectra are almost flat, and the omega-square model holds well. In contrast, in other cases, the residual spectra are undulating, and the source spectra deviate from the omega-square model so much that they appear to have two corner frequencies. A similar trend is seen in the aftershocks of the 2019 Ridgecrest earthquake. The regional variety will be a clue to the earthquake source complexity.

© The Seismological Society of Japan

Spatial pattern in frictional properties on the subducting Philippine Sea Plate off the east of Kyushu Island

*Takuji YAMADA[1]

1. Ibaraki University

1. はじめに

九州東方沖では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震が繰り返し発生している。本研究では、2003年1月から2020年12月に九州東方沖で発生した小地震（4.0 <= Mw <= 5.0）のうち、2.で説明するとおり、プレート境界面の摩擦特性を反映していると考えられる140地震を選び出し、応力降下量の解析を行った。

2. 解析地震の選択基準

本研究では深さ方向の震源決定精度を考慮して、Baba *et al.* (2002), Hirose *et al.* (2008), Nakajima and Hasegawa (2007) の推定したフィリピン海プレート境界面から±15 km の深さで起きた小地震（4.0 <= Mw <= 5.0）を選び、解析対象とした。

解析対象の地震の規模の下限と上限は、以下の理由から設定した。マグニチュードが3.5を下回る地震では、特に低周波数帯の信号-ノイズ比が悪かった。そこで、経験的グリーン関数（EGF）として用いる地震をMw3.5とし、コーナー周波数の決定精度を確保するため、解析対象地震はEGFと0.5以上のマグニチュードの開きをもつ地震（Mw >= 4.0）とした。また、応力降下量は各地震の断層面の大きさに応じた平均的値として求められるため、解析対象地震の断層面が大きすぎると、空間不均質性の議論に不適である。よって、解析対象地震の規模の上限はMw5.0とした。

なお本研究では、気象庁によって決定されたマグニチュードMjmaがモーメントマグニチュードMwに等しいと仮定しているが、この仮定の妥当性についても検討済みである。また、解析対象地震のうち、防災科学技術研究所によってメカニズム解が求められている地震については、フィリピン海プレートの沈み込みと調和的な節面を持つことを確認済みである。

3. 応力降下量解析

Yamada *et al.* (2021) の手法を用いて、応力降下量の解析を行った。まず、2003年から2020年に発生したMw3.5の地震のうち、解析対象の小地震（4.0 <= Mw <= 5.0）の震源から最短距離にある地震の観測波形をEGFとした。次に、解析対象の地震の観測波形スペクトルをEGFのスペクトルでデコンボリューションし、震源スペクトルがオメガ2乗モデルに従うとの仮定のもと、解析対象地震のコーナー周波数を求めた。最後に、断層面が円形であり、かつ破壊伝播速度がS波速度の90%であると仮定して、Madariaga (1976) のモデルを用いてコーナー周波数から応力降下量を計算した。

4. 結果および考察

小地震の応力降下量の解析結果から、プレート境界の摩擦特性、特に剪断強度の空間不均質分布を推定することができる（Yamada *et al.*, 2021）。各地震の応力降下量の解析結果をもとに、緯度・経度それぞれ0.1度ごとに平滑化した応力降下量分布を図1.に示す。

北海道南東沖（Yamada *et al.*, 2017）や東北地方東方沖（Yamada *et al.*, 2021）の太平洋プレートの沈み込みに伴う小地震の解析結果と比べると、全体的に応力降下量が小さい。これは、九州東方沖のフィリピン海プレート上の摩擦強度が相対的に低いことを示唆していると考えられる。また、より小さな空間スケールでの結果に着目すると、1996年日向灘地震の震源域（図1.の赤枠A）の南隣に、応力降下量が大きい領域が見られる。すなわち、この領域では剪断強度が高く、日向灘地震の際にバリアとして働いたのかもしれない。

小地震の応力降下量の解析結果から推定される摩擦特性の空間分布は、動的破壊シミュレーションの剪断強度分布として使用することを通して、強震動予測の精度向上にも貢献できると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

参考文献：
- Baba *et al.* (2002), PEPI, https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00044-4
- Hirose *et al.* (2008), JGR, https://doi.org/10.1029/2007JB005274
- Madariaga (1976), BSSA, 66 (3): 639–666
- Nakajima and Hasegawa (2007), JGR, https://doi.org/10.1029/2006JB004770
- Yagi *et al.* (1999), GRL, https://doi.org/10.1029/1999GL005340
- Yamada *et al.* (2017), PEPS, https://doi.org/10.1186/s40645-017-0152-7
- Yamada *et al.* (2021), EPS, https://doi.org/10.1186/s40623-020-01326-8

謝辞：本研究では、Hi-net（防災科学技術研究所）、気象庁、鹿児島大学、九州大学、高知大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

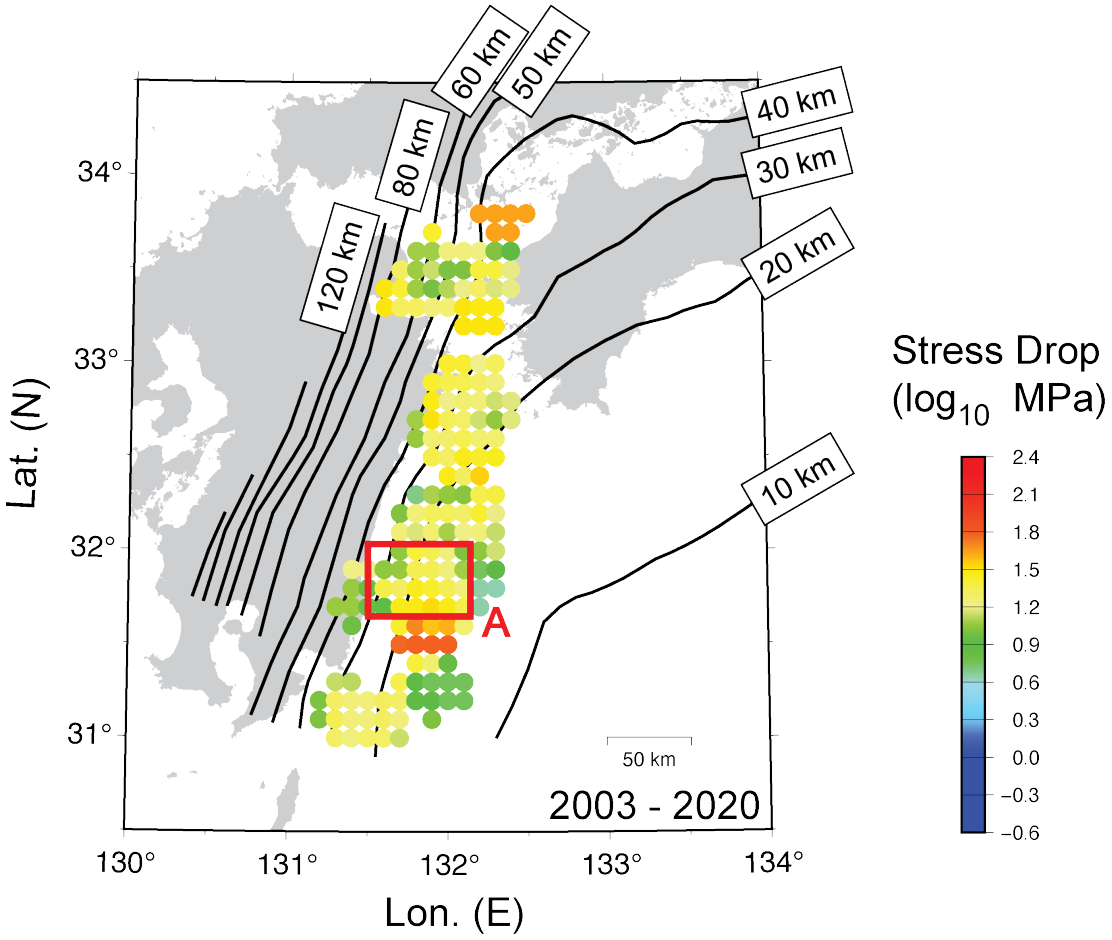


図1. 応力降下量の空間分布。黒線はフィリピン海プレート上面の深さを表す（Baba *et al.*, 2002; Hirose *et al.*, 2008; Nakajima and Hasegawa, 2007）。赤枠で示された領域Aは、1996年日向灘地震の震源域を示す（Yagi *et al.*, 1999）。

© The Seismological Society of Japan

Horizontal Site Amplification Factors and Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of S-wave Part and Whole Duration: Needs of Different Correction Function

*Hiroshi KAWASE[1], Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2]

1. Disaster Prevention Research Institute, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION

観測地震動の水平サイト増幅特性(HSAF)をサイト固有の値として求めることは強震動予測のためには必要不可欠である。本研究では、まず一般化スペクトル・インバージョン法(GIT, 仲野・他, 2019)を用いて、K-NET，KiK-net，気象庁, およびCEORKAの観測データを対象に、露頭地震基盤相当の基準サイトの地震動に対する各地点のHSAFを求めた。さらにHSAFだけでなく、観測上下動を用いて同じ基準サイト地震動に対する上下動増幅特性VSAFも求めた。その分離したHSAF・VSAFに基づいて、水平／上下スペクトル比(EHVR)を求め、Ito et al. (2021)の方法を拡張する形で、HSAFを直接推定する上下動補正関数(VACF)を提案した。

まず、主要なS波部分（マグニチュードに応じて5～15秒間）についてのみ切り出し、そのHSAFとVSAFを抽出した。それをsHSAF・sVSAFと表す。観測地震動のS波部スペクトルをFs_ij（水平動）・Gs_ij（上下動）とし、その震源スペクトルをSs_i、伝播経路特性をPs_ijとすると、後者の2つは共通なので

sHSAF=<Fs_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (1)

sVSAF=<Gs_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (2)

と表すことができる。ここで< >は平均操作を表す。またこのS波部の水平／上下スペクトル比sEHVRは

sEHVR=<Fs_ij/Gs_ij> (3)

と得られるので結局

sHSAF= sEHVR * sVSAF (4)

となる。このsVSAFの平均値が補正関数sVACFである。ここまでは既にIto et al. (2021)に示された通りである。

次に、全く同様にS波到達以降の全継続時間（以下「S波部」に対応させて「全波」と呼びwを前に付ける）のHSAFとVSAF（wHSAFとwVSAF）を求める。その際、重要なことは震源特性と伝播経路特性はそのままS波部のものを参照することである。すなわち観測地震動の全波スペクトルをFw_ij（水平動）・Gw_ij（上下動）とすると

wHSAF=<Fw_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (5)

wVSAF=<Gw_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (6)

が得られ、全波の水平／上下スペクトル比wEHVRは

wEHVR=<Fw_ij/Gw_ij> (7)

と得られる。S波部と同様に

wHSAF= wEHVR * wVSAF (8)

となるのでwVSAFの平均値が全波用の補正関数wVACFに相当する。ここでS波部に対して分離解析をしたのと同様に全波に対して独立した分離解析をしないでS波部から求めた震源スペクトルと伝播経路特性を使う理由は、概念として、基盤が露頭している盆地端部まではS波として伝播し、そこで盆地生成表面波に変換された波動の寄与がS波部サイト特性に追加的増幅として付加されると考えたからに他ならない。伝播経路間のS波の散乱によって基盤入射波の後続動を形成したS-Coda波は、理論的にS波あるいはP波の増幅特性で増幅し、sHSAF・sVSAFに一致するので全波サイト特性との差の原因とはなり得ない。

以上の2つの時間区間の分離サイト特性を比較したところ、wHSAFとwVSAFは、2Hz以下の低周波数領域において、盆地生成表面波の寄与により、sHSAF・sVSAFに比べてはるかに大きい（3倍から10倍の）付加的増幅を示すことがわかった。全波サイト特性とS波部サイト特性の比WSRを水平成分・上下成分について

WSRh=wHSAF/sHSAF (9)

© The Seismological Society of Japan

WSRv=wVSAF/sVSAF (10)
のように求めると、水平動から求めたWSRhも上下動から求めたWSRvも非常によく一致しており、ほぼ１：１の関係にあることがわかった。全2593地点の平均値を求めると、0.3Hzで最大値2.5倍を取り、1Hzで2倍、3Hzで1.5倍となる滑らかな関数が得られた。標準偏差は約倍／半分である。このことは、WSRが盆地生成表面波の寄与を含んだ全波サイト特性をS波やP波の増幅特性によって規準化したものであることを考えると驚くべきことである。

上記のことから、EHVRの全波とS波部の比、すなわちWSRhvを求めればほぼ1になることが期待される。求めてみると0.3Hzで1.0、1Hzで0.8、3Hzで0.7となり、広い周波数範囲で1.5倍／0.7倍の範囲に収まった。これは過去EHVRを求める際に、地震動の継続時間に対して注意を払って来ずとも安定して求められてきたことと符合する。 しかし、このことは同時に式(8)で得られるwVSAFの平均値を用いないと正しいwHSAFが得られないことを意味する。そこで本研究では全波の水平動サイト特性を全波の水平上下比から簡便に求めるための新しいVACF、すなわちwVACFを提案した。それはすなわち
wVACF=sVACF*WSRv (11)
で求められる。直接的に式(8)に示されたwVSAFの平均値から求めるよりも式(11)から求めた方が安定性が高かった。その妥当性を検証した事例をFig.1に示した。

© The Seismological Society of Japan

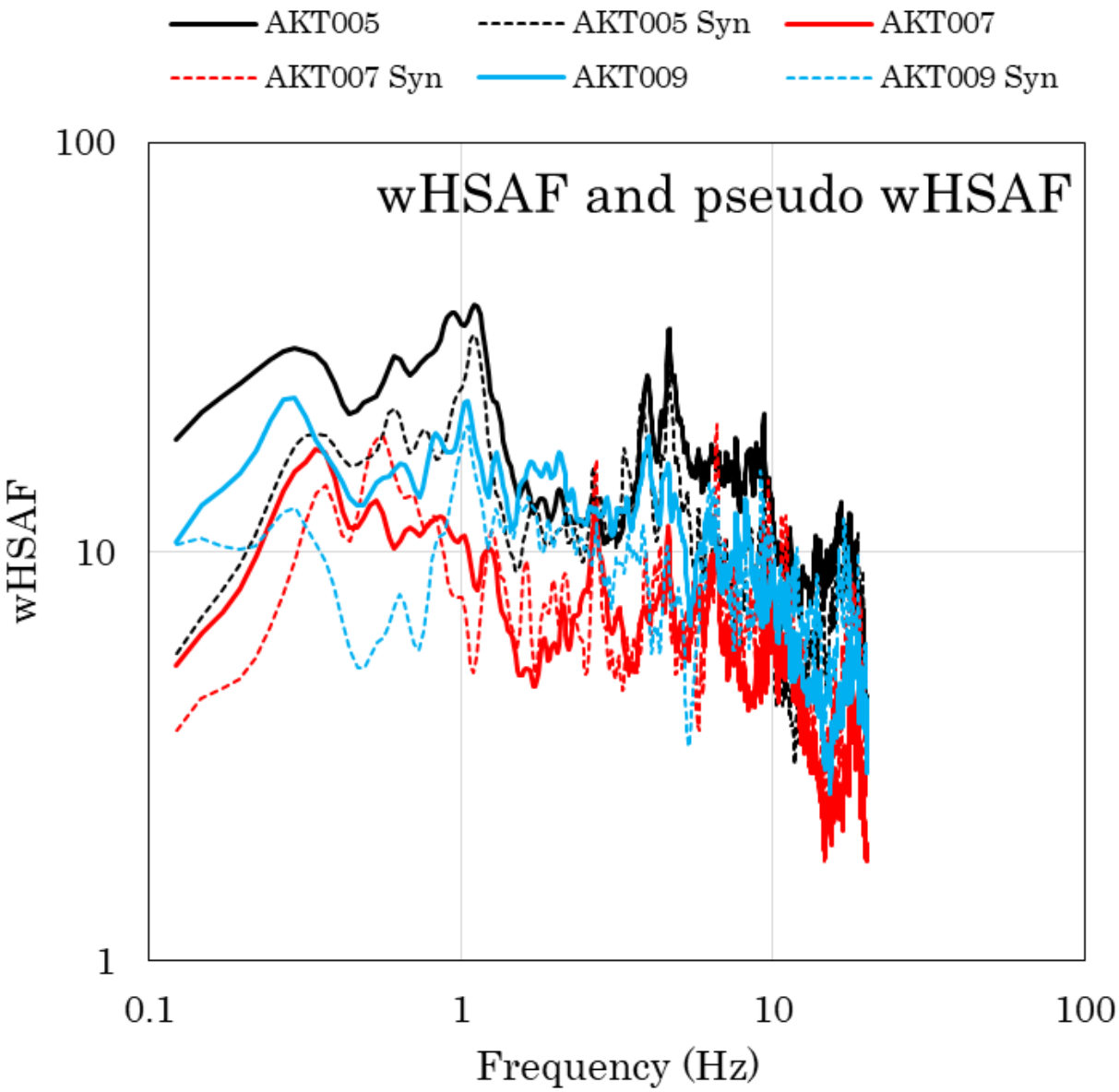


Fig.1 Examples of the comparison between observed wHSAF (solid) and synthetic pseudo-wHSAF=wEHVR*sVACF*WSRv (dotted).

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S19. Seismology, general contribution

AM-1

chairperson:Masumi Yamada(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)
Thu. Oct 14, 2021 10:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

[S19-01] Characteristics of earthquake swarm activity in central Nagano prefecture as seen from the time variation of background seismic activity estimated by the point process model

○Takao KUMAZAWA[1], Yosihiko Ogata[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.The Institute of Statistical Mathematics）

10:00 AM - 10:15 AM

[S19-02] Estimation of the source of the explosive sound on April 26, 2021 in Hokkaido, Japan

○Masumi YAMADA[1] （1.DPRI Kyoto University）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

Characteristics of earthquake swarm activity in central Nagano prefecture as seen from the time variation of background seismic activity estimated by the point process model

*Takao KUMAZAWA[1], Yosihiko Ogata[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics

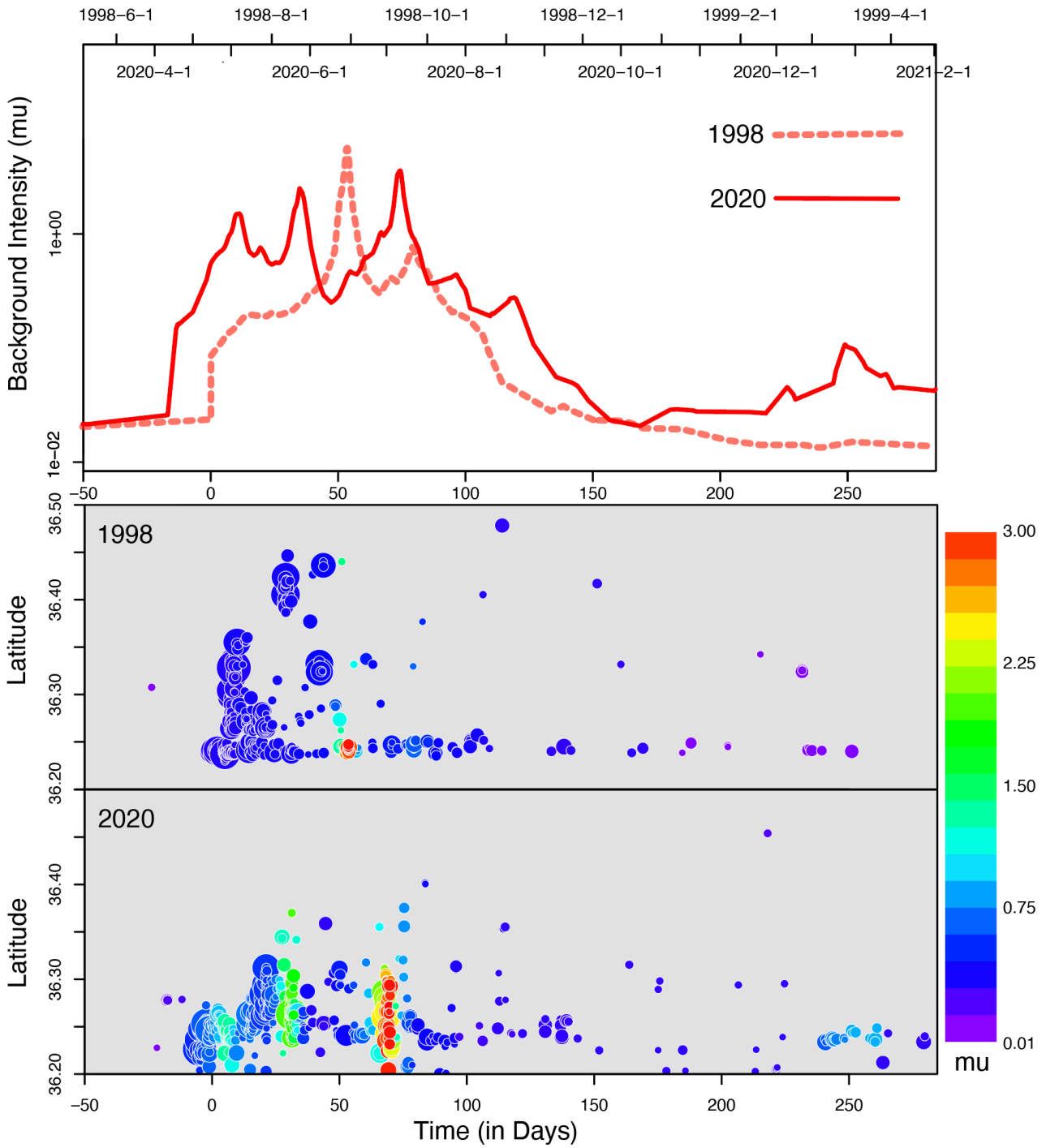
地震時系列データからは様々な統計量を抽出できるが、中でも背景地震活動強度は地震活動の予測の観点からも重要な意味を持つ。我々の研究ではETASモデルの背景地震活動度の時間変動をベイズ法で推定する点過程モデルを用い、長野県中部の群発地震活動に適用して、その地震活動の特徴を調べた。

1998年 8 月から長野県中部・上高地において始まった群発地震活動は10月にかけて長野・岐阜県境付近を北上しつつ活動域が拡大して多くの地震が観測された。その活動の時空間分布、マグニチュード分布、メカニズム、 *b*値などが予知連会報で報告されている。2020年の活動は7月から始まり同地域の南部で起きた。

2020年の群発地震も1998年の場合と同様に、地震のメカニズムはストレス場を反映した、北西－南東方向を圧縮軸に持つ、横ずれ断層型が多いが、これらは飛騨山脈（北アルプス）に連なる火山地帯の付近の群発地震なので、熱水やマグマ流体の移動や間隙圧の拡散に関連していることも考えられる。 これらの群発地震は時空間的には両期間とも初期には南端地域から北に推移している。1998年の群発活動はより浅い方向への広がりも見えるが、これは北方にも延びたためである。

背景地震活動度の時間方向への推移は、1998年では群発開始後50日頃に背景活動度が常時より数十倍～数百倍のピークに達している。これは南端領域で深部に活動が集中しているが、これらは全てM3.5 以下の小地震である。2020年には同様なピークが3度あった。深さ方向には広く分布している。2020年末からの背景活動度の増加も見られたが、小さな活動で収まった。

© The Seismological Society of Japan



(上段) 背景地震活動度 (mu) の時間変化 . 赤点線は 1998 年、赤実線は 2020 年の活動時 .
(中下段) 地震活動の時空間分布 .
半径はマグニチュード、色は対応する時刻の背景地震活動度に対応する .

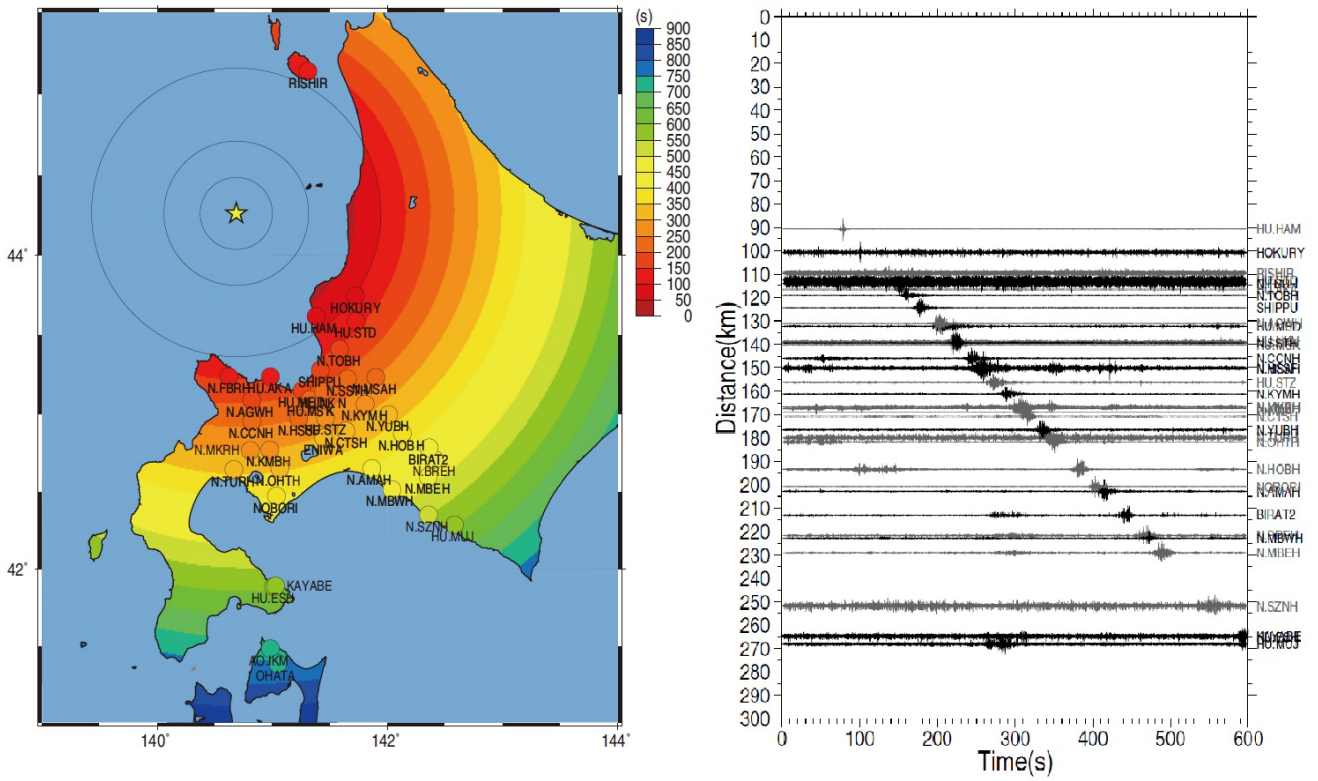
© The Seismological Society of Japan

Estimation of the source of the explosive sound on April 26, 2021 in Hokkaido, Japan

*Masumi YAMADA[1]

1. DPRI Kyoto University

An explosive sound was heard over a wide area of Sapporo city, Hokkaido, Japan on April 26, 2021. It was accompanied by minor shaking and was considered likely to be a sonic boom produced by a fireball. However, no luminous phenomenon was observed. We analyzed seismic data to identify the source of the sonic boom, and estimated the trajectory of the object from the associated signal arrival times. The source was located approximately 100 km off the west coast of Hokkaido, at an altitude of 50 km. The elevation angle was higher than 66 degrees and the estimated velocity was higher than that of a fighter plane.
We compared trajectory models estimated from optical and seismic observations for past sonic boom events, and they were found to be in good agreement. Although our trajectory model is simplified and assumes that sound and the fireball have a constant speed, the model is highly accurate. The results show that seismic data can be used to estimate the trajectory of objects producing sonic booms, even when visual observations are unavailable.



© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

AM-2

chairperson:Eri Ito(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University), Nobuyuki Morikawa(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Thu. Oct 14, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM A (ROOM A)

[S15-01] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 3 - - Powerful seismic difficult waves to record by a seismograph -

○Hiroshi MAEHARA[1] （1.Geosystem Research Institute）

11:00 AM - 11:15 AM

[S15-02] Expansion of Ground Motion Prediction Equation Based on Prototype Strong-Motion Database

○Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Asako Iwaki[1], Takahiro Maeda[1] （1.NIED）

11:15 AM - 11:30 AM

[S15-03] An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of S-waves in the layered structur

○Tomonori IKEURA[1] （1.Kajima Technical Research Institute）

11:30 AM - 11:45 AM

[S15-04] Characteristics of sPL and PL phase: Applicability to real-time source depth estimation

○Keishi OSUGA[1], Takashi Furumura[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

11:45 AM - 12:00 PM

[S15-05] High-Resolution Immediate Fault Slip Estimation of Large Earthquakes Using Seismic Backpropagation

○Yugo SHIBATA[1], Takashi Furumura[1], Takuto Maeda[2] （1.Earth Research Institute, the University of Tokyo, 2.Hirosaki University）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 3 -
- Powerful seismic difficult waves to record by a seismograph -

*Hiroshi MAEHARA[1]

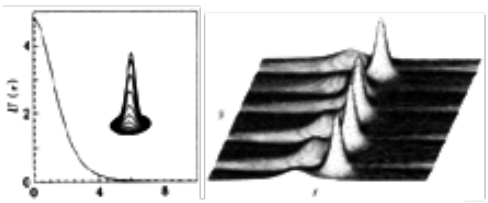
1. Geosystem Research Institute

地震計でこれまで正確に観測できていない，強烈な衝撃的鉛直地震波動が働き，構造物に多大な被害を起こしたことが，土木学会関西支部の調査研究委員会活動で明らかになり，その報告書を一昨年春に同支部より公開しました[1>]．この報告書では橋脚の被害事例を中心に，100年余り前に作られた海震の震度階表 <ルドルフの表,1898年-10段階，シーベルグの表,1923年-6段階> と，船舶工学者から指摘の語句 "海震で船舶が損壊する時の地震波は，疎密波である事は常識である" を交え，問題の波とその被害の存在を説明しています．その後，耐震基準にこの問題の波が考慮されていない欠陥の改善を目指し，この研究成果に関する発表や広報活動を進めているが [2>]，この問題の波が地震計で観測できていないため，この現象の理解が進展しにくい状況があります．そこで今年は，なぜ地震計で観測できていないのかの課題に焦点を当てることにしました．
この問題の波は通常の地震波とは異なり，1.高周波，2.局在波，3.威力波である3種類の性質を持つため，従来の地震計では観測できない訳です．しかし，この点の理解も広まっていないので，3種類の性質に視点を置き3回に分けて発表することにしました <土木-関西，土木-全国，地震-秋季>．本稿はこのシリーズの <その３> で副題を “地震計で捉え難い威力波” としています．

問題の強烈な衝撃的鉛直地震波動はどのような波かは，まだ正確には観測できていないのと， 発生状態に多様性を持つことや，その発生原因が未解明なこともこの波の状態を理解し難くしています．最近になり重要な資料の確認ができ，その資料の要点を急遽，今年の地盤工学会の第56回発表会 <7.13> で先に紹介しました．そこでは発生源因について説明していませんが，地殻ブロックの動きを予想さす資料が別途得られていたので，地殻ブロックの動きに伴う境界部の圧力変化が物質の相変化を促し，それが問題の波の発生原因と考えれば，多様な発生形態や前述の3種類の特性を持つことも説明できるようになると考えられます[2>]．
こうした展望を背景に，本稿では “地震計で捉え難い威力波” として以下に3番目の論点を述べます．

次頁の図1.a,は単独で生じる衝撃的鉛直地震波のイメージで，それが連成した場合が図1.b,です．釣鐘型をしていますが，頭部が平坦な場合で，さらに断面が長円や長楕円形の場合も予想されます．図2は岩<約5tf>が跳出した写真<長野県西部地震>で，図3は石碑<約3tf>が慰霊碑の台上から5.8m程跳ばされた写真<熊本地震>です．広域地震観測網の観測点では，地面に埋め込まれた長さ1mで80cm角のコンクリート台<約1.5tf>の上に地震計が装着されています．問題の地震波は 5tfや3tf の物体を簡単に跳び出さす威力を持ちますので， 観測台<約1.5tf>は簡単に浮き上がらすことが予想されます．図4<地表，熊本地震>，図5<胆振東部地震>および図6.a,<岩手・宮城内陸地震>に示すUD波形は，突き上げ加速度が1400gal程度以上になると，波形の上向きと下向きで極端な非対称な形が記録されることを示します．すなわち観測台が突上げられて周面摩擦抵抗が働き，浮き上がる状態の加速度と，下向き加速度<１Ｇ相当>の状態を反映していると見られます．この傾向は図7.a,b,のクリストチャーチ地震<余震, 2011>の記録にも顕著に見られます．周面摩擦を考慮すると1.5Ｇ以上の上向き加速度の威力を持つ地震波が作用すると，観測台が浮き，正確な地震波動は観測できなくなることを意味します．
また，図4<益城>，図6.b,c,<東成瀬>の地上と地中の記録を見ると，地表での最大加速度時に対応する波は地中の記録に見られません．すなわち地中では素通りした波が観測台を動かす状況が，記録されたことを表しています．地震計による地震波の観測は，地震学の発展だけでなく，国家的な課題の重要施設の耐震および安全対策の根幹に係る観測ですので，このような欠陥は早急に改善しなくてはなりません．

© The Seismological Society of Japan



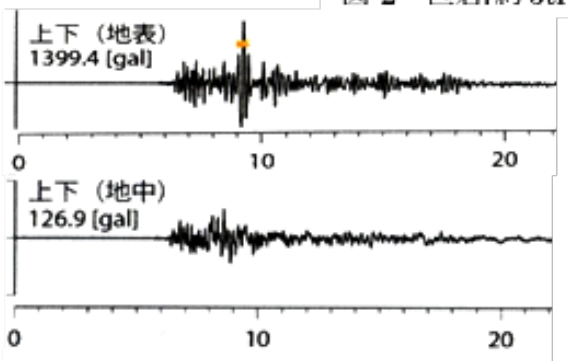
(a)切断図と立体図 (b)連成する波
図 1　釣鐘型孤立波の例 (ソリトン)



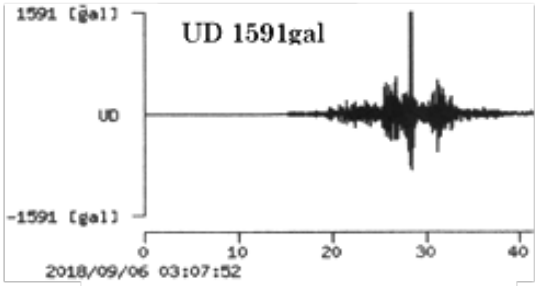
長野県西部地震 (1984, M6.8)
図 2　巨岩[約 5tf] の跳出し



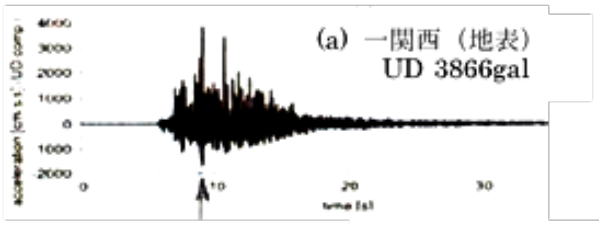
熊本地震 (2016, M6.5, M7.3),
石碑 [約 3tf] は 5.8m 程飛翔
図 3　慰霊塔施設　飛散状況

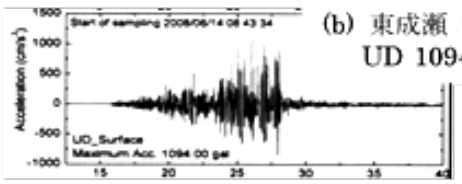


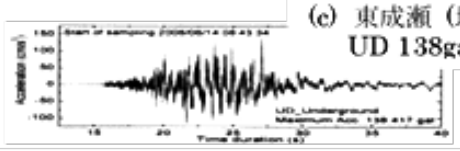
熊本地震 (前震, 2016.4.14. M6.5)
図 4　KiK-net 益城の UD 波形



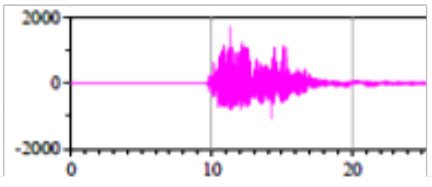
胆振東部地震 (2018.M6.7)
図 5 K-NET 追分の UD 波形



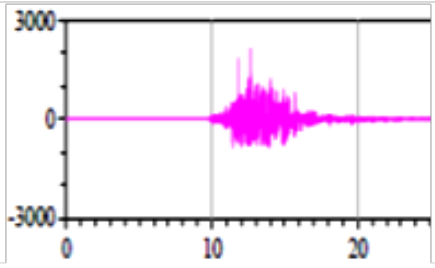




岩手・宮城内陸地震 (2008. M7.2)
図 6　一関西と東成瀬の UD 波形



(a) PRPC ;　UD 1851gal　(震央 8km)



(b) HVSC ; UD 2161gal (震央 3km)

Christchurch 地震　[逆断層+右横ｽﾞﾚ]
(余震 2011.2.21. M6.3, D5km)
図 7　上下動波形の代表例

参考文献

1) 土木学会関西支部, 都市直下地震での鉛直方向の免震構造に関する調査研究委員会報告書, 平成 31 年 3 月.
https://www.jsce-kansai.net/wp-content/uploads/2019/06/chosa_chokka_2017-2018.pdf

2) 前原博 : 海震と強烈な衝撃的鉛直地震動に関する考察,－新しい地震観の構築に向けて－, 日本船長協会 [船長] 第 138 号, p48-86, 2021.1.

© The Seismological Society of Japan

Expansion of Ground Motion Prediction Equation Based on Prototype Strong-Motion Database

*Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Asako Iwaki[1], Takahiro Maeda[1]

1. NIED

観測記録に基づく地震動予測式（以下、GMPE）については、観測記録の蓄積とともに多くの研究が行われるようになり、近年では機械学習などにより式の形が明確でない地震動予測モデル（GMM）の構築も行われつつある。日本においても、様々な目的に応じてそれぞれの研究者（グループ）によりGMPEやGMMが提案されているが、強震動予測に用いるという観点から、ほとんどがモーメントマグニチュード（以下、Mw）5程度以上の地震が対象となっている。

我々は、これまでに日本全国を対象とした地震ハザード評価に適用することを目的としたGMPEを構築してきた。さらに、K-NETおよびKiK-net観測記録に関して、気象庁、F-netおよびSRCMOD（Mai and Thingbaijam, 2014）による震源パラメータ、観測点のPS検層データおよび地震ハザードステーションJ-SHISの地下構造モデルと紐づけた新たな強震動データベース試作版を構築し（森川・他，2020；JpGU）、さらに既往のGMPE（MF13; 司・翠川，1999）に対する残差のデータベースも作成してきた（森川・他，2020；2020年度秋季大会）。データベースは100万を超える記録（注：3成分で1記録、KiK-netの地表と地中は別記録としている）から成るが、日本の多くのGMPEの適用範囲となっているMw5.0以上、断層最短距離200km以内の記録の数は約1/7にすぎない。しかしながら、観測点ごとの揺れやすさや限定した地域内での地震動の減衰特性をより精度よく評価するためには、規模の小さい地震や遠距離など振幅が小さいながらも多数存在する観測記録を活用することが有効である。

本検討では、この「残差データ」を用いて、Morikawa and Fujiwara (2013) の GMPE について小振幅域まで適用できる拡張を行う。具体的には規模の小さな地震（Mw3.5以上）および遠距離（断層最短距離500km以内）に適用できる補正項を求める。また、重要構造物等を対象とした強震動予測において必要とされてきている上下動についても、水平動に対する「残差データ」を用いて水平動に対する比のGMPEとあわせて同様の補正項を導出する。なお、本検討では、地表の観測記録のみを用い、KiK-netの地中記録は用いていない。

Mw5.5未満の規模の小さな地震については、Mwの二次式でモデル化されている元の式に対して、Mwの一次式のモデルに変化するようにモデル化する。ただし、周期2秒程度以上の長周期成分では、Mw4.0程度とそれ未満で残差の傾向が変わる様子が見られ、観測記録にノイズが含まれている影響を受けているようである。断層最短距離200km超については、森川・他（2003）と同様の補正を行う。このとき、地震タイプ（地殻内地震、海溝型プレート間地震、海溝型プレート内地震）による違いはほとんど見られなかった。なお、長周期成分では遠方の補正に関する効果が小さい。上下動については、Morikawa and Fujiwara (2013) の適用範囲においてはおおむね定数の補正項として表されることが確認された。一方で、今回の検討対象となる拡張領域に対しては、水平動（RotD100）に対して求められる係数と若干の違いが見られた。

今後、小振幅データにおける長周期成分のデータの扱いや海溝型プレート間地震とプレート（スラブ）内地震の分類に関するデータベースの改修を行うとともに、観測点ごとの揺れやすさである「サイト係数」の導出、ばらつきの分布形状についての検討を進める予定である。

© The Seismological Society of Japan

An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of S-waves in the layered structur

*Tomonori IKEURA[1]

1. Kajima Technical Research Institute

【1. はじめに】内陸地震の震源近傍では震源から放射されそのまま上昇伝播して観測点に到達する直達S波が最大の入射成分となる可能性がある．ただし，直達S波は，三次元の幾何減衰効果，Q値減衰効果の他に成層構造中の透過率の影響により震源深さhの数倍程度以上の震央距離Δで消失する．実際に，直達SH波の透過率は，例えば我が国の陸域の平均的な速度構造モデルであるJMA2001[上野他(2002)]では，Δ=3h～4h付近で0となる[池浦(2019)]．一方，この付近から遠方では，直達S波以外の，震源から様々な射出角で放射され反射・屈折・散乱を経て観測点に到達したS波群のみで地震動が構成され，強震動の主体となる波動成分は距離レンジで異なる．そこで，本研究では直達S波とそれ以外の間接的なS波群の距離減衰特性の違いを考慮して地震動の距離減衰モデルを設定し，近畿～中国地方における内陸地震の地震動への適用を試みた．

【2. 内陸地震による地震動の距離減衰モデル】震源距離rにおける周波数fの地震動振幅A(f)を直達S波の振幅DS(f)と間接的なS波群の振幅IS(f)のベクトル和で表し，DS(f)とIS(f)をそれぞれ以下のように表す．

・$A(f) = \{DS^2(f) + IS^2(f)\}^{0.5}$ …(1)

・$DS(f) = S(f) \times r^{-1}\, CTR(h, \Delta) \exp[-b_{DS}(f)\, r] \times G(f)$ …(2)

・$IS(f) = S(f)\, CIS \times r^{-0.5} \exp[-b_{IS}(f) r] \times G(f)$ …(3)

ただし，S(f)とG(f)はそれぞれ震源特性とサイト特性，CTR(h, Δ)はJMA2001を仮定した場合の直達S波の透過率，CISは間接的なS波群の生成効率，$b_{DS}(f)$と$b_{IS}(f)$はそれぞれ直達S波と間接的なS波群のQ値効果による距離減衰係数である．

なお，(3)式で表される間接的なS波群としては，震源から様々な射出角で放出され地殻内にトラップされて伝播する様々なS波成分の混在状態を想定している．その場合，波動エネルギーの拡散は三次元的な実体波よりもむしろ二次元的な表面波に近づくので幾何減衰効果を$r^{-0.5}$とした．また，そのQ値減衰効果も直達S波とは区別して距離減衰係数$b_{IS}(f)$を考えた．さらに，そういったS波群の起源となる震源特性は明らかでないため，震源スペクトルに乗じる係数としてS波群の生成効率CISを設けた．

以上のモデルを観測データに当てはめる際には，個々の観測地震動を各々の地点の相対サイトファクターで割り算して得られる基盤換算地震動 [例えば，池浦(2018)]を用いることで，G(f)を未知数から除外することができる．その場合，残る未知数は各地震の震源特性S(f)とS波群の生成効率CIS，および直達S波と間接的なS波群の距離減衰係数$b_{DS}(f)$，$b_{IS}(f)$である．これらの推定は，対数をとって線形化する方式が適用できず，非線形最適化問題となる．ここでは微分を用いない共役勾配法(PARTAN)[コワリック・オズボーン (1970)]を適用する．

【3. 近畿～中国地方の6地震への適用結果】本研究では，近畿～中国地方の内陸地震の基盤換算地震動[池浦(2018)]を用いて上記のモデルの有効性を調べることとし，表1の地震のΔ≦10hの地点を対象に上記の距離減衰モデルを当てはめた．震央と観測地点の分布は図1のとおりである．また，上記のモデルを当てはめた結果を検討するにあたり，従来法による結果として，同じデータで地震層別回帰分析を行い，震源特性の地震項と距離減衰係数を参照することとした．

まず，地震項から#6) 2018/06/18大阪府北部の地震(M6.1)を基準とした各地震の震源スペクトル比を求め，従来法の結果（LSQ）と比較して図2に示す．小規模地震の低周波数側でやや違いが見られるものの従来法とほぼ同じ結果が得られている．また，図3では距離減衰項から一律にS波速度3.5kmを仮定して求めたQ値を比較している．これによると，従来法のQ値（Q_{LSQ}）は1.3Hzで発散気味であり，同じ周波数で直達S波のQ値（Q_{DS}）は発散している．しかし，それを除けば，Q値の大小関係は，概ね従来法（Q_{LSQ}）＞間接的なS波群（Q_{IS}）＞直達S波（Q_{DS}）である．図4はS波群の生成効率CISの評価結果であり，全周波数帯域で0.1をやや下回る程度の結果であるが，数値としては，地震項とのトレードオフがあるため，決定精度に課題を残している．図5では，全データにわたって求めた誤差の対数標準偏差σにつき，その倍率exp[σ]で従来法による結果

© The Seismological Society of Japan

と比較している．本検討のモデル（DS+IS）による誤差のばらつきは，従来法（LSQ）のそれと大差ない．最後に図6では震源距離30km以内のデータで観測／計算の倍率を比較した．本研究のモデル（DS+IS）はばらつきの幅は従来法（LSQ）と大差ないものの，平均値が全帯域で概ね1倍であり，従来法に比べて良い推定となっている．

【4. まとめ】直達S波と間接的なS波群について異なる距離減衰特性を仮定し，両者の和で観測地震動を説明する距離減衰モデルを設定した．また，それを近畿～中国地方の内陸地震に適用し，震源近傍における地震動の再現性が従来法に比べて向上する結果を得た．今後も改良を加えつつ，他地域での検討を試みる．

【参考文献】池浦(2018)日本地震工学シンポジウム，池浦(2019)日本地震学会2019年秋季大会，コワリック・オズボーン(1970)非線形最適化問題（培風館），上野他(2002)験震時報．

© The Seismological Society of Japan

表 1 地震諸元

	Date	Origin Time	North Lat. (degN)	East Long. (degE)	Depth (km)	M_{JMA}
#1	2001/01/12	08:00:04.25	35.4660	134.4900	10.59	5.6
#2	2001/08/25	22:21:25.12	35.1518	135.6600	8.18	5.4
#3	2011/07/05	19:18:43.44	33.9905	135.2342	7.33	5.5
#4	2013/04/13	05:33:17.75	34.4188	134.8290	14.85	6.3
#5	2016/10/21	14:07:22.57	35.3805	133.8562	10.61	6.6
#6	2018/06/18	07:58:34.14	34.8443	135.6217	12.98	6.1

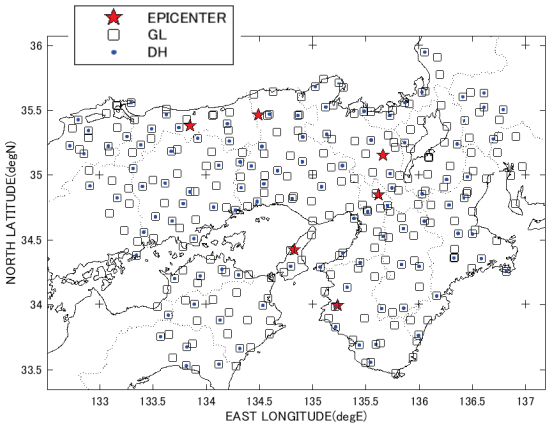


図 1 震央と観測地点の分布

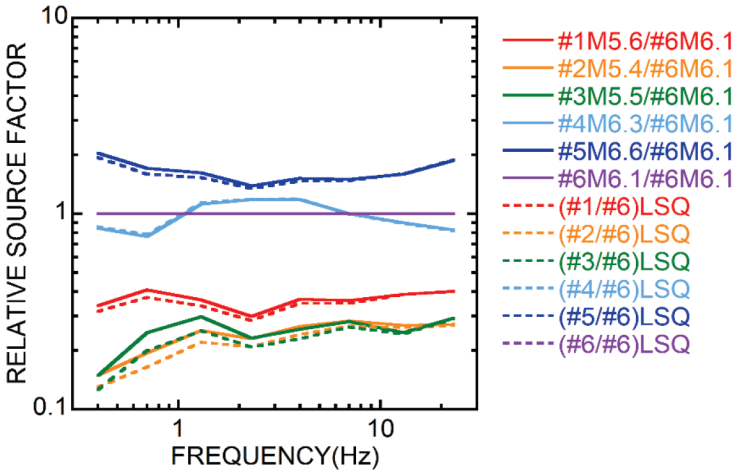


図 2 震源スペクトル比

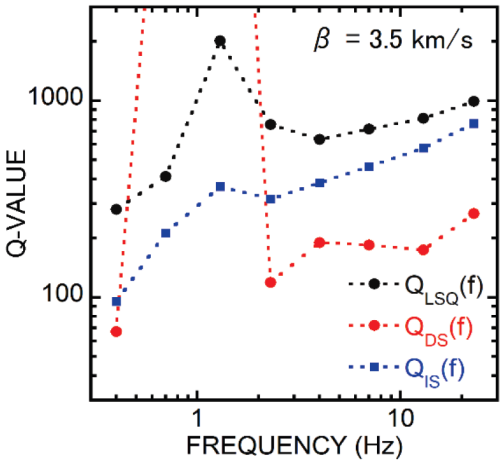


図 3 Q 値

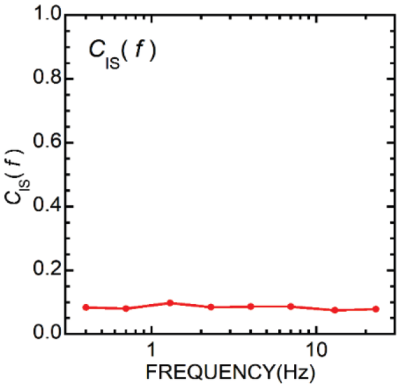


図 4 CIS

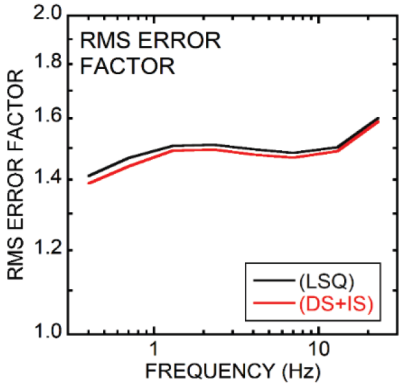


図 5 誤差の対数標準偏差の倍率

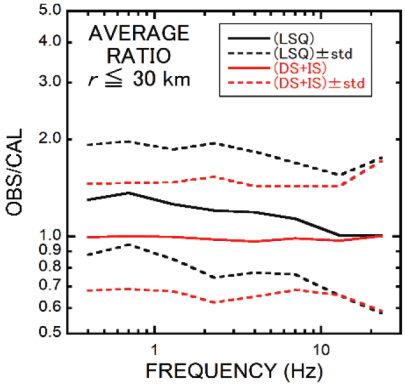


図 6 震源近傍の観測／計算の倍率

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of sPL and PL phase: Applicability to real-time source depth estimation

*Keishi OSUGA[1], Takashi Furumura[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1.近地地震波形に見られるsPL とPL相　地殻内または海域のプレート境界で発生する浅発地震において、P波とS波の間に周期数秒～数十秒の、やや長周期の相の発生が顕著に認められる。図１は、2005年11月15日に三陸沖のプレート境界で発生した、深さ14 km、M7.0の地震の、F-net強震観測記録のZ成分のレコードセクションである。震源距離300 km付近においてP波の直後に周期20秒程度の大振幅の相が見られる様子がわかる。この相は、伝播距離とともに震幅が急激に減衰し、震源距離600 km以遠では、より長周期（周期30～50秒）の相に置き換わる様子もわかる。これらの相は、いずれも弱い正分散性を示し、粒子軌跡がPrograde（反時計回り）することから、表面波に分類されるsPL波とPL波と判断できる（図2）。sPLとPL波は、浅い震源から放射されたS波が地表でsP変換し、あるいは震源から放射されたP波が地殻内を多重広角反射しながら伝播する過程で干渉により生成したものと解釈できる。 sPLとPL波は、Leaking modeの波と解釈することができ（Oliver and　Major, 1960）、伝播の過程で地表において強いPS変換を起こすために、エネルギーがマントルにLeakingすることで一般に距離減衰が大きい。しかし、地表下に低速度層（堆積層）が存在すると、PS変換効率が低下するために遠地までP波が保存されるため（Leakingが抑えられるため）、数百km以上にわたって大きな振幅を保つことができる(Furumura & Kennett, 2018)。なお、巨大地震の際に、遠地（震源距離1000 ～10000 km）において上部マントルを広角反射により伝わるP波が同様のメカニズムにより超長周期（100～1000秒）の相を形成するが、これはW-phase(Kanamori, 1993)として知られている。 本研究では、近地地震波形に見られるsPLとPL波を用いて、震源メカニズム、特に震源の深さを早期推定することを目的として、sPLとPL波の生成メカニズムと波形の震源深さ依存性を、観測データ解析と地震波伝播シミュレーションにより検討した。 2. 地震波伝播シミュレーション 近地地震波形に顕著に見られたsPLとPL波の生成と伝播特性を確認するために、３次元差分法（OpenSWPC; Maeda et al., 2017）を用いて地震波伝播シミュレーションを行った。 宮城県沖～東北日本にかけての2300 km ×2300 kmの領域（図1a）を1 kmの格子間隔で離散化し、JIVSM（Koketsu et al., 2012）に基づき堆積層、地殻、マントル、プレート構造を設定した。前述の2005年11月15日の宮城県沖の地震の震源は、GCMT解析結果に基づきパルス幅6秒の三角型の震源時間関数により点震源で近似した。 図３に、地震発生から65秒、75秒、85秒後の北西−南東方向の２次元断面の波動場（赤がP波、緑がS波を表す）を示す。震源から放射されたP波が地殻内において広角反射をしながら先行し、震源から放射されたS波が地表に臨界角で入射して大振幅のsP変換波を生成したものがこれに後続する様子が分かる。地殻を伝わるP波は、伝播とともに地表でPS変換を起こしてマントルへとSエネルギーがleakingするため、P波の減衰が大きい。そして、伝播距離が500 kmを超えるとsPLの振幅は急激に弱まり、先行するPL波に続く長い波群を持つPL波へと置き換わる様子もわかる。PL波はsPLより長い周期30～50秒の卓越周期を持ち、1000 km 以上遠地まで伝播する。 ３．sPLとPL振幅の深さ依存性 表面波の一種であるsPL及びPL相の振幅は、震源の深さに敏感であると考えられる。また、地表でSP変換により生じるsPLは、震源深さを反映したdepth phaseとして震源決定に特に有効であると期待される（Chong et al., 2010; Bao et al., 2013; Kim et al., 2017）。震源の深さとsPL及びPL相の振幅、そしてP～S初動付近の波形変化を見るために、深さの異なる震源に対する地震波形の差分法シミュレーションを行った。震源は、先の地震と同様の45度の逆断層型の点震源を仮定し、深さ６km～深さ100 km までの震源深さに対する震央距離430 km（図３a）と1080 km（図３b）でのZ成分速度波形について相反定理を用いて計算した。 震源の深さを関数とするレコードセクションを見ると、深さとともにsPLの波形と振幅が大きく変化し、また、深さとともにP～S間の到着時刻が直線的に遅れる（深いほどP～sPL時間が長くなる）ことから、P～S間の波形全体を用いたCMTインバージョンは、震源深さの拘束に有効と期待できる。一方、PL波は、表面波（Rayleigh 波）と同様に震源深さとともに振幅が急激に小さくなるが、その波形変化はsPLほど顕著ではない。しかし、P波直後に到着することや、表面波より振幅が小さく巨大地震でも記録が振り切れにくい特性を活かして、大地震の震源メカニズムの早期推定に

© The Seismological Society of Japan

活用できると考えられる。近年、W-phaseによる大地震のCMT解析（e.g. Kanamori & Rivera, 2008）を、M6～7クラスの近地地震に適用する研究が進められており（引用）、これらの研究ではここで議論するsPLやPL波を含めた近地地震波形を解析対象としているものと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

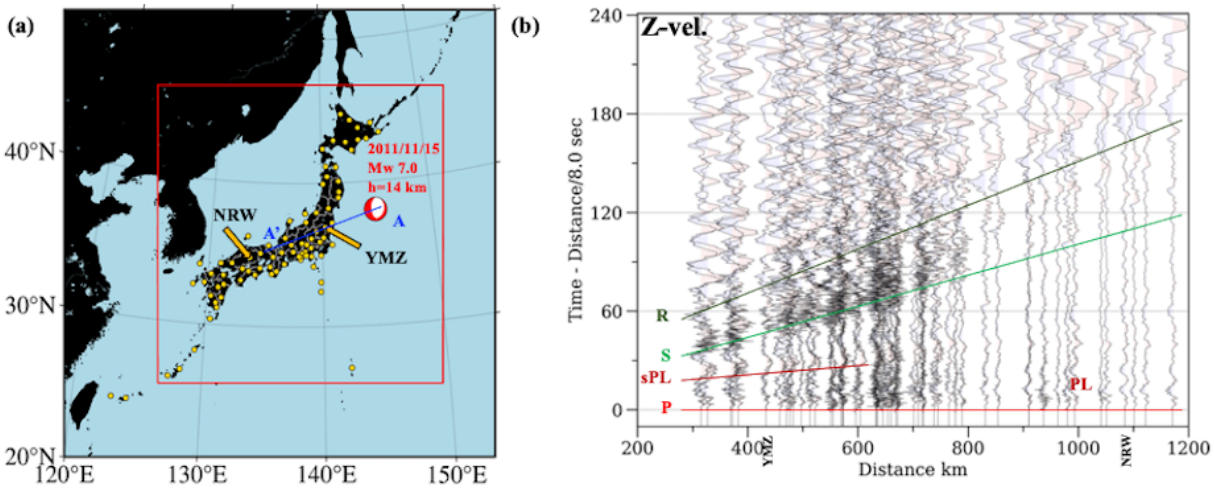


図1 (a) 2005年11月15日に発生した、三陸沖地震(M7.0, 深さ14 km)とF-net観測点、(b) F-netのZ成分のレコードセクション。3次元地震波伝播シミュレーションの範囲とスナップショット断面の側線を表す。

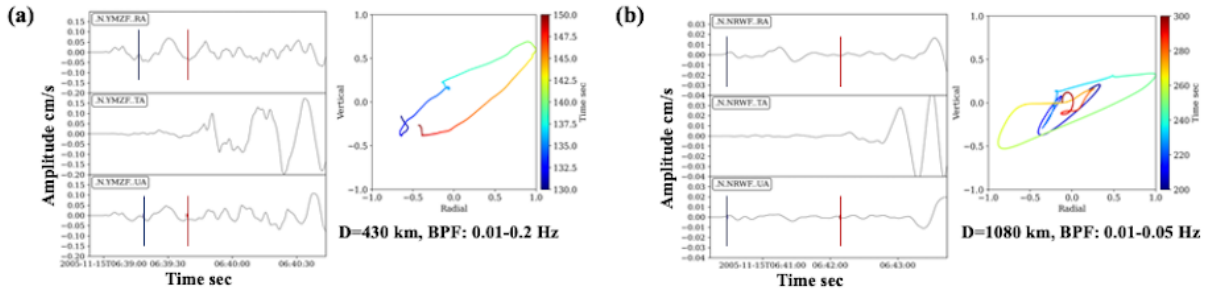


図2 (a) F-net YMZ（八溝）観測点（D=430 km）および、(b) F-net NRW（成羽）観測点（D=1080 km)での3成分速度波形および、sPLとPL波の粒子軌跡。

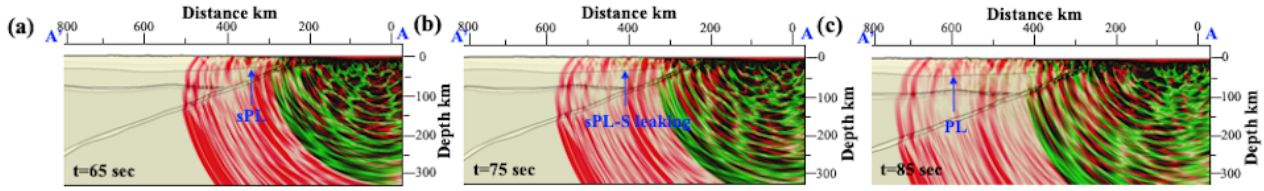


図3 3次元地震波伝播シミュレーションによる、北西–南東断面（図1a）の地震波伝播のスナップショット(赤はP波、緑はS波動場を表す)。地震発生から65秒、75秒、85秒後。

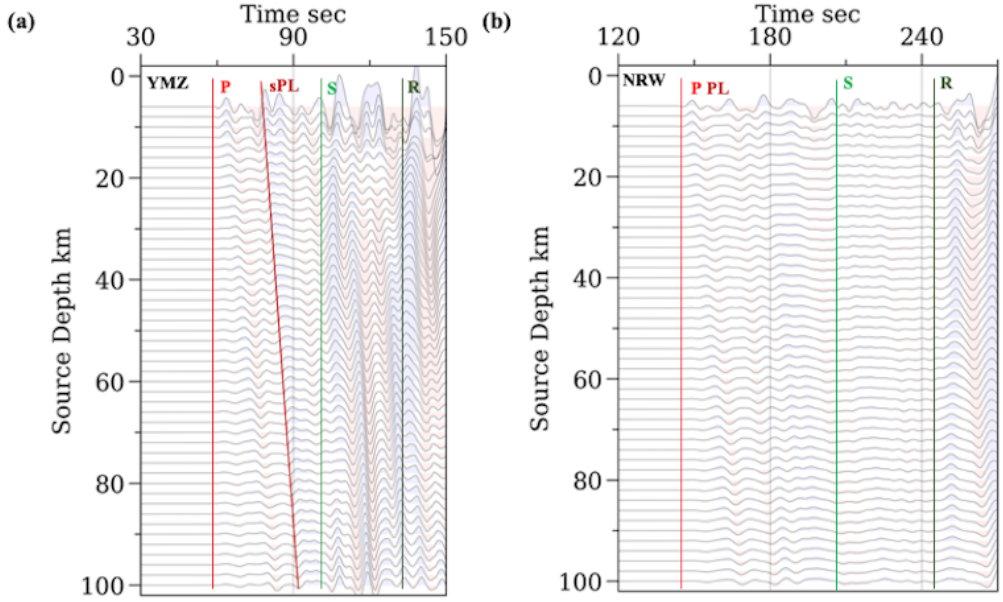


図4 震源の深さとZ成分速度波形。(a) 震源距離D=430 km、(b) D=1080 km。sPL波とPL波の最大振幅、及びS波の最大振幅の深さ変化を右に示す。

© The Seismological Society of Japan

High-Resolution Immediate Fault Slip Estimation of Large Earthquakes Using Seismic Backpropagation

*Yugo SHIBATA[1], Takashi Furumura[1], Takuto Maeda[2]

1. Earth Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hirosaki University

１．はじめに 我々はこれまで、高密度地震観測データを用いた大地震の震源断層すべりの即時推定に向けて、地震波逆伝播による震源イメージング（Time Reversal Imaging；TRI）手法の利用を数値実験及びKiK-net観測データ用いて検討を進めてきた（柴田・古村・前田、2020；2021）。TRIでは観測点から震源に向けて逆伝播させた波動場が、一旦アスペリティに収束した後に、再び広がる問題（Fink et. al., 2001）があり、特に複数のアスペリティを持つ大地震の断層滑りイメージングにおいて問題となっていた。また、地震波の位相が時間振動するために、震源イメージングの結果も時間振動を伴い移動することもイメージングの解像度を下げる問題があった。 これらの問題に対し、本研究では従来の弾性エネルギーを用いた震源イメージングに対してP波とS波エネルギーの積を用いたイメージング（Artman et. al., 2010）を用いることで、時間解像度を高めることを試みた。また、逆伝播に用いる地震波形のヒルベルト変換を用いた、時間分解能の向上可能性についても理論地震波形を用いた数値実験により検討した。
２．TRIの数値実験 (1) 理論地震波形の計算 数値実験に用いる理論地震波形データを、図１aで与えた断層すべりモデルに基づき、3次元差分法計算により準備した。計算では、中部日本の水平460.8 x 460.8 km、深さ57.6 kmの範囲に、堆積層、地殻、マントル、太平洋／フィリピン海プレートの速度・減衰構造をJIVSM（Koketsu et al., 2012）に基づき設定した。太平洋プレート上面に、120 x 60 km の断層面を設定し、3つのアスペリティを置いた。断層面は3 x 3の小断層に分割し、断層面中央の震源から2.8 km/sの破壊伝播速度で震源時間関数３秒、滑り量2.0 m（背景領域はそれぞれ８秒と0.1 m）に対応する地震波を放射させた。以上のモデルを用いて、領域内の271点のKiK-net、S-net観測点での理論地震波形を用意した（図1b）。(2) 震源断層滑りイメージング TRI計算では、時間を反転した130秒間の理論地震波形をKiK-netとS-net観測点から震源に向けて逆伝播させ、与えた断層すべりモデルの再現を試みた。このとき、地震波形には0.05―0.2 Hz のバンドパスフイルタをかけ、さらに観測点間の波動場を相関距離10 kmのガウス分布関数で補間して地表の全格子点から逆伝播させることで、スムーズな逆伝播波動場を合成した。震源断層滑りのイメージングは、３成分速度場の振幅から計算した弾性エネルギーの総和と、速度場の発散と回転から求めたPとS波動場のエネルギーの積（PSエネルギー重合）の総和の二つを用いて行い、両者を比較した。図２は、TRI結果から求めた太平洋プレート上面全体の弾性エネルギー総和の時間変化、図3は、TRIは全時間にわたり太平洋プレート上面に集まったエネルギーの分布である。弾性エネルギーを用いたイメージング結果（図２b）は、発震時にアスペリティに収束した地震波が時間を遡ってさらに伝播するためにイメージがぼやけるが、PSエネルギー重合を用いたイメージングでは、観測点から逆伝播したP波とS波が同着する地点と時刻にのみイメージングが行われるためこの問題が解消し、３つのアスペリティの解像度を高めることができた（図2a）。 なお、DATRIにより得られた震源断層滑りイメージングでは、地震波の振幅が時間振動して2π（絶対値を取る場合はπ）の任意性があるために、イメージングの解像度を下げる問題があった。これは、地震波形に狭域のフイルタをかけた場合に特に問題となる。これを解決するために、本研究ではヒルベルト変換（π/2だけ位相をずらした）地震波形についてもイメージングに用い、位相ずれあり／なしの結果の2乗平均平方根（RMS）を取ることで、時間振動の影響を取り除くことができた。この2つの技法の組み合わせにより今後実データでもイメージングを試みる。

© The Seismological Society of Japan

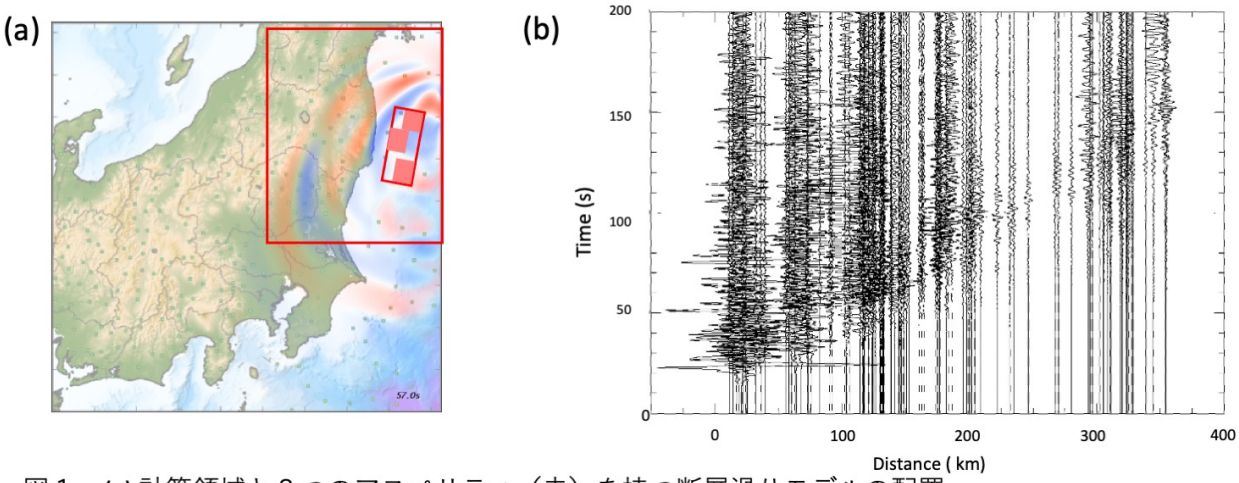


図 1　(a) 計算領域と 3 つのアスペリティ（赤）を持つ断層滑りモデルの配置。
(b) 計算から求められたKiK-net観測点での理論波形（NS成分速度波形）。

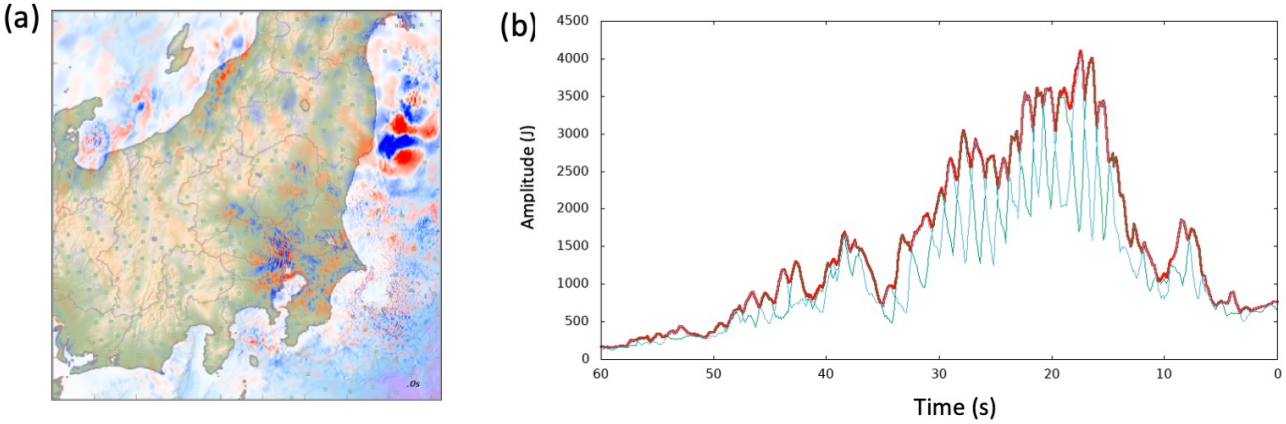


図 2 (a) TRI計算における地表の地震波伝播のスナップショット。赤と青はNS, EW方向の揺れの強さを表す。
(b) 太平洋プレート上面の弾性エネルギー最大値の時間変化（青線）、
ヒルベルト変換を行った地震波形の逆伝播に用いた場合（緑線）、二つのRMSをとったもの（赤線）。

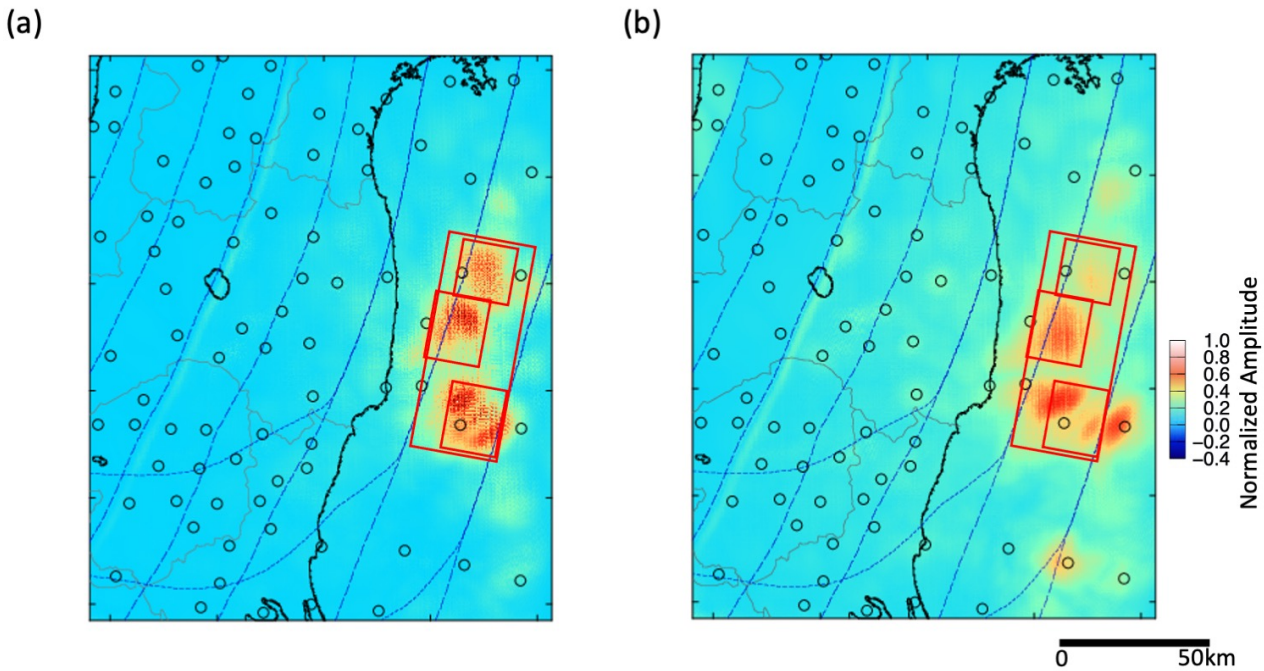


図3 TRI計算により得られた太平洋プレート上面での震源滑りイメージング結果（図1の赤枠の範囲を拡大）。
(a) PSエネルギー重合を用いた場合。(b)弾性エネルギーを用いた場合。
赤枠は、数値実験で与えた断層とアスペリティの位置を表す。白丸はKiK-netとS-net観測点を表す。

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

PM-1

chairperson:Atsushi Nozu(Port and Airport Research Institute), Shohei Yoshida(Ohsaki Research Institute, Inc.)

Thu. Oct 14, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM A (ROOM A)

[S15-06] Evaluation of ground motion by kinematic source model considering dynamic rupture process of branch fault for 1896 Rikuu earthquake

○Shuji KUMAGAI[1], Hiroaki MATSUKAWA[2], Yuta MITSUHASHI[2], Yusuke SAIJO[2] （1.Tohoku Electric Power Co.,Inc., 2.Kozo Keikaku Engineering Inc.）

1:30 PM - 1:45 PM

[S15-07] Complex Source Characterization of the 1944 Tonankai Earthquake from Simulated Collapse Ratios of Wooden Houses

○Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2], Haruko Sekiguchi[1], Hiroshi Kawase[1] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.HAZAMA ANDO CORPORATION）

1:45 PM - 2:00 PM

[S15-08] **Estimate of the rupture process of the 2021 off-Fukushima earthquake based on the finite-fault source inversion Inferred from strong motion records**

○Shohei Yoshida[1], Kenichi Tsuda[2], Chen Ji[3], Ralph Archuleta[3,4], Toshiaki Sato[1] （1.Ohsaki Research Institute, Inc. , 2.Shimizu Corporation, 3.University of California, Santa Barbara, 4.RJA Ground Motion Analysis, Inc.）

2:00 PM - 2:15 PM

[S15-09] Strong motion simulation with the SPGA model for the Onagawa Nuclear Power Plant

○Atsushi NOZU[1] （1.Port and Airport Research Institute）

2:15 PM - 2:30 PM

[S15-10] Strong motion simulation of a hypothetical M7-class intraslab earthquake in the Tokyo Bay region using MeSO-net observation data

○Wataru SUZUKI[1], Takeshi KIMURA[1], Hisahiko KUBO[1], Shigeki SENNA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

2:30 PM - 2:45 PM

[S15-11] Study on correction of the rupture propagation effect of elemental earthquakes used in the empirical Green's function method.

○Junpei KANEDA[1], Shinya TANAKA[1], Yoshiaki HISADA[2] （1.Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., 2.Prof.,Kogakuin Univ.）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Evaluation of ground motion by kinematic source model considering dynamic rupture process of branch fault for 1896 Rikuu earthquake

*Shuji KUMAGAI[1], Hiroaki MATSUKAWA[2], Yuta MITSUHASHI[2], Yusuke SAIJO[2]

1. Tohoku Electric Power Co.,Inc., 2. Kozo Keikaku Engineering Inc.

1896年陸羽地震では、東傾斜の主断層とそれに共役な西傾斜の分岐断層（川舟断層）で地表地震断層が認められた（松田・他、1980）(1)。この様に分岐断層が認められる場合、主断層と分岐断層が同時に活動した際の地震動評価は、特に分岐断層近傍を含めた領域の地震動予測を行う上で重要である。しかし、主断層と分岐断層を併せた特性化震源モデルの作成、及び特性化震源モデルを用いた地震動評価はこれまでにあまり行われておらず、モデル化に関する知見も十分に得られていない。

分岐断層のモデル化に必要な情報を得る事を目的とした研究例である熊谷・他(2020) (2)では、主断層と分岐断層を含めた断層運動の評価を動力学的アプローチにより行っている。具体的には、陸羽地震を対象に地表地震断層の変位量（松田・他、1980）を評価できるような2次元FEM解析により動力学モデルを構築し、主断層と分岐断層から放出されるエネルギーの比率や両断層の破壊伝播速度の違い等を評価している。

本研究では、特性化震源モデルの作成で従来行われてきた地震調査研究推進本部による、震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)に基づく手順により作成された特性化震源モデルに、熊谷・他(2020)の動力学的なアプローチによる断層運動の評価結果を加味した運動学的な震源モデルを作成し地震動評価を行うことで、分岐断層のモデル化に資する知見を得ることを試みた。また、住家の全潰率・半潰率に基づき推定された地震動強さ（武村・他, 2010、神田・武村, 2011）(3)，(4)との比較も行った。

まず、「レシピ」を参考に、主断層と分岐断層を対象にスケーリングモデルの考え方に則って、主断層及び分岐断層の運動学的な特性化震源モデル（図1、図2）を作成した。次に、熊谷・他(2020)を参考に、2次元FEM解析結果より得られた分岐断層の破壊過程に関する知見を、運動学的な特性化震源モデルに加味した震源モデルを別途作成した。震源モデルに加味した知見は、具体的には以下の2点である。①分岐断層の破壊伝播速度は主断層よりも遅い ②主断層の破壊が断層上端に到達した後に分岐断層の破壊が開始する。

続いて、「レシピ」に基づいて作成した特性化震源モデルと、2次元FEM解析結果の知見を加味して作成したモデルを用いて、統計的グリーン関数法による面的な地震動評価を行い、武村・他 (2010)、神田・武村 (2011)の震度分布より概算した陸羽地震時の工学的基盤上のPGV分布と比較を行った（図3、図4）。その結果、分岐断層周辺に着目すると、「レシピ」に基づいた特性化震源モデルによる地震動評価結果（図3）は過大評価となったが、2次元FEM解析結果の知見を加味した震源モデルによる地震動評価結果（図4）は分岐断層の破壊伝播速度を遅くさせた影響により地震動強さが小さくなり、PGV分布に近づく傾向となった。なお、主断層近傍では地震動強さに対する分岐断層の寄与は限定的であり、主断層由来の地震動が支配的であった。

本検討では2次元FEM解析結果から得られた分岐断層の破壊過程のうち、破壊伝播速度や破壊開始時刻に着目して運動学的な分岐断層の震源モデルの与条件としたが、分岐断層のモデル化に関する課題として、例えばより詳細な動力学的アプローチを実施し、その解析結果を運動学的な震源モデルの与条件とすることが挙げられる。一方、断層モデル全体の説明性向上に関する課題として、主断層に起因する地震動の再現性向上も必要である。そのために、例えば主断層のアスペリティの配置等の運動学的な特性化震源モデルの検討が挙げられる。また、本検討で用いた住家の全潰率・半潰率に基づき推定された地震動強さ（PGV）は情報として幅を含み、地震動評価結果との比較の際には留意が必要と考えられるため、地震動評価の妥当性確認方法の検討も課題である。

参考文献：(1)松田時彦・山崎晴雄・中田高・今泉俊文：1896年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, 55, 1980.，(2)熊谷周治・広谷浄・三橋祐太・西條裕介：1896年陸羽地震の分岐断層から生じた地震動の評価（動力学的破壊シミュレーションによる予備的検討）, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS15-P20, 2020.，(3)武村雅之・高橋裕幸・津村建四朗：1914（大正3）年秋田仙北地震の被害データと震度分布, 歴史地震, 25, pp.1-27, 2010.，(4)神田克久・武村雅之：震度データによる1914年秋田仙北地震の短周期地震波発

© The Seismological Society of Japan

生域と地震規模の推定および1896年陸羽地震との比較, 地震, 第2輯, Vol63, pp.207-221, 2011.

© The Seismological Society of Japan

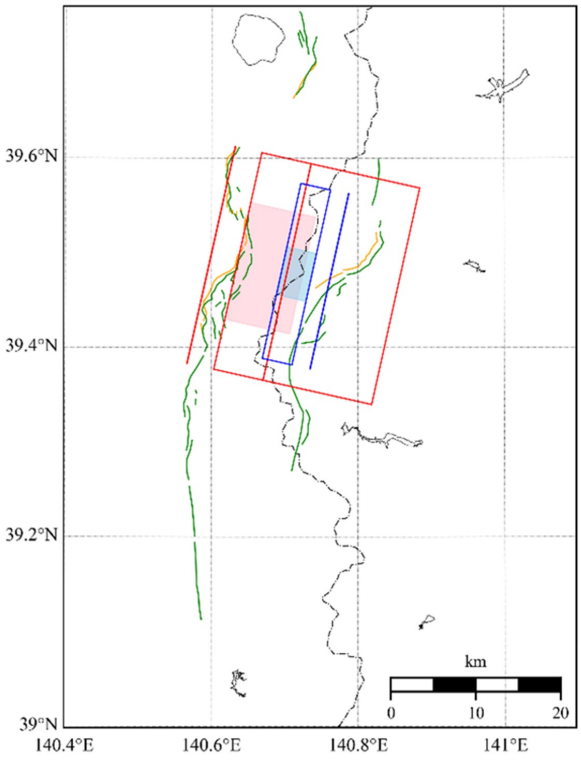


図 1　統計的グリーン関数法による地震動評価に用いた断層モデルの配置
赤線は主断層、ピンク色の領域は主断層のアスペリティ、青線は分岐断層を、水色の領域は分岐断層のアスペリティ

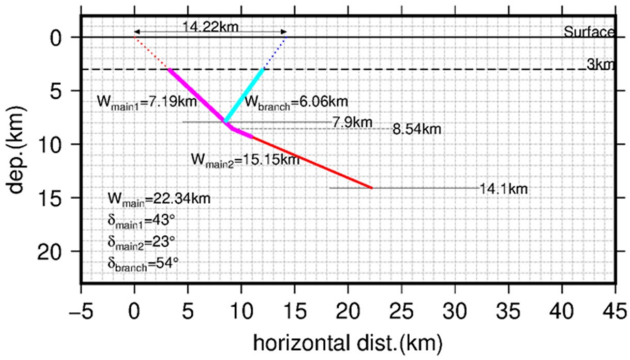


図 2　統計的グリーン関数法による地震動評価に用いた断層モデル断面図
赤線は主断層、ピンク色は主断層のアスペリティ、青線は分岐断層を、水色は分岐断層のアスペリティ

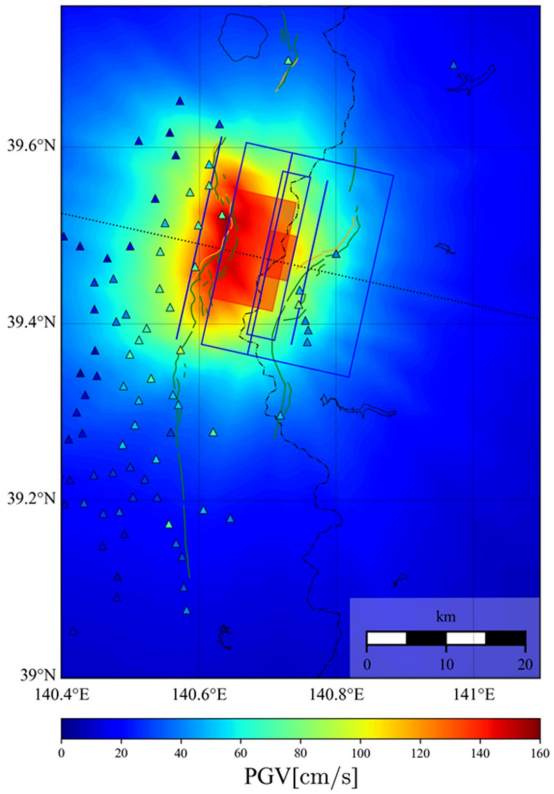


図 3　FEM 解析結果を加味しない特性化震源モデルによる PGV の面的分布図

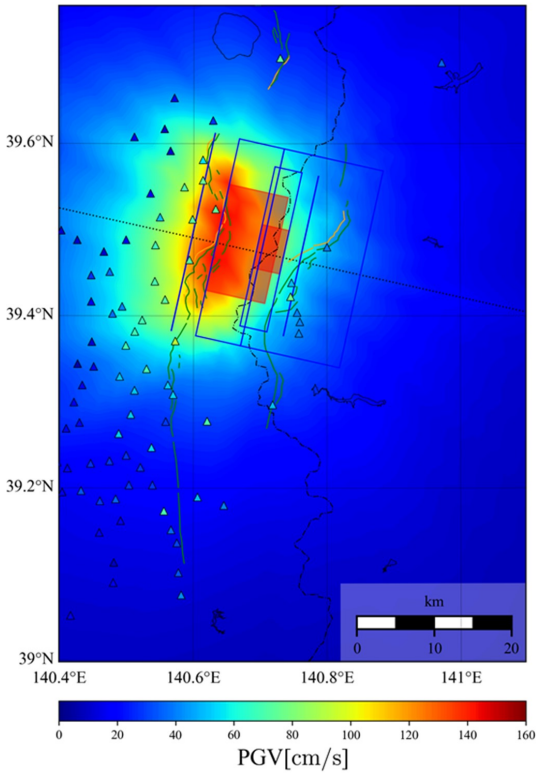


図 4　FEM 解析結果（分岐断層の破壊伝播速度）を加味した特性化震源モデルによる PGV の面的分布図

© The Seismological Society of Japan

Complex Source Characterization of the 1944 Tonankai Earthquake from Simulated Collapse Ratios of Wooden Houses

*Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2], Haruko Sekiguchi[1], Hiroshi Kawase[1]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION

2011年東北地方太平洋沖地震では、それまで十分に解明されてこなかった海溝型地震の震源特性（震源像）に関し、津波の発生に関係する周期20秒以上の長周期地震動生成域と、建物被害に直結する周期２秒以下のやや短周期地震動生成域が棲み分けられているという事実が得られた。今後さらに海溝型巨大地震を理解し、将来発生しうる被害を軽減するためには、基礎情報として過去の地震の詳細な震源破壊過程の物理モデルによる再現が重要である。しかしながら昭和の海溝型巨大地震である1923 年関東地震、1944 年東南海地震、1946 年南海地震に関しては、長周期地震動生成域についてはある程度解明されている一方で、やや短周期地震動生成域に関しては十分に検討されていない。そこで本研究では、1944 年東南海地震を対象に、滑り量・破壊伝播速度に不均質性を付与した震源モデル(不均質震源モデル)と分離手法による統計的グリーン関数による強震動作成手法を確立する。そして、新たに構築した1930年以前の建物被害モデルに強震動を入力して得られる建物被害分布と観測記録に残る被害分布を比較することで1944年東南海地震のSMGAの特徴を抽出する。 まず、内閣府 (2015) に基づくSMGA の配置と、不均質な滑り量・破壊伝播速度を有する震源モデルを標準モデルとして、破壊開始点(3 種類)、強震動生成域(SMGA1～4)の位置(4 種類)、SMGA の応力降下量(3 種類)の異なる合計36 ケースの不均質震源モデルを構築した。その上で、構築した震源モデルと仲野 (2020) の統計的グリーン関数を用いて、武村・虎谷 (2015)に記載されている被害観測地点のうち、建物倒壊率が１％以上の５３地点において強震動を作成した。得られた強震動の最大加速度・最大速度はMorikawa and Fujiwara (2013)の経験式に概ね一致した。 その後、1930年以前の建物被害評価モデルである戦前モデルを、吉田・他(2004)の建物被害予測モデルの各建築年代の耐力比と八木・他(2020)の常時微動結果から得られた各建築年代と固有振動数の関係式に基づき構築した。作成した強震動を入力して対象地点における倒壊率を算出し（計算倒壊率とする）、武村・虎谷(2015)の観測倒壊率と比較した。回帰直線の傾きと決定係数R^2 を両者の一致度の指標としたところ、破壊開始点・４つのSMGAの位置が陸側に深く、応力降下量が大きいケース3-2-3 が、36ケースの中では最も観測事実を説明する震源モデルであることが分かった。しかしながら、ケース3-2-3 では、静岡県東部に広がる倒壊率40%以上の地点では計算倒壊率が過小評価となった。このことを受け、破壊開始点とSMGA の配置は同じで、SMGA1 と2 の面積と応力降下量を変更した不均質震源モデルを5ケース追加し比較した。その結果、SMGA2 の応力降下量のみを60MPa に変更したケース3-2-5 が新たに最も観測事実を説明するモデルとなることが分かった。このケースでは観測倒壊率40%以上の地点での一致度はケース3-2-3 より改善されたが、依然過小評価となった。今回の結果から、40%以上の建物倒壊率を説明するためには、より強力なフォワードディレクティビティを静岡県東部に生じせしめるような震源破壊プロセスを考えていく必要があることが分かった。

© The Seismological Society of Japan

Estimate of the rupture process of the 2021 off-Fukushima earthquake based on the finite-fault source inversion Inferred from strong motion records

*Shohei Yoshida[1], Kenichi Tsuda[2], Chen Ji[3], Ralph Archuleta[3,4], Toshiaki Sato[1]

1. Ohsaki Research Institute, Inc. , 2. Shimizu Corporation, 3. University of California, Santa Barbara, 4. RJA Ground Motion Analysis, Inc.

A Mw 7.1 intra-slab earthquake occurred off the coast of the　Fukushima prefecture, northeastern Japan, at 23:07 on 13th February 2021 (JST). This earthquake generated strong shaking (the seismic intensity 6+ and 6- in JMA scale) along the coast of the Fukushima and Miyagi prefecture. In this study, we have estimated the rupture process of this event by the waveform finite-fault inversion method developed by Ji *et al.* (2002).We use three-components strong-motion records at 16 K-NET and KiK-net surface stations in the Fukushima and Miyagi prefecture. To improve the quality of the inversion results, we have introduced an individual 1D velocity structure model for each station in calculating Green’ s functions. First, we have constructed the 1D velocity model for each station. We interpolate the Japan Integrated Velocity Structure Model [JIVSM] (Koketsu *et al.*,2012) for its subsurface, the seismic tomography model of Matsubara *et al.*(2019) for crust, and the PREM (e.g., Shearer, 2018) for mantle. Then, we calibrate these models by forward simulation for the record of a Mw 5 aftershock occurring in March 17, 2021. Consequently, we got good agreements in both arrival time and amplitude for the frequency range between 0.05~0.5Hz. For the inversion of the mainshock, we assumed one fault plane dipping 33 degrees to the east based on the aftershock distribution and F-net focal mechanism (Fukuyama *et al.*, 1998). The fault plane was divided into 2km by 2km sub-faults. We optimized five fault parameters (e.g. slip amplitude, rupture time, rake angle, starting and ending time of an assumed analytical slip-rate functions) for each individual sub-fault by minimizing an objective function defined in wavelet domain using simulated annealing (SA) inversion procedure. Our inverted results shown in the figure suggest that the fault rupture mainly propagated towards to the south-west. The area with large slip was detected on this side. The centroid time of the rupture of this asperity was about 10 sec from rupture initiation. Also, the area with large slip velocity is coincide with the area with large slip.

© The Seismological Society of Japan

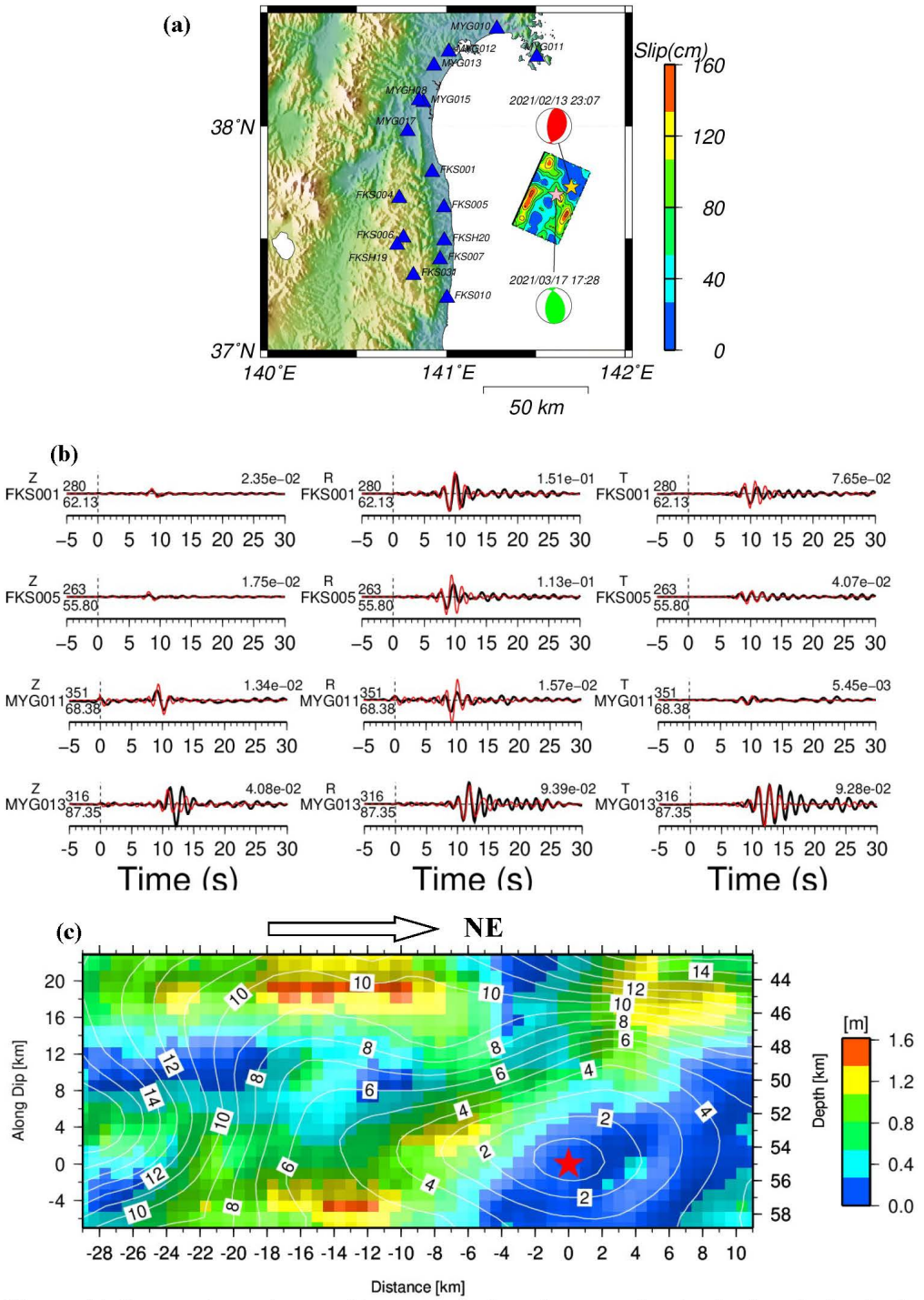


Figure: (a) Observation points used in our analysis, epicenters of main-shock and aftershock, and slip distribution of our inversion result. (b) Comparison of the observations (black line) and theoretical seismograms (red line) of the aftershock. (c) Slip distribution of Our inversion result. The contour lines in (c) denote the rupture time

© The Seismological Society of Japan

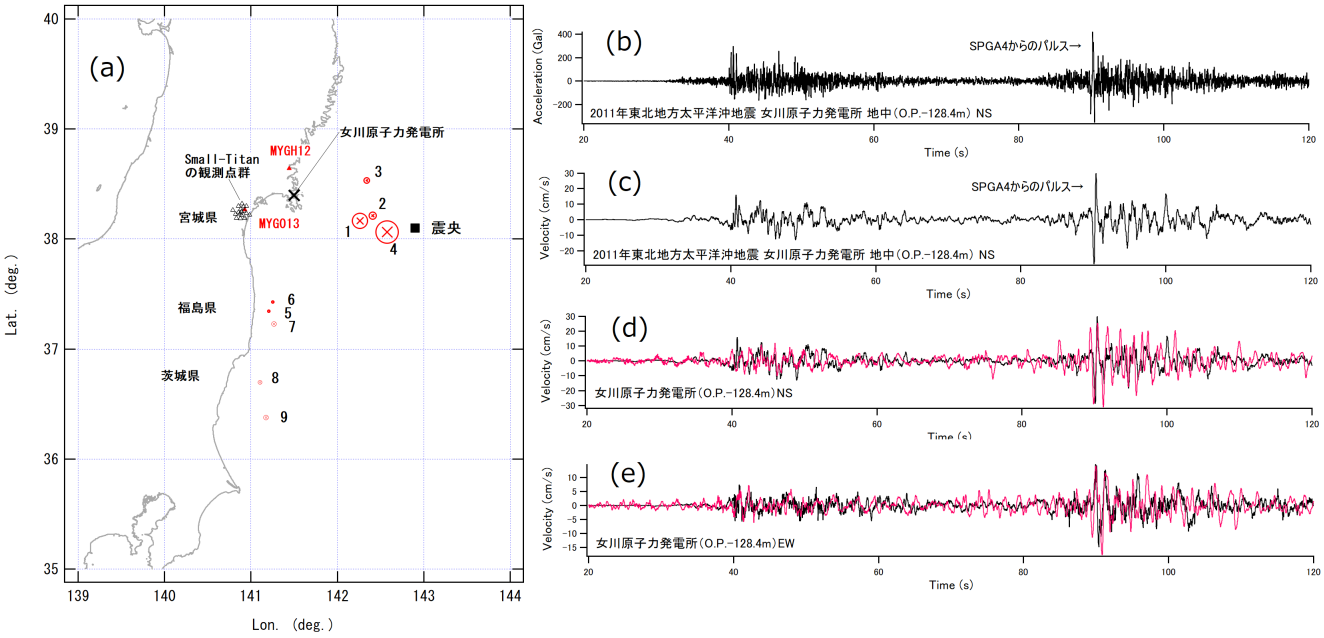
Strong motion simulation with the SPGA model for the Onagawa Nuclear Power Plant

*Atsushi NOZU[1]

1. Port and Airport Research Institute

東北地方太平洋沖地震による強震動の特性としては，継続時間が長かったこと，遠方でも長周期地震動が観測されたことなどが語られることが多いが，仙台市内など震源近傍の多くの地点で周期1-2秒程度のパルス的な地震動が支配的であったことも，東北地方太平洋沖地震の強震動の重要な一側面である．これらのパルスの時定数の短さは，それらが一般にSMGAと呼ばれる一辺が数10km程度の領域ではなく，筆者がSPGAと呼ぶ一辺が数km程度の領域で生成されたことを物語っている（野津，2018，日本地震工学シンポジウム）．このうち最大のパルスは，筆者がSPGA4と呼ぶ領域（図(a)）で生成されたと考えられるが，この領域は仙台市から見て150kmも沖合である．それにも関わらず，仙台市内ではSPGA4に起因するパルスは地盤条件によっては100 cm/s以上あるいは震度7相当となった．すなわち，海溝型巨大地震のSPGAは150km離れた地点に震度7や100 cm/sの地震動を作りだすだけの力があるということであり，この点で内陸地殻内地震のアスペリティとは異なっている．東北地方太平洋沖地震の際，より陸域に近い場所でもSPGAの破壊は見られたが，それらは相対的に弱いものであった．SPGA4のような強いSPGAの破壊が陸域の近傍で生じなかったことは不幸中の幸いであった（野津，2015，科学）． SPGA4に起因するパルス波は女川原子力発電所でも観測されている．図(b)(c)は地中（-128m）でのNS成分（設置方位の補正は行っていない）の加速度波形と速度波形（周期10s以上をカットして周波数領域で積分）を示している．ここでの時間軸の原点は記録開始時刻で，記録開始の約90秒後にSPGA4からのパルスが到来し，そのときに加速度波形，速度波形とも最大値を示している．すなわち，SPGA4の破壊が女川原子力発電所に基準地震動を超える地震動をもたらしたと言える． 筆者は，東北地方太平洋沖地震によるパルスを含む強震動を精度良く再現できる震源モデルとしてSPGAモデルを提案しているが（野津他，2012），同モデルによる女川原子力発電所での地震動の再現性については確認していなかったので，確認を行った．地震動の計算には修正経験的グリーン関数法（https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_049.pdf）を用いた．経験的サイト増幅特性は，女川原子力発電所地中（-128m）とK-NET北上における中小地震記録のスペクトル比と，K-NET北上における既存の経験的サイト増幅特性（野津・長尾，2005）をもとに算定した．位相特性としては2011年3月10日3:45の地震の記録を用いた．結果を図(d)(e)に示す（周期10s以上をカットして周波数領域で積分した速度波形，赤が計算結果）．約90秒付近のパルスの振幅・周期をはじめとして波形全体が比較的良好に再現されている．したがって東北地方太平洋沖地震によるパルスを含む強震動を精度良く再現するための震源モデルとしてのSPGAモデルの有効性が改めて確認できた． 謝　辞 東北電力および防災科学技術研究所が取得した強震記録を利用しました．ここに記して謝意を表します．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Strong motion simulation of a hypothetical M7-class intraslab earthquake in the Tokyo Bay region using MeSO-net observation data

*Wataru SUZUKI[1], Takeshi KIMURA[1], Hisahiko KUBO[1], Shigeki SENNA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

首都圏に被害をもたらし、かつ発生頻度の高い地震として、関東直下のM7級の地震が懸念されている。中央防災会議（2004）ではそのようなM7級地震として「東京湾北部地震」や「多摩地震」といったフィリピン海プレート上面で発生するプレート間地震を想定していた。その後、中央防災会議（2013）は「東京湾北部地震」や「多摩地震」を想定していたプレート境界域では1923年関東地震により応力解放されていて、フィリピン海プレート内部の地震の方が蓋然性が高いとして、想定する地震のタイプをスラブ内地震に変更している。全国を均質にカバーする強震観測網K-NET及びKiK-netが構築されて以降、トリガによる強震記録の得られた東京湾を震央とする地震はいくつか発生している。2015年9月12日にはM_{JMA}5.2、深さ57 kmの地震が発生し、南関東地域を中心に加速度計が展開されているMeSO-net（首都圏地震観測網）により高密度の強震動データが得られている。F-netメカニズム解によればこの地震は北西一南東方向に伸張軸をもつ正断層型であり、震源深さを考慮するとフィリピン海プレート内のスラブ内地震と考えられる。この地震の近傍、震源間の距離10 km未満で、2004年8月25日に同様のメカニズム解を持つM_{JMA}4.4の地震が発生している。フィリピン海プレート内部に正断層構造が発達している可能性が示唆され、この震源メカニズムによる大規模地震を想定することは防災対策上必要と考えられる。本研究では関東直下の複雑な地下構造の影響やスラブ内地震特有の震源特性を適切に取り込んだ強震動評価を図るため、MeSO-net観測記録を用いた経験的グリーン関数（EGF）法による強震動シミュレーションを実施した。

2015年の地震の強震記録をEGFに用いるため、始めにその断層サイズとライズタイムを仮定する必要がある。鈴木・他（2021、連合大会）ではスケーリング則に基づきそれらのパラメータを仮定したが、本研究では2004年の地震の強震記録のEGFシミュレーションから、2015年の強震記録を再現するパラメータをグリッドサーチにより推定した。2004年にはMeSO-netが構築されていないため、K-NET及びKiK-netの強震記録を用いた。推定された断層サイズは1.0 km×1.8 km、ライズタイムは0.04秒であり、断層サイズはスラブ内地震のスケーリング則（岩田・浅野、2010）を外挿して想定される大きさ（7.5 km^2程度）と比べて有意に小さかった。

続くM7級スラブ内地震の強震動シミュレーションについては中央防災会議（2013）が設定した強震動生成領域のサイズ（150 km^2）と応力降下量（62 MPa）を参考に強震動生成領域を設定した。EGFの足し合わせ個数は強震動生成領域と2015年の地震のサイズの比より決定し、EGFの振幅の増幅倍率（応力降下量比）は強震動生成領域の地震モーメントと振幅を調整せずにEGFを足し合わせた場合の地震モーメントの比より決定した。始めの2015年の強震記録の再現も含め、Irikura （1986）によるEGF法を用いた。2015年の地震の南北走向と東西走向の2つの節面それぞれについて強震動シミュレーションを行い、それぞれ北方向と西方向に、断層の深部から浅部に向けて破壊が伝播すると仮定した。MeSO-netでは地震計が地中20 mに設置されており、強震動評価のためには地表相当に変換する必要がある。本研究ではMeSO-net観測点の地表における臨時観測により地表と地中で同時に観測した地震記録から推定した震度増分を用いて、地表相当の計測震度分布を推定した。

MeSO-net観測点におけるシミュレーション結果では地中20 mにおいても1,000 galを超えるような最大加速度が得られた。東京都西部から神奈川県北部や埼玉県南部にかけての地域や東京都の東部から埼玉県南部の地域に最大加速度の大きい領域が広がる様子が見られる。東西走向の断層モデルでは特に東京都西部の最大加速度が大きい領域が広くなり、地下構造特性に加えて破壊伝播の効果が影響したと考えられる。加速度応答スペクトルを見ると、周期0.2～0.3秒にピークを持つ観測点が多いが、1秒前後にピークを持つ観測点や0.2～0.3秒と1秒前後の2つのピークを持つ観測点も散見される。また、地表相当の計測震度分布では震度7となる点もみられ、南北走向の断層モデルでは千葉県や茨城県でも大きな計測震度が推定された。このように稠密なMeSO-netの観測記録を用いたEGFシミュレーションにより、想定される東京湾直下地震の地震動の

© The Seismological Society of Japan

様々な特性を面的に評価することができた。

© The Seismological Society of Japan

Study on correction of the rupture propagation effect of elemental earthquakes used in the empirical Green's function method.

*Junpei KANEDA[1], Shinya TANAKA[1], Yoshiaki HISADA[2]

1. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., 2. Prof.,Kogakuin Univ.

1. はじめに

経験的グリーン関数法（以下，EGF）は過去に発生した地震の観測記録の再現に関しては実績もあり広く用いられている地震動評価手法の一つである。しかしながら，要素地震に含まれる破壊伝播効果の影響や補正等については十分な検討が行われていないと考えられる。金田・他（2020，地震学会秋季大会）では2004年新潟県中越地震の余震（2004.10.27.10:40，Mw5.9）について破壊伝播効果の影響がある程度大きいことを確認したうえで，本震（2004.10.23.17:56，Mw6.6）の要素地震として用いた波形合成を行った。その結果、1Hz周辺で本震の観測記録に対して要素地震の破壊が近づく地点では過大評価，破壊が遠ざかる地点では過小評価する傾向を示した。これは本震と要素地震の破壊伝播特性が異なることが要因と考えられる。

本稿では本震と異なる破壊伝播特性の地震を要素地震として用いる場合を想定し、要素地震に含まれる破壊伝播効果の補正を行う。なお、対象周波数は工学的に重要とされる1Hz程度とする。

2. 検討方法

本検討ではHikima and Koketsu（2005）による2004年新潟県中越地震の本震と余震に加え、一回り規模の小さい小地震（2004.10.27.17:15，Mw3.7）を用いる。初めに，観測記録を用いて小地震に対する本震，余震のフーリエ振幅スペクトル比から震源からの方位に依存する破壊伝播特性の違いを整理する。最後に，要素地震に含まれる破壊伝播効果の補正とEGFを用いた波形合成による本震の観測記録の再現解析を行う。

3. 検討結果

3.1　本震と余震の破壊伝播特性の違い

本震と余震の破壊伝播特性について整理する。検討に用いる地震と観測地点を図1，表1に示す。小地震と震源位置・発震機構が近い場合，フーリエ振幅スペクトル比を算出することで伝播特性・サイト特性・震源放射特性が除去されると仮定すると，観測点間の違いは震源破壊過程による破壊伝播効果の影響として現れると考えられる。破壊伝播効果による方位依存性の評価には理論震源スペクトル比（本震，余震及び小地震をω^{-2}モデルに基づく理論的な震源スペクトルでモデル化した時の小地震に対する比率）と観測スペクトル比（観測記録における小地震に対する比率）との比を算出し，0.5Hz～2.0Hzの幾何平均をディレクティビティ係数として評価する。本震と余震のディレクティビティ係数の分布を図2に示す。本震は北東側と南西側で振幅が大きくなるのに対して，余震では南西側で振幅が大きく，破壊伝播特性が異なることがわかる。また，図には小山（1987）による理論的な短周期の方位依存性を併せて示しており，2地震ともに理論的な方位依存性と整合していることが確認できる。なお，図中の数値は小山（1987）による方位依存性の算出に用いた方位角である。

3.2　要素地震の破壊伝播効果の補正検討

余震を要素地震として用いたときの破壊伝播効果の補正を試みる。要素地震の補正方法とEGFによる波形合成結果を図3に示す。図3(a)はHikima and Koketsu(2005)の震源逆解析結果に基づく特性化震源モデル（SMGAのみを考慮する）で，要素地震の規模が大きいため要素断層は一辺4kmに再分割している。また，図3(b)は震源逆解析結果に基づいて設定した余震の特性化震源モデルであり，小地震を要素地震としたEGFで観測記録の再現解析を行い震源モデルの妥当性を確認している。ここで、EGFにおいて余震は要素断層に対してすべり方向の重ね合わせ数を1とすると、要素断層と余震が1対1で対応するため，本震のSMGAの要素断層内の破壊過程は図3(c)で表わせる。図より要素断層の主要なすべりの破壊方向は南西側であることがわかる。一方，本震の本来の破壊過程が破壊開始点から同心円状に広がるとすると図3(d)に示すようバイラテラル破壊と

© The Seismological Society of Japan

なり，図3(c)とは乖離する。

本検討では要素断層内の破壊過程を図3(d)の破壊形状へ補正する。図3(e)に補正のイメージを示す。初めに図3(c)の震源逆解析結果に基づく破壊開始点（基本ケース）を設定し，余震を対象としたEGF（小地震を要素地震とする）を行う。次に破壊開始点を図3(d)の仮想破壊開始点とし，余震を対象としたEGFを行う。これらの波形合成結果のフーリエスペクトル比を算出し補正係数とする。この補正係数を余震の観測記録のフーリエスペクトルに乗じることで位相と振幅を補正する。この作業を全ての要素断層（sub_Fault_No1～5）で行った後，波形合成を行う。

余震において破壊が近づく地点のNIGH19と遠ざかる地点のNIGH08における波形合成結果（速度波形、観測記録とのフーリエ振幅スペクトル比）を図3(f)に示す。なお，補正係数の高周波数側にノイズが含まれていたため、速度波形は6Hz以下を示す。図には比較のため要素地震波の補正を行っていない場合も併せて示している。速度波形では両者とも観測記録の位相はおおむね再現できていることがわかる。次に観測記録とのフーリエ振幅スペクトル比では補正を行うことで2地点ともに1Hz周辺の残差が1に近づいていることが分かる。一方、より低周波数帯では過小評価、過大評価の傾向があり，今後の課題である。

謝辞
防災科学技術研究所による地震記録を使用させていただきました。図の作成にあたっては国土地理院の地理院地図とGMTを使用しました。ここに記して、お礼を申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

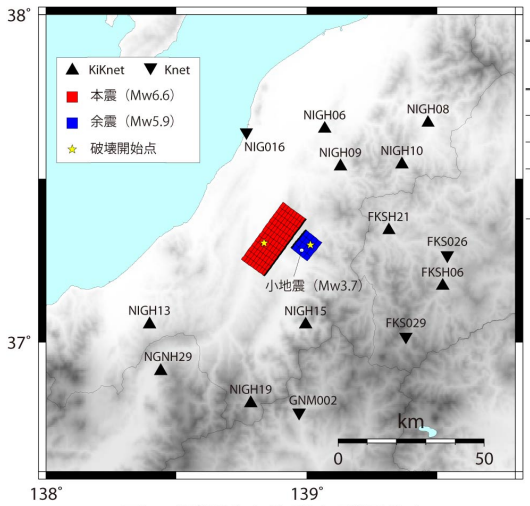


図 1 観測地点位置と震源分布

表 1 地震諸元

Name	date	Mw	Dep※1 [km]	M_0※1 [dyne・cm]	σ_{spec}※2 [MPa]	σ_{grid}※3 [MPa]	fc [Hz]	発震機構※1
本震	2004.10.23.17:56	6.6	5	7.53×10^{25}	-	9.4	0.18	
余震	2004.10.27.10:40	5.9	11	6.34×10^{24}	12.5	-	0.45	
小地震	2004.10.27.17:15	3.7	11	4.50×10^{21}	3.2	-	3.20	

※1：F-net より設定.
※2：田中（2016）に小地震を追加したデータセットを用いたスペクトルインバージョン解析より推定.
※3：小地震との観測スペクトル比と理論スペクトル比の対応が良い値を推定.

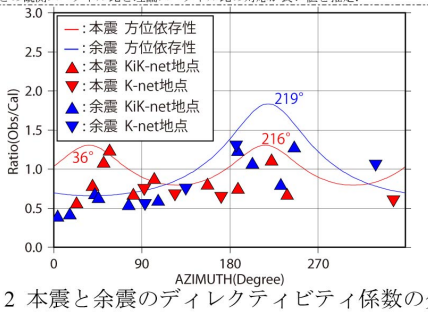
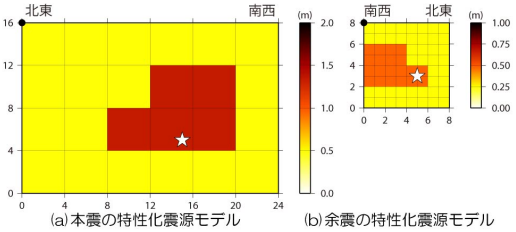
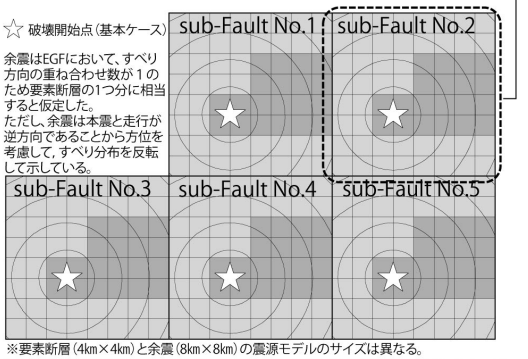


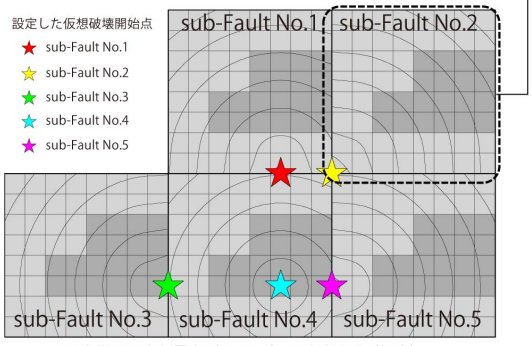
図 2 本震と余震のディレクティビティ係数の分布



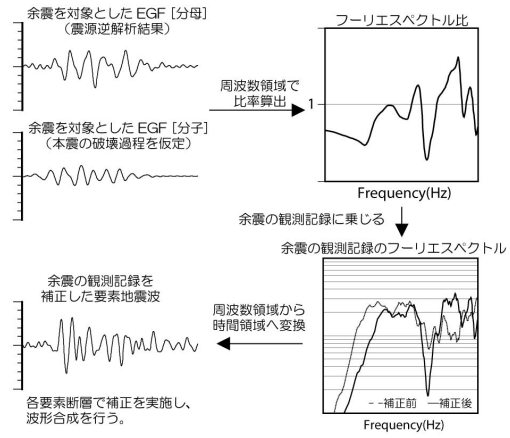
(a)本震の特性化震源モデル　(b)余震の特性化震源モデル



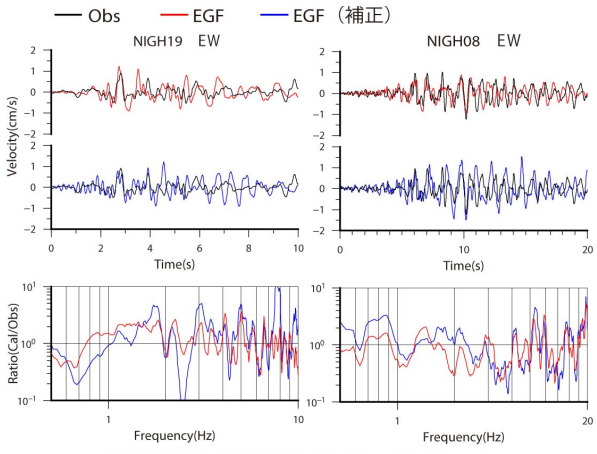
※要素断層（4km×4km）と余震（8km×8km）の震源モデルのサイズは異なる。
(c)余震を要素地震として本震（SMAG）に当てはめた時の破壊イメージ



(d)本震の要素断層内（SMGA）の破壊過程（仮定）



(e)要素地震に含まれる破壊伝播効果の補正イメージ



(f)波形合成結果と観測記録の比較（6Hz 以上をカット）

図 3 要素地震の補正と EGF による波形合成結果

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

AM-1

chairperson:Kimiyuki Asano(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University), Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute)

Fri. Oct 15, 2021 9:00 AM - 10:00 AM ROOM A (ROOM A)

[S15-12] Inhomogeneous structure in the crust of the Kyushu region by seismic tomography

○Koji Yamada[1], Mitsuhiro Toya[1], Atsushi Okazaki[2] （1.Hanshin Consultant's Co.,Ltd., 2.KEPCO）

9:00 AM - 9:15 AM

[S15-13] Difference of attenuation structure between Northeastern Japan and Hokkaido revealed by the earthquakes east off Aomori Prefecture

○Yasumaro KAKEHI[1] （1.Graduate School of Science, Kobe Univ.）

9:15 AM - 9:30 AM

[S15-14] Long-Period Ground Motion Amplifications in the Hakodate Plain Based on Ground Motion Simulations Using a New 3D Velocity Model

○Kimiyuki ASANO[1], Tomotaka IWATA[1], Kunikazu YOSHIDA[2], Naoto INOUE[2], Kazuhiro SOMEI[2], Ken Miyakoshi[2], Michihiro OHORI[3] （1.DPRI, Kyoto Univ., 2.Geo-Research Inst., 3.RINE, Univ. of Fukui）

9:30 AM - 9:45 AM

[S15-15] Joint analysis of receiver function and autocorrelation using strong motion for velocity structure profiling based on seismic interferometry

○Kosuke CHIMOTO[1] （1.Kagawa University）

9:45 AM - 10:00 AM

©Seismological Society of Japan

Inhomogeneous structure in the crust of the Kyushu region by seismic tomography

*Koji Yamada[1], Mitsuhiro Toya[1], Atsushi Okazaki[2]

1. Hanshin Consultant's Co.,Ltd., 2. KEPCO

震源決定や震源インバージョンなど地震の震源域に関する解析の多くは1次元構造によるものであり、基盤岩における不均質構造は考慮されていない。震源情報や強震動予測の精度を考慮するにあたり、基盤岩の不均質を考慮する必要性があるか否か検証しておくことは重要であると考えられる。

これまでに幾つかの大爆破の観測等により基盤岩における構造推定が試みられているが、基盤岩内部の不均質を推定できるほどその数は多くない。VJMA2001、JIVSMなど幾つかの速度構造モデルが提案されているが、いずれも情報量の少ない中で構築されていると考えられる。構造探査は波動の発生のし易さからP波が用いられるが、工学的に重要なS波に対してはほとんど行われていない。特に大深度においてはS波の構造探査は行えないのが実情である。一方、現時点までに観測された自然地震に関する走時情報は相当量蓄積されている。そこでこの走時情報を用いて、九州地方を対象としたP波およびS波の地震波トモグラフィーを実施し、基盤岩の速度不均質に関する検討を行った。

北緯32.1～34.0˚、東経129.4～131.9˚、深さ0～20 kmで発生した地震を対象として、Hi-net検測値データに、強震観測網（K-net）の連続観測データからP、S波走時を読み取った走時データを追加した。別途、北朝鮮で実施された核実験の表面波位相速度およびモホ面を伝わったと考えられる地震波速度を用いた逆解析を行って、地表からモホ面までの大局的な速度構造を求めた。これをトモグラフィー解析のための初期モデルとしてhypomhプログラム（Hirata and Matsu’ura, 1987）を用いた震源決定を行い観測点補正量を推定するとともに、①解の収束条件を満たさなかった地震、②データ数が10未満の地震、を除いた初動走時をトモグラフィーに用いるデータセットとした。その結果、地震数は79375地震、観測点数はHi-net、気象庁、大学で95点、K-NET62地点となった。また、走時数はP波が1130862、S波が1149210個である。

解析にはFMTOMO(Rawlinson et al, 2006)を用い、北緯32.0～34.1˚、東経129.3～132.0˚の範囲を水平方向のグリッド間隔を0.1˚刻みとして与えた。鉛直方向に関しては、最初は4km間隔とし、解が収束した段階で、それを初期モデルとする深さ方向に2km間隔の格子として、深さ方向への分解能の向上を行った。

上記の解析をP波およびS波に対して独立に行った。それぞれ独立に行った解析であるが、それぞれの速度分布の遅速には良い対応関係にあるように見られる。なお、阿蘇火山の直下付近の深さ12～20km付近には周辺に比べ、P波及びS波が周辺に比べてやや遅い速度分布でVp/Vs比がやや小さくなる分布が見られている。Abe et al. (2017)はレシーバー関数の解析および理論計算の対応から、阿蘇の下にS波の低速度領域が存在することを指摘している。トモグラフィーによる低速度分布は、Abe et.al(2017)の結果に対応するものと考えられる。

今後は推定した不均質速度構造の妥当性の検討を3次元差分法により進める予定である。なお、今回行ったトモグラフィー解析では、地震観測点密度により、これ以上の分解能の不均質速度構造を得るのは困難であった。より詳細な不均質を明らかにするためには、地震数を増やすだけではなく、観測点密度を上げることが必要と考えられる。

謝辞：検測データおよび強震波形データは防災科学技術研究所高感度地震観測網（Hi-net）および強震観測網（K-net）に公開されているデータを用いました。記して感謝いたします。また、本研究は、12電力等による共同研究の成果の一部です。

© The Seismological Society of Japan

Difference of attenuation structure between Northeastern Japan and Hokkaido revealed by the earthquakes east off Aomori Prefecture

*Yasumaro KAKEHI[1]

1. Graduate School of Science, Kobe Univ.

青森県東方沖では震源の深いプレート境界地震が発生する。この研究では2015年6月8日（M_W 6.1，深さ66.07 km，以下イベント1）と2021年7月26日（M_W 5.2，深さ52.5 km，以下イベント2）の2つの青森県東方沖のプレート境界地震を取り上げ，その強震動の特徴を調べる。解析には防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netの強震記録を使った。図(a)は，2つのイベントによる加速度振幅の最大値（PGA）の空間分布を示す。東北日本では，大きな加速度振幅は島弧の前弧側のみで見られ，背弧側での加速度振幅は小さい。これはKakehi (2015)が指摘しているように，東北日本弧の2次元的な減衰構造，すなわち前弧側は高Q値の媒質，背弧側は低Q値の媒質（火山フロント直下は特にQ値が小さい）から成るという減衰構造を反映し，高周波地震波の振幅が背弧側で急激に小さくなることによるものである。このような島弧の背弧側での高周波地震波の振幅の減衰は，北海道でも同じように見られる。ただし，北海道の場合，東北日本とは異なり，図(a)に見られるように前弧側においても高周波地震波の振幅が小さくなる領域が存在する。具体的には日高山脈の西側の領域がそうである。日高山脈では島弧と島弧が衝突しており，その領域は「日高衝突帯」と呼ばれ，地下速度構造が複雑であることが知られている。日高衝突帯では速度構造のみならず減衰構造も複雑で，衝突帯の西側には，前弧側であるにもかかわらずQ値の低い領域が存在することが先行研究によって明らかにされている（Kita et al. (2014)，Nakamura And Shiina (2019)）。この前弧側の低Q値領域の存在により，北海道では前弧側でも高周波地震波の振幅が小さい領域が生じ，東北日本とは異なり複雑な振幅分布を示す。図(c)はイベント1による加速度最大振幅（PGA）の距離減衰を示す。図は，図(b)に示す3本の直線アレイに着目し，各直線アレイをなす観測点のデータを黒丸で示している。北海道の前弧側を通るline01では，震源距離の小さい観測点も大きい観測点も振幅が同程度となる特異な傾向を示す。line01の震源距離が大きい観測点（道東の太平洋岸の観測点）は，白丸で示されるデータセット全体の中で振幅の大きい位置を占め，これは前弧側での減衰が小さいことに対応している。それに対し，line01の震源距離が小さい観測点は，まさに上述の日高衝突帯西側の領域に対応するのだが，データセット全体の中で振幅が小さいグループをなしており，これは低Q値の媒質によって地震波の振幅が減衰したことを強く示唆している。line02は北海道の前弧側から背弧側に延びる測線であるが，測線の前弧側が日高衝突帯西側に位置し，背弧側のみならず前弧側も低Q値の媒質により高周波地震波が減衰を受けるという測線である。実際，距離減衰の図を見ても，測線上の観測点の黒丸は白丸で示されるデータセット全体の中で振幅の最も小さいグループをなしている。一方，主として東北日本弧の前弧側を通るline03の場合，地震波は前弧側の高Q値の媒質中のみを伝播するので，振幅はほとんど減衰しない。それを反映して，距離減衰の図の測線上の観測点の黒丸は，データセット全体の中で振幅の大きいグループをなしている。

© The Seismological Society of Japan

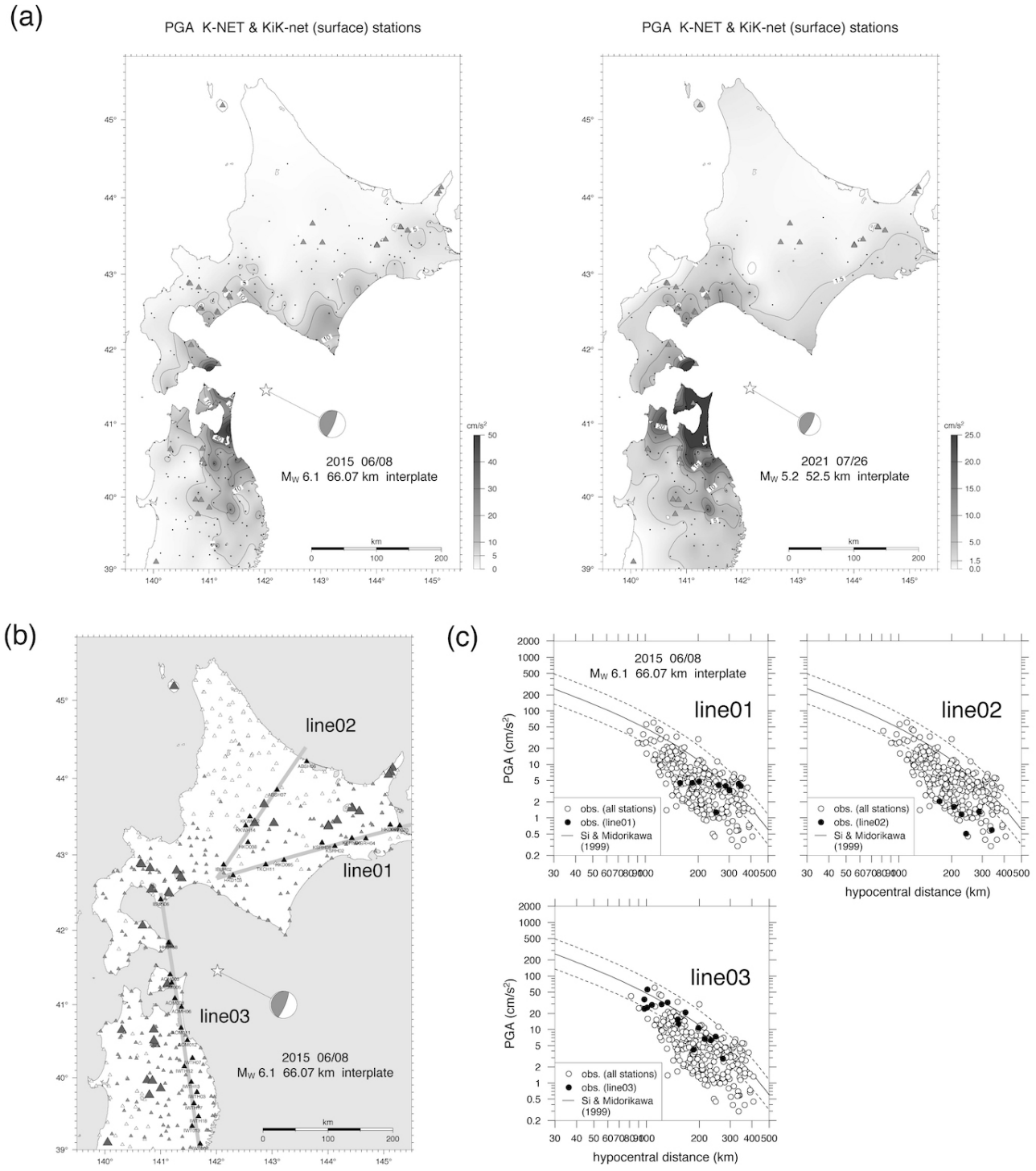


図. (a) 2つのeventのPGAの空間分布。(b) 3本の直線アレイ。(c) PGAの距離減衰（白丸：全データ, 黒丸：各直線アレイ上の観測点のデータ）。

© The Seismological Society of Japan

Long-Period Ground Motion Amplifications in the Hakodate Plain Based on Ground Motion Simulations Using a New 3D Velocity Model

*Kimiyuki ASANO[1], Tomotaka IWATA[1], Kunikazu YOSHIDA[2], Naoto INOUE[2], Kazuhiro SOMEI[2], Ken Miyakoshi[2], Michihiro OHORI[3]

1. DPRI, Kyoto Univ., 2. Geo-Research Inst., 3. RINE, Univ. of Fukui

函館平野は南側を津軽海峡に面し，東西を上磯山地と亀田半島に囲まれた堆積盆地であり，函館平野の西縁は，逆断層である函館平野西縁断層帯によって丘陵・段丘と低地との地形境界が形成されている［太田・他, 1994］．我々は日本海地震・津波研究プロジェクトのサブサブテーマ3.2として，北海道の函館平野において，小半径～大半径の微動アレイ探査（５地点）を実施し，既存の反射法探査結果［石油公団, 1981; 佐藤・他, 2019］も併せ，函館平野の三次元深部地盤速度構造モデルを作成した．函館平野の堆積盆地構造は，大局的には平野西縁に向かって深くなる構造をしている．第四系及び新第三系からなる堆積層の層厚は最深部で約３kmである．また，2016年内浦湾の地震の地震動シミュレーション（＜２Hz）を行うことで，速度構造モデルのパフォーマンスチェックも行った［以上，浅野・他, 2020, 地震学会］．

函館平野においては，函館平野西縁断層帯のほかにも，太平洋や日本海で発生する巨大地震による地震動が想定される．例えば，1968年十勝沖地震では函館港周辺や五稜郭の被害などが報告されている［1968年十勝沖地震調査委員会, 1969］．また，盆地としての深さも最大で3 km程度あり，大阪盆地などと比べても遜色のない規模を有していることから，長周期地震動についても発達しやすい環境にあると考えられる．本研究では，日本海地震・津波研究プロジェクトで作成した速度構造モデルに基づいて，函館平野における長周期地震動の伝播・増幅特性を検討した．理論的な地盤増幅特性に関する既往の多くの研究では，一次元構造の地盤速度構造モデルを与えて計算されることが多い．函館平野をはじめ活断層などで盆地形状が急変している地域などでは，地震動の三次元的な伝播による影響も考慮していく必要がある．また，実体波（S波）だけでなく，後続の表面波部分についても含めて考えなければならない．

本研究では，函館平野からある程度離れた位置に仮想的な点震源を配置し，それぞれの震源について，堆積盆地ありと堆積盆地なしの2通りの地震動シミュレーション（差分法）を実施し，水平2成分の全波（60秒間）のフーリエスペクトルの二乗和平方根を計算地震動のフーリエ振幅スペクトルとして得た．ここで堆積盆地なしモデルとは，堆積層各層の物性値をすべてＳ波速度2.7 km/sの層のものに置き換えたモデルである．今回は，震央8ケース，震源深さ2ケースを設定したので，全部で16ケースのシミュレーションを実施した．各ケースについて，堆積盆地ありとなしの計算地震動のフーリエ振幅スペクトル比を計算した．最後に，全16ケースのフーリエ振幅スペクトル比の対数平均と対数標準偏差を求めることにより，その地点の地震動増幅特性を推定した．

周期5秒では，平野南西部の沿岸付近（上磯周辺）を中心に増幅率5～6倍の領域が広がった．その領域を取り囲むような感じで，周期4秒の増幅率が大きい領域が拡がっている．これらは，この地域で基盤深度が最も深くなっていることと対応している．周期3秒以下では平野のほぼ全域に増幅率4倍以上の領域が広がっている．周期1～2秒になると，平野内でかなり複雑な空間分布となるとともに，対数標準偏差が大きくなり，ケース間のばらつきも目立つようになる．周期1秒での増幅率の対数標準偏差は最大で0.3（つまり2倍）となった．この検討では，全波のフーリエスペクトルを計算していることから，周期が短くなると，入射方向によって後続動の励起や干渉に違いが生じるためと推測される．ただし，V_S < 600m/sの浅部地盤速度構造モデルについては作成されていない．このため，本検討はあくまでS波速度600 m/sの速度層上面での地震動増幅特性を議論していることに注意が必要である．函館平野での地震動予測の高度化においては，浅部地盤速度構造の適切なモデル化に資する調査や研究も今後実施されることが望まれる．

謝辞：本研究で使用した三次元深部地盤速度構造モデルは文部科学省科学技術試験研究委託「日本海地震・津波研究プロジェクト」（平成25～令和2年度，代表機関：東京大学地震研究所）による成果です．

© The Seismological Society of Japan

Joint analysis of receiver function and autocorrelation using strong motion for velocity structure profiling based on seismic interferometry

*Kosuke CHIMOTO[1]

1. Kagawa University

地下構造探査では、遠地地震によるPs変換波を検出するためのレシーバー関数が多く使われている（Langston, 1979）。小林ほか(1998)は、堆積盆地において近地地震のレシーバー関数により、地震基盤面を推定している。大規模な堆積平野においては、PpPs変換波が卓越する（下村ほか, 2018）。近年、レシーバー関数法が、地震波干渉法により一般化されたものであることが示された（Tauzin et al., 2019）。それにより地震波干渉法による自己相関関数とレシーバー関数を同時に使用した解析が行われている（Mroczek and Tilmann, 2021）。本研究では、KiK-net成田において観測された強震記録のレシーバー関数と自己相関関数を計算し、それらの同時解析によりP波とS波速度構造の推定を行う。 まず、全国一次地下構造モデルにより、理論レシーバー関数を計算した。モホ面によるPs変換波は、4秒以上で観測される一方で、地震基盤によるPs変換波は約0.8秒で観測され、さらに1.6秒程度でPpPs変換波が観測されることを確認した。さらに、モホ面によるPs変換波は、入射角と層の傾斜によって走時がそれぞれ1秒以上遅くなるが、地震基盤によるPs変換波はそれらによる変化はほとんど見られないことも確認した。 KiK-net成田において、2008年以降に観測された1000以上の地震観測記録のP波部分のレシーバー関数と、上下動の自己相関関数を計算した。計算ではスペクトルホワイトニングを施し、周波数1-8Hzのバンドパスフィルタをかけた。レシーバー関数にはおよそ1秒と2秒においてPs変換波とPpPs変換波が明瞭に確認できた。さらに上下動の自己相関関数には、約1秒において反射波が確認できた。これらは、KiK-net成田の速度構造モデル（NIED, 2019）から計算されるものとよく合っている。さらに、S波のレシーバー関数を同様に解析したところSp変換波が確認できた。 レシーバー関数によるPs変換波とPpPs変換波および自己相関関数の上下動とトランスバース成分によるP波とS波の反射を用いて、H-kスタック（Zhu and Kanamori, 2000）によりVpとVsの推定を行なった。Vsは適切にモデル化されているが、Vpは低くモデル化されていることがわかった。

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

AM-1

chairperson:Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute), Kimiyuki Asano(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Fri. Oct 15, 2021 10:00 AM - 10:30 AM ROOM A (ROOM A)

[S16-01] A theoretical basis for the applicability of seismic interferometry

○Yosuke NAGASAKA[1], Atsushi Nozu[1] （1.Port and Airport Research Institute）

10:00 AM - 10:15 AM

[S16-02] Long-period later phases in the east of Fukushima prefecture during the M7.4 off Fukushima earthquake on Nov. 22, 2016

○Tomiichi UETAKE[1] （1.Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

A theoretical basis for the applicability of seismic interferometry

*Yosuke NAGASAKA[1], Atsushi Nozu[1]

1. Port and Airport Research Institute

Sanchez-Sesma and Campillo (2006)やWapenaar and Fokkema (2006)は2地点の相互相関と厳密なグリーン関数を結びつけるための地震波干渉法の定式化を示しているが，そこでは波動場についていくつかの仮定が必要であり，その1つとして，S波とP波のエネルギー密度の比が$2(V_P/V_S)^3$となるという仮定が用いられている．この仮定の妥当性については，過去にも研究がなされているが，未解明な点も残されている．
Weaver(1982)は拡散波動場をある周波数周辺に固有周波数を持つ各モードが平均的に等しいエネルギーを持つような波動場と定義している．このとき，S波とP波のエネルギー密度比は各固有モードの数の比と等しくなり，これが$2(V_P/V_S)^3$となることを説明している．しかし，エネルギー密度比が$2(V_P/V_S)^3$でない状態から出発して最終的に$2(V_P/V_S)^3$となるためには固有モード間のエネルギー交換が必要であり，このエネルギー交換が弾性方程式を満たしながらどのように行われるかについてはWeaver(1982)は示していない． 一方，Ryzhik et al. (1996)やPapanicolaou et al. (1996)は弾性波の放射輸送方程式を用いて多重散乱によるS波とP波のエネルギー交換について調べた．その結果，ランダムな媒質の内部では多重散乱により初期条件に関わらずエネルギー密度比は最終的に$2(V_P/V_S)^3$となることを示した．しかし，自由表面や媒質境界の影響については論じておらず課題であると述べている． 自由表面の影響に最も迫った研究はEgle(1981)の研究である．Egle (1981)は自由表面を持つ一様弾性体を考え，拡散波動場を様々な方向に伝播するランダムな平面波の重ね合わせとして定義して考察している．Egle (1981)による拡散波動場の定義は，Weaver(1982)によるものと比べより直観的で分かりやすく，また，反射の影響を考慮しやすい形となっている．Egle (1981)は自由表面にランダムに入射する平面波がPS変換，SP変換を繰り返すことでエネルギー密度比が一定の値に収束することを示したが，Egle (1981)が数値的に求めた値は$2(V_P/V_S)^3$とはわずかに異なっていた．Weaver(1982)はその違いを数値誤差によるのではないかと考えたが，その真偽は明らかとなっていない． そこで本研究では自由表面が弾性波のエネルギー密度equipartitionに与える影響をより厳密に理解することを目的とし，Egle(1981)の条件に従う波動場のS波とP波のエネルギー密度比が$2(V_P/V_S)^3$に収束することを解析的に示す． 媒質は自由表面に囲まれた一様弾性体とし，波動場はランダムな位相を持つ平面波の重ね合わせとして表現されるものとする．異なる進行方向，タイプ（S波，P波），周波数を持つ平面波は互いに無相関とする．Egle(1981)の検討によれば，このとき，自由表面での反射によるモード変換を繰り返すことで，S波とP波のエネルギー密度比（Rとする）は$R=(\gamma_{LT}V_p)/(\gamma_{TL}V_s)$で表される．ここで$\gamma_{LT}$は単位時間あたりの自由表面への入射P波のエネルギーに対する反射S波のエネルギーの比率，γ_{TL}はその逆の変換におけるエネルギーの比である．γ_{LT}とγ_{TL}はあらゆる入射角を考慮した平均的なモード変換の割合である．特に反射波については自由表面における反射係数の2乗を入射角について積分することが必要であり，解析的な検討がなされなかった理由の1つであると推測される．しかし，Rを求めるにはγ_{LT}とγ_{TL}の比率を求めればよく，それぞれを解析的に求める必要はない．本検討ではまずEgle(1981)で示されていなかったγ_{LT}とγ_{TL}の表現を求め，これらについて比較的単純な変数変換を行うことにより直接積分を行うことなくRを積分を含まない形で表せること，それが$2(V_P/V_S)^3$となることを示した． 本検討により，自由表面をもつ一様な弾性体内におけるランダムな平面波による波動場は地震波干渉法の定式化におけるエネルギー密度比に関する条件を満たすことが示された．自由表面での反射と多重散乱はS波とP波のエネルギー密度について同じ効果を持つことになる．自由表面での反射または散乱によりSP変換とPS変換が繰り返されることが本質的なメカニズムであると考えられる．従って自由表面を持つランダムな媒質内においても波動場は上記の比率を満たすことが期待できる．自由表面だけでなく異なる媒質の境界の影響についても検討を行う必要があり，これについては今後の課題である．

© The Seismological Society of Japan

Long-period later phases in the east of Fukushima prefecture during the M7.4 off Fukushima earthquake on Nov. 22, 2016

*Tomiichi UETAKE[1]

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

1．はじめに
2016年11月22日に福島県沖で発生したM7.4の地震は、地震規模が大きく、震源も浅い（JMA:25km、F-net:11km）ため、広域でやや長周期地震動が観測された。特に震央に近い福島県東部の広野町では周期6秒が卓越した顕著な後続波群が三成分に認められた。本研究では、福島県東部における後続波群の伝播に注目し、広野で観測された後続波群の特徴を明らかにする。

2．波群の伝播特性
福島県内のK-NET・KiK-netの記録を用いて、周期5秒以上の長周期速度波形を作成し、福島県東部域での波群の伝播性状を調べた。なお、水平動波形は、震央からの方位でRadial成分・Transverse成分に変換した。UD成分に見られる後続波は、浜通りの平野から双葉断層を越え、阿武隈山地、中通り、会津盆地まで追跡が可能である。見かけの群速度は、およそ3.0 km/sである。Radial成分にも同様な波群が認められた。一方、Transverse成分波形では、震央に近い海岸部での振幅は大きいが、広域で連続性の良い後続波が認められない。

3．海岸線沿いの波群の変化
各機関により福島県東部で行われている強震観測の記録をもちいて、広野町周辺での後続波群の変化を調べた。UD成分に見られる後続波群については、隣接する広野火力とFKS010での振幅がやや大きいものの、観測点間の連続性は広い範囲で良い。一方、広野火力での速度波形が振幅最大、継続時間最長となっている水平動の後続波群は、南北に延びる海岸線上では連続的に波形が変化しているが、やや内陸の観測点では後続波の振幅は小さく継続時間も短い。そのため、顕著な後続波群は海岸線にトラップされているように見える。なお、北側の海岸線では顕著な後続波は認められない。長周期地震動予測地図(暫定版)[Koketsu et al.(2012）]の地震基盤（Vs=3.2 km/s）深さを見ると、深さ変化は海岸線と平行ではでなく、海岸線に斜行する様に県南部が急激に深くなっている。構造変化の違いが後続波の励起に影響いている可能性がある。

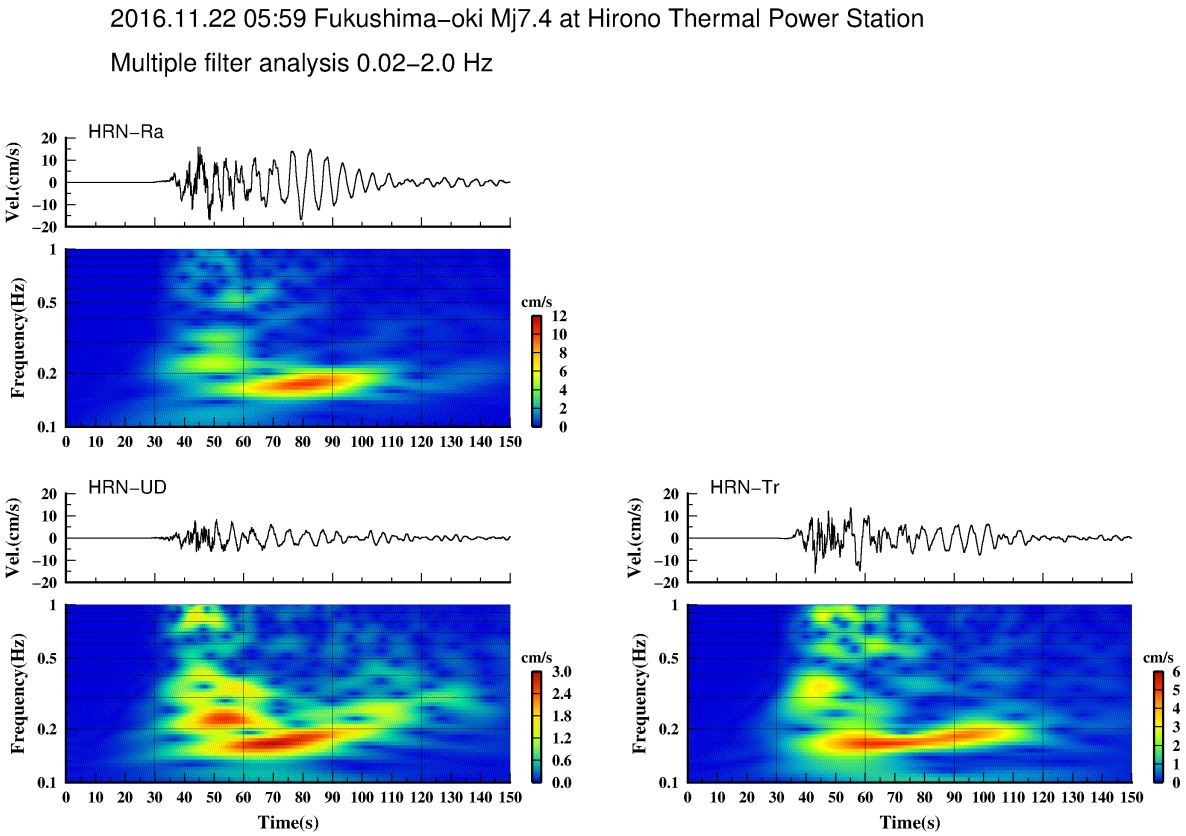
4．アレイ解析による伝播方向の推定
広野町周辺の強震観測点5点をアレイ観測点と見なし、周期6秒における波動の伝播性状を把握し、地下構造モデルから計算される表面波速度との対応を検討した。広野の地下構造モデルは、防災科研のJ-SHIS深部地盤モデル（Ver3.2）にKoketsu et al.(2012）の地震基盤（Vs=3.2 km/s）以深の構造を組み合わせた。 UD成分のバンドパスフィルター波形（中心周期6秒）にセンブランス解析を適用すると、位相速度3.6 km/sでN61度E方向から伝播していると評価された。広野から見た震央の方位は約76度なので、ほぼ震央方向から伝播していると評価できる。構造モデルから計算されたRayleigh波速度と対比すると1次高調モードに対応する。 水平動のフィルター波形を用いた解析からは、N21度Eの方角から伝播する3.8 km/sの波が抽出された。到来方向は、震央より北側となっている。波の到来方向に直交する振動成分を抽出しているため、この波はLove波の1次高調モードに対応する。
なお、阿武隈山中の観測点5点（F-net：HRO地点を含む）を用いてUD成分のアレイ解析を行い、周期6秒の波動の速度を求めると3.1 km/sであった。Koketsu et al.(2012）のモデルを用いると、この速度は、HROにおけるRayleigh波の基本モードに相当する。

5．まとめ
2016年11月22日福島県沖の地震(M7.4)により、福島県東部の広野周辺で観測された周期6秒の顕著な後続波

© The Seismological Society of Japan

群について分析を行った。 UD成分の後続波は、阿武隈山地の観測点とも連続性が良い。アレイ解析からは、広野周辺（海岸線付近）では一次高調モードのRayleigh波が、山地部では基本モードのRayleigh波が伝播していると考えられる。 広野周辺の記録の水平動に顕著な後続波は、県の南半分の海岸線にトラップされたように見える。アレイ解析結果は、震央方向より北から伝播する一次高調モードのLove波の可能性を示唆している。 ローカルな波群の生成・伝播には、地下構造の変化が影響していると考えられる。

謝辞
次の機関による強震観測記録を使用致しました。記して感謝いたします。 (国研)防災科学技術研究所、気象庁、(一財)電力中央研究所、(公財)地震予知総合研究振興会、東京電力HD(株)。



© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

AM-2

chairperson:Takumi Hayashida(IISEE, Building Research Institute), Kunikazu Yoshida(Geo-Research Institute)
Fri. Oct 15, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM A (ROOM A)

[S16-03] Seismic velocity structure at NB-1 boring site, Nara city

○Tomotaka IWATA[1], Koji YAMADA[2], Motoki SAWADA[2], Daisuke ISHIHARA[2], Shigeru OKAMOTO[2]
（1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Hanshin Consultants, Co. Ltd.）
11:00 AM - 11:15 AM

[S16-04] Investigations of the 2020 seismic noise reductions in areas around Tokyo using MeSO-net seismic data traffic

○Takumi Hayashida[1], Masayuki Yoshimi[2], Haruhiko Suzuki[3], Shinichiro Mori[4], Takao Kagawa[5], Masayuki Yamada[6], Koji Ichii[7] （1.IISEE/BRI, 2.GSJ/AIST, 3.OYO Corporation, 4.Ehime Univ., 5.Tottori Univ., 6.NEWJEC Inc., 7.Kansai Univ.）
11:15 AM - 11:30 AM

[S16-05] Phase velocity of the Love wave estimated based on array-derived rotation from the microtremor array records observed in the Wakayama plain, Japan

○Kunikazu Yoshida[1], Hirotoshi Uebayashi[2], Michihiro Ohori[3] （1.Geo-Research Institute, 2.Kyoto University, 3.University of Fukui）
11:30 AM - 11:45 AM

[S16-06] Fundamental Study on Separation of Surface Waves and Application to Long-Period Ground Motions in the Kanto Plain

○Takuya Sato[1], Hirotoshi Uebayashi[2], Masayuki Nagano[1] （1.Tokyo university of Science, 2.Kyoto university）
11:45 AM - 12:00 PM

[S16-07] Equivalent linear method with complex frequency for site response analyses to near-fault fling-step displacements

○Shuanglan WU[1], Atsushi Nozu[1], Yosuke Nagasaka[1] （1.Port and Airport Research Institute）
12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Seismic velocity structure at NB-1 boring site, Nara city

*Tomotaka IWATA[1], Koji YAMADA[2], Motoki SAWADA[2], Daisuke ISHIHARA[2], Shigeru OKAMOTO[2]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Hanshin Consultants, Co. Ltd.

令和元年度より３年計画で実施している「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」では，当該断層帯の長期評価及び強震動評価の高度化を進めている．令和元年度には奈良盆地北部の奈良市高畑町から宝来町にかけて，奈良堆積盆地の基盤岩までを明らかにする測線長約7kmの反射法地震探査を行った（文部科学省・京都大学防災研究所，2020）．引き続き，この測線沿いの奈良本町において深度300ｍのオールコアボーリングを実施した（文部科学省・京都大学防災研究所，2021，三田村・他，2021）．このボーリング孔を使用したVSP探査等を行って，奈良堆積盆地の速度構造に関する情報を得た．
VSP調査はP波震源（油圧インパクタ）及びS波震源（油圧式S波震源）と，孔中３成分地震観測を行い，P波及びS波の速度構造を推定した．孔中地震計は深度5ｍから300ｍまで5ｍ間隔で測定を行った．初動解析から，深さ300ｍまでのP波及びS波の速度構造を推定した．地表極近傍を除いて，P波速度は1.8～2.0km/s，S波速度は0.34～0.75km/sに深さとともに漸増する速度構造が得られた．この深さまでの反射法解析に用いた速度解析結果とよい対応が得られていることもわかった．
反射法探査から，ボーリング地点の堆積層基盤面深度は約520ｍと推定されている．また，記録には，この基盤面からの反射波と考えられる相が得られていたことから，これらの相を利用して，深さ300～520ｍの堆積層下部の速度プロファイルを求めた．深さ300ｍ以深のP波速度は2.0～2.3km/s，S波速度は0.8～0.85km/sと求められた．これらの値は，類似の堆積環境や堆積物で構成されている大阪平野や京都盆地南部のそれらと似通った値であった．
加えて，浅部の速度構造を詳しく知るため，深度25ｍまで，１ｍきざみで，カケヤによるＰ波及びＳ波起震を行っての速度構造調査も行った．発表では，これらの速度構造及び地震波減衰構造についても触れる予定である．これらの情報やこの地点の速度構造プロファイルを用いて，奈良堆積盆地の速度構造モデル（関口・他，2019）の高度化を進めている．

参考文献
三田村宗樹・高橋春菜・岩田知孝，奈良東縁断層帯調査における奈良市三条本町NB-1ボーリングコアの概要，日本地質学会第128年学術大会，2021
文部科学省・京都大学防災研究所, 奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測，令和元年度成果報告書, 198pp, 2020.
文部科学省・京都大学防災研究所, 奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測，令和2年度成果報告書, 234pp, 2021.
関口春子・浅野公之・岩田知孝, 奈良盆地の３次元速度構造モデルの構築と検証, 地質学雑誌, 125(10), 715-730, 2019.

謝辞：本研究は，令和３年度文部科学省科学技術基礎調査等委託事業「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」によってなされました．ボーリング実施に関しては，奈良市都市整備公園緑地課のお世話になりました．記して感謝致します．

© The Seismological Society of Japan

Investigations of the 2020 seismic noise reductions in areas around Tokyo using MeSO-net seismic data traffic

*Takumi Hayashida[1], Masayuki Yoshimi[2], Haruhiko Suzuki[3], Shinichiro Mori[4], Takao Kagawa[5], Masayuki Yamada[6], Koji Ichii[7]

1. IISEE/BRI, 2. GSJ/AIST, 3. OYO Corporation, 4. Ehime Univ., 5. Tottori Univ., 6. NEWJEC Inc., 7. Kansai Univ.

地震計によって測定される常時微動（雑微動、地動ノイズ：以下、微動と呼ぶ）のうち、1Hz以上のものは人間活動が主たる振動源であるとされている。2020年初頭、新型コロナウイルス感染症（Covid-19）の感染拡大を受けて都市封鎖が実施された都市において人間活動が著しく低下し、周辺の地震観測点で記録された微動の振幅が低下したという現象が世界中で数多く報告されている（例えば、Gibney, 2020; Lecocq et al., 2020）。日本国内においても、小中高校の休校措置・国や自治体による外出自粛要請等の社会的背景を反映したと思われる首都圏での微動振幅の低下が報告されている（Yabe et al., 2020）。これらの先行研究では微動のスペクトル特性の考慮や評価の対象周波数に違いがあるものの、振幅特性の経時変化の有無と増減に、人間の社会活動の消長を対応付けて検討していることが共通している。一方、首都圏を対象にYabe et al. (2020)が検討に用いた観測点の多くは代表的な繁華街付近に位置しており、用いた観測点数も限られていることから、微動の変化をもたらした主要因が何であったのか、その影響はどの範囲にまで及ぶのかなど、様々な解釈の余地が残されている。これらを適切に評価するためには、多地点、長期間のデータによる検討が必要であり、そのためには微動の振幅特性を総合的に示す簡易的な振幅指標があれば便利である。

東京大学地震研究所により設置され、現在、防災科学技術研究所によって運用されているMeSO-net観測点は、首都圏周辺の約300地点に展開されており、各点で地震動の連続観測が行われている。MeSO-netの波形データはWIN32形式によって圧縮されており、同形式ではデータ転送の高速化・効率化のために振幅情報を前タイムステップの振幅との差分情報として記録している（例えば、卜部・他，1990；卜部，1994）。このため、微動の振幅が大きい平日昼間の時間帯に波形データの容量が増加し、夜間や休日に低下するという特徴がある（岡田・小原，2000）。本研究ではこの特性に着目し、MeSO-netの波形データ容量の時系列変化（データトラフィック）を「微動レベルの簡易的な指標」とみなすことで2020年における微動振幅の推移を追った。我々は、東京都および近郊エリアの169点で2018年1月～2021年8月の期間に観測された連続観測記録を用いて、Covid-19蔓延に伴う人間活動の変化とデータトラフィックとの関係を検証した。本発表では、首都圏におけるデータトラフィックの時間帯毎の特徴を紹介するとともに、観測点が設置されている施設の種別や周辺環境、観測点周辺のモバイル人流データ、断面交通量データなど各種記録との比較検討を通じて、2020年の首都圏において微動の振幅低下をもたらした原因について考察する。また、各観測点における振幅スペクトルの時間推移についても併せて議論する。

謝辞：本研究は、国内の微動研究者および技術者から成る「微動の会」会員有志による研究プロジェクト（代表：愛媛大学 森伸一郎）の一環として実施したものです。また、同会会長である藤原広行博士（防災科学技術研究所）からは、本研究の着想を得る上で有益なご助言をいただきました。本研究の実施にあたり防災科学技術研究所のMeSO-net、Hi-netの観測記録を使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

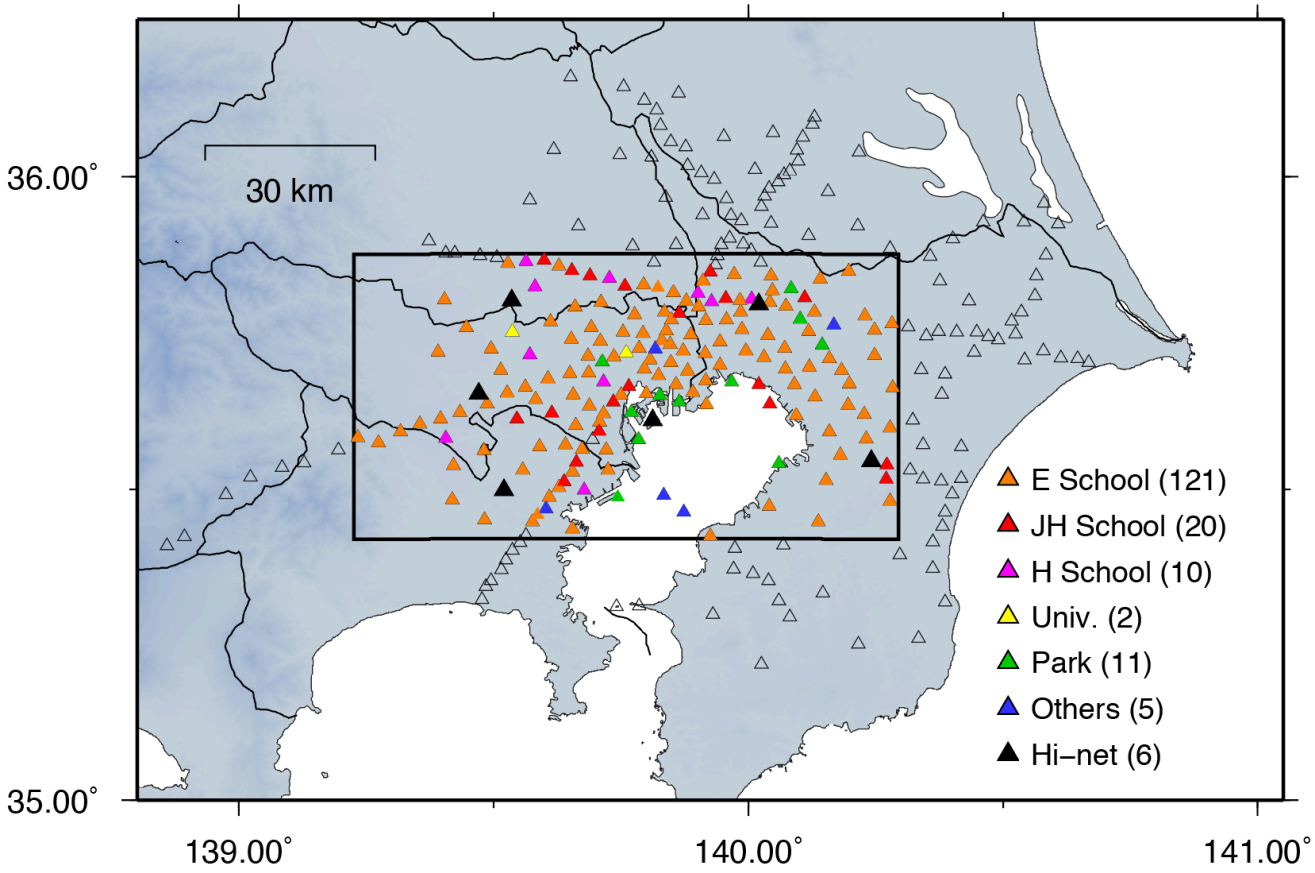


図. 検討に用いた観測点の分布

© The Seismological Society of Japan

Phase velocity of the Love wave estimated based on array-derived rotation from the microtremor array records observed in the Wakayama plain, Japan

*Kunikazu Yoshida[1], Hirotoshi Uebayashi[2], Michihiro Ohori[3]

1. Geo-Research Institute, 2. Kyoto University, 3. University of Fukui

強震動予測に用いる地下構造モデルを作成する基礎データとして，微動アレー探査の結果がよく用いられる。これまでは鉛直成分をもとにしたレイリー波の位相速度が数多く用いられてきたが，水平成分を用いたラブ波の位相速度も考慮することによって地下構造モデルをより精度よく構築できることが期待される。ラブ波の位相速度の推定法として，回転成分を用いたものが最近提案されている（吉田・上林，2018; Yoshida and Uebayashi, 2021）。本研究ではこの手法の妥当性を評価するため，上林・他（2018）により和歌山平野で観測された微動アレー記録の水平成分を用いてラブ波の位相速度を推定した。

本研究では，アレー記録から回転成分を求める際にゆがんだ三角形アレーにも対応できるように手法を改良した。回転成分を評価するアレーの基準点（原点）P_0での地動をu_0とし，$P_i=(x_i,y_i)$における観測点iにおける地動のu成分は，空間方向の微分をテイラー展開し2次以降の項を無視して

$u_i=x_i\partial u/\partial x + y_i\partial u/\partial y+u_0$

と表される。この式をN個の観測点に対し作り，行列で表記すれば，右辺の偏微分およびu_0を逆行列あるいは最小二乗法で求められる。水平2成分に対しこの計算を行い，ベクトルの回転の定義に従って回転成分を求めた。この改良した手法を観測記録に適用し，各サイトにおける回転成分を求めた。得られた回転成分波形から，空間自己相関法により位相速度を求めた。

和歌山平野で行われた微動アレー観測では，半径200～600 mの7点二重三角形アレーが用いられた。位相速度の推定に先立ち，アレー記録からコヒーレンスとフェイズを求め，観測記録の水平成分の品質を確認した。

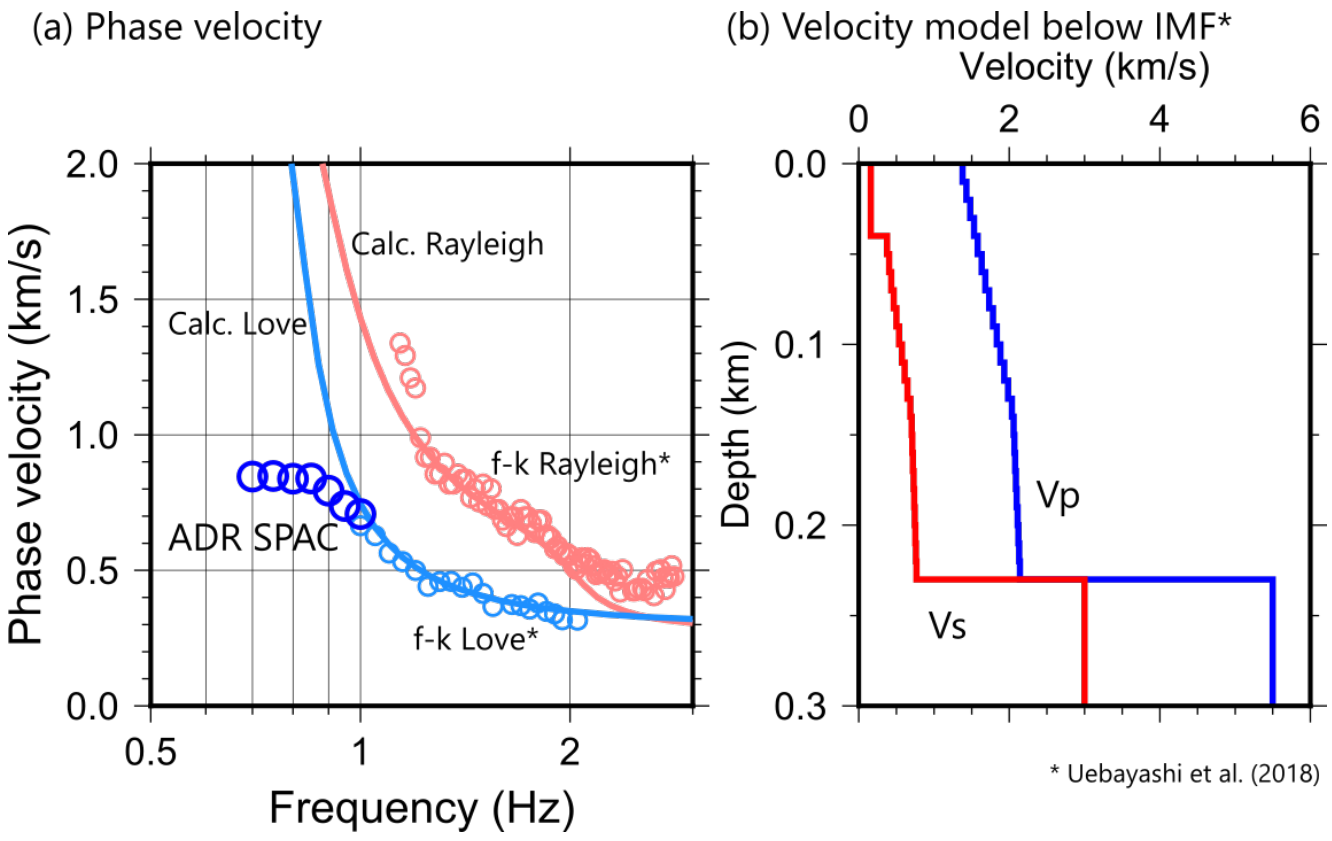
回転成分より得られた位相速度は，アレー半径などに応じて0.5～2 Hzで0.4～1.3 km/sで，ほとんどの観測サイトで正の分散性を示した。一例としてIMFサイトでの結果を図aに示す。回転成分の空間自己相関法（ADR SPAC）により推定したラブ波の位相速度と，大堀・他（2015）およびそれをまとめた上林・他（2018）による同じアレー記録を用いた水平成分のf-k法により求めたラブ波の分散曲線を比較すると，重複する周波数帯域でほぼ同じ値が得られた。また，空間自己相関法の方がf-k法よりも長周期側の位相速度を求めることができた。

ラブ波位相速度を求めたサイトのうち，IMFおよびJMAサイトについて微動記録から推定した位相速度と既往の3次元地下構造モデルから計算した理論位相速度を比較した。IMF（図b）では，理論と観測の位相速度はおおむね対応したが，JMAサイトでは差が見られた。JMAサイトについては発表までにさらに検討を進めたい。

謝辞　本研究は科研費・基盤研究(B)「強震動予測のための微動を用いた不整形地盤構造推定システムの構築」（課題番号：19H02287，代表：上林宏敏）による。文部科学省委託研究業務「中央構造線断層帯（金剛山地東縁ー和泉山脈南縁）における重点的な調査観測」プロジェクトのデータおよび成果の一部を利用しました。

参考文献　大堀・他（2015）建築学会大会梗概集．上林・他（2018）地震工学会論文集．吉田・上林（2018）物理探査．Yoshida and Uebayashi (2021) BSSA.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Fundamental Study on Separation of Surface Waves and Application to Long-Period Ground Motions in the Kanto Plain

*Takuya Sato[1], Hirotoshi Uebayashi[2], Masayuki Nagano[1]

1. Tokyo university of Science, 2. Kyoto university

南海トラフを代表とするM 8～9クラスのプレート境界での巨大地震の発生が危惧される中，関東平野や大阪平野での地震動予測が多く行われている。このときの長周期地震動の計算には主に三次元差分法が用いられ，サイトと震源位置に依存して変化する波動の伝播特性や増幅特性が明らかとなっている。一方，検討対象地点の地震動の増幅特性を把握する際に，どのような表面波が堆積層内を伝播し，増幅するかを調べることは，波動伝播特性を考察するうえで必要である。上林 (2019)は，3次元波動場を波動ポテンシャルによりP，SV，SH波に分離する手法を提案し，簡易的な堆積盆地状の堆積地盤モデルに適用した。提案手法をAL法で得られたP，SV，SH波との比較により検証し，グリッド間隔による波形の精度などの検証を行った。 本研究では、上林(2019)で示された手法を用いて，簡易的な波動場での波動分離の精度を確認するとともに，3次元差分法に波動分離の式を直接組み込み，プレート境界から生じ関東平野に伝播する長周期地震動の波動分離に適用した。なお，本検討では，SH波(ラブ波)とそれ以外のP・SV波(レイリー波)の分離のみに着目し，水平2方向の波動成分のみを利用している。 最初に，図1,2_aに示すように，平面波の斜め入射場をイメージして水平方向に一定速度で伝播する面外波(SH波)と面内波(SV波)の波動場を擬似的に作成した。この結果，図1,2_b,cに示すように，上記手法で精度よく波動分離が行われていることを確認した。次に，図3,4_aに示すように，解析領域の中心部から同心円状に広がる波動場について，Radial方向，Travsvers方向に振幅を有する波動場を擬似的に作成し，波動分離を試みた。図3,4_b,cに示す結果から，多少の誤差は見られるが，概ね精度よく波動分離が行われていることが分かる。最後に，関東平野を対象領域とし，茨城県沖で生ずる太平洋プレート境界の地震が関東平野における影響を数値計算により評価した。関東平野の堆積層やプレート境界の地盤構造を考慮した地震動評価には三次元差分法[永野(2004)]を利用し，そこに波動分離を組み込んだ。地盤モデルは全国1次地下構造モデルを使用し，最表層は第二層の物性値に置換した。グリッド間隔は250mとした。以上より，計算された速度波形および分離した波形について水平二方向の合成を行い，最大速度を評価した結果を図5に示す。これより，茨城県沖の震源に対しては，関東平野ではレイリー波が卓越して伝播することが分かった。 図の作成にGMTを利用させて頂きました。

© The Seismological Society of Japan

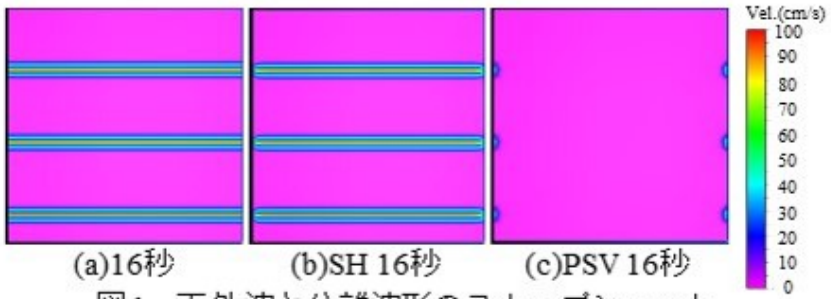


図1　面外波と分離波形のスナップショット

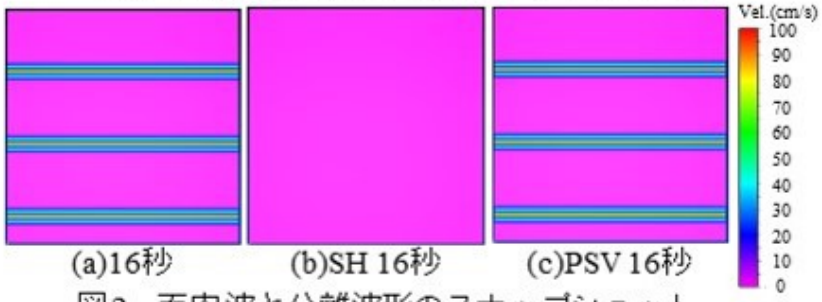


図2　面内波と分離波形のスナップショット

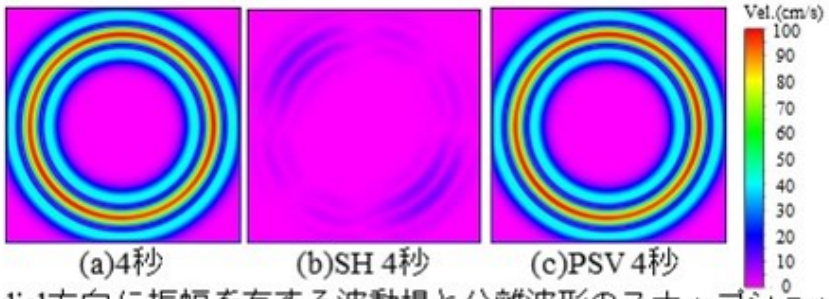


図3　Radial方向に振幅を有する波動場と分離波形のスナップショット

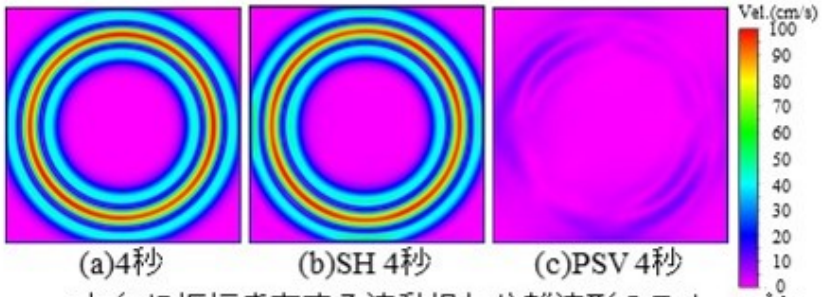


図4　Transverse方向に振幅を有する波動場と分離波形のスナップショット

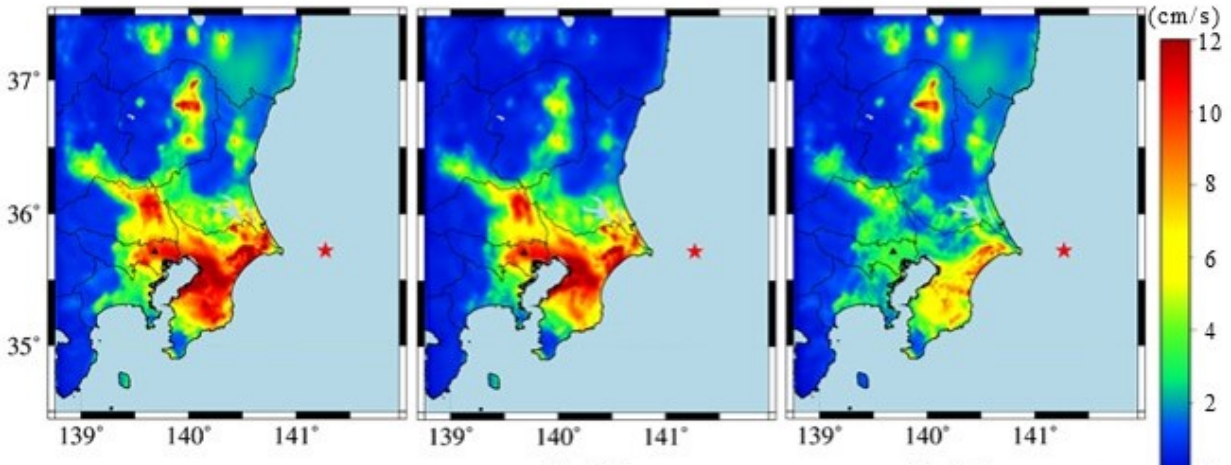


図5　水平二方向合成のPGV分布

© The Seismological Society of Japan

Equivalent linear method with complex frequency for site response analyses to near-fault fling-step displacements

*Shuanglan WU[1], Atsushi Nozu[1], Yosuke Nagasaka[1]

1. Port and Airport Research Institute

The equivalent linear method is commonly used for site response analyses in engineering practice. However, it cannot evaluate the displacement response of the ground subject to fling-step displacements because the fling-step displacements are characterized by non-zero final values, making the application of ordinary Fourier transform with real frequency inappropriate. On the other hand, in seismology, the use of complex frequency is a well-established technique. It was proposed by Phinney [1] and has since been widely and successfully adopted in computational seismology for the calculation of ground motions including near-fault fling-step displacements with the discrete wavenumber (DWN) method [2, 3]. As pointed by Wu et al. [4], the use of complex frequency is essential in avoiding the inconsistency between the theoretical and discrete Fourier transforms when the DWN method is applied to a displacement waveform with a nonzero final value. Therefore, in this study, the complex frequency was introduced to the equivalent linear method for the seismic ground response analyses subjected to near-source fling-step displacements.

The newly developed method was applied for analyzing the recordings at the KiK-net KMMH16 vertical array during the mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence. The vertical array contains two acceleration sensors on the ground surface and in the borehole at a depth of 252 m (NIED Strong-motion Seismograph Networks). We adopted the soil profile including the PS logging data at KMMH16 provided by NIED. We also used the density profile re-evaluated by Goto (Personal communication). Moreover, we also adopted the nonlinear soil properties at KMMH16, i.e., the stiffness-strain and damping-strain relations, which were again estimated by Goto (Personal communication) based on Ramberg-Osgood model. In the following we will show the results for the EW-components. Based on Boore [5], the accelerograms were integrated in time domain after a baseline correction and the resultant velocity waveforms were corrected by subtracting linear functions. Then the corrected velocity waveforms were integrated again in time domain to obtain displacement time histories at GL-252m and GL-0m. The former was used as the input ground motion for the equivalent-linear analyses.

Fig. 1 showed the results. **Fig. 1 (a ~ c)** shows good agreement between the synthetic and observed time histories for acceleration, velocity and displacement, respectively. In particular, the agreement is excellent for the displacement waveforms including the fling-step as well as the initial vibratory components. The maximum acceleration was underestimated but the phases were reproduced very well. **Fig. 1(d)** shows that the agreement between the observed and synthetic spectral ratio is excellent especially for the fundamental mode. **Fig. 1 (e ~ g)** show the peak acceleration, velocity and strain as a function of depth. The tendencies in the peak strain in **Fig. 1(g)** is similar to the results by Suetomi et al. [6] in a sense that the maximum strain occurred near GL-8m ~ 9m, even though different soil models were used in the analyses. The maximum strain is approximately 0.6%, which is less than 1%. These results well demonstrated that, the equivalent linear method with complex frequency is applicable to seismic ground response analyses subject to fling-step displacements.

Acknowledgment
Strong motion data and the soil profile at KMMH16 were provided by the National Research Institute for

© The Seismological Society of Japan

Earth Science and Disaster Resilience. The authors also express their appreciations to Hiroyuki Goto, Associate Professor of Kyoto University, for sharing his knowledge on the soil profile and dynamic soil properties at KMMH16, and suggestions regarding the application of the parameters.

References

[1] Phinney RA. *J. Geophys. Res.* 1965; 70(20): 5107-5123.
[2] Bouchon M, Aki K. *Bull. Seismol. Soc. Am* 1977; 67(2): 259-277.
[3] Bouchon M. A Review of the discrete wavenumber method. Pure and applied geophysics 2003; 160(3): 445-465.
[4] Wu SL, Nozu A, Nagasaka Y. *Bull. Seismol. Soc. Am* 2020; 111(1): 309-320.
[5] Boore DM. *Bull. Seismol. Soc. Am* 2001; 91(5): 1199-1211.
[6] Suetomi I, Fukushima Y, Oshige J. Proc of the 36th JSCE earthquake engineering symposium, 2016: Tokyo, Japan. A23-1006.

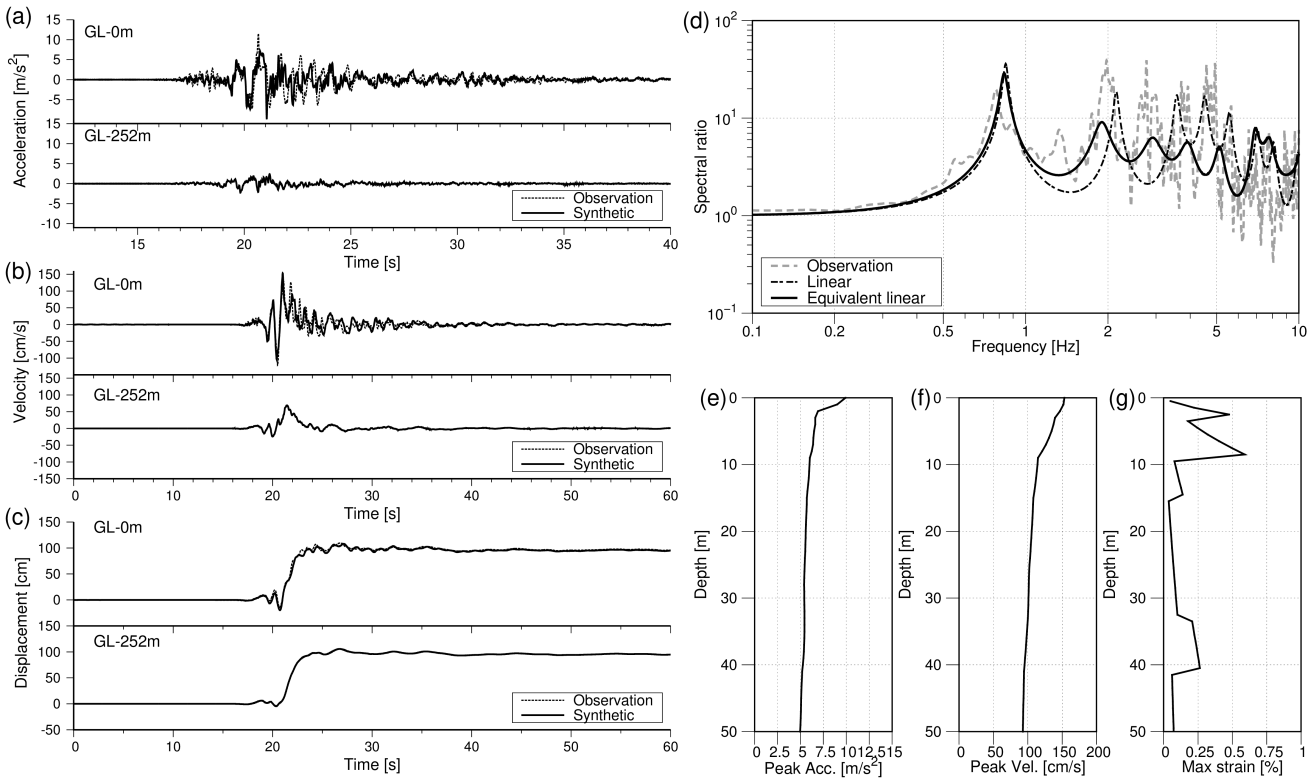


Fig. 1 Observed and synthetic time histories for (a) acceleration, (b) velocity, and (c) displacement. Also plotted are the (d) spectral ratios and the peak responses along the depth for (e) acceleration, (f) velocity and (g) strain.

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S04. Tectonics

PM-1

chairperson:Atsushi Nakao(JAMSTEC), Shinji Yoneshima(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Fri. Oct 15, 2021 1:30 PM - 2:45 PM ROOM A (ROOM A)

[S04-01] Exploring the Geometry of the Philippine Sea Plate beneath Hokuriku region

○Kazuki MIYAZAKI[1], Junichi Nakajima[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[2,3] （1.Tokyo Institute of Technology, 2.Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3.Faculty of Science, Graduate School of Science, Kobe University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S04-02] Seismotectonics at off-Ibaraki region identified from dense earthquake source arrays and dense OBS arrays.

○Shinji YONESHIMA[1], Mochizuki Kimihiro[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

1:45 PM - 2:00 PM

[S04-03] 3-D seismic anisotropy structure of the Cascadia subduction zone

○Dapeng ZHAO[1], Y. Hua[1] （1.Research Center for Earthquakes &Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University）

2:00 PM - 2:15 PM

[S04-04] Regression analysis relating maximum earthquake magnitudes with subduction zone parameters

○Atsushi NAKAO[1], Tatsu Kuwatani[1], Kenta Ueki[1], Kenta Yoshida[1], Taku Yutani[1], Hideitsu Hino[2], Shotaro Akaho[3] （1.Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Department of Statistical Modeling, The Institute of Statistical Mathematics, 3.Human Informatics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology）

2:15 PM - 2:30 PM

[S04-05] Triggering mechanism of volcanic eruptions by large earthquakes

○Takeshi NISHIMURA[1] （1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University）

2:30 PM - 2:45 PM

©Seismological Society of Japan

Exploring the Geometry of the Philippine Sea Plate beneath Hokuriku region

*Kazuki MIYAZAKI[1], Junichi Nakajima[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[2,3]

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Faculty of Science, Graduate School of Science, Kobe University

西南日本下に沈み込んでいるフィリピン海プレートの形状は地震波トモグラフィーをはじめとした手法を用いて詳細に決定されており(例えばNakajima et al., 2009; Liu and Zhao,2016など)、特に四国・中国地方下に沈み込むフィリピン海プレートは日本海下約400kmの深さまでイメージングされている。一方で、北陸地方下では約140kmまでしか形状が確認されておらず、現在理解されているフィリピン海プレートの沈み込み量は東西で大きく異なっている。四国海盆の拡大以降、フィリピン海プレートが一定の速度で西南日本下に沈み込み続けているとするモデル(Seno and Maruyama, 1984)に基づいて沈み込み量を推定すると、北陸地方下のフィリピン海プレートには未発見の部分が存在すると考えられる。この地域のフィリピン海プレート形状を新たに決定することによって、フィリピン海プレートの沈み込みの歴史や、陸上の火山との関連性、さらに太平洋プレートとの相互作用に伴うプレートの変形量から沈み込むプレートの物性について新たな知見を提供することができると期待される。

そこで、本研究では若狭湾から佐渡島にいたる北陸地方下におけるフィリピン海プレート形状を明らかにすることを目指す。本研究では中部日本下の、太平洋プレートと地表に囲まれた領域の構造を求めるため、主に太平洋プレート内で発生する深発地震を用いた走時トモグラフィーを行なった。結果として、現在決定されているフィリピン海プレート形状より深部へと繋がる連続的な低速度構造がイメージングされた。また、太平洋プレートと接する一部の領域では、太平洋プレートの上に乗り上げるような低速度構造も見られた。次に、フィリピン海プレートと太平洋プレートの沈み込みにおける相互作用を二次元の粘性流体を仮定してシミュレーションしたところ、中部日本下に沈み込んだフィリピン海プレートが、より高速で沈み込む太平洋プレートによって深部に引き込まれるような結果が得られた。以上のことから、北陸地方下のフィリピン海プレートは、地下で太平洋プレートと衝突し相互作用を受けた結果、形状・温度ともに特異的な状態であると予想される。そのため、この領域のプレート形状をより詳細に決定するためには、様々なアプローチを用いる必要があると考えられる。また、本講演では、ScSp波とScS波の波形を用いて、走時とは独立に北陸地方下のフィリピン海プレート上面の形状を明らかにするとともに、粘性流体を仮定した数値シミュレーションにより沈み込んだフィリピン海プレートの温度構造を計算することで、トモグラフィーを行なった際にイメージされるフィリピン海プレートの速度偏差についても触れる予定である。

© The Seismological Society of Japan

Seismotectonics at off-Ibaraki region identified from dense earthquake source arrays and dense OBS arrays.

*Shinji YONESHIMA[1], Mochizuki Kimihiro[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

はじめに

茨城沖では，2011年に発生した東北沖地震の最大余震として本震発生からおよそ30分後に Mw7.9の最大余震が発生した．最大余震の発生に伴い，多くの余震としての微小地震が発生したが， 最大余震震源域直情付近に設置されていたOBSの稠密アレーにより最大余震発生域から浅部にかけての海底微小地震記録を得ることができた．筆者らによるこれまでの地震活動の震源決定解析の結果，深さ約10～30㎞程度の領域にて，幾つかの複雑だが特徴のある地震活動の時空間分布が明らかになった． 1つ目は，微小地震発生領域，大地震の発生領域，Tremor発生領域が空間的に相補関係にあるような分布を示していること．2つ目は，微小地震活動は大局的にはdowndipなトレンドを持つがローカルには変化の大きい3次元的な分布を示していること，などである．

目的・課題

こうした地震活動で見出された複雑だが特徴のある地震活動が，沈み込み帯のどの層あるいは層境界で発生しているかを高精度に把握することは，テクトニクスを理解するうえで重要であり，これが本研究の目的である．しかしながら，震源については比較的詳細な分布が得られた一方で地下構造については不明な点が多い．一般に陸側プレート，海洋プレートともに異なる岩相から構成されるためプレート境界の他にも複数の速度境界が存在することがよく知られているが，これに加え茨城沖では海山の沈み込みが報告されている．このため地下構造は3次元的に変化していると考えられるが茨城沖では今回の地震活動で得られたものと同程度の空間密度を持つ高密度な3次元構造は得られていない．だが地下構造を得るにも，自然地震を用いる地震波tomographyやレシーバ関数などでは地下構造情報の解像度が不足している．他方，一般に解像度が高いと考えられる人工地震探査ではエネルギー不足による探査深度不足や，多重反射波などの影響により，海山を有するのSeismogenic zone付近での複雑な地下構造をイメージングすることは困難である．さらに仮に構造が得られたとしても，震源分布と地下構造は異なる手法，モデルで得られたものであり，互いの深度を一致させることは難しい．上記理由によりseismogenic zoneにおいては震源と構造を高精度でマッチングすることは技術的に大きな困難を伴うものであるというのがこれまでの現状であった．

方法

本研究では，こうした自然地震と構造の対応問題を解決するために，OBS観測網周辺で発生したローカルな微小地震のみを用いて，自然地震そのものから，震源位置周辺の速度境界や速度を抽出することを試み，自然地震の発生位置と速度境界とのマッチングを行う．具体的には以下の2アプローチを取った．

１．震源アレー，特にVertical source arrayを用いることによりVSP-likeな処理を行い 自然地震と速度構造境界とのマッチングをする．

２．OBSアレーによる自然地震掃除から屈折波速度解析を実施することにより震源近傍の速度構造を求める．

まず1．の震源アレーでは後続波である特定の境界面からの反射波を抽出することで反射面位置を特定する．これにより反射面の深さと自然地震の深さを直接対応付けることが可能となる．また初動到達時刻よりVp, Vsの速度プロファイルを得ることができる．これらにより，Vertical source array周辺での震源深さと構造との対応を明らかにすることができると考えられる．ただし，このアプローチではSource array周辺のみの情報しか得られない．一方2．の屈折波解析では，震源と層境界の相対位置はわからないが，震源周辺にどのような層境界があるかの情報を得ることができる．さらにOBSネットワーク内の複数のOBS測線と震源を工夫して組み合わせることで，3次元的な見掛け屈折波速度分布を得ることができる． １と２を突合することで，OBSネットワーク周辺における微小地震の発生位置を相当程度制約することができると考え，現在解析を

© The Seismological Society of Japan

進めている．

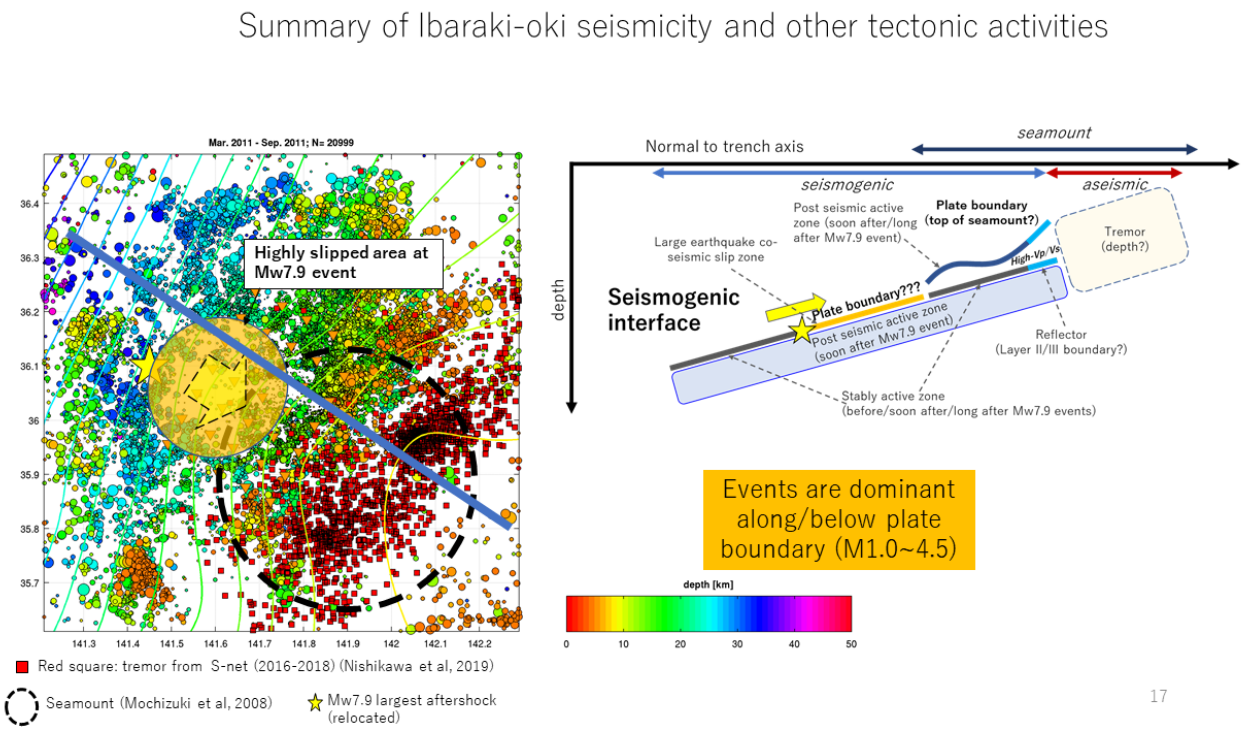
結果

現時点までで得られている震源分布および解釈図を図1に示す．プレート境界が複雑な形状をしていること，プレート境界より深部に反射面が存在し，LayerII/IIIの境界と解釈される．最大余震が発生したと考えられる深さ領域では，地震発生面は比較的シンプルな形状をしていることなどがわかってきた．発表では最新の解析結果および解釈結果を示し，最大余震ー海山ーTremor含めたテクトニクスについての議論を行う．

参考文献

Mochizuki et al. (2008, Science)
Kubo et al. (2013，GRL)
Nishikawa et al. (2019，GRL)

図1：茨城沖OBSのデータ解析結果．左図：震源分布（丸）と最大余震（黄色のハッチ），海山（黒点線），Tremor（赤四角）．右図：深さ断面の解釈図（断面は左図の青測線）．



© The Seismological Society of Japan

3-D seismic anisotropy structure of the Cascadia subduction zone

*Dapeng ZHAO[1], Y. Hua[1]

1. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University

We determine the first P-wave tomography of 3-D azimuthal and radial anisotropy of the Cascadia subduction zone by inverting a great number of arrival-time data of local and teleseismic events. Fast-velocity directions (FVDs) of azimuthal anisotropy in the crust are generally trench-parallel, reflecting N-S compression along the Cascadia margin. Radial anisotropy (RAN) is negative (i.e., Vpv > Vph) in the crust and upper-mantle wedge beneath the Cascadia volcanoes and back-arc area, reflecting hot and wet upwelling flows associated with fluids from dehydration reactions of the young and warm Juan de Fuca plate that is subducting toward the northeast. Trench-parallel FVDs occur in the subducting slab under the forearc, suggesting that the gently-dipping slab may still keep its original anisotropy produced at the mid-ocean ridge and modified at the outer-rise before subduction. The slab and subslab mantle exhibit the same RAN pattern: positive RAN in the Cascadia forearc whereas negative RAN under the Cascadia volcanoes and the back-arc. This feature suggests that the slab and the subslab asthenosphere are strongly coupled, and subslab mantle flow is formed by entrainment of the asthenosphere with the overriding slab. In northern Cascadia, NE-SW FVDs occur in a prominent subslab low-velocity zone that also exhibits negative RAN, reflecting thermally buoyant mantle materials derived from nearby oceanic hotspots, which flow toward the northeast and gradually accumulate under northern Cascadia, resulting in decompression melting.

Reference

Zhao, D., Y. Hua (2021). Anisotropic tomography of the Cascadia subduction zone. Phys. Earth Planet. Inter. 318, 106767.

© The Seismological Society of Japan

Regression analysis relating maximum earthquake magnitudes with subduction zone parameters

*Atsushi NAKAO[1], Tatsu Kuwatani[1], Kenta Ueki[1], Kenta Yoshida[1], Taku Yutani[1], Hideitsu Hino[2], Shotaro Akaho[3]

1. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Department of Statistical Modeling, The Institute of Statistical Mathematics, 3. Human Informatics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. 研究背景・研究目的

巨大地震は，海洋プレートが沈み込むプレート境界 (沈み込み帯) でのみ発生する．その規模には地域差があり，チリ南部では過去にM9.5が観測された一方，ケルマデク諸島南部では最大M6.6しか記録されていない．近年，沈み込み帯に関する地球物理的データが充実してきたものの，各地域の最大マグニチュードM_{max}と明確に相関するパラメタは見つかっていない (Schellart & Rawlison, 2013)．本研究では，複数のパラメタの複合的な寄与を検討するため，後述する「沈み込み帯パラメタ」のうちから，M_{max}を合理的に説明する変数を，複数の評価基準を用いた全数探索法により抽出する．

2. データ・解析方法

M_{max}の説明変数の候補として，データベース SubMap4.3 (Heuret & Lallemand, 2005; Heuret et al., 2011 ほか) 等による世界の沈み込み帯169地点・17次元の観測データを用いる．用いたデータには，海洋底の年代，海底地形の荒さ，プレートの沈み込み角度，プレート・海溝の運動速度，上盤プレートの応力場，付加体の有無などが含まれる．「圧縮/中立/引張」や「有る/無し」といった名義尺度は，ダミー変数に変換する．これら17種のパラメタの線形和として目的関数M_{max}を表現し，重回帰分析を行う．2^{17}通りのパラメタの全組合せの内から，M_{max}を最もよく説明するものを，LOOCV (一個抜き交差検証) による平均二乗誤差，AIC (赤池情報量規準)，BIC (ベイズ情報量規準) などの評価基準に基づいて決定する．

3. 結果・議論

LOOCV誤差・AIC・BICのいずれの評価基準においても，M_{max}を最もよく説明する変数の組合せとして，上盤プレートの地殻の厚さ，海洋スラブの曲率半径，海溝の堆積物の厚さ，付加体の有無，海溝の深さの５つが選ばれ，いずれもM_{max}に対して正の寄与をする（付加体については，存在する方がM_{max}が大きくなる）ことがわかった．堆積物の厚い地域ほど大きなM_{max}が観測されるという結果は，過去の複数研究と整合的である (Heuret et al., 2012; Seno, 2017; Brizzi et al., 2018)．近年の数値シミュレーションでは，沈み込み角度がM_{max}を制御するパラメタであることが示唆されていたが (Brizzi et al., 2020; Muldashev & Sobolev, 2020)，本研究では曲率半径の方がより良い説明変数として採用された．上盤プレートの地殻の厚さがM_{max}の説明変数である点は新しい発見であり，広域スケールでプレート境界の面積が大きいことが，巨大地震の発生する上で重要であることが示唆される．本研究で得られた回帰モデルは，M_{max}のおおよその傾向を再現できるものの，一部説明できない観測点もあり，考慮していない要素（海山の沈み込みなど）が影響している可能性がある．

© The Seismological Society of Japan

Triggering mechanism of volcanic eruptions by large earthquakes

*Takeshi NISHIMURA[1]

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

1707年の宝栄地震（M8クラス）の発生から49日後に富士山が噴火したり（宝永噴火），フィリピンではM7.8ルソン地震の約1年後に20世紀最大の噴火といわれる1991年ピナツボ噴火が発生したりしたように，大地震が発生すると近くの火山が噴火することはよく知られている．このような大地震による火山噴火の誘発現象は，過去の記録をもとにした調査から起こりうることが示され，そのメカニズムとして，大地震の応力解放に伴う火山体の静的膨張や収縮，あるいは，強震動が提案されている．これまで，様々な視点からこれらのメカニズムの可能性を指摘する研究が報告されてきたものの，必ずしも主要因は明らかとなっていない．今回，信頼性の高いカタログデータをもとに，大地震による静的・動的歪みの火山噴火への影響を調べ，噴火誘発の条件と噴火発生の可能性を明らかにしたので報告する．

地震のデータは，1976年から世界規模の地震観測によって整備されたGlobal CMTカタログを利用する．火山噴火は米国スミスソニアン博物館Global Volcanism Programの噴火カタログを使う．大地震発生前後10年間の噴火の誘発現象は調べるため，噴火データは1966年から2020年の55年間，地震のデータは1976-2010年の35年間を解析する．なお，漏れなく記録されている，マグニチュード5以上の地震，火山爆発指数（VEI）が2以上の中規模以上の噴火のみを解析対象とする．

噴火誘発のメカニズムとしては，これまで主要因のひとつとして提案されている動的歪み及び静的歪み（膨張／圧縮）を検討する．動的歪みは強震動と関係するので，地震のマグニチュードと火山までの距離などから求められる強震動予測式（司・翠川1999）を利用する．また，静的歪み場は，Okada （1992）の解を利用し，モーメントテンソル解をもとに火山下5kmでの体積ひずみを計算する．大地震の発生時刻を基準に経過時間をとり，静的歪みと強震動の大きさをもとに噴火発生数を調べた．その結果，強震動の大小の違いによっては，大地震の発生前後で噴火数には違いが見られないことがわかった．一方，強震動の大小にかかわらず，静的歪みが0.5micro strain 以上の膨張場となると，噴火発生数が大地震前の2－3倍になることがわかった．この噴火数の増大は，大地震発生から10年程度は続く．膨張場の形成により，気泡成長によってマグマの密度低下と浮力の獲得，火道の閉塞の緩和が促され，噴火が発生しやすくなったと考えられる．

噴火を誘発される火山の特徴を調べるため，火山の噴火履歴を調べた．その結果，噴火を頻繁に起こしている火山の方が誘発されやすい傾向があるものの，静穏期の長い火山でも噴火が誘発されることがわかった．また，大地震により静的歪みが0.5 micro strain以上の膨張場となるのは，世界で年間2－3火山であり，そのうちの15-25％で VEI 2以上の噴火が発生すると見積られた．この数はそれほど大きくないが，VEI 1の小規模な噴火の発生頻度はVEI2の約7倍であるので，大地震の発生により噴火が発生する可能性は，この見積もりよりは大きくなると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S01. Theory and analysis method

AM-2

chairperson:Akiko Takeo(ERI, University of Tokyo), Yuta Maeda(Nagoya University)
Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM A (ROOM A)

[S01-01] Finite difference calculation of constant-Q seismic ground motion using Rayleigh damping

○Kazuki KOKETSU[1], Hongqi DIAO[2] （1.Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

11:00 AM - 11:15 AM

[S01-02] Dependency of a priori information for radiation-corrected empirical Green’ s function in waveform inversion

○Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo）

11:15 AM - 11:30 AM

[S01-03] Evaluating errors in autocorrelation functions for reliable estimates of a reflection profile

○Yuta MAEDA[1], Toshiki Watanabe[1] （1.Nagoya University）

11:30 AM - 11:45 AM

[S01-04] Passive seismic reflection imaging for local earthquakes: RTM application to MeSO-net data

○Kazuya SHIRAISHI[1], Toshiki Watanabe[2] （1.JAMSTEC, 2.Nagoya University）

11:45 AM - 12:00 PM

[S01-05] Three-dimensional shear-wave velocity structure and shallow very-micro earthquakes above sea level in the Showa-shinzan volcano

○Akiko TAKEO[1], Kiwamu Nishida[1], Motoko Ishise[1], Hiroshi Aoyama[2], Yosuke Aoki[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Finite difference calculation of constant-Q seismic ground motion using Rayleigh damping

*Kazuki KOKETSU[1], Hongqi DIAO[2]

1. Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震動を含む振動現象の減衰は，振動のエネルギーEが１周期の間にΔEだけ変化するときに$Q^{-1} = -\Delta E/2\pi E$と定義されるQ値で表される．１次元の減衰振動が(1) $u = A\,e^{i(\omega t-kx)} = a\,e^{-\eta t}\,e^{i(\omega t-kx)}$と表されるならば，一般に$E$は$A^2$に比例することから，$t = 0$と$t = T$（$T$は周期）の間のエネルギーとその変化は$E \propto A^2 \approx a^2$，$\Delta E \propto a^2\,e^{-2\eta T} - a^2$になる．従って，$Q^{-1} = (1 - e^{-2\eta T})/2\pi \approx \eta T/\pi = \eta/\pi f$である．一方，$t$に従って減衰するのではなく，$x$に従って減衰するとした場合，(2) $u = a\,e^{-\varsigma x}\,e^{i(\omega t-kx)}$とすることができる．このとき，$E$，$\Delta E$は$x = 0$と$x = L$（$L$は波長）の間のエネルギーとその変化となり，$L = v/f$を用いると$Q^{-1} = \varsigma v/\pi f$である．

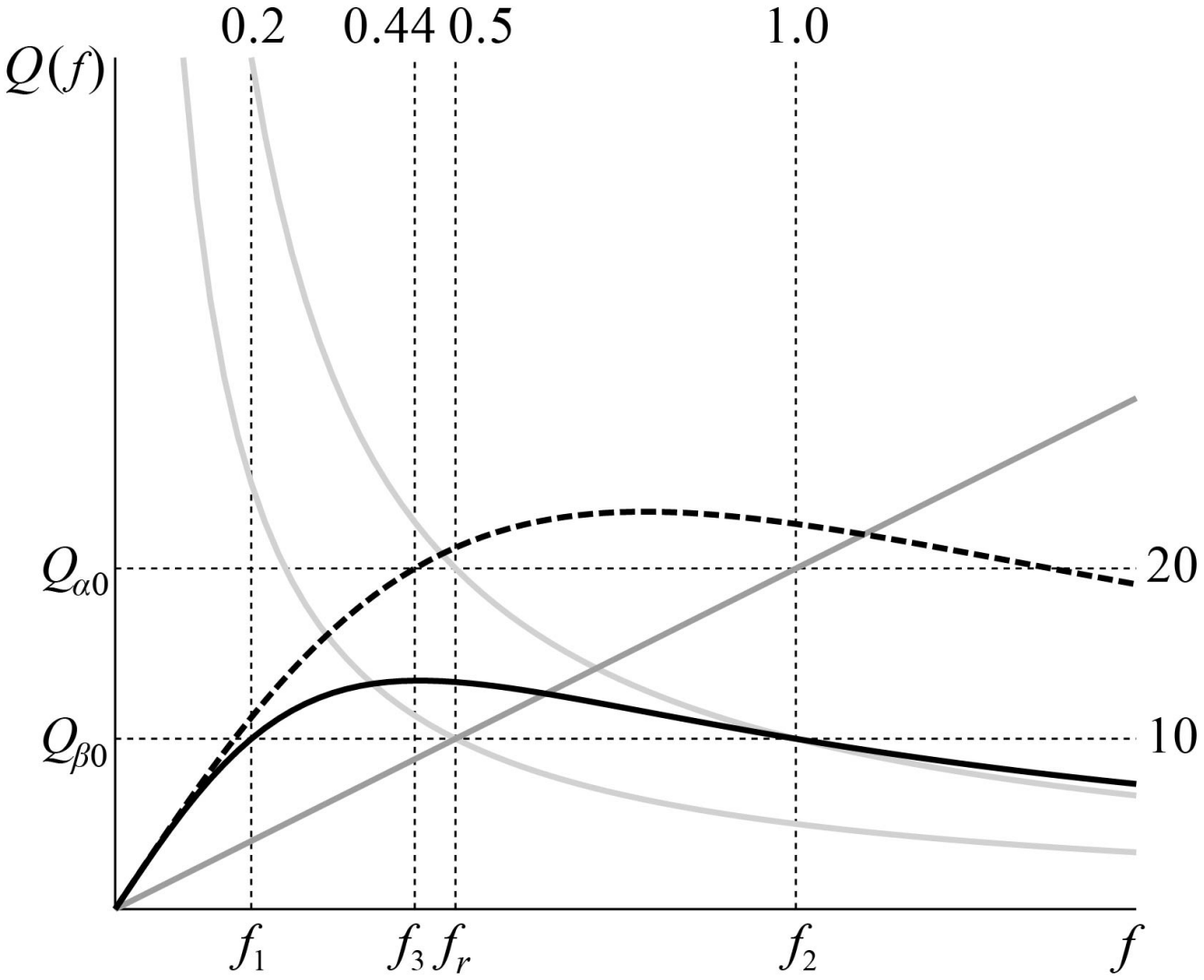
１次元媒質が完全弾性体ならば応力ーひずみ関係が$\tau = \gamma e$と表わされるとする．減衰のためにその関係が$\tau = \gamma * \partial e/\partial t$（*はコンボリューション）となるとき，運動方程式は(1)式を解とした減衰振動方程式となる．方程式の中の減衰係数は$2\pi f\rho/Q$となるから，この減衰は質量比例減衰と呼ばれる（質量は密度を意味する）．上記から$Q^{-1} = \eta/\pi f$で，参照周波数f_rにおいてQ値がQ_rならば$\eta = 1/\pi f Q_r$であるから，Q値スペクトルは$Q(f) = Q_r\,f/f_r$になる（図の濃い灰色実線）．一方，応力ーひずみ関係を$\tau = \gamma e + \Gamma\,\partial e/\partial t$とすると，運動方程式は(2)式を解とする減衰振動方程式となる．その減衰係数はΓに関係し，Γはγ（弾性定数，剛性とも呼ばれる）に比例すると考えられるので，この減衰は剛性比例減衰と呼ばれる．(2)式を代入した方程式を解いて得られる$\varsigma = \omega^2\Gamma/2v\gamma$と上記の$Q^{-1} = \varsigma v/\pi f$から，$Q^{-1} = 2\pi f\Gamma/\gamma$となる．参照周波数$f_r$においてQ値が$Q_r$ならば$\Gamma/\gamma = 1/2\pi f_r Q_r$であるから，Q値スペクトルは$Q(f) = Q_r\,f_r/f$になる（図の薄い灰色実線）．

現実の地震動の減衰では，質量比例減衰と剛性比例減衰が，ある割合で組み合わされて実現されるとする（Rayleigh 減衰）．１次元媒質の場合，この割合は，それぞれの減衰振動（(1)式と(2)式）の中の減衰項の指数にかかる重みw_ρ，w_vで表わされるとする．その結果と$x = vt$からRayleigh 減衰の減衰振動方程式は$u = a\exp\{-(w_\rho\,\eta/v + w_v\varsigma)x\}\,e^{i(\omega t-kx)}$と表わされるはずである．剛性比例減衰と同様の導出で，Rayleigh減衰のQ値が$Q^{-1} = (w_\rho\,\eta/v + w_v\varsigma)\,v/\pi f$と得られる．参照周波数$f_r$が与えられ，そこにおける質量比例減衰と剛性比例減衰のQ 値をそれぞれ$Q_{\rho r}$，Q_{vr}とすると，$Q(f) = 1/(w_\rho\,f_r/f\,Q_{\rho r} + w_v\,f/f_r Q_{vr})$が得られる．

以上を3 次元媒質に拡張すると，Rayleigh 減衰の中の剛性比例減衰はP 波とS 波に分けられ，それらの減衰項の指数への重みをw_α，w_β，参照周波数におけるQ 値を$Q_{\alpha r}$，$Q_{\beta r}$とする．目標とするQ一定減衰もP波とS波に分けられ，一定値を$Q_{\alpha 0}$，$Q_{\beta 0}$とすると，Q 一定減衰がRayleigh 減衰で実現されるならば(3) $Q_{\alpha 0} = Q_\alpha(f)$，$Q_{\beta 0} = Q_\beta(f)$が成り立つはずである．さらには$Q_{\alpha r} = Q_{\alpha 0}$，$Q_{\beta r} = Q_{\beta 0}$を仮定し．地震動は主にS波で構成されるので，質量比例減衰では$Q_{\rho r} = Q_{\beta 0}$とする．3つの周波数f_1，f_2，f_3において(3)式のうちのひとつが成り立つとして3本の連立方程式を立てられれば，3つの重みw_ρ，w_α，w_βを決めることができる．S波を重視して，周波数2つf_1，f_2はS波の方程式に割り当てるとする．

池上（2009）が挙げている計算例から$Q_{\alpha 0}$=20，$Q_{\beta 0}$=10，f_r = 0.5 Hz，f_1 = 0.2 Hz，f_2 = 1.0 Hz，f_3 = 0.44 Hzの場合を考えると，図の中に黒色の太い点線および太い実線で示されているP波Rayleigh減衰とS波Rayleigh減衰が得られる．後者はf_1以上で概ね$Q_{\beta 0}$に近く，前者はf_3以上で概ね$Q_{\alpha 0}$に近くなっている．このほか，重みを最小二乗法で決める計算例も行った．Rayleigh減衰を導入した2次元差分法を，標準線形固体1つまたは5つを導入した2次元差分法と比較すると，標準線形固体1つと同程度の計算時間で同5つと同程度の精度が得られた．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Dependency of a priori information for radiation-corrected empirical Green’s function in waveform inversion

*Ritsuya Shibata[1], Genki Oikawa[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1], Satoshi Ide[2]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

経験的グリーン関数(EGF; e.g. Hartzell, 1978)は、解析対象とする地震(Target event)の近傍で発生した、メカニズムが似ている地震(EGF event)の観測波形を、Target eventのグリーン関数とする手法である。EGFは、理論的な手法で要求されるような複雑な速度構造を仮定する必要がないという利点がある一方で、解析に適した地震が存在しないと使うことができないという制約がある。この制約を軽減するために、我々は放射パターンを補正した経験的グリーン関数(Radiation-corrected EGF)を導入した。Radiation-corrected EGFは従来のEGFの振幅を、Target eventとEGF eventの理論的な放射パターンの比を用いて補正することで得られる。しかし、本手法では、メカニズム解・震源位置・速度構造という3つの先験情報を与える必要があり、Radiation-corrected EGFの実データへの適用可能性を評価するためには、これらの先験情報の不確定さが結果に与える影響を調べることが不可欠である。そこで、本研究では先述の先験情報の影響を調べるために、波形インバージョンを用いた2種類のテストを行った。

本テストでは、日本の内陸部で発生した3つのM5クラスの地震に対して解析を行った。解析においては防災科学技術研究所(NIED)の設置しているKiK-netの地中観測点のうち、Target eventから震央距離45km以内の観測点を使用した。また、簡単のためTarget eventとEGF eventをそれぞれ点震源とみなせるように、解析周波数帯を0.1-1.0 Hzに設定した。放射パターンの計算には初期構造としてJMA2001(上野ほか, 2002)を与え、メカニズム解の初期値としてF-net (NIED)のCMTインバージョン解を、震源位置の初期値として気象庁カタログに記載された震源情報をそれぞれ設定した。また、波形インバージョンによる推定解は、波形の再現具合を表すVariance Reduction (VR)によって比較する。

まずは、みかけのメカニズムを直接的に回転させる要因となるメカニズム解・震源位置の誤差が解に与える影響を、実観測波形を用いて調べた。ここでは、先ほどの初期設定のうちメカニズム解(回転軸・回転角)と震源位置(移動方向・移動距離)にそれぞれ一様にランダムな摂動を加え、そのメカニズム解・震源位置において計算された放射パターンを用いて、インバージョンを行った。このテストの結果、メカニズム解の回転角・震源位置の移動距離が大きくなるにつれて、低VRを得る確率が高くなることが確認された。また、メカニズム解の回転の影響の方が、震源位置の移動による影響よりも大きいことが確認された。

続いて、速度構造の違いによる変換波や反射波などの直達波以外のフェーズが与える影響を、理論波形を用いて調べた。理論波形の計算には速度構造を除いて、実データの初期設定を用いている。速度構造については、JMA2001に堆積層を追加した構造を5種類用意し、各観測点にランダムに5種類の構造を割り当てる。以上の設定において理論波形を計算し、インバージョンを行った。ここで、放射パターンはオリジナルのJMA2001を仮定して計算を行っている。このテストの結果、堆積層が追加されたことによる変換波や反射波などの影響は周波数依存するものであり、本研究の解析周波数帯である0.1-1.0 Hzでは結果への寄与が小さいことが確認された。

本研究の結果、メカニズムの差異が認められる場合には、従来のEGFよりもRadiation-corrected EGFを適用する方がより良い推定解を得られることが、実データにおいても確認された。また、先験情報の不確定さが結果に与える影響は確認されたものの、その影響は地震ごとに異なるものである。このようなテストを行うことにより、各ケースにおけるradiation-corrected EGF適用の妥当性を論ずることができることも確認された。

© The Seismological Society of Japan

Evaluating errors in autocorrelation functions for reliable estimates of a reflection profile

*Yuta MAEDA[1], Toshiki Watanabe[1]

1. Nagoya University

1. はじめに
鉛直入射する地震波の自己相関関数を用いると地表の力源に対する同一地点での反射応答を疑似的に得ることができる(Claerbout, 1968)。この原理を用いた反射断面の推定が多数行われている(e.g., Tsutsui, 1992; Watanabe et al., 2011; Sun and Kennett, 2016; Chimoto and Yamanaka, 2020)。これらの研究において反射応答の誤差評価はあまり行われていない。反射応答の波形には多数の山と谷が含まれ、その中から真の反射波に対応するものを見分けるには誤差評価が有用であると思われる。そのための手法を考案し、検証を行ったので報告する。

2. 手法
観測点直下で発生した地震のP波の波形を使用する。この波形が地震による真のシグナルとランダムノイズの重ね合わせであると考える。平均が0でP波到着前のノイズ部分と等しい標準偏差を持つランダムノイズ波形を多数生成し、観測波形からこれらを差し引いたものを真のシグナルの候補とし、それらの自己相関関数を計算する。各観測点において、地震1つにつき生成したランダムノイズ波形と同数の自己相関関数が得られるので、その標準偏差が自己相関関数の誤差を表すと考える。次に各観測点においてすべての地震の自己相関関数を分散で重みづけしてスタッキングする。これにより観測点毎の自己相関関数を誤差評価付きで得ることができる。

3. 検証
首都圏地震観測網(MeSO-net)のデータに本手法を適用した。まずHi-net下総観測点に近接するMeSO-netのE.STHM観測点において詳細な検証を行った。下総観測点では掘削時の検層によって深さ2300 mまでの地震波速度・密度構造が求められており、堆積層(P波速度2000 m/s、密度2000 kg/m^3)と基盤(P波速度5000 m/s、密度2600 kg/m^3)の2層でよく近似できること、その境界が深さ1500 mにあることが知られている(太田他, 1978; 鈴木他, 1983)。MeSO-netのE.STHM観測点は下総観測点から水平距離1.6 kmと近接しているため、ほぼ同様の2層構造で近似できると思われる。そこで本手法によって深さ1500 mに単一の反射面をイメージングできるかを試した。その結果、10 Hz以下の周波数帯においては深さ1500 mからの反射波が標準偏差の3倍を有意に超える振幅で得られる一方、他の深さからの反射波振幅は標準偏差の3倍程度以内に収まるものであった。また、深さ1500 mからの反射波はスタッキング数を増やすと標準偏差に対する相対振幅が増大したが、他の深さに見られる振幅の小さな山や谷ではそのような傾向が見られなかった。このことから本手法で真の反射面を識別できると考えられる。一方、10 Hzよりも高周波では標準偏差の3倍をやや超える振幅の山や谷が様々な深さに現れ、深さ1500 mからの反射波振幅もそれらと同程度になり、識別は困難であった。
次に他のMeSO-net観測点にも本手法を適用し、標準偏差の3倍以内の振動をマスクする色付けでプロットを行った。誤差を考慮せずにスタッキングとプロットを行う従来手法と比較した。その結果、本手法の方が全体的な縞模様を抑制でき、堆積層・基盤岩境界などの強い反射面をより強いコントラストで得ることができた。

4. 議論
Hi-net府中観測点、日高観測点においても掘削時に深部までの構造が得られており、近傍にMeSO-net観測点が存在する。しかしこれらの観測点では明瞭な反射波は得られなかった。原因として、府中観測点では3層構造で近似され、各層内も均質ではなく深さとともに速くなる傾向が顕著なこと、日高観測点では更に複雑な速度構造であることが考えられる。他のMeSO-net観測点においても全般に東関東では明瞭な反射面が得られたが西関東では不明瞭であった。このことから強いインピーダンスコントラストが無いと明瞭な反射面を得るの

© The Seismological Society of Japan

は難しい可能性がある。また、高周波帯において不明瞭になる原因としては細かい不均質による多重反射等が考えらえる。このように顕著な反射面が無い場合やスタック数の不足等によって十分なS/N比を実現できていない場合において、従来手法では反射波振幅の相対値しか分からないために有意でないシグナルを強調してしまう場合があるが、提案手法では標準偏差との比較に基づいて有意性を判断できる。これにより、信頼性の高い反射断面の描像を得ることに寄与すると考えられる。

謝辞
本研究では首都圏地震観測網(MeSO-net)の波形データと気象庁一元化震源カタログを使用した。波形データのダウンロードにはHinet-Py (Tian, 2020)を用いた。本研究はJSPS科研費JP19K04016の助成を受けた。

© The Seismological Society of Japan

Passive seismic reflection imaging for local earthquakes: RTM application to MeSO-net data

*Kazuya SHIRAISHI[1], Toshiki Watanabe[2]

1. JAMSTEC, 2. Nagoya University

地震観測網の整備が進み、地震計の稠密展開や光ファイバーケーブルを用いた地震観測など、リアルタイム地震観測の機会とその重要性が増している。そのデータは、地震活動のモニタリングに加え、地震トモグラフィやレシーバ関数、雑微動解析など、地下構造の解析にも活用される。しかし、自然地震の反射波を用いた地下構造イメージングは一般的には行われていない。自然地震は地中を伝わるエネルギーが大きく、人工震源では調査の難しい深部の構造情報を得られる可能性がある。また、反射波を利用することで、地震波トモグラフィや同じ周波数帯を用いたレシーバ関数よりも高分解能な地下構造プロファイルの獲得が期待できる。そこで、自然地震記録に含まれる反射波を用いた地下構造のイメージングを目的として、これまでに、観測点の情報だけに基づくイメージング手法を開発し、数値シミュレーションを通じて理論的検証を行ってきた（Shiraishi, 2015; Shiraishi and Watanabe, 2021）。本研究では、首都圏地震観測網MeSO-netによる近地地震の観測データへ適用し、関東地方の深部構造イメージングを試みる。

自然地震を対象とする受動的反射波イメージング（Shiraishi and Watanabe, 2021）では、地中で生じた地震波が地表面と地下の境界面の間で反射する波群を構造イメージングに利用する。反射法地震探査で用いられるリバースタイムマイグレーション（reverse time migration, RTM）を応用し、地表付近の観測点で得られた波形記録を入力にして、すべての観測点から時間の進む方向に順伝播させた波動場と、時間を巻き戻す方向に逆伝播させた波動場をそれぞれモデリングし、各時間ステップにおける波動場の相関結果を時間積分する。この方法では、正確な震源情報を必要とせず、地震イベント毎に得られる構造断面イメージを多数加算することにより、有意な反射境界が結像して地下構造プロファイルが得られる。

本研究では、陸上稠密地震観測網の一つであるMeSO-netにより観測された近地地震データに対して提案手法を適用した。関東地方ではこれまでに、地震波トモグラフィやレシーバ関数解析を中心に、フィリピン海スラブと太平洋スラブの深度や形状ならびにそれらの相互関係、地殻内部の構造推定が行われてきたものの、反射波による深部構造の解析例は稀である。ここでは、MeSO-net観測点が概ね線形に配置されている西南西-東北東に190kmの解析測線を設定し、測線から5kmの距離範囲にある72観測点を利用した。まず、2017年4月から2020年3月までの気象庁一元化震源リストに基づき、観測点を含む180km×110kmの範囲内に震央がある、マグニチュード2.5以上の近地地震722イベントを抽出し、そのうち信号ノイズ比の高い方から200イベントを選択して解析に用いた。次に、信号を含む60秒間の鉛直方向成分記録に対して、0.5H-3Hzのバンドパスフィルタと自動振幅補償を適用した。波形記録の中には、構造不均質に起因する反射波と考えられるコヒーレントな波群を初動以降に確認することができた。解析に用いる二次元モデルは、Matsubara et al. (2019)の三次元地震トモグラフィによるP波速度構造から、測線に沿って水平距離190km×深度100kmを抽出し、グリッド間隔100m×100mに空間内挿した。そして、P波反射波を解析対象とし、スカラー波動方程式の有限差分法による音響波RTMを適用した。

解析の結果、深度20-40kmに複数の連続的な反射面がイメージングされた。これらは、地震波トモグラフィによる速度構造と調和的であり、また、既往研究で報告されているフィリピン海スラブの深度域に対応することから、スラブに起因する反射面を含む深部地殻構造を示唆するものと考えられる。この結果は、近地地震に含まれる反射波を利用することで、従来よりも高分解能な深部のイメージが得られ、詳細にスラブ形状の推定ができる可能性を示すものである。今後はイメージ品質の改善に向けた工夫や三次元的な解析により、自然地震を用いた従来の解析結果と相補的に、かつより詳細に深部構造の推定に貢献することが期待される。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費基盤研究C（JP19K04028）の助成を受けたものです。また、気象庁一元化震源リストおよび防災科学技術研究所のMeSO-net観測データを解析に利用しました。

© The Seismological Society of Japan

Three-dimensional shear-wave velocity structure and shallow very-micro earthquakes above sea level in the Showa-shinzan volcano

*Akiko TAKEO[1], Kiwamu Nishida[1], Motoko Ishise[1], Hiroshi Aoyama[2], Yosuke Aoki[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

有珠火山の東に位置する昭和新山は1943-1945年の噴火及び隆起において形成された標高398mの火山である。最上部にはマグマが露出した溶岩ドームが存在し、標高約200mで比較的平らな屋根山と呼ばれる部分は植生が回復している(図）。現在でも山頂周辺では噴気が見られるほか、山体の収縮が続いている。昭和新山の形成・冷却過程を明らかにするため、本研究では先行研究の表面波解析手法を拡張して内部の3次元S波速度構造を推定し、内部で見つかった微小地震活動と合わせて解釈を行う。

先行研究Takeo et al. (GJI改訂中)では、昭和新山上や周辺の22箇所(図の三角)に短周期地震計を1ヶ月設置した。地震波干渉法を用いてRayleigh波を解析し、山頂付近・屋根山・麓の3地域毎に平均的な1次元S波構造を推定した。位相速度を自動測定するため、全10層のS波速度をモデルパラメータとして地震波干渉法の相互相関関数を波形フィッティングする方法を開発した。波長と観測点配置の影響のため、位相速度が測定できる周波数帯域は地域毎に異なる。一方、地下構造が地域毎に異なるため、ある周波数のRayleigh波がS波速度構造に感度をもつ深さも地域毎に異なる。これらが組み合わさった結果、全地域共通の深さ範囲（地表から深さ約20–500 m）においてS波速度を推定することができた。

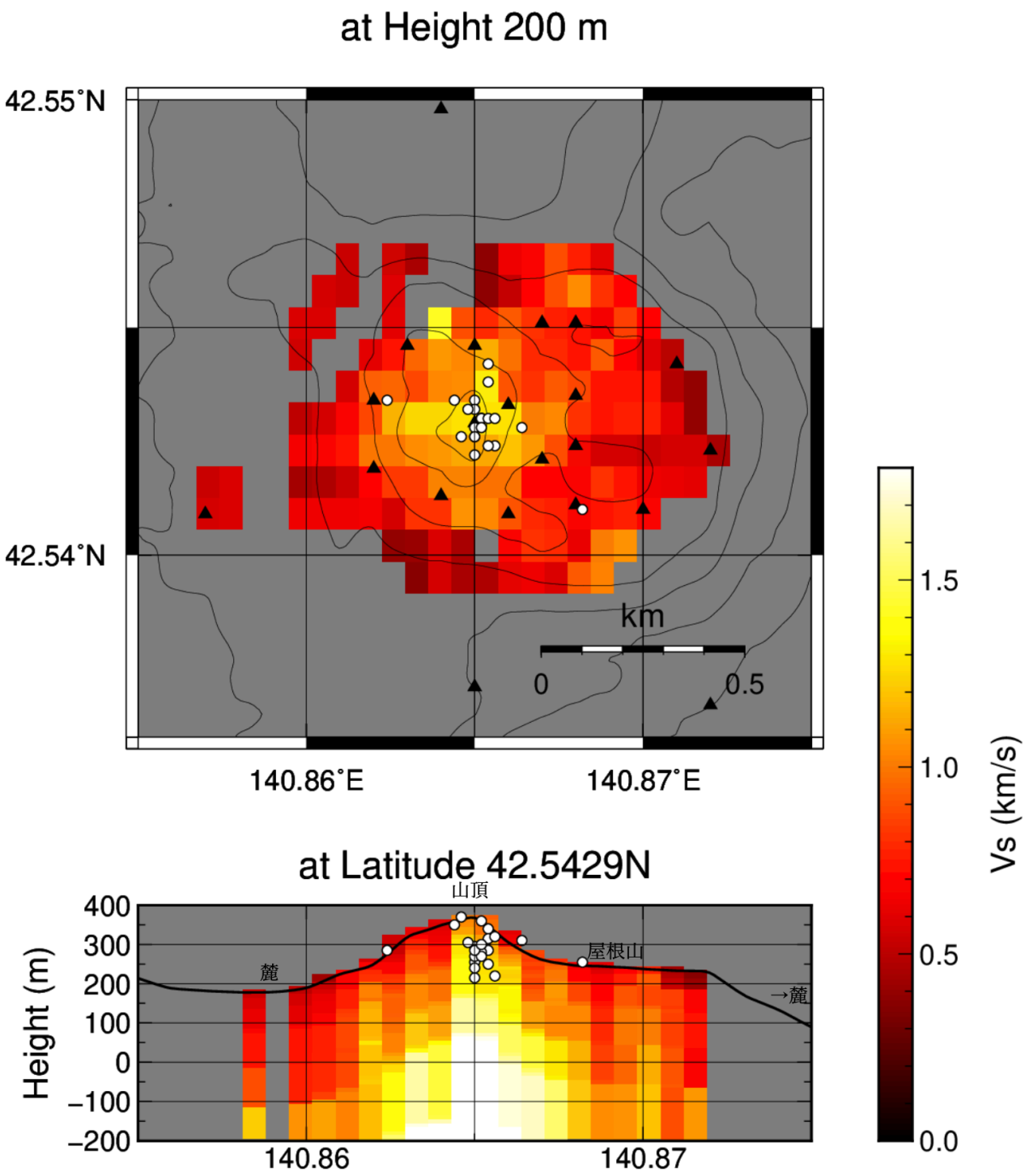
本研究では、この先行研究の手法を拡張し、3次元S波速度構造を推定した。まず、各観測点ペアの相互相関関数に対して波形フィッティングによって10層のS波速度構造を推定した。日中と夜間でノイズスペクトルの形が異なるため、毎日同時間台のデータを用いて24通りの相互相関関数を計算し、ブートストラップ法による誤差推定も行った。精度良く位相速度が推定できる周波数帯は上述の様に観測点ペアによって異なるため、通常の表面波トモグラフィーの様に2次元位相速度分布のインバージョンを行うことは難しい。そこで、波形フィッティングで得られた観測点ペア毎のS波速度構造をパス平均の構造と見なして、２通りの方法で3次元構造推定を行った。1つ目は緯度・経度を0.0007度毎のグリッドに分け、各グリッドを通るパスのS波速度重み付き平均を標高毎に求めた(図)。重みはパスの長さと測定精度によって定義した。2つ目は、角周波数毎の位相速度分布推定で通常用いられている波線追跡法（Rawlinson and Sambridge 2003）を適用して地表からの深さ毎にインバージョンを行った。どちらの手法においても高低差が150mを超えるパスは取り除いた。

2通りの解析結果に共通して、山頂直下のS波速度は全ての深さで他の領域よりも速くもとまった。この結果は先行研究（Takeo et al. GJI改訂中）と調和的であり、噴火・隆起時の地下のマグマは水平方向に狭く分布したと解釈できる。加えて波線追跡インバージョン結果から山頂直下でも特に露出した溶岩ドームの東側でS波速度が速いことが明らかになった。当時の写真記録などから最も噴火活動が活発であった第四火口の火道に対応する可能性がある。先行研究では山頂直下のS波速度はNishiyama et al. (2017)が推定した密度と経験的なスケーリングで予想されるより約40%小さく推定されており、未だ溶岩ドーム内部が高温であることや空隙が存在することなどを低速度の原因として挙げている。本研究の結果は、溶岩ドーム内にも水平不均質が存在し、例えば溶岩ドーム東側は空隙が少なかったり低温であったりすることを示唆する。

この3次元構造推定には技術的な問題が2つ存在する。1つ目は周波数毎の位相速度分布推定で通常仮定する様な破線理論を本来適用してはいけないことである。2つ目は地形の影響を十分に考慮していないことである。本研究のように深さ毎にインバージョンするアプローチは他の火山地域にも応用できる可能性があり、今後新たな技術開発をしていく必要がある。

© The Seismological Society of Japan

本研究では、以上の結果に加えて昭和新山内部でほぼ毎日発生しているマグニチュード-3から-2.5の極微小地震活動(竹尾他 2020 JpGU)にも着目する。一様P波速度を仮定した暫定震源推定結果によると、溶岩ドーム直下の海抜200–350mすなわち深さ50–200m付近に位置している(図の白丸)。複数観測点の到達走時の違いから少なくとも2箇所以上で発生しており、今後3次元構造を仮定した震源決定や相対位置再決定などにより空隙・温度分布と地震活動の関係性など議論できると期待できる。



標高 200m および緯度 42.5429˚N での S 波速度分布。

三角は観測点、丸は極微小地震の暫定震源位置を示す。

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S01. Theory and analysis method

PM-1

chairperson:Tomoya Takano(Hirosaki University)

Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:15 PM ROOM A (ROOM A)

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms: a comparison with the wave model WAVEWATCH III

○Kiwamu NISHIDA[1], Ryota TAKAGI[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S01-07] Seismic velocity response to tidal deformation at shallow crust in Japan

○Tomoya TAKANO[1], Kiwamu NISHIDA[2] （1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

1:45 PM - 2:00 PM

[S01-08] Seismic noise observed by an ocean bottom seismometer revealed glacier sliding velocity in Greenland

○Yoshio MURAI[1], Evgeny A. Podolskiy[2], Naoya Kanna[3], Shin Sugiyama[4,2] （1.Faculty of Science, Hokkaido Univ., 2.Arctic Research Center, Hokkaido Univ., 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, 4.Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ.）

2:00 PM - 2:15 PM

©Seismological Society of Japan

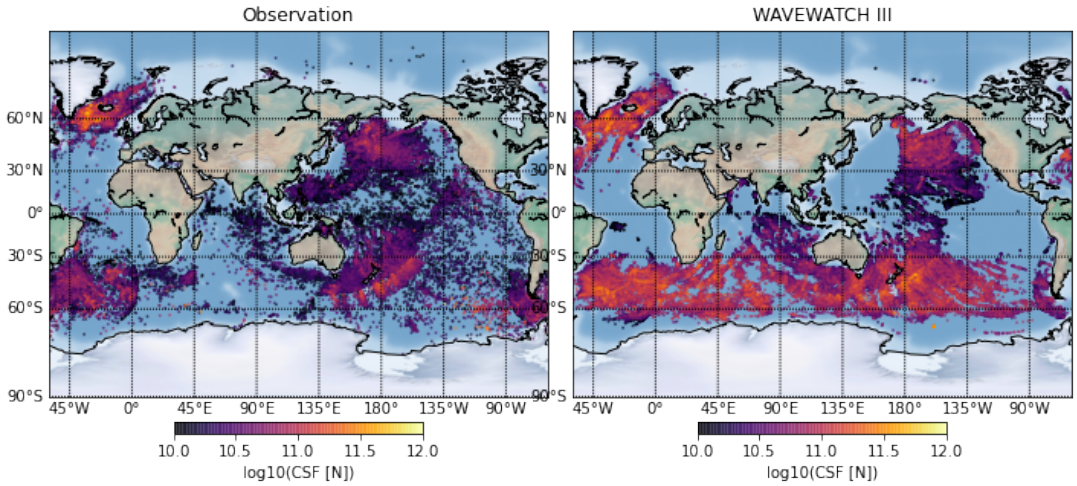
A centroid catalog of P-wave microseisms: a comparison with the wave model WAVEWATCH III

*Kiwamu NISHIDA[1], Ryota TAKAGI[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

■はじめに
地動の脈動の存在自体は1940年代から知られている。励起源が海洋波浪であることは既に確立されており、その励起の特徴から約 0.07 Hz の卓越周期を持つPrimary microseisms と約0.15 Hzの卓越周期をもつsecondary microseimsである。Secondary microseismsは海洋波浪のちょうど倍の卓越周波数を持ち、海洋波浪の非線形効果が励起に大きく寄与している事が知られている (LonguetHiggens, 1950)。ともに海洋波浪が励起源のため表面波が卓越しているが、脈動の遠地実体波も観測される。
■解析手法
脈動の起源メカニズムを系統的に理解するためには理解するためには、脈動P波の重心位置のカタログ化は情報は重要である。本研究では、beamforming法の自然な拡張として、slowness ベクトルと波面の曲率の両方の情報を抽出できる新しい手法 (auto-focusing法)を適用した。
■解析
2004年から2018年までに防災科学技術研究所が運用によって展開されているHi-net (速度計 鉛直成分約750点) を解析した。機器応答は時間領域 で補正し (Maeda et al., 2011)、収録機器起源のコヒーレントなノイズは予め差し引いた (Takagi et al., 2015)。解析には、これら広帯域化した速度計記録を用いた。時系列を512秒ごとに切り出し、地震の影響を取り除いたセグメントは解析から除外した。遠地の地震はglobal CMTカタログ (Ekström et al., 2012) を用い除外し、近地の地震は平均自乗振幅の時間変化の大きさから判断し除外した。さらに、観測点ごとの平均自乗振幅の大きさに閾値を設定し、局所的なノイズの影響を受けているとして解析から除外した。選択したデータを用い、0.1-0.25Hzの帯域でcentroid single force (CSF) を推定した。解析はP波、PP波、PKP波、PKIKP波を対象とた。また3次元構造の補正を、3次元波線追跡プログラムLLNL (Simmons et al., 2012)用いて行った。
■WaveWatch IIIに基づくcentroid カタログの推定
より定量的に理論を検証するため、海洋波浪モデル (WAVEWATCHIII) を使ってP波の理論的な予想値と比較した (c.f., Nishida and Takagi, 2016)。海洋波浪による励起はArdhuin et al. (2011)に従い計算し、波線理論によるP波のGreen関数は Farra et al. (2016)に従った。
■解析結果とWaveWatch IIIの比較
Centroidの時空間分布を比較したところ、Hi-netによる解析結果とWAVEWATCH III は大局的に調和的であった。Centroidは北半球の冬の期間、主に北西太平洋・北大西洋に分布していた。南半球の冬の期間には、主に南太平洋・南極海に分布していた (図参照)。
本研究では、P波、PP波 , コアフェイズを解析したが、PP波の検出数はWAVEWATCH III に比べて優位に少なかった。また、PP波によって決定したCSFの大きさも優位に小さいことが分かった。これは、PP波が浅部の不均質構造の影響をより強く受けるために、3次元構造の影響を補正しきれなかった事が原因だと考えられる。
解析結果とモデルの間の最も大きな違いは、オーストラリア北部 (カーペンタリア湾)のP波脈動である。毎年夏に顕著な脈動活動が観測されている。この違いは、WAVEWATCHIIIがLonguet-Higginsメカニズムで重要となってくる海岸での波浪の反射を上手くモデリングできていない事に起因しているかもしれない。ただカーペンタリア湾は閉じた湾であるために、海洋波浪活動があまり活発でないことが知られている。また水深も約50mと浅いために、Longuet-Higginsメカニズムとは違った非線形効果を考える必要があるかもしれない。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Seismic velocity response to tidal deformation at shallow crust in Japan

*Tomoya TAKANO[1], Kiwamu NISHIDA[2]

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地殻内の歪みの蓄積・解放過程を調べることは地震や火山活動の発生機構を理解する上で重要である．地殻内の歪み変化は，地殻を伝播する地震波速度の時間変化を観測することで調べることができる．観測された地震波速度変化から地殻構造の歪み変化を推定するためには，歪み変化に対してどのぐらい地震波速度変化が生じるのか理解する必要がある．近年，歪み変化のみによる地震波速度変化を調べるために，高精度に理論計算できる地球潮汐に伴う地震波速度変化の検出が地震波干渉法により行われている．しかしながら，先行研究 では限られた地域での観測結果しか報告されておらず，地球潮汐に伴う地震波速度変化の地域性などの空間的な特徴はまだよくわかっていない．そこで本研究では，Hi-net観測点で記録された常時微動を利用して，拡張カルマンフィルタに基づき地球潮汐による地震波速度変化のみを抽出し，日本全国における速度変化の潮汐応答の空間分布について調べる．

防災科学技術研究所のHi-net（速度計3成分，878観測点）において，2010年から2011年までに記録された連続記録を解析する．データロガーによるノイズの影響を除去した(Takagi et al., 2015)後に，時間領域で機器応答を補正し(Maeda et al., 2011)，20Hzにリサンプリングする．各観測点において，1時間ごとに常時微動の自己相関関数3成分（NN, EE, ZZ成分）と同一観測点での相互相関関数６成分（ZE, ZN, EN, EZ, NZ, NE成分）を計算する．得られた相関関数に対し0.2-0.5Hzの帯域でフィルターを適用する．Nishida et al., (2020)に基づき，線形化したストレッチング法に対して拡張カルマンフィルタを適用することで，1時間ごとの9成分の相関関数から潮汐に対応する地震波速度変化を抽出する．ここで，異なる周期の潮汐による速度変化をcosine関数の重ね合わせによりモデル化し，説明変数としてカルマンフィルタの中の状態–空間モデルに組み込む．カルマンフィルタの処理過程において，説明変数である地球潮汐による速度変化を最尤法により決定する．

分潮の中で振幅が最も大きいM2分潮に対する速度変化の空間分布を調べたところ，海洋荷重による歪み量の大きい湾周辺や島の観測点で速度変化が大きくなることがわかった．また，各観測点でのM2分潮に対する地震波速度変化とGOTIC2（Matsumoto et al., 2001）により計算した潮汐歪量を用いて，地震波速度変化の歪感度を推定した．地震波速度変化の歪感度は10^3から10^5の間で分布し，これまで先行研究で推定された速度変化の歪感度値と整合的であった．得られた歪感度値を地殻浅部におけるS波速度（Nishida et al., 2008）と比較したところ，速度変化の歪感度値はS波速度の低い領域において大きくなることがわかった．

本研究では，防災科学技術研究所のHi-netの連続データを使用させていただきました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Seismic noise observed by an ocean bottom seismometer revealed glacier sliding velocity in Greenland

*Yoshio MURAI[1], Evgeny A. Podolskiy[2], Naoya Kanna[3], Shin Sugiyama[4,2]

1. Faculty of Science, Hokkaido Univ., 2. Arctic Research Center, Hokkaido Univ., 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, 4. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ.

１．はじめに

近年、地震波ノイズの励起に関して、地震波ノイズと海洋潮汐［Becker et al. (2020)］や風による気圧変化［Tanimoto and Wang (2021)］などとの関係が調べられている。Podolskiy et al. (2021)は、グリーンランド・ボードイン氷河直前の海底に海底地震計を設置して、地震波ノイズと氷河の流動速度を比較することによって、地震波ノイズパワーと流動速度の間に高い相関があることを発見した。このことから、地震波ノイズは氷河がすべる時に生じる微動であると考えられ、地震波ノイズの観測から氷河の流動速度を推定できることが示された。氷が陸上から海に流入すると海水準が上昇するので、海底地震観測によって氷河から海に流入する氷と融け水をモニタリングできれば、地球温暖化による海面上昇の解明に役立つことが期待される。一方、氷河の流動では基盤上を氷がすべる現象が重要であり、固体と固体の接触面での安定すべり実験と見なすこともできる。本研究では、Podolskiy et al. (2021)による観測結果をレビューし、氷河が流動する際に、どのようにして地震波が励起されるかについて地震学的に考察する。

２．観測と解析結果

グリーンランド北西部のボードイン氷河は、海洋に流れ込む氷河の１つである。Podolskiy et al. (2021)では、2019年7月21日～8月6日の期間に、ボードイン氷河の氷河末端から約640 m離れたフィヨルドの海底に海底地震計1台を設置して観測を行った。センサーには、固有周波数4.5Hzの3成分速度計を使用した。また、氷河と陸上にもGPS受信機と速度型地震計を設置した。解析では、地震計の記録から機器特性を除去し、power spectral density (PSD)を計算した。PSDはいくつかの周波数帯で積分し、各周波数帯域での時系列を作成した。PSD の時系列はばらつきが大きかったので、PSD の最小値をノイズレベルの最小値として、氷河上のGPSで観測された氷河の流動速度との比較を行った。氷河の流動速度は約1 m/dayの速さで、海洋潮汐の影響による約12時間周期の変動に加えて、融解水が氷河の底に供給される夕方に速くなる傾向がある。地震波ノイズパワーの時系列は、3.5 Hz～14.0 Hzの周波数帯で氷河の流動速度との間に相関が見られ、特に海底地震計では、氷河上で発生する氷の破壊や強風によるノイズの影響を抑えることができたため、高い相関があることが明らかになった。以上のことから、地震波ノイズは氷河がすべる時に生じる微動であると考えられる。

３．解釈

なぜ微動振幅と氷河の流動速度との間に相関が見られるのか、その原因について考察する。ボードイン氷河では、氷に縦孔を掘削して氷内部の変形を直接調べたところ変形量が小さいことが明らかになっており、氷河の流動速度と氷河底面のすべり速度はほぼ同じと仮定できる。Aki and Richards (2002)の式(4.32)によると、断層すべりによる変位場の遠地項は、地震モーメントの時間微分に比例する。地震モーメントは断層すべりに比例するので、変位場はすべり速度に比例する。観測では速度型地震計を使用しているので、観測された地震波の速度場はすべり加速度に比例することになる。ここで、3.5 Hz～14.0 Hzの周波数帯での微動は、同じ周波数帯でのすべり加速度によって励起されることになるが、GPSから得られた氷河の流動速度は15分間の平均値から計算されたもので、微動のような高周波成分のすべり速度やすべり加速度は検出できないことに注意する必要がある。したがって、以下では定性的に議論する。

　氷河がすべる時に高周波の微動を励起するためには、氷河は滑らかに流動するのではなく、高周波の速度ゆらぎを伴いながら流動していると考えられる。そのような高周波の速度ゆらぎが、高周波のすべり加速度の原因となり、微動による速度場が励起される。その際、氷河の流動速度が速くなると、高周波の速度ゆらぎによるすべり加速度が大きくなるため、微動による速度場も振幅が増大してノイズレベルが上昇すると考える

© The Seismological Society of Japan

と、観測結果を説明することができる。氷河の底面には氷河堆積物が付着していて、その中に含まれる砕屑岩が氷河の流動によって引きずられて、基盤の硬い部分を通過する時に氷河の流動速度にゆらぎが生じて、すべり加速度が発生し、微動が励起される。氷河の流動速度が速くなると、氷河の底面の砕屑岩が基盤の硬い部分をより頻繁に通過するようになるので、氷河の流動速度のゆらぎが大きくなり、強いすべり加速度と微動が励起されるのかもしれない。

文献

Podolskiy et al., 2021, Nat. Commun., 12, doi:10.1038/s41467-021-24142-4.

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

Sat. Oct 16, 2021 2:15 PM - 3:00 PM ROOM A (ROOM A)

[S12-01] Regional stress field in the northern Kinki district investigated by dense seismic observation

○Toshio Tanaka[1], Yoshihisa Iio[2], Hiroshi Katao[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2]
（1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction）

2:15 PM - 2:30 PM

[S12-02] In-situ stress at the basement under Osaka plain(3) -Re-evaluation using rock core samples with DCDA method-

○Kentaro OMURA[1], Akio Funato[2], Takatoshi Ito[3] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Fukada Geological Institute, 3.Institute of Fluid Science, Tohoku University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S12-03] Experimental evaluation under hydrous condition on thermal maturation of carbonaceous materials as a proxy of frictional heating in a fault during an earthquake

○Keita IWAGAKI[1], Tetsuro Hirono[1] （1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Regional stress field in the northern Kinki district investigated by dense seismic observation

*Toshio Tanaka[1], Yoshihisa Iio[2], Hiroshi Katao[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2]

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE KYOTO UNIVERSITY Research Center For Earthquake Prediction

近畿地方の北部には、有馬－高槻断層帯、三峠・京都西山断層帯、花折断層帯、琵琶湖西岸断層帯などの活断層が分布しており、日本で活断層が集中している有数の地域の一つである。これらのうち、有馬－高槻断層帯は、北側の北摂山地と、南側の大阪平野や六甲山地の境界部に沿って、ほぼ東北東－西南西に延びる活断層帯である。その長さは、高槻市街地北部から神戸市北区の有馬温泉西方まで、約55kmある。有馬－高槻断層帯の南西側には、兵庫県南部地震(1995 M7.3)を引き起こした六甲・淡路島断層帯があり、断層帯の近傍では、大阪府北部の地震(2018 M6.1)が発生した。
有馬－高槻断層帯の北側の丹波地域では、活発な微小地震活動が長期間継続している。この地震活動は大地震の後の余震活動とは異なっている。また、特定の断層の近傍で発生しているのではなく、広い範囲で発生している。地震活動には地殻内流体が関連していることが示唆されており、近畿地方北部における下部地殻内のS波の反射面の解析を通して、断層帯深部の地震学的構造の解明がなされてきている(Aoki et al., 2016；Katoh et al., 2018)。
近畿地方北部は近畿三角帯の西縁側の一部に位置し、また、新潟－神戸歪集中帯の南西端の一翼を担う場所でもある。したがって、広域のテクトニクスを考察する上でも重要な場所である。地殻の応力の状態をより正確に把握することは、考察を深めるために欠かせないだけではなく、将来の地震活動を予測する上でも極めて重要である。
琵琶湖西岸から丹波山地周辺には、2008年以降、満点システムと名づけられた、80点を超える稠密観測網が整備されてきている(三浦ほか, 2010)。平均観測点間隔は約5kmで、従来の定常観測網の約20kmと比較するとはるかに稠密である。近畿地方北部の応力場については、既に藤野・片尾(2009)や青木ほか(2012)により解析がなされているが、この満点システムから得られた多数のデータ、および周辺の高感度定常観測点から得られたデータを用いて、応力場の解析を行った。解析に用いた地震は北緯34.4～35.7°、東経134.5～136.6°の範囲内で2008年11月から2018年3月までに発生した約2万個の地震である。一つのメカニズム解を求める際に地震の観測点の下限は15とした。メカニズム解に複数の解がある場合は10個以下の場合のみを用いた。インバージョン解析においては、以下のパラメータなどで解析した。
Kagan角の最大値：35°、Score値の最小値：0.9、グリッド内の地震数：16以上50以下、
グリッドの大きさ：x軸10km、y軸10km、z軸2.5km
これらのうち、z軸(鉛直)方向の距離については、応力の上下方向の変化を詳しく調べるために2.5kmに設定した。藤野・片尾(2009)は、深さ、東西、南北とも10kmの立方体を解析対象としたが、2.5km間隔で設定できたのは、稠密観測網により膨大な数の地震波形データが得られたからである。解析に際しては、変化の連続性を保つため、原則としてグリッドの大きさの半分ずつの距離を移動させ、各データを2回使用した。
地殻にはたらく最大主応力の方位は、西南日本では一般的に東西方向である。しかし、有馬－高槻断層帯の主部は、かなり東西に近い走向の横ずれ型の断層であり、広域的な応力場とは必ずしも調和的でないように見える(飯尾, 2020)。大阪府北部の地震の後の余震観測などによると、P軸の方位は、東－西方向だけでなく、南東－北西方向にも向いていることが計測されている(飯尾, 2020)。
本研究の結果、有馬－高槻断層帯付近にある、大阪府北部の地震の震源地付近の最大主応力の方位は、深度10kmの地点において、東－西方向から、南東－北西方向に、時計回りに20°回転していた。また、丹波地域でも角度は異なるが、時計回りに回転している場所があった。応力方位の上下方向での変化については、有馬－高槻断層帯周辺では、地震の発生深度が限られていて数も少ないので、推定は困難であった。一方、丹波地域ではより深い場所でも発生し数も多いので、上下方向での変化も推定できた。その結果、特徴的な変化を示す場所があることも分かった。一例として、大阪府北部の地震の震央点の北方40kmの地点から東方に20kmにわ

© The Seismological Society of Japan

たる範囲の地域では、深度が7.5、10、12.5kmと深くなるにつれ、応力方位が時計回りに回転していた。角度は、東を基準として時計回りの方向を正とした場合、7.5kmでは-10または-15°、10kmでは10°、12.5kmでは15°であった。
最大主応力方位の角度の変化を引き起こす要因については、詳しい分析を今後継続して行う予定である。

© The Seismological Society of Japan

In-situ stress at the basement under Osaka plain(3) -Re-evaluation using rock core samples with DCDA method-

*Kentaro OMURA[1], Akio Funato[2], Takatoshi Ito[3]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Fukada Geological Institute, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University

日本列島の原位置の絶対応力に関するデータ，特に深さ100mを越える深部データは，陸域においても，数少ない状況にあるなか，掘削で採取された既存の岩石コアを用いた地殻応力測定法を適用し，信頼性の高い地殻応力データをはばひろく取得することを目指してきた．本発表では，一例として，防災科学技術研究所の，大阪平野にある深層地殻活動観測井における原位置地殻応力測定の結果を報告する．本観測井では，ボアホールテレビュア検層から，ボアホールブレイクアウトが観察され，すでに応力方位が推定されているが（小村，地震学会秋季大会2020），Funato and Ito (2017, IJRMMS)で設計され，防災科研に整備された装置でコア形状を再計測し，コア変形法（DCDA法, Diametrical Core Deformation Analysis法）を適用して応力値を推定した．コア変形法では，地下深部から採取された岩石コアが，応力解放により弾性変形することから，その弾性変形を計測し，岩石の弾性定数と掛け合わせて応力値を推定する．先行研究により，1000mを超えるような深部岩石コアでは，採取後の弾性変形が大きく，コア変形法の適用できることが示されている．

大阪府の此花観測井(北緯34°39'45.92"，東経135°23'22.53"，掘削深度約2033m)の基盤に達する深度2035.5mコアと田尻観測井(北緯34°23'52.14"，東経135°17'01.24"，掘削深度約1532m)の同じく基盤となる深度1202.4mおよび1494.8mコアにおいて，採取後，10年以上経過したものではあるが，外周にそって直径がサインカーブ状に変化し，岩石コア断面が応力開放にともない楕円状に弾性変形していることが示され，コア変形法の適用可能と判断した．採取された岩石コアのP波速度，S波速度，密度測定から計算される弾性定数を適用し，応力値を求めたところ，～60 MPaから100MPaを越える差応力値となった．過去の，周辺の原位置地殻応力測定の結果と比べて，大きな値となっている．一方でボアホールブレイクアウトから求まった応力方位は，周辺の広域応力方位に整合的である．大きな差応力に意味があるかどうか，今後，岩石コアの亀裂の存在の影響などを考慮していかなければならないと考える．

本結果をふまえ，一般に，観測井などの孔井掘削と岩石コア採取し，あわせて孔内検層実施し，条件が適合して，ボアホールブレイクアウトが観察されれば，原位置地殻応力の値と方位をともに計測可能であることが示されたものといえる．

© The Seismological Society of Japan

Experimental evaluation under hydrous condition on thermal maturation of carbonaceous materials as a proxy of frictional heating in a fault during an earthquake

*Keita IWAGAKI[1], Tetsuro Hirono[1]

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震性滑りの指標として，断層中に含まれる炭質物の熱熟成反応が挙げられる．この反応は断層中の摩擦発熱による温度上昇の推定に広く用いられる，温度上昇に伴う不可逆的な反応である．しかし，実際の地震発生時の断層は水で満たされているにもかかわらず，水が炭質物の熱熟成反応に及ぼす影響についてはこれまで精査されていない．そこで本研究では，初期熟成度の異なる２種の炭質物（褐炭，瀝青炭）を用い，水と共にガラス管に真空封入し，加熱処理を実施し，水の炭質物の熱熟成度の変化への影響を実験的に精査した．加熱実験では，炭質物-水量比（乾燥状態, 2:1, 1:4），ターゲット温度（350, 700, 1050 ˚C），最高温度保持時間（40 s, 1, 3, 5 h）を変化させて加熱を施し，その後，実験後試料において，赤外・ラマン分光分析による分子構造の解析を行った．その結果，炭質物-水量比が2:1における350, 700, 1050 ˚Cでの40秒~5時間の加熱，1:4における350 ˚Cでの1, 3, 5時間の加熱による官能基の離脱に，水の有無による有意な差が認められなかった．また，ラマン分光分析については現在解析中である．赤外分光分析の結果から，水は炭質物の熱熟成反応に影響を及ぼさないと言える．本発表ではさらに現在解析中のラマン分光分析の結果も踏まえ，これまで構築されてきた地震時の摩擦発熱指標としての炭質物の熱熟成反応を評価する．

© The Seismological Society of Japan

Room B | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

AM-1

chairperson:Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Hiromichi Nagao(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM B (ROOM B)

[S23-01] A Bayesian multi-model inference for slip distribution in slow slip events beneath the Bungo Channel: the effect of prior constraints

○Ryoichiro AGATA[1], Ryoko Nakata[2], Amato Kasahara[3], Yuji Yagi[4], Yukinari Seshimo[5], Shoichi Yoshioka[5], Takeshi Iinuma[1] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Independent researcher, 4.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 5.Graduate School of Science, Kobe University）

9:00 AM - 9:15 AM

[S23-02] Symplectic-adjoint-based exact uncertainty quantification method and its applications to seismology

○Shin-ichi ITO[1] （1.Earthquake Research Institute,The University of Tokyo）

9:15 AM - 9:30 AM

[S23-03] Coseismic fault model estimation using the Hamiltonian Monte Carlo method and its comparison with the Metropolis-Hastings method

○Taisuke Yamada[1], Yusaku Ohta[1], Keitaro Ohno[2] （1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Geospatial Information Authority of Japan）

9:30 AM - 9:45 AM

[S23-04] An earthquake tomography method for detecting of velocity discontinuities via structured regularization

○Sumito Kurata[1], Yohta Yamanaka[1], Keisuke Yano[2], Fumiyasu Komaki[1], Takahiro Shiina[3], Aitaro Kato[1] （1.The University of Tokyo, 2.The Institute of Statistical Mathematics, 3.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology）

9:45 AM - 10:00 AM

[S23-05] Detection of deep low-frequency earthquakes by matched filter technique using the product of mutual information and correlation coefficient

○Ryo KURIHARA[1], Aitaro Kato[1], Sumito Kurata[2], HIromichi Nagao[1,2] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo）

10:00 AM - 10:15 AM

[S23-06] l_1 trend filtering based detection of short-term slow slip events from a GNSS array in southwest Japan

○Keisuke YANO[1], Masayuki Kano[2] （1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

A Bayesian multi-model inference for slip distribution in slow slip events beneath the Bungo Channel: the effect of prior constraints

*Ryoichiro AGATA[1], Ryoko Nakata[2], Amato Kasahara[3], Yuji Yagi[4], Yukinari Seshimo[5], Shoichi Yoshioka[5], Takeshi Iinuma[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Independent researcher, 4. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 5. Graduate School of Science, Kobe University

地震波形・測地データを用いた断層すべり分布推定においては、1. 断層面形状と弾性構造よりなる地下構造のモデルを一つ設定し、2. 設定した地下構造モデルに基づきデータからのすべり分布のインバージョンを行う、という二つの段階からなる推定方法が一般的である。この方法は、すべり分布推定を単純な線形逆問題として定式化することを可能とするため、広く用いられている。しかし、地下構造に関して不確実な情報しかない状況下で、すべり分布推定の前に他の地下構造モデルを選択する可能性を捨ててしまうことは、その不確実性に起因するモデルによる予測誤差の大きさを過小評価することになり、推定におけるオーバーフィットを招く一因となる。
本研究では、モデルの不確実性に起因する予測誤差を適切に取り扱うために、事前確率分布関数で特徴付けられる地下構造モデルの多数の候補を保持して、すべり分布のフルベイズ推定を行う手法について検討する。この手法の基本的な考え方は、Agata et al. （2021, GJI）によって示されたものであり、モデル予測誤差の統計的性質をデータ誤差共分散行列の共分散成分により表現したYagi & Fukahata (2011, GJI)やDuputel et al. (2014, GJI)などによる手法を、モデル予測誤差のガウス性を仮定しない形に拡張したものと捉えることができる。また、多数のモデル候補をベイズ推定の枠組みの中で同時に考慮するという意味で、ベイズマルチモデル推定あるいはベイズモデル平均化（例えばRaftery et al., 1997）の一種と考えることもできる。そのため、本稿では本手法をBMMSE（Bayesian Multi-model slip estimation：ベイズマルチモデルすべり推定）と呼ぶ。Agata et al. （2021, GJI）では、BMMSEの簡単な数値実験への適用のみが示された。本研究では、BMMSEを豊後水道の地下で2010年と2018年頃に発生した長期的スロースリップイベント（L-SSE）の観測変位データ（Seshimo & Yoshioka, 2021, JpGU）に適用し、すべり分布を推定する。その際、BMMSEをすべり推定に導入することによる2つの利点に着目する。第一に、BMMSEを用いてモデルの不確実性に起因する予測誤差の確率的特性を精度よく考慮したフルベイズ推定を行うことは、すべり分布の滑らかさなどに対する強い先験的拘束を含めないすべり推定をより容易にするという点、第二に、L-SSEのように同じ場所で繰り返し発生するイベントのすべり分布推定において、地下構造を特徴づける事前確率分布関数をイベントごとに逐次更新することができる、という点である。
提案した手法を用いて得られた結果は、すべりがプレート境界面のdip方向にかなり狭い範囲で分布していることを示唆するものであった。すべり分布の推定結果から計算したイベント前後でのクーロン破壊応力変化量の空間分布を、L-SSEの期間中に発生したdown dip側の深部低周波微動の分布と比較したところ、すべり分布の滑らかさによる先験的拘束に基づいた結果と比べ、よりよく一致していた。このことは、L-SSEと周辺地域において同期して発生したスロー地震との力学的な関係をより明確に示している。このように、得られたすべり分布と他のイベントとの関係を議論する上で、物理的な根拠のはっきりしない拘束条件を導入せずにすべり分布を推定することがより効果的であることが示唆される。また、2010年のイベントに対する推定で更新された地下構造を特徴づける事前確率分布関数を、2018年のイベントを解析する際の入力として使用したところ、2018年のイベントを独立に解析した場合よりもWBIC（Widely Applicable Bayesian Information Criterion (Watanabe 2013, JMLR): 負の対数周辺尤度の近似値）がより小さくなり、より適切なベイズモデルが推定されていることが示された。このことから、事前確率分布関数をイベントごとに逐次更新することで、より適切なベイズ推論によるすべり分布推定が行えることが示された。

© The Seismological Society of Japan

Symplectic-adjoint-based exact uncertainty quantification method and its applications to seismology

*Shin-ichi ITO[1]

1. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo

説明変数が何らかの微分方程式で拘束されている目的関数の微分計算は、ニューラルネットワーク・４次元変分法データ同化など、大規模な固体地球科学の問題を解析するための統計関連手法において必須の技術である。特にそのような目的関数の２階微分行列であるヘッセ行列は、その逆行列要素が推定量の不確実性の評価に直結するため重要であるが、計算コストが大きいため、大規模系に対してもヘッセ行列を高速かつ高精度に計算する枠組みが希求されている。これまでに我々は、ヘッセ行列およびその逆行列要素の高速・高精度計算を目的として、４次元変分法データ同化で用いられる 2nd-order adjoint (SOA) 法に基づくアルゴリズム開発およびその応用研究を推進してきた[1]。SOA 法で利用される SOA モデルは一般に常微分方程式の形式で与えられ、ヘッセ行列評価には SOA モデルの数値積分が必要になるが、その数値積分法の選び方によっては必要なメモリが増大するだけでなく、ヘッセ行列の計算精度が著しく低下し、それに基づいて計算される不確実性などの結果が信頼できないものになる可能性があるなどの問題があった。そこで本研究で我々はSOA法に内在するシンプレクティック性に着目することで、必要なメモリを最低限に抑え、さらにヘッセ行列の数値誤差を計算機誤差まで抑えることを可能にする SOA モデルの最適な数値積分法の選択法を提案した[2]。この方法では SOA 法に登場する微分方程式群に存在する保存量を離散化後も保存するような数値積分法を構築することで高精度なヘッセ行列計算を可能にしている。簡単な波動方程式を用いたデータ同化問題を通じて本手法を検証したところ、本手法から提案される数値積分法は従来用いられてきた数値積分法に比べて、ヘッセ行列に含まれる数値誤差を劇的に抑えることが確認できた。講演では、本手法の大規模地震シミュレーションモデルへの適用した結果[3]も紹介する。

[1] S. Ito, H. Nagao, A. Yamanaka, Y. Tsukada, T. Koyama, M. Kano and J. Inoue, Physical Review E 94, 043307, 2016.
[2] S. Ito, T. Matsuda, and Y. Miyatake, BIT Numerical Mathematics, 61, 503—522, 2021.
[3] S. Ito, M. Kano, and H. Nagao, in preparation.

© The Seismological Society of Japan

Coseismic fault model estimation using the Hamiltonian Monte Carlo method and its comparison with the Metropolis-Hastings method

*Taisuke Yamada[1], Yusaku Ohta[1], Keitaro Ohno[2]

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Geospatial Information Authority of Japan

限られた観測データから推定される断層モデルの推定不確実性を定量把握することは、得られた結果を解釈する上できわめて重要である。Ohno et al. (EPS, 2021)は、リアルタイムGNSSから矩形断層モデルを、その推定誤差とともに即時推定する手法をマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC法)に基づいて開発した。同手法ではMCMC法の代表的な手法の一つであるメトロポリス・ヘイスティング法 (M-H法) を採用している。しかしM-H法では約20～30%の採択率が理想とされ、結果として長いマルコフ連鎖が必要となる。すなわち、高次元の問題について非常に長い混合時間が必要であり、より効率的な探索手法の活用が必要とされている。そのような課題を克服するため、本発表では、ハミルトニアンモンテカルロ法 (HMC法) にもとづく断層モデル推定手法を開発した。

HMC法はMCMC法の一種であり、目標となる事後分布の微分 (勾配) を利用した効率的な遷移を行う。具体的にはleapfrog法による数値積分を用いたハミルトン力学のシミュレーションを行うことで、詳細釣り合いを満足した高速な混合を実現する。leapfrog法ではハイパーパラメータとしてステップサイズeとステップ数Lを事前に仮定する必要がある。それらについて、Lに関してはNo-U-Turn Sampler (NUTS) を用いることで最適化を行い、eに関しては試行錯誤的に10^{-3}と仮定した。

本研究では、Okada (1992) による単一矩形断層モデルの断層パラメータを未知数とした。各未知パラメータについてステップサイズを最適化するため、緯度と経度を除くすべての未知パラメーターにlogもしくはlogit変換による変数変換を適用した。開発した手法を2016年熊本地震に適用した結果、burn-inの1000連鎖を含む20000連鎖程度で収束が確認された。また，推定結果は先行研究と極めてよく一致した。また本研究ではM-H法によるサンプリングと比較して議論を行った。その結果、HMC法を用いることで， M-H法の5%程度の連鎖数で十分な精度の事後確率分布を推定可能であることが明らかになった。これより、連鎖数の観点からHMC法はM-H法に対して優位性があり、より長い連鎖数を必要とする高次元の問題や1連鎖の計算コストが大きい問題において効率の良い推定が可能であると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

An earthquake tomography method for detecting of velocity discontinuities via structured regularization

*Sumito Kurata[1], Yohta Yamanaka[1], Keisuke Yano[2], Fumiyasu Komaki[1], Takahiro Shiina[3], Aitaro Kato[1]

1. The University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

地震波トモグラフィは、地表面の観測網で記録された地震の到達時間から地球内部の地震波速度構造を推定する手法である。従来手法ではスムージングに伴う拘束条件のため、地震波速度が急峻に変化する速度不連続面(velocity discontinuity)の存在を検出することが困難であった 。したがって、モホ面、コンラッド面に代表される速度不連続面を扱う場合、変換波などの速度不連続面の存在に敏感な波群から推定された形状を事前に与える、というアプローチがとられてきた。しかしながら、そのような波群が観測される地域は限られていることが多く、またデータ数も不十分な場合が多い。このため、速度不連続面の詳細な形状が同定されているとは限らず、普遍的に観測される得るP波やS波の初動走時データからその位置や分布を検出することは、地球内部構造を理解する上で大きな意義がある。そこで本発表では、構造正則化を応用することで、限られた走時データから未知の不連続面を検出しつつ、速度構造を推定するインバージョン法を提案する。
速度構造の推定にあたっては、まずグリッドポイントを地球内部に仮定し、それら個々に速度パラメータを設定する。震源から観測点に到達するまでの予測時間を算出する際には、これらのグリッドポイントの補間により得られる速度を用いて経路積分を行う。多くの従来法では、この予測到達時間と観測到達時間との残差に基づいて、各グリッドポイントの速度パラメータを推定している。
提案手法の最適化関数は、従来手法で用いられている残差項に、グリッドポイントの空間的位置関係を考慮した罰則項を加えることで定義される。罰則項は水平方向に課すものと深さ方向に課すものとに分かれており、水平方向には隣接グリッドの速度差に関するl2ノルムに基づいた罰則を定義することで滑らかな速度構造を表現する。この罰則項はスムージング項として地震波トモグラフィで広く用いられている罰則の形である。そして深さ方向に対してはスパース正則化を応用し、深さについて見た平均速度勾配にl2ノルムのl1和に基づいた形の罰則を与える。この罰則は深さの速度変化に区分線形的な傾向を与え、急峻な速度変化に対応することで不連続面の検出を図るものである。
本発表では、防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netで観測された初動走時データ(気象庁一元化処理震源)から、静岡県近郊の地下速度構造を推定する地震波トモグラフィの実例を紹介する。本実験を通して、従来法やスパース正則化を用いない場合と比較し、少ないデータ数で不連続面を自動的に検出出来るという提案手法の特長が確認される。

© The Seismological Society of Japan

Detection of deep low-frequency earthquakes by matched filter technique using the product of mutual information and correlation coefficient

*Ryo KURIHARA[1], Aitaro Kato[1], Sumito Kurata[2], HIromichi Nagao[1,2]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo

マッチドフィルター法は、深部低周波地震のような微小地震の検出によく用いられる手法である。従来の手法では、テンプレート地震の波形と観測データの間の相関係数を計算し、その総和を基準として、閾値を超えた場合に検出となる。しかし、従来の方法では地震観測点が少ない場合には検出精度が大幅に低下するという欠点があった。本研究では、テンプレート波形とターゲット波形の類似性を測定するために、CCに加えて相互情報量を採用し、その積を基準とすることにより、1つの地震観測点のみでも深部低周波地震を精度よく検出することに成功した。まず、人工ノイズと深部低周波地震の波形からなる合成データセットに対して、相互情報量と相関係数の積を計算し、その時間推移を調べた。その結果、ノイズデータとして非周期的なノイズであるガウシアンノイズを利用した場合、周期的なノイズである正弦波ノイズを利用した場合の両方のケースについて、ノイズ部分には高い値を示さず、地震信号に対応する明確なピークを示すことがわかった。次にこの手法を日本で最も活発な火山の一つである霧島火山の観測データに適用したところ，2010年12月のデータから354の深部低周波地震が検出された。利用した観測点は防災科学技術研究所Hi-netのN.SUKH観測点である。この期間には気象庁のカタログの深部低周波地震はわずか2つしか検出されていない。今回構築した深部低周波地震のカタログは、従来のマッチドフィルター法（火山近傍の6観測点の相関係数の和を用いる方法）で得られたものと同様の時間的挙動を示している。提案された手法は、従来の方法で構築されたカタログに含まれる地震の約80%を識別することに成功した。相関係数と相互情報量の積を用いて検出した結果では、1観測点で相関係数のみ、相互情報量のみを用いて検出を行なった場合に比べても一致度が高い。これらの結果は、提案した手法が1つの地震観測点のみを用いて、深部低周波地震の正確なカタログ作成に大きく貢献できることを示唆しており、強い信号が少数の観測点でしか観測されない微小な地震の検出や観測網の網羅性が低い地域などでの検出に利用できると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

l_1 trend filtering based detection of short-term slow slip events from a GNSS array in southwest Japan

*Keisuke YANO[1], Masayuki Kano[2]

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University

1. 概要
高密度の測地学的観測の拡充により様々な沈み込み帯においてスロースリップイベント（SSE）が発見された。これらのSSEは、沈み込み帯における応力の解放と蓄積を理解するための重要な手がかりである。しかし、継続時間が短い短期SSE（S-SSE）は、目視できるほどの変位を伴わないことが多く、S-SSEの発生をできるだけ正確に把握するためには、高精度の自動検出法が必要となる。本研究では，スパース推定の一種であるl1トレンドフィルタリングとp-値の統合を用いて、Global Navigation Satellite System(GNSS)アレイの観測データからS-SSEを自動検出する手法を提案する。提案手法は，S-SSEの開始候補点を見つけるためにl1トレンドフィルタリングを利用し、検出の信頼値を得るためにp-値の統合を利用する．人工データによる双子実験では、赤池情報量規準(AIC)に基づく自動検出法と比較し、本手法が誤検出をほとんど起こさずにほぼすべてのイベントを検出できることを示した。さらに，提案手法を、西南日本四国西部の39のGNSS観測点の日次変位に適用し、提案手法によりすべての既知のS-SSEを検出するだけでなく、新たなイベントも発見した。これらの新検知イベントについて低周波微動との共起性やベイズ的逆解析の結果を議論する。
2. 提案手法
提案手法は、トレンドフィルタリング・隣接観測点を用いた検定・検定結果の統合を段階的に行う．図1は提案手法の概要図を表している。まず、l1トレンドフィルタリング(Kim, et al., 2009)により観測系列に区分線形関数を当てはめる。当てはめた関数の節点情報を集めて検定を行う。最後に複数の観測点での検知の疑わしさを表す検定のp-値を統合する．l1トレンドフィルタリングは、高次全変動正則化とも呼ばれるスパース推定の手法であり、与えられた入力の中に潜む区分多項式関数を精度良く推定することができる。正則化の度合いを表すハイパーパラメータはMallowsのCp規準を用いてデータから決定することができる。後続する検定では，l1トレンドフィルタリングで得られた区分点を利用する。提案手法の精度検証のため、2004年4月1日からの2年間における四国西部のGNSSデータとこのデータから生成した人工データを利用し、解析においては二次元の変位データをアムール海プレートのフィリピン海プレートへの沈み込み方向に射影して利用した。
3. 結果
人工データを利用した比較によって，以下のことが分かった．AICの空間平均は窓幅によってイベント見逃し率・ノイズ誤検知率が変化する一方，提案手法は誤検出をほとんど起こさずにほぼすべてのイベントを検出できることが確認された。提案手法を実データに利用し、全ての既知のS-SSEを検出できるだけでなく新たな検知をいくつか発見した。これらの検知についてKato and Nakagawa (2020)のカタログを用いた低周波微動との共起性 (図２) およびMCMCを用いた逆解析の結果(図３)について報告する。

© The Seismological Society of Japan

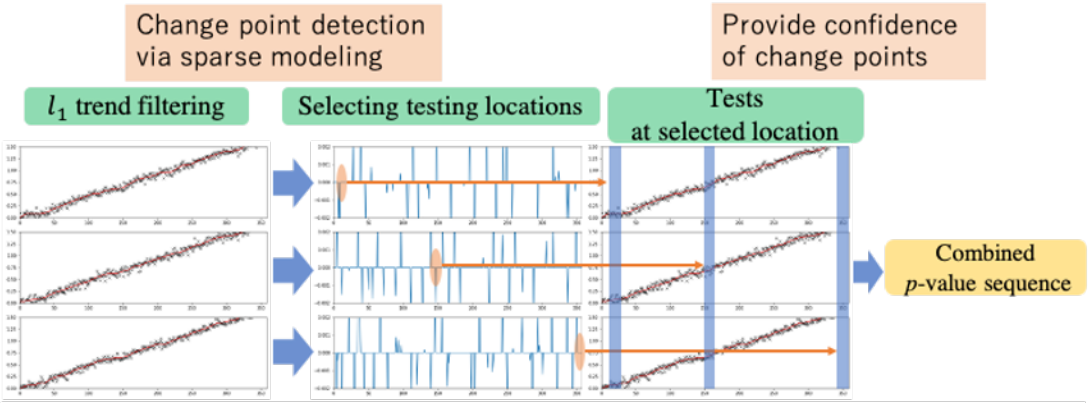


図 1：提案手法の概要図

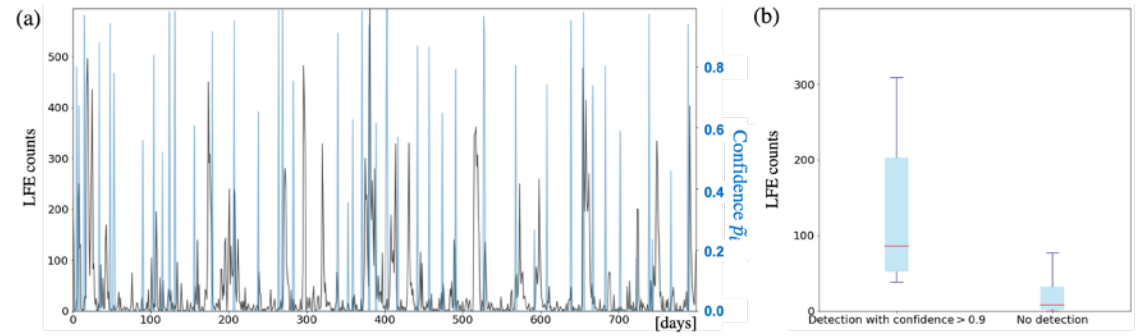


図 2： (a) 提案手法の検知確からしさ(青線)とKato & Nakagawa (2020)カタログの低周波微動の日次平均(黒線)。(b) 検知日±3日と検知なし日の低周波微動数の箱ひげ図。

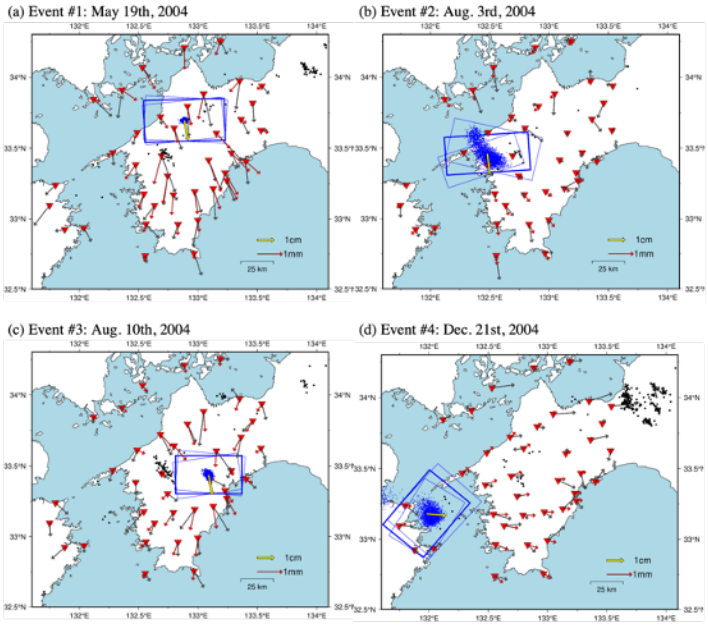


図 3：新検知の逆解析例：観測点(赤逆三角)、断層位置の事後標本(青点)、断層の大きさ(青四角)、観測すべりベクトル(黒矢印)、事後平均に基づくすべりベクトル(赤矢印)、微動震源(黒点)。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

AM-2

chairperson:Hiromichi Nagao(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

[S23-07] [Invited] Some problems associated with Bayesian inversion

○Yukitoshi FUKAHATA[1] （1.RCEP, DPRI, Kyoto University）

11:00 AM - 11:20 AM

[S23-08] [Invited] Nonlinear inversion of geodetic data based on Bayesian statistics

○Junichi Fukuda[1], Kaj M. Johnson[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University）

11:20 AM - 11:40 AM

[S23-09] [Invited] A Bayesian framework for Earthquake Early Warning

○Stephen Wu[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）

11:40 AM - 12:00 PM

[S23-10] Relative probability of ground motion level revealed from the extreme value statistics applied to a continuous seismogram obtained before and after a mainshock.

○Kaoru SAWAZAKI[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

[Invited] Some problems associated with Bayesian inversion

*Yukitoshi FUKAHATA[1]

1. RCEP, DPRI, Kyoto University

ABICを用いたインバージョンは難しいと言われる。解析者の直感に反する過大あるいは過小な超パラメタの値、即ち不適切な解が、ABIC最小の規準によってしばしば選ばれてしまうためである。しかし、そのような解析者の直感に反する解が得られる原因は、不適切なモデル化に起因することが普通である。そのため最近は、"Bad modelling leads to a bad result. A bad result suggests bad modelling." という標語を掲げている。この不適切なモデル化の問題ついて、モデル誤差に起因する共分散 (Yagi & Fukahata, 2008, 2011, GJI) など誤差の取り扱いの重要性については広く認識されてきたと思う。そこで、本講演では、それ以外のベイズインバージョンにまつわるモデル設定の問題について取り上げる。
例えば、解空間の設定は一般に難しい問題である。狭く取ってしまうと適切な解が選べなくなる一方、過大に取ってしまうとモデルの自由度が高くなり過ぎて、これまた適切に解を構成することが難しくなってしまうからである。先験情報は、”主観確率”とも呼ばれるくらいだから、解析者が主観に基づいて自由に選んで構わないという考えがあるようだが、そうではない。先験情報にもやはり適切なものと不適切なものとがあり、不適切な先験情報を用いると、解が歪められるなどといった問題が生じる。基底関数や境界条件の選択も軽視されることが多いが、適切に解を推定するためには見過ごすことができない要因である。こういった内容について、具体的な解析事例も交えて説明する。

© The Seismological Society of Japan

[Invited] Nonlinear inversion of geodetic data based on Bayesian statistics

*Junichi Fukuda[1], Kaj M. Johnson[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University

GNSSやInSAR等の測地データを用いて地震現象に関連した地殻変動の変動源を研究するためには、フォワードモデルのパラメータを推定する逆（インバージョン）解析を行う必要がある。測地データに対する逆解析の方法は、目的関数の最小化により最良のパラメータを推定する最適化と、ベイズ統計学に基づきパラメータの事後確率分布を推定するベイズ推定に大別できる。ベイズ推定の枠組みでは、ベイズの定理に基づき、逆問題の解である事後確率分布を推定する。ベイズ推定の利点として、パラメータの不確実性やトレードオフを事後確率分布に基づき定量化できることや、事前情報を解にどの程度反映させるかを決めるハイパーパラメータを客観的に決定できることが挙げられる。しかし、ベイズ推定は最適化に比べて一般に計算コストが高いことが欠点として挙げられる。

断層すべり分布を推定するインバージョンなどの線形の逆問題では、事後確率分布がガウス分布であれば、最小二乗法を用いて事後確率分布を解析的に得ることができる。このような問題は取り扱いが容易で計算コストも低いため、ベイズ推定は広く使用されてきた。一方、非線形の逆問題に対するベイズ推定では、事後確率分布を得るためにマルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法などの数値的な手法が必要となる。MCMC法は近年、測地データの逆解析に広く用いられるようになりつつあるが、この手法は多数回のフォワード計算を必要とするため、計算コストの高いフォワードモデルに適用することは困難である。

近年の地殻変動のモデリング研究では、断層面上の応力・摩擦やマントルの粘弾性応力緩和などを考慮した物理モデルを導入する動きが加速している。このようなモデルのパラメータを観測データから推定する問題は非線形の逆問題となり、フォワードモデルの計算コストが高いため、一般にMCMC法によるベイズ推定は困難である。このような例として、本講演では余効すべりと粘弾性緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルのパラメータを測地データ基づきベイズ推定した結果（Fukuda and Johnson, 2021）を示す。フォワードモデルでは、地震時の応力変化により余効すべりと粘弾性緩和が駆動され、余効すべりは速度依存の摩擦則、粘弾性緩和はBurgersレオロジーに従うと仮定した。また、余効すべりと粘弾性緩和の相互作用を考慮した。地震時のすべり分布、これに対する平滑化パラメータ、断層の摩擦パラメータ、海洋マントルとマントルウェッジのMaxwell及びKelvin粘性率を未知パラメータとし、これらをベイズ推定した。計算コストの高いモデルに対してベイズ推定を行うために、(1) 既存のフォワード計算の結果からVoronoi cellを用いて近似的な事後確率分布を構築し、(2) これをGibbs samplerでサンプリングし、(3) (2)で生成されたサンプルに対してフォワード計算を実施するというプロセスを反復して事後確率分布の推定を逐次的に改良するアルゴリズムを構築した。この手法を2011年東北沖地震の地震時及び地震後7年間の測地データに適用しパラメータのベイズ推定を行った。この結果から、比較的単純な物理モデルに対して測地データに基づくベイズ推定が可能であることが示された。今後、より現実的なモデルに対するベイズ推定を行うためには、できる限り少ない回数のフォワード計算で高次元の事後確率分布を推定できる手法の開発が重要となる。

© The Seismological Society of Japan

[Invited] A Bayesian framework for Earthquake Early Warning

*Stephen Wu[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics

Earthquake early warning (EEW) systems are designed to rapidly analyze real-time seismic data and report occurrence of earthquakes before strong shaking is felt at a site. EEW has been implemented in many seismically active regions around the world, yet there are still many challenges to be solve in order to achieve faster and more accurate strong shaking warning. Two of the key challenges of EEW include: (1) prediction of fault rupture using only the first few seconds of seismic wave data is highly uncertain, and (2) existing ground motion prediction equations that are computationally fast enough for EEW are highly uncertain. A natural solution to handle these uncertainties is to apply a fully Bayesian framework to EEW, but the typically high computational demand in Bayesian inference has been a bottleneck. In this presentation, I will introduce multiple attempts to design efficient EEW algorithms based on a Bayesian framework, including the seismic source inversion problem, ground motion prediction problem, and decision-making of emergency response under different source of uncertainties.

© The Seismological Society of Japan

Relative probability of ground motion level revealed from the extreme value statistics applied to a continuous seismogram obtained before and after a mainshock.

*Kaoru SAWAZAKI[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震の直後には地震カタログの品質が低下し、地震カタログに基づく地震活動予測が困難となる。そのため、カタログによらず、地震計記録を直接解析することにより余震による最大振幅を予測する手法が近年提案されている。この手法では、連続地震動記録の区間最大振幅（等時間間隔ごとの最大振幅）が極値分布の一種である非定常Frechet分布にしたがうことを利用し、極値統計解析を用いて揺れの超過確率を予測する。区間最大振幅は地震波の重なり合いの影響をほとんど受けないため、本震発生から数時間以内でロバストな予測が可能となる。さらに、この手法は大地震後に限らず普段の地震動記録にも適用できると考えられ、対象観測点における揺れやすさの「平常時からの倍率」を予測することもできる。平常時からの倍率は発生確率よりも体感的にわかりやすい指標であるため、地震情報を提供する際に有用と考えられる。本研究では、極値統計解析に基づく予測手法を2008年岩手・宮城内陸地震（M_J7.2）2018年大阪府北部の地震（M_J6.1）、2021年福島県沖の地震（M_J7.3）の前後におけるHi-netの連続地震動記録（強震動については併設のKiK-net記録を使用）に適用し、本震後に任意の値以上の揺れが生じる確率が平常時と比較してどれくらい増加したかを調査した。

適用した極値統計解析の手法は主にSawazaki (2021)に基づく。本震後1時間ごとに24時間後までの期間について、非定常Frechet分布を1分毎の区間最大振幅に適用し、分布を規定するパラメータA（地震の活動度、震源距離、サイト増幅率などを反映）、p（地震活動の時間減衰を反映。大森ー宇津式のp値に相当）、m（最大振幅の規模別頻度分布を反映）を推定した。推定したパラメータを用いて、本震の4日後までの最大振幅の超過確率を計算した。このとき、パラメータの推定値だけではなく、その不確定性を予測に反映させるベイズ予測を採用した。平常時については、本震前半年間の連続地震計記録について半日ごとの区間最大振幅を計算し、同様の解析を行った。ただし、平常時には地震発生頻度が時間変化しないと仮定し、p値を0に固定した。また、Sawazaki (2021)では雑微動レベルを反映するパラメータx_{min}も同時に推定していたが、今回はこの値を本震前の雑微動レベルに基づきあらかじめ固定した上で解析を行った。

解析の結果、3つの本震はそれぞれ規模やメカニズムが異なり、観測点ごとに震源距離やサイト増幅率などが異なるにもかかわらず、いずれの地震、観測点でも、本震発生後数時間以内にロバストな予測を示した。例として図1aに、10^{-2}m/s以上の最大振幅（震度２から3相当。ただしHi-netは地中に設置されているため、地表ではこれを上回る揺れが生じる）が起こる超過確率の推移を、岩手・宮城内陸地震の3時間後時点で予測した結果を示す。本震後は大森ー宇津則にしたがい地震活動が減衰するので超過確率曲線は次第に緩やかになるが、それでも4日後までに10^{-2}m/s以上の揺れが起こる確率は36－91%と高い。実際には、N.ICEHとN.KGSH観測点で本震の4時間後に10^{-2}m/s以上の最大振幅を観測した。図1bは、本震が起こらなかった場合についての超過確率の推移予測である。本震前の期間については地震活動の定常性を仮定したため、超過確率はほぼ直線的に増加する。4日後までに10^{-2}m/s以上の最大振幅が起こる確率はいずれの観測点でも0.8%未満である。図1aと1bの確率の比を示した図1cは、超過確率の平常時に対する倍率の予測を表す。平常時からの倍率は、4日後時点でも90－220倍と高い水準を維持している。震源距離やサイト増幅率などを反映して、観測点によっても値の差が大きい。

同様の解析結果を大阪府北部の地震と福島県沖の地震についてそれぞれ図2、3に示す。大阪府北部の地震の規模は他の二つの地震より小さいため、超過確率の絶対値は3－16%と低い（図2a）が、近畿地方の普段の地震活動も0.14%未満と低い（図2b）ため、平常時からの倍率は20－200倍と高めに推定された（図2c）。福島県沖の地震は規模が大きく超過確率の絶対値は20－70%と高い（図3a）が、東北地方の普段の地震活動が0.2－2.2%と活発であるため（図3b）、平常時に対する倍率は10－110倍と今回の解析例の中では低く推定さ

© The Seismological Society of Japan

れた（図3c）。なお、図2、3で使用した８観測点のうち、福島県沖の地震におけるN.NMEH観測点以外では、10^{-2}m/s以上の最大振幅は4日後までに生じなかった。

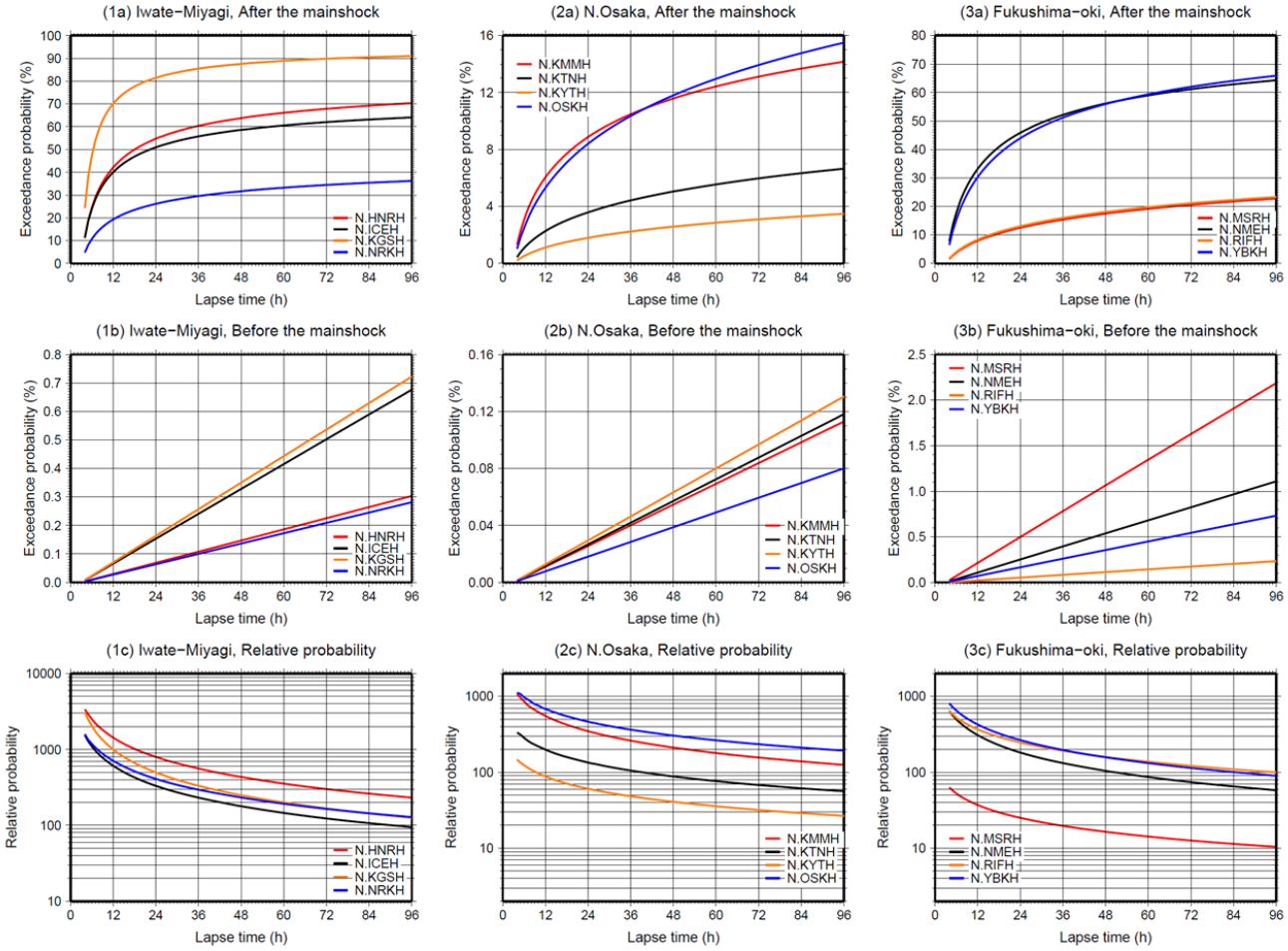


図1：(a)岩手・宮城内陸地震発生後４日間での最大振幅10^{-2}m/sを超える確率。予測時点は本震から3時間後。(b) 岩手・宮城内陸地震発生前半年間の地震動記録に基づく、本震が起こらなかった場合の4日間での最大振幅10^{-2}m/sを超える確率。(c)最大振幅10^{-2}m/sを超える確率の本震前に対する本震後の倍率。1aの曲線を1bの曲線で除して算出。異なる色の曲線は異なるHi-net観測点名（図中凡例）を表す。
図2：大阪府北部の地震における、図1a～1cと同様の図。
図3：福島県沖の地震における、図1a～1cと同様の図。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

PM-1

chairperson:Keisuke Yano(The Institute of Statistical Mathematics), Hisahiko Kubo(NIED)
Thu. Oct 14, 2021 1:30 PM - 2:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S23-11] The research of spherical time-space ETAS model

○Ziyao Xiong[1], Jiancang Zhuang[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）

1:30 PM - 1:45 PM

[S23-12] Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression

○Kosuke Morikawa[1], Hiromichi Nagao[2], Shin-ichi Ito[2], Yoshikazu Terada[1,3], Shin'ichi Sakai[2], Naoshi Hirata[2,4] （1.Osaka Univ., 2.Univ. of Tokyo, 3.RIKEN, 4.NIED）

1:45 PM - 2:00 PM

©Seismological Society of Japan

The research of spherical time-space ETAS model

*Ziyao Xiong[1], Jiancang Zhuang[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics

The widely used space-time ETAS (epidemic-type aftershock sequence) model was developed by Ogata (1998). This model successfully explains foreshocks and high order aftershocks in earthquake sequences and provides a very effective tool for seismic activity analysis. However, this space-time ETAS model is only suitable for the study within a small space range. When the space range is large, since the earth is a sphere, the simulation results of the model will produce errors. In this study, we reformulate the model from its planar version to a spherical version, to analyze and forecast global seismicity or seismicity in high latitude regions. The new model is verified by applying it to the global CMT catalogue. The results show that the new model can simulate the global seismicity variation well. It provides support for better modeling of seismic activities and seismic interactions in global regions.

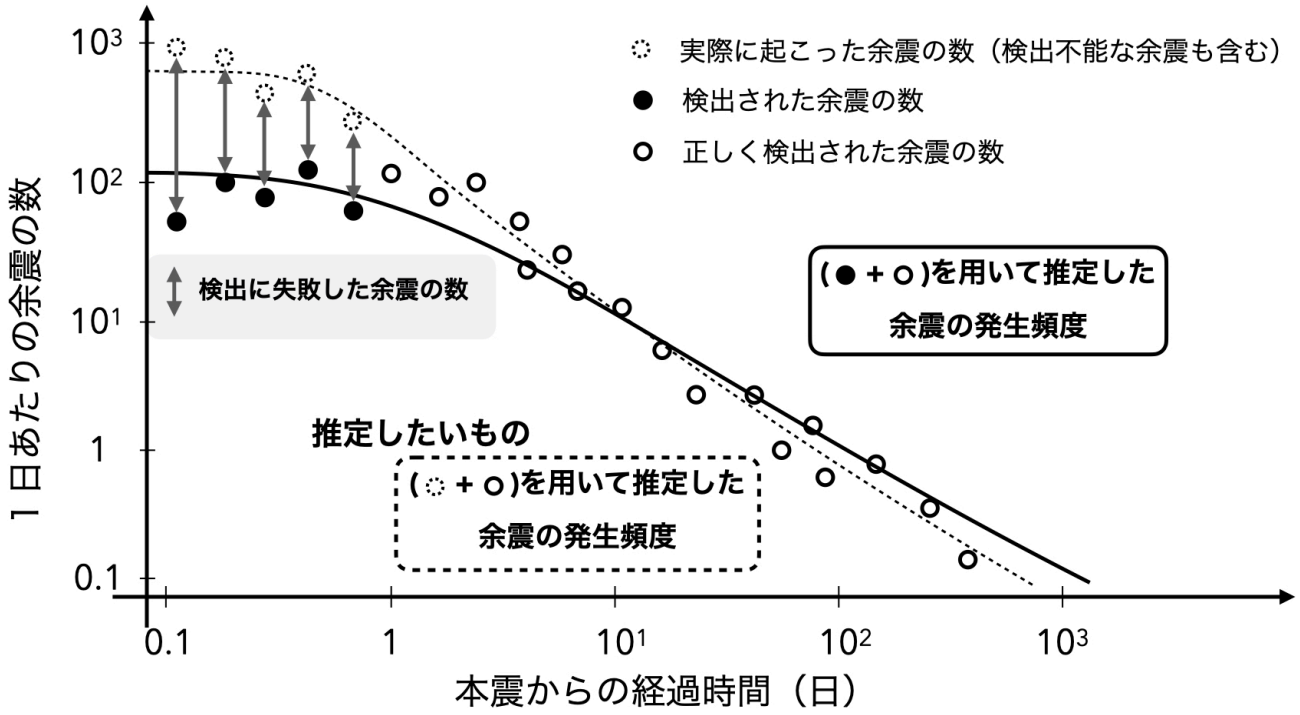
© The Seismological Society of Japan

Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression

*Kosuke Morikawa[1], Hiromichi Nagao[2], Shin-ichi Ito[2], Yoshikazu Terada[1,3], Shin'ichi Sakai[2], Naoshi Hirata[2,4]

1. Osaka Univ., 2. Univ. of Tokyo, 3. RIKEN, 4. NIED

本震発生直後は非常に多くの余震が発生する．余震の時間に関する統計則として，大森・宇津則やETASモデル，規模に関する統計則として，Gutenberg-Richter則が知られている．これらの統計則を規定するパラメータをデータからいち早く推定することで，余震発生の時間・規模に関する情報を迅速に把握し，今後の防災へ生かすことが可能となる．
しかし，本震発生直後は地震計のSN（信号対雑音）比が著しく悪化するため，すべての余震を検出することは難しい．また，検出された余震データのみから余震分布を推定すると，図のように推定される余震分布に大きなバイアスが生じる．
そこで余震検出確率をモデル化し導入することで，検出された余震データから正しい余震分布の推定を行う．``未検出の余震"は実際には観測されないため，検出された余震に対する条件付き分布から尤度関数を構成する．その際，検出確率を構成する未知関数に対しガウス過程回帰のアイディアを応用し，事前分布としてガウス過程を用いることで，従来手法よりも表現力が高い余震分布のノンパラメトリックベイズ推定手法を開発した．ガウス過程回帰は表現力が非常に高いことが知られており，ある条件下では実際深層学習と同等の性能を持つことが知られている．さらに点推定だけでなく，従来推定が困難であった余震検出確率及びパラメータの不確実性および予測分布まで推定可能となる．また，データ拡大法とギブスサンプリングを組み合わせることで，近似を必要とする複雑な最適化を避け，サンプリングによるパラメータの推定手法を確立した．実際の地震データに対する本手法の適用結果は当日報告する．



© The Seismological Society of Japan

Room B | Special session | S22. Advances in Seismology using AI

PM-1

chairperson:Hisahiko Kubo(NIED), Keisuke Yano(The Institute of Statistical Mathematics)
Thu. Oct 14, 2021 2:00 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S22-01] Construction of Convolutional Neural Network to Detect Deep Low-Frequency Tremors from Seismic Waveform Images

○Ryosuke KANEKO[1,2], Hiromichi NAGAO[2,1], Shin-ichi ITO[2,1], Kazushige OBARA[2], Hiroshi TSURUOKA[2] （1.Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

2:00 PM - 2:15 PM

[S22-02] Feature Extraction of Earthquake Time-Series Data by Dynamic Mode Decomposition

○Ryota Kikuchi[1], Hisahiko Kubo[2] （1.Kyoto University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

2:15 PM - 2:30 PM

[S22-03] Application of Bayesian Optimization to Black-Box Optimization Problem in Seismology: An Example of Centroid Moment Tensor Inversion

○Hisahiko KUBO[1], Keisuke YOSHIDA[2], Takeshi KIMURA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Tohoku University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S22-04] CMT Data Inversion Using Gaussian Processes

○Tomohisa OKAZAKI[1], Yukitoshi FUKAHATA[2] （1.RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2.Kyoto Univ. Disaster Prevention Research Institute）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Construction of Convolutional Neural Network to Detect Deep Low-Frequency Tremors from Seismic Waveform Images

*Ryosuke KANEKO[1,2], Hiromichi NAGAO[2,1], Shin-ichi ITO[2,1], Kazushige OBARA[2], Hiroshi TSURUOKA[2]

1. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

深部低周波微動は高感度地震観測網（Hi-net）の整備をきっかけに初めて観測的に見出された現象[1]であり，発見以降多くの研究によって通常の地震との関係性が示唆されている．一方で，微動に関するデータは直近の約20年分しか存在せず，その特性をより深く理解し数十年～数百年周期で発生する巨大地震の予測などへ活用するためには，さらに過去まで遡ってデータを収集することが重要である．

現在は地震計で観測された振動を高精度なデジタルデータとして記録するシステムが用いられているが，約50年前は振動に応じて動くペンによって波形を記録紙に連続的に書き記していた．このような古記録は，過去に発生した地球内部起源の振動現象を研究する上での貴重な情報源であり，東京大学地震研究所では和歌山地域に展開されている観測点の古記録をスキャンし画像データとして保存する研究が行われている[2]．古記録画像から微動検出を行う場合，微小な微動波形をデジタイズすることは非常に困難であるため，現在のデジタルデータに対して用いられている検出手法を直接適用することはできない．また，古記録の数は膨大であるため，専門家の目視によって個々に検出することは非現実的である．そのため，古記録画像から効率的に微動検出を行う画像処理手法が必要である．

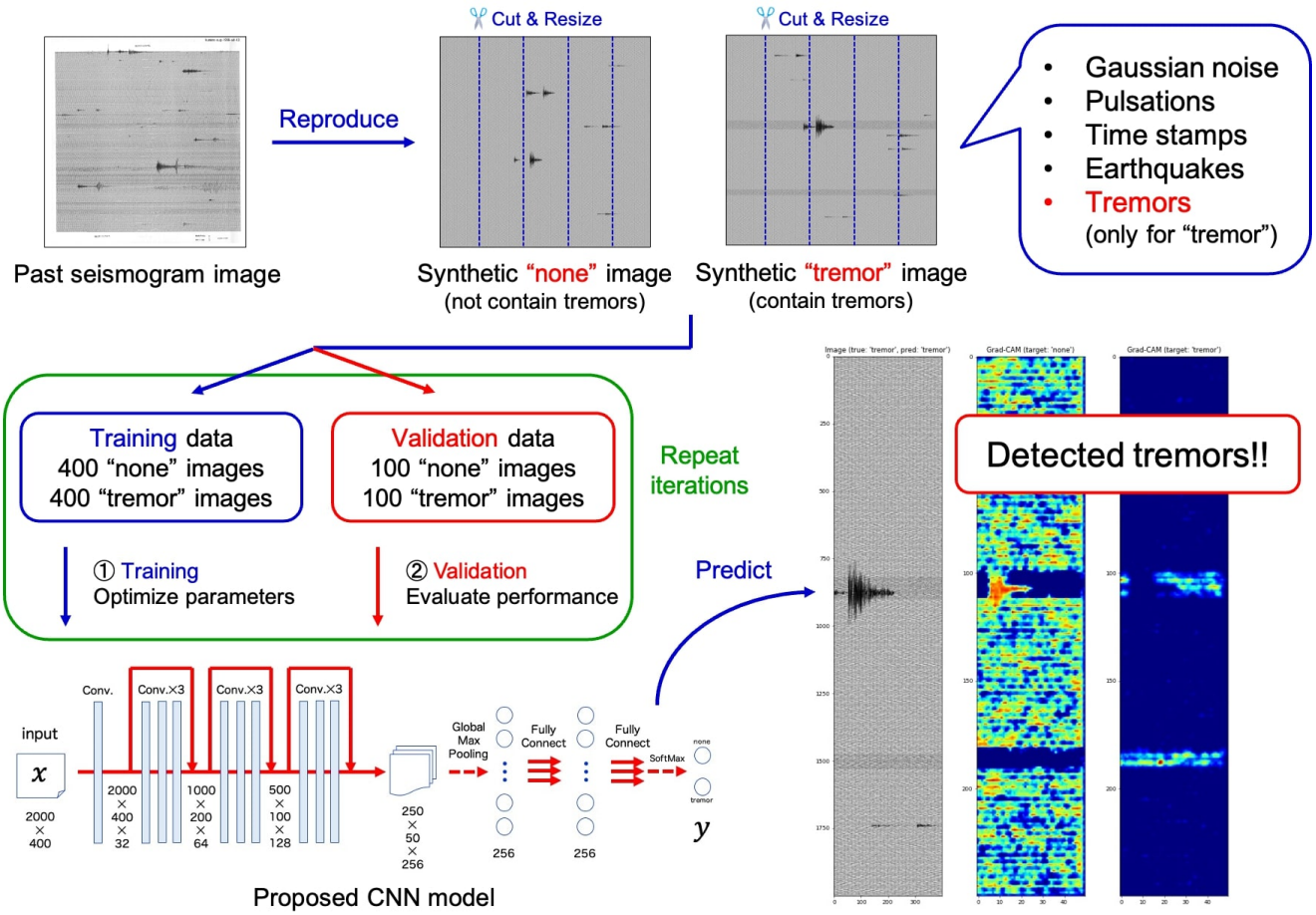
本研究では，画像認識に特化した深層学習手法の一つである畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた手法開発に取り組む．CNNモデルは，予め正解が分かっている教師データを学習することによって，モデル内部のパラメータを自動で調整し対象の識別が可能になる．今回の場合，微動カタログ[3–5]をもとにHi-netの記録を教師データとして用いることができるが，実データに含まれる多くのノイズが妨げとなって学習が上手く進行しない可能性がある．そこで，これまでの研究[6]では，古記録画像をもとにした波形画像を人工的に作成しモデルを学習させる数値実験を行ってきた（画像参照）．その結果，学習済みモデルは地震や脈動とは区別して微動を認識できることが可能になった．また，教師データには各画像に微動が含まれるか否かのみを正解として与えたのにもかかわらず，モデルは画像内のどの領域に微動が含まれるかも正しく検出することができた．

本講演では，この数値実験の結果をもとにHi-netの実データを用いてモデルの学習を行った結果を紹介する．人工波形画像による学習済みモデルをファインチューニングに活用しモデルの構造にも改良を加えることで，ノイズを多く含む実データに対しても人工波形画像に対する結果と遜色ない性能を示した．

[1] K. Obara, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, 296, 1679-1681, 2002.
[2] K. Satake, H. Tsuruoka, S. Murotani and K. Tsumura, Analog seismogram archivesat the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Seismological ResearchLetters, 91(3), 1384–1393, 2020.
[3] T. Maeda and K. Obara, Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, Journal of Geophysical Research, 114(B10), 2009.
[4] K. Obara, S. Tanaka, T. Maeda and T. Matsuzawa, Depth-dependent activityof non-volcanic tremor in southwest Japan, Geophysical Research Letters, 37(13), 2010.
[5] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Activity of deep low-frequency tremor in southwest Japan (May, 2020 –October, 2020), Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction, 105, 397–401, 2021.
[6] R. Kaneko, H. Nagao, S. Ito, K. Obara and H. Tsuruoka, Convolutional neural network todetect deep low-frequency tremors from seismic waveform images, Trends andApplications in Knowledge Discovery

© The Seismological Society of Japan

and Data Mining (Lecture Notes in Computer Science,vol. 12705), 31-43, 2021.



© The Seismological Society of Japan

Feature Extraction of Earthquake Time-Series Data by Dynamic Mode Decomposition

*Ryota Kikuchi[1], Hisahiko Kubo[2]

1. Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

計測技術の発展およびコンピュータによる演算能力向上により、高密度な観測や多数回のシミュレーションデータを得ることが可能になった。得られた多次元時系列データは、現象を精密に再現する一方で、データ解析をする際に解釈や現象理解が困難になる可能性がある。高密度な観測や多数回のシミュレーションデータを活かすためには、データの背後に潜むダイナミクスや特徴構造を抽出するアルゴリズムが必要となる。 防災科学技術研究所では全国に約2100ヶ所の地震観測点を設置・運用しており、そのうち陸域の約1700ヶ所において強震計による観測を実施している。これらによる地震動データは，被害の原因の究明や震源過程解析など事後検証的に活用され，耐震工学や地震ハザード評価などを通じて将来の震災軽減に役立てられてきた。この情報より、高密度な観測点ごとのリアルタイムな震度情報を得ることができる。複数の観測点による空間的な特徴と時系列データによる時間的な特徴があり、地震現象を高度に理解するためには両者を適切に取り扱う必要がある。 多次元時系列データを解析する方法として、動的モード分解(Dynamic Mode Decompostion: DMD)が挙げられる。DMDは、流体解析の分野において、実験およびシミュレーションで得られた多次元時系列データの中から時空間的な特徴構造を抽出する方法として提案された。一般的に用いられる主成分分析(Principal Component Analysis: PCA)や固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition: POD)は、静的な情報に対する特徴抽出を対象としており、動的な特徴抽出には適さない。また、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)は、個々の観測点において動的な時間スペクトルを得ることができるが、空間全体の時間的な特徴構造を把握することには適用できない。DMDは、静的な空間モードだけではなく時間発展を考慮した動的モードの両方を抽出することができる。地震動データにおいても、時空間的な特徴を考慮した空間および動的モードを抽出することは、多次元時系列データからの現象理解の促進に貢献できる可能性がある。 本研究では、DMDを地震動の時系列データに適用し、地震イベントごとのケーススタディを実施することで、DMDの有用性を評価することを目的とする。

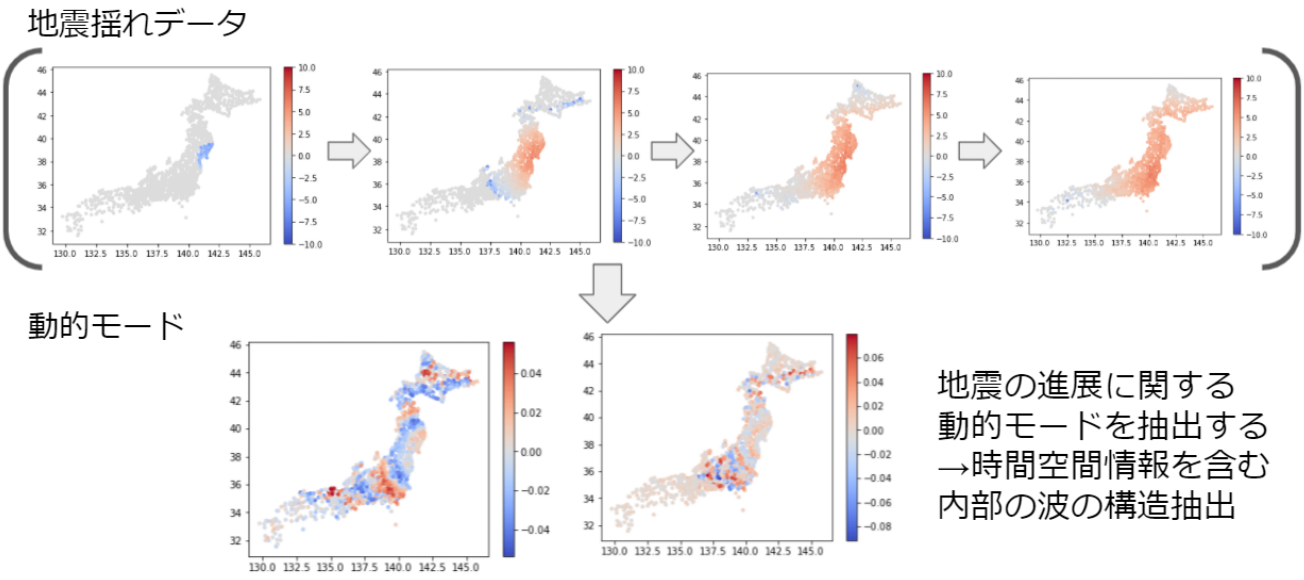


Figure: 地震揺れ時系列データから動的モード抽出の例

© The Seismological Society of Japan

Application of Bayesian Optimization to Black-Box Optimization Problem in Seismology: An Example of Centroid Moment Tensor Inversion

*Hisahiko KUBO[1], Keisuke YOSHIDA[2], Takeshi KIMURA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University

システムfへの入力xに対して出力yが得られる状況を考える（y=f(x)）。fは往々にして数学的に陽に書き下すことができない。具体的には、ある入力に対する出力を得ることはできるが、fの全体像に関係する情報（例えば勾配など）を得ることができない状態である。その場合のf はブラックボックス関数と呼ばれる。このようなブラックボックス関数fの出力を最大化（もしくは最小化）にする入力パラメータx*を見つける問題（ブラックボックス最適化問題）を考える。機械学習の分野における代表的なブラックボックス最適化問題として、ハイパーパラメータの最適化があげられる。ハイパーパラメータはデータの学習からは決定されないパラメータのことであり、学習前に設定する必要がある。ニューラルネットワークであれば中間層の層数や各層のニューロン数、活性化関数の種類、最適化手法の種類などがそれにあたり、機械学習アルゴリズムのパフォーマンスを最大限に引きだすには最適なハイパーパラメータの組み合わせを探索する必要がある。一般的に、ブラックボックス最適化問題に関しては、考えられるパラメータ空間をしらみつぶしに調べるグリッドサーチや、パラメータ空間をランダムに調べていくランダムサーチなどによる探索が行われてきた。しかしながら、それらの手法は計算コストが高く、特にパラメータ数が大きい場合には最適値にたどり着けないことがある。そこで、効率的な探索手法として、ベイズ最適化を適用することが近年多くなっている。ベイズ最適化は、可能な限り少ない試行回数でブラックボックス関数fの性質を解明し、それを最適化することを目的とした機械学習手法である。具体的には、（１）それまでに探索した入力とその結果として得られた出力の情報から、ガウス過程などに基づいて関数fを近似する代理モデルを構築する、（２）代理モデルに基づく獲得関数を最大化する探索点の候補を求める、（３）探索候補点での試行を行い、それに対する出力を新たに得る、（４）新たに得られた情報から代理モデルを更新する、という一連の流れを繰り返す。

ブラックボックス関数最適化問題へのベイズ最適化の適用は、機械学習分野だけにとどまらず、多くの科学分野で取り入れられつつある（例えば、Shields et al. 2021）。本研究は、地震学分野におけるブラックボックス関数最適化問題へのベイズ最適化の取入れを試みるものであり、具体的な事例としてセントロイドモーメントテンソルインバージョンにおけるセントロイド位置の推定問題を取り上げる。点震源仮定が成り立つとき、ある地点で観測される地震波形は点震源におけるモーメントテンソルの組み合わせと線形の形で結びつけることができる。そのため点震源の位置（セントロイド位置）が既知の場合には、モーメントテンソルインバージョンは線形問題となり、簡単に解くことができる。しかしながらセントロイド位置も同時に求めるセントロイドモーメントテンソルインバージョンにおいて、求めたいパラメータ（モーメントテンソルとセントロイド位置）と地震波形の関係は非線形となり、これまでの研究ではグリッドサーチによるパラメータ探索が行われてきた。この非線形問題は観測波形と理論波形の残差を最小にするパラメータを推定する問題であるが、波形残差の関数を最大にするパラメータを求めるブラックボックス関数最適化問題とみなすことができる。ここではセントロイド位置に関して水平方向および深さ方向の探索を行うセントロイドモーメントテンソルインバージョンを考える。

ベイズ最適化のツールとしてPreferred Networksによるオープンソースのハイパーパラメータ自動最適化フレームワークOptuna（Akiba et al. 2019）を用いた。Optunaはdefine-by-runスタイルのユーザAPIを有するpythonライブラリであり、各種のベイズ最適化アルゴリズムを備えているほか、様々な可視化や枝刈り、分散最適化の機能も有する。ベイズ最適化のアルゴリズムにはTree-structured Parzen Estimator (Bergstra et al. 2011, 2013)を用いた。

© The Seismological Society of Japan

実解析を模擬した理論テストを試行的に行ったところ、ランダムサーチに比べてベイズ最適化の方が、同じ試行回数でより真値に近いセントロイド位置を推定することができることが確認された。

© The Seismological Society of Japan

CMT Data Inversion Using Gaussian Processes

*Tomohisa OKAZAKI[1], Yukitoshi FUKAHATA[2]

1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kyoto Univ. Disaster Prevention Research Institute

地殻の応力状態を推定する応力インバージョン手法の一つであるCMTデータインバージョン(Terakawa and Matsu’ura, 2008)は、地震による応力解放が周辺の応力場に比例するという仮定の下で、CMT解から応力場の空間パターンを推定する。原論文では基底関数展開(Yabuki and Matsu’ura, 1992)によるインバージョン解析が適用された。

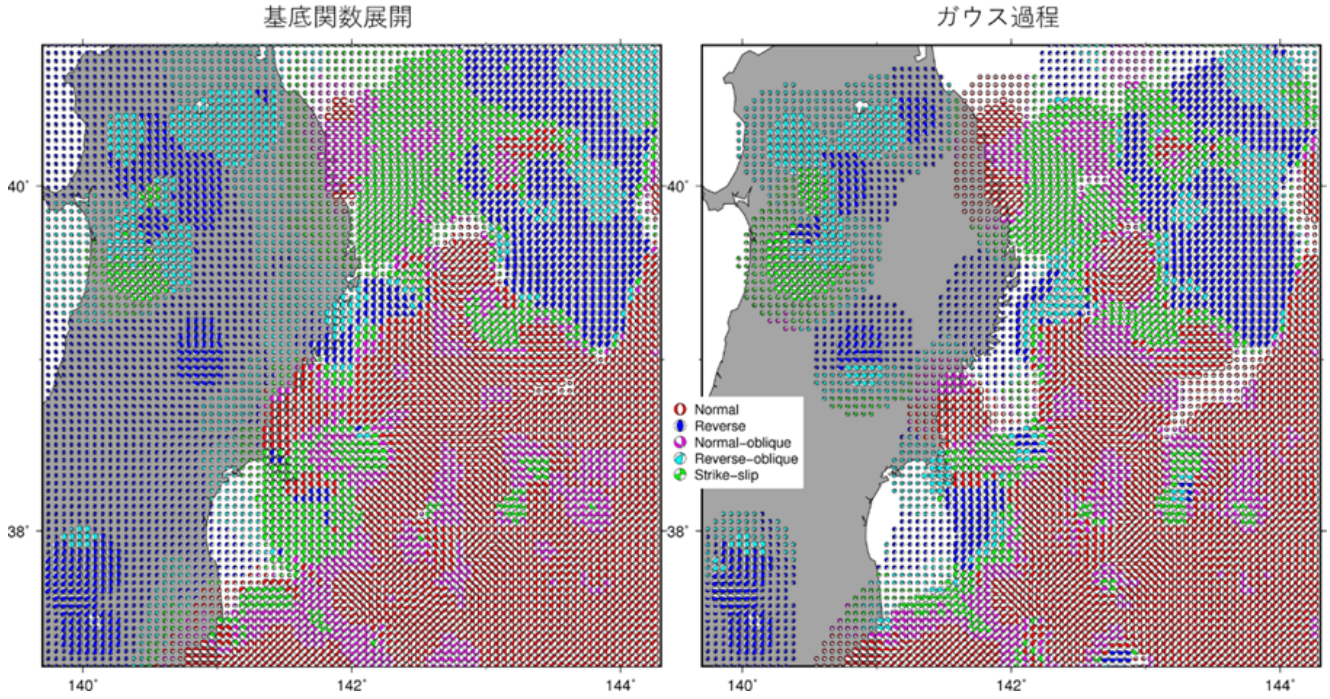
一般に基底関数展開では、モデル・パラメタ数が高次元データに対し指数的に増大し、計算量的に困難となる問題（次元の呪い）が知られている。回帰問題においては、モデル・パラメタが陽に現れないガウス過程回帰を用いることで、次元の呪いを回避できることが知られている。CMTデータは3次元空間内に分布するため、広域を解析対象とするとモデル・パラメタ数が顕著に増大し(Terakawa and Matsu’ura, 2010)、更に時間変化を取り入れた場合には、計算量的な困難が予想される。本研究では、ガウス過程によりCMTデータインバージョンを解くことで、この計算量的な困難の解決を試みた。

回帰問題ではデータと推定量が同一の物理量であるが、CMTデータインバージョンでは、データがCMT解である一方、推定量は応力場であるため、そのままではガウス過程が適用できない。そこで本研究では、(1)応力場の共分散関数からCMT解の共分散関数を導出、(2)応力場をCMT解の断層長0の極限として表現、という新たな定式化を開発することにより、この問題を解決した。

基底関数展開およびガウス過程を東北地方周辺のCMTデータに適用した。データの期間は、2011年東北沖地震後から2019年末である。その結果、(1)データのある領域では両手法は概ね調和的な結果を与えること、(2)データのない領域では、基底関数展開では周辺領域の推定値を内挿するが、ガウス過程では相関距離を超えると推定値が0に収束することを確認した（図1）。(2)の結果は、先験情報として、基底関数展開では滑らかな空間変化を課す一方、ガウス過程では平均0の事前分布を設定することに起因しており、ガウス過程を地球物理学データに適用・解釈する際の注意点といえる。さらに発表では、日本全国のCMTデータに対するガウス過程のインバージョン解析結果を示し、応力場の空間変化を概観する。

本研究では、基底関数展開を適用可能な問題設定において、ガウス過程による解析の動作確認および手法比較を行った。今後の展開としては、ガウス過程がより有効となる、時間軸を含む４次元CMTデータを解析することで、応力場の時間変化の抽出を試みる。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

AM-1

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo), Tatsuya Kubota(NIED)
Fri. Oct 15, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM B (ROOM B)

[S08-01] Slip and stress drop distribution models of the Tohoku-Oki earthquake: A mechanical implication on the near-trench large slip

○Tatsuya Kubota[1], Tatsuhiko Saito[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

9:00 AM - 9:15 AM

[S08-02] Spatiotemporal change in the inelastic strain and displacement fields due to aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

○Ayaho MITSUOKA[1], Satoshi MATSUMOTO[2], Yuhei YUASA[3] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Japan Meteorological Agency）

9:15 AM - 9:30 AM

[S08-03] Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake

○Yoshihisa IIO[1], Satoshi Matsumoto[2], Kyoto Kyushu Tokyo （1.DPRI, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanoloty, Kyushu University）

9:30 AM - 9:45 AM

[S08-04] Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?

○Ryosuke ANDO[1], Yoshihiro Kaneko[2], Howell Andy[4,3], Andy Nicol[4], Robert Langridge[3], Ian Hamling[3] （1.School of Science, University of Tokyo, 2.School of Science, Kyoto University, 3.GNS Science, 4.Canterbury University）

9:45 AM - 10:00 AM

[S08-05] Quasi-dynamic earthquake sequence simulation of the Median Tectonic line Fault Zone

○Kazunori Muramatsu[1], So Ozawa[1], Ryosuke Ando[1] （1.Department of Earth and Planetary Science, The university of Tokyo）

10:00 AM - 10:15 AM

[S08-06] Investigation of scaling laws for earthquake source parameters using simulations of dynamic rupture with a hierarchical patch structure

○Kazuki Masuda[1], Yoshihiro Kaneko[1] （1.Graduate School of Science, Kyoto University）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

Slip and stress drop distribution models of the Tohoku-Oki earthquake: A mechanical implication on the near-trench large slip

*Tatsuya Kubota[1], Tatsuhiko Saito[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

これまで2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）の震源過程の研究が広く行われ，さまざまな断層モデルが提案されてきた．なかでも，プレート浅部のすべりやすべり域の広がりの拘束には津波記録が大きく貢献した (e.g., Satake et al. 2013; Yamazaki et al. 2018 JGR)．津波データに基づく断層モデルによると，宮城沖から岩手沖にかけて大すべりがあり，海溝まで進展するすべりが推定されている．この特徴は多くの地震波・測地データに基づく断層モデルでも共通する (e.g., Wang et al. 2018 Geosphere)．このような高い精度で拘束されたすべり分布にもとづいて東北地震の発生に至った過程を定量的に考察することが，巨大地震の発生メカニズムの理解に重要である．

巨大地震の発生メカニズムの理解には，断層面上のすべり分布にもとづく運動学的な議論だけでなく，地震時に解消された歪みエネルギー量や応力解放（降下）量などに基づく力学的な考察 (e.g. Kostrov 1974; Noda et al. 2021 JGR)，および摩擦則による破壊シミュレーション (e.g. Hok et al. 2011) も重要である．断層面上の応力降下量は，すべり分布から得られる基本的な力学的物理量である．しかし，これまで報告されてきた断層モデルに基づいて計算された東北地震の応力降下分布には，さまざまなパターンがみられる (e.g., Brown et al. 2015 GRL)．なかには，運動学的 (すべり分布) 視点では不都合が無くても，力学的 (応力) 視点では不自然となる断層モデルもあり得る．地震発生を力学的に議論するには，力学的にも正確なすべり分布が不可欠である．本研究では，以上の点を踏まえて東北沖地震の断層モデルの推定を試みる．そして，断層モデルから期待される応力降下量の分布が断層モデルが力学的にもっともらしいか議論し，東北沖地震時に海溝で大すべりが発生した力学的原因を考察する．

手法・データ

解析には沖合の津波データを用いた (e.g., Maeda et al. 2011)．なかでも震源域直上で得られた水圧計データ(Kubota et al. 2021 GRL) は，過去の断層モデル推定の研究では使用されていない．

本解析では，3次元のプレート形状を正しく表現するため，Iinuma et al. (2016) を参考に，既存のプレートモデルを三角形の小断層要素に分割した．地殻変動の計算においては，水深を考慮して，プレートモデルから設定した三角要素の深さを一律 8 km 浅くした．さらに，東北沖地震の地表にまで進展した破壊を正しく表現するため，三角要素断層のうち，海溝と一致するもっとも浅い列の要素の上端深さを計算上の自由表面 ($z = 0$ km) に接するように補正した．

結果・議論

津波データのインバージョン解析の結果，これまで報告されてきたすべり分布と同様，宮城沖の領域に海溝軸まで進展する大すべりが推定された (図1a)．一方で，すべり分布から期待される応力変化 (応力降下) では，海溝軸そば付近では応力降下はほとんどゼロで，深部側の震源近傍に大きな応力降下域が得られた (図1b)．

本解析で得られた応力降下分布から，力学的な固着はプレート境界深部側でのみ起こり，浅部では起こっていないことが示唆される．一方で，これまで報告されてきた断層モデルに基づく応力降下分布には，海溝軸近傍の大すべりに対応して浅部に大きな応力降下をもち，一方で深部側での応力降下が小さくなるものも見られた (Brown et al. 2015, fig. S2)．この応力降下分布は固着が海溝軸の浅い場所でのみ生じていると解釈できるが，深さとともに増加する温度・圧力の条件を考慮すると，浅部でのみ固着が生じるとは考えづらい (e.g., Scholtz 1998; Lay et al. 2012)．深部側でのみ力学的な固着が生じる本研究のモデルが力学的にもっともらしいと言える．プレート境界浅部において大きなすべりが生じた原因は，浅部が力学的に固着していたのではな

© The Seismological Society of Japan

く，プレート境界深部の力学的な固着が浅部側の沈み込みが押し留め，すべり遅れを生じさせた (Herman & Govers, 2020 G3; Lindsey et al. 2021 Nature Geo) ためと解釈される．

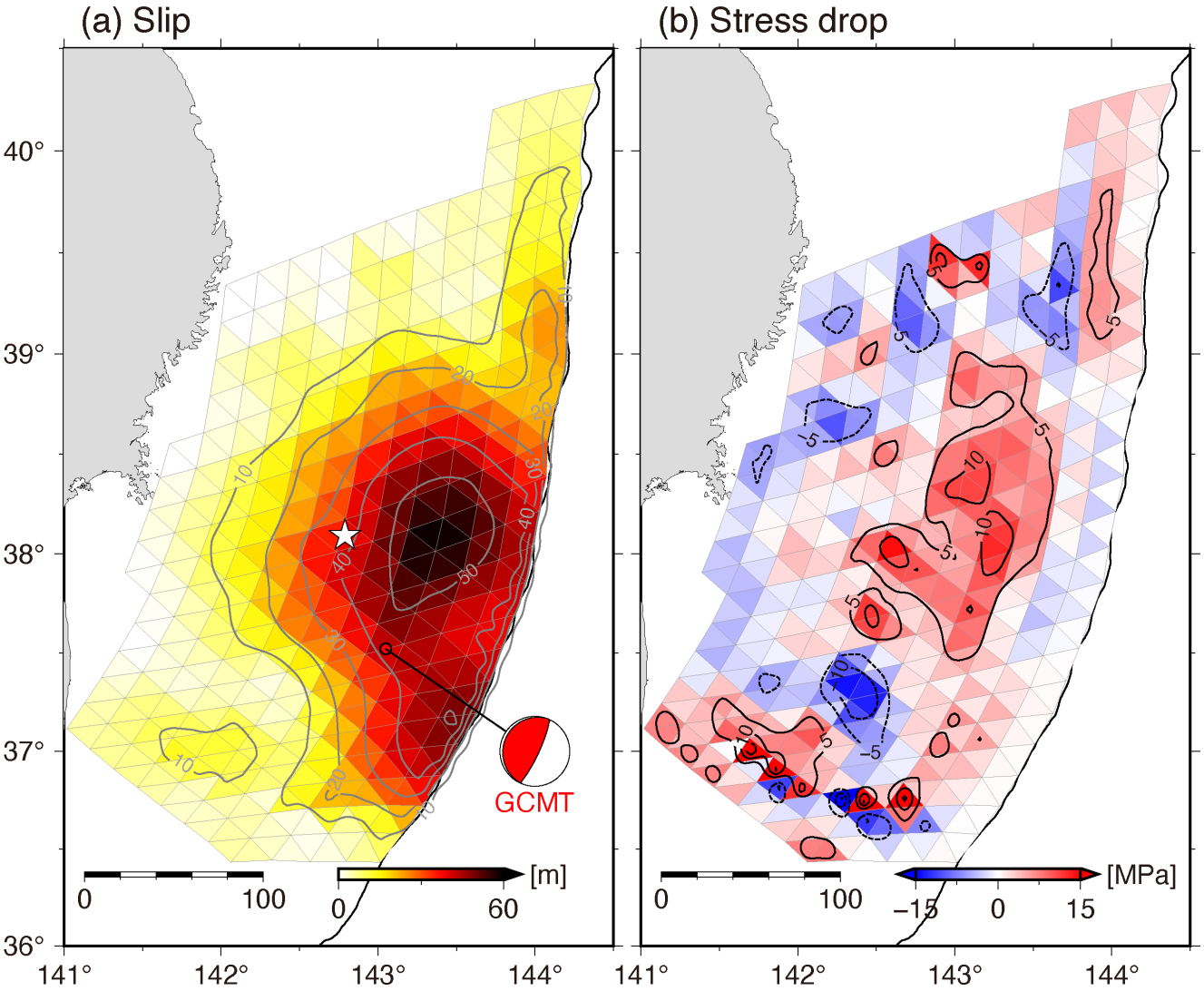


Figure. (a) 解析により推定された東北沖地震のすべり分布. 各要素断層上でのすべり量を色とコンター線で表す(コンター線間隔:10m). 白星は震央 (Suzuki et al. 2012 EPS) を示す. (b) すべり分布から計算した断層面上での応力降下の分布 (正:応力降下, 負:応力増加). コンター線の間隔は5MPa.

© The Seismological Society of Japan

Spatiotemporal change in the inelastic strain and displacement fields due to aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

*Ayaho MITSUOKA[1], Satoshi MATSUMOTO[2], Yuhei YUASA[3]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Japan Meteorological Agency

地震は地殻内に蓄積された弾性歪み(応力)を解放する現象であることを考えると、大地震発生後の余震活動は、大地震の断層運動によって蓄積された弾性歪みを、地震(非弾性変形)によって解消する活動と解釈することができる。地震発生後の地殻内での応力再配分、緩和過程を理解するために、余震活動による非弾性歪み場をとらえることは重要である。

大地震後の余震活動による非弾性歪み速度は、時間のべき乗則($d\varepsilon/dt \propto t^{-P}$)に従うことが知られており、これらの時間変化は、地震時に生じた弾性歪みへの応答として解釈することができる(たとえばNanjo et al., 2019; 楠城, 2007)。このべき乗則のべき指数–Pを本研究ではP値と呼ぶ(余震数の減少を示す大森係数 p 値とは異なる意味を持つ)。
対象期間を、熊本地震本震(Mj 7.3、2016年4月16日)後から2020年9月までと設定し、モーメント密度テンソルと非弾性歪みテンソルの関係(Noda and Matsu'ura, 2010)を用いて、非弾性歪み速度の時空間変化を調べ、P値を最小二乗法で推定した。P>1となる領域は、歪みが時間経過に伴い、減少する領域であるが、地震時断層(たとえばAsano and Iwata, 2016; Mitsuoka et al., 2020)の周辺に位置していた。一方で、P値が1より小さくなる(非弾性歪みが時間経過とともに増加する)領域が、地震時断層の南西側に確認された。このような領域は、最大前震・本震が発生したことによる弾性変形によって生じた応力ステップへの応答だけでは、この活動を説明できないことがわかる。

また、GNSS観測網の拡充により、詳細な地表面での変位場を得ることができる。対象期間の九州全域の変位場を求めると、およそ10 –30 cmの変位があることがわかった。さらにプレート運動などによる定常運動による変動を除くと、日奈久・布田川断層周辺、つまり2016年の熊本地震の震源域では、定常運動とは異なる数cmから10 cmほどの変位が推定された。

このような地殻内の非弾性歪みや地表変位の増加は、大地震発生後に、アフタースリップなどの余効変動の影響を受けていると考えることができる。そこで本研究では、地震後に見られた非弾性歪みと地表変位は、アフタースリップによって生じたと仮定し、このすべりを起こす断層モデルの推定を試みる。

アフタースリップを仮定すると、ある断層が非地震的にすべることによって周囲に弾性歪みが蓄積されると考えられる。
余震活動によって生じた非弾性歪みは、個々の地震の発震機構データから推定されるわけだが、その場に負荷された弾性歪みが非弾性歪み(余震活動)として即座に解消されるのか、時定数がどうなっているのか、また、空間的に応力の緩和過程が異なるのかどうか、という問題が重要になってくる。つまり、その場に負荷された弾性歪みをどのくらいの時間かけて解消するのか、また、観測された非弾性歪みがその何%に相当するのか、場所によってそれらは異なるのか、未知なままである。

一方で、地表面では与えられた弾性歪みがそのまま変位として現れると考えると、地殻内のアフタースリップ断層のすべりに対する地表変位を計算することで、データと比較することが可能であると考えられる。そこで、地表での変位をデータとし、Okada (1992)の矩形断層による弾性歪み変化、変位を用いて観測方程式を立

© The Seismological Society of Japan

て、最小二乗法でアフタースリップ断層面上のすべり分布を推定した。アフタースリップ断層は、日奈久・布田川断層それぞれで地震時断層(たとえばAsano and Iwata, 2016; Mitsuoka et al., 2020)を延長して設定した。その結果、最大で50 cm程度、地震時にすべった領域に加え、日奈久断層の深部延長部で大きいすべりを示す分布が得られた。

これは、地表変位が説明できるすべり分布であるわけだが、このアフタースリップ断層がすべることによって生じる歪み変化を、低P値が示された領域で計算し、地震によって解放された非弾性歪みと比較を行った。歪みテンソルの軸方向は有意に一致しないものの、正断層型、横ずれ型の歪み変化を生じることがわかり、これは観測された非弾性歪みの傾向と同じであった。また、非弾性歪みの大きさは、弾性歪み変化のおおよそ10%程度である結果が得られた。さらに詳細な断層すべりやそれが周囲に及ぼす歪み変化、P値との比較について議論する。

© The Seismological Society of Japan

Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake

*Yoshihisa IIO[1], Satoshi Matsumoto[2], Kyoto Kyushu Tokyo

1. DPRI, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanoloty, Kyushu University

1. はじめに
大きな地震が起こると余震が引き起こされる。 断層端での大きな静的応力集中により、大きな地震が起こることが予想されるが、実際に大きな地震が発生することはむしろ稀である。 2016年鳥取県中部地震の約10,000個の高精度のメカニズム解を解析して、余震震源に対する本震断層の水平端の位置を約200mの精度で推定することが出来た(Iio et al.,2021)。 その結果、余震は、断層の水平方向の端と延長部ではほとんど発生しないことが分かった。 この観測結果は、本震の前に断層の両端部で応力緩和が起こっていたことにより解釈可能である。 断層端の応力緩和は、本震の破壊を止めるとともに、大きな地震の続発を起こりにくくすると考えられる。
2.　結果と考察
　2016年10月21日鳥取県中部地震(Mj6.6)の余震域に、本震発生の翌日早朝から設置を開始した69点の高感度地震計および周辺の高感度定常観測点のデータを用いて、約2か月間に発生した余震の震源とメカニズム解を正確に決定した。それにより、断層の両端付近において、P・T軸とも、推定断層を境に方位が急変していることが分かった。また、断層南端の東側においては正断層型の余震が卓越しており、本震すべりによる正断層型の地震に対するΔCFSが正の領域と良く対応していることも分かった。推定断層を境としたT軸の方位の急変から「真の」断層面の位置を推定した。断層に直交する方向におけるT軸の方位分布を階段関数で近似し、その段差の位置に断層があると見なし、それらの位置を平滑化して断層面を推定した。この断層面を用いて、余震域の両端部付近において、正断層型の余震に対するΔCFSが最も大きくなる断層端の位置を求めた。本震のすべり分布は、InSARやGNSSデーから推定された断層モデル(Meneses-Gutierrez et al., 2019)を参考にして、矩形すべりの端からtaperをかける単純なものとした。その結果、断層南端の位置を200m程度の精度で推定することが出来た。
断層南端付近におけるP軸の傾斜角の分布と、正断層および本震と同じ横ずれ断層に対するΔCFSの分布を比較により、正断層型の余震の分布が、正断層に対するΔCFSの大きな領域とよく一致している一方、横ずれ断層に対するΔCFSの大きな領域では、横ずれ型の余震は非常に少ないことが分かった。このΔCFSは本震すべりによる応力変化によるものであり、地震前の応力場も考慮すると、本来は、断層端では本震と同様の横ずれ型の余震が圧倒的に起こりやすいはずである。
このことを説明する４つの可能性が考えられる。i) 断層端付近において、その規模に寄らず断層の強度が非常に大きい、ii) 地震前に、本震すべりの起こった領域のみに応力集中が発生していた、iii)　断層端において地震後に非弾性変形が起こった、iv)　地震前に断層端において応力緩和が起こっていた。i)の場合は、一般的には、断層端付近で余震活動が活発になる(例えば、Aki,1979)。ii)として想定されるのは、地震前に本震断層の周辺で非地震性すべりが発生していた場合である。しかし、非地震性すべりが発生していた場合、同じところで地震後に予効すべりが起こることが期待されるが、地殻変動の解析結果からはそのような変動は検知されていないし、予効すべりに伴うことが期待される余震の震源移動も見られていない(Iio et al., 2020)。また、山陰の地震帯は歪集中帯となっており、地震帯直下の下部地殻において数mm/年の非地震性すべりが検知されているが(Nishimura and Takada, 2017)、それによる応力集中は幅広いものとなり、震源断層だけに応力集中を起こすことは出来ない。iii)についても、地殻変動の解析結果では検知されていない。残されるのはiv)であり、断層端において、本震前に非常に長い時間スケールを持った非弾性変形が発生して応力緩和が生じていた可能性が考えられる。山陰の地震帯においては、満点観測網のデータを用いた地震波トモグラフィーにより、大きめの地震の余震域の両端に、系統的に低速度異常域が推定されている。この知見は、山陰の地震帯において、大きな地震の断層両端において、地震前に応力緩和が起こっていた可能性を示唆している。
文献　Iio et al., 2021, Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori

© The Seismological Society of Japan

earthquake, Communications Earth & Environment　DOI：10.1038/s43247-021-00231-6.

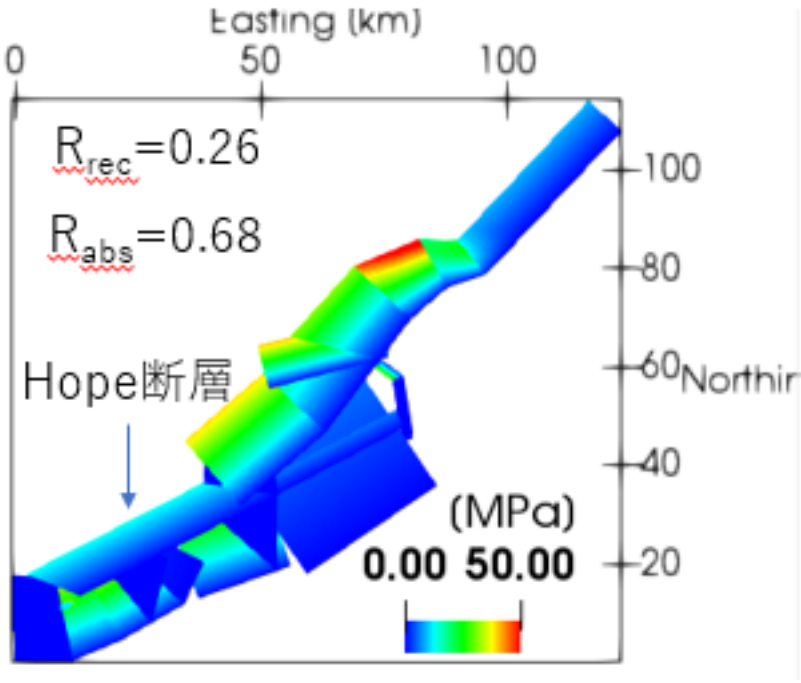
© The Seismological Society of Japan

Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?

*Ryosuke ANDO[1], Yoshihiro Kaneko[2], Howell Andy[4,3], Andy Nicol[4], Robert Langridge[3], Ian Hamling[3]

1. School of Science, University of Tokyo, 2. School of Science, Kyoto University, 3. GNS Science, 4. Canterbury University

The complex multi-fault rupture is observed in the 2016 Kaikoura (New Zealand) earthquake. Although the overall slip pattern was well explained by dynamic rupture simulations (Ando and Kaneko, 2018, GRL), a big question remains on the reason why the Hope fault was bypassed during the 2016 event. The Hope fault is one of the most active upper plate faults in the focal area, accommodating the relative motion between the Pacific Plate and the Australian Plate. In this study, we first test a hypothesis: The stress level of the Hope fault (see fig.) is lower than the surrounding faults due to the effect of the last event before 2016. A set of parameter studies shows that 70-80% lower stress level on the Hope fault leads to the passive partial slip resembling the observation of the 2016 event. So far, we do not exclude the possibility that the Hope fault is bypassed through a more complicated rupture path than that obtained in A&R (2018). To explore this hypothesis, we adopt the 3D fault geometry developed by Nicol et al. (in prep July 2021) to revise the geometry of the Point Kean and Papatea faults based on the aftershock distribution (Chamberlain et al., 2021).



© The Seismological Society of Japan

Quasi-dynamic earthquake sequence simulation of the Median Tectonic line Fault Zone

*Kazunori Muramatsu[1], So Ozawa[1], Ryosuke Ando[1]

1. Department of Earth and Planetary Science, The university of Tokyo

中央構造線断層帯（MTLFZ）上で生じた地震の記録は乏しく，MTLFZの構造およびMTLFZ上における地震の連動破壊過程は不明である．古文書の記録およびトレンチ調査（HERP,2017）などの地質学的な証拠から，MTLFZ上で起こった最新の地震は慶長地震（1596）であると推定されている．慶長地震では，少なくとも300kmの規模で，慶長伊予地震，慶長豊後地震，慶長伏見地震の3つの地震が連動して発生したことが示唆されているが，この一連の地震における破壊開始点とその伝播過程は断定されていない．Ikeda et al. 2018は慶長地震について，MTLFZの西端を破壊開始点として慶長豊後地震および慶長伊予地震が発生し，東方に伝播して慶長伏見地震を起こすケースと，四国北部の川上断層を開始点として西方に伝播したのちに慶長伏見地震が生じるケースを想定した．そして主応力軸の方向，傾斜角をパラメータセットとしてCoulomb応力変化を計算し，その正負から東西の双方向に伝播するケースを支持した．本研究では，MTLFZを10数個の深さ10kmの鉛直な矩形断層に分けて3次元モデル化し，準動的地震シークエンスシミュレーションを行った．0.25kmのセルサイズで各断層を離散化し，それぞれの要素は速度状態依存摩擦則に従い，諸摩擦パラメータは深さ依存せず一様とした．全断層面に一様なせん断応力速度を付加した場合，全セルの平均変位速度との比例関係が見られた．GNSSを用いて求められたMTLFZ周辺の区間における平均相対変位速度は9~10m/1000年，平均歪速度は10^{-7}/年（Nishimura et al. 2018）であるが，本シミュレーションでは，少なくともセル平均変位速度が1~15m/1000年となる範囲で，MTLFZの中央から西方に地震が伝播したのち，MTLFZの東側で中央から東に地震が連動することが再現された．代表的な例では，平均歪速度1.3×10^{-7}/年に対応する平均変位速度は5m/1000年，再来間隔は約3000年であった．今後は，現状の矩形断層が接続された滑らかでない断層モデルの改善や，摩擦パラメータの深さ依存性の設定，また四国周辺の応力分布の観測結果に則した非一様な広域応力場の考慮が必要である．

© The Seismological Society of Japan

Investigation of scaling laws for earthquake source parameters using simulations of dynamic rupture with a hierarchical patch structure

*Kazuki Masuda[1], Yoshihiro Kaneko[1]

1. Graduate School of Science, Kyoto University

地震破壊の成長過程とそれに伴う地震波の放射を理解することは、地震災害や減災のために重要である。Ide（2019）は、異なるマグニチュードの地震で、P波の発生から0.2秒以内の初期波形の類似性が観測されたことを、フラクタルに分布する断層パッチの階層構造で説明できるのではないかと提案した。本研究では、すべり弱化摩擦則に基づき、破壊エネルギーGcの階層構造を取り入れた断層上の自発的な動的破壊モデルが、地震の震源パラメータに関するいくつかのスケール法則を説明できるという仮説を検証する。このシミュレーションはスペクトル要素法で行われており、Aochi and Ide (2003)によって提案された効率的な計算手法を取り入れている。まず、破壊エネルギーGcの階層的なパッチで特徴づけられた一次元断層上で、幅広いマグニチュード（M1からM6）の地震のシミュレーションを行った。次に、計算した地震の震源パラメータに関する様々なスケール法則（地震モーメントと震源継続時間、マグニチュードと発生頻度の関係，モーメントレートの成長と時間，破壊エネルギーと地震性すべりなど）を定量化した。そして、モデルパラメータの値を変化させたときにこれらのスケール法則がどのように変化するかを分析した。予備的な結果として、階層的なパッチの大きさと個数の関係を変えると、スケール法則の一部に影響を与えることが示唆された。今回得られたスケール法則に影響を与える重要なモデルパラメータを特定し、このモデルを2次元断層に拡張するための取り組みを報告する。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

AM-2

chairperson:Akemi Noda(MRI), Kazutoshi Imanishi(AIST)
Fri. Oct 15, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-07] Plate locking along the Nankai Trough: A scenario for coseismic and post seismic ruptures

○Tatsuhiko SAITO[1], Akemi Noda[2] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Meteorological Research Institute）

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-08] Spatial and temporal variations in interplate coupling along the Tohoku-Oki plate boundary deduced from a new method using off-fault earthquakes and geodetic data

○Kazutoshi IMANISHI[1], Akemi Noda[2] （1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Meteorological Research Institute）

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-09] Deep volcanic low frequency earthquakes induced by spatio-temporal stress distribution in northeast Japan

○Genki OIKAWA[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1] （1.Tokyo Institute of Technology）

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-10] Estimate of the stress field in the region of the 2017 southern earthquake

○Hikari Nogi[1], Yoshihisa Iio[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

11:45 AM - 12:00 PM

[S08-11] Estimation of inelastic deformation using geodetic and seismic data: Application to Niigata-Kobe Tectonic Zone

○Akemi NODA[1], Tatsuhiko SAITO[2] （1.Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Plate locking along the Nankai Trough: A scenario for coseismic and post seismic ruptures

*Tatsuhiko SAITO[1], Akemi Noda[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Meteorological Research Institute

（はじめに）　運動を予測するためには，運動を引きおこす原動力やエネルギーを定量化することが重要である．プレート間巨大地震を引きおこす原因は，プレート間の固着によって蓄積する歪みエネルギーである (e.g., Savage 1969; Noda et al. 2021 JGR)．衛星測位データ解析によってすべり遅れ分布を推定し，それをもとに将来起こりうる巨大地震の規模や場所が予測されている (e.g., Watanabe et al. 2018; Baranes et al. 2018)．しかし，すべり遅れ域と力学的な固着域は同一ではない (e.g. Wang and Dixson 2004; Noda et al. 2018 JGR)．力学的に固着している箇所では，大きな摩擦力によって地震間に応力が増大し，歪みエネルギー蓄積の根本原因となる．一方，力学的固着が無い箇所でも，隣接した固着域によってすべり遅れが生じる (e.g., Herman et al. 2018)．このような領域では地震間の応力増加が無くても，地震時には隣接する固着の破壊のためにすべりを引き起こす．例えば，東北地震では宮城沖海溝付近は，応力降下がほとんど無いにもかかわらず，隣接深部に位置する力学的固着の破壊によって大すべりが起こっている（久保田・齊藤　本大会）．巨大地震の連動や半割れ破壊後の推移予測を行うために，地震を引き起こす原因となる力学的固着分布が重要である．本研究では，力学的固着の推定法を提案し，南海トラフの固着分布を推定する．さらに，結果をもとに想定しうる連鎖的な巨大地震発生と余効すべりのシナリオ例を示す．

（解析手法）　プレート間の剪断応力の蓄積速度が大きい箇所が，力学的に固着している箇所と考えられる．剪断応力として，プレート沈み込みによるslip方向の向きのtractionの成分を考え，以下の手順によって，プレート間剪断応力速度分布をGNSSデータ逆解析で推定する．プレート間剪断応力分布を水平拡がり60km程度の大きさの基底関数を約250個使って表現する．各基底関数による地表変形速度応答を次のように計算する．半無限均質媒質を仮定し，南海トラフプレート境界を大きさ一辺10km程度の三角要素5400個程度を使って表し，それぞれの三角要素のすべり速度に対するそれぞれの三角要素における剪断応力速度応答を計算する．このデータセットを使うことで，剪断応力速度基底関数に対応するすべり速度分布を逆問題によって得ることができる．そして，地表変位速度をすべり速度分布から計算する．この手順で剪断応力速度の基底関数による地表変形速度応答を得る．地表変形速度応答を使い，GNSSデータの逆解析から，プレート間剪断応力速度分布を推定した．

（力学的固着と連動破壊シナリオ）　プレート境界深さ~25kmより浅い箇所に4箇所（室戸沖，紀伊半島沖，熊野灘沖，東海沖）に顕著な力学的固着域を推定した．それぞれ，年間10kPa程度で剪断応力が蓄積されていく．特に，室戸沖の固着領域は広く，剪断応力蓄積速度が大きい．仮に，応力蓄積期間が100年ならば，これら固着域に1MPa程度の応力が蓄積する．固着域が破壊すれば，1MPa程度の応力降下をもつ巨大地震を引き起こす．一方，プレート境界深部や力学的固着が弱い箇所では，余効すべりが発生する可能性がある．　得られた固着分布から想定しうる破壊シナリオのうち，複数のプレート境界地震が連鎖的に発生する可能性を紹介する．まず，紀伊半島沖の固着が破壊することで，Mw 8程度の前震が発生する．この地震によって周囲の応力が増加する．前震すべり域周辺の応力をゆるやかに解消するようにして余効すべりが発生する．余効すべりはMw 8程度と前震と同程度の規模となるが，応力降下量が前震に比べて小さいために解消する歪みエネルギー（available energy）は，前震の3分の１程度となる．さらに，余効すべりにトリガーされ室戸沖の固着が破壊することで，Mw 8.3の本震となる．本震は前震に比べて3倍程度の歪みエネルギーを解消する．ただし，モーメント，解消する歪みエネルギーは，応力解消領域やすべり域の設定で変化する．

（さいごに）　本研究やNoda et al. (2021 JGR) は力学的な固着分布から，今後起こりうる巨大地震や連鎖する地震の破壊シナリオを想定した．しかし，摩擦則および背景応力に関して大きな不確定性があり，大地震や

© The Seismological Society of Japan

余効すべりが起きたときに，そのデータを使って，現在の考えやモデルの検証と修正をすることが重要である．あり得る複数の破壊シナリオを提示し，シナリオ作成時の仮定・条件を明確するなど，検証の準備をすすめていく．

© The Seismological Society of Japan

Spatial and temporal variations in interplate coupling along the Tohoku-Oki plate boundary deduced from a new method using off-fault earthquakes and geodetic data

*Kazutoshi IMANISHI[1], Akemi Noda[2]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute

1. はじめに

プレート境界における巨大地震の発生時期や規模を予測するためには、プレート境界の固着状態をモニタリングすることが重要である。通常は地殻変動データをもとに推定されるが、地震データも組み合わせた解析を行うことで、高い時空間分解能を持つ固着状態の推定が期待できる。本研究では、プレート境界の周辺で発生している地震（オフフォルト地震）がプレート間固着による応力変化に調和的に発生しているか否かを評価し、直近のプレート境界の固着状態を推定する方法を提案する。そして、この手法を東北沖プレート境界に適用した結果について報告する。

2. 手法

本手法の背景にある基本的な考え方は以下の通りである。

・応力場は、背景応力にプレート間固着による応力蓄積が加わったものと記述される。
・地殻内には様々な姿勢の既存クラックがあり、それらの多くが応力の臨界状態にある。
・背景応力に調和的なクラックでも破壊は生じるが、プレート間固着に起因する応力場（応力変化）に調和的なクラックが優先的に破壊する。

プレート間固着に起因する応力場から計算されるすべり角と断層面のすべり角との角度差（ミスフィット角）に着目すると、プレート間固着が継続する場合はミスフィット角の小さい地震が多く発生することが期待され、逆にゆっくりすべり等により固着が剥がれる場合は、ミスフィット角の大きい地震が多く発生することが期待される。従って、ミスフィット角の時空間平均を推定することで、直近のプレート間固着状態の変動を可視化することができる。

実際の解析手順は以下の通りである。

（1）プレート間固着により周辺域に作り出される応力テンソルを水平方向に0.1˚間隔、深さ方向に5km間隔で計算する。
（2）それぞれのメカニズム解の震源位置に最も近い位置の応力テンソルを用いて、ミスフィット角を計算する。この際、2つの節面のうち、小さい方のミスフィット角を採用する。
（3）空間方向に0.1˚間隔のグリッドを設定する。グリッドを中心とした半径75km以内、1年以内に含まれる地震を抽出し、ミスフィット角の平均値を計算する。

3. データ

データとなるメカニズム解は、防災科学技術研究所のF-net解（1997年1月～2021年7月）を使用した。デクラスタリング（Reasenberg, 1985）処理後、代表的なプレート境界地震のメカニズム解に対するKagan角を元にプレート境界型の地震を除去し、オフフォルト地震のカタログを作成した。また、プレート間固着に関しては、1998年3月から2008年2月のGNSSデータを用いて推定した。

4. 結果と解釈

本研究では2011年東北沖地震を挟む約24年間にわたる解析結果が得られた。ミスフィット角は時間的にも空間的にも複雑な挙動を示すが、特定の場所に着目すると、ある程度の周期性を持ちながら変動している。Uchida et al.(2016)は小繰り返し地震と地殻変動データから、およそ1～6年の周期を持つゆっくりすべりの存在を報告しているが、本研究の結果はそれと概ね調和的である。また、プレート境界型の地震はミス

© The Seismological Society of Japan

フィット角が小さい時（固着継続時）に発生する傾向があり、本手法の妥当性が伺える。

東北沖地震発生前に着目すると、東北沖地震の大すべり域（アスペリティ）内のミスフィット角は小さく、基本的に固着し続けていたと推定される。また、その周囲ではミスフィット角の大きい時期が間欠的に発生しており、周囲のゆっくりすべりにより応力が繰り返しアスペリティ内に載荷されていたことも予想される。アスペリティ内をさらに詳細にみると、2001年7月から10月、2005年8月から10月、2008年8月から2009年3月、2010年8月、そして東北沖地震発生前に、ミスフィット角の大きい時期が確認できる。このうち、一部は先行研究（e.g., Ito et al., 2013）により報告されているゆっくりすべりの発生時期と重なっている。今後慎重な検討が必要であるが、徐々に発生間隔が短くなっている傾向があり、アスペリティ内での固着の剥がれが加速的に進行していた可能性がある。

東北沖地震発生後は広い範囲でミスフィット角が90°を超えるようになる。これは本震による応力変化に調和的なクラックで破壊が生じているためと考えられ、正断層型の余震が多く起きている観測事実（Asano et al., 2011）からも理解できる。一方、三陸沖と茨城県沖では本震後も小さいミスフィット角を維持しており、固着が継続していると解釈できる。それに加えて、本震すべりによる応力載荷の寄与もあると考えられ、地震発生ポテンシャルの高い地域として注意が必要であろう。

謝辞：防災科学技術研究所のF-netカタログ、国土地理院のGEONET F3解を使用しました。記して感謝します。

© The Seismological Society of Japan

Deep volcanic low frequency earthquakes induced by spatio-temporal stress distribution in northeast Japan

*Genki OIKAWA[1], Naofumi Aso[1], Junichi Nakajima[1]

1. Tokyo Institute of Technology

近年の高感度な地震観測網の発達により、通常の地震よりも深部の下部地殻及び上部マントルで発生する微小地震が観測されてきた。この地震は規模が小さいにも関わらず2-8Hzの低周波成分が卓越することから低周波地震と呼ばれ、主に火山周辺やプレート境界で観測されている。東北日本では活火山周辺で活発な地震活動が見られており、2011年に発生した東北沖地震以降、いくつかの地域では顕著な活動変化が見られている(小菅・他2017)。東北日本の応力場は基本的に東西圧縮(Terakawa and Matsu’ura, 2010)であるが、東北沖地震によって応力変化が起きたことが活動変化に繋がったと考えられる。本研究では火山深部低周波地震のメカニズム解を決定し、応力の時間及び空間変化との関係を調べた。
メカニズムの決定にはS波とP波の振幅比を用い、グリッドサーチによって理論振幅比との残差が最小となるモーメントテンソルを推定した。結果として東北日本の26個の火山領域で発生した264イベントについてメカニズム解を決定した。得られたメカニズム解の多くは、double-couple成分を多く含んでおり、低周波地震の初期破壊プロセスが断層すべりによって駆動されている可能性を示している。一方で、メカニズムには有意なCLVD成分も少なからず含んでいることを考えると、完全な平面ではなく凸凹な面、もしくは湾曲した面上での断層すべりである可能性がある。さらに興味深い特徴として、メカニズム解のNull軸の傾斜角は震源深さ15～25kmでは20～30ºと小さいが、深くなるにつれてばらつきが大きくなり、多様であることがわかった。この結果は、下部地殻では局所的な応力場がおおむね東西圧縮であるのに対し、モホ不連続面付近では熱応力やマグマ貫入プロセスによる応力の擾乱によって変化していることを示唆している。
次に、Coulomb 3.3 (Toda et al., 2005; Lin et al., 2004) を用いて2008年岩手宮城地震、2011年東北沖地震による静的応力変化と得られた低周波地震との関係性を調べた。この解析の結果、応力テンソルの変化と低周波地震のメカニズム解のモーメントテンソル間の類似度と活動変化の度合いには弱い正の相関があることが分かった。この結果は低周波地震活動が時間的な応力変化にある程度敏感であることを示唆している。

© The Seismological Society of Japan

Estimate of the stress field in the region of the 2017 southern earthquake

*Hikari Nogi[1], Yoshihisa Iio[2], Masayo Sawada[2], Kazuhide Tomisaka[2]

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

内陸地震の発生には応力場が密接に関係しており、地震発生過程を理解するためには、地殻の応力状態を知ることが重要である。例えばKawanishi et al.(2009)では、2000年鳥取県西部地震 (Mw=6.6) の稠密余震観測で得られた余震データを使用して応力インバージョン法により詳細な応力場を推定し、中国地方の地震帯において、それ以外の領域に比べて最大圧縮応力の向きが回転していることを示唆した。この空間変化は、地震帯直下の下部地殻の不均質構造を仮定した有限要素法による応力場のパターンと整合的であり、断層上の延性的なすべりによる影響で説明できることが報告された。
本研究では、長野県西部地域における稠密地震観測で得られた地震データを用いて、2017年6月25日に発生した長野県南部の地震(Mj=5.6)の断層近傍の詳細な応力場を推定し、空間的な不均質性を調べた。

本研究の対象領域である長野県西部地域は、1984年の長野県西部地震(Mj=6.8)の発生以降30年以上にわたり地震活動が継続している。地震は本震断層面に沿って分布するだけでなく、御嶽山東麓域では断層から離れたところでも多数起こっている。本研究で扱う長野県南部の地震は、村瀬・木股(2020)において左横ずれ断層によると考えられ、長野県西部地震の断層の東端付近で発生した。
メカニズム解の推定には、稠密地震観測データのうちIio et al.(2017)が使用した1995年６月から2010年6月までの地震データに未解析のデータを加えて、2017年長野県南部の地震発生前までのデータを使用した。この地域は震源が浅く、その直上に多数の観測点が設置されているため、精度の良いメカニズム解を求めることができる。

応力インバージョンの計算には、Iio et al.(2017)よる、断層面上で生じるすべりの方向が断層面に働く剪断応力の方向と平行であるとするWallace-Bott仮説と、解析領域内の応力場は時空間的に一様であるという仮定を用いて、解析に用いる地震に関して、観測されたすべりの方向と理論的なそれとの差 (ミスフィット角) の二乗和を最小とする方法を用いて、グリッドサーチにより求めた。

応力インバージョンの結果、断層近傍において応力場の不均質性が見られた。本解析領域全体における最大圧縮応力σ_1のazimuthの平均は西南西-東南東方向であり、これはTerakawa et al.(2013)における、本研究で解析に用いた領域を含む広域でのσ_1のazimuthと比較すると、やや東-西に近い向きであった。また長野県南部の地震の西側の一部(深さ2-3km)では、σ_1のazimuthが北西-南東から北北西-南南東方向であり、応力比は周囲と比べて低い傾向が見られた。これはYukutake et al.(2010)にて報告された特徴と同様の応力場のパターンを示している。さらに、長野県西部地震の断層の南東側 (深さ2.5-3km)と長野県南部の地震断層より北部(深さ3-3.5km)では一部、σ_1のazimuthが東-西方向へと回転している領域が見られた。
これより、本解析領域全体におけるσ_1のazimuthの平均が西北西-東南東であるのに対して、一部北西-南東から北北西-南南東を示す領域や東-西方向など、平均的な応力パターンとは異なる不均質構造の存在が考えられる。しかしながら、不均質性を示す一部の領域では、ミスフィット角が明確な最小値を示していないため、解の精度評価についても検討する。また、地震発生前の不均質な応力場が地震発生にどのような影響を与えるのかについては、局所的な剪断応力の増加に寄与するのか、断層強度の低下に寄与するのか、などの観点から考察していきたい。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of inelastic deformation using geodetic and seismic data: Application to Niigata-Kobe Tectonic Zone

*Akemi NODA[1], Tatsuhiko SAITO[2]

1. Meteorological Research Institute, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震は地殻内の弾性歪みエネルギーを解消する現象であることから、地殻内の歪みエネルギーの蓄積状況を知ることは、地震の発生メカニズムを理解する上で重要である。そのため、我々はこれまで地震データと測地データに基づいて地殻内の歪みエネルギー変化をモニタリングする手法の開発を行ってきた。

歪みエネルギー変化は、背景応力場と応力変化から定量的に評価することができる。地震発生に至る歪みエネルギー蓄積（時間変化）をモニタリングするためには、周辺の地殻活動による応力変化の正確なモデル化が必要となる。プレート境界地震を発生させる歪みエネルギー蓄積の原因は、プレート境界での安定すべりや固着といったすべりの不均質による応力変化にあると理解できるのに対して、内陸の地殻浅部で発生する地震（内陸地震）はプレート境界ほど明瞭な構造境界のない場所で発生するため、プレート境界地震と同じ枠組みをそのまま適用することはできない。そこで本研究では、応力変化の原因である地殻内非弾性変形をプレート境界のような平面に限定させるのではなく、3次元モーメントテンソル密度分布としてモデル化することで、地殻内の応力変化の汎用的な推定手法を確立することを目指している。

Noda & Matsu'ura (2010) で提案した3次元モーメントテンソル密度分布の推定手法では、モーメントテンソルの方向も含めて推定したが、地表の限られたGNSS観測データから地下のモーメントテンソル6成分を一意に決定できるか、その信頼性が残された課題となっていた。地殻変動の力源たるモーメントテンソルの物理的実体が、地殻内の微小なクラックで生じる脆性破壊や塑性流動といった非弾性変形であることを考慮すると、その方向は基本的にテクトニック応力場（背景応力場）に従うはずである。そこで、モーメントテンソルの方向を応力場の方向に固定した上でモーメントテンソル密度分布を推定することとした。応力場の情報は、対象地域で発生した地震のメカニズム解から推定できる。つまり、モーメントテンソルを応力場の方向に固定する新たな手法では、測地データでは足りない情報を地震データの情報で補い、モデルの信頼性を高めることができる。

本講演では、新潟神戸変形集中帯への適用例を紹介する。新潟神戸変形集中帯のうち東経136°以東をモデル領域とし、F-netメカニズム解からモデル領域内の平均的な応力場を推定した。次に、GEONETのF3解を時系列解析して2004年中越地震等の地震イベントによる変動を取り除き、地震間のGNSS変位速度データを得た。モーメントテンソルの方向を平均的な応力場に固定し、変位速度データから3次元モーメントテンソル密度分布を推定した結果、新潟神戸変形集中帯に沿って不均質な分布が推定された。

Noda & Matsu'ura (2010) の結果と比較すると、Noda & Matsu'ura (2010) のモーメントテンソル密度のピークのうち、モーメントテンソルの方向が背景応力場と調和的な領域に関しては、本研究の解析でも同様のピークが現れた。一方、Noda & Matsu'ura (2010) でモーメントテンソルの方向が背景応力場と食い違う領域に関しては、本研究の結果ではモーメントの集中は見られなかった。したがって、モーメントテンソルの方向を固定することにより、その場のテクトニクスと調和的なモーメント、つまり非弾性変形を抽出することができたと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

PM-1

chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University), Junichi Nakajima(Tokyo Institute of Technology)
Fri. Oct 15, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-12] Repeating earthquakes and aseismic slip: Toward unified understanding of seismogenesis

○Junichi NAKAJIMA[1], Akira Hasegawa[2] （1.EPS Department, Tokyo Tech, 2.Graduate School of Science, Tohoku University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-13] Detection of slip events amid the transitional regime between the unstable seismic and stable sliding regimes

○Yoshio FUKAO[1], Tatsuya Kubota[2], Hiroko Sugioka[3], Aki Ito[1], Takashi Tonegawa[1], Hajime Shiobara[4], Mikiya Yamashita[5], Tatsuhiko Saito[2] （1.JAMSTEC , 2.NIED, 3.Kobe Univ, 4.Univ Tokyo, 5.AIST）

1:45 PM - 2:00 PM

[S08-14] Longer than One-year Afterslip due to the 2016 Moderate Earthquakes along Chaman Fault: Noncomplementary Co- and Post-seismic Slip Distribution

○Masato FURUYA[1], Fumiko Matsumoto[2] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2.PASCO）

2:00 PM - 2:15 PM

[S08-15] Propagation velocity of detachment front along a seismogenic plate interface in a rate– state friction model

○Naoyuki KATO[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

2:15 PM - 2:30 PM

[S08-16] Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories

○Keisuke ARIYOSHI[1], Toshinori Kimura[1], Yasumasa Miyazawa[1], Sergey Varlamov[1], Takeshi Iinuma[1], Akira Nagano[1], Joan Gomberg[2,3], Eiichiro Araki[1], Toru Miyama[1], Kentaro Sueki[1], Shuichiro Yada[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[4], Shuichi Kodaira[1] （1.JAMSTEC, 2.USGS, 3.University of Washington, 4.NIED）

2:30 PM - 2:45 PM

[S08-17] Conditions for the existence of the propagation velocities for two forms of the slip fronts and their physical interpretations

○Takehito SUZUKI[1] （1.Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Repeating earthquakes and aseismic slip: Toward unified understanding of seismogenesis

*Junichi NAKAJIMA[1], Akira Hasegawa[2]

1. EPS Department, Tokyo Tech, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

内陸地殻やスラブ内における地震の発生には高間隙圧流体の存在とそれによる有効法線応力の低下が深く関与しているとの指摘がある一方で，プレート境界における繰り返し地震の発生には孤立したアスペリティパッチの周囲の準静的すべり（非地震性すべり）が不可欠であると考えられている．内陸地殻においても大地震の前震の中の繰り返し地震活動や前震のマイグレーションなどから非地震性すべりの存在が示唆されているが，非地震性すべりが普遍的に存在するかどうかはよくわかっていない． そこで本研究では，Igarashi (2020)の相似地震・繰り返し地震カタログに含まれる地震を用いて，日本列島下における繰り返し地震の分布およびその時間的特徴を系統的に調査した．まず，相似地震カタログに含まれる2003年～2017年に発生した地震を内陸地殻，太平洋プレートの上部境界面，および太平洋プレート・フィリピン海プレート内部（スラブ内部）の３つの領域に分け，地殻内とスラブ内の地震については波形相関を用いた震源決定(hypoDD)を行い，震源の重なりから繰り返し地震かどうかを判定した．断層半径の計算には応力降下量は3MPa（内陸地殻），10MPa（スラブ内）を仮定し，断層が平面および深さ方向とも70%以上重なっている場合を繰り返し地震と判定した．このようにして選ばれた繰り返し地震は地殻内が1333グループ，スラブ内が79グループであった．これらの繰り返し地震は発生間隔が短い（数分から数ヶ月）ものがほとんどであり，いわゆるバースト型の繰り返し地震（Igarashi et al. 2003）である．なお，プレート境界の繰り返し地震についてはこれまでも多くの研究がなされているため，Igarashi (2020)の繰り返し地震カタログをそのまま利用した． 本研究の結果，繰り返し地震は従来その発生が確認されていたプレート境界だけではなく，内陸地殻やスラブ内でも広く発生していることが明らかになった．特に，M6.5以上の大地震余震域や群発地震が活発な地域で繰り返し地震が多く発生しているという特徴がある．また，発生の時間的特徴から，平均発生間隔と発生レートがべき乗則の関係にあることも示された．この特徴は繰り返し地震の発生場所（内陸地殻，プレート境界，スラブ内），またはその発生時期（定常的な活動か大地震の余効すべりに伴って発生かなど）によらず，すべての繰り返し地震グループで共通であり，改良大森公式のp値は概ね0.7–1.0の範囲になる．これらの結果は，繰り返し地震はどこでも起こりうること，またその発生メカニズムは場所によらず同じであることを強く示唆している．つまり，周囲の準静的すべりにより孤立したパッチが破壊することで繰り返し地震が発生するというプレート境界で考えられてきたモデルは，すべての繰り返し地震に適用できると考えられる． 繰り返し地震の発生メカニズムをより詳細に調べるため，2011年東北沖地震に誘発され，その地震活動の詳細な解析から間隙流体圧の時間変化が明らかにされた福島・山形県境の群発地震（Yoshida and Hasegawa, 2018）の震源域内で起こっている繰り返し地震の時空間変化を分析した．その結果，1) 繰り返し地震は背景地震と同じ断層面上で発生していること，2) 間隙圧が高い活動初期に繰り返し地震の発生割合が高いこと，3）繰り返し地震の発生間隔は間隙圧が高い活動初期に短いことが明らかになった．結果1）は繰り返し地震の発生は通常の地震（背景地震）と同じメカニズム（既存断層面上でのすべり）であることを示している．さらに，プレート境界での繰り返し地震の解釈を援用し，結果2)，3）も考慮すると，断層面上での間隙流体圧が大きいときに非地震性すべりのすべりレートが大きいこと，そのすべりに伴って繰り返し地震が発生することが強く示唆される．なお，繰り返し地震として認識されるためには，周囲のパッチと相互作用のない孤立したパッチが観測期間内に複数回すべることが必要であり，この条件が満たされない場合には，繰り返し地震ではないいわゆる普通の地震として観測されることになる． 今回の観測事実とこれまでにわかっている知見を総合的に解釈すると，すべての地震は，A) 間隙圧の上昇によって既存断層面の強度が低下し，B)そこで非地震性すべりが発生し，C）その中のアスペリティパッチがすべることによって発生すると結論づけられるのではないだろうか．これまでは地震発生にはA）のメカニズムが本質であると考えられてきたが，全ての地震の背後には非地震性すべりがあると考えると，プレート境界地震も含めすべての地震を統一的に理解できる．

© The Seismological Society of Japan

Detection of slip events amid the transitional regime between the unstable seismic and stable sliding regimes

*Yoshio FUKAO[1], Tatsuya Kubota[2], Hiroko Sugioka[3], Aki Ito[1], Takashi Tonegawa[1], Hajime Shiobara[4], Mikiya Yamashita[5], Tatsuhiko Saito[2]

1. JAMSTEC , 2. NIED, 3. Kobe Univ, 4. Univ Tokyo, 5. AIST

１．序：　プレート間滑りには、応力解放を伴わない定常安定滑りから蓄積応力を爆発的に解放する不安定滑りまで多様なモードが存在する。どのモードが出現するかは断層とそれを取り巻く条件に依存する。数値実験によればコントロールされた条件下では、滑りモードは安定滑り領域、遷移領域、不安定滑り領域に分離される（Barbot,2019）。スロースリップイベント（SSE）は安定滑り領域と遷移領域との境界付近で発生し、津波地震や超低周波地震（VLFE）は遷移領域と不安定滑り領域との境界付近で起こる現象と考えられる（図１）。しかし、これまで遷移領域本来の滑りイベントの観測例がないため、SSEと津波地震との間には物理的に本質的なギャップがあるとする考えもある（Ide, 2014）。本講演では遷移領域の真っただ中に位置付けられる滑りイベントの観測例を2件報告する。
２．観測と記録解析： 2015年5月から翌年5月までの１年間、北部小笠原海溝急斜面の西側緩斜面（水深約5000m）において10台（故障のため実質的には8台）の絶対海底水圧計PARO-8B7000-I-005による最小サイト間距離10kmのアレー観測を行った。サンプリング速度は4Hz, カットオフ周波数は0.7Hzとした。2015年9月1日にアレーのごく近傍でM6.0の低角逆断層地震が発生し、アレーはその長周期地震波海底加速度成分・津波・上下動海底永久変位を記録した。これらを一連のダイナミックなプロセスとして解析し地震断層モデル（D=15 cm, S=210 km^2, Mo=0.95x10^18 Nm, Δσ=0.77 MPa）を得た。このモデルに基づいて計算した水圧波形と観測波形との一致は驚くほど良い。 アレーは、地震の直後と3.5日後にそれぞれ時定数１－2時間程度の海底変動を記録した（図２：青線）。これら２イベントは、それぞれ本震と同じメカニズムの非地震性逆断層滑りであると考えて、その大まかな滑りの分布と時間発展を求めた。断層面はIwasaki et al. (2015)の推定したプレート境界面上にあるとし、深さ方向に３枚の断層セグメント（各面積は20x20 km^2）を設定し、滑りは１つのセグメント上で一定であるとした。時刻tの観測水圧変化は３つのセグメントの時刻tにおける滑りの効果の和であると考え、各セグメントの滑りの時間発展を求めた。得られたモデルに基づく水圧変化の時間発展を赤線で示す（図２）。観測とモデルとの一致は一般に大変良い。
３．結果と議論： 本震直後のイベントも3.5日後のイベントも、また何れのセグメントにおいても、滑りの時間発展は、f(t)=1-exp(-t/T) タイプの時間関数で非常に良く近似できる。３セグメントの平均的なTの値は最初のイベントが3800 s, ２番目のイベントが2100 sであった。即ちイベントの特性時間2Tは１時間から２時間の程度であった。Moは最初のイベントが8.1x10^18 Nm, ２番目のイベントが8.4x10^18 Nm で、何れも本震より１桁近く大きい。震源関数f(t)の形とMoの大きさからして、これらが本震の余効変動ではなく、テクトニックな応力の解放イベントであることは明らかと思われる。応力降下量Δσは最初が1.2 MPa, 次が0.96 MPaの程度で本震のΔσと余り変わらない。 観測されたイベントの特性時間2Tは同じMoの通常の地震の継続時間と比べて４桁大きく、同じMoのSSEの継続時間と比べて３桁小さい（Gao et al., 2012）。応力降下量は、通常の地震と比べると（Denolle & Shearer, 2016）低めで、SSEと比べると（Gao et al., 2012）１桁以上大きい。破壊速度を断層の長さと継続時間の比で定義すると、通常の地震よりも４桁遅く、SSEよりも３桁速い（Gao et al., 2012）。今回検出したイベントは津波地震や超低周波地震よりも遅く、スロースリップイベントよりも早い現象である。プレート間滑りを不安定滑り（地震）領域と安定滑り領域とに分けたとき、両者の間を繋ぐ遷移領域の実態が見えてきたと考える。

© The Seismological Society of Japan

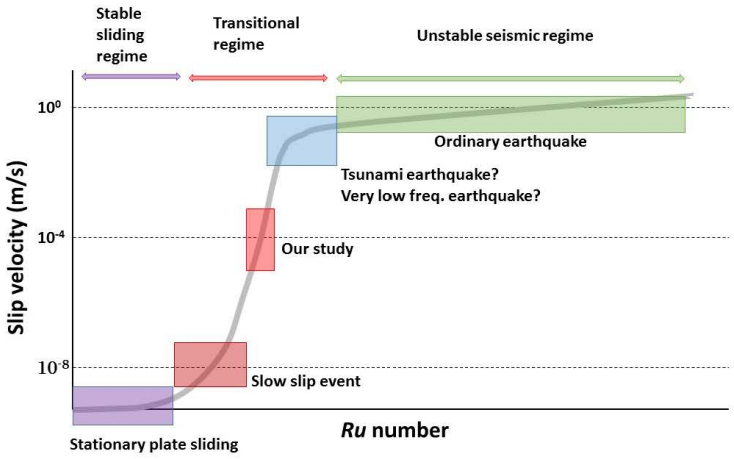


Figure 1. Schematic illustration for how slip mode changes when the R_u number is varied while the frictional parameter ratio, $(b–a)/b$, is kept constant (Barbot, 2019).

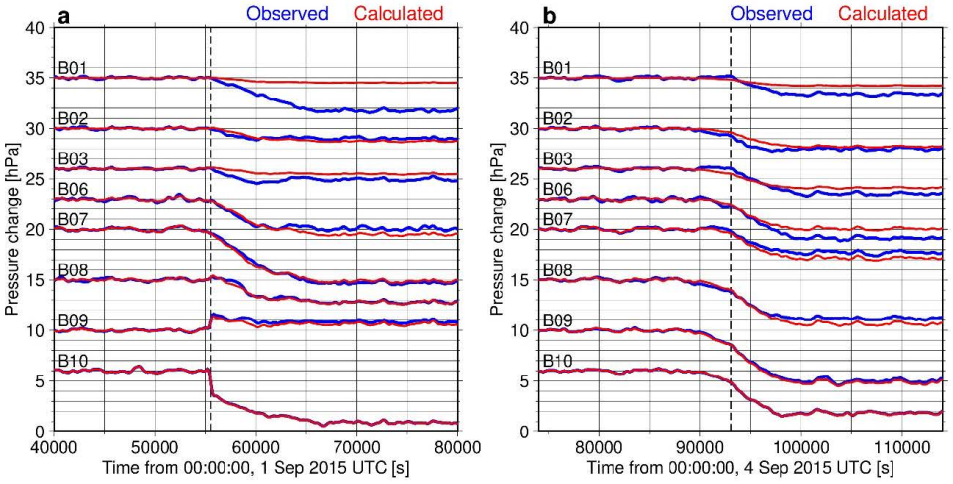


Figure 2. Observed (blue) and calculated (red), 600-s lowpass filtered, tide-removed records. They show the quasi-static responses of seawater to seafloor vertical displacements. **a**. Records for the first aseismic event. The vertical dashed line indicates the origin time of the mainshock. **b**. Records for the second aseismic event. The vertical dashed line indicates the origin time of the M3.2 aftershock. In **a**, the records were inverted for the first aseismic event after subtraction of the impact of the mainshock.

© The Seismological Society of Japan

Longer than One-year Afterslip due to the 2016 Moderate Earthquakes along Chaman Fault: Noncomplementary Co- and Post-seismic Slip Distribution

*Masato FURUYA[1], Fumiko Matsumoto[2]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. PASCO

チャマン断層は、インドプレート西部とユーラシアプレートの境界にあたる長さ900km以上の左横ずれ断層であり、地質学的に予想されるプレート間相対運動は~2cm/年程度である．この断層は歴史的に見ても地震活動が低いことが知られており、固着しているかあるいはクリープしているのではないかと考えられてきた(Ambraseys and Bilham 2003)．陸上観測点は依然として少なく，InSARを用いてクリープ域と固着域のマッピングが報告されている(Fattahi and Amelung 2016; Barnhalt 2016)．一方，Furuya and Satyabala (2008)は、2005年に発生したM5の地震が非常に長く広い範囲でのAfterslipを起こしていたことを報告した．この2005年のM5地震以来、大きな地震は発生していなかったが，2016年5月と7月にM5クラスの地震が南西方向に100km以上離れた断層沿いで発生した．

2016年地震の地震前および地震時、地震後の地殻変動をESAのSentinel-1衛星のInSARデータを用いて調べたところ、震源近傍での地震前の地表付近のクリープ運動は存在していなかった．地震時地震後の地殻変動は明瞭で，特に2016年7月のmb4.7に伴う地殻変動は，Furuya and Satyabala (2008)で報告した変動とよく似ている．

得られた地震時地震後のInSARデータを元に、カルマンフィルタ~に基づいたいわゆる「時間依存滑りインバージョン」(Segall and Matthews 1997)を行って、滑り分布と滑り速度分布を推定した．空間方向と時間方向の二つのハイパーパラメータは、Miyazaki et al (2006)に倣ってトレードオフから決定した．

推定された滑り分布(滑り速度分布)で最も特徴的なことは、一年以上続いた地震後滑りが地震時滑りの空間分布と「相補的ではない」ことである．従来から報告されているM>6地震に伴うAfterslipは，ほぼ例外なく地震後滑りは地震時滑りの外側で起こっている(e.g., Miyazaki et al., 2004; Hsu et al., 2006; Barbot et al., 2009)．我々の推定でも浅部での地震後滑りはゼロではないが，最も顕著に滑るパッチは明らかに地震時滑りが最大のパッチである．

この結果をRate-and-state friction (RSF) lawの枠組みで解釈するためには，(a-b)の「滑り速度依存性」(e.g., Shimamoto 1986)が必要である．この滑り速度依存性はSlow slip event (SSE)のモデリングでもしばしば要請されている(e.g., Shibazaki and Iio 2003, Im et al 2020)．SSEは”静かに"滑り始めるように見えるため地震時滑りは無視されることが多いが，Ide et al (2007)が示したようにゼロではない．チャマン断層の中規模地震(とその地震後滑り)はNon-silent SSEと言えるかもしれない．

有効法線応力の動的な変化など(e.g., Suzuki and Yamashita 2009, Segall et al 2010)のRSF則の摩擦パラメータの調整以外の解釈もあり得る．

© The Seismological Society of Japan

Propagation velocity of detachment front along a seismogenic plate interface in a rate–state friction model

*Naoyuki KATO[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

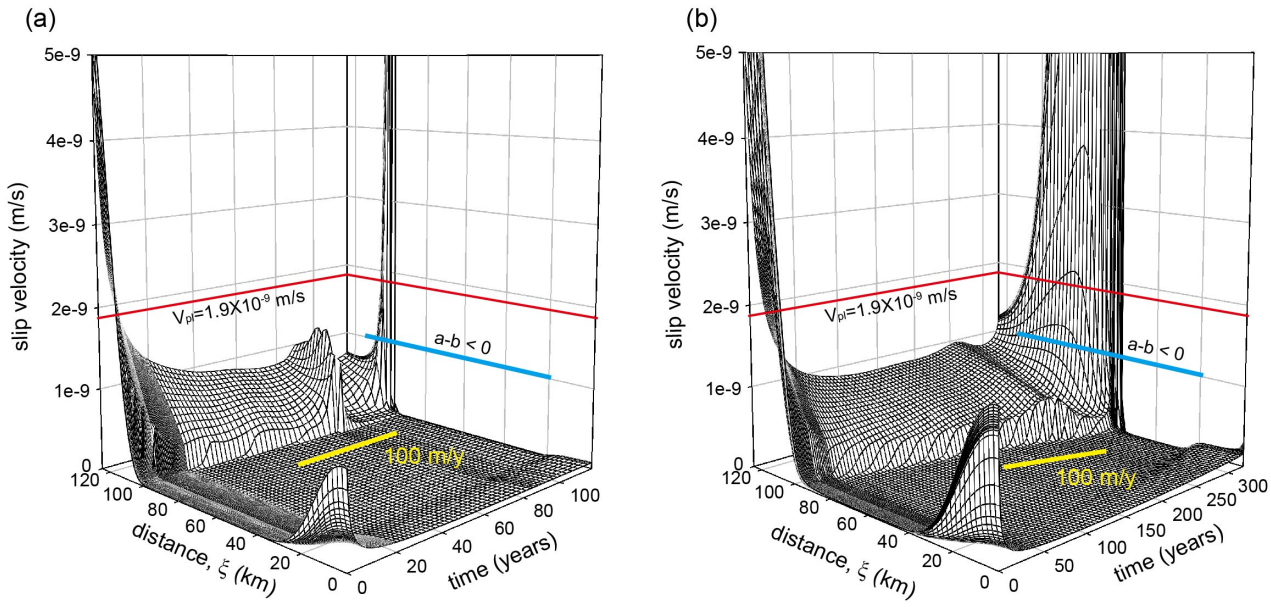
速度・状態依存則を用いて地震発生サイクルの数値シミュレーションを行い，地震間（前の地震の直後から次の地震の直前まで）の非地震性すべりの時空間発展を調べた．モデルでは，沈み込み域のプレート境界を仮定し，十分深部のプレート境界に一定の安定すべり速度Vplを与えた．シミュレーションでは，浅部の速度弱化域（a-b<0）で地震が周期的に発生し，深部の速度強化域（a-b>0）で常に非地震性すべりが発生する状況が再現される．地震間での速度弱化域は完全に固着しているわけではなく，非地震性すべりが深部から浅部に伝播していく．深部の非地震性すべりにより固着域の最深部で応力集中が生じ，固着が徐々に破壊されていくためである．図1は，地震間のすべり速度の時空間分布のシミュレーション結果の例であり，(a)は速度・状態依存則の特徴的すべり量L =20mmの場合，(b)はL =100mmの場合である．ξはプレート境界に沿って地表から測った距離であり，速度弱化域と速度強化域の境界はξ=113 kmである．深部の速度強化域では常に非地震性すべりが発生しており，これは速度弱化域に徐々に伝播していく様子が見られる．速度弱化域での非地震性すべりのすべり速度は0.1Vpl程度であり，伝播速度はほぼ一定で，Vplに比例し，(b-a)σに反比例することがわかった（σは有効法線応力）．特徴的すべり量Lには依存しない．非地震性すべりの伝播に伴い，プレート境界のせん断応力は，前の地震による応力降下の状態から，すべり速度約0.1Vplに対応する定常応力まで増大する（負の応力降下）．非地震性すべり域の先端では，深部の非地震性すべりによる応力集中と，非地震性すべりの伝播による負の応力降下による負の応力集中とが釣り合っている状況であると考えることができる．この２つの状況の応力拡大係数が等しいと仮定し，均質無限弾性体中の半無限長クラックの解を利用すると，非地震性すべりの伝播速度を導くことができ， Vplに比例し(b-a)σに反比例するというシミュレーション結果を説明することができる．図１の２つの例の場合の理論的な伝播速度は約80 m/yで，シミュレーションで得られる約100 m/yと非常に近い値が得られる．非地震性すべりの伝播は測地データなどから検出できる可能性がある．Bruhat & Segall (2017)はCascadia沈み込み帯においてプレート境界の固着域で伝播する非地震性すべりの伝播速度を30–120 m/yと推定した．この結果から，前述の関係を使うと，(b-a)σは0.1–0.3 MPaと推定することができる．

図１では，サイクルの後半ですべり速度の顕著な増大がみられる．このエピソディックすべりは，Lが小さいほど，またσが小さいほど顕著となる傾向がある（図１a）．プレート境界の浅部行くほど，前の地震による応力降下から回復しておらず低応力状態にあるので，このすべりは浅部にはあまり伝播せず停止する．一方，深部方向には高速で逆伝播し，その伝播速度は図１(a)の場合は4 km/yである．図１(b)の場合は，すべり域の先端が明瞭でなく，伝播速度は決められない．このエピソディックすべりに伴い，せん断応力は，ほぼτss(V)に沿って低下する．

文献

Bruhat, L. & Segall, P., 2017, Geophys J Int., 211, 427-449.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories

*Keisuke ARIYOSHI[1], Toshinori Kimura[1], Yasumasa Miyazawa[1], Sergey Varlamov[1], Takeshi Iinuma[1], Akira Nagano[1], Joan Gomberg[2,3], Eiichiro Araki[1], Toru Miyama[1], Kentaro Sueki[1], Shuichiro Yada[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[4], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC, 2. USGS, 3. University of Washington, 4. NIED

In our recent study, we detected the pore pressure change due to the slow slip event (SSE) in March 2020 at the two borehole stations (C0002 and C0010), where the other borehole (C0006) close to the Nankai Trough seems not because of instrumental drift for the reference pressure on the seafloor to remove non-crustal deformation such as tidal and oceanic fluctuations. To overcome this problem, we use the seafloor pressure gauges of cabled network (DONET) stations nearby boreholes instead of the reference by introducing time lag between them. We confirm that the time lag is explained from superposition of theoretical tide modes. By applying this method to the pore pressure during the SSE, we find pore pressure change at C0006 about 0.6 hPa. We also investigate the impact of seafloor pressure due to ocean fluctuation on the basis of ocean modeling, which suggests that the decrease of effective normal stress from the onset to the termination of the SSE is explained by Kuroshio meander and may promote updip slip migration, and that the increase of effective normal stress for the short-term ocean fluctuation may terminate the SSE as observed in the Hikurangi subduction zone.

© The Seismological Society of Japan

Conditions for the existence of the propagation velocities for two forms of the slip fronts and their physical interpretations

*Takehito SUZUKI[1]

1. Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University

２つの媒質間の滑りの伝播は理学的・工学的に重要な問題であり、特にその伝播端の伝播速度の決定機構は長く興味を集めてきた。これにはもちろん断層面上の滑りの伝播速度の理解も含まれる。本発表では滑り速度に二次で依存する摩擦則を仮定した以前の我々の結果（Suzuki and Matsukawa, 2019）を拡張し、滑りにも依存する摩擦力を導入して、それらの伝播速度が物理的に存在できる条件を摩擦則中に現れるパラメータの観点から明らかにする。

解析には線形臨界安定性解析（Linear Marginal Stability Hypothesis, LMSH）を用いる。ここで伝播端にはintruding frontとextruding frontの二通りがあることに注意する（Suzuki and Matsukawa, 2019）。その理解のため、１次元系を考え、ある物理量sの伝播を考える。sがゼロと正の定常状態があるとし、一方が安定、もう一方が不安定であるとする。この時、s=0が不安定でs>0の領域が侵入していく場合をintruding front, s>0が不安定でs=0の領域が侵入していく場合をextruding frontと呼ぶ。特にextruding frontについて着目したい。定義から明らかなように、通常extruding frontは「一定速度で相対的に滑っている媒質の運動を止めた時の滑りの伝播端」の形状である。

LMSHの仮定の下、intruding front速度として２つ、extruding front速度として３つが存在することが明らかになり、またそれらの解析解も得られた。これらのうち、intruding front速度のうちの一つ、extruding front速度のうちの２つは光学モードであり非物理的な伝播速度であった。すなわち両frontsに対して一つずつが物理的な音響モードであったと言える。加えて、支配方程式中において摩擦則をC_1 \dot{u}-C_2 uと書いた時（uは変位、\dot{u}はその時間微分）C_1-C_2相空間でそれらの物理的伝播速度が存在し得る領域の境界を表す曲線の解析的表現も得た。これは伝播速度の存在の有無、すなわち定常伝播の存在の有無がC_1とC_2の値から予測可能であることを示す。

加えて、extruding front速度において、滑り速度の二次の依存性を仮定した摩擦則に基づいた以前の数値計算結果（Suzuki and Matsukawa, 2019）と調和的な結果が得られたことは重要である。LMSHで行われるような、変位uやその微分が小さいという仮定では通常intruding frontしか現れない。しかしここでは（一般的に小さくない）ある基準となる滑り・滑り速度の点の伝播がextruding frontとして記述できるということが明らかになった。加えて強調すべきは、extruding速度の方がintruding速度よりも小さいということである。前者が高速地震、後者がゆっくり地震に対応することも示唆される。通常の地震とゆっくり地震の存在する条件を示せたとも言える。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

AM-2

chairperson:Keisuke Yoshida(Tohoku University), Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.)
Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-18] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

○Takumi Aoki[1], Yoshihiro Kaneko[1], Jesse Kearse[2] （1.Kyoto University, 2.Victoria University of Wellington）

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-19] Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

○Takumi MOTOKOSHI[1], Satoshi Matsumoto[2], Yoshihisa Iio[3], Shin'ichi Sakai[4], Aitaro Kato[4] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.Earthquake Research Institute , the University of Tokyo）

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-20] Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

○Makoto NAOI[1], Keiichi IMAKITA[1], Youqing CHEN[1], Kazune YAMAMOTO[1], Rui TANAKA[1], Hironori KAWAKATA[2], Tsuyoshi ISHIDA[1], Eiichi FUKUYAMA[1], Yutaro ARIMA[3] （1.Kyoto Univ., 2.Ritsumeikan Univ., 3.JOGMEC）

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

○Keisuke YOSHIDA[1], Hiroo Kanamori[2] （1.Tohoku University, 2.California Institute of Technology）

11:45 AM - 12:00 PM

[S08-22] Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

○Kantaro Kawai[1], Nobuki Kame[1] （1.ERI, UNIVERSITY OF TOKYO）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*Takumi Aoki[1], Yoshihiro Kaneko[1], Jesse Kearse[2]

1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington

地震の強震動分布を決定する要因の１つである地震の破壊伝播方向を、古地震に対して求めることは重要な課題である。近年、過去の地震で観測された条線と単純な平面断層での動的破壊モデルによって、地震時に断層面上に記録される条線の湾曲と破壊伝播方向との間の関係性が示され（Kearse et al., 2019; Kearse and Kaneko, 2020）、地質的観察から破壊伝播方向を推定できる可能性が提示された。一方で複雑な断層面で記録された条線には、この関係性と湾曲の凹凸が逆向きになっているものも報告されている。このような湾曲が逆向きになっている条線を説明するため、本研究では地表付近に形状を与えた断層や複雑な形状を持つ断層モデルを用いて地震破壊のシミュレーションを行った。その結果、平面断層の場合と逆向きの凹凸を持つ条線が得られた。これは断層に形状を与えることで断層面上の初期応力が変化し、特にその鉛直成分の変化によって逆向きの湾曲が得られたと考えられる。また本研究では、特に初期応力が深さとともに増加するようなモデルでは地表面近くで逆向きの湾曲が得られるようなパラメータ範囲が狭く、地表付近で湾曲の向きを逆にすることが難しいことも分かった。本研究の結果から、複雑な断層形状を持つ地点での条線の解釈には地形の影響を考慮する必要があり、条線の湾曲から破壊伝播方向を推定する際には断層形状が単純な地点での観察を用いるべきであると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

*Takumi MOTOKOSHI[1], Satoshi Matsumoto[2], Yoshihisa Iio[3], Shin'ichi Sakai[4], Aitaro Kato[4]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute , the University of Tokyo

通常の断層運動（ダブルカップル型地震：DC地震）では説明できない地震を非ダブルカップル型（NDC）地震と呼ぶ。NDC地震は、これまで主に火山地域や地熱地帯で報告されており、NDC成分は、断層の破壊の複雑さや流体の存在などを示すものとして考えられている。NDC地震の研究は、断層運動のプロセスや地震の発生機構を理解するために重要であり、地殻の応力や強度に関する新しい情報を得る機会を提供すると考えられる。

2000年に発生した鳥取県西部地震震源域では様々な研究がされており、この地域では2017年3月から2018年4月まで1000点の地震計を設置する観測が行われた（0.1満点地震観測）。Hayashida et al. (2020) は0.1満点地震観測網の地震計と定常観測点であるHi-net観測点の記録を用いてP波の走時と極性を読み取り、震源決定を行った。発震機構解を推定すると節面やヌル軸付近にDCでは上手く説明できない極性分布があり、内陸地震発生場でNDC地震が観測されたことが示された。本研究は、P波のスペクトルからNDC地震とDC地震の特徴を比較することで、NDC地震への理解を深めることを目的とする。

本研究では、NDC地震とDC地震について、観測点ごとにP波到達時間前後のスペクトルを求め、これらをコーダ波のスペクトルで規格化することで、各観測点のスペクトルの特徴を見た。また、震源球上でP軸、T軸を通る観測点を選択し、スペクトルの変化を確かめた。観測点選択の際はコーダ波/ノイズのスペクトル比が２以上となる周波数が多い観測点を選択した。

解析の結果、DC地震とNDC地震で震源スペクトルに大きな違いは見られなかった。そのうえ、地震によってはノイズが大きく、広い周波数域でスペクトルの特徴を正確に見ることができなかった。そのため、近接するDC地震とNDC地震について、各観測点のP波スペクトルとその比の特徴をみたが、同様に観測点の位置とスペクトルの関係は見られなかった。今回は少数の地震について震源スペクトルの特徴を確認したため、今後はより多くの地震とDC地震・NDC地震の組み合わせの震源スペクトルの特徴を確かめることで、NDC地震の発生過程を考察していく。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

*Makoto NAOI[1], Keiichi IMAKITA[1], Youqing CHEN[1], Kazune YAMAMOTO[1], Rui TANAKA[1], Hironori KAWAKATA[2], Tsuyoshi ISHIDA[1], Eiichi FUKUYAMA[1], Yutaro ARIMA[3]

1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. JOGMEC

圧電素子を用いたAE（Acoustic Emission）センサは，数cm規模の室内実験から数十m規模の現場計測において破壊現象の監視に用いられる．数100 kHz以上の高周波で高い感度が得られるので，地震計では検知できない微小な破壊を検出できるが，その周波数特性は複雑であり，かつ設置状態の影響を大きく受けるので，波形記録やスペクトルを用いて詳細な解析を行うことは簡単ではない．例えば，個々のセンサの微妙な接着状態の違いによってその感度が倍半分程度変化するので，振幅を用いた解析にはそれぞれのセンサの感度評価・補正が必要であるし，絶対感度が不明であるため波形記録から破壊の規模を求めることも困難である．本研究では，１）AEセンサの指向性を独自推定，２）実際に用いる設置方法における周波数特性をレーザー・ドップラー速度計を用いて評価，３）実験毎に全センサの相対感度を音波透過試験によって評価，することでこれらの問題を解決し，室内水圧破砕実験で得られたAEの地震モーメントMoを評価するとともに，Multiple Empirical Green function法（MEGF法；Hough et al. 1999）によってそのコーナー周波数fcを評価した．

解析には，Tanaka et al. (2021; GJI) が実施した山口県産黒髪島花崗岩を用いた実験と，Naoi et al. (2020; GJI）が実施した米国産イーグル・フォード頁岩を用いた実験で得られたAEデータを用いた．実験は，65x65x130 mmの直方体形状に整形した供試体を用いて実施し，供試体長手方向に５MPaの一軸載荷を加えた状態で，供試体中央部に穿孔した破砕孔に流体を圧入することで実施した．AEデータは，供試体表面に設置した24個のAEセンサ（共振型AEセンサ8個，プリアンプ内蔵高感度AEセンサ16個）によって，10 MHz sampling, 14bitの連続収録によって取得した．得られた連続波形データから，波形切り出し，走時自動検測，震源決定を行ってAEカタログを作成し，これらのイベントに対して，Moとfcの推定を実施した．

個々のAEのP波スペクトルに対し，１）−３）の影響を補正した観測スペクトルに，理論スペクトルをフィッティングしてMo，Mw（モーメント・マグニチュード）を評価したところ，-9.2から-6.8のMwを得た．Moの評価に必要になる放射パターン係数の補正は，Naoi et al. (2020; GJI），Tanaka et al. (2021; GJI)が，各センサの相対感度とセンサ指向性を評価・補正した上で求めたモーメント・テンソル解を用いて行った．これらの先行研究では，イーグルフォード頁岩ではほぼすべてのAEが開口型であること，黒髪島花崗岩の実験では，剪断・開口・閉合型を含む多様なメカニズムのAEが生じたことがわかっている．

次に，AEセンサの周波数特性や媒質の伝達関数のモデリング誤差の影響を軽減可能なMEGF法を用いて個々のイベントのfcを推定したところ，100–1000 kHzの範囲の値を得た．測定帯域が狭いことや，AEの震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスが複数かかるために，結果の解釈に注意が必要であるが，得られたAEに対して，１）せん断型破壊に対して繰り返し報告されている応力降下量一定則と調和的なMo-fc関係を持つイベントが震源メカニズムによらず多発した，２）特に開口成分が卓越するものに対して，上記スケーリング則から予想されるよりも低周波成分が卓越するイベントが多発した，という結論が得られた．２）からは，震源における高い間隙流体圧の存在が，開口変位の発生と低周波成分の卓越に寄与することが示唆される．

本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) および，科研費 (16H04614)，京都大学教育研究振興財団の援助により行われました．

© The Seismological Society of Japan

Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

*Keisuke YOSHIDA[1], Hiroo Kanamori[2]

1. Tohoku University, 2. California Institute of Technology

Although the corner frequency is widely used in earthquake source studies, its relation to physical source parameters is often ambiguous. Specifically, the source corner frequency or source duration does not explicitly include information about the complexity of the source process. The radiated energy is a more direct physical quantity for studying the dynamic characteristics of earthquake rupture. In Japan, high-quality seismic waveform records are available from the dense national seismic networks, which allow the determination of detailed source time functions even for small earthquakes (Mw > 3.3) (Yoshida, 2019). We systematically examined the radiated energy of small earthquakes in Japan using the abundant source time function data.

We estimated the radiated energy of earthquakes for which the moment tensor is listed in the F-net moment tensor catalog from 2004 to 2019 (Mw3.3-5.5). The waveform data were derived from the stations of national universities, JMA, NIED Hi-net, F-net, and V-net. We applied the deconvolution algorithm developed by Ligorria and Ammon (1999) that employs the method of Kikuchi and Kanamori (1982) to SH waves and estimated the apparent source time functions (ASTFs). We used the waveforms of smaller earthquakes that occurred close to the target earthquake (< 3 km) with magnitude differences from 1 to 2 as the empirical Green's functions (eGFs). We first applied a low-pass filter to the raw velocity waveforms, with a cut-off frequency increasing with $M_0^{-1/3}$ of the target earthquake.

For approximately 1300 earthquakes (Mw3.3-5.5), we derived ASTFs at more than ten stations. Many earthquakes show a coherent azimuthal dependence of AMRFs. Some earthquakes are characterized by distinct multiple pulses (Fig. 1), indicating complex ruptures of multiple patches. Then, we estimated the radiated energy E_R from each AMRF using the method of Vassiliou & Kanamori (1982). We also measured the source duration T and computed the radiated energy enhancement factor (REEF; Ye et al., 2018). As representative values of E_R, source duration T, and REEF for each earthquake, we used the median of the results estimated from the different AMRFs.

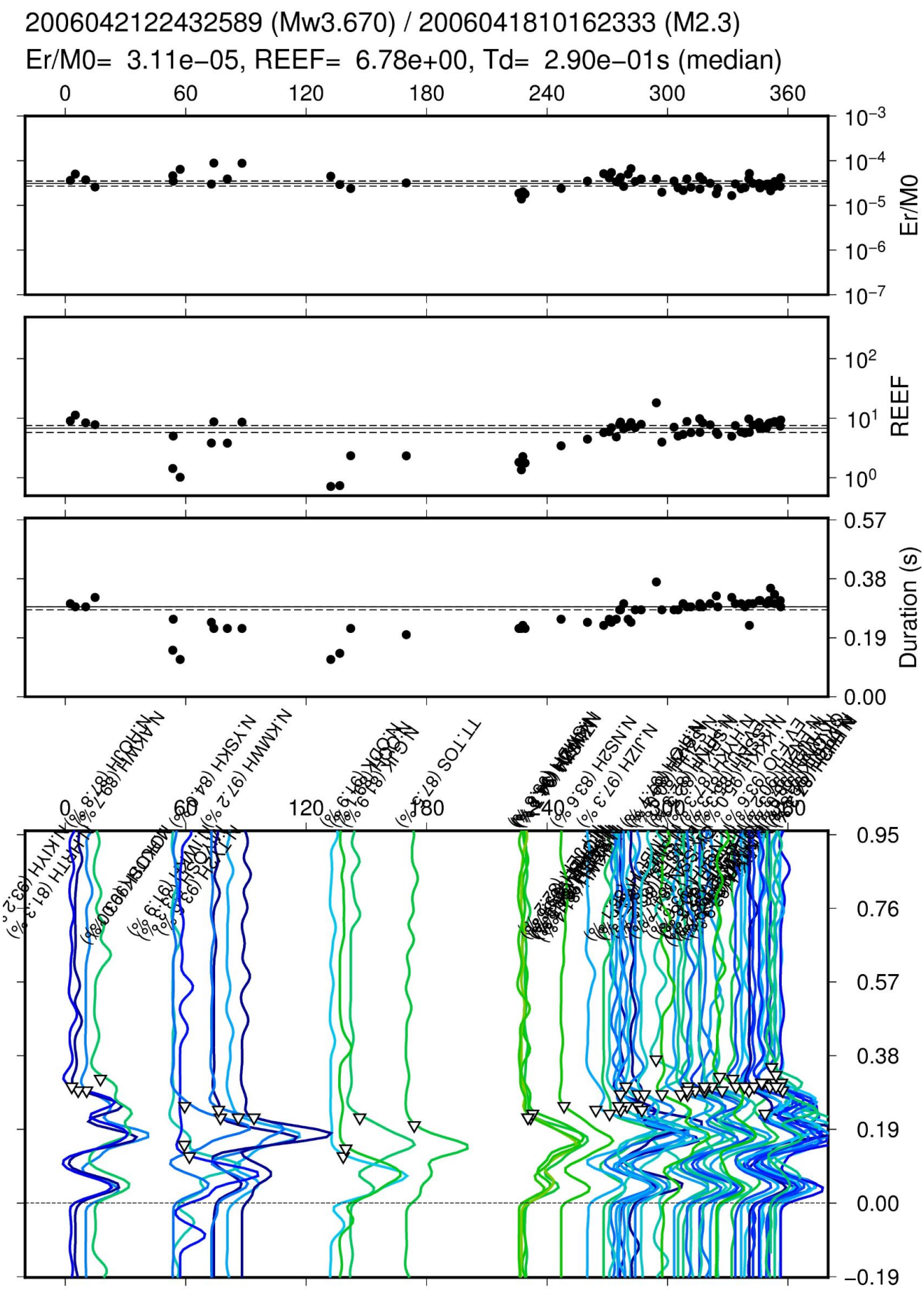
The estimated values of E_R are generally proportional to M_0, with a typical ratio E_R/M_0 of about 3.6×10^{-5}. The duration cubed, T^3, tends to be proportional to M_0, with a typical value of M_0/T^3 about 3.9×10^{16} (in SI unit). This corresponds to a stress parameter of 2.0 MPa in Brune's (1970) model. REEF is typically ~3 but tends to be larger for multiple shocks. We do not see significant spatial variations of E_R/M_0, M_0/T^3 and REEF, or any clear dependence of these parameters on depth, focal mechanism, and seismicity type.

The scaled energy $E_R M_0 = 3.6\times10^{-5}$ obtained in this study for small earthquakes (Mw<5.5) is comparable to the estimates for larger earthquakes (e.g., Kanamori et al., 2020) in Japan. E_R/M_0 in our dataset does not significantly vary with the earthquake size, as suggested by Ide et al. (2001). The typical values of $T/M_0^{1/3}$ and REEF in our data set tend to be smaller than those of larger global earthquakes (Duputel et al., 2013; Ye et al., 2018). At face value, this suggests that small earthquakes have simpler source processes than large ones. However, this trend may be affected to some extent by our low-pass filter with a relatively low cut-off frequency.

© The Seismological Society of Japan

Although the median values of E_R/M_0 and M_0/T^3 are fairly constant with M_0 (or Mw), the individual values do vary over an approximately 1.5 order of magnitude. E_R/M_0 in our dataset generally increases with M_0/T^3 with an approximate slope of 0.5 on the log-log plot. This suggests that M_0/T^3 or stress parameter can be used to approximately estimate the scaled energy. However, the proportionality relationship does not hold for complicated ruptures (high REEF events). The variation of REEF ranging from 1 to 40 obtained in this study suggests that considerable rupture complexity is involved in small earthquakes too.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

*Kantaro Kawai[1], Nobuki Kame[1]

1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO

地震の動的破壊は断層周辺に質量再分配を引き起こし、また地震波は岩石の密度変動を伴いながら伝播する。両過程はP波到達前に過渡的な重力変動を引き起こす。このようなP波前重力信号は、既住研究において複数の大地震のデータ中に検出されてきた。しかし、検出は垂直成分に限定されノイズの高い水平成分は利用されてこなかった。

木村(2020, 学位論文)は、Hi-net水平加速度計(tiltmeter)アレイデータ解析から2011年の Mw 9.1 東北沖地震におけるP波前重力信号の水平成分を初めて検出した。これを、広域帯地震計の信号垂直成分と組み合わせ3成分全波形を用いて震源パラメータのグリッドサーチを行ったところ、断層の傾斜角 δを11.5˚-15.3˚、Mw 8.75-8.92 に制約することに成功した。地球自由振動の理論研究において地震波の励起は、 δ が小さく震源が浅い地震に対して地震モーメントをM_0とすると $M_0 \sin(2\delta)$ に近似的に比例し、 δ と Mw はそれぞれ独立に決定できない量であることが示される(Kanamori and Given, 1981)。木村の研究は従来の自由振動理論では説明されていないP波前信号の震源励起依存性を示している。そこで本研究では、この新たに見いだされた信号特性を理解することを目指して、理論波形合成計算コードを用いた数値実験を行った。

数値実験には Zhang et al. (2020)と Wang et al. (2017)によって開発された計算コード QSSPPEGS_potential_Code を用いた。この計算コードは、従来の長周期地震波形合成計算と同じ弾性重力完全結合の方程式を用いて現実的な地球構造におけるP波前重力信号の波形合成を可能にする。これまでに提案されてきた計算法と異なり、一切の近似計算をしていないことが特徴であり、また現実的な時間で実用制度の波形を得ることができる。ここでは、2011年 Mw 9.1 東北沖地震の傾斜角を系統的に変化させた模擬P波前重力信号波形を合成し、振幅の傾斜角依存性を調べた。点震源を仮定し、$Mw = 9.1$ に固定し、 δ = 10˚, 15˚, 20˚, 25˚, 30˚ と変化させた。観測点を神岡として、地動加速度$(d^2/dt^2)\boldsymbol{u}$、重力場の変化 $\delta \boldsymbol{g}$ のそれぞれの成分を合成し、これらを用いて観測されるP波前重力信号を求めた。ここで、加速度センサーの出力$\boldsymbol{s}$は重力変化そのものではなく、地動加速度の影響を受け $\boldsymbol{s} = (d^2/dt^2)\boldsymbol{u} - \delta \boldsymbol{g}$ となることに注意が必要である。

結果、$(d^2/dt^2)\boldsymbol{u}$ と $\delta \boldsymbol{g}$ の水平成分は共に $\sin(2\delta)$ の依存性を示すが、信号出力 $\boldsymbol{s} = (d^2/dt^2)\boldsymbol{u} - \delta \boldsymbol{g}$ には $\sin(2\delta)$ とは異なる傾斜角依存性がみられた。計算前の想定通りに $(d^2/dt^2)\boldsymbol{u}$ と $\delta \boldsymbol{g}$ は $M_0 \sin(2\delta)$ で震源励起され、これらの差をとると新しい傾斜角依存性が現れる結果となった。一方、想定とは異なり $(d^2/dt^2)\boldsymbol{u}$ と $\delta \boldsymbol{g}$ の垂直成分の振幅は共に、$\sin(2\delta)$ の依存性を示さなかった。逆に、$\boldsymbol{s} = (d^2/dt^2)\boldsymbol{u} - \delta \boldsymbol{g}$ は $\sin(2\delta)$ の依存性を示す結果となった。このP波前重力信号 $\boldsymbol{s}$ の δ依存性は水平成分と垂直成分ともに木村(2020)の実データ解析結果と調和的である。しかし、数値実験の垂直成分の結果は想定しておらず、今後、地球自由振動の理論との整合性との検討が必要である。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

PM-1

chairperson:Shiro Hirano(Ritsumeikan Univ.)

Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S08-23] Stochastic source time functions satisfying the ω^{-2}-model, the cube law, and the GR law

○Shiro HIRANO[1] （1.College of Sci. &Eng., Ritsumeikan Univ.）

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-24] Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor

○Satoshi IDE[1] （1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo）

1:45 PM - 2:00 PM

©Seismological Society of Japan

Stochastic source time functions satisfying the ω^{-2}-model, the cube law, and the GR law

*Shiro HIRANO[1]

1. College of Sci. & Eng., Ritsumeikan Univ.

震源時間関数(STF)は, 地震時の断層面上の滑り速度分布を空間積分した時系列である. 多くの震源過程インバージョンの結果がデータベースに集積された結果, STF について以下の経験則が明らかにされている:
経験則1) STF は連続で, 有限の持続時間を持ち, 多くは非負かつ単峰.
経験則2) STF を時間積分したモーメント関数は, 破壊開始からの経過時間の3乗に比例して成長.
経験則3) STF の Fourier 振幅スペクトルは ω^2モデルで良く近似される.
経験則4) 最終的なモーメントの出現頻度は Gutenberg-Richter 則に従う.

経験則1については, ごく最近定量化され, STF の8割は単峰, 2割は複峰であることが分かっている [Yin+ 2021 SRL]. この傾向と例外の存在は, 震源過程のモデルが概ね単純でありながら, ある程度の複雑さもまた要求されることを示唆している. また, 個々の事例においては充分滑らかな関数というわけではなく, 多少の擾乱を伴なう時系列であることも明らかである. 経験則2および3については, 古くから知られ, これらを説明する様々な震源モデルが提唱されてきた. しかし古典的な亀裂モデルなどは前述の擾乱を容易に再現できない. 一方で非平面断層などの動力学的モデルは, パラメタ数と計算機負荷の双方に難があり, データを高精度に説明するには不可欠であるものの, 全く別の単純なアプローチもまた, 困難を補い理解に資する可能性がある. 更に経験則4も踏まえると, 現象の細部は割愛するとして, 統計的に経験則を満たす確率論的アプローチが有効であろうと考えられる.

地震にまつわる統計的性質を理解するための確率論的方法として, 確率微分方程式(SDE)によるモデル化が複数試みられてきた. SDE とは, 微分方程式にノイズ項を加えて積分することにより, ランダムさを内包した系をモデル化するものである. 先駆的なものは繰り返し地震の間隔 [Matthews+ BSSA 2002] やスロー地震 [Ide 2008 GRL] について, いずれも長時間を意識したものである. これらは通常の地震イベントの STF をモデル化するものではないが, 地震学における SDE の有効性を示唆している. より短時間の現象としては, 破壊の最中における断層面上の運動方程式に摩擦法則とノイズを導入した事例 [Wu&Chen 2019 arXiv; Wu+ 2019 Chaos] があるが, 残念ながら定常状態を意識したものであり, 地震の開始と停止については度外視されている.

そこで本研究においては, 地震時の STF を SDE に基づいてモデル化し, 経験則1-4を満足することを示す. ただし SDE の性質から必然的に, 確率変数の時系列は, その振幅スペクトルが ω^1 に漸近するブラウン運動である. 従って1つの確率変数の時系列だけでは, 通常の地震についての経験則3を満たすことはできない. そこで, スペクトルが ω^1 に漸近する時系列を2つ用意し, その畳込み積分が STF であると解釈することで, 経験則3を満たすことができる. これを発想の起点として, Bessel 過程と呼ばれる SDE を考える. Bessel 過程の解は必ず非負で, かつパラメタを適切に設定すれば有限持続時間を持つことが数学的に示されているため, 経験則1を満たす上で都合が良い. また, パラメタ如何では持続時間の出現頻度がべき分布で近似され, 従って経験則4も満足する. 残された経験則3については, 本研究の数値計算により統計的に満たされることが明らかになった. 従って, 4つの経験則は全て, 2つの Bessel 過程の畳込み積分によって説明可能である. なお, 2つの Bessel 過程の持続時間は確率によって決まるためそれぞれに異なるが, 両者が大きく異なる場合には経験則3が満たされない. そこで両者の比を2以内(case A)に制限した場合と10以内(case B)に制限した場合を考え, 後者のほうが STF に多様性が生じることが分かった(Figure 1).

最後に, 2つの Bessel 過程の畳込み積分が持つ物理的意味について考察する. Aki&Richards の表現定理から, STF は断層面上の応力降下速度の空間積分と, それに対する断層滑りの自己応答関数の畳込み積分で記述でき

© The Seismological Society of Japan

る. 前者の応力降下速度が Bessel 過程だとすると, 断層全体で積分した滑りと応力の時系列は, 臨界滑り量が最終滑り量の20–50%程度であるような滑り弱化則と等価であることがわかった. 後者については, 今なおその意味が自明ではないが, 少なくとも断層の自己応答が線形弾性体のものではなく, 断層破砕帯などに起因する散乱波などのランダムネスが卓越するものであると予想される.

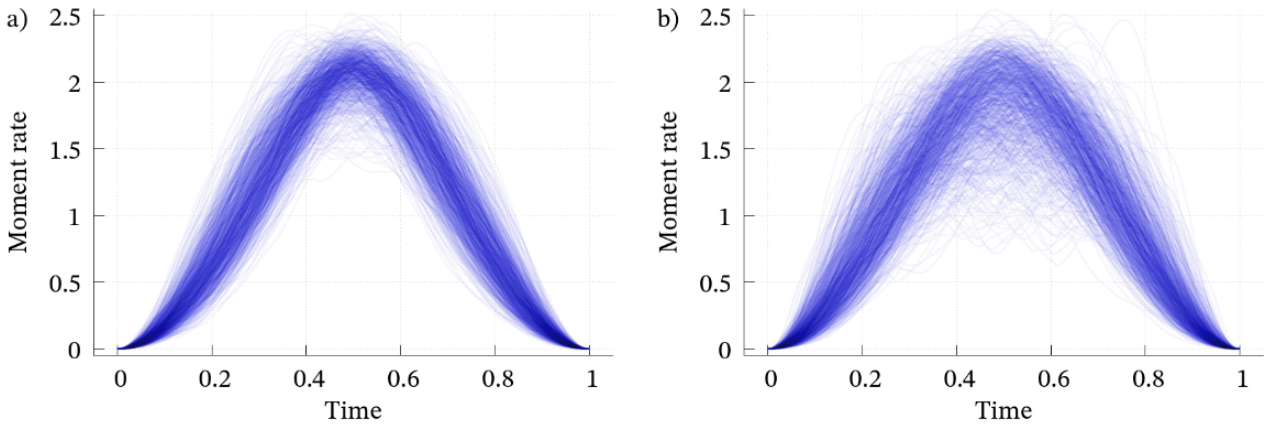


Figure 1. The 1,000 computed convolutions of the two Bessel processes for (a) case A and (b) case B. Time scale and total moment are normalized.

© The Seismological Society of Japan

Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor

*Satoshi IDE[1]

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

テクトニック微動と低周波地震（LFE）は、広帯域スロー地震の高周波（1Hz以上）成分の異なる表現であり、様々な地域で発見されている。LFEは微動の構成要素と考えられているが、長時間続く微動の中には、構成要素とみなせるLFEを見つけることが困難な場合も多い。そこで本研究では一般的に微動中から合成LFE、つまり微動発生地域におけるインパルス的震源からの地動応答を抽出する新しい手法を開発した。合成LFEは、多くの観測点で同時に発生する微動信号のインパルス性を用いて定義され、規格化してスタックした微動波形の絶対振幅最大値を最大化することで抽出される。この最大化関数は、極めて多峰的なので、遺伝的アルゴリズムと反復的改善を組み込んだ最適化手法を用いて最大化する。まず、この手法の妥当性をテストデータに適用して検証した後、近隣でLFEがほとんど検出されていない微動活動に適用する。一例は、潮汐応力に非常に敏感であることが知られている岡山の微動である。この微動に対して抽出した合成LFEは、正確な震源位置の決定や、マッチドフィルター解析による長期にわたる包括的な微動活動の把握に役立つ。具体的には海溝軸から遠く離れているにもかかわらず、岡山の微動の深さは約26kmと極めて浅いことがわかる。このように、LFEを微動のインパルス性を用いて新たに定義できることは、連続する微動活動は、ランダムな揺らぎで構成されているという仮説を支持する。スロー地震の挙動をより深く理解するためには、このようなランダム性を定量的に特徴づけることが重要である。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session | S18. Education and history of seismology

PM-1

chairperson:Noa Mitsui(Nagoya University)

Sat. Oct 16, 2021 2:00 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

[S18-01] Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

○Satoko MUROTANI[1] （1.National Museum of Nature and Science）

2:00 PM - 2:15 PM

[S18-02] Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

○Noa MITSUI[1], Takeshi Sagiya[1] （1.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University）

2:15 PM - 2:30 PM

[S18-03] Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

○Yoshiaki ORIHARA[1] （1.Tokyo Gakugei University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S18-04] Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

○Hiroo NEMOTO[1] （1.Ritsumeikan Univ.）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

*Satoko MUROTANI[1]

1. National Museum of Nature and Science

2021年は東日本大震災から10年となる年である．国立科学博物館（以下，科博）では，地震発生日である3月11日を含む約1か月間（3月9日～4月11日）を会期として，企画展「東日本大震災から10年ーあの日からの地震研究ー」を開催した．災害を風化させないため，当時の被害や復興の様子を振り返るとともに，この10年間の地震調査研究の成果や科博がこの10年間で行ってきた標本レスキュー活動や復興支援事業についても紹介した．科学系博物館での展示であるため，ただ東日本大震災のことを振り返るだけではなく，地震調査研究というサイエンスの部分に重点を置き，私たちは前を見て進んでいるということを示す展示を目指した．コロナ禍の中，入場人数や展示場所の制限を行うなかでの開催ではあったが，約3万人の方に足を留めていただいた．

本展示は第1会場5章＋第2会場という構成とした．1章は「東北地方太平洋沖地震と東日本大震災」として，地震の概要や当時の被害状況を岩手県の津波被災資料（東北地方整備局より借用）とともに振り返った．2章は「地震調査研究の貢献」として，この10年間の大きな成果と言える日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や緊急地震速報の改良，2020年から導入された津波フラッグ（気象庁より借用）の紹介など，震災以降に巨大地震に対する防災・減災に向けて行われてきている調査研究の一部を紹介した．この企画展の目玉となったのは海底地震津波観測装置（日本電気株式会社・防災科学技術研究所より借用）で，展示ホール中央に展示したが，かなりのインパクトを与えたようである．来場者からは，津波フラッグの取り組みを始めて知ったというコメントが多かった．3章は「くり返し起こる地震・津波」として，東北地方をくり返し襲った地震・津波について紹介した．日本三代実録における869年貞観地震の記述や，明治三陸地震，昭和三陸地震に関する資料，ならびに仙台平野での津波堆積物のはぎ取りとその調査風景（産業技術総合研究所より借用）を展示した．また，今年は1891年濃尾地震から130年という節目の年でもある．4章では「いつでもどこでも地震は起こる」として，海域で発生した観測史上最大の地震である2011年東北地方太平洋沖地震に対して， 陸域で発生した観測史上最大の地震である1891年濃尾地震の写真を展示した．5章は「国立科学博物館の取り組み」として，この10年間に科博として行った被災地の標本レスキュー活動や復興コラボミュージアム活動について紹介した．さらに第二会場では「東日本大震災からの復興と伝承」として，この10年間の三陸地方の復興の様子を辿った映像や写真（NHKテクノロジーズより借用）とともに，東日本大震災に関する伝承施設の紹介パネルを展示した．

展示できたのは震災に関するほんの一部であり，関連する講演会を開催することもできなかったが，会期中は春休みだったということもあり，親子連れや友人同士で観に来られた方が多かった．展示を見ていく中で，改めて思い出したことや自分がするべきことを考えることができた，という感想も見られた．今後も博物館という強みを生かし，展示等を通して，来館者に地震・津波や防災に関する教育や普及に努めていきたい． 最後に，本展示にあたっては多くの方々にお世話になりました．深く感謝申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

*Noa MITSUI[1], Takeshi Sagiya[1]

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

活断層で起きる地震に備えるには、ハザード情報の適切な提供が必要である。しかし、活断層の情報は不確実性を有する。例えば、一つの断層帯における震源断層の区間を正確に決定できないという不確実性が、マグニチュードや再来間隔、地震動の大きさの不確実性を生じる。

この問題に対して現在は、活断層地震に関する確率を計算し、公表する方法で対処している。具体的には、各活断層帯において今後30年以内に発生するM7.0以上の活断層地震を確率で表し、確率に応じたランクで発表する方法（主要活断層の長期評価）ならびに、各地域におけるM6.8以上の活断層地震の発生確率を発表する方法（活断層の地域評価）が地震調査研究推進本部（以降、地震本部）によって行われている。

確率を用いた対処方法について、活断層の長期評価内容を国民にわかりやすく伝えられるように表現を工夫してきたことを高く評価する声もある（山口、2008）。一方、これらの評価が適切に理解されず、本来の意図とは異なる形で使用される事例が指摘されている。また、別の視点からの批判として、Geller（2011）は、確率論的地震動予測地図で高い発生確率を示す場所が過去約30年間の被害地震の発生場所と一致しないことを示している。地球科学的に算出される地震動予測地図と、人間の時間スケールで把握できる被害地震が一致しないということは、地震動予測地図は元々人間が理解しにくい情報である可能性を示す。

これらの状況を考慮して我々は、最初の取り組みとして、現在の活断層情報の伝え方、すなわち、地震本部による公表結果（活断層の長期評価と地震動予測）の適切さを検討する。公表結果の受け止め方に関する調査は、地震本部が一般国民や地方公共団体を対象に行っている（文部科学省、2011-2019）。一方、活断層や地震に関する専門家の意見は、長期評価や地震動予測の作業過程では反映されているが、公表結果の認知度や評価は明らかになっていない。

そこで本研究では、長期評価や地震動予測地図の公表結果について、活断層や地震の専門家へのアンケート調査を実施した。調査対象は、日本活断層学会会員262人および日本地震学会代議員123人である。調査期間は令和３年２月22日～令和３年３月４日（日本活断層学会は令和３年２月24日～令和３年３月４日）である。インターネット上のセルフアンケートサイトQuestantを利用したウェブ調査を行い、各学会のメーリングリストを通じて、回答の協力を依頼した。有効回答数は全体 47件（うち、回答者の所属学会は、活断層学会のみ36.2%、地震学会のみ27.7%、両学会34.0%）であった。

アンケート結果から、まず、自治体職員には活断層に関する情報を幅広く知っていて欲しい、という期待の高さが読み取れた。また、改善案の検討で参考にすべき下記の回答傾向が得られた。

1. 科学的妥当性＆信頼性を重視
2. 長期評価等の発信方法：改善の余地が多い
3. 他機関との連携の必要性
4. 評価と災害と関係を述べることが必要
5. 公表結果の活用方法について言及することが必要
6. 外部の知見を取り入れることが必要

その他、情報提供先の区別や新手法への評価など、意見が分かれる検討課題の存在も明らかになった。例え

© The Seismological Society of Japan

ば、委員経験の有無によって「活断層の地域評価」の認知度の違いや、他機関との連携に関する考え方の違いが見られた。後者について、委員経験のない回答者は「情報を受け取る側（住民や自治体）」の視点に立ち、利便性の改善や知識の理解度を考慮した意見が多かった。一方、委員経験者は「情報の発信側（政府）」の視点に立ち、各省庁の目的の違いや、情報を統一する正当性を考慮した意見がしばしば見られた。このように、専門家間でも一つの問題に対して視点の違いに基づく意見の違いがみられたことは重要である。また、このような意見の違いは、専門家間の議論によって、解決策を示せる可能性が考えられる。

上記の意見を、一般国民ならびに地方公共団体を対象とした調査結果（文部科学省、2011-2019）と比較した。その結果、住民は知識より予測される災害を重視する点、地方公共団体は情報源の信頼性や発信方法の改善を求める点など、専門家と共通する意見が多くみられた。また、これらの比較により、専門家を含めた情報発信側の課題も明らかになった。例えば、知識を得る重要性を含めて住民に伝えるよう工夫する、市区町村の防災が中央防災会議や都道府県の指針に沿って行われていることをふまえて情報提供方法を改善する、などの課題が挙げられる。

上記の意見や検討課題は、多角的な視点から具体的な改善策を検討すべきである。そのため、地震動や災害関連などの専門家や地方公共団体の防災担当者、防災関連団体、地域住民への調査を行い、意見を集約して改善案の提案につなげることが今後の課題である。

謝辞
本調査研究においてアンケート調査にご協力いただいた日本活断層学会ならびに日本地震学会の皆様に感謝の意を表します。

© The Seismological Society of Japan

Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

*Yoshiaki ORIHARA[1]

1. Tokyo Gakugei University

週刊ポストでは年に数回、株式会社地震科学探査機構（JESEA）による地震予知情報に近い「MEGA地震予測」を掲載している。2021年4月26日に “予測的中の「MEGA地震予測」　GW中に要警戒の全国5エリア”と題したWeb記事がNEWSポストセブンから配信された（NEWSポストセブン, 2021）。「MEGA地震予測」は、データの扱い方から予測の出し方、自己評価など様々な点で問題があると指摘されている（織原・長尾, 2015; 川崎・加藤, 2016; 横山, 2020）。しかし、週刊誌などのメディアによる宣伝の影響もあり、否定的な主張は世間になかなか広まらない。

今回のNEWSポストセブンの記事はYahoo Newsでも取り上げられた（Yahoo, 2021）。Yahoo Newsの大半は記事ごとに読者のコメントが掲載されている。この「MEGA地震予測」の記事についても、肯定的、否定的両方のコメントが掲載されていた。そこで、本研究ではこのコメントから、なぜ信じるのか、または信じないのか、その理由を探ることを試みた。肯定的なコメントとしては、注意喚起としてこのような活動を受け入れる意見や、「MEGA地震予測」の村井俊治氏を専門家として応援する意見などがみられた。一方、否定派のコメントは、データの扱い方に関する問題点の指摘、必ず当たるような言い方への批判などであった。また、今回の記事については、予測対象期間であるGW（ゴールデンウィーク）中に該当する地震が発生している（2021年5月1日宮城県沖で最大震度５強の地震）。地震発生後、肯定派のコメントは予想が当たったと賞賛する声が多かった。これに対し否定派は、予測範囲の広さを問題視するコメントが多くみられた。

＜引用文献＞

NEWSポストセブン, 2021, 予測的中の「MEGA地震予測」　GW中に要警戒の全国5エリア, <https://www.news-postseven.com/archives/20210426_1654811.html?DETAIL>, (参照2021-5-6).
織原義明・長尾年恭, 2015, 地震前兆現象を科学する, 祥伝社新書, 232pp.
川崎一朗・加藤照之, 2016, 科学史・科学哲学の枠組みを借りた 地震予知研究についての論点整理の試み, 地震2, **69**, 11-22.
横山裕道, 2020, 迷走する地震予知：課題の解決急ぎたい, 地震ジャーナル, **70**, 55-58.
Yahoo, 2021, 予測的中の「MEGA地震予測」　GW中に要警戒の全国5エリア, <https://news.yahoo.co.jp/articles/a9f45647b8ce8b00189151ea0b80afe8514b7715>, (参照2021-5-6).

＜謝辞＞

本研究は東京大学地震研究所共同利用（2020-KOBO08）の援助をうけました。

© The Seismological Society of Japan

Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

*Hiroo NEMOTO[1]

1. Ritsumeikan Univ.

１．はじめに
平成20（2008）年改訂小学校学習指導要領（以下，旧小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下，旧中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は，旧小中学習指導要領と記す）の告示以降，平成29（2017）年に改訂された小学校学習指導要領（以下，現行小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下，現行中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は，現行小中学習指導要領と記す）が告示されるまでの間に，平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震や平成28年（2016年）熊本地震など最大震度７を記録する大震災を伴う事象が発生している．気象事例でも，平成24年（2012年）九州北部豪雨，平成26年（2014年）８月豪雨，平成27年（2015年）９月関東・東北豪雨など激甚な被害をもたらした気象災害が発生してきている．こうした自然災害の多発を受け，小中学校にて地震や気象，および自然災害に関して旧小中学習指導要領による学びから現行小中学習指導要領による学びにて具体的にどのような変更があったのかを調査分析しておくことは，今後の地震教育，地震防災・減災教育等を考える上で必要であると考え，現行課程の教科書分析を行った．なお，高等学校での学びに関しては，平成30（2018）年改訂の高等学校学習指導要領による学習開始が令和４（2022）年以降であることから，2021年時点では取り上げられない．

２．資料
本発表では，自然現象，自然災害のうち，小中学校「理科」での地震，地震防災・減災の学びに焦点をあて，旧小中学習指導要領および現行小中学習指導要領での課程（以下，順に旧課程，現行課程と記す）による「理科」教科書の記載内容の比較分析および考察を行った結果を報告する．よって，用いた資料は旧課程および現行課程での小中学校「理科」の全教科書（小学校６種類，中学校５種類）である．なお，旧課程での分析に関しては根本（2015a：2015b）にて報告済みである．例えば，旧課程小学校「理科」では，６種類の教科書に共通して使われている地震に関係する用語は僅かに２語（地震，断層）だけであったことを報告している［根本（2015a）］．

３．結果および考察
現行課程の小学校「理科」教科書では，６種類の教科書に共通して使われている地震に関係する用語は“地震”，“断層”，“津波”の３語となっている．平成23年（2011）年東北地方太平洋沖地震による津波の影響を受けた結果と考えられる．“断層”と“地震”との説明が地震学的におかしな記述となっている教科書が旧課程の小学校「理科」教科書では６種類中５種類あったが［根本（2015a）］，現行課程の教科書では６種類中１種類と改善が進んでいる．この１種類の教科書の説明文も，地震学的に正しい記載であるとも読み取れなくは無いことから，日本語の問題と言えるのかもしれない．
現行小学習指導要領では内容の取扱いにて『自然災害についても触れること。』と旧小学習指導要領には記されていなかった文言が加わった．これを受け，６種類の教科書ともに震災，火山災害の記述が行われるようになったが，取扱いの分量には差が生じている．ページ数で比較すると，火山災害と合わせて３ページの教科書もあれば７ページの教科書もある．使われている用語も教科書により大きく異なっており，例えば，緊急地震速報は４種類の教科書で使われている一方，防災倉庫，稲むらの火，ハザードマップなどは１種類の教科書で使われているだけである．こうした現状は，小学校段階で伝えるべき地震防災・減災に関わる用語選択が，各教科書出版社の判断によっているために生じている可能性が高い．「理科」にて取り扱う地震防災・減災に関係する用語や内容の整理が必要である．
字数制限の関係で「社会科」や現行課程の中学校「理科」教科書の内容に関して本予稿では触れないが，小学校「理科」教科書と同様の課題が浮かび上がってきている．

© The Seismological Society of Japan

４．まとめ

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書の分析から，地震に関する記載の改善が見られていること，および小中学習指導要領での記載の変化により震災，地震防災・減災に関する記述が加わったが，その内容は教科書毎に開きのあることが明らかとなった．今後，小学校段階および中学校段階にて「理科」にて取り扱うべき，地震防災・減災，震災に関して使用する用語および内容の整理を行い提案する必要がある．

参考文献

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書.
根本泰雄，2015a，（公社）日本地震学会モノグラフ，4，44-48.
根本泰雄，2015b，（公社）日本地震学会モノグラフ，4，56-60.
＜ https://www.zisin.jp/publications/pdf/monograph4.pdf ＞

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson:Naofumi Aso(Tokyo Institute of Technology), Taku Ueda(University of Tokyo)
Thu. Oct 14, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-01] Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs

○Thystere Matondo Bantidi[1], Takeshi Nishimura[1] （1.TOHOKU UNVERSITY）

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

○Jiancang ZHUANG[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-03] Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

○Naofumi ASO[1] （1.Tokyo Institute of Technology）

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-04] Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

○Taku Ueda[1], Aitaro Kato[1], Christopher W Johnson[2], Toshiko Terakawa[3] （1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2.Los Alamos National Laboratory, 3.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University）

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-05] Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

○Tomoaki NISHIKAWA[1], Takuya Nishimura[1] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-06] Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

○Yuta MITSUI[1], Keiji UEHARA[1], Issei KOSUGI[2], Koji MATSUO[3] （1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Graduate School of Science, Shizuoka University, 3.Geospatial Information Authority of Japan）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs

*Thystere Matondo Bantidi[1], Takeshi Nishimura[1]

1. TOHOKU UNVERSITY

The present study systematically examined the characteristics of successive earthquakes that are not so-called aftershocks but closely occur in space and time after the occurrence of a small, moderate or large earthquake in order to understand the triggering process. We use the Global Centroid Moment Tensor catalog for the period from 1976 to 2016. Shallow earthquakes with a moment magnitude, Mw, of larger than or equal to 5 are analyzed. We also use F-net catalog provided by NIED, Japan, for the period from 2001 to 2010 and analyze the earthquakes occurring around Japan islands with Mw<5.5. We separately analyze these two data set to clarify the characteristics of successive earthquake occurrence for a wide magnitude range of Mw>=3.5. We search the earthquakes that occur within a horizontal distance (*D*) and a lapse time (Ta) from a source event, and group them as a cluster. We then count the number of the clusters, which represents the successive earthquakes, for different *D* and Ta. To examine whether or not these successive earthquakes occur randomly, we compare the results with simulations in which earthquakes are set to randomly occur in time (but at the locations same with the estimated centroid). The results show that the number of clusters for the simulation for a given Ta and a magnitude range rapidly increase with *D* and merge with those for real data at a short distance called triggering distance. The triggering distance increases with increasing the magnitude of source event and decreases as the lapse time increases. This implies that the seismic activity turns to become the normal condition in which the occurrence time intervals of large earthquakes obey a Poisson distribution. From the analysis of both global CMT and F-net catalogs, we found that the triggering distance increases with being almost proportional to about 1/5 to 1/4 of the seismic moment of source earthquake. Such moment dependency is reconstructed from the simulated data that follow ETAS model. We further derive empirical scaling relations between the seismic moment and triggering distance from the equations in ETAS model, and the observed exponent of 1/5 to 1/4 are well predicted from the estimated ETAS parameters reported at various regions around the world. These consistencies suggest that we may evaluate the triggering probability of eartqhaukes by ETAS model.

Key words: Spatio-temporal clustering, successive occurrence, triggering distance, ETAS model.

© The Seismological Society of Japan

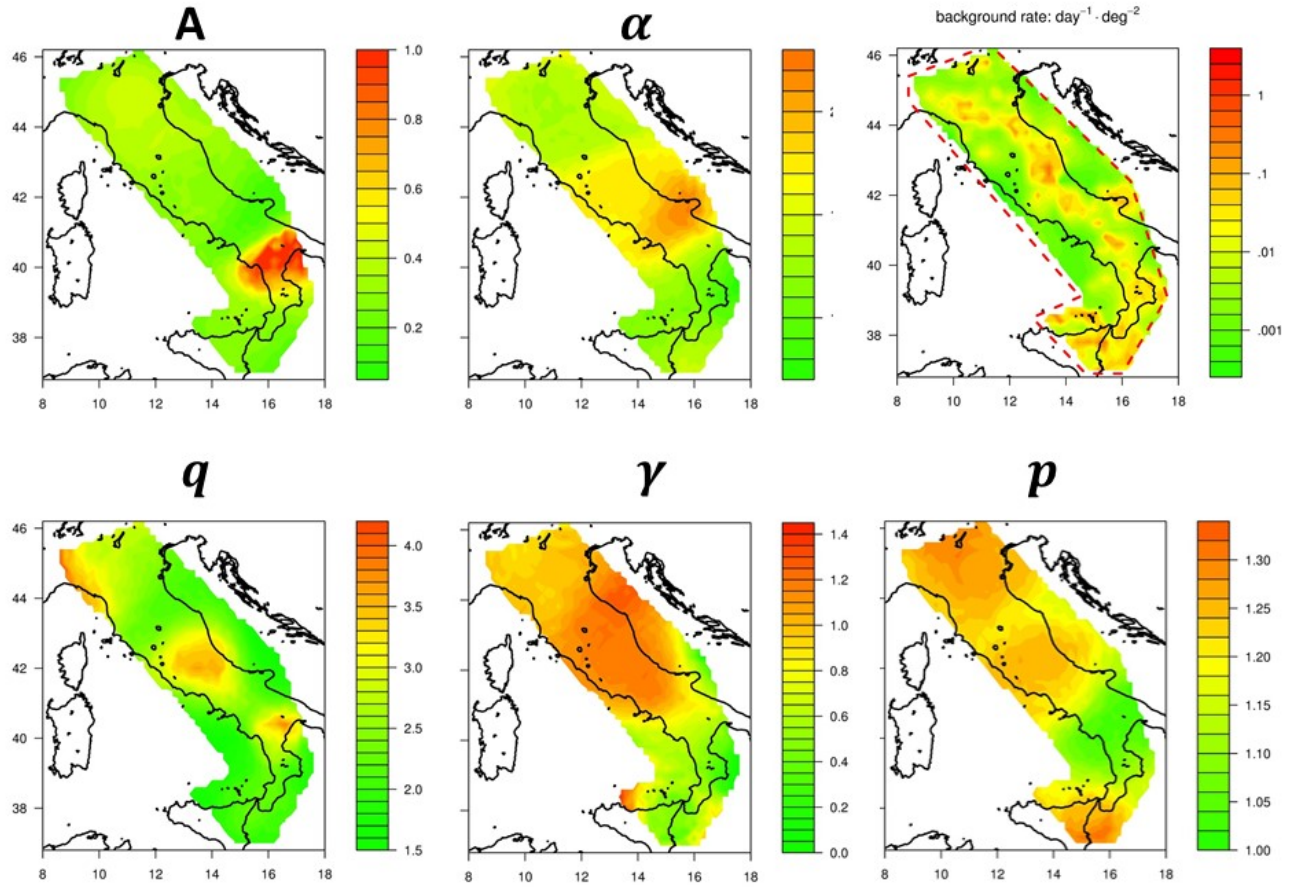
Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

*Jiancang ZHUANG[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics

Based on the ETAS (epidemic-type aftershock sequence) model,
which is used for describing the features of short-term clustering of earthquake occurrence, this paper presents some theories and techniques related to evaluating the probability distribution of the maximum magnitude in a given space-time window, where the Gutenberg-Richter law for earthquake magnitude distribution cannot be directly applied. It is seen that the distribution of the maximum magnitude in a given space-time volume is determined in the long-term by the background seismicity rate and the magnitude distribution of the largest events in each earthquake cluster. The techniques introduced were applied to the seismicity in the Italy and Southern California regions.

Figure: Spatial variations of the ETAS parameters in the Italy region.



© The Seismological Society of Japan

Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

*Naofumi ASO[1]

1. Tokyo Institute of Technology

震源分布の時空間的な特徴から、あたかも震源が移動しているように見えることをマイグレーションと呼ぶ。その物理的実体は、岩石や流体がその速度で移動しているのではなく、応力や流体圧がいわば群速度として伝わっていることによるものだと考えられる。こうしたマイグレーションは、拡散的な物理現象が背後にあることを示唆しており、地球物理学的に重要な知見を与える。しかしながら、マイグレーションの特定には、高い時空間分解能をもつ地震カタログが必要になる。本研究では、ETASモデル［Ogata, 1988］の改良を行うことにより、点状クラスターなど、マイグレーションの見られないような場合においても、拡散的な物理現象を示唆する特徴を抽出できる方法を提案する。
余震活動に関するマクロな経験則である大森則により、地震間のミクロな相互作用が与えられるという仮定のもと、地震活動を説明するモデルがETASモデルである。しかしながら、群発的な活動は、うまくETASモデルでは説明できないことが知られている。その本質的な原因は、群発的な活動に潜む拡散的な物理現象がETASモデルでは説明できないからであると考えられる。そこで、ETASモデルに指数関数的な項を加えることで、拡散的な物理現象も説明できる改良ETASモデルを提案する。実際に、群発的な活動として代表的な島根県東部の準火山型深部長周期地震に適用した。もとのETASモデルとAICを指標として比較すると、パラメータ数が増えるデメリットよりも、対数尤度が改善するメリットの方が大きく、より妥当なモデルとして示された。改良ETASモデルに基づくシミュレーションも行うことで、地震発生間隔分布などの特徴も再現することができた。以上のように、群発的な活動も説明できるような改良ETASモデルを提案した。この方法を用いれば、時空間的なマイグレーションが見えなくても拡散的な特徴を抽出できるため、地震学や火山学においてさらなる活用が期待される。

© The Seismological Society of Japan

Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

*Taku Ueda[1], Aitaro Kato[1], Christopher W Johnson[2], Toshiko Terakawa[3]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Los Alamos National Laboratory, 3. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

地震活動度は、降水量や灌漑などの地表や地下浅部に応力変化や強度変化をもたらす現象と相関があることが既往研究で指摘されている(e.g., Heki, 2003; Amos et al., 2014)。例えば、カリフォルニアでは地下水荷重の年変動に対応して、地震活動が季節変動を示す(e.g., Amos et al., 2014; Johnson et al., 2017)。Johnson et al. (2017)ではGPSの鉛直変位から地下水荷重が断層面に与える応力変化を計算し、カリフォルニアでの地震活動が剪断応力が増加するときに発生しやすいことを示した。日本でも地震活動の季節変動性が指摘されており、積雪荷重や降水との関係が議論されているが(e.g., Heki, 2003; Ueda and Kato, 2019)、原因として考えられる表層荷重による応力変化と直接比較した研究はほとんど行われていない。
本研究では東北地方内陸部において、地表の上下動変位データから荷重の空間分布を推定し、表層荷重による地下での応力変化と地震の発生時期との比較・検討を行った。まず、GEONETのF5解(2003/08/14-2010/12/31)の上下動成分をBedford and Bevis (2018)の手法を用いてトレンド成分、地震等による過渡的な変化、季節変動成分、残差に分離した。その後，各観測点における季節変動成分と残差を足し合わせた時系列データから，それらの中央値をcommon mode errorとして抽出した。上下動変位のデータからcommon mode errorを除いたデータに対して、再度Bedford and Bevis (2018)の手法を適用し、季節変動成分の推定を行った。推定した季節変動成分を基に、Johnson et al. (2017)の手法を用いて、月ごとの表層荷重の空間分布を推定した。その結果，積雪量の大きな日本海側の地域において冬に増加し、春に減少する荷重分布が得られた。
地殻内地震発生域の応力場(Terakawa and Matsu'ura, 2008; 2010)における最大せん断応力面をレシーバー断層として表層荷重が生み出すクーロン応力の地震発生時の変化を計算し、地震発生のタイミングと比較した。気象庁一元化処理震源カタログの1980-2010年のM3以上の地震を使用した。HIST-ETASモデル(Ogata, 2004)を用いて、各地震が背景地震活動度として発生した確率で重み付けすることで、余震活動を取り除いた背景地震活動と表層荷重による応力変化との関係を評価した。その結果、東北地方内陸部における背景地震活動はクーロン応力が高い時に発生しやすいことがわかった。

謝辞：GNSSの上下動変位のデータは国土地理院のGEONETのF5解を使用しました。上下動変位の季節変動成分の抽出にGRATSID (Bedford and Bevis, 2018)を使用しました。気象庁の一元化処理震源カタログを使用しました。HIST-ETASモデルのパラメータ推定にOgata et al. (2021)のコードを使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

*Tomoaki NISHIKAWA[1], Takuya Nishimura[1]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

世界各地の沈み込み帯プレート境界では、スロースリップイベント（Slow slip event; SSE）と呼ばれる低速な断層滑り現象が発生する（Obara & Kato, 2016）。スロースリップイベントは、ときに大地震や群発的な地震活動を誘発することが知られており（Ozawa et al., 2003; Radiguet et al., 2016）、各地の沈み込み帯では、SSEと地震活動の因果関係の解明が進められている（Kato et al., 2012; Nishikawa et al., 2021）。

その一方、現在、世界で標準的に使用されている地震活動統計モデルであるEpidemic-type aftershock-sequence (ETAS) モデル（Ogata, 1988）には、SSEが地震活動に及ぼす影響（誘発効果等）が全く考慮されていない。そのため、プレート境界でSSEが発生した際、ETASモデルに基づく地震発生確率予測の結果と、実際に観測される地震活動が大きく乖離するという問題がある（Llenos et al., 2009）。この問題を回避するため、Okutani & Ide (2011)は、SSE発生期間と非SSE発生期間に、それぞれ異なるETASパラメータを割り当てることで、SSEに起因する地震発生レートの上昇を既存のETASモデルの枠組みの中で表現した。しかし、このモデルにはSSEの震源特性（モーメントマグニチュードやモーメントレートなど）が組み込まれていないため、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式は、このモデルからは直接は得られない。つまり、「あるマグニチュードのSSEが発生した際、いくつの地震が誘発されるか？」という基本的な問いに、このモデルは答えることができない。

そこで、本研究は、既存のETASモデル（Ogata, 1988）にGlobal Navigation Satellite System (GNSS) 観測データから推定したSSEのモーメントレートを陽に組み込み、新たなモデル（SSE-informed ETAS model）を作成した。このモデルは、SSEのモーメントレートと地震発生レートに線形な関係（或いはべき乗の関係）を仮定し、SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数（或いはSSEの地震モーメントと地震発生数の比例定数）を新たなETASパラメータとして直接推定する。

我々は、新たなモデルをニュージーランド・ヒクランギ海溝浅部で発生した3つのSSE（2006年8月Mw 6.8、2008年3月Mw 6.6、2011年6月Mw 6.7）とそれらの周辺で発生したM 2.5以上の地震に適用した。2006年と2011年のSSEはヒクランギ海溝中央部南より（南緯40.5度付近）に、2008年のSSEは中央部北より（南緯39度付近）に位置する。各SSEのモーメントレートはGeoNetが公開しているGNSS座標時系列データとTDEFNODE（McCaffrey, 2009）を用いて事前に推定した。

その結果、2006年と2011年のイベントでは、赤池情報量規準（Akaike information criterion; AIC）が従来のETASモデルと比べて大きく減少し、新たなモデルがより良いモデルであることが示された。また、新たに導入したパラメータ η（SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数）から、ちょうど１つの地震を誘発するのに必要なSSEのマグニチュードが計算でき、2006年のSSEではMw 6.0/event（95% CI: Mw 5.8/event ~ Mw 6.3/event）、2011年のSSEではMw 5.5/event（95% CI: Mw 5.4/event ~ Mw 5.7/event）と推定された。その一方、2008年のSSEでは、AICはむしろ増加し、従来のETASモデルのほうが良いモデルであった。

ヒクランギ海溝沿いの群発地震活動に関する先行研究（Nishikawa el al., 2021）では、SSEとそれに伴う群発地震活動に数日から1ヶ月程度の発生時間のずれがあることが報告されている。これをふまえ、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れを許容したモデルと許容しないモデルを比較した。その結果、2006年のSSEでは、18日の時間遅れがあるモデルが、時間遅れのないモデルと比べてAICが2.7減少

© The Seismological Society of Japan

し、時間遅れを許容したモデルがより良いモデルあることが示唆された。加えて、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式のべき指数を1（線形）としたモデルと、べき指数を1以外としたモデルの比較も行なったが、べき指数1（線形）のモデルに比べ、AICが顕著に減少（2以上の減少）することはなかった。

本研究の新たなモデルによって、SSEに起因する地震発生レートの上昇を考慮した地震発生確率予測が可能となった。また、本モデルによって、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式を得ることができた。加えて、本モデルは、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れや、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式の関数形（べき指数等）に関する定量的な議論を可能にした。今後、本モデルを各地の沈み込み帯沿いのSSE及びそれに伴う地震活動に適用することで、各地の地震活動の予測精度向上や、SSEに伴う地震活動の特徴の定量化及びその地域差の解明につながると期待される。

© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

*Yuta MITSUI[1], Keiji UEHARA[1], Issei KOSUGI[2], Koji MATSUO[3]

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Graduate School of Science, Shizuoka University, 3. Geospatial Information Authority of Japan

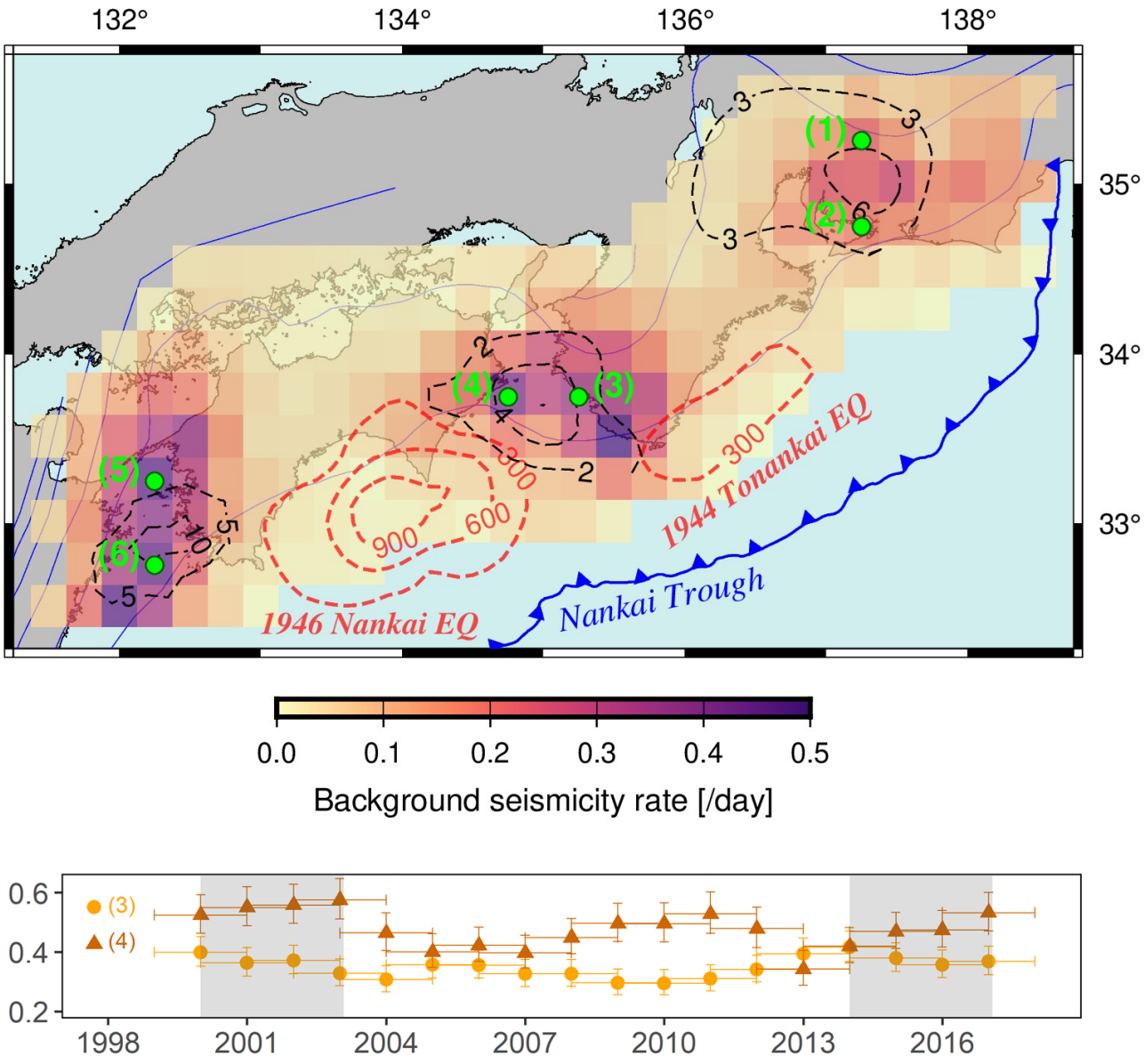
沈み込み帯でのファスト地震とスロースリップとの間には、多種類の関係があると考えられる。一例として、スロースリップ発生時に地震活動が活発化することが報告されてきた(Hirose et al., 2012; Passarelli et al., 2021)。この性質には沈み込み帯による多様性があること、また、プレート境界地震に限らずプレート内地震まで考慮すべきであることも、指摘されてきた(e.g., Nishikawa et al., 2021)。

本研究では、南海トラフ沈み込み帯を対象として、ファスト地震とスロースリップの関係を探る。まず、気象庁の震源カタログ(1998-2017年)より、沈み込むプレート境界から鉛直方向15km以内にある地震を抽出した。M1以上の地震でG-R則が成り立っていることを確認した(b値0.82)。M3以上の初動発震機構解がほとんどプレート内地震と判断できるものだったため、M1以上の地震もほぼプレート内地震と仮定できる。これらの地震に対して、ETASモデル(Ogata, 1988)に基づく背景地震活動率の推定を行った。

全期間を通しての背景地震活動率には、along-strike方向の不均質が見られた。具体的には、浜名湖から岡崎平野の下、紀伊水道から紀伊半島南端の下、豊後水道下の3箇所で、高い値となった。この3か所は、M6.5を超える長期的スロースリップイベント(L-SSE)の発生域(Ochi and Kato, 2013; Kobayashi, 2017; Yoshioka et al., 2015)と空間的に良く対応している。これらはまたフリーエア重力異常(Matsuo and Kuroishi, 2020)の低重力域とも対応している。さらに、背景地震活動率の時間変化についても推定を行ったところ、紀伊水道の西部で、2回のL-SSE期間中と2010年頃に地震活動率が増大していた。岡崎平野の北部でも若干ながら同様の傾向があった。一方で、L-SSEとの時間的対応が明確でない場所も存在し、短波長不均質が見られた。

本結果は、第一に「プレート内地震が活発な領域でL-SSEが発生する」こと、細かく見ると「L-SSE発生に伴ってプレート内地震活動が揺らぐ」場合もあることを表す。前者については、低重力異常から想定される断層荷重の減少やスラブ傾斜角変化によるせん断応力擾乱(Mitsui and Hirahara, 2006)、後者についてはスラブ流体(圧)移動の影響が考えられる。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson:Shinji Toda(Tohoku University), Kota Fukuda(University of Tokyo)
Thu. Oct 14, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-07] Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

○Hiroki TANAKA[1], Ken Umeno[1] （1.School of Informatics, Kyoto University）
11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

○Shinji TODA[1], Ross S Stein[2] （1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Temblor, Inc.）
11:15 AM - 11:30 AM

[S09-09] Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

○Takaki IWATA[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Prefectural University of Hiroshima, 2.Kanazawa University）
11:30 AM - 11:45 AM

[S09-10] Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

○Satoshi MATSUMOTO[1], Ayaho Mitsuoka[2], Yoshihisa Iio[3], Shinichi Sakai[4], Aitaro Kato[5] （1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2.Graduate School of Science, Kyushu University, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）
11:45 AM - 12:00 PM

[S09-11] Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

○Kota FUKUDA[1], Takahiro HATANO[2], Kimihiro MOCHIZUKI[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Space Science Osaka University）
12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

*Hiroki TANAKA[1], Ken Umeno[1]

1. School of Informatics, Kyoto University

地震の時間間隔分布のマグニチュード閾値依存性を検討する上で, 異なるマグニチュード閾値での時間間隔の間の条件付き確率$p_{mM}(\tau_m|\tau_M)$を用いる方法が提案されている[1]. この条件付き確率は, マグニチュードの時系列に異なる二つの閾値(M,m(<M))を設定したとき, 上部閾値(M)における長さτ_Mの時間間隔に含まれるという条件のもとで下部閾値(m)において長さτ_mの間隔が見出される確率密度関数である.

この条件付き確率についてのベイズの定理を考えることで, 下部閾値においてある長さτ_mの間隔が見出された時に, それを含む上部閾値での間隔の長さについての逆確率密度関数$p_{Mm}(\tau_M|\tau_m)$を導ける. さらに, イベント間に相関のない重み付き点過程（ETASモデルにおけるバックグラウンドサイスミシティ）について, このベイズの定理をベイズ更新に拡張し, 複数の下部閾値での間隔$\{\tau_m^{(1)},...,\tau_m^{(n)}\}$が見出された場合の逆確率密度関数$p_{Mm}(\tau_M|\tau_m^{(1)},...,\tau_m^{(n)})$とその近似関数が導ける. 後者の近似関数は条件付き確率の積の形を含む主要な項と補正項からなり, 特に主要な項は数値計算する上で便利な形をしている[2].

本発表ではこれらの結果に基づいて, イベント間に相関のあるETASモデルの時系列にベイズ更新の方法を適用して, 下部閾値での間隔の情報から上部間隔の長さを推定する. その推定値と実際の発生時刻との比較を行い, ベイズ更新の方法が予測を行う上でどの程度有効であるかについて統計的に検討した結果について報告する.

まず生成したETASモデル[3]の時系列にベイズ更新を適用することで, 逆確率密度関数の近似関数における補正項は最頻値にあまり影響しないことを示す. このことから, 数値計算のしやすい近似関数の主要項について, その最頻値を上部間隔の推定値として用いる. この推定値と実際の発生時刻との間の相対誤差を用いて各更新時点における推定の良さを決め, 良い推定が実際の発生時刻よりも十分に前から続いていることを予測の有効性として評価を行った. その結果, 予測の有効性は時系列の定常性と関係があり, 時系列中で定常的な活動が支配的である大イベントの直後または十分時間が経過した場合により有効な予測ができることが示された.

[1] H. Tanaka and Y. Aizawa, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 024004 (2017).
[2] 田中宏樹, 梅野健, 日本地震学会秋季大会, S09-25 (2020).
[3] Y. Ogata, J. Am. Stat. Assoc. 83, 9 (1988).

© The Seismological Society of Japan

Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

*Shinji TODA[1], Ross S Stein[2]

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor, Inc.

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）から10年が経過したにもかかわらず，依然として余震と考えられる地震活動が続いている．特に，２月13日には福島県沖でM7.3のスラブ内地震（深さ55km）が発生し，蔵王町，国見町などで最大震度6強を記録した（気象庁，2021）．その後も，3月20日に宮城県沖でM6.9（深さ59km），5月1日に同じく宮城県沖でM6.8（深さ51km）のプレート境界型地震が発生した．東北沖震源域周辺の今後の地震ハザード評価に資するため，本発表では余震活動の継続性について検討する．

【最近５年間（2016-2021）と東北沖地震前の比較】まず東北沖地震からの10年を５年区切りで前半（2011/3/11-2016/3/10）と後半（2016/3/11-2021/3/10）に分け，余震活動の継続性の観点から，後半の活動に注目した．特に東北沖地震前（1998/1/1-2011/3/10）を常時地震活動（background seismicity）と仮定し，後半の活動の変化を検討した．その結果を図１aに示す．常時地震活動に比べて数倍～数十倍の余震活動域が震源域を囲むようにドーナッツ状に広がる．特に，三陸沖～福島沖近海と海溝軸～その東側（アウターライズ）が顕著である．対称的に，東北沖地震の震源域でも特に大すべり域（例えば，Iinuma et al., JGR, 2012）で顕著に地震活動が低下している．この震源域での活動低下については，Kato & Igarashi (GRL, 2012)による報告もあるが，後半の活動では静穏化がより明瞭になっている．また，プレート境界だけではなく震源域のスラブ内にも広がっているようにみえる（図１c）．

【東北沖本震と大規模余震によるクーロン応力モデル】次に，これらの地震活動度変化を説明するために，クーロン応力変化と速度および状態依存摩擦則（Dieterich, JGR, 1994）を組み合わせた地震活動予測モデル（以下，クーロン応力モデル．Toda et al., JGR, 1998）を適用した．クーロン応力変化は本震直後の地震活動を概ね説明するが（Okada et al., EPS, 2011; Toda et al., EPS, 2011），今回は応力ー地震活動応答の地域性や時系列を検討するため，前段のモデルを改良したToda & Stein (BSSA, 2020)の手法を導入した．同手法の特徴は，レシーバ断層として常時地震活動時のメカニズム解（ここでは防災科研，F-net）を用い，本震だけではなく前半５年間に発生したM6.5余震による応力変化も考慮して，状態変数を時空間的に時々刻々に変化させることにある．また，実際に観測された余震発生レートから摩擦則パラメータ・常時地震レートを学習・最適化するなどの工夫を行っている．さらに，同モデルではDieterich (1994)の余震継続期間taを一定にしても（ここでは20年），多様なレシーバ断層上の応力変化の不均質分布により，地域によってこの初期値が大きく変動するのも特徴である．前半５年間までの震源データを用いて後半５年間の地震活動度変化をレトロスペクティブ（retrospective）に予測したものを図１bに示す．実際の観測結果（図１a）と概ね整合することがわかる．三次元的にみると，例えば福島県一福島県沖を横断する断面図（図１c）では，震源域の全面的静穏化とスラブ内地震，アウターライズ地震の継続的な活発化がわかる．スラブ内地震，アウターライズ地震の活動の持続化は，応力載荷速度（secular stressing rate）の速いプレート境界に比較して，プレート内の載荷速度が遅いことによる応力伝播効果の長期化とも考えられる（Stein & Liu, Nature, 2009; Toda & Stein, BSSA, 2018）．本年２月13日のスラブ内地震もこの長期的余震域で発生した．また，1896年明治三陸地震（プレート境界型）と1933年昭和三陸地震（アウターライズ型）のペアにみられるように今後長期にわたって大規模なアウターライズ地震の発生も危惧される．

謝辞：地震活動の解析・モデリングにあたっては気象庁一元化震源カタログ（暫定も含む），防災科学技術研究所F-netメカニズム解を使用した．

© The Seismological Society of Japan

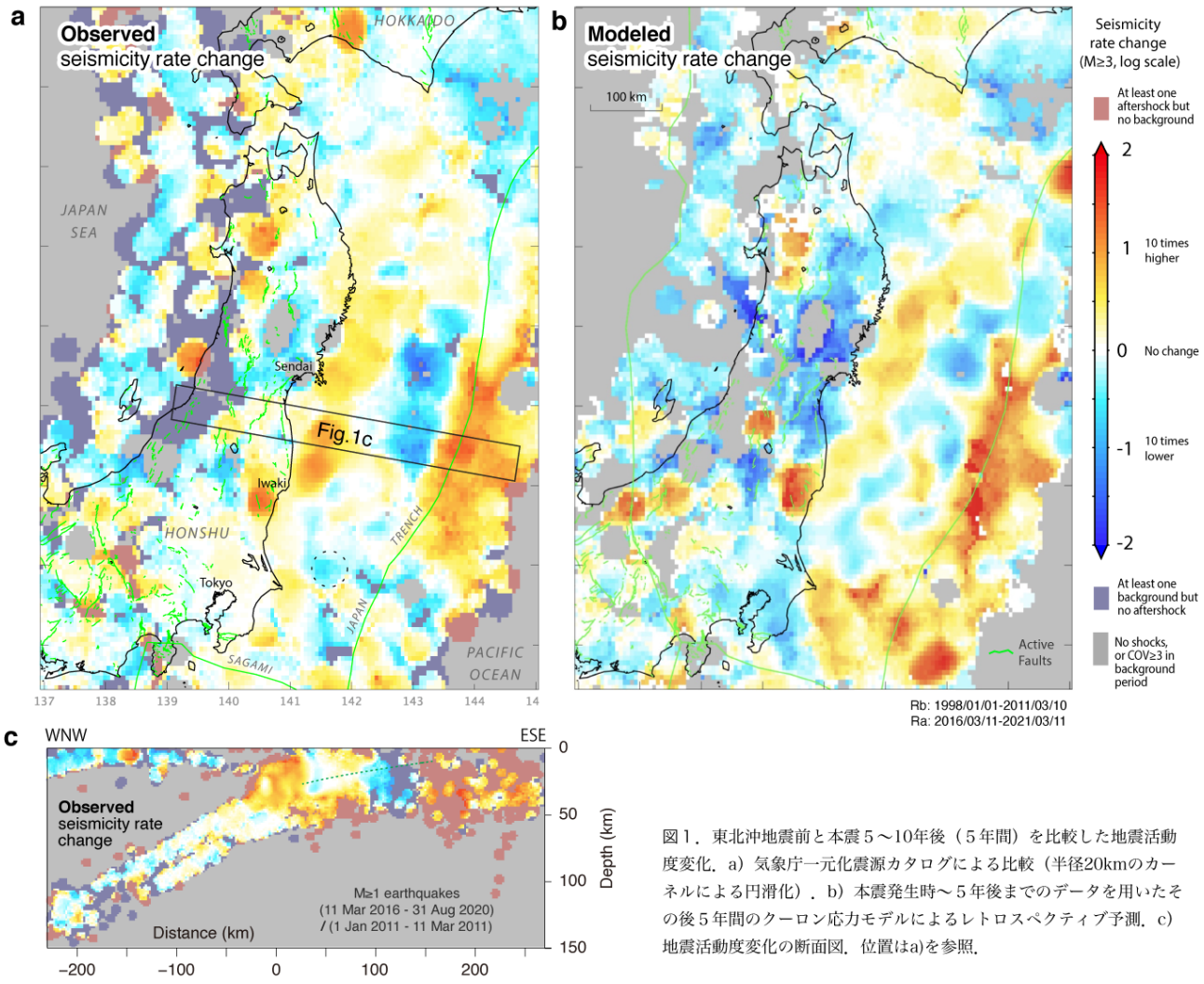


図１．東北沖地震前と本震５～10年後（５年間）を比較した地震活動度変化．a）気象庁一元化震源カタログによる比較（半径20kmのカーネルによる円滑化）．b）本震発生時～５年後までのデータを用いたその後５年間のクーロン応力モデルによるレトロスペクティブ予測．c）地震活動度変化の断面図．位置はa)を参照．

© The Seismological Society of Japan

Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

*Takaki IWATA[1], Yoshihiro Hiramatsu[2]

1. Prefectural University of Hiroshima, 2. Kanazawa University

深部低周波微動（DLF）を含むスロー地震の規模が従う分布としてはベキ分布 [例えばBostock et al., 2015, JGR, doi:10.1002/2015JB012195] や指数分布 [例えばChestler & Creager, 2017, JGR, doi:10.1002/2016JB012717] が提案されている．さらにより複雑な分布としてベキ分布と指数分布を掛け合わせたtapered Gutenberg-Richter (GR)則 [Vere-Jones et al., 2001, GJI, doi:10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x] を用いた研究もある [Nakano et al., 2019, GRL, doi:10.1029/2019GL083029]．これらの分布に対し，本研究では南海トラフの深部低周波微動に対して，ベキ分布と指数分布を適当な比率で足し合わせた混合分布を適用した例を示す．

適用した確率分布は以下の通りである：

（モデルA）$p_A(M_0) \propto [\gamma M_0^{-b}/C_1 + (1-\gamma)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$

（モデルB）$p_B(M_0) \propto [\gamma(1-r(M_0))M_0^{-b}/C_1 + (1-\gamma)r(M_0)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$

ここでM_0は地震モーメントである．C_1およびC_2は各項のγあるいは$1-\gamma$を除いた部分をM_0で積分して1になるようにするための正規化定数である．γはベキ分布と指数分布に従うイベントの個数比である．モデルAではベキおよび指数分布の混合比がM_0に依存しておらずγがそのまま混合比に相当する．これに対し，モデルBでは混合比自体がM_0に依存して変化することが仮定されている．$r(M_0)$は正規分布の累積分布関数でありM_0が小さければ0，大きければ1に近づく．これによりM_0の小さい方でベキ分布，M_0の大きい方で指数分布に近づくような確率分布を表現することが出来る．さらに$q(M_0)$はあるM_0におけるイベント検知率であり，Ogata & Katsura [1993, GJI, doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x] やIwata [2013, GJI, doi:10.1093/gji/ggt208]と同様，これも正規分布の累積分布関数を用いることとする．通常の解析ではSSEが完全に取れているM_0以上の範囲のみを解析するが，$q(M_0)$を導入することでSSEの記録が不完全であるM_0の小さな範囲も含めた解析が可能となる．

解析に用いたデータはDaiku et al. [2018, Tectonophys., doi:10.1016/j.tecno.2017.11.016]（以下D2018）によって得られたものに基づいた．D2018では南海トラフに沿った東海地方から四国地方を5つの領域に分け，各領域で観測されたDLFのapparent momentを求めた．期間は2002年4月から2013年7月までであり，各領域で219～663個のDLFのapparent momentが得られている（領域分けについてはD2018のFigs.2および3を参照されたい）．本研究ではNakamoto et al. [2021, JGR, doi:10.1029/2020JB021138] に倣い，D2018によるDLFのapparent momentに$4\pi\rho V_s^3$（ρは媒質密度，V_sはS波速度）を掛けS波の平均的なradiation pattern係数で割ったものをM_0として解析を行う．なお，apparent momentをM_0に変換する際に必要となる値はMaeda and Obara [2009, JGR, doi:10.1029/ 2008JB006043] のものを用いた．

各領域のデータに対して上に示した2つのモデル（確率分布）を適用した．合わせて従来研究で用いられたベキ分布・指数分布・tapered GR則も適用した．各モデルのパラメータは最尤法で推定し，得られた最大対数尤度の値からAIC（赤池情報量規準）[Akaike, 1974, IEEE Trans. Auto. Control, doi: 10.1109/TAC.1974.1100705] を求めて計5つのモデルに関するモデル比較を行った．

結果例として紀伊半島北部および中央・西四国に対する結果を図に示す．紀伊半島北部（図(a)）については従来研究の3モデル（青・水色・紫点線）および本研究のモデルA（緑実線）は観測されたM_0の（相補）累積分布関数（黒実線）全体には合っていない．それに対し，モデルB（赤実線）は観測されたM_0の累積分布関数に比較的良く適合している．実際，AICの値でも2番目に良かった（小さかった）tapered GR則に比べて22.0小さく，有意に優れていると言える．中央・南紀伊および東四国でも同様の結果となった．

一方，中央・西四国については，モデルBが観測されたM_0の累積分布関数に対して部分的に合っていない．tapered GR則（紫点線）も同様であるが，AICの値ではtapered GR則の方が3.7小さく，こちらの方が有意によい．東海地域においてもtapered GR則のAICの値がモデルBのものよりも小さかった（但し，値の差は

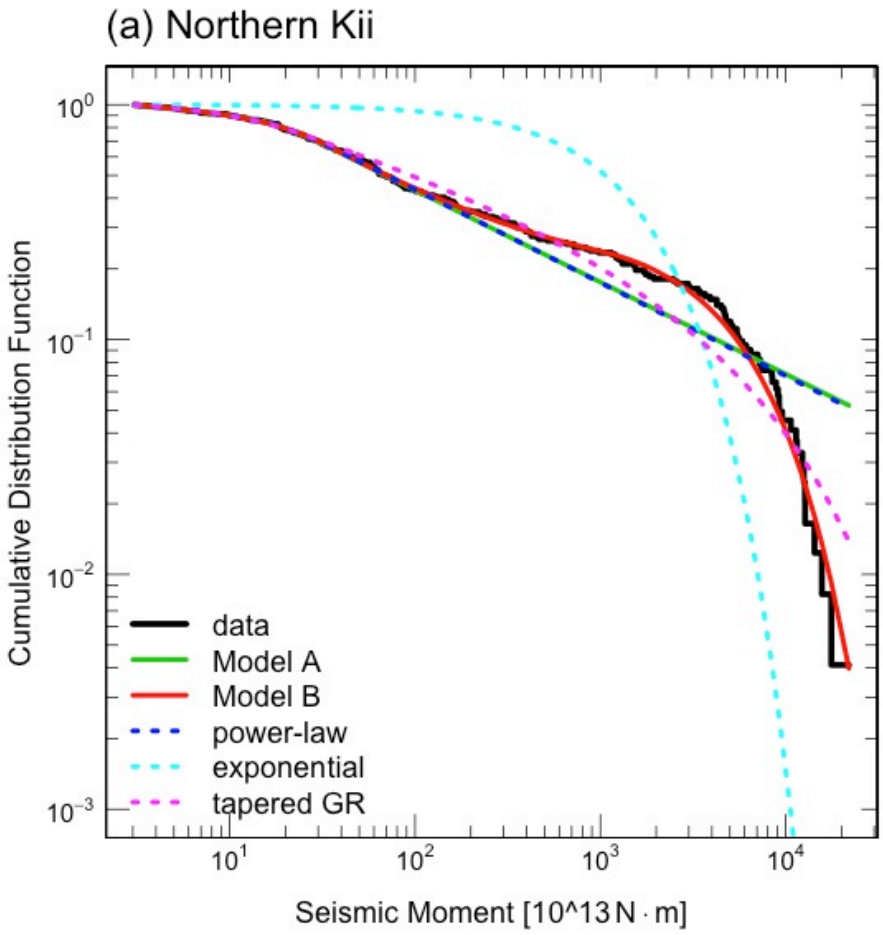
© The Seismological Society of Japan

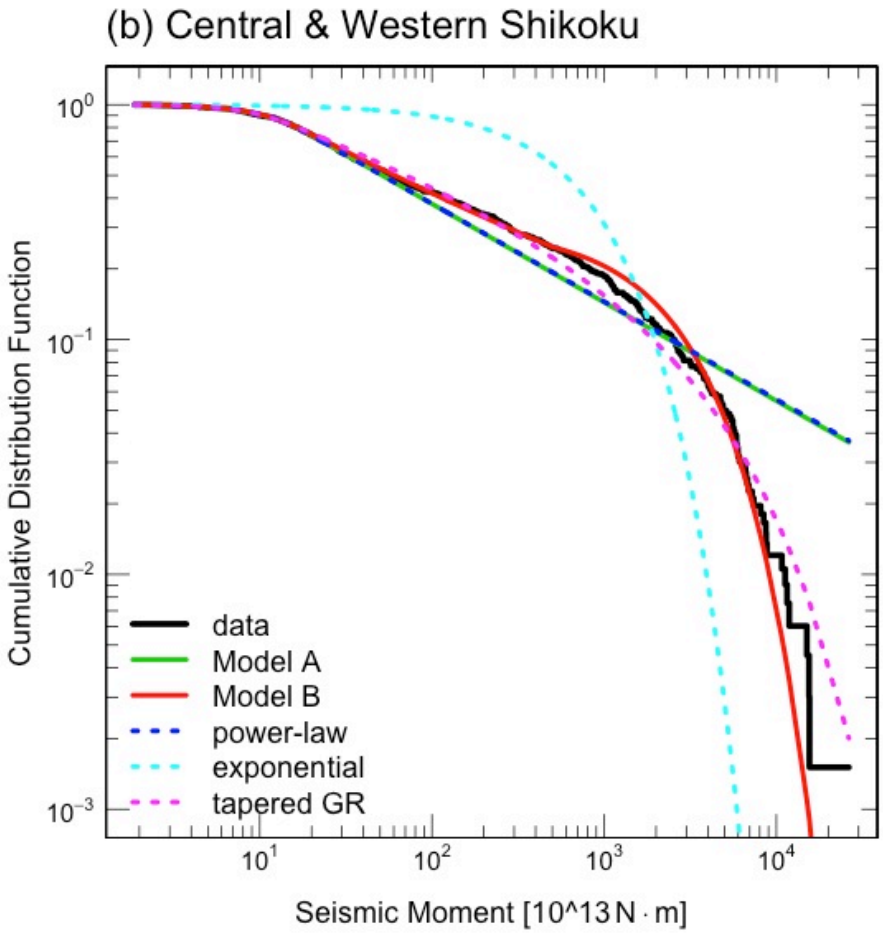
0.7であり「有意に差がある」とまでは言えない）．

以上のように，本研究で提案した混合分布が優れている場合とtapered GR則が優れている場合とが混在している．現段階では5領域を調べただけであり，今後は解析事例を増やすなどして差異が生じる要因を調べるといったより踏み込んだ解析が必要と考えられる．

図：観測されたM_0および最尤推定値に基づく5モデルとの比較．比べやすくするため（相補）累積分布関数に直してある．(a) 紀伊半島北部，(b) 中央・西四国に対するもの．

© The Seismological Society of Japan





© The Seismological Society of Japan

Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

*Satoshi MATSUMOTO[1], Ayaho Mitsuoka[2], Yoshihisa Iio[3], Shinichi Sakai[4], Aitaro Kato[5]

1. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2. Graduate School of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震は地殻に蓄積された弾性ひずみを解放するが，解放の仕方はさまざまであると考えられる。例えば，成熟した断層帯においては断層走向に沿ったすべりが卓越するであろう。一方，未成熟の場合は走向方向だけでなく様々な方向のすべりが発生すると考えられる。こういったすべり方向の多様性と断層の成熟度・強度には関係があることはある意味，明らかである。 媒質がある応力状態にあった時，弾性ひずみは主応力と45度をなす最大せん断方向の面で滑りが発生するとき最も“効率的”にひずみエネルギーが解放される。一方，クーロンの破壊基準によれば内部摩擦角は摩擦係数によって変化する。そのため，最適面（最大圧縮応力軸に対して±30度，ただし摩擦係数0.6のとき）で滑りを起こす。この場合，圧縮軸に対して共役な2つの面で滑りを起こすと，結果的に弾性ひずみを減少させるが，その効率は低下する。具体的には，最大せん断方向で滑った地震のメカニズム解を考えてみると，このメカニズム解をもつ地震で解放されるモーメントM0とした場合，±30度の面を持った地震2つで解放されるモーメントは，2M0となるはずであるが，和をとるとモーメントテンソルはその形は45°滑りと同じになり，その大きさは2M0より小さくなる（摩擦係数＝0.6の時，比はおよそ0.74）。これは，よりすべりやすい面で多数滑ることによって弾性ひずみを解放していくプロセスを示している。摩擦係数が小さくなると徐々に比は1に近づいてゆく。一方，既存の亀裂が非最適面でかつ流体圧が高い場合，モーメント比は徐々に低下する。このように地震で解放されるモーメントと解放される弾性ひずみの比は地殻の成熟度・強度を示していると考えられる。ここでは，このモーメント比を実際の地震データから求めてその特性について検討する。 2017年3月から2018年4月まで鳥取県西部地震震源域で行われた”0.1満点地震観測“は1000点の地震観測点をおよそ1㎞間隔で展開し，余震域を取り囲んだ地震観測である。これによって余震のメカニズム解が詳細に推定された。これらを3x3x2.5㎞のブロックごとにモーメント比を求めた。その結果，1に近いところは余震域が水平に広がる部分に対応している。一方，場所によっては0.6程度以下になるブロックも存在している。位置としては鳥取県西部地震の先駆的地震活動震源位置に対応している。これは流体圧が高い可能性を示唆している。 2016年熊本地震前後の地震活動について同様の解析をした。ここでは0.05°×0.05°×5㎞のブロックで見積もった。その結果，摩擦係数が低いような場所は見られなかった。一方で，モーメント比が0.6程度以下の場所が断層周辺に存在している。さらに，地震発生後にはその部分が広がっているように見える。これは，応力場の不均質が影響している可能性はあるものの，流体が貫入したことによる影響を見ているとも解釈できる。 以上のようにモーメント比を用いると，地殻の強度情報が抽出できる可能性がある。この比を用いることによって地殻の力学的応答をモデル化できる可能性があり，地殻活動のシミュレーションに将来的に貢献すると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

*Kota FUKUDA[1], Takahiro HATANO[2], Kimihiro MOCHIZUKI[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Space Science Osaka University

従来のセルオートマトンモデルを用いた地震研究では、統計性質に主眼が置かれていた為、点過程に議論が限定されてきた。本研究では、Olami et al.,(1992)によって提案された、GR則を再現するOFCモデルに対し、破壊現象を扱えるような拡張を行った。このモデルでは、最小破壊の時定数を導入することで、モーメントレートの時系列を扱うことができる。さらに、本研究では、この最小破壊の時定数に対する応力蓄積や強度回復の時定数の比をパラメターとする事で、時定数の競合によって生じる、破壊描像と統計性質の変化に注目する。

強度回復や応力蓄積に対し、破壊伝播の遅い現象を表すパラメター領域では、周波数の-1乗に比例したモーメントレートスペクトルが得られ、一方、破壊伝播の速い現象を表すパラメター領域では、自己相似的な破壊と、周波数の-2乗に比例したモーメントレートスペクトルが再現される。また、応力蓄積の時定数に対し強度回復の時定数が大きくなるにつれて、微動や群発地震のような永続的なイベントを発生させるレジームから、GR則を満たす通常地震的なレジーム、繰り返し地震的挙動のレジームへの遷移が生じる。強度回復の時定数の増加は、定性的には塑性から脆性への遷移と捉えることもできる為、脆性領域に近付くことで、通常地震的な挙動や繰り返し地震的な挙動が得られることを意味している。

これらの結果は、スロー地震、群発地震、通常地震、繰り返し地震などの多様な地震活動の特徴が、「時定数の競合」という観点である程度統一的に理解できる可能性を示唆しており、この点について議論する。

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

PM-1

chairperson:Yuki Noda(Kyoto University), Masaru Nakano(JAMSTEC)
Thu. Oct 14, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-12] Seismic activity around lake of Ryujin-ko

○Shin'ichi SAKAI[1,2], Takahiro Akiyama[2] （1.Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo）

1:30 PM - 1:45 PM

[S09-13] Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the ocuurrence factor

○Yuki NODA[1], Hiroshi KATAO[2], Yoshihisa IIO[2] （1.Kyoto University Graduate School of Science, 2.Kyoto University Disaster Prevention Research Institute）

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-14] Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

○Yuta Amezawa[1], Takuto Maeda[1], Masahiro Kosuga[1], Tomoya Takano[1] （1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University）

2:00 PM - 2:15 PM

[S09-15] Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

○Rina IKEDA[1], Keisuke Yoshida[1], Ryo Takahashi[3], Yo Fukushima[2], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Japan Meteorological Agency）

2:15 PM - 2:30 PM

[S09-16] DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

○Masaru NAKANO[1], Hiroko Sugioka[2], Eiichiro Araki[1], Tomoya Nakajima[1], Aki Ito[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Takashi Yokobiki[1], Takashi Tonegawa[1], Yojiro Yamamoto[1], Toshinori Kimura[1], Gou Fujie[1], Satoru Tanaka[1] （1.IMG, JAMSTEC, 2.KOBEC, Kobe University）

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-17] Seismic activity (D>10km) around the summit of Mt. Ontake (1)

○Yoshiko YAMANAKA[1] （1.Univ. of Nagoya ）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Seismic activity around lake of Ryujin-ko

*Shin'ichi SAKAI[1,2], Takahiro Akiyama[2]

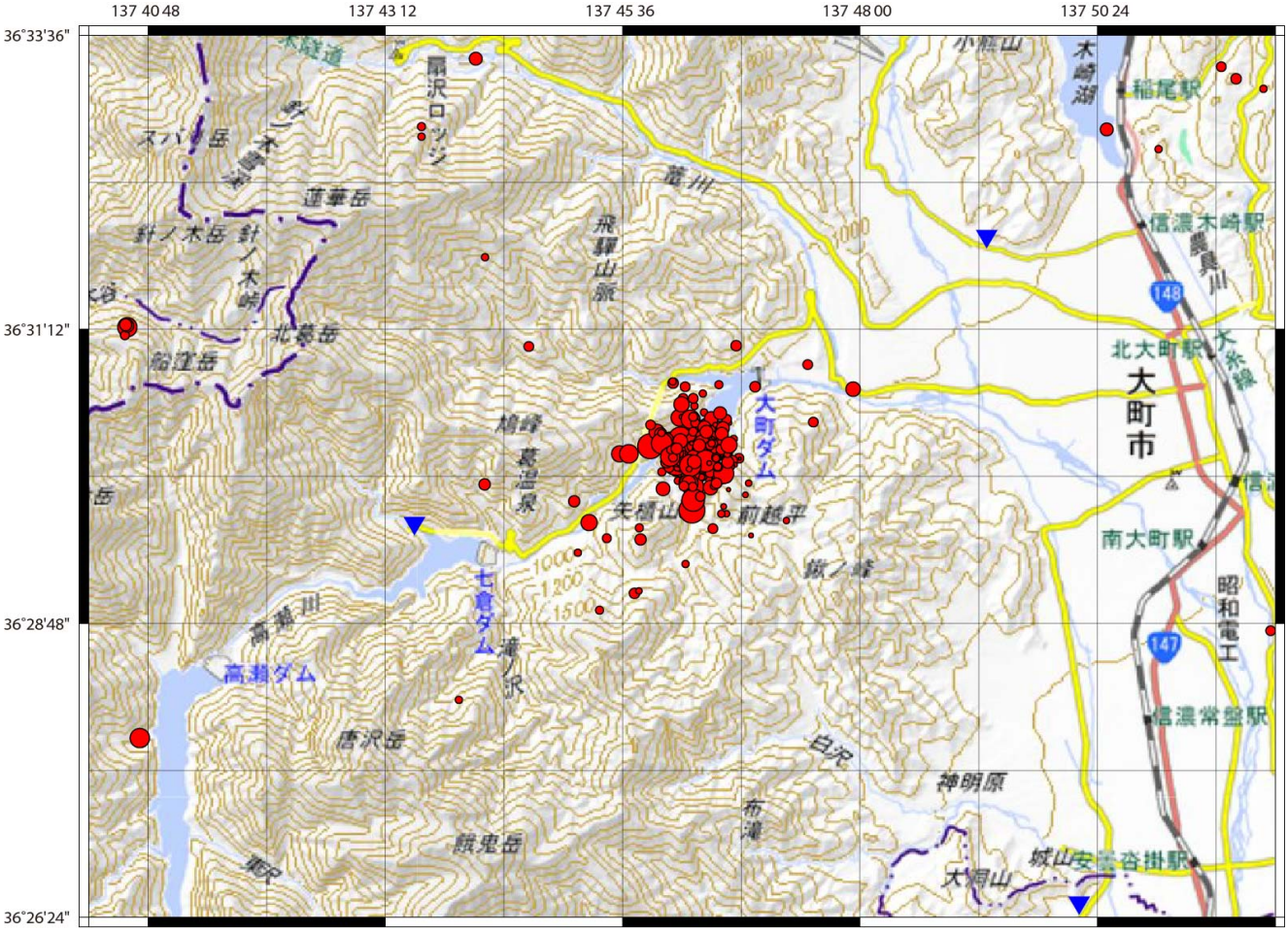
1. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo

長野県大町市龍神湖（大町ダム）周辺において、2021年3月下旬から、地震活動が続いている（図１）。この活動中の最大規模の地震は、4月13日22時53分に発生したM3.6の地震で、約6㎞離れた大町市役所で震度３を観測した。発震機構解は、北西ー南東方向に圧縮軸を持った横ずれ型の地震で、震源の深さが約2㎞と浅かったため、大町ダム周辺の道路や林道では、小規模な土砂崩れが確認されたが、人的な被害は報告されていない。この約5か月間（3月21日～7月31日）に、大町市役所では、23個の有感地震が観測されていて、無感も含めると約300個の地震が報告されている（気象庁の暫定解による）。
これまで、この付近に大きな活断層は知られていないが、大町市では、1918年（大正7年）11月11日に「大町地震」と呼ばれる地震が発生している。この地震では、M6.5の地震が、約13時間の間隔で続けて2回発生していた。そのときの震源地は、今回の地震活動領域から東に約10㎞離れたJR大糸線信濃大町駅付近で、家屋の全壊が6棟、半壊が2852棟の被害を生じさせていた。今回の地震活動が、大正時代の大町地震とどのように関係するのかは、不明であるが、この地震活動が続く原因は何なのか、周辺で発生した2014年11月の白馬の地震や糸魚川ー静岡構造線と関係するのか、今後の地震活動の拡大や周辺の活動への影響等、様々な疑問が生じている。
そこで、これらを解明することを目的として、震源地の直上および震源域を取り囲む数ヶ所に地震計を設置した（2021年4月21日から）。観測機器は、固有周期1秒の地震計（レナーツ社製MK-Ⅲ）とその記録を収録する装置（白山工業社製LS-8800）である。それらは、小さなボックス（約40cm程度）に収め、道路わき等に設置した。現地は携帯電話の通話圏外のため、テレメータできず、SDカードに現地収録した。単1乾電池32個で約３ヶ月稼動するため、8月に電池交換と記録媒体の交換を行った。地震活動は、何度か活発化したものの、全体としては、低調になってきた。
今回は、この3か月分の記録を用いた解析の一部を紹介する。 新たな臨時観測点の読み取り値を含めて震源を決め直したところ、震源の深さは2㎞前後に集中していた。切り出した記録の中には、規模の小さな地震波形がたくさん見られたため、臨時観測点の波形で自動処理を行ったところ、4月21日から5月31日の約40日間で841個の地震を検知した。同じ期間の気象庁一元化震源が67個であるため、10倍以上検知された。今後は、小さな地震も含めた震源分布から、この地震活動の全体像を解明することが目的である。

図１　震源分布（2021年3月21日～4月19日）国土地理院地図に加筆

謝辞：国土交通省大町ダムおよび千年の森自然学校に臨時の観測点を設置させていただきました。この観測研究では、東京海上各務記念財団から助成をいただきました。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the ocuurrence factor

*Yuki NODA[1], Hiroshi KATAO[2], Yoshihisa IIO[2]

1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute

長野県西部地域では1995年6月から稠密地震観測網が展開されていて，観測点は1984年に発生した長野県西部地震の余震域の東部を中心に設置されている．その中で10kHzのサンプリング周波数でデータを記録しているものが最大で57ヶ所に設置された．この地域で発生する地震は震源が浅いものが多く，さらに観測点の周囲が静かでノイズレベルが小さいため，多数の微小地震データが得られている．

1999年4月5日に，この観測網の内側でM3.7の地震が発生した．また，その震源付近ではその発生の10日以上前から活発な地震活動が見られた．

各地震の破壊開始点について高精度な相対震源決定を行うために，この稠密地震観測で得られた10kHz波形データを使用し，各観測点における2つの地震のP波到達時刻の差を，P波初動のみを含むような0.01秒幅のウインドウを使って相互相関により求めた．そのようにして求めたP波到達時刻の差を用いて，Ito (1985) を参考に相対震源決定を行った．

震源再決定の結果，M3.7の地震の震源に向かって地震活動が移動していく様子が確認された．また，その震源分布には空間的なギャップがあり，この地震活動は地震の発生に伴う応力変化だけでは説明できない可能性がある．さらに，これらの地震は平面的には発生しておらず，非地震性すべりがこの地震活動の原因である可能性は低い．

© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

*Yuta Amezawa[1], Takuto Maeda[1], Masahiro Kosuga[1], Tomoya Takano[1]

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

背景と目的

群発地震は，本震と呼べる様な最大地震を持たず，非大森則的な地震活動が一定期間継続する現象である．これまでの研究で，群発地震の震源マイグレーションの拡散係数と活動継続時間の間に負の相関があることが判明した (Amezawa et al., 2021)．しかし，活動の推移に伴って地震波形がどのように変化するのか系統的に調べた研究は少ない．地震波形の時間変化は群発地震の発生メカニズムが時間的に変化したことに関係する可能性がある．ゆえに，地震活動の推移と地震波形の変化の対応を調べることは重要である．本研究では，地震活動が長期に渡っている例として，発生から10年以上継続している東北日本北部の森吉山での群発地震について，地震波形がどのように変化したかを波形相関に着目して調べた．

震源再決定

近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べるためには，高精度に決定された震源位置が必要である．そこで，波形の相互相関データを用いたDouble-Difference法により，震源再決定を行なった．解析には気象庁一元化震源カタログに記載されている2011–2019年に発生したM≧0の地震のうち，群発地震の周囲60 km以内で比較的S/N比の良い16定常観測点の半数以上において，P・S波の観測走時が得られた7213地震を用いた．気象庁検測値に加えて，弘前大学によって実施された臨時観測記録の手動検測値も用いた．さらに，気象庁・Hi-net・東北大学の観測点で記録された地震波形の相互相関係数から相対走時データを作成して用いた．相関は 2–12 Hzの帯域通過フィルタをかけた波形に対し，P・S波の理論走時±1秒の時間窓で計算した．

震源再決定の結果，初期震源数の99%が再決定され，RMS残差は手動検測値では117 msから35 msへ，相対走時データでは 138 msから6 msへ減少した．再決定震源の空間分布から，群発地震の震源は複数の小クラスタに分かれ，水平面内では4 km程度にひろがり，厚さ1–2 kmの東傾斜の面状分布を示すことなど，これまで以上に詳細な特徴が判明した．

波形相関の時空間変化

次に，再決定された震源位置に基づき，近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べた．ある地震を起点とし，そこから1年以内に発生した地震が震源距離0.3 km以内に10個以上ある場合，これを地震のグループとした．全ての再決定震源を起点としてグループ化を行い，得られた全てのグループについて，グループの起点とした地震とグループ内の各地震のP・S波形の相互相関係数を求め，その平均をAverage Cross Correlation (ACC) とした．ACCの計算には，S/N比が12 dB以上かつ使用観測点の半数以上でP・S波が記録された波形を使用した．

得られた全ACCの分布は，平均μ=0.39，標準偏差σ=0.11のやや左に歪んだ正規分布となった．今回は，ACC $\geqq \mu+1.5\sigma$ の地震グループを特に波形の類似性が高いグループとし，ACCの時空間変化と地震活動の対応を述べた．森吉山の群発地震はクラスタの南東深さ10 km付近（クラスタ底部）から始まり，約200日間はここから水平・深さ方向に約 1 kmの狭い領域で活動が続いた．この活動では，ACCが高いグループが特に多くみられた．その後，地震活動の中心が北東へ移動し，約500日後には複数のバースト的な活動を伴いつつ活動中心は南西へ移動した．約 1500日後になるとクラスタサイズがほぼ確定し，活動が比較的低調になった．これらの活動移行期と停滞期についてのACCは活動初期に比べて全体的に低く，波形の類似性が高いグループはほとんどみられなかった．

議論

森吉山における群発地震の初期の活動が比較的狭い領域内に限られていることは既知であったが，本研究に

© The Seismological Society of Japan

より，その初期の活動においてのみ地震波形が互いに類似していることが判明した．このことから，活動初期においては近接する位置での同じような断層運動で地震が起きたことが示唆される．しかし，その後の活動では，クラスタのほとんどの領域で，震源が近接していてもACCは低い．その理由として，近接していても断層運動の仕方が微妙に異なること，震源周辺の不均質が非常に強くて震源位置の僅かな違いにより波形が異なることの，一方または両方が考えられる．これらの原因が群発地震活動にあるのか，元々存在したのかは，今回の結果だけでは判然としないが，森吉山の群発地震の時空間発展が単純ではなかったことを考慮すると，群発地震域は群発地震以前から不均質な状態であった可能性がある．

謝辞
気象庁一元化震源カタログ，気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・東北大学の観測点で観測された地震波形記録を使用しました．記して謝意を表します．

© The Seismological Society of Japan

Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

*Rina IKEDA[1], Keisuke Yoshida[1], Ryo Takahashi[3], Yo Fukushima[2], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Japan Meteorological Agency

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震以降、福島-茨城県境周辺では非常に活発な地震活動が続いている。特に、茨城県北部においては2011年3月19日と2016年12月28日にM6程度の地震が発生しており、2つの地震が同一の断層の同じ場所を繰り返し破壊した可能性が指摘されている(Fukushima et al., 2018; Uchide, 2017, JpGU)。内陸断層で地震がこのような短期間で繰り返し発生する事例は極めて珍しく、この事例を調べることは内陸地震の発生サイクルや応力蓄積・解放過程を理解する上で極めて重要であるといえる。本研究では，福島-茨城県境周辺の地震活動中の小中地震に含まれる繰り返し地震を検出し，更にその情報を震源分布の時空間変化および地震活動の情報と組み合わせることにより、M6地震の繰り返しの原因について調べた。
最初に、2003年から2018年10月31日までに福島-茨城県境周辺で発生した気象庁マグニチュード1以上の地震45988個を対象に、Double-Difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002)を用いた震源の再決定を行った。得られた震源分布は複雑な微細断層構造を示した。ただし茨城県北部地域では地震活動が西へ傾斜する一枚の面構造に集中しており、M6地震はこの断層上で発生したと考えられる。
次に、繰り返し地震の検出を行った。多くの先行研究では繰り返し地震の検出のために、波形の相互相関を用いているが、その方法では近傍で起こった地震群を繰り返し地震と見誤る可能性がある。本研究では、精密な震源再決定位置に基づき繰り返し地震の検出を行った。具体的には、全地震ペアの震源間距離を地震の断層サイズと比較することにより、次の条件に基づいて繰り返し地震の検出を行なった。(1) 地震間距離 ＜ 平均断層半径、(2) マグニチュードの差が0.5以下となる地震ペアを繰り返し地震ペアとみなした。この際，断層サイズは、応力降下量20MPa (池田・他，2020, JpGU)の円形断層を仮定して求めた。その結果、379個の地震ペアが見つかり、その多くが茨城県北部に分布することが分かった。これらの地震ペアの地震波形は近傍の観測点で見ても非常によく似ており、断層上の同一の場所を破壊した繰り返し地震である可能性が高いと思われる。
震源再決定により得られた震源分布から、茨城県北部で2011年と2016年に発生したM6地震直後の余震の時空間分布を調べると、それぞれのM6地震の震源周辺から余震域が徐々に拡大している様子が見られた。2つのM6地震後の余効滑りに起因している可能性がある。Nadeau & Johnson (1998)による経験式に基づき、繰り返し地震間の周囲の非地震性すべり量を推定したところ、20cm前後の値が得られた。Fukushima et al. (2018)は、2011年に発生したM6地震による余効滑り量を推定し、その大きさが数十 cm程度以上と非常に大きかったことを示しているが、研究で検出された繰り返し地震は、この余効滑りの影響により発生した可能性が考えられる。
茨城県北部で繰り返し発生したことが推定されている 2つのM6地震のうち、2011年の地震の余震活動が2016年の地震のそれに比べて顕著に活発であったことが分かった。2011年の地震の余震の減衰率は通常の大森公式に比べても有意に小さかった。GPS観測点で計測された地震直後の余効変動も 2011年の M6地震の場合の方が 2016年の地震よりも大きかった。2011年の M6地震の余効滑り量が同規模の内陸地震に比べ異常に大きかったことが報告されているが (Fukushima et al., 2018)、その量は同じ場所で発生した 2016年の M6地震に比べても大きかったことが示唆される。同一の場所にもかかわらず余効すべり量の大きさが異なった要因として、震源域の状態の時間変化が考えられる。ひとつに2011年東北沖地震による余効変動の減衰により応力増加レートが減少したことが影響しているかもしれない。あるいは、間隙水圧の時間変化が余効すべり量に影響を与えた可能性も考えられる。群発地震の解析から、東北日本のいくつかの地域では、東北沖地震後の地殻流体の上昇により間隙水圧が時間変化したことが推定されている (Yoshida et al., 2016)。茨城北部地域においても、東北沖地震直後の2011年のM6地震の際には，上昇してきた地殻流体により地震・余効すべりが生じやすくなっていた可能性も考えられる。

© The Seismological Society of Japan

DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

*Masaru NAKANO[1], Hiroko Sugioka[2], Eiichiro Araki[1], Tomoya Nakajima[1], Aki Ito[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Takashi Yokobiki[1], Takashi Tonegawa[1], Yojiro Yamamoto[1], Toshinori Kimura[1], Gou Fujie[1], Satoru Tanaka[1]

1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe University

鬼界カルデラは130ka、95ka、そして7.3kaにカルデラ形成を伴う巨大噴火を起こした火山として知られる。鬼界カルデラは九州南方に位置し、そのほとんどが海底下にあるため、火山の構造や活動については不明な点が多い。我々はその構造調査及び現在の活動把握のための新しい観測手法開発のため、鬼界カルデラ周辺に設置された光海底ケーブルを用いた分布型音響センシング（DAS）観測を行った。DASは光ケーブルにレーザー光を入射した際に生ずる後方散乱によって、ケーブルの軸方向の歪変化を検出する技術であり、ケーブルに沿った高密度多点の振動計測が可能なことから、近年地震観測への応用が進んでいる。海域火山において光海底ケーブルを用いたDAS観測が行われたのは、我々が知る限り本研究が初めてである。 鬼界カルデラ周辺の海域には、鹿児島県三島村が保有、管理する、三島村の竹島、硫黄島、黒島と本土の枕崎を結ぶブロードバンド通信のための光海底ケーブルが設置されている。我々はこれを活用し、鬼界カルデラにおいてDASによる地震動観測を行った。測器を薩摩硫黄島および枕崎に設置し、それぞれと竹島、黒島を結ぶ光海底ケーブルでのDAS観測を行った。観測はこれまでに2021年4月と7月の二回行った。4月の観測ではトカラ列島や種子島沖で起きたマグニチュード2～4クラスの地震の記録が得られた。枕崎からの測線では地震動の振幅は比較的一様であった。一方、硫黄島から延びる鬼界カルデラに近いケーブルでは、振幅に大きな地域性が見られた。これはケーブル直下の減衰構造もしくはケーブルと海底のカップリングに大きな地域性があるためであると考えられる。7月の観測では、同時に鬼界カルデラ周辺海域で行われたエアガン探査のシグナルを観測した。エアガンのチームと協力し、鬼界カルデラを挟んでDAS測線の反対側でエアガンを発振することで、カルデラ内部を通る波線のシグナルの観測を試みた。観測が終了したのは本稿作成の直前であり、今後詳しく解析を進めていく予定である。また、観測開始からエアガンが始まるまでの期間に、種子島沖や九州西方で起きた地震を多数観測した。また気象庁一元化カタログに無いローカルと思われるイベントも複数観測した。これらのイベントの解析により、鬼界カルデラ周辺の構造や火山活動を調べていく予定である。 謝辞：本研究にあたっては鹿児島県三島村の光海底ケーブルを利用させていただきました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Seismic activity (D>10km) around the summit of Mt. Ontake (1)

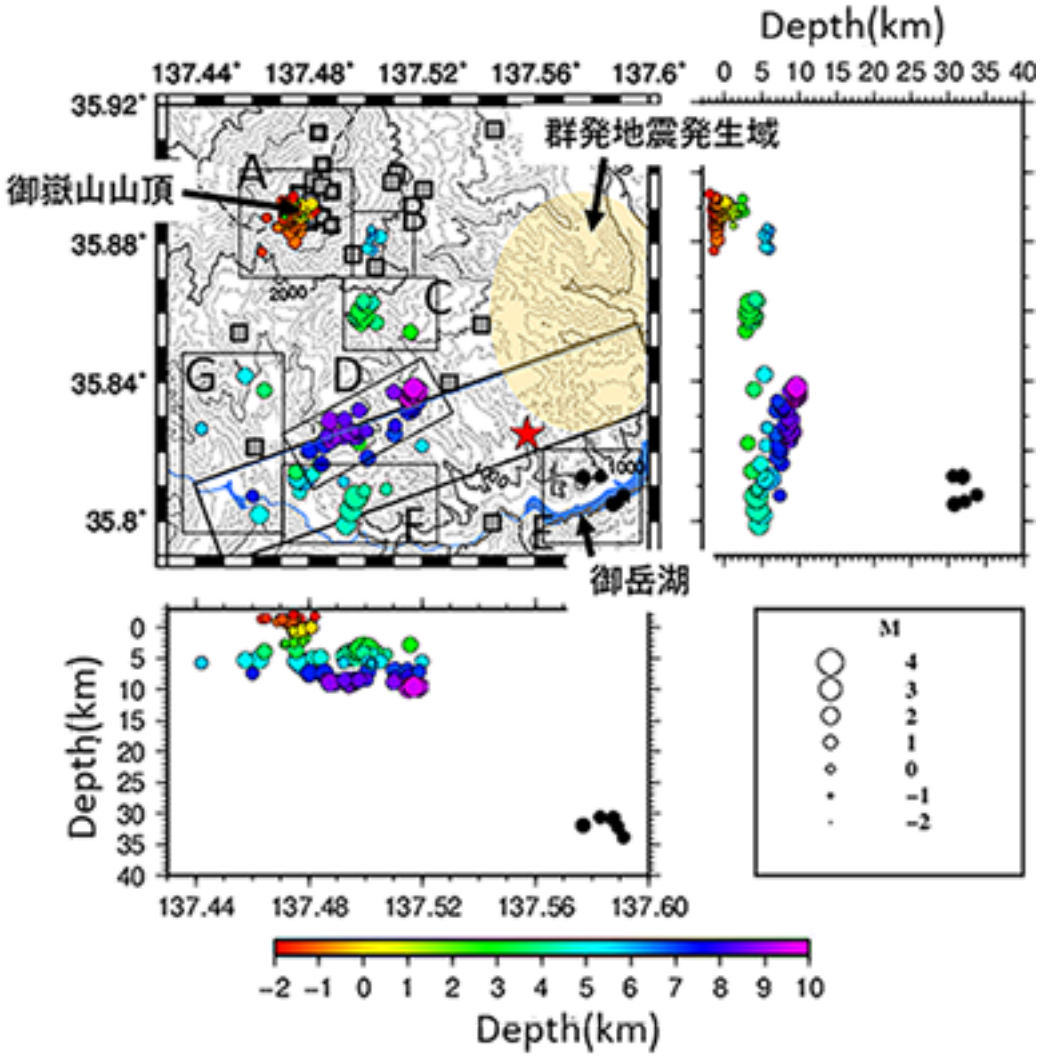
*Yoshiko YAMANAKA[1]

1. Univ. of Nagoya

<<はじめに>>
　2007年と2014年の御嶽山噴火前後の地震活動を比較するため、御嶽山山頂周辺で発生する地震活動を調べていたところ、ある限られた領域（図1）でやや深い（深さ3-35km）地震が発生していることがわかった。御嶽山山頂周辺で発生する地震はM＜1の地震が多いが、これらの地震は比較的規模の大きい（M2-M3）ものも発生している。これらの地震の内、図1の領域Ｄはほぼ1984年長野県西部地震の断層（図1中の四角形）下限にあたる。また図1のハッチをつけた範囲では長野県西部地震以降群発的に地震が発生している。さらに御岳湖付近の深さ30-35km（領域Ｅ）では低周波地震が発生する。
　そこでMatched Filter法を用いて御嶽山山頂周辺でのやや深い地震および山頂直下の地震活動を2006年まで遡って調べた。
<<手法>>
　2014年御嶽山噴火の直前直後の地震活動を調べたKato et al. (2014)に従い、Matched Filter法を山頂周辺の観測点に適用した。解析には御嶽山周辺の名古屋大学、気象庁、Hi-net、長野県の定常観測点の連続データ3成分を用いた。年代によってかなり観測点数が異なるが、2006年頃でも最大9点（NU.KID1, NU.MKO1, NU.MUR, NU.TKN1, V.ONTA, V.ONTN, N.KADH, TKGS, ROPW）の観測点データが使えた。テンプレート地震としては図1に示した224個の地震を用いた。
<<結果>>
1. 御嶽山山頂直下での地震活動は日頃は低調であるが、時々集中的に深さ3kmより浅部で活発化することがあり、その活動が1週間以上連続したのは2007年と2014年の噴火前だけであった。
2. 2015年7月中旬から9月にかけて領域Dで深さ10km前後の活動が活発化した。このとき気象庁田の原観測点では火山性地震が38回観測、継続時間3分の火山性微動も1回観測され、傾斜計も僅かに山上がりを示すなど、火山活動との関連性を示唆する現象が観測されている。領域Ｄでの活動は2007年の噴火前の地震活動でも見られた。このときの活動も2ヶ月程度続き、その後領域ＢやＣでの群発的な活動が発生している。これらの深さは長野県西部地震の余震活動から見えた反射面の深さ(Inamori et al, 1992)ともよく一致することから、領域Ｄ付近が深部から流体上がり口で、そこから上がってきた流体がすでに流路ができているところでは地震を起こさず流路がないところでは群発的に地震を発生しながら広がっているようにも見える。2006年以前についてはデジタル記録がそろわないためMatched Filter法を用いた解析ができないが、気象庁の震源情報によると1988年や1993年頃にも活発化しているようである。ただし2000年以前のこの付近の震源決定精度はあまり良くない。
3. さらに深部の深さ30-35kmの地震については2010年2月3日19時代に極めて活発な活動があった。その他の時期についてはパラパラと活動があることはわかったが、あまり相関がよくない。現在テンプレートが2010年と2015年の活動の5イベントしかなく、毎回活動の場所が少しずつ異なっていることを意味しているのかもしれない。気象庁の震源情報をみると2002年8月にも深さは22-30kmとやや浅めであるが群発的に発生している。
今後これらの活動についても調べ、御嶽山山頂周辺のやや深い地震の活動と噴火活動、群発地震との関係を明らかにしたい。

図1　御嶽山山頂周辺の地震活動（テンプレート地震）。赤星と太い線の長方形は1984年長野県西部地震の震央と断層の位置を示す。グレーの四角は観測点、オレンジ色のハッチは群発地震発生域を示す。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-1

chairperson:Masashi Ogiso(MRI), Lina Yamaya(University of Tokyo)
Fri. Oct 15, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM C (ROOM C)

[S09-18] Correlation on Seismicity of Regular and Very-low Frequency Earthquakes in the Northern Ryukyu Region

○Youichi ASANO[1] （1.NIED）

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-19] Rapid tremor migration revealed by a dense seismic array in the western Shikoku, Japan

○Aitaro KATO[1], Akiko Takeo[1], Kazushige Obara[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-20] Spatiotemporal distribution of tectonic tremors at off the Kii Peninsula during the period from December 2020 to January 2021 inferred from spatial distribution of seismic amplitudes

○Masashi OGISO[1], Koji TAMARIBUCHI[1] （1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency）

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-21] Characteristics of secondary slip fronts detected from deep low-frequency tremor

○Takuya Maeda[1], Kazushige Obara[1], Akiko Takeo[1], Takanori Matsuzawa[2], Yusaku Tanaka[3] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University）

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-22] Comprehensive detection of shallow tremor activities in the Nankai subduction zone, Japan, based on the DONET seafloor seismic data

○Kazuaki OHTA[1] （1.The National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-23] Centroid moment tensor inversion using dense array of short-period OBSs at off Ibaraki region

○Lina Yamaya[1], Kimihiro Mochizuki[1], Takeshi Akuhara[1], Shunsuke Takemura[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

Correlation on Seismicity of Regular and Very-low Frequency Earthquakes in the Northern Ryukyu Region

*Youichi ASANO[1]

1. NIED

日向灘から南西諸島にかけてのトラフ・海溝沿いでは，活発な超低周波地震活動がしばしば観測されている．これに加えてこの地域では，プレート間で発生する通常の地震活動も比較的活発であり，M5クラス以上の地震と超低周波地震活動が同期するケースも報告されている［例えば，Asano et al. (2019AGU)］．このような同期のメカニズムを理解するために我々は，日向灘から南西諸島北部域の地震・超低周波地震活動の時空間的特徴をより詳細に調べた．
解析には2003年6月から2021年7月の防災科研F-net（一部，臨時観測を含む）の記録を使用し，通過帯域0.02～0.05 Hzのバンドパスフィルタを通した記録波形にAsano et al. (2015) の手法を適用した．具体的には，発生時刻と位置が既知の地震（主にセントロイド深さ20 km前後のプレート間地震）17個，超低周波地震6個をテンプレートとして，これらと類似した波形を持つ未知イベントの探索と位置推定を行った．そして，ここで検出されたイベントのリストを気象庁一元化処理震源と照合し，対応するイベントが見出された場合には通常の地震（以下，通常地震），そうでない場合には超低周波地震と識別した．このようにして検出された通常地震と超低周波地震について，緯度・経度それぞれ0.5度の領域ごとに活動の特徴を調べた．
解析の結果，解析対象領域のほぼ全域で通常地震と超低周波地震の活動に強い相関が見られることが分かった．特に北緯30度～32度の日向灘～種子島・屋久島沖と北緯28.5度～29度の奄美大島北東沖では，エピソディックな超低周波地震活動に対応する通常地震の活発化が非常に明瞭である．このような活動の特徴は，通常地震の発生領域にまで達するようなスロースリップ・イベントが発生し，それに伴ってエピソディックな地震（場合によっては群発地震）・超低周波地震活動が生じていることを強く示唆する． より詳細に見ると，通常地震の活発化は超低周波地震活動域にごく近接した領域で特に顕著である一方で，より西側に遠く離れた領域では定常的な地震活動に埋もれて不明瞭となることも明らかとなった．すなわち，通常地震を起こしうる領域の中でも，エピソディックなイベント間にはカップリングしているとみられる領域と，イベント間にもすべりが見られる領域があることが分かった．

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費 JP16H06473の助成を受けたものです．

© The Seismological Society of Japan

Rapid tremor migration revealed by a dense seismic array in the western Shikoku, Japan

*Aitaro KATO[1], Akiko Takeo[1], Kazushige Obara[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

1. はじめに

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートの固着域の深部では，深部低周波微動（微動）が活発に発生している。微動の発生機構の物理的理解を深めるために，微動の時空間発展をより正確かつ高精度に把握することで，微動活動の定常性・非定常性を明らかにすることが重要である。深部低周波地震の高速移動現象は，基盤的地震観測網の波形データを用いたMatched Filter法により報告されており（Shelly et al., 2007; Kato and Nakagawa, 2020)，移動速度は50 km/hr程度であることが知られている。しかしながら，震源位置の推定精度の問題があるため，高速移動現象の詳細な活動様式に関しては未解明の点が残されている。本研究では，陸域超稠密短周期地震計アレイ観測を通して，微動の高速移動現象の解明に焦点を当てる。

2. データ・解析方法

四国西部の4カ所で，短周期3成分地震計（固有周波数4.5Hz）を用いた超稠密アレイ観測を2019年12月下旬から2020年7月上旬にかけて実施し，微動の連続波形記録を取得した。データロガーとして独立型単独システムGSXを使用し，250 Hz-samplingで波形を記録した。約半年間の連続観測が可能なように電池ボックスを新たに作成し，各観測点において単一乾電池55本を用いて観測を実施した。4カ所のアレイの中で，微動域の浅部側に位置するアレイ（計100観測点：口径約2km）の連続波形記録を，Nakamoto et al. (2021)の手法を参考にして解析した。Hirose et al. (2008) によるフィリピン海プレート上面モデルを平面で近似し，その平面上に0.1 km間隔でグリッドを均等に配置した。各グリッドから，アレイの基準観測点への波線のバックアジマスと入射角を計算し，センブランス値（Neidell and Taner, 1971）を計算した。解析対象の時間窓の長さは10秒に設定し，アレイ中心の観測点の波形と波形相関値がある一定以上の値（ex. 0.3）の波形のみをセンブランス値の計算に用いた。各時間でセンブランス値の最大値が閾値（ex. 0.3）を越えた場合のみ微動の震源とした。観測期間中，微動活動が最も活発であった2020年2月下旬の活動について上記のセンブランス解析を行い，微動の時空間発展を明らかにした。

3. 結果

微動が，約10分間という短い時間内に距離約5 ㎞を高速に移動する現象を複数見出した。移動速度は30 km/hr程度であり，プレートの傾斜方向に対する移動が多くみられる。Matched Filter法に基づく深部低周波地震カタログ（Kato and Nakagawa, 2020; 気象庁地震カタログ）で得られた振る舞いと概ね整合的であるが，既存のカタログでは検出されていない微弱な振幅を捉えることで，微動の高速移動現象の詳細が明らかになった。特に，順方向に移動した後に，逆方向に伝播する特徴に注目して議論を行なう予定である。

謝辞）　気象庁地震カタログを使用させていただきました。記して感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

Spatiotemporal distribution of tectonic tremors at off the Kii Peninsula during the period from December 2020 to January 2021 inferred from spatial distribution of seismic amplitudes

*Masashi OGISO[1], Koji TAMARIBUCHI[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

はじめに

近年の地震・測地観測網の充実に伴い、プレート境界では通常の地震以外にも様々な卓越周期を持つ地震イベントの存在が明らかとなった。それらのイベントは卓越周期(周波数)が数Hzのものは低周波微動(Tectonic tremor)、数10秒のものは超低周波地震(Very low frequency earthquake: VLFE)、数日から数か月にわたるものはスロースリップと分類され、総称してスロー地震と呼ばれている。これらのスロー地震は互いに時間・空間的に相関を持った活動様式を有しており、プレート境界の状態モニタリングに重要な現象である。 海域のトラフ軸付近で発生するスロー地震については、陸域観測網を用いた超低周波地震のモニタリングは行われていたものの、低周波微動のモニタリングは陸域のそれと比べるとやや立ち遅れた状況であった。しかし、自己浮上式海底地震計を用いた稠密観測によって低周波微動が発生していることが明らかとなり、また、DONETやS-netのような稠密な海底地震観測網が整備されたことから、今後は海域における低周波微動の観測もプレート境界の状態モニタリングに重要となるであろう。

紀伊半島南東沖の海溝軸付近では、Obara and Kodaira (2009)によって浅部低周波微動の存在が確認されたのち、Annoura et al. (2017)やTamaribuchi et al. (2019)によって低周波微動の活動様式が調査されている。本研究では、DONETの観測記録を用いて2020年12月から2021年1月にかけて紀伊半島南東沖の海溝軸付近で発生した浅部低周波微動の震源決定を行い、その時空間分布の特徴や外部擾乱への応答を調査する。

手法

トラフ軸付近で発生する浅部低周波微動は、速度構造や海水層の存在によって継続時間が長くなる傾向にあり(Takemura et al., 2020)、走時が不明瞭となる。そこで、本研究では地震波振幅の空間分布を用いた震源決定法(Amplitude Source Location (ASL) method; Kumagai et al., 2019)を採用した。ASL法は地震波の到達時の読み取りが不要であるという利点があるため、走時読み取りが困難な火山性微動の震源決定に広く活用されているが、浅部低周波微動の震源決定にも有効である(Tamaribuchi et al., 2019)。本研究では、Nakanishi et al. (2002)による2次元速度構造からトラフ軸付近の構造を取り出した1次元速度構造を採用し、また、減衰パラメータ及びサイト特性はYabe et al. (2021)の値を用いて、ASL法を実行する。震源計算には2-8HzのバンドパスフィルタをかけたDONETの上下動成分の連続記録を用いる。オリジンタイム及び震源の位置を仮定して、震源から観測点への計算走時から起算して60秒のタイムウィンドウにおける地震波振幅の二乗平均平方根を計算してASL法に使用する観測振幅値とした。なお、観測振幅値にはS/N比チェックや複数の周波数帯域間の振幅比チェック(Sit et al., 2012)といった品質管理を適用している。仮定するオリジンタイムを10秒ずつ移動させて連続的に震動源の位置を推定し、スクリーニングを経て最終的な震源分布を得た。

結果及び議論

　得られた震源分布を図1に示す。全部で約3600個の震源を得ることができ、そのうち深さ14km以浅に決定されたものは約3300個であった。震央は、DONET1の東端付近からDONET2のEノード付近まで、約130km×50kmの範囲でトラフ軸に沿うように分布している。微動活動は12月６日、DONET1のBノード付近から始まり、トラフ軸の走向方向に約4km/日、直交方向に約3km/日の速度で震央が拡大していった。12月31日ころからDONET1と2の中間付近で発生した低周波微動の震央域は約8km/日の速度で南西方向に拡大した。また、12月28～30日頃と1月11～13日頃にかけて、10数km/日の速度で震央域が北東方向に移動する現象が確認された。

微動活動と地球潮汐との対応を確認するため、プレート境界をレシーバ断層として地球潮汐に伴うΔCFFを計算し、微動活動と比較した。ΔCFFが減少傾向である期間でも微動の発生レートはあまり変化せず、この期間

© The Seismological Society of Japan

の微動活動は地球潮汐にはトリガーされていないと考えられる。この期間に全世界で発生したマグニチュード6.5(Global CMTプロジェクトによる)以上の地震は3つのみであった。そのうち、日本時間の12/28 6:39にチリ付近で発生したマグニチュード6.7の地震の後、数日間にわたって一時的に微動活動が活発化した。なお、この期間は上記の震央域が北東方向に移動した時期と一致している。

本発表の解析期間では、低周波微動のほか、超低周波地震活動(南海トラフ地震に関する評価検討会・東京大学地震研究所・防災科学技術研究所資料)やスロースリップを示唆する地殻変動(南海トラフ地震に関する評価検討会・海洋研究開発機構資料)が観測されているが、これらの活動と本発表で得られた低周波微動活動は非常によく対応しており、紀伊半島南東沖の浅部プレート境界で発生した一連のスロー地震活動を異なる周波数帯域で観測した事例のひとつといえる。

謝辞

本研究ではDONETの観測記録(防災科学技術研究所, 2019; doi: 10.17598/nied.0008)を使用しました。産業技術総合研究所の矢部優氏にはYabe et al. (2021)のサイト特性の値を提供していただきました。また、海底地形データはETOPO1(doi: 10.7289/V5C8276M)を参照しました。

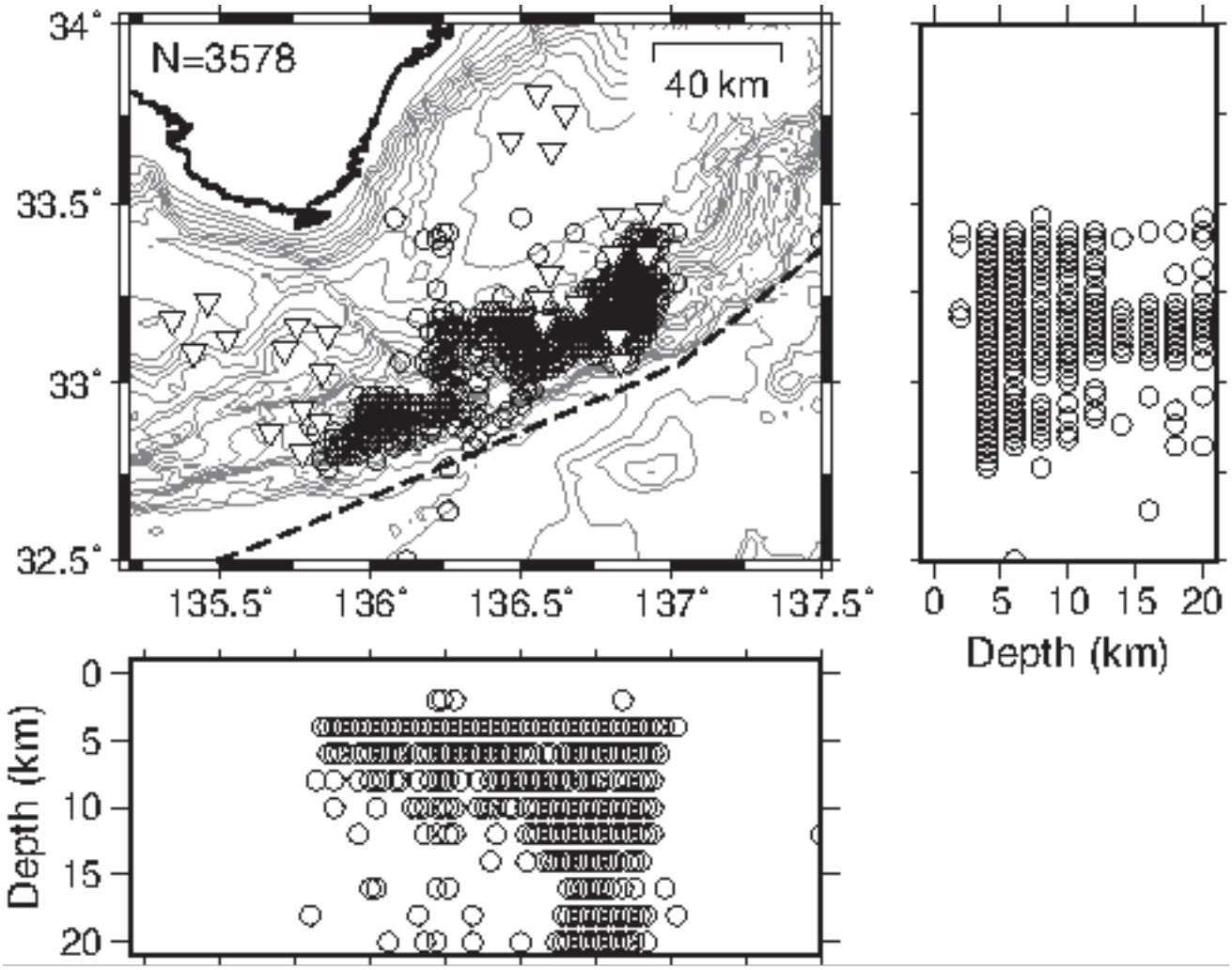


Figure 1 Hypocenter distribution of tectonic tremors derived by the ASL method.

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of secondary slip fronts detected from deep low-frequency tremor

*Takuya Maeda[1], Kazushige Obara[1], Akiko Takeo[1], Takanori Matsuzawa[2], Yusaku Tanaka[3]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

深部低周波微動は沈み込むプレートの境界に沿って、巨大地震発生域よりも深部側の領域で発生する。微動は短期的スロースリップイベント(SSE) とともにEpisodic Tremor and Slip (ETS) を構成し、1日約10 kmの速度で、プレート形状の走向 (strike) 方向に移動することが知られている。ETSのメインフロントが通過した後、その約10~20倍の速度でメインフロントの進行方向とは反対向きに移動するRapid Tremor Reversal (RTR)やメインフロント移動のおよそ100倍の速度でプレートの傾斜 (dip) 方向に移動するstreakなどの比較的小規模で高速な移動がしばしば確認されている。Bletery et al.（2017）は、これらの小規模な微動の移動現象を2次的スリップフロント（secondary slip front：SSF）と解釈し、CascadiaにおけるSSFを様々な時間窓で検出した。

本研究では微動移動現象の特徴をより明らかにするために、Maeda and Obara (2009)による微動カタログを用いて、紀伊半島におけるSSFを網羅的に検出した。解析期間は2001～2020年の約20年間とし、1、2、4、8、16、32、64時間の7通りの時間窓を用いて、その半分の時間長で時間窓をずらしながら解析した。ここでは，SSFを特徴づけるパラメータとして、進行方向、速度、形状の空間スケールを求めた。なお、SSFの形状は長方形を仮定した。最初に時間窓に含まれる微動分布の重心からの距離に応じて空間的な外れ値を取り除いた。SSFの進行方向は、グリッドサーチを用いて与えられた方向に投影した距離と微動の発生時刻の相関係数を最大化することによって推定し、その時空間プロットの回帰直線から速度を推定した。SSFの形状のうち進行方向の長さは、速度に時間窓スケールを乗じたものとし、直交方向の長さは、微動の空間分布の標準偏差を求めその6倍とした。また、1つの時間窓における微動数が20個未満の場合、または時間窓を4等分したいずれかにおいて微動数が3個未満の場合、SSFとしては採用しないこととした。

約20年間の微動活動をまとめて解析した結果、SSFの進行方向は時間窓が短い場合は等方的となり，時間窓が長くなるとNE-SW方向（strikeに沿った方向）に卓越する。SSFの速度の中央値は時間窓が長くなるほど遅くなり，例えば、1時間の時間窓では265 km/day、64時間では9 km/dayとなる。SSFの形状については，ほとんどの場合で移動方向の長さに対して直交方向の長さが長くなる。この結果は、微動の移動が二次元的な現象であることを強く示唆している。

本研究ではSSFの抽出を試みたが、長い時間窓において抽出された低速度かつstrike方向の移動については、2次的な現象(SSF)ではなくETSのメインフロントそのものだと考えられる。一方、短い時間窓では、SSFはRTRと同程度及びそれよりも遅い速度を有し、偏りなくどの方向にも移動する。先行研究によって指摘されているRTRは、ETSのメインフロントの進行方向であるstrike方向に沿った時空間プロットにおいて明瞭に観測されているが、本研究結果から、RTRと同様の速度を有する微動移動現象は、全方位に対して等方的に生じていることが明らかになった。

© The Seismological Society of Japan

Comprehensive detection of shallow tremor activities in the Nankai subduction zone, Japan, based on the DONET seafloor seismic data

*Kazuaki OHTA[1]

1. The National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

西南日本の沈み込み帯に発生する深部低周波微動は，沈み込みプレート境界において巨大地震発生領域よりも深部側で発生し，短期的スロースリップイベントや超低周波地震を伴うことがある．浅部側でも類似の現象が発生することがあり，しばしば短期的スロースリップを伴う顕著な微動活動が観測される．最近でも2020年12月から2021年1月にかけて紀伊半島南東沖において大規模な微動活動があった．本研究では，防災科学技術研究所の運用する地震・津波観測監視システムDONET1およびDONET2の広帯域地震計記録（2015年10月～2021年7月）を使用し，室戸岬沖から紀伊半島沖にかけての領域における微動活動の網羅的な検出を行なった．
微動の検出・震源決定はエンベロープ相関解析によって行なった．海底地震計記録にはしばしば海洋探査によるエアガン発振等の人工ノイズが混入し，微動として誤検出されることがある．本研究ではエンベロープ波形のスペクトル振幅を用いた経験的な方法を導入し，これらを除去した．
微動は大きく分けて室戸岬沖・潮岬沖・紀伊半島南島沖の3つのアスペリティ状の領域に分布し，震源移動を伴う顕著な活動が観測された．活動期間は30～60日程度で短期的スロースリップに由来すると考えられるが，活動周期は非常に長く，本観測期間内では特定できなかった．それぞれの活動は時空間に相補的であり，プレート境界面における歪みの蓄積状態を反映していると考えられる．また，先述した2020年12月から2021年1月にかけての大規模活動においては，南海・東南海地震のセグメント境界の浅部延長領域を跨ぐ震源移動も観測され，この領域で震源移動がやや加速する傾向が見られた．こうした特徴は大地震のセグメント境界付近におけるプレート境界面の摩擦特性の変化を反映しているのかもしれない．

© The Seismological Society of Japan

Centroid moment tensor inversion using dense array of short-period OBSs at off Ibaraki region

*Lina Yamaya[1], Kimihiro Mochizuki[1], Takeshi Akuhara[1], Shunsuke Takemura[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

近年、巨大地震発生域の定常的なモニタリング等のために、沈み込み帯に沿って海底地震計 (OBS) の観測網が構築されている。沈み込み帯に沿って発生する中小規模地震のモーメントテンソル解は、巨大地震発生域周辺の応力場や地震発生メカニズムを理解する上で重要である。一般にモーメントテンソル解の推定は低周波成分 (0.1Hz以下) の解析により実施されるが、中小規模地震は低周波成分が弱く、海底地震計によって地震発生域の周辺で観測された高周波成分を解析する必要がある。高周波成分を用いてモーメントテンソル解を推定するためには、高解像度の3次元地震構造が必要である。Yamay et al. (2021) は茨城沖領域の音響基盤上の微細な堆積層構造を、深さ方向に約0.1～1.0k m水平方向に約10 kmの解像度で推定した。本研究では、この地震波速度構造を用いて、茨城沖領域における中小規模地震のモーメントテンソル解の推定を行った。

2010年10月から2011年10月にかけて、短周期OBSの稠密観測網が茨城沖領域に展開された。この観測網は32台のOBSで構成されており、観測点間隔は6 kmである。観測期間中に東北地方太平洋沖地震 (東北沖地震、Mw9.0) が発生した。この最大余震 (Mw7.7) は観測網の南西で発生し、観測網の周囲で大量の余震を引き起こした (Nakatani et al., 2015)。本研究では、この観測期間中に観測網周辺で発生し、気象庁カタログに掲載されているMj2.5以上の地震に対してセントロイド・モーメントテンソル (CMT) インバージョン (Sipkin, 1982; Takemura et al., 2020) を適用した。セントロイド位置と時刻は、水平方向0.01°、鉛直方向0.5 km、時間方向0.1秒のグリッド幅でグリッドサーチにより推定した。理論波形の計算には、Open SWPC (Maeda et al., 2017) を用い、東京大学情報基盤センターOakforest-PACSを使用した。3次元地震波速度構造は、Yamaya et al. (2021) 及び Koketsu et al. (2012) を結合して作成したモデルを採用した。観測及び理論波形には0.4–1.0 Hzのバンドパスフィルタを適用し、CMTインバージョンを実施した。

その結果、数百個のCMT解の推定に成功した。推定したCMT解の位置は、プレート境界と概ね調和的な傾きを示した。観測網の北側では、逆断層の地震が多く発生したことがわかった。一方、観測網の南西部では、太平洋プレート内に正断層地震が推定された。これは、太平洋プレートの上に沈み込んだフィリピン海プレート (Uchida et al., 2009) の影響であると考えられる。また、東北沖地震の発生前はプレート境界と調和的な逆断層の地震が発生していたが、東北地震の発生後は様々なタイプの地震が発生していたことがわかった。さらに、観測網の北側に比べて、南側のメカニズムがばらついていた。これは、東北地震の本震及び大規模な余震に伴う応力場の変化及び、観測網南側に推定されている沈み込んだ海山 (Mochizuki et al., 2008) に伴う局所的な応力場の不均質に影響されていると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

AM-2

chairperson:Ryosuke Azuma(Tohoku University), Satoru Baba(University of Tokyo)
Fri. Oct 15, 2021 11:00 AM - 12:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S09-24] Low-frequency tremors activity immediately after the 2003 Tokachi-oki earthquake (M 8.0) detected by offshore aftershock observation

○Susumu Kawakubo[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Hino[1], Hidenobu Takahashi[2], Kazuaki Ohta[3], Masanao Shinohara[4] （1.Tohoku University, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-25] eismicity around the subducting seamount in the Japan-Kuril trenches junction detected by a broad-band OBS array and S-net observatory

○Ryosuke AZUMA[1], Susumu Kawakubo[1], Hidenobu Takahashi[3], Yusaku Ohta[1], Ryota Takagi[1], Syuichi Suzuki[1], Makiko Sato[1], Ryota Hino[1], Shinichi Tanaka[2], Masanao Shinohara[2] （1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.ERI, University of Tokyo, 3.Central Research Institute of Electric Power Industry）

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-26] Quantification of characteristics of temporal change in very low frequency earthquake activity

○Satoru BABA[1], Kazushige Obara[1], Shunsuke Takemura[1], Akiko Takeo[1], Ryo Kurihara[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-27] Fault geometry of M6-class outer-rise normal-faulting earthquakes in central Japan Trench from ocean bottom seismograph observations

○Koichiro OBANA[1], Tsutomu Takahashi[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1] （1.JAMSTEC）

11:45 AM - 12:00 PM

©Seismological Society of Japan

Low-frequency tremors activity immediately after the 2003 Tokachi-oki earthquake (M 8.0) detected by offshore aftershock observation

*Susumu Kawakubo[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Hino[1], Hidenobu Takahashi[2], Kazuaki Ohta[3], Masanao Shinohara[4]

1. Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込んでいる北海道南方沖のプレート境界浅部では、0.01 –0.1 Hzの帯域で卓越する超低周波地震 (Very Low Frequency Earthquake, VLFE) や2 ––8 Hzの帯域で卓越する低周波微動 (Low Frequency Tremor) などのスロー地震が観測されている。低周波微動は、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) の運用が始まった2016年以降初めて検出 (Nishikawa et al., 2019; Tanaka et al., 2019) され、Kawakubo et al. (JpGU, 2021) は2006 –2007年に同海域で設置されていた海底地震計の観測データの再解析によって、2016年以降の活動と同じ場所で微動が発生していたことが明らかにされた。一方、2006 –2007年の活発化の時間間隔は2 –4ヶ月と、2016年以後のS-netで観測される微動活動の活発化が 1 年間隔であるのに対して短い。こうした活動度の違いはVLFEにも認められ (Baba et al., 2020)、その背景には、この領域で発生していた2003年十勝沖地震 (M 8.0) の余効すべり (Itoh et al., 2019) があると考えられる (Kawakubo et al., JpGU, 2021)。そこで、本研究では2003年十勝沖地震直後の期間の低周波微動の活動を、自己浮上式海底地震計による余震観測 (Shinohara et al., 2004; Machida et al., 2009) で得られた地震波形連続記録を用いて解析した。この期間中、VLFEの活動が非常に活発であったことが知られており (Asano et al., 2008; Baba et al., 2020)、微動も多発していた可能性が高い。このような背景から、本研究では2003年十勝沖地震の直後の余震観測データにエンベロープ相関法（e.g., Ide, 2010）を適用し、微動の検出と震源決定を試みた。

本研究でデータを解析した余震観測は、気象庁、東京大学、九州大学、北海道大学、海洋研究開発機構、東北大学の共同観測として実施され、2003年10月1日から11月20日までの期間に、本震の破壊域周辺に広帯域地震計1台と短周期地震計28台が展開された。10月20日には短周期地震計が追加投入され、11月20日までの間は計37台による観測が行われた。本研究では、３成分の波形記録に2 –8 Hzのバンドパスフィルターを施し、RMS振幅を計算することで３成分を合成し、0.5 Hzのローパスフィルターを適用したのちに1 Hzにリサンプルしたエンベロープ波形を解析に用いる。エンベロープ相関解析 (e.g., Ide, 2010) ではエンベロープ波形を時間窓120秒、オーバーラップ60秒で区切っていき、観測点間の時間窓同士の最大相互相関係数が0.6を超える観測点ペアが10組を超えた場合にイベントを検出したとみなした。

解析の結果、15,475個のイベントが検出され、そのうち震央誤差と時間残差がそれぞれ5 km、3秒以内でかつ、振動継続時間が20秒以上と長く、微動と考えられるイベントは614個であった。検出した微動の多くは十勝沖地震の本震すべり域より浅部側に海溝軸に沿って分布し、S-netの観測で検知されている微動の分布とおおむね一致する。本研究が解析対象としている期間中にAsano et al. (2008) やBaba et al. (2020) により検出されたVLFEは2000個以上あり、数時間から数日の間隔で活発な活動が見られるが、微動と識別・震源決定できたイベント数はVLFEの発生数と比べて非常に少ない。2006-2007年観測やS-net観測により検知された微動活動とVLFEの活動度との間にはよい相関が見られるため、上記の微動の検知数は過小であるように思われる。その原因として、観測網が通常地震の発生域側に偏っていて微動発生域の一部しか覆っていないことのほか、微動活動が非常に活発であるために異なる震源を持つ複数の微動が同時多発的に発生していて、通常のエンベロープ相関法でこれらを区別して検知・震源決定することが困難となっていることも想定される。今後は、検知できた微動の時空間分布を、余震としてすでに震源が決定されている通常地震の分布と詳細に比較するために、走時補正を導入した震源決定を行うとともに、微動の特徴の詳細を議論するために観測点の振幅補正を行って規模を推定し、微動の波形記録の周波数領域での特徴抽出も進める予定である。

© The Seismological Society of Japan

eismicity around the subducting seamount in the Japan-Kuril trenches junction detected by a broad-band OBS array and S-net observatory

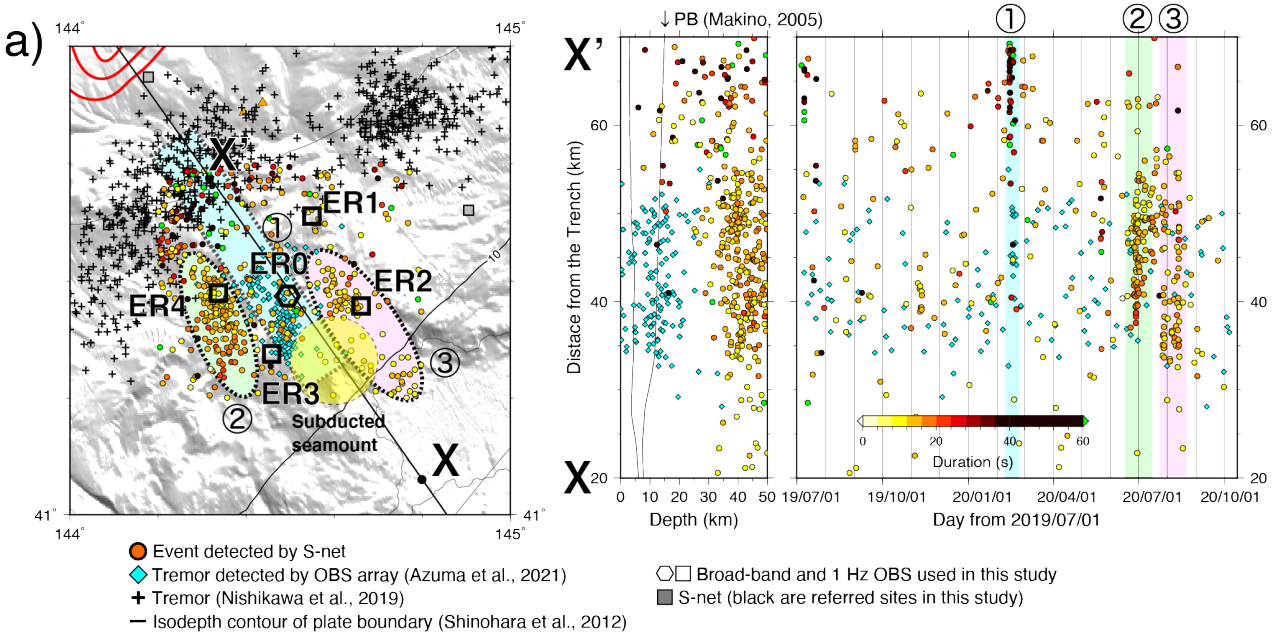
*Ryosuke AZUMA[1], Susumu Kawakubo[1], Hidenobu Takahashi[3], Yusaku Ohta[1], Ryota Takagi[1], Syuichi Suzuki[1], Makiko Sato[1], Ryota Hino[1], Shinichi Tanaka[2], Masanao Shinohara[2]

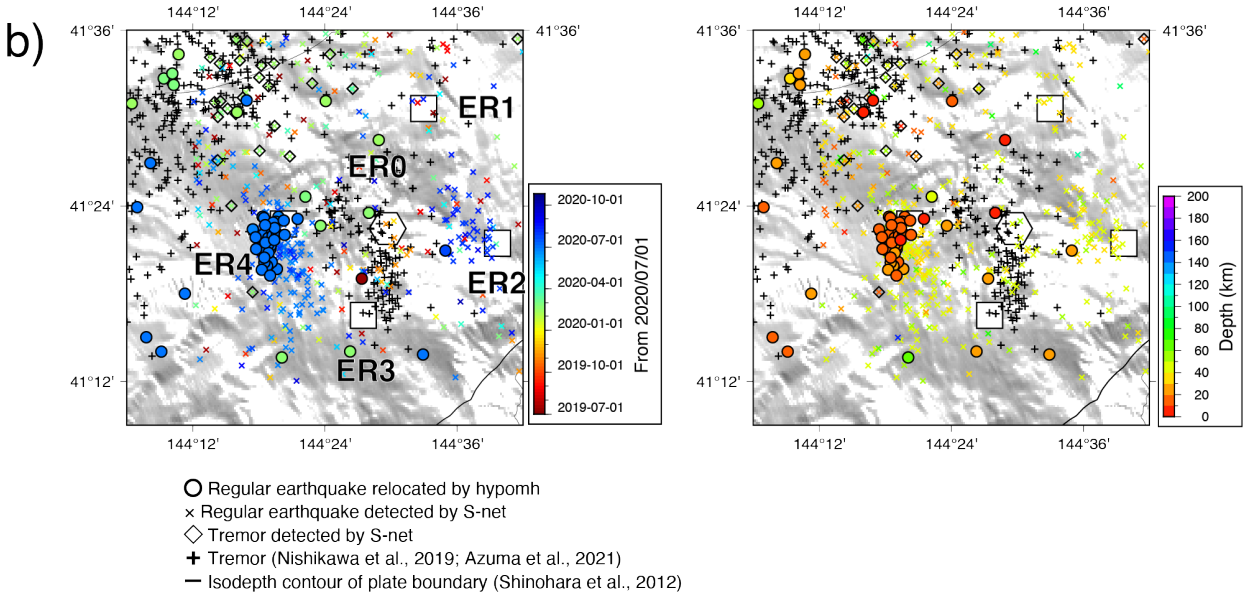
1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. ERI, University of Tokyo, 3. Central Research Institute of Electric Power Industry

北海道襟裳岬沖の千島－日本海溝会合部では、沈み込んだ海山 (Tsuru et al., 2005) のごく近傍に活発な浅部超低周波地震(sVLFE) 活動が陸上広帯域地震観測網F-netによって観測されている (例えば、Baba et al., 2020)。一方、sVLFEと同期し海溝に沿って帯状に分布する浅部低周波微動が日本海溝地震津波観測網S-net (2017年以降：Nishikawa et al., 2019; Tanaka et al., 2019) と機動海底地震観測 (2006-2007年：Kawakubo et al, JpGU, 2021) によって観測されているが、微動とsVLFEの空間な対応関係の議論は、海域地震に対する陸上と海域の観測網とでの震源精度の違いのために困難であった。こうした背景から、沈み込んだ海山周辺でのスロー地震活動の実態解明には、活動域の直上観測にそれらの時空間分布を把握することが重要である。
著者らはこれまでに、sVLFEの発生が予想される沈み込んだ海山周辺に120秒速度計１台と1秒速度計４台で構成した海底地震計（以降、OBS）アレイで2019年7月～2020年10月の間に観測された地震波形記録を、エンベロープ相関法 (以降、ECC, Ide, 2010) を用いて解析を行ってきた。その結果、先行研究では未検出であった海山のごく近傍に継続時間の長い微動を検出し、2020年2月中旬の一週間で特に活発であったことがわかった (Azuma et al., JpGU, 2021)。一方、微動の発生時刻においてsVLFEのシグナルが確認されていない、地震波形記録のランニングスペクトル上には検出したイベント以外にも低周波帯域に多数のシグナルが認められる、本アレイが既知の微動帯で起きたイベントに震源精度を持たないことが課題であった。そこで本研究は、既知の微動帯での活動との関連性も検討にするためにOBSとS-netの併合処理を行い、会合部の地震活動の実態を明らかにしていく。
OBSアレイ観測期間中に，S-net（S4, S5ケーブルの全ノードとS6ケーブルの1~9番ノードの計60点）で観測された記録のみに対してECCを適用してイベントカタログを作成した（S-netカタログ）。ECC解析では、2-8 Hz帯域の地震波形記録から作成した３成分合成エンベロープを、時間窓120秒、60秒オーバーラップで切り出し、観測点間の最大相互相関係数が0.6以上となる観測点ペアが10ペア以上ある場合にイベント検出とみなした。次に、Azuma et al. (2021) によるOBSアレイのECC解析で得られたカタログ（OBSカタログ）とS-netカタログのそれぞれに含まれるイベントについて、微動・ローカル・遠地地震・誤検知の判別をOBS・S-netの地震波形（時系列・スペクトル）に基づき目視で行った。通常地震と判別されたイベントについては、OBSとS-netの記録を統合してP・S波到達時刻を読み取りHYPOMH (Hirata and Matsu'ura, 1987) によって震源再決定を行った。なお、再決定ではPS-P時間から求めた堆積層補正を施し、速度構造にはJMA2001 (Ueno et al., 2002) を用いた。
S-netデータに対するECC解析の結果、OBSアレイの周辺で450個余りのイベントが検出された。これまでに、解析対象期間中におこった３回の活発期（図a中の①～③）に検出されたイベントを中心に、目視判別と震源再決定を行った。以下に活動の詳細および今後の課題を述べる。
①2020年2月14日からの一週間に、周波数成分と継続時間から微動と解釈できるイベントが、OBSとS-netの両カタログ合わせて40個検出された。そのうちS-net の解析で見つかったイベント（図a中〇）はOBSの解析で見つかったもの（図a中◇）と異なって、微動発生帯（図a中＋）に分布し、発震時刻も一致しない。しかしながら、発生時期は一致しており、OBSとS-netの両方で目視でも低周波数帯域に未検出のイベントが多く認められることから、より活発な活動であった可能性がある。OBSとS-net観測点を併合した再解析によって未把握の微動の探索を進める。
②2020年6月末から7月上旬にかけて、明瞭なP・S相を持ちF-P時間にもとづくマグニチュードが1~2程度の微小地震がS-netカタログで多数検知された。これらはOBSによるECC解析で有意なイベントとして検出されなかったが、地震波は観測されており、再決定した震源45個（図b中〇）はどれも海山北西側にあるOBS観測点

© The Seismological Society of Japan

ER4下に集中して分布した。震源深さはプレート境界周辺に相当する（図b右）が、観測点配置とS波到着走時残差を考慮すると、厳密な位置関係の議論は難しい。ただし、これらの地震波形は脈動帯域より高周波側で相似性が非常に良い傾向にあり、なんらかの特徴的な活動が起こっていた可能性がある。二重走時差や波形相関を用いた震源決定により地震間の相対位置を定量的に調べるのが課題である。
③2020年7月末からの活動は震源再決定を終えていないため詳しい考察に至らないものの、いくつかの地震は海山の北東側ER2下に分布することがわかっている。今後の解析で上記３活動の相対位置関係の検討、微動活動を手がかりとしたsVLFEの探索を進め、沈み込んだ海山の周りの地震活動を明らかにしていく。





© The Seismological Society of Japan

Quantification of characteristics of temporal change in very low frequency earthquake activity

*Satoru BABA[1], Kazushige Obara[1], Shunsuke Takemura[1], Akiko Takeo[1], Ryo Kurihara[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

巨大地震が発生するプレート境界では、通常の地震のほかに、スロー地震と呼ばれる通常の地震よりも遅いすべり速度の断層破壊現象が発生している。スロー地震には、巨大地震発生域の深部延長で発生する深部スロー地震と、海溝軸近くで発生する浅部スロー地震が存在する。スロー地震の一種である超低周波地震（VLFE）は、0.02–0.05 Hzの周波数帯で観測されており、深部および浅部のどちらについても、防災科学技術研究所の広帯域地震観測網F-netで15年以上にわたる解析が可能である。Baba et al. (2020a, b) ではF-netの連続波形記録に対し、統一した手法によって網羅的にVLFEを検知した。具体的には理論波形を使ったテンプレートマッチングによって、千島海溝・日本海溝および南海トラフ沿いで2003–2018年の期間のVLFEの発生時刻、位置、モーメントを推定し、その空間変化の特徴を調べ、VLFE活動の時間変化の類似性から14の地域に分類した。VLFEのモーメントの総解放量は、西南日本の日向灘の浅部VLFEで最も大きく、西南日本の深部VLFEや東北沖の浅部VLFEは小さいという特徴があった。本研究では、各地域のスロー地震活動の時間変化の特徴を定量化することを目的として、Baba et al. (2020a, b) のVLFEカタログを用いて、Kurihara & Obara (2021, https://doi.org/10.1002/essoar.10505063.3) の手法に基づきVLFE活動の群発性と連続性などを評価する。

解析期間を各地域のVLFEの検出個数で割った値を平均発生間隔とし、前のイベントとの発生時間差が平均発生間隔より短いイベントが連続して10個以上継続する場合、群発的活動と定義する。この群発的活動の割合を地域ごとに評価するため、各地域のVLFE総数に対して、群発的活動に含まれるVLFEの割合を群発率とした。さらに、群発的活動の発生頻度を求めるため、時間的に連続する２つの群発的活動の時間間隔を評価した。

VLFE活動の群発率は全体的に浅部VLFEの方が深部VLFEよりも大きく、特に日向灘、紀伊半島沖、十勝沖の浅部VLFEの群発率は0.9を超えており、間欠的な活動様式を示していた。一方、四国東部や東海地方の深部VLFEは群発率が低く、0.4程度であった。群発的活動の間隔は、地域を問わず深部VLFEは数ヶ月程度であったが、浅部VLFEでは、2–3ヶ月程度から2年程度までと、地域による多様性が大きい。Baba et al. (2020a, b) の結果と合わせて考察すると、プレート境界浅部のVLFE活動は、深部と比べ時空間的な多様性が大きく、プレート境界浅部は応力蓄積と解放過程の不均質性が深部と比べて大きいことを示唆する。本発表では、群発率や群発的活動の時間間隔といったスロー地震活動の時間変化の特徴を支配する要因を検討する。

© The Seismological Society of Japan

Fault geometry of M6-class outer-rise normal-faulting earthquakes in central Japan Trench from ocean bottom seismograph observations

*Koichiro OBANA[1], Tsutomu Takahashi[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC

2011年3月の東北沖地震発生以降、日本海溝の海溝軸付近や海溝海側のアウターライズ域では、太平洋プレート内部で発生するアウターライズ正断層地震の活動が活発化している（e.g. Asano et al. 2011)。複数のM7クラスの地震が発生しているのに加え、さらに大規模な地震の発生とそれに伴う津波の被害も懸念されている（e.g. Lay et al., 2011）。日本海溝のアウターライズ域を震源とする正断層地震では、複数の正断層が連動して破壊した事例が、主に余震分布から指摘されている。例えば、1933年昭和三陸地震では、余震分布の再解析や津波記録の検討から、東下がりと西下がりの傾斜方向が異なる2つの正断層が同時に破壊した可能性が指摘されている（Uchida et al., 2016）。また、海底地震計による観測からはM7クラスの地震において2枚の共役な正断層や横ずれ断層に沿って余震が発生している様子が観測されている（Hino et al. 2019, Obana et al., 2013）。ただし、これらの観測は本震発生以降に設置された海底地震計を用いたものであり、本震そのものや、本震直後の余震活動を捉えたものではない。JAMSTECでは、日本海溝中部の海溝軸周辺ならびに海溝海側において、超深海型を含む計45台の海底地震計（OBS）を用いた地震観測を2017年9月から2018年7月にかけて実施したが、観測期間中にM6クラスのアウターライズ地震が3回発生している（2017年9月21日M6.3、10月6日M6.3、11月13日M6.0）。OBSによる記録を用いた解析を行い、これらの地震について本震の破壊開始点や余震分布、震源メカニズムを検討した。特に各地震の本震発生後3日間程度については、連続記録から可能な限り検測を行なった上で解析を実施した。 得られた震源分布からは、いずれの地震も本震発生から約1時間の余震は、本震の破壊開始点を含む10km程度の範囲に限られていることが示された。一方、本震後1時間の余震域と比べると、その後数時間で余震域が断層走向方向に10kmから15km程度拡大していく様子も捉えられている。また、2017年9月の地震では、断層の走向とは直交方向に10kmから15km程度離れたグラーベンでも、本震から数時間以内に活動が活発化している。余震分布は、概ねGlobal CMTによるメカニズム解の走向方向に広がっている。海底地形に見られる正断層によって形成されたグラーベンや、海洋プレート形成時の構造を反映していると考えられる地磁気異常の方向とも一致しており、ホルスト・グラーベンを形成する正断層や、プレート形成時の古い構造に沿ってアウターライズ地震が発生していると考えられる。余震分布は傾斜角45度から70度の傾斜面に沿っており、広角の正断層の活動を示唆している。また、2017年10月の地震では、傾斜角や傾斜方向の異なる複数の面上の余震活動が本震直後から発生しており、M6クラスの地震であっても複数の断層が連動して破壊する可能性を示している。アウターライズ地震による津波を想定する場合、このような複雑な断層面形状も考慮にいれることが必要である。

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S17. Tsunami

AM-2

chairperson:Ryosuke Azuma(Tohoku University), Satoru Baba(University of Tokyo)
Fri. Oct 15, 2021 12:00 PM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-01] Outer rise Normal Faulting Earthquakes and their Aftershock Activities

○Nobuo HAMADA[1] （1.non）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Outer rise Normal Faulting Earthquakes and their Aftershock Activities

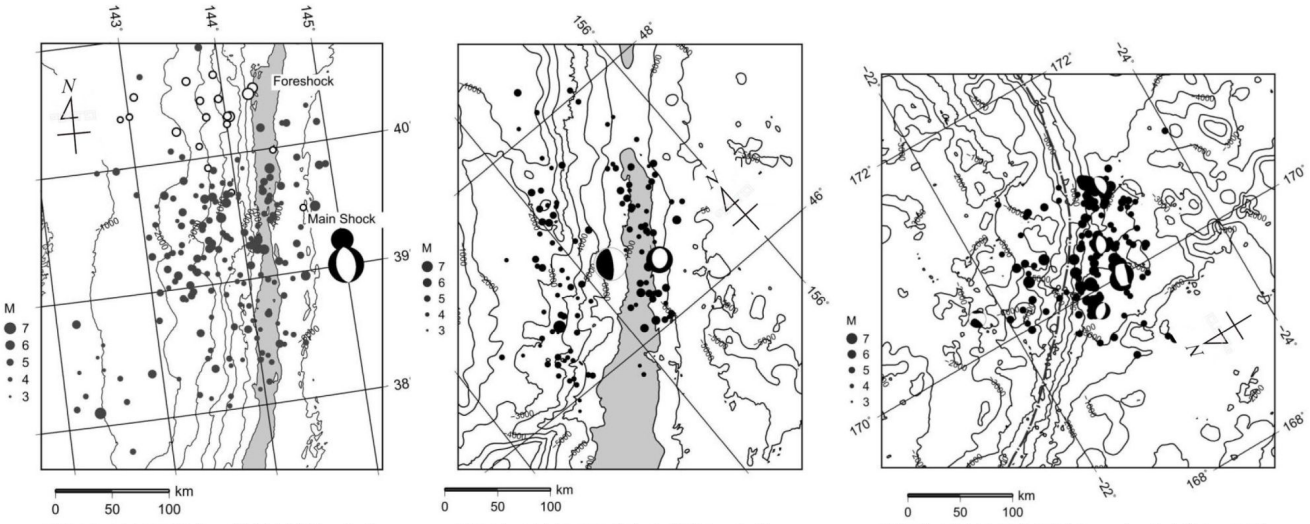
*Nobuo HAMADA[1]

1. non

１．はじめに
1933年昭和三陸地震（Ｍｗ 8.4)は海溝を挟んだ両側で余震活動が活発化し、海溝外側では本震と同じ正断層型の余震、海溝陸よりではプレート間の逆断層型の余震が発生したと考えられている。一方2006年の千島中部の地震では11月のプレート間地震（Ｍｗ 8.3)の直後から海溝を挟んだ海域で昭和三陸地震の場合と似たような余震活動が発生した。この余震分布は二ヶ月後の2007年1月の海溝外側の正断層型の最大地震（Mw8.0)発生前にはすでに形成されていたことから、昭和三陸地震の場合と似たような余震分布が海溝外側の正断層型の地震の発生にかかわらず、プレート間の逆断層地震だけでも形成されることを示している。従って余震分布の類似性を考慮すると1933年昭和三陸地震の震源過程の中にプレート間の逆断層地震の発生が含まれている可能性を、昨年秋の学会で言及した。海溝外側の正断層型地震の発生は希であるが余震分布について他にも似たような事例がないか検討した。
２.日本海溝外側の場合
日本海溝の外側（outer rise）で発生した正断層型の地震は、大きい方から1933年昭和三陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震の直後に宮城県沖で発生した余震（Ｍｗ 7.6）、2005年11月に同じく宮城県沖で発生した地震（Ｍｗ 7.0)の三つがある。これら三つの地震はいずれも海溝軸から60km前後離れた場所に震央が求められていること、余震が本震の海溝側、西よりの海域に分布するという共通の特徴がある。海溝内側、陸寄りのプレート間逆断層と考えられる余震活動は、2005年11月の地震では発生は認められていない。2011年の地震では本震自体の余震活動との区別は不可能であるためその存在は確認できない。
３．その他の沈み込み帯の場合
2005年の宮城県沖の地震で、海溝内側の余震活動が誘発されなかったことの理由として地震の規模（Ｍｗ 7.0)）が小さかったことが考えられることから、Ｍｗ7.5以上の海溝外側で発生した浅い正断層型の地震の余震活動を調査した。海溝外側のプレート内で発生する地震には浅い正断層型の地震以外に、横ずれ型の地震、プレート下部のプレート内で発生する逆断層型の地震がある。
Outer riseでの横ずれ型の地震は、1988年3月のAlaska湾の地震(Mw 7.8)、1998年5月の台湾東方沖の地震(Mw7.5)、 2012年4月のSumatra島沖の地震（Ｍｗ 8.6、Ｍｗ8.2）の地震、2018年1月のAlaska Kodiak島沖の地震(Mw 7.9)などがある。これらの地震では2012年4月のSumatra島沖の地震以外には海溝内側の地震活動には何ら影響が認められない。Sumatra島沖の地震でも海溝陸側のプレート間の逆断層地震の活動は、海溝外側の余震活動に比較すれば微々たる数で、海溝外側の横ずれ断層の地震が、プレート間地震の発生に与える影響は小さいと判断される。
正断層地震については事例が少なく、資料が不十分ながら1969年11月のSumatra島沖地震（Ｍｓ 7.6）、1995年5月のRoyalty諸島の地震(Ｍｗ 7.7)、同じく2018年12月のRoyalty諸島の地震(Ｍｗ 7.5)がある。1995年の地震では図に示すように海溝軸内側にも余震が発生していることが分かる。しかし海溝外側で発生した余震に比べその数は少数である。昭和三陸地震や、2006年千島中部の地震のような余震活動にはならなかったことが分かる。地震検知能力が不十分だった1969年のSumatra島沖の地震も、報告されている余震の数は少ないが同様の傾向が伺われる。
2018年12月のRoyalty諸島の地震については約3ヶ月前の8月末に海溝内側でＭｗ 6.9のプレート間逆断層地震が発生しその余震が海溝内側で広がっていたことから、2006年千島中部の地震のようなプレート間地震と海溝外側の正断層地震のdoubletと見ることができる。数少ない事例であるが、海溝外側の正断層地震だけでは、昭和三陸地震に伴って発生したような海溝両側での余震活動を形成することは難しいと考えられる。昭和三陸地震の発生の二ヶ月前に北部で発生した先行地震活動（前震）が海溝内側の領域で発生したことも考え合わせると、昭和三陸地震は、海溝外側の正断層地震に、海溝内側でのプレート間逆断層地震を伴った可能性が高い。

© The Seismological Society of Japan

海溝を挟んだ両側で余震活動を伴った地震の事例



1933年3月3日昭和三陸地震(Mw 8.4)　2006年11月15日千島中部(Mw 8.3)　1995年5月16日(UTC)Royalty Isl.(Mw 7.7)

Over riding plate ⟷ Subducting plate

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S17. Tsunami

PM-1

chairperson:Toshitaka Baba(Tokushima University), Satoshi Kusumoto(JAMSTEC)
Fri. Oct 15, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S17-02] A New Calculation Method of Wet/Dry Boundary for Tsunami Inundation

○Masaaki MINAMI[1] （1.Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute）
1:30 PM - 1:45 PM

[S17-03] Comparison between tsunami hazard curves and exceedance rate estimated from historical tsunamis in the Nankai subduction zone

○Toshitaka BABA[1], Ryoichi YAMANAKA[2], Hiroyuki FUJIWARA[3] （1.Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2.Research Center for Management of Disaster and Environment, Tokushima University, 3.NIED）
1:45 PM - 2:00 PM

[S17-04] Tsunami source model of the 1854 Ansei-Tokai earthquake based on crustal deformation and tsunami trace height distributions

○Kentaro IMAI[1], Satoshi Kusumoto[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[2,1], Takashi Furumura[3] （1.JAMSTEC, 2.NIED, 3.ERI, The Univ. of Tokyo）
2:00 PM - 2:15 PM

[S17-05] The 1854 CE Ansei Tokai Earthquake and Tsunami Deposits at Iruma, Minami-Izu City, Shizuoka Prefecture

○Satoshi KUSUMOTO[1], Kentaro Imai[1], Takane Hori[1], Daisuke Sugawara[2] （1.JAMSTEC, 2.Tohoku University）
2:15 PM - 2:30 PM

[S17-06] Back-projection imaging of a tsunami source location using S-net ocean-bottom pressure records

○Ayumu MIZUTANI[1], Kiyoshi Yomogida[2] （1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Faculty of Science, Hokkaido University）
2:30 PM - 2:45 PM

[S17-07] Interaction of tsunamis generated by successive Mw 7.4 and Mw 8.1 earthquakes on Kermadec Islands on March 4, 2021

○Yuchen WANG[1,2], Mohammad HEIDARZADEH[3], Kenji SATAKE[1], Kentaro IMAI[2], Takane HORI[2], Gui HU[4] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3.Department of Civil &Environmental Engineering, Brunel University London, 4.School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University）
2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

A New Calculation Method of Wet/Dry Boundary for Tsunami Inundation

*Masaaki MINAMI[1]

1. Japan Meteorological Agency Meteorological Research Institute

1 背景と目的 津波浸水計算では、浸水現象を水が存在するメッシュ(以下wetと表記する)と水が存在しないメッシュ(以下dryと表記する)との境界条件として取り扱うことが一般的である。その境界条件の違いは、浸水計算結果の正確性、計算安定性に大きく影響する。これまでに相田 (1977)、岩崎・真野 (1979)、Hibberd and Peregrine (1979)などのアルゴリズムが利用され、最近では、岩崎・真野 (1979)の方法を改善した小谷ほか (1998)の方法（以下、小谷の方法という）が、研究や防災のための津波数値計算で広く利用されている (例えば、Imamura et al. 2008; 国土交通省 津波浸水想定の設定の手引きVer 2.10 2019)。小谷の方法は、計算精度に優れていることから多くの計算で用いられている。一方、小谷の方法を用いた場合に、遡上先端の計算が不安定になる場合があることも指摘されている(原子力土木委員会 津波評価部会 2007)。この計算不安定は、従来の相田 (1977)の方法を用いることで回避可能である(原子力土木委員会 津波評価部会 2007)が、相田 (1977)の方法は越流公式を基にした計算条件であり、その計算精度についての検証が充分でない。そこで本研究では、津波数値解析に基づいて、小谷の方法の計算不安定の原因を明らかにするとともに、それを改善して数値解析の安定性を向上させるための手法を提案する。 **2 小谷の方法** 小谷の方法については以下の通りである。1) wet側の波高がdry側の地盤高がよりも高い場合にのみ遡上計算を行う。(2) wet/dry境界の計算を行う際の全水深Dについて、wet側の波高とdry側の地盤高の差とする。(3) wet/dry境界の計算の移流項の計算の際に、全水深Dがゼロまたはある下限値より小さくなった場合には、その全水深を分母として持つ項のみを省略し移流項の計算を行う。 **3 数値解析条件** 数値解析においては、津波数値モデルJAGURS (Baba et al. 2015)を用いた。JAGURSでは、上述の小谷の方法が浸水境界条件として実装されている。 **4 結果と考察：小谷の方法の数値不安定の原因** 数値解析の結果、小谷の方法の数値不安定は、上記2の(2)wet側格子の波高とdry側格子の地盤高の差を全水深Dとしていることが原因であった。これは、通常wet/wet境界では、境界に接する二つのメッシュの全水深の相加平均を境界上での全水深Ｄとしており(例えばImamura et al. 2006)、これには両方の静水深が情報として入っている。しかしながら、小谷の方法の(2)では全水深Dでは海側（wet側）のメッシュの静水深の情報が抜け落ちており、海側のメッシュの静水深が大きければ大きいほど、wet/dryの境界条件からwet/wetでの計算に変わった際の全水深Dの不連続が大きくなり、その全水深Dの差がfluxを計算する際に大きな差となっていた。つまり、小谷の方法では、wet/dry境界のfluxが過少に評価され、次タイムステップでwet/wet境界に変わったときに、fluxの不連続が大きくなる場合があり、これが計算不安定に繋がっていると考えられる。これは、水深/地盤高の変化が小さい場合、つまりは隣接メッシュ間の水深/地盤高の差が十分小さい場合では問題にならず、水深/地盤高の変化が大きい場合に顕在しやすい。 **5 新手法の提案とその性能評価** 以上の考察に基づいて、以下の通り、wet/dryの境界条件についての改善を提案する。それは、wet/dry境界で用いる全水深Dについて、小谷の方法の(2)のwet側の波高とdry側の地盤高の差ではなく、wet側の全水深Dとdry側の全水深(dryなので全水深はゼロ)の相加平均、すなわちwet側の全水深Dの1/2を用いる方法である。この方法を用いることによって、wet/wetでの計算との不連続をなくすことができる。この提案手法を、小谷の方法では計算不安定(数値振動)が生じていた状況に適用した結果、数値振動は発生しなくなることを確認できた。

© The Seismological Society of Japan

Comparison between tsunami hazard curves and exceedance rate estimated from historical tsunamis in the Nankai subduction zone

*Toshitaka BABA[1], Ryoichi YAMANAKA[2], Hiroyuki FUJIWARA[3]

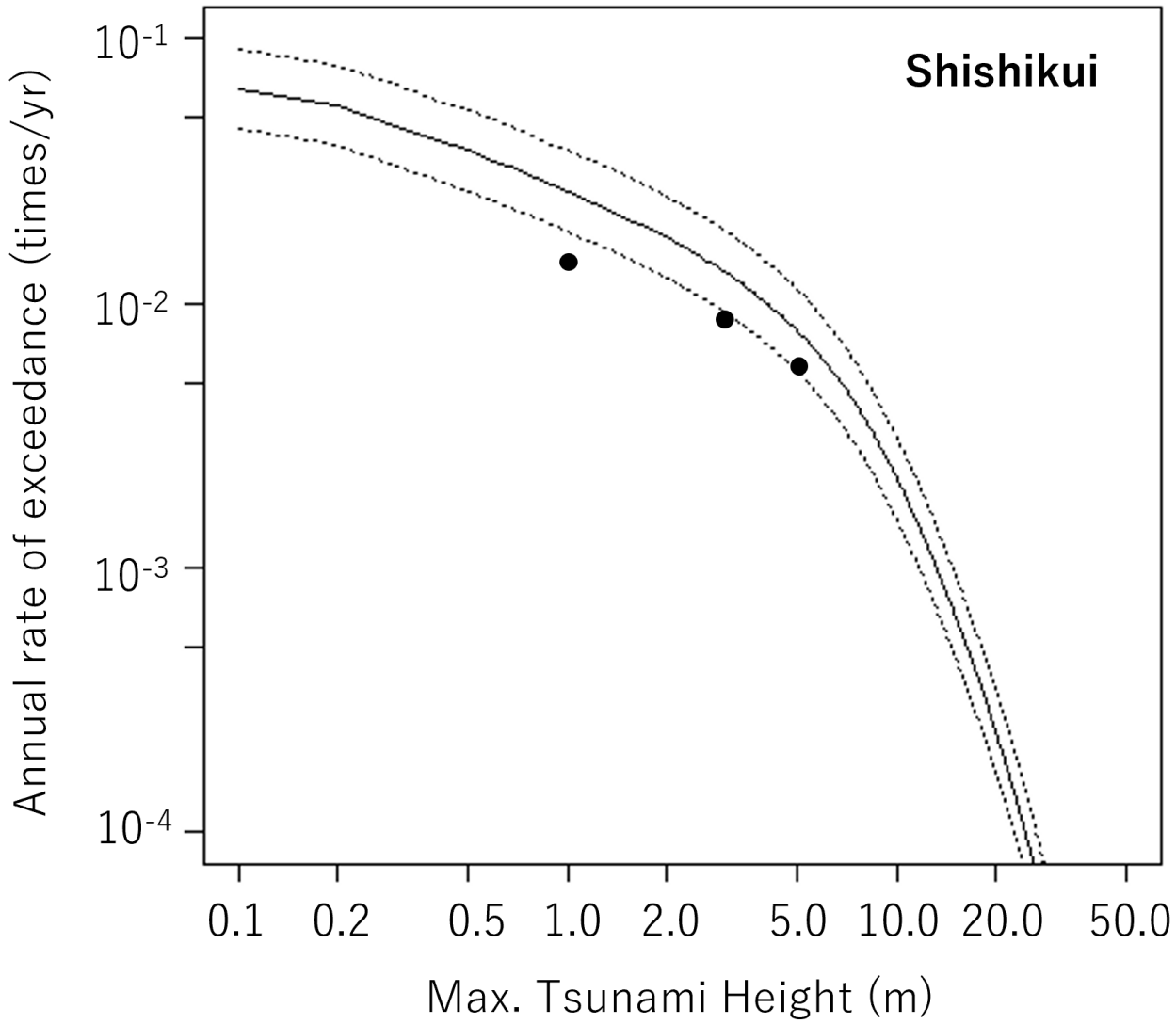
1. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2. Research Center for Management of Disaster and Environment, Tokushima University, 3. NIED

最悪ケースの地震シナリオに基づく津波浸水想定が津波ハザードマップとして公表される．一方，地震や津波は不確実性を含んだ自然現象であるため，例えば都市計画などの分野においては津波ハザードの確率的な評価も必要である．藤原ほか（2020）は，M7.6～M9.1の3480ケースの南海トラフ地震のすべりモデルを提案し，すべての津波を計算して，海岸線での津波ハザードカーブを構築した．一般に津波ハザードカーブの妥当性評価は容易ではないが，南海トラフの海岸では過去の複数回の海溝型地震による津波記録が利用できる．そこで本研究では，津波ハザードカーブと歴史津波の超過頻度を比較する．藤原ほか（2020）では，長期評価による地震発生確率を利用して今後30年間の津波ハザードカーブを提示しているが，これでは歴史津波の超過頻度との比較が難しいので，本研究ではGR則を利用して，長期間の平均的なハザードカーブを求めた．GR式の推定には，気象庁一元化地震カタログ（確定版）の期間は1923年1月14日～2015年5月31日，範囲は東経131-139度，北緯30-36度のうち海域に震央がある地震で，かつ，マグニチュードは5.0以上，震源深さは50km以浅のデータを利用した．得られたGR式はlog(N)=3.097-0.668M±0.156となった（誤差は標準偏差）．ここで，Mはマグニチュード，NはM毎の年頻度である． 本研究では最終的に津波浸水の確率評価を目的としており，3480ケースのすべての断層モデルに対して高分解能な津波浸水計算を行った．ネスティングアルゴリズムを利用し，計算領域のうちの一部（徳島県）で10mの空間分解能の計算格子とした．徳島県の津波浸水想定で用いられた地形データを利用した．津波ハザードカーブの作成では，偶発的不確実性を入れた最大津波高の確率密度分布とGR則に基づく発生頻度を独立事象として重ね合わせて，さらに潮位の確率密度分布を畳み込んで津波襲来時の潮位の違いよる影響も考慮した．東北大学津波痕跡データベースのデータと，欠けている部分は安中ほか（2003）の震源モデルを利用して計算し，歴史津波の超過頻度を推定した．比較地点は高分解能な津波計算を実施した徳島県海岸線とした．津波ハザードカーブと歴史津波から推定した超過頻度はほぼ矛盾ないものの，ハザードカーブの方がやや大きい（図）．これは，GR式の推定においてプレート境界型地震以外の地震も含んでいることが一因と考えられる．一方，湾口に津波防波堤が存在する地域では，歴史津波から求めた超過頻度より明らかに津波ハザードカーブの値が小さくなっており，津波防波堤による軽減効果が確認できる．

図 本研究で求めた徳島県宍喰での津波ハザードカーブ（実線）．点線はGR式の標準偏差に対応するハザードカーブのばらつき．黒点は歴史津波記録から求めた超過頻度．

謝辞：本研究の津波計算には東京大学情報基盤センターのFujitsu PRIMERGY CX600M1/CX1640M1(Oakforest-PACS)を利用させていただきました．科研費基盤研究B（19H02409）の支援を受けています．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Tsunami source model of the 1854 Ansei-Tokai earthquake based on crustal deformation and tsunami trace height distributions

*Kentaro IMAI[1], Satoshi Kusumoto[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[2,1], Takashi Furumura[3]

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. ERI, The Univ. of Tokyo

南海トラフ沿いではM8クラスの巨大地震が100～200年程度の間隔で繰り返し発生し，大きな被害をもたらしてきた．一連の南海トラフ巨大地震の発生様式は，以前は一定のプレート運動速度に基づき，固有の地震断層面における再来と発生間隔が受け入れられてきた（例えば，石橋・佐竹, 1998）．一方，瀬野（2012）は，安政東海地震と昭和東南海地震の強震動生成域が異なる（相補的である）可能性を指摘し，昭和東南海地震が安政東海地震の震源域の一部で起きたという従来の考えに疑問を呈している．今井・他（2019）は安政東海地震の津波波源域について，津波高分布に基づいた再検討を行ったが，そこでは，地殻変動量分布や３次元のプレート構造が充分に考慮されていなかった．本研究では，これらの考慮に加えて，現在入手できる地震津波に関する履歴情報を最大限に活用して，安政東海地震の波源断層モデルの再評価を試みる．

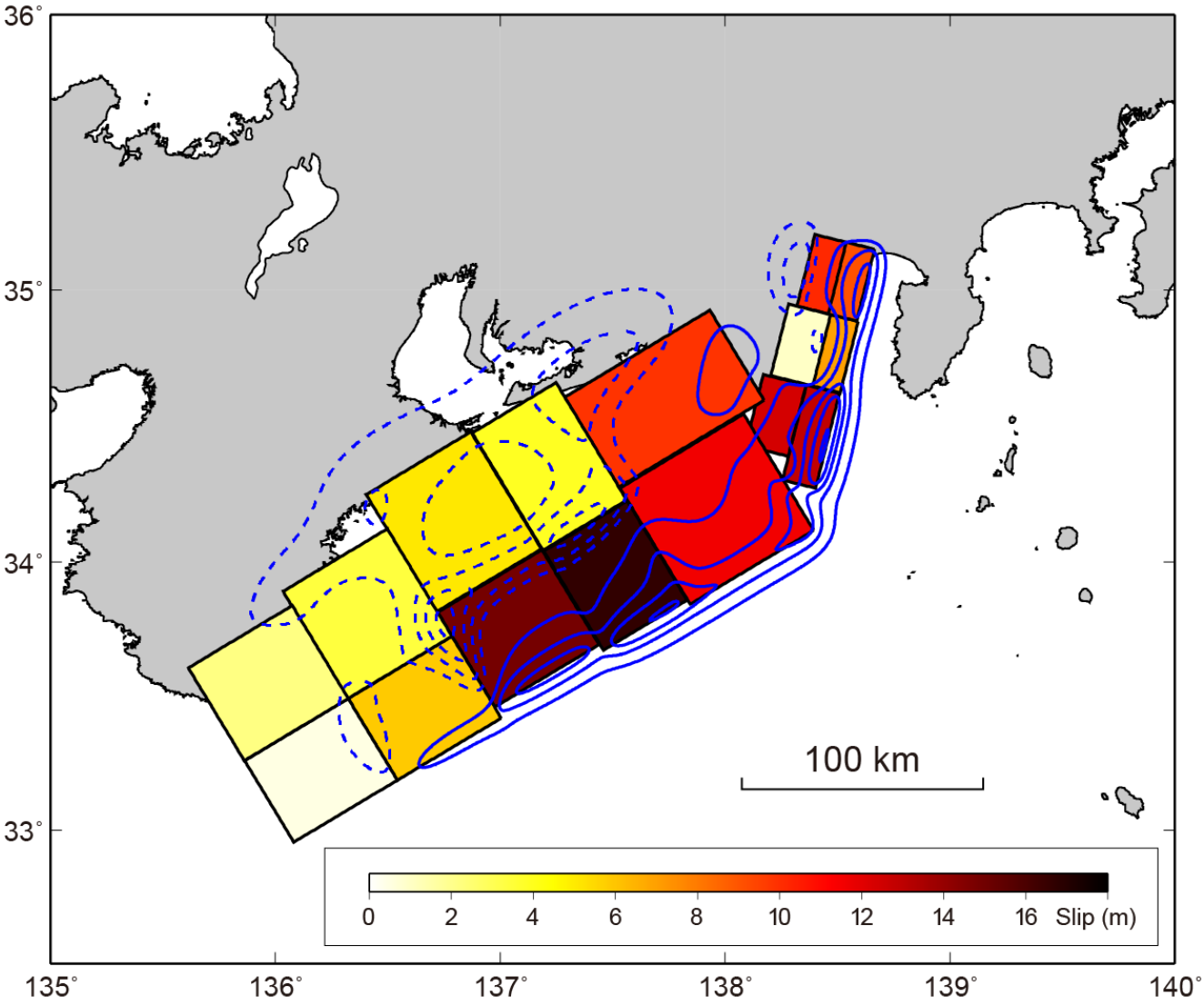
本研究では，既往研究（羽鳥，1977；都司・他，1991，行谷・都司，2005；都司・他，2013；都司・齋藤，2014；今井・他，2017）と，史料集の再精査によって得られた津波痕跡高（今井・他，2019）を用いた．地殻変動量については既往研究（石橋，1984；Kitamura & Kobayashi, 2014）に加え，既刊の地震史料集における本地震による地殻変動量に関する記述から評価した．

波源断層モデルは南海トラフ沈み込み帯の3次元構造モデル(Nakanishi et al., 2018)を参照し，地殻変動や津波高の痕跡点数を考慮して東海震源域については6分割，東南海震源域は10分割の合計16枚の小断層で構成されるものを仮定した．各小断層上の滑りによる地殻変動はOkada (1985)の方法，津波のグリーン関数は線形長波理論（空間格子間隔150 m，時間間隔0.2 s）に基づき計算した．地殻変動の痕跡点は34点を利用した．津波痕跡点については既往研究のデータも含め283点あるが，空間格子間隔の問題や精緻な地形復元作業を必要とする痕跡点，内海の痕跡点（例えば，浜名湖沿岸や伊勢湾内の痕跡）を除いた45点を利用した．比較的遠浅地形となる地点では，津波伝播における非線形性の影響が無視出来ないため，各地点における線形長波と非線形長波モデルから計算された津波高の応答関係を8次の多項式を用いて近似した．地殻変動量と津波痕跡高の分布を説明する各小断層のすべり量は，再現性指標VRS（Imai et al., 2020）が最適値（≒1）に近づくようにSA（Kirkpatrick et al., 1983）を用いて推定した．地殻変動や津波痕跡高には観測誤差や本地震以外の地殻変動成分が含まれると考えられる．本解析では，この誤差を1 m程度と仮定して一様乱数により与え，1,000回試行のアンサンブル平均処理を行い，各小断層のすべり量を評価した．

求められた波源断層のすべり量分布を図 1に示す．本モデルの地震規模はMw 8.5±0.1程度となった．また，VRSは0.85±0.02となり，地殻変動や津波高の分布をおおむね再現できた．津波痕跡高分布を説明するためには，御前崎沖，遠州灘沿岸および志摩半島のトラフ軸付近で大きな断層すべりが必要であり，これにより伊豆半島入間における15 mの津波高を再現できる．しかし，国崎の22 mの津波高は再現できていない． 昭和東南海地震の波源断層モデル（例えば，Baba et al., 2005）には志摩半島沿岸直下で大きな断層すべりが生じていたことと照らし合わせると，瀬野（2012）が指摘した安政東海地震と昭和東南海地震の強震動生成域の相補関係は，津波励起領域においても存在が示唆される．

謝辞：本研究はR2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構　小平秀一）の一環として行われました．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

The 1854 CE Ansei Tokai Earthquake and Tsunami Deposits at Iruma, Minami-Izu City, Shizuoka Prefecture

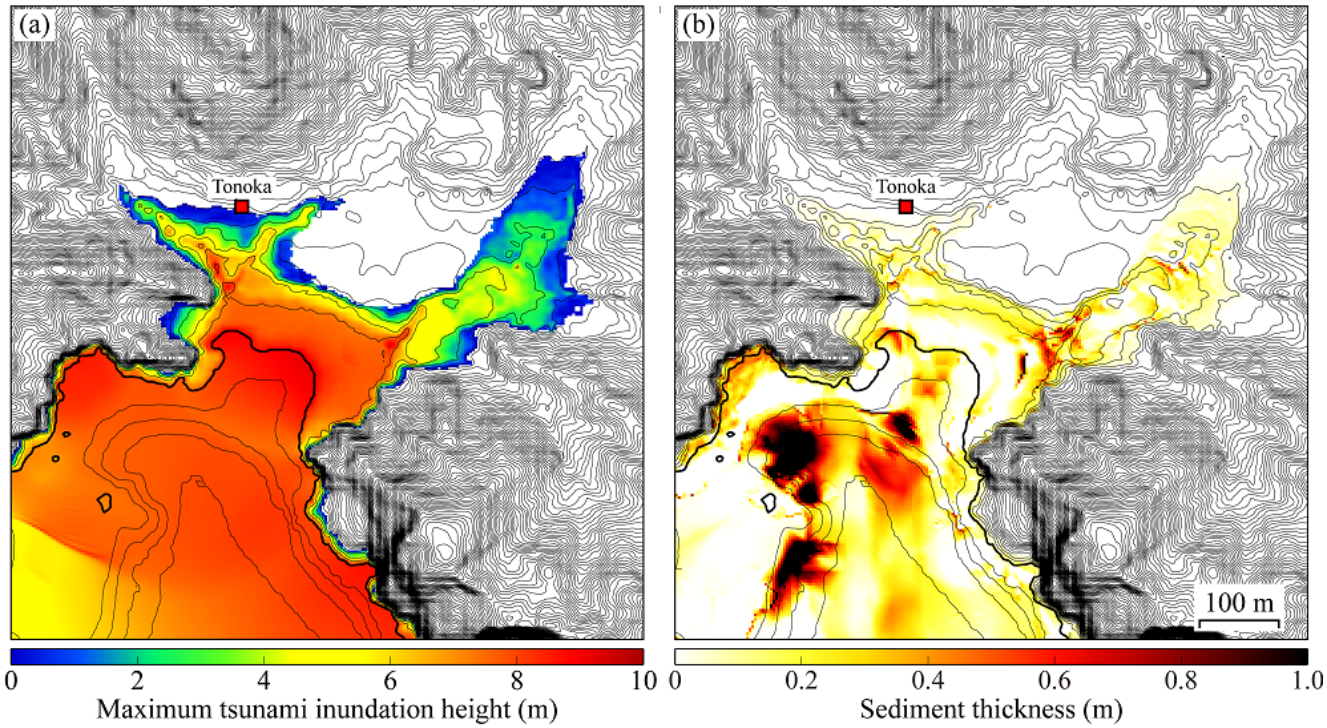
*Satoshi KUSUMOTO[1], Kentaro Imai[1], Takane Hori[1], Daisuke Sugawara[2]

1. JAMSTEC, 2. Tohoku University

1854年12月23日に発生した安政東海地震に伴う津波は伊豆半島から紀伊半島の沿岸にかけて高く，伊豆半島沿岸での津波遡上高はおよそ5～6 m と推定されている（e.g., 羽鳥, 1977；都司ほか, 2019）．一方，伊豆半島南端に位置する静岡県南伊豆町入間では15.7 mと周辺地域に比べて三倍近い大きな値が得られている．また入間の旧家である外岡家の『加美家沿革誌』の伝承には安政東海地震津波で集落に津波堆積物が打ち上げられたという記述があり，それに基づいて現地調査した結果，津波堆積物の層厚は4 m以上，場所によっては8 mに達すると推定されている（浅井ほか, 1998）．一般に陸上に堆積する津波堆積物の層厚は数十cm～1 m未満であり，この津波堆積物は異常に厚いことになる．本研究では，最新の津波波源モデルと津波土砂移動数値計算モデルを基に，津波遡上高と津波堆積物の堆積層厚について検証した．
本研究の解析対象地域は静岡県南伊豆町入間である．入間集落は北・東・西の三方を山に囲まれた谷の出口にあり，南は海に面している（図1）．谷の出口をふさぐように砂堆が存在しており．この砂堆の標高は高い場所で16 m以上ある．『加美家沿革誌』によると，この砂堆上部は人工改変を受けていて，現在の集落は1924年1月11日に30数軒を焼く大火の焼け跡を均して再建されている．入間での津波高（15.7 m）は集落西側の外岡家の近傍にある木の枝に浮遊物が漂着した高さである．
津波伝播・浸水・土砂移動の数値解析には．エネルギー平衡に基づく浮遊砂濃度評価式（Sugawara et al., 2019）を採用した津波土砂移動数値解析モデル（高橋ほか，1999）を使用した．中央粒径は0.267 mmとし，モデルパラメータは高橋ほか (2011)とGusman et al (2018)に準拠した．本解析では，既往研究と再精査した津波痕跡高を基に再評価した最新の安政東海地震を津波波源モデルとして採用した（今井ほか，2021）．砂堆の標高は藤原ほか(2008; 2009)を参考に現在の地表面から6 m取り除いた場合（ケース①，標高10 m）と砂堆が存在しない場合（ケース②，標高6 m）の二種類で計算を実行した．
津波浸水の数値計算結果を図1aに示す．ケース②で砂堆が存在しない場合，外岡家まで津波は到達しない．すなわち，外岡家に津波が到達した原因は砂堆によって地形が狭まっていたことで津波が増幅したためと推察される．また砂堆は安政東海地震以前から存在していたことも示唆される．数値計算により求まった津波堆積物の堆積層厚は厚いところでも1 m程度で，浅井(1998)の報告と大きく異なる結果が得られた（図1b）．一方，入間で地質試料を採取・分析した藤原ほか(2008; 2009)はおよそ1 m程度の粗粒砂礫層を安政東海地震の津波堆積物と認定しており，これは我々の研究成果と概ね調和的である．浅井ほか(1998)の主張は『加美家沿革誌』と「津波以前には現在の集落地の西方に位置する外岡家から集落の東側に位置する畑が見渡せたが，現在は集落に阻まれてその畑は見えない」という現地の聞き取り調査に基づくもので，人工改変などの盛土を津波堆積物と誤認した可能性がある．
謝辞：本研究は R2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構　小平秀一）の一環として行われました．

図1 安政東海地震津波の(a)推定最大浸水深分布と(b)計算堆積層厚分布．赤四角は外岡家の位置を示す．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Back-projection imaging of a tsunami source location using S-net ocean-bottom pressure records

*Ayumu MIZUTANI[1], Kiyoshi Yomogida[2]

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University

地震学においてバックプロジェクション(BP: back-projection)法は、アレイ観測による波形記録を足し合わせるという簡便な操作によって地震の破壊伝播過程を推定することが可能であるため、これまでに多くの巨大地震に適用されてきた(e.g., Ishii et al., 2005; Honda et al., 2011)。またFukahata et al. (2014)はBP法についての理論的な考察をおこない、各観測点におけるグリーン関数の足し合わせをデルタ関数で近似できる場合には、BP法で精度の良い推定が可能であることを示した。

近年、日本列島太平洋沖にはS-netやDONETといった海底観測網が整備され、津波の伝播を面的に捉えることが可能になってきた。本研究では、S-netで得られた水圧記録に対してBP法を適用することで、津波波源の位置推定をおこなった。地震波記録を対象としたBP法では、想定する断層面上の点と各観測点の間での理論走時だけ観測記録の時間軸をずらしてスタックし、得られた波形がその点における地震波の放射強度を表しているとして断層すべりの時空間変化を推定する。これに対して、津波を対象とした場合、線形長波仮定の下では、津波の伝播速度は水深と重力加速度のみで決まり、伝播補正が正確に行えるため、地震波の場合と比較して正確な理論走時が得られる。またBP法で得られる結果は、津波を励起する海面変動に関係していると考えられる。

本研究では、まず初めに、津波記録にBP法を適用した場合の理論走時の影響を確認した。津波数値シミュレーションコードのJAGRUS (Baba et al., 2015)を用いて、幅２kmの2次元ガウス関数を波源とした津波を計算し、各観測点におけるグリーン関数とした。水深データにはETOPO1 (Amante and Eakins, 2009)を、観測波形をスタックする際に必要な理論走時の計算にはFast Marching Method (Sethian, 1999)を用いた。S-netのS1-S5の観測点におけるグリーン関数を足し合わせた結果を図1に示す。実際の水深データを用いて足し合わせた波形はt=0にピークを持っており、デルタ関数によって近似できる。つまり、理論走時を精度良く計算することができる場合は、単純な足し合わせで直達波を抽出することができると考えられる。
次に実際のデータの例として、2016年11月22日の福島県沖地震(Mw6.9)に伴って発生した津波のS-net海底水圧記録に対してBP法を適用した。S-netのS1-S5のサブシステムの中で、生の水圧記録とNAOTIDE (Matsumoto et al., 2000)で計算した理論潮汐との相関が0.8以上となった94観測点を解析に用いた(図2(a))。観測記録の前処理として、(1)理論潮汐を除き、(2)全体の平均値を引くことでDC成分を取り除き、(3)100-3000秒のバンドパスフィルタを適用し、(4)それぞれの最大振幅によって各波形を正規化した。図2に、BP法でスタックして得られた波形を2乗し、最初の300秒を積分した結果を正規化してプロットした。図2(b)における破線は津波インバージョン(Gusman et al., 2017; Adriano et al., 2018)と気象庁による遠地実体波を用いた震源過程解析によって推定された断層すべりによる海底変位を示しており、本研究で得られた振幅分布はそれらと良く一致している。

BP法は対象とする領域と観測点との間の理論走時のみを用いて推定をおこなうため、グリーン関数や逆行列の計算が不要であり、津波波源推定で一般的におこなわれている波形インバージョン(e.g., Satake, 1987)と比べて計算コストが非常に低い。また、津波到達時刻を元にした逆伝播による波源推定(e.g., Hatori, 1969)は走時情報のみを用いるため波源域内での振幅分布を十分に復元できない。したがって、本研究が提案する津波を対象としたBP法は、簡便かつ精度の良い津波波源の推定手法として有用であると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

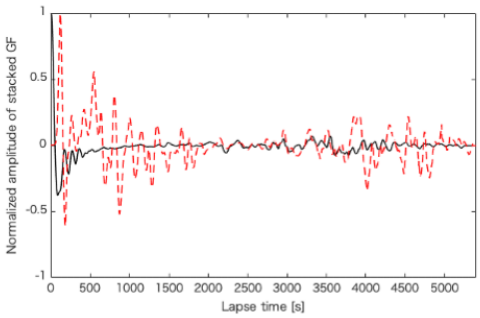


図1
S1-S5の各観測点におけるグリーン関数のスタック波形. 理論走時を計算する際に実際の水深を用いたものを黒線で, 一定値(2500m)を用いた場合を赤破線で示している.津波の波源は図2(a)における震源の位置とした.

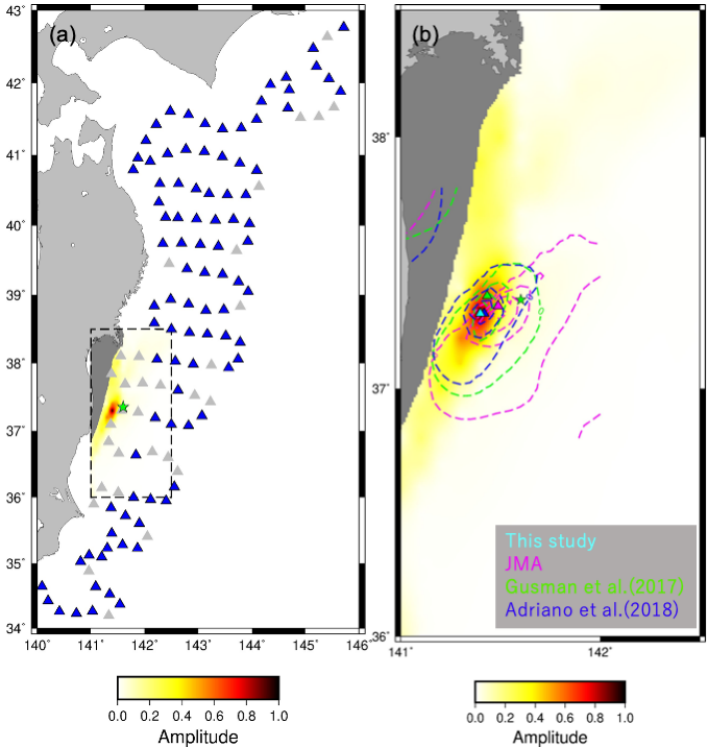


図2
2016年11月22日の福島県沖地震(Mw6.9)による津波記録にバックプロジェクション(BP)法を適用した結果.
(a)解析に使用した観測点(青)と震源(緑). 黒破線はBP法の対象とした領域を示している.
(b)(a)の破線で囲まれた領域を拡大した図. 水色の三角形は本研究によって推定された振幅のピークを, 紫, 緑, 青のコンターと三角形は気象庁, Gusman et al. (2017), Adriano et al. (2018)によって推定された断層すべりによる海底変位の絶対値とそのピークを示している.コンターの間隔は0.5 mとした.

© The Seismological Society of Japan

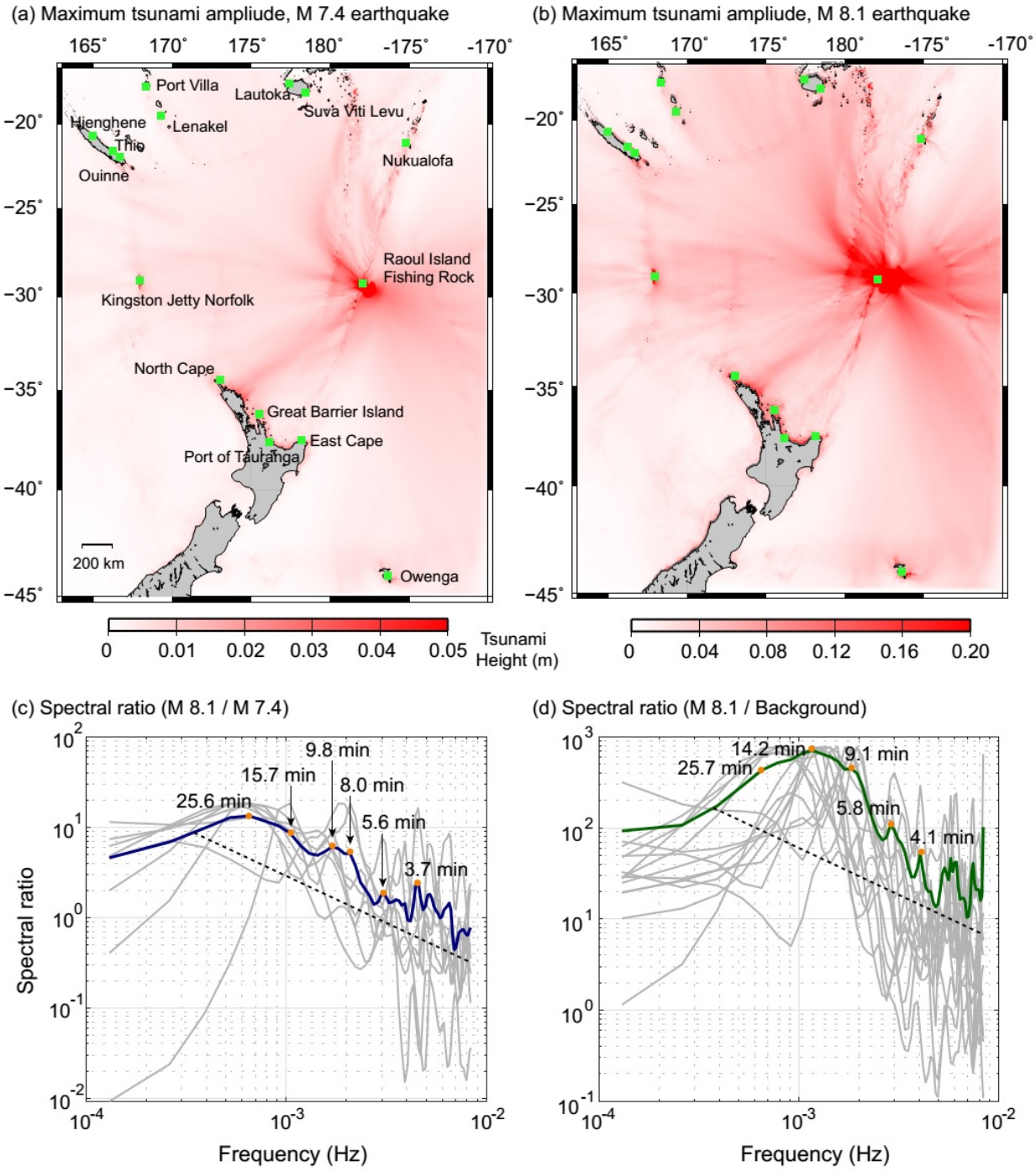
Interaction of tsunamis generated by successive Mw 7.4 and Mw 8.1 earthquakes on Kermadec Islands on March 4, 2021

*Yuchen WANG[1,2], Mohammad HEIDARZADEH[3], Kenji SATAKE[1], Kentaro IMAI[2], Takane HORI[2], Gui HU[4]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3. Department of Civil & Environmental Engineering, Brunel University London, 4. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University

On March 4, 2021, two earthquakes occurred successively on Kermadec Islands, New Zealand. The foreshock (Mw 7.4) happened at 17:41:23 (UTC) whose epicenter was at 29.58˚S, 177.03˚W with a depth of 41 km. It had a thrust mechanism and generated a small tsunami. The mainshock (Mw 8.1) happened at 19:28:33 (UTC), approximately two hour later after the foreshock. The epicenter was located at 29.11˚S, 176.77˚W with a depth of 37 km. It generated a moderate tsunami affecting New Zealand and other Polynesian countries. The epicenters of two earthquakes are very close (~55 km) and their focal mechanisms are similar. The occurrence of two successive tsunamigenic earthquakes provides us with a rare opportunity to study the tsunami interaction.
We collected sea surface elevation records at 15 tide gauges: North Cape, Great Barrier Island, Port of Tauranga, East Cape, Owenga, Nukualofa, Suva Viti Levu, Lautoka, Lenakel, Port Villa, Ouinne, Thio, Hienghene, Kingston Jetty Norfolk, and Raoul Island Fishing Roack. We conducted spectra analysis to these records. The spectra of Fourier analysis show that the dominant period ranges of the first and second tsunamis are 5–17 and 8–28 min, respectively. In addition, wavelet analysis show that two distinct oscillation patterns with different period ranges are visible on the wavelet plots of most stations. We observed that after the arrival of the second tsunami, the oscillation in the period range of the first tsunami still persists and becomes sometimes stronger at some tide gauges, indicating the interaction of the two tsunamis. We calculated the source spectrum of second tsunami by two different approaches: empirical Green’ s function (EGF) method (Heidarzadeh et al., 2016) and tsunami/background ratio method (Rabinovich, 1997). Using the first tsunami as the EGF, spectral deconvolution indicates that energy of the second tsunami is mainly distributed in the period range of 8–30 min, with spectral peaks at 25.6, 15.7, and 9.8 min. The method of tsunami/background ratio presents similar results: The period range of main energy of the second tsunami is 7–28 min, with spectral peaks at 25.7 min, 14.2 min and 9.1 min. These results are also consistent with the dimensions of USGS source models. It indicates that the short axis has stronger effects on tsunami source spectrum.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

AM-2

chairperson:Daisuke Ishimura(Tokyo Metropolitan University), Yoshiki Shirahama(AIST)
Sat. Oct 16, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-01] Averaged left-lateral slip rate of the Shufukuji fault revealed by surface exposure dating

○Yoshiki SHIRAHAMA[1] （1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan (GSJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)）

11:00 AM - 11:15 AM

[S10-02] An examination on interconnectedness between the southern part of the Lake Biwa Western Coast Fault system and Oubaku Fault, northern part of the Eastern Margin Fault system of the Nara Basin, central Japan.

○Taku KOMATSUBARA[1], Akihito Nishiyama[2] （1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

11:15 AM - 11:30 AM

[S10-03] Paleo-seismic events on the Futagawa fault, Futa, Nishihara Village, Kumamoto Prefecture

○Daisuke ISHIMURA[1], Yoshiya Iwasa[2], Naoya Takahashi[3], Ryuhei Oda[1], Ryuji Tadokoro[4] （1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.Hiroshima Univ., 3.Tohoku Univ., 4.Chiba Univ.）

11:30 AM - 11:45 AM

[S10-04] Impact of tsunami on Hokkaido due to the 1780 Urup earthquake

○Yutaka HAYASHI[1] （1.Meteorological Research Institute）

11:45 AM - 12:00 PM

[S10-05] Damage seismic intensity distribution and damage due to the 1944 Tonankai earthquake in Suwa area

○Karan Okuyama[1], Kotoe Uchiyama, Daisuke Hirouchi[2] （1.Shinshu University Education grad school, 2.Shinshu University）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Averaged left-lateral slip rate of the Shufukuji fault revealed by surface exposure dating

*Yoshiki SHIRAHAMA[1]

1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan (GSJ), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

野坂・集福寺断層帯集福寺断層は北西一南東方向に約10 km延びる左横ずれ断層である．本研究では，文部科学省委託事業「活断層評価の高度化．効率化のための調査」の一環として集福寺断層の左横ずれ変位速度の解明を試みた．集福寺断層に沿う滋賀県長浜市沓掛地区周辺において，沓掛面と呼ばれる河成段丘が分布する．それらを下刻する小河谷には，断層を横切る箇所において系統的な左横ずれ変位が認められる．
まず，沓掛面や周辺の山岳地形や変動地形を把握するため，断層に沿う長さ4 km、幅1.5 kmの範囲を対象に航空レーザー測量を実施し，数値地形データ（1 mメッシュ）を作成した．地形データを元にした判読の結果，沓掛面を下刻する河川に約100 mの系統的な左横ずれ変位が確認された．また，沓掛面を構成する沓掛砂礫層及び基盤の花崗岩の分布や変形を把握するため，断層周辺の踏査を行った．結果，沓掛砂礫層が断層の両側に分布していることが確認され，沓掛面が離水して以降の変位が蓄積されていることが明らかとなった．したがって，沓掛面の離水年代が得られれば，平均変位速度が推定できる．
沓掛面は地形学的には高位面相当との分類がなされているものの，これまで定量的な編年は試みられていない．そこで，被覆層中の火山灰分析，表面照射年代測定，ESR年代測定を実施した．まず，沓掛面上においてピット掘削を行い，段丘堆積物とその被覆層を採取した．被覆層について火山灰分析を行った結果，姶良Tn火山灰が検出されたものの，高位面相当に対応するそれより古い広域テフラは確認できなかった．被覆層と段丘堆積物について表面照射年代測定を行い，得られた宇宙線生成核種蓄積量を分析した結果，予察的な結果として，後期更新世以前に離水したことが推定された．ここから求められる平均変位速度は集福寺断層の活動度がＢ級以下であること示唆している．本発表では，表面照射年代測定やESR年代測定の結果を元に沓掛面の地形発達過程と離水年代について議論し，平均変位速度について考察する．

© The Seismological Society of Japan

An examination on interconnectedness between the southern part of the Lake Biwa Western Coast Fault system and Oubaku Fault, northern part of the Eastern Margin Fault system of the Nara Basin, central Japan.

*Taku KOMATSUBARA[1], Akihito Nishiyama[2]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1　はじめに

奈良盆地東縁断層帯北部・黄檗断層は，琵琶湖西岸断層帯南部の比叡断層と，直線状の谷を介して約2.5ｋｍの間隔で近接している．これらが連動するか否かは，奈良盆地東縁断層帯の活動性評価に当たって重要な項目の1つである．演者らは，地形・地質学と歴史学および考古学の面から，これらの断層が最新活動時に連動したか否か検討した．

2　琵琶湖西岸断層帯南部・堅田断層および比叡断層の最新活動

琵琶湖西岸断層帯南部の堅田断層のジオスライサー調査(Kaneda et al., 2008)は，この断層が^{14}C年代測定(暦年補正年代値)より西暦1060年～1260年に最新活動を行ったことを示した．堅田断層対岸の守山市赤野井湾遺跡では，考古学的調査により鎌倉時代初頭ごろに湖岸が沈水したことが明らかにされている(濱，1998)．

一方，堅田断層の最新活動の年代幅中の，1185年元暦(二年)京都地震では，京都盆地北東部の左京・白河および東山で大きな被害が生じたほか，比叡山延暦寺や比叡山東麓の日吉大社で建物倒壊が生じた(西山，2000)．このような地震被害分布から，西山(2000)は元暦京都地震の震源を琵琶湖西岸南部周辺と推定した．上記期間内に京都に大きな被害をもたらした地震は，この元暦京都地震以外に確認できない．

以上から，堅田断層・比叡断層を含む琵琶湖西岸断層帯南部は，1185年に最新活動を起こした可能性が高く，年代幅をとって見積もったとしても11世紀中期~13世紀中期に活動したことは確実である．

3　黄檗断層の最新活動の上限年代

京都市山科区大宅地区では，黄檗断層による変位を受けていない谷底低地の堆積物の^{14}C年代から，西暦600年以降には断層変位が生じていない可能性が高いことが示された．また黄檗断層直上の大宅廃寺遺跡からは縄文時代晩期(滋賀里Ⅴ期：紀元前5世紀ごろ)の甕棺が完全復元可能な状態で出土していること(京都市埋蔵文化財研究所，1988)，同じく断層直上の醍醐古墳群では7世紀前半の古墳の石室から高坏などの安定性の良くない遺物が完全な形でかつ直立した状態で見いだされていること(京都市埋蔵文化財研究所，1987)から，歴史時代に黄檗断層が活動した可能性は極めて低いと考えられる．

一方，西山(2000)は元暦京都地震による，黄檗断層直上・直近の建造物被害状況について，①平等院の損傷は軽微とみられること，②醍醐寺とその近傍の東安寺では築地塀や門の倒壊の記録はあるものの，堂塔の倒壊の記録は見つかっていないこと，を報告している．中でも平等院や醍醐寺五重塔は現存しており，11世紀中期以降に黄檗断層が活動していないことを強く支持する．

以上から，黄檗断層の最新活動は西暦600年以前と考えられ，少なくとも琵琶湖西岸断層帯南部の最新活動時に両断層は連動しなかったと考えられる．

謝辞

京都市埋蔵文化財研究所の内田好昭管理課長および京都府埋蔵文化財調査研究センターの小池寛調査課長より遺跡発掘調査に関して多くのご教示をいただきました．本研究は 文部科学省委託事業「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」 としておこないました．

文献

© The Seismological Society of Japan

・濱修(1998)赤野井湾遺跡発掘調査報告書第4分冊，314-324.
・ Keneda et al., (2008) Jour. Geophys. Res., B5, 113, B05401.
・京都市埋蔵文化財研究所(1987)醍醐1号墳調査概要報．29ｐ．
・京都市埋蔵文化財研究所(1988)昭和60年度京都市埋蔵文化財調査概要．103-108.
・西山昭仁(2000)歴史地震，16，163-184.

© The Seismological Society of Japan

Paleo-seismic events on the Futagawa fault, Futa, Nishihara Village, Kumamoto Prefecture

*Daisuke ISHIMURA[1], Yoshiya Iwasa[2], Naoya Takahashi[3], Ryuhei Oda[1], Ryuji Tadokoro[4]

1. Tokyo Metropolitan Univ., 2. Hiroshima Univ., 3. Tohoku Univ., 4. Chiba Univ.

2016年熊本地震の際には，主断層である布田川断層沿い以外にも広範囲に地表地震断層（以後，地震断層）が出現した．我々の研究グループでは，それら副次的な断層（以後，副断層）の活動履歴を明らかにするとともに，主断層である布田川断層との同時性を議論するために，2019年に熊本県西原村布田でトレンチ掘削調査を行った．本発表では，そのトレンチ調査結果を報告するとともに，我々がこれまでに行った副断層上でのトレンチ調査結果との比較を行う．

2016年熊本地震では，数多くの地震断層が出現した（Fujiwara et al., 2016）．主断層である布田川断層と日奈久断層の北部に加え，出ノ口断層や阿蘇カルデラ北西部の断層群といった事前に位置が推定されていた断層と事前に位置が推定されていなかった断層上にも地震断層が出現した．これら副断層の活動履歴に関して，Ishimura et al. (2021)により阿蘇カルデラ北東部の宮地断層上で掘削されたトレンチ調査から，約2000年前に2016年と同様の変位を示す断層活動が認められた．また，Fukushima and Ishimura (2020)は，この宮地断層のすべりは深度1.5 km以浅に限られることを指摘し，地下構造としては布田川断層からは独立したものであることを示した．このように2016年熊本地震で出現した副断層の少なくとも一部は，非常に小さな変位であったとしても過去にも繰り返し活動しており，さらにその活動時期は主断層である布田川断層と同時である可能性を指摘できる．

一方，布田川断層の古地震調査に関しては，2016年熊本地震で認識されるようになった活断層トレースである東端部（カルデラ内）や益城町にかけて連続する分岐断層上で行われたものが多く，布田川断層の中央部での活動履歴は不明であった．そこで本研究では，布田川断層中央部の古地震履歴を明らかにするとともに，副断層の活動履歴と比較可能な高精度な活動履歴情報取得を目的として，西原村布田でトレンチ調査を行った．

トレンチ位置は，石村（2019）で報告された布田川右岸の断層露頭の東延長部にあたる．トレンチサイトでは，右横ずれを示す雁行配列した地震断層と南落ちの地震断層の2条が認められる．本研究では，より確実度の高い活動履歴解明を目的としているため，2条の断層を横断する計5つのトレンチを掘削した．このような手法により，各トレンチで共通する断層活動履歴の確実度が増し，また1つのトレンチでは不確実な断層活動を他のトレンチで検討することが可能となる．

断層トレンチ壁面では，鬼界アカホヤ（K-Ah：7,300年前）テフラ，姶良Tn（AT：30,000年前）テフラ，草千里ヶ浜軽石（Kpfa：32,500年前）が確認された（年代は，Smith et al.（2013）とMclean et al.（2020））．いずれのトレンチでも，2016年の変位に加えて，3万年前以降の断層活動が認められた．特にK-Ah以降には，2016年熊本地震を含めて計4回の活動履歴が認められた．活動履歴は，各トレンチで共通して認められた断層イベントを中心に，断層による上下変位の累積性や亀裂充填堆積物から推定された．それらの年代を，放射性炭素年代結果に基づき推定した．K-Ahテフラより古い断層イベントに関しては，1つの地層に多くの断層活動が記録されているため，その地層堆積中に活動した1つ1つの断層活動を区別できていない可能性があるため，詳細な年代推定は行っていない．

次に，副断層上で行ったトレンチ調査の古地震履歴との比較を行う．我々が掘削した宮地断層（Ishimura et al., 2021）と出ノ口断層上でのトレンチ調査結果と比較すると，K-Ah以降の活動履歴はほぼ重なる．放射性炭素年代の誤差を考えると別のタイミングで活動した可能性を棄却することはできないが，2016年熊本地震で起きた現象を考えると，主断層である布田川断層と2016年に出現した副断層は過去にも同時に活動してきたことが推定される．さらに各トレンチの活動年代が重なる部分を布田川断層の活動年代とすると，その活動間隔は概ね2,000年程度である．このことは最近4回は比較的同じ時間間隔で発生していること示唆する．

【引用文献】Fujiwara et al. (2016) EPS, 68, 160. Fukushima and Ishimura (2020) EPS, 72, 175. Ishimura

© The Seismological Society of Japan

et al. (2021) EPS, 73, 39. 石村（2019）活断層研究，50, 33-44. Mclean et al. (2020) Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21, e2019GC008874. Smith et al.（2013）QSR, 67, 121-137.

© The Seismological Society of Japan

Impact of tsunami on Hokkaido due to the 1780 Urup earthquake

*Yutaka HAYASHI[1]

1. Meteorological Research Institute

1. 背景

1780年6月29日千島列島のウルップ島での地震に伴う津波の様子は，島の東海岸に停泊中に津波に遭ったロシア船聖ナタリア号の航海日誌に詳述されている（Soloviev and Ferchev, 1961）．航海日誌からは，1月から有感地震が多発したこと，5〜6サージェン(1サージェン=2.133m)の高さの津波で船が流され陸に乗り上げたこと，津波が夜明け前から日没まで継続したこと，浸水は島の南部と東部にあり北部にはなかったこと，北東側の三島（チルポイ，シムシル，ケトイ）まで津波（ウルップ島よりも小さい）と余震があったこと，などを読み取れる．

NOAAの津波データベースは，ウルップ島とその北東側の三島に加え，Iida(1984)のカタログを引用して北海道東岸でも津波があったと記し，ウルップ島での高さも記載している．いずれも高信頼度の津波記録と判定している．ロシアのノボシビルスク津波研究所(NTL)のデータベースは，さらに択捉島も加え，全場所の津波高も記載している．地震のマグニチュードは，NOAAのデータベースは7.5，NTLでは8.2，最新の「日本被害地震総覧」(宇佐美・他, 2013)では7.0など，カタログによる差が大きい．

ウルップ島とその北東側各島への津波は，当事者の調査記録に基づく明らかに高信頼度の情報だが，択捉島と北海道東岸への津波については，Iida(1984)にもNOAAとNTLのデータベースにも典拠が示されず，信頼性と根拠が不明確である．択捉島以西の津波の状況は，マグニチュードの推定にも，津波堆積物との対比（例えば，Minoura et al., 1994）の妥当性の検討にも重要である．

本研究では，1780年ウルップ島地震による択捉島以西の津波の情報の根拠を文献調査した．

2. 1780年ウルップ島地震に関する日本の史料

松前藩の主な編年史・家系図(『福山旧事記』，『松前家記』など8点)を調べたが，1780年の地震・津波に関する記述はなかった．一方，地震から6年後の天明六年には，幕府から蝦夷地探検に派遣された最上徳内らが択捉島とウルップ島を訪れた．『蝦夷草紙　付録』(最上, 1790)には，ウルップ島で最近に大津波があったと聞き，津波で山に打ち上げられたロシア船も目にしたことが記されている．この発見は，当探検で初めて和人が公式に1780年のウルップ島での津波を知ったことを示唆している．本調査範囲からは，松前藩が1780年ウルップ島地震の情報を把握していた根拠は見当たらなかった．

『大日本地震史料』(震災予防調査評議会編,1943)には，安永九年四月(1780年)の項目に，『北海道の津浪に就て』(河野,1913)，『北海道史』(北海道庁編,1918)，『本邦大地震概表』(大森,1919)の三文献の該当箇所を収録している．大森(1919)からの抽出箇所は，津波後に島に残ったロシア人が「厚岸，根室，国後，択捉の蝦夷と交易」したという津波の二次的な影響も含んでいる．これら三文献は，行政区としての北海道が千島列島を含む時代に記され，各文献とも1780年ウルップ島地震を道内（国内）の地震として扱ったが，ウルップ島以外，すなわち，現在の北海道・日本における直接的な津波の影響の情報は全く含まない．なお，これら三文献の地震津波の発生月（5月；日本の旧暦で四月）の根拠は判明しなかった．

3. 北海道への津波の誤解

1960年チリ地震津波後に刊行された気象庁技術報告の中の表(湯村,1961)では，1780年ウルップ島地震が「北海道東岸へも波及した」とし，日本における津波の階級1(波高が2m内外等の基準に該当)を与えている．「北海道東岸」は，大森(1919)が示す津波の二次的な影響が及んだ範囲「厚岸，根室」ほかと整合する．このため，湯村(1961)による北海道東岸への津波の記述と津波の階級は，二次的な影響と津波の直接被害を混同したとも考えられ，誤解を招きやすい情報である．

Iida(1984)のカタログにおける北海道東岸への津波の記述も，湯村(1961)の情報の直接または間接的な影響を受けて創られた誤情報の可能性が非常に高い．

© The Seismological Society of Japan

4. 結論

1780年ウルップ島地震とその津波に遭遇したロシア船の航海日誌には，津波について信頼度の高い情報が記録されている．しかし，ウルップ島より南西側の各島に津波が及んだことを記録する一次資料の存在は，全く確認できない．和人による同地震の把握は，1786年の蝦夷地探検より前には遡れなかった．現在，国内外で広く利用されているデータベースやカタログには，北海道東岸などへの津波到達・高さの情報を含むものが多い．しかし，択捉島以西への津波は誤情報だと判断するのが妥当であり，修正が必要である．

© The Seismological Society of Japan

Damage seismic intensity distribution and damage due to the 1944 Tonankai earthquake in Suwa area

*Karan Okuyama[1], Kotoe Uchiyama, Daisuke Hirouchi[2]

1. Shinshu University Education grad school, 2. Shinshu University

１．はじめに

地震の被害やゆれの大きさは地盤条件などに大きく左右されるため（武村，2003），その場所の地盤特性とゆれの関係を事前に調べ備えることが重要である。特に過去の地震時における地形条件とゆれの関係は，将来起こり得る地震の被害予測にダイレクトに関わることから，詳細な調査が必要である。例えば1995年兵庫県南部地震で甚大な被害が出た“震災の帯”における被害差については，地質，地盤特性が及ぼす影響について検討されている（石川ほか，2000）。昭和19年東南海地震は12月7日に三重県志摩半島沖（遠州灘）を震源として発生し，震央から遠く離れた諏訪市で最大震度6を記録し異常震域として発表された（中央気象台,1945）。これは諏訪地域の歴史上で最も大きい地震であるが，戦時中であったことから詳細な公的記録はほとんどなく被害の全貌は確認できない。そこで本研究では，昭和19年東南海地震が諏訪地域でどのような被害をもたらしたのかを復元し，詳細震度分布と被害を明らかにすることを目的とし，地形条件と関連づけて被害差の要因について考察する。

２．研究方法

本研究では，まず1947年米軍撮影の空中写真を用いて地形判読を行い，地形分類図を作成した。その後，岡谷市・下諏訪町・諏訪市の3市町で当時の新聞や学校日誌等の資料収集を行った。また3市町の80歳以上の全員にアンケートを送付し，有効な回答者に対してヒヤリング調査を行った。ヒヤリングでは，当時の地図や空中写真を使いながら，地震時の行動や被害情報を位置情報を含め詳細に収集し地図化した。さらに被害の様子を気象庁震度階級関連解説表に基づいて震度に直して数値化してプロットし，GISを用いて地形分類図と重ねて分析を試みた。

３．諏訪地域で新たに明らかになった被害

今回の調査によってこれまでにない精度と密度で諏訪地域における震度分布や被害の詳細が明らかになった。

１　岡谷市：諏訪湖沿岸の岡谷東高校では，校庭が凹凸になるほどの地盤被害が明らかになった。また諏訪湖畔から離れた建物でも壁に亀裂が入るなど大きな被害が確認できた。諏訪湖西岸湊地区の湊小学校では，液状化被害が確認された。

２　下諏訪町：諏訪湖沿いの赤砂地区で庭の地割れ被害が認められた。一方，ヒヤリングでは高木・大門地区では目立った被害は確認できなかった。

３　諏訪市：上諏訪駅の西側で建物のガラスが割れるなどの証言があり大きな被害があった一方で，東側はほとんど揺れを感じなかった・電灯がゆれただけという証言もあり，ゆれの強さや被害は場所によって大きな差がみられた。特に旧村部である豊田地区では家屋が潰れ，2階が1階になる被害が確認できた。

４．震度分布と地形との関係

諏訪地域における震度推定から，岡谷市や下諏訪の諏訪湖沿岸及び諏訪市の豊田地区付近で最大震度6程度であることが明らかとなった。また地形条件と震度の関連では，震度6のゆれは埋立地，自然堤防，後背湿地に分類されることが多い。また段丘や扇状地等では震度4～5程度と比較的小さくなることが多い。埋立地，自然堤防では液状化が確認され，後背湿地でも諏訪湖沿岸の下諏訪の赤砂，諏訪市南部の上川付近で液状化と思われる地面の亀裂等の被害を確認した。本調査は諏訪市で未だ継続中であり，今後地点数を増やして更なる検討を行う予定である。一方当時は住宅がなかった場所での被害を明らかにすることが難しいなどの課題や．被害は建物の構造や強度も影響する。今後のアンケートとヒヤリング調査でデータの数を増やし，さらに詳細な分析をおこなっていく。

© The Seismological Society of Japan

引用文献

石川浩次・細矢卓志ほか（2000）：地震災害と地形・表層地形・地盤特性ー“震災の帯”の中の被害差の原因についてー．第四紀研究39
武村雅之 (2003)：『関東大震災 大東京圏の揺れを知る』．鹿島出版会
中央気象台（1945）：『昭和十九年十二月七日東南海地震調査概報』．中央気象臺

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

PM-1

chairperson:Yoshiki Shirahama(AIST)

Sat. Oct 16, 2021 1:30 PM - 2:00 PM ROOM C (ROOM C)

[S10-06] Analysis of earthquake activity in southern Miyagi prefecture in the 18th century derived from the Takano family records

○Sunao Urushibara[1], Yasuyuki Kano[1], Junzo Omura[1] （1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

1:30 PM - 1:45 PM

[S10-07] Analysis of aftershock activity of the Ansei-Edo Earthquake using historical documents in Kanto-Koshinetsu

○Michito Baba[1], Yasuyuki Kano[1] （1.University of Tokyo, Earthquake Research Institute）

1:45 PM - 2:00 PM

©Seismological Society of Japan

Analysis of earthquake activity in southern Miyagi prefecture in the 18th century derived from the Takano family records

*Sunao Urushibara[1], Yasuyuki Kano[1], Junzo Omura[1]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

日記史料を用いた歴史地震研究として、東京の日記に書かれた地震記録の検出閾値を推定し長期的な地震活動の変化を考察したSatake and Ishibe (2020)が上げられる。また、宇佐美・他(2001)は盛岡での日記に記録された地震について現代のカタログと比較し、震度について検討している。

宮城県の主な地震は、大きく分けると日本海溝沿いで発生する地震や内陸で発生する地震に分けられる。日本海溝沿いで発生する地震の場合、宮城県沖以外にも茨城県沖～青森県沖までの太平洋沖合での地震でも宮城県南部で被害が生じることがある。内陸の地震は、長町-利府線断層帯や福島盆地西縁断層帯等の活断層に起因するものや、栗駒山や蔵王山などの火山性の群発地震も知られている。現在、蔵王町平沢付近に蔵王町円田観測点が2002年3月～設置されており、現在までに震度1～震度6強まで観測されている。また、2003年～2020年までの平均で1年間に震度1が94回、震度2が33回観測されている。

本研究では日本の歴史地震史料拾遺5ノ上に収録されている「高野家記録」の地震記事の有感地震数に着目をした。高野家は蔵王町平沢に領地を持ち江戸時代250年に渡ってこの地を治めた。「高野家記録」は元禄九年(1696年)～天明二年(1782年)の86年間に渡って仙台藩の家臣である高野家に由来する記録である。特に高野家19代当主の高野倫兼による記録が大半を占め、主に仙台や蔵王町平沢での日々の生活や天候、地震の記録が細かく記載されている。
史料集に載っている蔵王町平沢と仙台での有感地震数は、86年間で合計約450回であった。そのうち、蔵王町平沢で記録されている地震数は約220である。この「高野家記録」で記録されている地震記録と現代の観測により記録された地震の比較を行った。その結果「高野家記録」の筆者は震度2以上の地震は記録しており、震度1の地震も一部は記録していると考えられる。

次に、史料集の「高野家記録」に記載されている地震について、他の史料に記載されている有感記録も加味して発生タイプ別の分類を行った。発生タイプとしては「日本海溝での地震」、「内陸・日本海側の地震」、「その他」とした。その結果、「高野家記録」で記録された地震のうち、約半数が分類でき、4割が日本海溝での地震、1割が内陸・日本海側の地震であると考えられる。分類できなかった地震は、史料集に他の有感記録のある史料がなかったためである。これらのうち、特に明和六年八月三十日(1769年9月29日)～明和六年十一月一日(1769年11月28日)までの61日間のうち18日間で蔵王町平沢において有感地震が記録されており、その総有感回数は19回である。明和六年は「高野家記録」による1年間の有感地震数が24回であり、この61日間に1年の約8割の有感地震が記録されていたことになる。これらは福島盆地西縁断層帯や蔵王山での群発性の地震活動の可能性が考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Analysis of aftershock activity of the Ansei-Edo Earthquake using historical documents in Kanto-Koshinetsu

*Michito Baba[1], Yasuyuki Kano[1]

1. University of Tokyo, Earthquake Research Institute

安政江戸地震は安政二年十月二日の夜四ツ時（1855年11月11日午後９時頃）に発生し、江戸市中を中心に関東一円に地震動被害をもたらした。宇佐美(2001)では本震の震央を東京湾北部と推定している。安政江戸地震において、本震についてはもちろんのこと、余震活動の詳細がわかる史料が多数残されている。そこで、本研究では既刊の地震史料集に加え、２０００年代初頭に発見された『海老原文庫』や、都司(2003)が紹介した『大屋家日記』などを用いて、安政江戸地震の余震活動の分析を行った。

本研究では、まず安政江戸地震における余震活動の時間変化に注目した。『海老原文庫』に記録されている『安政地震書留之事』に残る安政江戸地震本震後の地震の記録と、江戸で記録された『破窓の記』などの余震が詳細に記されている史料の記録の比較や、日中と夜間の有感記録数の差についての議論を行った。また、『破窓の記』は安政江戸地震後の地震活動について特に詳細に記録しているが、その他の既刊の地震史料集に収録されている史料との比較を通じて、『破窓の記』が記録している余震がどの程度他史料に記録されているかを検討した。その結果、『安政地震書留之事』では江戸で記録されなかった本震直後の地震を記録している可能性があることや、今回比較に用いた２史料では夜の地震の記録数が少ない訳ではないことが分かった。史料ごとの余震の記録数の違いの理由としては、史料ごとの地震の発生時刻の分解能の違い、余震ごとの震央や規模の違いによる有感範囲の違いなどが考えられる。震央に近い江戸では多数発生する余震を区別して記録できない場合があり、少し離れた場所では、区別して記録できた場合があったとも考えられる。

次に、安政江戸地震における余震活動の空間的変化に注目した。既刊の地震史料集に収録されている史料について、記録の内容から「余震当日の記事なし」「余震当日の記事はあるが地震の記録なし」「余震当日の記事があり、地震の記録もある」「余震当日の記事があり、大きな地震の記録がある」の４つに分類した。これを関東地方の地図上にプロットすることで、安政江戸地震の最大余震とされる安政二年十月七日の地震を含む複数の余震について有感記録分布図を作成した。最大余震と考えられる安政二年十月七日に発生した地震に着目し、それぞれの史料に残っている地震の発生時間や揺れの特徴を比較したところ、暮頃と夜に２度の地震があり、暮の地震の方が揺れは大きかったと推定できる。夜の地震のみを記録している史料は、記録の時間のばらつきの範囲内で、暮の地震を記録していると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session | S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

PM-1

chairperson:Takehi Isse(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
Sat. Oct 16, 2021 2:00 PM - 2:30 PM ROOM C (ROOM C)

[S07-01] Slow anomalies atop the 410-km discontinuity oceanward of the Kurile slab

○Masayuki OBAYASHI[1], Junko Yoshimitsu[1], Yoshio Fukao[1] （1.IMG, JAMSTEC）

2:00 PM - 2:15 PM

[S07-02] Impact of anisotropic thermal conductivity on the thermal structure of the Tohoku subduction zone, Northeast Japan

○Manabu MORISHIGE[1], Miki TASAKA[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Shizuoka University）

2:15 PM - 2:30 PM

©Seismological Society of Japan

Slow anomalies atop the 410-km discontinuity oceanward of the Kurile slab

*Masayuki OBAYASHI[1], Junko Yoshimitsu[1], Yoshio Fukao[1]

1. IMG, JAMSTEC

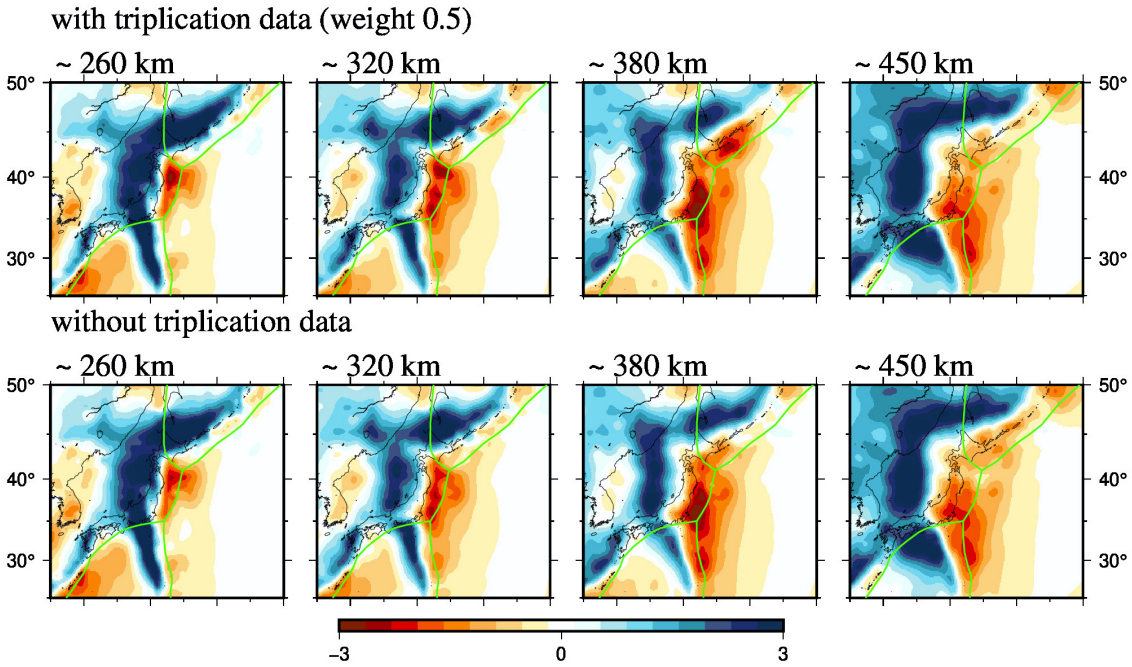
本州スラブの下の410-km分連続面の直上には低速度異常があり，高温の異常に起因することが示唆されている（e.g. Obayashi et al, 2006; Bagley & Revenaugh, 2008）。しかしそこで示された低速度異常域は本州スラブおよび伊豆–小笠原スラブの北端付近と限定的であり、その広がりは未だ明らかでない。我々はJpGU-AGU joint meeting 2020, において千島海溝付近で起きた11地震のHi-netデータを解析し、南千島から本州にかけても２–３％の低速度異常が410-km不連続面の直上にあり、Obayashi et al.（2006）で示された１次元速度モデルM200M（200℃高温及び１％未満のメルトに起因する410-km不連続面直上の低速度異常および410-km不連続面の沈降）で説明できることを示した。そこでは11地震の自乗エンベロープ波形を震源深度が120kmとなるように補正後スタックした波形を用い、スタック波形の走時を説明する１次元速度構造をフォワードモデルリングによって示した。

今回、初動走時及び初動と410-km不連続面triplication のretrograde相間の走時差を用いたトモグラフィーで410-km不連続面付近のP波速度構造を明らかにした。上記スタック波形作成に用いた11地震から波形がシンプルで明瞭な8地震を選び、初動到達時刻はhand-pickにより測定し、走時差は自乗エンベロープ波形の初動と後続波のピーク間の時間を測定した。トモグラフィーの初期モデルは１次元速度モデルIASP91に３次元速度モデルGAP_P4（Obayashi et al., 2016）のperturbationを加えたモデルとした。2000年以降のInternational Seismological Centre（ISC）の初動走時データ約1,500万パスと上記測定値それぞれ約1500パスをIASP91モデルを基に波線計算し有限波長効果を考慮したカーネルを用いた。その際、初動走時データについては2.0Hz、走時差データに関しては自乗エンベロープ波形作成時に使用したフィルタ0.3–2.0Hzを仮定した。千島海溝付近8地震で得られたデータの重みはISCデータのみで得られる高速スラブ異常に変化がないように0.5（ISCデータの重み1に対し）と設定した。

図は得られた結果をISCデータのみを使用したトモグラフィー結果と比較したものである。千島列島下の410-km不連続面直上にはObayashi et al.（2006）で示された本州スラブおよび伊豆–小笠原スラブの北端付近の異常と同程度の強度の低速度異常が得られた。従って沈み込むスラブの下の410-km不連続面付近の異常は本州スラブに限られたものではなく千島から本州にかけても見られる一般的な現象と考えられる。

図：（上）千島海溝付近の８個の地震の初動走時データと初動と410-km不連続面triplication のretrograde相間の走時差データをISC初動走時データと共にインバージョンした結果。（下）ISC初動走時データのみをインバージョンした結果。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Impact of anisotropic thermal conductivity on the thermal structure of the Tohoku subduction zone, Northeast Japan

*Manabu MORISHIGE[1], Miki TASAKA[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Shizuoka University

(背景・目的)
マントルでは主に転位クリープによる変形に伴い、その構成鉱物の結晶軸がある特定の方向に揃っていく。これは結晶選択配向と呼ばれる。その結果、マントル内部には地球物理学的な観測、例えば地震波速度や電気伝導度で見られるような異方性が生じる。一方、結晶選択配向による岩石の異方性がマントルの流れや温度に及ぼす影響に着目した研究例は少なく、粘性率の異方性を取り扱ったものが数件ある程度である。そこで本発表では、熱伝導率の異方性に焦点を当てる。マントル主要構成鉱物であるかんらん石の熱伝導率は結晶軸の方向により最大2倍程度異なることが知られている。研究対象地域は東北地方沈み込み帯とし、マントルウェッジにおける熱伝導率の異方性を取り入れることで、等方的な熱伝導率の場合に比べて温度構造がどの程度変わるのかを評価する。

(手法)
モデルは簡単のため2次元定常状態を仮定し、マントル構成鉱物としてかんらん石のみを考える。同じ変形様式に対しても、温度・応力・含水量などによって結晶選択配向が大きく異なる可能性が報告されている。そこでマントルウェッジ内かんらん石の結晶選択配向として、従来支配的であると考えられてきた[100](010)すべり系(Aタイプ)に加え、[001](100)すべり系(Cタイプ)、[100](001)すべり系(Eタイプ)も考慮する。また近年発表された地震学的解析結果を踏まえ、東北地方の前孤マントルは等方的である(つまり結晶軸がランダムな方向を向く)と仮定する。

(結果・議論)
熱伝導率の異方性が最も大きくなるのは上盤プレート底部とスラブ上面近傍となった。これらはマントルの歪みが最も大きくなる場所に一致する。またスラブ表面近傍の温度構造はスラブ表面に対して垂直な方向の熱伝導率によって主に決まる。例えばAタイプの場合ではスラブ表面に対して垂直な方向の熱伝導率が小さくなり、その結果熱伝導率が等方的な場合に比べて、スラブ直上マントルウェッジの温度が上昇、スラブ最上部の温度が低下する。ただしスラブ内部の温度は熱伝導率が等方的な場合に対して最大でも30℃程度しか変化しない。そのため、少なくとも今回のモデル設定下では熱伝導率の異方性の影響は限定的であると言える。しかし今後、沈み込むスラブに対しても熱伝導率の異方性を考慮することで温度構造が大きく変わる可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-1

chairperson:Ayako Nakanishi(JAMSTEC)

Thu. Oct 14, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM D (ROOM D)

[S06-01] Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku

○Shun FUKUSHIMA[1], Masanao SHINOHARA[2], Tomoaki YAMADA[2], Kiwamu NISHIDA[2], Akiko TAKEO[2], Kiyoshi YOMOGIDA[3] （1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 3.Hokkaido University,Graduate school of Science,Department of Natural History Sciences）

9:00 AM - 9:15 AM

[S06-02] Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net

○Takashi Tonegawa[1], Ryota Takagi[2], Kaoru Sawazaki[3], Katsuhiko Shiomi[3] （1.JAMSTEC, 2.Tohoku Univ., 3.NIED）

9:15 AM - 9:30 AM

[S06-03] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling

○Takaya IWASAKI[1], Hiroshi Sato[2,3], Eiji Kurashimo[2], Hirokazu Ishige[4], Hidehiko Shimizu[4], Tatsuya Ishiyama [2], Takashi Iidaka[2], Masanao Shinohara[2], Shinji Kawasaki[4], Susumu Abe[4], Naoshi Hirata[5,2] （1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4.JGI, Inc., 5.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

9:30 AM - 9:45 AM

[S06-04] Lithosphere– asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions

○Takeshi AKUHARA[1], Kazuo Nakahigashi[2], Masanao Shinohara[1], Tomoaki Yamada[1], Hajime Shiobara[1], Yusuke Yamashita[3], Kimihiro Mochizuki[1], Kenji Uehira[4] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Tokyo University of Marine Science and Technology, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

9:45 AM - 10:00 AM

[S06-05] A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave

○Motoko ISHISE[1], Aitaro Kato[1], Shin'ichi Sakai[1], Shigeki Nakagawa[1], Naoshi Hirata[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

10:00 AM - 10:15 AM

[S06-06] Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan

○Makoto MATSUBARA[1], Katsuhiko Shiomi[1], Hsatoshi Baba[2], Hiroshi Sato[3], Takahito Nishimiya[4] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Department of

©Seismological Society of Japan

Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)
10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku

*Shun FUKUSHIMA[1], Masanao SHINOHARA[2], Tomoaki YAMADA[2], Kiwamu NISHIDA[2], Akiko TAKEO[2], Kiyoshi YOMOGIDA[3]

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 3. Hokkaido University,Graduate school of Science,Department of Natural History Sciences

近年，光ファイバをセンサとして，歪みを数m間隔で数十kmの長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing（以下 DAS）が地球科学分野に応用されつつある（e.g., Zhan 2019）．東京大学地震研究所では，三陸沖に設置した光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用して，DAS観測を行なってきた．Spica et al. (2020) では，このDAS観測データから短周期（周期２秒以下）レイリー波の位相速度を計測し，深さ約3kmまでの堆積層のS波速度構造を推定している．観測システムが敷設されている三陸沖は2011年東北沖地震の震源域北部に位置し，また，深さ約50kmのプレート境界で繰り返し地震の発生が報告されいる (e.g., Matsuzawa et al., 2002 ）．この領域での地震発生様式の理解には，高分解能な島弧側上側プレートの構造が必要である．そこで，DAS観測データに対して地震波干渉法を適用し，プレート境界付近の深さまで感度を有する周期10秒程度までの表面波位相速度の推定を試みた．

本研究では，堆積層及び，島弧側上部地殻構造の地震波速度構造の高分解能推定を目指し，DASデータに対して地震波干渉法を用いて表面波の抽出を行い，frequency –wavenumber法（F-K法）を用いて周期10秒程度までの位相速度推定を行った．本研究で使用したデータは，2020年2月に行われた観測のうち，約12時間のDASデータである．このDASデータは観測点間隔が約5mで，最大観測距離が約100km，約20000チャンネルで構成される．

図１は，仮想震源を10000 チャンネルとし、観測点8000-15000 チャンネル ペアに対し地震波干渉法を適用し得られた２点間距離ごとの波形群を示す．DAS 観測点は非常に密に配置されているため，地震波干渉法をDAS データに適用した場合，従来の海底地震計と比較し，短時間のデータでSN 比の良い表面波が抽出できることが分かった．もっとも顕著な波群はレーリー波と考えられる．DAS はケーブル方向の歪み速度成分を記録するので，ケーブル方向に伝播するradial 成分に感度が高いため，通常の地震計よりも地震波干渉法によって，レイリー波 が選択的に検出できると考える．

図２は図1 のレイリー波に対してF-K 法を適用し得られた位相速度の分散曲線である．図２中の実線は，光ファイバ近傍で行われた制御震源探査から得られた P 波速度(Takahashi et al., 2004)のモデルに対して，Disper80（Saito 1988） により計算したレイリー波の基本モード位相速度である．ここで, 密度とS 波速度はBrocher (2005) の経験式を使用しP 波速度から計算した．また，破線は基準モデルから堆積層のみS 波速度を±20%としたモデルのレイリー波の理論分散曲線である．その結果，このモデルから得られる分散曲線が、解析した範囲で信号がもっとも大きな基本・１次モードでそれぞれ周期9秒と5 秒までよく一致する．

以上より地震波干渉法をDAS データに応用することで，12 時間の観測データで周期約9秒程度までの表面波位相速度を推定できた．DAS アレイの場合，様々な大きさのアレイサイズに対してFK 法を適用することができるので，対象となる周期・波長に合わせてアレイサイズを変えて位相速度を測定することができ，高分解能かつ高精度な測定が期待される．今後，DAS データから得られた位相速度から速度構造を求めることで，従来よりも空間的に分解能が高い島弧側上部地殻地震波速度の推定をめざす．

© The Seismological Society of Japan

図1

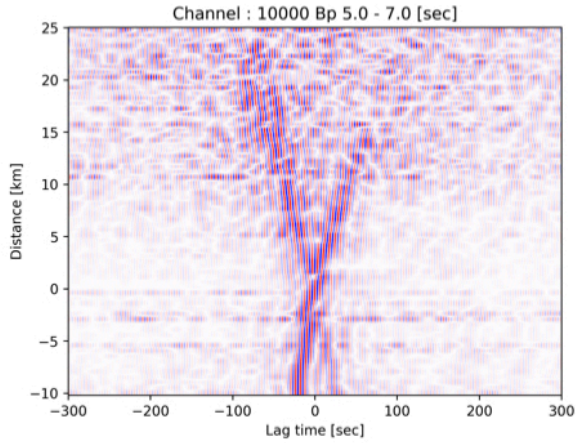


図2

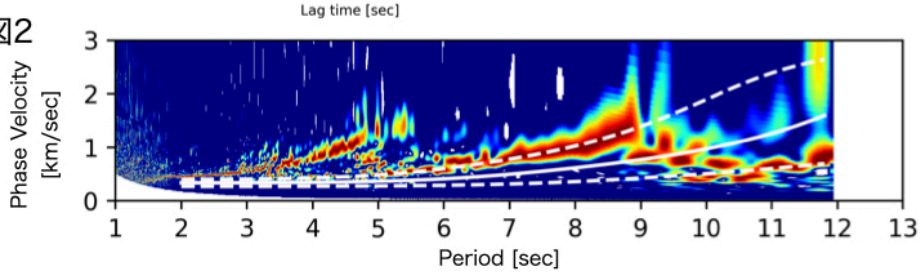


図1: 仮想震源10000と観測点8000-15000チャンネルペアに対し地震波干渉法を適用し得られた表面波．周期５~7秒のband-pass filterを適用．

図2: 図1の表面波にF-K法を適用し得られた位相速度の分散曲線．実線は，Takahashi et al., 2004により得られたP波速度を基準モデルとして計算したレイリー波の基本モード位相速度を示し，破線は基準モデルから堆積層のみ+-20%したモデルの位相速度を示す．

© The Seismological Society of Japan

Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net

*Takashi Tonegawa[1], Ryota Takagi[2], Kaoru Sawazaki[3], Katsuhiko Shiomi[3]

1. JAMSTEC, 2. Tohoku Univ., 3. NIED

常時ノイズ記録に地震波干渉法を適用して二点間を伝播する波動場を抽出し、その波動場の時間的な変化を抽出することで、構造の時間的な変化を調べることが可能である。このような研究を実施するためには長期間観測された連続記録が必要であるため、海域ではそれほど実施されてこなかった。しかし、近年、海域でも定常観測網が設置され、海底下の構造の時間変化を抽出する研究例が南海トラフで報告されるようになった（例えば、Ikeda and Tsuji, 2018; Tonegawa et al. 2020, JpGU）。また、日本地球惑星科学連合2021年大会ではS-net記録を用いた構造の時間変化を発表し（Tonegawa et al. 2021, JpGU）、東北沖の海溝軸付近で浅部の地震波速度が少しずつ速くなっていることを報告した（データは2020年6月末まで）。本研究では、そのデータ使用期間を2021年6月末まで延長し、2021年に東北沖で発生した3つの地震（2月福島県沖地震：Mw7.1, 3月宮城県沖地震：Mw7.0, 5月宮城県沖地震：Mw6.95）に伴う変化も抽出したので報告する。
連続記録の期間は2016年6月～2021年6月で、観測点は海溝より陸側の観測点を使用した（ただし、S6ケーブルの観測点は除く）。連続記録の3成分波形はTakagi et al. (2019)の方法を用いて合成した。相互相関関数はスペクトルホワイトニングを行い、0.5-1.0 Hzの帯域で計算した。このとき、機器ノイズを除去するため、1時間分の連続記録と次の1時間分の連続記録の差分波形を用いて相互相関関数を計算した（Takagi et al. 2021）。それらを30日間毎にスタックし、リファレンス波形は全期間スタックした波形を使用した。構造の時間変化の抽出にはストレッチング法を用いた（Wegler and Sens-Schönfelder, 2007）。
結果では、海溝軸に近い（海側）観測点では少しずつ速度が上昇することが検出され、その一方で、陸に近い（陸側）観測点ではそのような上昇はあまり顕著ではなかった。海側観測点では4.5年で0.3-0.4 %ほど速度が上昇し、その後、2021年の地震によって0.4 %ほど低下した。S-netの観測開始以来、海側観測点では、2016年福島県沖地震（M7.4、深さ25 km、正断層）のときも含めて大きな地震による速度構造の変化を検出したことがなかったため、今回が初めての観測例となる。また、もちろん陸側観測点でも、震源により近いため、この2021年のイベントによる速度減少を検出できた。

Data citation S-net: doi:10.17598/NIED.0007

© The Seismological Society of Japan

The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling

*Takaya IWASAKI[1], Hiroshi Sato[2,3], Eiji Kurashimo[2], Hirokazu Ishige[4], Hidehiko Shimizu[4], Tatsuya Ishiyama [2], Takashi Iidaka[2], Masanao Shinohara[2], Shinji Kawasaki[4], Susumu Abe[4], Naoshi Hirata [5,2]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4. JGI, Inc., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

In 2019, an extensive onshore-offshore seismic expedition was undertaken from the Yamato bank to the Japan Trench across the central part of the NE Japan arc (Sato et al., 2020a, b). This expedition was supported by several funds from MEXTs' projects of "Integrated Research Project on Seismic and Tsunami Hazards around the Sea of Japan" and "2nd Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program", and from ERI, the University of Tokyo. The onshore seismic line in the NE Japan Arc was laid out from the Shonai Plain on the coast of the Sea of Japan to the eastern margin of the Kitakami Mountains on the Pacific coast, crossing the Dewa Hills, Shinjo Basin, Ou Backbone Range and Kitakami River Valley from west to east. The total length of the profile is about 155 km, on which 1,667 receivers were set to record 24 large energy shots. As seismic sources, we used explosives at 3 shot points and 4 vibroseis trucks with 150 stationary sweeps at the other 21 points.

The preliminary results beneath the onshore line and offshore part of the Pacific side were presented by tomography analyses (Sato et al, 2020a, b, Kurashimo et al., 2021) and ray-tracing technique (Iwasaki et al., 2021). In the present paper, we proceed to model the whole crust and uppermost mantle under the onshore profile from the combined interpretation on tomography and ray-tracing analyses. For the travel-time analysis, we carefully reconstructed the travel time data both for first arrivals and later phases. In the modelling for the crooked part of the onshore profile, "the distance correction" was applied to correct the systematic travel-time shifts arising from the inadequateness of the simple 2D ray-tracing. Deeper structures of the middle/lower crust and uppermost mantle were constructed from travel times of first arrivals and later phases both from land and air-gun shots.

The features of the obtained velocity model were summarized as follows;
(1) The uppermost part of the crust is composed of 4 layers of Vp= 1.6-2.0, 1.8-3.5, 3.7-5.0 and 4.5-5.5 km/s, respectively, representing sedimentary and volcaniclastic rocks. Their geometry shows significant change along the profile line. Actually, their total thickness is 2-5 km in the western and middle parts of the onshore profile, but only 0.5 km beneath its eastern edge. Such structural undulation is well correlated with fault and caldera systems developed in the surveyed region, representing successive tectonic processes in the NE Japan arc since Miocene.
(2) The crystalline part of the upper crust has a velocity of 5.8-6.1 km/s, which was underlain by the middle crust with Vp of 6.3-6.4 km/s. The thicknesses of the upper and middle crusts are 5-9 and 5-7 km, respectively.
(3) The lower crust with a velocity of 6.5-7.1 km/s is situated in a depth range of 15-30~32 km. This part is composed of 2 or 3 parts and considered to be reflective. Its reflective property, however, shows regional change both in horizontal and vertical directions. The seismic activity in the lower curst is considerably

© The Seismological Society of Japan

low as compared with those of the upper/middle crust. The velocity in the lowermost part may exceed 7.0 km/s.
(4) The Moho depth is around 30-32 km, beneath which the upper mantle velocity is estimated to be about 7.7 km/s. These characteristics are rather well constrained both from the onshore-offshore tomography and ray-tracing analysis of the onshore line.

References

Iwasaki et al., 2021. The upper crustal structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling, JpGU Meeting, SCG49-05.
Kurashimo et al., 2021. Seismic structure from the forearc region off Miyagi to the central part of Northern Honshu arc, Japan, revealed by onshore-offshore seismic experiment. submitted to 2021 JpGU Meeting, SCG49-04.
Sato et al., 2020a. Seismic transect across the central part of Northern Honshu, Japan, 2020 JpGU-AGU Joint Meeting, MIS03-P05.
Sato et al., 2020b. Deep seismic reflection profiling across the Shonai and Shinjo basins, northern Honshu, Japan, 2020 Spring Meeting of JAPT, 016.

© The Seismological Society of Japan

Lithosphere–asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions

*Takeshi AKUHARA[1], Kazuo Nakahigashi[2], Masanao Shinohara[1], Tomoaki Yamada[1], Hajime Shiobara[1], Yusuke Yamashita[3], Kimihiro Mochizuki[1], Kenji Uehira[4]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The evolution history of the Sea of Japan back-arc basin remains under debate, involving the opening of sub-basins such as the Japan and Yamato Basins. Detailed knowledge of the lithospheric structure will provide the key to understanding tectonic history. This study identifies the lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) beneath the Sea of Japan back-arc basin using S-receiver functions (S-RFs). The study area, including the Japan and Yamato Basins, has been instrumented with broadband ocean-bottom seismometers (OBSs). S-RFs from these OBSs show negative Sp phases preceding the direct S arrivals, suggesting the LAB. The S-RFs also show abnormally reduced amplitudes. For further qualitative interpretation of these findings, we conduct transdimensional Bayesian inversion for S-wave velocity models. This less-subjective Bayesian approach clarifies that the low-velocity seafloor sediments and damped deconvolution contribute to the amplitude reduction, illuminating the necessity of such considerations for similar receiver function works. Inverted velocity structures show a sharp velocity decrease at the mantle depths, which we consider the LAB. The obtained LAB depths vary among sites: ~45 km beneath the Japan and Yamato Basins and ~70 km beneath the Yamato Rise, a bathymetric high between the two basins. The thick lithosphere beneath the Yamato Rise most likely reflects its continental origin. However, the thickness is still thin compared to that of eastern Asia, suggesting lithosphere extension by rifting. Notably, the Japan and Yamato Basins show a comparable lithospheric thickness, although the crustal thickness beneath the Yamato Basin is known to be anomalously thick. This consistency in the lithospheric thickness implies that both basins undergo similar back-arc opening processes.

© The Seismological Society of Japan

A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave

*Motoko ISHISE[1], Aitaro Kato[1], Shin'ichi Sakai[1], Shigeki Nakagawa[1], Naoshi Hirata[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

■はじめに

首都圏とその周辺域では，伊豆弧のオホーツク/北米プレートへの衝突，相模トラフからのフィリピン海プレート東端部の沈み込み，日本海溝からの太平洋プレートの沈み込み，そして相模トラフから沈み込んだフィリピン海スラブ東端部と日本海溝から沈み込んだ太平洋スラブの相互作用（近接～接触）といった，地球上まれに見る多様なテクトニクスが展開されている．この一帯では非常に活発で多様な地震活動が見られ，歴史的に様々なタイプの大地震に見舞われてきていることが知られている．また，近い将来においても，プレートの沈み込みに伴うＭ７程度の地震の発生確率が非常に高いとされている（地震調査委員会，2014）．このようなテクトニクスと地震活動を解明すべく，1980年代から地震活動と３次元地震波速度構造解析研究が精力的に進められ，複数の構造モデルが提案されてきている（中村・島崎，1981；野口，1985；笠原，1985；Ishida, 1992；Nakajima et al., 2009; 酒井，2012など）．しかし，既往研究が示すフィリピン海スラブ上面の形状・深さ，およびフィリピン海スラブの北東端の位置と形状は，モデルによって大きく異なっている．そこで本研究では，これまで注目されてこなかった「地震波異方性」の観点から，首都圏下のプレート構造を求めその解釈を行う．

■データと解析方法

解析に使用した地震は，2010年～2013年に関東地方で発生したM3以上の1877地震であり，これらの地震の初動P波到達時刻をデータとした異方性トモグラフィー解析（Ishise et al., 2015）を実施した．観測点は，高感度地震観測網および首都圏に密に配備された首都圏地震観測網（MeSO-net）であり，観測点数はそれぞれ294点と296点で，合計500点である．なお，到達時刻は，防災科研で作成されたマニュアルピックの初動P波到達時刻データ（441,170個）を使用した．

■等方性構造の特徴

異方性を考慮したトモグラフィー解析で得られた等方性構造の特徴は，概して既往の等方性トモグラフィー研究（例えばNakajima et al., 2009）によるものと調和的であった．一方で，MeSO-netのデータを用いたことで浅部の構造の分解能が格段に向上し，これまでは明らかでなかった構造を検出することができた．例えば，深さ20km以浅において，東西方向に伸びるいくつかの帯状の構造が得られた．これらは，関東平野の下に存在すると推定されている古い付加体の分布とよく対応している．帯状構造の深さ変化を追跡することで，付加体の深部構造についての知見が得られると期待される．

■異方性構造の解釈

得られた異方性の方向の特徴から，大陸地殻の異方性（Ｒ１），海洋性地殻の異方性（Ｒ２），スラブマントルの低速度異常領域の異方性（Ｒ３），大陸マントルの異方性（Ｒ４），スラブマントルの高速度異常領域の異方性（Ｈ）を定義した（Ishise et al., 2021 JGR）．

Ｒ１，Ｒ２，Ｒ３，Ｒ４，Ｈの異方性の方向は，それぞれWNW-ESE，NW-SE，NS，WNW-ESE, NSで特徴付けられ，これらは大陸プレートの縁辺部に形成された付加体の走向方向，相模トラフの走向，地震メカニズムで卓越した断層面の走向，太平洋プレートの沈み込み方向，地震メカニズムで卓越した断層面の走向と一致しており，Ｒ１は付加体の層構造，Ｒ２はプレートbendingによる亀裂の配列，Ｒ３とＨはスラブマントル内の弱面の配列，マントル物質の結晶格子選択配向に起因した異方性であると推定される．

© The Seismological Society of Japan

■首都圏下のフィリピン海スラブについての新たな知見

上記の解釈を用いることで，フィリピン海プレートの構造について次の新たな知見が得られた．

（１）北緯35.7-36度付近で東西方向に伸びる一連の低速度異常領域は，これまでは蛇紋岩化したマントルウェッジ（Kamiya and Kobayashi, 2000）や大陸地殻とマントルウェッジ（Nakajima et al., 2009）と解釈されてきた．しかし，本研究で得られた異方性構造から，この低速度異常領域は，大陸プレート，フィリピン海プレートの海洋性地殻，大陸プレートのマントルで構成されていることがわかった．
その結果フィリピン海プレートの北東端は，既往研究（Uchida et al., 2009）による北東端と比べて南側に位置する可能性が示された．

（２）房総半島に分布する南北方向に伸びた深さ20km以深の低速度異常領域は，これまでは大陸プレートの地殻深部構造として解釈されてきた．しかし，本研究で得られた異方性構造から，スラブマントル内の低速度異常領域であることが新たに示された．
　その結果，フィリピン海プレートの上面深さが既往のモデルと比べ浅くなった．

© The Seismological Society of Japan

Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan

*Makoto MATSUBARA[1], Katsuhiko Shiomi[1], Hsatoshi Baba[2], Hiroshi Sato[3], Takahito Nishimiya[4]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

1. はじめに

駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートとユーラシアプレートとの境界では、海溝型巨大地震が繰り返し発生してきた。巨大地震に伴う強震動予測やプレート間での固着状況を解明するためには、沈み込むフィリピン海プレートの高精度な形状を明らかにしていく必要がある。本研究では、防災科学技術研究所(防災科研)の高感度地震観測網(Hi-net)や気象庁、大学等の定常観測網に加えて海底の臨時観測点で得られたデータを合わせて解析した地震波トモグラフィーの結果や、微小地震の震源分布、低角逆断層型の地震の分布等を考慮して、フィリピン海プレート上面の形状を推定するとともにレシーバー関数解析も行い、その結果と比較した。

2. データ・手法

解析領域は駿河湾や東海地域を覆う東経136˚-139˚および北緯34˚-36˚である。陸域の定常観測網のデータと東海大学や気象研究所等により駿河湾内に設置された臨時海底地震計のデータを合わせて用いた。陸域定常観測網では2000年10月から2017年12月まで97,369個の地震を捉えていた。その中から、水平0.01˚(約1km)四方、深さ1kmの領域から読取数最大の地震を1個ずつ、36,632個の地震を解析に用いた。2018年1～8月に行われた海底観測点のデータから得られた、定常観測網ではトリガーされない228個の微小地震を解析に用いた。海底地震計により捉えられた地震については定常観測網の連続データから切り出したデータと合わせて再読取りを行った。さらに、陸域で実施された4発の人工地震探査からの到達時刻データも用いた。36,632個の地震からの1,573,094個のP波、1,532,330個のS波、4発の人工地震探査からの92個のP波、228個の地震からの3,958個のP波、4,809個のS波の到達時刻データを解析に用いた。

地震波速度構造解析には、Zhao et al. (1992)の手法にスムージングや観測点補正値を導入した地震波トモグラフィー法(Matsubara et al., 2004; 2005)を用いた。水平方向に0.05˚(約5km)間隔、深さ方向に2.5～30km間隔で三次元的にグリッドを配置した。初期速度構造は防災科研Hi-netにおける震源決定に用いられている一次元速度構造(鵜川・他, 1984)を用いた。

レシーバー関数解析は、速度不連続面の検出に有効な手法である。116個の地震を解析に用いた。観測機器の方向補正を行い(汐見, 2013)、周波数領域でのレシーバー関数解析を行った(Park and Levin, 2000)。時間領域における深さ変換には、本解析で得られた三次元地震波速度構造を用いた。

3. 結果と議論

日本全体の解析では、水平方向の分解能は0.2˚であるが(Matsubara et al., 2019)、チェッカーボードテストの結果、多くの観測点が存在し多くの地震が発生する東海地域では水平方向に0.1˚の分解能があることが分かった。海域の臨時観測点のデータを活用したことにより、海域下の深さ5kmや10kmの浅い領域の解像度が向上した。

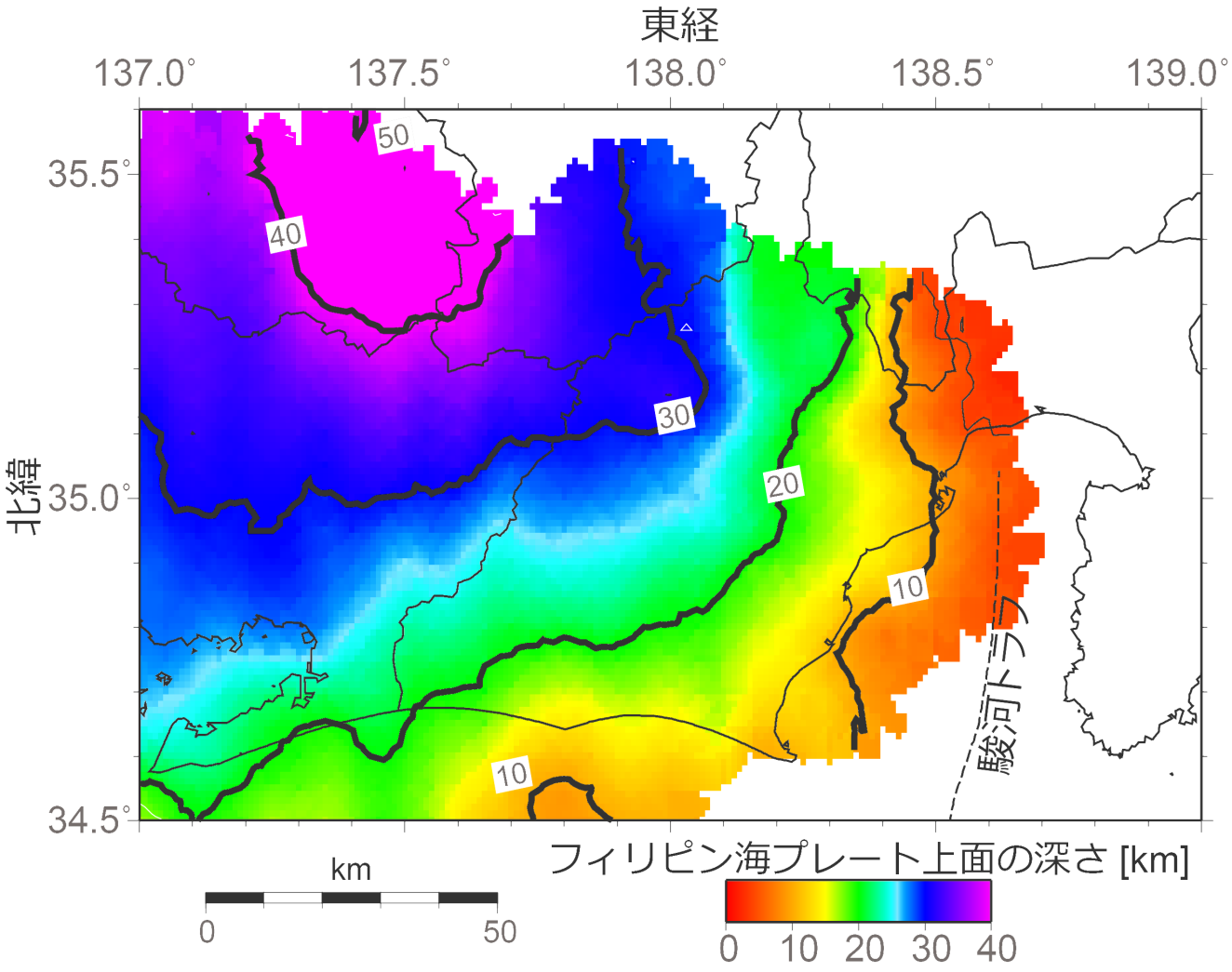
水平断面図を見ると深さ10kmや20kmでは中央構造線の北側の高速度域と南側の低速度域が明瞭にイメージングされた。西南日本では中央構造線は緩やかな北傾斜であるが、東海地域では急傾斜となっている。これは、伊豆弧衝突帯でのフィリピン海プレートの浮揚性沈み込みにより上盤側のユーラシアプレートの隆起運動を伴う短縮変形により生じたものである。Kano et al. (1990)では水平回転が議論されたが、本解析ではフィリピン海プレートの衝突による上盤のユーラシアプレートの三次元的な変形がイメージングされた。

鉛直断面図では、沈み込むフィリピン海プレートの低速度かつ高Vp/Vsな海洋地殻と低Vp/Vsな海洋マント

© The Seismological Society of Japan

ルがイメージングされた。この海洋地殻の結果や微小地震の震源分布、プレート境界で発生していると考えられる低角逆断層型の地震の分布からフィリピン海プレート上面境界を構築した。この形状はレシーバー関数法による結果と調和的であった。駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートは深さ20km程度までが既往のモデルより沈み込む角度が緩やかになり、上面の深さは6-10km程度浅くなった。特に深さ10kmの等深線の位置は5～10km程度西側になった。また、深さ10kmや20kmの等深線の位置は静岡県三保半島から山梨県にかけての陸域下では5～20km程度西になった。定常観測点と臨時海底地震計を組み合わせることにより、プレート境界を交差する波線を用いた解析ができるようになり、浅い沈み込み帯の形状が明らかになった。

Matsubara, M., Shiomi, K., Baba, H., Sato, H., & Nishimiya T. (2021). Improved geometry of the subducting Philippine Sea plate beneath the Suruga Trough. Global and Planetary Change, 204, 2021, 103562, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103562



© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

AM-2

chairperson:Motoko Ishise(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)
Thu. Oct 14, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S06-07] Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan

○Ryou HONDA[1], Yuki Abe[1], Motoko Ishise[2], Shin'ichi Sakai[3,2], Yohei Yukutake[2], Ryosuke Doke[1]
（1.Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo）
11:00 AM - 11:15 AM

[S06-08] Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough

○Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[1], Gou Fujie[1], Katsuhiko Shiomi[2], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[1,2], Takeshi Nakamura[3], Toshiya Fujiwara[1] （1.JAMSTEC, 2.NIED, 3.CRIEPI）
11:15 AM - 11:30 AM

[S06-09] Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough

○Gou FUJIE[1], Ryuta Arai[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Shuichi Kodaira[1], Yuka Kaiho[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1] （1.JAMSTEC）
11:30 AM - 11:45 AM

[S06-10] Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity

○Ryuta ARAI[1], Seiichi Miura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Yuka Kaiho[1], Shuichi Kodaira[1], Kimihiro Mochizuki[2], Rie Nakata[2], Kyoko Okino[3] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo）
11:45 AM - 12:00 PM

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

○Yanxue Ma[1], Rie Nakata [1], Kimihiro Mochizuki[1], Seiichi Miura[2], Yasuyuki Nakamura[2], Ryuta Arai [2], Gou Fujie[2], Yuka Kaiho[2], Shuichi Kodaira[2] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）
12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan

*Ryou HONDA[1], Yuki Abe[1], Motoko Ishise[2], Shin'ichi Sakai[3,2], Yohei Yukutake[2], Ryosuke Doke[1]

1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

はじめに

フィリピン海プレートはその北縁で大陸プレートに対し年間3 - 4 cmの速度で収束しており、南海トラフや相模トラフでは大陸プレートに対して沈み込んでいる。そのため、伊豆半島の東では関東地震が発生し、西では東海地震が発生する。一方、伊豆半島の付け根付近の伊豆衝突帯では、下部地殻は沈み込んでいるが上部地殻などは衝突し、浮揚性沈み込みが起きているため、周辺とは異なる地殻活動が生じている。伊豆衝突帯のプレートの収束様式や地震活動などは、伊豆島弧の地殻の厚さや物性によって大きく影響を受けていると考えられるが、その空間的な分布は未解明である。これまでに伊豆衝突帯を含む領域でレシーバ関数による構造解析が行われた(Kinoshita et al., 2015, J. Geophys. Res.)がフィリピン海プレート及びスラブのモホ面の3次元形状は推定されていない。そこで本研究では、レシーバ関数解析と地震波トモグラフィにより得られた結果からモホ面や地殻の形状を3次元的に捉え、この領域での地震活動との関係について考察した。

モホ面の探索

2007年から2017年までの期間に神奈川県とその周辺地域の観測点で得られた遠地地震(震央距離30–90、M6以上）の波形から、P波レシーバ関数とS波レシーバ関数を作成した。レシーバ関数は、時間拡張型マルチテーパ(Shibutani et al., 2008, Bull. Seismol. Soc. Am.)を用いて作成し、Matsubara et al. (2019, InTech Open)の3次元地震波速度分布と防災科学技術研究所の浅部・深部統合地盤モデルを仮定して深さ変換し空間的に平均した。 その結果、解析領域の広範囲の深さ20 –60 kmに不連続面の存在が示された。この不連続面は、これまでに推定されているフィリピン海スラブ上面(Hirose et al., 2008, J. Geophys. Res.; 弘瀬ほか, 2008, 地震; Nakajima et al., 2009, J. Geophys. Res.)に比べて深くモホ面と解釈するのが妥当である。ただし、原因については断定できていないが、丹沢山地付近ではモホ面に対応するレシーバ関数のピークが検出できなかった。 そこで、丹沢山地付近のモホ面深度を別のデータを用いて補完することを試みた。Kodaira et al. (2007, J. Geophys. Res.)が人工地震探査データから推定した伊豆島弧の速度構造では、地殻の底部のP波速度が7.5 km/s程度である。それを参考に、Ishise et al. (2021, J. Geophys. Res.)が地震波トモグラフィにより推定したモデルからP波速度7.5 km/sの等速度面の深度分布を抜き出したところ、その分布はレシーバ関数で検出したモホ面の分布とおおよそ一致した。このことからその等速度面がこの地域のモホ面深度の指標になると判断し、レシーバ関数でモホ面が検出できなかった領域をその等速度面で補完した。

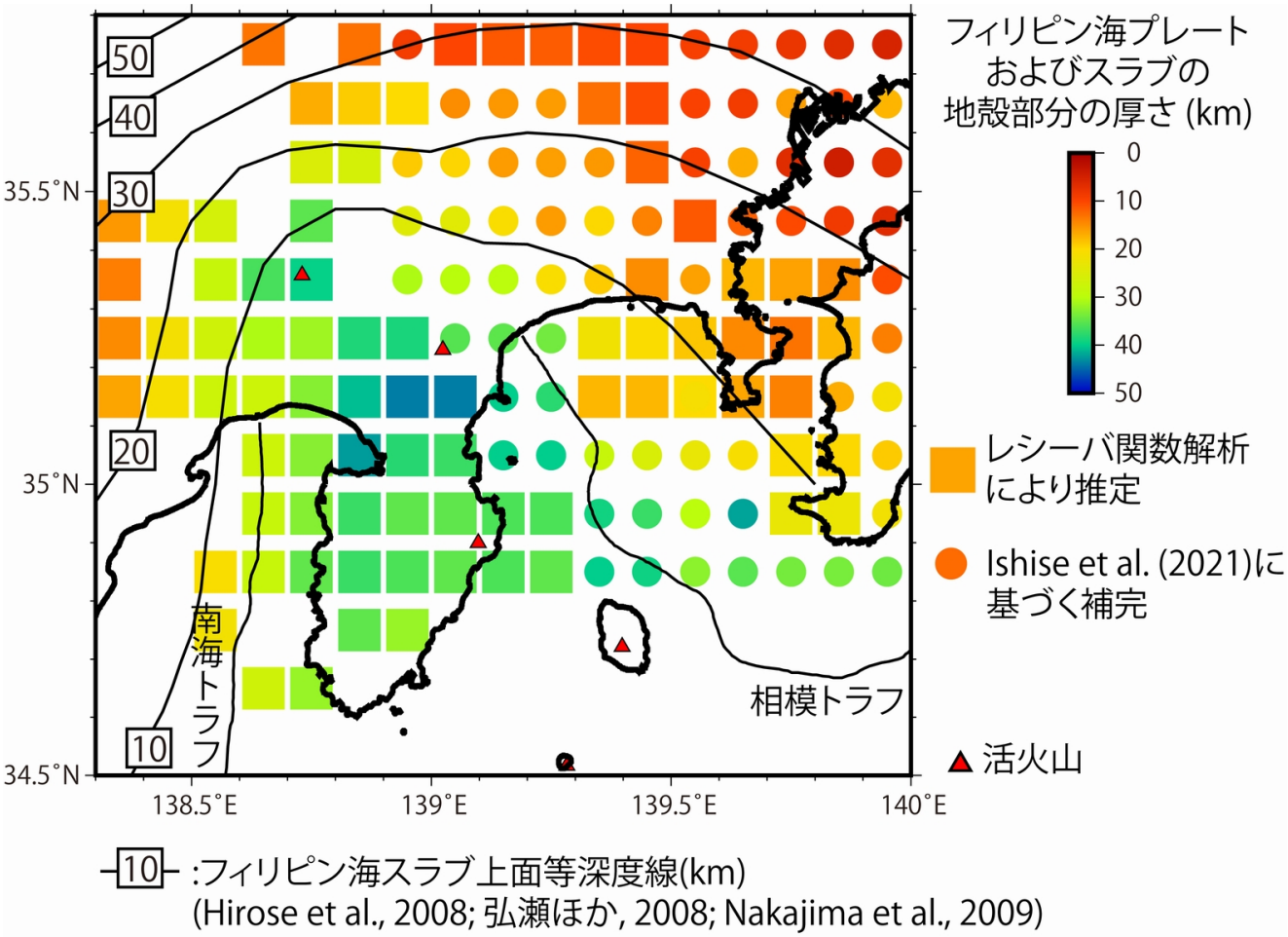
地殻の厚さ分布

上述の先行研究により推定されたフィリピン海スラブ上面の深度分布を考慮してフィリピン海スラブの地殻の厚さの分布を推定した。その結果、地殻は伊豆半島と富士山、箱根火山付近の直下では35 km以上の厚さを持ち、その領域から遠ざかるにつれて薄くなるように分布することが分かった(図)。 伊豆弧の北西延長ではスラブ内の地震活動は不活発であるが、相模トラフとその北西延長に沿う領域の周辺ではやや活発な地震活動があり、その中でも丹沢山地東部ではスラブの沈み込みと整合的なメカニズムの震源が分布する(Yukutake et al., 2012, Earth Planets Space)。またその領域は、剪断歪の集中域(Doke et al., 2020,Geol. Soc. Spec. Publ.)に近接し、さらに1923年関東地震のアスペリティの西端近傍でもある。つまり相模トラフとその北西延長に沿う領域付近では歪、応力、プレート境界のカップリング強度の空間変化が大きい。 本研究で推定した地殻の厚さには、相模トラフとその北西延長を挟んで南西側から北東側へ厚さが20 km以上減少する、という特徴がある。地殻の厚さが急変する領域には、地殻を構成する岩石の組成や密度・浮力などの空間変化の存在が示唆さ

© The Seismological Society of Japan

れ、それが歪、応力、カップリング強度の分布に影響を与えて収束様式を変化させる原因になっていると考えられる。

謝辞 防災科学技術研究所、東京大学、気象庁の地震波形データを使用させていただきました。本研究の一部は、首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクトの助成を受けて実施いたしました。記して感謝いたします。



© The Seismological Society of Japan

Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[1], Gou Fujie[1], Katsuhiko Shiomi[2], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[1,2], Takeshi Nakamura[3], Toshiya Fujiwara[1]

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI

南海トラフ巨大地震震源域における地震・津波ハザード評価、強震動予測、高精度震源決定などに用いる地下構造標準化の試みとして、沈み込むフィリピン海プレートの形状を含む3次元地震波速度構造モデルが提案された(Nakanishi et al., 2018)。このモデルは、主に、屈折法地震探査により推定された地震波速度構造に基づくものであるが、海域における震源決定、海域で発生する地震による陸域の地震動（特に長周期地震動）の予測や地震発生シミュレーションの信頼性の向上のためには、3次元構造モデルの高精細化のみならず、S波速度構造、密度構造を反映する必要がある。しかし、現時点では、地震探査においてS波を射出可能な制御震源の活用が困難であり、海域におけるS波速度構造の詳細な把握の事例は限られている（例えばTakahashi et al., 2002）。密度についても掘削調査による局所的な情報に限られており、空間的な構造は把握できていない。
本研究では、屈折法地震探査に限らず、反射法地震探査や自然地震トモグラフィー、表面波の解析などから成果として得られる様々な地震波速度情報を統合した3次元地震波速度構造モデルとこれに基づく３次元密度構造モデルの構築を目指す。モデルの構築にあたってS波速度と密度の情報が現段階では十分ではないため、最初に、既存の3次元P波速度構造から、経験式（例えば、Brocher, 2005、Ludwig et al., 1970）によってS波速度や密度に変換することとした。提案されている様々な経験式の中から、南海トラフ域に適用できるものについて整理し、これまでに、地殻最浅部の堆積層とそれ以下の深部の構造について、それぞれ別の変換式を適用した構造モデルを作成した。今後、付加体と沈み込むプレート側の構造を構成する岩石の性質との関連を考慮して、各地層区分に対する変換式の適用を検討するとともに、調査観測の成果から得られたS波速度情報や地震調査および重力データとの比較等による変換式の検証方法の検討を進める。
本研究は、文部科学省による科学技術試験研究委託事業「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。また、本研究の一部は、JSPS科研費JP19H01982の助成を受けたものである。

© The Seismological Society of Japan

Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough

*Gou FUJIE[1], Ryuta Arai[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Shuichi Kodaira[1], Yuka Kaiho[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1]

1. JAMSTEC

フィリピン海プレートが日本列島下に沈み込む南海トラフ海域は、世界でもっとも地震観測研究が充実しているプレート沈み込み帯の一つであり、M8クラスの巨大地震から、微小地震、さらには各種スロー地震(低周波微動、非地震性滑りなど)まで、さまざまなプレート境界断層すべり現象が時空間的に不均質に分布していることが知られている。スロー地震は通常の地震が発生する周辺に分布する傾向があるなど、これら多様な断層すべりは何らかの関連性を持っており、プレート境界断層で発生する現象として包括的に理解することの重要性が指摘されている。

最近の地震活動研究や地下構造研究の進展から、海山の沈み込みなどプレート境界断層形状の複雑さや断層付近の物性(低速度層)などローカルな構造不均質が、スロー地震活動分布などと興味深い相関を示すことが分かってきた。そこで、海洋研究開発機構では南海トラフ沈み込み帯全域のプレート境界断層の詳細な実態把握を目指した大規模地下構造調査研究を2018年から進めている。この一環で、2019年11月～12月、我々は室戸岬沖の土佐碆と呼ばれる海底地形の高まり付近において、制御振源(エアガン)と稠密な海底地震計アレイ(2km間隔)を用いた構造調査観測を実施した。土佐碆の下には、大きな海山が沈み込んでいると考えられており、その陸側(北側)では巨大地震が、トラフ側(南側)ではスロー地震(低周波微動)が観測されるなど、本海域は海山の沈み込みがプレート沈み込み帯の発達や断層すべり挙動の多様性に与える影響を研究する上で理想的な条件を揃える。

本研究では、プレート境界断層形状に加えてプレート境界付近の流体分布や underthrust sediment などの実態把握を進め、プレート境界断層すべり挙動の多様性を支配する構造要因を解明することを目指して、下記の手順で地震波速度構造モデルを構築している。まず、初動走時トモグラフィによって長波長地震波速度構造モデルを構築し、その結果を初期構造として波形インバージョン（周波数領域、音響場、Full-waveform Inversion, FWI）によって高解像度地震波速度構造のモデリングを行う。FWI解析は、入力データのノイズ抑制やインバージョン・パラメータの調整など、モデルの最適化に向けた課題が残っている状況ではあるが、海洋地殻上面形状やBSRのほか、デコルマを示唆するような地震波速度の逆転など、興味深い構造的な特徴が描き出されている。

特に注目すべきは、上盤内の地震波速度の不均質である。たとえば、土佐碆海盆下のプレート境界上面は顕著な低速度になっている一方、そのトラフ側(海側)には明瞭な高速度帯が形成されているなど、プレート境界断層上面の地震波速度はトラフ軸から陸側に向かって単調に上昇しているわけではないことが分かってきた。観測された構造不均質とプレート境界断層すべり挙動の関連性については、今後、さまざまな角度から検討を加えていく必要があるが、地震波速度の不均質性が強い場所で低周波微動が観測されているなど興味深い相関が見られており、我々の構造解析結果は、プレート境界断層のすべり挙動の理解には、断層形状にとどまらず断層物性の不均質性についても考慮していく必要があることを示唆している。

© The Seismological Society of Japan

Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity

*Ryuta ARAI[1], Seiichi Miura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Yuka Kaiho[1], Shuichi Kodaira[1], Kimihiro Mochizuki[2], Rie Nakata[2], Kyoko Okino[3]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

南海トラフ西端に位置する日向灘海域では低周波微動や超低周波地震などの多様なスロー地震活動が発生している（Yamashita et al., 2015; Tonegawa et al., 2020）。これらの地震活動域は九州パラウ海嶺が沈み込んでいる場所に対応しており,沈み込む海山と一連の地震活動との関係について活発な議論がなされている。例えば、微動活動は地磁気異常データ等から推定される海山の縁に分布し、またプレート境界の等深度線に沿って震央が移動することが知られている。こうした活動場所や移動を支配する要因を理解するためには、活動が発生する場所の断層形状や物性、摩擦特性を詳細に把握する必要がある。

海洋研究開発機構では南海トラフ域全体のプレート沈み込み構造を高精細化し、スロー地震活動を含むプレート境界断層での多様なすべり現象の発生要因を包括的に理解することを目指し、2018年度から大規模かつ稠密な地震波構造探査研究を実施してきている。2020年度には新学術研究領域「スロー地震学」および「日向灘掘削計画」との共同研究として、海底地震計（OBS）を用いた稠密屈折法探査と5.6 km長のストリーマーケーブルを用いた反射法探査を日向灘海域で実施した。屈折法探査では、OBS100台を海溝に平行な測線（HYU01）と沈み込み方向の測線（HYU02）の2測線に稠密（2 km間隔）で展開し、エアガン発振による地震波データを取得した。反射法探査では、これらの測線に加えてHYU01に直交する2測線（HYU18、HYU22）でもデータを取得した。本発表では主に、海溝平行測線（HYU01）のデータ解析から明らかとなった上盤プレート内およびスラブ沈み込み構造とスロー地震活動の関係について議論する。

OBSおよびストリーマーケーブルデータを用いた走時トモグラフィ解析から、プレート境界周辺の地震波速度がプレート境界に沿って変化することがわかってきた。最も注目されるのは、九州パラウ海嶺の沈み込み域にはプレート境界に比高1～2kmほどの高まりがあり、その高まりの東縁部に周囲に比べて顕著な低速度域（Vp～4.0km/s）が存在する点である。この低速度域は低周波微動の活動度が測線の中で最も高い場所に一致することから、プレート境界断層周辺の物性の不均質性が微動活動と相関していることが示唆される。 今後は、OBSデータへ波形インバージョン解析を適用することで、特にプレート境界周辺の不均質構造をより高解像度で明らかにしていく計画である。

© The Seismological Society of Japan

High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

*Yanxue Ma[1], Rie Nakata [1], Kimihiro Mochizuki[1], Seiichi Miura[2], Yasuyuki Nakamura[2], Ryuta Arai[2], Gou Fujie[2], Yuka Kaiho[2], Shuichi Kodaira[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Various types of slow earthquakes including slow slip events (SSEs), very low frequency earthquakes (VLFEs) and tectonic tremors occur around the segment boundary off the Bungo Channel located between the Kyushu and Shikoku Islands. Their distributions appear to vary along depth of the subduction of the Philippine Sea Plate. The VLFE and tremor activities have been observed to occur around a subducted seamount of the Kyushu Palau Ridge (KPR, Yamashita et al.,2017; Tonegawa et al., 2020; Nakata et al., 2020). We processed two seismic reflection profiles; one existing KR0114-8 profile (Park et al., 2008) and the other HYU-02 profile newly acquired by JAMSTEC in 2020 to investigate the relationship between the distribution of the tremor activity, the morphology and physical properties along the plate interface. The HYU-02 line is parallel to the subduction direction, and the KR0114-8 line runs along the strike of the Nankai Trough near the deformation front extending further to the west across the KPR. The HYU-02 line was processed, and a pre-stack depth migration image was obtained. We performed denoise, deghost and designature on the seismic reflection data of KR0114-8. Then, we applied pre-stack time migration to the dataset and imaged in high resolution complex geological structures, the topography of the subducting oceanic crust including the KPR, decollement and faults. The KPR is imaged as a compex topographic high. We compared these structures seen in the seismic images and distributions of the 2013 and 2015 tremor activities. During the 2015 episode, the tremor activity around the KR0114-8 profile apparently concentrates to the east of the KPR reaching near the trough axis where typical accretionary prisms are formed. On the other hand, most of 2013 tremors occurred in the west of the KPR. Tremors are considered to occur along the plate interface. The spatial relationships between the tremor distribution and the subducting KPR suggests that the geometry of the plate interface and surrounding structural disturbances induced by the KPR subduction may have a primary control on the tremor generation.

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S06. Crustal structure

PM-1

chairperson:Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)
Thu. Oct 14, 2021 1:30 PM - 2:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S06-12] Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal

○Chintan Timsina[1], James Mori[2], Masumi Yamada[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-13] Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion

○Admore Phindani MPUANG[1,2], Takuo SHIBUTANI[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University , 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

1:45 PM - 2:00 PM

©Seismological Society of Japan

Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal

*Chintan Timsina[1], James Mori[2], Masumi Yamada[2]

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

We imaged the three-dimensional upper crustal attenuation structure of central Nepal in the source region of the 2015 Gorkha earthquake (Mw 7.8) by analyzing more than 35000 seismic waveforms from local earthquakes. We used P- and S-wave spectra of the Gorkha earthquake sequence recorded by a temporary network of 42 stations deployed for 11 months. We modeled the amplitude spectra for the path-averaged attenuation operator (t*) using a non-linear least square technique by assuming a ω^{-2} source model for the frequency band of 1-30 Hz. This procedure depends on finding an optimal fit between observed spectra and theoretically computed spectra based on low-frequency spectral level (Ω_o), corner frequency (f_c), and t*. During the fitting, station site responses are estimated by stacking together all the residual for each station. After removing the site response, the fitting procedure is repeated and the weighting of each t* measurement is also estimated based on how well the spectrum is modeled. We obtained more than 25,000 high-quality t* measurements which are then inverted for frequency-independent Q_p and Q_s structure using SIMUL2000 (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) code. For the ray tracing, we used the 3D velocity models and hypocenter locations from the result of our previous velocity tomography of the region. In general, preliminary results of the attenuation structure agree with the velocity structure, where the high-velocity regions are consistent with high Q-values (low attenuation). In this presentation, we will further discuss the lateral variations on velocity and attenuation structure of the region and their implications for the 2015 Gorkha earthquake.

© The Seismological Society of Japan

Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion

*Admore Phindani MPUANG[1,2], Takuo SHIBUTANI[2]

1. Graduate School of Science, Kyoto University , 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The use of genetic algorithms in receiver functions inversion for crustal and uppermost mantle velocity-depth structure is well established (e.g. Shibutani et al., 1996). Their operation is analogous to the evolution of biological species through the use of (pseudo)random numbers to control the selection, crossover and mutation processes in their search for an optimal model(s). Despite their robustness, one drawback of the standard genetic algorithms is that towards the end of a 'run', only a few new solution ideas are explored which may lead to the stagnation of the optimization process. This can be an especially major drawback for large model dimensions, such as in the inversion of receiver functions for dipping and anisotropic structures. To mitigate this problem, this study introduces an extinction concept to genetic algorithm inversion of receiver functions for crustal shear wave velocity structure. With extinction, parts of the explored model population are regularly replaced to exploit highly fit models as well as random explorations of other domains. The concept of self-organized criticality, which has similarly been used to explain the extinction of biological species (e.g. Newman, 1996), is applied to control the size and frequency of the extinction events in the genetic algorithm following Krink et al. (2000).

Three different model replacement strategies are tested against the standard genetic algorithm of Shibutani et al. (1996) for performance comparison on both synthetic and real data problems. In random replacement, extinct models are replaced by randomly generated models. Survivor mutant replacement comprises replacing extinct models with randomly generated mutations of the surviving population. Lastly, in best-model mutant replacement, extinct models are replaced with mutations of the current best model, mutated at 2, 3 or 4 points selected at random positions. Preliminary results show that random replacement achieves the most extensive model space exploration but with the least exploitation of fitter models, consequently resulting in a less fit ‘best model’. Greater exploitation of fitter models is achieved by survivor mutant and best-model mutant replacement strategies which obtain fitter best models in fewer generations compared to the standard genetic algorithm. A combination of the three replacement strategies may offer the best balance between exploitation of 'fitter' models and exploration of the whole model space without affecting the efficiency of the algorithm as shown by the results from the synthetic tests. The difference in computational costs between the standard genetic algorithm and the genetic algorithm with extinction was insignificant during these tests. These results show that extinction in genetic algorithm inversion of receiver functions can be tuned to improve the efficiency of the optimization process in escaping local minima as well as reducing convergence time. This technique can prove very useful for optimization problems with large dimension model spaces.

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

PM-1

chairperson:Tomokazu Kobayashi(Geospatial Information Authority of Japan), Yusaku Tanaka(Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Thu. Oct 14, 2021 2:00 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S03-01] Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Satoshi FUJIWARA[1] （1.Geospatial Information Authority of Japan）

2:00 PM - 2:15 PM

[S03-02] Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

○Yusaku TANAKA[1], Takeshi Sagiya[1] （1.Nagoya Univ.）

2:15 PM - 2:30 PM

[S03-03] Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

○Satoshi ITABA[1], Kazuaki OHTA[2], Hiroshi HASEGAWA[3] （1.AIST, 2.NIED, 3.JMA）

2:30 PM - 2:45 PM

[S03-04] Slow-slip events of one-hour duration

○Akio KATSUMATA[1], Kazuki Miyaoka[3], Takahiro Tsuyuki[5], Satoshi Itaba[4], Masayuki Tanaka[5], Takeo Ito[6], Akiteru Takamori[2], Akito Araya[2] （1.Univ. of Toyama, 2.ERI, Univ. of Tokyo, 3.JMA, 4.AIST, 5.MRI, JMA, 6.Nagoya Univ.）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Satoshi FUJIWARA[1]

1. Geospatial Information Authority of Japan

地殻変動の空間的分布を求めるためには、観測点ごとに抽出目的の地殻変動が含まれる期間の前後の差をとることによって求められるのが通常である。ところが、対象となる地域の範囲が広くなると、例えばプレート運動に伴うような広域の地殻変動も含まれてくるために、単純に２時期の差をとるだけでは、抽出目的以外の変動がノイズとなって現れてしまう。本報告では、国土地理院の電子基準点を200点以上利用し、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による余効変動を時間と空間両方で関数モデル（時空間モデル）化することで、実際の観測値からの差分を求めるだけで余効変動以外の微小な地殻変動を精度よく、かつ非常に簡便に求められることを示す。

Tobita (2016)により、下記の式で表される、２つの対数と１つの指数関数の混合モデルを用いることで、東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列が短・中期的な時間推移とともに、場所によって異なる余効変動の空間分布も予測できる時空間モデルが作成できることが示されている。

$$D(t)=a\ln(1+t/b)+c+d\ln(1+t/e)-f\exp(-t/g)+Vt$$

ここで、$D(t)$は余効変動時系列の各成分、t は地震後の日数、lnは自然対数、b、 e、 g は全観測点に共通の対数関数または指数関数の緩和時定数、Vは観測点ごとの定常速度である。

この時空間モデルを利用して2020年までの余効変動の時系列を精査したところ、2015年2月以降に北海道から中部地方にかけての広域において一定速度で進行する新たな変動が見いだされた。この一定速度成分も新たに関数項として追加することで、時空間モデルの余効変動の推定精度を向上させた。

一般に、微小な地殻変動を時系列から検出するためには、対象となる場所や時期に合わせて近傍に基準となる固定点を設定したり、広域の変動を除去するためにトレンドを観測点ごとに推定したりといったモデル化をその都度ごとに行う必要がある。本報告は、このモデル化を時空間モデルであらかじめ与えてしまうものである。 最初にローカルな変動の抽出例として、2018年5月末～7月に発生した房総半島SSEについて図１に示す（固定点 福江）。数十日間の短期ではあるが、単純に2時期の差分をとった図１左では東北沖地震の余効変動があちこちに含まれており、そのパターンも一様でない。しかし、改良した時空間モデルを使用して時間変化を求めた図１右では房総半島のSSEのみがきれいに抽出されており、単純の2時期の差とは比べものにならない地殻変動抽出力を持っている。

この時空間モデルはさまざまな微小な変位現象を抽出するのに有効である。もちろん、上記のようなローカルな現象にも使えるが、ローカルな範囲内では大地震の余効変動という広域の現象は均一的に現れるため、ローカルな範囲内のみの差分でも十分なことが多い。したがって、本時空間モデルが真価を発揮するのは広域にわたる微小な現象の抽出である。こうした広域で微小な変動を検出する例として積雪による荷重変形による変動を図２に示す。この図は、例年3月上旬頃が最深積雪になることから地震後の各年（2015年を除く）3月11日前後の実測値から時空間モデルの残差を求め、その平均値を描いたものである。1~2mmという非常に小さな変化を求めてこうした図を作成するには各点で変化をモデル化するなど複雑な操作が必要になるが、時空間モデルを差し引くだけでこうした図が簡単に描くことができる。

© The Seismological Society of Japan

この時空間モデルの特徴は、広域（北海道～中部地方）、高精度、簡便（観測値から差し引くだけ）、将来予測可能（新たな広域の現象が現れなければ使い続けられる）であり、変動検出には応用範囲も広い強力なツールである。

参考文献 Tobita M (2016) Earth Planets Space. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4

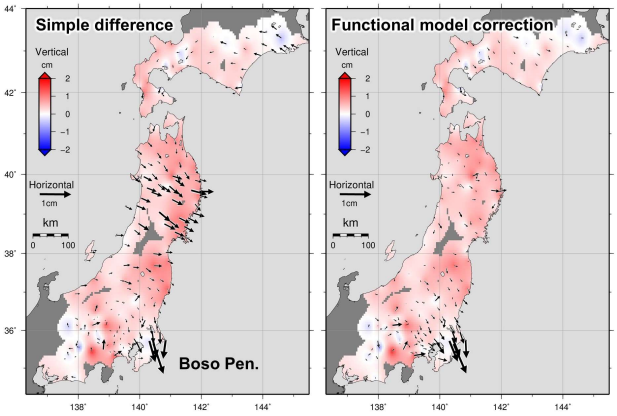


図１ 2018年6月の房総半島沖SSEによる地殻変動
左 5月末～6月末の10日間ごとの単純差（固定点 福江）
右 上記から東北地震余効変動関数モデルによる変化を除去

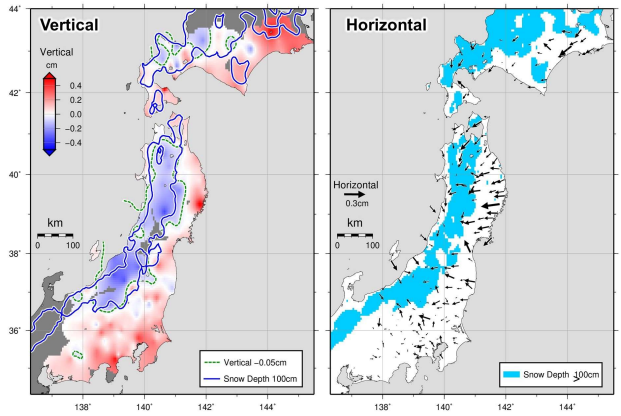


図２ 各年3月上旬の余効変動モデルからのずれと積雪量
左 上下変位
右 水平変位
各変位量は、各年（2015年を除く、2012年～2020年の3月11日前後10日間平均値から東北地震余効変動関数モデルによる変化を除去して求めている。

© The Seismological Society of Japan

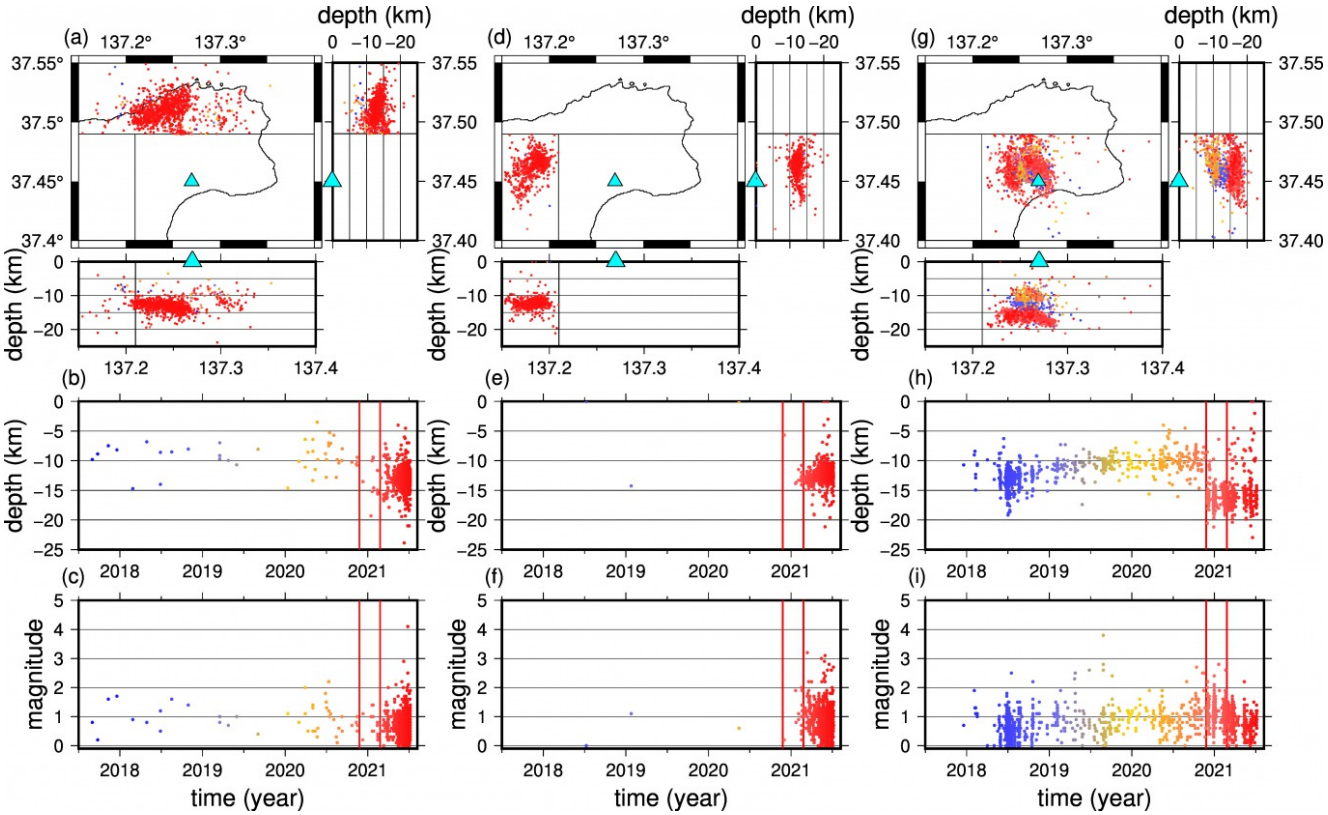
Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

*Yusaku TANAKA[1], Takeshi Sagiya[1]

1. Nagoya Univ.

地震、すなわち断層すべり運動の進行速度は幅広い帯域で観測される。このうち、非常にゆっくりとした速度で進行するものをスロー地震と呼び、特に、地震波の検出が困難であるため地殻変動を通して検出されるものをスロースリップイベント（SSE）と呼ぶ。SSEはこれまで環太平洋の多くの沈み込み帯で観測されているが、内陸においての検出事例はほとんど報告されていない。これには内陸でSSEが発生しづらい何らかの物理的要因が存在する可能性が考えられるが、それに加えて、SSEが内陸で発生したとしても、その地殻変動の振幅や空間スケールが小さく、明確にそのシグナルがSSEであると判断することが困難であるという事情もある。これまでに報告された数少ない内陸SSEの観測報告としては、2012年に北海道で発生した群発地震と同時期に観測された局地的な地殻変動を、群発地震を引き起こしたSSEによるものだとみなして説明を試みたOhzono et al., (2015) があるが、内陸で発生した群発地震に伴ってSSEによると見られる地殻変動が発見された事例は他に無かった。 本発表では、2018年から現在まで引き続き発生している能登半島における群発地震と、その活動の変化に伴って2020年11月から進行し始めた、ゆっくりとした地殻変動について報告する。当該群発地震は2018年に能登半島北部、深さ約 13 km の地点で発生し、その後、非常にゆっくりと深さ約 8 km までマイグレーションした様子が観測されている。そのマイグレーションは2020年11月に終息したが、それとほぼ同時に、その下部、深さ約 17 km の地点で群発地震が発生した。更に、この群発地震の下方移動と同時に、その直上のGNSS観測点(GEONET, 珠州)で地殻変動が進行を開始した。この地殻変動は、水平方向の変動は2021年2月ごろ終息したものの、上下方向については2021年7月末においても隆起を続けている。また、2021年2月ごろ及び3月ごろのそれぞれに、それまでに群発地震が観測されていた領域の西部と北部で、別の群発地震が開始した。 これまでの多くの研究で、群発地震やSSEの発生には、断層中の流体移動が関与していることが示唆されている。能登半島については、火山地帯ではないものの温泉が湧くことで有名であり、また、マントルからヘリウムガスが湧き出てくることも知られている(Umeda et al., 2009)。このように、能登半島の地下には多くの流体が存在することが分かっている。また、多くの先行研究で、能登半島の地下には多くの断層が存在することも分かっているため、今回観測された現象には、能登半島地下の断層中の流体移動が関与していることが疑われる。そこで、本発表では、この現象の詳細と、それを説明するモデルを提唱する予定である。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

*Satoshi ITABA[1], Kazuaki OHTA[2], Hiroshi HASEGAWA[3]

1. AIST, 2. NIED, 3. JMA

2020年12月上旬から翌1月下旬にかけて，紀伊半島沖熊野灘において活発な浅部微動活動が観測された[太田ほか, 2021]．2020年12月中旬～翌1月中旬にかけては，産総研のボアホール歪観測3点においてわずかな変化が観測された．観測された歪変化からプレート境界面上におけるすべりを仮定して断層面を推定したところ，微動発生域のうち西側・深部側においてMw6.2のすべりが推定された（図1 model A）．微動発生域全体がすべったと仮定して断層面を推定したところ，その規模はMw6.6と推定された(図1 model B).

海域のボアホールにおける間隙水圧観測などによると，この領域では繰り返し浅部SSEが発生していることが報告されている[Araki *et al.*, 2017]．観測条件が良好な場合（SSEの規模が大きい，降雨・気圧変化が少ない，深部SSEが発生していない等）については陸域のボアホール歪観測でも有意な変化が検出され断層モデルの推定が可能であることが分かっている（例えば2016年4月）．スタッキング手法[宮岡・横田, 2012]を用いて過去の観測波形を網羅的に調査したところ，これらのイベント以外にもいくつかの浅部SSE発生の可能性がある事例が検出された．陸域の観測網は，浅部SSE発生領域からは大きく離れており，海溝軸（dip）方向へのすべりの広がりを把握することは困難である．一方でstrike方向の広がりなど，大まかな全体像を把握するには有用であると考えられる．

本講演では，上述の2020年末～2021年初めのイベントのほか，いくつかの浅部SSE検出事例を紹介する．

参考文献

Araki, E., D. Saffer, A. Kopf, L. M. Wallace, T. Kimura, Y. Machida, S. Ide, E. Davis, IODP Expedition 365 shipboard scientists (2017), Science, 356(6343), 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120.
太田和晃, 松澤孝紀, 汐見勝彦 (2021), 紀伊半島南東沖の微動活動（2020年12月～2021年1月）, 地震予知連絡会会報, 106, 印刷中.
宮岡一樹, 横田崇 (2012), 地殻変動検出のためのスタッキング手法の開発－東海地域のひずみ計データによるプレート境界すべり早期検知への適用－, 地震２, 65, 205-218.

© The Seismological Society of Japan

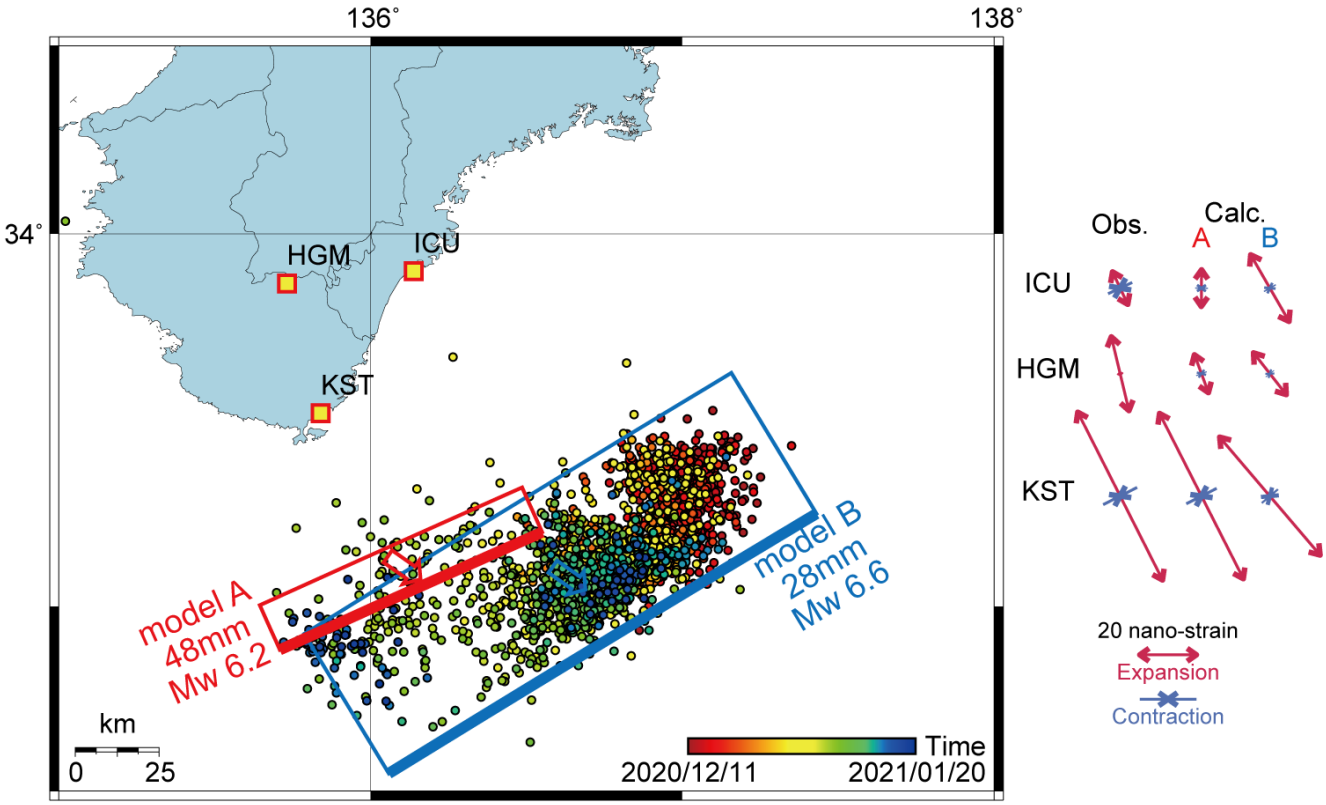


図1 2020年末～2021年初めに発生した浅部SSEの推定断層モデル（赤色矩形: model A, 青色矩形: model B）および浅部微動の震央分布. 右側は, 主歪の観測値および理論値の比較.

© The Seismological Society of Japan

Slow-slip events of one-hour duration

*Akio KATSUMATA[1], Kazuki Miyaoka[3], Takahiro Tsuyuki[5], Satoshi Itaba[4], Masayuki Tanaka[5], Takeo Ito[6], Akiteru Takamori[2], Akito Araya[2]

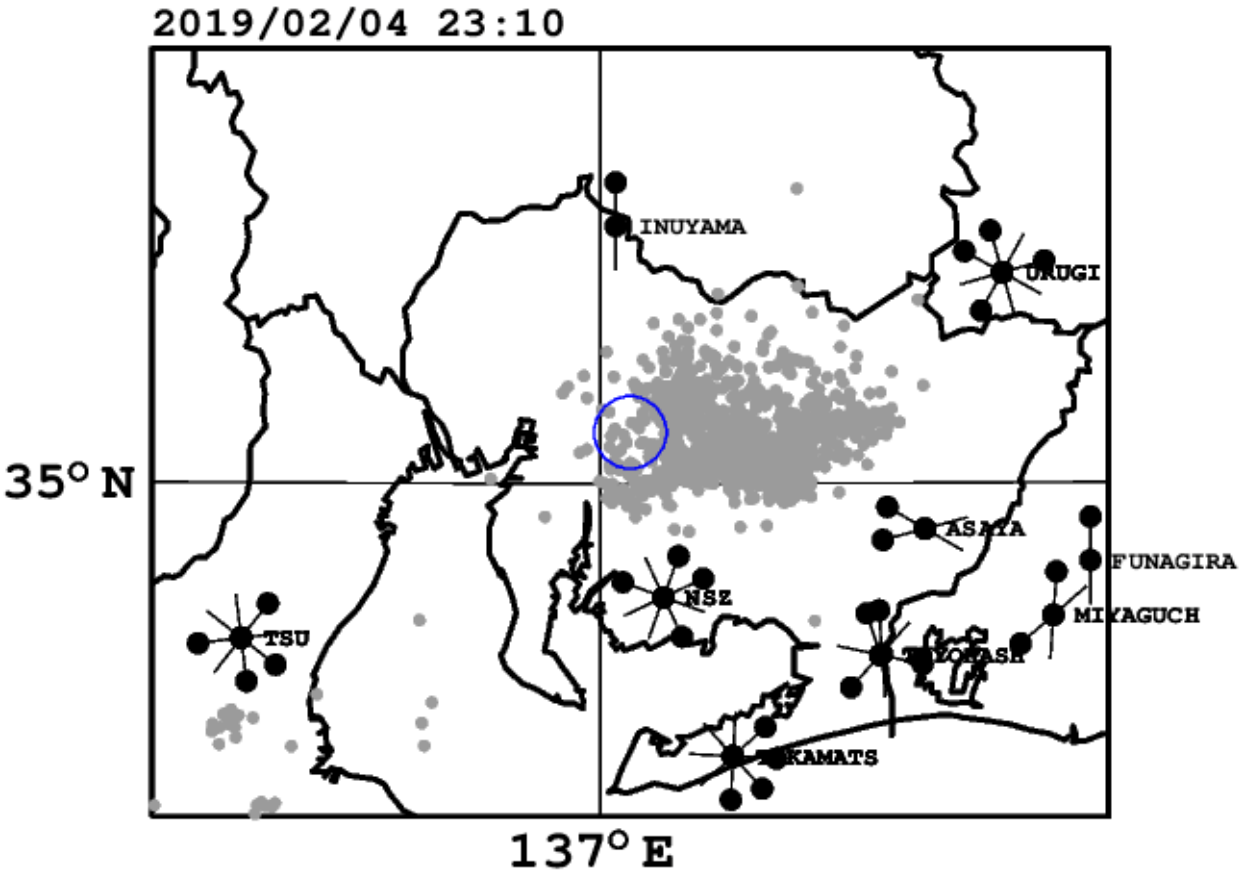
1. Univ. of Toyama, 2. ERI, Univ. of Tokyo, 3. JMA, 4. AIST, 5. MRI, JMA, 6. Nagoya Univ.

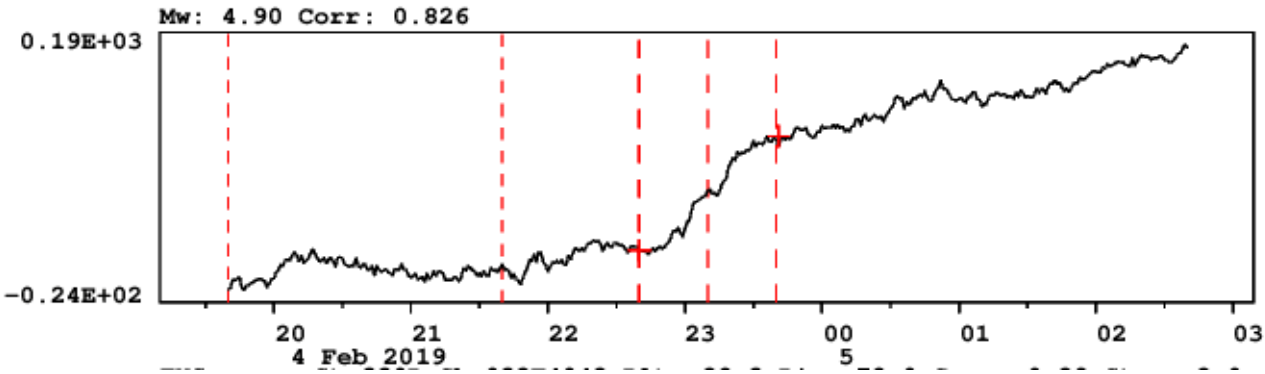
これまで様々な継続時間のスロースリップ現象が報告されている。継続時間が数十秒より短い深部低周波微動・地震や超低周波地震は地震計によって検知されている。また、継続時間数日の短期的スロースリップはボアホール型ひずみ計や傾斜計あるいはGNSSなどにより検知されている。継続時間が数十秒と数日の間のスロースリップ現象はあまり知られていない。ここでは、その間の継続時間を持つスロースリップ現象についてレーザー伸縮計とひずみ計のデータを用いて調査した。

我々は犬山観測点及び天竜船明観測点に設置されているレーザーひずみ計と気象庁・産業技術総合研究所が設置している及びボアホール型多成分ひずみ計のデータを用いて、継続時間1時間のスロースリップ現象を解析した。まず、観測ひずみデータとランプ関数との間の相関をとり、複数観測点において同時に相関が高くなる時間帯を見つける。その時間帯について宮岡・横田(2012)によるスタッキング手法により規模等を推定した。スタッキング法においては、断層位置・すべり方向を仮定して、ノイズレベルに基づい重みをつけて複数観測点のデータを足し合わせた。ノイズは対象とする時間帯の1～3時間前の範囲の値を評価した。推定された規模はM4.7からM5.0程度であった(図)。この規模は、Ida et al.(2007)によって提唱されたスロー地震のスケーリング則に調和的である。ただし、検出された信号のレベルはノイズに比べて明確に大きなものでなく、ソースの位置やすべり方向をデータだけから推定することは困難であった。ここでは短期的スロースリップの場所を仮定して規模を求めた。そのため解析対称は短期的スロースリップの発生時間帯に限られている。なお、微動活動の位置・発生時間帯を参照して検出を試みたが、有意な結果は得られていない。

図の説明
地図の青丸の位置は仮定した震源断層の位置を表す。用いた観測点の場所も示す。観測点に示す線分はひずみ計の方位を表している。灰色の点は、産業技術総合技術研究所が求めた深部低周波微動の震央である。下の図はスタッキングの結果を示す。中央の部分が検出した継続時間1時間のスロースリップ現象であり、規模はMw4.9と推定された。左側の2本の赤い波線で示す範囲でノイズレベルを評価した。

© The Seismological Society of Japan





© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

AM-1

chairperson:Fumiaki Tomita(IRIDeS, Tohoku University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

Fri. Oct 15, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM D (ROOM D)

[S03-05] Spatial and temporal characteristic of the early afterslip following the 2011 Tohoku-Oki earthquake deduced from onshore and offshore geodetic data

Putra MAULIDA[1], ○Yusaku OHTA[1], Ryota HINO[1], Takeshi IINUMA[2], Ryoichiro AGATA[2]
（1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.JAMSTEC）

9:00 AM - 9:15 AM

[S03-06] Spatio-temporal evolution of the slow slip event in Kumano-nada occurred during December 2020 to January 2021

○Takeshi Iinuma[1], Eiichiro Araki[1], Ryoichiro Agata[1], Yojiro Yamamoto[1], Toshinori Kimura[1], Yuya Machida[1], Keisuke Ariyoshi[1], Tsuyoshi Ichimura[2], Takane Hori[1], Syuichi Kodaira[1] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

9:15 AM - 9:30 AM

[S03-07] Seafloor crustal deformation off the east coast of Izu-Oshima volcano using the Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder

○Yuya MACHIDA[1], Shuhei Nishida[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Eiichiro Araki[1] （1.JAMSTEC）

9:30 AM - 9:45 AM

[S03-08] Application of a method for detections of slow slip events in Nankai region using ocean bottom pressure recorded by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)

○Tomohiro Inoue[1], Yoshihiro Ito[2], Tatsuya Kubota[3], Katsuhiko Shiomi[3], Kazuaki Ohta[3]
（1.Division of earth and planetary sciences, Graduate school of science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

9:45 AM - 10:00 AM

[S03-09] GNSS-Acoustic observations using a Wave Glider and the recent seafloor crustal deformation off Tohoku

○Fumiaki TOMITA[1,2], Takeshi Iinuma[2], Motoyuki Kido[1], Chie Honsho[3], Yusaku Ohta[3], Tatsuya Fukuda[2] （1.IRIDeS, Tohoku University, 2.JAMSTEC, 3.Graduate School of Science, Tohoku University）

10:00 AM - 10:15 AM

[S03-10] Time stability of sound speed structure affecting the GNSS-A seafloor geodetic observation and observation accuracy

○Yusuke YOKOTA[1], Shun-ichi Watanabe[2], Tadahi Ishikawa[2], Yuto Nakamura[2] （1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard）

10:15 AM - 10:30 AM

©Seismological Society of Japan

Spatial and temporal characteristic of the early afterslip following the 2011 Tohoku-Oki earthquake deduced from onshore and offshore geodetic data

Putra MAULIDA[1], *Yusaku OHTA[1], Ryota HINO[1], Takeshi IINUMA[2], Ryoichiro AGATA[2]

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. JAMSTEC

The Tohoku-Oki earthquake (M_w 9.0) struck northeast Japan on March 11, 2011. A dense onshore geodetic network in tandem with seafloor geodetic observations captured large coseismic and postseismic deformation. An understanding of the spatial and temporal evolution of the early afterslip, beginning immediately after such a massive interplate earthquake, is essential to understanding the frictional properties of the plate boundary. On this basis, we investigated the spatial and temporal evolution of the early afterslip following the 2011 Tohoku-Oki earthquake using on- and offshore geodetic data. To identify the distribution of early afterslip, we utilized geodetic observations from onshore Global Navigation Satellite System (GNSS) and Ocean Bottom Pressure gauge (OBP) sites to quantify postseismic deformation. We adopted the kinematic GNSS analysis to obtain a higher temporal resolution. We applied the common-mode error analysis and principal component analysis to improve the signal-to-noise ratio of the kinematic GNSS time series. To estimate early afterslip distribution, we utilized L1-norm regularization, which is characterized by regularization without smoothing. The main area of the estimated early afterslip was located off the shores of Iwate, Miyagi, Fukushima, and Ibaraki at a depth of 30–60 km. The slip was narrow along the dip direction with an along-strike variation. Several fault patches were estimated to occur offshore. These were estimated to explain the subsidence at the OBP sites. We examined the spatial relationship between the early afterslip with the down-dip limit of the interplate earthquakes and the distribution of the aftershocks. The estimated early afterslip distribution was consistent with the down-dip limit of the interplate earthquakes off Miyagi and Iwate. Several cross-sections along the strike direction clearly showed the different characteristics and locations of the afterslip and aftershock activities. For example, off Miyagi and Iwate, the location of afterslip tended to be in the up-dip portion of the larger afterslip area. In contrast, off Fukushima, the distribution of aftershocks was in the down-dip of the larger afterslip area. This discrepancy is attributed to along arc-variation with different structural characteristics. Based on the temporal evolution of afterslip, we emphasized the relationship between early afterslip evolution and the number of aftershocks. Aftershock–afterslip temporal evolution is consistent in almost every region, although the regions off Iwate and Miyagi showed a lack of aftershocks 30 hours after the mainshock, in contrast with the estimated early afterslip.

© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal evolution of the slow slip event in Kumano-nada occurred during December 2020 to January 2021

*Takeshi Iinuma[1], Eiichiro Araki[1], Ryoichiro Agata[1], Yojiro Yamamoto[1], Toshinori Kimura[1], Yuya Machida[1], Keisuke Ariyoshi[1], Tsuyoshi Ichimura[2], Takane Hori[1], Syuichi Kodaira[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

１．はじめに
2020年12月から2021年1月にかけて、紀伊半島南東沖のプレート境界においてスロースリップイベントが発生した。南海トラフからフィリピン海プレートが沈み込むこの領域においては、直上の海底ではDONET（Dense Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis、地震・津波観測監視システム）が運用されるとともに、IODP（International Ocean Discovery Program、国際深海科学掘削計画）の一部として構築された、LTBMS（Long-Term Borehole Monitoring System、長期孔内観測システム）によって、地震及び地殻変動の観測が行われている。LTBMSの備える間隙水圧計や地震計により、陸上の観測では十分に検出できなかった、南海トラフ近傍のプレート境界浅部で発生するスロースリップイベントが捉えられるようになってきており、今回のイベントに際しては、3つの孔内観測点（C0002、C0006及びC0010における間隙水圧変化や傾斜変動が観測された。さらに、同海域に設置された別の傾斜計（BMS1）やDONETの海底水圧計によっても、スロースリップイベントによると考えられる地殻変動が記録されている。本講演では、これらのデータを用いて、プレート境界面におけるすべり分布の時空間発展を推定した結果について紹介する。

２．解析手法
海底地殻変動データをもとにスロースリップイベントの時空間発展を把握するためには、プレート境界でのすべりと海底面及び海底下における地殻変動を結びつけるグリーン関数が必要である。今回の解析対象のように、変動源であるプレート境界と観測点との距離が近く、また、構造的な不均質が著しい場合には、それらの影響を正しく取り込んだグリーン関数を用いることが、精確なすべり分布の推定には不可欠である。さらに、特に傾斜変動には海底地形の効果も大きく表れると考えられるため、これらの情報を取り込んだ有限要素法モデルを構築して、プレート境界に配置した単位すべりによる各観測点での応答を計算し、これをグリーン関数として用いて解析を実施することとした。 解析には、3か所（C0006、C0010及びBMS1）での傾斜観測データ、LTBMS3点（C0002、C0006及びC0010）での間隙水圧観測データ、並びに、11点のDONET観測点での海底水圧データを用いた。海底水圧データに関しては、複数観測点からなるノードごとに基準点を選定し、それ以外の観測点の水圧データと基準点の水圧データとの差分をとることで、相対的な上下変位を見積ったうえで解析に使用した。観測期間全体を、観測データに見られる特徴によって9つの区間に分割し、それぞれの区間における傾斜・ひずみ・変位速度データをもとに、すべり速度の分布を推定した。 すべりの空間分布及び時間変化が滑らかになるように拘束をかけ、重みをABICによって最適化する逆解析手法を用いてすべりの時空間発展を推定したが、観測項目ごと及び観測点ごとのデータの重みづけなどに任意性が残ること、また、正断層型のすべりが顕著に求まることなどから、逆解析によって得られた結果を1次的なものとし、同時期に発生していた超低周波地震の震源分布も参考にしつつ順解析を2次的に実施して、最終的なすべり分布を得た。

３．結果
推定されたすべり分布からは、プレート境界の深い側から始まったスロースリップイベントが、深い側でのすべりを継続的に発生させつつ領域を浅い側へと広げ、南海トラフごく近傍（もしくは海底にまで）すべりが到達した様子が見て取れる。また、トラフ軸近傍にすべりが到達したのちも、同領域では2週間程度にわたってすべりが継続していたと考えられることも分かった。 今後、プレート境界面以外でのすべりの可能性や、グ

© The Seismological Society of Japan

リーン関数を計算するためのプレート境界面上のノード位置の影響等について検討し、得られた最終的な結果に基づいて発表を行う見込みである。

© The Seismological Society of Japan

Seafloor crustal deformation off the east coast of Izu-Oshima volcano using the Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder

*Yuya MACHIDA[1], Shuhei Nishida[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Eiichiro Araki[1]

1. JAMSTEC

海底における長期精密圧力計測は地震火山活動に伴う長期的な地殻変動の検知や、気象・海象などの長期的変動などの地球物理的な知見を得るために重要である。海洋研究開発機構では、伊豆大島直下にあるとされるマグマ溜まりへのマグマの供給プロセスを捉えることを目的とし、長期海底設置用水圧計（LT-OBPR: Long-Term Ocean Bottom Pressure Recorder）の開発を行い、2021年7月に伊豆大島東方沖に設置、観測を開始した。

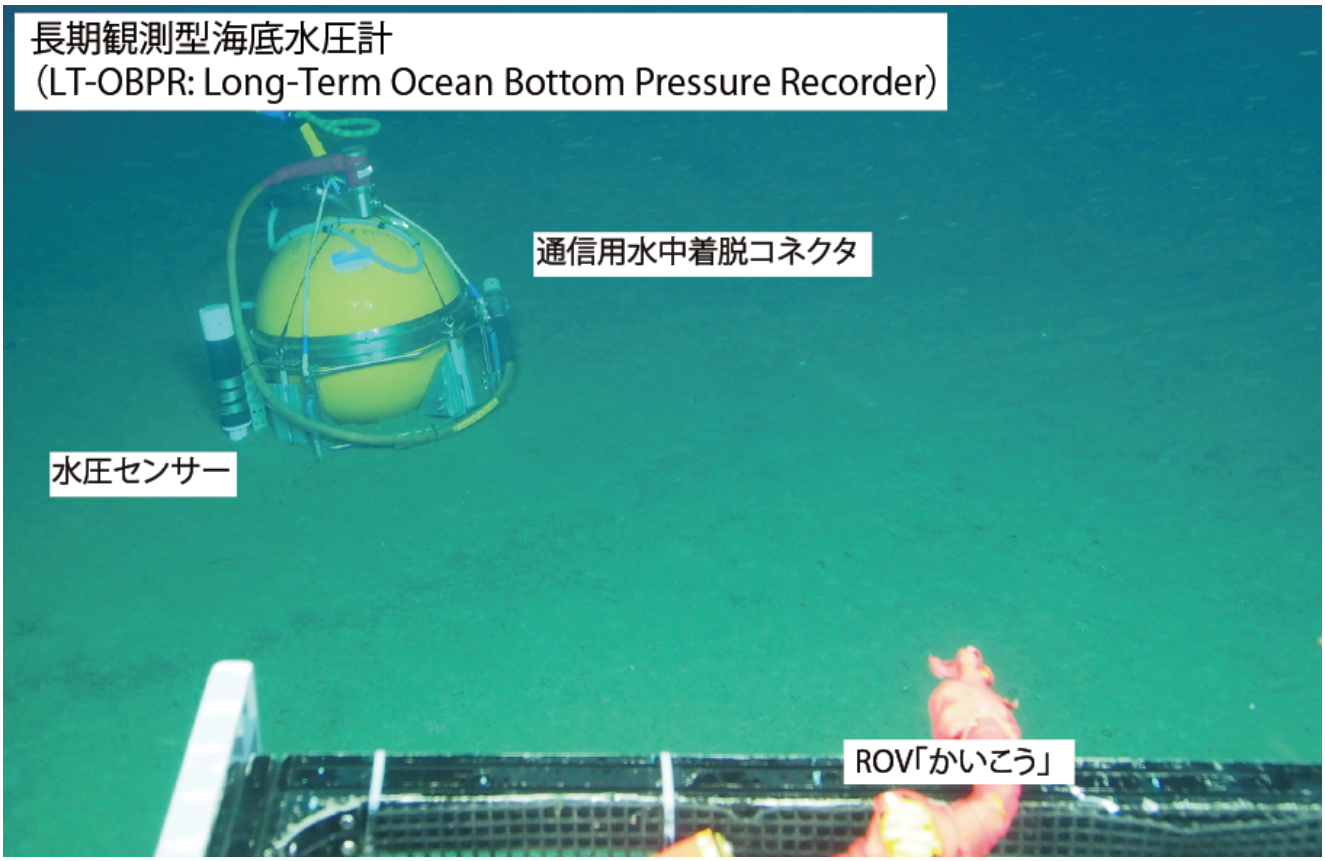
1. はじめに
伊豆大島火山は観測体制が整備された火山の１つであり、これまで1968年の噴火時を含めて地震活動や火山活動が詳細に捉えられてきた。特にGNSS観測網が整備されて以降、カルデラより深さ4-5 km程度にある圧力源（マグマ溜まり）が2-3年の周期で伸縮/膨張を繰り返していること（例えば地震研、第148回火山噴火予知連絡会）、それより深い約7 kmの位置に別の圧力変動源があることなどがわかっている（気象研技術報告69号）。また伊豆大島の南東沖5 km、深さ30 km~には深部低周波地震が発生しており、深部低周波地震の活発化と山体の膨張（歪変化）が同期するなど、より深部からのマグマの供給・蓄積プロセスが示唆されている（渡辺2012）。しかしながら伊豆大島火山の地殻変動を捉えるための観測網は島内にあり、特に深さ30km程度で示唆されている深部の圧力源の位置、深さを推定するのは難しい。そこで伊豆大島周辺海域において長期水圧観測を行い、深さ数kmにあるとされる浅部マグマ溜まりを圧力源とする長期的な地殻変動、さらにより深部を圧力源とする変動を捉え、そのマグマ供給・蓄積過程を明らかにすることを目的として伊豆大島における長期精密水圧計測を開始した。さらに伊豆大島の南東沖は1968年の噴火時に大きな地殻変動が見られたとされている領域であり、伊豆大島における火山発生のプロセスにおいてこの領域での長期的な地殻変動を捉えこの意義は大きい。そこでLT-OBPRを基点とて地殻変動が大きく見られるとされる領域に測線を設定し、その測線上に基準マーカーを3点設置し、その基準マーカーの水準を計測することで測線上における長期的な地殻変動を捉える試みを行う。

2. 長期海底設置用水圧計
長期水圧計測システムは南海トラフに設置されている地震・津波観測監視システム（DONET）や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）などで代表されるオンライン型の水圧計が多く展開されているが、伊豆大島周辺海域にはネットワーク観測網が展開されていないためオフライン型とした。このためLT-OBPRは低消費電力型で5年間の連続観測ができるようにした。LT-OBPRは直径650mmのチタン合金で作られた耐圧容器内に計測ロガー、バッテリーを組み込み、外側に圧力センサー、データ回収を行うための水中着脱コネクタ、浮力を調整するための錘が取り付けられている。LT-OBPRで使用する圧力センサーはParoscientific社の8B7000-2-005（周波数出力タイプ）を用い、実験室にて現場を模擬した環境（低温、高圧下）における長期ドリフト評価、および圧力ヒステリシス試験を実施した。また圧力センサーの基準周波数源として内部のクロックを使用し、内部クロックと原子時計（Microsemi社、CSAC SA.45s）を定期的に比較校正することで計測する圧力の精度を保証する仕様とした。

3. 設置、および今後の計画
LT-OBPRは2021年7月に実施されたKR21-08航海において伊豆大島東方沖、カルデラよりおよそ10 kmの位置に設置した。安定した計測を実施できるため比較的傾斜の緩い領域を選定した。設置はR/Vかいれいの観測ウインチを用いて海底面より数10mの位置まで降ろし、切り離しを行って自由落下により設置を行った。その後、ROV「かいこう」にてLT-OBPRの位置調整を行い、計測開始とした。今後は1年間隔程度で連続データの

© The Seismological Society of Japan

回収を行うとともに、水晶水圧計に見られる年間数hPa程度 (1 hPa = 1 cm) の機器的なドリフトを取り除くため、校正用水圧計（Machida et al., 2020）による校正を行うことを計画している。さらに基準マーカーも定期的に校正装置を用いて圧力の値付けを行い、LT-OBPRとの水準差を定期的に計測することを計画している。



© The Seismological Society of Japan

Application of a method for detections of slow slip events in Nankai region using ocean bottom pressure recorded by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET)

*Tomohiro Inoue[1], Yoshihiro Ito[2], Tatsuya Kubota[3], Katsuhiko Shiomi[3], Kazuaki Ohta[3]

1. Division of earth and planetary sciences, Graduate school of science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

海底圧力計(以降、OBP)は、スロースリップ(以降、SSE)に伴う海底の上下地殻変動をGNSS-A（GNSS音響結合方式）に比べ、時空間的に高解像度で連続的に観測可能な機器である。しかしながら、OBPにはスロースリップによる地殻変動に加えて、海洋起源の圧力変動が地殻変動と同程度またはそれ以上の振幅で記録される。また、長周期潮汐や海洋変動に伴う非潮汐変動の成分のいくつかは、その変動周期がSSEの継続期間と近い。このため、SSEに伴う海底地殻変動の検出に際して、海洋起源の圧力変動の適切な除去が必要となる。OBPから海洋起源の圧力変動を取り除く方法として、これまでに主に二つの手法（(i)単独観測点手法。(ii)複数観測点手法）が提案されている。(i)では、個々の観測点の時系列に対して海洋物理モデルを適用することで海洋起源の圧力変動（以降、非潮汐変動）を除去する（例えばMuramoto et al., 2019）。(ii)では、観測網内の非潮汐変動がコモンモードとして共通に観測されると仮定して、２つの観測点における時系列を差し引くことで相対変動を得る手法である（例えばIto et al., 2013; Wallace et al., 2016）。これまで観測点間の距離の増加に伴い、2点間の非潮汐変動の相関が低下すると考えられていた。最近、等水深に設置された観測点間で非潮汐変動の相関が高く、同等の水深に設置された観測点間の時系列記録について差を取ることで非潮汐変動を効率よく低減できることが指摘された (カスカディア: Fredrickson et al., 2019; ヒクランギ: Inoue et al., 2021)。

本発表では、潮岬一室戸岬沖に設置されているDONET２観測網によって観測される海底圧力記録を使用し、主に２つの内容について報告する。１）同海域における非潮汐変動の水深依存性と距離依存性。２）先行研究においてGNSS-Aによって検出されたSSE(2017.2–2018.4年, Yokota & Ishikawa, 2020)に対して、Nishimura et al. (2013)で使用されているΔAICを用いたSSE検出手法のOBPへの適用可能性。

海底圧力記録の事前処理について述べる。始めに、生データを平均化することにより１時間値を得る。次に、ローパスフィルターを適用し、２日未満の周期を持つ短周期潮汐、機器ドリフト及び年周半年周成分をそれぞれ除去した後、日平均値を１時間値から求めた。１）について、得られた時系列のうち欠測がない期間(2017年5月から2017年8月まで)について、全ての組み合わせの観測点ペアについて差分圧力時系列記録を得た。明瞭なSSEが含まれない期間において、差分時系列記録の平均値と標準偏差を求め、観測点ペア毎に得られる標準偏差をその水深差及び距離で比較することで、非潮汐変動の水深依存性と距離依存性を調べた。

結果、潮岬一室戸岬沖において観測される非潮汐変動は、強い水深差依存を示すことがわかった。全ての観測点ペアの水深差と標準偏差の値の分布から得られるR値は、高い相関値が得られた。また、観測点ペアの深い方の観測点の水深を４つの範囲（2000m以下、2000–2500m、2500–3000m、3000m以上）で区分しR値を推定した結果、それぞれ0.62、0.84、0.93、0.84となり比較的浅水に比べて深水で相関が高くなる傾向が見られた。これらの特徴は、カスカディアやヒクランギで得られた水深依存性と同様の傾向を示す。また、他の海域と同様に、距離依存性は水深差と比べて小さく、標準偏差と観測点ペアの距離と標準偏差で得られるR値は~0.3となった。

２）について、解析方法を述べる。先ず、事前処理後の時系列を使用して、設置水深が近い観測点間の差分圧力時系列を得る（例えば、M.MRE20(水深3603m)についてはM.MRG28(水深2499m)に対する相対圧力値）。次に、各観測点ペアにおいてΔAICを計算する。ΔAICの値は、差分時系列を単純な一次関数と、線形トレンドとステップ関数を組み合わせた関数による近似でそれぞれ得られるAIC(赤池情報量規準)の差分として計算される。なおΔAICの算出時には、Yokota&Ishikawa(2020)で報告されているSSE期間(2017.2–2018.4)の時系列は除外し、SSE前後それぞれ8ヶ月間の差分時系列を用いた。Yokota&Ishikawa(2020)で推定された

© The Seismological Society of Japan

SSE断層モデルから期待される地殻変動が大きい観測点で得られた相対圧力変動は約-5hPaであり、ΔAICに基づく評価でも有意な変動として検出された。得られた相対圧力変動量は、モデルから期待される地殻変動と調和的である。一方、期待される変動が小さな観測点では、得られた相対地殻変動も小さく、明瞭な変動とはならない。つまり、2017年2月から2018年4月に潮岬一室戸岬沖で発生したSSE(Yokota&Ishikawa, 2020)に伴う圧力変動を本手法でも検出できた可能性を示す。すなわち、OBP記録を用いたΔAIC に基づくSSE検出手法の妥当性を示す結果と言える。今後は、既存SSEの期間外にもΔAICを適用し、小規模のSSEも含めたイベントの検出に取り組み、このDONET2海域で発生するSSEとプレート沈み込みによる滑り収支を解明する。

© The Seismological Society of Japan

GNSS-Acoustic observations using a Wave Glider and the recent seafloor crustal deformation off Tohoku

*Fumiaki TOMITA[1,2], Takeshi Iinuma[2], Motoyuki Kido[1], Chie Honsho[3], Yusaku Ohta[3], Tatsuya Fukuda[2]

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. JAMSTEC, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

GNSS音響測距結合方式の海底地殻変動観測（GNSS-A観測）により，地震サイクルに伴う海域における地殻変動が捉えられるようになってきている [e.g., Honsho et al., 2019, JGR]．GNSS-A観測では，海上でのGNSS測位及び海上-海底間の音響測距を行うための海上プラットフォーム（海上局）が必要であり，一般的に船舶を海上局とした観測が行われてきた．しかし，船舶を使用したGNSS-A観測は，人的・金銭的なコストが高いことが問題である．こうした高いコストが，近年増設が進んでいる多数のGNSS-A観測点において観測を高頻度で実施する上での障害となっている．海洋研究開発機構と東北大学では，波の力により無人航行可能なウェーブグライダーを海上局とした長期自律型のGNSS-A観測システムの開発に取り組んでいる。2019年7月に単独観測点での短期間の試験観測を実施し，ウェーブグライダーを用いた観測によって船舶と同程度の精度で海底地殻変動の検出が可能であることを示した [Iinuma et al., 2021, Frontiers in Earth Science]．その後，１ヶ月程度の長期的なウェーブグライダーの運用による複数点での網羅的な観測を含め，2020年中に北三陸沖合の観測点において計３回の観測（6–7月・10月・11–12月）の実施に成功した [富田・他，JpGU2021]．本発表では，上記の観測とその成果に加え，2021年4–5月に新たに実施した長期観測とその成果について紹介する．
ウェーブグライダーには，GNSS-A観測用機器として，2つのGNSSアンテナ（海上局位置計測及びGNSSジャイロによる姿勢2成分（Heading, pitch）計測用），音響船上装置，音響トランスデューサ（音響測距データ取得用），MEMSジャイロ（姿勢3成分計測用）を搭載した他，観測データの取得状況の確認及び陸上転送のためのThuraya衛星通信機器を搭載している．2021年4–5月の観測において，ウェーブグライダーは，新青丸 KS-21-05航海にて4月6日に根室沖のG22観測点で投入され，48日間の観測を経て，傭船航海にて5月25日に宮城県沖のG14観測点で回収された．この間，合計で17観測点にてGNSS-A観測を実施した．北三陸沖において，局所的な強い海流の影響を受け，ウェーブグライダーが観測点から流されることが数回発生したものの，網羅的な観測の実施に成功した．また，これまでのウェーブグライダーを用いた観測では，同機の移動速度を考慮して中心での定点（具体的には，100 m程度の半径での8の字航走）観測のみを実施していたが，音速勾配や上下変動成分の検出のため，海底局アレイの広がり程度の半径の円に沿った航走観測も実施した．
ウェーブグライダーによって取得した観測データを処理し，海底局アレイ変位の推定を行った．推定では，Honsho et al. [2019]の手法に基づき，海面から一定深度までの音速勾配層を仮定した解析を実施した．2016年以前の東北沖におけるGNSS-A観測はどの観測点でも年1回程度は行われていたが，2016年以降は上記の運用コスト等の問題によりほとんど観測を行うことができていなかった．しかし，ウェーブグライダーの導入により2020年以降，宮城沖県～青森県沖の観測点で網羅的に観測を行うことができた．その結果，岩手県沖以北の観測点では，変動自体は小さいものの， 2015年に発生したSSEの影響もあるために，変動の向きが2016年以降やや変わっている様子が見られた．また，宮城県沖の観測点は粘弾性緩和による顕著な陸向きの変動が継続的に生じている様子が確認された一方，その変動速度はやや小さくなっている傾向が見られた． 本発表では，上記のウェーブグライダーによる観測の概要に加え，その結果を基にした東北沖北部の余効変動の水平成分についての議論を行う．

© The Seismological Society of Japan

Time stability of sound speed structure affecting the GNSS-A seafloor geodetic observation and observation accuracy

*Yusuke YOKOTA[1], Shun-ichi Watanabe[2], Tadahi Ishikawa[2], Yuto Nakamura[2]

1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

GNSS－音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測では，海中の音速構造の傾斜状態が精度に大きく影響する．GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）では海面を移動する海上局と海底局間距離を利用した2つのパラメータで傾斜による影響を抽出しており，それによって海底局位置の決定精度の向上と海中構造の概観を捉えることができる（Yokota et al., 2018, MGR; Yokota and Ishikawa, 2019, SNAS）．これまでの調査でこの2つの傾斜構造パラメータのうち，海底局間距離による抽出パラメータを実軸（*Re***G**），海上局の移動による抽出パラメータを虚軸（*Im***G**）にとった場合の複素数**G**の角度arg**G**はほとんどの観測機会において，π/3～π/2（π*4/3～π*3/2）の範囲に収まることがわかっている．その中でも，π/2や0～π/3（π*3/2やπ*4/3～π）の範囲を取る場合に局位置のばらつきが大きいことが確認されている（横田ほか, 2020, 地震学会）．本稿では，その原因について考察する．

各観測エポックにおける**G**の状態を調べたところ，局位置のばらつきが大きい場合には，観測時間内におけるarg**G**が変化し，**G**の虚軸に対する切片が０周辺にないケースが多いことがわかった．またこの時，**G**の傾き（$\kappa = \Delta Re\mathbf{G} / \Delta Im\mathbf{G}$）をarg**G**として拘束した上で，改めてGARPOSによる解析を行うことで，局位置のばらつきが軽減されることもわかった．

これらの結果はすなわち，*Re***G**と*Im***G**の絶対値の推定には誤りがあったが，κは正しく推定できていたと解釈できる．GARPOSでは*Re***G**と*Im***G**はそれぞれ時間方向に滑らかな関数で推定している．その中で，*Re***G**と*Im***G**はそれぞれ何らかの要因によってバイアス誤差を持ってしまう可能性がある．一方で，それらの時間変化の比に当たるκはバイアス誤差影響を受けても影響がないため，*Re***G**と*Im***G**に比べると正しい推定となっていると考えられる．**G**の傾きをarg**G**として拘束した場合に局位置のばらつきが軽減されるということは，多くのエポックで**G**の傾きの時間変化は観測時間（4～12時間程度）内で安定していたことを示唆する．arg**G**がある範囲を取る場合に局位置のばらつきが大きく見えるのは，このような**G**の推定における誤りが局位置推定に反映されやすい範囲だからであると考えられる．

上記の議論と検証によって，傾斜パラメータの時間変化の特徴を考慮することでGNSS-A解析の精度が向上することがわかった．ただし，ここで検証に用いた方法では2段階の解析（κを決めるための1st cycleとarg**G**を拘束した2nd cycle）を要する．また，観測点ごとに時間変化の安定性が異なることも想定される．今後は，上記の海洋場の特徴量を直接推定する解析方法について考察する必要がある．

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S11. Various phenomena associated with earthquakes

AM-2

chairperson:Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada(Tohoku University)

Fri. Oct 15, 2021 11:00 AM - 11:15 AM ROOM D (ROOM D)

[S11-01] Turbidity current associated with 2003 Tokachi-oki earthquake recvisited

○Ryoichi IWASE[1] （1.JAMSTEC）

11:00 AM - 11:15 AM

©Seismological Society of Japan

Turbidity current associated with 2003 Tokachi-oki earthquake recvisited

*Ryoichi IWASE[1]

1. JAMSTEC

2003年9月26日04:50 JSTに発生した十勝沖地震(MJ 8.0)の際、震央の東南東約25 kmの海底に位置する釧路・十勝沖「海底地震総合観測システム」先端観測ステーション（水深：2540 m、以下「先端観測ステーション」）では、電磁流向流速計により最大流速が約1.5 m/s に達する混濁流が捉えられた。通常より流速が大きい状態は17時間以上継続し、この間サンプリング周波数 100 Hzのハイドロフォン信号上では特異な信号が検出された。その特徴は混濁流の到達後8時間は10 Hz未満の比較的広帯域の信号だが、その後はピーク周波数が 1 Hz程度の信号が約4時間継続している。後者のピーク周波数に関しては、衝突理論(Impact theory)を基にした河床土砂移動の研究において報告されている関係式から音源を構成する物体の直径を推定すると数十mの巨岩となってしまう（岩瀬, 2017）。
一方、同じ先端観測ステーションに取り付けられている音響層別流速計(acoustic Doppler current profiler, ADCP)について、1999年の設置以来2016年まで取得されたデータの復旧を進めている（岩瀬, 2021）。データ取得時の伝送エラーに起因するビットエラー等によりメーカー（Teledyne RDI Instruments）提供ソフトウェアWinADCPでは再生できないデータについても、メーカーのドキュメントを基にして直接ascii変換することにより、一部の再生不能データについても再生可能となっている。十勝沖地震時のデータについても同ソフトウェアでは混濁流の到達後の5時間までしか再生できない状態であったが、それ以降のデータも再生可能となった。そこで今回、この混濁流について改めて考察を行った。
ADCPは48層の鉛直流速プロファイルを取得している。各層の厚さは8 mで、最下層の海底からの高度は12 mである。サンプリング間隔は30分としている。Fig.1及びFig.2にそれぞれ最下層（高度12 m）及び高度76 mの流速プロファイル（水平流速、流向、及び鉛直流速）を示す。Fig.1では7時に混濁流が到達し、7時半に水平流速が1.5 m/s弱に達し、同時に下向きの流速が増加している。流向は当初南西向きの流れであり、18時以降徐々に西向きの流れが卓越している。一方、Fig.2で大きな流速はないものの、混濁流到達時には東向きの流れが卓越し、12時頃以降には北向きの流れが卓越しており、低層と上層での流れが異なる状況を示している。一方、海底地形を見ると先端観測ステーション付近は南下がりの斜面となっており、必ずしも混濁流の流向と整合しているとは言えない。また最下層では観測期間を通じて西向きの流れが卓越している。
ADCPは流速だけでなく、音響信号の後方散乱強度も計測している。この散乱強度は、懸濁物量と相関がある。観測期間全体の傾向として、散乱強度は、春から初夏にかけてピークを有する傾向が見られる。岩瀬(2021)では静止画による海底画像観測における底生生物の増加傾向から、海面におけるスプリングブルームとの関係を指摘したが、その後、十勝川および釧路川水系の流量変化と比較したところ，比較的良い相関が見られることが分かった。このことから、雪解けや大雨による物質流入の可能性も考えられる。
以上の状況を整理して報告する。

参考文献
岩瀬(2017)、2017年度地震学会秋季大会講演予稿集、S11-01.
岩瀬(2021)、JpGU2021、AOS19-02.

© The Seismological Society of Japan

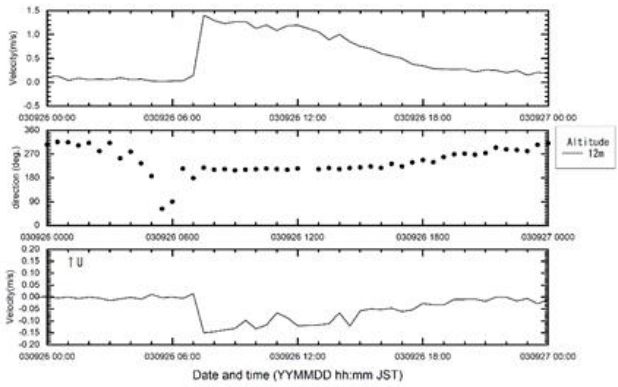


Fig.1 ADCP ptrofile (altitude: 12 m)

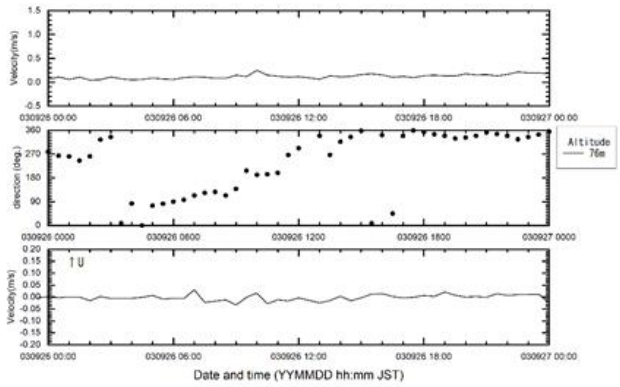


Fig.2 ADCP ptrofile (altitude: 76 m)

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

AM-2

chairperson:Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Tomomi Okada(Tohoku University)

Fri. Oct 15, 2021 11:15 AM - 12:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S02-01] An investigation of mechanical characteristics of energy source in seismic reflection survey using underwater speaker

○Kazuki Takanaka[1], Rema Kurosawa[1], Tetsurou Turu[1] （1.Tokyo university of Marine science and Technology）

11:15 AM - 11:30 AM

[S02-02] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor off Boso Peninsula 2

○Hajime SHIOBARA[1], Toshinori Sato[2], HyeJeong Kim[1], Yuki Kawano[1], Haruka Nagai[1], Aki Ito[3], Masanao Shinohara[1], Hiroko Sugioka[4] （1.ERI, Univ. Tokyo, 2.Chiba Univ., 3.JAMSTEC, 4.KOBEC, Kobe Univ.）

11:30 AM - 11:45 AM

[S02-03] To what extent can stationary seismic observation network detect small landslides using short-period seismic waves?

○Issei DOI[1], Takuto MAEDA[2], Aitaro KATO[3], Tetsuya TAKEDA[4], Hidehiko MURAO[5] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 3.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5.Murao Chiken）

11:45 AM - 12:00 PM

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (1)

○Shigeki NAKAGAWA[1], Hiroshi AOYAMA[2], Hiroaki TAKAHASHI[2], Takuto MAEDA[3], Naoki UCHIDA[4], Mare YAMAMOTO[4], Kazuo OHTAKE[5], Hiroshi TSURUOKA[1], Yosuke AOKI[1], Yuta MAEDA[6], Shiro OHMI[7], Haruhisa NAKAMICHI[7], Makoto OKUBO[8], Takeshi MATSUSHIMA[9], Hiroshi YAKIWARA[10], Katsuhiko SHIOMI[11], Kenji UEHIRA[11], Hideki UEDA[11], Kazuki MIYAOKA[12], Koji TAMARIBUCHI[13], Ryou HONDA[14], Shutaro SEKINE[15] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Hokkaido University, 3.Hirosaki University, 4.Tohoku University, 5.Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6.Nagoya University, 7.Kyoto University, 8.Kochi University, 9.Kyushu University, 10.Kagoshima University, 11.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12.Japan Meteorological Agency, 13.Meteorological Research Institute, JMA, 14.Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15.Association for the Development of Earthquake Prediction）

12:00 PM - 12:15 PM

©Seismological Society of Japan

An investigation of mechanical characteristics of energy source in seismic reflection survey using underwater speaker

*Kazuki Takanaka[1], Rema Kurosawa[1], Tetsurou Turu[1]

1. Tokyo university of Marine science and Technology

１． はじめに

近年、沿岸域を震源とする地震の活断層調査や海洋開発に向けた地盤調査など、沿岸域での地下構造探査需要が増加している。地下の構造形態を高精度に映像化する手法として、地殻構造探査や石油探査分野で広く使用されて来た反射法地震探査は、人工的に地震波を発生させ、地層境界面から跳ね返ってくる反射波を受振し解析することによって、地下構造を推測する探査手法である。この探査手法の問題点として、振源から発振されるパルス波によって海洋性哺乳類や生態系への影響があると考えられていること、そして大規模な探査システムであることから、船舶の交通の障害となるため探査海域が制限されてしまうことの二点が挙げられる。これらの問題点を解決すべく、東京海洋大学探査工学研究室では、従来振源と比較して音圧が小さいため海洋生物への影響が小さく、また、小型で安価なため沿岸域での複数振源としての運用が可能といった利点をもつ水中スピーカーを振源に利用した探査システムの開発に取り組んでいる。これまで、東京湾などでの海上試験において、二次元地震探査データの取得および三次元データ取得のための波動場分離精度の検証などを実施した。前者としては、海底下数十mまでの地下構造を映像化できることを実証した（Tsuru et al. 2019, EPS）。後者においては、3個の水中スピーカーを用いた同時発振実験で問題なく波動場分離ができることが検証された（小川, 2021）。 観測データの品質の更なる向上を目指し、振源波形の最適化に関する研究を実施している。たとえば、陸上のバイブロサイス振源で使用されている周波数を変化させるスイープ波に対し、当研究室では疑似ランダム波を用いている。それにより、観測波形との相互相関後の記録におけるサイドローブを抑制することができる。 しかし、水中スピーカーが、疑似ランダム波を正確に発振しているかどうかは未だ検証されていない。すなわち、振源波形として疑似ランダム波を用いる場合、水中スピーカーの機械特性に起因する発振波形の歪がどの程度生じるのかは不明である。もし、実際の発振波形が歪んでいるとしたら、相互相関後の波形におけるS/N比を低下させているはずである。そこで、本研究では、水中スピーカーの機械特性による発振波形の歪の検証を目的として、発振波形の観測を試みた。さらに、観測した発振波形を利用することによりデータ品質の向上を図った。

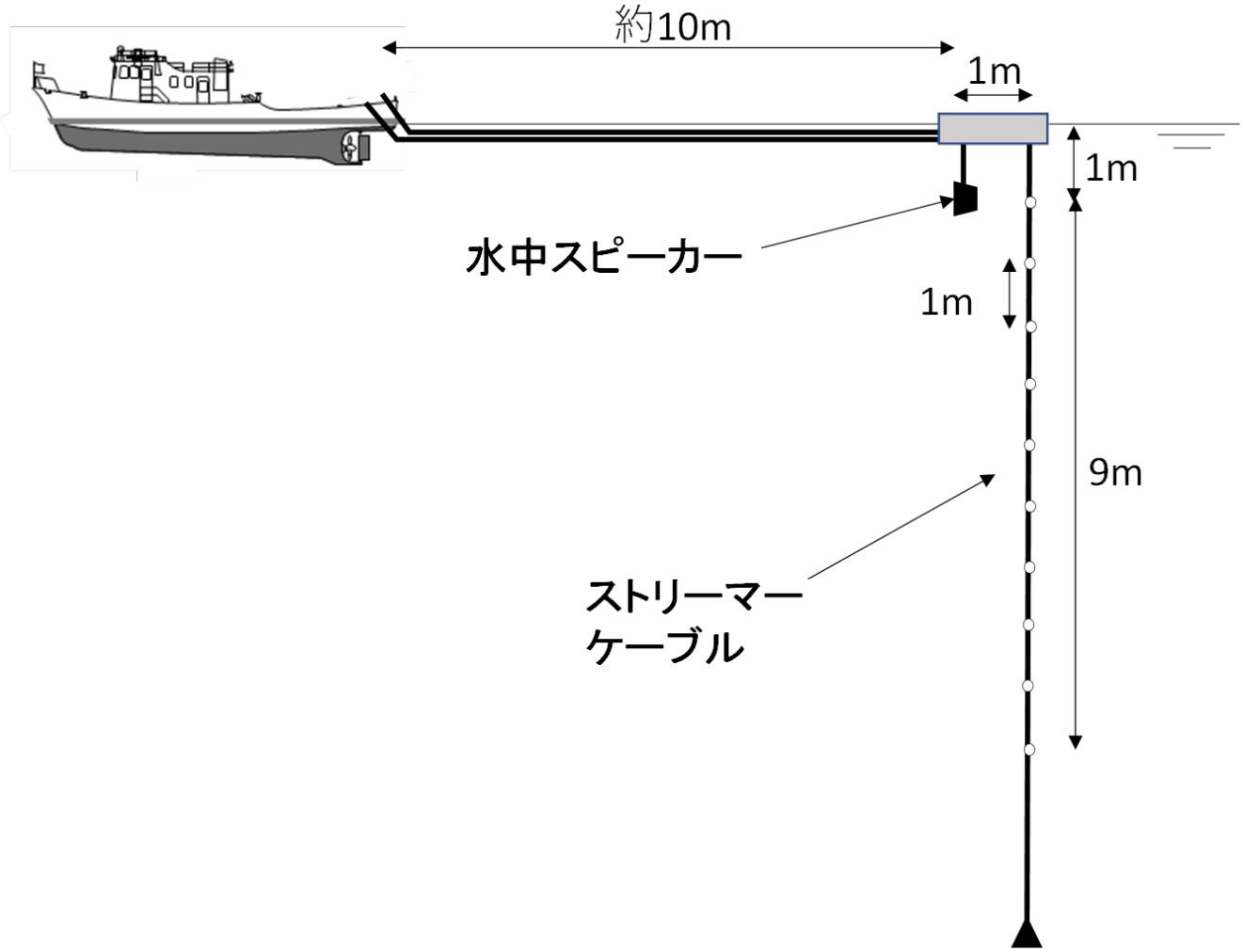
2． 発振波形観測実験の概要

2021年7月20日、沼津沖内浦湾の水深80～100mの海域において、発振波形の観測実験を行った。測定仕様は右図に示す通り、10チャンネルのストリーマーケーブルを鉛直方向に展開した状態で、複数回発振を行った。それらの記録を重合することにより、海底面などからの反射波が抑制され、ノイズの少ない観測波形が得られる（東京海洋大学, 2021；特願2020-217557）。調査に使用した船舶は、株式会社オキシーテックの計測船「ひびき」（19トン）である。

３．結果およびまとめ

実験結果によれば、疑似ランダム波を使用する場合、水中スピーカーから発振される波形はオリジナル波形（発振用に作成された振源波形）とはかなり異なっていた。また、観測した発振波形を用いて観測波形と相互相関した結果は、オリジナル波形との相互相関と比べ、明らかな品質向上効果が見られた。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor off Boso Peninsula 2

*Hajime SHIOBARA[1], Toshinori Sato[2], HyeJeong Kim[1], Yuki Kawano[1], Haruka Nagai[1], Aki Ito[3], Masanao Shinohara[1], Hiroko Sugioka[4]

1. ERI, Univ. Tokyo, 2. Chiba Univ., 3. JAMSTEC, 4. KOBEC, Kobe Univ.

1. はじめに

機動的な海底傾斜変動観測の実用化に向け、新型の広帯域海底地震計(BBOBS-NX)[1]を基にしたBBOBST-NXによる長期観測について2014年・2017年の地震学会で報告した[2][3]。今回は、2015年に設置し5年ぶりに回収した房総半島南東沖に設置していたBBOBST-NXの観測結果を紹介する。

2. 計測・処理方法

BBOBS-NXでは独立した広帯域センサー部が海底面に大半埋設されており、底層流の影響による傾斜変動はほぼ無い。自由落下して貫入するため海底堆積層との結合も良好である。広帯域センサーの水平動2成分のマスポジション信号(加速度出力)を速度信号3成分と併せ連続記録するBBOBST-NXは、広帯域地震・傾斜変動を同時観測できる。実際に得られた記録には、広帯域センサーの経時変化とマスのセンタリングによるシフトが見られる。シフトの前後で記録はほぼ連続しており、シフト分を補正した後に適当な関数(1次＋対数)をgnuplotを使い当てはめ、経時変化を差し引き、傾斜変動の記録を得る。海底での潮汐による傾斜変動は約0.1μradと小さいがbaytap08プログラム[4]を適用して潮汐成分を取り除く。

3. 長期試験観測

本観測は房総半島南東沖で繰り返しSSEが発生している領域で2015年7月から2年間の長期試験観測を予定した。これまでの同様な観測時には数10～100m離れた場所に流向流速計を設置して水温等も記録していたが、この観測では自記式精密水温計(10分サンプリング)のみをBBOBST-NXの外装に取り付けた。2017年・2019年に回収航海があったが悪天候などで作業出来ず、2020年10月のYK20-15S「よこすか・しんかい6500」航海でやっと回収し、観測を継続するために新規のBBOBST-NXと海底電磁流向流速計(OBEMC、距離25m)、および別2地点での海底圧力計(OBP)の設置も行った。BBOBST-NXは設置から5年経過していたが内部時計はバックアップ電池で稼働しており、データの時刻精度も確保出来た。水温データは4年以上取得されていた。

4. 水温変化と傾斜変動

今回のマスポジションデータは、2年間でマスのセンタリングがほぼ無いほどに安定していた。基本的な処理を済ませた傾斜変動には、2成分共に水温変化との明確な関連性が見えた(図)。以前、同じ個体のセンサーで取得した結果[5]では、傾斜変動と水温変化の関係が明確に示せなかったが、今回はセンサー近傍での水温計測のためか温度依存性(ほぼ-30μrad/˚C)が確認できた。過去の傾斜変動と水温変化の関係を見て、全て共通して負の温度係数で傾斜値が変化していることから、水塊移動によるものではなく、センサー自体の機械的温度依存性であると判断できる。この水温変化の影響を傾斜変動から除去する方法を試し、周波数領域で温度係数を推定してその分を差し引くことにした。同じセンサーによる過去2回の傾斜記録に対しても同様な処理を行ったが、水温計測地点が離れていたためか、温度係数がやや異なった。この処理後でも2014年のSSE時の傾斜変動は明確にあると見える。

5. まとめ

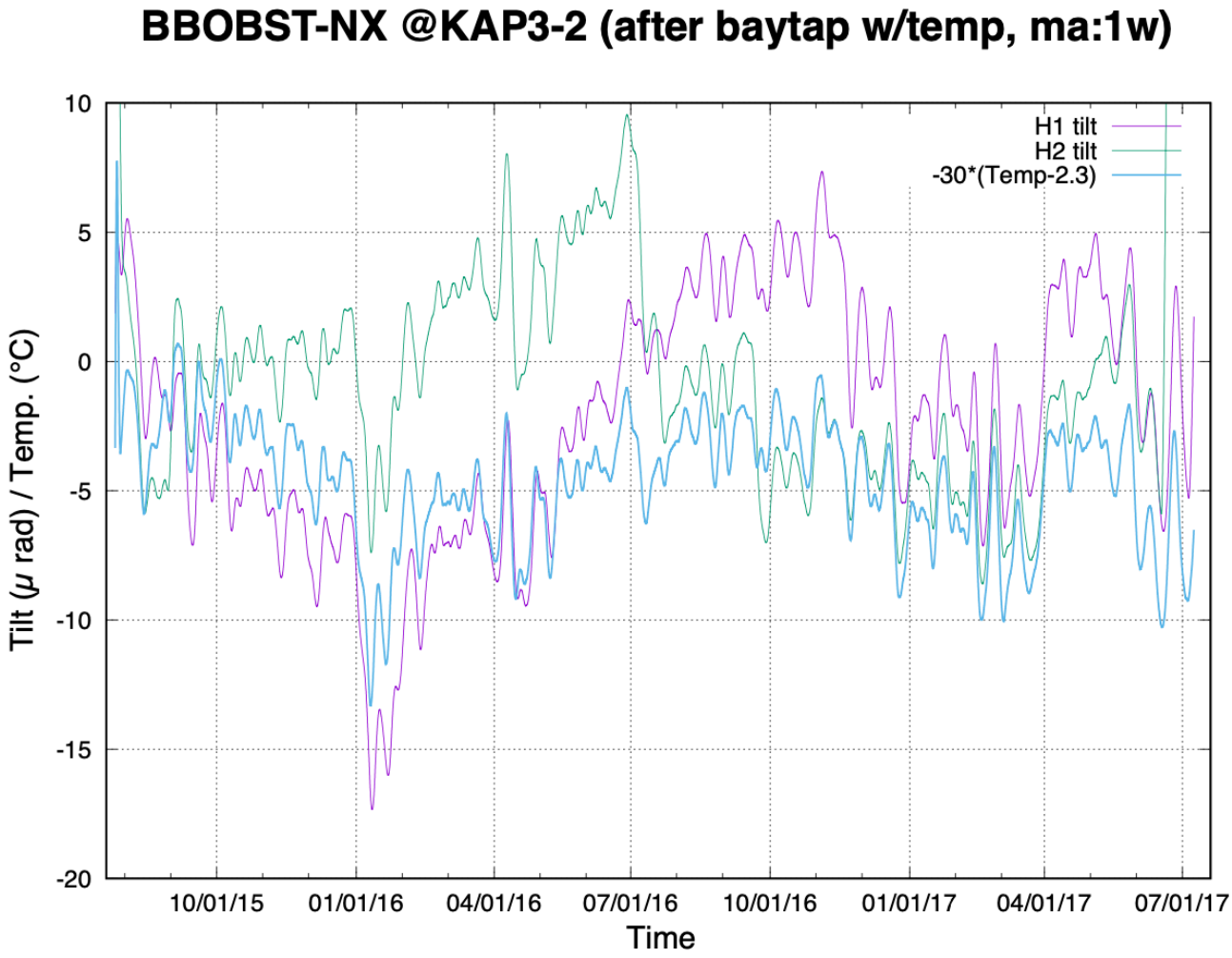
今回はSSEが起きていない2年間のBBOBST-NXによる傾斜観測から、水温変化の計測と温度係数の推定が重要なことが明確となった。温度係数のオーダーから、水温変動が0.1˚Cにも達しないような深海底では問題にならないかもしれないが、今後、傾斜変動観測するには、埋設される広帯域センサー部内での精密温度測定が

© The Seismological Society of Japan

必要になると考えている。

参考文献

[1] Shiobara, H., T. Kanazawa and T. Isse, *IEEE-JOE*, 38, 396-405, 2013.
[2] 塩原・他, *日本地震学会秋季大会*, C32-09, 2014.
[3] 塩原・他, *日本地震学会秋季大会*, S02-07, 2017.
[4] Tamura, Y., et al., *GJI*, 104, 507-516, 1991.
[5] Shiobara, H., et al., *Front. Earth Sci.*, 8:599810, 2021.



© The Seismological Society of Japan

To what extent can stationary seismic observation network detect small landslides using short-period seismic waves?

*Issei DOI[1], Takuto MAEDA[2], Aitaro KATO[3], Tetsuya TAKEDA[4], Hidehiko MURAO[5]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Murao Chiken

１． はじめに

斜面崩壊の発生をいち早く知ることは、被災者の迅速な把握や交通の安全な運行の確保など斜面災害の防災、減災にとって大変重要である。近年、斜面崩壊が励起する震動を定常地震観測網の地震計が記録する事例が報告されている。Suwa et al. (2010) は奈良県王塔村における大規模な岩盤地すべりによる震動を周辺の複数の地震計が捉えたことを報告した。さらに、定常高感度地震観測網の地震波形記録を用いてそれらの発生場所が数 km の精度で推定できることが例証されてきた（e.g. Yamada et al., 2012; Doi and Maeda, 2020）。これらのことから、地震観測によって斜面崩壊がリアルタイムに検知されることが期待されるが、どの程度の大きさの斜面崩壊がどのくらい離れて検知可能か、どのようなタイプの斜面崩壊であれば検知されやすいかなど、解明されていないことが多々残されている。これらの解決にはさらなる事例の蓄積が必要である。そこで本研究では、これまで発生したさまざまなスケールの斜面崩壊に対して、周辺の定常地震観測網の観測点の網羅的な調査をおこなった。斜面崩壊による地震動が検知されていないかを調べ、検知されていた場合には、震源決定によって崩壊源の推定が可能かを明らかにした。

２． 方法

斜面の崩壊範囲の大きさが数十メートル四方以上であり、斜面崩壊の発生時刻が文献などによって1時間程度の範囲でわかっている2011年から2021年までの全22事例に対して検討をおこなった。まず、近傍のHi-netと気象庁の地震観測点における地震波形記録やそのランニングスペクトルから、既往研究（例えば、Dammeier et al., 2011）において観察されている斜面崩壊に由来する地震波形の特徴と照合した。「崩壊発生時刻と合致すること」「卓越周波数が 0.5-10 Hz の中に含まれること」「継続時間が10秒以上であること」のすべての条件を満たした波形について斜面崩壊を検知した可能性があるものとした（一つでも満たさないものは「検知されず」とした）。続いて、同一事例に対して斜面崩壊を記録した可能性がある観測点数と、波群の伝播や振幅の特徴から、斜面崩壊を検知したかどうかについて、下記のような確度に応じて分類した。

・ 確度Ⅰ： 観測点3点以上で検知され、ASL法（Kumagai et al., 2010）あるいはレコードセクションにおける震源が斜面崩壊位置と矛盾しない。
・ 確度Ⅱ： 観測点2点で検知される、または、観測点3点以上で検知されたものの震源決定ができない。
・ 確度Ⅲ： 観測点1点で検知され、当該波群の特徴に類似する波群が前後の時間帯に存在しない。
・ 不明： 確度ⅠからⅢ以外。

３． 結果

解析した22事例のうち、確度Ⅰが5事例、確度Ⅱが2事例、確度Ⅲが3事例、その他の12事例は検知されずとなった。確度Ⅰの事例において崩壊体積は10^4 m^3（斜面崩壊位置から地震観測点までの最小距離は約 7 km）から10^6 m^3であった。また、地震計で検知されなかった12事例における崩壊体積は2×10^3 m^3から4×10^4 m^3（（斜面崩壊位置から地震観測点までの最小距離は約 4 km）であった。斜面崩壊位置から観測点までの距離が極端に小さい場合を除き、体積10^4 m^3程度の斜面崩壊から定常地震観測網によって検知されうる一方で、崩壊体積が大きくとも検知されないか確度が落ちる場合が見られた。本研究によって斜面崩壊と地震動の関係の有無が数多くの事例について明らかになった。今後は地震観測記録に基づく斜面崩壊の自動検知を目指し、斜面崩壊の形態や特徴との対応、ノイズレベルの検討などを進めていく。

© The Seismological Society of Japan

謝辞）　防災科学技術研究所高感度地震観測網および気象庁の地震波形データを使用させていただきました。記して感謝申し上げます。なお、本研究はJSPS科研費 JP21K18792の助成を受けたものです。

© The Seismological Society of Japan

Development of multi-platform next-generation WIN system (1)

*Shigeki NAKAGAWA[1], Hiroshi AOYAMA[2], Hiroaki TAKAHASHI[2], Takuto MAEDA[3], Naoki UCHIDA[4], Mare YAMAMOTO[4], Kazuo OHTAKE[5], Hiroshi TSURUOKA[1], Yosuke AOKI[1], Yuta MAEDA[6], Shiro OHMI[7], Haruhisa NAKAMICHI[7], Makoto OKUBO[8], Takeshi MATSUSHIMA[9], Hiroshi YAKIWARA[10], Katsuhiko SHIOMI[11], Kenji UEHIRA[11], Hideki UEDA[11], Kazuki MIYAOKA[12], Koji TAMARIBUCHI[13], Ryou HONDA[14], Shutaro SEKINE[15]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction

１．はじめに

地震・地殻変動等の時系列データの伝送や験測処理に広く用いられているWINシステム（卜部・東田，1991；卜部・東田，1992；卜部，1994など）は，開発から25年以上が経過しUnix上のX-window環境でなければ動作しないという制限があるにも関わらず，代替となるソフトウェア群がないために大学等の基幹システムとして使い続けられており，伝送系や自動処理系における設定等は扱いに熟練したスタッフの口伝や試行錯誤に大きく依存しているのが現状である．特に現在の対話験測処理ソフトウェアは機能向上を図ることが難しく，験測処理の高度化や迅速な情報発表を図る上での障害となりつつある．一方，この四半世紀で，ハードウェアの性能が大幅に向上したほか，マルチプラットフォームに対応した言語や対話処理に優れた入力デバイスの開発・淘汰が進み，ハードウェア環境に依存しないソフトウェア群の構築が可能になってきた．そこで，WIN形式データのリアルタイム伝送が機関の枠を超えた全国規模のデータ流通の基盤となっていることを踏まえ，定期的に更新が進められてきた防災科研や気象庁のデータ伝送システムや対話験測処理システムを参考にしながら，マルチプラットフォームのソフトウェア群（次世代WIN）の開発を進めることとした．

２．現行システムの課題と次世代システムへの要望

開発を進めるにあたり，まず，現WINシステムにおける課題と次世代システムへの要望の意見集約を行った．WINシステムに関連の深い研究者や技術者にメール等によりアンケート調査を実施し，18機関（北海道大学，東北大学，東京大学，名古屋大学，京都大学，高知大学，九州大学，鹿児島大学，琉球大学，防災科学技術研究所，神奈川県温泉地学研究所，気象庁，気象大学校，地震予知総合研究振興会，企業4社）から回答を得た．

調査の結果，次のような課題と要望が寄せられた．昨今の観測網の高密度化に伴うデータ量（チャネル数）の増大，観測項目の多様化，通信の高速化，再送機能の充実，高精細かつ多色表示可能な操作環境への対応が検討事項として挙げられていた．また，WINシステムでは標準的にhypomh (Hirata and Matsu’ura, 1987)が震源計算に使われているが，それ以外の震源計算プログラムや他の解析プログラム（メカニズム解析など）への対応，WINシステムのチュートリアルの充実なども課題として挙げられていた．

３．対話験測処理系システムの試作と今後の展望

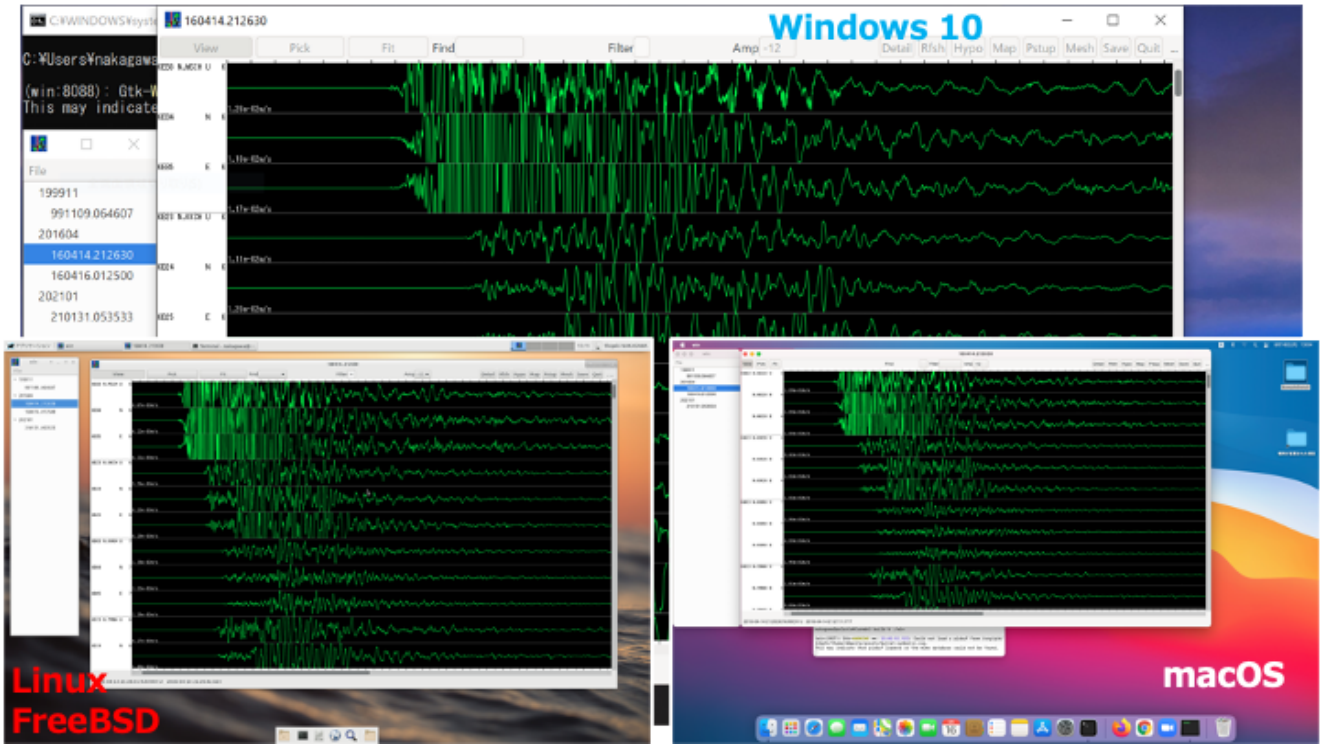
前項の調査を参考にして，次世代の対話験測処理系システムの試作を開始し，対話検測ソフトウェアの基礎部分を作成した．最大の特徴は，1つのソースコードからUnix (Linux, FreeBSD)，Windows，macOS の複数プラットフォーム上で動作するネイティブバイナリをそれぞれの環境下でコンパイルできることである（図）．現在は，波形表示と手動験測の最小限の機能しか備えていないが，今後の機能拡張が可能な設計となっている．

今後は，この試作したプログラムを基にして，震源決定プログラムなどの外部コマンド実行機能などの実装

© The Seismological Society of Japan

を進めていきたい．また，伝送系システムの仕様について検討を進めたい．

謝辞：本研究では，国立研究開発法人防災科学技術研究所，北海道大学，弘前大学，東北大学，東京大学，名古屋大学，京都大学，高知大学，九州大学，鹿児島大学及び気象庁の地震観測データを用いました．ここに記して感謝します．なお，本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第２次）」の支援を受けました．



© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

PM-1

chairperson:Satoshi Katakami(Center for Railway Earthquake Engineering Research)
Fri. Oct 15, 2021 1:30 PM - 2:15 PM ROOM D (ROOM D)

[S02-05] Seafloor seismic observation using long-distance DAS technology

○Hiroyuki MATSUMOTO[1], Eiichiro Araki[1], Takashi Yokobiki[1], Kinzo Kishida[2], Daiji Azuma[2]
（1.JAMSTEC, 2.Neubrex Co., Ltd.）

1:30 PM - 1:45 PM

[S02-06] Long-period noise reduction on fiber optic distributed acoustic sensing (DAS)

○Eiichiro ARAKI[1], Takashi Yokobiki[1] （1.JAMSTEC IMG）

1:45 PM - 2:00 PM

[S02-07] Long term DAS acquisition using Toyohashi-Oki seafloor cable

○Toshinori KIMURA[1], Eiichiro Araki[1], Takashi Yokobiki[1], Koshun Yamaoka[2], Shuhei Tsuji[2], Toshiki Watanabe[2] （1.JAMSTEC IMGFEAT, 2.Nagoya University）

2:00 PM - 2:15 PM

©Seismological Society of Japan

Seafloor seismic observation using long-distance DAS technology

*Hiroyuki MATSUMOTO[1], Eiichiro Araki[1], Takashi Yokobiki[1], Kinzo Kishida[2], Daiji Azuma[2]

1. JAMSTEC, 2. Neubrex Co., Ltd.

光ファイバセンシング技術の一つである光ファイバ分散型音響センシング（DAS：Distributed Acoustic Sensing）は、入射光に対して光ファイバ内の発生する散乱光から散乱体の位置変化を計測するものである。光ファイバの一部がひずむと、散乱光の位相が変化する。DASは、光ファイバの散乱体の相対位置変化の分布を光ファイバ全長にわたって観測する。DASの特徴は長距離にわたり空間分解能が高い連続データが観測できることである。本研究では、DASを海底ケーブルに適用して光ファイバ長100 kmまでの観測を行い、DASによる地震発生帯での地震動の検出能力について考察した。 本研究で利用した光ファイバは、図1に示す「高知県室戸岬沖海底地震総合観測システム」の海底ケーブルである。この観測システムは、2019年3月に運用を停止して以降、主にDAS観測のテストサイトとして利用している。ケーブル長は、陸上局から先端観測ステーション（DSO）まで約128kmあり、6心の光ファイバをもつシステムである。海底ケーブルの途中に2台の海底地震計（OBS）と2台の津波計（PG）が設置されている。 まずDAS観測の地震観測への適用性を調べるために、DSOラインを用いて60 km計測レンジにより概ね15 km～30 kmのセクションについて38時間の連続観測を行った。連続観測を行った期間に、紀伊水道でM 2.5の地震が発生した（図1）。地震の発生時刻は2020年3月24日00時31分54.1秒である。震央からDAS観測のケーブルセクションまで概ね120 kmであった。DASによる地震観測例として、10.5 mの空間分解能で計測（decode）したデータセットを50 m毎にスタッキングして、10～20 Hzのバンドパスフィルタを適用したものを図2に示す。海底面とのカップリングが強いセクションは高感度の観測ができている。P波はS波に比べるとS/N比は下がるが、カップリングが強いセクションではP波も識別できる。DASは光ファイバの軸方向ひずみへの感度が高いため、S波の到達はより明瞭に観測されている。 次に、光ファイバの結合部（CPL）が120.7 kmに存在するPG1ラインを用いて120 km計測レンジにより概ね0 km～60 kmおよび40 km～100 kmの2セクションの観測を行い、光ファイバ長100 kmまでのノイズレベルを比較した。上記と同様のデータ処理を施し、0.1～10 Hzのバンドパスフィルタを適用した。図3にそれぞれの光ファイバセクションの3分間のDAS観測の記録を示す。図3(a)に沿岸に近いセクションの観測を示すが、海岸線から2 km付近までは海底ケーブルが波浪の影響を受けるためノイズレベルが高い。海底面とのカップリングがよいセクションでは脈動が明瞭に観測されている。図3(b)に沖合のセクションの観測を示すが、70 kmより遠方のセクションはノイズレベルが高くなる。図4に10 km毎に計算したパワースペクトル密度を示す。30 kmを除き、70 kmまでは脈動の帯域にピークがある。図3(a)からもわかるように、30 kmは海底面とのカップリングが弱いセクションであることを示唆する。また2回の観測でオーバーラップする40 kmならびに50 kmは同等のノイズレベルとなっている。計測距離が長くなるにつれて入射光の減衰が大きくなるため、広帯域でノイズレベルが高くなる傾向にあり、80 kmと90 kmのPSDには脈動のピークは認識できない。したがって現在のところ、光ファイバ長70 kmまでのセクションで海底地震観測に適用可能と考えられる。

© The Seismological Society of Japan

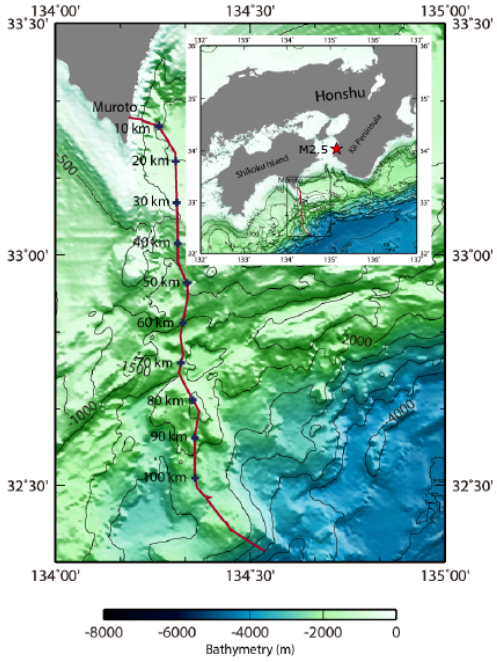


図 1：JAMSTEC 室戸海底ケーブルの敷設位置
（☆は紀伊水道で発生した地震の震央）

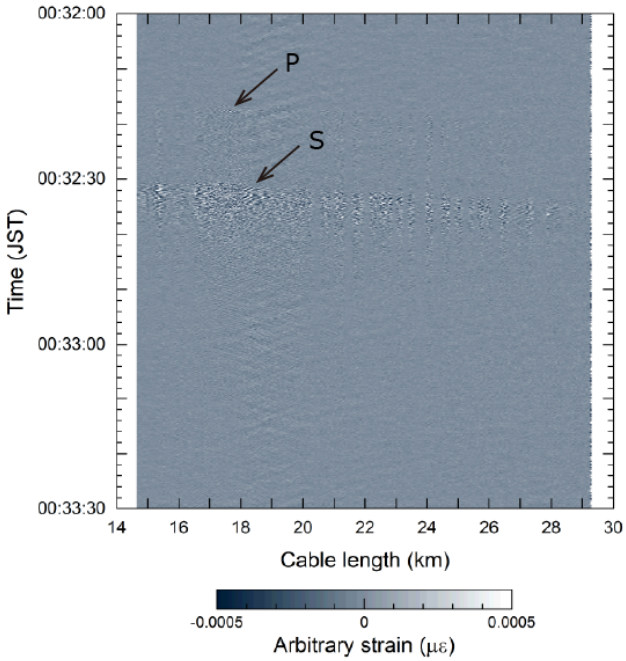


図 2：2020 年 3 月 24 日に紀伊水道で発生した地震の
シグナル（10 - 20 Hz バンドパスフィルタを適用）

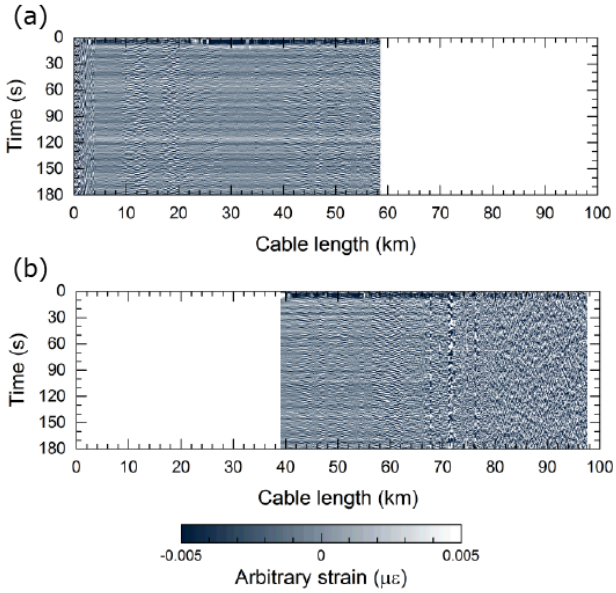


図 3：(a) 0 - 60 km、(b) 40 - 100 km セクションの DAS
観測（0.1 - 10 Hz バンドパスフィルタを適用）

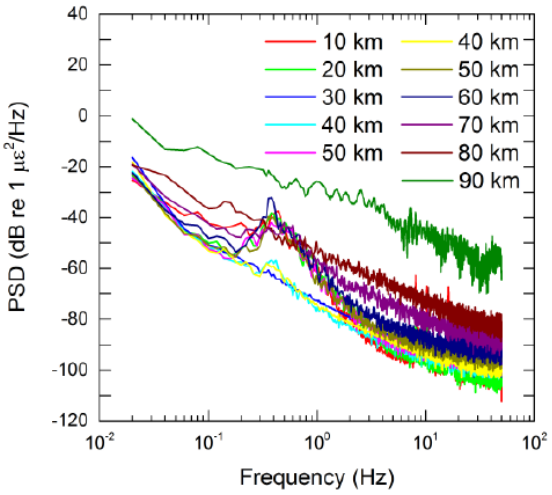


図 4：10 km 毎のパワースペクトル密度

© The Seismological Society of Japan

Long-period noise reduction on fiber optic distributed acoustic sensing (DAS)

*Eiichiro ARAKI[1], Takashi Yokobiki[1]

1. JAMSTEC IMG

我々は、南海トラフ室戸沖に展開された120km の海底光ファイバーケーブルを用い、分布型音響センシング（DAS）計測を展開している。DASは、光ファイバーの光ファイバー歪変化を多点・高密度に計測できるのが特長であり、室戸沖海底ケーブルでは、ローカルな地震だけでなく、長周期地震動に富んだ遠地地震の観測も行えている（Ide, Araki, Matsumoto, 2021）が、0.1秒より長い長周期においては、機器ノイズが多いため、近傍のDONET海底広帯域地震計と比べて長周期地震動の観測限界は高くない。同じ南海トラフに展開している200m長の1本の光ファイバー歪計による観測結果(Araki et al., 2021)を考えると、このDAS機器ノイズを減少させることができれば、海底光ファイバーケーブルでも、海底広帯域地震計と同様の高感度・広帯域観測が行えることが期待できるため、DASの長周期観測ノイズの原因を考察するとともにその観測ノイズを補正して長周期における観測限界を高めることを意図した実験を行ったので報告する。

DASでの10秒より長周期での観測ノイズは、光ファイバーが実際に温度変化等により見掛けの伸縮を起こしていることの他に、DAS装置に用いられているレーザー光源の波長の揺らぎが見掛けのファイバー伸縮として見える効果が主要なノイズ源であると考えられる。この後者の効果を測定することができれば、観測記録を補正することによって長周期観測限界を高めることができるのではないかと考えた。 レーザー波長の揺らぎは、光ファイバーの1回の計測（通常1ms程度）の間は小さいと考えられるため、揺らぎの影響は、光ファイバー観測記録全体に共通の成分として現れると考えられる。そこで、観測ファイバーに「歪変化のない」区間を挿入し、その区間の計測結果をレーザー波長揺らぎの効果として、他の計測区間の記録を補正した。

「歪変化のない」観測ファイバーの区間は、石英管に巻き付けた光ファイバー約140mを断熱容器に収納することによって実現した。 また、「歪変化のない」光ファイバー区間にそれで生じているちいさな「歪変化」をも、並行して高安定レーザー光を用いた光干渉法によって計測することにより、さらなる補正を行うことも試みた。この計測に用いる高安定度レーザー光源は、高真空環境で断熱されたキャビティに周波数ロックした周波数ドリフト率が10^-10/日程度のものを用いたので、「歪変化のない」光ファイバー区間の実際の歪変化を0.1nstrain より高い精度で把握することが十分に可能である。

これらの実験装置：DAS観測装置(AP Sensing N5226A 50km range） 、「歪変化のない」光ファイバー(自作)、高安定度レーザー光源(Stable Laser Systems社SLS-INT-1550-1) 、光干渉計測装置（自作）を海洋研究開発機構の室戸沖海底ケーブルの陸揚げ局舎内に設置を行い、試験観測を2021/3/4-3/31の期間連続的に実施した。

得られたDAS観測記録では、0.01-0.1Hz の長周期地震動の帯域において「歪変化のない」光ファイバー区間と30km までの計測範囲での記録は非常によく相関しており、「歪変化のない」区間の記録を用いることで、これらの計測範囲において観測ノイズを少なくとも1/10程度に減らすことが可能と考えられる結果が得られた。それより先の区間ではやや相関が低くなっているが、これはDAS装置で観測しているレイリー散乱光の強度が小さいため、光ファイバーの歪変化を完全にトラッキングできていないことによるものと考えられる。いずれにしても、観測装置の計測区間のかなりの範囲で、記録の長周期ノイズを減少させることができることが示された。 高安定度のレーザーを用いた光干渉計測の結果によれば、「歪変化のない」光ファイバー区間も、設置場所の温度変化の影響を受け、日変化に卓越した歪変化が観測された。したがって、DASの観測データをより長周期（～日）で活用しようとする場合には、今回実験をしたような方法でDAS観測の長周期計測の精度を高めることが必要になると示唆された。

© The Seismological Society of Japan

Long term DAS acquisition using Toyohashi-Oki seafloor cable

*Toshinori KIMURA[1], Eiichiro Araki[1], Takashi Yokobiki[1], Koshun Yamaoka[2], Shuhei Tsuji[2], Toshiki Watanabe[2]

1. JAMSTEC IMGFEAT, 2. Nagoya University

1. はじめに
光ファイバ分散型音響センシング (DAS: Distributed Acoustic Sensing) は光ファイバ内に光パルスを連続的に送信し，ファイバ内にランダムに分布する散乱点からの後方散乱光を観測・処理することにより光ファイバ上の数m間隔での分散歪を連続的に観測する。DASは主に資源探査分野での稠密構造探査・モニタリングなどを対象として技術開発が進められてきたが、近年は自然地震観測等，地球科学分野への適用も進み，従来型の地震計では実現不可能であった超稠密地震観測の可能性を示す研究成果が多数報告されている。DASによる観測は光ファイバに光源および処理装置を接続するのみで実現できるため，既存の光ファイバを利用することで観測コストを従来の手法と比較して大幅に低減することができる。特に，海底等の受振装置を設置することが困難な海域観測ではこのメリットは大きい。また，固定された光ファイバの利用により繰り返し探査・モニタリングが容易に実現できる。一方で，DASをこれらの地震観測・モニタリングの観測に適用するためには，精度等の観測性能を明らかにする必要があるが，現状観測例・議論は十分でない。

2. データ観測
本研究では，愛知県豊橋沖の海底ケーブルを用いDASの長期観測を行い，観測された地震記録，常時微動記録などを利用してDASの観測データ・観測性能の議論を行う。2021年5月1日～7月11日にJAMSTEC所有の豊橋沖ケーブルにAPsensing社製のDAS収録装置 (N5226A R50) を接続し， 2か月以上の連続データの観測に成功した。陸側から23kmまでのケーブル区間を観測区間に設定し，ゲージ長40m, 空間サンプリング間隔5m, 時間サンプリング間隔 2ms での観測を行った。観測開始時に複数のゲージ長 (5-40m) の試験観測を短時間実施し，最適な観測パラメータを決定した。観測装置一式は陸上のケーブル局舎に設置し，収録データは大容量NASに保存された。また，データQC，処理を円滑に行うため，観測と並行して時間・空間サンプルをそれぞれ 10ms, 50m にダウンサンプルするデシメーション処理をリアルタイムで実施した。

3. データ確認・処理
観測された時系列データには，常時微動，近地・遠地地震記録などの信号が確認された。観測データの時系列を目視で確認すると，常時微動成分は陸側の振幅が沖側と比較して相対的に強いことが分かった。定量的な議論のために常時微動成分のパワースペクトル密度 (PSD) を計算したところ，複数の明瞭なピークが確認された。0.08-0.1 Hz付近，および0.4-0.5 Hz 付近に明瞭なピークが確認された。複数のケーブル距離で観測されたデータのPSDを確認したところ，低周波数側0.08-0.1 Hzのピークは陸側から沖側にかけて振幅が減少することが分かった。一方，0.4-0.5 Hz のピークはケーブル距離が変化してもそれほど振幅が変化しないことが確認された。これらのシグナルの由来を議論するために，F-Kスペクトルを算出しそれぞれの波群の見かけ速度を確認した。F-Kスペクトルの計算の結果，低周波数側のシグナルは，傾き10-20 m/s程度の傾きで伝わる波群，高周波数側のシグナルは300-500 m/s程度で伝わる波群であることが分かった。これらはそれぞれ海洋波浪の伝播速度，表面波の伝播速度に対応していることから，前者は海洋波浪の伝播自体により励起される圧力変動由来のシグナル，後者は脈動セカンダリ成分由来の表面波・境界波であると考えられる。地震記録としても，震央距離数km～3500 km, マグニチュード2～7程度までの複数の近地・遠地地震が観測された。例えば2021年5月3日7時57分に岐阜県で発生したM2.4の近地地震，5月22日3時4分に中華人民共和国青海省で発生したM7.3の遠地地震についても，明瞭にとらえられていることを確認した。

4. さいごに
本研究では豊橋沖海底ケーブルを利用した長期間のDAS観測および観測データの初期解析を行った。初期解析

© The Seismological Society of Japan

の結果，海底ケーブルによるDAS観測では波浪伝播，脈動由来の信号が明瞭に観測されること，広範囲での近地・遠地地震が観測されることを確認した。今後，陸上の観測点に設置された地震計の比較などにより，観測性能の定量的な評価を行う予定である。また，将来的なDAS観測と定常震源を組み合わせた地震波速度構造モニタリング実現に向けた取り組みとして，付近に設置されたACROSSによる信号抽出の取り組みを今後行う予定である。

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session | S14. Earthquake prediction and forecast

PM-1

chairperson:Fuyuki Hirose(Meteorological Research Institute)

Fri. Oct 15, 2021 2:15 PM - 3:00 PM ROOM D (ROOM D)

[S14-01] Application of weighted likelihood method to the Brownian Passage Time model for recurrent earthquakes with uncertain origin times and an analytical soluton of the maximum likelihood estimate

○Masajiro IMOTO[1], Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

2:15 PM - 2:30 PM

[S14-02] Trial calculation of long-term probability for crustal earthquakes using GNSS data

○Takuya NISHIMURA[1] （1.DPRI, Kyoto Univ.）

2:30 PM - 2:45 PM

[S14-03] Modified estimation of the HIST-ETAS model for earthquake catalogs possessing long- and short-term incomplete data

○Yosihiko OGATA[1], Koichi Katsura[1] （1.The Institute of Statistical Mathematics）

2:45 PM - 3:00 PM

©Seismological Society of Japan

Application of weighted likelihood method to the Brownian Passage Time model for recurrent earthquakes with uncertain origin times and an analytical soluton of the maximum likelihood estimate

*Masajiro IMOTO[1], Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

繰り返し地震として複数の時系列が候補とされ，一つの時系列に特定できない場合がある．このような場合，各時系列の信頼性に応じた重み付き尤度関数を用いて，平均的なモデルパラメータを推定することができる（Imoto and Fujiwara, 2012,EPS）．離水地形や津波堆積物など地形地質学的手法により特定される地震には，標本の年代測定に起因する発生時期の不確定性がある．このような場合も，発生年が連続的に変化する複数の時系列として重み付き尤度法を適用できる．発生年不確定な地震時系列の更新過程モデルについてはすでに尤度関数が提案されているが（Ogata,1999,JGR），この式による最尤推定値は偏ることが報告されている（井元他,2021,JPGU）．ここでは，発生年不確定の繰り返し地震更新過程モデルに適用した重み付き尤度法を紹介し，地震間隔分布がBrownian Passage Time (BPT)分布の場合の最尤推定値解析解を導く．得られた関係式を用いて，相模トラフ沿いのM8クラス地震について離水地形データからBPT分布モデルの最尤推定値を求める．

重み付き尤度法

Imoto and Fujiwaraは，M8クラス関東地震の複数の歴史地震時系列への重み付き尤度法の適用で，各時系列の対数尤度関数を重み付き加算し対数尤度関数としている．発生年不確定な時系列では地震発生年が連続的に変化するため，地震発生年を積分変数とした対数尤度関数の多重積分により重み付き尤度関数を表現できる．重み付き尤度法では，データに対する信頼度に応じて重みをつける．年代測定の結果として発生年の確率密度関数が報告されている場合には，それを重みとして用いることができる．確率密度がわからない場合には，発生年は一様分布であると考える．この場合には，重み付き尤度関数は(1)式(表1)で表される．積分範囲は各地震の不確定期間$((a_i,b_i),i=1,2,...n)$となる．不確定期間が相互に一部重なる場合には，発生年の逆転を避ける$(t_1 < t_2<...<t_n)$条件付き積分となる．地震間隔の確率密度関数は(2)式BPT分布で与える．モデルパラメータμおよびαをそれぞれ平均間隔およびばらつきと呼ぶ． 尤度関数をモデルパラメータにより微分し連立方程式を解く．多重積分と微分の順序を入れ替え，多重積分を(3)式(4)式で表すと(5)式(6)式を得る．

相模トラフ沿いM8クラス地震

地震調査研究推進本部地震調査委員会報告書(調査委員会報告書，2014)では，2400calyBP～5400calyBPの間に推定される9回の地震を用いて今後発生する地震について評価している．これら9回の不確定期間は相互に重ならないので，(3)式の多重積分は被積分関数に含まれる変数に関する2重積分となる．地震間隔およびその逆数の2重積分は(7)式(8)式で与えられる． (7)式から不確定期間中央値の差が平均間隔となることがわかる．(5)式と(6)式から最尤推定値として平均間隔363年ばらつき0.49 を得る．

調査委員会報告書ではOgata(1999)と同等なParsons(2008,JGR)に従ったモンテカルロ法により地震系列を生起し，平均間隔とばらつきの中央値や平均値を求めている．このモンテカルロ法における最尤推定値は記載されてないが，我々の計算では平均間隔360年程度ばらつき0.28程度となっている．重み付き尤度法の結果に比べばらつきが0.2ほど小さい．この比較からもOgata(1999)やParsons(2008)ではばらつきが小さく決まることがわかる．ある時点から30年間に地震が発生する確率（30年確率）の比較を図１に示す．一般に経過年数が短い時点では，ばらつきが小さいと大きい場合に比べ確率は小さくなる．図１によると大正関東地震(1923年)から100年程度経過で，ばらつきが小さいParsonsでは確率値はほぼ0%であるが，重み付き尤度法では1～2%になる．98年経過時点(2021年9月1日)における30年確率は，重み付き尤度法では1.6%，Parsonsで

© The Seismological Society of Japan

0.01%以下，3歴史地震(応仁，元禄，大正)で 2.4% となる．このようにParsonsではばらつきが小さく決まる結果，現時点の30年確率は過小評価となる．上記モンテカルロ法の時系列はParsonsの偏りを引き継いでいるため，モデルパラメータ中央値や平均値，確率値のベイズ推定等も偏っていると推測する．

© The Seismological Society of Japan

表 1

(1)	$\ln L^{w}(\theta) = \int_{a_1}^{b_1}\cdots\int_{a_n}^{b_n}\ln[\{\prod_{i=2}^{n} f_\theta(t_i - t_{i-1})\}]\prod_{i=1}^{n}\frac{1}{b_i-a_i}dt_n\cdots dt_1$
(2)	$f_\theta(t) = f(t,\mu,\alpha) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}}\exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu\alpha^2 t}\right\}$
(3)	$E[F(t_{i-1},t_i)] = \int_{a_1}^{b_1}\cdots\int_{a_n}^{b_n} F(t_{i-1},t_i)\prod_{i=1}^{n}\frac{1}{b_i-a_i}dt_n\cdots dt_1$
(4)	$E[1] = \int_{a_1}^{b_1}\cdots\int_{a_n}^{b_n}\prod_{i=1}^{n}\frac{1}{b_i-a_i}dt_n\cdots dt_1$
(5)	$\hat{\mu} = \frac{1}{n-1}\frac{1}{E[1]}\sum_{i=2}^{n}E[(t_i - t_{i-1})]$
(6)	$\widehat{\alpha^2} = \frac{1}{n-1}\frac{1}{E[1]}\sum_{i=2}^{n}E\left[\left(\frac{1}{t_i - t_{i-1}}\right)\right]\cdot\hat{\mu} - 1$
(7)	$\frac{1}{(b_1-a_1)(b_2-a_2)}\iint_{a_1a_2}^{b_1b_2}(t_2-t_1)\,dt_2dt_1 = \frac{(a_2+b_2)-(a_1+b_1)}{2}$
(8)	$\frac{1}{(b_1-a_1)(b_2-a_2)}\iint_{a_1a_2}^{b_1b_2}\frac{1}{t_2-t_1}dt_2dt_1$ $= \frac{1}{(b_1-a_1)(b_2-a_2)}\{(b_2-a_1)\ln(b_2-a_1) - (b_2-b_1)\ln(b_2-b_1) - (a_2-a_1)\ln(a_2-a_1) + (a_2-b_1)\ln(a_2-b_1)\}$

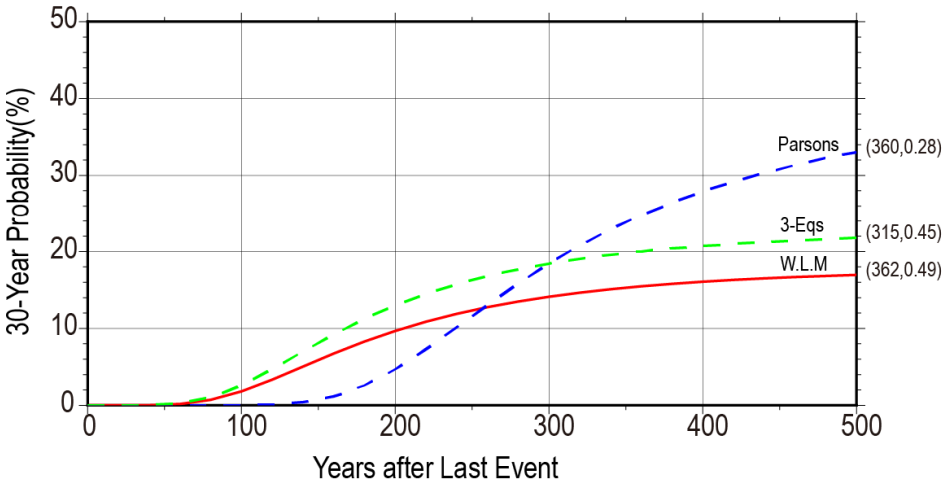


図 1　30 年確率の推移. 重み付き尤度法最尤推定値に基づく 30 年確率の推移を赤線で示す. Parsons と 3 地震(永仁，元禄，大正)による推移を青破線，緑破線で示す.

© The Seismological Society of Japan

Trial calculation of long-term probability for crustal earthquakes using GNSS data

*Takuya NISHIMURA[1]

1. DPRI, Kyoto Univ.

はじめに

我が国では地震の長期的な確率予測として地震調査委員会による長期評価が行われており、地殻内で発生する地震（以下、内陸地震）に関しては地形・地質学的手法による活断層に基づく評価が行われていて測地データは用いられていない。一方、諸外国の地震長期予測モデル（例えば、Field et al., 2017）には、GNSS等の測地データが広く用いられている。日本列島で稠密なGNSS観測網が整備されているので、測地データを用いて内陸地震の長期予測を試算し、既存のモデルと比較することは、より信頼性の高い地震の確率予測モデルを構築するために有益であると考えられる。本研究では、西南日本のGNSSデータを用いて内陸地震の長期発生確率を試算し、実際の地震活動との比較を行った。

地震長期発生確率の計算方法

本研究では、最も単純な地震発生予測モデルとして、内陸地震の発生はポアソン過程に従うと仮定し、地震の発生率はその地域の地震モーメント速度と規模別発生頻度から計算した。地震の規模別頻度分布は、切断グーテンベルグ・リヒター則に従うものとし、最大地震の気象庁マグニチュードを8.0、b値は0.9と解析地域で一定の値を仮定した。 地震モーメント速度は、以下のようにGNSSデータから計算した。まず、大地震の発生が少なかった2005年４月から2009年12月までの水平速度を推定し、南海トラフ沿いのプレート間固着による弾性変形をNishimura et al.(2018)のモデルを用いて除去した。プレート間固着による弾性変形を除去した理由は、この弾性変形はプレート間地震の発生によって解消されるものであり、内陸地震の発生の原動力そのものではないと考えたからである。次に、補正を行った水平変位速度からOkazaki et al.(2021)の手法を用いて0.2度グリッドの中心位置でのひずみ速度を計算した。ひずみ速度から地震モーメント速度への換算式は先行研究で提案された３つのモデルで試算し、換算式中の地震発生層の厚さ、剛性率については解析領域で一様のモデルと総地震数の90%の地震が発生する深さ（Omuralieva et al., 2012）とJ-SHIS深部地盤構造モデルを用いて可変とするモデルで計算を行った。 測地学的ひずみ速度は、過去の地震活動から推定されるひずみ速度に比べて数倍から１桁程度大きいことが指摘されており（例えば、Shen-Tu et al., 1993）、測地学的ひずみ速度は海溝型地震によって解放されるひずみ速度を含むことや内陸域での非弾性ひずみを含むことが原因であると考えられてきた。本研究では前者のひずみ速度は前処理で除去したが、内陸の非弾性変形がどの程度生じているかは内陸地震として解放されるモーメント速度に大きく影響する。そのため、ここでGNSSひずみ速度データから換算した地震モーメント速度と過去の地震によって解放されたモーメント速度の割合を計算した。M6以上の内陸地震の地震モーメント速度は、大地震の記録が概ね残っていると思われる天正地震以降の期間（西暦1586-2019年）で、測地データから換算したモーメント速度の13–20%程度であり、この割合を測地ひずみ速度から地震モーメント速度への変換に用いた。

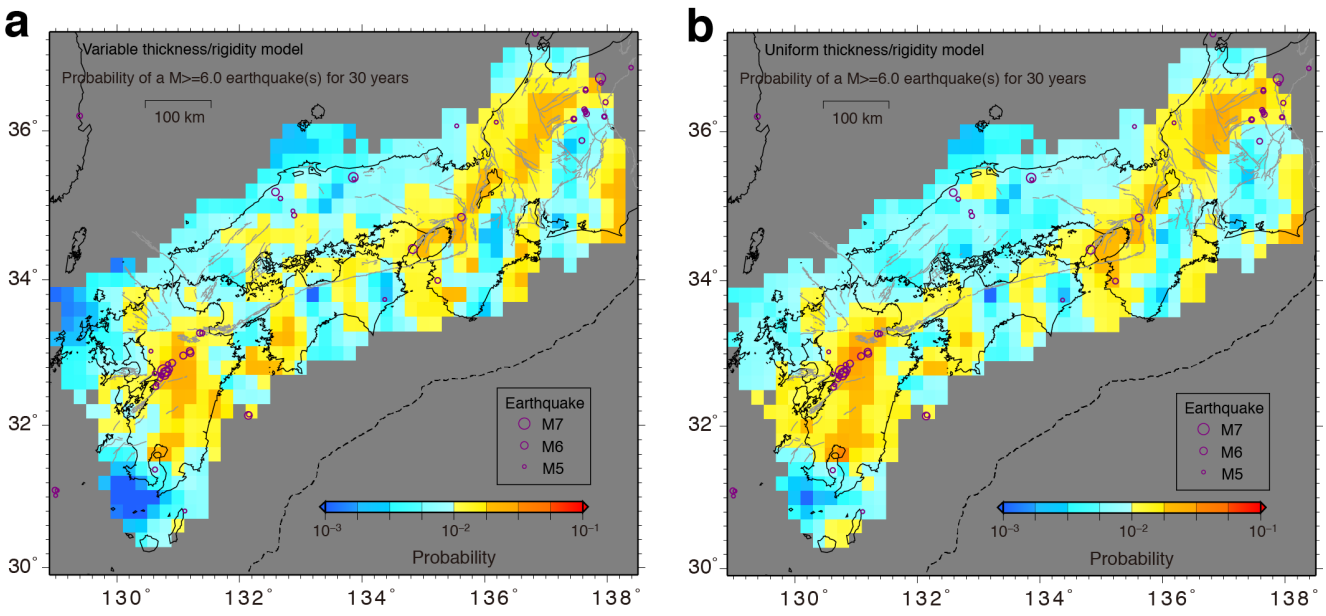
地震長期確率モデルの試算結果と比較

M6以上の内陸地震について30年間の発生確率を試算した結果を図に示す。過去の地震分布ともっとも整合的であったモーメント速度の換算式は、水平方向の２つの主ひずみ速度の絶対値及び面積ひずみ速度の絶対値の最大値を用いるSavage and Simpson(1997)の換算式であり、地震発生層の厚さと剛性率が可変のモデル（図a）と一様のモデル（図b）は、過去地震との整合度において大きな差はなかった。地震発生層の厚さ一様のモデルで0.2度グリッドの発生確率の最大値は九州中部の3.5%で、最小値は薩摩半島沖の0.1%であった。試作したモデルと実際の内陸地震の分布を比べると、地震の空間分布は一様であるという参照モデルに対して、地震１個あたりの確率利得では1.1-1.3程度であるが、ひずみ速度が上位25%のグリッドに地震数で43%以上、地震モーメントで62%以上の地震が発生しており、ひずみ速度の高い場所で地震が多発する傾向は明らかである。よって、測地データを用いた長期予測は、新たな地震発生予測手法として有効であると考えられる。

謝辞：本研究では、国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業(IGS)のGNSSデータ、気象庁一元化カタロ

© The Seismological Society of Japan

グ、世界の被害地震の表（https://iisee.kenken.go.jp/utsu/）を利用しました。地殻内地震発生確率評価手法検討ワーキンググループ、特に加藤愛太郎、尾形良彦両博士との議論は有益でした。ここに記して感謝いたします。



© The Seismological Society of Japan

Modified estimation of the HIST-ETAS model for earthquake catalogs possessing long- and short-term incomplete data

*Yosihiko OGATA[1], Koichi Katsura[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics

１．要約： 本研究では、階層型時空間ETAS（HIST-ETAS）モデルを用いて、日本全国や内陸部などの広領域で、地域依存の地震活動を短期予測するとともに、背景地震率を分離する。予測や背景地震率の分解能を高めるためには、気象庁震源カタログの下限マグニチュード値を適切に下げることが考えられる。しかし、これによって長期的には人為的なデータの時空間的不均一性を考慮する必要がある。同時に、大地震の直後には数多くの連発余震が発生し、余震の波形が重なり、小さめの余震の欠落が起こる。それゆえ大地震発生後に低下する余震検出率を推定することによってHIST-ETASモデルの偏りのないパラメータを再推定できる。結果、地震活動度の大地震後の地震活動がどのように補正されるかを可視化し、時空間の地震発生率を準リアルタイムで予測し、アニメーションで示すことができる。

２．階層ベイズ型時空間ETASモデルと地震予測の補正： 震源データベースから階層ベイズ型的時空間Epidemic-Type Aftershock Sequence (HIST-ETAS) モデルを推定する．ここで，準リアルタイム（例えば１時間以内）で検出地震群からAICで，余震や群発地震の非等方性の短期空間予測を近似する．時間経過に依存しない常時活動度は地域的に数桁の違いで変化し，大地震の長期的予測に有用である．すなわち常時活動度の高い地域は，大地震の予測結果や歴史地震の多発域と調和的である．余震生産性のパラメータは短期確率予測に必須である．この他にもHIST-ETASモデルの主要パラメータは，地震活動パターンの地域的非一様性を表すために地震の位置に依存する． これは任意の位置での主要パラメータの値が，デロネ三角形網の各頂点での値（デロネ係数）によって線形的に補間（区分的線形関数）されるものである．地震の数に比例して係数の数が膨大になるので，適切な推定には区分線形関数に滑らかさの制約を課して，「罰則付き対数尤度」を最大化する逆問題（インバージョン）として，ベイズ最適解（MAP解）を求める． 宇津カタログを準備データとし、1926年以降の気象庁カタログをターゲットのデータとして使った対数尤度は、次節で求められる下限マグニチュード*Mc*地震検出率関数を重みに使う。

３．時空間地震検出率： 下限マグニチュードを十分下げてデータを増やし、予測の解像度を上げたい．その場合，長期的なデータの非一様性を補うと同時に，大きな地震直後の余震検出率の低下によるバイアスを補正して，正しいHIST-ETASモデルの推定と予測が出来るようにしなければならない．そのために震源から作ったドローネ（Delaunay）４面体ネット上での時空間検出モデルを準備する．ここでマグニチュード分布係数*b*値の時空間変化の指数関数と次の正規分布の累積分布関数を掛け合わせる。すなわち平均パラメータが50%検出のマグニチュードに対応し，標準偏差は部分的に検出されるマグニチュードの範囲を示す．かくして下限マグニチュードMcの検出率を全ての時空間で補間できる。 1926年以降の気象庁カタログの震央と発生時刻に関する結果を示す。そのため地震カタログデータを頂点としたドローネ４面体の時空間分割を効果的に構成する。とくに、一元化後の膨大なデータを克服するドローネ４面体分割の作成や、大地震の直後に発生する急激な検出率低下を定量化できるように工夫し、尤度関数が設計される。 各ドローネ４面体上で線形な多面体スプライン関数でG-R則の 、検出率の および の時空間関数を表現し、平滑化の空間的制約と時間的制約の其々の重みを最適化する赤池ベイズ情報量基準（ABIC）で決定する。こうして求めた日本内陸部と沖合周辺部のマグニチュード時空間検出率や *b* 値変化の計算結果を動画で可視化できる。

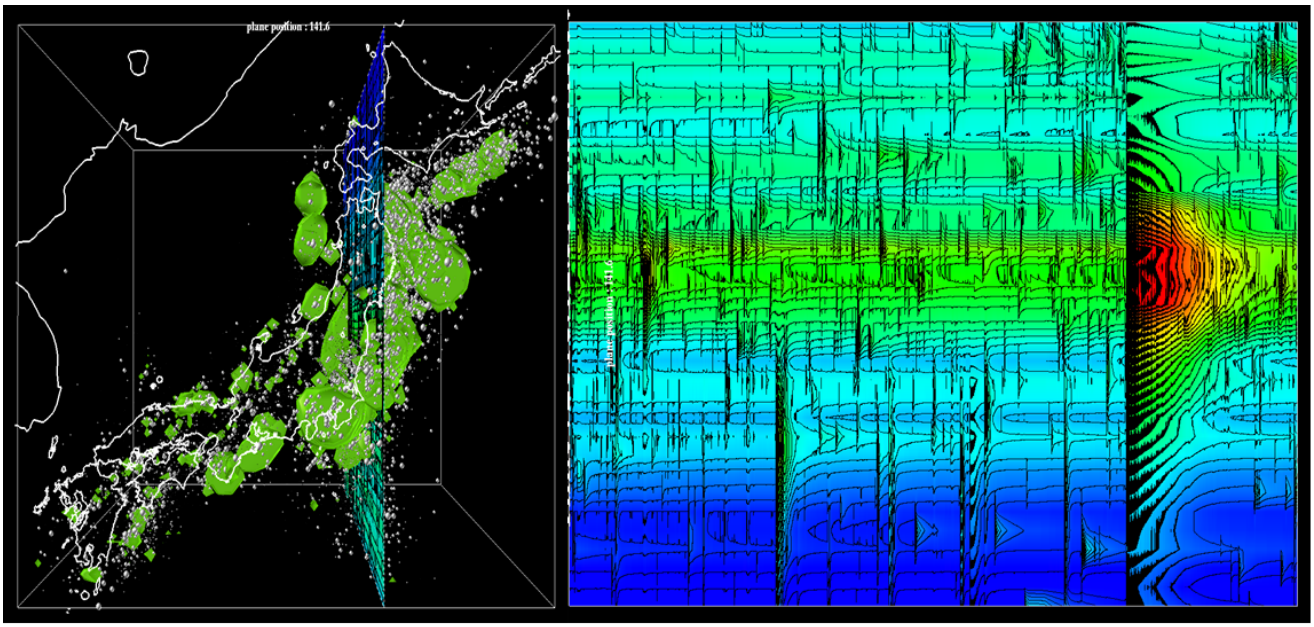
参考文献およびソフトウェアとマニュアル：

1) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993). Analysis of temporal and spatial heterogeneity of magnitude frequency distribution inferred from earthquake catalogues, *Geophys. J. Int.*, **113**, 727-738.
2) Ogata, Y. and Katsura, K. (2006). Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *Geophys.*

© The Seismological Society of Japan

Res. Lett., **33** (10), L10305, doi:10.1029/2006GL025888.
3) Ogata et al. (2021) Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM): Software Documentation and codes, *Computer Science Monographs* https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html No. 35, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo; or temporally available in http://bemlar.ism.ac.jp/ogata/HIST-PPM-V3/.

図の説明： 階層ベイズ型時空間ETASモデルの地震活動がどのように補正されているかを可視化している。HIST-ETASの時空間intensity rateの比の時空間等高面（左）と東経141度38分で切った緯度変換時間の平面上のintensity ratesの比の画像と等高線（右）。いづれも対数スケール。



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P1 (ROOM P)

[S03P-01] Continuous estimation of the transition process from coseismic rupture to initial postseismic slip based on the PTS analysis

○Yusuke TANAKA[1], Yusaku Ohta[2], Shin'ichi Miyazaki[3] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-02] Details on crustal deformation and gravity-inferred density structures at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

○Tomokazu KOBAYASHI[1], Koji MATSUO[1], Ryosuke ANDO[2], Takayuki NAKANO[1] （1.Geospatial Information Authority of Japan, 2.University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-03] Application of an objective detection method for long-term slow slip events to Hyuga-nada

○Akio KOBAYASHI[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-04] Systematic-detection of short-term slow slip events in the Alaska subduction zone

○Yutaro OKADA[1], Takuya NISHIMURA[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University , 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-05] Long-term SSE along the Nankai trough since 2018

○Shinzaburo Ozawa[1], Hisashi Suito[1], Hiroshi Munekane[1] （1.Geospatial Authority of Japan）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-06] Decadal postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake observed with the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

○Shun-ichi WATANABE[1], Tadashi Ishikawa[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-07] Temporal variation in slip deficit rate at Nankai trough observed by the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

○Tadashi ISHIKAWA[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, the University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-08] Evaluation of the effects of underwater sound speed structure on GNSS-A observation using numerical simulation

○Yuto NAKAMURA[1], Yusuke Yokota[2], Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

©Seismological Society of Japan

Continuous estimation of the transition process from coseismic rupture to initial postseismic slip based on the PTS analysis

*Yusuke TANAKA[1], Yusaku Ohta[2], Shin'ichi Miyazaki[3]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Kyoto University

地震時すべりから地震後の余効すべりに至る遷移過程の把握は，断層のすべり収支や摩擦特性の正確な理解に必要不可欠である．しかしながら地震時すべりの終了から余効すべりのごく初期の立ち上がりに至る，地震発生後の数分から半日程度の期間をGNSSで連続的に扱った事例は今のところ少数である．これは地表変位と大気遅延等の他の誤差要因との分離の困難性により，同時間スケールで既存の測位解析の精度が特に低下するためである．そこで我々は新たな手段として，GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する手法 (以降 PTS (Phase To Slip)) を用いた，広帯域断層すべりモニタリング技術の開発に取り組んでいる．PTSでは座標推定を行わず，生データである搬送波位相変化をグリーン関数と視線方向への幾何学的変換を介して直接断層すべりに結びつける．そして断層すべりと他の誤差要因の時間変化を一括で推定する．このような手法であれば未知パラメータの推定・分離状況の一体的な定量評価が可能であり，分離精度の改善において有利であると考えられる． 本研究では広帯域な断層すべり把握手段としてのPTSの性能評価を目的として，2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり・初期余効すべりの連続的な推定を試みた．推定では東日本の73のGEONET点の搬送波1秒データを使用し，3月11日の14時から16時 (JST，本震発生は14時46分) の2時間について解析した．まず静的なグリーン関数としてOkadaの式を用いた推定では，本震と岩手沖・茨城沖で発生した余震の断層すべり分布やマグニチュードが通常測位と同等の精度で推定された．得られた結果は地震波形インバージョンによる推定とも概ね調和的となった．さらに上記の3つの地震時すべりとは別に，本震後の時間帯に初期余効すべりの発生も推定された．初期余効すべりは主に本震で大きくすべった領域の深い側に隣接する，岩手・福島・茨城付近の陸寄りの断層域に推定された．すべり量は本震後の34分間で0.2-0.5mとなり，Munekane (2012) 等の先行研究と比べて大きいものの，すべり域の位置としてはよく一致した．これらの結果により，PTSを用いて地震時と地震後のすべりを一括して推定可能であることが示された．一方で現状の推定では静的なグリーン関数を用いているため，地震動の影響は適切に扱われていない．したがって地震発生直後の最初の数分間の部分については，詳細な議論に達していない状況にある．そこで本発表ではさらに発展的な解析として動的なグリーン関数を用い，本震の動的な破壊過程と引き続く余効すべりの立ち上がりの一括推定を試みた結果を紹介する．そして地震時から地震後のすべり現象の遷移過程や両者の関係性，および背景の物理について議論を行う．また広帯域な断層すべり把握手段としての，PTSの有用性について論じる．

© The Seismological Society of Japan

Details on crustal deformation and gravity-inferred density structures at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI[1], Koji MATSUO[1], Ryosuke ANDO[2], Takayuki NAKANO[1]

1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo

１．はじめに

本研究の目的は，断層破壊の終端部及びその周辺に特徴的な地殻構造が存在するかを調べ，断層破壊の終焉を制御する要因について議論することにある．この目的のために，本研究では，2016年熊本地震を対象に，SARによる地殻変動から推定される断層運動の詳細と重力によって推定される地殻構造との間の空間的関係を調査した．

２．データと解析

まず初めに，ALOS-2衛星のSARデータを用いたInSAR解析を行い，断層付近を含む震源域の地殻変動を取得した．本研究では，標準的なInSAR法に加えて，レンジ及びアジマス成分の周波数を帯域分割して干渉処理する手法（SBI法）も適用した．アジマス成分に関する処理はMAI法として知られているが，本手法を適用することにより，標準的なInSARでは大きな変位勾配のために干渉性が低くなる震源域近傍においても，空間的に詳細な変位を取得できた．標準的なInSARでは変位計測できなかった領域にSBI法で得られた変位を補間することで，震源領域全体における完全な変動場を獲得できた．さらに，複数の軌道データから得られた変動データを用い，最小二乗法により上下，東西，南北3成分の地殻変動を得た． 続けて，重力データを用いた地殻構造の推定を行った．解析には，後述する布田川断層の破壊終端部周辺を中心にキャンペーン重力観測（60点）を行い，これらデータと既存の重力データを用いたインバージョン解析により地下の密度構造を推定した．地球の質量構造に起因しない重力の影響を除去し，ブーゲ補正や地形補正等を施して地球の内部不均質構造を反映する完全ブーゲ重力異常を得た後，重力インバージョン解析によって地下の密度不均質構造を推定した．密度不均質構造は，平行六面体の質量塊の引力を応答関数とし，密度コントラストを推定パラメータとする重み付き最小二乗法により3次元的に推定した．解析では，初期値として与える密度を様々なパターンで計算することで，初期値依存性を把握・考慮しながら，信頼性の高い解を得るようにした．

３．結果

地殻変動の解析から，断層運動起因と推定される変位境界が，布田川断層の東部延長上に伸展して，阿蘇カルデラ西縁部で主に2方向に分岐していることが認められた（図１a）．1つは布田川断層の東部延長上に右横ずれを伴いながら南東側の地盤が沈降する変動を，もう1つはほぼ東西方向に左横ずれを伴いながら北側の地盤が沈降する変動を示している．これらの変位境界・急変帯は比較的広範囲に広がり，かつ直線的に分布することから断層運動起因であることが強く示唆される． 一方，重力データから推定された密度構造の結果は，阿蘇カルデラの中心部に比較的広い低密度領域が分布していることを示す．さらに西側に注目すると，その低密度領域から舌状に延びるように，阿蘇カルデラ西部の浅い部分（深さ約1～2km）にくさび形の低密度体が存在することが分かった（図１b）．注目すべきは，SARによって推定された分岐断層が，その局所的な低密度体の側面およびその西部延長上に沿って位置しており，地殻変動の終端部はその低密度体とほぼ重なっていることである．低密度領域の実体については今後さらに検討する必要があるが，断層面を構成する何かしらの物理境界を示している可能性がある．

謝辞：　本報告で使用したALOS-2データの所有権は，JAXAにあります．これらのデータは，国土地理院とJAXAの間の協定及び地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動に基づいて，JAXAから提供されたものです．本研究はJSPS科研費JP18K03810の助成を受けたものです．

© The Seismological Society of Japan

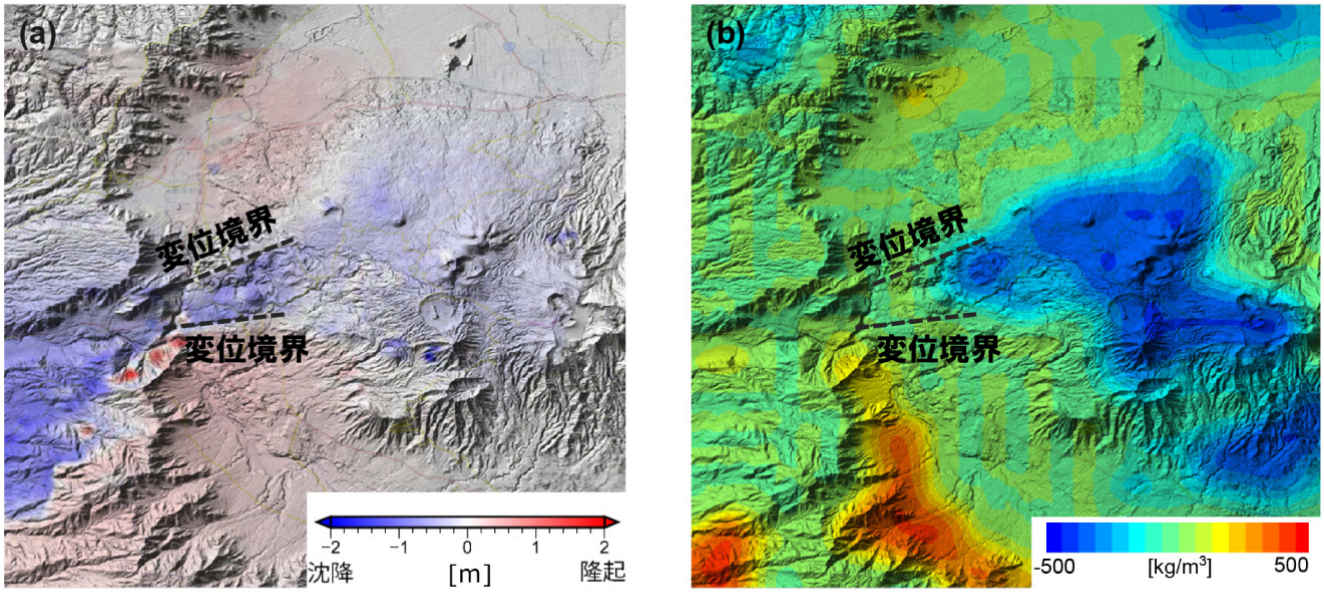


図1 (a) 干渉SAR解析から得られた上下変位. (b) 重力インバージョンによって推定された阿蘇カルデラ西縁周辺の地下密度不均質構造（深さ1.5㎞の水平断面）. 青色（赤色）は周囲よりも密度が低い（高い）領域を表す.

© The Seismological Society of Japan

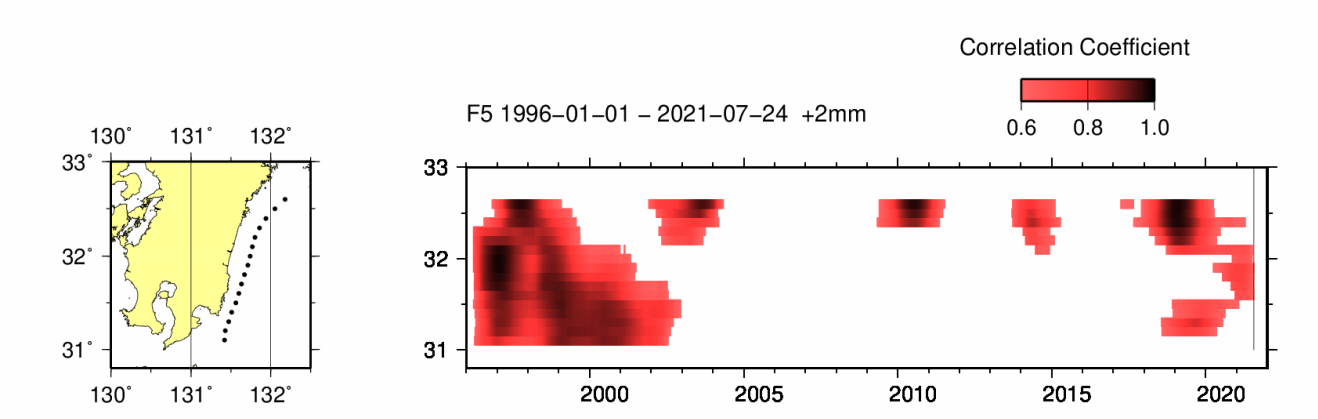
Application of an objective detection method for long-term slow slip events to Hyuga-nada

*Akio KOBAYASHI[1]

1. Meteorological Research Institute

Kobayashi (2017)はGNSS日座標値（日値）を用いて、南海トラフ沿いの長期的スロースリップ（SSE）をランプ関数との相関値により客観的に検出する手法を開発し、それまで試行錯誤的に検出していたSSE現象を一定条件で検出した。検出領域の西端は豊後水道であるが、九州東岸の日向灘でもこれまでに長期的SSEが報告されている（Yarai and Ozawa, 2013; Takagi et al., 2019）。南海トラフ地震の想定震源域は日向灘を含むため、この領域で発生するSSEの監視も重要となる。このため、同手法の仕様を一部変更して日向灘で発生する長期的SSEを検出できるようにした。具体的な手順は以下の通り。
(1)観測点の成分ごとに直線トレンド、アンテナ交換などに伴うオフセットと主な地震に伴うオフセット、年周・半年周成分を除去する。
(2) 長期的SSEの影響がほぼ見られない九州北西部の観測点の共通ノイズを全点から引き去り、領域全体を固定する。
(3) 各観測点の水平成分からフィリピン海プレート沈み込みと逆方向（S55E）の成分を計算し、プレート等深線25 kmに沿って設定した緯度0.1度間隔の地点を南東端とする50×100 kmの矩形範囲内の各観測点の成分の平均値を求める。
(4) 2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)、2016年熊本地震(M7.3)、2019年5/10日向灘の地震(M6.3)の余効変動を除去する。なお、1996年10/19(M6.9)と12/3(M6.7)の日向灘の地震に伴う余効変動は検討中。
(5) 地点ごとの時系列と1年の傾斜期間を持つランプ関数との相互相関と、対象期間前後の2年間変化量を求める。
なお処理の仕様上、最新期間については、今後データ追加に伴い解析結果が変わる可能性がある。
また、小林（2021）の手順に従い、プレート境界上に置いた矩形断層でのすべりによる理論変位と比較することにより、長期的スロースリップの規模を推定した。
相関係数0.6以上の時空間分布を見ると、1996年の日向灘の地震に伴う余効変動に対応する非定常変位の他に、1997、2003、2010、2014、2019年の豊後水道長期的SSEに対応する変位、2020年からの日向灘南部の長期的SSEに伴う変位が見られる。2019年に鹿児島県東岸で相関の高い部分が見られるが、これは2019年1月に発生した種子島近海の地震（M6.0）に伴う余効変動が含まれている可能性がある。相関係数は0.6未満になるが、Yarai and Ozawa (2013)で指摘された2005年、2007年、2009年の日向灘長期的SSEに伴う変位、Takagi et al. (2019)による2013年の日向灘長期的SSEに伴う変位、Ozawa (2017)による2013-2014年、2015-2016年の日向灘長期的SSEに伴う変位に対応するやや相関の高い部分も確認できる。
本調査には国土地理院GEONETの座標値およびオフセット値を使用させていただきました。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Systematic-detection of short-term slow slip events in the Alaska subduction zone

*Yutaro OKADA[1], Takuya NISHIMURA[2]

1. Graduate School of Science, Kyoto University , 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

スロー地震は通常の地震と比べゆっくりと断層がすべる現象であり、環太平洋地域の複数の沈み込み帯で観測されている（e.g., Obara and Kato, 2016）。スロースリップイベント（以下、SSE）は測地観測機器により観測されるスロー地震の一種で、数か月間から数年間継続する長期的SSE（以下、L-SSE）と数日間から数週間継続する短期的SSE（以下、S-SSE）に大別される。また一部地域で発生するSSEは同じくスロー地震の一種であるテクトニック微動（Obara, 2002）と時空間的に同期することが知られており、この同期現象はEpisodic Tremor and Slip（以下、ETS）と呼ばれる（Rogers and Dragert, 2003）。北アメリカプレートの下に太平洋プレートが沈み込むアラスカ沈み込み帯では、L-SSEや微動が先行研究により検出されている（Ohta et al., 2006; Wei et al., 2012; Wech, 2016）。一方で、S-SSEが定常的に発生している可能性が微動活動とそれに同期する地表変位により示唆されているものの、この地域において個別のS-SSEとしてモデル化されたイベントは1例しかない（Rousset et al., 2019）。そこで、本研究ではアラスカ沈み込み帯において個別のS-SSE検出を系統的に実施することで、この地域のS-SSEの活動様式とL-SSEや微動との時空間的関係の解明を試みる。

本研究ではNevada Geodetic Laboratory（http://geodesy.unr.edu/）によって解析されたGNSS観測局86局の2007年4月から2021年3月までの期間の日座標時系列（Blewitt et al., 2018）を用いた。初めに、181日間の座標値とSSEの時間発展を模したテンプレートの間の相関係数を計算することで、各観測局・成分の時系列からS-SSEが発生したおおよその時期を抽出する。次に、SSEが沈み込むプレート境界面上で発生した場合に期待される地表変位で相関係数を重みづけして平均することで、S-SSEの候補となるイベントを検出する（Rousset et al., 2017; Okada et al., in prep.）。続いて候補イベントの矩形断層モデル（Okada, 1992）と継続期間を推定する。継続期間は座標時系列のノイズレベルと推定した断層モデルから計算される変位によって重みづけされた各観測局・成分の181日間の座標値を重合した時系列を用いて推定した（宮岡・横田, 2012; Rousset et al., 2017; Okada et al., in prep.）。最後に、断層モデルと継続期間の推定結果に閾値を適用することで、候補イベントをS-SSEへと分類した。

その結果、アラスカ沈み込み帯において14年間で28個のS-SSEの検出に成功した。検出されたS-SSEの大部分は西経151°より東に分布し、西経150°と西経148°の深さ40 km付近にS-SSEのクラスターが発見された。S-SSEの空間分布は1964年に発生したアラスカ地震の余効すべり域（Suito and Freymueller, 2009; Huang et al., 2020）とおおよそ一致しており、また西側のクラスターはクック湾奥部のL-SSEのすべり域（Ohta et al., 2006; Fu and Freymueller, 2013）と一致していた。検出されたS-SSEの規模はMw 6.1から6.6であり、継続期間は2日間から57日間であった。また、S-SSEの地震モーメントと継続期間の分布は、スロー地震のスケーリング則（Ide et al., 2007）に大きく矛盾しない。検出されたS-SSEの一部は、Rousset et al.（2019）で示唆されたように、微動活動（Wech, 2016）と時空間的に同期するETS型のイベントであった。

謝辞

本研究ではAaron Wech博士に提供していただいたテクトニック微動カタログと、Nevada Geodetic Laboratoryによって解析されたGNSS日座標データを使用した。本研究で用いたGNSS観測局は、UNAVCO、University of Alaska, Fairbanks、United States Coast Guard、Alaska Volcano Observatory、Federal Aviation Administration、National Oceanic and Atmospheric Administrationにより設置されたものである。

© The Seismological Society of Japan

Long-term SSE along the Nankai trough since 2018

*Shinzaburo Ozawa[1], Hisashi Suito[1], Hiroshi Munekane[1]

1. Geospatial Authority of Japan

要旨 GNSS観測により、2018年以降、九州・四国・紀伊水道域で遷移的な地殻変動が観測された。観測された地殻変動から南海トラフ域のプレート間滑りを推定した。その結果、2018年６月頃から2019年８月頃にかけて、日向灘北部・豊後水道域で長期的SSEが発生し、2019年初めころから2021年1月にかけて四国中部で長期的SSEが発生したこと、2020年７月頃から日向灘南部で長期的SSEが発生していることが推定された。また紀伊水道では、2019年４月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。 はじめに 豊後水道では５～６年ほどの周期で繰り返し長期的SSEが発生してきた。四国中部では1977-1980年に水準測量の結果から長期的SSEの発生が推定されている(Kobayashi,2012)。紀伊水道の長期的SSEは、1996, 2000, 2016年に発生している(Kobayashi,2014; Kobayashi,2017)。そのような中、2018年6月頃から、九州北部で遷移的な地殻変動が発生し、その後2018年10月頃から豊後水道周辺で遷移的な地殻変動が発生している。また四国中部で2019年初めころから豊後水道SSEに伴う地殻変動と異なった遷移変動が発生している。2020年７月頃から九州南部で遷移的な変動が発生し、2021年７月まで続いている。紀伊水道では、2019年４月頃から遷移的な変動が発生している。本研究では、GNSSで観測された地殻変動のデータから、四国・九州・紀伊水道域のプレート間滑りの時空間変化を推定した。 解析手法 九州域では豊後水道域で2006-2009年間、宮崎南部域で2007/1-2009/1間、種子島域で2008/3-211/3間の一次トレンドを除去している。四国中部、紀伊水道域では2017/1-2018/1間の一次トレンドを除去した。九州域に関しては、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震の余効変動を粘弾性緩和のシミュレーション結果に基づいて除去している（Suito 2017;水藤2017）。このようにして得られた東西、南北、上下の座標時系列データを用いて時間依存のインバージョン解析を九州・四国域、四国中部域及び紀伊水道域に関して行った。観測点は南海トラフ域の観測点約250点を使用した。弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状を九州・四国域、四国中部域の解析では三角形要素で表して解析に使用している。グリッド間隔は、20-40km程度としている。プレート境界面上のすべりの方向はプレート収束方向になるように拘束をかけた。紀伊水道域に関しては、弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状をスプライン曲面で表し、滑り方向は東向きから南向きの範囲に拘束した。グリッド間隔は10km程としている。 結果と考察 2018年６月頃から2019年８月頃にかけて日向灘北部・豊後水道でSSEが発生している。豊後水道SSEと同時期に四国中部でSSEが発生し、2020年７月まで継続している。豊後水道SSEはMw6.9、四国中部SSEはMw6.1程度と推定された。豊後水道SSEはおおよそ５－６年周期と調和的で、四国中部は、1977-1980年に発生し、2013年に発生しているが、その繰り返し間隔はあまり周期的でないように見える。2018年末に日向灘南部で長期的SSEが発生し、2020年7月頃から日向灘南部で長期的SSEがまた発生している。紀伊水道のSSEは、2019年４月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。繰り返し間隔ははっきりしないように思われる。

© The Seismological Society of Japan

Decadal postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake observed with the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

*Shun-ichi WATANABE[1], Tadashi Ishikawa[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

2011年に発生した東北沖地震の地震時・地震後プロセスを研究することで，日本海溝沿いの領域における地震サイクルに関して有用な知見を得ることができる．東北沖地震の震源域はほぼ全域が海底下にあったが，多くの海底観測装置が設置されていたことにより，地震時の破壊や地震後の緩和過程等のシグナルが高い空間分解能で取得されている．中でも，GNSSー音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測は，地震後の変形過程における粘弾性緩和の重要性を示し，震源域近傍の余効変動の理解において重要な役割を果たした（Watanabe et al., 2014, GRL）．しかし，海底測地観測点の空間カバレッジや観測期間が不足しており，地震時の挙動も含め，特に走行方向の広がりについてコンセンサスの得られるような地殻変動モデルの構築には至っていない．震源域周辺での経時的な余効変動，すなわち粘弾性緩和と余効すべり，による変動を分離することを目的とし，われわれは海上保安庁が運用するGNSS-A海底測地観測アレイ（SGO-A）において海底測地データを取得してきた．今回得られた10年間のGNSS-Aデータから，主破壊域の南北縁において余効すべりが生じ，それが概ね2–3年でほぼ減衰したことがわかった．これらの余効すべり域は非地震性の摩擦特性を持ち，それらが地震時の破壊の南北への伝播を止めたと考えられる．また，震源域南部（~37 °N）の福島県沖の観測点では，水平方向の余効変動が減衰した後も沈降が継続していることが確認された．この観測事実を説明するためには，それより東側の，海溝近くでの地震時すべりに駆動される粘弾性応答を考慮に入れる必要がある．つまり，地震時の測地観測データでは，福島県沖の海溝近くでの解像度が足りずに地震時のすべりが推定できていなかった（e.g., Iinuma et al., 2012, JGR）が，今回の観測結果から，そこですべりが生じていたことが明らかになった．これは津波データから推定されるすべり分布（e.g., Satake et al., 2013, BSSA）と整合的であり，それをサポートする結果である．さらに，こうした結果からは，長期的な粘弾性緩和による余効変動が，地震発生から10年が経過した現在においても継続しており，宮城県沖の主破壊域のみならず震源域南部の福島県沖においても顕著な影響を及ぼしていることも示された．なお，本研究の内容はWatanabe et al. (EPS, in press) として報告されている．

© The Seismological Society of Japan

Temporal variation in slip deficit rate at Nankai trough observed by the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

*Tadashi ISHIKAWA[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

海上保安庁では、GNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底地殻変動観測を定常的に実施し、南海トラフ想定震源域におけるプレート境界の固着状態の把握のためのデータを収集している。観測成果は、気象庁の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」や地震調査研究推進本部の「地震調査委員会」に定期的に報告し、地震・地殻活動の現状評価に役立てられている。

これまでに、陸上GNSSと海底GNSS-Aの観測結果から得られた海陸の地殻変動速度場から、南海トラフ地震想定震源域のプレート境界におけるすべり欠損レートの推定が行われている(例えば、Yokota et al. 2016; Nishimura et al. 2018; Noda et al. 2018; Kimura et al. 2019など) 。その結果、陸上GNSSのみで解像できなかったすべり欠損レートの空間的不均質性が見えるようになった。南海トラフでは、スロースリップ (SSE)などの短期の非定常変動が度々発生しているため、時間変化を含めたプレート境界の状態を把握することが必須である。しかしながら、これまでの研究に用いられている海底の速度場は、ある特定の期間のデータの回帰分析から求めた平均値によるスナップショットであり、時間変化は考慮されていない。

十分長期のデータから求めた平均速度場は、プレート境界の摩擦特性の違いから生じるSSE発生域と強固着域の分布を把握するために有効である。平均を取る期間にSSE発生時期が含まれる領域では速度が相対的に遅くなるため、SSEが発生しない領域との速度差にコントラストが生まれ、SSE発生域と強固着域の分布が明確になることが期待される。しかしながら、現在のGNSS-Aデータは高々10年程度の蓄積しかなく、SSE発生域においても0～1回程度のイベントしか含まれていないと考えられるため、より正確な領域の分布の推定には、今後も観測を長期間継続しデータを蓄積する必要がある。本発表では、現時点のデータを用いた推定結果について報告する。

SSEのような非定常変動の推移を把握するためには、定常的な状態からのゆらぎとして顕れる変動を検知し監視していく必要がある。しかしながら、GNSS-A観測は、無人のオンライン連続観測が実現している陸上のGNSS観測網と異なり、観測の都度有人船で現場に赴く必要があることから、観測頻度が年に4－6回程度であり、時間分解能の高い監視を実施することは困難である。Yokota and Ishikawa (2020)は、過去のデータにAICを用いたモデル比較を適用し、SSE由来と考えられる非定常な時間変化を検出した。本発表では、速度場の移動平均を取ることで、すべり欠損レートの時間変化を推定した結果について報告する。

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of the effects of underwater sound speed structure on GNSS-A observation using numerical simulation

*Yuto NAKAMURA[1], Yusuke Yokota[2], Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）は、GNSS測位と海中音響測距を海上プラットフォームで結合することで、海底に設置した基準点の絶対位置をセンチメートル単位で決定する技術である。GNSS-A方式を用いた海底地殻変動観測により、日本海溝と南海トラフ沿いの海底下における様々な現象が明らかにされてきた。しかし、GNSS-Aは依然として陸域GNSS観測に比べ観測頻度と測位精度が大きく劣るという課題を抱えている（Yokota et al. 2021, under review）。時空間的により小さなイベントを検出可能にするためには、GNSS-A観測に影響する個々の誤差要因の評価が不可欠である。
GNSS-A観測における最大の誤差要因の一つとして、海中音速場の擾乱が挙げられる。海中音速場の時空間的な変動を適切に表現するため、これまでに様々な解析手法が開発されてきた。中でもベイズ統計的手法を用いて海中音速場と海底局位置を同時推定するGNSS-A解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al. 2020, FES）では、海中音速場を平均音速度、海上プラットフォームの位置に依存する成分（比較的上部における音速の水平傾斜場）、そして海底トランスポンダの位置に依存する成分（比較的下部における音速の水平傾斜場）に分解した海中音速度モデルを実装している。しかしながら、GNSS-A観測の時空間スケール（観測海域は数km四方、観測時間は1回あたり数時間程度のスケール）の中での海洋場の変動を観測することは困難であり、GARPOSで実データを解析して得られた海中音速度モデルの妥当性について詳しく検証することはできていない。
そこで本研究では、任意の海中音速場を与えることができる数値シミュレーターを用いてGNSS-A疑似データを作成し、これを解析することによりGARPOSの海中音速度モデルを検証した。本研究で用いた数値シミュレーターは、PythonのEikonal方程式レポジトリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いることで、与えられた海中音速場グリッドから三次元的な音波の伝播を計算する。これにより、鉛直のみならず水平方向の音波の屈折も考慮した、より厳密な音響走時のシミュレーションが可能である。数値実験では、まず水平傾斜場が存在しない時空間的に一様な海中音速場を与えることで、GARPOSの海中音速度モデルで時空間的に一定な場が再現されることを確認した。その後、様々な深さ・厚さの水平傾斜場を与えた海中音速場でシミュレーションを行い、与えた水平傾斜場に対するGARPOSの解析結果を検証した。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S06. Crustal structure

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P2 (ROOM P)

[S06P-01] Preliminary report on seismic reflection survey off the southeastern coast of Hokkaido, Kuril trench

○Tetsuo NO[1], Shuichi Kodaira[1], Gou Fujie[1], Yasuyuki Nakamura[1], Kazuya Shiraishi[1], Ryo Muira[1], Hiroto Yamaguchi[2,1], Yuka Kaiho[1], Jin-Oh Park[3], Yue Sun[3], Fan Yu[3], Masao Nakanishi[4], Megumi Fujimoto[5,6], Ryoya Kobayashi[5] （1.JAMSTEC, 2.Kobe Univ., 3.AORI, Univ. of Tokyo, 4.Graduate School of Science, Chiba Univ., 5.Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 6.SOEST, Univ. of Hawaii at Manoa ）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-02] Measurement of seismic velocity anisotropy in the Tohoku region, NE Japan by shear wave splitting analysis (4)

○Tatsuya MIZUTA[1], Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ryota TAKAGI[1], Keisuke YOSHIDA[1], Shin'ichi SAKAI[3], Kei KATSUMATA[4], Mako OHZONO[3,4], Masahiro KOSUGA[5], Takuto MAEDA[5], Yoshiko YAMANAKA[6], Hiroshi KATAO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Takashi NAKAYAMA[1], Satoshi HIRAHARA[1], Toshio KONO[1], Toru MATSUZAWA[1], Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake （1.Univ. of Tohoku, 2.Victoria University of Wellington, 3.Univ. of Tokyo, 4.Univ. of Hokkaido, 5.Univ. of Hirosaki, 6.Univ. of Nagoya, 7.Univ. of Kyoto, 8.Univ. of Kyushu, 9.Univ. of Kagoshima）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-03] Philippine Sea plate structure inferred from SP converted waves: Preliminary analysis in the southwestern Tokyo metropolitan area

○Kazuo YOSHIMOTO[1] （1.Yokohama City University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-04] Three-dimensional velocity structure beneath Hakusan volcano estimated by double-difference tomography

○Rin Miura[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-05] Detailed seismic reflection structure mapping in the western Nankai Trough

○Yasuyuki NAKAMURA[1], Yuka Kaiho[1], Tetsuo No[1], Kazuya Shiraishi[1], Gou Fujie[1], Shuichi Kodaira[1], Gaku Kimura[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1], Ayako Nakanishi[1] （1.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-06] The characteristics of small normal faults developed on the subducting Philippine Sea Plate along Nankai Trough

○Mikiya YAMASHITA[1,2], Ayako Nakanishi[2], Seiichi Miura[2], Shuichi Kodaira[2], Yoshiyuki Kaneda[3,2] （1.Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3.Kagawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

[S06P-07] Effects of insufficient back-azimuth coverage on the estimation of a dipping velocity discontinuity

○Katsuhiko SHIOMI[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-08] Random velocity inhomogeneity at the western part of the Nankai subduction zone

○Tsutomu TAKAHASHI[1], Koichiro OBANA[1], Yasushi ISHIHARA[1], Seiichi MIURA[1], Shuichi KODAIRA[1], Yoshiyuki KANEDA[2] （1.JAMSTEC, 2.Kagawa Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Preliminary report on seismic reflection survey off the southeastern coast of Hokkaido, Kuril trench

*Tetsuo NO[1], Shuichi Kodaira[1], Gou Fujie[1], Yasuyuki Nakamura[1], Kazuya Shiraishi[1], Ryo Muira[1], Hiroto Yamaguchi[2,1], Yuka Kaiho[1], Jin-Oh Park[3], Yue Sun[3], Fan Yu[3], Masao Nakanishi[4], Megumi Fujimoto[5,6], Ryoya Kobayashi[5]

1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. AORI, Univ. of Tokyo, 4. Graduate School of Science, Chiba Univ., 5. Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 6. SOEST, Univ. of Hawaii at Manoa

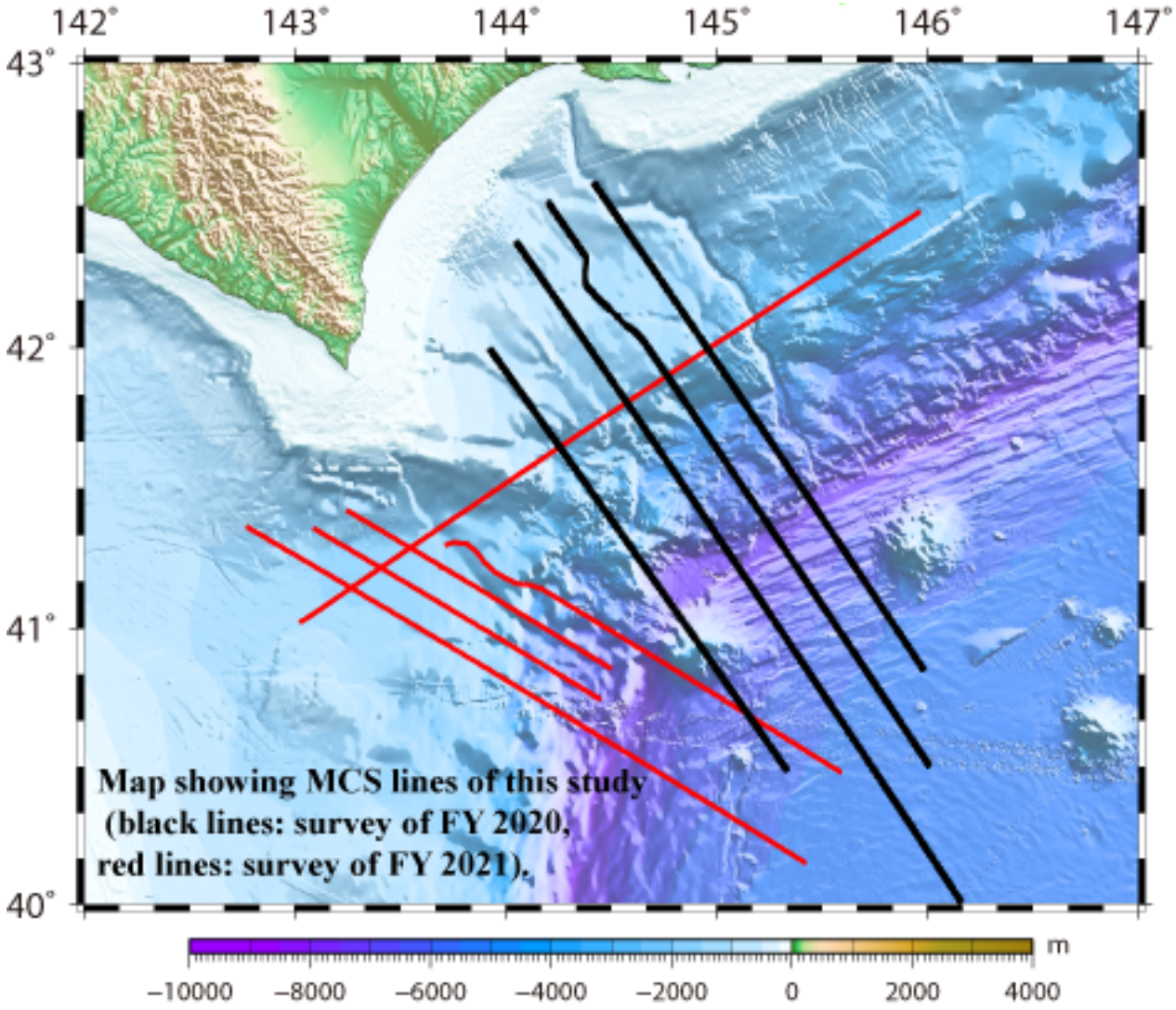
1990年代後半以降、日本周辺の沈み込み帯では南海トラフや日本海溝を中心に多くの地殻構造探査とそのデータを用いた研究が進められ、単に地殻構造研究のみならず、掘削科学や津波・地震サイクルシミュレーション等へも重要な役割を果たしてきた。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、日本周辺の地震発生帯に関する評価の再検討が進められ、千島海溝においても地震調査研究推進本部が2017年12月に「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版）」を新たに公表した。ただし、地殻構造探査の観点からみると、千島海溝周辺は南海トラフや日本海溝と比べるとデータが少なく、千島海溝周辺の長期評価をより高精度する上では、さらなる多くの観測・研究が必要な海域である。 東北地方太平洋沖地震以降、JAMSTECは2016年と2018年に深海潜水調査船支援母船「よこすか」で千島海溝の海溝底を中心に横切る測線を設定した高解像度反射法地震探査を実施し（中村・他, 2019, JpGU）、2019年には根室沖から釧路沖にかけて深海調査研究船「かいれい」を用いたMCS探査とOBSを用いた地震探査を行った（東・他, 2021, JpGU）。

そして、2020年10月と2021年7月には、釧路沖から日高沖にかけて、新たな調査測線を設定し、海底広域研究船「かいめい」による反射法地震探査を実施した（図）。新型コロナウイルスに関わる対応や調査海域での漁業活動・気象・海象の影響等はあったが、2航海で9測線のデータを取得することができた。これらの測線の一部は、日本海溝と千島海溝の接合部にも位置しており、もし千島海溝から日本海溝への構造変化を抽出できれば、この接合部での地震活動や震源断層と地殻構造の関係についての知見が得られる可能性もある。また、海溝海側に関しても、アウターライズ域での正断層型の大地震に関する震源断層の研究に対して貢献できるデータとなる。

なお、2020年と2021年の「かいめい」によるMCS探査の主なデータ取得仕様は、発震間隔50 m、エアガン総容量最大10600 cu.in.、エアガン曳航深度10 m、受振点間隔12.5 m、ストリーマーケーブル曳航深度12 m、受振チャンネル数最大444である。

本発表では、以上のデータ取得の概要と暫定的なデータ解析結果について報告する。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Measurement of seismic velocity anisotropy in the Tohoku region, NE Japan by shear wave splitting analysis (4)

*Tatsuya MIZUTA[1], Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ryota TAKAGI[1], Keisuke YOSHIDA[1], Shin'ichi SAKAI[3], Kei KATSUMATA[4], Mako OHZONO[3,4], Masahiro KOSUGA[5], Takuto MAEDA[5], Yoshiko YAMANAKA[6], Hiroshi KATAO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Takashi NAKAYAMA[1], Satoshi HIRAHARA[1], Toshio KONO[1], Toru MATSUZAWA[1], Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. Univ. of Tohoku, 2. Victoria University of Wellington, 3. Univ. of Tokyo, 4. Univ. of Hokkaido, 5. Univ. of Hirosaki, 6. Univ. of Nagoya, 7. Univ. of Kyoto, 8. Univ. of Kyushu, 9. Univ. of Kagoshima

本研究では，地殻中の異方性媒質を地震波が通る時にS波が速い波と遅い波に分裂する現象であるS波スプリッティングを用いて，東北地方のS波偏向異方性の測定を行った．手法はSavage et al.（2010）で紹介されているMFAST（Multiple Filter Automatic Splitting Technique）を用いた．この手法では，各観測点で得られた地震波形3成分のデータに対し，あらかじめ用意した14個のバンドパスフィルターから最適なものを適用後，多数の時間窓でSC91（Silver and Chan, 1991）の手法で異方性の方向と大きさを測定し，多数の時間窓から測定された多数の測定値でクラスター分析（Teanby et al., 2004）を用い，結果の信頼性評価を行う．MFASTはこの一連の流れがプログラムで自動化されているため，従来の方法と比べて素早く多数のデータを処理することができ，客観的で信頼性の高い測定値を使うことができる．
解析は東北地方全域で行っているが，本講演では，主に秋田県内陸部の地震群発域と，岩手県内陸部から沿岸部で詳細な解析を行った結果を紹介する．データには，2011年東北地方太平洋沖地震緊急合同観測などの臨時地震観測データも利用した．秋田県内陸部では，2011年の東北沖地震の前後で解析を行った．東北沖地震の前後で異方性の方向はあまり変化しなかったものの，領域全体で様々な方向の異方性が観測された．異方性が小さなスケールで空間変化していることが示唆され，領域内に応力起因のものと断層などの構造性起因の異方性のどちらも存在していると考えられる．異方性の大きさを示す遅延時間は，東北沖地震前後ともに，領域全体で大きい値を示していたが，前後で比較すると東北沖地震後に地震が群発している領域では大きくなったものの，活火山である岩手山周辺では東北沖地震後に小さくなる結果となった．
岩手県内陸部から沿岸にかけての解析では，異方性の方向は秋田県内陸部と同様に領域全体で様々な方向が得られ，各々の場所により応力起因のものと断層などの構造性起因の異方性のどちらも存在していたと考えられる．一方，異方性の大きさは秋田県内陸部と比べて全体的に小さい結果となった．岩手県沿岸では深さ40kmよりも深い（プレート境界ないし沈み込むプレート内）地震も観測対象とした. 深さ毎に分けて検討すると，浅い領域では異方性は大きいが，深くなるにつれて異方性は全体的に小さくなる結果となりS波スプリッティングの原因となる異方性は主に地殻上部に分布していると考えられる．ただし，プレート境界ないしプレート内で発生している地震に対しては異方性が若干大きくなる傾向も得られた．

© The Seismological Society of Japan

Philippine Sea plate structure inferred from SP converted waves: Preliminary analysis in the southwestern Tokyo metropolitan area

*Kazuo YOSHIMOTO[1]

1. Yokohama City University

はじめに

首都圏下の地震活動は，相模トラフから沈み込むフィリピン海プレート（以下，PHSプレート）の構造により強く特徴付けられている [例えば，長谷川・他 (2013)]．このうち首都圏南西部（神奈川県およびその周辺）においては，相模トラフの走向に沿った方向（概ね東西方向）に地震活動の空間変化が見られ，その要因には，伊豆半島北部におけるプレート衝突や東西方向へのPHSプレートの構造変化（島弧地殻～海洋地殻）などが考えられる．しかしながら，伊豆衝突帯とその周辺のPHSプレートの構造については，その南方の伊豆・小笠原島弧の構造と比べて不明な点が多い．そこで本研究では，制御震源よりも大深度の構造推定に有利な自然地震を用いて，観測地震波形のSP変換波に着目し，首都圏南西部におけるPHSプレートの構造推定のための予備解析を実施した．

データと解析方法

解析には，2008年5月から首都圏地震観測網（MeSO-net）の神奈川県や東京都などの観測点で記録されている，日本列島周辺で発生した深発地震の波形データを使用した．波形記録のSN比が高く，直達波（P波およびS波）の波形がパルス的なマグニチュード5～6程度の地震を選択した．MeSO-netの加速度波形は時間積分して，速度波形または変位波形に変換して解析した．解析した地震の変位波形のパルス幅は1～3秒程度である．水平成分の波形記録は，震源と観測点の位置関係をもとに，radial成分とtransverse成分に回転した．特定の観測点の波形記録には，S波の到達に先行して，上下動成分に卓越するSP変換波と考えられる波相が検出された．本解析では，神奈川県と東京都を横断するMeSO-netの２本の測線で収録された地震波形に注目して，これらの測線におけるSP変換波の振幅とS-SP時間の空間変化を詳しく調べた．

解析結果

例えば，2013年11月19日4時10分に遠州灘で発生した深発地震（M_w 5.7，深さ340 km）については，発生時間が未明であり関東地方の最大震度が2であったことから，SN比の高い地震波形が収録されている．この地震について，神奈川・栃木県境から東京都東部まで西南西-東北東に約80 km連続する測線で観測されたSP変換波の特徴をまとめると以下のようになる．測線西端の丹沢山地に位置する観測点では，大振幅で明瞭なSP変換波が観測され，S-SP時間は5.5秒程度である．このSP変換波については，その振幅極性とS-SP時間から，上位（浅部）が相対的に低速度の地震波速度不連続面を形成する同地域のPHSプレートのモホ面によって励起されたものと解釈できる．なお，SP変換波は，丹沢山地（藤野木-愛川線を東縁とする）より東側で急に不明瞭になることから，関東平野に入るとその地震波速度不連続性は小さくなるものと考えられる．一方，関東平野の中央部に位置する測線東端に近い東京都内の観測点では，S-SP時間で5～7秒程度に，逆極性のSP変換波が1～2秒程度の走時差を伴って観測される．既往研究 [例えば，Nakajima et al. (2009)] より，これらのSP変換波はPHSプレート（スラブ）の地殻のほぼ上面と下面で発生しているものと考えられるが，詳細の解明については今後の課題である．本発表では，上述の地震ついて他の観測点で見られたSP変換波の特徴，および他の深発地震についての解析結果などを紹介する予定である．

謝辞

防災科学技術研究所・東京大学地震研究所・神奈川県温泉地学研究所による
MeSO-net（DOI：10.17598/NIED.0023）の地震波形記録を使用しました．震源情報は，防災科学技術研究所 F-net MTカタログ，気象庁一元化震源カタログを参照しました．

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

Three-dimensional velocity structure beneath Hakusan volcano estimated by double-difference tomography

*Rin Miura[1], Yoshihiro Hiramatsu[2]

1. Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2. Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

１. はじめに

白山火山はフィリピン海プレートの沈み込み開始に伴い、流体起源が太平洋プレートからフィリピン海プレートに推移した活火山である。最終噴火記録は1659年であり、その後の経過時間の長さから長期的にはいつ活動を再開してもおかしくなく、現在は山頂直下での群発地震が度々観測されている。白山火山に焦点を当てた地震波トモグラフィー(高橋・他, 2004)では、深さ10～14 km付近にマグマ溜り、その深部に下部流体域が推定されているが、このマグマ供給系について詳細に明らかにされているとは言い難い。そこで本研究では、Double-Difference Tomography法を用いて白山火山周辺の３次元速度構造を推定し、マグマ供給系に関する新たな情報を得ることを目指す。

２. データと方法

気象庁一元化震源カタログに記載されている、2010年から2020年に発生した3590個の地震 (東経135.5-139度，北緯34.5-37.5度，震源深さ0-500 km, 2.0≦Mj≦9.0)，の験測値データを用いた。以上の地震と、全地震データから半径150 km以内の常時観測点を用いて連係震源決定(JHD) 法(Kissling et al. (1994))により一次元速度構造を決定した。地震波トモグラフィーにはDouble-Difference Tomography法(Zhang and Thurber, (2003))を用いた。これにより先行研究より震源が集中している地域においての解像度の上昇を図ることができる。また、チェッカーボードテストにより解像度を検討した。

３. 結果

得られた地下速度構造について、先行研究で発見された深さ10~14kmの低速度・高Vp/Vs領域に加え、今回は深さ6~10kmでP波低速度(-9%程度), S波低速度(-8%程度)領域を発見できた。また、この領域におけるVp/Vs値が1.68だったことから、先行研究に新たな解釈を加えることが必要だと考えられる。この特徴から水に富む領域が存在するのではないかと推測できるが、今後更なる考察を行なっていく予定である。

４. 謝辞

解析には気象庁一元化震源カタログを使用させて頂きました。解析について、東京大学地震研究所の行竹洋平博士にご助言いただいた。記して感謝いたします

© The Seismological Society of Japan

Detailed seismic reflection structure mapping in the western Nankai Trough

*Yasuyuki NAKAMURA[1], Yuka Kaiho[1], Tetsuo No[1], Kazuya Shiraishi[1], Gou Fujie[1], Shuichi Kodaira[1], Gaku Kimura[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1], Ayako Nakanishi[1]

1. JAMSTEC

南海トラフはプレート境界型の巨大地震が繰り返し発生してきた沈み込み帯である。近年ではゆっくり地震の観測が報告され、プレート間滑り挙動の多様性や相互関係を研究する上で重要な領域である。超低周波地震と沈み込む海山の関連が指摘されるなど、沈み込み帯の詳細な地下構造は、プレート境界近傍での地震関連滑り現象を解明する鍵の一つであると考えられる。
我々は、2018年から南海トラフ沈み込み帯において稠密測線による反射法地震探査を主とした構造調査を実施し、これまでに、潮岬沖から足摺岬沖の海域において4-8km間隔の測線で反射法探査データを取得した。これら新規取得した測線に加え1990年代に取得した測線のデータを対象に重合前時間マイグレーション（PreSTM）、重合前深度マイグレーション（PreSDM）解析を実施し、高品質な反射断面を作成した。20年以上前に取得されたデータは、ケーブル長が短い、チャンネル間隔が長いなど、反射法解析には不利な条件のデータではあったが、近傍で新規に得られたデータの解析結果を参考にしつつ最新の解析技術を適用することで、過去のデータからも構造マッピングに使用可能な断面を作成することができた。
得られた断面には、沈み込むフィリピン海プレート上面やデコルマ面、付加体の変形、斜面堆積物、BSRなど、南海トラフに特徴的な構造が明瞭に描き出されている。稠密な測線で得られた断面の解釈を元に、これまでに無い高分解能での3次元的構造マッピングが可能となった。沈み込むフィリピン海プレート上面の形状は、浅部低周波地震活動が報告されている室戸岬沖周辺では起伏に富む一方、紀伊半島西部から紀伊水道沖および土佐湾沖では多少の起伏は認められるものの概ね滑らかであることがわかった。室戸岬沖には海山が沈み込んでいることがこれまでにも指摘されていたが、本研究の結果からそれらの海山は複数の頂部を持つような構造であることが示唆されるなど、プレート境界滑りに関わるより詳細な構造情報が得られつつある。
本研究では、PreSDMによって深度断面を作成した。約4.5-5.5km長のストリーマーケーブルによって得られたデータを用いているため、沈み込み帯深部における速度決定精度は低下する。これは反射断面にイメージされるプレートの沈み込み角度などに影響を与えると考えられる。今回の解析では、フィリピン海プレート上面からの反射波の連続性などを指標に速度推定を行ったが、今後、OBSを用いた速度構造との比較などによって、速度・深度の精度に関する議論も行っていきたい。

© The Seismological Society of Japan

The characteristics of small normal faults developed on the subducting Philippine Sea Plate along Nankai Trough

*Mikiya YAMASHITA[1,2], Ayako Nakanishi[2], Seiichi Miura[2], Shuichi Kodaira[2], Yoshiyuki Kaneda[3,2]

1. Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3. Kagawa University

1．はじめに

巨大地震が繰り返し発生する南海トラフでは，これまで数多くの地殻構造探査が実施され沈み込むフィリピン海プレートの形状が詳細になってきた（Nakanishi et al., 2018）．また近年南海トラフ周辺では高密度・高精度の地震観測によって低周波地震・微動の分布が数多く報告されている（例えばYamashita et al., 2015）．プレート構造や物性と低周波地震・微動の分布を対比させることはプレート境界における地震性すべり域やスロースリップといった現象の理解に有効であり，また詳細なモデルを作成することで地震動予測などシミュレーション分野にも大きく貢献することが期待される．一方，南海トラフでは深部強反射面の発見（Park et al., 2002）やデコルマ面上の位相変化（Park et al., 2014）などのトラフ軸より陸側の研究例がほとんどで，日本海溝などで注目されている海溝海側の構造については研究例が報告されていない．低周波地震・微動の現象には高間隙水圧が関係影響しているが（Hirose et al., 2021），沈み込むフィリピン海プレートのどこからプレート内部へ水が供給されているのかは明らかになっていない．本研究では高分解能で取得された既存反射法地震探査測線を利用して，トラフ軸より海側に発達する正断層に着目してその特徴を報告する．

２．高分解能反射法地震探査

海洋研究開発機構が南海トラフで2013・2014年に海洋調査船「かいよう」によって四国沖から紀伊半島にかけて実施した高分解能反射法地震探査はトラフ軸周辺の微細構造解明が目的であった．取得した計23測線のうち13測線はトラフ充填堆積層を横断し四国海盆までデータが得られている．測線間隔は10～20㎞であり，本データを用いてトラフ軸よりも海側の構造に着目した正断層マッピングを行った．

３．結果

本研究では海底面で確認できるものを断層と同定し，解釈可能な13測線すべてで正断層が確認された．これらの正断層はトラフ軸で見られるプロトスラスト帯と同様に断層面に沿った大きな変位を伴わず，海底面での変位もほとんど見られなかった．断層の平均水平間隔は250mである．陸側に一番近い正断層のトラフ軸の前縁断層からの距離は10～25㎞であり，トラフ充填堆積層の分布幅と調和的であった．四国海盆の拡大軸周辺にある紀南海山の延長部にあたるHDNT123・125測線で最も発達しており，沈み込むフィリピン海プレートが断層発達に影響していると考えられる．さらに本研究では複素アトリビュート解析を適用することで，正断層群によるプレート内部の影響を評価していく予定である．

© The Seismological Society of Japan

Effects of insufficient back-azimuth coverage on the estimation of a dipping velocity discontinuity

*Katsuhiko SHIOMI[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

【はじめに】
地下の地震波速度不連続面を検出する手法として、レシーバ関数 (RF) 解析法が広く活用されてきた。沈み込むプレート等、検出対象となる速度不連続面が傾斜している場合では、地震波の到来方向によってtransverse成分にも関連する変換波が記録される。Shiomi & Park (2008; JGR)によるグリッドサーチやBianchi et al. (2010; JGR)によるharmonic decomposition解析は、いずれもradialおよびtransverse両成分のRFの地震波到来好方向依存性に着眼し、観測点下の速度不連続面の傾斜方向や傾斜角、異方性構造の特徴を推定するための解析方法である。これらの解析方法は、RFの推定に用いる遠地地震記録が、全ての方位から均質に到来することで、安定した推定結果を得ることが可能になる。一方、日本列島を対象としたRF解析を行う場合、通常の解析に用いられる遠地地震は南東から南南西方向 (オセアニア～東南アジア) で発生するものが圧倒的に多く、逆に北東から東方向や北西方向から到来する遠地地震波形は皆無である。今回、日本のように地震波の到来方向に強い偏りがある場合に、上記の解析方法でどの程度安定した推定結果が得られるのかを改めて確認するため、簡単な構造を用いた理論波形を合成し、検証を行った。

【計算方法】
理論波形の合成にはRAYSUM (Frederiksen & Bostock, 2000; GJI) を用いた。今回は、傾斜する地震波速度不連続面推定において、一定の方位からの地震波が欠落している場合の影響を調査することを目的とした。そのため、モデルは下部地殻と最上部マントルに相当する単純な2層構造とし、その境界面に傾斜を与えた。傾斜方向 (strike) は0˚から345˚まで15˚おきに、傾斜角 (dip) は5˚から45˚まで5˚ごとに変化させた。地震波の到来方向は0˚から355˚まで5˚ごとに設定し、全ての方位から地震波が到来する事例 (ケース1) と、実際の観測結果同様、東方向に相当するN60˚EからN115˚Eおよび北西方向に相当するN320˚EからN345˚Eのデータを除外した事例 (ケース2) の2例を設定した。モデル下部への入射角は約25˚に固定した。なお、理論波形にノイズ（雑微動）は加算していない。

【結果・議論】
まず、得られたRFにharmonic decomposition解析を適用し、境界面の傾斜方向を推定した。ノイズを加算していないこともあり、全方位から地震波が到来するケース1では、設定した方位と寸分違わぬ結果が得られ、計算方法が妥当であることの確認が取れた。また、一部の方位の地震波を除外したケース2でも、全てのstrike / dipのモデルにおいて推定値と設定値の差分は2˚未満であった。結果を詳細に確認すると、境界面が南西から西方に傾斜する事例、すなわち境界面が浅くなる方向のデータが欠落している場合に設定値からの差分がやや大きくなる傾向が見えた。次に、グリッドサーチにより、境界面のdipを推定した。この場合、ケース1でも3˚程度の差分が生じるとともに、設定したdipが30˚を超えるあたりから、推定するdipの頭打ちが生じた。前者は変換波のパルス幅の取り方、後者はモデル下部への入射角よりも大きなdipを設定したことに起因すると考えられる。なお、元来、RF解析では急な傾斜角を持つ不連続面や大きな入射角の地震波の使用は想定されていない (e.g., Ammon, 1991; BSSA)。一方、この方法をケース2に適用すると、多くのモデルでは、設定値と推定値の差分は5˚以下であったが、設定したdipが20˚以下、かつ面が南西から西方に傾斜するモデルで推定値が設定値と10˚～35˚異なる事例を確認した。以上の結果から、現状、傾斜方向はある程度の確度で推定可能であるが、傾斜角は10˚程度の推定誤差を有すること、特に日本の場合では、西方に緩く傾斜する不連続面の傾斜角の推定は困難であることが分かった。汐見 (2020; SSJ FM) は、harmonic decomposition解析により、四国東部下の海洋モホ面が、従来のRF断面図やトモグラフィ解析からは見いだせなかった凹凸がある可能性を示した。今後は、より安定した傾斜角の推定方法を検討するとともに、四国の各観測点下の海洋モホ面の

© The Seismological Society of Japan

傾斜角の推定を実施し、より詳細なフィリピン海プレートモデル構築につなげる予定である。

© The Seismological Society of Japan

Random velocity inhomogeneity at the western part of the Nankai subduction zone

*Tsutomu TAKAHASHI[1], Koichiro OBANA[1], Yasushi ISHIHARA[1], Seiichi MIURA[1], Shuichi KODAIRA[1], Yoshiyuki KANEDA[2]

1. JAMSTEC, 2. Kagawa Univ.

数Hz以上の地震波は，伝播距離の増大とともに波形が崩れ複雑な波群を示す．これはランダムな不均質構造による多重散乱として解釈され，波群の継続時間などを用いて速度不均質のパワースペクトル密度などを推定する研究が進められている．S波の初動到達から最大振幅到達までの時間差（ピーク遅延）は内部減衰の影響を受けにくく，ランダム不均質構造を推定するのに適していると考えられている．本研究では四国沖からトカラ列島周辺までの領域を対象とし，陸上観測点と海底地震計で得られた地震波形記録を用いてランダム速度不均質の三次元構造を推定した．解析に用いた地震数は492で，防災科学技術研究所のHi-net及びF-net，海洋研究開発機構が島嶼部に設置した臨時陸上観測点，265台の海底地震計の計485点で得られた約38000経路の波形記録を使用した．速度波形の水平動2成分からRMSエンベロープを合成し，4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hzにおけるピーク遅延を測定した．ランダムな速度不均質のパワースペクトル密度はvon Karman型を仮定し，スペクトルの勾配を規定するパラメータ(κ)とパワースペクトル密度の振幅を規定するパラメータを未知数とした．構造推定にはreversible jump MCMC（Green 1995）を用い，未知数の数と空間配置を変えながら最適解を探索した．散乱の周波数依存性を考慮するため，同一波線の異なる周波数間の残差が相関をもつよう，尤度関数の共分散行列の非対角成分の一部を非ゼロとした．

解析の結果，地殻内の非火山地域ではκが0.8程度と推定され，速度不均質のパワースペクトル密度は波数15km^{-1}で10^{-8} ~ 10^{-7} km^3 と比較的弱い不均質性が推定された．別府から島原の火山列や桜島付近の火山群の下は周囲に比べて不均質性が強く，深さ0-30kmではκ は約0.5，波数15km^{-1}でのパワースペクトル密度は約10^{-6}km^{3}と推定された．これらの火山の下では，深さとともにκが減少し，パワースペクトル密度が大きくなる傾向が見られた．沈み込んだ九州パラオ海嶺付近では顕著な不均質性の変化は見られなかったが，九州パラオ海嶺付近に設置された海底地震計では16-32HzのS波が明瞭に観測されない傾向が見られた．これは散乱の影響を強く受けたために最大振幅がノイズレベルを下回った可能性を示唆し，高周波数域での多数の欠測により不均質性を過小評価した可能性が考えられる．

種子島・トカラ列島の東側では，波数15km^{-1}でのパワースペクトル密度が火山地域の地殻内と同程度の媒質が深さ0-20kmに分布していることがわかった．この領域ではκが0.5以上であり，スペクトルの特徴は火山域とは大きく異なる．この領域のプレート境界10-20kmと推定されており(Yamamoto et al. 2020)，主に上盤側の構造を反映していると考えられる．また中国地方西部の深さ20-40kmに火山周辺と類似した不均質性の強い領域が推定された．同様の構造は九州東部の深さ20-30kmにも分布する．これらの不均質性の強い構造の成因などは現時点では不明であり，今後他の領域での解析事例を増やすなどして解釈を進める必要がある．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P3 (ROOM P)

[S09P-01] Relation between activity of repeating earthquakes and slip-rate deficit under the Ryukyu Trench– Nanakai Trough

○Akinori HASHIMA[1], Hiroshi Sato[2], Tatsuya Ishiyama[2], Toshihiro Igarashi[2] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-02] Swarm earthquake activity in the northeastern Noto Peninsula

○Yoshihiro Hiramatsu[1] （1.Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-03] Numbers and duration of aftershocks for inland earthquake in Japan as a function of their size

○Taichi Honda[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-04] Relevance of Seismic activity near Wakayama City to the earth tides

○Funa Iizuka[1], Yasuhiro Yoshida[2] （1.Sapporo Regional Headquarters, JMA, 2.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-05] A trial digitization and spectral analysis of analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network for the analysis of tectonic tremor

○Takanori MATSUZAWA[1], Tetsuya TAKEDA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-06] Comparison of the regional characteristics of the magnitude-frequency distribution of earthquakes with interplate slip phenomena along Japan Trench

○Kohei Nagata[1], Koji Tamaribuchi[1], Fuyuki Hirose[1], Akemi Noda[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-07] Urgent ocean bottom seismic observation of earthquake swarms in the Tokara Islands initiated in April 2021

○Yukihiro NAKATANI[1], Hiroshi Yakiwara[1], Yusuke Yamashita[2], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1] （1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-08] Seismicity pattern before and after the 2016 Kumamoto earthquakes

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Jun Izutsu[4], Yoshiaki Orihara[5], Masashi Kamogawa[1] （1.Univ. of Shizuoka, 2.Shizuoka Univ., 3.Inst. of Stat. Math., 4.Chubu Univ., 5.Tokyo Gakugei Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-09] A preliminary study on low-frequency earthquakes below Mt. Fuji: Creation of an earthquake catalog using the Matched Filter method and quality evaluation of the catalog

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Yohei Yukutake[4] （1.Univ. of Shizuoka, 2.Inst. of Stat. Math., 3.Shizuoka Univ., 4.Univ. of Tokyo）

©Seismological Society of Japan

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-10] Anomalous seismic activity including shallow low-frequency events near Hakodate: hypocenter distribution and characteristics of waveforms derived by dense seismic observation

○Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Masahiro Kosuga[2], Takuto Maeda[2] （1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Hirosaki University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-11] Stress field in the Tohoku region, Japan and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

○Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Shin'ichi Sakai[2], Mako Ohzono[2,3], Kei Katsumata[3], Masahiro Kosuga[4], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Shu'ichiro Hori[1], Toru Matsuzawa[1], . Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake （1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 4.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5.Graduate School of Encironmental Studies, University of NAGOYA, 6.Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 8.Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-12] Performance comparison of hash-based methods for similar waveform detection

○Yuki Takayama[1], Shiro Hirano[1], Hironori Kawakata[1] （1.Ritsumeikan University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-13] Along-strike variation of shallow very low frequency earthquake activity in the Nankai subduction zone

○Shunsuke TAKEMURA[1], Satoru Baba[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Katsuhiko Shiomi[4], Takanori Matsuzawa[4] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.Tohoku University, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-14] Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude

○Koji TAMARIBUCHI[1], Masashi OGISO[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-15] Aftershocks and shear strain energy changes caused by inland earthquakes in Japan

○Sachiko TANAKA[1] （1.NIED）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-16] Three-dimensional tectonic stress field inferred from long-term data of seismicity with prior information

○Toshiko TERAKAWA[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2] （1.Nagoya Univ., 2.ISM）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

[S09P-17] Spatio-temporal distribution of the very-low frequency earthquake at Kumano-nada — Activity between Dec. 2020 and Jan. 2021—

○Yojiro Yamamoto[1], Keisuke Ariyoshi[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Takane Hori[1]
（1.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-18] Controling factors of along-dip segmatation of mega-thrust earthquakes in subduciton zones

○Kiyoshi YOMOGIDA[1] （1.Earth Planetary Dynamics, Grad Sch Sci, Hokkaido University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-19] Visualization of seismic activity anomalies - comparison of multiple methods

○Sumio YOSHIKAWA[1] （1.No affiliation (JMA, retired)）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-20] Scaling relations of moment magnitude and rupture area for intraslab earthquakes

○Xuelei Zhang[1], Makoto Nemoto[1], Nobuyuki Morikawa[2], Yuji Dohi[2], Kenji Hirata[2], Hiroyuki Fujiwara[2] （1.OYO corporation, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Relation between activity of repeating earthquakes and slip-rate deficit under the Ryukyu Trench–Nanakai Trough

*Akinori HASHIMA[1], Hiroshi Sato[2], Tatsuya Ishiyama[2], Toshihiro Igarashi[2]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

著者らは、さきの研究において、琉球ー西南日本弧における1998–2010年の測地データのインバージョンにより琉球海溝ー南海トラフにおけるすべり速度欠損の分布を求めた（橋間ほか, 2018, 日本地球惑星科学連合2018年大会）。すべり速度欠損は、南海トラフでは最大8 cm/yrとなり、過去の研究と調和的であった。一方、琉球海溝では、九州南部から南方に向けて負のすべり速度欠損（すべり速度余剰）が増加し、琉球海溝最南部で5 cm/yrに達した。琉球海溝におけるすべり速度余剰はスラブ後退の浅部における表れであり、沖縄トラフの背弧拡大を引き起こすものと考えられる。一方、琉球海溝においては、測地データとは独立に、繰り返し地震によるすべり速度が求められている（Igarashi, 2010, 2020; Igarashi & Kato, 2021)。そこで本研究では、測地データインバージョンによるすべり速度欠損分布を繰り返し地震によって検証する。繰り返し地震のすべり速度データとしては、観測期間を考慮し、Igarashi (2010)のカタログのものを用いた。繰り返し地震によるすべり速度はプレート相対速度に沿った向きであると仮定し、各点におけるプレート相対速度を差し引いてすべり速度欠損とする。プレート相対速度の計算にはNUVEL-1Aモデル（DeMets et al., 1994）を用いた。繰り返し地震によるすべり速度欠損はばらつきが2-3 cm/yrと非常に大きく、琉球海溝の最南部ではすべり速度欠損が3 cm/yrと-10 cm/yrを示す繰り返し地震が近接する例もある。測地データインバージョンのすべり速度欠損は、このばらつきの下限を画するように分布する。両者の解像度の違いを考えると、繰り返し地震によるすべり速度のばらつきは、測地データインバージョンでは捉えられない局所的な固着による影響を受けたものと考えられる。興味深いことに、1911年M8喜界島地震の震源域（後藤, 2013）付近では、測地データインバージョンのすべり速度欠損、繰り返し地震のすべり速度欠損の下限がともに0 --1 cm/yrとなり、相対的な固着域となっている。一方、両すべり速度欠損分布と計器観測以前の1771年、1791年の～M8地震の震源域との間に明白な関連は見られなかった。

© The Seismological Society of Japan

Swarm earthquake activity in the northeastern Noto Peninsula

*Yoshihiro Hiramatsu[1]

1. Kanazawa University

・はじめに
能登半島北東部の珠洲市では気象庁震度データベースによると2021年5月～7月に有感地震が13回発生し，明らかに過去の平均的な有感地震数（～数回／年）より多い．この地域での地震活動の活発化は2020年12月頃から始まっており，GNSSデータでもそのタイミングに合わせて奥能登で局所的な地殻変動が始まっていることを見ることができる（西村, 2021）．さらに遡ると，この地震活動の始まりは2018年5月頃である．本研究では，能登半島北東部の群発地震活動について報告する．

・データと方法
本研究で対象とする地域は能登半島北東部の珠洲市周辺地域で，北緯37.4～37.6度，東経137.1～137.4度の範囲である．気象庁の験測値データを用いて，JHD法（Kissling et al., 1994）にて一次元地震波速度構造を求め，その速度構造を用いてDouble Difference法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）にて震源再決定を行った．

・結果と考察
本研究地域の地震活動は珠洲市の南部（富山湾側），西部（内陸部），北部（日本海側）の3つの領域に大別できる．南部域では2018年5月から地震数が増加し，6月～8月にかけて集中的に地震が発生し，その後も地震活動が比較的高い状態が継続していた．2020年12月にそれまでの活動域を囲むような震源分布で地震数が急増した．震源の深さは3領域全てにおいて概ね～15 km程度であるが，2020年12月の南部域の地震については15 kmより深い地震が多いことやそれまでの活動域の外側にドーナツ状に地震発生域が広がっていることが特徴的である．西部域では2021年2月から，北部域では2021年3月から地震活動が目立つようになり，両地域ともに5月から地震数が急増し，特に北部域では2021年6月，7月にかけてさらに地震数が増え，マグニチュードも3～4と比較的規模の大きい地震が起こるようになった．

能登半島北東部のGNSSデータからは，2020年12月頃からこの地域において局所的に非定常地殻変動が起こっていることが分かる．西村(2021)は能登半島のGNSSデータの詳細解析から，この非定常地殻変動は茂木モデルを仮定すると，2020年12月からのドーナツ状の地震活動域の北西部付近の深さ12 kmの体積膨張源により説明できることを示した．この非定常地殻変動は現在も継続しており，2021年に一層の活発化を示した一連の群発地震の成因であると考えられる．

飯尾(1983)は群発地震の最大地震のマグニチュード（M_{max}）と活動域のリニアディメンジョン（L_{swm}）の関係式として，$M_{max}=\log_{10}L_{swm}+2.65$を提唱している．2021年7月末時点において，奥能登の3つの群発地震活動域について，観測された最大地震のマグニチュードと活動域のリニアディメンジョンの関係は飯尾(1983)の関係式と概ね整合的である．

・謝辞：本研究では気象庁の験測値データを使用しました．記して，感謝します．

© The Seismological Society of Japan

Numbers and duration of aftershocks for inland earthquake in Japan as a function of their size

*Taichi Honda[1], Takuji Yamada[1]

1. Ibaraki Univ.

1.はじめに

余震とは、ある地震（以後、本震と記す）の後に本震の断層およびその近傍で起こる本震よりも小さな地震のことである。本研究では、余震数と余震の継続時間という２点に着目し、2003年以降に日本の内陸部で発生した、マグニチュード(M)5.5以上の13地震を解析した。

2.解析手法

定常的な活動の地震と余震を区別するために、時空間的な余震の定義が必要である。最初に、スケーリング則から本震の断層の長さを求めた。そして、深さ30 km以浅、本震の震央から断層の長さを半径とする円柱を余震域と定義し、余震域内に震源を持つ地震を余震の候補とした。また、時間的定義は以下とした。はじめに、余震域内での本震前180日間の地震活動を「定常的な活動」として定義し、その地震数を集計した。次に、本震後180日間の地震総数を1 日ずつ時間窓をずらしながら集計し、その地震数が「定常的な活動」の地震数を以下になった時点を余震活動の終了とした。以上の空間・時間的な定義を両方満たす地震を余震とした。なお、各余震域での地震活動の規模別頻度分布を考慮することにより、M2.0以上の地震を解析対象とした。

3.結果および考察

一般に、地震数の時間変化をグラフ化すると、余震数と本震の規模には単純な相関がない印象を受ける。ところが解析の結果、日本の内陸地震に関しては、本震の規模と余震数には強い相関があることが明らかとなった（図1.a）。この結果は、本震直後の余震活動の激しさと余震の継続時間が逆相関の関係にあることを示唆している。また、Mが１大きくなると余震数はおよそ10倍になることから、余震数はグーテンベルク・リヒター則を満たすような値を取ることが確認された。しかし、本震の規模と余震数の相関から大きく外れる地震も存在している。本震が発生しなければ余震も起こらないことを考慮しながら、各地震の破壊の複雑性等との相関を吟味することにより、これらの原因について今後検討を進めていきたい。また、余震の継続時間と本震の規模の間には緩やかな正の相関があるものの、本震の規模と余震数の相関に比べると明確に弱い（図1.b）。これは、余震の継続時間には本震の規模以外の要素が重要であることが考えられる。一方、余震の時間的定義については、慎重に検討する必要がある。余震の時間変化がOmori公式に従うならば、余震の積算数は本震後の経過時間の対数に比例すること、現在の定義では180日以内で終了する余震活動が存在しないことなどを考慮しながら、余震の継続時間についても議論を深めたい。

© The Seismological Society of Japan

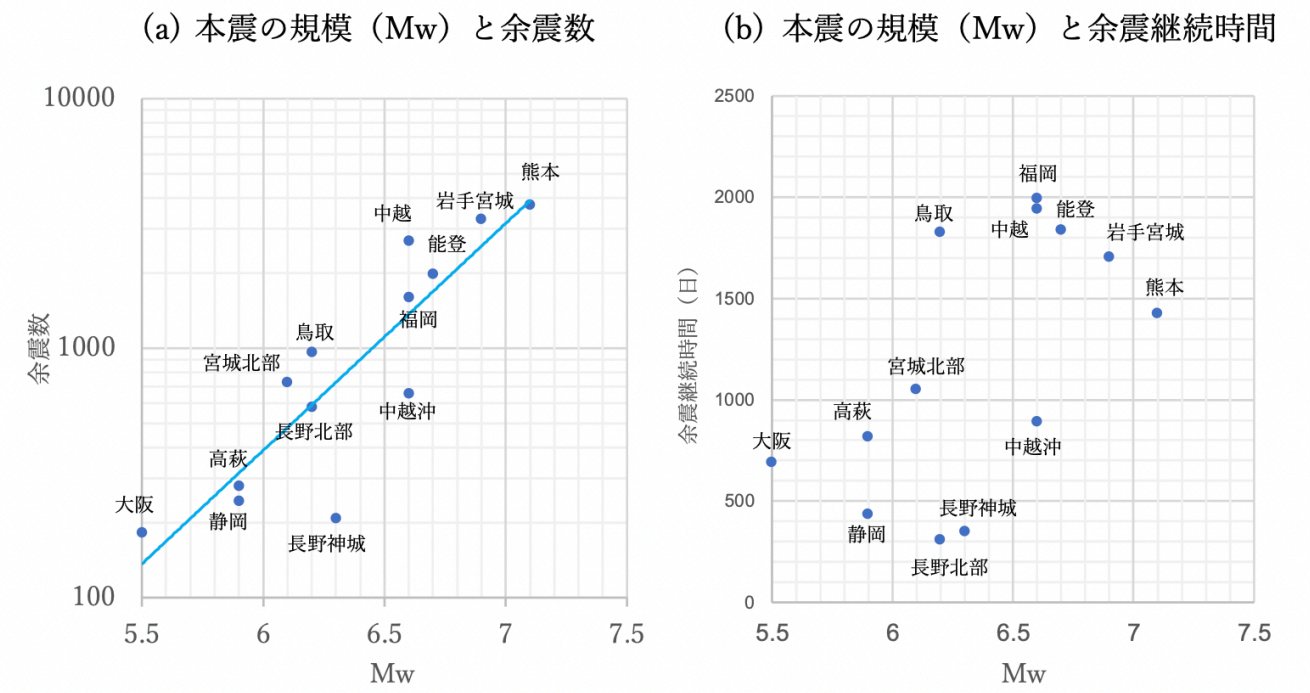


図 1 . (a)余震数および(b)余震継続時間と本震の規模の関係。(a)内の水色直線は、余震数が地震の規模の 1 次関数として表されると仮定した際に、最小二乗法により求められた回帰直線を示す。

© The Seismological Society of Japan

Relevance of Seismic activity near Wakayama City to the earth tides

*Funa Iizuka[1], Yasuhiro Yoshida[2]

1. Sapporo Regional Headquarters, JMA, 2. Meteorological Research Institute

和歌山市付近の地震活動は非常に活発で、まわりに比べて震源が浅い、土地の膨張・隆起が観測されている、といった特徴があるものの地震の発生原因について詳しく調査した研究は少ない。本研究では、この領域での地震活動と地球潮汐との関係を調べることでこの地震活動が何に影響を受けているのかを解明することを目的とした。

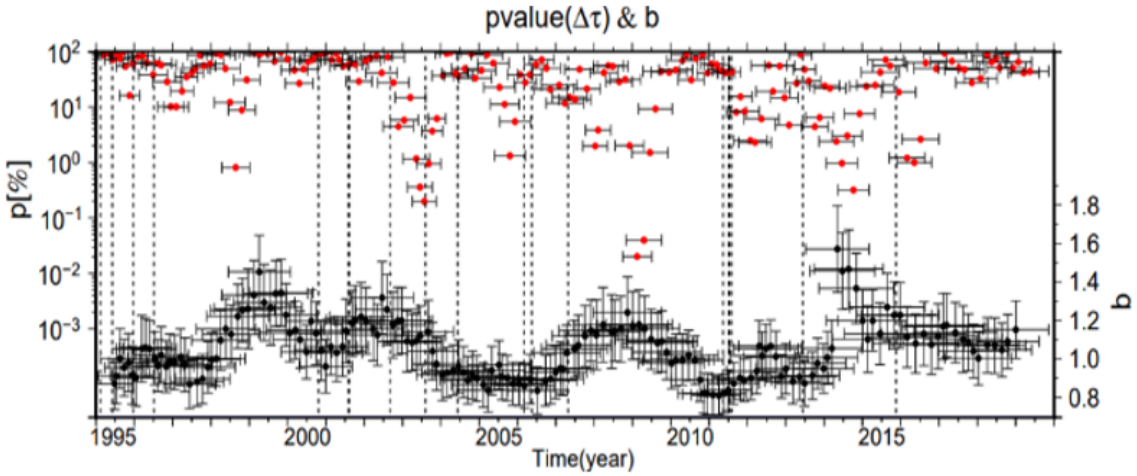
地震活動と地球潮汐の相関は、地震発生時の地球潮汐の応答を計算し（Hirose et al.,2019）、Schuster’s testの手法に基づいたｐ値などに基づいて判断する。この方法を使った解析の結果から地震活動と潮汐の相関がみられる時期について、対象領域の周辺で発生している低周波地震や長期的スロースリップ、地震活動のｂ値、地殻変動、地震発生場所との関連を調べた。

解析対象期間は1995年から2019年の25年間であり、期間中、潮汐によるせん断応力Δτと地震活動の相関が強く、1998、2003、2005、2008、2011、2015年の6つの時期に特に潮汐相関が高まっていることが分かった。低周波地震と潮汐相関の関係を調べたところ、大阪湾での低周波地震が活発化していた時期の数か月後にΔτのｐ値が低下している事例が数例観測された。この地域では地下から流体が上昇してきている可能性が指摘されており（Nakajima and Hasegawa,2007）、フィリピン海スラブの下から湧昇してきた流体が深さ20～30km で低周波地震を引き起こし、その流体が更に上昇してきて対象領域の下深さ約10kmの群発地震域に到達し、断層面に入り込むことで断層滑りが起こりやすくなり潮汐相関が高まったと考えられる。また、ｐ値とｂ値の時間変化を調べた結果が下図である。赤丸がp値(左軸)、黒丸がｂ値(右軸)の時間変化を示しており、その対応関係を調べたところΔτのｐ値の低下と地震活動のｂ値の上昇には弱い相関(r=0.371)が見られた。また、ｐ値が低下しているときにｂ値が高い領域での地震の発生率が高まっていたことが分かった。これは水やマグマといった高温物質が地下から上昇してきて断層面に入り込み差応力が小さくなることでｂ値が大きくなり、それと同時に断層面が滑りやすい状況になっていたために地球潮汐と地震活動の相関が強くなった考えられる。

このように、潮汐相関が高まっていた時期について大阪湾で発生した低周波地震、地震活動のｂ値との関係が見られた。両者とも上昇してきた流体が断層面に入り込み、断層滑りが起こりやすくなったことで地球潮汐という微小な応力変化による地震の誘発が見られた、というモデルを立てると観測事実を整合的に説明できる。以上のことから、和歌山市付近の浅発地震の発生には地下から上昇してくる流体が関わっている可能性が高いと考えられる。一方、紀伊水道での長期的スロースリップや紀伊半島下のフィリピン海プレート上面で発生する低周波地震、GNSSによる土地の膨張・隆起が捉えられていた時期との関連は見られなかった。

謝辞：本研究では気象庁が決定した震源及び発震機構のデータを使用しました。 また、気象研究所の弘瀬冬樹様から提供して頂いたプログラムTidal strain、気象研究所の小林昭夫様から頂いた地殻変動に関するデータ、気象大学校の木村一洋准教授のGNSSデータ解析ツールを使用させて頂きました。その他、本研究に対するご助言を賜りました気象研究所の皆様にも深く感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan



図：ｐ値とｂ値の時間変化（赤丸がｐ値(左軸)、黒丸がｂ値(右軸)を表す）

© The Seismological Society of Japan

A trial digitization and spectral analysis of analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network for the analysis of tectonic tremor

*Takanori MATSUZAWA[1], Tetsuya TAKEDA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフにおける深部微動（以下，微動）の発見(Obara, 2002)以降，多くの研究者によってスロー地震が精力的に研究されてきた．一方数値シミュレーションの研究からは，大地震発生領域への応力蓄積過程に伴い，スロー地震活動の発生間隔に長期的な変化が見られる可能性が指摘されている(例えば，Matsuzawa et al., 2010)．東海地域における長期間のスロー地震カタログとしては，例えば東海地域の1984年以降についてひずみ計を用いた短期的スロースリップイベントに関する研究がなされているが（小林他，2006），とくに1998年以前については観測点数の問題から，詳細な位置推定は難しい．また，歪や傾斜といった地殻変動観測においては，降水などの影響を受けやすい点も，活動を網羅的にカタログ化する観点で課題となる．

防災科研は1970年代末から関東東海地殻活動観測網の運用を開始しており，ペンレコーダーによる地震計のアナログ記録が残されている．高密度に展開された地震観測網の地震波形記録が連続のデジタルデータとして保存されることが一般的になったのは2000年代以降であるため，それ以前のスロー地震活動状況を解明するには，こうしたアナログの地震波形記録が有用となる．我々はこの記録を用いた1980年代の愛知県東部の微動活動把握を目指し，目視による活動検出を実施した（松澤・武田, 2020）．しかし，客観的な基準で微動を検出し，微動源の位置を議論するためには，波形をデジタルデータ化して解析することが重要となる．また，数日間におよぶエピソード単位の活動の解析や，年単位の連続記録の網羅的な解析を目指す場合には，手作業でなく可能な限り自動化できることが望ましい．こうした目的のもと，我々は波形データの自動デジタイズの試みを開始した（松澤・武田，2021, JpGU)．しかしながら，スキャンされた画像の傾きが補正できない点，波形の振幅がトレース間の平均間隔の半分を越えた場合には周囲のトレースを含め正しくデジタイズできない点が，主な問題点となっていた．我々はこうした問題の解決を目指し，手法の改良を行った．

解析対象となる波形記録では，１枚の記録紙に２時間分の上下動地震波形がペンレコーダーで記録されている．記録は上下段および左右の４つのブロックに分かれ，上段が前半１時間，下段が後半１時間分となっている．左側は毎分0～35秒台の波形トレースが上から順に並んでおり，右側は30～65秒台の波形トレースが同様に並んでいる．各トレースにおいては，１秒毎にstreak状のタイムマークが上向きに入り，0秒台にはやや長いオフセットが入るようになっている．デジタル化を実施する波形画像については，松澤・武田(2021, JpGU)と同様，この記録紙を400dpiグレースケールのPNG(Portable Network Graphics)形式でスキャンしたものを使用した．

データのデジタイズにあたっては，プログラム上でビットマップデータを扱った．今回の方法では，まずこのビットマップデータについて画素毎に縦方向に，色のついた領域を抽出した．その後，抽出された領域について横方向に近接するもの同士をつなぐことで，それぞれ35秒間のトレースを得た．左右のブロックを分離した後，それぞれのトレースの傾きからブロック全体の傾きを推定し，ペンレコーダーによる記録時およびスキャン時の傾きの補正値とした．加えて，傾きと同時に推定される縦軸の切片情報を用い，トレースの間隔を推定するとともに，上下段の分離も行った．こうして得られた波形トレースをデジタルの波形のデータとして得た．

手法の検証として，防災科研Hi-netのデジタル地震計記録を用いて疑似的な紙記録イメージを作成したのち，このプログラムを適用し元データとの比較を行った．微動の発生が確認されている期間の記録については，高周波成分の情報は欠落しているものの，波形は概ね一致し，スペクトルの比較でも10Hz以下の帯域ではよく一致した．さらに，実際の波形への適用も試み，傾きが補正され，上下の隣のトレースと線が交わらない

© The Seismological Society of Japan

範囲内において，デジタイズ後の波形は元画像と概ね一致することを確認した．また，小林他(2006)で短期的スロースリップイベントが報告されている期間について適用したところ，1Hzとその倍音にピークは見られるものの，Hi-netと同様に数Hzに卓越するシグナルが確認できた．ただし，ここで得られたデータは1秒毎のタイムマークを含んでいるため，そのままエンベロープ相関法のような震源決定手法に適用することは難しい．今後，微動源の位置を議論するためには，こうした影響を回避する方法を検討する必要がある．

© The Seismological Society of Japan

Comparison of the regional characteristics of the magnitude-frequency distribution of earthquakes with interplate slip phenomena along Japan Trench

*Kohei Nagata[1], Koji Tamaribuchi[1], Fuyuki Hirose[1], Akemi Noda[1]

1. Meteorological Research Institute

著者らは，地震活動の特徴を表す様々な指標の監視に基づき地殻活動の現在の異常度を表現することを主な目的とし，過去の地震活動から“ふつう”の地震活動の特徴を洗い出して，他とは有意に異なる指標値分布を持つ活動を統計的手法により抽出することを提案している．永田ほか [2021, JPGU] では，気象庁一元化震源を用いて，規模別頻度分布に関するGR則のｂ値とGR則からの逸脱を表すη値，体積ひずみの潮汐変動との相関，ETASモデルによる地震発生回数の期待値と実際の地震発生回数の差を指標とし，日本全国を矩形領域で分割した各領域について，領域内の連続する一定数毎の地震から推定した指標値の分布が領域外のすべての推定値の分布と有意に異なる場合の抽出を試みた．この結果，特に規模別頻度分布に関する指標について，他とは異なる指標値分布を持つ領域が抽出され，地域的な物理現象を反映していることが推察される．本発表では，これらの他とは異なる指標値分布がどのような物理現象と対応づけられるのかを確かめるため，主にプレート境界のすべりに関係すると考えられている既往研究による観測成果（Igarashi [2020, EPS] による相似地震カタログから推定される平均すべり量，Nishikawa et al. [2019, Science] によりまとめられている微動や超低周波地震）との比較を行った結果について報告する．

相似地震カタログ [Igarashi, 2020] から推定される平均すべり量との比較からは，以下のことが分かる．ア．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも低い領域では，領域中の地震数における相似地震の割合が高く，平均すべり量は小さい．イ．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも高い領域のうち，領域中の地震数における相似地震の割合が高いところでは，平均すべり量が大きい．ウ．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも高い領域であっても，領域中の地震数における相似地震の割合が低いもしくは無いところでは，平均すべり量は小さい．これらの領域を微動や超低周波地震の発生域 [Nishikawa et al., 2019] と比較すると，地震活動の解析を一定の空間領域内で行っているために空間分解能は良くないものの，上記ア．に対応する領域が微動や超低周波地震の発生域もしくはその周辺陸側に多くあることが分かる．このことと上記ア．イ.の結果を合わせて見ると，Nanjo & Yoshida [2018, Nature Communications] が指摘する南海トラフ沿いのすべり欠損速度とｂ値の負の相関と同様の関係が日本海溝沿いにおいても確認されたものと考えられ，そのうちｂ値の分布が全体に比べて有意に高い領域，低い領域が本手法により抽出できていることが強く示唆される．また，本解析の結果からは，このようなプレート間のすべりとの対応関係が，プレート間地震が主体の活動以外からは見て取れないことも分かる．上記ウ．は，プレート境界以外の地震活動が主体でｂ値が高い活動領域に対応すると考えられる．F-netカタログ（https://www.fnet.bosai.go.jp）によれば，これらの活動中には正断層型の地震が多く含まれており，Schorlemmer et al. [2005, Nature] が指摘する地震の発震機構の違いに対応するｂ値の分布のうち，全体に比べて有意に高い活動に対応するものと考えている．

これらの結果からは，統計的手法により抽出された特徴的な指標分布が，プレート間のすべり速度や，地震のメカニズムを支配する応力場といった地域的な特徴を反映していることが確認できたと言えるだろう．このことは，通常とは異なるプレート間のすべりや応力場の変化に対応する地震活動の変化を，地震活動の統計的手法により客観的に検出できる可能性を示唆する．発表においては，このような可能性についても議論したい．

引用文献

© The Seismological Society of Japan

Igarashi, T. (2020). Catalog of small repeating earthquakes for the Japanese Islands. Earth, Planets and Space, 72, 1-8.
Nanjo, K. Z., & Yoshida, A. (2018). A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes. Nature communications, 9(1), 1-7.
Nishikawa, T., Matsuzawa, T., Ohta, K., Uchida, N., Nishimura, T., & Ide, S. (2019). The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories. Science, 365(6455), 808-813.
Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. Nature, 437(7058), 539-542.

© The Seismological Society of Japan

Urgent ocean bottom seismic observation of earthquake swarms in the Tokara Islands initiated in April 2021

*Yukihiro NAKATANI[1], Hiroshi Yakiwara[1], Yusuke Yamashita[2], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1]

1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ.

南西諸島北部のトカラ列島近海（鹿児島県十島村・小宝島付近）において，2021年4月9日23時台から顕著な地震活動が発生した．一連の地震活動は，開始から約3日間で200回以上の有感地震を伴う群発地震の様相を呈し，最大マグニチュード（M）は5.3，最大震度は4（悪石島）であった．島嶼部に展開された地震観測網を用いて，鹿児島大学地震火山地域防災センター附属南西島弧地震火山観測所（NOEV）が決定した震源の多くは深さ約10–20 kmであり，当該群発地震は陸側プレートの地殻内で発生したと考えられる．有感地震の活動としては，消長を繰り返しながら約10日間で計250回以上を観測し，4月22日以降は散発的な活動を示している．

今回の群発地震が発生した小宝島周辺では，過去にも群発地震活動が見られている．特に1995年12月に発生した活動域は今回と類似しており，最大Mが5.5，M2.5以上の地震が約10日間で250回以上観測された点でも共通している．多くの群発地震活動の背景の一つとして，地殻流体の移動が考えられている．小宝島周辺においては，熱水活動やガスプルームを伴う海底火山が確認されているほか，トカラ海峡付近で流体の流路となり得る構造的な不均質性も高いと考えられる．しかしながら，今回の群発地震の原因を検討するにあたり，現有の震源精度が悪い問題がある．これは，地震観測点が北東一南西方向に直線状かつ疎らに配列した島嶼部に限定されているためである．

NOEVと京都大学防災研究所宮崎観測所は，こうした背景を踏まえ，緊急の海底地震観測を開始した．新規に設置した海底地震計は4.5 Hz速度計を搭載した短期収録型海底地震計1台で，観測点配置は，曽根が多い急峻な海底地形も考慮しつつ，陸上観測点が存在する悪石島・宝島との3点で地震活動域を取り囲むように設定した．4月17日に設置が完了し，同日23時より観測を開始した．海底地震計の回収は，当初2021年6月～7月に計画していたが，海況不良やコロナ禍のため本予稿投稿時点では未実施で，8月下旬～9月上旬に予定している．本発表では，当該地震活動の特徴と海底地震観測の詳細について紹介するとともに，回収予定の海底地震計記録も用いた暫定結果を報告する．

謝辞：海底地震計の設置航海は，長崎大学水産学部附属練習船長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施されました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Seismicity pattern before and after the 2016 Kumamoto earthquakes

*Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Jun Izutsu[4], Yoshiaki Orihara[5], Masashi Kamogawa[1]

1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Chubu Univ., 5. Tokyo Gakugei Univ.

本講演では、平成28年(2016年)熊本地震の起きた布田川・日奈久断層帯周辺の地震活動のパターンについて解析した結果を報告する。2016年4月14日と16日に起きたマグニチュード(*M*)6.5と7.3の地震は、それぞれ、日奈久断層帯と布田川断層帯で起きた。これらの断層帯周辺では、熊本地震前から一定程度の地震活動はあったが、前者の*M*6.5地震の後の地震活動や、後者の*M*7.3地震の後の地震活動は更に活発だった。先行研究(Nanjo et al., 2016, 2019; Nanjo and Yoshida, 2017)では、個々の地震活動のパターンについて議論しているが、本研究ではそれらを総合的にまとめ、熊本地震前後の地震活動のパターンについて議論する。

本解析は、地震活動の時空間分布と、地震の規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター(GR)則(Gutenberg and Richter, 1944)、および余震の減衰様式を表す大森・宇津(OU)則(Utsu, 1961)に基づく。規模の大きい地震と小さい地震の数の比率に相当するGR則の*b*値は、岩石破壊実験では、差応力に反比例の関係があると示唆され、地球規模の事例でも、その関係を支持する傾向が見られる(Scholz, 1968, 2015)。また、OU則は、大きい地震(本震)の発生直後に増加した小さい地震(余震)の数は時間と共にべき乗で減少することを表す。速度・状態依存摩擦では(Dieterich, 1994)、OU則の冪指数p=1が仮定されているが、応力減少が速いか遅いかにより、p>1やp<1が観測されうる事を示している。

気象庁が維持管理する地震カタログ(一元化震源カタログ)を使用して解析した結果は、以下の様にまとめられる。(1)熊本地震が起きる前は、*M*6.5と*M*7.3の地震の震央付近における応力状態は高めであった。熊本地震の一連の活動が開始した後は、布田川・日奈久断層帯に沿った応力は大局的に減少傾向を示した。(2) *M*7.3地震前のプレスリップや同地震後のアフタースリップが断層帯に沿って起きた事が示唆される。これは、国土地理院のGEONETによる地殻変動の解析結果(Pollitz et al., 2017)や、応力テンソルインバージョン法による、熊本地震の震央周辺の応力場の特徴(防災科学技術研究所, 2016)と調和的である。

GR則を利用した最近の研究から(Gulia and Wiemer, 2019)、大地震後にそれが本震か、または将来に起きる更に大きな本震の前震かを判断するモデルが提案されている。本発表では、上記の熊本地震の結果から示唆されたプレスリップの効果をモデルに取り込む事が、モデルの精度向上になる可能性があると指摘する。

謝辞：本研究では、気象庁一元化震源カタログを使用した。また、日本学術振興会による科研費(20K05050)の助成、中部電力株式会社「原子力に係る公募研究」の助成、東京海上各務記念財団の研究助成、中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究IDEAS202111の助成、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」の助成を受けて、本研究の一部を実施した。

© The Seismological Society of Japan

A preliminary study on low-frequency earthquakes below Mt. Fuji: Creation of an earthquake catalog using the Matched Filter method and quality evaluation of the catalog

*Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Yohei Yukutake[4]

1. Univ. of Shizuoka, 2. Inst. of Stat. Math., 3. Shizuoka Univ., 4. Univ. of Tokyo

通常の地震よりもゆっくりとした地震波を励起する低周波地震が、富士山直下の深さ10-25kmで観測されている(浜田, 1981; Ukawa et al., 2005)。富士山の低周波地震は常時起きているが、2000-2001年の活発化の様に(吉田他, 2006)、活動に変化が見られる。低周波地震の発生は、火山深部の流体の存在を示唆すると考えられている(例えば、Nakamichi et al., 2003)。例えば、富士山の山体膨張と低周波地震の関係性を示す報告があり、富士山直下のマグマ溜まりの圧力が高まって膨張歪を生じさせ、低周波地震も活発化したと説明されている(原田他, 2010)。一方で、箱根火山周辺での観測結果の様に、膨張歪に伴って、低周波地震の活発化が見えない事例もある(原田他, 2010)。本講演では、富士山の低周波地震と火山活動の関係について再検証することを目的として、富士山周辺で得られた地震波形記録にMatched Filter法(MF法)を適用し、低周波地震を詳細に把握することを目指す研究の序報を報告する。

MF法はS/N比の良い地震波形を雛形にして、連続地震波形と雛形地震波形との相関処理により、イベント検知を行う方法である(例えば、Peng & Zhao, 2009)。本研究では、箱根山の低周波地震を検知するMF法を用いたシステムを(行竹, 2017, Yukutake et al., 2019)、富士山に適用できる様に改良した。改良方法について、日本地球惑星科学連合2021年大会で楠城他 (2021)は報告したので、ここでは、その概要を説明する。(1)はじめに、気象庁の一元化震源カタログから雛形地震となる低周波地震を選択し、その地震の波形を雛形波形として準備した。(2)次に、雛形波形に対して、富士山周辺の32観測点で記録された2012-2020年の連続波形と相関処理を行い、雛形地震と相関のあるシグナルが含まれている場合に地震が起きたと判断して、地震を検知した。(3)最後に、検知された地震の震源情報をリスト化した(地震カタログの作成)。

低周波地震の詳細を把握する前に、その大まかな特徴を理解する必要があるという方針で、作成された地震カタログの性能を評価した。(i)2012-2020年の低周波地震はほぼ一定の割合で起きていた。同様の傾向は、気象庁の一元化震源カタログに収録されている低周波地震でも確認した。ただし、前者は年間約1,250個の割合で低周波地震が起きており、後者(年間約125個の割合)の約10倍に相当する。(ii)また、小さい低周波地震ほど数が多く、大きい低周波地震ほど数が少ない傾向にあった。これも、気象庁の一元化震源カタログに収録されている低周波地震で見られる特徴であることを確認した。

現在、2000年代の前半まで連続地震波形を遡って、地震カタログを再構築することを行っている。このことにより、長期間の低周波地震の発生様式が把握できることになる。また、富士山の膨張歪み変化は、2006年頃から少なくとも2009年末まで見られたが(原田他, 2010)、その歪み変化と低周波地震との関係を再検証する研究環境が整うことになる。

さらに、通常の地震の活動推移を把握するために使われている技術を、低周波地震へ適用できるように改良している。例えば、ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence)を用いて(Ogata, 1999)、低周波地震の活動推移を評価できるか、また、規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター則の*b*値を用いて(Gutenberg and Richter, 1944)、富士山直下の応力状態の変化を推定できるかなどについて検討している。

本講演では、現在進めている研究の速報も合わせて報告する予定である。

© The Seismological Society of Japan

謝辞：本研究では、気象庁一元化震源カタログ、気象庁、防災科学技術研究所及び東京大学地震研究所観測点における地震波形記録を使用した。また、本研究の一部は、公益社団法人ふじのくに地域・大学コンソーシアムの共同研究助成、日本学術振興会による科研費(20K05050, 21K04613)の助成、中部電力株式会社「原子力に係る公募研究」の助成、伊豆半島ジオパーク学術研究助成を受けて実施した。

© The Seismological Society of Japan

Anomalous seismic activity including shallow low-frequency events near Hakodate: hypocenter distribution and characteristics of waveforms derived by dense seismic observation

*Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Masahiro Kosuga[2], Takuto Maeda[2]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Hirosaki University

本発表では，北海道函館市付近で発生する特異な地震活動について，稠密地震観測によるデータを用いた解析結果について報告する．
北海道函館市沖では，地震予知総合研究振興会（以下，振興会）が設置・運用する地域観測網AS-netによって，地殻内の深さ10 kmより浅部で低周波地震が発生していることが確認された（野口・他，2018）．さらに，通常地震もこの低周波地震とほぼ同じあるいは極めて近接した位置で発生していると推定された．従来，低周波地震は，プレート境界浅部で発生するものや火山活動に伴うものを除けば，通常の地震が発生する脆性破壊領域ではなく，より深部の深さ約15~40 kmで発生すると考えられてきた．上記の函館浅部の特異な低周波地震活動は，こうした考えを覆すものである．なお，この特異な活動の領域から5-10 km東の深さ約15-35 kmには，深部低周波地震の活動領域も存在する．こちらは，内陸に点在する深部低周波地震活動の典型的な特徴を示す．
この特異な浅部低周波地震活動について詳細な調査を行うことは，低周波地震一般の発生メカニズムの解明や，地殻内地震との関係の解明のためにも非常に重要である．しかしながら，この地震活動では地震の規模が概ねM2かそれ未満と小さく，既存の観測網では詳しい調査のための地震観測点の密度が十分ではない．このため，振興会と弘前大学は，2018年10月より当該地震活動の周辺に臨時地震観測点の設置を開始した（野口・他，2020）．以降，同時に最大で14観測点が展開され，データの蓄積が進んだことから，得られた高密度データを活用した解析を開始した．
震源決定は，函館市付近の浅部の特異な低周波地震活動と，その東側の深部低周波地震活動のイベントを対象に行った．臨時観測点とともに周辺の既存の18観測点のデータを用いた．これら観測点についてWIN systemによる手動検測を行った．臨時観測点は地域が市街地に近く，波形にノイズが多いことから，観測波形によるイベント検出には使用せず，振興会が青森県～北海道南部において独自に決定している震源カタログ（野口・他，2016）の中から，対象のイベントの震源再決定を行った．
浅部の特異な低周波地震活動については，活動が低調なものの8件のイベントが震源決定された．これらの地震については，最も近い観測点（石崎神社，臨時）からの震央距離は1.5 kmほどだが，そこでのS-P時間は1秒未満であり，振興会のカタログによる震源深さよりさらに浅い可能性が示された．再決定された震源位置のばらつきの大きさは最大でも1 km程度であり，非常に狭い範囲で発生していることが示唆された．震源決定プログラムhypomhによる震源決定誤差は概ね0.2-0.5 kmであり，振興会カタログの誤差値のおおよそ半分程度であった．なお，これら8件が通常地震であるか低周波地震であるかについては，少なくとも2件の波形ではS波部分で高周波数成分を欠き継続時間が長いなどの低周波地震の特徴を示したが，その他については一見して判断が難しい波形であった．しかしその他の波形についても，付近の通常地震と比べて波形全体で高周波数成分を欠き，低周波数成分に富む傾向がみられた．気象庁一元化カタログでは，この8件中7件が記載されており，うち3件は低周波地震，他は通常地震とされていた．この3件の低周波地震は，低周波地震の特徴を示す上記2件のイベントを含んでいる．
一方，東側の深部低周波地震の活動については，23イベントが再決定された．これらの波形は典型的な低周波地震のものであり，しばしば連続して発生することから，読み取り精度は高くないが，観測点が増えたことで震源決定がより安定するようになった．
この函館付近の特異な地震活動については，Yoshida et al. (2020)が詳細な解析を行っている．既存観測点のデータで高精度の震源決定を行い，この活動の低周波地震と通常地震は極めて近接していると結論付けた．これは本研究の結果と同様である．また，特に2015-2016年に頻発した一連の通常地震がほぼ同じ場所で発生し

© The Seismological Society of Japan

ており，これらが地殻流体の間隙水圧の急変に伴う「繰り返し地震」であることを示唆している．このような現象は，稠密地震観測の期間では未だ捉えられていない．さらにこの浅部の活動は東側の深部低周波地震活動と関連しており，ともに地殻流体の移動に起因すると推定している．我々は今後も稠密地震観測を続けるとともに，高密度データを活かした解析を行い，こうした仮説の検証にも取り組んでいく予定である．

謝辞
臨時観測点の設置・運用にあたり，函館市をはじめとする関係各位には多大なご協力をいただきました．また，本研究では，防災科学技術研究所，気象庁，北海道大学，東北大学，青森県による地震観測データを使用しています．記して感謝いたします．

参考文献
Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi and K. Kasahara (2020), Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, Geophysical Journal International, 223(3), 1724-1740, December 2020.
https://doi.org/10.1093/gji/ggaa418
野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・石田貴美子（2016），AS-netによる青森県・北海道南西部の震源分布，日本地震学会2016年度秋季大会，名古屋，2016年10月，S09-P16.
野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・阿部信太郎・石田貴美子（2018），高密度観測網AS-netで捉えられた東北地方北部～北海道南西部の低周波イベントの分布と特徴，日本地震学会2018年度秋季大会，郡山，2018年10月，S23-P26.
野口科子・笠原敬二・小菅正裕・前田拓人・雨澤勇太・春山太一・石田早祐美・松野有希・大類樹（2020），函館市付近の浅部低周波地震と通常地震が混在する地震活動を対象とした稠密地震観測，日本地球惑星科学連合2020年大会，SSS13-P06.

© The Seismological Society of Japan

Stress field in the Tohoku region, Japan and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

*Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Shin'ichi Sakai[2], Mako Ohzono[2,3], Kei Katsumata[3], Masahiro Kosuga[4], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Shu'ichiro Hori[1], Toru Matsuzawa[1], . Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 4. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5. Graduate School of Encironmental Studies, University of NAGOYA, 6. Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 8. Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University

背景・目的

現在の東北日本の応力場は逆断層型応力場が分布する（例、Terakawa and Matsu’ura, 2010）。東北日本には日本海形成時に発達した正断層が存在し(岡村・加藤, 2002; 岡村, 2010)、古い正断層が逆断層として活動するインバージョンテクトニクスが発生する（例、Okamura et al., 1995）。我々は東北日本で発生した大規模地震周辺の応力場に対する断層面のすべりやすさをSlip Tendency法を用いて検討した（例、田上・他、JpGU2021）。推定した応力場は2011年前後で最大圧縮方向（S_{Hmax}）が反時計回りに回転する傾向を示し、ST値から内陸地域ではすべりにくい面が実際にすべっていることを確認した。

本研究では①応力場とST値の関係の検討と②東北地方内陸地域の2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）後における応力場の変化の要因の検討を行った。

検討①

Synthetic slip（Neves et al., 2009）を使用し、応力場に対して断層面が活動するときのrakeを算出した（計算rake）。断層モデルのrakeと計算rakeの差をrake差とし、ST値と比較した。

結果

ST値0.5~1.0、rake差40°以内に集中する。内陸地域では2011年後にrake差が大きくなり、東北沖地震の影響を反映している可能性が考えられる。

検討②

Coulombプログラム（Toda et al., 2005; Lin and Stein, 2004）を用いて、東北沖地震による応力場の変化を求めた。地震時の応力変化によって計算された応力場と実際の地震から推定した東北沖地震後の応力場を比較し、それらが類似した条件を求めた。

結果

1998年岩手県雫石町の地震、2008年岩手・宮城内陸地震では東北沖地震後に見られたS_{Hmax}の回転と応力比の大きさの増加を再現することができた。2003年宮城県北部の地震においても再現することができたが、摩擦係数が小さかった。震源の空間分布の違いがあることから応力場の不均質を反映している可能性（Smith and Dietrich, 2010; Smith and Heaton, 2011）が考えられる。

まとめ

東北沖地震の断層モデルから応力場の傾向を再現することができたため、応力場の変化は大規模地震による応力擾乱の影響と考えられる。応力場の変化はST値に影響してしまうため、広域の応力場に変化をもたらす大地震の影響を除くことが望ましいと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Introduction

In northeastern Japan, stress fields of east-west oriented compression are widely distributed (e.g., Terakawa and Matsu'ura, 2010). It is frequently observed that tectonic inversion of old normal faults occurs acting as reverse faults (e.g., Okamura et al., 1995). In our previous studies, we evaluated the fault activity in the northeastern Japan by using the Slip Tendency (ST) method (e.g., Tagami et al, JpGU Meeting 2021). From the estimated stress field, we confirmed the rotate of maximum compression direction (S_{Hmax}) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (the Tohoku-oki earthquake). From the ST value, we suggested the fault planes were active in an unlikely to slip condition in the inland area.

In this study, we evaluated the relationship between the ST value and the stress field (Study 1). Furthermore, we investigated the factors of the changes in stress field after the Tohoku-oki earthquake (Study 2).

Study 1

We use the Synthetic Slip (Neves et al., 2009) to calculate the rake angle (calculated rake) when the fault plane become active to stress field. The difference between “fault model rake” and “calculated rake” is defined as “rake difference” and compared with the ST value.

Result

Distribution of ST value is concentrated in a range of 0.5 to 1.0 and rake difference 40˚. In the inland area, rake difference become large in the after the Tohoku-oki earthquake. This may reflect the influence of the Tohoku-oki earthquake.

Study 2

We use the Coulomb program (Toda et al., 2005; Lin and Stein, 2004) to estimate changes in the stress field due to the Tohoku-oki earthquake. We compared the calculated stress field with the actual stress field, and seek the condition which both become similar.

Result

In the case of the 1998 Shizukuishi earthquake and the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, we were able to reproduce the rotation of the S_{Hmax} and increase of the stress ratio. In addition, even in the case of the 2003 northern Miyagi earthquake, we were able to reproduce the stress field. However, the friction coefficient is too small.

Summary

We were able to reproduce the tendency of the stress field. Therefore, the changes might be due to the stress disturbance caused by the Tohoku-oki earthquake. When evaluating using Slip Tendency, we should eliminate the effect of a large earthquake which could change the stress field over a wide area.

References

Neves, M.C., Paiva, L.T., and Luis, J., 2009, Com. & Geosci., 35(12), 2345-2352.
Okamura, Y. and Kato, Y., 2002, Univ. Tokyo Press, 47-69.
Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, R., and Satoh, M., 1995, Island Arc, 4(3), 166-181.
Smith, D.E., and Dietrich, J.H., 2010, Pure Appl. Geophys. 167, 1067-1085.
Smith, D.E., and Heaton, T. H., 2011, Bull. Seismol. Soc. Am. 101, 1396–1421.
Terakawa, T., and M. Matsu’ura, 2010, Tectonics, 29(6).

© The Seismological Society of Japan

Performance comparison of hash-based methods for similar waveform detection

*Yuki Takayama[1], Shiro Hirano[1], Hironori Kawakata[1]

1. Ritsumeikan University

はじめに

これまで、Template matchingを用いて相似地震を検出する研究が多く行われてきた。相似地震とは、類似の波形を持つイベントとして定義される(Igarashi, 2020)。ただし、Template matchingでは、既知の波形の類似波形のみを見つけることしかできない。既知の波形をテンプレート波形として固定しない類似波形の検出を行うことで、Template matchingでは見つけ出せなかった新たな類似波形のペアを見つけ出すことが可能となる。そのような検出手法には、Auto correlation（AC）がある。この手法は連続波形をN個の波形ウィンドウに分割し、それらすべての組み合わせにおいて相関係数を計算するというものである。しかし, ACは解析する期間が長いと計算時間が$O(N^2)$に比例して、非常に長くなるという欠点がある。そこで、Yoon et al. (2015)は、画像検索や音声検索、Web検索エンジン等で利用されているハッシュ法を用いたFingerprint and Similarity Thresholding(FAST)という手法を開発した。ハッシュ法とは、ハッシュ関数を文字データや画像データなどの任意のデジタルデータに作用させることで、より簡易なデータ(ハッシュ値)に変換し、ハッシュ値をデータの要約として、データ同士の比較を高速化するという手法である。ここでハッシュ関数とは、個々のデジタルデータに何らかのビット列を割り当てる規約であり、類似性検索の場合には高速化のために元データよりも短いビット列を割り当てる。駒形ほか(2020)は、Fingerprintingよりも簡単に計算でき実行時間短縮が見込める、2bit-ahashとkhashの2つを提案した。

一方、ほぼ同じ場所で発生し、ほぼ同一の発震機構を持つ類似の地震を繰り返し地震と呼ぶ(Igarashi, 2020)。しかし、前段落のようにして検出される相似地震のうちどの程度が繰り返し地震であるかについては、検出される波形をもたらすイベントの小ささ故、詳しく調べられてこなかった。Uchide(2020)は、深層学習を利用して日本列島下で発生した小規模地震の初動メカニズム解を推定した。小さいイベントは、メカニズム解が決定できるとは限らないため、まずはメカニズムまで含めて既知のイベントについて類似度指標とメカニズム解の相関を見ることが必要となる。ノイズ(常時微動)とノイズやノイズとイベントは相関の低いものであり、余分な計算となってしまう。駒形ほか(2020)によりkhashならノイズは高確率で除去できることが確かめられているため、イベントとイベントについてのみメカニズム解と類似度の相関を考えることになる。

そこで、本研究では、駒形ほか(2020)が提案した2bit-ahashとkhashに着目し、この２つと相互相関係数を使用して波形の類似度を計算し、波形の類似度だけでなく、発震機構も使用することで、繰り返し地震に対して、どの程度有効となるかを1つの指標として、3つの類似度指標の比較を行うことを目的とする。

解析手法

解析データとして、2018年6月18日7:58に大阪府北部で発生したMj6.1の地震直後から16時間のHi-net交野、久御山観測点で記録された連続波形記録の3成分を用いた。サンプリング周波数は100Hz、周波数帯域は5~30Hzを使用した。まず、非定常的なイベントをピックし、それらについて3つの類似度指標それぞれで観測点ごと総当たり的にイベント同士の類似度を計算した。その後、Uchide(2020)で初動解が決定されているイベントのうち信頼性のたかいもののみについてUchide(2020)の初動解からP軸、T軸、N軸を計算した。イベント同士のP軸の内積とT軸の内積の絶対値の和を横軸に、イベント同士の類似度を縦軸に、イベント同士の震央間距離をカラースケールでとり、図を作成した。ここで、深さについては、決定精度が低い可能性があるため、無視した。

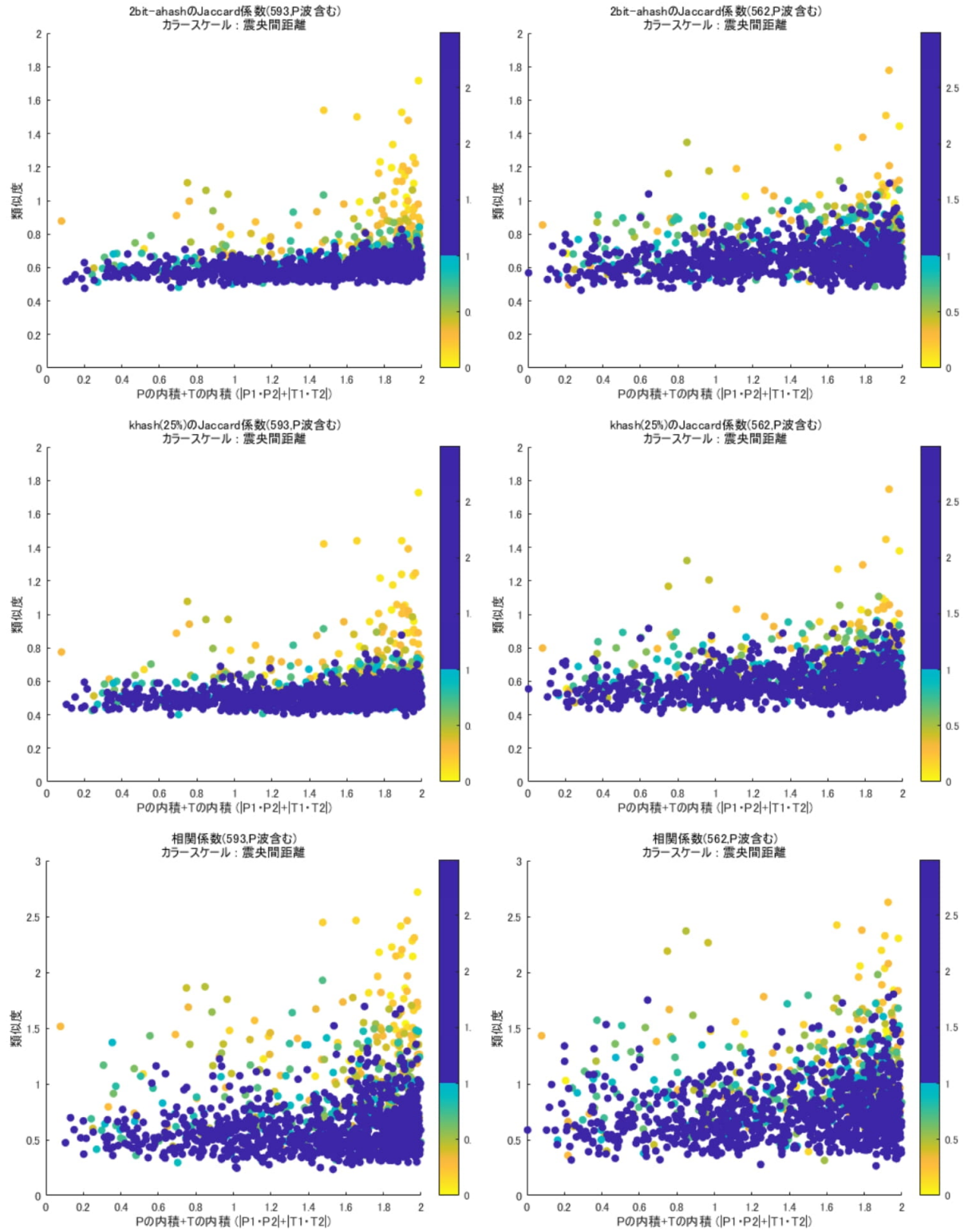
結果

図より、2bit-ahashとkhashは相互相関係数に比べて、イベント同士の震央間距離が遠いペアの類似度は相対的に低くなり、震央間距離が近いペアの類似度が相対的に高くなり、その境界が明確になることが明らかに

© The Seismological Society of Japan

なった。このことから、類似度閾値の設定を容易にすることが期待できる。また、相互相関係数よりも2bit-ahashやkhashの方が、震央間距離が遠いイベントについては、メカニズムが似ていたとしても、類似度が高くならないことが期待できる。また、解析の結果、3つの類似度指標間の順位相関(特に相互相関係数)が必ずしも高くならないことが明らかになった。波形が類似していることと、イベント間の震央間距離と震源メカニズムが似ていることが、どの程度一致するのかを知ることは、3つの類似度指標が繰り返し地震についてどの程度確証を持てるかの指標になる。今回の解析結果では、相互相関係数よりも2bit-ahashやkhashの方が繰り返し地震の判定に有効であることが考えられる。

© The Seismological Society of Japan



左：交野観測点　右：久御山観測点

上：2bit-ahash　真ん中：khash　下：相互相関係数

© The Seismological Society of Japan

Along-strike variation of shallow very low frequency earthquake activity in the Nankai subduction zone

*Shunsuke TAKEMURA[1], Satoru Baba[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Katsuhiko Shiomi[4], Takanori Matsuzawa[4]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tohoku University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフの巨大地震発生域の浅部側では浅部スロー地震活動が確認されている．浅部スロー地震は，プレート境界のすべり欠損速度（あるいはせん断応力変化）が大きい領域の周囲かつ地震波速度の低速度帯で活発な傾向がある（例えば，Tonegawa et al., 2017; Baba, Takemura et al., 2020）．そのため，浅部スロー地震活動は，プレート境界浅部の摩擦強度などの指標となると考えられている．武村・他（2021，JpGU）では，紀伊半島南東沖において高精度かつ長期的な浅部超低周波地震カタログを構築し，古銭洲海嶺の西端で特に活発であることを示した．本研究では，武村・他（2021, JpGU）の手法を室戸岬沖と紀伊水道沖の浅部超低周波地震活動へも適用することで，南海トラフの浅部超低周波地震活動の走向方向の変化とその原因を明らかにすることを目的とする．

広帯域地震観測網F-netの連続記録に対してTakemura, Noda et al. (2019)の手法を適用し，浅部超低周波地震の検知および震央再推定を行った．OpenSWPC（Maeda et al., 2017）の相反定理モードを用いて0.025º毎の仮想震源格子上，プレート境界型の逆断層のメカニズム，6秒のKüpper関数のシミュレーション波形を大量に作成した．震央位置は再推定した位置，深さはJIVSM（Koketsu et al., 2012）のプレート境界に固定した．浅部超低周波地震のモーメントレート関数が，6秒のKüpper関数の重ね合わせで記述できると仮定し，焼き鈍し法により推定した．

2004年4月から2021年3月の解析期間中、室戸岬沖と紀伊水道沖において483個の浅部超低周波地震を検知した．これらの浅部超低周波地震活動のうち，観測波形との一致度VR 30%以上のもののみで計算した積算モーメントは5.5×10^{17} Nmであり，Takemura, Matsuzawa et al. (2019)のCMTカタログの積算モーメントの3.6倍程度である．この差は，相互相関解析とモーメントレート関数の詳細推定により，小さいサイズのイベントあるいはサブイベントまで網羅的にモデル化できたことに起因する．再推定した震央位置は，Takemura, Noda et al. (2019)と同様に，30 km四方程度の狭い領域で集中的に発生していた．Yokota & Ishikawa (2020)により，2009年および2018年頃に室戸岬沖から紀伊水道沖にかけてMw 6.5程度の浅部スロースリップ（SSE）が検知されており，浅部SSE中に室戸岬沖から紀伊水道沖への浅部超低周波地震の活動域の移動が確認された．浅部SSE期間の浅部超低周波地震による積算モーメントはそれぞれ1.6×10^{17}および1.4×10^{17} Nmと，浅部SSEの地震モーメントの1~5 %程度である．深部短期的SSE（以下、単に深部SSE）と同期間に発生した深部超低周波地震の積算モーメントも，深部SSEのモーメント1 %以下と報告されている（Ito et al., 2009）．

発表では，本研究で構築した室戸岬沖と紀伊水道沖の浅部超低周波地震カタログと武村・他（2021, JpGU）の結果を合わせることで，超低周波地震活動の走向方向の変化を詳細に議論する．

謝辞　防災科学技術研究所F-net（https://doi.org/10.17598/NIED.0005）の波形記録を利用しました．地震波伝播シミュレーションに東京大学情報基盤センターのOakforest-PACSを利用しました。本研究は、JSPS科研費21K03696により実施されました。

© The Seismological Society of Japan

Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude

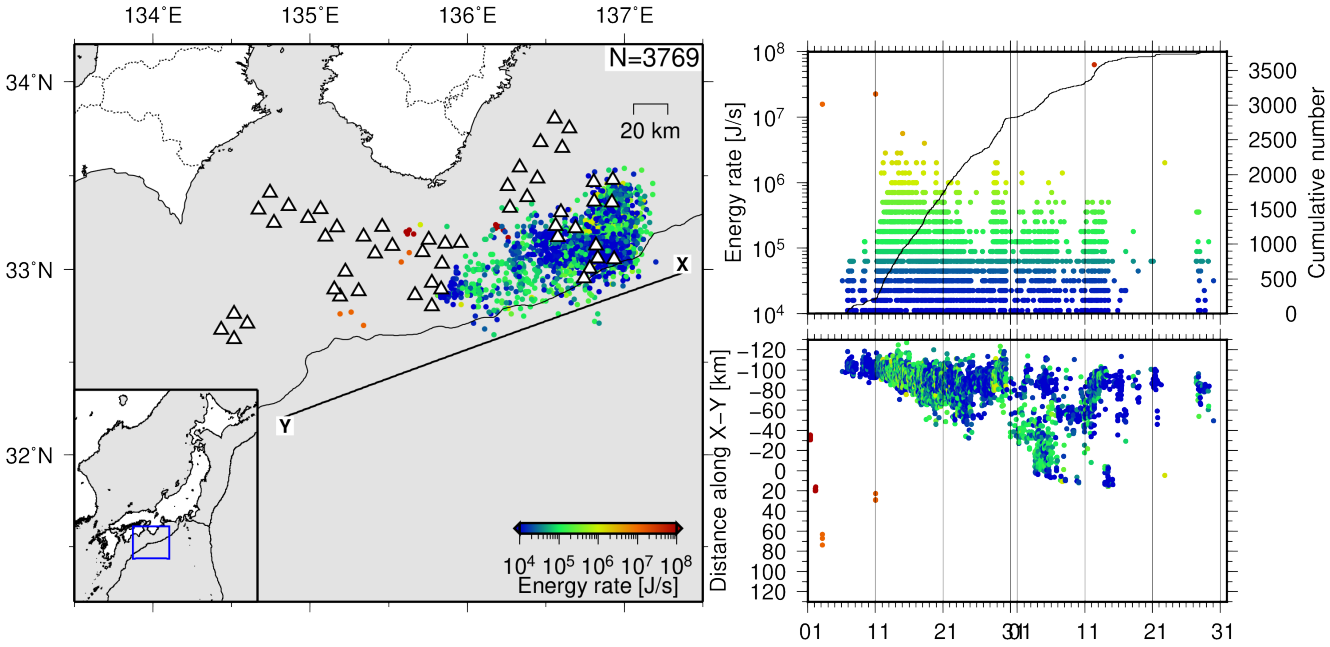
*Koji TAMARIBUCHI[1], Masashi OGISO[1]

1. Meteorological Research Institute

浅部低周波地震（微動）は，普通の地震に比べて低周波域が卓越し，継続時間が長い特徴があるすべり現象である．南海トラフ沿いでは，海溝軸付近で浅部低周波地震が海底地震観測により観測されている (e.g. Annoura et al. 2017, Tamaribuchi et al. 2019)．浅部低周波地震は，広帯域地震計で観測される超低周波地震や，測地観測によるスロースリップと同期して発生することが知られており (Nakano et al. 2018)，プレート境界あるいは分岐断層上で発生する断層すべりによるものと考えられる．これらのスロー地震は，1週間–1か月程度活発になり，その後数年間活動がないなど，エピソード的に発生する．さらに，遠方で発生した大地震，潮汐によって誘発されることがあるので，応力変化に敏感なストレスメータとしてふるまう．
近年ではDONET 等のケーブル式海底地震観測網の進展により，リアルタイムでの地震観測体制が構築されている．これまで，低周波微動の解析では主にエンベロープ相関法（Obara 2002）が用いられてきた．浅部の場合，ソースと観測点が深部に比べて近く，パスが観測点によって大きく異なることから，必ずしもエンベロープの相互相関が良いとは限らない．そこで本研究では，エンベロープ最大振幅も同時に考慮した震源決定プログラムを開発した．これにより，南海トラフ浅部のスロースリップの監視強化に寄与することを目的とする．
データは，DONETの広帯域速度波形の記録で，水平2成分を使用した．まず連続波形から微動を検出し，次に検出した時刻付近の波形を用いて震源推定を行う．連続波形から微動を検出する方法として，Frequency scanning method (FSM) (Sit et al. 2012, Katakami et al. 2017) を用いた．FSM は微動の特徴的な周波数帯である2-8 Hz が他の周波数帯に比べて卓越する時間帯を検出する．3 種類のバンドパスフィルタ（帯域T: 2–5 Hz, E: 10–15 Hz, S: 0.02–0.1 Hz）を適用し，$R=T^2/ES$を観測点ごとに求めた．R値の時系列から漸化式フィルタでSTA/LTAを求め，STA/LTAが2倍以上の場合に微動検出とした．
次に，エンベロープ波形からエンベロープ相関法 (Obara 2002) により相対走時を計算する．また，最大振幅分布から，震源位置を推定するAmplitude Source Location (Battaglia and Aki 2003) を併用して最尤法で震源を推定した．ここでは，相対走時と振幅は独立変数なので，単純にそれぞれの尤度を分散で規格化して積を取った．尤度関数には，正規分布の代わりに異常値にロバストなコーシー分布を採用した．また，震源誤差を見積もるため，最尤値探索には重点サンプリングを用いた．得られた震源分布から，クラスタリングを行った．クラスタリング条件は，一元化震源と比較して通常の地震を取り除き，1時間以内かつ震央距離20 km以内に震源が3個以上決定された場合に結果を出力した．
本手法を2020年12月～2021年1月の地震波形に適用した．暫定的な結果ではあるが，クラスタリング後で約3800個（クラスタリング前で約7000個）が決定された．震源分布は概ね海溝軸に沿って東西に分布しており，マイグレーションやRapid tremor reversalなどが観測された．振幅のみで決定した小木曽・溜渕（2021, 本大会）との結果と調和的である．
今後，リアルタイムモニタリングシステムを構築するとともに，長期間の解析を行い，微動検出や震源推定の安定性や精度などを確認する予定である．

謝辞
MOWLAS DONET (https://doi.org/10.17598/nied.0008) の地震波形を使用しました．サイト増幅特性にはYabe et al. (2021) を使用させていただきました．解析には東京大学地震研究所共同利用 (2021-F3-12) 大規模地震連続波形データ解析システムを利用しました．一元化震源を使用しました．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Aftershocks and shear strain energy changes caused by inland earthquakes in Japan

*Sachiko TANAKA[1]

1. NIED

大地震が発生すると，震源域やその周辺では，引き続き，多数の余震が発生する．通常，余震の規模は本震と比べると一回り小さいが，追加的な被害を生じさせるような大きい余震が発生する場合もあり，余震活動の評価は被害の軽減の観点からも重要である．本研究では，余震活動の空間的な広がりの検討として，日本列島内陸域の地震について，本震による剪断歪みエネルギー変化と余震活動の対応関係を調査した．剪断歪みエネルギーは，応力テンソルの第2不変量や相当応力に関連する量で，その増加は，ランダムに分布する断層群の平均的な剪断応力の増加に対応する（Saito et al., 2018）．

用いた地震データは，気象庁一元化処理による震源リスト（2006年から2019年まで，深さ20 km以浅，M2.0以上）である．シングルリンク法（Frohlich and Davis, 1990）によるクラスタリング処理（時空間の変換係数1 km/day，時空間距離10 km以内）を行い，M6以上の地震を含むクラスタについて，最大規模の地震を本震，それ以降の地震を余震として定義した．本震による剪断歪みエネルギー変化は，Saito et al.（2018）の導出に従い，半無限均質弾性体を仮定し，Okada（1992）の方法を用いて計算した．本震の断層モデルは国土地理院による矩形断層モデルを採用した．背景の応力場は，防災科研高感度地震観測網Hi-netによるP波初動解（2004年から2020年まで，深さ20 km以浅）から応力テンソルインバージョン法（Michael, 1987）を用いて推定した．

以上の手法が適用可能な本震を8個選定し（M6.1～7.3），各余震について，本震による剪断歪みエネルギー変化を計算した結果，余震の総数に対して剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合が65%以上となる事例が4個あった．特に，2016年熊本地震（M7.3）では，剪断歪みエネルギーの増加域で約85%の余震が発生していた．一方，残りの4事例については，剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合は25～50%に止まり，剪断歪みエネルギーの増加との相関は認められなかった．

剪断歪みエネルギー変化と余震活動の対応関係について，相関の有無の観点から各事例を比較すると，本震規模や断層タイプによる違いは確認できなかった．一方，余震活動の空間的な広がりに注目すると，広がりの大きい事例でよい相関を示す傾向がみられた．実際，日本列島の内陸地震（M5.5～7.3）を対象に本震規模と余震域面積との間に得られた関係式（田中・他，2019）と比較すると，相関のある4事例はこの関係式より広い余震域，相関のない4事例は狭い余震域を伴っている．今回設定した単純な断層モデルでは，本震近傍の剪断歪みエネルギー変化を正確に評価できておらず，余震活動の広がりが小さい事例でその影響が特に大きく表れているのかもしれない．しかし，余震活動が広がりをみせるような事例では，このような単純なモデルでも剪断歪みエネルギー変化によって余震活動の広がりを十分評価できる可能性を示唆していると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Three-dimensional tectonic stress field inferred from long-term data of seismicity with prior information

*Toshiko TERAKAWA[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2]

1. Nagoya Univ., 2. ISM

複雑な沈み込み帯に位置する日本列島の周辺域では，プレート運動が作り出すテクトニック応力場を反映した多様な地震活動が観測される．CMTデータインバージョン法（Terakawa & Matsu'ura, 2008）は，モーメントテンソルの定義に基づいてCMTデータと応力場を結び付け，ベイズの統計推論とABIC（Akaike, 1980）に基づくインバージョン手法（e.g., Yabuki & Matsu'ura, 1992）に従って3次元応力場のパターンを推定誤差と共に求める手法である．Terakawa & Matsu'ura (2010) は，CMTデータインバージョン法を防災科学技術研究所のF-netモーメントテンソル・カタログのデータに適用し，当時の最大限のデータセットから日本列島全域のテクトニック応力場のパターンを推定している．その後，2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震をはじめとした大地震が発生し，そのたびに地震前後の応力場の時間変化が議論されている．しかし，地震データの分布は空間的に強い不均質性を持ち，時々刻々変化する場合が多く，大地震前後の応力場の時間変化を議論することは難しい．

本研究では，長期間の地震データから安定的にテクトニック応力場を推定し，その時間変化を評価することを目指し，従来のCMTデータインバージョン法に「過去のデータの解析結果を直接的先験情報として取り入れる機能」を追加した（Terakawa & Matsu'ura, in prep.）．具体的には，Matsu'ura et al. (2007) の統合逆化公式に基づき，直接的先験情報とモデルパラメータの構造を規定する間接的先験情報を統一的に取り扱うことができるようにした．この定式化により，観測データ，直接的及び間接的先験情報の３種類の情報の最適な重みをABICに基づいて求め，応力場のパターンを推定する．既存のデータセットから得られた直接的先験情報に，新しい観測データを追加した解析を実施することで，一般には，応力場の推定精度が向上することが期待される．一方，新しいデータを追加したにも拘らず推定誤差が大きくなる場合は，応力場のパターンに時間変化があったことや局所的な断層強度の低下などにより特定の向きを持つ断層運動が活発化したことなどを示唆する．まず，模擬データを用いた解析により，これらのことが正しく再現できることを確認した．

次に，実データへの適用例として，24年分のF-netモーメントテンソル・カタログのデータ（1997年1月～2020年12月）から，2016年4月16日に発生した熊本地震の震源周辺域（水平：160 km×210 km, 深さ：0～20 km）の応力場を推定した．この期間のデータセットの中には，熊本地震の余震をはじめとした大量の余震データが含まれている．余震は本震による応力変化だけでなく間隙流体圧の変化も反映して発生するため，これらのデータから正しく応力場が推定されるとは限らない（Terakawa et al., 2013）．このため，Zaliapin & Ben-Zion (2013) の方法により，データを単独地震とグループ地震に分け，更にグループ地震を前震，本震，余震に分け，単独地震及び本震のみから構成されるデータセットを作成した．このデータセットを期間1（1997年1月～2016年3月）と期間2（2016年4月～2020年12月）の２つに分け，まず，期間別に従来法で応力場を推定した（解析1及び2）．次に，解析1の結果を直接的先験情報として取り入れ，期間2のデータを追加して応力場を推定した（解析3）．解析2と解析3を比較すると，情報が多い解析3の方が全体の推定誤差が小さくなった．また，解析1と解析3の応力場の結果を推定誤差と共に比較すると，両者の応力場のパターンに大きな違いは見られないが，震源断層の南西端の延長部の浅い領域（深さ５km）で，応力場のパターンの系統的な“時間変化”が見られた．この領域の地震時応力変化は0.1MPaオーダーと小さく，応力場のパターンの“時間変化”は地震時応力変化では説明できない．一方，この地域は熊本地震後に地震活動度が著しく上昇した領域であり，間隙流体圧の上昇が地震活動の活発化を促したことが示唆されている（Nakagomi et al. 2021）．二つの期間において，この領域で発生した地震のモーメントテンソルのCLVD成分の割合を計算したところ，熊本地震後の方がCLVD成分の割合が大きい傾向があることが分かった．この結果は，この領域に分布する既存断層に深部から高圧流体が流入することにより地震がトリガーされた可能性を

© The Seismological Society of Japan

示唆する（Matsu'ura & Terakawa, 2021）.

© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal distribution of the very-low frequency earthquake at Kumano-nada —Activity between Dec. 2020 and Jan. 2021—

*Yojiro Yamamoto[1], Keisuke Ariyoshi[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Takane Hori[1]

1. JAMSTEC

南海トラフ沈み込み帯は、M8級の巨大地震が繰り返し発生する領域として知られ、現在も強く固着していると考えられている。通常の地震活動はその多くがプレート内地震である一方で、プレート境界では、さまざまな時定数を持つスロー地震活動が観測されている。スロー地震活動は強い固着域と安定滑り域の遷移域で発生すると考えられるため、それらの時空間分布を把握することは、プレート間固着状態をモニターする上で重要である。
2020年12月から2月にかけて、熊野灘のトラフ軸近傍においてスロースリップが発生した（例えば、Araki et al., 2021JpGU）。我々は、DONET広帯域地震計記録により、このスロースリップの活動期間中において、周期10～20秒の波が卓越する浅部超低周波地震（以下、VLFE）の発生を確認した。これらVLFE活動の時空間変化を調べるため、DONET波形記録の目視によるVLFE活動の検出と震源決定、発震機構解の推定を実施した。解析にはNakano et al. (2008)によるSWIFTを適用し、Nakano et al. (2018)と同様に、海域の1次元速度構造を仮定したグリーン関数を用いた。この解析により、合計736個のVLFEの震源位置と発震機構解を推定した。
推定したVLFEのうち、M3以上、かつ3観測点以上、上下動成分最低1つを含む5成分以上の波形データを利用でき、Variance reductionが0.3以下となったものは、290個である。これらを用いて、今回の活動の検討を行った。 まず、活動域の平均的なプレート境界形状である走向240度、傾斜角6度の逆断層を仮定した発震機構解と比較すると、2つの発震機構解の間の最小回転角を示すKagan角が30°以内となるものが大半であることから、VLFE活動の多くは低角逆断層型のプレート境界上の活動と解釈した。次に時空間分布を検討した。今回のVLFE活動には、2段階の空間発展がみられる。第一段階として、12月6日の夜にDONET1のBノード付近からVLFE活動が開始したが、この活動は3日間の活動を経て数日低調となった。この活動域は2015年10月におけるVLFE活動域とほぼ同じである（Nakano et al., 2018; Toh et al., 2020）。その後第二段階として、12月11日から、VLFEはBノードからみてトラフ軸平行方向南西側に位置するDノード付近、およびDノードの南東、トラフ軸近傍に位置するCノード付近まで活動域を拡大し、1月中旬まで活動は継続した。時空間分布からは、第一段階・第二段階ともにトラフ軸平行方向に活動域が広がっている様子が見られ、拡大速度は第二段階のほうが第一段階よりも速いようにみえる。また、第二段階の活動と領域が同じ2016年4月に観測されたVLFE活動（Nakano et al., 2018）においても、逆方向への拡大であるものの第二段階と同程度の拡大速度での空間発展がみられる。このことから、活動域の時空間拡大の速度は場所によって一定である可能性が考えらえる。また、12月28日にはRapid tremor reversal（RTR; Houston et al., 2011）が発生したように見える。
孔内観測による間隙水圧変化からは、スロースリップ現象は2021年2月中旬まで継続したようにみえる。一方で、2021年1月18日以降は、発震機構解の推定に十分なデータ数をもつVLFE活動は確認されていない。ただし、１～２観測点の波形記録においてVLFE活動が確認される例が、特にCノード付近で1月5日から2月2日まで確認される。このことから、スロースリップ活動の後半では、トラフ軸近傍において小規模なVLFEが発生していた可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

Controling factors of along-dip segmatation of mega-thrust earthquakes in subduciton zones

*Kiyoshi YOMOGIDA[1]

1. Earth Planetary Dynamics, Grad Sch Sci, Hokkaido University

沈み込み帯プレート境界のmegathrust地震に対して、海溝軸に沿っての断層面のセグメントの区分け（along-strike segmentation）は詳細な議論が長くなされてきた（e.g., Lay et al., 1982）。しかし、2011年東北沖地震では、全く異なった海溝軸に直角方向のセグメントの区分け（along-dip segmentation）が本質的な役割を担っていたことが多くの研究で明らかになった。超巨大地震の典型例と考えられてきた1960年チリ地震や2004年スマトラ地震では、この方向のセグメントは実質的に単一であり、だからこそalong-dip segmentationはそれまで考慮されてこなかった（along-dip single segmentatiom、以下single seg.と呼ぶ）。2011年東北沖地震では深い側のセグメントと浅い側のセグメントの破壊様式・発生前後での挙動のコントラスが明らかとなり（along-dip double segmentation, double seg.）、1964年アラスカ地震でも実はそのような特徴が内在していたことが判明した（Yomogida et al, 2011; Koyama et al., 2012）。

Double seg.の地震が発生する沈み込み帯は、海溝軸と陸側の海岸線にある程度の距離が必要で、海溝側の浅いセグメントは通常時の地震活動がほぼ皆無に対して、深いセグメントでは活発な活動と対照的である。さらに、double seg.の沈み込み帯では、海溝軸方向の隣接したセグメント間（along-strike）で発生様式や大地震時での滑り量が劇的に異なる点は、従来型のsingle seg.のmegathrust地震の概念とは異なっている（e.g., Feymueller et al., 2008）。例えば、東北沖地震の宮城沖では100mに迫る大滑り量のセグメントに対して、両側の三陸沖と福島沖では突然小さくなった。この海溝軸方向のセグメント毎の大きな変動は、沈み込むプレートの年代（温度構造）といった従来考えられてきた不均質性では説明がつかない。また、海山などの存在では、セグメント境界を規定する可能性のみで、セグメント境界をまたいでの差異の要因にはならない。

沈み込むプレートの探査が飛躍的に進み、例えば、東北沖で沈み込む前の太平洋プレート浅部に大きな構造の違いが最近発見された（e.g., Fujie et al., 2020)。東北沖地震での大滑り領域の沖合の太平洋プレートでの均質で厚いチャート層に対して、その北側ではpetit hot spotsによりチャート層が岩脈などで著しく乱されている。このプレート浅部の微細構造の違いが数百年以上にわたる歪み蓄積の有無を決して、通常の地震活動や東北沖地震での滑り量の違いをもたらしたとするFujie et al. (2020)の案は自然である。しかし、浅いセグメントのみならず、深いセグメントでも宮城沖と三陸沖では通常の地震活動で大きな差があり、それだけがプレート境界での地震発生・活動様式を支配する要因に限らない。

　沈み込むプレート浅部の構造のコントラストは、東北沖に限らず一般的に存在する。多くの沈み込み帯はsingle. seg.であり、セグメント間の劇的な相異は顕著でない。Double seg.は比較的古いプレートが沈み込み、プレート境界のカップリングが古典的な視点（2011年以前に日本海溝はそう思われていた）では弱い。古典的な視点でカップリングが強いsingle seg.の沈み込み帯（e.g., チリ、南海トラフ）では、沈み込むプレート浅部の不均質性の効果は限定的であろう。弱いプレート境界でのカップリングの沈み込み帯で、かつdouble seg.の浅いセグメントのみ、すなわち弱い背景応力場でかつ比較的低温のプレート境界面であるからこそ、沈み込むプレート浅部の微細構造が長期の歪み蓄積に本質的な役割をもたらすと考える。日本近海では千島海溝の南部がある。南海トラフのようなsingle seg.の沈み込み帯では、このような不均質性は大まかなセグメント区分けを規定するだけで、セグメント間の大きな違いはもたらさないと考える。

© The Seismological Society of Japan

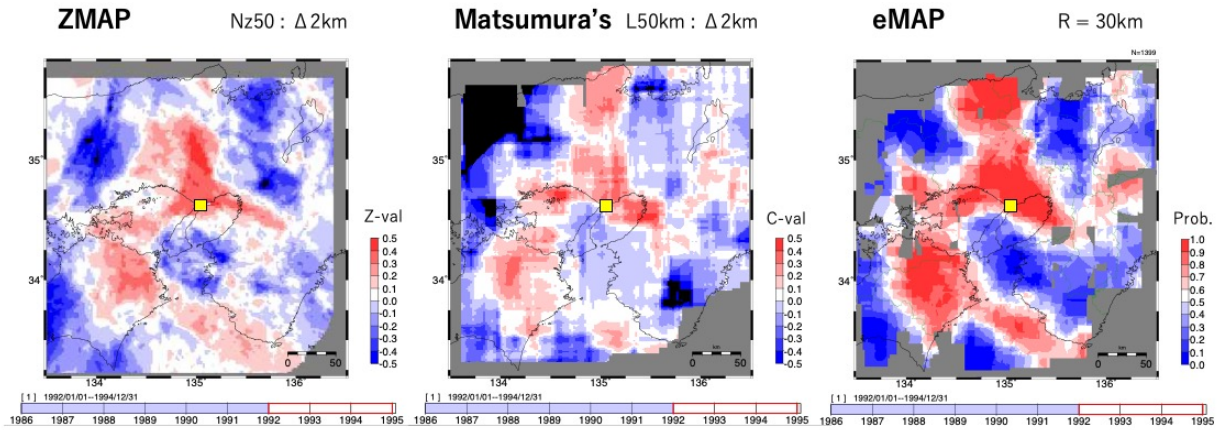
Visualization of seismic activity anomalies - comparison of multiple methods

*Sumio YOSHIKAWA[1]

1. No affiliation (JMA, retired)

地震活動の変化を客観的に検出する方法として，震源分布そのものではなく地震活動の静穏化・活発化現象の視覚化を目的としたZMAP［Wiemer and Wyss (1994)］が開発されている．また同様の目的で，松村の方法［松村 (2002)］および eMAP［吉川・他 （2017］が開発されている．これらの方法の地震活動の変化に対する特性が明らかでなかったことから，吉川・他（2021）は３つの方法において地震活動に同じ変化を与えた場合の解析結果を比較した．それによると松村の方法とZMAPは地震活動の変化に対してほぼ同様に変化に応じた定量的性質を示す一方，eMAPは定性的ではあるが地震活動の変化をより高感度に捕捉できる結果を示した．この発表では，1995年1月17日の兵庫県南部地震（Ｍ７.３）発生前の地震活動の事例を用いて３つの方法による解析結果を比較した結果を示し，視覚化表示の有効性を再確認する．　それぞれの解析方法には基本的な違いがある．地震活動の基準期間と評価期間を設定することは同様であるが，ZMAPは両期間の地震計数率の相対差（Z値），松村の方法は両期間の地震計数率の相対比をそれぞれ用いるのに対して，eMAPは両期間の地震計数率に基づくポアソン確率を用いる．また地震活動を把握する領域に関しては，ZMAPと松村の方法では等間隔の円形および矩形要素をそれぞれ用いるのに対し，eMAPでは個々の震源位置を中心とする円形要素を用いる．　今回の調査は，気象庁震源カタログで近畿地方とその周辺における地殻内のＭ２.２以上の震源を対象とした．図は，1986年1月から1991年12月までの期間を基準に，1992年1月から1994年12月までの期間の活動変化を示す．いずれの解析結果も淡路島付近を中心とする静穏化域とそれを囲む活発化域を示しており，いわゆるドーナツパターンを示す．３者を比較するとZMAPは地域的な詳細変化を最も明確に表すことが分かる．またeMAPは静穏化・活発化域のコントラストを最も明確に示すのが明らかである．　以上の事例から，地震活動の視覚化は異常変化の客観的把握に効果的な方法であり，複数の解析手段を同時に適用することは評価の信頼性を確認するのに役立つということができる．

© The Seismological Society of Japan



Seismic rate changes visualized by ZMAP, Matsumura's method and eMAP. The analysis values of Z-val. and C-val. are normalized to be within the range of -0.5 to +0.5. Prob. is the Poisson probability. The square in each figure is the epicenter of the main shock.

© The Seismological Society of Japan

Scaling relations of moment magnitude and rupture area for intraslab earthquakes

*Xuelei Zhang[1], Makoto Nemoto[1], Nobuyuki Morikawa[2], Yuji Dohi[2], Kenji Hirata[2], Hiroyuki Fujiwara[2]

1. OYO corporation, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Intraslab earthquakes that occur in the subducting slab have different source characteristics compare to those earthquakes that occur in the subduction interface. The systematic difference of fault rupture area between intraslab and interface events has been revealed by previous studies of scaling relations for fault rupture area and moment magnitude (Strasser et al.,2010). Such kind of difference has been supported by a later study by Allen and Hayes 2017 which only uses finite fault models in regression analysis. In the study of Strasser et al.,2010 and Allen and Hayes 2017, all data for intraslab earthquakes have complied in a single data set even though source characteristics might also be different between shallow and intermate depth intraslab earthquakes (Satatani et al., 2006). Recent years, more and more finite fault models for intraslab earthquake have been published online which make the discussion of the difference in centroid depth possible. In this study, we compile a data set of fault parameters from 56 finite fault models corresponding to 47 intraslab earthquakes. The fault dimension of each model has been estimated using effective length and width (Mai and Beroza 2000) based on the definition of the autocorrelation width (Bracewell 1986). As in previous studies, averaged effective length, width, and moment magnitude were taken for earthquakes with multiple models. Based on the circular crack model (Kanamori and Anderson 1975), we also calculated the averaged stress drop for each pair of fault rupture area and earthquake magnitude. The results of stress drop show 8 earthquakes have very low stress drop (less than 2MPa). By reviewing the slip distribution of those earthquakes, we noticed the slip of those earthquakes are widely distributed and most of them have multiple slipped areas. Since the distribution of slip of these earthquakes is different from the others, they should be considered in different scaling relations. By visualizing the distribution of centroid depth and Stress drop, we found that there is a gap at a depth around the depth of 80km. In the depth shallower than 80km, the stress drop increase with depth, and in the depth deeper than 80km, although the deviation is larger, generally the stress is independent with depth (Fig 1a). Based on the analysis shown above, scaling relations divided by a centroid depth of 80km is obtained (Fig 1b). The average stress drop for the deeper earthquakes is roughly double the number for shallower earthquakes. The difference of the stress drop of earthquakes at different depths is a result of a complicated combination of the physical properties of materials such as the coefficient of friction of the fault surface, elasticity, viscosity of surrounding rocks, and the forces applied by the bending of unbending of the slab, dehydration, and buoyancy. Although the detail of these factors is still unclear to us and further discussion is beyond the scope of this study, the result of the study shows that the depth dependence of stress drop needs to be considered in the scaling relation for intraslab earthquakes.

Reference Allen, T. I., & Hayes, G. P. (2017). Alternative rupture-scaling relationships for subduction interface and other offshore environments. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 107(3), 1240-1253. Bracewell RN (1986) The Fourier transform and its applications, vol 31999. McGraw-Hill New York Kanamori H, Anderson DL (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America* 65(5):1073-1095 Mai, P. M., & Beroza, G. C. (2000). Source scaling properties from finite-fault-rupture models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(3), 604-615. Sasatani, T., Morikawa, N., & Maeda, T. (2006). Source characteristics of

© The Seismological Society of Japan

intraslab earthquakes. Geophys. *Bull. Hokkaido Univ*, 69, 123-134. Strasser, F. O., Arango, M. C., & Bommer, J. J. (2010). Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude. *Seismological Research Letters*, 81(6), 941-950.

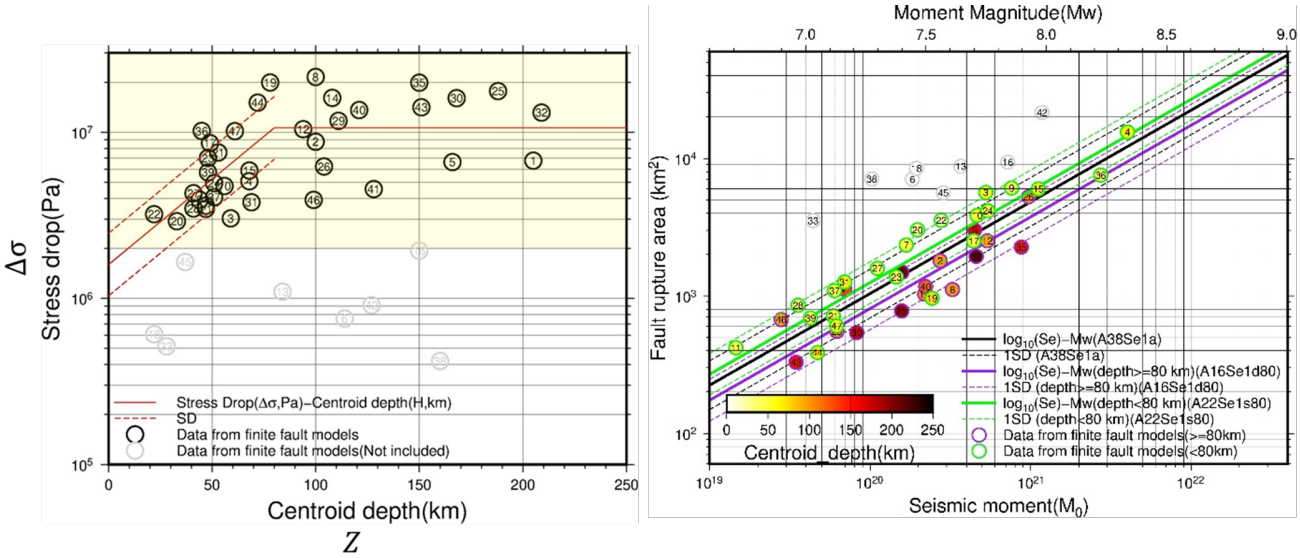


Fig1. (a)Black circles show the relationship between stress drop and Centroid depth. The red solid line and broken line at a depth shallower than 80km are the regression line and standard error derived from data, respectively. A Red solid line at a depth deeper than 80km indicates the averaged stress drop. (b)Solid lines show the scaling relation for moment magnitude and fault rupture area for intraslab earthquake The fill color of circles shows the centroid depth for earthquakes. Gray circles show the magnitude and fault rupture area of those earthquakes whose stress drop are smaller than 2MPa. These earthquakes are not used in the regressions. Green and purple circles are the earthquakes whose centroid depth is shallower and deeper than 80km, respectively. Green and purple lines are the regression lines for the data with the same color. The black line is the regression line for all data except for the gray circle.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S13. Crustal fluids and earthquake

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P4 (ROOM P)

[S13P-01] Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan

○Tsuyoshi WATANABE[1], Shinya Hiratsuka[1], Koji Shimada[1] （1.Japan Atomic Energy Agency）

3:30 PM - 5:00 PM

[S13P-02] Crustal anisotropy structure around Mt Ontake derived from shear-wave splitting analysis

○Osamu MURAKAMI[1], Tsuyoshi Watanabe[1] （1.Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan

*Tsuyoshi WATANABE[1], Shinya Hiratsuka[1], Koji Shimada[1]

1. Japan Atomic Energy Agency

地殻内に存在する流体、とりわけ深部からの流体の流入は、地震発生を議論する上で重要なファクターであるとともに、地層処分事業においても、地層処分システムにおける閉じ込め機能の喪失という観点から懸念事項とされている。このような問題に対し、地震学などの地球物理学的観測から地下のイメージングを行い、流体の存在や移動経路を明らかにすることは有効であると考えられる。そこで、原子力機構では、S波が流体やクラックなどの異方性媒質中を通過する際、二つに分離するという特徴に着目し、S波スプリッティング解析を用いた地殻内流体の移動経路推定手法の開発に取り組んでいる。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、2011年東北地震）の発生後に地殻内の地震活動が活発になった福島県浜通りから茨城県北部にかけての地域を対象に実施したS波スプリッティング解析について報告を行う。

上記の領域では、2011年東北地震の発生後、2011年3月19日にM6.1、3月23日にM6.0、M5.8、M5.5、M5.8のいずれも西北西－東南東から東－西方向に伸張軸をもつ正断層型の地震が相次いで発生した（気象庁・気象研究所, 2011）。さらに、4月11日には、福島県浜通りで東北東－西南西方向に張力軸を持つ正断層型のM7.0の地震（福島県浜通りの地震）が発生し、活断層とされる井戸沢断層と湯ノ岳断層の一部で同時に破壊が生じ震源断層が現れている（堤・遠田, 2012）。また、この地震直後から、いわき市内の数か所で温泉の異常な湧き出しが報告され、その湧水は湧出量の変化を生じつつも、2018年以降も継続した（Sato et al., 2020）。

このような背景に基づき、本研究では、2011年東北地震及び福島県浜通りの地震発生前後の二つの期間に分けてS波スプリッティング解析を進めた。使用したデータは、これらの地震前（期間Ⅰ）については、2004年4月28日から2011年1月6日までに30 km以浅で発生したMj 1.5～3.2の675イベント、地震後（期間Ⅱ）については、2011年6月1日から2011年12月30日までに30 km以浅で発生したMj 1.5～1.9の4159イベントの地震波形である。また、利用した観測点は、福島・茨城・栃木県に位置する防災科学技術研究所の高感度地震観測網、気象庁、東北大学が運用する18観測点である。解析には、Silver and Chan（1991）による手法を用い、速いS波の振動方向（φ）と遅いS波が到達するまでの時間差（dt）の推定を行った。さらに、SP変換波によるS波到達時の位相擾乱を避けるため、鉛直下向きより各観測点への波線の入射角が35°以内となる震源と観測点の組み合わせを対象とした。そして、速いS波と遅いS波の波形の相関係数が0.9以上となる地震を採用し、φやdtの空間分布について調べた。

期間Ⅰでは、φ分布のヒストグラムを作成するにあたり、十分な地震数であるとは言い難いものの、沿岸部で最大水平圧縮応力や太平洋プレートの収束方向（Yoshida et al., 2015）である西北西－東南東方向ではなく、海溝に対し平行な方向への分布が卓越し、内陸部でも同様の特徴が示された。期間Ⅱについても、沿岸部で、おおむね海溝に対して平行な方向へのφ分布が卓越し、内陸部でも、最大水平圧縮応力や太平洋プレートの収束方向とは異なり、南北方向から北東－南西方向へのφ分布が示された。これらの結果は、先行研究（Iidaka and Obara, 2013; Iidaka et al., 2014）で示されたものと調和的であった。また、期間ⅠとⅡを通してφ分布の比較を行うと、数十度程度の違いが見られる観測点はいくつかあるものの、大きな変化はなかった。

続いて、地震数が十分に確保された期間Ⅱについて、dtを震源距離で規格化した値（距離規格化dt）の平均値に関する空間分布について調べた。この結果、ほとんどの観測点で距離規格化dtの平均値が0.005 sec/km以下となったが、観測点IWAKMZやHITACHで相対的に高い値が示されることが明らかとなった。とくに、観測点

© The Seismological Society of Japan

IWAKMZは、Sato et al.（2020）で示された湧水の継続している温泉付近に存在することから、地殻内に存在する深部流体の影響を反映し、他の観測点に比べて大きな距離規格化dtの平均値が得られたことが示唆される。なお、同観測点は、いわき市三和町の水石山（みずいしやま）公園内に設置されており、水石山の起源が、山頂に水が溜まっている石があり、日照りでも枯れることがないという言い伝えに由来している。このことからも、同領域付近は定常的に流体の豊富な地域であることが示唆され、今回の解析で得られた結果を支持する。

一方で、Umeda et al.（2015）は、2013年11月から12月に解析対象領域の南部で電磁探査を行っている。その結果では、太平洋沿岸の海岸線から陸域に向けて長さ約30 km程度、深さ20～30 kmの領域に低比抵抗領域が存在し、その直上に福島県浜通りの地震に関連した地震活動が集中している。この電磁探査の測線は、観測点N.JUOHとN.KIBHの間に位置することから、地殻内に流体が存在すると仮定した場合、距離規格化dtの平均値が相対的に高い値をとることが期待されたが、同観測点で相対的に大きな値は示されなかった。いくつかの理由として、電磁探査の測線を横切るような地震が今回の解析に含まれなかったこと、電磁探査で見えた低比抵抗領域が不連続な分布で島弧と平行な方向へ広がっていないことなどが考えられる。これについては、解析期間を延長するなどしてデータの拡充を行い、電磁探査の結果との対応関係についても議論を進めたい。

本発表は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の成果の一部である。

© The Seismological Society of Japan

Crustal anisotropy structure around Mt Ontake derived from shear-wave splitting analysis

*Osamu MURAKAMI[1], Tsuyoshi Watanabe[1]

1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency

御嶽山周辺では，1979年の噴火以降，2007年，2014年にも小規模な水蒸気噴火が発生し，さらに1984年長野県西部地震や2017年長野県南部の地震（Mj5.6）をはじめとした御嶽山南東麓での活発な地震活動が見られる．このような様々なイベントが発生する領域では，かなり不均質な地殻構造が予想され，御嶽山近傍には地殻流体の存在も予想される．断層のような不均質構造や地殻流体の検出に有用なツールの1つとして，S波スプリッティング解析法が挙げられる．そこで本研究では，このような御嶽山周辺域における常設地震観測点で記録された連続地震波形データを用いたS波スプリッティング解析を行うことにより，領域内の地殻異方性構造の推定を試みた．
解析にあたっては，気象庁一元化震源カタログから，解析対象領域内で2004年4月1日から2019年12月31日までに発生したMj1.5以上の地震3223個（深さ20km以下）を選んだ．これらの地震について，御嶽山周辺域に展開されている常設地震観測点（Hi-net，気象庁，大学）で観測された連続波形データを用いた．はじめに，Nakajima and Hasegawa (2007)による地震波速度構造を用いて，各観測点における1次元速度構造を仮定した．この仮定した速度構造と気象庁一元化震源から，それぞれのイベントによる各観測点に到来する地震波の入射角を推定し，入射角35度未満の震源-観測点ペアのみに解析対象を限定した．これは，入射角が高角度な場合に生じうる，地表でのS-P変換波の影響（e.g., Booth and Crampin, 1985）を排除するためである．入射角35度未満の観測点-震源ペアについて，Silver and Chan (1991)の手法を適用して，速いS波の偏向方向および，速いS波と遅いS波とのarrival timeの差を推定した．
上述の解析の結果，多くの観測点でこの領域の最大水平圧縮応力の方向（WNW-ESE）と概ね平行な速いS波の偏向方向が得られたが，一部の観測点ではそれと直交するような速いS波の偏向方向が推定された．前者については応力起源の地震波異方性を，後者については構造起源の地震波異方性を反映しているものと考えられる．しかしながら，近接した観測点で互いに90度異なるような速いS波の偏向方向が推定されるケースも見られた．Crampin et al. (2004)は，90度異なる速いS波の偏向方向を異方性のある多孔質弾性体でモデル化し，観測点下におけるマイクロクラック分布の形状の，間隙流体圧の変化によるクラックの開口や閉口による再配列の結果，90度異なる速いS波の偏向方向が生じることを提唱している．発表では，本研究において近接する観測点で推定された90度異なる速いS波の偏向方向が，間隙流体圧の変化で説明可能かどうかを検討する．

謝辞: 本研究では，防災科学技術研究所 Hi-net，気象庁 地震・津波検知網，気象庁 火山観測網，東京大学地震観測網，名古屋大学地震観測網のデータを使用させていただきました．また，本研究は，経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和2~3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発)」の成果の一部である．

参考文献:
・Booth, D. C. and S. Crampin, Shear-wave polarizations on a curved wave- front at anisotropic free surface, Geophys. J. R. Astron. Soc., 83, 31–45, 1985.
・Crampin, S., Peacock, S., Gao, Y. and Chastin, S., The scatter of time-delays in shear-wave splitting above small earthquakes. Geophys. J. Int., 156, 39–44, 2004.
・Nakajima, J., and A. Hasegawa, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, J. Geophys. Res., 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770, 2007.
・Silver, P. G. and W. W. Chan, Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *J. Geophys.*

© The Seismological Society of Japan

Res., 96, 16429–16454, 1991.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P5 (ROOM P)

[S15P-01] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of earthquakes around Fukushima Prefecture based on Block Inversion analysis using S-net data

○Yusuke TOMOZAWA[1], Tomoki Hikita[1], Tomonori Ikeura[1], Kentaro Kasamatsu[1] （1.Kajima Technical Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-02] **Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites**

○Yadab Prasad DHAKAL[1], Atsushi Wakai[1], Hiroaki Yamanaka[2], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Tokyo Institute of Technology）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-03] Modeling of a three-dimensional shallow S-wave velocity structure based on numerous microtremor arrays: A case study in and around Nishio City, Aichi Prefecture

○Ikuo CHO[1] （1.Geological Survey of Japan, AIST）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-04] Strong motion very close to the surface rupture during the 2016 Kumamoto earthquake

○Asako IWAKI[1], Hiroyuki Fujiwara[1] （1.NIED）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-05] Source Process of the Off Fukushima Earthquake of February 2021 - Analysis considering 3D subsurface structure -

○Kazuhito HIKIMA[1] （1.Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-06] Applicability of the strong ground motion prediction method to the 2021 Fukushima-oki earthquake (Mj7.3)

○Kiyoshi IRIE[1], Shohei YOSHIDA[1], Yasuo OKADA[1], Ken MIYAKOSHI[2], Kazuhiro SOMEI[2], Haruhiko TORITA[1] （1.Ohsaki Research Institute, Inc., 2.Geo-Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-07] Re-examination of scaling relationships of source parameters of the interplate earthquakes in Japan

○Ken MIYAKOSHI[1], Yujia GUO[1], Kunikazu YOSHIDA[1], Kiyoshi IRIE[2] （1.Geo-Research Institute, 2.Ohsaki Research Institute, Inc.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-08] Concept of Earthquake Disaster Prevention Infrastructure Simulator for the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

○Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Takahiro MAEDA[1], Yuji DOHI[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Harumi ISHIMARU[3] （1.NIED, 2.OYO RMS Corporation, 3.Mitsubishi Space

©Seismological Society of Japan

Software Co.,Ltd.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-09] Long-duration and broadband ground motion simulation for the great earthquakes along the Nankai Trough

○Takahiro MAEDA[1], Asako IWAKI[1], Shin AOI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Kosuke SEKI[2], Ryuta IMAI[3] (1.NIED, 2.Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3.Mizuho Research &Technologies, Ltd.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-10] Tsunami Inundation Simulation Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough
- For Effective Use of Tsunami Hazard Information -

○Yuji DOHI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Katsuya YAMORI[2], Takashi SUGIYAMA[2] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-11] A trial of conditional hazard assessment based on Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

Hiromitsu NAKAMURA[1], ○Yoshinori Tokizane[2], Hiroyuki FUJIWARA[1], Satoshi SHIMIZU[2], Miki ASO[2] (1.NIED, 2.OYO RMS Corp.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-12] Number of earthquakes from seismic activity model of the probabilistic seismic hazard map for Japan starting from 2020

○Jun'ichi MIYAKOSHI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Hiroyuki FUJIWARA[2] (1.Ohsaki Research Institute, Inc., 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-13] Nonergodic Ground Motion Prediction Model Using Artificial Neural Networks

○Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Asako IWAKI[2], Hiroyuki FUJIWARA[2], Naonori UEDA[1] (1.RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-14] Analysis and numerical modeling of local earthquake records obtained by the AN-net

○Hisashi NAKAHARA[1], Shutaro Sekine[2] (1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of earthquakes around Fukushima Prefecture based on Block Inversion analysis using S-net data

*Yusuke TOMOZAWA[1], Tomoki Hikita[1], Tomonori Ikeura[1], Kentaro Kasamatsu[1]

1. Kajima Technical Research Institute

1．はじめに

福島県沖で発生する海溝型地震の距離減衰特性は，例えば筧 (2015) や池浦 (2020) で議論されているように，プレート内部の地震波伝播の影響や低減衰領域の通過の影響等で特徴づけられている．2016年のS-netの観測開始以降，観測記録が蓄積されつつあり，海域での距離減衰特性や，震源特性のより高精度な推定に資するものと考えられる．本検討では，S-net，K-NET，KiK-net記録を用いたブロックインバージョン解析により福島県周辺で発生する地震の距離減衰特性を推定した．

2．データセット

福島県沖で発生した地震は，S-netとK-NET，KiK-netで同時に観測された地震を対象とした．対象期間はS-netの観測開始から2021年3月31日まで，M_J 5.0以上，震源深さ100 km以下の地震を収集した．S-netの観測開始前ではあるが，福島県周辺の陸域で発生した内陸地殻内地震も収集した．内陸地殻内地震は，震源距離100 km，プレート間地震とプレート内地震は，震源距離200 kmまでの記録を収集した．地盤の非線形化の影響を避けるため，K-NETとS-netは100 cm/s^{2}以下の記録を用い，KiK-netは地中記録を用いた．S-netの観測記録は，Takagi et al. (2019) の姿勢角情報を基に回転補正を行った．地震による揺れの途中で加速度波形にオフセット変化を生じさせるような強震動を受けた観測点では，姿勢角に変化が生じたと判断して，それ以後に発生した地震の記録は用いないこととした．対象地震と観測点の分布を図1に示す．

3．解析手法

友澤ほか (2020) を参照して深さ方向と水平方向のQ値の不均質性を考慮したブロックインバージョン解析を行った．伝播経路特性は，深さ方向を大陸地殻，マントル，太平洋プレートの3層でモデル化し，各層の水平方向の不均質性を考慮してモデル化した．震源と観測点を結ぶ断面で2次元レイトレースを行って，各層の伝播距離を評価した．地震本部 (2012) を参照して各層の境界は第17層のマントル，第21層の海洋性地殻第2層（太平洋プレート）の上面深度を用いた．S波速度はそれぞれ3.4 km/s，4.5 km/s，4.6 km/sとした．レイトレースの例を図2に示す．本手法はブロックの統合と分割を行い，領域分割の再設定をしながらブロックインバージョンを繰り返し実行し，最適な領域分割を推定する．本検討では，最小ブロックサイズを0.4˚×0.4˚，各ブロックが満たすべき有意水準を5%とした．なお，本検討では伝播経路特性のみに着目し，震源特性とサイト特性については議論しない．

4．解析結果

推定した不均質減衰構造を図3に示す．大陸地殻の不均質減衰構造は，海域も含めて概ね均質なQ値が広がっており，活火山周辺が相対的にlow-Qの領域が推定された．マントルの不均質減衰構造は，対象領域の西側でlow-Qが推定された．ただし，本検討で用いた観測記録は，活火山直下よりも海溝軸側のマントル部分を伝播する波線が支配的である．太平洋プレートは水平方向の不均質性を推定する自由度を与えて解析したが，最終的には一様な領域分割が推定された．推定した不均質減衰構造を用いて，福島県沖で発生する深さ30 kmのプレート間地震と，深さ50 kmのプレート内地震を想定し，地震基盤面上での地震動振幅の面的評価を行った結果を図4に示す．図4に矩形で示した領域の距離減衰特性を図5に示す．なお，震源特性は基準化しているため，距離減衰特性の傾きのみに着目すると，傾きはプレート内地震＞プレート間地震であり，観測記録の特徴と整合する．

謝辞

防災科学技術研究所K-NET，KiK-net，S-netの観測記録を活用させていただきました．記して感謝します．

参考文献

© The Seismological Society of Japan

筧楽麿 (2015), 神戸大学都市安全研究センター研究報告. 池浦 (2020) , 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第7号. Takagi et al. (2019), Seismological Research Letters, Vol. 90, No. 6. 友澤裕介, 加藤研一, 塩田哲生 (2020), 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第7号. 地震調査研究推進本部 (2012), 長周期地震動予測地図2012年試作版.

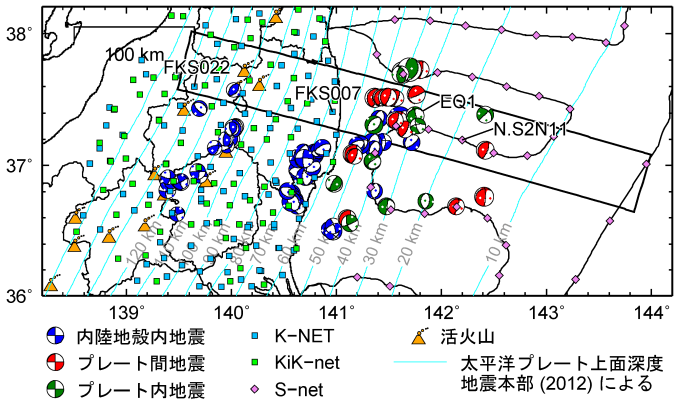


図 1　解析に用いたデータセット

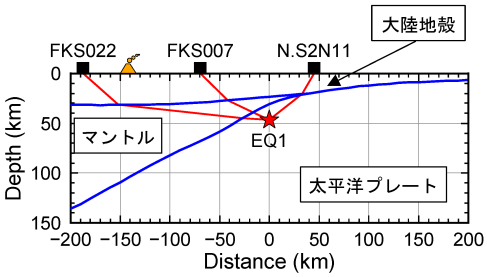


図 2　2 次元レイトレースの例

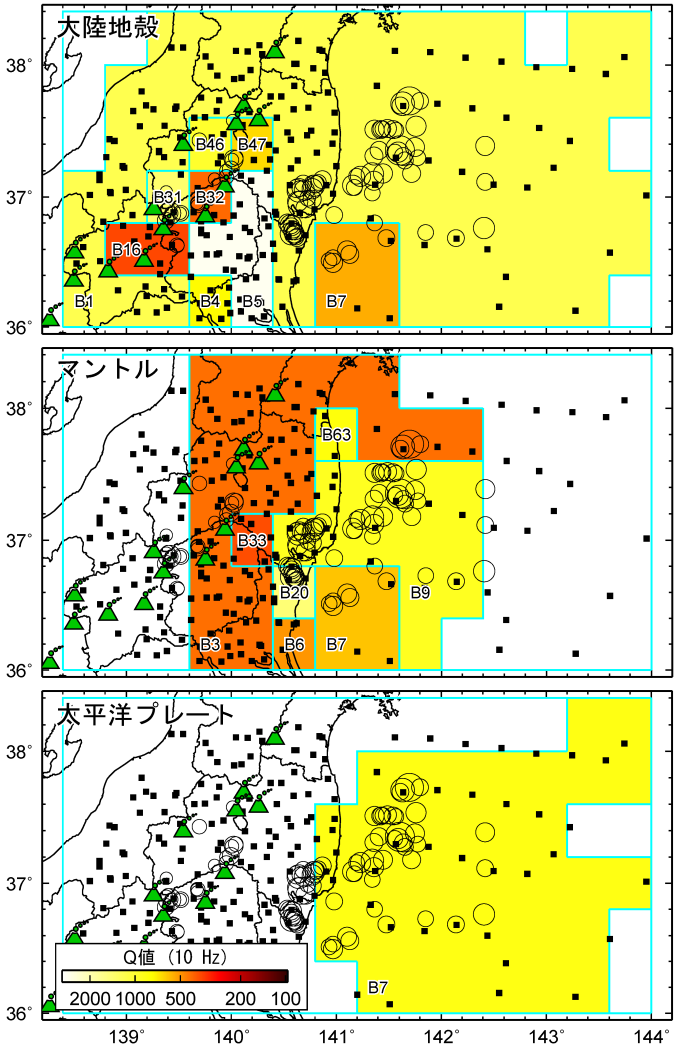


図 3　推定した不均質減衰構造（カラーは 10 Hz の Q 値）

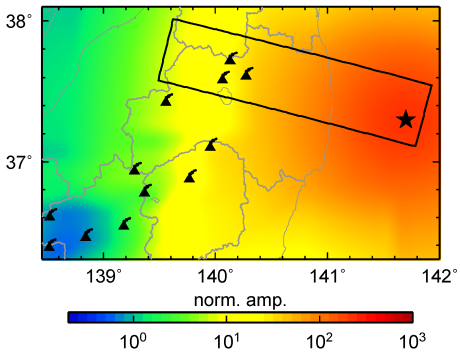


図 4　基盤面上の 10 Hz の距離減衰特性の面的分布（プレート内地震）

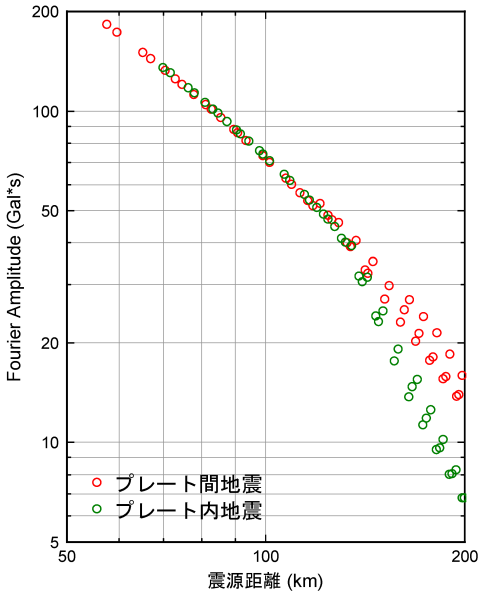


図 5　距離減衰特性の比較（10 Hz）

© The Seismological Society of Japan

Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites

*Yadab Prasad DHAKAL[1], Atsushi Wakai[1], Hiroaki Yamanaka[2], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1]

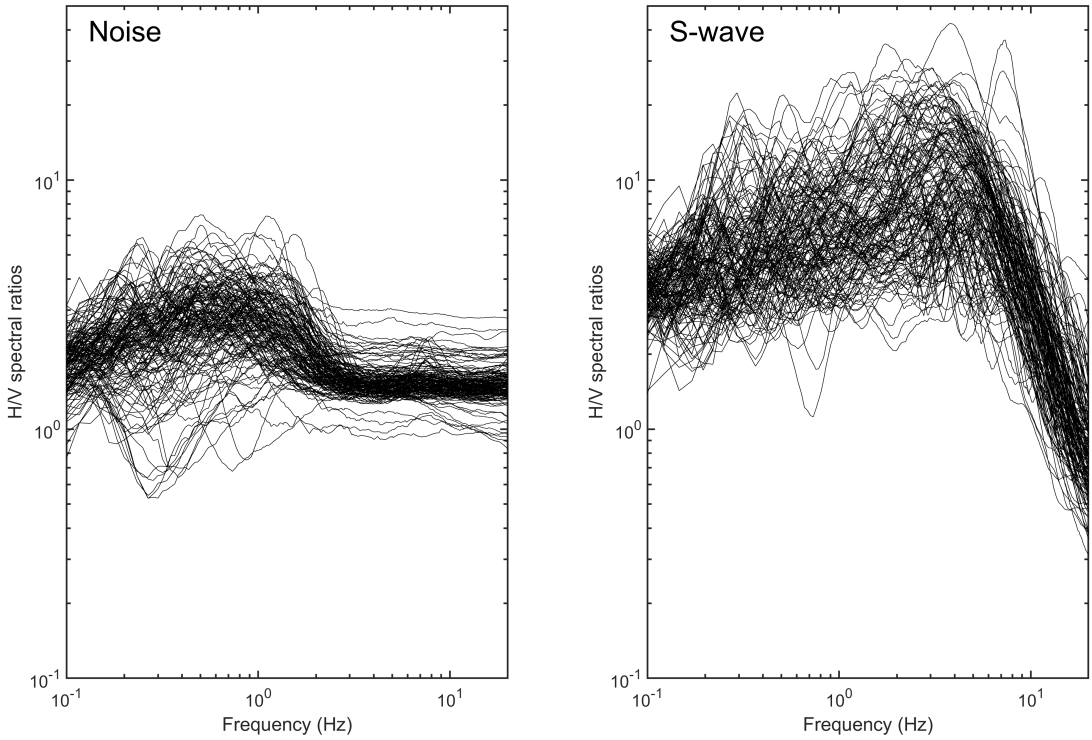
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokyo Institute of Technology

Studies about the horizontal-to-vertical spectral ratios (HVSRs) of ambient noises and earthquake motions are popular in Japan and many other earthquake-prone countries to estimate the dynamic properties of soils for earthquake disaster mitigation. In this study, we analyzed the HVSRs of ambient noises, referred to as noises, and earthquake motions at the S-net seafloor sites to understand the site effect on the recorded motions for the reliable prediction of ground motions for earthquake early warning. We processed the strong-motion records at the 150 stations of S-net from over 1000 earthquakes of Mj >= 4 and JMA focal depth < 70 km recorded between 2016 and 2019. We focused on the relatively low amplitude records (maximum value of peak accelerations of three components < 50 gals) to minimize the effects of rotations of sensor vessels and nonlinear site responses that may occur during large amplitude earthquake motions. The horizontal and vertical components of motions were obtained by finding the roll and pitch angles from the pre-event parts of the records and matrix operations described in Takagi et al. (2019). The S-wave onset times were estimated from the JMA2001 travel-time table (Ueno et al. 2002) to expedite the data processing, and a time window of 40.96 s was selected beginning 5 s before the S-onset time. We obtained the Fourier spectral amplitudes for each component, smoothed them using the smoothing function of Konno and Ohmachi (1998), and obtained the HVSRs as the square root of the sum of squares of the two horizontal components of motions divided by the vertical component of motions. The HVSRs for the noises were also similarly computed from the parts of the records before the earthquake origin time. We show the median values of the HVSRs for the noises and S waves (more accurately, extended S-wave portion) at all sites of the S-net in the attached figure. The plots of HVSRs of the noises gave gentle hump-shaped curves at frequencies between about 0.1 and 2 Hz at many sites, while they were flat at higher frequencies. In contrast, the plots of the S-wave HVSRs gave higher and wider hump-shaped curves including between 1 and 10 Hz. Some of the curves showed prominent peaks with steep slopes between 1 and 10 Hz. The maximum values of the HVSRs for the noises ranged between about 1.5 and 7, with the median value about 3.5. In contrast, the maximum values of the HVSRs for the S-waves ranged between about 5 and 40, with the median value about 10. The peak frequencies of the HVSRs for the noises mainly ranged between 0.1 and 2 Hz, with the median frequency of about 0.6 Hz, while they were mostly between 0.2 and 10 Hz for the S-waves, with the median frequency of about 3 Hz. The HVSRs of the noises at few sites displayed sinuous pattern with frequencies lower than about 1-2 Hz, especially in the shallow water regions (depths < 600 m). The S-wave HVSRs showed a steep decrease of the values after about 7-8 Hz. Some sites gave peak values of the S-wave HVSRs near the resonance frequency of the P waves in the water layer, while such peaks did not exist for the noise HVSRs. It has been argued that the HVSRs at the ground stations primarily reflect the effect of sediments. On the other hand, the values at the seafloor sites may reflect the combined effect of the sediments and water layer because the vertical components of motions are affected by the water layer. Further analysis is necessary to explain these observed features of the HVSRs to extract useful information for site characterization.

Acknowledgments: This study was supported by "Advanced Earthquake and Tsunami Forecasting Technologies Project" of NIED and JSPS KAKENHI Grant Number JP20K05055.

© The Seismological Society of Japan

Median values of H/V spectral ratios at the S-net sites



© The Seismological Society of Japan

Modeling of a three-dimensional shallow S-wave velocity structure based on numerous microtremor arrays: A case study in and around Nishio City, Aichi Prefecture

*Ikuo CHO[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

産業技術総合研究所では，沿岸域の産業立地評価や地震防災施策等に資する調査手法指針の構築を目指し，海洋–沿岸–陸域におけるシームレスな地質情報の整備を実施している．本発表は，その一環として行われた伊勢湾・三河湾沿岸域の地質・活断層調査（2017–2019年度）のうち，愛知県西尾市周辺における微動アレイ探査結果についての報告である．

愛知県西尾市北部周辺の調査対象領域（3.7 km×4.4 km）で120地点の微動アレイ探査を実施した．各地点で半径0.6 mの三角形アレイ及び地震計間隔8–20 mの三角形／直線アレイを用いて15分間程度の観測を行なった．上下動微動波形からレーリー波位相速度（概ね2 –28 Hz；最大1.9 Hzから47 Hz）を同定し，深さ30 mまでの平均S波速度（AVS30）と 1次元S波速度（Vs）構造を推定した．長さ1.1–4.5 kmの12測線に沿うVs鉛直断面をそれぞれ作成し，調査対象領域浅部（平均最大深度28 m）の3次元Vs構造の概観を得た（図１）．調査対象領域南部の完新世低地ではVs 200 m/s以下の沖積層が深さ10–20 mまで堆積する一方，北部の更新世中位段丘でこの軟弱層は非常に薄いことが分かった（測線NS1）．また，領家変成岩の山地ではVs 数百m/s以上の基盤が地表付近に現れ，周囲に向かって徐々に深度を増す様子が捉えられた（測線EW1）．今後は他の種類の調査・探査結果を統合して地質地盤モデルとしての完成度を高める必要がある．

なお，現在実務で用いられているいわゆる微動アレイ探査は，2000年代の初めに実用化されたものであり，標準的な観測方式とデータ処理手順が確立されている（物理探査学会標準化検討委員会, 2008; 佐藤・岡田，2016）．本発表のケースもスペクトル解析は確立された手順に従うが，ごく小さな微動アレイを多くの地点で展開する稠密微動アレイ観測を基礎として浅部地盤の2次元ないし3次元速度構造をモデル化するような方式は，近年始まったばかりの試みである（長・先名, 2016；中澤ほか，2020）．したがって，その手順は必ずしも一般的ではなく，試行錯誤的な部分も多く含まれる．本発表では，このような新しいタイプの微動アレイ探査のケーススタディとして，標準化されていない観測方式やデータ処理手順について紹介する予定である．

微動観測点の選定及び解析結果の確認のために産総研 阿部朋哉氏との議論が参考となった．

物理探査学会標準化検討委員会 (2008) *物理探査適用の手引き，土木物理探査マニュアル*，111–126.
長　郁夫, 先名重樹 (2016) 極小微動アレイによる浅部構造探査システム：大量データの蓄積と利活用に向けて, *Synthesiolgy*, **9**, 86-96.
中澤努・長　郁夫・坂田健太郎（2020） ローム台地のS波速度構造と地盤震動特性，*地質学雑誌*，**126**, 311-326, doi:10.5575/geosoc.2020.0012.
佐藤浩章・岡田　廣 (2016) 微動利用の地下構造推定法，物理探査学会編，*物理探査ハンドブック増補改訂版*，第4章，229––248.

© The Seismological Society of Japan

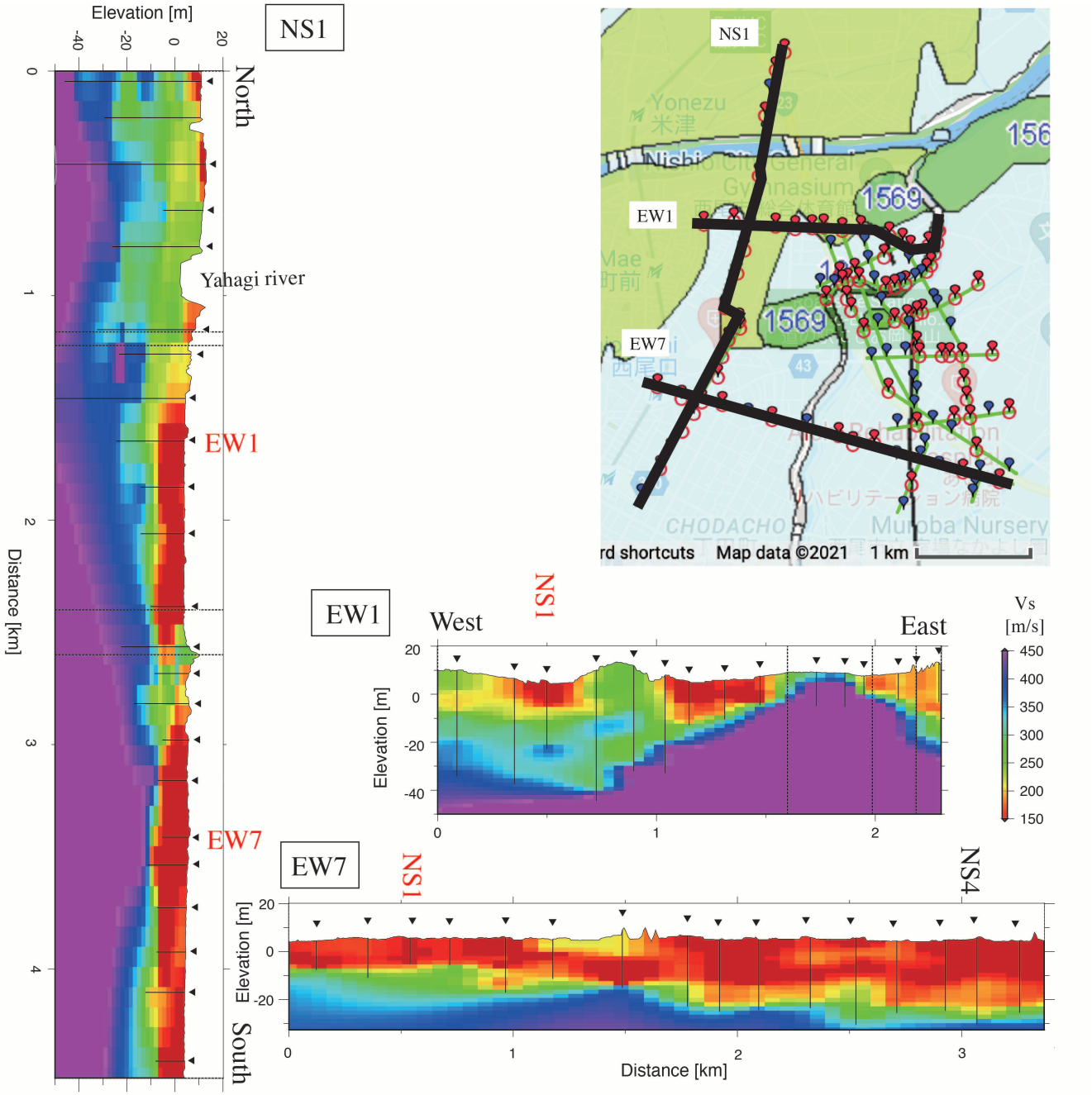


図 1 測線沿いのVs構造鉛直断面（測線NS1, EW1, EW7）. 右上の地質マップの太線は測線位置を示す. 速度断面の縦点線は測線の折れ曲がる箇所, 三角は観測点位置, 三角直下の縦棒は速度構造モデルの最下層までの深さを示す.

© The Seismological Society of Japan

Strong motion very close to the surface rupture during the 2016 Kumamoto earthquake

*Asako IWAKI[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. NIED

2016年熊本地震で特に益城町中心部で建物被害が集中したことは広く関心を集めた．断層モデルを用いた強震動評価によって益城町中心部における強震動を断層内の比較的浅い領域に位置する強震動生成域によって説明するモデルが提案されている（例えば，貴堂・他，2019；Somei et al. 2020）．
この地震で益城町寺迫から同町広崎町に至る地表断層が新たに確認されており（都市圏活断層地図，2017），益城町中心部で特に甚大な建物被害の集中した地域を通っている．現地調査に基づく詳細な地表断層位置（鈴木・他, 2018）および航空写真・道路走行調査画像判読と建物登記簿調査に基づいた分析により，地表断層から100mの範囲に倒壊建物の約80%が集中しており断層から離れるに従い急激に倒壊率が下がることが報告されている（内藤・他, 2018; 中村・他2018）．
この地震について，詳細な地表断層形状を取り入れた断層モデルによる強震動計算により断層近傍の変位分布の再現性が向上することを示しており（岩城・他, 2021），強震動予測における事前情報としての活断層情報の有用性を検討している．しかし，使用した断層モデルにおいて数kmの広がりを持つ強震動生成域や断層浅部の食い違いは地表断層から数100ｍ～数km離れた位置に強い地震動を生じさせるものの，上述したような地表断層から100 m程度以内の集中的な被害を断層モデルで説明するためには，それらに加えて断層内部でさらにスケールの小さい機構が必要である可能性がある． そこで，その機構として地表付近のごく近傍域のみに存在する断層内部領域で生じている地盤変形の影響を考えた．この地盤変形は，観測された地表断層の変位量の断層運動で生じた変位量からの欠損分と仮定すると，地表付近での断層運動による変位を一部打ち消す方向に働く力に相当すると考えることができる．この地盤変形に対応する力として断層ごく近傍の地表付近に体積的な変形を近似的に表現するシングル力をおき，断層モデルと組み合わせた線形の強震動計算による簡単な数値実験により，断層面全体に連続的な食い違い量を持つ断層モデルだけでは説明できない地表断層ごく近傍に集中した強い地震動を生成できることを示した． 実際の建物倒壊率を説明するためには，この変形が建物倒壊に寄与するための力の大きさを地盤の非線形応答も含めて検討する必要がある．

© The Seismological Society of Japan

Source Process of the Off Fukushima Earthquake of February 2021 - Analysis considering 3D subsurface structure -

*Kazuhito HIKIMA[1]

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute

【はじめに】

2021年2月13日に福島県沖で発生したMj7.3の地震では福島県および宮城県では最大震度6強に達し多くの被害が発生した．この地震は西北西ー東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型で，太平洋プレート内で発生した地震である（地震調査委員会,2021）．スラブ内地震による生じる強震動を考える上で震源過程を知ることは重要であり，防災科学技術研究所(2021)による速報解をはじめ，既にいくつかの詳細な解析が行われている（津田・他，久保・他，染井・宮腰; 2021 JpGU，など）．

本発表では，既報と同様に強震記録を使い震源インバージョン解析を行った結果を報告する．解析に当たっては，余震の震源を再決定しその結果を考慮して断層面を設定するとともに，太平洋プレートを含む３次元速度構造の影響についても検討する．

【震源再決定】

震源インバージョン解析に先立ち，本震を含めて一連の地震の震源再決定を行った．本震発生後4週間以内に発生した地震について，防災科研のWebサイトで公開されている気象庁一元化処理による検測値を用いて，DD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により震源決定を行った．以下の解析に用いた本震の震源位置は(37.7259˚N, 141.6894˚E, 55.17km)である．

再決定された余震分布は主に北北東ー南南西方向に並びその範囲は40 km程度に及ぶ．多くの余震は東南東側に高角に傾き下がる面上に分布しているが，一部ではより低角な面上に並ぶ余震群も見られる．これは気象庁(2021)などによる再決定震源分布と同様である．なお，本震震源は震源域の北東端に近い位置にあり，破壊は南南西方向にユニラテラル的に進展したものと考えられる．

【震源過程解析】

震源域が海域に位置するためやや遠い観測点も含まれるものの，震源から120 km程度以内のKiK-netの波形記録を震源インバージョン解析に使用した．また，福島県内にある東京電力の地震観測点での観測記録も解析に加えた．なお，浅部地盤による影響を軽減するために地中記録の使用を基本とした．

通常の震源インバージョン解析の際には，グリーン関数の計算はKohketsu (1985)により行い，計算に用いる１次元水平成層構造は，全国１次地下構造モデル（JIVSM-V1; Koketsu et al., 2012）の各観測点直下の速度構造を抜き出したものを余震記録で若干のチューニングを行ったモデルを使用した．

震源解析には，加速度波形に0.03～0.6 Hz をフラットレベルとするバンドパスフィルタをかけて積分した速度波形を用い，インバージョンはマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al., 1996; 引間, 2012)により行った．

解析の際の断層面は，再決定した余震のうち，本震後24時間以内程度に発生した余震の分布をもとに，F-netによるメカニズム解なども参考にし，さらに予備的解析を行い観測波形と合成波形との残差も考慮して設定した．余震分布全体に拡がる主断層面は走向:37˚，傾斜:45˚の長さ40km，幅24kmの1枚の矩形断層とした．さらに，この面を仮定した解析に加えて，これらから離れた低角な余震の並びを考慮し，長さ14km．幅12kmの傾斜:20˚の副断層面も付加したケースについてもインバージョンを実施した．なお，小断層サイズは2 km×2 km とした．

【解析結果（１次元構造）】

主断層面のみを考慮した解析では，破壊は震源から南東側にほぼユニラテラルに進展し，震源から12～20 km程度離れたやや浅部に大きなすべりが求まった．その分布は既発表の解析結果と概ね整合している．最大すべり量は2m程度，地震モーメントは4.7×10^{19}Nm (Mw7.0)となった．一方，副断層も設定した場合には，主断層面の最大すべり量は約1.8m，副断層では約1.6mのすべり量が求まり，全体では$M_0=5.3\times10^{19}$Nm (Mw7.1)とやや大きな値になった．

© The Seismological Society of Japan

観測波形の再現性の観点では，副断層面を設定した場合には特に福島県内での観測点の再現性が主断層面のみに比べると良好であった．インバージョン結果では副断層面上にも有意なすべりが求まっており，また，副断層面近傍の余震は本震直後から発生していることから，本震時には副断層面に相当する断層面もほぼ同時に活動したものと考えられる．

【３次元速度構造による波形計算】

１次元速度構造による震源インバージョン結果を用いて，３次元速度構造モデル（JIVSM）を使い波動伝播シミュレーションを行った．暫定結果ではあるが，観測波形の主要な特徴が良好に再現されることを確認した．これにより仮定した速度構造モデルは震源インバージョン結果を大きく変える程は影響を及ぼさないものと考えている．ただし，細部では再現が不足している地点も見られるため，３次元速度構造を用いた震源インバージョンを実施し，より詳細な震源過程を求める予定である．

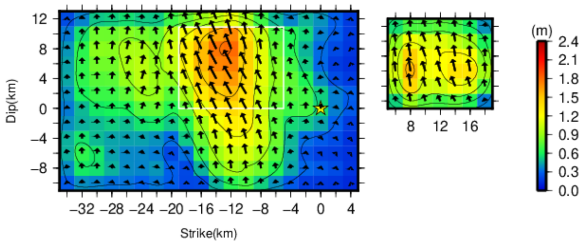
謝辞：本検討ではKiK-netおよびF-netメカニズム解，JMA一元化データを使用させて頂きました．

震源インバージョン結果（２枚断層）

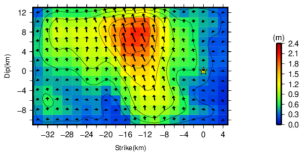
●1次元速度構造による**暫定結果**

走向: 37°，傾斜: 45°　[主断層]
走向: 37°，傾斜: 20°　[副断層]
M_O=5.3×10^{19}Nm (M_W7.1)
最大すべり量: 約1.8 m[主]，約1.6 m[副]

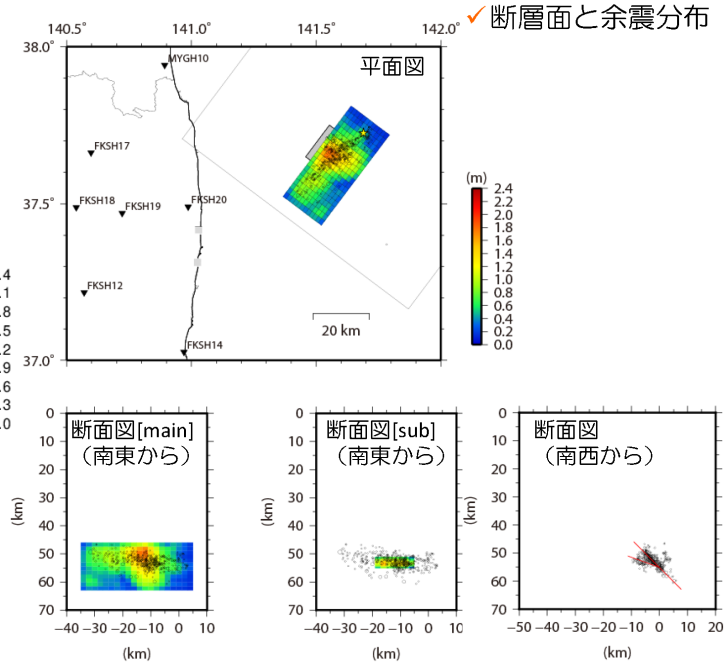
✓すべり分布（拡大図）



•参考：1枚断層のすべり分布



✓断層面と余震分布



© The Seismological Society of Japan

Applicability of the strong ground motion prediction method to the 2021 Fukushima-oki earthquake (Mj7.3)

*Kiyoshi IRIE[1], Shohei YOSHIDA[1], Yasuo OKADA[1], Ken MIYAKOSHI[2], Kazuhiro SOMEI[2], Haruhiko TORITA[1]

1. Ohsaki Research Institute, Inc., 2. Geo-Research Institute

１．はじめに

2021年2月13日に福島県沖の地震（Mj7.3）が発生した．この地震は沈み込む太平洋プレート内に震源が位置するスラブ内地震であり，この地震によりKiK-net山元観測点（MYGH10）の地表において1,432 Gal（三成分合成）の地震動が観測された（地震調査研究推進本部（地震本部），2021）．スラブ内地震を対象とした特性化震源モデルの設定手法は，地震本部の強震動予測手法「レシピ」において提示されているが，実地震による地震動予測手法の検証例は他のタイプの地震に比べて多くない．そこで，本研究では2021年福島県沖の地震について既往の研究結果で求められた震源パラメータをスラブ内地震のデータベースと比較するとともに，既往の地震動予測手法に基づいて特性化震源モデルを構築し，強震動シミュレーションにより地震動予測手法の適用性について検討を行った．

２．2021年福島県沖の地震のパラメータ

2021年福島県沖の地震について，強震記録を用いた震源インバージョンによって震源過程が推定されている（たとえば，津田・他，2021；久保・他，2021；など）．一方，染井・宮腰（2021）や吉田・他（2021）は，経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより強震動生成域（SMGA）や短周期レベルを求めている．これらのパラメータ値を既往のスラブ内地震のスケーリングデータと比較した．ここで，既往地震のデータには，大崎総合研究所（2021）のスラブ内地震のデータベースを用いた．地震モーメントと短周期レベルの関係（暫定結果）を図1に示す．国内外のスラブ内地震のデータと比較するため，地震モーメントはGlobal-CMT解の値を用いた．同図より，染井・宮腰（2021）および吉田・他（2021）の短周期レベルは既往地震のばらつきの範囲内におさまっており，新井・他（2015）による太平洋プレートを対象とした関係式と調和的な値となっている．同様に，地震モーメントとSMGAの面積の関係についても，大崎総合研究所（2021）のデータベースと比較したところ，吉田・他（2021）のSMGA面積は笹谷・他（2006）の関係式に調和的な値を示しているのに対し，染井・宮腰（2021）のSMGA面積はやや小さい値を示しているが，既往地震のばらつきの範囲内にはおさまっていることが確認された．これらから，2021年福島県沖の地震のパラメータは既往のスラブ内地震と比べて特異な値ではないことがわかる．

３．特性化震源モデルの設定

笹谷・他（2006）および新井・他（2015）を用いた特性化震源モデルをそれぞれ設定する．断層走向，断層傾斜，アスペリティ位置は染井・宮腰（2021）等のSMGAモデルの先行研究を参考に設定する．

４．強震動シミュレーション

構築した特性化震源モデルを用いて，経験的グリーン関数法により強震動シミュレーションを行う．特性化震源モデルと強震動シミュレーション結果は発表時に報告する．

謝辞：

本研究は、原子力規制庁の委託研究「令和３年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業」の一環として実施しています．

参考文献：

新井・他 (2015) AIJ, 716, 1537-1547; 壇・他 (2001) AIJ, 545, 51-62; 地震本部 (2021) 2021年2月13日福

© The Seismological Society of Japan

島県沖の地震の評価; 大崎総合研究所 (2021) 令和2年度原子力規制庁委託成果報告書; 久保・他 (2021) JpGU, SSS11-17; 笹谷・他 (2006) 北海道大学地球物理学研究報告, 69, 123-134; 染井・宮腰 (2021) JpGU, SSS11-P24; Somerville *et al.* (1999) SRL, 70, 59-80; 津田・他 (2021) JpGU, SSS11-16; 吉田・他 (2021) AIJ大会梗概集（投稿中）.

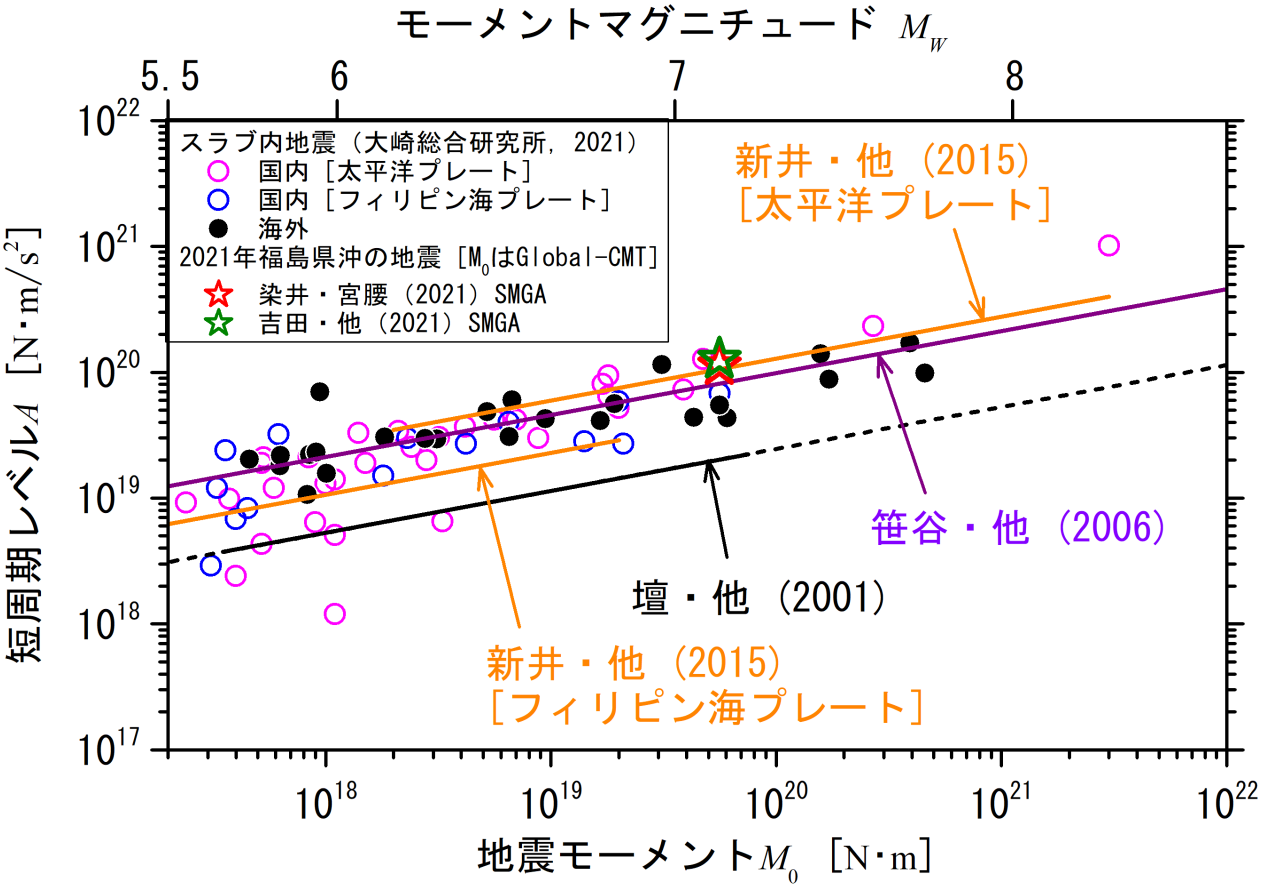


図1　スラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルの関係（暫定結果）

© The Seismological Society of Japan

Re-examination of scaling relationships of source parameters of the interplate earthquakes in Japan

*Ken MIYAKOSHI[1], Yujia GUO[1], Kunikazu YOSHIDA[1], Kiyoshi IRIE[2]

1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

プレート間地震の震源スケーリング則として地震本部(2020)は，例えば佐藤(1989) や宇津(2001)などを挙げている．一方，Murotani et al. (2008, 2013)や田島他(2013)は，主に震源インバージョン解析による不均質すべり分布モデルに基づいた震源スケーリング則を提案している．佐藤(1989) と宇津(2001)は1498～1994年に国内で発生した地震(Mw6～8クラス)，Murotani et al. (2008, 2013)と田島他(2013)は1923～2011年に国内外で発生した地震(Mw6～9クラス)を対象にしている．これらの震源スケーリング則は震源断層面積に対して地震モーメントの2/3乗の比例関係(Mw<8.4)を仮定している．なお，田島他(2013)は断層幅の飽和(200km弱)を指摘し，Mw8.4以上の地震の震源断層面積は地震モーメントの1/2乗の比例関係となることを提案している．ところで，これらの震源スケーリング則はMw8.4以下で同じ傾き(2/3乗)を仮定しているにもかかわらず，宇津(2001)とMurotani et al. (2008)のy切片は異なる．すなわち，同じ地震モーメントに対して前者の震源断層面積は後者に対して約0.6倍と小さい．このような震源スケーリング則の差異は用いているデータセットの違い（例えば，解析手法や国内外の地震）が考えられることから，本検討では国内のプレート間地震(Mw6.7～9.0)に限って震源スケーリング則の再検討を行う．

震源スケーリング則を検討する上で，同質なデータセットを用いることは重要であり，Somerville et al. (1999)は断層全体の平均すべり量の0.3倍未満となる断層端部をトリミング操作して，それ以上のすべりを持つ領域を震源断層と規定する規範を提案している．本検討ではSomerville et al. (1999)の規範あるいはそれと同等な規範を用いた国内のプレート間地震のデータセットを収集・整理した．Somerville et al. (1999)の規範を用いた地震のデータセットとして①Somerville et al. (2002; SM2002), ②Murotani et al. (2008; MU2008), ③田島他(2013; TJ2013), ④Skarlatoudis et al. (2016; SK2016)がある．ただし，同じ規範を用いているにもかかわらず，SK2016についてはMU2008と同じ地震の一部で同程度の震源断層面積が得られていなかった．この原因は不明であるが，本検討ではこのようなデータは用いなかった．また，⑤Thingbaijam et al. (2017; TH2017)のデータセットはSomerville et al. (1999)とは異なるThingbaijam and Mai (2016)の規範でトリミングしたものを用いているが，宮腰他(2018)は同じ地震を対象に両者の規範によってトリミングされた震源断層面積は同程度となることを確認している．一方，⑥Allen and Hayes (2017; AH2017)は独自のトリミング手法によって震源断層面積を抽出しているが，同じ地震を対象にTH2017と比較した結果，AH2017はTH2017に比べてMw8程度以下で系統的に小さいことが認められた．本検討では同質なデータセットを用いることを重視し，①SM2002, ②MU2008, ③TJ2013, ④SK2016の一部，⑤TH2017の計5つのデータセットを用いた．なお，異なるデータセット間で同一研究者によるインバージョンモデルを持つ地震も複数存在するが，ここでは，それらを区別していない．

以上の国内のプレート間地震を対象に収集・整理した5つのデータセットと宇津(2001) ，Murotani et al. (2008) 及び田島他(2013)が提案する震源スケーリング則を比較した．その結果，Mw6.7～8.4の地震データセットに対し，宇津(2001)に比べてMurotani et al. (2008)の震源スケーリング則の方が整合的であった．一方，Mw8.4以上の地震データセットは少なく，宇津(2001)及び田島他(2013)のスケーリング則の整合性の検討は困難であった．ここまでは暫定的な結果であり，今後は，データセットと震源スケーリング則の差について定量的な評価を行うとともに，他の震源パラメータ（断層幅や長さ等）についても検討を進める予定である．

謝辞：本研究は原子力規制庁による令和3年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業の一環として実施されています．

© The Seismological Society of Japan

Concept of Earthquake Disaster Prevention Infrastructure Simulator for the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Takahiro MAEDA[1], Yuji DOHI[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Harumi ISHIMARU[3]

1. NIED, 2. OYO RMS Corporation, 3. Mitsubishi Space Software Co.,Ltd.

地震調査研究推進本部（以降「地震本部」と称す）の長期評価は、南海トラフでは、約100～200年間隔で繰り返し大地震が発生し、同じ領域で同じような地震が繰り返し発生するのではなく、その規模や震源域の広がりは多様性に富んでいることを指摘している。また、これまでの科学的知見等に基づき、Ｍ８クラスの大地震が発生し、残りの領域においても連動して大地震が発生する可能性が高まることや、通常と異なるゆっくり滑り等が観測される可能性が中央防災会議防災対策実行会議報告書等において示されている。このような国難級の南海トラフ地震に備えるため、科学的・定量的なデータに基づき、「通常と異なる現象」の把握とその推移予測を、迅速かつ精度よく評価することを目指した評価・情報発信手法の開発や、発信された情報を被害軽減に最大活用するため、「通常と異なる現象」が観測された場合、住民や地域、企業等の防災対策のあり方や、防災対応を実行する方策について研究を実施する「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」が開始された（小平・他；地惑連合2021年大会）。 本研究では、前述の研究プロジェクトにおける将来を予測する基盤的情報として、「通常と異なる現象」発生後の時間推移についてもその地震発生の時空間的な多様性の一例として取り込み、地震や津波のハザードやそれによって引き起こされるリスク情報を提供可能とする地震防災基盤シミュレータの開発構想について述べる。具体的には、「通常と異なる現象」を地震発生の多様性の一例としてとらえ、それが起こった後の時間推移を考慮した条件付きリスク評価手法の開発を行う。また、地震本部の知見を採り入れつつ、地震発生の多様性を表現するために構築された時空間的に膨大な組み合わせからなる断層モデル群に対して、長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）や津波遡上を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法を開発し（前田・他、土肥・他；本秋季大会）、これらのハザード情報に基づいたリスク評価から事前避難、産業活動、大都市機能維持のそれぞれの地域性の観点から南海トラフの地震像を類型化する手法の開発を行い、類型化毎の代表的な広域災害シナリオを構築する（時実・他；本秋季大会）。このように創出したハザード・リスク情報を格納する情報基盤を、防災科研の地震ハザードステーション（J-SHIS）、津波ハザードステーション（J-THIS）、リアルタイム地震被害推定システム（J-RISQ）と連携できる形で地震防災基盤シミュレータとして構築し、想定する利用者の目的に適した形態で提供可能とするとともに、利活用を推進する活動を通して防災対策に活かすことを計画している。 謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© The Seismological Society of Japan

Long-duration and broadband ground motion simulation for the great earthquakes along the Nankai Trough

*Takahiro MAEDA[1], Asako IWAKI[1], Shin AOI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Kosuke SEKI[2], Ryuta IMAI[3]

1. NIED, 2. Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3. Mizuho Research & Technologies, Ltd.

南海トラフのプレート境界ではこれまでマグニチュード8級の海溝型巨大地震が繰り返し発生しており、強震動や津波によって甚大な被害が引き起こされてきた。地震調査研究推進本部による南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）では、2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ、過去に発生したことが確認されていないものの現在の科学的知見に基づいて推定されうる「最大クラス」の地震も含む、地震の多様性が考慮されている。
文部科学省の「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（小平・他；地惑連合2021年大会）の一環として、防災科学技術研究所では、時空間的に多様な南海トラフ地震による地震や津波のハザードやリスク情報を提供可能とする地震防災基盤シミュレータ（中村・他；本秋季大会）を開発しており、本研究では、地震防災基盤シミュレータに格納するハザード情報のひとつである長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法を開発している。
　海溝型巨大地震では震源から遠く離れた平野や盆地においても長大構造物が長周期地震動による被害を受けることが知られている。首都圏を含む大都市は平野上に発達しており、南海トラフの海溝型地震に対しては強震動と津波の評価のみならず長周期地震動の評価も重要である。我々はこれまで南海トラフ沿いで想定される多様な断層モデル群に対して差分法による長周期地震動シミュレーションを行ってきたが、計算タイムステップの増加とともに振幅が指数関数的に増大する発散現象のため長継続時間の地震動を計算することが困難な場合があった。そこで、本研究では防災科研が開発しているシミュレーションシステムであるGMS（地震動シミュレータ）による地震波伝播計算にImai et al.(2018)の波動場平滑化スキームを導入し、発散抑制効果を検証した。
波動場平滑化スキームは移流拡散方程式のアナロジーを応用し波動方程式に拡散項を付加した修正波動方程式を解くもので、拡散項（付加項）に乗ずる係数を適切に設定することで、ある周期よりも短周期成分を選択的に減衰させることができる。経験的に発散現象は、地震動計算として有効な周期帯域よりも短周期帯で生じており、波動場平滑化スキームにより発散の影響のみが除去され、長継続時間の地震動計算が可能となることが期待される。
　我々がこれまでに実施した差分法計算において発散が生じた計算モデル（3次元地下構造モデル＋震源モデル）を対象に、波動場平滑化スキームを実装したGMSを用いて計算を行ったところ、拡散項の係数をある幅の中で設定することで発散が抑制されることが確認できた。今後は、拡散項の係数の設定が波動場にどのような影響を与えているかを定量的に評価するとともに、係数の適切な設定方法に関する検討を行い、南海トラフ巨大地震による長継続時間地震動の計算を行う予定である。
謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© The Seismological Society of Japan

Tsunami Inundation Simulation Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough - For Effective Use of Tsunami Hazard Information -

*Yuji DOHI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Katsuya YAMORI[2], Takashi SUGIYAMA[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

近い将来の発生が懸念される南海トラフ巨大地震に対して、事前の備え・対策に資する、多様な津波ハザード・リスク情報を創出することは喫緊の課題である。地震調査委員会（2020）による「南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価」は、最大クラスの地震を除く、Ｍ８クラスからＭ９までの地震規模の南海トラフ巨大地震について、地震発生の空間的な多様性を考慮した波源断層モデル2,720個を設定し、海岸に来襲する津波に対する確率論的津波評価を実施した。また、藤原・他（2020；防災科学技術研究所研究資料）は、地震調査委員会（2020）が設定した波源断層モデル群に加え、最大クラスの地震を考慮した波源断層モデル3,480個を設定し、海岸に来襲する津波に対する確率論的津波評価を実施した。これらの既往研究では、地震発生の時空間的な多様性を持つとされる南海トラフ巨大地震に対して、多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群を用いた津波ハザード情報を創出しているものの、浸水域の拡がりや浸水深といった、陸域における津波ハザード情報は示されていない。事前の備え・対策に資する、より効果的な津波ハザード・リスク情報を創出するためには、陸域を遡上する津波の検討が求められる。
本研究では、地震調査委員会（2020）や藤原・他（2020）が設定した、南海トラフ巨大地震に対する空間的な多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群を用いた津波遡上計算を実施し、陸域における津波ハザード情報を含む、多様な津波ハザード情報を創出する。創出する津波ハザード情報は、南海トラフ巨大地震に対する事前避難、産業活動、大都市機能維持に資するハザード・リスク情報を整備する情報基盤「地震防災基盤シミュレータ」（中村・他、2021；本大会）に格納する予定である。また、南海トラフ巨大地震による建物被害・人的被害のリスク評価（時実・他、2021；本大会）や、「臨時情報」発表時における事前避難分析ツールの開発（杉山・他、2021；信学技報）等における利活用を想定している。本研究の概要を図１に示す。
本発表では、上述した研究全体の計画、進捗、さらに、現時点における津波ハザード情報の活用事例について報告する。

謝辞：本研究は「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。

© The Seismological Society of Japan

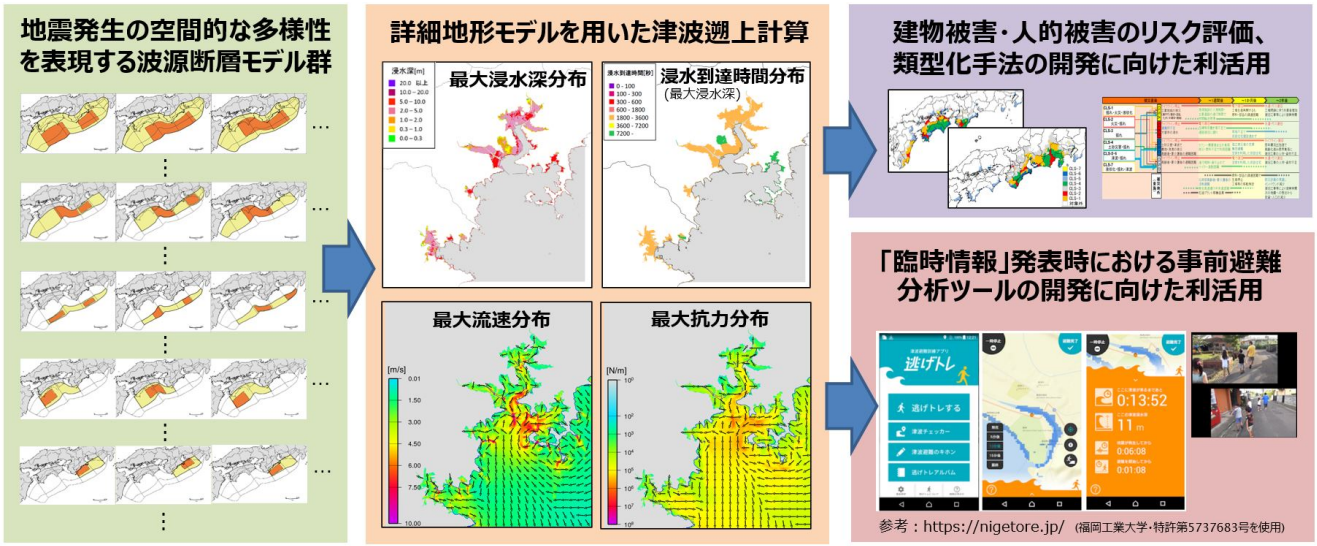


図１　本研究の概要。本研究では、南海トラフ巨大地震に対する空間的な多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群（図左側）を用いた津波遡上計算を実施し、多様な津波ハザード情報を創出する（図中央）。創出する津波ハザード情報について、建物被害・人的被害等のリスク評価、南海トラフ巨大地震の地震像に対する類型化手法の開発、「臨時情報」発表時における事前避難分析ツールの開発に向けた利活用等を想定している（図右側）。

© The Seismological Society of Japan

A trial of conditional hazard assessment based on Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

Hiromitsu NAKAMURA[1], *Yoshinori Tokizane[2], Hiroyuki FUJIWARA[1], Satoshi SHIMIZU[2], Miki ASO[2]

1. NIED, 2. OYO RMS Corp.

南海トラフ沿いで発生する地震は、規模や震源域の広がりが多様であると評価（地震調査研究推進本部、2020）されており、防災対策のあり方を考える際にはこれらの多様性を踏まえた検討が必要と考えられる。これらの課題をうけて、「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（小平・他；地惑連合2021年大会）では、時空間的に多様な南海トラフ地震によるハザードやリスクを取り込んだ地震防災基盤シミュレータの開発に取り組んでいる（中村・他；本秋季大会）。本研究では、地震防災基盤シミュレータの開発の一環として、膨大な地震および津波ハザード情報（前田・他、土肥・他；本秋季大会）に基づいたリスク評価を行い、事前避難、産業活動および大都市機能維持等の観点で、地震発生の多様性を有する南海トラフ地震を類型化する手法を開発するとともに、類型毎の代表的な広域での災害シナリオを構築する計画である。本発表では、研究計画を紹介することに加え、前述の災害シナリオ構築の基礎的な情報となる半割れケース発生後の条件付きハザード評価を試みたので報告する。ここでの「半割れケース」とは南海トラフ沿いのプレート境界で発生するＭ８クラス以上の地震のうち潮岬以東もしくは以西を震源域とする地震を指し、内閣府の「南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン」において発生後には南海トラフ臨時情報のうち巨大地震警戒が発表される地震に相当するものである。 半割れケース発生後の条件付きハザード評価は、確率論的津波評価(地震調査研究推進本部、2020)や地震動予測地図(地震調査研究推進本部、2021)の考え方を参考とした。まず半割れケース発生後に起こりうる地震の震源域の組み合わせとして、既に半割れした震源域を除いたいわゆる割れ残り領域のみから構成される震源域の組み合わせと、既に半割れした震源域を含む全ての震源域の組み合わせを考えた。次に、それぞれの組み合わせに対して地震動予測地図での事例を参考に重みを付与し、半割れケースが発生した場合におけるハザードと条件付き超過確率の関係を評価した。今後、これらのハザード評価に基づいて、事前避難等による人口分布の変化を考慮したリスク評価を行っていく予定である。 謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© The Seismological Society of Japan

Number of earthquakes from seismic activity model of the probabilistic seismic hazard map for Japan starting from 2020

*Jun'ichi MIYAKOSHI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Hiroyuki FUJIWARA[2]

1. Ohsaki Research Institute, Inc., 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震調査研究推進本部地震調査委員会により公表されている「全国地震動予測地図」のうち確率論的地震動予測地図では、地震を複数に分類した上で、各々について地震発生の確率モデルが作成されている。確率論的地震動予測地図の妥当性検証の1つとして、地震活動モデルで表現されている規模別地震発生頻度と近年の地震カタログデータとの比較がある（例えば、森川・他，2019、日本地球惑星科学連合大会）。そこでは、確率論的地震動予測地図2018年版の地震活動モデルを対象としており、平成23年東北地方太平洋沖地震後のカタログの余震の扱いが一つの課題となっていた。本稿では、2017年までの地震カタログを用いた確率論的地震動予測地図2020年版における地震発生数を算定し、地震カタログデータおよび2018年版における地震発生数との比較を行う。

まず、確率論的地震動予測地図の地震活動モデルにおいて、2020年版での主な変更点は以下の通りである。

・日本海溝沿いの超巨大地震、青森県東方沖および岩手県沖北部のプレート間巨大地震、宮城県沖のプレート間地震について、多様な発生パターンを考慮している。

・南海トラフの地震（M8～9クラス）について、確率論的津波評価で設定した従来よりも多様な震源域の組み合わせと、それぞれの起こりやすさを考慮した重み付けを踏まえたモデルとしている。

・震源断層を予め特定しにくい地震の発生頻度の算定において、領域区分を一部変更、地震カタログとして宇津（1982）による1885～1921年のM 6.0以上の地震と1922～2017年のM 5.0以上の気象庁震源データに変更（2018年版は、宇津（1982）による1885～1925年のM 6.0以上の地震と1926～2010年のM 5.0以上の気象庁震源データ）、余震を除去する場合とカタログのすべての地震を用いる場合を併用、等である。

つぎに、確率論的地震動予測地図の地震活動モデルで表現される地震発生数として、30年間での期待値を規模ごとに算定し累積地震数で表す。手順は以下の通り。

・非定常な地震活動モデルが採用されている地震については、基準日から30年間の地震発生確率を地震数の期待値とする。

・多様な発生パターンを考慮している地震（南海トラフの地震（M8～9クラス）、相模トラフ沿いのM8クラスの地震、千島海溝沿いの超巨大地震（17世紀型）、十勝沖および根室沖のプレート間巨大地震、日本海溝沿いの超巨大地震、青森県東方沖および岩手県沖北部のプレート間巨大地震、宮城県沖のプレート間地震）については、30年間の全体の地震発生確率に各発生パターンの重みを乗じたものをそれぞれ30年間の地震数の期待値とする。

・ポアソン過程が採用されている地震については、地震発生頻度に基づく30年間の地震数を用いる。

・モーメントマグニチュード（Mw）でモデル化されている地震の規模について、主要活断層帯で発生する地震はM = (Mw-1.08) / 0.78、それ以外の地震は M = Mwにより気象庁マグニチュードMに変換する。

比較対象とする地震カタログについては、宇津（1982）による1885～1921年のM 6.0以上の地震と1922～2017年のM 5.0以上の気象庁震源データを組み合わせたものとする。このとき、確率論的地震動予測地図2020年版と同様に、余震を除去する場合とカタログのすべての地震を用いる場合との地震数を0.5：0.5の重みで算出する。

陸側プレートの浅い地震については、平均ケースの場合M7.4以下、最大ケースの場合M7.6以下においてカタログよりモデルの地震数がやや大きいが、それより大きな規模ではモデルの地震数が小さい傾向が見られる。

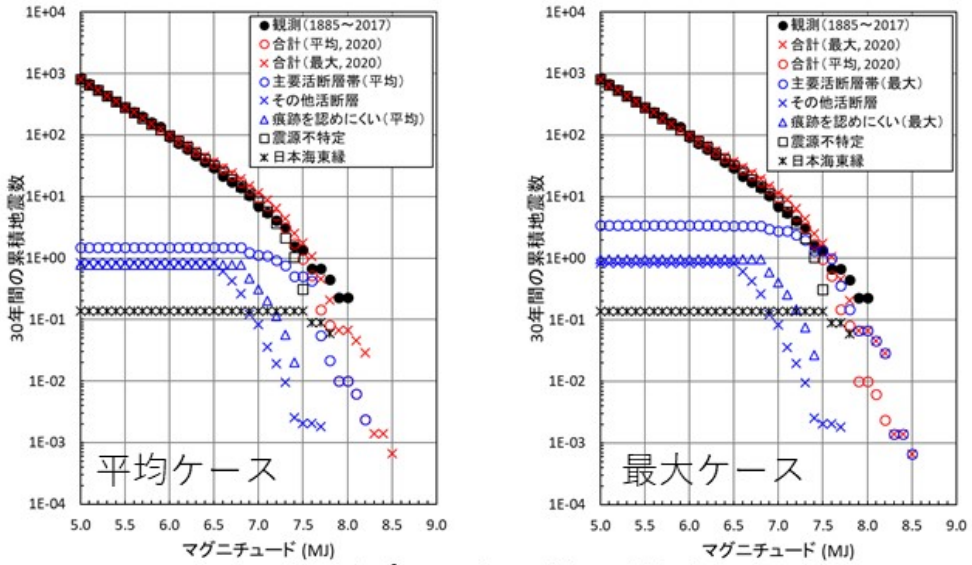
フィリピン海プレートの地震については、M8.0以下においてモデルとカタログの地震数が整合的であるものの、それより大きな規模ではモデルの地震数が極端に大きくなっている。これは南海トラフの地震（M8～9クラス）において時間予測モデルに基づいた大きな発生確率がモデル化されていることが影響している。ただ

© The Seismological Society of Japan

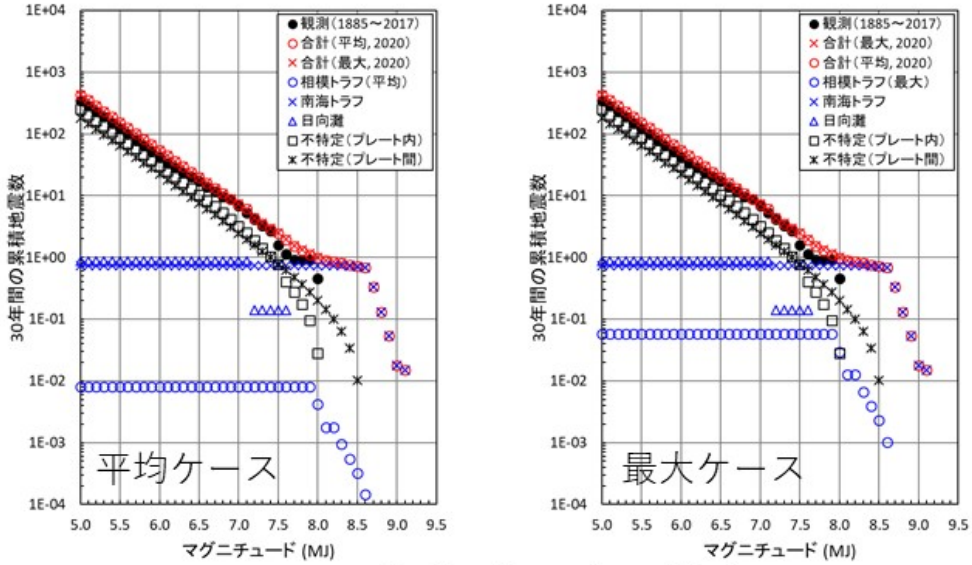
し、カタログにおける最大規模の地震は1946年の南海地震（M8.0）であり、それより大きな規模については直接カタログの地震数との比較はできない。

太平洋プレートの地震については、平均ケースの場合M8.4以下、最大ケースの場合M8.8以下においてカタログよりモデルの地震数がやや大きいが、それより大きな規模ではモデルの地震数が小さい傾向が見られる。ただし、カタログにおけるM8.6以上の地震は2011年の平成23年東北地方太平洋沖地震（M9.0）のみであり、カタログでは133年に1回発生したとして地震数を算定していることに注意されたい。

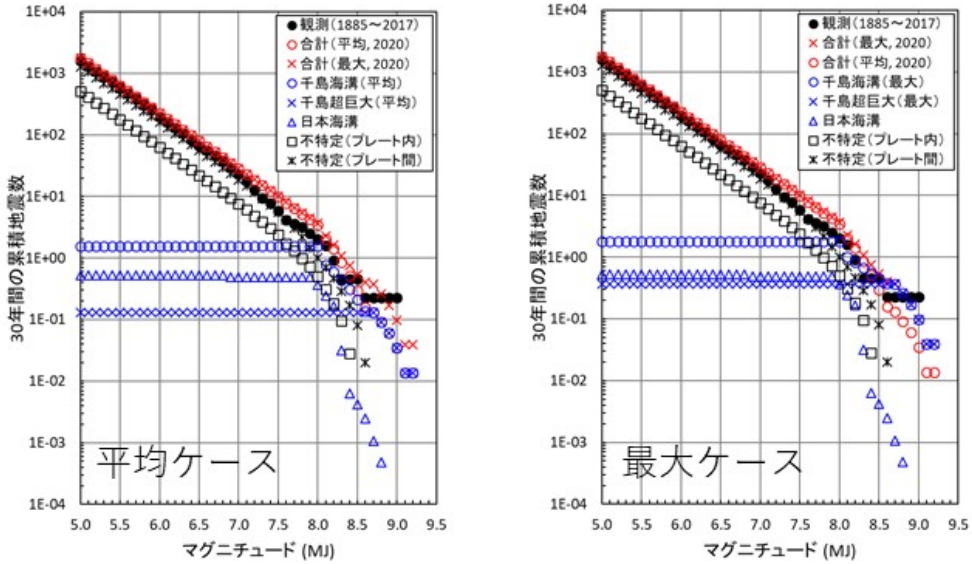
© The Seismological Society of Japan



陸側プレートの浅い地震



フィリピン海プレートの地震



太平洋プレートの地震

モデルとカタログの地震数の比較（2020年版）

© The Seismological Society of Japan

Nonergodic Ground Motion Prediction Model Using Artificial Neural Networks

*Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Asako IWAKI[2], Hiroyuki FUJIWARA[2], Naonori UEDA[1]

1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震動予測式（距離減衰式）は、地震・観測点に関する少数の説明変数から強震動強さを推定する経験式であり、主に回帰分析による研究が進められてきた。地震動予測式は確率論的地震ハザード評価において重要な役割を持つ。2000年頃より地震・観測点の地理的位置を明示的に考慮する非エルゴード的予測式が、稀少な地震動に対するハザード評価において本質的であることが認識され、非エルゴード的予測式の開発が活発に行われている。

最近では機械学習のニューラル・ネットワークによるモデル化が多数提案されているが、その大部分は地理的位置を考慮しないエルゴード的予測式である。Okazaki et al. (2021, BSSA)は、観測点をone-hotベクトルで入力するサイト特定モデルを提案し、過適合を抑制しつつ観測点固有の特性を学習できることを示した。しかし、学習されたサイト特性には、震源・伝播経路の特性が含まれていることが観察された。

本研究では、ニューラル・ネットワークにより地震・観測点位置を指定するパス特定モデルの構成を試みた。その際、各特性の寄与を分離できるように、エルゴード的予測式・震源項・伝播経路項・サイト項を逐次的にモデル化した。発表においては、各項が示す地震学的知見について議論を行う。

© The Seismological Society of Japan

Analysis and numerical modeling of local earthquake records obtained by the AN-net

*Hisashi NAKAHARA[1], Shutaro Sekine[2]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction

はじめに　AN-net（関根・他，2010）は，（公財）地震予知総合研究振興会により新潟県長岡地域の40カ所に展開された地震観測網で，ボアホール内に加速度計と速度計，地表に加速度計が設置されている．観測点間隔は5㎞から10㎞と小さく，やや長周期の地震波であればコヒーレントな伝播過程を調べることが可能であると期待される．そこで本研究では，観測網周辺で発生したM6程度の中規模地震を対象に，AN-netと防災科研K-NET, KiK-netで観測された表面波の伝播の特徴をまとめ，地震波伝播の数値モデリングにより，その特徴を再現することを試みた．

データ解析・結果 解析に使用した地震は２つで，2013年2月25日栃木県北部の地震（Mj6.3）と2019年6月18日山形県沖の地震（Mj6.7）である．一つ目の地震はAN-netから西に位置し，震央距離は60-120㎞程度である．2つ目の地震は，AN-netから北に位置し，震央距離は100-170km程度である．AN-netの地表の加速度記録，防災科研KiK-netの地表の加速度記録，K-NETの加速度記録を使用した． データ解析として，レコードセクションの確認，ランニングスペクトル解析，最大振幅や卓越周波数の空間分布の推定，粒子軌跡の計算，センブランス解析による位相速度と到来方向の推定，を行った． レコードセクションでは，長岡平野のAN-netの観測点ではやや長周期地震動の継続時間が伸びていることを確認できる．後続波の伝播は結構複雑で，平野内の往復するような様子を視認することは難しい．最大速度振幅は，AN-netの観測点の間で最大1桁程度変化している．その空間分布は，同じ周波数帯では，上下動成分のほうが水平動成分よりやや複雑な分布を示すように見える．後続波のスペクトルは，周波数0.2-0.6Hz程度が卓越することがわかり，長岡平野の北部では低く，南部では高い傾向にある．北に向かって地震基盤等の境界面の深さが深くなるためと推察される．この傾向は3成分すべてで確認されるが，特に上下動ではっきりと見える．水平動成分の表面波ではレイリー波とラブ波双方の寄与があるが，上下動成分ではレイリー波のみの寄与のためだと考えられる．また，隣接する複数の観測点を地震計アレイと見なしたセンブランス解析により，後続波部分では見かけ速度が概して1km/sより遅く0.5km/sに近い場合もある．表面波の卓越が考えられる．また到来方向は，最初は震源方向からの入射が見られるが，時間が経過するにつれて震源とは逆方向から入射するフェイズも見られるようになり，散乱された表面波であると考えられる．

数値モデリング 数値モデリングにはOpenSWPC（Maeda et al.,2017）を使用した．地震波速度構造はJIVSM（Koketsu et al., 2012）に基づく．点震源を仮定し，防災科研F-netのモーメントテンソル解を採用した．震源時間関数はKupper型とし，継続時間はGlobal CMT解のHalf-durationを2倍して用いた．現在は，グリッドサイズ0.2㎞，時間ステップ0.01sとして，最大周波数0.35Hz程度まで計算している．計算波形は観測波形に比べると比較的単純な形状をしている．そのため，レコードセクションを作成すると，観測とは異なり，震源方向から長岡平野に入射し平野の端で逆方向に向かって伝播していく様子を見つけやすい．最大速度振幅の空間分布については，低周波成分はそれなりに再現できている．しかし，高周波になるにつれて，観測と数値計算とのずれが出てくる．後続波のみかけ速度については，1km/sより遅い波が再現される．観測と数値計算で相違が出てくるのは，震源時間関数がもっと複雑であるのか，点震源の仮定が不十分なのか，あるいは現実の3次元地震波速度構造がより小さい空間スケールまで不均質であるのか，このような可能性が考えられる．今後，それぞれの影響について検討する予定である．

まとめ 本研究では，AN-netで観測された近地地震の波形の特徴をまとめ，数値モデリングによる再現を試みた．観測波形と計算波形との合わせこみにはまだ改良の余地が残っており，今後，震源時間関数や速度構造の調整を行う予定である．

© The Seismological Society of Japan

謝辞　防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netのデータを使用しました．また，地震波形の数値モデリングには，OpenSWPC（Maeda et al.，2017）と東京大学情報基盤センターのOakforest-PACSスーパーコンピュータシステムを使用しました．また，計算にあたっては，東京大学地震研究所共同利用 (2020-S-04) の助成を受けました．ここに記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S19. Seismology, general contribution

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P6 (ROOM P)

[S19P-01] Picking of P and S waves and hypocenter determination of the Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake

○Katsuhiro Takasaki[1], Masanao Komatsu[2], Tomotsugu Watanabe[2], Hiroshi Takenaka[3], Mitsutaka Oshima[4] （1.Department of Earth Sciences, Okayama University (Current Affiliation: Japan Meteorological Agency), 2.Department of Earth Sciences, Okayama University, 3.Department of Earth Sciences, Okayama University, 4.Shimizu Corporation）

3:30 PM - 5:00 PM

[S19P-02] Research Project for Disaster Prevention on the great Earthquakes along the Nankai trough: Result and plan

○Shuichi KODAIRA[1], Hiroyuki Fujiwara[2], Narumi Takahashi[1,2] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Picking of P and S waves and hypocenter determination of the Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake

*Katsuhiro Takasaki[1], Masanao Komatsu[2], Tomotsugu Watanabe[2], Hiroshi Takenaka[3], Mitsutaka Oshima[4]

1. Department of Earth Sciences, Okayama University (Current Affiliation: Japan Meteorological Agency), 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Department of Earth Sciences, Okayama University, 4. Shimizu Corporation

2016年4月16日の熊本地震本震(M_{JMA}7.3)で誘発された大分県由布市の地震(M_{JMA}5.7) は、本震の後続波の影響で震源決定のために必要なP波、S波の初動読み取りの気象庁検測値データが少なく、その精度も良くない. 本研究では気象庁検測値がない観測点を含む大分県の観測点の波形記録から誘発地震の初動読み取りを行い、震源を再決定した.

波形記録は、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net、気象庁震度計、大分県内の自治体震度計によるものを使用した. P波、S波の読み取りには Oshima and Takenaka (2020, BSSA)の地震波振幅の確率密度関数に基づくP波、S 波のピッキング手法を用いた. この手法では記録された波形振幅の確率密度関数とランダム性の高い波の振幅分布に従うレイリー分布及びガウス分布との時間経過に伴う非類似性の変化をKullback-Leibler divergenceを計算して評価する. Kullback-Leibler divergenceはP波、S 波の初動部分で大きくなるため、それらの到達時間を検出できる. この方法で得られたP波、S 波の読み取り値を使用して、震源決定を行った. 気象庁が推定した震央周辺を水平方向、深さ方向にグリッドサーチし、観測点間の理論走時と読み取り走時の残差二乗和のRMSが最小となる点を震源とした. 理論走時の計算には気象庁の走時表（JMA2001）を用いた. なお、走時の観測点補正値は2016年04月29日に発生したM_{JMA}4.5の余震記録を使用し、各観測点の波形からP波、S波の初動を目視で読み取り、理論走時との差を計算することによって求めた. 余震の震源情報は、小割（2020, 岡山大学修士論文）によるものを用いた.

結果をFigure 1に示す. Figure 1(a)は、S波の検出例を示す. 誘発地震のS波の初動付近に明瞭なピークが見られる. Figure 1(b)は、震源決定の結果を示す. 本研究における震央は、気象庁が推定した震源より南西方向の由布院断層の西端付近に求められた. 誘発地震発生後、由布院断層沿いに余震が発生している（小割, 2020, 岡山大学修士論文）ことから、大分誘発地震は由布院断層の活動によって発生したと考えられる.

謝辞
本研究では防災科学技術研究所（K-NET、KiK-net）、気象庁、大分県の震度観測網の観測波形記録及び気象庁一元化処理震源データを使用させて頂きました. 誘発地震の余震の震源情報は、小割（2020, 岡山大学修士論文）によるものを使用させて頂きました.

© The Seismological Society of Japan

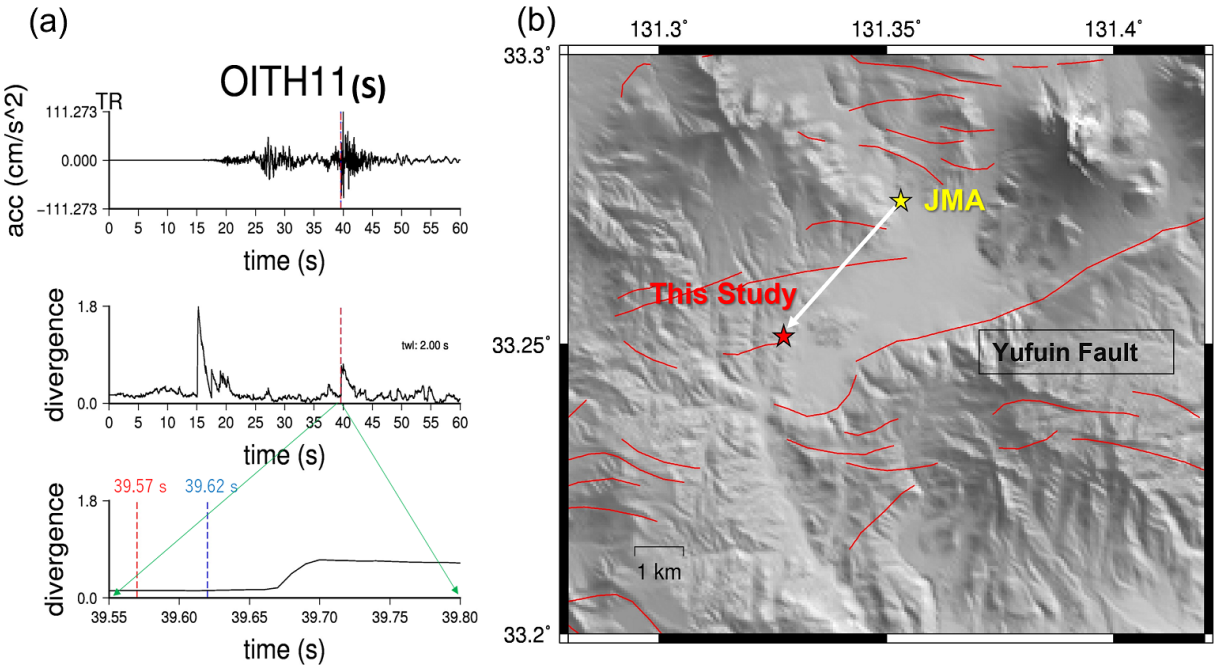


Figure 1. (a) An example of S-wave picking in OITH11. Red and blue dashed lines indicate arrival times of S-wave picked in this study (39.57 s) and reported by JMA (39.62 s), respectively. (b) Location of the triggered earthquake in this study. Red and yellow stars denote epicenters determined in this study and reported by JMA, respectively. Each of Red lines indicates the active fault in this region.

© The Seismological Society of Japan

Research Project for Disaster Prevention on the great Earthquakes along the Nankai trough: Result and plan

*Shuichi KODAIRA[1], Hiroyuki Fujiwara[2], Narumi Takahashi[1,2]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

最近の研究成果により南海トラフにおける多様な巨大地震発生様式や複雑なプレートすべり・固着の現状が指摘され、それら科学的な知見や観測データを取り入れた防災対応の検討が求められている。本プロジェクトは、南海トラフ地震に備えるため、2020年度より5カ年計画の予定で開始され、現在、以下の三つの課題を実施している。
「課題１地殻活動情報創成研究」目的：南海トラフの地殻活動の現状や通常と異なる現象を観測した際に、それら観測情報を迅速かつ精度よく評価し情報発信する手法を開発する。取り組み：最新の観測データに基づいて南海トラフ地震発生帯の海陸統合３Dモデルを構築し、そのモデルと海陸統合地震・地殻変動データを活用した地震活動・プレート固着すべりの現状把握・推移予測を行うシステムを構築する。
「課題２地震防災情報創成研究」目的：発信された情報を被害軽減に最大活用するためのシステムを構築し、平時や通常と異なる現象が観測された場合、防災対策のあり方、実行方策について検討する。取り組み：巨大地震や通常と異なる現象発生の多様性も取り込んだ地震や津波ハザードやリスクの防災情報基盤を創生し、それら情報を活用し、”命、地域産業、都市機能“を守るための総合的な研究を実施する。
「課題３創成情報発信研究」目的：課題１，２等で進めた研究成果が被害軽減の向上にどのように貢献したか定量的な評価を行い、地域防災・減災計画に向けた効果的な研究開発項目を明らかにする。取り組み：地域での情報発信検討会等を通して、地域防災力の向上のために事前準備、災害時対応、災害後対応の各ステージで地域防災に活用するための情報発信の在り方を検討する。
さらに、プロジェクト成果の最大活用に向けて、防災情報基盤で活用するための地震発生シナリオや地震発生帯モデルの構築などの課題間連携の強化も進めている。本発表ではこれら課題間連携の検討結果を含み、本プロジェクトのこれまでの成果と今後の計画について報告する。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S21. Seismic spectral analyses for earthquake source physics, earth structure estimation, and strong motion assessment

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P7 (ROOM P)

[S21P-01] Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

○Noriko KAMAYA[1], Masashi OGISO[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S21P-02] Rupture propagation effects of moderate-sized earthquakes off Fukushima prefecture derived from source spectra

○Toshimi SATOH[1] （1.Shimizu Corporation）

3:30 PM - 5:00 PM

[S21P-03] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Spatial heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

○Tsukasa Masuda[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki University）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

*Noriko KAMAYA[1], Masashi OGISO[1]

1. Meteorological Research Institute

１．はじめに

精度の高い強震動即時予測を実現するためには、予測対象地点のサイト特性を考慮する必要がある。そのサイト特性として、周波数に依存するサイト増幅係数を使用することの有効性が既往研究により示されている（例えばHoshiba (2013)やOgiso *et al.* (2016)）。それらのサイト増幅係数を算出する際に使われているのは高速フーリエ変換（FFT）であるが、FFTでスペクトルを求める場合、分析可能な最低周波数を引き下げるためには時間窓長を延ばす必要があり、短時間のシグナルデータから低周波のスペクトルを算出するのは難しい。また、FFTでは周波数軸で等間隔の分析結果が得られるため、低周波側は疎なデータになる。これに対し、過去のデータを元に将来のデータを予測するために使われる自己回帰（AR）モデルは、モデルの推定の際にスペクトルが得られ、そのスペクトルにはFFTにあるような制限がない。そこで、長周期地震動を含む地震動即時予測の精度向上のため、ARモデルによるスペクトル解析を用いた、地盤増幅率の周波数特性評価を試行した。

２．解析手法

北海道のKiK-net白糠南（KSRH09）観測点の、地表置き（標高27m）及び地下置き（深度100m）の強震計において観測された加速度データ（計６成分）の、8イベントのP波10秒間及び9イベントのS波20秒間のデータについてARモデルとFFTによるスペクトルを求め、地表と地下のスペクトルの振幅比を算出した（図１）。サンプリングレートは、2002年と2003年のイベントは200Hz、それら以外は100Hzである。ARモデルの係数は、Yule-Walker法で求めた。Yule-Walker法では、あらかじめARモデルの次数を決める必要があるので、最適次数を求めるために次数ごとの赤池情報量規準（AIC）を算出した。そうしたところ、次数が大きいほどAICが小さい傾向を示したこと（図２）や、低次のARモデルによるスペクトルは特に低周波領域で平滑化することから（図３）、取り得る最大次数（解析対象サンプル数－２）をARモデルの次数として用いることにした。なお、高次数のARモデルによるスペクトルは、FFTによるスペクトルと良く似た形状になる。今回の解析ではプログラミング言語pythonを使い、FFTは拡張モジュールNumPyのfft.fft()、AICはStatsmodelsのar_select_order().aic、Yule-Walker法に必要な自己相関はPandasのautocorrを使用して算出した。

３．結果

解析の結果、KSRH09観測点の地表/地下のスペクトルの振幅比は、ARモデルとFFTで大きな違いはないことや、詳しく見ると以下の傾向があることが分かった（図４）。

・P波（NS成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT
・P波（EW成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル≈FFT
・P波（UD成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT。特に低周波領域において顕著。
・S波（NS成分）：高周波領域以外では、ARモデル>FFT。特に低周波領域において顕著。
・S波（EW成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル≈FFT
・S波（UD成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT

また、低周波領域において、ARモデルの方がFFTよりもイベントごとのばらつきが大きいように見えた。

４．今後に向けて

今後は解析対象観測点を増やし、ARモデルによる地表/地下のスペクトル振幅比の持つ性質の検出とその原因の考察を行い、ARモデルのスペクトルが特に低周波領域での地盤増幅特性の評価に有効であるかどうか、検討していく予定である。

[謝辞]

国立研究開発法人防災科学技術研究所のKiK-netのデータ(防災科学技術研究所、2019)を使用させていただ

© The Seismological Society of Japan

きました。ここに記して感謝いたします。

[参考文献]

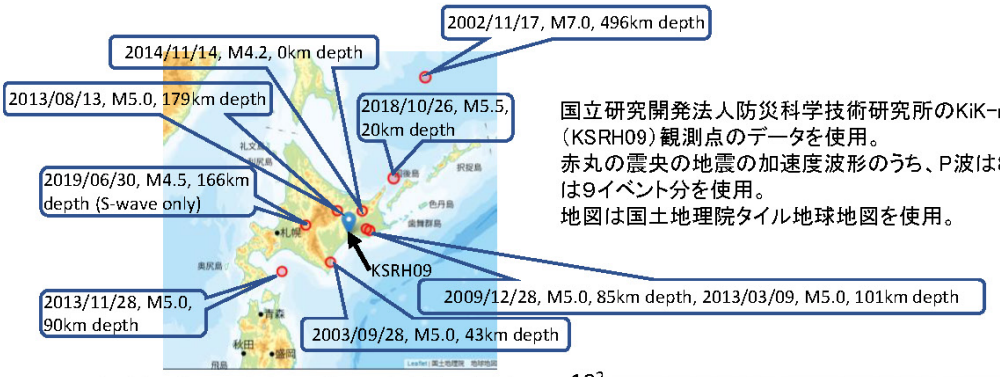
Hoshiba M (2013) Real-time correction of frequency-dependent site amplification factors for application to earthquake early warning. Bull Seismol Soc Am 103:3179–3188. doi:10.1785/0120130060
Ogiso M, Aoki S, Hoshiba M (2016) Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors. Earth, Planets and Space 68:83. doi:10.1186/s40623-016-0467-4
防災科学技術研究所 (2019) NIED K-NET, KiK-net. doi: 10.17598/nied.0004

© The Seismological Society of Japan

自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価の試行

Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

鎌谷紀子・小木曽仁（気象研究所）



国立研究開発法人防災科学技術研究所のKiK-net白糠南（KSRH09）観測点のデータを使用。
赤丸の震央の地震の加速度波形のうち、P波は8イベント、S波は9イベント分を使用。
地図は国土地理院タイル地球地図を使用。

図1. 解析に使用した観測点及び地震の震央



図2. ARモデル推定に使用する次数とAICの関係

次数が大きいほどAICが小さくなる。（2002/11/17のイベントのS波20秒間のNS成分を使用。サンプリングレートは200Hz, サンプル数は4000。）

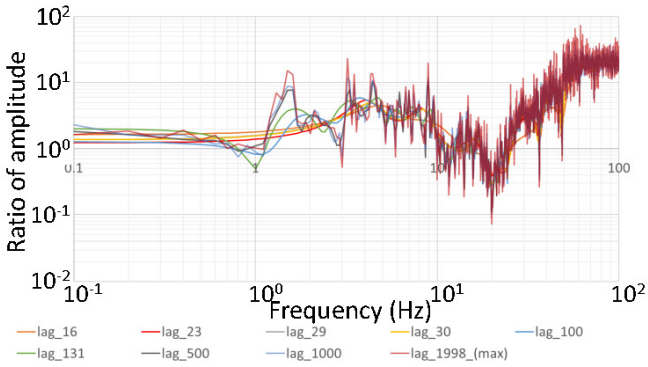


図3. ARモデルのスペクトルで見た地表/地下の振幅比の次数による違い

低い次数のARモデルのスペクトルは平滑化した形状を呈するので、地表/地下の振幅比のグラフも平滑化したものになる。特に低周波領域では低次数での平滑化の度合いが大きくなり、次数による振幅の違いが大きくなる。（2002/11/17のイベントのP波10秒間のNS成分を使用。サンプリングレートは200Hz, サンプル数は2000。）

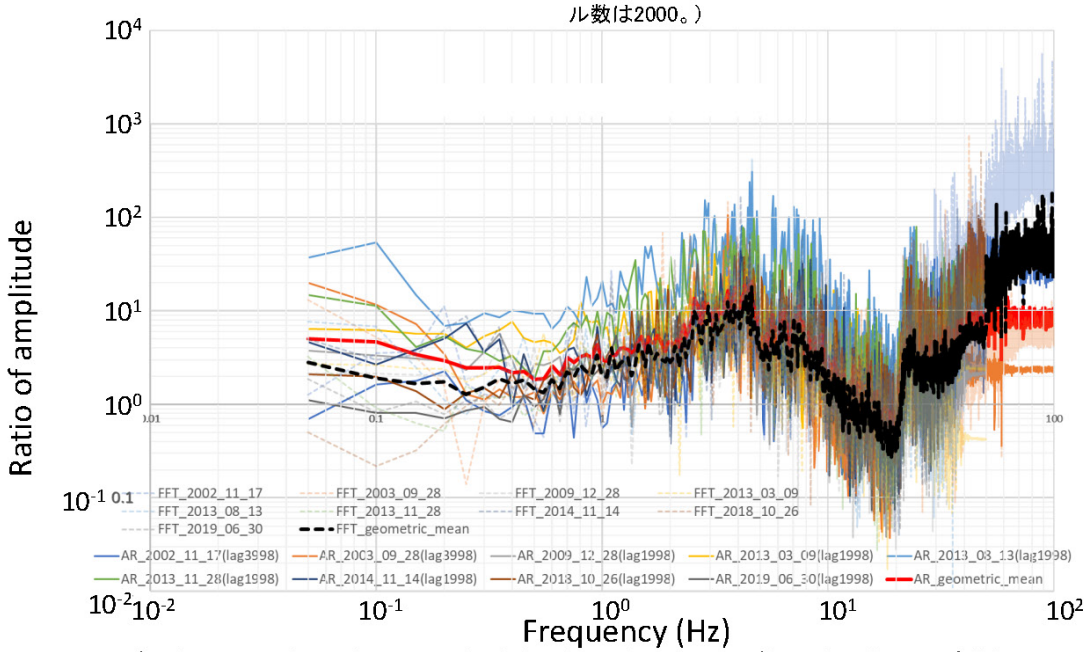


図4. ARモデルとFFTによるスペクトルで見た地表/地下の振幅比の比較（S波20秒間NS成分）

実線はARモデル、点線はFFTによるスペクトルから算出した地表/地下の振幅比。赤実線と黒点線は、それぞれARモデル及びFFTによる振幅比の幾何平均（相乗平均）を示す。振幅比はARモデルとFFTで大きな違いはないが、S波20秒間のNS成分のデータを使用した解析では、ARモデルは高周波領域以外ではFFTよりやや大きめであり、特に低周波領域においてその傾向が顕著であることが示された。

© The Seismological Society of Japan

Rupture propagation effects of moderate-sized earthquakes off Fukushima prefecture derived from source spectra

*Toshimi SATOH[1]

1. Shimizu Corporation

本研究では、2016年8月から観測が開始されたS-netとK-NET、KiK-netの強震記録を用いて、2021年2月13日の福島県沖の地震(Mw7.0)の震源域の11の中規模地震の破壊伝播方向と震源スペクトルに寄与する破壊伝播効果について検討した。2016年8月から2021年3月までの震源深さ40～60kmの地震であり、本震と同タイプ(down-dip compression)の4つのスラブ内地震(Mw4.4-5.0)と7つのプレート境界地震(Mw4.7-6.3)を対象とした。このMwの範囲は、本震の強震動生成域を経験的グリーン関数法で推定するための要素地震の選択を念頭においたものである。震源距離150km以下の水平成分のS波部を対象とし、最大加速度が200cm/s2以上のデータは対象外とした。RT変換し、フーリエ振幅の2乗和の平方根を検討対象とした。 基準地震に対する同一観測点での他の地震のフーリエ振幅スペクトル比を距離補正して、観測震源スペクトル比を算出した。そして、すべり量とライズタイムが一定でユニラテラル破壊を仮定し、コーナー周波数より高周波数の震源スペクトル比が破壊伝播方向と震源での波線の方向のはさむ角に依存するモデルを用いて、破壊伝播方向を推定した。基準地震及び他の10地震の破壊伝播方向を-170°～180°を10°刻みで与えて、基準地震と他の10地震の断層面内での破壊伝播方向を、観測震源スペクトル比をターゲットにグリッドサーチで推定した。7つの周波数帯域(0.2-0.5、0.5-1.0、1-2、2-3、3-5、5-7、7-10Hz)で算出した観測震源スペクトル比は1-5Hzで方位依存性が大きく、特に、2-3Hzで顕著であった。観測震源スペクトル比から推定された対象地震のコーナー周波数は、ほとんどの地震で1-4Hzであることから、大規模地殻内地震で指摘されているディレクティビティパルスの周期の地震規模依存性と同様に、地震規模に依存していると考えられる。一方、0.2～0.5Hzの観測震源スペクトル比はラディエーションパターンの方位依存性と類似していた。そこで、本研究では、2-3Hzの観測震源スペクトル比を破壊伝播方向を推定した。なお、基準地震との方位角の差が45°以上のデータは除いた。S波速度に対する破壊伝播速度の比は0.7と0.8のケースを検討し、差は極めて小さいものの観測との残差が小さい方の0.7を用いた。 モデルスペクトル比は、観測震源スペクトル比の方位角依存性を震源距離150kmまで良く再現しており、4つのスラブ内地震はupdip方向の破壊伝播が推定された。すなわち、西の陸側に向かう伝播方向である。一方、プレート境界地震は5つはupdip方向、2つはdowndip方向の破壊伝播が推定された。downdip方向に伝播した1地震は、pure updip方向であるが、他の1地震はほぼ水平に近い方向であった。この水平に近い破壊伝播の地震と5つのupdip方向の破壊伝播の地震は、南方向に近い破壊伝播である。pure updip方向の破壊は、震源から西の陸側に向かう伝播方向である。4つのスラブ内地震の全無限弾性体のSV波とSH波の2乗和の平方根のラディエーションパターンは、いずれも震源の西側の陸域で大きく、破壊伝播でスペクトルレベルが大きくなる領域と重なっていることがわかった。したがって、観測震源スペクトル比は全観測点での平均より、陸域の観測点での平均が大きくなり、S-netでの平均は小さくなっている。陸域の観測点での平均をターゲットに短周期レベル(コーナー周波数より高周波数側の加速度震源スペクトルの一定レベル)を推定した結果、全観測点での平均をターゲットにした場合の2倍程度大きい値が推定された。一方、プレート境界地震のラディエーションパターンが大きくなる領域は、陸域では沿岸部ではなく震源から遠い内陸部であり、破壊伝播効果によりスペクトルレベルが大きくなる領域はほとんど重なっていない。したがって、陸側に破壊伝播する1地震を除き、全観測点での平均をターゲットにした場合と陸域の観測点での平均をターゲットにした場合の短周期レベルの違いはほとんどなかった。2021年福島県沖の地震が震源から同心円状に破壊したとすると、1日以内の余震分布や震源インバージョンによるすべり量の大きな領域に対応する破壊伝播方向に近いのは、2017年7月15日のスラブ内地震(Mj4.6)であり、全観測点の観測震源スペクトル比から推定されたコーナー周波数は3.16Hz、Bruneの応力降下量は27MPaであった。 謝辞：本研究では防災科学技術研究所のS-net、K-NET、KiK-net、F-net、気象庁の一元化震源情報を用いました。

© The Seismological Society of Japan

Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Spatial heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

*Tsukasa Masuda[1], Takuji Yamada[1]

1. Ibaraki University

1. はじめに
茨城県・千葉県東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う地震が定常的に多数発生している。本研究では、2003年1月から2019年12月の期間に茨城県沖・千葉県東方沖で発生した小地震 (4.2 <= Mw <= 5.0) のうち、2. で説明するとおり、太平洋プレートの摩擦特性を反映していると考えられる576地震について、S波を用いて応力降下量を解析した。

2. 解析対象地震と解析手法
2003年1月から2019年12月に茨城県沖・千葉県沖で発生した 4.2 <= Mw <= 5.0 の地震の内、震源が太平洋プレート上面から15 km以内の地震について、Yamada *et al.* (2021)の手法を用いて応力降下量を解析した。まず、各解析対象地震に最も震源の近いMw 3.5の地震の観測波形を経験的グリーン関数とした。また、周波数領域にて解析対象地震の観測波形を経験的グリーン関数の波形で除し、観測点ごとにスペクトル比を求めることにより、震源の情報を抽出した。次に、地震の震源スペクトルはオメガ2乗モデル（Boatwright, 1978）に従うと仮定し、スペクトル比から解析対象地震および経験的グリーン関数地震のコーナー周波数を求めた。さらに、Madariaga (1976) の円形断層モデルに従って、コーナー周波数から応力降下量を推定した。この操作を解析対象地震すべてについて実行し、576地震の応力降下量を求めた。

3. 結果および考察
緯度経度0.1度ごとに平滑化した応力降下量の解析結果を図1に示す。茨城県中部沖 (図1. の領域A) で応力降下量の値が大きく、スロースリップの発生が報告されている千葉県沖 (領域B) で小さい特徴が見られる。この領域AとBの応力降下量の差は、t検定より危険率5%で有意な差であることが確認できた。また、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域 (図1. の領域C) では、応力降下量の値が大きい。これは、過去の大地震大すべり域で応力降下量が大きいと主張しているYamada *et al.* (2017) の結果と調和的であり、応力降下量の空間分布から剪断強度の不均質性の推定ができると主張しているYamada *et al.* (2021) の結果を支持する。今後、P波についても解析を行うとともに、応力降下量の時間変化の有無を確認しながら、摩擦特性の時間変化についても議論したい。

謝辞：本研究では、Hi-net （防災科学技術研究所）、気象庁、国土地理院、国立大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

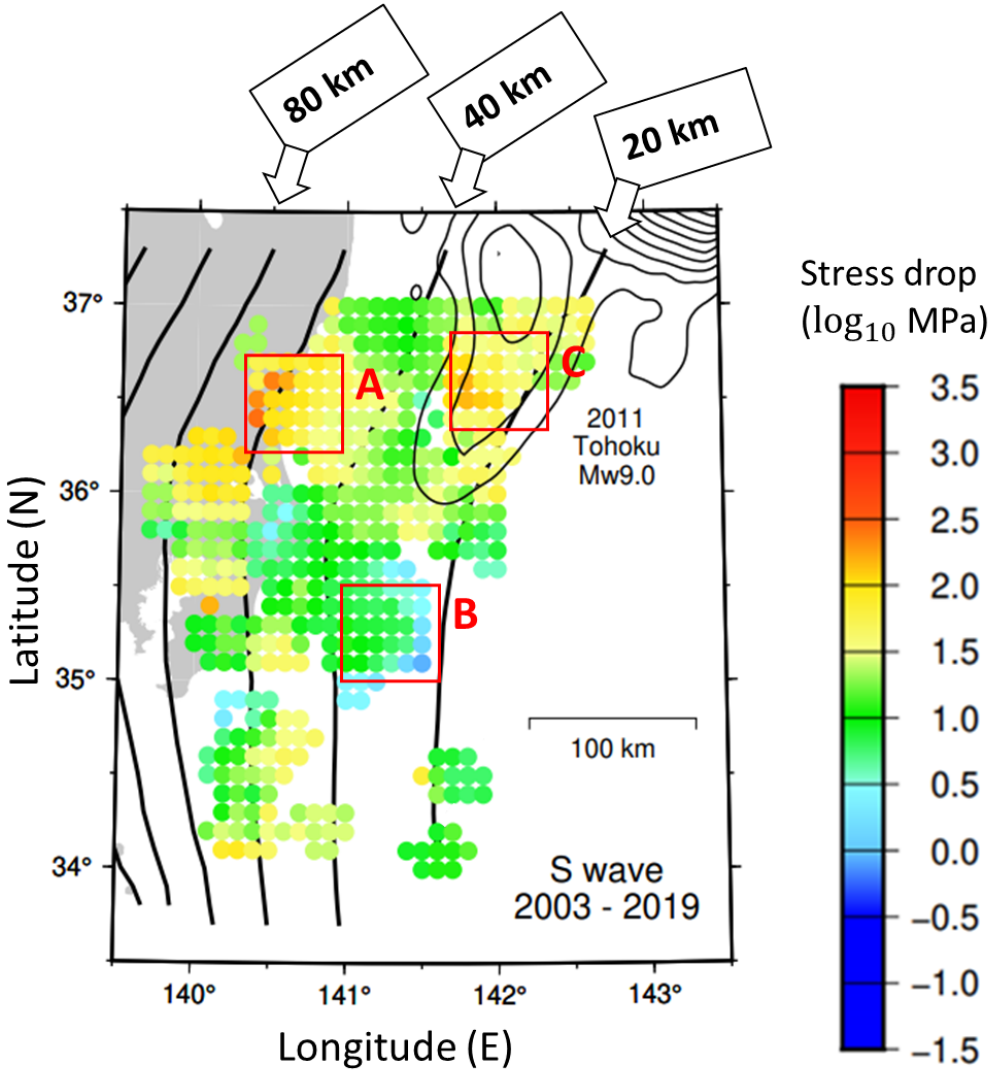


図１． S波の解析から得られた応力降下量の空間分布。グリッドポイント間隔は緯度経度0.1度ごとである。各グリッドポイントの値は、グリッドポイントから半径20 km以内の地震の応力降下量の平均値を示す。黒のコンターは、2011年東北地方太平洋沖地震のすべり分布を示し、その間隔は2 mごとである(Iinuma *et al.*, 2012)。太い黒線は、沈み込む太平洋プレート上面の深度を表しており、線間隔は20 kmである(Kita *et al.* 2010; Nakajima and Hasegawa 2006; Nakajima *et al.* 2009) 。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S22. Advances in Seismology using AI

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P8 (ROOM P)

[S22P-01] Validation of Seismic Phase Picking Using Deep Learning Models Trained by Hakone Volcanic Earthquake Data

○Ahyi KIM[1], Yuji Nakamura[1], Umi Hatakeyama[1], Hiroki Uematsu[1], Yohei Yukutake[2], Yuki Abe[3]
（1.Yokohama City University, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Hot Springs Research Institute, Kanagawa）

3:30 PM - 5:00 PM

[S22P-02] Automatic reading of P-wave first motion amplitudes of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory using a deep learning technique

○Makoto NAOI[1], Youqing CHEN[1], Rui TANAKA[1], Yutaro ARIMA[2] （1.Kyoto Univ., 2.JOGMEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S22P-03] Improvement of the Single Station Algorithm in Earthquake Early Warning Using Machine Learning Technique

○Shunta NODA[1], Masato UKAI[1] （1.Railway Technical Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Validation of Seismic Phase Picking Using Deep Learning Models Trained by Hakone Volcanic Earthquake Data

*Ahyi KIM[1], Yuji Nakamura[1], Umi Hatakeyama[1], Hiroki Uematsu[1], Yohei Yukutake[2], Yuki Abe[3]

1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Hot Springs Research Institute, Kanagawa

火山地帯では度々火山活動に関連した活発な群発地震が発生し、それらの迅速な検出、検測は火山防災において非常に重要である。しかし現在、これらのプロセスは最終的には人間の判断に委ねられ、膨大な時間とコストを要し、リアルタイムでの詳細な検証は不可能である。本研究ではこの問題を解決するため、近年多くの地震観測で研究が進んでいる機械学習の適用を試みた。現在、すでに膨大な訓練データ（主に地殻内地震）を用いた学習済みモデルがいくつか公開されている。それらをそのまま適用しても問題無い事例もあるが、検出精度が有意に悪くなる例も報告されている。本研究のターゲットは火山地帯という特殊な地域で発生する地震であるので、既存の学習済みモデルが適用が難しい可能性がある。そこで、本研究ではZhu and Beroza(2018)によって構築されたPhaseNetの学習済みモデル（model0）と、そのアーキテクチャを利用して、箱根火山で記録された1999年から2020年までの約3万個のイベントから約22万個の地震波形データを用い、ゼロから学習を行ったモデル（model1）とmodel0を初期値に前述の箱根データでファインチューニングしたモデル（model2）を作成し、その性能評価を行った。model1とmodel2の学習では220424個の地震波形をランダムに振り分け、75%を訓練データ、25%を検証用データとして用い、epoch100まで計算を繰り返し各モデルのパフォーマンスを検証した。その結果model1ではepoch8で、model2ではepoch89でF1値が最高となり、それぞれ、P波で0.870, 0.867, S波で0.782, 0.776という、わずかにmodel1で高いが、ほぼ同じ結果になった。同じ検証用データを用いてmodel0でのF1値を計算したところ、P波で0.832、S波で0.707となり、主にS波で大きな改善が見られた。また、これらのモデルを訓練にも検証にも用いていない2021年1月から5月まで記録された947個の波形に適用したところ、model0, model1、 model2でそれぞれ、P波、0.916、0.942、 0.941、S波、0.760, 0.817、0.814という結果になった。検証用データの時と同様にmodel1とmodel2でわずかにmodel１が良い値を示し、model0に比べて箱根の訓練データを用いて学習したモデルで良いパフォーマンスを示す事がわかった。検証用データで全体的に性能が落ちるのは2009、2011、 2015年の非常に活発な群発地震のデータを多く含むためである可能性がある。本研究では訓練データに多様性を持たせるために、オリジナルのPhaseNetでの訓練データ作成方法を踏襲し、波形をある程度長く（90秒）切り出し、そこからP、S波を含む30秒をランダムに切り出して訓練、検証用データとしている。しかし活発な群発地震では90秒の間でも他の地震が入り込むことがあり、判定の正誤検証に問題を招く場合がある。今後はそのような短いタイムウィンドウに多数のイベントを含むデータについて、該当箇所をノイズで置き換えるなどの処理を施し、再度学習検証を行う予定である。また、このモデル他の火山地帯での地震にも適用し、火山地帯の地震波検測への汎用化の可否を検証する。

© The Seismological Society of Japan

Automatic reading of P-wave first motion amplitudes of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory using a deep learning technique

*Makoto NAOI[1], Youqing CHEN[1], Rui TANAKA[1], Yutaro ARIMA[2]

1. Kyoto Univ., 2. JOGMEC

指向性が公表されておらず，設置状態によって感度が変化するAEセンサの記録に対しては，振幅を用いた解析は簡単ではないが，これらの特性を適切に補正することで個々のAEイベントのモーメント・テンソル解（以下MT解）を推定できる．Yamamoto et al. (2019; GJI), Naoi et al. (2020; GJI), Tanaka et al. (2021; GJI)では，シェールガス・オイル開発における水圧破砕亀裂進展プロセスの解明を目的とした室内実験で記録されたAEに対し，P波初動極性・振幅を読み取り，個々のセンサ感度及び指向性を補正して逆解析を行うことで，MT解の推定に成功している．

Yamamoto et al. (2019)，Naoi et al. (2020)では，解析対象となるイベントが１供試体あたり多くても数百個程度だったため，極性・振幅は手動で読み取られたが，Tanaka et al. (2021)では，１供試体あたり数千個，合計10供試体で５万個に及ぶAEイベントを解析対象としており，手動処理は不可能であった．そこでTanaka et al. (2021)では，１次元の畳み込みニューラルネットワークを用いて up, downの二値分類問題としてP波の初動極性を読み取り，結果がup（down）であれば理論走時周辺の波形の最大（最小）値を初動振幅値とする，という方法で逆解析に用いる振幅値を取得した．しかし，この方法には，１）理論P波走時と初動ピーク値を取るタイミングの差が大きい場合に振幅値を誤って読み取る可能性が高い，２）波形のどの場所を参照したかの情報は得られないので，特にSN比が低い波形において，波形を目視で確認しても読み取りの妥当性が判断し難い，３）訓練・検証は SNの良い波形を用いて行っているのに対し，実際の推論はよりSNが悪いものに対しても適用しているので，検証データで得られた性能指標が，実際に適用する場合の読み取りの精度を表していない，という問題があった．

そこで本研究では，初動極性ではなく，初動ピーク値をとる時刻を読み取る深層学習ネットワークを構築し，訓練・検証・テストに，SNの良い波形とノイズ波形を合成したものを用いることで，上記の問題を改善して，MT解析に必要な初動振幅値を取得することを試みた．解析には，Zhu and Beroza (2019)が実体波の走時検測に用いたものと類似したUnet型（Ronneberger et al. 2015）のアーキテクチャを採用した．ネットワークへの入力は，10 MHz samplingで収録されたP波走時前後512 サンプルの波形を用いた．出力は512サンプルの波形の各ポイントがP波の初動ピーク時刻に対応する確率値とし，教師データにおいては，読み取り初動ピーク値のタイミングで１の値を持つ，幅1.0 μs（10サンプル）の三角形形状の確率値を与えて訓練を実施した．

訓練・検証・テストデータは，Naoi et al. (2020)が実施した米国産イーグルフォード頁岩で行った2実験，Tanaka et al. (2021)で実施した山口県産黒髪島花崗岩で行った10実験，及び新たに実施した香川県産庵治花崗岩で行った1実験で得られたAEデータの中からSN比が良い波形を選び，実験開始直後のAEシグナルが含まれていない時間帯のノイズ記録を合成することで作成した．このとき，シグナルが含まれている波形に適当な倍率をかけて振幅を調整することで，さまざまなSN比の波形を再現した．また，訓練データの作成においては，各シグナル波形に対して10個のノイズ波形と組み合わせることでデータを水増しし，合計423 732個の波形データを用意した．訓練後のネットワークをテストデータに適用した結果に対し，出力スコアの最大値が0.5以上でかつ読み取り時刻の走時差が2サンプル以下のものを正解と定義して性能を評価した結果，precisionが0.888，recallが0.965，accuracy が0.866，F1値が0.925であった．なお，テストデータにはSN比が非常に低いイベントが含まれており，読み取り時刻の振幅値のプレシグナルに対するSN比が1.5以上

© The Seismological Society of Japan

という条件でデータを選別したところ，precisionは0.962まで上昇した.

本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)，科研費 (16H04614；21H01191)，文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の援助により行われました.

© The Seismological Society of Japan

Improvement of the Single Station Algorithm in Earthquake Early Warning Using Machine Learning Technique

*Shunta NODA[1], Masato UKAI[1]

1. Railway Technical Research Institute

気象庁の緊急地震速報や新幹線の早期地震警報システムでは、それぞれの観測点ごとに震央距離・方位やマグニチュードを推定するアルゴリズムが使用されている（以下、単独観測点処理；例えば、Yamamoto & Tomori [2013]）。単独観測点処理における問題として、他の地震計のデータを使わずに独立して推定を行うため、震央距離などの推定精度が低いという点が挙げられる（ただしその代わり、警報の即時性が高いなどのメリットがある）。

以前の新幹線早期地震警報システムでは、震央距離の推定においてB-Δ法と呼ばれる手法を使用していた（Odaka et al. [2003]）。現在はこの手法を更新し、C-Δ法と呼ばれる手法の使用が始まっている（岩田・他 [2016]）。この手法は、P波の極初動部分（1秒）の10Hz以上の加速度振幅の立ち上がり（＝傾き：Cと呼ぶ）が震央距離Δと負の相関を持つことを利用したものである（Okamoto & Tsuno [2015]）。

本研究では、単独観測点処理において、このC-Δ法の代わりにニューラルネットワーク法（例えば、He et al. [2016]）を用いて震央距離を推定し、推定精度の検証を行った。手法の適用にあたって学習させたデータは、（国研）防災科学技術研究所の強震観測網K-NETで観測されたMj4.0以上かつ震央距離200km以内の16,562個（データ全体の80%）の上下動成分加速度データ（P波開始から2秒間）である。検証に使用したデータは同条件の4,161個のデータである（学習に使用していない残り20%のデータ）。なお学習用と検証用のデータは無作為に分割している。なお、ここでは検証のため、P波開始時刻は手動で検測したデータを用いている。

ここではニューラルネットワーク法として、畳み込みニューラルネットワーク法（He et al. [2016]）を用いた。これにより推定された震央距離の精度は、対数誤差RMSで約0.25となった。C-Δ法による震央距離の推定精度は同指標で約0.31であるため、畳み込みニューラルネットワーク法の使用により、精度が約19%向上することが明らかになった。なお岩田・他[2016]は、B-Δ法（Odaka et al. [2003]）からC-Δ法へ手法を更新した際、6%程度推定精度が向上することを指摘しているが、本研究ではこれと比較してさらに大きな精度改善が期待される結果を示している。

今後はさらなる震央距離推定手法の改善、震央方位やマグニチュードなどへの適用性の検証、および新幹線早期地震警報システムへの機械学習法の導入に向けた検討を継続する計画である。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P9 (ROOM P)

[S23P-01] Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for understanding the current state of postseismic deformation and its short-term prediction following the 2003 Tokachi-oki earthquake

○Masayuki KANO[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Yoichi Ishikawa[3], Kazuro Hirahara[4,5] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Faculty of Science, Kyoto University, 3.JAMSTEC, 4.Riken, 5.Kagawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S23P-02] Estimation of depth-dependent variations in seismic velocity in the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake based on the MCMC approach

○Takahiro SHIINA[1], Masayuki KANO[2], Sumito KURATA[3], Aitaro KATO[4] （1.Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 4.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for understanding the current state of postseismic deformation and its short-term prediction following the 2003 Tokachi-oki earthquake

*Masayuki KANO[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Yoichi Ishikawa[3], Kazuro Hirahara[4,5]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Faculty of Science, Kyoto University, 3. JAMSTEC, 4. Riken, 5. Kagawa University

プレート沈み込み帯で観測される様々な時定数を持つ断層すべり現象は、主にプレート境界面の摩擦特性の違いを反映していると考えられる[例えばYoshida and Kato, 2003]。従って摩擦特性を観測データから推定することにより、より定量的にプレート境界のすべりの挙動を知ることができる。Kano et al. [2013]は、速度状態依存摩擦構成則を仮定して計算される断層すべりの数値シミュレーションに、断層すべり速度を観測データとしてアジョイント法により同化し、プレート境界の摩擦特性を推定する手法を開発し、数値実験を行った。さらに、2003年十勝沖地震の地震後15日間の余効すべりの断層すべり速度[Miyazaki et al. 2004]を同化し、摩擦特性の空間分布の推定を通して、その後15日間の余効すべりの短期推移予測性能が向上することを示した[Kano et al. 2015]。しかしながら、Kano et al. [2015]において使用したデータは、運動学的インバージョンにより推定されたプレート境界における日毎の断層すべり速度であり、インバージョンの際のすべりの平滑化によるバイアスが含まれている可能性がある。そこで、Kano et al. [2020]では先行研究で開発したアジョイント法を改良し、GNSSデータの地震後の日毎の累積変位を直接データ同化することにより摩擦特性を推定し、断層すべりの現状把握と短期推移予測を行う手法を開発した。
その結果、地震後15日間のGNSSの累積変位を説明可能な摩擦特性が、Kano et al. (2015)と同様、A–B ~ O(10 kPa), A ~ O(100 kPa), L ~ O(10 mm)として推定され、摩擦特性の推定により、その後15日間のGNSSデータの短期推移予測精度が向上することが分かった。一方で、得られた摩擦特性のオーダーは同じものの、Kano et al. [2015]で推定された摩擦特性を用いると、GNSSデータの海溝方向の変位が最大数十%程度過小評価されることが分かった。これはデータ同化に用いる観測データの違い、すなわち断層すべり速度推定に用いるすべりの平滑化の影響、を反映していると考えられる。
また、摩擦特性に加え、数値シミュレーションにおける初期条件（地震発生直後の断層すべり速度）の同時推定を行い、摩擦特性の推定のみを行った場合の結果と比較した。よい初期条件が得られている場合には、GNSSデータの再現と短期推移予測という観点で両者の結果に大きな差異は見られなかった。実際の問題においては、運動学的インバージョンで得られた断層すべり速度を初期条件として用いるのが現実的であり、またこの初期条件には上述の通りバイアスが含まれていることから、初期条件と摩擦特性を同時に推定するのがよいと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of depth-dependent variations in seismic velocity in the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake based on the MCMC approach

*Takahiro SHIINA[1], Masayuki KANO[2], Sumito KURATA[3], Aitaro KATO[4]

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震波速度構造は地震の震源位置を決定するために必要不可欠な情報であるとともに，震源域周辺の物質構造や物理特性を検討・議論する際の基礎となる．このため，地震波速度構造を精度良い推定およびその不確かさを定量的に評価することは地震発生場の環境や地震活動のメカニズムを理解する上で非常に重要となる．
椎名・加納 [2021, JpGU]ではマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）を用いた断層近傍，具体的には鉛直に近い速度境界面が存在する領域，において震源位置と境界を挟んだ異なる2つの1次元速度構造を同時に推定する手法を提案した．彼らの手法では，割り当てられる1次元速度構造をデータ駆動的に選択することで観測点をクラスタリングすることで，水平方向に速度構造が大きく変化する領域における震源位置や速度構造の特徴を精度良く推定することを可能とした．
本発表では，椎名・加納 [2021, JpGU]の手法を用いて2004年新潟県中越地震震源域周辺の速度構造の推定を行う．特に，2004年新潟県中越地震発生直後に行われた臨時観測で取得された稠密な地震観測データ[e.g., Kato et al., 2009]に基づき，震源域周辺における地震波速度構造の特徴を再検討する．なお，椎名・加納 [2021, JpGU]の手法では，観測点のクラスタリング結果から地表面における速度境界の分布を推測することができる．しかしながら，地下の速度境界面の形状に関する情報を直接得ることができない．そこで，MCMC法でサンプリングされたモデルパラメータをベースにした速度境界面の形状，特に地表面からの傾斜角の検出可能性についても議論する．

謝辞：本研究では新潟県中越沖地震合同観測グループにより取得されたデータを使用させていただきました．また，JST CREST [JPMJCR1763]の支援を受けました．記して感謝申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S01. Theory and analysis method

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P1 (ROOM P)

[S01P-01] Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust

○Kazuki Kidoguchi[1], Jun Kawahara[1], Takahiro Shiina[2] （1.Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2.Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-02] Numerical test for imaging oceanic slab based on a passive-source reverse time migration

○Takashi FURUMURA[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-03] Numerical simulation of seismoacoustic wave propagation on and beneath the sea surface: Evaluation of deamplification effect due to a seawater layer

○Takeshi NAKAMURA[1], Hiroshi TAKENAKA[2] （1.Central Research Institute of Electric Power Industry, 2.Okayama University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-04] Migration-based event location method applicable to local earthquakes recorded in Ocean Bottom Seismograph.

○Shinji YONESHIMA[1], Kimihiro Mochizuki[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-05] Study on the wavefield for the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Taro OKAMOTO[1], Hiroshi Takenaka[2], Takeshi Nakamura[3] （1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Earth Sciences, Okayama University, 3.Geology and Geotechnical Engineering Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-06] Extraction of P-s converted wave of mantle discontinuities beneath Japan from ambient seismic noise

○Shota KATO[1], Kiwamu Nishida[1] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-07] How to interpret vertical-CLVD moment tensor solution at active calderas with ring faults? — Case studies at Sierra Negra in the Galá pagos Islands and Kilauea in Hawaii

○Osamu SANDANBATA[1,2], Hiroo Kanamori[3], Luis Rivera[4], Zhongwen Zhan[3], Kenji Satake[5], Shingo Watada[5], Voon Hui Lai[6] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.JSPS Research Fellow (PD), 3.California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 4.Université de Strasbourg, CNRS, ITES UMR 7063, Strasbourg F-67084, France, 5.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 6.Australian National University）

©Seismological Society of Japan

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-08] The observability of seismic radial anisotropy parameters using MCMC and a reconstruction of thinly layered structure under a volcano

○Junpei MARUYAMA[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Nozomu Takeuchi[1] （1.Earthquake research institute, The university of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-09] A study on the Application of 3-D Travel-Time Prediction to the Bayesloc multiple-event lolation

○Yuko Kondo[1], Hiroko Sugioka[1], Masayuki Obayashi[2] （1.Kobe University, 2.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S01P-10] Symplectic numerical integration method for normal mode computation of the spherically symmetric Earth

○Shingo WATADA[1] （1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust

*Kazuki Kidoguchi[1], Jun Kawahara[1], Takahiro Shiina[2]

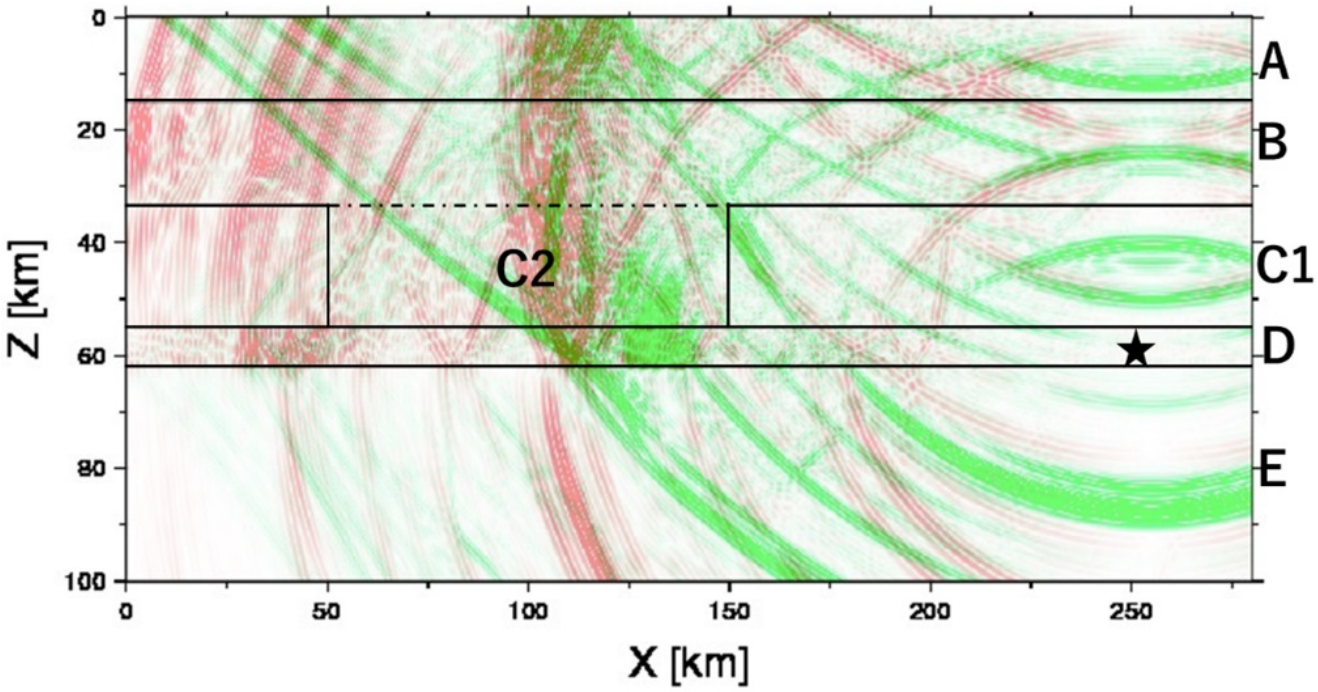
1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

海洋性地殻内部や近傍で発生する地震では、周囲に比べて地震波速度の遅い海洋性地殻内部に地震のエネルギーがトラップされることにより発生し、伝播するガイド波が観測されることが知られている (e.g., Fukao, 1983; Hori et al., 1985; Ohkura, 2000; Abers, 2005; Miyoshi et al., 2012)。特に日高山脈付近では太平洋スラブ直上に大陸下部地殻程度の速度を持つ低速度域が存在すると考えられており (Kita et al., 2010, 2012)、この低速度域と海洋性地殻の接触により、海洋性地殻内部を海溝軸と平行に伝わるガイド波のエネルギーの一部が、地表面に向けて放出されると推測されている（Shiina et al., 2014; 椎名, 2015）。椎名(2015)は、日高山脈下の不均質構造 (Kita et al., 2010, 2012) や低速度の海洋性地殻などを導入した2次元構造モデルを仮定し、海洋性地殻内部を伝播するガイド波の地表面での観測可能性に注目した数値シミュレーションを行った。その結果、このガイド波が地表面で観測されるためには、日高山脈下に地震波の低速度域が存在し，太平洋スラブ直上付近まで分布している必要があることがわかった。

本研究では、椎名(2015)で詳細に検討されなかった海洋性地殻の地震波速度や内部構造の違いについて、海洋性地殻内部を伝播するガイド波の地表面観測波形に与える影響に注目した数値シミュレーションを行った。計算には速度-応力型有限差分法(Virieux, 1986)を用い、ダブルカップル点震源を与えて2次元P-SV波を放射させた。構造モデルは、椎名(2015)の2次元構造モデルを若干単純化したものを用いた（図）。このモデルは地表面から順に、大陸上部地殻、大陸下部地殻、マントルウェッジ、海洋性地殻、スラブマントルから成る水平成層構造を基本とし、マントルウェッジの一部の地震波速度を大陸下部地殻と同じ値にすることで低速度域を表現した。各層のVp/Vs比、密度、厚さなどは、椎名(2015)の2次元構造モデルを参考にして与えた。海洋性地殻内部に卓越周波数1.4 Hzの点震源を置いて波動伝播シミュレーションを行い（図）、地表観測点における地震動を合成した。その結果、海洋性地殻の地震波速度を若干（0.5 km/s程度）変更すると、海洋性地殻内部のガイド波の伝播速度や励起強度が変わり、結果として観測されるガイド波の走時や振幅、継続時間等にも変化が見られた。このことはガイド波の特徴から海洋性地殻内部の構造やその変化をある程度制約できる可能性を示唆する。

図：シミュレーションの一例：A：大陸上部地殻、B：大陸下部地殻、C1：マントルウェッジ、C2：マントルウェッジ内の低速度域、D：海洋性地殻、E：スラブマントル。星印は震源。赤はP波、緑はS波を表す。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Numerical test for imaging oceanic slab based on a passive-source reverse time migration

*Takashi FURUMURA[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

近年、近地・遠地地震のアレイ観測波形データの逆伝播計算に基づく、地下深部の不連続面のイメージング手法（Passive-source reverse time migration; PSRTM）が提唱され、Moho面や沈み込む海洋プレート形状の推定への適用が議論されている（e.g. Shang et al. 2012; Li et al. 2018; Zou & Cheng 2021）。PSRTMは、地中の境界面で発生したPS、SP変換波を含む観測波形を時間反転し、観測点から地中に逆伝播させることで、変換が発生した境界へ戻す（境界面をイメージングする）手法である。地震波逆伝播計算には、差分法等が用いられ、地下構造モデルとしては既知の１次元ないし不均質構造が用いられる。なお、PSRTM解析では、P、Sの読み取りや震源情報は必要なく、また予めレシーバ関数を求める必要はない。本研究では、日本周辺の海・陸地震アレイ観測データを用いた太平洋スラブのイメージングに向けて、２次元モデルを用いた数値実験を試した。なお、既往研究はPS変換を対象に実施されたが、本研究では変換率の高いSP変換の利用を検討した。

PSRTM数値実験

数値実験は、東北～北海道下に沈み込む太平洋スラブのイメージングを想定し、図１に示す水平580 km、鉛直640 kmの２次元断面で行った。 最初に、数値実験に用いる模擬観測波形を計算した地下構造モデルは、*ak135*速度構造モデル(Kennett et al. 1995)を背景に、厚さ100 kmの太平洋スラブ（背景より＋5%の速度異常を持つ）を組み込み、深さ110 kmまで厚さ7 kmの海洋性地殻（-10%）を置いた。スラブ上面深度110～240 kmの範囲にはマントルウエッジ（−5%）を置いた（図a下）。地殻は、CRUST1.0（引用）モデルを参考に、陸域（厚さ35 km）から海域（20 km）にかけて薄く修正した。遠地地震を想定し、モデル深部から平面S波を入射して、地表に20 kmの間隔で並んだ23観測地点での上下・水平動速度波形を計算した(図a上)。レコードセクションを見ると、入射S波のほかにMoho面、スラブ上・下面で生成したSP変換波が確認できる。 次に、PSRTM解析では、太平洋スラブ等を含まない、１D速度構造モデル（ak135）を、深さ方向に移動平均を取り境界をスムーズ化したものを用いた（図c）。FDM計算により、200秒間の模擬観測波形を観測点に入力し、地中に向けて逆伝播させた（図b）。このとき、粗い観測点間隔による波動場のエリアジングを避けるために、模擬観測波形には1 Hzのローパスフイルタをかけ、さらに観測点間の波動場をガウス補間することで、なめらかな逆伝播波動場を構築した。 逆伝播計算で得られた各時刻の波動場に対し、発散(div)と回転（rot）を求めてP、S波動場に分解した。そして二つの波動場の相互相関を取り、P波とS波が同着する場所（すなわちSPまたはPS変換が起きた境界）をイメージングした（図b）。これを全時間にわたって足し合わせることで、境界面の位置をイメージングした（図２a）。

結果の考察

図cは、鉛直（0°）平面S波入射の場合のイメージング結果である。地殻および深さ230 km程度までの太平洋スラブ上面と海洋性地殻のイメージングが確認できる。イメージングの極性（赤／青）は、境界面の音響インピーダンスに対応する。 さらに、平面S波の入射角を−−−20～20°、５°刻みに行い、イメージング結果を重ねたものを図dに示す。入射S波と速度境界面の角度が変わることで、SP変換が強く発生する場所が変化し、イメージングの範囲が拡大した。また、スラブ下面や海洋性地殻が明瞭化した。410 km不連続面はイメージングできなかった。ほぼ鉛直S波入射ではSP変換効率が小さいため斜め入射が必要である。 深さ110～240 kmの範囲で太平洋スラブのイメージングが数キロ浅くなっているのは、上部のマントルウエッジの影響である。イメージングの精度は速度構造モデルに依存するため、例えば、既知の速度トモグラフィの結果を利用することも有効であろう。Zu & Chen(2021)は、マントルとスラブの速度異方性を考慮したPSRTMによる高解像度化

© The Seismological Society of Japan

の効果を議論している。なお、本数値実験では、非弾性減衰（Q）は考慮しなかったが、減衰の効果を適切に補正（逆伝播計算において振幅を増大させる）することで、深部のイメージング強化も期待される。 本実験ではSP変換波を用いたイメージングを行ったが、PS変換波に対しても同様なPSTRM処理が可能である。S波とP波では、入射角による変換波の生成効率が異なるため、SPとPS変換波を相補的に用いることで、イメージングの高解像度化が期待できる。

© The Seismological Society of Japan

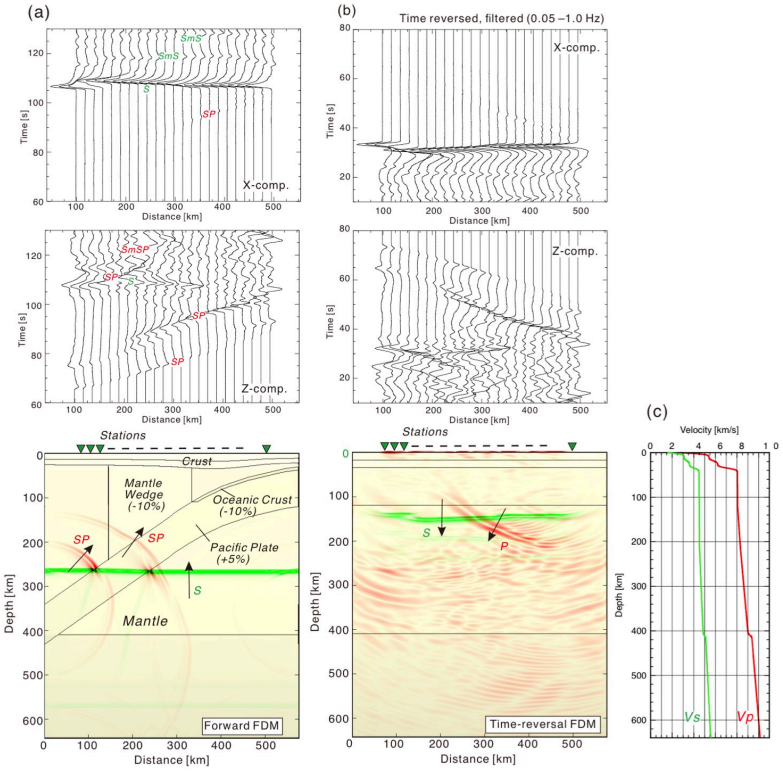


図１.(a) 実験に用いる模擬観測波形の計算。平面 S 波をモデル深部から入射させ、地表観測点での上下(z)、水平（x）成分の地震波形を計算した（緑が S 波、赤が P 波成分を表す)。計算波形には直達 S 波のほか、スラブ下面・上面、モホ面等での SP 変換波が含まれる。(b) 時間反転した模擬観測波形を入力とする PSTRM 計算。観測点から地中に観測波を逆伝播させ、P、S 波動場の相互相関を取り PS 変換点をイメージングする。(c)PSTRM 計算に用いた１次元速度構造（ak135 を鉛直方向にスムージング)。

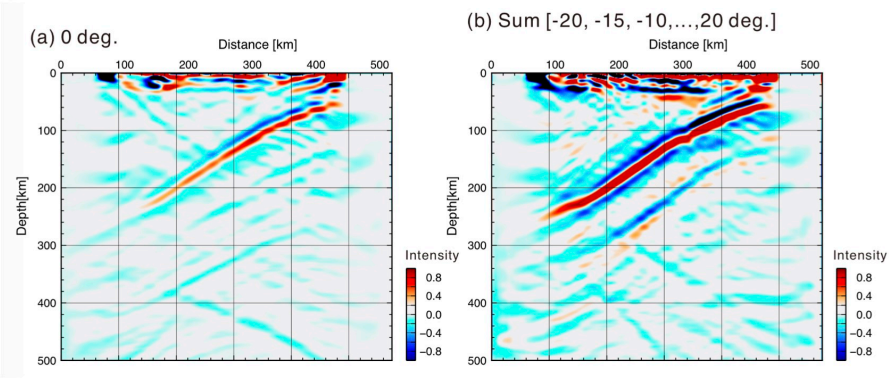


図２．(a)PSTRM 計算から得られた境界面のイメージング画像（地下 500 km までを表示；平面 S 波の鉛直入射＝0°の場合)。赤と青は、反射係数の正負を表す。(b) S 波入射角±20°の５°刻みでのイメージング結果のスタック画像。

© The Seismological Society of Japan

Numerical simulation of seismoacoustic wave propagation on and beneath the sea surface: Evaluation of deamplification effect due to a seawater layer

*Takeshi NAKAMURA[1], Hiroshi TAKENAKA[2]

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University

水平成層構造における地表や地中の変位を評価するために、周波数および波数領域における各層の変位・応力の応答を層境界でつないで計算を行うpropagator行列法（Haskell, 1953）が古くから用いられている。これは、構造の上層側と下層側がともに固体である場合、固体-固体間の層境界で変位と応力の成分が連続量であることを基に、各層の弾性定数や厚さ等を変数とした伝達関数の行列（propagator行列）の重ね合わせから変位を求める手法である。しかし、海域のように、海水などの流体層が入った構造の場合では、固体-流体境界で変位や応力の不連続成分があるため、固体-固体境界と同様の演算を行って変位を求めることができない。沢飯・他（1995）は、最上層を流体層として、Haskell (1953)が示した流体中におけるpropagator行列を用い、通常採用されることが多い演算処理とは異なる、下層から上層に向かって各層の行列を重ね合わせる演算を採用することで固体-流体境界条件の破綻を避け、流体層を含む構造に対する固体層上端における応答特性を示した。また、Okamoto and Takenaka (1999)は、propagator行列法ではなく反射行列・透過行列法を用い、流体内で応力変数の代わりに圧力変数を用いることで固体-流体の境界条件を満足する反射行列・透過行列を示し、不規則形状の場合を含む海底面での変位波形計算の安定的な解法を示した。

近年の海底地震観測網の充実により、海底における地震動の特性を示した成果が多く出ている（例えば、Nakamura et al. (2015); Kubo et al. (2018)）。また、CTBTOのIMSをはじめとする海中のハイドロフォン観測点のデータを使い、T相を含む、遠方から伝播した海中の地震波（もしくは水中音響波）の特徴を示した成果も出ている（例えば、Yildiz et al. (2013)）。一方、海震を含む、海面や海中における震源近傍の地震動（もしくは水中音響波による振動）は、観測例が非常に少なく（例えば、塩谷・笹 (2013)）、理論的評価も限られている。本研究では、海面や海中における震源近傍の地震動評価を行うために、固体において点震源の不連続ベクトルからの地震波伝播をpropagator行列法で求める中村・竹中(2005)およびNakamura and Takenaka (2006)の手法を拡張し、固体-流体の境界条件と流体内の各層でのpropagator行列を導入した。そして固体中の点震源に対する海面および海中における水中音響波形の計算を行い、海水層の存在による増幅や減幅の影響評価を行った。

固体-流体境界条件および流体である海水層の導入にあたり、固体-流体間で変位と応力の法線成分の連続性を保ち、さらにオイラー方程式により固体側の応力の法線成分から流体側の変位の水平成分を求める行列を準備した。沢飯・他（1995）と同様に、下層から上層に向かって行列演算を行い、固体-流体境界では先述の行列を適用する。海水層においては、流体中の音波に関するpropagator行列で計算を行う。ただし、下層から上層へ向かって計算を行う場合、その逆向きの場合と比べ、自由表面と放射境界条件から導かれる応答式がやや複雑となる。さらに、層厚や鉛直波数が関わる指数関数項が増え、不連続ベクトルを導入した計算では安定性が低下し、高周波や層が厚い構造での計算は注意を必要とする。

計算で使用した構造および震源と、計算結果例を図に示す。各深さ位置における観測点のpropagator行列法による波形を確認したところ、海底の固体側においては、SH波の伝播における自由表面であることから、大きな振幅が水平成分に現れた。しかし、固体-流体間で変位の水平成分が不連続かつ海中でS波が伝わらないため、海底近傍の海水側においては、固体側と比べて波形が大きく変わり、水平成分の振幅は鉛直成分と同程度にまで小さくなることを示した。その鉛直成分については、固体-流体間で連続であるため、海底の固体側と海水側で同じ波形として現れた。海面における鉛直成分については、主に自由表面の影響により、海底と比べて

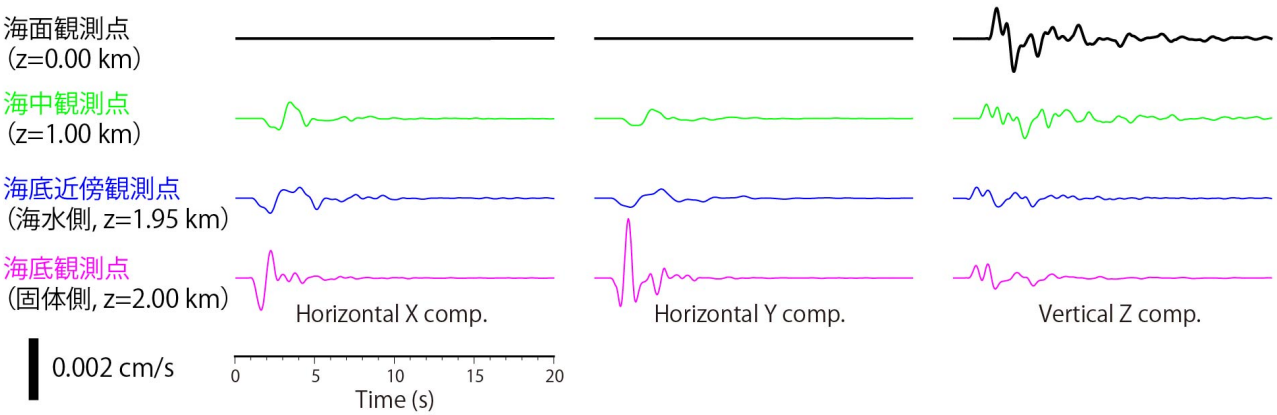
© The Seismological Society of Japan

水中音響波が増幅することを示した。今回の計算の場合では、その増幅した振幅の大きさが、海底の固体側における水平成分の半分程度の大きさとなった。海面の水平成分については、海面で垂直応力とその水平方向微分、海面および海中でせん断応力が0であることから、波形振幅は現れない。

計算設定



計算結果例



© The Seismological Society of Japan

Migration-based event location method applicable to local earthquakes recorded in Ocean Bottom Seismograph.

*Shinji YONESHIMA[1], Kimihiro Mochizuki[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

はじめに

これまで海底地震計（OBS）記録を用いた震源決定では，目視により手動でP, Sの検測が行われていた．これは主に海底地震記録では，海面反射波や基盤岩でのPS変換波，ローカルなスパイクノイズなどの混在により，従来のAICなどを用いた自動検測ではミスピックが多発し十分な信頼性を確保できなかったことなどによる．一方で，近年の海底地震観測技術の発達により，海底地震計（OBS）にておよそ1年にわたる観測期間の地震記録が得られるようになった．これに数十台規模の観測網と併せて，臨時観測であっても大量の海底地震波形記録が得られるようになった．

課題

こうしたデータ量の増加に伴い，地震活動が活発な領域では，手動で検測できる量を超えている観測ケースが発生している．2011年東北沖地震の場合，茨城沖で実施していた31台のOBS観測では，周辺の余震活動として80000個を超える数の地震が検出された．これらすべての地震記録について手動で検測を行うのは時間的制約から困難であり，現実的ではない．

目的

本研究にて対象とする地震記録は，OBSで記録されたローカルな微小地震である．こうした地震について手動検測に匹敵する程度の信頼性の高い震源決定を実施する手法の開発を行うことを本研究の目的とする．

方針

本研究では，近年，海底地震計以外の分野で適用されているMigrationベースの震源決定法のアプローチをとった．このアプローチにより手動での検測を行う必要がなくなるため，震源決定に要する時間を大幅に短縮できることが期待される．Migrationの際には，多くの先行研究と同様，地震波形を変換したCharacteristic function（以下CF）を用いる．OBS記録に適用する際に必要となる項目は以下のとおりである．

・イベントの検出，速度構造の作成，観測点補正などMigration以外の処理は，従来の震源決定処理と同様の手順を踏襲する
・Ｐ，Ｓを用いた震源決定とする
・CFはP, Sの到達時刻で安定したピークを持ち，手動検測と同程度の精度を持つものとする．
・観測点補正を実施可能にする
・速度構造の不確実性を織り込むことができる
・海面反射波やPS変換波にフィットしないようにする
・誤差楕円を計算する．
・処理のパラメータは既存手法と同程度で，地震データに依存しないものとする
・3次元速度構造にも対応可能にする
・後処理としてS/NによるCFピーク時刻の遅れを補正処理し検測時刻を計測する．これによりDouble difference法など高精度な震源決定処理を行えるようにする．

CFの特徴

上記特性を満たすCFが先行研究では存在しないため，本研究にて新規開発となった．CFは以下の特徴を有する

・地震速度波形の初動の波形をTransient関数とみなし，理論的なTransientな速度波形の相互相関関数を定義

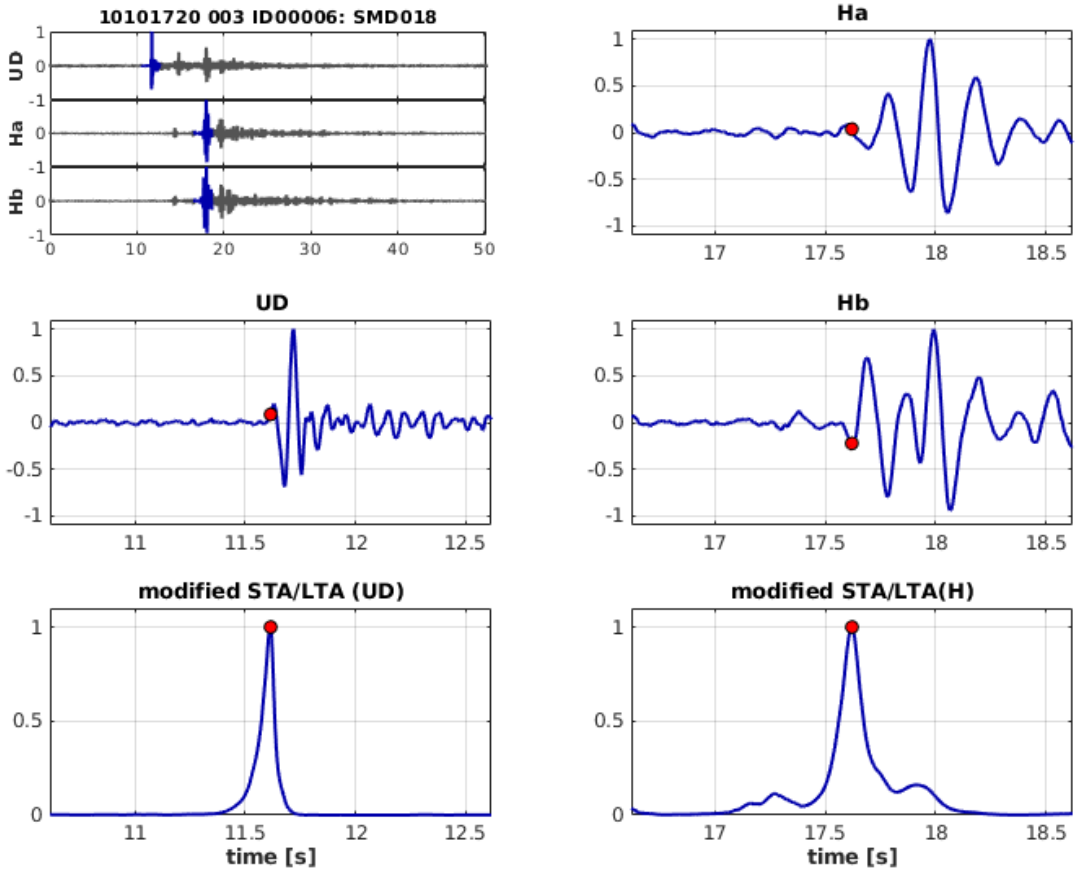
© The Seismological Society of Japan

する．
・初動周辺で相互相関関数の複数のピークが出てしまうことを避けるため，STA/LTAのコンセプトを適用し，STA部：Transientな相互相関関数（これはTransient関数を重みとする重み付きSTAとみなせる）．LTA部：従来のLTA，として，重み付きSTA/LTAとして定式化する．
・こうして定義された重み付きSTA/LTAは，初動付近にピークを持ち，観測点間の相対到達時刻のずれが小さいため，Migration-baseの震源決定と親和性が高い．
・相互相関は漸化式による再帰計算が可能なため，効率良く計算可能である．
・Transientな関数にはrise timeのパラメータがあるが，Transient関数同士の相互相関では，非対称な形状の関数同士ながら相互相関のピーク時刻がシフトしないという特徴を持つ．この特徴により，震源時間関数のrise timeのパラメータによらずピーク時刻はrise timeによらず不変となる． なお観測波形は機器特性や伝搬経路での減衰などの影響により歪が生じているが，観測点間で共通，あるいは十分に小さいとみなすことで相対的なピーク時刻は安定しているものとした．

結果

CFの例を図1に示す．P, S共に初動付近にユニークなピークを持っている．発表ではMigration処理全体のフロー，定式化の詳細，合成波形でのロバストネステスト，手動検測との比較，既存のCFとの比較，テストデータによる評価結果，および2010年茨城沖で観測された実データへの適用結果について紹介する．

図1．既存手法との比較．左上：3成分の地震波速度波形（上：上下動，下：水平同2成分）．左中：上下動の地震波形．赤丸はCFのピーク時刻を示す．右上・中：水平動地震波形記録．左下：上下動CF，右下：水平動CF．



© The Seismological Society of Japan

Study on the wavefield for the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Taro OKAMOTO[1], Hiroshi Takenaka[2], Takeshi Nakamura[3]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Geology and Geotechnical Engineering Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

沈み込み帯では地球内部構造が強い3次元不均質性を持っている。そのため、この地域の地震の震源パラメータや断層破壊過程の研究においては、3次元不均質構造をもとにして生成した計算地震波波形による解析が欠かせない。このとき計算波形の精度が不十分であると、解析結果にバイアスを生じたり分解能に制約を受けたりする可能性がある。とくに短周期（短波長）の計算波形の精度に限界がある場合は、短波長現象である破壊現象の考察や、地震発生場の短波長構造の考察において分解能のうえで制約となる可能性がある。そこで我々は、プレート沈み込み型の巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震の震源域において、周期数秒から10秒程度の計算波形の精度を向上させることを目的として、波形トモグラフィーによって地球内部構造モデルを改良する研究を続けている。これまでに周期7秒程度の波動場について海溝付近の浅い地震と陸上観測点との間での感度カーネルを調べ、直線経路に関して非対称なパターンや屈曲したパターンになることを見出してきた（地震学会2020年秋季大会発表など）。これは、短周期地震波においては横方向に均質な構造モデルを用いたトモグラフィーでは波動伝播状況を再現できないことによるバイアスが入る可能性を示唆する。

上記のようにこれまでの検討は周波数領域で行ったが、今回はより詳細に波動場の状況を把握するために、時間領域の波動伝播の検討を行った。例として、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域で発生した浅い地震（2003/11/01、Mw5.8）とF-net観測点TYSのペアについて中心周期7秒の波動伝播のスナップショットを調べたところ、平均的な群速度が2km/s程度以下の後続表面波群については、直線経路に関して北側の波動場の振幅が相対的にやや強くなっていることがわかった。経路の北側は南側よりも海溝に近づいており、経路上の海水層や堆積層が南側よりも厚くなっている。そのため北側の方が短周期地震波の励起が強くなる可能性や、あるいは波の振幅も大きくなるということの結果として、これらの波動場が感度カーネルの非対称なパターン形成に寄与した可能性が示唆される。発表では他の震源・観測点ペアの例も含めて時間・空間波動場の様子を議論して、波形トモグラフィーに向けた考察を行う。

謝辞　気象庁と防災科学技術研究所からは震源パラメータや地震波形データ、地盤構造モデルデータを提供していただきました。またGlobal CMTプロジェクトのCMT解を利用いたしました。本研究は科研費（課題番号：20K04101）および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（課題番号：jh210054-NAH）の支援によって実施しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Extraction of P-s converted wave of mantle discontinuities beneath Japan from ambient seismic noise

*Shota KATO[1], Kiwamu Nishida[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

脈動は0.05-0.3 Hzの帯域で海洋波浪によって励起されるランダムな波動場である(Nishida, 2017)。脈動は従来地震波形に対するノイズとして扱われてきたが、近年では地震波干渉法によって地球内部構造の推定に用いられている (e.g., Shapiro et al., 2004; Poli et al., 2012)。地震波干渉法は、観測点間の観測波形の相互相関関数を計算することにより、観測点間のグリーン関数を抽出する手法である (Snieder and Larose, 2013) 。しかし、地震波干渉法によって観測点間を伝播する実体波を抽出し地球内部構造を推定する場合、脈動実体波の非一様な波源分布や観測網の配置によって適用できる領域に制約が生じることが知られている。
そこで、本研究では0.1-0.2 Hzでの脈動実体波を地震のようなイベントとしてみなし、新たなレシーバー関数解析により脈動実体波からHi-net観測点下の不連続面でのP-s変換波を抽出し、日本列島直下の構造推定を試みた。ここで脈動実体波の励起源は地震のように空間的に局在化しており、一方その震源時間関数は過渡的ではなく数日の時間スケールで持続的であると仮定した。P-s変換波の抽出には、レシーバー関数解析を拡張した手法を開発した。まずアレー解析によって入射P波を推定し、震源時間関数とみなした。上下動記録から求めた入射P波(震源時間関数)による水平動記録のRadial成分のデコンボリューションを計算し、P-s変換波の抽出を試みた。
解析に用いた観測波形は、防災科学技術研究所の展開する高感度地震観測網Hi-netの北海道を除く685点の上下動・水平動の速度計記録とし、解析対象とした脈動実体波のイベントは、0.1-0.2 Hzの全球的な脈動実体波カタログ (Nishida and Takagi, 2020 AGU) から信号/ノイズ比の良いもの100イベントとした。脈動実体波 (P波) の走時の計算には1次元速度構造モデルAK135 (Kennett et al., 1995)と日本列島の3次元速度構造モデル (Nishida et al., 2008) を用いた。全観測点の上下動波形記録から1024秒の窓を切り出し、脈動実体波 (P波) の走時に沿って足し合わせることによって入射P波を推定した。
全観測点のレシーバー関数をアレー解析した結果、観測点下の410 km不連続面、660 km不連続面でのP-s 変換波の検出に成功した。変換波の強度は空間的に異なるため、今後は反射面の空間分布について議論していく予定である。

© The Seismological Society of Japan

How to interpret vertical-CLVD moment tensor solution at active calderas with ring faults? —Case studies at Sierra Negra in the Galá pagos Islands and Kilauea in Hawaii

*Osamu SANDANBATA[1,2], Hiroo Kanamori[3], Luis Rivera[4], Zhongwen Zhan[3], Kenji Satake[5], Shingo Watada[5], Voon Hui Lai[6]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD), 3. California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 4. Université de Strasbourg, CNRS, ITES UMR 7063, Strasbourg F-67084, France, 5. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 6. Australian National University

At active calderas with a ring-fault system, M_w~5 moderate earthquakes with deviatoric moment tensors dominated by a vertical compensated-linear-vector-dipole (vertical-CLVD) component are sometimes generated. Ring-faulting, dip-slips along the ring-fault system induced by pressure change of a shallow magma chamber at calderas, can cause such earthquakes with vertical-CLVD moment tensors (Shuler *et al.* 2013, JGR). However, the deviatoric moment tensor inversion using long-period teleseismic data has been known to be very unstable because at a shallow source depth M_{xz} and M_{yz} are inefficient in exciting long-period seismic waves, and therefore unresolvable; this issue makes it difficult to interpret moment tensor solutions of ring-faulting, limiting our understanding of the source properties.

We propose a method to constrain ring-fault geometry by focusing on the ratio and the polarity of the other moment tensor components that are well-resolved from long-period teleseismic data, i.e., the vertical-CLVD (CLVD) and the vertical strike-slip (SS) components. We suggest that the arc length of ring fault can be inferred from the dominancy of the CLVD component, whereas the ring-fault orientation can be constrained from the azimuth of the tension- or pressure-axis of the SS component.

We apply the method to vertical-CLVD earthquakes observed at two calderas with a ring-fault system: Sierra Negra in the Galápagos Islands and Kilauea in Hawaii. We first investigate the arc angle and orientation of the fault geometry of several ring-faulting events during volcanic activities in 2005 and 2018 at the summit caldera of Sierra Negra. The difference in the tension-axis orientation of the SS component indicates variations in the slip location along the ring-fault system. Additionally, the polarity reversal of the CLVD component between the two events in 2018 indicates that the slip direction changed before and after the eruption onset. We also apply the method to recurring M~5 seismic events during the 2018 Kilauea summit caldera collapse. We infer that the summit caldera collapses occurred with partial ring-faulting along either the northwestern or southeastern segment of the ring-fault system. Our estimations of the ring-fault geometry and kinematics at the two volcanoes are consistent with those inferred from geodetic observations and/or near-field seismic data.

These results show the usefulness of long-period teleseismic data for estimating a ring-faulting source, although parts of the source information, such as ring-fault dip angle and seismic moment, are indeterminate. By utilizing the well-resolved moment tensor components, we are able to examine remotely the structures and kinematics below active calderas with ring faults that are distributed globally. Lastly, we also discuss possible biases in the deviatoric moment tensor inversion caused by a volumetric change that potentially coincides with the ring-faulting.

© The Seismological Society of Japan

The observability of seismic radial anisotropy parameters using MCMC and a reconstruction of thinly layered structure under a volcano

*Junpei MARUYAMA[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Nozomu Takeuchi[1]

1. Earthquake research institute, The university of Tokyo

近年，火山直下の地殻や海洋の地殻・上部マントルに強い鉛直異方性（Radial Anisotropy）の存在が報告されている（Ekstrom&Dziewonski, 1998; Nettles&Dziewonski, 2008; Russell et al., 2019; Jaxybulatov et al., 2014; 長岡, 2020）．このような鉛直異方性の原因として地震波速度の大きく異なる互層構造の存在が考えられている（Backus, 1962）一方で，その詳細な構造について地震波観測からの制約は得られていない．これは従来の研究で用いられている表面波のデータのみでは5つの異方性パラメタのうち主に鉛直S波速度β_V[川勝1]と水平S波速度β_Hしか制約することができず，互層構造についての十分な情報を与えることができないことに起因している（Aki, 1968）．残された3つの異方性パラメタはP波の走時や，不連続面で生じるSP，PS変換の変換係数に大きい影響を与えることが知られており（Kawakatsu, 2018），これらのデータと合わせることでより詳細な異方性パラメタの推定が可能となることが期待される．
本研究では，特に強い異方性が観測されている火山の直下をモデルケースとして，表面波の分散，P波の走時およびレシーバー関数の解析を同時に行うことによる異方性パラメタの計測可能性をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を使って評価することを試みる．そのために，表層の深さ30kmまでに鉛直異方性を持つ単純な二層構造モデルについて予備的試験を実施した．最初に構造モデルから順問題として表面波の分散曲線，P波の走時曲線，レシーバー関数の波形を計算する．それらの数値に誤差を付加した上でMCMCを用いて逆問題を解くことで，それらのデータから異方性パラメタにどのような制約を与えるか検証した．その結果，表面波とP波のデータに加えてS波レシーバー関数では入射角を20–30˚，P波レシーバー関数では20－50˚の範囲で幅広く取ることで複数の異方性パラメタの間に存在したトレードオフを解消し，それぞれを従来手法より精度良く推定できることを確認した．これによって，地下に存在が想定されている互層構造について，特に個々の層のVp/Vs比が大きく異なる場合にはそれぞれの層の厚さや地震波速度について強い制約を与えることができる場合があることを示した．講演では，様々な観測環境に応じて観測されるデータとそこから得られる地下構造についての情報の関係を整理し，鉛直異方性の制約から地下の物性や微小な構造について推定できることを明らかにすることで将来的な解析/観測に資する予定である．

© The Seismological Society of Japan

A study on the Application of 3-D Travel-Time Prediction to the Bayesloc multiple-event lolation

*Yuko Kondo[1], Hiroko Sugioka[1], Masayuki Obayashi[2]

1. Kobe University, 2. JAMSTEC

自然地震を用いたトモグラフィによる速度構造推定において、地震の震源位置と震源時もまた未知数であり、3次元速度不均質構造と震源位置のずれを明確に区別することは難しい。このため、震源パラメータを高い精度で推定することは極めて重要な問題である。

Myers et al. (2007; 2009)は、階層ベイズモデルを用いた多数イベントの震源同時推定手法（Bayesloc）を開発した。Bayeslocは、震源位置、走時補正、到達時検測精度、フェイズラベルの推定 パラメータセットについて、ベイズの定理に従って同時事後確率密度分布を定式化したものである。同時事後分布からのサンプリングにはマルコフ連鎖モンテカルロ法が使用されている。Myers et al. (2011)ではグローバルデータセットに適用するために改良が加えられた。この改良によって、Bayeslocで実行される走時計算に対する補正、到着時データの精度推定、確率的フェイズラベリングにおける妥当性が示されるとともに、グローバルトモグラフィに応用されている(Simmons et al., 2011; 2012）。この改良Bayeslocの走時計算では、1次元グローバル標準速度モデルに対する走時を用い、波線ごとに統計的な走時補正を施している。

本研究では、ベイズ統計を用いた震源決定法への3次元速度構造による走時計算の適用手法を検討した。まず各到着時データに対して、3次元速度構造モデルによる走時計算を行い、走時表に対する補正値を求める。次に、補正された到着時データをBayesloc (Myers et al., 2009)に適用して震源を再決定する。これら2つのプロセスを反復する。本研究はグローバルトモグラフィへの応用を目的としているが、最初の試みとして、1964年から2017年に東北地方で発生した深発地震に対してこの手法を適用し震源の再決定を行い、妥当性を検証した。ここでは、到着時データとしてInternational Seismology Centre(ISC)によるものを、3次元P波速度モデルとしてGAP_P4 (Obayashi et al., 2013) を用いた。まず、iasp91(Kennet and Engdahl, 1991)に基づいた走時表を用いて、Bayesloc (Myers et al., 2009)で震源を再決定した。決定された震源位置とISCの位置を比較した結果、水平方向には北西へ、深さ方向には浅い方への系統的な偏差が認められた（図１）。これは、Bayslocで実行される統計的な走時計算への補正によるものと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

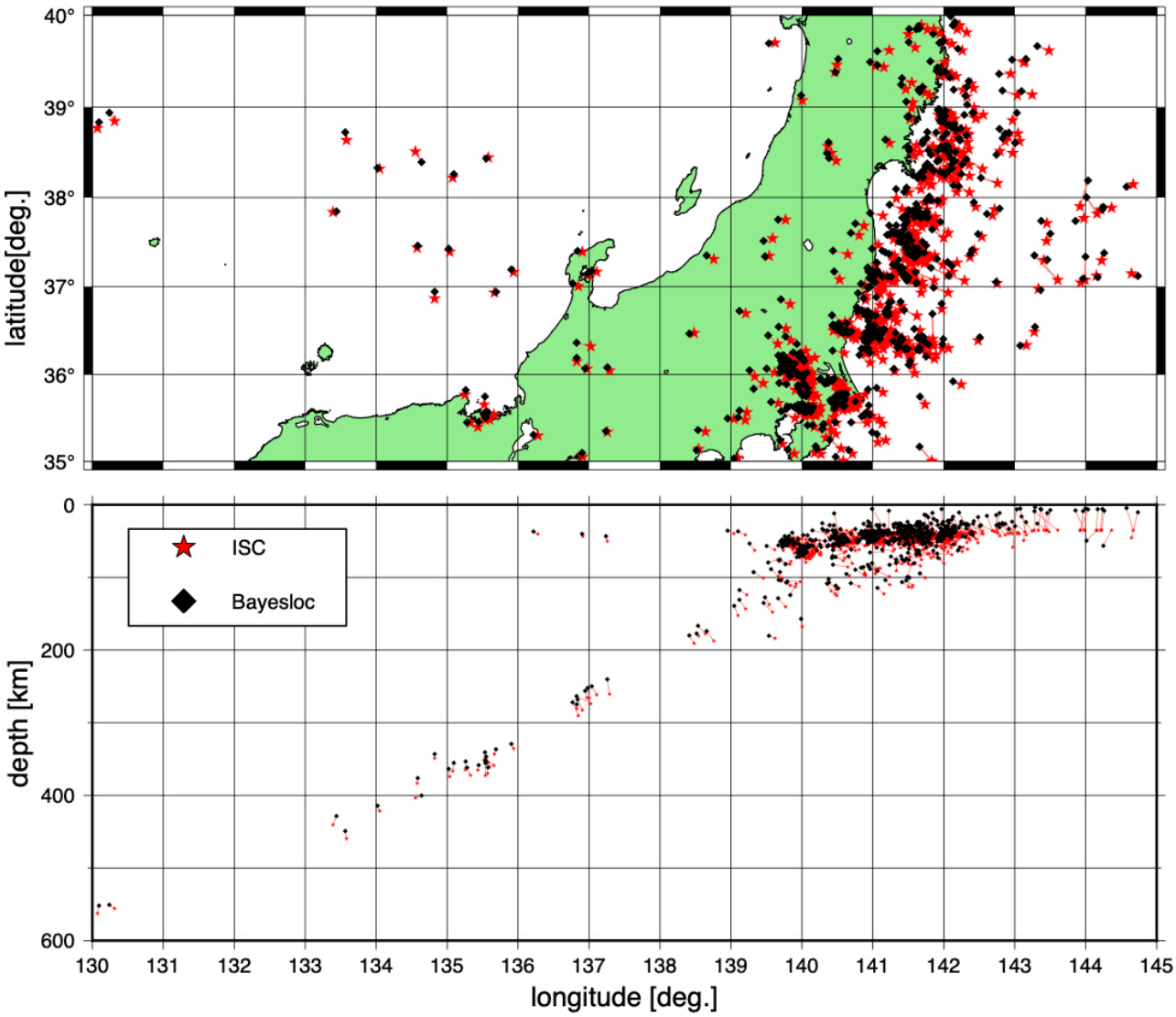


図1. 1964年から2017年に東北地方で発生した深さ35 kmより深い地震の震源分布。赤星はInternational Seismology Centre (ISC)で決定された震源位置を、黒菱形はiasp91(Kennett and Engdahl, 1991)の走時表を用いて、Bayesloc (Myers et al., 2009)で再決定した震源位置を表す。

© The Seismological Society of Japan

Symplectic numerical integration method for normal mode computation of the spherically symmetric Earth

*Shingo WATADA[1]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震や地滑り火山噴火などの励起源が生じる永久変位を包括する波動現象（地震・津波・大気波動）は、重力弾性結合系の地球自由振動解を用いて、変位（と時間・空間微分）の理論波形が簡便高速に計算される。近年報告されている、P波到達前の重力場変動計算では、純粋な弾性地震波動場の粗密に起因する重力場を時間領域で計算や、励起項に相当する非斉次項を有する重力摂動を含む周波数領域の運動方程式の直接積分による手法とられてきた。重力摂動を含む重力弾性結合系の地球自由振動解を用いるとP波到着前の重力場変動が高速簡便に計算されると期待されるが、こらまで、高周波（～１Hz）領域まで安定的に数値計算することが困難であった。 周波数領域で変数分離した後の動径方向を独立変数とする微分方程式は、重力摂動を含めると６変数連立１次微分方程式となる。安定的に数値積分を行うためにいくつかの手法が提案されてきたが(斎藤2009, Woodhouse 1988)、数値不安定のため高周波まで計算ができない。その連立微分方程式は、変位と重力ポテンシャルの固有関数を一般化座標ベクトルq、歪みと重力ポテンシャルの微分の固有関数を一般化運動量ベクトルpとする、６次元位相空間のハミルトニアン形式d(q,p)dr=J H(q,p)と書くことができる。このハミルトニアンH(r)は一般化座標qと一般化運動量pの2次形式となっており、H(q,p)＝U(q)+T(p)のように分離できないため安定的数値積分法として知られているシンプレクティック（Symplectic）数値計算法を用いることができなかった。今回発見したQ=Q(q,p), P=P(q,p)とする座標変換によりハミルトニアンHがH(Q,P)=U(Q)+T(P)分離できた。さらに、一般化座標として動径rと一般化運動量としてH(r)に相当するE(r)加えた８次元位相空間の新たハミルトニアンH(Q,P)-Eは座標rに関して一定となり、安定的に数値計算できることが判明した。

The normal mode method has been used for wave phenomena including permanent deformation, tsunami and atmospheric waves when we include the solid earth and ocean and atmosphere as a single gravitationally coupled elastic body. Once the normal mode set have been obtained, the computation time is very short, compared with other numerical simulation methods. Recently pre-P signal in seismograms induced by gravity potential change has been reported and confirmed by numerical simulations. We try to shorten the computation time by using the normal mode method. After the separation of variables of the differential equation for a symmetric Earth model in the frequency domain, 6 dependent variables as functions of independent variable r compose a 1 st order simultaneous differential equation. The numerical solution methods for the simultaneous differential has been proposed, however , it has been difficult to compute the solutions at high frequencies, ~1Hz. We extend the Hamiltonian formulation of the differential equation d(q,p)dr=J H(q,p). H(q,p) is a quadratic function of q and p and cannot be separated into H(q,p)＝U(q)+T(p). We found a coordinate transformation Q=Q(q,p) and P=P(q,p) so that the new Hamiltonian H(Q,P)= U(Q)+T(P) is separable. So a numerically stable symplectic integration method is applicable for the differential equations. Further, we extended the dimension by adding a new generalized coordinate r and a new generalized momentum E and compose a new Hamiltonian H(Q,P)-E. The new Hamiltonian can be integrated stably.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P2 (ROOM P)

[S02P-01] Hypocenter determination in 3-dimensional velocity structure based on the travel-times calculated by the shortest path method

○Shoji SEKIGUCHI[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-02] Examination of centroid moment tensor analysis using S-net

○Hisanori KIMURA[1], Youichi ASANO[1] （1.NIED）

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-03] Development of a realtime monitor system for WIN system using the MQTT protocol

○Hiroshi TSURUOKA[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-04] Seismic activity in the central-southern part of Tohoku District - a preliminary report

○Tomomi OKADA[1], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Shigeki Horiuchi[9], Kei Katsumata[2], Mako Ohzono[2,4], Masahiro Kosuga[3], Takuto Maeda[3], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Group for the aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake （1.Tohoku University, 2.Hokkaido University, 3.Hirosaki University, 4.ERI, University of Tokyo, 5.Nagoya University, 6.Kyoto University, 7.Kyushu University, 8.Kagoshima University, 9.Homeseismo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-05] Real-Time Calculation Method of Seismic Intensity Applicable to Low-Rate Sampled Acceleration Record

○Takashi Hirai[1], Yuki Yoshioka[2] （1.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-06] Seismic reflection survey using seafloor optical cable and DAS measurement off Sanriku

○Hiroki Takano[1], Masanao Shinohara[2], Rie Nakata[2], Eiji Kurashimo[2], Tatsuya Ishiyama[2], Kimihiro Mochizuki[2] （1.Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S02P-07] A coupling degree of optical fiber cable on seafloor using earthquake travel time recorded by distributed acoustic sensing (DAS)

○Satoshi KATAKAMI[1], Eiichiro ARAKI[2], Narumi TAKAHASHI[3], Shunta NODA[1], Naoyasu IWATA[1], Masahiro KORENAGA[1], Yasutomo YAMAUCHI[1] （1.RTRI, 2.JAMSTEC, 3.NIED）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

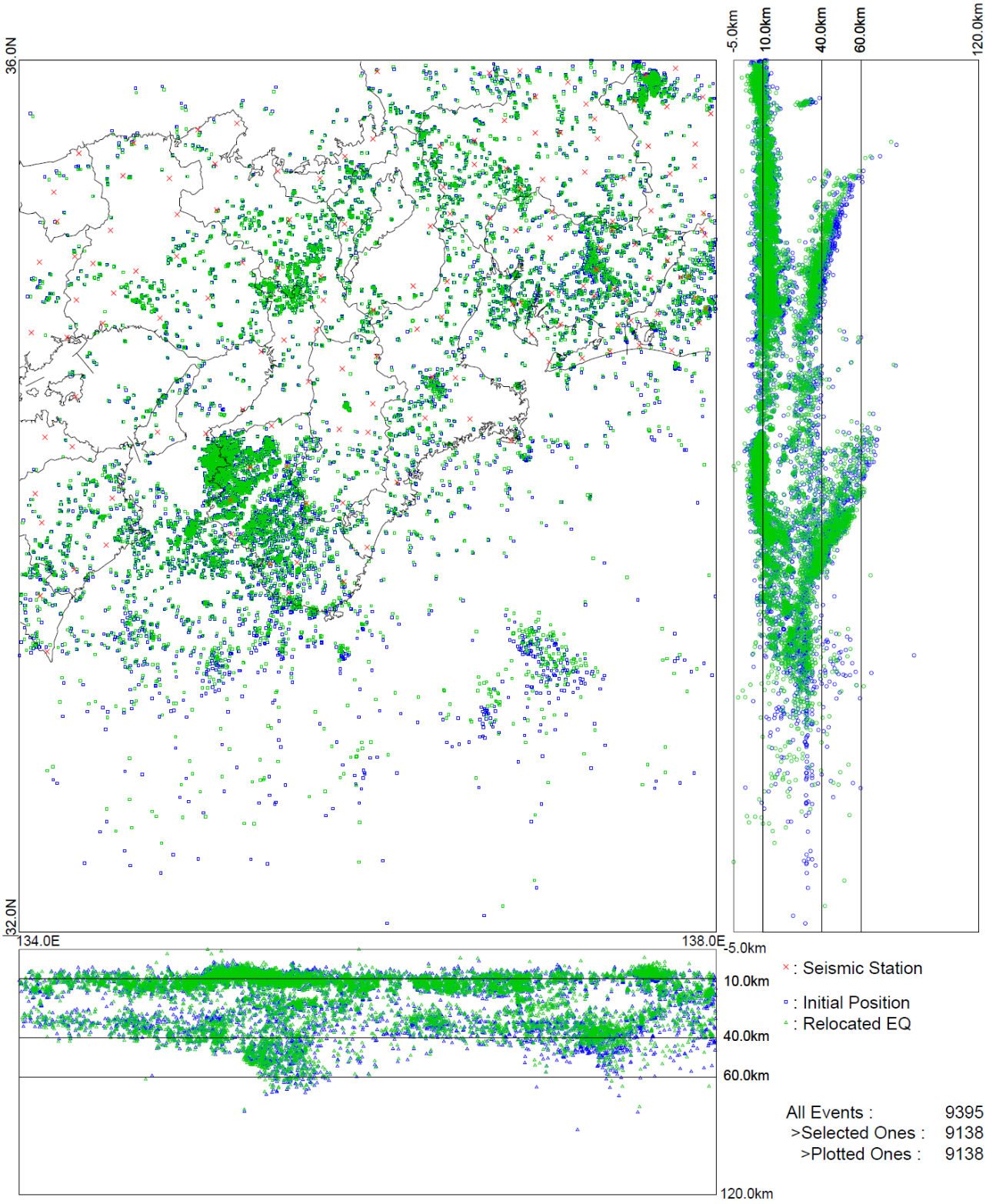
Hypocenter determination in 3-dimensional velocity structure based on the travel-times calculated by the shortest path method

*Shoji SEKIGUCHI[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

最短経路法を３次元不均質構造の走時計算に適用し、その計算結果をもとに震源決定を行う手法を開発したので、紹介する。 最短経路法の特徴として、ローカルな最小値に陥ることなく走時が計算できることがあげられる。特に３次元不均質構造の場合、多くのローカルな最小値が発生する可能性があり、また、それを事前に予測し回避することは通常の波線計算手法のみでは難しい。たとえば、日本地震学会2019年度秋季大会S01-P02（関口）においてはチェッカーボードパターンの２次元速度構造に最短経路法とPseudo-Bending Methodを適用し波線経路が一致しないことを示している。 一方、最短経路法のデメリットとしては、一度に対象領域全部の走時を計算するため、計算に時間がかかる点である。そこで今回は、あらかじめ各観測点を震源として対象領域全体の走時を計算しその結果をスプライン関数として保存することにし、実際の震源再決定の際には、保存したスプライン関数をメモリ上に呼び出し、使用することにした。そのことにより震源再決定の処理時の計算時間の大幅な短縮が可能となった。なお、最短経路法の代わりにPseudo-Bending Methodを走時計算に適用したケースはすでに日本地震学会2017年度秋季大会S02-P02（関口）で報告している。 計算結果を図に示す（緑色シンボル）。３次元速度構造はMatsubara & Obara (2011)を使用した。Ｐ波Ｓ波の読み取りデータはHi-netの2010年１年間のものである。比較のためHi-netのルーチン処理（１次元速度構造）により決定された震源も示す（青色シンボル）。初期震源はルーチン処理の震源を用いた。観測点の実際の高さをそのまま計算にとり入れるために高さ5kmまで速度を外挿して領域を拡張している。それ以外の観測点補正は考慮していない。ルーチン処理結果と今回の計算結果を比較してみると、ほぼ一致しているが、詳細に見てみると、ルーチン処理では南の海域下でよく決まらないために深さが固定されてしまった地震が散見されるが、今回の結果ではばらつきは大きいが位置は決められている。また、東海・中部地方下の沈み込むフィリピン海プレートに対応する地震分布をみると、今回の結果の方が浅く決まっている。地震の上の領域の速度が遅いなどの３次元構造の影響であろう。なお、事前の全走時の計算時間はおよそ450時間、震源再決定の計算時間は全イベントで4秒、平均走時残差は初期値0.407秒から0.330秒へ減少した。計算機諸元は以下の通りである。 CPU : Intel Xeon E-1650 v3 3.5GHz、 OS : Ubuntu 20.4.2、 Memory : 64G、 外部保存装置：SSD。
次に（図には示していないが）計算走時をPseudo-Bending Methodと比較する。１次元速度構造では、モホ面付近の速度急増域で地表に返ってくる波線によって形成されるtriplication付近で波線が一致しなくなることにより走時の差が発生する。それ以外の領域で走時はほぼ一致している。３次元速度構造の場合は、相当に広い範囲で一致しない。おそらく波線経路の違いによるものと思われる。したがって、正確な走時の計算値を得るために、計算時間はかかるものの最短経路法を用いる意味はあるだろう。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Examination of centroid moment tensor analysis using S-net

*Hisanori KIMURA[1], Youichi ASANO[1]

1. NIED

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)をうけて、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)が整備された。S-netには、加速度計が接続されていることから、セントロイドモーメントテンソル(CMT)解析への活用が期待される。特に、S-netの導入によりカバレッジが向上し、CMT解析の精度が向上する可能性がある。一方、即時震源パラメータ解析システム(Accurate and QUick Analysis System for Source Parameters; AQUA)では、M4程度以上の地震を対象として、地震の位置、規模、およびモーメントテンソル(MT)等の震源パラメータを高精度に自動決定してきた。そこで、AQUAのCMT解析へのS-netの適用可能性について検討した。
解析にあたって、まずデータの品質を確認した。ランニングスペクトルの画像表示より、加速度計2の Low gain (以下、A2L)で長周期帯でのノイズレベルが最も低かった。また、遠地地震による観測波形を近傍の広帯域地震観測網(F-net)と比較し、0.01-0.03Hzの帯域では同等の波形が再現されることを確認した。このため、S-netのA2Lについて、特段の特性補正は行わず使用することとした。
CMT解析は、検討の結果、以下のように実施した。まず、F-netのみを用いてセントロイドの水平位置を固定したMT解を決定した(AQUA-MTとする)。次いで、AQUA-MTのセントロイド時刻・深さに固定して、F-netおよびS-netの各点ごとのMT解を得た。これを元に、観測点方位毎に品質(Variance Reduction; VR)の高い点を、F-net最大10点、S-net最大10点まで選択し、セントロイド位置を探索しCMT解を決定した。セントロイド位置の探索は、以下の点を除いて、現行のAQUAと同じである。S-netのデータは、Takagi et al. (2019)のパラメータを用いて回転した後、オフセット除去、バンドパスフィルターを施し、2回積分して変位波形とした。この時、各点ごとMwがAQUA-MTのMwより0.5以上大きくなった点は除外した(詳細は後述)。帯域は、0.02-0.05Hzおよび0.01-0.05Hzを検討した。
S-net内および近傍で発生した地震(最大Mw7.0)を解析した結果、およそMw5.5以上の場合に、5点以上のS-netを含むCMT解が得られた。
S-netの各点毎の解析結果は、震央の近傍でMwが不自然に大きな値をとる傾向がみられた。こうした傾向について、様々な要因を検討したところ、地震動そのものの加速度ではないセンサーの回転に起因することが分かった。地震前後の加速度の平均値からセンサーの回転角度を推定すると、回転角度が大きいほどMwが過大評価される傾向がみられ、Mw6.8以上の地震では、回転角がおよそ$1x10^{-2}$°以上で観測点毎のMwは0.5程度以上の増加となった。Takagi et al. (2019) によると、PGAが大きいほど回転角も増大するため、震央に近くPGAが大きいほど回転が大きくMwも過大評価されると考えられる。そこで、震央距離範囲は現行のAQUAと同じとし、さらに各点ごとのMwが0.5以上大きい観測点は除外することとした。
帯域については、0.01-0.05Hzより、0.02-0.05Hzの場合に、S-netが含まれるCMT解が多く得られた。これは、長周期ほどS-netのノイズレベルが高いためと考えられる。
得られた結果をAQUAと比較したところ、Mwおよび発震機構解については、ほとんど同じ結果が得られた。セントロイド深さについては、S-netを入れた場合に、浅くなる傾向が見られた。例えば、2021年3月20日宮城県沖の地震(Mw6.9)では、深さ58 kmと推定された。これは、AQUA(65 km)やF-net(62 km)より浅く、プレート境界を表すと考えられる震源分布に近い。発震機構解や震源分布から、この地震はプレート境界の地震と考えられることから、S-netを導入することにより、もっともらしい深さに近づいた可能性がある。
CMT解析へS-netの導入を検討したところ、およそMw5.5以上の地震では有効であること、また、Mw7.0程度まではカバレッジの改善により精度が向上する可能性が示された。一方、これより大きい地震では、今回より長周期の帯域が適していると考えられる。現時点では、解析に用いた地震が十分でないため、引き続き検討が必要である。

© The Seismological Society of Japan

Development of a realtime monitor system for WIN system using the MQTT protocol

*Hiroshi TSURUOKA[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

WINシステムは。多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムで、UNIX上で動作する多くのプログラム群から構成されている。地震観測テレメータシステムにおいては、その波形フォーマットを含め、リアルタイムデータ交換のためのシステムとして日本においては広く利用されている。プログラム群の中には、データ交換の際に利用される共有メモリ上のデータをテキストで表示するプログラムshmdumpがあり、これと連携したTcl/Tkで作成された波形表示プログラム群 (shmx、 shmz、 shmck) もパッケージには同梱されている。波形表示プログラムは、Tcl/Tkで記述されているためマルチプラットフォーム対応となっているが、Webプラットフォームには対応していない。Webによるリアルタイム表示システムは存在しているものの、１秒ごとに波形表示用のファイルを作成して、それらをJavaScriptのプロットライブラリによって表示するシステムなどが開発されている。今回M2MやIoTにおいてよく利用されているMQTTプロトコルを用いた簡便なWINシステム用リアルタイム表示システムを開発した。

MQTTとは

Message Queueing Telemetry Transport (MQTT) は、機械同士が通信を介して情報をやり取りする M2M (Machine-to-Machine) や家電や自動車など多種多様なモノがインターネットにつながりお互いに情報をやりとりする IoT (Internt of Things) においてよく利用されているプロトコルであり、シンプル、軽量、省電力という特徴を持っている。今回はその実装アプリであるmosquitto を利用した。MQTTでは、パブリッシュ/サブスクライブ型モデルを採用しており、１対１はもとより多対多のやり取りが可能なプロトコルであり、応用性に富んでいる。

リアルタイム波形モニタリングシステム

地震データのやり取りは、MQTTプロトコルを採用し、リアルタイムの波形表示については、http://smoothiecharts.org にあるJavaScript ライブラリの smoothie.js を採用した。さらに、mosquitto broker への配信データフォーマットとしては、smoothie.js でのプロットがシンプルかつダイレクトであるため、WINテキストフォーマットをjson形式に変換して送信を行なった。

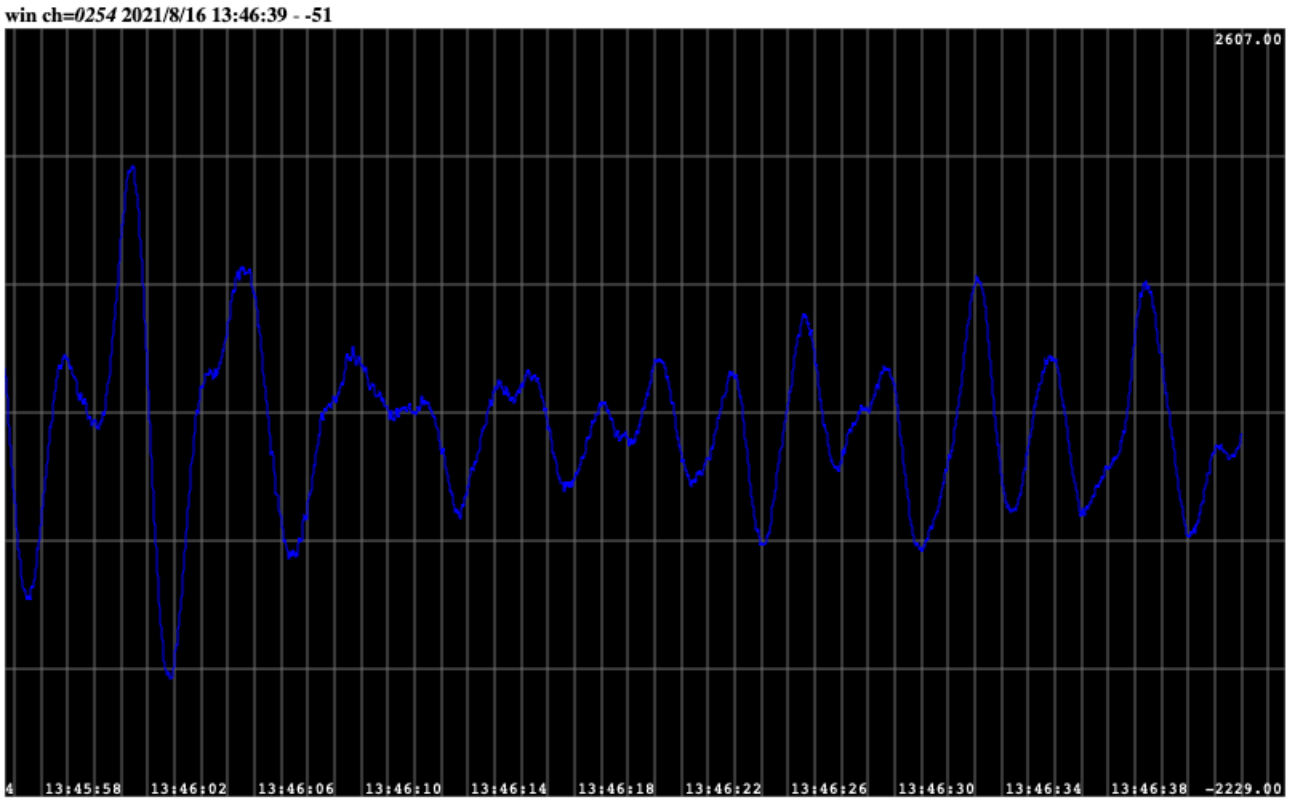
実際例

実際に開発されたシステムのスナップショットを示した。ブラウザの負荷は非常に軽く、スマートフォンなどのブラウザでも表示できることを確認した。

今後の展望

今回は、mosquitto を利用したために、データ伝送はアスキー形式のみの対応となっているが、WINパケット（バイナリ）を送信できることがデータ転送サイズ等の面からも効率的である。また、MQTTプロトコルを採用することによりデータ送受信にアクセス制限をかけるなどが可能であり、より柔軟なデータ送受信を実現できる。また、MQTTプロトコルはrecvt/send_raw に変わって利用できる可能性がありその性能評価なども今後実施したい。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Seismic activity in the central-southern part of Tohoku District - a preliminary report

*Tomomi OKADA[1], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Shigeki Horiuchi[9], Kei Katsumata[2], Mako Ohzono[2,4], Masahiro Kosuga[3], Takuto Maeda[3], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Group for the aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. Tohoku University, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. ERI, University of Tokyo, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kyushu University, 8. Kagoshima University, 9. Homeseismo

1. はじめに

宮城県中部～山形県南部～福島県北部にかけての領域は、長町-利府線断層帯、福島盆地西縁断層帯、双葉断層帯などの断層帯が複雑に分布している。蔵王山や吾妻山などの火山も分布している。一方で、地震活動は東北地方の他地域に比べると低調であるが、地震観測網が比較的荒いことも考えると、充分な理解がなされているとは言えない。 これまで観測・理解が手薄だった領域の強化として、宮城県中部～山形県南部～福島県北部において臨時地震観測網を整備した。本稿では観測の序報について述べる。

2. 観測概要

観測点間隔は、地震発生層の厚さ（約10-20km）を考慮し、既設の定常観測網・臨時観測網と併せて約10km程度とした。 地震計は1Hzないし2Hzの短周期地震計を使用している。データは携帯電話回線を利用したテレメータ方式により伝送されている。 得られた連続波形データを定常地震観測網や他の臨時観測点と合わせて、自動処理（堀内・他）により、地震の同定、震源決定を行なった。

3. 初期結果

観測網の設置が概ね完了し、自動処理の改良も完了した、2020年8月～2021年7月までの期間について、震源決定結果などの確認を行なった。

3.1 震源分布

本研究で実施した臨時観測および自動処理により同定されたイベントを確認し、気象庁一元化震源カタログに記載されていない地震を確認した。それらは、双葉断層付近や長町-利府線断層帯一福島盆地西縁断層帯のおよそ西側（上盤側）の他、それらの間の領域（宮城県南部、丸森町付近）にも見られる。

3.2 メカニズム解

本研究で実施した臨時観測および自動処理により、対象領域内でメカニズム解を推定した。方法はHASH (Hardebeck and Shearer, 2002) である。横ずれ型ないし逆断層型でP軸は東-西または北西-南東方向となる。

3.3 地震波速度構造

対象領域において、地震波速度トモグラフィ(Zhao et al., 1992) を行った。初期構造はOkada et al. (2015)である。本研究で実施した臨時観測のデータを用いることで対象領域の解像度が上がることが確認できた。 予備的な成果として、例えばOkada et al. (2015)により、断層帯深部や震源域付近に地震波速度低速度域が見いだされている。 １）長町-利府線断層帯および福島盆地西縁断層帯に沿って、上部・下部地殻に地震波速度低速度異常が分布する、 ２）蔵王山や吾妻山の直下の深部低周波地震震源域付近にはマグマ供給系に対応すると考えられる地震波低速度域が存在する、ことが得られている。今後、データの蓄積に伴い、速度構造の改良を行う予定である。

© The Seismological Society of Japan

Real-Time Calculation Method of Seismic Intensity Applicable to Low-Rate Sampled Acceleration Record

*Takashi Hirai[1], Yuki Yoshioka[2]

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

1. はじめに

本稿では、功刀・他 (2008) および功刀・他 (2013) による時間領域の近似フィルターを用いて加速度記録からリアルタイムで計測震度相当値を算出する手法について、既存のアルゴリズムが適用不可能な低いサンプリング周波数の加速度記録や、さらには不等間隔でサンプリングされた加速度記録に対しても適用可能となる新たな計算方法を提案する。この手法は、今後活用が広がると考えられるMEMS加速度センサーなどを用いた簡易な震動計において、処理系の演算性能やサンプリングの安定性が限定されている場合などに有効である。

2. 既存のリアルタイム震度演算法の概要

功刀・他 (2008) は、平成8年気象庁告示第4号に定められる計測震度算出に用いられる周波数フィルターと極力同じ振幅特性を持ち、かつ因果的な無限インパルス応答関数を有する近似フィルターを設計した。功刀・他 (2013) は、これをさらに改良したものである。リアルタイム震度演算は、加速度記録に対して時間領域の処理によりこのフィルターを施したうえで3成分を合成した振幅波形を作成し、適当な時間間隔で過去60秒間の振幅波形に対して継続時間判定処理を行って計測震度相当値を得るものである。

従来の演算法では、時間領域のフィルター処理を実装するにあたり、ラプラス変換形式で表現されたフィルター伝達関数から双線形変換によりz変換形式の伝達関数を導き、等間隔でサンプリングされた加速度記録に対して漸化式を適用することでフィルター波形を得ることとしている。この方法は簡便ではあるが、双線形変換にともなう周波数ひずみの影響などにより、加速度記録のサンプリング周波数によっては漸化式の自己回帰項が不安定な特性を示すことがある。具体的には、功刀・他 (2013) のフィルターの場合、サンプリング周波数がおよそ77 Hzを下回ると不安定となり、フィルター波形が発散する。

3. 提案手法の概要

たとえばサンプリング周波数50 Hzの加速度記録に対してリアルタイム震度演算を行う場合、そのまま時間領域の処理を適用するとフィルター波形が発散するため、線形補間などの方法により100 Hzサンプリングの加速度記録としてから演算を行うことも考えられる。しかし、ここではそうした方法を用いず、沢口 (2018) を参考に、もとのサンプリング周波数のまま演算を行う方法を提案する。

功刀・他 (2013) のフィルターは6つの双二次フィルター（ラプラス変換形式の伝達関数で分母が s の2次式となっているもの）を直列に接続した形となっている。各段階のフィルターについて、まず、入出力信号間の関係を規定する2階微分方程式を書き下す。次に、これを対角正準形式の状態空間表現で表すことにより、独立な2本の1階微分方程式の組の形にする。さらに、入力信号はサンプル時刻間で線形的に変化すると仮定して、これらの微分方程式を解析的に積分することにより、状態ベクトルおよび出力信号の時系列を得る。このとき、サンプリング間隔が一定である必要はない。最終的には状態ベクトルの時間変化が漸化式の形で表現されるが、自己回帰項はサンプリング間隔の長短にかかわらず常に安定な特性を示す。

図1に、提案手法を2004年中越地震のK-NET小千谷 (NIG019) 観測点の強震記録（サンプリング周波数100 Hz, 計測震度6.732）に対して適用した結果を示す。加速度波形 (a) (b) (c) は東西成分のみを示しているが、計測震度相当値 (d) は3成分を合成した結果から算出した。従来法と提案手法によるフィルター波形はよく一致しており、計測震度相当値も括弧内に示した最大値を含めて同等となっている。図2に、同記録のサンプリング周波数を50 Hz, 10 Hzとしたときの提案手法の適用結果を示す。サンプリング周波数の変更は、単にデータを間引くことによって行った。フィルター波形・計測震度相当値ともに安定して得られていることが分かる。サンプリング周波数10 Hzの場合はエイリアシングの影響を無視できないが、計測震度相当値は極端に外れた値

© The Seismological Society of Japan

とはならなかった。

4. 課題

功刀・他 (2013) による近似フィルターには複数のパラメータが含まれるが、その値は双線形変換に基づく演算法を用いる前提で最適化されている。提案手法に対しては、今後あらためて調整を行う必要があると考えられる。

参考文献

功刀卓, 青井真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之, 震度のリアルタイム演算法, 地震 第2輯, 60, pp.243-252 (2008)
功刀卓, 青井真, 中村洋光, 鈴木亘, 森川信之, 藤原広行, 震度のリアルタイム演算に用いられる近似フィルタの改良, 地震 第2輯, 65, pp.223-230 (2013)
沢口義人, 不等間隔時系列に対する状態空間フィルタによる心拍変動周波数解析の高速化, 自動制御連合講演会講演論文集, 61, pp.41-44 (2018)

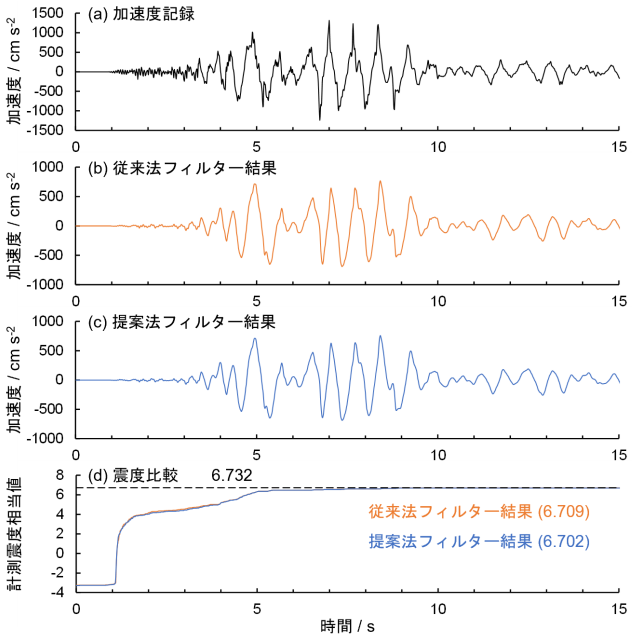


図 1　(a) 新潟県中越沖地震 NIG019 EW 加速度記録に対して
(b) 従来法と (c) 提案法のフィルターを施した結果と (d) 計測震度相当値の比較

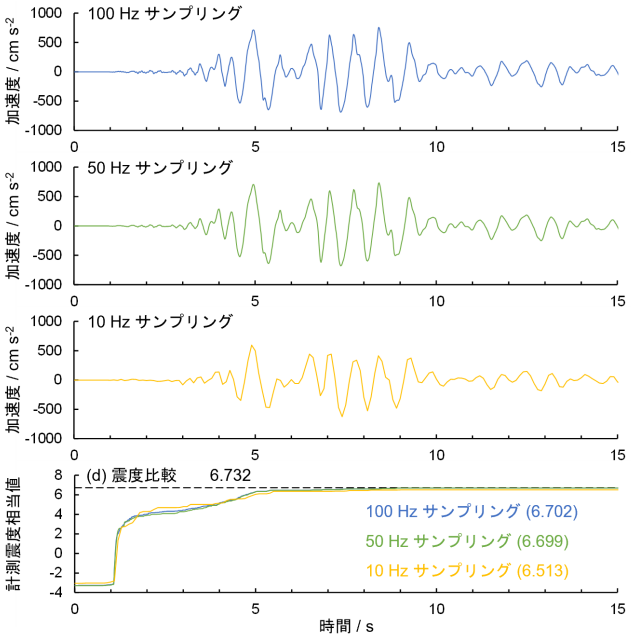


図 2　新潟県中越沖地震 NIG019 EW 加速度に対して
(a) 100 Hz, (b) 50 Hz, (c) 10 Hz サンプリングとしたときの提案法による
フィルター結果と (d) 計測震度相当値の比較

© The Seismological Society of Japan

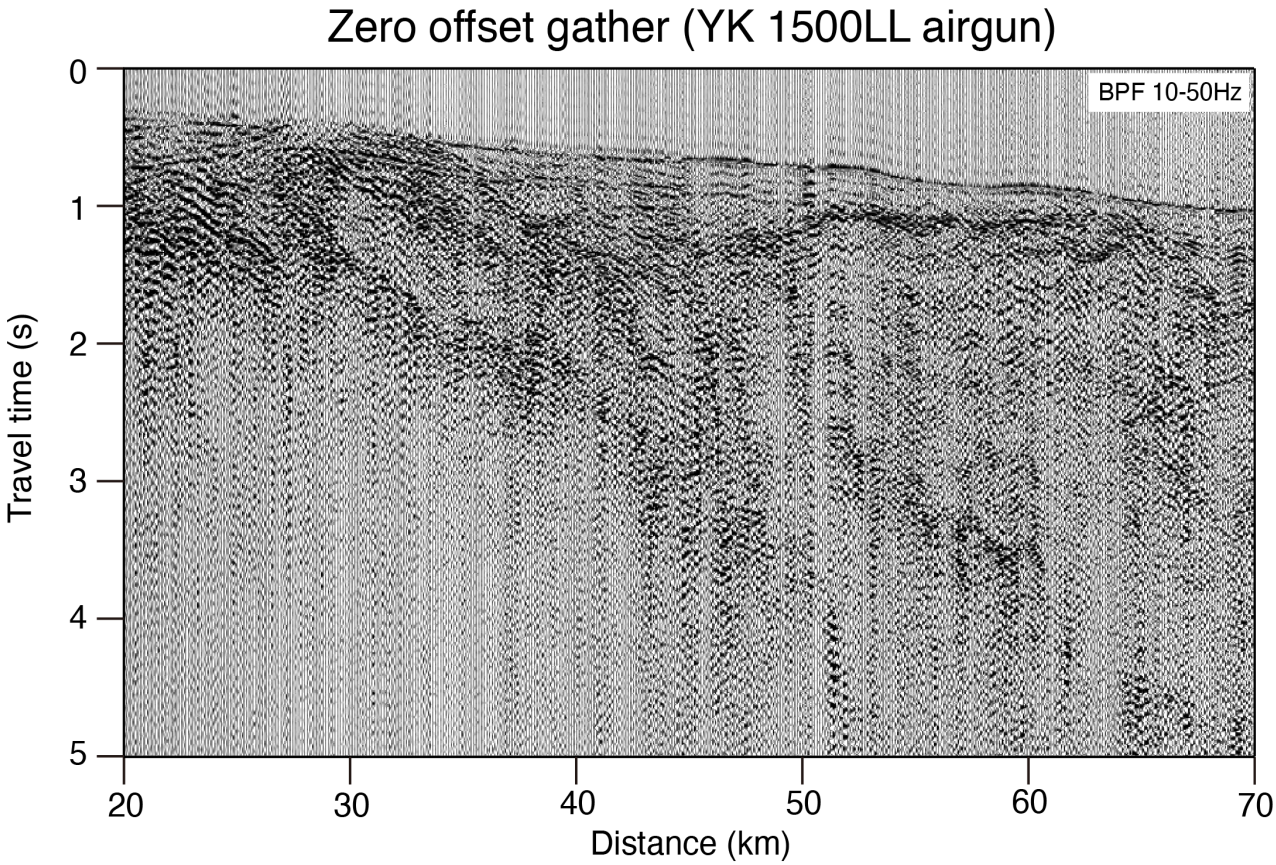
Seismic reflection survey using seafloor optical cable and DAS measurement off Sanriku

*Hiroki Takano[1], Masanao Shinohara[2], Rie Nakata[2], Eiji Kurashimo[2], Tatsuya Ishiyama[2], Kimihiro Mochizuki[2]

1. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

近年、分散型音響センシング（DAS : Distributed Acoustic Sensing）計測が地震学の観測にも用いられてきている。DASは光ファイバに送り込まれたレーザーパルスが光ファイバ内の不均質部で散乱して発生する後方散乱光を観測することによって光ファイバに沿ったそれぞれの部分での歪みを計測する。DAS観測のメリットは数十キロにわたるケーブルにおいて、チャンネル間隔が数メートル～数十メートルといった高密度な観測を実施できることである。東京大学地震研究所が所有する岩手県釜石市から約120km沖合まで敷設されている海底ケーブル内の２本の未使用光ファイバを用いてDAS観測を行いながら、海底ケーブルの敷設ルートを測線とした構造探査実験を行った。構造探査は2020年11月5日～7日に実施し、エアガンの発震には大気海洋研究所白鳳丸を用いた(KH-20-11）。使用した制御震源はBolt社1500LLエアガン(チャンバー容量1500cu.in.) 4台とSercel社GIガン(チャンバー容量355 cu.in.)2台である。陸上局舎内において、2本のファイバの末端にそれぞれ計測器を接続し、同時DAS観測を行った。DASの収録はサンプリングレート500Hz、チャンネル間隔5m、ゲージ長40m、観測総距離100km（一部80km）で行った。1500LLエアガンの測線は、釜石市の沖合の約10km地点から海底ケーブル敷設ルートに沿い、ケーブルの終端を超え釜石市から東に約200kmの地点までである。発震間隔は40秒であり、発震総数は、1910発である。このうち、725発が海底ケーブル敷設ルート上で発震されている。GIガンの測線は、釜石市の沖合の約10km地点から海底ケーブル敷設ルートに沿い、釜石市から東に約100kmの地点までである。GIガンについては、同一測線を往復して、発震を行った。発震間隔は20秒であり、発震総数は、4066発である。このうち、3291発が海底ケーブル敷設ルート上で発震されている。また、エアガン発震時の平均航行速度は約4.5knotsであった。DAS計測に加えて、1500LLエアガン発震時に長さ150mの2chミニストリーマケーブル、GIガン発震時に総チャンネル48chで長さ1400mのマルチチャンネルストリーマケーブルを曳航して、エアガンを観測した。この実験では、海底において、5mの間隔で、全長80km以上の収録が行われており、DAS計測記録による反射法地震探査処理が適用可能である。しかしながら、DASを用いた海域における反射法地震探査の前例は少ないため、海底ケーブルにより収録されたDASデータへの反射法地震探査処理の適用、さらに高密度データを活かした高解像度反射断面の作成が本研究の目的である。収録されたデータでは、2つのDAS計測データ双方において、エアガンからの地震波が観測されており、2つの計測器間に大きな差はなかった。共通発震点記録では、DAS計測はケーブル方向の成分に高い感度を持つため、エアガン直下の記録では振幅が著しく小さくなる。また、エアガンから震央距離約2.5km以上になるとP波に加えてPS変換波と思われる相の到着も確認できるため、S波反射断面図が作成できる可能性がある。今後は通常の反射法処理を適用して、構造断面を作成する。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

A coupling degree of optical fiber cable on seafloor using earthquake travel time recorded by distributed acoustic sensing (DAS)

*Satoshi KATAKAMI[1], Eiichiro ARAKI[2], Narumi TAKAHASHI[3], Shunta NODA[1], Naoyasu IWATA[1], Masahiro KORENAGA[1], Yasutomo YAMAUCHI[1]

1. RTRI, 2. JAMSTEC, 3. NIED

Distributed Acoustic Sensing（DAS）は、光ファイバーケーブル（Optical Fiber Cable: OFC）に沿ったひずみ変化を測定する手法であり、低コストで長期モニタリングが可能な地球物理学に適用可能な計測ツールとして期待されている。一方、記録された信号の振幅の絶対値を利用するためには、OFCと設置面のカップリングを考慮する必要がある。室戸岬沖の海底OFCを用いたDAS観測によって観測された信号の振幅は、200m程度の距離でもDASチャネル間で大きく異なり、特に室戸岬から20-25km先では振幅の大小（1-2桁程度の差）が200m程度の間隔でbimodalに変化する（Ide et al., 2021）。これはOFCと海底のカップリングに起因すると考えられている。したがって、DASの記録からOFCの敷設環境を評価する手法検討として、DASを用いてOFCに沿って記録された地震動の走時の空間分布から、海底面に敷設されたOFCのカップリングを含めた敷設環境を推定した結果を報告する。

海洋研究開発機構（JAMSTEC）は、室戸岬沖で包括的な海底監視システムを開発し、6本のシングルモードファイバーを備えた海底ケーブルは、陸上と海底の観測機器を接続している（Momma et al., 1997）。DASの観測には、海岸から伸びるケーブルの50km区間においてAPセンシング社製の機器を使用している。観測は時間サンプリング間隔500Hz、空間サンプリング間隔5.10m、ゲージ長40.8mで実施し、全チャンネル数は10789である。 2021年1月から3月に室戸沖に設置されたOFCのDAS観測によって記録された西日本で発生した地震に着目し、地震波形のチャンネル間の波形相関およびlag timeを計算した。まず、各チャンネルで記録された地震波形のP波の立ち上がり部を含む2秒間の波形を使用し、4-10Hzでバンドパスフィルタを適用した。次に隣り合うチャンネル同士で相互相関を計算し、係数が最大値をとる際のlag timeを100ch毎に積算することで（50chのoverlap）、OFCに沿ったlag timeの変化から海底OFCのカップリングを含む敷設環境を推定した。

徳島県下（深さ7km）で発生したMj4.0の地震に関して、室戸岬から約20-25km先（4000-5000ch）のlag timeを100ch毎に積算した結果を示す。4000-5000chにおける海底OFCはおおよそ南北方向に敷設されているため、OFCの北側で発生した地震に対するDAS記録はOFCに沿ってみかけ速度は正になる。一方、4000-4060ch、4100-4170ch、4480-4500ch、4780-4810ch、4940-4960chではみかけ速度が負を示した。さらに、みかけ速度が負の区間における地震波の位相は、隣のみかけ速度が正の区間の地震波の位相と逆（polarityが逆）を示した。また、4100-4170ch、4780-4810chにおいてはDASの信号の振幅が小さい区間（カップリングが弱いと考えられる）においてみかけ速度が負になっている。次に、同様の地震・チャンネルにおいて、地震波形のS波の立ち上がり部を含む2秒間で相互相関を計算しlag timeを100ch間で積算した。みかけ速度が負になったチャンネル区間はP波のものと同様だが、polarityが逆転したのはカップリングが弱いと考えられる区間のみであった。

以上の結果から海底面におけるOFCの敷設環境を推察すると、みかけ速度が負になる区間ではOFCが谷を下り、水深が深い箇所にあるOFCの方が地面から入射してくる波をより早く検知していると考えられる。一方、カップリングが弱い区間では、OFCが谷部をまたぐなどして水中に浮いていると考えられる。S波から水中へ変換した音波（疎密波）が水中を伝播し、水中に浮いたOFCにて記録されていると考えらえる。水の体積弾性率は0℃で約2.0MPa、SiO2のヤング率は約75GPaであり1～2桁程度異なるため、記録される振幅の違いは歪を計測する媒質の違いを表すと推測される。また走時ではS波が到来している時間だが、変換した疎密波が記録されているためpolarityが逆になったと考えられる。ちなみに、海底下堆積層におけるP波地震波速度は、浅部において1.5km/sを示し（Nakanishi et al., 2018; Tonegawa et al., 2021; JpGU）、水中の音波の伝播速度（1.5km/s）と同程度であるため、伝播した媒質の違いによるみかけ速度への影響は小さいと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S04. Tectonics

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P3 (ROOM P)

[S04P-01] Relationship between tectonic tremors and 3D distributions of thermal structure and dehydration in the Alaska subduction zone

○Kaya IWAMOTO[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[2,1] （1.Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2.Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Relationship between tectonic tremors and 3D distributions of thermal structure and dehydration in the Alaska subduction zone

*Kaya IWAMOTO[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[2,1]

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

１. はじめに

アラスカ沈み込み帯では、1964年アラスカ地震（Mw9.2）に代表される海溝型巨大地震や、スロースリップイベント・深部低周波微動などのスロー地震がプレート境界付近で発生している。この地域では、北米プレートの下に太平洋プレートが沈み込んでいる。その東端では、ヤクタットテレーンと呼ばれる海台が存在し、沈み込んでいることが近年の研究で明らかになってきた。ヤクタットテレーンは、太平洋プレートとはテクトニックセッティングが大きく異なり、堆積層や海洋地殻がそれぞれ6㎞、25㎞と非常に厚く、深部低周波微動が発生し(Wech, 2016)、その直上には火山が存在していない、といった特徴がある。岩本他 (2021, JpGU)ではヤクタットテレーンと太平洋プレートの同時沈み込みに伴う3次元熱対流数値モデルを用いて、1964年アラスカ地震の震源域と長期的スロースリップイベントの発生域の温度範囲を定量的に推定した。

本講演では、岩本他 (2021, JpGU)で得られた3次元温度構造と含水鉱物の相図を用いて、スラブ上面付近の含水量分布を求め、アラスカ沈み込み帯で発生する深部低周波微動の発生との関連性について議論する。

２. モデル設定

本数値シミュレーションでは、岩本他 (2021, JpGU)に従い、Mathews et al. (2016)のプレート回転モデルを用いてプレートの沈み込み史を考慮し、沈み込み速度を与えた。さらに、新たに、太平洋プレートとヤクタットテレーンで、堆積層や海洋地殻の厚さを区別して与え、18Maから現在までの温度場・流れ場の時間発展問題を差分法を用いて解いた。水平面内において沈み込み方向にx軸を、海溝軸に沿ってヤクタットテレーン側から太平洋プレート側に向かってy軸を、鉛直下向きにz軸をとり、それぞれ、モデルサイズは600 km, 700 km, 200 km、グリッド間隔は8.6 km, 10 km, 3.3 kmとした。流れの境界条件は、+x, -x, +y, -y, +zの境界面では流れは透過条件とし、-zの境界面（モデル表面）では流れはないものとした。温度の境界条件は、+x, +y, -y, +zの境界面では断熱条件を与え、-xの境界面の温度はプレート冷却モデル(Grose, 2012)を用い、各タイムステップで深さの関数として温度分布を与えた。-zの境界面の温度は0℃と仮定した。数値シミュレーションで得られた現在(0Ma)の温度場は、キュリー点深度分布や地殻熱流量の観測データと比較し、観測値と計算値の残差が小さくなるようなモデルを構築した。含水量分布の計算には、海洋堆積物はvan Keken et al. (2011)のタービダイトの相図を、海洋地殻とスラブマントルは、それぞれTatsumi et al. (2020)のMORBと超苦鉄質岩の相図を用いた。

３. 結果と考察

最終的に得られた0Maでの数値シミュレーション結果から、海溝側では沈み込み角が小さく、浅く平らなスラブ形状が続いているため、その上面付近の温度場に関しては、太平洋側に比べヤクタットテレーン側では低温の領域が内陸部まで広がる傾向がみられた。また、内陸側ではプレートの沈み込み角が急激に大きくなるため温度勾配が大きくなった。本数値シミュレーションで得られた温度-深さの関係と、海洋堆積物や海洋地殻中に含まれる前述の含水鉱物の相図を用いてスラブ上面付近の含水量分布と、沈み込み方向の単位距離当たりの脱水勾配を求めた。

その結果、現時点での暫定的な結果として、スラブ上面の深部低周波微動の発生域付近において、海洋堆積物中(スラブ上面から0~6 km)ではphengite lawsonite blueschist相からamphibole phengite zoisite eclogite相への脱水分解反応により約0.05wt%/kmの脱水勾配が、海洋地殻中(スラブ上面から6~31km)ではblueschist相からamphibole eclogite相への脱水分解反応により約0.10wt%/kmの脱水勾配が見られた。以上

© The Seismological Society of Japan

のことより、これらの脱水のうち、いずれか、または両者が深部低周波微動の発生に関与している可能性があることが示唆される。また、太平洋プレート側で深部低周波微動が発生していない理由として、太平洋プレートでは、ヤクタットテレーンに比べて、海洋堆積物や海洋地殻の厚さが薄いため、これらの層に含まれるスラブ内の含水量の総量が少ないことや、脱水分解反応が起こったとしても深部の高温の塑性領域での脱水となるため、深部低周波微動が起こりえないといった可能性が考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P4 (ROOM P)

[S07P-01] The location of the inner core hemispherical boundary in the north polar region

○Tadashi Iwasaki[1] （1.kyoto university ）

3:30 PM - 5:00 PM

[S07P-02] Surface wave fitting for Vs structure of the oceanic crust and upper mantle - Development of the initial model using shorter period waveforms -

○Haruka NAGAI[1], Nozomu Takeuchi[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Hajime Shiobara[1], Takehi Isse[1], Hiroko Sugioka[2], Aki Ito[3], Hisashi Utada[1] （1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Kobe University, 3.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

The location of the inner core hemispherical boundary in the north polar region

*Tadashi Iwasaki[1]

1. kyoto university

1. はじめに

内核表層の詳細な構造の把握は、外核の対流、内核の成長過程や深部構造を理解する上で重要である。Tanaka and Hamaguchi（1997) は、内核の表層100km~500kmに高速等方的な東半球と低速異方的な西半球が存在することを発見した。東西半球の違いは、その後表層100kmにも存在することがわかった（Niu and Wen, 2001）。しかし、東西半球の境界の位置や形状はいまだ議論の中にある(e.g. Waszek and Deuss 2011, Miller et al. 2013, Ibourichene and Romanowicz 2018, Iritani et al. 2019, Ohtaki et al. 2021)。本研究では、北極域ユーラシア大陸北部に最深点をもつPKIKPとPKiKPの走時差をもとに、東西半球の境界について検討する。

2. 使用データ・解析手法

本研究では、空間的に高密度なデータが利用可能なことから、IRISで収集された2013年1月から2016年6月までの北米東部の広帯域地震計のデータを用いた。震央距離130~150°を伝わるPKIKPを調査するために、インドネシア付近（緯度5.03°S~4.78°N、経度95.07°E~104.63°E）で起きた震源の深さ38~151km、Mw 5.6~6.6 の7つの地震を使用した。IRISから取得した上下動成分の波形データは、地震計の応答関数を取り除き、地動速度に対して0.5~2 Hzのバンドパスフィルターをかけて使用した。 本研究では、PKiKPとPKIKPの観測走時差とAK135モデル (Kennett et al., 1995)の理論走時差を比較し、両者の違い（δt）の空間分布を調べる。PKiKPとPKIKPの理論走時はTauP Toolkit（Crotwell et al., 1999）で算出した。PKiKPとPKIKPの観測値は、SN比改善のために震央距離幅数度内の波形をスタッキングした上で、振幅の極大値から読み取った。これには波の走時差とともにみかけのスローネスの違いが評価できる利点がある。スタッキング にはphase weighted stack法(Schimmel and Paulssen, 1997)を用いた。PKIKPと後続のPKiKPの同定には、 PKiKPとPKIKPの極性が逆になること、PKIKPの極性がGlobal CMT解と合うこと、PKiKPのみかけのスローネスがPKIKPより大きいことを条件にした。PKiKPやPKIKPの走時やみかけのスローネスがAK135から大きく外れる極大値は除外した。なお、本研究のPKIKPの波線は、AK135モデルより、自転軸から64~80°程度傾いていると考えられる。

3. 結果・議論

本研究で調査したPKIKPの最深点は、北緯60°~80°、東経70°~130°の領域に位置する。東西半球の境界が経線であるwedge model（Niu and Wen 2001, Waszek and Deuss 2011）では内核内波線の大部分が高速な東半球を通過して正のδtが予想されるが、震央距離幅2°のスタッキングによる本研究の結果では、震央距離130～150°にわたってゼロから負のδtが卓越して観測され、低速な西半球の特性を示す。この結果はIbourichene and Romanowicz （2018）とも調和的であり、東西半球の境界が北極点を通らないTanaka and Hamaguchi (1997)のようなeye-ball model（Ohtaki et al., 2021）の東西半球境界と合うようにみえる。

© The Seismological Society of Japan

Surface wave fitting for Vs structure of the oceanic crust and upper mantle
- Development of the initial model using shorter period waveforms -

*Haruka NAGAI[1], Nozomu Takeuchi[1], Hitoshi Kawakatsu[1], Hajime Shiobara[1], Takehi Isse[1], Hiroko Sugioka[2], Aki Ito[3], Hisashi Utada[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. JAMSTEC

海洋上部マントルの地震波速度構造は、グローバルトモグラフィーによって広く研究されてきたが、約50 km以浅の構造推定は難しい(例えばWoodhouse and Dziewonski, 1984)。また、近年では、海底地震計アレイのデータの位相速度解析により、アレイ直下の1次元速度構造を推定する手法が開発されている(例えばTakeo et al., 2018)。本研究では、北西太平洋に設置された広帯域海底地震計で記録された短周期(約8秒)から長周期(約200秒)に至る広い帯域の地震波形データを用いた、震源-観測点間のトモグラフィーにより、地殻からアセノスフェアまでの連続的なS波速度構造を求めることを目指す。

一般的な波形トモグラフィーは観測波形と理論波形を位相情報も含めてフィッティングをするが、短周期成分(周期約25秒以下)の活用が難しい。そこで、位相情報を含まないエンベロープのフィッティングを併用したトモグラフィーを試みる。具体的には、まずはエンベロープのフィッティングにより特に浅部構造を解像度良く制約し、得られたモデルを初期モデルとして波形トモグラフィーを実施することで、地殻からアセノスフェアまでの連続的な速度構造を推定する。

今回の発表では、エンベロープのフィッティングにより短周期成分が活用できるかどうか、並びに地殻構造や最上部マントル構造が高精度・高解像度で推定できるかどうかを調べ、適切な初期モデルが構築可能であることを確認する。

日本海溝近傍で発生したマグニチュード5.1-6.5のイベントに対する良質な鉛直動成分の波形(119トレース)を選別し、エンベロープの周期毎・群速度毎の振幅分布のダイアグラムをスタックした。また振幅ピーク位置を用いてエンベロープ振幅分布を指標化した。ブートストラップ法によりピーク位置の誤差を測定し、高精度に計測できた範囲をデータセットとした(図2)。60秒以上の長周期成分は活用が難しかったが、60秒以下の基本モード並びにオーバートーンは高精度に測定可能であることがわかった。

マントルの深さ毎のS波速度に加え、地殻のP波速度・S波速度・厚さをモデルパラメータとして推定した。地殻の各パラメータはオーバートーンや短周期の基本モードのエンベロープに異なる感度を持ち、独立に分離できることを確認した。予備的な解析では、PA5モデル(100-125 Maの太平洋下の速度構造モデル、Gaherty et al., 1996)よりも厚い地殻が推定された(8.0 km; PA5は6.8 km)。これはパスの一部が島弧地殻を通過しているためと考えられる。また地殻のP波速度はほぼ等しいがS波速度が有意に遅くなり、Vp/Vs比が大きめ(1.78; PA5は1.61)に求められた。発表では、今回求めた構造を初期モデルとして、波形インバージョンによって地殻からアセノスフェアまでの連続的なS波速度構造モデルを発表する予定である。

© The Seismological Society of Japan

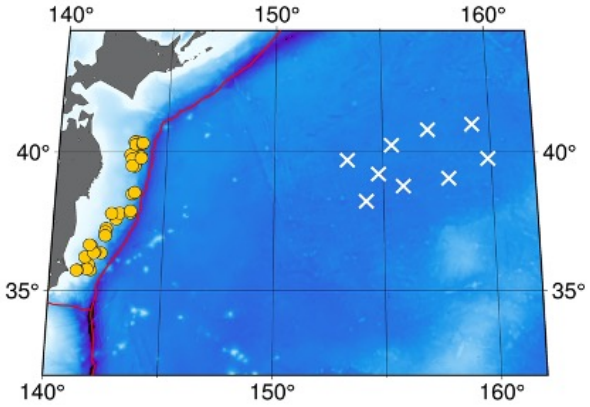


図1. 解析に用いた観測点(白十字)とイベント(黄色)の分布。

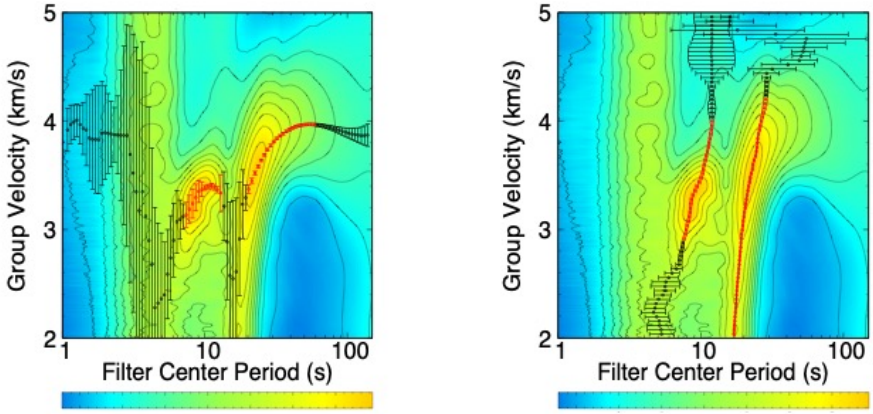


図2. 表面波エンベロープの振幅分布。各周期で振幅ピークとなる群速度(左)と
各群速度で振幅ピークとなる周期(右)。赤色がデータセットとして用いた範囲。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S08. Earthquake physics

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P5 (ROOM P)

[S08P-01] Similar aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake

○Emana Mori[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-02] Estimating the shape of the source spectrum of regular and low-frequency earthquakes in the inland area of Japan

○Masaki Orimo[1], Keisuke Yoshida[1], Taka'aki Taira[2], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1], Kentaro Emoto[3] （1.Research center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University , 2.Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, 3.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-03] The characteristics of source parameters of interplate earthquakes occurring in and around the Raukumara Peninsula in the North Island, New Zealand

○Kazuya TATEIWA[1], Calum Chamberlain[2], Martha Savage[2], Tomomi Okada[1] （1.Tohoku University, 2.Victoria University of Wellington）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-04] Source process of volcano tectonic earthquakes during the earthquake swarm off the east of Izu Peninsula in 2006

○Yukako Tanaka[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-05] Seismic radiation process of the 2011 Tohoku earthquake inferred from ocean bottom pressure records above its source region

○Hisahiko KUBO[1], Tatsuya KUBOTA[1], Tatsuhiko SAITO[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-06] Initiation of the M~9 earthquake cycle: the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition

○Keisuke YOSHIDA[1], Toru Matsuzawa[1], Naoki Uchida[1] （1.Tohoku University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-07] Preparation process for a Miyagi-Oki earthquake following the 2011 Tohoku-Oki earthquake

○Ryoko NAKATA[1], Ryota Hino[1] （1.Tohoku University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-08] Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

○Yuko KASE[1], Yumi URATA[1] （1.Geological Survey of Japan）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-09] Simulation of dynamic earthquake sequence in a linear poroelastic medium

©Seismological Society of Japan

○Hiroyuki NODA[1] （1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-10] The influence of fault-strength heterogeneity on earthquake cycle in a viscoelastic medium

○Makoto Yamamoto[1], Hiroyuki Noda[1] （1.Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-11] Temporal evolution of b-values in rate-and-state fault models with frictional heterogeneities

○Ryo Ito[1], Yoshihiro Kaneko[1] （1.Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-12] Large-scale earthquake sequence simulations on 3D geometrically complex faults with lattice H matrices

○So OZAWA[1], Akihiro Ida[2], Tetsuya Hoshino[3], Ryosuke Ando[1] （1.Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Information Technology Center, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-13] Steady-state pore pressure based on a hydraulic model considering changes in P-T conditions and clay dehydration due to plate subduction

○Shunya KANEKI[1], Hiroyuki NODA[1] （1.DPRI, Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-14] Estimation of parameter values for a slip- and time- dependent law using slip-stress relations of the Boso slow slips

○Reo Uchida[1], Toshinori Sato[1], Takuma Kobayashi[1,2] （1.Chiba University, 2.Asia Air Survey Co.,Ltd.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-15] Estimating Effective Normal Stress During Slow Slip Events From Slip Velocities and Shear Stress Variations

○Toshinori SATO[1], Takuma Kobayashi[1,2] （1.Graduate School of Science, Chiba University, 2.Asia Air Survey CO., LTD）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-16] Frictional properties of metagabbro gouge in centimeter scale -Toward understanding scale dependence of rock friction-

○Futoshi Yamashita[1], Kazuo Mizoguchi[2], Sachiko Iizuka[3] （1.NIED, 2.CRIEPI, 3.CERES Inc.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-17] Calibration of AE sensor by wave propagation modeling on a 4-meter-long biaxial friction apparatus

○Kurama Okubo[1], Futoshi Yamashita[1], Fukuyama Eiichi[2,1] （1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate school of engineering, Kyoto university ）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-18] Microstructure in the gouge layer developed by large-scale velocity step change experiments

○Shun Watanabe[1], Futoshi Yamashita[2], Sumire Maeda[2], Akihiro Shimoda[3], Eiichi Fukuyama[1,2] （1.Kyoto University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3.Nippon Life Insurance Company）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

[S08P-19] Friction and wear properties of Indian sandstone with increasing work rate and generation and destruction of the fault mirror

○Sumire MAEDA[1], Futoshi Yamashita[1], Kurama Okubo[1], Eiichi Fukuyama[1,2] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience , 2.Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-20] Existence of Weak Zones: Enhancing Dynamic Rupture or Not?

○Koji UENISHI[1,2], Kunihiro NAGASAWA[2] （1.Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Engineering, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-21] On the Dynamic Stability of a Granular Slope

○Koji UENISHI[1], Dongyun XI[1] （1.Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S08P-22] Physical Properties of Core Samples Recovered from a seismogenic zone and the host rock of a M5.5 Earthquake

○Kensuke Sakaguchi[1], Shunsuke Yoshida[2], Mitsuya Higashi[3], Yuki Yokoyama[4], Koichiro Suzuki[1], Yasuo Yabe[5], Dakalo Ligaraba[6], Nandipha Masondo[6], Tetsuro Hirono[7], Yuji Yamamoto[8], Takuya Matsuzaki[8], Hiroshi Ogasawara[9], Seiya Ohba[9], Masaya Wakimoto[9] （1.Graduate School of Sci. Eng., Ritsumeikan Univ., 2.Japan Mint, 3.Mazda Motor Corporation, 4.TechnoPro, Inc., 5.Graduate School of Science, Tohoku Univ., 6.Graduate School of Geoscience, University of the Witwatersrand, 7.Graduate School of Science, Osaka Univ., 8.Center for Advanced Marine Core Research, Kochi Univ., 9.College of Sci and Eng., Ritsumeikan Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Similar aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake

*Emana Mori[1], Yoshihiro Hiramatsu[2]

1. Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2. Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

・はじめに
相似地震とは波形が類似している地震のことで、同じ小さなアスペリティを繰り返し破壊することで発生している(e.g. Nadeau and Johnson, 1998)。内陸地震においても相似地震は主に大地震後に起こる余効すべりに伴って観測される(e.g. Hiramatsu et al., 2011)。継続時間の長い余効すべりでは、構成する地震の数が多く、長い発生期間をもつ相似地震群が見つかる可能性があり、このような相似地震群が多く見つかることは余効すべりを含む内陸大地震後の断層の挙動の解明につながることが期待される。そこで本研究では、2016年4月14日21時26分(Mj6.5)の前震をはじめとし、2016年4月15日0時3分(Mj6.4)、2016年4月16日1時25分(Mj7.3)の本震が3日間の間に立て続けに発生し、余震活動も活発で継続時間の長い余効すべりが期待できる2016年熊本地震を用いた（ここでは以後、Mj6.5の地震を前震、Mj7.3の地震を本震と呼ぶことにする）。
本研究では、2016年熊本地震の余震から多数の地震が属し長期間にわたる相似地震群を分類し、相似地震群を用いて大地震後の断層の挙動のモニタリングを試みた。

・データと方法
データは気象庁で記録された一元化震源データ用い、解析期間は前震が起こった2016年4月14日からの約2年間で、深さは20kmまで、Mj1.5からMj4.5のものを使用した。
はじめに、緯度・経度差が0.002度以内で、深さの差が0.3km以内である地震のペアを見つけ、異なる地震ペアが同じ地震を共有している場合は同じグループの相似地震候補と見なしグループ分けを行った。WINシステム(Urabe and Tsukada, 1991)を用いて同一観測点で同一グループの異なる地震のP波とS波の到着時間を再験測し、その値を使って験測走時差を求めた。次に、再験測した到着時間に基づき上下動成分のP波、S波部分をクロススペクトル解析し、1-8Hzの周波数帯においてコヒーレンスが0.8以上のデータを用いて解析走時差を求めた。そして、Double-Difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)を用いて精密再震源決定を行った。その後、スカラーモーメントとマグニチュードのスケーリング関係(Hanks and Kanamori, 1979)と円形クラックモデルの式(Brune, 1970; 1971)を用いて震源域の大きさを推定した。

・結果と考察
震源域の重なり度合いや波形の類似性やマグニチュードの差を考慮して分類された相似地震の内、前震の破壊域に含まれる相似地震においては、Asano and Iwata(2016)によって推定された前震のアスペリティの端に分布している。これは小アスペリティが本震のアスペリティの周囲に分布することを示しており、2007年能登半島地震(Hiramatsu et al., 2011)、2000年鳥取県西部地震(Hayashi and Hiramatsu, 2013)の相似地震の結果と調和的である。また、相似地震は前震・本震の破壊域から離れた位置でも発生しており、前震・本震の破壊域だけでなくその周辺の余震域においても余効すべりが起こっていた可能性がある。
また、Somerville et al, (1999)によるスカラーモーメントとすべり量の式から相似地震のすべり量を算出し、相似地震のすべり量と繰り返し間隔からすべり速度を算出した。2016年6月30日以前に一つ目の地震が発生している相似地震群において、その繰り返し間隔は前震からの経過時間とともに増加し、すべり速度は前震からの経過時間とともに減少していることが分かった。これは、前震によって発生した余効すべりの減衰を反映しているのではないかと考えられる。

謝辞：本研究には防災科学技術研究所Hi-netや九州大学、気象庁の観測点で記録された地震波形を使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Estimating the shape of the source spectrum of regular and low-frequency earthquakes in the inland area of Japan

*Masaki Orimo[1], Keisuke Yoshida[1], Taka'aki Taira[2], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1], Kentaro Emoto[3]

1. Research center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University , 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, 3. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

震源スペクトルは地震時の断層破壊の時空間発展に関する重要な情報源である。Aki (1967) は地震の震源スペクトルの高周波側が周波数の2乗で減衰するオメガ二乗モデルを提案し, このモデルが観測された地震波の特徴とよく調和することを示した。 オメガ二乗モデルは震源スペクトルの標準モデルとして地震の解析に幅広く用いられているが, オメガ二乗モデルに従わない地震も存在すると考えられる。特に低周波地震に関しては, 震源スペクトルの高周波側が周波数の二乗ではなく一乗程度で緩やかに減衰することを示唆する先行研究 (e.g., Ide et al., 2007; Yoshida et al., 2020) も存在する。 2020年に岐阜・長野県境付近で発生した群発地震活動と2008年岩手・宮城内陸地震の震源域は地震観測網に囲まれており, 通常地震に加えて低周波地震も多く発生している。本研究では2020年の岐阜・長野県境付近の群発地震活動および 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺で発生した地震の震源スペクトルを推定し, それらの高周波側の減衰の特徴を比較した。 震源スペクトル推定のために, 初めにコーダ規格化法 (Aki and Chouet, 1975; Aki, 1982) を用いて震源域周辺の$Q^{-1}(f)$と観測点のサイト特性G(f)の推定を行った。(Takahashi et al., 2005; Yoshida et al., 2017)。この方法では地震の震源スペクトルがオメガ二乗モデルに従うことを仮定する必要がない。そして，得られた$Q^{-1}(f)$とG(f)を用いて通常地震と低周波地震の震源スペクトルを推定した。2008年岩手・宮城内陸地震震源域で発生した地震については, 通常地震1036個, 震源域周辺で発生した低周波地震15個について震源スペクトルの推定を行い, 2020年岐阜・長野県境付近の群発地震活動の震源域で発生した地震については,通常地震773個, 震源域周辺で発生した低周波地震44個について震源スペクトルの推定を行った。 震源スペクトルの形状を定量化するための尺度として, 震源スペクトルの高周波側での周波数減衰のべき指数nを用いた。各地震の震源スペクトルに対してグリッドサーチを用いたフィッテイングにより, 地震モーメント, コーナー周波数, べき指数nの3つのパラメータを推定した。 2020年岐阜・長野県境付近の群発地震活動の震源域で発生した通常地震について得られたnの平均値は 2.16, 標準偏差は0.27 であり, 震源域周辺で発生した低周波地震について得られたnの平均値は 2.44, 標準偏差は 0.22 であった。2008年岩手・宮城内陸地震の震源域で発生した通常地震について得られたnは平均値が 1.87, 標準偏差が0.38 であり, 震源域周辺で発生した低周波地震について得られたnは平均値が1.85, 標準偏差が 0.17 であった。 2つの地域で発生した通常地震に推定したnの値がおおむね2程度で, 基本的にはオメガ二乗モデルに従うようにみえる。低周波地震についても，2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺で発生したものについては概ねオメガ二乗モデルに従ってみえる。一方で，岐阜・長野県境付近の群発地震活動震源域周辺の低周波地震については, nの値が2.44 とオメガ二乗モデルよりも高周波側が大きく減衰する傾向も見られた。低周波地震について得られた結果の数は少ないものの，通常地震と低周波地震の震源時間関数の複雑性の違いを反映している可能性も考えられる。 通常地震, 低周波地震の両方の場合でnの値がばらついて分布している様子が見られた。得られたnの多様性は断層破壊の様式が地震ごとにある程度多様であることを反映している可能性がある。ただし，本研究では、震源域周辺の$Q^{-1}(f)$が空間的に変化しないことを仮定して解析を行なった。しかしながら、低周波地震は通常地震よりも深部で発生するため、実際には代表する$Q^{-1}(f)$が異なっている可能性も考えられる。このため本研究で推定した低周波地震の震源スペクトルの形状が系統的に誤って推定され, その結果nの値が誤って推定された可能性は否定できない。今後，通常地震近傍で発生している低周波地震を対象にすることや, $Q^{-1}(f)$の空間変化を考慮した解析を行うことにより、震源スペクトルの形状の多様性についてより詳細な情報が得られると期待される。

© The Seismological Society of Japan

The characteristics of source parameters of interplate earthquakes occurring in and around the Raukumara Peninsula in the North Island, New Zealand

*Kazuya TATEIWA[1], Calum Chamberlain[2], Martha Savage[2], Tomomi Okada[1]

1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington

背景

ニュージーランド北島は太平洋プレートがオーストラリアプレート下に沈み込んでいる地域であり、スロースリップイベント、微動、繰り返し地震など多様な地震活動が観測されている。反射法地震探査やMT法（Magnetotelluric法）による調査から、流体や沈み込む海山の存在といった摩擦特性に関わる特徴と前述の多様な地震活動が結びついていることが分かってきた（例えば、Bell et al., 2009）。ニュージーランド北島は摩擦特性と地震活動や震源パラメータの関係を調べるうえで格好の研究対象となっている。

Tateiwa et al. (2021, JpGU)はニュージーランド北島北東部に位置するラウクマラ半島周辺で発生する繰り返し地震の震源パラメータ（地震モーメントと繰り返し間隔の関係やコーナー周波数）の特徴を調べることで繰り返し地震発生域での摩擦特性について議論を行った。しかし、そこで用いられた繰り返し地震の数は少なく解析領域も限られていたため、地震数を増やすことによってより信頼性の高い空間分布が求められていた。本研究ではラウクマラ半島周辺で発生する通常のプレート境界地震の震源パラメータを調べ、繰り返し地震に限らず解析される地震の数を増やすことで地震発生域における摩擦特性についての議論をTateiwa et al. (2021, JpGU)に引き続き行う。

データ・手法

プレート境界地震抽出のため以下のような手順を踏む。

1. プレート境界で発生したと考えられている1966年ギズボーン地震とメカニズム解が似ており、かつ震源がプレート境界（Williams et al., 2013）に近い地震を既存のGeoNetカタログから探し出す。ここで選ばれた地震をReference eventと呼び、プレート境界で発生した地震であると解釈する。
2. 各Reference eventと震源が近く、かつ初動付近の波形が3観測点以上で類似しているM>2の地震を探す。ここで選ばれた地震をTarget eventと呼び、やはりプレート境界で発生した地震であると考える。
3. Target eventを新たなReference eventとし2に戻る。

Target eventが新たに選ばれなくなるまで上記のループを繰り返すことで最初のReference eventを中心としてプレート境界地震探索網が広がっていく。本研究ではループが4回行われ、最初のReference eventとして13個の地震が、Target eventとして累計111個の地震が選ばれた。これら計124個の地震のうちM>3の地震101個についてスペクトル比法を用いてコーナー周波数（f_c）の推定を行い、$M_0 f_c^3$やP波とS波のコーナー周波数の比（f_c^P/f_c^S）の空間分布を調べる。

結果・議論

P波、S波ともに$\log(M_0 f_c^3)$はラウクマラ半島北西部で約18、それ以外の領域で約17となり、ラウクマラ半島北西部で大きくなる傾向にあった。また、繰り返し地震の$\log(M_0 f_c^3)$の値とも整合的な結果となった。$\log(M_0 f_c^3)$が大きくなっている領域はヒクランギ海台の沈み込みによりプレート境界の形状が大きく変化している領域にあたる。形状の影響で高い応力がかかるため応力降下量が高くなったと考えれば$M_0 f_c^3$が大きな値を示す理由が説明できる。なお、コーナー周波数を推定できたプレート境界地震の数は、繰り返し地震で5個、通常地震で63個であるためデータ数を増やすという目的は適切に達成されている。

Tokomaru-Tolagaでは他の領域よりもf_c^P/f_c^Sの値がやや小さな値をとる傾向にあった。f_c^P/f_c^Sが小さいことは破壊伝播速度が大きいことを示唆する（Kaneko and Shearer, 2015）。Tokomaru-Tolagaの地震発生域よりもややup-dip側では流体に富む沈み込んだ堆積物が存在すると指摘されている。断層の剛性率が小さいと破壊伝

© The Seismological Society of Japan

播速度が大きくなることが知られているため、Tokomaru-Tolagaのやや小さなf_c^P/f_c^S（やや大きな破壊伝播速度）は低剛性率な堆積物が原因となっている可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

Source process of volcano tectonic earthquakes during the earthquake swarm off the east of Izu Peninsula in 2006

*Yukako Tanaka[1], Takuji Yamada[1]

1. Ibaraki University

1. 序論

伊豆半島東方沖では、1970年代後半以降、群発地震活動が断続的に発生している。これらの地震活動は、地下の火山性流体の移動に起因する火山構造性地震であると考えられている。本研究では、2006年4月に発生した伊豆半島東方沖の群発地震活動のうち、規模が大きな4地震（3.9≦Mw≦5.6）について、経験的グリーン関数（EGF）を用いた複数時間窓の波形インバージョンを行い、震源時間関数に見られる4地震の特徴の比較とその背景の考察を行った。

2. データと解析手法

EGFとして、同じ群発地震活動中に発生した3つの小地震の観測波形を使用した。解析対象の4地震、およびEGFとして用いた3地震は、いずれも横ずれ断層型のメカニズム解を示す。解析には、防災科学技術研究所（NIED）のK-net強震計記録を用いた。加速度波形記録を積分して速度波形とした後、0.1-1.0 Hzのバンドパスフィルタをかけ、さらにS波を含む10秒間を切り出して解析に使用した。

解析には30個の時間窓を用い、各時間窓の間隔は0.05秒とした。次に、EGF地震の震源時間関数は破壊継続時間0.2 sの二等辺三角形で表せると仮定し、解析対象地震のモーメントはNIEDのCMT解と一致するとの条件の下、解析対象地震の震源時間関数を求めた。

3. 結果と考察

解析から得た4地震の震源時間関数を図1aに示す。解析対象地震は、規模の大きい順にAからDと呼ぶこととする。A(Mw5.6)は破壊開始後0.2秒程度でモーメントレートが最大になった後、破壊が１秒程度尾をひいている。B(Mw4.5)とC(Mw4.3)は、ともに2回の大きな破壊を起こしているが、特徴が異なる。すなわち、Bは２回の破壊が同規模である一方、Cは2回目の破壊が明らかに小さい。D(Mw3.9)は破壊継続時間0.2秒程度の単一の破壊であった。

これらの震源過程の特徴の違いは、震源の空間分布と関連すると考えられる。A, Bは少なくとも20年程群発地震が発生していない領域で起こった地震である一方、Cは1998年に発生した群発地震活動の震源域に近接している。このことから、以下のような推論が可能である。過去に破壊が起こった領域では、すでに存在する強度の低い部分を破壊が比較的スムースに進展するのに対し、過去に破壊の起こっていない領域ではフレッシュな強度の高い部分を破壊が進展するため、複雑な破壊過程を示すのかもしれない。すなわち、たとえばUmeda(1990)が本震と余震の破壊過程の相違について言及しているように、過去の地震活動による破砕の有無が、解析した4地震の破壊過程の相違として見られたと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

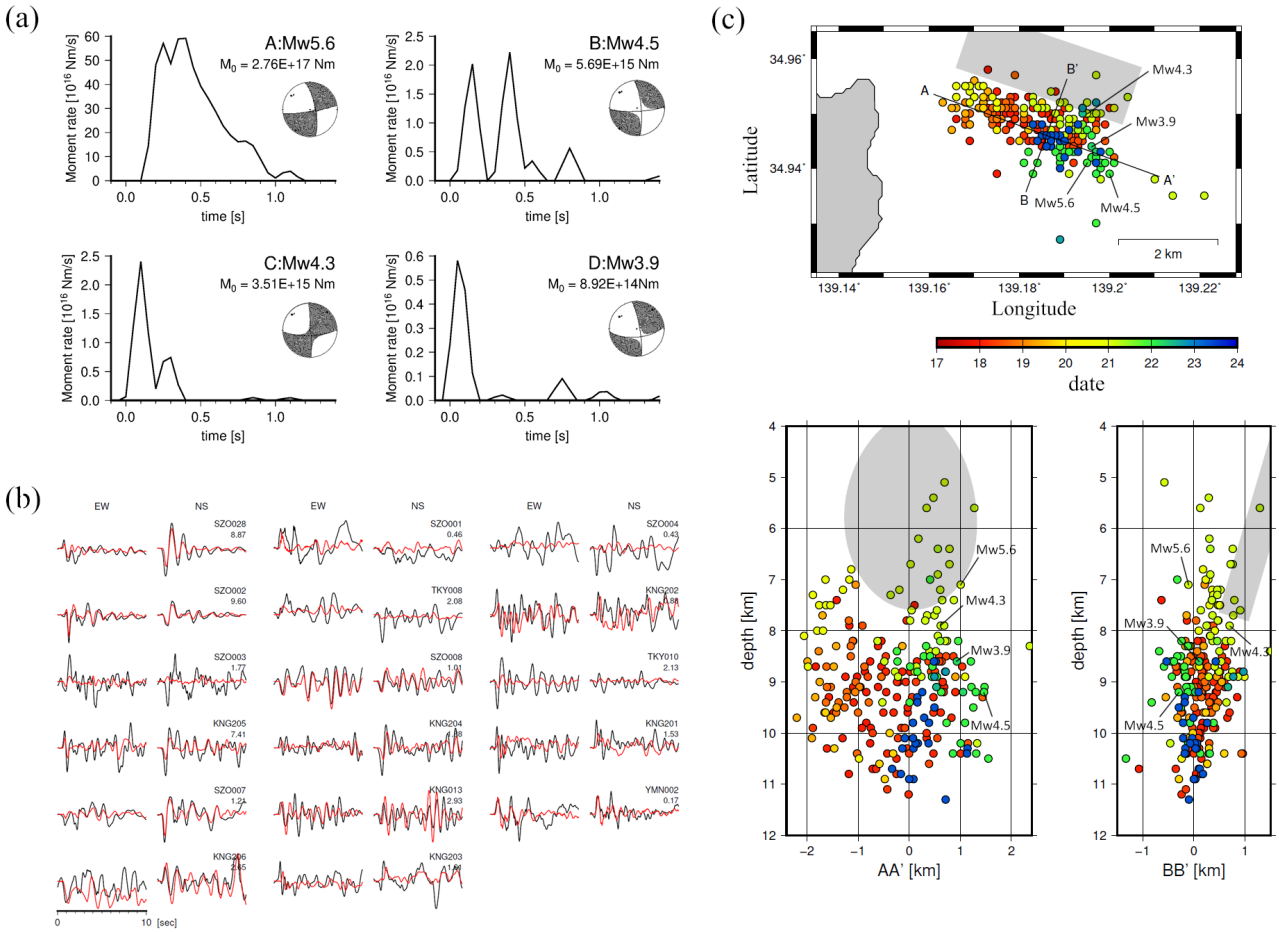


図1. (a) 解析対象の4地震の震源時間関数。縦軸はモーメントレート（単位：10^16 Nm/s）、横軸は時間（単位：秒）を表し、時刻ゼロは破壊開始時刻を表す。(b) 地震Aの観測波形（黒）と理論波形（赤）。 (c) 2006年4月に発生した群発地震活動の震源分布。色は時間経過を示す。灰色部は1998年の群発活動の震源分布域。

© The Seismological Society of Japan

Seismic radiation process of the 2011 Tohoku earthquake inferred from ocean bottom pressure records above its source region

*Hisahiko KUBO[1], Tatsuya KUBOTA[1], Tatsuhiko SAITO[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震時に震源域近傍で観測される地震波形記録は、その地震の断層破壊過程や地震波放射過程の詳細および強震動の生成メカニズムを知る上で重要なデータである。内陸で発生した地震に関しては、陸域の強震観測網で観測された断層近傍での地震波形記録が、内陸地震の震源過程解析において重要な役割を果たしてきた（e.g., Wald et al. 1994; Ma et al. 2001; Dreger et al. 2004; Asano & Iwata 2021）。他方で、海域で発生する地震に関しては海域における地震観測の乏しさから震源域直上での地震波形の観測事例はこれまであまりなかった。近年の海域観測体制の充実に伴って観測事例が少しずつ増えてきている一方で、過去に観測された海底水圧計記録から地震波形記録を取得するというアプローチがいくつかの研究にて試みられている（Nosov & Kolesov 2007; Matsumoto et al. 2012; An et al. 2017; Kubota et al. 2017a; Kubota et al. 2021）。過去の地震に関しては観測を新たに実施することはできないため、同アプローチによって当時の記録からこれまで見出されていなかった情報を新たに取り出すことは重要である。Kubota et al. (2017a)は海底水圧計記録が一定の条件下で上下動加速度記録として扱えることを示し、海底水圧計記録に基づく地震波形記録を海域地震のモーメントテンソル解析に用いた。Kubota et al. (2021)は地震動成分と津波成分が混在する海底水圧計記録から永久変位込みの地震動成分を抽出する手法を開発し、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）における震源域直上の海底水圧計記録に適用した。本研究では、東北地震とその二つの前震（2011年3月9日11時45分のMj 7.3の地震と2011年3月10日6時23分のMj 6.8の地震）における海底水圧計記録から上下動地震波形記録を取得した上で、それぞれの地震における地震波の伝播特性および地震波放射特性を調べた。

海水が剛体であると近似できる場合、すなわち水中音波の基本モードよりも十分に長い周期帯域において、水圧計が観測する水圧変動は重力に起因して生じる静水圧変動と海底上下動加速度に比例する動圧変動の足し合わせで表現することができる（例えば、Saito 2013; Kubota et al. 2021）。前者の静水圧変動は後者の動圧変動よりもより長い周期帯域において卓越するため（例えば、Kubota et al. 2021）、適切な周期帯域を選ぶことによって水圧計記録から上下動加速度を直接得ることが可能である。本研究では、東北沖地震およびその二つの前震の際に東大地震研および東北大の海底水圧計によって観測された記録 (Maeda et al. 2011; Hino et al. 2014) を対象とし、時間積分を行った上で、周期25秒から50秒までのバンドパスフィルターを適用して、上下動速度波形記録を得た。最小周期に関しては最も深い観測点GJT3の水深における水中音波の基本モードを考慮して設定した。最大周期に関しては、Kubota et al. (2021)の結果に基づいて、静水圧変動に対して動圧変動が十分に卓越する周期帯を取るように選んだ。なお海域だけでなく陸域の観測記録も併せた解析を行うために、防災科研の強震観測網K-NET・KiK-netによる観測記録も用いることとし、それぞれの地震波形記録に時間積分と周期25秒から50秒までのバンドパスフィルターを施した。

まず二つの前震に関しては、陸域の上下動波形記録は3~4 km/sで伝播する一つの波群で主に構成される。同波群は海域の観測点においても見られ、それぞれの地震の震央および主破壊域（Kubota et al. 2017b）の近くに位置するP08・P09までさかのぼることができる。それに対して東北地震における上下動波形記録は、前震時の記録に比べて非常に複雑であり、東北地震の複雑な地震波放射特性を反映している。東北地震の震央からdown-dip方向に位置する陸域の観測点においては顕著な二つの波群が見られる（例えば、Suzuki et al. 2011）。この二つの波群は同地震震央近くに位置する海域観測点（P02・P06・P08・P09）の付近までさかのぼることができる。陸域では二番目の波群の方が相対的に大きな振幅であるが、海域では観測点の位置によって相対的な振幅の大小が異なっており、それぞれの波群の励起位置の違いに起因する地震波放射パターンの違いを見ている可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

Initiation of the M~9 earthquake cycle: the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition

*Keisuke YOSHIDA[1], Toru Matsuzawa[1], Naoki Uchida[1]

1. Tohoku University

The 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake provides a rare opportunity to investigate how the earthquake cycle of a great (M9) earthquake impacts the generation of smaller (M7-8) earthquakes on the same fault. Following the Tohoku-Oki earthquake, the interplate seismicity drastically increased in the downdip extension while it disappeared within the main rupture area. An Mw7.0 earthquake occurred in the downdip extension off Miyagi in March 2021, followed by an Mw6.7 earthquake in May 2021. To examine the initial evolution of the earthquake cycle after the Tohoku-oki earthquake, we investigated the regional seismicity around the two M~7 earthquakes and their source processes.

We first relocated earthquake hypocenters around the source regions of the 2021 March Mw7.0 and May Mw6.7 Miyagi-Oki mainshocks by using the Double-Difference method (Waldhauser & Ellsworth, 2000). We used 49070 P-wave and 47566 S-wave differential arrival time data from the JMA unified catalog and 175817 P-wave and 204395 S-wave differential arrival time data derived from the waveform correlation.

We obtained the relocated hypocenters of 2736 interplate events. A small number of interplate earthquakes occurred before the Tohoku-Oki earthquake in and around the source region of the March earthquake, but the number sharply increased after the Tohoku-Oki earthquake. The hypocenter of the March Mw7.0 earthquake is located very close to the hypocenters of four M5-6 earthquakes which occurred after the Tohoku-Oki earthquake. The inter-event distances of these four earthquakes were much shorter than the source sizes of the four earthquakes and the mainshock, even when considering the estimation error; they probably ruptured the same seismic patch. Inside these M5-6 repeating earthquake source regions, M2-3 repeating earthquakes also occurred, forming a hierarchical structure. Almost all of these repeating earthquakes occurred after the Tohoku-Oki earthquake, suggesting that the March mainshock was initiated in a conditionally stable region where the repeating earthquake sequence emerged after the Tohoku-Oki earthquake (Hatakeyama et al., 2017).

We then estimated the spatiotemporal distributions of the slips of the two mainshocks in the same manner, following Hartzel & Heaton (1983) by using the apparent moment rate functions (AMRFs). To estimate the AMRFs, we applied the iterative time-domain approach by Ligorría and Ammon (1999) after Kikuchi and Kanamori (1982) to the S-waves (transverse component) with a non-negative constraint. We used the acceleration waveform data from onland stations of NIED KiK-net and offshore stations of S-net.

The results show that the March Mw7.0 mainshock had two large-slip regions: several kilometers ESE (first rupture; t=4–7 s) and ~20 km south of the hypocenter (second rupture; t=8–12 s). The rupture area of the March mainshock showed a complementary relationship with the aftershock area located between the two large slip areas. The May Mw6.7 occurred ~15 kilometers southeast of the southern large slip patch of the March mainshock, where the shear stress increased by the March mainshock rupture. In the May mainshock, the maximum slip occurred a few kilometers southeast of the hypocenter, with the total slip area being longer in the north direction as a moderate slip propagated to the north.

The two M~7 mainshocks ruptured the westernmost part of seismic patches of the 1978 Mw7.5

© The Seismological Society of Japan

Miyagi-Oki earthquake, which is the most recent typical earthquake in an ~40-year interval of M~7.5 earthquake sequence, and loaded the eastern shallow seismic patches for the sequence. The further updip area is a part of the main rupture area of the Tohoku-Oki earthquake and hosts almost no interplate seismicity after this earthquake. Assuming that the spatial pattern of interplate earthquakes along the Japan trench will be restored to a situation similar to that before the Tohoku-Oki earthquake in the future, the downdip seismically active area should gradually expand to the updip area. The initial ruptures propagated in the updip direction for the 2021 M~7 earthquakes, similarly to the smaller earthquakes after the Tohoku-Oki earthquake (Yoshida et al., 2020, JpGU). The March Mw7.0 earthquake was initiated from a conditionally stable patch, which is probably a transient feature in the postseismic period of the previous M9 earthquake. Therefore, the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 initiated at the deep plate boundary probably illuminates seismicity in the early stage of the great interplate earthquake cycle. Continued monitoring of interplate seismicity is essential to examine how plate-locking evolves during the M9 earthquake cycle.

© The Seismological Society of Japan

Preparation process for a Miyagi-Oki earthquake following the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Ryoko NAKATA[1], Ryota Hino[1]

1. Tohoku University

【はじめに】
宮城県沖では、1978年宮城県沖地震のように、過去にM＞7海溝型大地震が約40年間隔で繰り返し発生し、沿岸地域に被害をもたらしてきた。この履歴に基づく長期評価に加え、2011年東北地方太平洋沖地震の影響を定性的に踏まえた結果、2021年1月時点では、宮城県沖でのM7.4前後の地震発生確率は30年以内に60～70%程度となっている [地震調査研究推進本部, 2021]。ここで想定されている地震の震源域付近で2021年3月20日に発生したM6.9の地震の震源域は、1978年の震源域の西側の一部に重なると考えられており [地震調査研究推進本部, 2021年4月9日]、今後の推移が注目されている。 本研究では、地震発生の原因であるプレート境界での応力蓄積と解放過程に基づく数値シミュレーションを用いて、東北沖地震後の宮城県沖地震の準備過程について検討する。Nakata et al. [2016]では、地震発生サイクルシミュレーションで得られた121シナリオについて、M9地震後には、M9地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、M>7宮城県沖地震が発生する場合が多く見られたと報告している。これは、M9地震の余効すべりが宮城県沖地震単独の場合よりも大きいために、宮城県沖の陸寄り地域での応力蓄積レートが高くなったためであると考えられる。
【手法】
地震発生サイクルシミュレーションは、先行研究 [Nakata et al., 2016]と同様の物理法則とプレート境界面形状で実施する。入力する摩擦パラメタの値や空間分布に関して、複数の条件で計算を行った。全モデルの共通点は、海溝近傍の走向方向に約100～150 km長の領域と、そのdowndip側の半径20～30 kmの円内部に、摩擦的に不安定な条件を設定したことである。これによって、東北沖地震のような海溝近傍で発生する繰り返し間隔数百年以上のM9クラス巨大地震と、そのdowndip側で発生するM7クラスの宮城県沖地震を再現する。Nakata et al. [2016]のFigure 2で示した摩擦パラメタを基にしたものがほとんどであるが、震源域の面積（宮城県沖地震の半径、M9震源域の走向・dip方向の広がり）や位置（中心座標、M9震源域とバックグラウンド領域との遷移幅）、各領域の摩擦パラメタの値、東北沖地震と宮城県沖地震以外の地震（福島県沖・茨城県沖・M9震源域内でのM~7地震）の有無などについて、モデルごとに少しずつ異なるものを用いた。
【結果・議論】
新たに計算した結果では、東北沖タイプの地震の規模・繰り返し間隔・震源域・余効すべりの時空間分布・前震や余震の有無、宮城県沖地震の規模・繰り返し間隔などが異なる約120シナリオが得られた。これらについて、宮城県沖地震を抽出し、各地震の発生間隔を計算する。その際、先行研究と同様に、東北沖地震と宮城県沖地震の共存が再現できていないシナリオ、つまり海溝近傍で発生する最大地震の規模がM<8.5の結果や、宮城県沖地震がM<7の結果は、除外する。M9地震以前の宮城県沖地震の繰り返し間隔を計算する際には、M9地震前の200年間に発生したM≧7地震を扱う。上述の違いに加え、M9地震の破壊継続時間がやや長い76シナリオ（地震波の放射によるエネルギー減衰を準動的に近似するダンピング係数が大きい条件で計算したもの）を含む先行研究の121シナリオを合わせた約240シナリオについて、先行研究と同様に、M9地震後には、M9地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、M≧7宮城県沖地震が発生する場合が多く見られた。
　また、すべり速度の時空間変化からは、M9地震の前後で、宮城県沖地震の余効すべりの広がり方に顕著な違いが見られた。M9地震前の宮城県沖地震の余効すべりは、震源域のupdip側への伝播が顕著であった。一方、M9地震後では、updip側への伝播はほとんど見られなかった。この違いは、宮城県沖地震震源域のupdip側、つまりM9地震震源域の固着がどの程度はがれているかに起因すると考えられる。今後の宮城県沖地震の発生時期を議論するには、2021年3月の地震の余効すべりがupdip側でどのようになっているかを観測から明らかにしたうえで、シミュレーション結果と照らし合わせた議論をする必要があろう。

【謝辞】

© The Seismological Society of Japan

本研究の一部は、JSPS科研費Grant Number JP21K04604およびJP19H05596の助成を受けて実施されたものです。本研究のシミュレーション結果は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムおよびJAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して得られたものです。

© The Seismological Society of Japan

Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

*Yuko KASE[1], Yumi URATA[1]

1. Geological Survey of Japan

中央構造線断層帯は，日本で最も活動的な断層帯のひとつである．この断層帯の連動可能性とその条件を検討するため，断層帯の置かれた条件を反映した動力学的震源モデルを構築し，動的破壊シミュレーションをおこなう．本稿では，中央構造線断層帯讃岐山脈南縁東部区間，同西部区間，石鎚山脈北縁区間，同西部区間を対象として，既存情報を基にプロトタイプの震源モデルを構築し，連動可能性について調べるための試計算をおこなった結果を報告する．

断層モデル各区間の走向と長さは，都市圏活断層図 (後藤・他, 1998; 中田・他, 1998;岡田・他, 1998; 堤・他, 1998; 後藤・他, 1999; 中田・他, 1999; 岡田・他, 1999; 堤・他, 1999; 中田・他, 2009; 岡田・他, 2009; 岡田・他, 2014) を基に決定した．また，傾斜角と地震発生層の深さについて，地震調査研究推進本部 (2017) では中角度と高角度を併記しているが，本稿では，まず，高角度（鉛直）の場合のみを扱う．モデルは半無限媒質とし，地震波速度構造はNakajima and Hasegawa (2007) の紀伊半島・中国四国地方のモデルを，密度は日本列島基盤岩類物性データベース (大熊・金谷, 2007) を参考に仮定した．

応力場は2通りのモデルを設定した．ひとつは，佐々連における応力解放法による応力測定データ (Tanaka, 1986; 斎藤・他, 1988) より，最大主圧縮応力（σ_1）は東西方向，最小主圧縮応力（σ_3）は南北方向としたもの，もうひとつは，有限要素法による静的解析(文部科学省・産総研, 2021) から，もっとも変位が大きくなると推定された，σ_1はN60˚W，σ_3はN30˚Eとしたものである．どちらも，σ_1とσ_3の大きさは応力測定データを参照，また，中間主応力（σ_2）は鉛直でかぶり圧に等しいとし，それぞれ深さに比例するとした．その上で，破壊の始まる領域の応力降下量の比例係数aを仮定し，静水圧条件が成り立つとして，動摩擦係数を求めた．更に，破壊の始まる区間での強度と応力降下量の比 (Andrews, 1976; Das and Aki, 1977) を1.6と仮定して，静摩擦係数を求めた．摩擦係数は破壊の始まる領域の走向によって異なるが，aを1.0として，間隙水圧を考慮しない場合，動摩擦係数は概ね0.2～0.5程度となった．

断層面の境界条件には，Coulombの破壊基準とすべり弱化の摩擦構成則 (Ida, 1972; Andrews, 1976) を仮定し，弾性体の運動方程式を差分法 (Kase and Day, 2006) で解くことによって，断層面上の破壊伝播過程を求めた．臨界すべり量は，全セグメント共通で0.50ｍとした．

σ_1の向きと破壊の始まる領域の走向によって各区間の応力状態が異なるため，それに対応した様々な連動パターンが得られた．例えば，石鎚山脈北縁区間東端から破壊が始まった場合や，石鎚山脈北縁西部区間東端から破壊が始まる場合は，σ_1の向きが東西の場合，N60˚Wの場合とも，その区間のみの破壊に留まる．一方，讃岐山脈南縁東部区間東端から破壊が始まる場合，σ_1の向きが東西の場合は4区間のほぼ全域にわたって破壊が広がるのに対し，N60˚Wの場合は，讃岐山脈南縁西部区間の西端で破壊が停止し，石鎚山脈北縁区間以西には広がらないというように，σ_1の向きによって破壊の広がり方が異なる．今後，応力降下量の比例係数aを変えてシミュレーションをおこない，各区間，各地点での１回の活動によるすべり量を説明しうるパラメータの範囲を調べる必要がある．

謝辞：本研究は，文部科学省委託事業「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究」として実施されました．

© The Seismological Society of Japan

Simulation of dynamic earthquake sequence in a linear poroelastic medium

*Hiroyuki NODA[1]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Rice and Ben-Zion (1996) により提案されたスペクトル境界積分方程式法（SBIEM）による線形弾性体中の動的地震サイクルシミュレーションは、Lapusta et al. (2000) による効率化を経て、断層構成則と地震を繰り返す断層の挙動の関係の研究に大いに活用されている。動的地震サイクルシミュレーションでは、地震時に重要となる慣性項を無視せず、加えて地震間のゆっくりとした準静的過程も単一のフレームワークで（人為的に支配方程式を切り替えることなく）計算する。過去及び現在の断層変位とグリーン関数の時空間畳み込み積分を用いて断層面上でのトラクション変化 を表現することができるが、これを静的なトラクション変化 $_{st}$ と残り $_{dy} = -_{st}$ にわける。$_{st}$ は「もし即時に断層を接着してこれ以上の変位を禁じた場合、弾性波が過ぎ去った後に残るトラクション変化」であり、弾性体の場合には現在の変位量と静的なグリーン関数の空間畳み込みで表現される。一方 $_{dy}$ に関しては、十分過去の滑り速度による影響を無視する事ができるため、時間に関する畳み込みを打ち切る事で、無限に続く地震サイクルを有限のメモリーで計算する事ができる。近年、Miyake and Noda (2019) により本手法が Maxwell 線形粘弾性体における地震間の応力緩和にも拡張され、弾性体に限らない線形媒質に対する適用の可能性が広がった。

本発表では、SBIEM を用いた地震サイクルシミュレーションを、線形多孔質弾性体に適用した手法の報告と、予察的なシミュレーション結果を紹介する。 In-plane 問題や３次元問題では、断層滑りに伴って圧縮・伸長の体積歪が生じる領域が存在し、流体圧の増加・減少が引き起こされ、その勾配に駆動されて流体移動が発生する。この流体の再分配により媒質の変形が時間発展的に発生し、断層面上での応力変化や余効変動を引き起こし得る。Detournay ant Cheng (1991) は線形多孔質弾性体中の開口亀裂を解析し、亀裂の導入後に時間発展的に追加の開きが生じることを示した。また Yamashita (2007) は断層を挟んで異なる物性を持つ線形多孔質弾性体を考え、断層面の摩擦強度が一定の場合に、地震後の流体移動に伴って本震滑り域内で余効滑りが発生する可能性を指摘している。この様な効果を動的地震サイクルシミュレーションに取り入れることにより、余効滑りや余震の発生過程を調べたい。

流体移動を駆動する体積歪は anti-plane 問題では発生しないため、本研究では２次元の in-plane 問題を扱う。ある時刻に発生した局在化した滑りに対するグリーン関数は Detournay and Cheng (1987) により導出された。これを直接適用すると、$_{st}$ の計算に時空間畳み込み積分が発生してしまう。スペクトル法では空間畳み込みは掛け算になるため問題にはならないが、時間畳み込みを実行する必要は残り、SBIEM の地震サイクルシミュレーションの問題サイズを決定する必要メモリ量を圧迫してしまう。そこで本研究では、Miyake and Noda (2019) と同様に、波数空間に分布するメモリー変数を導入し、メモリー関数の常微分方程式を毎タイムステップ逐次時間積分する事により、簡便に精度よく流体移動の影響を計算する手法を開発した。各波数におけるメモリー変数は、それぞれ固有の無次元緩和時間と $_{st}$ への寄与を持つとしたが、これらのパラメータはグリーン関数に対する最小二乗法フィッティングを行って決定した。各波数に対して18個のメモリー変数を使えば、相対誤差10^{-6}以下の精度での計算が可能である。Noda and Lapusta (2010) では摩擦発熱による間隙水圧の上昇を地震サイクルシミュレーションに取り入れるために、断層面上の各点に対して120個程度のメモリー（状態）変数を持ちいた。今回使用した18個のメモリー関数はそれほど多い数ではなく、シミュレーションの計算速度に対しては微々たる影響しかない。

予察的に、速度・状態依存摩擦構成則（Aging law）を用いた地震性パッチの地震サイクルシミュレーションを行った。現在計算した限り、地震発生後に地震性パッチは速やかに固着し、内部での余効滑りの顕著な増加は確認できていない。上述の既往研究では、イベント後の亀裂や断層では強度が回復しないと仮定してい

© The Seismological Society of Japan

た。Aging law では地震後の流体移動による剪断応力の上昇よりも断層強度の回復が勝るため、余効滑りが発生しにくい可能性がある。多孔質弾性体内の断層の地震直後の挙動を考える上で、強度回復の時間スケールを考える重要性が示唆される。

© The Seismological Society of Japan

The influence of fault-strength heterogeneity on earthquake cycle in a viscoelastic medium

*Makoto Yamamoto[1], Hiroyuki Noda[1]

1. Kyoto Univ.

速度状態依存摩擦則（RSF則）が発見されて以来、これを適用した地震サイクルシミュレーションが盛んに行われている [e.g., Lapusta et al., 2000]。断層の挙動を決める要素の一つに摩擦パラメータ *a-b* が挙げられ、その正負が重要になる。低速での摩擦係数について、速度弱化（*a-b* < 0）を示す鉱物は Byerlee 則に従う値（～0.6）を示すのに対し、速度強化（*a-b* < 0）を示す鉱物には粘土鉱物などの小さな値を示すものも存在することが確認されている。全体としては、低速での摩擦係数は摩擦パラメータ *a-b* と負の相関が見られる[Ikari et al., 2011]。このことから、地震サイクルシミュレーションを行う際には、基準滑り速度 V_0 における定常摩擦係数 f_0 の不均質性を考慮する必要があると考えられる。ただし、媒質が線形弾性体の場合、 f_0 の分布は滑りの基準（滑りをゼロと定義する状態）の選択に吸収されてしまい、初期条件の影響のなくなったリミットサイクルやアトラクタにおける滑り速度 V の時空間的分布には影響を及ぼさない。その一方で、媒質に粘弾性体を採用する場合、非弾性変形の速度が媒質中の偏差応力の絶対値に依存するため、 f_0 の分布が断層の長期的挙動に影響する。

地中では、地殻浅部から深部にかけて地震性の領域、スロースリップイベント（SSE）が起こる領域、定常滑りの領域へ移り変わる。また、深さや物質の変化に依存し、媒質の弾性・粘弾性の遷移も見られる。弾性・粘性遷移による断層挙動への影響を調べるために、粘弾性媒質中での2次元の動的地震サイクルシミュレーション手法が開発されている [Miyake and Noda, 2019]。緩和時間の変化において地震性（EQ）-永久固着（Stuck）遷移が起こることなど、緩和時間と震源核サイズの2種類のパラメータを変化させたときの影響が詳細に調べられている。しかし既往研究では、単純化の為 f_0 は断層面で一様と仮定されており、 f_0 の不均質性が断層挙動に与える影響についてはまだ調べられていない。

本研究ではまず、 f_0 の値を 0.6 で一様としていた Miyake and Noda (2019) による粘弾性媒質中での動的地震サイクルシミュレーションに対し、他の物性値を変化させず f_0 のみに不均質性を加えた。本シミュレーションでは速度弱化パッチを断層の中央に設置しており、それに合わせて f_0 を上に凸の矩形関数として与えた。速度弱化パッチにおける f_0 を $f_0^{(rw)}$ 、 速度強化領域における f_0 を $f_0^{(rs)}$ とする。初期条件について、基準状態における載荷は f0 の平均値を与えた。緩和時間一定のもとで $f_0^{(rs)}$ をパラメータ（$0.3 \leqq f_0^{(rs)} \leqq 0.6$）とすることで $f_0^{(rw)}$=0.6 との差を変化させ、それによる断層挙動の変化を調べた。その結果、一定の緩和時間であっても、 $f_0^{(rs)}$ を変化させると EQ - Stuck 遷移が起こることが分かった。また、 $f_0^{(rs)}$ を 0.39 程度まで小さくすると、Miyake and Noda (2019) の報告より一桁以上大きな値での EQ-Stuck 遷移が確認された。 f_0 の不均質性が大きくなるにつれて地震再来間隔は大きくなり、やがて永久固着へと遷移する。本研究ではさらに、 Ikari et al.(2011) 等を参考に摩擦パラメータ *a*, *b* の分布を再考した上で、$f_0^{(rs)}$と緩和時間の2次元でパラメータスタディを行い、 f_0 の不均質の影響を定量的に調べる。

© The Seismological Society of Japan

Temporal evolution of b-values in rate-and-state fault models with frictional heterogeneities

*Ryo Ito[1], Yoshihiro Kaneko[1]

1. Kyoto University

前震活動のメカニズムを理解することは，地震の予測にとって重要な問題であると同時に，震源物理の根本的な理解につながる．大地震の前の地震活動の観測により，Gutenberg-Richterの累積地震数とマグニチュードの関係における傾き，すなわちb値が，大地震の発生前に減少することが多数報告されている．例えば，2011年Mw9.0東北地方太平洋沖地震の震源域におけるb値が本震前に減少したことが観測されている(Nanjo et al.,2012)．しかし，観測されたb値の時間変化を物理的に解釈することは未だ困難である．ここでは，摩擦不均質性を伴う地震サイクルシミュレーションを用いて，b値の時間変化の再現を試みる．本震開始前に活発化する前震がみられるような摩擦パラメータの範囲を特定し，それらの前震を統計的に解析したところ，本震開始前にb値が減少するような前震活動を再現することができた．この結果は，摩擦不均質性が前震活動に大きな影響を与えることを示唆している．モデル内の前震活動におけるb値の変化のパラメータ依存性について考察する．

© The Seismological Society of Japan

Large-scale earthquake sequence simulations on 3D geometrically complex faults with lattice H matrices

*So OZAWA[1], Akihiro Ida[2], Tetsuya Hoshino[3], Ryosuke Ando[1]

1. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Information Technology Center, University of Tokyo

Large-scale earthquake sequence simulations with boundary element method (BEM) require huge computational costs in multiplication of a dense matrix and a slip rate vector. Recently, Hierarchical matrices (H-matrices) are often used to accelerate the multiplication. However, because of the complex matrix structure of the H matrices and communication costs between processors, it is not highly scalable and cannot be efficiently used on distributed memory computer systems. Recently, lattice H matrices are proposed as a way to improve the parallel scalability of H matrices. Here, we implement lattice H matrices in earthquake sequence simulations on 3D nonplanar faults. Our simulations using over 10^5 degree of freedom show parallel speed-up beyond 10^4 MPI processors and achieve >10-fold speedup compared to the best performance when the normal H matrices are used. By using this code, we can run unprecedented large-scale earthquake sequence simulations on geometrically complex faults with supercomputers.

© The Seismological Society of Japan

Steady-state pore pressure based on a hydraulic model considering changes in P-T conditions and clay dehydration due to plate subduction

*Shunya KANEKI[1], Hiroyuki NODA[1]

1. DPRI, Kyoto Univ.

間隙水圧の空間分布は、地震サイクルシミュレーションに代表される断層運動の数値計算を行う上で設定する必要がある境界値である。現在までに報告されている計算では、深さに対して線形に増加するモデルや、一定の深度以降は有効圧が頭打ちになるよう間隙水圧を設定することが多い。後者の圧力分布は、流体の物性値を定数、透水率を有効圧の急激な減少関数とした場合の横ずれ断層のモデルから計算されるものである（Rice, 1992）。しかし、天然のプレート沈み込み帯はこのモデルの前提を逸脱してるため、より現実的なモデルを構築して解を計算する必要があった。

近年の地震波・測地観測網の整備に伴い、スロースリップや低周波微動などのスロー地震は、世界中のプレート沈み込み帯で発生していることが明らかになりつつある。このようなスロー地震の発生は、断層中の高間隙水圧と関連付けて議論・解釈されることが多い。特に浅部スロー地震の発生深度は、粘土鉱物の脱水反応が起こる領域と空間的に重なる場合がある。しかし、脱水反応による間隙水圧への定量的な影響を評価した研究は稀であるため、脱水反応とスロー地震との関係はその有無も含めて不明な点が多い。

本研究では、Rice (1992) による既存のモデルをベースとして、沈み込みに伴う温度圧力条件の変化および粘土鉱物の脱水反応による岩石の体積変化・流体の湧き出しを考慮した水理学的モデルを構築した。一般的に断層帯の透水性は母岩と比べて高いことから、先行研究と同じく、流体は断層に沿ってのみ流れるとした。構築したモデルに基づいて間隙流体圧や脱水反応率など、諸量の時間発展と空間分布に関する偏微分方程式を立式し、定常状態の仮定と海底面での各物理量の初期値を用いた数値積分を実行することで、定常解の空間分布を求めることができる。今回は Runge-Kutta-Fehlberg 法を用いて、海底面から地震発生層下限（海底下 35 km）までの空間積分を数値的に行った。代表的なプレート沈み込み帯として南海トラフ熊野沖に着目し、種々の物性値は同地域から採取されたコア試料の値を参照した。海底面表層での岩種割合および流量は未知数であるため、これら二つについては値を振ってパラメータスタディを行った。

計算結果は大別して三つに分類でき、空間積分が系の底まで実行できないケース、系の底まで空間積分が実行できたが有効圧が負になる領域が存在するケース、系の底まで空間積分が実行できて有効圧が常に正になるケース、が存在した。最初のケースでは、海底面に与える流量が小さすぎたため、深度の増加に伴う流体源の減少によって流量が負になり、より深部で解が発散する挙動が見られた。二番目のケースでは、逆に海底面で与える流量が大きすぎたため、間隙水圧の勾配が静岩圧の勾配を超えてしまい、有効圧が負となっていた。最後のケースの解は、これら二つのケースのどちらにもならない中間の流量を海底面に与えた場合にのみ得られ、初期の泥岩割合が多いほど（透水率が低いほど）解の存在できるパラメータ空間が小さいことがわかった。このとき、有効圧の深度分布は完全な頭打ちにはならないものの、その勾配は緩やかになっていたことから、第一次近似としては深度に線形なモデルではなく既存の Rice (1992) のモデルを支持する結果となった。しかし、詳細に見れば有効圧に正の深度依存性が存在するため、地震時の応力降下量に深度依存性があるとする観測結果を支持している。系の底（海底下 35 km）での間隙圧比は概ね 0.9 から 0.95 の間を取ることが多かった。温度圧力条件の変化および脱水反応が有効圧に及ぼす定量的な影響は、海底面に与える流量の初期値に強く依存し、空間積分が底まで実行できないケースの流量に近づくにつれて、その影響が一桁ほど大きくなることがわかった。系の底から供給される流量を固定した場合、温度圧力条件の変化による有効圧への影響は岩種依存性が強く反映されたが、脱水反応による影響は岩種によらずおおよそ一定の値を取った。ま

© The Seismological Society of Japan

た海底面での初期流量が十分大きい場合、脱水反応が流体圧のソースではなく流体圧のシンクとして機能する場合もあることがわかった。プレート沈み込み帯を対象とした地震サイクルシミュレーションを行う場合、本研究で得られた解を境界値として用いることで、より現実的な数値計算を実施することができると期待される。また、脱水反応の有無によって有効圧が局所的に顕著に変化する様な挙動は得られなかったことから、粘土鉱物の脱水反応による流体圧の上昇が直接的にスロー地震を発生させるという仮説は支持されないことがわかった。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of parameter values for a slip- and time- dependent law using slip-stress relations of the Boso slow slips

*Reo Uchida[1], Toshinori Sato[1], Takuma Kobayashi[1,2]

1. Chiba University, 2. Asia Air Survey Co.,Ltd.

断層での摩擦構成則や有効法線応力、剪断応力を知ることは、断層面の挙動を理解し、地震等のイベントを理解する上で重要である。小林・佐藤（JpGU, 2019）は、房総沖スロースリップのすべり速度と応力変化から、すべり速度・状態依存摩擦構成則に基づいて、スロースリップが起こっている場の有効法線応力の絶対量を求める方法を提案した。本発表は、スロースリップでは摩擦力と剪断応力が釣り合っていることを用いて、すべりと応力変化からすべりと時間に依存する摩擦構成則のパラメータの推定を試みる。これにより観測からイベント発生場での摩擦構成則のパラメータを求めることができる。

用いたデータは国土地理院による日々の座標値（F3解）である。スロースリップによる変動を抽出するために線形トレンドや季節変動などを除き、なめらかなフィッティングを行い、3日間ごとの変動を取り出した。次にその変動データからABICインバージョン法を用いてすべり分布を推定した。求めたすべり分布からCoulomb 3.3を用いて応力変化の計算を行った。 すべりと時間に依存する摩擦構成則は、Aochi and Matsu’ura (2002) によるフラクタル的性質を持つ断層表面の変位に伴う変形と摩耗の効果に加え、断層表面の回復過程を示す凝着の効果を考慮した構成則を用いた。この構成則での重要なパラメータは、フラクタル的性質の持つ断層表面の上限界波長と摩耗係数、凝着係数である。

房総沖スロースリップのすべりと応力変化の観測値と構成則から求まる理論値の比較の結果、摩耗の効果のみを考慮した場合、房総沖スロースリップが発生している場のフラクタル的性質を持つ断層表面の上限波長はおよそ100cm程度、摩耗係数は0.01~0.1程度であることが推定された。また、発表時には、摩耗に加え、凝着の効果を考慮したパラメータの推定結果を述べる。

謝辞 解析では国土地理院の日々の座標値（F3解）とUSGSのCoulomb 3.3プログラムを使用しました。記して感謝します。

© The Seismological Society of Japan

Estimating Effective Normal Stress During Slow Slip Events From Slip Velocities and Shear Stress Variations

*Toshinori SATO[1], Takuma Kobayashi[1,2]

1. Graduate School of Science, Chiba University, 2. Asia Air Survey CO., LTD

スロースリップは、地震波を出さずにプレート境界等を10日～数か月かけて数十cmゆっくりすべる現象である。スロースリップはGNSS観測以降発見され、プレート境界でのエネルギー蓄積・解放の新たな1つの過程として位置づけられている。これを調べることはプレート境界のテクトニクス等を知る上で重要である。スロースリップの原因の１つとして、プレート境界面上の流体の存在が議論されている。

すべり速度状態依存摩擦則を用いたバネ・スライダーモデルを用いた理論的解析から、速度弱化の条件で準静的なすべりが起こることが示されている（Rice and Tse, JGR, 1986）。この解析によると、剪断応力変化とすべり速度のグラフ上のスライダーの軌跡は、準静的すべりが定常状態の摩擦則のラインに沿って徐々に加速し、そして減速することを示している。定常状態の摩擦則のラインの傾きは、摩擦係数をa、 b、有効法線応力を σ'_nとすると、$(a-b)\sigma'_n$ となる。

我々は、過去6回の房総沖スロースリップについて、GNSSデータを用いてすべりの時空間分布と剪断応力変化を求め、剪断応力変化とすべり速度のグラフを作成した。ほとんどのグラフ上の軌跡は理論的解析のものと類似していて、これは房総沖スロースリップは、上記の理論的解析の結果が適用可能であることを示している。(a –b)を-0.003とすると、軌跡の傾きから有効法線応力が深さ12.5～20.5 kmで10～50 MPaと推定された。この値はその深さの静岩圧（350～600 MPa）より著しく低く、高圧の流体の存在を示唆している。

謝辞
解析にあたり、国土地理院の日々の座標値（F３解）を使用しました。応力の計算では、米国地質調査所のCoulomb3.3を使用しました。ここに記して感謝します。

© The Seismological Society of Japan

Frictional properties of metagabbro gouge in centimeter scale -Toward understanding scale dependence of rock friction-

*Futoshi Yamashita[1], Kazuo Mizoguchi[2], Sachiko Iizuka[3]

1. NIED, 2. CRIEPI, 3. CERES Inc.

断層破壊シミュレーションやサイクルシミュレーションを実施するにあたり，センチメートルスケールの試料が示す摩擦特性は実大断層スケールにおいても同等であると暗に仮定されている．しかしながら，それが真に有効であるかはまだ不明な点が多い．この観点からYamashita et al. (2015, Nature)は，メートルスケールの変はんれい岩試料を用いた摩擦実験をおこない，定常摩擦係数の仕事率（せん断応力とすべり速度の積）依存性がセンチメートルスケールとは明確に異なることを明らかにした．彼らはさらにその原因が摩擦すべりにともない自発的に発生・成長する力学的不均質にあることを示したが，その実験は岩石同士を直接接触させた状態で行われており，自然断層と同様にガウジを含んだ断層の摩擦特性がスケールに依存するか否かは明らかではない．そこで著者らは断層摩擦特性のスケール依存性の解明に向けて様々なスケールにおけるガウジ摩擦実験を実施しており，本講演ではセンチメートルスケールにおける実験結果について報告する．

山下他（2020，地震学会）及び下田他（2020，地震学会）によるメートルスケールのガウジ摩擦実験結果と比較するため，同様にジェットミルにより粉砕した変はんれい岩の粉末粒子（平均粒径10 μm，最大粒径200 μm）を模擬ガウジとして用い，加圧前のガウジ層圧を3 mmとした．実験は電力中央研究所が所有する二軸摩擦試験機（Mizoguchi et al., 2021, EPS）により実施した．模擬断層面は長さ10 cm，幅5 cmである．実験中の垂直応力はメートルスケール実験と同様に3.4 MPaもしくは6.7 MPaの一定に保った．10分間加圧をした後，10 μm/sで4 mm変位させ，0.1-1.0-10.0-100.0 μm/sの速度ステップを3セット与えた．各速度での変位量は100.0 μm/sにおける1.0 mmを除き0.5 mmとした．速度ステップに応じた摩擦係数の変化が速度-状態依存摩擦則（以下RSF則）に従うと仮定し，各パラメタの推定をおこなった．摩擦データへのフィッティングにはSkarbek and Savage (2019, Geosphere)によるプログラムを利用した．下田他（2020，地震学会）の推定結果と比較するため，同様に速度低下時の応答にSlip law (Ruina, 1983, JGR)をフィッティングさせた．

得られたRSF則パラメタのうち，累積変位量が9.5 mmでのb-a及びD_cはどちらの垂直応力下でもそれぞれ1×10^{-3}，10 μmのオーダーとなった．これらの値は下田他（2020，地震学会）による推定結果と調和的である．このことから，比較的均質なガウジ層におけるRSF摩擦特性はスケールによって明確な違いを示さないことが示唆された．Yamashita et al. (2015, Nature)で確認されたようなスケール依存性が見られなかった理由として，ガウジ層がすべりに伴う力学的不均質の発生・成長を抑制したことが考えられる．今後，実験後に採取したガウジサンプルの観察等を通し，この仮説の検証をおこなっていく予定である．

© The Seismological Society of Japan

Calibration of AE sensor by wave propagation modeling on a 4-meter-long biaxial friction apparatus

*Kurama Okubo[1], Futoshi Yamashita[1], Fukuyama Eiichi[2,1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate school of engineering, Kyoto university

せん断応力の載荷によるひずみの蓄積，そして震源核形成から断層面の主破壊に至るまでの素過程の解明を目指し，大型岩石摩擦試験機を用いた室内実験が行われてきた．主破壊の直前に発生するAEイベントを前震とみなし，その統計的な性質についての研究が進められているが，それぞれの前震のすべり分布をはじめとする詳細な震源特性は明らかにされていない．その震源特性を精度よく決定するためには，まず岩石試料に取り付けられたAEセンサのキャリブレーションが必要である（e.g. Kwiatek et al., 2014）．そこで本研究では，ボールドロップ試験で得られた波形データと波動伝播の数値シミュレーションとを用いて，AEセンサのゲインと指向性を推定するための解析を行なった． ボールドロップ試験は，防災科学技術研究所が保有する大型二軸岩石摩擦試験機の下側岩石試料（インド産変はんれい岩，すべり面：長さ4.0 m x 幅0.1 m）を用いて行った．AEセンサの感度は，機器特性に加えて岩石試料との接着状態にも影響されるため，試料に取り付けた状態でのキャリブレーションが必要となる．高さ500 mmから直径3 mmの鉄球を断層面に自由落下させた際の衝撃を震源とし，それにより励起された弾性波を断層面下70 mmに片面あたり16個ずつ（計32個）取り付けたAEセンサ（Olympus V103-RM）を用いて計測した．計測した電気信号はプリアンプ(Physical Acoustics, 2/4/6C)によって40 dB増幅した．断層面の長手方向に沿った32箇所でボールドロップ試験を実施し，それぞれについてP波の初動到達時刻からボールの落下位置を決定した．次に，岩石試料およびそれを支える金属プレートの３次元数値モデルを作成し，震源決定によって求めたボールドロップ位置とHertzian impact theoryによるボールドロップ震源関数の解析解(Reed 1985; McLaskey and Glaser, 2009)を用いて測定点における速度波形を数値計算により求めた．波動伝播シミュレーションにはOpenSWPC(Maeda et al., 2017)を用いた．グリッドサイズは一辺0.5 mmとし，ボールドロップ震源のコーナー周波数0.1 MHzに対して最小波長あたりのグリッド数が20以上となるようにした． 数値シミュレーションではボールドロップ震源が励起する波の最大振幅は一様であるとしたが，鉄球の衝突速度や接触状態により実際の振幅は試行毎に異なると考えられる．また，AEセンサに関する指向性として，設置面の振動方向に対するAEセンサの鉛直成分感度についても検討する必要がある．本研究では，センサ感度に加え，ボールドロップ入力のばらつきを表す振幅係数，および指数関数型モデルに従うAEセンサの指向性を仮定した振幅補正モデルを提案し，その補正パラメータを用いることで観測波形がよりよく再現されることを確認した．プリアンプを含む感度は420±140 V/(m/s)，ボールドロップの振幅係数は0.6-2.1と推定された．またAEセンサの指向性については，入射角の増加に伴い最大20%の感度減少が示唆された．本研究ではさらに周波数・位相特性についても検討する．推定されたセンサ特性と岩石試料の数値モデルは，前震の震源特性の推定に活用され，前震によって生じた本震前の断層面のすべり分布を明らかにできると期待される．

© The Seismological Society of Japan

Microstructure in the gouge layer developed by large-scale velocity step change experiments

*Shun Watanabe[1], Futoshi Yamashita[2], Sumire Maeda[2], Akihiro Shimoda[3], Eiichi Fukuyama[1,2]

1. Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3. Nippon Life Insurance Company

近年、石油やシェールガス･オイル採掘のため、地下深くの岩盤に人工的に亀裂を入れる水圧破砕を行うことがある。その際、破砕流体を岩盤に注入するため、間隙水圧が上昇し、誘発地震が発生することがある。このような誘発地震の発生条件を特定するために、断層摩擦の性質を調べる必要がある。しかしながら、実スケールに近い岩石摩擦実験はあまり行われていない。今回、防災科学技術研究所（防災科研）にて行われた、ガウジ層を挟んだ載荷速度を段階的に変化させた大型岩石摩擦実験後のガウジ層を採取し、薄片を作成しその観察を行ったので、報告する。特に、実験によって形成されたせん断帯の形成と載荷速度変化実験によって得られた摩擦パラメータとの関係について調べた。
実験は、防災科研の大型２軸岩石摩擦試験機を用いて行われた。用いた岩石試料は、上部がL1.5 m×W0.5 m×H0.5 m、下部がL2.0 m×W0.1 m×H0.5 mの変斑レイ岩であり、これらを積み重ねた後、上方から法線応力を加え側方から剪断応力を加えることで実験を行った。接触すべり面積は0.15 m^2である。実験前に岩石試料間にガウジを厚さ3 mmとなるように散布して実験を行った。ガウジは、アイシンナノテクノロジーズ株式会社のジェットミルにより、供試体と同じ変斑レイ岩試料から,平均粒径10 μm，最大粒径200 μmとなるように粉砕して生成したガウジを用いた。各実験後に使用したガウジをすべて取り除き、実験ごとに新しいガウジを散布して実験を行った。実験は、法線応力を3.3 MPaかけたLB21-003, 004と、6.5 MPaかけたLB21-007, 008の4回行った。載荷速度は0.01 mm/s, 0.1 mm/s, 1 mm/sの間で段階的に変化させることを繰り返した。各実験の総変位量は87 mmであった。実験後、上部供試体を真上に持ち上げ、下部供試体表面上にガウジ層が露出する状態にした後、ガウジ層のサンプリングを行った。まず、整髪スプレーをガウジ層に吹きつけガウジ層を仮固定し、一定時間経過後カミソリとピンセットを用いて2 cm角程度の領域を採取した。採取したガウジ層試料はエポキシ樹脂により固化させ、すべ方向の断面の薄片を作成した。LB21-003の実験から2箇所、LB21-004, 008からそれぞれ3箇所、LB21-007から4箇所の計12カ所の薄片を作成した。作成した薄片は正立工業用顕微鏡システム（（株）オリンパス、BX53MTRF-S）を用いてガウジ層の微細構造の観察を行った。
薄片の観察により、法線応力の小さいLB21-003, 004の薄片に比べて法線応力の大きいLB21-007, 008では明瞭なせん断帯（Y面、R1面）が形成されており、法線応力が大きいほどガウジの細粒化が促進されせん断帯が形成されていることが確認できた。またR1面に形成されるリーデルせん断帯は観察した薄片12枚の内、LB21-007の2枚とLB21-008の1枚の計3枚でのみ形成されていた。この3枚のリーデルせん断帯の形成頻度を見ると、2〜3 mmおきにまとまって発生している箇所もあれば一つのせん断帯だけ孤立して形成されている箇所もあり様々であり、ガウジの細粒化の程度も含め、せん断帯の形成状況は空間的には不均質であることが分かった。Marone and Kilgore (1993, Nature)は、せん断帯の厚さがすべり弱化距離Dcに比例するという結果を得ている。このように薄片観察の結果からDcのような摩擦パラメータが推定できることは非常に有益である。今回の実験ではY面は供試体と境界に近いガウジ層上面及び下面付近に形成されていたため、サンプリングの際にYせん断帯全体をうまく採取できなかった。そこで、今回は、リーデルせん断帯の厚さに注目して解析を行うこととする。薄片観察で得られたリーデルせん断帯の厚さは30〜70 μmであった。一方、下田･他(2020, 地震学会)は、本実験のDcの推定を行っており、10〜100 μmと推定している。リーデルせん断帯の形成と摩擦パラメータとの関係を調べるため、本研究で得られたリーデルせん断帯の厚さと摩擦パラメータの関係を、他の既往研究による摩擦実験後のガウジ層に生じたリーデルせん断帯の厚さと摩擦パラメータの関係との比較において議論したい。

© The Seismological Society of Japan

Friction and wear properties of Indian sandstone with increasing work rate and generation and destruction of the fault mirror

*Sumire MAEDA[1], Futoshi Yamashita[1], Kurama Okubo[1], Eiichi Fukuyama[1,2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience , 2. Kyoto University

断層帯の幅は断層の累積変位量と正の相関があり，断層の成長や活動を評価する上での重要な指標の１つである．一方，Shipton et al. (2006) は砂岩内に発達する断層帯の幅が累積変位量に対して著しく小さいことを指摘した．その要因の１つとして，断層面に発達する‘Slickenside (鏡肌)’が挙げられる．Hirose et al. (2012) は石灰岩質砂岩を用いた高速剪断摩擦実験に基づき，試料の剪断面に発達したshiny slickenside surface (以下，鏡面) が断層帯の幅の成長率を小さくする可能性を示唆した．炭酸塩岩（炭酸塩鉱物を多く含む岩石も含む）に発達する鏡面に関する研究は多数行われており，その生成・破壊条件や摩擦・摩耗特性が明らかにされつつある (e.g., Smith et al., 2013; Verbern et al., 2014; Park et al., 2021)．一方で，石英質砂岩における鏡面の生成条件等については不明な点が多く，摩擦特性等とともに明らかにする必要がある．

そこで本研究では，インドラジャスタン州カラウリに産出する白砂岩(以下，インド砂岩)を対象とした高速剪断摩擦試験を行い，模擬断層面に発達する鏡面の生成・破壊条件及び摩擦・摩耗特性を明らかにする．実験条件は垂直荷重を0.5もしくは1.0 MPaとし，すべり速度（等価変位速度）を1.2×10^{-3}-1.7×10^{-1} m/sの範囲とした．本研究では，すべり距離が60-100 mの間で測定された摩擦係数の平均値(μ_{ave})を代表値として使用する．鏡面の生成・破壊条件が摩擦すべりによる温度上昇に伴う化学反応と密接に関連していると予想されるため，仕事率（剪断応力とすべり速度の積），温度，μ_{ave}の関係性を調べた．模擬断層面近傍の温度は赤外放射温度計（KEYENCE IT2-02, IT2-50）を用いて連続的に計測した．また，摩耗率を調べるため軸方向の変位をレーザー変位計（Micro-Epsilon, optoNCDT IDL1700-50）を用いてモニターした．

本実験結果から，仕事率，試料剪断面の構造，および摩擦係数には４つのフェーズがあることが判明した．１）仕事率が10^{-4} MJ m^{-2} s^{-1}のオーダーではμ_{ave}は約0.5を示し，剪断面に鏡面の発達を確認．２）仕事率が10^{-3} MJ m^{-2} s^{-1}を超えるとμ_{ave}は低下傾向を示し，仕事率が10^{-2} MJ m^{-2} s^{-1}の時にμ_{ave}は約0.2に減少．剪断面に鏡面の発達を確認．３）仕事率が3.6×10^{-2} MJ m^{-2} s^{-1}の時にμ_{ave}は約0.4まで増加．剪断面には顕著な摩耗痕が確認．４）仕事率が4.7×10^{-2} MJ $m^{-2}s^{-1}$の時にμ_{ave}は約0.3に減少．剪断面に摩耗痕と鏡面の両構造が確認．1回の実験（全すべり距離：～200m）中に有意な軸方向の変位は認められず，すべり距離に対する軸方向変位の変化はnm/mのオーダーであった．

炭酸塩岩を用いた実験では鏡面は高速度下で形成され，低速度下(< ~0.07 m s^{-1})では形成されないことが明らかにされている(e.g., Hirose et al., 2012; Siman-Tov er al., 2015; Park et al., 2021)．一方，インド砂岩は一部の条件（1.7×10^{-1}m/s，0.5 MPa）を除き，残りの全ての実験で鏡面の発達が確認できた．すなわち，鏡面の生成・破壊条件は岩種によって異なることを意味している．また，本研究の実験範囲では，鏡面が発達しない条件における一時的な摩擦係数の増加を除き，インド砂岩の摩擦係数および摩耗率が低いことが判明したことから，その著しく低い摩耗率は，鏡面が容易に形成されることに起因すると考えられる．Di Toro et al.（2011）は石英の非晶質化とゲル化により，石英岩の摩擦が非常に低いことを報告している．インド砂岩の構成鉱物の約70%は石英であることから，本研究で明らかとなった低摩擦・低摩耗率も石英の特性に起因すると考えられる．

本研究結果から，Ⅰ）岩種によって鏡面の生成・破壊条件が異なる，Ⅱ）砂岩の摩擦係数・摩耗率は構成鉱物の特性を強く反映している，ことが示唆された．これらの結果は、砂岩中に発達する断層帯の成長の理解に貢献すると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Existence of Weak Zones: Enhancing Dynamic Rupture or Not?

*Koji UENISHI[1,2], Kunihiro NAGASAWA[2]

1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

Existence of a mechanically weak zone such as a geological fault plane is quite often considered to enhance or promote propagation of dynamic rupture in a brittle solid. Indeed, extraordinarily accelerated high-speed ruptures and ensuing asymmetric seismic motion and structural failures due to the presence of large-scale fault planes have been indicated experimentally as well as numerically (e.g. Uenishi et al., *BSSA*, 1999; Uenishi, *Eng. Fail. Analysis*, 2015). However, for instance, as pointed out by Uenishi (*Proc. Mat. Sci.*, 2014), deflection or bifurcation of rupture propagation at another typical weak zone, namely, at an interface of a layered medium, is not usually taken into account in seismological studies, and it is not certain at all whether the existence of a weak zone really promotes seismic rupture propagation or not.

Therefore, in this study, by continuing our investigation into rupture development in a brittle solid that contains weak zones or sets of small-scale parallel cracks in certain areas (Uenishi et al., *SSJ Fall Meeting*, 2017, 2018, 2019; Uenishi and Nagasawa, *SSJ Fall Meeting*, 2020), we examine the effects of positions, density and individual length of the small-scale cracks. As before, using a digitally controlled laser cutter, we prepare rectangular photoelastic polycarbonate specimens with small-scale cracks that are parallel to each other and have some dip angle. Each specimen is externally loaded by a tensile testing machine quasi-statically at a constant strain rate.

Our experimental observations using a high-speed digital video camera show that weak zones do not always promote propagation of primary rupture and they can rather arrest and "absorb" rupture propagation itself. Furthermore, the experimentally obtained snapshots indicate that a sudden spatial change of crack density in a weak zone can mechanically serve as a large-scale plane of weakness. We also illustrate that the length of each crack plays a decisive role in rupture development in and around a weak zone.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 20K04680.

© The Seismological Society of Japan

On the Dynamic Stability of a Granular Slope

*Koji UENISHI[1], Dongyun XI[1]

1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

In our previous study (Uenishi and Goji, *SSJ Fall Meeting*, 2018), in order to deepen our understanding of the fundamental mechanisms associated with dynamic phenomena involving large deformation like landslides due to earthquakes, dynamics of granular media subjected to impact loading has been investigated. In particular, wave and rupture evolution inside the media under dry conditions has been experimentally observed by employing the technique of dynamic photoelasticity in conjunction with a high-speed video camera. Using a digitally controlled laser cutter, penny-shaped birefringent particles have been prepared, and two-dimensional granular slopes consisting of the particles and having different inclination angles have been constructed on a rigid horizontal plane. Impact loading has been applied to each of the slopes on the top horizontal free surface. The experimental observations have clearly indicated that typically there exist two distinct patterns of dynamic failure in granular slopes under consideration: (1) Mass flow and total collapse of the whole slope owing to unidirectional stress transfer; and (2) toppling-like separation of the slope face only, induced by widely spread multi-dimensional waves (Uenishi and Goji, *Proc. Strut. Integrity*, 2018). However, the previous experiments have been performed in the "monolithic" framework and no inhomogeneity in and around slopes has been taken into account.

Therefore, in this contribution, possible influence of material inhomogeneities on the dynamic stability of a granular slope is examined. Firstly, rigid plates are placed over certain boundaries of the granular slopes, and the mechanical roles of confining pressure in the generation of dynamic particle motion, stress transfer and structural collapse are experimentally assessed. Secondly, the open source discrete element code ESyS-Particle is used to numerically reinforce the outcome of the experimental observations and evaluate not only the effects of material stiffness but also those of inhomogeneities like cavities and seismic barriers placed in the granular slopes.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 20K04680.

© The Seismological Society of Japan

Physical Properties of Core Samples Recovered from a seismogenic zone and the host rock of a M5.5 Earthquake

*Kensuke Sakaguchi[1], Shunsuke Yoshida[2], Mitsuya Higashi[3], Yuki Yokoyama[4], Koichiro Suzuki[1], Yasuo Yabe[5], Dakalo Ligaraba[6], Nandipha Masondo[6], Tetsuro Hirono[7], Yuji Yamamoto[8], Takuya Matsuzaki[8], Hiroshi Ogasawara[9], Seiya Ohba[9], Masaya Wakimoto[9]

1. Graduate School of Sci. Eng., Ritsumeikan Univ., 2. Japan Mint, 3. Mazda Motor Corporation, 4. TechnoPro, Inc., 5. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 6. Graduate School of Geoscience, University of the Witwatersrand, 7. Graduate School of Science, Osaka Univ., 8. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi Univ., 9. College of Sci and Eng., Ritsumeikan Univ.

地震発生場については、地表や海底付近からの遠隔観測が充実し、近年、研究の進展がめざましい。これらの研究では、観測結果を説明する物理パラメータを地震発生場と想像される場所に分布させ、観測データに合うようにその時空間発展を運動幾何学的に拘束して地震発生場の理解を深めている（例えば、加藤、2012）。ところが、なぜそこが地震発生場になったか、あるいは、実際に、そこで局所的に岩石と破壊と水がどのように相互作用し、応力やレオロジー特性の不均質が生まれているかを決定づけるためは、地震発生場とその周囲の直接的な調査が不可欠である（例えば、廣野・他、2013）。

地表や海底からの掘削調査が直接調査の唯一の方法である。地震発生場に到達する掘削と直接調査に挑戦したものとしては、例えば、米国のサンアンドレアス断層掘削計画（例えばZoback et al. 2011）、日本の南海トラフ地震発生帯掘削計画（Tobin et al. 2020）などがある。しかし、これらの計画では、地震発生場まで到達させることや、主にロータリー掘削であるため、試料を破壊せずに十分な量を回収することに成功していない。

この残された課題に取り組むことのできる絶好の機会が、2014年に南アフリカMoab Khotsong金鉱山下で発生した、左横ずれ型のM5.5オークニー地震であった。ICDP 「DSeis計画」は、地下2.9㎞の密度と地震波速度が上部地殻に近い29億年前に堆積し変成した堅固な岩盤内にある坑道から三本の孔（Hole A,B,C）をワイヤライン・フルコア掘削し、総延長1.6㎞のコア試料を掘削時のダメージを抑制して回収することに成功した。Hole A（817m）はオークニー地震の余震発生帯まで約100mの位置に到達した。Hole B（約700m）はM5.5断層上部と交差させることができた。しかし、孔口から612～620ｍの破砕帯区間（掘削水のロスもあった）はコアが十分回収ができなかった。そのため、Hole Bの544mから分岐孔であるHole C（96m）を掘削し、最も重要な区間は1.5m長のトリプルチューブでコア試料をより多く回収できた。

横山（2020 阪大修論）は回収したコア試料から、破砕帯付近については1m間隔を目安に、1cm厚のディスクを切り出し、薄片観察や粉末XRD、XRF分析を行い、断層交差部付近がタルクや黒雲母に富む剪断構造を持つことを確認した。 吉田（2021 立命大修論）と阪口（2021立命大卒業研究）では孔内検層データや高知コアセンターに輸入された破砕帯付近のコアのP波伝播速度、密度、自然γ線、磁化率を測定し、X線CTスキャンによる分析の結果をとりまとめた。本ポスターでは、この結果を報告する。

母岩に貫入したドレライト・シルは密度とP波速度が下部地殻物質並みであった。Hole BとCの断層交差部直前からは、密度は下部地殻並み（約3000kg/m^3）である厚さ数ｍランプロファイア・ダイクが始まり、Hole BとCとの断層交差位置からダイクの走向はM5.5断層の走向・傾斜と調和的であることがわかった。また、ランプロファイア・ダイクの区間には、P波速度が低く、磁化率が高い部分があり、そこは、横山（2020）が確認したタルクが多い場所と一致した。
X線CTスキャンは、全輸入コアに対して医療用（分解能0.35mm以下）のものを、一部のコアに対しては産業用（分解能数十μm）のものを実施してある。本ポスターでは、これらから読み取れるCT値の3次元分布の特

© The Seismological Society of Japan

徴との比較もとりまとめて報告する予定である。

謝辞：
掘削と孔内検層はICDPとMoab Khotsong鉱山、高知コアセンターの非破壊分析は同センター共同利用、南アフリカと高知コアセンターでの活動はJSPSCore-to-Core Program, 災害の軽減に貢献するための地震火山研究計画、立命館大学の支援を頂いた。南アフリカでは、CSIR、Witwatersrand大、CGSの方々のお世話になった。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S10. Active faults and historical earthquakes

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P6 (ROOM P)

[S10P-01] Gravity anomaly analyses of the Chojagahara and Yoshii faults

Yuki Matsui[1], Akihiro Sawada[1], ○Yoshihiro Hiramatsu[1] （1.Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S10P-02] Damages of stonewalls and seismic intensity distribution of the 1914 Sakurajima earthquake in Kagoshima city, Japan

○Reiji KOBAYASHI[1] （1.Kagoshima University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S10P-03] Verification of the doubtful damaging earthquake in the late Edo period by using historical diary records (1)

○Tomoya HARADA[1], Akihito NISHIYAMA[2], Akihiko KATAGIRI[3], Rei MIZUNO[4], Seiya YOSHIOKA[4] （1.Independence, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recover, Niigata University, 4.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Gravity anomaly analyses of the Chojagahara and Yoshii faults

Yuki Matsui[1], Akihiro Sawada[1], *Yoshihiro Hiramatsu[1]

1. Kanazawa University

・はじめに
長者ヶ原ー芳井断層は，広島県南東部から岡山県南西部にかけて北東－南西走向の右横ずれ断層で，神辺平野から南西に延びる長者ヶ原断層と北東に延びる芳井断層から構成される（地震調査委員会, 2016）．両断層の間隔は最大約3 kmであるが，地下の断層構造の連続性については明らかではない．本研究では長者ヶ原ー芳井断層周辺で重力測定を実施し，重力異常データの解析から得られた長者ヶ原ー芳井断層の断層構造について報告する。

・データおよび解析方法
長者ヶ原ー芳井断層周辺地域において、2020年9月13日～19日と2020年11月29日～12月5日に，計212点の重力測定を実施した．使用した重力計は金沢大学所有のScintrex社製CG-3M型重力計である．測定点の緯度，経度および標高は，GNSSにより決定した．解析には金沢大学既存重力データに加え，国土地理院(2006)，Yamamoto et al. (2011)，産業総合技術研究所地質調査総合センター(2013) の重力データを使用した．地形補正とブーゲー補正に用いる仮定密度は，産総研(2009) が岡山地域でABIC最小化法により求めた2550 kg/m^3 を使用した．重力データは通常の補正に加え，10mDEMによる地形補正，ローパスフィルター処理，トレンドの除去を行った．この重力異常に対して重力勾配テンソル解析を行い，水平一次微分(HD)，鉛直一次微分(VD)，鉛直一次微分で正規化した水平一次微分(TDX), 次元指数（Di）を計算した（楠本, 2015; Hiramatsu et al., 2019）．また，神辺平野の断層を横断する測線で二次元タルワニ法による密度構造解析を行った．

・結果と考察
長者ヶ原ー芳井断層周辺でのHD, VD, TDX の分布は，それほど明瞭ではないものの，概ね両断層に沿ってHDとTDXの高い値やVDのゼロ等値線が見られ，地下の断層構造を反映したものと考えられる．広域の解析結果からは神辺平野内ではそのような特徴的な分布は確認できなかったが，神辺平野周辺に範囲を限定した解析では断層沿いにTDXの高い値が分布するようにも見える．両断層上では概ねDi < 0.5であり，二次元的な地下構造を示す．一方，芳井断層と神辺平野の断層の間ではDi > 0.5となり，地下の断層構造の不連続性が示唆される．神辺平野の断層を横断する測線での二次元タルワニ法による密度構造解析からは，地下約400 mに鉛直変位量60 mの断層構造を仮定した場合に観測された重力異常値が再現されることが示された．

・謝辞
本研究では，国土地理院，Yamamoto et al. (2011)，産業総合技術研究所地質調査総合センターによる重力データを使用しました．現地での重力測定では，金沢大学の稲生健人，深田雅人，山本史に協力いただいた。記して感謝します．

© The Seismological Society of Japan

Damages of stonewalls and seismic intensity distribution of the 1914 Sakurajima earthquake in Kagoshima city, Japan

*Reiji KOBAYASHI[1]

1. Kagoshima University

1914年1月12日、桜島大正噴火が継続している中、マグニチュード (M) 7.1の地震が発生した（以降、1914年桜島地震と呼ぶ）［例えば、今村 (1920)、Omori (1922)、宇津 (1979)］．この地震による死者数は29人であり、桜島大正噴火の全体の死者数の半分を占めている［例えば、今村 (1920)］．鹿児島市内においては12人が石垣または石塀の倒壊によって亡くなっている［鹿児島新聞記者十餘名 (1914)］。

この地震について小林・他 (2017) は武村・虎谷 (2015) の方法を使って住家の全潰率と全半潰率から鹿児島市内の震度を評価した。その結果、先行研究の今村 (1920) の震度IVや深見 (2000) の震度6弱の領域と、本研究の震度6弱以上の領域とは調和的であった。しかし、今村 (1920) の震度I～IIIや深見 (2000) の震度4～5強と、本研究の震度階級とはあまり調和的ではなかった。今村 (1920) や深見 (2000) では石塀倒潰率を考慮しているのに対し、本研究では考慮していないことが要因と考えられた。

そこで、深見 (2000) の方法を参考にして、石塀倒潰率を考慮した震度の評価を行った。深見 (2000) は「高級住宅街（平之・東千石・西千石など）においては、家屋倒壊率が0%であっても、石塀倒壊率が顕著（50%以上）な地域」を震度5強、「石塀倒壊率が数%～49%」を震度5弱とした。しかし、この方法の妥当性を定量的に検証したものはなかった。そこでこの妥当性を文献調査によって確認することにした。

内田 (1915) は鹿児島市で使われていた複数の石材の強度を検討しており、一部の種類を除いて極めて脆弱としている。さらに内田 (1915) は接合面に使われている材料や基礎などを詳しく検討している。今村 (1920) は内田 (1915) の結果をまとめて、1000 mm/s/s 前後の水平動で傾倒する、としている。震度と加速度とは単純には結びつけられないが、1000 mm/s/sであれば震度5弱は妥当であろう［例えば気象庁 (1996)］。

震度階解説表では、塀の被害の記述がある。現在の気象庁震度階級関連解説表では、塀の中でも、ブロック塀での記述となっている。東京都総務局災害対策部 (1983) は震度階解説表において、ブロック塀に加えて大谷石塀についても記述している。震度5弱で「施工の悪い大谷石塀は倒れるものがある」、震度5強で「大谷石塀はほとんど倒れる」としている。この解説表では、一応の目安として「……ものがある」という表現は「震度階に特徴的に現れ始めるといった程度の現象で、上記のように現象を量的に表現できかねる場合」（ここで、上記というのは、量的に表現できている他の目安を示している）、「ほとんど」は「80～90%」に対応するとしている。1914年の鹿児島市における石塀と、1980年頃の大谷石塀との違いが不明であるので、この記述をそのまま当てはめて良いかも不明ではある。しかし、深見 (2000) が採用した、倒潰率数%～49%を震度5弱、50%以上を震度5強とする評価基準は、東京都総務局災害対策部 (1983) の震度階解説表と大きく矛盾することはないように思われる。

本研究と深見 (2000) の方法を統合すると、武村・虎谷 (2015) の方法で震度4であっても、石塀倒潰率が5%以上50%未満の時に震度5弱と評価した（深見 (2000) の数%を本研究では5%とした）。また、武村・虎谷 (2015) の方法で震度4-5弱であっても、石塀倒潰率が50%以上の時に震度5強と評価した。

その結果、石塀倒潰率が50%以上である中央部の新照院町、平之町、西千石町において、震度4から震度5強に2階級大きくなり、その周囲でも震度が1階級大きくなった。これらの地域は氾濫原低地や三角州・海岸低地となっており、かつ盛土となっている。こうした地盤によって、家屋より石塀に影響しやすい強震動となったのかもしれない。

© The Seismological Society of Japan

この一連の研究は小林 (2021, 地震第2輯) で公表された。

© The Seismological Society of Japan

Verification of the doubtful damaging earthquake in the late Edo period by using historical diary records (1)

*Tomoya HARADA[1], Akihito NISHIYAMA[2], Akihiko KATAGIRI[3], Rei MIZUNO[4], Seiya YOSHIOKA[4]

1. Independence, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recover, Niigata University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

『日本被害地震総覧599-2012』（宇佐美･他，2013）には，震央やマグニチュードが推定できない被害地震が数多く掲載されており，中には「疑わし」，「後考をまつ」，「要再考」と記述されている地震もある．これらの地震の多くは，後世の史料や乏しい情報の文献に基づいているため，その存否は疑わしい．このような地震は，例えば，南海トラフ巨大地震発生前後における内陸地殻内の地震活動を検討する際などに，取り扱いが非常に難しく，実態の検討が急務である．しかしながら，その検討は，収集・翻刻された複数の史料の記述内容を，地震学者自らが読解する必要があり，大変な労力と時間を伴うためにこれまであまり進捗していない．

最近，歴史学研究者が中心となって，江戸時代末期における日本全国の日記史料に記録された有感地震のデータベース化が開始された（西山，2019）．現在，52点の日記史料における有感地震の記録が「日記史料有感地震データベース（試作版）」（西山･他,2020）として公開されており（「日記史料DB」），疑わしい地震の検討が容易になってきた．「日記史料DB」では，「有感地震のない日についてもデータ化している」と説明されているように，“地震があった日”と同じく“地震がなかった日”が分かる．同時代史料における“地震がなかった日”の情報は，地震の存否を明らかにするために非常に重要である．すなわち，後世の史料や文献に被害地震の存在が記述されていても，複数の日記史料に被害や揺れの記録がなければ，その存在は明確に否定される．逆に，被害記録の少ない地震であっても，複数の日記史料に記録があれば，その存在は確実となる．

本研究では，嘉永元年（1851年4月）以降江戸時代末期に発生した存否の疑わしい被害地震について，「日記史料DB」の有感記録を用いた検討を行った．現在，「日記史料DB」で公開されている有感記録の期間は，一部の日記史料を除き嘉永六年(1853年)～安政三年(1857年)であるため，期間外の地震については，他の日記史料の原典や信頼できる翻刻史料を用いて検討した．今後，嘉永元年以前に発生した地震についても，順次検討を進めていきたい．

現時点の検討結果は以下の通りである．**①嘉永七年閏七月二日(1854年8月28日)八戸の地震**:「奥南温古集」(明治23年に南部家に献上された八戸藩の歴史書)にある地震．「日記史料DB」の「遠山家日記」(現青森県八戸市)，「弘前藩庁日記」(現青森県弘前市)，「門屋養安日記」(現秋田県湯沢市)，「宗尹日記」(現山形県尾花沢市)，「桜田良佐日記」(現宮城県仙台市)には，この日の地震記録はない．五日の誤りと考えられる．**②嘉永七年八月二十日(1854年10月11日)伊勢の地震**:『木曾岬村史』のみに掲載される地震．「日記史料DB」の「浄慈院日別雑記」(現愛知県豊橋市)，「竹川竹斎日記」(現三重県松阪市)，「万相場日記」(現滋賀県蒲生郡竜王町)には，この日の地震記録はない．安政二年八月二十日の台風被害の誤記と考えられる．**③安政二年六月二十三日(1855年8月5日)二戸の地震**:『南部二戸郡淺澤郷土史料』内の83歳の老人の証言(大正13年)による地震．「日記史料DB」の「遠山家日記」，「弘前藩庁日記」，「門屋養安日記」，「宗尹日記」，「桜田良佐日記」には，この日の地震記録はない．安政三年八戸沖の地震(M7.5)の記憶違いと考えられる．**④安政二年七月四日(1855年8月16日)米子の地震**:「控帳」(鳥取県立博物館所蔵)の「去る四日」を安政二年七月四日と考えたことによる地震．「日記史料DB」の「堀敦斎日記」(現鳥取県鳥取市)，「土屋家日記」(現広島県福山市)，「多度津藩日記」(現香川県仲多度郡多度津町)，「今中家日記」(現広島県広島市)，「伊予小松藩会所日記」(現愛媛県西条市)には，この日の地震記録はない．「去る四日」は，嘉永七年十一月四日と考えて良いのではないか．**⑤安政二年十月七日(1855年12月10日)伊予の地震**:『大洲市誌』のみにある地震．「日記史料DB」の「伊予小松藩会所日記」，「今中家日記」，「広瀬久兵衛日記」(現大分県大分市)，「佐伯藩日記」(現大分県佐伯市)，「中村平左衛門日記」(現福岡県小倉市)には，この日の地震記録はない．嘉永七年十月七日の伊予西部の地震の誤りと考えられる．**⑥安政三年十一月十二日(1856年12月9日)益田の地震**:『益田市史』の

© The Seismological Society of Japan

みにある地震．「日記史料DB」の「今中家日記」，「土屋家日記」，「伊予小松藩会所日記」，「古谷道庵日乗」(山口県下関市)，「中村平左衛門日記」には，この日の地震記録はない．『益田市史』には，当地に被害を与えた安政五年石見の地震(M6.2±0.2)の記述がないためその誤記と考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P7 (ROOM P)

[S12P-01] **Development of the photoelastic experimental system using gel medium to observe induced earthquakes caused by water injection**

○Nana YOSHIMITSU[1], Eiichi FUKUYAMA[1,2], Shiro HIRANO[3], Masato OSAKI[1] （1.Kyoto Univ., 2.NIED, 3.Ritusmeikan Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S12P-02] Calibration of broadband ultrasonic transducers with sensitivity up to about 4 MHz

○Hironori KAWAKATA[1], Tomohiro Ohuchi[2] （1.College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 2.Geodynamics Research Center, Ehime University）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Development of the photoelastic experimental system using gel medium to observe induced earthquakes caused by water injection

*Nana YOSHIMITSU[1], Eiichi FUKUYAMA[1,2], Shiro HIRANO[3], Masato OSAKI[1]

1. Kyoto Univ., 2. NIED, 3. Ritusmeikan Univ.

近年の資源採掘技術の進歩はこれまで以上に生産率を上げることを可能にしたが，採掘の影響で発生する誘発地震がしばしば問題となっている．その一因として，ボアホールへの流体注入の影響が指摘されている．注入された流体が地殻中の既存弱面の強度を下げ，地震が発生しやすくなると考えられている．この過程における弱面や地殻内の応力変化を視覚的に観察することを目指して，本研究では寒天ゲルを用いた光弾性実験システムの確立を目指した．光弾性とは，透明な弾性体に外力を加えると応力の大きさに応じて光学的異方性が発生する現象であり，機械や構造物にかかる応力の解析にしばしば利用されてきた．光弾性を地震メカニズムの研究に利用した例は，Rosakis et al. (1999, Science)やYoshioka and Sakaguchi (2008, Advanced in Geosciences)のプラスチックを用いた実験事例がある．桑野 (2015, 東レ理科教育賞 受賞作品集)や桑野・他 (2011, 日本地震学会ニュースレター)は弾性波速度の遅い寒天ゲルを利用することで，波動伝播や断層の動的破壊が観察できることを示した．

薄板状にした寒天ゲル媒質を二次元モデルとして，ボアホールを模したアクリルパイプを介して注射器から水を注入し，媒質中を水が伝播する様子や断層が滑る様子を観察する．実験では150 mm x 30 mm x 150 mmの薄型水槽にゲルを注入して固めた．媒質の作成には粉状になった寒天末を利用した．異なる濃度の試料を複数作成・比較したところ，高濃度の硬い媒質には人力での安定的な注水が困難であったため，濃度１％の媒質を解析に用いることとした．光弾性実験から得られる応力情報は主応力差と主応力方向であるが，これらの情報を視覚的に分離するために，光源-偏光板A-1/4波長板A-ターゲット媒質-1/4波長板B-偏光板B-カメラ, の順に波長板と媒質を配置することで，円偏光を用いて等色線縞（主応力差）を得た．

まず断層のない媒質に注水を実施したところ，パイプ先端からモードIで亀裂を生成しながら左右に水が浸透していく様子が見られた．その際に，開口部先端の亀裂進展方向と直交する方向に強い応力集中が認められた．また硬さの違うゲルを用いてパイプに対して45度の角度で層境界を作成したところ，層境界の破壊は弱面のない部分の破壊に比べてはるかに高速で亀裂が進展した．

観察の結果から，これまで用いられてきた光弾性媒質よりもやわらかい寒天ゲルを用いることで，媒質内における流体の動きとそれに伴う応力変化を観察できることがわかった．今後，媒質や断層により適切な強度を与えるために実験条件を精査するとともに，応力の時空間変化の定量的解析を試みる．

© The Seismological Society of Japan

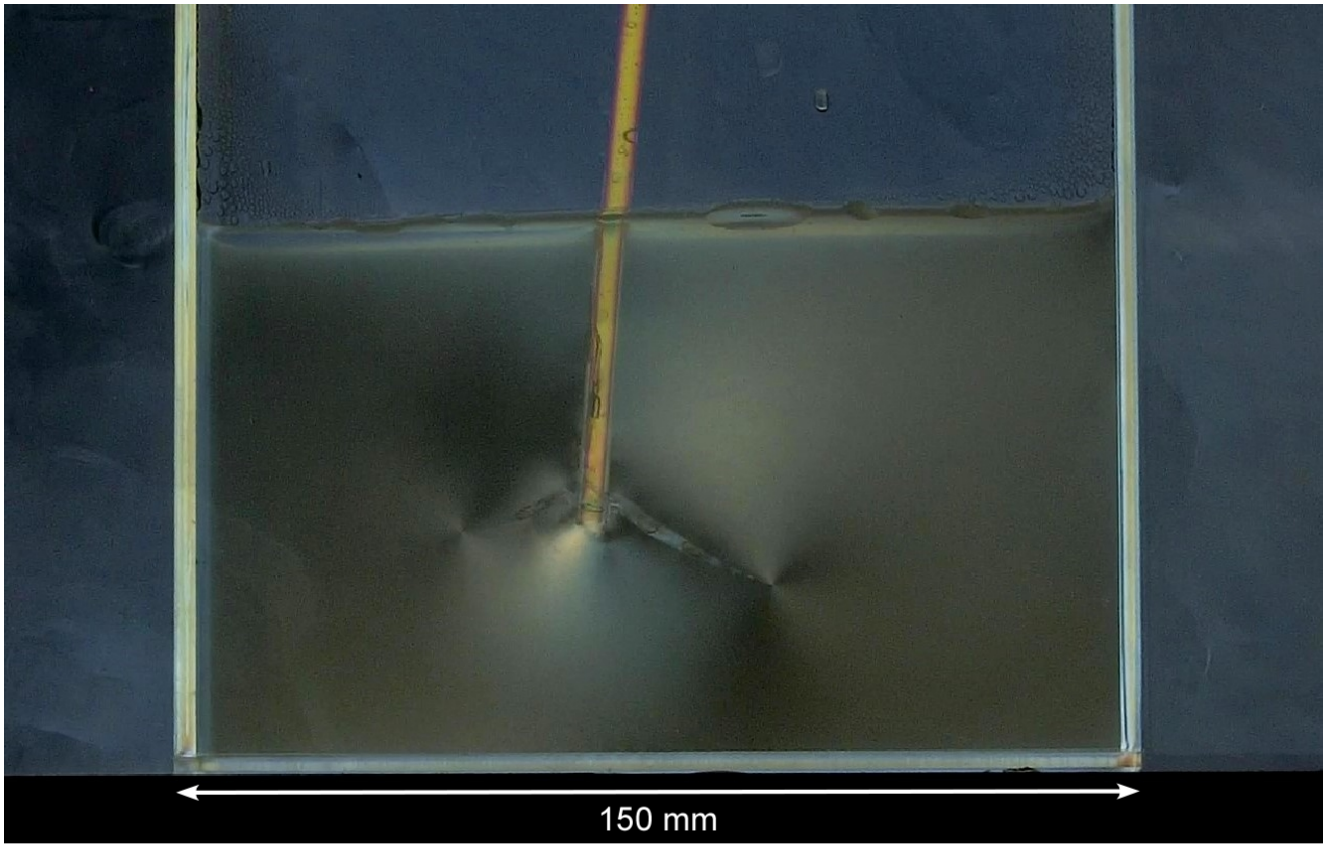


Figure: Snapshot of the photoelastic image during water injection into the gel medium.

© The Seismological Society of Japan

Calibration of broadband ultrasonic transducers with sensitivity up to about 4 MHz

*Hironori KAWAKATA[1], Tomohiro Ohuchi[2]

1. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 2. Geodynamics Research Center, Ehime University

岩石試料の破壊にともなう微小破壊（アコースティック・エミッション、以下AE）に関し、多くの地震学的手法を用いた研究が実施されてきた。最大振幅値を利用した振幅別頻度分布の指標*m*値およびその時間変化に関する研究に端を発し、震源決定が可能になった後は、振幅を利用した簡易的な相対マグニチュードを利用した規模別頻度分布の指標*b*値、震源の時空間分布に関する研究へと発展した。近年は広周波数帯域に感度を持つトランスデューサが活用可能になり、三軸圧縮試験下では地震モーメントとコーナー周波数に関するスケーリング則がAEと自然地震で共通することが明らかにされた（例えばYoshimitsu *et al.*, 2014; GRL）。また、一軸圧縮下の水圧破砕実験においてはモーメント・テンソル推定が実施され、剪断型、開口型を中心とする様々なメカニズム解を示すAEの存在が明らかにされた（例えばTanaka *et al.*, 2021; GJI）。これらの解析は10 cmオーダーの試料を用いた試験で得られた波形に対するものであるが、より高圧下での試験の場合、試料サイズは1 cmにも満たないようなものとなる。この場合波長を考えると、これまでの広帯域トランスデューサの活用範囲上限である1-2 MHzでは十分ではなく、少なくとも4 MHz程度に上昇させる必要がある。

マルチアンビル型高圧発生装置を用いた高圧力環境においては、従来型の圧電素子を用いた計測による震源位置決定がde Ronde *et al.* (2007; GJI)によって実現されたことに端を発し、D-DIA型変形装置を用いた変形試験時のAE計測が多数おこなわれるようになった（例えばSchubnel *et al.*, 2013; Science）。これらの研究では、６個のアンビル背面に従来型の圧電素子を貼り付け、AEの初動時刻、極性、振幅を用いて、モーメント・テンソル解を得る試みがなされているが、Tanaka *et al.* (2021; GJI）などでも指摘されている通り、計器特性の補正をおこなうことは必須となる。

そこで本研究では、沈み込むスラブ内浅部の温度圧力条件下（1-2 GPa, 400-900℃）において発生するAEの高品質かつ補正可能な波形を取得し、モーメント・テンソル解の時空間分布、地震モーメントとコーナー周波数に関するスケーリング則などの解明を目指し、小型の広帯域超音波トランスデューサをD-DIA型変形装置への導入に向けて、4 MHz程度の高周波数帯域までの較正を実施した。

広帯域トランスデューサとしては、Yoshimitsu *et al.* (2014; GRL）において使用された特注仕様のもの(富士セラミックス社製5145SMAT-1152)をベースとし、信号線取り出し部分を改変したものを使用する。愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター所有のD-DIA型超高圧変形装置 Madonna Iに使用するアンビルの台座にトランスデューサを貼り付け、アンビルの試料（圧媒体）に接する側の面に貼り付けたOlympus V106探触子から疑似矩形波を送信し、その信号を計測する。また、同じ送信に対する信号をレーザー・ドップラー速度計（LDV）でも受信し、両信号を比較する。上記以外の較正に使用する信号の取得方法については、Yoshimitsu *et al.* (2011; BSSA)に準じる。

トランスデューサとLDVで取得された信号、および0-0.2 ms分の両波形（テーパー処理後）の振幅スペクトルを図１に示す。振幅スペクトルを比較したところ、4 MHz程度まではS/Nが１より高く、100kHz-4MHzの範囲においてトランスデューサによる電圧記録（単位V）の振幅スペクトルに周波数の0.84乗をかけ、$10^{5.5}$で割るとLDVの速度記録（単位m/s）の振幅スペクトルと良い一致を示した。そこで、簡易的にこれをトランスデューサの特性として波形の補正を実施した。20kHz-1MHzの範囲に絞って波形比較をおこなうと（図２）、位相も含めて非常に良い一致が見られた。これより高い周波数帯においても、少しの時間ずれは見られたものの比較的似た波形が得られ、位相に関する較正も期待できる結果が示された。以上の通り、3-4 MHz付近ではLDVの感度が必ずしも高くないものの、トランスデューサでは4 MHz以下では100倍程度のS/Nが得ら

© The Seismological Society of Japan

れ、このトランスデューサを使用することで、D-DIA型超高圧変形装置を用いたGPaレベルの圧力条件下での良質のAE波形を取得できる可能性が示された。

© The Seismological Society of Japan

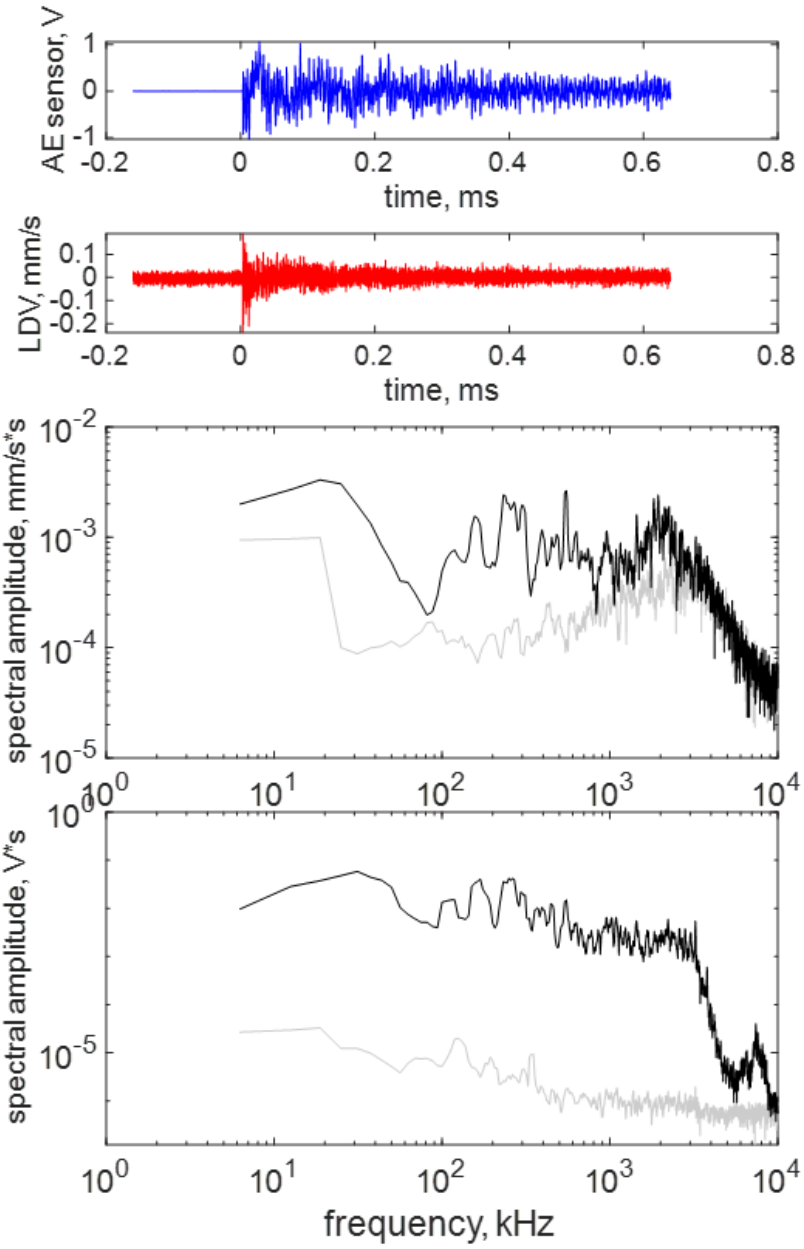


図１．トランスデューサ（青）、LDV（赤）による波形記録（LDVは4 MHzのLPF処理後）と両者の振幅スペクトル（黒上：トランスデューサ、黒下：LDV）。灰色はノイズスペクトル。

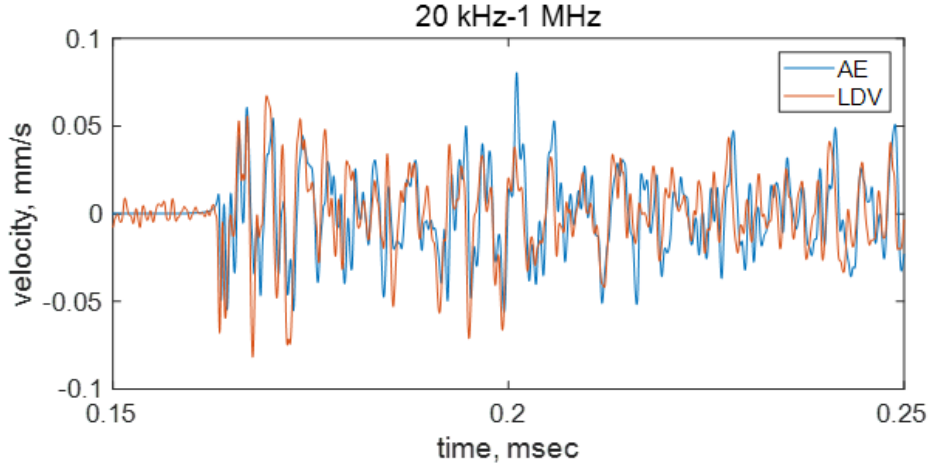


図２．補正後のトランスデューサ（青）、LDV（赤）による速度波形。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S14. Earthquake prediction and forecast

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P8 (ROOM P)

[S14P-01] Efficiency of earthquake forecast models based on the information of the earth tidal correlation of background seismicity along the Tonga-Kermadec trench

○Fuyuki HIROSE[1], Kenji MAEDA[2], Osamu KAMIGAICHI[3] （1.Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2.Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency, 3.Japan Meteorological Business Support Center）

3:30 PM - 5:00 PM

[S14P-02] Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

○Hironobu KAMIKUBO[1] （1.Hamamatsu Hokusei Jhs）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Efficiency of earthquake forecast models based on the information of the earth tidal correlation of background seismicity along the Tonga-Kermadec trench

*Fuyuki HIROSE[1], Kenji MAEDA[2], Osamu KAMIGAICHI[3]

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency, 3. Japan Meteorological Business Support Center

背景地震活動の潮汐相関が大地震前に高くなり，大地震後に低くなると報告されている．しかしながら，先行研究は特定の大地震後に回顧的に解析された結果であり，他の大地震についても同様のパターンを示すのかや，大地震とは無関係な平常時に潮汐相関が低い状態を保っているのかどうかは漠然としている．そこで本研究では，背景地震活動の地球潮汐相関情報に基づいた地震予測モデルの有効性について，トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型地震（1977～2020年，M_w 5.5以上，深さ70 km以浅，729個）を対象にMolchanダイアグラムを用いて検証した．その結果，ターゲット規模がM_w 7.0以上の場合については無作為な予測よりも有効とは言えなかった．ターゲット規模がM_w 6.5, 6.0, 5.5以上の場合については，無作為な予測よりも成績が良くなるケースはあったものの，最大でも確率利得は1.7であった．そのため，この地域について潮汐相関情報に基づいた予測モデル単独での実用性は乏しいといえる．このことは同時に，ターゲット地震前に必ずしも広域の背景地震活動の潮汐相関が高くなるとはいえないことを示唆する．

© The Seismological Society of Japan

Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

*Hironobu KAMIKUBO[1]

1. Hamamatsu Hokusei Jhs

１概要

静岡県西部地域では2013年5月から浜松市中郡（NG）,2016年8月から湖西 市新居（KOA）,磐田市中泉（IWN）,掛川市徳泉（KAT）にて白金測温抵抗 体の水温センサーを用いた長期水温観測を行っている(図２).
NGでは2014年後半から下降を続けていた水温が12月末から上昇に転じ,急激な温度上昇の後,しばらく停滞していたが最近,これまでにない上昇率での水温上昇が観測されている.
地殻の岩盤の応力が強まると深部の高圧流体は低圧環境である地殻上部へ移動し浅層地下水に混じり地下水温を上昇させるとする深部流体上昇仮説（佃,2005) [1]により静岡県西部地域の地下岩盤にかかる圧力が増加していると解釈できる.

２ KOA・NG・IWNの水温変化の同期性

図１はKOA・NG・IWNの水温変化のトレンドが変化した日の例を示したものである. 2016年12月24日にKOA・NG・IWNの3カ所で水温が上昇する変化が生じた. 2020年11月5日から11月11日にかけて3カ所の観測井で上昇していた水温が下降に転じた.2020年12月31日から2021年2月3日にかけて3カ所の観測井で下降していた水温が上昇に転じた.同時期の水温変化は地下の岩盤にかかる圧力の変化がこの地域で広範囲に生じたと考えることができる. KOAとNGはトレンドが変わる時期が近く,IWNはKOA・NGとトレンドの変わる時期が多少異なっている.地下水温変化の時期の違いから地域ごとの地下にかかる圧力の変化を推測できる可能性がある.

３　浜名湖周辺での長期スロースリップとNG水温変化

NGの水温変化は2013年の観測開始から停滞・下降を続けていたが2016年12月24日を境に上昇に転じた.これは,浜名湖周辺で観測されていた長期スロースリップが終息し地下岩盤の圧力が圧縮場となり水温変化を上昇に転じさせたと考えられる.
上久保(2018）は浜名湖周辺での長期スロースリップモーメント変化とNGでの水温変化との相関について相関性(相関係数0.91)があることを示した(図３）[2].
スロースリップ進行期は,陸側地盤の南東方向への移動により,陸側岩盤は膨張し圧力が低下する.間隙内に存在する高温の流体は圧力の低下により,地表への流入量が低下し地下水温は低下すると考えることができる.
スロースリップ停滞期には陸地岩盤は圧縮され圧力が上昇する.間隙内に存在する高温の流体は圧力の増加により地表への流入量が増加し地下水温は上昇すると考えることができる.

４　スラブ内地震発生率とNG水温変化率の関係

静岡県西部地域のスラブ内地震（30km-60km　M1以上）の発生率は2017年12月頃から0.076個/日から0.100個/日に32%程増加している(図4）. フィリピン海プレートが大陸プレートに沈み込みにくくなり,スラブ内にかかる圧力が増してスラブ内の地震発生率が増加していると考えることができる.
NGの水温上昇率は2018年1月頃より+0.067℃/年から+0.093℃/年に39%程増加している.
プレート境界付近にかかる圧力が2018年1月頃より増加し,地下深部の間隙水が浅部帯水層に混入する流量が増加して水温変化率を増加させていると考えられる.

5 御前崎の沈降状況とNG水温変化

これまで直線的に沈み込みを続けてきた御前崎の沈降状況は2020年４月から2021年3月にかけて沈降が停滞しているようにみえる(図５). この期間,NGの水温変化は上下を伴いながらも停滞している. この地下水温変化

© The Seismological Society of Japan

の停滞は御前崎の沈降の停滞により地下岩盤に膨張領域と圧縮領域が交互に生じ,この付近に存在する間隙水の大陸プレート浅部への流量を変化させた可能性がある.

6　参考文献・資料

[1] Tsukuda, T.,K.Goto and O.Sato,2005,Bull.Earthq.Res.Inst,80,105-131.
[2]上久保廣信,静岡県西部地域の地下水温変化と浜名湖周辺の長期スロースリップとの相関性について,常葉大修論,2018.

図1　KOA・NG・IWNの水温変化と主な同期時期
図2　KOA・NG・IWN・KATの観測点位置
図3　気象庁浜名湖周辺のモーメントの累積グラフ(第375回地震防災対策強化地域判定会気象庁資料)に浜松中郡（NG）水温変化(1か月移動平均値)を上下反転させて重ねたもの
図4上・中　静岡県西部地域の地震累積回数（2013年1月～2022年7月まで　M １以上　深さ30-60ｋｍ）.図の作成には東大地震研究所TSEISweb版の気象庁 データ.JMA––_PDEを使用した
図４下　NG水温上昇率（2017年1月～2018年6月と2018年7月～2019年3月）
図5 NG水温変化(矢印の期間は2020.4～2021.3)と御前崎沈降状況（気象庁令和和3年度8月6日判定会資料に(矢印の期間2020.4～2021.3等を加筆）

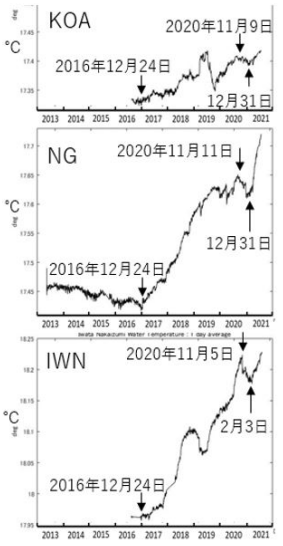


図１　KOA・NG・IWNの水温変化

図２　観測点位置



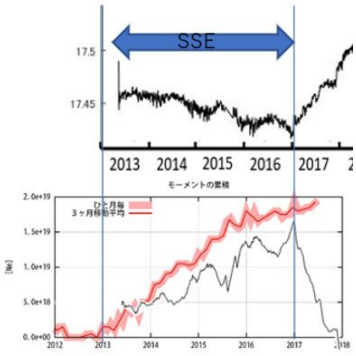


図3　スロースリップモーメントとの相関

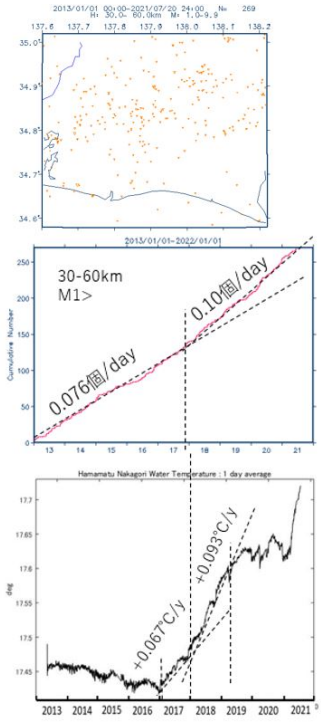


図4　地震活動変化率とNGの水温変化率

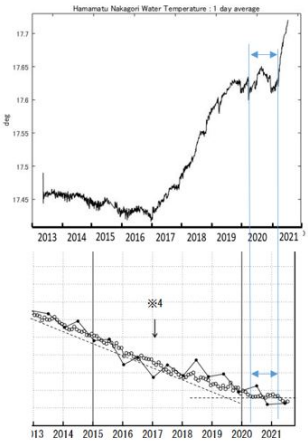


図5　NG水温変化と御前崎沈降状況

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P9 (ROOM P)

[S16P-01] Estimation of shallow shear-wave velocity structure from vehicle-induced surface waves on DAS records along Route 4

○Katsuhiro YABU[1], Hisashi NAKAHARA[1], Kentaro EMOTO[1], Takeshi NISHIMURA[1] （1.Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-03] Microtremor Survey near the Yoshioka Fault Caused by the 1943 Tottori Earthquake - Case of Miyadani and Ohtsuka area, Tottori City -

○Tatsuya NOGUCHI[1], Ryo Ashida[1], Kazuki Kobayashi[2], Isamu Nishimura[3], Nao Yoshikawa[1], Takao Kagawa[1] （1.Tottori University, 2.Aratani Civil Engineering Consultants CO.,LTD., 3.Graduate School of Engineering, Tottori University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-04] Microtremor Observation for Numerical Modeling of Subsurface Velocity Structure in the Kochi Plain

○Nobuyuki YAMADA[1] （1.Kochi University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-05] Modeling of subsurface velocity structures from seismic bedrock to ground surface for Yamanashi region

○Shigeki Senna[1], Atsushi Wakai[1], Tadashi Satou[2], Atsushi Yatagai[2], Hisanori Matsuyama[2], Hiroyuki Fujiwara[1] （1.NIED, 2.OYO Corporation）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-06] Attempt to search the caldera boundary by microtremor H/V on Satsuma-Iwojima Island

○Masayuki YAMADA[1], Yoshihiro ITO[1], Yosuke NAGASAKA[2], Atsushi NOZU[2], Takashi NAGAO[3], Hisashi OIWANE[4] （1.NEWJEC Inc., 2.Port and Airport Research Institute, 3.Kobe Univ., 4.Musuhi LLC.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-07] Dynamic deformation characteristics in the shatter zone of the Mino Fault of Median Tectonic Line

○Takao KAGAWA[1], Kazunari Kimura[2] （1.Tottori Univ., Faculty of Engineering, 2.Naiba Co. Ltd.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-08] Estimation of Subsurface Structures and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground from Microtremor Observations – Case of Kitazono, Tottori City –

○Isamu Nishimura[1], Nazuna Nishimura[2], Tatsuya Noguchi[2], Takao Kagawa[2] （1.Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, Tottori University, 2.Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-09] A study on the de-convolution waveform based on seismic interferometry using the data observed at MeSO-net

©Seismological Society of Japan

○Kenichi Nakano[1], Hirotoshi Uebayashi[2] （1.HAZAMA ANDO CORPORATION, 2.Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-10] Evaluation of characteristics of spatial variation at adjacent points based on 3-D ground motion simulation and coherence model

○Ryoichi Tokumitsu[1], Yu Yamamoto[1], Yasuo Uchiyama[1], Susumu Ohno[2] （1.Taisei Corporation, 2.Tohoku Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S16P-11] Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (2)

○Tadashi YAMASHINA[1], Makoto OKUBO[1], Takao TABEI[1], Muksin UMAR[2], Nazli ISMAIL[2] （1.Kochi University, 2.Syiah Kuala University, Indonesia）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

Estimation of shallow shear-wave velocity structure from vehicle-induced surface waves on DAS records along Route 4

*Katsuhiro YABU[1], Hisashi NAKAHARA[1], Kentaro EMOTO[1], Takeshi NISHIMURA[1]

1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University

Distributed Acoustic Sensing (DAS) は，光ファイバーケーブルに入射したレーザーパルスの後方散乱波を利用することで，光ファイバーケーブルに沿った軸歪（速度）を測定する技術である．光ファイバーケーブルを多チャンネルの軸歪計として利用できるため，超稠密な地震波観測手法として近年急速に導入が進んでいる．DASで記録される常時微動を用いた地震波干渉法により浅部速度構造を求める研究が近年多数報告されている．しかしながら，多くの光ファイバーケーブルは道路直下に埋設されているため，DAS記録には自動車による道路交通振動が含まれ地震波干渉法の適用を困難にする．我々はこれまでに，複数の移動する自動車によって励起された表面波の分散曲線を求める手法を開発した(Yabu et al., IAGA-IASPEI 2021)．本研究では，国道４号線沿いにおけるDAS観測記録にこの手法を適用して分散曲線を求め，浅部S波速度構造を推定した．

使用したデータは，宮城県仙台市から大崎市古川にかけての国道4号線直下に埋設されている光ファイバーケーブルを使用したDAS記録（江本・他，2020地震学会）である．測定期間は2020年1月10日から2月10日の1か月間，チャンネル間隔とゲージ長はともに 5 m，チャンネル数は 9854 （測線長約 49 km），サンプリング周波数は 500 Hz である．

DAS記録には自動車による振動が頻繁に記録されている．レコードセクションを見ると，1台の自動車は，道路上の凹凸により1, 2秒ごとに表面波を励起し，前後数百mにわたって伝播していく様子がわかる．まず，自動車が励起する表面波の伝播が明瞭に見えている 250 mの区間を抽出し，自動車が通過する時刻を基準にそれぞれのチャンネルから1秒間の時間窓の記録を目視で選ぶ．各チャンネルの記録にトレンド除去やテーパリングなどの前処理を行った後，Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) [Park et al., 1999] を用いて表面波の分散スペクトルを計算した．移動する車両の平均速度に合わせて使用するチャンネルと時間窓を変えながらこの操作を行い，さらにこれを複数の車両に対して同様の操作を行って100 mのセクション 毎に平均することで分散曲線のS/Nを向上させた．S波速度構造の推定の際には，Vs = 1100 m/s より深い構造はJ-SHIS（防災科学技術研究所, 2021）のデータを用い，より浅部は試行錯誤的に構造を仮定しながら，得られたレイリー波の複数のモードの分散曲線を説明できる構造を決定した．モードが見えにくい場合には，隣接するセクションの分散スペクトルも参考にした．

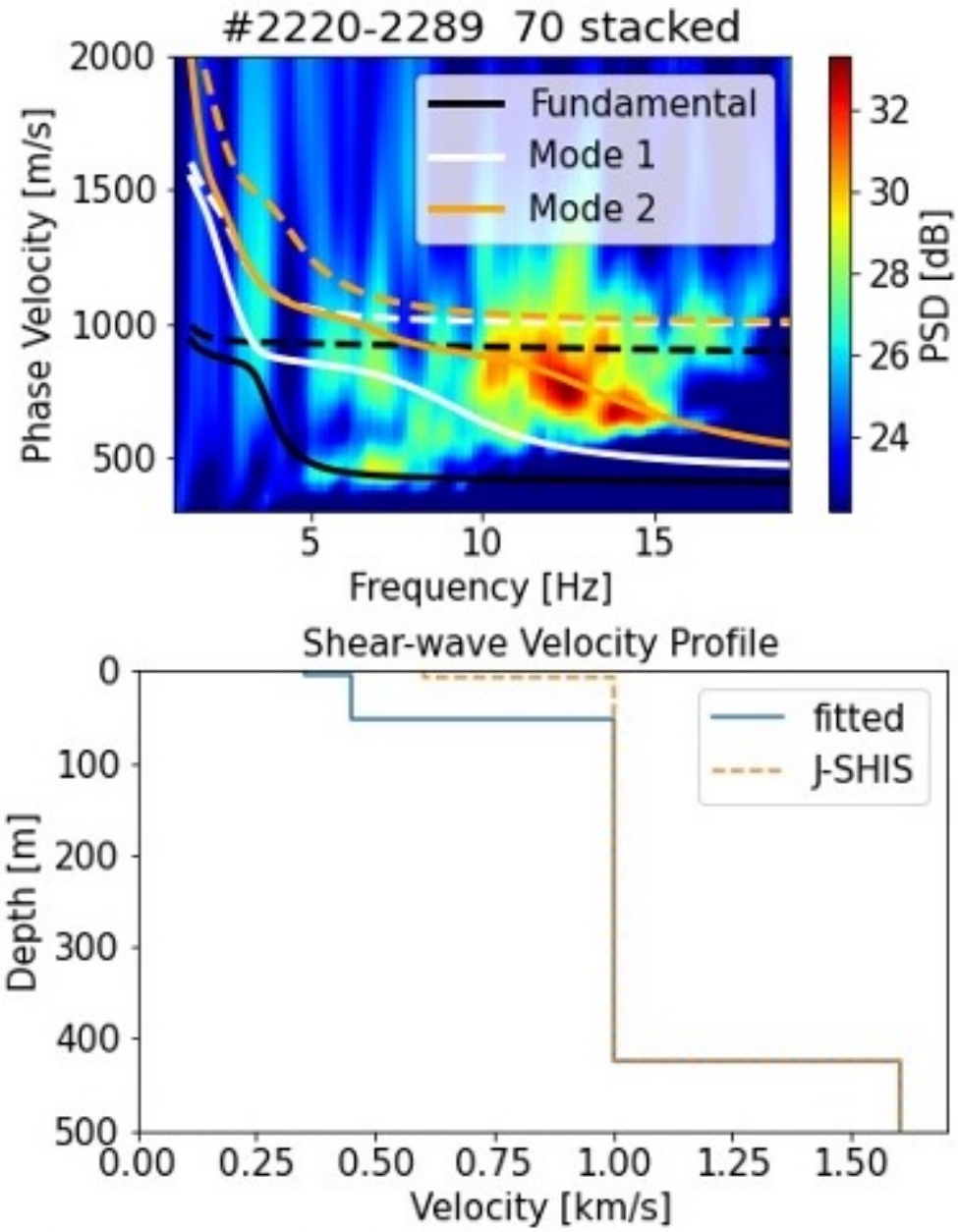
解析の結果，移動する車両に沿って時空間平均をとることで，空間分解能は低下するものの，５ｋｍにわたり空間的に連続的な分散曲線が得られた．レイリー波の基本モードと思われる曲線が卓越する場所だけでなく，例えば図のように，高次モードがよりはっきりとみえるセクションも観測された．このセクションではJ-SHISの速度構造に比べて浅層でより遅いS波速度が求められた．

本研究は，移動する車両を活かし，道路に沿って連続的に分散曲線を求め，速度構造を推定した．分散曲線の空間平均を取ることによりS/N比を高めることができ，また，速度構造を求める際には隣接セクションの情報も参照できるが，速度が不連続に急速に変化する場所では明瞭な分散曲線が得られない可能性がある．しかしながら，本研究の手法によりそのような場所やS/N比が極端に小さい場所を除き，空間的に連続して速度構造を得ることが可能になる．

謝辞
本研究は国土交通省所有の光ファイバーケーブルを使用した．DAS観測では，仙台河川国道事務所，東北大学

© The Seismological Society of Japan

大学院理学研究科の山本希氏，寒河江皓大氏，Gugi Ganefianto氏の協力を得た．



（上図）得られた分散スペクトル．実線はフィッティングした曲線，破線は初期モデル(J-SHIS)を表す．

（下図）推定した速度構造と初期モデルの比較．

© The Seismological Society of Japan

Microtremor Survey near the Yoshioka Fault Caused by the 1943 Tottori Earthquake - Case of Miyadani and Ohtsuka area, Tottori City -

*Tatsuya NOGUCHI[1], Ryo Ashida[1], Kazuki Kobayashi[2], Isamu Nishimura[3], Nao Yoshikawa[1], Takao Kagawa[1]

1. Tottori University, 2. Aratani Civil Engineering Consultants CO.,LTD., 3. Graduate School of Engineering, Tottori University

1943年の鳥取地震により生じた鹿野・吉岡断層おいて，地震断層ごく近傍の地盤震動特性を把握するために，各種地下構造調査が行われており，これらの調査の結果，断層に伴う地下構造の変化が地盤震動特性に影響を及ぼしていることが示唆された（野口他，2021）．本研究では，新たに吉岡断層ごく近傍の地表変位が確認されている（西田他，1993，金田他，2002）宮谷地区および大塚地区で稠密な微動観測を実施し，地盤震動特性を調べた．

微動の単点3成分観測は，2020年8月28日，11月5日に，宮谷地区で24点，大塚地区で41点の計65点で行った．さらに，2021年7月15日，16日に大塚で10～20m間隔での稠密観測を55点で実施した．アレイ観測は，大塚地区において，2021年8月28日，11月5日，2021年7月16日に4箇所で実施した．4台の地震計を円の中心に1台，円周上に3台を等間隔に配置し，アレイ半径1，5，10，30mとして観測した．地震計はJU410（白山工業）を用い，サンプリング周波数は単点3成分観測では200Hz，アレイ観測では1000Hzもしくは200Hzとした．観測時間は単点3成分観測では1か所につき10分間，アレイ観測では1展開につき15分間とした．

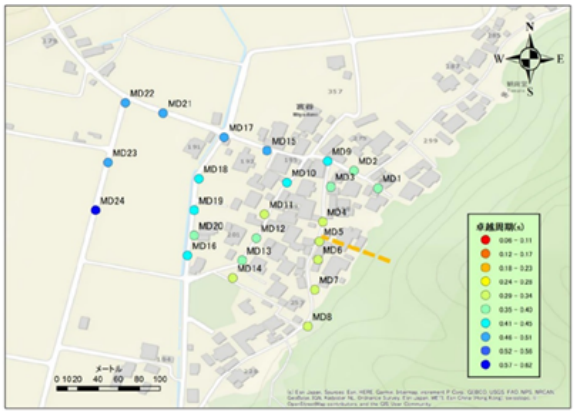
解析について，微動の3成分の記録については，20. 48秒間の区間を5区間以上選定し，各成分のフーリエスペクトルを求め，平均スペクトルとし，水平動と上下動のスペクトル比（H/V）を求め，卓越周期，ピーク値，形状などの特徴を調べた．また，断層を横切るライン上の観測点では，微動波形から10秒間抽出し，0.1～0.5秒のバンドパスフィルターをかけ粒子軌跡を求めて比較した．アレイ観測の同時記録についてはCCA法（Cho, et. al.，2007）に基づき位相速度を推定した．得られた位相速度とアレイ中心のH/Vから，レイリー波基本モードによるフォワードモデリングによりS波速度構造を推定した．

宮谷地区については，断層を挟んで北側が南側より卓越周期が長く，北落ち段差構造の影響を受けていると考えられる．また，断層の南側でH/Vの形状に違いがみられ，これは断層の破砕帯の影響と考えられる．微動の粒子軌跡は，断層変位の走向である北55°西に概ね沿った方向に偏向する楕円形上を示すことがわかった．

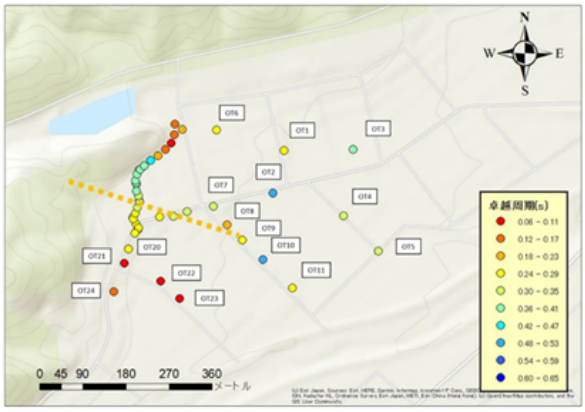
大塚地区については，断層線を境に北側で卓越周期が変動し，またピークの大きさも大きくなることがわかった．これは，断層破砕帯や段差構造などの断層運動に伴う地盤構造の変化の影響と考えられる．微動の粒子軌跡から，断層変位の走向である北70°西または北80°西に偏向する楕円形上を示す観測地点が多くみられ，断層直上付近では円形状に近くなることがわかった．地盤構造モデルとしては，1層目Vs=170m/s（シルト）の層が薄く堆積し，2層目Vs=500m/s（砂）の層が20m，3層目Vs=700m/s（礫）の層が30m堆積していることがわかった．また，3層目のVs=700m/sと4層目のVs=1500m/sとの境界が，H/Vの長周期側のピークに対応していることがわかった．

参考文献：野口・他（2021）：土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.72，No.4，[特]地震工学論文集，西田・他（1993）：鳥取大学教養部紀要，27，金田・他（2002）：活断層研究，Vol.2002，No.21．，Cho, et. al.（2006）：J. Geophys. Res. 111

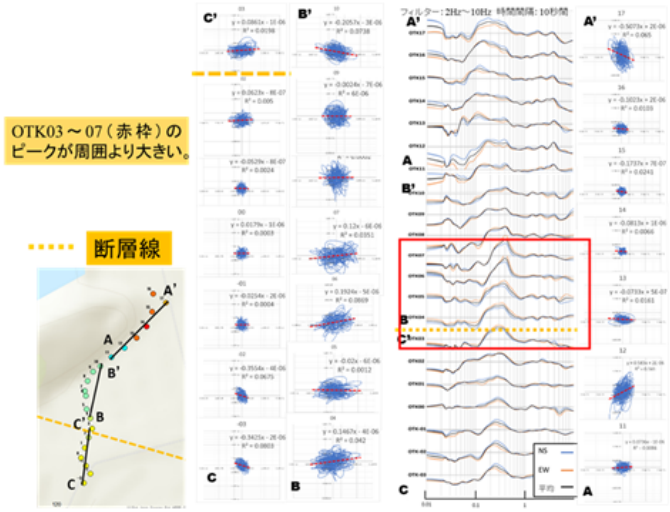
© The Seismological Society of Japan



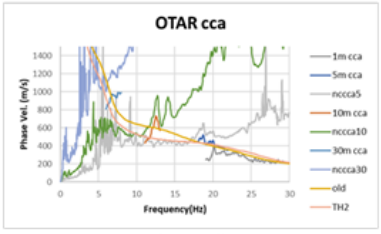
宮谷地区の卓越周期分布図



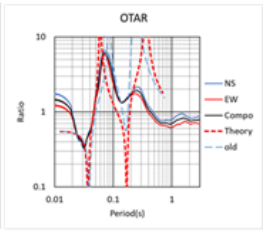
大塚地区の卓越周期分布



大塚地区の断層近傍のH/Vと粒子軌跡



位相速度分散曲線



アレイ中心点のH/V

地盤構造モデル

H[m]	ρ [t/m^3]	Vp[m/s]	Vs[m/s]
3	1.7	1480	170
20	1.9	1730	500
30	2.1	2070	700
70	2.2	2620	1500
-1	2.4	4070	2500

大塚地区の地盤構造推定結果

© The Seismological Society of Japan

Microtremor Observation for Numerical Modeling of Subsurface Velocity Structure in the Kochi Plain

*Nobuyuki YAMADA[1]

1. Kochi University

地震動評価のための地盤構造調査は全国各地で実施され，地盤構造モデルの構築・更新がなされている。今回対象にした高知平野（狭義の土佐平野）は，北側を四国山地，南側を標高300～400mの山地で囲まれ，南北数km東西20～30km程度で，比較的古い時代の地質で囲まれた小さな平野である。地震基盤(Vs: 3000m/s)相当層上面の深さは200～400ｍ程度[J-SHIS]となっているが，大阪平野や関東平野のような地震基盤で囲まれた明瞭な盆地構造は示されていない。この平野の地形や表層地質，四国南部地域の地質の成因[例えば，産総研(2018)]からは，変化に富んだ複雑な地質・地下構造であることが窺える。高知平野においては，常時微動の単点観測データに基づく表層地盤構造の推定結果[例えば，大石・他(2012)]やボーリングデータ[高知地盤公開情報サイト]が多数存在し, 土質とN値からS波速度に換算するなどのモデルも提案[例えば，山本・他(2010)]されてはいるものの，物理探査データに基づく速度構造情報が整理された事例は限られている[例えば，大堀・他(2013)]。こうした小規模の平野において，地震動評価のための数値モデルの高精度化のために，平野規模や地形の変化具合に見合った密度での面的な速度構造情報の把握は必要なことであると考えられる。

そこで，対象地域の速度構造情報を得ることを目的に，既往の研究成果を参照しながら，2018～2020年にかけて実施した常時微動の観測記録をもとに，微動特性と表層地盤構造について報告する。微動の観測は，高知城付近を通過する土佐平野を南北に縦断する測線（計87点）を設定した。この測線の近隣にはK-NET高知や気象台，自治体震度計の観測点があり，地震動データの活用も可能である。この測線は，平野の北端と南端および中央（高知城付近）で標高が高くなり古い時代の層が露頭する。また，南へは，土佐平野南側の山地を貫き平野の外側の海岸まで測線を伸ばしている。こうした測線は，既存のボーリングデータが複数存在し参照もできる。観測には，ポータブル3成分強震計(SMAR)を用い，各地点で20分程度の収録を実施した。一部の地点は，①同じ位置で数か月毎の複数回の収録，②複数地点での同時収録を実施した。

こうして得られた記録から，水平動/上下動スペクトル比（H/V）を算出した。また，大堀・他(2013)から物性値を引用し，このH/V比の山谷の周期が合うような層厚を求めた。こうして得られた測線下の表層地盤構造の推定し，ボーリングデータによる地質断面図との比較を行った。また，平野中央の岩盤地点の高知城公園での定期的な観測データのフーリエスペクトルからは，常にNS成分が大きくなる傾向が見られ，水平成分記録による粒子軌跡から，その長軸方向はN15～25°W方向となり，この傾向は，ほかの地点では見られない特徴的なものであった。

対象とした平野での常時微動の観測とその分析は，過去にも多くの試みがなされているが，ここで得られた観測記録において，微動特性を提示するとともに，詳細な表層地盤構造の推定に結び付けることによって，既存のものにさらに詳細な速度構造モデルを作成することが可能と考えられる。現在，上記の測線に沿う位置での小規模の微動アレイ観測を実施し，地点毎の速度構造を得ることを試みている，今後，微地形などを考慮した速度構造のモデル化と数値計算等で地盤構造モデルの妥当性などを確認したい。

なお，この報告の内容の一部は，高知大学理学部・理工学部の卒業研究：森有紗氏(2018年度)，松園龍汰氏(2019年度)，石川晃大氏(2020年度)の成果によるものです。

© The Seismological Society of Japan

Modeling of subsurface velocity structures from seismic bedrock to ground surface for Yamanashi region

*Shigeki Senna[1], Atsushi Wakai[1], Tadashi Satou[2], Atsushi Yatagai[2], Hisanori Matsuyama[2], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. NIED, 2. OYO Corporation

１．はじめに

これまでに防災科研では、強震動予測精度向上のため、関東、東海および熊本地方の浅部・深部統合地盤構造モデルの構築を行ってきた． 本検討では，関東と東海地方に隣接する山梨地方を対象とした浅部・深部統合地盤構造モデルの構築について取り上げる．モデル構築手順は基本的に，先行してモデル化を実施している関東地域の方法(例えば先名他,2017)に従う．具体的には，まず，既存の地盤モデル，これまでに収集したボーリングデータ(約3,000本超)や山梨県の地震被害想定調査、文科省の交付金調査(2002)等の地質情報等に基づき初期地盤モデルを作成した．そして，稠密な微動アレイ探査を実施して得られた地盤震動特性等を用いて，初期地盤モデルを調整した．本稿では，主に甲府盆地全域について上記内容および修正地盤モデルの特徴等について報告する．

２．初期地盤モデルの構築

初期地盤モデルについては，深部地盤は，基本的には防災科研のJ-SHISV2モデルとした．浅部地盤は，ボーリングデータを用いて当てはめ方式で作成した地盤モデルを初期モデルとした．その上で，浅部地盤の工学的基盤上面を深部地盤の第1層上面とするなどして両者を統合あうることで，初期統合地盤モデル（250mメッシュ単位）とした．

３．微動アレイ探査

実施した微動アレイ観測は，対象地域の低地および台地において，大アレイ観測(アレイ半径100，200，400mの3点および一辺25～75mのL字型)を約5km間隔にて23地点，極小・不規則アレイ観測（アレイ径60cmの4点および1辺5m～10m超の三角形）を約1km間隔にて約550地点で実施した(2021年8月現在)．微動探査地点毎の位相速度，H/Vスペクトルを求め，東京大学地震研究所の首都圏強震動総合ネットワーク（SK-net）に記録されている地震記録を用いて，観測点ごとのRVスペクトルを求めた．これらの地盤震動特性データと初期地盤モデルに基づいて，ジョイントインバージョンを行い，各観測地点における１次元S波速度構造を得た．

４．微動アレイ探査結果に基づく初期地盤モデルの修正

甲府盆地において，３章で得られた１次元S波速度構造等を用いて，各観測地点における初期深部地盤モデルを修正し，速度層ごとに水平方向へ空間補間して３次元S波速度構造モデルを作成した．推定されたS波速度構造に基づいて，深部地盤速度構造（J-SHIS V2）の修正を行った。S波速度1,000 m/s層までは，J-SHIS V2が一様に浅いため，修正後では深くなる結果となった．S波速度1,200m/s層以降は，山梨県の北西側において，モデル修正後のほうが浅くなり，東側では深くなった。また，深部地盤については，その他の地域（身延地域，富士山北麓地域）については、各種探査データが比較的少なく、狭小な谷筋の構造であるため、作成の方法を検討した上で構築した．

５． まとめ

本稿では，山梨地方を対象とした浅部・深部統合地盤構造モデルの構築と結果の一例を示した．今後は，モデル化の検討を続け，最終的には３次元差分法を用いて，地震観測点における地震記録と比較を行い，地盤モデルの精度の検証を行う予定である．

© The Seismological Society of Japan

参考文献

先名・他(2017)：関東地域における広帯域強震動評価のための浅部・深部統合地盤モデルの構築(その２),日本地球惑星科学連合2017年大会, SSS15-19.
地震本部・文部科学省（2003）:甲府盆地の地下構造調査に関する調査成果報告書（平成13～15年度）

© The Seismological Society of Japan

Attempt to search the caldera boundary by microtremor H/V on Satsuma-Iwojima Island

*Masayuki YAMADA[1], Yoshihiro ITO[1], Yosuke NAGASAKA[2], Atsushi NOZU[2], Takashi NAGAO[3], Hisashi OIWANE[4]

1. NEWJEC Inc., 2. Port and Airport Research Institute, 3. Kobe Univ., 4. Musuhi LLC.

山田ら(2016)は，硫黄島港(以下，港と呼ぶ)および薩摩硫黄島飛行場(以下，飛行場と呼ぶ)において，臨時地震観測によるサイト増幅特性の算定と，常時微動観測(アレイ観測)による地盤モデルの推定を行った．山田ら(2016)によると，港および飛行場の地盤モデルから求めた伝達関数には0.2～0.3Hz付近にピークは見られるものの，それほど明瞭ではなかったことから，サイト増幅特性に見られる0.2～0.3Hz付近の明瞭なピークは盆地構造による3次元的な効果や，地震波の入射方向の効果に起因するものと考えられた．港と飛行場のサイト増幅特性の0.2～0.3Hz付近の共通の特徴から，両地点は深い地盤構造を共有していると推察され，実際のカルデラ構造が従来の解釈より複雑である可能性が示唆された．なお，従来の解釈では，港と飛行場の間にある急崖がカルデラ壁とされ，港はカルデラ内，飛行場はカルデラ外に位置すると考えられている．
そこで，従来の解釈でカルデラ内に位置すると考えられる港とカルデラ外に位置すると考えられる飛行場の間において振動特性の異なるカルデラ境界を探索することを目的として，港と飛行場間の常時微動観測(単点観測)を行った．
常時微動観測は，道路上を基本とし，No.1～No.30の28点(No.11とNo.20は欠測)で行った．サーボ型加速度計(白山工業製JU210)を用いて，各観測点11分間の常時微動観測を行った．常時微動H/Vの算出においては，長周期の波動成分の影響も考慮できるように，各観測点について擾乱の少ない163.84秒間のデータを3区間抽出し，その平均値としている．水平成分は直交する2成分の二乗平均の平方根とした．スペクトルの平滑化については，長周期においてもピークを明瞭に判別できるようにする観点から水平成分，鉛直成分ともにバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを用いた． 港では山田ら(2016)において常時微動観測が行われており，7mアレイ(青色●印)の中心点(A071)，20mアレイ(緑色●印)の中心点(A201)の結果を用いた．
図-1に観測点を示す．図の左端に飛行場，中央下端に港が位置している．その間に等高線が密になった急崖があり，カルデラ壁と考えられている．観測点No.1,2,3が最も港に近く，No.4からNo.5,6,7,8,9,10を通る西側ルートとNo.30,29,28,27,26,25,24,23,22,21,19,18の東側ルートを設定し，No.12からNo.13,14,15,16,17の順でNo.17が最も飛行場寄りである．西側ルートの一部は険しい獣道で，No.9と12の間にカルデラ壁と考えられる急崖があり，No.10は急崖の中段に位置する．東側ルートは普通乗用車の通行可能な道路で，No22が崖の下，No.18が崖の上，No.21,19が崖を切り崩してできた道上であるため崖の途中と考えられる．
図-1には観測点と対応させて，常時微動H/Vを併記した．また，No.10の常時微動H/Vを左下に拡大して示した．常時微動H/Vのピーク周波数に着目すると，表層の影響と考えられる3Hzより高周波数帯のピークは観測点によって変化するものの，深い地盤構造の影響と考えられる0.3Hz付近の低周波数のピークはすべての観測点において共通にみられた．0.3Hz付近のピークは急崖の上下でも共通に見られ，港と飛行場の間において振動特性が変化する箇所は見つけることはできなかった．
港と飛行場の間にある急崖がカルデラ壁とされ，港はカルデラ内，飛行場はカルデラ外に位置すると考えられているが，深い地盤構造を反映すると考えられる低周波の振動特性が港から飛行場まで連続しており，従来，カルデラ外と考えられている急崖上もカルデラの影響を大きく受けていることがより明瞭となった．山田ら(2016)でも指摘したように，実際のカルデラ構造は従来の解釈より複雑である可能性がより強く示された．
山田ら(2016)：薩摩硫黄島における低周波数のピークを有するサイト増幅特性の要因分析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.72，No.4(地震工学論文集第35巻)，pp. I _691- I _699.

© The Seismological Society of Japan

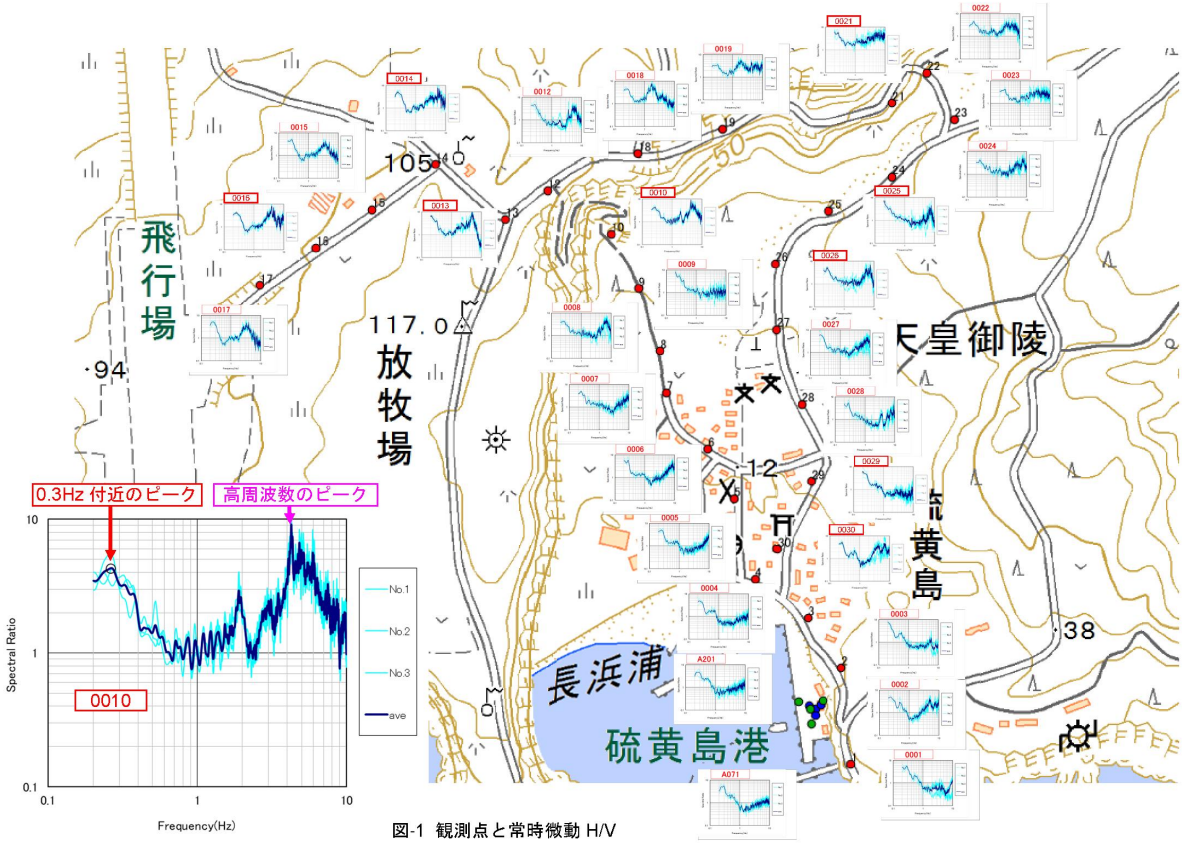


図-1 観測点と常時微動 H/V

© The Seismological Society of Japan

Dynamic deformation characteristics in the shatter zone of the Mino Fault of Median Tectonic Line

*Takao KAGAWA[1], Kazunari Kimura[2]

1. Tottori Univ., Faculty of Engineering, 2. Naiba Co. Ltd.

１．はじめに
被害地震において地表断層変位が明瞭に見られる近傍において地震動による影響が必ずしも大きくない事象が散見され，また常時微動計測においても断層帯近傍で卓越周期が不明瞭になる現象が報告されている。これを地震動応答の観点から考察すべく，断層帯破砕帯を対象に不撹乱試料を採取し，動的変形特性の把握を試みたので報告する。

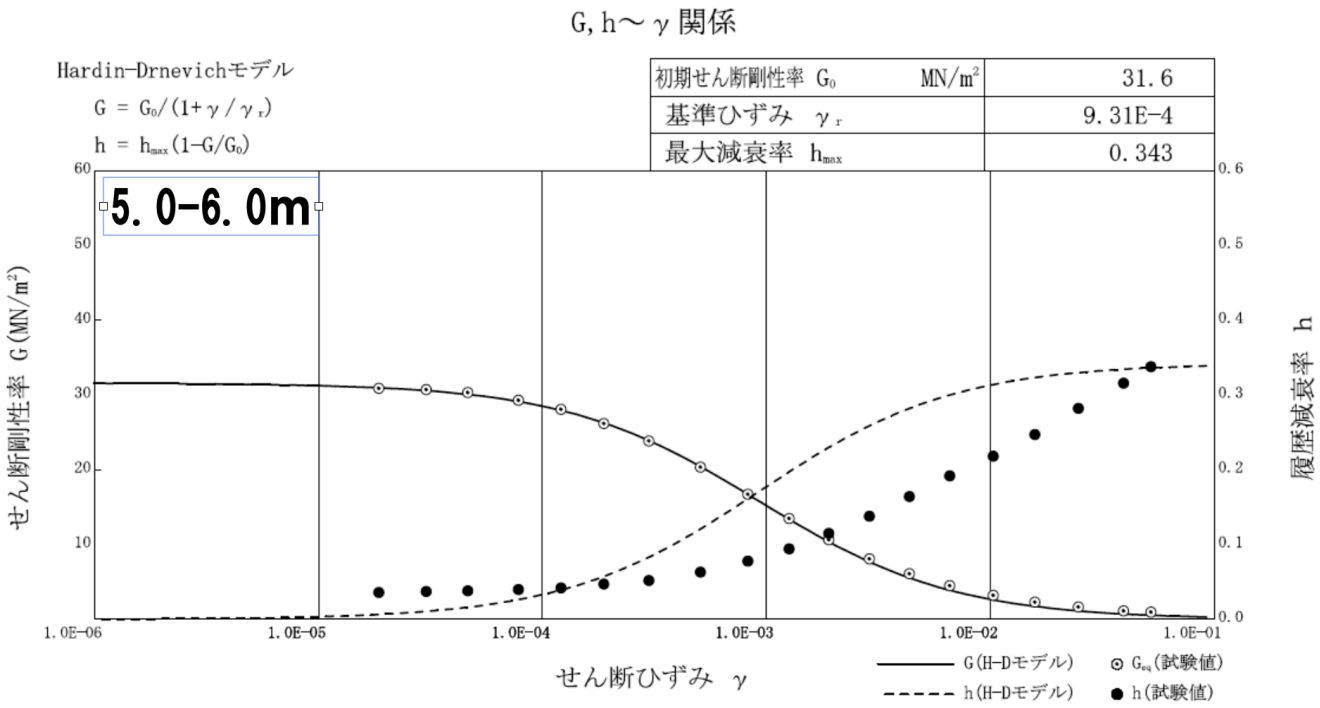
２．調査の概要
ボーリングによって不撹乱試料を得るには，アクセスが比較的容易で十分に大きな破砕帯を対象とする必要がある。そこで，徳島県三好市三野町太刀野における中央構造線断層系三野断層の破砕帯を選定した。ボーリングは表層部の10ｍ（径86mm）を対象とし，ロータリー式三重管サンプラー（トリプルサンプラー）で９深度の試料を採取した。このうち７試料について繰り返し三軸試験を実施し，動的変形特性（G/G0-γ，h-γ）を得た。うち４試料はよく締まった粘土質破砕帯，３試料は強固結した断層岩となった。 ボーリング孔を利用してダウンホール法によるPS検層をあわせて実施し，断層破砕帯を横断するように常時微動の単点３成分観測（JU410を１台利用）を14点で実施した。

３．調査結果
表層から７ｍはよく締まった粘土質破砕帯に相当し，Ｓ波速度で245～327m/sとなった。それ以深は強固結した断層岩（カタクレサイト）でＳ波速度484m/sが得られた。得られた動的変形特性にHardin-Drnevichを適用すると，基準ひずみは表層７ｍで1×10^{-3}程度，それ以深で$2\sim6\times10^{-4}$程度と比較的小さな値が得られた。最大減衰は表層７ｍで0.34～0.38程度と大きく，それ以深では0.14～0.18程度となった。また，特に表層７ｍについては，剛性低下と減衰増大で基準ひずみが異なるとした方が試験結果を説明する結果となった（図）。常時微動H/Vスペクトル比を見ると，断層帯を挟んで卓越周期が変化し，その遷移部にあたる断層帯付近でピークが不明瞭になる特性がここでも確認された。

４．おわりに
得られた動的変形特性のモデル化を進め，強震時に想定される局所的な地震応答について検討したい。また，地盤速度構造より想定される常時微動特性についても解釈を試みたい。

謝辞
(有))山口興業には所有する敷地内での調査への許可，ご協力を頂きました。本研究は日本学術振興会科研費19H02406の助成を受けたものです。記して感謝致します。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Estimation of Subsurface Structures and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground from Microtremor Observations –Case of Kitazono, Tottori City –

*Isamu Nishimura[1], Nazuna Nishimura[2], Tatsuya Noguchi[2], Takao Kagawa[2]

1. Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, Tottori University, 2. Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University

高度経済成長期以降，山麓地域や丘陵地の斜面の谷埋め盛土造成地が相次いで開発され，大地震の度にそのような地盤での被害が見られている．東北地方太平洋沖地震の被害調査によると，盛土造成地の盛土部や切り盛り境界部において，地すべりや地盤の隆起・沈下に伴う建物の倒壊などの被害が数多く発生し，切土部に比べて被害が甚大であったことが報告されている．これは谷埋め部分のS波速度が切土部と比較して小さく，地震動の増幅が起こりやすいためである．本研究では盛土地盤の地盤震動特性を把握するために，大規模盛土造成地に指定されている鳥取市北園地域において常時微動観測を実施した．

微動観測は2021/6/23の日中に実施した．3成分単点観測を観測時間10分程度として53点で行った．アレイ観測は地震計を円の中心に１台，円周上に３台が正三角形になるように４台配置し，アレイ半径は1-30mの範囲で，観測時間はアレイ半径ごとに15分程度として盛土部と切土部で各１地点の計2地点で観測を行った．使用機器には加速度型微動計JU410を４台用いた．サンプリング周波数はともに200Hzとした．

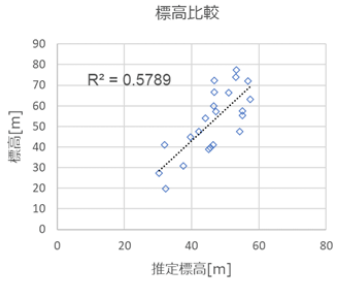
微動の3成分観測記録より，20.48秒を10区間以上選定し，3成分のフーリエスペクトルを算出，対数ウィンドウ（係数20）で平滑化し，水平動のスペクトルと上下動のスペクトルの比（H/V）を求めた．H/Vスペクトルから卓越周期とその時のピーク値（振幅比）を読み取った．アレイ観測記録は，CCA法（Cho et. al.，2006）によりセグメント長10.24秒，Parzenウィンドウ（バンド幅0.3Hz）でスペクトルを平滑化し，位相速度分散曲線を求めた．位相速度分散曲線とH/Vを用いて，レイリー波基本モードを仮定して，試行錯誤で地盤構造モデルを推定した．

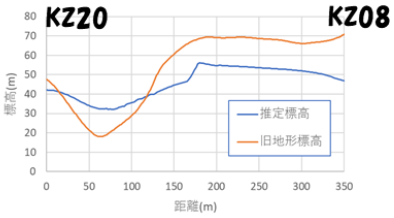
解析の結果，山麓の平野部に近い場所ではH/Vスペクトルのピーク値が大きく，卓越周期が0.3-0.5秒であった．大規模盛土造成地に指定されているエリアでは盛土部で卓越周期が長く，ピーク値も大きい傾向にあることがわかった．アレイ観測より表層に盛土部ではVs＝180m/s，切土部ではVs＝130m/sの層がみられ，切土部の方がより低速度であると推定された．推定モデルから4分の1波長則を用いて表層厚を算出し，旧地形の標高値と比較した結果，値は完全には一致しなかったが，その傾向は類似していることがわかった．

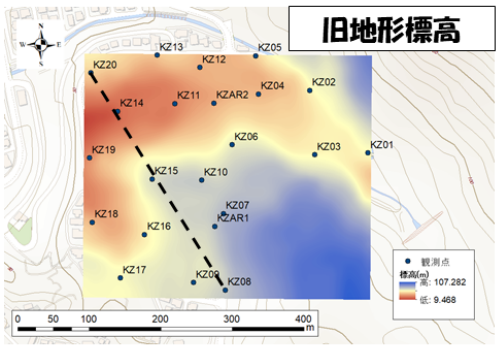
© The Seismological Society of Japan

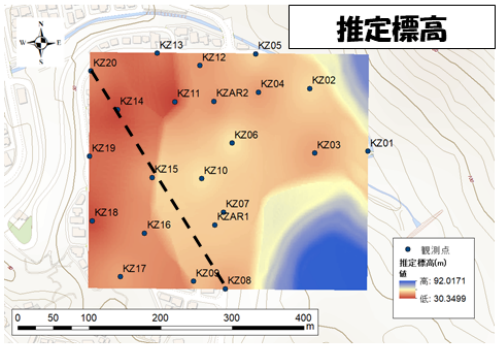
旧地形標高の比較

- 4分の1波長則を用いて表層厚を算出し，**推定標高値**（現地形標高-推定表層厚）と**旧地形標高**を比較
- 観測地点の旧地形標高を読み取り，推定標高値と相関を取る









© The Seismological Society of Japan

A study on the de-convolution waveform based on seismic interferometry using the data observed at MeSO-net

*Kenichi Nakano[1], Hirotoshi Uebayashi[2]

1. HAZAMA ANDO CORPORATION, 2. Kyoto University

首都圏地震観測網（MeSO-net; NIED, 2021）では同観測網で得られた加速度連続波形記録が公開されている。それらのデータを対象にした地震波干渉法の検討例は既にいくつか報告されている（e.g, Denolle et al, 2014; 元木ら, 2017）。その上で、関東平野内を横断する特定の測線に着目し、かつ、振幅情報と位相情報の両者に着目した検討事例の蓄積は、首都圏を対象にした地震動伝播特性の解明および強震動予測への寄与の観点からは意義があると考える。

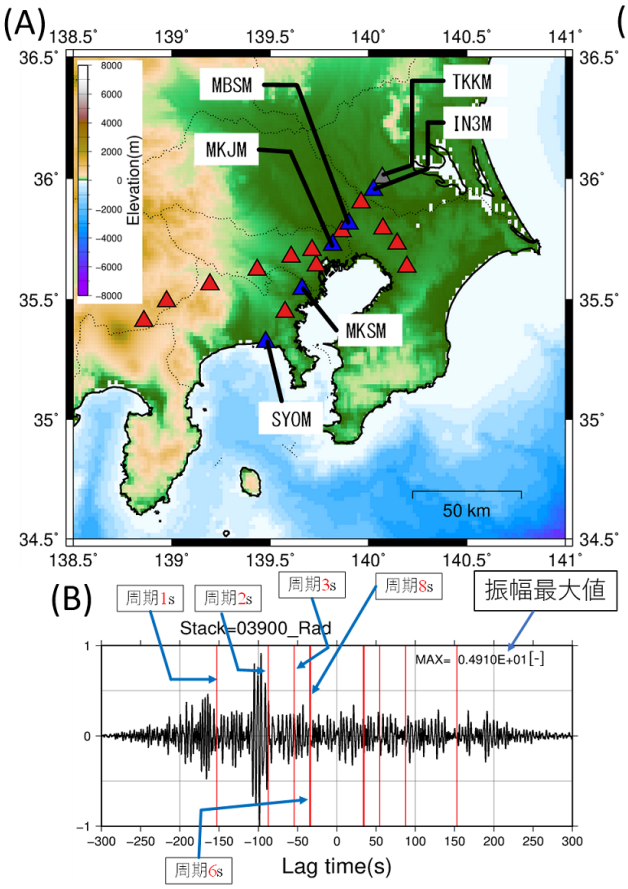
本研究では、MeSO-netの複数の観測地点と基準点を設定し、基準点に対する各観測地点のデコンボルーション波形の抽出を試みると共に、伝播に伴う基本的な性質について考察した。 MeSO-netの19地点を選択し、基準点（TKKM）と各観測地点の組み合わせとなる計18ペアを設定し、それぞれのペアで（2つの観測点間で）得られる相互相関関数を推定する。ここではできるだけ歪みの少ない振幅と位相情報を求めるため、地元･山中(2010)を参考にしてコヒーレンスを介したデコンボルーション波形を求めた。先ず、2020年7月20日～8月18日までの約1か月間の連続波形記録を使用し、10分間を1区間としてオーバーラップさせずに先のコヒーレンスを3,900回スタッキングした。次に、スタッキングされたコヒーレンスを逆フーリエ変換してデコンボルーション波形を求めた。この時、2点間を結ぶ測線の方位に合わせて各区間の観測波形を回転させることでRadial成分とTransverse成分を求めた後、相互相関関数を時間領域で計算した。また、考察のため、ペア毎の2つの観測点で得られる水平成層地盤構造モデル（Koketsu et al, 2012）に基づいてRayleigh波とLove波の基本モードの群速度を算出し、代表周期毎に群速度と2点間距離から求まる伝播時間を推定した（2地点それぞれから求まる伝播時間の平均値を使用）。群速度の算出には久田教授の公開プログラム（久田, 1997）を一部修正の上、リコンパイルして使用した。また2-10sの帯域に着目するため、スタッキング終了後のコヒーレンスにバンドパスフィルタを乗じた。

関東平野内の特定の測線で最大100 km程度の長い伝播距離を有する2点間ペアに関して、明瞭な振幅を持つ信号が確認できた（図(A)-(C)を参照）。また、水平成層地盤構造モデルを仮定した周期毎の波群の到達時刻との比較から、両者は子細には異なるものの大局的には調和的であり、今回求めたデコンボルーション波形は少なくとも物理的に伝播する波動であると判断でき、いわゆるグリーン関数と見なせる可能性がある。伝播特性の詳細な検討については今後の課題としたいが、デコンボルーション波形から読み取ると最も明瞭な波群（周期は約4秒前後）の伝播速度はRadial成分で約1 km/s程度、Transverse成分で約0.5 km/s程度である。この値は山中ら（2010）の群速度の推定結果や地元･山中（2011）による周期2-6 sにおける群速度のトモグラフィ解析結果（神奈川県を含む東京湾周辺の領域）と調和的である。なお、デコンボルーション波形に関しては、特にRadial成分の信号において負側の時刻よりも正側の時刻の方が大きいことが確認できた。本研究の結果は元木ら（2017）を支持する結果であると判断できる。本研究では直線的な伝播経路を仮定しているが、盆地内では地震波の伝播経路は複雑であり、必ずしも直線的ではないことが指摘されており（e.g. 向井ら, 2018; 上林･関口, 2020）、慎重に検討を進めたい。

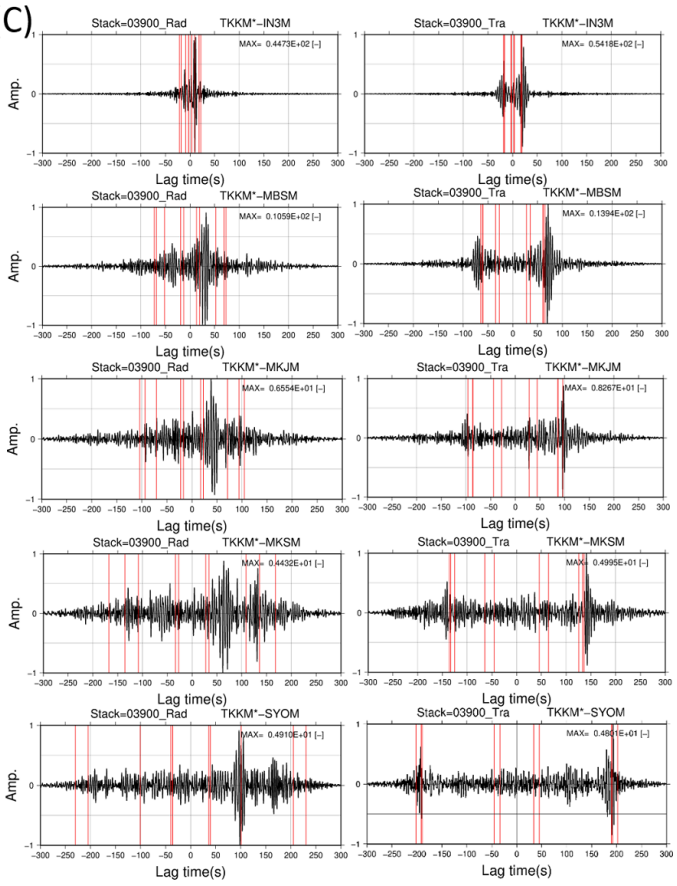
今後の展望としては、前述の伝播経路に関する考察の他、理論的なグリーン関数との比較も実施したい。ただし、現時点ではデータ数自体が限定的なため、データ数を増やした検討も行いたい。

謝辞：本研究では首都圏地震観測網（MeSO-net; NIED, 2021）の連続波形を使用しました。作図にはGMT（Wessel and Smith, 1998）を用いました。また、データ処理に際してはサイエンステクノロジー新井啓祐氏にご協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan



図(C)中の赤線の凡例（水平成層地盤(JIVSM)の群速度から概算した周期毎の推定到達時刻を表す）



(a)Radial 成分　　(b)Transverse 成分

図(A)中に示した2地点間のデコンボルーション波形

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of characteristics of spatial variation at adjacent points based on 3-D ground motion simulation and coherence model

*Ryoichi Tokumitsu[1], Yu Yamamoto[1], Yasuo Uchiyama[1], Susumu Ohno[2]

1. Taisei Corporation, 2. Tohoku Univ.

1. はじめに

地震動は離間距離が数m～数十mとごく隣接する地点間においても、表層地盤の不均質性に伴い、位相や振幅に空間的な変動が見られる。本検討では3次元不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーションにより、隣接地点間における地震動のコヒーレンス特性を分析する。また、散乱を考慮した波動方程式に基づき隣接地点間における地震動のコヒーレンスモデルを構築し、地震動シミュレーションにより計算されるコヒーレンスとの整合性を検証する。

2. 不均質地盤モデルと入力地震動

3次元不均質地盤モデルの形状を図1に示す。モデルのサイズは水平2方向を300mとし、深さ方向は40～200mの範囲において40m単位で変化させた。またモデルのメッシュサイズは1m×1mとした。平均S波速度は300m/sとし、ばらつきのパターンがガウス型の自己相関関数に従うように変動させた。

地盤の不均質パターンは2ケース作成した。いずれのケースも水平方向の相関距離を30mとし、鉛直方向の相関距離はケース1を6m、ケース2を15mとした。また変動係数はいずれのケースも15%とした。本検討では初期乱数を変化させることにより、各ケースに対し5種類の地盤モデルを作成した。なお地盤の内部減衰は考慮していない。ケース1の地盤モデルの例を図2に示す。

入力地震動はy方向のみに振幅を持つ加振時間0.02秒の三角型関数の変位波形を地盤モデルの底面より鉛直方向に平面波入射した。応答波は図1に太線で示すとおり、モデル地表の中央部でx、y方向ともに100mの線上において1.0m間隔で抽出し、全抽出点間のコヒーレンスの平均を評価対象とした。なお、応答波の抽出時間はモデル底面より入力を開始してから約2.5秒間とした。

3. コヒーレンスモデルとシミュレーション結果との比較

不均質地盤を伝播する地震動の波動方程式より、Ishimaru(1978) [1)] を参考に、隣接地点間における地震動の相関関数（コヒーレンス）の評価モデルを構築した。また3次元不均質モデルを用いた地震動シミュレーションより計算した隣接地点間における地震動のコヒーレンスとの比較により、評価モデルの適用性について検証する。

不均質媒質中を鉛直方向（z方向）に波動が伝播するとき、不均質媒質中の(ρ,z)（ρは水平方向のベクトル）における波動場$u(\rho,z)$の波動方程式は、伝播速度の変動分を$n_1(\rho,z)$とすると、（1）式となる。

$$(\partial^2 u(\rho,z))/(\partial z^2)+k^2[1+n_1(\rho,z)]^2 u(\rho,z)=0 \quad (1)$$

ここでkは波数である。隣接地点間の地震動のコヒーレンスは（1）式を展開し、（2）式のとおり表現できる[1)]。

$$Coh(|\rho|,z)=\exp\{-k^2 z[\int B_n(0,z-z')dz'-\int B_n(|\rho|,z-z')dz']\} \quad (2)$$

ここで$|\rho|$は水平方向の離間距離、$B_n(0,z-z')$および$B_n(|\rho|,z-z')$は$(0,z-z')$間および$(|\rho|,z-z')$間での$n_1(\rho,z)$の相関関数で、ガウス型とする。

地震動シミュレーションにおけるケース１、２の不均質パラメータを対象に、（2）式にてコヒーレンスを評価し、地震動シミュレーションにより計算したコヒーレンスの結果を比較する。（2）式により離間距離5m～50mにおいて5mごとにコヒーレンスを評価した結果および地震動シミュレーションにより計算されたコヒーレンスを図3に示す。

ケース1は（2）式と地震動シミュレーションによる結果がおおむね対応している。一方、ケース2では、地盤深さが深くなるほど、地震動シミュレーションによる結果の方が（2）式による評価に比べ、かなり大きくなる。

水平方向と鉛直方向の相関距離の比は地震波の散乱角に影響し、散乱角が大きくなると想定されるケース2では、散乱波がコヒーレンスの上昇に寄与する成分も多くなると予想される。ケース2において、（2）式により

© The Seismological Society of Japan

コヒーレンスが過小評価されるのは、（2）式がz方向の1次元波動方程式に基づき構築されているため、コヒーレンスに含まれる散乱波の影響が反映されていないためと推測される。

４．まとめ

隣接地点間における地震動のコヒーレンスモデルを構築し、不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーションに基づくコヒーレンスと比較した。コヒーレンスモデルは地震動シミュレーション結果より計算されるコヒーレンスとほぼ同様の傾向を示したが、鉛直方向の相関距離が大きい不均質地盤モデルでは、地震動シミュレーション結果に比べ過小評価する傾向が見られた。

【参考文献】1）Ishimaru, A.: Wave propagation and scattering in random media, Academic Press, New York, 1978

© The Seismological Society of Japan

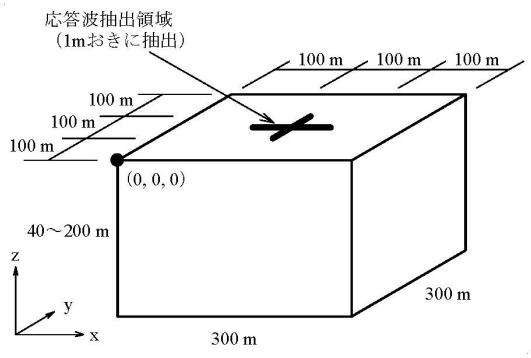


図 1　3 次元地盤モデルの形状

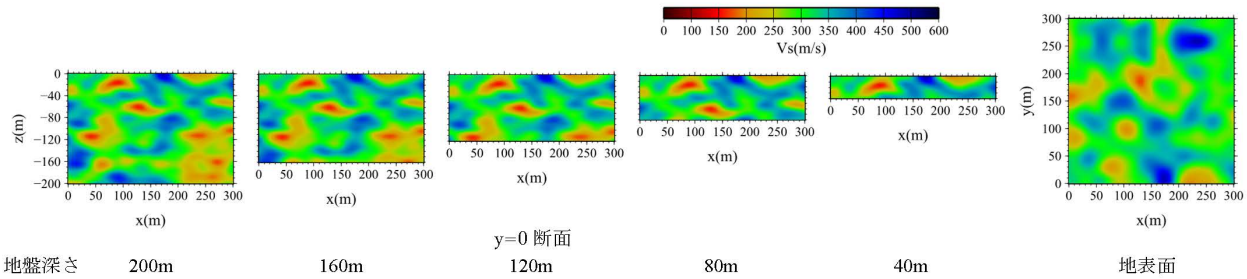
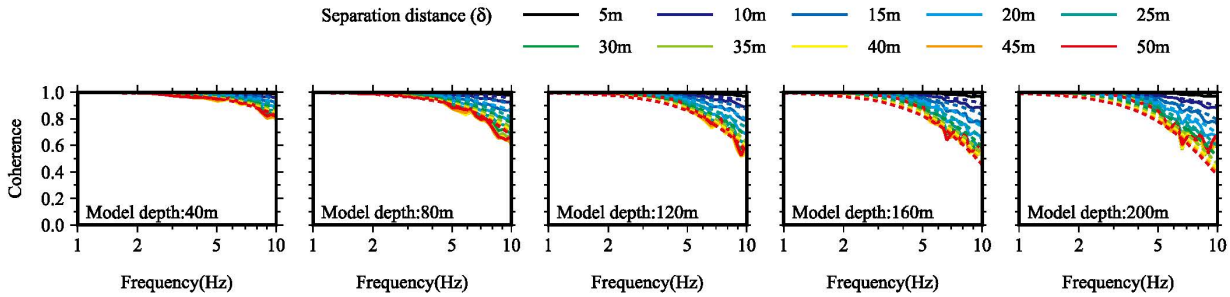
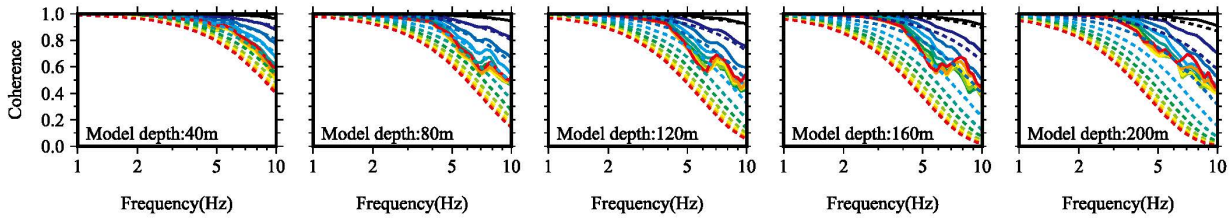


図 2　不均質地盤モデルの例（ケース 1）



(a)　ケース 1



(b)　ケース 2

図 3　隣接地点間の地震動のコヒーレンス　地震動シミュレーションと評価モデルとの比較
（実線：地震動シミュレーション　点線：コヒーレンスモデル）

© The Seismological Society of Japan

Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (2)

*Tadashi YAMASHINA[1], Makoto OKUBO[1], Takao TABEI[1], Muksin UMAR[2], Nazli ISMAIL[2]

1. Kochi University, 2. Syiah Kuala University, Indonesia

我々は、インドネシア、スマトラ島北部のスマトラ断層の断層面を推定するために断層近傍で得られた地震波形記録に地震波干渉法による地下構造推定法であるSITES法（大久保, 2009, JpGU2009, S157-015）を適用し、断層面からの反射波と考えられる信号が抽出できることを報告している（Yamashina et al., 2019, AGU Fall Meeting 2019, S11D-0373；山品・他, 2020, 日本地震学会2020年度秋季大会, S10P-12）。解析に用いたSITES法は、一般的には鉛直成分記録のみを用いる地震波干渉法を3成分の記録全てを用いるように発展させた解析手法であり、地震波反射面（例：断層、帯水層）の空間的な広がりを一観測点での記録からも評価可能である利点を持つ。解析には、2011－2015年にスマトラ島北端部Ache州を中心にスマトラ断層のセグメントであるAche、Seulimeumの両セグメント近傍で行われた臨時地震観測で得られた3成分連続雑微動記録を用いた。
前2報では、断層面からの反射波と考えられる信号が抽出され、その結果から推定された反射面は既知の断層に対応していることを報告した。しかしながら、いくつかの観測点については得られた自己相関関数（ACF）に明瞭なピークが現れず、断層面からの反射波を同定することができない場合があった。考えられる要因としては、前処理で適用したバンドパスフィルタの帯域設定が適切でなかった、解析対象の雑微動に対して大きいエネルギーを持つ自然地震や人工振源などからの振動の影響を受けている、ことが挙げられる。そこで、バンドパスフィルタの帯域設定の検討、相関関数を用いる解析において自然地震などの過渡的な影響の軽減が期待される sign-bit normalization の適用などを行った。本発表では、上記による解析結果への影響についての検討と、断層面の推定結果について示す。

謝辞：本研究では、科研費JP24403005、JP17H04577によって得られたデータや成果を利用しました。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 15th) | Regular session | S17. Tsunami

P

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P10 (ROOM P)

[S17P-01] A Fundamental Study on the Probabilistic Analysis Method for Landslide-induced Tsunamis Triggered by Earthquakes

○Masanobu KOBA[1], Satoru Tsuchiya[2], Tatsuto Kimura[3], Masafumi Matsuyama[4], Katsuhide Kato[5] （1.EGC, 2.Unic, 3.TEPSCO, 4.CRIEPI, 5.CEPCO）

3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-02] Tsunami database type tsunami inundation prediction using different optimization methods

○Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[2] （1.Graduate School of Frontier Sciences, Tokushima University, 2.Graduate School of Social Science and Engineering, Tokushima University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-03] Two-Layer Flow Model Tsunami Calculation with Non-hydrostatic Pressure Effect under the Assumption of Submarine Landslide in the Northern Part of Tosa-Bae off Shikoku

○Masahiro Kurozumi[1], Toshitaka Baba[1] （1.Tokushima univ）

3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-04] A Preliminary Examination on Characteristics of Submarine Landslide Tsunami along the Nankai Trough

○Kentaro IMAI[1], Yasuyuki Nakamura[1], Toshiya Fujiwara[1], Yuichiro Tanioka[2] （1.JAMSTEC, 2.Hokkaido Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-05] Attenuation of the 2006 and 2007 Kuril islands tsunamis

○Keiji Akai[1], Naoko Shinmoto[2], Toshitaka Baba[1] （1.Tokushima graduate school, 2.Tokushima univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S17P-06] Later tsunami wave of the 1952 Kamchatka earthquake

○Hiroaki TSUSHIMA[1], Takeyasu YAMAMOTO[1] （1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

A Fundamental Study on the Probabilistic Analysis Method for Landslide-induced Tsunamis Triggered by Earthquakes

*Masanobu KOBA[1], Satoru Tsuchiya[2], Tatsuto Kimura[3], Masafumi Matsuyama[4], Katsuhide Kato[5]

1. EGC, 2. Unic, 3. TEPSCO, 4. CRIEPI, 5. CEPCO

1. 検討対象

地すべり発生位置における地震外力（水平加速度）の年超過確率が得られている場合に，沿岸のある地点における津波水位の年超過確率を求めることを目的として，確率論的津波ハザード評価 (PTHA) の方法を検討した．海底で発生する地すべりと，陸上で発生し海域に突入する地すべりをともに対象とし，地すべり運動のタイプは地層中の弱層がすべり面となり移動体がほぼ一体となって移動するslide（並進すべり）及びslump（回転すべり）とした．検討した方法に基づき，–仮想的な地すべりを対象とした数値実験を実施し，地すべり発生確率及び津波水位超過確率への影響を評価した．

2. 地震をトリガーとする地すべり津波の確率論的評価の構造

(1) 基本構造

地震の水平加速度を起点に，地すべりの発生（位置・規模）及び津波の発生・伝播を(2)，(3)に示すモデルで関係づける．ただし，各プロセスにおいて前提条件及び解析結果に含まれる不確実さを確率論的に考慮する必要がある．そのために，地すべりのトリガーを特定せず個々の地すべりは固有の規模と繰り返し間隔をもつ前提とした木場・他（2018, 地震学会秋）と同様に，認識論的不確実さをロジックツリーにより，偶然的不確実さを確率分布により表現する．認識論的不確かさは，地すべり運動のタイプや地盤物性等，主に地すべり発生の有無に影響を与える項目と，地すべりの移動速度や水位の評価手法等，津波水位評価に影響を与える項目で構成する（図1）．

(2) 地すべり発生の評価方法

多数のすべり面または地盤物性を対象に地すべりの有無を判定する必要があることから，地すべり発生の有無に関しては，2次元断面内の極限平衡法(LEM)による比較的簡易な斜面安定解析により得られるすべり安全率Fsを用いる．地震の最大加速度が与えられた際，地すべり面の位置，寸法（長さ・厚さ）及び地盤物性値（密度・せん断強度）をパラメータとして斜面安定解析を実施する．これらパラメータに不確実さが含まれる場合，パラメータ値を設定範囲内でランダムに変化させるモンテカルロシミュレーション （例えば，鴫原・Horrillo (2014)[*1]）を実施し，多数のFsを得る．地すべりが発生するFsの閾値にも不確実さを見込む．これらの結果，地すべりと発生確率が対応づけられる．

(3) 津波の評価方法

地すべり起因の津波の水位を正確に評価できる解析手法は確立されていないという認識のもと，複数の解析手法による水位の差違を沿岸水位の不確実さとして評価に取り込む．解析手法は，以下の3通りを前提としている．①Watts et al. (2005[*2]; 海底)またはFritz et al.(2004[*2]; 陸上)による初期水位＋平面二次元モデルによる伝播，②Satake(2007,EPS)によるkinematic landslide model (KLS)，③二層流モデル(松本・他,1998[*3])．ただし，多数の解析を必要とすることから，最も簡易な①を基本として計算を実施し，②③との差異は予備的計算により評価し，相田(1977, 震研彙報)による幾何平均K及び幾何標準偏差 κ を用いて解析手法間の水位の不確実さを考慮できるものとした．さらに，計算を実施した水位にも解析誤差等による不確実さを見込む．

3. 仮想的な地すべりを対象とした数値実験

仮想的な地すべりを設定し，一連の評価が可能であることを確認するとともに，パラメータや解析手法が発生確率や津波水位に与える影響を評価した．

(1) 地すべり発生確率

海底にすべり面を固定して仮想的な地震外力や地盤物性を与えた場合の修正フェレニウス法によるFsの計算を行った．すべりが生じる限界すべり安全率を1.0とした場合と0.15(有意な移動量を生じる閾値; ten Brink et al., 2009[*4])とした場合で，地すべりの再来期間に3オーダー程度の極めて有意な違いが生じることが判った．

(2) 津波評価手法間の差違

© The Seismological Society of Japan

前述した3手法により陸上及び海底の地すべりに伴う沿岸津波水位を比較した．いずれの地すべりでも手法①③と②の差違が非常に大きくなった（図２）.これには②のパラメータのひとつである地すべり移動速度の見積もりが強く影響していることが判った．ここでは自由落下または摩擦を考慮した自由落下の式により速度を設定したが，適切な設定方法については今後の課題である．

謝辞　本研究は電力11社による原子力リスクセンター共研として実施した成果であることを付記するとともに，土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会（委員長 高橋智幸関西大学教授）の委員各位に研究成果をご議論頂き，有益なご助言を賜りました．関係各位に謝意を表します．

*1: *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, *2: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *3: *海岸工学論文集*, *4: *Marine Geology*, Vol. 264, pp.65-73.

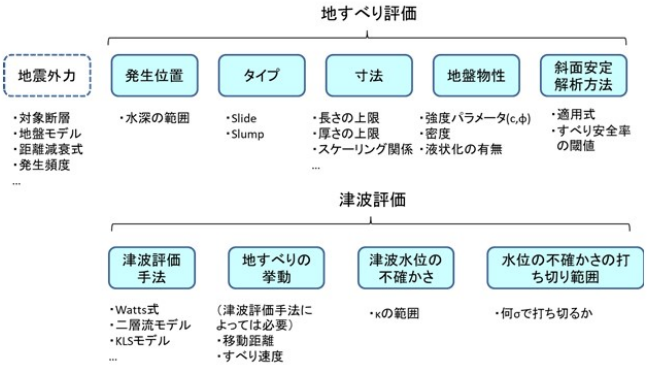


図１　認識論的不確実さの構成

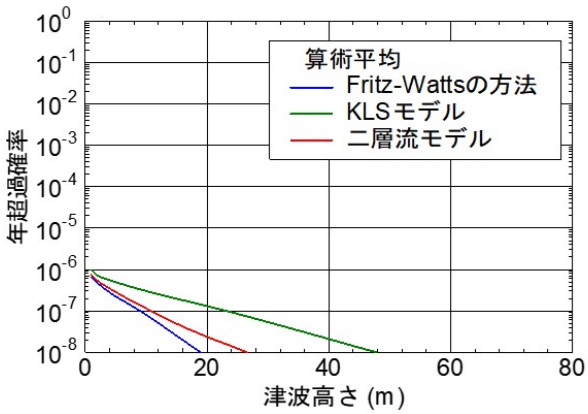


図２　仮想的な陸上地すべりによる津波水位超過確率の津波解析手法による比較例

© The Seismological Society of Japan

Tsunami database type tsunami inundation prediction using different optimization methods

*Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[2]

1. Graduate School of Frontier Sciences, Tokushima University, 2. Graduate School of Social Science and Engineering, Tokushima University

日本では沖合を伝播する津波は海底水圧計やGPS波浪計で海岸に到達する前に観測可能である。エネルギー保存則より得られるグリーンの法則を用いれば、沖合津波高から沿岸津波高を簡単に推定できる。さらに発展した手法として、多数の津波シミュレーション結果に基づいて回帰するモデル（以降、回帰モデル）が知られている。回帰モデルはシンプルであるが実用的で、処理速度の割に高精度な予測が可能である。しかし、回帰モデルは海岸の任意の1点のみの高さを予測するだけで、最大浸水深分布のような面的な分布を求めるに至っていない。津波災害発災後の応急対応などを考えた場合、沿岸津波高だけでなく、浸水深分布も予測できることが望ましい。既存の回帰モデルで浸水深分布を求めるには、単純には空間上のすべての点について予測を実施すればよいわけだが、予測点が膨大となるため処理時間が長くなるという問題がある。解決策として、津波による浸水深が常に類似しているエリアを予めグループ化して予測点を減らす手法を提案する。本研究では浸水深の分布を高速に予測する手法の開発を目的とする。
解析対象地域は徳島県阿南市付近とした。クラスタリング解析を行う浸水深データとして、南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価(防災科学技術研究所,2020)に掲載されている波源断層モデルから計算された津波浸水データベースを用いた。本研究の解析手順として先ず、この津波浸水データベースの3480ケースの地震シナリオからランダムに選択した14シナリオの浸水深分布に対して、非階層的手法であるk-means法を適用し、浸水深がほぼ同じ領域を判別した。k-means法では解析者がクラスタ分割数を定義する必要があり、クラスタ内の浸水深データの平均値で規格化した標準偏差が0.2未満となる事を目安としてクラスタ数を設定した。クラスタ数18とした場合とクラスタ数を27とした場合であまり違いが見られなかったので、分割数18を最終的に採用した。次に、個々のクラスタ化した領域において、津波浸水データベースの浸水深データの特徴量（平均値、標準偏差、最大値）を抽出し、抽出した特徴量を目的変数、DONET観測点の最大津波高を説明変数として、べき乗則による回帰モデル(Yoshikawa et al., 2019)を線形化及び共役勾配法により構築した。最後に構築した線形化と共役勾配法2通りの回帰モデルを使って、内閣府モデル11ケースによる津波浸水を予測し、フォワード津波計算による真値と比較した。また、浸水深の予測モデルによる違いを比較する為に、ニューラルネットワークを用いた浸水深の予測式を構築して、フォワード津波計算による真値と比較した。
解析対象地域への影響が大きい内閣府南海トラフ地震シナリオ3について、各クラスタの予測誤差は、線形化手法に対して共役勾配法を用いることで最大値については26%，平均値は20%の改善が見られた。しかし、最大値の予測結果ではフォワード計算値と予測値の差が10mに達するクラスタも見られた。対応策として、クラスタ解析に使用するシナリオセットの違いによる浸水深の分類傾向を比較する事やクラスタ分割数を現在よりも大きいクラスタ分割数を採用する事が考えられる。ニューラルネットワークによる予測では最大値の予測は比較的うまく行えたが、平均値の予測では共役勾配法による予測値及びフォワード計算値よりも大きな値となる傾向が見られ、予測精度は共役勾配法と比べて必ずしも良いものではなかった。今後の課題として、提案手法の精度評価や浸水深の予測値が大きいパターンを上手く予測できる方法の検討が挙げられる。

© The Seismological Society of Japan

Two-Layer Flow Model Tsunami Calculation with Non-hydrostatic Pressure Effect under the Assumption of Submarine Landslide in the Northern Part of Tosa-Bae off Shikoku

*Masahiro Kurozumi[1], Toshitaka Baba[1]

1. Tokushima univ

地震性津波は地震動を伴っているため揺れで津波の来襲を予期できるが，海底地すべりによる非地震性津波は地震動を伴わないか，もしくは弱いため，津波の来襲を見誤る恐れがある．我々は海底地すべりのリスク評価のため，四国沖の海底地すべり痕の地形調査を実施しており，その結果から得られた地すべり痕を基に計算コードJAGURSの二層流モデルを用いて数値シミュレーションを行った．地すべり痕の大きさは東西方向に約1.9km，南北方向に約2.3km，厚さ約60mであった．この二層流モデルには下層の変位を上層に受け渡す際に毎ステップ非静水圧効果(Kajiuraフィルター)を導入しており，本研究ではKajiurraフィルターの有無による沖合津波波形，海岸沿いでの津波高，分散波計算を調査した． Kajiurraフィルターを使用することによって津波波形に生じていた微小振動が抑制された．津波波源ではKajiuraフィルター有りの場合では水位上昇量が最大0.85ｍであったのに対し，考慮しない場合では2.42ｍであった．しかし，その他の地点ではKajiurraフィルターの有無で0.1ｍ以下の違いしかなかった．本海底地すべりに四国海岸沿いでは最大約３ｍの津波が予測されるので，この値に対してKajiurraフィルターの有無による違いは，へ減を除いて，十分小さいといえる． 上層に分散項を追加した計算を試みたが，Kajiurraフィルターの有無にかかわらず四国沖土佐ばえの実地形データでは，振動が発生してしまいうまく計算ができなかった．このため，水深を1000ｍから3500ｍで傾斜が10度の仮想地形データを作成し，Kajiurraフィルターの有無による解析を実施した．波形を比べるとフィルター無のほうが引き波が顕著になる傾向が見られた． さらに，本研究の解析では下層に振動が発生していたので，下層に粘性項も導入した．既往研究を参考にして粘性係数を設定し計算を実施したが，結果に違いは見られなかった．

© The Seismological Society of Japan

A Preliminary Examination on Characteristics of Submarine Landslide Tsunami along the Nankai Trough

*Kentaro IMAI[1], Yasuyuki Nakamura[1], Toshiya Fujiwara[1], Yuichiro Tanioka[2]

1. JAMSTEC, 2. Hokkaido Univ.

南海トラフでは100-200年間隔で巨大地震が繰り返し発生しており，当該沿岸地域では津波による激甚被害を被ってきた．このような歴史的背景に加えて，2011年東北沖地震津波の発生状況を踏まえ．内閣府は現在考え得る最大規模であるM9クラスの南海トラフ巨大地震の波源断層モデルを公表した．この最大想定モデルでは，断層すべりによる津波励起について検討されているが，巨大地震に伴った海底地すべりによる津波励起の影響については検討されていない．一方で，南海トラフ沖において海底地すべり痕は多く見出されている．森本・他（2017）は，南海トラフ沖を包含する日本周辺における海底地すべりの判読を行い，その分布特性について検討を行っている．Strasser et al. (2011) は熊野灘沖における3次元の地下構造反射断面を活かして詳細な地すべり諸元について詳細に検討を行っている．Baba et al. (2019) や黒住・他（2021）は，四国沖土佐ばえにおいてマルチナロービーム音響測深による海底地すべりの調査を実施し，大規模な海底地すべり痕を見出し，さらに，海底地すべりによる津波の影響評価を検討している．いずれの先行研究でも，海底地すべりの発生年代や励起源については言及されていないものの，南海トラフの沖合における海底地すべりの存在が発生状況の理解が進んでいるといえる．

本研究では，先行研究の成果を踏まえて南海トラフ巨大地震に伴って発生し得る海底地すべり津波の規模について，簡易的な評価手法を用いて予察を行い，巨大地震に伴った海底地すべり津波の影響について検討することを目的とする． 地すべり痕の諸元が明らかにされている熊野灘沖 (Strasser et al., 2011)でのイベントにおける津波励起の規模について検討を行った．Strasser et al. (2011) で評価された地すべり規模について，発生個所の水深は2,200 m，地すべりの推定長さおよび幅は10 kmと3～5 km，構造断面から読み取ることのできる滑落深さは150～2200 mである．この地すべり諸元に基づいてWatts et al. (2005) で地すべりによる最大津波励起振幅を評価するとおおよそ10 cm程度となり，沿岸での津波は最大で40 cm程度となる．この地すべり痕の近傍地域である和歌山県那智勝浦を例としてその影響を検討してみると，当該地域では，1707年宝永地震で6～7 m，安政東海地震で6 m，昭和東南海地震では4 m程度であり，熊野灘沖の地すべり痕による津波の影響は1割程度以下となる．ただし，津波周期に応じた副振動の影響などは考慮していないため，定量的な評価には数値解析を要する．ただし，同規模の海底地すべりがより浅い水深で発生する場合には結果は大きくことなり，Strasser et al. (2011) で評価された地すべり規模が水深200 m程度の海域で発生した場合，最大津波励起振幅は3 mを越えることとなり，無視できなくなる．

本発表では，森本・他（2017）による地すべり痕の判読成果を活用して，南海トラフ沖の海底地すべり規模の評価を行い，巨大地震に伴う海底地すべり津波の影響について検討する．

謝辞：本研究は 科学研究補助金（研究代表者：谷岡勇市郎，課題番号：19H01977）Rの一環として行われました．

© The Seismological Society of Japan

Attenuation of the 2006 and 2007 Kuril islands tsunamis

*Keiji Akai[1], Naoko Shinmoto[2], Toshitaka Baba[1]

1. Tokushima graduate school, 2. Tokushima univ.

津波の到達時刻および高さを精度よく予測する技術とともに、事後対応の迅速さや安全性のために津波の減衰について精度よく予測する技術も求められる．本研究では、2006 年及び 2007 年千島列島沖地震の DART 及び日本沿岸の験潮所で観測された津波の減衰について、地震発生から 48 時間の津波記録に適当な近似関数をフィットさせ、減衰パラメータを推定した．二つの地震はそれぞれ海溝型地震とアウターライズ地震であった．また、DART記録については非線形長波式で計算された津波の減衰と比較した．数値シミュレーションによって、津波の減衰過程を再現できるかについての検証も目的の一つである．

本研究では、減衰の傾向を把握する手法として、林ら(2010)で定義された移動自乗平均振幅(MRMS 振幅)に倣った．林ら(2010)は、検潮所で観測された津波の MRMS 振幅の最大値以降の部分について、指数関数または累乗関数をあてはめ、減衰パラメータを推定した．しかし、本研究で扱った DART 記録については指数近似、累乗近似ではうまく近似できず、対数関数による近似が最も良い2値が得られた。また、検潮所で観測された津波については、指数近似と対数近似で同等の結果となった．以上から、津波の減衰は沿岸、沖合に関わらず、共通して対数関数による近似が好ましいと結論付けた．

また、観測津波と計算津波の比較の手法として、計算の入力に用いる断層パラメータのすべり量を適宜修正することで観測津波と計算津波の MRMS 振幅の最大値を一致させ、最大値以降の減衰過程を比較した．その結果、すべての DART 観測点において計算津波の減衰が観測波形に比べ遅かった。計算時の摩擦係数を大きくするにつれ、観測津波の減衰過程に近づく傾向があるが、両者を一致させるには摩擦係数が現実的でない値が必要で、課題が残った．

© The Seismological Society of Japan

Later tsunami wave of the 1952 Kamchatka earthquake

*Hiroaki TSUSHIMA[1], Takeyasu YAMAMOTO[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

背景と目的

津波が発生すると，第一波が沿岸に到着した後，数時間以上経ってから顕著に高い後続波が沿岸に押し寄せることがある．2006年千島列島沖の地震（Mw 8.3）においては，天皇海山列で散乱された津波の影響で，日本の太平洋沿岸では第一波到達後5時間以上経ってから最大波が観測された（たとえば，気象庁，2006）．こうした顕著な振幅を持つ後続波について，その発現条件（波源と観測点の位置関係等）や，津波数値モデルによる後続波の再現可能性を把握しておくことは，実際に津波が起きた際に，リアルタイムにその時間推移を見通すうえでの参考になる．1952年カムチャツカ地震（Mw 9.0）では，日本の沿岸検潮所で，第一波到達後に，遅れて高い津波が観測された．本研究では，この顕著な後続波に着目し，津波数値解析による再現が可能であるかを調べるとともに，その成因を探る．

潮位観測データ

日本の太平洋沿岸の検潮所のうち，気象庁所管の函館，宮古，鮎川，小名浜の紙記録をデジタイズして，潮位波形データを作成した．同波形データから潮汐成分を除去して，64分の時間幅で移動二乗平均平方根（Moving Root Mean Squares：MRMS）振幅を算出し，4地点のMRMS振幅時系列を津波第一波到達時刻で揃えてスタックした．得られた時系列を観察すると，日本への津波到達後，MRMS振幅が増加して経過時間12時間付近で最大になり，40時間にかけていったん減衰したのち，48時間付近において最大値の半分程度まで再び振幅が増加する様子がみられた．

津波数値計算

非線形長波理論に基づき，太平洋全域について津波数値計算を行った．数値計算にはJAGURS (Baba et al., 2015)を用いた．空間格子間隔は30秒とし，GEBCO_2014の地形データを用いて，72時間の積分計算を行った．津波の初期条件としては，Johnson and Satake (1999)が津波波形逆解析で推定した1952年カムチャツカ地震のすべり分布モデルを用いた．Okada (1985)の式で海底上下地殻変動分布を計算し，それを初期水位分布とみなした．この津波数値計算により得られた沿岸検潮所4地点の津波波形に対して，観測データと同様の処理を行い，スタックしたMRMS振幅時系列を算出した．

結果と考察

数値計算によるMRMS振幅時系列をみると，第一波到達後に振幅が増加し，いったん減衰したのち，48時間付近で再び増加する時間変化をしており，観測データにみられた時間変化のパターンを概ね再現した．この後続波の成因を調べるため，数値計算による津波高のスナップショットを観察したところ，波源から南米へ伝播した津波がチリ沿岸で反射して，日本まで伝わる様子がみられた．このことから，日本の沿岸検潮所で観測された48時間付近の振幅の高まりは，チリからの反射波であると解釈できる．

© The Seismological Society of Japan

S24

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities (ROOM P)

[S24P-01] Public Relations Committee

○佐藤 利典[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-02] Newsletter Editorial Board

○豊国 源知[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-03] Strong Ground Motion Committee

○干場 充之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-04] Committee for School Education

○加納 靖之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-05] Disaster Investigation Committee

○吾妻 崇[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-06] Committee on Summer School for Kids

○佐藤 明子[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-07] Geoparks Assistance Committee

○松原 誠[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-08] Committee for Seismology Outreach

○久田 嘉章[1] （1.The Seismological Society of Japan）

©Seismological Society of Japan

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-01] Public Relations Committee

○佐藤 利典[1] （1.The Seismological Society of Japan）

広報委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-02] Newsletter Editorial Board

○豊国 源知[1] （1.The Seismological Society of Japan）

学会情報誌編集委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-03] Strong Ground Motion Committee

○干場 充之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

強震動委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-04] Committee for School Education

○加納 靖之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

学校教育委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-05] Disaster Investigation Committee

○吾妻 崇[1] （1.The Seismological Society of Japan）

災害調査委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-06] Committee on Summer School for Kids

©Seismological Society of Japan

○佐藤 明子[1] （1.The Seismological Society of Japan）

普及行事委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-07] Geoparks Assistance Committee

○松原 誠[1] （1.The Seismological Society of Japan）

ジオパーク支援委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-08] Committee for Seismology Outreach

○久田 嘉章[1] （1.The Seismological Society of Japan）

地震学を社会に伝える連絡会議の活動を紹介します

©Seismological Society of Japan

S24

Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities (ROOM P)

[S24P-01] Public Relations Committee

○佐藤 利典[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-02] Newsletter Editorial Board

○豊国 源知[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-03] Strong Ground Motion Committee

○干場 充之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-04] Committee for School Education

○加納 靖之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-05] Disaster Investigation Committee

○吾妻 崇[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-06] Committee on Summer School for Kids

○佐藤 明子[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-07] Geoparks Assistance Committee

○松原 誠[1] （1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-08] Committee for Seismology Outreach

○久田 嘉章[1] （1.The Seismological Society of Japan）

©Seismological Society of Japan

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-01] Public Relations Committee

○佐藤 利典[1] （1.The Seismological Society of Japan）

広報委員会の活動を紹介します

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-02] Newsletter Editorial Board

○豊国 源知[1] （1.The Seismological Society of Japan）

学会情報誌編集委員会の活動を紹介します

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-03] Strong Ground Motion Committee

○干場 充之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

強震動委員会の活動を紹介します

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-04] Committee for School Education

○加納 靖之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

学校教育委員会の活動を紹介します

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-05] Disaster Investigation Committee

○吾妻 崇[1] （1.The Seismological Society of Japan）

災害調査委員会の活動を紹介します

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-06] Committee on Summer School for Kids

©Seismological Society of Japan

○佐藤 明子[1] （1.The Seismological Society of Japan）

普及行事委員会の活動を紹介します

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-07] Geoparks Assistance Committee

○松原 誠[1] （1.The Seismological Society of Japan）

ジオパーク支援委員会の活動を紹介します

(Fri. Oct 15, 2021 3:30 PM - 5:00 PM Introduction of committee activities)

[S24P-08] Committee for Seismology Outreach

○久田 嘉章[1] （1.The Seismological Society of Japan）

地震学を社会に伝える連絡会議の活動を紹介します

©Seismological Society of Japan