

Sat. Oct 31, 2020

ROOM P

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

S02P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S02P-01] Development of the Web application for WIN system -Porting of the function of IT kyoshin seismometer-

○Takamori Ito¹ (1.aLab Inc.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-02] Development of monitoring systems using seismic intensity meters equipped with a MEMS acceleration sensor

○Jun Uchida¹, Masahiro Oi², Kaoru Yoshioka³,
Shoichi Shiozaki³, Yoshiya Ouchi¹, Keizo Motohashi¹

(1.KINKEI SYSTEM CORPORATION, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Chiba Prefectural Government)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-03] Accuracy of time and pressure due to calibration intervals by an atomic clock in an ocean bottom pressure gauge

Ayumu Yokoyama¹, OToshinori Sato¹ (1.Chiba Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-04] Calibration of instrument responses in high-density broadband seismograph networks based on teleseismic waveform data

○Takeshi Kimura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-05] Change of social activities due to the spread of COVID-19 infections detected by seismograph networks

○Katsuhiko SHIOMI¹, Takeshi KIMURA¹, Youichi ASANO¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-06] Comparison between results of array analysis of tiltmeters and template matching analysis of broadband seismometers

○Youichi Asano¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

S03P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S03P-01] Recent long-term slow slips along the Nankai Trough detected by GNSS objective detection method

○Akio Kobayashi¹, Takahiro Tsuyuki¹
(1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-02] Long-term SSE along the Nankai trough detected by GEONET

○Shinzaburo Ozawa¹, Ryouji Kawabata¹, Hiroshi Munekane¹ (1.Geospatial Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-03] Automated detection of short-term slow slips using multiple GNSS stations by trend filtering

○Keisuke Yano¹, Masayuki Kano² (1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-04] Estimation of short-term slow slip event source model considering opening-mode dislocation

○Noa Mitsui¹, Satoshi Itaba², Yasuhiro Asai¹,
Takanori Matsuzawa³, Norio Matsumoto² (1.Tono Research Institute of Earthquake Science, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-05] Correction of initial changes in borehole type strain meter

○Takahiro Tsuyuki¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-06] Evaluation of forecasting post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake 2020

○Satoshi Fujiwara¹, Mikio Tobita¹, Shinzaburo Ozawa¹ (1.Geospatial Information Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-07] Very Long-term Post-seismic Gravity Changes due probably to Long-term Viscoelastic Relaxation

○Yusaku Tanaka¹ (1.ERI, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-08] Development of analysis tool “GARPOS” for open GNSS-A

○Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹ (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)
4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-09] A numerical simulator for the new GNSS-A data analysis software “GARPOS”

○Yuto Nakamura¹, Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota² (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)
4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-10] Effect of sound speed profile on GNSS-A seafloor positioning

○Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹ (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)
4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S08. Earthquake physics

S08P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S08P-01] Temporal change in the rupture velocity of repeating earthquakes occurring in and around the source area of the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Kazuya Tateiwa¹, Tomomi Okada¹, Naoki Uchida¹, Toshio Kono¹ (1.Tohoku University)
4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-02] Spatial and Temporal Variations in Rupture Processes of the Repeating Earthquake Sequences off-Iwate following the 2011 Tohoku-oki Earthquake

○Ahyi Kim¹, Naoki Uchida² (1.Yokohama City University, 2.Tohoku University)
4:00 PM - 5:30 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)
4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-04] ICDP DSeis: Evaluation of Spatial Stress Change by Diametrical Core Diameter Analysis of M5.5 Aftershock Zone Core

○Yoshihiro Mima¹, Ryogo Tadokoro¹, Shunsuke Yoshida¹, Mitsuya Higashi¹, Kensuke Sakaguchi¹, Bennie Liebenberg, Siyanda Mngadi⁴, Yasuo Yabe², Akio Funato³, Takatoshi Ito², Raymond Durrheim⁴, Hiroshi Ogasawara¹ (1.Ritsumeikan University, 2.Tohoku University, 3.Fukada Geological Institute, 4.University of the Witwatersrand)
4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-05] Detection and spatial distribution of non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake by “0.1 manten” hyperdense seismic observation

○Motokoshi Takumi¹ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University)
4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-06] Validating the Method of Estimating Fault Slip Angles by Using the Wallace-Bott Hypothesis and Regional 3D Stress Field

○Takeo Ishibe¹, Toshiko Terakawa², Akinori Hashima³, Masashi Mochizuki⁴, Ritsuko S. Matsuura¹ (1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Nagoya University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-07] Temporal variation of the inelastic strain field around the hypocentral area of the 2016

Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan
○Ayaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoto², Azusa Shito³, Hiroshi Shimizu², 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 Science, Kyushu University, 3.Department

of Biosphere-Geosphere Science Faculty of
Biosphere-Geosphere Science Okayama University of
Science)

4:00 PM - 5:30 PM

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

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

4:00 PM - 5:30 PM

- [S08P-09] Investigation of multi-segment earthquake on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

OYuko Kase¹ (1.GSJ, AIST)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S08P-10] Dynamic earthquake sequence simulation with a spectral method without periodic boundary condition

OHiroyuki Noda¹ (1.Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM

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

OKazuki 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)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S08P-12] Modelling of spontaneous and periodic slow slips and a tsunami earthquake in the northern part of the Japan Trench

ORyoko Nakata¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹
(1.Graduate School of Science, Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S08P-13] Numerical model of slow slip events in the Nankai and Hyuganada region revisited from recent observational studies

OTakanori Matsuzawa¹, Bunichiro Shibasaki²
(1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Building Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S08P-14] Examination of constitutive relation for the fault zone along the plate boundary in subduction

zone

OTakane Hori¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

4:00 PM - 5:30 PM

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

OShinichi Oba¹, YUTA Mitsui² (1.Grasuate School of Science and Tecnology, Shizuoka University,
2.Faculty of Science, Shizuoka University)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S14. Earthquake prediction and forecast

S14P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

- [S14P-01] Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

OHironobu Kamikubo¹ (1.Hamamatsu Hokusei Jhs)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S14P-02] On the upheaval of Muroto during the Nankai earthquake and the time- predictable model

Oyasuhiro umeda¹ (1.previous DPRI Kyoto univ.)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S14P-03] The possibility to argument about the existance of "Repeating Tremor" by the log from Twitter(2020)

OMichiko Imazu¹ (1.jisin-kurumiru)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

S16P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

- [S16P-01] Estimation of Subsurface Soil Depth Affecting Spatial Variation of Ground Motion between Adjacent Points

ORyoichi Tokumitsu¹, Yu Yamamoto¹, Yasuo Uchiyama¹, Susumu Ohno² (1.Taisei Corp.,
2.Tohoku Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S16P-02] Overview of ground motions on the islands of Kagoshima, Japan -Using seismograph data of Kagoshima Prefecture-

ONobuyuki Yamada¹, Kimiyuki Asano², Tomotaka Iwata² (1.Kochi University, 2.DPRI Kyoto)

University)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S16P-03] Long-period ground motion simulation in the Kanto region: effects of 3D CMT solutions
 ○Shunsuke Takemura¹, Kazuo Yoshimoto², Katsuhiko Shiomi³ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Yokohama City University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S16P-04] Influence of Seismic Source Locations of Interplate Earthquake along the Nankai Trough on Long-Period Ground Motions in Osaka Bay Area
 ○Tomohiro Oguchi¹, Masayuki Nagano² (1.Tokyo University of Science Graduate School, 2.Tokyo University of Science)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S16P-05] Microtremor Array Surveys in and around the Lowland Area along the Kizu River, Kyoto
 ○Kimiya Asano¹, Masayuki Yoshimi², Tomotaka Iwata¹, Hiroto Uebayashi³, Michihiro Ohori⁴, Haruko Sekiguchi¹, Hiro Nimiya², Tatsuya Noguchi⁵ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, GSI/AIST, 3.Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, 4.Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, 5.Faculty of Engineering, Tottori University)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S16P-06] Microtremor array surveys on the Eastern Part of the Nara Basin, Japan
 ○Masayuki YOSHIMI¹, Kimiyuki ASANO², Tomotaka IWATA², Hiro NIMIYA¹, Takeshi SUGIYAMA (1.Geological Survey of Japan/AIST, 2.DPRI, Kyoto university)

4:00 PM - 5:30 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)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S16P-08] S wave seismic reflection and microtremor surveys on the Shikano fault appeared in the 1943 Tottori earthquake
 ○Takao Kagawa¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada², Tetsuya Takameoto² (1.Faculty of Engineering, Tottori University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd.)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S16P-09] Estimation of gravity basement structure in the central Tottori, Japan
 ○Tatsuya Noguchi¹, Isamu Nishimura¹, Takao Kagawa¹ (1.Tottori University)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S17. Tsunami

S17P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

- [S17P-01] Tsunami heights along the Sea of Japan coast from active faults off-Hokkaido and off-Tohoku
 ○Kenji Satake¹, Iyan Mulia¹, Tomoko Goto¹, Satoko Murotani², Takeo Ishibe³ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Museum of Nature and Science, 3.Association for the Development of Earthquake Prediction)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S17P-02] Regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for the Sea of Japan
 ○Iyan Mulia¹, Takeo Ishibe², Kenji Satake¹, Aditya Gusman³, Satoko Murotani⁴ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction, 3.GNS Science, 4.National Museum of Nature and Science)

4:00 PM - 5:30 PM

- [S17P-03] Consideration of tsunami source of the AD1662 Hyuga-nada earthquake occurred off Miyazaki Prefecture
 ○Kei Ioki¹, Yusuke Yamashita², Yoshihiro Kase³ (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Miyazaki Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization)

4:00 PM - 5:30 PM

- [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 - 5:30 PM

[S17P-05] Characteristics of the 1854 Tokai and Nankai Tsunamis Observed at West Coast of North America

○Satoshi Kusumoto¹, Kentaro Imai¹, Ryoko Obayashi¹, Narumi Takahashi^{1,2}, Takane Hori¹ (1.JAMSTEC, 2.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-06] Kinematic behavior of fault segments near the trench based on tsunami inversion source models of the 2011 Tohoku earthquake

○Yoshinori Satou¹, Masanobu Koba², Masafumi Matsuyama³, Hayato Mori⁴ (1.Unic, 2.EGC, 3.CRIEPI, 4.CEPCO)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-07] Sensitivity of tsunami height distribution to fault model parameters based on the 2016 off Fukushima earthquake

○Yutaka HAYASHI¹ (1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-08] Quantitative evaluation of conventional magnitudes for the slow tsunami earthquakes in case of occurrence near Japan

○Takahito Nishimiya¹, Akio Katsumata¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 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.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-10] Real-time tsunami inundation forecast based on the multi-index method examined considering several source models

○Wataru Suzuki¹, Naotaka Chikasada¹, Takayuki Miyoshi¹, Shin Aoi¹ (1.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-11] Tsunami inundation prediction using regression

models using tsunami database

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

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-12] Real-time forecast of near-field tsunami decay based on linear regression to tide-gauge data

○Hiroaki TSUSHIMA¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S18. Education and history of seismology

S18P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S18P-01] Digital Archiving of Bromide Paper Records of Ground Tilt Observed in Kii Peninsula, Japan

○Yasuyuki Kano^{1,2} (1.ERI, UTokyo, 2.CRO for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S18P-02] Activity of Children's Summer School on Earthquake and Volcanoes in TANGO and future prospects

○Tomoya Hiroyama¹, Yasuyuki Kano², Satoko Murotani³, Specified Nonprofit Corporation Earth design school, Committee for Children's Summer School on Earthquake, Volcanoes and Geology (1.Promotion Committee, 2.University of Tokyo, 3.National Museum of Nature and Science, Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S19. Seismology, general contribution

S19P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S19P-01] Estimation of the fall path of the fireball fell on July 2, 2020

○Shutaro Sekine¹, Naoshi Hirata² (1.Association for the Development Earthquake Prediction, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Special session | S22. Geodynamics of the Ryukyu arc

S22P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S22P-01] Complementary distribution of very low-frequency earthquakes and the interplate-coupled area in the southwestern Ryukyu Trench

○Ren Yakabu¹, Mamoru Nakamura¹ (1.University of The Ryukyus)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-02] Distribution of very low-frequency earthquakes in the Miyako Strait, central Ryukyu Trench

○Hiromu Furugen¹, Mamoru Nakamura²
(1.Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyu, 2.Faculty of Science, University of the Ryukyu)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-03] Spatial and temporal distribution of very low-frequency earthquakes activity in the central Ryukyu Trench using ocean-bottom seismometers

○Mamoru Nakamura¹, Shuichi Kodaira², Yasushi Ishihara², Ban-Yuan Kuo³, Ching-Ren Lin³, Pei-Ying Patty Lin⁴ (1.Faculty of Science, University of the Ryukyus, 2.JAMSTEC, 3.Academia Sinica, 4.National Taiwan Normal University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-04] Shallow low-frequency tremor activity off Kikai Island, northern Ryukyu Trench subduction zone

○Yusuke Yamashita¹, Yukihiro Nakatani², Hiroshi Yakiwara², Shuichiro Hirano², Shigeru Nakao², Hiroki Miyamachi³, Reiji Kobayashi³, Hiroshi Shimizu⁴, Takeshi Matsushima⁴, Kazunari Uchida⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Hideji Abe⁷, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁷ (1.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 2.NOEV, Kagoshima Univ., 3.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, Univ. of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-05] Migration of shallow low frequency tremors in the central Ryukyu arc

○Tsutomu Takahashi¹, Yasushi Ishihara¹, Yojiro Yamamoto¹, Aki Ito¹, Ryuta Arai¹, Ayako Nakanishi¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda²
(1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-06] CMT solutions of earthquakes around Okinawa

island from strong-motion records by using a land-ocean unified 3D structure model

○Masanao Komatsu¹, Hirofumi Kowari², Tomotsugu Watanabe¹, Taro Okamoto³, Takeshi Nakamura⁴, Hiroshi Takenaka¹ (1.Okayama University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd., 3.Tokyo Institute of Technology, 4.Central Research Institute of Electric Power Industry)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Introduction of committee activities |
S25.Committee activities for society

S25P

4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S25P-01] Public Relations Committee

*Public Relations Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-02] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-03] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-04] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-05] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-06] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-07] Geopark Assistance Committee

*Geopark Assistance Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-08] Kanamori Fund

*Kanamori Fund¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

S02P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S02P-01] Development of the Web application for WIN system -Porting of the function of IT kyoshin seismometer-

OTakamori Ito¹ (1.aLab Inc.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-02] Development of monitoring systems using seismic intensity meters equipped with a MEMS acceleration sensor

OJun Uchida¹, Masahiro Oi², Kaoru Yoshioka³, Shoichi Shiozaki³, Yoshiya Ouchi¹, Keizo Motohashi¹ (1.KINKEI SYSTEM CORPORATION, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Chiba Prefectural Government)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-03] Accuracy of time and pressure due to calibration intervals by an atomic clock in an ocean bottom pressure gauge

Ayumu Yokoyama¹, OToshinori Sato¹ (1.Chiba Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-04] Calibration of instrument responses in high-density broadband seismograph networks based on teleseismic waveform data

OTakeshi Kimura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-05] Change of social activities due to the spread of COVID-19 infections detected by seismograph networks

OKatsuhiko SHIOMI¹, Takeshi KIMURA¹, Youichi ASANO¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

[S02P-06] Comparison between results of array analysis of tiltmeters and template matching analysis of broadband seismometers

OYouichi Asano¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

Development of the Web application for WIN system -Porting of the function of IT kyoshin seismometer-

*Takamori Ito¹

1. aLab Inc.

WINシステムは無料で利用でき、十分な実績もあるため、外部とのデータ交換の必要性の有無にかかわらず、廉価に新たなテレメータシステムを構築する際には有力な候補となり得る。ただし、WINシステムはもとよりWebを利用した運用を考慮して実装されていないため、データを公開するような場合でも標準的に使用できる無料のツールは存在していない。また、unix上で表示にはX Windowを使用する前提のため、一部の研究者以外にとっては利用しづらいものになっていると考えられる。

これに対して、IT強震計(鷹野他 2004)ではWebを用いた表示を表示を当初から実装しており、内部で扱う波形データもWINフォーマットを使用してきた。ただし、データファイルの格納ルール等が独自のものであり、表示に使用していたJavaアプレットもIT強震計用に特化した仕様で、WINシステムで汎用的に使用できるものではなかった。Javaアプレットのサポート終了に対応するため、波形表示用のJavaアプレットを代替するJavaScriptを開発した(伊藤 2018)が、その際、IT強震計に限らずWIN汎用で使用可能になるよう考慮した。IT強震計では、CGIとJavaアプレットが連携してWebアプリケーションとして動作していた。現在JavaアプレットをJavaScriptに置き換える作業を進めているが、CGIを整理するとともにWINシステムと連携して運用できるように開発を進めている。これにより、WINシステムをインストールしたサーバにapache等Webサーバをインストールし、いくつかの実行ファイルとCGIをコピーするだけで、収録データにWebからアクセスして表示できるようになった。

今後、サーバ側のプログラムと連携して各種の処理を行い結果を表示・継続処理につなげることで、より高度な運用をunixでない通常のPC、場合によってはスマートホン等から行えるように開発を進める。

(参考)

鷹野・伊藤・原(2004), IT強震計-その概念と試作-, 地震学会, 2004.10

伊藤(2018), JavaScriptによる地震波形表示の試み, 連合大会, 2018.5

伊藤(2018), WINシステムで利用可能なWeb利用のリアルタイム波形表示, 地震学会, 2018.10

伊藤 他(2019), 廉価・容易に構築できる地震計ネットワークの提案, 連合大会, 2019.5

ITK Wave Viewer (winPrint.js), (<http://seism.jp>)

Development of monitoring systems using seismic intensity meters equipped with a MEMS acceleration sensor

*Jun Uchida¹, Masahiro Oi², Kaoru Yoshioka³, Shoichi Shiozaki³, Yoshiya Ouchi¹, Keizo Motohashi¹

1. KINKEI SYSTEM CORPORATION, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Chiba Prefectural Government

前回、私達はアナログデバイセズ社の3軸MEMS加速度センサを内蔵した普及型計測震度計を開発し、千葉県内の高層建築物に設置して振動モニタリングを行っていることを報告した。

本報告では、防災科学技術研究所との共同研究「高層建築物の振動モニタリングシステムの構築」において、クラウド環境を用いたリアルタイム波形表示機能の開発とLTE通信における課題解決について報告する。

【地震動の観測】

開発した普及型計測震度計（以下、MEMS計測震度計）は、モバイル通信機能を内蔵することが可能であり、LTE通信でクラウドにデータ送信を行うことができる。そのため、MEMS計測震度計の設置は、電源が供給できれば場所を選ばず容易に設置して、地震動のモニタリングを開始することができるという特徴がある。私達は、千葉県内の高層建築物の高層階、低層階、地表面、地下にMEMS計測震度計を平成31年3月に設置し、これまでの1年6か月間に複数の地震動を観測した。

千葉県周辺では、5月の連休期間中の4日に千葉県北東部の地震（M5.6、深さ48km）、6日に千葉県北西部の地震（M5.0、深さ68km）に発生し、6月25日には千葉県東方沖の地震（M6.1、深さ36km）が発生している。千葉県北東部や千葉県東方沖の地震では、地表面の観測波形の卓越周期が高層建築物の1次固有周期に近いこともあり、高層階の観測波形には共振が見られた。しかし、千葉県北西部の深い地震では、地表面の観測波形の卓越周期が高層建築物の1次固有周期よりも短周期側であったため、高層建築物の観測波形には明瞭な共振は見られなかった。

【リアルタイム波形表示機能の開発】

MEMS計測震度計で観測された加速度波形データは、1分毎にwinフォーマットのファイルとしてクラウドサーバに送信されており、利用者はクラウドサーバからwin形式の波形データをダウンロードして、波形表示することができる。本開発では、利用者がWEBブラウザ経由でクラウドサーバにアクセスし、連続データのリアルタイムモニタリングやイベントデータをCSV形式等でダウンロードできるクラウド環境を構築した。イベントデータは過去の地震について選択表示することが可能である。

【LTE通信の課題解決】

1年6か月間の試験運用では、LTE通信における障害が多く発生した。現在、LTE通信はどこでも可能であるが、MEMS計測震度計は、高層建築物の地下階やEPS室内に設置されており、電波環境の良い環境下にあるとは言えない。そのため、一時的に通信が途切れた場合の再送処理をはじめ、バッファ機能の確保による長時間の基地局保守の対応、さらに通信レベルの最も良い基地局と必ず接続されるわけではないことに起因する障害への対応などを行い、より確実な通信環境を実現できるようにした。

Accuracy of time and pressure due to calibration intervals by an atomic clock in an ocean bottom pressure gauge

Ayumu Yokoyama¹, *Toshinori Sato¹

1. Chiba Univ.

1. はじめに

海底圧力計（OBP）は、海底の隆起沈降を連続的に観測でき、スロースリップ（SSE）の観測等に非常に有用である。例えば、Sato et al. (GRL, 2017)は、2014年の房総沖SSEによる上下変動（約2 cm）を捉えることに成功した。また、村田 他（JpGU, 2020）は、2018年の房総沖SSEの変動を多点特異スペクトル解析を用いて捉えている。OBPに用いている圧力計は、Paroscientific社のセンサーで、圧力を水晶発振の周波数として出力している。周波数はOBP内部のクロックによって計測している。従って、このクロックが正確でないと、正しい圧力観測が行えないことになる。我々のOBPでは、クロックの精度を保つため、原子時計（Microsemi社CSAC SA.45s）を用いて一定間隔でクロックを較正している。理想的にはクロックを原子時計で常時較正すればよいが、電力の限られるOBPでは、原子時計の常時使用は、観測期間の短縮になってしまう。本研究は、様々な較正間隔でのクロックの精度を測定し、観測精度と観測期間が両立する較正間隔を見出すことを目的としている。

2. 計測方法と評価方法

計測は、実際の観測と同じくOBPをセットして、そこから時間信号（1分パルス）を取り出してGPS時計との時間差を取ることで行った。1つの較正間隔に対して約4週間の長期計測を行った。

評価方法は、以下の通りである。クロックの規定周波数を f_0 とする。このクロックの実際の周波数が、 $f=f_0+f_d$ であるとすると、このクロックの1秒は f_0/f となる。

1（このクロックの1秒）： $f_0/f = S$ （このクロックの秒）：1（真の1秒）

より

$$S = f/f_0 = 1 + f_d/f_0 = 1 + r$$

となる。これは、例えば周波数が10%（ $r = 0.1$ ）大きくなればクロックの進みも10%早くなることを意味する。

測定した時間差 d は、 $S-1$ を積分したものになるので、 $d = rt$ となる。実際はクロックの周波数は時間変化するもので、それを $r(t)$ とすると、測定した時間差 $d(t)$ は $r(t)$ を積分したものになる。つまり、時間差を時間で微分するとクロックの周波数変化 $r(t)$ を出すことができる。この周波数変化が小さいほど精度が良いことになる。

3. 結果

計測は室内で行った。校正間隔は、常時校正、1時間間隔で5分間校正、12時間間隔で5分間校正、無校正の4種類、それぞれ約4週間の計測を行った。同時に室温の計測も行っている。周波数変化は時間差の差分を取ることで算出した。

計測の結果、周波数変化は、常時校正の場合 $-3.3 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ 、1時間の場合 $-6.3 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-9}$ 、12時間の場合 $-8.0 \times 10^{-9} \sim 1.5 \times 10^{-8}$ 、無校正の場合 $-3.8 \times 10^{-8} \sim 3.7 \times 10^{-8}$ で変化した。この周波数変化による圧力の見かけの変化は水深換算すると、最大0.22 mm（常時校正）、0.47 mm（1時間）、1.17 mm（12時間）、3.80 mm（無校正）となる。Sato et al. (GRL, 2017)の結果からOBPによる水深変化の誤差は10 mm程度であるので、12時間間隔以下ならば十分な精度で観測できることになる。我々のOBP（40 cmガラス球）の稼働可能期間は、9か月（常時校正）、14か月（1時間）、15か月（12時間、無校正）であるので、観測期間を1年とすれば、1時間または12時間間隔校正で設定するのが良いということになる。

謝辞

海底圧力計とGPS時計の稼働につきましては株式会社東京測振の方々にご協力をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

Calibration of instrument responses in high-density broadband seismograph networks based on teleseismic waveform data

*Takeshi Kimura¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

広帯域地震計は広い周期帯域の地動速度に対して平坦な応答特性を持ち、その観測データは地震学における重要なツールの1つである。一方で、観測データから地動への変換に必要な地震計の応答特性が製造者からの提供情報と異なるケースが報告されており、このような特性の異常を判定する手法がいくつか提案されている（例えば、Kimura et al. [2015]）。これらの手法は観測網を運用する際の監視ツールとして有用であることに加えて、データのユーザーにとっても該当データを解析に使用するかどうか判断する上で重要な情報をもたらす。さらに、異常な状態の地震計特性を推定しデータを適切に補正することができれば、解析に利用できるデータ量が増え結果の精度向上等に貢献することが見込まれる。本研究では、観測点間隔が約100kmという広帯域地震観測網としては高密度なF-netを対象に、遠地地震時の表面波記録を観測点間で相互に比較することにより、地震計の応答特性のキャリブレーションを行った。

Kimura et al. [2015]により特性異常が明らかになっているF-netの斜里（N.SHRF）と泊（N.TMRF）観測点を対象にキャリブレーションを行った。Global CMTカタログより2000年から2018年の間に発生した深さ50km以浅、Mw6.5以上の471地震のうち、震央距離2000-14000kmの観測記録（1Hzサンプリング、上下動成分）を用いた。製造者から提供されている応答特性により観測データを補正した後、表面波部分（データ長2048秒）の振幅スペクトルについて対象観測点から200km以内の複数観測点での観測データとのスペクトル比を利用した。互いに近接した観測点の遠地地震波形はほぼ同一であるため、このスペクトル比は地震計の応答特性が正常であれば全ての周期で1になり、異常があれば1から外れることが見込まれる。本研究では、このスペクトル比から対象観測点の地震計特性の感度、長周期側のコーナー周期、ダンピング定数の補正値を推定する。計算したスペクトル比は時系列に沿って50記録ずつスタックし補正値の推定に用いた。スタックの際にはBootstrap法により200のBootstrapサンプルを生成し、推定値の誤差評価に用いた。

上述の解析の結果、N.SHRF観測点では2002年の観測開始から2012年まで、コーナー周期、ダンピング定数に明らかな異常はなかったが、感度が提供情報の約0.5であったことが推定できた。また、N.TMRF観測点では、感度に異常は見られなかったが、コーナー周期とダンピング定数が2000年から2011年まで時間変化しており、特にダンピング定数が2011年には2程度にまで増加していることが分かった。

このような補正値の推定を観測網全体に対して行うことで、観測データの品質の向上につながるような情報の提供が可能になることが見込まれる。

Change of social activities due to the spread of COVID-19 infections detected by seismograph networks

*Katsuhiko SHIOMI¹, Takeshi KIMURA¹, Youichi ASANO¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

新型コロナウイルス感染症拡大防止を目的として社会活動が制限されたことに伴い、世界各地の地震観測点でのノイズレベル低減が報告されている(例えば, Lecocq et al., 2020). 日本国内において, Yabe et al. (2020)は首都圏地震観測網MeSO-netのデータを解析し, 3月上旬頃と3月下旬~4月上旬頃の2段階のノイズレベル低減があることを確認するとともに, それぞれ学校の臨時休校, 都の活動自粛要請ならびに国の緊急事態宣言発令と関係するとした. 本稿では, 日本全国に設置された防災科研Hi-netとF-netの観測データを概観し, 新型コロナウイルス感染症拡大に伴う影響の有無について, ノイズレベルならびに砕石発破による人工地震数の観点から確認を行った.

Hi-netやF-netでは, 社会活動等によるノイズを避けるため, 観測井の底や山間部に地震計を設置している. 多くの観測点では, ノイズレベルは冬季に高く, 夏季に低くなる季節変化の影響が大きい, 日単位や週単位といった社会活動に関連するノイズレベル変化を記録する観測点も存在する. このような観測点のうち, 住環境に近い地域に設置されている観測点では, MeSO-netの事例同様, 3月下旬から5月中旬にかけてRMS値が小さくなる傾向が見られた. 日別の変化を確認すると, 昼夜のRMS値の差が小さくなる, すなわち昼間の社会活動レベルの低下と関連する変化が明瞭であった. 一方, 山間地や感染者がほぼ報告されていない地域では, RMS値の日あるいは週単位の変動に大きな変化は見られない点もあった. 日本で発令された「緊急事態宣言」は法的に社会活動制限するものではなく, 交通サービスや流通網は通常レベルが維持されたため, このような地域性が生じたものと考えられる.

一方, 感染の拡大に伴う経済活動の停滞も話題となっている. 岡田(1996)は, 景気動向指数と砕石発破に関連する人工地震数に強い関連があることを報告した. 防災科研ではリアルタイムで流通する高感度地震観測データを用いて独自にイベント検出ならびに自動震源決定を行っており, 発破が頻発する地域・時間に震源が決まった場合は「発破」フラグを付与してデータベースに格納している(汐見, 2017). ただし, 自動震源カタログでは, 精度の悪い震源情報に対してフラグが適切に振られているとは限らない. まず, 活動状況変化の概観を把握することを目的として, 自動処理カタログに登録された震源深さが浅いイベント数の推移に着目した. 通常地震は昼夜の差なく発生しているのに対し, 発破は主に7時から19時までの12時間に集中する. 2016年4月から2020年7月末までを対象に, 上記12時間にトリガーしたイベントが同日24時間で検出した総イベント数に占める割合の変化を調べた. その結果, 2020年3月以前はおおむね60%程度で推移していたが, 同年4月初旬に50%台前半に低下したことを確認した. この変化は国内の観測網で見られるノイズレベルの変化傾向と一致するほか, 内閣府が公表する景気動向指数の変化とも対応しているように見える. 自然地震のみを収録している気象庁一元化震源カタログで同様の処理を行ったところ, 全期間を通じておおむね45%~50%程度で一定であり, このような変化は見えない. このことから, この変化は砕石発破等の人工地震によるイベント数の変化を反映していると考えられる. 本調査では広域を対象にイベント数の比のみを評価したため地域の平均的な特徴を捉えたに過ぎない. また, 2016年熊本地震のように通常地震活動数が極端に増加した場合, 必然的に割合は50%に近づくため検知は困難になる. そこで, 一部の発破クラスタについて, その活動状況を個別に確認したところ, 変化の有無を含めクラスタごとに異なる特徴が見られた. ただし, それぞれのクラスタで検知されるイベント数のゆらぎも大きく, 客観的な判断は困難であった. 経済活動状況モニタリングのための指標とするためには, 発破頻発地域を対象としたイベント検出状況の精査を行うとともに, イベントの自動検知能力の向上と安定運用が不可欠である.

謝辞: 本研究の実施に際し, 気象庁, 北海道大学, 弘前大学, 東北大学, 東京大学, 名古屋大学, 京都大

学，高知大学，九州大学，鹿児島大学，産業技術総合研究所，国土地理院，海洋研究開発機構，地震予知総合研究振興会，青森県，東京都，静岡県，神奈川県温泉地学研究所の観測波形データならびに気象庁・文部科学省が協力してデータを処理した結果を使用しました。

Comparison between results of array analysis of tiltmeters and template matching analysis of broadband seismometers

*Youichi Asano¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

我々は、防災科研高感度地震観測網（Hi-net）に併設された高感度加速度計記録のアレイ解析によって、海溝・トラフ近傍で発生する超低周波地震の検出と位置決定を行ってきた [Asano et al (2008)]。また、既知イベント記録と連続記録との波形相関解析によって、観測点密度が比較的疎な広帯域地震観測網（F-net）の広帯域速度計記録からも超低周波地震の検出と位置決定を行ってきた [Asano et al (2015)]。

前者のアレイ解析では南西諸島に観測点が無いことから、日向灘以南における超低周波地震の位置決定精度が悪い。それに対して後者の波形相関解析では、南西諸島にも一定の観測網カバリッジを有することから、日向灘以南においても超低周波地震の位置決定精度が比較的良い。その一方で、既知イベントを必要としないアレイ解析とは対照的に、既知イベント近傍で発生する発震機構解の類似したイベントを探索する波形相関解析では、検出すべきイベントに波形が似た既知イベントがなければ検出漏れも発生しうる。このような観測網カバリッジや手法の違いによる評価するために本研究では、アレイ解析と波形相関解析の結果の比較を行った。具体的には、2003年6月～2020年7月の期間内における北緯28～33度、東経129～134度の範囲内でそれぞれの手法によって検出されたイベントを比較した。波形相関解析ではF-net 15点に加えて臨時観測点3点も用い、21イベントの既知イベントとの類似イベントを探索した。

解析の結果、波形相関解析では日向灘、種子島沖から奄美大島沖にかけての広い範囲で検出されたイベントが、アレイ解析ではそのほぼ全てが日向灘、種子島沖付近に位置決定されていることが分かった。また、アレイ解析ではコヒーレントな波群が捉えられているにも関わらず波形相関解析ではイベントが検出できないケースもしばしば見られることも分かった（例えば、2019年1月の活動）。これの原因については、検出すべきイベントと相似な波形を持つ既知イベントがないことによる検出漏れが考えられるが、震源時間関数の複雑さや媒質の不均質の影響を受けて、近傍の既知イベントとの相関係数が高い値をとりづらい状況となっている可能性も考えられる。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費 JP16H06473の助成を受けたものです。

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

S03PSat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S03P-01] Recent long-term slow slips along the Nankai Trough detected by GNSS objective detection method○Akio Kobayashi¹, Takahiro Tsuyuki¹ (1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-02] Long-term SSE along the Nankai trough detected by GEONET○Shinzaburo Ozawa¹, Ryouji Kawabata¹, Hiroshi Munekane¹ (1.Geospatial Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-03] Automated detection of short-term slow slips using multiple GNSS stations by trend filtering○Keisuke Yano¹, Masayuki Kano² (1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-04] Estimation of short-term slow slip event source model considering opening-mode dislocation○Noa Mitsui¹, Satoshi Itaba², Yasuhiro Asai¹, Takanori Matsuzawa³, Norio Matsumoto²
(1.Tono Research Institute of Earthquake Science, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-05] Correction of initial changes in borehole type strain meter○Takahiro Tsuyuki¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-06] Evaluation of forecasting post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake 2020○Satoshi Fujiwara¹, Mikio Tobita¹, Shinzaburo Ozawa¹ (1.Geospatial Information Authority of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-07] Very Long-term Post-seismic Gravity Changes due probably to Long-term Viscoelastic Relaxation○Yusaku Tanaka¹ (1.ERI, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-08] Development of analysis tool “GARPOS” for open GNSS-A○Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹ (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-09] A numerical simulator for the new GNSS-A data analysis software “GARPOS”○Yuto Nakamura¹, Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota² (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science,

University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S03P-10] Effect of sound speed profile on GNSS-A seafloor positioning

○Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹ (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, The

University of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

Recent long-term slow slips along the Nankai Trough detected by GNSS objective detection method

*Akio Kobayashi¹, Takahiro Tsuyuki¹

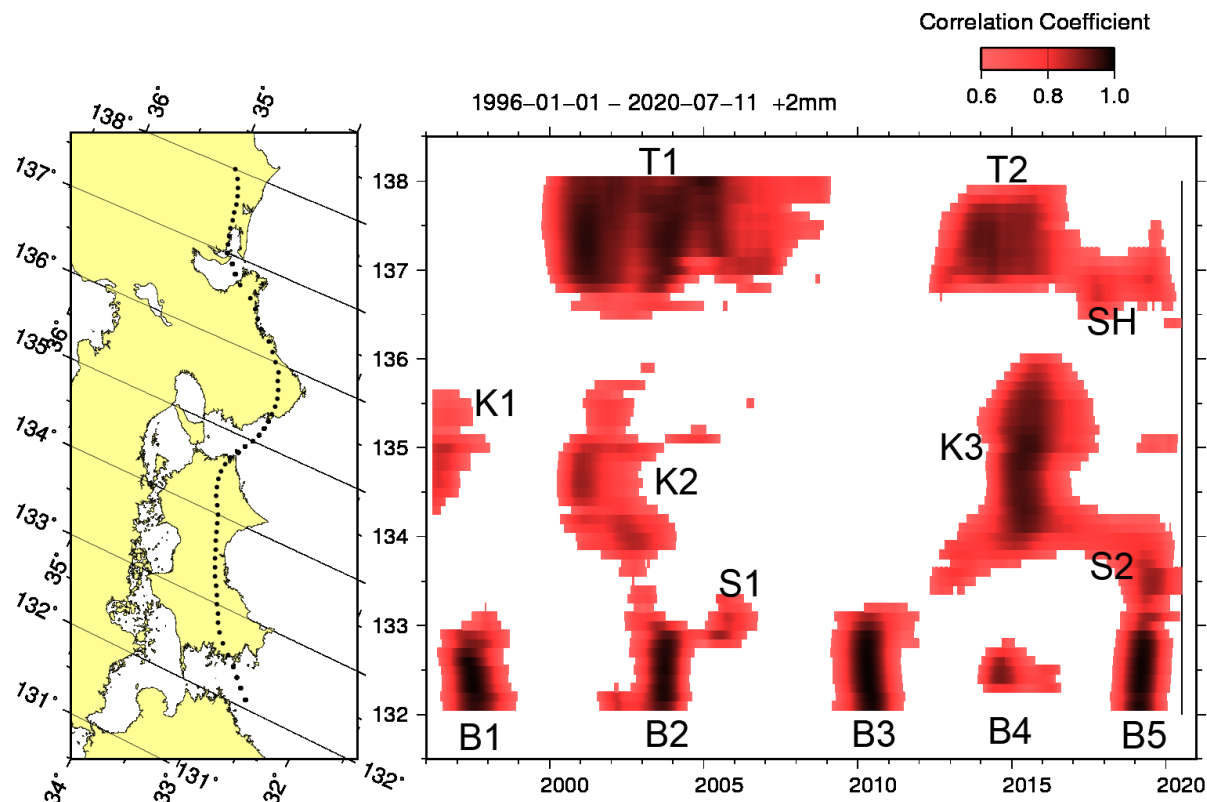
1. Meteorological Research Institute

南海トラフ沿いでは短期的スロースリップイベント(SSE)や長期的SSEなどのスロー地震が発生しており、その分布や規模、発生頻度などを均質的に把握することは、プレート境界の特性の時空間変化に関する理解をもたらすことが期待される。Kobayashi (2017)は南海トラフ沿いの長期的SSEについて、GNSSによる客観的検知手法を開発した。この方法を最新データまで適用し、検出された志摩半島付近と四国中部の長期的SSEについて報告する。

Kobayashi (2017)の手法を簡潔に書くと以下の通りである。GEONETのF3解座標値を用い、各点について一次トレンド、アンテナ交換などによるオフセット、地震によるオフセットの補正を行った。次に、長期的SSEの影響がほぼ見られない中国地方の観測点について1日ずつの領域内中央値を求め、各点の座標値から領域内中央値を差し引いた。各点の水平成分からフィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分を計算し、南海トラフ沿いのプレート等深線25 kmに設定した経度0.1度間隔の地点を中心とする50×100 kmの矩形範囲内の各点の平均値の時系列を得た。さらに2004年三重県南東沖の地震(M7.4)、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)、および2016年熊本地震(M7.3)の余効変動を除去した。この時系列と1年間の傾斜期間を持つランプ関数との相互相関値と2年間の変化量を求めた。

2013～2016年の東海長期的SSEが落ち着いた2017年春から2018年秋にかけて、志摩半島付近の長期的SSEに伴う高相関値があり、その後も2020年春まではやや高い値が同地域で継続していた。志摩半島の各点と北西方向の丹後半島付近の地点との基線長変化を見ると、2017～2018年の伸びが一度おさまった後、2019年半ばから2020年春まで再び伸びている様子が見られる。2017年春から2年間のすべりの規模はMw6.4相当、3年間のすべりの規模はMw6.6相当で、すべりの中心はいずれも志摩半島にある。また、2019年の豊後水道長期的SSEにやや遅れて2019年に四国中部で高相関値が見られる。豊後水道長期的SSEによる非定常変位が四国中部にも及んでおり、これを簡易的に除去するため2010年豊後水道長期的SSE時の変位を差し引くと、四国中部に南東向きの非定常変位が現れる。この非定常変位からプレート境界上のすべりを推定すると四国中部に中心があり、2019年1年間のすべりの規模はMw6.1相当であった。

本調査には国土地理院GEONETの座標値およびオフセット値を使用させていただきました。



Long-term SSE along the Nankai trough detected by GEONET

*Shinzaburo Ozawa¹, Ryouji Kawabata¹, Hiroshi Munekane¹

1. Geospatial Authority of Japan

要旨

GNSS観測により、2018年以降、九州・四国・紀伊水道・志摩半島域で遷移的な地殻変動が観測された。観測された地殻変動から南海トラフ域のプレート間滑りを推定した。その結果、2018年6月頃から2019年8月頃にかけて、日向灘北部・豊後水道域でSSEが発生し、2019年初めころから2020年7月にかけて四国中部でSSEが発生していること、2019年4月頃から2020年初めころにかけて紀伊水道でSSEが発生し、2019年初めころから2020年4月頃にかけて志摩半島でSSEの発生が推定された。2019年の一時期には、日向灘北部・豊後水道・四国中部・紀伊水道・志摩半島で長期的SSEが同時に発生していたことがわかった。

はじめに

豊後水道では5～6年ほどの周期で繰り返し長期的SSEが発生してきた。四国中部では1977-1980年に水準測量の結果から長期的SSEの発生が推定されている。紀伊水道の長期的SSEは、1996, 2000, 2016年に発生している。志摩半島SSEは、2017-2018年に発生していた。そのような中、2018年6月頃から、九州北部で遷移的な地殻変動が発生し、その後2018年10月頃から豊後水道周辺で遷移的な地殻変動が発生している。また四国中部で2019年初めころから豊後水道SSEに伴う地殻変動と異なった遷移変動が発生している。紀伊水道周辺では2019年4月頃から遷移的な地殻変動が観測され、志摩半島域では、2019年初めころから遷移的な地殻変動が捉えられている。本研究では、GNSSで観測された地殻変動のデータから、四国・九州・紀伊水道・志摩半島域のプレート間滑りの時空間変化を推定した。

解析手法

GNSSによる、観測点の座標時系列から、2013-2019年間の年周、半年周成分を三角関数の重ね合わせで推定し、元の座標時系列からとり除いた。周期成

分を取り除いた時系列から九州・四国域、紀伊水道域の解析では2017-2018年間の一次トレンドを志摩半島の解析では2016年3月から2017年3月の一次トレンドを差し引いている。このようにして得られた東西、南北、上下の座標時系列データを用いて時間依存のインバージョン解析を九州・四国域、紀伊水道域、志摩半島域で行った。観測点は南海トラフ域の観測点約250点を使用した。弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状を三角形要素で表して解析に使用している。グリッド間隔は、凡そ20-40km程としている。プレート境界面上のすべりの方向はプレート収束方向になるように拘束をかけた。

結果と考察

2018年6月頃から2019年8月頃にかけて日向灘北部・豊後水道でSSEが発生している。豊後水道SSEと同時期に四国中部でSSEが発生し、2020年7月まで継続している。紀伊水道のSSEは、2019年4月頃から発生し、2020年初めころに終息している。志摩半島SSEは2019年初めころから発生し、2020年4月ころに終息している。2019年の一時期には、日向灘北部・豊後水道、四国中部、紀伊水道、志摩半島で長期的SSEが同時に発生していたことがわかった。豊後水道SSEはMw6.9、四国中部SSEはMw6.1、紀伊水道SSEはMw6.1、志摩半島SSEはMw6.2程度と推定された。豊後水道SSEはおおよそ5～6年周期と調和的で、四国中部は、1977-1980年に発生し、2013年に発生しているが、その繰り返し間隔はあまり周期的でないように見え

る。紀伊水道SSEも発生間隔は周期的に見えない。志摩半島SSEは繰り返し間隔はわかっておらず、2017-18年に発生していたものが2018年に収まって2019年に発生しており、一連のSSEなのか、別々のSSEなのかははっきりしない。

Automated detection of short-term slow slips using multiple GNSS stations by trend filtering

*Keisuke Yano¹, Masayuki Kano²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University

本研究では複数のGlobal Navigation Satellite System(GNSS)の観測点を用いた短期的スロースリップイベント(SSE)の自動検知を考える。短期的SSEは通常の地震よりもゆっくりとした速度の断層すべり現象のことで、一般に継続期間が数日から数週間程度である(Obara and Kato, 2016)。これまでGNSSや傾斜計といった測地学的観測によって、プレートの沈み込み帯付近で多くの短期的SSEが発生していることが分かった(例えばSekine et al. 2010, Nishimura et al. 2013)。SSEは巨大地震や低周波地震などの他の種類の地震と関係しており(Kano et al., 2019)、その発生を検知することは重要である。

GNSSで観測される短期的SSEの信号は微弱であることが多く、複数の観測点の信号をうまく統合する必要がある。Nishimura et al. (2013)は、赤池情報量規準(AIC)の空間平均に基づく短期的SSE検知手法を提案し、西南日本で発生した短期的SSEの自動検知を行った。

本研究では、トレンドフィルタリングに基づいた複数のGNSS観測点からの検知手法を提案する。提案手法は短期的SSEをGNSS変位データにおける区分変化点として捉え、変化点の確からしさを複数の観測点を利用して検証する手法である。人工データによる双子実験および四国西部のGNSSデータを用いた検証により手法の精度検証を行った。

提案手法は、トレンドフィルタリング・隣接観測点を用いた検定・検定結果の統合を段階的に行う。図1は提案手法の概要図である。まず、l1トレンドフィルタリング(Kim et al., 2009)により観測時系列に区分線形関数を当てはめる。当てはめた関数の節点情報を集めて節点の前後の区間で速度が変化しているかどうかの仮説検定を行う。l1トレンドフィルタリングの節点を利用することで、節点前後の区間の長さはデータから自動決定される。最後に複数の観測点での検定の疑わしさを表す検定のp-値を統合する。l1トレンドフィルタリングは、高次全変動正則化とも呼ばれるスパース推定の手法であり、与えられた入力の中に潜む区分多項式関数を精度良く推定することができる。正則化の度合いを表すハイパーパラメータはMallowsのCp規準を用いてデータから決定することができる。後続する検定では、l1トレンドフィルタリングで得られた区分点を利用する。

提案手法の精度検証のため、2004年4月1日から2009年3月31日の期間における四国西部のGNSSデータと、このデータから生成した人工データを利用した。観測点として、図1の赤い逆三角のうち緑・オレンジの影がかかっている6観測点を使用した。また、GNSSのコモン・モードエラーの除去は五島列島の3観測点の平均を差し引くことで行い(Kano et al., 2019)、二次元の変位データをアムール海プレートに対するフィリピン海プレートの沈み込み方向(N45W)に射影して利用した。

人工データを利用した比較によって、以下のことが分かった。AICの空間平均は窓幅によってイベント見逃し率・ノイズ誤検知率が変化する。一方、提案手法は、適切に窓幅を設定したAICの空間平均と同程度の性能をもつことがわかった。

提案手法を実データに利用した結果は以下である。図2は1観測点におけるGNSSの変位(黒丸)、l1トレンドフィルタリングで得られた区分線形関数(赤線)、検知点(青い縦線)を表示している。図で示しているのはプ

レートの沈み込み方向への射影成分なので、11トレンドフィルタリングの結果により、全体的にはプレートの沈み込み方向に向かっているが、一部の時間帯でその反対側に動いている様子が分かる。一方で、隣接観測点の情報を利用して検知を行うため、一つの観測点で反対側に動いているからといって検知しているわけではない様子も分かる。検知点の確からしさを評価するため、四国西部の低周波微動(LFE; Kato and Nakagawa, Research Square)の一日平均個数との同期を確認した(図3)。図3は検知日±5日のLFEの個数の箱ひげ図(図中Our detections)とそれ以外の日のLFEの個数の箱ひげ図(図中No detection)を表している。図3から、検知している日の近辺で明らかにLFEが活発に起こっていることが分かる。

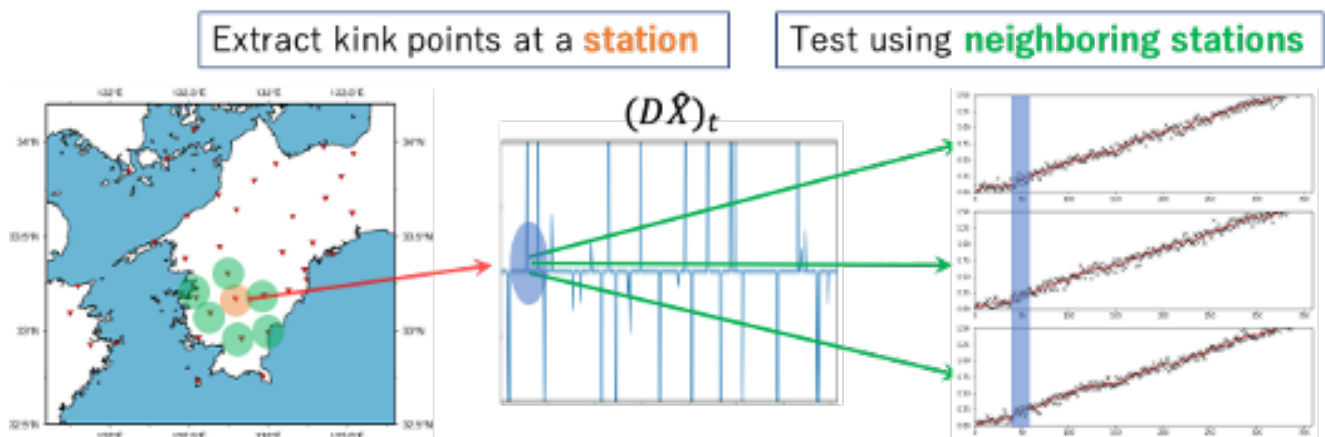


図1：提案手法の概要図.

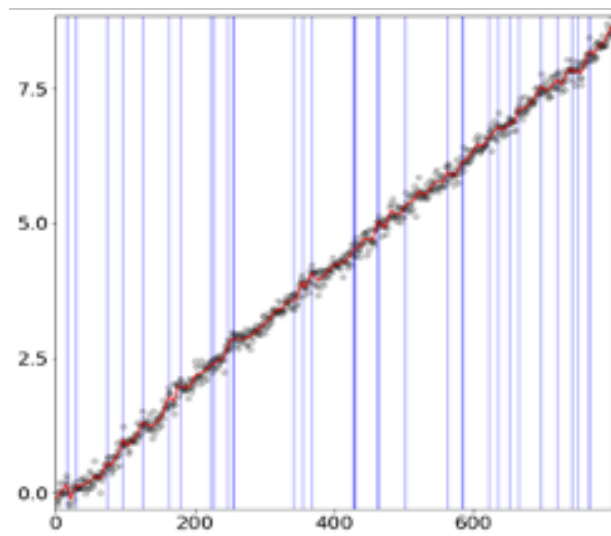


図2：2004年4月1日から800日間の変位[cm] (黒丸)，トレンドフィルタリングの結果(赤線)，検知点(縦線)

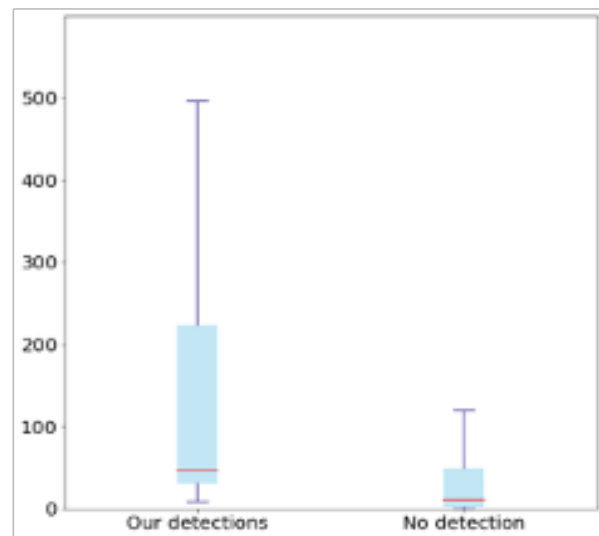


図3：検知日±5日のLFEの個数(Our detections)とそれ以外の日のLFEの個数(No detection)の箱ひげ図

Estimation of short-term slow slip event source model considering opening-mode dislocation

*Noa Mitsui¹, Satoshi Itaba², Yasuhiro Asai¹, Takanori Matsuzawa³, Norio Matsumoto²

1. Tono Research Institute of Earthquake Science, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

沈み込み帯で検出される各種スロー地震は、通常の地震と同様に断層運動としてモデル化されるが、これらがスローかつ非定常な現象となるメカニズムは不明である。そこで本研究では、深部スロー地震の一つである短期的スロースリッピイベント（S-SSE）について、発生域における変形様式を考慮して、発生源モデルの再推定を行った。

S-SSE発生源における変形様式

まず、断層の破壊強度や地質学的な知見に基づいて、S-SSE発生源における変形様式を検討した。

断層の破壊強度の知見から、深部スロー地震発生域は温度－圧力条件の深さ依存に伴う脆性－延性遷移域であると示唆される。脆性破壊から延性破壊（延性流動）への遷移に伴い、プレート境界岩における塑性変形の増加が予想される。一般的に塑性変形は、3次元の偏差応力によって生じるため、平面で生じる断層すべりと異なる変形成分をもつ可能性がある。この場合、断層すべりで近似できない塑性変形は断層面に対して垂直な伸長変形（または圧縮変形）として検出され得る。

一方、かつての沈み込み帯で形成されたメランジュの露頭調査に基づき、S-SSE発生源での断層すべりおよび法線方向への伸張変形が示唆されている（Ujiie et al., 2018）。現在のS-SSE発生源でも同様の変形が生じているならば、それらの変形量を地殻変動データから推定できる。

したがって本研究では、S-SSE発生源で断層すべりならびに断層面に対して法線方向への変形が生じると仮定し、それらの変形量を歪計・傾斜計のデータから推定した。

S-SSE発生源モデルの再推定

本研究では東海地域のS-SSEを研究対象とした。東海地域における深部S-SSEはこれまでに多数報告されているが（例えば産総研・防災科研、2017）、これらの震源モデル推定に使用された観測点は、いずれも断層面に対してすべり角の方向（沿岸側）に位置する。発生源の位置をより良く推定するため、従来のデータに加えて、S-SSE発生源の内陸側である岐阜県瑞浪市・土岐市に位置する東濃地震科学研究所（TRIES）所有の歪計・応力計データの併用を検討した。理論潮汐歪を用いた観測値のキャリブレーションおよびその信頼性評価（Matsumoto et al., 2010）に基づき、本研究では屏風山観測点(BYB)における歪計データを併用した。

本発表では、2017年2月に発生したS-SSE発生源モデルの再推定結果を報告する。S-SSE発生源は矩形断層モデル(Okada, 1985)で表す。産総研・防災科研（2017）のモデルと異なる点は、伸長変形（または圧縮変形）を開口変位でモデル化する点のみである。下記の3ケースについて、それぞれモデルパラメタを推定した。

- ・ Case 1. 開口変位なし
- ・ Case 2. 開口変位あり（あらかじめ1mm単位で与える）、長さ・幅・すべり量の探索範囲は産総研・防災科研(2017)と同じ

- ・ Case 3. 開口変位あり、探索範囲の制限なし

なお、開口変位は負の値も与えて、圧縮変形の可能性を検討した。

結果の概要は下記の通りである。

- ・ Case 1 では産総研・防災科研(2017)と同じ結果が得られた。
- ・ Case 2, 3 では、すべり量と同程度の正の開口変位が推定された。
- ・ 観測値と計算値の残差は、Case 1 が最大、Case 3 が最小となった。

発表では、結果の考察やモデルの評価方法にも言及する。

謝辞

本研究の実施にあたり、気象庁および静岡県が多成分歪計の記録ならびに気象庁によるキャリブレーション係数を使用しました。ここに記して感謝します。

引用文献

Matsumoto, N., O. Kamigaichi, Y. Kitagawa, S. Itaba, and N. Koizumi (2010) In-situ Calibration of Borehole Strainmeter Using Green's Functions for Surface Point Load at a Depth of Deployment, Eos, Trans. AGU, Abstract G11A-0626.

Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., 82, 1018-1040.

産業技術総合研究所・防災科学技術研究所（2017）東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント（2016年11月～2017年4月）、地震予知連絡会会報、第98巻、263-274.

Ujiie, K., Saishu, H., Fagereng, Å., Nishiyama, N., Otsubo, M., Masuyama, H., and Kagi, H. (2018) An explanation of episodic tremor and slow slip constrained by crack-seal veins and viscous shear in subduction mélange. Geophysical Research Letters, 45, 5371–5379.

Correction of initial changes in borehole type strain meter

*Takahiro Tsuyuki¹

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

ボアホール式ひずみ計は、埋設初期には数ヶ月から数年程度にわたって、大きな伸びまたは縮みの緩和的变化が続く。これは、主として地中センサーと岩盤を固着するためにセメントに膨張剤を用いることによる変化と考えられる。また、体積ひずみ計の場合には、センサー内部にシリコンオイルが用いられていることから、セメント硬化に伴う温度低下によって、見かけ上の伸びの変化を示すこともある。

こうした変化は、沈み込むプレート境界面で発生する長期的SSEのように、数か月程度から数年にわたる地殻変動を解析する場合には大きな支障となる。たとえば、2001年～2007年にかけて東海地域で発生した長期的SSEについては、体積ひずみ計の多くが1990年代に更新されていたことや、石井式多成分ひずみ計が1990年代後半に設置されたことから、その埋設初期変化が大きく、長期的SSEによる変化は客観的に見いだせていない。同様に、2013年～2016年にかけて東海地域で発生した長期的SSEについても、スタッキングの手法などにより長期的SSEを見出すことはできているが、個々の成分をみた場合に、その変化が長期的SSEに伴うものであるかを判別するのは困難である。

ボアホール式ひずみ計の長期的な安定性が、GNSSなどに比べて相対的に高くないこともその一因ではあるが、降水に伴う変化の補正などひずみ計自体の補正技術は、以前に比べて格段に進歩しているので、このような埋設直後の初期変化を何らかの方法で補正することができれば、長期的SSEに伴う変化が明瞭に見えてくるのではないかという期待もある。そのために、たとえば指数関数を用いて埋設初期の変化を近似して取り除くことが行われている。しかし、埋設初期の変化は非常に複雑で、これを一つの特定の関数系にフィッティングすることが適当なのかどうか、必ずしも定かではない。

本発表では、埋設初期の変化を特定の関数形にフィッティングするのではなく、埋設直後の数ヶ月間のデータ変化を使って、再帰型ニューラルネットワーク（LSTM）を用いた非線形回帰を行った。これにより、その先の変化を予測することを試みた。この方法によって埋設直後の変化を除去した場合に、補正後のデータから何か新しいものが見えてこないかどうかを検討する。

Evaluation of forecasting post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake 2020

*Satoshi Fujiwara¹, Mikio Tobita¹, Shinzaburo Ozawa¹

1. Geospatial Information Authority of Japan

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列に関数近似を行うという予測実験を通して、広域にわたる余効変動の将来推移予測の実力と課題を示す。東北沖地震の余効変動は、主にプレート境界面上の余効すべりと上部マントルの粘弾性緩和により生じていると考えられており、こうした物理現象発生過程のより正確な推定のためにも有効と考えられる。本報告では、2020年初頭までの地殻変動データを用いて、余効変動予測の検証を行った

Tobita (2016)により、下記の式で表される対数・指数関数の混合モデルを用いることで、短・中期的な時間推移とともに、場所によって異なる余効変動の空間分布も予測できることが示されている。

$$D(t)=a \ln(1+t/b)+c+d \ln(1+t/e)-f \exp(-t/g)+Vt$$

ここで、 $D(t)$ は余効変動時系列の各成分、 t は地震後の日数、 $\ln$ は自然対数、 b, e, g は全観測点に共通の対数関数または指数関数の緩和時定数、 V は観測点ごとの定常速度である。

図1に、電子基準点「宮古」の東西及び上下成分の観測値・予測値及び2年間の予測に基づく残差を示した。予測値は観測値に対して2015年2月まではほぼ1cm以内で一致していたが、その後、2015年2月の三陸沖の地震（M6.9）、5月の宮城沖の地震（M6.8）の頃から異なった傾向となった。つまり、2015年に、それまで続いていた東北地方大洋沖地震の余効変動とは異なる別の事象が発生し、余効変動の予測モデルの前提が崩れてしまったことが窺える。このことを図2の範囲の電子基準点全体でみると、2年間の予測に基づく3.9年後の残差の標準偏差は水平で1.3mm、上下で3mm程度であったが、8.9年後では水平で1.7cm、上下で1.2cm程度と拡大している。

しかしながら、中部地方から北海道南部にかけて、1mを超える東北地方太平洋沖地震の余効変動を8.9年後においても数cm程度の精度で予測できており、房総半島のSSE等の余効変動ではない別のローカルな事象の発生の検出に本予測は極めて有効である。

求められた時定数のうち短周期（時定数1.5日程度。上式第1項）の地震後3年時での空間分布を図2に示す。この成分は三陸及び銚子付近で大きくなり、余効すべりの影響を表している。別途、粘弾性モデルから計算された余効すべり成分（Suito 2017）と比べてみると、空間分布の傾向はよく似ている。予測に用いた時空間関数は純粋に統計的に求められたものであるものの、地下の物理過程を反映しており、余効変動以外の予測への応用が期待される。

参考文献

Suito H (2017) Earth Planets Space. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0611-9>

Tobita M (2016) Earth Planets Space. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4>

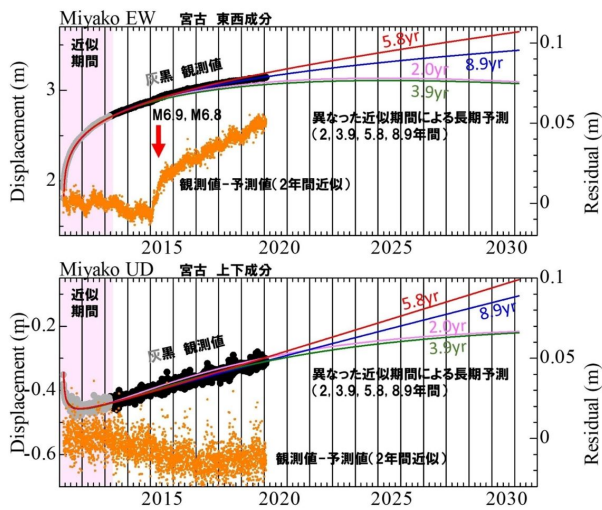


図1 電子基準点「宮古」東西・上下成分の観測値、予測値と残差

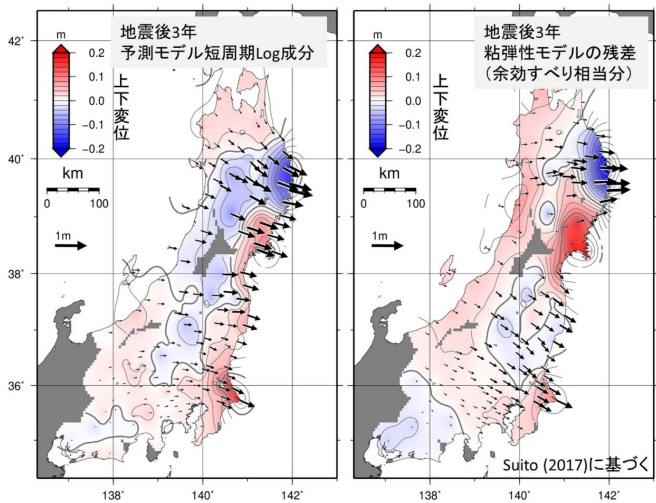


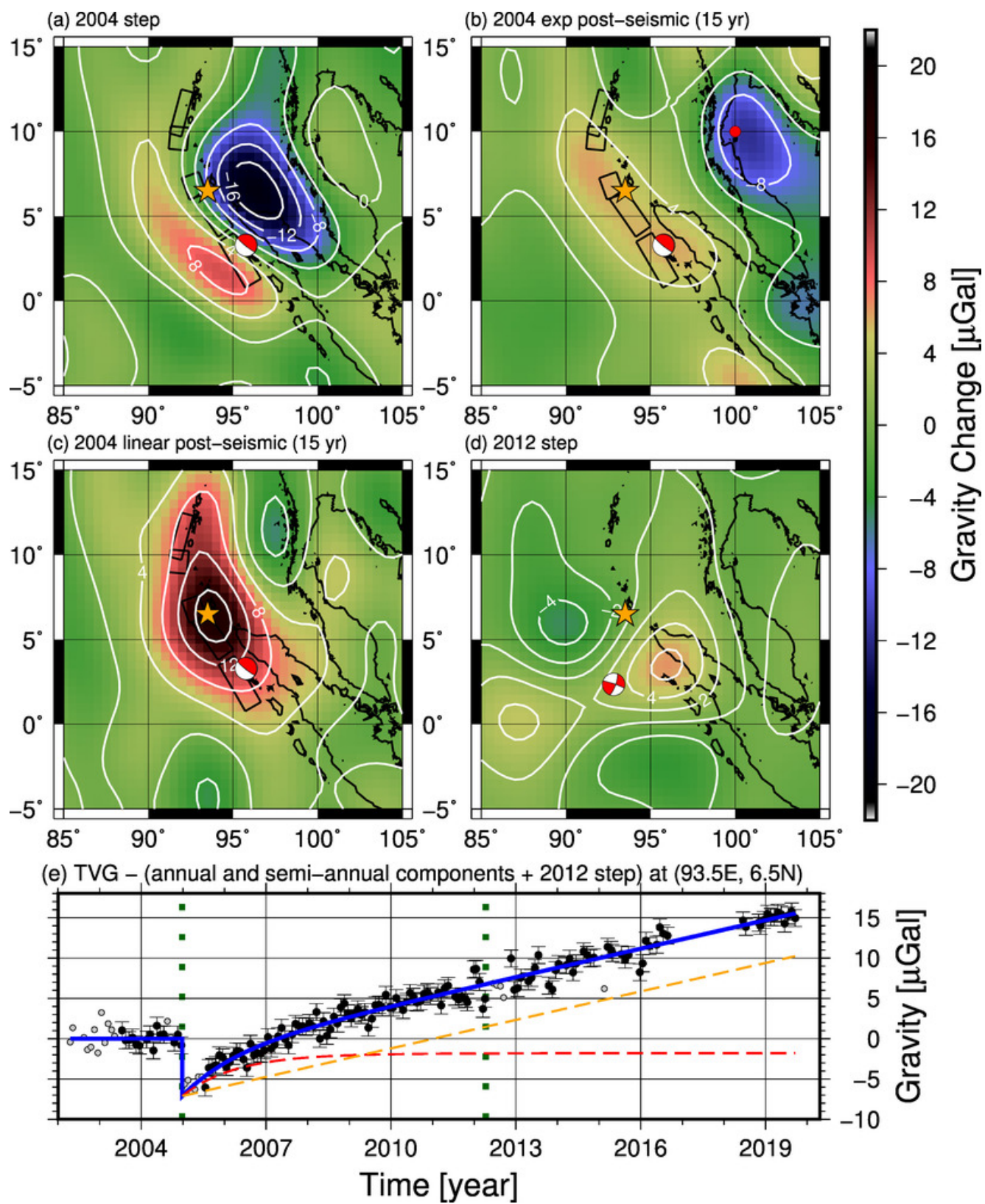
図2 予測モデルの短周期Log成分及び粘弾性モデルの残差 (余効すべり相当分)

Very Long-term Post-seismic Gravity Changes due probably to Long-term Viscoelastic Relaxation

*Yusaku Tanaka¹

1. ERI, UTokyo

Long-term post-seismic gravity change of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw9.1-9.3) detected by GRACE + GRACE-FO is modeled sufficiently by an exponential function until the 2012 Indian-Ocean earthquake (Mw8.8) but gravity increasing became constant after that. An interpretation is post-seismic gravity change of the 2004 earthquake was almost completed in 2012 and that of the 2012 earthquake proceeded constantly. Assuming this, I calculate their spatial distributions. Post-seismic gravity change of the 2012 earthquake was expanded along the faults of the 2004 earthquake and the peaks of post-seismic gravity changes of the two earthquakes appeared at a same location. This suggests another interpretation, namely, post-seismic gravity change of the 2004 earthquake has another long-term component expected by Burgers rheology and post-seismic gravity change of the 2012 earthquake is slight. Spatial distributions of post-seismic gravity change on this assumption support this interpretation. This also shows Burgers rheology is appropriate to consider the viscosity of upper mantle based only on satellite gravimetry. This does not conflict with post-seismic gravity changes of other earthquakes.



Development of analysis tool “GARPOS” for open GNSS-A

*Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹

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

GNSS-A（GNSS-音響測距結合方式）による海底測地観測は、海上保安庁や大学等、複数の機関で実施されているが、データはそれぞれ独自のフォーマットで収集され、独自のルーチンで処理・解析される。他方で、GNSS-A解析において必要となるデータは原則として観測手法によらないため、GNSS観測のRINEXのような互換性のある共通データフォーマットを作成することで、データ交換や検証を促進することができる。渡邊・他（2019, 地震学会秋季大会）は、具体的なフォーマットを提案したが、こうした取り組みを進めることで、観測機関以外の研究者にも広くデータが提供され、解析技術の高度化にもつながることが期待される。本研究では、提案した共通フォーマットを扱うベースソフトウェアGARPOS（GNSS-Acoustic Ranging combined POsitioning Solver）を新たに開発した。本講演では、その概要について紹介する。

既存のGNSS-A解析手法と比較した際のGARPOSの最大の特徴は、海底局アレイ上の海域を広く移動しながら観測を行う移動型GNSS-A観測のデータから、海洋音速場の空間的な傾斜構造とその変化を、海底局位置と同時に推定できる点にある。初期の解析手法であるFujita et al. (2006, EPS) や Ikuta et al. (2008, JGR) のアルゴリズムでは、船が移動することによる音速場の位置変化も、見かけの時間変化として推定していた。その後、2010年代になると、海洋のより深部における傾斜構造も誤差因子として注目されるようになった。例えば、Yasuda et al. (2017, GRL) や Honsho et al. (2019, JGR) が所与の深さまでの一次元傾斜を推定するモデル（一次傾斜モデル）を構築している。また、Yokota et al. (2019, MGR) は、傾斜を仮定しない従来の推定結果の残差をさらに詳細に解析することで、個々の海底局位置に依存した音線の違いによる音速変化を抽出する手法を開発した。それに対し、提案手法では、具体的な傾斜構造をあらかじめモデル化することなく、あくまで音線の両端位置と時刻の関数として取り扱い、その摂動場を海底局位置と同時に推定する。提案したモデルは、既存の一次元傾斜モデルをその特殊な例として包含しており、より複雑な場も推定することができる。

ただし、このような複雑な音速場の同時抽出は、データに対する過剰適合を容易に引き起こす。そこで、提案手法では、データ誤差の分散共分散の非対角成分を導入することで、時空間的に近い音線を取るデータの相関が高くなるという仮定を表現した。その相関長はハイパーパラメータとして制御し、音速摂動場の時間変化の滑らかさを制御する他のハイパーパラメータも含め、適切なモデルをABIC（赤池ベイズ情報量基準; Akaike, 1980）を最小化するように選択するスキームとした。これにより、過剰適合を抑制することに成功し、時間的になめらかに変動する音速摂動場を得ることができた。

海底測位解については、実際のGNSS-A観測データを用いた解析から、既存の手法（Yokota et al., 2019, MGR）と同等の安定性で解を得られることを確認した。さらに、プイ等を用いて定点で音響観測をする構成のデータについても、分解能がないために音速場の推定はできないものの、GARPOSを用いて適切に解析できることも確認した。

本研究で開発したGARPOSはオープンソースソフトウェアとして公開している
(<https://doi.org/10.5281/zenodo.3992688>) 。

A numerical simulator for the new GNSS-A data analysis software “GARPOS”

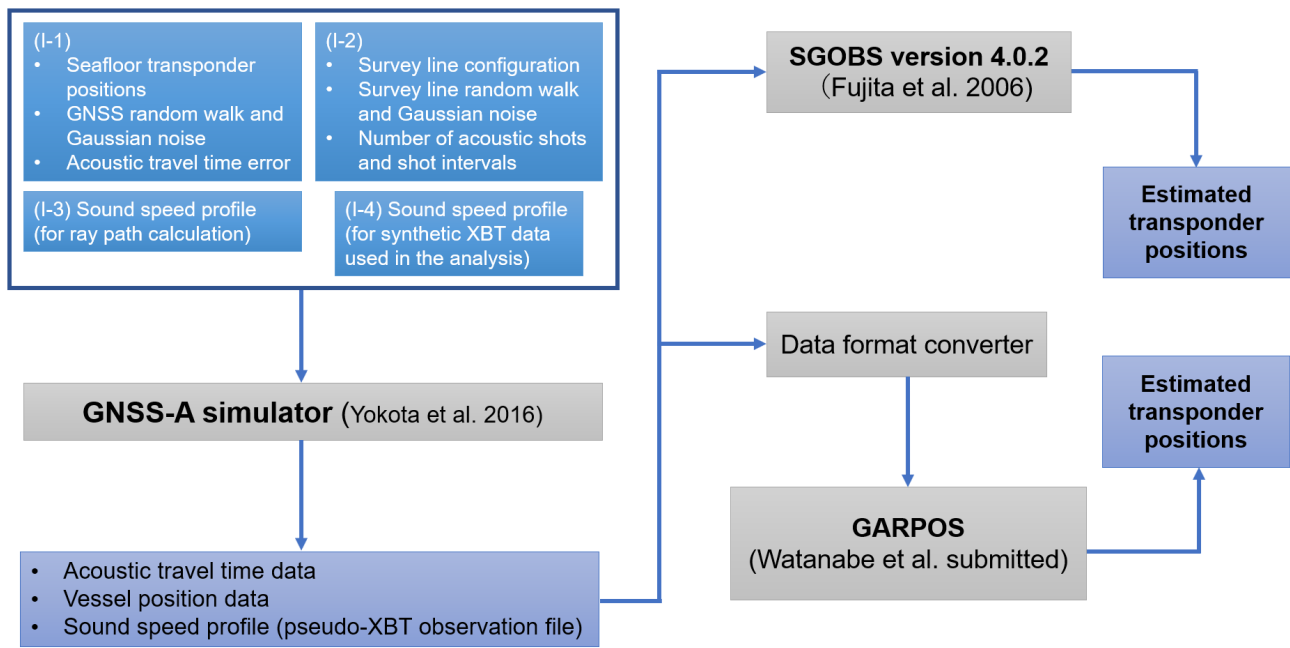
*Yuto Nakamura¹, Shun-ichi Watanabe¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota²

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

GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）を用いた海底地殻変動観測により、海底の絶対位置をセンチメートル単位で測定することが可能となった。GNSS-A観測によってこれまでに2011年東北地方太平洋沖地震に関連するプレート境界浅部における地殻変動の検出、南海トラフ周辺海域におけるプレート境界面の固着分布の推定やスロースリップの検出など様々な地震学・測地学的成果が得られてきた。

GNSS-A観測には様々な誤差要因があるが、中でも大きなウェイトを占めているのが海中の音速場の擾乱である。これまでに、音速場の水平傾斜構造を推定するために様々な解析手法が開発されてきた（Yasuda et al. 2017; Yokota et al. 2019; Honsho et al. 2019）。新たに開発されたGNSS-Aデータ解析ソフトウェアGARPOS（GNSS-Acoustic Ranging combined POsitioning Solver）では、ベイズ統計的手法を用いることによりデータの過剰適合を防ぎつつ海洋場をより直接的に抽出することを可能としている（Watanabe et al. submitted）。

本発表では、GNSS-Aデータ解析ソフトウェアGARPOSで得られる音速場と海底局位置の推定精度を評価するための数値シミュレーター及び数値実験の結果について紹介する。実際のGNSS-A観測データは音速場の擾乱以外にもGNSSのバイアスや誤差、船体動揺等様々な誤差要因を含むため、観測データの解析から個別の誤差要因を評価するのは困難である。そこで、海上保安庁で現在使用している解析ソフトウェアSGOBS（Fujita et al. 2006）で解析可能なGNSS-A疑似データを作成する数値シミュレーターが開発された（Yokota et al. 2016）。この数値シミュレーターでは任意の誤差等を設定でき、誤差要因を個別に評価することが可能である。本研究ではGNSS-A疑似データをGARPOSのフォーマットに変換することで同一の疑似データをSGOBS version 4.0.2とGARPOSで解析した。本発表ではこれらの解析結果を比較し、それぞれの局位置推定精度について議論する。



Effect of sound speed profile on GNSS-A seafloor positioning

*Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yusuke Yokota², Yuto Nakamura¹

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

GNSS-A海底地殻変動観測では、海中音速度の擾乱が測位精度に大きな影響を与える。センチメートルレベルの測位のためには、音線の通った場所・時間における音速を正確に与える必要があるが、時間・空間で複雑に変化する海中の音速場を要求精度内で計測することは事実上不可能である。一方で、計測された音波の往復走時には、距離だけではなくその途中経路の音速場の情報も含まれているため、解析を工夫することで、音速場の情報を取り出すことが可能となる。

時間・空間の4次元で変化する音速場に対する音線計算は複雑で計算コストも多大になるため、現在の解析では、4次元の変動は基準となる水平成層の音速プロファイルに対する補正項として表現し、音線はSnellの法則によって2次元面内で計算している。インバージョン解析では、補正項を時間・空間でなめらかな関数であるとした先験情報のもとでベイズ的に推定することによって、過適合を防ぎつつ適当な音速場モデルが得られる(Watanabe et al., submitted)。推定された補正項が十分に小さいときは、音速場の時間・空間変動を基準プロファイルからの摂動として近似的に表現できていると解釈される。一方で、方程式系としては補正項の大きさに制限はなく、補正項が大きくなる場合も許される。そうした場合は基準プロファイルの設定が適切でないと想定されるが、結果の解釈は必ずしも明らかではない。また、プロファイル自体の変動は考慮していない。

基準プロファイルはCTD等による水温・塩分の実観測から求めた音速値を基に設定しているが、時間・空間的に密な観測は難しく、また水深2,000m以深については、過去の統計値を外挿するなど、必ずしも正確なプロファイルを反映しているとは言えない。渡邊・内田(2016、海洋情報部研究報告)では、各観測点における過去の水温・塩分観測データから、水温・塩分構造の安定性を評価している。そこでは、1,200m以深では1 σ で0.2°C程度という測定機器の精度程度に収まる安定性を見せている一方で、800m以浅では海域によって複雑な変化が顕れることがあることが確認された。

本観測における音波の射出角では、海中における音線の屈折が小さくほぼ直線に進むため、こうしたプロファイル形状の違いが、特に水平位置の測位に対して、大きな影響を与えることがないと期待される。そのため、その影響の定量的な評価はこれまで十分に検討されてこなかった。しかしながら、近年南海トラフ浅部のSSEによる非定常変動や、日本海溝における東北地方太平洋沖地震の余効変動における鉛直変動の重要性など、さらなる精度の向上が求められているなかで、改めてその影響を評価する必要がある。また、その影響の多寡によっては、現在の音速・塩分観測の頻度等の観測計画の再設計も必要となることが想定される。本講演では、プロファイル形状が測位結果に与える影響について定量的に評価した結果について議論する。

S08P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S08P-01] Temporal change in the rupture velocity of repeating earthquakes occurring in and around the source area of the 2011 Tohoku-oki earthquakeOKazuya Tateiwa¹, Tomomi Okada¹, Naoki Uchida¹, Toshio Kono¹ (1.Tohoku University)
4:00 PM - 5:30 PM**[S08P-02] Spatial and Temporal Variations in Rupture Processes of the Repeating Earthquake Sequences off-Iwate following the 2011 Tohoku-oki Earthquake**OAhyi Kim¹, Naoki Uchida² (1.Yokohama City University, 2.Tohoku University)
4:00 PM - 5:30 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**OKoichiro Suzuki¹, Musa Siphiwe 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)
4:00 PM - 5:30 PM**[S08P-04] ICDP DSeis: Evaluation of Spatial Stress Change by Diametrical Core Diameter Analysis of M5.5 Aftershock Zone Core**OYoshihiro Mima¹, Ryogo Tadokoro¹, Shunsuke Yoshida¹, Mitsuya Higashi¹, Kensuke Sakaguchi¹, Bennie Liebenberg, Siyanda Mngadi⁴, Yasuo Yabe², Akio Funato³, Takatoshi Ito², Raymond Durrheim⁴, Hiroshi Ogasawara¹ (1.Ritsumeikan University, 2.Tohoku University, 3.Fukada Geological Institute, 4.University of the Witwatersrand)
4:00 PM - 5:30 PM**[S08P-05] Detection and spatial distribution of non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake by “0.1 manten” hyperdense seismic observation**OMotokoshi Takumi¹ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University)
4:00 PM - 5:30 PM**[S08P-06] Validating the Method of Estimating Fault Slip Angles by Using the Wallace-Bott Hypothesis and Regional 3D Stress Field**OTakeo Ishibe¹, Toshiko Terakawa², Akinori Hashima³, Masashi Mochizuki⁴, Ritsuko S. Matsu'ura¹ (1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Nagoya University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
4:00 PM - 5:30 PM**[S08P-07] Temporal variation of the inelastic strain field around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan**OAyaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoao², Azusa Shito³, Hiroshi Shimizu², 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 Science, Kyushu University, 3.Department of Biosphere-Geosphere Science Faculty of Biosphere-Geosphere Science Okayama University of Science)

4:00 PM - 5:30 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)

4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-09] Investigation of multi-segment earthquake on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

○Yuko Kase¹ (1.GSJ, AIST)

4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-10] Dynamic earthquake sequence simulation with a spectral method without periodic boundary condition

○Hiroyuki Noda¹ (1.Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

4:00 PM - 5:30 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)

4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-12] Modelling of spontaneous and periodic slow slips and a tsunami earthquake in the northern part of the Japan Trench

○Ryoko Nakata¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹ (1.Graduate School of Science, Tohoku University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-13] Numerical model of slow slip events in the Nankai and Hyuganada region revisited from recent observational studies

○Takanori Matsuzawa¹, Bunichiro Shibasaki² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Building Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM

[S08P-14] Examination of constitutive relation for the fault zone along the plate boundary in subduction zone

○Takane Hori¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

4:00 PM - 5:30 PM

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

○Shinichi Oba¹, YUTA Mitsui² (1.Grasuate School of Science and Tecnology, Shizuoka University, 2.Faculty of Science, Shizuoka University)

4:00 PM - 5:30 PM

Temporal change in the rupture velocity of repeating earthquakes occurring in and around the source area of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Kazuya Tateiwa¹, Tomomi Okada¹, Naoki Uchida¹, Toshio Kono¹

1. Tohoku University

1. はじめに

規模の大きな地震が発生した後、その余効すべりがもたらす載荷速度変化の影響を受けて、周囲で発生する小繰り返し地震では震源パラメータの変化が観測されることがある。釜石沖繰り返し地震系列を例にとると、2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）の発生前は繰り返し間隔 T_r が約5年、マグニチュードが約4.8で一定であったが、東北沖地震発生直後は T_r が数十日程度にまで減少しマグニチュードは約5.8に増加した。その後は時間の経過とともに T_r は増加し、マグニチュードは減少することで東北沖地震前の状態に近づいていった。これは東北沖地震の余効すべりによる載荷速度変化で説明される（Uchida et al., 2015）。東北沖で発生する小繰り返し地震の繰り返し間隔 T_r と地震モーメント M_0 の関係はq-valueという指標を導入することで評価される。立岩・他 (2020) では、 T_r - M_0 を両対数プロットしたときの回帰直線の傾きをq-valueとして定義し、東北沖で発生する繰り返し地震系列のq-valueを求め、その空間分布を調べた。その結果、宮城県沖・岩手県沖（Region 1）では負のq-value（繰り返し間隔が短くなるほど地震モーメントが大きくなる傾向）が卓越し、日高沖（Region 2）では正のq-value（繰り返し間隔が短くなるほど地震モーメントが小さくなる傾向）が卓越していることが明らかとなった。速度状態依存摩擦則を用いたChen et al. (2010)の数値シミュレーションでは、速度弱化パッチ半径 r と臨界破壊核サイズ h^* の比、つまり r/h^* が1程度のときに負のq-value、 r/h^* が1より大きいときに正のq-valueになることが示されている。彼女らの結果を用いるとRegion 1では r/h^* が1程度であることやRegion 2では r/h^* が1より大きいことが示唆される。一方、これらの繰り返し地震のコーナー周波数 f_c を求め $M_0 f_c^3$ を調べたところ、Region 1では東北沖地震前は $M_0 f_c^3$ が小さく、Region 2では $M_0 f_c^3$ が大きかった。このことは、 r/h^* が小さいときに破壊伝播速度 V_r が遅く低周波に卓越し、 r/h^* が大きいときには V_r が速く高周波に卓越すると考えれば説明可能であり、Region 1は東北沖地震直後の $M_0 f_c^3$ が大きく求まっており、東北沖地震の余効すべりによる載荷速度上昇が臨界破壊核サイズの縮小をもたらし V_r が大きくなったのだと考えられる（Kaneko et al., 2016, Guérin-Marthe et al., 2019）。そこで、本研究では東北沖の小繰り返し地震の V_r を求め、それが各繰り返し地震系列内でどのように時間変化するのか調べる。

2. データおよび解析手法

対象とする繰り返し地震は東北日本太平洋プレート境界上で2006年4月11日から2016年8月31日の間に発生したものであり、全1737系列、5426イベントである。まず、繰り返し地震をマスターイベント、その近傍で発生した規模の小さな地震をEGFイベントとし、スペクトル比法でコーナー周波数 f_c を推定する。 f_c 推定にはマスターイベントから震央距離が200 km以内にあるHi-net観測点を使用する。次に、本研究では線震源を仮定し、各観測点で推定される f_c の方位角変化から破壊伝播方向 α と破壊伝播速度 V_r をグリッドサーチで決定する。本研究の手法は、震源時間関数の継続時間を用いるAbercrombie et al. (2017)の手法を改良し周波数領域で行ったものである。その際、各観測点の f_c を独立に用いるときには α と V_r に加えて線震源の長さもグリッドサーチで決定する必要があるが、本研究では2観測点の f_c の比を用いることで α と V_r のみが推定量となるため、推定が容易となる。

3. 結果および議論

解析を行った結果、多数の同一繰り返し地震系列内の地震に対して V_r の系統的な時間変化が見られたものが2系列見つかった。これらはRegion 1内の東北沖地震後のみ地震が発生している系列であり、東北沖地震直後から約1-1.5年の間は破壊伝播速度 V_r とS波速度 V_s の比 V_r/V_s が約0.7であったが、その後は V_r/V_s が約0.5程度にまで低下していた。なお、破壊伝播方向 α は時間によらず概ね一定であった。Region 1では r/h^* 1となっていること、東北沖地震の余効すべりが大きいことを考慮すると、東北沖地震直後は載荷速度が大きく臨界破壊核サイズが小さくなったため大きな V_r が推定されたと解釈される。一方で、その後は載荷速度がそれほど大きくないため臨界破壊核サイズが比較的大きくなり V_r は遅くなったと考えられる。さらにKaneko and Shearer (2015)の破壊モデルが示すような V_r が大きくなるほどP波とS波のコーナー周波数の比が小さくなるという傾向が観測されたため、 V_r の時間変化は確かに起きていると示唆される。

以上に示すように、同一繰り返し地震系列内での V_r の時間変化は、q-valueから推測される r/h^* の大きさおよび余効すべりの大きさから予想されるものと整合的であった。すなわち、 V_r は載荷速度とは正の係数に、臨界破壊核サイズとは負の係数にあると考えられる。このことは、先行研究で行った、繰り返し地震のq-valueが実際の r/h^* 、つまり摩擦特性を反映していることを示唆しているとする考えを支持するものである。

Spatial and Temporal Variations in Rupture Processes of the Repeating Earthquake Sequences off-Iwate following the 2011 Tohoku-oki Earthquake

*Ahyi Kim¹, Naoki Uchida²

1. Yokohama City University, 2. Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）後、大規模な余効変動が観測された岩手県沖では既存の繰り返し地震の再来間隔や規模の変化が見られた他、新たな系列の発生が観測された。それらの破壊過程を詳しく調べることによってその変化の原因を検証することは、プレート境界型地震の発生様式を決定づける要因の理解を深めるために重要である。本研究ではこのような規模や再来間隔に変化のあったものや新たに出現した様々な繰り返し地震系列について経験的グリーン関数(EGF)を用いた波形インバージョンを適用し破壊過程を推定し比較した。すべり量分布の比較では、同じ系列においてはマグニチュード毎に平均、最大すべり量は異なっても、主な破壊領域は重なる事が明らかとなった。しかしその系列の近傍に新たな系列が発生すると最初単独で発生していた系列の破壊領域がやや縮小し、新しい系列と破壊領域の中心部が重ならないように棲み分けているという現象が見られた。さらにこれらの地震について、破壊伝播速度を調べたところ、東北地震後の早い時期に発生した系列については震源域のS波速度の85%-90%値が最適解として得られたが、後に発生したものについてはうまく求まらなかった。これらについてはタイムウィンドウ数や断層のサイズなどのパラメータを変えてさらに詳しく調べていく必要がある。また、繰り返し地震の規模と平均すべり量の関係について調べた先行研究において、両者には線形的な関係が示唆されていた（Chen et. al., 2016）が、本研究では東北地震後の早い時期に発生した系列で滑り量の平均値、ピーク値が共に低く見積もられ、後に発生したものはこれまでの線形の関係と調和的な結果となった。これらすべり量の平均値を決める（もしくは破壊領域の大きさを決める）要素の一つとして、東北沖地震による余効すべりによる載荷速度の大小が影響することが示唆される。

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

ICDP DSeis: Evaluation of Spatial Stress Change by Diametrical Core Diameter Analysis of M5.5 Aftershock Zone Core

*Yoshihiro Mima¹, Ryogo Tadokoro¹, Shunsuke Yoshida¹, Mitsuya Higashi¹, Kensuke Sakaguchi¹, Bennie Liebenberg, Siyanda Mngadi⁴, Yasuo Yabe², Akio Funato³, Takatoshi Ito², Raymond Durrheim⁴, Hiroshi Ogasawara¹

1. Ritsumeikan University, 2. Tohoku University, 3. Fukada Geological Institute, 4. University of the Witwatersrand

地震発生場では、母岩や地震断層系の不均質が破壊の核形成・伝播・停止をコントロールすると考えられている。しかし、地震発生場に掘削を到達させ、十分な量のコア試料が回収された事例がなかったため、実際の地震発生場で何が起きているかを詳細に議論できる機会がこれまでなかった。

2014年、地下約2~3kmを採掘する南アフリカMoab Khotsoeng金鉱山の下で、左横ずれ型のM5.5の地震が発生した(Midzi et al. 2015)。この地震では、鉱山坑内の46台の地震計と地表の15台の強震計が、本震の破壊域と余震発生域が地下3~7kmに広がる様子を詳細に記録した。ICDP DSeis計画(2017-2019; Ogasawara et al. DeepMining 2019)は、この鉱山の地下2.9kmから、三本(Hole A, B, C)の総延長約1.6 kmのFull Core掘削に成功した。そして、この余震発生帯上縁部(マントルを起源とし変質したマフィックなシルとダイク; $V_p > 5.0 \sim 6.4$ km/s)とその周囲の母岩(太古代の堆積変成岩; Witwatersrand Super Group; $V_p > 5.5$ km/s)を回収することができた。2017年に掘削されたHole A (817m)は、孔が曲がり、余震発生帯の上縁部よりも200~300m下まで到達したが、余震発生帯との距離を約100mよりも縮めることができなかった。しかし掘削孔は安定していたので、コアのほぼ100%を採取することができた。2018年に掘削が始まったHole B (700m長)はM5.5断層上部と交差させることができた。そこで、Hole Bが交差した断層部の開始地点の手前から分岐してM5.5断層部を掘り抜くHole C (96m長)の掘削(核心部はトリプルチューブ)を行い、より多くの断層部のコアサンプルを手に入れることができた。

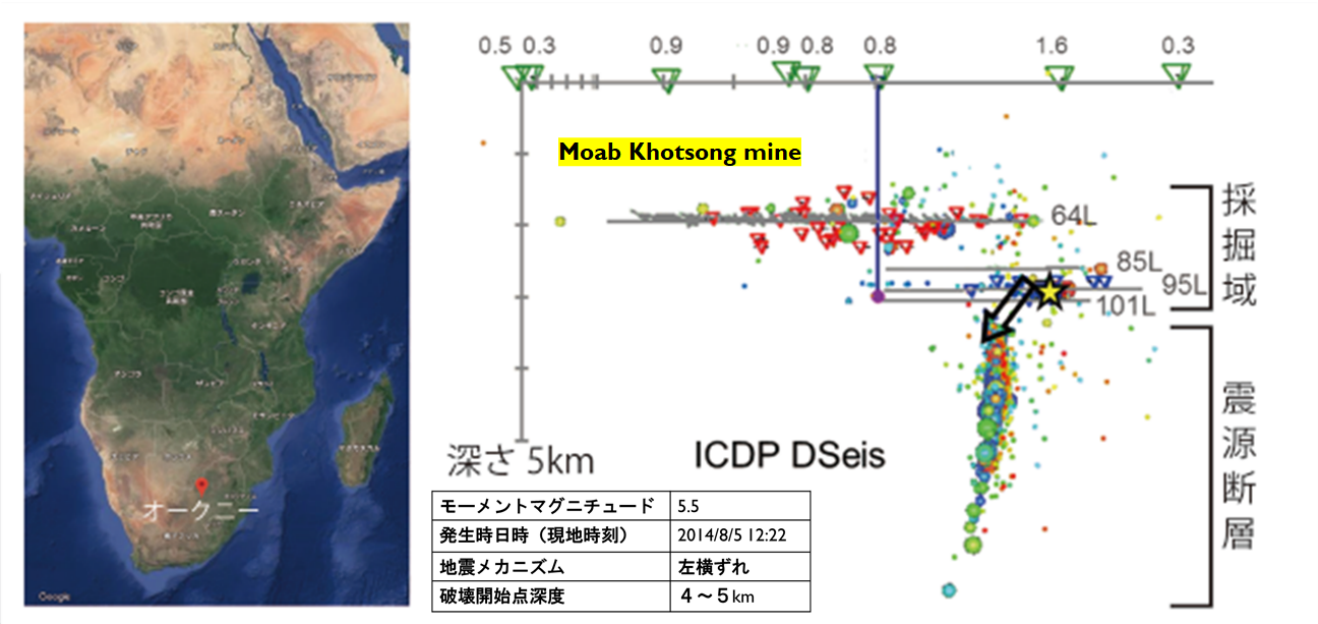
Funato and Ito (2017)は、十数cm長のコアさえあれば、非破壊で短時間で応力を測定できる方法

(Diametrical Core Deformation Analysis; 以下、DCDA法)を開発した。この方法では、以下のようにして応力を測定する。(1) ドリリング中にコアが母岩から切り出されて解放されたときに生じる、コア軸に直交する断面が弾性的に楕円変形したコアの直径の変化を測定する。(2) 測定されたコアの最小直径と最大直径の値の差から歪を計算する。(3) 弾性変形を仮定し、その岩石の剛性率(あるいはヤング率とポアソン比)からコア軸に直交する面内の差応力を推定する。船戸が所有するこの測定システムを用い、南アフリカにおいて、石田(2018修士論文)は、可能な限り多くのコア(186個)のDCDA応力測定を行った。当時測定できたのは、余震発生帯上縁部よりも大きな深度まで到達したが余震発生帯とは交差できなかったHole A(817m長; NQダブルチューブ)のコアであった。しかし、石田は、岩相によって残差の分散とその要因が異なる場合でも、統計的に統一した基準で測定結果を採用したり棄却したりする基準をつくることができた。また、Hole Aの軸に垂直な平面内の差応力の、空間変動を描き出すことに成功した。そして、intrusives(シルとダイクの交差部; 湧水部、および、余震帯上縁部付近の深度の付近)に応力集中があるのを発見した。杉村(2020修士論文)は、Hole Aの応力集中が著しい深さのコアと、その後掘削され余震発生帯上縁部と交差したHole B (700m長; NQダブルチューブ)とそのSide track孔(Hole C; 96m長; 核心区間はNQトリプルチューブ)のコアの計86個のDCDA応力測定を追加した。追加測定されたデータにより、石田の測定からM5.5余震発生帯の上縁部周辺の深さにおけるintrusivesで見つかった応力集中が異常値ではないことを確認できた。本研究では、漏れていた箇所のDCDA応力測定を追加した。Hole A, B, Cの核心部、総延長140mのコアが高知コアセンターに輸入され、MSCLやX線CTスキャン、XRDやXRF分析などによって、余震発生帯の断層構造と物質の詳細の解析が始まった(Ogasawara et al. 2020 JpGU; 横山 2020 修士論文)。

本ポスターでは、これまでの先行研究の結果と本研究で2019年にHole A, B, Cのコアについて追加測定した

137個のデータから、M5.5断層と交差するHole Bと交差しなかったHole Aの空間応力分布を示し、それぞれの違いや関連性を報告するとともに、Hole Bから分岐して断層部を掘削したHole Cのデータから得られた結果についても報告する。

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, 高知コアセンター, 立命館大学, AngloGold Ashanti, Harmony



Detection and spatial distribution of non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake by “0.1 manten” hyperdense seismic observation

*Motokoshi Takumi¹

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University

通常の断層運動（ダブルカップル型地震:DC地震）では説明できない地震を非ダブルカップル型（NDC）地震と呼ぶ。NDC地震は、これまで主に火山地域や地熱地帯で報告されており、NDC成分は、断層や破壊の複雑さや流体の存在などを示すものとして考えられている。NDC地震の研究は、断層運動のプロセスや地震の発生機構を理解するために重要であり、地殻の応力や強度に関する新しい情報を得る機会を提供すると考えられる。

2000年に発生した鳥取県西部地震震源域に2017年3月から2018年4月まで1000点の地震計を設置する観測を行った（0.1満点地震観測）。Hayashida et al. (2020)は0.1満点地震観測網の地震計と定常観測点であるHi-net観測点の記録を用いて、手動でP波の走時と極性を読み取り、震源決定を行った。発震機構解を推定すると節面やヌル軸付近にDCでは上手く説明できない極性分布があり、内陸地震発生場でNDC地震が観測されたことが示された。本研究では、さらに多くの地震について読み取りを行うと同時に自動読み取りのデータも併せて、断層面でのNDS成分の大きさの分布とその特徴の把握を目的とする。

本研究では、Hayashida et al. (2020)と同様にtensile-shearモデルを仮定し、NDC成分をグリッドサーチと相関解析により推定する。ここでは、震源球上のデータ密度を均質化することで、よりもっともらしい値を推定できると考え、サーチの際に各観測点に重みを与えることにより最適解の推定を試みた。グリッドサーチによって計算される極性と観測された極性を比較し、極性がミスフィットする観測点の重みの合計が最小となる解を求めた。複数ある場合は、その中でHi-net観測点の3成分波形記録から、解から期待される直達S波/P波振幅比と観測値を比較して相関係数最大のものを最適解とした。

解析した地震のうちほとんどの地震が開くクラックを伴ってせん断破壊が起きていることが分かった。また、観測点に重みを与えることによって得られる最適解は、重みづけ無しの解析で得られる最適解よりもNDC成分が大きくなる傾向があることが分かった。さらに、断層面の全体でNDC成分が大きいイベントが発生しており、余震域のうち北部の地震の発生数の多い場所では特に大きなNDC成分をもつイベントが発生しているという傾向があることが分かった。しかしながら、この傾向は自動読み取りで震源決定したイベントも含まれていることに加え、手動読み取りイベントの分布に偏りがあるため、今後は断層面の全体に分布するように手動読み取りイベントを増やすことで、より正確な傾向をつかむ。

Validating the Method of Estimating Fault Slip Angles by Using the Wallace-Bott Hypothesis and Regional 3D Stress Field

*Takeo Ishibe¹, Toshiko Terakawa², Akinori Hashima³, Masashi Mochizuki⁴, Ritsuko S. Matsu'ura¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Nagoya University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

活断層調査に基づき将来発生する地震の現実的な強震動・津波予測には、入力データとなる断層形状や断層すべり角（ずれの向き）、断層すべり量などが実際に発生する地震のそれらと乖離しない事が求められ、その高精度化を目的とした調査研究が日々進められている。特に断層すべり角の設定が津波の予測に与える影響は大きく、その適切な設定は防災上においても重要な課題である。近年では、地震は断層面に働く応力ベクトルの剪断成分の方向にすべるという考え方（Wallace-Bott仮説）に基づき、活断層調査から得られた断層形状と地震データから推定された広域応力場の情報から断層すべり角が推定され、これらが強震動・津波予測に活用されてきた（例えば、日本海における大規模地震に関する調査検討会，2014；武田・他，2014；岩田・他，2020；佐竹・他，2020）。

しかしながら、広域応力場ならびにWallace-Bott仮説から推定した断層すべり角を強震動あるいは津波予測に用いる事の妥当性の検証ならびに精度（誤差）について、十分に検討が行われているとは言い難い。また一般に、活断層で発生する固有地震規模の地震の平均再来間隔は数千年から数万年のオーダーであると推定されており、その期間に蓄積された応力が解放される現象が地震である事を鑑みると、10年程度の非常に限られた期間における地震学データから推定された広域応力場をどの程度、長期間のテクトニックな応力場のプロキシとして用いる事ができるのか、検討する必要がある。

地震調査研究推進本部（以下、地震本部）は、基盤的な調査対象として現在、114の主要活断層帯を選定し、これらの活断層（帯）における過去の活動履歴や位置形状等を調査し、断層の幾何形状に関する情報（断層長さ、幅、傾斜角、走向等）や断層のずれの向きと種類（逆断層、正断層、左横ずれ断層、右横ずれ断層等）、平均再来間隔、将来の地震発生確率等の長期評価を公表している（例えば、地震本部地震調査委員会，2017）。また、長期評価による断層の幾何形状（長さ、幅、傾斜角、走向等）ならびにずれの向きと種類に基づいて、その断層が活動した場合にどういった地震動に見舞われるのか、強震動評価が行われている。そこで本研究では、Terakawa and Matsu'ura (2010) による広域的三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説から推定されるすべり角を気象庁による分類方法に準拠し、左横ずれ断層（ $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ）、逆断層（ $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ ）、右横ずれ断層（ $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$ または $-180^{\circ} \sim -135^{\circ}$ ）、正断層（ $-135^{\circ} \sim -45^{\circ}$ ）に分類し、変動地形学的に推定された断層のずれの向きと種類と比較する事で、上記手法の適用可能性に関する考察を行った。なお、主要活断層帯に対する断層モデルとして、地震ハザードステーション（J-SHIS）を用いた。

その結果、安芸灘断層帯など一部の断層帯を除き、三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説によって推定された断層すべり角（断層のずれの向きと種類）は、変動地形学的に推定された断層のずれの向きと種類と一致した。防災科学技術研究所によるF-netメカニズム解ならびに国立大学地震観測網初動メカニズム解カタログ（JUNEC FM²；Ishibe et al., 2014）を用いた検証からは、2011年東北地方太平洋沖地震後に東北日本内陸において活発化した群発的活動など一部の地震を除き、上記手法から推定されたすべり角とメカニズム解のすべり角が概ね整合的である事が示されている（Ishibe et al., 2020）。これらの結果は、限られた観測期間の地震学データから推定された三次元広域応力場を長期間のテクトニックな応力場のプロキシとして用い、Wallace-Bott仮説により断層すべり角を推定する手法について、一定の妥当性を示すものと考えられる。一方で、三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説によって推定された断層すべり角からは、Obliqueなす

べりが期待される断層も多く、すべり角の設定が強震動・津波予測に及ぼす影響について、今後、具体的に検討する必要がある。

謝辞：本研究では、地震調査研究推進本部による主要活断層帯に対する長期評価結果ならびに防災科学技術研究所による地震ハザードステーション（J-SHIS）の断層モデルを用いた。本研究は文部科学省からの委託事業である「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一部として実施した。ここに記して関係者に感謝申し上げる。

Temporal variation of the inelastic strain field around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

*Ayaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoto², Azusa Shito³, Hiroshi Shimizu², 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 Science, Kyushu University, 3. Department of Biosphere-Geosphere Science Faculty of Biosphere-Geosphere Science Okayama University of Science

大地震発生後の非弾性歪み場は、地震発生による地殻内での応力再配分を理解するための鍵となる。大地震発生後の余震活動について、改良大森公式(宇津(1957, 1999); Utsu (1961))に示されているように、地震発生率は時間のべき乗則に従う。また非弾性歪み速度も時間のべき乗則($d\varepsilon/dt \propto t^{-p}$)に従うことが示されており、これらの時間変化についてモデル化が行われている(たとえばNanjo et al., 2019; 楠城, 2007)。そのモデル化のためにまずは、非弾性歪み速度の時間変化を調べる必要がある。本研究では、2016年熊本地震の震源域で地震活動による非弾性歪みの時間変化を調べた。

震源域周辺を約10km四方の領域に分割し、いくつかの時間ウィンドウを設定し、モーメント密度テンソルと非弾性歪みテンソルの関係(Noda and Matsu'ura, 2010)を用いて、非弾性歪み速度の時空間変化を調べた。

地震前後ともに、震源域北部は正断層型、南部は右横ずれ型の不均質な歪み場を持つ。本震発生後、非弾性歪み速度が時間のべき乗則($d\varepsilon/dt \propto t^{-p}$)に従うと考え、各小領域で、 p 値を最小二乗法により推定した。震源断層周辺は $p>1$ となり、この領域の変形は、べき乗流体を考えた時の弾性歪みへの応答として解釈できる(楠城, 2007)。

一方、 p 値が1より小さくなる領域が確認された。この領域では、非弾性歪みが時間経過とともに増加することになり、最大前震・本震が発生したことによる弾性変形によって生じた応力ステップへの応答だけでは、地震活動を説明できないことがわかる。そこで、その領域について議論を行う。

一連の地震活動では、最大前震($M_j=6.5$)と本震($M_j=7.3$)の2つの大きな地震が発生したことが知られており、それらのすべり分布モデルがいくつか示され、Asano and Iwata (2016)の本震断層モデルは、日奈久・布田川断層両側に2枚モデル化されている。 p 値が1より小さい領域は、この本震断層モデルの日奈久断層の南延長部、あるいは布田川断層の西延長部に位置することがわかった。

日奈久断層南延長部の領域について、この領域の p 値は、深さが増すと小さくなり、また、浅部ではさらに南側に低 p 値の領域が広がることがわかった。このことから、上部地殻下部(7.5–15 km付近)とより南側の浅部に影響する、例えばアフタースリップのような地震後の変動がある可能性が示唆される。また、この領域ではM5を超える地震が本震後に発生していることもあり、その地震が及ぼす弾性歪みに対する非弾性歪みを検出している可能性も考えられる。

流れ則に従い、非弾性歪みの主歪みの方向に応力が働き、変形が進んでいると仮定すると、この領域で働く主応力の向き、それに最適な断層の形状を推定することができる。日奈久断層は右横ずれの運動を生じていることを考慮し、この領域で断層モデルを仮定した。震源分布(平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査報告書)を見ると、この断層面上で発生したと考えられる地震活動が確認される。この断層モデルの形状を持つ断層がすべることによって周囲に及ぼす応力変化や変位について議論する。

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。

Investigation of multi-segment earthquake on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

*Yuko Kase¹

1. GSJ, AIST

The Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line active fault zone (ISTL) in central Japan is one of the most active fault zone in Japan. To discuss the possibility and condition of multi-segment earthquakes in the ISTL, we construct dynamic rupture models for the north-central and south-central portions of the ISTL based on geological and geophysical data.

The previous studies based on seismic reflection, seismic refraction, and gravity surveys suggested that the north-central and south-central portions of the ISTL are east-dipping (e.g. Hagiwara et al., 1986; Ikami, et al., 1986; Sato et al., 2004) and west-dipping (e.g. Hirakawa et al., 1989; Kumamoto and Ikeda, 1993; Karino et al., 2004) faults, respectively, however, the dip angles were obscure. Using FEM modelling, the Ministry of Education, Science, Sports and Culture (MEXT) and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) (2020) proposed that the dip angles of the portions were vertical. Based on the proposed fault geometry, the north-central and south-central portions of the ISTL are modeled as vertical left-lateral strike-slip fault planes in this study. The lengths of the fault planes are 34 km and 26 km, respectively, and the south-central portion bend at 5 km from the northern end.

Azimuth of the maximum principal stress and stress ratio are assumed, considering the stress inversion result (MEXT et al., 2010) and the FEM modelling (MEXT and AIST, 2020). Surface slips of the latest events on each portion were observed at three locations of the north-central portion (Okumura et al., 1994; Kondo et al., 2006; Kondo et al., 2019) and a location of the south-central portion (Miura et al., 2004) by trench surveys. Four initial crack locations, the north and south ends of both portions, are assumed. Varying depth coefficient of stress drop, we calculate dynamic rupture processes by a finite-difference method (Kase and Day, 2006), and compare the left-lateral slips with the observed ones.

The ruptures initiating at the north or south end of the north-central portion can jump to the south-central portion. Even a multi-segment rupture on the north-central and south-central portions, however, needs quite a large stress drop for surface slips on the north-central portion to be consistent with the observed ones. The result implies that the latest event on the north-central portion was likely a multi-segment earthquake including the north portion, which agrees with paleoseismological data (MEXT and AIST, 2020). On the other hand, the ruptures initiating at the north or south end of the south-central portion cannot jump to the north-central portion. The slip of the single event on the south-central portion needs a large stress drop to be consistent with the observed one. The latest event on the south-central portion may be a multi-segment earthquake on the south-central and south portions, which is suggested by paleoseismological data (MEXT and AIST, 2020).

Acknowledgement: This research was funded by the Research Project for Long-term Evaluation Methods of Active Faults related to Multi-segment Earthquake in FY2019 by MEXT.

Dynamic earthquake sequence simulation with a spectral method without periodic boundary condition

*Hiroyuki Noda¹

1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute

動的地震サイクルシミュレーション (例えばLapusta et al., 2000) は、地震間の準静的な応力蓄積過程、震源核の形成、地震破壊の動的な伝播、余効滑りと再固着、といった異なる時間スケールの現象を同一のフレームワークでシームレスに扱う事のできる手法であり、地震を繰り返す断層の運動のダイナミクスを調べる上で重要な手法である。Lapusta et al. (2000) は離散化の為にフーリエ基底を採用し、Geubelle and Rice (1995) が導出された積分核を用いた。スペクトル法であるため滑らかな問題に対して近似誤差が早く収束し、また高速フーリエ変換を用いて空間方向の畳み込み積分を波数空間で行うため、計算コストが低く抑えられる、といった利点がある。一方で、この手法では滑り δ や滑り速度 V の分布に対して周期境界条件を仮定し、無限媒質中の無限平面断層に対する解をグリーン関数として用いるため、周期境界条件を興味対象の領域から十分遠くに設定する必要がある。滑りによる静的な応力変化は遠くまで伝わるため、この周期境界の間隔をどの程度に取る必要があるのか、考慮が必要となる。本研究では、同様にフーリエ基底と高速フーリエ変換を用いながら、周期境界条件を仮定する必要のないスペクトル法の地震サイクルシミュレーションを構築した。

境界積分方程式法では、断層面でのトラクション τ は断層滑りが過去と現在に無い場合のトラクション τ_0 、過去に断層がすべった事による寄与 f 、及び現在その場に滑り速度がある影響 (インピーダンスの効果) $-V\mu/2cs$ の和で表現できる。ここで μ は剛性率、 cs はS波速度である。 f は過去の δ もしくは V と積分核の時空間的な畳み込みで表現できる。動的地震サイクルシミュレーションでは f を現在の滑り分布に依存する静的な効果 f_{st} とそれ以外 $f_{dyn} = f - f_{st}$ に分ける。 f_{dyn} は十分過去の滑り速度に関してその影響がゼロに漸近する。そのため、 f_{dyn} を V に関する積分で計算し、この積分を十分長い時間窓 t_w で打ち切ってやることにより、過去を忘れながら (すなわち有限のメモリーで) 数値計算を進めていく事ができる。これが Lapusta et al. (2000) による動的地震サイクルシミュレーションの仕組みである。

f の空間フーリエ変換 F は滑り量の空間フーリエ変換 D と積分核 K をかけた物を時間積分する事によって得られる。この K に関して、Cochard and Rice (1997) は周期境界条件を取り除く手法を提案した。彼らの手法では、滑りを許す領域 ($0 < x < L$) の2倍の長さの領域 ($0 < x < 2L$) を準備し、その半分 ($L < x < 2L$) をゼロで埋める。その上で、滑りを許す領域でのみ正しい f の波数空間での表現が導出されている。ただし Geubelle and Rice (1995) に比べて積分する回数が1回多く、これを数値的に評価すると計算コストが大きくなる。しかし今回、この積分核の全時間の積分 (静的な積分核) に関しては積分を解析的に実行する事が可能である事を見出した。波数 k (>0) のフーリエモードに関し、静的な積分核は $-\mu k \text{Si}(kL)/\pi$ と表す事ができる。ここで $\text{Si}()$ はサイン積分関数であり、高波数では積分核が周期境界条件を仮定した場合の $-\mu k/2$ に漸近する。

今回提案する手法では、 f を Lapusta et al. (2000) と同様に Geubelle and Rice (1995) の表現を用いて計算する。ただし、周期境界の向こう側からの弾性波が興味対象の領域 ($0 < x < L$) に達する事が無い様、周期境界の間隔は十分に広く取る。ソースと評価点の相対位置 $-L < x < L$ に関して積分核を評価し、このフーリエ変換を波数空間でのグリーン関数として持っておく。ここから Cochard and Rice (1997) から求めた静的な積分核を差し引く事により、 $f_{dyn} = f - f_{st}$ を計算する。これを用いると、周期境界を取り除いた地震サイクルシミュレーションが可能となる。発表では手法の説明に加え、Aging law によって支配される孤立した断層の地震サイクルシミュレーションを紹介し、その途中で加えた動的および静的な応力擾乱の影響を議論する。

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

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

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

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

Modelling of spontaneous and periodic slow slips and a tsunami earthquake in the northern part of the Japan Trench

*Ryoko Nakata¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0)の海溝近傍のすべり域は、日本海溝中部に限定されていた [e.g., Iinuma et al., 2012]。その南側の福島県沖では、余効すべりや低周波微動・超低周波地震 [Nishikawa et al., 2019]などのスロー地震が観測されている。一方、北側の三陸沖では、津波地震として知られている1896年明治三陸地震 (Mw8.0) [Tanioka & Satake, 1996; Satake et al., 2017]が過去に発生したほか、スロースリップ (SSE)やM5程度の地震 [Uchida et al., 2016]が数年周期で観測されている。2011年東北沖地震のすべり域がなぜ南北に広がらなかったのか、このようなすべりのすみわけがなぜ起こるのかを理解するために、日本海溝において地震発生サイクルの数値シミュレーションを行ってきた。これまでに、中部でのM9地震時すべり域と南部での余効すべりとのすみわけを、地下構造の明瞭な違いを反映した摩擦パラメータ分布を用いて説明したり [Nakata et al., preparing]、三陸沖で自発的に発生する周期4~5年のSSEを小さなパッチで近似し、このSSE領域全体で発生する津波地震を小さなSSEパッチの集合体でモデル化したりしてきた [Nakata et al., 2020, JpGU]。

本研究では、階層構造モデル [Ide & Aochi, 2005]やスロー地震の物理モデル [Ando et al., 2010; 2012; Nakata et al., 2011]などを参考にし、周期数年のSSEと、その付近で発生する繰り返し間隔100年以上の津波地震との共存等の観測と調和的なすべりの時空間分布を再現する。今後は、このモデルを、M9地震とその余効すべりを含むモデル [Nakata et al., preparing]と組み合わせ、日本海溝北部におけるスロースリップや津波地震が、2011年東北沖地震のような巨大地震発生履歴の中で果たす役割を明らかにする。

Numerical model of slow slip events in the Nankai and Hyuganada region revisited from recent observational studies

*Takanori Matsuzawa¹, Bunichiro Shibazaki²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Building Research Institute

1. はじめに

深部低周波微動の発見(Obara, 2002)以来, 世界各地のプレート境界で発生するスロー地震について, 精力的に研究が進められてきている. 近年, 南海トラフにおいては, とりわけスロースリップイベント(SSE)に関する新たな知見が多く得られている. 例えば, プレート固着域の深部延長上のプレート境界で発生する長期的SSEについては, 従来知られていた東海地方や豊後水道, 四国中西部だけでなく, 日向灘や紀伊水道, 志摩半島でも発生が報告されている(例えば, Ozawa et al., 2017; Kobayashi, 2017; Kobayashi and Tsuyuki, 2019). また, Takagi et al. (2019)は長期的SSEが日向灘において, 2~3年間隔で発生している可能性を指摘している. これらの研究は, 短期的SSEと同様に, 長期的SSEについても沈み込み帯で広く発生している普遍的な現象であることを示している. さらに, 固着域を挟んで浅部側の領域においてもSSEが発生していることが, 近年の海底地殻変動観測の進展により明らかとなった(Araki et al., 2017; Yokota and Ishikawa, 2020). 我々はこれまで南海トラフにおいて発生する深部の長期的および短期的SSEの数値シミュレーション研究を実施してきた. 本発表においては, 対象領域を種子島沖まで拡張したモデルに基づいて, 数値シミュレーション結果と観測結果の比較を行うとともに, 地震サイクル内における挙動についても議論を行う.

2. 計算手法・モデル

数値モデルにおいては, フィリピン海プレート上面の形状を約17万個の三角形要素で表現し, Matsuzawa et al. (2013)と同様にカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を仮定して, 各要素上でのすべり速度および摩擦の時間発展を計算した. 短期的SSEの領域設定においては, 低い有効法線応力を仮定するとともに, 観測された微動活動の分布に基づいて(a-b)が負となる領域を設定した. 東海地域および豊後水道の長期的SSE領域については, Matsuzawa et al. (2013)と同様に, 有効法線応力が周囲よりやや低い領域の沈み込み方向の幅を広く設定した. 加えて日向灘領域については, この幅を他地域より広く, 東海地域や豊後水道の長期的SSE領域よりも狭い, 中間的な幅に設定した.

3. 結果・議論

数値シミュレーション結果においては, 短期的SSEに加え, 長期的SSEが報告されている深さ25~29kmにおいて, 長期的SSEの繰り返し発生が広範囲で再現された. 豊後水道および東海地域においてはそれぞれ6年および10年程度の間隔で長期的SSEが発生し, 観測と同様の比較的周期的な発生挙動を示した. 日向灘地域においては, 再来間隔が数年程度となり, Takagi et al. (2019)の観測結果と調和的であった. 豊後水道, 東海地域, 日向灘以外の領域における長期的SSEは発生間隔が10年以上となるものが多く, 発生領域が地震サイクルの後半になるにつれ, 浅部へと拡大する傾向がみられた. 一方, 東海地域および豊後水道の長期的SSEについて, その発生域は地震サイクルを通じてほぼ一定であった. 我々の数値シミュレーション結果は, 長期的SSEが普遍的に発生しうることを示すとともに, 有効法線応力がやや低い領域の幅が長期的SSEの発生挙動の違いを生じさせる可能性を示唆する.

加えて数値シミュレーション結果では, とくに紀伊半島南方沖の浅部領域において長期的SSEが繰り返し発生した. 同領域においては活発なスロー地震活動が観測されており, 数値シミュレーションによって同様な地域性を再現することができた. 我々の数値モデルはトラフ軸に沿う方向の摩擦特性の変化を仮定していないものの, 同領域では大地震の固着域が狭くなっており, こうした差異が浅部のSSE挙動を規定している可能性も示唆される.

Examination of constitutive relation for the fault zone along the plate boundary in subduction zone

*Takane Hori¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

沈み込み帯プレート境界に沿った断層帯では、巨大地震をはじめとした様々な規模の地震が発生するとともに、様々な規模のゆっくり地震（通常の地震よりも周波数の低い地震や地震波をほとんど伴わないゆっくりした断層すべり）も発生する。このように時空間的に多様な振る舞いを示す断層帯をどのようにモデル化するのが適切だろうか？実体そのものを忠実にモデル化することは、観測・観察不能なことが多すぎて困難なので、目的に応じて単純化したモデルを構築する必要がある。ここでは、時空間的に多様な地下の断層の振る舞いをモニタリングしつつ、その後の推移を予測することを目的としたモデル化を考える。モニタリングし、かつ、予測をするということは、モデルに使う変数やパラメータが観測データによって十分に拘束される必要がある。地下（しかも多くは海底下）数km～数十kmにある断層帯で発生している現象のモニタリングと予測するために我々が用いることができる観測データは、断層帯での動きを反映した地表（海底）での変位・歪変化などに限られる。そのため、断層帯内部で生じている様々な物理・化学過程を直接モデルに取り込むことは無理がある。観測データから拘束できるのは、高々、断層帯の厚さ方向全体の歪（あるいは相対変位）の時空間分布やその周辺の弾性体の物性であり、それすらも限られた空間解像度で推定できるに過ぎない。そこで、断層帯に沿った歪（あるいは相対変位）の時空間分布をモニタリングと予測の対象とすることを考える。モニタリングについては、従来から行われているインバージョン解析そのものであるが、予測をするには、断層帯に沿った歪（あるいは相対変位）がどのような発展則に従うのかを考える必要がある。つまり、断層帯の構成関係を、歪（あるいは相対変位）と断層帯に働く応力との関係でどう記述するかが問題となる。通常の地震に対しては、断層すべり時の弱化と、弱化後の強度回復過程を表現できることが必要である。また、様々な規模の地震発生を表現するためには、スケール依存性や階層性を取り入れることが必要と考えられる。一方、ゆっくり地震に対しても、部分的にはそれらの組み合わせで表現できる場合がある。しかし、ゆっくり地震のモデル化で従来必須と考えられることが多い、すべり速度依存性の導入の必要性や導入する場合の定式化が、まず検討すべき課題と考えている。この課題について、単純な系を用いた数値実験の検討結果について紹介する予定である。

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。

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S14. Earthquake prediction and forecast

S14P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S14P-01] Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

OHironobu Kamikubo¹ (1.Hamamatsu Hokusei Jhs)

4:00 PM - 5:30 PM

[S14P-02] On the upheaval of Muroto during the Nankai earthquake and the time-predictable model

Oyasuhiro umeda¹ (1.previous DPRI Kyoto univ.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S14P-03] The possibility to argument about the existance of "Repeating Tremor" by the log from Twitter(2020)

OMichiko Imazu¹ (1.jisin-kurumiru)

4:00 PM - 5:30 PM

Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

*Hironobu Kamikubo¹

1. Hamamatsu Hokusei Jhs

図1は静岡県西部地域で白金測温抵抗体の水温センサーを用いて行っている長期水温変化である。観測開始は浜松市中郡（NG）が2013年5月、湖西市新居（KOA）、磐田市中泉（IWN）、掛川市徳泉（KAT）が2016年8月である。

NGでは2014年後半から下降を続けていた水温が2017年から上昇に転じ、その後急激な温度上昇が観測されていたが2020年頃より上昇が停滞しているように見える。

図2はNGの浜名湖周辺の長期スロースリップ終息後の2017年1月1日から2020年8月5日までの水温変化である。

図3は同時期の静岡県西部地域の深さ20km-25kmのM1.0以上の地震活動の積算図である。図中の2018.6.12, 2018.11.3, 2020.1.30, 2020.6.25はこの間に地震活動が活発化し始めた日である。

これらの地震活動の活発化した時期に対応して水温の上昇率の高まりが見られる。

また、地震活動が活発化した後に活動が停滞する期間が見られるが、地震活動の停滞終息後にやや遅れて水温変化の停滞（2018.6.12）や下降（2018.11.3, 2019.8.13）が見られる。2020.1.30からの地震活動の急増はクラスタの発生によるものである。

浜名湖周辺で観測された長期スロースリップが2016年末頃に終息したことから浜名湖以東への応力の増加がもたらされ、この地域の地震活動が活発化したと考えられる。特に浜松中郡（NG）と磐田中泉（IWN）で水温の上昇が顕著に見られることからこの地域への地下応力の増加が進んでいると考えられる。

地震活動の増加をもたらした地下応力の変化と水温変化との間にみられる同期性は、佢が提唱した地殻の岩盤の応力が強まると深部の高圧流体は低圧環境である地殻上部へ移動し浅層地下水に混じり地下水温を上昇させるとした深部流体上昇仮説(Tsukuda et al.2005)と調和する。

【参考文献】

Tsukuda, T., K. Goto and O. Sato, 2005, Bull. Earthq. Res. Inst., 80, 105-131.

上久保廣信, 静岡県西部地域の地下水温変化, 日本地震学会講演予稿集S14-P04, 2019.

図1 上から湖西市新居（KOA）、浜松中郡（NG）、磐田市中泉（IWN）、掛川市徳泉（KAT）の水温変化（1日平均値）（2013年6月～2020年8月11日まで）の地下水温変化

図2 浜松中郡（NG）の2017年1月から2020年8月5日までの地下水温変化（1日平均値）

図3 静岡県西部地域の地震累積回数（2017年1月～2020年8月5日まで M1以上 深さ20-25km）と地震活動が活発化し始めた日

図の作成には東大地震研究所TSEISweb版の気象庁データJMA--_PDEを使用した

図 1

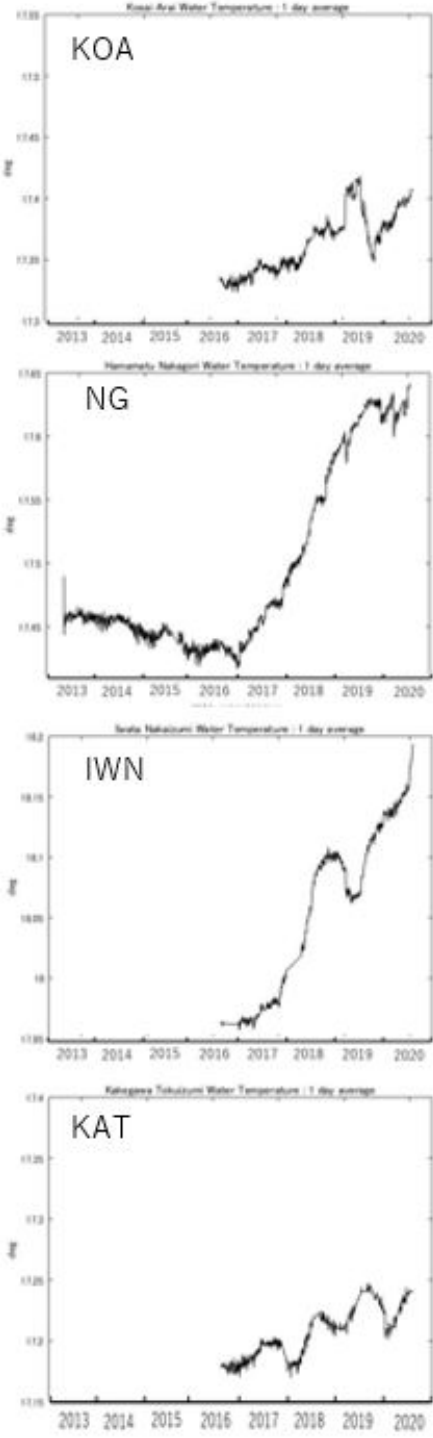


図 2

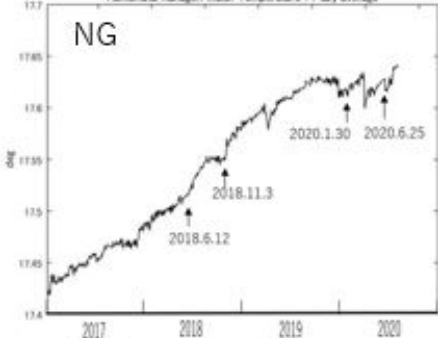
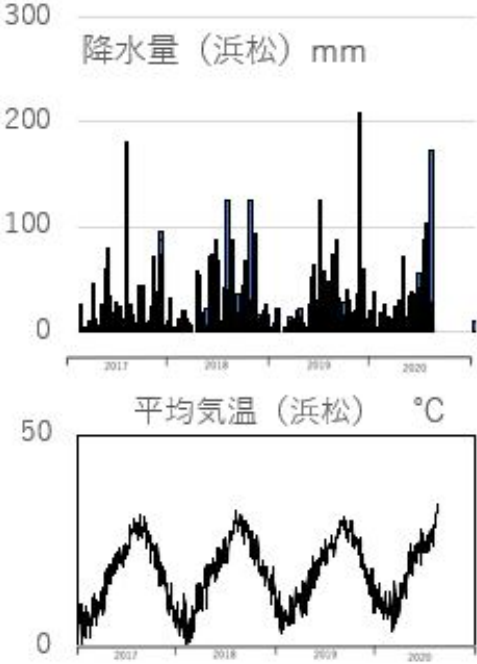


図 3



On the upheaval of Muroto during the Nankai earthquake and the time- predictable model

*yasuhiro umeda¹

1. previous DPRI Kyoto univ.

1. はじめに

過去3回の南海地震の室津（室戸市）の隆起量を基に，Shimazaki and Nakata(1980)は南海地震の時間予測モデル（time- predictable model）を提唱した．このモデルの図では，縦軸に地震毎の断層変位とその積算を採るのが元々の考えになっているので，室戸の隆起量を縦軸に採る場合は，それが断層変位（滑り量）に比例しているという仮定がある．

安政南海地震（M8.4）と昭和南海地震（M8.0）とでは地震規模が異なるにも関わらず，室戸の隆起量は前者が1.2 m，後者は1.15 mとほぼ同じになっている．断層の滑り量と室戸の隆起量は比例していない可能性がある．

2. 上下変動と滑り量および断層の幅との関係

地表の上下変動は断層の滑り量と断層の幅の2つの要素によって決まる．添付図の上は南海トラフにほぼ直交方向の断面図である．斜め曲線はプレート境界で，境界上に昭和南海地震の断層（細長い黒の矩形）と安政南海地震（細長い点線の矩形）を設定した．図下の実線は昭和南海地震の滑り量を5 mとした時の地表の上下変動，点線は安政南海地震の滑り量を8 mとした場合の地表の上下変動である．滑り量は1.5倍異なるにもかかわらず，室戸の隆起は両地震でほぼ同じになっていることがわかる．高知の沈降も同様，両地震共ほぼ同じである．その理由は断層幅も約1.5倍に広げたためである．断層幅を広げた結果，地表の隆起のピークはトラフ側へ，沈降のそれは陸側へシフトし，安政南海地震の室戸や高知の上下変動は相対的に小さくなっている．このように断層の滑り量と地表の上下変動は比例しない場合がある．

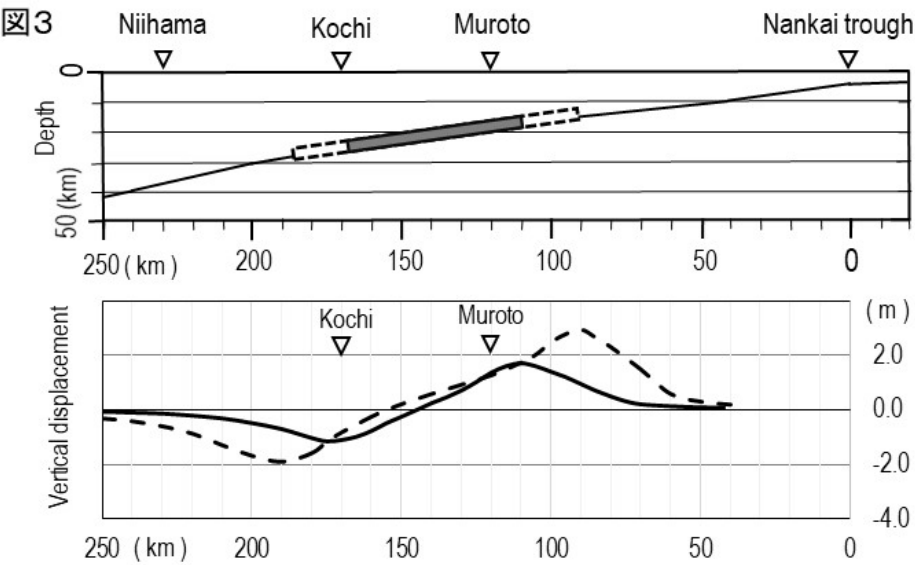
3. 議論

内陸地震の場合はトレンチ調査によって過去の地震の滑り量を直接測定できるが，プレート境界の地震では直接測定ができない．そのため地表で測定された上下変動が時間予測モデルに採用されているが，南海地震のように過去3回の地震データで，その一つの変動量が小さく評価されると，予測時期は大きく変わってしまうことがある．

上下変動に代わる簡便法として，マグニチュードから滑り量を推定し，時間予測モデルに準拠した図を作ることとはできる．過去3回の地震データだけを使うと最短で2004年，最長でも2019年になる．地震数（データ数）によって次の地震発生の予測年が変わる．1361年正平地震以降の6回の地震を用いると，次の地震は2050年頃になる．また地震数（データ数）が増えれば，時間予測モデルと滑り予測モデルとの違いがなくなり，どちらのモデルが適当かはわからなくなる．

地震	M	室戸	高知
昭和	8.0	1.15	-1.2
安政	8.4	1.2	-1.1

表：2回の地震のマグニチュードと
室戸・高知で測定された上下変動
(単位は m)。
地震規模は異なるが上下変動は
両地震でほぼ同じ。



図上：南海トラフ軸にほぼ直行方向のプレート境界（細い斜め実線）と断層面の断面。黒の細長い矩形は昭和南海地震（断層幅 60 km），点線の細長い矩形は安政南海地震（断層幅 95 km）。
下：実線は昭和南海地震（滑り量 5 m），点線は安政南海地震（滑り量 8 m）による地表の上下変動。後者の滑り量は 前者の1.6倍だが，室戸の隆起も高知の沈降もふたつの地震共同じになっている。

滑り量と地表の上下変動は比例しない場合がある

The possibility to argument about the existance of "Repeating Tremor" by the log from Twitter(2020)

*Michiko Imazu¹

1. jisin-kurumiru

1994年に体感による微動を捕捉し1995年兵庫県南部地震が発生した、最初の発見から一歩進んで2012年、加速度センサーによる捕捉を試みたが、かろうじて捕捉できたサンプルは不明瞭かつ微小で説得力に欠けており壁にぶつかっていた。その後、体感による微動記録をブログからTwitterに変えた。このなかで地震速報をフォローすることで、体感できた微動と実際に発生した地震の時間的、規模、場所、メカニズムの相関をTLで記録し、Twilogで客観的検証ができることに気づき、今回はその記録をもとに、2020前半のいくつかの局面を例に「地震発生の先行現象としての”規則微動”が確かに存在している」このと論証を試みる。今回は期間内に日本での陸域直下の被害地震に先行するものは入っていないが、ほかに、よく発生している海外の大型地震に先行する一時的な微動がある。それぞれについて傾向を説明しつつ例示する。

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S16. Subsurface structure and its effect on ground motion**S16P**Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S16P-01] Estimation of Subsurface Soil Depth Affecting Spatial Variation of Ground Motion between Adjacent PointsORyoichi Tokumitsu¹, Yu Yamamoto¹, Yasuo Uchiyama¹, Susumu Ohno² (1.Taisei Corp., 2.Tohoku Univ.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S16P-02] Overview of ground motions on the islands of Kagoshima, Japan -Using seismograph data of Kagoshima Prefecture-ONobuyuki Yamada¹, Kimiyuki Asano², Tomotaka Iwata² (1.Kochi University, 2.DPRI Kyoto University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S16P-03] Long-period ground motion simulation in the Kanto region: effects of 3D CMT solutionsOShunsuke Takemura¹, Kazuo Yoshimoto², Katsuhiko Shiomi³ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Yokohama City University, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

[S16P-04] Influence of Seismic Source Locations of Interplate Earthquake along the Nankai Trough on Long-Period Ground Motions in Osaka Bay AreaOTomohiro Oguchi¹, Masayuki Nagano² (1.Tokyo University of Science Graduate School, 2.Tokyo University of Science)

4:00 PM - 5:30 PM

[S16P-05] Microtremor Array Surveys in and around the Lowland Area along the Kizu River, KyotoOKimiyuki Asano¹, Masayuki Yoshimi², Tomotaka Iwata¹, Hirotoshi Uebayashi³, Michihiro Ohori⁴, Haruko Sekiguchi¹, Hiro Nimiya², Tatsuya Noguchi⁵ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, GSJ/AIST, 3.Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, 4.Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, 5.Faculty of Engineering, Tottori University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S16P-06] Microtremor array surveys on the Eastern Part of the Nara Basin, JapanOMasayuki YOSHIMI¹, Kimiyuki ASANO², Tomotaka IWATA², Hiro NIMIYA¹, Takeshi SUGIYAMA (1.Geological Survey of Japan/AIST, 2.DPRI, Kyoto university)

4:00 PM - 5:30 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 -OIsamu 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)

4:00 PM - 5:30 PM

[S16P-08] S wave seismic reflection and microtremor surveys on the Shikano fault appeared in the 1943 Tottori earthquake

○Takao Kagawa¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada², Tetsuya Takameoto² (1.Faculty of Engineering, Tottori University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S16P-09] Estimation of gravity basement structure in the central Tottori, Japan

○Tatsuya Noguchi¹, Isamu Nishimura¹, Takao Kagawa¹ (1.Tottori University)

4:00 PM - 5:30 PM

Estimation of Subsurface Soil Depth Affecting Spatial Variation of Ground Motion between Adjacent Points

*Ryoichi Tokumitsu¹, Yu Yamamoto¹, Yasuo Uchiyama¹, Susumu Ohno²

1. Taisei Corp., 2. Tohoku Univ.

1. はじめに

表層地盤の不均質性に伴う地震動の空間変動には、建物への入力地震動の低減効果が期待される。耐震設計において地震動の空間変動特性の影響を考慮し、建物の地震応答の精度向上を図るためには、表層地盤の不均質パラメータを明確にするとともに、設計において地震動の空間変動の影響を適切に評価するためにモデル化すべき地盤深さを把握することが重要である。

本検討では不均質地盤モデルによる地震動シミュレーションから得られた隣接地点間における応答波形を解析対象とし、Ritter et al.(1998)¹⁾に基づき、地盤の平均S波速度および平均S波速度に対する変動係数、相関距離をパラメータとして、隣接地点間における地震動の空間変動に影響を与える表層地盤の深さを推定する。

2. 地震動の空間変動と地盤の不均質パラメータとの関係

Ritter et al.(1998)¹⁾は地震動の空間変動 $\varepsilon(f)$ を散乱係数および伝播距離との関係式で示すとともに、Shapiro et al.(1993)²⁾の散乱係数と地盤の不均質性の相関関数との関係式に基づき、 $\varepsilon(f)$ を地盤の不均質パラメータとの関係式で表現している。例えば地盤の不均質パターンがガウス型に従う場合、(1)式で表現される。

$$\ln(\langle \varepsilon(f)^2 \rangle + 1) = (4\pi^{2.5} \cdot (\sigma^2 a) \cdot L \cdot f^2) / c^2 = \gamma \cdot f^2 \dots \dots (1)$$

ここで左辺の $\langle \varepsilon(f)^2 \rangle$ のうち、 $\langle \rangle$ は平均を示す。右辺の σ は不均質地盤における地盤物性の変動係数、 a は相関距離、 L は地盤中の地震波の伝播距離すなわち地盤深さ、 f は周波数、 c は地盤の平均伝播速度を示す。(1)式は地震動の空間変動 $\langle \varepsilon(f)^2 \rangle$ は係数を γ とする f の2次関数で表現されることを示しているとともに、地盤調査により σ 、 a 、 c を把握できた場合、観測記録より $\langle \varepsilon(f)^2 \rangle$ が求まれば、 L すなわち $\langle \varepsilon(f)^2 \rangle$ に影響を与える地盤深さを推定できることを示している。なお、(1)式は地震動の散乱の程度が強くない範囲において有効であるとされている。

3. 不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーション

解析に使用した不均質地盤モデルの例を図1に示す。本検討では2次元のFEMモデルを使用した。モデルのサイズは水平方向を500m、深さ方向を200mとし、メッシュサイズは1m×1mとした。地盤の平均S波速度は300m/sとし、ガウス型の自己相関関数に従うようにS波速度を変動させ、相関距離は等方的に10m、変動係数は15%とした。また、本検討では初期乱数を変化させることにより、10パターンの地盤モデルを作成した。なお、地盤の内部減衰は0.5%とした。入力地震動はインパルス的な地震動を与えるため、加振時間0.02秒の三角型関数を地盤モデルの底面よりSH方向に平面入射した。応答波は図1に示すとおり、モデル両端から150mの範囲を除く幅200mの地表面の領域において、1.0m間隔で抽出した。抽出時間は地震動の入力直後より約10秒間とした。また(1)式の $\varepsilon(f)^2$ はRitter et al.(1998)¹⁾を参考に、隣接する2観測点より抽出した時刻歴波形の振幅を平均した波形と、もとの波形から平均した波形の差分の波形のパワースペクトル比で定義した。

4. 空間変動に影響を与える表層地盤深さ

10種類の不均質地盤モデルより抽出したすべての応答波を対象に、離間距離が5m、10m、15m、30m、60mとなる2観測点の $\ln(\langle \varepsilon(f)^2 \rangle)$ と f との関係を図2に示す。Ritter et al.(1998)¹⁾は $\ln(\langle \varepsilon(f)^2 \rangle)$ が0未満の範囲は散乱が強くないとしていることから、本検討では観測点間の離間距離ごとに、 $\ln(\langle \varepsilon(f)^2 \rangle)$ が0未満の周波数帯を解析対象とした。図2に基づき $\ln(\langle \varepsilon(f)^2 \rangle + 1)$ と f との関係を描いた結果を図3に示す。また解析対象の周波数帯において回帰分析し、 $\ln(\langle \varepsilon(f)^2 \rangle + 1)$ を f の2次関数で表現した結果を図3に点線で示す。回帰係数により求めた回帰係数を(1)式の γ に代入し、 $\sigma^2 a$ と L との関係を描いた結果を図4に

示す。図 4には本検討で使用した不均質地盤モデルの σ^2a に相当する値を黒の点線で示す。 σ^2a およびLとの関係の線と不均質地盤モデルの σ^2a に相当する黒の点線との交点が地震動の空間変動に影響を与える地盤深さLに相当する。図4に基づき、観測点間の離間距離と地震動の空間変動に影響を与える地盤深さLとの関係を描いた結果を図5に示す。観測点間の離間距離が大きくなるほどLも深くなるが、離間距離が30m以上になると、Lが大きく変化しなくなる傾向が見られる。

参考文献

1) Ritter et al.(1998): Geophys. J. Int., 134, pp.187-198
2) Shapiro et al.(1993): Geophys. J. Int., 114, pp.373-391

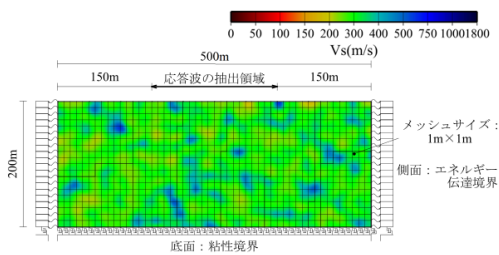


図 1 不均質地盤モデルの例

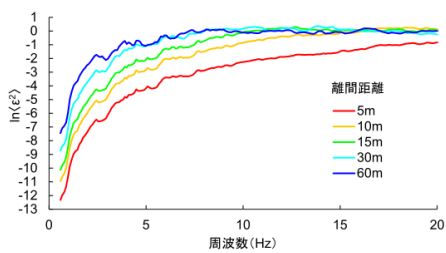


図 2 $\ln\langle\epsilon(f)^2\rangle$ と f との関係

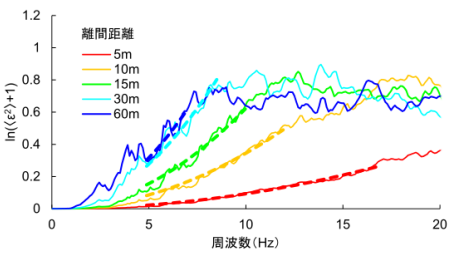


図 3 $\ln\langle\epsilon(f)^2+1\rangle$ と f との関係

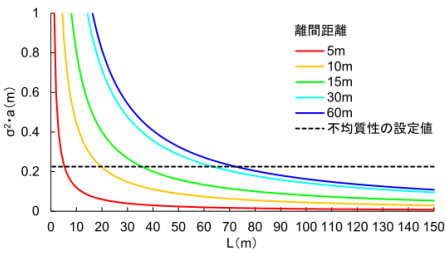


図 4 $\langle\epsilon(f)^2\rangle$ に影響を与える地盤深さ

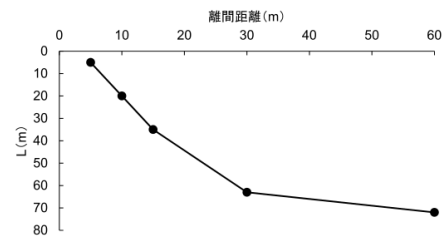


図 5 離間距離と $\langle\epsilon(f)^2\rangle$ に影響を与える地盤深さとの関係

Overview of ground motions on the islands of Kagoshima, Japan -Using seismograph data of Kagoshima Prefecture-

*Nobuyuki Yamada¹, Kimiyuki Asano², Tomotaka Iwata²

1. Kochi University, 2. DPRI Kyoto University

鹿児島県は、南北約500kmにわたる広範囲に奄美群島、吐噶喇列島、大隅諸島および甬島列島など大小多数の島々を行政区に有する。これらの地域では、沖縄トラフや琉球海溝などでの地震によりたびたび強い揺れに見舞われ、過去には地震被害も発生している（例えば、1911年の喜界島近海の地震M: 8.0[宇佐美(1996)]など）。さらに、将来被害をもたらす地震の発生も危惧され、有人島における地震防災を考える上で、精度の高い地震動評価は必要である。

これら点在する島々には、各市町村に震度観測点（計測震度計は、国際計測器製KSG-T2030）があり、各観測点で得られた加速度波形データ（期間2010年10月～2018年2月）の取りまとめがなされている[地震調査研究推進本部：平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査(2019)]。また、山田(伸)ほか(2018)では、奄美群島と吐噶喇列島の一部での微動アレイ探査を実施しており、深部地盤構造の概略を推定している。こうした経緯から、本研究では、この震度計データを主に活用し、鹿児島県の島嶼部の地震動を概観し、強震観測点の無い島や地域の地震動特性を明らかにするとともに、今後の南西諸島における地震動評価のための一資料とすることを旨とする。

鹿児島県が設置する震度計は73地点あり、3成分を1個とした地震動記録数（観測点×イベント数）は3339個で、そのうち、島嶼部のものは、25地点で1312個であった。地点毎の記録数は、十島村小宝島で最多の162個、同村悪石島で112個、反面、十島村平島で9個、三島村硫黄島で8個、同村黒島で3個であり、記録数に偏りは大きい。記録長は、60～90秒前後のものが多い。

本報告の第1段階として、できるだけ多くの震度観測点での記録が得られている地震（最大で12地点で5地震が該当）や記録数の少ない地点の記録を含む地震の計20地震を選び、各島での地震動の性状の把握を行った。この20地震については、防災科学技術研究所のK-NET（計13地点）によるデータも参照した。対象となった地震の中には、2011年11月8日の東シナ海の地震(Mj: 7.0, 深さ217km)や2015年11月14日の九州西方沖の地震(Mj: 7.1, 深さ17km)などがあり、2016年4月16日の熊本地震も含めた。地震の発生場所や規模はばらばらであるが、概ね地域単位での地震動特性の把握ができそうである。いくつかの地震の速度波形によると、喜界町(喜界島)や三島村(硫黄島)などは、S波以降の後続位相が他地点と比して常に顕著であった。これらの島については、例えば、前者は竹中ほか(1997)、後者は山田(雅)ほか(2016)で地震動等についての記載がある。また、これらの記録の一部について、S波の立ち上がりを目視またはS波速度を3.4 km/s（山田(伸)ほか(2018)の平均基盤速度を利用）として走時を計算して、そこから40.96s間を切り出し、高速フーリエ変換によりスペクトルの水平動成分の合成を上下動で除したスペクトル比(H/V)も計算した。現段階では、H/Vの形態が地震毎にばらつきが大きい地点もあるためデータ区間の設定など再考を要する点があると考えられるが、多くの地点でそのピーク周期は0.2～0.5 s（喜界島や硫黄島は1.0 s前後）であった。今後さらにこれら震度計等のデータの処理と精査を行い、鹿児島県の島嶼部の地震動特性を明らかにするとともに、表層地質や島の成因などを考慮しながら地震動評価のための地盤構造モデルの推定に活用できるか模索したい。

本研究で使用した地震動波形データについて、震度計によるものは、鹿児島県震度情報ネットワークシステム[鹿児島県危機管理局危機管理防災課]によるもの、K-NETのデータは、防災科学技術研究所によるものです。関係者各位に記して感謝申し上げます。

Long-period ground motion simulation in the Kanto region: effects of 3D CMT solutions

*Shunsuke Takemura¹, Kazuo Yoshimoto², Katsuhiko Shiomi³

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Yokohama City University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

長周期の変位波形は不均質構造に対してロバストであると考えられており、1次元構造がCMT解析で広く用いられている。しかし、海域などの不均質の強い地域ではその限りではなく、3次元地下構造の考慮が必要であることが報告されている（例えば、Hejrani et al., 2017; Takemura, Okuwaki et al., 2020; Wang & Zhan, 2020）。本研究では、関東地方で2017年4月から2020年3月の間に発生したMw 4.5以上かつ50 km以浅の地震について、F-net広帯域地震計の記録から得られた周期25-100秒の変位波形を利用したCMT解析実施した。そして、本研究で得られた3次元CMT解を利用した地震動シミュレーションを行い、周期数秒以上の長周期地震動（以下、単に長周期地震動）の再現性を評価した。

3次元CMT解析および長周期地震動シミュレーションでは、全国1次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）を利用し、OpenSWPC（Maeda et al., 2017）により地震波伝播を評価した。CMT解の推定には、Takemura, Okuwaki et al. (2020)のグリッドサーチ3次元CMT解析手法を採用した。関東平野における長周期地震動の観測記録とシミュレーション結果の比較にはMeSO-netの記録を利用した。手法やシミュレーションに関する詳細は、Takemura, Yoshimoto & Shiomi (2020)に記されている。

本研究による3次元CMT解（図左側）とF-net MT解を比較すると、震源の深さやメカニズム解に大きな差はなかった。しかし、3次元CMT解では、特にスラブ内で発生する地震についてMwがF-net MT解と比較して最大で0.3程度異なることがわかった。Takemura, Okuwaki et al. (2020)による南海トラフの3次元CMTカタログでも同様の傾向が見られた。F-net 1次元構造（Kubo et al. 2002）を含む様々な不均質構造を用いた地震動シミュレーションにより、スラブ内地震で見られたF-net MT解と3次元CMT解のMwの差は、震源域の剛性率構造に起因することが明らかになった。3次元地下構造モデルでは沈み込む海洋性地殻（低剛性率体）と海洋性マントル（高剛性率体）が含まれているのに対し、1次元構造ではMoho面以深では一様な剛性率構造となっており、そのためにMwの推定で系統的な差異が発生した。Mwの大きさは地震動シミュレーションの地震動の振幅と直接的に関係する。本研究の結果は、正確な長周期地震動のモデル化を目指すには、利用する3次元地下構造モデルに調整されたCMT解（例えば、3次元CMT解）を利用する必要があることを示唆している。本研究による3次元CMT解を利用した地震動シミュレーション（図右側）は、CMT解析に使用していないMeSO-net観測点との比較を含め、周期10秒以上の長周期地震動を概ね再現することに成功した。

手法とCMTカタログに関する参考文献

Takemura, Okuwaki et al., 2020 GJI <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa238>

Takemura, Yoshimoto & Shiomi 2020 <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-43689/v1>

本研究によるCMTカタログ <https://doi.org/10.5281/zenodo.3926883>

謝辞 防災科学技術研究所F-net (<https://doi.org/10.17598/NIED.0005>) とMeSO-netの波形記録を利用しました。地震動計算には東京大学地震研究所 地震火山情報センターの計算機システムおよび東京大学 情報基盤センターのOakforest-PACSを利用しました。本研究は、東京大学地震研究所 共同利用（2020-S-04）およびJSPS科研費19H04626により実施されました。

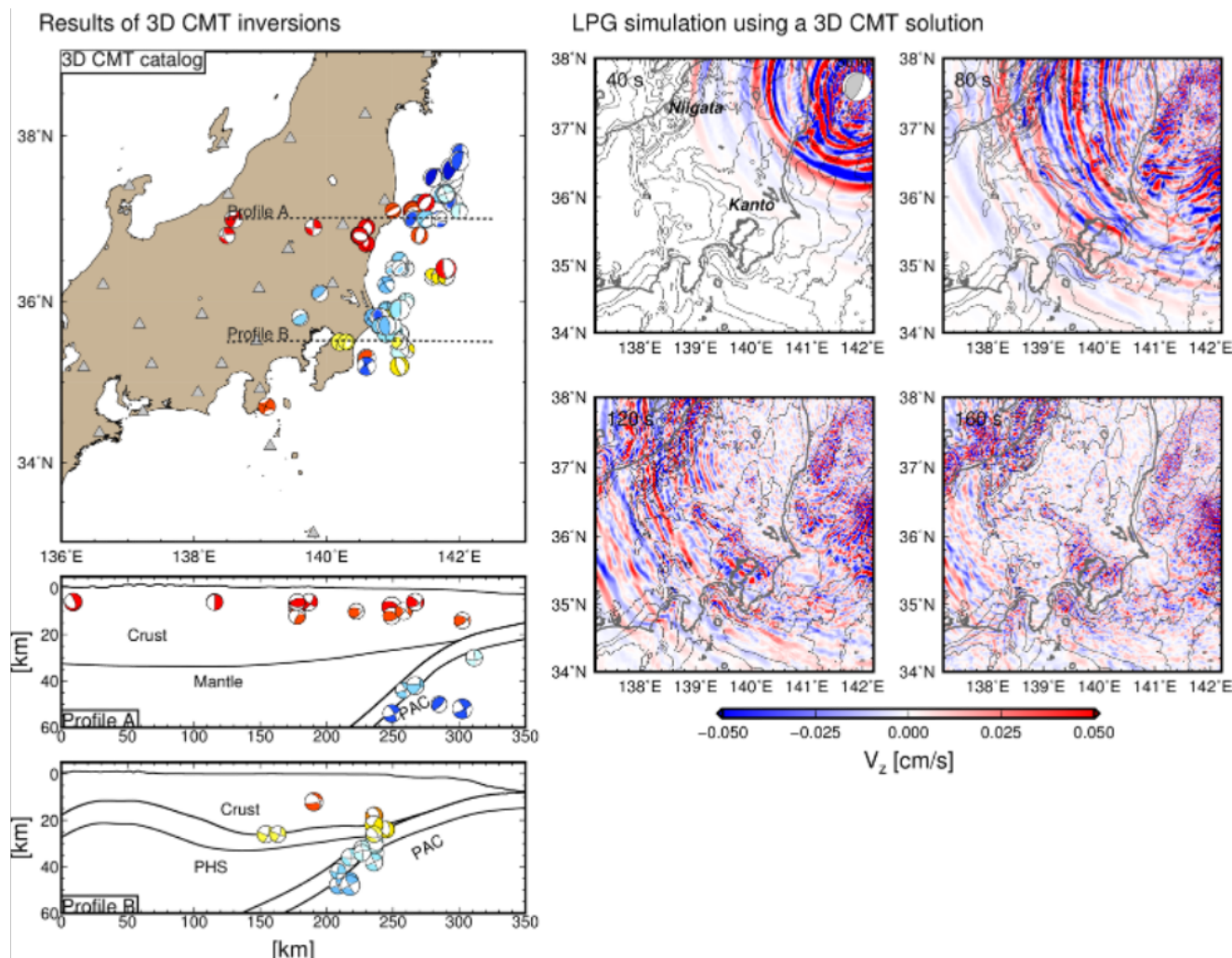


図. 3次元CMT解析および長周期地震動シミュレーションの結果. 右側は本研究で得られた3次元CMT解の分布図. プロファイルAおよびBの断面におけるプレート構造は全国1次地下構造モデル (Koketsu et al. 2012) を参照. 左側は2019年8月4日に発生したMw6.3の地震の3次元CMT解を利用した地震動シミュレーションの結果. 上下動成分の速度場のスナップショットを示し, 背景の等深線は全国1次地下構造モデルの地震基盤深度.

Influence of Seismic Source Locations of Interplate Earthquake along the Nankai Trough on Long-Period Ground Motions in Osaka Bay Area

*Tomohiro Oguchi¹, Masayuki Nagano²

1. Tokyo University of Science Graduate School, 2. Tokyo University of Science

2011年東北地方太平洋沖地震(以下、3.11本震)の際には、震源から遠く離れた大阪湾沿岸部で周期6~8秒の成分が卓越する長周期地震動が発生した。これにより、超高層建物内で国内最大級の応答変位が観測され、スプリンクラーの破損やエレベーターの停止などの建物被害の発生が報告された。3.11本震時の強震記録の分析や計算から、大阪平野内の堆積地盤により沿岸部で周期6~8秒の地震動成分が増幅したことが指摘されている。今後、南海トラフを震源とするM8~9クラスの巨大プレート境界地震の発生が危惧されている中で、2025年には大阪府夢洲において大阪・関西万博の開催が予定されており、大阪湾沿岸部での地震動予測は重要な課題といえる。

不整形な地盤構造を有する堆積平野では長周期地震動の最大振幅や卓越周期が震源位置によって変動することが指摘されており、変動の一因として不整形な地盤構造への地震波の入射方向による伝播経路の違いが挙げられている。大阪平野は上町断層帯などが伏在する複雑な地盤構造を有しており、震源位置によって長周期地震動の性状が変動することが推察される。天藤・他(2015)は大阪湾沿岸部における長周期地震動の地震波入射方向の影響について、水平SH波入射による地盤応答解析を三次元差分法により行い、南海トラフ沿いを想定した方向から地震波が入射した場合、3.11本震時と比較して長周期地震動が励起される可能性を示唆している。一方、南海トラフ沿いで発生するプレート境界地震について、断層面内の震源位置が大阪湾沿岸部における長周期地震動評価に与える影響を評価した例は少ない。

本稿では、図1に示す大阪湾沿岸部の埋立地に位置するKiK-net此花(OSKH02)を対象地点とし、南海トラフ沿いで発生するプレート境界地震の震源位置が大阪湾沿岸部における影響を数値計算により評価した。大阪平野の堆積層やプレート境界の地盤構造を考慮した地震動評価には三次元差分法[永野(2004)]を利用し、相反定理に基づき多数の震源点に対するグリーン関数を算定し地震動を評価した。震源位置が与える影響を検討するため、震源は全て点震源とし、フィリピン海プレートの上面付近に震央位置を10km間隔で設定した。震源域は、地震調査研究推進本部(2013)において示された、南海トラフ沿いの想定震源域とした。以上より、計算された速度波形について水平二方向の合成を行い、それぞれの震源での最大速度を求めることで震源位置が与える影響を評価した(図2)。設定した震源の中から、図2に示す震源1および震源2を選択し、通常の三次元差分法を用いた順解析を行った(図3および図4)。以下に得られた知見をまとめる。①僅かな震源位置の違いで、OSKH02および大阪平野内の地震動の空間分布が大きく変動した(図2~図4)。②特にOSKH02の南東方向の位置からの地震動が大きく増幅した。南北方向に縞状の速度分布がみられた(図2)。③南海トラフ沿いの付加体(図5)を地震基盤($V_s=3200\text{m/s}$)に置換したところ、縞状の速度分布はみられなかった(図6)。

図の作成にGMTを利用させて頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

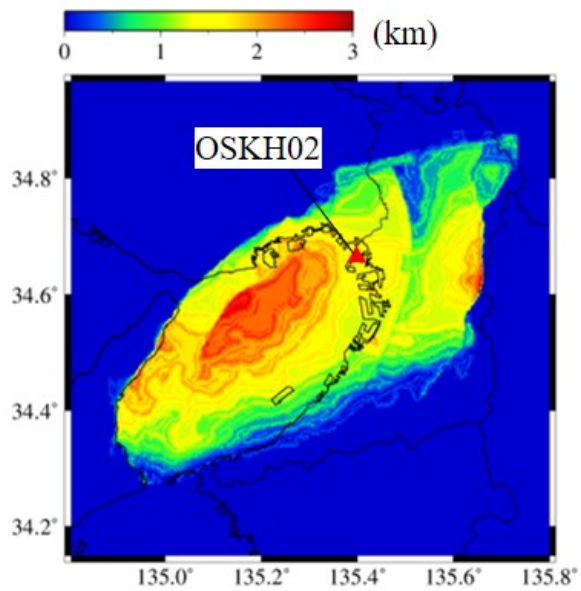


図1 大阪湾沿岸部の地震基盤深さ

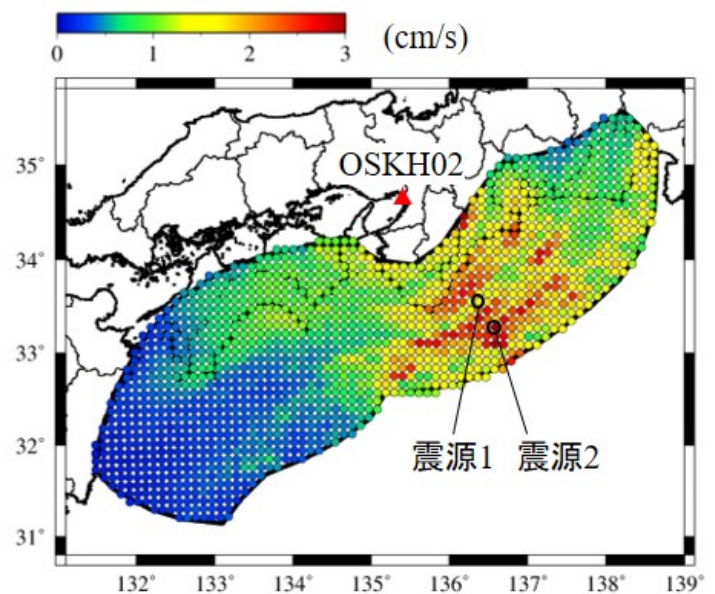


図2 OSKH02における最大速度分布

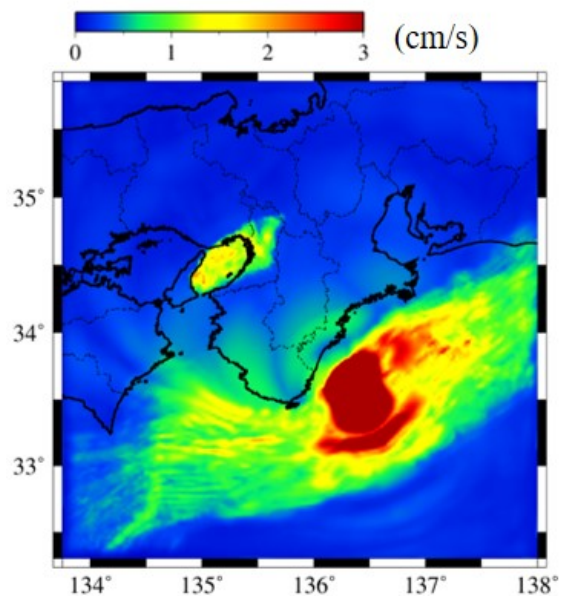


図3 震源1の地表面最大速度

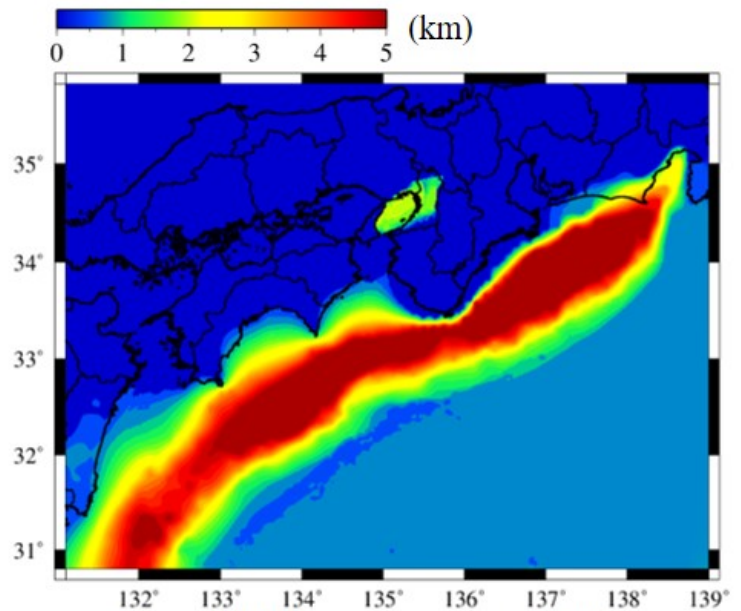
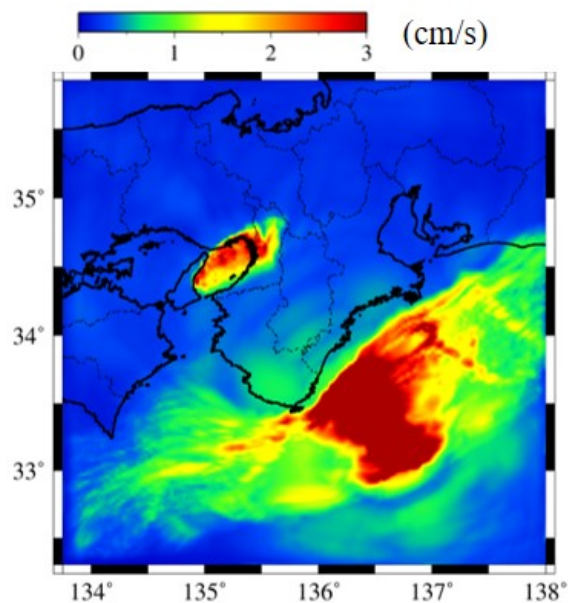
図5 付加体 ($V_s=1000\text{m/s}$) 下面深さ

図4 震源2の地表面最大速度

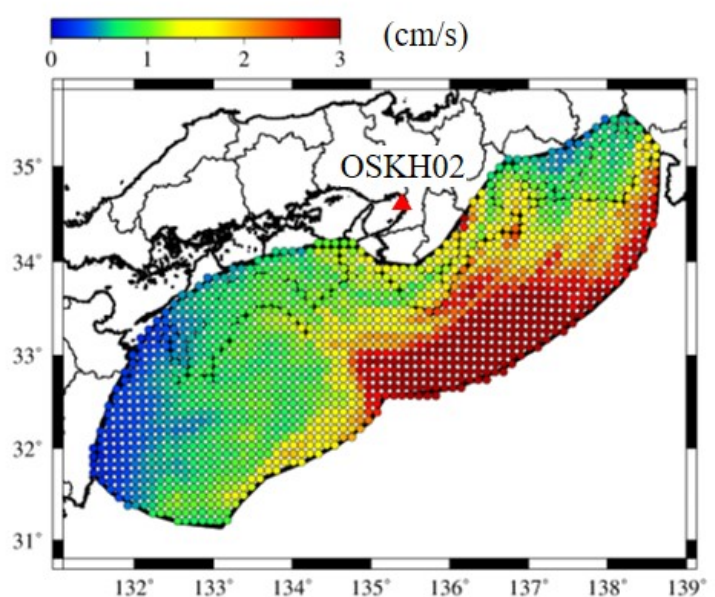


図6 付加体を地震基盤に置換した場合のOSKH02における最大速度分布

Microtremor Array Surveys in and around the Lowland Area along the Kizu River, Kyoto

*Kimiya Asano¹, Masayuki Yoshimi², Tomotaka Iwata¹, Hirotoshi Uebayashi³, Michihiro Ohori⁴, Haruko Sekiguchi¹, Hiro Nimiya², Tatsuya Noguchi⁵

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, GSJ/AIST, 3. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, 4. Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, 5. Faculty of Engineering, Tottori University

文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」（代表：岩田知孝）サブテーマ3では、奈良盆地東縁断層帯が活動した場合の強震動予測の高度化を目指し、京都盆地や奈良盆地における地盤構造の調査とモデル化のための研究を進めている。京都盆地においては、京都市内から巨椋池にかけての15地点で大半の微動アレイ探査〔京都市, 2001〕がなされ、基盤までのS波速度構造が調査されているものの、京都府南部の木津川沿いの低地帯周辺では、これまで深部までのS波速度構造を把握するための調査はほとんどなされていなかった。本研究では、木津川低地での深部地盤構造モデルの改訂に資するため、京都府南部の木津川沿いの低地帯で最小半径0.6 mから最大半径500~600 mまでの微動アレイ観測を実施し、各地点のS波速度構造モデルを推定した。観測計画やアレイ設計を吉見が主に担当し、解析を浅野が主に担当した。微動観測や結果の議論には著者全員が参加した。

微動アレイ観測は、久世郡久御山町佐山から木津川市木津にかけての6地点（KZ01~KZ06）で実施した（Fig. 1）。現地での観測は、2020年3月5~7日に実施した。また、データを補うための追加調査を2020年7月15日に実施した。追加調査では比較のため、KZ06の約2 km南に位置する丘陵上の奈良市佐保台（SHD）でも新たに微動アレイ観測（アレイ半径 2~300 m）を行った。微動観測システムは東京測振製速度計SE-321（5 V/(cm/s)）と白山工業製収録装置LS-8800（アンプゲイン8倍）を組み合わせたシステムを主に使用した。小半径のアレイの一部では白山工業製ポータブル微動観測装置JU410（2 V/G, アンプゲイン100倍）を使用した。サンプリング周波数は200 Hzとした。いずれも正三角形アレイによる4点同時観測とし、アレイ半径を変えて1地点あたり6~7組の観測を行った。アレイ設計に際しては、竿本・吉見(2020)による微動アレイ探査における地震計設置場所選定プログラムを使用した。プログラムに必要なOpenStreetMapの道路情報が不足していた地域（農地など）については、地図情報を追加した。観測はすべて日中に行い、半径10 m以下の小アレイでは少なくとも20分以上、中規模の半径のアレイでは30分以上、半径200 m以上の大アレイでは1時間以上測定した。

微動アレイ観測で得られた上下動記録にSPAC法を適用し、位相速度を推定した。例えば、1 Hzでの位相速度を比べると、北からKZ01とKZ02では約0.7 km/s, KZ03とKZ04では約1.2~1.3 km/s, KZ05では約0.9 km/s, KZ06とSHDでは約1.0 km/sと地域による違いが見られた。なお、KZ06とSHDの分散曲線は低周波数帯（< 1.5 Hz）では似ており、丘陵部と低地で深部構造の違いは小さい可能性がある。木津川沿いの低地帯での高周波数側（約10~20 Hz）の位相速度は、各地点で0.10~0.15 km/sであり、木津川沿いの沖積層の存在に対応する。

位相速度分散曲線をRayleigh波基本モードでモデル化することにより、各地点の一次元S波速度構造を推定した。J-SHIS V2やJIVSMなどを参考にして、層構造モデルを仮定した上で、第1層から V_s 2.7 km/s層までの各層の層厚と第1層の V_s をMCMC法で推定した。上部地殻はJ-SHIS V2, 上部/下部地殻境界~上部マントルはJIVSMから一次元構造として与えられるモデルに固定した。 V_s 2.7 km/s層の上面深度は、KZ01とKZ02では約640~650 mと深く（参考：京都盆地最深部の巨椋池での基盤深度は約700 m〔京都市, 2003〕）、木津川沿いのKZ03, KZ05, KZ06とSHDでは約400~440 mの深さと推定された。KZ04ではより浅い。推定された基盤深度は既往の反射法探査結果〔横倉・他, 2002; 京都府, 2006〕とも大きく矛盾しないものであった。木津

川左岸の相楽郡精華町周辺のKZ05では、 V_s 0.8～0.9 km/sの層が堆積層全体に占める割合（約80%）が、低地帯の他の地点（59～66%）に比べて大きかった。この地点付近では、大阪層群の最下部層の占める割合が相対的に大きいのではないかと推測される。

今後、本研究の微動アレイ探査結果やその他の調査結果（反射法地震探査、ボーリング資料など）を取り入れて、奈良盆地東縁断層帯周辺の3次元地盤構造モデルの改訂が進められていく予定である。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」の一環で実施しました。現地での微動アレイ観測では、対象地域の土地改良区や実行組合はじめ、地域の皆様にお世話になりました。記して感謝いたします。

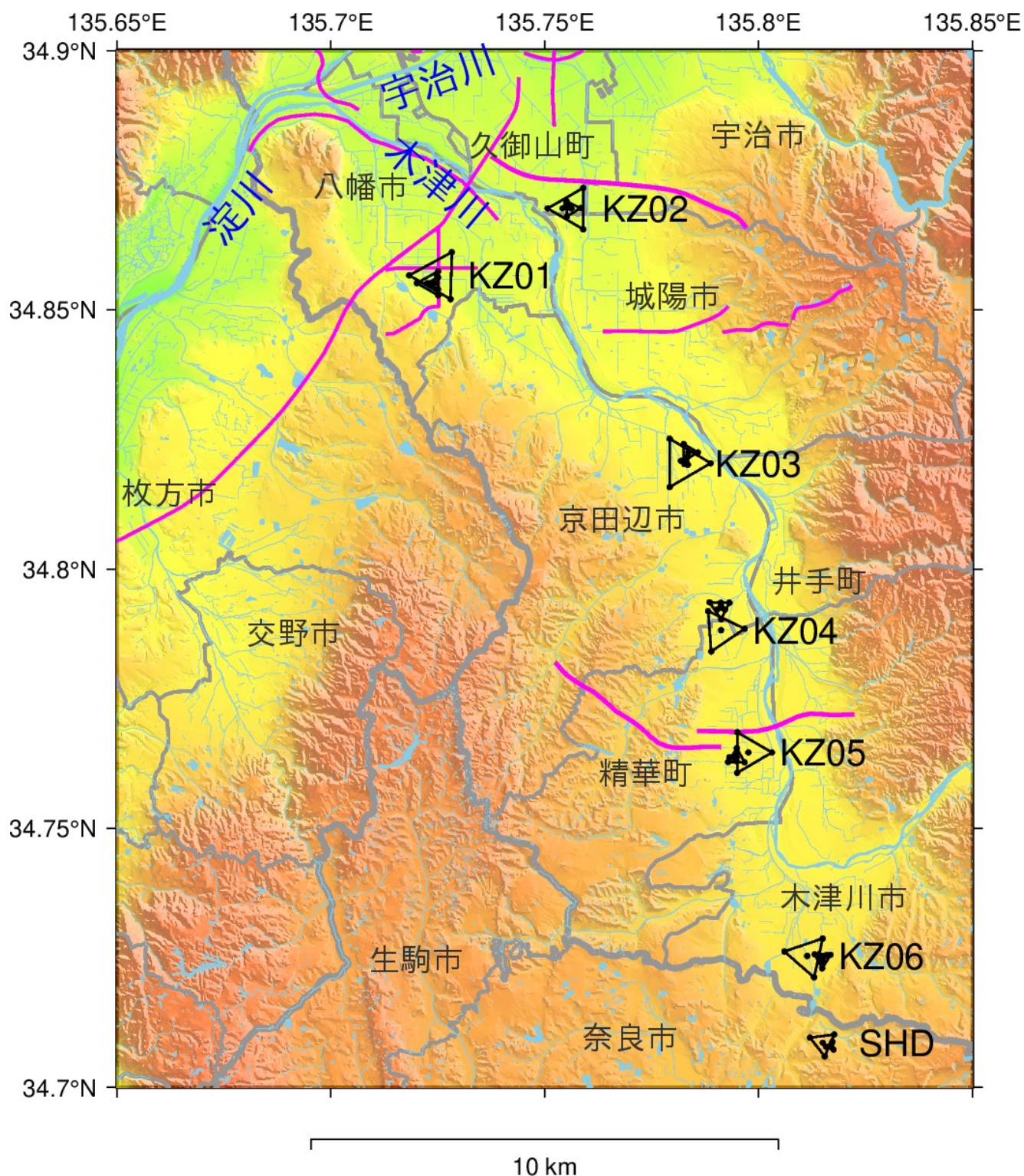


Fig.1: Map of the microtremor array survey sites along the Kizu river, Kyoto. The purple lines represent the seismic reflection survey lines in the literature.

Microtremor array surveys on the Eastern Part of the Nara Basin, Japan

*Masayuki YOSHIMI¹, Kimiyuki ASANO², Tomotaka IWATA², Hiro NIMIYA¹, Takeshi SUGIYAMA

1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. DPRI, Kyoto university

文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」（代表：岩田知孝）サブテーマ2では、奈良盆地東縁断層帯の地殻活動の現状把握に基づく震源断層形状と活動形態の推定を目的とした研究を進めている。奈良盆地東縁断層帯のうち奈良盆地周辺部に着目すると、奈良盆地の北部では断層・撓曲が東西3 kmに渡って並走するが、南端の桜井付近では0.5 kmほどの幅に収斂する。これらの断層位置は主に変動地形により判断されており、その実在を検討するには基盤岩の高度分布の推定も重要である。天理市帯解地区にて実施されたP波反射法地震探査（奥村ほか、1997）では、分岐断層・撓曲に対応した基盤岩の高度差が明瞭に見いだされた。そこで、基盤岩深度を推定するため、奈良盆地内の断層・撓曲をまたぐ3測線（帯解測線：NRO、天理測線：NRT、桜井測線：NRS）にて微動アレイ探査を実施した。帯解測線（NRO）は反射法測線とその延長に沿うよう設定し、天理測線（NRT）はNROの約5 km南、桜井測線（NRS）はさらに約10 km南に設定した。測線は東西走向で、それぞれの測線に断層線を跨がないよう5つの観測アレイを配置した。奈良盆地の基盤深度は1 km以内であると推定されることから、最大半径を400 mとし、7点同時観測の大アレイと、半径4 m～60 mの4点正三角形アレイを設定した。観測には、3成分速度計（東京測振製 SE-321, 5V/kine, 固有周期10秒）を小型低消費電力データロガー（白山工業製 LS-8800, GPS時刻校正, 24 bit AD変換）に接続し、サンプリング周波数200 Hz, 最小位相フィルター, 8倍アンプをかけてデータ収録した。なお、全観測点にてX方向を磁北に合わせ、水平動を用いた解析にも対応するようにした。長時間の観測にあたっては微動計をバケツで覆い風雨等の影響を避けた。観測は夜間に大半径観測を、昼間に小半径観測を実施した。観測日は2020年1月20日から2月5日である。

微動アレイ観測で得られた速度時刻歴データについて、微動アレイ解析ツール「BIDO2.0」ソフトウェアを用いて解析した。ここでは、Rayleigh波を対象とし、観測記録のうち上下動成分のみを解析に用いた。大アレイ（半径150 m以上）のデータは20.48秒（データ数4096）を小アレイのデータは10.24秒（データ数2048）を基本区間長として波形を切り出し、SPAC法にて解析した。その結果、概ね0.5 Hzから20 Hzの周波数範囲で、0.2 km/sから2 km/sの観測位相速度が抽出された。活断層位置より東に位置する各測線の東端の観測アレイ（NRO-1, NRT-1, NRS-1）の位相速度は他点よりも大きく、深い地下構造を反映する低周波数側（概ね2 Hz以下）の位相速度は、概ね断層から離れるほど小さくなる傾向が見いだされた。

観測位相速度をもとに、山中・石田（1995）の遺伝的アルゴリズムにより1次元S波速度構造モデルを探索した。探索する速度構造の設定においては、奈良盆地では大阪層群下部および最下部の比較的硬い堆積層が厚く分布することから $V_s=600$ m/s以上の層が厚いS波速度構造を想定した。暫定的な結果ではあるが、帯解測線ではNRO-1からNRO-3にかけて基盤深度が増大する反射法探査結果と矛盾しない基盤深度が推定された。天理測線、桜井測線では推定断層位置を境にした基盤深度の違いについては、今後精査を進める予定である。

謝辞

この研究は文部科学省科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」の一環として実施されたものです。微動アレイ観測にあたっては、天理市、大和郡山市、桜井市、田原本町および地域の方々のご協力をいただきました。

参考文献

奥村晃史・寒川 旭・須貝俊彦・高田将志・相馬秀廣, 奈良盆地東縁断層系の総合調査, 平成8年度活断層研究調査概要報告書, 地質調査所研究資料集, 51-62, 1997.

関口春子・浅野公之・岩田知孝, 奈良盆地の3次元速度構造モデルの構築と検証, 地質学雑誌, 125, 715-730, 2019.

Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki, New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of

Technology.(http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Publications/Doc/conference_7th.pdf), 2010.

山中浩明・石田 寛, 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 466, 9-17, 1995

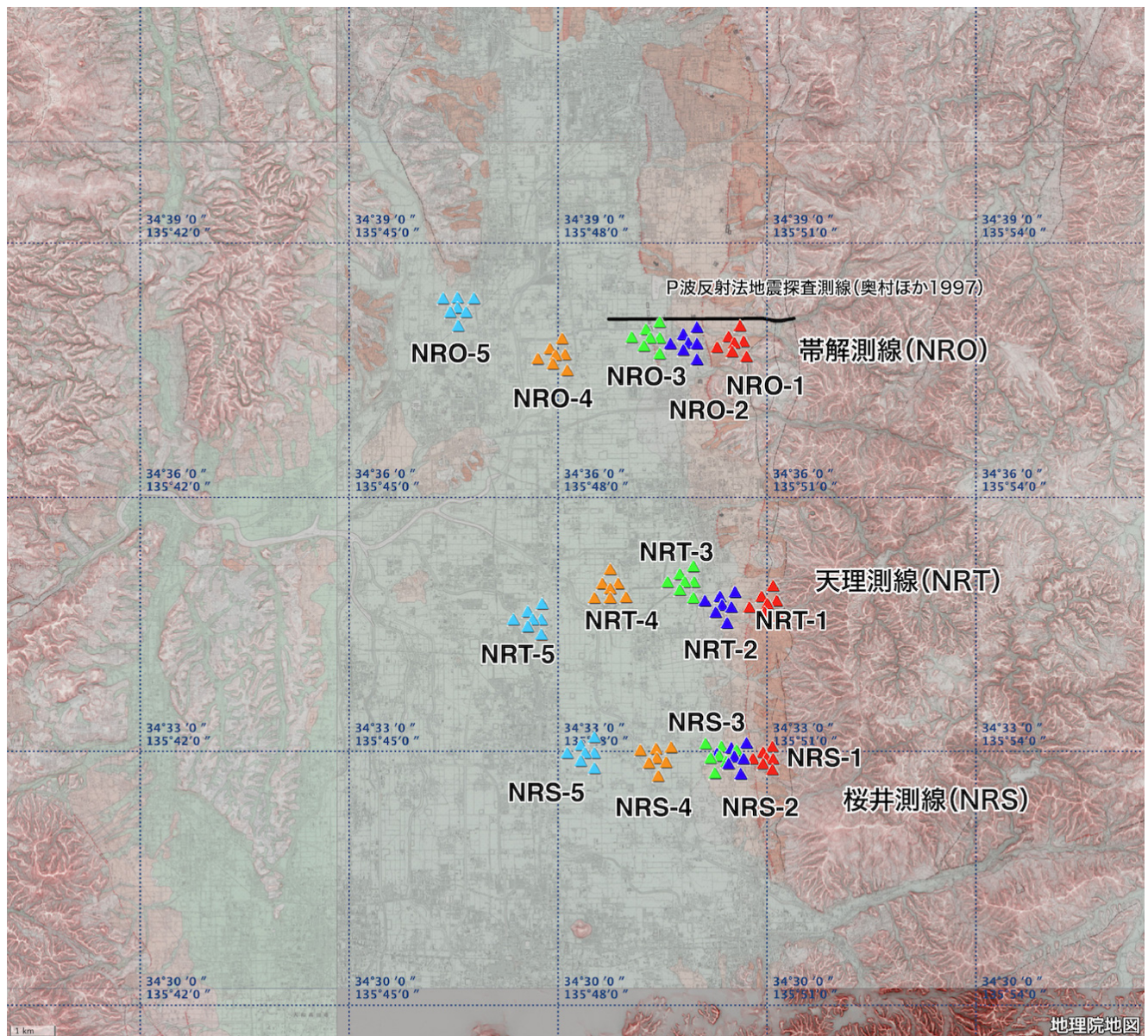


Fig 1: Location map of the microtremor array surveys on the eastern part of the Nara Basin. (GSi Map service is used.)

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。

S wave seismic reflection and microtremor surveys on the Shikano fault appeared in the 1943 Tottori earthquake

*Takao Kagawa¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada², Tetsuya Takameoto²

1. Faculty of Engineering, Tottori University, 2. Hanshin Consultants Co., Ltd.

1. はじめに

1943年鳥取地震（Mj7.2）では、震源断層の東側にあたる鳥取市街において、倒壊率からは震度7に相当する被害を生じた。東側には地表地震断層が現れなかったが、西側では明瞭な地表地震断層として吉岡・鹿野断層が断続的に出現した。鹿野断層の西縁部にあたる鳥取市鹿野町法楽寺地区では、家屋の基礎が断層変位によって寸断されたものの、揺れによる倒壊を免れた事例が残されている。一方、この断層出現位置からやや離れた鹿野町中心部では多くの家屋倒壊が発生した。

2. 調査の概要

今回、鹿野町法楽寺地区の上記地表地震断層出現部を横断して、S波反射法地震探査および常時微動探査を実施した。S波震源には油圧による板叩き機材を用い、ショット間隔1 m、地震計間隔1 mで、0.5 mの共通中間点（CMP）の記録を、測線長200 mにわたって取得した。あわせて、同測線周辺において常時微動を用いた単点3成分観測およびアレイ観測を実施し、卓越周期の変化と浅層地盤構造を推定したので、その結果を報告する。

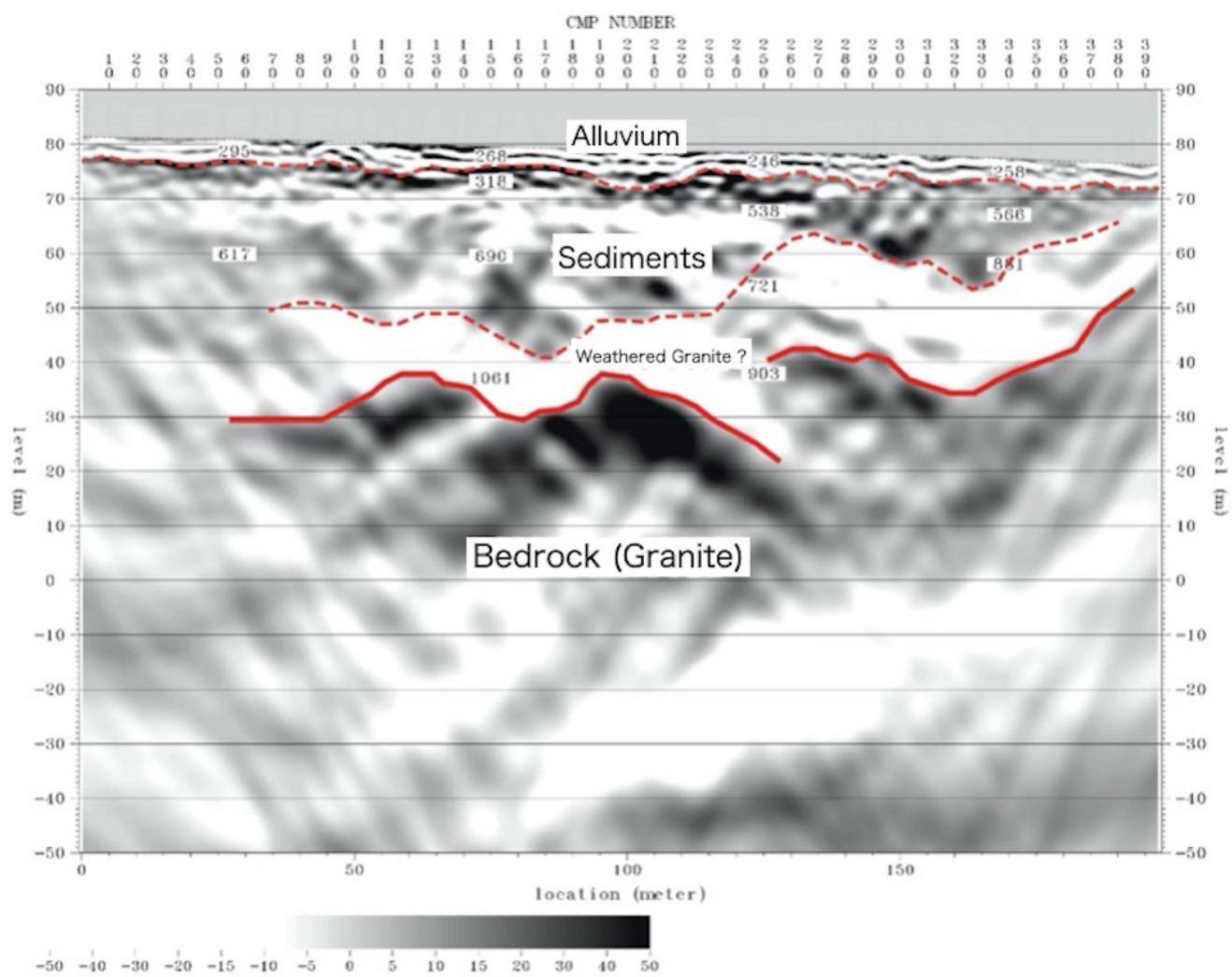
3. 解析結果

得られデータに一般的に反射法解析処理を施したS波反射断面（図）からは、鹿野断層に相当するCMP番号（200）付近で表層部の乱れが確認されたが、鹿野断層が横ずれを主とするため明瞭な段差構造は見られなかった。深さ45 mあたりに強い反射面が確認され、速度解析によって得られたそれ以浅のS波速度から、この反射面が常時微動探査から得られた卓越周期に対応しているものと考えられる。また、反射法探査で得られたデータの多チャンネル表面波探査（MASW）解析による位相速度と微動アレイによる位相速度も良く対応しており、反射断面で得られた浅層地下構造を常時微動を用いて周辺に外挿することで、より広範囲の地下構造をモデル化することが期待される。

4. おわりに

今回の調査では、S波人工震源によるショット波形を、反射法地震探査測線上のピックアップだけでなく常時微動3成分観測用の複数の微動計でも取得しており、これらを用いて地表地震断層ごく近傍での地盤震動特性、地表地震断層を通過した波動の変化などについて総合的な解釈を試みたい。

謝辞：本研究は日本学術振興会科研費 19H02406の助成を受けたものです。



Estimation of gravity basement structure in the central Tottori, Japan

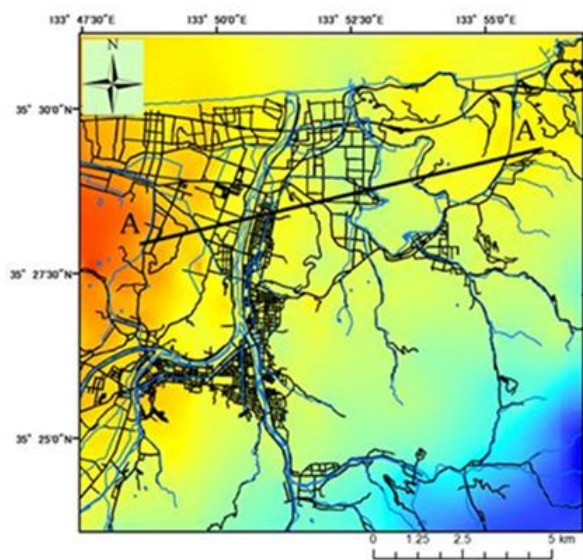
*Tatsuya Noguchi¹, Isamu Nishimura¹, Takao Kagawa¹

1. Tottori University

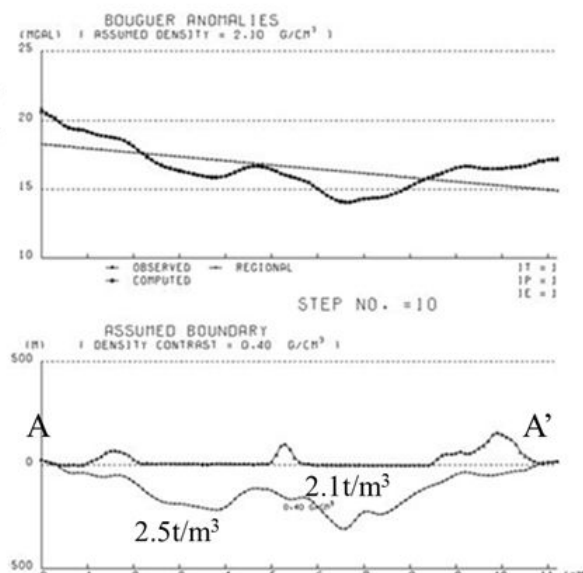
鳥取県中部では2016年鳥取県中部の地震が発生し、広範囲で建物被害が発生した。被害要因を検討や地震動評価を行うためには、地盤構造の情報が必要となる。この地域では、微動観測や重力観測（例えば、野口・香川，2014），鳥取県中部の地震直後には臨時余震（強震）観測（野口他，2019）が実施され、それらのデータに基づき、地盤構造の推定がなされている。本研究では、既往の重力異常データを用いて、微動観測や余震観測による地盤構造モデルを参考にして、各層に対応する層境界を拡張することにより基盤構造を推定した。

重力基盤のモデルとしては、3層の密度構造モデルを想定し、重力異常を用いた2次元解析を行った。各層の密度としては、第1層を 2.1t/m^3 ($V_s=100\sim500\text{m/s}$ 層に相当)，第2層を 2.2t/m^3 ($V_s=700\text{m/s}\sim1300\text{m/s}$ 層に相当)，第3層を 2.5t/m^3 ($V_s=2500\text{m/s}$ 層に相当)と仮定した。地震観測点での微動および余震観測に基づく地盤構造モデルより、仮定した密度に対応する層までの基盤深度を参考に、重力異常を説明するように試行錯誤で密度構造モデルを推定した。また、微動や地震動による結果を融合的に用いて、3次元構造に拡張する方法も試みた。さらに、得られた基盤構造の基盤面起伏と地震による被害分布との関係も調べた。

参考文献：野口・香川（2014）：土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.70, No.4, [特]地震工学論文集，野口・他（2019）：日本地震工学会論文集，特集号「第15回日本地震工学シンポジウム」その2，19巻，6号。



ブーゲー異常図(仮定密度: 2.5t/m^3)



2次元解析結果(2層均質モデル)

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S17. Tsunami

S17P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S17P-01] Tsunami heights along the Sea of Japan coast from active faults off-Hokkaido and off-Tohoku

○Kenji Satake¹, Iyan Mulia¹, Tomoko Goto¹, Satoko Murotani², Takeo Ishibe³ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Museum of Nature and Science, 3.Association for the Development of Earthquake Prediction)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-02] Regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for the Sea of Japan

○Iyan Mulia¹, Takeo Ishibe², Kenji Satake¹, Aditya Gusman³, Satoko Murotani⁴ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction, 3.GNS Science, 4.National Museum of Nature and Science)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-03] Consideration of tsunami source of the AD1662 Hyuga-nada earthquake occurred off Miyazaki Prefecture

○Kei Ioki¹, Yusuke Yamashita², Yoshihiro Kase³ (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Miyazaki Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization)

4:00 PM - 5:30 PM

[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 - 5:30 PM

[S17P-05] Characteristics of the 1854 Tokai and Nankai Tsunamis Observed at West Coast of North America

○Satoshi Kusumoto¹, Kentaro Imai¹, Ryoko Obayashi¹, Narumi Takahashi^{1,2}, Takane Hori¹ (1.JAMSTEC, 2.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-06] Kinematic behavior of fault segments near the trench based on tsunami inversion source models of the 2011 Tohoku earthquake

○Yoshinori Satou¹, Masanobu Koba², Masafumi Matsuyama³, Hayato Mori⁴ (1.Unic, 2.EGC, 3.CRIEPI, 4.CEPCO)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-07] Sensitivity of tsunami height distribution to fault model parameters based on the 2016 off Fukushima earthquake

○Yutaka HAYASHI¹ (1.Meteorological Research Institute)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-08] Quantitative evaluation of conventional magnitudes for the slow tsunami earthquakes in case of occurrence near Japan

○Takahito Nishimiya¹, Akio Katsumata¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 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.)

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-10] Real-time tsunami inundation forecast based on the multi-index method examined considering several source models

○Wataru Suzuki¹, Naotaka Chikasada¹, Takayuki Miyoshi¹, Shin Aoi¹ (1.NIED)

4:00 PM - 5:30 PM

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

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

4:00 PM - 5:30 PM

[S17P-12] Real-time forecast of near-field tsunami decay based on linear regression to tide-gauge data

○Hiroaki TSUSHIMA¹ (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

4:00 PM - 5:30 PM

Tsunami heights along the Sea of Japan coast from active faults off-Hokkaido and off-Tohoku

*Kenji Satake¹, Iyan Mulia¹, Tomoko Goto¹, Satoko Murotani², Takeo Ishibe³

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Museum of Nature and Science, 3. Association for the Development of Earthquake Prediction

平成25年度～令和2年度にかけて実施されている、文部科学省受託研究「日本海地震・津波調査プロジェクト」（以下、日本海PJ）では、陸域・海域での構造調査や古地震・古津波・活構造調査などにに基づき得られた断層モデルから日本海沿岸における津波シミュレーションにより日本沿岸での津波高を予測するとともに、個々の断層モデルに基づくシナリオモデルの他に、各地に影響を及ぼす可能性のある断層からのシナリオを組み合わせた確率論的な津波予測を実施している（Mulia・他，2020；本大会）。これまで、北陸沖海域（Gusman・他，2016；地震学会秋季大会）、北陸沖～山陰沖（Gusman・他，2017；地震学会秋季大会）、山陰沖～九州沖（佐竹・他，2018；地震学会秋季大会）の海底活断層による津波シミュレーションを実施し、その津波高について整理してきた。

本研究では、北海道沖から東北沖の海底活断層を対象としてシナリオ型津波シミュレーションを実施し、日本海沿岸部における津波高分布を調査した。これらのうち、北海道沖に対しては断層長が20 km 以上の断層に対してそれぞれの断層が単独で活動すると想定した41 モデル、長さ20 km 以下の断層も含めて複数の断層・セグメントが連動する28 モデルの合計69 モデルに対し、津波伝播解析を実施した。一方、東北沖に対しては単独67モデル、連動123モデルに対して実施した。

断層すべり量については、地震調査研究推進本部地震調査委員会による震源断層を特定した地震の強震動予測手法（以下「レシピ」）による①入倉・三宅（2001；地学雑誌）式（以下、旧レシピ（ア））、②松田（1975；地震）式+武村（1990；地震）式（以下、レシピ（イ））、ならびに③武村（1998；地震）式の3通りのスケーリング則から算定し、その影響について調査した。「レシピ」は、日本海PJの実施期間中に改訂され、断層面積が1800 (km²) 以上となる断層に対して、第3 ステージのスケーリング則（Murotani *et al.*, 2015；PAGEOPH）が導入された（以下、レシピ（ア））。そのため、北海道沖は旧レシピ（ア）によってすべり量を計算していたが、断層面積が1800 (km²) 以上に該当する断層モデル（単独4 モデル、連動23 モデル）に対しては、レシピ（ア）によるすべり量を用いた津波伝播計算についても実施した。なお、レシピ（イ）によるすべり量ならびに津波高は概ね旧レシピ（ア）と同程度であったことから、レシピ（イ）を除く2通りによるすべり量を用いて津波伝播計算を実施した。

また、当該海域で発生した顕著な津波を伴った地震（1833 年天保庄内沖、1940年積丹半島沖、1964 年新潟、1983 年日本海中部ならびに1993年北海道南西沖地震）を対象に、実測された津波痕跡高とこれらの断層モデルから計算された津波高とを比較した。実測された津波痕跡高は東北大学と原子力規制庁による「津波痕跡データベース」（岩淵・他，2012；土木学会論文集）を参照した。さらに、9秒メッシュを用いた概略津波伝播解析の結果、それぞれの3秒メッシュ領域内における沿岸の津波高が最大となる波源断層モデルを選定し、沿岸域における主な構造物ならびに陸上への遡上を含む詳細津波伝播解析を実施した。なお、津波シミュレーションの基礎方程式には非線形長波式を用い、9秒メッシュを用いた計算では陸上遡上は考慮しなかった。時間格子間隔は0.5秒とし、マニングの粗度係数は $n=0.025 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ を与えた。計算は地震発生後5時間まで行い、平均潮位面を基準面とした。

以下、北海道沖に分布する断層に対する結果を示す。北海道南西沖に分布する断層を中心に、北海道沿岸域だけでなく能登半島や隠岐諸島北岸等において高くなる傾向が見られ、これは日本海中央部における大和礁など、海底地形の影響によるものと考えられる。1983年日本海中部地震など、近年に発生した地震津波に対し

て実測された津波高も、能登半島や隠岐諸島で高い津波高となっている。また、多くの断層モデルに対して、ロシア沿岸域にも高い津波が到達する結果が得られた。このことは、当該海域において過去に発生した大地震の断層モデルの構築やその発生頻度に関する研究に対して、ロシア沿岸における調査の重要性を示唆する（例えば、室谷・他，2019；地震学会秋季大会）。

また、断層モデルによって大きな津波高となるスケーリング則は異なった。傾斜が緩やかで面積が大きい断層モデルに対しては、（旧）レシピ（ア）による断層すべり量の方が武村式に比べて大きくなり、その結果、津波高も大きくなった。一方で、高角な断層に対しては、山陰沖～九州沖に分布する断層（高角横ずれ断層が主）と同様に、武村式による断層すべり量を用いた津波高の方が、（旧）レシピ（ア）によるものに比べて大きい傾向となった。

謝辞：本研究は、文部科学省受託研究「日本海地震・津波調査プロジェクト」の一環として実施されました。記して感謝いたします。

Regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for the Sea of Japan

*Iyan Mulia¹, Takeo Ishibe², Kenji Satake¹, Aditya Gusman³, Satoko Murotani⁴

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction, 3. GNS Science, 4. National Museum of Nature and Science

The Sea of Japan is known to host large tsunamis generated by earthquakes ($M > 7$) on several active fault systems: the 1993 South-west Hokkaido ($M7.8$), 1983 Japan Sea ($M7.7$), 1964 Niigata ($M7.5$), 1940 Shakotan-oki ($M7.5$), and 1833 Shonai-oki ($M7.5$). The aforementioned tsunamis were responsible for severe destructions and many casualties in the coast of the Sea of Japan region. As part of disaster countermeasures, we conducted a probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) at 154 coastal locations for municipalities along the Sea of Japan coast, divided into six regions: Hokkaido, Tohoku, Chubu, Kinki, Chugoku, and Kyushu. The study was supported by the Integrated Research Project on Seismic and Tsunami Hazards Around the Sea of Japan from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

Here we analyzed the regional tsunami hazard associated with 60 active faults beneath the eastern margin of the Sea of Japan, which were identified based on seismic reflection surveys (MLIT, 2014). In our PTHA study, we set a minimum magnitude of M_w 6.5 at all faults, while a maximum magnitude at each fault varies from M_w 6.8 to 7.9 according to the estimated fault sizes. We discretized the faults into a 10 km $\times$ 10 km subfault size to take into account the slip heterogeneity and to facilitate the Green's function summations. We generated a large number of stochastic slip realizations using a Monte Carlo approach at each fault. The method is implemented in a software package called SlipReal (<http://equake-rc.info/cers-software/rupgen/>, accessed 1 April 2020) developed by Mai and Beroza (2002). The corresponding tsunamis at the 50-m isobaths were calculated by applying the precalculated Green's function to the randomly generated slip. Subsequently, we applied an amplification factor by the Green's Law, assuming that the final tsunami heights were calculated at a water depth of 1 m. Based on the Monte Carlo convergence analysis, the total number of considered scenarios is 76,685. Such a large number of samples is expected to account for the epistemic uncertainty on the slip distribution of faults. Furthermore, the variance parameter (β) representing aleatory uncertainty in the PTHA was determined from the comparison with four most recent historical tsunamis using a logarithmic standard deviation κ of Aida (1978), such that $\beta = \ln(\kappa)$. The β values for the four events are: 0.615 for the 1940 and 1983 events, 0.713 for the 1964 event, and 0.784 for the 1993 event. We then applied a logic-tree approach to incorporate those β values in the PTHA with weights of 0.5 for the β of 0.615, and 0.25 for the remaining β of 0.713 and 0.784. Lastly, we estimated the earthquake recurrence rate of each fault based on a and b values of the Gutenberg-Richter frequency magnitude distribution (Gutenberg and Richter, 1944) derived from observed seismicity in the study area from the Japan Meteorological Agency unified hypocenter catalog over a period of 1997-2017. Additionally, we also analyzed the effect of variations of a and b values to the tsunami hazard assessment, which in this study, is apparently not very sensitive.

Our probabilistic analysis indicates that the tsunami hazard generally increases from southwest to northeast, which is consistent with the number and type of the identified fault systems, i.e. many reverse faults exist in the northeastern parts whereas strike-slip faults dominate the southwestern parts. More specifically, tsunami hazard in Chubu, Tohoku, and Hokkaido regions are considerably higher than that of

Kyushu, Chugoku, and Kinki regions. The highest maximum coastal tsunamis of approximately 3.7, 7.7, and 11.5 m for the return periods of 100-, 400-, and 1000-year, respectively, are expected to occur at a coastal point in Niigata prefecture of Chubu region. Most coastal points in Tohoku, several in Chubu, and one in Hokkaido have more than 10% probability of experiencing maximum coastal tsunami of higher than 0.5 m at any given year, while in Kyushu, Chugoku, and Kinki, the probability is generally less than 5%. Furthermore, the deaggregation of hazard suggests that tsunamis in the northeast are predominated by local sources, while the southwestern parts are likely affected by several regional sources. These local sources raise concerns on the appropriate measure for tsunami mitigation, because near-field tsunamis render a timely warning less effective due to the extremely short lead time. Therefore, more attention should be given to Chubu, Tohoku, and Hokkaido regions in ensuring an efficient and effective regional tsunami disaster mitigation strategy for the Sea of Japan coast.

Consideration of tsunami source of the AD1662 Hyuga-nada earthquake occurred off Miyazaki Prefecture

*Kei Ioki¹, Yusuke Yamashita², Yoshihiro Kase³

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Miyazaki Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization

南海トラフ西端部に位置する日向灘では、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込むため、M7クラスのプレート境界型地震が繰り返し発生している。歴史記録上、日向灘で発生した最大規模の地震は西暦1662年日向灘地震（外所地震）とされている。この地震により津波が発生し、宮崎市沿岸部では津波の高さが4-5 mと推定され、大きな被害をもたらした。また日向灘は、浅部スロー地震活動が活発な地域である。2011年東北地方太平洋沖地震の震源域に含まれる浅部スロー地震の震源域は、巨大津波生成の要因の1つと考えられている。1662年津波は、日向灘における通常のM7クラスの地震により発生した津波より、はるかに大きな津波となった。これをもとに本研究では、1662年津波は、浅部スロー地震域が1662年日向灘地震の震源域となって巨大津波が発生した可能性を考え、その検証を予察的に行った。はじめに、日向灘で観測された最近の地震活動をもとに、1662年日向灘地震の断層モデルを仮定した。次に、1662年津波の波源を推定するため、宮崎県の太平洋沿岸一帯（延岡市から串間市）で津波堆積物調査を行った。その結果、複数地点において1662年津波の可能性があるイベント堆積物を確認した。仮定した断層モデルを用いて津波の数値計算を行い、宮崎県の宮崎市宮崎平野と日南市小目井で、確認されたイベント堆積物の分布と計算浸水範囲を比較した。その結果、大きな津波を発生させるには、プレート境界浅部のすべりが必要であることが分かった。一方で、歴史記録より揺れによる建物被害も大きいことから、強震動を生成させるには、陸に近いプレート境界深部のすべりも必要である。これらの考察から仮定した断層モデルにより計算された浸水範囲は、地質調査により確認されたイベント堆積物の分布を説明することができた。今後、他の地域においても津波堆積物の分布や歴史記録と、計算浸水範囲を比較することで、仮定した断層モデルの精度を上げる。

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。

Characteristics of the 1854 Tokai and Nankai Tsunamis Observed at West Coast of North America

*Satoshi Kusumoto¹, Kentaro Imai¹, Ryoko Obayashi¹, Narumi Takahashi^{1,2}, Takane Hori¹

1. JAMSTEC, 2. NIED

1854年12月23日及び25日に南海トラフ沿いの沈み込み帯で安政東海地震及び安政南海地震が発生した。これらの地震に伴う津波は太平洋を横断し、北米西岸の検潮所でその波形が記録されている（例えば、Bache 1856; Kusumoto et al., 2020）。これまでの研究で津波伝播の数値シミュレーションから求めた計算波形と観測波形の比較を基に安政東海・南海地震の津波励起時刻を推定する試みが行われている一方で、観測波形に対する解析は十分ではない。そこで本研究では、サンフランシスコ及びサンディエゴで記録された安政東海・南海地震津波の観測波形に対して波形解析を行い、その特徴を調べた。

観測波形として、大森(1913)の潮位記録をデジタル化して理論潮汐曲線の山谷を基に時刻補正した潮汐波形を使用した(図1; Kusumoto et al., 2020)。いずれの波形も湾口部から約5 km離れた検潮所で記録されたものである。まず $1.3\text{E-}4$ Hzをカットオフ周波数とするハイパスフィルターで潮汐成分を除去し、次に短波長のノイズを除去するため、振幅スペクトルを基に $5.0\text{E-}4$ Hzのローパスフィルターを適用した。振幅は地震発生当時の潮位計の水理フィルターが不明のため最大値で規格化した。

図1にサンフランシスコ及びサンディエゴの検潮所における安政東海・南海地震津波の観測波形を示す。安政東海地震津波は初動より後続波の振幅が大きく、最大波の出現時刻は初動到達からおおよそ2~3時間後である。観測波形の卓越周期はどちらの検潮所でも40~50分前後である。安政南海地震津波の初動到達時刻ははっきりとしない。サンフランシスコの検潮所では12月25日の午前2時~午後2時(GMT)、サンディエゴの検潮所では12月25日の午前2時~午後6時(GMT)にかけて大きな振幅を持つ長波が記録されている。これらは安政南海地震の後続波であると考えられる。

安政南海地震津波は安政東海津波と比較して、どちらの検潮所でも振幅がやや大きく波長もわずかに長い。これらの特徴は安政東海地震及び安政南海地震の津波波源に起因している可能性がある。本発表では、以上の解析結果を基に安政東海・南海地震津波の観測波形の特徴について議論する。

謝辞：本研究は R2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構 小平秀一）の一環として行われました。

参考文献

Bache, A.D. (1856) Notice of earthquake waves on the western coast of the United States, on the 23rd and 25th of December, 1854, *American J. Sci. Arts*, 21, 37-43.

Kusumoto, S., Imai, K., Obayashi, R., Hori, T., Takahashi, N., Ho, T.-C., Uno, K., Tanioka, Y., & Satake, K. (2020) Origin time of the 1854 Ansei-Tokai tsunami estimated from tide gauge records on the west coast of North America, *Seismol. Res. Lett.*

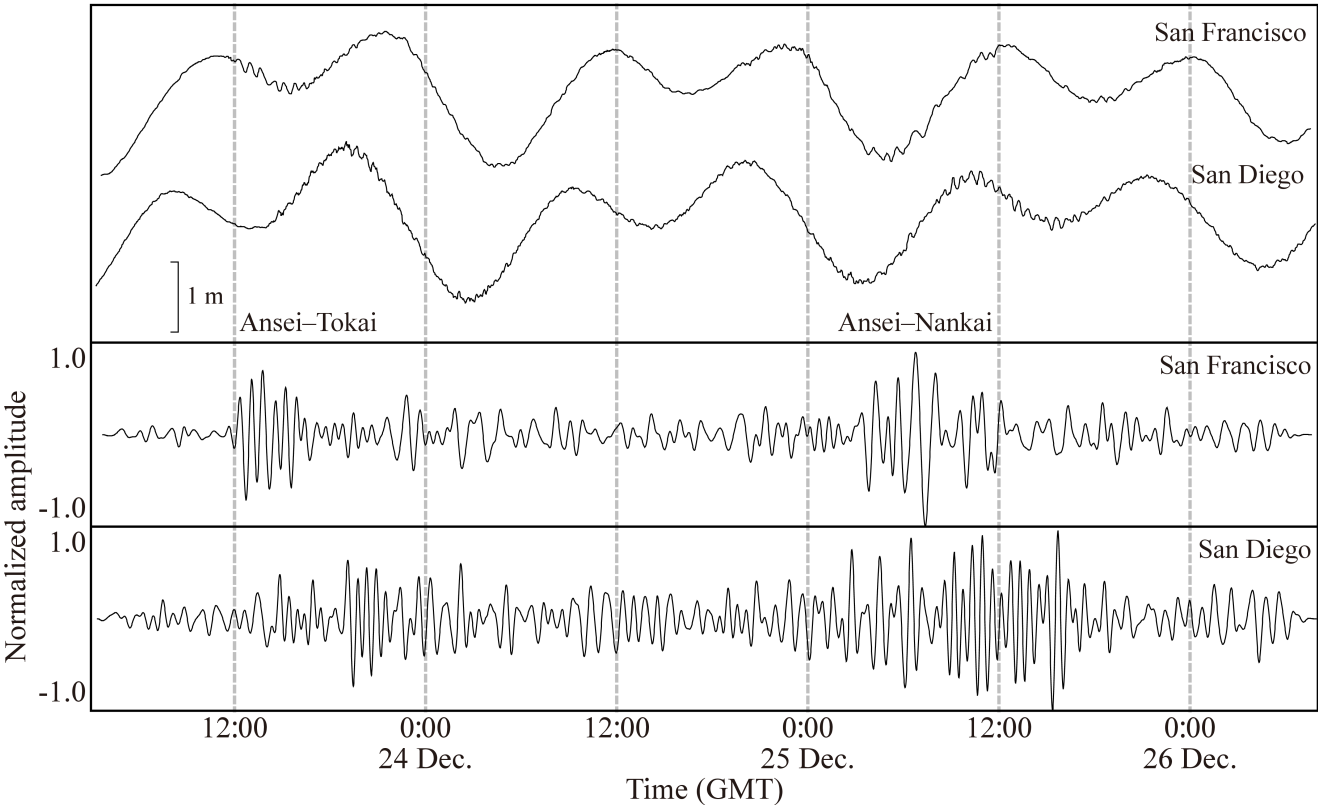


図1 北米西岸における安政東海・南海地震津波の観測波形

Kinematic behavior of fault segments near the trench based on tsunami inversion source models of the 2011 Tohoku earthquake

*Yoshinori Satou¹, Masanobu Koba², Masafumi Matsuyama³, Hayato Mori⁴

1. Unic, 2. EGC, 3. CRIEPI, 4. CEPCO

1. はじめに

M9クラスの2011年東北地方太平洋沖地震の津波の再現では、断層のライズタイム（断層面のある場所のすべりの継続時間）の影響を無視できず、特に海溝軸付近の断層の破壊過程は沿岸に到達する津波挙動に大きく影響を及ぼすことが既往研究（例えばSatake et al.(2013)など）より明らかとなっている。既往研究の津波波源モデルのライズタイムは、マルチタイムウィンドウインバージョン解析によって推定されており、タイムウィンドウの設定条件等によって規定されている可能性がある。そこで本研究では、津波波源のライズタイムに着目したインバージョン解析を実施するとともに、本検討および既往研究の津波波源における海溝軸付近の断層の運動学的挙動を考察した。

2. 津波波源のライズタイムに着目したインバージョン解析

2011年東北地方太平洋沖地震での津波波形の再現において、津波波源のライズタイムがどの程度必要となるのかを検討するため、タイムウィンドウの合計時間 T を60～300秒まで変化させたマルチタイムウィンドウインバージョン解析を実施した（タイムウィンドウ幅は10秒とし、ウィンドウ数を変化）。波源モデルの断層形状はSatake et al.(2013)を使用し、再現対象はGPS波浪計の津波波形と陸域の最終地殻変動量とした。破壊伝播速度 V_r は1.5～3.0km/sの範囲で4パターン設定し、各小断層は震源からの破壊フロント到達後に各々設定したタイムウィンドウの範囲内で破壊可能とした。図1に本検討結果を示す。図1(a)に示す波形残差平方和は、タイムウィンドウが増加するほど解の自由度が増加するため値が小さくなることは当然であるが、T210（タイムウィンドウの合計時間210秒）以降でほぼ収束している。一方、T60やT90では波形残差平方和は大きく、観測波形を十分に再現することができない。図1(b)に示すライズタイムは、各小断層のすべり量が0.1m以上となるタイムウィンドウを集計し、その最大値を示したものであるが、240秒程度で頭打ちとなる。これらの結果より、津波を再現するうえで必要となる津波波源のライズタイムは200秒程度と判断される。

3. 津波波源モデルにおける海溝軸付近の断層の運動学的挙動

本検討結果と同様に、津波観測記録や最終地殻変動量を再現対象とした波源モデルに、内閣府(2012)、杉野ほか(2013)およびSatake et al.(2013)がある。また、上記の観測記録に加え、陸域のGNSS連続観測データ（1秒間隔地殻変動データ）を用いた波源モデルに、金戸ほか(2019)と根本ほか(2019)がある。これらの波源モデルについて、小断層ごとのすべり量とライズタイムの関係を図2に示す。本検討結果(T210, $V_r=2.0$ km/sのケース)では、ライズタイムがタイムウィンドウの合計時間に達しておらず、タイムウィンドウの制約を殆ど受けていないといえるが、既往研究結果ではタイムウィンドウの合計時間に達している断層が多数存在している。つまり、既往研究結果では、各モデルで設定されたライズタイムの上限値の影響が含まれていることとなるが、内閣府(2012)以外での海溝軸付近の断層のすべり速度（近似直線の傾き）は本検討結果と同程度といえる。なお、内閣府(2012)のみすべり速度の傾向が異なっているのは、断層の深さが実際よりも深めに設定されていることが一因と考えられる。金戸ほか(2019)や根本ほか(2019)では、GNSS連続観測データの再現のため、陸域に近い海溝軸付近以外の断層で大きなすべり速度を示したものであるが、海溝軸付近の断層のすべり速度は本検討結果と同程度である。以上より、いずれのモデルでも、すべり量が大きい小断層ほどライズタイムも大きく、津波波形への影響が大きいとされる海溝軸付近の断層に着目すると、海溝軸付近の断層における津波波源としてのすべり速度は、平均的に0.2～0.3m/s程度といえる。

謝辞 本研究は電力11社による原子力リスクセンター共研として実施した成果であることを付記するとともに、土木学会 原子力土木委員会 津波小委員会（委員長 高橋智幸関西大学教授）の委員各位に研究成果をご議

論頂き、有益なご助言を賜りました。また、東京電力ホールディングス株式会社の金戸俊道氏および応用地質株式会社の根本信氏からは波源モデルに関するデータをご提供いただきました。記して関係各位に謝意を表します。

注記 本研究に示す金戸ほか(2019)は下記情報の修正前データを使用したものである。

https://www.tepco.co.jp/press/release/2019/1516534_8709.html

(福島第一原子力発電所波高計の設置箇所情報の誤りについて)

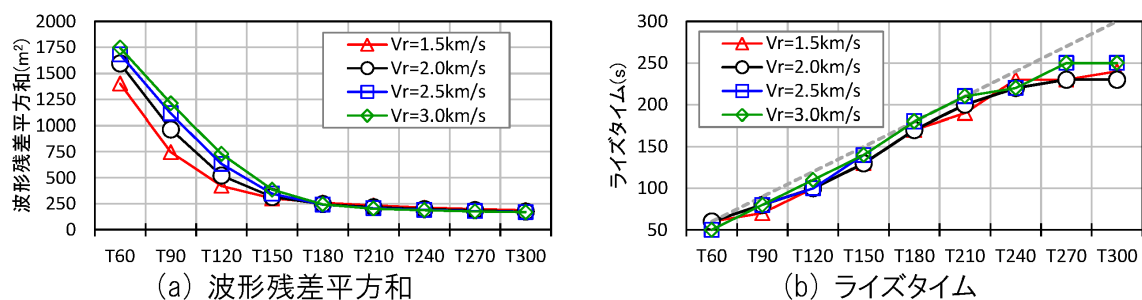


図1 本検討によるインバージョン解析結果

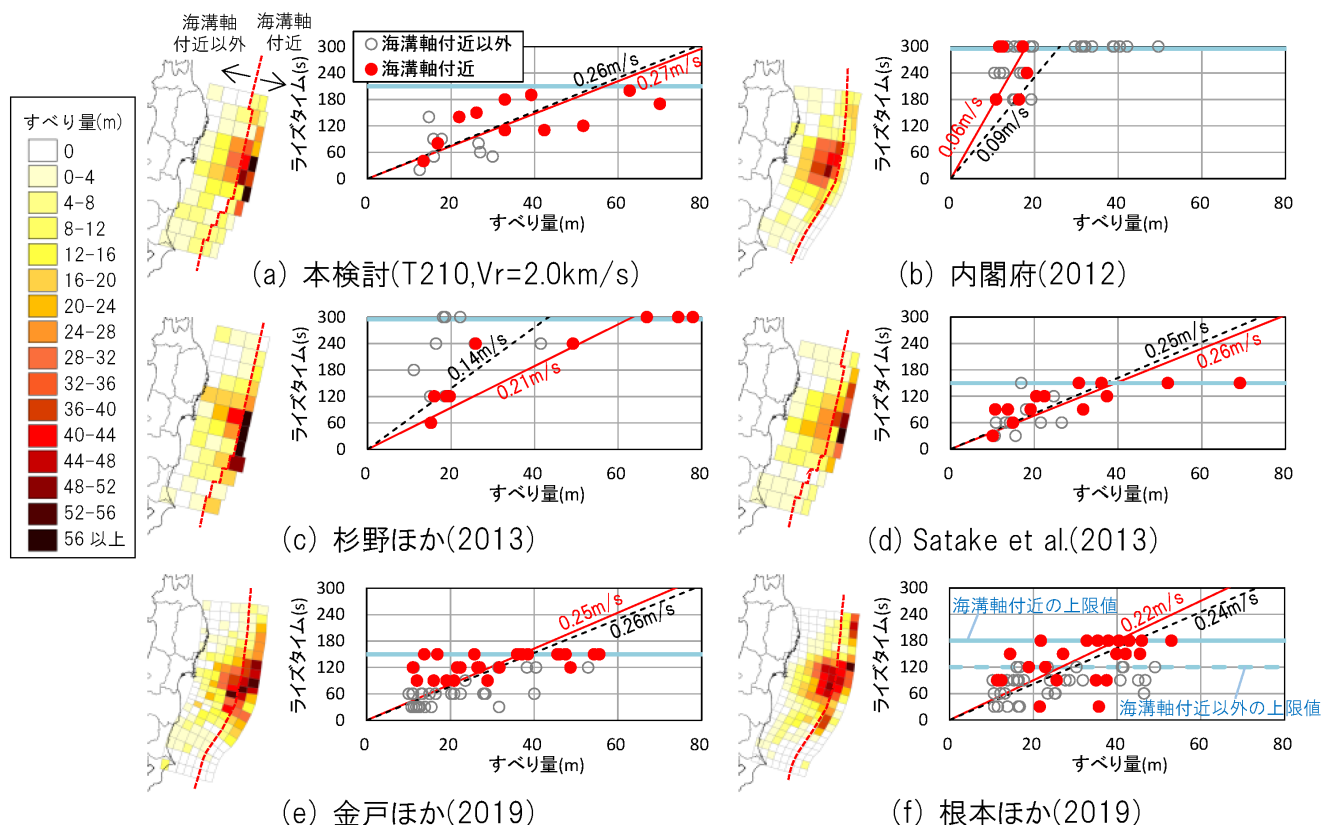


図2 津波波源モデルのすべり量分布およびすべり量10m以上の断層によるすべり量とライズタイムの関係。各波源モデルのグラフ内の直線と数値は、すべり量10m以上の断層による近似直線とすべり速度(近似直線の傾き)を示し、赤が海溝軸付近のみを対象とした場合、黒が全範囲を対象とした場合である。さらに、グラフ内の青の太線は、インバージョン時に設定されたタイムウィンドウの合計時間(ライズタイムの上限値)を示す。

Sensitivity of tsunami height distribution to fault model parameters based on the 2016 off Fukushima earthquake

*Yutaka HAYASHI¹

1. Meteorological Research Institute

1. 背景

2016年11月22日に福島県沖の深さ12kmを震源とするマグニチュード(M)7.4の北西-南東方向に張力軸を持つ正断層型の地震が陸のプレート内で発生し、宮城県の仙台港で144cmをはじめ北海道から和歌山県にかけての太平洋沿岸などで津波が観測された(気象庁, 2016)。この海域では、かつては逆断層型の地震が主体だったが、東北地方太平洋沖地震の発生以降は正断層型の地震が比較的多く発生するようになった(気象庁, 2016)。気象庁が量的津波予報に用いるデータベース(以下、津波DB)では、2016年当時、この海域ではほぼ南北方向の逆断層を想定した津波計算結果が収録されていた。事前計算と異なる走向の地震であったことが2016年福島県沖の地震で宮城県における津波高さの過小評価の原因であることと、津波予報の精度低下の大きな要因となる計算条件の改善の必要性が指摘されている(例えば、倉本ほか, 2018)。気象庁では、過去に発生した地震のCMT解とその海域で津波DB作成に用いた地震シナリオの間で、走向が大きく異なる海域について全国的に調査し、2018年までに津波DBに収録するシナリオを一部追加する改善を施した。

2. 手法

想定と異なる地震の発生が津波予測に与える影響を検討するため、2016年福島県沖の地震を基準に、走向を含む断層モデルパラメータに対する津波高分布の感度を分析した。まず、「津波レシピ」(地震調査委員会, 2017)を参考に、CMT解、Mwと断層長・断層幅・平均すべり量のスケーリング則、アスペリティの面積とすべり量の規模の経験則で特性化した断層モデル(基準モデル)を作成した。次に、走向、傾斜、断層中央位置のいずれか一つだけが基準モデルから異なる断層モデル(派生モデル)群を作成した。その際、断層中央位置を震源から断層長の1/2程度の範囲で変化させるなど、パラメータの変化の許容範囲が、津波予報時点までの即時地震解析で知りえない不確かさの範囲に相当するように決定した。基準モデルと各派生モデルに基づく津波伝播計算を実施し、牡鹿半島から福島県の5検潮所の位置での津波の高さの最大値等を抽出し、モデル間の計算値を比較し、各パラメータに対する津波高分布の感度を測定した。ここでは、各パラメータの単位変化量(走向・傾斜では1°、断層面中央位置では1km)に対する、5か所の津波の高さの最大値の相乗平均を感度として求めた。

3. 結果と議論

基準モデルからは、従来(例えば、倉本他, 2018; Nakata et al., 2019)から指摘されてきたように、仙台港での比較的高い津波が、波源から福島県の海岸に達した後に反射した波による津波後続相によることが確認できた。一方、どの断層モデルパラメータを変化させた場合であっても、派生モデル群の中に、仙台港の津波の高さの最大値の出現が第一波による場合と第二波以降による場合があった。これは、2016年福島県沖の地震は、津波予報時点までに即時解析で知りうる地震学的情報のみに基づく限り、津波の最大波出現要因は原理的に予測不可能な事象であったことを意味する。

傾斜角を変化させた場合は、5か所の測定点とも津波が高く(あるいは低く)なりやすいため、トレンドを除去する方法でも測定したところ、低角度と高角度で感度が大きく異なることが分かった。得られた各パラメータに対する感度の大きさの比較から解釈すると、走向の想定と45°異なることによる津波高分布の典型的な予測誤差は、傾斜角を45°と鉛直の場合で取り違える、あるいは、震源を断層面からも外れる程度(断層長の1/2以上)ずれて決定される場合の予測誤差の大きさに匹敵する。

本研究は2016年福島県沖の地震を標準とした場合のみに基づく感度測定結果に基づいた。このような断層モデルパラメータに対する津波の高さ分布の感度測定の考え方は、今後も想定外の地震が発生した後に、津波DBを修正する方針を合理的に決定する目的で活用できるだろう。また、津波DBを新たに設定する場合に

は、各シナリオの配置間隔（空間的位置に加えて地震規模・走向・傾斜なども）が隣接シナリオ間の予測の違いが均等に近くなる設定であれば効率的だが、本研究で示した考え方は、計算量に応じた予測精度の最適化を図る事前調査に利用できるだろう。

文献

地震調査委員会 (2017): 波源断層を特性化した津波の予測手法（「津波レシピ」）。

気象庁(2016): 平成28年11月地震・火山月報（防災編）。

倉本和俊, ほか(2018): 土木学会論文集B2(海岸工学), 74(2), I_535-I_540.

Nakata, K., et al. (2019): Earth, Planets Space, 71(1), 30.

Quantitative evaluation of conventional magnitudes for the slow tsunami earthquakes in case of occurrence near Japan

*Takahito Nishimiya¹, Akio Katsumata¹

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

地震発生後、最初期段階の津波予測は通常、震源近傍で観測された地震波振幅から推定した震源の位置、マグニチュード (M) に基づく。これは、気象庁では最初の津波警報を地震検知後およそ3分程度で出すこととしており、その時点ではモーメントテンソル解は通常得られていないためである。地震波振幅からだけでも多くの場合、モーメントマグニチュード (M_w) に近い値が得られている。

通常の地震に比べて高周波帯域で地震波エネルギーが極端に小さいスロー型津波地震 (slow tsunami earthquake) については、前述の震源近傍の地震波振幅に基づく M は M_w に対して過小な推定値になってしまうと考えられるが、震源近傍の地震波形記録があまりないため、その定量的評価が難しい。

そこで我々はこれまでも、遠地広帯域波形記録をもとに震源スペクトルを推定 (西宮・勝間田, JpGU Meeting 2018) したり、得られたスペクトルに基づきスロー型津波地震が日本近海で発生したと仮定して武尾 (1985) を用いて近地地震波形を合成 (西宮・勝間田, 地震学会2018秋季大会) し、それにより M を推計 (西宮・勝間田, JpGU Meeting 2019) し、 M の過小推定の問題を定量的に評価しようと試みてきた。対象とした M は、気象庁マグニチュード (M_j)、気象庁が巨大地震の過小評価対策として導入している100秒マグニチュード (M_{100} : Katsumata et al.(2013)の100秒low-cut filter 波形によるマグニチュード) である。

今回、発生を仮定する津波地震の震源時間関数について、これまで試みてきた簡易なものではなく、先行研究などにおいて推定されたものを用いることによって、より信頼性のある解析結果が得られたので報告する。発生を仮定した津波地震は、1992年ニカラグア沖 (M_w 7.6)、1994年ジャワ島沖 (M_w 7.8)、1996年ペルー沖 (M_w 7.5)、2006年ジャワ島沖 (M_w 7.7)、2010年スマトラ島沖 (M_w 7.8) の5地震で、まとめると次のとおり。

- (1) M_j については過小推定となる。場合によっては1以上も過小に推定されてしまう。
- (2) M_{100} については推定値が M_j に比べて大きく改善する場合もあるが、百数十秒やそれ以上の長い破壊継続時間である地震 (例えば2006年ジャワ島沖) の場合では0.5以上過小になるなどあまり改善しない。
- (3) 巨大地震の判断材料として気象庁において使用している長周期成分モニター (広帯域波形記録の100~500秒バンドパスフィルタ波形の合成振幅を監視) では、それ自体は M を推定する手段ではないが、スロー型津波地震であっても M_w の大きな地震であると認識できる可能性が高い。ただし、破壊継続時間がさらに長い地震であった場合は過小な規模の地震とみなしてしまうおそれもある。

謝辞

IRISのWebサイトから入手した広帯域地震波形/Global CMTのデータを使用しました。(国研)防災科学技術研究所の広帯域地震観測網(F-net)の波形データを使用しました。SCARDEC及びUSGSが公開している震源時間関数の時系列データを使用しました。

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

*Ayumu Mizutani¹, Kiyoshi Yomogida¹

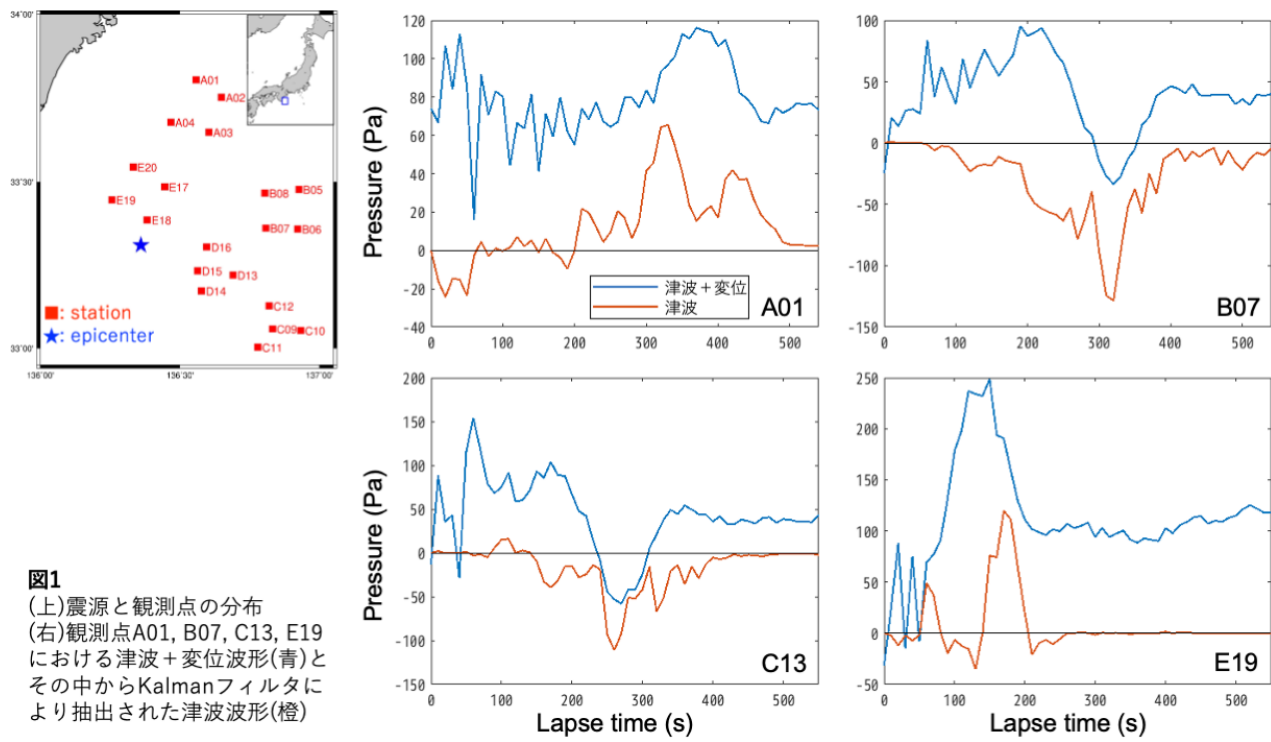
1. Hokkaido Univ.

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。



Real-time tsunami inundation forecast based on the multi-index method examined considering several source models

*Wataru Suzuki¹, Naotaka Chikasada¹, Takayuki Miyoshi¹, Shin Aoi¹

1. NIED

海底水圧計データを用いた津波即時予測のため、データベース（津波シナリオバンク）から観測された海底水圧計データに近いシナリオ群を選別するMulti-index法が提案されている（Yamamoto et al., 2016, EPS）。Multi-index法では評価時刻での水圧変動の絶対値の最大値について、観測値で正規化したVR（Variance Reduction）、シナリオの値で正規化したVR及び相関係数の3つの指標により、観測とシナリオの類似度の評価を行う。Multi-index法を用いることで、事前に準備したシナリオを即時に選び出すことで計算負荷の高い津波遡上まで予測対象とすることができ、S-netデータを用いた津波遡上即時予測システムとしてシステム実装されている（Aoi et al., 2019, JDR）。津波遡上即時予測システムでは震源情報の不確実性に左右されないように、毎時刻Multi-index法での評価を行い、閾値を満たすシナリオが選別されると予測を開始する。そのためYamamoto et al. (2016)では検討されていなかった、リアルタイムデータ処理のための帯域制限フィルタ、オフセット除去及び最大値を取る区間の設定やシナリオデータが地震発生から何分後にあたるかを様々に変えて検索する機能が津波遡上即時予測システムでは採用されている。本研究では、沖合にS-netが敷設された東日本太平洋沿岸での概観的な津波予測のために構築した津波シナリオバンク（近貞・他, 2019, 防災科学研究資料）を用い、津波遡上即時予測システムと同じ検索処理により選別されたシナリオ群に基づき、Multi-index法による津波遡上即時予測の検証を行う。検証には既往研究で推定された波源断層モデルから計算した模擬データ（S-net水圧計データ及び陸域浸水深分布）を用いるが、推定された波源断層モデルに固有の特性、バイアス等のため、生成される模擬データが必ずしも実際の津波現象全てを代表できる訳ではない。そこである1つの波源断層モデルの例に最適化するのではなく、大局的な予測性能を向上することを目的に、1つの地震に対して異なる研究による波源断層モデルに基づく複数の模擬データを用いて検証を行う。概観的な予測のための津波シナリオバンクでは、伊豆諸島から根室半島の沖合をカバーするように太平洋プレートのプレート間地震とアウターライズ地震を設定し、沿岸で90m格子の地形モデルを用いて津波浸水計算を行ったシナリオを有している。断層面内では一様すべりを仮定しているが、プレート間地震については地震規模と断層面積の関係式を3パターン用いることにより、多様な震源特性を考慮している。波源断層モデルの走向方向位置と沿岸波高分布の感度解析結果を基に、プレート間地震は走向方向に約25kmずらして設定している。模擬データとして2011年東北地方太平洋沖地震についての27波源断層モデルから計算されるデータを用いた。これらの波源断層モデルは主に津波データもしくは地震波形データの解析に基づき推定されている。なお海底水圧計データについては波源断層モデルによるシミュレーション波形に、2018年台風13号襲来時の観測波形をノイズとして付加している。

北緯38.3度～38.5度、東経141.1度～141.4度の領域（宮城県石巻市から東松島市付近）での地震発生から10分後までのデータから予測される最大浸水深分布を確認したところ、Multi-index法で選別されたシナリオ群のうち観測値とシナリオの両方で正規化したVRが最大となるシナリオは6模擬モデルに対して過小な予測となる傾向が見られた。一方でMulti-index法で選別されたシナリオ群から計算される平均値を予測とすると、過小となるのは1模擬モデルのみとなった。また平均値を、選別されたシナリオ群全てから求める場合と、VRが全シナリオの最大値から0.1以内となるシナリオ群から求める場合では、予測の傾向は概ね似ているが、シナリオ群全体から求める方が過小予測の傾向が小さかった。なお、模擬データの推定に用いられたデータ（津波データか地震波形データか）と、良好な予測結果が得られたかどうかには関連性は見られていない。津波遡上即時予測システムでは、VR最大シナリオによる予測と、選別されたシナリオ群の平均値による予測の双方に対応している。他領域や他地震に対する検証、予測精度評価方法や予測の時間発展の整理を行い、適切な津波予測に向けて検証結果をシステムに反映していくことが今後の課題である。

謝辞：本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）の成果を利用した。

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。

Real-time forecast of near-field tsunami decay based on linear regression to tide-gauge data

*Hiroaki TSUSHIMA¹

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

はじめに

近地巨大地震や遠地地震では、津波の収束までに時間を要するため、津波警報・注意報が発表された状態が長時間継続する。たとえば、2011年東北地方太平洋沖地震では、津波警報・注意報がすべて解除されたのは地震から48時間後であった。津波警報の解除の見通しをたてて、防災対応に資するうえで、津波の減衰予測は重要である。

本研究では、近地津波の減衰に着目し、過去の津波観測データから判明している統計的な特徴に基づく予測を試みる。林・他（2011, 海岸工学）は、2003年十勝沖地震（Mw 8.3）等の際に日本沿岸で観測された津波波形の減衰部を統計的に解析し、減衰部の包絡線の時間推移は、地震からの経過時間 t に概ね反比例すること（ $1/t$ ）を見出した。また、2011年東北地方太平洋沖地震の津波波形の観察によれば、同地震の津波の減衰過程も $1/t$ で概ね近似できうる。そこで、本研究は、この特徴に着目し、リアルタイムに得られる沿岸観測波形から、その後の津波の時間推移を予測する手法を考案する。

データと解析手法

沿岸潮位観測点の潮位時系列の波形データを使用する。この波形データに一定幅の時間窓をかけて移動二乗平均振幅（MRMS振幅）（林・他, 2010, 海岸工学）を算出し、減衰予測解析に用いる。ここではMRMS振幅算出の窓幅は2時間とした。

本研究が提案する津波減衰予測手法は、減衰の時間推移は関数 $1/t$ にしたがうものと仮定し、津波のおおよその規模を観測データから推定して、その後の時間推移を予測するものである。具体的には、現時刻の直近の時間窓内のMRMS振幅（を定数倍した）時系列に関数 k/t を当てはめて振幅係数 k を推定し、それを関数 k/t に代入することで、それ以降の津波減衰の時間推移を予測する。減衰の時間推移を表す関数を $1/t$ に固定するため、逆問題の未知数が振幅係数のみとなり、予測結果が安定することが期待できる。ここでは、当てはめの対象とするMRMS振幅は3倍している。これは、林・他（2010, 海岸工学）による遠地津波の統計解析に基づく知見「減衰過程においては、津波高さがMRMS振幅の3倍を超えることは稀である」ことを参考にした。また、当てはめの時間窓は6時間とした。

結果

本提案手法の減衰予測性能を検証するため、2011年東北地方太平洋沖地震に適用した。一例として、北海道の釧路の予測結果を示す（図1）。本手法による推移予測曲線（赤線）が、観測波形（灰線）の上限付近を概ね予測できている。こうした推移予測曲線に基づき、日本の太平洋沿岸の潮位観測点において50 cmの津波の高さが最後に観測される時刻（最終観測時刻）を、地震発生後15時間の時点（多くの沿岸潮位観測点でMRMS振幅の最大ピークが出現してすでに減衰過程に移行した段階）でどのくらい予測できるかを評価した。その結果、ほとんどの観測点において、最終観測時刻の ± 12 時間の減衰見込み時刻が得られることがわかった（図2）。

謝辞

本研究では、国土交通省港湾局及び気象庁の沿岸潮位観測データを使用しました。記して感謝します。

引用文献

- 林 豊・他（2010），海岸工学論文集，66, 1, 1_211-1_215.
林 豊・他（2011），海岸工学論文集，67, 2, 1_216-1_220.

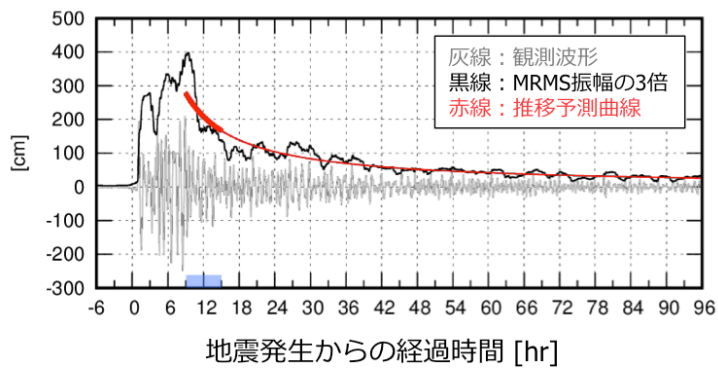


図1 地震発生後15時間における釧路港での津波の減衰予測結果。青色部のMRMS振幅を当てはめに用いた。

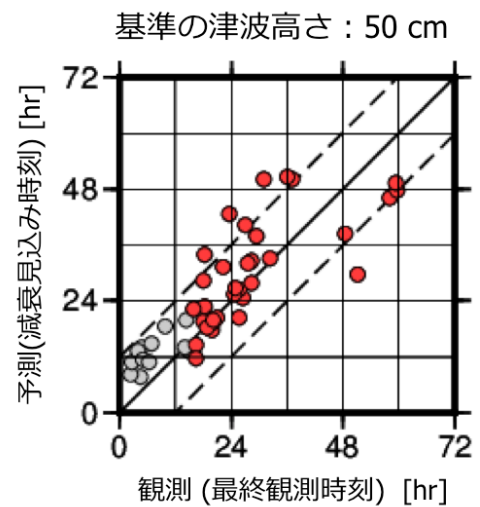


図2 地震発生後15時間における日本の太平洋沿岸の潮位観測点での津波高さ50cmの最終観測時刻の予測結果。丸印は沿岸検潮所で、赤色が予測実施時刻よりも未来、灰色が過去をそれぞれ示す。

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S18. Education and history of seismology

S18P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S18P-01] Digital Archiving of Bromide Paper Records of Ground Tilt Observed in Kii Peninsula, Japan

○Yasuyuki Kano^{1,2} (1.ERI, UTokyo, 2.CRO for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, UTokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S18P-02] Activity of Children's Summer School on Earthquake and Volcanoes in TANGO and future prospects

○Tomoya Hiroy¹, Yasuyuki Kano², Satoko Murotani³, Specified Nonprofit Corporation Earth design school, Committee for Children's Summer School on Earthquake, Volcanoes and Geology (1.Promotion Committee, 2.University of Tokyo, 3.National Museum of Nature and Science,Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

Digital Archiving of Bromide Paper Records of Ground Tilt Observed in Kii Peninsula, Japan

*Yasuyuki Kano^{1,2}

1. ERI, UTokyo, 2. CRO for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes, UTokyo

紀伊半島の2か所の観測点の土地傾斜の記録について、デジタルアーカイブを構築した。これらの観測は主として京都大学防災研究所によって実施されたものである。紀州観測点（三重県熊野市）と由良観測点（和歌山県日高郡由良町）では、1974年頃までは土地傾斜の観測記録にブロマイド紙（感光紙）が用いられていた。現在は、このブロマイド記録は京都大学阿武山観測所で保管されている。観測点ごとに、適当な観測期間ごとに束にまとめられている。これらのブロマイド記録を利用する際の利便性向上のため、順次記録を撮影し、デジタル画像を作成してきている。

紀州観測点では1947年に水平振子型の傾斜計が設置された。1951年に異なる鉱区に移設されているが、これは現在の水管傾斜計の設置地点のごく近傍である。1974年までは横30 cm、縦8.5 cmのブロマイド紙に記録されている。紙送りの速度は時期によって変更されているが、1970年代には約0.2 cm/hに設定されていた。各ブロマイド紙の裏面には、記録番号、記録期間、振り子の固有周期、紙送り速度、期間中に発生した地震に関するメモが残されている。紀州観測点のブロマイド記録を用いて、スロースリップイベントの可能性のある傾斜変化について検討がなされた。

今回のデジタルアーカイブ（「地殻変動ブロマイド記録」<https://www.dheq.org/repo/s/bromide/>）の構築には、Omeka（<https://omeka.org/>）を用いた。Omekaは、デジタルコレクションを共有するためのWeb上での出版プラットフォームで、多くの博物館、美術館、図書館、文書館、あるいは研究プロジェクトなどのデジタルアーカイブに用いられている。オープンソースソフトウェアであるOmekaを用いることで、デジタルアーカイブ構築にかかる費用や技術的要求を大幅に減らすことが可能になった。

ブロマイド紙のデジタル写真とメタデータ（ここでは、記録紙裏面の情報および観測者・観測点に関する情報）をOmekaに登録した。記録の検索を容易にするため、メタデータ中の観測点と観測期間に関する情報を各画像に結びつけた。Omekaでは、画像をInternational Image Interoperability Framework (IIIF)に準拠して公開することができる。これを利用して、閲覧者はIIIFに対応した好みの画像ビューアでブロマイド記録を表示することができる。また、将来的には、IIIFを利用して、オンラインでブロマイド紙記録を画像処理し、以後の分析を実施するような仕組みを構築できる可能性がある。

Activity of Children's Summer School on Earthquake and Volcanoes in TANGO and future prospects

*Tomoya Hiirō¹, Yasuyuki Kano², Satoko Murotani³, Specified Nonprofit Corporation Earth design school, Committee for Children's Summer School on Earthquake, Volcanoes and Geology

1. Promotion Committee, 2. University of Tokyo, 3. National Museum of Nature and Science, Tokyo

地震火山こどもサマースクールは、日本地震学会、日本火山学会、日本地質学会に加えて開催地団体を主催として、災害だけでなく災害と不可分の関係にある自然の大きな恵みを伝えることを目的とし、1999年から毎年夏休みに全国各地で開催している。2020年より前身の地震火山こどもサマースクールから地震火山地質こどもサマースクールに名称を変更した。

2019年度は特定非営利活動法人地球デザインスクールが主体となり、8月10～11日の2日間にわたり京都府北部の京丹後市および宮津市、伊根町で実施した。開催にあたり、地震火山こどもサマースクールin TANGO実行委員会を設置し、実行委員長に加納靖之（東京大学地震研究所）を選出した。また、講師には尾池和夫氏（京都造形芸術大学）、松原典孝氏（兵庫県立大学）、横山光氏（北翔大学）、大邑潤三氏（東京大学地震研究所）、室谷智子（国立科学博物館）を迎えた。「丹後半島のヒミツを解きあかそう！」をテーマに、日本海拡大期から現在までの歴史やそこに成立した地域社会との関係について、野外観察や身近な材料を使った実験、研究者との対話を通して理解し、自然の恵みや観光、自然災害についての理解を深めるとともに、丹後半島の形成過程や丹後地域の過去、現在、そして未来を考えることを活動の目的とした。

丹後地域が含まれる山陰海岸ジオパークは、平成22年10月に世界ジオパークネットワークへの加盟が認定されたジオパークである。京都府、兵庫県、鳥取県にまたがる東西約120km、面積2458.44km²の大きさを持ち、丹後地域はその東端に位置する。地質学的な知見から、丹後地域は主に基盤岩である白亜-古第三系の宮津花崗岩類、それらと不整合関係および貫入関係にあたる新第三系中新統の北但層群、および中部更新統以降の地層より構成される。また、1927年に北丹後地震を引き起こしたとされる郷村断層帯と山田断層帯が分布する。

現地では、20人のこどもたちを4つのチームに分け、天橋立、新井崎神社、丹後海と星の見える丘公園、Hi-net 網野観測点、郷村断層、京丹後市郷土資料館などを回った。天橋立、新井崎神社、丹後海と星の見える丘公園など周辺の地形観察や実験観察から、どこに断層地形が見られるのか、それぞれの地形にはどのような特徴がありどのように形成されたのか、などをグループごとに考えた。特に実験では、日本海の拡大、北但層群中のハイアロクラスタイトのでき方、断層の形成、天橋立の形成と成長など、丹後半島の自然について身近なものをを用いて考察した。さらに、国指定の天然記念物である郷村断層と京丹後市郷土資料館では、1927年の北丹後地震による被害や復興について学んだ。プログラムの最後には、こどもたちがチームごとに学んだことをまとめ、「丹後半島はどうできた？」「この丹後半島で、どう遊び、どう暮らす？」について発表を行った。発表では、大地震が生じたことでより強固で安全な街づくりが進行するきっかけとなる、自然景観を保ちながら天橋立の侵食を防ぎたい、地元の丹後のいい所を守りたいなどの意見が挙げられ、プログラムを通じて、深く考察していることがうかがえる。

今年度は浅間北麓ジオパークでの開催を予定していたが、新型コロナウイルス感染症拡大と感染防止の観点から来年度に延期とした。この企画は、こどもたちが現地で自然と触れ合いながら、その地域の環境や災害について考えることができることが最大の特徴である。サマースクールの継続的な実施のためにも、来年度開催に向けて、今情勢に合致した開催形式を検討していく予定である。

Poster session (Oct. 31th) | Regular session | S19. Seismology, general contribution

S19P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S19P-01] Estimation of the fall path of the fireball fell on July 2, 2020

○Shutaro Sekine¹, Naoshi Hirata² (1.Association for the Development Earthquake Prediction,
2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 5:30 PM

Estimation of the fall path of the fireball fell on July 2, 2020

*Shutaro Sekine¹, Naoshi Hirata²

1. Association for the Development Earthquake Prediction, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

地球に落ちてくる流星のうち、明るい流星を火球と呼ぶが、火球は落下する際には衝撃波を発生させながら落ちていく事が知られている。今までに落ちた火球でも、そのいくつかにおいては、その衝撃波を地震計が捉え、落下経路等が推定されている（石原・他（2001））。

2020年7月2日の2時32分に関東上空を大きな火球が飛び話題になった。火球は神奈川の上空で光り始め、東に向かって目撃された。火球はいくつかに分割し、それらは習志野市に落ちて回収された（国立博物館プレスリリース）。火球から発生した衝撃波は首都圏一円に展開されている首都圏地震観測網（MeSO-net）の地震計に広範囲で観測された。そこで、本研究では、火球が通った際に発する衝撃波を解析することによりその落下方向等を推定することにした。

データおよび解析手法

火球が見えていた時間前後のMeSO-netの波形データを用い、火球が通過した際に生じた衝撃波を地震計が捉えた時刻の読み取りを行った。経路の推定においては、石原・他（2001）で用いられた手法を用い、火球の入射角や速度等のパラメータをグリッドサーチで推定した。その際に大気圏突入後の火球の運動を等速直線運動とし、大気は等温大気であると仮定した。

結果および考察

MeSO-net で明瞭に捉えられた衝撃波の読み取りの時間を図に示す。火球は衝撃波を出している間は超音速であるが、その衝撃波は音速で伝わっている為、火球の高度が高い位置での衝撃波が観測点に到達するのは、より低い位置で発生した衝撃波よりも後に到着するため、到着時の等時線を描くと楕円を描くことになる。図内では西側の方がより遅く到着している為、火球は西から飛来している事がわかる。また、千葉県側では、衝撃波の到達は確認出来ず、習志野で隕石が見つかった事を考えると、衝撃波は火球の経路前方には飛んでいかないという事も示している。

このデータを用いて、グリッドサーチで経路の推定を行ったところ、火球の入射角は、33度から40度で、方位は東から北方向に5度から15度ぐらいに推定された。一般的に大気圏に突入する高度約80kmで火球が光り始めたとなると、神奈川の上空で光り始めたと言われる火球はこの入射角で東京上空まで火球が光っていたという観測結果から、高度約20km程度までは衝撃波を出していたと推定できる。また、火球の速度は大体30km/s

付近で推定したが、過去の火球の解析と比較すると、火球速度が速く推定されている。

なお、8月21日の22時30分頃に、落下した別の火球においても、MeSO-netで衝撃波の波形が観測されているので、同様に経路等を推定し、比較をする事にする。

謝辞

この研究においては、MeSO-netの波形データを使用いたしました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

石原吉明, 束田進也, 酒井慎一, 平松良浩, 古本宗充, 稠密地震観測網記録による火球経路の決定, 地震研究所彙報Vol.76, 87-92, 2001.

国立科学博物館, 各地で観測された火球が隕石であることを確認, 国立科学博物館プレスリリース, (<https://www.kahaku.go.jp/procedure/press/pdf/421874.pdf>), 2020.

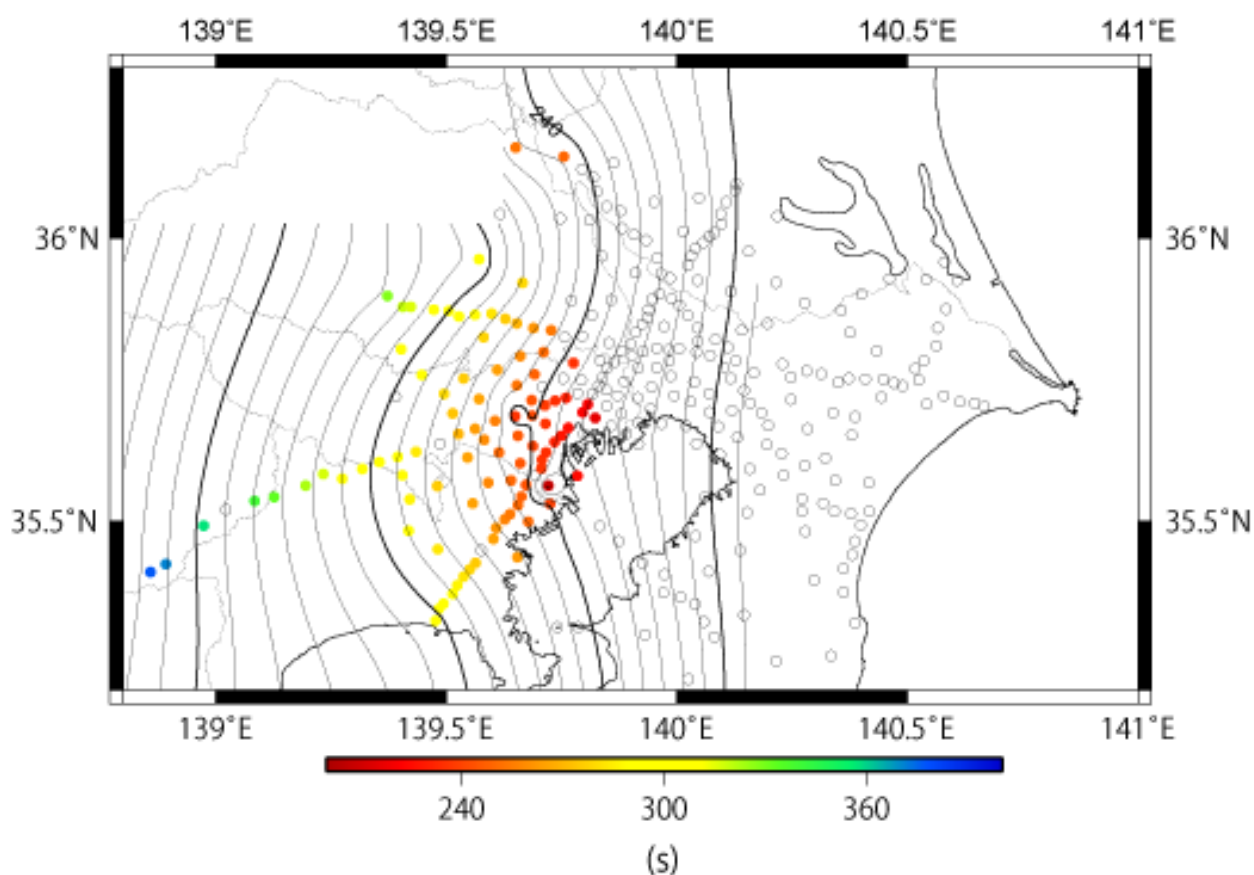


図:火球衝撃波の到達時刻 (2020年7月2日2時30分を起点)

S22P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S22P-01] Complementary distribution of very low-frequency earthquakes and the interplate-coupled area in the southwestern Ryukyu TrenchORen Yakabu¹, Mamoru Nakamura¹ (1.University of The Ryukyus)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-02] Distribution of very low-frequency earthquakes in the Miyako Strait, central Ryukyu TrenchOHiromu Furugen¹, Mamoru Nakamura² (1.Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyu, 2.Faculty of Science, University of the Ryukyu)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-03] Spatial and temporal distribution of very low-frequency earthquakes activity in the central Ryukyu Trench using ocean-bottom seismometersOMamoru Nakamura¹, Shuichi Kodaira², Yasushi Ishihara², Ban-Yuan Kuo³, Ching-Ren Lin³, Pei-Ying Patty Lin⁴ (1.Faculty of Science, University of the Ryukyus, 2.JAMSTEC, 3.Academia Sinica, 4.National Taiwan Normal University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-04] Shallow low-frequency tremor activity off Kikai Island, northern Ryukyu Trench subduction zoneOYusuke Yamashita¹, Yukihiro Nakatani², Hiroshi Yakiwara², Shuichiro Hirano², Shigeru Nakao², Hiroki Miyamachi³, Reiji Kobayashi³, Hiroshi Shimizu⁴, Takeshi Matsushima⁴, Kazunari Uchida⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Hideji Abe⁷, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁷ (1.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 2.NOEV, Kagoshima Univ., 3.Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 4.SEVO, Kyushu Univ., 5.Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6.JMA, 7.ERI, Univ. of Tokyo)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-05] Migration of shallow low frequency tremors in the central Ryukyu arcOTsutomu Takahashi¹, Yasushi Ishihara¹, Yojiro Yamamoto¹, Aki Ito¹, Ryuta Arai¹, Ayako Nakanishi¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda² (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

4:00 PM - 5:30 PM

[S22P-06] CMT solutions of earthquakes around Okinawa island from strong-motion records by using a land-ocean unified 3D structure modelOMasanao Komatsu¹, Hirofumi Kowari², Tomotsugu Watanabe¹, Taro Okamoto³, Takeshi Nakamura⁴, Hiroshi Takenaka¹ (1.Okayama University, 2.Hanshin Consultants Co., Ltd., 3.Tokyo Institute of Technology, 4.Central Research Institute of Electric Power Industry)

4:00 PM - 5:30 PM

Complementary distribution of very low-frequency earthquakes and the interplate-coupled area in the southwestern Ryukyu Trench

*Ren Yakabu¹, Mamoru Nakamura¹

1. University of The Ryukyus

We investigated the distribution of very low-frequency earthquakes (VLFs) in the southwestern Ryukyu Trench and clarified its relationship with interplate-coupled area. In the southwestern Ryukyu Trench, the cluster of VLFs is distributed from the south of the Yaeyama Islands to the east of Taiwan (Nakamura and Sunagawa, 2015). It is important to clarify the positional relationship between the region of slow earthquakes, interplate coupling region, and source regions of past earthquakes and tsunamis in the Ryukyu Trench, to understand the strain accumulation process. The western part (approximately 123°) of the VLF cluster overlaps the interplate coupling zone (Hsu et al., 2012). The source area of the 1771 Yaeyama tsunami is located in the east of the cluster (approximately 125°). However because of the inaccurate determination of the VLF epicenters, it was not previously possible to compare the positional relationships in detail. To clarify the relationship between the VLF distribution and the coupling region in the southwestern Ryukyu Trench, we performed a detailed epicenter determination of the VLFs. We used four stations of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience's F-net and seven stations of the Broadband Array in Taiwan for Seismology (BATS) from 2005 to 2013. The seismographs of the vertical component were 0.02–0.05 Hz band-pass filtered, and the waveforms at 2 or 3 neighboring stations were computed by semblance analysis to determine the epicenter. The results showed that the VLFs were distributed between south of Yonaguni Island and south of Miyako Island. The distribution of VLFs between south of Yonaguni Island and Iriomote Island was elongated east-west direction. However, the VLFs in the south of Ishigaki Island and south of Miyako Island formed the isolated clusters. The location of the VLF cluster corresponds to a slab depth of 10–15 km. The distribution of the VLFs were similar to that of the LFs (Nakamura, 2017). The distribution of VLF did not overlap with the interplate coupling zone near Taiwan. Although moderate-size thrust-type earthquakes occur commonly in the down-dip part of the coupled area near Taiwan, there is no VLF activity in this area. This suggests that the distribution of VLFs is complementary to the cluster of moderate-size interplate earthquakes associated with the coupled zone.

Distribution of very low-frequency earthquakes in the Miyako Strait, central Ryukyu Trench

*Hiromu Furugen¹, Mamoru Nakamura²

1. Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyu, 2. Faculty of Science, University of the Ryukyu

The distribution of very low frequency earthquakes (VLFs), which are one type of slow earthquake, illuminates the heterogeneous stress accumulation at the subducting plate interface. VLFs are known to occur in the Ryukyu Trench (Ando et al., 2012); however, their detailed distribution has not been clarified because there are few broadband seismic stations along the Ryukyu arc. In particular, the detection ability is poor in the Miyako Strait, between Miyako Island and Okinawa Island, where the spacing of seismic stations is 300 km. In this study, we determined the epicenters of the VLFs in the Miyako Strait using waveform data from temporary stations in the central Ryukyu Islands. We used the F-net stations of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience and temporary stations on Okinoerabu Island, Kume Island, Miyako Island, Tarama Island, and Hateruma Island, which were set up by the Association for the Development of Earthquake Prediction. We performed band-pass filtering at a frequency range of 0.05–0.1 Hz for the seismogram using Seismic Analysis Code software. We then determined the epicenters of the VLFs using the template matching method described by Asano et al. (2015). For the template, we selected the thrust events of regular earthquakes near Ryukyu Trench in the Miyako Strait. We determined the epicenters of VLFs that occurred between January 2017 and December 2017. The results showed that the epicenters formed one cluster near the Ryukyu Trench. Although the locations were similar to the results of Nakamura and Sunagawa (2015), the VLFE epicenters of each cluster were concentrated in a narrow area. The characteristics of the spot-like distribution of the VLFs are similar to those observed around Okinawa Island and the Yaeyama Islands. The VLFE cluster in the center of the Miyako Strait was distributed apart from the cluster of regular interplate earthquakes, without overlapping. The location of the VLFE cluster corresponds to a slab depth of 15 km. This suggests that the distribution of VLFs is similar to that of regular earthquakes. However, VLFE activity was activated in this cluster during the activated period of regular earthquakes (January–March 2017). This suggests that the VLFE activity was triggered by stress changes caused by the regular earthquakes.

Spatial and temporal distribution of very low-frequency earthquakes activity in the central Ryukyu Trench using ocean-bottom seismometers

*Mamoru Nakamura¹, Shuichi Kodaira², Yasushi Ishihara², Ban-Yuan Kuo³, Ching-Ren Lin³, Pei-Ying Patty Lin⁴

1. Faculty of Science, University of the Ryukyus, 2. JAMSTEC, 3. Academia Sinica, 4. National Taiwan Normal University

We investigated the spreading process of the slow earthquake induced by regular earthquakes using the spatio-temporal variation of the very low-frequency earthquakes (VLFEs) swarm in the central Ryukyu Trench. We used the waveforms of the ocean bottom broadband seismometers (OBSs) in the central Okinawa Trough and central Ryukyu Trench and F-net broadband seismometers. We bandpass-filtered at 0.05-0.1 Hz for the vertical component waveforms and analyzed using cross-correlation with template events to determine their relative positions. The analysis period was from September 2018 to June 2019. During this period three major VLFE swarms (November 2018, January 2019, and March 2019) occurred in and near the OBS network. Among them, November 2018 VLFE swarm, which occurred in the northeast of Amami Island, accompanied the migration of the VLFE activity. The detailed distribution of the VLFE swarm and regular earthquakes showed that the cluster of the VLFE swarm was distributed west and south of the cluster of regular earthquakes. The VLFE swarm started in the west of the cluster of regular earthquakes after the swarm-like earthquake activity (maximum magnitude of 4.9) occurred on November 5-7, 2018 in the cluster of regular earthquakes. The area of the VLFE swarm spread northeast and southwest direction, which is along the strike of the subducting plate. After November 14, the VLFE swarm migrated to the shallower part. On the other hand, in the case of March 2019 swarm in the south of Amami Island, the VLFEs were concentrated in several very small patches. From the spatio-temporal distribution of the low-frequency earthquakes, the slow earthquakes did not migrate south of Amami Island and that they occur in isolation (Nakamura, 2017). These suggest that the condition of the interplate coupling on the subducted plate interface or the connectivity of the region which can cause slow earthquakes differs between the north and south of the region.

Shallow low-frequency tremor activity off Kikai Island, northern Ryukyu Trench subduction zone

*Yusuke Yamashita¹, Yukihiro Nakatani², Hiroshi Yakiwara², Shuichiro Hirano², Shigeru Nakao², Hiroki Miyamachi³, Reiji Kobayashi³, Hiroshi Shimizu⁴, Takeshi Matsushima⁴, Kazunari Uchida⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Hideji Abe⁷, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁷

1. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 2. NOEV, Kagoshima Univ., 3. Grad. School of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 4. SEVO, Kyushu Univ., 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6. JMA, 7. ERI, Univ. of Tokyo

南海トラフから南西につながる南西諸島海溝では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う活発な地震活動が昔からよく知られている。近年のGNSS観測や海底観測により、南西諸島海溝ではスロー地震活動も非常に活発であることが分かってきており、大局的には南西諸島海溝の北に接する日向灘から活動が連続しているように見えている。その一方で、細かく見ると海溝の走向方向の活動度に時空間的な変化が見られる事が明らかになりつつあり、陸域の観測網が脆弱な南西諸島海溝において、海底観測を継続的に実施する事はこの地域の様々なスケールにおける地震活動を知る上で必要不可欠である。

我々は、2019年4月より南西諸島海溝北部域の喜界島東方海域において、20 kmスパンの海底地震観測を開始した。この海域は、通常地震活動が周囲に比べて低調な領域が広がっており、1911年喜界島沖の地震(M 8.0)の震源域に対応している可能性が指摘されている。一方、最近の観測からは、短期的スロースリップや浅部低周波微動活動が活発なことが明らかになってきており、巨大地震・通常の微小地震活動・スロー地震との関係について調査する格好のフィールドである。我々は、今後数年の間に、1年間の観測を複数回実施し、少しずつ観測点配置をずらして、地震活動が低調な領域とその周辺領域を覆う形で観測を実施することになっている。その上で、通常地震と浅部低周波微動の時空間な関係を明らかにすることが大きな目的の1つである。

本研究で使用している海底地震計は8台で、すべて1 Hzのセンサーを搭載した東京大学地震研究所所有の長期観測型海底地震計である。8台の海底地震計は正六角形の各頂点と中心およびいずれからの頂点から20km離れた1点に位置している。1回目の観測は、本来2020年4月に回収予定であったが、COVID-19流行の影響を受け、2020年8月に回収を実施した。観測期間中には、陸上観測網より観測海域直下と考えられる浅部スロー地震活動があったことが確認されている。過去に実施した海底観測でも同じ機材を用いて観測を実施しており、浅部低周波微動そのものの観測には成功していたが、観測点間隔が30kmより広く、収録トラブル等の影響もあり、震源分布は十分な精度では得られていない。現在、8月に回収したデータの1次処理を進めており、今後、観測データの精査を進め、浅部低周波微動についてエンベロープ相関法による解析を行い、浅部微動の活動領域を明らかにする予定である。

謝辞：海底地震計の設置・回収は、長崎大学水産学部練習船・長崎丸の教育関係共同利用に基づく航海によって実施されました。また、本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」および東京大学地震研究所共同利用の支援を受けました。記して感謝申し上げます。

Migration of shallow low frequency tremors in the central Ryukyu arc

*Tsutomu Takahashi¹, Yasushi Ishihara¹, Yojiro Yamamoto¹, Aki Ito¹, Ryuta Arai¹, Ayako Nakanishi¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda²

1. JAMSTEC, 2. Kagawa University

Ryukyu arc, southwestern Japan, shows high activities of various slow earthquakes such as slow slip events (SSEs) (e.g., Heki & Kataoka 2008; Nishimura 2014), very low frequency earthquakes (VLFs) (e.g., Ando et al. 2012) and shallow low frequency tremors (e.g., Yamashita et al. 2015). In this area, offshore seismic observations have important roles to improve accuracies of their locations and spatial extents. We conducted a passive seismic survey around Amami islands to elucidate detailed activities of regular and slow earthquakes and seismic structures. We deployed 30 short-period ocean bottom seismographs (OBSs) and 5 temporal onshore stations at 25~40 km interval. Deployed OBSs recorded ground motion from Mar. 2019 to July or Aug. 2019.

During this observation, we observed many regular earthquakes and several sequences of shallow low frequency tremors. We estimated epicenters of about 630 tremors by the envelope correlation method. Focal depths are fixed at 15km with consideration for our seismic refraction survey in this area (Takahashi et al. 2020, JpGU). All tremors distribute between Amami islands and Ryukyu trench. Distance from the Ryukyu trench to tremors is about 20~80km. Most tremors locate at the source area of 1995 Amami earthquake (M7.1) (e.g., Yamada et al. 1997). Many aftershocks of the Amami earthquake distribute in the subducted slab. Arai et al. (2017) found large normal faults intersecting the subducted slab at north of tremor area. These imply a complex geometry of plate surface and fractured structures in the slab at the tremor area.

The most active sequence of tremors occurred from 3/5/2019 to 19/5/2019. This activity started at southern part of the tremor area, and migrated north for about 70 km. Migration speed is about 4.0~4.5km/day. Similar migration speed was observed for shallow VLFs in Hyuga-nada (Tonegawa et al. 2020) and Kumano-nada (Nakano et al. 2018) at Nankai subduction zone. Yamashita et al. (2015), in contrast, observed fast migrations (30~60 km/day) of shallow low frequency tremors in Hyuga-nada. They also pointed out rapid reverse migrations. Such reverse migration was not clearly seen in our case.

A large cumulative slip of SSEs is observed near the Amami plateau (Nishimura 2014). In this large slip area, we observed low activity of shallow tremors. Tremor migration we observed stopped at south of the large slip area. Arai et al. (2017) found a subducted seamount near the large slip area of SSEs. It implies that the subducted seamount affects tremor migration. We may say that complex geometries of plate surface or fractured structures in the subducted slab may have important roles for slow earthquake activities in the central Ryukyu arc.

Acknowledgement: This study was partially supported by “Research Project for Compound Disaster Mitigation on the Great Earthquakes and Tsunamis around the Nankai Trough Region” of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan. We are grateful for Amami-city, Tokunoshima-town, Amagi-town, China-town and Toshima-village for their kind corporation for onshore seismic observations.

CMT solutions of earthquakes around Okinawa island from strong-motion records by using a land-ocean unified 3D structure model

*Masanao Komatsu¹, Hirofumi Kowari², Tomotsugu Watanabe¹, Taro Okamoto³, Takeshi Nakamura⁴, Hiroshi Takenaka¹

1. Okayama University, 2. Hanshin Consultants Co., Ltd., 3. Tokyo Institute of Technology, 4. Central Research Institute of Electric Power Industry

沖縄本島近海では地震活動が活発である。本研究では2007年10月から2013年6月に発生した M_{JMA} 5.2~5.8の7つの地震の強震波形データから、CMTインバージョンを行い、地震の位置、規模、震源メカニズムを推定した。

CMTインバージョンにはFAMT (Okamoto *et al.*, 2017, EPS)の方法を用い、グリーン関数の計算には陸上、海底地形を考慮できる3次元差分法の計算コードHOT-FDM (Nakamura *et al.*, 2012, BSSA)を使用した。沖縄本島南東沖に南北方向、東西方向、鉛直方向に各2 km間隔でセントロイド震源の候補点を設定し、相反定理を用いてグリーン関数を計算した。グリーン関数の計算に用いた海陸統合の3次元地下構造モデルは以下のように構築した。陸上地形は国土地理院の250 mメッシュ(標高)を、海底地形はJTOPO30を導入し、海水層を考慮した。モホ面は反射法探査の結果 (Nishizawa *et al.*, 2019, EPSなど)の結果をコンパイルし、モデル化した。フィリピン海プレート上面はIwasaki *et al.* (2015, AGU)のモデルを採用した。これらの地震波速度や密度は公開されている広域モデル(たとえば、全国1次地下構造モデル)を参考に設定した。上部地殻より上の地盤はJ-SHIS深部地盤モデルを採用した。

本研究で使用したデータは防災科学技術研究所が展開する強震観測網(K-NET)の8観測点(KGS033, KGS034, KGS035, OKN001, OKN002, OKN003, OKN004, OKN005)で観測された強震波形である。これらを速度波形に積分しバンドパスフィルタをかけて使用した。

解析した結果をFigure 1に示す。イベント番号は発生日時の順に付けた。セントロイド震源はF-netによるものと比べて北西側に移動した。また、深さのばらつきはF-netによるものよりも小さくなった。メカニズムはイベント①と⑥の横ずれ成分を除き、北西・南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型であり、圧縮軸の方向はフィリピン海(PHS)プレートの沈み込む方向に対応する。本研究で求めた震源はイベント①と⑥は海洋マントル、それ以外は海洋地殻内に位置している。なお、発表ではさらに最新のイベントやマグニチュードの小さなイベントを含めて解析数を増やす予定である。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)の強震波形記録、国土地理院の数値地図250 mメッシュ(標高)、JTOPO30、J-SHIS深部地盤モデルを使用しました。プレート境界モデル(Iwasaki *et al.*, 2015, AGU)は、国土地理院の数値地図250mメッシュ(標高)、日本海洋データセンターによる500mメッシュ海底地形データ(J-EGG500, http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html)及びGeographic Information Network of Alaska (アラスカ大学)の地形・水深データ(Lindquist *et al.*, 2004, Eos Trans. AGU)から作成したものです。グリーン関数の計算は学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援により(課題番号: jh190075-NAH)、名古屋大学情報基盤センターの超並列スパコンFX100を利用し、および東京大学地震研究所の共同利用における援助を受け(課題番号: 2020-S-08)、同大情報基盤センターのシステム(Oakforest-PACS)を利用しました。

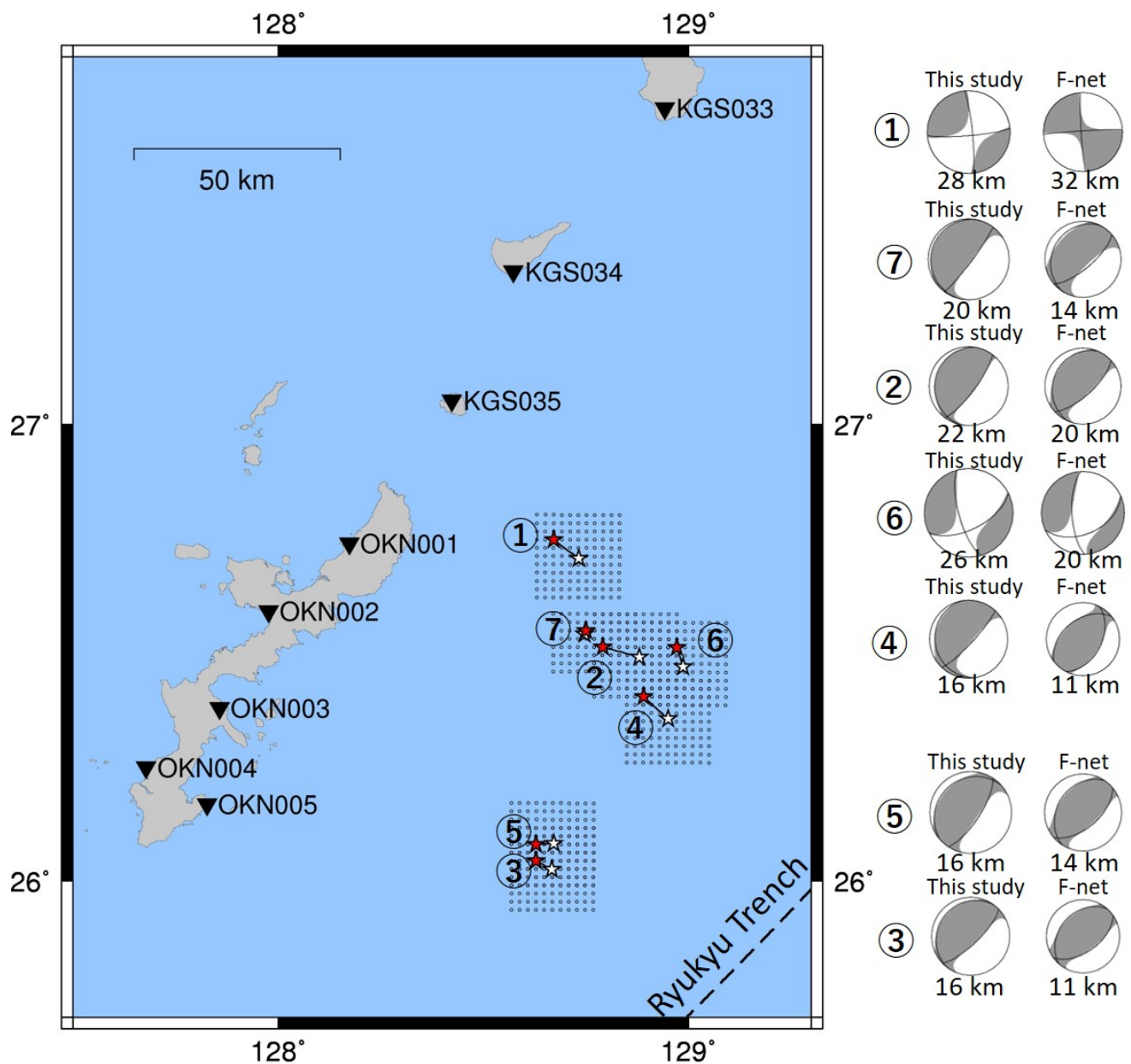


Figure 1. Location of the 7 events analyzed in this study. Red and white stars indicate epicenters determined in this study and reported by NIED, respectively. Black points are ranges of grid searches for the CMT. Inverse triangles denote K-NET stations in NIED. Black dashed line indicates Ryukyu trench. The obtained moment tensor solutions and centroid depths are shown on the right.

Poster session (Oct. 31th) | Introduction of committee activities | S25.Committee activities for society

S25P

Sat. Oct 31, 2020 4:00 PM - 5:30 PM ROOM P

[S25P-01] Public Relations Committee

*Public Relations Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-02] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-03] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-04] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-05] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-06] SSJ Committee

*SSJ Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-07] Geopark Assistance Committee

*Geopark Assistance Committee¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

[S25P-08] Kanamori Fund

*Kanamori Fund¹ (1. The Seismological Society of Japan)

4:00 PM - 5:30 PM

Public Relations Committee

*Public Relations Committee¹

1. The Seismological Society of Japan

広報委員会の活動を紹介します

SSJ Committee

*SSJ Committee¹

1. The Seismological Society of Japan

学会情報誌編集委員会の活動を紹介します

SSJ Committee

*SSJ Committee¹

1. The Seismological Society of Japan

強震動委員会の活動を紹介します

SSJ Committee

*SSJ Committee¹

1. The Seismological Society of Japan

学校教育委員会の活動を紹介します

SSJ Committee

*SSJ Committee¹

1. The Seismological Society of Japan

災害調査委員会の活動を紹介します

SSJ Committee

*SSJ Committee¹

1. The Seismological Society of Japan

普及行事委員会の活動を紹介します

SSJ Committee

*SSJ Committee¹

1. The Seismological Society of Japan

ジオパーク支援委員会の活動を紹介します

Kanamori Fund

*Kanamori Fund¹

1. The Seismological Society of Japan

金森基金の活動を紹介します