

Wed. Oct 26, 2022

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-1

chairperson: Osamu Sandanbata(NIED), Futoshi YAMASHITA(NIED)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S08-18] Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S08-19] Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S08-20] Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S08-21] Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD))

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S08-22] Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Hiroyuki NODA (Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute), Sumire MAEDA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S08-23] Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co., Ltd.)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S08-24] Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S08-25] Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

*Futoshi YAMASHITA¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S08-26] Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-27] Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹ (1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

1:45 PM - 3:00 PM JST | 4:45 AM - 6:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson:Kurama OKUBO(NIED), Makiko OHTANI(ERI)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S08-28] Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S08-29] Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of technology)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S08-30] Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S08-31] Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S08-32] Recurrence interval of M>7 Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of M~9 earthquake*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

3:15 PM - 4:30 PM JST | 6:15 AM - 7:30 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S08-33] Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S08-34] Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S08-35] Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3} (1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S08-36] 4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO² (1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S08-37] Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹ (1. Aoyama Gakuin University)

Room B | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster**9:30 AM - 11:00 AM JST | 12:30 AM - 2:00 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)****[S15] AM-1**

chairperson: Toshihiro Shimoyama (Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency), Kotoyo Tsuchida (Hanshin Consultants Co., Ltd.)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S15-06] Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part (1)

Mitsuhiro Toya¹, Sayumi Yoshida², *Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹ (1. Hanshin Consultants Co., Ltd., 2. N/A)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S15-07] Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part(2)

*Masanori HORIKE¹, Sayumi YOSHIDA², Mitsuhiro TOYA¹, Kotoyo TSUCHIDA¹ (1. Hanshin consultants., LTD., 2. N/A)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S15-08] Updating proxy-based site amplification map in Osaka, Japan with soil borehole data: A Bayesian updating scheme based on Uncertainty Projected Mapping

*Anirban Chakraborty¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada² (1. Hosei University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S15-09] Variation of long-period strong ground motions at Hitachi-Naka port depending on the epicenter regions

*Tomiichi UETAKE¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S15-10] Study on prediction of long-period ground motion

*Toshihiro SHIMOYAMA¹ (1. MRI, JMA)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S15-11] Real-time forecast of long-period ground motions using Green's function based on seismic interferometry

*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Room B | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster**11:15 AM - 12:30 PM JST | 2:15 AM - 3:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)****[S15] AM-2**

chairperson: Asako Iwaki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), Yusuke Tomozawa (Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S15-12] Evaluation of scaling relations for subduction earthquake using source inversion models

*Fumiaki Nagashima¹, Hiroshi Kawase¹, Eri Ito¹, Jikai Sun¹ (1. Disaster Prevention Research Institute)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S15-13] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of Earthquakes Occurring off the Pacific Coast of Tohoku

*Yusuke Tomozawa¹, Tomoki Hikita¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S15-14] An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of direct S-waves in the layered structure : Application to inland earthquakes in Chugoku region

*Tomonori IKEURA¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S15-15] Correlation between strong motion intensities based on the unified strong motion database by NIED

*Hongjun Si^{1,2}, Asako Iwaki³, Nobuyuki Morikawa³, Hiroyuki Fujiwara³ (1. Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, 2. Seismological Research Institute Inc., 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S15-16] Comparison of Ground-Motion Models based on the Strong Motion Database

*Asako IWAKI¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Tomohisa Okazaki², Hisahiko Kubo¹, Hongjun Si³, Atsuko Oana⁴, Toru Ishii⁴, Yusuke Tomozawa⁵, Tomoki Hikita⁵ (1. National Research Institute for Disaster Resilience, 2. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 3. Seismo Research, 4. Osaka Research Institute, 5. Kajima Technical Research Institute)

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

2:00 PM - 3:15 PM JST | 5:00 AM - 6:15 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-1

chairperson: Kazuhito Hikima (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.), Wataru Suzuki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S15-17] Automatic Hypocenter Determination with the IPFx method for the 2018 Hualien earthquake sequence

*Masumi YAMADA¹, Dayi Chen² (1. Kyoto University, 2. Central Weather Bureau, Taiwan)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S15-18] Rupture processes of the 2021 and 2022 Fukushima-oki earthquakes: Reactivation of the faults in the subducting slab originally formed in the outer-rise region

*Hiroaki KOBAYASHI¹, Tetsushi Watanabe¹, Kazuki Koketsu² (1. Kobori Research Complex, 2. Graduate School of Media and Governance, Keio University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S15-19] Comparative study of strong motion distributions of the two *M7*-class Off Fukushima earthquakes in 2021 and 2022*Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Takeshi Kimura¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S15-20] Source Processes of the Off Fukushima Intra-slab Earthquakes in March 2022 and February 2021 - Analysis using 3D subsurface structure -

*Kazuhiro HIKIMA¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., TEPCO Research Institute)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S15-21] Ground motion in the Tokyo metropolitan area for the 2021 Northwestern Chiba earthquake

*Hiroe MIYAKE¹, Miki UEHARA¹ (1. ERI, Univ. Tokyo)

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

3:30 PM - 4:30 PM JST | 6:30 AM - 7:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-2

chairperson: Yosuke Nagasaka (Port and Airport Research Institute), Fumino Suzuki (Kobori Research Complex INC.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S15-22] Preliminary analysis of residual data between strong-motion records and calculations by a ground motion model

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Asako IWAKI¹, Takahiro MAEDA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S15-23] Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: Remodeling of source parameters and estimation of detailed seismic intensity distribution

*Fumino SUZUKI¹, Tetsushi WATANABE¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹ (1. KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S15-24] Strong Motion Simulation of 2016 Kumamoto Earthquake Mainshock Using Dynamic Rupture Modeling

*JIKAI SUN¹, HIROSHI KAWASE¹, ARBEN PITARKA², FUMIAKI NAGASHIMA¹, ERI ITO¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Lawrence Livermore National Laboratory)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S15-25] Reevaluation of strong ground motions during the 2016 Kumamoto earthquake sequence utilizing regional spectral inversion analysis

*Yosuke NAGASAKA¹ (1. Port and Airport Research Institute)

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

9:45 AM - 10:45 AM JST | 12:45 AM - 1:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] AM-1

chairperson:Yutaro Okada(Kyoto University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S03-08] Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation*Yuto NAKAMURA¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S03-09] Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A*Koya Nagae¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yuto Nakamura¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S03-10] Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A*Yusuke YOKOTA¹, Koya Nagae², Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S03-11] Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy*Ryosuke Nakahata¹, Ryoya Ikuta¹, Akihiro Nagaya², Keiichi Tadokoro³, Mamoru Nakamura⁴, Rumi Sohrin¹, Yasushi Harada⁵, Masataka Ando¹ (1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University)

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

11:00 AM - 12:00 PM JST | 2:00 AM - 3:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] AM-2

chairperson:Yutaro Okada(Kyoto University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S03-12] Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches*Yutaro OKADA¹, Takuya NISHIMURA² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S03-13] Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench*Tadashi ISHIKAWA¹, Yusuke Yokota² (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S03-14] Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough*Sota Murakami¹, Akinori Hashima², Takeshi Iinuma², Kohei Fujita¹, Tsuyoshi Ichimura¹, Takane Hori² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S03-15] Study on viscus flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough*Hisashi SUTO¹ (1. GSI of Japan)

Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system**1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)****[S02] PM-1**

chairperson: Masayuki Yoshimi (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Masayuki Obayashi (JAMSTEC)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S02-01] The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

*Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Hiroko Sugioka², Joel D Simon³, Yu Yong⁴ (1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S02-02] Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

*Ryoichi IWASE¹ (1. JAMSTEC)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S02-03] Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

*Katsuhiro YABU¹, Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO², Takeshi NISHIMURA¹ (1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S02-04] Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

*Masanao SHINOHARA¹, Tomoaki Yamada¹, Hiroki Takano², Eiji Kurashimo¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Shin'ichi Sakai³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S02-05] Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

*Masayuki YOSHIMI¹, Satoshi IDE², Teppei ENARI³, Daiki TAYA³, Shuji IWATA⁴ (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company)

Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

3:00 PM - 4:15 PM JST | 6:00 AM - 7:15 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S02] PM-2

chairperson:Hajime Shiobara(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Toshinori Sato(Chiba University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S02-06] Classification for Earthquakes with Linked Data*Hiroki UEMATSU^{1,2,3}, Ahyi Kim³, Hideaki Takeda^{1,2} (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S02-07] Development of multi-platform next-generation WIN system (2)*Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Naoki UCHIDA¹, Mare YAMAMOTO⁴, Kazuo OHTAKE⁵, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Yuta MAEDA⁶, Shiro OHMI⁷, Haruhisa NAKAMICHI⁷, Makoto OKUBO⁸, Takeshi MATSUSHIMA⁹, Hiroshi YAKIWARA¹⁰, Katsuhiko SHIOMI¹¹, Kenji UEHIRA¹¹, Hideki UEDA¹¹, Kazuki MIYAOKA¹², Koji TAMARIBUCHI¹³, Ryo HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S02-08] Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method*Shigeki Horiuchi¹, Yuko Satou¹, Yoshihisa Iio², Aitarou Kato³, Tomomi Okada⁴ (1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S02-09] Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments*Ryuhei YAMADA¹, Kazuyoshi Asari², Hiroaki Shiraishi³ (1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S02-10] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient*Hajime SHIOBARA¹, Masanao Shinohara¹, Toshinori Sato², Aki Ito³, Hiroko Sugioka⁴ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBEC, Kobe University)

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

9:45 AM - 11:00 AM JST | 12:45 AM - 2:00 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S07] AM-1

chairperson: Masato Furuya (Hokkaido University), Keiko Kuge (Kyoto University)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S07-01] Seismic discontinuities beneath the Australian continent from Bayesian inversion using multimode surface waves and receiver functions*Kotaro Tarumi¹, Kazunori Yoshizawa^{1,2} (1. Graduate School of Science, Hokkaido University,, 2. Faculty of Science, Hokkaido University)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S07-02] Upper mantle S-wave structure beneath Mongolia, Central Eurasia*Baigalimaa Ganbat^{1,2}, Kazunori Yoshizawa^{1,3}, Demberel Sodnomsambuu², Ulziibat Munkhuu² (1. Dept Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Astronomy and Geophysics of Mongolia, 3. Dept Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S07-03] Inferring 3-D S- and P-velocity structure of D'' beneath Central America using waveform inversion*Rei Sato¹, Kenji Kawai¹ (1. Univ. of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S07-04] Waveform inversion for the 3D S-wave velocity structure in the D'' beneath the Southern Atlantic*Keisuke Otsuru¹, Kenji Kawai¹ (1. University of Tokyo)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S07-05] The Q-value and its frequency dependence suggested from the recent absence of the Chandler Wobble*Masato FURUYA¹, Ryuji Yamaguchi² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Hokkaido University)

Room D | Regular session : S18. Education and history of seismology

11:15 AM - 12:00 PM JST | 2:15 AM - 3:00 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S18] AM-2

chairperson: Yoshinari Hayashi (Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai Univ.)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S18-01] Consideration of seismological information on regional differences in disaster preparedness awareness*Yoshinari HAYASHI¹, Tadahiro MOTOYOSHI¹ (1. Kansai Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S18-02] Effects of science education for prevention and mitigation of psychological damages caused by earthquake disasters*Noa MITSUI¹, Kumi Yoshitake², Hiroko Tsuboi³, Yuki Kubota⁴, Kazuyuki Nakagawa⁵ (1. Nagoya University, 2. University of human environments, 3. Nagoya City University, 4. Kyushu Sangyo University, 5. Jiji Press)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S18-03] Significance of holding the event: 2022 summer school for school teachers in Sakaiminato city & Daikon Island*Hiroo NEMOTO¹, Ken'ich ARAI², Akihiko ITO³, Yasuyuki KANO⁴, Makoto YAMANO⁴, Masashige MINAMISHIMA⁵, Hideki MUKOYOSHI⁶, Hiroki HAYASHI⁶, Takao KAGAWA⁷ (1. Ritsumeikan Univ., 2. Sakae Higashi UPR Sec. Sch., 3. The Open Univ. of Japan, 4. ERI, 5. Ryogoku Sec. Sch., 6. Shimane Univ., 7. Tottori Univ.)

Room D Regular session : S10. Active faults and historical earthquakes
--

1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S10] PM-1

chairperson: Haruo Kimura, Takashi Ogami (Geological Survey of Japan, AIST)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S10-01] Paleo-seismicity of the southeastern part of Unzen Fault Group based on offshore active fault survey in Shimabara Bay, southwestern Japan

*Takashi OGAMI¹, Tadashi MARUYAMA¹, Takashi HOSOYA², Takashiro KUBO³, Oshie TAZAWA³, Kenjiro MUKAIYAMA³
(1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Chuo Kaihatsu Corporation, 3. Kawasaki Geological Engineering, Co., Ltd.)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S10-02] Active tectonics, structures and seismicity of the Tenpoku fold-and-thrust belt, northern Hokkaido

*Tatsuya ISHIYAMA¹, Makoto Matsubara² (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S10-03] Gravity anomaly in adjacent areas of the southern edge of the surface ruptures occurred during the 1896 Rikuu Earthquake

*Haruo Kimura¹, Yasuhira Aoyagi¹, Hidenobu Takahashi¹, Motoshi Tomura², Katsuya Noda² (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Geosys Inc.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S10-04] Mean displacement rate and age of the last event of northern part of the Nara-bonchi-toen faults, central Japan

*Taku KOMATSUBARA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S10-05] Earthquake-related phenomena and source fault of the 1909 Anegawa earthquake

*Naoji KOIZUMI¹, Norika Yamamura², Mamoru Nakamura³ (1. School of Environmental Science, Univ. Shiga Pref., 2. N/A, 3. Faculty of Science, Univ. of the Ryukyus)

Room D | Regular session : S10. Active faults and historical earthquakes

3:00 PM - 4:15 PM JST | 6:00 AM - 7:15 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S10] PM-2

chairperson: Ritsuko Matsu'ura (Association for the Development of Earthquake Prediction), Junzo Ohmura (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S10-06] Damage to Levees and Flooding Caused by the 1830 Kyoto Earthquake

*Junzo OHMURA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S10-07] Seismic Activity in Southern Miyagi Prefecture in the 18th Century Based on the Microfilmed Records of the Takano Family

*Sunao Urushibara¹, Yasuyuki Kano¹, Junzo Ohmura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S10-08] Examination of the Sources of the Documents Published in historical documents on earthquakes: The Earthquakes of 1579

*Kentaro HATTORI¹ (1. Kansai University)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S10-09] Isn't "Ninna earthquake" in 887, long believed to be a typical Nankai earthquake, the latest activity of the Osaka-Bay fault?

Shigehiro Fujino¹, *S. Ritsuko MATSU'URA² (1. Univ. of Tsukuba, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S10-10] An Entire Revision of the "Japanese Damaging Earthquakes List" in "Chronological Scientific Tables"

*Kazuki KOKETSU¹, Tomoya HARADA² (1. Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2. N/A)

Poster session (3rd Day) | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC | ROOM P-1 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S09P] AM-P

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-01] Analysis of seismic activity (Oct 2017-Sep 2021) beneath the Hakusan volcano.

*Masato Fukata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-02] Stress change on inland faults in Southwestern Japan due to the 1944 Tonankai and the 1946 Nankai earthquakes

*Akinori Hashima¹, Takane Hori¹, Takeshi Iinuma¹, Souta Murakami², Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-03] Tidal correlation of deep tectonic tremors rising during long-term slow slips in Bungo Channel

*Fuyuki HIROSE¹, Akio KOBAYASHI¹, Kenji MAEDA¹ (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-04] Numbers and duration of aftershocks on inland earthquakes in Japan

*Taichi Honda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-05] Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes after 2021 around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Toshihiro IGARASHI¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-06] Temporal variation of seismic attenuation around the slow-slip events area in southwestern Ibaraki prefecture

*Yosuke Ito¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-07] Earthquake swarm occurring in Noto Peninsula

*Akio Katsumata¹, Atsumoto Shima¹, Takahito Nishimiya² (1. Univ. of Toyama, 2. MRI, JMA)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-08] Temporal change in focal mechanisms of double seismic zone's events in the Pacific plate after the 2011 Tohoku EQ

*Shunsuke Kawabe¹, Toshinori Sato¹ (1. Chiba Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-09] Temporal variation in coda Q before and after the 2011 Tohoku earthquake around the Atotsugawa fault zone

*Maho Kawajiri¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-10] Steep gradient zone of seismic velocity structure at the hypocenter of offshore Iwate events on March 18, 2022

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato², Shin Koshiya³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Faculty of Science and Engineering, Iwate University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-11] Detection of low-frequency earthquakes at Mount Fuji and statistical analysis

*Kazuyoshi Z. Nanjo^{1,2,3}, Yohei Yukutake⁴, Takao Kumazawa³ (1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Univ. of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-12] Observation of shallow slow earthquake activity from December 2020 southeast off the Kii Peninsula using dense ocean bottom seismometer array.

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹ (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-13] Slow Earthquakes in the Japan Trench

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Satoshi IDE², Takuya NISHIMURA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. School of Science, Univ. of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-14] Hypocenter distribution using S-net data during 2016 April – 2022 March

*Azusa NISHIZAWA¹, Masashi Mochizuki¹, Kenji Uehira¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-15] Dependence of earthquakes happen in the northern Osaka on depth

*Ryota Ono¹, Yoshihisa Iio² (1. Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-16] **Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay**

*Yannis PANAYOTOPOULOS¹, Shintaro Abe¹, Hisatsoshi Baba², Nagisa Nakao², Takahito Nishimiya³ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai University, 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-17] Comprehensive extraction of tremor migrations in Nankai subduction zone, southwest Japan, and their characteristics

*Kodai SAGAE¹, Takahiko Uchide¹, Takanori Matsuzawa² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-18] Construction of the automatic hypocenter relocation system using the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko Shiomi¹, Makoto Matsubara¹, Shoji Sekiguchi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-19] Determination of the focal mechanism solution of swarm earthquakes in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-20] **Detectability of very low frequency earthquakes in Nankai using F-net and DONET**

*Shunsuke TAKEMURA¹, Satoru BABA², Suguru YABE³, Yusuke YAMASHITA⁴, Katsuhiko SHIOMI⁵, Takanori MATSUZAWA⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-21] Spatiotemporal distribution of shallow very-low-frequency earthquakes between January and March 2022 detected by DONET2 seismic stations

*Yojiro Yamamoto¹, Shuichiro Yada¹, Keisuke Ariyoshi¹, Masaru Nakano¹, Takane Hori¹ (1. JAMSTEC)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-22] Centroid moment tensor inversion of earthquakes in the Japan Trench subduction zone using S-net ocean bottom seismometers

*Lina Yamaya¹, Hisahiko Kubo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Shunsuke Takemura² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-23] Spatial distribution of moment magnitude anomalies in subduction zones: Comparison with seismic activity in the Kanto region

*Kazuo YOSHIMOTO¹, Takaya HASEGAWA¹ (1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University)

Poster session (3rd Day) | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-1 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S21P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-01] Automatic detection of S-wave later phase by 1D convolutional neural network*Yuta Amezawa¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-02] Event catalog development for AEs induced by hydraulic fracturing experiments in the laboratory*Makoto NAOI¹, Youqing Chen¹, Yutaro Arima² (1. Kyoto University, 2. JOGMEC)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-03] Towards Constructing a High-precision Phase picker for Volcanic Earthquakes Using Deep Learning: Performance Evaluation of Various Models*Yuji Nakamura¹, Ahyi Kim¹, Hiroki Uematsu¹, Yohei Yukutake², Yuki Abe³ (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-04] Estimation of volcanic earthquakes at Kirishima volcano using machine learning*Yohei YUKUTAKE¹, Ahyi KIM² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Yokohama City University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-05] Development of Seismic Wave Detection System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network*Yukino Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-06] Toward Efficient Pore Pressure Estimation along Plate Boundary Faults Using Deep Learning*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-07] Fault Plane Estimation from 3D Hypocenter Distribution by Two-step Clustering Considering Local Shape*Yoshihiro Sato¹, Haruo Horikawa¹, Takahiko Uchide¹, *Satoru Fukayama¹, Jun Ogata¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-08] Estimation of wave propagation direction from seismic waveforms using a deep learning model*Yuki KODERA¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-09] Towards Real-Time Seismic Intensity Prediction Using Deep Learning: Developing a Prediction Model with Relatively Little Observed Data*Momoko Nakamura¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu¹, Yukino Yazaki¹, Ahyi Kim¹, Hisahiko Kubo² (1. Yokohama City University, 2. NIED)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-10] Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning*Takashi FURUMURA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-11] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning —Part3 Simulation of response spectrum of crustal earthquake in Eastern Japan—

*TIANZENG WEI¹, KAI TERAZONO¹, HIDENORI KAWABE¹ (1. Osaka University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-12] Study on Prediction of Pseudo-velocity Response Spectrum Using Machine Learning -Part2: Response Spectrum Simulation of the 2016 Kumamoto Earthquake-

*Kai Terazono¹, Tianzeng Wei¹, Hidenori Kawabe¹ (1. Osaka University)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities : S24.Committee activities for society

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-8

[S24] S24

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

*久田 嘉章¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

*吾妻 崇¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

*新井 隆太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

*松原 誠¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

*三井 雄太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

*篠原 雅尚¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

*松島 信一¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

*中川 和之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S22P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-01] Estimation of early postseismic slip following the 2003 Tokachi-oki earthquake by assimilating high-rate GNSS data

*Masayuki KANO¹, Yuji Itoh^{2,3} (1. Tohoku University, 2. ISTerre, Université Grenoble Alpes, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-02] Evaluation for hypocenter estimation error in the Kuril trench using seismic data

*Masayoshi ICHIYANAGI¹, Hiroaki Takahashi¹, Ryosuke Azuma² (1. ISV, Hokkaido University, 2. AOB, Tohoku University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-03] Three-dimensional Vs structure in the offshore forearc region along the Japan and Kuril trenches estimated by ambient noise tomography

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-04] Difference of tsunami sources by great earthquakes that occurred in the southern Kuril trench around the 17th and 13th centuries

*Kei IOKI¹, Yuki SAWAI¹, Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-05] A preliminary study on the western source area of the tsunami that struck the Pacific coast of Hokkaido, Japan, on April 25th, 1843

*Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology (IEVG), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-06] Nonlinear and linearized propagation characteristics of the 2003 Tokachi-Oki tsunami

*Yusuke YAMANAKA¹, Yuichiro TANIOKA¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Poster session (3rd Day) | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-3 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S23P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-01] Minimum information dependence modeling for analyzing the dependence in mixed-domain data: Application to the dependence analysis of focal mechanisms and depths

*Keisuke YANO¹, Tomonari Sei² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-02] Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault

*Shin-ichi ITO¹, Masayuki KANO², Hiromichi NAGAO¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tohoku University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-1

chairperson: Osamu Sandanbata(NIED), Futoshi YAMASHITA(NIED)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S08-18] Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S08-19] Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S08-20] Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S08-21] Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD))

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S08-22] Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda²

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute

1. はじめに

プレート境界における巨大地震の発生時期や規模の予測には、プレート境界の固着状態を監視することが重要である。通常は地殻変動データが用いられるが、地震データも組み合わせた解析を行うことで、高い時空間分解能を持つ固着状態の推定が期待できる。今西・野田（2021,地震学会）は、地殻変動データから平均的なプレート間固着を推定し（基準固着）、プレート境界周辺の地震（プレート内地震）が基準固着による応力変化に調和的に発生しているか否かを判定することで、固着状態の変化を推定する手法を提案した。この手法を東北沖プレート境界に適用したところ、先行研究で報告されている本震前の固着の剥がれを始めとした様々な変動と調和的な結果が得られた。また、プレート内地震を使うため、固着が強くて日常的にプレート境界地震が少ない領域の固着状態も推定できる利点があることもわかった。本研究では、日常的にプレート境界地震の活動が極めて少ない南海トラフ沿いに本手法を適用し、年スケールの固着変化を調べた結果を報告する。

2. 手法

今西・野田（2021）の基本的な考え方は以下の通りである。

- ・ 応力場は、背景応力にプレート間固着による応力変化が加わったものと記述される。
- ・ 地殻内には様々な姿勢の既存クラックがあり、それらの多くが応力の臨界状態にある。
- ・ プレート間固着が継続する場合、固着に起因する応力変化に調和的なクラックが優先的に破壊する。
- ・ ミスフィット角（各地震の断層面のすべり角と固着に起因する応力変化から計算されるすべり角との角度差）に着目すると、固着が継続する場合はミスフィット角の小さい地震が多く発生することが期待され、逆にSSE等により固着状態からのずれが生じる場合は、その周囲でミスフィット角の大きい地震が多く発生することが期待される。

以上の考えを元に、実際の解析手順は以下の通りである。

（1）地殻変動データから基準固着を推定し、基準固着により周辺域に作り出される応力テンソルを水平方向に0.1°間隔、深さ方向に5km間隔で計算する。

（2）それぞれの地震の震源位置に最も近い位置の応力テンソルを用いて、ミスフィット角を計算する。この際、メカニズム解の2つの節面のうち、小さい方のミスフィット角を採用する。

（3）空間方向に0.2°間隔、時間方向には目的に応じた間隔のグリッドを設定する。グリッドを中心とした半径75km以内の地震を抽出し、ミスフィット角の平均値を計算することで、プレート間固着状態の変動を可視化する。

3. データ

メカニズム解は、防災科学技術研究所のF-net解（1997年1月～2022年6月）を使用した。代表的なプレート境界地震のメカニズム解に対するKagan角を元にプレート境界型の地震を除去し、プレート内地震のカタログを作成した。基準固着に関しては、2005年3月～2011年2月のGNSSデータを用いて推定したNoda et al.(2018) のモデルを使用した。2009～2010年に発生した豊後水道SSEによる影響はデータから除去されている。また、この期間はその他に顕著な長期的SSEが発生しておらず、また東北沖地震の影響も受けていないことから、南海トラフ沿いの平均的な固着状態を表していると考えられる。

4. 結果と解釈

全期間のミスフィット角の空間分布をみると、1944年東南海地震及び1946年南海地震で大きくすべった領域で小さい値を示している。これは、過去の大すべり域の固着が少なくとも25年間にわたり継続していると解釈できる。次に、時間方向のグリッド間隔を10か月に設定し、年スケールの変動を調べた。時間的にも空間的にも変動する様子が伺えるが、最近の数年間に着目すると、日向灘周辺のミスフィット角も小さい値を示すようになっている。現在は、南海トラフ沿いの広い範囲で固着が継続していることが示唆される。

ミスフィット角が大きくなる要因の一つとして、SSEの寄与が考えられる。長期的SSEが報告されている東海、紀伊水道、豊後水道に着目すると、長期的SSEの発生に同期してミスフィット角が大きくなる傾向が確認できた。東海地域を例に挙げると、2000年頃のミスフィット角の平均値は30度程度であったのが、5年後には120度程まで上昇し、その後再び30度程度まで低下した。これは2000年秋～2005年夏頃の東海SSEの発生時期と重なっており、本手法がうまく機能していることを示している。時間変動の特徴をさらに詳しく見ると、1年から数年の周期的な変動が含まれることが確認できる。この変動は短期的SSEの発生時期に対応している可能性があり、より小さな地震のメカニズム解を用いた精密解析による検証が必要である。

謝辞：防災科学技術研究所のF-netカタログ、国土地理院のGEONET F3解を使用しました。

Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO²

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

相模トラフ沿いプレート境界では、過去に1703年元禄関東地震（M8.1）、1923年大正関東地震（M7.9）が発生して関東地域に甚大な被害をもたらした。地震時の鉛直変位や津波浸水域の観測記録から、これら2地震の震源域は同一ではないことが分かっている（Matsuda et al., 1978）。測地データ解析による大正地震の震源モデル（Matsu'ura et al., 2007）、旧汀線データ解析による元禄地震の震源モデル（Sato et al., 2016）、そしてGNSS変位速度データ解析による地震間のすべり遅れ速度分布（Noda et al., 2013）の比較から、相模トラフ沿いプレート境界には3つの破壊領域があり、元禄地震と大正地震は異なる2つの領域の組合せで破壊が生じたものと推測される。このような複雑な環境下で発生する地震は、元禄地震型・大正地震型の2種類だけだろうか？これまで経験のない大規模／小規模なプレート境界地震が発生する可能性はあるだろうか？これらの問いに答えるためには、地震発生の根本的原因であるプレート境界への応力蓄積を明らかにし、地震発生サイクルの力学モデルを構築する必要がある。そのため本研究では、Saito and Noda (2022) による力学的カップリング推定手法を関東地域に適用し、相模トラフ沿いプレート境界の地震間の応力蓄積速度の推定を試みた。

力学的カップリング推定手法では、地震間の地表の変位速度とプレート間すべり遅れ速度の線形関係、プレート間すべり遅れ速度と応力蓄積速度の線形関係を結合することにより、地表の変位速度の観測データからせん断応力蓄積速度（以降「応力蓄積速度」と呼ぶ）を直接インバージョン推定する。本研究では応力蓄積速度をガウス分布型の基底関数の重ね合わせで表現し、重ね合わせの係数を未知パラメータとして推定した。この際、非負の条件を課したダンピング最小二乗法を用いたが、これは（1）岩石の強度は有限であることから極端な応力集中を避ける、（2）地震間は基本的に応力蓄積する、という2つの拘束条件を課したインバージョンを意味する。従来のすべり遅れ速度のインバージョン解析では（1）の物理学的要請に基づいてすべりの滑らかさの拘束条件を課することが一般的である。本手法では、応力蓄積速度を直接的に拘束することができるため、より合理的で柔軟な条件設定が可能となる。

関東地域の2005年3月～2011年2月のGEONET時系列データから求めたGNSS変位速度ベクトルデータを解析した。データ期間内の2007年に房総半島沖で発生したスロースリップの影響を予め除去したため、推定された応力蓄積速度はスロースリップが発生していない状態を表している。プレート境界の深さ10kmの等深度線に沿って大きく3つの応力蓄積領域（アスペリティ）が存在し、そのうちの西側2つは大正地震、東側2つは元禄地震の震源域に対応していることが分かった。これらはプレート境界の高摩擦領域に対応しており、いずれ蓄積した応力を解放する大地震が発生すると考えられる。この結果は、当該領域で過去2種類の異なる地震イベント（元禄地震、大正地震）が発生した原因が、3つのアスペリティの連動の多様性にあることを示唆する。一方、変位速度データの分布範囲外は推定精度が落ちる傾向にあり、推定されたアスペリティの妥当性について、感度解析により慎重に評価する必要がある。今後、本研究の推定結果に基づいてプレート境界の応力蓄積モデルを構築し、断層破壊の力学と組み合わせることで、相模トラフ沿いで発生する多様なプレート境界地震のシナリオ作成に活用することが期待できる。

参考文献

Matsuda et al. (1978). GSA Bulletin, doi:10.1130/0016-7606(1978)89<1610:FMARTO>2.0.CO;2
Matsu'ura et al. (2007). GJI, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03578.x
Noda et al. (2013). GJI, doi:10.1093/gji/ggs129

Saito and Noda (2022). JGR: Solid Earth, doi:10.1029/2022JB023992

Sato et al. (2016). EPS, doi: 10.1186/s40623-016-0395-3

Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino²

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

2011年東北地方太平洋沖地震（東北地震）では、宮城沖のプレート境界浅部において50 mを超える大すべりが生じた (Kodaira et al. 2012; Sun et al. 2017). 従来、プレート境界浅部は安定すべり領域のために地震すべりを起こさないと考えられていた (Scholtz 1998; Lay et al. 2012) にもかかわらずこのような大きなすべりが生じたため、その原因がこれまで広く考察されてきた。たとえば、地震時のすべり速度の増加に伴ってプレート境界浅部が動的に不安定すべり領域に遷移したり摩擦強度が著しく低下した説 (e.g., Noda & Lapusta 2013; Hirono et al. 2016) が提唱された。一方で、地震時の浅部の急激な摩擦弱화를積極的に支持しない報告事例もある。たとえば、地震後の掘削調査からは浅部断層を構成する鉱物の摩擦強度はそもそも低いことが明らかとなり (Ujiie et al., 2013), その鉱物試料を用いた摩擦実験では摩擦強度のすべり速度依存性が見られなかった (Remitti et al. 2015). このように、東北地震で浅部大すべりのメカニズムの決定的な答えは得られていない。この浅部の大すべり原因を明らかにすることは、巨大地震の津波発生メカニズムの理解には不可欠である。久保田・齊藤 (2021SSJ) では、震源直上の水圧計による津波波形を用いて東北地震の断層モデルを推定した。本研究では、さらに海陸の地殻変動観測データを加えて断層モデルをアップデートし、その結果をもとに東北地震の浅部すべりの原因を議論する。

津波と測地データを用いたインバージョン解析により得られた断層モデルからは、宮城沖の領域に海溝軸まで進展する大すべりが推定され、最大すべり量は海溝軸ごく近傍において約53 mとなった (Fig. 1a). 一方で、すべり分布に基づいて断層面上でのせん断応力変化 (応力降下) を計算したところ、海溝軸の付近では応力降下は小さく ($\ll 3$ MPa), 深部側の震源近傍に大きな応力降下 (> 5 MPa) が得られた (Fig. 1b). この応力降下の分布は、浅部大すべりを伴った東北地震の原動力となった歪みエネルギーの蓄積は、大すべりを起こした浅部ではなく、深部のプレート間の力学的固着が担っていたことを示唆する。

本解析結果は、浅部のプレート境界で応力を解放せずとも浅部大すべりを引き起こすことができることを意味する。これは一見すると矛盾しているようにも見えるが、深部での強いプレート間固着および地表の影響を考えれば合理的に解釈される。東北地震が起こる前の地震間プロセスでは、プレート境界深部の力学的固着が浅部側の沈み込みを押し留め、浅部にすべり遅れを生じさせる (Fig. 1, e.g., Lindsey et al. 2021). この深部固着による浅部すべり遅れが、東北地震において浅部が大きくすべったそもそもの要因であると解釈できる。この考えは、東北地震前から考えられてきた、浅部は安定すべり域で応力を蓄積しないとする考え (Scholtz, 1998) と調和的である。

本解析における応力降下の計算では、半無限均質媒質における理論解 (Meade, 2007) を使用した。しかし、本来、地殻構造、とくに海溝軸の周辺は構造の不均質性が大きく、これが応力降下の推定に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、2次元の鉛直断面における有限要素法に基づく計算により、構造の不均質性が応力変化にどれほど影響しうるか評価した。宮城沖での構造探査測線 (Miura et al. 2005) に沿った鉛直断面を仮定し、有限要素計算にはPylithソフトウェア 3.0.1 (Aagaard et al. 2022) を使用した。本解析で得られたすべり分布のうち、同じ測線に沿ったすべりを入力とした。計算の結果、海溝軸近傍の領域 ($z < 10$ km) においては、構造探査をもとにした速度構造を用いて計算した応力変化は、均質構造を用いて計算された応力変化の3-4割程度となった。これは海溝周辺に存在する付加体ウェッジの剛性率が低いことが主な原因である。地殻構造の不均質性を考慮すると、プレート浅部での応力降下はさらに小さくなると見積もられる。

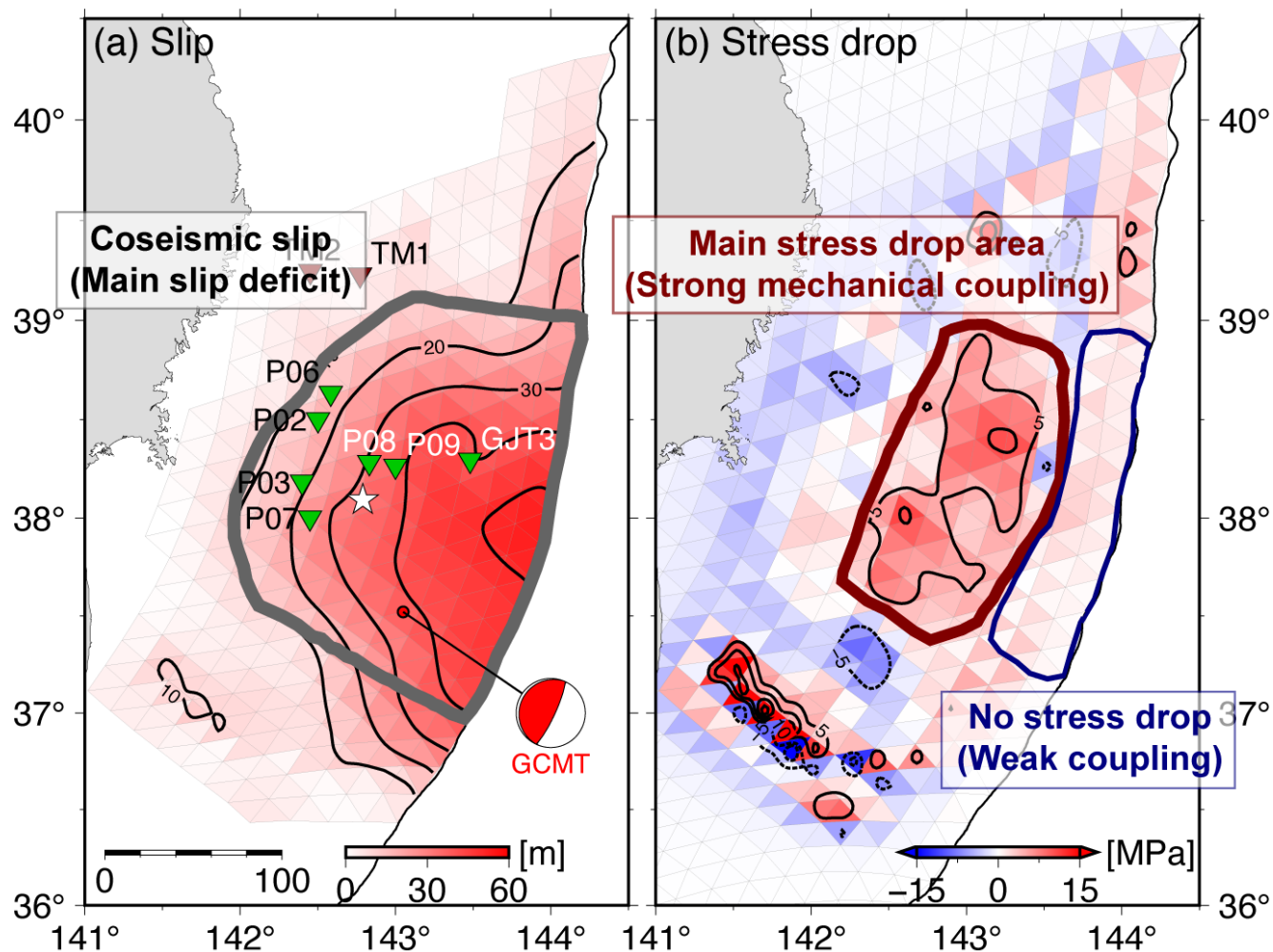


Figure 1. (a) 本研究により推定されたすべり分布 (赤色) および対応する地震間プロセスにおける主なすべり欠損域 (灰色太線). (b) すべり分布より得られた応力降下分布および地震間プロセスにおけるプレート間力学的固着領域 (濃赤色太線).

Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD)

近年、複数の海底カルデラ火山において「トラップドア断層破壊」と呼ばれる火山現象が、M5規模の火山性地震とともに津波を繰り返し引き起こすことが明らかになってきた (Sandanbata et al., 2022など)。この種の現象は、カルデラ地下に蓄積して高圧化したマグマが作る地殻内応力場によって、カルデラ内部の環状断層が地震性すべりを起こすことによって発生すると考えられる。

本研究では、トラップドア断層破壊の静的力学モデルの計算手法を提案する。ここではトラップドア断層破壊を、高圧マグマが作り出す地殻内応力場を駆動力として、「環状断層での傾斜すべり」、「マグマに満たされた水平クラックの開口/閉塞」、「水平クラックの体積変化に伴うマグマ圧力変化」の三つのプロセスが同時に発生する現象としてモデル化を行う。これらのプロセスによる環状断層における剪断応力降下と、水平クラック壁における法線応力・マグマ圧力間の力学的つりあいを境界条件として境界要素法を解き、トラップドア断層破壊の静的力学モデルを計算する。この静的力学モデルを用いることで、地震前後でのマグマ圧力・地殻内応力場の変化や、地震前のマグマ圧力と地震規模の定量関係を調べることが可能となる。

上記の静的力学モデルを、2008年6月12日に伊豆小笠原諸島・北硫黄島近海の海底カルデラ（以降、「北硫黄島カルデラ」と呼ぶ）で発生した、トラップドア断層破壊と見られるMw 5.3の火山性地震・津波イベントに適用する。このイベントに伴う津波・地震波の波形記録と、上記の静的力学モデルを用いて計算した津波・地震波の波形を突き合わせることで、北硫黄島カルデラにおけるトラップドア断層破壊の静的力学モデルを構築した。その結果、約10–20 MPaのマグマ圧力の増加によって環状断層に応力が蓄積され、その剪断応力を解消するように発生する約5–8 mの傾斜すべりを伴うトラップドア断層破壊モデルがイベント記録をよく説明した。またこのモデルから推定されるマグマ減圧量は< 5 MPa程度で、断層破壊発生後もマグマの圧力状態は依然としてある程度高い状態に保たれることが示された。

本研究のアプローチのように、トラップドア断層破壊の力学を調べることは、構造性地震と異なる発生機構を持つカルデラ火山特有の地震現象の発生機構の理解に繋がる。さらに、定量的観測が困難な火山地下の応力場環境やマグマだまり内に蓄積したマグマ圧力状態を推定することができ、新たな火山モニタリング手法としての可能性を有している。

Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

2014年に南アフリカ Orkney 近郊の Moab Khotsonk 金鉱山の深部にて M5.5 の地震が発生した（以下、Orkney 地震）。この地震の震源は深度 4.7 ± 1.2 km に位置し (Midzi et al., 2015), 余震発生域は主に 3.5–7 km に分布していた (Ogasawara et al., 2019)。国際科学陸上掘削計画 (ICDP) の “Drilling into Seismogenic zones of M2.0 to M5.5 earthquakes in deep South African Gold Mines (DSeis)” プロジェクトにより、Moab Khotsonk 金鉱山の地表深度 2.9 km の坑道から掘削調査が実施され、3つの掘削孔からコア試料が回収された。中でも、長さ約 700 m に渡って掘削された Hole B の地表深度約 3.3 km では、2014年の余震発生域と交差し、現地オンサイトチームによって、断層角礫岩を主としたコア試料の回収に成功した (Ogasawara et al., 2019)。

本研究では、Hole B コアの 50 試料において、粉末 X 線回折 (XRD) 分析による構成鉱物の同定、密度・空隙率および帯磁率の測定を実施した。また、各岩相から計13試料を選定し、蛍光X線分析による主要元素の濃度分析と室内摩擦実験装置による摩擦係数の計測および滑り安定性 (a-b) の評価を実施した。

鉱物学的・化学的分析の結果、断層帯とその周囲の貫入岩では、周囲の岩相と比較して、角閃石、黒雲母、方解石、および滑石の含有率が高い。また、鉄 (Fe_2O_3)、マグネシウム (MgO)、およびカルシウム (CaO) の濃度が高く、ケイ素 (SiO_2)、アルミニウム (Al_2O_3)、およびナトリウム (Na_2O) の濃度は相対的に低い。室内摩擦実験の結果、それらの摩擦係数は相対的に低く、a-b 値は正であった。また、一部の試料では高い帯磁率を示した。断層帯を内包する貫入岩の鉱物・元素組成より、貫入岩はランプロファイアと推測される。また、その鉱物学的・化学的特徴より、著しい変質を受けていると考えられる。また、断層試料の低い摩擦係数は、30 wt.%に達する高い滑石の含有量に起因するかもしれない。しかし、a-b 値は正であり、安定滑りの特徴に相当する。これは観測事実である余震発生と矛盾する。但し、断層の他の主要構成鉱物である角閃石のa-b 値は正負両方の値を示し (Fagereng and Ikari, 2020)、黒雲母は負 (Scruggs and Tullis, 1998)、方解石は正を示す (Carpenter et al., 2016)。すなわち、これら4種の各鉱物が有する摩擦滑り安定性が複雑に作用した結果、断層全体として複雑な摩擦挙動の傾向を示しているかもしれない。同時に、断層帯とその周囲の貫入岩における鉱物の量比のばらつきは大きいため、断層強度や滑り安定性における空間的な不均一性が存在するかもしれない。以上のような複雑な断層帯の物質科学的特徴が、Orkney 地震やそれに引き続く余震の発生およびそれらの震源分布に強く影響を与えているだろう (Miyamoto et al., 2022, GRL)。

【引用文献】

Carpenter et al., 2016, *Geophys. J. Int.*

Fagereng and Ikari, 2020, *J. Geophys. Res., Solid Earth*.

Midzi et al., 2015, *J. Seismol.*

Miyamoto et al., 2022, *Geophys. Res. Lett.*, 49, doi: 10.1029/2022GL098745.

Ogasawara et al., 2019, Proc. of the ninth international conference on deep and high stress mining.

Scruggs and Tullis, 1998, *Tectonophysics*.

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Hiroyuki NODA (Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute), Sumire MAEDA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S08-23] Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co., Ltd.)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S08-24] Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S08-25] Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

*Futoshi YAMASHITA¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S08-26] Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-27] Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹ (1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³

1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co.,Ltd.

大型岩石試料を用いた摩擦実験を行うことで、模擬断層面での震源核の広がりやその後の高速な破壊伝播を再現することが可能となるが、それらを詳細に観察するためには断層面近傍でのひずみの多点計測が必要である。しかし、ひずみゲージ毎に配線が必要であるため、その取り回しが計測点数の制約となる。本研究ではそのような状況を改善するために、光ファイバーを用いたひずみ計測手法であるFiber Bragg Grating (FBG)センサーに着目し、断層面近傍のひずみ変化を空間的に密に計測することを目的とした岩石試料のひずみ計測実験を行った。

FBGセンサーは、光ファイバーケーブルのコアの一部に長さ4-8mmに渡って回折格子(FBGゲージ)をあらかじめ加工し、その伸縮に伴う反射光スペクトルの波長変化を測定することでFBGゲージを貼り付けた部分の軸ひずみを計測する。FBGセンサーを用いたひずみ計測では、1本の光ファイバーに格子間隔の異なるFBGゲージを複数点加工し、それぞれの反射スペクトルをモニタリングすることで多点のひずみを同時計測することが可能である。さらに、インテロゲーターとよばれる波長変化を測定する装置の中には、複数本の光ファイバーを同時に使用できるものもある。近年地震波観測に応用されつつあるDistributed Acoustic Sensing(DAS)との違いは、FBGセンサーは光ファイバーにあらかじめFBGゲージを加工する必要がある一方で、DASよりも高い空間分解能(DAS: >1m, FBG > 10mm)を有している点が挙げられ、室内実験スケールではFBGセンサーの方が用途に適しているといえる。

本実験では、防災科学技術研究所が所有する4m大型二軸岩石摩擦試験機を用いてスティックスリップ実験(垂直応力6MPa)を行い、断層近傍の準静的なひずみ蓄積や動的なひずみ変化を計測した。FBGセンサーは一本の光ファイバーに合計20点、1点の長さ4mmのFBGゲージ(DTG-LBL-1550, ベルギーFBGSインターナショナル社製)を120mm間隔で加工し、下側岩石試料側面の模擬断層面直下2mmに一般的なシアノアクリレート系瞬間接着剤を用いて貼り付けた。FBGゲージは模擬断層に対して平行に貼り付け、断層面に平行な軸ひずみ(ε_{xx})を測定した。インテロゲーターは、計測分解能 $<1\mu\varepsilon$ 、サンプリング周波数1kHzの性能を有し、20点のFBGセンサーを同時に計測できる波長帯域(1460nm-1620nm)を持つsi255(米国Luna社製)を用いた。また、FBGセンサーによるひずみ計測値の比較対象として、断層面を挟んで断層面直上10mmの上側岩石試料側面に取り付けられた半導体ひずみゲージを用いた。光ファイバーの径が非常に小さい($\sim 0.2\text{mm}$)ことを活かしてFBGセンサーを断層面の極近傍に貼り付けたことにより、スティックスリップ時に半導体ひずみゲージの計測値($\sim 5\mu\varepsilon$)よりも大きなひずみ変化($\sim 15\mu\varepsilon$)を計測することができた。また、20点のうちひずみ変化を明瞭に計測できた数点については、半導体ひずみゲージとFBGセンサーの間で断層破壊の圧縮側・引張側に対応する対称性を確認できた。また、スティックスリップ実験で特徴的である準静的なひずみ蓄積に関してもFBGセンサーを用いて計測することができた。

一方で、断層面からの距離の違いと対称性を考慮に入れても、断層破壊時のFBGセンサーと半導体ひずみゲージによるひずみ変化の違いを定量的に説明することはできなかった。これは本実験における動的すべりが単純なモデルで説明できるものではなかったことによると考えられる。また、震源核の成長過程や破壊伝播速度を計測するためには、より高いサンプリング周波数が必要であることも明らかとなった。20点のFBGゲージのうち3点は接着不良により反射スペクトルの波長変化が計測できなかったことから、岩石試料への接着方法も改善する必要があることが分かった。本発表では、FBGセンサーを用いたひずみ計測結果の解析に加え、インテロゲーター内のガスセルを用いた波長校正に起因するランダムノイズの除去方法についても議論する。

今後、一本の光ファイバーで複数点のひずみを同時に計測可能であるという利点を活かし、半導体ひずみゲージよりも多点かつ断層により近いひずみ計測を実現することで、震源核の成長過程や破壊伝播様式の解明に貢献できると期待される。

Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}

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

断層の摩擦特性を明らかにすることは地震の発生機構を理解する上で重要であるため、岩石摩擦特性に関する室内実験研究が盛んに行われてきた。特に、様々な岩石が断層の不安定すべりを引き起こす速度弱化（摩擦係数がすべり速度の増加とともに低下する傾向）の性質を持つことがこれまでに示されている（e.g., Di Toro et al., 2011）。一方、近年の観測学的研究により通常の地震よりもはるかに遅いすべり速度で準安定的に断層がすべるスロー地震が様々な地域で発生していることが確認されており、またすべり速度の異なる現象が近接した、もしくは同一の断層構造で発生していることが先行研究により指摘されている（e.g., Ito et al., 2013; Yokota & Ishikawa, 2020; Fukao et al., 2021）。このような速度・時間スケールの異なるすべり現象を生じさせる断層の摩擦特性を明らかにすることは、多様な地震発生形態を理解するうえで重要である。さらに、摩耗物の生成や剪断に伴う断層面の状態も摩擦特性と密接な関係がある（e.g., Hirose et al., 2012; Verberne et al., 2014）。したがって、本研究では、広範囲なすべり速度帯における摩擦特性、摩耗特性および断層面の状態について明らかにすることを目的とし、地殻の主要構成鉱物である石英を多く含む石英系砂岩を対象とした剪断摩擦実験を行い、得られたデータを解析した。

実験には防災科学技術研究所に設置された回転剪断摩擦試験機を用いた。岩石試料は既存弱面の影響が少なくと考えられるインド産の石英系砂岩を使用した。実験条件はすべり速度 10^{-3} – 10^{-1} m/s、垂直応力は0.5, 1.0, 1.5 MPaの3通り、すべり距離は約200–300 mの条件で合計45回の実験を行った。また、赤外放射温度計（KEYENCE IT2-02, IT2-50）を用いて実験中の断層面近傍の温度を連続的に計測した。摩耗率を推定するために、実験後に生成された摩耗物を全て収集し、その質量を計測した。本研究では、様々な垂直応力およびすべり速度での実験結果を比較するために、垂直応力とすべり速度の積で表される入力仕事率[W/m²]を導入し、摩擦特性、摩耗特性および断層面の状態を調査した。剪断応力とすべり速度の積で求まる摩擦力の仕事率は摩擦特性と密接に結びついている（Di Toro et al., 2011）一方で、すべり量に応じて非定常的に変化するため異なる実験条件間の比較指標として扱いづらいことから（前田・他, 2022, JpGU）、本研究では実験条件ごとに定常的な入力仕事率を基準とした。

実験の結果、入力仕事率が0.06 MW/m²を境に摩擦特性、摩耗特性、断層面の状態が大きく変わることが明らかとなった。平均剪断応力と垂直応力の比によって求まる摩擦係数は0.06 MW/m²以下では速度弱化特性を示したのに対し、0.06 MW/m²以上では速度強化特性に転じることがわかった。摩耗率（一実験中の摩擦力による総仕事量に対する収集された摩耗物の質量）は0.06 MW/m²以下では摩耗物がほとんど生成されないため入力仕事率によらずゼロに近い値であったのに対し、0.06 MW/m²以上では入力仕事率に対して正の相関を示した。断層面の状態は0.06 MW/m²以下では光を反射する面（鏡面）が形成されるのに対し、0.06 MW/m²以上では鏡面の破壊が始まり、入力仕事率が0.1 MW/m²以上になると再び鏡面の形成が始まることが確認された。剪断面近傍の温度を調べた結果、0.06 MW/m²以上では最高温度が100℃を超えていたことが判明した。上記の結果から、石英系砂岩内の断層にすべりが生じた場合、そのすべり速度と垂直応力の増加に伴い摩擦特性、摩耗特性、断層面の状態がある閾値を境に大きく変わることが予想される。特に摩擦特性の調査結果は、石英系砂岩内の断層が安定すべりから不安定すべりに遷移する過程ですべり速度の増加に伴う速度強化特性が生じた場合に、そのすべりの成長を抑制し、スロー地震の一因となる可能性を示唆している。

Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

*Futoshi YAMASHITA¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}

1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.

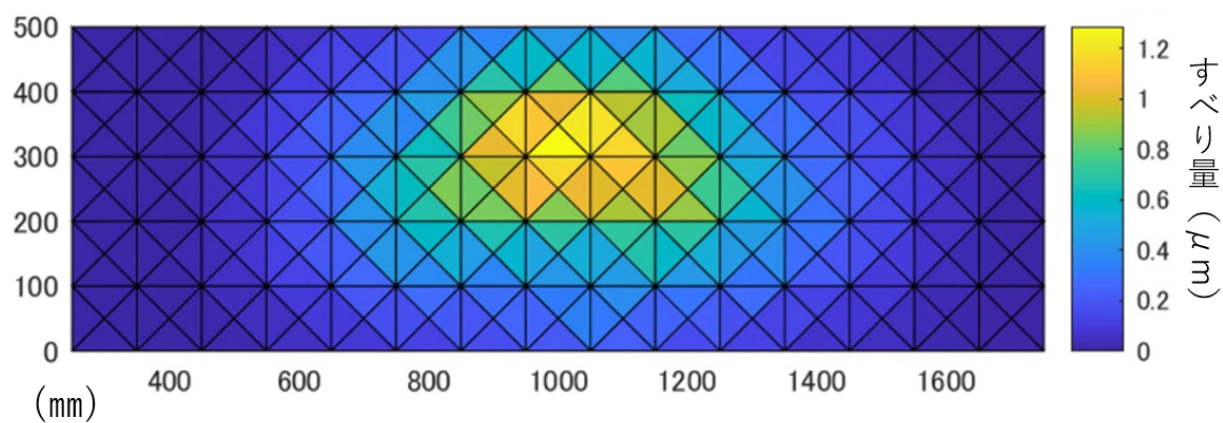
岩石の摩擦特性が断層スケールに依存するか否かは極めて重要な研究テーマである一方、確認する手段が限られていることから、未だその真偽は明らかとはならない。そのため、山下他（2021, 地震学会；2022, JpGU）は変はんれい岩の粉末粒子を模擬ガウジ（平均粒径12 μm , 最大粒径75 μm ）として用い、メートルとセンチメートルの二つの断層スケールにおいて可能な限り近い条件下での摩擦実験を実施して、スケール間で摩擦特性に違いがないかを調べてきた。メートルスケール実験（下田他, 2020, 地震学会）に使用した試験機は防災科学技術研究所が所有する大型二軸摩擦試験機（断層面積: 1.5 m $\times$ 0.1 m）、センチメートルスケール実験で使用した試験機は電力中央研究所が所有する二軸摩擦試験機（断層面積: 10 cm $\times$ 5 cm）である（Mizoguchi et al., 2021, EPS）。調査の結果の一つとして、速度ステップ変化に対する応答から見積もられた速度-状態依存摩擦則（rate- and state-dependent friction law, 以下RSF則）の摩擦パラメタのうち、 a および b に関しては二つのスケール間で有意な差は見られなかったが、 D_c に関してはセンチメートルスケール実験で得られた $9.9 \pm 4.9 \mu\text{m}$ に対し、メートルスケール実験では $23.9 \pm 10.2 \mu\text{m}$ と倍以上の大きさが見積もられた。ガウジの D_c はガウジ層の厚さに依存することが知られているが（e.g. Marone and Kilgore, 1993, Nature）、どちらの実験でも初期の層厚は3 mmと共通であるため、それが差の原因ではない。また、ガウジの D_c はせん断変形の集中により実験中の総変位量の増加に伴って減少する性質が示されている（e.g. Marone and Kilgore, 1993, Nature; Scuderi et al., 2017, Geology）が、メートルスケール実験で D_c が推定された際の変位量はセンチメートルスケール実験に比べ大きかったことから、この変位量依存性でもスケール間の D_c の違いを説明できない。一方、メートルスケール実験では、速度ステップ変化実験に加え、一定速度での摩擦実験も実施されており、特定の条件では、既往研究（e.g. Leeman et al., 2016, Nature Communications; Scuderi et al., 2017, Geology）で見られたような安定すべりから最大すべり速度の小さいスティックスリップ（以下、スロースティックスリップと呼ぶ）に遷移する現象が確認されている（山下他, 2020, 地震学会）。そこで、このスロースティックスリップを数値実験によって再現し、摩擦パラメタを制約できるかの調査をおこなった。再現においては、Urata et al. (2017, PAGEOPH) を参考に、1自由度のバネ-スライダ系において、断層面の摩擦すべりがRSF則のSlip law (Ruina, 1983, JGR) に従うものとして計算をおこなった。メートルスケール実験でスロースティックスリップの発生が確認されたのは、垂直応力が1.3 MPaもしくは2.7 MPaで載荷速度が10, 15, 30 mm/sの条件下である。一方、垂直応力2.7 MPa, 載荷速度5 mm/sでは明瞭なスロースティックスリップは発生しなかった。摩擦パラメタとしてメートルスケールの速度ステップ変化実験で推定された $a=0.004156$, $b=0.004983$ を仮定し、上記の7つの実験条件での摩擦すべり応答を計算した。7つの実験中に観察されたせん断荷重変化の最大振幅と、同条件で計算されたせん断荷重変化の最大振幅とが最も近くなる D_c を探索したところ、6 μm という値が得られた。この値は速度ステップ変化実験から推定された D_c に比べ有意に小さく、最大振幅を再現するには最適な一方、すべり初めの安定すべりを再現することはできない。安定すべりを再現するにはより大きな D_c が必要であるため、 D_c がすべりに伴って23.9 μm から6 μm に徐々に変化すると仮定して計算したところ、安定すべりからスロースティックスリップへの遷移についても再現できた。ただし、初期の D_c が23.9 μm である必要はなく、値を確定することはできなかった。また、ここでは摩擦パラメタ a 及び b の変位量に伴う変化も考慮していない。以上の通り、速度ステップ変化実験で推定された摩擦パラメタの a 及び b に基づき、実験で観察されたスロースティックスリップの基礎的な挙動を再現することはできたが、各パラメタを制約するには至らなかった。今後、メートルスケール実験後に採取されたガウジ層の微細構造観察や断層沿いに設置されたひずみゲージデータの解析をおこなひ、摩擦パラメタのスケール依存性に関し総合的に調査を進めていく予定である。

Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹

1. Kyoto University

近年、シェールオイルガス採掘や高温岩体地熱発電などに伴う地下注水などにより、誘発地震の発生が問題となっており、その破壊伝播メカニズムを解明により、誘発地震発生リスクの軽減に資する必要がある。断層面上のすべりの時空間分布や岩石の摩擦構成則を推定し、誘発地震の発生過程を推定することは重要である。室内実験においてさえ、断層面付近の歪み分布を計測する事は可能であるが2次元断層面上のすべり分布を直接測定する事は困難である。本研究では、大型岩石摩擦実験によりFukuyama et al. (2018, Tectonophysics)によって得られた断層面近傍のせん断歪みのアレーデータを用いて、断層面上の摩擦パラメータとすべりの時空間分布の推定を行った。野田・福山(2022, JpGU)は、境界積分方程式法を用いた平面断層の動的破壊伝播の計算手法(Hok and Fukuyama, 2011, GJI)により数値実験をおこなった。この計算手法では断層面を三角形要素に分割しその要素上ですべり速度が一定と仮定し断層面全体のすべり速度、せん断応力を計算する。摩擦構成則は線形すべり弱化摩擦構成則(Ida, 1972, JGR; Andrews, 1976, JGR)を用い、静摩擦力、動摩擦力、すべり弱化距離をパラメータとした。一定速度で伝播する正規化Yoffe関数(Tinti et al., 2005, BSSA)を用いて真のすべり分布を作成し、Hok and Fukuyama (2011)のプログラムを用いて剪断応力の時空間分布データを作成し疑似測定データとした。Hok and Fukuyama(2011)のプログラムを用い摩擦パラメータを変化させながら疑似入力データを再現する摩擦パラメータを求め、その際計算されたすべり分布と真のすべり分布を比較した。実験の結果、すべり開始位置から近い位置ですべり量、せん断応力分布を精度良く求めることが出来たものの、破壊開始点から遠ざかるにつれて誤差が大きくなり、摩擦パラメータの空間的不均質性の導入が必要なことがわかった。Fukuyama et al. (2018)によって得られた、大型岩石摩擦実験の際の断層面直下で測定されたせん断歪アレーデータに対して、野田・福山(2022)の手法を適用し、摩擦パラメータとすべり分布の推定を試みた。実際の測定点は数値実験とは異なりまばらであるので、せん断歪のデータをcubic splineで内挿し、ひずみアレーの外側のデータはひずみアレー端の値と同じと仮定して外挿した。垂直応力は断層面上で一定の1.3MPaとした。また、初期破壊域は、数値実験結果を参考に直径20 cmの領域とした。本研究において対象としたイベントは、Fukuyama et al. (2018)においてType 2と区分された、断層内部から破壊が始まるイベントである。イベント発生直前の応力が静止摩擦力とほぼ等しく、イベント発生後の応力が動摩擦力に近い値になっていると考え、摩擦構成則を設定した。すべり弱化距離は試行錯誤的に与えた。最適なパラメータの評価は、測定点におけるせん断歪の時間変化の測定値と推定値の2乗残差を誤差関数として設定し、誤差関数が最小となる摩擦パラメータとその時の滑り分布を最終解とした。本発表において最終的に求められた摩擦パラメータ及びすべり分布を紹介する予定である。



図：すべり弱化距離10 μm の時の破壊開始0.04秒後のすべり分布

Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹

1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute

Yamashita et al (2015) は長さ 1.5 m の岩石試料の摩擦実験と直径 4 cm の試料の回転剪断試験の比較を行い、後者では 0.1 m/s 程度で発生する所謂「高速摩擦」の急激な速度弱화가、前者では 1 cm/s 程度で発生する事を報告した。彼らはこの原因として、断層面の形状の不均質に起因する垂直応力の不均質と、それに伴う摩擦仕事（発熱）の集中を挙げている。本研究では摩擦発熱による温度上昇と熱弾性効果に注目し、垂直応力の不均質が摩擦滑り中にどのように時間発展するかを考察した。

無限媒質における非連成熱弾性（熱伝導率： β 、変位固定時の圧力上昇／温度上昇： α ）を考え、簡単の為に 2 次元の面内問題を考える。断層面を模した平面状の発熱体を考えると、断層面での垂直応力の変化を過去の摩擦発熱の時空間分布とグリーン関数の畳み込みで表現することができる。グリーン関数には Xiao et al. (2021) による時空間的に集中した熱源に対する解析解を使用した。これに断層方向のフーリエ変換を施し空間一様の滑り速度 V と一定の摩擦係数 f を仮定すると、ある角波数 k の垂直応力擾乱 $\Delta\sigma$ を自身の過去の履歴と積分核との時間畳み込みで表現することができる。この積分方程式には低速 $V < V_{cr}$ において初期値 σ_0 と同符号の定常解が存在し、 $V_{cr} = \gamma \beta |k| / \alpha f$ 、 $\Delta\sigma = \sigma_0 V / (V_{cr} - V)$ と表すことができる。ここで γ は Poisson 比 ν の関数で $\gamma = 4(1-\nu)/(1-2\nu)$ である。高速 $V \geq V_{cr}$ では定常解は初期値と符号が異なるため、「高垂直応力部で発熱と熱膨張が顕著になる」なる直観に反する。

上述の系について、時刻 $t=0$ に摩擦滑りを開始する場合の挙動を、境界積分法方程式法およびメモリー変数法 (Noda, 2022) を用いて数値的に解析した。低速 $V < V_{cr}$ では、 $\Delta\sigma$ は定常解に漸近するのに対し、 $V = V_{cr}$ では時間に対して線形に、 $V \geq V_{cr}$ では時間に対して指数関数的に際限なく増大する結果が得られた。定常状態の $\Delta\sigma$ は初期値 σ_0 に比例するため、摩擦実験試料の平面加工の精度を上げることによって垂直応力不均質の影響を少なくすることが可能である。しかし定常解に漸近しない $V/V_{cr} = \alpha f V / \gamma \beta |k| \geq 1$ の場合は、理想的な平面を作成するのは不可能であるので、垂直応力不均質の振幅はどこまでも大きくなり、最終的には摩擦発熱の面内での局所化やそれに伴う巨視的な弱化に至る事となる。

斑レイ岩の物性値 (Schön, 1996) を用いた場合、 $k = 2\pi/(1 \text{ cm})$ では $V_{cr} = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、 $k = 2\pi/(1 \text{ m})$ では $V_{cr} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ となる。これらの滑り速度は室内実験に用いる速度レンジ内にあり、これまでの摩擦実験中で熱弾性の影響が重要である可能性を示唆している。摩擦実験試料のサイズを超える波長の擾乱は試料中に発生し得ないため、例えば $V = 1 \text{ mm/s}$ 程度の実験の際には、cm スケールの試料の場合は熱弾性の影響は限定的であるが、m スケールの試料の場合は大きな影響が存在しうる。大型摩擦実験の際には、温度分布の測定と、歪ゲージで測定する応力に対する温度の影響の補正が重要である可能性がある。天然断層の挙動を考える上では、広い波数の擾乱が存在すること、滑り速度が時空間的に変化する影響、動弾性との連成の必要性などの検討が課題である。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:45 PM - 3:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:45 AM - 6:00 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson:Kurama OKUBO(NIED), Makiko OHTANI(ERI)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S08-28] Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault

*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S08-29] Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law

*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of technology)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S08-30] Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S08-31] Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation

*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S08-32] Recurrence interval of M>7 Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of M~9 earthquake

*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault

*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹

1. Osaka University

The frictional resistance on a fault controls the earthquake dynamics via solid contact surfaces. Recent studies have revealed that the abundance of clay (smectite) can result in low apparent friction coefficients and facilitate fault slip. A close example is the March 2011 Tohoku-Oki earthquake that produced huge displacement and a disastrous tsunami, while the shallow regions of the plate-boundary thrust were thought to slip aseismically. The drilling survey revealed the fault zone is characterized by 60 to 80 wt% of smectite and a solid fraction of about 0.6. While clay can be simply thought of as a weaker material compared to rocks and minerals, it is distinguished from other fault-zone inclusions in terms of the smaller size and activeness to water. In addition, these properties may largely depend on the clay type. Rheological experiments reveal that the clay-water mixture at low solid fractions behaves as a viscous fluid with thixotropy and can reproduce stick-slip behavior. However, it is still unclear how clay would behave under high pressure and high solid fraction. The underlying mechanism of low shear resistance is also unknown. In this study, we examine the feasibility of nanometer scale simulation of clay particles using molecular dynamics. Individual clay particles are modeled as disc-like ellipsoids with large aspect ratios. Long-range interactions between particles are simplified as Gay-Berne potentials with mid-range attraction and short-range repulsion. The system is compressed and sheared to reach a target configuration of a given pressure or a given solid fraction. Our results show that molecular dynamics can be a promising approach for further study into the rheology and slip behavior of clay-rich faults.

Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law

*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹

1. Tokyo Institute of technology

断層破壊シミュレーションでは、先見的な情報として断層形状に加え断層面における初期応力および摩擦則が必要になる。その摩擦則には滑り弱化則と速度状態依存摩擦則が主に用いられる。本研究では動的破壊を再現するのに優れた滑り弱化則を用い、その空間不均質性について調べた。滑り弱化則に対する空間不均質性として、Ide and Aochi(2005)では、降伏強度は均質のまま臨界滑り弱化距離 D_c に不均質性を与えている。摩擦則の不均質性は、断層上でのミクロな凹凸に起因するものであるから、降伏強度にも不均質性を考慮する必要がある、本研究では降伏強度と臨界滑り弱化距離の不均質性を同時に検討した。

一般に摩擦はマクロな状態量であり、摩擦法則は任意のスケールで相似な関数系であるべきである。本研究では、この自己相似性に着目し、合理的な滑り弱化則の不均質性について精査した。そのために、1次元断層で境界積分法による滑りの時間発展を解いた。摩擦則の不均質性については、i)降伏強度一定で D_c のみに不均質、ii) D_c と強度降下量が比例しながら不均質、iii) D_c と強度降下量が反比例しながら不均質の3つのパターンを考慮した。初期条件の影響を排除するために、定常的な応力ローディングにより複数回の地震を発生させ、5回目以降の地震の滑りと応力に着目した。ある空間スケールで滑りと応力を平均化したものが、そのスケールでの滑り弱化を経験的に表したものであると考えられる。このように様々なスケールについて得られた滑り弱化の経験則が自己相似であることを検証した。特に、a)単一の関数として精度良く求めるか、b)スケール間で共通の関数系で表現できるかの2点において合理性を検証した。

計算の離散化スケールに近いときは、仮定したような直線的な関数を確認できた一方で、大きなスケールで平均化すると、多様な形状の履歴が得られた。不均質性パターン i) と ii) では条件a)を満たさない一方で、不均質性パターン iii) では条件a)とb)を満たし、マルチスケールで共通の関数系で表現される滑り弱化則を確認することができた。このように単一の関数系に収束した理由としては、不均質性パターン iii) では破壊エネルギーが均質に設定されている事に起因していると考えられる。この結果は、滑り弱化則を使用する際には、少なくとも局所的には破壊エネルギーが均質であるような設定が望ましいことを示唆する。また、与えた直線的な滑り弱化則に対し、得られた共通の関数系はハーフガウシアンのような曲線状であり、そのような摩擦則を仮定することの妥当性を示唆する。

Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹

1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震やその余効変動より、日本列島の地殻の広い範囲で変形が観測された。特徴的なのは、例えば新潟神戸歪集中帯において、GNSSで求めた歪速度の長波長成分が地震前の収縮から地震後には伸長に変化した一方、短波長成分は収縮を続けた(Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016)ことである。この長波長の変形にはアセノスフェアの粘弾性緩和も寄与していると考えられ、Fukahata et al.

2020は地震後の新潟神戸歪集中帯における体積歪速度の長波長成分を74 nanostrain/yearと推定している。このように、巨大地震後の地殻の変形を再現するには、粘弾性の効果を含めたシミュレーションを行う必要がある。しかしながら、既存の粘弾性グリーン関数を用いる手法（Hashima et al. 2008）では水平成層構造しか考慮できず、海洋スラブやウェッジマントルなどの沈み込み帯の3次元構造を十分に再現できない。そこで本研究では、弾性媒質中に力学境界として震源断層を表す面とリソスフェア-アセノスフェア境界（LAB）を表す面を用意し、それぞれ速度と状態変数に依存する摩擦（RSF）則と粘性抵抗を境界条件として与え、境界積分方程式法で準動的に解く手法を提案する。本手法は、バルク粘弾性を弾性体内部境界面上での粘性緩和として扱ういくつかの手法（例えばDuan and Oglesby, 2005や、Miyake and Noda, 2019）に類似したものである。

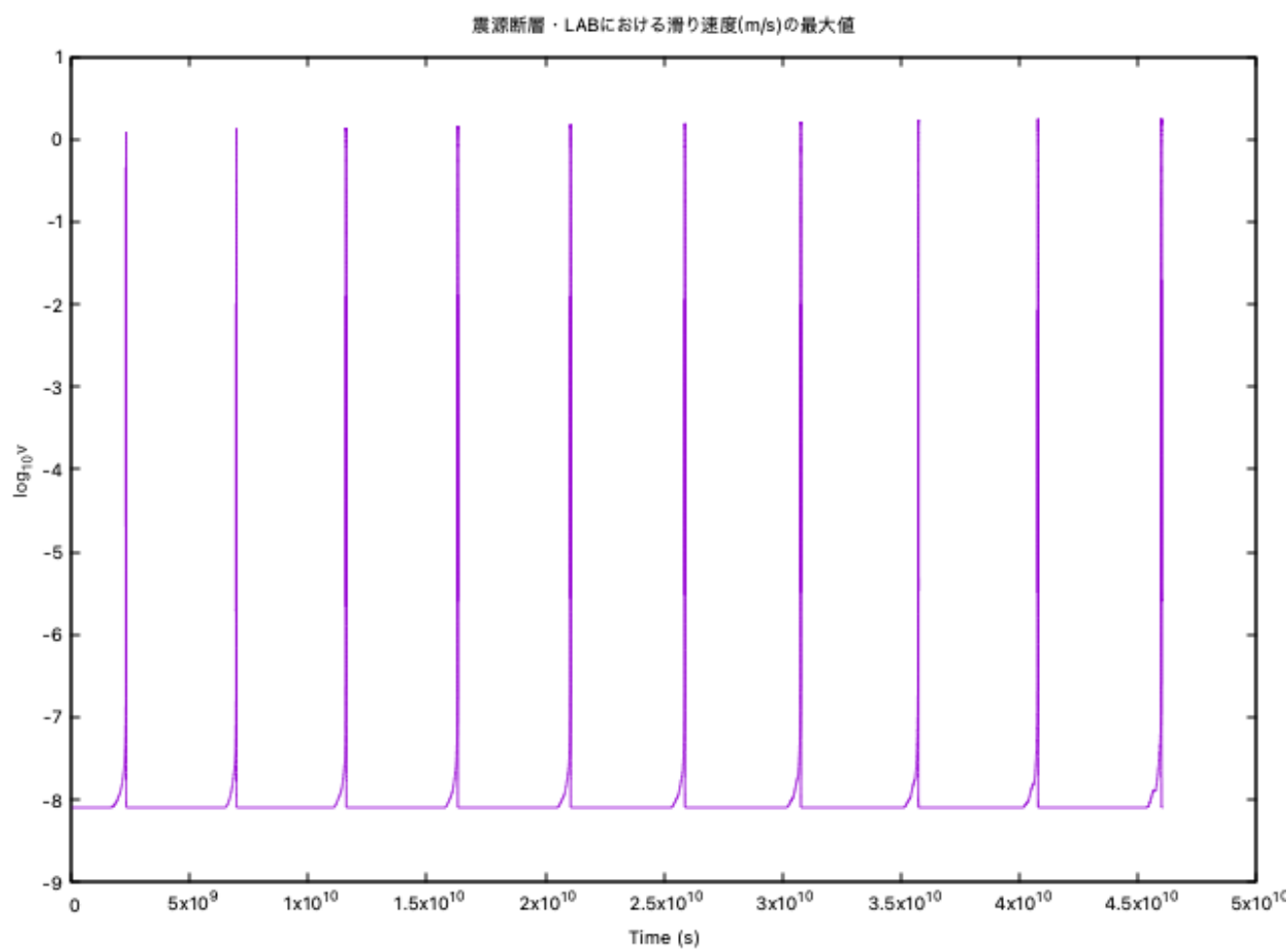
手法・モデル

本研究では、まず最も単純な場合として傾斜角が30°であり一片の長さが100kmである平行な2つの面を用意し、上面には正規化されたRSF則（Rice et al. 2001）を、下面には粘性抵抗 $\tau = \eta v/w$ （e.g. Ando et al. 2012）を境界条件として与えた。後者の境界条件は、アセノスフェアの粘性が生じる応力をリソスフェア側の境界面が受ける抵抗力として考慮したものとみなせる。上面はプレート境界の震源断層を、下面は海洋プレートとアセノスフェアの境界を表したものである。また、沈み込み運動による応力载荷を与えるため、下面にのみプレート相対運動に対応するバックスリップを考慮した。これを慣性効果が放射減衰項による近似として加味された平衡方程式（Rice, 1993）と連立し、Ozawa et al. (2022, 投稿中)のコード（hbi）を改良し粘性抵抗を扱えるようにしたコードを用いて解いた。また、行列ベクトル積の計算には格子H行列法（Ida, 2018）を用い、計算時間や使用メモリの削減を図った。

結果

粘性抵抗を与えた下面にのみバックスリップ25cm/年を与えたところ、上面ではM8の地震が150年周期で発生し、また地震滑り後にはLABでの粘弾性応力緩和に伴う余効変動が発生し、粘性係数が大きいほど緩和時間が長くなることが確認された。

沈み込み帯の3次元構造を再現するには、プレート境界の震源断層・海洋リソスフェア（スラブ）-アセノスフェア境界だけでなく、マントルウェッジ構造を含めた大陸LAB、および断層面上での速度弱化・速度強化領域の分布も考慮すべきである。当日はそのような沈み込み帯構造を再現したモデルの計算結果を報告する予定である。



Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation

*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹

1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST

はじめに

中央構造線断層帯(MTLFZ)は右横ずれ運動の卓越する日本最長の活断層帯である(Ikeda et al., 2009). 中央構造線における断層運動は、地表付近における変動地形の調査(Tsutsumi and Okada, 1996など)や横ずれ運動から示唆される鉛直または高角傾斜面(中央構造線活断層系(MTLAFS), Ikeda et al., 2009)上において起こるか、反射法地震探査(Ito et al., 1996, Sato et al., 2015など)によって観測されている北傾斜面(物質境界, MBMTL)上で起こっているかは定かでない. Uchide et al., (2022)はJ-SHISデータベース記載の活断層位置, 走向, 傾斜と, 小地震($M_j > 0.5$ の 約22 万イベント)の震源メカニズム解を用いた応力インバージョン結果から, 日本全体のslip tendency $Ts' = |\tau|/(\mu|\sigma|)$ (Yukutake et al. (2015))の分布を計算した. 中央構造線断層帯の特に四国周辺については, 傾斜 90° と仮定した場合には $Ts' > 0.95$, 傾斜 40° と仮定した場合には $0.6 \leq Ts' \leq 0.7$ を得た. 本研究では, MTLAFSの断層面傾斜角を, 物理モデルと観測に基づいて得られた応力場の情報から推定することを目的とする.

手法および予察

本研究では, まず中央構造線の鉛直断層面および北傾斜断層面の可能性をそれぞれ考慮した3次元非平面断層形状モデルを新たに構築した. そして, 鉛直断層面モデルおよび北傾斜断層面モデルにおいて準動的シークエンスシミュレーションを行い, 地形学・地質学的調査(岡田, 1970, 後藤ほか, 2003など)から得られる平均活動間隔及び平均変位速度と比較し, それぞれの形状モデルの妥当性を評価する. シミュレーションに際し, 各断層面におけるRake角は地震発震機構を用いた応力インバージョンの結果(Uchide et al., 2022)から, そして断層面法線方向及び接線方向の応力載荷速度は, GNSSデータから求められるひずみ速度分布からプレート間固着による弾性変形の寄与が除去されたもの(Nishimura, 2022)から与える. 数値計算には, Ozawa et al. (2022, 投稿中)で実装された格子H行列を用いて高効率化された準動的境界要素法コード(HBI)を用い, 20万要素と30万タイムステップ数の規模の計算を, Wisteria/BDEC-01の100ノードを約10時間使用して実施した. その結果, 垂直モデル・北傾斜モデルそれぞれの3次元断層形状と応力場の空間変化に応じて, 平均変位速度および平均活動間隔が変化する様子が見られた. これらのより詳細な解析結果を発表する予定である.

Recurrence interval of $M > 7$ Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of $M \sim 9$ earthquake

*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO²

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

【はじめに】

宮城県沖では、1978年宮城県沖地震のように、過去に $M > 7$ 海溝型大地震が約40年間隔で繰り返し発生し、沿岸地域に被害をもたらしてきた。この履歴に基づく長期評価に加え、2011年東北地方太平洋沖地震 ($M 9.0$)の影響を定性的に踏まえた結果、2021年1月時点では、宮城県沖で $M 7.4$ 前後の地震発生確率は30年以内に60~70 %程度となっている [地震調査研究推進本部, 2021]。ここで想定されている地震の震源域付近で2021年3月20日と5月1日に $M 6.9$ と 6.8 の地震が発生した。これらの地震は、2011年東北沖地震以降ではこの地域では最大のプレート間地震であるが、規模は想定されている地震よりもやや小さく、震源域は1978年の震源域の西側部分 [吉田他, 2021; 地震調査研究推進本部, 2021]だけであった。

Nakata et al. [2016]では、地震発生サイクルシミュレーションで得られた結果について、 $M 9$ 地震のすぐ後には、 $M 9$ 地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、 $M > 7$ 宮城県沖地震が発生するケースが多く見られたと報告している。これは、 $M 9$ 地震の余効すべりが宮城県沖地震単独の場合よりも大きいために、宮城県沖の陸寄り地域での応力蓄積レートが高くなったためであると考えられる。本研究では、先行研究と同様の地震発生原因であるプレート境界での応力蓄積と解放過程に基づく数値シミュレーションを行い、その結果の妥当性や、東北沖地震のような $M 9$ 地震サイクルにおける、宮城県沖地震の準備過程について、先行研究よりも詳しく検討を行った。

【手法】

地震発生サイクルシミュレーションは、先行研究 [Nakata et al., 2016]と同様の物理法則とプレート境界面形状で実施した。入力する摩擦パラメタの値や空間分布は、Nakata et al. [2016; 2021]で示した摩擦パラメタを基に微修正した。

【結果】

シミュレーション結果では、宮城県沖での $M > 7$ 地震の繰り返し間隔は、複数の $M 9$ 地震サイクルを通して共通の時間的特徴を示していた。Nakata et al. [2016]で述べたように、 $M 9$ 地震直後は $M 9$ 地震以前に比べて間隔が短い。その後、繰り返し間隔は一旦長くなるが、次の $M 9$ 地震が近づくにつれて、繰り返し間隔は一定に近づいていった。また、宮城県沖地震による余効すべり分布は、 $M 9$ 地震直後は震源域のupdip側への伝播がほとんど見られないのに対し、 $M 9$ 地震前はupdip側への伝播が顕著であった。 $M 9$ 地震後数10年間の累積すべり量は、宮城県沖地震震源域のdowndip側では $M 9$ 地震による余効すべりの影響で大きくなるが、updip側では小さいか、固着していた。

【議論】

このシミュレーション結果の妥当性を検証したところ、観測に見られるいくつかの特徴と整合していることが確認できた。例えば、 $M 9$ 地震前の宮城県沖地震の余効すべり分布は、2005年の宮城県沖地震の観測から示唆されるもの [Hino et al., 2007; Miura et al., 2007; Uchida et al., 2007]と、累積すべり量の時空間分布は、2011年以降の繰り返し地震の観測から見積もられるもの [Uchida & Matsuzawa, 2013]と調和的であった。また、 $M 9$ 地震前に発生した複数回の宮城県沖地震の繰り返し間隔に大きなばらつきがないことも、過去の地震発生履歴と矛盾していないと言える。

上述したような $M 9$ 地震サイクルを通じた繰り返し間隔の変化は、宮城県沖地震震源域のupdip側、つまり

M9地震震源域下限での固着域と非地震性すべり域の分布に起因していると考えられる。今後の宮城県沖地震の発生時期を議論するには、M9地震以前の繰り返し間隔を基に推定するだけではなく、測地・地震学的観測から見積もられる東北沖地震震源域内における固着の回復の程度を明らかにしたうえで、シミュレーション結果と照らし合わせて検討する必要があるだろう。

【謝辞】

本研究の一部は、JSPS科研費Grant Number JP21K04604、JP19H05596およびJP21H05206の助成を受けて実施されたものです。本研究のシミュレーション結果は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムおよびJAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して得られたものです。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:15 PM - 4:30 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:15 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S08-33] Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S08-34] Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S08-35] Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3} (1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S08-36] 4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO² (1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S08-37] Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹ (1. Aoyama Gakuin University)

Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹

1. Kyoto Univ.

速度状態依存摩擦則（RSF則）が発見されて以来、これを適用した地震サイクルシミュレーションが盛んに行われている [e.g., Lapusta et al., 2000]。低速での摩擦係数について、速度弱化（ $a-b<0$ ）を示す鉱物は Byerlee 則に従う値（0.6-0.85）を示すのに対し、速度強化（ $a-b>0$ ）を示す鉱物には粘土鉱物などの小さな値を示すものも存在することが確認されている。全体としては、低速での摩擦係数は摩擦パラメータ $a-b$ と負の相関が見られる [Ikari et al., 2011]。しかし基準滑り速度 V_0 における定常摩擦係数 f_0 の不均質性は、媒質が線形弾性体の場合、滑りの基準（滑りをゼロと定義する状態）の選択に吸収されてしまい、初期条件の影響のなくなったアトラクタにおける滑り速度 V の時空間的分布には影響を及ぼさない。その一方で、媒質に粘弾性体を採用する場合、非弾性変形の速度が媒質中の偏差応力の絶対値に依存するため、 f_0 の分布が断層の長期的挙動に影響する。地中では、地殻浅部から深部にかけて媒質の弾性・粘弾性の遷移が見られる。Miyake and Noda (2019) は、粘弾性媒質中での2次元の動的地震サイクルシミュレーション手法を開発し、空間的に一様な f_0 を採用し Maxwell 粘弾性体に対して（緩和時間）／（パッチサイズ）の減少によって地震性（EQ）挙動から永久固着（Stuck, ST）への遷移が起こることを報告している。永久固着とは、応力の緩和が速いことで地震が起こらなくなることである。地中深くの領域では、粘性が支配的になると考えられるため永久固着が起きやすくなる。本研究では、Miyake and Noda (2019) と同じシミュレーション手法を用い、EQ-ST遷移についてさらに詳しく調べた。粘弾性のパラメータに加え、速度弱化パッチとその外部の断層強度差（ $=f_0$ の差 Δf_0 ）による影響も調査の対象とした。パラメータスタディを行ったところ、Miyake and Noda (2019) で報告されていた粘弾性の変化だけでなく、 Δf_0 の変化によってもEQ-ST遷移があることが分かった。 Δf_0 が大きくなると永久固着が起こりやすくなり、本研究で最大の強度差である $\Delta f_0=0.3$ のときは $\Delta f_0=0$ の時と比べて一桁大きな緩和時間で永久固着が起こる。次に、この遷移の解釈を得ることを試みた。本シミュレーションは連続体モデルであるため自由度が大きく、物理的な理解が難しい。そこで、自由度を大きく削減したバネ-ブロックモデルを用いた。速度弱化域と速度強化域をそれぞれ代表させたブロックをバネとダッシュポットでつないだ単純なモデルである。連続体とバネ-ブロック両モデルのパラメータスタディと解軌道について比較を行った。すると、バネ-ブロックモデルについても同様にEQ-ST遷移が確認され、2つのモデルの結果がよく似ていた。このことから、EQ-ST遷移をバネ-ブロックモデルによって解釈することは一定程度有効であると考えられる。バネ-ブロックモデルにおける解軌道、ベクトル場から、EQ-ST遷移は Homoclinic 分岐である事を見出した。弾性体中の断層についてはこれまで、摩擦パラメータ $a-b$ が正のとき非地震性、負のとき地震が起こりうるということが知られており、これは Hopf 分岐として理解されている。本研究で見出した Homoclinic 分岐による遷移は全く新しいタイプの地震性・非地震性遷移である。パラメータスタディの結果は、温度が上昇して粘弾性緩和がより有効となると、大きなサイズの速度弱化パッチから地震発生頻度の減少と非地震性への遷移を起こすことを示している。Spada et al. (2013) は、世界の様々な大陸の b 値と深さの関係を示した。いくつかの大陸では、比較的浅い領域では深くなるにつれ b 値が減少するが、ある深さからは増加に転じた後に地震発生層の下限となる傾向が確認されている。この b 値増加の傾向は、地震発生層最下部では深いほど大きな地震が起こりにくくなることを示しており、本研究におけるパラメータスタディの結果と整合的である。

Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

円形アスペリティを仮定し、Nagata et al. (2012)により修正された速度・状態依存摩擦則に基づいてスロースリップイベント(SSE)のトリガーに関する数値シミュレーションを行なった。同じ半径のアスペリティでも、摩擦パラメータの値により、周期的地震、アスペリティの一部だけでの動的すべり、周期的SSE、安定すべりなどが発生する(Fig.1)。周期的に発生している状態で応力擾乱を受けると、すべりモードが移行する場合がある。Yoshida et. al (2015)は釜石沖地震について、以前はアスペリティ一部の破壊だったが東方沖地震の余効すべりの擾乱により全領域が破壊してマグニチュードの大きな地震が発生した可能性を指摘した。今回、周期的SSEが起きているときに、様々なタイミング、振幅で地震波による応力擾乱を与えSSEのトリガーについて調べた。擾乱の振幅が大きくなるにつれ、SSEの発生が早められ、SSE時のすべり速度が速くなり、継続時間が短くなっていく。さらに大きくすると、高速な地震すべりに移行することがわかった。また、安定すべりが起きている条件下で、擾乱を与えたときについてシミュレーションを行い、擾乱の振幅により、地震波通過時に、SSEあるいは高速な地震すべりがトリガーされるという結果が得られた。普段は地震やSSEが発生していない領域であっても、地震波によりSSEなどがトリガーされる可能性を示唆する。(b-a)*有効法線応力が大きいほど不安定性が増すが、Yoshida(2018)が示したように有効法線応力が小さいほどトリガー効果が大きくなる。アスペリティ内で浅くなるにつれ有効法線応力が小さくなるモデルを仮定して、そのトレードオフについても調べた。

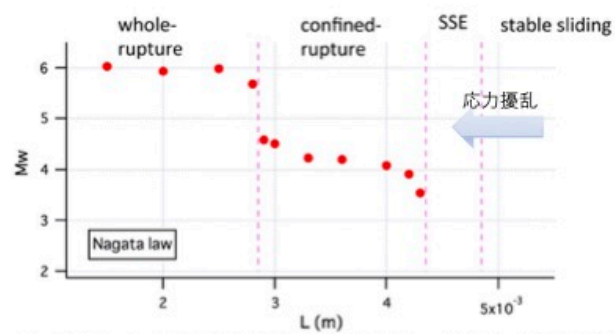


図1. 摩擦パラメータの特徴的すべり量 L を小さくすると、すべりモードは周期的地震、アスベリティの一部だけの動的すべり、周期的SSE、安定すべりに移行する。東北地震後に釜石沖地震のマグニチュードが大きくなったのは、余効すべりによる応力擾乱のためモードが変化したためと考えられる。安定すべり域においても、地震波による応力擾乱によりSSEがトリガーされることがある。Yoshida et. al (2015)に加筆。

Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3}

1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN

南海トラフ巨大地震の発生予測に向けて、巨大地震発生サイクルにおけるスロー地震の挙動を理解することは重要である (Obara & Kato, 2016)。

南海トラフ西部では、巨大地震震源域（固着域）の深部隣接領域でスロー地震の一つである長期的スローリップイベント（L-SSE）が発生している。そして、その再来間隔や伝播方向等の特徴（以下発生様式と呼ぶ）が、走向方向に多様性を示すことが指摘されている (Takagi et al., 2019)。

我々は、この四国中部～豊後水道～日向灘にかけての走向方向のL-SSEの発生様式の違いを説明するため、速度状態依存摩擦法則を使った数値シミュレーション研究を行っている。

現実的な3次元形状の断層モデルで実験を行う前に、L-SSEの相互作用について理解を深めるため、摩擦パラメータなどを走向方向に変化させた平面断層モデルを用いてシミュレーションを行った。具体的には、断層を走行方向にいくつかの領域に分割し、それぞれの領域ではパラメータは一樣となるようにパラメータ分布を与えた。

その結果、一つのパラメータを走向方向に変化させるだけでも、走向方向の各領域の長さなどを変えることで、再来間隔が変化する場合もあればしない場合もあるという結果が得られた。再来間隔が変化する場合は、SSEが走向方向に分裂して発生していたが、再来間隔が変化しない場合は、SSEが分裂せずに一つのイベントとして発生していた。

このことから、SSEの走向方向の発生様式の多様性について理解を深めるためには、SSEが走向方向に分裂する条件を調べることが重要であると考えた。

SSEが走向方向に分裂する条件を調べるため、領域幅 W に比べて走向方向の長さ L_{str} がかなり長い平面モデルでシミュレーションを行った。

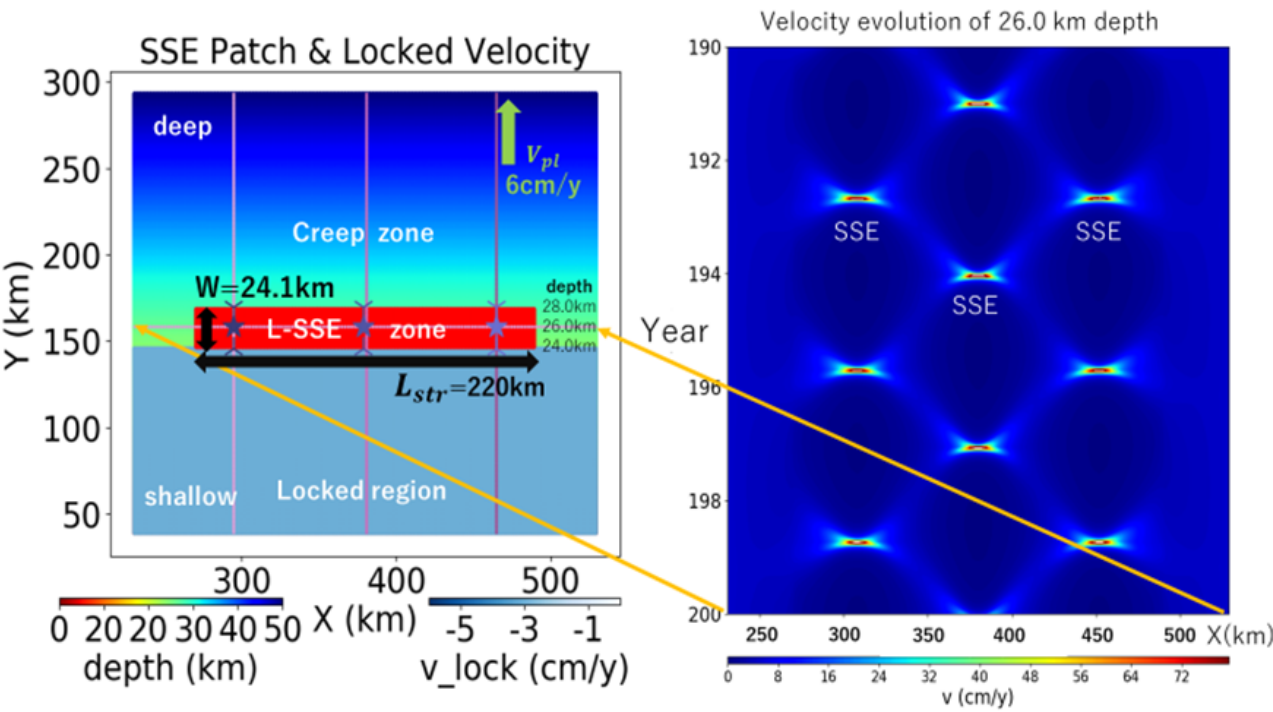
その結果、領域幅や摩擦パラメータを一樣にしても、走向方向の長さに応じて、SSEが2個以上に分裂する様子が観察された。また、摩擦パラメータを変え、分裂の様子が変化することも分かった。

一例として、図にSSEが3つに分裂する様子を示す。左図はモデル領域を示す。モデルは固着域（深さ5-24km、滑り欠損速度 $v_{lock} = 3.0\text{cm/y}$ ）・L-SSE域（深さ24-28km、幅 $W=24.1\text{km}$ 、走向長さ $L_{str}=220\text{km}$ 、震源核形成サイズ $h^*=31.83\text{km}$ ）・安定すべり(creep)域（深さ28-50km）の3領域から成り、傾斜角 10° 、プレート収束速度 $V_{pl}=6.0\text{cm/y}$ で走向方向に垂直に沈み込んでいる。右図にL-SSE域の中心深さ26.0km（ $Y=158.2\text{km}$ ）におけるすべり速度の時間発展を示す。一樣な領域幅や摩擦特性を与えたにもかかわらず3つのセグメントに分裂してL-SSEが発生している様子が見て取れる。ただし、再来間隔や、滑り速度が速い領域の幅などはセグメントごとに変化せず、ほとんど同じとなっている。

これまでの研究では、プレート収束速度やプレート形状の変化に伴う深さ方向の領域幅(Perez-Silva A. et al., 2022)、有効法線応力などの摩擦パラメータ (Li, H. et al., 2018) を変化させることで、走向方向にみられるセグメント化されたSSEの再来間隔や伝播といった発生様式の相違や相互作用が説明されてきた。これに対して本研究では、このような物理パラメータの変化を仮定せず、走向方向に一樣な領域幅・摩擦パラメータをもつ領域で計算をしても、走向方向にSSEが分裂することが明らかになった。また、分裂の個数や形態は、領域幅 W や震源核形成サイズ h^* と走行方向の長さ L_{str} の関係によって変化することを確認した。これまでの数値シミュレーションでは、深さ方向の領域幅 W と震源核形成サイズ h^* の関係に注目したものは多いが、走向方向の領域長さ L_{str} に注目した研究は無いように思われる。

もちろん、これまでの研究に見られるように、セグメントごとに再来間隔等の多様性が生まれる主要因は、各種物理パラメータの相違であると考えられるが、本研究では、走向方向のL-SSE発生様式の多様性について、走向方向の長さ L_{str} の影響という新たな知見を付け加えている。特に、 L_{str} 、 W 、 h^* とSSE分裂の関係の理解を深めると、プレート形状と観測されたSSEの分裂の様子から h^* を推定できるかもしれないという点が重

要である。
本発表では、SSEが分裂する条件と、走向方向の領域の長さ L_{str} と領域幅 W 、震源核臨界サイズ h^* の関係について議論する。



4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO²

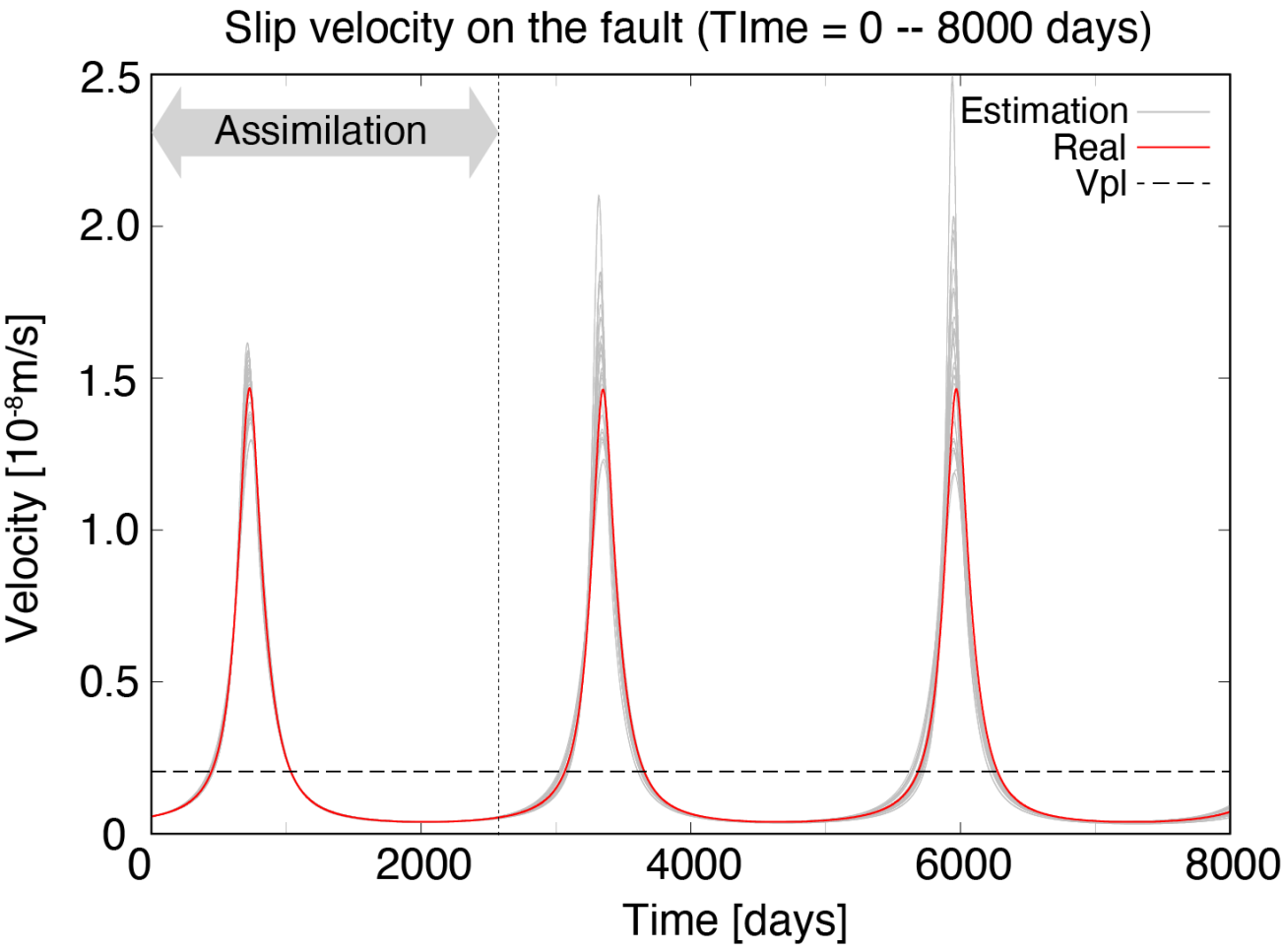
1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.

沈み込み帯プレート境界において、巨大地震発生領域の深部延長では長期的SSE(slow slip event)が発生し、巨大地震発生の誘発可能性に注目が集まる。SSE断層面上のすべりは地殻変動データから運動学的な逆解析によって推定されるが、その後の時空間発展を予測するには断層面の摩擦特性も推定する必要がある。この要請に対して、近年、地殻変動データから断層のすべり速度などのモデル変数と、モデルパラメタである摩擦特性の同時推定を目指したデータ同化研究が行われている。データ同化とは、物理モデルによる数値シミュレーションに実際の観測データを取り入れ、シミュレーションをより尤もらしいものにする方法である。Hirahara & Nishikiori (2019)は西南日本南海トラフ沿いの豊後水道で繰り返し発生する豊後SSEを想定し、データ同化のうち逐次同化手法の一つであるEnKF法を用いたデータ同化数値実験を行い、真値に近い変数・パラメタ値の同時推定に成功した。

H&N(2019)では一様な摩擦特性のSSEパッチモデルを用いた実験によってEnKFの有効性が示されたが、今後実データへの適用を考える際には断層面の摩擦不均質を考慮する必要がある可能性がある。この対処に際してEnKFでは、物理モデルに従って時間発展する複数の変数・パラメタの組(アンサンブル)によって予報のばらつきを表現するため、計算量が大きくなってしまいう問題点がある。これに対して、データ同化のうち4次元変分法(4DVAR)は、得られた時系列データを尤も良く説明する物理モデルの初期値を求める手法で、一般にEnKFよりも計算量が少ない。不均質な断層摩擦を考慮できるモデルに対しては、EnKFよりも4DVARの方が適しているかもしれない。

加納・他(2018)は、H&N(2019)と同様のパッチモデルに対して豊後SSEの4DVARデータ同化数値実験を実施し、模擬地殻変動データをよく再現することに成功した。しかしながら加納・他(2018)ではモデル変数(すべり速度・断層強度)の初期値分布は既知であるとしてパラメタ推定のみを行っており、このままでは実データに適用できない。データ同化において、断層面のすべり速度は地殻変動データの運動学的逆解析の値を初期値として直接利用できるが、断層強度の分布は現在の観測研究からは推定できない未知量だからである。そこで本研究では、すべり速度の初期値は既知とし、SSEの周期性を条件として陽に課すことで、断層強度の推定を行いつつ同時に摩擦パラメタの推定を行う数値実験を行う。本講演ではその推定方法及び推定結果を示す。

H&N(2019)に倣い、豊後SSEを想定してdip角15度の平坦な断層上に半径35 kmの円形SSEパッチを設定する。SSEパッチは一様な摩擦パラメタ($A, A-B, L$) = (100 kPa, -50 kPa, 0.04 m)をもつとしてこれを真値($A_{\text{true}}, A-B_{\text{true}}, L_{\text{true}}$)とする。このパラメタ値において、断層は物理モデルに従い一定周期でSSEが繰り返す。このとき、豊後SSE断層周囲の実際のGNSS観測点の位置に93点観測点を設定し、SSE一周分に対応する地表変位速度を切り出し、3 mm/年のガウスノイズを加えたものを模擬観測データ(time = 0–2620日)とした。モデルパラメタ $A, A-B, L$ の初期推定値を $A/A_{\text{true}} = 0.75, 1.0, 1.25, (A-B)/(A-B)_{\text{true}} = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, L/L_{\text{true}} = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ のいずれかにとり、断層強度の初期推定値をすべり速度に対する定常状態の値にとって、データ同化を実施した。初期推定値によっては、SSEの周期性を満たすような結果に到達できない場合もあったが、到達したものは総じて実際の断層のすべり速度・観測値をよく説明でき、推定された摩擦パラメタの真値からのずれは15%以内であった。図に断層の中心位置でのすべり速度を示す。赤線は真値、灰色線は各初期推定値から同化を行った結果得られたすべり速度の推定値である。Time = 0–2620日のデータ同化期間を超えると、推定値は真値からのずれが大きくなり、図中3回目のSSEピークは真値よりも最大で33日早く現れる結果となった。



Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹

1. Aoyama Gakuin University

天然断層においては、ゆっくり地震を何度か繰り返した後に高速地震が発生する、という振る舞いが見られることがある。このゆっくり・高速遷移がいつ起こるのか、その決定機構を明らかにすることは現在でも重要な問題である。加えて、一度高速地震が起こった後に再びゆっくり地震が起こるのか否か、という点も理解が進んでいない。

ここではゆっくり・高速両地震を統一的に取り扱うため、BKモデルと熱・流体・空隙相互作用を考える。断層岩は多孔質媒質であるので、それを模すために多孔質媒質のブロックと基板からなるBKモデルを考える。滑りは接触している領域の近傍で担われる変形と解釈し、それが起こる領域を滑り帯と呼ぶ。滑り帯は有限の幅を持つとし、その内部で熱・流体・空隙相互作用を考える。動的滑り時において、滑り帯内での空隙生成[摩擦発熱]の効果はそこでの流体圧を減少[増加]させ、摩擦応力を増加[減少]させて滑り速度を減少[増加]させる。従って、ゆっくり地震と高速地震を支配する物理的素過程はそれぞれ空隙生成と摩擦発熱であると解釈できる。なお、動的地震間の期間には空隙の回復も考え、空隙率が減少するとした。

滑り前後のエネルギーバランスを考えることによって、系の振る舞いを支配する関数 $F(u_f)$ を見出せた。ここで u_f は一回の地震の滑り量である。 $F(u_f)=0$ という方程式は複数の正の実数解を持つが、実際の地震に対して実現されるのはその中の最小のものである。本研究ではそれを地震開始時の流体圧 p_0 と空隙率 ϕ_0 の関数として求めることができた。特に大きい p_0 及び小さい ϕ_0 の下でゆっくり地震が発生し易いことが示された。 p_0 と ϕ_0 の値はいくつかの物理的素過程に影響されて決まるが、ここではその中でも空隙回復に着目する。この効果はあるパラメータ α_1 によって支配され、 α_1 が大きいほど空隙が早く回復すると考えて良い。まず無視できるほど小さい α_1 を仮定すると、ゆっくり地震を繰り返した後に高速地震が繰り返し発生した。最初に高速地震が発生した後には、ゆっくり地震は発生しなかった。これはゆっくりー高速遷移と解釈できる。そして α_1 を増加させていくと、ゆっくり地震の繰り返しの後、高速地震が一度発生してから再度ゆっくり地震が繰り返す、という振る舞いが見られた。これはゆっくりー高速ーゆっくり遷移と理解される。2つの遷移を分ける臨界的な α_1 の値が存在することが示唆される。他の物理的素過程、例えば流体拡散の効果も含めた統一的な遷移の多様性の理解は将来の課題であろう。

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 11:00 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 2:00 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S15] AM-1

chairperson: Toshihiro Shimoyama (Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency),
Kotoyo Tsuchida (Hanshin Consultants Co., Ltd.)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[S15-06] Is it feasible to derive high-frequency EGTDS? part (1)

Mitsuhiro Toya¹, Sayumi Yoshida², *Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹ (1. Hanshin Consultants Co., Ltd., 2. N/A)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S15-07] Is it feasible to derive high-frequency EGTDS? part(2)

*Masanori HORIKE¹, Sayumi YOSHIDA², Mitsuhiro TOYA¹, Kotoyo TSUCHIDA¹ (1. Hanshin consultants., LTD., 2. N/A)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S15-08] Updating proxy-based site amplification map in Osaka, Japan with soil borehole data: A Bayesian updating scheme based on Uncertainty Projected Mapping

*Anirban Chakraborty¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada² (1. Hosei University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S15-09] Variation of long-period strong ground motions at Hitachi-Naka port depending on the epicenter regions

*Tomiichi UETAKE¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S15-10] Study on prediction of long-period ground motion

*Toshihiro SHIMOYAMA¹ (1. MRI, JMA)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S15-11] Real-time forecast of long-period ground motions using Green's function based on seismic interferometry

*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part (1)

*Mitsuhiro Toya¹, Sayumi Yoshida², Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹

1. Hanshin Consultants Co., Ltd., 2. N/A

1. 初めに

点震源とみなせる震源から放射された地震動はモーメントテンソルとグリーン関数の空間微分のコンボリューションにより得られる。この二項を分離することは、震源と伝播経路のどちらの研究においても重要である。分離には、どちらかの項が既知でなければならないが、従来はグリーン関数を数値的な方法や経験的な方法で求めてきた。しかし、これらの方法には欠点がある。

数値的な方法として、周波数一波数積分法、差分法、有限要素法が提案されている。これらの手法は固有の長所と短所を有しているが、高周波数地震動の計算には短波長の不均質地下構造が必要となるため実用的な意味で計算できないという共通の困難も抱えている。

もう一つの方法は、観測波形をグリーン関数とみなす経験的グリーン関数法である。この手法では、高周波数までの利用可能性はあるが、発震機構や震源時間関数が異なる場合それらの補正を正確に行うのは難しい。

Plicka & Zahradnik (1998)は、上述した数値計算法や経験的グリーン関数法の欠点を克服する方法を提案した。具体的には、点震源と仮定できる領域内の複数の余震から放射された地震動波形からグリーン関数の空間微分を抽出する方法である。この手法では地下構造は必要なく、またグリーン関数の空間微分値 (EGTD) は点震源の条件を満たす高周波数成分まで含むことができる。EGTDが得られると、任意の発震機構とモーメントレート関数を持つ地震の地震動計算が可能となる。これにより、減衰や散乱等の伝播経路の性質を正確に評価できる。また、震源の性質の解明にも利用できる。例えば、震源インバージョンに用いると、高周波数地震動の発震域を特定できる。さらに、このインバージョン結果を用いれば、断層の摩擦則のパラメータ、特に Dc (critical distance) を精度よく推定できる可能性もある。

このようにEGTDが推定できれば伝播経路や震源研究の有力なツールとなると期待できるが、実用化に向けた研究は不足している。実用化には、以下の3課題を解決する必要がある。(1) 震源位置、断層パラメータ、モーメントレート関数の正確な決定、(2) どの程度の範囲内にある余震群からどのくらいの高周波数までのEGTDが推定可能か、(3) 使用する震源時間関数の選択、である。ここでは課題(1)について述べ、課題(2)、(3)については、その(2)で述べる。

2. EGTD推定に必要な震源パラメータの決定

EGTDの推定には様々な震源に関するパラメータが必要となる。ここでは、これらの推定について述べる。まず、使用した波形データについて述べる。我々は熊本地震余震の臨時観測を2016年5月6日から6月27日まで行った。この臨時観測のデータと気象庁一元化カタログに掲載されているこの期間に発生した M_j 2程度以上の地震を対象として、Hi-netや気象庁などの定常観測点での波形データを統合したものをを用いて震源パラメータを決定した。密な観測点を用いるため高精度の震源位置と震源パラメータの決定が期待できる。

震源決定では、まずWIN システムを用いて得た波形データからP 波およびS波到達時刻、P 波の初動極性の読み取りを行った。次に読み取ったP 波・S 波走時から、WIN システムに含まれている震源決定プログラム hypomhを用いて震源決定を行い、最後にdouble-difference(DD)法を用いて震源再決定を行った。

震源決定で読み取った地震のうち、P 波の初動極性が10点以上ある地震を対象として断層パラメータ (走行、傾斜、滑り角) を推定した。断層パラメータの推定は、Hardbeck and Sheare (2002)によるプログラム HASH1.2 を用いている。最終的に解が収束し、ある程度精度の良い結果となった640個の余震の断層パラメータを得た。推定された断層パラメータのタイプ分けを行うと、正断層横ずれタイプが多いことが分かった。また、推定した断層パラメータの信頼度を3段階で表示した。

決定した震源位置を用いて、EGTD推定に使用する直径1kmと2kmの範囲内に6余震以上ある余震群を探した。その結果、直径1kmの範囲内では2グループあり、以後これらをA1グループ、A2グループと呼ぶ。直径2kmの範囲内でも3グループあり、それぞれB1グループ、B2グループ、B3グループと呼ぶ。モーメントレート

関数を決める。具体的には、関数そのものではなく地震モーメント M_0 とコーナー周波数 F_c である。5グループ39余震を対象として、観測記録のスペクトルのインバージョンを用いて、余震の放射震源スペクトルを求めた。この際、地表と岩盤の観測点のスペクトル比を付加条件とした。放射震源スペクトルが ω^{-2} 則に従うと仮定して、フィッティングにより M_0 と F_c を求めた。

3. 最適な震源パラメータ

前節で述べた震源に関するパラメータの推定法は様々な仮定に基づいており真の値ではない。そこで、この研究では遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて得られる震源パラメータの最適値によるEGTD推定を行う。具体的には、地震モーメント、震源時間関数の時間パラメータ、断層の走行、傾斜、滑り角の5パラメータの最適値を求めた。

Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part(2)

*Masanori HORIKE¹, Sayumi YOSHIDA², Mitsuhiro TOYA¹, Kotoyo TSUCHIDA¹

1. Hanshin consultants., LTD., 2. N/A

1. 初めに

その(1)で述べたように、高周波数EGTDの推定が可能となると、伝播経路の性質の推定研究や震高周波数震源インバージョンやその結果として動的モデルの研究にも大きく寄与する。したがって、地震動から安定的に高周波数EGTDを取り出す方法を確立することは重要である。このためには、以下の課題を解決する必要がある。(1)どの程度の範囲内にある余震群からどのくらいの高周波数までのEGTDが推定可能か、(2)使用する震源時間関数の関数形の選択、(3)震源位置、断層パラメータ、震源時間関数のパラメータの決定の3課題である。課題(3)についてはその(1)で述べたので、ここでは課題(1)、(2)について述べる。EGTD推定に使用するデータは、熊本地震のMj1.5~3.5の余震で、熊本県とその周辺に設置されたHi-net観測点(震源距離10km~50km)において5月6日から6月27日までに記録されたものである。

震源位置からEGTD推定のために5余震グループを作成した。2グループは直径1kmの範囲に余震が分布し、それぞれA1, A2グループと呼ぶ。残りの3グループは直径2kmの範囲に分布しB1, B2, B3とそれぞれ呼ぶ。異なる範囲の余震グループを作成した理由は、余震の分布範囲の影響を調べるためである。

2. 解析

課題(1)のために、各グループ内のすべての余震とすべての観測点の記録を用いて余震グループとすべての観測点間の3成分のEGTDを推定した。さらに、それらのEGTDを用いて観測記録の再現を試みた。高周波数限界を調べるために3つのローパスフィルタを準備した。具体的には高周波数限界として、4Hz, 8Hz, 16Hzとした。EGTDを用いた計算波形の観測記録の再現性の評価には両者の相互相関係数を用いた。この相関係数を用いて高周波数の限界と余震群の範囲について検討する。EGTDの推定では、GAを用いて最適な断層パラメータと震源時間関数に対するEGTDを求めた。世代数は1000、染色体数は500とした。検索範囲はその(1)での値を基準として適切な範囲に設定した。なお、この処理を再現解析と呼ぶ。

課題(2)のために二つのステップからなる解析を行った。まずグループ内の1余震を除いた残りの余震からEGTDを推定した。次に、仮定した震源時間関数と推定したEGTDを用いて除外した余震の予測波形を計算し、観測波形の再現の程度を相互相関係数で評価した。なお、両ステップでGAを用いている。この解析を予測解析と呼ぶ。

予測解析を震源時間関数としてステップ関数と双曲線正接関数(tanh)の和である時間関数(SSF関数)と二等辺三角形の時間関数(TAF関数)を用いて行った。どちらがよりよく観測記録を予測できるかを比較し、この手法により適切な震源時間関数の選択が可能かどうかを調べた。

3. 結果

まず、A1グループのSSF関数を仮定した再現解析の結果について述べる。このグループでは、きわめて高い類似度を示した。全余震の全観測点で3成分波形の相関係数は16Hzでほぼ0.8以上、8Hzで0.9以上、4Hzで0.95以上となった。A2グループでは、7余震のうち1余震の相関係数がどの観測点でも低いためA1グループほどの再現性はないが、それでも4Hzでは相関係数は0.8以上となった。なお、相関係数の低い1余震を除くとA1グループと同程度の再現性を示した。

余震の分布範囲が2kmのB1, B2, B3グループでは、相関係数は低く4Hzでも0.8以下となる場合がかなりあった。この結果は余震分布範囲が大きいほど、点震源の仮定が成り立たないためEGTDの精度が悪くなることと対応している。

震源時間関数の影響を調べるためTAF関数を用いて再現解析を行った。結果は、SSF関数とほぼ同じ程度の観測記録の再現性を示した。これは、異なる震源時間関数を用いても観測記録をかなりよく再現できる高周波数EGTDが推定できることを意味すると同時に、真の高周波数EGTDを得るためには真の震源時間関数を用いる必要があることも意味する。実際二つの震源時間関数から得たEGTD波形を比較すると明らかに異なっていた。以上の再現に関する検討は、真の震源時間関数を用いれば高周波数EGTDが推定できることも示唆してい

る。したがって、次の課題は真の震源時間関数を見つける手法はあるのか、さらにその方法はどのようなものかである。異なる震源時間関数でも同程度の再現性が得られる理由は、震源時間関数とEGTDの合積（あるいは、周波数領域の掛け算）が同じものとなっているためと考えられる。

先述した予測解析により震源時間関数の優劣を決められるかを検討する。二つの震源時間関数（SSF&TAF）を仮定して、予測解析を行った。予測精度は相互相関関数で評価した。どちらの震源時間関数を用いてもほぼ同程度の予測となった。この結果は、提案した予測解析で震源時間関数の優劣を決定することは難しいことを意味する。

この研究では、震源時間関数が求めれば半径1km程度の範囲内にある余震を用いて高周波数（10Hz程度）の高精度EGTDが求まる可能性を示した。また、真のあるいはそれに近い震源時間関数を用いなければ、正確なEGTDは求まらないことも示した。さらに、予測解析による既存の震源時間関数の優劣の決定の可能性を調べたが、難しいことが分かった。

Updating proxy-based site amplification map in Osaka, Japan with soil borehole data: A Bayesian updating scheme based on Uncertainty Projected Mapping

*Anirban Chakraborty¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada²

1. Hosei University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Proxy-parameters like engineering geology, Vs30 (the time-averaged shear wave velocity (Vs) to a depth of 30 m), etc. are frequently used for preparing site amplification maps. However, these proxy-based maps do not always reflect the in-situ conditions. During the 2018 Mw 5.6 Northern Osaka earthquake in Japan, damage distribution in Ibaraki and Takatsuki cities of Osaka significantly deviated from the site amplification estimations of proxy-based Japan seismic hazard information system (J-SHIS) map. One possible explanation for the deviation is the difference between proxy-based and in-situ site amplification values. The other reasons could be strong ground motion, source effect, age of buildings, etc. In this study the role of site amplification in the damage distribution is investigated with the evaluations from available in-situ data. A Bayesian updating scheme is proposed for updating the proxy-based J-SHIS map with soil borehole data. The proposed scheme is based on uncertainty projected mapping (UPM), where spatial resolution corresponds to the denseness or sparseness of the available data. The study area is in Ibaraki and Takatsuki cities of Osaka, located close to the epicentre of the earthquake, where dense borehole data from Kansai Geo-informatics Network are available. In-situ site amplification at the borehole locations is evaluated using equivalent linear ground response analysis with non-linear soil modelling. The updated map or the posterior in Bayesian inference is generated with proxy-based J-SHIS values as priors, and evaluated in-situ site amplifications as likelihoods. The updated map with borehole data shows increased spatial granularity of low and high amplification regions. Several regions with relatively low amplification appeared in the previously high-amplification zone of proxy-based J-SHIS map. The appearance of relatively high amplification regions in previously low-amplification zones of proxy-based J-SHIS map might explain a couple of earthquake damage locations. However, the majority of damage locations cannot be explained by the updated map. It may be concluded that site factor alone is not sufficient, and factors like the source effect, age of buildings etc. should be considered for understanding the near-source damage distribution.

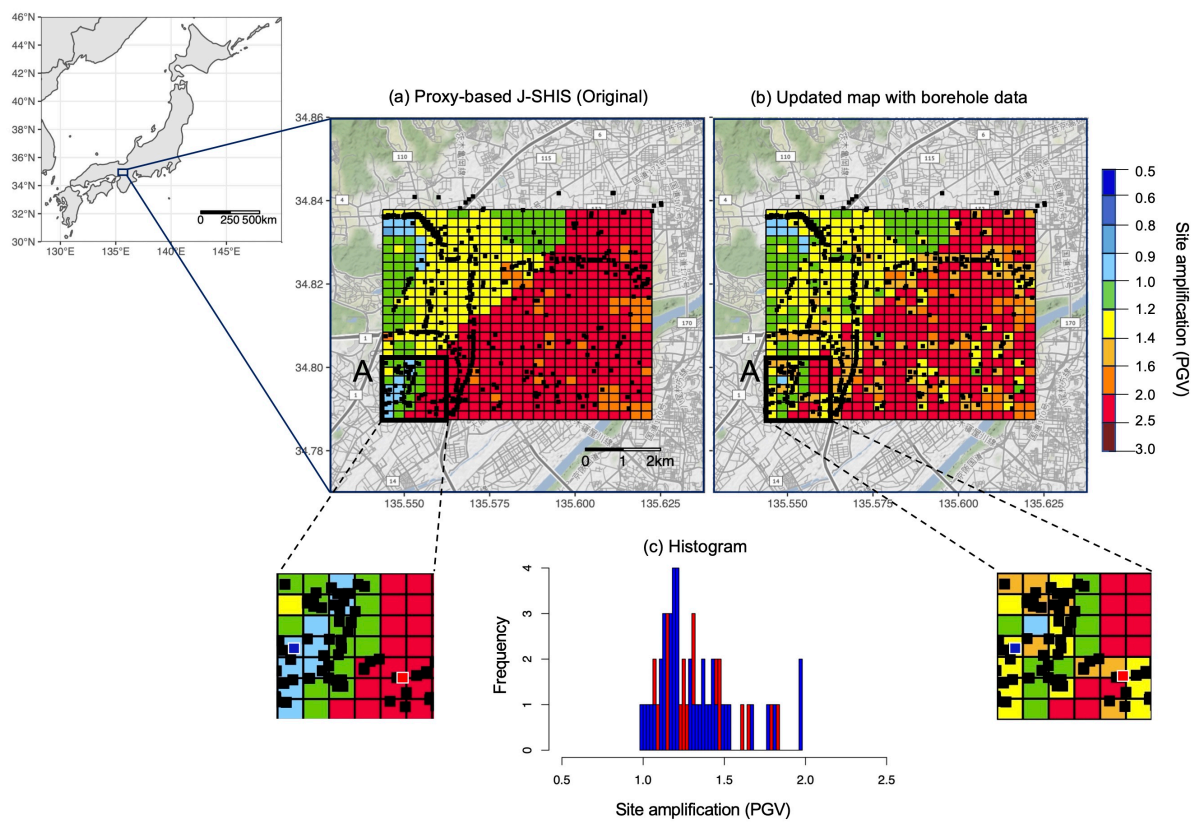


Figure 1. Comparison of site amplification in Osaka, Japan shown by (a) Proxy-based J-SHIS map and (b) Updated map with soil borehole data. (c) Histogram plot confirms the statistical significance of updated (higher spatial granularity) map resolutions in zone A

Variation of long-period strong ground motions at Hitachi-Naka port depending on the epicenter regions

*Tomiichi UETAKE¹

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

やや長周期帯域（周期数秒から十数秒）の地震動は、観測点直下の地下構造に加え周辺地域の地下構造の影響を受けるため、観測点から見て特定の方角の地震により特徴的な波群が確認されることがある。植竹(2017)は、2016年12月28日茨城県北部の地震(M6.3)により常陸那珂火力地点（HTN）で観測された周期2秒の後続波群について、周辺地域の観測記録を分析し、この波群が地下構造モデル〔例えば、地震調査研究推進本部（2021）〕が茨城県北部（HTNの西側）に示唆する地震基盤の窪地で発生した可能性を示した。また、植竹(2018)は、HTNから100 km圏で発生したM6～7クラスの地震に対し速度応答スペクトルの分析を行い、茨城県北部・福島県東部・栃木県北部で発生した地震では、上下動に周期2秒の後続波が認められるが、千葉県東方沖から福島県沖の海域で発生した地震ではそれが認められないことを報告した。今回は、より広域で発生したM6～8クラスの地震について、水平動を含めてスペクトル特性の変化を調べ、地震基盤の浅いKiK-net〔NIED(2019)〕のひたちなか観測点（IBRH18）に対する相対的な増幅特性を調べた。なお、HTNとIBRH18は約8 km離れているが、今回検討対象とした地震では、両地点の入射波は同等と見なした。

今回の検討のきっかけは、2022年1月22日の日向灘の地震（M6.6）である。この地震によるHTNの記録は、震央距離が短い東京湾岸の観測点より大きな速度振幅を示し、周期3～4秒の震動が卓越していた。あらためて過去の記録を検討すると、西日本で発生した2016年熊本地震（M7.3）、2016年鳥取県中部（M6.6）の記録でも周期3～4秒の卓越が確認された。2013年栃木県北部の地震（M6.3）では、水平動の周期3～4秒のピークとともに上下動に周期2秒のピークが確認できる。茨城県北部・福島県東部の浅い地震では、上下動の周期2秒に顕著なピークが認められる。一方、千葉県東方沖から宮城県沖で発生した地震では顕著なピークは認められなかった。さらに、2015年5月30日の小笠原諸島西方沖の深発地震(M8.1、深さ682km)の応答スペクトルでも顕著なピークは認められなかった。このように応答スペクトルの特徴には震源地域の依存性が認められる。

HTNにおいて水平動の3～4秒にピークの見られた2013年栃木県北部の地震（M6.3）、上下動の2秒にピークの見られた2016年茨城県北部の地震（M6.3）、顕著なピークの見られなかった2011年7月31日福島県沖の地震（M6.5）、2015年小笠原諸島西方沖の地震(M8.1)について、HTNとIBRH18の速度波形、スペクトル特性の比較を行った。両地点の速度波形を比較すると、いずれの地震でも両地点での主要動は類似しているが、HTNのやや長周期帯域に顕著なピークが見られる栃木県北部や茨城県北部の地震では、HTNの記録には遅れて出現するやや長周期の後続波群が認められる。また、いずれの地震でもIBRH18のスペクトル特性には、やや長周期帯域に顕著なピークは認められないことから、HTNにおけるピークの生成は震源に起因するものではないと考えられる。HTNとIBRH18のフーリエスペクトル比を図に示す。解析区間は、主要動を含む160秒間で後続波群も含んでいる。スペクトル比には、それぞれの観測点直下の構造の違いの影響も含まれているが、栃木県北部と茨城県北部の地震で振幅の大きな周期帯には、表面波と推定される後続波群が重要な役割を果たしていると考えられる。HTNの西側で発生した地震に対し、HTNとIBRH18の後続波の違いが顕著になる。

HTNは茨城県北部域の地震基盤の窪みと海側の地震基盤の深まりがつながるチャンネル上に位置しており、西側の窪みで成長した表面波はHTN付近を通過して東に向かう。こういった構造の影響が、HTNにおけるやや長周期帯域での地震動特性の震源地域依存性に影響していると考えられる。

文献：

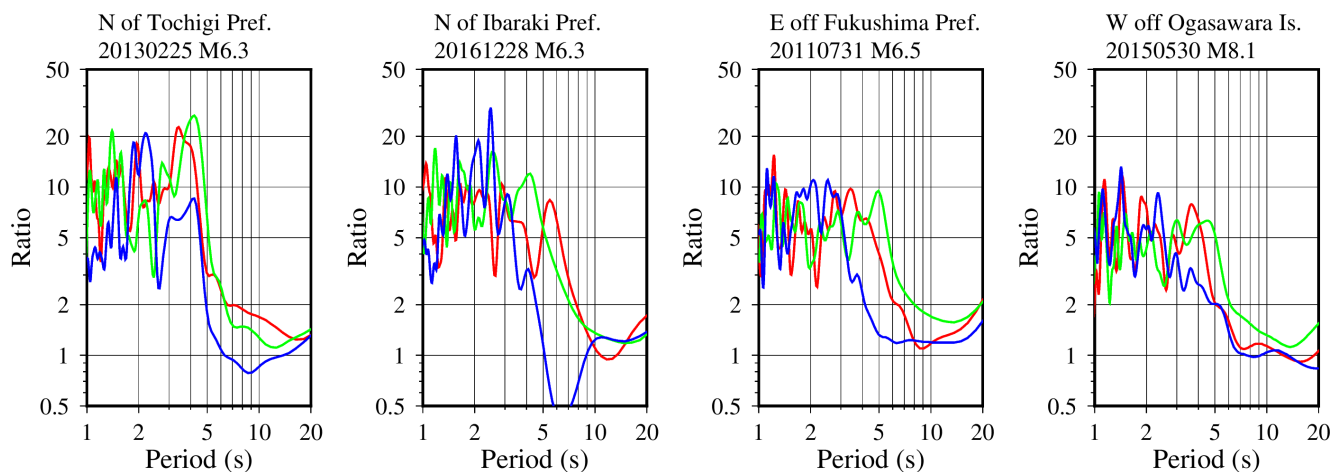
地震調査研究推進本部（2021）、関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル（2021年版）。

NIED (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004.

植竹(2017), 2016年12月28日茨城県北部の地震により常陸那珂港で観測された顕著な後続波群, 日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集, 165-166.

植竹(2018), 常陸那珂港で観測される周期2秒の顕著な後続波群, 日本地震学会2018年秋季大会講演予稿集, S15-06.

Fourier Spectral Ratio of HTN to IBRH18 (Red:NS, Green:EW, Blue:UD)



Study on prediction of long-period ground motion

*Toshihiro SHIMOYAMA¹

1. MRI,JMA

気象庁の緊急地震速報は、地震による揺れの広がり（地震動）が続いている途中で、その後の揺れ（地震動）を予測して発表する。揺れの予測は、その時点で得られている地震動のデータから、１．震源の位置・発震時刻・マグニチュードを即時に推定し、それら推定情報を元に予測する手法と、２．震源の位置などは求めずに揺れ（地震動）を波動伝播としてとらえ波動伝播理論に基づき予測する手法、これら二つの手法を組み合わせで行っている。波動伝播理論に基づき予測する手法は、計算機資源をあまりかけずシステムに組み込みやすくした手法であるPLUM法を導入している（PLUM法は2018年3月から導入）。

2022年度後半には、緊急地震速報に、長周期地震動の予測に基づいた基準が追加される。これまでの震度を対象とした予測（短周期地震動の予測）に加え、長周期地震動階級の予測によっても発表するものである。この予測に用いている手法は、１．震源の位置・発震時刻・マグニチュードから、長周期地震動を予測する手法であり、２．波動伝播理論による長周期地震動の予測手法は導入されていない。

そのため、本発表では、長周期地震動の予測についても「２．波動伝播理論による予測」を行うための一つの方法として、短周期の地震動予測に用いているPLUM法のような手法を適用できるかを検討する。検討は、過去に長周期地震動階級４を観測した地震（例：2022年3月16日23時36分の福島県沖の地震（M7.4、最大の長周期地震動階級４、最大震度６強）など）を対象として、

- １．長周期地震動の観測状況の整理、分析
 - ２．絶対速度応答時刻歴の分析
 - ３．適用範囲の検討（近傍観測点の比較）
- により行う。

Real-time forecast of long-period ground motions using Green's function based on seismic interferometry

*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

地震波干渉法から求めたグリーン関数を用いて、震源域近傍の強震観測データを入力値として遠地の平野で生成する長周期地震動を即時に予測する手法を検討した。

既往研究では、震源域近傍の基準観測点と予測地点の間のグリーン関数（伝達関数、応答関数）は、自然地震の波形データ（Nagashima et al., 2008; 倉橋ほか、2014）あるいは地震波伝播シミュレーション（吉本・武村、2018）から求められてきた。これに対し本研究では、基準観測点と予測地点の微動の相互相関を求める地震波干渉法により、2地点間のグリーン関数を作成した。地震波干渉法によるグリーン関数の導出は、近年Viens et al. (2017) やDenolle et al. (2018) らにより有効性が示されており、解析データを長期間スタックすることで自然地震を用いた場合よりも長周期側のS/N比の向上が期待される。さらに、自然地震の観測記録がない場所でもグリーン関数を算出できる点や、シミュレーションで見られる速度構造モデルの不正確性の影響を受けない点もメリットである。なお、地震波干渉法によるグリーン関数の絶対振幅は震源一観測点間の地下構造と非弾性減衰（Q）により規定されることが知られており（地元・山中、2012）、本研究ではDenolle et al. (2018) に倣い、微動のグリーン関数と自然地震のグリーン関数の振幅を比較することで、振幅補正係数を得た。

2. データと手法

解析には防災科学技術研究所のHi-netのデータを用いた。基準観測点はN.AKWH（愛川）観測点とし、観測点間距離400 km以内、方位角210度から260度（南海トラフ地震の想定震源域の方向）に位置する88点のHi-net観測点（Fig. 1a）を予測対象地点として相互相関を計算した。Viens et al. (2017) の手順を参考とし、50 %のオーバーラップの下で長さ60分に分割した微動データに対して、4 Hzのダウンサンプリング、トレンド除去、コサインテーパ適用を行った上で、FFTを用いて各予測地点の波形記録から基準観測点の波形記録をdeconvolutionした。これを2022年5月1日～30日までスタックして、基準観測点一各予測地点間のグリーン関数を求めた。

次に、得られたグリーン関数の振幅補正係数を求めるため、茨城県南部を震源とするM 5.6の地震についてdeconvolutionにより基準観測点一各予測地点間のグリーン関数を計算し、最大振幅を調べた。地震波干渉法による微動のグリーン関数との振幅比は、基準観測点と各観測点の平均的な速度構造や減衰構造を反映するものであり、距離依存性があると考えられる。しかし、本研究で対象とする長周期地震動ではQの影響は小さいと考え、全予測地点における最大振幅比の平均値（64.9）を振幅補正係数として用いた。

3. 結果

地震波干渉法により得られた基準観測点（N.AKWH）から各予測地点への地震波伝播のグリーン関数（EW成分）をFig. 1bに示す。図では、得られたグリーン関数に周期2-10 sのバンドパスフィルターをかけ最大値で規格化したものを、N.AKWHからの距離順に200 kmまで並べている。縦軸はN.AKWHから各観測点の距離、横軸はLag timeである。グリーン関数のシグナルは、 $t > 0$ のcausal partにおいて明瞭に表れており、微動が主に基準観測点の東側から到来したことを意味している。

得られた微動のグリーン関数を、各予測地点と基準観測点の並びの延長線上近傍で起きた茨城県南部の地震（M 5.6、深さ47 km）の基準観測点での観測波形に対してconvolutionし、振幅補正係数をかけることで、各地点における長周期地震動波形を予測した。Fig. 2に結果の例として、基準観測点N.AKWHでの入力波形、11 km及び138 km離れた予測地点N.KIYH（清川）とN.KG3H（掛川3）とのグリーン関数、及び2つの予測地点における予測波形・速度応答スペクトル（ $h=5\%$ ）を示す。また、比較のために実際の観測波形と速度応答ス

ペクトルを赤線で重ねて示す。

予測波形と観測波形は良い一致を示し、波形の最大振幅比はN.KIYHで1.0、N.KG3Hで0.9となり、振幅補正係数を含めて適切に予測できていることが確認できた。周期2-10 sにおける速度応答スペクトルの計算／観測比は、N.KIYHで1.26、N.KG3Hで0.85となり、この他の地点においても6割で0.4～2.5の範囲であった。一方、波形の山谷を含めた一致は難しく、N.KG3Hの予測波形はP波の立ち上がり時刻が観測波形よりも早くなったほか、2地点とも予測波形のSコーダ波の振幅は観測波形よりも大きくなり、観測波形と予測波形の相関係数は、N.KIYHで0.36、N.KG3Hで0.18のやや小さい値となった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、長周期地震動の即時予測に向けて、地震波干渉法により得られたグリーン関数を用いた地震動予測の実現性を確認した。グリーン関数の高精度化に向けて、微動データのスタック期間の影響や、振幅補正係数の震源や伝播経路の依存性など、より詳細な検討が必要である。また、今回は関東地方の地震を対象に西南日本の地点の地震動の予測を行ったが、大きな被害が予想される南海トラフや日本海溝沿いの巨大地震への応用に向け、これらの想定震源域で発生した地震を用いた予測手法の検証が必要である。

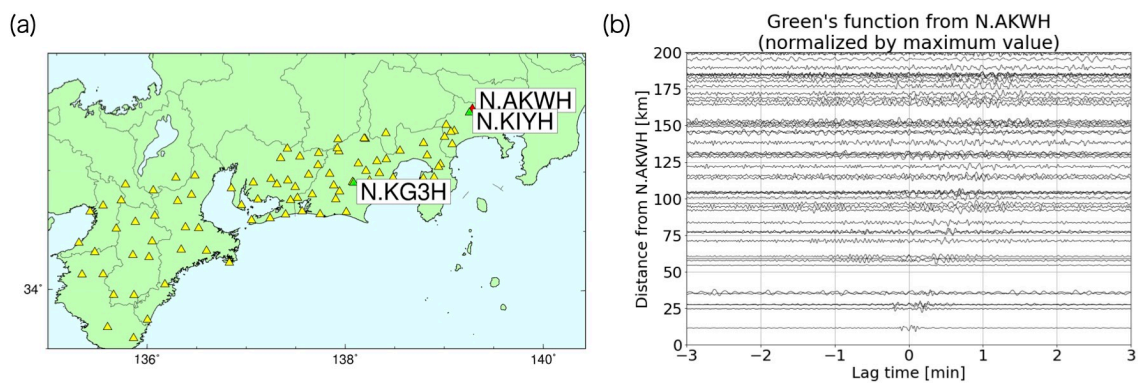


Figure 1. (a) Distribution of Hi-net stations used in this study. (b) Record section of Green's functions based on seismic interferometry.

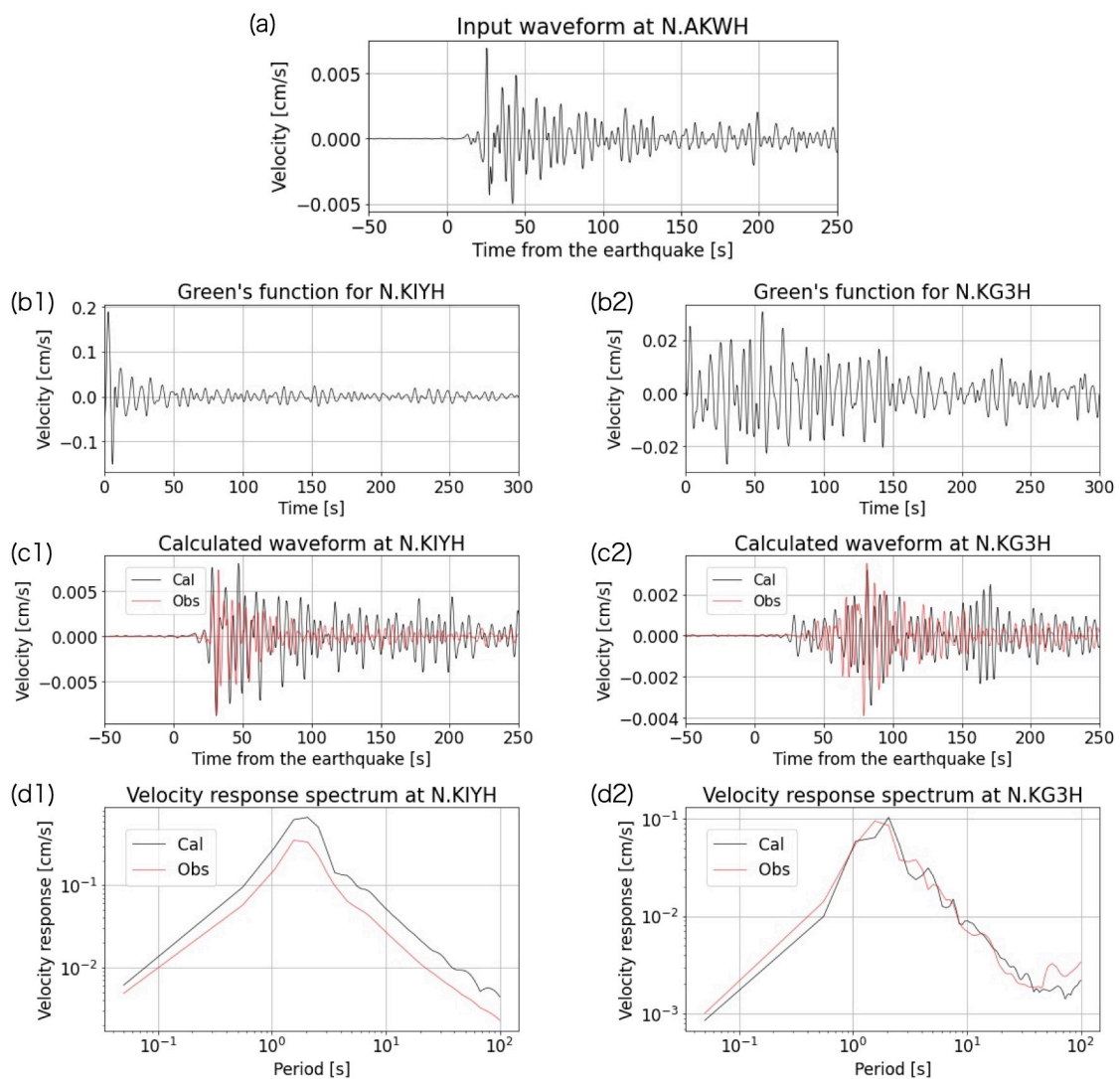


Figure 2. (1) Input waveform at N.AKWH. (b1) Green's function, (c1) calculated waveform and (d1) velocity response spectrum at N.KIYH. Red lines in (c1), (d1) are observed data. (b2-d2) Same figures for N.KG3H.

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:15 AM - 12:30 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:15 AM - 3:30 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S15] AM-2

chairperson: Asako Iwaki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), Yusuke Tomozawa (Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S15-12] Evaluation of scaling relations for subduction earthquake using source inversion models

*Fumiaki Nagashima¹, Hiroshi Kawase¹, Eri Ito¹, Jikai Sun¹ (1. Disaster Prevention Research Institute)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S15-13] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of Earthquakes Occurring off the Pacific Coast of Tohoku

*Yusuke Tomozawa¹, Tomoki Hikita¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S15-14] An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of direct S-waves in the layered structure : Application to inland earthquakes in Chugoku region

*Tomonori IKEURA¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S15-15] Correlation between strong motion intensities based on the unified strong motion database by NIED

*Hongjun Si^{1,2}, Asako Iwaki³, Nobuyuki Morikawa³, Hiroyuki Fujiwara³ (1. Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, 2. Seismological Research Institute Inc., 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S15-16] Comparison of Ground-Motion Models based on the Strong Motion Database

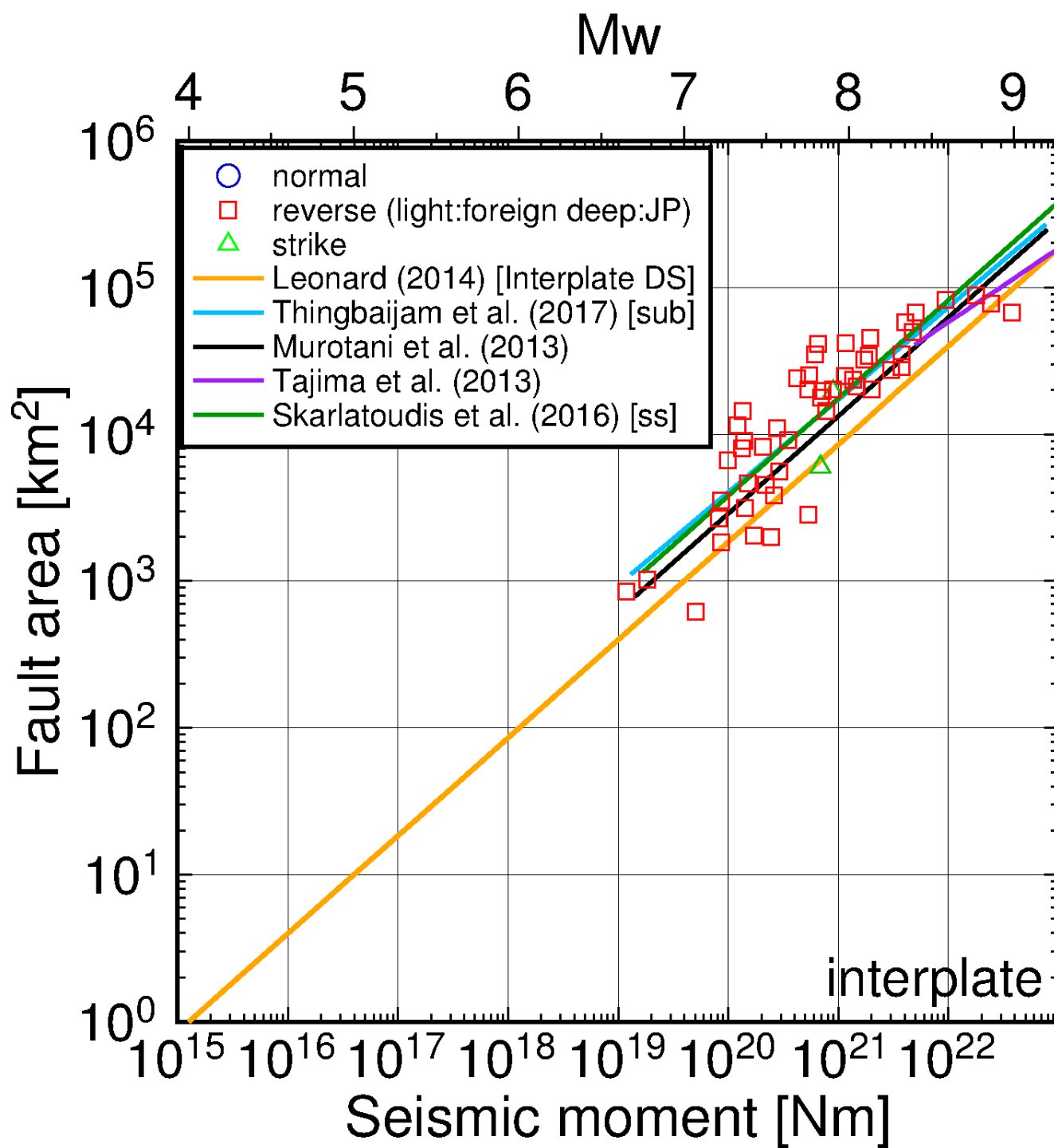
*Asako IWAKI¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Tomohisa Okazaki², Hisahiko Kubo¹, Hongjun Si³, Atsuko Oana⁴, Toru Ishii⁴, Yusuke Tomozawa⁵, Tomoki Hikita⁵ (1. National Research Institute for Disaster Resilience, 2. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 3. Seismo Research, 4. Osaka Research Institute, 5. Kajima Technical Research Institute)

Evaluation of scaling relations for subduction earthquake using source inversion models

*Fumiaki Nagashima¹, Hiroshi Kawase¹, Eri Ito¹, Jikai Sun¹

1. Disaster Prevention Research Institute

地震モーメントと震源断層のサイズおよび滑り量の関係、いわゆるスケーリング則は、将来の地震発生とそれによる強震動を予測する上で極めて重要な関係式であり、物理的考察を背景にして、そのできるだけ正確な相互関係を把握することは定量的強震動予測のための重要な第一歩である。我々は震源インバージョン結果を用いて海溝型地震のスケーリングを評価し、既往のスケーリング則の妥当性を検討した。Martin Mai博士らによる震源断層モデルデータベースSRCMOD(Mai and Thingbaijam, 2014)で公開されている震源インバージョン結果の中から、各インバージョン結果の参考文献やUSGSのWebサイト上の情報を参考に地図上での位置も確認しつつ海溝型地震を選択した。地震タイプ(Interplate・Intraplate)についても同様に参考文献等から判別して本研究のデータセットを構築した。収集した震源インバージョン結果にSomerville et al. (1999)のクライテリアでトリミングを施し、地震モーメント M_0 についてはトリミング前後で平均剛性率を保存してトリミング後に再計算した。トリミングしたモデルからSomerville et al. (1999)のクライテリアでアスペリティを抽出し、アスペリティ面積とアスペリティ内の平均すべり量を求めた。メカニズムについては一般的な平均すべり角を用いて分類し、同一地震に複数モデルがある場合には各パラメータの幾何平均を求めた。データセットは海外49地震94モデル、国内15地震50モデルを含み、多くの地震がInterplateの逆断層型地震であった。各地震の震源深さについてはIntraplate地震のいくつかで深さ100kmを超えているが、多くの地震が深さ50kmより浅い場所に分布した。 M_0 に対する断層長さ L ・断層幅 W ・断層面積 S ・平均すべり量 D ・アスペリティ面積 S_a ・アスペリティ平均すべり量 D_a について既往のスケーリング則と比較した。 M_0 - L では、Interplate地震ではLeonard (2014)やThingbaijam et al. (2017)のスケーリング則と本研究のデータセットの対応は良い。Intraplate地震やOuter rise地震の地震数は少ないが、Interplate地震よりIntraplate地震の断層長さは小さめとなった。 M_0 - W では、Interplate地震では $10^{20} < M_0 < 10^{21}$ Nmでデータのばらつきが大きく、その区間の中で大きい値に対してはSkarlatoudis et al. (2016)やThingbaijam et al.が整合的であった。Interplate地震よりIntraplate地震の断層幅は小さかった。 $W=200$ kmでの頭打ちについては、該当する地震規模の地震数は少ないながらも確認された。 M_0 - S では、図に示すようにInterplate地震では $10^{20} < M_0 < 10^{21}$ Nmで M_0 - W と同様にばらつきが大きく、 10^{21} Nm周りでデータセットよりスケーリング則の方が小さい。 $M_w > 8.4$ では、地震数が少なく評価が難しいものの、データセットの分布の傾きが $M_w < 8.4$ よりも小さくなっているように見える。断層面積についてもIntraplate地震はInterplate地震より小さい。Intraplate地震ではIwata and Asano (2011)と整合的であった。 M_0 - D では、既往のスケーリング則はデータセットと比べてやや過大評価となった。Intraplate地震の平均すべり量はInterplate地震よりも大きく、Intraplate地震では既往のスケーリング則はデータセットより小さめとなった。抽出したアスペリティの S_a/S や D_a/D は0.24倍から0.28倍、1.95倍から2.3倍となり、Murotani et al. (2013)のPlate-boundaryの $S_a/S=0.2$ や $D_a/D=2.2$ と対応した値となった。 M_0 - S_a や M_0 - D_a ではIwata and Asanoの M_0 - S_a や M_0 - D_a 、既往の M_0 - S スケーリング則の0.22倍や M_0 - D スケーリング則の2.2倍と比較を行った。 M_0 - S や M_0 - D の場合の分布傾向と同様に、 M_0 - S_a のInterplate地震の $10^{20} < M_0 < 10^{21}$ Nmでばらつきが大きく、 $M_w > 8.4$ での傾きが小さくなり、Intraplate地震の S_a はInterplate地震よりも小さく、Iwata and Asanoと整合的である。 M_0 - D_a はInterplate地震ではスケーリング則の方が大きめであり、Intraplate地震のデータはInterplate地震よりも大きく、データセットと比べIwata and Asanoは小さめとなった。



Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of Earthquakes Occurring off the Pacific Coast of Tohoku

*Yusuke Tomozawa¹, Tomoki Hikita¹

1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

1. はじめに

近年の強震観測記録の増加に伴い、地震動予測式の回帰係数に空間変動を考慮した研究が行われている (例えば, Landwehr et al., 2016; 引田・他, 2020)。高精度な地震動予測モデルを構築するためには、空間変動の要因となる震源励起特性の地域性や伝播経路特性の不均質性を詳細に評価することが重要となる。本検討では、これらのうち伝播経路特性に着目し、東北地方太平洋沖で発生する地震の空間変動の基礎的情報となる海洋プレートを含む三次元不均質減衰構造 (不均質Q 値構造) をブロックインバージョン解析により推定した。

2. データセット

東北地方太平洋沖で発生した地震のうちK-NET, KiK-net, S-netで観測された以下の条件に適合する記録を収集した。対象期間は、観測開始から2022年3月31日まで、 M_w 4.5以上7.0未満。震源距離範囲は、内陸地殻内地震では100 km以下、プレート間地震とプレート内地震では、200 km以下。地盤の非線形化の影響を避けるため、K-NETとS-netは100 cm/s^2 以下の記録を用い、KiK-netは地中記録を用いた。S-netの観測記録は、Takagi et al. (2019) の姿勢角情報を基に回転補正を行った。地震による揺れの途中で加速度波形にオフセット変化を生じさせるような強震動を受けた観測点では、姿勢角に変化が生じたと判断して、それ以後に発生した地震の記録は用いないこととした。対象地震と観測点の分布を図1に示す。

3. 解析結果

解析手法は、友澤ほか (2021) と同様である。伝播経路特性は、深さ方向を大陸地殻、マントル、太平洋プレートの3層でモデル化し、各層の水平方向の不均質性を考慮してモデル化した。震源と観測点を結ぶ断面で2次元レイトレースを行って、各層の伝播距離を評価した。地震本部 (2012) を参照して各層の境界は第17層のマントル、第21層の海洋性地殻第2層 (太平洋プレート) の上面深度を用いた。S波速度はそれぞれ3.4 km/s, 4.5 km/s, 4.6 km/sとした。推定した不均質減衰構造を図2に示す。大陸地殻の不均質減衰構造は、東北地方北部の火山帯周辺でlow-Qの領域が推定された。本検討のデータセットには、東北地方で発生した内陸地殻内地震を多く含んでいないため、宮城県以南の活火山周辺の減衰構造の不均質性の推定はできていないと考えられる。マントルの不均質減衰構造は、主に活火山直下で相対的にlow-Qの領域が広がっている。太平洋プレートでは、深さが深い領域ほど相対的にhigh-Qとなる傾向が得られた。推定した不均質減衰構造を用いて、宮城県沖で発生する深さ40 kmのプレート間地震を想定し、地震基盤面上での地震動振幅の面的評価を行った結果を図4に示す。火山フロントを通過すると地震動が減衰し、振幅が同心円所に広がらない異常震域が再現されている。今後は、推定した不均質減衰構造を考慮に入れた地震動予測モデルの構築を検討する。

謝辞

防災科学技術研究所K-NET, KiK-net, S-net, F-netを活用させていただきました。記して感謝します。

参考文献

Landwehr et al. (2016), BSSA, Vol. 106, No. 6. Takagi et al. (2019), SRL, Vol. 90, No. 6. 地震調査研究推進本部 (2012), 長周期地震動予測地図2012年試作版. 友澤・他 (2021), SSJ秋季大会, S15P-01. 引田・他 (2020), 日本地震工学会論文集, 第20 巻, 第2 号.

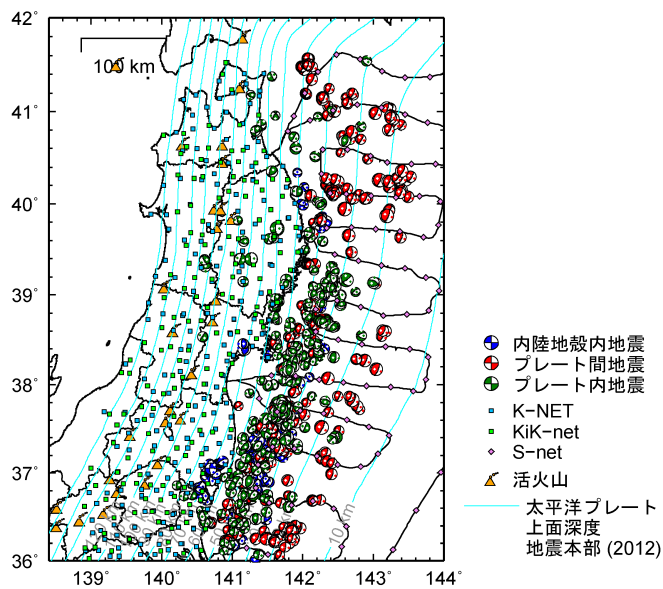


図 1 解析に用いたデータセット

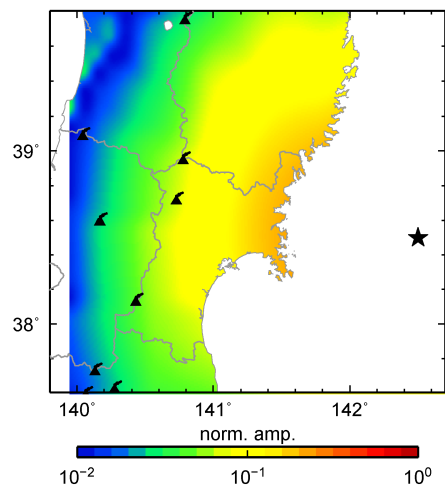


図 3 基盤面上の 10 Hz の距離減衰特性の面的分布（プレート間地震）

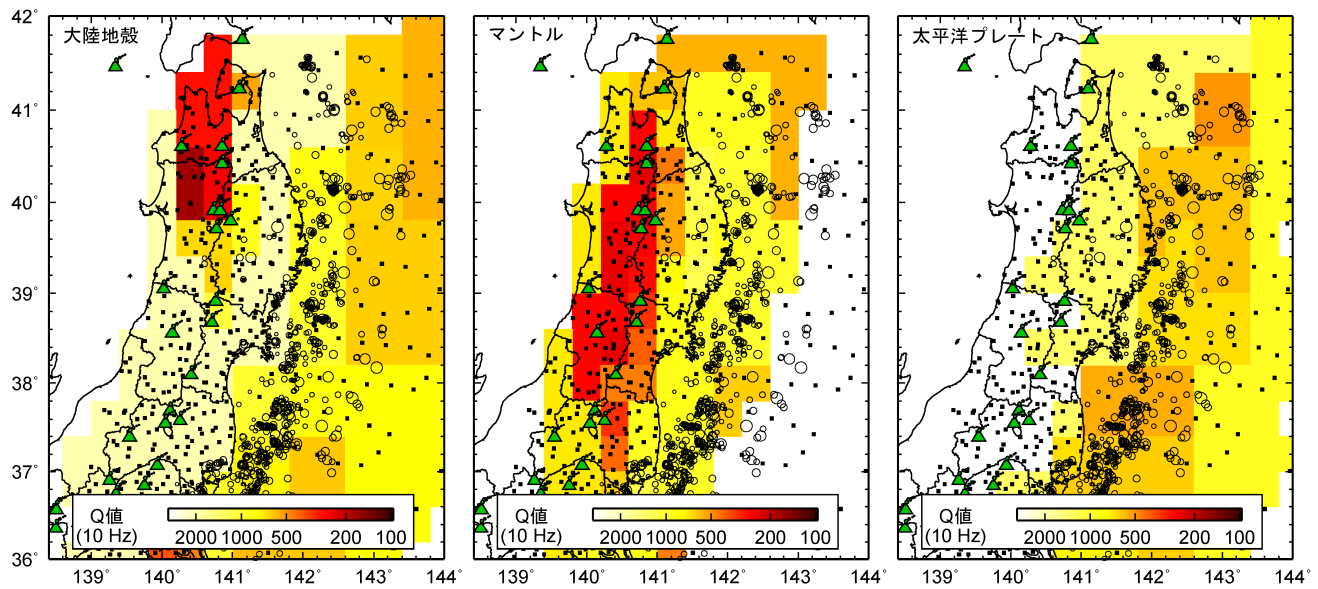


図 2 推定した不均質減衰構造（カラーは 10 Hz の Q 値）

An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of direct S-waves in the layered structure : Application to inland earthquakes in Chugoku region

*Tomonori IKEURA¹

1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

■はじめに

内陸地震の震源近傍地震動の予測は工学的に重要な課題の一つである。震源近傍では震源からの直達S波(DS)が最大の入射成分であるが、DSは成層構造内の透過率(CTR)の影響で震央距離(Δ)とともに急減するため、遠方では地殻内部で反射・屈折を経た間接的なS波群(IS)が支配的となる¹⁾。そこで本研究では、DSとISの距離減衰モデルをそれぞれ設定し、両者の和によって地震動全体の距離減衰特性を表すモデル化を試みている。既往研究^{1), 2)}では近畿地方、福島県浜通・茨城県北部において適用性を検討し、震源近傍地震動の再現性の観点で有効性を確認した。今回は中国地方に適用した結果を報告する。

■距離減衰特性のモデルと解析法

本研究ではS波部分の観測地震動(OBS)を観測地点の相対サイトファクター(RSF)で除して得られる基盤地震動(BRM)を扱う³⁾。震源距離 r における周波数 f のBRMの振幅を $A_{\text{BRM}}(f)$ とし、これをDSの振幅 $A_{\text{DS}}(f)$ とISの振幅 $A_{\text{IS}}(f)$ を用いて次式で表す。

$$A_{\text{BRM}}^2(f) = A_{\text{DS}}^2(f) + A_{\text{IS}}^2(f) \cdots (1).$$

また、 $A_{\text{DS}}(f)$ と $A_{\text{IS}}(f)$ はそれぞれ次のように表す。

$$A_{\text{DS}}(f) = S_{\text{DS}}(f) \times r^{-1} \text{CTR}(h, \Delta) \exp[-b_{\text{DS}}(f)r] \cdots (2), \quad A_{\text{IS}}(f) = S_{\text{IS}}(f) \times r^{-0.5} \exp[-b_{\text{IS}}(f)r] \cdots (3).$$

ただし、 $S_{\text{DS}}(f)$ と $S_{\text{IS}}(f)$ はDS、ISの地震項であり、両者の間に一定の倍率： $C_{\text{IS}}(f) = S_{\text{DS}}(f) / S_{\text{IS}}(f)$ を仮定する。また、 $\text{CTR}(h, \Delta)$ はJMA2001⁴⁾を仮定した場合のDSの透過率、 $b_{\text{DS}}(f)$ と $b_{\text{IS}}(f)$ はそれぞれDSとISのQ値効果による距離減衰係数である。

このモデルを観測データに当てはめる場合、未知数は地震毎の $S_{\text{DS}}(f)$ と全地震共通の $C_{\text{IS}}(f)$ 、 $b_{\text{DS}}(f)$ 、 $b_{\text{IS}}(f)$ であり、対数振幅のrms誤差を評価関数として非線形最適化手法を適用して求める。

なお、BRMの算出(OBS/RSF)は線形地盤応答が前提であるが、震源近傍の大振幅記録では地盤応答が非線形化する問題がある。今回は $\text{PGA} \geq 200 \text{ Gal}$ の地表記録を対象に、KiK-net地点では地表/地中(GL/DH)、K-NET地点では水平/上下(H/V)について、小振幅時の平均値に対する強震時の比 $R_{\text{NL}}(f)$ を求め、 $\text{OBS}(f)/R_{\text{NL}}(f)$ によって線形化補正を試みた。

■データ

今回は表1に示す $M \geq 5.0$ の10地震を対象とし、既検討²⁾と同様に $r \leq 90 \text{ km}$ の記録を扱った。震央と観測地点の分布を図1に示す。また、解析データの例として、7Hz帯域における線形化補正前後のBRM振幅の距離減衰分布を図2に示す。

■結果

2000/10/06鳥取県西部地震の7Hz帯域を例にして得られた距離減衰曲線とBRMとの対応関係を図3に示す。DSは震源近傍で卓越するが $r = 40 \text{ km}$ 付近で消失し、遠方ではISが主要な成分となる。

最適化による $C_{\text{IS}}(f)$ を他の地域の結果^{1), 2)}と合わせて図4に示す。 $C_{\text{IS}}(f)$ はいずれの地域でも概ね0.1前後の値である。また、各地震の $S_{\text{DS}}(f)$ を図5に示す。 $S_{\text{DS}}(f)$ の大小関係は概ね M_w に従っている。図6では2016/10/21鳥取県中部の地震($M6.6$)の $S_{\text{DS}}(f)$ 、 $S_{\text{IS}}(f)$ を波形インバージョン⁵⁾による震源スペクトル $S(f)$ と比較した。 $S_{\text{DS}}(f) > S(f) > S_{\text{IS}}(f)$ の傾向は他地域^{1), 2)}と同様である。

図7はDSとISのQ値と従来の線形回帰($\ln A = c - \ln r - br$)によるQ値であり、それぞれ大振幅データに線形化補正をした場合(Corrected Data)、しなかった場合(Observed Data)の結果を示している。DSのQ値だけが線形化補正で大きく変わっている。

■誤差

全距離範囲ではモデルや線形化補正による誤差の違いは小さい(図8)。しかし、震源近傍($r \leq 20\text{km}$)では、従来法(LSQ)が高周波数側で過小評価になること(図9)、線形化補正が高周波領域のばらつき低減に効果があること(図10)が分かる。

■まとめ

本研究の距離減衰モデルの震源近傍における適用性を確認し、大振幅記録に対する線形化補正が高周波数領域の精度向上に関して有効であることを確認した。

■謝辞

防災科学技術研究所K-NET, KiK-net, F-netのデータを使用させていただきました。記して感謝します。

■参考文献

1)池浦(2021)地震学会年大会, 2)池浦(2022)JpGU, 3)池浦(2020)日本地震工学会論文集, 4)上野他(2002)験震時報, 5)気象庁(2017)国内の地震の解析結果

表1 解析地震の諸元

No.	Date Time	North Lat. (degN)	East Long. (degE)	Depth (km)	M_J
#01	1997/06/25_18:50	34.4415	131.6662	8.3	6.6
#02	1997/09/04_05:15	35.2620	133.3767	8.9	5.5
#03	2000/10/06_13:30	35.2742	133.3490	9.0	7.3
#04	2000/10/08_13:17	35.1393	133.1502	6.8	5.6
#05	2000/10/08_20:51	35.3688	133.3107	8.3	5.2
#06	2002/09/16_10:10	35.3700	133.7393	9.6	5.5
#07	2016/10/21_14:07	35.3805	133.8562	10.6	6.6
#08	2016/10/21_14:53	35.3613	133.8678	8.9	5.0
#09	2018/04/09_01:32	35.1847	132.5867	12.1	6.1
#10	2018/06/26_17:00	34.9315	132.8718	11.6	5.0

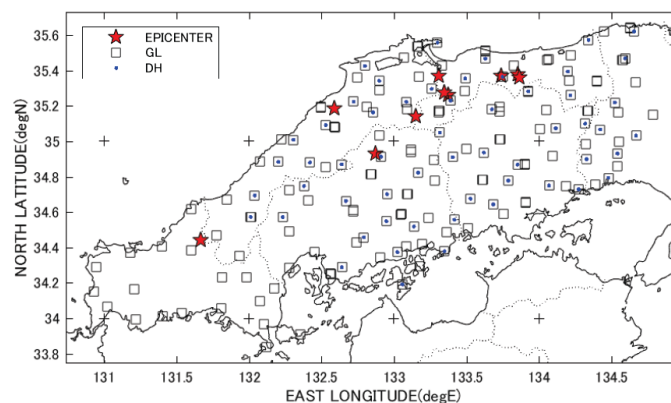


図1 震央と観測地点の分布

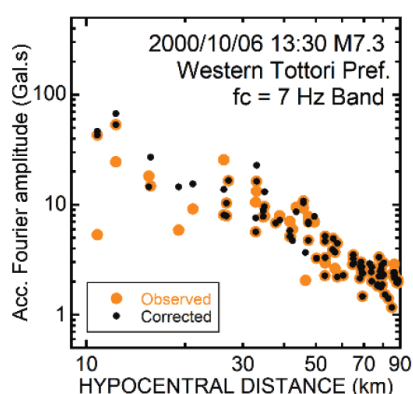


図2 BRM 振幅の距離減衰分布

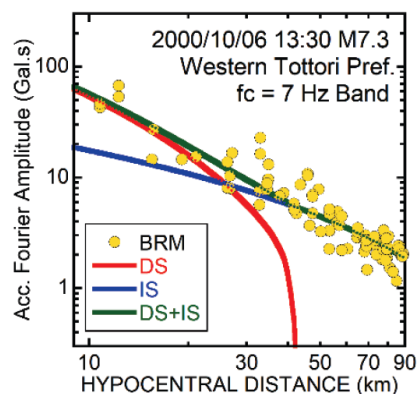


図3 BRMと距離減衰曲線

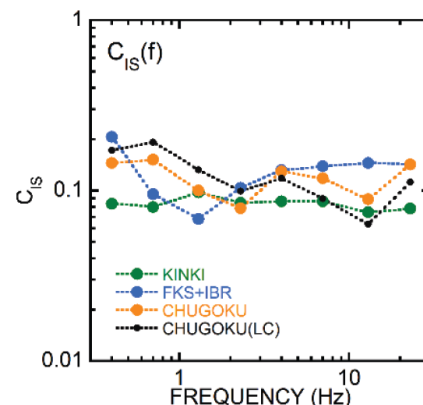
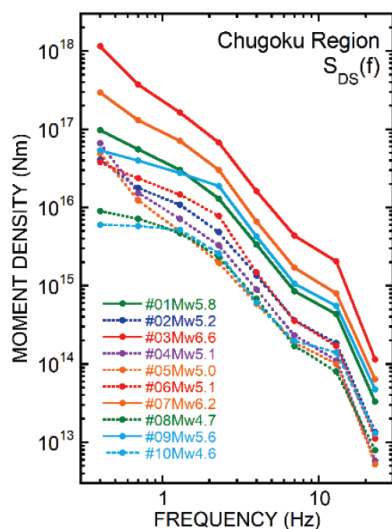
図4 $C_{IS}(f)$ 

図5 DSの震源スペクトル

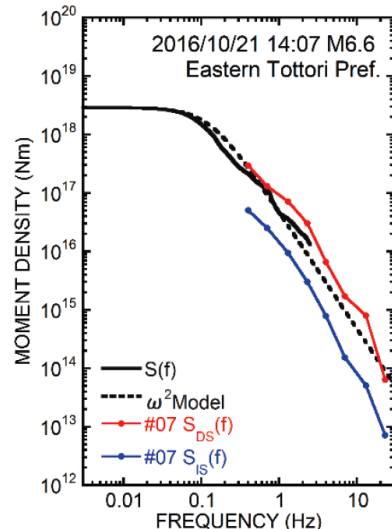


図6 #7地震の震源スペクトル

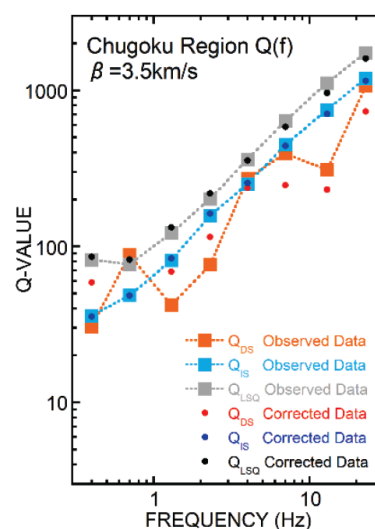


図7 Q値

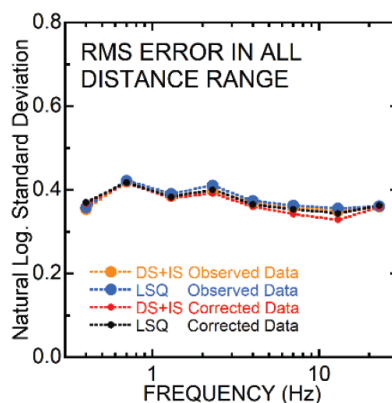


図8 全距離範囲誤差

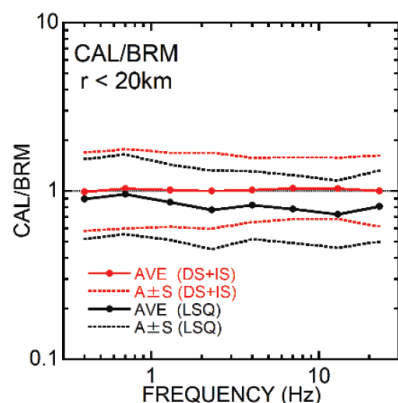


図9 震源近傍の計算/BRM

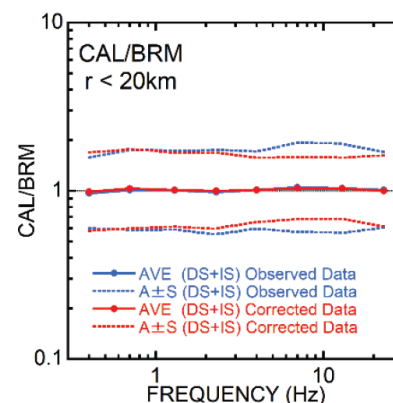


図10 線形化補正の効果

Correlation between strong motion intensities based on the unified strong motion database by NIED

*Hongjun Si^{1,2}, Asako Iwaki³, Nobuyuki Morikawa³, Hiroyuki Fujiwara³

1. Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, 2. Seismological Research Institute Inc., 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

簡易的な地震動予測方法として地震動モデル (Ground Motion Model; GMM) は広く用いられているが、GMMは過去に発生した地震による観測記録を用いて回帰分析等を行い、経験的に構築されるものである。通常、GMMは目的変数である地震動強さのパラメータ (最大加速度、最大速度、応答スペクトルなど) をマグニチュード、震源距離などの説明変数の関数として構築されている。これまでに世界中に多くのGMMが提案されているが、これらのGMMでは、目的変数となる地震動強さのパラメータの定義はさまざまであり、例えば同じ水平地震動の最大値でも水平2成分の最大値のうち、大きいほうの値なのか、その平均値なのかで異なる。そのため、GMMを用いた地震動評価を行う際に、地震動強さパラメータの補正が必要になる。これまでの研究では、福島(1993)によるレビュー論文では、Campbell (1985)を引用した形で地震動強さパラメータ間の関係を議論されているが、検討の詳細は明らかにされていないようである。そこで、本研究では、森川・他 (2022)による強震動データベースに収録されている豊富な観測記録を利用して、地震動強さパラメータ間の関係を調べたので、その結果を報告することとした。検討対象になるのは、下記のものとする。

(1) 地震動最大値のうち、水平2成分のうち大きいほうの値とその平均値の違い (2) 地震動最大値 (PGA、PGV) と応答スペクトルとの関係 (3) 計測震度とその他の地震動パラメータ (PGA、PGV、SI値等) の関係

本研究により、暫定的な検討結果として、以下のことが分かった。

(1) 地震動最大値のうち、水平2成分のうち大きいほうの値PGAmとその平均値PGAvの関係は、 $\ln PGAv = 0.995 \ln PGAm - 0.156$ で表すことができる。

(2) PGAは5%減衰0.02秒加速度応答スペクトルのRotD50にほぼ等しいことが分かり、PGVは5%減衰0.5秒～1秒加速度応答スペクトルのRotD50のうち、5%減衰0.6秒のRotD50との相関関係 (Pearson相関係数) が最も強いことは分かった。

(3) 計測震度とPGA、PGV、SI値の関係のうち、PGA、SI値との相関が高く、Pearson相関係数では、それぞれ0.60と0.54の値となった。今後、強震動データベースの詳細をさらに調べを行い、より詳細な解析を実施したいと考えている。

Comparison of Ground-Motion Models based on the Strong Motion Database

*Asako IWAKI¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Tomohisa Okazaki², Hisahiko Kubo¹, Hongjun Si³, Atsuko Oana⁴, Toru Ishii⁴, Yusuke Tomozawa⁵, Tomoki Hikita⁵

1. National Research Institute for Disaster Resilience, 2. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 3. Seismo Research, 4. Osaki Research Institute, 5. Kajima Technical Research Institute

強震動観測記録に基づく経験的な地震動予測モデル（Ground Motion Model; GMM）は確率論的地震ハザード評価(Probabilistic Seismic Hazard Assessment; PSHA)の基盤となる。日本国内では豊富な強震記録に基づいて多くのGMMが作られ分析が進められてきたが、作成条件やデータセットの異なるGMM同士はデータ処理方法や地震動指標値が異なるため定量的比較が難しい場合があり、強震動予測やPSHAにおける認識論的不確定性を増加させる要因となっている。そこで、強震観測記録を統一的に扱うことのできる共通基盤としての強震動データベースとそれに基づく複数のGMMを構築する取り組みを進めている（森川・他, 2022）。本研究では、GMMのばらつきや認識論的不確定性の定量化を目指し、防災科研のK-NET, KiK-net観測記録による地震動指標値、防災科研J-SHISの地盤情報も含めた観測点情報、気象庁一元化処理震源及び防災科研F-netの震源情報からなる強震動データベース（森川・他, 2022）を用いて作られた複数のGMMについて、定量的な比較と特徴付けの方法を検討する。本検討で用いるGMMは以下の6つである。これらのGMMには、定式化を伴う回帰分析をベースにしたもの（モデルA, B, F）、定式化を伴わない機械学習によるもの（モデルC）、それらの組み合わせによるもの（モデルD, E）が含まれる。

モデルA：Morikawa and Fujiwara (2013; MF13式)に遠方補正を適用したモデル（森川・他2021）

モデルB：司・翠川(1999)をM8.3以上の大地震に対応させたモデル（司・瀬瀬・三宅2016）

モデルC：一部の入力変数（M・距離・VS30）に単調依存性を課したNeural networkによるモデル (Okazaki et al. 2021)

モデルD：MF13式とExtremely Randomized Treeの組み合わせによるモデル（Kubo et al. 2020）

モデルE：MF13式による出力も説明変数に加えた勾配ブースティング木のモデル（小穴・他, 2022）

モデルF：ブロックインバージョン解析による地殻の不均質Q値を反映させ伝播経路特性の不均質性を考慮したモデル（友澤・引田2022）

一般にGMMには地震動特性を長期間・広範囲で捉えた時の平均値の安定性を仮定して全観測点で得られた記録を使用したエルゴード的なGMMのほか、観測点固有のサイト特性を反映させたGMMや、豊富な観測記録を活用し震源位置や対象地点を特定することによりさらにばらつきを低減させたGMMも開発されている。特に、特定地点のPSHAの目的においては、観測点固有のサイト特性を反映したGMMの重要性は高い。上記6モデルのサイト特性の反映方法はさまざまであり、またモデルEとFはGMMの入力に観測点・震源位置の両方を指定するモデルとなっている。本検討では、このように作成方法や特徴の異なる複数のGMMについて特徴を比較するため、いくつかの指定した観測点において、いくつかのタイプの地震に対する地震動予測結果を比較する。その際、GMMへの入力変数として

(1)該当観測点の地盤情報を反映したパラメータ（VS30など）のみを用いる場合

(2)該当観測点固有の情報（位置情報等を含む）を用いる場合

のいずれかまたは両方について、各モデルの出力結果の比較を行い、それぞれの違いを考察するとともに、観測点固有のサイト特性の反映方法が予測結果に及ぼす影響を検討する。

謝辞：本研究はJSPS科研費(20H00292)の助成を受けたものである。

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 2:00 PM - 3:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 5:00 AM - 6:15 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-1

chairperson: Kazuhito Hikima (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.), Wataru Suzuki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S15-17] Automatic Hypocenter Determination with the IPFx method for the 2018 Hualien earthquake sequence

*Masumi YAMADA¹, Dayi Chen² (1. Kyoto University, 2. Central Weather Bureau, Taiwan)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S15-18] Rupture processes of the 2021 and 2022 Fukushima-oki earthquakes: Reactivation of the faults in the subducting slab originally formed in the outer-rise region

*Hiroaki KOBAYASHI¹, Tetsushi Watanabe¹, Kazuki Koketsu² (1. Kobori Research Complex, 2. Graduate School of Media and Governance, Keio University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S15-19] Comparative study of strong motion distributions of the two *M*7-class Off Fukushima earthquakes in 2021 and 2022

*Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Takeshi Kimura¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S15-20] Source Processes of the Off Fukushima Intra-slab Earthquakes in March 2022 and February 2021 - Analysis using 3D subsurface structure -

*Kazuhito HIKIMA¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S15-21] Ground motion in the Tokyo metropolitan area for the 2021 Northwestern Chiba earthquake

*Hiroe MIYAKE¹, Miki UEHARA¹ (1. ERI, Univ. Tokyo)

Automatic Hypocenter Determination with the IPFx method for the 2018 Hualien earthquake sequence

*Masumi YAMADA¹, Dayi Chen²

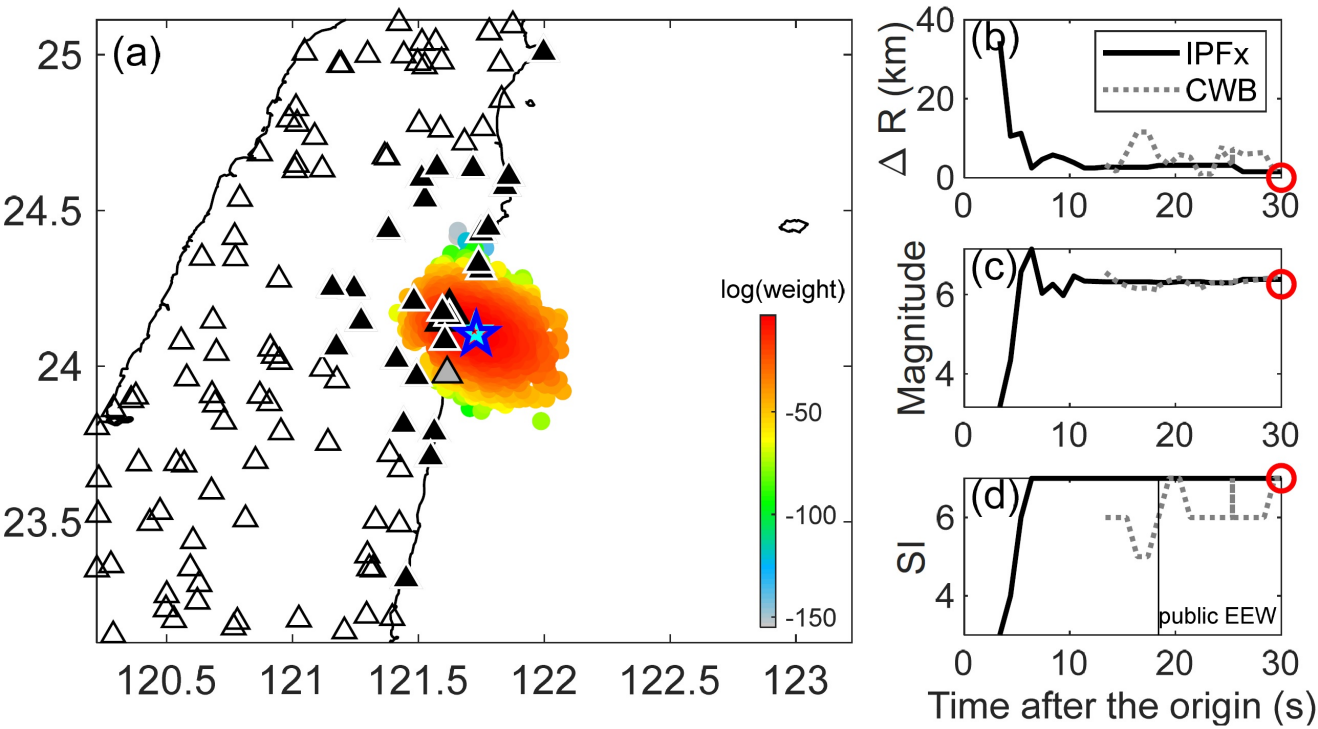
1. Kyoto University, 2. Central Weather Bureau, Taiwan

The extended integrated particle filter (IPFx) method is an automatic source determination algorithm designed for the Japanese earthquake early warning (EEW) system. The method improved earthquake source determination during active seismicity by incorporating the smart phase association scheme. We applied this method to the 2018 Hualien earthquake sequence and evaluated its performance by comparing it to the manual catalog.

We used 1-month continuous waveforms from February 2018 at 170 stations. Owing to the higher noise level, we improved the phase association algorithm to avoid noise contamination. The IPFx method detected the Hualien mainshock 9 s faster than the CWB EEW system and would have provided the warning 12 s earlier (Figure 1).

The detectability of the IPFx method was sufficient for use in EEW. Out of 127 earthquakes with a seismic intensity 4, 105 were successfully detected in one month, of which 103 had good accuracy with a location error of <30 km. Earthquakes in the manual catalog with magnitude 5 were mostly detected, while earthquakes with a magnitude between 2 and 5 were missed if they occurred immediately after large earthquakes. Except for the earthquakes with an interval <5 s, the detectability of the IPFx method agrees with the CWB manual catalog. The method was also applied to the 1-day continuous data on April 18, 2021, and detected 14 earthquakes with a magnitude ~2 that were not on the manual catalog.

Currently, the Central Weather Bureau in Taiwan uses the effective epicenter method to locate earthquakes for the EEW system. However, source determination for offshore events is difficult as most of the stations are on land. We expect the IPFx method to provide better location estimates for offshore earthquakes and during the period of active seismicity. It also provides an earlier warning as it sends the first message when three stations are triggered. This new method can potentially improve the speed and accuracy of the Taiwanese EEW system.



Rupture processes of the 2021 and 2022 Fukushima-oki earthquakes: Reactivation of the faults in the subducting slab originally formed in the outer-rise region

*Hiroaki KOBAYASHI¹, Tetsushi Watanabe¹, Kazuki Koketsu²

1. Kobori Research Complex, 2. Graduate School of Media and Governance, Keio University

2021年と2022年に福島県沖で発生した M_{JMA} 7.3と M_{JMA} 7.4の2つのスラブ内地震は、共に宮城県と福島県で最大震度6強が観測され、人的・住家被害が出た。余震分布などから、これら2地震はスラブ内で隣接する領域を破壊したと見られる。本研究では、これら2地震の断層構造と破壊過程を把握するため、強震・遠地・測地データを用いて震源過程解析を行った。

強震波形はK-NET, KiK-net, JMAのデータを用いた。解析には0.05-0.4 Hzのバンドパスフィルタをかけた速度波形を用いた。遠地波形はIRIS-DMCからデータを入手した。解析には0.01-0.4 Hzのバンドパスフィルタをかけた変位波形を用いた。測地データは、国土地理院のGEONETの日々の座標値 (F5解) を用いた。地震時の変位はGEONET岩崎 (950154) を固定し、地震前後7日間の平均値の差を取ることで求めた。

震源インバージョン手法はマルチタイムウィンドウ線形インバージョン法(Yoshida et al. 1996; Hikima and Koketsu, 2005)を用いた。観測点が震源から見て片側にしかないため、ジョイント時は強震・測地のデータセットの重みは遠地の半分を設定した。強震・測地・遠地のグリーン関数の計算には、それぞれKoketsu (1985), Kikuchi and Kanamori (1991), Zhu and Rivera (2002)の手法を用いた。グリーン関数の計算に用いた1次元地下構造モデルは、強震観測点および遠地の震源付近の構造については全国一次地下構造モデル(JIVSM, Koketsu et al., 2008; 2012)を基に構築した。その際、陸側のマントルまでと海洋性マントル (深さ43 km以深に一律に挿入) を考慮した。遠地観測点付近の構造はJ-Bモデルとし、測地観測点は強震観測点MYG011の速度構造モデルを共通して用いた。

断層モデルの構築にあたり、まずHypoDD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により、それぞれの余震を同時に再決定した。その後、それぞれ本震後24時間の震源分布および各機関のメカニズム解を参考に断層モデルを構築した。2021年については、震源付近に西北西傾斜の面 (strike 190°, dip 35°と60°), 震源より南西側に東南東傾斜の面 (strike 32°, dip 32°と52°) を仮定した。面はそれぞれ震源深さ付近で傾斜方向に折り曲げている。震源付近の低角の面は余震分布からは不明瞭であるが、JMAの初動解をもとに設定した。断層長さはそれぞれ10 kmと35 kmとし、幅は共通して20 kmとした。2022年については、東南東傾斜の面 (strike 15°, dip 40°と52°) を仮定し、こちらも2021年と同様に震源深さ付近で傾斜方向に折り曲げた。断層長さは50 km, 幅は25 kmとした。また、余震分布に整合させるために北半分については東側に数 km程度ずらしている。インバージョン解析では断層を5 km×5 kmの小断層に分割し、基底関数としては幅1秒の箱型関数を設定した。

解析の結果、2021年はまず西北西傾斜の面上で破壊が始まり、その後東南東傾斜の面が破壊した。破壊はup-dip方向および南南西方向に進んだ。また、東南東傾斜の面の中央付近に最大すべり量4.4 mが得られた。震源時間関数は破壊開始後9秒程度に最大となり、地震モーメントは 6.1×10^{19} Nm (M_w 7.1)と推定された。なお、第一タイムウィンドウの破壊開始時刻を決める V_r は2.9 km/s, 各小断層のウィンドウ数は6とした。2022年については、震源から主に北北東およびup-dip方向に破壊が伝播した。断層中央付近に最大すべり量4.9mが得られた。震源時間関数は破壊開始後6秒後と13秒後程度に2つのピークを持ち、主に断層中央と北部のすべりに対応するが、破壊開始後12s程度以降に震源付近が遅れて破壊しており、後者のピークはその寄与もあるとみられる。地震モーメントは 1.4×10^{21} Nm (M_w 7.4)と推定された。第一タイムウィンドウの破壊開始時刻を決める V_r は2.5 km/s, 各小断層のウィンドウ数は12とした。

近年の東北沖アウターライズ領域の調査によると、アウターライズ領域の断層のDip角は浅部で最大75°, 深部では45~60°程度である (e.g., Baba et al., 2020)。Iwasaki et al. (2015)のプレート境界モデルでは、今回2つの地震が発生した領域のプレートの傾斜は20°程度である。したがって、2021年と2022年の断層面のプ

レート境界面からの角度は余震分布からは不明瞭な2021年の破壊開始点付近の断層を除いて40~70°程度となり、アウターライズ領域の断層のDipと概ね整合的で、2011年の宮城県沖のスラブ内地震（Nakajima et al., 2011; Ohta et al. 2011）と同様に、スラブ内地震がアウターライズ領域で形成された断層の再活動であるという説（e.g., Silver et al., 1995; Jiao et al., 2000）を支持する。

Comparative study of strong motion distributions of the two $M7$ -class Off Fukushima earthquakes in 2021 and 2022

*Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Takeshi Kimura¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2021年2月13日に福島県沖で M_w 7.1のスラブ内地震が発生し、2022年3月16日には再び福島県沖で M_w 7.3のスラブ内地震が発生した。本稿では前者をEQF2021、後者をEQF2022とする。気象庁一元化震源情報に基づく2つの地震の震央間の距離は約8 km、深さはともに約56 kmであり、破壊開始点は非常に近接していた。防災科研AQUA-CMTによるセントロイドの水平位置の距離は約23 km、セントロイド深さの差は3 kmと破壊開始点に比べるとやや離れている。防災科研K-NET及びKiK-netによる三成分合成最大加速度（以下、PGA3）の分布を比較すると、震源域西方から南西の方向に位置する福島県内ではEQF2021とEQF2022で大きく変わらず、観測点によってはEQF2021の方が大きいケースも見られた。震源域北方の宮城県から北海道にかけてはEQF2022の方が大幅に大きく、PGA3が2倍以上となる観測点が100点弱に及ぶ。福島県以南では最大加速度が2倍以上となる観測点は兵庫県の1点を除き存在せず、南方の観測点では北方の観測点に比べてEQF2022とEQF2021のPGA3の比は大きくない。スラブ内地震どうして M_w では0.2、地震モーメントでは2倍ほどEQF2022の方が大きいところ、PGA3の分布は単純に一律にEQF2022の方が大きい訳ではないことは興味深い。消防庁の被害状況集計によると、福島県と宮城県のEQF2021に対するEQF2022の住家被害棟数はそれぞれ約1.2倍と約1.5倍であり、EQF2022により特に宮城県が強い揺れに見舞われたことに対応していると考えられる。本研究ではこの近接して発生した2つの福島県沖の地震による強震動分布を比較分析して、その特徴及びその成因について検討を行った。

周期0.05秒から10秒までの加速度応答値（減衰5%）のEQF2021に対するEQF2022の比の分布を見ると、0.05～0.5秒ではPGA3と同様の特徴を示すが、0.6～1.0秒では福島県から関東地方内陸部さらに中部地方にかけてEQF2021の方が大きい観測点が増加する。さらに周期1.5秒以上では一転して東日本全体でEQF2022の方が大きく、この長周期帯域では地震モーメントの差が大きく影響していると考えられる。最大加速度の比較において地震モーメントの違いを補正した比較を行うため、まず観測された水平最大加速度とMorikawa & Fujiwara (2013) の地震動予測式による予測との比をとり、その比についてのEQF2021に対するEQF2022の比をとった。PGA3の比では震源域北方で一様にEQF2022が大きかったが、この分布では空間的に短波長に変化しており、EQF2022は宮城県中部から北部、そして岩手県の沿岸部にかけての揺れが特徴的に大きい様子が見られた。また振幅の大小の影響を抑えて分布形状そのものを分析するため、EQF2021からEQF2022の間に福島県沖で発生しK-NET及びKiK-netで100点以上の記録の得られた地震に対するEQF2021とEQF2022のPGA3の比をとり、比ができるだけ一定となる場合に分布が似ていると考えて比の対数標準偏差を最小とする地震を抽出した。EQF2021に対しては2021年2月15日21時26分に発生した M_w 5.3の地震（以下、EQ0215）、EQF2022に対しては2021年12月8日16:22に発生した M_w 4.7の地震（以下、EQ1208）が対数標準偏差を最小にした。EQ1208の震央位置とセントロイド位置はEQF2021の震源とセントロイド、EQF2022の震源位置に近接している一方、EQ0215の震源位置とセントロイド位置はそれらの領域より南～南西に20 km程度離れており、EQF2021に比べてEQF2022のPGA3分布が北方に延びていることに対応していると考えられる。

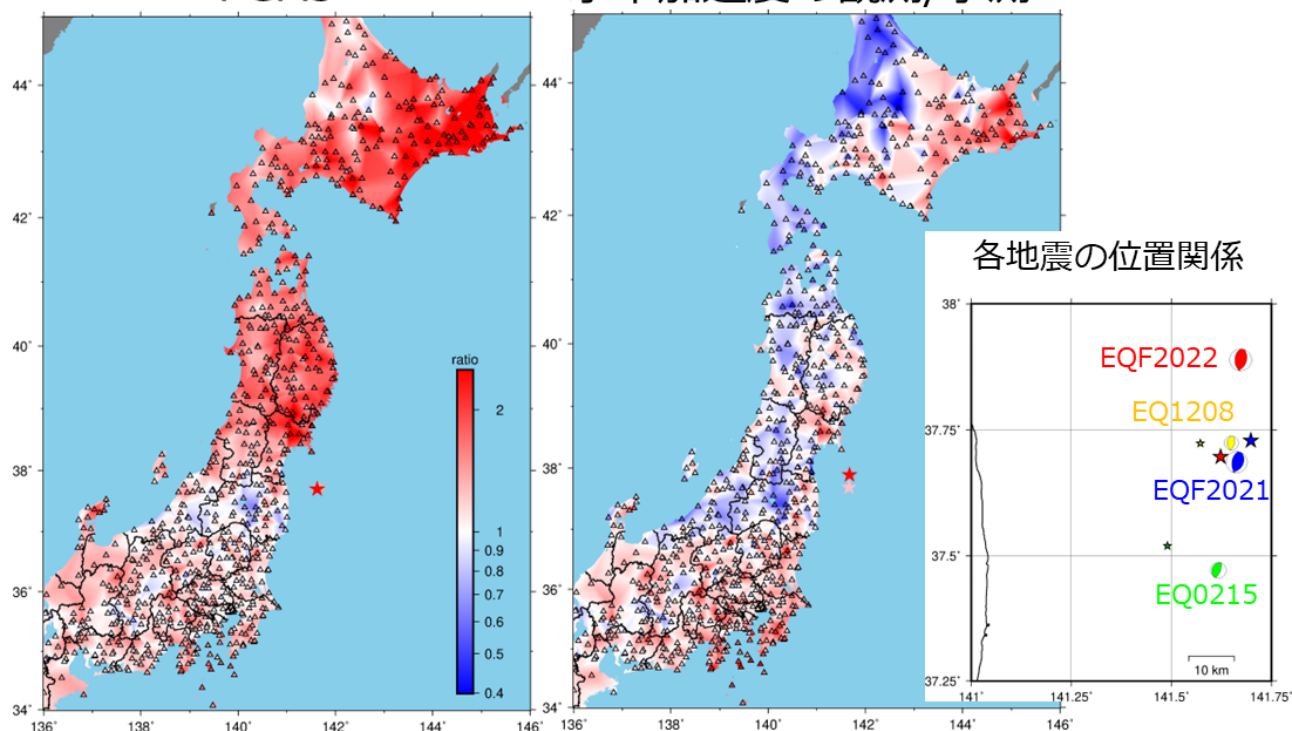
本研究では近傍で発生した地震どうしによる強震動分布の比を用いているため、パス及びサイト特性は相殺され震源特性に起因する地震動分布の差異を分析しているとみなせる。震源インバージョン解析ではEQF2021は破壊開始点から南西に、EQF2022は北に破壊が進展したと推定されており、本研究による結果と定性的には整合する。震源特性のうち、破壊伝播効果、強震動生成位置の違い、放射特性もしくはその他の効果のいずれがEQF2021とEQF2022の地震動分布の差異の主因であるかの検討は今後の課題である。

謝辞：気象庁による震源情報と消防庁による被害状況集計を利用しました。

EQF2021に対するEQF2022の比の分布

PGA3

水平加速度の観測/予測



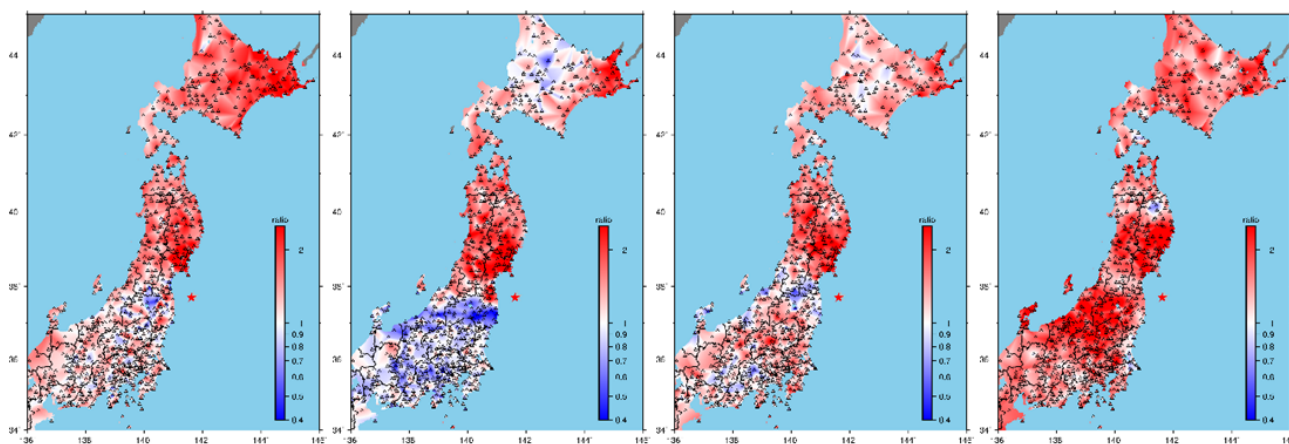
加速度応答値

0.5秒

0.9秒

1.5秒

4秒



Source Processes of the Off Fukushima Intra-slab Earthquakes in March 2022 and February 2021 - Analysis using 3D subsurface structure -

*Kazuhito HIKIMA¹

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute

【はじめに】

2022年3月16日に福島県沖でMj7.4の地震が発生した。この地震の震源の近傍では、昨年、2021年2月13日にもMj7.3の地震が発生しており、わずか1年余りでM7クラスの地震が発生したことになる。いずれの地震でも福島県・宮城県で最大震度6強が観測され多くの被害が発生した。これらの地震は西北西－東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型で、太平洋プレート内で発生した地震である（地震調査委員会,2021,2022）。

我々は、2021年の地震に対して、強震波形を使い太平洋プレートを含む3次元速度構造を考慮したGreen関数による震源インバージョン解析結果を実施した(引間, 2021)。本報告では、2022年3月の地震に対して同様の手順で震源解析を行った結果を示すとともに、2021年の地震も再解析し2つの地震の相違などについても議論する。スラブ内地震による強震動を考える上でも、震源過程の解析が必要である。

【震源再決定】

震源インバージョン解析に先立ち、本震・余震の地震の震源再決定を行った。2022年、2021年ともに本震発生後4週間以内に発生した地震について、防災科研のWebサイトで公開されている気象庁一元化処理による検測値を用いて、DD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により震源決定を行った。(Fig.1)

再決定された余震分布はどちらも北北東－南南西方向に並びその範囲は40 km程度に及ぶ。2022年の震源は2021年の震源よりも若干北に位置する。一方で2022年の地震では余震は主に震源よりも北北東で発生しているのに対して、2021年の地震では震源の南南西で発生した余震が多い。すなわち、2022年の破壊は北北東方向に、2021年の破壊は南南西方向にユニラテラル的に進展したものと考えられる。

どちらの余震も東南東側に高角に傾き下がる面状に分布しているが、それらの並びはある程度の幅を有している。特に、2021年の地震ではより低角な平面状に並ぶ余震群も見られた。

【震源過程解析】

震源域が海域に位置するためやや遠い観測点も含まれるものの、震源から120 km程度以内のKiK-netの波形記録を震源インバージョン解析に使用した。また、福島県内にある東京電力の地震観測点での観測記録も解析に加えた。なお、浅部地盤による影響を軽減するために地中記録の使用を基本とした。加速度波形に0.03～0.6 Hz をフラットレベルとするバンドパスフィルタをかけて積分した速度波形を解析に用い、インバージョンはマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al., 1996; 引間, 2012)により行った。

解析の際の断層面は、再決定した余震のうち、本震後1日以内に発生した余震の分布やF-netによるメカニズム解を参考に、さらに予備的解析を行い観測波形と合成波形との残差も考慮して設定した。2022年の地震は余震分布からは局所的に異なる面が存在する可能性は考えられるものの、それらを特定することは難しいため、走向:30°、傾斜:40°の長さ44 km、幅30 kmの1枚の矩形断層を設定してすべり分布を求めることとした。2021年の地震は引間(2021)と同様に、主断層面は走向:37°、傾斜:45°の長さ40 km、幅24 kmの矩形断層とし、長さ14 km、幅12 kmの傾斜:20°の副断層面を付加した。なお、小断層サイズは2 km×2 km とした。

【3次元速度構造による波形計算】

Green関数は3次元速度構造モデル(JIVSM; Koketsu et al., 2012)を使い、3次元差分法により計算を行った。Green関数の計算は相反定理を用いて行った。格子点間隔は水平方向に200 mの等間隔、鉛直方向には50～200 mの不等間隔、時間刻みは0.005 sとした。

【解析結果】

2022年の地震では、震源付近と走向方向に12～24 km程度北北東に離れた付近に大きなすべりが求まった(Fig.2)。最大すべり量は約3.1 mである。2021年の地震では、震源から南西側に12～20 km程度離れたやや浅

部に大きなすべりが求めた。最大すべり量は2.8 m程度、副断層では約1.8 mである。地震モーメントは2022年の地震は 1.03×10^{20} Nm (M_w 7.3), 2021年の地震は全体で $M_0 = 5.45 \times 10^{19}$ Nm (M_w 7.1)と求めた。なお、これらは震源付近の3次元速度構造を考慮した値である。いずれも、JIVSMによる太平洋プレート海洋性マントル内に震源が存在し、主要な断層すべりは海洋性地殻第2層以深に止まっているように見える。2021年、2022年の一連の地震はスラブ内地震の複雑性を示しているが、今回の震源解析結果は断層モデルを考える上で参考となるものと考えられる。

謝辞：本検討ではKiK-netおよびF-netメカニズム解、JMA一元化データを使用させて頂きました。

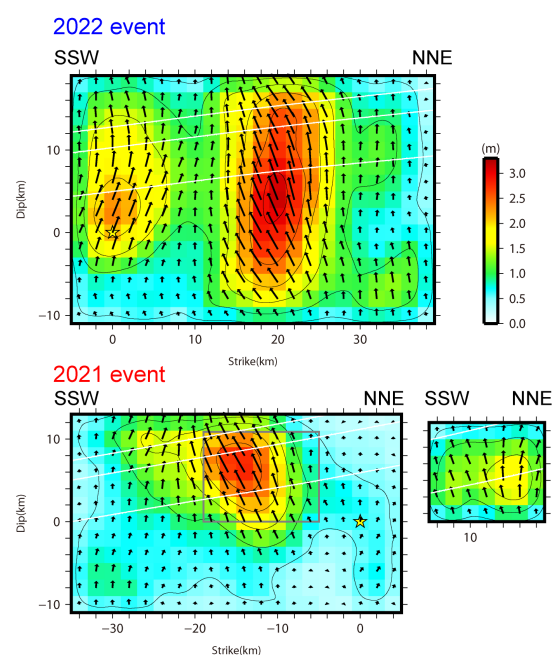
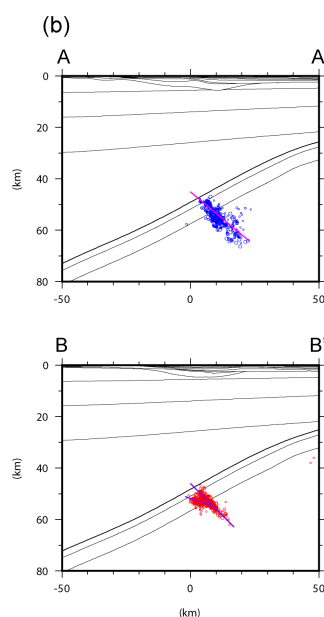
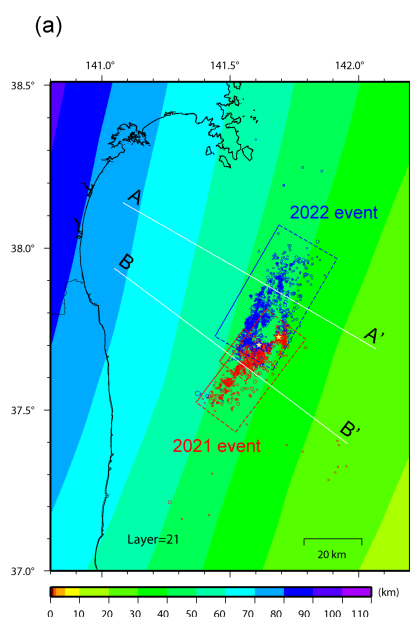


Fig. 1 (a) Aftershock distribution for the 2022 event (blue) and the 2021 event (red). The aftershocks occurred within 4 weeks after the mainshock are relocated using the DD method, respectively, and the events larger than $M_{2.5}$ are plotted. The fault positions are also depicted using the corresponding color. The color contour denotes the depth of upper boundary of the Pacific plate. (b) The cross sections at the white lines in Fig. (a). The boundary of subsurface structure model, the aftershock distribution, and the sections of the fault models are plotted.

Fig.2 Slip distributions on the faults for the 2022 and 2021 events. The arrows show the slip of the hanging wall. The white lines denote the boundary of the layers in the subducting plate of the JIVSM. The fault of the 2021 event consists of two planes, and the projected position of the subfault is shown as gray lines in the main fault. The yellow stars denote the hypocenters.

Ground motion in the Tokyo metropolitan area for the 2021 Northwestern Chiba earthquake

*Hiroe MIYAKE¹, Miki UEHARA¹

1. ERI, Univ. Tokyo

2021年10月7日に千葉県北西部の深さ75 kmで気象庁マグニチュード5.9 (Mw 5.9~6.0) の地震が発生した。この地震は、2005年7月23日に千葉県北西部の深さ73 kmで発生した気象庁マグニチュード6.0 (Mw 5.9~6.0) の地震の繰り返し地震と考えられ、それ以前の太平洋プレートの沈み込みに伴うM6クラスの地震との類似性(地震調査委員会, 2005, 2021; 鎌谷・勝間田, 2022)も指摘されている。

2021年と2005年の地震の地震動を比較すると、いずれの地震も最大震度は5強で、これらの高震度は自治体震度計により観測されている。2021年と2005年の地震の計測震度は、東京足立区伊興で5.1と5.0、埼玉川口市三ツ和(旧鳩ヶ谷市)で5.0と4.5、埼玉宮代町笠原で5.0と4.5であり、これらの3観測点においては、2021年の地震の計測震度の方が大きかった。

東京大学地震研究所の首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)では、自治体が運用する震度計等の観測波形データを、研究利用に限定して取得している。東京足立区伊興では、東西成分卓越する地震動が観測されており、計測震度の差は0.1であるが、周期1秒において2021年の東西成分の擬似速度応答は100 cm/sに達し、2005年の応答の約2倍となっている。また、観測点の移設等はないことを確認している。埼玉県2観測点についても、いずれも2021年の東西成分が大きく、高震度の原因となっている。

2021年と2005年の地震の観測記録については、鎌谷・勝間田(2022)は、東京大手町の気象庁震度計の東西成分を対象に相関係数0.93を求めているが、前述の高震度観測点の変位波形における相関係数はいずれもこの値よりも低く、2011年東北地方太平洋沖地震に起因する地盤特性の速度低下および時間変化等の影響が示唆される。本発表では、これらの地震の首都圏における強震動分布の特徴と空間相関係数の周期依存性について紹介する。

謝辞: 本研究ではK-NET・KiK-netの強震記録と、首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)を通して、東京都・東京消防庁・神奈川県・横浜市・埼玉県・千葉県・山梨県・群馬県・栃木県・茨城県・長野県・静岡県および東大地震研の強震計・震度計の観測波形データを利用しました。

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:30 PM - 4:30 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:30 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-2

chairperson:Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute), Fumino Suzuki(Kobori Research Complex INC.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S15-22] Preliminary analysis of residual data between strong-motion records and calculations by a ground motion model

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Asako IWAKI¹, Takahiro MAEDA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S15-23] Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: Remodeling of source parameters and estimation of detailed seismic intensity distribution

*Fumino SUZUKI¹, Tetsushi WATANABE¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹ (1. KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S15-24] Strong Motion Simulation of 2016 Kumamoto Earthquake Mainshock Using Dynamic Rupture Modeling

*JIKAI SUN¹, HIROSHI KAWASE¹, ARBEN PITARKA², FUMIAKI NAGASHIMA¹, ERI ITO¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Lawrence Livermore National Laboratory)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S15-25] Reevaluation of strong ground motions during the 2016 Kumamoto earthquake sequence utilizing regional spectral inversion analysis

*Yosuke NAGASAKA¹ (1. Port and Airport Research Institute)

Preliminary analysis of residual data between strong-motion records and calculations by a ground motion model

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Asako IWAKI¹, Takahiro MAEDA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

我々はこれまで、様々な強震動予測モデルの構築、改良、検証を可能とする強震動データベースを試作（森川・他、2020；JpGU）するとともに、モデルの改良とばらつきの分析を目的としてMorikawa and Fujiwara (2013)の地震動予測モデル（以下、MF13）の予測値に対する振幅比から成る「残差データ」を作成してきた（森川・他、2020；地震学会秋季大会）。さらに、この「残差データ」をもとに、MF13の適用範囲をモーメントマグニチュード（Mw）5.5未満の地震、断層最短距離200km以遠に拡張する追加補正項を求めた（森川・他、2021；地震学会秋季大会）。

本検討では、2018年3月から2021年末までのK-NET、KiK-netデータを追加し、地震タイプ（地殻内地震、海溝型プレート間地震、海溝型プレート内地震）に関する信頼性を向上させた強震動データベース（森川・他、2022；JpGU）を用いてあらためてMF13の地震動予測モデルに対する残差のデータセットを作成する。残差のデータセットの作成において予測値を求める際には、地盤増幅および観測点から火山フロントまでの距離をパラメータとした異常震域に関する補正項は考慮しない一方で、フィリピン海プレートの海溝型プレート内地震に対する追加補正（森川・藤原、2015；JpGU）と上述の森川・他（2021）による追加補正を適用した。

このようにして作成した残差データについて、Morikawa et al. (2008)に基づき「地震間」と「地震内」の残差への分離を行い、その特徴について分析する。「地震間」の残差については地震ごとにMwと震源深さとの関係を調べたところ、震源が50km程度から200km程度にかけて深くなるほど残差が大きい（観測値が予測値より大きい）傾向が海溝型プレート内地震の最大加速度をはじめとした短周期成分において見られた。ただし、それ以外の震源深さや周期1秒程度以上、他の地震タイプでこの深さ依存性は見られない。一方、「地震内」の誤差について観測点ごとにMwと震源深さに加え断層最短距離との関係を調べたところ、断層最短距離に対して「残差」の依存性が見られる点が存在している。このことは、特定地点を対象とした、あるいは伝播経路の違いによる減衰の違いを考慮した地震動予測モデル構築の有効性を示している。以上より、海溝型プレート内地震に対して震源深さに関する補正項を求めることでエルゴード的なMF13モデルのさらなる改良が見込まれる。また、観測点ごとに見られる「残差」の距離依存性を取り込む非エルゴード的なモデルの構築などの予測値の中央値（あるいは平均値）に関する改良の方向性が示された。

今後は別の地震動予測モデルを用いた場合についての検討を行うとともに、「残差」の分布形状と地震規模、断層最短距離などとの関係についての分析を進める予定である。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費(20H00292)の助成を受けたものである。

Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: Remodeling of source parameters and estimation of detailed seismic intensity distribution

*Fumino SUZUKI¹, Tetsushi WATANABE¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹

1. KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.

1. はじめに

首都圏に甚大な被害を及ぼした1923年関東地震に関して、著者らは震度データに基づく断層モデルの構築と統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行ってきた。既報のSuzuki et al. (2020)では、多重クラックモデルにより断層モデルを構築していたこと、評価地点がK-NET、KiK-netの強震観測点に限られていたことが課題であった。そこで本報では、断層モデルを多重アスペリティモデルに基づき再構築した上で、K-NET、KiK-netの強震動シミュレーション結果による震度分布を面的補間し、詳細な震度分布を推定する。

2. 多重アスペリティモデルによる断層モデルの再構築

強震動予測のレシピにおいて、多重クラックモデルは応力降下量に関して動学的断層モデルと必ずしも整合的ではないことなどから、多重アスペリティモデルに基づくレシピの再構築が行われた（入倉ほか、2002）。本報でも、多重アスペリティモデルにより、神田・加藤(2019)の震度データに基づき推定された断層全体の地震モーメント M_0 と短周期レベルA、小断層ごとのエネルギー放出分布とそこから抽出されたSMGAの領域を与条件として、断層モデルを再構築する。具体的には、 M_0 、A、全SMGAの総面積の等価半径 r から、Boatwright (1988)および壇ほか(2001)の単一アスペリティモデルの理論的關係により断層全体面積の等価半径 R を算出し、Eshelby (1957)の円形クラックの關係から断層全体の静的応力降下量 $\Delta\sigma$ を算出した。 $\Delta\sigma$ と断層全体と全SMGAの面積比からMadariaga (1979)の關係式により全SMGAの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を算出した。単一アスペリティモデルは多重アスペリティモデルに拡張可能であるため、 i 番目のSMGAと背景領域の地震モーメント M_{0ai} 、 M_{0b} を全体の M_0 からエネルギー放出分布の割合に比例して分配した上で、各SMGAの応力降下量 $\Delta\sigma_{ai}$ は壇ほか(2002)に基づき $\Delta\sigma_{ai} \propto D_{ai}/S_{ai}^{0.5}$ (D_{ai} と S_{ai} はそれぞれ各SMGAのすべり量と面積)となるよう $\Delta\sigma_a$ を分配した。

3. クリギング法による詳細震度分布の推定

3. 1 推定手法

上記の断層モデルのSMGAを用いてSuzuki et al. (2020)と同様に強震観測点の波形を評価し計測震度を算出した。クリギング法によりこれらの震度を面的に補間する。震度を単純にクリギング法で補間すると、距離に近い強震観測点に近い震度になるが、距離が近くてもその地点の地下構造が異なれば震度は異なると考えられる。そのためここでは補間地点の地盤情報と震源距離を反映して補間する。具体的には、強震観測点の震度を地盤情報と震源距離で回帰し、回帰残差をクリギング法により補間した上で、補間地点の地盤情報と震源距離から求めた回帰式により震度を評価する。震源距離も用いる理由としては、クリギング法は空間相関を持つ分布の補間に適しており、震源距離の影響も除いた残差の方が除かない残差よりも空間相関が見られるためである。地盤情報は面的なデータが公表されているJ-SHIS V4の表層30m平均S波速度と、深部地盤の情報としてJ-SHIS V3.2のVs 1000 m/sの下面深度を用いた。震源距離には等価震源距離を用いた。

3. 2 推定結果

推定した詳細震度分布を図1に示す。神奈川南部や千葉南部で震度6強～7、東京東部で震度6弱～6強となる傾向や、埼玉東部まで震度6弱が広がっている傾向などは、諸井・武村(2002)による木造住宅全壊率に基づく広域な震度分布を概ね良好に再現している。さらに、地域ごとに詳細な震度分布を評価している諸井・武村

(2001)、武村・諸井(2001、2002)、高浜ほか(2001)、武村(2003)とも比較を行い、各地域内での詳細な震度の違いについても対応を確認した。また本報の結果によれば、1923年当時は陸地として存在しなかった地点として、羽田空港などの東京湾岸の埋め立て地は当時の東京市と同等の揺れが予想される。

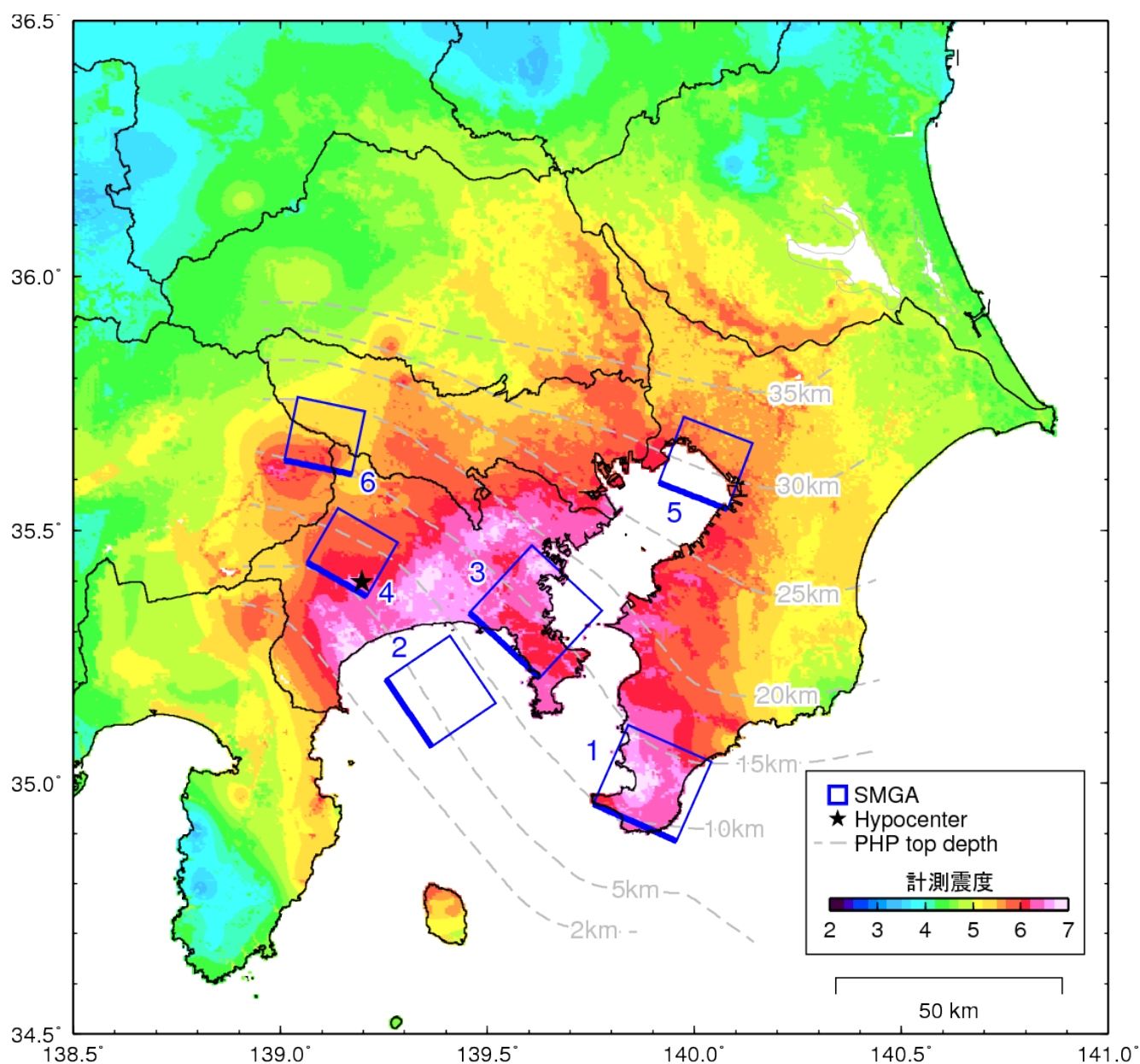


図1 クリギング法により推定した1923年関東地震の首都圏の詳細震度分布

Strong Motion Simulation of 2016 Kumamoto Earthquake Mainshock Using Dynamic Rupture Modeling

*JIKAI SUN¹, HIROSHI KAWASE¹, ARBEN PITARKA², FUMIAKI NAGASHIMA¹, ERI ITO¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Lawrence Livermore National Laboratory

Mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake (M_w 7.0) occurred on April 16, 2016 at 01:25 (JST) in the Kyushu Island (Yoshida et al., 2017), on the Futagawa and Hinagu fault system. The kinematic rupture modeling of the Kumamoto earthquake was applied in several studies (Yoshida et al., 2017; Asano and Iwata, 2021) to investigate the rupture process and simulate the strong ground motion for the mainshock. Near-fault ground motions generated by the earthquake were recorded with high accuracy by the NIED strong-motion network (K-NET and Kik-net), the Japan Meteorological Agency (JMA), and the local-government seismic-intensity network.

In this study, the dynamic rupture modeling (Pitarka et al., 2021) was applied to investigate the earthquake rupture process and to simulate the recorded near-fault ground motions. The dynamic rupture is modeled using a split-node method of Dalguer and Day (2007), implemented in the 3D staggered-grid finite-difference method of Pitarka (1999) and a linear slip-weakening friction law (e.g., Andrews, 1976). Following the research results of Yoshida et al. (2017) and Asano and Iwata (2021), we generated 500 and 1020 rupture models including three strong motion generation areas (SMGAs) with elevated stress drops, located on the Futagawa and Hinagu fault zones.

Locations of three SMGAs were randomly generated in the large slip distribution areas specified based on the kinematic inversion results by either Yoshida et al. (2017) or Asano and Iwata (2021). The 3D Japan integrated velocity structure model (JIVSM) (Koketsu et al., 2012) was used in modeling the elastic wave propagation. A simple linear regression method was applied to the eight end points of four fault segments, to define the location of a single, 45 km long rupture plane in this model. The top-left and bottom-right boundaries were determined by 13 km offset from the rupture plane, the bottom-left and top-right boundaries were offset 10 and 5 km from the outmost-edge foot points on the linear regression line. 26 strong-motion stations are located in the target area which observed the mainshock, 2 Kik-net sites, 4 K-net sites, 3 JMA sites, and 17 Kumamoto-ken local shindokei sites. Two kinds of goodness of fit (GOF) function were used to find the optimal simulation within 1520 scenarios; the authors' original GOF and the MO-GOF (Olsen and Mayhew, 2010) from Anderson's GOF (Anderson, 2004). After several preliminary investigations in comparing the estimation and observations, the authors' original GOF considers the misfit ratio of the peak ground velocity (PGV) and cross-correlation coefficient (CCC), while the MO-GOF was consist of ten factors of seismic wave and spectral characteristics. Moreover, the authors' defined GOF and GOF of PGV and acceleration response spectrum (SA) in MO-GOF were found to be efficient to search for the optimal simulation. We found that three SMGAs of the optimal simulation were located relatively close to the hypocenter and a large shallow SMGA was located on the Futagawa fault. Comparing the observed and estimated strong motions in 0.1-1.0 Hz, 16 of 26 sites displayed good wave fits, while the other 10 sites displayed not so good fits, which were mostly located in the distant area from the edge of the fault. The optimal scenario shows that a large peak slip rate appears in the deeper area (-15 km), which is as large as 7 m/s. However, the large slips are located at -8 km, in the shallow and large SMGA, which is as large as 4 m (Fig. 1). Analysis of the rake angle for the mainshock was found to be in 20-30 degrees, which was confirmed in the previous kinematic inversion reports.

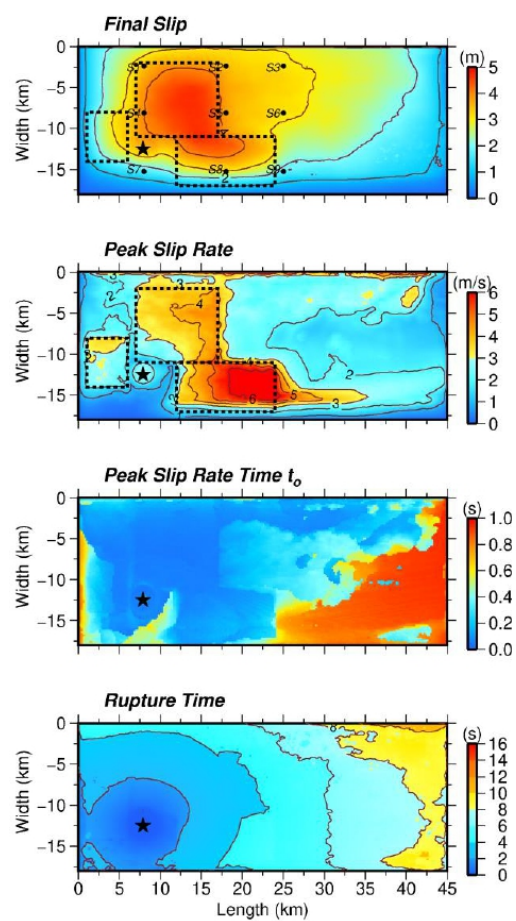


Fig. 1. Simulation of final slip, peak slip rate, peak slip rate time, and rupture time on the fault plane during the mainshock.

Reevaluation of strong ground motions during the 2016 Kumamoto earthquake sequence utilizing regional spectral inversion analysis

*Yosuke NAGASAKA¹

1. Port and Airport Research Institute

2021年に開催されたESG6において行われた強震動シミュレーションに関するブラインドプレディクションで筆者が行った検討について、事後検討を行った結果を報告する。対象地震は2016年4月16日3時3分熊本県の地震($M_j 5.9$)、2016年熊本地震の前震、本震の3つである。対象地点はJR熊本駅から約1.5km南の観測点(KUMA)である。対象地点における2016年熊本地震前後の中小地震記録が事前に配布されており、予測に使用できる。本検討では修正経験的グリーン関数法(野津・菅野, 2008)により対象地点とその周辺での強震動について検討した。この方法は、地震動の振幅スペクトルを震源、伝播経路、サイト増幅特性の3つを掛け合わせることで合成し、位相特性は中小地震記録をそのまま使うという方法である。震源スペクトルはオメガスクエアモデルを仮定し、規模の大きい地震に対しては矩形のアスペリティを用いる。伝播経路特性は幾何減衰とQ値を用いた非弾性減衰(Boore, 1983)を考慮する。サイト増幅特性は多数の地震記録を用いたスペクトルインバージョンによる経験的な増幅特性(たとえば野津・長尾, 2005)を用いる。KUMA近辺には気象庁の地震観測点があるが、本検討では用いていない。ブラインドプレディクション当初は、KUMAについてはK-NET観測点であるKMM006との同時観測記録の比による補正からサイト増幅特性を求めていた。しかし、KUMAとKMM006と約8km離れており、この2点が震源特性、伝播経路特性を共有しているとは限らない。また、周辺地点では野津・長尾(2005)による経験的サイト増幅特性を用いていたが、いくつかの地点は移設により特徴が変化していると考えられる。Q値は加藤(2001)による $104f^{0.63}$ を用いていた。この値は熊本で発生した地震を含めた解析の結果であるが、主な対象地域は鹿児島県北西部の地震の周辺であり、さらに1Hz以上が対象である。そこで、本検討ではまず熊本地震の震源域で発生した地震を対象とした地域的なスペクトルインバージョンによる伝播経路特性、サイト増幅特性の再評価を行った。スペクトルインバージョンは多くの記録を用いるため、よりバイアスのないサイト増幅特性の評価となることが期待できる。また、伝播経路特性のQ値もより熊本周辺に適したものになる。移設のない地点での野津・長尾(2005)によるサイト増幅特性を拘束条件として与え、Q値は未知数とした。強震動シミュレーションで用いることを考え、後続波を含めた波形を対象とした1段階の解析を行った。その結果、KUMAや移設地点では従来とは異なるサイト増幅特性が得られた。また、推定されたQ値は低周波数帯で通常用いられる a^p の形から外れたため、フィッティングしたQ値ではなくインバージョンにより得られたQ値をそのまま用いることとした。強震動シミュレーションにあたってはさらに各地震の震源パラメータが必要だが、これらは周辺地点の観測記録に合うように設定した。事後検討であるためKUMAの記録も含めて設定している。4/16 3:03の地震については疑似点震源モデルを、前震と本震については矩形アスペリティを用いたモデルをそれぞれ用いた。これらを用いた強震動シミュレーションを行ったところ、特にフーリエスペクトルについて当初のモデルよりも全体的に観測との一致度が改善される結果が得られた。地域的なスペクトルインバージョンによるサイト増幅特性と伝播経路特性は地震前に評価できるため、今後の強震動予測にも活用できると考えられる。このような解析は以前より行われているが、ブラインドプレディクション当初は異なる解析により得られた伝播経路特性とサイト増幅特性を組み合わせていた。それぞれ少しずつ異なる条件での解析であったため、本検討では同一の解析で推定した伝播経路特性とサイト増幅特性を用いたことが良い結果を得られた要因であると考えられる。また、推定されたQ値をそのまま使うことも本検討では有効であった。

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:45 AM - 10:45 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:45 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S03] AM-1

chairperson: Yutaro Okada (Kyoto University), Yuto Nakamura (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S03-08] Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

*Yuto NAKAMURA¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S03-09] Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

*Koya Nagae¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yuto Nakamura¹ (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S03-10] Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

*Yusuke YOKOTA¹, Koya Nagae², Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura² (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S03-11] Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

*Ryosuke Nakahata¹, Ryoya Ikuta¹, Akihiro Nagaya², Keiichi Tadokoro³, Mamoru Nakamura⁴, Rumi Sohrin¹, Yasushi Harada⁵, Masataka Ando¹ (1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University)

Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

*Yuto NAKAMURA¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹

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

GNSS観測と海中音響測距を結合することにより海底の動きをセンチメートル単位で検出するGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）の測位精度は、海中音速場の擾乱の影響を大きく受ける。そのため、海底測位の分野では海中音速場と海底局位置を観測データから適切に推定するための様々な解析手法が開発されてきた。海中音速場と海底局位置を経験ベイズにより同時推定するGNSS-Aデータ解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al. 2020, FES）では海中音速場を水平成層の基準場と、海上局及び海底局位置に依存する水平傾斜パラメータに分解し推定している。中村ほか（2021, 地震学会）では数値シミュレーションを用いてGARPOSの水平傾斜パラメータの解釈について議論したが、水平傾斜場が測位解の精度にどの程度影響を及ぼすかについてより詳しく検証する必要がある。

本研究では、PythonのEikonal方程式レポジトリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いた数値シミュレータで作成したGNSS-A疑似データにより、「GARPOS」の測位精度の評価を行った。数値シミュレータでは、直交座標系のグリッドに海中音速場を与え、最上部のグリッド（海面）からグリッド底面（海底）に設定した海底局位置の間の三次元的な音響伝播を計算する。PyKonalは離散化されたEikonal方程式を低い計算コストで解くFast Marching Method（Sethian 1999, SIAM Rev）を実装しており、Snellの法則を用いたレイトラッキングよりも厳密な理論音響走時を計算できる。計算した理論音響走時と送受信グリッドの座標を結合することにより作成したGNSS-A疑似データをGARPOSで解析し、解析結果をシミュレーションの設定条件と比較することで、GARPOSの測位精度を検証した。

数値実験では、様々な強度・厚さ・深度の水平音速傾斜場を与えてシミュレーションを行った。各パラメータがGARPOSの測位解にどのような影響を与えるか調べ、水平傾斜場が存在する海中音速場における測位解の系統的な誤差について議論する。

Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

*Koya Nagae¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yuto Nakamura¹

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

GNSSと音響測距を組み合わせることで海底地殻変動をセンチメートルレベルでとらえる手法を、GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）と呼ぶ。海上保安庁では、この手法を用いた海底地殻変動観測網SGO-Aを展開しており、これまで、2011年の東北地方太平洋沖地震による地殻変動やその後の粘弾性緩和、プレート間固着や浅部スロースリップ(SSE)などの固体地球科学における重要な結果を示した。現在は、GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）と呼ばれる解析ソフトウェアによりSGO-Aの測位解が公表されている。SGO-Aでの測距には、海上局と海底局の間を10kHzの正弦波を搬送波とする音響信号が用いられる。海上局が受信した波形と送信波形との相関処理を行い、信号の送受時刻を精密に決定することで、往復走時を算出している（富山, 2003, 海洋情報部技報）。ここで、往復走時の分解能は、搬送波の1波長である0.1 msec（往復距離に換算すると約7.5 cm）である。しかし、GARPOSによるこれまでの測位解析では、往復走時残差の標準偏差 σ が0.1 msec以上である結果が多く、観測エポックで得られている。さらに、多くの観測エポックで水平方向の測位解のばらつきよりも上下方向のばらつきの方が明らかに大きく、GNSS-A観測での上下方向の位置の不確実性が指摘されてきている。このような上下方向の解のばらつきは、SGO-A観測網が整備され始めて20年以上が経過し、海上局や海底局を更新する機会が増えたことによる機器の変化が原因の一つとして挙げられる（横田ほか, 2022, 地震学会）。このような機器依存により受信信号に変化（図1）が生じ、読み取り位置に誤りが生じたと考えられる。なお、この図1に示した2エポック間では使用した海底局が異なっている。従来の受信波形の読み取りは、まず、図1の中段に示した相関波形の最大値を見つけ、その値の0.4倍を初めて超す極大値を読み取り値として採用している。図より、2012年と2021年では、中段の相関波形の形状が大きく異なり、特に2021年の波形は後ろへ伸びて波形の最大値が不明瞭であり、結果的に読み取りの精度が悪化したと考えられる。そこで本発表では、SGO-Aにおける全期間にわたって統一的利用可能な新しい受信信号の読み取り方法を検討する。新しい手法では、まず下段の相関波形に対して立ち上がり位置を決定する。なおこの立ち上がり位置は、エポックごとに決定される閾値 s を初めて上回った極大値と定義する。次に、立ち上がり位置から N 個目の極大値を読み取り位置とする。ここで、閾値 s や N は、GARPOSにより得られる走時残差が小さくなるように決定する。この手法を用いることで波形の重畳の影響を抑えることができ、往復走時残差の σ を2 - 2.5 cm程度の精度が可能となる見通しであるが、将来的には、さらに高度で正しい読み取りが実現することが期待される。

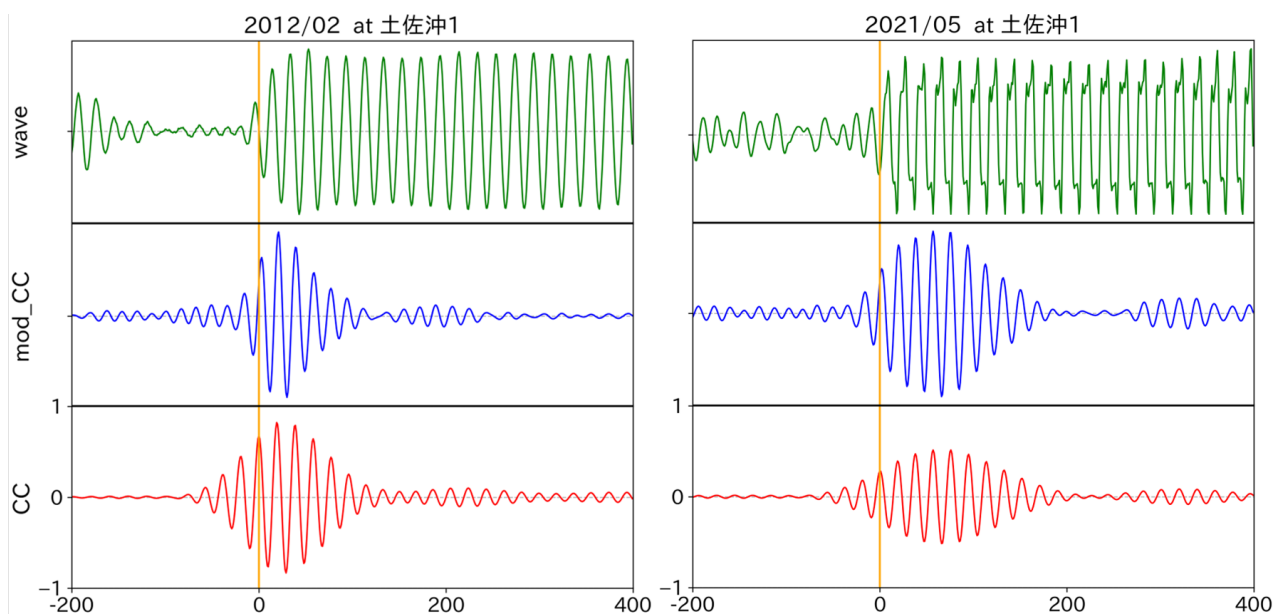


図 1 : 2012年（左）と2021年（右）における受信波形や相関関数の変化。
 上段：受信波形．中段：受信波形と変形参照波形（富山，2003，海洋情報部技報）の相関関数．
 下段：受信波形と参照波形の相関関数．

Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

*Yusuke YOKOTA¹, Koya Nagae², Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura²

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

海上保安庁はGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測を継続的に実施している。この観測網をSGO-Aと呼ぶ。現在、GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）と呼ばれる解析手法による結果が公表されている。船舶側の海上局と海底局の間は10kHzの正弦波で構成される音響信号によって測距される(富山, 2003, 海洋情報部技報)。送信信号と受信信号に対してそれぞれ理論波形との相関処理を行うことで信号の送受時刻を精密に決定して往復走時を計測する。

これまでのデータから水平動よりも大きい上下動のばらつきは、(i)音響信号の読み取り誤り(永江ほか, 2022, 地震学会)にくわえて、次の2つの要因による音響往復時間の計測誤りに依存していることがわかってきた。

(ii)ソナーの有限の大きさに依存した信号の位相反転、重畳などによる角度依存性

(iii)海上局、海底局や観測時期などの機器に依存した位相、タイミングの崩れ具合の違い

これら(ii)と(iii)の影響は見かけの受信波形・相関波形からは容易に識別することができない場合が多いが、GARPOSの最終残差に0.1msec (信号1波長分) ほどのばらつきが見られることで認識される。

音響信号の角度依存性はHonsho et al. (2021, FES)で東北大の観測で用いられる7次2波のM系列信号に対して指摘されており、SGO-Aで用いられている9次4波のM系列信号でも生じていることが確認されたものである。(ii)の角度依存性には(iii)で指摘される機器依存性も関係している。海上局と海底局の機器の組み合わせが変更された場合に角度依存性の表出の仕方が変化する。これらの複合的な影響による信号相関波形の違いに応じた読み取り閾値を考慮しなければ1波長（0.1msec）以上の読み取り誤りを生み、とくに上下動の推定に悪影響がある。

既に広く研究されているGNSS観測における誤差は、①大気圏・電離圏遅延量などの自然由来誤差(Davis et al., 1985, RS; Boehm et al., 2006, JGR)と②サイクルスリップなどの非自然由来誤差(Lau & Cross, 2007, JG), ③アンテナ補正量・マルチパスなどの衛星角度に依存した誤差(Kunysz, 2010, IEEE; Banville & Langley, 2013, JG)に分けられる。GNSS-A観測における海中音速度場による誤差(Yokota et al., 2019, MGR)は①のアナロジーであり、(i)信号の読み取り誤差は②、(ii)角度依存誤差と(iii)機器依存誤差は③（②を含む場合もある）のアナロジーであると考えられる。

本発表では、GARPOSによる推定結果を利用することで、全期間に統一的に利用できる信号トラベルタイムの補正法を考察し、SGO-A観測網のより正しい上下動を導出する方法を議論する。この中で、(iii)を適切に補正することで最も懸念される海底局置き換えなどによる10cm近いバイアス的なずれはほぼ補正可能であることがわかった。ただし、(iii)の物理的な原因は不明であり、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

(ii)はGARPOSの最終残差に対する移動平均などによるスムージング結果を用いることで補正することは可能であり、残差のばらつきを抑えるだけでなく、一部の観測エポックの上下動誤差の低減に効果を示すことがわかった。こちらも詳細な原因は不明であるが、以前から実験的に指摘されており(望月ほか, 2007, 海洋情報部研究報告)、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

これまでの考察から、 $\sigma \sim 2\text{--}2.5\text{cm}$ 程度の精度は実現できる見通しであるが、将来的にはさらに高度で尤もらしいトラベルタイム補正が実現することで精度を上げることができると考えられる。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所の公募研究ERI JURP 2022-Y-KOBO25により実施されています。

Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

*Ryosuke Nakahata¹, Ryoya Ikuta¹, Akihiro Nagaya², Keiichi Tadokoro³, Mamoru Nakamura⁴, Rumi Sohrin¹, Yasushi Harada⁵, Masataka Ando¹

1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University

琉球海溝の南西端に位置する八重山諸島は、1771年4月24日に発生した「八重山津波」と呼ばれる巨大津波によって壊滅的な被害を受けたことが知られている。八重山津波の発生源は未だ議論が続いているが、Nakamura (2009)は、琉球海溝南西端のプレート境界浅部で発生したMw8.0の津波地震が発生源であることを示唆している。そこで我々は、琉球海溝南西端のプレート境界の固着の有無を明らかにするために、2014年10月に波照間島南方沖約40km、水深約3300mの前弧海盆に海底基準局OHTM (図)を設置した。海底基準局は3台のトランスポンダをおおむね水深の1/√2程度の外接円直径をもつ正三角形に配置した。2014年10月から2022年6月まで、2021年を除いて年一回のGNSS/音響測距結合方式による観測を実施し、海底局の座標の変動から固着の有無を推定した。本発表では、すでに解析が済んでいる2014年10月～2020年9月の結果に、現在解析中の2022年の結果を併せて報告する予定である。

海底局の座標は、解析プログラム群OCDASAN (Ocean-bottom Crustal Deformation Analysis tool for Study in Ando labo. Nagoya university) を用いてIkuta et al. (2008)によって提案された方法で推定した。本研究では、3台のトランスポンダの重心を海底局の座標と定義している。OCDASANは、(1) 海中の音速構造は水平成層をなしており、一定の滑らかさで時間変化する、(2) 3台のトランスポンダの構成は不変、という2つの仮定のもと罰則付き最小二乗法を解くことにより海底局の座標を推定している。

解析の結果、2014年10月～2020年9月のOHTM海底局の移動方向及び移動速度は、揚子江プレートに対して南向きに 66.3 ± 10.3 mm/yr、東向きに 19.0 ± 9.4 mm/yrと推定された。また、上下方向は 0.0 ± 9.7 mm/yrと推定され、上下変動を伴っていないといえる。さらに、この海底局の移動速度は、西表島及び波照間島に設置されている国土地理院の陸上GNSS局で観測された移動速度よりも速い。この結果は、この地域のプレート境界には固着が存在せず、それどころか前弧海盆が上下変動を伴わずに伸長していることを示唆している。

上下変動を伴わずに前弧海盆を伸長させるメカニズムとして、Nagaya et al. (2016)で提案された、琉球海溝のマントルウェッジの先端におけるアンチゴライトの弱い対流が考えられる。アンチゴライトはマントル中のかんらん岩が水和してできる蛇紋岩の一種であり、かんらん岩よりも粘性率が低いのが特徴である。海底局を設置した前弧海盆の地下の比較的浅部にまで、水和してアンチゴライト化したマントルウェッジかんらん岩が侵入し、対流によって前弧ウェッジを海溝側に引き伸ばしていると考えられる。さらに我々は、FreeCAD 0.19 (<https://www.freecadweb.org/?lang=ja>)を用いて、有限要素法を用いて我々の観測結果を再現するモデルを検討した。OHTM直下のプレート境界に固着が無いだけでは不十分で、マントルウェッジの先端にウェッジを伸長させる対流が必要であることが示唆された。

本研究の結果は琉球海溝南西端の前弧下に固着が無いことを示しているが、固着の欠損がどの程度広範囲にわたるかを知るには更に海溝に沿って広範囲で海底地殻変動を観測する必要がある。OHTM観測点直下に固着が無い事実は、八重山津波の発生源としてOkamura et al. (2018)のような海溝斜面における海底地すべりが有力な候補であることを支持する。1771年の八重山津波では八重山諸島で強震動があったことが示唆されている (例えばAndo et al. 2018) が、直下型の地震に伴う海底地すべりであったと考えても矛盾はない。将来、海底地すべりにより八重山津波の規模の津波が強震動を伴わずに生じる可能性も考えられる。減災のためには海盆上に海底津波計などを設置し、発生した津波を直接監視するシステムが有効である。

今後の計画として、波照間島沖の海底地殻変動観測を続けるほか、宮古島南方沖の宮古深海平坦面に新たな海底局を設置し、この地域のMw8.0クラスのプレート境界地震を発生させうる固着の有無を明らかにしていく予定である。

引用文献

Ando, M., Kitamura, A., Tu, Y., Ohashi, Y., Imai, T., Nakamura, M., Ikuta, R., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., and Shishikura, M., 2018, Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics*, **722**, 265 -276. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.007>

Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takatani, K., Yada, K., and Besana G.M. 2008, A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: Application to the Nankai Trough. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **113**, B02401. <https://doi.org/10.1029/2006JB004875>

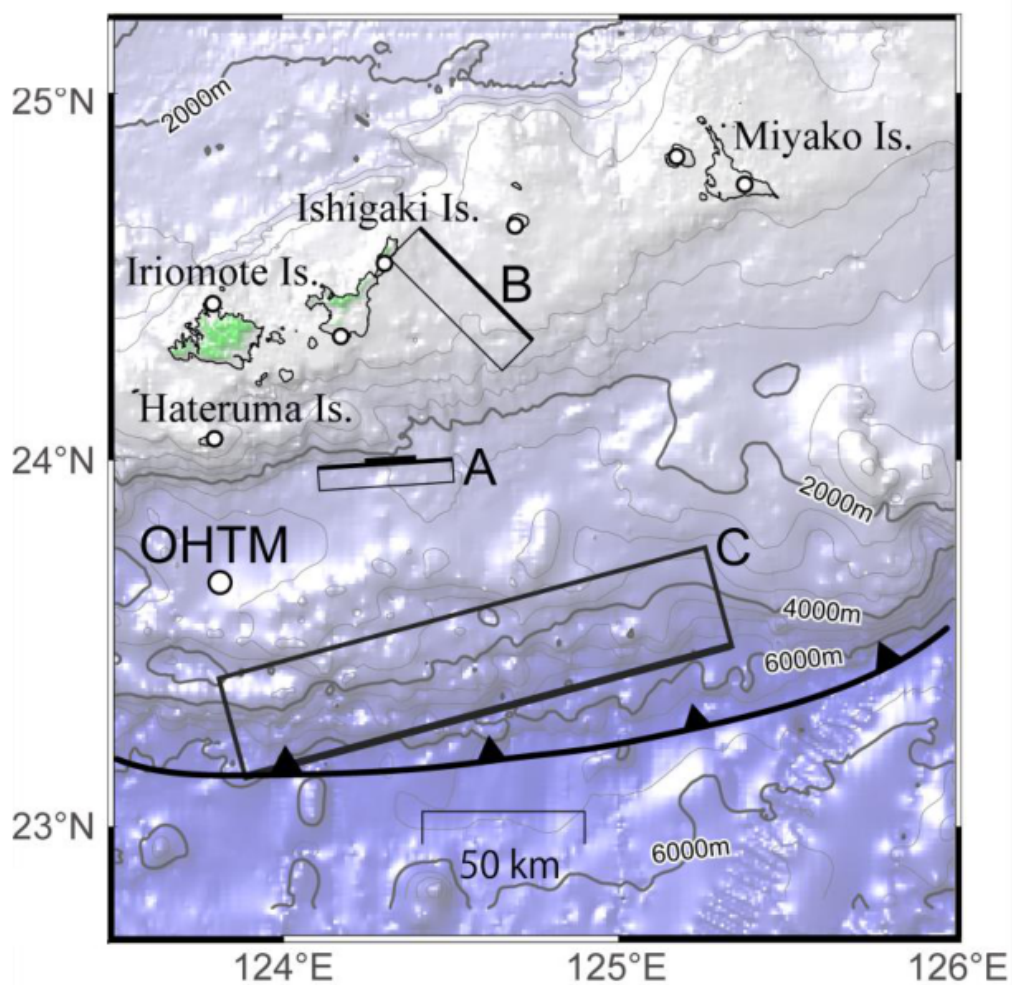
Imamura, F., Yoshida, Y., & Moore, A., 2001, Numerical study of the 1771 Meiwa tsunami at Ishigaki Island, Okinawa and the movement of the tsunami stones. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, **48**, 346-350 (in Japanese). <https://doi.org/10.2208/proce1989.48.346>

Nakamura, M., 2006, Source Fault Model of the 1771 Yaeyama Tsunami, Southern Ryukyu Islands, Japan, Inferred from Numerical Simulation. *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 41-54. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-0007-9>

Nakamura, M., 2009, Fault model of the 1771 Yaeyama earthquake along the Ryukyu Trench estimated from the devastating tsunami. *Geophysical Research Letters*, **36**, L19307. <https://doi.org/10.1029/2009GL039730>

Nagaya, T., Walker, A.M., Wookey, J., Wallis, S.R., Ishii, K., and Kendall, J.M., 2016, Seismic evidence for flow in the hydrated mantle wedge of the Ryukyu subduction zone. *Scientific Reports*, **6**, 29981. <https://doi.org/10.1038/srep29981>

Okamura, Y., Nishizawa, A., Fujii, Y., and Yanagisawa, H., 2018, Accretionary prism collapse: a new hypothesis on the source of the 1771 giant tsunami in the Ryukyu Arc, SW Japan. *Scientific Reports*, **8** :13620. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31956-8>



図：海底基準局 OHTM の位置と八重山津波の波源モデル。

A=Imamura et al. (2001); B=Nakamura (2006); C=Nakamura (2009)

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:00 AM - 12:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:00 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S03] AM-2

chairperson: Yutaro Okada (Kyoto University), Yuto Nakamura (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S03-12] Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

*Yutaro OKADA¹, Takuya NISHIMURA² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S03-13] Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

*Tadashi ISHIKAWA¹, Yusuke Yokota² (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S03-14] Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

*Sota Murakami¹, Akinori Hashima², Takeshi Iinuma², Kohei Fujita¹, Tsuyoshi Ichimura¹, Takane Hori² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S03-15] Study on viscous flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

*Hisashi SUIITO¹ (1. GSI of Japan)

Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

*Yutaro OKADA¹, Takuya NISHIMURA²

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

スロースリップイベント（SSE）は低速の断層すべりが数日間から数年間継続する現象であり、通常の地震と比べ時間スケールが長いスロー地震の一種である。オホーツクプレートの下に太平洋プレートが沈み込む日本海溝及び千島海溝では、活発なスロー地震活動が報告されている（e.g., Baba et al., 2020; Nishikawa et al., 2019）。一方で日本海溝ではいくつかの先行研究によってSSEの観測事例が報告されているものの（e.g., Ito et al., 2013; Nishimura, 2021）、千島海溝を含む領域全域におけるSSEの規模・継続期間や時空間分布といった活動様式は依然として不明である。本研究では継続期間が数日間から数週間である短期的SSE（S-SSE）に着目し、陸域のGNSSデータを用いた系統的検出を行うことで、この地域のS-SSEの活動様式の解明を試みる。本研究では国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業により東北日本に設置された529のGNSS連続観測局の1996年12月1日から2021年11月30日までの期間の日座標値を検出に用いた。ノイズを低減するための事前処理として、保守作業等に起因する人為的なオフセット、通常の地震に起因する地表変位、季節変動成分、及び共通誤差成分を取り除いた（Cleveland et al., 1990; Tobita, 2016; Wdowinski et al., 1997）。本研究ではS-SSE系統的検出手法（Okada & Nishimura, in prep.; Okada et al., 2022）を用いてイベントの検出を行った。この手法では、初めに測地マッチドフィルター（Rousset et al., 2017）をGNSSデータの水平成分に適用することでS-SSEの候補となる非定常変位イベントを検出する。続いて、非定常変位イベントの矩形断層モデルと継続期間を推定し（Matsu'ura & Hasegawa, 1987; 宮岡・横田, 2012; Rousset et al., 2017）、これらの推定結果に基づき非定常変位イベントをS-SSEへと分類する。本研究ではS-SSEの可能性の高いイベントをclass 1 SSE、S-SSEの可能性のあるイベントをclass 2 SSEとそれぞれ分類した。また本研究では上記の分類条件に加えて、M6.5以上の通常地震と時空間的に近接する変位イベントを地震に関連するイベントとして取り除いた。

予備解析の結果、25年間で114個のS-SSEの検出に成功した。検出したイベントの多くは関東地方東部の直下及び沖合に分布している（図1）。この地域では先行研究（e.g., Nishimura, 2021）で活発なS-SSEの活動が報告されており、浅部側と深部側に分かれてS-SSEが分布するといった特徴もNishimura (2021)と共通している（図1b）。2017年5月に関東沖合で検出されたイベントは、テクトニック微動（Nishikawa et al., 2019）との間の時空間的同期が確認された。また関東地方ほど活発ではないものの、小規模なS-SSEクラスターが宮城県沖と十勝沖に分布している。このうち、十勝沖で検出されたS-SSEの中には、超低周波地震（Baba et al., 2020）やテクトニック微動（Nishikawa et al., 2019）と時空間的に同期するイベントが確認された。本解析では十勝沖におけるS-SSEは必ず超低周波地震と時空間的に同期するという仮定の下、14件の超低周波地震のバーストを基準にGNSS座標時系列をスタックし矩形断層を推定した。その結果、平均的な断層モデルは2003年十勝沖地震の震源域（Yamanaka & Kikuchi, 2003）の浅部延長に推定された。

一方で予備的な検出結果の中には、明らかに誤検出と考えられる断層すべりで変位パターンを説明し難いイベントや、M6以上の通常地震の地震時変位またはその余効変動をSSEとして検出したと考えられるイベントが多数含まれている。地震に関連する地殻変動の補正とSSEとその他の非定常イベントの分類を解析の中で行ってはいるものの、S-SSEとそれ以外の非定常変位イベントの正確な分類は今後の課題である。

謝辞

本研究では国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業より提供されたGNSS RINEXファイルを使用した。本研究で用いたプレート境界モデル(Iwasaki et al., 2015)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)及びアラスカ大学アラスカ地理情報ネットワークの地形・水深データ(Lindquist et al., 2004)から作成したものである。

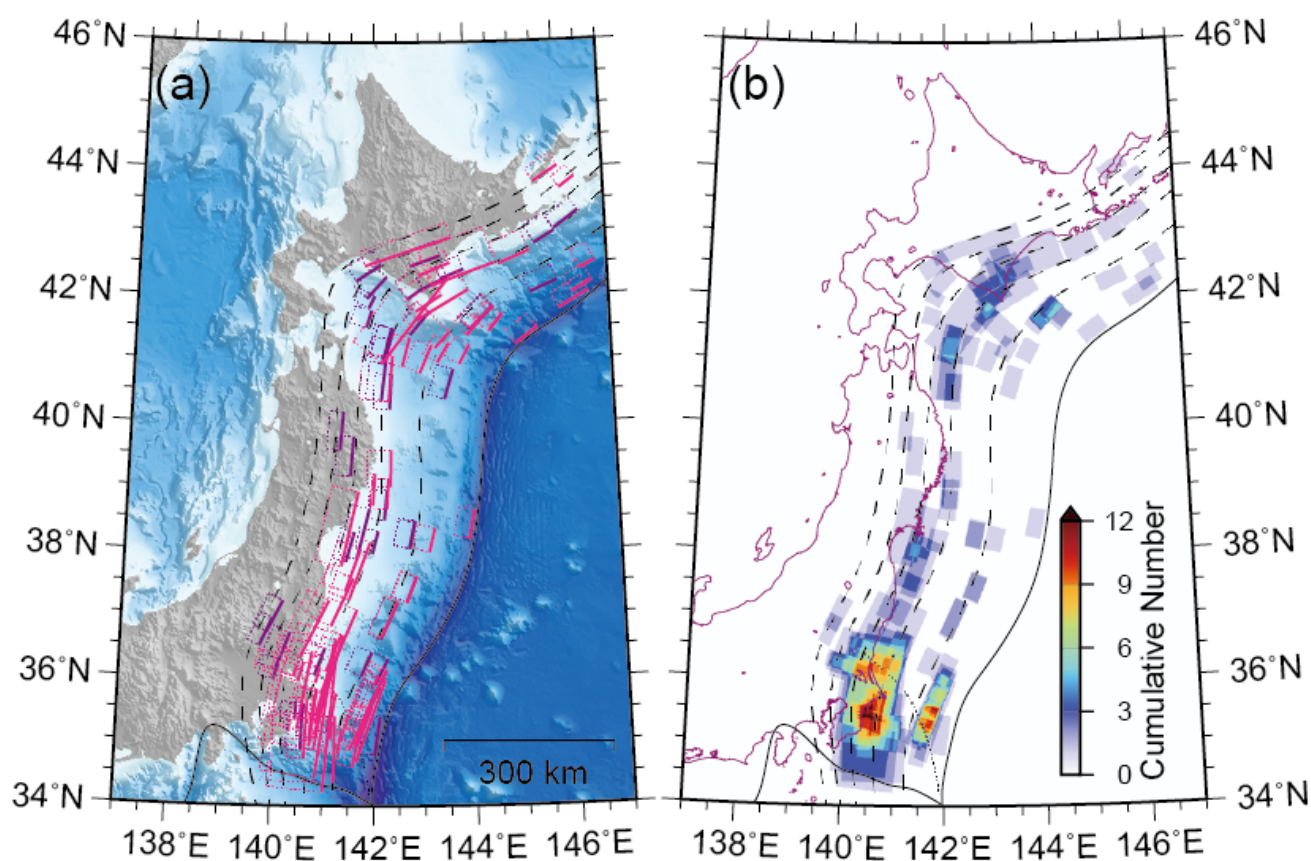


図 1. 予備解析により検出された S-SSE の分布。黒い実線と破線は海溝および 20 km ごとのプレート等深線を示す (Iwasaki et al., 2015)。(a) 検出された S-SSE の断層分布。ピンク色と紫色の長方形はそれぞれ class 1 SSE と class 2 SSE を示す。(b) 検出された S-SSE の累積個数分布。

Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

*Tadashi ISHIKAWA¹, Yusuke Yokota²

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

地殻変動観測は、地震の発生サイクルにおける断層すべりや固着状態の把握のために重要な情報を提供する。ひとくちに地殻変動観測といっても、対象とする時間スケールを異にする様々な手法がある。その中でも宇宙測地技術を用いた陸上のGNSS観測や海底のGNSS-A観測は、プレートの沈み込みやブロック運動などによる長期的な変動や地震時の永久変位、地震後の余効変動の把握に有効ほか、近年はスロースリップイベントのような短期の変動も重要なターゲットになってきている。現在、国土地理院GEONETによるGNSS観測網や海上保安庁SGO-AによるGNSS-A観測網などの定常観測によって、南海トラフ及び日本海溝の地殻変動場の詳細が把握され、政府の地震調査委員会等の関連会議における地震・地殻活動の現状評価に役立てられている。

地震の発生サイクルを詳細に把握するためには、各サイクルにおいて地下の断層でどのようなすべりが発生しているかを正確に推定する必要がある。そのため、現状の観測技術・観測網でどこまで微小なシグナルが検出可能かその検出能力を評価することは、得られた観測データの妥当性やそれに基づく政府機関における地殻活動の現状評価、さらには今後の観測網の展開を検討するにあたっての重要な指針となる。水藤

(2016) は、GEONETによる日本周辺の海溝におけるプレート境界すべりの検出能力を調査した結果について報告している。震源域となるプレート境界の大部分は海底下にあるため、陸上のGNSS観測のみでは、検出能力が低下する。海上保安庁はその欠点を補うため、日本海溝及び南海トラフ周辺の海底にGNSS-A観測網

(SGO-A) を展開しており、Yokota et al. (2021) は、同様の調査をSGO-Aに適用し、海域における検出能力の向上を定量的に示した。

こうした、地表の地殻変動と地下の断層すべりを結びつける解析の際には、Okada (1992) のような地球を均質な半無限弾性体と仮定したモデルによるグリーン関数がよく使われている。こうしたモデルは簡易でありながら、多くの場合に有用な結果を得ることが可能である。一方で、プレート境界型の巨大地震の震源域を対象とする場合、領域が陸上から海底までの広範囲にわたるため、地下構造の不均質性、観測点の標高差、地球の曲率などの効果が無視できなくなると考えられ、半無限均質弾性体モデルが妥当な近似とならないおそれがある。しかしながら、こうした効果を取り入れようとすると、非常に高い計算コストや複雑な計算が要求され、容易には計算できない。Hori et al. (2021) は、日本海溝及び南海トラフにおいて、これらの効果を考慮したより現実的なモデルによるグリーン関数をあらかじめ計算しライブラリ化した。

このライブラリを用いることで、ユーザーはスーパーコンピュータ等が必要になる複雑な計算と同じ結果を通常のPCで容易に再現可能となる。このグリーン関数ライブラリを用い、Yokota et al. (2021) と同様の検出能力の調査を行った結果、(本原稿執筆時では暫定的な結果ではあるが) 陸域からの検出能力が低下する傾向があるなど、半無限均質媒質モデルとの違いが見えてきている。こうした違いは今後の地殻活動の評価にとっても重要であり、詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究では、JAMSTECから提供いただいたHori et al. (2021) のグリーン関数ライブラリを使用しています。記して感謝いたします。

参考文献：

Hori et al. (2021), EPS, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01370-y>

Okada (1992), BSSA, <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>

水藤 (2016), 測地学会誌, <https://doi.org/10.11366/sokuchi.62.109>

Yokota et al. (2021), PEPS, <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00453-4>

Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

*Sota Murakami¹, Akinori Hashima², Takeshi Iinuma², Kohei Fujita¹, Tsuyoshi Ichimura¹, Takane Hori²

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

プレート沈み込み帯における巨大地震後の地殻変動については、アセノスフェアにおける粘弾性応力緩和と余効すべりの影響が考えられる。2011年に発生した東北沖地震に際しては、海底測地観測点において、地震直後から陸向きの大きな地殻変動が主破壊域直上で観測されており、陸側プレート下のマントルウェッジや海洋プレート下のマントルの粘性を考慮するだけでは説明ができない。この海底観測データの説明として lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) と呼ばれるプレート沈み込み帯下の低粘性領域をモデル化することが提案されている。過去、2004年スマトラアンダマン地震や2010年チリ地震といったプレート沈み込み帯の巨大地震においてはLABの検出に足る海底測地観測はなされていない。しかし、将来の海底観測網の充実によりプレート沈み込み帯におけるLABの普遍的な存在が認められる可能性がある。プレート沈み込み帯の一つであり、今後数十年以内に巨大地震の発生が危惧されている南海トラフにおいては、日本海溝と同様な海底測地観測網が備わっている。しかしながら、過去の地震においては、LABに対する感度が高い海底測地観測はなされていない。そこで、本研究では、想定される南海トラフにおける巨大地震に対し、LABの低粘性が地震後の地殻変動にどのような影響を与えるかを定量的な評価を行った。本研究では、南海トラフの現実的な地下構造モデルを考慮した粘弾性応力緩和による地殻変動解析を実施した。現実的な地下構造を考慮するために、対象領域を2500km x 2500km x 1100kmとし、最小要素サイズを500mとした 4.2×10^9 自由度の大規模な有限要素モデルを作成した。このような大規模なモデルによる解析においては、多大な計算コストを要するため、計算コストを著しく削減可能な地殻変動解析手法 (Ichimura et al., 2016) を導入することで、粘弾性解析を実現している。マントルウェッジと海洋マントルにおいて粘性率が異なる場合やLABの粘性率の異なるケースにおける、地震時すべりに対する4年間の地表面応答を計算した。計算の結果、LABの粘性率が 2.5×10^{17} Pasと低粘性が著しい場合、2011年東北沖地震の場合と同様に、海域で陸向きの非常に大きい水平変位が生じた。また、鉛直変位については、ケースによって隆起と沈降の分布が変わる複雑な挙動が見られた。これらの変形は、時間経過とともに急速に減衰していくことから地震後初期での観測が有効であることが分かった。具体的には、地震後1年間に於いて、GNSS音響結合方式(GNSS-A)の海底観測点の観測精度を上回る非常に大きな値を持つことから、検知できる可能性が高いことがわかった。一方で、LABの粘性率が 2.5×10^{18} Pas程度である場合、LABが存在せず海洋マントルの粘性率を 1.0×10^{19} Pasで一様とした場合と似た変形パターンが見られた。この場合、現状の観測精度を上回る差が生じないことから、検知が難しいことがわかった。ただし、GNSS-Aにおける高頻度観測や、DONETにおける観測精度向上など、海底観測技術の進展により検知できる可能性がある。なお、今回は南海トラフのいわゆる全割れ破壊を想定した場合の地表面応答を計算したが、半割れでの地震が発生する可能性があることや、実際のより複雑なレオロジー構造によって応答が異なる可能性がある。こうした複数の地震シナリオやレオロジーによる応答の違いを調べることで、LABの検出可能性を検討することが今後の課題である。

Study on viscous flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

*Hisashi SUIO¹

1. GSI of Japan

・はじめに

南海トラフ沿いでは、100～200年の間隔でプレート境界での大規模地震が繰り返し発生している。「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会（内閣府）」（平成29年8月）では、防災対応を検討するケースとして4つの典型的ケースに整理している。このうち、想定震源域の東側（片側）だけで大規模地震が発生しば場合（ケース1）、想定震源域で一回り小さいM7クラスの地震が発生した場合（ケース2）では、大規模地震の発生につながる可能性を検討するために、プレート境界の固着状態（＝余効すべり）の正確な把握が必要となる。従来、初期の余効変動の主要因は余効すべりに起因すると考えられてきた。しかし、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の余効変動に関する解析では、地震後の粘性緩和の影響を考慮した場合としなかった場合とで、推定される余効すべりの場所と大きさが大きく異なることが分かってきた。従って、余効すべりを正確に推定するためには粘性緩和の見積もりが重要であり、その見積もりには適切な地下の粘弾性構造と粘性率が必要である。最終的には粘弾性構造と粘性率の見積もりが重要であるが、本稿ではその前段階として、1944年東南海地震と1946年南海地震の断層モデルを参考に南海トラフ沿いで発生する大規模地震の地震時の変動を計算し、粘性緩和による変動が、粘性構造のどの領域が地表のどの場所の変動に、どのように影響するのかについて報告する。

・各粘弾性領域における変動の特徴

南海トラフ沿いの粘弾性構造は大きく2つの領域に分けられる。一つは陸域の大陸プレート下に位置するウェッジマントル、もう一つはフィリピン海プレート下の海洋アセノスフェアである。これら2つの粘弾性領域における粘性緩和は、ほぼ真逆の変動を引き起こす。1946年南海地震を想定した場合、ウェッジマントルの粘性緩和は、日本海側を中心として海溝軸に向かう南東方向の水平変動と日本海側を中心として陸域でわずかな隆起を引き起こす。一方、海洋アセノスフェアの粘性緩和は、ウェッジマントルの粘性緩和とはほぼ真逆で、太平洋側の海域から陸域の一部では海溝軸から離れる北西方向の水平変動、太平洋側の海域で隆起、陸域でわずかな沈降を引き起こす。ただし、日本海側の陸域ではウェッジマントルの粘性緩和と同じく、海溝軸に向かう南東方向の水平変動が生じる。太平洋側の陸域における水平変動の方向や隆起、沈降の境界は、地震時のすべり分布に強く依存し、太平洋側の陸域でも海溝軸に向かう南東方向の水平変動が引き起こされる場合もある。

次に1944年東南海地震を想定した場合、1946年南海地震の場合と概ね同じ傾向である。ウェッジマントルの粘性緩和は陸域を中心として海溝軸に向かう南東方向の水平変動が卓越する。一方、海洋アセノスフェアの粘性緩和はほぼ海溝軸から離れる北西方向の水平変動が卓越し、太平洋側の海域で隆起、陸域でわずかな沈降を引き起こす。1946年南海地震の場合に見られた日本海側の陸域での南東方向の水平変動はほとんど見られない。

フィリピン海プレートは低角で沈み込んでいるために粘性緩和を引き起こすウェッジマントルの領域が狭い。そのため、海洋アセノスフェアの粘性緩和の影響の方が顕著であると考えられる。また、フィリピン海プレートの厚さが30～40kmと太平洋プレートに比べると薄いことも、海洋アセノスフェアの粘性緩和の影響が顕著になる一因であると考えられる。従って、南海トラフで発生する大規模地震の粘性緩和の影響を評価する上では、ウェッジマントルよりも海洋アセノスフェアの粘性率の方が重要と考えられる。今後、1944年東南海地震および1946年南海地震後の地殻変動の観測データを精査し、適切な粘弾性構造と粘性率を推定していく。また、2004年紀伊半島南東沖の地震の余効変動データも粘性率を制約するには有効だと考えている。

Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 2:45 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 5:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S02] PM-1

chairperson: Masayuki Yoshimi (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Masayuki Obayashi (JAMSTEC)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S02-01] The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

*Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Hiroko Sugioka², Joel D Simon³, Yu Yong⁴ (1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S02-02] Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

*Ryoichi IWASE¹ (1. JAMSTEC)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S02-03] Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

*Katsuhiro YABU¹, Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO², Takeshi NISHIMURA¹ (1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S02-04] Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

*Masanao SHINOHARA¹, Tomoaki Yamada¹, Hiroki Takano², Eiji Kurashimo¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Shin'ichi Sakai³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S02-05] Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

*Masayuki YOSHIMI¹, Satoshi IDE², Teppei ENARI³, Daiki TAYA³, Shuji IWATA⁴ (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company)

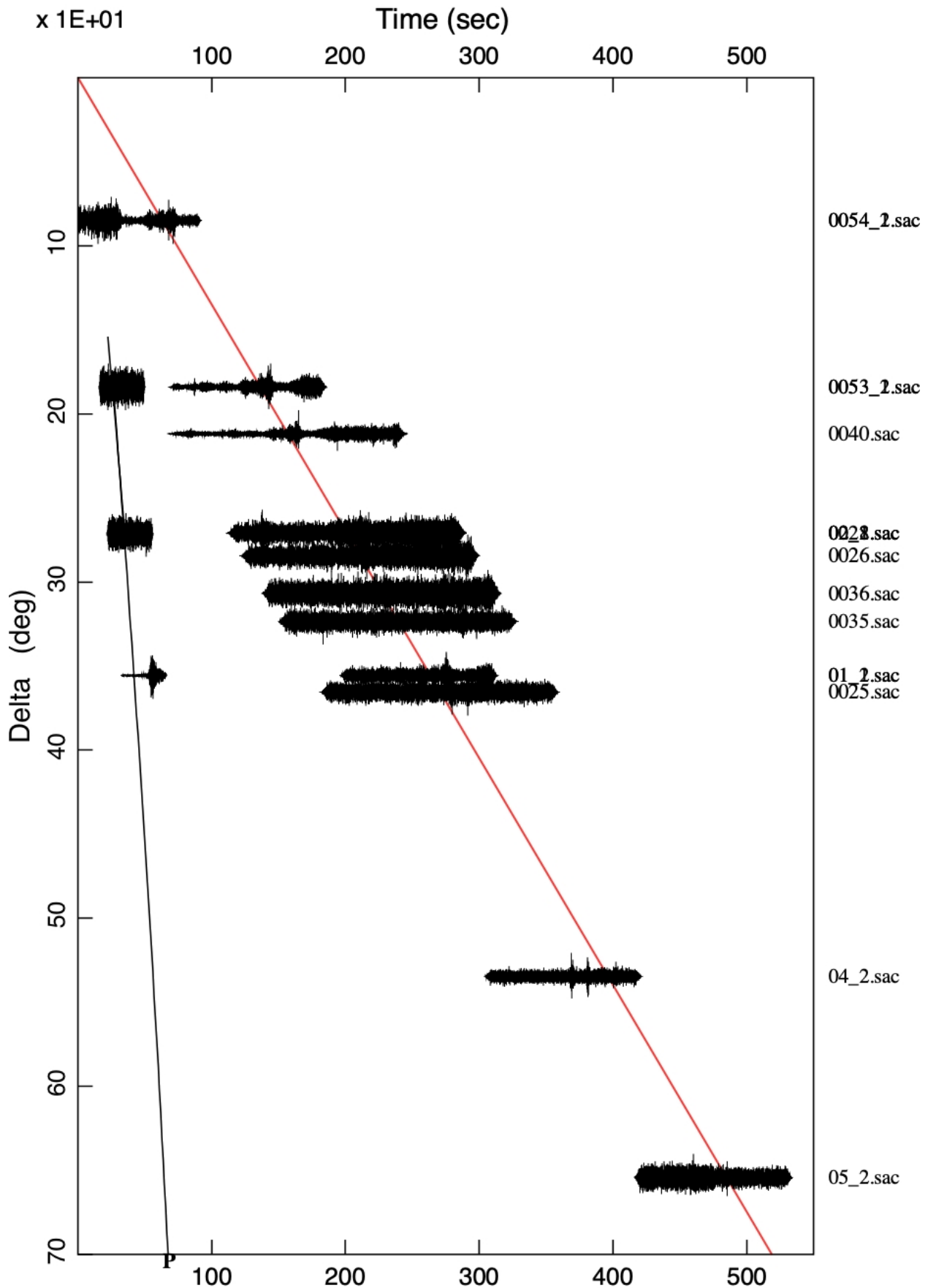
The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

*Masayuki OBAYASHI¹, Junko Yoshimitsu¹, Hiroko Sugioka², Joel D Simon³, Yu Yong⁴

1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech

現在約50 台のMERMAID (Mobile Earthquake Recording in Marine Areas by Independent Divers) フロートが南太平洋の海中を漂流しており、地球深部内部構造を求めることを目的に高周波 (~1 Hz) P 波から海底で変換された水中音波をハイドロフォンで観測し、その波形データを衛星通信を利用して準リアルタイムで送信している。このMERMAIDフロートアレイは国際プロジェクトSPPIM (South Pacific Plume Imaging and Modeling) の下2018 年の展開以来、ホットスポットとプルームに富む南太平洋下マントルを通る新しい波線経路のグローバルな地震の高品質P波波形データを何千も記録してきた。MERMAIDフロートはP波から変換された水中音波を観測する自律型フロートであるが、漂流深度 (通常1500 m) で周囲の音響場から地震特有の信号を検出するアルゴリズムを備え、地震が検出されると海面に浮上しその波形を送信する。さらに、MERMAIDフロートには双方向イリジウム通信を介して1年間取得可能なデータバッファが装備されている。従って、MERMAID フロートは、地震P波を準リアルタイムに自動的に送信するシステムを有する一方で、自動的に送信されなかった期間でも陸上からのリクエストにより関心のある期間のデータを切り出すための連続データも保存している。MERMAIDフロートは海洋島の地震計、海底地震計、係留型ハイドロフォンのいずれでもなく、MERMAIDフロート特有のデータであり、発表では、2022 年 1 月の爆発的な Hunga Tonga噴火に焦点を当てたリクエストにより得られたSPPIM MERMAIDフロートアレイのデータを紹介する。

2022 01 15 04:14:45 [-20.5453 -175.394] Hunga Tonga



MERMAIDで捉えたフンガ・トンガ噴火によるT-phase。横軸、縦軸はそれぞれ噴火時刻からの時間、火山からの距離。赤線は水中音波速度1.5 km/sを仮定した時の走時を表す。

Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

*Ryoichi IWASE¹

1. JAMSTEC

岩瀬(2022)では、2021年8月13日に福徳岡ノ場において発生した海底火山噴火、及び2022年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ（フンガ火山）で発生した海底火山噴火について、防災科学技術研究所の「日本海溝海底地震津波観測網」(S-net)を構成する海底地震計の観測波形を用い、深海サウンドチャンネル（Sound Fixing and Ranging, SOFARチャンネル）を伝搬した噴火に伴う水中音響信号を検出した。具体的には、噴火地点からS-net各観測点までの音波の伝搬時間を考慮して、時間軸を観測点毎にずらして描画したスペクトログラムを比較することにより、視覚的に噴火に伴う水中音響信号を識別した。今回、この識別結果をもとにして、福徳岡ノ場噴火に伴う水中音響信号について考察を加えた。使用したデータは岩瀬(2022)と同じく、S-netの各観測点を構成する2種類の地震計のうち速度計を使用し、もう一方の地震計である加速度計で計測される重力の方向をもとに鉛直成分を算出した波形データであり、サンプリング周波数は100 Hzである。元の波形データには地震に伴う信号や船舶ノイズ等が多数含まれているが、スペクトログラムを参照すると、噴火に伴う信号が有する周波数成分の検出下限は、観測点によって相違があるものの、およそ5 Hz程度と判断される。一方、ノイズ状況も観測点によって相違があるものの、10Hz以下ではノイズレベルが比較的低い状況となっている。そこで今回5Hzから10 Hzまでの周波数帯域を透過するバンドパス・フィルタの適用を試みた。当該フィルタ適用後の波形に対して観測点毎に時間軸を伝搬時間分ずらし、更にそれを伝搬距離順に並べた結果をFig.1に示す。なお伝搬時間は伝搬距離(大円距離)を音速(1500 m/s)で割って求めた。横軸は各観測点で検出した信号の音源での発出時刻に相当する。縦軸は伝搬距離(km)である。なお波形を表示した観測点は噴火に伴う信号を検出した44観測点のみを選択している。SOFARチャンネルを音速で伝搬した噴火に伴う信号は横軸の同じ位置に出現するので、噴火イベントとして識別可能となる。Fig. 1は2021年8月13日05:00 JSTから1時間の記録である。下向き三角印で示した05:57頃にパルス形状の波形が存在するが、それに先立つ05:55頃からのイベント発生が確認できる。Fig. 2は、05:56 JSTからの2分間の波形を拡大したものであるが、イベント波形の出現位置がやや傾いていることがわかる。そこで、音速を1472 m/sとして描画したものをFig. 3に示す。Fig. 2に比べ、イベント波形の出現位置が揃っていることがわかる。そこで音速を同じく1472 m/sとして、05:54 JSTからの5分間の波形をFig. 4に示す。05:55 JSTの少し前からの噴火活動の開始が推定される。今後フンガ火山の噴火に伴う信号についても同様な解析を行う予定である。

謝辞

本研究の実施に際し防災科学技術研究所の公開データ(<https://doi.org/10.17598/NIED.0007>)を利用しました。伝搬距離の計算には国土地理院のサイト(<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>)を利用しました。

参考文献

岩瀬(2022), JpGU2022, SVC31-21.

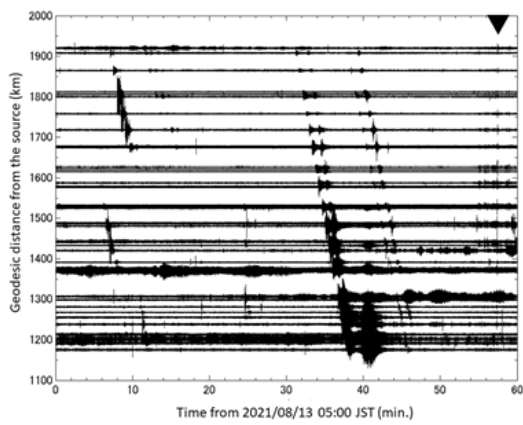


Fig. 1

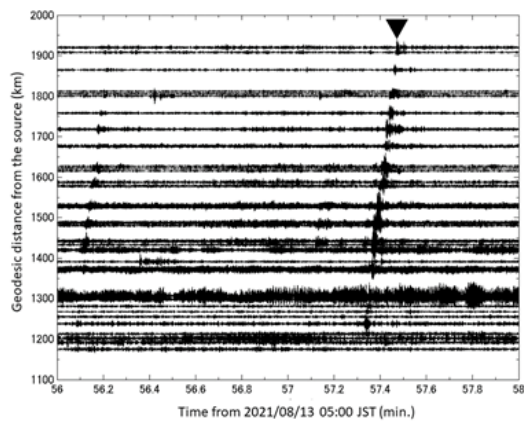


Fig. 2

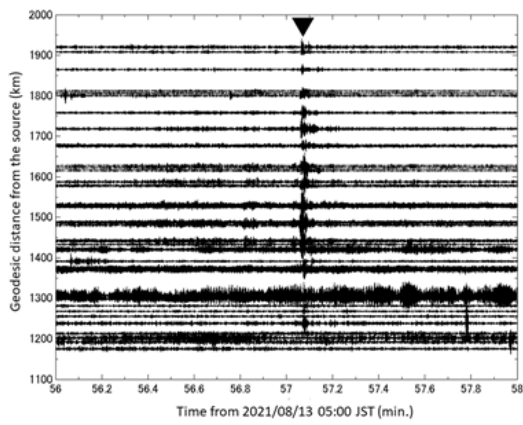


Fig. 3

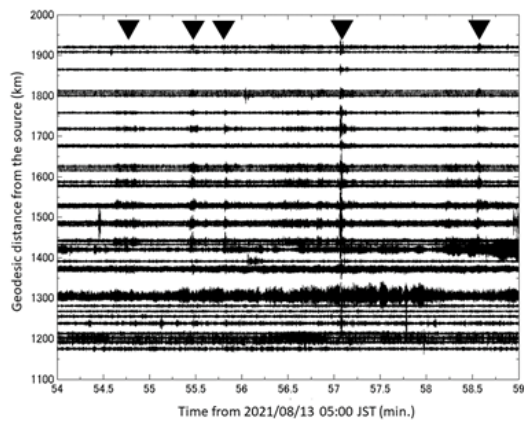


Fig. 4

Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

*Katsuhiro YABU¹, Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO², Takeshi NISHIMURA¹

1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.

DAS (Distributed Acoustic Sensing) は既存の光ファイバーケーブルに計測装置を接続するだけで、数m間隔で数十kmにわたるケーブル軸方向の歪みまたは歪み速度を計測できることから、近年地震学において導入が進んでいる。我々のグループは、2020年に宮城県内を通る国道4号線沿いに埋設されている通信用の光ファイバーケーブルを利用してDAS観測を行った(江本・他, 2020, 地震学会)。矢武・他(2021, 地震学会)では車両が励起する表面波の分散曲線を用いて浅部S波速度構造を推定した。しかし、位相だけではなく振幅も含めたDASの歪み波形を解釈するためには、車両が振動を励起する過程を詳しく理解する必要性を痛感した。そこで今回、DASの観測を再び行うにあたり、測線の間地点近くの大衡村の1か所において、ビデオカメラ、広帯域地震計を用いた観測も並行して実施した。本発表では、その観測の概要と、映像から得られる通過する車両の特徴とDAS歪み波形記録、広帯域地震計記録との関係についてこれまでに分かったことを紹介する。

Sintela社のDASの計測装置(ONYX)を国土交通省古川国道維持出張所内に2022年3月から4月の約1ヶ月間設置し、そこから南の仙台方向に国道4号線に沿って伸びている約50kmの光ファイバーケーブルに接続した。ゲージ長は9.57m、チャンネル間隔は6.38m、サンプリング周波数は200Hzとした。本観測機器の出力信号は歪みである。ビデオカメラと広帯域地震計は、大衡村の国道4号線沿道の民家の敷地内に設置した。近傍の車道は片側1車線ずつの計2車線であり、観測場所と車道中央までの距離は約9m、光ファイバーケーブルは観測場所から遠い方の車線の深さ約2.3mに埋設されている。広帯域地震計はナノメトリクス社の広帯域3成分速度計Trillium Compactを使用し、計測技研のHKS-9700でデータを連続収録した。ビデオカメラはパナソニック社HC-VZX990M-Wを使用し、観測期間中の数日間において断続的に車道方向の映像を記録した。

映像において車両を確認できた際には、広帯域地震計やDASに車両の通過に伴う地面の振動が記録されている。図は、大型トラックが通過した際の各記録の例である。DASの波形記録と映像とを比較すると、車両が最も光ケーブルに近づいたと考えられる時刻に歪み記録は伸びのピークを示し、その前後では縮みを示した。また、表面波の伝播によると考えられるより高周波の振動も捉えられた。コーナー周波数5Hzのローパスフィルタをかけた地震計記録には、同時刻の上下動成分にランプ状の波形が見られることが多かった。一方、水平成分は常に脈動と思われる周期状の波形が見られることが多かった。

映像記録から、軽自動車、普通自動車、普通貨物自動車・マイクロバス、大型貨物自動車・バス、超大型貨物、の5つに分類することができる。そこで、それぞれの車両通過に伴う最大ひずみ量を車両種別ごとに算出した。

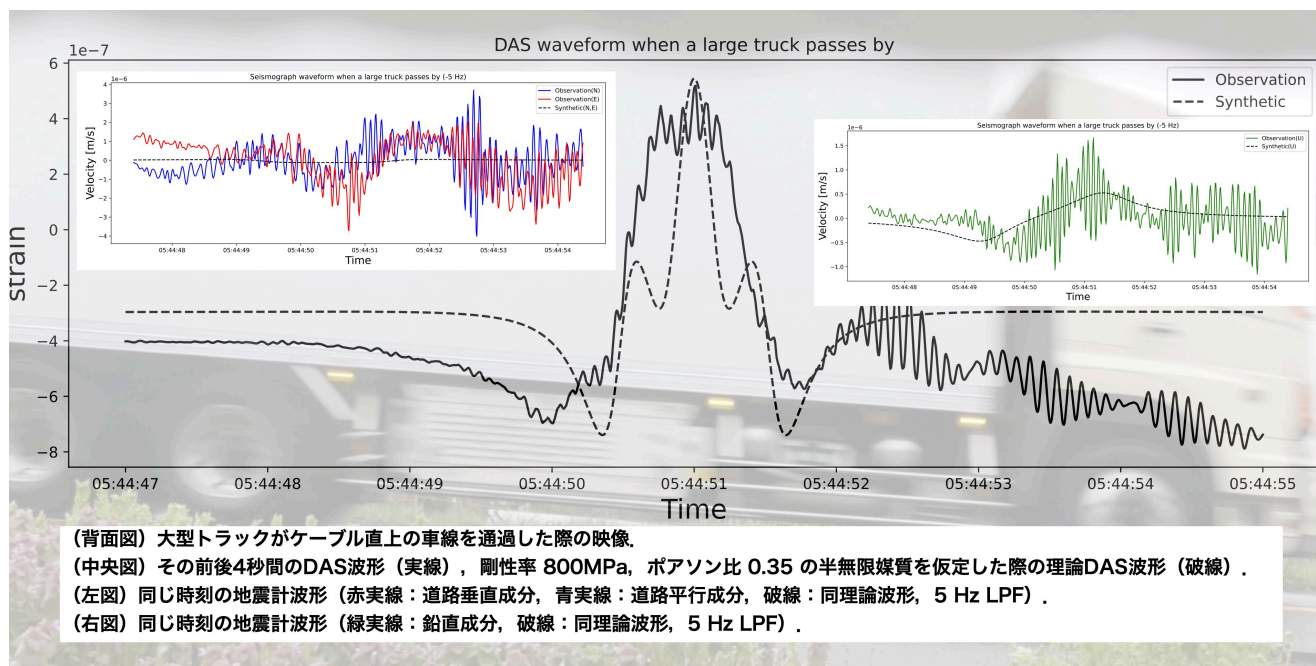
その結果、最大ひずみ量の平均値は、各車種カテゴリーの代表的な荷重の大きさにほぼ比例し、また、光ケーブルの直上の車線を走行する場合の方が、より大きいことがわかった。パルス幅については、大型の車両ほど長くなる傾向にあるが、同じ車両種別でもそのばらつきは大きいことがわかった。

これらの結果を定量的に解釈するため、半無限媒質表面の鉛直荷重に対する変位応答を計算するBoussinesq問題の解を利用した。車両が一定速度で観測点を通過すると仮定すると、理論DAS波形を水平方向にゲージ長分離れた観測点間のBoussinesq解による変位の水平成分の差と走行速度を用いて表すことがで

きる (Jousset et al., 2018) . この時、荷重は映像を基に求めたタイヤの位置に等しく分配されているとした。観測波形は、理論波形の形状に類似していることから、各車種カテゴリーの代表的な荷重と最大ひずみ量の平均値を基に、観測地点付近の地盤の弾性パラメータは、剛性率 800 MPa 程度、ポアソン比 0.35 程度と推定された。また、パルス幅が同じ車両種別でもばらつくのは、走行速度が異なるためであると解釈できる。さらに、このパラメータを用いて地震計の理論波形を同様に求めた。水平動成分は他のノイズが乗っていることが多かったものの、上下動成分の速度は複数の車両に対して観測値をよく説明することができた。

本研究では動画を併用したことで車両の特定を行うことが可能となり、多様な荷重源を基に弾性パラメータの推定精度を高めることができた。また、DASの解析結果を地震波形を用いて検証することもできた。さらに今後、この地点で求めた各車両の荷重を基に、車両が移動した先の映像記録がない地点においてもDAS記録を用いて弾性パラメータを求める予定である。

(謝辞) 国土交通省所有の光ファイバーを使用させていただいた。観測に当たって、仙台河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた。また、地震計とカメラの設置については、大衡村の石川敏氏様に多大なご協力をいただいた。

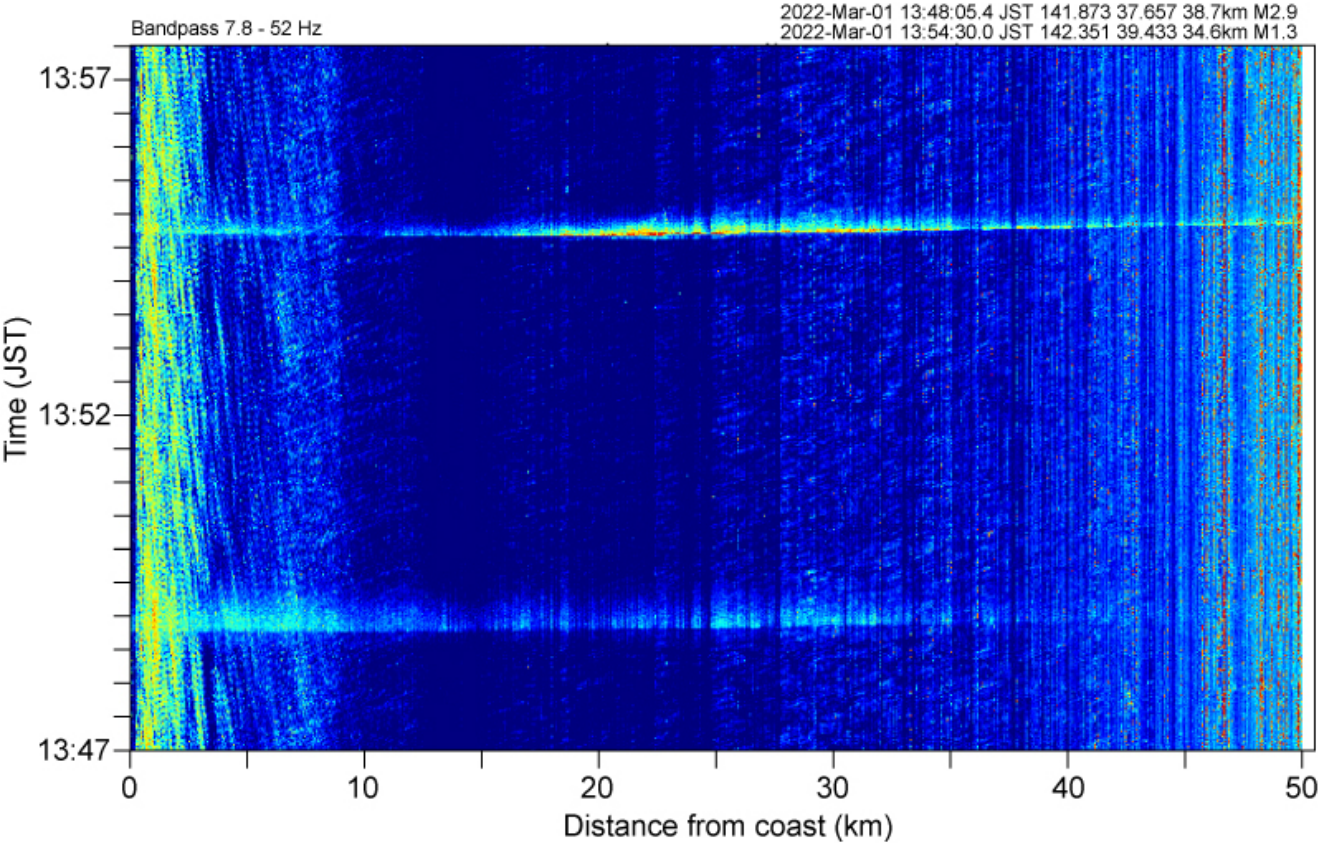


Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

*Masanao SHINOHARA¹, Tomoaki Yamada¹, Hiroki Takano², Eiji Kurashimo¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Takeshi Akuhara¹, Shin'ichi Sakai³

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

散乱波の干渉計測による分散型音響センシング(DAS)は光ファイバセンシングの一つであり、ファイバに沿って短い計測間隔で、長距離に渡って記録が得られることから、地震観測にも適用されている。干渉計測を用いたDAS計測は徐々に正確さが向上しており、現在は、質の高い記録が得られるようになってきている。現在海域において地震観測を行っている観測点はまだ数が少ないが、海底ケーブルを用いたDAS計測は線状ではあるが、海底観測点数を大幅に増加させることが可能で、今後が期待されている。1996年に東京大学地震研究所により設置された三陸沖海底光ケーブル地震津波観測システムは、拡張用に6本の予備ファイバがあり、この予備ファイバをDAS計測に使うことができる。そこで、2019年2月以降、予備ファイバを用いて、計8回の臨時観測を行っている。それぞれの観測期間は2日から2ヶ月である。収録チャンネル間隔が10m以下で、収録距離は長いときで100kmに達する。計測精度を示すゲージ長は10mから100mである。それぞれの観測において、微小地震を含む多数の地震が記録された。2019年2月の第1回の観測では、気象庁が決定したマグニチュード1.8以上のケーブルシステムから震央距離200km程度までの地震はすべて確認することができた。また、震央距離が約2,300kmであるマグニチュード6.6の遠地地震も記録された。三陸沖海底光ケーブル観測システムには、3地点において3成分加速度計が接続されており、DASデータとの比較が可能である。DASはファイバ方向の歪を計測しているが、単純な仮定の基で加速度に変換できる。その結果、現在の干渉計測によるDAS観測のノイズレベルは、ケーブルシステムに接続されている加速度計とほぼ同程度であることが確かめられた。DAS計測は陸上局から約100km沖合までを空間的に高密度で観測していることから、海岸線から沖合に至るノイズスペクトルの空間変化を求めることもできた。2020年11月に三陸沖海底光ケーブルのDAS計測と制御震源による構造探査実験を行った。使用した制御震源はBolt社1500LLエアガン（1台あたり容量1500cu.in.）4台とSercel社GIガン（1台あたり容量355 cu.in.）2台の2種類である。陸上局舎において、2本のファイバ末端にそれぞれ計測器を接続し、2台による同時DAS観測を行った。DASの収録はサンプリング500Hz、チャンネル間隔5m、ゲージ長40m、観測総距離100km（一部80km）である。1500LLエアガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートとその延長の全長約200kmである。発震間隔は約100mとした。GIガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートのみ約100kmであり、この測線上を2回発震した。発震間隔は約50mである。エアガン発震中はDAS計測を実施すると共に、発震を行う観測船から、ストリーマケーブルを曳航して、記録を収録した。収録されたデータは、2つの計測器間に大きな差はないことが確認された。また、DAS計測による制御震源の記録とケーブルシステムの加速度計による記録を比較したところ、DAS記録ではP波振幅が小さいことが確認された。構造探査実験では、海底において5mの間隔で全長80km以上の収録が行われており、高分解能な反射断面が得られることが期待される。そのため、得られたDASデータに対して基本的な反射処理を施し評価を行った。まず、DAS計測により記録された制御震源の水中直接波の走時を用いて、ケーブル位置の再決定を行った。その後、CMPソート、bandpass処理、単純なdeconvolution処理を行った後に、定速度重合により反射断面を作成した。DASデータは反射波の連続性が高くないために、定速度重合法による速度解析を行った。震央距離が3km以内のCMP gatherにおいて、1500LLエアガン記録に対しては1.0km/s、GIガン記録に対しては0.8km/sとして、定速度重合により反射断面図を作成した。DAS計測による反射断面図をストリーマケーブルによる反射断面と比較したところ、反射面の走時は異なるが、基本的に同じ反射面を示していると解釈された。DAS計測による反射断面における反射面の海底面からの往復走時は、ストリーマケーブルによる反射断面における同じと思われる反射面の海底面からの往復走時の約2~5倍となっている。反射面まで比較的長い往復走時やCMP重合の遅い重合速度などから、得られたDAS計測による反射断面は変換されたS波による反射波が卓越していると考えられる。



Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

*Masayuki YOSHIMI¹, Satoshi IDE², Teppei ENARI³, Daiki TAYA³, Shuji IWATA⁴

1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company

東海道新幹線の軌道沿いに布設された通信用光ケーブルを用いて、約三ヶ月間（2021年8月30日から11月23日）にわたるDAS観測（AP sensing製 N5226A）を実施した。新幹線や交通車両等による振動に加え、複数の地震記録が取得された。本発表では、計測の概要、光ケーブル設置条件と観測記録の特性、地震計記録との比較、テンプレートマッチングによる火山性低周波地震の検出試行結果を報告する。測定対象は小田原―掛川区間であり、このうち熱海―静岡区間（約75km）で74日間、熱海―小田原区間、静岡―掛川区間でそれぞれ2日間および3日間程度の連続観測を実施した。DAS観測に並行して、新丹那トンネル内の3箇所、富士川橋梁上、および、沿線の3箇所に広帯域地震計もしくは加速度計による観測を行った。DASの計測パラメータは、機器が設定を許す最大のサンプリングレートおよびゲージ長（空間サンプリング5.1m、ゲージ長40.8m、サンプリング周波数は熱海―静岡区間では1000Hz、それ以外では2000Hz）とした。1分間のデータ量は、熱海―静岡区間（約75km：約15000ch）で1.72GB、静岡―掛川区間（約45km：約9000ch）で2.1GB、熱海―小田原間（約19km：約3800ch）で0.87GBであり、観測期間全体で200TBあまりのデータ量となった。測定区間の新幹線軌道は、トンネル、橋梁、高架橋、盛土、掘割、自然地盤など様々な地盤・構造物上に設置されている。光ケーブルは、トンネルでは壁面に架けられ、それ以外の場所では線路脇等の配線箱もしくは配線棚に格納されている。新幹線通過時には位相跳びによる振幅の頭打ちが生じるものの、新幹線による振動が記録され、設置環境による振動特性の違いが明瞭であった。トンネル区間では、新幹線の突入に伴う微気圧波による振動が音速で伝搬する様子も観測された。観測期間中には房総沖、千葉中部、静岡県中部等を震源とする地震（有感）が発生し、これらのDAS計測波形が取得された。P波、S波のオンセットは概ね明瞭であった。後続波群は地震に関わらず場所ごとにほぼ同一の周波数帯域に収斂し、構造物―地盤系の振動特性を反映しているものと推察される。計測区間北方には富士山の火山性低周波地震の震源域がある。低周波地震のシグナルが明瞭に認識できるDAS計測波形のうち10秒区間をテンプレートにして、Matched Filter解析を実施した。約360万個の相互相関値のうち6 σ 以上のもの（112個）の中に、富士山の火山性低周波地震は21個（テンプレート地震含む）含まれていた。同じ期間の気象庁カタログに含まれるものの23個のうち12個、含まれないものも9個検出された。M0.5を超える低周波地震は概ね検出でき、また約5分間続く低周波地震活動も検出できていた。構造物設置の光ケーブルを用いたDAS観測は、当該構造物の振動特性把握など工学的に有用であるばかりでなく、地震検知など理学目的の自然地震観測にも有用である。

Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:00 PM - 4:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:00 AM - 7:15 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S02] PM-2

chairperson: Hajime Shiobara (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Toshinori Sato (Chiba University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S02-06] Classification for Earthquakes with Linked Data

*Hiroki UEMATSU^{1,2,3}, Ahyi Kim³, Hideaki Takeda^{1,2} (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S02-07] Development of multi-platform next-generation WIN system (2)

*Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Naoki UCHIDA¹, Mare YAMAMOTO⁴, Kazuo OHTAKE⁵, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Yuta MAEDA⁶, Shiro OHMI⁷, Haruhisa NAKAMICHI⁷, Makoto OKUBO⁸, Takeshi MATSUSHIMA⁹, Hiroshi YAKIWARA¹⁰, Katsuhiko SHIOMI¹¹, Kenji UEHIRA¹¹, Hideki UEDA¹¹, Kazuki MIYAOKA¹², Koji TAMARIBUCHI¹³, Ryo HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S02-08] Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method

*Shigeki Horiuchi¹, Yuko Satou¹, Yoshihisa Iio², Aitarou Kato³, Tomomi Okada⁴ (1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S02-09] Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments

*Ryuhei YAMADA¹, Kazuyoshi Asari², Hiroaki Shiraishi³ (1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S02-10] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient

*Hajime SHIOBARA¹, Masanao Shinohara¹, Toshinori Sato², Aki Ito³, Hiroko Sugioka⁴ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBEC, Kobe University)

Classification for Earthquakes with Linked Data

*Hiroki UEMATSU^{1,2,3}, Ahyi Kim³, Hideaki Takeda^{1,2}

1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University

本研究では、Linked Dataと呼ばれるWeb上のデータを互いにつなげることのできる形式で公開、共有する仕組みを用いて、地震データの整理を行う。また、地震データをLinked Dataで表現するために、地震に関する語彙を作成する。地震動は波形データとして記録され、震源パラメーターの推定、地下構造の推定などさまざまな研究に使われている。またこれらの大量に蓄積された波形データは近年地震学の分野で盛んに用いられる機械学習において、震度予測や、観測波形の分類、P波/S波の検出等の機械学習を用いた研究の教師データとして利用されている。機械学習には大量の良質な教師データが必要であるため、地震観測網で観測されたデータは有用だが、それらの収集には困難が伴う。例えば、防災科学研究所の波形データの取得サイトにはAPI等は用意されておらず、ユーザが日付時刻や震源、観測点等を指定して手動で波形データをダウンロードする必要がある。また、研究者が独自に観測した波形データや、気象庁や地方自治体の観測網を横断して検索するためには、波形データを集約したデータベースの作成等が考えられる。しかし、波形データの再公開はできず、また波形データを一意に指し示すURIを持たないため、研究者独自のデータベースが乱立することとなり、再利用可能なオープンな波形データベースの作成は難しい。そこで、地震動を観測した観測点の情報や震度、観測時刻、また観測された波形から推定された震源の位置やマグニチュードなど、「地震」のメタデータを収集し、Linked Dataの形式で公開する。Linked Dataは事物や概念が一意のURIを持ち、リンク構造を持つことでデータ同士をつなぐことができる。Linked Dataでは、事物や概念のリンク構造をトリプルと呼ばれるモデルで表現し、Webサイトのリンクを辿ることと同様に、プロパティ（リンク）を辿ることで、データを辿ることができる。ここで、Webサイトのリンクは、単なるつながりを示しているが、Linked DataのトリプルではリンクとなるプロパティもURIを持ちリンクの関係性を示している。本研究では、地震データに特化したプロパティとして、震源や震度、観測時刻など地震動に関する語彙や観測点に関する語彙を新たに定義する。例えば、「地震動」は、「震度」「マグニチュード」「発生時刻」等の語彙をプロパティとして持つ。また、「観測した波形」という語彙をプロパティとすることで、ある地震動を観測した波形のトリプルが作成され、「地震」そのものを観測することは難しいが、観測された地震動のリンク構造から「地震」を表現することが可能となる。本研究では、地震語彙の作成、観測波形や震源の情報をもとに地震にURIを付与することでLinked Dataの形式で公開し、地震データおよび学習データとして利用可能な地震カタログの可用性と流通の可能性を検討する。

Development of multi-platform next-generation WIN system (2)

*Shigeki NAKAGAWA¹, Hiroshi AOYAMA², Hiroaki TAKAHASHI², Takuto MAEDA³, Naoki UCHIDA¹, Mare YAMAMOTO⁴, Kazuo OHTAKE⁵, Hiroshi TSURUOKA¹, Yosuke AOKI¹, Yuta MAEDA⁶, Shiro OHMI⁷, Haruhisa NAKAMICHI⁷, Makoto OKUBO⁸, Takeshi MATSUSHIMA⁹, Hiroshi YAKIWARA¹⁰, Katsuhiko SHIOMI¹¹, Kenji UEHIRA¹¹, Hideki UEDA¹¹, Kazuki MIYAOKA¹², Koji TAMARIBUCHI¹³, Ryo HONDA¹⁴, Shutaro SEKINE¹⁵

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction

1. はじめに

地震・地殻変動等の時系列データの伝送や検測処理に広く用いられているWINシステム（ト部・束田, 1991；ト部・束田, 1992；ト部, 1994など）は、大学等の基幹システムとして25年以上にわたって使い続けられている。特に現在の対話検測処理ソフトウェアは機能向上を図ることが難しく、検測処理の高度化や迅速な情報発表を図る上での障害となりつつある。一方、この四半世紀で、ハードウェアの性能が大幅に向上したほか、マルチプラットフォームに対応した言語や対話処理に優れた入力デバイスの開発・淘汰が進み、ハードウェア環境に依存しないソフトウェア群の構築が可能になってきた。そこで、WIN形式データのリアルタイム伝送が機関の枠を超えた全国規模のデータ流通の基盤となっていることを踏まえ、定期的に更新が進められてきた防災科研や気象庁のデータ伝送システムや対話検測処理システムを参考にしながら、マルチプラットフォームのソフトウェア群（次世代WIN）の開発を進めている。

2. 対話検測処理系システムと今後の展望

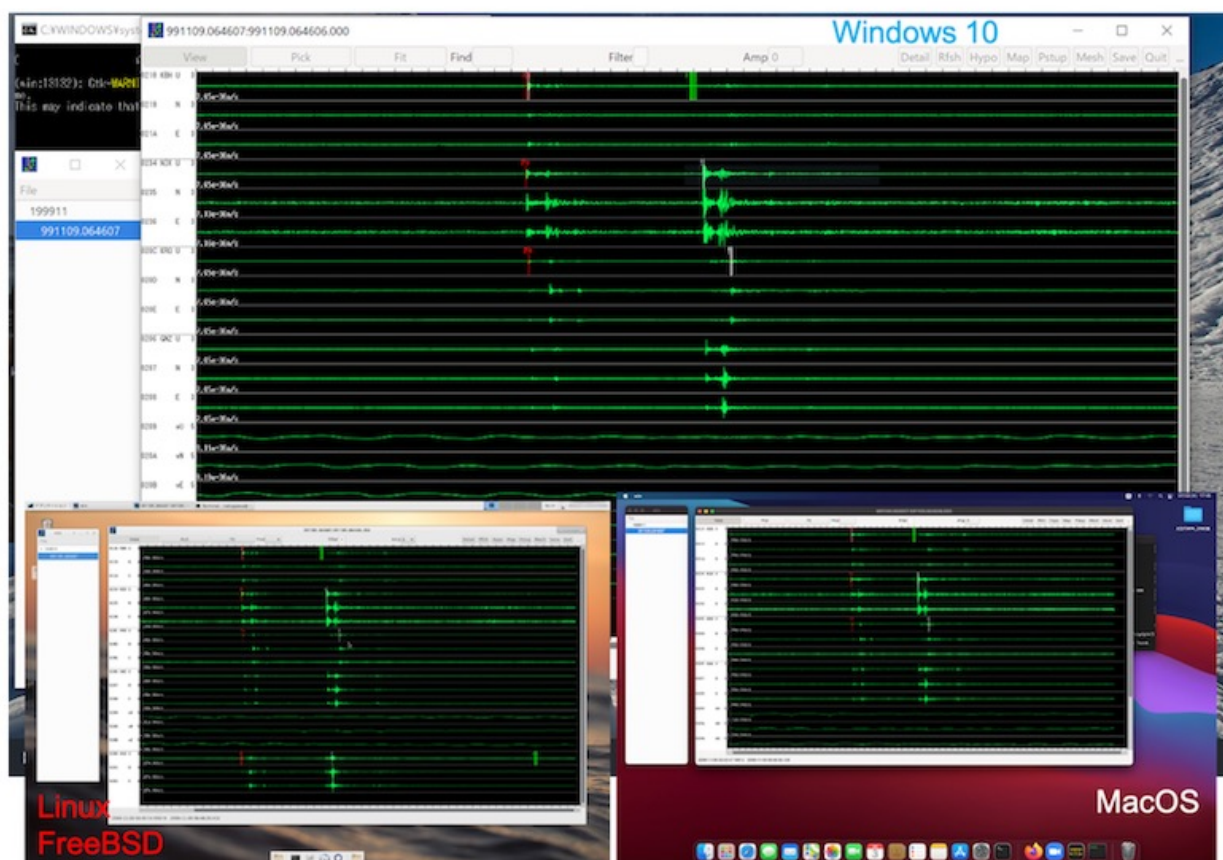
昨年度は波形データの読み込みやマウス操作による検測など対話検測ソフトウェアの基礎となる部分を試作した（中川・他, 地震学会, 2021）。最大の特徴は、1つのソースコードからUnix (Linux, FreeBSD), Windows, macOS の複数プラットフォーム上で動作するネイティブバイナリをそれぞれの環境下でコンパイルできることである。昨年度試作したプログラムは波形表示と手動検測の最小限の機能しか備えていないが、今後の機能拡張が可能な設計となっている。

本研究では、この昨年度試作したソフトウェアに、震源決定プログラムなどの外部コマンド実行機能や地図表示機能を実装した。震源決定プログラムはWINシステムに同梱されているhypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）を用いているが、入出力のフォーマットを整えれば他のプログラムでも差し支えない。震源決定プログラムを利用することで、検測後に震源決定するだけでなく、理論走時を波形に重ねて表示したり（図(a)）、震央距離順に観測点を並べ替えて表示したりできるようになった。また、決定した震源を地震活動と重ねて地図上に表示できるようになった（図(b)）。地図表示では、震源の深さによるカラー表示ができるようになった。

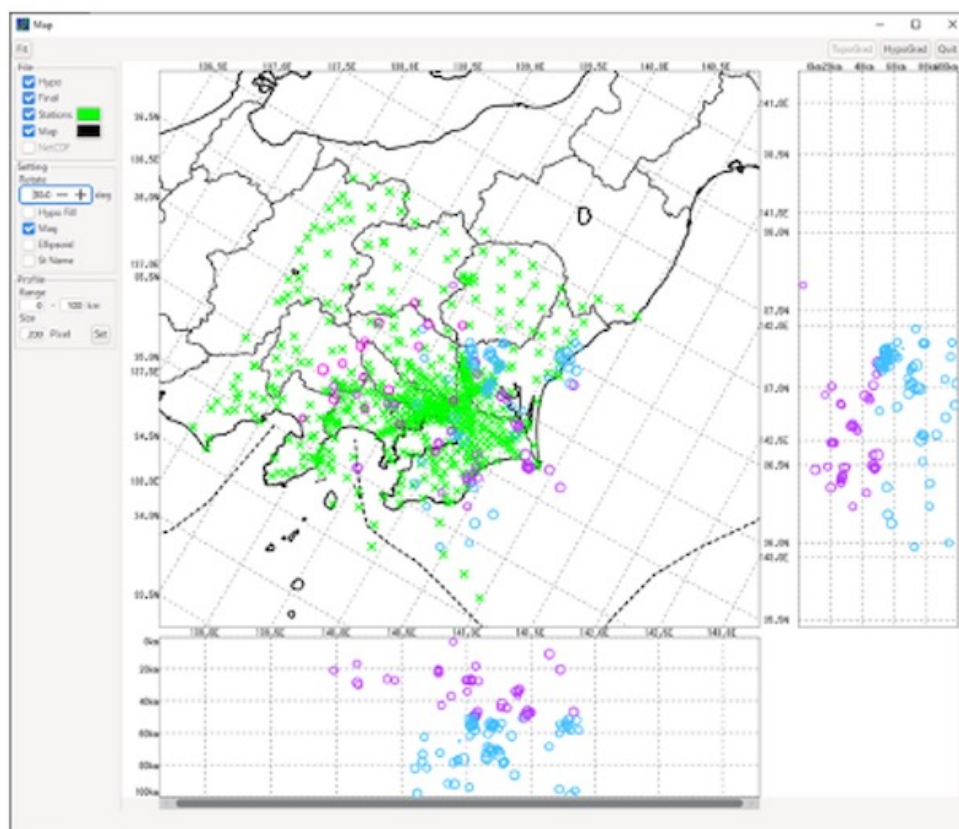
外部コマンド実行機能を実装したことで、他の外部コマンドを用いた機能拡張が可能となった。例えば、発震機構解を求める外部プログラムの利用などが考えられる。対話検測ソフトウェアとして必要最低限の機能は実装できたので、関連する研究者や技術者等で試用しながら、更なる機能拡張を進めていきたい。

謝辞：本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学及び気象庁の地震観測データを用いました。ここに記して感謝します。なお、本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の支援を受けました。

(a)



(b)



Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method

*Shigeki Horiuchi¹, Yuko Satou¹, Yoshihisa Iio², Aitarou Kato³, Tomomi Okada⁴

1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.

1. はじめに 到着時刻の自動読み取り、震源決定システムの開発が行われ、比較的精度の高い震源が自動決定できるようになった。しかし、各種ノイズの混入のため、全ての観測点の読み取りを正確に行うことは難しい。自動震源決定システムは、走時残差の大きさを利用して、間違った読み取りデータの削除を行っているが、地下構造に大きな不均質性が存在するため、読み取り誤差と、不均質性による走時残差とを区別することが難しい。一方、隣接して発生する2個の地震を相対震源決定すると、不均質性の影響が相殺され、走時残差は小さくなる。相対震源決定の走時残差を用いれば、自動読み取りの誤差が大きい観測点を自動検出できる可能性がある。本報告では、一個の地震について、その近傍で発生するマグニチュードの大きい地震を数10個選り、一個の地震と、数10個の地震との相対震源決定を行うことにより、その地震の各観測点での読み取り誤差を検出し、自動修正を行うシステムを開発した。また、自動震源決定に適した相対震源決定手法を開発したので報告する。

2. 複数の地震の相対震源決定を用いた読み取り誤差の推定方法 隣接して発生する地震を、相対震源決定すると、パスの違いによる不均質性の影響が相殺され、走時残差を小さくすることができる。また、大きい地震のS/N比は、小さい地震のそれに比べ高く、読み取り精度は高い傾向にある。そこで、自動震源決定された地震 A_k について、その近傍に震源決定され、かつ、マグニチュードの大きい地震を N 個(B_{km})選ぶ。地震 A_k と、その j 観測点の読み取り値を A_{kj} 、地震 B_{km} との相対震源決定の、 j 観測点の走時残差を R_{kmj} とする。読み取り誤差の推定は、その理論的到着時刻 T_{kj} を推定することにより行う。読み取りが行われ、 A_{kj} が存在する場合は、 T_{kj} は、走時残差 R_{kmj} の平均値と A_{kj} との和で表される。 A_{kj} の読み取り値が存在しない場合で、地震 B_{km} の j 観測点の到着時刻が存在する場合は、この読み取りデータを満足するように、地震毎に、 A_k の j 観測点の理論走時を求め、その平均値で理論走時を与えるようにした。この方法の最大のメリットは、地震 A_k の到着時刻が、 N 個の地震の読み取りデータから精度よく推定できる点である。ここでは、 $N=50$ とした。また、走時残差 R_{kmj} の平均値は、先ず、平均値と、分散を計算し、誤差が2乗平均誤差を超えるデータを削除して、求めるようにした。到着時刻の再読み取りは、読み取り値が、推定された到着時刻の2乗平均誤差の2倍を超える範囲外だった場合に行うようにし、顕著な位相の立ち上がりがあり、その範囲内に存在する場合に、読み取り値を採用するようにした。

3. 相対震源決定 Waldhauser & Ellsworth (2000)によるHypoDDは、解析する全領域で発生する全地震の相対震源決定の誤差が最小となるように震源決定する方法である。自動震源決定は、日本列島全域で発生する地震を対象にして行う場合もある。また、地震は、毎日発生することから、地震が発生する度に、過去に遡って、HypoDDを行うと、計算機の負荷は膨大になる。そこで、ここでは、上記 N 個の地震 B_{km} の震源位置をレファレンスとして、全ての B_{km} の地震との相対震源決定の走時残差の2乗和を最小となるように、 A_k の震源位置を求めるようにした。すべての A_k について、この震源決定を行うと、 B_{km} に属する個々の地震も、同様に、周りで発生する N 個の地震で相対震源決定される。本震源決定では、この操作を2回繰り返し、相対震源決定された B_{km} の地震位置をレファレンスとして、 A_k の地震の相対震源決定を行うようにした。

4. 結果 解析には、2016年10月21日マグニチュード6.6の鳥取県中部地震の発生の翌日の24時間の、京大・九大・東大地震研合同余震観測班(Iio et al., 2020)による地震観測データ、及び、2017年3月〜4月の福島県いわき周辺で発生した地震のHi-netデータを用いた。堀内・他(2009)による自動震源決定システムで震源決定されて地震のトリガー波形とピックファイルを用いて、上述の方法で、走時残差の大きい観測点の再読み取り、読み取りが行われていない観測点の再読み取りを行ない、相対震源決定を行った。通常の自動震源決定と、本方法による震源決定結果の比較、及び、一元化震源と、本方法によるそれとの比較から、本方法の適用により、詳細な震源分布が得られることが示された。また、鳥取県中部地震のデータを用いた場合の、相対震源決定の走時残差の平均値は、0.11秒であった。東北地方、海域で発生する地震についても、本方法の有効性を調べる予定である。

Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments

*Ryuhei YAMADA¹, Kazuyoshi Asari², Hiroaki Shiraishi³

1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS

地震の発生メカニズムや天体の内部構造に関する研究は、地震計による観測網拡張に伴い進展してきている。その一方で、一般に、海底、火山地域、極域、月惑星等、いわゆる人が地震計を運搬し、設置するのが困難な極限環境下に、地震観測網を展開するのは決して容易ではない。本研究では、極限環境域への地震観測網展開を目指すため、小型軽量、かつ高性能の広帯域地震計の開発を進めている。

この開発において、我々は宇宙機用として開発された短周期地震計(図1)をベースに周波数応答の広帯域化を実施してきた。この地震計は固有周波数1Hzの電磁コイル式の短周期地震計であり、同タイプの地震計と比較しても小型軽量(直径5cm×高さ5cm, 重量350g)でありながら、より高い感度(1000V/m/sec)を実現しているため、火山噴火地域や月惑星等、無人で観測装置を運ぶ際に有利となる。また、この地震計は航空機等からの投下により無人でのセンサー設置が可能なハードランディングプローブであるペネトレータにも搭載できる。ペネトレータは槍型の貫入装置であり、地震計を搭載しての地上試験実績も有している。開発した地震計は、このペネトレータの貫入衝撃に耐えて微小振動を観測できるだけの頑健性もすでに実現している(Yamada et al., 2009)。この小型軽量で汎用性の高い短周期地震計を広帯域化する事で、地震計の運搬・設置が困難な極限環境域で例え一点設置であっても、より多くの観測成果を得る事が期待できるようになる。

本研究では、この短周期計に容量変位検出器とフィードバック機構を取り付けて広帯域化を図り、1Hzよりも長周期側でも高感度(1000V/m/sec以上)を実現する事を目指した。この広帯域地震計として、我々は図1に示す地震計の振り子とケースの両端面に電極版を取り付けて、検波回路を接続することで、地動変位に伴う容量変化を検出できるようにした。そして、この地震計で固有周期10-30秒を実現するための負帰還回路の設計と製作を行った。この負帰還回路をセンサーに取り付けて、周波数応答の計測を実施したところ、設計通りの応答を示し、少なくとも0.1-20Hzの間で、約2000 V/m/secの感度を実現可能な事を確認する事ができた。そして、広帯域地震計の地動応答の評価のため国立天文台水沢の江刺地球潮汐観測所で、リファレンス用の広帯域地震計(CMG3 ESP)との比較観測を実施した。その結果、現状、0.15~1Hz程度までは、開発した広帯域地震計はリファレンス地震計と同等の応答を示す事を確認できた。一方、長周期側では、リファレンス地震計よりも、ノイズがより多く観測波形に含まれる事も示されたので、現在、負帰還回路の小型化や低ノイズOPアンプの使用などで、地震計の低ノイズ化を図っている。

本発表では、この小型負帰還回路を使用した結果も含めて、広帯域地震計の設計、これまでの開発状況、及び実験室や江刺での試験結果について、報告・議論する予定である。

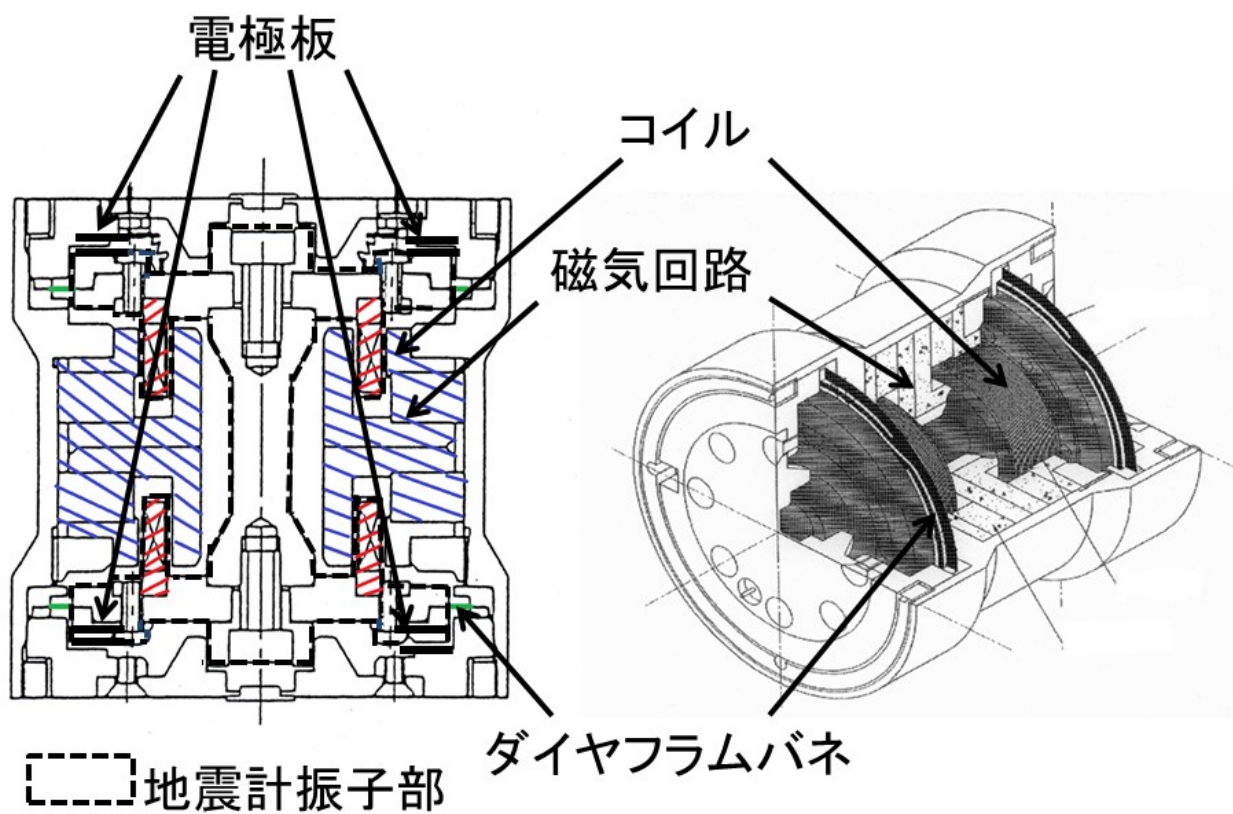


図1.短周期地震計の断面図と鳥瞰図

Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient

*Hajime SHIOBARA¹, Masanao Shinohara¹, Toshinori Sato², Aki Ito³, Hiroko Sugioka⁴

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBECE, Kobe University

1. はじめに

機動的な海底傾斜変動観測の実用化に向け、新型の広帯域海底地震計(BBOBS-NX)を基にしたBBOBST-NXによる長期観測について2014年・2017年・2021年の地震学会で報告した[1][2][3]。今回は、2020年に回収したBBOBST-NXの観測データに見られた傾斜値の温度依存性についての続報である。

2. 計測・処理方法

BBOBS-NXでは独立した広帯域センサー部が海底面に大半埋設されており、底層流の影響による傾斜変動はほぼ無く、海底堆積層との結合も良好である。広帯域センサーの水平動2成分のマスポジション信号(加速度出力)を速度信号3成分と併せ連続記録するBBOBST-NXは、広帯域地震・傾斜変動を同時観測できる(図A)。実際に得られた記録には、広帯域センサーの経時変化とマスのセンタリングによるシフトが見られる。シフトの前後で記録はほぼ連続しており、シフト分を補正した後に適当な関数(1次+対数)をgnuplotを使い当てはめ、経時変化を差し引き、傾斜変動の記録を得る。海底での潮汐による傾斜変動は約 $0.1 \mu\text{rad}$ と小さいがbaytap08プログラム[4]を適用して潮汐成分を取り除く。

3. 長期試験観測と取得データ

房総半島南東沖で繰り返しSSEが発生している領域で2013-2014年、2015-2017年に長期試験観測を実施した。初回は数m離れた流向流速計で、2回目は自記式精密水温計をBBOBST-NXの外装に取り付け、水温等も記録した。基本的な処理を済ませた傾斜変動には、2成分共に水温変化との明確な関連性(約 $-30 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$)が見えた(図B)。同じ個体の広帯域センサーを用いた、2012-2013年と2013-2014年の過去2回での試験観測での結果[5]では、傾斜変動と水温変化の関係が明確に示せなかったが、2015-2017年の観測結果からは温度依存性が確認できた。これらの傾斜変動と水温変化の関係をみると、全て共通して負の温度係数で傾斜値が変化していることから、水塊移動による傾斜変動ではなく、BBOBST-NX自体での温度依存性であると判断できる。この温度依存性の影響を傾斜変動から除去する方法を試し、周波数領域で温度係数を推定してその分を差し引くことにした。過去2回の傾斜記録に対しても同様な処理を行ったが温度係数が、同じオーダーではあるがやや異なった。この処理後、2014年のSSE時に見られた傾斜変動は、2成分共にその存在が明確になった。

4. 温度依存性の要因

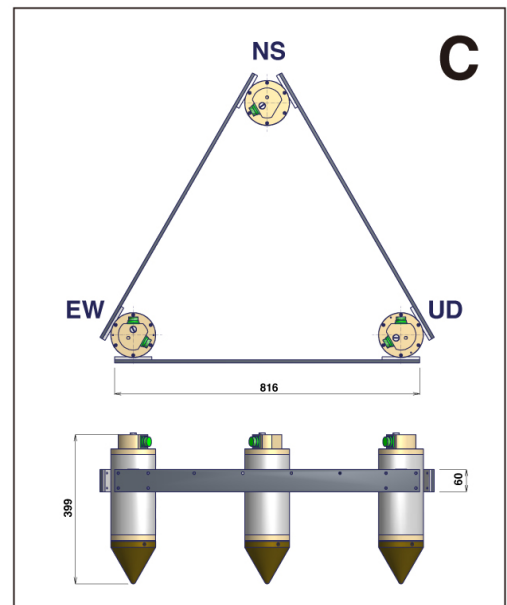
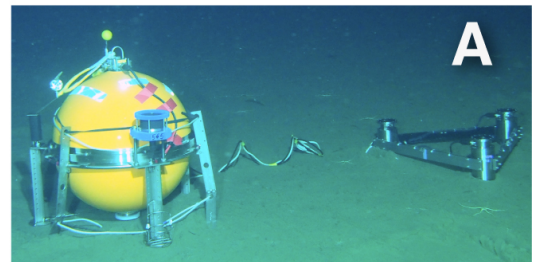
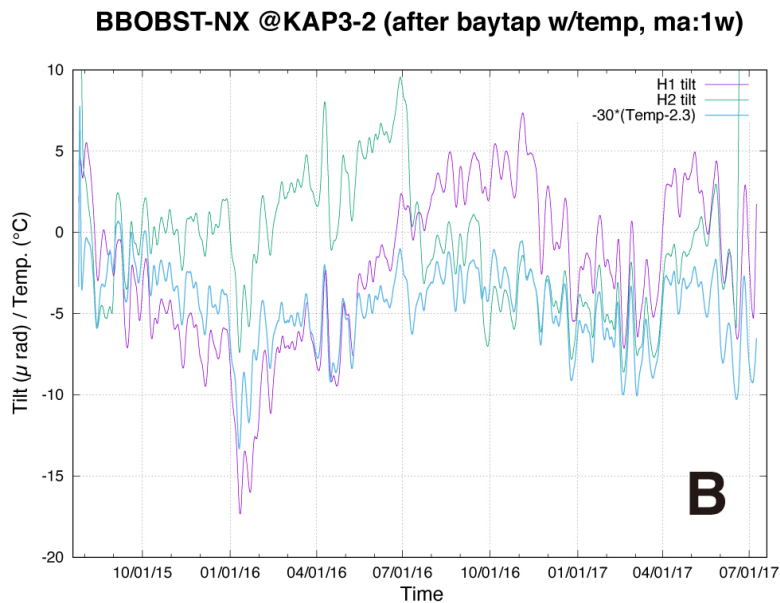
過去3回の海底傾斜観測時には同一個体の広帯域センサーを使用していたが、温度係数には差があるように見られた。これは広帯域センサーと水温測定場所との距離がそれぞれで異なるのが原因とも考えられる。また一方で、BBOBST-NXのセンサー部の構造(図C)から、3成分の各1成分を内蔵する筒型耐圧容器間を固定しているチタン合金製のバーの膨張係数($8.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)でも同程度の傾斜変化が起こる可能性もある。そこで、広帯域センサー自体のマスポジション信号の温度依存性を確認するべく、高精度の小型自記温度計を使った室内試験を2022年7-8月に地震研究所内の実験室環境で実施した。安定したマスポジション信号が得られた約3週間分の傾斜変動と広帯域センサーの容器(メーカー出荷用、3成分一体)内での温度変化を比較すると、既知の温度係数より小さい、約 $-10 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ と見られた。但し、この広帯域センサーの個体が上記の海底傾斜観測時(図B)のものとは異なること、温度係数自体が温度に依存する可能性もあることから、まだ完全には結論付けられない。

5. まとめ

室内試験の結果からは、やはり広帯域センサー内部での精密温度計測を行い、その温度係数を推定することが重要であるのが明確となった。広帯域センサー自体に高精度の温度測定機能を組み込むことが必要であり、今後、製造会社と協議する予定である。

参考文献

- [1] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, C32-09, 2014.
- [2] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, S02-07, 2017.
- [3] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, S02-02, 2021.
- [4] Tamura, Y., et al., GJI, 104, 507-516, 1991.
- [5] Shiobara, H., et al., Front. Earth Sci., 8:599810, 2021.



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

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:45 AM - 11:00 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:45 AM - 2:00 AM UTC | 🏢 ROOM D
5th floor (Training Room 520)

[S07] AM-1

chairperson: Masato Furuya (Hokkaido University), Keiko Kuge (Kyoto University)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S07-01] Seismic discontinuities beneath the Australian continent from Bayesian inversion using multimode surface waves and receiver functions

*Kotaro Tarumi¹, Kazunori Yoshizawa^{1,2} (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S07-02] Upper mantle S-wave structure beneath Mongolia, Central Eurasia

*Baigalimaa Ganbat^{1,2}, Kazunori Yoshizawa^{1,3}, Demberel Sodnomsambuu², UlziiBAT Munkhuu² (1. Dept Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Astronomy and Geophysics of Mongolia, 3. Dept Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S07-03] Inferring 3-D S- and P-velocity structure of D'' beneath Central America using waveform inversion

*Rei Sato¹, Kenji Kawai¹ (1. Univ. of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S07-04] Waveform inversion for the 3D S-wave velocity structure in the D'' beneath the Southern Atlantic

*Keisuke Otsuru¹, Kenji Kawai¹ (1. University of Tokyo)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S07-05] The Q-value and its frequency dependence suggested from the recent absence of the Chandler Wobble

*Masato FURUYA¹, Ryuji Yamaguchi² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Hokkaido University)

Seismic discontinuities beneath the Australian continent from Bayesian inversion using multimode surface waves and receiver functions

*Kotaro Tarumi¹, Kazunori Yoshizawa^{1,2}

1. Graduate School of Science, Hokkaido University,, 2. Faculty of Science, Hokkaido University

上部マントル内部の地震学的不連続面、特にリソスフェア–アセノスフェア境界（LAB: Lithosphere-Asthenosphere Boundary）やリソスフェア内不連続面（MLD: Mid-Lithosphere Discontinuity）は、プレートの進化や水平移動の過程を探る上での重要な情報である。近年、世界各地の広帯域地震計を用いた表面波トモグラフィーや実体波レシーバ関数解析により、豪州や北米等の大陸域での3次元異方的S波速度構造や不連続面の空間分布が明らかになりつつある（Yoshizawa & Kennett, 2015, GRL; Calo, et al., 2016, EPSL; Birkey et al, 2021, JGR）。特にマントル内部の境界面の推定には、境界面での変換波を含むレシーバ関数と、S波速度や異方性の3次元分布を推定できる表面波の情報を組み合わせた同時解析が有効である（e.g., Taira & Yoshizawa, 2020, GJI）。しかし、マントル深部に感度を有するマルチモード表面波とレシーバ関数との同時インバージョンの手法は、広範な大陸域にはまだ十分に応用されていない。本研究では、マルチモード表面波の位相速度と、P波レシーバ関数とを同時に用いた非線形インバージョンを通じ、大陸下の上部マントル内の異方的S波速度構造を推定する。特に、大陸マントル内の不連続面の空間マッピングに向けて、観測点毎の速度構造と検出された不連続面について検証を行う。インバージョン手法には、trans-dimensional hierarchical Bayesian inversion法を用いる。この方法では、層構造モデルのパラメータ数（層数）も未知変数として扱うことができ、データに合わせて層数が変化する。さらに、各データの誤差も変数として扱うことで、異種データ間の重みも適切に調整される。レシーバ関数は震央距離に応じたmoveout補正を加えてスタックしたものを用いる。また表面波の分散曲線は、Yoshizawa (2014, PEPI)によるマルチモードの位相速度分散曲線を使用する。なお、レシーバ関数と表面波位相速度のフォワード計算には、それぞれThomson & Haskell法とMINEOS (Masters et al., 2011)を用いる。この手法を豪州東部と西部の定常観測点（CTAO, MBWA）へ適用し、SV波およびSH波速度の1次元構造モデルを推定した。大陸東部のCTAO観測点では、顕生代の造山帯に特徴的な浅いLAB（SV波速度の低下に伴う境界面、深さ約70 km）が推定された。一方、大陸西部のMBWA観測点では、太古代のクラトン域特有の厚いリソスフェアに対応する高速度異常と、深さ140 km付近で急激な速度低下を伴うLABが検出された。より深部（約180 km）では、更なる速度低下を伴う境界面もみられた。このような、LAB付近でのステップ状の速度低下の一因として、約6-7cm/年で高速に水平移動する豪州大陸のクラトン直下での水平流動に伴うBasal Dragの影響（クラトン底面の浸食）が考えられる。より深部では、CTAOで約240 km, MBWAで約280km付近の深さに、SV波速度の上昇を伴う不連続面が見られ、これらはLehmann面（アセノスフェアの底面）を示すものと考えられる。今後、本手法を多数の定常および臨時観測点へ適用することで、大陸マントル内の不連続面の空間分布や鉛直異方性との関連性を明らかにできると期待できる。

Upper mantle S-wave structure beneath Mongolia, Central Eurasia

*Baigalimaa Ganbat^{1,2}, Kazunori Yoshizawa^{1,3}, Demberel Sodnomsambuu², Ulziibat Munkhuu²

1. Dept Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Astronomy and Geophysics of Mongolia, 3. Dept Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

We present a radially anisotropic 3-D shear wave model of the continental lithosphere and asthenosphere beneath central Eurasia around Mongolia using multimode surface wave tomography. We have employed seismic waveform data recorded at the permanent and temporary stations in Mongolia and neighboring GSN (Global Seismograph Network) stations. Our dataset includes three-component seismograms from 2151 teleseismic events ($M > 5.8$) from 2009 to 2021. The model is constructed using the three-stage inversion scheme developed by Yoshizawa and Kennett (2004, JGR). In the first stage, we performed fully nonlinear waveform fitting for individual seismograms to extract the multimode phase speeds of Love and Rayleigh waves (Yoshizawa & Kennett, 2002a, GJI; Yoshizawa & Ekström, 2010, GJI). In the second stage, we retrieved multimode phase speed maps using the linearized inversions based on the method of surface-wave tomography incorporating approximate effects of finite frequency (Yoshizawa and Kennett, 2002, GJI). In the third stage, localized multimode dispersion curves derived from the multimode phase speed maps were used to construct local 1-D S-wave profiles, including radial anisotropy, which formed a 3-D shear wave speed model beneath central Eurasia around Mongolia. In stable eastern Mongolia, high-velocity anomalies are seen above 120 km depth, particularly in the V_{SH} model. However, the tectonically active western Mongolia is characterized by a low-velocity anomaly, especially in the Hangay and Huvsgul regions, where the low-velocity feature extends down to a depth of 150 km. The radial anisotropy model shows a faster SH wave speed than SV in almost the entire Mongolian lithosphere above 100 km depth, except for the northern edge of the Altay Mountains region. However, the faster SV anomaly below 180 km depth is seen in central and eastern Mongolia, including the Hangay and Huvsgul regions. A slow wave-speed area with the anisotropic parameter $\xi < 1$ beneath the Hangay dome above 150 km depth may reflect the mantle upwelling resulting in the uplifting process in this region. In addition, we can see remarkably distinct lateral heterogeneities near the expected boundary between the Eurasian and Amur plates, especially near the northern and western edges of the Amur plate. This may indicate the seismological evidence of the enigmatic plate boundary of the Amur plate in the Mongolian region.

Inferring 3-D S- and P-velocity structure of D'' beneath Central America using waveform inversion

*Rei Sato¹, Kenji Kawai¹

1. Univ. of Tokyo

地球深部の深さ約2900kmに位置する核-マントル境界(CMB)は、固体岩石のマントルと液体鉄合金の外核が接する、地球内部の最も主要な熱・化学(物質)境界の一つである。そのため、最下部マントル領域(D''領域)の詳細な構造推定は地球の熱・化学進化の理解に欠かせない。D''領域内部にて化学進化を起こす主要な要因として、(A)熱境界層の地温勾配とマントル物質のソリダスが近接することに伴う部分溶融 (Garnero+ 2008)と、(B)海洋プレートの沈み込みに伴う海洋地殻成分の剥離および濃集 (Tackley+ 2011)、の2つが提案されている。これらの現象を検出するためには、D''領域内部を解像できる解像度(鉛直方向に100km以下)で構造推定を行う必要がある。また、地震波速度に対する温度と化学組成の効果を分離するためには、S波速度(Vs)及びP波速度(Vp)の不均質構造を同程度の解像度で同時に推定することが必要である(Masters+, 2000)。これまでのD''領域のVs・Vp構造同時推定では、地震波走時をデータとして扱ってきたが、D''領域を伝播する地震波のデータ量のばらつきによりVsとVpで解像度が異なっていた(Houser+ 2008等)。そこで本研究では、波動理論に基づき地震波形のもつ全情報を引き出すことで詳細に構造推定を行える局所的三次元波形インバージョン法(Kawai+, 2014等)を拡張することで、高解像度かつ同程度の解像度でのVs・Vp構造同時推定を行える手法の開発を目指した。開発した手法に北米で緻密に展開されているUSArray観測網のデータを適用することで、中米下D''領域における三次元Vs・Vp構造の同時推定を実行した。本発表では、推定されたモデルとその妥当性についての議論を行う。

Waveform inversion for the 3D S-wave velocity structure in the D'' beneath the Southern Atlantic

*Keisuke Otsuru¹, Kenji Kawai¹

1. University of Tokyo

D''領域はマンツルの最下部数百キロを占める熱境界層であり、マンツルのダイナミクスを解明する上で重要な存在である。D''領域には、太平洋下とアフリカ下の2箇所に巨大S波低速度域（LLSVP）が存在することが知られている。これらは高温または化学組成（もしくはその両者の組み合わせ）の異常によるものと考えられるが、詳しいことは未だわかっていない。マンツル対流シミュレーションの結果からは、マンツル対流が熱のみの効果により駆動されていれば「プリュームクラスター」と呼ばれる小さなプリュームの集合体が形成される一方、化学組成異常がマンツル対流の駆動に関与していれば「熱化学パイル」と呼ばれる大きな化学組成異常の塊がコア-マンツル境界（CMB）直上に形成されることが示唆されている。これまでも全マンツルインバージョンにより最下部マンツルの地震波速度構造を推定する研究が行われてきたが、その水平方向の解像度は1000 km程度であり、LLSVPが「プリュームクラスター」か「熱化学パイル」かを判別するには至っていない。

本研究では、最近公開されてきているアフリカ大陸の地震波観測網のデータを活用して、低速度異常の推定に有効な波形インバージョンを行うことで、アフリカLLSVP西側境界域にあたる南大西洋下のD''領域の詳細な3次元S波速度構造を推定する。使用する波形データは深発およびや深発地震からの地震波を震央距離70~100度で観測したおよそ3600本の広帯域地震波形のトランスバース成分であり、IRISから取得した。0.005 Hz~0.1 Hzの周波数帯のフィルターをかけ、SおよびScSフェーズを含む時間窓を使用した。アフリカ大陸の観測点分布が偏っているために従来の手法では解像度の低い領域が生じてしまった。そこで本研究では、解像度の偏りを平滑化するためにマルチグリッド波形インバージョンの手法を開発した。その方法を適用することで、構造推定結果の安定性を確保しつつ概ね水平方向250 km、鉛直方向50 kmの解像度での構造推定を実現し、手法の妥当性を確認した。

得られた3次元S波速度構造モデルには、ブラジルの下にファラロンスラブと思われる高速度域がみられた。他、南大西洋下のCMB直上に複数の小スケールの低速度域が確認された。低速度域は従来LLSVPとされてきた領域の内部だけでなくその西側にも存在しており、LLSVPがCMB直上で100 km程度の厚さで西側に伸びている可能性が示唆された。また、CMB直上の低速度域は熱化学パイルのような大きな塊は形成していないものの、プリュームクラスターとして上方に連なっている様子もはっきりとは確認できず、LLSVPの成因を解明するためにはさらなる解析が必要である。

The Q-value and its frequency dependence suggested from the recent absence of the Chandler Wobble

*Masato FURUYA¹, Ryuji Yamaguchi²

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

チャンドラーウォブル (CW) はS. C. Chandlerによる1891年の発見以来、100年以上に亘り観測され続けていたが、山口・古屋 (2021, 日本測地学会第136回講演会) はCWが2015年以降に励起されていないことを報告した。Malkin & Miller (2010, EPS)は2005年頃からのCWの振幅減少と位相変化、Wang et al (2016, Surv. Geophys.)も2015年までの極運動データからCWの振幅減少を報告していたが、CWの振幅が小さくなることは1920年台にも発生していた。Yamaguchi & Furuyaは、19世紀末からカバーするIERSのEOP C01 IAU 1980データも用いて、最近のCWが1920年台の極小振幅よりも遥かに小さく、観測史上初めて「消失」したことを示した。また、2022年7月の時点でも従来通りの振幅を示すような再励起は始まっていない。

CWは地球の固有(自由)振動モードの一つとして、一定の周期Pと減衰Qの時定数を持つ (Smith & Dahlen, 1981) : 複素周波数 $2\pi i/P(1+i/2Q)$ が用いられる。周期Pについては、極運動データそのものから14ヶ月程度であることは明らかで430-435日程度で多くの見解は一致している。一方Qについては、常に励起され続けていたために従来はデータそのものから読み取ることは困難だった。Smith & Dahlen (1981)では $Q \sim 100$ が好まれたが、Furuya & Chao (1996)以降は励起源データと併せて推定されるようになり、 $Q < 100$ とする研究が多い。

しかし2005年以降に励起されていないとすれば「励起源データ」を使う必要もなく、減衰の時定数のみから単純かつ直接的に推定することができる。その時定数は、2005年以降に励起されていないとすれば10年以下であり、 $P=1.2$ 年として $Q < 26.2$ となる。2000年以降だとしても $Q < 39.3$ であり、従来のQの推定値に比べ明らかに低い。つまり励起源のパワーは従来考えられていた以上に大きい(強い)ことが示唆される。言い換えると2015年以降のCWの消失は、ランダムな励起源の一時的停滞というよりは、共鳴励起作用の急速な停止である可能性を示唆している。

CWの減衰がどこで起きるかについてはSmith & Dahlen (1981)以降、下部マントルが有力視されてきた。しかし地震学の標準的な全球モデルPREMによると、下部マントルでは $Q \sim 300$ とされ、また実体波から自由振動0S2の周波数範囲まで、Qは周波数に依存しないとされている。しかしながら測地学的なデータまで含めた場合には $Q \sim \omega^a$ の依存性が仮定されることが多い。Benjamin, Wahr et al (2006, GJI)はM2分潮から長周期潮、CW、18.6年章動データまで含めて、Qが周波数に依存することを明示し、 $0.2 < a < 0.3$ 程度が多くのデータと整合的としている。 $Q < 30$ となると、さらに大きなaが示唆される。

Room D | Regular session : S18. Education and history of seismology

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:15 AM - 12:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:15 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM D
5th floor (Training Room 520)

[S18] AM-2

chairperson:Yoshinari Hayashi(Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai Univ.)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S18-01] Consideration of seismological information on regional differences in disaster preparedness awareness

*Yoshinari HAYASHI¹, Tadahiro MOTOYOSHI¹ (1. Kansai Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S18-02] Effects of science education for prevention and mitigation of psychological damages caused by earthquake disasters

*Noa MITSUI¹, Kumi Yoshitake², Hiroko Tsuboi³, Yuki Kubota⁴, Kazuyuki Nakagawa⁵ (1. Nagoya University, 2. University of human environments, 3. Nagoya City University, 4. Kyushu Sangyo University, 5. Jiji Press)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S18-03] Significance of holding the event: 2022 summer school for school teachers in Sakaiminato city & Daikon Island

*Hiroo NEMOTO¹, Ken'ich ARAI², Akihiko ITO³, Yasuyuki KANO⁴, Makoto YAMANO⁴, Masashige MINAMISHIMA⁵, Hideki MUKOYOSHI⁶, Hiroki HAYASHI⁶, Takao KAGAWA⁷ (1. Ritsumeikan Univ., 2. Sakae Higashi UPR Sec. Sch., 3. The Open Univ. of Japan, 4. ERI, 5. Ryogoku Sec. Sch., 6. Shimane Univ., 7. Tottori Univ.)

Consideration of seismological information on regional differences in disaster preparedness awareness

*Yoshinari HAYASHI¹, Tadahiro MOTOYOSHI¹

1. Kansai Univ.

地震をはじめとした自然災害が多発する国において、人々の防災行動を促進し、個人レベルにおける防災力を高めることは社会的に重要な課題である。日本ではそのための手法の1つとして、特定の地震への注目度を高めて、人々の意識を向上させる取り組みがなされてきた。1970年代に始まった東海地震対策で顕著になり、2011年東日本大震災以降は南海トラフ地震と首都直下地震にシフトして現在まで続いている。しかし、特定の地震への注目度を高めることは、その対象地震から離れた地方において地震対策への注目度を低下させる危険性をはらんでいる。個人レベルの防災力の評価は、家庭内における具体的な防災行動をリスト化し、それらの対策を多くしている場合に防災力が高く、していない場合には防災力が低いとされることがこれまでに行われてきた(e.g., 新井ほか, 2008, 清水ほか, 2007; Turner, Nigg, & Heller-Paz, 1986)。元吉(2019)は、個人の防災力を測定する一つの指標として、防災対策の実施度ではなく、災害発生時にさまざまな困難がある中で、必要な知識やスキルを発揮しながら自分がどの程度適切な行動を実行できるか、そして災害を経て生き抜くことができるかという災害自己効力感を提案し、その妥当性を検証した。また島崎・尾関(2017)は、防災意識を「災害に対して日常的に、自らが被災し得る存在であることや、情動的・物的・社会的備えが必要であることを認識している度合い、また、自分や周囲の人の生命や財産、地域の文化や共同体を自ら守ろうとする程度」と定義して、新しい防災意識尺度を作成した。そこで本研究では、災害自己効力感と防災意識の地域差に注目し、各尺度の防災行動への影響についても合わせて比較して考察する。2022年2月にインターネット調査会社にモニター登録している宮城県、東京都、愛知県、大阪府、徳島県、富山県の6都府県に在住の成人に回答を求めた。各都府県500名(男性250名、女性250名)ずつ計2,000名で調査を実施した。回答者は、徳島県のみ484名で、残りの5都府県は500名であった。地震学的情報の影響の評価については、1年以内、10年以内、30年以内といった複数の期間ごとに、経験すると考えている最大震度の大きさについて、地震は起きない、震度4以下、震度5弱、震度5強、震度6弱、震度6強、震度7の7件法で回答を求めた。元吉(2019)の災害自己効力感尺度11項目については5件法で、島崎・尾関(2017)の防災意識尺度20項目については6件法で回答を求めた。また家庭での防災対策の実施度(e.g., 食糧の備蓄、非常用トイレ)は12項目について「はい」か「いいえ」で回答を求めた。想定している震度の大きさについては、顕著な地域差が見られた。1年以内の期間で震度5弱以下と回答した人数の割合は、富山県では80%以上に上るが、東京都、愛知県、大阪府、徳島県では70%程度となり、宮城県では55%程度となった。期間が長くなるとこの割合は低下し、震度5強以上の強い地震動を想定する割合が増加するが、その傾向は地域によって異なっていた。10年以内の期間とした場合、富山県では震度5弱以下が70%程度であるのに対し、愛知、大阪、徳島の3府県は30%程度と急減した。宮城県と東京都は20–25%程度とさらに低い結果となった。より期間が長い、30年、50年になると、宮城県、東京都、徳島県の3都府県は震度5弱以下という低い想定震度の割合がさらに低下するが、愛知県と大阪府の低下は相対的に小さかった。災害自己効力感については、想定震度の大きさよりは地域差が小さかったが、東京都、愛知県、大阪府の3都府県は類似した傾向を示したのに対し、宮城県、富山県、徳島県の3県はそれぞれ異なる傾向が見られた。防災意識尺度は宮城県のみがその他の5都府県と異なる傾向を示した質問項目が多かった。今後、因子分析や相関分析を進め、地域による想定災害レベルの違いと地震学的ハザード情報との対比や、防災意識との関連性を明らかにする。

Effects of science education for prevention and mitigation of psychological damages caused by earthquake disasters

*Noa MITSUI¹, Kumi Yoshitake², Hiroko Tsuboi³, Yuki Kubota⁴, Kazuyuki Nakagawa⁵

1. Nagoya University, 2. University of human environments, 3. Nagoya City University, 4. Kyushu Sangyo University, 5. Jiji Press

1. 背景と目的

日本は地震多発国であり、日本社会に生きる人々への地震学の普及は重要である。しかし、人々の関心は地震そのものではなく被災生活にあるため、その差異を理解して専門知識を伝える必要がある。

この問題について、光井（2018）は被災生活における心理的ストレスという観点で地震学との関係を考察した。その結果、被災生活の原因となる「地震そのもの」の知識を事前に得ることで、被災時に自らが置かれた状況を地学の側面からも考えて納得しやすくなり、ストレス軽減が期待されると示唆した。そして、この考察について心理学の専門家による検証が必要だと提起した。

さらに、上記のような検証を要する事例が2016年熊本地震に関して報告された（中川、2017）。益城町の小学校在籍当時（2000年頃）に理科の授業で、学校の直下にある布田川断層について学んでいた子供たちが、その後、熊本地震で被災した際に、地震を引き起こしたのがその布田川断層だったと思い出したことで気持ちが落ち着いた、というのである。

事前の理科教育から被災時のストレス軽減に至る過程には多様な心理的プロセスが想定され、このプロセスを心理学的に説明する必要がある。事前の教育については、理科の専任教員として授業を担当したX教諭への面接を実施し、授業内容等を確認した（光井・吉武、2020）。その結果、特に重要な内容として下記の2点が挙げられた。

- ・教諭が重視していた点は、主に「自分達の住む土地がどのようにできたか知る」「地球のダイナミックさを伝える」「山を自分の足で歩いて登り、地層の大きさ等を体感するなど、野外等での観察を通じて地学現象のスケールの大きさを実感する」であった。

- ・断層については、地質図（田村、1995）を見せながら『この辺を見てごらん、みんな、阿蘇の火砕流が積んだところだよ』など、自分達の住んでいる所の土地の成り立ちを説明し、布田川断層にも言及した。当時は、地震の発生をあまり現実的に思っていなかったため、『いざとなったら起こるかも』と話した。また、同時に『でも実際に起こる時は、断層からの距離はあまり関係なく一帯が揺れる』とも説明した。

本研究ではまずX教諭の教え子への面接を行い、理科の授業内容および熊本地震発生時の心理的状況について聞き取りを行った。本発表では、その概要を紹介する。

2. 面接方法

- ・対象者： X教諭の教え子かつ、熊本地震の被災者
- ・人数： 18名（面接当時20代後半～30代後半の成人）、うち2名は断層の授業の実施前に卒業済み
- ・日時と場所： 2022年3月、熊本県上益城郡益城町内の公共会議室またはオンライン
- ・面接時間： 一人あたり30-60分程度
- ・質問例：
 - 基本情報（例：年齢、被災当時の居住地域・建物の構造・家族構成）
 - 印象的な授業内容、X教諭の印象
 - 授業内容を地震後のいつ頃、どのように思い出したか
 - 地震が発生したとき、どのように感じたか（怖さや不安の程度）
 - 被災経験をどのように考えているのか（回復の程度、被災の受容程度）

面接方法は、研究目的に即した面接内容を確保しながら、会話の流れに応じた話もできる半構造化面接を採用した。面接手引書を作成し、複数の面接者による面接内容の同一性を担保した。また、被災経験を聴くにあ

たり、面接対象者の心理的負担に配慮するため、面接手引書の質問内容や表現を複数の臨床心理士とともに検討した。当日はすべての面接に臨床心理士が同席し、適切なインタビューが行われているかを確認した。なお、本研究について事前に人間環境大学研究倫理委員会の承認を得た。

3. 結果の概要・今後の課題

授業の印象について、多数の対象者が「座学以外の授業（理科室での実験、農園での野菜作り、野外学習など）が多くて面白い」、「夏休みの自由研究に力を入れていて、まとめ方などの助言をもらった」と回答していた。

断層の授業については、被災後に授業内容を思い出したのは16名中7名であった。思い出した時の気持ちは、全員が地震が起きたことに納得する傾向を示した（発言例：『何でここについていうよりは、ああ、やっぱりそうだったかーってというような感じ』）。内2名は（おそらく日奈久断層による）更なる地震も心配していた（発言例：『となると、あと一つの断層は大丈夫なのかなってというのは、ずっと考えてた』）。その他、地盤の強さや断層の上盤/下盤と関連づけて被害の大きさを考える発言が2名からあった。一方、授業内容を思い出さなかった対象者は、人とのつながりのみによって被災経験を意味のあるものととらえる傾向がみられた。そのため、授業内容を思い出し、被災経験を考える観点が增えることで、被災後の心理状態に至る過程に差異が生じる可能性が示唆される。

今後、会話内容の分析を行い、事前の教育から被災時の心理的状況に至るプロセスの仮説を生成する。その仮説をアンケート調査で検証し、事前の地学教育と被災時の心理状態との関係を明らかにする。これにより、学術的根拠をもって地震学の社会普及を目指す。

Significance of holding the event: 2022 summer school for school teachers in Sakaiminato city & Daikon Island

*Hiroo NEMOTO¹, Ken' ich ARAI², Akihiko ITO³, Yasuyuki KANO⁴, Makoto YAMANO⁴, Masashige MINAMISHIMA⁵, Hideki MUKOYOSHI⁶, Hiroki HAYASHI⁶, Takao KAGAWA⁷

1. Ritsumeikan Univ., 2. Sakae Higashi UPR Sec. Sch., 3. The Open Univ. of Japan, 4. ERI, 5. Ryogoku Sec. Sch., 6. Shimane Univ., 7. Tottori Univ.

1. はじめに

学校教育委員会は1996年度から教育関係者相互、研究者と教育関係者との間の交流を図り、こうした交流を通して学校教員等への地震学の知識普及を進めることを目的として、教員サマースクール（以降、教員SSと記す）を毎年度開催してきている。ただし、2020～2021年度はCOVID-19の影響により教員SSの開催を諦め、教員ウィンターミーティングを代替行事としてオンラインにて実施した。2年間の中断はあったものの、2022年度は第25回教員SSを対面で開催することとし準備を進めた。

2. 2022教員SSの概要

第25回教員SSの開催地、日程、タイトル、目的、および講師陣は以下の通りである。

開催地：鳥取県境港市、島根県松江市の大根島および島根半島

日程：2022年8月20日（土）～ 8月21日（日）

タイトル：妖怪の足音ききくらべー地震計をもって境港と溶岩の島をあくるー

目的：2000年10月6日に発生した平成12年（2000年）鳥取県西部地震での境港市内の揺れの違いを微動観測から考え、さらに宍道断層ほかの活断層と活断層地形について学び、あわせて大根島の自然、中海干拓事業とその中止の経緯とから自然環境に対する意識を高める。

講師陣（敬称略）：

8月20日：香川敬生

8月21日：林 広樹、向吉秀樹

3. 2022教員SSの内容

初日は、平成12年（2000年）鳥取県西部地震にて境港市内でみられた特徴的な震度分布の秘密を探る方法を、観測実習を通して学ぶことを目的とした。観測実習地点は、境港駅横、アメダス境観測所横、境港市役所構内の3点とし、最後に境港商工会議所会議室にてデータ解析の流れに触れる講習を行う内容とした。

二日目は野外にて、宍道断層による活断層地形の観察など地震に関係する野外観察を主体とした内容とし、さらに地震に関係する内容だけに留めず、スコリア丘訪問、中海干拓事業の歴史に触れる、などを通して、自然環境に対する意識を高める野外活動の内容とした。当日の行程（好天時）は以下とした。

華厳寺第一展望台（大根島、中海の俯瞰）

NHK松江FMラジオ送信所横（宍道断層による活断層地形を観察）

輝陽礦業（有）碎石工場（断層露頭、断層地形の観察）

大根島本陣（溶岩庭園観察）

スコリア丘（大塚山公園）と溶岩トンネル（竜溪洞）との観察

波入の湧水（かわ）、波入港親水公園内の湧水にて淡水レンズによる湧き水に触れ、チュムラス、柱状節理の観察

なお、雨天時には、島根半島・宍道湖中海ジオパーク松江ビジターセンターを訪問し、その後に大根島の各サイトを訪ねる計画とした。

4. 参加者の内訳

人口密集地帯から距離がある地での開催だったためか、定員20名に対して参加申込者数は10名と若干低調で

あった。10名の内訳は次の通りである。

小学校教員 2 名（うち 1 名は小中学校教員）

中学校教員 1 名

高等学校教員 6 名

学士課程学生（大学生） 1 名

残念ながら地元教員の参加が 0 であったが、全国各地からの参加者となった。勤務校（在籍校）がある都道府県名を北から順に並べると、山形県、埼玉県、東京都、神奈川県、石川県、滋賀県、大阪府であった。

5. 準備時に判明した課題

COVID-19対策を行うために定員を抑え、大型バスの利用を想定した。しかし、下見時には大型バス通行可であった道でも、その後に沿道の樹木の枝が垂れ下がるなどといった道路状況の変化により通行不可となった道があった。対策として、途中の山道区間は片道15分程度であることから、小型バスに乗り換えて移動を行うこととした。この分、バスの借り上げ代金が予定を上回ることであった。

COVID-19対策が不要であれば、準備段階の初期から小型バスでの移動を想定した定員やコース設定が可能であったと考えられる。よって、2022年度もCOVID-19による影響を受けていたといえる。今後もCOVID-19による影響がしばらく続く可能性もあるので、開催地を決める段階から移動手段を考慮していく必要があることが明らかとなった。

なお、本予稿提出締切日が8月19日であったことから、本番を通してのまとめをここに記すことができない。発表では本番の様子も紹介し、3年振りに再開した教員SSの成果と今後の開催に向けて明らかとなった課題等に関しても報告する。

謝辞 大根島本陣の皆様、輝陽礦業（有）砕石工場、竜溪洞のジオガイドの門脇様、地元の方、以上の皆様からご助力をいただきました。ここに記して深謝します。

参考文献

島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域, 2013, ウェブ版 島根地質百選, <
<https://www.geo.shimane-u.ac.jp/geopark/> (2022年8月17日閲覧確認) >

Room D | Regular session : S10. Active faults and historical earthquakes

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 2:45 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 5:45 AM UTC | 🏢 ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S10] PM-1

chairperson: Haruo Kimura, Takashi Ogami (Geological Survey of Japan, AIST)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S10-01] Paleo-seismicity of the southeastern part of Unzen Fault Group based on offshore active fault survey in Shimabara Bay, southwestern Japan

*Takashi OGAMI¹, Tadashi MARUYAMA¹, Takashi HOSOYA², Takashiro KUBO³, Oshie TAZAWA³, Kenjiro MUKAIYAMA³ (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Chuo Kaihatsu Corporation, 3. Kawasaki Geological Engineering, Co., Ltd.)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S10-02] Active tectonics, structures and seismicity of the Tenpoku fold-and-thrust belt, northern Hokkaido

*Tatsuya ISHIYAMA¹, Makoto Matsubara² (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S10-03] Gravity anomaly in adjacent areas of the southern edge of the surface ruptures occurred during the 1896 Rikuu Earthquake

*Haruo Kimura¹, Yasuhira Aoyagi¹, Hidenobu Takahashi¹, Motoshi Tomura², Katsuya Noda² (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Geosys Inc.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S10-04] Mean displacement rate and age of the last event of northern part of the Nara-bonchi-toen faults, central Japan

*Taku KOMATSUBARA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S10-05] Earthquake-related phenomena and source fault of the 1909 Anegawa earthquake

*Naoji KOIZUMI¹, Norika Yamamura², Mamoru Nakamura³ (1. School of Environmental Science, Univ. Shiga Pref., 2. N/A, 3. Faculty of Science, Univ. of the Ryukyus)

Paleo-seismicity of the southeastern part of Unzen Fault Group based on offshore active fault survey in Shimabara Bay, southwestern Japan

*Takashi OGAMI¹, Tadashi MARUYAMA¹, Takashi HOSOYA², Takashiro KUBO³, Oshie TAZAWA³, Kenjiro MUKAIYAMA³

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Chuo Kaihatsu Corporation, 3. Kawasaki Geological Engineering, Co., Ltd.

雲仙断層群南東部の活動性を明らかにするため、島原湾に分布する海底活断層の調査研究を実施した。雲仙断層群南東部は、島原半島から島原湾の沖合にかけてほぼ東西方向に延びる長さ約23 kmの活断層帯であり、断層の南側が相対的に隆起する正断層によって構成されている。地震調査研究本部地震調査委員会（2006）によれば、本断層帯の最新活動時期はK-Ah降下層準（7.3 ka）以降であり、平均上下変位速度および将来の地震発生確率は不明とされている。2009年度には、本断層帯を対象とした総合的な海底活断層調査が実施されている。この調査によって、海域に分布する断層の位置・形状が明らかにされ、本断層帯の支配的な活断層が500 ka前後と見積もられる反射面を約1,200m上下変位させていることが示された（産総研・他、2010）。そこで、本研究では後期更新世以降の活動性および完新世における活動履歴を検討するため、新たに海上ボーリング調査を実施し、既存の音波探査記録にもとづいて地質構造を再検討した〔大上・他（2022, JpGU）〕。本発表では、その再検討の結果にもとづいて本断層帯の活動履歴について報告する。なお、本研究は文部科学省委託事業「活断層評価の高度化・効率化のための調査」の一環として実施したものである。

既存のブーマーを音源とした高分解能マルチチャンネル音波探査（産総研・他、2010）では、往復走時0.2秒程度（海面下150m程度）までの地下構造が捉えられている。この探査記録を地質学的に解釈するために、海上ボーリング調査を実施することによって、海底面下40 m程度までの地層の形成年代や堆積環境を検討した。本研究では、断層の低下側（UTO1地点、水深46.69 m）で掘削長40.00 mの堆積物試料を、断層の隆起側（UTO2地点、水深33.07 m）で掘削長35.25 mの堆積物試料をそれぞれ採取した。採取した堆積物試料については、肉眼およびCTスキャナによる岩相観察、放射線炭素年代測定、火山灰分析を実施して、層序を検討した。断層低下側のUTO1地点においては、海底面下29.90 mまでは16.57 cal kBP以降の年代を示す後氷期の細粒堆積物によって構成されている。海底面下29.90-33.20mはLGM末（18 ka頃）に対比される砂礫、33.20-40.0mは22.49 cal kBPの年代を示す有機質シルトおよびAT火山灰（29-30 ka）を挟在するLGMの細粒堆積物によって構成されている。UTO1地点においては、15層準を対象に放射性炭素年代測定を行い、詳細な年代モデルを作成した。UTO2地点においては、海底面下5.20mまでが後氷期の年代を示す堆積物、5.20—8.15mはLGMに対比し得る砂礫、8.15—14.8mまでがAso-4（85—90ka）の火砕物、14.80—35.25mは最終間氷期の細粒堆積物によって構成されている。

既存の高分解能マルチチャンネル音波探査記録（産総研・他、2010）を対象として再解析を実施し、S/N比の高い探査記録断面（以下、「再解析断面」）を作成した。海水中および堆積物中の弾性波伝播速度を1,500 m/sと仮定すると、海上ボーリング調査で明らかになった岩相境界の位置は、再解析断面の連続性の良好な反射面の深度とほぼ一致する。よって、海底面下40m程度までの弾性波伝播速度について、1,500 m/sとみせると判断した。再解析断面にもとづけば、最も変位量の大きい主断層は、LGM末（22.49 cal kBP—16.57 cal kBP）の基準面を上下方向に35—38 m変位させている〔大上・他（2022, JpGU）〕。主断層は上下変位量が大きく、断層の低下側に厚く形成されている後氷期以降の地層を、断層の隆起側まで追跡することが難しい。そのため、主断層において直接的に活動履歴を検討することが困難である。他方で、主断層から北に約1.2 kmの距離を並走する副断層に着目すると、副断層によって後氷期の地層から海底面に至るまでの累積的な変形を確認できる。後氷期以降におけるこの副断層による累積的な上下変位量は約10 mに達する。内部構造に着目すると、地層の層厚が断層を挟んで低下側で厚くなっている層準（イベント層準）が存在し、後氷期以降の地層の内部に、少なくとも3層のイベント層準（新しい層準から順に、E1, E2, E3）を識別できる。これらのうち、E1の形成年代は8 ka以降である。副断層の活動時に断層帯全体が活動したと仮定すれば、本断層帯で

は、16.5 cal kBP以降に3回以上の断層活動が発生したことになり、E1のイベントが8 ka以降であるとすれば、平均活動間隔は2.8～8.3 kyと求められる。ただし、本断層帯の活動時に副断層に必ず変位が生じたとは限らないため、副断層の変位から求めた活動回数・平均活動間隔が最小見積もりであることに注意が必要である。

引用：

地震調査研究本部地震調査委員会，2006，雲仙断層群の長期評価（一部改訂）。

産総研・他，2010，沿岸海域における活断層調査 雲仙断層群/北部及び南東部(海域部)成果報告書。

大上・他，2022，島原湾における雲仙断層群南東部(海域部)の活動性，JpGU2022。

Active tectonics, structures and seismicity of the Tenpoku fold-and-thrust belt, northern Hokkaido

*Tatsuya ISHIYAMA¹, Makoto Matsubara²

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

北海道北部の中軸部には北北西～南北走向の褶曲・衝上断層が発達しており、そのうち第四紀に活動的な構造はサロベツ断層帯と呼ばれる（池田ほか編, 2002; 産総研, 2006; Ishiyama et al., 2006）。本発表では、DEMによる変動地形解析や既存・新規の地形・地質・反射法等のデータを踏まえて、北海道北部の褶曲・衝上断層帯の活構造の構造的特徴について改めて検討する。また、2022年8月の宗谷地方北部の地震（M5.4）に代表される当地域の地震活動と褶曲・衝上断層帯の構造的な関係についても若干の検討を行う。北海道北部の中軸部をなす宗谷丘陵から日本海沿岸にかけては、白亜紀後期から第四紀の堆積物（天北堆積盆）が参加する北北西～南北走向の褶曲・衝上断層が多数存在する。宗谷丘陵脊梁部には上部白亜系が露出し、西に向かって褶曲に参加する地層が若くなる。また、褶曲構造は一般的に急傾斜の西翼部と緩傾斜の東翼部からなる非対称褶曲である。これらの構造的特徴から、西フェルゲンツのフォアランド型褶曲・衝上断層帯をなすと考えられる。このうち、宗谷丘陵の西側に広がる天塩平野・幕別平野縁辺部に位置するサロベツ断層帯に沿っては、第四紀に活動的な構造が多く存在し、褶曲・衝上断層帯前縁部の変形フロントを構成する。天塩平野縁辺部では同じ層準の地層が繰り返し背斜軸部に露出しており、活褶曲下にデコルマと分岐断層が伏在することを示唆する。また、宗谷丘陵南東部～天塩山地北部にかけては、超苦鉄質岩類をコアとする褶曲・衝上断層帯西翼部の基部には間寒別断層帯が存在し、中～後期更新世の段丘・堆積物に変形が認められる（岡, 1985）。

サロベツ断層帯に沿っては、中～後期更新世の河成・海成段丘面が不整合面下の新第三系の褶曲構造と調和的な変形を受けている。日本海沿岸では稚畛内背斜の直上では、陸側に東傾斜する最終間氷期の海成面を切って複数段の離水浜堤列が分布しており、褶曲・衝上断層帯の変形フロントにおける地震時すべりに伴う間欠的な隆起を示している（産総研, 2006; Ishiyama et al., 2006）。このほか、1 m グリッドDEMによる地形解析によれば、サロベツ原野では沖積低地面にも褶曲変形やこれに伴うと推定される水系発達が見られ、変形に参加していると考えられる。これらの完新世の変動地形は、群列ボーリングによる完新統の地質断面図とも整合的である。また、中・後期更新世・完新世の変動地形は、反射断面に認められる東傾斜のデコルマ上の非対称背斜の構造と調和的である（産総研, 2006; Ishiyama et al., 2006）ことから、褶曲・衝上断層帯前縁部の完新世における繰り返しの活動とこれに伴う変形・構造の成長を示すと考えられる。また、雁行する活褶曲を横断する反射断面からは、複数のスラストシートが折り重なる構造が認められ、デコルマ・分岐断層の構造が雁行する活褶曲の分布・構造を制約していると考えられる。一方、褶曲・衝上断層帯の後背地側に分布する間寒別断層帯は、間寒別断層帯は蛇紋岩化した超苦鉄質岩類をコアとする複背斜の西側にほぼ限定的に分布しており、局所的な断層面強度の弱化がその存在を規定している可能性がある。

北海道中軸部北部ではM4-5を上限とする地殻浅部の地震活動が顕著に発生してきた。2022年8月11日にはM5.4の地震（深さ4 km）が発生した（気象庁, 2022）。地震発生域はおおよそ空知～エゾ帯に相当し（高橋・笠原, 2006）、すなわち褶曲・衝上断層帯において地震活動が発生している。微小地震活動は中軸部では深さ20 km程度以浅が大半であり、M4-5クラスの地震の発生深度も中軸部では深さ10 km以浅であることから、北海道中軸部北部直下の地震活動は、褶曲・衝上断層帯の構造と関連している可能性がある。一方、日本海沿岸の地震活動は深さ15～30 km程度で発生しており、褶曲・衝上断層帯のデコルマよりも有意に深いと考えられる。

引用文献：池田ほか編, 2002, 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会; Ishiyama et al., 2006, AGU Fall Meeting Abstract, T33A-0499; 気象庁, 2022, <https://www.jma.go.jp/jma/press/2208/11a/kaisetsu202208110250.pdf>; 三浦, 1995, 日本地理学会予稿

集, 45, 188-189; 岡, 1985, 活断層研究, 1, 19-29; 産総研, 2006, サロベツ断層帯の追加補完調査報告書; 高橋・笠原, 2005, 北海道大学地球物理学研究報告 68, 199-218.

Gravity anomaly in adjacent areas of the southern edge of the surface ruptures occurred during the 1896 Rikuu Earthquake

*Haruo Kimura¹, Yasuhira Aoyagi¹, Hidenobu Takahashi¹, Motoshi Tomura², Katsuya Noda²

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Geosys Inc.

【はじめに】 本研究では横手盆地東縁断層帯について、1896年の陸羽地震($M_{jma} = 7.2$)の際に明瞭な地表変位を生じた北部区間と、1896年地震の際の地表地震断層の出現が報告されていない南部区間で、地下構造の特徴にどのような違いがあるかを明らかにするために、重力探査を実施した。

【横手盆地東縁断層帯】 本断層帯は、東北地方の秋田県仙北市から横手市を経て湯沢市に至る、南北走向で約56 kmの断層長を有する東側隆起の逆断層であり、大局的には横手盆地と東方の山地との境界に沿うように分布する（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2005, 横手盆地東縁断層帯の評価, 23p）。同断層帯は1896年の陸羽地震時に、北方の駒ヶ岳西麓断層群および東方の真昼山山地東縁断層帯の一部と共に活動し、横手盆地東縁断層帯の北部（約26 km, 白岩断層・太田断層・千屋断層・金沢断層北部）では、明瞭な地表地震断層が出現した（例えば、山崎, 1896, 震災予防調査会報告, 11, 50-74; 松田ほか, 1980, 東京大学地震研究所彙報, 55, 795-855）。しかし、同断層帯の南部（約30 km, 金沢断層南部・杉沢断層・大森山断層）では顕著な地表変位は報告されていない。

【重力探査】 本探査は、横手盆地東縁断層帯北部の仙北郡美郷町北部を北縁とし、同断層帯南部の湯沢市稲川地区付近を南端とする南北約40 km, また、同断層帯の主部をほぼ中心軸とする東西約10 kmの範囲において実施した。重力測定にはカナダScintrex社製CG-6 Autograv（相対重力計）を用いて、東西南北約1 kmの間隔で、総数410点において測定を実施した。各々の重力観測点では、GPS測量によって位置座標と標高値を計測した。また、重力観測点近傍（観測点から0~20m程度の範囲）の地形の特徴について記載した。これらの現場データ取得作業は2組の機材を用いて、2グループに分かれて実施した。データ取得作業の実施期間は、2020年8月20日から9月15日である。

【重力異常】 取得したデータをもとに、機械高補正、閉合ドリフト補正、地形補正、緯度補正、フリーエア補正、ブーゲー補正を行い、仮定密度を2.00, 2.30, 2.67 g/cm³とするブーゲー異常図を作成した。いずれの仮定密度によるブーゲー異常図でも、1896年陸羽地震地表地震断層南端部（横手盆地東縁断層帯の北部区間の南端部）周辺は、東西に伸びる高重力異常部の嶺に相当することがわかった。また、同断層帯付近および東方地域に注目すると、北部区間に比べて南部区間では低重力異常部－高重力異常部の境界がステップするように西側へ張り出していることがわかった。加えて、より広域的な重力異常に基づく北北東－南南西走向の一次傾向面除去を行って、残差重力図を作成した。得られた残差重力図でも、上記ブーゲー異常図で見られたものと同様の特徴が見られた。さらに、同断層帯の北部区間－南部区間境界付近～やや南方においてとくに高重力異常が大きい場所が見られ、こうした場所は弥勒層中の安山岩の表層分布域（臼田ほか, 1976, 秋田県総合地質図幅「六郷」および説明書, 1:50,000）に対応していることがわかった。

【三次元密度構造】 先述した探査範囲について100 mグリッドの三次元インバージョン解析を行って地表から深度約4.5 kmまでの密度構造モデルを作成した。この三次元モデルから、断層とほぼ平行な方向の断面を切り出して、横手盆地東縁断層帯北部区間－南部区間周辺の密度構造の変化について検討した。その結果、上述した同断層帯の北部区間－南部区間境界付近～やや南方のとくに大きな高重力異常部に対応する地下の高密度領域は、地下2 km以深へも連続していることがわかった。したがって、この高重力異常部は、表層に分布する弥勒層中の安山岩だけではなく、探査範囲でより深部に分布する真昼川層中の玄武岩、あるいはさらに深部の地質に起因するものと考えられる。いずれにせよ、本研究で見られた1896年陸羽地震地表地震断層南端部周辺の高重力異常は、地下深部の地震発生層における密度構造を反映している可能性がある。

Mean displacement rate and age of the last event of northern part of the Nara-bonchi-toen faults, central Japan

*Taku KOMATSUBARA¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

はじめに 奈良盆地東縁断層帯は、大阪層群の変位量分布と運動開始時期の違いから2つに分けられる。演者は北部セグメントの活動性評価を目的として踏査、ボーリング調査、遺跡資料検討などを行ってきた。

更新世段丘の変位量（速度）分布 断層帯北部周辺には高位2面（中期更新世間氷期）と中位1面（最終間氷期前期：MIS 5e）の2つの段丘が広く分布する。その変位から、本断層帯は宇治川付近で約1.3m/千年、その他で0.3m/千年以上の変位速度をもつと考えられる。

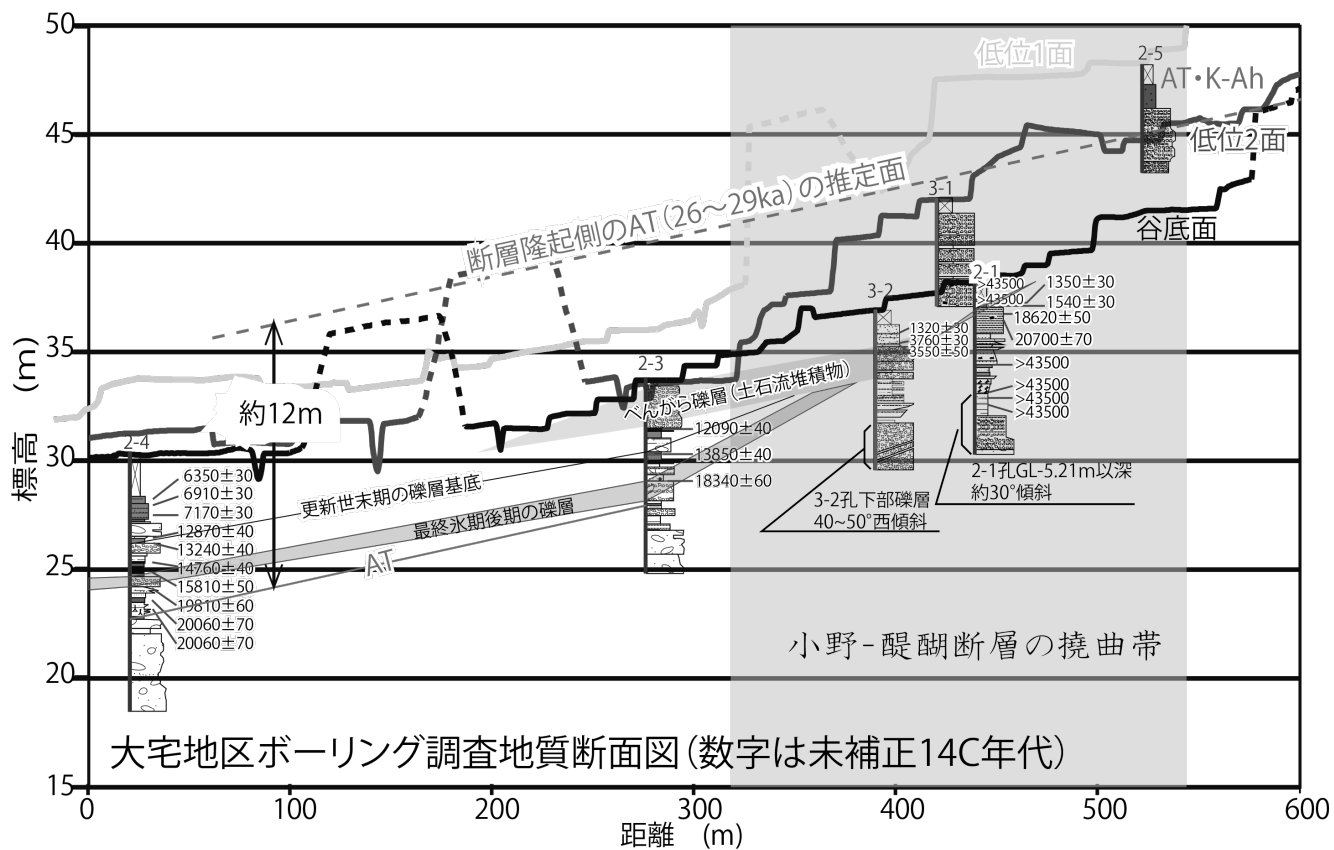
大宅地区ボーリング調査結果 京都市山科区大宅地区には、小野-醍醐断層（黄檗断層群の一部）によって撓曲変位した4面の段丘面と変位していない谷底面および断層低下側の沖積面が分布する。谷底面で掘削された2-1孔の深度1.2m以浅の乱されていない粘性土層（栽培植物の珪酸体をほとんど含まない）から1330±30, 1540±30yBPの未補正¹⁴C年代値が、この下位の砂礫層からは18620±50, 20700±70yBPの年代値が得られた。谷底低地西端付近の3-1孔で、①深度1.7m以浅の礫混じり土（下部では栽培植物の珪酸体をほとんど含まない）から3540±30, 3750±30yBPの年代値、②深度1.7～3.2mでは特徴的な土石流堆積物（べんがら礫層）、③深度3.2～4.7mでは逆グレーディング砂層を含む礫～シルト互層、④4.7m以深では層状に砂～シルト薄層を挟む砂礫層、が得られた。この孔でボアホールカメラを用いて孔壁の地質構造を観察し、④の砂礫層が40°～50°西傾斜する一方、②のべんがら礫層は水平に堆積していることが観察された。断層西側の2-3孔でべんがら礫層下位より12090±40 y BPの年代値が得られている。

断層近傍の遺跡における遺物出土状況と新期地形面の変位 小野-醍醐断層の撓曲肩部の大宅廃寺遺跡調査では、紀元前5世紀前後（北白川V式の時代）の甕棺が破壊されていない産状で出土した（京都市埋蔵文化財研究所, 1988）。同断層近傍の醍醐古墳群では、7世紀前半の古墳から直立した状態で高坏などが出土している（京都市埋蔵文化財研究所, 1986）。また、宇治傾動帯中の寺界道遺跡では段丘面下でK-Ahテフラが確認されている（宇治市教育委員会, 2001）。この段丘面は西に傾動し、沖積面と交差する。

奈良盆地東縁断層帯北部の活動時期 当セグメントが同時活動したと仮定するなら、これはK-Ah降下（約7200年前）以降、西暦6世紀以前に活動したと考えられる。特に最新活動の上限年代は、べんがら礫層堆積前（紀元前18世紀以前）まで遡る可能性がある。後者は、大宅廃寺遺跡で破壊されていない甕棺が出土したと矛盾しない。

この研究は文科省研究開発局が京都大学に委託した「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」の一環として同志社大学と共同で行ったものである。地元および研究関係者に厚く感謝申し上げます。

文献 京都市埋蔵文化財研究所, 1986, 醍醐寺古墳群発掘調査概報, 28pp. 京都市埋蔵文化財研究所, 1988, 昭和60年度京都市埋蔵文化財調査要, 178pp. 宇治市教育委員会, 2001, 宇治市埋蔵文化財発掘調査概報第51集, 37pp.



Earthquake-related phenomena and source fault of the 1909 Anegawa earthquake

*Naoji KOIZUMI¹, Norika Yamamura², Mamoru Nakamura³

1. School of Environmental Science, Univ. Shiga Pref., 2. N/A, 3. Faculty of Science, Univ. of the Ryukyus

姉川（江濃）地震は、1909年8月14日に滋賀県東部で発生したマグニチュード6.8、最大震度6の地震である。滋賀県から岐阜県にかけて被害をもたらし、姉川流域の村落（現在の長浜市周辺）に全壊率60%を超えるような大被害を与えたほか、数多くの液状化現象（噴砂・噴水）や琵琶湖での津波、地下水の変化（井戸水の枯渇等）が報告されている。この地震については、近江國姉川地震報告(滋賀県彦根測候所, 1911) や江濃地震報告(岐阜県岐阜測候所, 1910), 震災予防調査会報告(震災予防調査会, 1910) など、当時の地震被害を詳細に記した調査報告が多く残されており、被害状況や地震に伴う地変がよくわかっている。しかし、詳細な調査が実施されたにもかかわらず、断層破壊が地表面まで達していなかったため、震源断層については断定することが困難であった。そのような中で、坂井・盛川(2005)は、長浜市周辺での重力測定に基づいて三次元基盤構造を推定し、報告されている被害分布を考慮して、柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯の鍛冶屋断層の位置に断層モデルを構築している。本研究では、報告されている地変（特に液状化現象・琵琶湖の津波・地下水の変化）を坂井・盛川（2005）の断層モデル等を使ってどの程度合理的に説明できるかを調べた。液状化現象と地下水変化については、坂井・盛川（2005）の断層モデルから推定される予測震度分布や地震時静的体積歪変化及び地盤状況で説明できることがわかった。他方、琵琶湖の津波については、坂井・盛川（2005）の断層モデルでは説明できず、震災予防調査会(1910)の記録に整合するような湖底地すべりによって、定量的に説明できることがわかった。本発表の詳細については、山村・他（2022）を参照されたい。なお、熊谷道夫立命館大学教授（元・滋賀県琵琶湖研究所上席総括研究員）には、琵琶湖湖底地形の貴重なデータを頂いた。ここに記して感謝します。参考文献：山村紀香・小泉尚嗣・中村衛（2022）1909年姉川地震の地変と震源について、歴史地震，37，印刷中。

Room D | Regular session : S10. Active faults and historical earthquakes

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:00 PM - 4:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:00 AM - 7:15 AM UTC | 🏢 ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S10] PM-2

chairperson: Ritsuko Matsu'ura (Association for the Development of Earthquake Prediction), Junzo Ohmura (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S10-06] Damage to Levees and Flooding Caused by the 1830 Kyoto Earthquake

*Junzo OHMURA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S10-07] Seismic Activity in Southern Miyagi Prefecture in the 18th Century Based on the Microfilmed Records of the Takano Family

*Sunao Urushibara¹, Yasuyuki Kano¹, Junzo Ohmura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S10-08] Examination of the Sources of the Documents Published in historical documents on earthquakes: The Earthquakes of 1579

*Kentaro HATTORI¹ (1. Kansai University)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S10-09] Isn't "Ninna earthquake" in 887, long believed to be a typical Nankai earthquake, the latest activity of the Osaka-Bay fault?

Shigehiro Fujino¹, *S. Ritsuko MATSU'URA² (1. Univ. of Tsukuba, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S10-10] An Entire Revision of the "Japanese Damaging Earthquakes List" in "Chronological Scientific Tables"

*Kazuki KOKETSU¹, Tomoya HARADA² (1. Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2. N/A)

Damage to Levees and Flooding Caused by the 1830 Kyoto Earthquake

*Junzo OHMURA¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1830年8月19日（文政十三年七月二日）に京都盆地北西部付近を震源とするM6.5±0.2と推定される地震が発生した。京都盆地南部では巨椋池周辺の堤防に亀裂や堤体の沈下が発生した。これらの地域は地震発生の半月後に豪雨に見舞われ、堤防が決壊して宇治川が流れを変え巨椋池に流れ込む状況となった。本事例は地震と洪水による複合災害といえる。地震による河川堤防の被害とその後発生する水害を考える上で、本事例の復原と分析は意義のあるものと考えられる。

本地震による京都盆地南部の被害については、伏見の比較的地盤の悪い地点で建物倒壊が発生し、葭島を埋め立てた場所では液状化が発生している。また淀城では櫓が2ヶ所破損し瓦や壁などが落ちたが淀大橋などの橋梁は無事であったとあり、いずれの地点も震度5強程度であったと推定される。

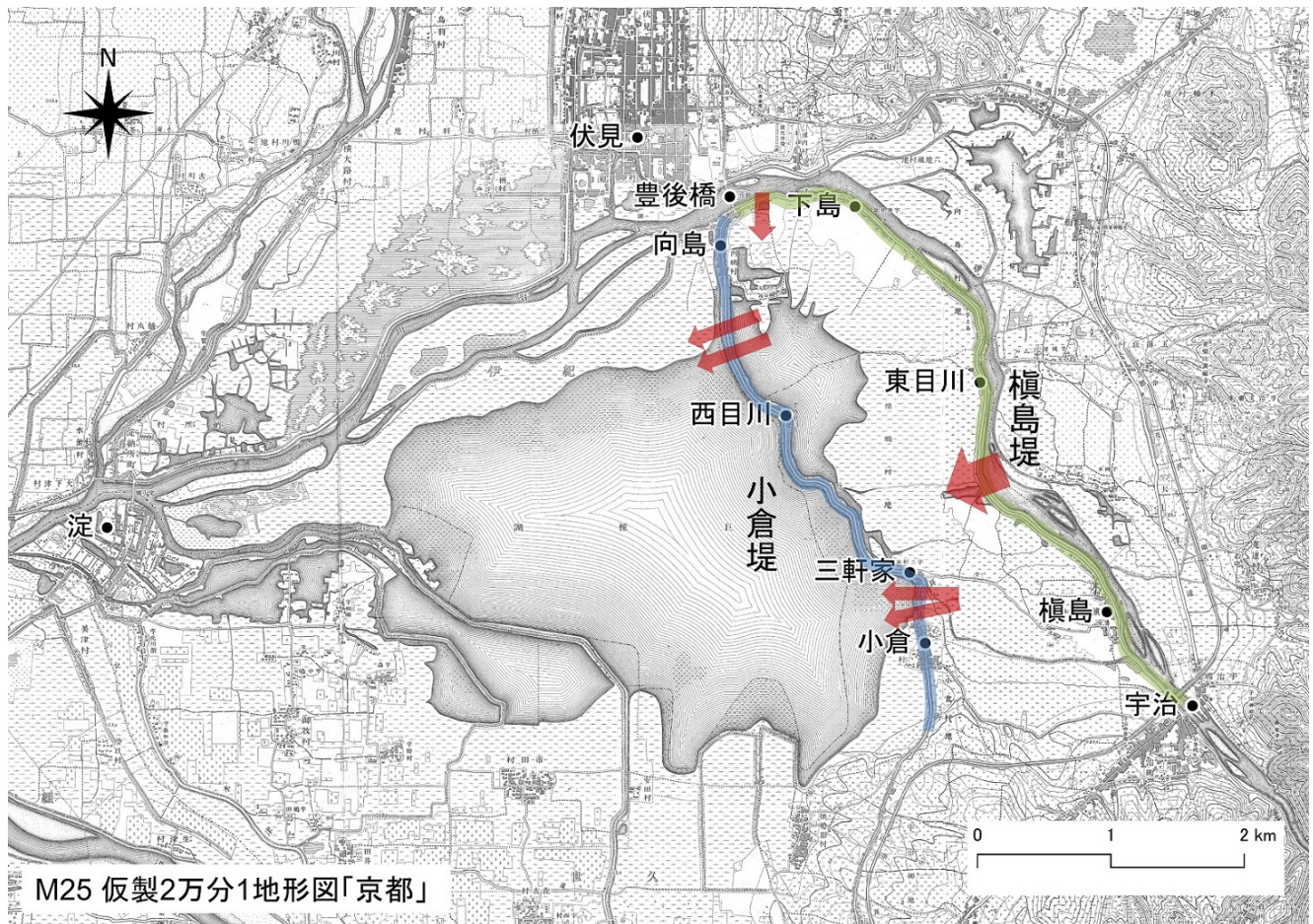
堤防の被害は紀伊郡で国役堤が1ヶ所（約100m）崩れ、地割れが1ヶ所（約50m）との記録がある。別の史料では豊後橋（現在の観月橋）から宇治までの堤防（槇島堤）で、東目川村から下島村までの約4Kmで堤防の上端が大荒れになり、100～200mほどの堤体が90～120cm沈下して裂け割れたとある。小倉堤は至る所が悉く裂け15cmほど口を開き、場所によっては15cmほど堤体が沈下した。前年に切れた場所の新堤は1.5mほどゆり込んだ。

地震発生の約半月後9月4日の正午頃から豪雨となった。伏見では宇治川が氾濫して床上30cm余浸水したが、槇島付近で堤防が決壊して巨椋池へ流れ込んだため水が引いた。淀では床上90cmの浸水となった。宇治川が槇島で決壊したため、伏見から淀まで宇治川の川筋は水が無くなり歩ける程となった。

堤防の主な決壊場所を史料数点からまとめると、槇島堤は槇島村付近と豊後橋上流の2ヶ所、小倉堤は3～4ヶ所で決壊したようである。堤防決壊の様子を描いた絵図によると、槇島村と東目川村の間のやや東目川村寄りの堤防が約100m決壊し宇治川の水の9割が巨椋池に流れ込んだとある。また豊後橋では流れてきた宇治川の部材が引っかかって落橋しそうになったが、橋の上流の堤防が約40m決壊したため落橋を免れた。小倉堤は向島村と西目川村の間に2ヶ所、三軒家村と小倉村の間に2ヶ所程度決壊した。

槇島堤における槇島村付近の決壊場所は地震によって被害が顕著であったとされる区間の南端付近にあたる。この付近は宇治川の屈曲部であり歴史的に頻繁に破堤する場所でもある。この地点の地震による堤防被害の実態および厳密な位置の特定は難しいが、地震により堤防が弱化していたところに豪雨で水量が増し、弱い屈曲部で破堤した可能性が考えられる。一方、豊後橋上流の破堤は豊後橋の堰き止めによるダムアップが主要因であろう。

小倉堤はほぼ全区間にわたって亀裂を生じ堤体が沈下しており洪水防御機能が損なわれていたと考えられる。槇島付近で宇治川の水が巨椋池東部に流れ込み水位が上がった結果、小倉堤の弱化した部分が決壊し巨椋池西部に流れ込んだと推測される。



Seismic Activity in Southern Miyagi Prefecture in the 18th Century Based on the Microfilmed Records of the Takano Family

*Sunao Urushibara¹, Yasuyuki Kano¹, Junzo Ohmura¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

本研究では、「高野家記録」をもとに、18世紀の宮城県南部の地震活動について分析する。高野家は仙台藩伊達家の家臣で、領地を蔵王町平沢に持ち、江戸時代250年に渡ってこの地を治めた。「高野家記録」は元禄九年～天明二年(1696年～1782年)に高野家の代々の当主によって記された日記記録である。特に高野家19代当主の高野倫兼による記録が大半を占め、主に仙台や蔵王町平沢での日々の生活や天候、地震の記録が細かく記載されている。日記記録を用いた歴史地震研究としては、例えば、八戸・盛岡・弘前の日記に書かれた地震記録の震度下限を推定し、千島海溝で発生した地震の割合について推定した佐竹(2002)や盛岡・余目町(山形県)での日記に記録された地震について、記録された揺れの大きさと震度の関係について検討した宇佐美・他(2002)等がある。日記史料からは地震計の無い過去の地震活動を調査できる可能性がある。しかし、まだ検討されていない地点や日記史料が存在することもあり、「高野家記録」もその1つである。

「高野家記録」が記録された地点は主に現在の仙台市青葉区と蔵王町平沢である。それらの宮城県南部で有感となる地震を大きく分けると、日本海溝沿いで発生する地震と内陸で発生する地震に分けられる。日本海溝沿いで発生する地震の場合、宮城県沖以外にも茨城県沖～青森県沖までの太平洋沖合での地震でも宮城県南部で被害が生じることがある。内陸の地震は、長町-利府線断層帯や福島盆地西縁断層帯等の活断層に起因するものや、栗駒山や蔵王山の周辺で発生する群発地震も知られている。

「高野家記録」は既刊の史料集である『日本の歴史地震史料拾遺5ノ上』に地震記事の抜粋が収録されている。東北大学大学院文学研究科・文学部図書室には原本をマイクロフィルムに撮影したものが所蔵されており、漆原・他(2022)ではこれを約10年分調査した。その結果、『日本の歴史地震史料拾遺5ノ上』では約180日分の有感記録が収録されていたのに対して、マイクロフィルムからは約340日分の有感記録がみつかった。また、地震記録は主に十九代当主倫兼・二十代当主博兼の日記に書かれていることがわかった。特に、明和三年正月一日(1766年2月9日)～明和七年七月廿五日(1770年9月14日)の期間は倫兼・博兼それぞれの日記が存在しており、同一日に2つの記録がある。

「高野家記録」では、地震の被害に関する記述もいくつか存在する。明和四年四月七日(1767年5月4日)と明和四年九月三十日(1767年10月22日)には仙台・平沢両地点で被害記録が存在し、安永元年五月三日(1772年6月3日)には仙台での被害記録が存在する。明和四年の2つの地震について地震後の有感記録数を比較した。四月の地震後は有感記録が少なく、九月の地震後は有感記録が多いという特徴がみられた。被害と余震数の影響を考慮すると、四月の地震は渡辺(1991)が余震数の少ない宮城県沖地震として「金華山沖タイプ」と呼んでいる地震に似ていると考えることができる。また、この地震は松浦・中村(2021)では「陸中下PAC内の深さ120km, M6.3の地震」としているが、平沢での被害を考慮すると、震源はもう少し南になるか規模が大きくなる可能性がある。九月の地震は、『日本被害地震総覧』[宇佐美・他(2013)]や松浦・中村(2021)で福島県沖の群発地震のようなものとされている。1938年の福島県沖地震は仙台で有感となった地震数は多かった。逆に2021, 2022年に発生した福島県沖の地震は仙台で有感となる地震は少なかった。「高野家記録」の有感記録数からみても、九月の地震は1938年の福島県沖地震のような群発地震と似た地震だと考えられる。

Examination of the Sources of the Documents Published in historical documents on earthquakes: The Earthquakes of 1579

*Kentaro HATTORI¹

1. Kansai University

『理科年表』の「日本付近のおもな被害地震年代表」に代表される被害地震カタログに掲載された情報のうち、既刊地震史料集からの引用に留まっているものが存在する。こういった情報について、史料集に掲載された記述の出典を調べることが重要である。

本発表では、天正七年正月二十日（ユリウス暦1579年2月15日）の摂津の被害地震に注目する。「日本付近のおもな被害地震年代表」によると、この地震により、四天王寺の鳥居が崩壊し、余震が3日続いたとされている。この情報は、『増訂大日本地震史料集第1巻』545頁に掲載された「天正日記」という史料が元になっている。しかし、出典に遡ることができないこと、また同日の地震記録が他に見えないことなどから、天正七年の被害地震の実在性に疑問が唱えられていた（『続 古地震』233-238頁）。

今回の発表では、出典を調査した結果、天正七年ではなく天文七年正月二十日（ユリウス暦1538年2月19日）の被害地震であった可能性について議論する。

なお、天文七年正月二十日の地震を記した記録としてこれまで知られていたのは、「お湯どのの上の日記」（『新収日本地震史料補遺』59頁）と「大般若経奥書」（中西・矢野，2003；『日本の歴史地震史料拾遺三』30頁）である。今回、これら以外の記録についても調査した結果を発表する。

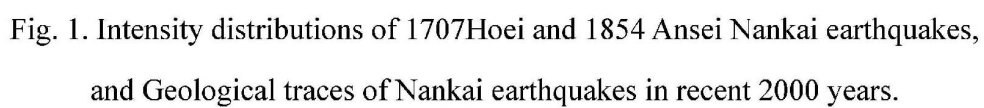
Isn't "Ninna earthquake" in 887, long believed to be a typical Nankai earthquake, the latest activity of the Osaka-Bay fault?

Shigehiro Fujino¹, *S. Ritsuko MATSU'URA²

1. Univ. of Tsukuba, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction

昭和南海地震の発生以降は、長らく今村明恒の説が暗黙の常識とされ、684年白鳳（年号的には天武）・887年仁和・1099年康和・1361年正平・1498年明応・1605年慶長・1707年宝永・1854年安政・1946年昭和、と南海トラフのプレート間巨大地震は固有地震の繰返が歴史史料からも明白な典型例、と扱われてきた。しかし、情報が多くなる明応以降に関して近年例えば 明応東海地震：東海地震のみ既知、とされてきたが、別説に銭洲海嶺付近のPHSプレート内地震の可能性 慶長南海地震：津波地震で南海トラフよりもっと遠方の地震の可能性、がそれぞれ提起され、二つとも南海トラフのプレート境界地震とは異なる特徴が指摘されている。さらに近世以降では、宝永は東海・南海部分が一度に破壊したが、安政では30時間遅れで、昭和では2年遅れて東海と南海とに分かれて発生している。この最近3回を眺めると、一つ前の地震との間隔が短い程、発生した地震規模が小さい＝「サイズプレディクタブル」な特徴が際立つ。要するに情報が増えてくる15世紀以降は、毎回個性的で「固有規模の地震の繰返」と単純化できない。それ以前の康和や正平は史料情報が豊富ではないが、古代の白鳳と仁和に関しては、これまで誰も南海トラフの巨大地震とする説に対して異論を示してこなかった。しかし近年、西南日本太平洋沿岸部の津波堆積物調査事例が多くなると、白鳳に対応する堆積物は発見されるが、仁和に対応するものが検出できない事例が蓄積されつつある。仁和南海地震は南海トラフ巨大地震とされてきた割には変ではなからうか？一方、大阪湾断層の最新活動時期は9世紀以降（e.g. 七山ほか、2000）とされており、既知の史料情報を通観すると、京都の震度が大きく、津波の最大被害地は摂津、とされる仁和地震は、最右翼候補たりえる。勿論史料地震学的には「暗黒の中世」に未知の大地震が大阪湾と雖も存在した可能性は残る。そこで、今回は、改めて南海地震とされている仁和地震の史料や発生当時の摂津や京都の状況を検討してみた。その結果、1) 京都の震度は、ご神体として人目に晒してはならない天皇が、紫宸殿前の広庭に急いで避難してしまったこと、京都市中の被害家屋が少なくないこと、から近世の南海地震時の京都の揺れ方よりは大きく怖かった可能性が高いこと、2) 「日本三代実録」は古代正史の中で内容が充実しているにも関わらず、湯峯温泉や道後温泉の湧出停止、高知平野の沈降、四国・紀伊半島での津波、など「南海トラフのプレート間巨大地震」の証拠になる事象が仁和に関しては全く朝廷に伝わっていない、ことが確認できた。仁和地震は菅原道真の出世途上の時期に発生している。地震時彼は讃岐守として讃岐に居た。坂出に居ても、京都の方ばかり向いていた可能性もあるが、後年「類聚国史」を主導し、「日本三代実録」の内容が充実しているのも、道真の人並み外れた能力の高さに依る所大と考えられることから、四国の珍しい事象を、おめおめと見過ごして「日本三代実録」に記録しなかった、とは考え難く、南海トラフの典型的な事象は仁和三年旧暦七月三十日の地震には付随しなかった可能性の方が高い。近世の宝永や安政南海で大阪市の津波被害が甚大となったのは、近世初頭に水運のための整備されていた堀川に千石船が津波で運ばれたため、古代の摂津では決して生じ得ない被害である。宝永地震時「摂津」の範囲（現在の神戸～大阪市北西部のみ）で津波波高によって被害を受けた低地利用域は、当時海岸域だった新興埋立地で逃げ場がなかった西成などに限られる。中世に石山寺が開闢する以前の古代の大阪は、現在とは地形が全く異なる。今の住吉から神戸にかけての「摂津」の海岸沿いで南海トラフの地震で津波の甚大被害を受けただろうか？このような時代状況を踏まえて、日本三代実録の記述内容を素直に読んだ時、現在南海トラフの巨大地震とされている、仁和三年七月三十日の五畿七道の地震は、実は大阪湾断層の活動であり、大阪湾岸の真正面で発生した海底活断層の地震によって、摂津の津波は甚大、京都も震度が大きかった、と考えても十分史料情報と整合する。その場合、南海トラフの地震は発生していたとしても、全く別の日付で京都では注目されなかった、ことになる。そもそも百年に一度、と信じられている割には、古代でも漸く二百年に一度しか当てこめなかった南海トラフの巨大地震に関しては、植え付けられた固定観念に囚われること無く、史料や堆積物など証拠に基づいて判って居る範囲内で活動間隔そのものから根拠に基づいて再構築することが大切なのではないだろうか。

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。



An Entire Revision of the “Japanese Damaging Earthquakes List” in “Chronological Scientific Tables”

*Kazuki KOKETSU¹, Tomoya HARADA²

1. Graduate School of Media and Governance, Keio University, 2. N/A

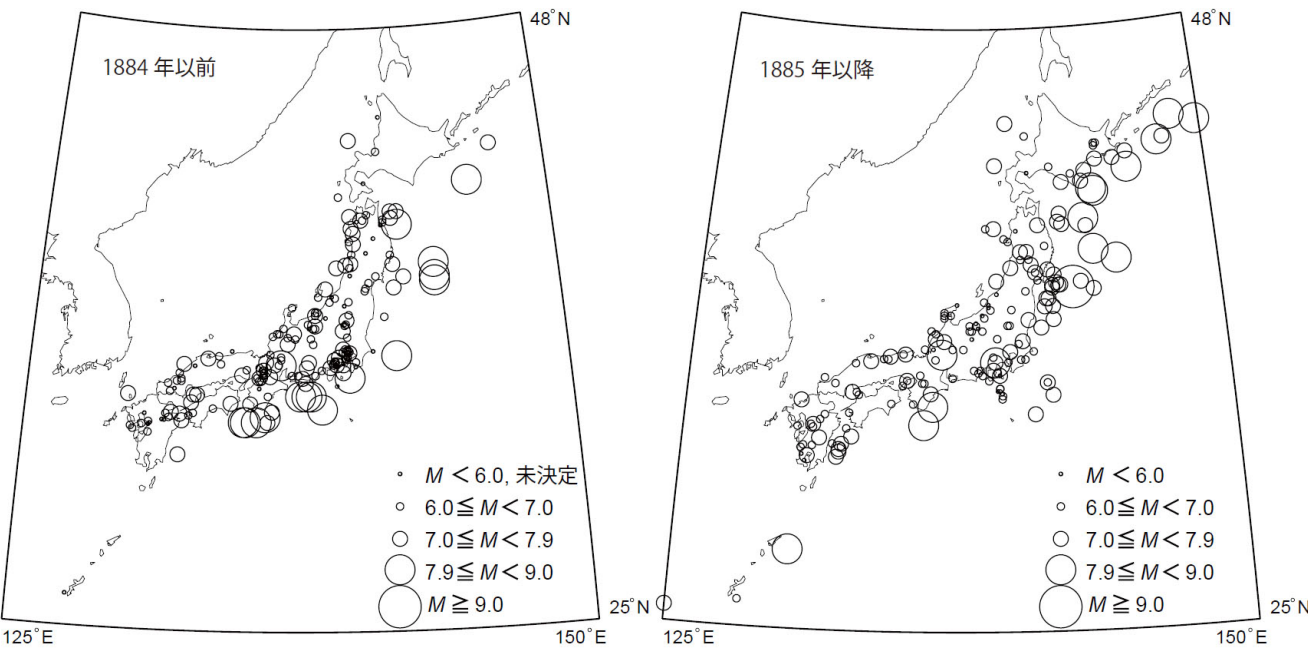
理科年表の「日本付近のおもな被害地震年代表」（以下、年代表）の歴史地震部分（1884年以前）は2021年版において大改訂が行われて、2020年版に対して地震47件と海外津波3件が追加され、地震2件が削除された〔原田・瀬瀬（2020）〕。その際、追加保留とされた地震25件をここで検討した。また、近現代的な観測などに基づく1885年以降の地震についても検討を行い、この部分に対して年表の編集を担当するようになってから初めて大改訂を行った。2021年版1884年以前の追加保留25件に対する検討の結果、「追加しない方がよい・判断が難しい」20件、「追加して良い」5件となった。2023年版では後者のみを追加し、前者は追加しないことで確定とした。以上より1884年以前は、2020年版で地震268件、海外津波2件だったものが、2021年版では地震313件、海外津波5件となり、2023年版では地震318件、海外津波5件とする予定である。

原田・瀬瀬（2020）と今回の検討では、『日本被害地震総覧599－2012』（以下、総覧）に番号付きで記載されているのに年代表2020年版に記載されていない地震を主な対象とし、総覧で無番号1件と不記載2件を加えた95件を検討した。そのうち55件（地震52件、海外津波3件）が追加され、40件は追加しないとされた。それら以外に、年代表に記載され総覧にも番号付きで記載されている2地震（1831年11月13日と1847年2月15日）を、最近の研究に基づいて削除した。これら改訂のうち研究上議論となるのは、総覧で不記載または無番号であるのに追加された2+1件であろう。また、年代表の2020年版にあって継続掲載の地震のうち、総覧では無番号である7件も同様である。不記載で追加のうち1454年12月22日（享徳3年11月24日）の地震について、以下で詳しく述べる。

行谷・矢田（2014）によれば、この地震の被害（津波による被害）が記述されているのが『王代記』のみで、それ以外の『会津旧事雑考』、『大宮神社古記録抄』、『続本朝通鑑』、『新撰和漢合図』には、「大地震」または「地大震」としか記載されていない。石橋（2015）が見出した『異本塔寺長帳』も同様である。従って、『王代記』をどう評価するかが1454年の地震の評価となる。『山梨県史』によると、同書は大永4年（1524年）には成立しており、1454年の事象に対してはほぼ同時代史料と考えられるし、同書影印本の磯貝・服部の解説によれば、山梨県の普賢寺の住職が代々書き継いだ年代記であるので史実が書かれていると窺われる〔行谷・矢田（2014）〕。これらをもって年代表2023年版には1454年の地震が追加された。

1885年以降は、地震の件数に関し、2022年版に対して2022年3月の福島県沖の地震が追加されたのみである。しかし、個々の地震の記述についてはほとんどの地震で修正が入った。特に、1919年以降の地震の緯度・経度・ M は気象庁の遡った月報カタログに合わせたが、地域はカタログに書かれたものではなく、震度データベースと「日本付近で発生した主な被害地震」の表から得られる地震情報の震央地名を用いた。ただし、明らかに当時の震央地名と異なると考えられる場合は、当時のものを*付きで用いた。年代表2023年版に掲載された1885年以降の地震をプロットしたものが図の右側である。これに対して左側は1884年以前の緯度・経度が与えられている地震のプロットである。 M が未決定の場合は6未満の地震と同じ大きさとした。両者を比較すると、北海道と九州南端・南西諸島を除けば概ね傾向は似ており、1884年以前もそれほど大きな偏りはないように見受けられる。京都・鎌倉・江戸周辺に M が小さい、または未決定の地震が多数プロットされているのは、古文書の分布から考えて致し方ないであろう。

日本暦は改元時期が正しく反映されるように訂正したものがかなりある。ただし、それによって地震名と矛盾する場合は、地震名に含まれる年号も<>付きで示した。原田・瀬瀬（2020）と今回の大改訂で年代表は件数に関してほぼ安定したと考えられるので、今後は総覧のように地震番号を固定とし、件数の増減があれば枝番や欠番で対応する予定である。一方、海溝型地震の諸元は『地震活動総説』〔宇津（1999）〕で再検討されている場合があり、日本海溝のものはすでに取り入れてあるが、千島海溝や南海トラフは今後である。1843年の千島海溝の地震の M は今回試験的に取り入れた。



Poster session (3rd Day) | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 12:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-1 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S09P] AM-P

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-01] Analysis of seismic activity (Oct 2017-Sep 2021) beneath the Hakusan volcano.

*Masato Fukata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-02] Stress change on inland faults in Southwestern Japan due to the 1944 Tonankai and the 1946 Nankai earthquakes

*Akinori Hashima¹, Takane Hori¹, Takeshi Iinuma¹, Souta Murakami², Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-03] Tidal correlation of deep tectonic tremors rising during long-term slow slips in Bungo Channel

*Fuyuki HIROSE¹, Akio KOBAYASHI¹, Kenji MAEDA¹ (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-04] Numbers and duration of aftershocks on inland earthquakes in Japan

*Taichi Honda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-05] Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes after 2021 around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Toshihiro IGARASHI¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-06] Temporal variation of seismic attenuation around the slow-slip events area in southwestern Ibaraki prefecture

*Yosuke Ito¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-07] Earthquake swarm occurring in Noto Peninsula

*Akio Katsumata¹, Atsumoto Shima¹, Takahito Nishimiya² (1. Univ. of Toyama, 2. MRI, JMA)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-08] Temporal change in focal mechanisms of double seismic zone's events in the Pacific plate after the 2011 Tohoku EQ

*Shunsuke Kawabe¹, Toshinori Sato¹ (1. Chiba Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-09] Temporal variation in coda Q before and after the 2011 Tohoku earthquake around the Atotsugawa fault zone

*Maho Kawajiri¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-10] Steep gradient zone of seismic velocity structure at the hypocenter of offshore Iwate events on March 18, 2022

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato², Shin Koshiya³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Faculty of Science and Engineering, Iwate University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-11] Detection of low-frequency earthquakes at Mount Fuji and statistical analysis

*Kazuyoshi Z. Nanjo^{1,2,3}, Yohei Yukutake⁴, Takao Kumazawa³ (1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Univ. of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-12] Observation of shallow slow earthquake activity from December 2020 southeast off the Kii Peninsula using dense ocean bottom seismometer array.

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹ (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-13] Slow Earthquakes in the Japan Trench

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Satoshi IDE², Takuya NISHIMURA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. School of Science, Univ. of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-14] Hypocenter distribution using S-net data during 2016 April – 2022 March

*Azusa NISHIZAWA¹, Masashi Mochizuki¹, Kenji Uehira¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-15] Dependence of earthquakes happen in the northern Osaka on depth

*Ryota Ono¹, Yoshihisa Iio² (1. Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-16] **Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay**

*Yannis PANAYOTOPOULOS¹, Shintaro Abe¹, Hisatsoshi Baba², Nagisa Nakao², Takahito Nishimiya³ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai University, 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-17] Comprehensive extraction of tremor migrations in Nankai subduction zone, southwest Japan, and their characteristics

*Kodai SAGAE¹, Takahiko Uchide¹, Takanori Matsuzawa² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-18] Construction of the automatic hypocenter relocation system using the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko Shiomi¹, Makoto Matsubara¹, Shoji Sekiguchi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-19] Determination of the focal mechanism solution of swarm earthquakes in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-20] **Detectability of very low frequency earthquakes in Nankai using F-net and DONET**

*Shunsuke TAKEMURA¹, Satoru BABA², Suguru YABE³, Yusuke YAMASHITA⁴, Katsuhiko SHIOMI⁵, Takanori MATSUZAWA⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-21] Spatiotemporal distribution of shallow very-low-frequency earthquakes between January and March 2022 detected by DONET2 seismic stations

*Yojiro Yamamoto¹, Shuichiro Yada¹, Keisuke Ariyoshi¹, Masaru Nakano¹, Takane Hori¹ (1. JAMSTEC)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-22] Centroid moment tensor inversion of earthquakes in the Japan Trench subduction zone using S-net ocean bottom seismometers

*Lina Yamaya¹, Hisahiko Kubo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Shunsuke Takemura² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC

[S09P-23] Spatial distribution of moment magnitude anomalies in subduction zones: Comparison with seismic activity in the Kanto region

*Kazuo YOSHIMOTO¹, Takaya HASEGAWA¹ (1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University)

Analysis of seismic activity (Oct 2017-Sep 2021) beneath the Hakusan volcano.

*Masato Fukata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University

1) はじめに

白山火山は石川-岐阜両県境に位置する活火山である。束田ほか(1990)や高橋ほか(2003)など白山火山直下の地震活動に焦点を当てた研究では、解析期間における地震活動は山体直下の浅い領域に集中し、メカニズム解は広域応力場に調和的であった。また、2005年には4回の群発地震活動が認められ、各群発地震の発生領域は異なり、白山火山直下の地震としては最大のM4.5の地震が発生した(平松・和田, 2008)。近年、白山火山は地震数やベニオフ歪の増加傾向から地震活動が活発化している可能性があり、最後の噴火から350年以上が経過しているため、将来火山活動が再開する可能性がある。本研究では、白山火山直下で発生した地震を解析し、震源の空間分布や震源メカニズム解から地震活動について考察を行う。

2) データと手法

使用するデータは防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)と気象庁、京都大学防災研究所の観測点で得られた連続地震波形である。気象庁一元化震源リストから2017年から2021年の間で地震が多発する期間を選び、気象庁の連続地震波形記録から地震を目視で確認し、WINシステム[ト部・束田, 1992]により震源決定を行う。また、震源位置の相対精度を高めるため、観測点補正值とDouble Difference法[Waldhauer and Ellsworth, 2000]を用いて震源再決定を行う。その後、P波の押し引きが多数の観測点で確認できる比較的マグニチュードの大きい地震(M1.5以上)においてWINシステムを用いて初動の押し引きの検測を行い、Maeda(1992)のプログラムを用いて震源メカニズムを決定し、スコア0.9以上で決定された震源メカニズム解を使用する。

3) 結果と考察

震源決定は7期間(2017/10/10~11, 2017/11/29, 2019/01/12, 2019/03/06, 2020/03/28, 2020/06/19~20, 2021/09/21)で行った。震源決定の結果、気象庁一元化震源リストに比べ、約4倍の震源を決定することが出来た。震源分布は震源決定の際に用いたP波速度構造モデル[竹内, 1979]により気象庁一元化震源リストに比べ浅く決定された。観測点補正值とDouble Difference法を用いた各地震群の震源は2005年の群発地震の発生領域上に分布していた。また、震源メカニズム解の推定を行った結果、多くの地震は西北西-東南東方向に主圧力軸を持つ横ずれ断層型や逆断層型を示していた。防災科学技術研究所の広帯域地震観測網(F-net)により推定された周辺地域のメカニズム解と同様のメカニズム解を示したため、多くの地震はこの地域の広域応力場を反映していると考えられる。一部、正断層型のメカニズム解を示したが、過去に同様の領域で発生した地震も同様のメカニズム解を示している事からこの領域において地域性がある可能性がある。多くの地震群で震源領域の長径方向と震源メカニズム解の節面の方向が一致している事から震源分布領域に断層面があると考えられる。メカニズム解は広域応力場と整合的であったが、クーロン破壊応力変化(ΔCFF)から山頂直下の深さ5-10km付近に球状圧力源がある場合やダイクが存在する場合、多くの地震発生領域で正の ΔCFF 値が見られたため、地震活動の一時的な増加の要因として地下の圧力源やダイクの存在を否定するものではないと考えられる。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所、気象庁、京都大学防災研究所の各観測点の地震波形データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

Stress change on inland faults in Southwestern Japan due to the 1944 Tonankai and the 1946 Nankai earthquakes

*Akinori Hashima¹, Takane Hori¹, Takeshi Iinuma¹, Souta Murakami², Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita²

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

西南日本弧ではフィリピン海プレートが南海トラフで沈み込み、100-200年の再来間隔で巨大地震が発生している (Ando, 1975)。歴史地震記録によると、プレート境界の巨大地震発生50年前から10年後にかけて西南日本において内陸地震が活発化することが知られている (Utsu, 1974)。このような内陸地震発生の定量的な評価のためには、巨大地震サイクルによる内陸の震源断層への応力変化を見積もる必要がある。

巨大地震前の内陸地震発生に関連する応力蓄積は、地震前の固着 (すべり速度欠損) パターンから推定することができる。一方、巨大地震の発生後の応力変化は、巨大地震の破壊過程とその粘弾性効果に強く依存する。そのため、ありうる地震破壊のシナリオを事前に想定しておき、そのシナリオにおける応力蓄積パターンを見積もっておくことが必要である。

南海トラフ下の巨大地震破壊は様々な発生パターンを示している。直近の巨大地震は1944年 (M7.9 東南海) と1946年 (M8.0 南海) であり、東と西のセグメントが2年間隔で破壊する、いわゆる「半割れ」が発生したのちに比較的短い時間をおいて残りの部分でのすべりが起こることで、いわゆる「全割れ」とほぼ同等の応力変化が最終的にもたらされるパターンであった。これらの巨大地震の後、内陸域においては、1945年三河地震や1948年福井地震といったM7級の被害地震が発生した。特に1945年三河地震は、1944年の半割れの直後、1946年の残りの破壊の前に発生しており、このような破壊プロセスによる応力変化と内陸の地震発生の関連を調べることが重要であることを示している。

2011年東北沖地震の陸域と海域を合わせた地殻変動観測により、M9級地震後の余効変動によるアセノスフェアの粘弾性緩和の影響が示されてきた (Sun et al., 2014; Watanabe et al., 2014)。有限要素法による粘弾性解析により、M9地震後の特徴的な余効変動パターンを再現するために、粘性構造、特に海陸の粘性率比や沈み込むスラブ下部の低粘性層を考慮することの必要性が示されている (e.g. Sun et al., 2014; Freed et al., 2017)。近年の数値解析手法の発展により、高詳細な地表地形や内部構造を取り入れた粘弾性解析も可能になってきている (Ichimura et al., 2016)。

従って、本研究では、1944年–1946年の破壊過程によって西南日本の各断層に生じた応力変化を見積もる。断層形状モデルは地震調査研究推進本部 (2009) を用い、応力変化の計算には、地下の粘性緩和の影響を考慮できる高詳細有限要素法 (Ichimura et al., 2016; Hori et al., 2021) を用いる。入力値として与える1944年東南海、1946年南海地震のすべり分布は、様々なモデルが提案されているが、紀伊半島南東岸に平行に分布する東南海地震のすべり分布、土佐湾から海溝にかけて分布する南海地震のすべり分布、と共通する特徴が認められる (e.g. Ichinose et al., 2001; Baba et al., 2005; Sagiya & Thatcher, 1999; Sherrill & Johnson, 2021)。そこで、本研究では、これら過去研究のすべり分布を5つの基本すべり領域の重ね合わせとして表現する。過去研究の様々なすべりパターンを考慮し、内陸地震の断層におけるクーロン応力変化 (ΔCFS) を計算した。

大局的に、1944年東南海地震による ΔCFS は中部～近畿地方の震源域周辺の断層において正の値をとり、その周りの断層で負の値をとる。引き続き1946年南海地震により、中央構造線および中国～近畿地方の断層の断層が正值となる。両地震の影響域の中間にある断層では、1946年南海地震およびその粘弾性緩和の影響により、 ΔCFS の符号が変化するものが見られた。このような断層では、東南海・南海の地震を通して、一旦静穏化したのちに活発化する、またはその逆といったように、大きく変化する。

Tidal correlation of deep tectonic tremors rising during long-term slow slips in Bungo Channel

*Fuyuki HIROSE¹, Akio KOBAYASHI¹, Kenji MAEDA¹

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research

1. はじめに

豊後水道では、巨大地震発生層の深部縁において継続時間半年～1年程度、Mw 6–7程度の長期的スロースリップイベント（LSSE）が数年間隔で繰り返し、それに同期して数Hzの卓越周波数を持つ深部微動が活発化している。微動は潮汐せん断応力（または摩擦係数が非常に小さなクーロン応力）との高い相関関係を示し〔例えば、Thomas et al., 2009, Nature; Houston, 2015, NatureGeo〕、位相（特に半日周）〔例えば、Ide, 2010, Nature, 2012, JGR; Katakami et al., 2017, GRL〕や振幅〔例えば、Lambert et al., 2009, JGR; Houston, 2015; Ide et al., 2015, GRL〕との関連が指摘されている。数日間のゆっくりすべり現象中の微動の潮汐応答についての調査は多いが、年オーダーの時間変化に着目した研究は知らない。そこで本研究では、豊後水道における深部微動と潮汐との相関の長期的な時間変化を調査した。

2. データ

本研究では、エンベロープ相関法で検出された深部微動の防災科研カタログ〔Maeda and Obara, 2009, JGR; Obara et al., 2010, GRL〕を用いた。解析に用いたデータは、2001年1月1日～2021年4月30日に豊後水道LSSEに近接する領域Ba（Obara et al. [2010]による領域分けに準拠）内で発生した深部微動1903個である。微動に対する理論潮汐応答を計算する際には、位置・発生時刻・断層パラメータの情報が必要となる。微動の位置については、震央はカタログ情報をそのまま用い、深さはプレート境界〔Hirose et al., 2008, JGR〕で発生していると仮定して設定した。発生時刻については、カタログ値をそのまま用いたが、時間分解能は1時間であるため、正時に発生したと仮定した。このことは、本質的にデクラスタされたデータセットを用いていることになる。断層パラメータについては、プレート形状とプレート収束方向〔DeMets et al., 2010, GJI〕を考慮してイベント毎に設定した。

解析期間中に豊後水道のLSSEは複数回発生している。本研究では、LSSEの開始及び終了の時期を、LSSEの中心（フィリピン海プレート上面の深さ25 kmコンターと東経132.4度線の交点）においてKobayashi [2017, EPSJ]による客観解析で相関係数0.8以上となる期間と定義した。その結果、LSSEは解析期間中に全部で4回発生している。

3. 解析手法

理論潮汐応力は、TidalStrain.2〔Hirose et al., 2019, JGR;

<https://mri-2.mri-jma.go.jp/owncloud/s/tjqx7HfK8bD3KQf>〕を用いて計算した。微動の各震源において仮定した断層面上における潮汐せん断応力($\Delta \tau$)と潮汐法線応力($\Delta \sigma$)について調査した。せん断応力については断層すべりを促進する方向を正、抑制する方向を負、法線応力については拡張を正、圧縮を負とした。

微動の潮汐感度は、Houston [2015]に倣って、以下の式の α 値で評価した。

$$N_{\text{obs}} / N_{\text{exp}} = e^{\alpha(S)}$$

ここで、 S は応力binの中間の値、 N_{obs} は潮汐力が応力bin内の値を取る期間に観測された微動数、 N_{exp} は同期間に潮汐と無相関に期待される微動数である。 α が大きいほど潮汐感度が大きい。

4. 結果

先行研究と同様に、潮汐せん断応力($\Delta \tau$)による潮汐感度が高く、潮汐応力値が大きいほど微動が発生する傾向を示した。潮汐法線応力($\Delta \sigma$)は微動のトリガーにはほとんど効いていなかった。LSSE期間中の微動の潮汐感度は、LSSE期間以外の期間（背景（BG）期間）のそれよりも概ね高かった（例外としてBGの4期目はやや高め）。

ただし、BG期間の潮汐感度は低いとは言え、帰無仮説「微動が潮汐とは無関係に発生」はKS検定により有意水準1%で棄却される。つまり生来潮汐せん断応力は微動のトリガー作用に関与しているということである。そして本解析により、LSSE期間にはそのトリガー効果が増幅されていることがわかった。潮汐は広域に同時に数時間にわたって影響を及ぼすため、微動域は勿論のこと、すべり速度が増加したLSSEによって隣接した微動域に与えるせん断応力が増加し、微動の潮汐感度も高くなった可能性がある。

Numbers and duration of aftershocks on inland earthquakes in Japan

*Taichi Honda¹, Takuji Yamada¹

1. Ibaraki University

1. はじめに

余震とは、本震後に本震の断層およびその近傍で起こる本震よりも小さな地震である。日本全国について地震数の時間変化をグラフ化すると、余震数と本震の規模には単純な相関がない印象を受ける。そこで本研究では、日本内陸部で2003年から2018年の間に発生したマグニチュード(M)5.5以上の13地震について、余震数と余震継続時間を解析し、本震の規模との関係を議論する。

2. 解析手法

余震の解析には、まず時空間的な余震の定義が必要である。空間的定義として、深さ0-30 km、本震の震央から距離R kmの円柱（余震域）を想定し、この余震域内に震源を持つ地震を余震の候補とした。このとき、Rは地震のスケーリング則を考慮し、とした。この余震の候補のうち、次の時間的定義を満たす地震を最終的に余震とした。時間的定義は2通りの手法を用いた。手法1として、まず、余震域内での本震前180日間の地震活動を「定常的な活動」と定義し、その地震数を集計した。そして、本震後t日からt+180日までの地震数を集計し、その地震数が「定常的な活動」の地震数以下になるtの値（整数値）を余震の継続時間とした。手法2として、余震活動が大森公式に従うと仮定した解析をおこなった。本震直後の余震数が発散しない改良大森公式は、次の(1)式で表される。

$$n(t) = K (t+c)^{-p} \quad (1)$$

ここで、cは通常1日以下の小さい値、pは1に近い値を取ることが知られている。c=0、p=1と仮定すると、(1)式は大森公式となり、単位時間あたりの余震数が経過時間tに反比例することが分かる。ここで、c=0、p=1を代入した(1)式の両辺を時間tで積分すると、次の(2)式を得る。

$$\int n(t) dt = K \log t \quad (2)$$

すなわち、左辺の積算余震数は、log tに対して傾きKの直線となり、余震が終了すると、この直線から外れるはずである。手法2では、この直線から外れるtの値を余震の継続時間とした。なお、解析対象地震の規模については、規模別頻度分布を作成して検討し、M2.0以上とした。

3. 結果および考察

「1. はじめに」で述べた当初の研究の契機とは異なり、解析の結果、日本の内陸地震では本震の規模と余震数に相関が見られることがわかった（図1a）。これは、本震直後の余震活動の活発さと余震の継続時間が逆走間になることで、結果として余震数と余震継続時間の相関関係が成り立っている可能性が考えられる。また、図1の回帰直線からのずれは、それぞれの地震およびその発生地域の特性が表れているのかもしれない。次に、本震の規模と余震の継続時間の関係には、2種類の異なる解析手法の結果の両者に、緩やかな正の相関が見られた（図1b,c）。これは、余震の継続時間には本震の規模以外の要素が関わっていることが考えられる。本震が発生しなければ余震は発生しないことから、今後、各地震の破壊の複雑さと余震活動の相関を考察することにより、これらの原因について検討を進めたい。

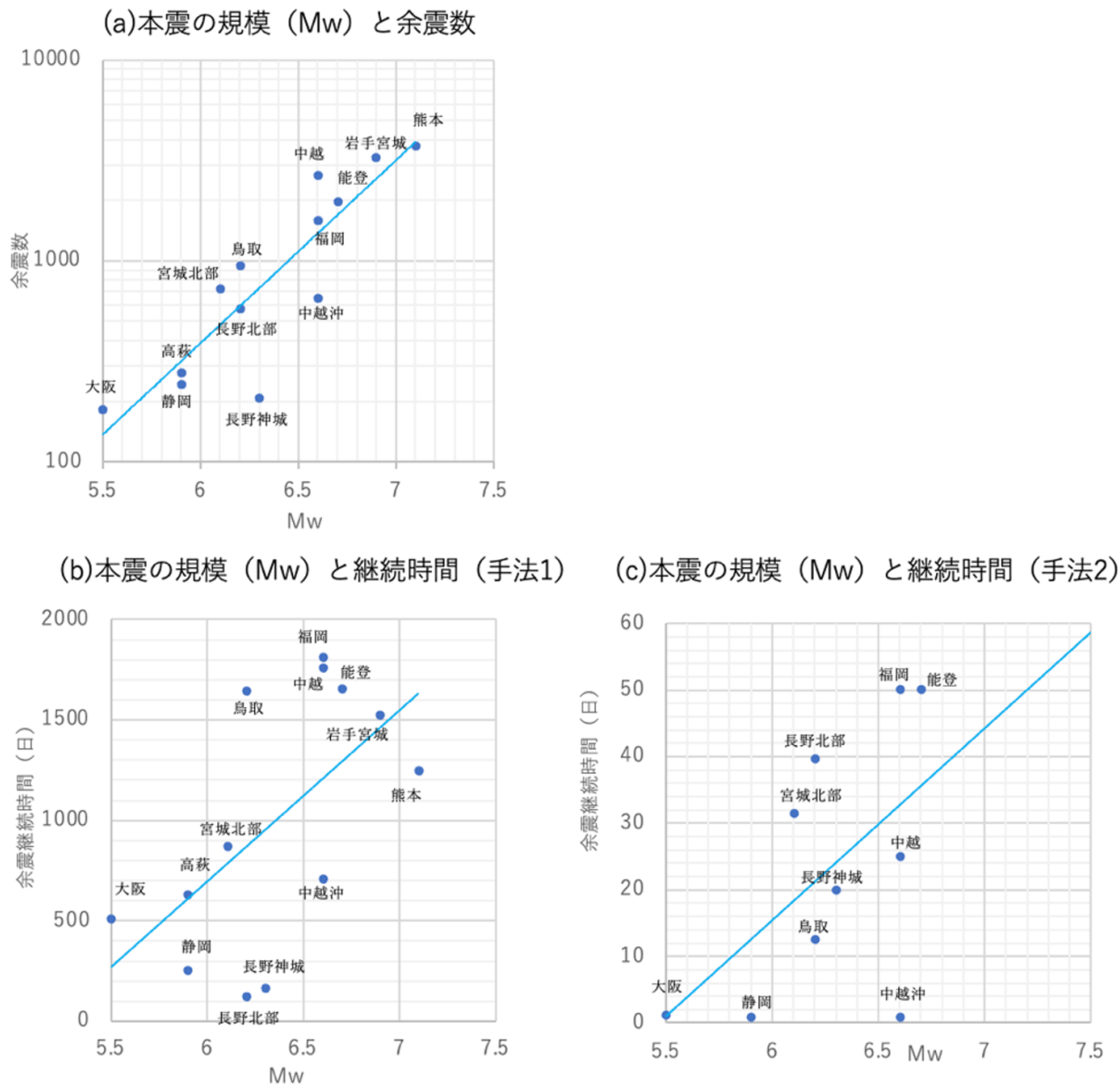


図 1.
(a)余震数と本震の規模の関係
(b)余震数と余震継続時間の関係手法 1 および(c)手法2
水色直線は、最小二乗法により求めた回帰直線を表す。

Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes after 2021 around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Toshihiro IGARASHI¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2021年から2022年にかけて、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺では、M6からM7クラスのプレート間地震およびスラブ内地震が複数発生した。これらのうちの6つの地震は、宮城県沖から福島県沖にかけて比較的狭い範囲に集中している。そこで本研究では、ほぼ同じ場所で繰り返し発生している小繰り返し地震活動をj用いて、これらの地震によって生じたプレート間非地震性すべりの時空間変化を調査した。

小繰り返し地震は、日本列島に展開されている地震観測網で得られた地震波形の相互相関係数とS-P到達時刻差を基に抽出した。本研究では、既に報告している2019年までに発生した小繰り返し地震カタログに、2022年3月16日のM7.4福島県沖地震発生直後まで解析を進めた結果を加えて使用した。小繰り返し地震の再来間隔は、大規模な非地震性すべりが生じていない時期には数年程度となる。そのため小規模で短期的なすべり速度変化には応答しない可能性がある。そこで本解析では、繰り返し地震に隣接する地震活動が同一の断層面で発生し、その活動度の変化がすべり速度の時間変化と対応すると仮定して揺らぎを与え、短期間の時空間変化を推定した。

その結果、2021年以降に発生したいずれの大地震発生後においてもプレート間非地震性すべりの加速が見られた。特に、宮城・福島県沖で見られたすべりの時空間変化は、プレート内地震とプレート間地震の発生が、プレート間の非地震性すべりを介して相互に作用したことを示唆していた。まず、2021年2月の福島県沖スラブ内地震の前には、その東側でプレート間非地震すべりがわずかながら生じていた。2月の地震後、震源の南西側ですべりが加速し、その後、北側ですべり速度が増加した。2021年3月の宮城県沖プレート間地震までには、その震源付近まで広がった。3月の地震発生後、5月1日の宮城県沖プレート間地震の震源域を含む地域ですべりが加速した。その後、すべり域はさらに南側に広がり、5月14日の福島県沖プレート間地震の震源付近まで到達した。5月14日の地震後に生じた非地震性すべりは震源域の東側に局在しており、その西側の2022年3月にその西側で発生したスラブ内地震の震央側には広がらなかった。2022年3月のスラブ内地震発生後にはその震源域周辺にプレート間非地震性すべりが広がった。

このように、非地震性すべり域は、次に発生する大地震の震源まで広がっていく傾向が見られた。プレート間のすべりによる応力増加がスラブ内のダウンディップコンプレッション型地震の発生を増加させることは既に指摘されている。本解析の結果は、スラブ内大地震の発生によりプレート間の応力が増加し、非地震性すべりが生じ、また、プレート間地震が非地震性すべりの伝播によって誘発された可能性を示唆している。宮城・福島県沖地域は、プレート境界型地震とスラブ内ダウンディップコンプレッション型地震の両方が多数発生している。そのため、相互作用の影響が顕著に表れたのかもしれない。

2011年東北沖地震後には、その震源域周辺の広範囲で余効すべりが発生している。その積算すべり量は震源の西側に位置する宮城県沖北部で最も大きい。すべり速度は時間とともに減少する傾向は見られるものの、本震発生後11年以上経過した現在においても、プレート間の相対運動よりも速い状態が続いている。2021年の大地震発生後には一時的に再加速した可能性がある。一方、2021年以降に大地震が発生した宮城県沖南部から福島県沖を含むその他の地域では、加速したすべりは数年程度でほぼ収束しており、近年のすべり速度は、相対プレート運動速度よりも小さかった。巨大地震のすべり域に隣接する地域では、次の地震発生に向けた応力蓄積が起きている可能性がある。

今回推定された大地震発生後の非地震性すべりはいずれも短期間で収束しており、その積算すべり量は5-10 cm程度にとどまる。このすべり量は、繰り返し地震で用いられているスケーリング則においてM2.2の地震の再来に伴うすべり量にすぎない。そのため、小繰り返し地震が短期間で再来することは期待できない。微小地震活動と組み合わせた解析が短期的、局所的なすべりの変化を調査する際には重要となるだろう。地震活動解析から非地震性すべりの時空間変化に関する情報を得ることは、将来発生する大地震の発生可能性を推定する手助けとなるかもしれない。

Temporal variation of seismic attenuation around the slow-slip events area in southwestern Ibaraki prefecture

*Yosuke Ito¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

我々は、スロースリップ発生域周辺における地震波減衰構造及び地震活動の時間変化を調べることで、スロースリップの発生過程を考察している。茨城県南西部に沈み込むフィリピン海プレートの上部境界面では、スロースリップが深さ約50km付近で周期的に発生している。Nakajima and Uchida(2018)は、茨城県南西部で発生する繰り返し地震の活動から推定したプレート境界面の滑り速度と、その直上におけるP波の減衰構造の時間相関を調べ、1年周期のスロースリップの発生がプレート境界から上盤大陸プレートへの排水を引き起こすモデルを提案した。一方、Warren-smith et al.(2019)やKita et al.(2021)は、それぞれニュージーランドのヒ克蘭ギ沈み込み帯北部と西南日本の紀伊半島沖で発生するスラブ内地震活動を解析することで、スロースリップに先行して、沈み込むプレート内上部の間隙水圧が上昇していると考察した。本研究では、茨城県南西部において上盤プレートとスラブ内の地震活動と地震波減衰構造を調べることで、スロースリップ発生前後における水の挙動を定量的に考察し、より理解を深めることを目的としている。本研究では、次の2つの解析をおこなった。1つ目の解析はNakajima and Uchida (2018)では解析されていない上盤プレート内の Q_s^{-1} の推定、及び Q_p^{-1} と Q_s^{-1} の時間変化の定量的な比較である。二点目はスロースリップ発生域直下に位置する沈み込むフィリピン海スラブ内における地震波減衰構造の時間変化である。これらの解析は、スロースリップを引き起こす原因となりうる水の移動を理解する重要な手がかりとなる。本研究では、2009年から2021年の間に発生した349個の地震から、上盤-プレート境界地震の地震ペアと、プレート境界-スラブ内地震の地震ペアを使用し、スペクトル比を解析することで、上盤内の Q_p^{-1} 、 Q_s^{-1} とスラブ内の Q_p^{-1} を推定した（詳しい手法はNakajima and Uchida, 2018を参照）。また、それぞれのコーナー周波数は、上盤地震とプレート境界地震についてはスペクトル比法で推定したものを使用し、スラブ内地震については応力降下量（100MPa）を仮定して理論的に求めたものを使用した。解析に用いた地震波形はMeSO-netの8観測点において200Hzサンプリングで記録されたものである。周波数帯は20-45Hzを解析の対象とした。震源の情報は、気象庁1元化震源カタログと、Igarashi(2020)の繰り返し地震カタログから使用した。上記の解析から、3つの主要な結果を得た。1. Nakajima and Uchida(2018)で提案された約1年周期のスロースリップによる上盤プレートへの排水は、少なくとも2019年まで続いている 2. 上盤プレート内では Q_s^{-1} も Q_p^{-1} と同様な時間変化を示したが、 Q_p^{-1} よりも小さい値を示した。この結果は、水に起因する地震波の減衰メカニズムの理解につながる可能性がある。 3. スロースリップ発生域直下のスラブ内の Q_p^{-1} は時間変化し、スロースリップに先行して大きくなる。スロースリップの発生の前に、脱水反応によりスラブ内に水が蓄積される過程を示している可能性がある。

Earthquake swarm occurring in Noto Peninsula

*Akio Katsumata¹, Atsumoto Shima¹, Takahito Nishimiya²

1. Univ. of Toyama, 2. MRI, JMA

(1)はじめに

能登半島の北部にある石川県珠洲市では、2018年6月頃から現在まで、群発地震が発生している。群発地震の震源の位置を地図上にプロットすると、4つの地震活動が活発な領域が認められる(図)。本発表では、この地震の発生時系列の特徴や深さ分布などについて報告する。

(2)方法

本研究を行う上で、一元化震源データを用いた。地震活動が活発な4つの領域の地震群の位置の精度を高めるために、DD法を用いて震源の再計算を行った。震源決定で用いたDD法の計算には、アメリカ地質調査所(USGS)が公開しているHypoDDプログラムを使用した。震源位置の計算に用いた速度構造データには、1次元速度構造と勝間田・西宮(2022)が求めた3次元速度構造の2つを使用した。

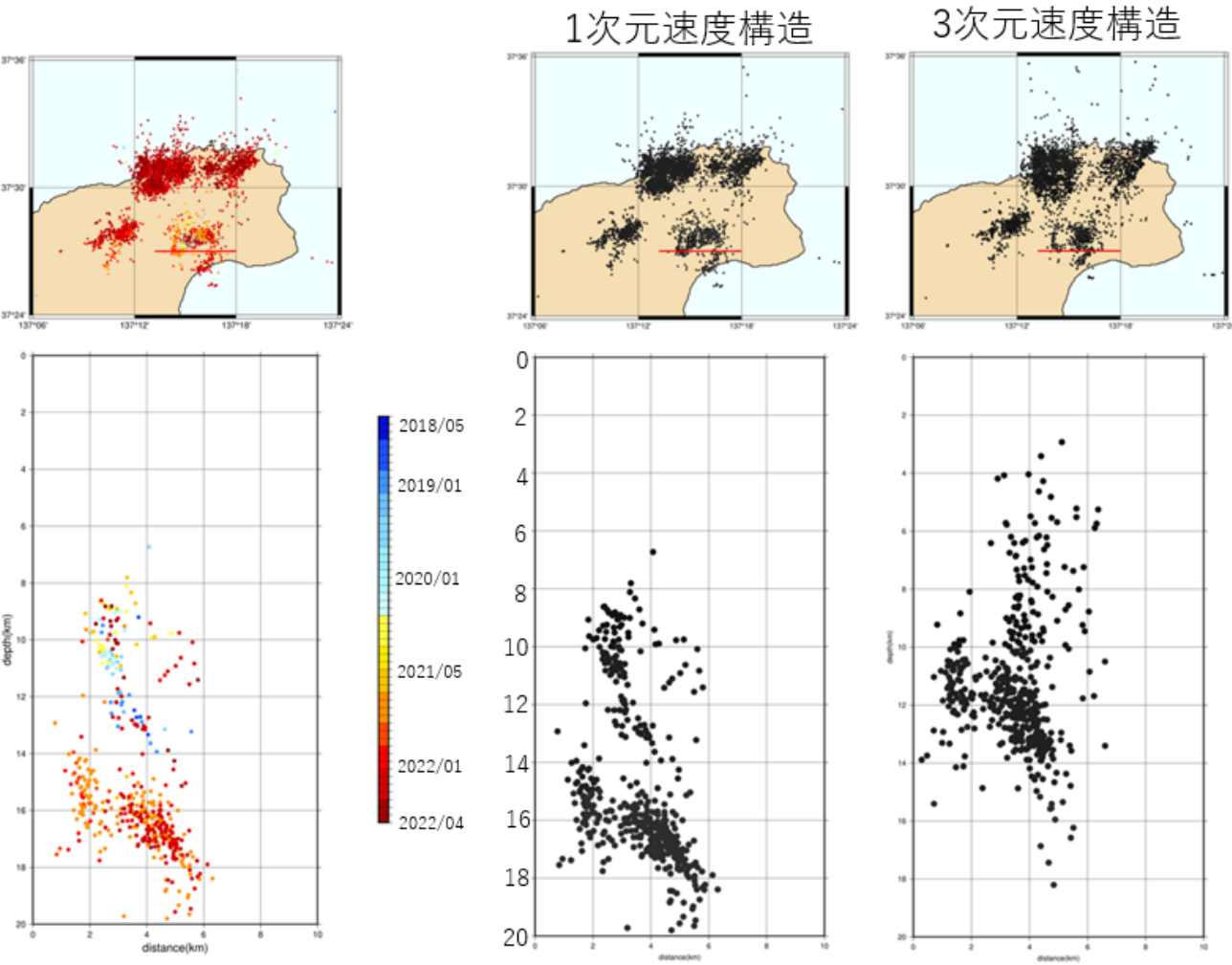
(3)結果

4つの地震群の名称を平松(2022)を参考として、東クラスター、北クラスター、南クラスター、西クラスターとする。まず、地震活動の推移を調べるために、時系列図を作成すると、2018、19年に起きた地震は、ほとんど南クラスターで発生している。2021年2月頃から西クラスターで地震が起こり始め、2021年5月には北クラスター、6月には東クラスターで地震が発生し始めた。それ以降では、北、東の2つのクラスターで活発に地震が発生している。次に、クラスターごとに震源断面図を作成し、時間の推移と深さの関係を調べた。南クラスターに注目すると、2018、19年では深さ9~14km、2020年は8~11km、2021年1~7月は13~19km、それ以降は9~20kmと、時間と共に地震の発生場所が変わっている。他のクラスターでは、このような顕著な差異は見られないが、時期により活動場所が違う。

上記の深さは、一元化速度構造モデルを用い、HypoDDで震源計算したデータである。速度構造モデルを3次元速度構造モデルを用いて計算すると、全体的に深さが2~4km浅くなる。具体的には、東、西クラスターで2km、北クラスターで2~3km、南クラスターで4km浅くなる。水平位置も速度構造によって違いは見られるものの、顕著なものではない。

謝辞

本調査では、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、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、国立研究開発法人海洋研究開発機構及び気象庁の地震データと、それを気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した一元化震源を使用しました。



Temporal change in focal mechanisms of double seismic zone' s events in the Pacific plate after the 2011 Tohoku EQ

*Shunsuke Kawabe¹, Toshinori Sato¹

1. Chiba Univ.

1. はじめに

日本付近で沈み込んでいる太平洋プレート内には、二重深発地震面が存在していることが知られている。佐藤・他 (JpGU2018) や陳・他 (JpGU2019) では、房総沖の太平洋プレート内の二重深発地震について、陸上観測と海底地震計観測のデータを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震前後での発震機構を調べた。東北地震後の約1年間で約4カ月ごとに分けて発震機構の変化を調べて時間変化をみたところ、上面では東北地震直後では圧縮 (down-dip compression) と引張 (down-dip extension) が拮抗し、その後引張が卓越していた。下面では東北地震直後は圧縮が卓越していたが、その後引張が優位になっていたことが報告された。本研究では、東北直下の二重深発地震の発震機構が、東北地震前後でどう時間変化したのかについて報告する。

2. データと解析方法

使用データはHi-netのイベントデータと、F-netのCMT解である。対象の地震は、東北地震で大きくすべった範囲の西側である北緯37.5°~39.5°、東経139°~142°、深さ60 km以上、マグニチュード1.0以上とした。また対象の期間を2010年3月~2013年3月と、東北地震前後合計3年とした。対象の地震を取るためにTSEIS (鶴岡、1998) を用いた。

対象の地震のうちマグニチュード3.5以上かつF-netにCMT解がある地震はそのまま使用した。マグニチュード3.5以下、もしくは3.5以上だがF-netにCMT解がない地震は、Hi-netから波形データをダウンロードして、微小地震検測支援ソフトWINシステム (ト部、東田、1992) を用いて解析を行った。WINの検測作業によって得られたP波の押し引きをもとにFPFIT (Reasenber and Oppenheimer, 1985) を使用して発震機構解を求めた。

3. 結果

現在解析中ではあるが、東北地震前1年間では、上面は圧縮の地震が引張の地震に比べ約2倍多くみられた。これに対して下面では、圧縮の地震よりも引張の地震が多くみられた。これらは沈み込むプレートのunbendingによって説明ができる。

東北地震後では、上面は地震直後の4か月では、圧縮と引張が拮抗していた。地震後4~8か月では引張がかなり卓越していた。地震後8~12ヶ月では、圧縮の数が増えているが、まだ引張が卓越していた。地震後1~2年では引張に比べ圧縮が約2倍と、東北地震前1年と類似した結果となった。東北地震によってスラブ全体に圧縮の応力が加わったと考えられるにも関わらず、引張の地震が増えたことは興味深い結果といえる。

下面では地震直後の4か月では圧縮が卓越していた。地震後4~8か月では引張が卓越していた。地震後8~12ヶ月では圧縮と引張が拮抗し、この傾向は、地震後1~2年でも続いていた。この結果は東北地震によって圧縮の応力場になったというところまでは説明ができるが、その後引張が卓越したあとに圧縮と引張の地震が拮抗していることは興味深い。また、これらの結果は房総沖での結果と類似しており、東北だけの地域的なものではない可能性がある。

謝辞

本研究では、解析を行うにあたって、Hi-net、F-netのデータを国立研究開発法人防災科学技術研究所よりダウンロードさせて頂きました。また、東京大学地震学研究所のWINシステムと地震解析プログラムTSEISを使用させて頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

Temporal variation in coda Q before and after the 2011 Tohoku earthquake around the Atotsugawa fault zone

*Maho Kawajiri¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University

はじめに

内陸地震を発生させる応力蓄積過程の解明のために新潟から神戸にかけての歪集中帯(新潟－神戸歪集中帯)(Sagiya et al., 2000) が注目されている。Iio et al. (2002) は、高歪速度の成因として、下部地殻の低粘性率領域の存在によって歪速度が集中するweak zone model を提案した。Hiramatsu et al.(2013)はNKTZ中央部のcodaQ分布を調査し、低周波数帯のcodaQが下部地殻の変形速度の指標となり、codaQと地震の間に良い空間的相関がみられることから高歪速度帯の原因が地殻の脆性-延性遷移帯以下の高変形速度に起因する可能性を示唆している。列島規模の変形場の変化により歪集中帯北東部のcoda Qが変化するか否かを明らかにすることは、この地域の地殻内の高変形速度領域の存在の検証に繋がり、歪集中帯の成因を考える上で重要であると考えられる。Dojo and Hiramatsu (2019)はNKTZ北東部におけるcoda Q の時空間変化を調査し、2011年東北地方太平洋沖地震前後でcoda Qの空間分布や他パラメータとの相関に有意な時間的変動は見られないと報告した。これは、高い速度での持続的な延性変形の存在が、NKTZの内陸部の高歪速度帯を発生させる主な原因である可能性が高いことを示唆している。本研究では、NKTZ北東部と歪集中帯の成因が異なる可能性が指摘されているNKTZ中央部において2011年東北地方太平洋沖地震前後におけるcoda Qの時間変化を調査し、NKTZ中央部における歪集中帯の成因について議論を行う。

データと手法

2008年3月から2011年12月（Period 1）と2012年1月から2015年12月（Period 2）、2016年1月から2019年12月（Period 3）の3つの期間のcoda Qの時間変化を調査した。解析には防災科学技術研究所のHi-net、気象庁、国立大学の観測点を使用する。震源が30 kmより浅く、M1.8よりも大きな地震を解析対象とする。震央から30 km以内の観測点の地震波形データに一次後方散乱モデル (Aki and Chouet, 1975) を適用し coda Qを求め、各観測点で平均をとり、coda Qの時間変化を求める。この際、局所的なイベントの影響を除去するため、デクラスター処理を行った。M3以上の地震をそれぞれ本震であると仮定し、本震からある期間、ある距離内で発生している地震を除去する。このとき、除去するイベントは本震発生から5日以内、距離については一定応力降下量（3 MPa）の円形断層モデル（Brune, 1970）から推定される震源半径の2倍とした。この結果、Period 1-2間、Period 2-3間共にcoda Qの空間分布のパターンに系統的な変化は見られなかった。また、跡津川断層付近の15の観測点でそれぞれの期間におけるcoda Qの平均と標準偏差を求め、隣り合う2つの期間の変化量と比較した。

結果

この結果、coda Qの減少、増加といった変化パターンが混在しており、調査領域全体で系統的な変化は見られなかった。標準偏差の値を上回るような変動を示す観測点は少数であり、Period 1-2間と2-3間で変化量などに明瞭な相違は見られなかった。さらに、coda Qの時間変化の有意性を確認するためにwelchのt検定とbootstrap法による並べ替え検定を行った。本研究では変化の有意性を判定する閾値を0.01とした。この結果、Period 1-2間では有意な変化を示す観測点が1-2 Hzで4点、2-4 Hzで5点、4-8 Hzで5点、8-16 Hzで3点、16-32Hzで2点確認された。また、Period 2-3間では1-2 Hzで2点、2-4 Hzで4点、4-8 Hzで3点、8-16 Hzで3点、16-32 Hzで3点確認された。

考察とまとめ

今回見られたcoda Q値の変動は両解析期間における震源分布の相違のなど、局所的な要因によるものであると考えられる。また、東北地方太平洋沖地震を伴うPeriod 1-2間と大規模な地震イベントを伴わないPeriod

2-3間のcoda Qの変動に顕著な相違は見られなかった。これらの結果から、跡津川断層帯周辺のcoda Qの空間分布は東北地方太平洋沖地震によって有意な時間変化はしていないと考えられる。これはDojo and Hiramatsu (2019)で示されたNKTZ北東部における結果と整合的である。2011年東北地方太平洋沖地震前後におけるcoda Q値が跡津川断層帯周辺全域で系統的な有意な時間変化を示さなかったことは列島規模の変形場の変化により歪集中帯中央部のcoda Qが変化していないことを示し、Hiramatsu et al. (2013) で指摘された跡津川断層帯周辺の地殻の脆性-延性遷移帯以深での高変形速度が持続的に存在し、高歪速度帯を形成していることが考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり防災科学技術研究所、気象庁、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所地震予知研究センターより地震波形データを提供していただきました。震源データとして気象庁の一元化カタログを利用させていただきました。記して感謝いたします。

Steep gradient zone of seismic velocity structure at the hypocenter of offshore Iwate events on March 18, 2022

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato², Shin Koshiya³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Faculty of Science and Engineering, Iwate University

1. はじめに

2022年3月18日23時25分頃にM JMA5.6の地震が発生し、最大震度5強を観測した。防災科学技術研究所（防災科研）では陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）を運用し、高感度地震観測網（Hi-net）や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）等も含めて震源決定を行っている。本研究では、余震を含めた周辺の地震活動について三次元地震波速度構造を用いて再決定するとともに、地震波速度構造や重力異常、地磁気異常、反射法地震探査データなどと比較した。

2. データ・手法

防災科研MOWLASのうちのHi-netやS-netに加えて、気象庁、国立大学等のデータも含めて解析した三次元地震波速度構造や観測点補正值（Matsubara et al., 2019）を用いて2016年4月以降の約5年間の地震の震源を再決定した。

3. 結果と議論

Hi-netによるP波初動解および防災科研広帯域地震観測網（F-net）によるモーメントテンソル（MT）解はともに東北東-西南西圧縮、北北西-南南東伸長の横ずれ断層型を示す。2022年3月18日～4月3日の地震活動は西北西-東南東の節面に沿って発生しており、鉛直断面ではほぼ垂直に分布している。P波速度は北側の高速度域と南側の低速度域の境界で発生していることが分かる。

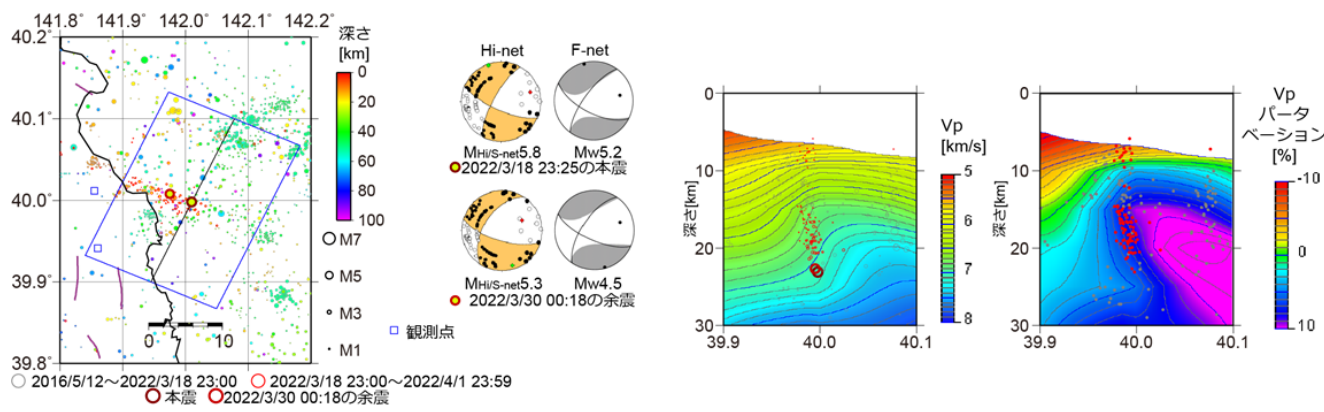
地磁気異常分布では、南西側の高磁気異常と北東側の低磁気異常の急勾配域と一致する。また、重力のブーゲ異常では、北東側の大重力と南西側の小重力の急変帯と一致する。この断層の東部延長では、石油資源探査から明らかにされている南側低下の地質断層が存在する（大澤・他, 2002）。これらのことから、2022年3月18日に発生した岩手県沖の地震(M JMA5.6)は、地質時代に形成された断層が再活動したものと判断される。

Matsubara et al. (2019) Seismic velocity structure in and around the Japanese Island src derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, Seismic Waves - Probing Earth System, IntechOpen, 1-19, <https://doi.org/10.5772/intechopen.86936>

大澤正博・中西敏・棚橋学・小田浩, 三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル, 石油技術協会誌, 67, 38-51

産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2005, 日本空中磁気データベース, 数値地質図 P-6.

産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013, 重力データベース, 数値地質図 P-2.



Detection of low-frequency earthquakes at Mount Fuji and statistical analysis

*Kazuyoshi Z. Nanjo^{1,2,3}, Yohei Yukutake⁴, Takao Kumazawa³

1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Univ. of Tokyo

富士山において発生する低周波地震を、マッチドフィルタ法(Peng & Zhao, 2009)を用いて検知し、その地震活動を統計解析した結果を報告する。

使用する検知システムは、箱根山の低周波地震の検知に用いられているシステムを(行竹, 2017; Yukutake et al., 2019)、富士山用に改良したものである。事前に、気象庁が維持管理する地震カタログから雛形(テンプレート)となる低周波地震を選択し、選択したテンプレート地震のテンプレート波形を準備する。本システムは、このテンプレート波形と富士山周辺の16観測点で2003-2019年に観測された連続波形記録との相関処理を行う。テンプレート地震と相関のあるシグナルが含まれている場合、テンプレート地震にマッチする地震が起きたと判断する。

本システムを用いて検知された地震の数は15,000を超える。相関係数は0.1から1まで取り得て、同係数の頻度分布は約0.2で頻度が最大になる傾向を示す。同係数0.2以上の低周波地震に、通常の地震の規模別頻度分布で成り立つグーテンベルグ・リヒター則(Gutenberg & Richter, 1944)が当てはまることを確認した。また、通常の地震の時間変化を定量的に扱うETAS モデル(e.g., Ogata, 1985, 1988; Kumazawa & Ogata, 2013)も低周波地震に応用できることを確認した。通常の地震、低周波地震に関わらず、これらの法則やモデルが適用可能である。

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震(マグニチュードM9.0)が三陸沖の太平洋を震源として発生し、その4日後に静岡県東部地震(M6.4)が富士山頂の南4km、深さ約15kmを震源として発生した。ETASモデルから、両地震の影響は気象庁カタログの低周波地震には見られなかったが、本研究で検知した低周波地震には静岡県東部地震のタイミングで活発化したことが見られた。富士山の低周波地震の発生域周辺では静岡県東部地震により応力変化があったと指摘されており(Fujita et al., 2013)、低周波地震の活発化のきっかけになった可能性がある。現在統計解析による追試を進めており、本発表では最新の結果を紹介する予定である。

Observation of shallow slow earthquake activity from December 2020 southeast off the Kii Peninsula using dense ocean bottom seismometer array.

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹

1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.

紀伊半島南東沖の南海トラフ近傍のプレート境界浅部において、2020年12月から2021年1月まで浅部スロー地震が発生した。F-netやDONETなどの定常観測網により微動や超低周波地震が観測され、震源域の移動現象などの活動様式に関する研究が進んでいる（例えば、Ogiso & Tamaribuchi 2022; Takemura et al., 2022）。本研究では、この浅部スロー地震活動の特徴を詳細に把握することを目的とし、稠密海底地震計アレイで観測されたスロー地震波形の特徴を調査した。研究に用いた海底地震計アレイは、15台の固有周波数1Hzの3成分地震計から構成され、2019年9月20日から2021年6月1日の期間中、DONET1とDONET2の間に設置された。その中には、5台の地震計を観測点間隔約1kmで配置した十字型アレイが2セット含まれている。2020年12月1日から2021年1月31日までの2ヶ月間について上下動成分の観測データを、超低周波地震のシグナルが見られる0.05-0.10 Hz及び0.10-0.15 Hz(Tonegawa et al., 2020)の2つの低周波数帯と、微動のシグナルが顕著に見られる2-8 Hzの高周波数帯でプロットし、比較した。まずは、エピソードのうち活動域の拡大時期に相当する2020年12月12日について着目し、浅部スロー地震波形を周波数帯毎に比較した。その結果、波形の高周波数帯に約120個の微動シグナルが確認された。また、そのうち2割ほど0.10-0.15 Hz帯のシグナルが同期しており、さらにその半部分が0.05-0.10 Hz帯のシグナルも同期していることを確認した。これらの時間的同期は、微動と超低周波地震が2020年12月12日のエピソード中に同期して発生したことを示唆し、海底地震計アレイにより広い帯域でスロー地震現象を確認できた。

Slow Earthquakes in the Japan Trench

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Satoshi IDE², Takuya NISHIMURA¹

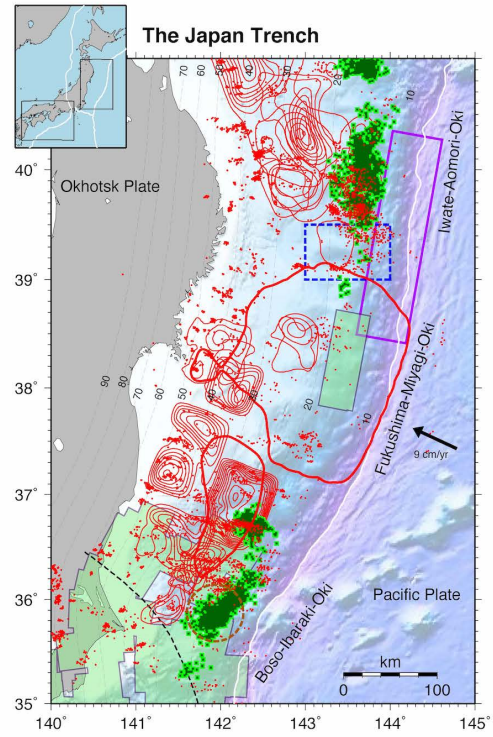
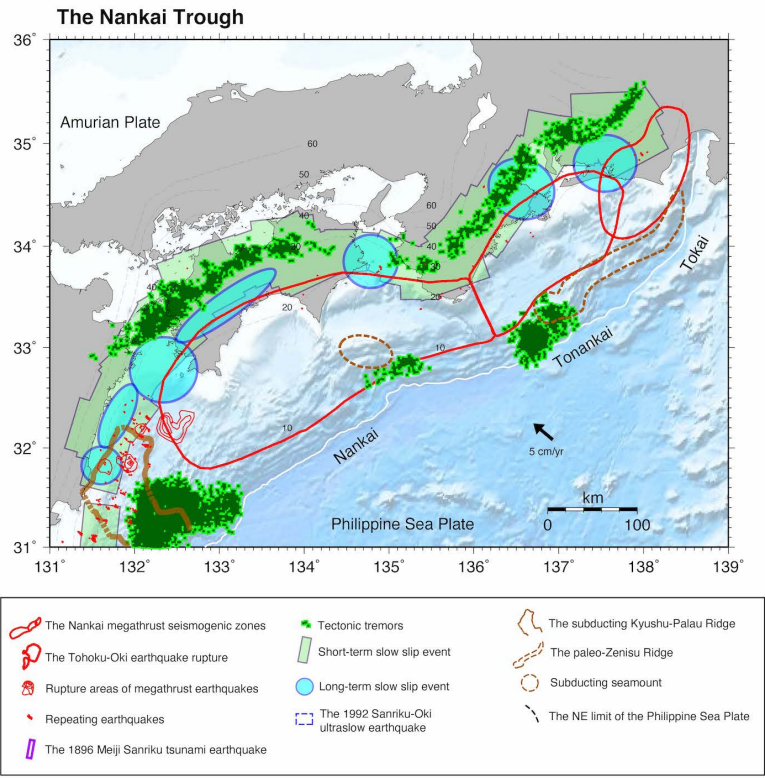
1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. School of Science, Univ. of Tokyo

Slow earthquakes are episodic slow fault slips at plate boundaries. They are fundamental components of interplate deformation processes along with fast, regular earthquakes. Recent seismological and geodetic observations have begun to reveal detailed slow earthquake activity along the Japan Trench, the subduction zone where the 11 March 2011 moment magnitude (M_w) 9.0 Tohoku-Oki earthquake occurred.

Here we review observational studies on slow earthquakes along the Japan Trench. Compiling the observations of slow earthquakes (e.g., tectonic tremors, very-low-frequency earthquakes, and slow slip events) and related fault slip phenomena (e.g., small repeating earthquakes, earthquake swarms, and foreshocks of large interplate earthquakes), we present the integrated slow earthquake distribution along the Japan Trench. Slow and megathrust earthquakes are spatially complementary in distribution, and slow earthquakes sometimes trigger fast earthquakes in their vicinities. An approximately 200 km-long along-strike gap of seismic slow earthquakes (i.e., tectonic tremors and very-low-frequency earthquakes) corresponds with the huge interplate locked zone of the central Japan Trench. The 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake ruptured this locked zone, but the rupture terminated without deeply propagating into the slow-earthquake-genic regions in the northern and southern Japan Trench. Slow earthquakes are involved in both the rupture initiation and termination processes of megathrust earthquakes in the Japan Trench.

We then compare the integrated slow earthquake distribution with the crustal structure of the Japan Trench (i.e., interplate sedimentary units, subducting seamounts, petit-spot volcanoes, sediment thickness at the trench, horst-and-graben structures, residual gravity, seismic velocity structure, and plate boundary reflection intensity) and describe the geological environment of the slow-earthquake-genic regions (i.e., water sources, pressure-temperature conditions, and metamorphism). As a result, we find some correspondences between the slow earthquake distribution and crustal structure (e.g., fluid-rich interplate sedimentary units, subducting seamounts entraining fluid-rich sediments, and strong plate boundary reflection suggesting the existence of a thin layer of aqueous fluids) and between the slow earthquake distribution and geological environment (e.g., the site where opal and smectite dehydrate).

The integrated slow earthquake distribution enables us to comprehensively discuss the roles of slow earthquakes in the occurrence process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. The correspondences of the slow earthquake distribution with the crustal structure and geological environment provide insights into the slow-earthquake-genesis in the Japan Trench and imply that highly overpressured fluids are key to understanding the complex slow earthquake distribution. Furthermore, we propose that detailed monitoring of slow earthquake activity can improve forecasts of interplate seismicity along the Japan Trench.



Hypocenter distribution using S-net data during 2016 April –2022 March

*Azusa NISHIZAWA¹, Masashi Mochizuki¹, Kenji Uehira¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

日本海溝および千島海溝域にS-net（Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench：日本海溝海底地震津波観測網）が設置され、沿岸から海溝軸外側（東側）にかけての海域における地動連続記録が安定的に取得できるようになった。これにより海域の地震活動はどの程度把握できるようになったかを調べるために、2016年4月1日から2022年3月31日までの6年間に発生したいくつかの顕著な地震活動域における震源分布を求めた。震源決定のコードはNonLinLoc（Lomax et al., 2000, 2014）を使用し、S-netの各観測点に対してマルチチャネル反射法地震断面図から求めた堆積層厚に基づく補正（西澤ほか, 2022）を行った。速度構造モデルは各領域において実施された構造探査結果を参照し、沈み込む太平洋プレート上面の深さはIwasaki et al. (2015)及びLindquist et al. (2004)によるプレート境界の位置から設定した。また、各領域において震源決定に使用した全観測点に対して震源計算時の走時残差（O-C）から求めた観測点補正値を適用して最終的な震源分布を得た。

宮城県沖では2021年3月20日18時09分に M_{JMA} 6.9（最大震度5強, F-net: M_w 7.0, 深さ62 km）の地震が、また2021年5月1日には M_{JMA} 6.8（最大震度5強, F-net: M_w 6.7, 深さ56 km）の地震が発生した。これら地震の発震機構はいずれも西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震であった。1978年宮城県沖地震のすべり域を含むこれらの地震の活動域において、S-net及びHi-netの手動読取值データを使用して求めたそれぞれの地震の余震は最近6年間の地震活動分布から推定されるプレート境界にほぼ沿って分布しているが、本震の位置はプレート境界よりも5 km程度深く、破壊開始点が断層面の深部付近にあることを示唆する。また、 M_{JMA} 6.8の震源の深部には2011年4月7日（ M_w 7.1）の余震と考えられる活発な地震活動が見られる。

福島県沖において2022年3月16日23時34分に M_{JMA} 6.1の地震が発生し、2分後の23時36分には M_{JMA} 7.4（F-net M_w 7.4）の地震が発生した。 M_{JMA} 7.4の地震の発震機構は西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、震源の位置は太平洋プレート内部であり、2021年2月13日に発生した M_{JMA} 7.3の余震活動域内と推定された。S-net及びHi-netの手動読取值データを使用して求めた2022年3月16日の地震の余震分布は複数の断層面の存在を示唆し、その南端が2021年2月13日 M_{JMA} 7.3の地震活動域の北端部に重なり、2021年2月13日の地震発生後に活発化した余震活動の北端部西側の活動がさらに北へ延びたことを示した。2021年及び2022年のいずれの余震活動域も2016年4月以降2021年2月13日の地震発生前までの期間は地震活動が低い領域であり、2021年2月13日の地震発生以降はその余震活動は南方に延びたが北方には延びず、北方で2022年の地震が発生したことがわかった。

1994年12月28日三陸はるか沖地震（ M_{JMA} 7.6）及び2011年3月11日15時08分に発生した岩手県沖地震（ M_{JMA} 7.4）の余震域からアウターライズまでの領域のやや活発な地震活動についても、S-netの手動読取值データを用いて（海溝軸東側の地震についてはS6のデータ取得開始後の2017年4月13日以降について）震源決定を実施した。海溝軸東側には観測点が少ないためアウターライズ領域の震源の深さを正確に決めることは難しいが、2011年岩手県沖地震の余震域にあたる北緯39.5度近傍では地震活動がプレート境界に集中しており、海溝軸からプレート境界の深度10kmの間ではプレート境界に沿う地震活動が見られないことを示した。一方、1994年三陸はるか沖地震の余震域である北緯40.5度付近では海溝軸近傍浅部にも地震活動が検出されたが、震源の深さの決定精度について今後も十分な検証が必要である。

Dependence of earthquakes happen in the northern Osaka on depth

*Ryota Ono¹, Yoshihisa Iio²

1. Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2018年に発生した大阪府北部地震(M6.1)では、およそ深さ10kmから15kmの範囲内に余震分布が集中している。例えば、2004年の新潟県中越地震(M6.8)では、深さ15km程度を中心に、地表付近まで浅くなるにつれて徐々に分布域が広がっていくような、お椀状の余震分布が見られている(Shibutani et al., 2005)。また、2005年の福岡県西方沖地震(M7.0)では、同様に余震が深さ15km程度を中心に地表付近まで浅くなるにつれて分布するような方向が見られている(Uehira et al., 2006)。大阪府北部地震の余震の分布がこれらのような内陸地震の例とは異なっている理由について調べる。

一般に、断層の強度と深さとの関係は地域によって異なる。本研究では、断層の強度とG-R則から導かれるb値との間に関係があると考え、JMAデータによる定常的な大阪府北部地域での地震活動及び大阪府北部地震前後の活動における深さ方向のb値の変化に着目した。b値を求めるにあたって、コンプリートネスマグニチュード(Mc)の違いによる影響を考え、複数の手法(Wiemer and Wyss, 2000及びOgata and Katsura, 1993)による変化、対象とするデータ内における時間経過による変化を踏まえた。

こうして得られたb値から、当該地域における深さ方向の変化について議論し、断層の強度に関する考察を行う。

Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay

*Yannis PANAYOTOPOULOS¹, Shintaro Abe¹, Hisatsoshi Baba², Nagisa Nakao², Takahito Nishimiya³

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai University, 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Suruga Bay is evaluated as the location of the next major event on the Tokai segment of the Nankai-trough, which hasn't ruptured since the 1854 M8.4 Ansei-Tokai Earthquake. Recently, moderate size earthquakes have occurred in the Suruga Trough axial region (M4.9 in 1994, M6.5 in 2009 and M6.2 in 2011), that resulted in a prominent excitation of seismicity in the area. Paradoxically, the routine seismic observation network on both sides of the bay is particularly sparse, which results to great uncertainty regarding the earthquake location accuracy inside the Bay. In order to address the location accuracy problem, a total of 2 sets of 6 OBSs have been deployed in rotation every three months inside the Suruga Bay from spring 2017 and an additional one from spring 2019 to a total of 7 stations. We combined our OBS stations with the routine seismic observation network stations surrounding Suruga Bay and accurately relocated the observed seismic activity inside the Philippine Sea (PHS) plate using a pseudo-3D determination scheme and station corrections retrieved from the RMS travel time residuals. Our combined processing of inland and OBS stations revealed a 25° northwest dipping 2~5 km wide zone on which the regional seismic activity occurs. Overall, the seismic activity is observed to be 5~10 km shallower than that reported by the routine networks data only, bringing the seismogenic layer in the area at shallower depths than originally estimated. The striking feature of the analyzed activity is the presence of a prominent strike slip component in the genesis mechanism of the events with their P-axis almost exclusively oriented towards the north. Major events on both sides of the bay in the past 100 years also display a similar strike slip mechanism which is evidence that the co-seismic stress field is the same as the intra-seismic period.

Comprehensive extraction of tremor migrations in Nankai subduction zone, southwest Japan, and their characteristics

*Kodai SAGAE¹, Takahiko Uchide¹, Takanori Matsuzawa²

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

世界各地のプレート沈み込み帯で発生しているテクトニック微動の重要な特徴として、微動の震源位置が時間とともに移動する微動マイグレーションがある。微動マイグレーションはその現象を見る時間スケールによってさまざまな振る舞いを示し、数時間から数日のスケールではプレート走向方向に約10 km/day で移動するメインフロント (e.g., Obara, 2010), 数時間スケールでメインフロントとは反対方向に約 100 km/day で移動する rapid tremor reversal (RTR) (e.g., Houston et al., 2011) などがある。微動マイグレーションはプレート走向方向だけでなく傾斜方向にも移動するため上記のような特徴すべてを目視で判別するのは困難である。本研究では発表者が開発した時空間ハフ変換 (Sagae et al., 2021, JpGU) を用いて西南日本全域の微動マイグレーションを客観的に抽出し、その時空間的な特徴を調べることを目的とする。

時空間ハフ変換とは時空間 (経度, 緯度, 時間) における直線要素を抽出する手法であり、微動マイグレーションの位置情報・継続時間・進行方向・移動速度などを客観的に抽出することができる。具体的には、原点から直線までの距離 ρ , 天頂角 θ , 方位角 ϕ , 回転角 ψ の4つのパラメータ (ρ, θ, ϕ, ψ) を用いて時空間での直線を表現する。特に $\tan \theta$ は移動速度を、 ϕ は進行方向を示す。また、幅を持った直線 (円柱) を考えることで震源の不確かさ情報を考慮することができ、最も多くのイベントがその円柱内部に含まれるようなものを微動マイグレーションとして抽出する。さらに、時空間ハフ変換は複数の直線が入り組んでいる場合でも、それらパラメータ (ρ, θ, ϕ, ψ) をもとに直線を分離することができる利点がある。

解析するデータには、防災科学技術研究所がエンベロープ相関法 (Maeda and Obara, 2009) を用いて1分ごとに決定している微動カタログ (以降, NIEDカタログ) を使用した。解析期間は2010年1月1日から2019年12月31日までの10年間であり、解析地域は四国・紀伊半島・東海の3つの地域である。時空間ハフ変換をNIEDカタログに適用するために、 ϕ と ψ は10°の刻み、 θ は $\tan \theta$ が0.125-60 km/hr の範囲で1 km/hr の刻みで、 ρ は0-150 km まで0.25 km 刻みでパラメータを用意した。また、NIEDカタログの平均的な震源の不確かさ5 km を円柱の半径となるように設定した。解析手順はまず、1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24 時間の長さをもつ時間窓を用意し、それぞれの時間窓を解析期間内で重複させずに移動させる。そして、時間窓の中に10個以上のイベントが含まれるときに時空間ハフ変換を適用し、円柱内部に8個以上のイベントが含まれるものを微動マイグレーションとして抽出する。抽出された微動マイグレーションを構成するイベントを時間窓から取り除いた後、再度、微動マイグレーションの抽出を行う。この操作を時間窓の中のイベントが10個未満または円柱内部に含まれるイベントが8個未満になるまで繰り返す。最後に複数の時間窓で重複して抽出されたものを取り除き、微動マイグレーションのカタログを作成する。

解析の結果、10年間の微動カタログデータの中から四国では6,712個、紀伊半島では4,016個、そして東海では1,396個の微動マイグレーションを抽出することができた。抽出したすべての微動マイグレーションの進行方向・継続時間・移動速度に関する場所ごとの特徴を調べた。継続時間の中央値が6時間と相対的に長い場所では移動速度の中央値が1 km/hr (24 km/day) と相対的に低速であり、それはメインフロントの特徴と一致する。一方、移動速度が10 km/hr 以上と高速な微動マイグレーションはそれとは逆方向に進行する傾向が見られる。上記の結果はメインフロントやRTRが繰り返し起きている場所が存在していることを示唆している。本発表では微動マイグレーションの特徴と微動エネルギーの空間分布などを比較し、微動マイグレーションの振る舞いとプレート境界面上の不均質の関係について議論する。

Construction of the automatic hypocenter relocation system using the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko Shiomi¹, Makoto Matsubara¹, Shoji Sekiguchi¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

西南日本下の地下構造は、南海トラフから沈む込むフィリピン海プレートの存在などにより、三次元的な変化に富んでいる。これにより、この地域の詳細な震源情報を得るためには、適切な三次元地震波速度構造モデル（3D構造モデル）を用いて波線経路や走時を評価する必要がある。防災科研では、文部科学省委託研究「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」（防災南海PJ）において、3D構造モデルを用いた自動震源決定システムの構築を担っている。本システムは、南海トラフ及びその周辺域で発生する地震の活動状況を逐次的かつ適確に把握し、プレート固着状態等の現状評価に資する情報を提供することを目的とする。昨年度末に本システムのプロトタイプを構築し、試験稼働を開始したので、今回、本システムの概要ならびにシステムの性能評価の現状について報告する。

本システムは、防災科研が別途運用する自動震源決定システム（Hi-netシステム）により得られた震源情報を受信し、その情報が解析対象範囲やマグニチュード等の計算条件に合致した場合に起動する。震源計算方法として、既存の①Pseudo-bending法（Koketsu & Sekine, 1998, doi: 10.1046/j.1365-246x.1998.00427.x）により走時を逐次計算する方法のほか、予め仮想震源と観測点間の走時表を整備し、それを参照する方法として、②関口の方法（2010, doi: 10.24732/nied.0000120）と③NonLinLoc法（Lomax et al., 2000）を採用した。計算方法や計算に用いる3D構造モデル、計算パラメタ等に応じて独立したサブシステムを構成することとし、各サブシステムには1台の仮想マシン（VM）を充当した。必要な入力情報及びそのフォーマットは、計算方法ごとに異なる。本システムでは、まず、Hi-netシステムから全てのサブシステムでの処理に必要な情報を一括抽出した「共通ファイル」を作成し、この共通ファイルを各計算方法で用いる入力ファイルに変換した上で、各VMに転送することで震源決定が自動的に行われる。Hi-netシステムで妥当な震源情報が得られなかった地震やシステム停止中（含、稼働前）の地震等の震源再計算を行う場合、初期震源や検測値情報を「共通ファイル」形式で用意し、簡単なコマンドを実行することで、各サブシステム上にセットされた震源再計算を随時実行することも出来る。計算結果の出力も計算方法ごとに異なるが、出力ファイルについても、一旦、共通の保存フォーマットに変換した後、共通のデータベース（DB）に登録することとした。共通フォーマットを採用することで、DBとのインターフェイスを担うプログラムをひとつに限定することが出来る。DB上では、各地震に対して独立したインデックスを付与し、計算方法や計算条件の違いはサブインデックスで区分する形式とした。

2022年度時点では、3D構造モデルとして海陸の観測データに基づくトモグラフィ解析結果（Matsubara et al., 2019, doi: 10.5772/intechopen.86936）を用いているが、防災南海PJでは様々な情報を統合した高精度な3D構造モデルの構築も進めている（Nakanishi et al., 2022, JpGU及び本大会）。サブシステム①は構造モデルの更新に対応しやすいという特徴がある。一方、サブシステム②と③は、都度、走時表を再構築する必要が生じるが、予め走時表を保持することで計算時間の大幅短縮が見込まれる。最短経路法を用いた波線計算方法（Sekiguchi, 2021, doi: 10.1093/gji/ggab001）等、大きな計算コストを必要とするものの複雑な構造モデルに対して安定して波線経路を評価可能な方法を実装する際には、予め走時表を保持することは有効な実行手段と言える。

現在、サブシステム①の日向灘海域における結果を用いて、システムの動作確認並びに性能評価を進めている。2022年1月の地震活動については、3D構造モデルを用いることで、気象庁一元化震源よりも全体的に数km浅くなり、活動域上端がプレート境界に近接した。これは、当該地域の地下構造から予察される結果と整合的であった。

謝辞：本研究は，文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している．震源計算には，気象庁・大学・産業技術総合研究所等の観測データを使用している．また，解析結果の比較検討に気象庁一元化震源カタログを使用した．

Determination of the focal mechanism solution of swarm earthquakes in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University

1. はじめに

能登半島北東部に位置する珠洲市周辺では地震が2018年6月頃から増え始め、2020年12月以降は地震活動が活発化するとともに非定常地殻変動も観測されている。この群発地震活動の震源域は4つのクラスターを形成しており、地震活動は南部から始まり、その後、西部、北部、東部と活動域が広がり、2022年6月19日には最大規模となるマグニチュード5.4の地震が東部のクラスターで発生している。非定常地殻変動や震源移動、抵抗構造の解析結果からこの群発地震活動に流体が関与している可能性が指摘されている（e.g. 地震調査委員会, 2022）。断層面への流体移動が地震活動を励起すると、広域応力場と整合的ではない地震メカニズム解が観測されることがある。本研究では、能登半島北東部で発生した地震の震源メカニズム解について報告する。

2. データおよび手法

気象庁一元化震源データにおいて、2020年12月以降に珠洲市周辺で発生したマグニチュード3以上の地震を解析対象とした。ただし、2020年12月から2021年3月の間はこの条件を満たす地震が少ないため、マグニチュード2.5-3の地震も解析対象とした。WINシステム（ト部・束田, 1992）を使用して、P波とS波の到着時、P波の初動極性と最大振幅を再検出し、震源位置と震源メカニズム解を決定した。震源決定にはhypomhプログラム（Hirata and Matsu'ura, 1987）を使用し、速度構造は竹内（1978）のモデルを使用した。P波の初動極性をを用いた震源メカニズムの決定にはMaeda（1992）のプログラムを使用し、スコアが0.9以上のものを採用した。

3. 結果と考察

能登半島北東部で発生した地震の多くは、北西-南東方向または西北西-東南東方向の主圧力軸を持つ逆断層型の震源メカニズムであり、この地域の広域応力場と調和的である。しかし、横ずれ型の震源メカニズムを持つ地震も少なからず発生している。南部のクラスターでは明瞭な逆断層型の震源メカニズムは見られなかった。横ずれ型の震源メカニズムを持つ地震は、能登半島北東部沿岸に震源が位置し、北北西-南南東の主圧力軸であった。また逆断層型以外の震源メカニズム解を持つ地震は、地震発生数が多い2022年3月～6月の間に多く発生する傾向が見られる。この時期の地震活動には断層での流体移動の影響が大きい可能性が指摘されており（Nishimura et al., 2022）、逆断層型以外の震源メカニズム解を持つ地震の発生も流体移動と関係することが考えられる。

謝辞

本研究では、気象庁の一元化震源データと地震波形データ、防災科学技術研究所Hi-netの地震波形データを使用しました。記して感謝いたします。

Detectability of very low frequency earthquakes in Nankai using F-net and DONET

*Shunsuke TAKEMURA¹, Satoru BABA², Suguru YABE³, Yusuke YAMASHITA⁴, Katsuhiko SHIOMI⁵, Takanori MATSUZAWA⁵

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

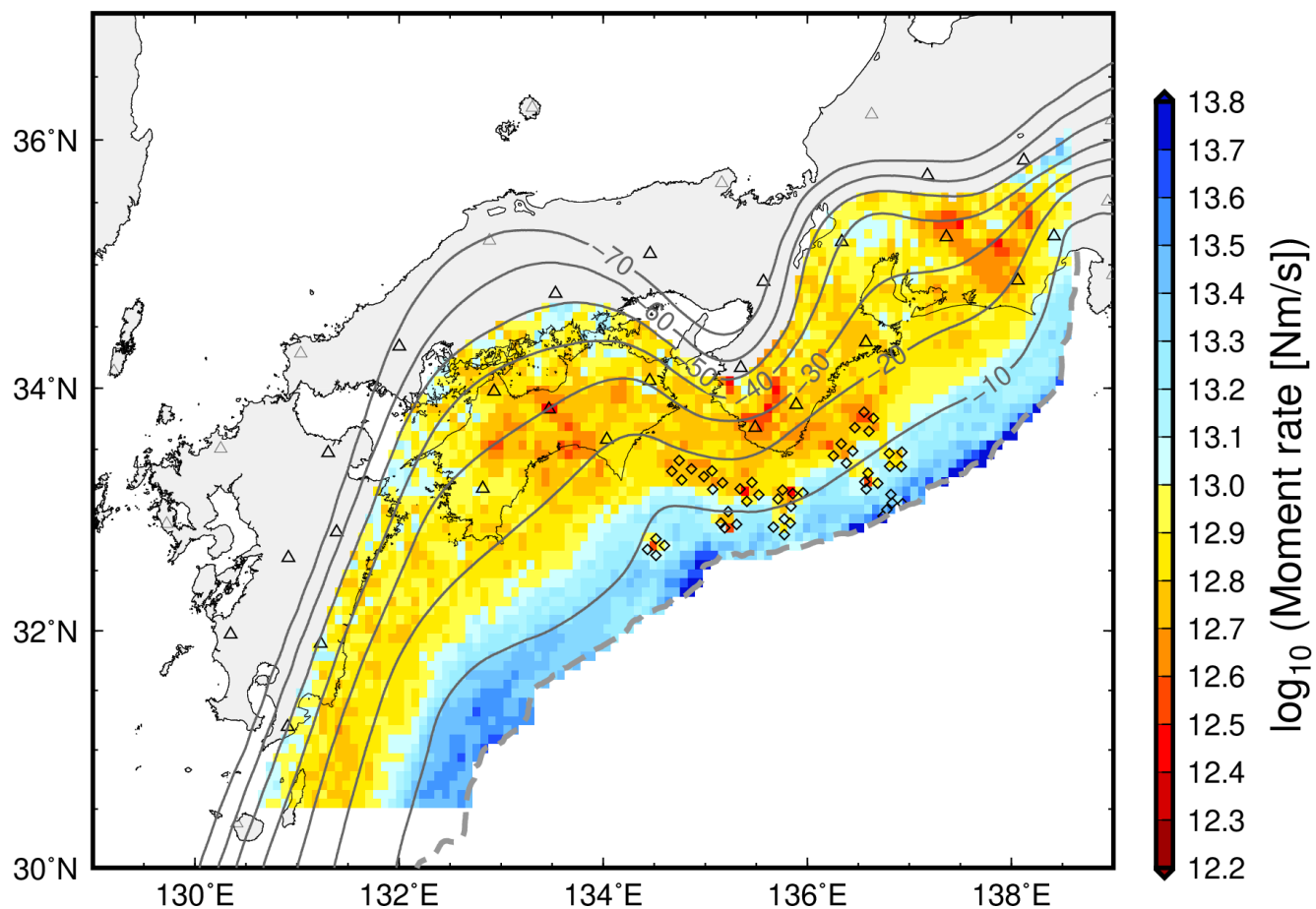
南海トラフや日本海溝の巨大地震発生域周辺の地震活動を適切にモニタリングおよび評価する際、特にスロー地震などの微弱な信号の検知下限を知ることは有用である。地殻変動については、水藤（2016）やAgata et al. (2019)などにより検討されている。本研究では、スロー地震のうち0.02-0.05 Hz帯で顕著に確認される超低周波地震(VLFE)の検知下限について、OpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いた3次元地震波伝播シミュレーションによる理論波形により検討した。

理論波形合成のための地下構造モデルは全国1次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）を基本とし、固体領域の最小S波速度を1.5 km/sに変更して用いた。プレート境界に0.05°毎に仮定した仮想震源について、Baba et al. (2020)と同様にプレート形状と収束方向を考慮した逆断層型のメカニズムの理論波形を用意した。理論波形の最大振幅が基準値（ノイズレベルの1.5倍）を超える観測点が3点以上ある場合、検知可能とみなした。VLFEのモーメントレート関数は多様である（例えば、Ide et al., 2008; Takemura et al., 2022ab）。そこで、合成した理論波形にBrownian walk model（Ide, 2008; Ide & Maury, 2018; 以下、Brownian model）、Boxcar関数、Brune model（Brune, 1970）を畳み込み、最大振幅の変化を確認した。Brownian modelによるモーメントレート関数は、しきい値により切り出すことで様々な破壊継続時間のモーメントレート関数を用意した。破壊継続時間 t が5~200秒のモーメントレート関数を畳み込み、観測点における最大振幅を評価したところ、次のような特徴があった。地震モーメントを固定した場合、（1） t が長いほど最大振幅が小さくなる、（2） t の増加に対する最大振幅の減少率はモーメントレート関数のスペクトル形状に依存する。すなわち、 w^{-2} （ w は角周波数）で特徴づけられるBrune modelは t^{-2} で最大振幅が減少し、 w^{-1} で特徴づけられるBrownian modelとBoxcar関数は t^{-1} で最大振幅が減少する。VLFEと微動の特徴をBrownian modelで概ね再現できることから、VLFEの検知下限はモーメントレート（ M_0/t ）で議論することが可能であり、Boxcar関数で簡略化できることがわかった。

上記の検討を踏まえ、Boxcar関数を仮定し、 M_w 2.5~5且つ破壊継続時間 t が5~200秒のVLFE波形を合成した。F-netの解析周波数帯を0.02-0.05 Hzとし、基準値を上下動3 nm/s、水平動5 nm/sとして、F-netによるVLFEの検知下限を推定した。その結果、深部VLFEが観測される四国や紀伊半島の検知下限は $10^{12.5} \sim 10^{12.7}$ Nm/s程度となり、浅部VLFEが観測される海溝軸付近では $10^{13} \sim 10^{13.3}$ Nm/s程度となった。予測される浅部VLFEの検知下限は、F-netにより長期間の浅部VLFEを評価したTakemura et al. (2022a)のカタログのモーメントレートの下限と同程度であった。続いて、DONETを追加した場合の評価を行った（図参照）。海底地震計記録の0.03 Hz以下は海洋重力波の影響が大きい（Webb, 1998）ため、DONETについては0.03-0.05 Hzを採用し、基準値は上下動3 nm/s、水平動30 nm/sとした。DONET観測点を追加することで、DONET観測点近傍の検知下限は $10^{12.6}$ Nm/sへと改善するが、DONET1とDONET2の間（潮岬の南南東沖）や、DONETの各ノード間については明瞭な改善は見られなかった。これは、海底地震計の水平動のノイズレベルが陸域より高いこと、距離減衰と輻射特性の影響で震源近傍の観測点以外は振幅が急激に小さくなること（Toh et al., 2018）に起因する。DONETを用いることで浅部VLFEの高精度な位置決定や震源過程解析（例えば、Toh et al., 2020; Yamamoto et al., 2022）が可能だが、南海トラフ全域のVLFEを一定の検知力のもとで俯瞰的に解析するにはF-netなどの陸域広帯域地震計記録を用いたモニタリング（例えば、Asano et al., 2008; Baba et al., 2020）が有用であると考えられる。

謝辞

防災科学技術研究所が管理・運用するDONET <https://doi.org/10.17598/NIED.0008> とF-net <https://doi.org/10.17598/NIED.0005> の波形記録を利用しました。地震波伝播シミュレーションは東京大学情報基盤センターのWisteria/BDEC-01を利用しました。本研究は、JSPS科研費21K03696および21H05205の助成により実施されました。



Spatiotemporal distribution of shallow very-low-frequency earthquakes between January and March 2022 detected by DONET2 seismic stations

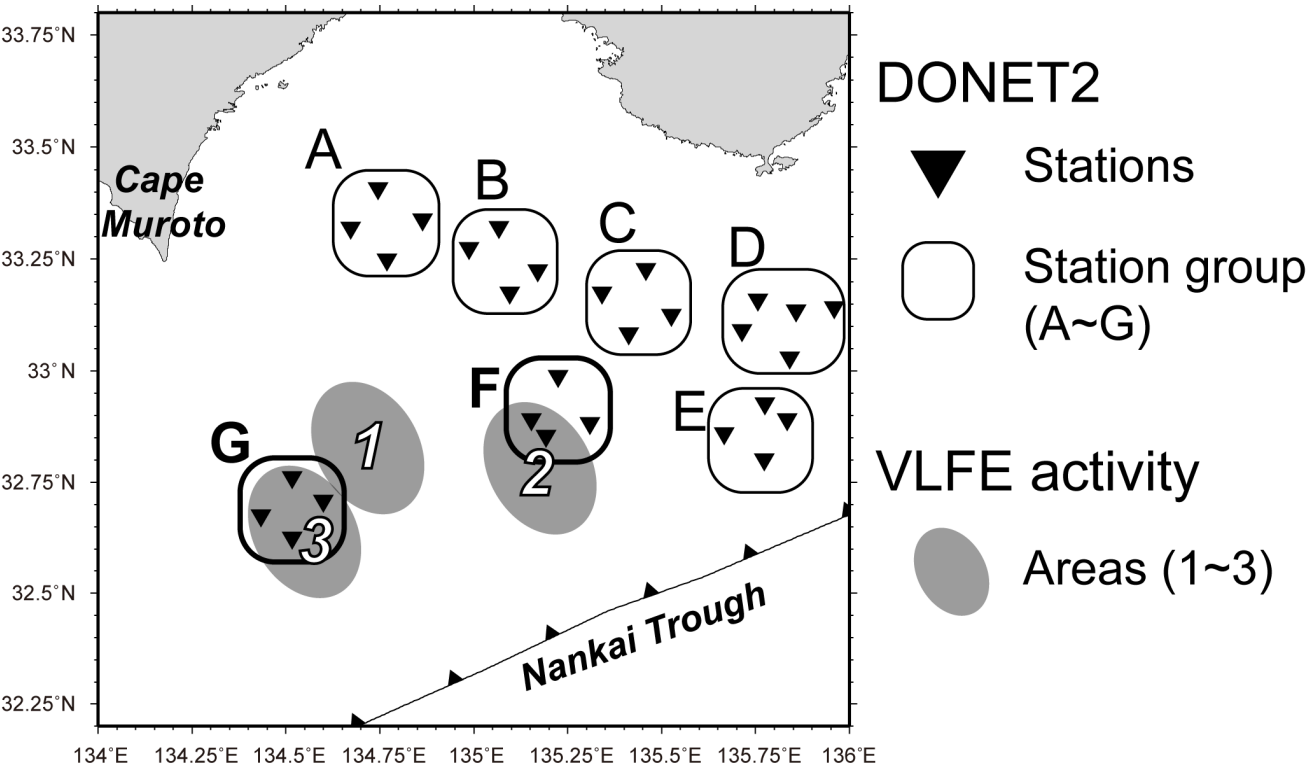
*Yojiro Yamamoto¹, Shuichiro Yada¹, Keisuke Ariyoshi¹, Masaru Nakano¹, Takane Hori¹

1. JAMSTEC

南海トラフ巨大地震震源域の浅部側に隣接したトラフ軸近傍の領域では、低周波微動や超低周波地震といったスロー地震活動が報告されている。これらの活動の時空間変化をモニタリングすることは、南海トラフ地震発生帯の状態把握のために重要である。2022年の1月から3月にかけて、紀伊水道から室戸岬沖に設置されている地震・津波観測監視システム、DONET2の広帯域地震計において、周期20秒周辺にエネルギーを持つ、超低周波地震（very-low frequency earthquake；以下、VLFE）と見られる波群を複数確認した。本研究では、ランニングスペクトルの目視によりイベント時刻を検出し、SWIFT（Nakano et al., 2008）を適用した、VLFE活動の時空間分布の推定結果を報告する。具体的には、広帯域地震計の波形に0.03-0.05 Hzのフィルターをかけ、2秒にデシメーション処理をした観測波形を計算し、これらを説明する震源位置および断層面解を、水平方向0.01°、深さ方向1 kmを刻み幅としたグリッドサーチによって推定した。

震央分布から、今回のVLFE活動の領域は、主に3つのエリアに分けることができる。活動の開始時期順にそれぞれエリア1、2、3と区別すると、エリア1は室戸岬沖に位置するDONET2の観測点グループGの北東側（32.8°E, 134.7°E付近）、エリア2は観測点グループFの南西側（32.8°N, 135.2°E付近）、エリア3は観測点グループGの直下から南側（32.65°N, 134.55°E付近）に位置する（図参照）。このうちエリア1およびエリア2は、2009年および2018年にVLFEが確認された領域（Takemura et al., 2019）と一致する。また、エリア2およびエリア3では、DONET2観測網により、それぞれ2015年と2016年にVLFE活動が確認されている（Nakano et al., 2018）。エリア1のVLFE活動は、1月2日に開始し、4日には一旦収まった。その後、1月27日までは活動はほとんど確認されなかったものの、1月28日に再び数個のVLFEが確認された。その後、1月30日からは、エリア1およびエリア3の両領域にまたがる範囲において群発的にVLFEが発生し、2月9日頃には、エリア1・3両方の活動は収束した。その後、3月末までの間、VLFE活動は確認されていない。エリア2では、1月4日に1イベントが確認されたあとは一週間ほど静穏であったが、1月12日、1月17日～19日、1月27日前後に群発的な活動が確認された。これらの群発活動の間にも、散発的な活動が確認されている。また、1月28日以降の活動は低調であったものの、2月21日、3月11日にそれぞれ複数のVLFE活動が確認されている。3月12日以降、3月末までの間には、VLFE活動は確認されていない。

震源深さについては、7～8 kmと推定されたものが最も多く、この深さは本研究領域のプレート境界面深度（Nakanishi et al., 2018）に近い。一方で、深さが3 kmと浅く推定されたものや、10 kmより深く推定されたものも、少数であるが存在する。断層面解は、プレート境界面を想定させる低角逆断層型のものが一定数あるものの、その他のものも含まれており、ばらつきがある。現在、ブーツストラップ解析を実施中であり、震源位置および断層面解それぞれの誤差評価している。暫定的な結果をみると、ブーツストラップによる震源位置の平均値はプレート境界を想定させる面上に沿って分布しているように見え、プレート境界より深い位置に決まっているイベントは深さの推定精度が低い傾向がある。今後、カタログの拡充と誤差評価を進めるとともに、時空間的な活動域の変化や、固着域および構造不均質との位置関係に関する議論を進める。



Centroid moment tensor inversion of earthquakes in the Japan Trench subduction zone using S-net ocean bottom seismometers

*Lina Yamaya¹, Hisahiko Kubo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Shunsuke Takemura²

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

地震発生機構の理解のために、地震のセントロイド・モーメントテンソル（CMT）解が広く推定されてきた。しかし、海溝型巨大地震の発生域である海域において、現状の主なCMT解カタログでは、震源から遠く観測点カバレッジの悪い陸域の観測網を使用しているため、決定されるCMT解の網羅性が不十分である。これに加えて、厚い海洋堆積層や沈み込んだ海洋プレートに伴う不均質性を無視した簡易な地下構造モデルを使用しているため、発震機構や深さを誤推定する可能性が指摘されている（例：Takemura et al., 2020）。近年、観測技術の発達に伴い、DONETやS-netのような定常的な海底観測網が整備されてきた。また、近年の大型計算機の発展に伴って、3次元地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションも容易になりつつある。そこで本研究では日本海溝を対象とし、2017年に全域での運用が始まったS-net海底地震計の加速度波形に対し、3次元地下構造モデルを使用した地震波伝播シミュレーションによるグリーン関数を用いて解析することで、地震のCMT解を推定した。S-net海底地震計の方位・回転角の補正には、Takagi et al. (2019) を用いた。グリーン関数の計算には防災科学技術研究所の大型計算機を利用した。地震波伝播シミュレーションにはOpenSWPC（Maeda et al., 2017）を使用した。3次元地下構造モデルとしては、全国1次地下構造モデル（Koketsu et al. 2012）を用い、固体領域の最小S波速度を1.0km/sとした。まずは、2017年以降に発生したマグニチュード4.0以上の地震を対象とし、S-net海底地震計の加速度波形の周期20-50秒を用いてCMTインバージョンを行った。求めたCMT解の発震機構をプレート境界面と、またセントロイド位置を3次元地下構造と比較することで、地震の発生場所を分類した。さらに、既存のCMT解カタログ（F-netカタログ、Takemura et al., 2021）と比較し、CMT解推定に対する海底観測網や3次元地下構造モデルの寄与を検討した。

Spatial distribution of moment magnitude anomalies in subduction zones: Comparison with seismic activity in the Kanto region

*Kazuo YOSHIMOTO¹, Takaya HASEGAWA¹

1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University

1. はじめに

地震の大きさを表わすモーメントマグニチュード M_w は、物理的意味が明確な地震モーメントを用いて算出されるため実用性が高い。しかしながら、地震モーメントの評価に使用する地下構造モデルに実構造とのずれがある場合、その影響で偏差が生じてしまう。例えば、Takemura et al. (2021)は、1次元と3次元の構造モデルを使用したモーメントテンソルインバージョン解析の比較から、スラブの地殻内で発生する地震では、構造モデルの不整合により M_w に0.2程度の差異が発生する可能性を指摘している。本研究では、地震活動が複雑でその解釈が難しい関東地方を対象として、地震発生場と沈み込むスラブとの関係を明らかにするために、F-net MT解の M_w と気象庁マグニチュード M_j のずれ（偏差）の空間分布の特徴を詳しく調べた。

2. 解析方法

関東地方（東経139.0°-140.5°、北緯35.0°-36.5°）を対象地域として、F-net MTカタログ（1997年1月-2021年12月）をもとに、783個の地震（深さ0-80 km, $3.5 \leq M_j \leq 4.5$ ）について、 M_w の M_j に対する偏差（以下、モーメントマグニチュード偏差）を求めた。F-net MT解は、深さ33-100 kmを均質な最上部マントルとする水平成層構造モデルを使用して求められている。このため、本研究では、深さ33 km以深で発生した地震のうち、スラブの沈み込みに関連して形成され则认为される3つのクラスター（1. 千葉県北西部 深さ70 km; 2. 茨城県南部 深さ60 km; 3. 茨城県南西部 深さ40-60 km）に注目してモーメントマグニチュード偏差を調べた。

また本研究では、対象地域の地震波速度構造の情報を得るために、地震波トモグラフィー（Double-Difference Tomography法 [Zhang and Thurber (2003)]）を実施した。同解析には、気象庁一元化震源カタログ（1998年1月-2019年12月）に記載されている、約4万個の地震（ $1.6 \leq M_j \leq 4.0$ ）の418観測点における検測値データ（P波：約96万個、S波：約82万個）を使用した。

3. 結果および考察

既往研究 [例えば、弘瀬・他 (2008)]により、クラスター1と2の地震は太平洋スラブの上面の境界、クラスター3の地震はフィリピン海スラブの上面の境界で発生していると解釈されている。クラスター1と2の地震について、モーメントマグニチュード偏差を計算すると、平均値はともに0.2程度になる。この偏差（ $M_w > M_j$ ）は、クラスター1と2の地震が太平洋スラブの地殻（F-net MT解析で使用している構造モデルよりも低剛性率）で発生していることを強く示唆している。地震波トモグラフィーの結果も、これらのクラスターを低S波速度域に含むことから、この解釈と整合する。しかしながら、この結果とは対照的に、クラスター3の地震については、モーメントマグニチュード偏差がほとんど見られないことを確認できる。地震波トモグラフィーの結果でも、このクラスターは（少なくとも浅部は）低S波速度域に含まれない。この解析結果は、フィリピン海スラブの上面の境界で発生するクラスター3の地震については、低剛性率でない領域で発生していることを示唆する。

上述の解析結果は、減衰構造の影響などを考慮しないものであるが、モーメントマグニチュード偏差の精査によって、地震発生場の構造（数km程度のスケール）についての情報が得られる可能性を示している。本発表では、詳細な解析結果を踏まえて地震活動の解釈について議論する。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のF-net MTカタログおよび気象庁の一元化震源カタログを使用しました。トモグラフィー解析には、Wisconsin-Madison大学のC. H. Thurber氏にご提供いただいたtomoDDを使用しました。ここに記して感謝いたします。

Poster session (3rd Day) | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-1
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S21P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-01] Automatic detection of S-wave later phase by 1D convolutional neural network

*Yuta Amezawa¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-02] Event catalog development for AEs induced by hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Makoto NAOI¹, Youqing Chen¹, Yutaro Arima² (1. Kyoto University, 2. JOGMEC)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-03] Towards Constructing a High-precision Phase picker for Volcanic Earthquakes Using Deep Learning: Performance Evaluation of Various Models

*Yuji Nakamura¹, Ahyi Kim¹, Hiroki Uematsu¹, Yohei Yukutake², Yuki Abe³ (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-04] Estimation of volcanic earthquakes at Kirishima volcano using machine learning

*Yohei YUKUTAKE¹, Ahyi KIM² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Yokohama City University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-05] Development of Seismic Wave Detection System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

*Yukino Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-06] **Toward Efficient Pore Pressure Estimation along Plate Boundary Faults Using Deep Learning**

*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-07] Fault Plane Estimation from 3D Hypocenter Distribution by Two-step Clustering Considering Local Shape

*Yoshihiro Sato¹, Haruo Horikawa¹, Takahiko Uchide¹, *Satoru Fukayama¹, Jun Ogata¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-08] Estimation of wave propagation direction from seismic waveforms using a deep learning model

*Yuki KODERA¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-09] Towards Real-Time Seismic Intensity Prediction Using Deep Learning:Developing a Prediction Model with Relatively Little Observed Data

*Momoko Nakamura¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu¹, Yukino Yazaki¹, Ahyi Kim¹, Hisahiko Kubo² (1. Yokohama City University, 2. NIED)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-10] Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning

*Takashi FURUMURA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-11] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning — Part3 Simulation of response spectrum of crustal earthquake in Eastern Japan—

*TIANZENG WEI¹, KAI TERAZONO¹, HIDENORI KAWABE¹ (1. Osaka University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-12] **Study on Prediction of Pseudo-velocity Response Spectrum Using Machine Learning -Part2: Response Spectrum Simulation of the 2016 Kumamoto Earthquake-**

*Kai Terazono¹, Tianzeng Wei¹, Hidenori Kawabe¹ (1. Osaka University)

Automatic detection of S-wave later phase by 1D convolutional neural network

*Yuta Amezawa¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

はじめに

近年、機械学習を活用した直達波の検知および検測技術の開発が精力的に行われている（e.g., Zhu & Beroza; 2019）。これらは過去数十年にわたり蓄積された多量の地震波形データと、熟練した検測者によるラベル付き検測値に基づいた学習により、STA/LTA法などの従来法よりも高精度かつ網羅的なイベント検出を可能にした。一方、地下の顕著な速度コントラストに起因する反射波などの直達波以外の波（後続波）についても機械学習に基づく高精度な自動検出・検測が試みられている（Ding et al., 2022）が、研究例は少ない。後続波からはその発生源である地下の不均質構造に関する情報を抽出できる（e.g., Matsumoto & Hasegawa, 1996）。ゆえに、膨大な地震波形記録に蓄積された後続波の情報を活用することで、地下の不均質構造を詳細かつ網羅的に解析することができる。そのためには、後続波の検出・検測を自動化することが重要である。そこで本研究では、日本域における後続波解析自動化の端緒として、上部地殻内で発生した地震の地震波形記録に観測されるS波後続波（e.g., 堀・他, 2004）を対象に、その自動検出を試みた。

データ・手法

本研究では、東北地方北部の森吉山地域の群発地震について、その近傍のHi-net阿仁観測点（N.ANIH）で観測された地震波形記録を使用した。本地域では2011年から群発地震活動が継続しており、その地震波形記録のTransverse成分に顕著なS波後続波が報告されている（e.g., Kosuga 2014）。また、本地域におけるS波後続波の波形形状は時間変化しており（Amezawa et al., 2019）、同一の定常観測点において、後続波を含む波形と含まない波形を多数取得できるという利点がある。

まず、森吉山北方の群発地震クラスター内で発生した5,000個の地震について、N.ANIHで観測された地震波形記録の水平2成分からTransverse成分を合成して、6–24 Hzの帯域通過フィルタを適用し、S波最大振幅で規格化した上で、S波後続波を含むもの（3,935個）と含まないもの（1,065個）に目視分類した。これらを学習データ（80%）とテストデータ（20%）に分割し、さらに学習データの20%を検証データとして使用した。次に、1次元畳み込みニューラルネットワークに基づくS波後続波自動検知モデルを次のように作成した。畳み込み層とプーリング層の繰り返しに続き、全結合層を設定し、最後はsoftmax関数を用いて和が1となる非負の2つの数値を出力する。2つの出力は、それぞれS波後続波を含む場合と含まない場合の確率に対応させ、閾値を0.5としてS波後続波の有無を判断させた。モデルへの入力データは、目視分類を行った地震波形記録について、気象庁S波検測時の0.2秒前から5.12秒間の時間窓で切り出したS-coda部分とした。

結果・議論

本研究で作成したモデルをテストデータに適用した結果、正解率は0.89であった。モデルの評価のために、偽陽性率に対する真陽性率を様々な閾値のもとでプロットしたROC曲線を作成し、その下側面積であるAUC（理想的なモデルで1.0に、ランダムな分類に対し0.5となる指標）を計算した。その結果、AUCは0.89であり、作成したモデルはテストデータに対しS波後続波の有無を判断できていることがわかった。一方、閾値0.5における偽陽性率は0.1以下であるのに対し、真陽性率は約0.8であった。後者の結果は、S波後続波有りのラベル付きデータを2割ほど取りこぼしていることを意味する。

S波後続波有りのデータの取りこぼしの要因として、S波後続波の有無の判断に迷うようなデータ（例えば、S波後続波の振幅が小さい場合）が含まれていることが考えられる。また、S波後続波有りと無しのデータ数に不均衡があるため、モデルの学習時にそれを解消するようなデータに重みづけや under sampling を行ったが、いずれの場合も分類精度が低下した。その主要因としては、学習データ数の不足が考えられる。

今後は、複数観測点での地震波形記録の追加や data augmentation によって学習データを増やしつつ、最適

な学習方法を模索する。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所Hi-netによる地震波形記録、気象庁一元化震源カタログ、気象庁による手動検測値を使用しました。深層学習フレームワークはTensorFlowを使用しました。また、文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）[JPJ010217]の支援をいただきました。感謝いたします。

Event catalog development for AEs induced by hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Makoto NAOI¹, Youqing Chen¹, Yutaro Arima²

1. Kyoto University, 2. JOGMEC

地震計やAEセンサの連続波形記録から震源カタログを作成する場合、典型的にはイベント検出・走時検測・Phase Association・震源決定といった複数の処理が行われる。近年、これらの各プロセスに深層学習を始めとした機械学習技術の適用が進み、従来の自動化手法を超える性能が達成され、同じデータからより高品質の震源カタログが作成できるようになりつつある。本研究では、室内水圧破碎実験中に10MHzサンプリングで収録した24チャンネルAE連続波形記録から、深層学習を利用して震源カタログを作成した。

カタログ作成は、1) 24チャンネルAE波形をインプットとし、イベント確率値を時間の関数として出力する深層学習ネットワークによるイベント検出、2) PhaseNet (Zhu and Beroza 2019) に似たU-netタイプの深層学習ネットワークによる走時検測、3) REALアルゴリズム (Zhang et al. 2019) によるPhase association・震源決定を行い、4) 非線形最小二乗法によって震源を再決定する、という手順で行った。

1)、2) で用いた深層学習ネットワークの訓練には、STA-LTAによるイベント検出 (Allen 1978)、AR-AICによる走時検測 (Tanakami and Kitagawa 1988)、非線形最小二乗法による震源決定という、古典的手法を組み合わせた自動処理手法 (Naoi et al. 2018) によって作成した、黒髪島花崗岩10供試体 (Tanaka et al. 2021)、イーグルフォード頁岩2供試体 (Naoi et al. 2020) の実験に対して得られたAEカタログから、よく震源が求まったものに対する検測値等を用いた。イベント検出や走時検測のための深層学習ネットワークの訓練に用いるデータには手動処理結果を用いる場合が多いが、本研究では自動処理による結果からQuality Controlの基準を厳しく設定して選別した結果を用いた。

Phase Associationに用いたREALアルゴリズムは、震源に対するグリッドサーチをおこない、理論走時を中心としたある幅の窓内に含まれる走時の数をカウントし、予め設定した閾値以上の走時が適合する震源を採用する手法である。震源に対するグリッドサーチは計算コストが大きいので、本研究ではこの問題を差分進化アルゴリズムで解くことによって計算コストの削減を行った。

一連の手法を、深層学習ネットワークの訓練に用いていない、ウルフキャンプ頁岩供試体を用いた実験において得られたAE連続収録データに適用し、AEカタログを作成した。同供試体の実験データに対して、先に説明した古典的手法によるカタログ作成手法では、972個のイベントからなるAEカタログが作成されたが、深層学習による手法では、Quality controlに用いる基準に依存して2600-6300個のイベントからなるカタログが作成できた。

Towards Constructing a High-precision Phase picker for Volcanic Earthquakes Using Deep Learning: Performance Evaluation of Various Models

*Yuji Nakamura¹, Ahyi Kim¹, Hiroki Uematsu¹, Yohei Yukutake², Yuki Abe³

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

火山地帯では度々火山活動に関連した活発な群発地震が発生し、それらの迅速な検出、検測は火山防災において非常に重要である。しかし現在、これらのプロセスは最終的には人間の判断に委ねられ、膨大な時間とコストを要し、リアルタイムでの詳細な検証は不可能である。本研究ではこの問題を解決するため、近年多くの地震観測で研究が進んでいる機械学習の適用を試みた。現在、すでに膨大な訓練データを用いた学習済みモデルがいくつか公開されている。それらをそのまま適用して問題無い事例もあるが、学習データの地域依存性も報告されている（Münchmeyer et al., 2022）。本研究のターゲットは火山地帯という特殊な地域で発生する地震であるので、主に地殻内地震の波形で学習した既存の学習済みモデルは適用が難しい可能性がある。本研究では箱根火山で発生する地震をより精度良く検出できるモデルの構築を目指し、まずZhu and Beroza（2018）によって構築されたPhaseNetのアーキテクチャを利用して、箱根火山で発生した1999年から2020年までの約22万個の地震波形に対して性能評価を行った。結果として箱根火山の地震データで学習したモデルの検出率は、既存のPhaseNetの学習済みモデルの検出率と比較して大幅に向上した。PhaseNetではU-Net（Ronneberger et al., 2015）の構造が採用されているが、次のステップとしてそれに再帰残差ユニットを追加したR2U-Net、注意機構を追加したAttention U-Net、再帰残差ユニットと注意機構の両方を追加したR2AU-Netを用いた学習モデルを構築した。さらに、これらのモデルをPhaseNetの学習時に用いた箱根データを用いて学習することで、その性能評価を行った。また、上記の学習済みモデルをベースとして転移学習を行うことにより、よりデータ数の規模が小さい別の火山地帯での精度の良い地震波検出モデルの構築を試みる。

Estimation of volcanic earthquakes at Kirishima volcano using machine learning

*Yohei YUKUTAKE¹, Ahyi KIM²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Yokohama City University

火山性地震はマグマや熱水の移動や応力場の変化などに反応し活発化し、火山内部状況を評価するうえで重要な情報となる。高精度な地震カタログの構築にあたり、従来はSTA/LTAなどの指標を用いて地震を検出し、目視による地震波の到達時刻や振幅の検測情報に基づき震源位置と規模を決定するという手順を踏むため膨大な時間を必要としていた。近年、機械学習のフレームワークを用いて、地震の検出及び検測を自動で高精度に行う手法が開発されている(例えば、Ross et al., 2018; Zhu & Beroza, 2018)。行竹・金(2022, JpGU)では、霧島火山地震観測網のデータに対して、Zhu & Beroza(2018)によって構築されたPhaseNetのアーキテクチャを利用し、さらに金ほか(2022, JpGU)により構築された火山性地震カタログに基づいた学習モデルを用いて、同火山地帯での火山性地震の検出と震源決定を行った。本研究では、霧島火山における火山性地震と火山活動との関連の理解を目的とし、上記の過程により検出された火山性地震の活動様式についてより詳細な検討を行った。JHD法(Kissling et al., 1994)により対象領域の1次元速度構造と観測点補正值を推定し初期震源位置を決定した後、Double-difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)による相対震源決定を実施した。2012年から2020年の期間で気象庁火山地震カタログの約7倍に相当し約37000イベントの火山性地震の震源が決定された。2017年から2018年にかけてマグマ噴火が発生した新燃岳では、火口直下海拔0m付近で多数の地震の震源位置が決定された。地震活動は噴火に先行して活発化するとともに、地震活動深さ上限が徐々に浅部に拡大する様子が見られた。またb値の時間変化を調べると、噴火に先行して数か月前からb値が増加する様子が見られた。2018年に水蒸気噴火が発生した硫黄山においても、類似した火口浅部での地震活動の増加が検出された。これらの地震活動は噴火準備過程における、火口直下での流体圧の増加を反映している可能性がある。また、霧島火山西部では解析期間中に頻繁に群発地震活動が発生しており、各群発クラスター内で震源位置の移動が認められ、火山性流体の寄与が示唆される。火山地域における地震活動について機械学習を用いることにより、高い精度で地震活動の描像を得ることが可能になってきた。

謝辞 本研究では、気象庁、防災科学技術研究所、九州大学、東京大学地震研究所により取得された地震波形記録を使用しました。気象庁から火山震源カタログを提供していただきました。本研究はJSPS科研費22K03752及び文部科学省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」の助成を受けたものです。

Development of Seismic Wave Detection System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

*Yukino Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹

1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics

地震大国である我が国では、様々な機関において高密度振動観測網が展開され、各地点での震度の即時計算および効果的な地震速報の発令を可能にしている。しかし、現状では地震計の設置間隔である20kmより細かい解像度での震度計測は不可能であり、緊急地震速報も約30km圏内で発生した地震に関しては対処できない。また、近年、都市部では高層ビルやマンションの建設が急速に進んでおり、同じ建物内でも階や柱からの近さにより、被害の現れ方が異なる。つまり、人口が集中する都市部に対し、現行の大域的な震度予測だけでは被害状況の把握と予想には不十分である場合も考えられる。そこで、本研究では、既存の観測網に加えて一般家庭にも設置できる地震計を提案し、高精度な即時地震動検出の実現を目的とする。この地震観測網はCSN (Citizens Seismic Network) (金, 2016)と称し、神奈川県横浜市の複数箇所に設置を進めている。具体的な手順は次のようである。比較的安価に入手が可能であるMEMSセンサー(witmotion)に、小型の演算装置ラズベリーパイを接続し、3成分方向の加速度の逐次データを取得する。次に、このデータから地震を判定するモデルを作成する。最後に、モデルをラズベリーパイで演算可能とし、センサーが受け取った加速度データに対して、即時に地震の判定を行う。本発表では、上記のうち、地震動の検出モデルの構築に焦点を当てる。センサーデータに対し、古典的な地震検知法であるsta/ta比による地震判定を行ったところ、真の地震だけでなく、その倍以上の数のノイズを地震として判定した。この問題を解決するため本研究では機械学習モデルを使用したアプローチを検討する。使用するモデルは中村他(2022, 本大会)が性能評価を行なった4種類のモデル、1) U-net, 2) リカレント残差ユニットを追加したR2U-Net、3) 注意機構を追加したAttention U-Net、4) U-Netにリカレント残差ユニットと注意機構の両方を追加したR2AU-Netを用いた。CSNでは学習と検証に使用するデータに十分な量のデータが蓄積されていないので、防災科学技術研究所が運用する強震計ネットワークK-NETから取得したデータを使用する。学習には、データを加工せず使用する場合と、センサーのノイズの影響も考慮し、ランダムノイズを加えた場合の2通りの入力データを検討する。以上の複数通りのモデルとデータ加工により作成されたモデルを実際のCSNデータに適用、地震動の検出を試み、その性能を比較検証する。さらにそれらのモデルの運用についてラズベリーパイへの実装可能性も含めて検討する。

Toward Efficient Pore Pressure Estimation along Plate Boundary Faults Using Deep Learning

*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.

南海トラフ沈み込み帯では、フィリピン海プレートが北西方向に向けてユーラシアプレートの下に年間4 cmの収束速度で沈み込んでいる。歴史上で、南海トラフ沈み込み帯の巨大地震は強震動及び大津波を起こし、100-200年の再来期間を持つとされている。この壊滅的な巨大地震の震源断層として、プレート境界断層（つまり、デコルマ）が挙げられる。南海トラフの巨大地震の発生メカニズムを明らかにするために、南海トラフ海溝軸を横断する反射法地震探査は数多く行われてきたが、間隙水圧の推定に関する研究はわずかであった。過去の研究では、2011年にJAMSTECが紀伊半島潮岬沖の南海トラフで取得した2次元マルチチャンネル反射法地震（Multi-channel seismic; MCS）探査データ（測線KI01）を用いてP波速度構造モデルを構築し、そのP波速度モデルをもとに、デコルマに沿った間隙水圧や有効応力を推定するなど、デコルマの物性の解明を試みた（Yu et al., JpGU 2022 Abst.）。潮岬沖の測線KI01のMCSデータを用いた重合前深度マイグレーション処理の結果として得られた南海トラフ付加体の構造は、先行研究である室戸岬沖の付加体構造（Tobin and Saffer, 2009）とは異なり、タービダイト層がデコルマに沿って沈み込んでいることが判明した。P波速度モデルに基づいて推定した間隙水圧、有効応力などの物性を分析することで、潮岬沖では、間隙流体が静岩圧全体に対する割合が比較的に低く、堆積物からの排水が良好で、垂直有効応力が高いことが明らかになった。潮岬沖と室戸岬沖のデコルマ物性の違いはタービダイトの存否に起因すると考えられる。南海トラフでは、これまで反射法地震探査が盛んに行われてきたが、潮岬沖の測線KI01のような現場の物性を求めた研究はまだ数が少なく、デコルマに沿った間隙水圧推定の研究は進んでいない。一方、測線1本のMCSデータからP波速度モデルを決定するまでには膨大な時間と労力がかかるため、南海トラフ沈み込み帯の全域をカバーする多数の2次元MCSデータを処理するには、より効率的な手法が求められている。そういった事情を踏まえて、我々は、近年話題になっているディープラーニング技術を用いて、プレート境界断層の間隙水圧をより早く、かつ精度よく推定できる方法を考案した。ディープニューラルネットワーク(DNN)をMCSデータ処理作業に導入し、学習済みモデルを用いて、迅速なP波速度モデルの構築を目標として、南海トラフの広範囲においてデコルマの物性や構造の解明を目指す。海溝軸付近の地質構造は複雑で、ショットギャザーから直接にP波速度モデルを生成するDNNモデルの訓練は現在の段階で困難な課題になっているため、本研究では、労力を費やす速度モデルの構築のステップに着目する。まずは、Marmousi2 modelを利用し、ランダムに生成した速度モデルから反射法地震探査データを合成した後、CDPギャザーから特徴（例えば残差速度）を抽出し、DNNモデルの訓練を実施する予定である。

Fault Plane Estimation from 3D Hypocenter Distribution by Two-step Clustering Considering Local Shape

*Yoshihiro Sato¹, Haruo Horikawa¹, Takahiko Uchide¹, Satoru Fukayama¹, Jun Ogata¹

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

震源分布により、地下における断層の形状を推定することは広く行われているが、断面図などによる可視化に基づいて主観的に行われることが通例である。震源分布は概ね平面的であるが、全体が湾曲したり、複数の面が交わっていたり、局所的には震源のばらつきが見えたりと、一定の複雑性があり、それが客観的な断層検出を難しくしている。

従来は、震源の3次元位置情報を用いた教師なし機械学習によるクラスタリング手法により断層面の3次元特徴を把握する手法 (e.g., Ouillon et al., 2008; Piegari et al., 2022) が提案されてきた。しかし、震源の位置情報のみを用いたクラスタリング手法では、実際の断層面構造とは異なる面を抽出する場合があるため、入力する震源数や解析する震源の分布範囲、学習パラメータを調整する必要があり、汎用性に欠点がある。

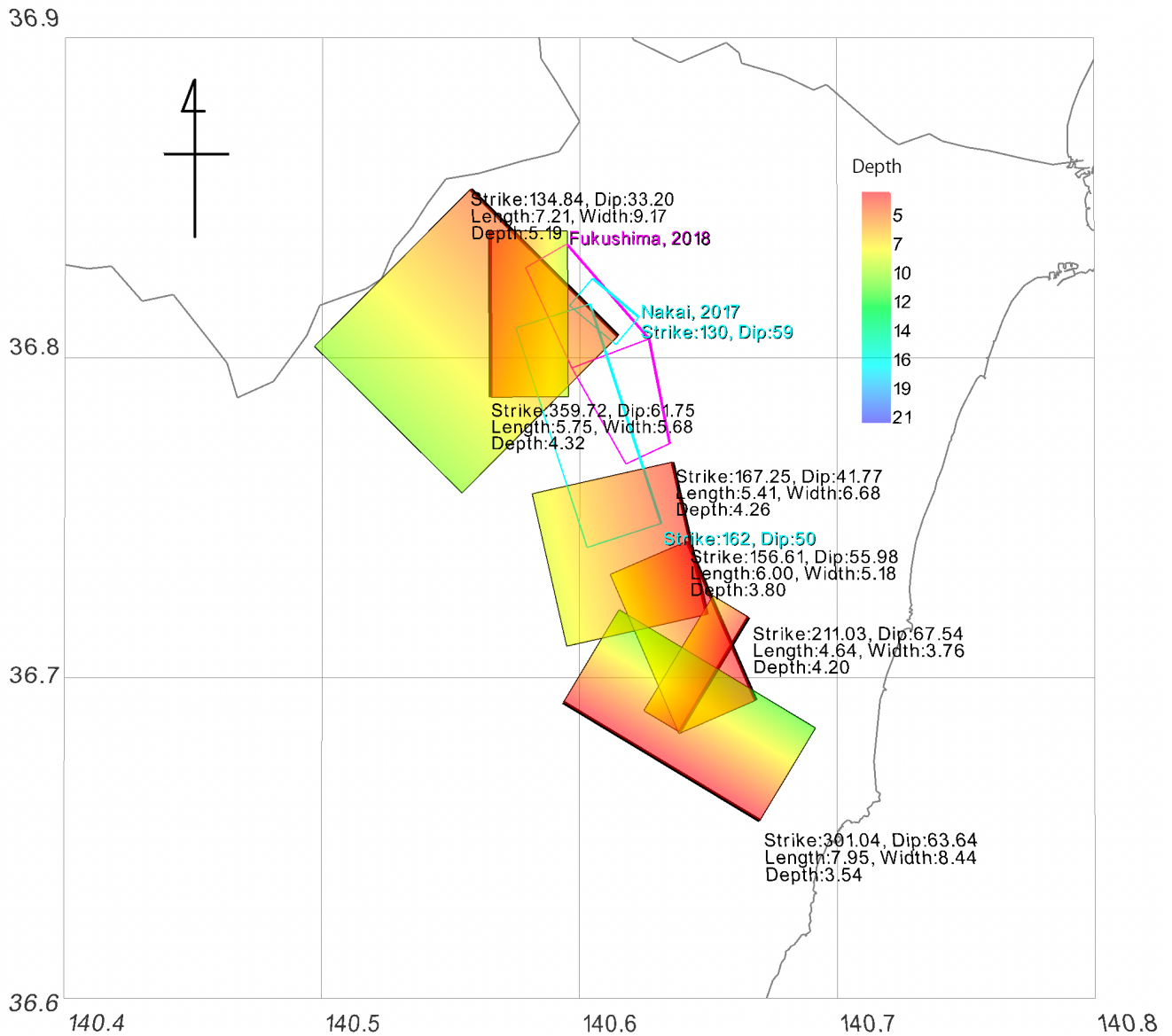
本研究では、震源の3次元位置情報に、震源分布を基に算出した法線ベクトル(3次元情報)を付与した6次元情報を用いて教師なし機械学習によるクラスタリングを行うことで、局所的な断層構造を検出する手法を提案する。具体的には、1段階目として法線ベクトルの3次元情報を用いた震源のクラスタリングを行う。2段階目では、分割されたクラスタごとに震源の3次元位置情報を基にさらに震源のクラスタリングを行う。これにより、複雑に構成される断層面の大局的な面構造を保持したまま断層面を細分化することができ、断層面の局所構造を把握に貢献すると考えられる。本研究では、事前にクラスタ数を設定することなく、ボトムアップにクラスタリングを行う階層型クラスタリングアプローチを採用し、1段階目のクラスタリングでは、法線ベクトルのコサイン類似度を用いて一定のクラスタ間距離を設定可能なAgglomerative clustering、2段階目のクラスタリングでは、震源分布における局所的な密度の違いに対応可能なHDBSCAN (McInnes et al., 2017) をそれぞれ適用した。

本提案手法をhypoDD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)によって再決定された茨城県北部の震源分布(71336個)に適用する。検出された断層面から同地域の微小地震の震源メカニズム解(Uchide et al., 2022) (38164個)と比較し、条件に一致する断層面を抽出する。抽出条件は、震源メカニズム解と断層面に垂直な距離が0.5km以内、震源メカニズム解のどちらかの節面と断層面のなす角が5度以内と設定した。

提案手法によって検出された断層面を図に示す。図では、提案手法によって検出された断層面をグラデーション付きの矩形として示し、グラデーションカラーは深度を示す。断層面周辺の黒文字では検出された断層面のパラメータを示し、1段目は検出された断層面の走向および傾斜、2段目は長さおよび幅、3段目は断層面の深度を示す。InSAR解析による2011年・2016年茨城県北部の地震の断層モデル (Fukushima et al., 2018; 仲井ほか, 2017) は、紫色および水色の矩形によってそれぞれ示す。提案手法では6枚の断層面が検出された。断層面の多くは概ね南北走向であるが、緯度36.8度以北では北西-南東走向に変わっている。この変化は、Fukushima et al. (2018)の断層モデルにも見受けられ、断層モデル周辺に検出された断層面の走向方向はほぼ一致している。仲井ほか(2017)の断層モデルでは、浅部の断層面が北西-南東走向、深部の断層面がほぼ南北走向となっている。そのような断層構造は、2011年・2016年の地震時に活動した区間よりも広域に及んでおり、茨城県北部の地震ではその一部が活動したことが示唆される。2011年・2016年茨城県北部の地震では主に西落ちの断層が破壊したと考えられるが(田中・岩切, 2017; 仲井ほか, 2017; Fukushima et al., 2018)、本研究では東落ちの断層面も検出した。緯度36.8度付近では断層面が検出されていないが、これは2011年・2016年茨城県北部の本震に破壊域に対応し、余震活動が極めて低調であったためであると考えられる。このような地震活動が低調な地域における断層面の検出は今後の課題である。

謝辞

本研究では、気象庁一元化処理検測値、産業技術総合研究所地質調査総合センターによる発震機構解データ(内出ほか、2022)を使用した。本研究は、文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト(STAR-Eプロジェクト) JPJ010217の助成を受けたものです。



Estimation of wave propagation direction from seismic waveforms using a deep learning model

*Yuki KODERA¹

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

巨大地震や連発地震発生時においても安定して地震動即時予測を行うため、近年では震源推定をせずに揺れから揺れを直接推定する手法が提案されている（例えば、Hoshiba and Aoki, 2015; Kodera et al., 2018）。これらの手法では、各観測点におけるリアルタイム震度（功刀・他, 2013）の観測値を入力として波動伝播の計算を行っているが、波の振幅だけでなく、伝播方向などの他の物理量の観測値も合わせて用いることができれば、より予測の迅速性や精度の向上につながると期待される。本研究では、波動伝播モデルに取り込める観測情報を増やすことを目的として、観測点の地震波形から波動伝播方向を深層学習によって推定する方法を開発する。波の到来方向はP波初動の震動軌跡を見ることでも推定することは可能ではあるが、この方法はP波初動を正確に検出できることを前提にしており、P波初動が不明瞭となる連発地震などではうまく推定ができない恐れがある。本研究では、初動部分だけではなく波形全体の形状から情報抽出を試みることで、よりロバストな伝播方向の推定を目指す。

対象観測点をKiK-netひたちなか（IBRH18）の地上点として手法の検証を行った。2010年1月から2022年7月までに観測された波形のうち、リアルタイム震度0.5以上かつ理論P波時刻の2秒前以前から収録されている波形を抽出した（約1500波形）。入力は2秒間の3成分加速度波形とし、理論P波時刻の2秒前から10秒後までを0.2秒ごとにスライドさせて学習用のデータセットを生成した。教師データとなる波動伝播方向は、観測点から見た震央方位に等しいとした。深層学習モデルはGRU（Gated Recurrent Unit）と全結合層からなるネットワークを採用し、データセットをtrain : validation : test = 6 : 2 : 2に分けて学習と評価を行った。学習済みモデルをテストデータに適用したところ、以下の傾向が見られた：（1）理論P波到達後2秒までの波形を入力した時点では、約4割の事例が $\pm 30^\circ$ 以内の精度で、約6割が $\pm 45^\circ$ の精度で伝播方向を求められた。（2）さらに後続の波を入力していくと、伝播方向の推定精度が徐々に悪化していくが、理論P波到達後10秒時点では、 $\pm 30^\circ$ 以内の精度で求まる事例が約1割、 $\pm 45^\circ$ の精度の事例が約3割あった。これらの結果は、後続波には到来方向が様々な多重反射や多重散乱の波が多く含まれているため伝播方向の推定は難しいものの、波形全体の形状を学習させることで、P波初動を陽に検出することなく伝播方向をある程度推定することが可能であることを示している。今後はモデルの改良を進めるとともに、連発地震などに対する評価も行う予定である。

Towards Real-Time Seismic Intensity Prediction Using Deep Learning: Developing a Prediction Model with Relatively Little Observed Data

*Momoko Nakamura¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu¹, Yukino Yazaki¹, Ahyi Kim¹, Hisahiko Kubo²

1. Yokohama City University, 2. NIED

地震発生時、速やかに震度の空間分布を予測することは防災上非常に重要である。予測精度向上のため、地震計を高密度に設置し多数の観測データを得る必要があるが、人的、経済的コストの面から難しい。また、観測データに加えて地質情報等の先験的知識を用いる手法もあるが、地質情報の精度等課題が多々ある。そのような背景から地質情報を用いない深層学習を用いた震度予測が提案されその有用性が示されている(Otake et al., 2020)。本研究では先行研究よりも格段に学習データの少ない横浜市の周辺において、深層学習の一種であるLong-short term memory(LSTM)を用いたリアルタイム震度(功刀, 2008, 以降Ir)の予測モデルの構築を試み、そのパフォーマンスの検証を行った。

本研究では、2つの手法を検証し比較を行った。1つ目の手法では、Otake et al. (2020)と同様に既存の防災科学技術研究所強震観測網K-NETの観測点を予測ターゲットとして、その周辺の4つのK-NET観測点のデータと共に学習し、学習に用いていないターゲットのIrとIrの立ち上がり順を予測するモデルを作成した。入力観測点4つにはKNG004、KNG012、TKY007、TKY021を選択し、ターゲットとしてKNG002を選択した。先行研究では東北地方の観測点を用いたため、2011年東北地方太平洋沖地震の余震が数多く確保でき、学習に用いる地震の数が約1000個にも登ったが、本研究では全観測点で共有する地震数は1996年から2021年までで249個と4分の1である。データの预处理として、記録開始から60秒の3成分の地震波形をIrに変換後、100Hzにリサンプリングした。学習における入力データは入力観測点のIrである。正解データにはKNG002のIrを用いた。モデルはマスク層、3層のLSTM層、LSTM層の間に存在するドロップアウト層、全結合層で構成される。損失関数はMSE、全結合層の活性化関数はlinearを使用した。今回学習したモデルは、LSTMのユニット数を50、バッチサイズ1000、学習率0.001とし、エポック20で学習した。データ全体の1割をテストデータ、残りの9割のうち1割を検証データ、9割を教師データに利用した。

初めにt-1秒からt秒までの観測データを使い、予測地点のt秒目のリアルタイム震度を予測し、加重平均と最大入力値を用いて比較を行った。加重平均は予測地点から入力観測点までの距離を重みとして算出した。最大入力値はPLUM法(Kodera et al., 2018)を模倣した値であり、各時刻で入力観測点4つのうち最も大きい値を予測地点の震度としIrを算出した。時系列全体での予測値と観測値のMAE値はLSTMモデルが1.62であり、加重平均の1.41、最大入力値の2.22と比べると、LSTMより加重平均の方が良い値を示した。次に、t-1秒からt秒までの観測データを使い、入力観測点からターゲット観測点までのS波到達までの時間を考慮しt+8秒目のIr予測を行った。入力観測点と予測地点の平均距離が32kmであるため、入力観測点の最初のトリガー時刻から約8秒でS波が到達するという仮定でt+8秒目の予測を行った。MAE値は1.60となった。Irの時系列に加えて立ち上がり順を予測していることから十分に学習させることができなかったため、2つ目の手法では時系列の形状のみを予測するモデルを作成した。

2つ目の手法では、入力観測点をTKY007、TKY021の2点、ターゲット観測点をKNG002とし、Ir時系列の形状のみを予測した。Irの立ち上がり順を考慮しないため、ターゲット観測点がトリガーした時点から予測を行うと仮定し、ターゲット観測点より先にトリガーすることができる2点を入力観測点として使用した。使用する地震数は、使用観測点3点全てが共有し、かつKNG002が最後にトリガーしている、1996年から2021年までの312個である。データの预处理やモデルは1つ目の手法と同様である。t秒目の予測ではMAE値が0.56、t+8秒目の予測では0.58と、入力観測点数が異なるため単純な比較はできないが、観測点数が2点と少ない学習データで、1つ目の手法と比べて良い値を示した。

時系列の形状のみを予測するモデルでは精度が向上した。しかしリアルタイムでの震度予測を行う場

合、1つ目のように立ち上がり順を考慮する必要がある。そのためにはデータ数を増やす事が不可欠であるので、本研究では解決策としてリアルタイム震度の立ち上がり部分の予測式（久保・功刀, 2022）を用いて訓練データを増やし、その性能について検証する予定である。

Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning

*Takashi FURUMURA¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

深層学習に基づき、大地震の震源域近傍での強震観測波形データに基づき、遠地の離平野で生成する長周期地震動（周期2～20秒程度）の即時予測モデルを開発した。深層学習を強震動予測に適用した既往研究には、震源要素とサイト特性を入力とする最大加速度分布の予測（例えば、Kubo et al. 2020）や、震源近傍での地震波形データから遠地の地震動レベル（例えば、Jozinovic et al. 2020）及び応答スペクトルの予測（田屋・古村、2022-本大会）がある。本研究では、震源近傍での観測波形から、遠地の長周期地震動を予測する、“波形から波形の予測”を行った。これは、長周期地震動による構造物の影響評価において、速度応答スペクトル値に加え、揺れの包絡線形状や継続時間など、揺れ波形の特徴も重要な指標になると考えられるためである。

2. データ・手法

日本海溝沿いの大地震による長周期地震動予測をターゲットとし、F-net八溝観測点（YMZF；栃木県大田原市）の速度型強震計記録を入力データとして、南南西方向に141 km離れたHi-net 富岡観測点（YFTH；横浜市金沢区）の長周期地震動の予測を行った。この距離では、表面波の到着まで約50秒の猶予時間がある。予測モデルには、時系列データ処理に用いられるTemporal Convolutional Network (TCN)を採用し、Keras-TCNライブラリ(Remy 2020)を用いてpythonコードを作成した。TCNは、他の時系列処理モデル（RNNやLSTMなど）に比べて、長い入力データを少メモリ・計算量で処理可能である。ここでは、長時間の波形データを扱うために、畳み込み層のフィルタ項数を256、カーネルサイズを3, dilationsを2,4,...,128と大きく設定した。また、過学習を防ぐためにドロップアウト率を0.01に設定した。学習データには、東北地方太平洋沖地震の前（2004/4/1～2011/3/10）に発生した、Mw6.0以上の33個の地震のF-net, Hi-net波形データを使用した（図1）。Hi-netデータは振り切れがないことを確認し、地震計特性補正フィルタ（Maeda et al. 2017）により広帯域化した。波形データには周期1～40 sのバンドパスフィルタをかけた後に4 Hzにリサンプリングし、長さ600秒の学習データセットを用意した。学習は、東大情報基盤センターのWisteriaを用いて実行し、バッチサイズを10とする1000エポック数の繰り返し学習にはGPU計算で2分を要した。

3. 結果

学習済みTCNモデルを用いて、東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）と以後（2011/3/11～2018/1/24）に東北沖で発生した25個の地震（ $\geq$ Mw6.3）を対象に長周期地震動の予測テストを行った。予測は、WisteriaのCPU計算により1地震あたり0.06秒で完了した。図2に、(a)東北地方太平洋沖地震、(b)2005/12/12岩手県沖の地震（Mw6.9）、(c)2008年12月14日の福島県沖の地震（Mw6.1）の長周期地震動の予測波形と実際の観測波形の比較、及び入力波形を示す。全ての地震の予測テスト結果と観測波形との一致度は、1）速度応答スペクトルの強度比、2）弾性震動エネルギーの総和比、3）波形エンベロープの相関係数、の3つの指標で定量化し、その分布の四分位数を箱ひげ図を用いて示す（図2d）。指標1)～3)の平均値は、それぞれ0.7、0.52、0.5となり、全体的に過小評価気味ではあるが、速度応答スペクトルと経時特性の形状が良く再現された。一方、予測の外れ値（過大評価）は、YMZF観測点に近い福島県浜通りの地震に対する予測結果である。この地域では、東北地方太平洋沖地震後に活動が活発化しており、予測モデルの汎用化に向けて新たな観測データを追加した学習の更新が必要である。

4. 今後の課題

今回の予測実験では、関東平野での予測の入力地点として茨城県のYMZF観測点を使用した。予測の猶予時間を確保するためには、より遠地の入力に基づく予測が望ましい。一方、猶予時間と予測精度にはトレードオ

フがあるため、複数観測点を用いた予測や、観測データの取得状況に合わせた予測の随時更新など、予測システムの拡張が必要である。

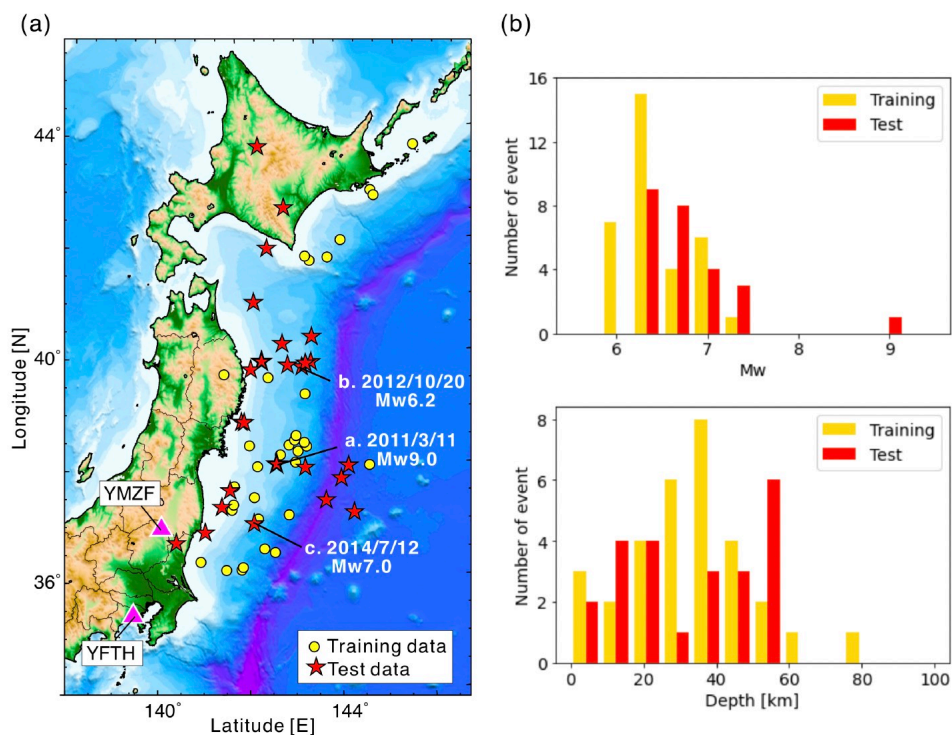


図1. (a)長周期地震動予測に用いる入力観測点 (YMZF) と予測地点 (YFTH)。地図中の黄色○印は学習データ、赤色★印はテストデータに用いた地震を表す。(b) 学習データとテストデータの Mw と深さ分布。

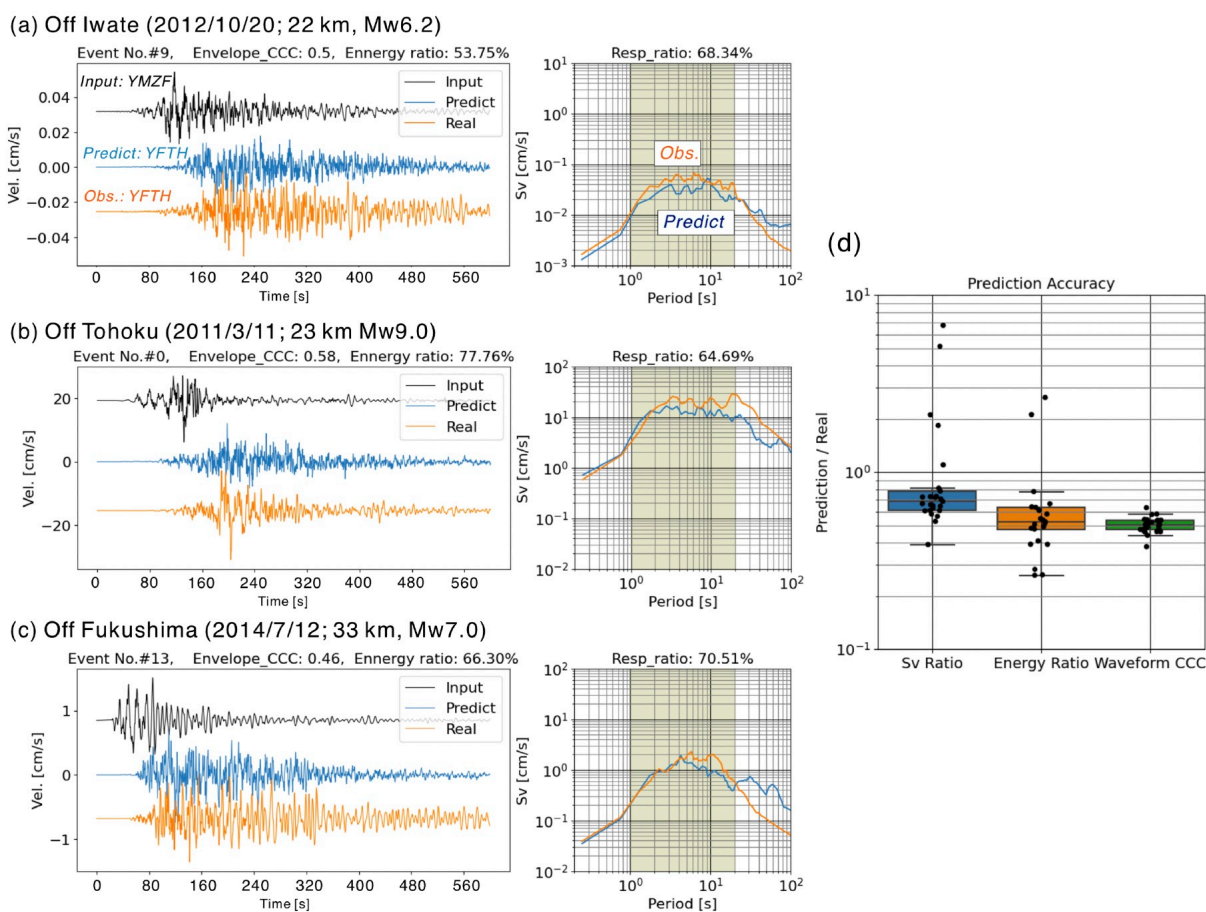


図2. 入力波形 (YMZF 観測点; 黒)、予測波形 (YFTH 観測点; 青)、および観測波形 (オレンジ) の比較・右図は予測・観測波形の速度応答スペクトル (ハッチは予測対象周期範囲: 1~20 秒)。(a) 岩手県沖の地震 (Mw6.2)、(b) 東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) (c) 福島県沖の地震 (Mw7.0)。右図は予測・観測波形の速度応答スペクトル ($h=5\%$)。 (d) 25 個の地震の予測/観測比と相関係数の分布を四分位数にて表示 (左から、1. 速度応答スペクトル比、2. 弾性エネルギー総和比、3. 波形の相互相関係数の分布)。

Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning —Part3 Simulation of response spectrum of crustal earthquake in Eastern Japan—

*TIANZENG WEI¹, KAI TERAZONO¹, HIDENORI KAWABE¹

1. Osaka University

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震が発生して以降、強震観測網の整備により得られた強震記録の数が大幅に増えている。膨大な強震記録を用いて精度の高い地震動予測を行う方法として、機械学習が近年注目されている。東日本では、2008年岩手城内地震や2011年東北地方太平洋沖地震など大規模な地震が多く発生している。構造物の地震被害を軽減するためには、耐震設計を行う際に構造物の建設地点において精度の高い地震動予測が必要である。そこで、本研究では東日本を震源とする地殻内地震を対象として機械学習を用いた擬似速度応答スペクトルの予測モデルを構築することを目的とする。

2. 使用する観測記録

1997年1月1日から2022年5月1日までの地震のうち、震源北緯 $34.0^{\circ} \sim 42.0^{\circ}$ 、震源東経 $138.0^{\circ} \sim 144.0^{\circ}$ の震源域の震源深さ40km以浅の地殻内地震を検討対象地震とする。地震タイプについては、気象庁の毎月の「地震活動及び火山活動について」¹⁾を参考に分類する。図に検討対象地震の位置及び規模を示す。防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netの地表の記録のうち、水平成分の最大加速度が 2cm/s^2 以上の観測記録を使用する。その上で、P波の立ち上がりがない波形及びSN比が悪い波形を除外する。選定した観測記録を用いて減衰5%擬似速度応答スペクトルを0.25秒間隔で周期10秒まで計算する。

3. 解析概要及び解析結果

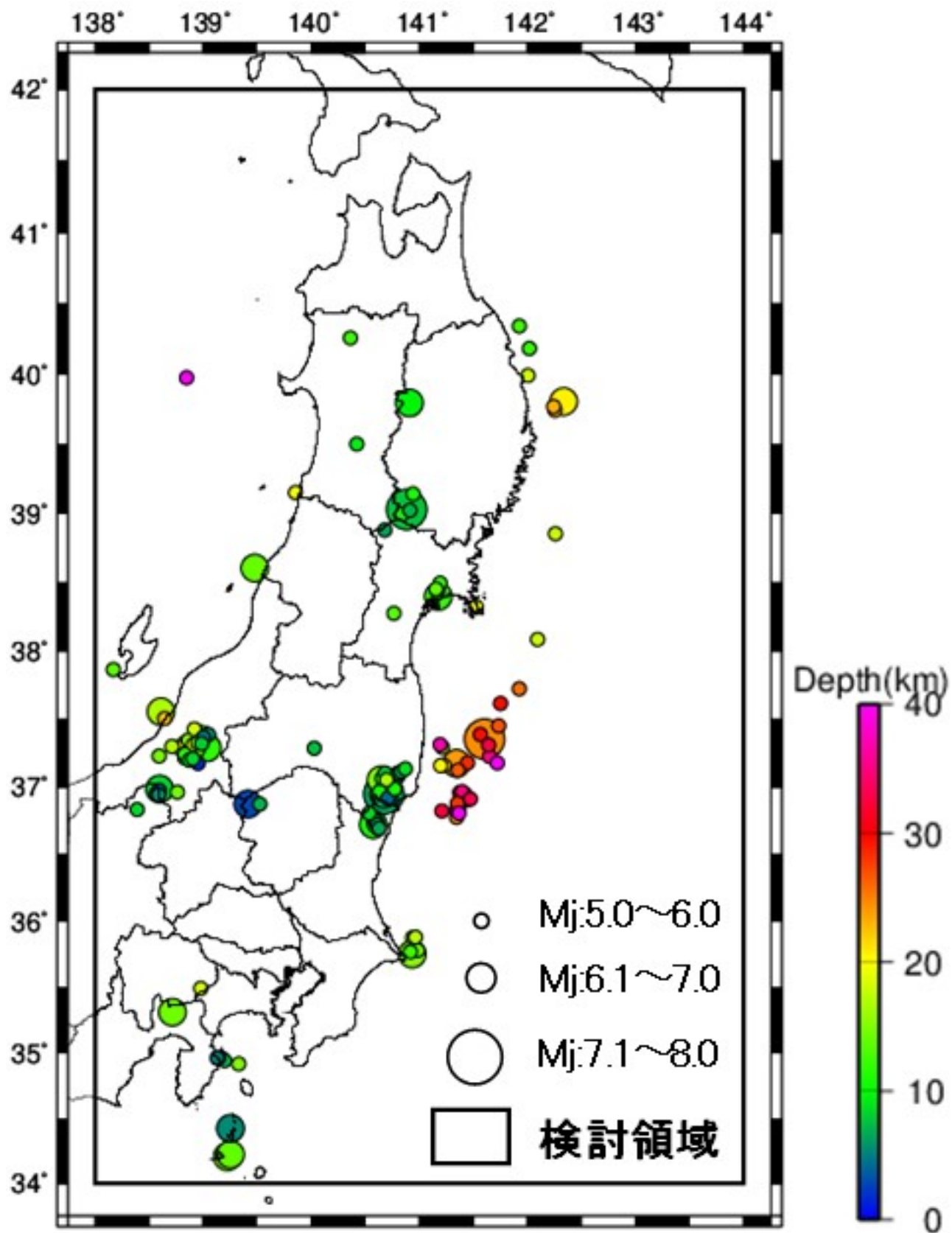
その2では観測点ごとに機械学習を用いて最適な予測モデルの検討を行ったが、その3ではその1と同様に対象地域の全ての観測点を対象として最適な予測モデルを構築する。震源の位置及びマグニチュード、震源のメカニズム解、観測点の位置、観測点の地下構造などの情報を組み合わせて複数の入力変数の組み合わせを設定する。ここでは、機械学習のアルゴリズムのうち、深層学習とXGBoostを用いて目的変数とする周期毎の擬似速度応答スペクトルの値の最適な予測モデルの作成を目指す。両手法の周期毎の予測精度を比較し、精度がより高い手法を用いて最終的な東日本の予測モデルを構築する。本発表ではこれらの検討結果を紹介する。

参考文献：

1)気象庁: 地震活動及び火山活動について, <https://www.jma.go.jp/jma/press/hodo.html>

謝辞：

本研究では、気象庁及び防災科学技術研究所のF-netの震源情報、K-NET及びKiK-netの地震記録、並びにJ-SHISの地下構造モデルを使用させて頂きました。ここに記して感謝いたします。



Study on Prediction of Pseudo-velocity Response Spectrum Using Machine Learning -Part2: Response Spectrum Simulation of the 2016 Kumamoto Earthquake-

*Kai Terazono¹, Tianzeng Wei¹, Hidenori Kawabe¹

1. Osaka University

1.はじめに

地震動予測の結果は、建物の耐震設計や地震による都市の被害想定などに利用されている。また、緊急地震速報では地震の揺れを迅速に予測し、揺れが到達する前に鉄道やエレベーターを止めるといった技術にも利用され始めている。予測の対象は震度、最大加速度や応答スペクトルなど様々な値があり、これらの値を精度よく予測することが求められている。既往の地震動予測の手法の1つとして、地震動予測式を使って最大加速度などの予測を行う手法がある。しかし、この手法では式の関数に用いられるパラメータ間の関係が決まっているため、関数に表すことのできない要素についてはその傾向を考慮して予測することができないという問題点がある¹⁾。そこで近年、機械学習を用いて地震動予測を行う研究が行われてきている¹⁾²⁾。機械学習には、様々な要素が影響しあう複雑な現象について、データに基づいて精度よく予測できるという特徴があり、地震動予測の分野においても予測精度の向上を目指して、機械学習を用いた研究が進められている¹⁾。すでに震度の予測などには機械学習が使用され始めているが、応答スペクトルの予測についてはまだあまり研究が行われていない。そこで、その2では、観測点ごとに機械学習を用いて応答スペクトルを予測する手法と、その最適な設定について検討する。

2. 解析の概要

本研究では地震は2016年熊本地震(前震、余震含む)の記録を用いて、九州地方を対象に機械学習を用いて減衰5%の疑似速度応答スペクトルの予測を目指し、その最適な設定について検討する。ここでは、機械学習の手法のうち深層学習を用い、ハイパーパラメータの最適な設定および、入力値の最適な組み合わせについて検討を行う。

3. データセットの作成

検討に用いる地震の検索範囲は、北緯32.0~33.5度、東経130.25~132.0度、震源深さ20km以浅、2016年4月14日 21時26分~2017年12月31日 23時59分、Mj4.0以上とし、この条件を満たす107地震を検討対象とする。検討に用いる観測点については、九州地方のK-NETおよびKiK-netの観測点のうち、観測記録数が一定数ある観測点を選定して検討を行う。検討に用いる観測点および検討対象とした107地震の震央位置を図に示す。これらの地震、観測点について気象庁およびF-netの震源情報、ならびに観測記録をもとに観測点ごとにデータセットを作成する。訓練データとテストデータの割合は8:2とした。

4. 入力値、予測値

本検討では入力層に入力するパラメータ(入力値)として、震源位置、気象庁マグニチュードおよび震源のメカニズム解を用いる。メカニズム解については、メカニズム解なし、CMT解、初動発震機構解、およびF-netのメカニズム解の4つを検討項目とし、それぞれの設定をモデル①~④とする。ハイパーパラメータについては、隠れ層のユニットの数を50,100,150,200個、隠れ層の数を1,2,3,4層とした計16ケースで検討を行う。学習率は0.001、ドロップアウトは有りとする。

5. 最適値の検討

4章で示した4つのモデルについて、それぞれ最適なハイパーパラメータの値を検討する。モデルごとに、計16ケースのうち評価関数Eの値が最も小さくなった最適な設定とそのときの評価関数の値を計算して、最も精度が良くなる最適な設定を求める。

謝辞

本研究を行うにあたり、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの地震記録およびF-netの強震観測データ、気象庁の強震観測データを使用させていただきました。作図にはGMTを使用させていただきました。ここに謹ん

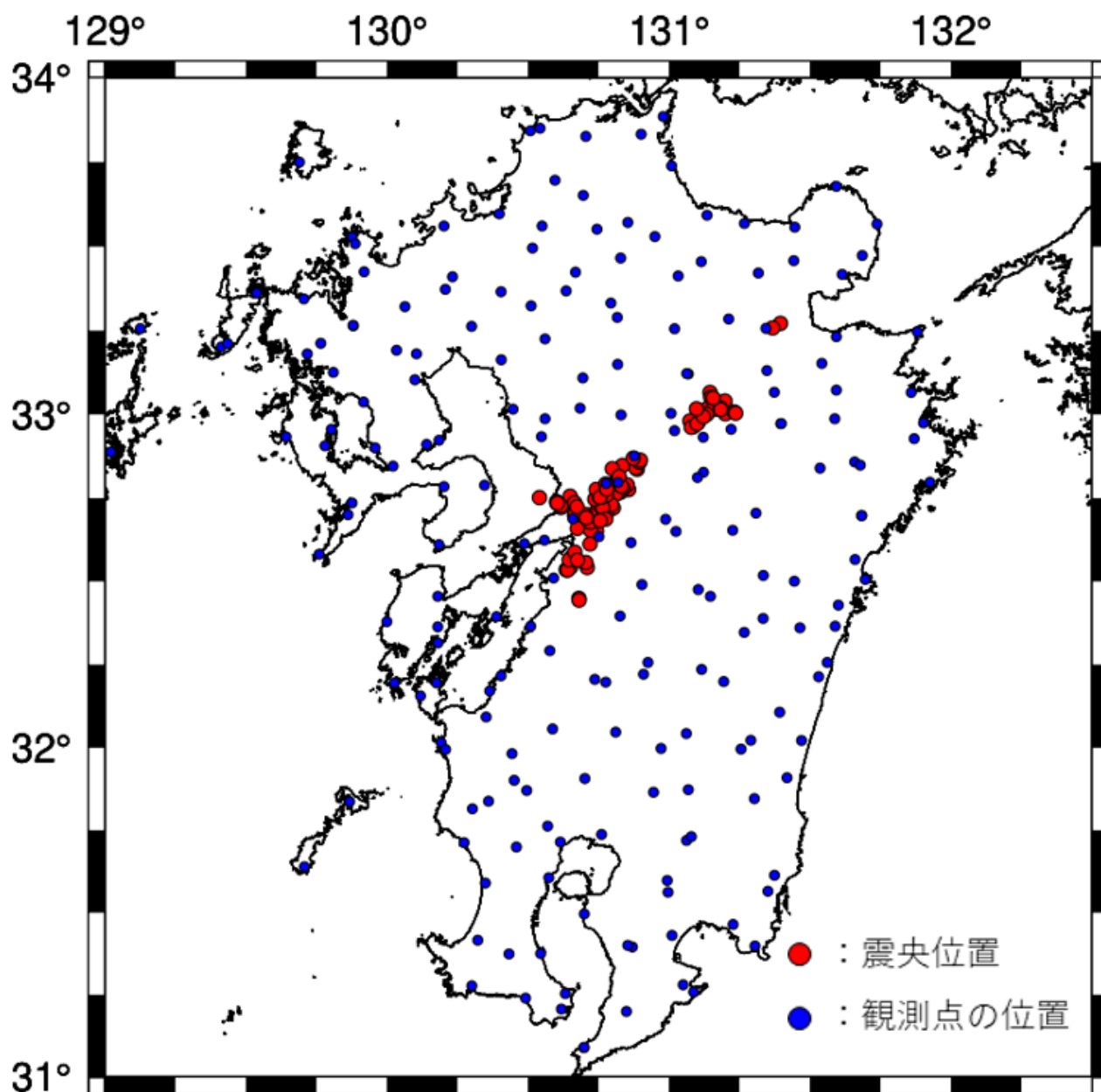
で、感謝の意を申し上げます。

参考文献

1) 地震本部: 機械学習と物理モデルのハイブリッドより良い地震動予測へ

https://www.jishin.go.jp/resource/column/column_20aut_p08/(参照日2022.3.10)

2) 小穴温子, 石井透, 和田健介: 機械学習による地震動評価モデルにおける特徴量の可能性, 人工知能学会全国大会論文集JSAI2020(0),3Rin403-3Rin403, 2020



Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities : S24.Committee activities for society

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏠 ROOM P-8
[S24] S24

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

*久田 嘉章¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

*吾妻 崇¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

*新井 隆太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

*松原 誠¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

*三井 雄太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

*篠原 雅尚¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

*松島 信一¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

*中川 和之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-01]Committee for Seismology Outreach

*久田 嘉章¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-02]Disaster Investigation Committee

*吾妻 崇¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-03]Newsletter Editorial Board

*新井 隆太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-04]Geoparks Assistance Committee

*松原 誠¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-05]Zisin Editorial Board

*三井 雄太¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-06]Public Relations Committee

*篠原 雅尚¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-07]Strong Ground Motion Committee

*松島 信一¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-08]Committee for School Education

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-09]Committee on Summer School for Kids

*加納 靖之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-10]Kanamori Fund

*中川 和之¹ (1. The Seismological Society of Japan)

Poster session (3rd Day) | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S22P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-01] Estimation of early postseismic slip following the 2003 Tokachi-oki earthquake by assimilating high-rate GNSS data

*Masayuki KANO¹, Yuji Itoh^{2,3} (1. Tohoku University, 2. ISTERre, Université Grenoble Alpes, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-02] Evaluation for hypocenter estimation error in the Kuril trench using seismic data

*Masayoshi ICHIYANAGI¹, Hiroaki Takahashi¹, Ryosuke Azuma² (1. ISV, Hokkaido University, 2. AOB, Tohoku University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-03] Three-dimensional Vs structure in the offshore forearc region along the Japan and Kuril trenches estimated by ambient noise tomography

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-04] Difference of tsunami sources by great earthquakes that occurred in the southern Kuril trench around the 17th and 13th centuries

*Kei IOKI¹, Yuki SAWAI¹, Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-05] A preliminary study on the western source area of the tsunami that struck the Pacific coast of Hokkaido, Japan, on April 25th, 1843

*Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology (IEVG), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-06] Nonlinear and linearized propagation characteristics of the 2003 Tokachi-Oki tsunami

*Yusuke YAMANAKA¹, Yuichiro TANIOKA¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Estimation of early postseismic slip following the 2003 Tokachi-oki earthquake by assimilating high-rate GNSS data

*Masayuki KANO¹, Yuji Itoh^{2,3}

1. Tohoku University, 2. ISTerre, Université Grenoble Alpes, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

巨大地震発生後の余効変動を正確に把握することは、地震後に発生する誘発地震の予測や次の巨大地震までの回復過程を理解する上で重要である。特に地震発生後数月から数年の間に卓越する余効すべりの正確な把握や推移予測には、地震発生直後（特に1日以内）の余効すべり（以下「初期余効すべり」と呼ぶ）の情報が必要であることが最近の研究により示されている（例えばTwardzik et al., 2019、Kano et al., 2020）。また初期余効すべりは断層のすべりを規定する摩擦構成則を理解する上でも重要である（Helmstetter and Shaw, 2009）。

Kano et al. (2020)は、GNSSによる地殻変動データを速度状態依存摩擦構成則を仮定して計算される断層すべりの数値シミュレーションにデータ同化する手法を開発し、2003年十勝沖地震（ M_w 8.0）の地震後一ヶ月の余効すべりを対象にすべりの再現と短期推移予測に成功した。しかしながら、この際同化したデータは地震翌日を初期時刻とした日ごとの変位データのため、地震直後から翌日までの情報は使用していない。また、最初の変位データが同化されるまでの1日間（すなわち地震の翌日から2日後）に不自然なすべり速度の加速が推定されたが、このすべりの加速の真偽を確かめるためには、より高サンプリングな観測データを用いる必要がある。そこで我々は従来より高サンプリングなGNSSデータに基づく地震直後の地殻変動データから初期余効すべりを推定するデータ同化手法を開発した。本講演では開発した手法を2003年十勝沖地震の初期余効すべり推定に適用した結果を報告する。

Evaluation for hypocenter estimation error in the Kuril trench using seismic data

*Masayoshi ICHIYANAGI¹, Hiroaki Takahashi¹, Ryosuke Azuma²

1. ISV, Hokkaido University, 2. AOB, Tohoku University

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋地震（M9.0）を契機として千島海溝から日本海溝にかけて防災科学技術研究所により日本海溝海底地震津波観測網（S-net）が設置された。気象庁では、2020年9月1日から気象庁一元化震源の震源決定にS-netのデータの利用が開始された。1999年に設置されたJAMSTECの釧路沖海底地震観測点3点を含むS-net観測網により北海道の千島海溝付近の十勝沖から根室沖にかけて発生する地震の震源決定精度の向上が期待される。本発表では、S-net観測網を利用することで、設置前と比較して、どの程度震源決定精度が向上したかを数値実験により評価する。十勝・根室沖で発生する地震の多くは沿岸寄りであるS-netと陸上の観測網の間で発生しているが、特にこの領域においてS-netの導入でどの程度震源決定精度の改善したのかを検討する。さらに、実際に十勝・根室沖で発生している地震の震源決定を行い、過去に行われた構造探査の結果と比較することで地震がプレート境界に対してどの位置で発生しているかを調査する。

2. 十勝・根室沖の数値実験による震源決定精度の検討

十勝沖から根室沖にかけて仮想震源を設定して各観測点への走時を計算し、P波とS波の読み取り誤差をランダムに複数発生させて走時に付与した後に震源決定を行うことで震源決定精度を検討した。使用した観測点は、S-net観測網内に仮想震源を配置した場合には、S-net観測点だけを用いた。また、陸上観測網とS-net観測網の間の沿岸寄りに配置した仮想震源に対しては、両観測網を用いた。走時計算と震源決定にはhypomh(Hirata and Matsu'ura, 1987)を用い、P波の読み取り値に0.1秒、S波の読み取り値に0.2秒の分散をもつ正規分布からランダムに誤算を発生させて1つの仮想震源に対して99通りの震源を計算した。その結果、誤差の与えたことにより、S-net観測網の中で発生した地震では水平方向で1km程度、深さ方向で8km程度のばらつきがあった。それに対して、S-net観測網と陸域観測網の間の仮想震源では、水平方向で5km程度、深さ方向で19km程度となった。S-net観測網内での震源決定精度のほうが沿岸部で発生した地震よりも誤差が小さい結果が得られた。

3. 堆積層補正値を考慮したS-net観測網での震源決定

次に、十勝沖の構造探査の結果（Iwasaki et al., 1989）を参考にして1次元P波速度構造を設定し、PS変換波から求めたS-net観測点とJAMSTECの釧路沖海底地震計3点の積層補正値（東・他、2019）を使用し、S-net観測網内で発生した地震に対して、海底地震計だけを用いて震源決定を行った。Vp/Vs比は1.73を仮定した。2021年5月16日に発生した十勝沖の地震（M6.1：気象庁一元化震源の深さ8.4km）は、この震源決定によると深さ14.9kmに決定された。Iwasaki et al. (1989)でのこの位置でのプレートの深さは15kmであり、この地震は、ほぼプレート境界で発生したことになる。一方、最近の海底地震観測の結果（地震本部、2009）から求めたプレート境界の位置は20kmとなっており、M6.1の地震はプレートの上盤側で発生したことになる。両観測結果によるプレートの深さの差は5kmであることから、数値実験で見積もられたの誤差（8km）よりも小さい。

本発表では更に、プレートの沈み込みを考慮した2.5次元の速度構造を用いて震源決定した結果も示す予定である。計算に使用した検測値及び震源データは、気象庁一元化震源データを使用しました。

Three-dimensional Vs structure in the offshore forearc region along the Japan and Kuril trenches estimated by ambient noise tomography

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）によって東北日本と北海道の前弧海域下における通常地震やスロー地震の詳細な活動や震源特性が明らかになってきた（e.g. Nishikawa et al., 2019, Yoshida et al., 2022）。しかし、地震発生場の理解に重要である前弧海域におけるS波速度構造の理解は限られている。本研究の目的は、S-netで観測された常時微動表面波を用いたトモグラフィーによって、東北日本と北海道の前弧海域における3次元S波速度構造を推定することである。解析にはTakagi et al. (2021) によって得られた機器ノイズ除去済みの多成分相互相関関数を用いて、レイリー波基本モード・1次モードおよびラブ波基本モードの分散曲線を観測点ペア毎の1次元速度構造をモデルパラメータとするTakagi & Nishida (2022)の手法により推定した。次に、波線の屈曲と有限周波数効果を考慮した表面波トモグラフィー（e.g. Yoshizawa et al., 2004）により周波数毎の位相速度マップを推定した。周波数帯域はレイリー波およびラブ波の基本モードでは0.03-0.12 Hz、レイリー波1次モードでは 0.09-0.12 Hz である。その後、大円経路からの距離で重みをつけて観測点ペア毎の1次元速度構造を平均化することで3次元初期構造を作成し、局所分散曲線の線形化インバージョン（Herrmann, 2013）により深さ50 kmまでの3次元S波速度構造を推定した。推定されたS波速度構造は、特に深さ10 km程度以浅において、構造探査によるP波速度構造の特徴とよく一致する（e.g. Ito et al., 2004）。また、沈み込む海洋性地殻と考えられる低速度領域が深さ30 km程度までイメージされた。上盤内およびプレート境界付近のS波速度構造は日本海溝および千島海溝に沿って空間的に変化しており、スロー地震および通常地震分布とS波速度構造の対応関係を詳細に調べることで、地震発生場の理解をより深められると期待される。

Difference of tsunami sources by great earthquakes that occurred in the southern Kuril trench around the 17th and 13th centuries

*Kei IOKI¹, Yuki SAWAI¹, Yuichi NAMEGAYA¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

歴史記録や地質記録の研究により、千島海溝南部ではM8-9クラスの巨大地震が繰り返し発生してきたことが明らかになっている。北海道東部太平洋沿岸地域では、先史時代に堆積した津波堆積物が報告されており、最新の巨大津波は17世紀、その一つ前のものは13世紀頃に発生したと考えられている(Nanayama et al., 2003等)。本研究では17世紀および13世紀頃に発生した地震の規模評価のため、津波堆積物の分布と計算浸水範囲を比較し、繰り返し発生する巨大地震の発生メカニズムの多様性について考察した。

17世紀と13世紀頃の津波堆積物の分布が違うことは、先行研究によって指摘されている。例えば、北海道厚岸郡浜中町霧多布湿原の一番沢奥部においては、17世紀および13世紀頃の津波堆積物の分布範囲が比較・検討されており、Nanayama et al. (2003)等より内陸で17世紀の津波堆積物が確認され、それよりさらに内陸(海岸から約4 km内陸)で13世紀頃の津波堆積物が確認されている(中村ほか, 2019)。また北海道根室市別当賀フレシマ湿原においても、17世紀の津波堆積物と、さらに内陸で13世紀頃の津波堆積物が報告されている(七山ほか, 2004)。

以上のような津波堆積物の分布状況を再現するため、津波堆積物の分布範囲と計算した浸水範囲の比較を行った。Satake et al. (2008)やIoki and Tanioka (2016)の先行研究では、17世紀地震の波源は、根室セグメントより十勝セグメントの方がすべり量が大きい特徴を持つ。一方、浸水計算結果より13世紀頃の地震の波源は、十勝セグメントより根室セグメントの方がすべり量が大きい可能性があることがわかった。本研究の一部はJSPS科研費(20H01988)により実施した。

引用文献

- ・ Nanayama, F., K. Satake, R. Furukawa, K. Shimokawa, B. F. Atwater, K. Shigeno, and S. Yamaki, 2003, Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench, *Nature*, 424, 660-663.
- ・ 中村淳路, 澤井祐紀, 松本弾, 谷川晃一郎, 伊尾木圭衣, 2019, 北海道霧多布湿原一番沢における津波堆積物の分布, *第四紀研究*, 58, 4, 303-312.
- ・ 七山 太, 重野聖之, 三浦健一郎, 古川竜太, 2004, 北海道東部, 根室市別当賀低地において記載された4層の津波砂層と広域イベント対比, *活断層・古地震研究報告*, 4, 9-15.
- ・ Satake, K., F. Nanayama, and S. Yamaki, 2008, Fault models of unusual tsunami in the 17th century along the Kuril trench, *Earth Planets Space*, 60, 925-935.
- ・ Ioki, K., Tanioka, Y., 2016, Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 433, 133-138.

A preliminary study on the western source area of the tsunami that struck the Pacific coast of Hokkaido, Japan, on April 25th, 1843

*Yuichi NAMEGAYA¹

1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology (IEVG), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

天保十四年三月二十六日（1843年4月25日）に北海道太平洋沿岸を襲った津波（以下、1843年津波と記す）について、その波源の西側にかんする予察的検討を行ったので報告する。1843年津波は1952年十勝沖地震津波（以下、1952年津波と記す）とその高さの分布パターンが似ているとされている（例えば、羽鳥, 1984; Satake et al., 2005）。例えば、いずれの津波も北海道厚岸町周辺に波高の高いピークがあること、また三陸沿岸の青森県八戸市などで比較的大きな波高が記録されていることが挙げられる。しかしながら、八戸での実際の津波の高さは1952年津波で2 m（中央气象台, 1953）、1843年津波で3 m（都司・他, 2014）と推定されていることや、宮古市の宮古湾奥においては1952年津波で2.0-2.5 m（金浜集落, 中央气象台, 1953）、1843年津波で3.2 m（赤前集落, 都司・他, 2014）と推定されている。これらのことから三陸沿岸については1952年津波に比べ1843年津波のほうが津波の高さが大きい可能性がある。この津波の高さの違いがそのまま波源の大きさ等の違いを表していると考えた場合、1843年津波の波源モデルを検討するためには、同津波と波高分布が似ているとされる1952年津波の波源モデルを出発点に付加的な波源を追加することが一つの解決案ではないかと考えた。そこで1843年津波の波源モデルとして、1952年地震の断層モデル（Hirata et al., 2003）に加えて、Hirata et al. (2003)の最西側の断層（小断層A・B）を西側に延長するような形で100 km 四方の断層（小断層K）を設置し2 mすべらせた場合で沿岸における津波の高さを計算した。この結果、八戸沿岸においては小断層Kを設置することにより津波の高さが増加し、小断層Kを設置しない場合に比べ1.3-1.9 倍程度高い津波の高さが計算された。これらは1843年津波の実際の高さに近くなる結果であった。このような傾向は三陸沿岸のほかの地域にも見られ、小断層Kを加えた場合の高さが3倍程度高くなる場所もあった。また、小断層Kを加えた場合は、北海道函館において記録されている津波の高さ（0.5 m, 羽鳥, 1984）もおおむね再現することができた。一方で厚岸側に着目すると小断層Kを加えた場合でも沿岸における津波高さの変化はほとんどなかった。このことは1952年地震のすべり量分布に対してすべり量2 mの小断層Kの道東への寄与はほとんどないといえる。逆に言えば道東のデータからでは小断層Kの必要性が議論できないことを意味する。本研究で扱った小断層Kの存在は、その存在性についてもまだ検討の余地がある。そもそも道東における1952年地震のすべり量分布と1843年地震のすべり量分布を同じとして扱っていいのか、あるいは三陸海岸沿岸での歴史記録調査を含め、1843年や1952年津波の実際の津波の高さデータの精査などを行う必要があり、これらの結果によっては他の解が生じる可能性も十分にあり得るだろう。なお、本研究で行った津波の計算はJAGURS（Baba et al., 2015）を利用し、沿岸域周辺では5秒メッシュで計算を行いました。また、本研究の一部はJSPS科研費（20H01988）により実施いたしました。記して感謝いたします。

Nonlinear and linearized propagation characteristics of the 2003 Tokachi-Oki tsunami

*Yusuke YAMANAKA¹, Yuichiro TANIOKA¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

地震により発生した津波が検潮所で観測された場合、それを観測津波波形として用いて震源過程の逆解析が行われる場合がある。そのような逆解析を行う場合、まず震源域内の要素断層すべりによる津波のグリーン関数を線形理論に基づき推定する。それを検潮所地点において線形に重ね合わせることで、観測津波波形を最も妥当に再現できる要素断層のすべり量分布を推定することが多い。しかしながら、沿岸域における津波は非線形特性を有している。前述の手法では、線形重ね合わせの原理を用いた逆解析の理論的整合性を維持するために津波の波動を線形近似して推定するが、これが逆解析の結果に及ぼす影響は十分に検討されていない。本研究では、津波の非線形性が逆解析に与える影響を評価することを念頭に置き、2003年十勝沖地震津波を対象としてその数値波動特性を分析した。

先行研究によってすでに十勝沖地震のモデル化は行われており、検潮所で観測された津波波形に基づく断層モデルも構築されている。本研究ではその断層モデルによる津波の伝播を、線形長波方程式および非線形長波方程式に基づき推定し、北海道沿岸域の検潮所地点(苫小牧西, 苫小牧東, 十勝, 釧路, 厚岸, 花咲)において両者を比較した。その結果、線形および非線形長波方程式に基づきそれぞれ推定された第一波目の津波は、苫小牧西, 苫小牧東, 厚岸, 花咲では概ね一致したが、津波による水位変動が大きかった十勝および釧路では両者が明らかに乖離していた。推定される津波の振幅と周期に線形近似の影響が及んでいたことから、その影響を考慮しないまま逆解析を行えば、推定されるすべり量の大きさやその分布に無視できない誤差が生じる可能性があることがわかった。さらに十勝検潮所周辺海域において、非線形長波方程式に組み込まれている非線形性項の影響の大きさを数値的に分析した。その結果、海底摩擦損失項よりも移流項の方が推定波形に及ぼす影響が相対的に大きく、移流項の影響は検潮所が設置されている十勝港の内側および防波堤開口部で顕著になることがわかった。

以上の結果から、津波の特性と地形条件によっては第一波目の津波においても非線形効果が無視できず、それが線形逆解析の結果に不確実性をもたらす可能性があることがわかった。観測津波波形を用いた線形逆解析を行う際には、津波の非線形効果が観測された津波波形にどの程度反映されているかを分析し、その影響が比較的小さい観測波形をスクリーニングする必要がある。

Poster session (3rd Day) | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-3
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S23P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-01] Minimum information dependence modeling for analyzing the dependence in mixed-domain data: Application to the dependence analysis of focal mechanisms and depths

*Keisuke YANO¹, Tomonari Sei² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-02] Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault

*Shin-ichi ITO¹, Masayuki KANO², Hiromichi NAGAO¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tohoku University)

Minimum information dependence modeling for analyzing the dependence in mixed-domain data: Application to the dependence analysis of focal mechanisms and depths

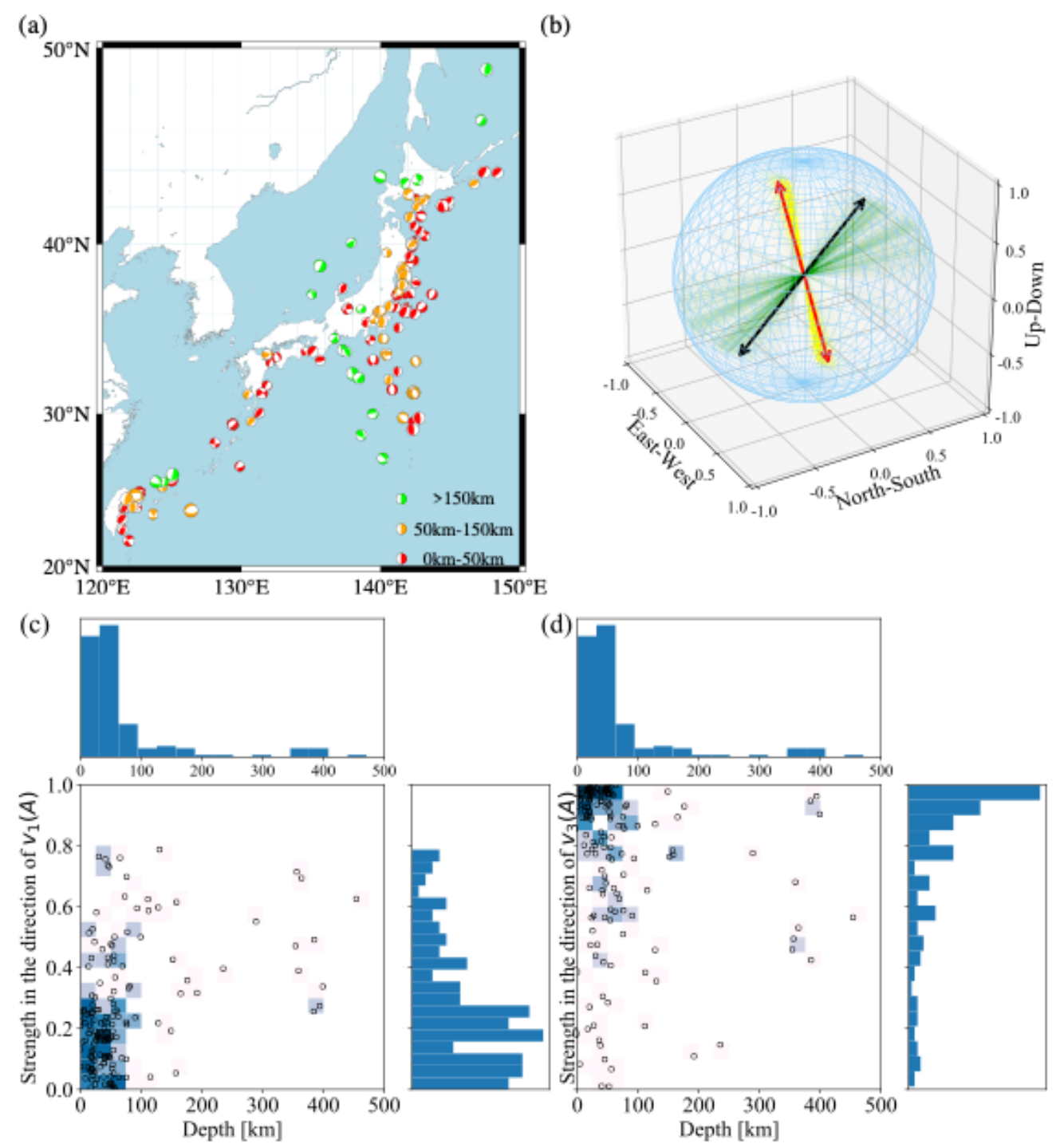
*Keisuke YANO¹, Tomonari Sei²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Univ. of Tokyo

地震学にはカテゴリーデータ・正值データ・角度データなど多種多様な形式のデータが存在する。本研究ではこれらの多種多様な形式のデータ間の依存関係を調べる統計モデル及び依存関係の推定法を提案する。提案手法のデモンストレーションとして、2021年の気象庁CMT解リストを用いて日本全土の初動発震機構解と深さの依存関係の解析事例を紹介する。

本研究では変数間の依存関係を表すパラメータと周辺分布を規定するパラメータを持つ最小情報従属モデルを提案する。このモデルのパラメータをデータから推定することによって、各変数間にどのような依存関係があるか、どのくらいの依存関係があるか、ということを定量的に評価することができる。しかしながら、尤度には複雑な項が含まれており、最尤推定することは非常に難しい。そこで、本研究では、尤度計算を必要としない依存関係のパラメータの推定法を提案する。提案する推定法は、周辺分布を規定するパラメータを用いず行うことができ、さらに最尤法と漸近的に同等である。

最小情報従属モデルを用いて、メカニズム解と震源の深さの依存関係を解析する。この適用では、2021年の気象庁CMT解リストに掲載されている158個の地震を用いた。震源の深さごとの震源球を図1(a)に表示している。この図から、メカニズム解と震源の深さの依存関係が定性的に確認される。そこで、最小情報従属モデルを用いて両者の依存関係の定量的な評価を試みる。まず、P軸とT軸を三次元空間上の直交枠(直交する二つの軸)と捉える。すなわち、P軸とT軸のペアはシュティーフェル多様体の要素であるとする。震源の深さは実数値と捉える。次に、P軸とT軸と震源の深さに対する最小情報従属モデルを考える。このモデルはP軸と深さの依存関係を表す未知の 3×3 の行列パラメータA・T軸と深さの依存関係を表す未知の 3×3 の行列パラメータBをもつ。A=B=0を仮説検定することでメカニズム解と震源の深さの独立性の検定を行うことができる。さらに、Aを固有値分解し、その固有ベクトルを求めることによって、P軸と深さとの依存関係が最も大きくなるあるいは最も小さくなる方向を同定することができる。Bを固有値分解することによって同様の解析をT軸に関しても行うことができる。まず、A=B=0を帰無仮説とする仮説検定のp-値は0.02となった。次に、データから推定されたP軸と深さの依存関係パラメータの固有ベクトルを図1(b)に示す。ここでは、Aを第2固有値が0になるように変換し、第1固有ベクトル(固有値が正の方向)及び第3固有ベクトル(固有値が負の方向)を示している。赤色の軸は推定第1固有ベクトルであり、周囲の黄色の軸はそのばらつきを表す。黒色の軸は推定第3固有ベクトルであり、周囲の緑色の軸はそのばらつきを表す。P軸データの第1固有ベクトル方向成分の大きさと震源の深さの2次元ヒストグラムを図1(c)に示す。P軸データの第3固有ベクトル方向成分の大きさと深さデータの2次元ヒストグラムを図1(d)に示す。図1(c)のヒストグラムから、震源が深くなるとP軸の鉛直に近い成分が0に近い地震が少なくなることが見てとれる。



Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault

*Shin-ichi ITO¹, Masayuki KANO², Hiromichi NAGAO¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tohoku University

Slip motion along a fault largely depends on the inhomogeneity of friction that occurs between the fault interfaces. Thus, it is a crucial task to estimate the spatial-dependent frictional features from the observations of the slip motion and then to identify essential parts that contribute to the principal slip motion by quantifying uncertainties involved in the estimates. This study considers an uncertainty quantification problem of the spatially-dependent frictional features based on a fault motion model that mimics the slow-slipping region along the Bungo Channel in the southwestern part of Japan. The fault motion model employs a rate-and-state dependent friction law, in which the frictional parameters are spatially dependent. Although uncertainty quantification in high-resolution is needed to attain the above task, such quantification based on the conventional statistical ways is computationally hard since the complexity exponentially increases with the spatial resolution. This study employs a variational data assimilation method based on a second-order adjoint method to avoid such complexity. Since the data assimilation method enables a selective extraction of the uncertainty of interest, we can attain a fast uncertainty quantification of the frictional parameters in high-resolution. The application of the data assimilation to the fault motion model together with the synthetic observational data of the slip velocity quantifies the spatial dependency of the uncertainty involved in the frictional parameters in high-resolution and reveals how the amount or quality of the observational data of the slip motion influences to the spatial distribution of the frictional parameters. Such quantification provides valuable information to the observational design.