

Thu. Oct 29, 2020

ROOM A

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

[S20]AM

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

9:00 AM - 12:00 PM ROOM A

[S20] President speech

9:00 AM - 9:04 AM

[S20] Award ceremony

9:04 AM - 9:43 AM

[S20-01] The Evolution of the ETAS Model and the Modeling of Causal Inference

○Yosihiko Ogata¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

9:43 AM - 10:13 AM

[S20-02] Three-dimensional dynamic rupture propagation including fault weakening processes and stress conditions

○Yumi Urata¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:13 AM - 10:33 AM

[S20-03] Study of stress magnitude in the lithosphere based on earthquake data

○Keisuke Yoshida¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

10:33 AM - 10:53 AM

[S20-04] Research on the seismogenic environment bridging the gap between laboratory rock experiments and natural earthquakes

○Nana YOSHIMITSU¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

10:53 AM - 11:13 AM

[S20-05] Improvement and Prospect of GNSS Earth Observation Network system (GEONET)

*GEONET Group, Geospatial Information Authority of JAPAN¹ (1. Geodetic Observation Center / Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of JAPAN)

11:13 AM - 11:33 AM

[S20-06] Establishment of regular GNSS-A seafloor geodetic observation technique and its contribution to seismology

*Masayuki FUJITA¹, Yoshihiro MATSUMOTO¹, Mariko

SATO¹, Tadashi ISHIKAWA¹, Shun-ichi WATANABE¹,
Yusuke YOKOTA² (1. JHOD; Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. IIS UT; Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

11:33 AM - 11:53 AM

[S20] Discussion

11:53 AM - 12:00 PM

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

[S15]PM-1

chairperson: Yo Fukushima (IRIDeS, Tohoku University),
chairperson: Yoshiaki Hisada (Kogakuin University)

1:00 PM - 2:15 PM ROOM A

[S15-01] What are Influencing Possibilities of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on Viaduct-Damages of the Tohoku-Shinkansen Railway?

○HIROSHI MAEHARA¹ (1. Geosystem Research Institute)

1:00 PM - 1:15 PM

[S15-02] Movement of Victims of Tokyo City in the First Step of Disaster Reconstruction from the 1923 Great Kanto Earthquake

○MASAYUKI TAKEMURA¹ (1. Nagoya University)

1:15 PM - 1:30 PM

[S15-03] Development of Earthquake Probability Transition Table as a Tool for Comprehension and Awareness for the Nankai-Trough Earthquake Scenarios

○Yo Fukushima¹, Tomoaki Nishikawa²

(1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S15-04] Causes of Fourier Amplitude Sags at Intermediate Frequencies for Simulating Broadband Strong Ground Motions using Stochastic Green's Function Methods

○Yoshiaki Hisada¹ (1. Kogakuin University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S15-05] Study on rupture propagation effect of small and medium-sized earthquakes used as elemental earthquakes of empirical Green's function method

○Junpei Kaneda¹, Shinya Tanaka¹, Yoshiaki Hisada²

(1. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.,

2.Prof.,Kogakuin Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM

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

[S15]M-2

chairperson:Seiji Tsuno(Railway Technical Research Institute),
chairperson:Ryuta Imai(Mizuho Information &Research Institute,
Inc.)

2:30 PM - 3:30 PM ROOM A

[S15-06] Improvement of IPF method with utilization of Hi-net

○Keishi Noguchi¹, Naoki Hayashimoto¹, Koji Tamaribuchi², Yuki Kodera² (1.Japan Meteorological Agency, 2.Meteorological Research Institute)

2:30 PM - 2:45 PM

[S15-07] Applicability of on-site P-wave earthquake early warning to the 2016 Kumamoto earthquake and the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

○Seiji Tsuno¹, Katsutomo Niwa² (1.Railway Technical Research Institute, 2.JR Central Consultants Company)

2:45 PM - 3:00 PM

[S15-08] A sample generation of scenario earthquake shaking maps via modal decomposition and empirical copula

○Ryuta Imai¹, Naoki Kasui¹, Asako Iwaki², Hiroyuki Fujiwara² (1.Mizuho Information &Research Institute, Inc., 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:00 PM - 3:15 PM

[S15-09] Toward application of large-scale numerical simulation of earthquake generation, wave propagation and soil amplification into comprehensive earthquake damage estimation

○Takane Hori¹, Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita², Ryoichiro Agata¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM

ROOM B

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

[S12]PM-1

chairperson: K entaro Omura(NIED)

1:00 PM - 1:45 PM ROOM B

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

○Kentaro Omura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 1:15 PM

[S12-02] Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

○Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2.Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3.Japan Meteorological Agency)

1:15 PM - 1:30 PM

[S12-03] Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

○Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

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

[S09]PM-1

chairperson:Satoshi Matsumoto(Kyushu University)

1:45 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-01] Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule -

○Satoshi Matsumoto¹ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-02] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

○Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

2:00 PM - 2:15 PM

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

[S09]PM-2

chairperson:Shiro Ohmi(DPRI, Kyoto University),

chairperson:Akemi Noda(MRI)

2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-03] Shear strain energy changes caused by the 2016

Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

○Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5.Institute of Statistical Mathematics)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-04] Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

○Ichiro Kawasaki¹ (1.Tono Research Institute of Earthquake Science)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-05] Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

○Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-06] Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

○Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹ (1.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

ROOM C

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]PM-1

chairperson:Gou Fujie(JAMSTEC)

1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

[S06-01] Mapping outer rise faults in the southern Kuril

Trench

○Shuichi Kodaira¹, Tetsuo No¹, Gou Fujie¹, Koichiro Obana¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Kentaro Imai¹, Toshitaka Baba², Naotaka Chikadasa³, Yuichiro Tanioka⁴ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Tokushima University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Hokkaido University)

1:00 PM - 1:15 PM

[S06-02] Crustal structure in the Kuril Trench subduction zone off Hokkaido, Japan, by a dense linear OBS-array seismic survey

Ryosuke Azuma¹, Shuichi Kodaira², Ryota Hino¹, Go Fujie², Koichiro Obana², Fumiaki Tomita², ○Yusaku Ohta¹ (1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

1:15 PM - 1:30 PM

[S06-03] 3-D structure and seismogenesis in the East Japan forearc derived from S-net data

○Dapeng Zhao¹, Y. Hua¹, G. Toyokuni¹, Z. Yu¹ (1.Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-04] Seismogenic source fault models in and around the Sea of Japan

○Hiroshi Sato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Tetsuo No², Kodaira Shuichi², Naoko Kato¹, Johan S Claringbould, Makoto Matsubara³, Akinori Hashima¹, Masahiro Ishikawa⁴, Takeshi Sato⁵ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Yokohama National University, 5.Sapporo Regional Headquarters, JMA)

1:45 PM - 2:00 PM

[S06-05] High-resolution tomography analysis in north-central Kinki region

○Shinya Katoh¹, Yoshihisa Iio², Junichi Nakajima³, Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (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, 3.Dept. of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology)

2:00 PM - 2:15 PM

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]PM-2

chairperson:ryosuke Azuma(Tohoku University)

2:30 PM - 3:30 PM ROOM C

[S06-06] Wide-angle seismic survey off Muroto in Nankai trough

○Gou Fujie¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1.JAMSTEC)

2:30 PM - 2:45 PM

[S06-07] Temporal variation of seismic velocity structure in the vicinity of shallow plate boundary in the Kumano-nada region

○Takashi Tonegawa¹, Suguru Yabe² (1.JAMSTEC, 2.AIST)

2:45 PM - 3:00 PM

[S06-08] Receiver function imaging of the Philippine Sea plate subducting beneath Shikoku (3)

○Takuo Shibutani¹, Jun Nakagawa¹, Airi Nagaoka¹, Tsutomu Miura¹, Yusuke Yamashita¹, Ken'ichi Yamazaki¹, Shintaro Komatsu¹ (1.Kyoto Univ.)

3:00 PM - 3:15 PM

[S06-09] The P and S Wave Structure in the Shikoku Region from GA-based Simultaneous Determination of Hypocenters and Seismic Wave Velocity Structure

○Kota Murata¹, Motoo Ukawa² (1.Pacific Consultants co., Ltd., 2.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

ROOM D

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

[S01]PM-1

chairperson:Daisuke Sato(DPRI, Kyoto University),

chairperson:Tsutomu Takahashi(JAMSTEC)

1:00 PM - 2:15 PM ROOM D

[S01-01] Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

○Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi² (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:00 PM - 1:15 PM

[S01-02] Proper reduction and asymptotic sampling

difficulty of posterior distributions in fully

Bayesian inversions

○Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1.DPRI, Kyoto University)

1:15 PM - 1:30 PM

[S01-03] Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

○Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi² (1.DPRI, Kyoto University, 2.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:30 PM - 1:45 PM

[S01-04] Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

○Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

1:45 PM - 2:00 PM

[S01-05] Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

○Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda² (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

2:00 PM - 2:15 PM

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

[S01]PM-2

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), chairperson:Issei Doi(DPRI, Kyoto University)

2:30 PM - 3:30 PM ROOM D

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms

○Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Science, Tohoku University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S01-07] Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram
 ○KAORU SAWAZAKI¹ (1.National Research institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:45 PM - 3:00 PM

[S01-08] Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

Ossei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S01-09] sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

Osamu Masahiro Kosuga¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:15 PM - 3:30 PM

ROOM A

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room A (S01, S15, S16)

[SPA]PM-3

chairperson: Wataru Suzuki (NIED)

4:00 PM - 5:00 PM ROOM A

[S01P-02] Towards the detection of the mantle-reflected P wave using seismic interferometry

*Shota Kato¹, Kiwamu Nishida¹ (1. Earthquake Research Institute, the university of Tokyo)

4:00 PM - 4:10 PM

[S15P-08] Theoretical analysis of the long-period velocity pulses observed in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

*Kotaro Tarumi¹, Tomotsugu Watanabe¹, Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹ (1. Okayama University)

4:10 PM - 4:20 PM

[S15P-15] Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

*MUHAMMAD ZAFAR IQBAL¹, Tae Woong Chung¹ (1. Sejong University)

4:20 PM - 4:30 PM

[S16P-07] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics in the Landslide Areas Derived from Microtremor Observation - Case of Ikutahara, Engaru-cho, Monbetsu-gun, Hokkaido -

*Isamu Nishimura¹, Tatsuya Noguchi², Yusuke Ono², Masanori Kohno² (1. Tottori University, Graduate

School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2. Tottori University, Department of engineering)

4:30 PM - 4:40 PM

ROOM B

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room B (S07, S08)

[SPA]PM-3

chairperson: Makiko Ohtani (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

4:00 PM - 5:00 PM ROOM B

[S07P-01] Seismic structure of the lithosphere-

asthenosphere system beneath the oldest seafloor- the broadband dispersion analysis of the Oldest-1 (Pacific Array) data

*Yuki Kawano¹, Takehi Isse¹, Akiko Takeo¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Hajime Shiobara¹, Nozomu Takeuchi¹, Hiroko Sugioka², YoungHee Kim³, Hisashi Utada¹, Sang-Mook Lee³ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. Seoul National University)

4:00 PM - 4:10 PM

[S08P-03] Reinterpretation of a legacy 3D seismic

reflection data to elucidate unusual sinistral M5.5 earthquake fault below a deep gold mine in a mafic sill and dike complex

*Koichiro Suzuki¹, Musa Sipiwe Manzi², Hiroshi Ogasawara¹, Taku Noda¹, Lindsay Linzer³, Raymond J Durrheim², Bennie Liebenberg⁴ (1. Ritsumeikan University, 2. University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3. SRK(Pty)Ltd, 4. Moab Khotsong mine)

4:10 PM - 4:20 PM

[S08P-08] Quantitative evaluation of the effect of static stress change of large earthquakes on activity change of volcanic deep low-frequency earthquakes

*Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

4:20 PM - 4:30 PM

[S08P-11] Derivation of all the static XBIEM kernels for 2D earthquake cycle simulation in heterogeneous media

*Kazuki Ohtake^{1,2}, Nobuki Kame², Makiko Ohtani² (1. Department of Earth and Planetary Science,

School of Science, The University of Tokyo, 2.
Earthquake Research Institute, The University of
Tokyo)

4:30 PM - 4:40 PM

- [S08P-15] Verification of conditions for intermittent events associated with powder shear using the Discrete Element Method
*Shinichi Oba¹, YUTA Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)
4:40 PM - 4:50 PM

ROOM C

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room C (S06, S09)

[SPA]PM-3

chairperson: Yasuhiro Yoshida (Meteorological College)
4:00 PM - 5:00 PM ROOM C

- [S06P-01] Towards continuous seismic imaging from offshore to land along the Japan trench: effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities)
*HyeJeong Kim¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Takeshi Akuhara¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)
4:00 PM - 4:10 PM
- [S06P-04] S-wave structure in the sediment beneath S-net stations estimated by V/H ratio of Rayleigh-wave (Scholte waves) extracted from ambient noise
*FUKUSHIMA SHUN¹, KIYOSHI YOMOGIDA¹ (1. HOKKAIDO UNIVERSITY)
4:10 PM - 4:20 PM
- [S09P-05] Repeater earthquakes observed in seismicity around the Fukushima-Ibaraki border since the 2011 Tohoku-oki Earthquake
*Rina Ikeda¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Tohoku University, 2. Meteorological Agency)
4:30 PM - 4:40 PM
- [S09P-12] Stress change estimated from GNSS displacement and seasonal variations in seismicity
*Taku Ueda¹, Aitaro Kato¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)
4:40 PM - 4:50 PM

ROOM D

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room D (S17, S24)

[SPA]PM-3

chairperson: Hiroaki Tsushima (Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)
4:00 PM - 5:00 PM ROOM D

- [S17P-04] Simulation of Tsunami Sediment Movement in Kamoda Pond, Tokushima Prefecture, assuming High Tide
*Takuya Saito¹, Toru Takeda¹, Kei Yamashita², Toshitaka Baba¹ (1. Tokushima University, 2. Tohoku University)
4:00 PM - 4:10 PM
- [S17P-09] Early estimation of tsunami heights with a Kalman filter: Combination of ocean-bottom pressure gauges and accelerometers
*Ayumu Mizutani¹, Kiyoshi Yomogida¹ (1. Hokkaido Univ.)
4:10 PM - 4:20 PM
- [S17P-11] Tsunami inundation prediction using regression models using tsunami database
*Masato Kamiya¹, Toshitaka Baba¹ (1. Tokushima University)
4:20 PM - 4:30 PM
- [S24P-01] Determination of *P*-wave first motion polarities and moment tensors for hydraulically-induced AEs using CNN technique
*Rui Tanaka¹, Makoto Naoi¹, Youqing Chen¹, Kazune Yamamoto¹, Keiichi Imakita¹, Naofumi Tsutsumi¹, Akihiro Shimoda¹, Daiki Hiramatsu¹, Hironori Kawakata², Tsuyoshi Ishida¹, Eiichi Fukuyama¹, Hiroyuki Tanaka³, Yutaro Arima³, Shigehiro Kitamura³, Daisuke Hyodo³ (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University, 3. JOGMEC)
4:30 PM - 4:40 PM
- [S24P-06] Numerical experiments towards detection of deep low-frequency tremors from seismic waveform images via convolutional neural network
*Ryosuke Kaneko¹, Hiromichi Nagao^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Kazushige Obara², Hiroshi Tsuruoka² (1. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:40 PM - 4:50 PM

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

[S20]AM

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A

[S20] President speech

9:00 AM - 9:04 AM

[S20] Award ceremony

9:04 AM - 9:43 AM

[S20-01] The Evolution of the ETAS Model and the Modeling of Causal Inference

○Yosihiko Ogata¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

9:43 AM - 10:13 AM

[S20-02] Three-dimensional dynamic rupture propagation including fault weakening processes and stress conditions

○Yumi Urata¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:13 AM - 10:33 AM

[S20-03] Study of stress magnitude in the lithosphere based on earthquake data

○Keisuke Yoshida¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

10:33 AM - 10:53 AM

[S20-04] Research on the seismogenic environment bridging the gap between laboratory rock experiments and natural earthquakes

○Nana YOSHIMITSU¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

10:53 AM - 11:13 AM

[S20-05] Improvement and Prospect of GNSS Earth Observation Network system (GEONET)

*GEONET Group, Geospatial Information Authority of JAPAN¹ (1. Geodetic Observation Center / Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of JAPAN)

11:13 AM - 11:33 AM

[S20-06] Establishment of regular GNSS-A seafloor geodetic observation technique and its contribution to seismology

*Masayuki FUJITA¹, Yoshihiro MATSUMOTO¹, Mariko SATO¹, Tadashi ISHIKAWA¹, Shun-ichi WATANABE¹, Yusuke YOKOTA² (1. JHOD; Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. IIS UT; Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

11:33 AM - 11:53 AM

[S20] Discussion

11:53 AM - 12:00 PM

9:00 AM - 9:04 AM (Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A)

[S20] President speech

9:04 AM - 9:43 AM (Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A)

[S20] Award ceremony

The Evolution of the ETAS Model and the Modeling of Causal Inference

*Yosihiko Ogata¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

1. はじめに

日本の地震活動の研究には、豊富なデータベースのもと、世界をリードしてきた長い伝統がある（例えば宇津徳治著「地震活動概論」参照）。これらの研究成果をもとに、講演者は主に「条件付強度関数」という点過程概念に基づく統計的モデルを考案して、地震発生データを予測する研究や、データの診断解析で捉えられる地震活動の異常現象の研究に取り組んでいる。これらの研究は、統計的予測理論や数値解析法などの実用化と相まって進展している。

2. ETASモデル

ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデル¹⁾は、短期的な地震発生率を予測するための余震活動の経験的根拠に基づいて作成されたものである。ETASモデルによって地震活動の特徴づけ、そのパラメータを直接的に最尤法で求める。ETASモデルは各地域の標準的な地震活動の中長期的な変化をシミュレーションする際に利用されることが多いが、ストレス場の変化に伴う地震活動の微妙な異常変化（相対的な静穏化や活性化）を検出するための「ものさし」としても利用できる。群発活動の中には、時間の経過とともに常時地震活動パラメータが変化する非定常ETASモデルが適しているものが多い。このような地震活動の異常は、例えば、スロースリップによる応力の変化や、流体の断層への侵入（断層の弱化）によると考えられ、これらと地震活動の間の定量的な関係を提供する可能性がある。

3. 時空間ETASモデルと地震予測の高度化

地震活動の近傍・遠方界への影響を表現した様々な時空間的ETASモデルが紹介されて以来、地震発生の物理モデルも参入した予測性能実験が、国際プロジェクトCSEPで10年以上にわたって比較検討されている。

中でも階層的時空間ETAS (HIST-ETAS) モデル²⁾は、地震活動の空間的非一様性を表すために、主要パラメータが地震の位置にも依存するモデルである。これは任意の位置でのパラメータの値が、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。これで地震の集中地域での高解像度の変化を提供し、大地震の初期段階で、実際の余震発生分布に良く対応した時空間予測を提供する。特に、余震や群発地震の非等方性の短期空間予測を準リアルタイムで提示する。他方、このような誘発効果を分離した常時地震活動のMAP解は、空間的に強度が数桁の違いで変化し、大地震の長期的予測に効果的である。すなわちHIST-ETASモデルの常時地震強度の高い地域は、大地震の予測および歴史地震の多発域と調和的であり、さらにGNSS測量結果による最大せん断応力の高蓄積率の地域と良く対応している。

同様に、関東地方の深さ100kmまでを、震源位置などを頂点としたデロネ四面体で分割した区分的線形関数による3次元版の階層的時空間ETASモデルを作成し、東北沖地震の効果を考慮した総合モデルは、顕著に関東直下の地震予測の実用性を示している。プレート境界では、東北沖で誘発された地震は常時地震活動が高いエリアで優先的に発生している。

4. 地震活動の因果推論

時を遡り、条件付強度関数で定義されたホークス過程を、講演者が初めて目にしたのは1970年代のことである。当時、統計数理研究所の赤池弘次博士は、ホークス型モデルを時系列解析の「自己回帰モデル」に擬え、予測の観点から尤度法を適用し、AICで誘発の応答関数の形状を推定する取り組みを周囲に推奨した。地震データが十分にあれば、そのような応答関数は大地震とともに急上昇し、その後速やかに減少するが長期的

には裾が重く、暗に大森・宇津型の減衰関数を示唆していた。さらに演者は、従来の統計検定解析法の障害となっていた続発性に対して、ホークス過程を組み入れて、地震活動の周期性（季節性）や因果関係などを調べるモデル³⁾を目指した。これらのモデルは地震活動に対する外部変数からの影響の有意性を調べるのに有用で敏感であった。その後ホークス型モデルに代わってETASモデルを使って、前駆的事象系列、異常地磁気変動、ひずみ応力変化の時系列、人口注水などの地震活動への誘発の可否（情報量利得）や応答の遅れなど、予測における確率利得の計算に応用されつつある。これらの発展について紹介する。

図の説明： HIST-ETASモデルを1923年から2018年に南西日本で発生したM4.5の地震に合わせた地震活動の時空間画像（条件付き強度の対数スケールの等値面）。昭和南海地震後の時間の表面と交差した活動度を対数スケール等高線で示している。

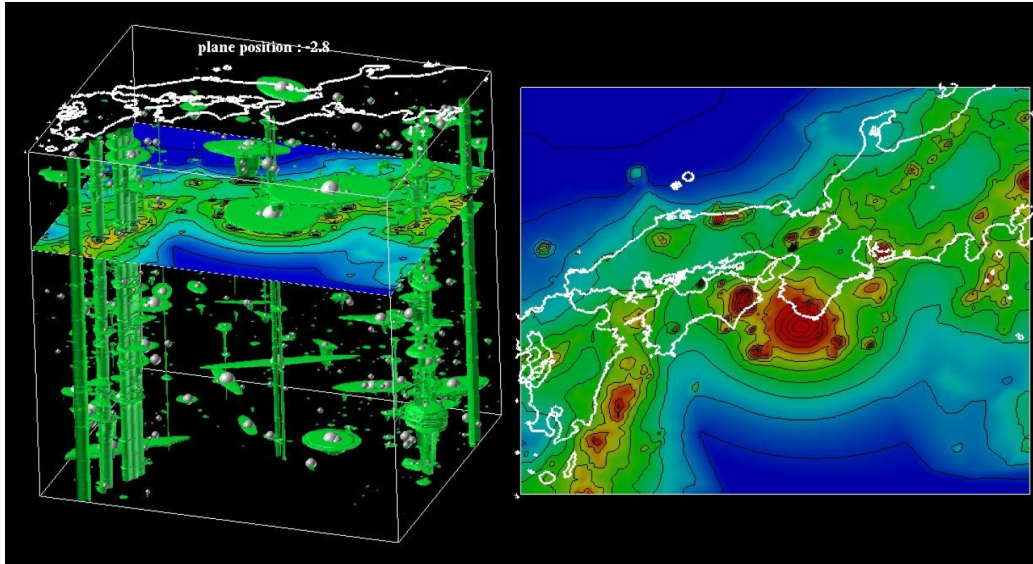
参考のソフトウェアとマニュアル：

1) ETAS modelなど: *Computer Science Monographs*^{*)}, No. 33, 統計数理研究所, 2006, および, XETAS (TSEIS -ETAS, GUIモジュール) > 連絡先 鶴岡弘@地震研究所

2) HIST-PPMモデルと予測：統計数理研究所 *Computer Science Monographs*^{*)}, No. 35に投稿中（2020），当面<http://bemlar.ism.ac.jp/ogata/HIST-PPM-V2/> に格納。

3) 周期性，因果性モデルなど: *Computer Science Monographs*^{*)}, No. 32, 統計数理研究所, 2006.

*) *Computer Science Monographs*はhttps://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html 参照。



Three-dimensional dynamic rupture propagation including fault weakening processes and stress conditions

*Yumi Urata¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

(1) はじめに

地震の発生と成長は、断層面に働く応力状態と断層の摩擦挙動によって決まる。地震発生層の応力場と岩石摩擦に関する研究は、主に地震学・地質学・測地学的な観測や観察、室内実験によって進められてきた。一方、地震の発生と成長の物理を理解するため、ミクロな物理過程からマクロな応力蓄積・断層破壊までの幅広い時空間スケールを扱う、数値シミュレーション研究が行われてきた。著者は、理論・数値モデル研究を主軸に、実験・観測データを組み合わせることで、断層摩擦と応力を推定し、地震の発生と成長の物理モデルを構築することに取り組んできた。

(2) 断層摩擦発熱と流体の相互作用が動的破壊過程に与える影響の解明

断層摩擦の急激な弱化によって、断層はすべりやすくなり、大地震に至る。断層摩擦の急激な弱化の要因の一つとして、断層摩擦発熱による間隙流体圧の増加（thermal pressurization、以下TP、Sibson 1977）がある。TPは理論的・地質学的には予想されていたが、地震時の断層破壊に与える影響は未評価であった。そこで著者らは、TPを3次元の動力学断層破壊伝播の数値計算に組み込み、TPによってすべり量や破壊伝播速度が増加、断層破壊が連動しやすくなり、結果として地震規模が大きくなることを定量的に明らかにした（Urata et al. 2008, 2012）。また、TPは分岐断層系での破壊伝播経路を変え（Urata et al. 2014）、津波の発生にも影響を及ぼしうる。さらに、TPの関連現象である、ダイラタンシー（断層破壊による空隙生成）や水の物性論から予想される相変化を動的破壊伝播計算に導入し、それらの効果の強さや複雑な影響を明らかにした（Urata et al. 2013, 2015）。これらの研究により、地震の成長に関する理解を深化させた。

(3) 岩石摩擦実験における断層面の摩擦の推定

小スケールの岩石摩擦実験から構築された速度状態依存摩擦則が、大スケールの自然地震でも成り立つのかは、地震学の大きな問題の一つである。一方、大型岩石を用いた摩擦実験（Fukuyama et al. 2014）では、固着すべりが起こるために、一般的な方法で摩擦パラメータを推定することができない。そこで、固着すべりの数値シミュレーションによって大型岩石摩擦実験データを再現することで、不安定すべり中の摩擦パラメータを推定する手法を確立した。その結果、スケールの効果として、従来の摩擦則で記述できない、断層面の状態の変化があることを明らかにした（Urata et al. 2017a）。

(4) 大地震が連続発生するための応力と断層摩擦の力学条件の解明

大地震の発生を規定する要因である応力場や断層面における摩擦パラメータ等を実際の観測データから明らかにすることは、大地震の発生前に現実的な地震シナリオを想定する観点からも重要である。著者らは、2016年熊本地震について、大地震を連続発生させる力学条件を解明した。まず前震による応力変化と本震破壊による応力解放に必要な力のバランスの理論的考察によって、応力と断層摩擦のとりうる範囲を推定した。次に、地震観測データから推定された応力の向きを用い、応力と断層摩擦を変化させた約150ケースで本震の動力学断層破壊シミュレーションを実施した。本震を再現できるのはわずか数ケースであり、本震を再現しうる応力場および断層摩擦の推定に成功した（Urata et al. 2017b）。この結果は、観測データから制約される応力場と動的破壊伝播シミュレーションを組み合わせることで、巨大地震の現実的な発生シナリオを合理的に提示しうることを示している。

Study of stress magnitude in the lithosphere based on earthquake data

*Keisuke Yoshida¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University

1. はじめに

地球内部で進行する変形過程の統合的な理解のためには、応力状態の知識が不可欠である。これまでの研究により、地球内部の応力場の“方向”の特徴が大まかに明らかになってきた。しかしその一方で、応力場の“大きさ”に関する情報は、その推定の困難さにより中々得られないままであり、このことが地震の発生をはじめとした地球内部の変形機構の理解を困難にしている。本講演では、筆者がこれまでの研究で得た日本列島地震発生域の応力状態およびそれと地震発生機構の関係に関する知見を紹介する。

2. 応力場の回転を利用した応力の大きさの推定に関する研究

東北日本の応力状態は大局的には東西圧縮の逆断層型であることが知られており、一つの支配的な考えは、それがプレート相対運動に由来する強い東西圧縮応力に起因するというものだった。筆者らは、地震データを用いた応力テンソル・インバージョンにより、応力場の方向の空間変化を調べ、それが実際にはプレート相対運動だけでなく地形や過去の地震活動などの様々な影響を受け変化していることを示した。例えば、標高が高い地域に横ずれ断層場が分布する (Yoshida *et al.*, 2015a, Tectonophysics)。また、複数の大地震震源域において、その静的応力変化と非常によく似た特徴的な応力場の空間変化のパターンが存在する (e.g. Yoshida *et al.*, 2014a, JGR, 2015b, GJI, 2016a, GJI)ことが分かった。

筆者らは、観測応力場と理論に基づくモデル応力場の比較により、東北日本の差応力が数十 MPa程度と小さい場合にのみ、前者は地形による影響により、後者は本震の静的応力変化の影響により説明可能であることを示した。それに基づき、東北日本の地震発生場の差応力が数十 MPaと非常に小さく、同程度の大きさの外的影響を受けた際に応力場の方向が擾乱されてしまうモデルを提案した (Yoshida *et al.*, 2015a, 2019, PAGEOPH)。東北日本内陸域では、2011年東北沖地震後に東西圧縮逆断層型と大きく異なる地震が生じるようになった。Yoshida *et al.* (2012, GRL)は、それが2011年東北沖地震による応力変化により応力場が回転したことに起因する可能性を示したが、Yoshida *et al.* (2019)は上記モデルの空間不均質な応力場に起因する選択的地震トリガリングが原因である可能性を考え、観測データ解析からそれを支持する結果を得た。このことは、応力場の地震前後の変化などの検出・議論の際には、額面的な誤差だけでなく、仮定、特に空間変化に関するものの妥当性についての注意深い考慮が極めて重要であることも示す。

3. 間隙水圧・断層強度変化に伴う地震活動・震源過程の変化に関する研究

上記で推定したような差応力が非常に小さい場で地震を生じさせる機構として、間隙水圧増加による断層強度低下が考えられる。筆者らは、2011年東北沖地震後にせん断応力が減少したにも拘らず生じた東北日本の誘発地震活動を用いることにより、間隙水圧・断層強度低下が地震活動・震源過程に与える影響を調べた。特に、東北沖地震のおよそ1週間後から生じた山形-福島県境周辺の顕著な群発活動を調べることにより、通常推定できない断層強度・間隙水圧の時間変化を推定することに成功した (Yoshida *et al.*, 2016b, JGR)。また、地震活動度、b値、応力降下量などのパラメータが、それと同期して変化することを示し (Yoshida *et al.*, 2017, JGR)、それらが断層強度・間隙水圧の変化を反映している可能性を示した。

4. 小地震の震源過程・構造推定手法の高度化に関する研究

上記で得た応力降下量と間隙水圧・断層強度の同期した時間変化から、地震の応力降下量から断層強度や間隙水圧の情報が得られる可能性が示唆される。一方、小中地震の応力降下量の推定手法には様々な仮定が含まれており解釈が非常に難しい。一つの大きな仮定は破壊伝播の等方性に関するもので、実際に観測されている directivity効果と明らかに矛盾している。そこで非対称な破壊伝播も考慮して応力降下量・破壊伝播速度等を

同時推定する新しいアプローチを模索している (Yoshida, 2019, Geoscience letters). また近傍の地震の波形を用いて地震波に含まれる伝播の影響を除去して震源過程の情報を抽出する方法 (経験的グリーン関数法) が広く用いられているが, 多くの場合に微妙な位置の違いにも影響を受けるはずである. そのわずかな差を用いて地震発生域の流体の情報を取り出す試みを行っている (Yoshida, 2020, GJI).

5. おわりに

以上, 筆者が自然地震データを用いて行ってきた応力・断層強度に関する研究についてまとめた. 講演時には上記で取り上げられなかった著者以外の研究も含めて紹介を行う予定である. これらの研究の中で幾度も直面したように, 地震データを用いた解析では現実と異なる仮定が必要な場合が多く, 得られた結果・誤差を鵜呑みにできないことが少なくない. そのような一筋縄でいかない状況下で, 常に解析結果の前提を疑い何が妥当か自分の頭で考え, 可能であればそこから何か引き出せるような研究を行っていきたいと考えています.

Research on the seismogenic environment bridging the gap between laboratory rock experiments and natural earthquakes

*Nana YOSHIMITSU¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

直接観測が難しく複雑な地震現象の素過程を観察する手段として、室内実験を用いた観測が1970年代頃から盛んになった。その後さらに、断層サイズ数mm～数cmという室内実験スケールと自然地震の間を埋めることを目指して、金鉱山における半制御地震発生実験のような観測も行われるようになった。岩石の圧縮破壊実験は、地震発生に至るまでの破壊面近傍での詳細な観測を可能とし、大きな断層滑りに向けて微小破壊が増加する様子や(Yanagidani et al., 1985)、弾性透過波の速度・振幅の低下(Lockner et al., 1977; Yukutake et al., 1989)などが報告されてきた。これらの記録には収録機器や観測の制約により自然地震の解析手法をそのまま適用できないという課題があったが、近年の技術の進歩によりこの課題を解決できる見通しが立ってきた。本講演では課題解決のための著者らの取り組みを周辺の研究動向や今後の展望と併せて紹介する。

実験システムの改良

岩石試料や鉱山地震観測の利点である震源極近傍観測のメリットを生かし、波形から震源や伝播経路の情報を明瞭に検出するには、媒質の微細な変化を捉えるために波の高周波成分を逃さず収録する必要がある。実験用の広帯域センサには耐圧性能がないため、地震発生環境に近い圧力下では利用することができなかった。また、自然地震と同様の解析を実施するには、高速・多点での観測が求められる。著者らは波形収録システムの改良とセンサの耐圧性能向上に取り組み、広帯域・高速・多点・連続での波形収録を実現した(Kawakata et al., 2011)。このシステムで収録した実験波形には一般的な自然地震解析と全く同じ手法を適用できるという点で、革新的である。

収録された波形を後続波まで利用するためには、有限の実験試料の中で反射波や変換波がどのようにふるまうのか把握する必要がある。筆者らは3次元差分法計算で、反射・変換波や表面波などの後続波を含む岩石試料内の全波動場を再現し、将来のより詳細な透過波研究への道を拓いた(Yoshimitsu et al., 2016)。

破壊進行過程

円柱状の岩石試料の圧縮破壊にともなう断層成長を観察する実験では、人工的に弾性波を透過させて震源断層付近の応力状態や不均質状態を推定する。Yoshimitsu et al. (2009) やYoshimitsu and Kawakata (2011) では上述の計測システムを用いて破壊中の岩石試料内で断層透過波をモニターし、破壊に至るはるか前から媒質の不均質性が高まるだけでなく、破壊直前に急激に波が通りにくくなるフェーズがあることを明らかにした。さらに、繰り返し地震を人工波源のように利用することによって、金鉱山における地震についても破壊の前から震源近傍で媒質の不均質性が地震発生前から進行していることを明らかにした (Yoshimitsu et al., 2012)。断層サイズ数百mの金鉱山と、数cmの実験室という中・小2つの異なるスケールで、破壊面近傍における減衰の強化が観測されたことは非常に興味深い。

震源特性の階層性

岩石試料内の破壊現象と自然地震の破壊サイズには数桁にわたるスケールギャップがあり、これらを直接比較してよいのかという疑問があった。規模の違う破壊の比較には、地震の震源特性を表す震源パラメタが用いられる。自然地震においては既往研究により震源パラメタが規模依存性を持つことが示されていた(e.g., Kwiatak et al., 2011)。Yoshimitsu et al. (2014) はこのスケーリング則がマグニチュード-7に相当する実験試料内での微小破壊にも当てはまることを初めて明らかにし、破壊サイズ数mm～cmの岩石試料、数m～kmの誘発地震、そして数km～数十の自然地震までが同一の表現で説明できることを示した。この発見は実験地震学の有用性を高めるとともに、破壊現象の幅広い階層性を示した。

今後に向けて

実験室における広帯域観測システムを用いた研究はまだ始まったばかりである。軽量・小型の広帯域センサの開発などもおこなわれており、今後さらなる観測・解析の深化が期待される。また、小スケールの研究を他のスケールと比較するうえで考慮すべき点や、微小イベント波形ならではの解析上の課題解決などについて、統計学的手法の導入などによる他分野の研究者との協働の可能性についても紹介する。

Improvement and Prospect of GNSS Earth Observation Network system (GEONET)

*GEONET Group, Geospatial Information Authority of JAPAN¹

1. Geodetic Observation Center / Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of JAPAN

1. GEONETについて

国土地理院のGNSS連続観測システム（GEONET：GNSS Earth Observation Network system）は、南関東・東海地域のGPS観測網（110点）と、全国GPS連続観測網（100点）を引き継ぐ形で、1996年4月に運用を開始したシステムで、全国に展開したGNSS連続観測局（電子基準点、2020年現在1,318点）と観測データの収集、解析、提供を行う中央局から構成されている。

GEONETは、地震調査研究の基盤的観測網であり、平時においては、プレート運動に伴う日本列島の定常的な地殻変動、地震発生時には地震時の地殻変動や余効変動を捉えている。またスロースリップ現象を日本各地で発見する等、地震調査研究に不可欠なツールとなっている。

2. システムの高度化

GEONETは、運用開始から20年以上が経過しており、その間、GPSを始めとする衛星測位システムを巡る環境は、利活用の観点を中心として急速に変化してきた。そういった変化に対応するため、GEONETではデータ収集のリアルタイム化やマルチGNSS対応等を行い、常に高精度な位置情報を提供する基盤となってきた。

1) データ収集のリアルタイム化

2002年に地殻変動の監視を強化するため、電子基準点の1秒間隔の観測データを常時接続の通信回線（IP-VPN）を使ってリアルタイムで収集するシステムを整備した。このリアルタイムデータを利用するとリアルタイムでcm級測位が可能となるため、測量の効率化や測位の高精度化を期待する民間の要望に応え、リアルタイムデータの民間事業者への配信を開始した。開始当初、配信は200点だけだったが、2004年には約1,200点に拡大し、全国で電子基準点を用いたネットワーク型RTK（Realtime Kinematic）によるcm級のリアルタイム測位が可能な環境が整った。

また、2018年11月から正式な運用を開始した、我が国の準天頂衛星システム（QZSS）のサービスの一つであるセンチメートル級測位補強サービス（CLAS：Centimeter Level Augmentation Service）は、特に自動走行・安全運転支援や高精度位置情報サービスでの利用が期待されており、その実現のためにはGEONETのリアルタイムデータが必要不可欠なものとなっている。

2) マルチGNSS対応

GEONETは、当初米国のGPSだけを観測していたが、2010年に準天頂衛星システムの初号機が打ち上げられたことを契機に、各国が整備を進めてきた衛星測位システムを利用できるよう、観測機器の更新や中央局の拡充を進めた。その結果、2012年には準天頂衛星とグロナス（GLONASS、ロシア）の観測を、2016年にはガリレオ（Galileo、欧州連合）の観測を開始し、これにより利用できる衛星数が増え、都市部や山間部等、上空の視界に制約がある地域においても電子基準点を使った測量や測位が可能となった。特に、ネットワーク型RTKによる測位の性能を安定的なものとし、リアルタイム測位が不可欠な建設機械の自動制御を行うICT施工の利用が拡大した。

3. システムの安定運用

GEONETは、止めてはならないインフラであり、観測データの取得率99.5%以上、リアルタイムデータの遅延時間1秒以内という目標を設けている。現在、取得率（99.77%）や遅延時間（0.4秒程度）は目標を満たすが、その維持には確実な保守が必要である。現地の電子基準点の保守は外部委託しており、異常発生時には原

則7日以内に復旧される。中央局の運用・保守も外部委託しており、夜間・休日も含めGEONETの状況を常に監視している。また、電子基準点は、比較的観測条件の良い場所に設置されているが、周辺環境の変化によって観測データの品質が低下し、測位結果に影響が出ることがある。一番多いのは、周辺の樹木が伸長し低仰角の衛星が観測できなくなり、測位結果のバラツキが大きくなるケースである。そのため、電子基準点は5年に一度現地調査を行い、適宜伐採も行っている。

4. 今後

GEONETは、これまで、位置情報の基盤として、測量や測位における利活用はもちろん、巨大地震における震源断層モデルの推定、余効変動の詳細な把握、またプレート間の固着分布の推定やスロースリップ現象の発見をはじめとした様々な地殻変動の把握に真価を発揮してきた。例えば、GEONETが捉えた地震・火山活動に伴う地殻変動情報は、遅滞なく、気象庁、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会、地震防災対策強化地域判定会、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会、地震予知連絡会等の関連機関に提供され、地震・火山活動のメカニズムの評価や減災のための活動に活用されている。

今後も、国土地理院では、GEONETの安定的な運用と、高精度な位置情報の提供を行うとともに、電子基準点の高度化や解析方法の改良等を行い、観測データの品質やサービスの向上等に努めていく。

最後に、GEONETの20年以上にわたる運用と高度化は、国土地理院に在籍した多数の職員の尽力によるものであり、今回の技術開発賞の受賞はこうした長年の努力の成果を評価していただけたものだと感じている。また、GEONETは数多くの研究者や測量関係者に支えていただいております、関係各位に深く謝意を表する。

Establishment of regular GNSS-A seafloor geodetic observation technique and its contribution to seismology

*Masayuki FUJITA¹, Yoshihiro MATSUMOTO¹, Mariko SATO¹, Tadashi ISHIKAWA¹, Shun-ichi WATANABE¹, Yusuke YOKOTA²

1. JHOD; Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. IIS UT; Institute of Industrial Science, University of Tokyo

海溝型巨大地震の発生メカニズムにアプローチするためには、地震発生時及びその前後のプレート境界の状態や地球物理学的情報が重要である。このような情報を得るためには、プレート境界震源域直上、特に海底における地殻変動データの観測が必要となる。陸域での精密な地殻変動観測技術は、GEONETをはじめとするGNSS観測技術によって20世紀後半に急速に発展したが、海底の精密な地殻変動観測については、海水の存在が精度向上を阻んでいた。このため、20世紀末の時点では海底が地殻変動観測データの空白域となっていた。

私たち海上保安庁海洋情報部では、長きにわたり海図作成を原点として培ってきた海中計測技術、測位技術を活かし、この海底精密測位という技術課題に挑戦してきた。その実現が、今回受賞対象となったGNSS技術と音響測距技術を結合する「GNSS-A海底地殻変動観測」技術（左図）である。

GNSS-A技術の原理は、1980年前後にScripps海洋研究所で提案されたが[たとえばSpiess, 1985, MG], 実際の技術開発は、同研究所を含め、1990年代に入ってから進展した。海上保安庁海洋情報部では2000年代初頭から、船上及び海底に設置する観測装置（ハードウェア）、データ解析技術（ソフトウェア）の開発を進め[Fujita et al., 2006, EPS], 2010年頃までに、ほぼ現在のGNSS-A海底地殻変動観測システムの構築を実現した。

具体的な測位方法は以下のとおりである：海底に設置した複数の音響トランスポンダ（海底局）が、刻々と移動する船上局から送信された音響信号を受信し、船上局に対して受信信号をそのまま返信することにより、その往復走時を計測する。送受信時の船上局の位置は、ハイレートGNSSによって決定されるため、これらをその時点の往復走時から求めた海中距離と組み合わせることにより海底局の位置を決定する。

これらの技術開発に合わせて、日本海溝及び南海トラフの近傍陸側に、海底観測点を展開した。この過程で、宮城県沖でのプレートの沈み込みに伴う定常的な地殻変動[Sato et al., 2013, JGR] や2005年宮城県沖の地震に関連する地殻変動を捉える[Matsumoto et al., 2006, EPS; Sato et al., 2011, GRL] などの重要な初期成果を得た。

2011年東北地方太平洋沖地震時には、震源域直上の海底で24mの地震時変位を捉えるなどの成果が得られた[Sato et al., 2011, Science], これを契機とした南海トラフ側の大幅な観測点の増設により、現在では30点近い観測点網が構築されている（右図）。

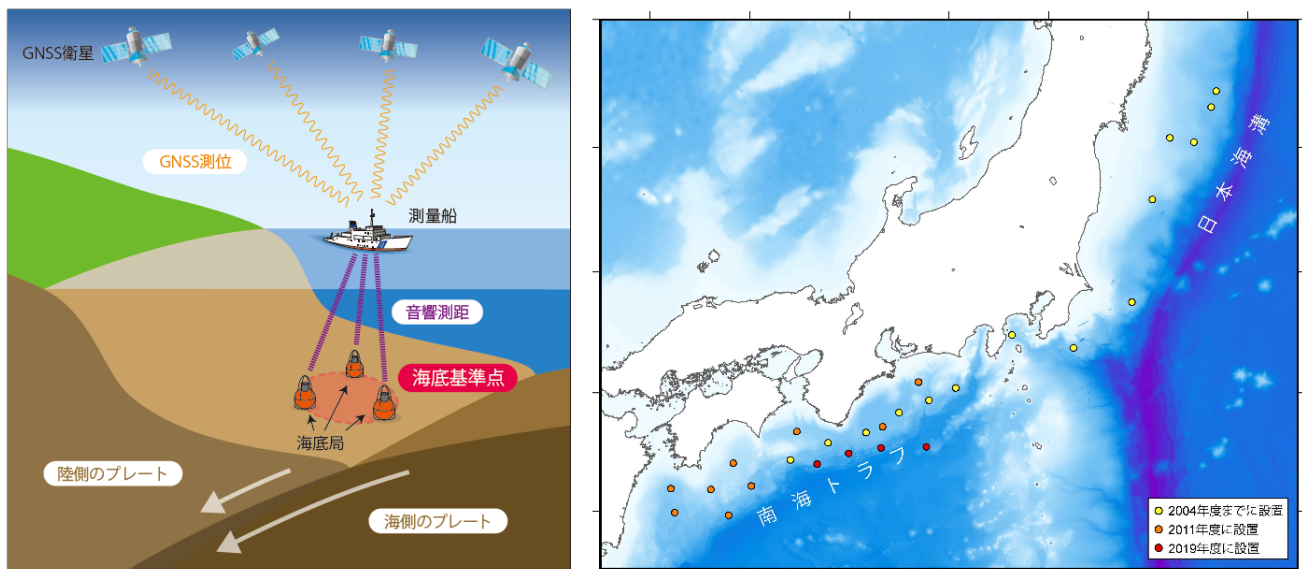
また、2010年代には、「定常的なGNSS-A観測」を目指した研究開発により、観測の高精度化、高頻度化が図られた[たとえばIshikawa et al., 2020, Frontiers in ES]. 近年では、東北沖地震の余効変動の観測[Watanabe et al., 2014, GRL], 南海トラフ沿いプレート間固着状態の導出を可能とする変動速度分布の検出[Yokota et al., 2016, Nature], 浅部スロースリップの検出[Yokota & Ishikawa, 2020, Sci Adv] など、次々とより詳細な観測成果の導出に成功している。

これらの観測成果は、他の技術では捉えることができない海底の地殻変動情報を数多く提供しており、海溝型地震の調査研究分野に大きく貢献している。また、この分野においては、データ論文やデータDOIを活用した

オープンデータシステムの開発も先駆的に進めており、GNSS-A観測システムによって取得されたデータが、今後さらに地震学・防災分野で活用され、社会貢献が進められていくだろう。

謝辞：本技術開発を通じて、これまで貢献されてきた多くの研究者、技術者の皆様、船舶運航・観測作業にご協力いただいた皆様、多大なご支援・ご助言を賜りました関係の皆様に、改めて厚く御礼を申し上げます。

図：（左）GNSS-A海底地殻変動観測技術の模式図，（右）2020年4月の観測点網



11:53 AM - 12:00 PM (Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A)

[S20] Discussion

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

[S15]PM-1

chairperson:Yo Fukushima(IRIDeS, Tohoku University), chairperson:Yoshiaki Hisada(Kogakuin University)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM A

[S15-01] What are Influencing Possibilities of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on Viaduct-Damages of the Tohoku-Shinkansen Railway ?

○HIROSHI MAEHARA¹ (1.Geosystem Resarch Institute)

1:00 PM - 1:15 PM

[S15-02] Movement of Victims of Tokyo City in the First Step of Disaster Reconstruction from the 1923 Great Kanto Earthquake

○MASAYUKI TAKEMURA¹ (1.Nagoya University)

1:15 PM - 1:30 PM

[S15-03] Development of Earthquake Probability Transition Table as a Tool for Comprehension and Awareness for the Nankai-Trough Earthquake Scenarios

○Yo Fukushima¹, Tomoaki Nishikawa² (1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S15-04] Causes of Fourier Amplitude Sags at Intermediate Frequencies for Simulating Broadband Strong Ground Motions using Stochastic Green's Function Methods

○Yoshiaki Hisada¹ (1.Kogakuin University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S15-05] Study on rupture propagation effect of small and medium-sized earthquakes used as elemental earthquakes of empirical Green's function method

○Junpei Kaneda¹, Shinya Tanaka¹, Yoshiaki Hisada² (1.Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., 2.Prof.,Kogakuin Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM

What are Influencing Possibilities of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on Viaduct-Damages of the Tohoku-Shinkansen Railway ?

*HIROSHI MAEHARA¹

1. Geosystem Research Institute

地震時にこれまで地震計で正確には観測できていない、強力な衝撃的鉛直地震動が働き、構造物にさまざまな被害を起こしていることが、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ました。その報告書が昨年春に同支部よりnet上に公開されました²。地震計ではこれまでに捉える事ができない、強力な鉛直地震波動がある事を、構造物の被害状況から説明しても長年理解を得にくい状況でした。この状況を変える契機となったのは、120年程前に海震の震度階表（ルドルフの表[1898年,10段階表], シーベルグの表[1923年,6段階表]）が作られていたことと、船舶工学者から「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」との指摘を紹介しつつ、構造物の特徴的な破壊状態と海震の証言等を合わせて説明ができたことです。この春には土木学会の中に超過荷重に対する課題も含め調査研究小委員会が新たに設けられました。

問題の強力な衝撃的鉛直地震動の波はどのような波かは、まだ正確には観測できていないので、被災事例や海震の証言などから、現在想像される波の形状や特徴をまとめると次のようになります。

- 1.従来の地震計では捉えられない高周波だが、破壊力を持つ疎密波である。
- 2.地震現象の主体的な面と随伴的な面の両面性を持つ波で、M6クラスの地震から破壊力を持つ波が生じる。
- 3.被害状況が線状で数km程断続する場合もあるが、多くは突き上げ力で局在波的な規模の被害を起こす。
- 4.波形の頭部は平坦な場合とか釣鐘型の形状が予想され、釣鐘型では孤立波や連立する波形が予想される。
- 5.構造物の条件・状況・形態等と衝撃的な波の状況や形態とにより、被害状況は多様性を示す。
- 6.主震時でも余震時でも何度も生じ、震源断層から遠く離れた場所でも、突き上げ力による破壊を起こす。
- 7.強力な衝撃的鉛直地震波動は主震動より、3分程後に生じる場合こともある（後発鉛直キラーパルス）。
- 8.構造物に振動でなく、突き上げ力の波動による破壊を起こすが、部材軸方向の共振を伴う崩壊も起こす。
- 9.発生原因は岩盤の割れではなく、物質の相変化が予想される。

上記のような特徴を持つ強力な衝撃的鉛直地震動の波に対して、重要構造物や施設の安全性を確保するために、真の姿を早急に把握して対策を講じることが必要です。しなしながら、大地震自体がめったに起こらず、強烈な突き上げ破壊力を持つ上に、出現状況が孤立波的な状態の場合が多いため、一度や二度の観測値でその全容を把握することは至難の業となり、容易には成果を望めません。

冒頭で述べた委員会報告書²では阪神高速神戸線の橋脚の被害状況に対して、海震の証言を考慮しながら、破壊状態を比較検討し、破壊の発生状況と経過を考察しています。さらにRC単柱の橋脚と地盤を簡易なモデルで表し、基盤層からの鉛直速度波の半波長分1波（一山の突き上げ波）を入射した場合の柱の応力度の応答を検討しました。その結果、周波数依存性があることが分かり、軸方向共振を伴う場合、最初の入射波が圧縮波で伝播する間は共振変位は生じず、次の瞬間の引張の位相になると共振する全体変位を誘起し、初めの波より数倍大きな引張応力度を生じます。次の瞬間に共振の半周期で圧縮の位相になると、絶対値で引張応答応力度の最大値を上回る圧縮応力度を生じます。すなわちRCの柱が共振現象を伴うと、見かけ上圧縮破壊をした柱でも、先に引張破壊が先行しており、その後にはたやすく押しつぶされています。柱の衝撃的な波動に対する耐力は圧縮強度ではなく、引張強度に支配されるという知見が得られました。これは大変重要な知見です。

前述の委員会報告書²では既存の地震での主な被害事例に対して、この知見と前述の9項目の特性を踏まえた新しい視点からの考察も行っています。この視点から東北新幹線高架橋の被害事例を見直してみます。

東日本太平洋沖地震で東北新幹線橋梁に被害がありました。新幹線の高架橋はRC立体ラーメン構造で橋軸方向

に3,4径間分を一橋梁とし、その橋梁間を単純桁橋で繋ぐ図1の形式が広く採用されます。被災した橋の内の一つに第1中曽根橋（北上駅北北東約7km）があり、図1はその7番目のR7橋側からR6橋を見た図です。R7橋の始点側の端橋脚（R7-1右,左）に大きな被害が出ており、図2に被害状況を示します。少し離れたR1橋の終端橋脚(R1-5)にも被害があり、その状況を図3に示します。（矢印は打ち継ぎ目位置を示します。）

R7-1の両柱はマッシュルーム型の破壊をしており、重度の被害状況ですが、上部の自重は主桁が支え、この柱の状態では荷重がかかっていません。水平地震動による慣性力が長い時間働き、この被害が生じたとする、荷重支持能力を失った段階で、この柱を壊す力は隣の柱に付加されるので、隣の柱もそれなりの損傷を生じる筈ですが、図1の通り隣の柱はほぼ無傷です。したがってこの被害原因は水平慣性力ではありません。この判断は被害調査団の判断とは異なります。強力な衝撃的鉛直地震動が局地的に働き、隣の柱と極端な被害度の差を示す典型例と見られます。R7-1柱の被害度には打ち継ぎ目の処理の不完全さが影響しています。

図3のR1-5の両柱の被害状況と似た被害で少し損傷度が軽めの被害が、三陸南地震（2003年、M7.0、D71km、太平洋プレート内地震）で起きています。図4(a),(b)はその位置図と被害状況の例です。被害は水沢江刺～盛岡間の広い範囲で断続的に生じました。図4(b)には被災柱の他に近隣の柱の状況も見られ、ほぼ無傷の状態です。一事例だけ見た段階ではわかりませんが、図4(b)、図3の2例、図2の2例と見比べてみると、局在波的な突き上げ力により柱が引張破壊を起こした状況と過程がよくわかり、詳しい解析が望まれます。



R6 橋-橋脚頭部は斜亀裂、脚頭部が破壊-R7 橋
図 1 第1中曽根橋の R7 橋-端橋脚と R6 橋-老番側（東日本太平洋沖地震,2011）



第1中曽根橋（矢印は打継目）
図 2 R7 橋の第1柱頭部の破壊状況



(a)被災位置図（三陸南地震,2003）(b)被災状況
図 4 橋脚被害の発生位置と被災状況



第1中曽根橋（矢印は打継目）
図 3 R1 橋の第5柱の損傷状況

2. 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

Movement of Victims of Tokyo City in the First Step of Disaster Reconstruction from the 1923 Great Kanto Earthquake

*MASAYUKI TAKEMURA¹

1. Nagoya University

通常、大震災が発生すれば、多くの人々が被災し、家屋を失い、自力ですぐに再建できる人もあるが、多くはすぐには難しく、ある人は親戚知人を頼って他所へ避難し、ある人は公助による仮設住宅に身を寄せ、それぞれ再起を期することになる。約100年前に発生した関東大震災は当時のGNPの36.7%もの被害を出したが、そのようななかで被災者はどのような道筋をたどって再起したのか。復興の初期段階における被災者の動向を量的につかむために、震災直後の調査結果や従来研究成果を利用して、被害が最も大きい東京市について検討した。

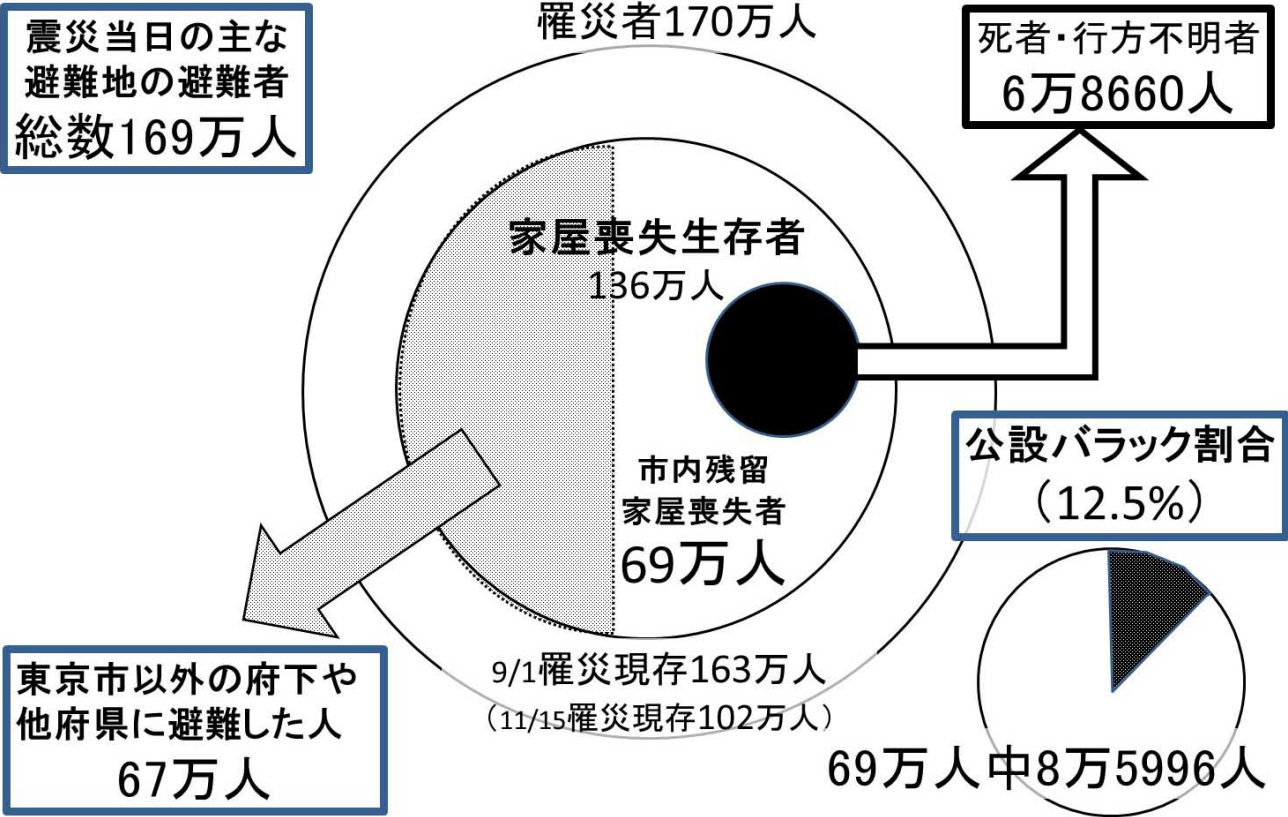
東京市(1925)『震災に因る日本の損失』によれば、震災地の1府6県(東京府と神奈川・千葉・埼玉・静岡・山梨・茨城の各県)の罹災者は約340万人、69万世帯に及んでいる。震災時の東京市の人口は約227万人でそのうち罹災者は170万人(約75%)である。このうち死者数(行方不明者も含む)は6万8660人であるので、罹災現存者は約163万人ということになる。

震災当日の市内の主な避難地の避難者数を『東京震災録』中輯(1926)から拾うと、合計で約169万人となり、先に示した罹災現存者数とほぼ同数となる。もちろんデータの性格上、精度の問題も多分にあるが、当日に限って言えば、火災による被災がほとんどであることもあり、罹災者のほぼ全てが安全な場所に避難せざるを得ず、かつ罹災者はこれら周辺の大公園などの空き地に避難するのが精いっぱいであったことがわかる。

次に、罹災現存者約163万人の内訳は全焼、全潰のほか半焼、半潰、破損(流失はゼロ)など様々であるが、そのうち全焼・全潰世帯の30万5146世帯(約143万人)をここでは家屋喪失世帯と仮定する。ただし、この中にも死者・行方不明者が含まれており、かつ諸井・武村(2004)『日本地震工学会論文集』第4巻が指摘しているように死者の大半は焼死であることから、ここではさらに死者・行方不明者の全員が家を失っていたと仮定して、実際に生存していて家を失った人(家屋喪失生存者)の数を求めると136万2494人となる。これは罹災現存者の約83%に達する。

政府の政策もあり、これらの人々の多くは、市外(東京府下や他府県)へ避難した。11月15日時点で全国一斉に行われた人口調査の結果を内務省社会局(1924)『震災調査報告』から引用すると、東京市からの避難者は66万9363人と推定され、さらに東京市内の罹災現存者は約102万人であることがわかる。東京府下や他府県へ避難するほどであるから、全てが家を失った人だと見なすと、先に求めた東京市全体の家屋喪失生存者数から、この数を差し引いて、11月15日時点での市内残留の家屋喪失者数を求めると、69万3131人となる。他府県へ避難する人のすべてが家屋喪失者であるとの仮定がやや過大であるとすれば、市内残留家屋喪失者は69万人以上ということになる。これは、罹災現存者約102万人の実に68%にあたる。

これらの人々に対して、どのくらい公的な仮設住宅(当時は公設バラック)が準備されたかについては、11月15日現在での東京市における公設バラック数の調査結果が東京市役所調査課(1924)『東京市震災状況概要』にある。それによれば、公設バラック数は2万1507世帯(8万5996人)分あったことがわかる。大きく見積っても12.6%の人しか公設バラックの恩恵に浴していなかったということになる。阪神淡路大震災など最近の地震の家屋の全壊・半壊数に対する仮設住宅の供給戸数が2-3割であると言われている[国土交通省住宅局住宅生産課(2012)]のと比較しても、その供給量の少なさがよくわかる。



Development of Earthquake Probability Transition Table as a Tool for Comprehension and Awareness for the Nankai-Trough Earthquake Scenarios

*Yo Fukushima¹, Tomoaki Nishikawa²

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

短期的な時間スパンでの地震発生予測の情報は、余震予測（大地震発生後の地震活動の見通しの予測）を除いて、これまで社会で実利用されていなかった。「南海トラフ地震臨時情報」（以下、臨時情報）は、南海トラフ沿いにおいて大規模な地震（Mw8.0以上）の発生の確率が平時より高まったときなどに1週間～2週間単位の地震発生の見通しに関する情報である。このような情報発表の仕組みの社会での運用は、世界的に見ても類を見ない新たな試みである。

南海トラフ地震想定震源域内のプレート境界でMw8.0以上（以下、M8+地震）の地震が発生した場合（「半割れケース」と呼ばれる）と、それ以外の場合のうち監視領域内でMw7.0以上の地震（以下、M7クラス地震）が発生した場合（「一部割れケース」と呼ばれる）には、それぞれ「巨大地震警戒」と「巨大地震注意」というキーワードが付記された臨時情報が発表されることになっている。

社会のステークホルダーが臨時情報発表時に実効的な対応を取るためには、起こりうる地震発生シナリオの幅と、各シナリオが発生する確率とその不確かさの目安について理解をしておく必要がある。内閣府

（2019）には、半割れケースと一部割れケースの場合について、新たなM8+地震が7日以内に発生する見込みをISC-GEM地震カタログから算出しており、それぞれ、十数回に1回程度、数百回に1回程度の確率で起こりうるとしている。本研究では、起こりうる地震発生シナリオの幅を示すために、内閣府と同様の方法を使い、異なる時間スパンでの発生確率や、M7クラス地震が別のM7クラス地震を誘発する場合（この場合、臨時情報（巨大地震注意）が二度発表され、注意する期間が延長されることになる）などについても発生確率の算出を行うとともに、平時の発生レートを複数のモデルを用いて検討することにより、確率利得についても検討を行った。また、これらの確率と確率利得の信頼区間も評価した。

データとしては、整合性の確認のため、ISC-GEM（ver 6.0）カタログとアメリカ地質調査所のANSSカタログのふたつを用いた。M8+地震とM7クラス地震に続いてそれぞれ半径500km以内と160km以内に発生した地震を後発地震とカウントした。時間スパンとしては、1日、3日、7日、14日、3年を使用した。確率利得の計算には、ポアソン分布モデルとBPT分布モデルの両方を用いて計算を行い、比較した。

結果を表に示す。地震の発生確率が時間とともに急速に減少していく特徴や、M8+地震のほうがM7クラス地震に比べて別のM8+地震の「誘発能力」が一桁大きいといった特徴が見て取れる。このような計算結果を、より理解のしやすい表現に整理した「地震確率推移表」（仮称）としてまとめることを予定している。この推移表をステークホルダーと共有することにより、これまで必ずしも広く伝わっていなかった情報（たとえば、別の地震が誘発される可能性は地震直後が大きくその後急激に減少するといったこと）が提供されることになり、対応策を計画するうえで有用な理解や気づきを得ることができるようになると考えている。

（文献）内閣府（2019）, 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【第1版】、令和元年5月、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun_guideline2.pdf

Earthquake Size	Catalogue	< 1 day	< 3 days	< 7 days	< 14 days	< 3 years
M8+	ISC (N=105)	1.9%	2.9%	2.9%	4.8%	10%
	ANSS (N=92)	1.1%	2.2%	2.2%	4.3%	9.8%
M7-class	ISC (N=1354)	0.22%	0.37%	0.59%	0.66%	1.7%
	ANSS (N=1252)	0.24%	0.40%	0.40%	0.48%	1.0%
M8+ gain (Poisson)	ISC (N=105)	6.3×10^2	3.1×10^2	1.3×10^2	1.1×10^2	3.2
	ANSS (N=92)	3.6×10^2	2.4×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2	3
M8+ gain (BPT)	ISC (N=105)	3.0×10^2	1.5×10^2	64	53	1.4
	ANSS (N=92)	1.7×10^2	1.1×10^2	49	49	1.4
M7-class gain (Poisson)	ISC (N=1354)	73	40	28	16	0.52
	ANSS (N=1252)	79	44	19	11	0.32
M7-class gain (BPT)	ISC (N=1354)	35	19	13	7.4	0.23
	ANSS (N=1252)	37	21	8.9	5.4	0.14

Causes of Fourier Amplitude Sags at Intermediate Frequencies for Simulating Broadband Strong Ground Motions using Stochastic Green's Function Methods

*Yoshiaki Hisada¹

1. Kogakuin University

1. はじめに

小地震から大地震の波形合成を行う経験的・統計的グリーン関数法を用いて広帯域強震動計算を行う際、目標とする理論的な ω^2 モデルと比較すると、一般に大地震の震源スペクトルの振幅は中間周波数帯で大きな落ち込みが生じる（例えば文献1)）。本論文は小地震として理論的な ω^2 モデルを用いる統計的グリーン関数法を用いて、振幅スペクトルの落ち込みを4つの要因に分類し、その原因と改善法を理論的に考察した。

2. 震源スペクトルにおける中間周波数帯の振幅の落ち込みの要因と改善法

振幅スペクトルの落ち込みの4つの要因は、下記の通りである。

- (a) F 関数（小地震から大地震の要素地震のmoment rate 関数への変換関数）による中間周波数帯での振幅の落ち込み、
- (b) 低周波数と高周波数で異なる位相スペクトルを用いた波形を重ねることによる接続周波数帯での振幅の落ち込み、
- (c) 大地震の断層分割数（相似比 N の2乗個）の増大により ω^2 モデルから ω^3 モデルに漸近することによる中間周波数帯での振幅の落ち込み、および、
- (d) 大地震の断層面上の要素地震を重ね合わせる際、低周波数での N の2乗倍から、高周波数での N 倍の振幅に移行する遷移周波数帯での落ち込み、

このうち、(a)と(c)は従来から知られている「中間周波数帯」での振幅の落ち込みであるのに対し、(b)と(c)は異なる視点から振幅の落ち込みを考察しており、本報告ではそれぞれ「接続周波数帯」と「遷移周波数帯」と呼ぶ。各要因の振幅落ち込みの原因と改善法に関して、まず(a)に関しては指数関数型のF関数を用いること（例えば文献2)）、次に(b)に関しては振幅スペクトルの補正を行うこと（例えば文献3), 4)）、がそれぞれ有効であることを確認した。

一方、(c)と(d)に関する計算例として、文献1)に倣い1946年南海地震（ $M_w 8.2$ ）を想定した大地震の震源パラメータとして、 $M_0 = 1.0 \times 10^{21}$ Nm, $f_c = 0.03$ Hz, $L = W = 100$ km とする。破壊開始点は、分割した要素断層のうちで最も断層面の角点に近い要素中心点とし、 $V_r = 2.8$ km/s で断層面上を円筒状に破壊伝播させる。(c)に関しては、既存の研究から相似比 N の増大により破壊伝播が滑らかになることで振幅が低減することが知られているが（例えば文献1), 5)）、振幅の落ち込みは N が小さくても発生し、それが要素地震の破壊開始時間間隔に相当する卓越周波数よりも低周波数で必ず落ち込みが生じることを示した（図1参照、文献1)によるランダム破壊時間を考慮した場合）。

小さな相似比 N から振幅が落ち込む原因として(d)では、低周波数での要素地震のコヒーレントな重ね合わせから、高周波数でのランダムな重ね合わせに至る遷移周波数帯で振幅が N の2乗倍から N 倍に落ち込むことを理論的に明らかにし、振幅の落ち込みは要素地震の破壊開始時間の関数項に起因することを示した（図2参照）。

最後に、振幅落ち込みの実用的な改善法として、理論的な ω^{-2} モデルによる振幅補正を行う手法を提案し、図1, 2で用いた震源モデルを用いて、破壊伝播のforward, backward, middle pointにおける強震動を、統計的グリーン関数法を用いて広帯域強震動を計算した。その結果、 ω^2 モデルに基づく震源スペクトルの振幅補正を行わない場合は中間周波数帯の振幅を著しく過小評価することが分かった（図3、4参照）。

3. おわりに

本論文では統計的グリーン関数法を用いて小地震から合成した大地震の震源スペクトルは中間周波数帯で大きな振幅の落ち込みが生じる原因を整理し、その改善法を提案した。なお、本報告ではM8級の大地震を対象として検討を行ったが、M6 級程度 ($L=W=10\text{km}$) の小規模な震源モデルを用いた遠方近似解の成り立つ場合の結果検証も行い、ここで得られる結論と全く同じ結果が得られることを確認している。今後は実際の観測地震波を用いた経験的グリーン関数法にも拡張し、適用性を検討する予定である。

謝辞 本研究は工学院大学・総合研究所・都市減災研究センター（UDM）の助成で行われました。

参考文献

- 1) Irikura, K., Kamae, K., *Annali Di Geofisica*, Vol. XXXVII, N.6, 1721-1743, 1994.
- 2) Dan, K., Watanabe, T., Tanaka T., 日本建築学会構系論文集, 第396 号, pp.27-36, 1989.
- 3) 久田嘉章, SEINWEB, NTTファシリティーズ, テクニカルコンテンツ, 2010.
- 4) Hisada, Y, *J. Seismo.*, Vol. 12, pp.265-279, 2008.
- 5) 野津 厚, 地震, 第2 輯, 第56 巻, pp.337-350, 2004.

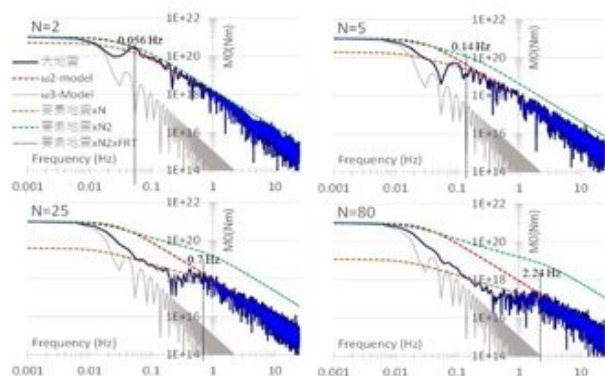


図1 相似比Nを変化させた大地震の震源スペクトルと中間周波数帯の落ち込み

大地震: 統計的グリーン関数法(文献4)による震源スペクトル
 $\omega 2$ -model: Brune(1970)による理論的 $\omega 2$ モデル
 $\omega 3$ -model: L・W方向のユニラテラル破壊による理論的 $\omega 2$ モデル
 要素地震×N: 要素断層地震の破壊開始時間を完全なランダム和とした震源スペクトル
 要素地震×N2: 完全な同時破壊とした震源スペクトル
 要素地震×N2×FRT: 要素地震×N2に破壊開始時間関数を乗じた震源スペクトル

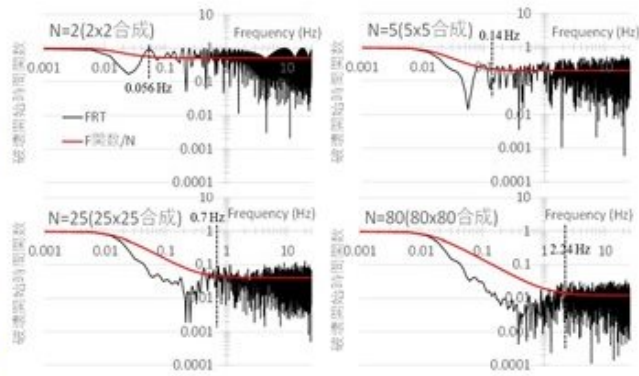


図2 破壊開始時間関数(下式)の振幅スペクトル(赤線: 相似比Nで基準化した文献2による指数関数型の関数)

$$F_{RT}(\omega) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e^{i\omega(\xi_{ij}/T_p + \varepsilon_{ij})} / N^2$$

ξ_{ij} 震源からij要素地震までの距離 ε_{ij} ランダム破壊開始時間

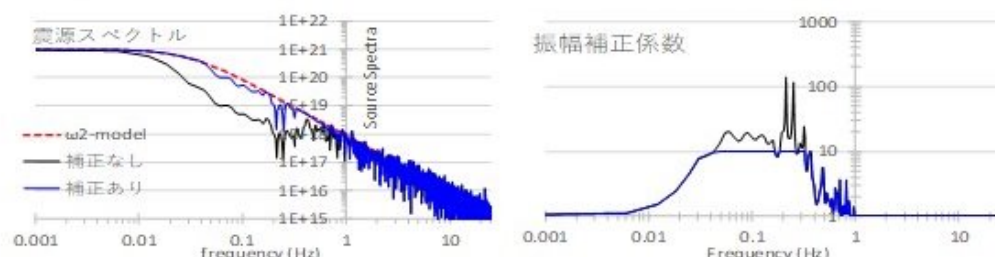


図3 中間周波数帯での振幅の落ち込みを $\omega 2$ モデルで振幅補正した震源スペクトル(左)と、振幅補正係数(右)。N=25を使用, 振幅補正は0-1 Hzで行い, うち0.4-1.0 Hzの区間は補正係数を1まで線形に低減。

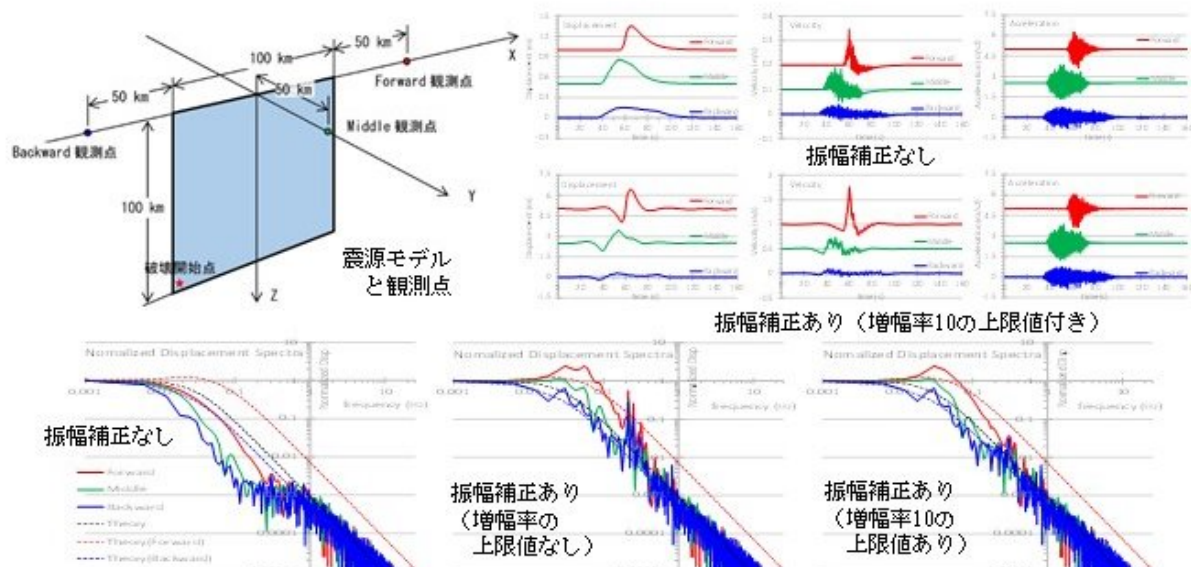


図4 統計的グリーン関数法(文献4)で用いた震源モデルと観測点(左上)、変位・速度・加速度波形(右上), および、最大振幅1で基準化した変位振幅スペクトル(下)。波形と振幅スペクトルにおいて、Forward(赤線), Middle(緑線), Backward(青線)に対応、スペクトルの破線は理論スペクトル。

Study on rupture propagation effect of small and medium-sized earthquakes used as elemental earthquakes of empirical Green's function method

*Junpei Kaneda¹, Shinya Tanaka¹, Yoshiaki Hisada²

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（例えば、三宅ほか（1999））。しかし、地震動予測を行う場合、要素地震をどのように選定するか明確な基準はない。池浦（1997）では本震と要素地震の位置や地震タイプが近いことや、地震規模の差が2程度以内であることを挙げている。海溝型地震や長大断層による地震ではM8以上となることから要素地震としてM6程度の地震を用いることとなる。しかし、M6級の地震は数km程度の面積を持つことになるため、震源の破壊過程の影響が無視できない可能性がある。熊谷（2019）では2008年岩手県沿岸北部の地震（Mw6.8）の浅野・岩田（2009）による震源モデル（主たるSMGAの断層面が6km×6km）の破壊開始点をわずかに変更することで特定の方向に位置する観測点の再現性が向上することを示している。同様に断層モデルを用いて破壊伝播効果の影響について検討している研究として、例えば香川（2015）や引田ほか（2015）があるが、これらの研究で用いている断層長さは数十kmとやや大きい。一方、中村・八代（2002）は、ほぼ同一の位置・規模の2地震のスペクトル振幅比から、M5級の地震でも周期1秒以下の短周期で震源の破壊過程の影響があることを示しているが、用いられた震源の破壊過程はあきらかにされていない。

本研究では、震源の破壊過程があきらかにされているM6前後の地震を対象として、観測記録の傾向を分析するとともに、EGFによる観測記録を再現したうえで、破壊開始点や破壊伝播速度を変更した波形合成を行うことで、破壊伝播効果の影響について検討を行う。なお、本研究は破壊伝播効果の影響を含んだ要素地震を用いた波形合成が本震へ与える影響を確認することを目的としている。

2. 検討方法

本研究ではHikima and Koketsu（2005）で震源の破壊過程が求められている2004年新潟県中越地震の本震と規模の異なる4つの余震を対象とする。

初めに震源から見て異なる方位に位置する複数の観測点で得られた記録を用いてフーリエスペクトル比を算定し、破壊伝播方向との関係について整理を行う。次に、Hikima and Koketsu（2005）を基本とした特性化震源モデルを作成し、EGFにより観測記録の再現を行う。最後に破壊開始点を変更した波形合成を行い、破壊伝播効果が地震動の計算結果に与える影響をあきらかにする。

なお、本稿ではHikima and Koketsu（2005）のevent5（Mw5.9）（ここではEq.1とする）に関する検討結果を示す。また、要素地震は断層面に近い位置で発生した2004/10/27,17:15（Mw3.7）を用いた結果を示すが、今後複数用いる予定である。対象とする地震と観測点を図1、表1に示す。

3. 検討結果

3.1 観測記録のフーリエスペクトル比

図1に示す観測点を対象に算定したフーリエスペクトル比（Eq.1／Eq.2）を図2に示す。要素地震の地震規模が小さいことから対象周波数は0.5Hz～10Hzとし、Parzen Window 0.2Hzで平滑化を行った。算定したフーリエスペクトル比は、0.5Hz～2.0Hz程度で震源から観測点の方位によって違いがみられたため、ここでは破壊進行方向のforward側とそれ以外のbackward側として分けて平均値を算定している。ここで、破壊進行方向は

Hikima and Koketsu (2005) において、すべりの大きい部分が破壊開始点の南西に位置していたことから、破壊開始点から南西方向に破壊が進行すると仮定した。0.5Hz~2.0Hz程度ではforward側はbackward側の2倍程度大きくなっていることがわかる。Mw3.7の要素地震がほとんど方位性が無い点震源と仮定すると、Mw5.9程度の地震でも破壊伝播効果の影響が0.5Hz~2.0Hz程度にあらわれていると考えられる。

3.2 EGFに基づく破壊伝播の影響に関する分析

前節で示した破壊伝播効果をEGFによる波形合成で確認する。対象地点はforward側のNIGH19観測点とbackward側のNIGH08観測点、両地点の中間地点に位置するFKSH06観測点の3地点である。波形合成の手法は入倉ほか(1997)に基づいて行った。震源モデルは図3に示すHikima and Koketsu (2005) を基に特性化したモデルを用いる。なお、断層の分割数は要素地震の地震規模を考慮して再分割している。また、ここで用いる要素地震の波形はS波到達から5秒程度までとし、後続波は考慮しない。破壊開始点はHikima and Koketsu (2005) の位置と、南西側に2km移動した位置を用いる。破壊開始点を変更した評価結果を比較し、破壊伝播効果の影響を確認する。図4にEGFによる波形合成結果のEW成分を示す。上段の速度波形では特徴的な位相は再現できている。NIGH19では破壊開始点を南西へ2kmだけ移動すると位相が大きく乱れ、また、フーリエスペクトル比(EGFによる波形合成結果/Eq.2) から1Hz付近の振幅が半分程度になり、破壊伝播効果の影響が大きいことがわかる。この結果は前節のforward側とbackward側のフーリエスペクトル比の違いと概ね対応している。NIGH08地点では破壊開始点を移動したことで破壊が遠ざかる方向から近づく方向になり、振幅が増幅している。一方、FKSH06では破壊開始点を変えたことによる破壊伝播効果の影響は小さい。破壊進行方向に直交する地点のためと考えられる。

4. 今後の検討方針

今後はHikima and Koketsu (2005) の異なるイベントと要素地震で同様の検討を実施し、さらに破壊伝播速度を変えた場合の計算を行い、破壊伝播効果の影響を評価したいと考えている。また、要素地震の切り出し時間を変えて、表面波が多く含まれる後続波が波形合成の過程でコヒーレントに重なり合う場合の影響についても調べる予定である。

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。東京電力ホールディングスの引間和人博士には、2004年新潟県中越地震本震、及び余震の震源インバージョン結果をご提供頂きました。東電設計(株)南雲秀樹氏には適切なお助言をいただきました。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。

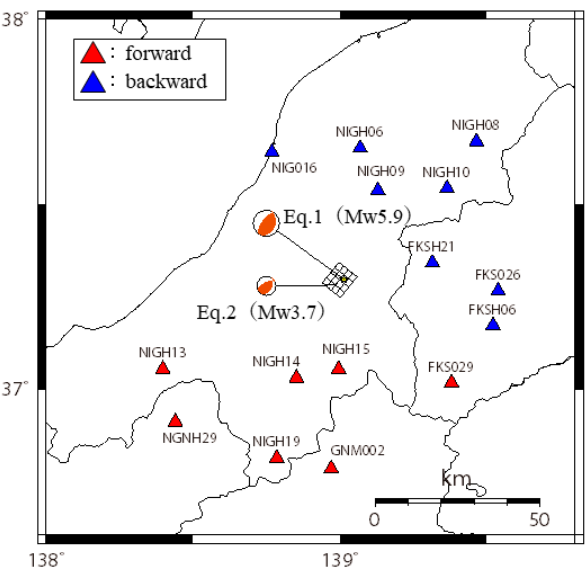


図1 検討地震と観測地点

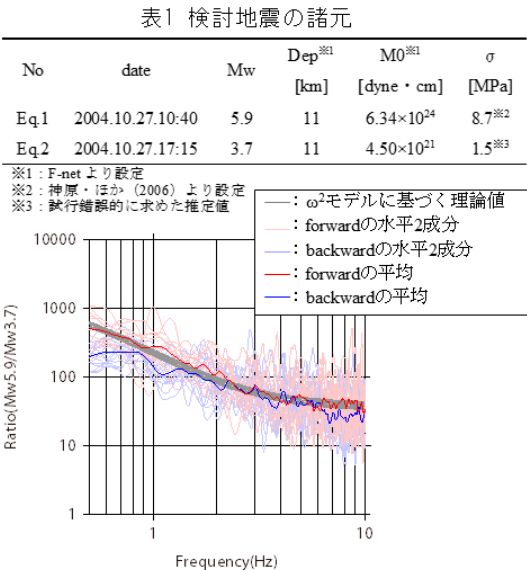
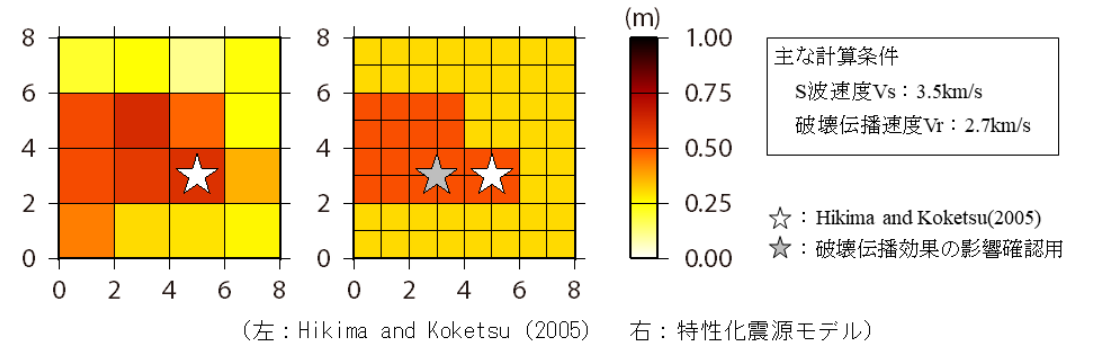


図2 観測記録のフーリエスペクトル比



(左: Hikima and Koketsu (2005) 右: 特性化震源モデル)

図3 Eq.1の震源モデル

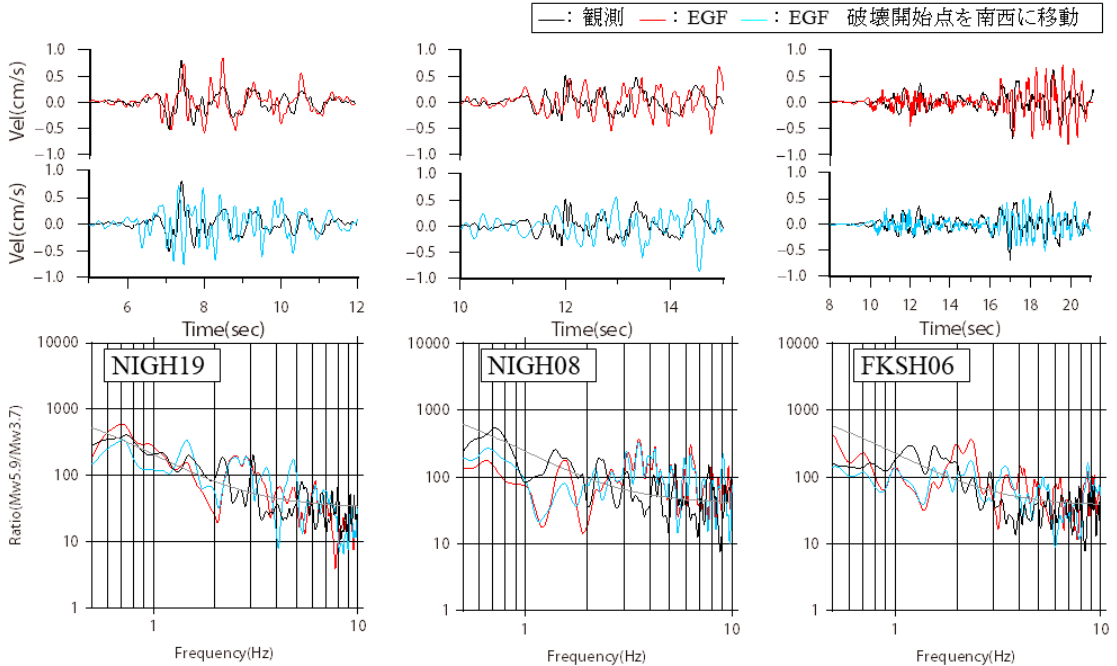


図4 EGFによるEW成分の波形合成結果

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

[S15]M-2

chairperson:Seiji Tsuno(Railway Technical Research Institute), chairperson:Ryuta Imai(Mizuho Information &Research Institute, Inc.)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM A

[S15-06] Improvement of IPF method with utilization of Hi-net

○Keishi Noguchi¹, Naoki Hayashimoto¹, Koji Tamaribuchi², Yuki Kodera² (1.Japan Meteorological Agency, 2.Meteorological Research Institute)

2:30 PM - 2:45 PM

[S15-07] Applicability of on-site P-wave earthquake early warning to the 2016 Kumamoto earthquake and the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

○Seiji Tsuno¹, Katsutomo Niwa² (1.Railway Technical Research Institute, 2.JR Central Consultants Company)

2:45 PM - 3:00 PM

[S15-08] A sample generation of scenario earthquake shaking maps via modal decomposition and empirical copula

○Ryuta Imai¹, Naoki Kasui¹, Asako Iwaki², Hiroyuki Fujiwara² (1.Mizuho Information &Research Institute, Inc., 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:00 PM - 3:15 PM

[S15-09] Toward application of large-scale numerical simulation of earthquake generation, wave propagation and soil amplification into comprehensive earthquake damage estimation

○Takane Hori¹, Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita², Ryoichiro Agata¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM

Improvement of IPF method with utilization of Hi-net

*Keishi Noguchi¹, Naoki Hayashimoto¹, Koji Tamaribuchi², Yuki Kodera²

1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute

1. はじめに

緊急地震速報の震源推定手法の1つであるIPF法 [溜淵・他(2014)] は、同時多発地震による観測データを適切に分離して処理できるという利点がある。一方で、IPF法は気象庁観測点、海底地震計、KiK-netの一部を使用しており、観測点密度の高いHi-netを使用した着未着法 [Horiuchi *et al.*(2005)] と比べると、内陸地震において迅速性と震源精度に課題があった。そこで本発表では、IPF法の迅速性と震源精度の改善のために、気象庁へリアルタイム伝送されているHi-netのデータをIPF法で活用することについて検討を行った結果を報告する。

2. 検討内容

Hi-netをIPF法で活用するため、以下の検討を行った。

a. Hi-net速度波形をIPF法の入力データにするための処理

Hi-net速度波形に加速度変換フィルタ [小寺(2019)] を適用して加速度波形に変換し、トリガ処理とその品質管理、震央方位解析 [横田(1985)]、及び震央距離解析 [Okada *et al.*(2003)、東田・他(2004)] など、気象庁加速度計と同様の波形解析処理を行った。

b. IPF法で多観測点処理を行うための高度化

観測点増加に伴って課題となる計算負荷を軽減するため、尤度計算に使用する観測点を最尤地点近傍に限定する観測点選別処理を追加した。加えて、非選別観測点の同一判定についても、「全パーティクルとの同一判定」の代わりに「尤度の重心との同一判定」を行うことで計算負荷の軽減を図った。また、品質管理異常となった観測点や、ノイズレベルが高くトリガしない観測点の未トリガ情報により、震源推定精度が低下することを避けるため、それらの観測点を”非選別”とすることで、未トリガ情報が疑わしい観測点を尤度計算から除外するロジックを追加した。

3. 結果

2018年に緊急地震速報を発表した898事例について検証を行った。Hi-net速度波形の加速度変換及び波形解析を行った結果、気象庁加速度計の波形解析結果（トリガ、震央方位、震央距離、振幅）と比較して大きな差異は認めなかった。これらの波形解析結果と気象庁観測点の波形解析結果を用いて、IPF法による震源推定を行った結果、既存のIPF法と比較すると、陸域の地震で第1報発表時刻の迅速化及び震源精度の向上が見られた。同様に、Hi-netを使用した着未着法と比較しても、ほとんどの事例で同等の精度で震源を推定できることがわかった。また、品質管理異常となった観測点や、ノイズレベルが高くトリガしない観測点を”非選別”とし、震源近傍での未着観測点の影響を軽減することで、尤度分布が収束し震源推定精度が向上することがわかった。

以上のように、Hi-netを活用したIPF法の高度化により、震源推定の迅速化と精度向上が可能となった。ただし、一部の深発地震、及び観測網の端で発生した地震については、特に震源推定初期段階においてIPF法の震源推定精度がやや低くなる場合があった。また、速度Mを使用している着未着法と比較すると、第1報発表時刻が遅い事例も多いことがわかった。今後はこれらに対応するため、IPF法の推定震源を用いた緊急地震速報の発表に速度Mを使用することなどについても検討を行う。

[謝辞]

本発表では気象庁観測点のデータのほかに、MOWLAS (Hi-net、S-net、DONET、KiK-net) のデータを利用しました。記して感謝いたします。

Applicability of on-site P-wave earthquake early warning to the 2016 Kumamoto earthquake and the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

*Seiji Tsuno¹, Katsutomo Niwa²

1. Railway Technical Research Institute, 2. JR Central Consultants Company

P波オンサイト早期地震警報の実用化を目的として、2016年熊本地震と2018年北海道胆振東部地震の際に取得された地震データに対して、S波/P波のスペクトル比および最大振幅比を利用したP波オンサイト早期地震警報(津野・宮腰, 2019)の適用性を検証した。本手法を震源近傍で観測された地震データに適用する際は、十分なTs-p時間を確保することができないため、短時間のデータ・ウィンドウを利用してP波からS波を予測する必要がある。そこで、本研究では、異なるデータ・ウィンドウによる予測値と観測値の残差を評価し、短時間のデータ・ウィンドウの適用可能性について検討した。また、震源近傍で観測された地震データでは地盤の非線形性が現れる場合があるため、限られたデータ数ではあるものの、2016年熊本地震と2018年北海道胆振東部地震の本震データから、地盤の非線形性による本手法の予測精度について検討した。

震源域近傍で観測された2016年熊本地震の余震データを使用して、S波/P波のスペクトル比とP波スペクトルを掛け合わせることで、熊本平野で観測された地震のP波スペクトルからS波スペクトルを適切に予測できることを確認した。使用するデータ・ウィンドウ長の検討を行った結果、P波到達後0.6秒のデータ・ウィンドウ長で本手法の精度を確保できることを確認した。また、S波/P波の最大振幅比とP波最大値を掛け合わせることで、震源近傍で観測された地震データに対して、P波到達後1秒以下のデータ・ウィンドウ長で本手法を適用可能であることを確認した。

2016年熊本地震におけるKMM16(益城)と2018年北海道胆振東部地震におけるIBUH03(厚真)・IBUH01(追分)の本震データによるS波/P波の最大振幅比と余震データによるそれらを比較検討した。使用した地震データはKiK-net観測点で取得されたデータであり、地表/地中のS波振幅比とも併せて検討した。その結果、IBUH03では、本震データにおいて明瞭な地盤の非線形性による地表/地中のS波振幅比の低下が示されるものの、S波/P波の最大振幅比は余震データのそれらと大きな違いは見られなかった。震源の違いによる影響の方がサイトの違いによる影響よりも大きいため、2018年北海道胆振東部地震におけるIBUH03の予測値は本手法全体(震源・伝播・サイト)の誤差範囲に含まれたと考えられる。2016年熊本地震におけるKMM16(益城)と2018年北海道胆振東部地震におけるIBUH01(追分)の本震データについても同様の傾向が見受けられた。

A sample generation of scenario earthquake shaking maps via modal decomposition and empirical copula

*Ryuta Imai¹, Naoki Kasui¹, Asako Iwaki², Hiroyuki Fujiwara²

1. Mizuho Information & Research Institute, Inc., 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

背景：震源シナリオの不確定性による地震ハザード評価におけるばらつきの定量化のためには、多数のシナリオに基づくシミュレーションを実行して、標本データとしての計算結果を蓄積することが重要である。しかしながら、ひとつのシナリオに対する地震波動伝播シミュレーションを実行するためにはスパコンのような大きなリソースが必要であり、標本データとしての計算結果を蓄積することは容易ではない。本報告では、既にあるシナリオ地震動予測結果を利用して、まだ設定されていないシナリオに対する地震動予測結果を簡便に生成する方法を提案する。

提案手法と関連研究：提案手法の一つ目のポイントは、既に蓄積されている標本データとしての計算結果にモード分解を施すことによって、計算結果の観測点依存成分であるモードシェイプとシナリオ依存成分であるモード座標を抽出することである。シナリオとそのモード座標を同一視することによって、あるシナリオと別のシナリオを補間することが可能となる。提案手法では、この補間によってシナリオ地震動予測地図のサンプルを生成する。一方、シナリオには不確かさが含まれており、地震動予測のシナリオ依存成分であるモード座標は確率変数と見なすことができる。シナリオの補間によって地震動予測の候補を生成するとき、この確率分布に従ってサンプリングしなければ、地震ハザード評価を歪める可能性がある。提案手法の二つ目のポイントは、モード座標が誘導する確率分布に従ってシナリオの補間の頻度を設定することである。シナリオ地震動予測結果のモード分解を実施している先行研究として、能島・他(2018)がある。能島・他(2018)では、シナリオ地震動予測地図の地震動分布の空間相関の特性を明らかにすることを目的としてモード分解を適用する方法が提案されている。一方、我々の提案手法は能島らの方法の延長線上に位置づけられるが、地震動分布の不確かさの確率分布に着目するところに特徴がある。我々の動機は、これまでに蓄積された地震動予測結果を利用しつつ、まだ設定されていないシナリオに対する地震動予測結果を簡便に生成して地震ハザード評価に適用することである。従って、まだ設定されていないシナリオに対する結果を生成するだけでなく、その発生頻度を説明できるような方法を提案することが目的である。

方法：地震動予測地図の面的分布をデータ行列として格納する。即ち、データ行列の縦方向を観測点、横方向をシナリオとして、各シナリオの各観測点における地震動強さを要素とする行列を考える。データ行列の固有直交分解を考えることによって、データ行列の各列ベクトルを主要なモードシェイプベクトルで展開することができる。このときの展開係数を並べたものがモード座標ベクトルである。モード座標はシナリオ依存成分を表していることから、確率変数とみなすことができる。モード座標を確率変数とみなす場合、シナリオの不確かさが地震動強さ分布に及ぼす影響の確率的な特徴はモード座標の確率分布に反映されと考えられる。とくに、シナリオの影響の頻度が周辺分布に反映されるだけでなく、異なるモード同士の確率的な依存関係が同時分布に反映されと考えられる。従って、確率変数とみなしたモード座標の同時分布を検討する必要があると考えられる。各モードのモード座標とその周辺累積分布関数の合成関数は一様分布に従う確率変数を定める。コピュラとは、この一様分布に従う確率変数ベクトルの同時累積分布関数のことである。大雑把に述べるならば、コピュラとは、モード毎の確率的な特徴を周辺累積分布関数に押し付けて、異なるモード同士の確率的な依存関係のみを表現するものと言える。本報告では、経験コピュラを採用することとした。

計算結果：まず、せん断食い違い型点震源のラディエーションパターンのモード分解を実施して、本提案手法が多数のシナリオ結果に通底する特徴を抽出する能力があることが示された。更に、各モードのモード座標は独立ではなく、特定の依存関係があることが確認された。換言すれば、モード座標を生成する場合に然るべき

依存関係を満足するようにサンプリングしなければ、たとえ無相関なサンプリングをしても、現実には存在し得ない結果を生成してしまったり、存在し得たとしても発生頻度を歪めたりする可能性があることを示唆している。次に、実際のシナリオ地震動予測地図に対してモード分解を適用して、まだ設定されていないシナリオに対する地震動予測結果を簡便に生成できることを示した。更に、生成する地震動予測結果にバリエーションを与える方法を試みた。コピュラを評価することによって、各モード個別の確率的な性質とモード間の依存関係を独立に議論することができ、モード間の依存関係を調節することで地震動予測結果のバリエーションを制御することができた。

Toward application of large-scale numerical simulation of earthquake generation, wave propagation and soil amplification into comprehensive earthquake damage estimation

*Takane Hori¹, Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita², Ryoichiro Agata¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

スーパーコンピュータ「富岳」の2020年度の運用開始に伴い、「富岳」を用いた成果を早期に創出することを目的として、文部科学省により「富岳」成果創出加速プログラム（2020～2022年度）が設置された。その課題の一つとして、著者らが中心となって申請した「大規模数値シミュレーションによる地震発生から地震動・地盤増幅評価までの統合的予測システムの構築とその社会実装」が採択された。著者らは前身課題であるポスト「京」重点課題において、富岳の計算性能を最大限活用できるような有限要素計算アプリケーションの開発に取り組んできた。重点課題において開発された地震動解析プログラム「E-wave FEM」は、四面体二次要素を用いた陰解法と高性能前処理による反復解法を組み合わせた弾性波動方程式の求解により、複雑地盤における地震動解析を精度よく、安定に、かつ高速に行うことができる計算アプリケーションである。本アプリケーションは、国の被害想定における長周期地震動評価のための手法高度化のニーズと合致していたため、重点課題の頃から国の被害想定への適用を目指した委員会での検討に組み込まれてきた。本課題においては、「富岳」でしかできない規模の地震動計算によって精度保証をした上で、国の被害想定における地震動評価で実際に用いられるようにすることが目標となる。さらに、開発した計算アプリケーション群を実務で活用するための環境整備を進め、建築・土木系企業等が、国の想定と同等の計算ができる仕組みを構築することも計画しており、5つの企業が本課題に連携機関として参画している。このように、高性能計算を活用した計算アプリケーションによる数値シミュレーションを、政策判断や実務等に活用するための基礎を築くことが、本課題の目指すところである。

プロジェクトの立ち上げからこれまでのところ、国の被害想定における長周期地震動評価に必要な計算を今年度中に遂行するための準備を進めている。まず「富岳」の実機を用いて、E-wave FEM・STRIKEなどに共通する有限要素解析ソルバー部分の計算で「富岳」の性能が引き出されるように、計算科学・計算機科学の最先端技術を駆使したコード改良を継続中である。さらに、E-wave FEMと国の被害想定において従来用いられてきた有限差分法の数値解をベンチマークテストで比較することで、E-wave FEMを被害想定のためのツールとして採用するメリット等を整理している。また、E-wave FEMを連携企業が実務で使いやすいツールとするため、マニュアル、プリポスト処理用計算機とツール群の整備など、環境整備構築も進めてきた。今年度後半には連携企業の計算チュートリアルを行い、実装されている機能に対するフィードバックをうけて、さらに環境整備を改善していく計画である。STRIKEについても、重点課題からの共同研究をさらに発展させ、企業ごとのニーズを踏まえた非線形地盤増幅計算を「富岳」で実施する準備を進めている。

さらに、津波初期水位推定や南海トラフプレート境界面固着度推定などを目的として、地震動解析コードとほぼ共通の有限要素解析ソルバーを用いた、弾性・粘弾性地殻変動の大規模計算コードE-cycle FEMの開発も進めている。こちらは、「富岳」でしかできない規模として、全球スケールの3次元不均質構造を考慮した弾性・粘弾性地殻変動計算により、参照解を得ることを目指す。そして、この参照解との比較により精度保証したグリーン関数を提供することで、国の被害想定のもとになる地震・津波シナリオの事前評価や、地震発生・準備過程ならびに津波発生過程の現状把握・推移予測・即時予測の高度化に貢献する。

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

[S12]PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 1:45 PM ROOM B

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

○Kentaro Omura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 1:15 PM

[S12-02] Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

○Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2.Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3.Japan Meteorological Agency)

1:15 PM - 1:30 PM

[S12-03] Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

○Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

*Kentaro Omura¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震発生過程やテクトニック変動を理解する上で、重要な物理量である地殻の原位置絶対応力を求めるには、陸域にしる海域にしる、水圧破碎法、応力解放法のように、掘削と複雑な孔内計測が必要であった。しかし、最近では、岩石コアを採取して室内計測する応力測定法(ASR法、DRA法、DCDA法など)や、孔内物理検層で得られる孔壁画像から、応力方位と値を推定する手法(ボアホールブレイクアウト、DITF)が適用されてきている。本発表では、一例として、防災科学技術研究所のHi-net観測網で、大阪平野にある深層地殻活動観測井での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、原位置地殻応力方位を推定した結果を報告する。

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)と田尻観測井(北緯34°23' 52.14" , 東経135°17' 01.24" , 掘削深度約1532m)において、ボアホールテレビュア検層(BHTV)が実施された。BHTVは、検層ツールのトランスデューサーを回転させ、超音波を孔壁に照射しながら孔内を上昇して、孔壁からの反射波の振幅と往復時間を濃淡表示することによって、孔壁面の画像を描く。亀裂などは、反射波の振幅が小さく、画像が黒くなる。検層ツールには磁力計が組み込まれていて、孔壁画像に写る亀裂などの方位がわかる。ボアホールブレイクアウトは、孔壁にかかる応力集中により、孔壁の一部が剪断破壊し、その部分が、崩れ、孔径が拡大する現象であり、孔壁画像で、深度方向に縦に筋が写ることで、認識される。崩壊した部分の幅から応力値が、崩壊部分の方位から応力方位が求められる。応力値には孔壁の破壊強度が直接関与し、推定が難しいため、今回は、応力方位のみ着目する。応力集中領域から90°回転した方位が原位置地殻応力の水平最大圧縮応力方位になる。

両観測井ともに、浅部の軟岩堆積層の大阪層群から、基盤は花崗閃緑岩となり、基盤のBHTV画像にボアホールブレイクアウトが認識された。図1に此花観測井のボアホールブレイクアウトのBHTV画像の例を示す。田尻でも広い範囲でボアホールブレイクアウトのBHTV画像がえられた。その方位から、原位置地殻応力の水平最大圧縮方位は、此花でN80°E-N260°E、田尻でN65°E-N245°Eとなり、+-15°程度の誤差が見込まれる。この応力方位は、周辺の北近畿地域における、東西方向の圧縮応力方位に整合的な結果になっている。BHTV検層は、標準的な検層種目となっており、観測井など孔井掘削する機会に、あわせて実施することにより、条件が適合して、ボアホールブレイクアウトが形成されれば、原位置地殻応力を求めることができる。

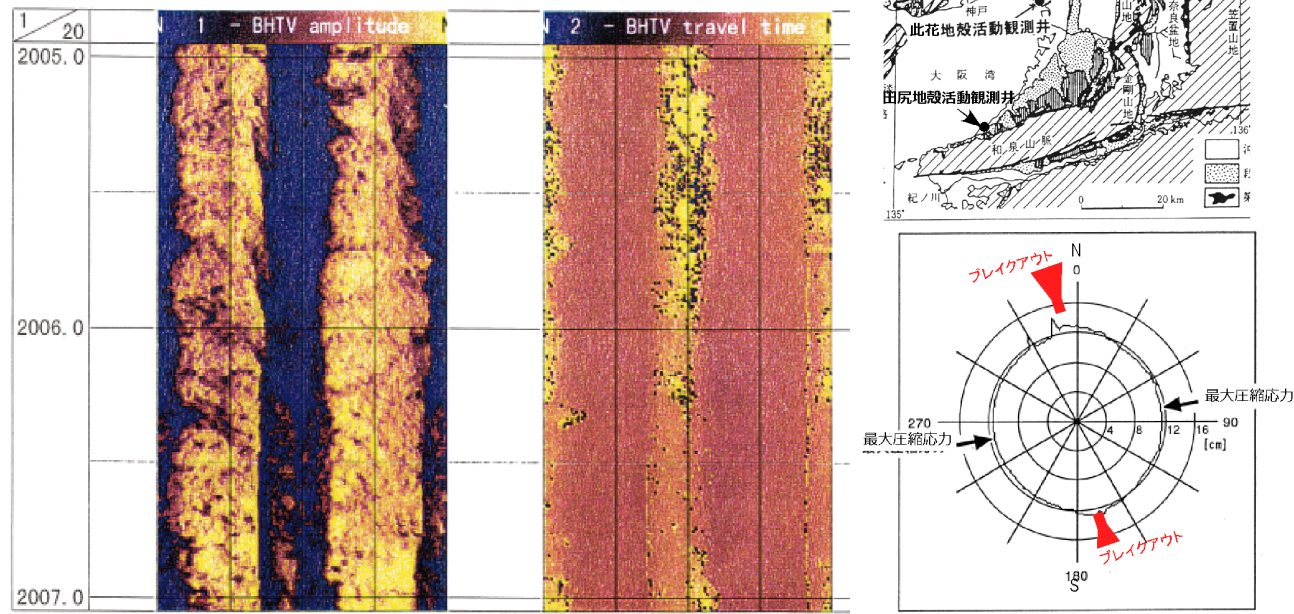


図1. 此花観測井の深度2006m付近のBHTV画像. 左が, 反射振幅, 右が往復時間を示す. 縦方向の黒い筋がボアホールブレイクアウト. 右図は, 往復時間から再現した孔壁断面で, 拡張したボアホールブレイクアウト部分から90°が最大圧縮応力方位になる

Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

*Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3. Japan Meteorological Agency

これまで秒速ナノメートルからメートルオーダーの範囲において摩擦実験が行われ (Di Toro et al., 2011), 様々な岩種の摩擦挙動が調べられてきた。また, 摩擦実験後のせん断帯に発達する微小構造の観察も行われてきた (例えば, Marone & Scholz, 1989; Moore & Lockner, 2011 など)。しかし, それらは限られた速度範囲での実施が多く, 同一岩種に対して広い速度範囲での摩擦実験を行った例は少ない。そこで, 本研究では統一的に摩擦挙動を理解することを目的とし, 房総半島江見層群の火山砕屑性堆積物を用いて速度範囲 0.0002–1.0 m/s にて摩擦実験を行った。その他の実験条件は, 封圧 1.5–3.0 MPa, すべり量 10 m で統一し, 乾燥および水飽和条件下で行った。実験の結果, 乾燥条件では 0.1 m/s 以上で, 水飽和条件では 0.01 m/s 以上ですべり弱化を示した。実験後試料の薄片を用いた微小構造観察の結果, 乾燥および水飽和両条件において, すべり弱化を示した速度域のせん断帯にはせん断方向と平行な Y 面が, すべり弱化を示さなかった速度域ではせん断方向と斜交する R_1 面の発達が確認された。

続いて, 摩擦実験中の粒子の挙動や粒子にかかる応力状態を粒子単位, 時間ステップ単位で詳細に解析することを目的として, 個別要素法 (DEM) による摩擦実験を再現した粒子シミュレーションを行った。その結果, すべり弱化を示した速度域では, 隣接粒子間相対変位が大きい部分がせん断方向に平行に存在し, 加えて摩擦係数上昇時にはせん断方向に対して傾斜した方向に, 摩擦係数下降時には塊状に存在した。粒子にかかる応力の局所的な集中は見られなかった。一方, すべり弱化を示さなかった速度域では, 隣接粒子間相対変位と粒子にかかる応力が大きな部分の局在化が見られたが, 摩擦係数低下時と上昇時でその粒子数は大きく異なり粒子の固着と解放が繰り返し行われていた。

以上の摩擦実験と実験後試料の薄片観察, および個別要素法による数値計算の結果から, せん断帯に発達する微小構造にはすべり速度依存性があることが分かった。

しかし, 江見層群の火山砕屑性堆積物の試料には火山性ガラスが含まれており, これが複合面構造の発達に影響を与えているか不明である。そこで, 複合面構造の発達とすべり速度との関係性をより精査するために, 試料として3種類の石英砂を用いた摩擦実験を行った。実験は全て乾燥条件下で, 封圧 2 MPa, すべり速度 1.0 m/s および 0.01 m/s, すべり量 10 m で実施した。すべり速度 1.0 m/s においてはすべり弱化を示し, 摩擦係数が定常状態を示すまでの弱化距離は 8–10 m であった。0.01 m/s では, すべり量 1 m 程度までのすべり強化に続いて定常状態に達する挙動を示した。石英砂におけるすべり速度と複合面構造の発達との対応性について, 今後, 微小構造観察などを通して精査していく予定である。

Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

*Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University

防災科学技術研究所では、岩石摩擦特性のスケール依存性を調べる目的で大型振動台を利用したメートル規模の摩擦実験をおこなっている。過去に実施したメートル規模の変はんれい岩試料同士を直接接触させておこなった摩擦実験では、摩擦係数が急減する仕事率の値がセンチメートル規模に比べ1桁小さくなるというスケール依存性を確認している。さらに様々な観察に基づき、その原因が摩耗に伴って自発的に発生・成長する断層面上の応力不均質にあると結論づけられた (Yamashita et al., 2015, Nature)。しかしながら自然の断層には一般にガウジと呼ばれる微細な岩石粒子が含まれている。ガウジ層を含む断層でも摩擦特性にスケール依存性が存在するか否かは重要な問題であることから、我々はメートル規模でのガウジ摩擦実験をおこなった。本研究でも変はんれい岩のブロックを母岩として用い、長さ1.5 m、幅0.1 mの接触面上に模擬ガウジを散布して摩擦実験をおこなった。模擬ガウジとしてジェットミルによって平均粒径10 μm 、最大粒径200 μm となるよう粉碎した変はんれい岩の粉末粒子を用いた。模擬ガウジを散布する面は凹凸が一面に渡って10 μm 以下となるよう成形した後、模擬ガウジをとらえられるようサンドブラストによって粗くした。模擬ガウジを接触面上にふるいを使って可能な限り均質に散布し、厚さが3 mmになるよう余分な模擬ガウジを取り除いた後、金属板を使って手で圧密した。大型振動台によるせん断載荷をおこなう前に油圧ジャッキにより最大6.7 MPaの垂直応力を与え、実験中は一定に保った。実験後、せん断を受けたガウジ層を観察するため、1実験あたり最低3箇所でもガウジ層を採取した。残りの模擬ガウジも可能な限り収集し、接触面に残った粒子は掃除機により除去した。本研究では目的に応じて2種類のせん断載荷による実験をおこなった。1つ目は速度-状態依存摩擦 (RSF) 則のパラメタを調べるための速度ステップ変化の載荷である。載荷速度を0.01 mm/sから1 mm/sの間で繰り返し変化させ、速度増加時と減少時の応答を収録した。得られたデータは、変はんれい岩の模擬ガウジが速度弱化の特性を示すことを示唆している。RSF則のパラメタ推定に関しては別の講演で報告をおこなう予定である (下田他, 2020, 本大会)。2つ目の載荷方法は定常すべり時の摩擦特性の調査を目的としたものであり、0.01 mm/sから30 mm/sの一定速度で載荷し最大で400 mmのすべり距離を与えた。定常状態での摩擦係数と仕事率とを比較したところ、岩石試料同士を直接接触させた状態の摩擦実験で見られていた高い仕事率での摩擦係数の急減が見られなかった。局所的な応力状態を調べるため模擬断層沿いに設置した歪ゲージアレイのデータを解析したところ、すべりに伴い模擬断層面上の垂直応力分布が不均質化ではなく均質化している過程が見られた。ガウジ層を含む状態では岩石同士が直接接触した状態で見られたような応力不均質が発達しづらく、それにより摩擦係数の急減が発生しなかったと考えられる。一方、載荷速度が高い条件での実験においては、実験の最終段階において巨視的な摩擦係数が低下し始める様子が観察されている。そのような実験では、実験後のガウジ層内に黒く固結した薄いガウジ片がしばしば見つかっており、せん断変形が集中し高い仕事率が発生して局所的に摩擦係数が低下したと考えられる。歪のデータでも、一旦均質化した垂直応力分布が巨視的な摩擦係数の低下と同期して再び不均質化していく様子を確認できる。したがって、ガウジ層を含む状態では応力不均質が発達するまでにより多くのすべり距離が必要となるものの、岩石同士が直接接触した状態と同様に応力不均質に起因する巨視的な摩擦係数の大幅な低下が引き起こされ、小さな規模では観察されないような低い仕事率での巨視的な摩擦係数の急減が発生する可能性がある。

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

[S09]PM-1

chairperson:Satoshi Matsumoto(Kyushu University)

Thu. Oct 29, 2020 1:45 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-01] Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule –

○Satoshi Matsumoto¹ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-02] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

○Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University , 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

2:00 PM - 2:15 PM

Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule -

*Satoshi Matsumoto¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

はじめに

中小地震の発震機構解やモーメントテンソルを用いた応力場推定がAngelier(1974)の先駆的な研究を皮切りに多くの手法開発や領域での推定がなされてきた（レビューとして、たとえば岩田・他，2020）。その中でMatsumoto(2016)は地震が媒質中の非弾性現象であることに着目し、マクロに見るとPrandtl-Reuss則に従うと考えて、モーメントテンソル密度が載荷される偏差応力に比例するとして応力テンソルを推定した。しかしながらその仮定が成立しているかどうかは定かではない。また、いわゆる応力インバージョンによって推定される偏差応力の比（応力比 $\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ここで $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はそれぞれ最大、中間、最小主圧縮応力）は推定精度が悪く、その意味するものについても不明な点がある。そこで本研究では非常に単純な計算からこれらの点について考察する。

流れ則の有効性と応力インバージョン

ここでは静岩圧平衡状態から3軸応力がかかる状態を考える。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ をそれぞれ各タイムステップで増加させ、最大せん断応力が破壊基準を超えた時に一定の応力降下が起こるとする（図1a参照）。具体的には基準はTresca状態を考えることになる。たとえばCoulombの破壊基準（摩擦係数で最適面で滑りが起こる）であっても $\mu = 0.6$ の時 σ_1 から ± 30 度の面で滑りが起こる。どちらも同様に起こるはずであるのでこれらを足し合わせれば単純に45度のすべりのモーメント解放と同じになる（図1b）。さて、ここでは簡単のために媒質中で強度は一定とし、基準を満たした瞬間に媒質で一斉に地震が起こり、応力降下に対応したモーメントが解放されることとする。応力場は最大せん断応力になる組み合わせの大きい応力と小さい応力でそれぞれ応力降下量の半分現象、増加することになる。最大せん断応力を基準とした場合、地震後も主応力は x, y, z 軸と一致し、回転は起こらない。

載荷する応力の比 $\phi = 0.2, 0.5, 0.8$, ($\sigma_1 = \sigma_x, \sigma_2 = \sigma_z, \sigma_3 = \sigma_y$) の3つのケースの場合の結果を図2に示す。載荷する応力($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)は各時間ステップで0.1, -0.1, -0.06 ($\phi = 0.2$), 0.1, -0.1, 0 ($\phi = 0.5$), 0.1, -0.1, 0.06 ($\phi = 0.8$) MPa/time stepである。ここで強度は10MPa, 応力降下は2MPaの場合を示す。この結果では以下の特徴が得られる。1) 媒質が破壊強度に達するまでは媒質内の応力は載荷された応力と等しい(stage 1)。 $\sigma_1 - \sigma_3$ の組み合わせが強度に達すると地震が起き始め、差応力は強度と強度一応力降下量の間を保つ(stage 2)。 σ_2 が増加（減少）しつづけ、 $\sigma_2 - \sigma_3$ ($\sigma_1 - \sigma_2$) の組み合わせが強度に達し、これらを解放する方向でも地震が起き始める(stage 3)。この結果、媒質内の応力は $\sigma_2 \approx \sigma_3$ ($\sigma_1 \approx \sigma_2$) の状態になる。一方解放されるモーメントは載荷される応力に比例する。すなわち、地震を用いた応力推定においては載荷される応力（応力レート）のみが反映され、その場応力を推定することはできない。2) Stage 2においては σ_2 の影響は観測されず、応力比はいつも0.5になる。3) 載荷される応力（強度を超えて）と解放される応力（非弾性ひずみ）は比例関係になり、いわゆる流れ則を満足する。

さらに、外部から瞬時に加わる応力変化から強度を見積もる方法について検討を行った。Hardebeck and Hauksson(2001)で提唱された応力比によらない主応力の回転から強度を推定する方法では応力比 < 0.5 の場合、 > 0.5 の場合では $\sigma_2 - \sigma_3$, $\sigma_1 - \sigma_2$ の面内の回転は直接応力変化を示し、強度の情報は含まない。そのほかの面内の変化では強度が求められることが明らかになった。

以上のように、簡単な計算から応力場推定についての検討を行い、今後の応力場推定や強度推定、モデリング

について重要な知見が得られた。

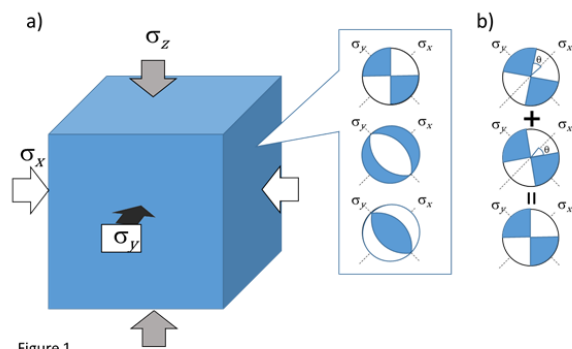


Figure 1.
a) Coordinate of the simulation in the text. Three types of seismic moment tensor indicated in right side occur inside of medium. b) Schematic illustration showing summation of two seismic moment tensor with compression angle perturbations are averaged.

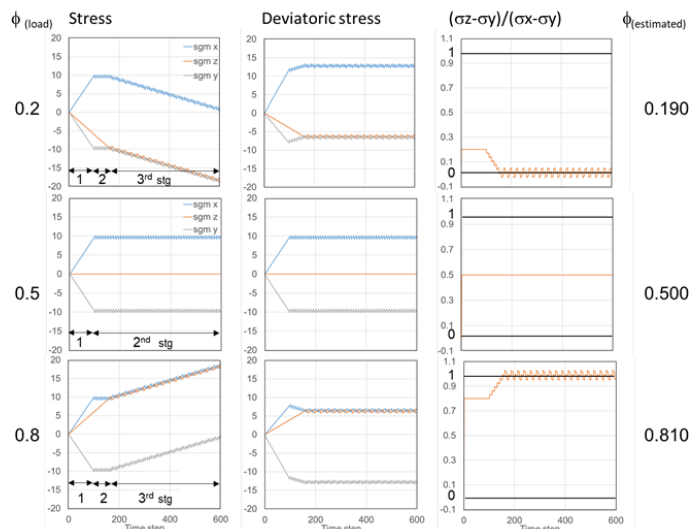


Figure 2
Column figures show temporal variations of stresses, deviatoric stress, and in-situ stress ratio, respectively. Coordinate system is shown in Fig. 1b. Colors in the figures are shown in legend. Stress ratios of given loaded from outside and estimated are indicated in the left and right of the column figures. Row corresponds to case for different loaded stress ratio. Arrows show stages of stress condition.

Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

*Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

地震の震源特性を理解するためには、地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c 、応力降下量 $\Delta\sigma$ などの震源パラメータを推定することが基本となる。地震モーメントとコーナー周波数のスケーリング則(相似則) $M_0 \propto f_c^{-3}$ が成り立つとすれば、応力降下量は地震の規模に依らず一定の値を取ることが知られている。このような震源スケーリングや応力降下量のばらつきを調べることは、震源物理の理解だけでなく、将来起こり得る地震の強震動予測の向上のためにも重要であると言える。

本研究では、2016年熊本地震系列における余震の震源分布に焦点を当て、そのうちの318イベントを対象としたS波コーダスペクトル比法による震源パラメータの推定を行い、応力降下量のばらつきやその要因について調べた。解析は、基本的にSomei et al. [2014]の手順に倣って、観測記録から震源スペクトル比を求めた。観測記録は防災科学技術研究所(以下、防災科研)高感度地震観測網Hi-netの観測点から7点、熊本地震合同地震観測グループによる観測点から9点の計16点における速度波形データを用いた。1–30Hzの周波数帯におけるSN比(Signal-Noise Ratio; SNR)が2以上という条件を満たす地震波形データを用いて、地震モーメント比・親地震と子地震のコーナー周波数の計3つの未知パラメータを非線形最小二乗法によるインバージョンで推定した。親地震の地震モーメントは防災科研広帯域地震観測網F-netのメカニズム解による値で固定し、地震モーメント比から子地震の地震モーメントを推定した。

解析の結果、地震モーメントはコーナー周波数に対して $M_0 \propto f_c^{-4.35}$ の関係に従う様子が見られた。一般的に知られるスケーリング則である $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係は破綻しており、規模依存性を示唆する結果となった。また、推定されたコーナー周波数と地震モーメントを用いて、地震断層を円形クラックと仮定して応力降下量を推定した[Eshelby, 1957; Brune, 1970, 1971]。対象とした318イベントの応力降下量は0.21–17MPaの間でばらついており、幾何平均は2.6MPa($-1\sigma/+1\sigma$ はそれぞれ1.2, 5.5MPa)であった。過去に日本国内で発生した内陸地震の応力降下量[Somei et al., 2014]と比較すると、本研究の推定値は空間的なばらつきの範囲内であった。一方、本研究では詳細に推定精度を検討したところ、熊本地震震源域内においても地震の規模や震源深さに対する有意な依存性が認められ、いずれも正の相関を示した(相関係数はそれぞれ0.47, 0.43)。これらは当震源域における地震の発生メカニズムを考えるうえで重要な結果である。

謝辞：解析において、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net、広帯域地震観測網F-net、気象庁のデータも用いました。記して感謝申し上げます。

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

[S09]PM-2

chairperson:Shiro Ohmi(DPRI, Kyoto University), chairperson:Akemi Noda(MRI)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-03] Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

○Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5.Institute of Statistical Mathematics)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-04] Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

○Ichiro Kawasaki¹ (1.Tono Research Institute of Earthquake Science)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-05] Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

○Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-06] Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

○Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹ (1.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

*Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at Meteorological Research Institute, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5. Institute of Statistical Mathematics

地殻内の歪みエネルギーを用いて断層破壊が進展することを考慮すると、地震発生層内に蓄積した歪みエネルギーの分布を明らかにすることは、地震の発生メカニズムを理解する上で重要である。本研究では、歪みエネルギーのうち地震発生との関係が深いと考えられるせん断歪みエネルギーに注目し、2016年熊本地震によるせん断歪みエネルギー変化を、地殻内の3次元空間分布として定量評価した。

地震時のせん断歪みエネルギー密度変化の空間分布を求めるには、地震による応力変化と背景応力場を知る必要がある。地震時の応力変化については、GNSS観測による地震時の地表変位データから断層すべりモデルを推定し、半無限弾性体を仮定してこのすべりモデルによる周辺地殻内の応力変化分布を計算した。一方、背景応力の向き（主応力軸の方向・応力比）は対象地域で発生する地震のメカニズム解から推定可能だが、その絶対値を知ることは難しい。そこで本研究では、背景応力の向きについてはTerakawa and Matsu'ura (2010) による応力インバージョンの結果を用い、背景応力の大きさは地殻内の摩擦強度に従うと仮定した。この際、地殻の有効摩擦係数として $\mu_{\text{eff}}=0.0, 0.1, 0.2, 0.4$ を候補に設定し、それぞれの場合のせん断歪みエネルギー密度の変化量を算出したところ、その空間分布のパターンは背景応力のレベルに強く依存することが分かった。背景応力の大きさがゼロであることを意味する $\mu_{\text{eff}}=0.0$ の場合、せん断歪みエネルギー密度は全ての場所で増加した。一方、摩擦係数が大きい場合（ $\mu_{\text{eff}}=0.4$ ）は、背景応力と地震による応力変化が同じ向きの地点でせん断歪みエネルギー密度が増加、逆向きの地点で減少した。

次に、以上のように得られたせん断歪みエネルギー密度変化を積分して、地震によるせん断歪みエネルギー変化の総量を計算した。 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ のケースでは、地殻内のせん断歪みエネルギーの総量は増加した。地震が地殻内に蓄積したエネルギーを解放する物理プロセスであることを考慮すると、これは不合理な結果である。その他のケースではせん断歪みエネルギーの総量は減少し、背景応力レベルが大きいほど減少量が大きいことが分かった。 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ のケースで見られたエネルギー増加の不合理を避けるには、有効摩擦係数は0.05以上でなければならない。これは深さ10 kmで最大せん断応力14 MPaに対応する。このように、せん断歪みエネルギー変化の総量の議論から背景応力レベルの下限値を拘束することができた。

最後に、 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ 以外のケースについて、せん断歪みエネルギー密度変化の空間分布と、熊本地震本震後1週間のうちに発生した余震の震源分布を比較した。その結果、せん断歪みエネルギー密度増加域と余震発生域には相関が見られ、余震の総数のうち凡そ75%がエネルギー密度増加域で発生していたことが分かった。余震が完全にランダムに発生したと仮定して100,000通りの余震データセットを合成し、テスト解析を行ったところ、せん断歪みエネルギー密度増加域で75%以上の余震が発生する確率は、0.001%より小さかった。従って、熊本地震の場合、せん断歪みエネルギーの増加と余震活発化の関連性は統計的に有意だと考えられる。本震の震源断層近傍ではエネルギーの増加で説明できない余震が発生したが、これらの余震発生を理解するには間隙水圧の増加による強度低下などの別の物理プロセスを考慮する必要がある。

Reference:

Noda, A., Saito, T., Fukuyama, E., Terakawa, T., Tanaka, S., and Matsu'ura, M. (2020). The 3-D spatial distribution of shear strain energy changes associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence,

southwest Japan, Geophysical Research Letters, 47, e2019GL086369.

<https://doi.org/10.1029/2019GL086369>

Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

*Ichiro Kawasaki¹

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

●2020年4月22日、驚いたことに飛騨上高地群発地震が再来した。たった20年程で激しい群発地震活動が再来したことは熱水が原因であることを示している。本発表は、気象庁HPの「震度データ検索」によって検索・作図した分布図を手掛かりに、そのメカニズムを探る試みである。

●1998年と2020年で、南北0.2分(0.37km)、東西2分(0.30km)以内で発生したM4以上の地震の組み合わせを探すと、表1のように、XA1, XA2, XB, XCの4地点が見出された。これらの地点は群発活動域が特定の時空間に移動したときの最初のM3以上の地震、あるいはそれに近いことに気が付いたので、時間区切りを「日」では無く、必要に応じて「時」、「10分」に下げると、群発地震活動は、図1のように時空間的に分離することが明瞭になった。2020の群発地震は、この予稿を準備している段階でM2以上の地震では槍ヶ岳周辺で停止してしまっているが1998年の時には富山・長野・岐阜県境まで拡大したので図には1998年の分布を示したが、時空間的に分離したことは2020年でも明瞭である。2回とも同じ区間区切りで時空間的に分離が生じたので、それは偶然ではない。

●1998年8月7日に始まった飛騨上高地群発地震と今回の群発地震のM2以上の群発活動域は、図1のような共通の区間区切りで「時空間的に分離」して移動した。図の区間を、南から北に向かって(A)(北緯36度15.5分以南。上高地周辺。地震の深度6kmから4km)、(B)(同15.5分から16.7分。西穂高岳東南側。深度6kmから4km)、(C)(同16.6分から18.8分。西穂高北側。深度5kmから4km)、(D)(同18.8分から22.3分。槍ヶ岳西山腹。深度4kmから1km)、(E)(同22.3分以上、槍ヶ岳から野口五郎岳。深度2kmから0km)と名付ける。なお、発生深度は6kmから4kmと述べた場合は深度6.5kmから3.5kmを意味する。

●特異な例を挙げておこう。

期間[2]には(C)が活動域になった。8月14日11時34分に3.1、14時6分にM4.2の地震(深度3 km)が発生し、活動域は西穂高岳尾根部に向かって「南」に延びて行った。この時空間の群発活動は「半日程」で沈静化した。

期間[3]には活動域は(B)に移動した。同日23時52分、長野県側の南端近くでM4.0(深度5 km)の地震が発生し、活動域は西穂高岳尾根部に向かって「北」に延びて行き、この時空間の群発活動は「1日程」で沈静化した。

●(A)から(D)の様に「空間的に分離」していることは、区間境界(例えば西穂高岳尾根部直下)に、熱水の移動を妨げる境界面があることを意味しているとしか考えられない。

「時間的に分離」していることは、地震発生域に熱水が充満して群発地震活動を引き起こしているのでは無いことを意味している。直接的な証拠は無いが、それは、「群発地震活動域の下に熱水混合層が上記区間におおよそ対応するように分離して分布しながらも、熱水脈で細々と連結して水圧は共有している。ある区間で水混合層から突破的に熱水が溢れ出して地震活動が生じると熱水混合層全体で水圧が下がり、今まで地震活動が生じていた場所では地震活動が終息する。そのようなサイクルを区間を変えて繰り返したこと」を意味しているように思われる。このようなモデルで無ければ「活動域の時空間分離」を説明することは困難であろう。

●立山・黒部地域では黒部峡谷の直下に熱水混合層が分布することは、川崎(2019, 測地学会)が1996年集中観測による地殻構造(Matsubara, et al, 2000)や重力異常データによる超低密度域(源内・他, 2002)などに基づいて議論した通りである。

槍・穂高・上高地地域にはその様な研究成果はないが、Mikumo et al. (1995)による上宝観測所や高山観測所の観測データのトモグラフィー、水谷・他(1983)による奥飛騨温泉郷の深さ700 mの地熱調査井の変質鉱物組成、温泉水の化学組成、酸素・炭素同位体比の研究、焼岳の山頂の160℃程の火山ガスのヘリウム3/4比などから、地下数kmに熱水混合層が分布することは疑えない。むしろ、群発地震の活動域の「時空間的分離」こそが熱水混合層存在の強力な状況証拠であろう。

●以上はM2以上の地震による飛騨上高地群発地震像である。M2以下の微小地震で見ればもっと多彩な活動をしている（大見，私信）。両方を合わせれば群発地震の全体像になるのであろう。

	発生日	時刻	北緯	東経	深度	M
XA1	1998/08/09	12:45	36° 14.5′	137° 38.3′	4km	M4.6
	2020/04/27	11:32	36° 14.7′	137° 38.3′	5km	M4.8
XA2	1998/08/12	09:40	36° 14.2′	137° 39.0′	4km	M4.6
	2020/04/23	13:57	36° 14.1′	137° 39.0′	5km	M5.0
XB	1998/08/14	23:52	36° 15.8′	137° 38.0′	5km	M4.0
	2020/05/13	10:28	36° 15.7′	137° 38.1′	3km	M4.8
XC	1998/08/14	14:06	36° 17.8′	137° 37.6′	3km	M4.2
	2020/05/19	14:23	36° 17.6′	137° 37.7′	3km	M4.7

表 1 緯度0.2分
(0.37km)，経度
0.2分 (0.30km)
以内で，1998年と
2020年に発生した
M4以上の地震の
組み合わせ。

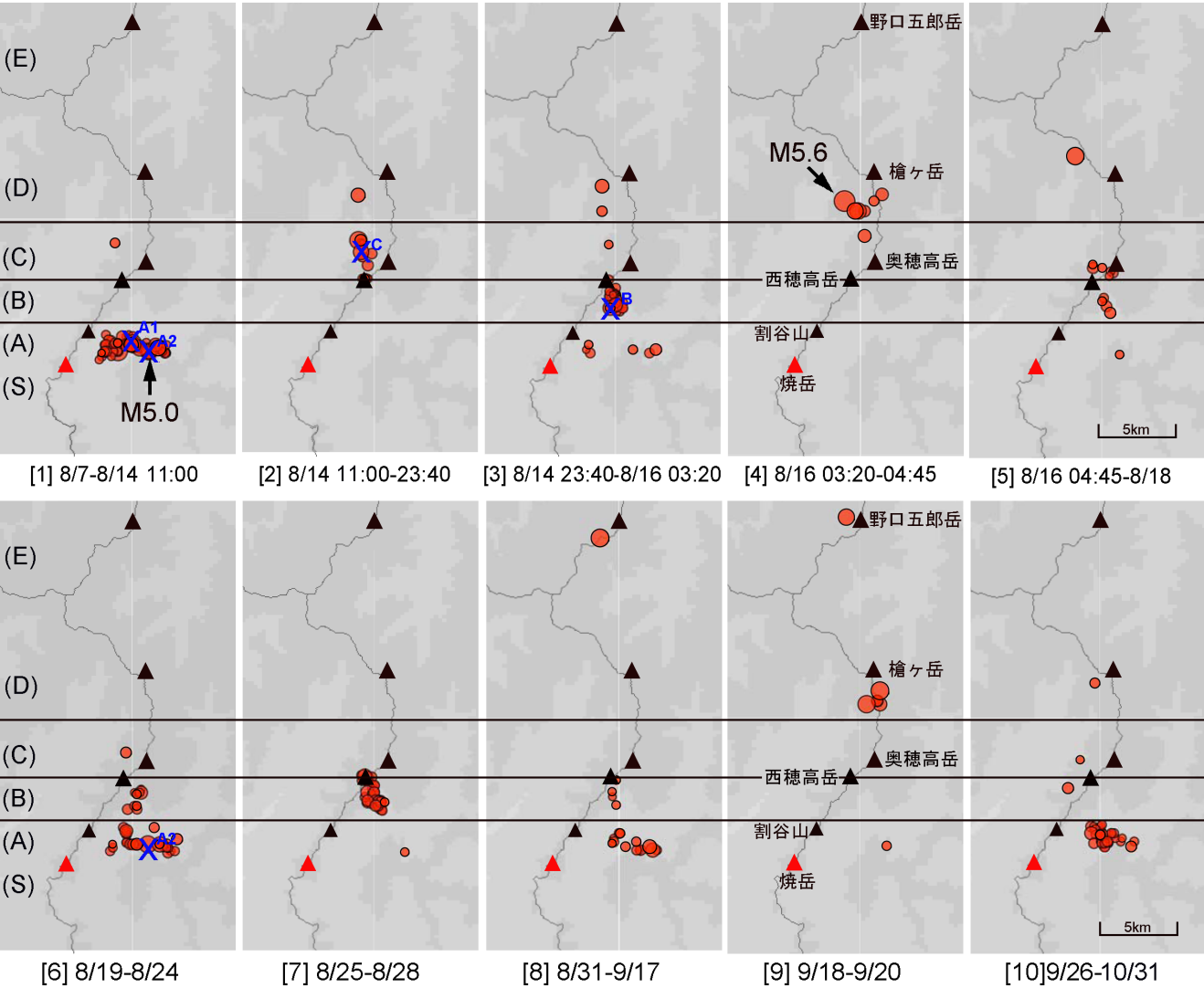


図 1 1998年飛騨上高地群発地震の期間 [1] から [10] のM2以上の地震の震央分布。
気象庁HPの「震度データベース検索」によって作図した震央分布を加筆編集した。

Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

*Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

§はじめに：飛騨山脈南部の上高地およびその周辺において、2020年4月23日のM=5.5（以下、Mは気象庁マグニチュード）の地震を最大地震として（2020年8月下旬現在）、活発な地震活動が続いている。今回の地震活動は、4月6日の上高地徳本峠付近での小規模な群発地震で始まったと考えられる。その後若干の震源移動と消長を繰り返した後、4月22日未明にM=3.8を含む地震が徳本峠付近の4月6日の活動域とほぼ同じ位置で発生し、翌日4月23日13時44分にM=5.5の地震が発生した。その後、上高地の谷底から岳沢にかけての地域に震源域が拡大し、5月13日早朝からの活動で飛騨山脈主稜線（岐阜・長野県境）の近くまで震源域が拡大した。5月19日13時12分の地震（M=5.4）において震源域が主稜線の岐阜県側に拡大し、その後は、長野県側と岐阜県側の双方で散発的な活動が継続している。

§過去の群発地震との比較：飛騨山脈の南部の、主に鷲羽岳から焼岳付近は断続的な群発地震が頻発する地域で、京大防災研が1970年代後半に地震観測を開始して以来、既往研究によれば、主な群発地震活動が1990～1991年（焼岳および烏帽子岳付近）、1993年6月～1994年1月（槍ヶ岳）、1998年8月～2000年2月（飛騨山脈群発地震）、2011年3月～4月（東北地方太平洋沖地震直後の群発地震）、2014年5月（西穂高・千石尾根付近）、2018年11月～2019年1月（焼岳西麓および上高地）などに発生している。また、小規模ながら、上述以外にもたとえば2003年12月の焼岳北東域や2013年10月の涸沢付近などにもクラス的な地震活動が見られた。これらのうち、1998年の活動は、1970年代後半以降では最大の活動であった。同地域で発生する群発地震の震央分布をみると、2018年の活動までは大まかにみるとそれぞれの震源域が重なっておらず、震源域が「棲み分け」をする現象が観察される。また、過去の大部分の活動では一連の活動の震源域が飛騨山脈の主稜線を越えることはなく、岐阜・長野のいずれかの側に限定されることが特徴であり、これまでの唯一の例外が1998年の活動であったが、今回の2020年の活動は5月19日の段階で長野側から岐阜側へ震源域が拡大し、1990年代以降2度目の例となった。

§地殻変動データの解析：京大防災研は、焼岳中尾峠、焼岳山頂などで焼岳火山の研究観測の一環としてGNSS連続観測を実施している。また、焼岳西側山麓の奥飛騨温泉郷中尾、同・栃尾でも別プロジェクトでGNSS連続観測を継続中である（京大・名大・北大の共同運用）。これらのデータに、気象庁の焼岳南峰南東および大正池南の観測点のデータを加えて、栃尾を基準点として解析したところ、4月下旬から一部の観測点で有意な地殻変動が検出され、5月中旬にはほぼ全ての観測点で変動が加速した。今回の地震活動は、M=5.0以上の地震を複数個含む活発なものであるが、GNSSで観測された地殻変動は、地震の断層運動による地殻変動の寄与だけでは観測された変動量を説明できないことがわかった。そこで、開口断層を仮定して変動源のパラメタを推定したところ、上高地の谷底から西穂高岳の稜線にかけての位置、および西穂高岳と奥穂高岳の中間付近の稜線を跨ぐ位置に、それぞれ北西～南東方向のほぼ鉛直な開口断層（総体積変化量 $2.4\sim 2.5\times 10^6\text{m}^3$ ）を置くことにより、変動量を説明できることがわかった。なお、InSARによる解析によれば、焼岳北東斜面には長期的な膨張が認められているが（たとえば、気象庁、第143回噴火予知連絡会資料）、今回の地震活動の開始前後の比較では有意な変動は認められない。

§考察：上で求められた開口断層の位置と、防災科研のF-netにより求められた、活動期間中の主だった地震の発震機構解を比較すると、求められた開口断層の周辺に発生した地震の発震機構解にはNon Double Couple成分が大きな地震が多く見られており、今回の解析の妥当性を示すものと考えられる。今回の活動は、(1) 過去

の活動の震源域と「棲み分け」をせず1998年の震源域に重なるように発生した、(2) 飛騨山脈の主稜線を跨ぐように震源域が拡大した、の2点で特異である。また、直近の2018年の群発地震活動では、すでに現在と同様のGNSS観測網が稼働していたが有意な地殻変動は検出されなかった。このようなことから類推すると、当地域で発生する群発地震のうち、主稜線を跨ぐような規模の大きな地震活動ではダイク貫入イベント等を伴う可能性があり、今回の活動だけではなく、1998年の活動もその一つであった可能性がある。2018年の活動のような地殻変動を伴わない群発地震の発生メカニズムの考察は今後の課題である。

§謝辞：気象庁からGNSS観測データを提供していただいた。記して感謝する。

Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

*Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹

1. Nihon University

1.はじめに

火山地域では深部低周波地震と呼ばれる通常の構造性地震に比べて卓越周波数が低い地震が深さ10～50kmで発生する。深部低周波地震は火山深部のマグマの活動と関連して発生すると考えられているが、詳細なメカニズムは明らかになっていない。

飛騨山脈の長野県と岐阜県の境界に位置する焼岳でも深部低周波地震活動が見られる。この地域では2020年5月2日から3日にかけて、20時間以上にわたり、規模の小さい深部低周波地震が連続的に発生した。本研究では、この連続的な深部低周波地震活動のスペクトルの時間変化について述べる。

2.焼岳の深部低周波地震活動の概要

気象庁の一元化震源カタログによると、焼岳近傍では通常の構造性地震が深さ0～10 kmで、また深部低周波地震が深さ10～40 kmで発生している。深部低周波地震は焼岳の北から北西にかけて、東西に10km、南北に5kmの範囲を中心に発生している。この活動は2つの群に分かれて活動し、東側の群は主として深さ20～35 kmで発生、西側の群は主に深さ10～20 kmで発生し、西ほど浅くなる傾向がある。西側の群は東側の群に比べて活動度は低い。

焼岳周辺の深部低周波地震は大見他(2003)で指摘しているように群発的に発生する傾向が強い。2004年以降は、2004年に群発的な深部低周波地震活動が起こって以降、この活動ほど顕著ではないものの、数年に一度続発的な活動が見られ、2019年以降、活動度は高くなっていた。

3.2020年5月の活動

2020年5月2日～3日にかけて非常に規模の小さい深部低周波地震が連続的に発生した。気象庁の一元化震源カタログによると、これらの連続的な深部低周波地震のマグニチュードは-0.9～0の範囲で、西側の浅い群に属し、深さは10～20 kmに決められている。国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net（以後、Hi-netと略す）の観測点の連続地震記録を見ると、この連続的な活動は2020年5月2日の正午ごろに始まっており、2020年5月3日の15時ごろに収束している。

4.2020年5月2日～3日の連続的発生のスペクトル

5月2日～3日の深部低周波地震活動について、鵜川(2020)と同様のウェーブレット解析を適用して、スペクトルの時間変化を調べた。ウェーブレット解析は低周波振動の中に高周波が重畳する場合に有効である。アナライジング・ウェーブレットとして下記の式で与えられるMorletのウェーブレットを採用した。

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$$

ここに η は無次元のパラメーター、 ω_0 は無次元の周波数パラメーターである。計算方法はTorrence and Compo(1998)に従った。本研究では、ウェーブレット解析結果から2秒間のスペクトル強度が最大となる周波数を、時間をずらしながら読み取ることで卓越周波数の時間変化の検出を試みた。地震波形データはHi-netの

100Hzサンプリング波形データを使用している。

その結果、図に示すようにHi-net観測点N.KOKH（神岡）では2020年5月2日18時頃から1Hz～2Hz程度の振動が連続的に卓越するようになり、2020年5月3日3時頃に2Hz程度の顕著な振動は見られなくなったが、1Hz程度の振動は2020年5月3日14時頃まで顕著に続いているということがわかった。同様の傾向がHi-net観測点N.KTRH（上宝）でも観測されている。

5.考察とまとめ

深部低周波地震が噴火や火山浅部の群発地震活動と同期して活発化する事例（例えば1991年ピナツボ火山噴火や1998年岩手山）があり、深部低周波地震が火山深部のマグマ活動と関連して発生していることを示していると考えられている。

焼岳近傍では2020年4月22日から地殻浅部の東北東側を中心に群発地震活動が活発化していた。5月2日～3日に発生した深部低周波地震の連続的活動は、この群発地震活動の活発な期間に発生している。浅部の群発地震と深部低周波地震の震央は一致していないが、深部からのマグマなど、火山性流体の移動を示している可能性がある。

本研究では、5月2日～3日に焼岳近傍で深部低周波地震が連続的に発生し、その卓越周波数が1～2Hzから1Hz程度に時間変化したことを明らかにした。今後、震源の精査と卓越周波数が変化するメカニズムを明らかにすることが課題である。

6.謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netの地震波形データを使用した。また、図の作成にはGMT6を使用した。記してここに感謝いたします。

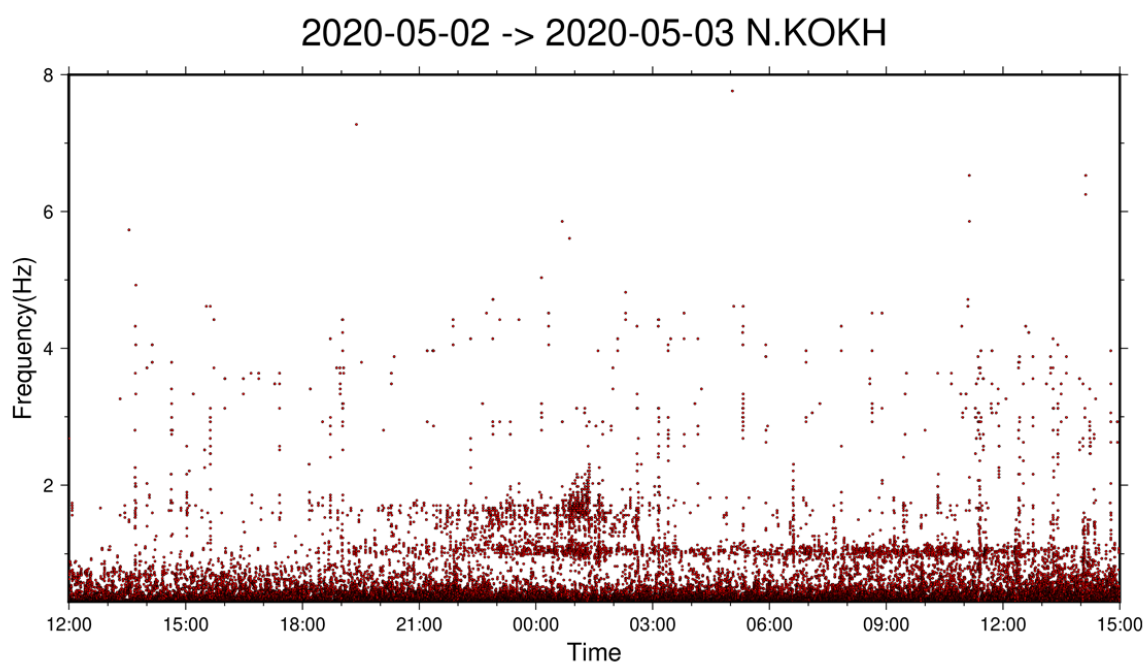


図.Hi-net観測点（N.KOKH）における5月2日12:00～5月3日15:00の卓越周波数の変化

Room C | Regular session | S06. Crustal structure**[S06]PM-1**

chairperson:Gou Fujie(JAMSTEC)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM C

[S06-01] Mapping outer rise faults in the southern Kuril Trench

○Shuichi Kodaira¹, Tetsuo No¹, Gou Fujie¹, Koichiro Obana¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Kentaro Imai¹, Toshitaka Baba², Naotaka Chikadasa³, Yuichiro Tanioka⁴ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Tokushima University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Hokkaido University)

1:00 PM - 1:15 PM

[S06-02] Crustal structure in the Kuril Trench subduction zone off Hokkaido, Japan, by a dense linear OBS-array seismic survey

Ryosuke Azuma¹, Shuichi Kodaira², Ryota Hino¹, Go Fujie², Koichiro Obana², Fumiaki Tomita², ○Yusaku Ohta¹ (1.RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

1:15 PM - 1:30 PM

[S06-03] 3-D structure and seismogenesis in the East Japan forearc derived from S-net data

○Dapeng Zhao¹, Y. Hua¹, G. Toyokuni¹, Z. Yu¹ (1.Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-04] Seismogenic source fault models in and around the Sea of Japan

○Hiroshi Sato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Tetsuo No², Kodaira Shuichi², Naoko Kato¹, Johan S Claringbould, Makoto Matsubara³, Akinori Hashima¹, Masahiro Ishikawa⁴, Takeshi Sato⁵
(1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4.Yokohama National University, 5.Sapporo Regional Headquarters, JMA)

1:45 PM - 2:00 PM

[S06-05] High-resolution tomography analysis in north-central Kinki region

○Shinya Katoh¹, Yoshihisa Iio², Junichi Nakajima³, Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (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, 3.Dept. of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology)

2:00 PM - 2:15 PM

Mapping outer rise faults in the southern Kuril Trench

*Shuichi Kodaira¹, Tetsuo No¹, Gou Fujie¹, Koichiro Obana¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Kentaro Imai¹, Toshitaka Baba², Naotaka Chikasada³, Yuichiro Tanioka⁴

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Tokushima University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Hokkaido University

プレート境界浅部巨大地震発生後に海溝海側斜面（アウターライズ）の海洋プレート内で地震活動が活発化することは過去の観測事例から指摘されており、1933年昭和三陸地震や2007年千島海溝地震のように海洋プレート内でM8クラスの巨大正断層地震が発生した事例もある。本研究の対象領域である千島海溝南部では今後30年以内にプレート境界巨大地震（M7.8-8.5）が発生する確率は80%程度と見積もられているが、海溝海側の領域では過去の地震に関する情報がほとんどなく地震・津波の発生評価が行われていない。そこで我々はアウターライズ地震震源断層マッピングとその情報に基づく津波評価に関するプロジェクトを開始した。震源断層マッピングに向けては、先行研究で作成した日本海溝アウターライズ断層マップと統合するため、先行研究と同様なデータ（詳細海底地形データ、地震探査データ、地震活動データ）、同様な基準に基づいて断層パラメータを決定する。これまでに詳細海底地形のコンパイル、及び根室一釧路沖において約20km間隔で設定された海溝に直交する4本の測線で反射法地震探査データを取得し処理を進めた。データ取得にはJAMSTEC深海調査研究船「かいれい」に搭載された大容量エアガン(5850-7800 cu. inch)・長大ストリーマケーブル（チャンネル数444 ch., チャンネル間隔12.5m）を用いた。反射法探査の結果からは海洋地殻基盤を切る明瞭な正断層群が確認でき、それらの断層は海溝軸から約40km付近から顕著になる。また、ほぼすべての断層が南東傾斜（海側に傾斜）であり海洋地殻基盤はhalf-graben構造を形成している。先行研究の日本海溝アウターライズでは東・西落ち双方の傾斜を持つ断層からなる断層系が発達しhorst-graben構造を形成していた。この断層形態の違いは、海洋地殻生成時の断層が再活動している千島海溝と、プレートの折れ曲がりにより海溝付近で形成された新しい断層が活動している日本海溝での断層形成過程の違いに規定されている可能性がある。今後、釧路一襟裳沖で新たな地震探査データを取得し、日本海溝アウターライズ断層系との形態や活動の違いにも着目しながら、千島海溝南部アウターライズ断層の走向、傾斜、断層の落差・長さ等の断層パラメータを求めるとともに、アウターライズ断層の発生過程について考察していく。

Crustal structure in the Kuril Trench subduction zone off Hokkaido, Japan, by a dense linear OBS-array seismic survey

Ryosuke Azuma¹, Shuichi Kodaira², Ryota Hino¹, Go Fujie², Koichiro Obana², Fumiaki Tomita²,
*Yusaku Ohta¹

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

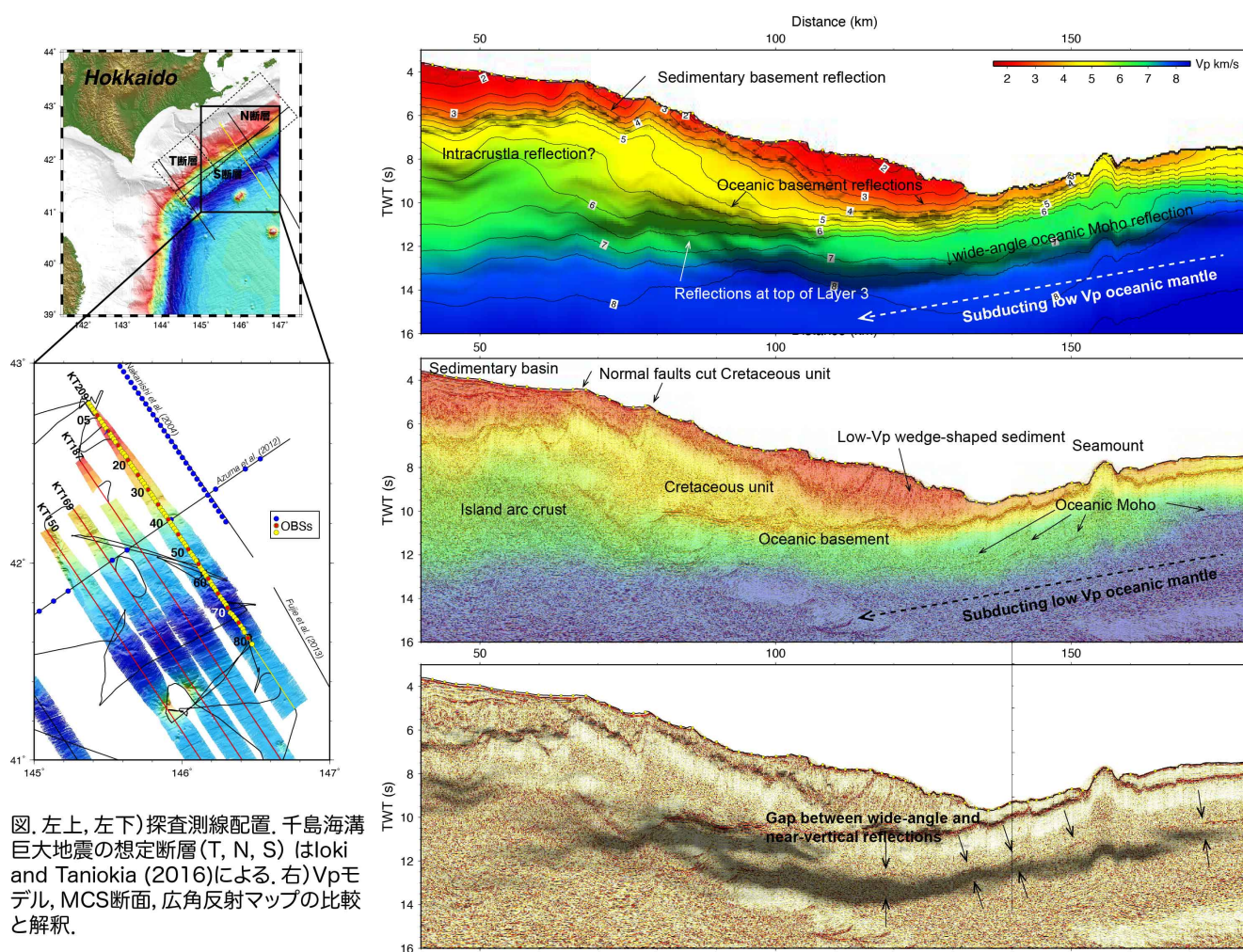
日本・千島海溝沈み込み帯は太平洋プレートの沈み込にかかわって地震・火山が活発に活動する領域である。両海溝域での地殻構造探査により、沈み込み直前に形成されるプレート曲がり断層の発達によって含水化が大きく進んでいる可能性が指摘され、火山活動に必要な水の地球内部への輸送過程が理解されつつあるが、こうした含水化の状態は陸側プレート下まで連続的に把握できていないのが現状である。一方、地震発生に着目すると、2011年東北沖地震の巨大津波の要因となった'slip to the trench'には海溝すぐ陸側の構造が関係することが、反射法探査から明らかとなりつつある。日本海溝に隣接する千島海溝ではプレート境界巨大地震の発生が今後30年以内に非常に高い確率で予測され、東北沖地震に類似して'slip to the trench'を起こす可能性がある。海溝周辺の地震学的構造の理解はこれらの固体地球現象の理解のために非常に重要であるが、日本・千島海溝とも、海底地震計（OBS）の耐圧水深の制約のために先行研究で詳しく把握されていない。本研究は巨大地震発生前の根室沖千島海溝域の構造探査を通して、東北沖地震震源域での知見をもとにプレート境界周辺構造と浅部すべりの関係を議論するとともに、太平洋プレートの沈み込み過程の理解を深めることを目的とする。本観測では大水深の海溝軸に設置可能な超深海OBSを導入し、同区間の構造イメージの分解能向上を図った。

構造探査は2019年に海洋研究開発機構の「かいいい」KR19-07航海および「よこすか」YK19-12航海により実施された。アウターライズ域から海溝軸を跨ぎ千島前弧斜面上部に至る全長208 kmの測線沿いにOBS 80台を約2 km間隔で設置し、総容量7,800 cu.in.のエアガンアレイを200 m毎に発震した。屈折法と同時に、マルチチャンネル・ハイドロフォンストリーマー（全長5.5 km、444 ch）を曳航してMCS反射法探査も行った。海溝より陸側では別途、50 m発震でも探査を行った。全てのOBSで震央距離70~200 kmにわたる連続的なP波初動が観測され、44,261個の読み取り値を得た。後続には、見かけ速度から堆積層基盤、プレート境界付近、海洋モホ面の反射波と思われる相が観測された。

本研究ではP波速度（Vp）モデルの推定に初動走時インバージョン（Fujie et al., 2013）を用い、初期モデルの依存性をモンテカルロ法（例えば、Korenaga et al., 2000）によって評価する。ここでは500個の初期モデルを生成してインバージョンを行い、 $\chi^2 < 1.1$ （RMS走時残差~60 ms未満）を満たした492個の平均を最終モデルとした。最終モデルの標準偏差分布および分解能テストから、海溝陸側では深さ25 km、海溝海側では深さ20 km以浅で良く解像できたといえる。さらに、走時マッピング法（TMM, Fujie et al., 2006）によって反射波分布を推定した。

先行研究（Nakanishi et al., 2004; Fujie et al., 2018）を参照し最終モデルを解釈すると、陸側斜面上部の最浅部に斜面上部から海溝軸にかけて鉛直速度勾配の大きい低Vpの堆積物（2~4 km/s）が分布し、海溝から30 kmの範囲では太平洋プレート上にウェッジ状に分布する。堆積層の下に勾配の小さい白亜紀層（4~5.5 km/s）と島弧地殻（5.5~6.5 km/s）が分布する。白亜紀層上部には凸形状の特徴があり、MCS断面で確認できる陸側傾斜の正断層面の分布と一致した。前弧斜面に発達した正断層は、強いプレート境界間固着のために陸側プレート下底が浸食され沈降していることを示唆し（von Huene et al., 1994）、探査海域が1973年根室沖地震の破壊域にあることと矛盾しない。同じく固着域である東北沖地震震源域にも正断層が存在する（Kodaira et al., 2017）点で共通する。今後、ウェッジ状堆積物の幅やプレート境界周辺の反射構造も含めて東北沖大すべり域と比較をすすめ、根室沖が'slip to the trench'を起こしうる場であるか考察する。

沈み込む太平洋プレートについて、Vp分布とモホ面反射との間に興味深い関係性を見出した。堆積層基盤反射面の下に大きな速度勾配を持つ海洋地殻第2層（4.5–6.5 km/s），その下に勾配が小さく高Vp（6.5–7.5 km/s）の海洋地殻第3層がそれぞれイメージされた。MCS断面に基づくと海溝直下のモホ面下のマントルVpは約7.5 km/sで、千島海溝の沖側遠方のマントル（ ~ 8.6 km/s, Kodaira et al., 2014）より有意に低速度である。すなわち、沈み込み前に含水化したマントルがそのまま島弧下に沈み込んでいる様子が捉えられた。一方で、TMMによるモホ面がMCSモホ面 비해往復走時で0.5秒ほど系統的に深い。この差はモホ面下数キロメートルまで達している蛇紋岩化深さ範囲（Fujie et al., 2018）とほぼ等しいことから、ひとつの解釈として、マントル最上部の蛇紋岩化により地殻–マントル間に厚みのあるモホ面遷移層（笠原・他, 2008）が形成されたことを示している可能性がある。



3-D structure and seismogenesis in the East Japan forearc derived from S-net data

*Dapeng Zhao¹, Y. Hua¹, G. Toyokuni¹, Z. Yu¹

1. Tohoku University

So far we have used the Kiban network data of suboceanic events relocated with sP depth phases to study the 3-D P and S wave velocity structure of the source zone of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake (Zhao et al., 2011; Huang & Zhao, 2013; Liu & Zhao, 2018). Significant structural heterogeneities are revealed in the Tohoku megathrust zone, which are correlated with the distribution and rupture processes of the large megathrust earthquakes ($M > 7.0$). However, the structure near the Japan Trench is still not very clear. Recently, we study the 3-D velocity structure of the entire forearc region off Eastern Japan using data recorded by both the permanent OBS network (S-net) and the Kiban seismic network on the land area (Hua & Zhao et al., 2020; Yu & Zhao, 2020). We used a large number of arrival-time data of local earthquakes during June 2002 to December 2018 recorded at 480 permanent stations of the Kiban seismic network and 120 OBS stations of the S-net. To conduct tomographic imaging of the East Japan arc, we selected many well-located local events that occurred beneath the Kiban seismic network and many suboceanic events that were recorded and located by the S-net. From the high-quality vertical-component seismograms recorded by the S-net, we picked P-wave arrival times generated by the local offshore events. The picking accuracy of the arrival times is estimated to be 0.05-0.15 s. Only arrival times of the events with well-located hypocenters (uncertainty < 3 km) are used in the tomographic inversion. The tomographic method of Zhao et al. (1992, 2011) is used to determine a high-resolution 3-D velocity model of the East Japan forearc. The well-determined geometries of the Conrad and Moho discontinuities and the upper boundary of the subducting Pacific slab are considered in the velocity model. The general pattern of the obtained tomographic model is similar to that of previous models (Zhao et al., 2011; Liu and Zhao, 2018), but our new model reveals a low-velocity (low-V) anomaly near the Japan Trench off Miyagi and Sanriku. The mainshock hypocenter of the great 2011 Tohoku-oki earthquake is located at the boundary between a down-dip high-velocity anomaly and the up-dip low-V anomaly. The slow anomaly at the shallow depths near the Japan Trench may reflect low-rigidity materials that are close to the free surface, resulting in large slips, weak high-frequency radiation, and the high tsunami on March 11, 2011. Our new tomographic model can explain not only the large slips near the trench but also weak high-frequency radiation from the shallow rupture areas.

References

- Hua, Y., D. Zhao, G. Toyokuni, Y. Xu (2020). Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake. *Nature Communications* 11, 1163.
- Huang, Z., D. Zhao (2013). Mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) and tsunami: Insight from seismic tomography. *J. Asian Earth Sci.* 70, 160-168.
- Liu, X., D. Zhao (2018). Upper and lower plate controls on the great 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science Advances* 4, eaat4396.
- Yu, Z., D. Zhao (2020). Seismic evidence for water transportation in the forearc off Northern Japan. *J. Geophys. Res.* 125, e2019JB018600.
- Zhao, D., Z. Huang, N. Umino, A. Hasegawa, H. Kanamori (2011). Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0). *Geophys. Res. Lett.* 38, L17308.

Seismogenic source fault models in and around the Sea of Japan

*Hiroshi Sato¹, Tatsuya Ishiyama¹, Testuo No², Kodaira Shuichi², Naoko Kato¹, Johan S Claringbould, Makoto Matsubara³, Akinori Hashima¹, Masahiro Ishikawa⁴, Takeshi Sato⁵

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Yokohama National University, 5. Sapporo Regional Headquarters, JMA

とくに2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波災害以降、日本海沿岸での津波災害についても着目されるようになった。どの程度の規模の津波が発生するのかという点については、資料の不足から不明な点が多く残されていた。2013年から開始された文部科学省の「日本海地震・津波調査プロジェクト」では、反射法地震探査を基軸とした地殻構造探査により、波源・震源断層モデルを構築し、津波・強震動を評価するという方法で検討を重ねてきた。ここでは、8カ年のプロジェクトによって得られた震源断層の矩形モデルと、それらの地殻構造上の特徴について述べる。

反射法地震探査データについては、海洋研究開発機構の長大ストリーマーと大容量エアガンにより取得し、沿岸については地震研が二船式を交えて、2-4 kmのストリーマーや1950 cu.inchのエアガンにより取得した。また、海陸統合測線として海底地震計と陸上の受振システムを展開し、エアガン・パイプロサイスの共通受振を行った。こうして得られた速度構造のデータは、石油公団などの既存の反射法地震探査データと合わせて、地殻・地質構造を理解する上で重要な資料となった。

震源断層の形状は、日本海形成時のテクトニクスと大きな関連を有している。日本海形成時に海洋地殻が形成された日本海盆と大和海盆、そして大陸地殻内のリフト帯の存在が弾性波速度構造の点から明らかになったことは大きな成果である。大陸地殻の伸展によるネッキングと海洋地殻を構成する苦鉄質岩の上昇により、大陸地殻との境界部には、リフトの外側に傾斜した緩傾斜の境界面が形成される。この面がその後の短縮変形場で逆断層となり、大規模な震源断層となる。1983年日本海中部地震はこうした地震の例である (No et al., 2014, EPSL)。日本海の拡大は、複数のリフト軸の活動によって達成され、とくに北日本の日本海側では秋田-山形堆積盆地や新潟-北部フォッサ堆積盆地、富山トラフ (Ishiyama et al., 2017, Tectonophys.)などにリフト構造が分布する。北日本では関東平野北西や鬼怒川低地帯など、分布が広範である。これらのリフト軸は帯状の周辺よりも高いP波速度を示す中・下部地殻を構成し、また地殻上部では厚い堆積層の分布により全体としては大陸地殻の薄化を示す。リフト軸と大陸地殻の境界には物質境界に起源をもつ低角度の震源断層が形成され、2007年中越沖地震はこうした地震の例である。また、大陸地殻内のリフト帯では地殻強度の低下により、褶曲断層帯が形成されている。リフト帯の縁辺以外の通常の伸展された大陸地殻部では、ハーフグラabenが普遍的に形成され、多くの震源断層は中角度の逆断層となっている。日本海東縁-北日本の日本海沿岸では、反時計回りの回転をとまなう日本海の拡大により、リフト期に形成された正断層群が、その後大きな横ずれ成分を示さない逆断層となり、断層のセグメントは伸張変形時の横断断層によって規制されている。

西南日本沖の日本海南部では、西南日本弧の時計回りの回転にともなって広く伸展された大陸地殻が分布し、西南日本弧と平行な正断層群が形成された。東北日本と大きく異なるのは、南海トラフでの熱い四国海盆の沈み込みが開始する6Ma程度まで、強い南北方向からの短縮変形を受けたことである。6Ma以降もNNW-SSE方向の圧縮応力は継続し、ほぼ垂直な同方向の断層を生み出した。その後、1Ma以降はフィリピン海プレートの変動方向の変化により、西南日本弧と平行な断層群は横ずれ断層として再活動しているが、日本海東縁に比べ再活動している断層の数は圧倒的に少ない。

震源断層の矩形モデルの構築に当たっては、音波探査などによって確認されている海底活断層の情報を重視し、その他、海底地形のパターンやより深部の情報により伏在断層を抽出した。断層の下限は、基本的には

Hi-netなどの観測網により求められD90に従ったが（松原ほか, 2020地震学会）、海域部分では観測網が未整備であるため、陸域の自然地震トモグラフィにもとづく推定構成岩石のレオロジーも考慮して推定した。大陸地殻内のリフトでは伸展された大陸地殻部分に比べ、苦鉄質岩が進入した領域ではD90が深く、こうした値を断層モデルにも反映させている。また断層のすべり角については、断層の姿勢をもとに、Terakawa & Matsu'ura (2010)の応力テンソルから求めている。とくに日本海南部では過去に応力場が大きく転換したために、すべり角の扱いが重要である。これらの震源断層モデルは、津波・強震動予測のみならず、測地データに基づく広域的な上盤プレートの三次元モデルでの応力状態の予測と合わせて、上盤プレート内地震の発生予測についても貢献するものである。

High-resolution tomography analysis in north-central Kinki region

*Shinya Katoh¹, Yoshihisa Iio², Junichi Nakajima³, Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka²

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, 3. Dept. of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

近畿地方中北部は微小地震活動が活発な地域である。この微小地震活動は特定の断層帯に沿って生じず面的に広がる活動であるということが知られているが、その成因は明らかになっていない。また、この微小地震活動が生じている直下の下部地殻には地震波低速度の薄い層である顕著なS波反射面の存在が明らかになっている(片尾. (1994), 加藤・他. (2019))。この地震波低速度のS波反射面の成因として流体の関与が指摘されていることから、この微小地震活動も流体の関与が考えられる。そこで、本研究ではこの微小地震が生じている近畿地方中北部の上部地殻における地震波速度構造を求め等価アスペクト比モデル(Takei. (2002))から流体量を推定し、特徴的な微小地震活動の成因を明らかにすることを目的として解析を行った。

近畿地方中北部には観測点間隔約5 kmの稠密地震観測網(満点システム; 三浦・他. (2000))が展開されている。本研究では、この稠密地震観測網とHi-netなどによる定常観測網で2009年から2013年の間に収録された地震波形を用いて、Zhao et al. (1992)による速度トモグラフィ解析を行った。

従来の定常観測網を用いたトモグラフィ解析のグリッド間隔は、その観測点間隔である約20 kmに制限されてしまうが、本研究では観測点間隔約5 kmの稠密地震観測網によるデータも用いることでグリッド間隔を5 kmに設定することができる。そのため、本研究ではトモグラフィ解析を行うときのグリッド間隔を水平方向5 km、鉛直方向2 kmに設定し、先行研究よりも高解像度で近畿地方中北部の地震波速度構造を求めた。

本発表では、高解像度で求めた地震波速度構造から等価アスペクト比モデルを用いて詳細な流体量を推定した結果を紹介し、微小地震活動の成因について議論する。

Room C | Regular session | S06. Crustal structure

[S06]PM-2

chairperson:ryosuke Azuma(Tohoku University)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM C

[S06-06] Wide-angle seismic survey off Muroto in Nankai trough

○Gou Fujie¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1.JAMSTEC)

2:30 PM - 2:45 PM

[S06-07] Temporal variation of seismic velocity structure in the vicinity of shallow plate boundary in the Kumano-nada region

○Takashi Tonegawa¹, Suguru Yabe² (1.JAMSTEC, 2.AIST)

2:45 PM - 3:00 PM

[S06-08] Receiver function imaging of the Philippine Sea plate subducting beneath Shikoku (3)

○Takuo Shibutani¹, Jun Nakagawa¹, Airi Nagaoka¹, Tsutomu Miura¹, Yusuke Yamashita¹, Ken'ichi Yamazaki¹, Shintaro Komatsu¹ (1.Kyoto Univ.)

3:00 PM - 3:15 PM

[S06-09] The P and S Wave Structure in the Shikoku Region from GA-based Simultaneous Determination of Hypocenters and Seismic Wave Velocity Structure

○Kota Murata¹, Motoo Ukawa² (1.Pacific Consultants co., Ltd., 2.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

Wide-angle seismic survey off Muroto in Nankai trough

*Gou Fujie¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC

プレート沈み込み帯では、巨大地震から、微小地震、低周波微動、そして非地震性滑りまで、海洋プレートと陸側プレートの境界部で多種多様な滑り現象が発生している。低周波微動や非地震性滑りは通常の地震発生域周辺で観測されるなど、これらの多様なプレート境界滑り現象はお互いに関連性があり、巨大地震の発生メカニズムを理解するという視点からも、多様な滑り現象をプレート境界部で生じる滑り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。

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・プレート沈み込み帯は、日本全国に展開されている稠密な陸上観測網に加え、海域定常観測点も世界に先駆けて展開されているなど、地震観測研究が充実した海域である。その結果、M8クラスの巨大地震が100~200年間隔で繰り返し発生してきたこと、その震源域はセグメントに分けられるが時に複数のセグメントが連動する場合があること、また低周波微動やスロースリップなど多様なゆっくり滑り現象が発生していることなど、世界でもっともプレート境界滑りに関する活動把握が進んでいる海域の一つである。加えて、海洋研究開発機構などによって多数の海域地下構造探査研究も実施されてきたことで、沈み込むフィリピン海プレートの大局的な3次元構造が明らかになっていることなど、地下構造研究も非常に充実した沈み込み帯である。

しかし、これらの研究の進展に伴い、海陸プレートの相対運動、プレート境界断層の形状や物性、温度構造など、さまざまな要因の複合的な影響によって決定付けられる多様なプレート境界滑り現象を包括的に理解するには、従来よりもさらに詳細にプレート境界断層の形状や物性などを把握していく必要があることも分かってきた。

そこで、海洋研究開発機構では南海トラフ域全体の地下構造研究の刷新を目指し、2018年度から新たな大規模で稠密な構造探査観測研究を開始している。この調査研究は、長大ストリーマーケーブルを用いた稠密二次元地震波反射法構造探査研究と、多数の海底地震計を用いた稠密地震波屈折法構造探査研究からなる。この一環として、2019年11月~12月、我々は室戸沖の土佐簗と呼ばれる海底地形の高まりを横切る海域で海底地震計を用いた地震波屈折法構造探査観測を実施した。土佐簗は海山の沈み込みに関係して形成された海底地形の高まりであると考えられており(たとえば Kodaira et al., 2000, 2002)、本調査観測では沈み込む海山付近の詳細なプレート境界断層の実態や海山沈み込みが前弧域の発達に与える影響などを把握し、この周辺で確認されている浅部低周波微動などプレート境界地震活動と比較議論することを目指し、2km間隔の稠密さで海底地震計を設置する調査測線を2km間隔で2本設定した。

海底地形の高まりである土佐簗は、その中央部を東西に横切る谷によって二つの高まりに分かれているが、本調査で得られた新しいデータを用いた走時トモグラフィー解析の結果から、この中央部の谷間には顕著な地震波速度の低速度域があることが分かってきた。この結果は、海底地形の高まりである土佐簗は従来考えられていたよりも複雑なプロセスによって形成されていることを示唆している。本講演では、初動走時を用いた地震波トモグラフィー解析により得られた大局的な二次元地震波速度構造モデルを元に議論を行う。

今後は、波形も用いたインバージョン解析により二次元地震波速度構造モデルを高精度化していく。将来的には、全てのデータを用いて3次元的な解釈にも進める計画である。

Temporal variation of seismic velocity structure in the vicinity of shallow plate boundary in the Kumano-nada region

*Takashi Tonegawa¹, Suguru Yabe²

1. JAMSTEC, 2. AIST

海底定常観測網の設置により、海底下における地震波速度構造の時間変化の事例が報告されつつある（例えば、Ikeda and Tsuji, 2018; 利根川・他, 2020, JpGU）。しかし、先行研究では表面波を使用しているため、どの深さで構造の時間変化が起きているかの特定が難しいという問題点もある。そこで本研究では、南海トラフ域に設置された地震・津波観測監視システム（DONET）のノイズ記録に地震波干渉法を適用し、海底下からの反射波の抽出が可能かどうかを検証した。もし反射波を定常的に抽出することができれば、その近傍の構造の時間変化に関する情報を抽出することが可能となる。

使用した記録はDONET1（熊野灘）の広帯域地震計記録で、期間は2011-2019年末までである。サンプリング間隔は100 Hzで、サイト増幅率を補正した後（Yabe et al. 2019）、80秒間ごとに上下動成分と水平成分を用いてデコンボリューションし、その処理後の波形を30日間スタックすることでPs反射波の抽出を試みた。このとき、水平成分はプレートの傾斜方向（N30°W）に回転させた。スタック波形に現れる振幅がどの深さから到来したのかを調べるため、時間領域のスタック波形を各観測点下の地震波速度構造（Tonegawa et al. 2017）を用いて深さ方向に変換し、その結果と構造探査による結果を比較することで反射波の特定を行った。

結果では、付加体先端部に設置された6観測点において、構造探査で得られた付加体内部の反射面（ここではデコルマと仮定）、分岐断層、海洋性地殻に対応すると考えられる北傾斜のPs反射波を抽出することができた。ここで、デコルマや分岐断層に対応するものは周波数帯域3-6 Hzで、海洋性地殻に対応するものは2-4 Hzで抽出できた。この周波数帯域の違いはそれぞれの境界面のシャープネスを反映していると考えられる。また、このようなPs反射波が本当に発生するのかどうかを確認するため、熊野灘で行われた構造探査の記録を用いてPs反射波の抽出を試みたところ、3-6 Hzで北傾斜の反射面を確認できた。このことから、ノイズ記録で抽出したものはPs反射波であると考えられる。

時間変化の結果を議論するために、まず、デコルマおよび分岐断層からのPs反射波を Ps_1 、海洋性地殻上面からのものを Ps_2 と定義し、これらの走時やそれらの差の時間変化を調べることで、付加体上部とプレート境界近傍の時間変化を議論する。まず、付加体先端部に設置されたKMB, KMC, KMDでは、 $T(Ps_1)$ と $T(Ps_2)$ が長期的に減少傾向（速度上昇）にあることがわかった。これは利根川・他（2020, JpGU）で得られた付加体が長期的に速度上昇しているという結果と調和的である。また、2016年ごろに見られる $T(Ps_1)$ や $T(Ps_2)$ の上昇（速度減少）は2016年4月1日の三重県沖地震に対応するものである。その一方で、 $T(Ps_2)-T(Ps_1)$ では長期的に単調変化するようなものは確認できなかったが、観測点KMD13ではスロー地震の前に変化する短期的な現象を確認することができた。これは利根川・他（2020, JpGU）で確認されたものとよく似ているが、本研究によって、デコルマやその下でも地震波速度が変化しうることが示された。

謝辞 本研究では、DONET（防災科学技術研究所：<https://doi.org/10.17598/NIED.0008>）および「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト」によって取得されたデータを使用しました。また、新学術研究領域スロー地震学 公募研究「浅部スロー地震に伴う流体挙動の解明」（19H04632）の助成を受けました。記して感謝申し上げます。

Receiver function imaging of the Philippine Sea plate subducting beneath Shikoku (3)

*Takuo Shibutani¹, Jun Nakagawa¹, Airi Nagaoka¹, Tsutomu Miura¹, Yusuke Yamashita¹, Ken'ichi Yamazaki¹, Shintaro Komatsu¹

1. Kyoto Univ.

1. はじめに

南海トラフ域で発生する巨大地震について、震源域や強震動生成域の広がりをも的確に推定し、地震規模や強震動の予測の確度を上げるためには、震源域となるフィリピン海スラブ周辺域や巨大地震から発せられた地震波の伝播経路にあたる領域の構造を高精度に推定することが必要である。

我々は、リニアアレイ観測、レシーバ関数解析および地震波走時トモグラフィ解析により、紀伊半島、南九州および四国の地下構造を高精度に推定することを試みてきた。

今回は、前回に引き続き、四国でのレシーバ関数解析の結果について報告する。

2. リニアアレイ観測

四国では、徳島県海陽町と鳥取県米子市を結ぶ海陽－米子測線の四国側（海陽－綾川区間）と徳島市と愛媛県西予市を結ぶ徳島－西予測線でリニアアレイ観測を行った。いずれも測線近傍の定常観測点も含めて、観測点間隔が約5 kmになるように臨時観測点を配置した。

海陽－綾川区間では2014年12月から2017年2月まで、徳島－西予測線の東側（神山－大豊区間）では2015年12月から2018年12月まで、徳島－西予測線の西側（いの－西予区間）では2017年3月から2019年1月まで、いずれも7点の臨時観測点を設置した。

各臨時観測点では、固有周期1秒の高感度地震計（L-4-3D、Sercel社製）の地動速度出力をデータロガー（LS-7000XT、白山工業製、100 HzサンプリングまたはEDR-X7000、近計システム製、250 Hzサンプリング）に連続収録した。データロガーは自動車用バッテリーで駆動し、太陽電池で充電するオフライン観測を行った。

2020年4月に高知県土佐清水市大岐から四万十市西土佐奥屋内までの土佐清水－西土佐奥屋内区間に7点の臨時観測点を設置した。2022年3月まで2年間観測を行う予定である。

3. レシーバ関数解析

海陽－米子測線と徳島－西予測線の観測点で記録された遠地地震波形を用いてレシーバ関数を求めた。レシーバ関数とは、観測点下のS波速度不連続面で生成されるPS変換波を抽出した波形である（澁谷・他、2009）。

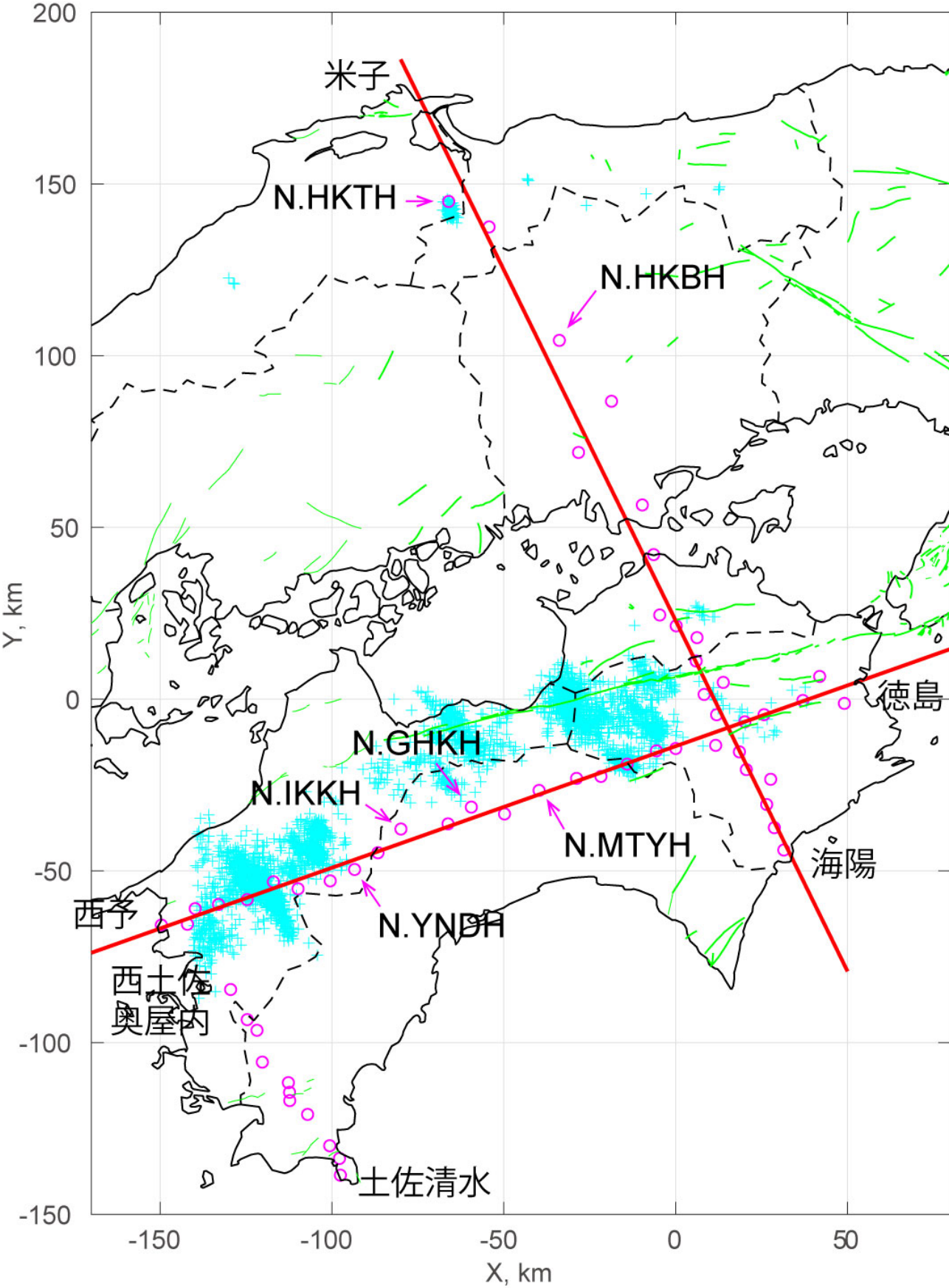
さらに、気象庁の地震波速度構造JMA2001（上野・他, 2002）を用いて、レシーバ関数の時間軸を深さ変換し、多数の観測点で多数の地震に対して得られたレシーバ関数の振幅を共通の変換点上で重合することにより、S波速度不連続面のイメージを求めた。

海陽－米子測線でのレシーバ関数イメージにおいては、高速度層の上面と考えられるフィリピン海スラブ内の海洋モホ面が、海陽町付近の深さ30 km弱から岡山県真庭市の北房観測点（N.HKBH）付近の深さ45 kmまで明瞭である。その6～8 km上方には、低速度である海洋地殻の上面、すなわちフィリピン海スラブの上面も明瞭に見られる。この結果から四国東部下のフィリピン海プレートは、6°程度の傾斜角で沈み込んでいることが分かった。これに対して、大陸モホ面は、やや不明瞭ではあるが、島根県安来市の伯太観測点（N.HKTH）付近の深さ35 kmから海陽町付近の深さ15 kmまでフィリピン海プレートの上方をせり上げるように分布していることが示唆された。

徳島－西予測線でも海洋モホ面は明瞭であり、徳島市付近では深さ33 kmに、西予市付近では深さ44 kmに見られる。高知県仁淀川町の池川観測点（N.IKKH）～愛媛県久万高原町の柳谷観測点（N.YNDH）では深さ30 kmまで浅くなっている。フィリピン海スラブの上面に対応する低速度層上面は、海洋モホ面の6～8 km上方に見られるが、高知県の町の吾北観測点（N.GHKH）を中心として、高知県本山町の本山観測点（N.MTYH）から池川観測点までの区間には、フィリピン海スラブの上面のさらに上方により明瞭な低速度層上面が見られる。大陸モホ面は、不明瞭ながらも、20 km弱の深さに見られる。

謝辞

防災科学技術研究所、気象庁、産業技術研究所、高知大学、京都大学の定常観測点の地震データを使用しました。



The P and S Wave Structure in the Shikoku Region from GA-based Simultaneous Determination of Hypocenters and Seismic Wave Velocity Structure

*Kota Murata¹, Motoo Ukawa²

1. Pacific Consultants co., Ltd., 2. Nihon University

1.はじめに

水平成層地震波速度構造は、震源決定や3次元地震波速度構造推定の標準地震波速度構造として、現在でも重要な役割を果たしている。自然地震を用いた水平成層地震波速度構造の推定においては、震源と地震波速度を同時決定する手法（例えばCrosson, 1976, JGR）がしばしば利用されているが、層厚を固定しなければならない。本研究ではGA（遺伝的アルゴリズム）を活用し、層厚も未知数とし、地震波速度構造を推定する手法を開発し、四国地方に適用した。その結果、安定した解として層厚、P波・S波地震波速度、観測点補正值を得ることができた。

2.手法

複数の観測点のP波とS波到着時刻データを観測値とし、震源と観測点補正值、P波・S波速度、層厚を推定する。地震波速度と層厚はGAを活用して推定する。震源と観測点補正值は、GAにおいて試行する各地震波速度構造について、鵜川・他（1985、地震）の手法により同時決定する。今回は四国地方の深さ50km以浅の地震を対象に地殻・最上部マントルの地震波速度構造を推定することを試みた。

地震波速度構造は図に示すような6層構造とし、浅部構造（第1層と第2層）及び最深部の第6層は地震波速度、層厚とも固定した。GAの計算では、各未知数について、搜索範囲を設定し、その範囲内にランダムな数値を生成する実数値遺伝的アルゴリズムを採用した。今回の推定では各世代の子孫数を5000、世代数を10世代とし、搜索範囲は世代を重ねると狭くなるように設定している。

なお、初期値として与えた地震波速度構造の第1世代の搜索範囲は、第3層～第5層は、層厚が5～10 km、P波速度が6.0～8.0 km/s、S波速度が2.5～4.5 km/sである。また観測点補正值は、綾上観測点(AYKH)のP波観測点補正值を0とした。

3.対象地域と使用データ

本研究では水平成層構造に近いと考えられる四国地方を対象とした。対象とした地震は気象庁一元化震源データから選択し、気象庁の検測値及び防災科学技術研究所のHi-net連続波形データから自身で検測した値を観測データとした。

深さが50km以浅の地震から対象地域にできるだけ偏らずに分布し、P波とS波ともに検測できる規模としてM2～4の範囲の地震18個を選択した。Hi-net観測点は四国地方の35観測点を選択し、各観測点の地震波到達時刻を気象庁の検測値がある場合は地震波形を確認し、検測値がない場合は検測した。

4.結果

得られた地震波速度構造を図に示す。繰り返し計算の後、第3層及び第4層の地震波速度と層厚はそれぞれ上部

地殻及び下部地殻に対応している値が安定して得られた。上部地殻と下部地殻の境界の深さは21.3kmである。第5層はモホ面の深さを推定するための層であるが、得られた結果はP波が7.5 km/sで最上部マントルの地震波速度としてはやや小さい。この層をマントル最上層と考えるとモホ面の深さは33.3 kmである。Vp/Vsに注目すると地殻（第3層と第4層）は1.71～1.73と比較的低く、最上部マントル（第5層）は1.84と高い値が得られた。観測点補正值（走時残差に対する補正值）は図に示すように、四国中央部で負、中央部から離れると正という傾向がP波、S波とも見られる。

5.議論

木村・岡野(1991,高知大学学術研究報告)によるP波速度構造では、上部地殻と下部地殻の境界は20km、上部地殻のP波速度は5.5km/sから6.4km/sまで増加、また、モホ面の深さを35km、最上部マントルの速度を7.8km/sとしている。今回の結果は地震波速度、層厚とも調和的である。木村・岡野(1991)では下部地殻の地震波速度は上部地殻に比べ低速度層になると示唆しているが、今回の結果は下部地殻の地震波速度の平均値は上部地殻より大きいことを示している。観測点補正值の地域性は、四国中央部から離れるにしたがって観測走時が速いことを示すことから、沈み込んだフィリピン海プレートの形状が影響していることが考えられる。

6.まとめ

四国地方のP波・S波速度構造を水平成層構造と仮定し、遺伝的アルゴリズムを活用して推定した。得られたP波速度構造は、これまでの研究と調和的であり、本研究の手法が地殻・最上部マントルの地震波速度構造推定に有効なことを示している。今後、地震波速度構造の誤差の評価が課題である。今回の得られたS波速度から、四国地方の地殻内は低Vp/Vs（低ポアソン比）であることが分かった。

7.謝辞

本研究では、防災科研のHi-net地震観測網の波形データを使用した。また図の作成にはGMTを使用した。記してここに感謝いたします。

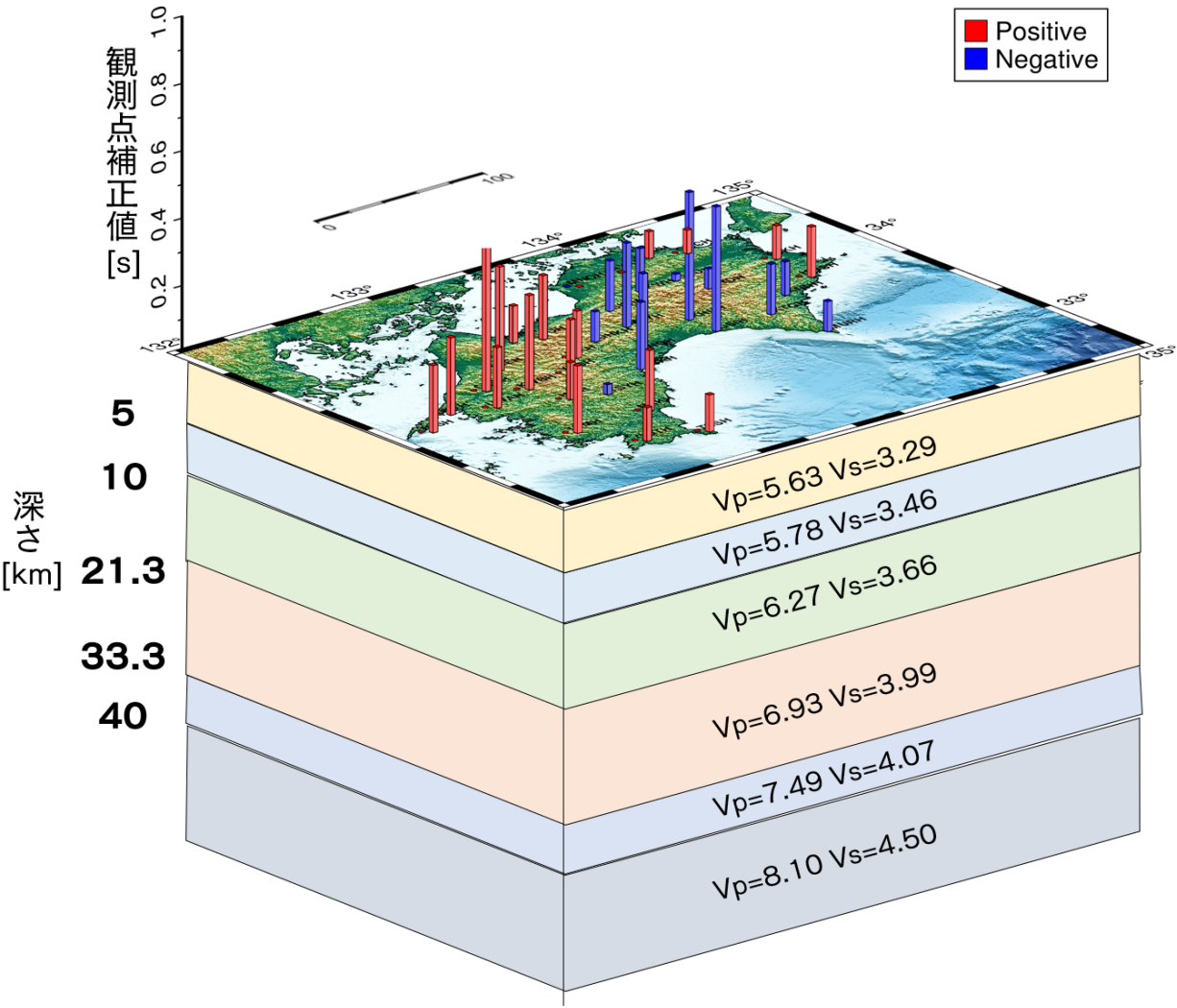


図.得られた地震波速度構造と P 波観測点補正值

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

[S01]PM-1

chairperson:Daisuke Sato(DPRI, Kyoto University), chairperson:Tsutomu Takahashi(JAMSTEC)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM D

[S01-01] Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

○Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi² (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:00 PM - 1:15 PM

[S01-02] Proper reduction and asymptotic sampling difficulty of posterior distributions in fully Bayesian inversions

○Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1.DPRI, Kyoto University)

1:15 PM - 1:30 PM

[S01-03] Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

○Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi² (1.DPRI, Kyoto University, 2.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:30 PM - 1:45 PM

[S01-04] Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

○Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

1:45 PM - 2:00 PM

[S01-05] Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

○Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda² (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

2:00 PM - 2:15 PM

Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

*Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

測地データや地震波データを用いた断層すべり推定においては、地下構造の不確かさに起因するモデル予測誤差が、しばしば推定に伴う誤差の主たる要因となる。しかし、従来の断層すべり逆解析手法では、モデル予測誤差を考慮しないか、観測に伴う誤差と区別しない定式化が一般的である。一方、過去10年間で、モデル予測誤差を陽に考慮した断層すべり推定手法が複数提案されるなど（例えばYagi & Fukahata 2008 & 2011, Duputel et al. 2014, Ragon et al. 2018）、手法開発が飛躍的に進んできた。これらの手法に共通するのは、モデル予測誤差が正規分布に従うことを仮定し、推定に必要なアルゴリズムを簡単にしている点である。本研究では、これらの研究の考え方を基礎とし、非正規分布に従うモデル予測誤差を柔軟に取り扱うことができ、同時に観測データから断層すべりだけでなく地下構造の情報も得る、という新しい断層すべり推定手法を開発する。地下構造の不確かさに関する既知の確率分布からランダムサンプルされたパラメータを基に地下構造モデルを多数生成することで、グリーン関数の不確かさを係数行列のアンサンブルにより表現する。断層すべりの事後分布を推定するベイズモデルを設定し、予測誤差に相当する積分項をこのアンサンブルを用いたモンテカルロ近似により計算する。これにより、非ガウスの予測誤差を考慮した断層すべりの事後分布推定が可能となる。さらに、モンテカルロ積分を行う過程で各係数行列に対する尤度も計算されることにより、地下構造モデルのサンプルの中から尤もらしいものの抽出を同時に行うことができる。事後分布のサンプリングにはレプリカ交換モンテカルロ法を用いる。事前に係数行列を十分数計算しておけばよいという点から、断層すべりと地下構造パラメータの事後分布を直接的に同時サンプリングする方法と比べ、計算コストにおいてアドバンテージがある。

手法の有効性を確かめるため、2次元半無限均質弾性体内の低角逆断層におけるすべり遅れレート（SDR）の測地データを用いた推定について数値実験を行った。すべり遅れレート分布の真値を設定し、真のディップ角を15度として人工データを作成した。その上で、ディップ角について、「平均18度、標準偏差3度の正規分布に従う」というバイアスを含んだ不確かな情報しかない、という状況を想定して推定を行った。このような場合、予測誤差は一般に正規分布には従わない。SDRの事後分布を推定したところ、事前知識におけるディップ角の平均値がディップ角真値と3度ずれているにもかかわらず、事後確率分布を近似するSDR分布のサンプル群がSDR分布の真値とよく整合した。ディップ角の不確かさに由来する予測誤差が精度よく推定されていることが示唆される。予測誤差を考慮しない場合はSDR分布の事後確率分布がSDR分布の真値と整合的でなかったため、手法の有効性が示されたといえる。また、SDRの事後分布のサンプリングを通じて計算された係数行列の事後確率密度を調べたところ、ディップ角15度前後に対応した係数行列の事後確率密度が特に大きくなっていった。このように、推定を通じて、データから真の地下構造に関する情報も得ることができた。同時に、ディップ角の推定精度が、事前情報の不確かさを表す、事前に設定したディップ角の標準偏差の大きさに依存することを確認した。また各観測点におけるモデル予測誤差の確率分布形状を可視化したところ、複数の観測点で、正規分布では通常表現が難しいといわれる歪度の大きな分布となっていることが確認された。

Proper reduction and asymptotic sampling difficulty of posterior distributions in fully Bayesian inversions

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹

1. DPRI, Kyoto University

前回の地震学会で、モデルパラメータ数が大きくなるにつれて従来のフルベイズ推定と赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) によるベイズ推定とでモデルパラメータ推定値が乖離し、これまでフルベイズの近似とわれてきたABICの方がより適切な推定値となるという問題を報告した (佐藤・深畑, 2019). 本発表では、その原因となっていた同時事後分布の性質を精査する。

ベイズ推定では、観測方程式とモデルパラメータに関する事前分布とをベイズの定理を介して結合し、事後分布を構成する。フルベイズ推定では、さらにモデルパラメータの事前分布を規定する超パラメータについてもその事前分布 (超事前分布) を考慮し、モデルパラメータと超パラメータに関する同時事後分布を構成する。

ここで、フルベイズ推定の本来の解は同時事後分布であるのだが、多次元の確率分布そのままでは有用な情報を引き出せない (松浦, 1990). そこで、同時事後分布からモデルパラメータの有用な統計量を得るために情報の縮約が必要となる。適切な縮約の方法は自明ではなく、少なくとも3つの流儀がこれまで用いられてきた。1つは、同時事後分布から超パラメータとモデルパラメータの組を直接的に同時推定する。この立場では、事後確率最大 (MAP) 解が推定値として通常採用される。もう1つは、同時事後分布からモデルパラメータのみを推定する。これは、超パラメータに関して事後分布を積分し、モデルパラメータに関して周辺化した事後分布を用いることに相当する。Fukuda & Johnson (2008) などフルベイズ推定を行っている研究では、しばしばこの指標が用いられている。そして、最後の1つはABICで、モデルパラメータを積分することにより超パラメータに関して周辺化された事後分布を求め、その分布を基にモデルパラメータを推定する。これは、同時事後分布を超パラメータの周辺事後分布とモデルパラメータの条件付き事後分布とに因数分解し、これら2つの確率値に基づく二段推定を行うことに相当する。この方法は、地球物理では広く用いられてきた (Yabuki & Matsu'ura, 1992).

これらの縮約に関して、モデルパラメータ数の増加につれて、モデルパラメータの周辺事後分布がMAP解にデルタ関数的に収斂する一方で、超パラメータの周辺事後分布はABIC推定値にデルタ関数的に収斂することを我々は解析的に導いた。これは、ABIC型の多段推定を行うかどうかでフルベイズ推定のモデルパラメータ推定値がABIC型とMAP型に二分されるということを意味する。

それらの二分された推定値のうちどちらが良いかをsynthetic testで検討した。検討の際は、roughnessが小さいという事前分布を用いた。その結果、従来の報告通り、同時事後分布が、MAP解として通常採用される局所最大に加え、underfit解 [モデルパラメータ数が多い場合にはさらにoverfit解 (伊庭, 1996)] に大域最大を持つ多峰分布であることを確認した。また、モデルパラメータ数が多い場合に局所最大解がunderfit側にバイアスされ、さらには消失していくことも新たに観察された。対照的に、超パラメータの周辺分布 (ABIC) は、一貫して最適値付近にピークを持つ単峰分布だった。

このようにしてABIC型の多段推定がそれ以外の縮約された分布に比べてより適切だとわかった。しかし、いずれの縮約も同時事後分布から生成される分布関数を用いている以上、これらの分布から得られる平均値は同一でなければならない。この点で、三通りに縮約された分布関数が異なる推定値にデルタ関数的に収斂するとした我々の結果は、一見奇妙である。

そこで、事後平均 (EAP) 推定値の解析的表現を導いた。その結果、モデルパラメータのABIC推定値とEAP推

定値とが同様の値をとることが見出されると共に、EAP推定値の同時事後分布での出現確率がモデルパラメーター数の指数関数として急減少していくことが明らかになった。従来、モンテカルロサンプリングは多次元標本空間がパラメーター数の指数で増加する問題（次元の呪い）を確率値の高い事象のみをサンプルすることで克服するとしたが、同時事後分布では確率の高い推定値（MAP解近傍）は適切でない以上、この処方は有効に機能しない。従来のモンテカルロサンプリングによるEAP推定値の数値近似解はMAP解の側にバイアスされていた可能性が高い。

一方、超パラメーターの周辺事後分布については、ほぼ無限大の個数で且つほぼ確率ゼロの事象が平均を支配するという同時事後分布の困難を、字義通り無限個の事象を積算することで解決していた、と考えられる。MAPのABICからのずれに相当する、同時事後分布と超パラメーターの周辺事後分布の対数差の主要項が、シャノンエントロピーと呼ばれる量（確率変数に対して拡張された事象の個数の対数（エントロピー）を表す量）であることがわかり、この予想が裏付けられた。

Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

*Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi²

1. DPRI, Kyoto University, 2. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

地震の震源過程（断層面上でのすべり分布、あるいはすべりの時空間発展）を求めるインバージョン解析では、非負の拘束条件が広く用いられてきた。非負の拘束条件とは、例えば逆断層型の地震では、逆断層成分が常に正またはゼロで、マイナスのすべり（つまりは正断層成分）が生じないという条件のことを指す。この条件は物理的に妥当であると考えられ、多くの解析において疑問を持たずに使用されてきた。

しかしながら、本講演で指摘するように、震源過程解析で非負の拘束条件を課すことには大きく二つの問題がある。

一つは、そもそもなぜ非負の拘束条件が必要となるのか、という問題である。震源過程解析において、少量の負のすべりが生じることは特に問題ないであろう。観測データや解析モデルは常に誤差を含んでいるので、推定誤差の範囲内で負のすべりが生じることはある意味自然であり、別段目くじらを立てる必要はない。そして、この場合には、非負の条件を課して、（例えば、政府への提出資料等として）結果の見栄えを良くすることは許容されるだろう（後述する2つ目の問題が重大でない場合には）。

実際のところ非負の条件が強く必要とされるのは、推定誤差を大きく越えて負のすべりが生じてしまう場合である。しかし、逆説的ではあるが、この場合には非負の拘束条件は使うべきではない。なぜなら、推定誤差を大きく越えて負のすべりが生じるということは、モデル化に重大な欠陥が隠れていることを意味するからである。つまり、何か重大な欠陥があるから、大きな負のすべりが生じてしまうのである。この場合に、非負の条件を課して一見もっともらしいすべり分布を得ることは、その重大な問題を覆い隠してしまい、真の解に近づく上ではむしろ弊害となる。但し、具体的にどのようにしてその重大な問題を解決するのは難しい問題である。一つの方策としては、グリーン関数の誤差の導入(Yagi & Fukahata, 2011, GJI)があるが、万能ではない。しかし、この難しい問題を解決していくのが、地震学の発展というものであろう。

もう一つの問題は、非負の拘束条件を課すと、震源域から離れたモデル領域において、そのすべり量の推定が不偏推定とならないことである。”不偏推定”とは、推定量の期待値が真値に一致することを意味し、どのように統計的推定を行うかの上で、最も重視される指標と言って良い。通常、震源過程解析では、モデル領域の設定がすべり量の推定に影響を及ぼさないように、すべりが実際に生じた範囲よりもある程度広くモデル領域を設定する。このとき、前述のようにモデル領域の端の近くの大抵の場所では、滑り量 u がゼロとなることが期待される。一方、非負の条件を課すと、必然的に、 $E(u(\mathbf{x})) > 0$ となる。ここで、 $\mathbf{x}$ は空間座標、 E は期待値を表す。つまり、すべりがほぼゼロのところでは、正の方向にバイアスされた値が選ばれてしまうのである。実際の解析において、すべりがゼロの領域を含まないように断層面の設定をすることはまず不可能である。しかし、非負の条件付きの場合、すべりがゼロの領域では常に正の方向にバイアスされた値が得られる。そのため、地震モーメントを一定にするために最大すべりを含む他の領域のすべり量が減少し、すべり分布の形自体にも影響を与えるといったことが起こる。

要するに、非負の条件だけを取り上げれば物理的に自然なものと言えるが、震源過程解析に非負の条件を用いることは、モデル化に含まれる重大な欠陥を覆い隠し、すべり分布にも無視できないバイアスを与えるという問題がある。

Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

*Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3. Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

We need accurate 3D structure model to study the correlation between the physical properties of the materials and the seismicity as well as the rupture processes of earthquakes. Currently available 3D structure model in and around the 2011 Tohoku-Oki source area is not sufficient in terms of the accuracy of the synthetic waveforms generated based on the model: we found that short period (< 10 s) synthetics for land stations in northeastern Japan do not reproduce the characteristics in the observed full waveforms from shallow earthquakes occurred there (Okamoto et al. *Earth Planets Space (EPS)* 2018). This research suggests the short wavelength features in the current model are not sufficient. Thus we attempt to improve the 3D model using the waveform tomography. We select shallow earthquakes ($M_w \sim 6$) in and around the source area. In this study, we re-analyze six events that we have previously reported (SSJ Fall Meeting 2019) and newly add five more shallow events. The observed full waveforms recorded by land seismic network (F-net, KiK-net) in northeastern Japan are used. A land-ocean unified 3D structure model including oceanic water layer is used as the initial model. First, we re-determine the source parameters (the moment tensor, source time function, source location, and origin time) based on the initial model using First-motion Augmented Moment Tensor analysis method (Okamoto et al. *EPS* 2017, 2018) to minimize the biases due to one-sided (i.e., only on land) station distribution. Then we simulate the forward (using the earthquake source) and the adjoint (using a single force at the station location) wave propagations based on the initial model. The simulations are performed on TSUBAME super computer of GSIC, Tokyo Institute of Technology using a multi-GPU version (Okamoto et al. in *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering* 2013) of HOT-FDM (Nakamura et al. *BSSA* 2012). The simulated waveforms are Fourier transformed and multiplied to generate waveform sensitivity kernels of relaxed modulus for P- and S-waves, density, Qp and Qs in frequency domain. For example, the kernels for a pair of a F-net station (TYS) and an outer-rise event (2017/10/06 M_w 6.2) show an asymmetric pattern with respect to the straight path even at a period of 9.8 s. At a period of 7.1 s, large amplitude pattern is observed along the oceanic trench, suggesting scatterings due to strong heterogeneity there. We will discuss the kernel features in other examples, and the results of the attempts of tomographic inversion.

Acknowledgements: The authors are grateful to Japan Meteorological Agency, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), and Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project for providing the earthquake parameters, to K Kisimoto for providing the topography models, to Headquarters for Earthquake Research Promotion and NIED for providing the structure models, and to NIED for providing the waveform records of KiK-net, and F-net. This study is supported by the Japan Society for the Promotion of Science (KAKENHI grant no.16K05535 and 20K04101), and Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures in Japan (JHPCN) (Project ID: jh200059-NAH).

Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

*Tutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda²

1. JAMSTEC, 2. Kagawa University

断層面の形状は幅広い空間スケールで不均質性（以下、面粗さ）を示す。露頭の断層面形状の調査などでは、面粗さのパワースペクトル密度が波数のべき乗に依存し、ハースト指数 H が0.6~0.9程度の自己アフィン性を示すことが報告されている(e.g., Brown & Scholtz 1985; Candela et al. 2011)。面粗さの統計的性質は表面の摩擦係数などを理解する上で重要な要素の一つであるが、地下の断層の面粗さは速度構造の空間分解能の制約などからこれまで推定されていない。この推定を行うには、断層周辺の速度構造の分解能を適切に把握した上で、解析可能な波数域が狭い場合でも安定した結果が得られる手法を用いることが重要となる。本研究では、ウェーブレット変換を用いた解析法の適用可能性を検討し、南海トラフ西部において沈み込んだフィリピン海プレートの面粗さを評価した。

解析に用いるプレート形状のデータは、JAMSTECが南海トラフ周辺で調査を行った構造探査測線のうち、海底地震計を用いた屈折法地震探査とMCS反射法探査がともに実施され、観測点間隔やエアガン発振間隔が密な6測線で得られたものである。屈折法探査の初動走時トモグラフィで得られた速度構造を用い、MCS記録の海洋地殻上面からの反射波走時を深度変換してプレート形状を得た。測線長は100km前後で、形状データは0.1km間隔である。上盤側の地震波速度の水平変化を調べた結果、そのパワースペクトル密度は低波数側ではべき乗則に従うが、観測点間隔よりやや小さい約4.5kmに対応する波数より高波数側でべき乗則から外れ、パワースペクトル密度が小さくなる傾向が見られた。このずれはトモグラフィの正則化項などの影響と考えられることから、面粗さの推定は約4.5kmよりも大きな空間スケールのみを対象とすることとした。

ウェーブレット変換を用いた面粗さの解析には、Wavelet Transform Modulus Maxima (以下、WTMM)と呼ばれる連続ウェーブレット変換の極大値に着目し、データ全体のスケール依存性が単一のハースト指数で特徴づけられることを仮定した解析法 (Audit et al. 2002) を用いた。これは本研究で用いるサンプル数が少ないデータでも安定する手法とされている。しかしサンプリング間隔から数オクターブ程度の範囲では安定した結果が得られるものの、それ以上のスケールでは推定誤差が増大する。この推定誤差を抑制するため、本研究では複数測線のデータを統合し、その平均的な面粗さを推定することとした。非整数ブラウン運動の人工データを使って検証を行った結果、1000サンプルの形状データが3つ程度あれば概ね安定してハースト指数を推定できることが確認された。

南海トラフ西部の各探査測線では、WTMMによる解析でもハースト指数を十分な精度で推定することはできないが、全6測線を統合することで南海トラフ西部におけるフィリピン海プレート表面のハースト指数は0.87程度と推定された。また沈み込んだプレートの南北でrms振幅が系統的に異なり、北側のrms振幅が大きな領域では $H \sim 0.57$ 、南側のrms振幅が小さな領域では $H \sim 0.86$ と推定された。単一測線での面粗さの推定精度を向上させるには、測線長が速度構造の空間分解能を数倍以上にすることが必要となる。しかし形状データのrms振幅とWTMMを併用することで、現状の探査精度でも面粗さの大きさやハースト指数の空間変化を安定して推定することが可能となった。今後、測線数の増大とともにハースト指数やその空間変化をより詳細に把握できるようになると期待される。

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

[S01]PM-2

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), chairperson:Issei Doi(DPRI, Kyoto University)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM D

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms

○Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,
2.Graduate School of Science, Tohoku University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S01-07] Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram

○KAORU SAWAZAKI¹ (1.National Research institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:45 PM - 3:00 PM

[S01-08] Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

○Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S01-09] sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

○Masahiro Kosuga¹ (1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:15 PM - 3:30 PM

A centroid catalog of P-wave microseisms

*Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. 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大きく2つに分類される。1つ目は、primary microseisms と呼ばれる約 0.07 Hz の特徴的な周波数を持つ振動である。この周波数が海洋波浪の特徴的な周波数と対応している事と Love波の振幅が卓越していることから、海岸線付近の斜面に打ち寄せる海洋波浪 が励起源だと考えられている。2つ目は secondary microseisms と呼ばれ、海洋波浪のちょうど倍の卓越周期 (0.15 Hz) をもつ。海洋波浪の非線形効果が励起に寄与していると考えられている[Longuet-Higgins, 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ことがよく知られている。

■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。backprojection法は、脈動P波の重心位置を特定するのに有効な手法である。この手法は、slowness ベクトルと波面の曲率の両方の情報を利用している。また、多くのphase (P, PP, core phase等)の情報を利用することも可能である。しかし全ての情報を同時に使用するため、どの情報が震源位置を抑えているのか検証することが難しい。また、10年以上にわたるグローバルなカタログを作成するためには、計算コスト大きな問題となる。一方、beamforming法の計算コストは実用的であるが、この方法では、slownessベクトルの情報のみを利用しているため、P波とPP波を区別することが原理的にできない。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を提案する。

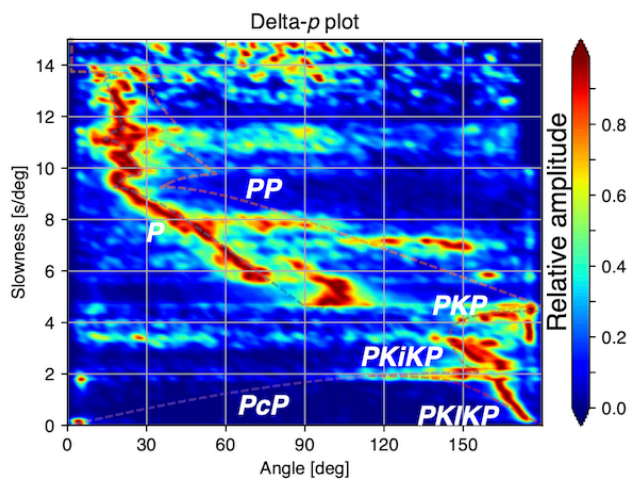
この手法では、まず、従来のbeamforming法に基づいて、アレー中心でのslowness ベクトルの初期値推定を行う。次のステップでは、slowness ベクトルを固定して、波面の曲率を変化させbeam power が最大化することによって波面の曲率を推定する。これらの値をアレー中心での初期値とし、摂動理論に基づいて、slownessベクトルと波面の曲率の値を反復的に更新していく。波面の曲率から、アレー中心と励起源の重心位置との距離を推定することができる。波面の曲率はslownessよりも水平方向の不均質に敏感なため、推定精度は悪くなる。しかし推定された距離情報に基づいて(図1)、検出されたスローネスを対応する相(例えば、P, PP)に分類する事が可能となる。この分類された位相に基づいて、推定したslowness ベクトルの値から震源の重心位置を推定する。

■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き解析から除外した。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、0.1-0.2Hzの帯域で解析を行った。

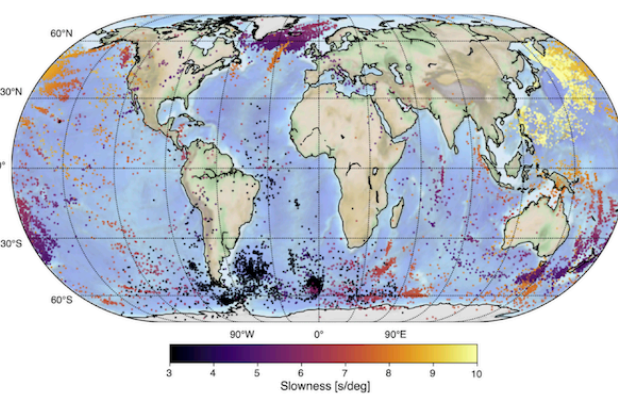
■結果と展望

推定された重心位置は季節的な変動を示しており、過去の研究結果とも調和的である。P, PP, PKP, PKIKP等の多くの相を同定できたため、1箇所のアレーデータから全球点な脈動P波の重心位置のカタログ化(図2)に成功した。本発表では、推定された脈動P波の重心位置のカタログから、脈動の励起メカニズムについて議論する予定である。



まず推定した震源毎に、震央距離とslownessに対して点をプロットし、その数密度を計算する。次に、各slowness毎に最大値で規格化する。P, PP, core phaseを同定することができる。

図 1



決定した重心位置をプロットしたず。色はイベントごとのslownessを表している。例えばグリーンランド近くではP波によって震源が決まっている。少し南側ではP波がshadowに入るため、PP波によって震源位置が決まっている様子が見て取れる。

図 2

Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram

*KAORU SAWAZAKI¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

昨年度は、観測された連続地震動記録の統計的特徴を用いることで、地震カタログを用いることなく、余震による最大振幅の発生確率を早期に予測する手法を提案した（澤崎、2019）。今回は、任意の閾値を超える最大振幅の発生数を確率的に表現する手法について報告する。具体的には、「期間 T_1 から T_2 の間に閾値 z 以上の振幅が n 回以上観測される確率は $Q\%$ 」と表される超過確率 Q を、任意の T_1 、 T_2 、 z 、 n の組み合わせについて算出する。ここでは n を閾値超過振幅数と呼ぶ。 n を1とする場合、この超過確率は「期間 T_1 から T_2 の間に観測される最大振幅が z 以上である確率は $Q\%$ 」と言い表すことができ、最大振幅の予測は閾値超過振幅数の予測の特殊な場合に相当する。

連続地震動記録の区間最大振幅（一定時間 T ごとの最大振幅。今回は T を1分に固定）は、Frechet分布と呼ばれる極値分布の一種にしたがう。この分布は、地震活動の活発さや伝播経路特性等を反映するパラメータ A と、Gutenberg-Richter式の b 値等を反映するパラメータ m とで特徴づけられる。地震数が大森-宇津則にしたがい時間減衰する場合、大森-宇津式の p 値もパラメータとなる。加えて、地震動記録は地震以外の雑微動を含み区間最大振幅は下限を持つため、その下限 $x_{\min}$ もパラメータとなる。以上4個のパラメータを用いると、区間最大振幅がしたがうFrechet分布の累積分布関数 G は

$$G(z, t, t+T) = \exp[-ATm^{-1}(z-x_{\min})^{-m}t^p] \quad (1),$$

確率密度関数 g は

$$g(z, t, t+T) = ATt^{-p} \exp[-ATm^{-1}(z-x_{\min})^{-m}t^p](z-x_{\min})^{-m-1} \quad (2)$$

と表される。ただし1、2式とも本震からの経過時間 t が T よりも十分大きいという条件の下で成り立つ。観測された区間最大振幅に最尤法を用いてFrechet分布をあてはめ、4個のパラメータを推定する。最尤推定値 $\theta = (A, p, m, x_{\min})$ を用いると、超過確率 Q は

$$Q_n(z, T_1, T_2; \theta) = 1 - \exp[-(N_{\infty} - N)] \sum_{n'=1}^n (N_{\infty} - N)^{n'-1} / (n'-1)! \quad (3)$$

$$N_{\infty} - N = (z - x_{\min})^{-m} A (T_2^{1-p} - T_1^{1-p}) / [m(1-p)] \quad (4)$$

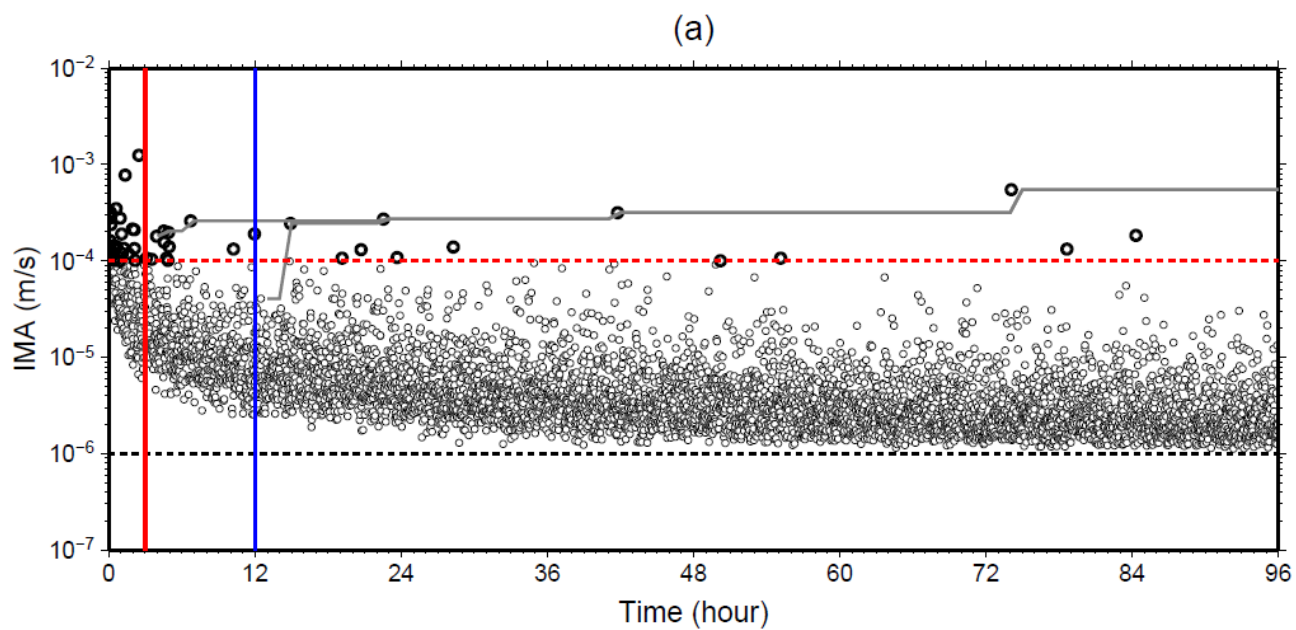
と表される。 N_{∞} は期間 T_1 から T_2 の間に発生する全地震数を、 N はその中で最大振幅が閾値 z を超えない地震数を表す。超過確率 Q は、 z についてFrechet分布、 n についてポアソン分布にしたがう。実際の予測においては、推定値の不確定性を考慮したベイズ予測（例えば、Omi et al., 2015）を用いる。

図aは、G-R式と大森-宇津式にしたがう余震活動を乱数を用いて生成し、マグニチュードと最大振幅の関係式から算出した区間最大振幅の推移（白丸）を表す。最大振幅の閾値は 10^{-4} m/s（赤点線）に設定し、これを超える区間最大振幅は太い丸印で示している。区間最大振幅の下限 $x_{\min}$ は 10^{-6} m/s（黒点線）に設定した。灰色の実線は評価時点以降に観測された最大振幅を表す。この疑似余震記録について、本震発生の5分後から3時間後（赤縦線）までのデータを用いてパラメータを推定し、超過確率曲線を描いた図がb（最大振幅）とc（閾値超過振幅数）である。赤丸が3時間後以降に発生した最大振幅（図b）と、閾値 10^{-4} m/sを超えた振幅の数（図c）の推移を表す。黒線は3時間後時点で評価した96時間後までの10%、50%、90%超過確率曲線を示す。最大振幅、閾値超過振幅数共に、予測の範囲で推移している。評価時点が12時間後（図a青縦線）の場合（図d、e）、使用できるデータ数が増えるためにパラメータの推定精度が上がり、特に閾値超過振幅数の予測幅は

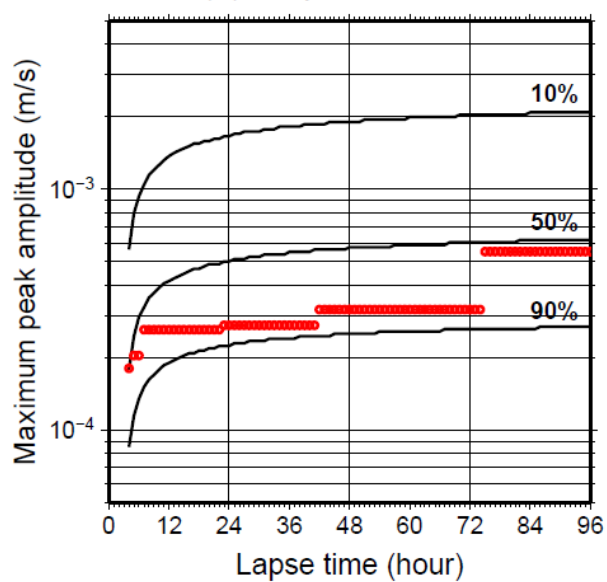
より絞り込まれる。この場合も3時間後の場合と同様に、超過確率曲線から予測される範囲内で最大振幅、閾値超過振幅数とも推移する。

異なる乱数列を用いて図b~eと同様の図を1000通り描くと、最大振幅や閾値超過振幅数が10%超過確率曲線を上回るケースと90%超過確率曲線を下回るケースはそれぞれ100ケース程となり、全ケースの10%程度となった。同様に、10%と50%超過確率曲線の間および50%と90%超過確率曲線の間を推移するケースはそれぞれ400ケース程で、全体の40%程度であった。以上の結果から、パラメータが時間変化しない理想的な状況下では、区間最大振幅を用いることで、大地震発生後数時間以内にその後の最大振幅と閾値超過振幅数を確率的に予測できることが分かった。

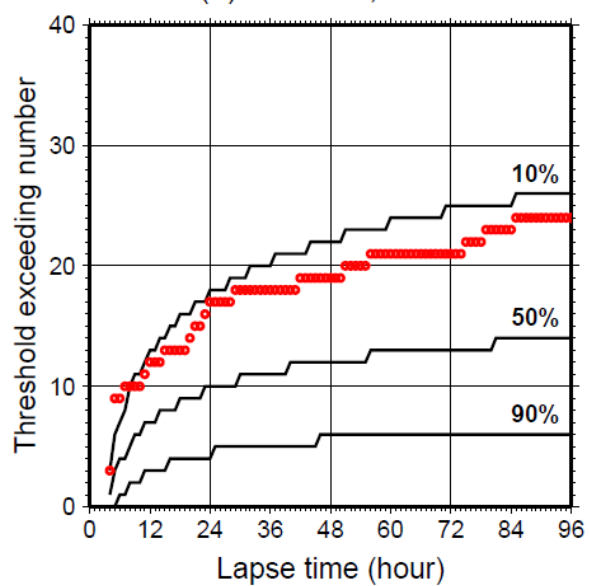
謝辞：本研究は科研費・若手研究B「連続地震波形記録を用いた準リアルタイム余震活動予測手法の開発」（課題番号17K14385）からの支援を受けています。



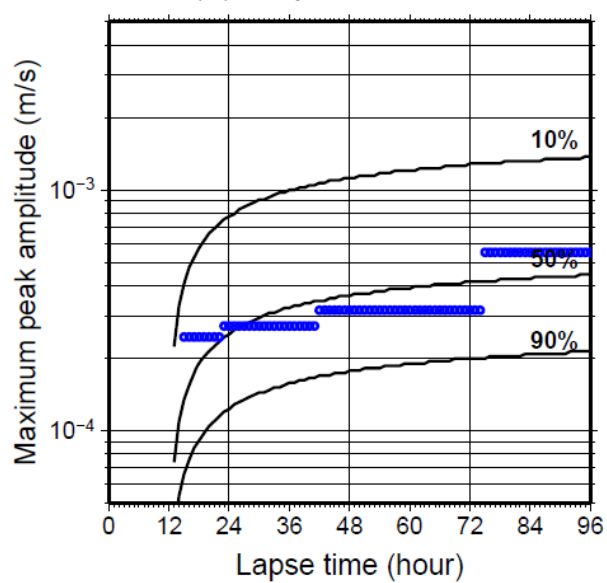
(b) Amplitude, 3 hrs



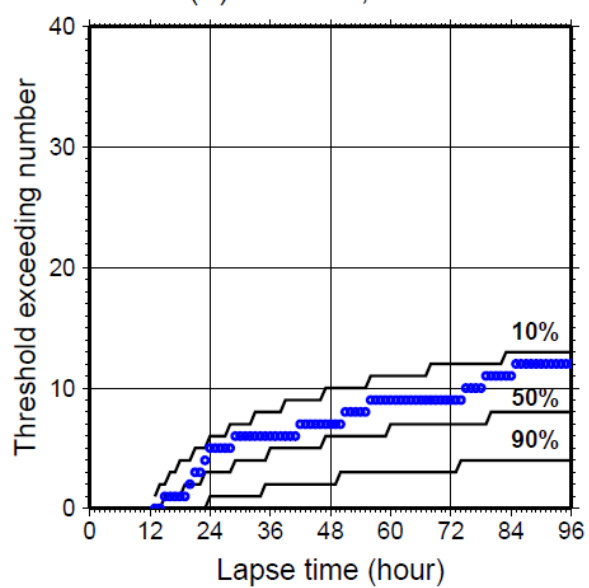
(c) Number, 3 hrs



(d) Amplitude, 12 hrs



(e) Number, 12 hrs



Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

*Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

2017年九州北部豪雨によって大分県日田市小野地区において7月6日午前9時45分ごろに大規模な斜面崩壊が発生した。この斜面崩壊によると思われる地震動が、約1分の間隔をおいて2回、定常地震観測網の4-5点の地震観測点において捉えられた。継続時間は40-60秒程度、卓越周波数は0.5-3 Hzであり既往研究（e.g. Dammeier et al., 2011）による斜面崩壊の地震波形記録と矛盾しない特徴を示した。また、崩壊地から約3 km/sの見かけ速度で伝播していたことから、本崩壊によって励起された地震動が捉えられたことが窺えた。

このように、比較的規模の小さな斜面崩壊であっても、高感度地震観測網にはその震動が記録されていることがあり、高周波連続地震観測記録が斜面崩壊の監視に重要な役割を果たすと期待される。しかし、それらの記録は一般にS/Nが低く、しかも通常の地震と違い明瞭なP波S波相がみられることはほとんどない。そこで、本研究ではこのような地震動が定常地震観測網で捉えられた際に、斜面崩壊に関する事前情報なしにどの程度震源を推定できるのかを調べた。

Doi and Maeda (2020) は、火山性の低周波微動の震源を観測点間の振幅比から推定した振幅震源決定法（ASL法、Kumagai et al., 2010）を、定常地震観測網で記録された2017年長野県飯山市の斜面崩壊による10観測点以上の地震波形データに適用し、推定精度約5 kmで崩壊斜面の周辺に震源を決定することに成功した。しかし、本研究で対象とする日田市小野地区における斜面崩壊はそれよりも規模が小さい。そのため、この手法をそのまま本研究の波形データにあてはめ震源決定をおこなったところ、高いS/N比を有する地震観測点が4点程度と少なく、そのままでは震源位置の拘束がうまくいかなかった。そこで、本研究では、S/N比が低い観測点におけるデータを有効活用するため、仮想震源位置に応じて利用するデータを動的に変更する2段階法を採用した。まず、グリッドサーチで仮定する仮想震源位置に対し、観測記録のS/N比の高い点のみの記録と振幅の理論予測曲線との比較から、すべての観測点における振幅の予測値を算出する。そして、信号のS/N比が低い観測点であっても、仮定した仮想震源位置からの振幅の理論予測値がノイズレベルの2倍以上であれば、その観測点では仮想震源位置からの地震動をノイズレベルよりも有意に大きな振幅で記録できるはずであると考えるデータとして算出し、理論予測曲線と観測振幅との残差を計算する。このようにして得られた残差がもっとも小さな仮想震源位置を斜面崩壊の波源とし、その周辺の残差の空間分布から誤差範囲を推定した。その結果、2回の地震動に対して、推定精度5 km程度で崩壊斜面の周辺に震源が求められた。

本研究で扱った小野地区の斜面崩壊は、観測点間隔が平均20-30 km 程度である定常地震観測網に囲まれるような場所で発生した。そのため、一般に日本国内の内陸部で発生する斜面崩壊においても、同様の観測条件が満たされることが予想される。したがって、本研究で採用した観測点選定基準を用いることで、高感度定常地震観測網の観測記録から、国内の多くの地域において同程度の斜面崩壊を事前情報無しに検知できることが期待される。

謝辞：防災科学技術研究所の高感度地震観測網の地震波形データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

*Masahiro Kosuga¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hirotsuki University

はじめに

地震観測網から離れた位置で発生した地震の震源深さを精密に決定するために、sP変換波を用いることがよく行われる。この波は、震源から放射されたS波が海底面などでP波に変換されて観測点に届いたもので、sP-P時間が震源深さの関数となる性質を震源決定に利用する。先行研究での変換波の検出は、主に目視と観測点ごとの波動特性によるものであった。しかし、特性の揃ったHi-net観測網のデータを用いると、sP変換波やその他の変換波を空間的に連続した波動として検出することが可能である。そこでここでは、地震計の特性を補正して低周波成分を用いると変換波が極めて明瞭に検出できることと、震源位置やメカニズム解の違いによって波形がどのように異なるのかを示す。

方法

地震計の特性補正は、Hi-net地震計特性でのデコンボリューションとF-net地震計特性のコンボリューションを行う再帰型数値フィルタ (Maeda et al., 2011) を作用させて行なった。変換の妥当性はF-net観測点での波形と比較して確認した。この変換により、地震計の固有周波数よりも低周波成分の波形の利用が可能になる。さらに、地震波形をwiggle表示して振幅の符号に応じて波形に着色する視覚化と、振幅の大小に応じて表示振幅を変えるauto gain controlを導入した。これらの処理を施した波形記録のペーストアップを作成して、変換波の出現の有無と波動の特徴を調べた。

また、変換波の起源を検討するために、OpenSWPC (Maeda et al., 2017) による3次元波動伝播シミュレーションも用いた。この目的には、観測波形と同様なペーストアップに加えて、スナップショットでの波動の追跡が有効である。

今回の検討は東北地方太平洋沖合で発生した地震を対象とした。気象庁CMT解カタログを基に、以下の2通りの地震群を抽出した。マグニチュードの範囲は4.3から6.4である。

- (1) 宮城県沖にほぼ東西に並ぶ低角逆断層型地震。これらはプレート境界で発生していると考えられる。同じ領域でのその他の断層タイプの地震も加えた。
- (2) 岩手県沖で発生している低角逆断層型地震。震央が近く断層タイプは同じでも、セントロイド深さが15 km程度異なるものを含むように抽出した。

変換波とその特徴

多くのペーストアップ記録において明瞭なsP変換波を検出することができた。sP波は震央距離100 km程度においてS波波群から分離し、震央距離とともに見かけ速度が増加してP波のそれに漸近し、震央距離400 km程度まで追跡することができる。sP波の空間的連続性には周波数依存性があり、フィルタの周波数が0.1-0.5 Hzにおいて最も明瞭で、高周波になるにつれて不明瞭になる。これは、低周波成分ほど地殻の不均質構造の影響を受けにくいため、短周期地震計記録を広帯域化することの効果をよく示している。また、震源位置に近い地震に対するペーストアップ記録の再現性は、非常に高いことも確認できた。

宮城県沖の地震は東西方向に並ぶように選択したが、sP波やその他の変換波の出現状況は経度とともに変化する。震源位置が東経142.5°以西では、sP波やpP波などの限られた変換波が見られる。震源位置がそれ以东になると、P波と同程度の見かけ速度を持つ変換波が繰り返し現れるようになる。これは海底面と海面の間での多重反射波と考えられる。この多重反射波以降の位相は、震源位置が東経143.5°付近では極めてインコヒーレントである。これは、この付近の海底面下の構造が広い波長範囲にわたって不均質であるためと考えられる。また、メカニズム解が異なると、P波とsP波の相対的振幅の空間分布が明瞭に変化することも確認できた。

岩手県沖ではセントロイド深さが異なる地震についての比較を行なった。深さが異なると変換波の出現時刻が

変わるようにも見えるが、震央位置の違いも影響するため、低周波の波形から目視で確認するのは困難であった。

おわりに

短周期地震計記録を広帯域化して視覚化の工夫を加えることで、sP波は広い震央距離にわたって明瞭に追跡できることがわかった。sP-P時間を精密に読み取ることができれば、震源深さの再決定や地殻構造の推定に有用なデータとなる。その読み取りは、sP波の波形が空間的に連続である性質を用い、平均的波形との相関を用いることで可能となる。

謝辞

本研究では防災科研H-netおよびF-netの観測波形と、気象庁CMT解カタログを使用した。波動伝播シミュレーションには東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用した。（公財）地震予知総合研究振興会からは研究費の援助をいただいた。以上の機関に感謝します。

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room A (S01, S15, S16)

[SPA]PM-3

chairperson:Wataru Suzuki(NIED)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM A

[S01P-02] Towards the detection of the mantle-reflected P wave using seismic interferometry

*Shota Kato¹, Kiwamu Nishida¹ (1. Earthquake Research Institute, the university of Tokyo)

4:00 PM - 4:10 PM

[S15P-08] Theoretical analysis of the long-period velocity pulses observed in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

*Kotaro Tarumi¹, Tomotsugu Watanabe¹, Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹ (1. Okayama University)

4:10 PM - 4:20 PM

[S15P-15] Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

*MUHAMMAD ZAFAR IQBAL¹, Tae Woong Chung¹ (1. Sejong University)

4:20 PM - 4:30 PM

[S16P-07] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics in the Landslide Areas Derived from Microtremor Observation - Case of Ikutahara, Engaru-cho, Monbetsu-gun, Hokkaido -

*Isamu Nishimura¹, Tatsuya Noguchi², Yusuke Ono², Masanori Kohno² (1. Tottori University, Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2. Tottori University, Department of engineering)

4:30 PM - 4:40 PM

Towards the detection of the mantle-reflected P wave using seismic interferometry

*Shota Kato¹, Kiwamu Nishida¹

1. Earthquake Research Institute, the university of Tokyo

地震波干渉法は2観測点で観測されたランダムな波動場の相互相関関数を計算することにより、片方を仮想的な震源とし、もう片方を観測点とした場合の観測波形(グリーン関数)を推定する手法である(e.g. Snieder et al., 2013)。地震波干渉法では、地震波動場がランダムかつその強度分布が等方・均質であることを仮定する。ランダムな波動場として海洋波浪起源の脈動を解析に用いる場合には、周期5-20 sの帯域で表面波が卓越することが知られている。そのため、脈動を利用した地震波干渉法による地震波速度構造推定の研究では、地殻・上部マントルの3次元構造の推定が主であった(e.g., Shapiro et al., 2005)。しかし、近年では、実体波を抽出することによってより深部の構造を推定することが試みられている。その一例として、マントルの410/660 km不連続面からの反射P波(P410P/P660P)の抽出が報告されている(Poli et al., 2012; Feng et al., 2017)。しかし、これらの反射P波を抽出した先行研究の対象地域は大陸に限られていた。本研究の目的は、防災科学技術研究所Hi-netの上下動記録に地震波干渉法を適用することによりP410P/P660Pを抽出し、反射P波の抽出における波源の空間分布の影響を調べることである。

本研究では以下の手順で各観測点ペアに対する相互相関関数を計算した。用いた波形記録は防災科学技術研究所Hi-net観測点のうち西南日本に存在する240点の上下動記録(2007年-2018年)である。まず、Hi-netの上下動記録を2 Hzにダウンサンプリングした。その上で各観測点について翌日の観測波形との差を計算して元の観測波形の代わりに用いた(Takagi et al., 2020)。これは、Hi-netの機器ノイズ(Takagi et al., 2015)の相互相関関数への影響を抑えるためである。次に、得られた1日長の波形を1024 sの時間窓に分割し、周期5-10 sおよび10-20 sの平均2乗振幅によって時間窓を選択した。選択した時間窓について周波数領域で白色化を行い、周期1-10 sの成分について全観測点ペアの相互相関関数を計算した。

脈動源分布のグリーン関数抽出への影響を調べるため、4-th root vespagramを全観測点ペアに対する相互相関関数について計算した(Rost and Thomas 2002)。その結果、P410Pがオフセット距離0-300 kmで見られ、P660Pはオフセット距離50-100 kmで見られた。また、P660PはP410Pに比べて弱いことがわかった。次にvespagramの方位角依存性を調べるため、観測点ペアを方位角により6グループに分けて各グループのvespagramを計算した。観測点ペアの方位角が0-30°、90-120°、150-180°のグループではvespagram上でP410Pが確認された。

この結果を遠地の脈動P波のスローネス分布(Nishida and Takagi, IASPEI, 2017)と比較した。観測点ペアの方位角が0-30°と150-180°のグループのP410Pはそれぞれ北大西洋や南極海の脈動源によると考えられる。しかし、観測点ペアの方位角が90-120°のグループのP410Pには対応する脈動源がなく、深部での散乱の可能性を示唆している。

地震による影響を評価するために、地震活動が活発な日のみに注目して、相互相関関数の計算を行った。手法は地震($M_w > 6.5$)の起きた461日を用いる点を除き、脈動の相互相関関数の計算手法と同一である。得られた相互相関関数は脈動の相互相関関数と類似しており、この手法では地震の寄与は脈動の寄与に比べて小さい事がわかった。今後はコーダ波部分の相互相関関数を計算し、脈動の相互相関関数との比較を行う予定である。

最後に、得られた反射P波を不連続面の深度に変換するため、Common Middle Point (CMP)重合を行った(e.g., Stein and Wysession, 2003)。具体的には、オフセット距離が500 km以内の各観測点ペアについて反射点の位置でグループ分けを行い、各グループに対して不連続面が水平と仮定しCMP重合を行った。速度構造は

JMA2001(上野ほか、2002)を用いた。CMP重合の結果は水平方向に連続的な410 km不連続面と断片的な660 km不連続面を示した。しかし、太平洋プレートに起因する明確な反射波は検出できなかった。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のHi-netの上下動記録を用いました。記して感謝いたします。

Theoretical analysis of the long-period velocity pulses observed in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

*Kotaro Tarumi¹, Tomotsugu Watanabe¹, Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹

1. Okayama University

1.Introduction

2016年熊本地震では、震源断層ごく近傍で震度7を記録した地震動が観測され、地殻変動を伴った大きな被害が発生した。特に本震(M_{JMA} 7.3)では、西原村小森（熊本県自治体震度観測計）において、観測された加速度記録からの積分によると、地動速度では時間幅約3秒の長周期速度パルスがEW成分とUD成分で見られ、地動変位では水平動、上下動共に約2 mの永久変位が生じたと推定されている。2016年熊本地震の前震と本震に関する震源断層のすべりインバージョンの研究は複数行われており、その多くで西原村の直下にアスペリティが存在し、その内部における破壊フロントはアスペリティ下端付近から地表面に向かって進行したことが示唆されている。そのため、西原村小森で観測された長周期速度パルスの原因が、破壊フロントの進行方向で遠地S波に起因して大振幅パルスが生じる破壊指向性（Forward directivity）なのか、あるいは震源断層ごく近傍で卓越する近地項、中間項の効果なのか議論されている。そこで本研究では、震源断層を単純化したモデルを設定し、全無限均質媒質中の有限矩形断層から生じる近地項、中間項、遠地項を分離した変位の解析解（垂水・竹中、2020, JpGU-AGU）を用いて、長周期速度パルスの成因について理論的に検討した。

2.Simple Asperity Model

Figure.1は本研究で設定した非常にシンプルなアスペリティモデルと西原村を模した観測点の例である。本研究では、Asano & Iwata (2016)を参考に、西原村直下と推定されたアスペリティのみをモデル化し、その寄与のみを考慮した。均質媒質中のP波速度は6.0 km/s, S波速度は3.5 km/sとし、アスペリティの長さは10 km, 幅14 km, すべり3.7 m, ライズタイム1.5 s, すべり角 -140° とした。アスペリティ内部を進行する破壊フロントは水平で、破壊伝播速度はS波速度の0.78倍とし、地表面に向かって進行すると仮定した。また、地表面では自由表面の効果として、振幅を2倍している。

3.Numerical results

Figure.2に地動速度（水平成分）の数値計算結果を示す。全変位に加えて、近地項（本研究では近地項と中間項の和）と遠地項も同様に示している。結果は、非常にシンプルなモデルを用いたにも関わらず、西原村で観測された（加速度記録から推定された）速度波形の特徴、特にEW成分とUD成分で観測された時間幅約3秒の長周期速度パルスを再現できている。この結果により、長周期速度パルスの生成には、近地項が主に寄与しているが、EW成分では遠地項（主に遠地S波）も寄与しており、破壊指向性の効果も考えられる。実際の震源過程の複雑さや背景領域の寄与等を考慮した綿密なモデリングをすることによって、より良く観測波形を再現できるかもしれない。

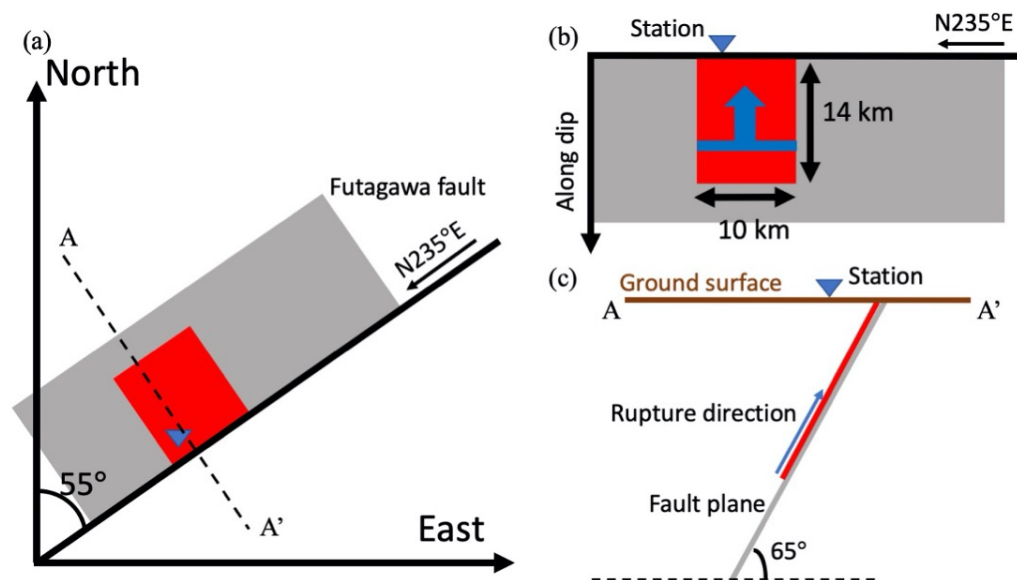


Figure.1 Simple asperity model in this study. Gray and red ((a) & (b):region, (c):line) show fault plane and asperity. Blue triangle denotes the station simulated as Nishihara-village. Blue line and vector indicate rupture front and its direction of propagation, it propagates from the bottom of the asperity to the top of that. (a)The relation between the fault plane/asperity and the station on North-East coordinate system. Strike angle is set as $N235^{\circ}E$. (b)Cross-section of simple asperity model across fault plane. Length and width of asperity are 10 km & 14 km. (c)Cross-section across A-A' (Figure.1-(a)), showing the appearance of the fault under the ground. Dip angle is set as 65° .

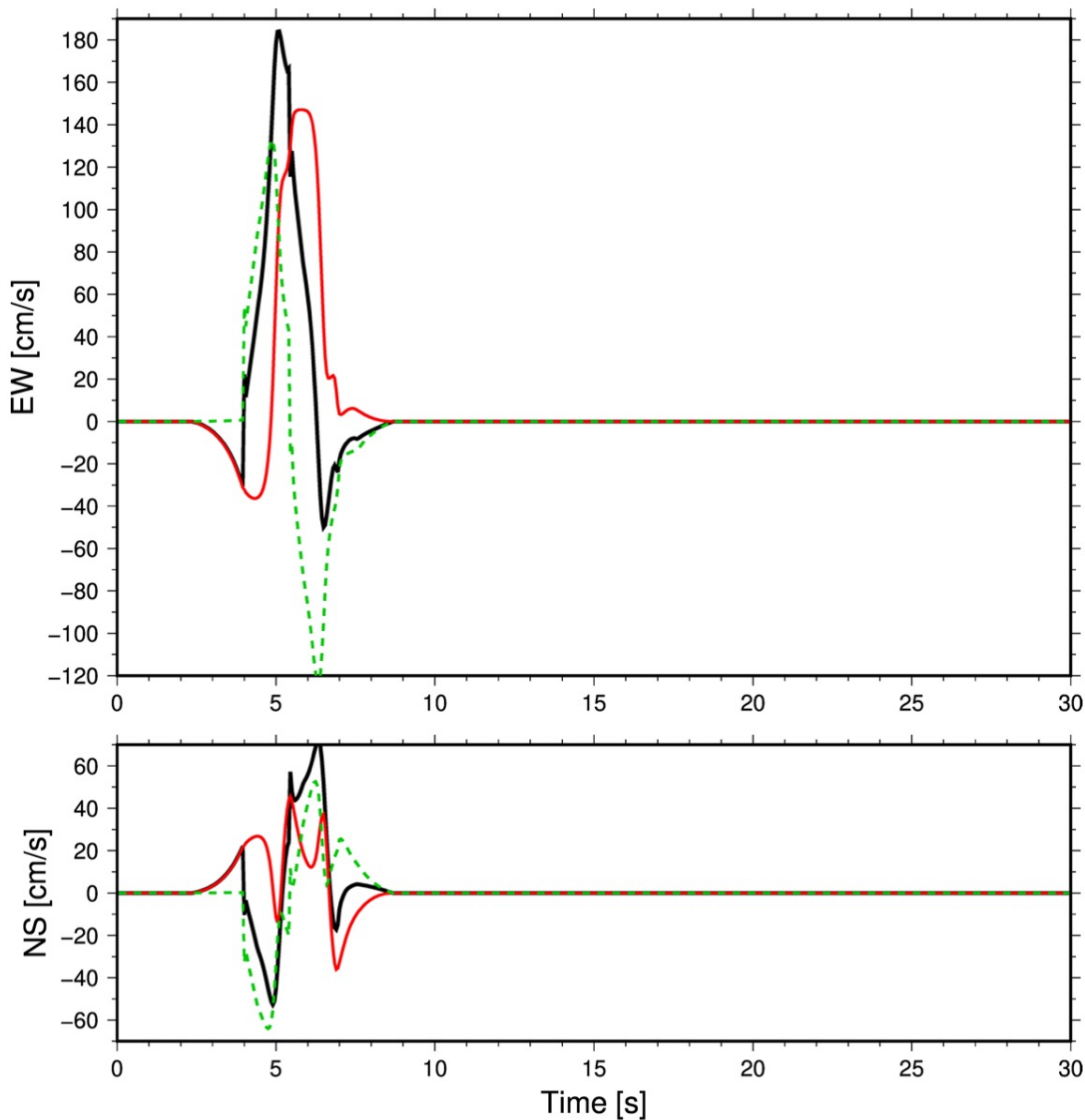


Figure.2 Numerical results of ground velocity of horizontal components. Black, red and green dashed lines indicate total displacements, the summation of near-field term and intermediate terms and far-field terms, respectively.

Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

*MUHAMMAD ZAFAR IQBAL¹, Tae Woong Chung¹

1. Sejong University

A remarkable increase of scattering attenuation (Q_s^{-1}) at low frequency was found associated with hazardous earthquakes in Japan and Korea in 2016. Applying Multiple Lapse Time Window Analysis (*MLTWA*) to N-S component seismograms recorded in the before earthquake period (*BEP*) and after an earthquake period (*AEP*), the Q_s^{-1} values were compared for M7.0, 6.6, and 5.8, occurred in Kumamoto (*K*), Tottori (*T*), and Gyeongju (*G*). The *BEP* and *AEP* were set to obtain enough data; while *G* was 5 and 14 years, *K* and *T* event was 5 and 5 years, and 4 and 3 years, respectively. The obtained events of the periods were 186 and 117 for Korea, whereas 501 and 619, 176 and 194 for two Japan events, respectively. To find the crustal variation associated with earthquakes, focal depths of events were shallower than 30 km and the hypocentral distance of seismograms was shorter than 80 km. The observed stations were applied by coda normalization to correct different earthquake sources and site amplification factors. The magnitude range of events was selected between 2.0 and 4.0. For band-pass filtered with five central frequencies of 1.5, 3, 6, 12, and 24 Hz, the best fit values for Q_s^{-1} and Q_i^{-1} (intrinsic attenuation) were obtained by comparison between observed energy curves and theoretical energy curves derived from direct simulation Monte Carlo method (Yoshimoto, 2000) with a focal depth of 10 km. The error bars of the values, derived from Fisher's *F* distribution with the confidence value of 60 %, shows reliably shorter lengths with more than 20 observations. Between *BEP* and *AEP* of the Q_s^{-1} values, the higher difference was observed at lower frequencies –remarkable at 1.5 Hz and negligible for 24 Hz. Whereas *G* event being the greatest difference in the epicentral region, the *T* event showed reliable difference with over the error bar range. However, *T* events showed little relevance of differences in the epicentral region.

The crustal inhomogeneity caused by open cracks had been observed in the seismically active area by coda analysis using tomography developed by Nishigami (1991). *MLTWA* also showed the seismic inhomogeneity by comparison of difference of Q_s^{-1} between *BEP* and *AEP*. The difference corresponds well to event magnitude represented by peak ground acceleration (*PGA*). The high difference in *K* and *G* events generally correlated with the high *PGA* area. However, the *T* event shows less relevance despite the large magnitude. This may be due to earthquakes with a comparable magnitude that occurred in the vicinity, such as *M* 7.0 in 1943 and *M* 6.7 in 2000. In the *K* event, six earthquakes (*M* > 6.0) occurred in inland since 1920, but only one earthquake (1975 *M* 6.1) occurred near the event region. On the other hand, the Korean peninsula, including the *G* event region has been quite seismically stable land until *G* event - the largest event is only *M* 4.2 since 1905 and no inland events with estimated *M* > 5.2 for 270 years. Thus the duration period of seismic silence also strongly correlates with the difference of Q_s^{-1} between *BEP* and *AEP*.

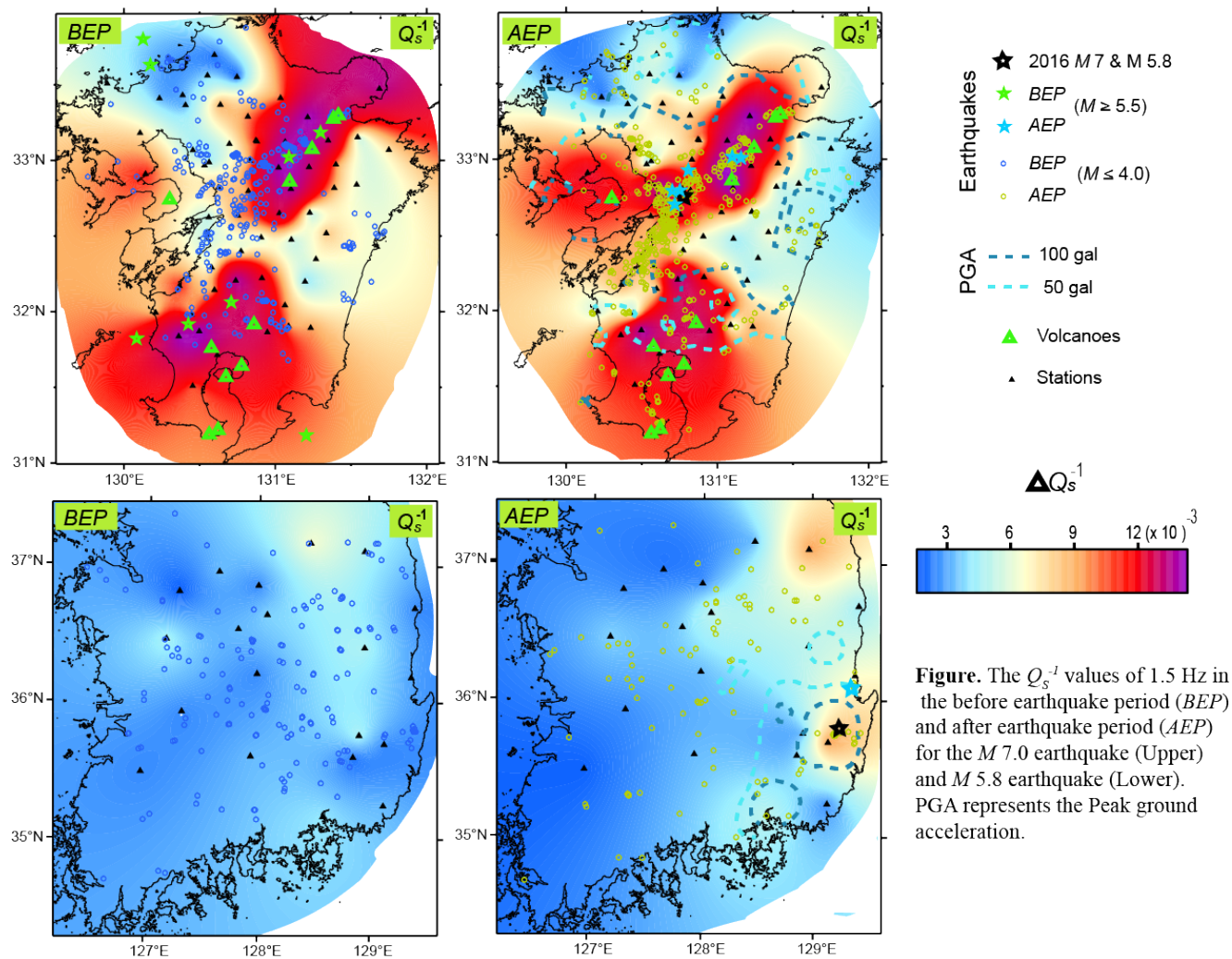


Figure. The Q_s^{-1} values of 1.5 Hz in the before earthquake period (BEP) and after earthquake period (AEP) for the M 7.0 earthquake (Upper) and M 5.8 earthquake (Lower). PGA represents the Peak ground acceleration.

Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics in the Landslide Areas Derived from Microtremor Observation - Case of Ikutahara, Engaru-cho, Monbetsu-gun, Hokkaido -

*Isamu Nishimura¹, Tatsuya Noguchi², Yusuke Ono², Masanori Kohno²

1. Tottori University, Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, 2. Tottori University, Department of engineering

近年、地震による地すべりによって大規模な被害が生じている。地すべりは過去の活動履歴より、繰り返し同じ場所で発生することが多く、地すべり地域の地盤震動特性の把握は重要である。地すべり地域の地盤の状態を知る手段として、微動探査を用いた評価がこれまで数多く行われている（たとえば島，1981）。これはすべり面上部の堆積物は非常に柔らかく、速度コントラストが明瞭である可能性が高いためである。本研究では古期地すべり地形が確認されている北海道紋別郡遠軽町の生田原公園にて微動観測を行い、地すべり堆積物をどの程度評価できるのかを検討した。

生田原公園は地すべり防止区域に指定されており、地質図から地山は碎屑岩及び火山碎屑岩であること、ボーリングデータから風化岩の上に砂、シルト、泥を含む地すべり堆積物が8-15m程度存在することが分かっている。観測は2019/9/24、25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42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1-80mの範囲で、5地点で実施した。観測には加速度地震計JU410を4台、およびセンサに速度計ジオフォン（UD成分のみ観測、固有周波数4.5Hz）4台とデータロガーに分解能27bitのHKS9700を用いた。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。またボーリングデータのあるライン上で、麓の観測点を基準とする水平動のスペクトル比(H/H)を求めた。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、山麓の平坦な場所ではH/Vスペクトルのピークが明瞭な点が多く、卓越周期が0.1-0.3秒であった。地すべり堆積物が確認されている場所のH/Vはフラットな形状であり、ピーク値が2.0を下回る点が多く、卓越周期が不鮮明である傾向がみられた。H/H比から各ラインでピークのある周期帯が異なっており、近傍の観測点でスペクトルの形状が多様であることがわかった。アレイ観測より表層に $V_s=130-200\text{m/s}$ の低速度層がみられ、これが地すべり堆積物に相当すると考えられる。一部の観測点において、山間部で微動の振幅レベルが小さいことから明瞭な位相速度が推定できなかった。今後は人工的に振源を与えるなど、観測方法を工夫して実施する予定である。

本研究は日本学術振興会科研費18H01523の助成を受けたものです。

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room B (S07, S08)

[SPA]PM-3

chairperson: Makiko Ohtani (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM B

[S07P-01] Seismic structure of the lithosphere-asthenosphere system beneath the oldest seafloor– the broadband dispersion analysis of the Oldest-1 (Pacific Array) data

*Yuki Kawano¹, Takehi Isse¹, Akiko Takeo¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Hajime Shiobara¹, Nozomu Takeuchi¹, Hiroko Sugioka², YoungHee Kim³, Hisashi Utada¹, Sang-Mook Lee³ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. Seoul National University)

4:00 PM - 4:10 PM

[S08P-03] Reinterpretation of a legacy 3D seismic reflection data to elucidate unusual sinistral M5.5 earthquake fault below a deep gold mine in a mafic sill and dike complex

*Koichiro Suzuki¹, Musa Sipiwe Manzi², Hiroshi Ogasawara¹, Taku Noda¹, Lindsay Linzer³, Raymond J Durrheim², Bennie Liebenberg⁴ (1. Ritsumeikan University, 2. University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3. SRK(Pty)Ltd, 4. Moab Khotsong mine)

4:10 PM - 4:20 PM

[S08P-08] Quantitative evaluation of the effect of static stress change of large earthquakes on activity change of volcanic deep low-frequency earthquakes

*Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

4:20 PM - 4:30 PM

[S08P-11] Derivation of all the static XBIEM kernels for 2D earthquake cycle simulation in heterogeneous media

*Kazuki Ohtake^{1,2}, Nobuki Kame², Makiko Ohtani² (1. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:30 PM - 4:40 PM

[S08P-15] Verification of conditions for intermittent events associated with powder shear using the Discrete Element Method

*Shinichi Oba¹, YUTA Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

4:40 PM - 4:50 PM

Seismic structure of the lithosphere-asthenosphere system beneath the oldest seafloor—the broadband dispersion analysis of the Oldest-1 (Pacific Array) data

*Yuki Kawano¹, Takehi Isse¹, Akiko Takeo¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Hajime Shiobara¹, Nozomu Takeuchi¹, Hiroko Sugioka², YoungHee Kim³, Hisashi Utada¹, Sang-Mook Lee³

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. Seoul National University

太平洋プレート上に地震・電磁気観測のアレイを設置し、海洋マントル構造の年代依存性や太平洋プレートの成長過程の解明を目標とした国際協力計画「Pacific Array」が2018年に始動した。日韓合同観測チームは、2018年から2019年に、マリアナ海溝沖の太平洋底における「Oldest-1アレイ」の設置・回収作業を行った。このアレイは太平洋最古の海洋底(170 Ma)に位置するため、直下のリソスフェア-アセノスフェア構造には、太平洋プレートの成長過程が記録されていると期待され、Pacific Arrayの目標達成に向けて重要な役割を担う。

そのなかで本研究は、アレイ直下のマントルの地震波速度構造の解明を目指し、広帯域表面波アレイ解析を行う。まず、地震波記録のS/N比向上のために、鉛直成分記録について、傾斜ノイズおよびコンプライアンス・ノイズの低減処理を行い、次に、表面波アレイ解析により、アレイ内平均位相速度を計測する。短周期(<40秒)では地震波干渉法を用い、4成分(鉛直成分, 圧力成分, Radial成分, Transverse成分)から、基本モード及び1次モード・レイリー波と基本モード・ラブ波の位相速度を計測した。長周期(>30秒)では遠地地震波解析から、基本モード・レイリー波の位相速度を計測した。さらに、レイリー波のアレイ内平均位相速度(7-100秒)から、深さ150 kmまでの1次元等方 β_v (Vs)構造を推定した。得られた構造は「ふつうの海洋マントル」計画の海域B(140 Ma)の構造(Takeo et al., 2018)とよく似たものであった。今後は方位異方性やより長周期の位相速度の計測を行い、過去のプレート拡大方向や現在のマントルの流れ場を推定するとともに、より深部の構造の解明を目指す。

Reinterpretation of a legacy 3D seismic reflection data to elucidate unusual sinistral M5.5 earthquake fault below a deep gold mine in a mafic sill and dike complex

*Koichiro Suzuki¹, Musa Sipiwe Manzi², Hiroshi Ogasawara¹, Taku Noda¹, Lindsay Linzer³, Raymond J Durrheim², Bennie Liebenberg⁴

1. Ritsumeikan University, 2. University of Witwatersrand, School of Geosciences, 3. SRK(Pty)Ltd, 4. Moab Khotsong mine

2014年、南アフリカ・オークニー市付近でM5.5の地震が発生した。この地域の典型的なM>4の金鉱山誘発地震は、深さ3 km以浅の鉱山採掘深度で北東-南西走向の正断層で発生する。しかし、このM5.5地震は、金鉱山の採掘深度よりも下の、北北西-南南東走向のほぼ鉛直な未確認の構造における、3~7 kmの深度範囲を左横ずれ的に破壊した。

このM5.5地震の破壊域は、南アフリカのKaapvaal Cratonの上に29年前に堆積し変成した、Witwatersrand Super Group内のWest Rand Groupであった。この上から地表(海拔約1.3 kmの準平原)までは、金鉱脈の地層を持ち、主に珪岩からなるCentral Rand Group、洪水玄武岩 (Ventersdorp Super Group; 27億年前)、主にドロマイトからなるTransvaal Group(26-27億年前)の順に折り重なっている。一部には、さらに若いPretoria GroupやKaroo Super Group(約2億年前)も地表付近で見られる。

金鉱山は、開発前に反射法地震探査を行っており、採掘深度(地下2~3km)の解釈が行われていた。小笠原ら(2017 AGU)は、M5.5地震の余震発生帯と交差する4本の2次元側線の1992年の探査データを再解析し、M5.5地震の余震発生帯とほぼ一致するVertical Zone of Disruption (VZD)を確認することができた。またこのVZDが、採掘レベルの既知の断層に切られていないことも確認した。しかし、M5.5の地震発生場所は、幾世代もの断層運動やSill・Dikeの貫入を経験し、地質構造が非常に複雑であったため、2次元データだけでより詳細を議論することができなかった。

Manzi et al.とLinzer et al.(2018地震学会)は、上記の4本の2次元側線と余震発生帯のより広い範囲を含む3次元反射法探査データ(範囲15km×8km; TWT4秒; binサイズ25m×25m; 以下3Dキューブ)が再解析できる状態であることを見つけ、野田(2020 立命館大修士論文)は、West Rand Group中の反射体の三次元形状やVZDをより明瞭に描き出すことに成功した。この3Dキューブには、ICDP・DSeis計画(小笠原他、ディープマイニング2019、EGU 2020、JpGU 2020a)が、地下2.9kmから余震発生帯まで掘削した3つの孔井(総延長1.6km)が含まれていた。本研究では、DSeis計画のコアや孔内検層や、鉱山内でマップされている地質情報と、3Dキューブ内の反射体を詳しく比較する。余震発生帯の東側は、金鉱脈を含むCentral Rand層群が深く落ち込んでいることが知られているが、野田(2020)はその構造解釈を行うことができていなかった。3Dキューブと比較するための地表探査掘削のデータが見つかっていなかったからである。それを入手できたため、本研究では、余震発生帯の東側の構造解析も行う。本ポスターではこれらを報告する。

謝辞 ICDP, JSPS (Core-to-Core; SA NRF bilateral), 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画, 立命館大学, AngloGold Ashanti, Harmony

Quantitative evaluation of the effect of static stress change of large earthquakes on activity change of volcanic deep low-frequency earthquakes

*Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

背景

近年のHi-netなどの地震観測網の発達により、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。本研究で対象とする東北日本では、活火山周辺の深さ20~40kmで低周波地震が発生している。2011年に発生した東北沖地震以降、蔵王などの火山地域では低周波地震活動が活発化した一方で、ほとんどの地域で活動が静穏化しているという特徴がある(小菅・他2017)。これらの活動変化は東北沖地震で生じた応力変化に起因していると考えられているが、未だ定量的な解析はなされていない。そこで、本研究では巨大地震の断層モデルから計算された応力テンソルと低周波地震のメカニズムの類似度を評価することによって、巨大地震の静的応力変化と低周波地震活動の関係を調べた。

手法

最初に、東北日本の26個の火山領域について低周波地震のメカニズムを決定した。メカニズムの決定にはS波とP波の振幅比を用い、自由表面とサイト特性の影響を補正した。サイト特性の補正にはメカニズムが既知である通常の地震を用いた。補正された振幅比に対し、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、イベント毎に100回のブートストラップテストによって精度が良いイベントのみを抽出した。次に、フリーソフトのCoulomb 3.3 (Toda et al., 2005; Lin et al., 2004) を用いて領域ごとに巨大地震から期待される応力テンソルを計算した。東北地方で発生した巨大地震として、2011年東北沖地震、東北沖地震のafterslip、2008年岩手宮城内陸地震を考慮した。得られた応力テンソルと低周波地震のメカニズムのモーメントテンソル間の距離をTape and Tape(2012)(eq.67)に基づいて計算し、3年毎に移動平均を取ってメカニズム間の距離の時間変動を調べた。

結果

まずメカニズム解析によって262個の解を決定した。得られたメカニズムは最も多い蔵王で40個以上、その他ほとんどの地域では5-10個程度であった。メカニズムに含まれるCLVD成分を見てみると有意なCLVD成分を持つイベントもあるものの、その多くはDouble-Couple成分が卓越していることがわかった。このことから、低周波地震の初動の破壊プロセスは普通の地震とあまり変わらない可能性が示唆される。次に、応力変化と低周波地震のメカニズムについて、蔵王と鳴子で特徴的な結果が得られた。活発化した蔵王では東北沖地震による応力変化に応答し、2012年頃から応力変化に似たメカニズムに変化していることが分かった。また、2014年ごろからafterslipに対応した若干の変動も見られた。蔵王では活発化するまでに1-2年ほど期間があることを考えると、粘弾性的に応力変化が伝わり、地震後のafterslipや粘弾性緩和といった長期的な変動が地震活動に影響していると考えられる。一方、静穏化した鳴子では蔵王と逆のトレンドを示しており、東北沖地震による応力変化を見てみると、2012年頃は2つのテンソルがあまり似ていないという傾向が得られた。この結果を踏まえると、鳴子では変化した応力場が、LFEのメカニズムに整合的でなかったために静穏化したと考えられる。

Derivation of all the static XBIEM kernels for 2D earthquake cycle simulation in heterogeneous media

*Kazuki Ohtake^{1,2}, Nobuki Kame², Makiko Ohtani²

1. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

地震観測の高密度化・高精度化により地下の構造不均質と地震の破壊過程の関連性が明らかになりつつある。一方、そのような地震発生機構の理解に必要となる地震破壊の理論的研究は、その数学的困難さから均質媒質中に限られてきた。不均質媒質の地震破壊の理論的研究の確立は地震学における喫緊の課題であり、Kame and Kusakabe (2012) は、非平面断層破壊に適した境界積分方程式法 (BIEM) を不均質媒質に拡張する拡張境界積分方程式法 (eXtended BIEM: XBIEM) を提案した。2次元動的破壊問題で必要となる動的XBIEM核関数を導出し、媒質コントラストに支配される動的破壊過程の局面を明らかにした (Kusakabe and Kame, 2017)。

動的破壊問題では一様な初期応力場を仮定することが一般的であるが、構造不均質の存在は地震発生に至る応力場の形成過程にも当然影響を及ぼすはずである。しかしながら、これに関する理論的研究は未だほとんど進んでいない。そこで、本研究では、構造不均質中の断層周辺の応力場形成過程から地震の破壊過程までの地震サイクルシミュレーション (Earthquake Cycle Simulation: ECS) の計算コードをXBIEMを用いて開発し、この未解決の問いに答えたいと考える。ここでは、その第一歩として、XBIEM-ECSの計算コード開発に必要な2次元静的XBIEM核関数を解析的に閉じた形で導出する。

2. XBIEMのECSへの適用

ECSでは通常、静的弾性平衡方程式に動的慣性項を近似的に導入した「準動的スキーム」が用いられる。XBIEMを準動的ECSに展開するためには、静的XBIEM核関数を導出する必要がある。媒質境界を考慮した静的な表現定理 (e.g., Aki and Richards, 2002) は、式(1)の通りである。BIEMでは断層面の滑りが震源になるが (右辺第1項。従来の無限媒質中のBIEMはこの項のみ)、XBIEMではさらに媒質境界でのトラクション (第2項) 及び変位 (第3項) が震源になる。第3項の変位応答関数は従来のBIEM核関数を用いて表すことができるので、第2項のトラクション応答の核関数を新たに導出する必要がある。

3. 2次元面外・面内変形における全ての静的XBIEM核関数の導出

2次元面外変形・面内変形のそれぞれにおいて、離散化された媒質境界要素震源 ($x_a < \xi_1 < x_b$, $\xi_2=0$) 上で区間一定値をとるトラクション入力に対する、媒質内部の任意の受信点での変位及び応力に対するトラクション応答関数 (静的XBIEM核関数) を導出する。変位に対しては、静的グリーン関数 (e.g., Tada and Yamashita, 1997) の積分のみで表されるが、応力に対しては、グリーン関数の微分・積分関数として表される。これらの計算結果は全て初等関数のみで陽に表される。例えば、面外変形の変位 u_3 と応力 σ_{32} のトラクション応答関数は式(2), (3)のように表せる。同様の計算を変位と応力の全成分に対して行うことにより、2次元静的XBIEMのトラクション応答関数の解析表現式を完全に得ることができる。

4. 今後の展望

まず、導出された静的XBIEM核関数が正しいことを確認するため、mode IIIで表層堆積層がある横ずれ断層を静的XBIEMでシミュレーションして、FEMでシミュレーションしたKame et al. (2008) の結果と比較する。次にXBIEMをECSに適用し、XBIEM-ECSを均質媒質中で行って、既往のECSの結果と比較してモデルの妥当性を検証する。そして不均質媒質中のXBIEM-ECSに進む。

References

- Kame and Kusakabe, 2012, Proposal of Extended Boundary Integral Equation Method for Rupture Dynamics Interacting With Medium Interfaces, *Journal of Applied Mechanics*, doi: 10.1115/1.4005899.
- Kusakabe and Kame, 2017, Derivation of 2-D XBIEM kernels and their application to a rupture crossing a bimaterial interface, *Geophysical Journal International*, 210(3), 1374-1387
- Aki and Richards, Quantitative Seismology, 2nd. Ed., pp.700, University Science Books, Sausalito, California
- Tada and Yamashita, 1997, Non-hypersingular boundary integral equations for two-dimensional non-planar crack analysis, *Geophysical Journal International*, 130(2), 269-282
- Kame, Saito, and Oguni, 2008, Quasi-static analysis of strike fault growth in layered media, *Geophysical Journal International*, 173(1), 309-314

$$\begin{aligned}
 u_q(\mathbf{x}) = & \int_{\Gamma} d\Gamma(\mathbf{y}) \Delta u_i(\mathbf{y}) n_j(\mathbf{y}) c_{ijkl}(\mathbf{y}) \frac{\partial}{\partial y_l} G_{qk}(\mathbf{x}; \mathbf{y}) \\
 & + \int_S dS(\boldsymbol{\xi}) T_i(\boldsymbol{\xi}) G_{qi}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\xi}) \\
 & - \int_S dS(\boldsymbol{\xi}) u_i(\boldsymbol{\xi}) n_j(\boldsymbol{\xi}) c_{ijkl}(\boldsymbol{\xi}) \frac{\partial}{\partial \xi_l} G_{qk}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\xi})
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$u_3^{t_3}(x_1, x_2) = \frac{t_3}{2\pi\mu} \left[(x_1 - x_b)(\log r_b - 1) + x_2 \arctan \frac{x_1 - x_b}{x_2} - (x_1 - x_a)(\log r_a - 1) - x_2 \arctan \frac{x_1 - x_a}{x_2} \right] \tag{2}$$

$$\sigma_{32}^{t_3}(x_1, x_2) = \frac{t_3}{2\pi} \left[\arctan \frac{x_1 - x_b}{x_2} - \arctan \frac{x_1 - x_a}{x_2} \right] \tag{3}$$

Verification of conditions for intermittent events associated with powder shear using the Discrete Element Method

*Shinichi Oba¹, YUTA Mitsui²

1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University

自然地震(数十m以上の規模)では、すべり変位Dは断層長Lでスケールされることが知られている(Scholz, 1982; Dawers et al., 1993)。この種の地震のスケーリング関係は、小さい側には、室内実験における岩石の微小破壊(AE)まで延長できるのかもしれない(Yoshimitsu et al., 2014)。一方、室内実験におけるスティックスリップは地震現象の有力なアナログと考えられてきたが、我々は、実験研究者により出版されている18の論文のデータから、自然地震のL-Dスケーリング関係との乖離を発見した。具体的には、自然地震のスケーリング関係の延長よりも実験のすべり変位Dは大きくなる傾向にある。とりわけ、人工的なガウジを挟んだすべり実験では、この傾向が顕著に見られた。

この結果に基づいて、本発表では、粉体の摩擦にコントロールされたスティックスリップについて理解を深めるため、3次元個別要素法に基づく粉体せん断の数値シミュレーション(e.g., Hazzard and Mair, 2003)による数値実験を行う。事前の予備実験により、ある種の条件下では自発的にスティックスリップのような間欠的なイベントが発生することを確認できた。このための条件やその様態の変化について、粉体の大きさ(粒径)・回転の有無・パッキングの状態などを変えながら調べる。現在のところ、イベントの最大すべり速度に対して、粒径が負の相関を示すこと、および、パッキングの強さが複雑に影響を及ぼすことがわかっている。また、この2つのパラメータと比較して、背景のせん断速度の影響は小さいことを確認している。

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room C (S06, S09)

[SPA]PM-3

chairperson: Yasuhiro Yoshida (Meteorological Collage)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM C

[S06P-01] Towards continuous seismic imaging from offshore to land along the Japan trench: effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities)

*HyeJeong Kim¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Takeshi Akuhara¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:00 PM - 4:10 PM

[S06P-04] S-wave structure in the sediment beneath S-net stations estimated by V/H ratio of Rayleigh-wave (Scholte waves) extracted from ambient noise

*FUKUSHIMA SHUN¹, KIYOSHI YOMOGIDA¹ (1. HOKKAIDO UNIVERSITY)

4:10 PM - 4:20 PM

[S09P-05] Repeater earthquakes observed in seismicity around the Fukushima-Ibaraki border since the 2011 Tohoku-oki Earthquake

*Rina Ikeda¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Tohoku University, 2. Meteorological Agency)

4:30 PM - 4:40 PM

[S09P-12] Stress change estimated from GNSS displacement and seasonal variations in seismicity

*Taku Ueda¹, Aitaro Kato¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

4:40 PM - 4:50 PM

Towards continuous seismic imaging from offshore to land along the Japan trench: effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities)

*HyeJeong Kim¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Takeshi Akuhara¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Kim et al. (2019, AGU) have reported receiver function common conversion point (CCP) stacking image from ocean to land beneath Japan by collecting data from the land seismometers and the ocean bottom seismometers (OBSs). OBSs lie on thick (few kilometers) and low velocity ($V_p \sim 2$ km/s) sediments along the Japan trench (e.g., Nakamura et al. 2014, Takahashi et al. 2004). The sediment layer makes a time delay of energy arrivals between the vertical component and the horizontal component upon an incident teleseismic P wave, which is measurable. The continuous image was made by correcting the time delay of the image from the OBS records. However, there are two more issues left to be understood toward continuous seismic imaging. First is the amplitude affected by the seafloor sediment. The second is the lateral heterogeneities offshore that deviate from the land 1D velocity.

The receiver function CCP stacking imaging with OBS show amplitudes larger (~ 5 times stronger) than those with the land seismometers (Kim et al. 2019, AGU). The amplification due to sediments may cause bias in the interpretation of the deeper structure phase amplitudes unless properly separated. We examined various sediment models to understand and retrieve the large amplitude scale observed in the OBS CCP stacking image. The amplification of the converted phases at the vicinity of the slab top is insufficient to explain with single-layered sediment. Preliminary results show that a very-low shear wave velocity thin layer on the top of the sedimentary layers increases the overall amplitude of the phases in the receiver functions.

The offshore region of the Japan trench has a heterogeneous velocity structure (Matsubara et al. 2019, Intech Open). Due to the ~ 10 % velocity perturbation existing in tomography models offshore and the systematic difference along subduction direction, an approximation of the structure as a 1D velocity model cannot be held. The different velocity models utilized in offshore receiver function migration affect the connectivity of the slab structure along the dipping direction of the slab. Comparisons of the travel times between the 3D structure from tomography (Matsubara et al. 2019) and various 1D velocity profiles are tested. For instance, using the JMA model for migrating the receiver functions from OBS data makes the image stretch to deeper depths whereas structures from active source experiments are limited to a certain profile. The comparisons show that using a station-wise 1D velocity showed a good approximation of the 3D structure for migration.

The two effects of offshore structures (sediment layers and lateral heterogeneities) done in this work are essential components for continuous seismic imaging from offshore to land, which will enable imaging along the entire Japan trench.

S-wave structure in the sediment beneath S-net stations estimated by V/H ratio of Rayleigh-wave (Scholte waves) extracted from ambient noise

*FUKUSHIMA SHUN¹, KIYOSHI YOMOGIDA¹

1. HOKKAIDO UNIVERSITY

近年、DONETやS-netなどの海底地震計技術の発達により、地震波干渉法による高解像度な浅部、地震波速度構造推定が可能となりつつある。また、沈み込み帯における、プレートの折り曲がりにより生じるクラックや間隙水の移動に伴う浅部速度構造と異方性構造の時空間変化を推定することが可能になりつつある。表面波の波形記録から地球表層の速度構造を推定する際、表面波が伝搬する2点間の位相速度や群速度の分散曲線がこれまで用いられてきた。これとは別にレイリー波の鉛直・水平振幅の比(V/H)からも観測点の近くでの地震波速度構造を推定できることが知られている(e.g., Lin et al., 2014)。

本研究では、まず海水が存在する場合のV/Hの感度カーネルを定式化し、いくつかのモデルに対して求めた。次に、S-netの観測点はケーブルに固定されているため、観測された、3成分波形は上下・東西・南北成分(E, N, U)とは一致しない。そこで、Takagi et al., (2019) の手法により、元の3成分波形からE, N, U成分波形へと補正した。このようなデータに対して、2017年1月から3月までの3ヶ月間において、S-netのサブアレイS3内の微動記録に対して相互相関関数を計算し表面を抽出した。このための処理として、100hzから4hzにダウンサンプリングを行い、2秒から40秒のバンドパスフィルターを適用し、さらに1 bit 化を行なった(e.g., Bensen et al., 2007)。一例を図1に示すが、このように、群速度0.2-0.3 km/sで伝搬する表面波の抽出に成功した。この波は堆積層中のS波速度が海水中のP波速度(1.5km/s)よりも遅い時、堆積層と海水の境界を伝搬するScholte waves に対応する。

抽出した表面波に対して、安定したV/H値を得るために、抽出した表面波に対して、周期4秒から20秒までの各周期ごとにgaussian filterを適用し、transverse方向とヒルベルト変換を行なったradial方向のzero-lag cross-correlations coefficient を計算した(e.g., Tanimoto and Rivera., 2007)。その値が0.7以上の波形に対して、V/H値とそれらの中央値を各周期ごとに計算した。その結果、周期5.5秒から7.5秒において、堆積層中の低速度層が存在するにも関わらず、V/Hの水平動に比べて上下動が卓越していることを明らかになった(図2)。これは、観測点の上側にP波だけが存在する層(海水)があると上下動成分だけが選択的に大きくなるという、感度カーネルでの計算結果とも調和的である。

最後に、V/Hデータの中央値に対して線形インバージョンを行い、浅部速度構造を求めた。海底から深さ3kmまでのS波速度の構造決定を図3に示す。推定した海底面表層のS波速度は0.65 km/sであり、Scholte wavesが伝搬する条件の低速度層が存在が確認された。

今後、さらに多くの観測点や異なる観測期間で同様な計算を行えば、堆積層中の地震波速度の時空間変動が求められると考える。

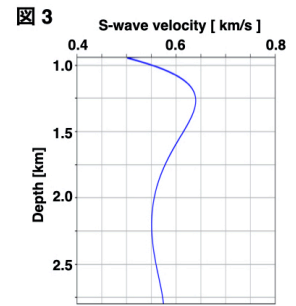
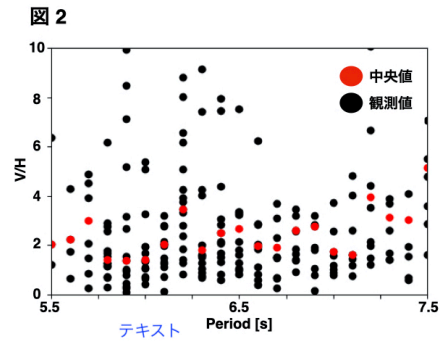
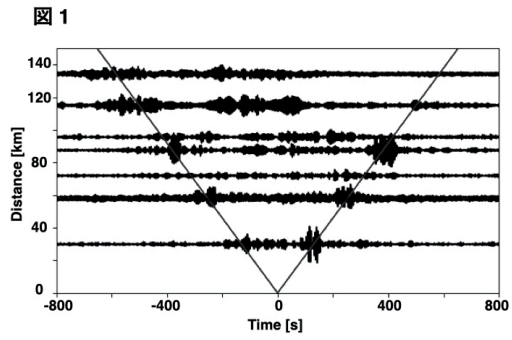


図 1 : サブアレイ S3 の観測点 01 とその他の観測点 (02 から 11) における VV 成分の相互相関記録. 実線は伝搬速度 0.23 km/s を示す.

図 2 : サブアレイ S3 の観測点 01 で観測された V/H の観測値 (黒) とそれらの中央値 (赤) .

図 3 : サブアレイ S3 の観測点 01 で推定された S 波の速度構造 (海底面より深い部分) .

Repeater earthquakes observed in seismicity around the Fukushima-Ibaraki border since the 2011 Tohoku-oki Earthquake

*Rina Ikeda¹, Keisuke Yoshida¹, Ryo Takahashi², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹

1. Tohoku University, 2. Meteorological Agency

茨城県北部では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つの地震は同一の断層面上で発生している可能性が指摘されている(Fukushima et al., 2018; Uchide, 2017, JpGU)。内陸の断層でこのような短期間に地震がくり返される事例は大変珍しいため、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な事例である。小中地震の中にも繰り返し地震が存在する場合、それらは非地震性滑りの指標となる(Nadeau & Johnson, 1998)。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。しかし、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、2011年3月の東北地方太平洋沖地震の発生後に福島-茨城県境周辺において活発に発生している小中地震を用いて精密な震源再決定を行い、それに基づき繰り返し地震の存在を調べた。

本研究では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MJMA1の地震46002個を対象に震源の再決定を行った。手法はYoshida & Hasegawa (2018)と同様に、Double-Difference法(Waldhauser & Ellsworth, 2002)を用いた。これは、波形の相互相関により高精度に求めたP,S波の相対到達時刻差データから震源位置を推定する手法であり、その精度を大幅に向上することができる。Takahashi et al. (2019, JpGU)が同じ活動を対象に小中地震の震源の再決定を行っているが、彼らが用いた地震のマグニチュード範囲は MJMA 2である。本研究ではより多くの地震の再決定を行うことにより、より詳細な断層構造を求めた。

得られた震源分布から、茨城県北部に西へ傾斜する明瞭な一枚の面構造が見られた。これはTakahashi et al. (2019, JpGU) がM6地震が繰り返したことを推定したのと同じ面構造である。

繰り返し地震の検出のために、46002個の地震の全ペアの地震間距離と応力降下量20MPa (池田・他, 2020, JpGU)を仮定した際の断層サイズ(半径)を計算した。そして、地震間距離*10<平均断層サイズ(半径)、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とみなした。茨城県北部の断層上にはそのような地震が2 MJMA 3で1000個弱、 MJMA3で数100個見つかった。これまで繰り返し地震はプレート境界沿いで発見されることが多かったが、この結果は内陸でも繰り返し地震は発生しうることを示唆している。

Stress change estimated from GNSS displacement and seasonal variations in seismicity

*Taku Ueda¹, Aitaro Kato¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

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)の年変動による応力変化に対応して、地震活動が季節変動していることが報告されている(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)、その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Heki (2003)で地震活動の季節変動性が指摘されている積雪領域において、地表の変位データから推定される地下での応力変化と地震活動の発生時期との比較・検討を行う。まず、GEONETの水平成分から Bedford and Bevis (2018)の手法を用いて地震や余効滑り等の過渡的な変化を除くことで季節変動成分を抽出する。次にSagiya et al. (2000)の手法を用いて季節変動する歪の時系列を推定し、Okada et al. (1985)の手法を用いて地下での応力変化を計算する。その後、観測された地震(気象庁一元化処理震源カタログ)のメカニズム解に対する剪断応力、法線応力、 ΔCFS などの地震発生時の応力変化を計算し、Johnson et al. (2017)と同様に、地震が季節変動する応力変化に対し、どういうタイミングで発生するか定量的に評価する。

Session for Selection of Student Presentation Award | Session for Selection of Student Presentation Award | Room D (S17, S24)

[SPA]PM-3

chairperson:Hiroaki Tsushima(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

Thu. Oct 29, 2020 4:00 PM - 5:00 PM ROOM D

[S17P-04] Simulation of Tsunami Sediment Movement in Kamoda Pond, Tokushima Prefecture, assuming High Tide

*Takuya Saito¹, Toru Takeda¹, Kei Yamashita², Toshitaka Baba¹ (1. Tokushima University, 2. Tohoku University)

4:00 PM - 4:10 PM

[S17P-09] Early estimation of tsunami heights with a Kalman filter: Combination of ocean-bottom pressure gauges and accelerometers

*Ayumu Mizutani¹, Kiyoshi Yomogida¹ (1. Hokkaido Univ.)

4:10 PM - 4:20 PM

[S17P-11] Tsunami inundation prediction using regression models using tsunami database

*Masato Kamiya¹, Toshitaka Baba¹ (1. Tokushima University)

4:20 PM - 4:30 PM

[S24P-01] Determination of *P*-wave first motion polarities and moment tensors for hydraulically-induced AEs using CNN technique

*Rui Tanaka¹, Makoto Naoi¹, Youqing Chen¹, Kazune Yamamoto¹, Keiichi Imakita¹, Naofumi Tsutsumi¹, Akihiro Shimoda¹, Daiki Hiramatsu¹, Hironori Kawakata², Tsuyoshi Ishida¹, Eiichi Fukuyama¹, Hiroyuki Tanaka³, Yutaro Arima³, Shigehiro Kitamura³, Daisuke Hyodo³ (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University, 3. JOGMEC)

4:30 PM - 4:40 PM

[S24P-06] Numerical experiments towards detection of deep low-frequency tremors from seismic waveform images via convolutional neural network

*Ryosuke Kaneko¹, Hiromichi Nagao^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Kazushige Obara², Hiroshi Tsuruoka² (1. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

4:40 PM - 4:50 PM

Simulation of Tsunami Sediment Movement in Kamoda Pond, Tokushima Prefecture, assuming High Tide

*Takuya Saito¹, Toru Takeda¹, Kei Yamashita², Toshitaka Baba¹

1. Tokushima University, 2. Tohoku University

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震からもわかるように、今後起こりうる巨大地震・津波を想定するためにはできるだけ過去に遡り地震・津波の発生をより正確に調査することが求められる。この過去の地震・津波の調査においては、津波堆積物は物的証拠として重要な情報となる。東日本大震災以降、津波堆積物調査は精力的に行われ、津波堆積物を予測するための土砂移動シミュレーションモデルも高橋ら

(1999, 2000, 2011) や藤井ら(1998)によって開発されているものの、調査結果とシミュレーション結果の比較はまだ十分ではない。著者らはこれまでに、それらのモデルのうち、高橋らの土砂移動モデル

(STM) を用いて南海トラフ沿いの沿岸湖沼での津波堆積物調査結果(岡村ら, 2012)と比較した。震源モデルは内閣府が想定した最大クラスの南海トラフ地震と1707年宝永地震(Furumura et al., 2011)を利用した。なお、STMシミュレーションにおける潮位はT.P.=0mとした。その結果、岡村らによる調査地点の一つである蒲生田大池では数千年前に一度、層厚およそ10cmの津波堆積物が確認されているが、シミュレーションではどの震源モデルにおいても湖内の土砂の移動は確認できなかった。

そこで、STMシミュレーションにおける潮位を満潮位として計算を実施したところ、内閣府の震源モデルでも蒲生田大池への津波の浸水は起こりうるということが分かった。しかし、蒲生田大池内での土砂堆積量を見るとおよそ数cm程度であり、岡村らの調査結果にくらべかなり低い値を示した。

前報(齋藤ほか, 2020, JpGU)までに確認したように、Hirata et al.(2017)の南海トラフ域の3967個の地震シナリオには、研究対象地域のも蒲生田大池に限って言えば、内閣府の震源モデルよりも大きな津波を発生させるモデルが含まれている。それらの震源モデルを使って満潮位仮定でSTMシミュレーションを実施したところ、蒲生田大池の土砂堆積量は最大で10cmとなった。こちらも岡村らで示された津波堆積物の厚さを再現できるほどではなかった。

現状、蒲生田大池の津波堆積物を再現できるSTMシミュレーションには至っていないが、現在と蒲生田大池に津波が襲来した時期とでは地形が異なる可能性がある。また、平常潮位面の高さも異なるかもしれない。古地形や潮位の再現は容易ではないが、次に地形標高やすべり量をいくつか変えた計算を行うことで蒲生田大池の津波堆積物を再現できるケースを調査する予定である。

謝辞：本研究では高橋ら(1999, 2000, 2011)によって開発された土砂移動モデルを利用させていただきました。本研究はJSPS科研費19H02409の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

Early estimation of tsunami heights with a Kalman filter: Combination of ocean-bottom pressure gauges and accelerometers

*Ayumu Mizutani¹, Kiyoshi Yomogida¹

1. Hokkaido Univ.

日本列島太平洋沖に近年整備されたDONETやS-netといった観測網によって、断層近傍における津波観測が可能になった。一方で、津波発生時に発生する水圧変化には水深変化や海底加速度変化などの非津波成分が重畳することが指摘されており(e.g., Saito and Tsushima, 2016)、水圧計による津波即時把握には課題が残されている。

本研究では、DONET・S-netの各観測点に設置されている水圧計・加速度計の記録をKalmanフィルタを介して組み合わせることで海底変位の逐次推定手法を提案する。これまでの研究で開発した、地震時水圧記録から津波・変位成分のみを抽出する手法(Mizutani et al., in press)により得られた波形に対して、そこに含まれる津波成分をノイズ、変位成分をシグナルとみなしてKalmanフィルタを適用した。また、推定した海底変位とMizutani et al.の手法で抽出した水圧波形を比較することで、津波波高の即時推定を試みた。

カルマンフィルタを用いた地震時変位の推定は、陸上観測点においてGNSS観測と加速度計を組み合わせる形でおこなわれており(e.g., Bock et al., 2011)、フィルタの設計はこれらの先行研究の結果を参考におこなった。GNSS観測と水圧計記録の相違点として、GNSS観測の場合はノイズが定常的に加わっていると考えられるのに対して、水圧記録に含まれるノイズである津波が観測されるのは有限の時間のみであることがあげられる。そのため本研究では、ノイズの非定常性を考慮した適応Kalmanフィルタ(e.g., 佐藤・竹井, 1998; Hu et al., 2003)を用いた。さらに、結果の発散を抑制するために、通常のKalmanフィルタを平方根形式に変形した、平方根Kalmanフィルタを用いた(e.g., Haykin, 1996)。

本手法を2016年4月1日に三重県南東沖で発生した地震(Mw 6.0)によるDONET記録に適用した結果、図1のように変位成分(オフセット成分)を低減させることに成功した。しかし、このような結果を得るためには、適応Kalmanフィルタの調節パラメータである忘却係数をあらかじめ適切に設定する必要がある。現段階では、オフセットを十分低減させるためには忘却係数の設定を事後的におこなう必要があるため、実用的な津波即時把握のためには、最適な忘却係数の決定を即時把握に適用できるように改善する必要がある。

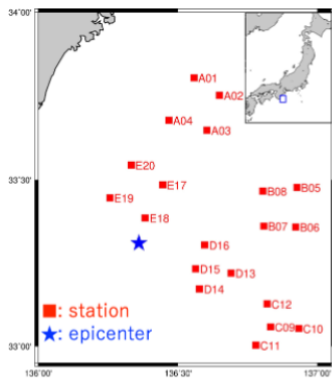
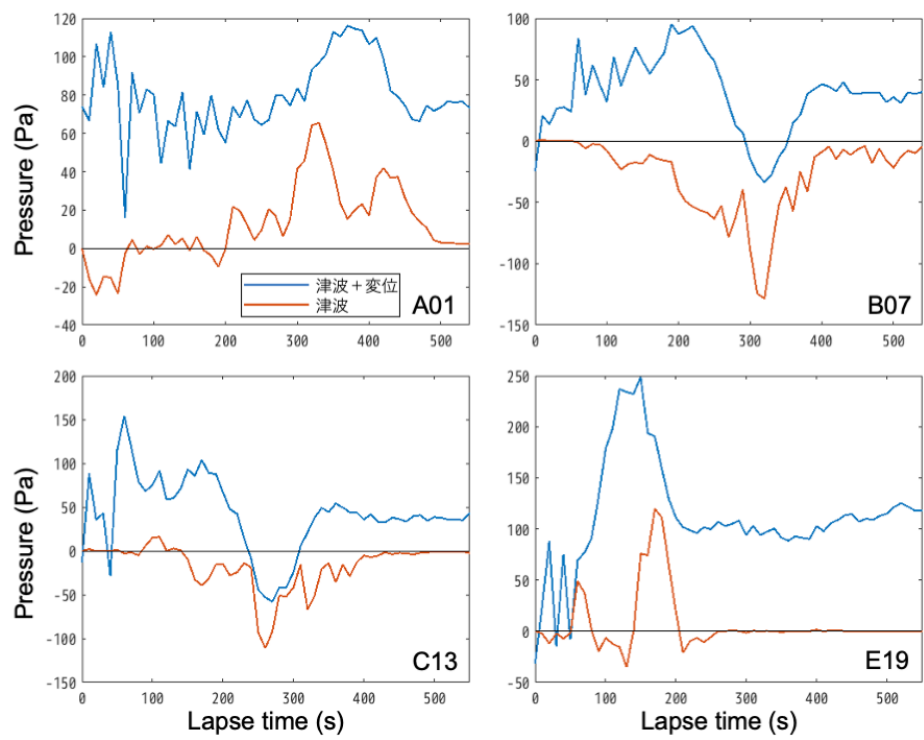


図1

(上)震源と観測点の分布
 (右)観測点A01, B07, C13, E19
 における津波+変位波形(青)と
 その中からKalmanフィルタに
 より抽出された津波波形(橙)



Tsunami inundation prediction using regression models using tsunami database

*Masato Kamiya¹, Toshitaka Baba¹

1. 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）が知られており、Baba et al. (2014)やYoshikawa et al. (2019)などがある。これら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ことが挙げられる。本研究ではこの実現を目的とする。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するために、ここではクラスタリング解析の非階層的手法の代表例であるk-means法を用いた。解析対象は、徳島県阿南市周辺地域とし、浸水深データは内閣府シナリオの11ケースによるものを使った。k-means法はクラスタ分割数をあらかじめ分析者が設定する必要があり、恣意性が残る。このため、分割数を変えて何回か解析し、あるひとつのクラスタの浸水深データの平均値で規格化した標準偏差（NSD）を調査した。ここで任意ながらNSDが0.2未満を目安とした。分割数を9とした場合、NSDが0.2未満を満たしたクラスタは全体の55.6%であった。分割数を18とした場合では63.6%、クラスタ数を27とした場合では64.6%であった。分割数18と27の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。重回帰分析により浸水エリアの浸水深を予測する手法として、べき乗の回帰モデル（Yoshikawa et al., 2019）を用いた。回帰モデルを構築するクラスタは、NSDが0.177であった分割数18の第17クラスタとした。回帰モデルの構築に利用したデータは、津波浸水データベース（武田，2019）の3967ケース中、予測エリアでの最大浸水深が高いシナリオを順に100個用いた。目的変数として当該クラスタ内の浸水深データの平均値、最大値、標準偏差を、説明変数としてDONET（地震・津波観測監視システム）の海底水圧計51箇所での最大津波高を利用した。最後に構築した回帰モデルを使って、当該クラスタの内閣府シナリオケース3の浸水深の平均値、最大値、標準偏差を予測した。それぞれ1.76m、4.46m、2.23mとなった。正解は1.58m、3.03m、0.28mであり、必ずしも精度が良いとは言えない。今回、回帰モデルの構築に利用したシナリオの個数は100個であり、かつ、大津波のシナリオに偏っていた。これが低精度の原因かもしれない。引き続き調査する予定である。

謝辞：本研究はJSPS科研費19H02409の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

Determination of *P*-wave first motion polarities and moment tensors for hydraulically-induced AEs using CNN technique

*Rui Tanaka¹, Makoto Naoi¹, Youqing Chen¹, Kazune Yamamoto¹, Keiichi Imakita¹, Naofumi Tsutsumi¹, Akihiro Shimoda¹, Daiki Hiramatsu¹, Hironori Kawakata², Tsuyoshi Ishida¹, Eiichi Fukuyama¹, Hiroyuki Tanaka³, Yutaro Arima³, Shigehiro Kitamura³, Daisuke Hyodo³

1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University, 3. JOGMEC

シェールオイル・ガス開発や地熱開発では、岩盤の透水性を向上させ、資源の流路を確保するために水圧破碎技術が利用されている。本研究では、水圧破碎による亀裂造成プロセスを明らかにするため、室内水圧破碎実験を実施し、実験中に生じるacoustic emission event（以下AE）を測定して、そのモーメント・テンソル（MT）解を推定した。大量のAEのMT推定を効率よく行うために、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）によるP波初動極性の読み取りを行い、得られた結果をもとに個々のAEのMT解を推定した。

実験は、65 x 65 x 130 mmの直方体形状の黒髪島花崗岩10個に対して5 MPaの一軸圧縮載荷下で実施した。供試体中央部に穿孔した破碎孔に1 cc/min ($1.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$) で破碎流体を圧入することで水圧破碎を行い、試験中に生じるAEを、供試体に設置したプリアンプ内蔵型の高感度・広帯域のM304Aセンサ16個、共振型のPICOセンサ（共振周波数550 kHz）8個の計24個のAEセンサを用いて14bit, 10 MHzで連続収録した。得られたAEデータからSTAとLTAの比を用いる手法（Allen 1978）による波形抽出を行い、供試体の速度異方性を考慮した非線形最小二乗法（Rothman et al. 1974）を用いてAEの震源位置・発震時刻を推定した。さらに、得られた震源を初期震源としてdouble difference法（Waldhauser & Ellsworth 2000）により震源を再決定した。

上記の処理で得られたすべてのイベントのうち、14個以上のM304Aセンサでシグナルノイズ比15以上の波形が得られたイベントに対してP波初動極性を手動で読み取り、得られた49375個の読み取り結果をCNNの訓練に用いた。図1に本研究で構築したCNNと訓練結果を示す。このネットワークでは、理論走時周辺の150サンプル分の波形を入力とし、その波形の初動極性を0（引き）から1（押し）の連続量で出力する。訓練は、手動読み取りデータの80%を訓練データ、20%を検証データとして行った。M304Aで得られた波形に対する結果ではepoch=72, PICOではepoch=47で訓練・検証データに対する損失の差が最小となった。この時の精度は出力値の閾値を0.5（0.5以上を押し、0.5未満を引き）とした場合、それぞれ95.30%, 96.83%, 閾値を0.05（0.95以上を押し、0.05未満を引き）とした場合、それぞれ99.22%, 99.11%であった。初動極性の自動読み取りにはこれらのepochでの重みパラメータを用い、また、出力値の選定には閾値0.05を採用し、出力値が0.05-0.95である読み取り結果は以降の解析に用いなかった。CNNにより1399767個の波形の初動極性の自動読み取りに成功し、この読み取り結果を元に各波形の理論走時周辺の30サンプルから初動振幅値を読み取り、これらを用いて49299イベントのMT解を推定した。

AEの時空間分布からは、破碎孔での流体圧の急降下（breakdown）を伴う最終的な亀裂造成の準備過程として2つのフェーズが確認された。最初のフェーズ（第1拡大フェーズ）は、破碎孔での流体圧が、breakdownが生じる圧力の10-30%で始まり、破碎孔から時間とともに三次元的に広がるAE活動で特徴づけられる。2つ目のフェーズ（第2拡大フェーズ）は、breakdown圧の90-99%で始まり、破碎孔から最大圧縮軸方向に二次元的に進展するAE活動で特徴づけられる。得られたMT解析結果からは、第1拡大フェーズでは様々な方向の開口型AEが起こったことが示唆された。第2拡大フェーズでは、AE震源が描き出す面上での開口に対応するメカニズム、すなわち古典的水圧破碎理論から予想される開口型のイベントが支配的であることがわかった。また、第2拡大フェーズでは開口型AEに加え、せん断型AEも生じたことが確認された。これらの結果から、第1拡大フェーズは、既存の空隙を利用して破碎流体が岩体に浸透する過程、第2拡大フェーズは、boreholeから主亀裂が生じ進展する過程に対応すると解釈できる。

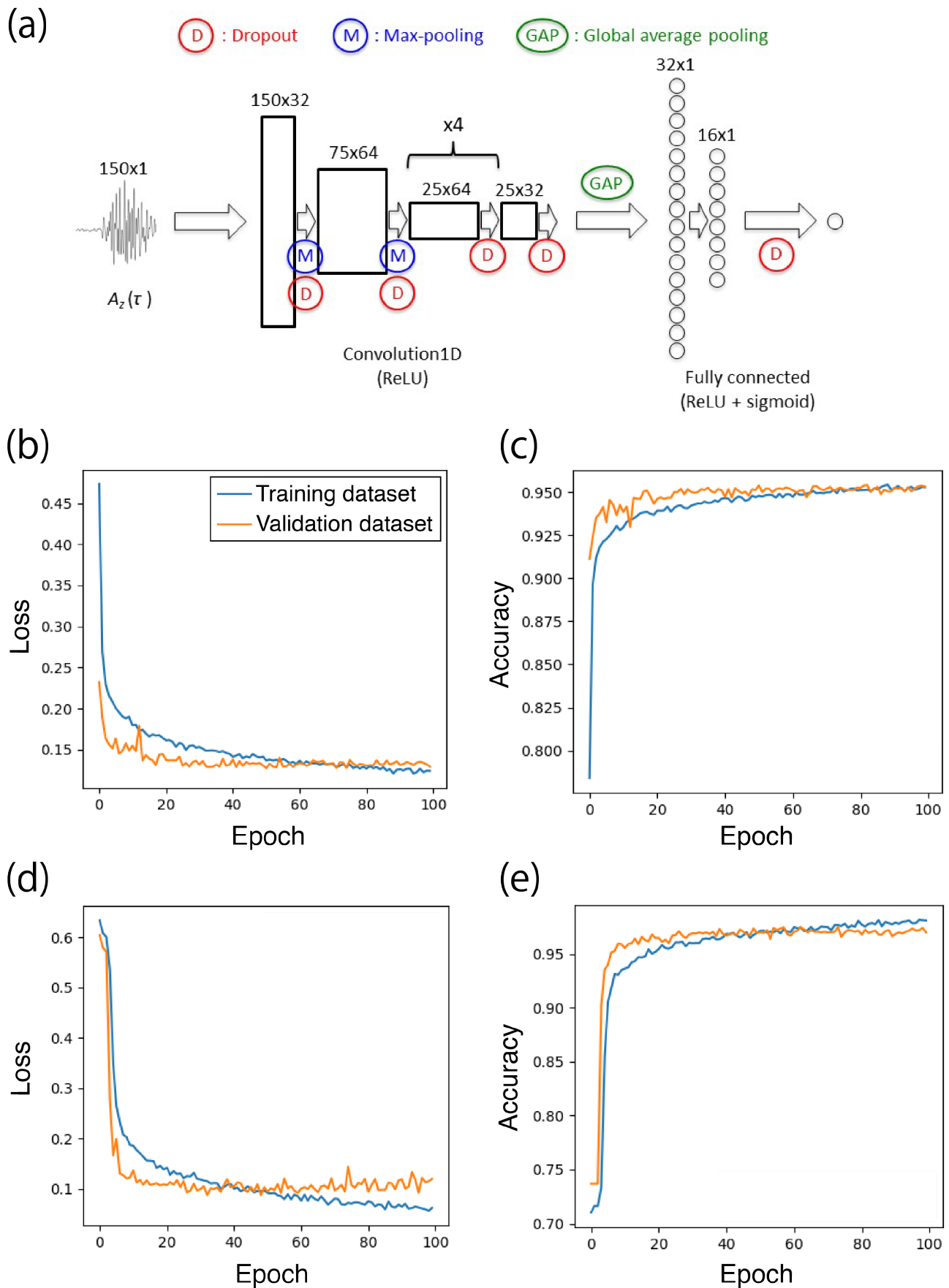


図1 (a) P波初動極性読み取り用のCNN. (b, c) M304Aで受振された波形を用いた訓練の結果. (d, e) PICOで受振された波形を用いた訓練の結果.

Numerical experiments towards detection of deep low-frequency tremors from seismic waveform images via convolutional neural network

*Ryosuke Kaneko¹, Hiromichi Nagao^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Kazushige Obara², Hiroshi Tsuruoka²

1. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

概要：

深部低周波微動は防災科学技術研究所高感度地震観測網Hi-netの構築によって初めて観測的に見出された[1]ため、それに関するデジタルデータは直近の約20年分しか存在しない。数十年～数百年という地震発生サイクルの時間スケールを考えると、過去の地震波形データにスロースリップイベントに伴う深部低周波微動が記録されているかどうかを詳しく調べ、その特徴をさらに明らかにすることは、地震学において当然検討すべき重要課題である（例えば [2]）。

現在のようなデジタル記録以前においては、地震波形データはペンによって振動を連続的に記録紙に直接書き記したドラム式のアナログ紙記録として保存されていた。このようなアナログ紙記録には、深部低周波微動や通常の地震などの自然現象や、波浪起源の脈動や人為的振動などに由来するノイズの振動が記録されているだけでなく、一定時間ごとに挿入される刻時のためのパルス波形、ペンまたは記録紙の駆動部分の不具合が原因と思われる不自然な波形、ペンの消耗や記録紙の交換によって発生したと思われるデータの欠損なども含まれる。そのため、深部低周波微動を解析対象とする場合、その振幅は微弱でノイズとほぼ同等であり、しかも刻時パルスなどが重畳するため、微動の波形をデジタイズし解析に用いることは極めて困難である。

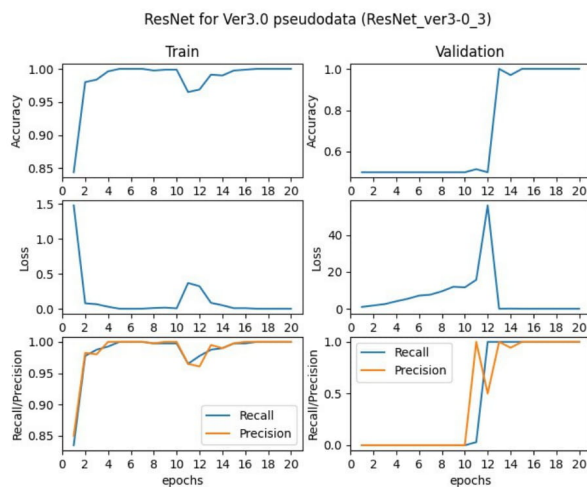
本研究では、畳み込みニューラルネットワークに基づき、アナログ紙記録から深部低周波微動を自動で検出するためのアルゴリズム開発を目指す。畳み込みニューラルネットワークとは、主に画像認識や手書き文字認証などで用いられる深層学習の手法の一種であり、人間の視覚細胞のはたらきを層の重なりによって数理的なモデルとして表現するのが特徴である。2010年代に入ってから画像認識のタスクにおいて従来の手法を遥かに上回る性能を発揮したことで注目されるようになり、現在ではスマートフォンのアプリなど我々の身近なものまで支える技術である。畳み込みニューラルネットワークの学習において人間が指定するのは主にモデルの構造のみであり、画像から特徴を抽出するために必要な内部のパラメータのチューニングはすべてコンピュータによって自動的に行われるため、人間の労力をあまり必要としない上に人間の画像認識の精度を上回る結果を得られることが期待される。そのため、モデルの構造や学習手法に関する研究は現在も盛んに行われている。例えば、2016年に発表されたResidual Network (ResNet) [3]においては、残差学習の考え方を取り入れており、一定数の層を通過したあとの出力値に元々の入力値を足し合わせるShortcut Connectionと呼ばれるシンプルな構造をモデルに組み込むことによって、深層化による過学習やパラメータ数の増加などのデメリットを軽減しつつ汎化性能を向上させることに成功している。

はじめから多種多様のノイズが入った実データを用いて一からモデルを学習させるのは困難であるため、まずは実際のアナログ記録を参考に振動現象や観測ノイズを模した疑似データを作成し、ノイズの大きさや種類を変えながらモデルの学習を行う。背景ノイズとして脈動を再現した波形と正規ノイズを加え、深部低周波微動が観測された場合と観測されなかった場合の疑似画像をそれぞれ作成し、ResNetと同じくShortcut Connectionの構造を持ったモデルにおいて学習を行った。脈動および微動を再現する波形については、正規ノイズを実際の周波数帯域に合わせてバタワースフィルタに通過させることによって作成した。その結果、図(a)のように学習済みモデルは微動の観測の有無をほぼ確実に正しく判定することができた。また、Grad-CAM [4]に基づきモデルの判定に影響を与えた部分を可視化したヒートマップを作成したところ、図(b)のように微動が観測された場合のデータに関して微動の発生時間帯まで正しく検出できることが確認できた。最終的には実データと同レベルのノイズが入った疑似データで学習させたモデルを初期モデルとして、そこから実データによる学習を行うというファインチューニングと呼ばれる手法を用いる。本研究の目標であるアナログ紙記録

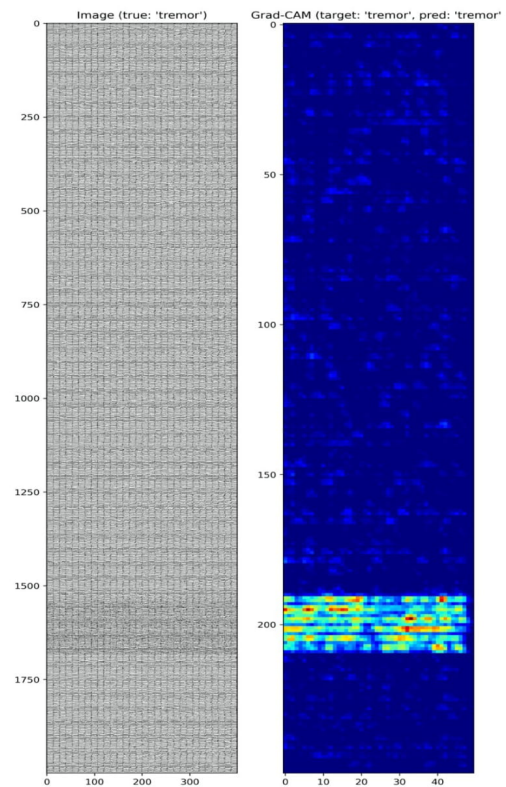
からの深部低周波微動の自動検出が達成されれば、現在よりも長期間の深部低周波微動に関するデータベースの構築が可能になることが期待される。

参考文献

- [1] K. Obara, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681, 2002.
- [2] M. Kano and Y. Kano, Possible slow slip event beneath the Kii Peninsula, southwest Japan, inferred from historical tilt records in 1973, *Earth, Planets and Space*, 71(95), 2019.
- [3] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, Deep residual learning for image recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016.
- [4] R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh and D. Batra, Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization, *International Journal of Computer Vision*, 128, 336-359, 2020.



(a) モデルの学習結果



(b) Grad-CAM に基づくヒートマップ