Tue. Oct 31, 2023

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room A F205+206

[S08] AM-1

chairperson:Futoshi YAMASHITA(NIED), Ryosuke Ando(University of Tokyo)

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

[S08-01] IODP JTRACK: Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench toward understanding fault strengthening and stress build-up processes

*Shuichi Kodaira[1], Kohtaro Ujiie[2], Takehiro Hirose[1], Weiren Lin[3], Ryota Hino[4], Yasuyuki Nakamura[1], Tatsuya Kubota[5] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. University of Tsukuba, 3. Kyoto University, 4. Tohoku University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-02] Development of a giant rock friction apparatus for understanding faulting phenomena over broad spatiotemporal scales

*Futoshi YAMASHITA[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Kurama Okubo[1], Sumire Maeda[1] (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University)

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

[S08-03] Molecular Study of Rock Friction and Wear Mechanism Using a Pair of α-quartz Asperities

*Sheng Li[1], Eiichi Fukuyama[1] (1. Kyoto University)

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

[S08-04] Influence of particle number on fluidization of sheared granular by vibration

*Ryunosuke Sakamoto[1], Takahiro Hatano[1] (1. Osaka University)

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

[S08-05] Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkiye, Earthquake Sequence

*Ryosuke ANDO[1], Dogan Kalafat[2], Haluk Ozener[2], Esref Yalcinkaya[3], Yojiro Yamamoto[4] (1. University of Tokyo, 2. KOERI, Bogazici University, 3. Istanbul University, 4. JAMSTEC)

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room A F205+206

[S08] AM-2

chairperson:Ryoko NAKATA(Graduate School of Science, The University of Tokyo), Daisuke Sato(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S08-06] The Investigation of Stress Condition of the 2014 Northern Nagano Earthquake with Surface Rupture Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA[1], Junichi Miyakoshi[1], Naoki Iwata[2], Yuji Sasai[2], Akihiro Matsui[2], Keita Higashi[2] (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. Chuden Engineering Consultants)

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

[S08-07] Numerical simulation of earthquake generation cycle using multiscale circular patch model

*Ryoko Nakata[1], Takane Hori[2], Hideo Aochi[3,4], Satoshi Ide[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. BRGM, France, 4. ENS-CNRS PSL, France)

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

[S08-08] Episodic Aseismic Slip Events as Incomplete Nucleation of Seismic Slip due to Heterogeneous Stress Distribution

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

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

[S08-09] 3D viscoelastic earthquake sequence simulation with plate-boundary fault and inland faults

*Ryoya Matsushima[1], So Ozawa[2], Ryosuke Ando[1] (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Stanford University)

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

[S08-10] Separating interlocking asperities from high slip deficit zones along the Nankai Trough, Japan

*Daisuke Sato[1], Takane Hori[1], Yukitoshi Fukahata[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room A F205+206

[S08] PM-1

chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University), Hitoshi HIROSE(Kobe University)

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

[S08-11] Analytical treatment of transition condition between slow and fast earthquakes and its validity

*Takehito SUZUKI[1], Hiroshi MATSUKAWA[1] (1. Dept. Phys. Sci., Aoyama Gakuin University)

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

[S08-12] Slow and fast earthquakes and earthquake modeling

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

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

[S08-13] Mega-earthquake potential along the Peruvian subduction zone based on shear stress build-up and the earthquake energy balance

*Nelson PULIDO[1], Juan Carlos Villegas-Lanza[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Instituto Geofisico del Peru)

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

[S08-14] Inter-plate sluggish slip: its initiation and growth

*Yoshio FUKAO[1], Hiroko Sugioka[2], Ryo Furue[3], Tatsuya Kubota[4] (1. JAMSTEC, Yokohama Institute, Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Kobe Univ., 3. JAMSTEC,, 4. NIED)

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

[S08-15] A stacking analysis of the tilt record prior to the 2011 great Tohoku earthquake

*Hitoshi HIROSE[1,2], Aitaro Kato[3], Takeshi Kimura[2] (1. Kobe University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. ERI, Univ. of Tokyo)

Room A | Regular session：S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

3:00 PM - 4:38 PM JST | 6:00 AM - 7:38 AM UTC | Room A F205+206

[S20] PM-2

chairperson:Takuto Maeda, Takuya Nishimura

3:00 PM - 3:03 PM JST | 6:00 AM - 6:03 AM UTC

[1A16-19-1add] President speech

3:03 PM - 3:18 PM JST | 6:03 AM - 6:18 AM UTC

[1A16-19-2add] Award ceremony

3:18 PM - 3:38 PM JST | 6:18 AM - 6:38 AM UTC

[S20-01] [Invited]Seismic tomography: New insights into seismotectonics, volcanism and geodynamics

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

3:38 PM - 3:58 PM JST | 6:38 AM - 6:58 AM UTC

[S20-02] [Invited]Flexible source-process imaging to illuminate a relationship between rupture growth complexity and fault geometry

*Ryo Okuwaki[1] (1. University of Tsukuba)

3:58 PM - 4:18 PM JST | 6:58 AM - 7:18 AM UTC

[S20-03] [Invited]Study on earthquake, tsunami, and volcanic phenomena using ocean-bottom pressure data considering solid-fluid coupled earth

*Tatsuya Kubota[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:18 PM - 4:38 PM JST | 7:18 AM - 7:38 AM UTC

[S20-04] [Invited]Improvement of earthquake early warning and detection of characteristic seismicity based on identification of simultaneous earthquakes

*Koji TAMARIBUCHI[1] (1. Meteorological Research Institute)

Room B | Special session：S23. 100 years after the Great Kanto earthquake: development of earthquake research in the Kanto region

9:30 AM - 10:40 AM JST | 12:30 AM - 1:40 AM UTC | Room B F201

[S23] AM-1

chairperson:Yusuke Tomozawa(Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation), Takumi Hayashida(IISEE, Building Research Institute)

9:30 AM - 9:50 AM JST | 12:30 AM - 12:50 AM UTC

[S23-01] [Invited]Probability of M8 class earthquake along the Sagami Trough, central Japan

*Masajiro IMOTO[1], Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:50 AM - 10:05 AM JST | 12:50 AM - 1:05 AM UTC

[S23-02] Future Probability of Occurrence of the Next M~8 Kanto Earthquake for Various Combination of Past Events

*Kenji SATAKE[1], Katsuhiko ISHIBASHI[2] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kobe University)

10:05 AM - 10:25 AM JST | 1:05 AM - 1:25 AM UTC

[S23-03] [Invited]Crustal Structures and Seismo-tectonics of the Izu Collision Zone

*Ryou HONDA[1], Yuki ABE[1], Ryosuke DOKE[1] (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government)

10:25 AM - 10:40 AM JST | 1:25 AM - 1:40 AM UTC

[S23-04] Importance of the 1923 coseismic uplift of Hatsushima Island in western Sagami Bay for seismotectonics of the Kanto earthquake

*Katsuhiko ISHIBASHI[1] (1. none)

Room B | Special session：S23. 100 years after the Great Kanto earthquake: development of earthquake research in the Kanto region

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room B F201

[S23] AM-2

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science), Mikiya Yamashita(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S23-05] Changes in seismic activity before the 1923 Kanto earthquake inferred from the macro-seismic observation and other data

*Nobuo HAMADA[1], Kenshiro Tsumura[1] (1. non)

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

[S23-06] Structural Characteristics of Uppermost Frontal Thrust along the Sagami Trough

*Mikiya YAMASHITA[1], Ayanori Misawa[1], Takafumi Kasaya[2], Masataka Kinoshita[3], Seiichi Miura[2] (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. JAMSTEC, 3. ERI, University of Tokyo)

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

[S23-07] Geometry of the top of Philippine Sea plate beneath the Kanto region, Japan: revealed by seismic profiling

*Hiroshi SATO[1,2], Susumu Abe[3], Takaya Iwasaki[4,1], Makoto Matsubara[5], Eiji Kurashimo[1], Tatsuya Ishiyama[1], Naoko Kato[1], Yoshitaka Nakayama[6], Naoshi Hirata[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. Shizuoka Univ., 3. JGI. Inc., 4. Association for the Development of Earthquake Prediction, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 6. Japan Organization for Metals and Energy Security)

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

[S23-08] Strong ground motion in the South-East part of Ibaraki Prefecture during the earthquakes in the North-East part of Chiba Prefecture, Japan

*Tomiichi UETAKE[1], Kazuhito HIKIMA[1] (1. Tokyo Electric Power Company Holdings)

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

[S23-09] How to convey and inherit the 1923 Great Kanto Earthquake - Utilization of digital contents

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

Room B | Regular session：S04. Tectonics

1:30 PM - 2:30 PM JST | 4:30 AM - 5:30 AM UTC | Room B F201

[S04] PM-1

chairperson:Dapeng Zhao(Tohoku University)

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

[S04-01] 2D subduction models in the presence of a high-density rigid continental block: a case study for the slab geometry beneath the Kii Peninsula.

*Erika Moreno[1], Vlad Manea[2], Marina Manea[2], Nobuaki Suenaga[3], Shoichi Yoshioka[1] (1. Kobe University, 2. CGEO, Universidad Nacional Autónoma de México, 3. Kyoto University)

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

[S04-02] Seismological evidence of a shear zone inside the Philippine Sea plate slab in Suruga Bay.

*Yannis PANAYOTOPOULOS[1], Hisatoshi Baba[2], Takahito Nishimiya[3] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai Univershity , 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

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

[S04-03] P and S wave tomography beneath Japan from joint inversion of local and teleseismic data recorded by S-net and Hi-net

*Motoya Suzuki[1], Dapeng Zhao[1], Genti Toyokuni[1] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S04-04] Subduction hydrothermal regime and seismotectonic variation along Kermadec-Tonga megathrusts

*Ye Zhu[1], Yingfeng Ji[1] (1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences)

Room C | Regular session：S13. Crustal fluids and earthquake

9:30 AM - 10:00 AM JST | 12:30 AM - 1:00 AM UTC | Room C F202

[S13] AM-1

chairperson:Daisuke INAZU

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

[S13-01] Abrupt water temperature increases near seafloor after the 2011 Tohoku earthquake

*Daisuke INAZU[1], Yoshihiro ITO[2], Ryota HINO[3], Wataru TANIKAWA[4] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Kyoto University, 3. Tohoku University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S13-02] The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Near-Trench Structural Evolution by Time-lapse Seismic Depth Imaging

*Ehsan Jamali Hondori[1], Jin-Oh Park[2] (1. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

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

10:00 AM - 10:45 AM JST | 1:00 AM - 1:45 AM UTC | Room C F202

[S03] AM-1

chairperson:Tomokazu Kobayashi

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

[S03-01] Detailed fault ruptures for the 2023 Turkey-Syria earthquake revealed by SAR-based crustal deformation analysis

*Tomokazu KOBAYASHI[1], Hiroshi Munekane[1], Masaki Kuwahara[1], Haruna Furui[1] (1. Geospatial Information Authority of Japan)

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

[S03-02] Numerical simulation of marine terrace at Kikai-jima: clarifying uplift history based on the interaction of EQ timing and geomorphic change

*Takeru Kamiya[1], Takeo Ito[2] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S03-03] Interseismic deformation analysis due to megathrust locking using GNSS Data: A case study of southwestern Pakistan

*Shaukat Parvaiz[1,2,3], Yo Fukushima[1] (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University Japan, 2. Department of Earth Sciences, Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan., 3. Department of Geological Engineering, Balochistan University of I.T, Engineering and Management Sciences (BUITEMS), Quetta, Pakistan.)

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

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room C F202

[S03] AM-2

chairperson:Fumiaki Tomita(Tohoku University), Hideto Otsuka(Tohoku University)

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

[S03-04] Temporal Changes of Seismic Attenuation after the Tohoku-oki Earthquake

*Hayato Tero[1], Junichi Nakajima[1] (1. Tokyo Institute of Technology)

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

[S03-05] GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations and their results along the Japan-Kuril trench

*Fumiaki TOMITA[1], Motoyuki Kido[1], Takeshi Iinuma[2], Yusaku Ohta[3], Ryota Hino[3], Mako Ohzono[4], Hiroaki Takahashi[4], Raymondo Plata-Martínez[2], Tetsuo No[2], Kazuo Nakahigashi[5], Kyosuke Nakamura[2] (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S03-06] Estimate the interplate coupling around the Southern Kuril Trench

*Shunsuke Imai[1], Hiroaki Takahashi[2] (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

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

[S03-07] Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake

*Kyosuke Hirata[1], Ryota Hino[1], Hideto Otsuka[1], Yusaku Ohta[1], Norihisa Usui[2] (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S03-08] SSE detectability of OBP data using principal component analysis: Application to data from Hikurangi and Alaska

*Hideto Otsuka[1], Yusaku Ohta[1], Ryota Hino[1] (1. Graduate school of science, Tohoku university)

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

1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room C F202

[S03] PM-1

chairperson:Yusuke Yokota, Tadashi Ishikawa

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

[S03-09] Representation of underwater sound speed structure in GNSS-A

*Yusuke YOKOTA[1], Tadashi Ishikawa[2], Shun-ichi Watanabe[2], Yuto Nakamura[2], Koya Nagae[2] (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-10] Trial of the detection of seafloor movement by the differential bathymetry method

*Tadashi ISHIKAWA[1], Masanao Sumiyoshi[1], Yuto Nakamura[1], Kei Imuta[1] (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] GNSS/A seafloor geodesy using an ultralight and compact towed buoy system.

*Ryoya IKUTA[1], Yasushi Harada[2], Keizo Sayanagi[2], Keiichi Tadokoro[3], Ryosuke Nakahata[1], Yusuke Yokota[1] (1. Shizuoka University, 2. Tokai University, 3. Nagoya University)

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

[S03-12] Reanalysis of GNSS-A data obtained in the Hateruma basin at the southwestern end of the Ryukyu trench

*Ryosuke Nakahata[1], Ryoya Ikuta[1], keiichi Tadokoro[2], Yasushi Harada[3] (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Tokai University)

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

[S03-13] Numerical experiment on template matching and relative strength index based on noise analysis of high-rate GNSS data

*Riko Arai[1], Yuta Mitsui[2] (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University)

Room D | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

9:30 AM - 10:40 AM JST | 12:30 AM - 1:40 AM UTC | Room D F204

[S22] AM-1

chairperson:Yoshihiro Hiramatsu, Takuya Nishimura

9:30 AM - 9:50 AM JST | 12:30 AM - 12:50 AM UTC

[S22-01] [Invited]Central Japan as a cold subduction zone and its implications for deep dehydration of subducted slab beneath the Noto peninsula

*Hikaru Iwamori[1], Hitomi Nakamura[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

9:50 AM - 10:10 AM JST | 12:50 AM - 1:10 AM UTC

[S22-02] [Invited]Subsurface resistivity structure and its heterogeneity around the earthquake swarm region in the Northeastern Noto Peninsula

*Ryokei YOSHIMURA[1], Yoshihiro Hiramatsu[2], Tada-nori Goto[3], Takafumi Kasaya[4], Rintaro Miyamachi[1], Jun Nakagawa[1], Nagi Yamashita[3], Rei Amano[3], Masato Fukata[2], Amane Sugii[2], Taisei Inui[1], Ken'ichi Yamazaki[1], Shintaro Komatsu[1], Takuya Iwahori[1], Masahiro Yoshikawa[1], Ayako Namigishi[1], Airi Nagaoka[1], Yasuto Tatsuyama[1], Akihiro Sawada[2], Ce Zhang[2], Mitsuteru Fukuoka[2], Yuya Jinde[2], Yuki Oshima[2], Momoka Kanazawa[3] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. University of Hyogo, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

10:10 AM - 10:25 AM JST | 1:10 AM - 1:25 AM UTC

[S22-03] Immediate aftershocks following the 2023 M6.5 earthquake in the Noto Peninsula, central Japan: Implication of fault valve model

*Aitaro KATO[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

10:25 AM - 10:40 AM JST | 1:25 AM - 1:40 AM UTC

[S22-04] Recent seismic activity in Noto region of Ishikawa Prefecture, including the M6.5 earthquake on May 5, 2023.

*Kazuhiro IWAKIRI[1], Issei SUGANUMA[1], Masahiko NODA[1], Kazuki MIYAOKA[1], Minoru FUNAKOSHI[1], Kana AKIYAMA[1], Nobuyuki HIROTA[1], Shigeki AOKI[1] (1. Japan Meteorological Agency)

Room D | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room D F204

[S22] AM-2

chairperson:Kimuyuki Asano, Masatoshi Miyazawa

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

[S22-05] Temporal variations of the shear wave polarization anisotropy around the source area of the swarm earthquakes in the Noto peninsula

*Osamu MURAKAMI[1] (1. JAEA, Tono Geoscience Center)

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

[S22-06] Fault slip distribution due to Mw 6.2 Earthquake at Noto peninsula on 5 May 2023 based on InSAR analysis

*Yohei Kinoshita[1] (1. University of Tsukuba)

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

[S22-07] Strong ground motion associated with seismic swarms at Noto Peninsula recorded by Distributed Acoustic Sensing (DAS) technique

*Masatoshi MIYAZAWA[1], Eiichiro ARAKI[2], Yoshiyuki TANAKA[3] (1. Kyoto Univ., 2. JAMSTEC, 3. Univ. of Tokyo)

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

[S22-08] Source rupture process of the M6.5 earthquake in the Noto Peninsula on May 5, 2023, estimated from strong motion records

*Kimiyuki ASANO[1], Tomotaka IWATA[1] (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S22-09] Source Processes of the May 2023 Off Noto Peninsula Earthquake and These Strong Ground Motions

*Kazuhito HIKIMA[1], Tomiichi UETAKE[1] (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. Tepco Research Institute)

Room D | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room D F204

[S22] PM-1

chairperson:Tomotaka Iwata, Michihiro Ohori

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

[S22-10] Ground motion characteristics and underground velocity structure at K-NET Shoin station

*Tomotaka IWATA[1], Kimiyuki Asano[1], Takeshi Miyamoto[2] (1. Disaster Prevntion Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University)

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

[S22-11] Ground Motion Records of Temporary Observation Stations in Suzu City for the May 5, 2023 Noto Earthquake (M6.5)

*Michihiro OHORI[1], Haruhiko SUZUKI[2], Tomotaka IWATA[3], Kimiyuki ASANO[3], Osamu ISHITUKA[2], Akira MURATA[4] (1. School of Environmental Science, University of Shiga Prefecture, 2. OYO Corporation, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Institute of Science and Engineering, Kanazawa University)

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

[S22-12] Results of microtremor observation in the Shoin district, Suzu-shi, Ishikawa, Japan.

*Shoji Arata[1], Akira Murata[2], Michihiro Ohori[3] (1. School of Geosciences and Civil Engineering,Kanazawa University, 2. Faculty of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University, 3. Shcool of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture)

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

[S22-13] Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake

*Yusuke Kitagawa[1], Akira Murata[1], Hiromi Sato[2], Tatsuru Suda[2] (1. Kanazawa University, 2. Kanazawa Institute University)

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

[S22-14] Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake
Part 3 Detailed structural investigation

*Takuma Chikatani[1], Hiromi Sato[1], Tatsuru Suda[1], Akira Murata[2] (1. Kanazawa Institute of Technology, 2. Kanazawa University)

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S08. Earthquake physics

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P11 (F203) Hall Annex

[S08P] PM-P

[S08P-01] Stress field related to the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO[1], Hikari Nogi[1], Shinya Kato[2], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Shunta Noda[3], Issei Doi[1] (1. DPRI, Kyto Univ., 2. ERI, Tokyo Univ., 3. RTRI)

[S08P-02] Stress field in the northeastern part of South Island, New Zealand, and the evaluation of the activity of the 1990 Lake Tennyson earthquake

*Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Martha K Savage[2], John Townend[2], Satoshi Matsumoto[3], Yuta Kawamura[3], Yoshihisa Iio[4], Tadashi Sato[1], Satoshi Hirahara[1], Shuutoku Kimura[1], Stephen Bannister[5], John Ristau[5] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, Shimabara, Japan, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Japan, 5. GNS Science, New Zealand)

[S08P-03] Spatial Variation of Stress Field around Turkey Estimated from Earthquake Focal Mechanisms and the 2023 Mw7.8 and Mw7.7 earthquakes

*Keisuke YOSHIDA[1] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

[S08P-04] Estimating effective normal stress during SSE in Bungo channel from slip velocities and shear stress variations

*Yojiro Sasagawa[1], Toshinori Sato[1] (1. Chiba University)

[S08P-05] The features and possible cause of the low-frequency marsquake S1022a

*Kirara Kotani[1], Keiko Kuge[1] (1. Kyoto University)

[S08P-06] Slow Slip Events (SSEs) detected by borehole and DONET observatories: similarities and differences of SSEs between 2020 and 2023 March

*Keisuke ARIYOSHI[1], Takeshi Iinuma[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasumasa Miyazawa[1], Sergey Varlamov[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Yuya Machida[1], Demian Saffer[2], Eiichiro Araki[1], Shuichiro Yada[1], Hiroki Horikawa[1], Kentaro Sueki[1], Narumi Takahashi[3], Takane Hori[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC, 2. University of Texas, Austin, 3. NIED)

[S08P-07] A Single-Station Method for Seismic Detection of Slow Earthquake: Applications to Japan, the Mexican Subduction Zone, and on a global scale

*Koki MASUDA[1], Satoshi IDE[1] (1. Dept. of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

[S08P-08] Spatio-temporal relationship between SSEs and tectonic tremor activities at the northern part of Hikurangi subduction margin, New Zealand

*Towako Aoyama[1,2], Kimihiro Mochizuki[1], Yusuke Yamashita[3], Tomoaki Yamada[1], Emily Warren-Smith[4], Katie Jacobs[4], Laura M Wallace[5], Martha K Savage[6], Masanao Shinohara[1] (1. Earth Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, 5. GEOMAR, 6. Victoria University of Wellington)

[S08P-09] Seismic energy estimation of shallow tremors using strain waveforms of distributed acoustic sensing

*Satoru BABA[1], Eiichiro ARAKI[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S08P-10] Evaluation of the seismic data and seismic parameters of induced earthquakes at Basel geothermal area

*Nana YOSHIMITSU[1], Yusuke MUKUHIRA[2], Hiroshi ASANUMA[3] (1. Kyoto University, 2. Tohoku University, 3. AIST)

[S08P-11] Ocean microseisms recorded by Cuban seismic stations: time variations and spectral features

*Viana POVEDA BROSSARD[1], Kiwamu NISHIDA[2], Bogdan ENESCU[1] (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[S08P-12] Observation of earthquake-induced rotational ground motions by broadband seismometer array

*Kazutoshi IMANISHI[1], Suguru Yabe[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S08P-13] Modeling seismic wave radiation from quartz vein concentrated zone in Makimine mélange

*Suguru YABE[1], Makoto Otsubo[1], Kotaro Ujiie[2] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. University of Tsukuba)

[S08P-14] Back-rupture propagation during the 2023 southeast of the Loyalty Islands earthquake

*Asuka Murakami[1], Yuji Yagi[1], Ryo Okuwaki[1] (1. Univ. of Tsukuba)

[S08P-15] The characteristic of the rupture propagation of the crustal earthquakes in Japan

*Ritsuya Shibata[1], Naofumi Aso[1,2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Applied Physics, Faculty of Advanced Engineering, Tokyo University of Science)

[S08P-16] On Cavitation, Shock Waves, and Generation of Seaquakes

*Koji UENISHI[1] (1. Univ. of Tokyo)

[S08P-17] Expansion of aftershock region observed in the Olami-Feder-Christensen model of earthquakes

*Tetsuto Otani[1], Nobuki Kame[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S08P-18] Numerical experiments using a friction law both for rapid and slow sliding with radiation damping effect

*Takane HORI[1], Hideo Aochi[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey))

[S08P-19] The latest event on the Median Tectonic Line active fault zone, inland Shikoku, inferred from dynamic rupture simulations

*Yuko KASE[1], Hisao KONDO[1], Yumi URATA[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S08P-20] Formation conditions of fault mirror and friction property of greywacke at low to medium slip rates

*Sumire Maeda[1], Futoshi Yamashita[1], Kurama Okubo[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Takamoto Okudaira[3] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University, 3. Osaka Metropolitan University)

[S08P-21] Topography and generated stress distribution of a gouge patch to control the initiation location of slip on the fault

*Kurama Okubo[1], Futoshi Yamashita[1], Eiichi Fukuyama[2,1] (1. NIED, 2. Kyoto University)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S04. Tectonics

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P12 (F203) Hall Annex

[S04P] PM-P

[S04P-01] Effect of the hot plume on the bending of the Philippine Sea slab beneath Kyushu (3)

*Natsuki Kozai[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[3,1] (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S15. Strong ground motion and earthquake disaster

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P2 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S15P] PM-P

[S15P-01] The broadband source model of the 2023 Mw7.8 Turkey earthquake and amplification factors at strong motion stations

*Toshimi SATOH[1] (1. Institute of Technolocy, Shimizu Corporation)

[S15P-02] Relationship between surface earthquake fault and building damage in the 2023 Southeast Türkiye Earthquake

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Naokazu Monma[1], Shohei NAITO[1], Tetsuya YAMADA[2], Rie SAKUMA[2], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. NIED, 2. PASCO)

[S15P-03] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 10 -
- Ignorance and unconcern kill people, destroy a country (3/3) -

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

[S15P-04] A study on slip model in shallow area based on earthquake surface fault rupture - case of strike slip type -

*Yasuhiro MATSUMOTO[1], Ken MIYAKOSHI[2], Tsutomu TAKAHAMA[1], Naoto INOUE[3], Kojiro IRIKURA[2], Katsuhiro KAMAE[4] (1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Aichi Institute of Technology, 3. GRI, 4. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University)

[S15P-05] The short-period flat levels of acceleration source spectra for inland earthquakes and their variability in the scaling relationships

*Kazuhiro Somei[1], Kunikazu Yoshida[1], Ken Miyakoshi[2], Katsuhiro Kamae[3], Kojiro Irikura[2] (1. Geo-Research Institute, 2. Aichi Institute of Technology, 3. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University)

[S15P-06] Nature of slip rates under the influence of the dynamic interaction between rupture process and sedimentary layers

*Ayaka Nakatsuji[1], Hiroyuki Goto[1] (1. Kyoto University)

[S15P-07] Spectral Characteristics of Long-Period Ground Motion Inferred from the F-net Broad-Band Strong Ground Motion Records

*Ken HATAYAMA[1] (1. National Research Institute of Fire and Disaster)

[S15P-08] Long-period ground motion simulations in the western part of Shizuoka prefecture for large earthquakes in the Nankai trough (Part 2)

*Takeshi NAKAMURA[1] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

[S15P-09] Source process inversion method with local seismograms for the interplate earthquake along the Nankai trough

*Takahito NISHIMIYA[1], Fuyuki Hirose[1] (1. Japan Meteorological Agency, Meteorological Research Institute)

[S15P-10] Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning (2) forecasting building shaking

*Takashi FURUMURA[1], Yusuke Oishi[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Data-Driven Innovation Initiative, Kyushu University)

[S15P-11] An earthquake early warning algorithm using wave propagation directions estimated with a machine learning technique

*Yuki KODERA[1] (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

[S15P-12] Real-time seismic intensity prediction using deep learning and synthetic data

*Anju Ohta[1], Ahyi Kim[1], Yukino Yazaki[1], Hisahiko Kubo[2], Masami Yamasaki[1] (1. Yokohama City University, 2. NIED)

[S15P-13] Validation of site-specific seismic motions generated by combining cGAN and GIT

*Yusuke TOMOZAWA[1], Junki YAMAGUCHI[1], Toshihide SAKA[1] (1. Kajima Technical Research Institute)

[S15P-14] Evaluating large-magnitude waveforms using site-specific ground motion generated by combining cGAN and GIT

*Junki Yamaguchi[1], Yusuke Tomozawa[1], Toshihide Saka[1], Tomoki Hikita[1] (1. Kajima Technical Research Institute)

[S15P-15] Construction of ground motion models using Bayesian neural networks

*Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki Morikawa[2], Hiroyuki Fujiwara[2], Naonori Ueda[1] (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S15P-16] Correction at Long Distances through Integration of Statistical Green's Function Method and Ground Motion Prediction Equations

*Takahiro MAEDA[1], Hiromitsu Nakamura[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Sho Akagi[2], Kosuke Seki[2] (1. NIED, 2. MESW)

[S15P-17] Relationships between the peak accelerations and static rotations of the S-net sensors in the Japan Trench area

*Yadab Prasad DHAKAL[1], Takashi Kunugi[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S15P-18] Characterization and Comparison Method of the Spatial Seismic Intensity Distributions Using Independent Component Analysis

*Takeshi KIMURA[1], Wataru SUZUKI[1], Hisahiko KUBO[1], Sho AKAGI[2], Rina SUZUKI[2] (1. NIED, 2. MESW)

[S15P-19] Evaluation of the influence of Surface Topography on Earthquake Ground Motions

*Hidenori KAWABE[1], Hiroto YAMAMOTO[1] (1. Osaka University)

[S15P-20] Estimation of seismic bedrock motion using empirical site effects in time domain

*Takashi Akazawa[1] (1. Geo-Research Institute)

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P3 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S16P] PM-P

[S16P-01] Site amplification correction of OBS data for regular and slow earthquakes

*Shunsuke TAKEMURA[1], Kentaro Emoto[2], Suguru Yabe[3] (1. ERI, UTokyo, 2. Kyushu Univ., 3. AIST)

[S16P-02] Autocorrelation function from ground motion records: detecting for shallow sedimentary layers

*Tomotsugu Watanabe[1], Hiroshi Takenaka[1] (1. Okayama University)

[S16P-03] Microtremor exploration in Okayama City

*Nobuyuki YAMADA[1], Hiroshi TAKENAKA[2], Tomotsugu WATANABE[2] (1. Kochi University, 2. Okayama University)

[S16P-04] Characteristics of strong ground motion and subsurface structure of landslide area based on microtremor observation in the Taki area, Japan

*Tatsuya NOGUCHI[1], Masanori Kohno[1] (1. Faculty of Engineering, Tottori University)

[S16P-05] Spectral amplification of ambient vibrations due to topography: Instrumental evidence from Chiba and Yamanashi Prefectures, Japan

*Anirban Chakraborty[1], Daiki Yamashita[2], Kodai Kato[3], Ryota Otake[4], Hisakazu Sakai[1], Hitoshi Morikawa[5] (1. Hosei University, 2. Railway Technical Research Institute, 3. Kozo Keikaku Engineering Inc. , 4. Oriental Consultants Global Co., Ltd. , 5. Tokyo Institute of Technology)

[S16P-06] Examination of two-dimensional optimal S-wave velocity structure model for the KiK-net site of Kamaishi

*Kentaro KASAMATSU[1], Takashi Nozawa[1], Tetsushi Watanabe[2] (1. Kajima Corporation, 2. Kobori Research Complex Inc.)

Poster session (Sep. 16th) | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P4 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S22P] PM-P

[S22P-01] An offshore-onshore integrated seismic observation in the epicentral region of earthquake swarm in the northeastern Noto Peninsula

*Eiji KURASHIMO[1], Shin'ichi Sakai[2], Masanao Shinohara[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

[S22P-02] Relation between the Noto Peninsula earthquake swarm and earth tides considering background earthquake probability

*Fuyuki HIROSE[1], Koji TAMARIBUCHI[1], Akio KOBAYASHI[2], Kenji MAEDA[1] (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency)

[S22P-03] Driving processes behind hypocenter migration associated with earthquake swarms in the northeastern Noto Peninsula, Japan

*Kodai SAGAE[1], Yuta AMEZAWA[1], Takahiko UCHIDE[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S22P-04] Focal mechanisms and stress field of the earthquake swarm region in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Yohei Yukutake[2] (1. Kanazawa University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S22P-05] Stress drop of the earthquake swarm in the northeastern Noto Peninsula

*Mitsuteru Fukuoka[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Takuji Yamada[2] (1. Kanazawa Univ. , 2. Ibaraki Univ.)

[S22P-06] Crustal deformation and mechanism for an earthquake swarm in the northeastern part of the Noto Peninsula based on GNSS observations

*Takuya NISHIMURA[1], Yoshihiro HIRAMATSU[2], Yusaku OHTA[3] (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

[S22P-07] Space-time evolution of fault slip associated with transient deformation in the Noto Peninsula observed by dense GNSS networks

*Atsushige Doi[1], Takuya Nishimura[1], Shinichi Miyazaki[1] (1. KYOTO UNIVERSITY)

[S22P-08] Vertical crustal deformation associated with the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake, based on littoral biological remains

*Masanobu SHISHIKURA[1], Tomoo Echigo[2], Yuichi Namegaya[1], Hideaki Maemoku[3], Ryo Tateishi[4], Nagisa Sawada[5] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Kankyo Chishitsu Co. Ltd, 3. Hosei UNiversity, 4. University of Toyama, 5. Graduate School, University of Toyama)

[S22P-09] Initial report on strain measurement using TW-COTDR distributed optical fiber sensing in a tunnel in Suzu, Ishikawa, Japan.

*Eiichiro ARAKI[1], Masatoshi Miyazawa[2], Yoshiyuki Tanaka[3], Takashi Yokobiki[1] (1. JAMSTEC IMG, 2. DPRI, Kyoto University, 3. School of Science, the University of Tokyo)

[S22P-10] Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake
Part 2 Seismic damage of shrines and temples

*Yuto Sawada[1], Takuma Arakawa[1], Honoka Shibaguchi[1], Tatsuru Suda[1], Hiromi Sato[1], Akira Murata[2] (1. Kanazawa Institute of Technology, 2. Kanazawa University)

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P5 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S03P] PM-P

[S03P-01] Spatiotemporal variation of strain field in the Niigata-Kobe Tectonic Zone: Long-term analysis using GNSS data

*Hiroki Kawabata[1], Shoichi Yoshioka[2,1] (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

[S03P-02] Time dependent modeling of the Nankai trough subduction zone, Japan since 2018.

*Shinzaburo Ozawa[1], Hiroshi Munekane[1], Hisashi Suito[1] (1. Geospatial Information Authority of Japan)

[S03P-03] Characteristics of deep short term slow slip events along the Nankai trough plate boundary

*Kenichi FUJITA[1], Hiroaki Katayama[1], Yasutaka Yamana[1], Minoru Funakoshi[1] (1. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency)

[S03P-04] Attempt to comprehensive detecting intermediate-term slow slip events in the shallow part of the Suruga Trough

*Yuji Kikuchi[1], Yuta Mitsui[2], Masayuki Kano[3] (1. Graduate School of Shizuoka University, 2. Shizuoka University, 3. Tohoku University)

[S03P-05] Slow-slip events of one-hour duration (4)

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

[S03P-06] Spatiotemporal evolution of Slow Slip Events along the Southern Ryukyu subduction zone during 2017-2022

*Hiromu SAKAUE[1], Yoshiyuki TANAKA[1], Masayuki KANO[2] (1. The University of Tokyo, 2. Tohoku University)

[S03P-07] Postseismic deformation due to the 2004 off Kii Peninsula earthquake: effect of 3-D viscosity structure

*Akinori HASHIMA[1], Takane Hori[2], Takeshi Iinuma[2], Kohei Fujita[3], Sota Murakami[3], Tsuyoshi Ichimura[3] (1. Tokyo Gakugei University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[S03P-08] On non-intuitive deformation fields caused by reverse faults in an elastic-viscoelastic medium

*Koitaro Koide[1], Yukitoshi Fukahata[1] (1. Kyoto University)

[S03P-09] GNSS-A seafloor positioning solution in SGO-A station

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

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S14. Earthquake prediction and forecast

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P6 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S14P] PM-P

[S14P-01] Long Intervals between Felt Earthquakes are Not Precursors to Large Earthquakes

*Mamoru KATO[1] (1. GSHE, Kyoto Univ.)

[S14P-02] Investigation of estimation scheme for inland earthquake long-term evaluation using machine learning

*Tomoyuki Fujita[1], Hiroaki Takahashi[2], Ohzono Mako[2] (1. Graduate School of Science,Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

[S14P-03] A Study of Atmospheric Pressure Distribution Affecting Earthquake Occurrence in the Japan Islands

*Jouichi SAITOH[1] (1. No affiliation)

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S17. Tsunami

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P7 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S17P] PM-P

[S17P-01] Progress and application of the synthesis of trans-oceanic tsunamis

*Shingo WATADA[1] (1. Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, Division of Monitoring Geoscience)

[S17P-02] Potential of significant later phases of tsunamis generated in the Pacific Rim: Estimation by numerical tsunami simulation

*Hiroaki TSUSHIMA[1], Takeyasu YAMAMOTO[1] (1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

[S17P-03] Applicability of real-time tsunami prediction by using offshore observation network and tsunami interferometry

*Kentaro IMAI[1], Tatsuhiko Tokuta[2,1], Yuchen Wang[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[3,1], Taro Arikawa[2] (1. JAMSTEC, 2. Chuo Univ., 3. NIED)

[S17P-04] Advanced development of real-time tsunami prediction system and its implementation

*Narumi TAKAHASHI[1], Kentaro Imai[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Japan agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S17P-05] Reexamination of the Initial Tsunami Source Model of the Meio Tokai Earthquake

*Satoshi KUSUMOTO[1], Kentaro Imai[1], Takane Hori[1] (1. JAMSTEC)

[S17P-06] Fault modeling and tsunami prediction for outer-rise earthquakes along the southern Kuril trench

*Toshitaka BABA[1], Tetsuo No[2], Koichiro Obana[2], Kentaro Imai[2], Naotaka Chikasada[3], Yuichiro Tanioka[4], Shuichi Kodaira[2] (1. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2. JAMSTEC, 3. NIED, 4. Hokkaido University)

[S17P-07] Tsunami source inversion of the 2020 Sand Point Earthquake

*Akino Naitoh[1], Toshitaka Baba[1] (1. Tokushima Univ.)

[S17P-08] Coastal boulder mapping based on deep learning, and boulder transport simulation: case study at Ilocos Norte, Luzon Island, Philippines

*Daisuke ISHIMURA[1], Keitaro Yamada[2], Toshitaka Baba[3], Naotaka Chikasada[4], Noelynna T. Ramos[6], Kenta Minamidate[5], Ace Matthew F. Cantillep[6], Clod Anne V. Punzalan[6] (1. Tokyo Metropolitan University, 2. Ritsumeikan University, 3. Tokushima University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Tohoku University, 6. University of the Philippines)

Poster session (Sep. 16th) | Special session：S23. 100 years after the Great Kanto earthquake: development of earthquake research in the Kanto region

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P8 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S23P] PM-P

[S23P-01] Possibility of the occurrence of the 1433 Eikyo interplate Kanto earthquake 140 years after the preceding one

*Katsuhiko ISHIBASHI[1] (1. none)

[S23P-02] The geometry of the Moho of the Philippine Sea Plate in and around the Izu collision zone in central Japan

*Yuki ABE[1], Ryou Honda[1], Motoko Ishise[2], Shin'ichi Sakai[3], Yohei Yukutake[4], Ryosuke Doke[1] (1. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government, 2. Faculty of Science, Yamagata University, 3. The University of Tokyo, Interfaculty Initiative in Information Studies, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S23P-03] Estimation of natural period and damping ratio of the Imamura-type strong-motion seismograph by the Random Decrement Technique

*Takashi HAYAKAWA[1], Shunichi KATAOKA[2], Toshiaki SATO[3], Keiichi OKADA[1], Junichi MIYAKOSHI[3] (1. SHIMIZU Corp. Institute of Technology, 2. Hirosaki University, 3. Ohsaki Research Institute)

[S23P-04] Study on the seismic intensity of earthquakes beneath the Kanto region: Classification of earthquakes with an anomalous seismic intensity

*Motoko ISHISE[1], Ryoichi Nakamura[2], Shiina Takahiro[3] (1. Yamagata Univ., 2. Naka Earthquake Research, 3. AIST)

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

Tue. Oct 31, 2023 9:30 AM - 10:45 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room A F205+206

[S08] AM-1

chairperson:Futoshi YAMASHITA(NIED), Ryosuke Ando(University of Tokyo)

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

[S08-01] IODP JTRACK: Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench toward understanding fault strengthening and stress build-up processes

*Shuichi Kodaira[1], Kohtaro Ujiie[2], Takehiro Hirose[1], Weiren Lin[3], Ryota Hino[4], Yasuyuki Nakamura[1], Tatsuya Kubota[5] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. University of Tsukuba, 3. Kyoto University, 4. Tohoku University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-02] Development of a giant rock friction apparatus for understanding faulting phenomena over broad spatiotemporal scales

*Futoshi YAMASHITA[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Kurama Okubo[1], Sumire Maeda[1] (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University)

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

[S08-03] Molecular Study of Rock Friction and Wear Mechanism Using a Pair of α-quartz Asperities

*Sheng Li[1], Eiichi Fukuyama[1] (1. Kyoto University)

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

[S08-04] Influence of particle number on fluidization of sheared granular by vibration

*Ryunosuke Sakamoto[1], Takahiro Hatano[1] (1. Osaka University)

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

[S08-05] Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkiye, Earthquake Sequence

*Ryosuke ANDO[1], Dogan Kalafat[2], Haluk Ozener[2], Esref Yalcinkaya[3], Yojiro Yamamoto[4] (1. University of Tokyo, 2. KOERI, Bogazici University, 3. Istanbul University, 4. JAMSTEC)

IODP JTRACK: Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench toward understanding fault strengthening and stress build-up processes

*Shuichi Kodaira[1], Kohtaro Ujiie[2], Takehiro Hirose[1], Weiren Lin[3], Ryota Hino[4], Yasuyuki Nakamura[1], Tatsuya Kubota[5]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. University of Tsukuba, 3. Kyoto University, 4. Tohoku University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2011年東北沖地震発生から13年となる2024年9月－12月に国際深海科学掘削計画(IODP) 東北地方太平洋沖地震震源断層掘削：JTRACK(Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench)が実施される。JTRACKの主要目的は、「プレート境界断層浅部とその周辺の構成岩石や流体の物理的・化学的特性と、その時空間変化を理解することにより、巨大断層すべりや巨大津波を引き起こす要因を把握する」ことである。地震発生から13年後に再び震源断層を掘削するJTRACKは地震発生後のプレート境界断層の固着強度、断層周辺の応力蓄積過程を明らかにする貴重な機会となり、これまで取り組むことができなかった巨大津波を生成する海溝型地震準備過程に関する本質的な問い、即ち「巨大津波を生成するプレート境界浅部すべりの駆動源は何か、どのように応力を蓄積するか」に迫ることができる。この目的達成のため、JTRACKでは地震発生直後に行われた震源断層掘削JFAST(Japan Trench Fast Drilling Project)と同一地点、およびその海溝海側の海洋プレート上において海底から海洋プレート上面に至る連続コアの採取、孔内検層、孔内温度計測を実施する。2011年東北地震発生直後には海底地形調査、海底地震・地殻変動観測、地下構造探査、JFASTによる震源断層掘削などが行われ、50mを超える断層すべりがプレート沈み込み口で海底に突き抜けたこと、巨大地震の震源断層は厚さ数mの遠洋性堆積物から構成されていたこと、地震時の断層の摩擦係数は約0.1と非常に小さかったこと、などマグニチュード９の海溝型巨大地震の実態が初めて明らかにされた。しかしながら、それらの調査は「地震発生時」の実態を明らかにしたのみで、マグニチュード９の巨大地震を発生させた震源断層がどのようにして次の巨大地震の準備を行うか、巨大地震震源断層の固着強度、断層周辺の応力蓄積過程を明らかにすることはできなかった。JTRACKはその問題に取り組むための貴重な機会となる。本講演では、2011年東北沖地震発生直後から行われた深海調査・掘削の成果を総括するとともに、JTRACK、及び関連した広域的な深海調査の目的、計画、期待される成果について報告する。

© The Seismological Society of Japan

Development of a giant rock friction apparatus for understanding faulting phenomena over broad spatiotemporal scales

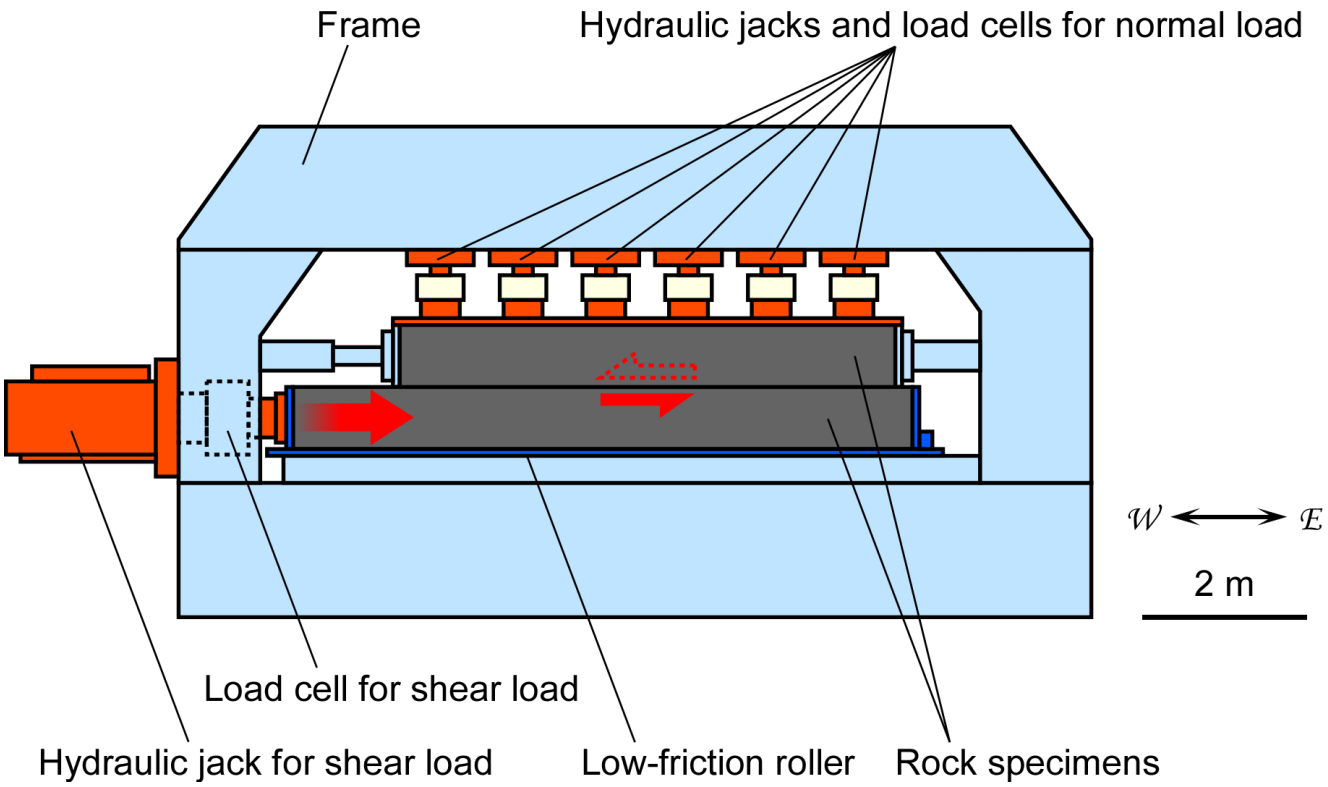
*Futoshi YAMASHITA[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Kurama Okubo[1], Sumire Maeda[1]

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

地震の原因である断層摩擦すべりは，時間的にも空間的にも幅広いスケールに渡る現象であり，その統一的な理解のためには，観測・理論・実験等による多角的なアプローチが必要である．空間スケールに関する特徴に注目すると，観測と実験それぞれで推定された規模の異なる地震の応力降下量が広いスケールで調和的である（McLaskey et al., 2014; Yoshimitsu et al., 2014）一方で，岩石の摩擦特性が断層面の大きさに依存して変化する，すなわち岩石摩擦のスケール依存性が実験的・理論的に指摘されており（Yamashita et al., 2015; Noda, 2023），より広範なスケールでの検証が必要とされている．時間スケールに関しても，数秒～数分で断層すべりが停止する通常の地震から数ヶ月間に渡り断層がすべり続けるスロースリップまでの広範に渡るスケールの現象が，隣接した，また一部は重複した地域で発生する複雑性が議論されている（例えばNishikawa et al., 2023）．また，ゆっくりとした震源核形成から高速な動的断層破壊への遷移過程を観察するには，現在のところ実験的アプローチ以外に手段がないが，その詳細な観察のためには震源の臨界核サイズを内包する模擬断層が必要とされる．さらに，大型岩石摩擦実験により，すべり量の累積に伴う断層面形状の発達が震源核形成及び断層破壊過程に影響を与えることも明らかとなっており（例えばYamashita et al., 2018; Xu et al., 2023），断層面の空間不均質性を考慮に入れた検討が求められている．以上の理由から，我々はさらに大規模な模擬断層を長距離ですべらせる摩擦実験が必要と考え，それを可能とする新たな巨大岩石摩擦試験機を開発した．

実験ではインド産の変はんれい岩からなる一対の岩石試料を使用しており，一方の長さは6.0 m，もう一方の長さは7.5 mである．幅及び高さは共通で，それぞれ0.5 m，0.75 mである．図に示す通り，長い試料の上に短い試料を積み重ね，試験機のフレーム内に収めて実験をおこなう．したがって接触面（模擬断層面）のサイズは長さ6.0 m ×幅0.5 mである．模擬断層面は初期表面の凹凸が面全体に渡って50 μm以内に収まるよう研磨されている．上側試料と試験機フレームの間に設置した6本の油圧ジャッキによって垂直荷重が加えられ，それぞれのジャッキに個別に荷重計が接続されている．垂直載荷ジャッキ1本あたりの最大載荷量は2 MNであるため，模擬断層面へ与えられる最大垂直応力は12 MN/3 m^2 = 4 MPaである．断層にせん断荷重を与えるためのジャッキが下側試料西側のフレームに固定されている．下側試料は低摩擦ローラーの上に設置されているため，せん断載荷ジャッキが与えるせん断荷重は模擬断層面のみが支えることとなる．このせん断載荷ジャッキの最大載荷量は12 MNである．載荷速度は0.01 mm/sから1 mm/sの間で自由に設定可能であり，最大変位距離は1 mである．垂直応力1 MPa，載荷速度0.01 mm/sの条件で予備実験をおこなったところ，多数のスティックスリップイベントを観測した．イベント発生にともなうせん断荷重降下量及びロードポイントにおける変位量から実験系の剛性を概算したところ，3.5±0.5 GN/mと推定された．断層すべりに伴い発生する局所的な現象を詳細にモニターするため，断層面近傍に二軸半導体ひずみゲージ（共和電業 KSN-2-120-F3-11）を44枚，三軸半導体ひずみゲージ（共和電業 SKS-30282）を44枚設置，さらにAE計測用の圧電素子センサー（オリンパス V103-RM）を64個設置した．これらのセンサーを用いた測定により，断層すべりに伴う幅広い時空間スケールの現象を把握するとともに，すべり量の累積に伴う変遷を調査していく予定である．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Molecular Study of Rock Friction and Wear Mechanism Using a Pair of α-quartz Asperities

*Sheng Li[1], Eiichi Fukuyama[1]

1. Kyoto University

Frictional instabilities of faults, a significant factor in triggering shallow earthquakes, have widely been recognized as a phenomenon governed by the wear of asperities on fault surfaces. However, there is still a lack of clarity regarding the wear mechanisms of asperities and their dynamical connections to friction. Here, at molecular level, we conducted a series of kinetic simulations with realistic atomic force field to explicitly reproduce multiple 3-D nanoscale wear processes under different normal forces. We extensively explored the friction and wear mechanisms by examining worn surfaces, total wear volume, wear volume rate with distance, and the links of total wear volume to friction work (i.e. integrating friction force over slip).

Our simulation was a sliding friction experiment and focused on the “running-in” period of smoothening asperities (Wang and Scholz, 1984). The surface area of two solid blocks was 23.77 nm×13.73 nm and each block contained an identical semi-sphere α-quartz asperity with radius being 3.40 nm. Initially, the two asperities were not contacted and the distance between semi-spherical centers was a radius. Then we pressed asperities together by applying normal force. The bottom of the lower block was fixed and a constant normal force and velocity were applied to the upper block where it was allowed to move in the fault normal (z-) direction. Additionally, periodic conditions were applied to the x- and y-directions while in the z-direction shrink-wrapping condition was applied. Furthermore, the sliding velocity was set at 10 m/s and the constant normal force was applied ranging from 1nN to 4nN.

Our results showed that the time-averaged friction force had a positive correlation to the normal force at nanoscale and scuffing wear was dominated in the normal force range we applied. This wear type could be due to the high hardness of α-quartz. Moreover, we observed that the total wear volume generally increased with the normal force but it did not show a clear positive correlation. In certain segments of the normal force range, a slight decrease could be observed. A similar phenomenon also occurred at macroscopic rotary shear experiment (Hirose et al., 2012), which could be related to the sliding velocity. On the other hand, we found that the wear volume rate increased nonlinearly with slip distance and it showed a positive dependence on the normal force. Finally, we confirmed that the friction work was proportional to total wear volume, which could be served as a potent indicator for predicting the volume of worn debris. These discoveries will offer a profound understanding of fault friction and wear mechanisms, laying the groundwork for modeling multi-scale friction constitutive laws.

© The Seismological Society of Japan

Influence of particle number on fluidization of sheared granular by vibration

*Ryunosuke Sakamoto[1], Takahiro Hatano[1]

1. Osaka University

ある震源から放射された地震波は他の地震を誘発しうる。これは、地震波による動的歪が断層に作用するためである。地震の動的誘発はnear-field(震源から10km以内)だけでなく、far-field(震源から1000km以上遠方)でも観測される。とりわけ、far-fieldの観測は、O(10^{-6}-$^{-9}$)の動的歪が地震を誘発することを示した(e.g., Hill and Prejean 2015)。このような小さな動的歪によって地震が誘発される理由の一つは、振動によってガウジが流動化するためと考えられている。例えば、Ferdowski et al. (2015)は、粒子シミュレーションにより、振動によってせん断粉体が流動化することや、流動化に必要な動的歪の閾値(critical strain)がO(10^{-6})となることを示した。しかし、critical strainがO(10^{-6})より小さくなることを示した研究結果はこれまで報告されていない。このため、O(10^{-6})より小さい動的歪によって発生する動的誘発地震においても、振動によるせん断粉体の流動化が重要な役割は果たしうるかは明らかとなっていない。

Lerner and Procaccia (2009)は、粒子シミュレーションにより、粒子数が増えるほど粉体の降伏応力が低下することを示した。つまり、粒子数が増えるほど、より小さなせん断応力で粉体が流動化することを示した。critical strainにもこうした粒子数依存性はあるだろうか。つまり、粒子数が増えるほど、より小さな動的歪で粉体が流動化することや粒子数が増えることでcritical strainがO(10^{-6})より小さくなることがあるだろうか。

本研究では、粒子シミュレーションにより、critical strainの粒子数依存性を調べた。具体的には、断層ガウジを2枚の基板で閉じ込め、片方の基板をバネ定数kのバネを介して一定速度Vで引っ張るというモデルに、一過性の振動を印加することによって、critical strainの粒子数依存性を調べた。

数値計算の結果から、印加する振動周波数によらず、粒子数が増えるにつれcritical strainが小さくなることが分かった。とりわけ、第一共鳴周波数の振動を印加した場合、粒子数が1376ではcritical strainはO(10^{-6})であったが、粒子数が22002ではcritical strainはO(10^{-8})となった。これは、粒子数の増加によってforce chainが長くなることで、より小さな動的歪でforce chainを破壊できるようになるためと考えられる。

我々の結果は、O(10^{-6})より小さい動的歪によって発生する動的誘発地震においても、振動によるせん断粉体の流動化が重要な役割を果たすことを示唆している。

© The Seismological Society of Japan

Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkiye, Earthquake Sequence

*Ryosuke ANDO[1], Dogan Kalafat[2], Haluk Ozener[2], Esref Yalcinkaya[3], Yojiro Yamamoto[4]

1. University of Tokyo, 2. KOERI, Bogazici University, 3. Istanbul University, 4. JAMSTEC

The 2023, M 7.8, Kahramanmaras earthquake (mainshock) occurred on February 6th, mainly along the plate interfaces called the East Anatolia fault ruptured toward NE (accommodating the motion between Anatolia and Arabia) and the Dead Sea Fault Zone ruptured toward SW (between Arabia and Africa). Followed in 9 hours, the M 7.6, Ekinozu earthquake (largest aftershock) was hosted by the subsidiary fault system called the Cardak –Surgu faults. This earthquake sequence presents significant complexity in fault geometry and rupture patterns. The observed hypocenter indicated that the mainshock rupture nucleated away from the East Anatolia fault (EAF) and was probably located on a subsidiary fault called the N-S striking Narli fault. The Narli fault is close to the area called Maras Tripple Junction (MTJ) where Anatolian, Arabian and African plates meet. We performed a set of stress tensor inversions and dynamic rupture simulations. We used the FDP-BIEM developed by Ando, 2016, for the fully-dynamic rupture simulation. The 3-D fault geometry is built based on the previously compiled surface fault traces with constant dip angles. Based on the stress inversion using the aftershock focal mechanisms (M>4), we find that the maximum horizontal principal stress axis around the Cardak –Surgu faults is slightly rotated clockwise from that around EAF. The Narli fault and EAF are favorably oriented. The simulation can reproduce a number of coseismic features determined by seismic and geodetic observations. Such features include 1) the rupture propagated from the Narli fault to EAF; 2) initially propagated towards the northeast on EAF, and eventually to the southwest; 3) the rupture to the south is posed at a bend (MTJ) before entering into the Dead Sea Fault zone (the Amanos Fault), further delaying the southwest rupture; 4) the possible super-shear on the Amanos Fault; 5) the locations of large slip areas determined by the SAR data. Moreover, the positive dynamic Coulomb stress change (~ 2MPa) is simulated in the middle of the Cardak Fault, while the Surgu Fault experienced a smaller amplitude. These characteristics are understandable as the primary effect of the fault geometry. Acknowledgment: This work used computational resources of Earth Simulator provided by JAMSTEC through the HPCI System Research Project (Project ID: hp220105).

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

Tue. Oct 31, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room A F205+206

[S08] AM-2

chairperson:Ryoko NAKATA(Graduate School of Science, The University of Tokyo), Daisuke Sato(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S08-06] The Investigation of Stress Condition of the 2014 Northern Nagano Earthquake with Surface Rupture Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA[1], Junichi Miyakoshi[1], Naoki Iwata[2], Yuji Sasai[2], Akihiro Matsui[2], Keita Higashi[2] (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. Chuden Engineering Consultants)

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

[S08-07] Numerical simulation of earthquake generation cycle using multiscale circular patch model

*Ryoko Nakata[1], Takane Hori[2], Hideo Aochi[3,4], Satoshi Ide[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. BRGM, France, 4. ENS-CNRS PSL, France)

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

[S08-08] Episodic Aseismic Slip Events as Incomplete Nucleation of Seismic Slip due to Heterogeneous Stress Distribution

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

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

[S08-09] 3D viscoelastic earthquake sequence simulation with plate-boundary fault and inland faults

*Ryoya Matsushima[1], So Ozawa[2], Ryosuke Ando[1] (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Stanford University)

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

[S08-10] Separating interlocking asperities from high slip deficit zones along the Nankai Trough, Japan

*Daisuke Sato[1], Takane Hori[1], Yukitoshi Fukahata[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

The Investigation of Stress Condition of the 2014 Northern Nagano Earthquake with Surface Rupture Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA[1], Junichi Miyakoshi[1], Naoki Iwata[2], Yuji Sasai[2], Akihiro Matsui[2], Keita Higashi[2]

1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. Chuden Engineering Consultants

動力学的断層破壊シミュレーションを行う上で重要な初期応力条件を設定する方法として，Aochi and Tsuda(2023)では深さ依存性を考慮した方法を提案し，地表地震断層を伴った2014年長野県北部地震への適用を試みた(Tsuda・他，2022)。得られたシミュレーション結果は既往の震源インバージョン結果(引間・他，2015)と比較して，最大すべりが2倍以上，断層面積が60%程度であった。これらの原因として，アスペリティ領域内では応力降下量を深さに依存して変化させているため，その領域内で応力降下量が負になってしまい，アスペリティの周辺で断層破壊が急激に減速してしまった等，動力学的断層破壊シミュレーションの初期応力パラメータの条件設定に関する課題が考えられた。 そこで本研究では，地表地震断層を伴った2014年長野北部地震を対象に，地表面の変位に着目した動力学的断層破壊シミュレーションの初期応力条件の設定について検討した。直応力とせん断応力はAochi and Tsuda(2023)を踏まえて設定し， 2つのアスペリティと背景領域からなる特性化震源モデル (Tsuda・他，2022)の応力降下量は，アスペリティ領域で負にならないように浅部のアスペリティ1で2.0 MPa，深部のアスペリティ2で7.4MPa，背景領域で0MPaの一定値とした。Dcに関しては，断層破壊が伝播するように，試行錯誤してアスペリティ領域は0.4m, 背景領域は0.9ｍと設定した。図1に設定した応力降下量分布を示す。媒質に関しては，地震発生層より浅い部分が深さ0.4kmとあまり大きくなく，単純な条件での検討を主眼としていることから，均質媒質(Vs3.4km/s, Vp 6.0km/s, ρ 2.75t/m^3)とした。なお，地震発生層より浅い部分の媒質の違いが結果に与える影響については今後の課題である。また，初期破壊領域は引間・他(2015)を参考に，アスペリティ2の上端部分に設定した(図１の黒い□の領域)。図2にはシミュレーションで得られたすべり分布を示す。最大すべりは1.4mで，引間・他(2015)による値(1.1m)と同程度であった。また，推定された地震モーメント(3.81E+18Nm)とSomerville・他(1999)の規範に基づいて算定した断層面積(262.2km^2)は，引間・他(2015)の地震モーメント(3.08E+18Nm)，断層面積(292.5km^2)と同程度であった。図3aには，断層近傍の地点(NGN005)における計算と観測の変位波形の比較を示す。両者の変位波形には，同じ0.5Hz以下のローパスフィルターを掛けている。シミュレーションでは純粋な逆断層を仮定しているため，計算波形のFP成分は振幅がほぼゼロであり観測波形を説明できていないが，FX成分とUD成分(鉛直成分)では計算波形と観測波形の最終変位は概ね対応している。図3bにシミュレーションによる地表の鉛直変位分布を，図3cにはInSARによる鉛直変位分布を示す。図より，アスペリティ1の直上の鉛直変位は計算では約50cm，InSARでは約30cm程度で概ね対応している。また，大きな鉛直変位が生じている範囲(図3bの白い□の領域)も観測記録(図3cの白い□の領域)と概ね対応している。以上より，本検討で設定した初期応力条件は，2014年長野県北部地震の地表面の変位を概ね再現できたものと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

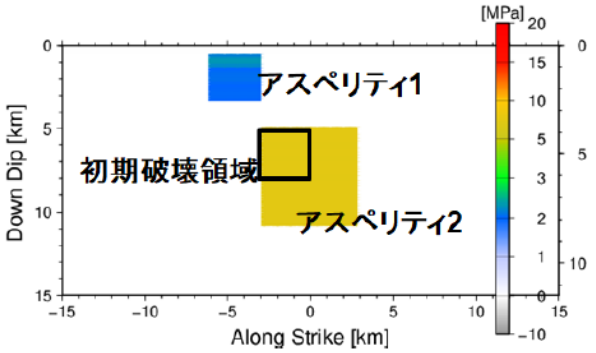


図 1 シミュレーションで設定した応力降下量分布(図中の□は初期破壊領域)

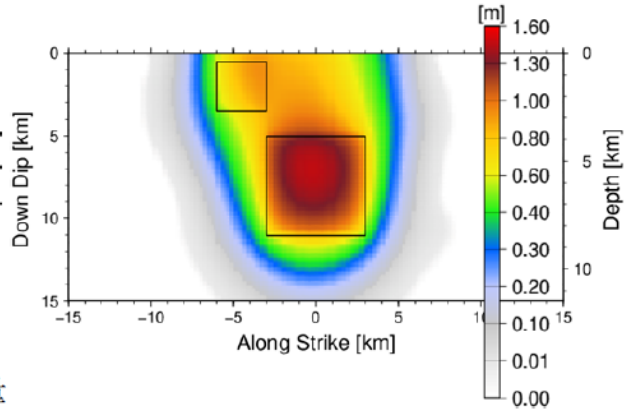


図 2 シミュレーションによるすべり分布

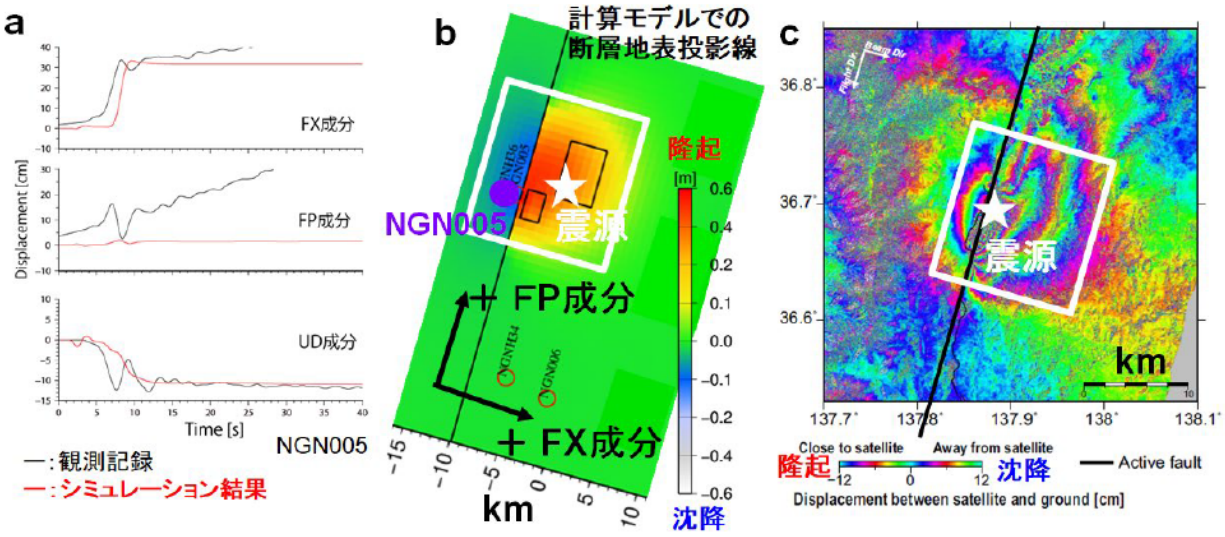


図 3 鉛直変位の観測記録との比較 a: 断層近傍の地点(NGN005)での変位波形の比較, b: シミュレーション結果の鉛直変位分布(図中の黒い□はアスペリティ)c : InSAR の地震後の変位分布(黒線は計算モデルでの断層地表投影線, 白い□は図 3b での同じ白い□の領域に対応)

© The Seismological Society of Japan

Numerical simulation of earthquake generation cycle using multiscale circular patch model

*Ryoko Nakata[1], Takane Hori[2], Hideo Aochi[3,4], Satoshi Ide[1]

1. Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. BRGM, France, 4. ENS-CNRS PSL, France

【はじめに】 地震活動が活発な地域では、様々な規模の地震が発生しているが、マグニチュードの分布は、一般的にべき乗則に従い、小さい地震ほどたくさん発生している。日本海溝を対象とした我々の先行研究では、過去に発生したM9地震とM7クラスの地震の震源域を矩形や円でモデル化した地震発生サイクルの数値シミュレーションを行ってきた [Nakata et al., 2016; 2023]。これらの先行研究で再現した地震活動は、過去に発生した地震の一部に過ぎない。そこで、本研究では、地震サイクルを通した長期にわたる地震発生過程を理解するために、日本海溝沿いの三陸沖で発生する幅広いマグニチュードの地震に、マルチスケール円形パッチモデル [Ide and Aochi, 2005; Aochi and Ide, 2009; Ide and Aochi, 2013]を適用して、準動的な地震発生サイクルシミュレーションを行った。
【手法】 マルチスケール円形パッチモデルは、Ide and Aochi [2013]では、2011年東北地方太平洋沖地震の複雑な動的破壊過程を説明するために用いられたものを参考にした。彼らは、気象庁カタログを基に、過去に発生したM>6.5の地震を規模別にグループ分けし、各グループの地震の震源域を同じ半径の円で近似した。各地震の震源位置に配置した円形パッチでは、すべり弱化距離Dcを円の半径に比例して変化させることで、空間的に不均質な階層構造を与えていた。本研究では、Ide and Aochi [2013]でモデル化した地震のうち、三陸沖領域にのみ着目する。従って、最大規模の地震は、1896年明治三陸地震 (M = 8)である。2番目に大きな規模のグループは、Mj = 7.1～7.6の6地震、3番目はMj = 6.6～7.2の9地震である。さらに、気象庁カタログから、1923年1月～2023年3月に発生した、震源深さ60 km以浅・Mj = 5.6～6.5の362地震を、4番目のグループとして追加した。
地震発生サイクルシミュレーションの数値計算は、先行研究 [Nakata et al., 2016; 2021; 2023]と同様の物理法則、初期値、境界条件、プレート境界面形状等で実施した。ただし、M5クラスの地震まで再現するために、プレート境界面を先行研究よりも細かく分割した。そこで、計算規模を小さくするために、モデル領域は先行研究よりも狭い三陸沖のみとした。本手法では、Dcは特徴的すべり量Lに相当する。A-Bはモデル領域全体で一様に、すべり速度弱化とした。
【結果・議論】 Ide and Aochi [2013]に倣って、全ての地震をそのままLの不均質に反映させると、グループ4の多数のパッチが合わさって見かけ上大きなパッチとなり、モデル領域のほとんどをカバーしてしまうため、階層構造が不明瞭になる。その結果、過去の地震のすべり分布の多くを、シミュレーションで説明することはできなかった。そこで、距離の近い地震をまとめてグループ4のパッチ数を1/10以下に減らしたところ、複数のパッチが適度に重なり合った4階層の構造によって、中～大規模地震が、複雑なすべり分布や繰り返し間隔を示すようになった。講演では、いくつかのモデルの結果を比較することで、階層構造を取り入れた効果について議論する。本研究の結果は、動的破壊過程だけではなく、地震サイクルにおいても、階層構造モデルが本質的に重要であることを示唆している。

【謝辞】 本研究のシミュレーション結果は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムおよびJAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して得られたものです。

© The Seismological Society of Japan

Episodic Aseismic Slip Events as Incomplete Nucleation of Seismic Slip due to Heterogeneous Stress Distribution

*Naoyuki KATO[1]

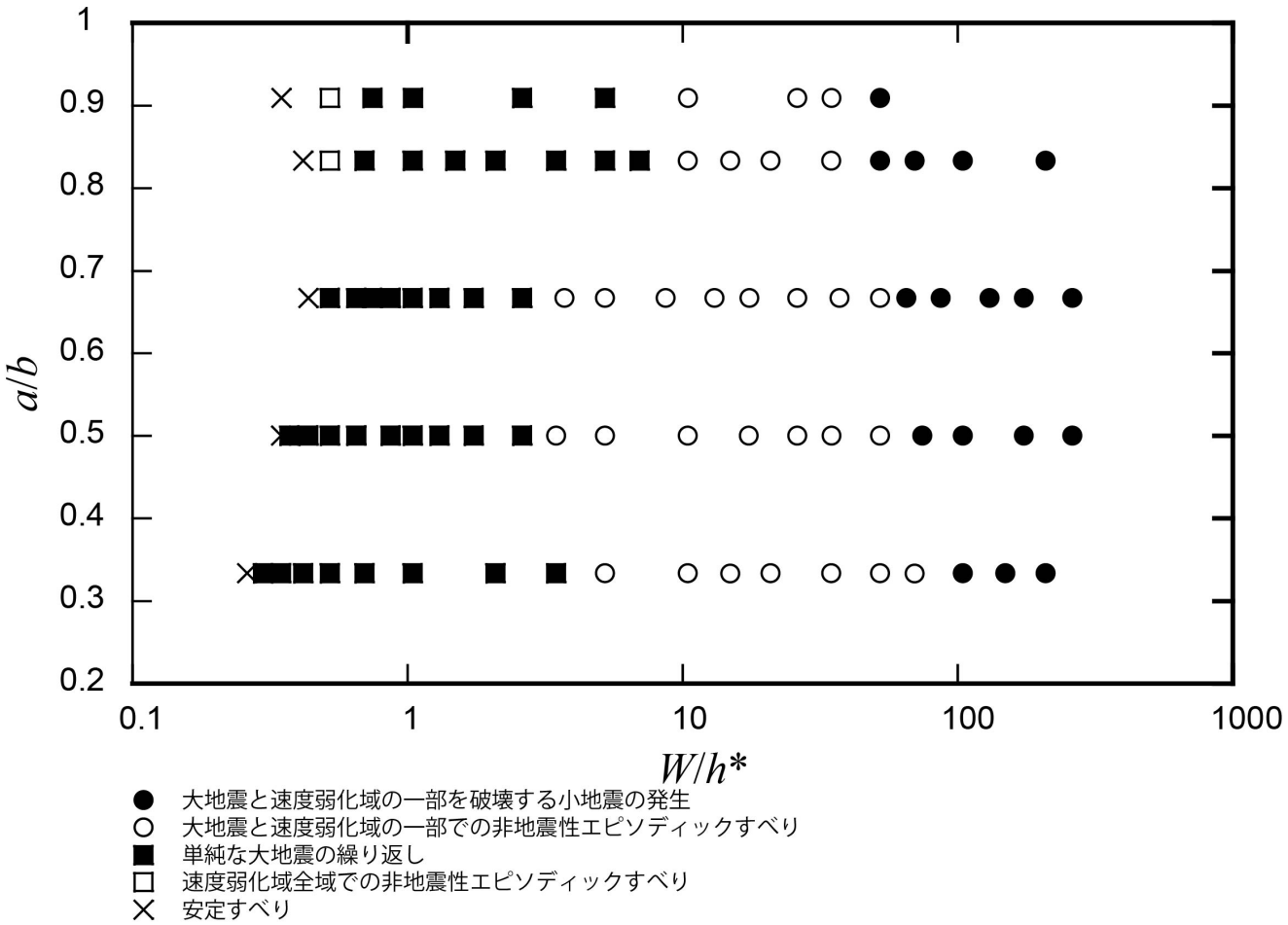
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

速度・状態依存則を用いた数値シミュレーションにより，様々な非地震性すべりの発生や複雑な地震サイクルの説明が可能になっている．Wu and Chen (2014)は，断層面上の速度弱化域（a-b<0）において摩擦特性が一様であっても，速度弱化域の一部が破壊されるような小地震が発生することを示した．これは，速度弱化域全体を破壊するような大地震発生後には速度弱化域のせん断応力がほぼ動摩擦応力まで一様に低下し，その後，深部の速度強化域（a-b>0）での安定すべりにより速度弱化域の最深部でせん断応力が増加するために応力の不均一性が形成され，速度弱化域の最深部のみが破壊される小地震が発生するためである．このような小地震は，摩擦パラメターから決まる破壊核臨界長h*が速度弱化域の幅Wよりも十分に短い場合に実現する．さらに，Cattania (2019)は，W/h*が十分に大きい場合には，速度弱化域を部分破壊する様々な規模の地震が発生し，地震の規模別頻度分布がべき乗則に従うことを説明した．浅部の地震発生域と深部の安定すべり域での摩擦特性の違いによる不均一な応力分布はごく普通に生じると考えられ，非地震性すべりの発生過程にも影響する可能性がある．非地震性エピソディックすべりの発生に着目して数値シミュレーションを行った．
均質半無限弾性体中の断層を考え，摩擦は速度・状態依存摩擦則に従うとする．浅部では速度弱化を深部では速度強化の摩擦特性を仮定した．有効法線応力と摩擦パラメターである特徴的すべり量Lは断層面上で一様であるとする．L（∝h*）を変化させることにより，幅広いW/h*について地震サイクルの数値シミュレーションを行った．また，摩擦パラメターaとbの比a/bの効果についても調べた．その結果シミュレーションで得られた地震サイクルのパターンを図に示す（Kato, 2023）．W/h*が100程度よりも大きいと，先行研究で示されたように，速度弱化域全体を破壊する大地震と速度弱化域の一部を破壊する小地震が発生し，複雑な地震サイクルが現れる．W/h*がやや小さい場合，速度弱化域全域を破壊する大地震に先行して，速度弱化域の一部での非地震性エピソディックすべりが発生する．これは，速度弱化域の最深部での応力集中により非地震性すべりが発生し破壊核が形成されかかるが，破壊先端が浅部の低応力域に入ることにより，破壊伝播が停止してしまうためである．その後，ほぼ同じ場所で再びエピソディックすべりが発生するが，速度弱化域内部のせん断応力は時間の経過により上昇しているために破壊は停止されず，破壊伝播は加速されて地震性すべりにまで発展する．W/h*がさらに小さくなると，速度弱化域の一部でのエピソディックすべりは発生せず，速度弱化域全域を破壊する大地震が繰り返し発生する．
スロースリップイベントは，大地震が発生する速度弱化域とその浅部または深部の速度強化域のとの境界域で多く発生するが，地震発生域内でのイベントも大地震発生との関連で重要である．本研究で示したように，速度弱化域内の摩擦特性が一様であっても，深部の安定すべりによるせん断応力の不均一分布により非地震性エピソディックすべりが発生する．これは途中で止められた（成功しなかった）破壊核形成過程であり，時間が経過して速度弱化域のせん断応力が増大すると再び破壊核形成過程が生じて大地震が発生する．

文献

Cattania, C. (2019). Geophys. Res. Lett., 46, doi: 10.1029/2019GL083628.
Kato, N. (2023). Bull. Seismol. Soc. Am., doi: 10.1785/0120230048.
Wu, Y., and X. Chen (2014). J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, doi:10.1002/2013JB010779.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

3D viscoelastic earthquake sequence simulation with plate-boundary fault and inland faults

*Ryoya Matsushima[1], So Ozawa[2], Ryosuke Ando[1]

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

沈み込み帯周辺の応力場は、内陸地震やプレート境界地震、アセノスフェアの粘弾性緩和や海洋プレートの定常的な沈み込みなど多くの要素の影響を受けており、その結果沈み込み帯周辺の応力場は時空間的に複雑なものになっている。例えば、2011年の東北地方太平洋沖地震後には東北日本の歪速度の長波長成分が収縮から伸長に転じた一方、新潟神戸歪集中帯における歪速度の短波長成分は地震後も収縮を続けた(Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016)。また、東北日本ではプレート境界地震による応力降下にも関わらず内陸では応力が長期的に蓄積し、逆断層型の地震を引き起こしている。
しかし、内陸の断層に応力が蓄積するメカニズムは明らかになっていない。また、内陸活断層における地震、プレート境界地震、アセノスフェアの粘弾性緩和の相互作用を地震シークエンスシミュレーションの枠組みでモデル化した研究はまだなされていない。そこで本研究では、弾性媒質中に断層を表す面とリソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)を表す面をおき、それぞれに適切な境界条件を与えて準動的に解く手法を提案する。

手法
まず、内陸に応力が蓄積するメカニズムについて考察するため、海洋プレート上面と下面、大陸プレート下面を表す面を用意し、海洋プレートを表す面の端に速度境界条件を与えて駆動するモデルを作成した。そして非地震性滑りを再現できるようにhbi (Ozawa et al. 2023)を書き換えたコードを用いて、定常状態になるまで時間発展させ、プレートが定常的に沈み込む時のそれぞれの面の変位速度分布を求めた。このようにして得られた変位速度分布から、Nikkhoo and Walter, 2015のグリーン関数を用いて沈み込み帯周辺の応力場を計算した。本研究では、プレートの形状や速度境界条件の値を変えつつ応力場を計算し、応力蓄積メカニズムを調べた。
次に、内陸地震、プレート境界地震、粘弾性緩和の相互作用を再現するために、このモデルに内陸断層を追加し、海洋プレート上面の一部をプレート境界断層にした。そして境界条件として断層には速度・状態に依存する摩擦則（RSF則）を、その他の面(LAB)には粘性抵抗を与えた。そして前述のコードを用いて準動的地震シークエンスシミュレーションを実行した。なお、LABに与えた境界条件の妥当性は、解析解(Savage and Prescott, 1978)の存在するモデルで粘弾性緩和による地表面変位を計算し、解析解と本手法の結果を比較することで検証した。

予備的結果と今後の展望
定常的なプレートの沈み込みによる応力場を計算したところ、大陸プレート内に引張応力場が形成された。また、海洋プレートの曲げにより、海洋プレート浅部には引張応力場が、海洋プレート深部には圧縮応力場が形成された。
また、断層を追加して準動的シミュレーションを行ったところ、プレート境界断層では数百年周期で地震が発生した。プレート境界地震により、LABでは粘弾性緩和が発生し、内陸断層では応力が過渡的に変化した。また内陸の断層では、プレート境界地震による応力降下にも関わらず、長期的に応力が蓄積し正断層地震が発生した。内陸の断層で発生した地震の周期はプレート境界における地震の周期より1桁大きかった。
今後は、内陸に圧縮応力場が形成されるメカニズムを明らかにするとともに、2011年東北地方太平洋沖地震前後の内陸断層の地震や粘弾性緩和をプレート境界地震と同一の枠組みでシミュレートし、地表面変位の観測結果や地震活動などを再現することを目指す。

© The Seismological Society of Japan

Separating interlocking asperities from high slip deficit zones along the Nankai Trough, Japan

*Daisuke Sato[1], Takane Hori[1], Yukitoshi Fukahata[2]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

地震時・地震間の断層滑りの推定法は、表現定理に基づく滑りインバージョンとして確立されている(Ide, 2007)。一方で、対応する断層摩擦特性の推定は、特定の物理モデルを採用することに由来するモデルエラーがあり、種々の結果は容易には比較できない。本研究では、特定の摩擦則を仮定せずに得られる断層摩擦の情報とは何かを追求する。結果として、物理モデリングでいうアスペリティにあたる、摩擦則本来の意味での固着域を地震間の測地データから直接に推定できることがわかった。この手法を実データに適用し、南海沈み込み帯の固着域と高滑り欠損域を分離する。

解析は、相補性(Smaï & Aochi, 2017)として知られる、摩擦運動の普遍的性質を原理にする。ここで相補性とは、摩擦境界では滑り量か剪断応力のどちらかがほぼ時間一定であることを指す。ゼロ滑り速度と定応力の二相は、いわゆるスティック・スリップにあたり、応力を蓄積する固着時のアスペリティと定常的にクリープする領域の物理的相である。こうして、固着したアスペリティの推定は、特定の摩擦則に依拠することなく、従来研究されてきたスティックスリップモデル（e.g., Bürgmann et al., 2005）のインバージョン解析に帰着する。スティックスリップインバージョンの観測方程式は、所与のスティックスリップのバイナリ変数に対する混合境界値問題(クラック問題)を設定し、これを滑り分布について解き、その滑り分布を表現定理で地表変位に変換するという一連の手続きで計算される(Johnson & Fukuda, 2010; Herman et al., 2020)。同推定は素朴には非線形でかつ不安定であるため、我々はアスペリティ形状を円形パッチの重ね合わせで表し、円の中心・半径・また個数を最適化することでこの逆問題を解いた。そのように解くことで、従来のスティックスリップインバージョンで見られた、粗い離散格子を用いた場合の推定値のグリッド依存性や稠密離散化で生じる解の不安定性(Herman et al., 2020)や、非線形問題における事前情報使用時の客観的超パラメター決定の課題(Johnson & Fukuda, 2010)を回避している。

実データ適用では、GEONETの陸上GNSSデータとYokota et al. (2016)が取得した海域GNSS-Acousticデータを解析した。まず、三次元弾性構造を考慮したHori et al. (2021)のグリーン関数と、グリーン関数の不確定性を確率変数として顕に考慮するYagi & Fukahata (2011)の方法を併用し、従来的な滑り欠損推定を行った。結果、3つの100-200kmの広がりを持つ高滑り欠損域が推定された。これらは、1944年東南海・1946年南海地震の震源域(Baba & Cummins, 2005)、および2018-2019年豊後水道長期スロースリップ域(Seshimo & Yoshioka, 2022)に概ね対応している。次に、上述のスティックスリップインバージョンを実施すると、それら3つの高滑り欠損域に対応する、50-100km幅の3つのアスペリティが検出された。これは、高滑り欠損域は必ずしも固着していないという最近の報告(Herman et al., 2020; Lindsey et al., 2021)と合致するのみならず、低速・高速破壊を生じるアスペリティは地震間においては区別なく固着域であることを示唆している。3つのアスペリティは空間的に明確に分離していることが確認されたが、一方で推定すべり欠損域については1946年南海地震と2018-2019年豊後水道長期スロースリップに対応する2つは重なっていた。南海沈み込み帯の巨大低速・高速地震の摩擦的アスペリティは、定常的クリープ領域によって隔てられてこそいるものの、周囲の滑り遅れを介する互いの弾性作用圏にある。

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

Tue. Oct 31, 2023 1:30 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room A F205+206

[S08] PM-1

chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University), Hitoshi HIROSE(Kobe University)

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

[S08-11] Analytical treatment of transition condition between slow and fast earthquakes and its validity

*Takehito SUZUKI[1], Hiroshi MATSUKAWA[1] (1. Dept. Phys. Sci., Aoyama Gakuin University)

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

[S08-12] Slow and fast earthquakes and earthquake modeling

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

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

[S08-13] Mega-earthquake potential along the Peruvian subduction zone based on shear stress build-up and the earthquake energy balance

*Nelson PULIDO[1], Juan Carlos Villegas-Lanza[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Instituto Geofisico del Peru)

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

[S08-14] Inter-plate sluggish slip: its initiation and growth

*Yoshio FUKAO[1], Hiroko Sugioka[2], Ryo Furue[3], Tatsuya Kubota[4] (1. JAMSTEC, Yokohama Institute, Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Kobe Univ., 3. JAMSTEC,, 4. NIED)

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

[S08-15] A stacking analysis of the tilt record prior to the 2011 great Tohoku earthquake

*Hitoshi HIROSE[1,2], Aitaro Kato[3], Takeshi Kimura[2] (1. Kobe University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. ERI, Univ. of Tokyo)

Analytical treatment of transition condition between slow and fast earthquakes and its validity

*Takehito SUZUKI[1], Hiroshi MATSUKAWA[1]

1. Dept. Phys. Sci., Aoyama Gakuin University

バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用によって生じるゆっくり・高速地震の遷移条件を解析的に取り扱う。ゆっくり地震と高速地震の違いは、それぞれブロックのエネルギーバランスを表す方程式の解が３つまたは１つの正の実数解を持つ場合に対応することを既に報告している。ここではある近似の下で解の個数の条件を解析的に求め、また数値計算も同時に行いその近似の有効性や妥当性を議論する。

ブロックの滑り前後のエネルギー変化を表す関数を$F(u_f)$とする。ここでu_fは一回の地震の滑り量である。Fは滑り前後のバネに蓄えられたエネルギーの差から動摩擦力がした仕事を引いたものであり、$F(u_f)=0$がエネルギー保存を示すため、この解が実際の地震の滑り量として実現されることになる。F=0が複数の正の実数解を持つ場合は、最小の解が実現される。ここではF=0が３つの正の実数解を持つ場合を考える。F(0)=0（滑らなければエネルギー変化もない）であり、かつ$dF(u_f)/du_f|_{u_f=0}<0$という条件も存在することに注意する。するとこの時は$dF(u_f)/du_f=0$が３つの正の実数解を持っており、その解を$u_1<u_2<u_3$とすれば$F(u_1)<0$, $F(u_2)>0$かつ$F(u_3)<0$である。

続いてF=0の正の実数解が縮退する場合を考える。境界条件から$F(u_1)<0$は常に成り立つ。これに加えて$F(u_3)<0$のままであるとすると、F=0の正の実数解は$F(u_2)=0$になった時に２つになり、$F(u_2)<0$になった時に１つになる。またこの時実現される解もそれまでの最小のもの（ゆっくり地震に対応）から最大のもの（高速地震に対応）へと不連続に大きくジャンプする。すなわち$F(u_2)=0$となる条件を解析的に書ければ、両地震への遷移条件が理解できるということになる。

ここで、$dF/du_f=0$の式と$F(u_2)=0$の式に$u_2>>1$とすると、u_2の二次方程式が得られる。これが正の実数解を持つ条件、すなわち判別式>0が、相転移の解析的表現である。Fには滑り開始時の流体圧や空隙率がパラメータとして含まれるが、それらが作る相空間中で両地震の振る舞いの境界を示せるとも言える。そして数値計算の結果、実際に多くのケースで先の近似は有効であることが確かめられた。地震滑りの振る舞いの予測に重要な役割を果たす解析的表現が得られたと言える。

© The Seismological Society of Japan

Slow and fast earthquakes and earthquake modeling

*Satoshi IDE[1]

1. Department of Earth and Planetary Science, The Uniersity of Tokyo

地震は断層運動といえるが、断層運動なら地震というわけではない。Leid (1911)の弾性反発説や、Brace and Byerlee (1966)の地震はstick-slipだという考え方によって、断層には固着とすべりという２つの状態があり、「地震＝断層すべり」という常識が形成された。そして断層のすべりのモデルならば、地震のモデルだと考えられてきた。ところが21世紀になって、スロー地震が発見され、この常識は修正を迫られている。スロー地震も、ほぼ弾性反発や、stick-slipとみなすことができるからである。
スロー地震とは何か？Ide and Beroza (2023)は、16年前にIde et al. (2007)によって提案されたスロー地震のスケール法則の再検討を行った。16年間の観測的証拠の蓄積によって、現在では1秒以下から数か月以上までの様々な時定数で、スロー地震を観測することができ、その地震モーメントMoは継続時間Tに比例することが確認できる。但し、すべての現象はノイズなどの影響から、検出限界ぎりぎりの信号しか出さない。観測できない様々な現象の存在を仮定すれば、MoとTの比例関係は、スロー地震の地震モーメントレートの上限を規定する関係と理解すべきである。地球内部の様々な変形現象は、この法則に規定されており、様々な断層のすべり運動が、スロー地震としてこの法則に従って発生する。これまでに様々な物理素過程を含むメカニズムが提唱されているように、スロー地震を生み出すメカニズムは多様な可能性があるが、すべてこの法則に従うようだ。見方を変えれば、この法則に従わないユニークな変形現象こそが、普通の地震である。普通の地震とは、実は普通でない変形現象ともいえる。
地震の何が特別かといえば、地震波を放出する点である。地震時には、断層のすべりが地震波の伝播速度と近い速度で進展することで、断層面における非弾性エネルギー損失を抑え、弾性エネルギーを効率的に地震波エネルギーに変換する。スロー地震の進展には、地震波のサポートがないので、この効率的な変換ができない。当たり前であるが、この高速の破壊伝播と地震波の放出なしに、地震をモデル化することはできない。しかし、多くの「地震のモデル」は、この必要条件を満たさない。1次元のバネとブロックのモデルは、非常によく検討されるが、もちろん地震波を出さない。これを連結したBurridge and Knopoff (1967)のモデルと、その派生形の様々な臨界現象モデルは、Gutenberg-Richter則を再現するので人気だが、地震波は出さない。Rate-and-State摩擦則を用いた地震サイクル計算も数多くなされている。多くの地震サイクル計算では、計算コストを下げるために、放射ダンピングの近似が用いられている。この準動的サイクルモデルにおいては、破壊の伝播速度は、非現実的に遅い。
現象の一面をとらえるために単純化したのがモデルであり、その一面の議論には役立つが、時に単純化の制約を超えた議論が誤った認識を生み出すことがある。例えば1次元のバネのブロックの安定性解析は、自発的なすべりの発生を議論するには良いが、自発的＝地震波を出すわけではない。スロー地震も自発的なすべり進展現象である。Gutenberg-Richter則は、地震について知られていたが、スロー地震の頻度統計も似たようなべき法則になるという指摘がある。べき法則を生み出すモデルが、スロー地震のモデルであっても問題はない。実際に臨界現象モデルを用いて、テクトニック微動が再現できるという指摘がある。準動的サイクルモデルの伝播速度を決めているのは、静的なエネルギーバランスである。すべりの進展と停止も、静的なエネルギーバランスが決める。つまり進展の条件は、スロー地震と同じである。このような計算で不均質な媒質中の破壊伝播の可能性を計算すれば、当然過小評価になる。
以上まとめれば、これまで地震のモデルと考えられていたものには、スロー地震のモデルとして見直すべきものがたくさんある。スロー地震が存在することが地震学の常識になった今、その認識に立ってモデル体系を再構築する必要があるだろう。

© The Seismological Society of Japan

Mega-earthquake potential along the Peruvian subduction zone based on shear stress build-up and the earthquake energy balance

*Nelson PULIDO[1], Juan Carlos Villegas-Lanza[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Instituto Geofisico del Peru

海溝帯における巨大地震発生の評価は通常、地域の地震履歴に基づいて行われる。 しかしながら、地震カタログに含まれる情報は巨大地震間において不完全である。 さらに、応力とひずみの蓄積や、破壊に対する断層強度等は、プレート境界で発生する大地震の破壊物理的プロセスの科学知見を、組み込む必要がある。 日本の南海・東南海沈み込み帯における最近の研究では、すべり欠損領域が、プレート境界での断層すべりを支配する局所的な摩擦強度特性等を、直接反映していないことが示されている。 したがって、地震発生の物理的条件を解明するために、プレート境界の力学カップリングモデルと地震エネルギー収支が提案されている（Noda et al. 2021）。 このモデルでは、ひずみエネルギーが断層破壊エネルギーを超えない限り、地震破壊は起こらない。 一方、巨大地震の断層破壊中には極めて強い動的弱化が発生することが、様々な摩擦実験データや動的破壊数値モデル等から明らかになりつつある。 本研究では、強力な動的断層弱化効果を考慮した地震エネルギー収支に組み込み、それをペルーの海溝型巨大地震発生ポテンシャル評価のために適用する。 破壊エネルギー (G) を計算するには、海溝型地震の震源断層破壊過程モデルのグローバルデータベースと 、2D 有限幅滑り動的破壊モデル (Pulido 2023、準備中) から得られた平均断層滑りと G のスケーリング法則を使用する。 本研究では、地震滑り欠損モデル (ISC) (Villegas-Lanza et al. 2016) と、個々のセグメントごとの過去最大規模の地震からの発生期間を用いて、ペルーの沈み込み沿岸帯に沿った、せん断応力蓄積レートと、総蓄積せん断応力分布を計算した。この情報を用いて、複数の破壊シナリオを設定し、各地震シナリオの破壊エネルギーとエネルギー収支の推定に基づいて、巨大地震発生の可能性について検討した。 その結果、ペルー中部（リマ地域）とペルー最南部（チリ近郊）の沈み込み帯が、数十年以内に、それぞれMw～8.9とMw～8.5の巨大地震を発生させるための、必要物理条件を満たすことを示している。 近年、世界中のISC モデルのデータが大量に利用可能になったことと、プレート境界の断層破壊エネルギーのスケーリング法則との統合において、本研究の手法を用いて、世界中の沈み込み帯の大地震発生ポテンシャルの一次評価は可能であると考えられる。

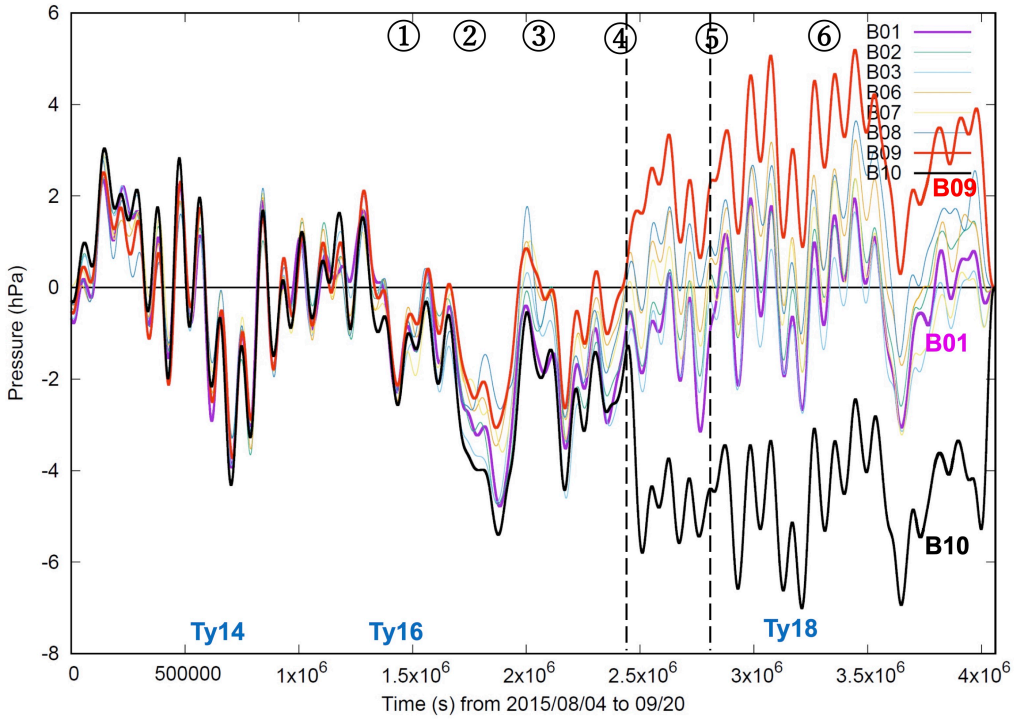
© The Seismological Society of Japan

Inter-plate sluggish slip: its initiation and growth

*Yoshio FUKAO[1], Hiroko Sugioka[2], Ryo Furue[3], Tatsuya Kubota[4]

1. JAMSTEC, Yokohama Institute, Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Kobe Univ., 3. JAMSTEC,, 4. NIED

１．序 伊豆・小笠原海溝のプレート沈み込みは非地震性滑りの代表例である。この海溝内側水深約5000mの海底で、2015年５月末から１年間、高感度水晶式水圧計によるアレー観測が実施された。我々はこの記録を解析し、M6.0の地震がアレー直下に発生したこと、その直後と3.5日後に、通常の地震よりは遅くSlow Slip Eventよりは早い滑り現象（Rapid Aseismic Slip）を見出した(Fukao et al., 2021, JGR)。今回は、（１）これらはほぼ１か月にわたってズルズルと続く滑りの中の数イベントであり、他にもいくつか主要なイベントがあるべきこと、（２）この期間、海底の上下変形は時間とともに増大し、最終的に水平距離10kmで高低差5cmを生む海底変動が生じたこと（３）sluggish滑りは、台風16号がアレーに最接近し海底水圧が低下したときと同期しているように見えること、を示す。 ２．記録 図は８月４日から47日間の８観測点の海底水圧記録である。NaotideとLowpass-filterを用いて海洋潮汐を除去しようとしたが適切なfilteringが未だできていない。以下、観測点B01,B09,B10の水圧変化（紫、赤、黒色の太線）の時間変化を追いかける。①台風16号が接近するまで海底に有意な高低差運動なし。②台風接近に伴う海底水圧の低下をきっかけに海底の高低差運動始まる。③B10の相対的隆起とB09の相対的沈降進行。④M6地震と直後のRapid Aseismic Slip (2)によりB10の相対的隆起とB09の相対的沈降が劇的に進行(2)、⑤地震から3.5日後のRapid Aseismic Slip (2)によりB10に対するB01の相対的沈降が急激に進行、⑥B10に対するB09の相対的沈降が続くがその勢いは次第に弱まり活動は終息に向かう。 ３．考察 このズルズル滑りの中から、これまでに前震・本震・余震型の地震１イベント、Rapid Aseismic slip ２イベントが検出されているが、記録は他にもイベント的な滑りがあることを示唆する。それらの一部がRapid aseismic よりも遅く、通常のslow slip eventsの範疇に仕分けされる可能性もある。伊豆・小笠原小笠原海溝では、こうした多様なモードの滑りの連鎖的発生がプレート間滑りの主流かもしれない。



© The Seismological Society of Japan

A stacking analysis of the tilt record prior to the 2011 great Tohoku earthquake

*Hitoshi HIROSE[1,2], Aitaro Kato[3], Takeshi Kimura[2]

1. Kobe University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. ERI, Univ. of Tokyo

Bletery and Nocquet (2023, Science; 以下 BN23) は、GEONET変位時系列データのスタッキング処理に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震発生直前の約2時間に、前兆的なスロースリップ (プレスリップ) が震源付近のプレート境界で起きていたと主張した。これに対して、Bradley and Hubbard [1] は、この変動は GNSS データに含まれる共通誤差 (Common Mode Error: CME) による見かけ変動であり、CMEを補正すると見えなくなることを指摘した。さらに、震源域から200 km以上離れたGNSS観測点のノイズしか含まないはずのデータのみを用いて、BN23 が示した「プレスリップ」のような見かけの変動を再現できることを報告しており、CME がこの見かけの変動の要因であることを主張している。そこで我々は GNSSデータとは独立なデータである防災科研 Hi-net 高感度加速度計 (傾斜計) のデータに対して BN23 と同様な手法を適用し、彼らの主張する本震発生直前の約2時間におけるプレスリップの有無を検証した。

岩手県、宮城県、福島県に位置する防災科研Hi-net 55 観測点の傾斜記録水平2成分によって記録された2011年1月はじめから3月11日の本震直前までの1分サンプリングデータを用いた。そのデータに BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を適用して潮汐応答成分を除去した。これらのデータに対して BN23 に準じた処理を適用した。まず本震発生時刻 (2011年3月11日14:46) の 48 時間前から本震までのデータを切り出した。その最初の24時間分、すなわち、本震の48時間前から24時間前までの中央値を各観測点・各成分で算出し、時系列全体から差し引いた。この2成分の時系列を $\mathbf{u}(t)$ とする。また同期間のデータでノイズレベル σ を算出した。次に Okada (1992) によって各観測点における理論傾斜変化ベクトルを算出した。このとき、震源位置・震源メカニズムは BN23 で用いられている SCARDEC database (Vallée and Douet, 2016) の値を用いた。このデータベースにある震源メカニズムの2つの節面のうち、ほぼ西落ちの低角の面 (走向197度, 傾斜14度, すべり角84度) を震源断層とした。断層面積を 1 km ×1 km とし、1 m のすべりを与えた際の各観測点での理論値を計算し $\mathbf{g}$ とした。これらの値を用い、各観測点で $\mathbf{u}(t) \cdot \mathbf{g} / \sigma^2$ を計算し、全観測点の和を取った (スタック: S(t))。また S(t) を、地震モーメントに対応する量に変換した ($M_0(t)$)。

この結果、算出された S(t), $M_0(t)$ には、BN23 で示されたような地震発生2時間前からの加速的な上昇は見られなかった。一方で、今回解析した 48 時間の $M_0(t)$ の長周期成分は数時間程度でゆらいでおり、その標準偏差は約10^{19} Nm (Mw 6.6) であった。これは Hi-net 傾斜記録を BN23 のスタッキング手法で処理した際の、本震震源近傍でのすべりの検知レベルを示すと解釈できる。BN23 がプレスリップと解釈した加速的変化の大きさは 2.9×10^{19} Nm (Mw 6.9) であり、今回の解析における検知レベルを超えている。すなわち、もしそのようなプレスリップがあったのであれば、我々の結果にも見られるはずであるが、その規模の同様な変動は見られなかった。したがって、Bradley and Hubbard [1] が指摘するように、BN23 がプレスリップと解釈した変動は見かけのものである可能性が高いと結論付けることができる。

[1] https://earthquakeinsights.substack.com/p/update-on-apparent-gps-detection

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session：S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

Tue. Oct 31, 2023 3:00 PM - 4:38 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 6:00 AM - 7:38 AM UTC | Room A F205+206

[S20] PM-2

chairperson:Takuto Maeda, Takuya Nishimura

3:00 PM - 3:03 PM JST | 6:00 AM - 6:03 AM UTC

[1A16-19-1add] President speech

3:03 PM - 3:18 PM JST | 6:03 AM - 6:18 AM UTC

[1A16-19-2add] Award ceremony

3:18 PM - 3:38 PM JST | 6:18 AM - 6:38 AM UTC

[S20-01] [Invited]Seismic tomography: New insights into seismotectonics, volcanism and geodynamics

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

3:38 PM - 3:58 PM JST | 6:38 AM - 6:58 AM UTC

[S20-02] [Invited]Flexible source-process imaging to illuminate a relationship between rupture growth complexity and fault geometry

*Ryo Okuwaki[1] (1. University of Tsukuba)

3:58 PM - 4:18 PM JST | 6:58 AM - 7:18 AM UTC

[S20-03] [Invited]Study on earthquake, tsunami, and volcanic phenomena using ocean-bottom pressure data considering solid-fluid coupled earth

*Tatsuya Kubota[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:18 PM - 4:38 PM JST | 7:18 AM - 7:38 AM UTC

[S20-04] [Invited]Improvement of earthquake early warning and detection of characteristic seismicity based on identification of simultaneous earthquakes

*Koji TAMARIBUCHI[1] (1. Meteorological Research Institute)

Room A | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-2

chairperson:Takuto Maeda, Takuya Nishimura

Tue. Oct 31, 2023 3:00 PM - 4:38 PM Room A (F205+206)

3:00 PM - 3:03 PM

[1A16-19-1add]President speech

©Seismological Society of Japan

Room A | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-2

chairperson:Takuto Maeda, Takuya Nishimura

Tue. Oct 31, 2023 3:00 PM - 4:38 PM Room A (F205+206)

3:03 PM - 3:18 PM

[1A16-19-2add]Award ceremony

©Seismological Society of Japan

[Invited]Seismic tomography: New insights into seismotectonics, volcanism and geodynamics

*Dapeng ZHAO[1]

1. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University

In the past 30 years I have made seismic tomography studies, which shed new light on seismotectonics, volcanism, and the Earth interior structure and dynamics. In this lecture I introduce the main findings of our tomographic studies made so far.

(1) Subduction zone structure and arc magmatism. We have investigated the 3-D structure of many subduction zones by conducting joint inversion of local and teleseismic data (e.g., *Zhao et al.*, 1992, 1994, 1995, 1997). The subducting slab is imaged clearly as a high-velocity (high-V) zone whose thickness depends on the slab age. Significant low-velocity (low-V) anomalies are revealed in the mantle wedge, which reflect arc magma and fluids associated with corner flow and slab dehydration, leading to the formation of arc volcanoes.

(2) Fluids and earthquakes. A low-V and high Poisson's ratio anomaly was revealed in the source zone of the 1995 Kobe earthquake (M7.2), reflecting a fluid-filled, fractured rock matrix that triggered the rupture of the Nojima fault (*Zhao et al.*, 1996). The fluids in the source zone came from dehydration of the subducting Philippine Sea (PHS) slab under SW Japan (*Zhao et al.*, 2000, 2002). Similar features have been revealed in source zones of various large earthquakes worldwide, suggesting that fluids are probably involved in all types of earthquakes (*Zhao*, 2021).

(3) Big mantle wedge and intraplate volcanism. East Asian mantle tomography shows that the Pacific slab becomes flat in the mantle transition zone (410-660 km depths) beneath the Korean Peninsula and East China, and a big mantle wedge (BMW) has formed above the slab under East Asia. The intraplate volcanism in NE Asia is caused by hot and wet upwelling flows in the BMW (*Zhao et al.*, 2004, 2009).

(4) Seismic anisotropy and mantle dynamics. The subducting Pacific and PHS slabs exhibit mainly trench-parallel azimuthal anisotropy, which may reflect frozen-in lattice-preferred orientation of aligned anisotropic minerals and/or shape-preferred orientation, such as normal faults produced at the outer-rise near the trench axis (*Zhao et al.*, 2023). Trench-normal anisotropy is generally revealed in the mantle wedge under the volcanic front and back-arc, which may reflect corner flows in the mantle wedge due to the plate subduction and dehydration (*Wang & Zhao*, 2021; *Zhao et al.*, 2023). Trench-normal anisotropy also occurs in the subslab mantle, reflecting asthenospheric shear deformation associated with the overlying slab subduction (*Fan & Zhao*, 2021).

(5) Mantle plumes and deep slabs. Global tomography has revealed deeply subducted slabs reaching the core-mantle boundary (CMB). Plume-like, continuous low-V anomalies appear beneath 13 hotspots, suggesting that they are 13 whole-mantle plumes originating from the CMB. These plumes exhibit tilted images, suggesting that plumes are not fixed in the mantle but can be deflected by the mantle flow (*Zhao*, 2004, 2015).

(6) Lunar tomography and moonquakes. Moonquake arrival-time data recorded by the Apollo seismic network operated during 1969 to 1977 were used to determine the first Vp and Vs tomography beneath the lunar near-side (*Zhao et al.*, 2008, 2012). A correlation between the Vs tomography and the thorium abundance distribution is revealed. The area with high thorium abundance exhibits a distinct low Vs that extends down to ~300 km depth, which may reflect a thermal and compositional anomaly. The distribution of deep moonquakes (700-1300 km depths) shows a correlation with the tomography in the deep lunar mantle. The presence of deep moonquakes and seismic-velocity heterogeneity implies that the interior of the present Moon may still be thermally and dynamically active.

© The Seismological Society of Japan

References

Fan, J., D. Zhao (2021). *Nature Geoscience* 14, 349-353.
Wang, Z., D. Zhao (2021). *Science Advances* 7, eabc9620.
Zhao, D. et al. (1992). *J. Geophys. Res.* 97, 19909-19928.
Zhao, D. et al. (1994). *J. Geophys. Res.* 99, 22313-22329.
Zhao, D. et al. (1995). *J. Geophys. Res.* 100, 6487-6504.
Zhao, D. et al. (1996). *Science* 274, 1891-1894.
Zhao, D. et al. (1997). *Science* 278, 254-257.
Zhao, D. et al. (2000). *J. Geophys. Res.* 105, 13579-13594.
Zhao, D. et al. (2002). *Phys. Earth Planet. Inter.* 132, 249-267.
Zhao, D. (2004). *Phys. Earth Planet. Inter.* 146, 3-34.
Zhao, D., J. Lei, Y. Tang (2004). *Chinese Sci. Bull.* 49, 1401-1408.
Zhao, D., J. Lei, L. Liu (2008). *Chinese Sci. Bull.* 53, 3897-3907.
Zhao, D. et al. (2009). *Phys. Earth Planet. Inter.* 173, 197-206.
Zhao, D. et al. (2012). *Global Planet. Change* 90, 29-36.
Zhao, D. (2015). *Multiscale Seismic Tomography.* Springer, 304 pp.
Zhao, D. (2021). *Earth-Science Reviews* 214, 103507.
Zhao, D. et al. (2023). *Surveys in Geophysics* 44, 947-982.

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Flexible source-process imaging to illuminate a relationship between rupture growth complexity and fault geometry

*Ryo Okuwaki[1]

1. University of Tsukuba

断層形状が破壊や滑りの時空間分布に与える影響は、これまで理論・シミュレーション研究によって検討されてきた。一方、実地震においては、そもそも非平面断層上の震源過程のイメージング自体が困難であった。発表者は、断層形状の複雑性が地震破壊伝播に及ぼす影響を解明するため、破壊伝播や滑りの急な加減速により放射される1 Hz前後の高周波地震波の強度を推定するBack-projection法および、より低周波帯域における有限断層インバージョンの改良に取り組み、断層の滑り方向と断層形状を同時推定可能にする高自由度な震源過程イメージング手法の開発とその適用を行ってきた。断層形状や破壊進行方向など、解析者が予め規定したシナリオに縛られること無く、地震波形データ自身がその情報を素直に描き出す震源過程イメージを構築することで、破壊成長過程の隠された複雑性を明らかにし、また断層形状との因果関係を実地震データ解析により検証可能になった。

例えば2008年四川地震 (Mw 7.9) においては、高周波地震波強度の時空間分布から、断層面が不連続な箇所において破壊進展が妨げられた後、強い応力集中により破壊伝播速度が急加速したことがわかった。断層形状が複雑な内陸巨大地震において、幾何バリアが破壊進展の不規則性をコントロールする主要原因となりうることを突き止めた。さらに、2018年インドネシア地震 (Mw 7.6) においては、S波速度を越えて進展する破壊前線が、断層の屈曲に従いまるで尺取り虫が進むように停滞と進展を伴いながら伝播したことが分かった。破壊前線は、断層の屈曲が背景応力にとって最適な方向に向く場合に進展し、そうでない場合に停滞することが数値シミュレーションにより予測されているが、これを実地震の解析により立証し、断層形状の複雑性が破壊成長を決定する重要な因子であることがわかった。

高自由度な震源過程解析は、地震破壊を規定するプレート境界面形状やスラブ内部の応力状態についても新たな拘束を与える。例えば2021年ハイチ地震 (Mw 7.2) において、一つの地震において逆断層破壊と横ずれ破壊を擁する極めて複雑な地震発生機構をもつことを見出した。2つの破壊エピソードはいずれも既知の横ずれ断層帯から予想される断層の向きや断層の動きとは相容れない機構であり、衝突とすれ違いを伴う複雑なプレート運動が複雑な断層セグメントを形成し得ることがわかってきた。また、2021年ニュージーランド地震 (Mw 7.3) において、スラブ内深部から浅部に至る領域で逆断層・横ずれ断層・正断層破壊が混在すること、特に逆断層破壊で特徴づけられるスラブ深部は海溝軸に並行する圧縮応力軸をもつことが分かった。スラブの浮力や海山の沈み込みに起因するスラブ内応力場の複雑な変化はスラブ形状の特異な折れ曲がりを示唆しており、柔軟な震源過程解析がニュージーランド北端をはじめとする複雑なテクトニクス場の理解に貢献する可能性を見出した。

本講演では、これらを含む解析事例に基づいて、破壊と滑りの加減速が断層形状と相関することを示し、先行するシミュレーション結果を踏まえた解釈が可能になったことを紹介する。断層面の屈曲や不連続が破壊を停滞させるだけでなく、時としてその進展を促し、階層的に地震を巨大化させ得る場合について議論する。さらにこれらの実地震データ解析が、テクトニクス分野の研究に対してどのような貢献をし得るかについても議論する。

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Study on earthquake, tsunami, and volcanic phenomena using ocean-bottom pressure data considering solid-fluid coupled earth

*Tatsuya Kubota[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2011年の東北地方太平洋沖地震 (東北地震) では，宮城沖のプレート浅部が大きくすべり，津波が発生し，沿岸に甚大な被害をもたらした．この東北地震でなぜ浅部大すべりが生じたのかを知ることは，海溝型巨大地震の発生の理解には重要である．著者は，海溝型巨大地震と巨大津波の発生を本質的に理解するためには巨大津波を励起しうる沈み込み帯プレート浅部のすべり量は何によって規定されるのか，そしてプレート境界すべりの駆動源となる応力はどのように蓄積するのか，を明らかにすることが重要であると考え，【(1) 固体ー流体の波動論を応用した海底の震源直上の観測データの解析手法の開発】を進め，【(2) 直上観測データを用いた東北沖で発生した地震の高精度・高信頼度な震源断層モデリングと東北沖の地震テクトニクスの研究】を進めてきた．加えて，これらの研究で得られた知見を発展させ，【(3) 地震以外の気象・火山噴火現象を要因として生じる津波現象の研究】 (e.g. Kubota et al. 2021a GRL; Kubota et al. 2022 Science) も進めてきた．発表では，主に(1)と(2)の研究で得られた知見や，それらの研究を進めるに至った背景や経緯を紹介したい．

近年，日本周辺の沖合には広域・稠密な海底観測網が展開されるようになり，沈み込み帯の地震テクトニクスの研究が進んでいる．一方で，いくら新しい観測網ができても，2011年東北地震当時の観測記録は増えることはない．著者は，東北地震の当時に展開されていた海底観測データから，いまだ見出されていない情報を引き出すことが重要であると考え，「振り切れない地震計」としての潜在性を持つ海底圧力計に着目した．従来，海底圧力計は，津波 (海洋長波) のような長周期の波や余効変動・スロースリップ等の地殻変動を主な観測対象としていたが，実際は，海底圧力計は短周期な地震波 (水中音響波) も観測している．著者は，固体ー流体の波動論 (e.g. Saito, 2019) に基づいた海底圧力記録の解析手法の開発に取り組んで，この短周期圧力変動を地震解析への活用可能性を示してきた．一例として，巨大地震の断層直上の地震動と津波が重畳する海底圧力記録から両者を分離する手法 (Kubota et al. 2021b GRL) や，長周期の津波や地殻変動 (永久変位) から，短周期の津波や地震動成分まで再現できる海底圧力モデリング手法を考案 (Kubota et al. 2017 GRL; 2021c GRL) した．震源直上の海底圧力計の広帯域変動成分をフル活用することにより，津波の利点 (伝播速度が遅く，水平位置の信頼度が高い) と地震波の利点 (時間解像度が高い) をあわせもつ震源過程解析ができるようになる．

開発した手法は，特に，震源直上で得られていたデータの解析への適用性が高いため，より高精度・高信頼度な震源断層モデルの推定が実現可能となり，地震発生の力学の定量的理解へとつなげることが出来る．一例として，2012年に宮城沖のアウターライズ域で2つのM7級プレート内地震が立て続けに発生した地震では，震源域直上に多数設置された海底圧力計データ解析から，2つの地震の震源過程を詳細に分離，それぞれの地震の応力降下量の推定を可能にした．さらに，これらを東北地震による静的な応力変化量と比較することにより，海洋プレート内部の応力と強度状態を明らかにした (Kubota et al. 2019 PEPS)．最近では，東北地震時に震源直上に展開された海底圧力計のデータと測地データの統合解析によって断層面上の応力変化分布を高い信頼度で推定し，プレート浅部は応力を解放することなく大すべりを起こしたことを指摘した．これは，浅部大すべりを駆動した歪みエネルギーは，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領域によって蓄積されていたことを示唆する (Kubota et al. 2022 PEPS)．現在は，これら一連の研究をさらに発展させ，より高精度な東北地震の時間・空間発展を求め，浅部大すべりのメカニズムのさらなる理解に向けた研究を進めている．

著者は，上記の一連の研究を通して，海底観測データ (とくに海底圧力データ) の可能性を押し広げることにより，海底地震学の進展に貢献できたと考えている．一方で，観測データの解析研究から高い信頼度で拘束できるのは，地震の運動学的な描像 (「何が起こったか」) であり，地震が「なぜ起こったか」，すなわち地震の駆

© The Seismological Society of Japan

動源となるエネルギーやその蓄積と解放を支配するレオロジーや摩擦の構成則といった力学的描像を明らかにすることも重要である．これら力学的性質が巨大地震発生にどのように影響するかを理解するべく，一層の研究を進めたい．

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Improvement of earthquake early warning and detection of characteristic seismicity based on identification of simultaneous earthquakes

*Koji TAMARIBUCHI[1]

1. Meteorological Research Institute

地震波形から迅速かつ適切に震源を識別・推定することは，緊急地震速報をはじめとする地震動即時予測や地震カタログの作成といった地震動・地震活動監視の根幹となる重要な要素である．また，通常の地震活動に加えて，スロー地震や繰り返し相似地震の監視も，プレート間の固着状況の監視に貢献する要素の一つである．発表者は地震動・地震活動の監視に貢献することを目的として，これまで地震識別手法および地震活動の統計解析に主に取り組んできた．本発表では，これらの研究開発について紹介する．
一つめは，地震識別手法の高度化である．一般に，大地震や群発地震が発生すると，多数の震源からの地震波が同時に観測されるため，地震識別が困難となる．特に，平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震以降，地震活動が非常に活発になり，緊急地震速報の過大な予測や手作業でのカタログ作成に遅れが生じ，早期に地震活動を把握することが困難になった．発表者らは，この課題を解決する二つの震源推定手法（IPF法：Integrated Particle Filter 法[1]，PF法：Phase combination Forward search法[2][3]）を開発し，改良を重ねてきた．IPF法は，ベイズ推定に基づく粒子フィルタを活用した震源推定手法で，各種観測データの統合解析と震源の不確定性を考慮した地震識別の高度化を実現した．この手法は，2016年12月から気象庁の緊急地震速報で活用されている．一方，PF法は，同様の考え方を微小地震カタログに応用した手法で，従来から用いられるP相，S相の検測時刻に加えて最大振幅を特徴量として用い，地震多発時でも高精度に震源を自動推定することを実現した．PF法は2016年4月から一元化震源に活用され，その直後に発生した平成28年 (2016年) 熊本地震ではその震源が気象庁の報道発表資料の第1報から利用される等，地震活動の早期把握に大きく貢献した[3]．
二つめは，地震活動の統計解析である．溜渕・他 (2010)[4] は，宮古島近海のプレート境界で，*M*4–5の繰り返し相似地震系列が複数の存在することを地震カタログと記象紙等の地震波形から見出した．その後，解析対象を全国の強震波形に広げ，震度3程度以上の繰り返し相似地震を検出した．Tamaribuchi et al. (2018)[5] では，熊本地震を契機として前震活動の統計解析を行い，前震の*b*値はいずれの本震規模であっても余震のものよりもわずかに小さいことを明らかにした．また，海底地震観測網を活用した自動震源カタログに対して機械学習を用いたノイズ誤検知低減手法を適用し，日本海溝沿いでスロー地震と同じ深さ10–20 kmで発生する前震活動が発生しやすい特異な微小地震活動領域を同定した[6]．さらに，南海トラフ沿いでは海底地震観測網を用いて浅部微動を検出し，浅部微動が地震動や潮汐に敏感に反応する様子[7]や，浅部微動のエネルギーレートの空間分布はプレート境界浅部の応力不均質によく対応していること[8]を明らかにした．
これらの研究に加えて，社会実装を進めていくことが，地震防災および調査研究の進展にとって重要である．今後も大地震から微小地震・スロー地震の即時解析を通じて地震動や地震活動の実況把握，評価，予測を目指し，包括的地震モニタリングの構築を進めていく．

謝辞：これらの成果は，一元化関係機関の皆様が培ってこられた高品質かつ大量の観測データや気象庁の運用システムに関する知見・技術に基づくものであり，観測網の維持・発展やシステム開発・運用にご尽力いただいている関係者の皆様に改めて感謝申し上げます．

[1] 溜渕功史, 山田真澄, Stephen WU, 2014, *地震2*, 67, 41–55. doi:10.4294/zisin.67.41
[2] 溜渕功史, 森脇健, 上野寛, 束田進也, 2016, *験震時報*, 79, 1–13.
[3] Tamaribuchi, K., 2018, *Earth Planets Space*, 70, 141. doi:10.1186/s40623-018-0915-4
[4] 溜渕功史, 山田安之, 石垣祐三, 高木康伸, 中村雅基, 前田憲二, 岡田正実, 2010, *地震2*, 62, 193–207.

© The Seismological Society of Japan

doi:10.4294/zisin.62.193
[5] Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, *Earth Planets Space*, 70, 90. doi:10.1186/s40623-018-0866-9
[6] Tamaribuchi, K., F. Hirose, A. Noda, Y. Iwasaki, K. Iwakiri, H. Ueno, 2021, *Earth Planets Space*, 73, 91. doi:10.1186/s40623-021-01411-6
[7] Tamaribuchi, K., A. Kobayashi, T. Nishimiya, F. Hirose, and S. Annoura, 2019, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 13737–13745. doi:10.1029/2019GL085158
[8] Tamaribuchi, K., M. Ogiso, and A. Noda, 2022, *J. Geophys. Res.*, 127. doi:10.1029/2022JB024403

© The Seismological Society of Japan

Room B | Special session：S23. 100 years after the Great Kanto earthquake: development of earthquake research in the Kanto region

Tue. Oct 31, 2023 9:30 AM - 10:40 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 12:30 AM - 1:40 AM UTC | Room B F201

[S23] AM-1

chairperson:Yusuke Tomozawa(Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation), Takumi Hayashida(IISEE, Building Research Institute)

9:30 AM - 9:50 AM JST | 12:30 AM - 12:50 AM UTC

[S23-01] [Invited]Probability of M8 class earthquake along the Sagami Trough, central Japan

*Masajiro IMOTO[1], Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:50 AM - 10:05 AM JST | 12:50 AM - 1:05 AM UTC

[S23-02] Future Probability of Occurrence of the Next M~8 Kanto Earthquake for Various Combination of Past Events

*Kenji SATAKE[1], Katsuhiko ISHIBASHI[2] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kobe University)

10:05 AM - 10:25 AM JST | 1:05 AM - 1:25 AM UTC

[S23-03] [Invited]Crustal Structures and Seismo-tectonics of the Izu Collision Zone

*Ryou HONDA[1], Yuki ABE[1], Ryosuke DOKE[1] (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government)

10:25 AM - 10:40 AM JST | 1:25 AM - 1:40 AM UTC

[S23-04] Importance of the 1923 coseismic uplift of Hatsushima Island in western Sagami Bay for seismotectonics of the Kanto earthquake

*Katsuhiko ISHIBASHI[1] (1. none)

[Invited]Probability of M8 class earthquake along the Sagami Trough, central Japan

*Masajiro IMOTO[1], Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大正関東地震(1923年M7.9)は相模トラフで沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートの境界付近で発生した地震で，これまでに繰り返し発生している．政府地震調査推進本部地震調査委員会は「相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）」を公表し（地震調査委員会, 2014），大正関東地震の再来など相模トラフ沿いに発生するM8クラス（M7.9～M8.6）プレート境界地震の発生確率を推定している．ここでは，地震調査委員会(2014)に基づき，関東M8クラス地震の発生確率について検討する．
地震調査委員会(2014)において，1) 地形・地質データ（浜堤列、海岸段丘、津波堆積物）により約3000年間に9回確認されたM8クラス地震の発生年代，2)更新過程Brownian Passage Time (BPT) 分布モデル，3)Parsons (2008) に倣った発生年の不確定性処理，により発生確率が算出されている．Parsonsの方法はOgata(1999)の多重積分を用いた尤度式の定義と基本的には同じで，尤度の実現値として9回の発生年代に合致する時系列を生起している．この方法とは異なり，東北地方太平洋沖を震源とする超巨大地震に関する報告書（地震調査委員会，2019）では，発生年が不確定な地震については各発生年代で乱数により発生年を決定し，多数の時系列を生起させている（無作為抽出時系列）．ここに挙げた２通りの方法による時系列は別物で，Parsonsによる時系列では各年代における発生年の分布は事前に与える発生年の確からしさ分布 (本稿では一様分布としている)とかけ離れることが多い．これに対し，無作為抽出時系列では発生年の確からしさ分布を反映させた発生年の頻度となる．
地震調査委員会 (2014)と地震調査委員会 (2019)における手法の違いを詳しく調べると，Ogata (1999) の尤度式により決定されたBPT分布モデルの地震間隔不規則性を表すパラメータ（以後，ばらつき）が，無作為抽出時系列のばらつきの分布（中央値や平均値）に比べ小さく偏ることがわかる．これは，各時系列において規格化されていない尤度を他の時系列の尤度と合算（積分）していることに起因する．この問題を回避する方法として，想定される地震間隔を全て同時に用いるBPT分布パラメータの推定法（尤度幾何平均推定法）が提案され，東北地方太平洋沖地震時系列や関東M8クラス地震時系列に適用された．尤度幾何平均推定法に基づく発生確率の推移は，無作為抽出時系列による確率の平均値や中央値と概ね一致している．
地震調査委員会 (2014) 記載のデータに基づき，① 9回の地震のうち発生年代の特定されていない地震（１回）について，発生年代を直接には使わない，② 歴史地震による地震間隔も用いる，を考慮して4通りの時系列ついて尤度幾何平均推定法によりBPT分布パラメータの平均間隔とばらつきを求めた．各時系列に含まれる地震は，時系列A：9回の発生年代，時系列 B：8回の発生年代（9回発生），時系列C：時系列Bに永仁（正応）地震(1293年)，元禄関東地震（1703年），大正関東地震（1923年）を追加，時系列D：時系列Bに永仁地震，明応地震（1495年），元禄関東地震，大正関東地震を追加，である．図１に各時系列による条件付き30年確率の推移を示す．これによると，大正地震発生から100年経過時点での確率値は0.5～1.8%である．時系列Aでは連続する地震の発生年代が接している時期があり，そこでは極めて短い地震間隔も想定されるため，短い経過年数における発生確率が他の時系列より高くなっている．
なお，過去に発生した相模トラフ沿いのM8クラスの地震の中で，南房総地域に海岸段丘面を形成する規模の大きな地震について発生確率は次の通りである．最新の地震は1703年元禄関東地震で，それより古い地震は，B.C.5200年，B.C.3000年，B.C.1000年に発生したとされる．これらの活動間隔から平均間隔2300年とばらつき0.15を得る．今後30年間に地震が発生する確率はほぼ0%となる（地震調査委員会，2014）．また，ポアソン過程を仮定すると，大正関東地震の場合には平均間隔320～363年から今後30年間に地震が発生する確率は8～9%となり，規模の大きな地震の場合では平均間隔2300年から確率は1%となる．

© The Seismological Society of Japan

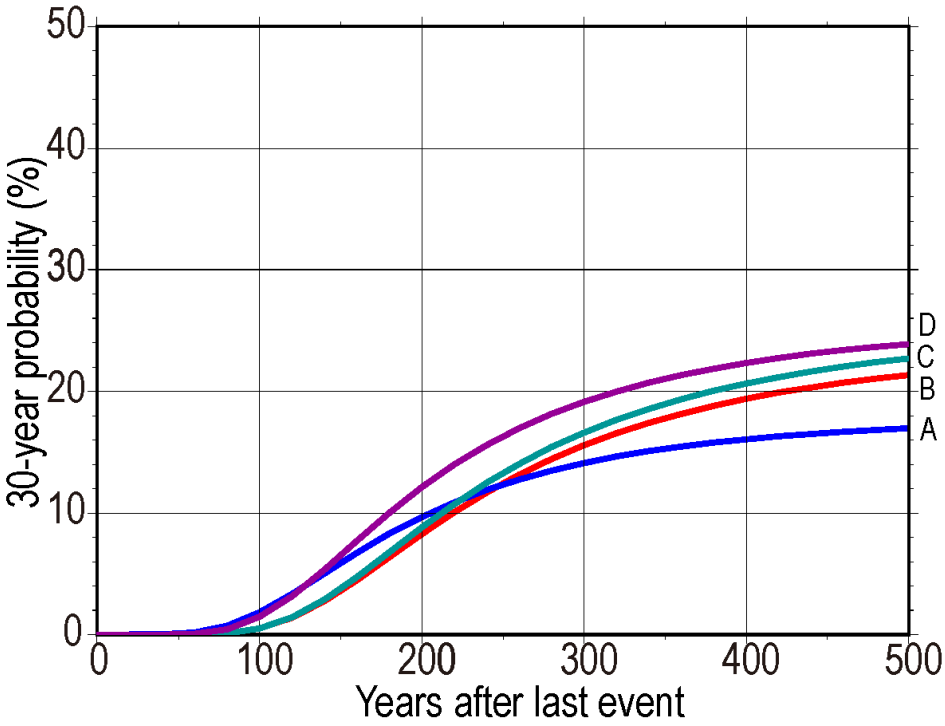


図１　条件付き 30 年確率推移の比較.
時系列 A：9 回の古地震発生年代を基に，尤度幾何平均によるパラメータ推定.
時系列 B：8 回の古地震発生年代に基づく.
時系列 C：時系列 B に永仁地震（正応地震，1293 年），元禄関東地震（1703 年），
大正関東地震（1923 年）を追加.
時系列 D：時系列 B に永仁地震，明応地震（1495 年），元禄関東地震，
大正関東地震を追加

© The Seismological Society of Japan

Future Probability of Occurrence of the Next M~8 Kanto Earthquake for Various Combination of Past Events

*Kenji SATAKE[1], Katsuhiko ISHIBASHI[2]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kobe University

1923年大正関東地震の前の関東地震として，1703年元禄関東地震が古くから知られており，房総半島南部での隆起量や東岸での津波高さが大正関東地震よりも大きかったことから，それぞれ「大正型」「元禄型」関東地震とされてきた．2004年に地震調査委員会から発表された「相模トラフ沿いの地震活動の長期評価」においては，大正型，元禄型関東地震の発生間隔はそれぞれ200～400年，2300年程度とされ，2002年から30年間の発生確率はそれぞれ0～0.8%，ほぼ0%とされた．
2014年に改訂された「相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）」では，大正型，元禄型を一括してM8クラスとして扱い，1293年の地震も加えた3地震から平均発生間隔は315年，30年発生確率は0～2%とした．また，岩井低地などに発達する浜堤列（宍倉・他，2001，地震；2005, 活断層・古地震研究報告）のうち，見落としが少ないと考えられる3000年間（2400～5400CalBP）の9回のイベントから，30年発生確率をほぼ0～5%と推定した．
Ishibashi (2020, SRL)は古代～中世の史料に基づき，過去の関東地震の候補について検討した．818年（弘仁九年）の関東諸国の地震ならびに1257年（正嘉元年）の鎌倉の地震については，被害分布や余震の数などから，M８級の関東地震ではなく，小規模・局地的な地震であるとした．そして，878年（元慶二年），1293年（正応六年，永仁元年），1433年（永享五年），１495年（明応七年）の地震が関東地震の候補であり，最後の二つのうちでは 1495年よりも1433年の方が関東地震の可能性が高いとした（表1）．
ここでは，Ishibashi(2020)が候補とした4地震及び1703年（元禄地震），1923年（大正地震）から，関東地震とみなす地震の組み合わせを変えて，今後30年間の発生確率及びその時間変化を計算した（表2）． 地震調査委員会（2014）と同様に3地震（正応，元禄，大正）を選んだ場合，これらに明応あるいは永享を加えた4地震，さらに元慶を加えた二通りの5地震， 6地震すべてを使った場合について， 30年確率（BPTとポアソン）の時間変化を図に示す。 Ishibashi(2020)も指摘しているように，正応，明応，元禄，大正の4地震の平均発生間隔は210±7年となり，αが最も小さい（最も規則的である）．この場合，今後30年間の発生確率は，前回地震から160年（西暦2083年頃）まではほとんど0%あるが，その後急に増加し，西暦2127年（前回地震から204年） 頃にはほぼ100%となる．一方で, これらのすべての6地震を考慮した場合，発生間隔は209年±117年とばらつきが大きく，最短は62年（1433～1495年）である．そのため今後30年間の発生確率は地震後すぐに増加し，現時点（地震発生後100年）ですでに19%と，ポアソン過程（13%）よりも高い値を示す．他の場合（3地震，組み合わせを変えた4地震，5地震）はこれらの中間的な値となる．
歴史上のどの地震が関東地震であるか，特に15世紀（明応または永享）の地震の特定によって，今後の発生確率は大きく変化する．

© The Seismological Society of Japan

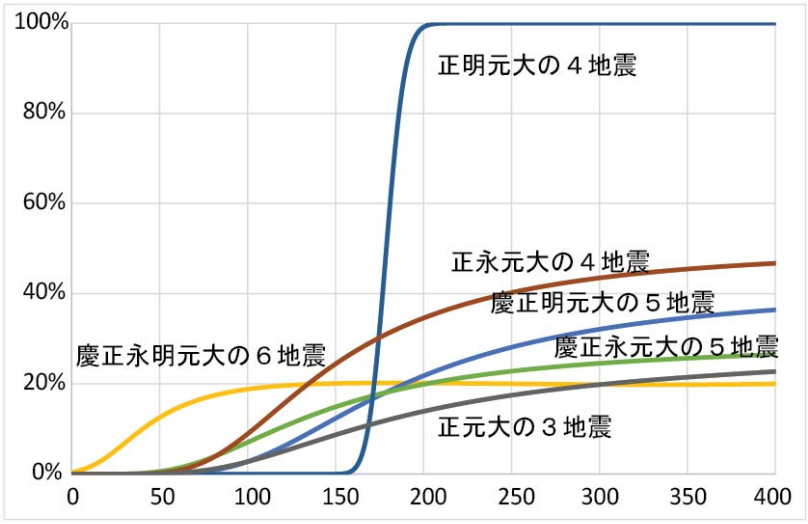


図　表 1 の 6 地震から選んだ地震についての今後 30 年間の発生確率（BPT）の時間変化

表 1　過去の関東地震の候補（Ishibashi, 2020）

元号	元慶	正応	永享	明応	元禄	大正
西暦	878	1293	1433	1495	1703	1923
間隔		415	140	62	208	220
M	7.4	7 - 7.5	≥ 7	--	7.9 - 8.2	7.9

間隔は左列からの発生間隔（年）

表 2　過去の地震の組み合わせと，平均発生間隔，今後 30 年間の発生確率

採用する地震	μ	α	B PT	ポアソン
正元大	315 年	0.45	2.8 %	9 %
正明元大	210 年	0.04	0.0 %	13 %
正永元大	210 年	0.34	8.9 %	13 %
慶正明元大	261 年	0.35	2.8 %	11 %
慶正永元大	216 年	0.46	7.1 %	11 %
慶正永明元大	209 年	0.76	19 %	13 %

μ は平均発生間隔，α は aperiodicity（ばらつきパラメーター），BPT，ポアソンは今後 30 年間の発生確率

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Crustal Structures and Seismo-tectonics of the Izu Collision Zone

*Ryou HONDA[1], Yuki ABE[1], Ryosuke DOKE[1]

1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefectural Government

はじめに

伊豆半島北縁部から相模湾にかけての領域は，伊豆半島以南の伊豆弧と本州側の本州弧の島弧地殻同士が衝突している場であるとともに，伊豆弧前弧側の海洋プレートが，本州弧の島弧地殻の下に沈み込む場となっている．この地域で発生する地震のうち，もっとも規模が大きくかつ大きな災害を引き起こすと考えられるのは，元禄や大正関東地震に代表されるプレート境界型の地震であろう．しかし歴史的にはプレート境界型の地震だけでなく，神奈川県西部から山梨県，静岡県に大きな被害をもたらした小田原地震のような直下型地震も発生する領域である．この地震は近年発生が懸念される首都直下地震の候補の一つでもあり，防災的な観点からもその地震像の解明が期待されている． 伊豆半島北縁部から相模湾にかけての地震像を理解する上では，衝突と沈み込みの違いがどのように解消されるのか，という点が問題であり1970年代から多くの研究者によって議論されてきた。またその基礎となる地下構造やプレート運動についても、基盤観測網の充実とともに多くの研究成果が発表されている。本講演では主に2000年代以降に地震学的・測地学的手法によって明らかにされてきた地下構造や地殻変動などについて整理し、伊豆衝突帯，特に伊豆半島北縁部から相模湾におけるテクトニクスモデルについて考察する． フィリピン海プレートの構造 近年のプレートの構造に関わる研究の大きな進展の一つとして，非地震性スラブの構造が明らかとなってきたことがあげられる．プレート境界で発生する地震の分布からおよその形状が見える駿河湾以西と相模湾以東と比べ，伊豆半島から北西方向に延びる地震の空白領域のプレート構造についてはさまざまな仮説が考えられてきた。90 年代までは，スラブそのものが存在しないとする考え方が多い（例えば石橋,1988; Ishida, 1992;山岡・他 , 1994，Mazzotti et al. ,1999）が，近年では地震波速度構造の解析・レシーバ関数解析などから沈み込む非地震性スラブの存在が明らかとなってきている（例えば、Nakajima et al. 2009; Kinoshita et al. 2015; Abe et al, 2023）．また人工地震探査の結果からも、沈み込む下部地殻の存在が示されている（Arai et al, 2009, 2014）。スラブが非地震性になる理由としては、含水鉱物が存在しないためであると考えられている。一方、地質・地形的には衝突によって伊豆島弧の上部・中部地殻が付加していることも明らかであり、衝突する上・中部地殻と沈み込む下部地殻の間に変位を起こす何らかの構造が必要となる。 GNSSの観測データから、伊豆半島の直下においても同様の構造の存在が示唆されている。石橋・井澗 (2004) は伊豆半島における西向きのGNSS 変位ベクトルを衝突による影響と考え，ユーラシアプレートに対するPHS の本来の運動方向に，衝突の効果としての南南東方向の速度欠損ベクトルを与え伊豆半島の西進の説明を試みた。Seno (2005) は石橋・井澗 (2004) の速度欠損ベクトルを説明するモデルとして，伊豆半島の西側2/3の部分の深さ15-20 kmに，付け根付近から半島南端よりさらに20 km 南まで延びる水平なデタッチメントの存在を仮定した．このモデルでは，デタッチメントが3 cm/yr の速度ですべることで，伊豆の西進を説明できるとした。

相模湾西部における地殻構造と地震の関係
上部・中部地殻の厚さは、島弧の主要部分（伊豆半島の直下）では20km程度の厚さがあるのに対して、相模湾側ではせいぜい数キロ程度と考えられ、相模湾の西部付近で厚さが急激に変化する。そのため、中部・下部地殻の境界が伊豆半島から東に行くほど浅くなり、沈み込む下部地殻と衝突する伊豆半島下の上部・中部地殻の間で東西方向に運動のずれが生じることになる。この運動のずれはGNSSデータでは左横ずれのひずみ集中帯（Doke et al, 2020）として観測されている。このひずみを解消するメカニズムとして、ひずみ集中帯の中に高角な左横ずれ断層が（複数）存在し地震をおこす、あるいはその一部を塑性変形によって解消する、といったことが考えられる。 このせん断帯を含む相模湾西部は小田原地震の震源域とされ、西相模湾断裂と呼ばれる断層帯が存在するとされてきた（石橋,1988）。石橋のモデルでは70数年に一度、M7クラスの地震を発生するとされているが、これは一つの断層に東西の運動のずれによるひずみをすべて押し付けていることに相当するだろう。講演ではこのひずみを解消するメカニズムについて、いくつかの候補をあげて議論する。

© The Seismological Society of Japan

Importance of the 1923 coseismic uplift of Hatsushima Island in western Sagami Bay for seismotectonics of the Kanto earthquake

*Katsuhiko ISHIBASHI[1]

1. none

●1923年関東地震の際，相模湾（正式には相模灘）西部の初島（熱海市；周囲約4km）は，島全体が約1.8ｍ隆起した（池田, 1925）．その北方約11kmにある相模湾西岸の真鶴岬も東端が約3ｍ隆起し，約2km西方の付け根も隆起して岬全体が西に傾動した．伊豆半島東岸の熱海・網代・伊東なども若干隆起した（例えば, 田中館, 1926）．しかし，1923年関東地震の震源断層モデルのほとんどは，初島・真鶴の地震隆起を考慮しておらず，この顕著な事実を説明できていない．最近のNakadai *et al.*（2023）のモデルでも初島の隆起量は数cmであり，彼らは初島付近の高角断層がslow slipかaseismic slipを起こしたのではないかと述べている．だが初島では，地盤がよいのに全43戸中全潰16戸（全潰率37%）であった（池田, 1925）．
●関東巨大地震は，フィリピン海プレート最北端部の南部フォッサマグナ（**SFM**；甲府盆地より南, 三浦・房総南部～駿河湾北西岸）のプレート収束運動の劇的な表れにほかならない．したがって，1923年地震の震源断層モデルも，**SFM**の変動史を考慮しなければ真実に迫れない．その象徴的現象の一つが初島の隆起であり，本発表でその重要性をレビュー的に強調したい．
●初島の1923年地震時隆起が，この地域のネオテクトニクス（即ち, 関東地震の地震テクトニクス）にとって第一義的に重要であることが，変動地形調査によって示唆される．杉原（1980）によれば，島の南東部の最高所の狭い平坦面（Ⅰ面, 47～50ｍ a.s.l.）は約8万年前に形成された小原台面に対比され，その下の高度25～40ｍ a.s.l.の広い平坦面（II面）は，約6万年前に形成された三崎面に対比される．また，石橋･他（1982）が掘削調査なども併用して明らかにしたところによれば，3段の完新世海成段丘（IIIa～IIIc）が発達しており，最高位のIIIa面は貝化石の^{14}C年代が6,730±190 yrsBPで，海成層上限高度は+10ｍであった．これらにもとづく平均隆起速度は，最近8万年間で0.7～0.8ｍ/1,000年，最近6万年間で0.75～0.9ｍ/1,000年，最近6千年間で1.2ｍ/1,000年となり，最近約10万年間，やや速度を増す傾向で隆起を続けているといえる．これは三浦半島南部に匹敵するものである．もう一つ注目すべきは，田中館（1926）の現地聴き取り調査結果をIshibashi (1985) がまとめたところによれば，真鶴岬付近～伊東付近の伊豆半島東岸が1923年以前の数10年間，年間1cm前後の速さで沈降していたことである．また，初島東方沖には相模トラフ最北部の西縁を画する比高1,000ｍの顕著な急崖が南北に走っている．そして，初島は全体的に北西に傾動している．
●石橋（1988a, b）は，貝塚（1984）の示唆を考慮し，**SFM**のプレート収束史を考察して，それまでの「西相模湾断層」説（Ishibashi, 1985）を改め,「西相模湾断裂」の考えを提唱した．これは，過去数百万年以上にわたるプレート収束において，浮揚性沈み込みと多重衝突をくり返した火山性伊豆内弧と，関東地方の下に沈み込んでいく非火山性伊豆外弧の間に必然的に鋏状のプレート内断裂が生じ，それが現在も初島沖～箱根東麓直下で活動的で，1923年にプレート境界主断層面と一緒にずれ動いたというものである．Ishibashi (2004) はその考えにもとづく1923年関東地震の静的断層モデルをフォワードモデルで示したが，田淵・他（2007）は真鶴・初島を含む上下・水平変動データを用いたインバージョンをおこない，初島の地殻変動をよく説明する静的断層モデルを得ている．このモデルを批判的に発展させることが重要であろう．

文献： 池田徹郎, 1925, 震災豫防調査會報告, 100号乙, 97-112; Ishibashi, K., 1985, *Earthq. Predict. Res.*, **3**, 319-344; 石橋克彦, 1988a, b, 科学, **58**, 537-547, 771-780; Ishibashi, K., 2004, *Earth Planets Space*, **56**, 843-858; 石橋克彦･太田陽子･松田時彦, 1982, 地震ii, **35**, 195-212; 貝塚爽平, 1984, 第四紀研究, **23**, 55-70; Nakadai, Y., Y. Tanioka, Y. Yamanaka, and T. Nakagaki, 2023, *Bull. Seismol. Soc, Am.*, **XX**, 1-11; 杉原重夫, 1980, 明治大学人文科学研究所紀要, 19, 1-25; 田淵裕司･石橋克彦･吉岡祥一, 2007, 月刊地球, 号外57, 154-164; 田中館秀三, 1926, 地学雑誌, **38**, 374-390.

© The Seismological Society of Japan

Room B | Special session：S23. 100 years after the Great Kanto earthquake: development of earthquake research in the Kanto region

Tue. Oct 31, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room B F201

[S23] AM-2

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science), Mikiya Yamashita(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S23-05] Changes in seismic activity before the 1923 Kanto earthquake inferred from the macro-seismic observation and other data

*Nobuo HAMADA[1], Kenshiro Tsumura[1] (1. non)

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

[S23-06] Structural Characteristics of Uppermost Frontal Thrust along the Sagami Trough

*Mikiya YAMASHITA[1], Ayanori Misawa[1], Takafumi Kasaya[2], Masataka Kinoshita[3], Seiichi Miura[2] (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. JAMSTEC, 3. ERI, University of Tokyo)

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

[S23-07] Geometry of the top of Philippine Sea plate beneath the Kanto region, Japan: revealed by seismic profiling

*Hiroshi SATO[1,2], Susumu Abe[3], Takaya Iwasaki[4,1], Makoto Matsubara[5], Eiji Kurashimo[1], Tatsuya Ishiyama[1], Naoko Kato[1], Yoshitaka Nakayama[6], Naoshi Hirata[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. Shizuoka Univ., 3. JGI. Inc., 4. Association for the Development of Earthquake Prediction, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 6. Japan Organization for Metals and Energy Security)

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

[S23-08] Strong ground motion in the South-East part of Ibaraki Prefecture during the earthquakes in the North-East part of Chiba Prefecture, Japan

*Tomiichi UETAKE[1], Kazuhito HIKIMA[1] (1. Tokyo Electric Power Company Holdings)

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

[S23-09] How to convey and inherit the 1923 Great Kanto Earthquake - Utilization of digital contents

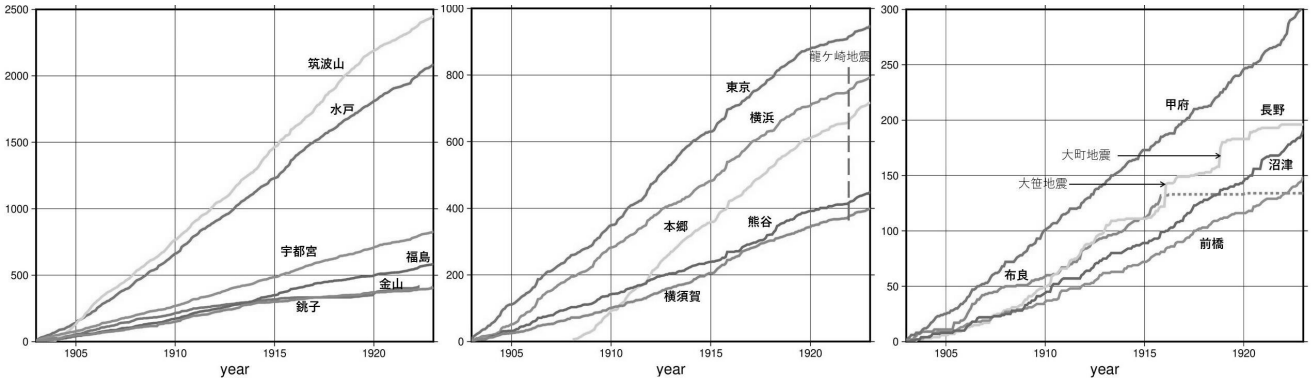
*Satoko MUROTANI[1] (1. National Museum of Nature and Science)

Changes in seismic activity before the 1923 Kanto earthquake inferred from the macro-seismic observation and other data

*Nobuo HAMADA[1], Kenshiro Tsumura[1]

1. non

1923年の関東地震発生の前の震源域周辺の地震活動がどのようなものであったか、当時の乏しい観測資料から推し量ることは困難で断定的な結論を得ることは出来ないと考えられるが、残された資料を用いて検討を行った結果を報告する。
今日残されている資料に1919年以降は気象庁地震月報による地震カタログ、それ以前は宇津（1982）による地震カタログがあるが、地震計による観測網の変遷により地震検知能力の変化が大きく、収録されている地震の数も少なく、震源の精度も限界があり、扱い、解釈が難しい。これに対し震度の観測は明治時代後半には、測候所ばかりでなく郡役所など自治体でも観測、報告が行われるようになり、その結果は官報などに掲載されるようになるなど定常的な観測が行われるようになっていた。震度の観測は地震計による観測と異なり地震検知能力の点では一定、均質と考えられる。勿論有感地震には広い範囲の地震活動が含まれるので、特定の地域の地震活動を正確に反映するとは限らない。また観測が行われていても資料としての保存状態は観測点によって異なり、資料の欠落が認められる観測点もある。これらの状況を踏まえながら、石垣(2007)によれば観測と報告が定常的に行われるようになった、1903年以降の各観測点の月毎の有感地震回数の累積変化を調べた結果の一例を図に示す。もし地震活動に変化がなければ累積地震回数は単調に直線で増加するが、活動が活発になれば変化は上向きになり沈静化すると下に向く。
図によれば東京、横浜、本郷などの観測点では1920年頃から積算回数が頭打ち、有感地震の観測数が減っていることが分かる。熊谷、横須賀は1915年くらいから回数が増加した後同様に有感地震数が頭打ちになっている。いずれの観測点でも1921年龍ケ崎地震による地震回数の増加が認められるが、全体の傾向は変わらない。その他の観測点、水戸や筑波山などの北関東の観測点ではわずかに似たような傾向が読み取れるが、甲府、沼津、長野あるいは前橋といった周辺の観測点では、同様の傾向は認められないかはっきりしない。これらのことから関東地震との関係はともかく、関東中部の地震活動おそらくフィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界付近の地震活動の一時的な沈静化があったものと推定される。
参考文献　1）宇津（1982）震研彙報，57,, 401-463. 、2）石垣(2007)，験震時報，70，29-49.



© The Seismological Society of Japan

Structural Characteristics of Uppermost Frontal Thrust along the Sagami Trough

*Mikiya YAMASHITA[1], Ayanori Misawa[1], Takafumi Kasaya[2], Masataka Kinoshita[3], Seiichi Miura[2]

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. JAMSTEC, 3. ERI, University of Tokyo

伊豆半島と三浦半島に囲まれ関東南部に位置する相模湾は，中央部の相模トラフがフィリピン海プレートの収束帯とされ，その運動に関連した活断層が東側を中心に発達し、西側では伊豆小笠原弧の火山フロントに沿った火山活動が活発な、複雑な場所である．1923年関東地震の震源域は相模湾を含む領域であり，沿岸域では津波も報告されているが，津波の波源域においてどの構造が大きな海底変動を起こした跡なのかは報告されていない．想定される津波の最大波高を予測するためには想定震源域の上限である，先端部は海底付近に達して海底面を変形させている前縁断層の同定が必要であり，今後のトラフ軸周辺の挙動を知る上では前縁断層からトラフ側まで含めた海底近傍の構造評価が重要である． 海洋研究開発機構ではこれまで稠密な測線に沿った反射法地震探査を相模湾周辺で実施してきたが，前縁断層の活動による海底面近傍における堆積層の変形については明らかになっていない．そこで本研究では新たに赤色立体地形図法を詳細な海底地形データに適用し，相模トラフから三重会合点周辺までの地形的特徴を抽出するとともに，既存の反射法地震探査データを用いて相模トラフに沿った断層先端部構造の特徴を明らかにする．

© The Seismological Society of Japan

Geometry of the top of Philippine Sea plate beneath the Kanto region, Japan: revealed by seismic profiling

*Hiroshi SATO[1,2], Susumu Abe[3], Takaya Iwasaki[4,1], Makoto Matsubara[5], Eiji Kurashimo[1], Tatsuya Ishiyama[1], Naoko Kato[1], Yoshitaka Nakayama[6], Naoshi Hirata[1]

1. Univ. of Tokyo, 2. Shizuoka Univ., 3. JGI. Inc., 4. Association for the Development of Earthquake Prediction, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 6. Japan Organization for Metals and Energy Security

はじめに: 関東地域では、1923年関東地震をはじめとする大規模なプレート境界地震が繰り返し発生してきた。2001年以降、大規模大震災軽減化プロジェクトや、首都直下地震防災・減災特別プロジェクト、神縄・国府津-松田断層帯の重点的調査観測プロジェクト等の中で、制御震源による大規模な地殻構造調査や自然地震の稠密アレイ観測が実施され、フィリピン海プレート(PHS)上面の形状が明らかになってきた。ここではPHS上面の形状とそれらの構造を生み出したテクトニックな要因、さらに1923年関東地震への影響について述べる。

フィリピン海プレートの上面形状: 通常プレート境界面は固着しており、地震活動のみでプレート境界を推定することは難しい。このため、深部反射法地震探査や稠密自然地震観測によるレシーバー関数解析などの解析方法を取り入れて、9測線においてPHSプレート上面のイメージングにつとめた。多数の測線においてフィリピン海プレート上面からの反射面が捉えられ、従来の推定よりもかなり浅い深度に位置することが明らかになった[1, 2, 3] (Fig. 1)。

伊豆衝突帯における地殻構造の特徴: 伊豆衝突帯北部、関東山地から甲府盆地に至る地域では、NW-SE, NS, ENE-WSW方向の互いに交差する測線で構造探査を行い、PHS上面はNNW-SSE方向のリッジ状の形状をなすことが明らかになった。東翼は緩傾斜であるが、西翼では傾斜を増大させ、甲府盆地の曽根丘陵下では、PHSからの反射面群が深さ40 kmまで追跡される[2]。このリッジ状のPHSの変形は、湾曲した形状の沈み込み境界への下降運動によるスラブの変形［4］と調和的である。背斜軸跡の方向は、古いフィリピン海プレートの運動方向［5］とほぼ一致することから、15 Ma以降継続したPHSの浮揚性沈み込みと一連のプロセスで形成されたと推定される。この東翼緩傾斜のリッジ状の形状は、1923年関東地震のすべり分布も規制している。新しいプレート境界形状に基づく1923年関東地震時の地殻変動や地震波形を用いて求められた地震時のすべり量分布は［1］、すべり領域の西縁がリッジ状形状の東翼部と一致することを示している。甲府盆地で確認されたPHS上面は、浮揚性沈み込みにより地殻上部が剥ぎ取られた本州側に付加した伊豆-小笠原弧の中部地殻に相当する。沈み込んでいるスラブ内の地震活動は、反射面群によって示唆される深部延長では消失しており、非地震性のスラブとなっている。伊豆衝突帯の北西部では、沈み込みに沿った地震活動の欠損により、スラブの存在そのものが不明確であったが、反射法地震探査によってその存在が明らかになった。甲府盆地下でのPHS上面深度は南アルプス下で推定されるものより有意に深く、とくに西方への連続性については更なる研究が必要である。

三浦・房総半島下の地殻構造の特徴: 関東平野の堆積盆地は、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う葉山-嶺岡隆起帯の背後に形成され、最大層厚は川崎沖の東京湾で6 kmに及んでいる。葉山-嶺岡隆起帯下のP波速度構造は、関東平野下の先新第三系の岩石に比べて低下し、付加体としての形成プロセスを反映してP波速度4〜5 km/s程度の厚い一様な速度構造を示す。三浦半島下の関東地震のアスペリティ領域では、プレート境界面周辺でのP波速度は6 km/s程度まで上昇している。

関東地域南部のテクトニクス: 15 Ma以降、伊豆衝突帯ではPHSの北北西進に伴い浮揚性沈み込みが進行し、伊豆-小笠原弧の地殻上部が付加した。この間、国府津-松田断層などプレート境界に平行する分岐断層が形成された。1 Ma以降、PHSの西北西方向への運動方向の変化によって［6］、伊豆衝突帯西側での上盤プレート地殻の短縮量の増大や駿河トラフにおけるPHSスラブの傾斜角の増加、三浦・房総半島における分岐断層の右横ずれ運動が生じた。1923年関東地震は、こうした伊豆衝突帯東方の低角度の沈み込み境界の横ずれ運動によって発生した。

© The Seismological Society of Japan

文献 [1]Sato, H. et al., Science, 309 (5737), 462-464, 2005. [2]佐藤比呂志，首都直下地震防災・減災特別 プロジェクト 総括成果報告書, 15-24, 2012. [3] Arai et al., G-cubed, 15, 1977–1990, doi:10.1002/2014GC005321, 2014. ［4］Niitsuma, N., The Island Arc, 8, 441-458, 1999. ［4］Ide, S. Nature, 466, 356–359, 2010. [5] Hashima, A. et al., Tectonophys., 679, 1-14, doi: 10.1016/j.tecto.2016.04.005, 2016.

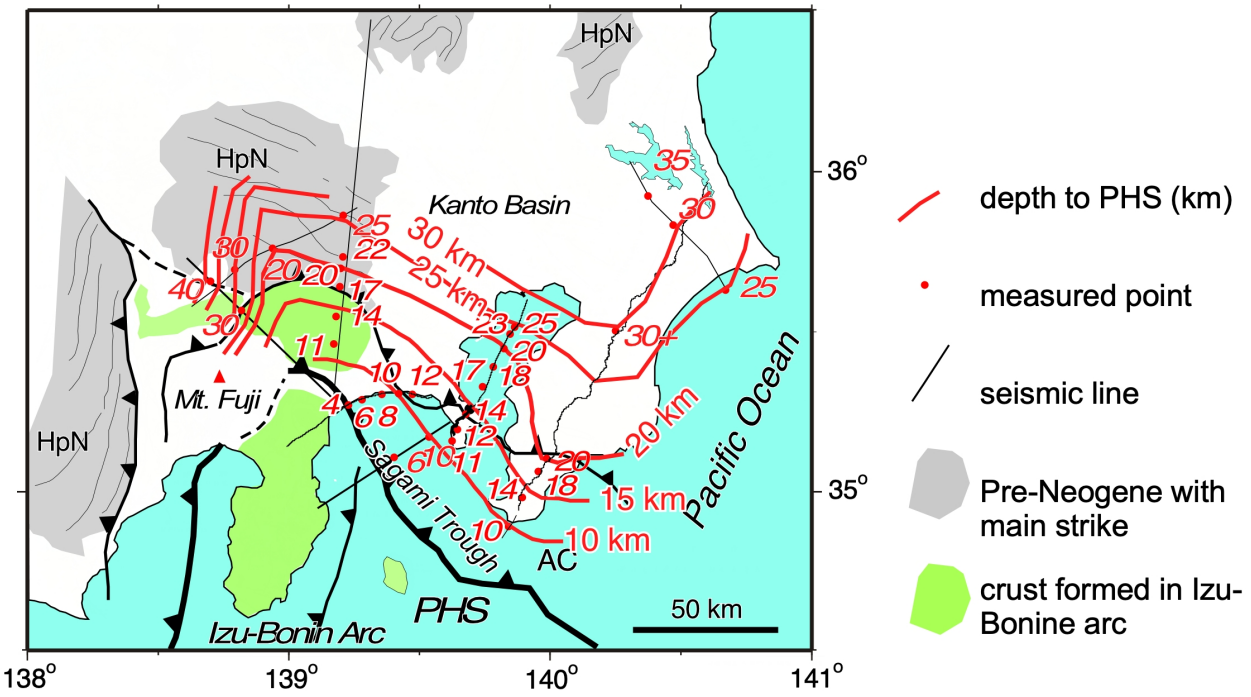


Figure 1. Depth to the top of Philippine Sea plate in the Kanto region.

© The Seismological Society of Japan

Strong ground motion in the South-East part of Ibaraki Prefecture during the earthquakes in the North-East part of Chiba Prefecture, Japan

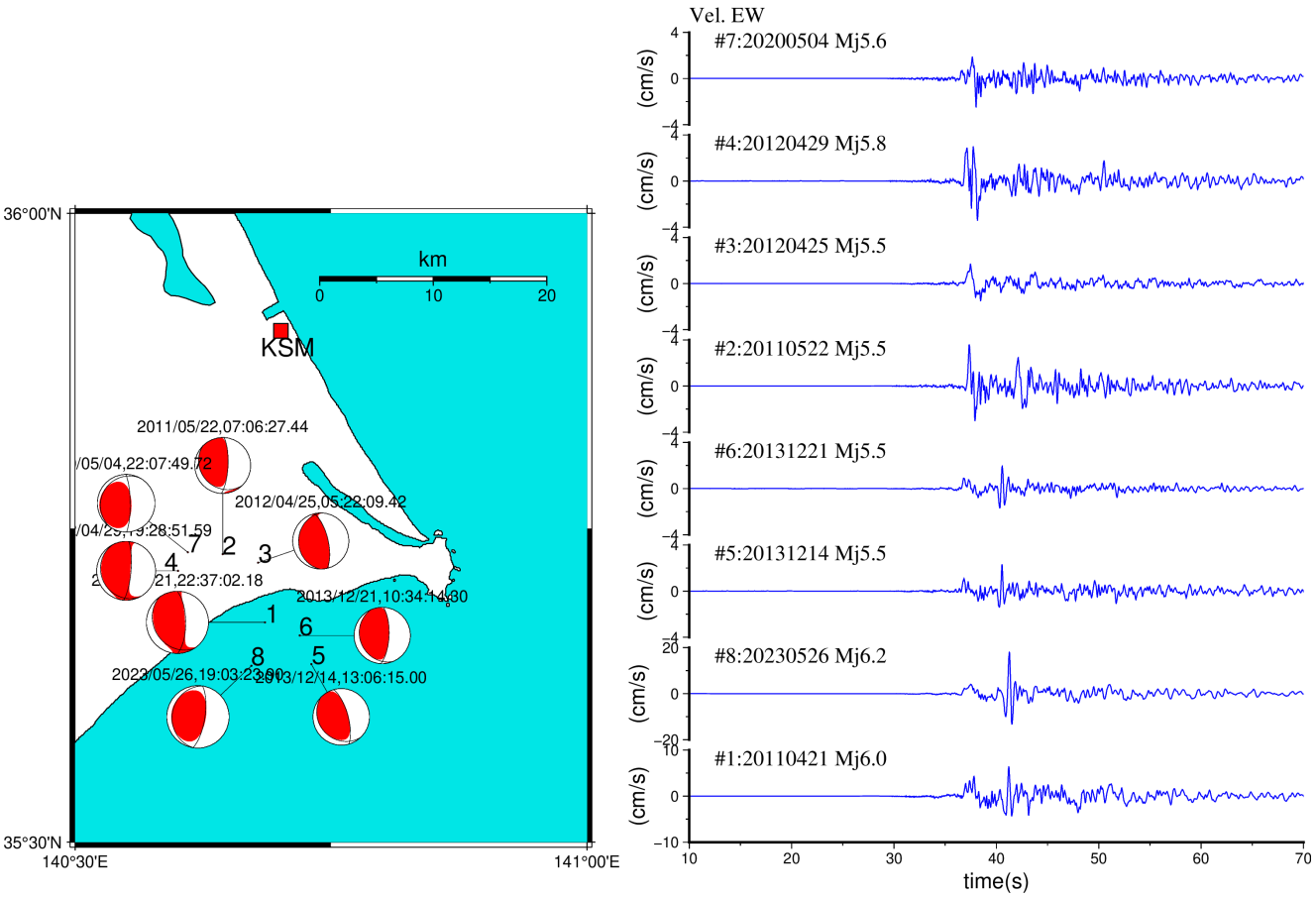
*Tomiichi UETAKE[1], Kazuhito HIKIMA[1]

1. Tokyo Electric Power Company Holdings

1． はじめに
2023年5月26日に千葉県東方沖でMj6.2のプレート境界型の地震が発生した．この地震では震央の北から北東側で震度5弱を観測している．震央の北側，約30kmに位置する鹿島火力発電所で得られた広帯域速度計記録にはS波初動より4秒ほど遅れて震幅の大きなパルス状の波群が確認された．この波群で最大速度（EW成分：17.9 cm/s）・最大加速度（EW成分：218 cm/s^2）を記録していることから，この特異な波群について分析を行うこととした．また，今回の震源周辺では繰り返しMj6クラスの地震が発生していることから，過去に得られた記録との比較も行った．
2．観測波形の特徴
千葉・茨城両県内の強震記録(加速度記録)を収集し，0.1～20 Hzのバンドパスフィルター波形を掛けて積分して速度波形を作成した．その結果，震央の北東側にあたる千葉県銚子市から茨城県鹿島市にかけての地域で速度振幅が大きく，特にEW成分が大きくなっていることが明らかとなった．震央の北東側の波形の特徴として周期の長い片揺れ的なS波初動とパルス状の後続波が認められ，パルス状の後続波で最大速度値を記録している．パルス状の後続波の見かけ速度はS波初動部より若干遅い．なお，震央から西側の観測点では明瞭なパルス波は確認出来なかった．
3． 過去の地震記録との比較
2011年以降，2023年5月26日の震央付近ではMj5.5以上の地震が8地震発生している．海域には今回の地震を含む4地震，陸域に4地震である．8地震の震源深さは43～50kmで，メカニズム解は低角逆断層型で類似している．鹿島火力発電所における8地震のEW成分波形を図に示す．波形は海陸の地震4地震に類似性が見られ，波形途中にS波初動部より短周期のパルス波が顕著である．パルス波とS波初動との時間差もほぼ一定であり，2011年4月21日（Mj6.0）と2023年5月26日（Mj6.2）の波形を重ねると波形の山谷が一致する．周辺のK-NET，KiK-netの波形でも同様な結果である．パルス波は構造的な要因で生成している波と推定される．一方，陸域の4地震では相互の類似性は見られるものの，海域側のような顕著なパルス波は見られない．10km程度の震源位置の違いで地震波の伝播性状が異なり波形の特徴が大きく変化している． この地域は陸のプレート，フィリピン海プレート，太平洋プレートの三層構造となっており，地震波の複雑な挙動が予想される．プレート形状がモデル化されているJISVM［Koketsu et al.(2012)］から，2023年5月26日の震央付近の地下構造を抽出した1次元構造とF-netのメカニズム解を用いて鹿島火力の波形を計算してみた．計算には，Reflectivity法[Kohketsu(1985)]を用いた．計算された波形は，S波初動が大きく陸域側で発生した地震の波形と類似性が見られたが，パルス波の再現は出来なかった．地下構造モデルの高度化と三次元的な波動伝播性状の検討が必要と考えられる．
4．まとめ
2023年5月23日千葉県東方沖の地震（Mj6.2）の際に，鹿島火力の観測波形に認められた顕著な後続パルス波について検討を行った．この後続パルス波は，震央の北東側の限られた地域で観測され強震動特性に影響を与えていた．同じ震源域で発生した規模の異なる地震でも同様なパルス波が観測されており，地下構造によって生成された波群であると推定された．強震動予測の精度向上のためには，プレート構造を含めた同地域の地下構造モデルの高度化を図る必要がある．
謝辞
鹿島火力の速度計記録に加え，気象庁の震度計，防災科研のK-NET，KiK-net，MeSO-netの加速度データを使用いたしました．気象庁による震源データ，防災科研F-netのメカニズム解データを使用しました．作図には

© The Seismological Society of Japan

GMT6［Wessel et al. (2019)］を用いました．記して感謝いたします．



© The Seismological Society of Japan

How to convey and inherit the 1923 Great Kanto Earthquake - Utilization of digital contents

*Satoko MUROTANI[1]

1. National Museum of Nature and Science

1923年9月1日に発生した地震（大正関東地震）によって関東地方に甚大な被害を及ぼした関東大震災から、今年は100年という節目の年となった。国立科学博物館（東京・上野公園、以下科博）では、2023年9月1日から11月26日までの約3か月間、関東大震災100年企画展「震災からのあゆみ　ー未来へつなげる科学技術ー」を開催することとした。本展示では、企画展示室、地球館オープンスペース、日本館中央ホール（※10月11日から）の3か所を会場とし、大正関東地震とその被害、関東大震災からの復興、この100年間の地震防災・減災研究、今私たちが災害に備えること、過去から未来への災害の継承について紹介する。この100年の間に私たちがどう自然を理解して自然災害から生活を守るために科学技術を発展させ、地震学および関連分野や防災・減災の研究の進歩を身近な生活に活かしてきたか、また、関東大震災を始めとする災害を人々の記憶に残るような展示方法を検討し、災害を我が事として考えるきっかけとなるような展示を目指した。

しかしながら、関東大震災に関する資料や調査・研究成果は膨大で、本展示では一部しか紹介できない。本展のテーマは「未来へつなげる科学技術」であり、実際に展示できない部分を、デジタルツインを活用するなどデジタルやオンラインのコンテンツも作成し、展示を充実することとした。科博は、東京帝国大学地震学教室や科博職員が撮影した関東大震災の被害写真を、多く所蔵している。それらの写真を地図上で現在の場所と重ねることで、実際に大災害が関東地方で起きたこと、100年前と現在の違いからこの間にどう街が変わっていったのかを、考えるきっかけになる。しかし当時の写真はモノクロで、震災を知らない私たちから見れば、遠い昔の出来事で他人事に思えてしまう。今回、人工知能（AI）や当時の資料をもとに人の手によって補正をしたカラー写真を展示する。モノクロ写真では、なかなか伝わらない火災の状況や人々の表情などがより鮮明となり、身近な出来事に感じることができる。その他にも最新の科学技術を使って、これまでにない見せ方で歴史資料を紹介する展示もあり（中央ホールにて10月11日より展示）、歴史的資料が長く残って来たからこそ、今実現できる展示となった。
　本発表では、実際の展示の様子や、デジタルコンテンツについて紹介する。

本展示は、360度ＶＲ撮影を行い、企画展終了後も当館ホームページ上でＶＲ展示を見ることができる。VR展示では、実際に展示することができなかった情報を追加していくことを検討している。展示を見に来られない遠方の方だけでなく、一度見た方や、今後の学習活動などに活用してもらえることを期待する。

　最後に、本展示には、多くの皆様のご協力をいただきました。ここに記して、感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session：S04. Tectonics

Tue. Oct 31, 2023 1:30 PM - 2:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 4:30 AM - 5:30 AM UTC | Room B F201

[S04] PM-1

chairperson:Dapeng Zhao(Tohoku University)

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

[S04-01] 2D subduction models in the presence of a high-density rigid continental block: a case study for the slab geometry beneath the Kii Peninsula.

*Erika Moreno[1], Vlad Manea[2], Marina Manea[2], Nobuaki Suenaga[3], Shoichi Yoshioka[1] (1. Kobe University, 2. CGEO, Universidad Nacional Autónoma de México, 3. Kyoto University)

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

[S04-02] Seismological evidence of a shear zone inside the Philippine Sea plate slab in Suruga Bay.

*Yannis PANAYOTOPOULOS[1], Hisatoshi Baba[2], Takahito Nishimiya[3] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai Univershity , 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

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

[S04-03] P and S wave tomography beneath Japan from joint inversion of local and teleseismic data recorded by S-net and Hi-net

*Motoya Suzuki[1], Dapeng Zhao[1], Genti Toyokuni[1] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S04-04] Subduction hydrothermal regime and seismotectonic variation along Kermadec-Tonga megathrusts

*Ye Zhu[1], Yingfeng Ji[1] (1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences)

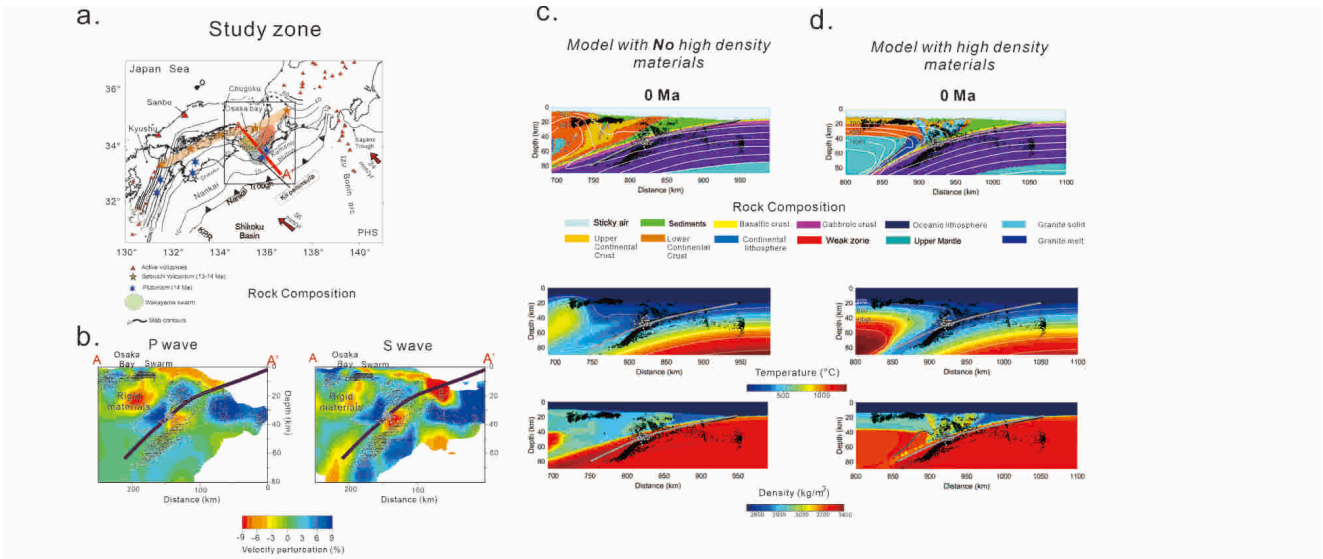
2D subduction models in the presence of a high-density rigid continental block: a case study for the slab geometry beneath the Kii Peninsula.

*Erika Moreno[1], Vlad Manea[2], Marina Manea[2], Nobuaki Suenaga[3], Shoichi Yoshioka[1]

1. Kobe University, 2. CGEO, Universidad Nacional Autónoma de México, 3. Kyoto University

Subduction along the Nankai Trough is characterized by great diversity in terms of slab geometry. For example, the Philippine Sea (PHS) plate exhibits shallow subduction beneath Shikoku and Chugoku regions, meanwhile the subduction beneath the Kii Peninsula occurs with a higher dip angle. However, considering a continuous and relatively uniform subduction process along the Nankai Trough since 15 Ma, the expected PHS slab between Shikoku and the Kii Peninsula would show little variation. However, seismic tomography and seismicity studies reveal two styles of subduction between both regions. The Kii Peninsula is characterized by the presence of the Kumano Pluton near the Nankai Trough. Seismic tomography studies reveal high seismic velocity zones adjacent to the slab beneath the Kii Peninsula, and a low seismic velocity zone beneath seismic swarm area in Wakayama. These high-velocity zones near the slab are currently associated with acidic rocks that consists of the Kumano Pluton. It is proposed that these blocks are characterized by rigid, impermeable, high-density materials that act as a barrier to rising the PHS slab fluids. Several hypotheses suggest that these rigid blocks induce a high dip angle subduction beneath the Kii Peninsula. In this study we employ 2D high-resolution visco-elasto-plastic numerical models of spontaneous subduction in order to better understand how the presence of a rigid and high-density tectonic block influences on the subduction dynamics of the PHS plate. We focus on a 2D profile passing through the Kii Peninsula. Our numerical models evolve over a period of 15 Myr, and the PHS plate initiates subduction beneath the Kii Peninsula at a high convergence rate of 7.69 cm/yr. In the vicinity of the Nankai Trough and between the upper and lower continental crust, high-density (HD) (rock density of r = 3200 kg/m^3) rigid materials (rocks cohesion of c = 1x10 ^{6} MPa) are imposed. Results of our numerical models are evaluated in terms of the current PHS slab geometry beneath the Kii Peninsula and the location of the rigid materials which were estimated using seismic tomography studies. Our numerical modelling found that the presence of the HD rigid block plays a fundamental role in the evolution of subduction dip angle. Without the presence of the HD rigid block, the subduction is characterized by shallow dip angle as observed beneath Shikoku and Chugoku regions. On the other hand, including the HD block adjacent to the Nankai Trough, the final result became slab geometry with a higher dip angle as observed beneath the Kii Peninsula.

© The Seismological Society of Japan



a) Tectonic map of the study area with iso-depths at 10, 20, 30, 40, 60, 80, and, 120 km respectively of the upper surface of the PHS slab in SW Japan (Baba et al., 2002; Nakajima and Hasegawa, 2007; Hirose et al., 2008). Red thick line represents the profile A-A' across the Kii Peninsula and to the right horizontal sections of seismic tomography of the study area at 10, 20, 30 and 60 km (Matsubara et al., 2022). b) P-wave velocity perturbation, and S-wave velocity perturbation a with the study profile A-A' taken from https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/sokudo_kozo/alljpn_download.php. The regions with dash line represent zones with high velocity perturbation and low velocities perturbations. Black dots in b. represent the hypocenters taken from the JMA unified hypocenter catalogue (https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html). The data obtained between 2003-2020. Oranges stars represent the Setouchi volcanic arc with ages between 13-14 Ma (Tatsumi et al., 2020). Blue stars represent plutonism with age 14 Ma (Tatsumi et al., 2020). White circles represent low-frequency earthquakes (LFEs) obtained from the database of JMA between 2003-2020 . The yellow circle represents the position of the Wakayama Swarm (Uehara et al., 2005; Maeda et al., 2018 Nakajima, 2023). The brown region represents the position of the Kumano Pluton (Takusa et al., 1994, Umeda et al., 2007; Yamamoto et al., 2017; Adrien et al., 2022). The Median Tectonic Line (MTL) is represented by the dashed line. Our study region is represented by the square area of 280km in Latitude x 350km in Longitude. Red triangles represent active volcanoes. Red arrows mark the present-day PHS convergence rates. Other notations: KPR – Kyushu Palau Ridge, PHS – Philippine Sea plate. C) Numerical results after 15 Myr of evolution. The black dots represent the hypocenters and the gray curve represents the plate geometry taken from Hirose et al. (2008). d) Numerical results after 15 Myr of evolution with high density materials. The black dots represent the hypocenters and the gray curve represents the plate geometry taken from Hirose et al. (2008). Model c generates low-angle subduction, while model d generates steep subduction with high-density materials in the vicinity of the slab.

© The Seismological Society of Japan

Seismological evidence of a shear zone inside the Philippine Sea plate slab in Suruga Bay.

*Yannis PANAYOTOPOULOS[1], Hisatoshi Baba[2], Takahito Nishimiya[3]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai University , 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Suruga Bay lies along the Tokai segment of the Nankai-trough, which last ruptured in the 1854 M8.4 Ansei-Tokai Earthquake, making it a potential locus for the next major earthquake on the Nankai-trough. Moderate size earthquakes have occurred in the Suruga Trough axial region (M6.5 in 2009 and M6.2 in 2011) that resulted in a prominent excitation of seismicity. Unfortunately, our ability to accurately locate these events is hampered by a sparse routine seismic observation network around the bay. In order to improve location accuracy, a total of 2 sets of 7 OBSs were deployed inside Suruga Bay, 6 from the spring of 2017, and an additional OBS from spring 2019. By combining the data from our OBS stations with that of existing land-based stations surrounding Suruga Bay, we were able to accurately relocate the observed seismic activity inside the Philippine Sea plate (PHS). We observed and analyzed a total of 755 events reported in the JMA unified catalogue that occurred within a 25 km radius of the OBS stations. We combined our data with that of routine network stations in a 50 km radius around the Bay and manually picked the P- and S- wave arrivals. We improved the location accuracy of hypocenter determinations by using a pseudo-3D location scheme that assigned a different 1D velocity structure to each station depending on the geological characteristics of the area upon which it sits, and additionally by solving iteratively to estimate station corrections from the calculated average RMS station delays. The relocated hypocenters appear to occur inside a narrow 2-5 km continuous zone that starts on the east side of the bay at approximately 10 km depth and deepens towards the west at an angle of 20˚~25˚. Analysis of the focal mechanisms of the observed events shows that the P-axis inside Suruga Bay is almost exclusively oriented in a northerly direction, in contrast to the northwest subduction direction of the PHS, which suggests that that the stress field in the area is not favorably oriented for thrust faulting on the Tokai segment. We propose the existence a shear zone subparallel to the subduction direction of the PHS with a trend approximately 35˚ counterclockwise from north. The net movement of Izu peninsula observed in the GNSS data (e.g., Sagiya, 1999; Nishimura et al., 2007) can be explained by the presence of a zone on which strain partitioning occurs between its northern and southern parts. This shear deformation zone acts as a region of strain release and explains the apparent difference in the angle of movement of the Izu peninsula and the angle of convergence of the PHS (Panayotopoulos et al., 2023). This zone could have important implications in the case of a future Tokai earthquake because it could function as a buffer that would impede the fault rupture process.

・ Nishimura, T., Sagiya, T., and Stein, R.S., 2007. Crustal block kinematics and seismic potential of the northernmost Philippine Sea plate and Izu microplate, central Japan, inferred from GPS and leveling data: Journal of Geophysical Research-Solid Earth, v. 112, no. B5. doi:10 .1029 /2005JB004102
・Panayotopoulos, Y., Baba, H., Nishimiya, T., 2023. Ocean Bottom Seismometers in Suruga Bay reveal a shear zone inside the Philippine Sea plate slab: Tectonophysics, v. 861, 229902, doi:10.1016/j.tecto.2023.229902
・Sagiya, T., 1999. Interplate coupling in the Tokai district, central Japan, deduced from continuous GPS data: Geophysical Research Letters, v. 26, p. 2315–2318. doi:10 .1029/1999GL900511

© The Seismological Society of Japan

P and S wave tomography beneath Japan from joint inversion of local and teleseismic data recorded by S-net and Hi-net

*Motoya Suzuki[1], Dapeng Zhao[1], Genti Toyokuni[1]

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

沈み込み帯におけるプレート境界型地震の発生は、プレート境界面の構造不均質にコントロールされると考えられている。しかし、海域の地震観測網の不足からスラブ下の構造不均質の影響について議論した研究例は少ない。近年、Subslab hot mantle upwelling (SHMU) がプレートの形状やプレート境界型地震の発生に影響を及ぼす可能性が指摘されており (例えば、Fan & Zhao, 2021; Zhao & Hua, 2021; Toyokuni et al., 2022) 、海域下の深部構造の更なる制約が重要視されている。日本では、2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）を契機として、防災科学技術研究所により海底地震観測網S-net（Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along Japan Trench）が太平洋沖に設置されており、前弧域の浅部・深部構造モデルの改善が見込める。既に、S-netにおける近地地震の到着時刻データを用いた走時トモグラフィーが行われつつある (例えば、Hua et al., 2020; Yu & Zhao, 2020; Zhao et al., 2022)。一方、S-netにおける大量の遠地地震データを用いた地震波トモグラフィーはまだ行われていない。
本研究では、2017年1月-2022年10月に発生した遠地地震 (M > 6.5)のうち48個について、Hi-net (High sensitivity seismograph network Japan) 及び S-netの記録を同時解析することで、P波で38,800個、S波で30,561個の相対走時残差を新たに得た。さらに、近地・遠地地震データを併せて用いる同時インバージョンを行い、日本列島下の深さ700 kmまでの３次元P波・S波速度構造モデルを得た。その結果、沈み込む太平洋プレートを反映する厚さ約90 kmの高速度異常や、マントルウェッジ中の上昇流を反映し、背弧域の深さ約200 kmから活火山直下へ続く低速度異常が明瞭にイメージングされた。こうした特徴的な構造は、従来の陸域地震観測網のみを用いた地震波トモグラフィー (例えば、Zhao et al., 2012; Liu & Zhao, 2016) の結果と共通している。また、東北地方北部や関東地方の地下には、太平洋プレート下に深さ約100 kmから700kmまで連続した低速度異常が存在し、東北地方北部ではM8クラスの大地震の分布と対応している。スラブ下の低速度異常はSHMUを反映し、その浮力がプレート境界型地震の発生に影響を及ぼした可能性がある。

参考文献

- Fan, J., Zhao, D., 2021. Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes. Nat. Geosci. 14, 349–353.
- Hua, Y., Zhao, D., Toyokuni, G., Xu, Y., 2020. Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake. Nat Commun 11:1163.
- Liu, X., Zhao, D., 2016. P and S wave tomography of Japan subduction zone from joint inversions of local and teleseismic travel times and surface-wave data. Phys. Earth Planet. Inter. 252, 1–22.
- Toyokuni, G., Zhao, D., Kurata, K., 2022. Whole-mantle tomography of Southeast Asia: New insight into plumes and slabs. J. Geophys. Res. Solid Earth 127 e2022JB024298.
- Yu, Z., Zhao, D., 2020. Seismic evidence for water transportation in the forearc off Northern Japan. J. Geophys. Res.: Solid Earth 125 e2019JB018600.
- Zhao, D., Yanada, T., Hasegawa, A., Umino, N., Wei, W., 2012. Imaging the subducting slabs and mantle upwelling under the Japan Islands. Geophys. J. Int. 190, 816–828.
- Zhao, D., Hua, Y., 2021. Anisotropic tomography of the Cascadia subduction zone. Phys. Earth Planet. Inter. 318, 106767.
- Zhao, D., Katayama, Y., Toyokuni, G., 2022. The Moho, slab and tomography of the East Japan forearc derived from seafloor S-net data. Tectonophysics 837, 229452.

© The Seismological Society of Japan

Subduction hydrothermal regime and seismotectonic variation along Kermadec-Tonga megathrusts

*Ye Zhu[1], Yingfeng Ji[1]

1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences

1. Introduction

The calamitous phreatomagmatic eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai (HTHH) volcano in January 2022 has been reported to have had a volcanic explosivity index (VEI) of 5-6 and a column height of 20 km and to have caused powerful tsunamis across the Pacific Ocean, suggesting that destructive arc magmatism evolved from an active and large subduction complex below Kermadec-Tonga. Along the heterogeneous and tightly coupled subvolcanic megathrusts, the hydrothermal structure and slab petrological metamorphism are considered essential to the deep arc volcanism and catalysis of focused interplate earthquakes. The mechanism of fast-slow earthquakes is still uncertain due to the heterogeneity of megathrusts, evidenced by the transition between the depleted arc lavas in northern Kermadec (and Tonga) and the mildly depleted southern Kermadec arc lavas and the slab geometries.

2. Model and method

With the focus on the Kermadec–Tonga megathrust and its changes in hydrothermal state along the strike and with subduction, we constructed a 3D thermomechanical kinematic model on the basis of the finite difference method (FDM) and the code Stag 3D. The dimensions of our model were 800 ×1800 × 400 km (length ×width ×depth, Fig. 1), which was designed to simulate subduction of the Pacific Plate northwestward over 20 Myr. We applied an anelastic approximation and the equations of conservation of mass, momentum, and energy. The plate geometry adopted Slab 2 within the modeled domain to ensure full subduction and steady thermal conditions. Observations of surface heat flow and Curie depth estimation were utilized to constrain the model thermal results along eight trench-perpendicular profiles.

3. Results and Discussion

Through modeling, we obtained the evolution of the subduction thermal regime at each time step and the final steady thermal state as well as the induced mantle viscous flow field. We predominantly focused on the steady thermal state of the subducted plate, which is largely influenced by the slab geometry and heterogenic intraslab structure. The results suggest that the subduction of the Pacific Plate beneath the Kermadec–Tonga microplate results in a cold thermal transition from 300 ˚C to > 900 ˚C between the mantle edge and subvolcanic interface, which changes greatly from Tonga to Kermadec along strike due to slab geometry heterogeneity. The distribution of seismicity is associated with the dehydration of subducted water-bearing minerals, which promotes the occurrence of both fast and slow subduction earthquakes. In addition, the ultramafic layer is much thicker than the MORB layer, suggesting that intraslab harzburgitization could be the dominant dehydration-derived fluid source for mantle melting. Therefore, slab metamorphism released large amounts of fluids, especially those from intraslab harzburgitization, which are key to influencing mantle melting and arc volcanism in Kermadec-Tonga.

© The Seismological Society of Japan

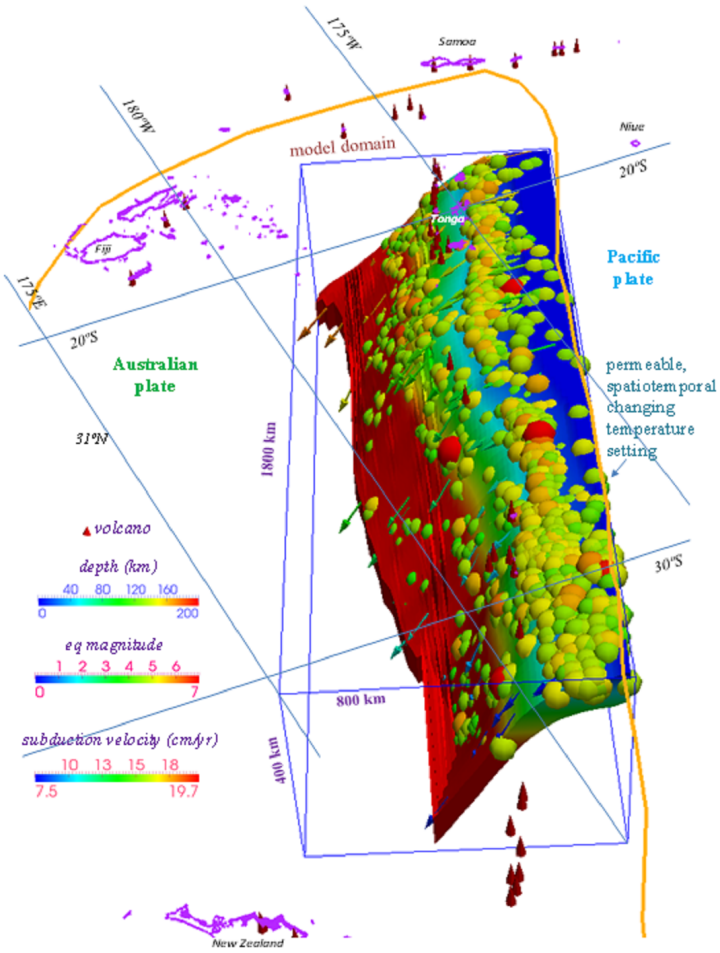


Fig. 1 Model setting and boundary conditions. Arrows indicate the subduction velocity. The intraslab seismic events from 2000 through 2010 are plotted by spheres, with the color indicating magnitude. Red cones indicate volcanoes.

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S13. Crustal fluids and earthquake

Tue. Oct 31, 2023 9:30 AM - 10:00 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 12:30 AM - 1:00 AM UTC | Room C F202

[S13] AM-1

chairperson:Daisuke INAZU

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

[S13-01] Abrupt water temperature increases near seafloor after the 2011 Tohoku earthquake

*Daisuke INAZU[1], Yoshihiro ITO[2], Ryota HINO[3], Wataru TANIKAWA[4] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Kyoto University, 3. Tohoku University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S13-02] The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Near-Trench Structural Evolution by Time-lapse Seismic Depth Imaging

*Ehsan Jamali Hondori[1], Jin-Oh Park[2] (1. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

Abrupt water temperature increases near seafloor after the 2011 Tohoku earthquake

*Daisuke INAZU[1], Yoshihiro ITO[2], Ryota HINO[3], Wataru TANIKAWA[4]

1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Kyoto University, 3. Tohoku University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2011年東北地震の震源直上海底における圧力観測の圧力データは、その地震で発生した地殻変動や津波の評価に多く用いられてきた。その際、圧力値の算出のために、海底圧力計内部の温度データも取得されているが、こうした（温度）補償のための補足的なデータはほとんど利用されてこなかった。

Inazu et al. 2023 PEPSでは、まず、これらの温度データが機器周辺の水温のプロキシーとして利用できることを確認し、次いで、2011年東北地震を経験した宮城県沖合の８点の海底圧力観測（水深1-6 km）の温度データを精査した。水深約3 km（GJT3）と6 km（TJT1）の２点（Hino et al. 2014 MGR参照）では、地震（本震）発生から数時間後に約0.1℃の温度上昇が見られ、その異常は2週間以上継続していた。考察の結果、その異常は本震時の大すべり域の深海（水深3-6 km）の海底下から温かな流体が湧出し、それが海底近傍の海水中で拡散したことよると述べた。

この温湧水が海水に与えた熱量を概算したところ、４×10^16 Jであった。観測された水温上昇の時間スケールも考慮しその起源を考察した結果、大すべり域の上盤内のいくつかの主要な断層（分岐正断層、および、より海溝軸近傍の逆断層群）の、海底下数kmに及ぶ破砕帯に閉じ込められていた流体が、本震発生から数時間の時間内で、ほぼ全て放出されたと推察される。このときの海底下から海底までの流体の移流速度は、数十cm/sに達していたと見積もられる。

GJT3とTJT1で見られた水温異常の約2週間の推移（上昇から減衰）は大局的には似ていたが、GJT3での異常がなだらかな減衰を見せた一方、TJT1での異常は、何回かの間欠的な上昇と下降を見せながら減衰していた。TJT1での間欠的な温度上昇は、周辺海域の海洋潮汐荷重の低下と同期していたため、本震発生後の数時間で海底近傍まで上昇してきたより深部の流体の一部が、潮汐荷重の低下に伴い間欠的に湧出したことが示唆される。

講演では、本震時からその後にかけての、海底下の流体・熱の移流・拡散の過程について、詳しく紹介する。

引用文献

Inazu, Ito, Hino, Tanikawa (2023) Abrupt water temperature increases near seafloor during the 2011 Tohoku earthquake. Prog Earth Planet Sci, 10, 24. https://doi.org/10.1186/s40645-023-00556-0
Hino, Inazu, Ohta, Ito, Suzuki, Iinuma, Osada, Kido, Fujimoto, Kaneda (2014) Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter. Mar Geophys Res, 35, 181–190. https://doi.org/10.1007/s11001-013-9208-2

© The Seismological Society of Japan

The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Near-Trench Structural Evolution by Time-lapse Seismic Depth Imaging

*Ehsan Jamali Hondori[1], Jin-Oh Park[2]

1. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), 2. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Previous comparative seafloor observations by the manned submersible Shinkai 6500 within the coseismic slip area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (M 9.0) showed several seafloor deformations, open fissures, and collapsed biological colonies associated with the earthquake. Differential bathymetry studies also showed that seafloor experienced a horizontal displacement of around 69 m near the Japan Trench, where the Pacific plate subducts beneath the Okhotsk plate. Despite these clear observations of the seafloor deformations, and many other researches using various types of geoscientific data, there are yet no detailed structural comparisons on sub-seafloor depth domain images of seismic reflection data before and after the earthquake. In this research, we did a time-lapse analysis between two seismic survey lines acquired on the same trajectory, but before and after the Tohoku-Oki earthquake, by applying Reverse Time Migration (RTM) on the multichannel seismic reflection data. For the baseline dataset we used 2D seismic line MY101, which had been acquired in 1999 using a streamer cable of 132 live channels at 25 m intervals with a maximum offset of 3400 m and shot intervals of 50 m. The monitor dataset is the 2D seismic line D13, which has been acquired in May 2011, just two months after the earthquake, using a similar shot spacing but a more advanced seismic acquisition system including a streamer cable of 444 channels at 12.5 m intervals with a maximum offset of 5700 m. Both surveys have been conducted by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC).

In order to maintain consistent survey geometry for both lines, we selected a subset of the monitor dataset which covers the same offset range as the baseline survey and skipped every other channel to have the same CMP (Common Mid-Point) fold coverage. Consequently, we used a similar pre-processing flow for both surveys to enhance the signal to noise ratio before imaging. For building a reliable RTM velocity model, we applied a layer-stripping migration velocity analysis approach followed by a reflection travel-time tomography using the full-offset monitor dataset, which provided us with a reasonable accuracy for constraining the velocity of the deeper reflections. We then used the velocity model and applied RTM with a maximum frequency of 20 Hz for both baseline and (offset-limited) monitor datasets.

The resulting seismic depth images show several distinct differences, which could be summarized as follows. (1) The plate boundary fault (i.e., decollement) reflection near the trench is continuously visible in the baseline but seems to be weak and partially broken in the monitor survey. Especially, the decollement reflectivity above a graben near the trench seems to be dimmed out in the monitor dataset, which implies that the seismic impedance contrast at this boundary has dramatically changed after the earthquake. (2) A number of thrust faults with strong reflectivity appear in the monitor line, which are not clearly visible in the baseline survey. Previously we have calculated pore-fluid pressures along the decollement and backstop interface, and observed that the backstop interface and several thrust faults in the accretionary wedge contribute to the fluid drainage from the underthrust sediments to the seafloor. The sharp reflections from the thrust faults observed in the monitor data may be caused by the impedance contrast of the fluid drainage paths along those faults. (3) The sedimentary units in the forearc of monitor line are partially deformed with different dips compared to the baseline survey. These structural deformations have not been reported before and we believe the complex rupture propagation pattern and coseismic slip of the Tohoku-Oki earthquake caused those unique features.

© The Seismological Society of Japan

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

Tue. Oct 31, 2023 10:00 AM - 10:45 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 1:00 AM - 1:45 AM UTC | Room C F202

[S03] AM-1

chairperson:Tomokazu Kobayashi

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

[S03-01] Detailed fault ruptures for the 2023 Turkey-Syria earthquake revealed by SAR-based crustal deformation analysis

*Tomokazu KOBAYASHI[1], Hiroshi Munekane[1], Masaki Kuwahara[1], Haruna Furui[1] (1. Geospatial Information Authority of Japan)

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

[S03-02] Numerical simulation of marine terrace at Kikai-jima: clarifying uplift history based on the interaction of EQ timing and geomorphic change

*Takeru Kamiya[1], Takeo Ito[2] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S03-03] Interseismic deformation analysis due to megathrust locking using GNSS Data: A case study of southwestern Pakistan

*Shaukat Parvaiz[1,2,3], Yo Fukushima[1] (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University Japan, 2. Department of Earth Sciences, Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan., 3. Department of Geological Engineering, Balochistan University of I.T, Engineering and Management Sciences (BUITEMS), Quetta, Pakistan.)

Detailed fault ruptures for the 2023 Turkey-Syria earthquake revealed by SAR-based crustal deformation analysis

*Tomokazu KOBAYASHI[1], Hiroshi Munekane[1], Masaki Kuwahara[1], Haruna Furui[1]

1. Geospatial Information Authority of Japan

１．はじめに

2023年2月6日01時17分（UTC），トルコでMw7.7の地震が発生した．その約9時間後には，本震の北で，Mw7.6の地震が発生した．本発表では，ALOS-2衛星の緊急観測データによるSAR干渉解析で得られた両地震の地殻変動の詳細とそれらから推定した断層モデルについて報告する．また，得られた断層モデルを基に，今回の地震で放出されたエネルギーと前回の大地震以降蓄積されたエネルギーの収支を比較し、各断層セグメントの地震発生サイクルに関する議論を試みる．

２．データと解析

本研究では，Lバンド合成開口レーダー衛星であるALOS-2のデータを用いた．本解析では，軌道番号path77（南行軌道・右観測）及びpath184（北向軌道・右観測）のScanSARモード観測によるデータの干渉処理により，東西約350㎞にわたる広域の地殻変動を調べた．地殻変動の計測には，標準的なSAR干渉処理に加えて，南北方向の変動を検出するために，MAI法も適用した．最終的には，これら解析により得られた変動を用いて，3方向成分（東西，南北，上下） の変動を算出した． さらに，得られた変動データを用いて，断層面上の滑り分布も推定した．後述するように，得られた変動場からは，断層破壊に相当するとみられる変位の不連続や急変帯が検出された．これらの情報を基にして，走向方向に4km，深さ方向に2kmのサイズの小断層で構成される断層面を設定し，最小二乗法により滑り方向及び滑り量を推定した．各断層の滑りは空間上で滑らかに分布すると仮定して，Laplacian Operatorによるスムージング処理の拘束をかけた．滑らかさを制御する超パラメータはABICにより決定した．

３．結果

東アナトリア断層の西部は，南側及び北側に断層帯が分岐している．解析の結果，Mw7.7及びMw7.6の地震に伴う地殻変動はそれぞれ，南側及び北側の分岐断層帯に沿って分布していることが分かった．南側の分岐断層沿いには，断層運動に相当するとみられる変位の不連続が約350kmの長さにわたり確認できる．不連続は，震源付近から東では走向約N60°Eの方向に伸びる一方，西側ではTürkolu付近でその走向を南東方向に変えてAntakya付近で終了している．この分岐断層帯は幾つかの断層セグメントで構成されていることが知られているが，変位不連続の位置から，Erkenek，Pazarck，Amanosセグメントが破壊されたと推察される．これらセグメントの全てで水平変位が卓越しており，左横ずれ運動と整合的である．一方，Mw7.6の地震を引き起こしたと推定される北側の分岐断層帯では東西約150kmにわたり変位の不連続が確認でき，それらも水平成分が卓越し，左横ずれ運動と整合的である．この変位不連続は，主にÇardakセグメントに沿ってほぼ一直線上に見られるが，東端及び西端でその走向を変えている．Çardakセグメントの東延長部にはSürgüセグメントがErkenekセグメントまで伸びているが，変位不連続はSürgüセグメント上には進まず北東方向に向きを変えほぼ一直線に伸びる．今回の地震でSürgüセグメント上での破壊の進展を示唆する地殻変動は特段認められない．西端では，走向が南東に変わるがその延長上にあるSavrunセグメントにまでは明瞭な不連続は認められない． 滑り分布の結果では，全ての断層面上でほぼ純粋な左横ずれの断層運動が推定された．断層面上の滑りは，両地震の断層とも概ね10km以浅に集中している．東アナトリア断層本体では10m前後の滑り量が推定されている一方，Çardak断層では10mを超える滑りが推定されている． 得られた断層モデルを基に，今回の地震で放出されたエネルギーと前回の大地震以降蓄積されたエネルギーの収支を比較したところ，PazarckとErkenekセグメントでは、解放されたエネルギーと蓄積されたエネルギーの収支が一致せず，2023年の地震に相当するすべり量を蓄積するためには、前回の地震と今回の地震の期間より長い年数が必要であることが分かった．このことは2023年の地震が古典的な固有地震モデルを支持しないことを示唆している．過去の地震

© The Seismological Society of Japan

におけるすべり残りが断層上のカップリングとして歴史的に蓄積され，より長い間隔をかけて巨大地震として放出されるとするスーパーサイクルモデルの考えが本内陸地震に適用できるのかもしれない．

謝辞： これらのデータは，地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ（地震WG）を通じて，（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けました．ここで使用しただいち2号の原初データの所有権は，JAXAにあります．本研究はJSPS科研費22K21372の助成を一部受けたものです．

© The Seismological Society of Japan

Numerical simulation of marine terrace at Kikai-jima: clarifying uplift history based on the interaction of EQ timing and geomorphic change

*Takeru Kamiya[1], Takeo Ito[2]

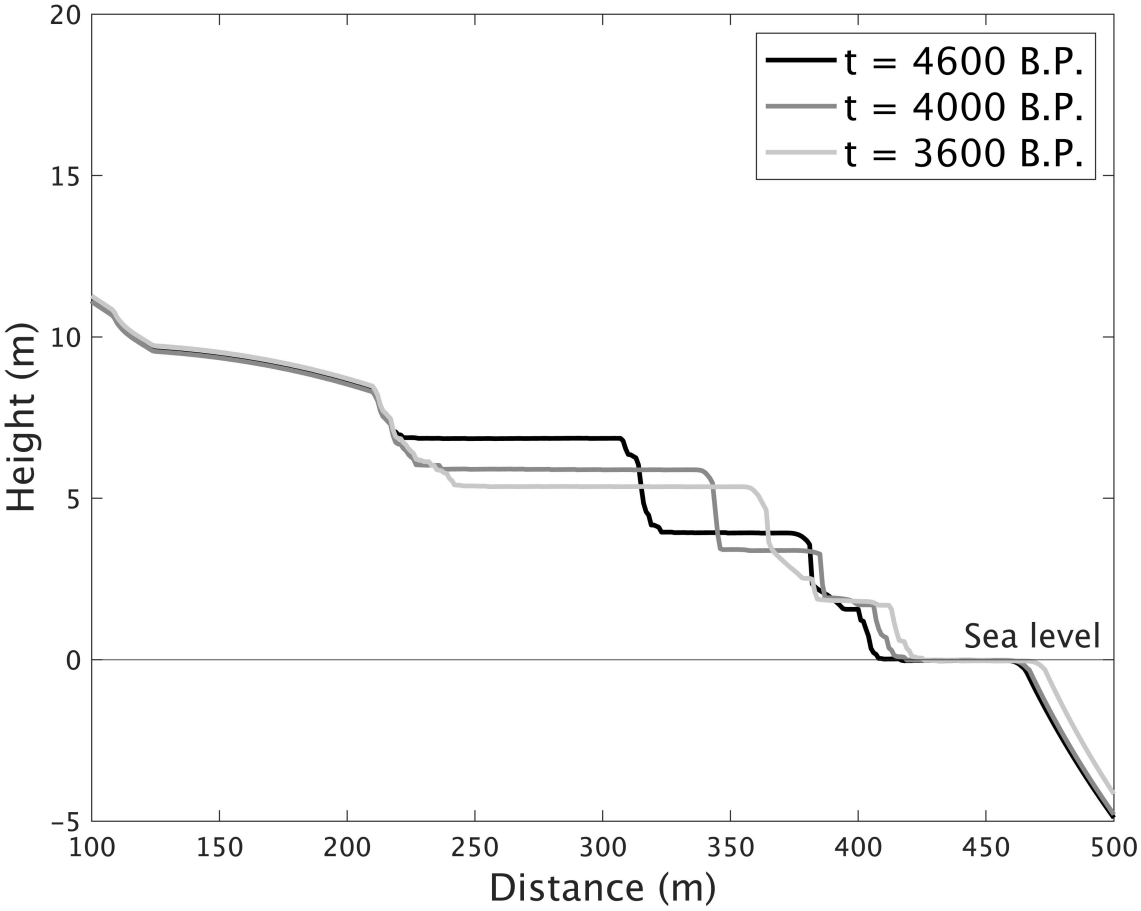
1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

南西諸島地域では、東側から沈み込んでいるフィリピン海プレートの影響により巨大地震の発生が危惧されているが、明瞭な地震の痕跡が少ないために地震の発生ポテンシャルの評価は困難とされている。その中でも喜界島の完新世海岸段丘は地震の痕跡として指摘され、この段丘上のサンゴ化石の放射年代を用いて海水準変動や各段丘面の形成期間について現在に至るまで議論が行われている。喜界島は海溝の近くに位置することや奄美海台が沈み込んでいる影響で、鉛直方向の変動の時間変化は複雑であり、さらに海岸付近の地形の侵食や堆積、サンゴの生育といった海岸段丘の形成プロセスとが共に密に関係しているため、未だに喜界島の地殻変動史は明らかになっていない。本研究では地震学・地質学を踏まえ、喜界島の4段の海岸段丘を数値シミュレーションによって再現することを目的とし、その結果から喜界島の地殻変動史を明らかにすることで、南西諸島における地震活動の推定やそれを元にした防災計画の策定に寄与すると考えられる。

本研究では、喜界島の海岸段丘が奄美海台による沈み込みと海溝型地震から構成される隆起モデルと沿岸付近の侵食等の相互作用であるとして地形の時間発展をモデル化した。シミュレーションには、地形の侵食速度・堆積速度・サンゴの成長速度をそれぞれStorms et al. (2002)、Noda et al. (2018)、Shikakura (2014)、地殻の隆起速度については伊藤・他 (2015)の手法を採用した。海水準変動速度は6〜8 kaの間に11 m上昇して現水準に達し、それ以降は変動がないものと仮定した。初期地形として、Webster et al. (1998)のボーリング結果と、8000年以前は海水準がかなり低い位置にあり、波や生物等の影響を受けないと仮定し、一様に3°傾いた地形を採用した。各時間ステップでの各変動速度を場所ごとに計算して積算することで地形の時空間発展を計算し、8000年間の地形変化量と現在の地形とを比較することでモデルの検証を実施した。

本研究では、多くの先行研究で推定された地震発生時期データに基づき、4回の地震発生時期を可能な範囲において変更し、有限要素法を用いて得られた粘弾性応答を考慮した隆起モデルを採用し、それに基づき評価した。沿岸プロセスモデルにおいても、最大侵食速度、波浪の陸側到達限界、サンゴの最大成長速度の3つのパラメータを変更し、算出した隆起モデルと組み合わせてグリッドサーチ的な数値解析法により最適な3つのパラメータの推定を実施した。 2023年日本地球惑星科学連合大会での発表時点では、4段の海岸段丘の再現には至らなかったが、形成されない原因を地震発生時期にあるとし、2回目の地震の発生年を、1回目と3回目の地震の発生時期の間、つまり3600〜5300年前で変更することによって4段の海岸段丘の再現が可能になった（図）。また、1回目の地震の発生時期によってはⅠ面が残存しない事象が生じたが、同様に6050〜6250年前の間で数値シミュレーションを行うことによってⅠ面が残存する閾値についても特定することができた。これらの結果から、喜界島における海岸段丘面の形成に必要な地震のマグニチュードや地震発生時期の推定が可能であることが示された。さらに、マントルの粘性率を1.0×10^{20}〜2.0×10^{19} Pa・sの間で変更させつつ、沿岸プロセスの3パラメータを変更して網羅的に解析を行った。この解析により、より現実的なパラメータの推定が可能となる見通しが得られた。今後の研究では、これらの考察を基に粘性率や侵食速度の推定などを行い、関連する条件について詳細な考察を進める予定である。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Interseismic deformation analysis due to megathrust locking using GNSS Data: A case study of southwestern Pakistan

*Shaukat Parvaiz[1,2,3], Yo Fukushima[1]

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University Japan, 2. Department of Earth Sciences, Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan., 3. Department of Geological Engineering, Balochistan University of I.T, Engineering and Management Sciences (BUITEMS), Quetta, Pakistan.

Pakistan lies on the region where three plates collide with each other along with a triple junction near Karachi city. In south, the Arabian plate subducts beneath the Eurasian plate off the southern coast of Iran and Pakistan. At the western end of the subduction megathrust, it is connected to the Zagros thrust system of Iran through Minab fault, whereas it is connected to the southern Chaman fault system along with Murray Ridge transtensional zone at its eastern end. The Makran Subduction Zone (MSZ) has produced the world's largest arc-trench gap (500-600 km) and wedge system with splay faults (both on and offshore), having ~7 km thick sedimentary strata. Convergence across the MSZ is complex and poorly understood, yet potentially the largest source of earthquakes and tsunami hazards in the region. The increasing convergence rates between Arabia and Eurasia from west to east across the subduction zone divides the MSZ into eastern and western parts with high and low seismicity, respectively. Historical seismicity shows that the eastern part of MSZ has experienced at least six large earthquakes (M>7) rupturing the plate boundary in the last 500 years, including the tsunamigenic 1945 M8.1 event (the second worst tsunami in the Indian Ocean after 2004 Sumatra tsunami). Following the 1945 earthquake, tsunami runups of up to 15 m were reported at Pasni, 1.4 m at Karachi, and 2 m at Mumbai (Byrne et al., 1992; Heidarzadeh et al., 2008). This zone has the potential to generate 8.7–9.2 (Mw) earthquakes (Smith et al., 2013; Frohling and Szeliga, 2016). We use Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements of crustal motion across the Makran megathrust to investigate the fault coupling distribution and fault geometry. Specifically, we estimate the slip deficit rates and width (locking depths) for three sections along the megathrust. Compared with previous studies, we attempt to test a new plate boundary geometry and a different modeling strategy. We use published GNSS data from more than 19 stations in Iran, Pakistan, and Oman, as well as hypocentral positions and seismic data, to build the geometry of the megathrust and a preliminary fault-coupling model for the MSZ. The precise GNSS velocity data show that the entire MSZ is broadly coupled from near the trench to a downdip depth range of 25-35km, although with small information in strike parallel and strike normal directions due to the sparse GNSS network. By modeling the GNSS data, we confirmed the intersesimic deformation due to megathrust coupling in the forearc region and its seismogenic potential. We are also working on high resolution Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) data sets (SAR sensors of Envisat (2003-2010) and Sentinel-1 (2015-2023) satellites) to update results, which is expected to complement the sparse GNSS stations and produce more detailed locking distribution.

© The Seismological Society of Japan

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

Tue. Oct 31, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room C F202

[S03] AM-2

chairperson:Fumiaki Tomita(Tohoku University), Hideto Otsuka(Tohoku University)

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

[S03-04] Temporal Changes of Seismic Attenuation after the Tohoku-oki Earthquake

*Hayato Tero[1], Junichi Nakajima[1] (1. Tokyo Institute of Technology)

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

[S03-05] GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations and their results along the Japan-Kuril trench

*Fumiaki TOMITA[1], Motoyuki Kido[1], Takeshi Iinuma[2], Yusaku Ohta[3], Ryota Hino[3], Mako Ohzono[4], Hiroaki Takahashi[4], Raymondo Plata-Martínez[2], Tetsuo No[2], Kazuo Nakahigashi[5], Kyosuke Nakamura[2] (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S03-06] Estimate the interplate coupling around the Southern Kuril Trench

*Shunsuke Imai[1], Hiroaki Takahashi[2] (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

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

[S03-07] Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake

*Kyosuke Hirata[1], Ryota Hino[1], Hideto Otsuka[1], Yusaku Ohta[1], Norihisa Usui[2] (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S03-08] SSE detectability of OBP data using principal component analysis: Application to data from Hikurangi and Alaska

*Hideto Otsuka[1], Yusaku Ohta[1], Ryota Hino[1] (1. Graduate school of science, Tohoku university)

Temporal Changes of Seismic Attenuation after the Tohoku-oki Earthquake

*Hayato Tero[1], Junichi Nakajima[1]

1. Tokyo Institute of Technology

東北地方太平洋沖地震では，東北地方の太平洋沿岸で最大で5 m，震源近くの海底では50 m程度の東向き水平移動が観測され，その後陸上は年間数cm～数十cmずつ東へ移動している．しかし，海底の水平変位は陸上とは逆の西向きを示しており，両者を説明するためにはアフタースリップと粘弾性緩和の両方が必要である．一方，アフタースリップと粘弾性緩和の地表変位に対する寄与はトレードオフの関係にある．従って，地表変位観測のみでは粘弾性緩和とアフタースリップの大きさを同定できないという問題を抱えている．本研究はそのようなトレードオフに対し，地震波減衰の時間変化の解析から観測的制約を与えることを目的とした．

主に宮城県沖で2011-2019年に発生したM3.0-6.5の東北沖地震の余震約2600個を解析対象とした．その約2600個の内，古いものから1200個を選び1つ目のデータセットとした．まず，データセットの中で震源が5 km以内にある地震ペアを選択し，同一観測点における P 波初動のスペクトル比を計算した．次にそのスペクトル比を理論的な震源スペクトルで補正した後，2つの地震の観測走時の平均で割り算して震源距離の影響を取り除いた．最後に，スペクトル比の分母の地震が分子よりも必ず古くなるような全ての地震ペアをスタックすることで観測スペクトル比を計算し，それに理論スペクトル比をフィッティングした．もし2つの地震間で減衰が変化していなければスペクトル比の傾きはゼロになるのに対し，時間変化があると正（減衰が徐々に小さくなる場合）または負（減衰が徐々に大きくなる場合）の傾きを持つ．本研究ではスペクトル比の傾きから減衰の時間変化を推定した．以上の操作を，データセットの1200個の地震を古い順に10個ずつ入れ替えながら計140回行った．

　得られた結果は，本震直後は減衰の減少量が大きく，時間の経過に伴い変化量が小さくなることを示している．この減衰の変化が東北沖地震後の粘弾性緩和を反映していると仮定すると，本震直後に減衰が急上昇した後，指数関数的に減少したことになる．この現象の緩和時間を求めるためにフィッティングをしたところ，単一の緩和時間では説明できず，少なくとも2つの緩和時間（約3ヶ月，約3年）が必要であることが判明した．この結果は2つ，もしくはそれ以上の時定数を持つ緩和現象が進行していたことを示唆している．

© The Seismological Society of Japan

GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations and their results along the Japan-Kuril trench

*Fumiaki TOMITA[1], Motoyuki Kido[1], Takeshi Iinuma[2], Yusaku Ohta[3], Ryota Hino[3], Mako Ohzono[4], Hiroaki Takahashi[4], Raymondo Plata-Martínez[2], Tetsuo No[2], Kazuo Nakahigashi[5], Kyosuke Nakamura[2]

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University, 5. Tokyo University of Marine Science and Technology

東北大学では，2012年に20点のGNSS-A観測点を東北沖に設置し，観測を実施しており，2016年9月までは各観測点で年に1～2回程度の船舶を海上プラットフォーム（海上局）として活用したキャンペーン観測を実施しており，その観測成果はHonsho et al. (2019)にまとめられている．それ以降は，船舶の運用コストの問題で高頻度の観測は実施できない状態となっていた．しかし，2019年より波の力により無人で航行可能なウェーブグライダーを海上局として運用する試みを開始し（Iinuma et al., 2021），2020年以降は多観測点を巡る運用を年に2回実施している．ただし，ウェーブグライダーは海流の強い海域での運用が困難であるため，基本的に黒潮続流の影響の無い宮城県沖以北の観測点でしか運用できていない。福島沖以南の観測点では，従来通りの船舶を海上局とした観測を，JAMSTEC・東京海洋大学と協力して行う体制を整えてきている．また，千島海溝沿い根室沖では，2019年に3点のGNSS-A観測点を設置し，船舶による観測を年に 1 回程度実施してきている．本発表では， 2023年7月までに実施したウェーブグライダーおよび船舶を用いたGNSS-A観測の成果について紹介する．

上記の観測データを東北大学で開発したGNSS-A解析ソフト「SeaGap」（Tomita & Kido, 2022; Tomita & Kido, under review）を用いて解析を行った．解析では，海中音速の単層水平勾配構造を仮定した．勾配深度・浅部勾配について事前分布（勾配深度：平均 0.65 km・標準偏差 0.15 kmの正規分布，浅部勾配：平均 0 sec/km・標準偏差 5.0×10^{-5} sec/kmの正規分布）を課すことで，定点観測データのみでも安定した測位解を得られるようにした． 東北沖の観測結果については，2011年東北沖地震の主破壊域に位置する宮城県沖の観測点は，粘弾性緩和によると考えられる10 cm/yr程度の継続的な西向きの変動が得られた．また，宮城県沖では海溝近傍まで沈降傾向が見られている．ただし，Wave Gliderで取得した近年のデータについては，GNSS測位の系統誤差，あるいは音速の初期構造による系統誤差と考えられる推定誤差が生じており，その評価が必要であると考えられる．岩手県沖・青森県沖の観測点は，宮城県沖に比べ変動量が小さいが，近年では西向きの傾向が強くなっている様子が見られ，余効すべりの減衰等によりプレート間固着や粘弾性緩和の影響が現れていると考えられる．福島・茨城県沖の観測点は，2016年9月の観測までで見られていた余効すべりの影響と考えられる東向きの挙動が概ね収束している様子が見られた．根室沖の観測成果については，プレート間固着と考えられる7 cm/yr程度の西北西方向の変動が見られた。

本発表では，上記の観測成果について変動要因の解釈も踏まえて報告を行う．また，上下変動の系統誤差についてもその評価・議論を行う．

参考文献

Honsho et al. (2019), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135
Iinuma et al. (2021), Frontiers in Earth Science, 9:600946, doi:10.3389/feart.2021.600946
Tomita & Kido (2022), Earth, Planets and Space, 74, 176, doi:10.1186/s40623-022-01740-0

© The Seismological Society of Japan

Estimate the interplate coupling around the Southern Kuril Trench

*Shunsuke Imai[1], Hiroaki Takahashi[2]

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

千島海溝南部は太平洋プレートがオホーツクプレートの下に沈み込む沈み込み帯で、1952年十勝沖地震や1969年北海道東方沖地震などのM8クラスのプレート境界地震が発生している。地震本部の長期評価による30年以内発生確率は、M8.8以上の超巨大地震で7-40%、根室沖のM8クラスでは80%程度と高い状態となっている。沈み込み帯においては、プレート収束速度とすべり遅れの比をとることでプレート間の固着率を推定する考え方（Savage,1983）が知られている。しかし、千島海溝南部における地殻変動データは地上観測が主であり、海溝付近のプレート境界から比較的浅い部分に関しては、地上観測点から距離があるため、解像度の低さや値の不確実性の高さが課題となっている。
よって、本研究では応力拘束を伴うインバージョン手法 （Lindsey et al.(2021)）を用い、千島海溝付近における、プレート境界浅部まで高い解像度を維持したプレート間固着度の推定に取り組んだ。これは、地震間期を通してプレート間に蓄積する応力は非負であるという拘束を指し、設定期間に短期的なSSE等の応力を解放するイベントを含んでいても、時系列をある程度長くとれば、応力の解放が蓄積を上回ることはないという仮定に基づいている。当該研究においては、海岸から離れたプレート境界浅部におけるプレート間固着度の不確実性が大幅に低減された。今井・他（2022，地震学会）では、同手法によって、2003年十勝沖地震の前後で十勝沖付近の海溝付近において固着度の低下がみられたことなど、海溝付近での固着の度合について先行研究と比較した。本発表では、計算範囲をより東側に拡張することによって、得られる結果の違いや海底局のデータ有無によるデータ不確実性の違いなどについて報告する。
今井・他（2022，地震学会）において示した結果は、Lindsey et al. (2020)が公開しているMatlabプログラムに内包されたプレート境界モデルをそのまま流用したものであったが、東端が根室沖をカバーしていなかったため、Lindsey(2020)が公開したslabmeshを用いて、新たにslab2モデルより千島海溝南部を広くカバーした三角メッシュの構築を試みた。インバージョン計算においては、南から境界面の一番浅い点を海溝軸からの深さが0kmと定義し、モデル中の最深部はプレート境界の地表からの深さ100kmとした。0kmと100kmの定義が異なることには注意が必要である。緯度の違いによる平面距離の違いや、実際のプレート境界面形状は頂点の決定の際には考慮していないため、メッシュの面積は均一ではない。
入力する変位速度データとして、国土地理院電子基準点日々座標値のF5解を時系列の東西、南北、上下変位に変換した上で期間を①2003年十勝沖地震前(1996~2003)、②2011年東北沖地震前(2006~2011)、③2011年東北沖地震後(2014~2019)、④直近4年間（2019~2023）の４つの期間に分けた。期間設定については、各地震の余効変動の影響を考慮して、地震後3年の時間を空けている。年周・半年周運動の影響を除外した直線近似の傾きを変位速度(mm/yr)とした。F5解はITRF14に準拠しており、北米プレート準拠の基準系に変換するため、plate motion calculator(UNAVCO web site)を用いて各観測点の北米プレートによる理論変位を計算して速度ベクトルを平行移動させて入力に用いる変位速度を導出した。
推定された固着分布は、プレート境界モデルの変更前と比較し、根室沖で顕著な違いがみられた。2003年十勝沖地震の前後では、根室沖深部の固着度は低い状態を維持した一方、浅部では高い状態を維持した。また、2011年東北沖地震以降では根室沖の固着度の高い領域は拡大している結果となった。プレート境界モデルの変更前後でモデルの適合性について調べるため、予測された地表の変位速度と実測の速度の残差を比較したところ、変更後のモデルは根室地方で有意に小さい値を取った。また、平滑性制約のパラメータを変更し、ABICが最小となるパラメータから10%以内の数値で計算を行った際、メッシュ1区画ごとに固着度の取りうる最大・最小の差を不確実性として算出したところ、変更後のモデルでは、GEONETの観測点東端（根室）から離れた東経147度以東で顕著に上昇し、以西では低い値を取った。これらの結果から、変更後のモデルは観測結果をよりよく説明し、根室沖までの計算結果は、より南部の十勝沖等と同様に評価できることが示された。
期間設定によって2003年および2011年の各地震の余効変動の影響を回避しようと試みたが、考慮が十分ではない可能性がある。今後は余効変動の影響を除去し、時間分布の推定精度向上を図る予定である。

© The Seismological Society of Japan

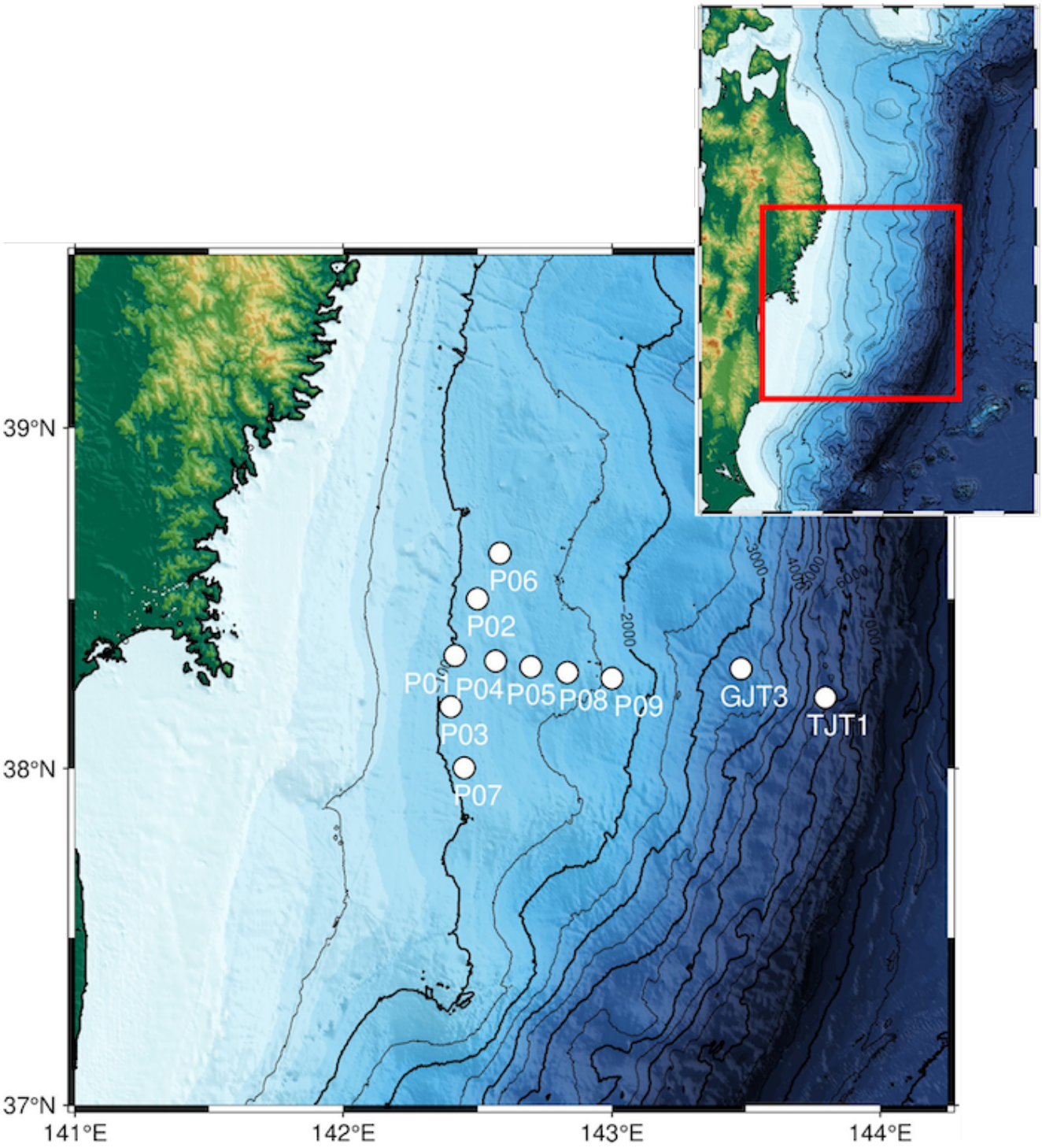
Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake

*Kyosuke Hirata[1], Ryota Hino[1], Hideto Otsuka[1], Yusaku Ohta[1], Norihisa Usui[2]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute

2011年東北沖地震以前の海底水圧計（OBP）データの解析では、地震発生前に様々なスロースリップ現象が確認されている。3月9日の最大前震後には、明らかな余効すべりがOhta et al. (2012)によって確認されている。Ito et al. (2016) は3月9日の前震の破壊域のアップディップ側で2月中旬からSSEが発生していることを報告している。一方、Hino et al. (2014) は本震の震源域付近でも明瞭な本震発生直前の非地震性すべりの加速に対応する地殻上下変動は確認できなかったと結論づけている。OBPデータから地殻変動シグナルを抽出するには非潮汐海洋変動成分を取り除くことが重要である。海洋変動ノイズを低減するために、海洋モデルを用いて海底圧力変動を推定する手法がとられており（たとえば、Hino et al., 2014; He et al., 2023）、こうした海洋モデルによる実際の海底水圧変動の再現性能の評価は、海底測地学の分野においても重要な課題である。Otsuka et al. (2023) は気象研究所が開発したMRI.COM-JPNモデル (Sakamoto et al., 2019) の性能評価を、DONETのOBPを用いて南海トラフ沿いの海域を対象に実施した。MRIモデルは、これまでのOBPデータ解析でしばしば用いられてきた稲津モデル（Inazu et al., 2012）が海水層を単層として扱っているのに対して、海水を多層構造として扱っていて水平方向の解像度も2倍以上である。彼らは、10年以上にわたるDONETのOBP記録との比較から、MRIモデルは広い周波数帯域で観測データに類似した海底水圧変動を予測することができることを示した。この新しい海洋モデルを用いた非潮汐海洋変動ノイズの除去を東北沖地震前のOBP観測データに対して適用することで、地震発生に先行した海底上下変動に関して、従来の研究よりも詳細な特徴抽出ができることが期待される。本研究では、東北沖地震の震源域におけるOBPデータのうち、先行研究で顕著な地殻変動現象が観測されるようになった2011年2月以前の記録に注目して、MRIモデルと稲津モデルの２種類のモデルによる非潮汐成分除去性能を比較した。観測データからモデル出力を差し引いて得られる残差時系列のRMS振幅の低減率を求めたところ、稲津モデルが全観測点の平均で26%であったのに対して、MRIモデルでは17%であった。Otsuka et al. (2023)がDONETのデータで同様の評価をした結果では、RMS振幅の低減率は対象とする水圧変動の周波数帯域に依存しており、100日程度より短い周期では稲津モデルを使った残差時系列の方がRMS振幅が小さくなることが示されており、今回の評価結果は日本海溝においても同様の傾向がみられることを示す。一方で、長周期帯域ではMRIモデルの方の再現性が高くなる向上があり、特に大きな長周期変動が観測されている最も海溝軸に近い観測点TJT1では、稲津モデルよりもMRIモデルの出力を差し引くことでこうした長周期変動をより低減することができることが確認された。海溝軸に近いOBPの方が長周期の非潮汐海洋変動成分が卓越していることを、MRIモデルがよく再現できていることを示している。測地学への応用では、長周期帯での再現性が重要である上に、東北沖地震に先行した一連の活動では海溝軸近傍での非地震性すべりが主要な役割を果たしたと考えられることから、新しいMRIモデルを用いた再解析により、東北沖地震に先行した海底地殻変動の特徴について新たな知見を提供できることが期待できる。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

SSE detectability of OBP data using principal component analysis: Application to data from Hikurangi and Alaska

*Hideto Otsuka[1], Yusaku Ohta[1], Ryota Hino[1]

1. Graduate school of science, Tohoku university

海底水圧計 (Ocean Bottom Pressure gauge; 以下，OBP) は海底の地殻変動場を連続的に観測できるセンサである．その一方，特にスロースリップイベント (Slow Slip Event; SSE) 等の非定常地殻変動の抽出には，その時定数の近さから非潮汐海洋変動の適切な評価，除去が重要となる．Otsuka et al. (*EPS*, 2023) は，DONET OBPデータに主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA) を適用した．その結果，水深方向に反相関する海洋変動成分が第2主成分 (PC2) に現れ，OBPデータに含まれる海洋変動成分の水深依存性を反映することを示した．また，SSEに起因する地殻変動成分を模した信号をOBP時系列に重畳させ，その時系列にPCAを適用することで， 地殻変動成分を含む主成分がその振幅に応じて変化することを見出した．さらに，基準の主成分からの変化を規格化内積値 (Normalized Inner Product; NIP) を用いて評価することで，定常的な海洋変動と異なる現象を検出する手法を提案した．また，海洋変動の空間的特徴が時間的に安定していれば，時系列を任意の時間幅毎に切り出し，それを用いることで実データからNIPによる非定常イベントが検出可能なことを示した．一方で，実際のDONET OBPデータからSSEを検出した例は示すことができていない．また，海洋変動の空間的特徴は海域毎に異なる (e.g., Dobashi and Inazu, 2021) ことから，NIPを用いた非定常イベントの検出手法が適用可能かまでは明らかになっていない．そこで本研究では，同手法によるデータから実際の非定常イベントの検出可能性を評価し，同手法の他海域での性能評価をNIP変化を用いることで実施した．

本研究では，事例研究としてOBPに基づくSSE検出の報告例があるニュージーランド ヒクランギ沖 (HOBITSS) (e.g., Wallace et al., 2016; Muramoto et al., 2019) およびアラスカ半島沖 (AACSE) (e.g., He et al., 2023) のOBPデータを用い，その海洋変動の特徴とNIP手法の性能評価を実施した．本研究で用いたHOBITSSは2014年5月～2015年6月の14観測点，AACSEは2018年5月～2019年8月の21観測点をそれぞれ用いた．HOBITSS，AACSE観測網データはIRISからダウンロードした．OBPデータはオリジナルのデータを平均化処理により1時間値にダウンサンプリングしたのち，含まれる潮汐成分は潮汐除去フィルタ，機器ドリフト成分は指数関数と線形近似を用いそれぞれ除去した．これら事前処理後のデータに対し，PCAを適用した．HOBITSS，AACSEともに水深200m以浅の陸棚上観測点と2,000m以深の観測点が含まれる．特に陸棚上の浅部観測点に含まれる海洋変動の振幅は相対的に大きい (e.g., Fredrickson et al., 2023) ことから，浅部観測点の振幅の影響を低減させるために，荷重PCA (Weighted-PCA; WPCA) を用いた．さらに，非定常イベント検出においては，時系列全体のPCの空間分布を，20または30日の時定数で切り出した時系列でのPCの空間分布と比較することでNIPの変動を調べた．同時定数は，先行研究で検出されたSSEの時定数 (20～30日) を考慮し設定した．

HOBITSS，AACSEにW-PCAを適用した結果，DONETと同様に共通成分がPC1，傾斜成分がPC2に見られた．そのため，DONETでみられた海洋変動の水深依存をもつ特徴はこれら異なる海域でも共通であることが明らかとなった．一方で主成分毎の寄与率はAACSEで大きく異なったが，これは観測網の形状や空間分布に基づく可能性がある．海洋変動の空間分布の時間変化および先行研究でSSEが検出された期間でのNIP変動を調べた．その結果，SSE期間で極端なNIPの低下はどちらの観測網でも見られなかった．これは，観測点形状および地殻変動の空間分布により，PCAで適切に非定常地殻変動を分離できなかった可能性がある．一方，NIPでは非定常イベントを検出できることから，それらには地殻変動以外が含まれうる．そこで，NIPの変化が大きかった時点での各PCの空間分布についても比較する必要がある．発表では，SSE期間を中心にNIP変化に基づき，これら観測網での非定常地殻変動，および海洋変動の特徴について詳細に報告する．

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

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

Tue. Oct 31, 2023 1:30 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room C F202

[S03] PM-1

chairperson:Yusuke Yokota, Tadashi Ishikawa

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

[S03-09] Representation of underwater sound speed structure in GNSS-A

*Yusuke YOKOTA[1], Tadashi Ishikawa[2], Shun-ichi Watanabe[2], Yuto Nakamura[2], Koya Nagae[2] (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-10] Trial of the detection of seafloor movement by the differential bathymetry method

*Tadashi ISHIKAWA[1], Masanao Sumiyoshi[1], Yuto Nakamura[1], Kei Imuta[1] (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

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

[S03-11] GNSS/A seafloor geodesy using an ultralight and compact towed buoy system.

*Ryoya IKUTA[1], Yasushi Harada[2], Keizo Sayanagi[2], Keiichi Tadokoro[3], Ryosuke Nakahata[1], Yusuke Yokota[1] (1. Shizuoka University, 2. Tokai University, 3. Nagoya University)

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

[S03-12] Reanalysis of GNSS-A data obtained in the Hateruma basin at the southwestern end of the Ryukyu trench

*Ryosuke Nakahata[1], Ryoya Ikuta[1], keiichi Tadokoro[2], Yasushi Harada[3] (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Tokai University)

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

[S03-13] Numerical experiment on template matching and relative strength index based on noise analysis of high-rate GNSS data

*Riko Arai[1], Yuta Mitsui[2] (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Department of Geosciences, Shizuoka University)

Representation of underwater sound speed structure in GNSS-A

*Yusuke YOKOTA[1], Tadashi Ishikawa[2], Shun-ichi Watanabe[2], Yuto Nakamura[2], Koya Nagae[2]

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

GNSS-Aでは海洋場，とくに海中音速場の傾斜状態を正しく推定することが局位置決定精度に重要である．これは，GNSSにおける大気・電離圏遅延の推定と同様であるが，場全体における影響の度合いや高さ方向の位置のばらつき方に大きな違いがある．

GNSS-Aにおいて代表的な解析手法であるGARPOS version 1.0.0 (Watanabe et al., 2020) では，海面と海底にある海上局の位置と海底局の位置に依存してパラメータ推定を行う．海中の傾斜場を海表面と海底面に投影してg_1とg_2（以下ベクトル$\boldsymbol{G}$とする）として推定している．これは他のSeaGap (Tomita & Kido, 2023) などで推定されるパラメータとも相互に関連づけることができる．

屈折の影響が小さくほぼ無視できると考えると，$\boldsymbol{G}$は，場の傾斜状態を無数に分解し，その影響の合算として与えられる．この時，$\boldsymbol{G}$をg_2-g_1平面にプロットすることを考える．プロットされた点が第1，第3象限（sgn(g_1)=sgn(g_2)）の時は1枚の傾斜場レイヤーに近似して考えることができる．第2，第4象限（sgn(g_1)≠sgn(g_2)）の時はそのように考えることができないため，複雑な場やバイアス的な誤りを想定しなければならない．

次に3次元の場合を考える．この時，g_1とg_2はそれぞれE方向とN方向のような2方向に分割して推定される．ゆえにg_1とg_2が直交2方向に対して得られる．この直交する２つの方向，例えばEとN方向に対して($g_{1E,}$ g_{1N})ベクトルと($g_{2E,}$ g_{2N})ベクトルのなす角がπ/2以下の時，適切な方向を取る(例えば座標をΦ回転させる)と$\boldsymbol{G}_{E\Phi}$，$\boldsymbol{G}_{N\Phi}$ともに１枚の傾斜場レイヤーに近似して考えることのできる値になる．ところが，π/2より大の時，どのような方向を取っても１枚で近似できない方向が生じる．この時，先ほどのg_2-g_1平面に同様にプロットするとその分布や座標回転時の軌道から場の状態やバイアス誤差の考察を容易に行うことができる．

この手法を用いると，実際のデータでも各観測機会の$\boldsymbol{G}$を比較することで観測時の場の状態やバイアス誤差の有無を検証することができる．

謝辞：本研究は地震研究所共同利用ERI JURP 2022-Y-KOBO25，SECOM 科学技術財団，科研費学術変革領域 (A) “Science of Slow-to-Fast Earthquakes“のJP21H05200の助成を受けました．

© The Seismological Society of Japan

Trial of the detection of seafloor movement by the differential bathymetry method

*Tadashi ISHIKAWA[1], Masanao Sumiyoshi[1], Yuto Nakamura[1], Kei Imuta[1]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

地震時の地殻変動を把握することは発生した地震の物理過程の解明に重要な役割を果たす．特にGNSSやInSAR等の人工衛星を用いた宇宙測地技術による地殻変動観測は高密度・高精度な地殻変動の検出を可能とし，震源断層のすべり推定に大きな貢献を果たしている．さらに，こうした宇宙測地技術が直接使用できない海域においても，地殻変動観測を可能とする技術の研究開発が進み，GNSS-A，海底間音響測距，水圧計などの他，海底に掘削した孔内での間隙水圧やひずみ・傾斜観測が実施されている．特に海底版GNSSともいえるGNSS-A観測は，海上保安庁や大学によって日本海溝・南海トラフを中心とした海域で継続的に観測が実施され，地震間の定常/非定常な変動，地震時変動，地震後の余効変動等の把握に着実に成果を残している．一方で，これらの海底観測は技術的な困難さに加え，海底への機器の設置・維持などにコストがかかるため，現状では陸上の観測網と比べ空間的な拡がりや密度が劣っているという欠点がある．

観測設備の有無とは無関係に地殻変動を検出する技術として，地震発生前後の地形データを比較することで地殻変動を検出する差分地形法がある．2011年東北地方太平洋沖地震発生後，海洋研究開発機構は地震発生前に取得していた地形データと同じ場所で地形調査を行い，その差分から地震時の変動を推定した．その結果，日本海溝の海溝軸付近において約50 mの水平変動があったことが捉えられた(Fujiwara et al., 2011)．このときの検出精度は水平変動について約20 mと見積もられており，2-3 cm の精度を持つGNSS-A観測とは3桁の違いがあるが，観測点が無い空白域においても，予め海底地形データを整備しておくことによって大まかな地殻変動を捕捉できる可能性があることで，差分地形法の有用性は高いと考えられる．また，巨大地震に伴う津波の発生原因として，断層すべりによる海底の地殻変動のほかに，地震動による海底地すべりも考えられる．差分地形法はこのような地すべりによる地形変化の検出にも有効な手法となりうる．

我々は，将来の南海トラフ地震に備え，想定震源域の海底における地形データの整備を試行的に開始した．南海トラフ地震の最大想定は全域を破壊するM9クラスであるが，片側のみの所謂半割れの場合はM8クラスとなり，Fujiwara et al., (2011)で見積られている20 mの精度ではその変動を検出することは難しい．しかしながら，Fujiwara et al. (2011)で用いたデータは元々高精度な海底地形の取得を目的としたものではないため，必ずしも本手法に最適な精度を有したデータではなかった．

そこで，はじめから異なる時期の詳細な地形の比較を目的とし，最新の機器による精度の高いデータを取得すれば，より高い精度で地殻変動を捉えることが可能になると期待される．より高い精度の海底地形データを取得するためには，航海安全のために高い精度が求められる水路測量における水深データ処理手法として使用されているCUBE 処理を前提としたマルチビーム測深手法を採用することが現時点では最適である．CUBE 処理は，データの不確かさを統計的に処理することによって，測深点データから高密度の水深グリッドデータを算出する処理手法であり，そのためには，十分な冗長性が担保された高密度データを取得する必要がある．

我々は最初の試行として，2021年10月に室戸岬沖の南土佐碆周辺において，マルチビーム測深機による海底地形調査を実施した(図1)．さらに2023年3月にも同一の海域で調査を実施し，比較による精度の検証を行っている．本発表では，差分地形による海底の地殻変動検出に向けて試験的に行った海底地形調査の実施手順と，取得した海底地形データについて報告する．

参考文献：
Fujiwara et al. (2011) The 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Displacement Reaching the Trench axis,

© The Seismological Society of Japan

Science, 334, 1240.
石川・他 (2023) 差分地形法による海底の地殻変動検出にむけて, 海洋情報部研究報告, 61, 75.

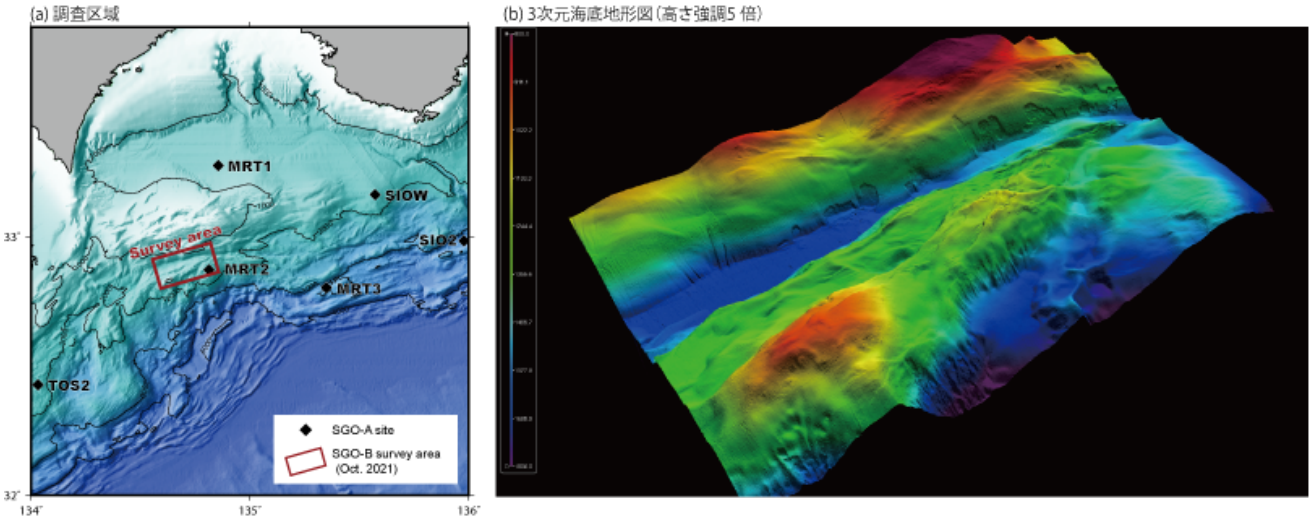


図 1　2021 年 10 月に実施した海底地形調査の調査区域 (a) と得られた海底地形図 (b)．石川・他 (2023) より抜粋.

© The Seismological Society of Japan

GNSS/A seafloor geodesy using an ultralight and compact towed buoy system.

*Ryoya IKUTA[1], Yasushi Harada[2], Keizo Sayanagi[2], Keiichi Tadokoro[3], Ryosuke Nakahata[1], Yusuke Yokota[1]

1. Shizuoka University, 2. Tokai University, 3. Nagoya University

GNSS-音響結合方式（GNSS-A）の海底地殻変動観測のために開発した超軽量-小型のえい航ブイシステムを駿河湾および宮古島沖における計測に使用したので紹介する。 GNSS-Aに導入された、船底トランスデューサを用いたハルマウントシステム(Sato et al., 2013)は、よくコントロールされた航跡を高速(～7 knot)で航行しながら信号を送受信できるため、精度の高い海底局位置の測位を短い時間で実現できる。ただしこのシステムは船底のトランスデューサと高価なジャイロコンパスを備えた専用の観測船が必要である。

そこで我々は、低予算、自前の船を持たずにハルマウントシステムと同等の観測を行えることを目指し、軽量-小型えい航ブイシステムの開発を行っている。GNSS-Aの構成要素はGNSSアンテナ（位置測定）、ジャイロコンパス（姿勢測定）、トランスデューサ（音響測距）である。本システムでは、図1のようにGNSS収録器（Net-R8）、トランスデューサのコントローラ部、姿勢データ収録部（ノートPC）を全て船上に集約し、ブイにはセンサーのみを設置することでブイの軽量化を試みている。2023年５月の連合大会では、重量25 kg全長1.5mのブイを作製し、海域試験において5 knotでえい航しながら十分なS-N比の音響測距が行えたことを紹介した（生田ほか, 2023）。その後このブイを用い、2023年４月と7月に三保半島沖の駿河湾（SNW海底局）、2023年6月に琉球海溝沿いの宮古深海平坦面（OMYK海底局を新設）で実観測を行った。

ブイの取り回しは問題なく行えている。駿河湾SNWでは東海大学の実習船「北斗」で、Aフレームとロープで上げ下ろしを行い、4名の人手が必要であった。宮古島沖OMYKの観測では漁船「第二幸徳丸」で、乾舷が低いためロープを使わず2名のみで上げ下ろしできた。SNWでは合計6時間、OHTMでは17時間を5ktでえい航し続け、耐久性も示された。

実観測を重ねる中で、ジャイロコンパスのトラブルが二件あった。一件目は電源部の浸水である。ジャイロコンパスには電源供給の必要があり、バッテリーとUSB-Hubを弁当箱に入れてブイに取り付けている。弁当箱はポリエチレン袋に入れて厳重に防水し、ジャイロと船に向かう2本のケーブルを外に出している（写真）。宮古島沖OMYKの観測でケーブル部分から弁当箱が浸水した。袋を2重3重にすれば浸水を防げるが、防水を厳重にするほどトラブル対応の際に揺れる船上での出し入れが大変になる。簡単で頑強な浸水対策を試行錯誤している。二つ目のトラブルは信号の途絶である。ジャイロコンパスからはNMEAフォーマットに準じた時刻と姿勢情報がシリアル通信で出力されるため、30m伝送するためにUSB Extenderで変換してEthernetケーブルを通している（図1）。観測の途中でしばしば、通信が途絶してシリアル接続が失われることがあった。ほとんどの場合はPCのUSBポートを無水エタノールで掃除して再接続すると復旧した。原因としてEthernetケーブルを経由した信号の電圧に余裕が無かったことが考えられる。ブイ側のUSB-Hubの電源供給をリセットしないと復旧しない場合もあった。市販のUSB Extenderは千円程度から数万円までであり（我々が使用したのは数千円）、より高性能のものを選定することで回避できた可能性がある。

2023年6月宮古島沖OMYKの観測では、水深約900mの海底に3台のトランスポンダーを設置し、17時間の観測で図2の幾何学形状を3往復半描いた。2023年4月と7月の駿河湾SNWの観測では、水深約800mに3台設置したトランスポンダー上を同様の幾何学形状の片道1回のみを行った。8月と9月では1往復を計画している。本発表では、駿河湾SNWで繰り返しの観測で得られる海底局位置の比較から本観測の局位置推定精度を評価し、また宮古島沖OMYKの初回位置を報告する予定である。

© The Seismological Society of Japan

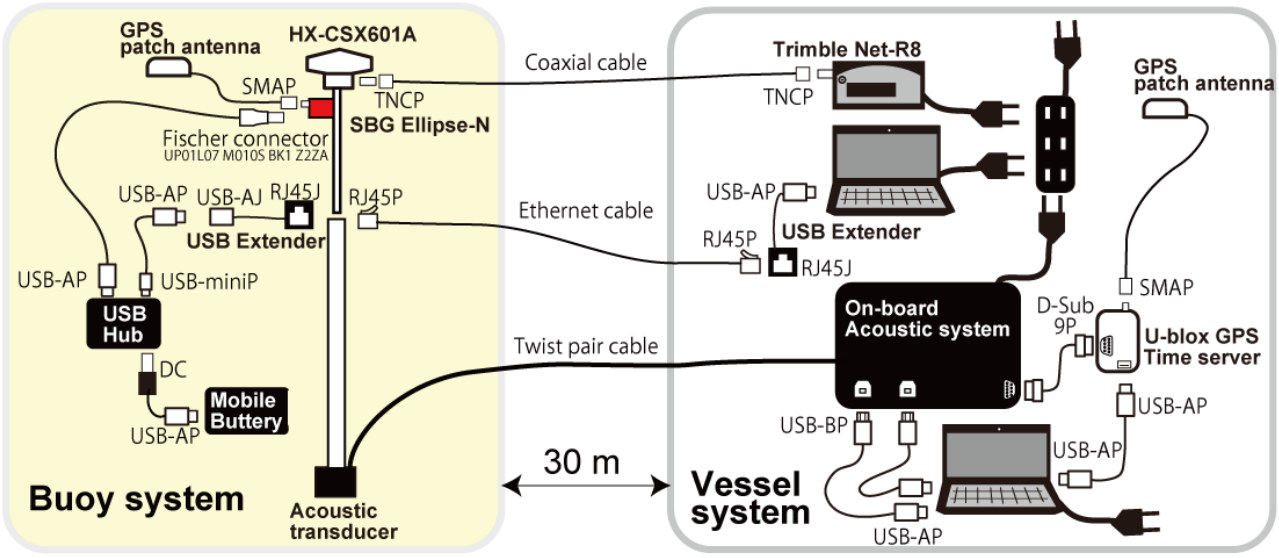
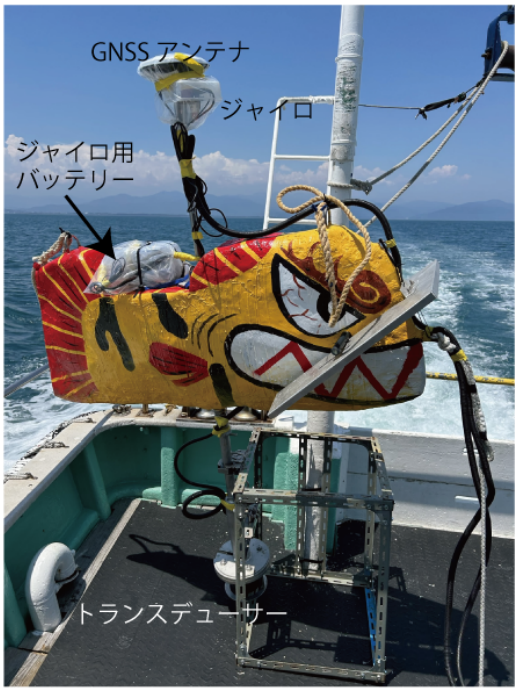


図１．ブイシステムの結線図。左側囲み内がブイ、右側囲み内が観測船。



写真．えい航ブイ「零号機」
2023 年 7 月 27 日駿河湾「北斗」船上にて

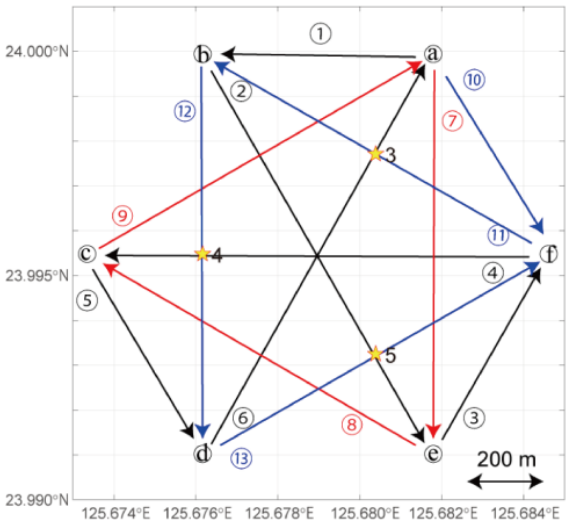


図 2. 2023 年 6 月 24 日　OMYK 観測における測線図。☆が海底トランスポンダーの位置。船は①～⑬の測線を矢印にしたがって順にたどる。黒、赤、青全ての測線で測距を行ったら、次は⑬～①を矢印とは逆にたどって往復 1 セットとする。

© The Seismological Society of Japan

Reanalysis of GNSS-A data obtained in the Hateruma basin at the southwestern end of the Ryukyu trench

*Ryosuke Nakahata[1], Ryoya Ikuta[1], keiichi Tadokoro[2], Yasushi Harada[3]

1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Tokai University

我々は琉球海溝南西端、琉球海溝に面した波照間海盆に海底局OHTMを設置してGNSS-A測地観測を行ってきた。昨年度の本学会で発表した2014年から2022年の海底局位置（中畑ほか, 2022）について、GNSS解析を見直して再解析を行った結果を報告する。

琉球海溝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」によって壊滅的な被害を受けたことが知られている。Nakamura (2009)は、八重山津波の発生源として、琉球海溝南西端のプレート境界浅部で発生したMw8.0の津波地震である可能性を示唆している。そこで我々は、琉球海溝南西端のプレート境界における固着の有無を明らかにするために、2014年10月に波照間島南沖約40km、前弧海盆である波照間海盆内に海底局OHTMを設置した。OHTMは水深約3300mの海底に、3台のトランスポンダを水深のおおむね1/√2程度の外接円直径をもつ正三角形に配置することで構成されている。

我々は昨年度の地震学会秋季大会で、2014年10月から2022年6月まで、2021年を除いて年1エポック、合計8エポックのOHTMの測位結果からプレート境界浅部に固着が無いことを推定した。また推定精度の向上のために今後も観測を継続する必要性を述べた。ところがその後、海底局OHTMを構成するトランスポンダのバッテリーが切れ、新たな観測エポックの追加は不可能となった。これを機に改めて過去のデータ、特にGNSS解析について見直しをしたので本発表で紹介し、再解析によって得られた2014年10月から2022年6月までの海底局OHTMの座標変化の結果を報告する。

GNSS解析は、高須知二氏によって開発されたオープンソースの解析ソフトウェアRTKLIB（高須ほか, 2007）を用いて行った。最初に独自に設置した陸上基準局の座標を、ITRF2008（Altamimi et al. 2011）で座標値が与えられているIGS点を基準として30秒サンプリングの位相データでstatic解析した。次に得られた座標値に基づいて、陸上基準局に対する船上アンテナの位置を0.2秒サンプリングでkinematic解析した。

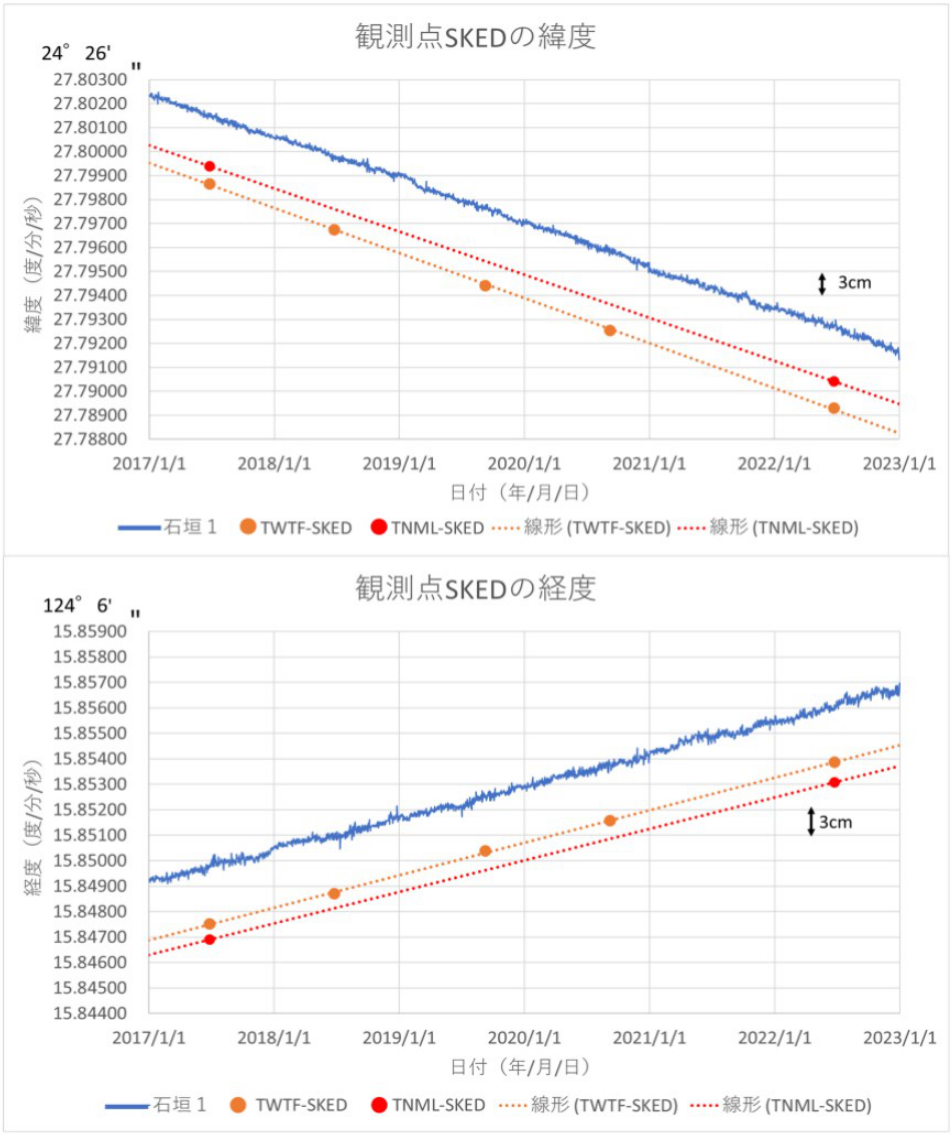
昨年度までの解析では、static解析に用いるIGS点として2014年から2017年及び2022年は観測点TNMLを、2018年から2020年は観測点TWTFを使用してきたが、用いるIGS点の違いにより陸上基準局座標の推定結果に水平成分で3cm程度のオフセットが生じていたことがわかった（図）。そこで再解析においてはIGS点として原則TWTFのみを用い、TWTFのデータの無い2015年のエポックのみTNMLを用いた。2015年のエポックについても、得られた陸上基準局座標から上記のオフセットを差し引くことで異なるIGS点を用いた効果を補正した。陸上基準局は機器の故障や設置場所の制約の都合で、2014年は石垣市立平真小学校屋上のGNSSアンテナ（観測点HESN）、2015年は台湾中央研究院地球科学研究所の観測点SUAB、2016年は同研究所の観測点SUAO、2017年以降は石垣市立崎枝小中学校屋上のGNSSアンテナ（観測点SKED）と変遷している。これらの基準局座標を再決定し、全エポックの船上アンテナのkinematic GNSS再解析を完了した。

得られた船上アンテナ位置に基づき、海底局位置解析プログラムOCDASAN (Ikuta et al. 2008) を用いて海底局位置の再解析を行った結果を報告する。

謝辞：本研究はJSPS科研費26287104、17K05630、22H01335の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

引用文献
Altamimi et al. (2011). *J. Geod.*, **85**:457–473. DOI 10.1007/s00190-011-0444-4
Ikuta et al. (2008). *JGR*, **113**, B0240. DOI 10.1029/2006JB004875
Nakamura (2009). *GRL*, **36**, L19307. DOI 10.1029/2009GL039730
高須ほか (2007).
https://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/gpssymp_2007_rtklib.pdf



図：観測点 SKED の座標
縦軸は緯度または経度（度/分/秒）、横軸は日付を示している。オレンジ丸とオレンジ線は IGS 点に観測点 TWTF を用いて推定した SKED の座標（2017 年～2022 年）と最小二乗法による回帰直線を、赤丸、赤線は IGS 点に観測点 TNML を用いて推定した SKED の座標（2017 年、2022 年）と最小二乗法による回帰直線を示している。青線は国土地理院の電子基準点石垣１（ID=960749）の日々の座標値（F5 解）を示している。

© The Seismological Society of Japan

Numerical experiment on template matching and relative strength index based on noise analysis of high-rate GNSS data

*Riko Arai[1], Yuta Mitsui[2]

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

様々な時間スケールのスロー地震が報告されている中、継続時間100秒程度から1日程度の帯域のイベントは検出事例が少ない(Ide and Beroza, 2023)。かつ、それらの検出事例の一部は微動・低周波地震のクラスター的活動を1つのイベントとして解釈した間接的なものであるため、測地学的手法でのより直接的なスロースリップイベント検出を行うことがこの帯域のスロー地震を理解する上で不可欠と考えられる。そこで、本研究では実際のハイレートGNSSデータのノイズ特性解析、および、シグナル検出手法の設定の検討(数値実験)を行う。

使用するデータは、Nevada Geodetic Laboratory が提供する、5分サンプリング精密単独測位解(Blewitt *et al*., 2018)のハイレートGNSSデータセットである。GNSSデータのノイズスペクトルは一般にホワイトノイズ的ではなく、周波数に依存した成分を持つことが知られている(e.g., Genrich and Bock, 2006; Geng *et al*., 2018)。このことがシグナル検出に影響を与えていると考え、データのノイズスペクトルが具体的にどうなっているかを調べる。そのため、連続した30日間のデータから1日分ずつのパワースペクトル密度を算出し、スタックする。次に、観測データのパワースペクトル密度の形状を単純化したパワースペクトル密度の形状を持つノイズを作成し、Clipped ReLU 関数のシグナル(範囲0~1、変位期間1800秒)を足した人工データXと、単純なホワイトノイズにシグナルを足した人工データωとを作成する。

その上で、1日サンプリングGNSSデータの解析で用いられてきた2つの手法について、シグナル検出の数値実験を行う。1つは、相関分析に基づくテンプレートマッチング(e.g., Rousset et al., 2017; Okada et al., 2022)で、Clipped ReLU 関数をテンプレートとし、テンプレート全体の窓幅は変位期間の10倍とする。変位期間およびノイズレベル(標準偏差σ)を変えたときに、シグナルの位置で最大の相関係数を取るか否かで結果を評価する。もう1つは、相対力指数(RSI)に基づく検出(e.g., Crowell *et al*., 2016)である。RSIは、株式市場において短期間での株価の急速な変化を判断する指標として知られ、シグナルの有無を判断する際の一般的な閾値の目安も確立している(e.g., Wong *et al*., 2003)。こちらも、期間およびノイズレベル(標準偏差σ)を変え、シグナルの位置でRSIが70を超える最大値を取るか否かで結果を評価する。

まず、観測データのノイズスペクトル(パワースペクトル密度)を調べた結果、周波数が3×10^{-4} Hz程度以下の低周波数帯では周波数の-1乗におよそ比例するピンクノイズ的傾向が見られるが、それ以上の高周波数帯では周波数依存性が小さいホワイトノイズ的傾向になることがわかった。なお、ハイレートGNSSデータ一般がこのようになっているわけではなく、今回使用した Nevada Geodetic Laboratory の5分解に固有の特性である。

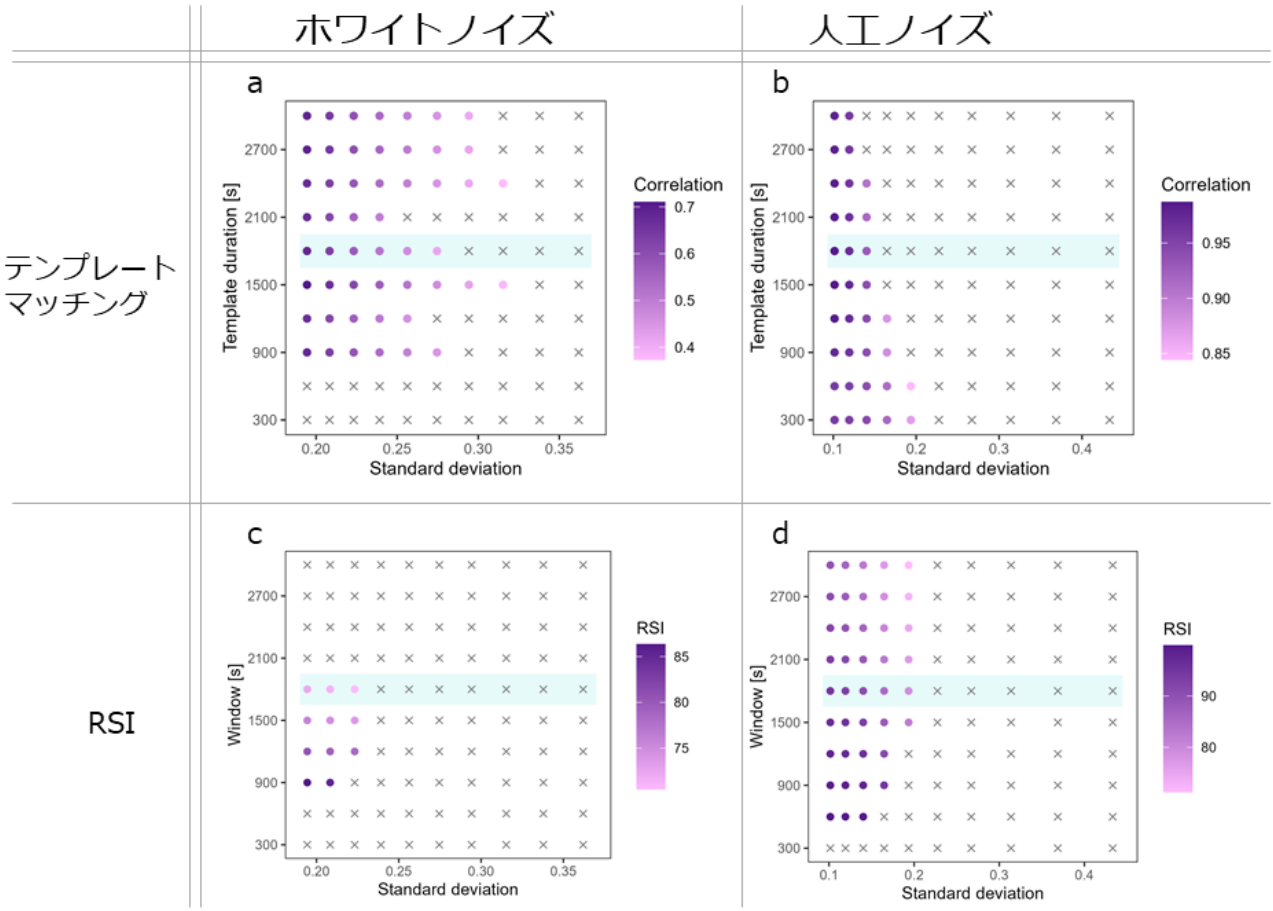
この観測データと同様の特性を持つノイズから作成した人工データ Xと、ホワイトノイズから作成した人工データω各々について、数値実験結果をまとめる。テンプレートマッチングでは、人工データω(ホワイトノイズ)のとき、シグナルの半分程度(900秒)未満の短い変位期間を設定すると、著しく性能低下することがわかった(図a)。人工データX(観測データ参照ノイズ)では、この性質が消え、テンプレートの変位期間が短ければ短いほど検出可能性が上がるという結果が得られた(図b)。ただし、ホワイトノイズの場合(人工データω)と比べて、観測データ参照ノイズ(人工データX)の場合、検出可能なノイズレベルの閾値が全般に小さくなり、ノイズに弱くなる傾向が見られた。

RSIに基づく検出では、人工データω(ホワイトノイズ)のとき、シグナルの半分程度未満、またはシグナルより

© The Seismological Society of Japan

長い期間を設定すると検出性能が低下した(図c)。人工データ*X*(観測データ参照ノイズ)では、長い期間を設定するほど性能が向上した(図d)。さらに、ホワイトノイズの場合(人工データω)に比べて、観測データ参照ノイズ(人工データ*X*)の場合、検出可能なノイズレベルの閾値が全般に大きくなり、ノイズに強くなる傾向が見られた。これはテンプレートマッチングとは真逆の傾向である。

人工データ*X*(観測データ参照ノイズ)に対しては、RSIの検出能力が全体として優れていた。株価の分析に用いられてきた指標が、ハイレートGNSSの解析にも応用できそうであることは興味深い。



© The Seismological Society of Japan

Room D | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

Tue. Oct 31, 2023 9:30 AM - 10:40 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 12:30 AM - 1:40 AM UTC | Room D F204

[S22] AM-1

chairperson:Yoshihiro Hiramatsu, Takuya Nishimura

9:30 AM - 9:50 AM JST | 12:30 AM - 12:50 AM UTC

[S22-01] [Invited]Central Japan as a cold subduction zone and its implications for deep dehydration of subducted slab beneath the Noto peninsula

*Hikaru Iwamori[1], Hitomi Nakamura[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

9:50 AM - 10:10 AM JST | 12:50 AM - 1:10 AM UTC

[S22-02] [Invited]Subsurface resistivity structure and its heterogeneity around the earthquake swarm region in the Northeastern Noto Peninsula

*Ryokei YOSHIMURA[1], Yoshihiro Hiramatsu[2], Tada-nori Goto[3], Takafumi Kasaya[4], Rintaro Miyamachi[1], Jun Nakagawa[1], Nagi Yamashita[3], Rei Amano[3], Masato Fukata[2], Amane Sugii[2], Taisei Inui[1], Ken'ichi Yamazaki[1], Shintaro Komatsu[1], Takuya Iwahori[1], Masahiro Yoshikawa[1], Ayako Namigishi[1], Airi Nagaoka[1], Yasuto Tatsuyama[1], Akihiro Sawada[2], Ce Zhang[2], Mitsuteru Fukuoka[2], Yuya Jinde[2], Yuki Oshima[2], Momoka Kanazawa[3] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. University of Hyogo, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

10:10 AM - 10:25 AM JST | 1:10 AM - 1:25 AM UTC

[S22-03] Immediate aftershocks following the 2023 M6.5 earthquake in the Noto Peninsula, central Japan: Implication of fault valve model

*Aitaro KATO[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

10:25 AM - 10:40 AM JST | 1:25 AM - 1:40 AM UTC

[S22-04] Recent seismic activity in Noto region of Ishikawa Prefecture, including the M6.5 earthquake on May 5, 2023.

*Kazuhiro IWAKIRI[1], Issei SUGANUMA[1], Masahiko NODA[1], Kazuki MIYAOKA[1], Minoru FUNAKOSHI[1], Kana AKIYAMA[1], Nobuyuki HIROTA[1], Shigeki AOKI[1] (1. Japan Meteorological Agency)

[Invited]Central Japan as a cold subduction zone and its implications for deep dehydration of subducted slab beneath the Noto peninsula

*Hikaru Iwamori[1], Hitomi Nakamura[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

The Japan arcs consist of several arc segments accompanied by two subducting slabs (the Pacific and the Philippine Sea slabs), with different subduction materials/parameters and physicochemical conditions of the mantle wedge beneath the arc segments. The geochemistry of lava reflects these differences and conditions. Based on the five isotopic ratios ($^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{143}Nd/^{144}Nd$, $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{208}Pb/^{204}Pb$) of 747 basaltic lavas over the Japan arcs (including Kuril, NE Japan, Central Japan, SW Japan, Ryukyu, Izu-Bonin arcs), five geochemical clusters have been identified using the whitened data-based k-means cluster analysis, a type of unsupervised machine learning approach (Iwamori and Nakamura, under review). The five clusters show geographical provenance, as well as correlations with the trace element concentrations and ratios. By combining the isotopic and trace element data, the mass balance and melting model provided constraints on the following points: the intrinsic composition of the mantle wedge, the amount and distribution of slab-derived fluid, degree of melting, and the depth extent of melting. Within this context, the Central Japan arc is characterized by a large amount of added fluid (>1 %) and a few percent of melting of spinel-garnet peridotite, suggesting a low potential temperature of the mantle wedge. Such a fluid-rich low-temperature condition was proposed also by the numerical simulation (Iwamori, 2000) and the petrological study (Nakamura and Iwamori, 2013), and indicates a significant deepening of dehydration of the subducting Pacific slab, compared to the other arc segments. This deepening of slab dehydration may explain the remarkable bend of the volcanic front around Asama Volcano and the volcanic zone towards the back-arc area below which the Pacific slab surface is deeper than 250 km. Such deep dehydration can supply a significant amount of fluid to the non-volcanic back-arc area such as the Noto peninsula, possibly causing the earthquake swarm and the crustal uplift in the peninsula since December 2020 (Iwamori and Nakamura, under review). The fluid flux calculated based on the numerical simulation (Iwamori, 2000) suggests that a fluid accumulation for 2000 to 3000 years accounts for the volume of crustal uplift since 2020 estimated by the geodetic study (Nishimura et al., 2022). When combined with the on-going regional compressional field that has lasted for at least 3 million years (Okamura, 2007), more than 100 m uplift is expected and could have contributed to formation of the Noto Peninsula itself.

Iwamori, H. (2000) Deep subduction of H_2O and deection of volcanic chain towards back-arc near triple junction due to lower temperature. Earth and Planetary Science Letters 181, 41–46.
Iwamori, H., Nakamura, H. (under review) Bend of volcanic front around Asama Volcano and deep dehydration beneath the Noto peninsula: constraints from regional magma geochemistry. In: Aramaki, S., Takahashi, M., Takeo, M., Yasui, M., Aoki,Y. (eds), Asama Volcano –Portrait of the most active and hazardous andesitic volcano near the Tokyo metropolitan area. Springer, Berlin, Heidelberg.
Nakamura, H., Iwamori, H. (2013) Generation of adakites in a cold subduction zone due to double subducting plates. Contrib. Mineral. Petrol., 165, 1107–1134.
Nishimura, T., Hiramatsu, Y., Ohta, Y. (2022) Earthquake swarms and crustal deformation in the Noto peninsula since around December 2020. Earthquake J. 74, 1-9 (in Japanese).
Okamura, N. (2007) The relationship between earthquakes and geological structures around the Noto peninsula. AFRC News (Active Fault Research Center News, Geological Survey of Japan, AIST), 66, 1-3 (in Japanese).

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Subsurface resistivity structure and its heterogeneity around the earthquake swarm region in the Northeastern Noto Peninsula

*Ryokei YOSHIMURA[1], Yoshihiro Hiramatsu[2], Tada-nori Goto[3], Takafumi Kasaya[4], Rintaro Miyamachi[1], Jun Nakagawa[1], Nagi Yamashita[3], Rei Amano[3], Masato Fukata[2], Amane Sugii[2], Taisei Inui[1], Ken'ichi Yamazaki[1], Shintaro Komatsu[1], Takuya Iwahori[1], Masahiro Yoshikawa[1], Ayako Namigishi[1], Airi Nagaoka[1], Yasuto Tatsuyama[1], Akihiro Sawada[2], Ce Zhang[2], Mitsuteru Fukuoka[2], Yuya Jinde[2], Yuki Oshima[2], Momoka Kanazawa[3]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. University of Hyogo, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

石川県珠洲市付近では、2020年末より群発的地震活動と局所的な非定常地殻変動が継続している。この活動は、2018年6月頃に端を発し、2021年9月16日にはM5.1（最大震度5弱）、2022年6月19日にはM5.4（最大震度6弱）、2023年5月5日にはM6.5（最大震度6強）の地震が発生しており、現在もその活動は収束を見せていない。
我々は電気物性の視点で、この群発活動がどのような場で発生しているのか、また、2007年能登半島地震の発生域と不均質性のスケールに違いがあるか否かを解明するために、地下比抵抗構造調査を実施している。2021年11月－12月および2022年3月－4月に取得した陸上計32か所、2022年11月－2023年2月に取得した陸上23か所、計55か所の広帯域電磁場データから推定された地下比抵抗構造では、一連の地震活動が開始した南側のクラスタの深部から現在最も活動が活発な北側のクラスタにかけて連続する低比抵抗領域が存在することが明らかになった。さらに、群発的地震活動はこの低比抵抗領域の外縁部に位置していることなどから、この活動への流体の関与を強く示唆する結果を得た。
本発表では、この地域で推定された地下比抵抗構造を詳報するとともに、2023年5月5日に発生したM6.5の地震のすべり域周辺の不均質性を紹介する。また、2022年9月－10月に実施した海域3か所、2023年8月から実施している海域2か所、2023年4月から実施している陸域2か所の補充観測データも考慮し、推定された構造の確度についても議論したい。

© The Seismological Society of Japan

Immediate aftershocks following the 2023 M6.5 earthquake in the Noto Peninsula, central Japan: Implication of fault valve model

*Aitaro KATO[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

2023年5月5日14 時 42 分に石川県能登地方の深さ約12 kmでマグニチュード(M)6.5の地震が発生した。この地震の発生後から18日間の連続地震波形データに対して，PhaseNet（Zhu and Beroza, 2019）を適用することでP波とS波の時系列データを作成し，グリッドサーチに基づいて地震イベントを認定（Zhang et al., 2019）した。検出された地震に対して，波形相関法を用いて相対走時差データを抽出し，相対震源決定法（Zhang and Thurber, 2003）を適用した。同様な解析を2022年6月19日に発生したM5.4の地震後の18日間の連続データにも実施することで，計7006個の地震の震源を再決定した。2023年M6.5の地震にともなう活発な地震活動は，東西約15 ㎞，南北約15 ㎞の領域内で発生した。震源の深さ断面図を見ると，南東に約45度で傾斜する震源の並びが確認でき，発震機構解の一つの節面と調和しており，今回の地震は南東傾斜の断層面上で発生したことが分かる。21時58分に発生したM5.9の地震も同様に南東傾斜の断層面で発生したが，M6.5の断層面よりも少し深い場所で生じた。また，今回の震源断層の深部は，2022年M5.4の震源断層と一部重なっているものの，棲み分けており，2022年M5.4の断層とは別の断層が活動したものと考えられる。今回の活動域は，これまでの活動域と比べて北西側の海域，つまり浅部に広がった点が特徴である。M6.5の地震発生前後の連続波形データに対して，再決定震源を用いたテンプレートマッチング法を適用したところ，M6.5の地震発生直後の約15分間に，地震活動域が断層浅部へ徐々に拡大する様子を捉えた。Nishimura et al. (2023)により一連の群発地震活動には地殻流体の関与が指摘されており，M6.5の地震直後の地震活動域の拡大は，破壊後の断層面に沿う流体移動を示唆しているかもしれない（断層バルブモデル; Sibson, 2009）。

© The Seismological Society of Japan

Recent seismic activity in Noto region of Ishikawa Prefecture, including the M6.5 earthquake on May 5, 2023.

*Kazuhiro IWAKIRI[1], Issei SUGANUMA[1], Masahiko NODA[1], Kazuki MIYAOKA[1], Minoru FUNAKOSHI[1], Kana AKIYAMA[1], Nobuyuki HIROTA[1], Shigeki AOKI[1]

1. Japan Meteorological Agency

はじめに

石川県能登地方では、2018年頃から地震回数が増加傾向にあり、2020年12月から2023年8月7日までに震度1以上を観測する地震が464回発生する等、活発な地震活動が長期間継続している。特に2023年5月5日に能登半島沖で発生したM6.5の地震（最大震度6強、10cm等の津波を観測）では大きな被害を生じた。本発表では、これらの一連の地震活動の時空間分布の詳細や地震活動モデルを用いた解析結果等を報告する。

方法・データ

地震活動の詳細把握にはDD法による再決定震源、発震機構を用い、また、M6.5の地震については強震波形を用いた震源インバージョン解析を行った。地震活動モデル解析では、定常ETAS解析による地震発生時系列の推定や、非定常ETAS解析（Kumazawa and Ogata, 2013）により推定した背景地震活動度$\mu(t)$及び余震誘発強度$K_0(t)$と国土地理院GNSS観測データ（珠洲、能都）等との比較を行った。また、M6.5とその後の地震を本震－余震系列とみなして地震調査委員会（2016）に基づいた余震発生確率（震度5弱程度以上、3日間）を算出した。

結果・考察

１．2018年から2023年5月5日M6.5発生前までの地震活動

当該期間における地震活動は、震央分布でみると概ね4領域に分かれている（以下、各領域を東西南北で呼ぶ）。活動は、2018年頃から南領域の深さ13km付近で始まり、深さ8㎞付近まで徐々に浅くなった。その後、2020年11月末に、急に深さ15㎞付近へ主な活動域が移動して活動が活発化するとともに、$\mu(t)$が高くなり始め、地殻変動の隆起及び水平移動が始まった。

その後、2021年7月頃にかけて、西、北、東の各領域の深さ13km付近で順に活発化し、同年後半からM6.5発生までの地震回数は、ほぼ一定レートで推移した。また、これら3領域では2021年末頃まで徐々に1～2㎞程度浅部に拡大した。この浅部への拡大期である2021年初め頃から後半にかけては、$\mu(t)$が西、北、東領域の順に上昇し、珠洲の隆起が継続した。一方、南領域は、2021年10月頃に再び浅部へ急拡大した後、2022年2月頃以降は主に浅部で活動した。このように南領域の活動は、深さ方向の移動が大きく、時間的にも消長がある等断続的であり、他の3領域とは活動推移が異なる。

各領域内での震源分布は1枚の面上ではなく、主に南東傾斜の複数の線状や面状のクラスターから構成されている。発震機構は活動の全期間を通じて北西－南東方向に圧力軸を持つ逆断層型が多く、各クラスターの南東傾斜の分布と調和的な節面を持つ。

ETAS解析のα値は、南領域以外で1.0程度、南領域で0.2程度であり、地震調査委員会（2016）による主な本震－余震型の活動と比べると小さく、群発的な活動の傾向を示す。

２．2023年5月5日M6.5発生後の地震活動

2023年5月5日にM6.5の地震が東領域の深さ12kmで発生した後は、東、北、南領域の活動は一時的に更に活発化した。特に東、北領域の活動は、M6.5発生前の南東傾斜の活動の浅部延長である沖合に拡大した。沖合には珠洲沖セグメントの活断層（産総研活断層データベースによる）の存在が指摘されているが、これら活動の浅部延長と活断層トレースの位置は一致していないように見える。震源インバージョン解析によると、M6.5の主なすべり域は東、北領域の浅部側に分布する。

M6.5発生後の日別の地震回数（M1.6以上）は、時間の経過とともに減少し、翌々月（7月）には概ね

© The Seismological Society of Japan

M6.5発生前の状況に戻った。余震発生確率で見た場合、M6.5の発生後2週間経過時点では、M6.5発生前（2021年7月以降についてポアソン過程で計算）に比べて5倍程度あったが、翌月（6月）下旬には同程度に低下した。

非定常ETAS解析では、M6.5の発生に伴い、北、東領域では$K_0(t)$の上昇は一時的であったものの、$\mu(t)$は高い状態が地震前後で継続している（2023年7月末時点）。今回の一連の活動について、地震調査委員会（2023）は、流体の移動が関与している可能性を指摘している。$\mu(t)$が流体による断層強度の弱化や回復等の過程を示すと考えれば、M6.5の大地震の後も$\mu(t)$が高い状態であることは、M6.5の後の活動についても、引き続き流体が関与している可能性を示唆している。

謝辞

一元化震源（2022年10月7日からは能登半島における合同地震観測グループによるオンライン臨時観測点「よしが浦温泉」、「飯田小学校」のデータを追加）を使用しました。国土地理院より提供いただいたGNSS観測データを使用しました。熊澤貴雄博士より提供いただいた非定常ETAS解析プログラムを使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Room D | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

Tue. Oct 31, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room D F204

[S22] AM-2

chairperson:Kimuyuki Asano, Masatoshi Miyazawa

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

[S22-05] Temporal variations of the shear wave polarization anisotropy around the source area of the swarm earthquakes in the Noto peninsula

*Osamu MURAKAMI[1] (1. JAEA, Tono Geoscience Center)

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

[S22-06] Fault slip distribution due to Mw 6.2 Earthquake at Noto peninsula on 5 May 2023 based on InSAR analysis

*Yohei Kinoshita[1] (1. University of Tsukuba)

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

[S22-07] Strong ground motion associated with seismic swarms at Noto Peninsula recorded by Distributed Acoustic Sensing (DAS) technique

*Masatoshi MIYAZAWA[1], Eiichiro ARAKI[2], Yoshiyuki TANAKA[3] (1. Kyoto Univ., 2. JAMSTEC, 3. Univ. of Tokyo)

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

[S22-08] Source rupture process of the M6.5 earthquake in the Noto Peninsula on May 5, 2023, estimated from strong motion records

*Kimiyuki ASANO[1], Tomotaka IWATA[1] (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S22-09] Source Processes of the May 2023 Off Noto Peninsula Earthquake and These Strong Ground Motions

*Kazuhito HIKIMA[1], Tomiichi UETAKE[1] (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. Tepco Research Institute)

Temporal variations of the shear wave polarization anisotropy around the source area of the swarm earthquakes in the Noto peninsula

*Osamu MURAKAMI[1]

1. JAEA, Tono Geoscience Center

2018年5月頃から，能登半島北東部において地震活動が増加傾向にあり，2020年12月以降，群発地震活動はさらに活発化し，群発地震活動は現在でも続いている（cf., Amezawa et al., 2023）．これまでに観測されてきた群発地震としては，1965年から数年にわたって長野県の松代で発生した松代群発地震がよく知られている．松代群発地震の際には，地下水の湧出や温泉井戸の自噴が観測され，群発地震活動には地殻流体が大きく影響することが示唆されていた．松代の群発地震活動に比べると，能登半島北東部で観測されている群発地震の震源の深さは深く，10km程度以上であるという深さの違いはあるものの，能登半島の群発地震においても地殻流体の挙動が大きく影響していることが想定される．地殻流体の流路の推定は，地質環境長期安定性評価の技術開発にも不可欠であることから，本研究では，地殻流体の流路の推定を最終的な目標としつつ，地殻流体の影響を評価するために，能登半島群発地震の震源域の常設地震観測点で観測された地震波形データを用いたS波スプリッティング解析を行った． 本研究でのS波スプリッティング解析においては，2004年4月1日から2023年5月4日までに能登半島北東部で発生したMj1.0以上の地震を用いた．使用した観測点は，能登半島北東部に位置するHi-netとJMAによる高感度地震観測点である．解析には，Silver and Chan (1991)による共分散行列法をベースとしたSaiga et al. (2013)による半自動化された解析手法を用いた．その結果，能登半島北岸付近に位置する観測点N.SUZHでの速いS波の偏向方向は，おおよそ北東-南西方向が卓越している一方，能登半島北東部の東岸付近に位置する観測点SUZHでの速いS波の偏向方向は，北西-南東方向が卓越していた． 能登半島での群発地震は，空間的に主に4つのクラスターから構成されていることを考慮し，これら2観測点で推定された速いS波の偏向方向についてクラスター別に分け，さらにNishimura et al. (2023)による期間分けにならい，いくつかの期間に分けることで，クラスター別期間別に速いS波の偏向方向を分類した．速いS波の偏向方向の時間変動を調べるために，観測点ごとクラスターごとに，期間別の速いS波の偏向方向の平均方向が等しいという帰無仮説を有意水準5%で棄却できるかどうかを，Tukeyの多重比較検定法により検定した．観測点N.SUZHについては，南部のクラスター（クラスターS）と北東部のクラスター（クラスターNE）では，どの期間の組み合わせについても帰無仮説は棄却されなかったが，北部のクラスター（クラスターN）では，一部の期間の組み合わせについて帰無仮説が棄却された．なお，西部のクラスター（クラスターW）については，S波スプリッティング解析の適用条件である入射角35未満を満たす波線経路がごくわずかしか存在しなかったため，時間変動の検定は行えなかった．観測点SUZHについては，クラスターSとクラスターNEでは，どの期間の組み合わせについても帰無仮説は棄却されず，クラスターWとクラスターNについては，利用可能な波線経路の数が少なかったため時間変動の検定を行わなかった．一部のクラスターについてのみであるが，期間別の平均方向が等しいという帰無仮説が棄却されたということは，能登半島北東部の群発地震の活動期間中に，速いS波の偏向方向が時間的に変動していた可能性が示唆される．地殻流体が群発地震活動に影響しているとすれば，速いS波の偏向方向の時間変動は，地殻内における間隙流体圧の変動を表しているのかもしれない． 謝辞: 本研究では，防災科学技術研究所 Hi-netならびに気象庁地震・津波検知網の地震波形データを使用させていただきました．また，本研究は，経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（JPJ007597）（地質環境長期安定性総合評価技術開発)」の成果の一部である．

© The Seismological Society of Japan

Fault slip distribution due to Mw 6.2 Earthquake at Noto peninsula on 5 May 2023 based on InSAR analysis

*Yohei Kinoshita[1]

1. University of Tsukuba

能登半島北東部において、2020年末頃より地震活動が活発化している。同時期からGNSSにより継続的な地殻変動も観測されており、地震活動活発化や地殻変動の原因およびその後の地震活動の推移について注目されている。このような状況の中、2023年5月5日に気象庁マグニチュード（M）6.5の地震が能登半島北東部の海岸線付近を震源として発生し、最大震度6強を記録した。この地震による地殻変動がGNSSおよびInSARにより検出されており、国土地理院の速報ではALOS-2によって珠洲市北部にて最大隆起約20cm、西向き変位が最大約10cm検出されている。本研究ではこれまでの地震活動活発化や継続的地殻変動とM6.5の地震との関係を明らかにすべく、InSAR解析を用いてM6.5の地震時に生じた断層すべりを推定したので、その結果について報告する。
InSAR解析において、本研究では継続的地殻変動に対してはSentinel-1データを、Mw6.2地震時の地殻変動に対してはALOS-2データを用いた。解析ソフトにはSentinel-1にはISCE ver.2、ALOS-2にはRINC ver.0.45を用いている。継続的地殻変動に対してはGNSSベースの中性大気補正を適用した後にLiCSBASによる時系列解析を行い、2.5次元解析によって準東西および準上下変位に変換した。M6.5地震に対してはGNSS精密軌道歴データが得られないことから大気補正手法を変更し、気象庁MSMモデルによる中性大気補正を適用、またALOS-2はL-band SARで電離層の影響が大きいことからSplit Spectrum Methodによる補正を適用している。Sentinel-1時系列解析により、2020年末から2023年4月頃にかけて、年間1~2cm/year程度の視線方向変位が能登半島北東部の陸域で検出された。2.5次元解析からは変位は主に隆起パターンを示しており、Bayesian Inversionによるモデリングの結果は、矩形断層のすべりや開口よりも球状圧力源の膨張の方がInSAR観測変位をよく説明できた。ALOS-2による地震時地殻変動の検出結果からは、国土地理院の報告と同様の変位を検出できている。なおInSARでは検出困難な変位の南北成分を検出すべくMultiple Aperture Interferometry解析も行なったものの、南北変位については有意なシグナルは検出できなかった。
M6.5地震による断層すべりモデリングにおいて、断層面の幾何情報については、2023/05/12公表の地震調査研究推進本部地震調査委員会の評価資料にある震源再決定分布を元に珠洲沖断層北部の伏在断層を仮定した。ALOS-2で得られた地殻変動分布を元に、Bayesian Inversionによるすべり分布推定を行なった。モデリングの結果、逆断層型で深さ約6kmに最大すべり量約144cmのすべりが推定された。すべりの大部分は深さ10km以浅に集中しており、地震波解析による震源の深さが約12kmであったことから、このM6.5地震は破壊開始後は浅部に向かって破壊が進行していたことが示唆される。今回InSARを用いて推定されたモーメントマグニチュードは6.38となり、気象庁の推定によるCMT解のMw6.2に対し大きい値となった。

本研究はJSPS科研費JP23K17482Aの助成を受けたものです。

© The Seismological Society of Japan

Strong ground motion associated with seismic swarms at Noto Peninsula recorded by Distributed Acoustic Sensing (DAS) technique

*Masatoshi MIYAZAWA[1], Eiichiro ARAKI[2], Yoshiyuki TANAKA[3]

1. Kyoto Univ., 2. JAMSTEC, 3. Univ. of Tokyo

はじめに

能登半島北東部では2020年末頃から地震活動の活発化が始まり、2023年8月現在でも一連の群発地震活動が続いている。2022年6月19日にはM5.4地震（最大震度６弱）、2023年5月5日にはM6.5地震（最大震度６強）が発生するなど、被害をもたらす地震も起きている。この様な活発な地震活動に伴う現象を詳細に調査する目的で、2023年1月から約２か月間、群発地震活動域の南西に位置する領域において、分布型音響センシング(Distributed Acoustic Sensing; DAS)技術によるひずみ測定を実施した（田中ほか, 2023）。DASでは光ファイバケーブル沿いに、ひずみ速度を計測することができる。ここで利用された光ファイバケーブルは、能登町から珠洲市にかけてのNTT西日本の保有する約28kmの地中・架空のケーブルであった。この観測中には数多くの地震が発生し、その地震動を地中区間は勿論のこと、架線区間であっても明瞭に捉える事に成功した。一方で、DAS測定において避けることのできないサイクルスキップの問題が顕著に現れ、大きな振幅値は振り切れてしまい、有感地震観測への対策が課題となった。このため2023年７月からサイクルスキップを回避し、群発地震活動を捉えるための観測実験を実施した。

観測の概要と結果

2023年7月12日に石川県能登町にあるNTT西日本の能都ビルに、ニューブレクス社製NBX-S4100を設置し、７週間の予定で測定を開始した。光ファイバケーブルは、能都ビルから珠洲市のNTT西日本珠洲までの約28kmの区間であり、光ケーブルのジオメトリは１月から３月にかけて実施したものと同一である。このうち、地中区間は光ケーブル始点からの約6kmと、終点までの約2kmである。他の約20kmの区間は架空である。前回（2023年1月～3月）の測定ではゲージ長5m、空間サンプリング5m、時間サンプリング500spsとしており、約30$\mu\varepsilon$/s以上のひずみ速度でサイクルスキップが生じ、振り切れてしまっていた。有感地震をDASで振り切れず捉えるために、今回の測定では、ゲージ長40cm、空間サンプリング2mまたは5m、時間サンプリングを1000spsとする事で、原理的に約800$\mu\varepsilon$/sのひずみ速度まで測定できるものとした。チャネル数は、空間サンプリングが2mの時は13,637、5mの時は5,682である。7月30日には深さ約10kmでM3.2地震が発生し、光ケーブルの終点から東に2km程の珠洲市正院町ではこの地震の最大震度となる３を記録した。震央距離が3km程度のDASによる終点近くの地中区間では、殆どのチャネルで振幅が数100$\mu\varepsilon$/sを超えても振り切れずに地震波を記録することに成功した。この近傍の廃線トンネル（のと鉄道春日トンネル）ではトンネル壁面を光ファイバひずみ計で測定している（荒木ほか, 2023）が、DASによるひずみの振幅値はこれと比べても整合的であった。一方で、DAS測定では非線形性の強い波形も観測されていた。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP21H05204, JP22H05306, JP22K19949, JP23K17482、および「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の助成を受けた。

参考文献

・荒木 英一郎、宮澤 理稔、田中 愛幸、横引 貴史 (2023). 石川県珠洲市トンネル内の光ファイバ歪・地震計およびDAS観測記録の比較, STT42-P04, JpGU 2023.
・田中 愛幸、宮澤 理稔、荒木 英一郎 (2023). 光ファイバーケーブルを用いた能登半島群発地震のDAS観測, STT42-01, JpGU 2023.

© The Seismological Society of Japan

Source rupture process of the M6.5 earthquake in the Noto Peninsula on May 5, 2023, estimated from strong motion records

*Kimiyuki ASANO[1], Tomotaka IWATA[1]

1. DPRI, Kyoto University

2020年12月以降、能登半島北東部で継続している群発地震活動では、2022年6月19日15時8分にM_{JMA}5.4の地震が発生し、K-NET ISK002（珠洲市正院町）で震度6弱の強震動が観測され、珠洲市内では地震被害が報告されている（大堀・村田, 2023）。その約10.5ヶ月後の2023年5月5日14時42分に、一連の群発地震活動の中で最大規模（予稿執筆時点）であるM_{JMA}6.5の地震が深さ12.1 kmで発生した（以下、本地震）。
本研究では、本地震の震源過程を強震記録の波形インバージョンにより推定し、群発地震活動や地殻構造、既知の活断層との関係などを調査した。マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン（Hartzell and Heaton, 1983）を用い、強震記録の速度波形（0.05～1 Hz）S波部分を解析した。各強震観測点のGreen関数は、全国一次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）から各観測点直下の構造を抽出し、観測点毎に一次元構造を仮定した上で、離散化波数法（Bouchon, 1981）と透過・反射係数行列（Kennett and Kerry, 1979）を用いて計算した。本地震に対しては、各機関から報告されているモーメントテンソル解から得られる断層面の走向、傾斜に差異がある。このため、走向4通り（43˚、49˚、55˚、61˚）、傾斜6通り（35˚、40˚、45˚、50˚、55˚、60˚）の計24通りの断層形状を考え、最適な走向と傾斜の組み合わせを、第1タイムウィンドウフロント破壊伝播速度と平滑化のハイパーパラメータと同時にABIC最小規準で決定した。逆断層のメカニズム解から、すべり方向は、90˚±45˚の範囲に拘束した。
解析の結果、最適な走向は49˚、傾斜は40˚と推定された。この傾斜は本地震以降の震源分布とも調和的である。5月5日14時42分の地震以前の群発地震活動は、主に深さ10～15 kmで発生していた。一方、本地震の主要なすべりは、破壊開始点の北西の深さ5～10 kmに求められた。それ以前に顕著な群発地震活動が生じていなかった深さにある断層を破壊しており、地震活動が新たな段階に移ったともいえる。2022年6月19日のM_{JMA}5.4の地震の震源付近（深さ13.1 km）でのすべり量は小さい。また、2023年5月5日21時58分に発生したM_{JMA}5.9の地震の震源（深さ13.7 km）は、14時42分の地震の断層面より約5 km深いので、同じ震源断層にはないと考えている。
日本海地震・津波調査プロジェクト（佐藤・他, 2022）では、海域での反射法地震探査結果等をもとに、珠洲沖セグメントに対応する震源断層の矩形モデル（NT5）が提案された。NT5断層の走向は52˚、傾斜は60˚である。本地震の震源断層は、NT5断層の西半部と地図上で重なり、走向が似ているものの、傾斜は整合していない。本研究で推定した断層面は、NT5断層よりも傾斜が低角のため、海底での珠洲沖セグメントのトレースよりも沖合まで拡がっている。この傾向は2023年5月5日以降の地震分布とも整合している。これらの結果からは、本地震の震源断層の浅部延長は珠洲沖セグメントへ直接には繋がらず、本地震と既存の活構造との関係は現時点では不明である。
謝辞：国立研究開発法人防災科学技術研究所（K-NET、KiK-net、F-net）及び気象庁の強震波形記録を使用しました。関係者の皆様に記して感謝いたします。本研究は、科学研究費助成事業・特別研究促進費23K17482の一部として実施しています。

© The Seismological Society of Japan

Source Processes of the May 2023 Off Noto Peninsula Earthquake and These Strong Ground Motions

*Kazuhito HIKIMA[1], Tomiichi UETAKE[1]

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

【はじめに】

2023年5月5日14時42分に石川県の能登半島沖でMj6.5の地震が発生した．この地震では最大震度6強の強震動を観測した．また，同日の21:58には同じ領域でMj5.9の地震(最大余震)が発生し，この地震でも最大震度5強を観測している．これらの地震の発震機構は北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で，地殻内で発生した地震である(気象庁，地震調査委員会,2023)．能登地方では2020年12月から活発な地震活動継続しており，5月の地震についても一連の地震活動との関連から注目される．

また，震源域の多くは海域にあるものの一部は陸域にかかっており，震源近傍での強震記録も取得されている．さらに，本震と最大余震では，地震規模の違いがあるにもかかわらず，短周期成分での地震動レベルが同程度である地点も見られ，震源での短周期地震動の生成を考える上でも興味深い．そこで，我々はこれらの地震の発生メカニズムや強震動生成要因を考えるために，近地強震波形を用いた震源過程解析を行った．

【震源過程解析】

解析の際の断層面の設定に当たっては，気象庁一元化震源による本震，余震の情報を参考にした．断層面の基準は本震，最大余震の一元化震源情報を用い，余震分布やF-netによるメカニズム解を参考にして仮の断層面を設定した上で予備的解析を行い，観測波形と合成波形との残差や得られたすべり分布などを考慮して面を設定した．暫定解として，本震は走向:51°，傾斜:55°の長さ15 km，幅14 kmの矩形断層とし，最大余震は走向:54°，傾斜:47°の長さ7 km，幅5 kmの矩形断層としている．なお，小断層サイズは1 km×1 km とした．

震源域が能登半島北端の沖合にあるため，解析に用いる観測点として震源を取り囲むような配置を取ることが難しい．そのため，能登半島にあるKiK-net，K-NETの観測点をできるだけ多く解析に用いることとした．さらに，観測点配置も考慮して，富山県～新潟県南部の観測点も使用したが，震央距離が大きくまた平野部に位置する観測点も含まれるため，観測点の吟味が必要かもしれない．暫定解では16観測点の波形を使用している．

観測された加速度波形に，KiK-net観測点(地中記録)には0.05～0.8 Hz，K-NET観測点には0.05～0.5 Hzをフラットレベルとするバンドパスフィルタをかけた上で積分した速度波形を解析に用いた．また，試算として，0.3 Hz程度を境として，低周波数側の波形と高周波数側の波形に分離した上でそれらを同時にインバージョンに用いる解析も行った．この目的は，低周波数波形で震源の大局的なすべりを再現した上で，高周波数波形でより詳細な震源像が得られることを期待したものである．

Green関数の計算はKohketsu(1985)のreflectivity法により行った．計算に必要な1次元速度構造モデルは，JIVSM(Koketsu et al., 2012)による各観測点直下の層構成を初期モデルとした上で，震源域で発生した小地震の波形を用いてチューニングを行い使用した．

インバージョンはマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al., 1996; Hikima and Koketsu, 2005)により行った．Green関数のライズタイムは0.5 sとし，各小断層のタイムウィンドウは6ないし4個のライズタイムで表現した．

【解析結果】

暫定的な解析結果(Fig.1)では，本震，最大余震ともに南東に傾斜するほぼ並行する断層面となっている．本震の地震モーメントは2.7×10^{18} Nm (Mw 6.2)，最大余震の地震モーメントは$M_0=3.9\times10^{17}$ Nm (Mw 5.7)と求まり，これらはF-netによる値とほぼ同じである．本震では，震源の北側浅部に最大すべり約1.4 mの大すべり域が求まった．最大余震は震源付近に約0.7 mの最大すべりが推定された．

波形記録を用いたインバージョンでは高周波数成分の生成に寄与する震源像を直接推定することは難しい

© The Seismological Society of Japan

が，今回推定されたすべりの時空間分布を考慮して，本震・最大余震の強震動生成要因についても検討する予定である．

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

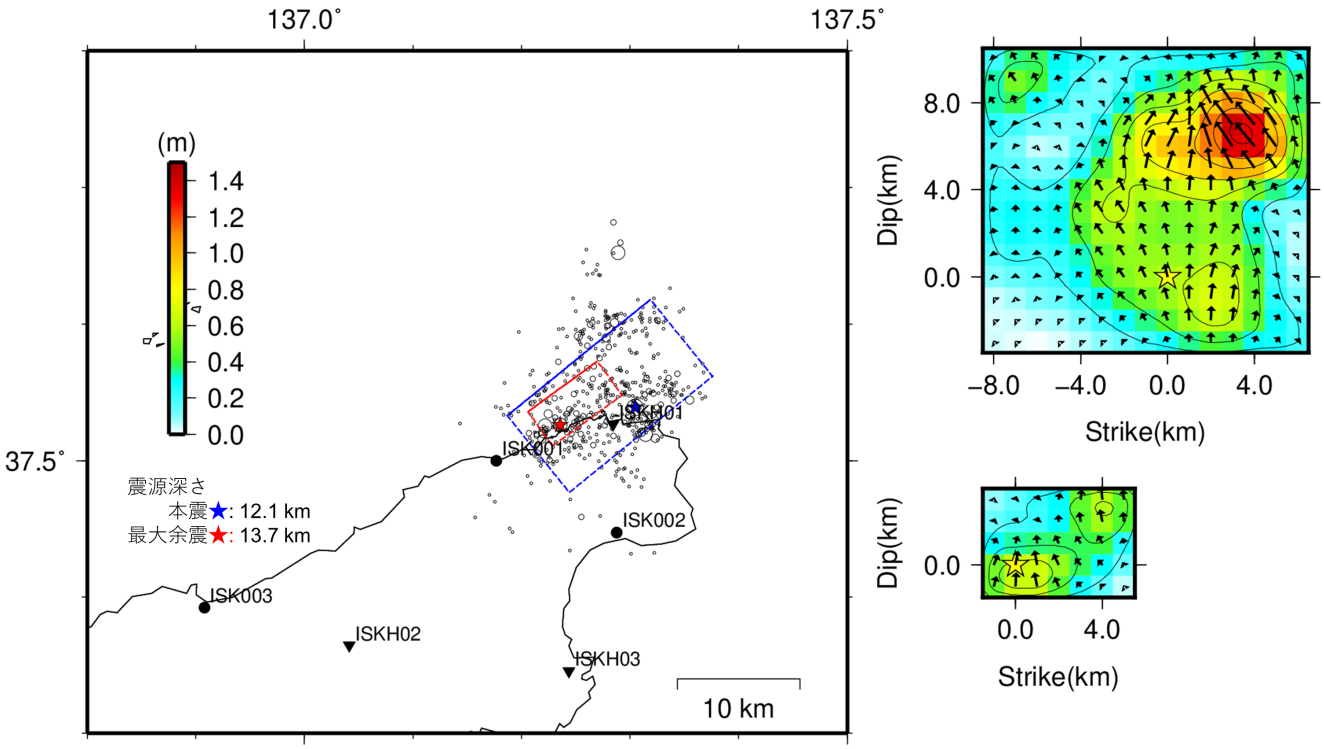


Fig.1　左：本震の断層面(青)と最大余震の断層面(赤)の地表投影図．○は本震後2週間以内のM2以上の震央(JMAによる)．右：断層上のすべり分布（右上：本震，右下：最大余震）

© The Seismological Society of Japan

Room D | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

Tue. Oct 31, 2023 1:30 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room D F204

[S22] PM-1

chairperson:Tomotaka Iwata, Michihiro Ohori

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

[S22-10] Ground motion characteristics and underground velocity structure at K-NET Shoin station

*Tomotaka IWATA[1], Kimiyuki Asano[1], Takeshi Miyamoto[2] (1. Disaster Prevntion Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University)

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

[S22-11] Ground Motion Records of Temporary Observation Stations in Suzu City for the May 5, 2023 Noto Earthquake (M6.5)

*Michihiro OHORI[1], Haruhiko SUZUKI[2], Tomotaka IWATA[3], Kimiyuki ASANO[3], Osamu ISHITUKA[2], Akira MURATA[4] (1. School of Environmental Science, University of Shiga Prefecture, 2. OYO Corporation, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Institute of Science and Engineering, Kanazawa University)

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

[S22-12] Results of microtremor observation in the Shoin district, Suzu-shi, Ishikawa, Japan.

*Shoji Arata[1], Akira Murata[2], Michihiro Ohori[3] (1. School of Geosciences and Civil Engineering,Kanazawa University, 2. Faculty of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University, 3. Shcool of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture)

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

[S22-13] Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake

*Yusuke Kitagawa[1], Akira Murata[1], Hiromi Sato[2], Tatsuru Suda[2] (1. Kanazawa University, 2. Kanazawa Institute University)

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

[S22-14] Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake
Part 3 Detailed structural investigation

*Takuma Chikatani[1], Hiromi Sato[1], Tatsuru Suda[1], Akira Murata[2] (1. Kanazawa Institute of Technology, 2. Kanazawa University)

Ground motion characteristics and underground velocity structure at K-NET Shoin station

*Tomotaka IWATA[1], Kimiyuki Asano[1], Takeshi Miyamoto[2]

1. Disaster Prevntion Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University

2020年末から活発な地震活動が継続している能登半島北東部において，K-NET正院観測点（ISK002）では，規模の大きい2022年6月19日M5.4，2023年5月5日M6.5の地震時にそれぞれ震度６弱，６強を観測し，特に後者においては，観測点周辺域で全壊家屋30棟などの建物被害が生じた．M5.4の地震時のK-NET正院の記録には周期約１秒の卓越が見られたため，先行研究（岩田・他，2022及び2023）では当該地域で微動アレイ探査を実施し，浅部地盤構造がこの地震動増幅に寄与したことを示した．ここではK-NET正院のM6.5の記録の解析を行い，浅部地盤構造や震源特性（例えば，浅野・他，2023）の影響を議論する．
珠洲市の平野部では1993年能登半島沖地震(M6.6)においても構造物被害が発生した．土質工学会・1993年地震災害調査委員会(1993)では，単点微動調査による地盤の卓越周期を評価し，沖積層厚（浅部地盤構造）との関係や被害との関係が議論された．岩田・他(2022, 2023)では，浅部地盤構造をより正確に知るため，K-NET正院において半径0.6m～約300mの複数アレイ観測を，臨時強震観測地点（大堀・村田，2023）やボーリング地点において工学的基盤面相当までの速度構造を得るための小アレイ観測を実施した．これらの結果や，ボーリングデータベースを参考にした対象地域の浅部地盤構造は以下のように特徴づけられた．
1)珠洲市南部の人口が多い地域において，工学的基盤面相当は珪藻泥岩層で，そのS波速度は0.6km/s程度と見積もられる．基盤面深度は10mから数10ｍとまちまちである．工学的基盤面以浅は砂，シルト，泥層で構成されており，ここのS波速度も，場所によって違うため，結果的に浅部地盤の卓越周期にはバラツキがある．
2)工学的基盤面のS波速度が速いことから，ここでの速度コントラストが大きめで，結果として，浅部地盤による卓越周期が増幅される特徴がある．
3)K-NET正院の観測記録にみられる1秒程度の卓越周期はこの浅部地盤による増幅の影響が大きい．

謝辞
防災科学技術研究所K-NETの波形データ（https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004）を用いました．関係諸氏に感謝いたします．緒方無顕さんには微動アレイ観測で協力いただきました．記して感謝いたします．本研究は科学研究費補助金・特別研究促進費22K19949, 23K17482の一環として実施しました．

参考文献
浅野・他（2023）日本地震学会2023年秋季大会予稿集
岩田・他(2022) 日本地震学会2022年秋季大会予稿集 S16-04
岩田・他(2023) 京都大学防災研究所令和４年度研究発表講演会B309
大堀・村田(2023) 日本地球惑星科学連合2023年大会SSS09-07

© The Seismological Society of Japan

Ground Motion Records of Temporary Observation Stations in Suzu City for the May 5, 2023 Noto Earthquake (M6.5)

*Michihiro OHORI[1], Haruhiko SUZUKI[2], Tomotaka IWATA[3], Kimiyuki ASANO[3], Osamu ISHITUKA[2], Akira MURATA[4]

1. School of Environmental Science, University of Shiga Prefecture, 2. OYO Corporation, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

1. はじめに

2023年5月5日14時42分に能登半島北東部でM6.5の地震（以降，本震）が発生し，K-NET正院（ISK002）では最大震度となる震度6強を記録した．さらに21時58分にはM5.9 の地震（以降，余震）が発生し，ISK002では震度5強を記録した．これらの地震により，死者1名，重傷者2名，軽傷者42名の人的被害と，全壊18棟，半壊15棟，一部破損706棟の住家被害が生じた．このほか，鳥居・墓石・ブロック塀の転倒，斜面崩壊，水道管破裂，液状化による噴砂等も発生した．約1年前の2022年6月19日15時8分にも能登半島北東部でM5.4の地震が発生し，石川県珠洲市のISK002では震度6弱を記録した．昨年の地震では，犠牲者はなく重大な住家被害もなかったが，鳥居・墓石・ブロック塀等の転倒が注目された．本研究では，昨年の地震直後から実施している珠洲市内における臨時地震観測の概要と，本震および余震の地震動記録について報告する．

2. 臨時地震観測の概要および本震と余震の記録

筆者らは，昨年の地震の翌日に被害状況の概略調査を実施し，同年7月初めより墓石やブロック塀の被害が多数見られた正院地区を中心に臨時地震観測点を6点設置し，余震観測を実施している（大堀ほか，2023JPGU）．地震計はMcSEIS-AT(3ch)（応用地質製，以降，McSEIS）を用いた．6地点で同時観測できた地震は2023年3月末で10個（M3.5～M4.4）であった．記録を増やしたかったことと，地震活動が続いていたことから，4月以降も引き続き観測を継続したところ，5月5日に本震と余震が発生した．この時，臨時観測点は，ソーラーパネルとカーバッテリーを併用した2点（SNK，SIK）では欠測となったが，AC電源を利用した4点（KMN，KFK，NNE，KSG）では記録が得られた．ただし，本震では2点（KMN，KFK），余震では3点（KMN，KFK，NNE）の水平成分の観測値に数サンプル（サンプリング周波数は100Hz）の飽和が見られた．飽和した観測値はスプライン関数を用いて補正することで，飽和が生じなかった際の記録をほぼ復元できたと考えている． なお，臨時観測点における本震の計測震度相当値は，KMNが5.77， KFKが 5.68，NNE が5.61，KSGが5.65と算出され，ISK002の6.10に比べて小さい結果となった．余震の計測震度相当値は，KMNが5.38， KFKが 5.56，NNE が5.49，KSGが5.29と算出され，ISK002の5.45とほぼ対応する結果となった．KMNはISK002から約18mの距離に位置し，参照用に設置した観測点である．両地点の計測震度は余震ではほぼ同等であったが，本震では0.33の違いが見られた．これは波形振幅（計測震度の算出過程における修正加速度）では約3割の違いに相当する．ISK002 の加速度波形を積分した速度波形に対しても，KMNの速度波形は最大振幅で4割ほど小さい．KMNの波形振幅が小さい理由は，上述の記録が飽和した問題とは異なる地震計の特性によると推察される．

3. 記録の飽和に関する振動台実験

臨時観測点で得られた本震および余震の記録に飽和が見られたのは，McSEISのセンサー（速度計，固有周波数は約2Hz）からの電圧信号がロガーの電圧入力範囲±2.5Vを超えたために生じた．ここでは，McSEISの速度計とロガーのそれぞれの特性を把握するために振動台実験を行った．実験には，京都大学防災研究所の振動台（LING Dynamic Systems LTD製感震器較正装置）を用いた．振動台上に， McSEISの速度計とJEP-6A3（アカシ社製加速度計）を固定し，McSEISの速度計からの電圧信号をMcSEISのロガーおよびGL900-8（Graphtec社製，電圧入力範囲±5.0V）を用いて測定するとともに，加速度計からの電圧信号をGL900-8で測定した．加振条件は振動台の稼働域（両側振幅17.6mm）とMcSEISの飽和時の速度振幅（約12cm/s）を考慮し，10Hzの

© The Seismological Society of Japan

正弦波加振とした．McSEISのロガーへの電圧入力の上限を少し上回るように両振幅約4mmを最大として与え，振幅を段階的に低減するように加振した．加振方向は水平方向と上下方向のそれぞれについて実施した．水平方向の加振時にはセンサーの向きを90度回転させることで，水平2方向の特性評価を行った． その結果，McSEISの速度計に関してはいずれの方向においても約800cm/s^{2}に相当する揺れに対して正常な動作を示すことがわかった．一方，McSEISの速度出力は，振幅が約6cm/s を超えると感度が小さくなる傾向が認められ，水平動では約5%，上下動では約12%の低減していることがわかった．McSEISのロガーの特性について，今後，より低い周波数帯における検討を行い，本来の観測値の目安を示したいと考えている．

謝辞

本研究は科学研究費補助金・特別研究促進費22K19949，23K17482（代表：金沢大学・平松良浩教授）の一環として実施しました．その他，科研費基盤研究（20K04663，21K04585）の支援を頂きました．研究の一部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」の支援を頂きました．現地での観測では，珠洲市のみなさまより多大なご協力を頂きました．東京大学地震研究所三宅弘恵先生からは研究を進める上で多くのご助言とご支援を頂きました．記して感謝申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Results of microtremor observation in the Shoin district, Suzu-shi, Ishikawa, Japan.

*Shoji Arata[1], Akira Murata[2], Michihiro Ohori[3]

1. School of Geosciences and Civil Engineering,Kanazawa University, 2. Faculty of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University, 3. Shcool of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture

令和5年5月5日に発生した能登半島沖を震源とする地震では，石川県珠洲市で最大震度6強を観測した．この地震は，2020年ごろから活発になっている群発地震の一部であると考えられている．珠洲市においては，染井ら[1)]は地震計の強震記録を用いた地震動特性の推定を行っており，岩田ら[2)]は特に建物被害の大きかった珠洲市正院地区において微動アレー観測による地震動特性の推定を行っている．地震動特性の推定にあたっては，強震記録によらず，常時微動のH/Vスペクトル比を用いる方法[3)]が提案されており，本調査では，正院地区を対象として，強震記録のない地点を含むより詳細な地震動特性の分布の把握のため，高密度な常時微動観測を行った．
本調査では，2023年8月8日から10日にわたって，**図1**に示す観測点120点において単点常時微動観測を行った．これらの観測点は100×100mメッシュ(標準地域メッシュの3次メッシュの1/10の大きさ)の中心近くに設定している．観測は，微動計JU410（白山工業株式会社製）を用いて，水平方向2成分(NS,EW成分)，鉛直方向1成分(UD成分)の計3成分の波形を測定した．サンプリング周波数は100Hzとし，40.96秒間のデータ5区間以上の平均から，H/Vスペクトル比を算出する．なお，水平成分のフーリエスペクトルはNS成分とEW成分の相乗平均を用いる．
算出したH/Vスペクトル比のピークを与える周期である卓越周期の分布の一例を**図2**に示す．**図2**は**図1**中の黒枠の範囲である．詳細な解析結果については発表時に報告する．

謝辞　本研究を実施するにあたり，科学研究費（23K17482 (研究代表者：平松良浩（金沢大学教授）)の研究助成を頂きました．また，常時微動観測調査にあたり，珠洲市の皆さまにご協力を頂きました．感謝いたします．観測にあたり東京大学地震研究所より微動計をお借りいたしました．三宅弘恵准教授（東京大学），土井一生准教授（京都大学），野口竜也准教授（鳥取大学）の各先生方に記して感謝いたします．

参考文献
1) 染井一寛・浅野公之・岩田知孝・大堀道広・宮腰研，北陸地方の強震観測点におけるサイト増幅特性とそれを用いた速度構造モデルの推定,京都大学防災研究所研究発表講演会，B120，2022.
2) 岩田知孝・浅野公之・宮本英・緒方夢顕，2022年6月19日能登地方の地震(M5.4)時に震度６弱を記録したK-NET正院の地震動特性と地盤構造，京都大学防災研究所研究発表講演会，B309，2023.
3) 常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，vol.4，pp.18-27，1988.

© The Seismological Society of Japan

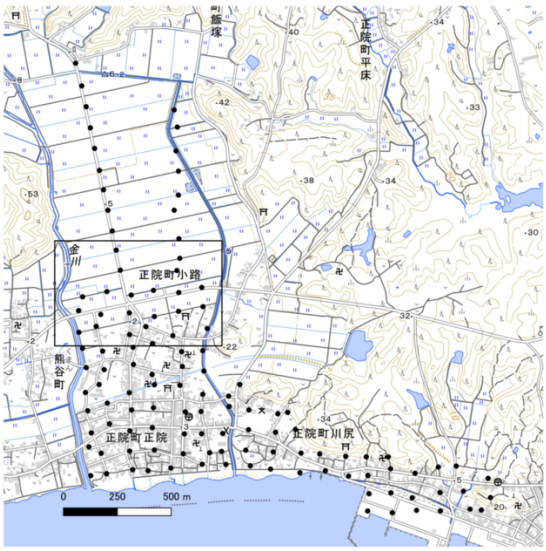


図1　観測地点

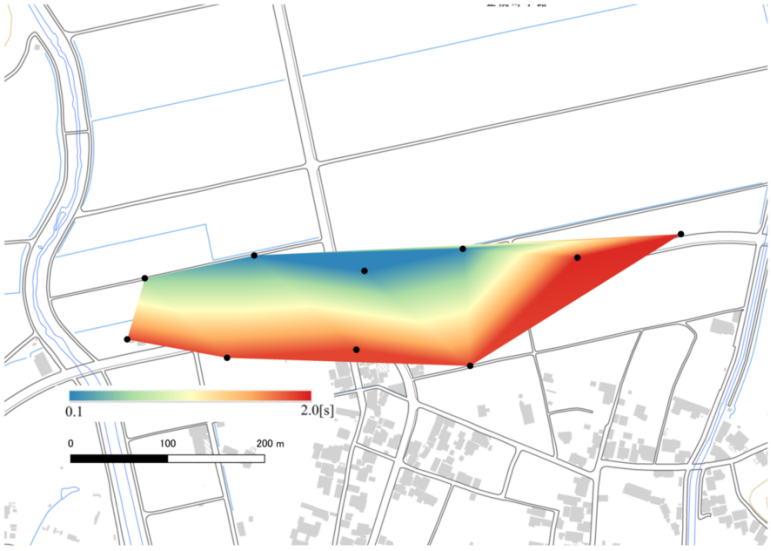


図2　卓越周期分布の一例

© The Seismological Society of Japan

Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake

*Yusuke Kitagawa[1], Akira Murata[1], Hiromi Sato[2], Tatsuru Suda[2]

1. Kanazawa University, 2. Kanazawa Institute University

令和5年5月5月に能登半島沖を震源とする地震(M_{jma}=6.5)が発生した。この地震により石川県珠洲市で最大震度6強を観測し，建物被害が発生した。特に建物被害の大きかった珠洲市正院地区において，建物被害の全体的傾向や地区内での被害分布を把握するため，発災直後の5月15日から18日にわたって建物被害の外観悉皆調査を行った。
調査対象地区は，特に建物被害の大きかった珠洲市正院町正院，珠洲市正院町川尻，珠洲市正院町小路を選定する。調査は2～3名を1チームとして，建物概況(構造形式・用途・築年数・階数等)，被害程度について調査する。築年数については，築年数20年以内の建物を「新しい」、築年数20年から40年以内の建物を「古い」、築年数40年以上の建物を「非常に古い」の3つに分類し、被害程度については，6段階のダメージグレード(D0～D6) [1)]で評価する。ダメージグレードについては，D0「無被害」，D1「軽微」，D2「小破」，D3「中破」，D4「大破」，D5・D6「倒壊」と分類する。
ダメージグレードの割合を図2に示す。なお，平屋建てにはダメージグレードD6が存在しないため，D5とD6をまとめて整理している。調査の結果，D5・D6が0%，D4以上が4%，D3以上が14%，D2以上が29%，D1以上が74%であり，7割を超える建物に被害が生じていることが明らかとなった。また，伝統木造と在来木造を比較すると，D1以上である被害発生の割合にはほとんど差がみられないのに対して，伝統木造が在来木造に比べてD2以上の割合が大きいことが分かった。建物の用途の比較では，調査結果に大きな差は見られなかった。築年数の比較では，建築年代が新しいほど，D1以上の割合が小さく，D2・D3の割合も小さいことが分かった。

謝辞
本調査にあたり，珠洲市の住民の方々には被災直後にもかかわらずご協力をいただきました。富山大学大氏正嗣先生，金沢工業大学永野紳一郎先生，石川工業高等専門学校小川福嗣先生，富山大学白河勇人氏，金沢大学地震工学研究室学生諸氏には現地にて調査にご協力いただきました。記して感謝致します。

参考文献 1) 岡田成幸，高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン，日本建築学会構造系論文集，No.524，pp.65-72，1999.

© The Seismological Society of Japan

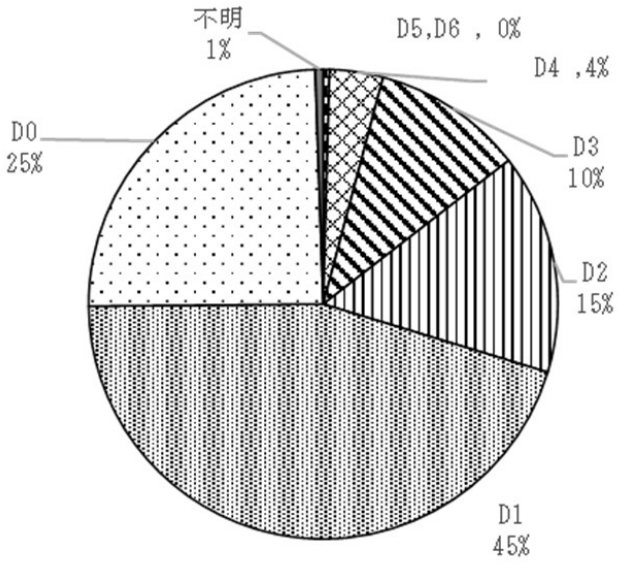


図2. 被害を受けた住宅のダメージグレードの割合

© The Seismological Society of Japan

Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake
Part 3 Detailed structural investigation

*Takuma Chikatani[1], Hiromi Sato[1], Tatsuru Suda[1], Akira Murata[2]

1. Kanazawa Institute of Technology, 2. Kanazawa University

2023年5月5日に石川県能登半島沖を震源として発生した地震において、被害が顕著であった珠洲市正院地区を中心に建築物の被害調査を実施した。その1、その2に引き続き、本報では寺院建築を対象に実施した構造詳細調査に基づいた被害状況を報告する。
調査期間は5月25日、5月31日～6月2日，6月16日，6月19日の6日間とし、調査は日本建築学会北陸支部災害部会で実施した。調査メンバーは金沢工業大学と金沢大学を中心に総計23人で構成した。調査方法は、対象地域の木造建物の被害および構造性能を把握するための構造詳細調査とし、正院町3件、三崎町1件、飯田町1件、宝立町1件の計6件の寺院本堂を対象とした。構造詳細調査では、建物内外部の被害部位・被害内容の把握、柱の残留変形の記録（2件のみ実施）、構造性能を把握するための実測調査等を行った。また、すでに修理を開始している物件もあったため、建物所有者より地震直後の被害の様子などをヒアリングした。
被害調査の結果、倒壊・大破に至る甚大な被害は少なかったが、壁の崩落・剥離、柱脚のずれなどが多くみられた。また残留変形も大きく、柱の残留変形を計測した寺院では1/30 rad.を超える変形も確認された。実測調査の結果より概算した耐震性能では、ベースシア係数0.2以下のケースもあり、倒壊は免れたものの耐震性能が不足している事例が確認された[1),2)]。

謝辞　本調査にあたり、建物所有者の皆さまには被災直後にも関わらずご協力いただき感謝申し上げます。関西大学西川英佑先生、東京大学藤田研究室OB西濱惇矢氏、中島裕貴氏、公益財団法人文化財建造物保存技術協会津和佑子氏、金沢大学北川裕喬氏、金沢工業大学荒川拓磨氏、澤田悠斗氏、金沢工業大学佐藤研究室学生諸氏には調査にご協力いただきました。ここに謝意を示します。

参考文献
1) 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル　限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法、木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会、2004年
2) 伝統的構法のための木造耐震設計法　石場建てを含む木造建築物の耐震設計・耐震補強マニュアル、伝統的構法木造建築物設計マニュアル編集委員会、2019年

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S08. Earthquake physics

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P11 (F203) Hall Annex

[S08P] PM-P

[S08P-01] Stress field related to the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO[1], Hikari Nogi[1], Shinya Kato[2], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Shunta Noda[3], Issei Doi[1] (1. DPRI, Kyto Univ., 2. ERI, Tokyo Univ., 3. RTRI)

[S08P-02] Stress field in the northeastern part of South Island, New Zealand, and the evaluation of the activity of the 1990 Lake Tennyson earthquake

*Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Martha K Savage[2], John Townend[2], Satoshi Matsumoto[3], Yuta Kawamura[3], Yoshihisa Iio[4], Tadashi Sato[1], Satoshi Hirahara[1], Shuutoku Kimura[1], Stephen Bannister[5], John Ristau[5] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, Shimabara, Japan, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Japan, 5. GNS Science, New Zealand)

[S08P-03] Spatial Variation of Stress Field around Turkey Estimated from Earthquake Focal Mechanisms and the 2023 Mw7.8 and Mw7.7 earthquakes

*Keisuke YOSHIDA[1] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

[S08P-04] Estimating effective normal stress during SSE in Bungo channel from slip velocities and shear stress variations

*Yojiro Sasagawa[1], Toshinori Sato[1] (1. Chiba University)

[S08P-05] The features and possible cause of the low-frequency marsquake S1022a

*Kirara Kotani[1], Keiko Kuge[1] (1. Kyoto University)

[S08P-06] Slow Slip Events (SSEs) detected by borehole and DONET observatories: similarities and differences of SSEs between 2020 and 2023 March

*Keisuke ARIYOSHI[1], Takeshi Iinuma[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasumasa Miyazawa[1], Sergey Varlamov[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Yuya Machida[1], Demian Saffer[2], Eiichiro Araki[1], Shuichiro Yada[1], Hiroki Horikawa[1], Kentaro Sueki[1], Narumi Takahashi[3], Takane Hori[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC, 2. University of Texas, Austin, 3. NIED)

[S08P-07] A Single-Station Method for Seismic Detection of Slow Earthquake: Applications to Japan, the Mexican Subduction Zone, and on a global scale

*Koki MASUDA[1], Satoshi IDE[1] (1. Dept. of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

[S08P-08] Spatio-temporal relationship between SSEs and tectonic tremor activities at the northern part of Hikurangi subduction margin, New Zealand

*Towako Aoyama[1,2], Kimihiro Mochizuki[1], Yusuke Yamashita[3], Tomoaki Yamada[1], Emily Warren-Smith[4], Katie Jacobs[4], Laura M Wallace[5], Martha K Savage[6], Masanao Shinohara[1] (1. Earth Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, 5. GEOMAR, 6. Victoria University of Wellington)

[S08P-09] Seismic energy estimation of shallow tremors using strain waveforms of distributed acoustic sensing

*Satoru BABA[1], Eiichiro ARAKI[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S08P-10] Evaluation of the seismic data and seismic parameters of induced earthquakes at Basel geothermal area

*Nana YOSHIMITSU[1], Yusuke MUKUHIRA[2], Hiroshi ASANUMA[3] (1. Kyoto University, 2. Tohoku University, 3. AIST)

[S08P-11] Ocean microseisms recorded by Cuban seismic stations: time variations and spectral features

*Viana POVEDA BROSSARD[1], Kiwamu NISHIDA[2], Bogdan ENESCU[1] (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[S08P-12] Observation of earthquake-induced rotational ground motions by broadband seismometer array

*Kazutoshi IMANISHI[1], Suguru Yabe[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S08P-13] Modeling seismic wave radiation from quartz vein concentrated zone in Makimine mélange

*Suguru YABE[1], Makoto Otsubo[1], Kotaro Ujiie[2] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. University of Tsukuba)

[S08P-14] Back-rupture propagation during the 2023 southeast of the Loyalty Islands earthquake

*Asuka Murakami[1], Yuji Yagi[1], Ryo Okuwaki[1] (1. Univ. of Tsukuba)

[S08P-15] The characteristic of the rupture propagation of the crustal earthquakes in Japan

*Ritsuya Shibata[1], Naofumi Aso[1,2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Applied Physics, Faculty of Advanced Engineering, Tokyo University of Science)

[S08P-16] On Cavitation, Shock Waves, and Generation of Seaquakes

*Koji UENISHI[1] (1. Univ. of Tokyo)

[S08P-17] Expansion of aftershock region observed in the Olami-Feder-Christensen model of earthquakes

*Tetsuto Otani[1], Nobuki Kame[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S08P-18] Numerical experiments using a friction law both for rapid and slow sliding with radiation damping effect

*Takane HORI[1], Hideo Aochi[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey))

[S08P-19] The latest event on the Median Tectonic Line active fault zone, inland Shikoku, inferred from dynamic rupture simulations

*Yuko KASE[1], Hisao KONDO[1], Yumi URATA[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S08P-20] Formation conditions of fault mirror and friction property of greywacke at low to medium slip rates

*Sumire Maeda[1], Futoshi Yamashita[1], Kurama Okubo[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Takamoto Okudaira[3] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University, 3. Osaka Metropolitan University)

[S08P-21] Topography and generated stress distribution of a gouge patch to control the initiation location of slip on the fault

*Kurama Okubo[1], Futoshi Yamashita[1], Eiichi Fukuyama[2,1] (1. NIED, 2. Kyoto University)

Stress field related to the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO[1], Hikari Nogi[1], Shinya Kato[2], Kazuhide Tomisaka[1], Masayo Sawada[1], Shunta Noda[3], Issei Doi[1]

1. DPRI, Kyto Univ., 2. ERI, Tokyo Univ., 3. RTRI

1. はじめに

2017年6月25日7時2分の長野県南部の地震(Mj5.6)は、1984年長野県西部地震(Mj6.8)の余震域の北東端付近、深さ1.5~4.5kmで発生した逆断層型の地震である。この付近の地震発生層の下限は5~6kmと非常に浅く、M5.6であるが、地震発生域をほとんど断ち切るような「大地震」であった。この地域は、長野県西部地震の震源断層から2～4kmほど北へ離れているが、1986年の合同観測の頃にも地震活動が活発だった(Yamazaki et al., 1992)。付近では、水準測量により2003年ごろに異常隆起が観測された(Kimata et al., 2010)。また、Vp/Vsの小さい顕著な低速度異常域が推定されており(Doi et al.,2013)、地震波速度構造が時間変化した可能性がある領域も存在する(土井・他,2014)。

この地域では、1995年より、10kHzサンプリングの地震観測が行われていたが(Iio et al., 1999)、2008年に満点地震計が追加された。満点観測網は主に、上記の低速度異常域を詳細に調べるために配置されたが、はからずも、Mj5.6を直上で待ち受ける体制となった。たまたまMj5.6の発生直前の6月22日ごろに、トリガー方式である10kHzサンプリング観測点のCFカードの交換を行ったため、多くの点において、地震の翌日である6月26日正午くらいまでデータを取得することが出来た。残念ながら、地震後に初めてデータ回収を行ったのは7月1日であり、その間は欠測となる観測点も多かったが、その後もしばらくは1,2週間間隔でデータ回収を行い、欠測を最小限とするように努めた。これらのデータから、M5.6の余震域付近の地震分布や応力場が詳しく検討された(野木・他, 2021)。この地域の広域の応力場として、Terakawa et al.(2013)は、平均的な最大圧縮応力σ1の方位はN125°Eであるとしている。野木・他(2021)は、M5.6の発生前のデータから、長野県西部地域の平均的なσ1の方位はN110°Eであり、M5.6の断層付近、およびその南側の深さ4-5kmにおいて、σ1の方位がさらに東西方向に回転していることを見出した。本研究では、加藤(2022)による機械学習を活用した手法により得られた読み取り値を加え、地震前および地震後の応力場をより精度よく推定した。

2. 結果

M5.6の余震域付近のσ1の方位の回転については、M5.6の断層付近から1984年長野県西部地震の断層付近まで、系統的に東西への回転が見られ、95%の信頼区間を超えて有意なものであると推定された。野木・他(2021)は、この主応力軸の回転を、地震発生域より深部の逆断層的なゆっくりすべり(長さ10km, 幅16km)により説明した。今回、より広い領域で系統的な回転が推定され、この説明をサポートするものとなった。ただし、M5.6の断層の北側では回転は見られず、他の要因を考慮する必要がある。

地震後については、M5.6による応力変化の空間変化のスケールが小さく、各解析領域で地震数が確保できる1kmグリッドで推定された応力場では詳細な議論が難しいため、メカニズム解のP,T軸の方位分布を調べ、推定断層面の上下において、顕著なP,T軸の方位分布の違いがみられた。これまでも、余震域の北側で横ずれ型の余震が多いことが知られていたが(気象庁, 2017)、特に、上盤側において、推定断層の北端付近で横ずれ型が顕著であることが分かった。一方、南端付近では、断層端に沿って、逆断層型の余震が多数発生している。これらの特徴は、摩擦係数0.6を仮定して計算されたクーロン破壊応力(dCFS)の空間分布とはむしろ逆センスであるが、せん断応力の空間変化とは矛盾しないことが分かった。このことは、摩擦係数が小さいことを示唆しているのかもしれないが、M5.6の断層モデルやすべり分布などを詳しく検討するとともに、地震前の応力場との関連も調べたい。

謝辞：高精度地震観測は、防災科研の特別研究「直下型地震のダイナミクス」により開始され、地震及び火山噴火予知のための観測研究計画、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画や科研費(課題番号19204043)のプロジェクトで維持されてきた。10kHz観測では産総研のボアホール地震計データを、2008年8月以降には、防災科研、名古屋大学、気象庁による定常地震観測点のデータも使わせていただいている。観測においては、長野県王滝村・木曽町、木曽森林管理署、長野県林務課、名古屋市市民休暇村ほか、地元の方々に大変お世話になった。

© The Seismological Society of Japan

Stress field in the northeastern part of South Island, New Zealand, and the evaluation of the activity of the 1990 Lake Tennyson earthquake

*Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Martha K Savage[2], John Townend[2], Satoshi Matsumoto[3], Yuta Kawamura[3], Yoshihisa Iio[4], Tadashi Sato[1], Satoshi Hirahara[1], Shuutoku Kimura[1], Stephen Bannister[5], John Ristau[5]

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, Shimabara, Japan, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Japan, 5. GNS Science, New Zealand

Introduction

The stress field would control fault activity. Thus, stress-based evaluation of fault is important for understanding the condition of fault activity.
In New Zealand, the Pacific plate is subducted into the Australian plate in the North Island and the northern part of the South Island. The characteristics of fault activity in the northern part of the South Island is differ between the west and east sides of the Alpine Fault.
The northwestern part is under a compressional stress field with ESE-WNW direction. Many reverse faults active in the current tectonic regime are inherited from Late Cretaceous-Paleocene normal faults formed during the opening of the Tasman Sea that were subsequently inverted (e.g., Ghisetti et al., 2014).
In the northeastern part, the stress field with strike slip fault type is dominant with ESE-WNW compressional axis (e.g., Balfour et al., 2005). This corresponds to the relative plate motion of the upper plate of the plate oblique subduction zone. The Marlborough Fault System (MFS) is composed of strike slip fault with strike NE-SW and dip 60˚ - 90˚ (e.g., Anderson et al. 1993).

The overall aim of our study is to clarify the conditions that cause fault activities in the northern part of South Island. In our previous study, we evaluated the fault likelihood of slip to stress field using Slip Tendency (ST) method (Morris et al., 1996) in the northwestern part (e.g., Tagami et al., JpGU 2023). The faults which large-sized earthquakes occurred were in favorable to slip to the stress field.
This study focuses on the northeastern part of the South Island. We estimate the stress field in this region and compare it with the northwestern part of the South Island. Also, we focus on the 1990 Lake Tennyson earthquake (M_w 5.9) to compare the ST value and the actual activity fault plane, which was estimated by previous studies.

Data and Methods

We estimate the stress field using the focal mechanisms obtained by temporal and permanent stations (Okada et al., 2019; Matsuno et al., 2022) and the GeoNet moment tensor solutions. The data period is 2003 - 2023. We deploy the stress tensor inversion method developed by Michael (1984, 1987). Then, we evaluate the likelihood of slip by the ST method (Morris et al., 1996). For the fault plane, we use the fault distribution map (Robinson, 2004) and focal mechanisms of the Lake Tennyson earthquake estimated by Anderson et al. (1993).

Results

1. Stress fields

To observe the overall spatial trend, we divided the study area into four areas (Area 1 (northern MFS): -42˚ - -41˚; 173˚ -174˚, Area 2 (Cook Strait): -42˚ - -41˚; 174˚ - 175˚, Area 3 (southwestern MFS): -43˚ - -42˚;

© The Seismological Society of Japan

172˚ - 173˚, and Area 4 (southeastern MFS): -43˚ - -42˚; 173˚ - 174˚). Also, considering the effects of the 2013 Cook Strait earthquake (M_w 6.6) and the 2016 Kaikōura earthquake (M_w 7.8), we set three timeframes (A: 2003 - 2013, B: 2013 - 2016, and C: 2016 - 2023).
Focal mechanisms of strike slip fault type are dominant in these areas. Most regions show stress fileds of strike slip type. Each S_{Hmax} is in between EW to NWN-ESE (90˚ - 120˚). Our Results is consistent with previous studies (e.g., Balfour et al., 2005; Townend et al., 2012), although Area 2 and Area 4 show different S_{Hmax} direction. In Area 2 and Area 4 where the Cook Strait earthquake and the Kaikōura earthquakes occurred, the rotation of S_{Hmax} can be confirmed before and after these large events. The results from Michael’s method have large errors. Therefore, we re-estimate the stress field by a different method of Vavryčuk (2014). The results from Vavryčuk’s method are consistent with the results from Michael’s method with smaller errors. For this reason, the results obtained in this study are considered reliable.

2. Slip tendency of the 1990 Lake Tennyson earthquake

This event occurs in Area 3 (southwestern MFS). McGinty et al. (1997) estimated the main fault lineation as ENE with 8 km. We calculate the ST value using the nodal plane estimated by Anderson et al. (1993). For the stress parameter, we use the results of Area 3 estimated by Vavryčuk’s method. The nodal plane with the strike of 55˚ shows a large ST value of 0.71, and 0.86 in the timeframe A and B, respectively. A large ST value means the fault plane is favorable to slip. If the stress field has not changed significantly since 1990, the Lake Tennyson earthquake seems to have occurred with a favorable slip.
We also estimate the ST value for other fault in Area 3 using Robinson’s fault model. The fault planes with strike (61˚ - 76˚) and vertical dip (90˚) show large ST values (0.80 - 0.98) in timeframes A and B. This is consistent with the Lake Tennyson earthquake result. However, a fault plane with a strike of 52˚ shows a lower ST value (~0.66) in the timeframe B.

© The Seismological Society of Japan

Spatial Variation of Stress Field around Turkey Estimated from Earthquake Focal Mechanisms and the 2023 Mw7.8 and Mw7.7 earthquakes

*Keisuke YOSHIDA[1]

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

2023年2月6日にトルコ東アナトリア断層帯周辺で Mw 7.8の左横ずれ断層型地震 (Nurda-Pazarck地震)が発生し，その約 9時間後には Mw 7.7の左横ずれ断層型地震 (Ekinözü地震)が発生した．その発生機構・発生過程の理解のためには，地震発生の原因となった地殻応力場の詳細の理解が不可欠である．本講演では，地震メカニズム解を用いて推定したトルコ周辺の応力場の空間変化の特徴について紹介する．

最初に，応力場を推定するためのデータとして，Global CMT (GCMT)カタログ (Ekström et al., 2012)，ボアジチ大学カンデリ地震観測研究所 (KOERI) CMTカタログ，およびトルコ災害緊急事態対策庁 (AFAD) メカニズム解カタログから，トルコ全域を含む領域で過去に発生した地震のメカニズム解を取得した．GCMTカタログからは，1979年から 2023年7月までに発生した 1325 個の地震のメカニズム解を，KOERIカタログからは，2015年から2023年6月までに発生した 379個の地震のメカニズム解を，AFADカタログからは，2007年から2023年 8月までに発生した 1660個の地震のメカニズム解を取得した．重複する地震がある際にはGCMTカタログ，KOERIカタログ，AFADカタログの優先順位で解を採用することにして， 3182 個の地震データからなるデータ・セットを作製した．アナトリア断層周辺の地震の中では (717個)，横ずれ断層型地震 (344個)が最も多く，次いで正断層型地震 (263個)が多い．

得られたメカニズム解カタログに，Yoshida et al. (2016)と同様の手順で応力インバージョン法を適用し，トルコ周辺域の応力場の空間変化を推定した．具体的には，研究対象領域全域に 0.1˚間隔でグリッド網を配置し，各グリッドにおける応力場の方向を表す 4パラメータの推定を行った．この際，各グリッド中心から水平距離 120 km 以内の範囲に含まれる地震データをグリッド中心に近いものから最大 25 個に対し，Michael (1984, 1987)の手法を適用し，応力場のパラメータを推定した．

図に得られた最大水平圧縮方向と応力レジーム A_の結果を示す．Anatoliaプレート内部で横ずれ断層場の領域と正断層場の領域が分布している．Anatoliaプレートと Arabiaプレートの境界に位置する東アナトリア断層周辺においては，最大圧縮軸がおよそ南北方向で一様であるのに対して，応力レジームは北側の横ずれ断層場から南側の正断層場への空間変化を示している．

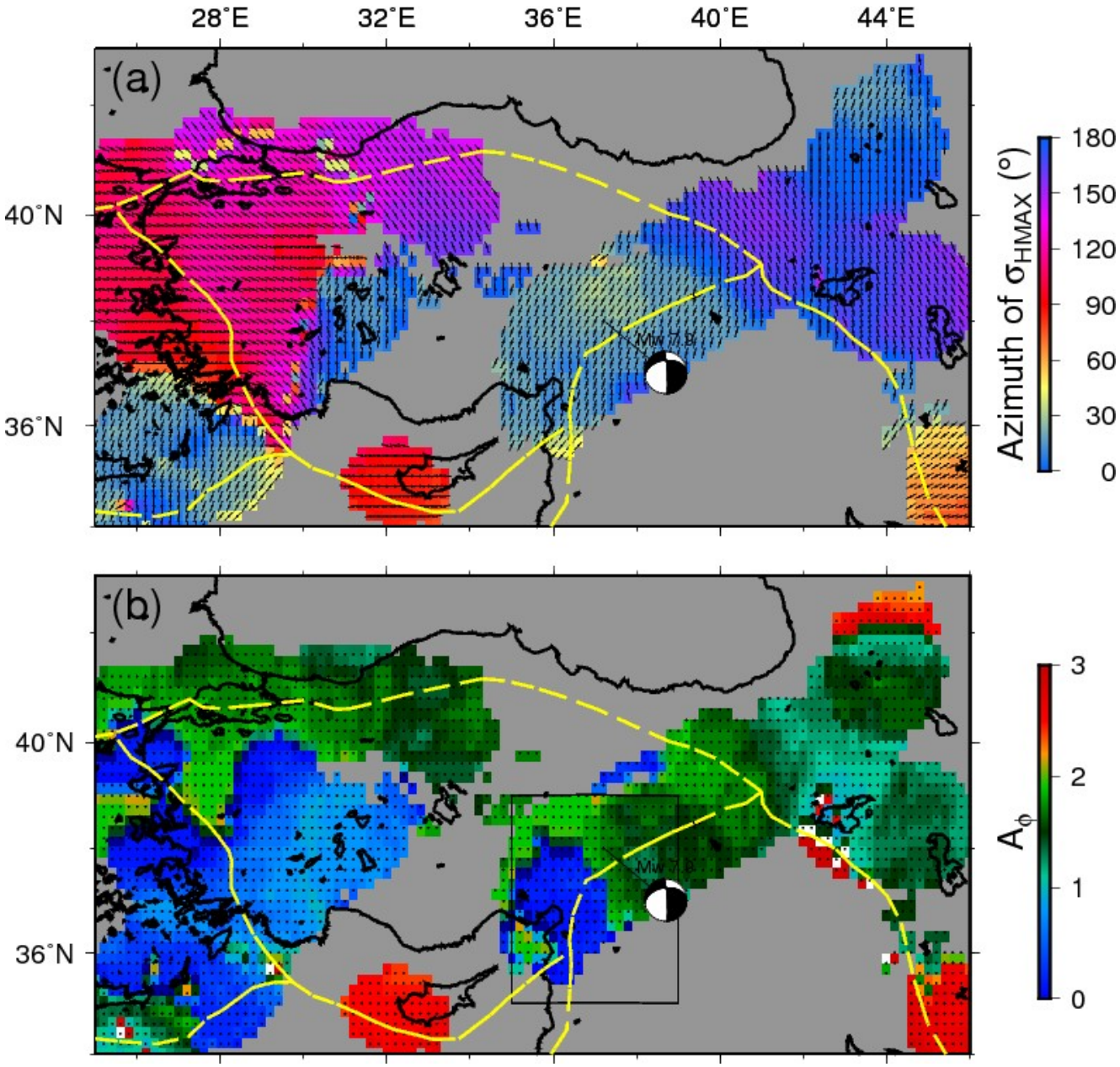
このような応力場の空間変化は，本震の破壊伝播・停止に影響を与えた可能性がある． 2023年 Mw7.8 Nurda-Pazarck地震震源南部側で推定された応力場も正断層型であり，余震のメカニズム解も北北東-南南西方向に走向方向を持つ正断層型のタイプが多かった．このことは，シンプルには，本震も震源より南側では正断層すべりを生じさせた可能性を思わせる．ただし，このM7.8地震の南部破壊域においては，本震前のメカニズム解が少なかったため，本震前からこの地域の応力場が正断層型であったのかどうかは定かではない．しかし，本震の応力変化により応力場が一様に南北方向に最大圧縮軸を持つ正断層場に変化することは，あまり考えやすくなさそうである．

一方，地震波形の解析からは，2023年 Mw7.8 Nurda-Pazarck地震時には，左横ずれ型断層滑りが震源よりも 100 km以上南部にまで拡大したことが推定されている (Okuwaki et al., 2023; Barbot et al., 2023)．この地域の応力場が本震前から正断層型であったとした場合，M7.8地震の南部破壊域には，せん断応力が掛かりにくくなっていたことが考えられる．その上で本震破壊が伝播したことは，この断層の摩擦強度が周辺の断層に比べ

© The Seismological Society of Japan

て小さくなっていたことを意味するのかもしれない.

謝辞：本研究はJSPS科研費 JP23K17482の助成を受けたものです。ボアジチ大学カンデリ地震観測研究所 (KOERI) CMTカタログ，およびトルコ災害緊急事態対策庁 (AFAD) のメカニズム解カタログ・震源カタログのデータを使用させていただきました.



© The Seismological Society of Japan

Estimating effective normal stress during SSE in Bungo channel from slip velocities and shear stress variations

*Yojiro Sasagawa[1], Toshinori Sato[1]

1. Chiba University

１．はじめに

スロースリップ(SSE)は、地震波を出さずにプレート境界等を10日～数年かけて数十cmゆっくりすべる現象である。SSEはGNSS観測以降発見され、プレート境界でのエネルギー蓄積・解放の新たな1つの過程として位置づけられる。これを調べることはプレート境界のテクトニクス等を知る上で重要である。 速度と状態に依存した摩擦則を用いた理論解析により、速度弱化に伴う準静的なすべり挙動が示されている。Kobayashi and Sato(GRL, 2021, https://doi.org/10.1029/2021GL095690)はGNSSのデータから房総半島沖で発生した６回のSSEの時空間すべり分布を推定し、剪断応力変化とすべり速度の関係をグラフに示した。すると、その軌跡のほとんどは理論的に安定な軌跡と類似していた。これは、房総沖のSSEは準静的な現象であり、すべり加速時の軌跡の傾きはSSEを引き起こしたプレートの摩擦係数（a, b）と有効法線応力（σ_n）の積（ (a-b) σ_n ）で表されることが示唆された。本研究では、Kobayashi and Sato(GRL, 2021)で用いた手法を豊後水道で発生したSSEに当てはめ、有効法線応力の絶対量を推定する。

２．解析方法

用いたデータは国土地理院による日々の座標値(F5解)である。SSEによる変動を抽出するために、SSEとは無関係な線形トレンドや季節変動等を推定し、除去する。線形トレンドや季節変動等を除去したデータをフィッティングによってなめらかな曲線で繋ぎ、１ヶ月毎の変動に分割する。次に、１ヶ月毎の変動データからABICを用いたインバージョン解析によって１ヶ月毎のすべり分布を推定する。そしてUSGS(United States Geological Survey)のソフトウェアCoulomb3.3を用いて、プレート境界面を長方形の微小パッチに分割してすべり分布に伴う剪断応力変化をそれぞれのパッチで計算する。求めた剪断応力変化とすべり速度の関係をグラフに表し、加速時の傾きから有効法線応力の絶対量を推定する。

３．結果

GNSSデータを処理し、豊後水道SSEのすべりの時空間分布を推定したところ、すべりは徐々に加速し、そして減速することが示された。現在、剪断応力変化を推定するために、長方形の微小パッチを用いてプレート境界面を分割し、すべり分布に伴う剪断応力変化をそれぞれのパッチで計算している。発表では、この結果を用いて、有効法線応力の絶対量について議論する。

謝辞

解析にあたり、国土地理院の日々の座標値（F5解）を使いました。応力の計算では、米国地質調査所のCoulomb3.3を使いました。ここに記して感謝します。本研究は科研費（23K03541）の補助を受けました。

© The Seismological Society of Japan

The features and possible cause of the low-frequency marsquake S1022a

*Kirara Kotani[1], Keiko Kuge[1]

1. Kyoto University

1. はじめに

2012年InSightミッションが開始し、2018年に地震計が備わった火星探査機「InSight」が火星に着陸した(Lognonné et al. 2019)。観測開始から1か月後の2019年3月、火星の内部で発生したと考えられる震動が初めて記録され、2022年12月にミッションが終了するまで、約1300個の火震が観測された (Lognonné et al. 2023)。

InSight Marsquake Serviceが検知した各火震は、火震の起こった火星日付をもとにラベル付けされ、データの質を基準にして質が良いものからQuality A、B、C、Dの４つに分類されている。P、S波を明瞭に識別でき、さらにP波のpolarizationが明確に見えている、つまりこれらから震央を推定できる火震は、Quality Aに分類されている。Quality Aに分類された火震は14個あり、Mwは3～5程度である(InSight Marsquake Service 2023)。

私たちは、これらQuality Aの14火震のP、S波の波形データを調べた。その結果、S1022aとラベル付けされた火震が他の火震と異なり特定の低周波数に卓越していることを見つけた。本発表では、この低周波火震S1022aの特徴を示すとともに、その原因を考察する。

2. 低周波火震S1022aの特徴

S1022aは、InSight Marsquake Serviceにより、地震計から東北東方向に約1800km(31°)離れた場所で起こったと推定されるMw3.6の火震である。火星でのノイズは昼間に大きく、夜間に小さくなる傾向があり(Giardini et al. 2020)、S1022aは火星での夕方頃の比較的ノイズが大きい時間帯に発生した。

S1022aのP波のvertical成分、S波のtransverse成分のスペクトルを図1に示す。いずれのスペクトルも、0.2Hz付近にピークをもち、0.4～0.5Hz付近で急激に値が下がり、0.5Hz以上では前日の火震が起きていない同時間での値より小さくなる。この特徴はP、S波のvertical、radial、transverseの全成分に見えている。またparticle motion解析では、0.2Hz付近のP波は直線状に振動しており、その方向は推定されている逆方位と調和的である。0.2Hz付近のS波の振動はこれにおおよそ直交する。

S1022a以外のQuality Aの多くの火震のスペクトルは、1Hz以下の特定の周波数に顕著なピークをもたない。特徴的なピークをもたない一部の火震のスペクトルがBrune震源モデル(モデル)とt*による減衰構造の影響で説明できることはGiardini et al. (2020)などで示されている。

また、S1022a前後のノイズが大きい時間帯でも、S1022aと同じ特徴のスペクトルは見られない。

3. 特徴の原因は何か

火震 S1022aでみられる特徴が、他のQuality Aの火震には見られないことから、地震計近傍の地下構造によるとは考えにくい。そのため地下構造が原因であるならば、地震計から離れた場所に原因となる構造を考える必要がある。その構造は卓越周波数がP波とS波で類似する必要もある。

一方、震源が原因である場合は、0.2Hzが卓越し、高周波成分をあまり励起しない震源モデルが必要である。

Kedar et al. (2021)は、それぞれ0.35、0.6Hzでピークをもつ Quality Bの２つの火震を、Julian(1994)の火山性微動モデルで説明することに試みた。Kedar et al. (2021)の火震と比べて、S1022aには、Mwが大きい、P、S波の到着が明瞭に見える、震動の継続時間が短い、ピーク周波数が低いなどの違いがある。また、明確な減衰振動の波形はS1022aにみえていない。

Martire et al. (2020)は、地表付近のインフラサウンドにより、Kedar et al. (2021)が扱った火震の１つを説明できると主張している。Martire et al. (2020)はそのように発生する震動の特徴を示しているが、S1022aは

© The Seismological Society of Japan

この特徴に当てはまらない。

謝辞：IRIS-DMCのデータとInSight Mars SEIS Data Serviceのデータとカタログを使用させて頂きました。記して感謝致します。

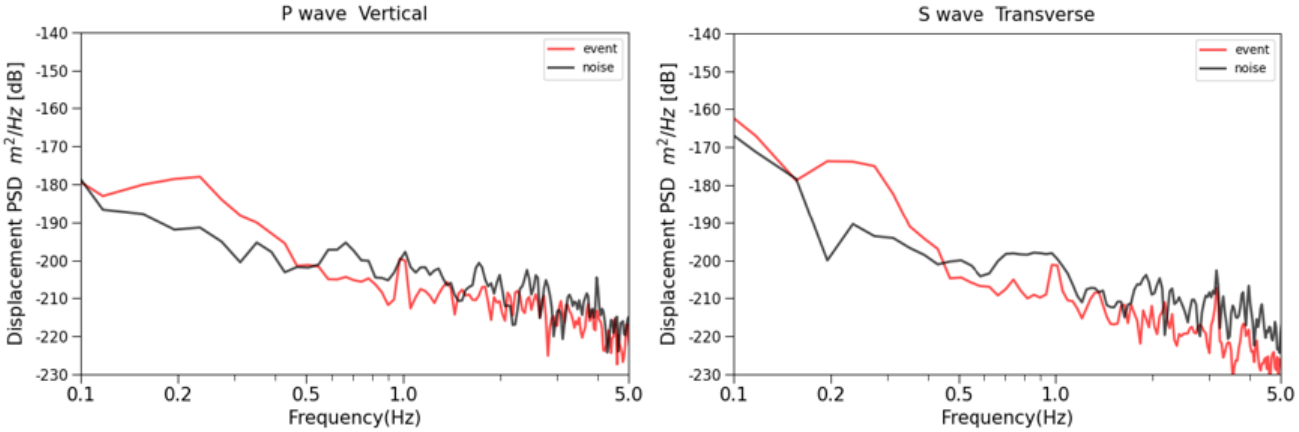


図1. S1022aのP波vertical成分(左)とS波transverse成分(右)の変位パワースペクトル密度。赤線がS1022aのP、S到達時刻の10s前からの50s間、黒線が前日の同じ時刻の50s間をノイズとして計算に使用。

© The Seismological Society of Japan

Slow Slip Events (SSEs) detected by borehole and DONET observatories: similarities and differences of SSEs between 2020 and 2023 March

*Keisuke ARIYOSHI[1], Takeshi Iinuma[1], Yojiro Yamamoto[1], Yasumasa Miyazawa[1], Sergey Varlamov[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Yuya Machida[1], Demian Saffer[2], Eiichiro Araki[1], Shuichiro Yada[1], Hiroki Horikawa[1], Kentaro Sueki[1], Narumi Takahashi[3], Takane Hori[1], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC, 2. University of Texas, Austin, 3. NIED

近年、地震や地殻変動を高感度かつ広域にわたって観測する技術の進展によって、通常の地震に比べて時間をかけて断層が滑るために人間では揺れを感じない「スロー地震」の発生が、日本周辺や世界中のプレート沈み込み帯で検知されるようになってきました。「スロー地震」は、規模の大きなものからスロースリップイベント・超低周波地震・低周波微動などに大別されており、規模の大きなスロースリップイベントは超低周波地震および低周波微動を誘発する場合があることが知られています。スロースリップイベントは長期孔内観測装置の間隙水圧計、超低周波地震・低周波微動はDONETの広帯域地震計でそれぞれ捉えられています。 しかしながら、間隙水圧を計測する孔内観測機器および海底に設置されたDONETの海底水圧計では、気象・海象擾乱によって影響を受けたりすると、その圧力変化がスロースリップイベントの発生を示すものかどうかを短時間で正しく判断するのが困難な状況となる、という問題を抱えていました。その解決策として、孔口あるいは近傍にあるDONETの海底水圧計の記録を用いて、相互相関関数から潮汐応答の時間差を推定し、孔内水圧データとの差分を取ることで海洋擾乱成分の軽減を図りました。その結果、2023年3月に発生したスロースリップイベントは、2020年3月に発生したスロースリップイベントと、発生領域・体積歪変化率などの点で類似している他、黒潮蛇行がDONET-1付近で発生していたという共通の特徴も確認できました。本講演では、類似点・相違点についてまとめた上で、解析の現状と課題についても議論する予定です。

© The Seismological Society of Japan

A Single-Station Method for Seismic Detection of Slow Earthquake: Applications to Japan, the Mexican Subduction Zone, and on a global scale

*Koki MASUDA[1], Satoshi IDE[1]

1. Dept. of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

比較的新しく発見されたテクトニックな現象であるスロー地震はこの20年間で世界中の多くの地域で検出・解析されてきた（e.g., Obara, 2020）。しかし、地震学的および測地学的手法で観測されるスロー地震のシグナルは非常に小さいため、日本とアメリカ西海岸といった密な観測網が整備された地域では積極的に解析が進められているが、その他の地域におけるスロー地震の情報は限定的である。本発表では、世界中でより網羅的な解析を行うために開発した単一の地震観測点のデータからスロー地震活動を検出する手法の性能評価と適用例を報告する。
この検出手法の基礎となっているのは、地震性スロー地震の地震波エネルギーレートと地震モーメントレートが比例するという性質である（e.g., Ide et al., 2008）。高周波数帯域（2-8 Hz）と低周波数帯域（0.02-0.05 Hz）の地震波形から地震波エネルギーレートと地震モーメントレートに相当する量を計算し、それらの相関を評価することでスロー地震活動を検出する。
まず、網羅的にスロー地震活動が解析されてきている日本に適用することで手法の性能を評価した。本手法は10000秒の移動平均を用いているため本手法で検出しているのは従来「イベント」として定義されてきたものの群発的な活動であり、また観測点の近く（典型的には 30 km 以内）で発生している活動しか検出できないため、検出の時空間解像度は複数の観測点を用いた従来手法に劣る。しかし本手法の検出の9割は従来の検出と整合的であり、検出結果は正しいことが確認された。次に、新しいスロー地震活動を検出するためメキシコ沈み込み帯のゲレロ、オアハカ、ハリスコの3地域の観測点に適用した。ゲレロおよびオアハカ地域では別の単一観測点のデータを用いる解析結果があり（Husker et al., 2019）、本手法はその結果とおおむね整合的であった。ハリスコ地域ではGNSSデータを用いた長期的な解析は行われていたが、地震計データを用いた長期的な解析は本研究が初めてである。GNSSで検出されたイベントと整合的なタイミングで大規模な活動を検出したのみならず、これまで知られていなかった活動の検出にも成功した。さらに、予察的な結果ではあるが、この手法を世界規模で適用した結果も報告する。

© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal relationship between SSEs and tectonic tremor activities at the northern part of Hikurangi subduction margin, New Zealand

*Towako Aoyama[1,2], Kimihiro Mochizuki[1], Yusuke Yamashita[3], Tomoaki Yamada[1], Emily Warren-Smith[4], Katie Jacobs[4], Laura M Wallace[5], Martha K Savage[6], Masanao Shinohara[1]

1. Earth Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, 5. GEOMAR, 6. Victoria University of Wellington

ヒクランギ沈み込み帯はニュージーランド北島の東沖に位置しており、西側のオーストラリアプレートの下に東側から太平洋プレートが沈み込んでいる。ヒクランギ沈み込み帯北部では約2年周期の高頻度で大きなスロースリップイベント（SSE）が発生しており、SSEとそれに関連する地震イベントの関係性を理解する上で最適なフィールドの一つである。この地域の最大の特徴は、スロー地震を含む多様な断層すべりイベントがとても浅いプレート境界で発生しているという点であり、一定のイベント発生周期と合わせ、海域での直上観測による詳細な時空間分布の把握が可能である。2014年から2015年にかけて本海域で行なわれたHikurangi Ocean Bottom Investigation of Tremor and Slow Slip（HOBITSS）では、海底地震計（OBS）と海底圧力計（OBP）が展開された。観測期間中である2014年9月に大規模なSSEが観測網下で発生し、陸上のGNSS観測点と海域のOBPのデータを用いてSSEのすべり分布が求められた（Wallace et al., 2016）。さらにこのSSEに関連するテクトニック微動が、SSE発生領域内にある沈み込んだ海山のdown-dip側で発生していることが確認された（Todd et al., 2018）。その後2018年から2019年にかけて同じ領域で行われた海底地震観測期間中の2019年3月に観測網下で大規模なSSEが発生し、それに伴うテクトニック微動も検出された（Yamashita et al.，2021）。2021年から2022年にかけては、OBSの台数を9台に増やし，観測域を北に伸ばして海域地震観測を行った。この観測期間中には同程度の規模のSSEは発生しなかったが、これまでの観測領域より北側で定常的な微動活動が確認された。本研究では、2019年の微動の時空間分布の解析に用いられたYamashita et al.(2021)の手法を2014年、および2021-2022年の微動活動に適用し、これらの活動の相違点を把握することによって、ヒクランギ沈み込み帯北部における微動活動の特徴を理解することを目的としている。 2014年の活動については、2014年9月から10月までの2ヶ月間のデータに対して、4-10Hz帯と12-20Hz帯の2つの周波数帯における振幅比によって通常地震とテクトニック微動を判別し、ヒクランギ沈み込み帯の海域下において初めて微動活動が確認された。ECM(Envelope Cross-correlation Method)を用いてテクトニック微動の震源決定が行われ、 120のテクトニック微動の震源が得られた（Todd et al., 2018)。 2019年の活動については、2-4Hz帯の観測波形を解析に用いるYamashita et al. (2021) のECM手法を適用し、1700を超えるテクトニック微動の震源が得られた。この手法ではテクトニック微動の震源の深さはプレート境界に固定されている。 本研究では2014年-2015年に展開された固有周期1 Hzの短周期OBS5台と広帯域OBS2台の計7台で記録された2-4Hz帯の観測波形に、Yamashita et al. （2021）で用いられたECMを適用し、テクトニック微動の震源決定を行った。この手法では地震も同時に震源決定されるため、ニュージーランドの陸上地震観測網であるGeoNetによる地震カタログに掲載されているイベントと同時間帯のイベントは除去した。その結果、Todd et al., (2018)で得られたテクトニック微動活動よりの20倍ほどのイベントが検出され、先行研究の解析期間外までイベントが継続していたことがわかった。得られた震源は沈み込んだ海山周辺のみに集中していた。2021-2022年の観測期間中に大規模なSSEは発生しなかったものの、小さなSSEに伴うと考えられる微動活動域の変化が見られた。 ヒクランギ沈み込み帯において、M6以上の大規模なSSEの後に微動活動がバーストすることは明らかになっているが、SSEとそれに伴う微動活動の具体的な時空間関係は明らかになっていない。本研究ではSSEと微動活動の時空間関係について、3例のSSEから議論する。

© The Seismological Society of Japan

Seismic energy estimation of shallow tremors using strain waveforms of distributed acoustic sensing

*Satoru BABA[1], Eiichiro ARAKI[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

光ファイバーケーブルを用いて歪の時間変化を計測する分布型音響センシング（DAS）は、空間的に密な観測が可能であることから、近年地震観測や構造探査に使われるようになっている。Baba et al. (2023) は、南海トラフ沿いの巨大地震発生領域のupdip側で発生するスロー地震の一種である浅部微動を、室戸岬沖の海底光ファイバーケーブルを用いたAP SensingのDASで観測し、海域地震観測網DONETの広帯域地震計データと合わせて震源決定を行った。同じモーメントのイベントで比較すると、スロー地震の地震波エネルギーは通常の地震よりも数桁小さくなるため、地震波エネルギーはスロー地震と通常の地震の違いを特徴付ける物理量である。本研究は、従来の地震観測網よりも多くの観測点のデータを使ってより高精度な地震波エネルギーの推定を行うことを目指し、室戸岬沖のDASデータを用いて微動の地震波エネルギーの推定を行った。
DAS観測データは、Baba et al. (2023)と同じものを用い、室戸岬から55kmの範囲で、5 mおきのチャンネルで500 Hzのサンプリングレートでデータを取得している。Baba et al. (2023) によって検出された室戸岬沖の微動の波形について、Lior et al. (2023) に基づき、0.1秒おきにセンブランスが最大となる見かけ速度をグリッドサーチによって探し、見かけの位相速度の時間変化を求めた。平面波を仮定し、歪波形の時間変化に見かけの位相速度の時間変化をかけ、速度波形に直した。この歪波形から速度波形への変換を、500 mおきのチャンネルで行った。DASのケーブルにおける微動の震源距離は、DONETのGノードとAノードの間に位置するが、変換した微動の速度波形の振幅は、DONET広帯域地震計のGノードとAノードの間の大きさになり、振幅の大きさは距離と整合的なものになった。
各チャンネルで得られたDASの速度波形のエンベロープを用いて、Yabe et al. (2019) の手法に基づき、微動の地震波エネルギーの推定を行った。室戸岬沖周辺で発生した、気象庁地震カタログ掲載のマグニチュード2.5以上の地震の波形を用い、F-net観測点N.UMJFを基準点として、S波最大振幅の値を用いたサイト増幅補正を行った。サイト増幅係数が小さいチャンネルは、光ファイバーケーブルと海底面のカップリングが悪いと考えられる。サイト増幅補正後、各チャンネルの微動のエンベロープ波形から求められたエネルギーレート関数を足し上げ、チャンネル数で割って、当該イベントのエネルギーレート関数とした。振幅最大値の0.25倍を超える時間の範囲でエネルギーレート関数を足し上げて当該イベントのエネルギーを求めた。その結果、地震波エネルギーの範囲は10^{5}–10^{6} J、地震波エネルギーレートの範囲は$10^{3.5}$–10^{5} J/sとなり、DONETの広帯域地震計データを用いて南海トラフ沿いの微動を解析したYabe et al. (2019; 2021)と同様の桁の範囲となった。今後は、センブランスによって求められた見かけの位相速度の時間変化と歪波形から変換した速度振幅の検証に加え、地震波エネルギーの誤差を定量的に見積り、地震計データのみで求めた場合との精度の比較を行う。

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of the seismic data and seismic parameters of induced earthquakes at Basel geothermal area

*Nana YOSHIMITSU[1], Yusuke MUKUHIRA[2], Hiroshi ASANUMA[3]

1. Kyoto University, 2. Tohoku University, 3. AIST

背景・目的
スイスのBasel地域における能動的地熱開発サイトでは，注水に伴う地殻の変化を監視する目的で，2006年から坑内計測による地殻応力の測定とボアホール微小地震観測が行われてきた(Häring et al., 2008)．通常，直接計測した地震発生時のせん断応力と，地震波形から推定した応力降下量の比較は困難であるが，このようなボアホール記録を使えば両者の比較・検討が可能となり，誘発地震のジオメカニカルパラメタとせん断応力の関係を明らかにすることができる．本解析ではまず微小地震記録の精査をおこない，観測スペクトルと理論スペクトルを比較することで，誘発地震の震源パラメタと応力降下量を推定する．

データ
2006年12月1日から12月31日にかけて，Basel地域に埋設されている6つの3成分短周期地震計で収録された3067イベントの速度波形データを解析した．Geothermal Explorers Ltd.社により生産された6つの地震計は全てダウンホールに設置され，サンプリングは1000 Hzである．S波到達時から0.512秒を切りだしてスペクトルを計算し，積分により変位スペクトルを得た．解析に利用した周波数帯は1-200 Hzである．

解析・議論
6観測点の全波形とスペクトルを描き出してノイズレベルやスペクトル形状を精査した結果，すべての観測点において波形記録は良好に取得されていたが，特にRIE2とOT2という2観測点が解析に十分なシグナルノイズ比を示した．RIE2は深さ927 mの堆積岩中，OT2は深さ2487 mの花崗岩質の基盤岩中に設置されている(e.g., Mukuhira et al., 2021)．観測点OT2の記録は常に他の5観測点よりも大きな振幅を示した．これはOT2が硬い基盤岩に埋設されているためと考えられる．観測点RIE2は常に2番目に大きな振幅を示した．その他の観測点に関しては，シグナルスペクトルとノイズスペクトルの振幅差が小さいため，本解析ではOT2とRIE2を取り扱う．OT2とRIE2のスペクトル形状はやや異なっており，OT2が平坦な低周波部分と100 Hz付近から減衰する高周波部分から構成されるのに対して，RIE2では低周波の平坦部はそれほど顕著に見えなかった．両観測点について，高周波成分はω^2で減衰するものとω^3で減衰するものが混在していた．
シグナルノイズ比が5倍以上のデータを選別し，OT2とRIE2それぞれの変位スペクトル記録に対して，Brune(1970, 1971)のω^2モデルから計算される理論スペクトルを，地震モーメントとコーナー周波数を未知数としてグリッドサーチによりフィッティングした．さらに，得られた地震パラメタを使ってEshelby(1957)の式より応力降下量を求めた．応力降下量は，OT2では0-10 MPaと推定されたのに対して，RIE2では0.2 MPa以下と非常に小さい値となった．OT2では50-200 Hz程度とコーナー周波数が推定されていたのに対し，RIE2では15-40 Hz程度とやや低い値に推定されたことがこの違いを生んでいると考えられる．観測点によるコーナー周波数の違いは，直達波を利用したことによるディレクティビティやラディエーションパターンの影響の可能性がある．そこで，直達波よりもこれらの影響を受けにくいと言われる散乱波で構成されたコーダ波を用いて(Mayeda et al., 2007)，再度震源パラメタを推定した．しかし，得られたコーナー周波数の値はOT2，RIE2ともに直達波の場合と大きくは違わず，ディレクティビティ等の影響を完全に取り除けていないようであった．近接した震源位置のイベントペアを利用したスペクトル比を使うなど，azimuthに影響されずに安定的に震源パラメタが推定できるか，さらなる検証が必要である．

© The Seismological Society of Japan

Ocean microseisms recorded by Cuban seismic stations: time variations and spectral features

*Viana POVEDA BROSSARD[1], Kiwamu NISHIDA[2], Bogdan ENESCU[1]

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The early efforts to study the seismic wavefield generated by the ocean date back to the middle of the 20th century (Longuest-Higgins, 1950; Hesselmann, 1963). The development of dense seismic observation has gradually allowed scientists to analyze ocean microseisms in detail, and the comparison with the ocean-wave action model reveals their source process (e.g., Tanimoto et al., 2006; Ardhuin et al., 2011; Nakata et al., 2019; Li et al., 2022). Although the ambient seismic noise generated by the ocean waves occurs in a relatively wide period range, from about 3 to 300 s (Nishida, 2017), strong double-peaked signals dominate the noise spectrum with periods from 3 to 20 s (Figure 1). The most prominent peak, at 3 to 10 s, is attributed to the so-called secondary microseisms (Figure 1) caused by the pressure field due to ocean-waves interactions. From 10 to 20 s, the less energetic peak, known as primary microseisms, originates from the linear coupling between ocean waves and seafloor topography in shallow water (Figure 1). Microseisms' amplitude and frequency are affected by the proximity to the coast of the recording seismic station and by seasonal variations.

This work analyzed spectral characteristics of marine microseisms using broadband seismic records at 13 seismic stations in Cuba. First, we estimated the power spectra of the vertical component in 2020 by the Welch periodogram method (Welch, 1967) to data windows of 3600 s with a 50 % overlap. The method reduces the variance without smoothing or binning the spectral estimates for an appropriate spectral resolution (e.g., Anthony et al., 2020). Since the occurrence of teleseismic events may bias the spectral estimations, we eliminated the teleseismic signal of earthquakes with magnitudes larger than or equal to 5.5 by removing the two-hour data after such events. We also removed the mean and linear trends of waveforms and corrected them for the instrument responses. We next analyzed the mean power spectral density behavior in space, time, and frequency for the primary and secondary microseism peaks.

Our results indicate that the dominant period of the secondary microseisms at almost all stations is between 3 to 3.8 s, with slight variations from station to station. The primary microseisms peak is found at around 15.6 s for the majority of stations. The power spectral density ranges from -121 to -127 dB and -150 to -155 dB for the secondary and primary microseisms, respectively. We also analyzed the energy variation of microseisms in the two seasons of Cuba (i.e., dry and wet). The strongest signals at the main period of the secondary and primary microseism are found during the dry season. These seasonal variations are relatively weak, which is consistent with findings by Stutzmann et al. (2009) that report stable and relatively small temporal variations of the microseisms' energy at stations located near the equator. We are currently investigating why relatively stronger signals are observed during the dry season. Meteorological events like tropical cyclones increase the intensity of microseisms on the days when these events' path is close to Cuba.

We also studied how the maximum power spectral density changes with the geographical distribution of stations. In the dry season for stations in the northern part of Cuba, located closer to the Atlantic Ocean, these values are stronger than for stations close to the southern Caribbean coast, although variations from station to station are less than 6 dB. In the wet season, differences in power spectral density between

© The Seismological Society of Japan

stations seem to be smaller than during the dry season and independent of location.

The location of marine microseisms sources changed over time. To better understand microseisms' characteristics, in particular their space-time migration, we are currently applying polarization analysis of the particle motion of Rayleigh and P waves (Takagi et al., 2018).

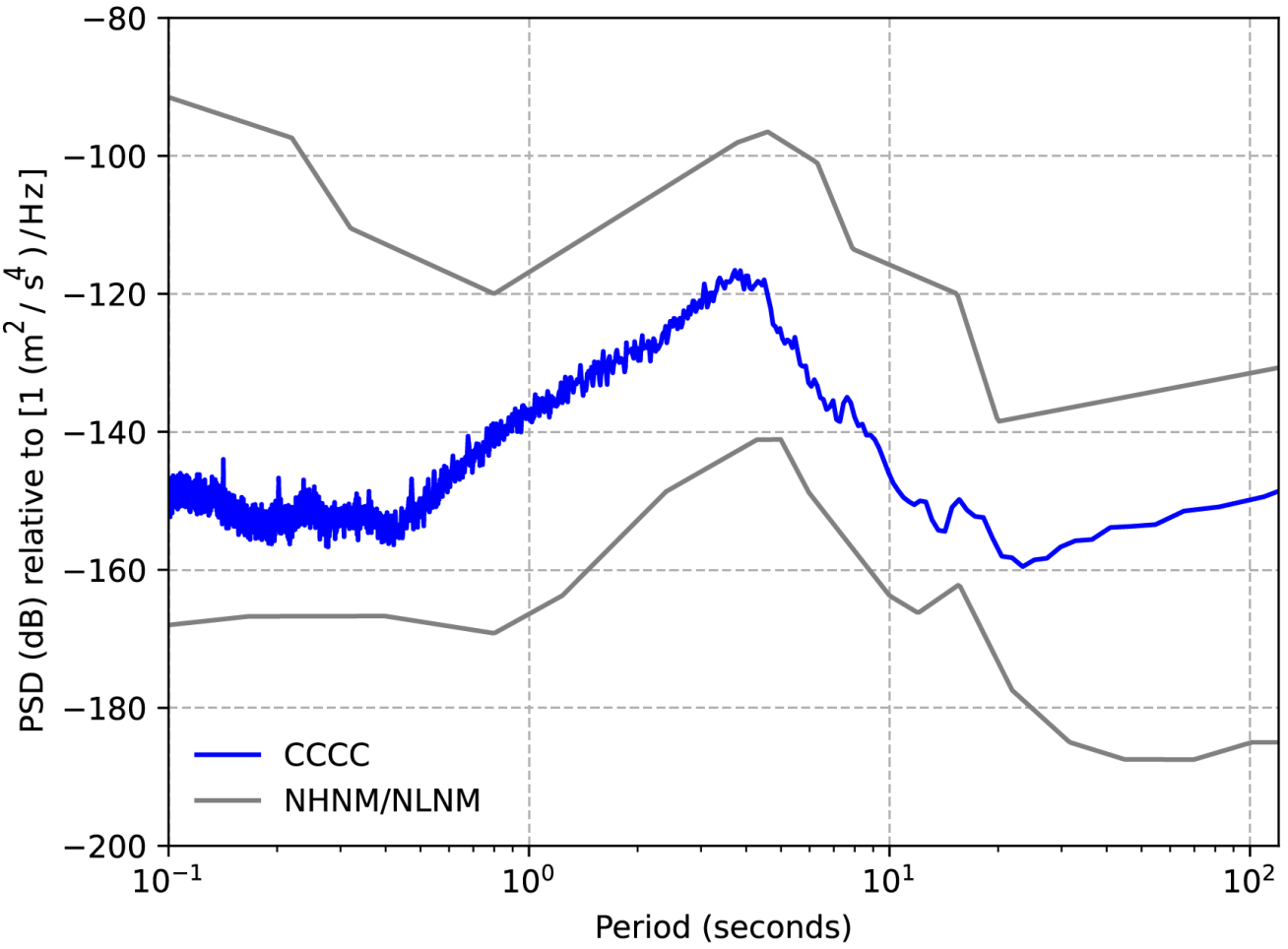


Figure 1. Power spectral density of acceleration in dB for 1 hour data (00:00:00 - 01:00:00 UTC), vertical component, registered at Cascorro station on January 2020, compared to Peterson's models New High Noise Model (NHNM) and New Low Noise Model (NLNM), standards that represent the limists for the highest and the lowest power spectral density to assess the seismic noise level.

© The Seismological Society of Japan

Observation of earthquake-induced rotational ground motions by broadband seismometer array

*Kazutoshi IMANISHI[1], Suguru Yabe[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

地面の動きを捉えることは地震学の基本であるが、長年に渡り観測されてきたのは地震計による並進３成分であり、変位の空間微分量であるひずみや回転成分の観測は限られている。しかし、地震波帯域のひずみや回転成分（以後、ひずみ地震動、回転地震動と呼ぶ）は、震源過程や地下構造の詳細を解明する上で非常に重要な観測量であり、並進成分と組合わせた解析が期待されている（Takeo and Ito, 1997; Igel et al., 2005）。

ひずみ地震動は、伸縮計やひずみ計の高サンプリング観測により観測可能であり（Kasahara, 1976; Okubo et al., 2004）、モーメントテンソル解析にも活用できることが示されている（矢部・今西, 2022）。回転地震動の観測については、光ファイバジャイロによる回転地震計の開発が進められ、最近ではフランスのイクスブルー社から可搬型の広帯域回転地震計（blueSeis-3A）が販売されている。我々は以前、イクスブルー社の国内代理店である（株）オーシャンウィングスからblueSeis-3Aのデモ機を借りる機会を得て、三重県の産総研観測点において約2か月間の試験観測を実施したことがある（Yabe et al., 2022）。観測期間中の2021年12月3日に紀伊水道でM_j5.4の地震が発生し、blueSeis-3Aで記録することができた。数Hz以上の高周波帯域では良好な記録が取れていたが、それよりも長周期帯域では機器ノイズが上回り、地震によるシグナルを確認することができなかった。周辺のF-net観測点では同周期帯域でも十分なSN比で記録が取られていることから、地震計に比べると、blueSeis-3Aの機器ノイズは依然として大きいことがわかった。

そこで我々は、広帯域地震計を用いたアレイ観測を行い、アレイデータの空間微分から長周期帯域の回転地震動を観測することを計画した。観測は愛媛県新居浜市の北東沖にある大島で行い、口径約１kmの範囲にTrillium compactを4台設置した。2023年2月から収録を開始し、データ回収を行った7月末時点で、豊後水道や日向灘で発生したM4クラスの地震3個を含む、良好な記録が取得されている。このアレイにより回転地震動を抽出できるかを確認するため、5月19日に豊後水道のプレート内で発生したM_j4.5の地震の解析結果を紹介する。SN比や観測点間隔を考慮し、2～20秒の周期帯域を解析対象とした。Spudich et al. (1995) に基づき、アレイデータから変位勾配テンソル（成分は$\delta u_i / \delta x_j$、i,j=1,2,3）を最小二乗法で推定し、それからひずみと回転成分を求めた。推定結果の信頼性を確認するために、アレイ中心から2kmほど南西側にある産総研のボアホールひずみ計（設置深度482m）の記録と比較した。観測地点がやや離れていることと観測深度の差異により、完全な一致は得られないものの、双方の波形は振幅値も含めて概ね同じ特徴を示すことが確認された。この事実から、回転地震動も適切に推定されたものと見なせる。回転地震動の絶対値は3成分とも10^{-9}rad/sのオーダーであり、これはF-netのモーメントテンソル解を仮定して計算した理論波形とも概ね一致している。なお、この振幅レベルはblueSeis-3Aの機器ノイズを1桁程度下回っていることから、blueSeis-3Aでの観測は不可能である。

当日の発表では、ひずみ及び回転地震動を使ったモーメントテンソル解析の結果についても報告予定である。

引用文献：
1) Igel et al. (2005) GRL, doi:10.1029/2004GL022336.
2) Kasahara (1976）測地学会誌, https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.22.292.
3) Okubo et al. (2004) EPS, https://doi.org/10.1186/BF03352567.
4) Spudich et al. (1995) JGR, https://doi.org/10.1029/94JB02477.
5) Takeo and Ito (1997) GJI, https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb01585.x.
6) Yabe et al. (2022) JpGU meeting 2022, SCG44-14.
7) 矢部・今西 (2022)　日本地震学会2022年度秋季大会, S08-13.

謝辞：本研究はJSPS科研費22H05317, 21H04505, 21K14022, 21H05203の助成を受けたものです。アレイ解析では、strainz17 (https://www.usgs.gov/node/279410)を使用しました。

© The Seismological Society of Japan

Modeling seismic wave radiation from quartz vein concentrated zone in Makimine mélange

*Suguru YABE[1], Makoto Otsubo[1], Kotaro Ujiie[2]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. University of Tsukuba

九州東部に分布する上部白亜系四万十付加体中の槇峰メランジュでは，千枚岩化した泥岩マトリックス中に石英脈が濃集することで特徴づけられる石英脈濃集帯が観察され，温度圧力条件やシーリングの時定数，変形構造などからスロー地震の痕跡ではないかと考えられている（Ujiie et al., 2018）．本研究では，この石英脈濃集帯が形成される過程において，現在地球物理学的に観察される微動や超低周波地震（VLFE）のシグナルが生成されうるのかを検討する．石英脈濃集帯の形成過程においては，泥岩マトリックスの面構造に並行な引張クラックと面構造に低角に斜交する剪断クラックの２種類が主に生じている．そこで，（１）個々のクラック破壊で生じる地震波と（2）クラック破壊の連鎖の２つの過程のモデル化を組み合わせることで，石英脈濃集帯形成時に放出される地震波をモデル化した．（１）についてはOpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いて3D波動伝播数値計算により，（２）については2Dブラウン運動モデル（Ide & Yabe, 2018）のスロー地震震源移動モデルによりモデル化した．クラックの大きさや数密度など，それぞれのモデル化に必要なパラメーターはできる限りフィールドにおける観察に基づいて設定した．引張クラックと剪断クラックの割合については，フィールドで正確に制約することが難しいため，さまざまな割合を検討した．
モデル化された地震波について，2-4 Hzの微動帯域と0.02-0.05 HzのVLFE帯域において，それぞれ特徴量を抽出し，現実の現象と対比した．その結果，微動帯域において100-1000 J/s程度の地震波エネルギーの放出が見られ，VLFE帯域においてMw 3.5程度のイベントが検出された．これらの値は，現実の微動やVLFEと同程度の値である．微動帯域とVLFE帯域のシグナルの大きさの割合を示すScaled Energyは，概ね現実の値と一致するが，引張クラックの割合が多い方がより現実の値に近い傾向が見られた．一方で，VLFEの非ダブルカップル成分の大きさは，剪断クラックの割合が多い方がより現実の値に近い傾向が見られた．これらの結果から，地球物理学的に観察される微動やVLFEといったスロー地震のシグナルは，石英脈濃集帯モデルによって十分説明可能であることが示された．

【引用文献】Ujiie et al. (2018), https://doi.org/10.1029/2018GL078374
Maeda et al. (2017), https://doi.org/10.1186/s40623-017-0687-2
Ide & Yabe (2018), https://doi.org/10.1007/s00024-018-1976-9

© The Seismological Society of Japan

Back-rupture propagation during the 2023 southeast of the Loyalty Islands earthquake

*Asuka Murakami[1], Yuji Yagi[1], Ryo Okuwaki[1]

1. Univ. of Tsukuba

2023年5月19日02:57:03 (UTC)，ロイヤリティ諸島南東部でモーメントマグニチュード（*M*w）7.7の地震が発生した (USGS, 2023)．震源域はバヌアツ沈み込み帯南端アウターライズ領域に位置している．震源域周辺ではオーストラリアプレートが太平洋プレートに対して東北東に75 mm/yrの速さで沈み込んでおり，沈み込み帯南部のアウターライズ領域では正断層型の地震活動がみられる．米国地質調査所 (USGS) によるモーメントテンソル解は，非ダブルカップル成分を53 %含んだ南北方向に引張軸を持つ正断層型を示している．またUSGSにより決定された本震後2日間の余震は，おおよそ海溝と並行に，本震の震央を中心にして東西150 kmの範囲に渡って分布している．一方でUSGSによる有限断層モデルは，遠地実体波P波の観測波形の特徴をほとんど説明できておらず，2023年ロイヤリティ諸島南東部地震の震源過程は，通常の震源過程解析手法ではその推定が困難であることを示唆している．一般に海溝付近で発生する海洋プレート内地震は複雑な震源過程を有している場合が多く，2023年ロイヤリティ諸島南東部地震も単純な震源過程モデルでは表現できない可能性がある．複雑な震源過程を明らかにするには，断層形状や破壊伝播方向に自由度を持たせた高自由度な震源過程モデルを用いた解析が相応しい．

そこで本研究は，ポテンシー密度テンソルインバージョン (PDTI) を使用して，2023年ロイヤリティ諸島南東部地震の震源過程を推定した．PDTIは，断層すべりの時空間分布を5つの基底ダブルカップル成分の重ね合わせで表現する．これにより，予め断層面を仮定することなく，破壊進展中の断層形状の変化やすべりベクトルの変化を柔軟に推定できる．解析には，USGSの余震分布を参考に108˚の走向を持つ135 km ×28 kmの鉛直モデル平面を設定した．破壊伝播方向も予め規定せず，モデルの時空間を広く設定することで，破壊進展中の揺らぎや反転 (逆破壊伝播) を許した解析を行った．仮想的な破壊フロントの最大速度は，震源近傍のS波速度を参考に3.2 km/sと設定した．解析には，震源メカニズムの変化に敏感で，かつ，初動をピックしやすい遠地実体波P波の鉛直成分を用いた．破壊進展中の震源メカニズム変化を捕捉できるよう，可能な限り方位の偏りがないように，震源域を囲む51観測点を選定した．グリーン関数の計算には，一次元速度構造モデルであるCRUST1.0を用いた．

解析により得られたポテンシーレート密度分布を時空間方向に積分することで得られるトータルのモーメントテンソルは，正断層型で58%の非ダブルカップル成分を持ち，地震モーメントは6.5×10^{20} Nm（*M*w 7.8）である．トータルのモーメントテンソルから推定されるダブルカップル節面のうち，63˚の高角な傾斜をもつ節面の走向は275˚であり，余震分布と調和的である．モーメントレート関数は，破壊開始から5秒後と12秒後に鋭いピークを持ち，破壊開始後24秒で収束する．本研究の震源過程モデルを用いて計算した理論波形は，観測波形の詳細な特徴をよく説明することができた．

破壊開始から8秒間，初期破壊は主に東南東方向に伝播する．震源メカニズムがもつ二つの節面のうち，余震分布と調和的な節面の走向と傾斜は，おおよそ290˚と70˚である．その後，震源の東南東側から主破壊が開始する．8〜13秒後まではバイラテラルに伝播，12秒後から23秒後は，主に西北西方向つまり震源に向かって逆伝播していく様子が得られた．逆破壊伝播時の余震分布と調和的な節面の走向と傾斜は，おおよそ270˚と65˚である．

本研究により，主破壊時の走向が初期破壊時の走向反時計回りに約20˚回転し，さらに初期破壊と主破壊の破壊伝播方向が反転していることがわかった．これは，初期破壊と主破壊の断層形状がそれぞれ異なること唆しており，隣接する二つの断層が連動して破壊したことで，結果的に破壊伝播方向の反転が発生したと考えられる．また本研究結果は，従来型の震源過程解析では多様性のある震源過程を認知することが困難であり，震源過程の多様性を理解するためには自由度の高い震源過程モデリングを行う必要性を示している．

© The Seismological Society of Japan

The characteristic of the rupture propagation of the crustal earthquakes in Japan

*Ritsuya Shibata[1], Naofumi Aso[1,2]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Applied Physics, Faculty of Advanced Engineering, Tokyo University of Science

地震は、断層に沿って剪断破壊が伝播し、解放したエネルギーを地震波として放出する物理現象である。断層破壊の時空間発展、すなわち震源過程には様々なバリエーションがあり、シンプルな近似モデルとしてはハスケルモデル (Haskell, 1964)や円形クラックモデル (Sato & Hirasawa, 1973)が挙げられる一方、現実の断層破壊ではより複雑な震源過程、あるいは破壊フロントが観測される場合がある。特に、断層アスペクト比が比較的小さいM_w7以下の地震において、複雑な破壊フロントが観測されることがある (例えば1995年兵庫県南部地震; Ide & Takeo, 1997, 1998年飛騨山群発地震; Ide, 2001)。
剪断破壊は破壊力学におけるクラックの進展に相当し、滑り方向に平行に破壊が伝播するモードIIの破壊と、垂直に伝播するモードIIIの破壊に分類される (Scholtz, 2019)。クラックの成長は、エネルギー解放率が破壊表面エネルギーを上回る時破壊が進展するというグリフィスの破壊規準 (Griffith, 1921)に従うことから、断層破壊はエネルギー収支によってコントロールされていることが示唆される。また、そのエネルギー収支は破壊モードによって異なるため、破壊モードは破壊伝播を決定づける一つのパラメタであると言える。
破壊モードは断層破壊固有の特徴量として調べられることが多いが (例えば Chounet et al., 2018)、時空間の各点において定義することも可能である。特に、複雑な破壊フロントを持つような地震においては、複数の破壊モードが混在していると考えられるため、時空間の各点における破壊モードを推定する必要がある。この観点で、滑りインバージョン結果は、時空間的な滑り量、滑り方向の分布を内包しているため有用である。
本研究では、断層破壊の特徴を破壊モードの観点から調べるために、滑りインバージョン結果を用いて、時空間的な破壊モード分布を推定した。具体的には、日本の地殻内で発生した複数のマグニチュード6クラスの地震の震源過程を波形インバージョン(Shibata et al., 2022)により推定した。このインバージョン結果については、ブートストラップ法を用いた解析や、速度構造が異なる場合に結果が受ける影響を調べることにより、ロバスト性を確認している。続いて、得られた震源過程から断層破壊伝播方向を抽出する手法を開発し、破壊伝播方向と滑り方向を各小断層、1秒ごとに推定することで破壊モードの時空間分布を得た。結果として、断層破壊全体における破壊モードは地震ごとに異なる分布を取り、全ての地震に共通するような顕著な特徴は見られなかった。一方で、断層破壊初期過程に着目すると、断層破壊はDip方向よりもStrike方向への伝播成分が大きいようであることがわかった。

© The Seismological Society of Japan

On Cavitation, Shock Waves, and Generation of Seaquakes

*Koji UENISHI[1]

1. Univ. of Tokyo

Seaquakes are violent vertical shocks experienced on board a floating body like a ship during a seismic event and may cause severe damage to the floating body. Dissimilar to tsunamis, seaquakes are normally felt only near the epicenter, but in the event of the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake, at least four ferry boats were struck by seaquakes. Two of them are subjected to two strong vertical shocks with an interval of one or two seconds while for another boat the interval between the two shocks was as long as a few minutes. Tsunamis, about 5 cm high, were observed in the Osaka Bay but they did not have two clear peaks. Thus, seaquakes are not tsunamis, and unlike the propagation of tsunamis where incompressible movement and gravitational balance of water are considered, seaquakes are often studied in light of the propagation of compressible P acoustic waves in water. In our previous study (Uenishi and Sakurai, *SSJ Fall Meeting*, 2012; *Int. J. Protect. Struct.*, 2014), based on simplified one-dimensional analyses, we have suggested two possible generation mechanisms of seaquakes: (1) dynamic interaction and quick resonance of linear elastic solid-liquid system that involves a layer of seawater of finite thickness on top of a semi-infinitely extending seabed (first shock); and (2) slow evolution and propagation of a nonlinear wave of velocity discontinuity or a shock wave in seawater that is related to the Burgers' equation in fluid mechanics (second shock) (Uenishi, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, 2017). Here, we consider another physical scenario for the generation of seaquakes (and possibly tsunamis) by reviewing the effect of cavitation on wave propagation in fluids and point out air bubbles have indeed a large influence on the generation and propagation of shock waves in compressible water. Such shock waves may play a significant role in generating a seaquake and might even induce tsunamis. We are now trying to investigate whether sufficient air bubbles can be really provided during a seismic event to cause shock waves and how air bubbles may influence the generation, propagation and strength of the shock waves, the initiation of seaquakes and tsunamis as well as the existence of tsunami earthquakes.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 23K04021.

© The Seismological Society of Japan

Expansion of aftershock region observed in the Olami-Feder-Christensen model of earthquakes

*Tetsuto Otani[1], Nobuki Kame[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

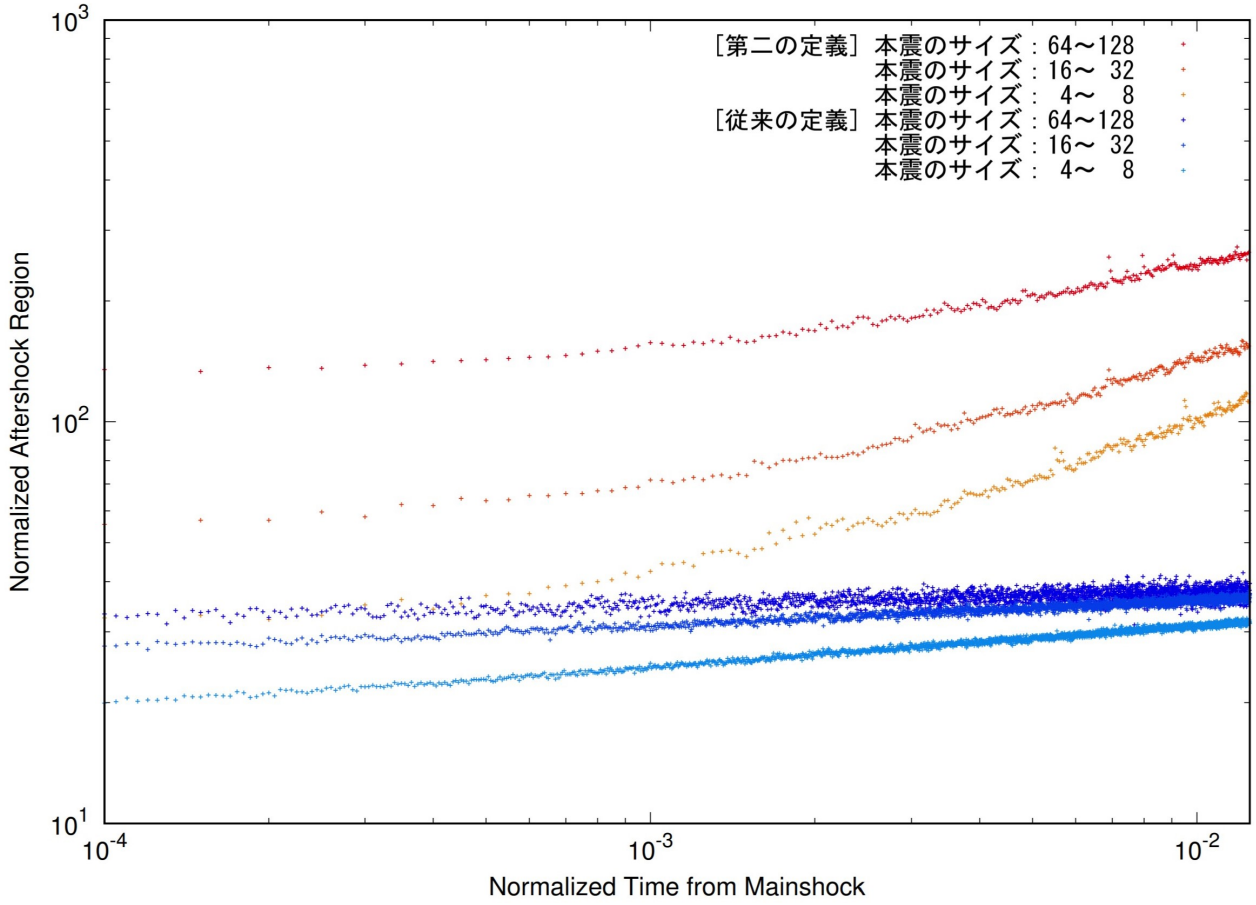
地震発生のセル・オートマトンモデルであるOlami-Feder-Christensen(OFC)モデルは、地震発生頻度のベキ乗則（Gutenberg-Richter則、その指数b値）が現れることがよく知られている。このモデルはまた、余震に関する統計的性質（大森則、その指数p値）も同時に現れる(Hergarten et al., 2002)。このことから地震のマルチスケール性の理解の手がかりとなることが期待されている。しかしながら、余震の定義およびそれに従って変化する余震の統計的性質については不明瞭な点が残る。実際、従来のOFCモデル研究における余震の定義は、ad-hocに「あるイベントの震央と本震の震央からの時空間距離が一定値以下のもの」としており、余震以外のイベントも集計されている可能性がある。

そこで本研究では、余震の定義を「OFCモデルに従い自然に定義される領域」として再定義し、余震発生の振る舞いがどのように変化するか二つの場合について調べる。第一の定義では、あるイベントの震央が本震の破壊領域、及びその影響を受ける領域に含まれるものを余震とする。第二の定義ではさらに、余震判定されたイベントに対する余震、すなわちsecondary aftershockも余震とみなす定義を採用する。これら二つの定義、及び既往研究の定義に基づく余震の統計的性質を比較し、OFCモデルにおける余震の性質について考察する。

まず、第一の定義から得られた大森則$K/(c+t)^p$（$K \sim 10^{\alpha M}$, cは時間方向のシフトを表す定数、Mは本震のマグニチュード）におけるp値、およびα値は、既往研究よりも大きな値となった。これは従来の定義では余震領域とみなす本震の震央からの距離が十分大きくとられているために余震以外の定常的に発生しているイベントが含まれてしまったからであると考えられる。第二の定義から得られたp値、及びα値は、第一の定義から得られたものよりもさらに小さくなった。また、既往研究において余震イベントの本震震央からの平均距離は時間と共に増加する、すなわち余震領域が時間のべき乗で拡大する現象が現れるが、興味深いことに第二の定義ではこの現象が既往研究よりはるかに明瞭に確認できた。そして、この余震域の拡大速度は本震のマグニチュードが小さいほど大きくなった（図参照）。

第二の定義で得られたp値、およびα値が第一の定義より小さくなった理由は以下のように考えられる。第二の定義では時間とともに余震領域が拡大するため、余震と見なされる地震が増える。その結果、p値は第二の定義のほうが小さくなる。また、余震領域は本震のマグニチュードが小さいほど速く拡大するため、本震が小さいほど第一の定義より余震を多く含むようになりα値も小さくなる。第二の定義では、余震領域の拡大現象が明瞭になったが、これはOFCモデルのルールにおいて意図していない拡大現象が生じていることを確実に示しており興味深い。

© The Seismological Society of Japan



図：余震発生領域の面積の本震発生からの時間発展のグラフ

© The Seismological Society of Japan

Numerical experiments using a friction law both for rapid and slow sliding with radiation damping effect

*Takane HORI[1], Hideo Aochi[2]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey)

To realize various fault slip behavior as regular and slow earthquakes, we assume a simple friction law. In the friction law, the frictional strength decreases due to fault slip and recovers with time. These two processes along the fault, slip-weakening and healing are the intrinsic ones to model regular and slow earthquake sequences. Here, an evolution equation of the frictional strength proposed by Nielsen et al. (2000) is used. In this equation, there are two frictional parameters, d_c and t_c, which represent a characteristic displacement for slip-weakening and a characteristic time for healing, respectively. The balance of these two parameters controls how frictional strength evolves depending on the fault slip history. To examine fault slip behavior with the evolution equation, a single degree of freedom elastic system, composed of a block and a spring with constant loading is introduced. The block starts to slip following the strength evolution equation when the shear stress acting on the contact surface of the block reaches the strength. On the other hand, the block is in stationary contact if the shear stress is less than the strength. Note that this is a classical constitutive law without direct effect in a rate- and state-dependent friction law (Nakatani, 2001). To examine the slip behavior depending on the above system, we modified a simulation code used in Aochi and Matsu’ ura (2002), which introduces more complex evolution equation of fault strength. Some preliminary results show that both intermittent rapid and slow sliding with can be demonstrated depending on the two frictional parameters. These slip behaviors are similar with regular and slow earthquakes. In this presentation, we specifically investigate how radiation damping effect affects the slow sliding behavior.

© The Seismological Society of Japan

The latest event on the Median Tectonic Line active fault zone, inland Shikoku, inferred from dynamic rupture simulations

*Yuko KASE[1], Hisao KONDO[1], Yumi URATA[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

中央構造線断層帯（MTL）は，日本で最も活動的な断層帯のひとつである．この長大な断層帯は10の区間に区分されて評価されているが，複数区間が連動する可能性についても，検討すべき課題として挙げられている（地震調査研究推進本部，2017）．そのため，この断層帯のうち，四国陸域の4区間（讃岐山脈南縁東部区間，同西部区間，石鎚山脈北縁区間，同西部区間）を対象として，連動可能性とその条件を検討するため，地質学的および地球物理学的データに基づいて動力学的震源モデルを構築し，動的破壊シミュレーションをおこなう．今回は，活動履歴を考慮した応力場モデルを構築する手法を検討し，最新イベントで起こり得た連動のパターンを整理することを試みる．

MTLの各区間では，平均活動間隔，最新イベントを含む複数のイベントの活動時期，および，最新イベントでのすべり量の値が得られており（地震調査研究推進本部，2017），四国陸域の最新イベントについては，讃岐山脈南縁東部区間，同西部区間で16世紀周辺，石鎚山脈北縁区間，同西部区間で15世紀以後，16世紀周辺以前の可能性があるとされている．そこで，各区間の平均活動間隔と，最新イベントおよび1つ前のイベントの活動時期から，最新イベント直前の地震後経過率を推定し，これを反映した応力場モデルを作成した．年代値は数百年の誤差を伴うため，平均活動間隔と1つ前のイベント年代について，それぞれ100年刻みで組み合わせを考え，最新イベント年代が調査結果と矛盾しない組み合わせを採用した．また，最新イベント年代が最も古い区間から最新イベントの破壊が始まったと考えると，その候補となるのは，讃岐山脈南縁東部区間もしくは石鎚山脈北縁西部区間のどちらかとなった．その結果，各区間の履歴の組み合わせと破壊の始まる区間の候補との組み合わせで，モデル数は44となった．

断層モデルと媒質モデル，現在の応力場のモデルは，加瀬・浦田（2023, JpGU）と同じものを使用した．現在の応力場は，最新イベントからの経過率分の応力降下量を蓄積した状態であり，イベントが発生すると剪断応力は動摩擦応力まで減少するとして動摩擦応力分布と動摩擦係数分布を求め，最新イベントの破壊が始まる区間に仮定する初期破壊領域中心での強度と応力降下量の比を1.3と仮定して求めた静摩擦係数と，その点での動摩擦係数との差を動摩擦係数分布に加えて，静摩擦係数分布を得た．そして，1つ前のイベントから最新イベントまでの経過率分の応力降下量を動摩擦応力分布に加えて，最新イベント直前の剪断応力分布とした．応力降下量は，シミュレーションで得られる地表のすべり量分布が活断層調査による最新イベントでのすべり量分布と調和的になるような値を探索した．

断層面の境界条件には，Coulombの破壊基準とすべり弱化の摩擦構成則（Ida，1972；Andrews，1976）を仮定し，弾性体の運動方程式を差分法（Kase and Day，2006）で解くことによって，断層面上の破壊伝播過程を求めた．

最新イベントとして得られた連動パターンは，「石鎚山脈北縁西部区間から始まり，石鎚山脈北縁区間までの2連動」「石鎚山脈北縁西部区間から始まり，4区間すべてが連動」「讃岐山脈南縁東部区間から始まり，石鎚山脈北縁区間までの3連動」「讃岐山脈南縁東部区間から始まり，4区間すべてが連動」の4パターンであった．このうち，「石鎚山脈北縁西部区間から始まり，石鎚山脈北縁区間までの2連動」は，活断層調査による変位履歴（産総研・文科省，2023）と調和的である．乗り移り先の地震後経過率が1.0未満でも連動することがあるため，どこまで連動するかは，乗り移り先だけではなく，乗り移り元の区間の地震後経過率にも左右される．そのため，地震後経過率が1.0の区間が連動しないモデルもあった．また，讃岐山脈南縁西部区間，石鎚山脈北縁区間，同西部区間はオーバーラップしているため，石鎚山脈北縁西部区間の連動性に，石鎚

© The Seismological Society of Japan

山脈北縁区間だけではなく，讃岐山脈南縁西部区間の地震後経過率も影響していることが推測される結果が得られた．これらの結果は，連動型地震を評価する際に，地震後経過率が1未満の区間の取り扱いに注意が必要であることを示唆している．

© The Seismological Society of Japan

Formation conditions of fault mirror and friction property of greywacke at low to medium slip rates

*Sumire Maeda[1], Futoshi Yamashita[1], Kurama Okubo[1], Eiichi Fukuyama[2,1], Takamoto Okudaira[3]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University, 3. Osaka Metropolitan University

鏡肌とは断層面において観察される光沢のある微細構造であり，断層すべりに伴う摩擦によって生成されたと考えられている．近年，この鏡肌の生成が地震性もしくは非地震性すべりに起因するのか，鏡肌の生成が断層すべりにどのような影響を与えるのかを明らかにするために，鏡面（以下，実験で再現された鏡肌を鏡面と表記する）の再現実験や，それが断層の摩擦特性に与える影響についての研究が行われている（例えば，Park et al., 2021, GRL）．砂岩を対象とした剪断摩擦実験から，石灰質砂岩（カルサイト含有量86%，石英含有量13%）では主に高速度（10^{-1} m/s）で鏡面が生成される（Hirose et al., 2012, J Struct Geol）一方，石英質砂岩（石英含有量70%）では低速度（10^{-3} m/s）でも鏡面が生成されることが判明した（前田・他, 2023, JpGU）．これらの結果から鏡面の生成条件は同一の岩種であってもその構成鉱物の種類やその量比などによって変化する可能性があると考えられる．
したがって本研究では，先行研究とは岩石学的特性，特に石英含有量が異なる砂岩を用いた剪断摩擦実験を行い，鏡面の生成条件の推定およびその摩擦特性を調査する．実験に使用する岩石試料は京都市北区雲ケ畑で採取された丹波帯 II 型灰屋ユニットのグレイワッケ（株式会社ニチカより購入）を円筒状（外径: 40 mm，内径: 16 mm)に成形した試料である．本研究で用いた試料の鉱物組成は未測定であるが，文献（楠・武蔵野, 1989, 地球科学）によると，石英が平均29%，基質が16%，長石類が23%である．最初に，本試料を室温条件下にて防災科学技術研究所が保有する回転式剪断摩擦試験機を用いて，接触面が一様に接触するまで低速かつ低法線応力下でプレスライディングを行った．次に，室温条件下にて等価すべり速度0.005～0.040 m/s，法線応力0.5MPaと1.0MPaの条件で剪断摩擦実験を行った．その後，複数の法線応力およびすべり速度条件の実験を相互比較するために入力仕事率（すべり速度と法線応力の積）を算出し，すべり距離200 mまでの範囲の摩擦係数の平均値（μ_{ave}）との関係を調査した．最後に，実験後の剪断面を目視にて観察した．
本実験結果からグレイワッケは，①入力仕事率が1.4×10^{-2} MW/m^{2}を超えると剪断面全体に鏡面が発達する，②剪断面全体に鏡面が発達するとμ_{ave}が0.6から0.4–0.2まで低下する，ことが判明した．①の結果から，グレイワッケでは剪断面全体に鏡面が発達するために必要な入力仕事率が，石英質砂岩（～10^{-4} MW/m^2）に比べ有意に大きいことが明らかとなった．また，②の結果は，鏡面の生成条件に関わらず，鏡面が生成されると普遍的に断層強度が低下する可能性を示唆する．これらの結果は，砂岩内に発達する断層の鏡肌の生成条件および鏡肌生成に伴う断層の力学的性質への影響解明に貢献すると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Topography and generated stress distribution of a gouge patch to control the initiation location of slip on the fault

*Kurama Okubo[1], Futoshi Yamashita[1], Eiichi Fukuyama[2,1]

1. NIED, 2. Kyoto University

大型二軸岩石摩擦実験では断層ガウジによって断層面が不均質となり，震源核の広がりに伴う前震が生じる（McLaskey and Kilgore, 2013; Yamashita et al., 2021）．前震の震源やマグニチュードは通常アコースティック・エミッション(AE)の波形記録などから推定される(McLaskey and Kilgore, 2014)．しかし，岩石試料の速度構造の不均質やAEセンサーの応答特性のばらつきによって震源パラメータには推定誤差が生じ，またその推定値を実験後に検証することも難しい．そこで，あらかじめ断層面に円形のガウジパッチを設置し，震源の位置や形状，応力状態を制約することで前震発生のメカニズムをより精緻に推定可能とすることを目的とし，本研究では再現性の高いガウジパッチの作成手法の確立，およびガウジパッチの形状計測とパッチ上の圧力計測を行った． 本研究で用いるガウジは，スティックスリップによって自然に生じる断層ガウジを模擬するために，摩擦実験で用いる岩石試料と同じ種類の岩石（変はんれい岩）を粉砕したものを用いた．ガウジの粒径分布は，D_{10}=1.41 μm, D_{50}=8.23 μm, D_{90}=23.98 μm,である．このガウジを目開き100 μmのふるいと円定規を用いて直径25mm，高さ47mmの円柱型岩石試料に設置した．ガウジパッチの表面粗さを一様にするために，ガウジを設置後にプラスチックシートでガウジを岩石試料に押しつけた．ガウジパッチが円形クラックとしてふるまった場合にコーナー周波数が300kHz程度となることを想定してパッチの直径は8mmとした．レーザー変位計（LT-9010M，KEYENCE，分解能0.01 μm）を用いた表面形状計測の結果，岩石試料表面からのガウジパッチの高さは平均25 μm，最大250 μmとなった．また，表面形状の空間スペクトルはフォン・カルマン型パワースペクトル密度関数でモデル化できた．これらの情報はガウジパッチの再現性を確認する上で有用である一方で，実際に垂直応力を加えた後の表面形状は未知であることに留意する必要がある． 次に，圧力測定フィルム（プレスケール LW・MW，富士フイルム株式会社）を用いてガウジパッチを設置した岩石試料に垂直応力を載荷した際の応力分布を計測した．載荷応力は実際のスティックスリップ実験と同条件の2MPaと4MPaとした．また，ガウジパッチの再現性を確認するために，それぞれのケースについてガウジパッチを複数回作成して計測を行った．圧力測定フィルムの発色濃度を専用ソフトウェア（プレスケール モバイル，富士フイルム株式会社）で読み取り，ガウジパッチ上の圧力分布を得た．載荷応力が２MPaのケースでは，５回分の計測のうちパッチ内の平均応力が3.8-4.5MPa，最大応力が5.8-6.5MPaの範囲でガウジパッチを複数回作成することができた．また．載荷応力が4MPaのケースは，３回分の計測でパッチ内の平均応力が13.6-15.1MPa, 最大応力が19.3-23.0MPaであった．どちらのケースでも，震源核サイズや亀裂の破壊エネルギーを議論する上で十分な精度でガウジパッチを再現できたと考えられる．今後，大型二軸摩擦実験において，本研究で示した手法で配置したガウジパッチを震源とする前震が生じた場合，AE波形を用いた震源パラメータ推定の検証や，前震の発生メカニズムの解明に貢献できると期待される．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S04. Tectonics

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P12 (F203) Hall Annex

[S04P] PM-P

[S04P-01] Effect of the hot plume on the bending of the Philippine Sea slab beneath Kyushu (3)

*Natsuki Kozai[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[3,1] (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

Effect of the hot plume on the bending of the Philippine Sea slab beneath Kyushu (3)

*Natsuki Kozai[1], Nobuaki Suenaga[2], Shoichi Yoshioka[3,1]

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

１．はじめに

九州下に沈み込んでいるフィリピン海（PHS）プレートは、深さ80~100 km辺りで、急激に高角に沈み込んでいる(例えば、Wang and Zhao, 2006)。この原因として、北西九州下に12Ma頃から存在したといわれているホットプルームが南東方向に水平に流れ、スラブを「く」の字型に押し曲げた可能性が指摘されている(Shinjo et al., 2000)。 しかしながら、沈み込んだPHSプレートがこのように急激に折れ曲がる要因について未だ定量的に示された研究はない。本研究では、北西九州下から湧昇してきたホットプルームが、九州下に沈み込むPHSプレートの急激な屈曲に及ぼす影響について、数値シミュレーションを用いて定量的に評価することを試みた。本発表では香西他（2022, 日本地震学会）のモデルにさらに改良を加え、モデル領域の拡張やそれに伴うPHSプレートの沈み込み、初期温度分布に改良を加え、モデリングを実行したので、その結果について報告する。

２．モデル設定

本研究では、Torii and Yoshioka(2007)による手法を用いて、２次元箱型熱対流モデルを構築した。 本モデルでは、北西九州下から湧昇するホットプルームと九州の南東沖から沈み込むPHSプレートを数値シミュレーションで再現した（図１）。九州の南東沖の海溝から北西九州を通る測線に沿って計算を行った。モデル領域は水平方向1000km、深さ方向800kmとし、流線の格子数はそれぞれ100、80とした。 ホットプルームに関しては、温度を固定した熱源を設定した。温度範囲はSakuyama et al.(2014)を参考にして、深さ約100～450kmで1475～1700℃程度となるように設定した。また、その熱源を、海溝（図1の水平距離300㎞の位置）から北西九州までの距離約400kmに相当する位置に配置した。　スラブに関しては、モデル領域の右側温度条件にプレート冷却モデル（McKenzie et al., 1969)を適用し、海溝軸から浅部では、PHSプレートの形状を模したガイドに沿ってプレートを沈み込ませ、その後、自由に振舞わせた。14Myrまで計算を行い、PHSプレートの沈み込み速度は、プレートの沈み込み史を考慮し、測線に沿って14Ma～3Maで5.1cm/yr、3Ma～0Maで6.4cm/yrとした。海溝における海底の年齢は、九州-パラオ海嶺が設定した測線を通過しないため、時間の経過とともに徐々に古くなるように設定した。 本講演では、このようなモデルを用いて、九州の南東部で、北西方向からほぼ水平に流れてきたホットプルームとPHSスラブが衝突した際、どのような条件下で、スラブが急激に折れ曲がるのかについて発表する予定である。

© The Seismological Society of Japan

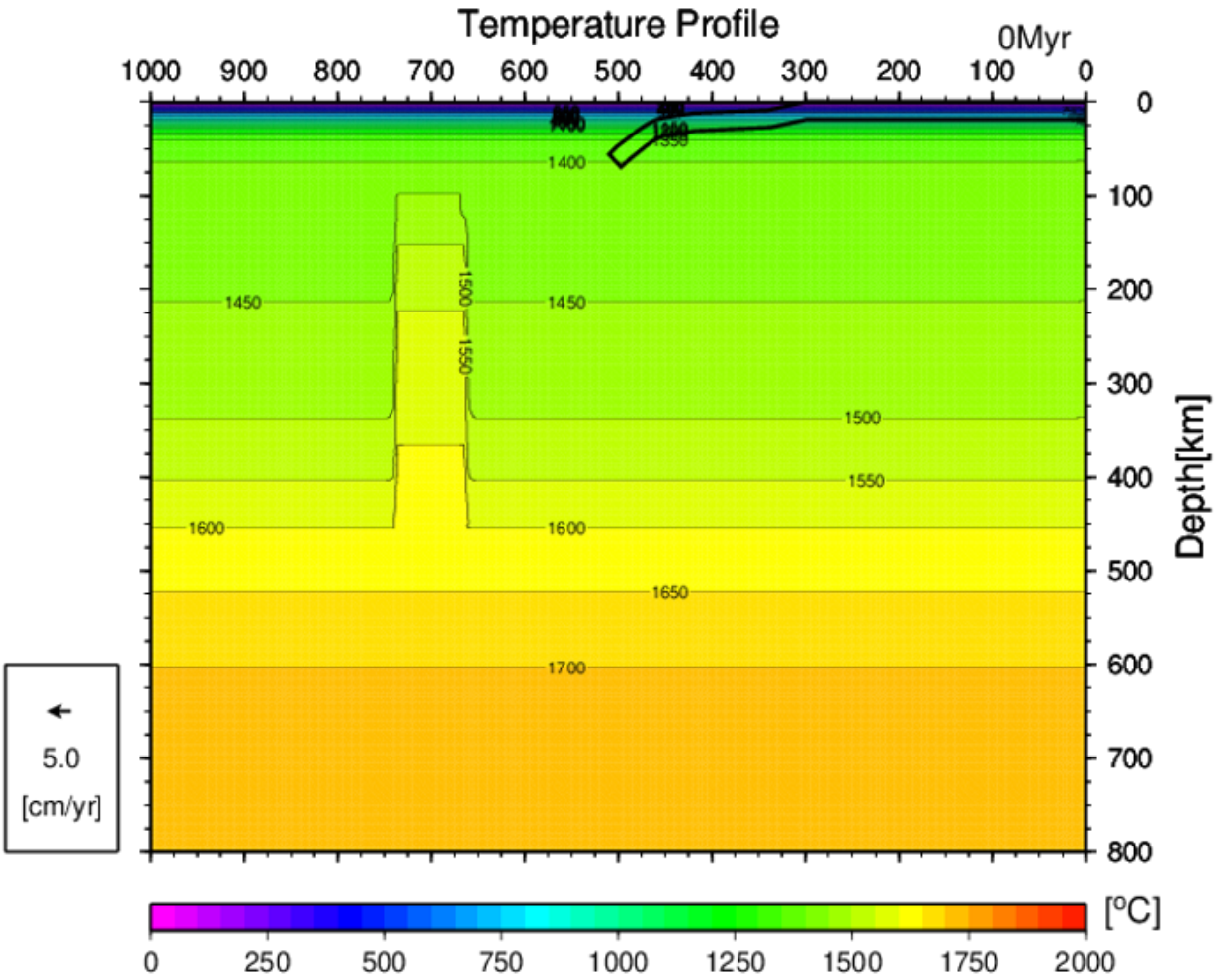


図１：測線に沿った鉛直断面内におけるモデル領域の0Myrの図。横軸(x)は水平距離、縦軸(z)は深さを示している。色は初期温度分布を、水平距離700km付近央の柱状の高温領域はホットプルームを表しているモデル領域の右上の太い黒線はスラブ物質を流し込むスラブ形状を模したガイドである。数字付きの黒線は等温線（℃）を表している（コンター間隔は50℃）、左下の黒枠内の矢印は流れの方向と大きさを表している。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S15. Strong ground motion and earthquake disaster

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P2 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S15P] PM-P

[S15P-01] The broadband source model of the 2023 Mw7.8 Turkey earthquake and amplification factors at strong motion stations

*Toshimi SATOH[1] (1. Institute of Technolocy, Shimizu Corporation)

[S15P-02] Relationship between surface earthquake fault and building damage in the 2023 Southeast Türkiye Earthquake

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Naokazu Monma[1], Shohei NAITO[1], Tetsuya YAMADA[2], Rie SAKUMA[2], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. NIED, 2. PASCO)

[S15P-03] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 10 -
- Ignorance and unconcern kill people, destroy a country (3/3) -

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

[S15P-04] A study on slip model in shallow area based on earthquake surface fault rupture - case of strike slip type -

*Yasuhiro MATSUMOTO[1], Ken MIYAKOSHI[2], Tsutomu TAKAHAMA[1], Naoto INOUE[3], Kojiro IRIKURA[2], Katsuhiro KAMAE[4] (1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Aichi Institute of Technology, 3. GRI, 4. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University)

[S15P-05] The short-period flat levels of acceleration source spectra for inland earthquakes and their variability in the scaling relationships

*Kazuhiro Somei[1], Kunikazu Yoshida[1], Ken Miyakoshi[2], Katsuhiro Kamae[3], Kojiro Irikura[2] (1. Geo-Research Institute, 2. Aichi Institute of Technology, 3. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University)

[S15P-06] Nature of slip rates under the influence of the dynamic interaction between rupture process and sedimentary layers

*Ayaka Nakatsuji[1], Hiroyuki Goto[1] (1. Kyoto University)

[S15P-07] Spectral Characteristics of Long-Period Ground Motion Inferred from the F-net Broad-Band Strong Ground Motion Records

*Ken HATAYAMA[1] (1. National Research Institute of Fire and Disaster)

[S15P-08] Long-period ground motion simulations in the western part of Shizuoka prefecture for large earthquakes in the Nankai trough (Part 2)

*Takeshi NAKAMURA[1] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

[S15P-09] Source process inversion method with local seismograms for the interplate earthquake along the Nankai trough

*Takahito NISHIMIYA[1], Fuyuki Hirose[1] (1. Japan Meteorological Agency, Meteorological Research Institute)

[S15P-10] Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning (2) forecasting building shaking

*Takashi FURUMURA[1], Yusuke Oishi[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Data-Driven Innovation Initiative, Kyushu University)

[S15P-11] An earthquake early warning algorithm using wave propagation directions estimated with a machine learning technique

*Yuki KODERA[1] (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

[S15P-12] Real-time seismic intensity prediction using deep learning and synthetic data

*Anju Ohta[1], Ahyi Kim[1], Yukino Yazaki[1], Hisahiko Kubo[2], Masami Yamasaki[1] (1. Yokohama City University, 2. NIED)

[S15P-13] Validation of site-specific seismic motions generated by combining cGAN and GIT

*Yusuke TOMOZAWA[1], Junki YAMAGUCHI[1], Toshihide SAKA[1] (1. Kajima Technical Research Institute)

[S15P-14] Evaluating large-magnitude waveforms using site-specific ground motion generated by combining cGAN and GIT

*Junki Yamaguchi[1], Yusuke Tomozawa[1], Toshihide Saka[1], Tomoki Hikita[1] (1. Kajima Technical Research Institute)

[S15P-15] Construction of ground motion models using Bayesian neural networks

*Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki Morikawa[2], Hiroyuki Fujiwara[2], Naonori Ueda[1] (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S15P-16] Correction at Long Distances through Integration of Statistical Green's Function Method and Ground Motion Prediction Equations

*Takahiro MAEDA[1], Hiromitsu Nakamura[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Sho Akagi[2], Kosuke Seki[2] (1. NIED, 2. MESW)

[S15P-17] Relationships between the peak accelerations and static rotations of the S-net sensors in the Japan Trench area

*Yadab Prasad DHAKAL[1], Takashi Kunugi[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S15P-18] Characterization and Comparison Method of the Spatial Seismic Intensity Distributions Using Independent Component Analysis

*Takeshi KIMURA[1], Wataru SUZUKI[1], Hisahiko KUBO[1], Sho AKAGI[2], Rina SUZUKI[2] (1. NIED, 2. MESW)

[S15P-19] Evaluation of the influence of Surface Topography on Earthquake Ground Motions

*Hidenori KAWABE[1], Hiroto YAMAMOTO[1] (1. Osaka University)

[S15P-20] Estimation of seismic bedrock motion using empirical site effects in time domain

*Takashi Akazawa[1] (1. Geo-Research Institute)

The broadband source model of the 2023 Mw7.8 Turkey earthquake and amplification factors at strong motion stations

*Toshimi SATOH[1]

1. Institute of Technolocy, Shimizu Corporation

2023年2月6日1時17分に発生した2023年Mw7.8トルコ地震では，震源域で甚大な被害が生じた．長周期波形や地殻変動を用いた既往研究のすべり量分布は震源の南西部では大きくないにもかかわらず，アンタキアを含むハタイ県南部周辺では大きな地震動が観測され被害も特に甚大であった．本研究では，AFADの強震記録を用いて経験的地盤増幅率を推定するとともに，アイソクロンバックプロジェクション法と経験的グリーン関数法に基づき広帯域震源モデルを推定し，この原因について考察した．　はじめに，本震の破壊開始点付近で発生した2月6日1時28分のMw6.6の余震に対する近傍の3つの余震(要素地震を含む)の観測震源スペクトル比からw^{-2}モデルを仮定してこれら4地震のコーナー周波数を推定した．そして，推定したw^{-2}モデルと周波数f依存のQ値(Demirci, 2019)と実体波の幾何減衰を用いて，震源近傍の強震観測点での経験的地盤増幅率を算出した．その結果，アンタキアを含むハタイ県南部周辺での増幅率が大きいことがわかった． 次に，アイソクロンバックプロジェクション法(e.g., Pulido et al., 2008; 佐藤, 2023)で，震源近傍の強震記録のS波部の3－10Hzの加速度エンベロープから，高周波数の励起(Brightness)の大きい領域を算出した．この際，近傍の余震記録の観測走時と1次元地下構造モデル(Güvercin et al.,2022)に基づく理論走時の差の平均から求めた強震観測点での走時の補正係数で本震記録の走時を補正した．また，上述の経験的地盤増幅率，および，本震とMw6.6の余震のH/Vの比で本震記録を周波数領域でも補正した．トルコ地震の断層は，東アナトリア断層沿いの3つのセグメントと破壊開始点を含む分岐断層のセグメントにモデル化し，4つのセグメントごとにグリッドサーチ手法により破壊伝播速度を推定した．その結果，分岐セグメント，分岐セグメントと接するセグメント，その北東部のセグメント，南西部のセグメントの破壊伝播速度が2.9，2.6，2.6，3.3 km/sと推定された． 推定された破壊伝播速度を用いて，Brightnessが大きい領域周辺で強震動生成域(SMGA)を探索し，経験的グリーン関数法(Dan et al., 1989)に基づくグリッドサーチ手法(三宅ほか, 1999)により広帯域震源モデル(0.2-10Hz)を推定した．Brightnessが大きい領域とフォワードモデリングに基づく初期解析から，SMGAは8個と仮定した．要素地震として適切な地震がなかったため，破壊開始点に近い2月6日2時23分の地震を要素地震として用いた．要素地震で震源近傍の波形の極性まで再現できないため，0.2-10Hzの加速度波形，0.2-2Hzの速度波形ともエンベロープをターゲットにした．その結果，分岐セグメント上に応力降下量が最大のSMGAが推定されたが，それ以外のSMGAは既往研究のすべり量分布が大きい領域近くに推定された．東アナトリア断層沿いでは，分岐断層が接する場所の西側と東側のSMGAの応力降下量が大きかった．東アナトリア断層沿いの南西側のセグメントでは，北側にのみSMGAがあり，アンタキアに近い南側にSMGAがないが，アンタキアを含む南部での大きな地震動がほぼ再現された．しかし，fling-stepの影響は考慮されていないことから，断層直上の一部の観測点では速度波形がやや過小評価となった．ただし，既往の研究(Wu et al.,2023; Baltzopoulos et al.,2023)で推定されているパルス状の波形の周期は，本研究で対象とした観測点では3.4秒以上であるためか，周期2秒以下では観測をほぼ再現することができた．アンタキアを含むハタイ県南部周辺は，破壊伝播進行方向にあり，平均的な破壊伝播速度も3.3km/sとS波速度相当であることも，大きな地震動の要因になったと考えられる． 推定した広帯域震源モデルから算出した短周期レベルAは4.05×10^{19} Nm/s^{2}であった．AFADの地震モーメント$M_0=5.88\times10^{20}$ Nmを用いたM_0-A関係は，引間・新村(2019)の長大断層まで考慮できるM_0-A関係とほぼ整合した．ただし，Mw7.1以下の日本の地殻内地震の記録に基づく佐藤・岡崎(2023)の経験式の外挿ともほぼ整合していた． 謝辞：本研究ではAFADの強震記録とメカニズム解，Lomax(2023)の震源情報を使用しました．走時の計算には，Hirata and Matsu‘ura(1987)のhypomhを用いました．

© The Seismological Society of Japan

Relationship between surface earthquake fault and building damage in the 2023 Southeast Türkiye Earthquake

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Naokazu Monma[1], Shohei NAITO[1], Tetsuya YAMADA[2], Rie SAKUMA[2], Hiroyuki FUJIWARA[1]

1. NIED, 2. PASCO

2023年2月6日、トルコ南東部でMw7.8の地震が発生し、Reitman et al. (2023)によると、この地震による地表地震断層がGobasiからIslahyeにかけて約200km、KirikhanからAntakyaにかけて約40km出現したと考えられる。一方、門馬・他(2019)は、2016年熊本地震における地表地震断層と建物倒壊率の関係を解析し、益城町では地表地震断層から100ｍまでの範囲における木造建物の倒壊率が60～80%と非常に高いことを明らかにした。本研究では、トルコ南東部の地震における地表地震断層と建物被害の関係を調査するため、地震発生前後に撮影された高解像衛星画像から、地表地震断層近傍の建物被害程度を判読し、地表地震断層と建物被害の関係を検討した。 建物被害判読に用いる衛星画像は、地上解像度50cmのPleiadesの画像とし、Sekeroba地区（約61km^2）、Islahiyu地区（約28 km^2）、Kirikhan地区（約28 km^2）、及びAntakya地区（約54 km^2）の４地区の、Reitman et al. (2023)の地表地震断層のトレースの左右１km程度の範囲について、地震発生前後の画像を用いて被害判読を行った。また、判読方法は、地震発生前後の画像を目視により比較し、5つの被害区分（区分1「画像からは被害が確認できない」、区分2「建物は傾いているが原型をとどめている」、区分3「建物の一部が崩れ落ちている」、区分4「建物の半分以上が崩れ落ちている」、区分5「建物が完全に崩れ落ちて原型をとどめていない、または完全に倒壊している」）に分類した。 Sekeroba地区において、判読した棟数は7,937棟で、このうち区分5の建物は549棟（判読した全棟数の約7%）、区分4は294棟（約4%）、区分3は1,127棟（約14%）である。建物倒壊に相当する区分5の空間分布については、地表地震断層に沿って連続して集中的に分布する領域と地表地震断層から離れた市街地に広く分布する領域がある。この地表地震断層に沿って連続して集中的に分布する領域に限定し、地表地震断層から水平距離別の区分5の占める割合を調べたところ、地表地震断層から100m以内では約11%であり、判読した全棟数に占める割合よりも高いものであった。今後、他の3地区も合わせた被害判読を行い、地表地震断層と建物被害の関係を総合的に検討することとしたい。 謝辞：科学技術研究費22K21372「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」の一環で実施した。

© The Seismological Society of Japan

Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 10 - - Ignorance and unconcern kill people, destroy a country (3/3) -

*Hiroshi MAEHARA[1]

1. Geosystem Research Institute

１．はじめに

共通の主題に用いている衝撃的鉛直地震波の問題が長年残されてきた背景には，自然科学分野だけでなく社会科学分野の原因があります．本文の共通副題の下で，問題の波が高周波，局在波及び威力波の特性を持つため，今年の先行する２回の発表では，自然科学分野から観測できていないことを述べました．また併せて，危険な地殻変動の兆候に昨年気付き，原発の安全対策が必要なことも指摘しました．本文では分かり易い事例の海震の話題を少し補足した後で，社会科学分野の原因について紙面の都合上一つの核心を述べ，地震と火山活動の頻発傾向に鑑みて，地震鉛直衝撃波に対する原発の安全性の確認が必要なことを改めて強調します．

２．海震及び地震鉛直衝撃波の存在性と復権(3)

海震については船舶工学者から「海震で船舶が損壊する時の地震波は，粗密波であることは常識である」と指摘されています．図1は兵庫県南部地震の時の明石海峡付近のフェリーの位置図で，図中のあさぎり丸とｸｲｰﾝﾀﾞｲﾔﾓﾝﾄﾞ号は海震を2度受け，両者とも2度目の方が強く，両船長の証言と海の表面波の波源域の解析資料から，2度目は約3分後に受けたと判断でき，その時刻は本震が収束した後と判明しました．同時に本震より強い余震は無く，強い海震の発生機構は，マグマの活動もないので，物質の相変化と確定できます．

図2は近代的な船のタンカーの損壊事例で，海震は鉄鋼船でも損壊さす威力を持つことを表します．図3は一般向けの本「あしたの地震学」（神沼克伊著，青土社，2020.3）の図です．強い突き上げ力の作用を表す例で，鉛直衝撃波の存在を連想させます．図4はトルコの地震（M7.7，2023.2.6）での最大観測加速度の記録波形です．その上下動の波形が非対称であることに対して，観測点固有の影響があるとの疑念を示しています．図5はその地震で，7階建のビルが崩落する状況の3枚の写真です．このビルの崩落時には地震の揺れは収まっており，前述の海震の例から，この崩壊は強い突き上げ力の作用と考えると整合します．問題は海震の常識が陸の地震工学者に共有されなかった社会科学的原因にあります。その問題の遠因については後程触れます．

３．危険な地殻変動の兆候

図6,7,9は日本列島の地殻変動図と福島県沿岸部の地盤の弱点を表す図で昨年用いた図です．図8は今年7月時点での，10年間の東日本の地殻変動図に原発の位置を記入したもので，変動形態は昨年と同じです．東日本太平洋沖地震を境に，日本の北東部の地殻変動の形態は一変しました．その変動形態はその地震後の1年間の変動形態の図7とも著しく違います．昨年ではこの地殻変動は巨大地震の余効変動と解釈していましたが，図6cの変動形態と似た変動形態が，本震の前から生じていたことから，この変動は地殻変動そのものが継続して生じていると考えました．図8に示す原発は勿論他の原発も，地震の頻発傾向に鑑み，この地殻変動の影響があるものは，早急に地震鉛直衝撃波に対する安全性を確認する必要があります．

４．消された調査研究会

図10は「材料・構造物の衝撃的破壊現象とその防止に関する調査」の研究会（全委員22名、3班構成の内12名で本委員会を構成）の報告書の表紙です．この会は阪神淡路大震災の直後に任意に構成されたが，活動は1年弱で頓挫・抑圧・抹殺され，報告書を辛うじて平成8年度の成果として残しました．その抑圧・抹殺には「3.11大津波の対策を邪魔した男たち」（島崎邦彦著，青志社，2023.3）の「原子力ムラ」の図とは別の 部隊が暗躍した訳です．地震鉛直衝撃波と原発に関しては，無知と無関心が人を殺し，国を滅ぼす虞があります．

© The Seismological Society of Japan



フェリーおおさか,落下物、あさぎり丸,海震 2、ｸｲｰﾝﾀﾞｲﾔﾓﾝﾄ,海震 2

図 1 明石海峡付近のフェリーと着目 3 隻の位置





(a)器材落下 (b)配管切断
ジブラルタル沖地震
M8.0 1969.2, 3.25 万 t

図 2 ﾀﾝｶｰの損壊例

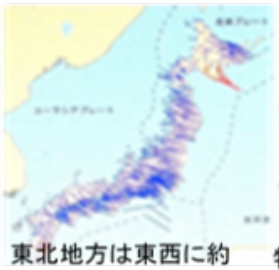
・下からの強いつきあげにより「く」の字に曲がった窓枠

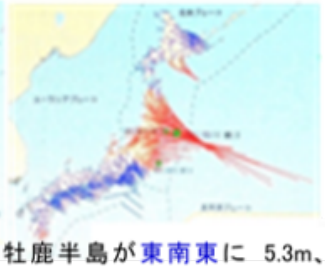
図 3 突上げ力の作用例

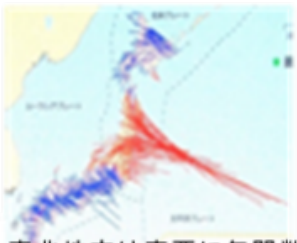


(a) 崩落前 (b) 崩落中 (c) 崩壊終局前

図 5 ビル(7 階建)の鉛直崩壊例 (主震動時間外)







東北地方は東西に約 3cm/年 縮む, **震災前** .(a) 1997.4～2010.10

牡鹿半島が**東南東**に 5.3m、1.2m 沈下, **震災翌月** .(b) 1997.4～2011.4

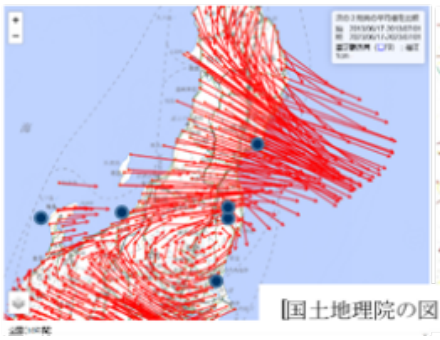
東北地方は東西に年間数 cm の伸び, **震災後 継続** .(c) 1997.4～2020.4

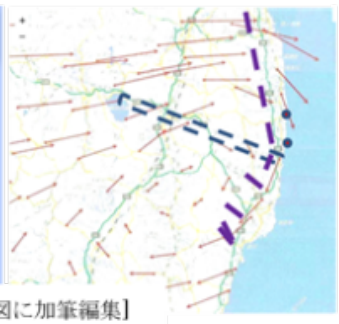
図 6 日本の地殻変動 [1997～2020] (国土地理院 地殻変動ｱﾆﾒを編集)



NHK ﾒｶﾞｸｴｲｸ. 2012.4.2

図 7 一年間の地盤変動





[国土地理院の図に加筆編集]

図 8 日本北東部の地殻変動 (10 年間),

図 9 福島沿岸部の地盤変動(5 年間)と弱点

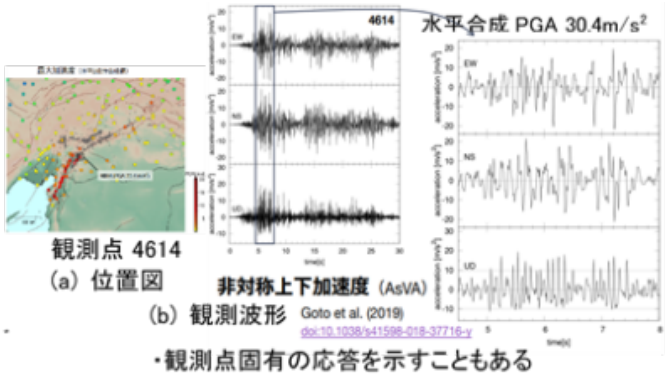
図 8, 9 の凡例: ● 印は原発 (福島では地盤拡張域内)
・紫色は断層、・青色は地盤の伏在弱線、
・赤色は地盤の渦状変動状況、＊地盤の小ﾌﾞﾛｯｸ化の虞、
＊ 悪条件が累積、＊危険な地盤変動の兆候

☆ 上図 8 に示す**原発**は地殻変動の影響が大きい場所で、**地震鉛直衝撃波**との**安全確認** が必要.



材料・構造物の衝撃的破壊現象とその防止に関する調査

図 10 消された調査研究会と報告書(表紙)



観測点 4614

(a) 位置図

非対称上下加速度 (AsVA)

(b) 観測波形 Goto et al. (2019) doi:10.1038/s41598-018-37716-y

・観測点固有の応答を示すこともある

図 4 非対称上下加速度記録への疑念

A study on slip model in shallow area based on earthquake surface fault rupture - case of strike slip type -

*Yasuhiro MATSUMOTO[1], Ken MIYAKOSHI[2], Tsutomu TAKAHAMA[1], Naoto INOUE[3], Kojiro IRIKURA[2], Katsuhiro KAMAE[4]

1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Aichi Institute of Technology, 3. GRI, 4. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

1. はじめに

近年発生した内陸地殻内の地震（例えば、2016年熊本地震、2014年長野県北部の地震など）では、地震発生時に地表地震断層が出現した。これらの断層極近傍で観測された地震動に見られる永久変位の再現には、レシピ（地震本部, 2020）では考慮されていない地震発生層以浅にLMGA（Long-period Motion Generation Area）と呼ばれるすべり領域を設定する必要があることが報告されている（例えば、Irikura *et al.*, 2020）。

このような地表地震断層が現れる震源断層の地震発生層以浅のモデル化については、上述の地震の再現解析などに基づき提案が行われているが、予測問題で地震発生層以浅に与えるすべり量、分布形状、配置などについては課題が残されている。特にすべり分布の形状については、特性化震源モデルにおけるアスペリティの形状に倣い矩形でLMGAをモデル化しているが、例えば、Wesnousky (2008)では地表地震断層の変位分布としてピークを有するsin型あるいはasymmetric sin型等を提案している。予測問題においては、設定したLMGAのすべり量、分布形状、配置が地表地震断層の変位分布形状に大きく影響するため、それらパラメータの設定においては観測記録に基づいた検討が重要である。

そこで本検討では、過去の地震における地表地震断層の変位量が整理されているWesnousky (2008)のデータセット（37地震39データ）を用いて、予測問題における地震発生層以浅（LMGA）のモデル化の検討を行う。

2. 検討方針

本検討では、Wesnousky (2008)のデータセットのうち、横ずれタイプの断層長さが40 km以上の地震で、変位分布の形状が複雑ではなく、単峰型を示す地震のデータを用いる。その結果、用いるデータ数は37地震39データのうち、8地震9データである。断層長さが40 km以上の地震を対象としたのは、井上 (2023)によると断層長さが40 km以上になると震源断層長さと地表地震断層長さがほぼ等しくなることを踏まえたものである。変位分布の形状が単峰型の地震を対象としたのは、変位分布を単純な関数形でモデル化するためである。

本検討で用いた地表地震断層の変位量のデータは、既に補間されているデータを基に1 km間隔に整理したデータとした。用いるデータは基本的にはNet Slipとしたが、水平方向と上下方向の変位量データがある位置が合致しない等の理由により、Net Slipの算出ができない場合は水平成分のみを用いた。

これらのデータを用いて、地表地震断層全体の平均変位量（AFD_{all}）、最大変位量（MFD）を算出するとともに、本検討では平均変位量（AFD_{all}）を基準値として、平均変位量（AFD_{all}）以上となる領域の長さをLMGA長さ（L_{LMGA}）と仮定する。さらにLMGA内の平均変位量（AFD_{LMGA}）を整理し、平均変位量に対する最大変位量の比（MFD/AFD_{all}）や、断層全体長さ（L）に対するLMGAの長さの比（L_{LMGA}/L）、地表地震断層全体の平均変位量に対するLMGA内の平均変位量の比（AFD_{LMGA}/AFD_{all}）を整理する。

また、Wesnousky (2008)を参考に変位量の分布形状をモデル化する。

3. 結果

9データのMFD/AFD_{all}の平均値は2程度、L_{LMGA}/Lの平均値は0.5程度、AFD_{LMGA}/AFD_{all}は1.5程度となった。また、地表地震断層の変位量が最大となる位置は、断層中央にない非対称性をもつ地震も多くあることを確認した。

次に、地表地震断層の変位量分布のモデル化（関数形）を試行した。地表地震断層の変位量が最大となる位

© The Seismological Society of Japan

置が必ずしも断層中央にないことから、断層中央で対称となるような関数形でのモデル化は難しい。そこで、L_{LMGA}/Lが0.5程度であることも踏まえて、図1のような非対称の変位量分布に適用できるasymmetric sin型の関数形でモデル化した。さらに、2023年トルコ・カフラマンマラシュ地震（Karabarak *et al.*, 2023）への適用を試みた。

4. まとめと今後

本検討ではLMGAのモデル化を目的に、Wesnousky (2008)のデータのうち、横ずれタイプの断層長さ40 km以上の地震で、変位分布の形状が単峰型の地震を対象に、地表地震断層の変位量の分析を行った。その結果、平均変位量を上回るのは断層全体の長さの0.5倍程度、最大変位量は平均変位量の2倍程度であることを確認した。また、これらの実測された断層変位の分布形を近似的に説明するasymmetric sin型の関数を提案した。

今後は、asymmetric sin型の関数が縦ずれ断層に適用可能かどうかの検討や、変位量分布の形状が複雑なケースのモデル化が課題である。

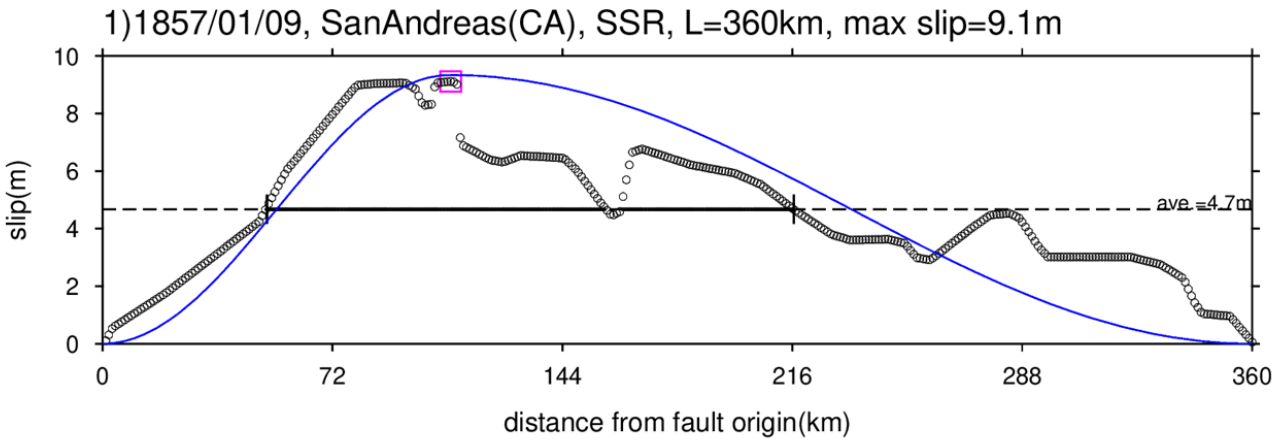


図1　提案する変位量分布の関数形（青色）

© The Seismological Society of Japan

The short-period flat levels of acceleration source spectra for inland earthquakes and their variability in the scaling relationships

*Kazuhiro Somei[1], Kunikazu Yoshida[1], Ken Miyakoshi[2], Katsuhiro Kamae[3], Kojiro Irikura[2]

1. Geo-Research Institute, 2. Aichi Institute of Technology, 3. Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

加速度震源スペクトルの高周波数側のフラットレベルを表す短周期レベルは，地震動予測を行う上で重要なパラメータである．地震調査研究推進本部の震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）における特性化震源モデルの微視的震源特性として，内陸地殻内地震のアスペリティの面積を設定する際に，短周期レベルと地震モーメントの経験式として傾きが1/3乗となる壇・他（2001）が使われている．一方で，特性化震源モデルの巨視的震源特性として，震源断層面積と地震モーメントの経験式は，地震発生層の飽和及びすべり量の飽和を仮定し，地震規模範囲によって傾きが異なる3ステージモデルが使われている．ここで，震源インバージョン解析によって推定された不均質すべり分布から得られるアスペリティ面積と震源断層面積の比（面積比）は地震規模によらず一定になること（例えば，長嶋・他, 2021）に対して，壇・他 (2001)の経験式から設定される面積比は一定規模以上（Mw 6.5程度以上）の地震に対して地震規模依存することに注意が必要である．藤堂・他 (2022, 2023)は，上述の問題を考慮し，16の内陸地殻内地震の短周期レベルを用いて，各ステージで傾きの異なる（傾きがそれぞれ1/3, 1/4, 1/2乗の3折れ線の）短周期レベルと地震モーメントの経験式を新たに提案した．このモデルでは，面積比は地震規模に依らず一定となっている．このような既存の経験式に対して，短周期レベルのデータがどの程度ばらついているかを分析することは，地震動予測で考慮すべき震源パラメータのばらつき，或いは，それから計算される地震動のばらつきを評価する上で重要である．そこで，本研究では，我々がこれまでに収集してきた内陸地殻内地震の強震動生成域モデルから計算される短周期レベルと既存の経験式から予測される短周期レベルとを比較，整理することで，データから考慮すべき短周期レベルのばらつきについて考察を行った． 本研究では，国内外の32の内陸地殻内地震（Mw: 5.5-7.8）に対する40の強震動生成域モデルを収集した．いずれの強震動生成域モデルも高周波数側は10 Hz程度までを対象として経験的グリーン関数法による地震動シミュレーションによってモデル化されている．経験的グリーン関数法を用いて求めた強震動生成域は地盤構造の影響を経験的グリーン関数として考慮しているため，観測記録から短周期レベルを精度良く推定可能と考えられる．強震動生成域の短周期レベルは，壇・佐藤 (1998)の式を用いて，強震動生成域モデルの応力降下量と面積，及び震源域のS波速度から計算した．1地震に複数のモデルが存在する場合は，各モデルについて計算した短周期レベルの対数平均を最終的な値とした．得られた32地震の短周期レベルを用いて，藤堂・他 (2022, 2023)と同様な考え方で3折れ線の経験式を作成したところ，藤堂・他 (2022, 2023)とほぼ同じ経験式が得られた．次に，ばらつき評価を行うために，上述の32地震の短周期レベルに加えて，藤堂・他 (2022)が用いた16地震のデータの内，これらの地震と重複しない3地震，さらに，壇・他 (2001)が不均質震源モデルから計算した12地震を加えた合計で47地震（Mw: 5.5-8.0）の短周期レベルを観測短周期レベル（Aobs）とした．一方，経験式として，壇・他 (2001)，藤堂・他 (2022, 2023)，本研究で試算した式をそれぞれ使用し，47地震のF-net等のMT解による地震モーメントから予測される短周期レベルを予測短周期レベル（Acal）とした．なお，対象とする地震の地震モーメントが，既存の各経験式の適用範囲を超える場合は，既存式を外挿した．経験式に対してのデータのばらつきを評価するために，ここでは上述したAobs/Acalの自然対数をとった．47地震の自然対数ln(Aobs/Acal）は，概ね正規分布に従い，本研究で試算した経験式の標準偏差（Aobs/Acalの自然対数標準偏差）は0.37であり，壇・他 (2001)及び藤堂・他 (2022, 2023)も同程度となった．つまり，本研究で対象とした47地震の観測短周期レベルのばらつきは，既存の経験式に対して1.4－1.5倍，1/1.4－1/1.5倍となることがわかった．今後，データの収集を引き続き行うとともに，短周期レベルと他の震源パラメータとの関係についても検討する予定である．

謝辞：本研究は，原子力規制庁の令和4年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業の一部として実施されました．

© The Seismological Society of Japan

Nature of slip rates under the influence of the dynamic interaction between rupture process and sedimentary layers

*Ayaka Nakatsuji[1], Hiroyuki Goto[1]

1. Kyoto University

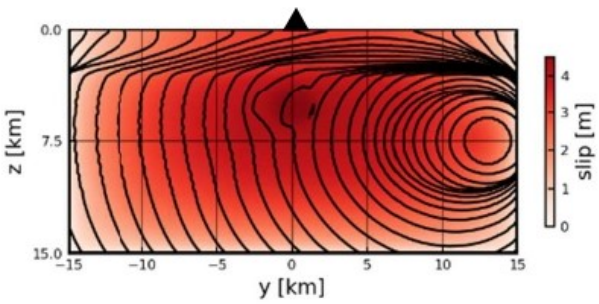
震源断層の近傍における地震観測点では，長周期のパルス性地震動が観測されることがある．このような地震動は大規模な土木構造物や高層建築に大きな被害をもたらす可能性がある．そのため，長周期のパルス性地震動の生成メカニズムを解明することは地震工学における重要な課題である．長周期のパルス性地震動の観測事例の中で，2016年熊本地震や2022年台湾東部の地震のように，地表地震断層が現れた地震において断層平行方向に観測された事例に着目する．2016年熊本地震の事例では，Kaneko and Goto(2022)により，地震波動場が地表の存在と堆積層の存在により影響を受け，この地震波動場と断層破壊とが相互作用することで長周期のパルス性地震動が生じた可能性が指摘されている．加えて，断層破壊と地表や地盤構造との相互作用は，熊本地震に限らない一般的な事象である可能性を指摘している．断層の破壊過程に対する自由表面の効果については多くの研究が行われている（Wada and Goto(2012), Yin and Denolle (2021)）一方で，堆積層による影響は十分には解明されていない．よって本研究では地表地震断層が現れるような横ずれ断層型の地震を対象として断層破壊シミュレーションを行い，堆積層の有無による断層破壊過程の違いやそのメカニズムを考察する．

2層の水平成層構造を仮定した堆積層を含むモデルと，半無限均質媒質を仮定した堆積層を含まないモデルとで動力学震源モデルにより生成される断層の破壊過程を比較した．なお，地震発生層を仮定した3 km以深のみに応力降下量を与え，深さ0-3 kmでの応力降下量は0とした．いずれも地震発生層における破壊に引きずられるように地表付近へと破壊が伝播している様子が解析されており，断層の全体的なすべり分布や破壊フロントの伝播性状は堆積層の有無によりほぼ変わらない．断層中央の地表における滑り速度を比較すると，堆積層を考慮した場合は堆積層を考慮しない場合に比べて地表付近の滑り速度の τ_h（ピーク値の1/2に達してから1/2に戻るまでの時間）が長く，τ_r（破壊時からすべり速度が0となるまでの時間）が短い傾向が認められた．堆積層のパラメータと滑り速度形状の関係について検討するために，堆積層厚を500 m, 1000 m, ~ 2500 m，堆積層のS波速度を1500 m，2000 m，2500 mと変化させた15ケースから得られた結果を整理した．τ_hはばらつきがあるものの，S波速度毎にほぼ一定値で与えられる．τ_rはS波速度1500 m/sの多くの場合と2000 m/sの約半数の場合で$2H/Vs$で説明できる．すなわち，τ_hは堆積層のS波速度，τ_rは堆積層と基盤の境界面で生じる反射波の走時に関係している可能性が考えられる．特に堆積層と基盤のインピーダンス比が大きい場合には，反射波の到達走時とτ_rが非常に良い対応を示した．本研究では地表付近の滑り速度を用いて堆積層の影響を検討したが，同様に断層近傍の地震動についても議論を進めたい．

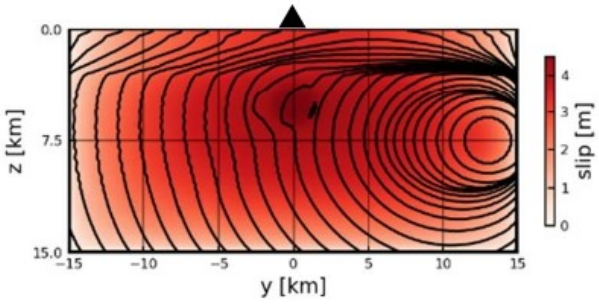
参考文献

Kaneko and Goto (2022). The origin of large, long-period near-fault ground velocities during surface-breaking strike-slip earthquakes, GRL, 49(10), e2022GL098029.
Wada and Goto (2012). Generation Mechanism of Surface and Buried Faults: Effect of Plasticity in a Shallow-Crust Structure. BSSA, 102(4), 1712-1728.
Yin and Denolle (2021). The Earth's Surface Controls the Depth-Dependent Seismic Radiation of Megathrust Earthquakes. AGU Advances, 2(3), e2021AV000413.

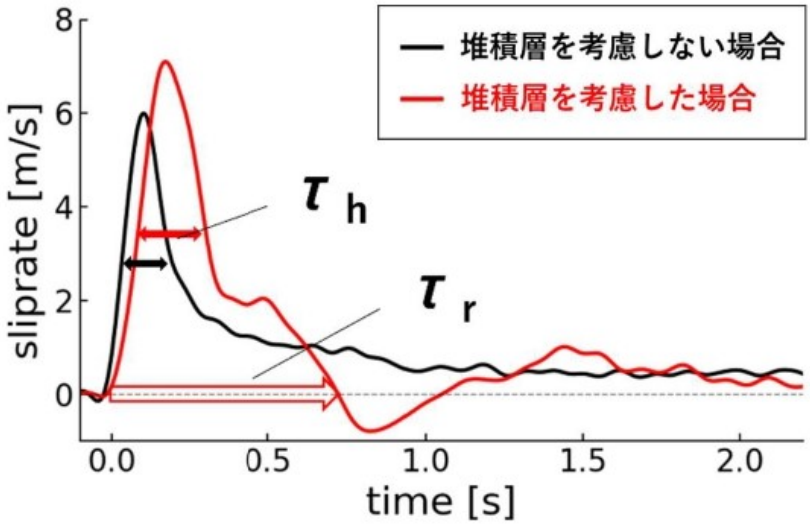
© The Seismological Society of Japan

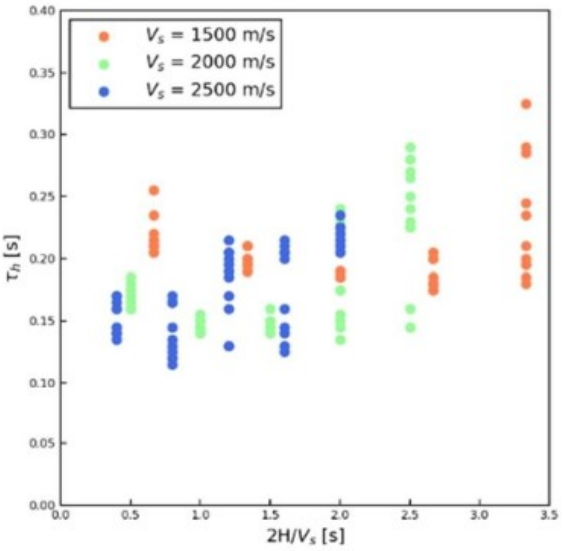


半無限均質媒質（堆積層を考慮しない場合）

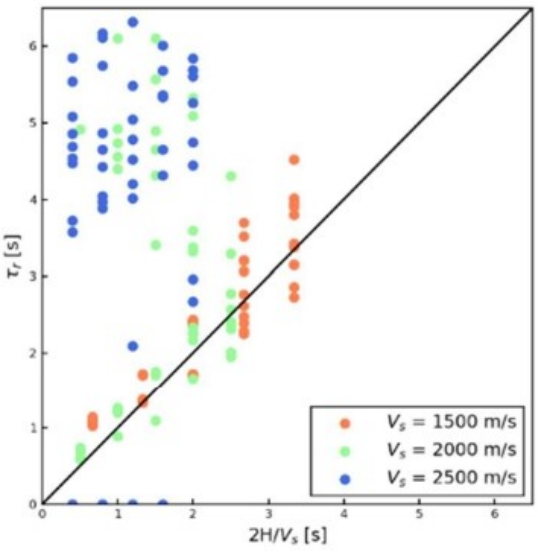


2層系水平成層構造（堆積層を考慮する場合）





$2H/V_S$ — τ_h



$2H/V_S$ — τ_r

© The Seismological Society of Japan

Spectral Characteristics of Long-Period Ground Motion Inferred from the F-net Broad-Band Strong Ground Motion Records

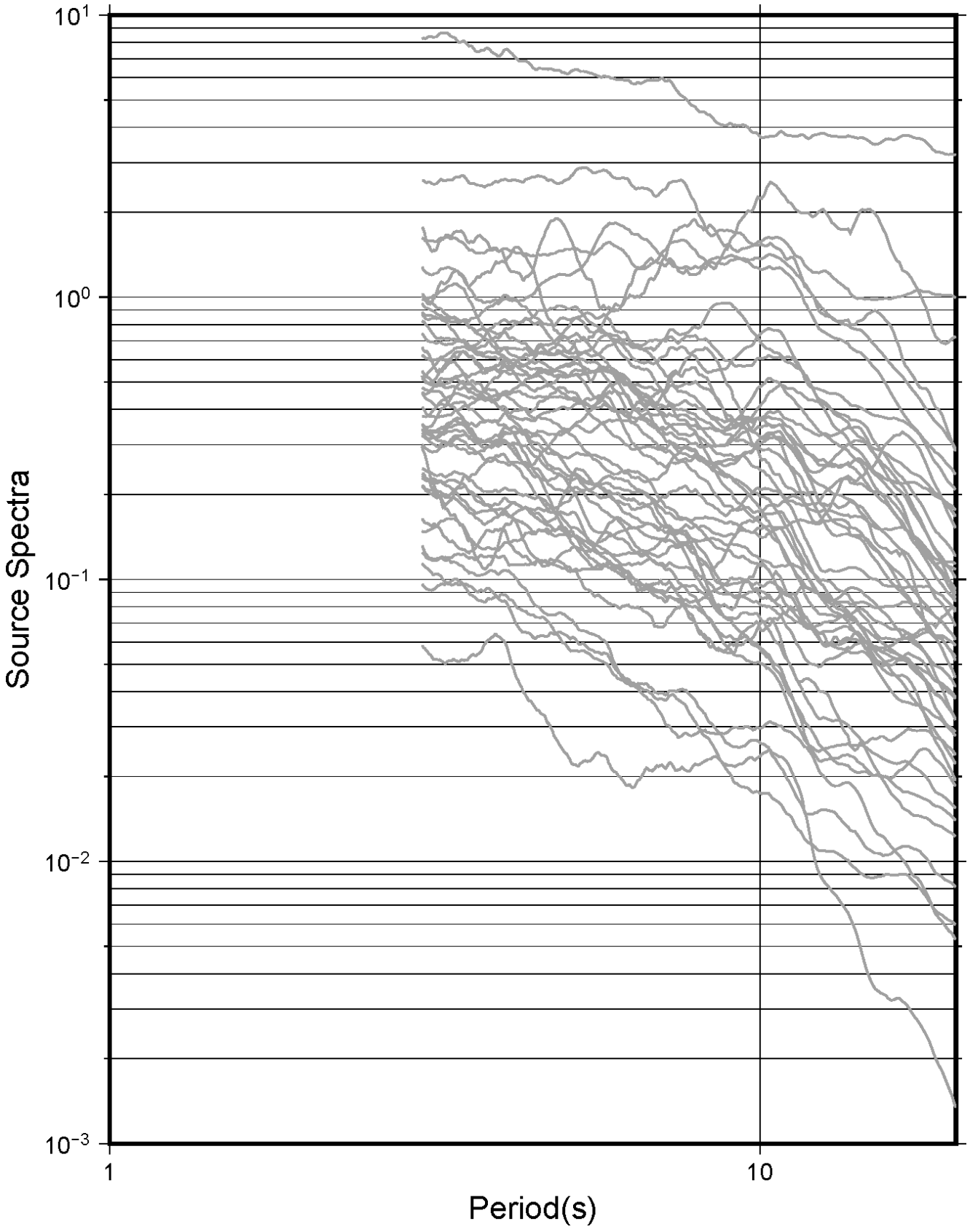
*Ken HATAYAMA[1]

1. National Research Institute of Fire and Disaster

研究の動機 消防法令で定められている大型石油タンクの長周期地震動に対する耐震基準は，2003年十勝沖地震の際に苫小牧地域の石油タンクで火災，浮き屋根沈没等の甚大なスロッシング被害が発生したことを受けて，2007年に大きく改正された．その改正では，耐震基準上の長周期地震動レベルである「液面揺動の設計水平震度」が，石油タンク立地地域の長周期地震動スペクトル特性に応じて，最大2倍引き上げられた．そこでの判断材料となった長周期地震動スペクトル特性は，基本的に，座間(2000)など座間による一連の研究から編み出された経験的長周期地震動予測式から得られたものであった．ここで，座間(2000)の経験的長周期地震動予測式は，全国共通の標準スペクトルと，石油タンク立地地域と地震地体構造区分上の震央地域の組み合わせ毎に過去の地震記録から経験的に推定されたサイト増幅スペクトル（標準スペクトルに対する観測スペクトル比）との積という構造になっている．この地震動予測式は，近年発生した大地震（2003年十勝沖地震，2011年東北地方太平洋沖地震も）の際の観測スペクトルをそれなりに再現するが，そのような良い結果にならない事例もある． 2016年熊本地震の際，大分地域の浮き屋根式石油タンクではスロッシングが発生し，浮き屋根の浮き室が損傷した．この地震の際には，大分よりも震源から遠方の地域でも，遠方のわりには高いレベルの長周期地震動が観測され，ところによってはスロッシングも観測された．大分地域を含め，これらの地域で観測された長周期地震動のレベルは，のきなみ，座間(2000)の経験的長周期地震動予測式による予測値を数倍から10倍上回った．これは，長周期地震動の全体的なレベルを左右する標準スペクトルが，この地震に対してはうまく機能していないことを示唆している．座間(2000)の経験的長周期地震動予測式における標準スペクトルは，Kudo(1989)の提案式を改良したものとなっているが，（1）距離減衰項の中の減衰パラメータは，依然としてKudo(1989)が用いたMamula et al.(1984)の提案値であり，データが少ない時代の経験値であること，（2）震源深さが表面波励起強度に及ぼす影響が考慮されていない，などの問題点を指摘することができる．もっとも，これらのことで生ずる問題は，サイト増幅スペクトルが吸収し，地震動予測式としては，結局は一定程度つじつまが合うような構造になっているのであろうが，「標準スペクトル」なるものをより適切にモデル化することによって，より高い精度の地震動予測式を編み出せる可能性は期待できる．このような観点から，2022年の日本地震学会秋季大会での発表では，（1）の問題を考えるべく，岩盤もしくは硬質地盤上で多数の良質な長周期地震動記録が蓄積されているF-net広帯域強震記録を用いて，長周期地震動の全国平均的な減衰特性を調べた．今回は，同じくF-net広帯域強震記録を用いて，（2）の影響について調べた．

解析内容と結果 2003年9月26日の十勝沖地震以降，2020年3月までに日本周辺で発生したMw6.5以上の地震のF-net広帯域速度型強震計記録（サンプリング周波数20Hzのもの）のうち震央距離1,000km未満のもの対象として，岩田・入倉(1986)流のスペクトルインバージョン解析を行った．観測スペクトルに対するモデル式における距離減衰項は，Mamula et al.(1984)と同じく，$\exp[-\alpha(T)\cdot r]/r^{0.5}$（r：震央距離，T：周期，$\alpha(T)$：単位距離あたりの減衰強度）とした．解析対象周期は3～20sとした．観測スペクトルは，水平2成分の加速度フーリエ振幅スペクトルの幾何平均とし，スペクトル解析区間は，とりあえず，発震時からおおむね15分間（波形の立ち上がり時刻ではない）とした．各記録につき，記録長が短く地震動の主要動部分が記録されていないもの，波形がおかしいもの，ノイズが大きいもの，水平2成分合成振幅の最大値が20mkine未満のものは除外した．さらに，解析対象地震は，5個以上の観測点で解析対象記録が得られているもの，解析対象観測点は，5個以上の地震で解析対象記録が得られているものとした．サイト増幅特性の基準点は，とりあえず，つくば観測点とし，全周期について増幅率1とした．結果，46個の地震，70個の観測点，1,718個の観測記録が解析対象となった． 解析の結果得られた震源スペクトルを図に示す．発表では，マグニチュードが近い地震どうしを比較し，震源の深さとスペクトルレベルの関係を議論する． 謝辞 国立研究開発法人防災科学技術研究所の広帯域地震観測網F-netのデータを使わせていただきました．記して感謝します．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Long-period ground motion simulations in the western part of Shizuoka prefecture for large earthquakes in the Nankai trough (Part 2)

*Takeshi NAKAMURA[1]

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

本研究では、南海トラフで繰り返し発生している大地震について、海域の3次元地下構造や海水層、海底地形を含む構造モデルを用いて、静岡県西部地方をターゲットにした長周期地震動のシミュレーションを実施した。静岡県西部は、牧之原台地から西方の遠州灘沿岸部で低地が続き、浜名湖から天竜川河口付近にかけて広がる浜松平野においては高さ100 m超の高層建築物が複数立地する。1944年東南海地震では、紀伊半島南部の破壊開始点から断層面上で破壊フロントが伝播する方向にあたり、また、それと平行して海洋堆積層がトラフ軸に沿って広がる方向に位置し、伝播経路上の堆積層で生成、増幅した表面波の伝播が予想される場所である。断層面上のすべり分布の不均質性が大きく破壊様式が多様な大地震の断層震源に対し、本研究では基準とする震源モデルから多数の派生的なモデルを構築、シミュレーションを実施し、モデルの不確実性による振幅のばらつきを含めた評価を行った。

観測点は、防災科学技術研究所KiK-net SZOH28（浜松市）を対象とし、波形合成で必要となるグリーン関数の計算では、Nakamura et al. (2012)による3次元差分法を用いた。地下構造については、J-SHIS（藤原・他, 2012）および仲西・他（2021）等のモデル、陸上および海底地形についてはGEBCOによる15秒メッシュデータを用いた。震源モデルについては、Murphy et al. (2016)による手法に倣い、基準とする断層震源モデルのすべり量分布を確率密度関数として、マルチスケールの円形クラックを確率密度関数に従って配置した派生的なすべり分布モデルを50個準備した。多数の震源モデルに対して波形合成を効率的に実施するため、本研究では相反定理を用いて総計算量を節減した。基準とするモデルとしては、前回発表（2022年度日本地震学会秋季大会）で用いたIchinose et al. (2003)およびKikuchi et al. (2003)に加え、本発表では内閣府（2012）によるモデルも用いた。各すべり分布モデルに対し、破壊伝播速度や破壊開始点などのパラメータを変えながら長周期帯（5秒以上）の波形振幅値を求め、速度波形の最大振幅値について数倍の違いが生じることを確認した。また、振幅値のばらつきは、断層直交成分で大きいことを確認した。複数の構造モデルを用いたシミュレーションも実施し、海水層の有無による振幅の明瞭な違いは見られず、震源に関わるパラメータと比べて注目周期帯においては海水層の影響は小さいと考えられる。なお、本研究は、科研費19H01982の助成を受けたものである。

© The Seismological Society of Japan

Source process inversion method with local seismograms for the interplate earthquake along the Nankai trough

*Takahito NISHIMIYA[1], Fuyuki Hirose[1]

1. Japan Meteorological Agency, Meteorological Research Institute

南海トラフ沿いでプレート間大規模地震が発生した場合に破壊領域（地震すべり領域）を速やかに推定できるよう、近地震源過程解析の手法開発を進めている。
気象庁では、南海トラフ沿いのプレート境界でM_W7.0以上の地震が発生した場合に速やかに南海トラフ臨時情報を発表することとしており(下山・他,2021)、このためリアルタイムで伝送される気象庁の地震観測網のデータから震源過程を得る手法を目指している。
南海トラフについては、海域の厚い堆積層が観測される地震波に大きな影響を与え(例えば Nakamura *et al.*,2015)、その影響を考慮した解析が必要である（例えば Takemura *et al.*,2018）。
そこで震源過程解析で用いるグリーン関数を3次元構造をもとに計算することとし、今般そのプロトタイプを作成した。概要は以下のとおり。

1.手法
(1) モデル設定
　南海トラフから駿河トラフにかけての沈み込むフィリピン海プレート（PHS）の上面（プレート境界面）上に約1,300のグリッドを配置し、そのグリッドでの地震すべりの時系列（またはそれに対応したモーメントレート）を解析する。グリッドは水平面投影で緯度方向に0.1度、経度方向に0.125度ごとの配置となっている。
　対象となるグリッドとその隣接グリッドとの間にできる三角形の面（多い場合4面）の法線ベクトルを求めてそれらの平均をとり、そのベクトルから対象グリッドの走向・傾斜角を設定している。すべり角については後述。

(2) 震源過程インバージョン
　すべりの方向が各グリッドに与えたすべり角から±45度の範囲内に拘束される手法とし、観測波形と合成波形の差が最小となるよう非負最小二乗法で解く。すべりのグリッドが矩形平面断層上に配置した各小断層の中心であれば、例えば Ide *et al.*(1996)と同様の手法となる。
　与えるすべり角は、南海トラフ付近でのPHSの移動方向を参考に、水平面投影で120度となるようにグリッドごとに設定している。
　各グリッドと観測点間のグリーン関数は3次元構造を用いてあらかじめ計算している。構造にJIVSM(Koketsu *et al.*,2012)、計算にOpenSWPC(Maeda *et al.*,2017)を用いた。
　グリッドごとの各すべり方向の総すべり量が空間的に滑らか、-45度と+45度の方向のすべりが同程度、という制約を課す。結果的に水平面投影で120度の方向のすべり量が空間的に滑らかという制約になる。
　なお、制約の条件との間のハイパーパラメータについては試行錯誤して設定した。

2.検証
　現在検証を進めているところであるが、予稿投稿時点で以下のような結果が得られている。

＜昭和東南海タイプの地震の観測波形の合成＞
　南海トラフ沿いでの地震発生シミュレーション(Hirose *et al.*,2022)の中から昭和東南海タイプのすべりのシーケンスをもとに各グリッドでのすべりの過程を設定し、前述のグリーン関数を用いて、各観測点での観測波形を合成した。

© The Seismological Society of Japan

＜インバージョン解析＞
　上記を観測波形として、作成したプロトタイプでインバージョンを行った。ただし、インバージョンで使用するグリッドについては、南海トラフから駿河トラフにかけての広範囲だがグリッドの総数が概ね100となるように間引いた。結果、水平面投影でグリッド間隔が３倍程度と粗くなっている。
　また、各グリッドで使用できるすべりの基底関数の個数がプログラムの制約上最大で25となっているため、観測波形を合成するのに用いた基底関数よりも継続時間が長いものをインバージョンでは使っている。

＜結果＞
　九州から関東にかけての観測点を用いた解析で、すべり領域が潮岬の東側に限定され（昭和東南海タイプ地震のすべり領域の広がりに対応）、西側ではすべっていないという結果が得られた。

© The Seismological Society of Japan

Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning (2) forecasting building shaking

*Takashi FURUMURA[1], Yusuke Oishi[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Data-Driven Innovation Initiative, Kyushu University

1. はじめに

深層学習に基づいて、大地震の際に大型平野で発生する長周期地震動とそれによる高層ビルの揺れの即時予測モデルを開発した。震源近傍での強震観測データを入力として、関東平野の代表地点での長周期地震動と、その周辺の高層ビルの揺れの即時予測を目指す。現行の緊急地震速報での長周期地震動階級の予測に対し、地震波形を予測することで建物の揺れの継続時間と累積震動エネルギー等による影響評価が可能になる。震源情報（位置、深さ、規模）を必要としない、“揺れから揺れ”の予測のため、震源決定にかかる時間が省略され、また大地震の同時発生の場合にも対処できる利点もある。 深層学習による予測は、まず震源近傍での強震観測データを入力として、関東平野の代表地点の長周期地震動を予測し、次に、この地点（地面）の予測波形から、周辺の高層ビルの揺れを予測する２段階で行う。１段階の予測モデルは、予測対象とする大地震の震源域（日本海溝沿い、南海トラフ沿いなど）と、これに用いる入力観測点毎に用意する必要があるが、２段階目の予測モデルは全地震に対して共通となる。

２．データ・手法

日本海溝沿いの大地震を対象として、防災科学技術研究所のF-net広野観測点（HROF；福島県双葉郡）の強震計データを入力として、200 km離れたMeSO-net 銀座観測点（GNZM；東京都港区）の長周期地震動を予測し、次にGNZMから1.5 km離れた中央合同庁舎７号館32階（CG7；千代田区霞が関）の揺れの予測を行った（Fig. 1 ）。建物観測データは、建築研究所の強震データベースより取得した。 地震動予測には、Furumura and Oishi (2023)のTemporal Convolutional Network（TCN）に基づく手法を用いた。そして、(1) HROFからGNZM、(2) GNZMからCG7の２つのTCNモデルを用意し、１段階目の予測モデルの学習は、2008～2011年に東北沖で発生したM5.5以上の174個の地震（Fig. 1 ：緑印）波形を用いて行った。２段階目のモデルの学習には、2015～2021年に日本周辺で発生したM5.5以上の地震26個（Fig. 1 ：赤印）を用いた。GNZM及びCG7観測点の加速度波形は、HROFに揃えて速度波形に時間積分し、0.08–3 Hzのバンドパスフイルタをかけた後に５ Hzにリサンプリングして1000秒間の学習データセットを用意した。TCNモデルは、畳み込み層のフイルタ数を256、カーネルサイズを3, 畳み込む要素間の間隔（dilations）を2,4,…,512に設定し、活性化関数にはlinear、評価指標にはRMSEを用いた。Keras-TCNライブラリ(Remy 2020)を用いてPythonコードを作成した。バッチサイズを5とする500エポックの学習に要する時間は、東大情報基盤センターのWisteria-aスパコンのGPU（NVIDIA A100）を用いて３分程度であった。

３．予測結果

２つの学習済みTCNモデルを順に用いて、学習に用いていない、2021年以降に東北沖で発生した大地震（≧M6.3）の際の都心と高層ビルの揺れを予測した。Fig. 2 に宮城県東方沖の地震（M6.8）と福島県東方沖の地震（M7.2）の２例について、福島地点の入力波形（HROF）を示し、都心の予測波形（GNZM）、高層ビルの予測波形（CG7）を実際の観測波形と比較する。予測の一致度は、１）速度応答スペクトルの強度比（*pSvR*）、２）波形エンベロープの相関係数(*ECCC*)、３）弾性震動エネルギーの総和比(*EnR*)、４）揺れの継続時間（最大振幅の1/10までの時間）比（*DuR*）の４つの指標で定量化し、観測値の倍・半分（2.0～0.5）の範囲内に収まることを確認した。CG7の速度応答スペクトルを見ると、１次モードの卓越周期（1.2 s）が若干長周期側にずれているが、基本モード（3.2 s）とともに建物の震動特性を良く評価できていることがわかる。また、建物強震観測データは600秒程度で切れているが、揺れはこれよりもずっと長く続いたこともわかる。 学習済みTCNモデルにより１回の波形予測に要する時間は、0.06秒程度である。HROFからGNMZまでの表面波の伝播には1分以上の猶予時間があり、最新の観測データを用いた予測の繰り返し更新による精度向上が期待

© The Seismological Society of Japan

できる。

４．今後に向けて

地面から高層ビルの揺れの予測は、長周期地震動の波長（数km）程度離れた、より遠くのMeSO-net観測点を用いても同様の結果が得られた。首都圏に高密度（2～10 km間隔）に設置されたMeSO-netを活用することで、関東一円の高層ビルの揺れ予測が可能であろう。各建物の揺れを予測する（２段階目の）TCN予測モデルの学習には建物強震観測が一定期間必要であるが、自然地震に加えて風や常時微動の観測データが活用できる可能性がある。

5. 謝辞

防災科学技術研究所のF-net及びMeSO-net観測データ、建築研究所強震観測ネットワークの建物強震観測データを使用した。東大情報基盤センタースパコンの利用には、東京大学地震研究所共同利用の援助を受けた。

© The Seismological Society of Japan

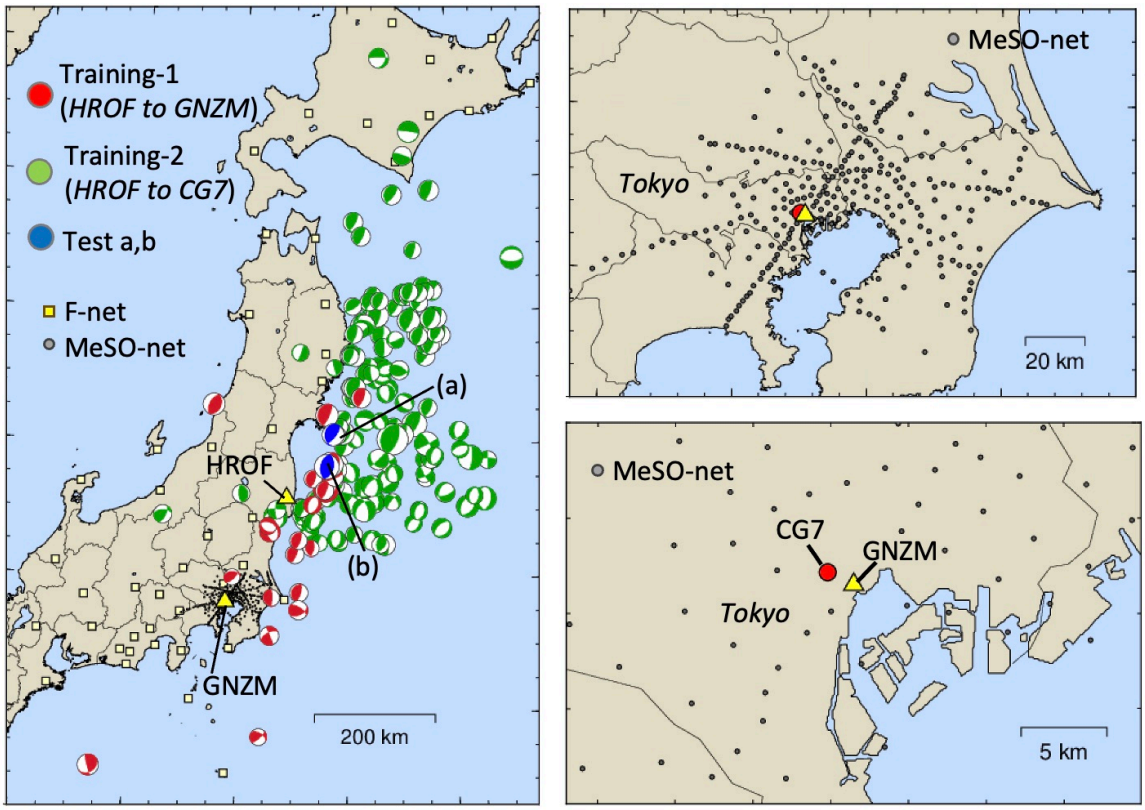


Figure 1. Maps showing the earthquakes used to train the two TCN models and locations of F-net (HROF) and MeSO-net (GNZM). Enlarged maps of the Tokyo area and the locations of CG7 and GNZM are shown on the right.

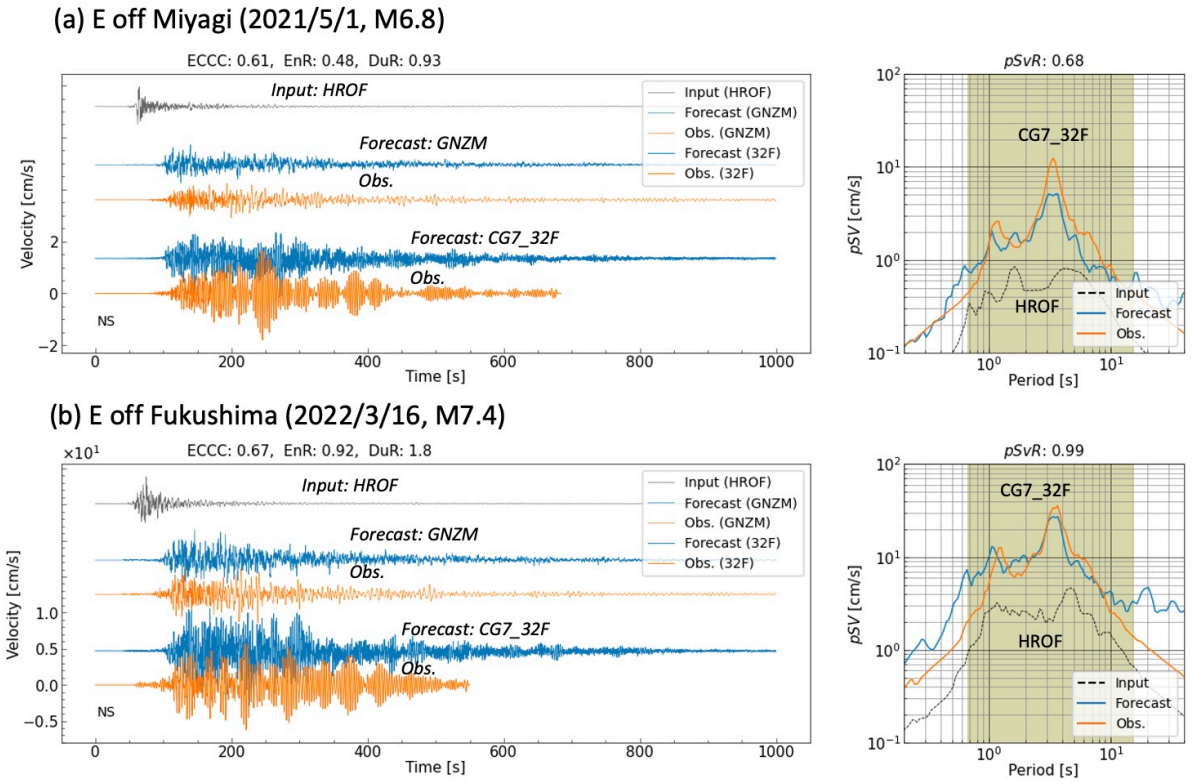


Figure 2. Forecasted long-period motion results of NS component for two test events (blue in Fig. 1), (a) E off Miyagi, 2021/5/1, M6.8) and (b) E off Fukushima (2022/3/16, M7.4) earthquakes. From top, observed waveforms at HROF (input motion), forecasted (blue trace) and observed (orange trace) waveforms at GNZM, and forecasted (blue) and observed (orange) waveforms at 32nd floor of CG7. Velocity response spectra of input (HROF), forecasted and observed waveform at CG7 are shown on the right.

© The Seismological Society of Japan

An earthquake early warning algorithm using wave propagation directions estimated with a machine learning technique

*Yuki KODERA[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

巨大地震や連発地震が発生した場合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観測された揺れから将来の揺れを直接予測する手法が提案されてきた（例えば，Hoshiba and Aoki, 2015; Kodera et al., 2018）．これらの手法では，各地点で観測された波の振幅（リアルタイム震度；功刀・他，2013）を入力として波動伝播の実況把握・将来予測を行っているが，振幅のみならず，伝播方向といった他の物理量も合わせて観測値として用いることができれば，より予測パフォーマンスが向上すると期待される．本研究では，観測リアルタイム震度および機械学習から推定した伝播方向を入力として，ALPHA法（距離減衰を導入したPLUM法；Kodera, 2019）の改善を検討した．
ALPHA法は，短距離の地点しか予測できないというPLUM法の技術的課題に対処するために開発された手法である．PLUM法は観測リアルタイム震度が半径30km以内であれば減衰せずに伝わると仮定して予測するのに対し，ALPHA法では各観測点において付近（~45km以内）の観測リアルタイム震度の分布から距離減衰を推定し，その距離減衰を用いて遠く（~300km以内）の地点の震度を予測する（距離減衰は，各観測点直下に置いた点震源の重ね合わせで表現）．現在ALPHA法が距離減衰を推定する際には，基準観測点から見て最も観測震度が小さい方向を伝播方向と見なしたうえで点震源モデルの距離減衰を当てはめて計算しているが，これを機械学習から推定した伝播方向に置き換える．伝播方向にある観測点のうち，観測震度が大きい観測点（但し基準観測点よりも観測震度が大きい観測点は除外）を用いて距離減衰の当てはめを行う．これにより，従来のALPHA法に比べてより早く正確な距離減衰が推定できると期待される．各観測点における伝播方向の推定は，3成分の加速度波形を入力とした深層学習モデルを用いる（小寺，地震学会2022）．
KiK-netひたちなか（IBRH18）を基準観測点として2018年2月～2022年7月の地震に対して手法の検証を行ったところ，推定された伝播方向に観測点が十分にある場合においては，正確な距離減衰が従来のALPHA法よりも早く求められるケースがあった．一方で，伝播方向の推定精度が悪いために距離減衰が正しく求められず予測震度を過大評価してしまう等の事例も見られた．今後は伝播方向の推定精度を高めるとともに，伝播方向の推定精度が悪い場合の予測計算を改善する予定である．

© The Seismological Society of Japan

Real-time seismic intensity prediction using deep learning and synthetic data

*Anju Ohta[1], Ahyi Kim[1], Yukino Yazaki[1], Hisahiko Kubo[2], Masami Yamasaki[1]

1. Yokohama City University, 2. NIED

地震発生時、リアルタイムに各地の震度や大きな揺れの到達時間を知ることは、瞬時の安全確保や避難のタイミング、救助活動等の点で重要である。しかしながら、空間的に高解像度な震度予測を精度良く行うには、観測点密度の増加が効果的であるが、コスト面で難しい。そこで現在は地質情報を用いる補完方法が使用されているが、地質情報の質や量で精度が左右されるという課題もある。これに対し、既存の地質情報を使用しない深層学習での震度予測も提案されている。本研究では比較的学習データが少ない横浜市周辺において、深層学習モデルLong-Short Time Memory(LSTM)を使用してリアルタイム震度の予測モデルを作成した。また、模擬データを用いたデータ拡張の有効性についても検討した。 本研究では、ある予測観測点1点のリアルタイム震度の時系列を周辺4つの観測点のリアルタイム震度から予測する。この5つの観測点には、防災科学技術研究所の強震観測網K-NETから予測観測点にKNG002、入力観測点にKNG004、KNG012、TKY007、TKY021を用いた。ここで得た観測波形データは功刀他(2013)の手法でリアルタイム震度に変換し、データ長を100秒に統一して学習する。本研究では学習するデータに基づいて3つの手法に分けて行った。(1)観測実データのみでの学習では、1996年～2022年で5つすべての観測点で観測できたイベントの中で、Ｐ波が含まれていることを確認できたイベント（147イベント）の観測波形データを用いて学習を行う。(2)観測実データと模擬データの学習では、予測観測点と入力観測点4つのうち1つでも観測できたイベントの中で、Ｐ波が含まれているイベント（410イベント）の観測波形データを用いる。このイベントの中で観測できていない、もしくはＰ波が含まれていない地震は久保・功刀(2022)の手法を用いて模擬データを作成し補完した。(3)模擬データのみでの学習では、(2)と同じイベントを使用するが、すべて模擬データに置き換えたもので学習を行った。そしてそれぞれの手法で、0秒先予測と事前予測である8秒先予測を行った。予測結果の評価指標にはMAEとRMSEを使用し、8秒先予測では入力観測点の距離で重みづけした加重平均値、PLUM法を模した入力観測点の最大値も加えて比較を行った。(1)-(3)において、特に8秒先予測ではRMSE、MAEの値は加重平均値よりは低く、最大入力値とはほぼ同等の精度となった。しかし、予測された時系列を確認するとリアルタイム震度の短時間での急激な変動が目立った。そのため、移動平均的な意味合いでダウンサンプリングを行った結果、0秒先予測8秒先予測ともに値の上下振動が緩和された。また、過去に観測データがない地点での予測可能性を考慮し、シナリオ地震の検討を行った。ここでは既存の地震データの範囲で、震源の緯度、経度、深さ、マグニチュードのパラメータをランダムに決定してシナリオ地震を作成し、入力観測点で記録されたとした場合の模擬データを2000個作成した。この模擬データを学習データとして学習・予測をしたところ、上記(1)-(3)の方法とほぼ同等の精度となった。この結果により、教師データがない地点での予測の有効性が示唆された。次のステップとして、さらなる精度の向上を図るために、入力観測点の追加も検討する。

© The Seismological Society of Japan

Validation of site-specific seismic motions generated by combining cGAN and GIT

*Yusuke TOMOZAWA[1], Junki YAMAGUCHI[1], Toshihide SAKA[1]

1. Kajima Technical Research Institute

1．はじめに

現行の地震動評価において，周期1秒程度以上の長周期成分は三次元差分法などの決定論的な波動伝播シミュレーションで求め，1秒程度以下の短周期成分は統計的手法で求め，両者をハイブリッドする手法が多く取り入れられている（例えば，SCEC BBP）。一方，近年の機械学習技術の発達と強震観測記録の充実により，全く別のアプローチから地震動の時刻歴波形の生成が可能となっている（例えば，Florez et al., 2022; Esfahani et al., 2022）。著者らは，Conditional Generative Adversarial Networks (cGAN) とGeneralized Inversion Technique (GIT) を組合せ，振幅特性と経時特性にある確率分布をもった時刻歴波形群を出力する手法（山口・他，2022）を提案しており，本検討では提案手法により出力した地震動と観測記録との比較からValidationを行った結果について報告する。

2．観測記録を用いたValidation

cGANによる経時特性モデルの構築は，収集した45,145記録のうちランダムに抽出した約78%の35,415記録を学習用のデータとし，残りの10,000記録を検証用データとしている。この10,000記録に対して，提案手法により観測記録ごとに10波の波形群を生成し周波数特性と経時特性の比較を行った。例として，2016年4月27日の宮城県沖の地震Mw 5.0における震源距離55.9 kmのMYG011観測点での観測記録と本手法により生成した10波の比較を図1～図5に示す。出力波形群は，P波とS波とコーダ波が再現されており，加速度波形の全パワーで正規化された累積パワー曲線（Husidプロット）の観測と計算との対応もよい。フィッティング範囲とした1～10 Hzでのフーリエ振幅スペクトルは，観測と整合した結果が得られている。

次に，10,000記録を対象に上記と同様に提案手法により時刻歴波形群を出力し，その残差（提案手法による10波の平均フーリエ振幅スペクトル／観測記録のフーリエ振幅スペクトル）の平均を図6に示す。1 Hzよりも高周波数側では，平均的には概ね残差が1倍となっている。フィッティングの対象外ではあるが1 Hzよりも低周波数側では過大評価となっている。この原因とし，マグニチュードが大きく低周波数側までシグナルのある観測記録が学習データにそれほど含まれていないため，出力された基準化時刻歴波形に低周波数側の情報が含まれていないことが考えられる。 波形の継続時間を表す指標として$D_{5\text{-}95}$に着目し，観測記録と本検討の出力結果の比較を図7に示す。平均的に見れば，残差（提案手法による10波の$D_{5\text{-}95}$の中央値／観測記録の$D_{5\text{-}95}$）の平均は$\mu = 1.07$と概ね整合し，標準偏差$\sigma = 0.352$となった。$D_{5\text{-}95}$は多数の経験式が提案されており，経験式作成時の残差の標準偏差は，Bommer et al. (2009) は$\sigma = 0.475$，Kempton and Stewart (2006) は$\sigma = 0.440$，能島 (2015) は$\sigma = 0.401$であるので，本検討のσは十分に小さい値となっている。振幅特性と経時特性の両方に観測点ごとの経験的情報を考慮したSite-specific地震動を出力しているためと考えられる。

3．課題と今後の展望

あるマグニチュード，距離，観測点での時刻歴波形群を出力することができることを示し，観測記録を用いた定量的な検証からこの手法の有効性が示された。本検討ではプレート間地震のみを対象としているが，その他の地震タイプへの拡張や，震源深さもパラメータに入れるなどのモデルの改良が今後必要と考えられる。提案手法により大規模地震を直接予測することは現時点では課題があると考えているが，山口・他（2023，本大会）のように波形合成手法と組み合わせることによって，大規模地震の予測は可能と考えている。

謝辞

防災科学技術研究所K-NET，KiK-netの観測記録とF-netのメカニズム解を活用させていただきました。記して感謝します。

© The Seismological Society of Japan

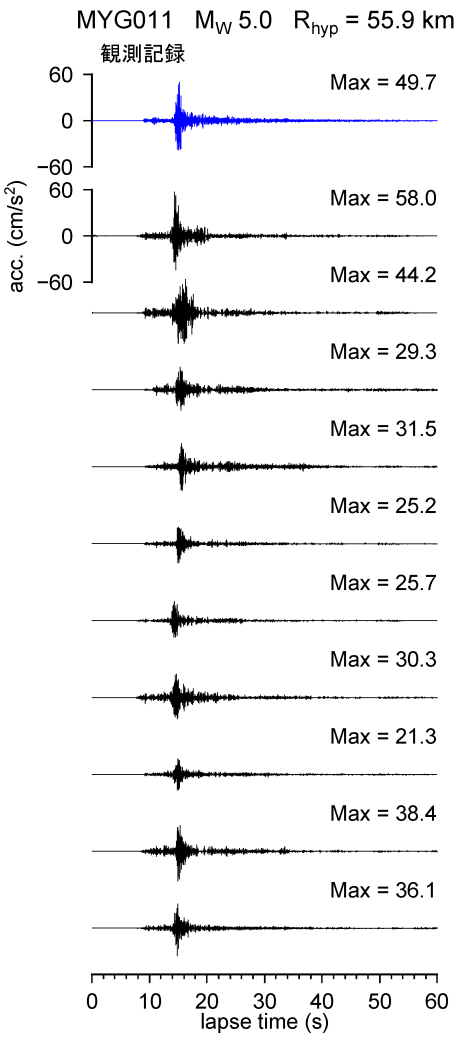


図 1　観測記録と出力 10 波の加速度波形

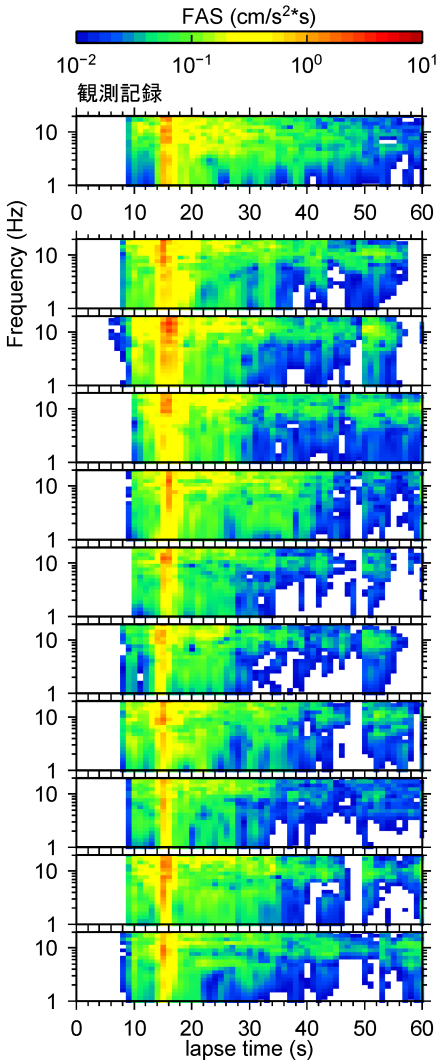


図 2　観測記録と出力 10 波のランニングスペクトル

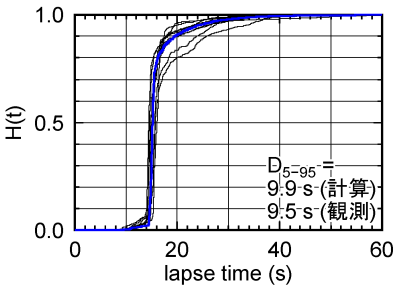


図 3　Husid plot の比較

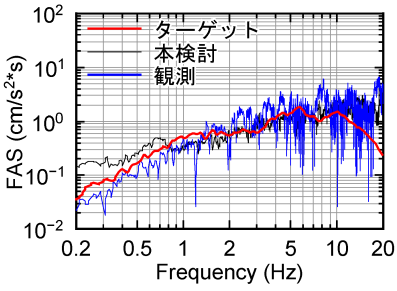


図 4　フーリエ振幅スペクトルの比較

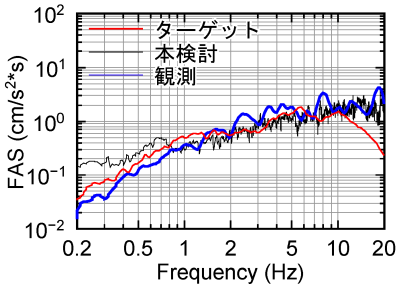


図 5　フーリエ振幅スペクトル（平滑化）の比較

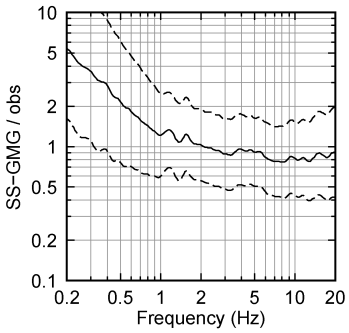


図 6　残差（本検討による 10 波の平均 FAS／観測記録の FAS）の平均

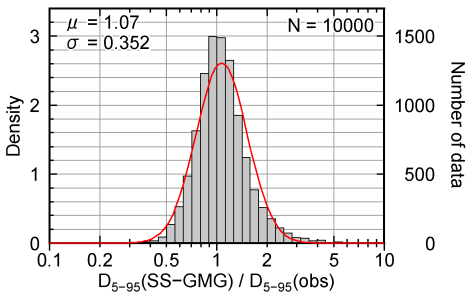


図 7　検証用記録の D_{5-95} と本検討により出力した 10 波から評価した D_{5-95} の中央値の残差の分布

© The Seismological Society of Japan

Evaluating large-magnitude waveforms using site-specific ground motion generated by combining cGAN and GIT

*Junki Yamaguchi[1], Yusuke Tomozawa[1], Toshihide Saka[1], Tomoki Hikita[1]

1. Kajima Technical Research Institute

１．はじめに

経験的グリーン関数法 (EGF) や統計的グリーン関数法 (SGF) で大規模地震の評価を行う際には、波形合成に用いる要素地震の設定で評価結果の精度が左右されるという課題がある。EGFでは小地震記録を要素地震として用いるが、適切な小地震記録がない場合があることや、どの小地震記録を選択すべきかが一意に決まらないことなどがある。SGFでは、ランダム位相を用いて要素地震波を作成するが、観測記録のような時刻歴波形の複雑性や地点固有の経時特性の再現が困難である。本研究では、既報（山口ら(2022)）によって生成した時刻歴波形群を要素地震とする手法を提案する。これにより、あるシナリオに対する振幅特性と経時特性の両方にばらつきを有した大規模地震の時刻歴波形群の出力を目指す。

２．cGANとGITを組み合わせて生成した時刻歴波形による合成手法

今回要素地震とする時刻歴波形の生成には、条件付き敵対的生成ネットワーク(conditional generative adversarial networks; cGAN)とスペクトルインバージョン解析(generalized inversion technique; GIT)を組み合わせた、山口ら(2022)の手法を用いる。cGANに学習させる観測記録や前処理等についても同手法に準ずる。この手法を用いることで、ある小断層から評価地点への要素地震は、振幅特性と経時特性の両方にばらつきを有した時刻歴波形群として設定される。波形合成手法については、Irikura (1986), 入倉・他 (1997), Miyake et al. (2003)を引用する。

３．宮城県沖地震を対象とした波形合成の例

本手法の適用性を確認するために、2005年8月16日宮城県沖地震(Mw 7.1)を対象にして波形合成を行う。震源モデルの研究にはKamae(2006)やSatoh(2006)などがあるが、今回はSuzuki and Iwata(2007)を仮定し、対象観測点や波形合成方法も同様の手法で地震動評価を行う。この地震の観測記録には、２つの明瞭な波群が見られ、2つのstrong motion generation areas(SMGA)が推定されている（図1）。これらを震源に近い順にSMGA1、SMGA2とする。Suzuki and Iwata(2007)では要素地震として2005年9月6日の宮城県沖の地震(Mw 4.1) を用いているが、本研究ではそれを山口ら(2022)の手法によって生成した時刻歴波形群に置き換える。使用する波形群はSMGA1、SMGA2それぞれの中心から図1示す観測点までの距離とMw 4.1を条件として設定し、各観測点に対して10波ずつ生成する。2つの波形群からランダムに様々な組合せで波形を選び重ね合わせることで、各観測地点の大規模地震も波形群として出力できる。

MYGH11とMYGH12の観測点において観測記録と出力した10波の波形群の比較を図2、図3に示す。特にMYGH11の観測記録においては明確な2つの波群が見られたが、本手法においてはSMGA1の波群の再現に課題がある。一方、両観測点の周波数特性について、まずランニングスペクトルでの比較では、ピーク周波数が現れる時間帯等、観測記録と整合するような結果が得られた。フーリエスペクトルにおいては、10波の波形群の平均と標準偏差を示しており、±標準偏差の範囲内で観測記録と概ね整合する結果が得られた。しかし、ピーク周波数帯に関しては観測記録に若干長周期化している部分が見られる。これは大規模地震により地盤が非線形化しているためと推測する。今回の検討では地盤は線形を仮定しているため、改良の余地があると考えられる。

４．今後の課題と展望

本手法では、任意の小断層から評価地点へのグリーン関数を、振幅特性と経時特性の両方にばらつきを有した時刻歴波形群として評価可能である。本手法により生成した波形群を用いた震源インバージョンへの適用可能性についても今後検討を進める。

© The Seismological Society of Japan

謝辞
防災科学技術研究所K-NET、KiK-netの観測記録とF-netのメカニズム解を活用させていただきました。記して感謝します。

© The Seismological Society of Japan

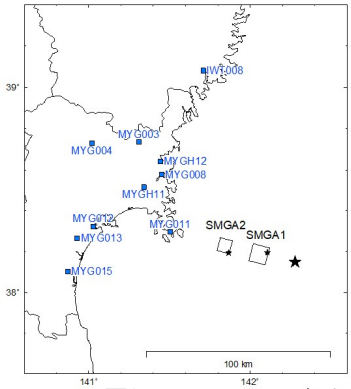


図1　震源、SMGA、観測点

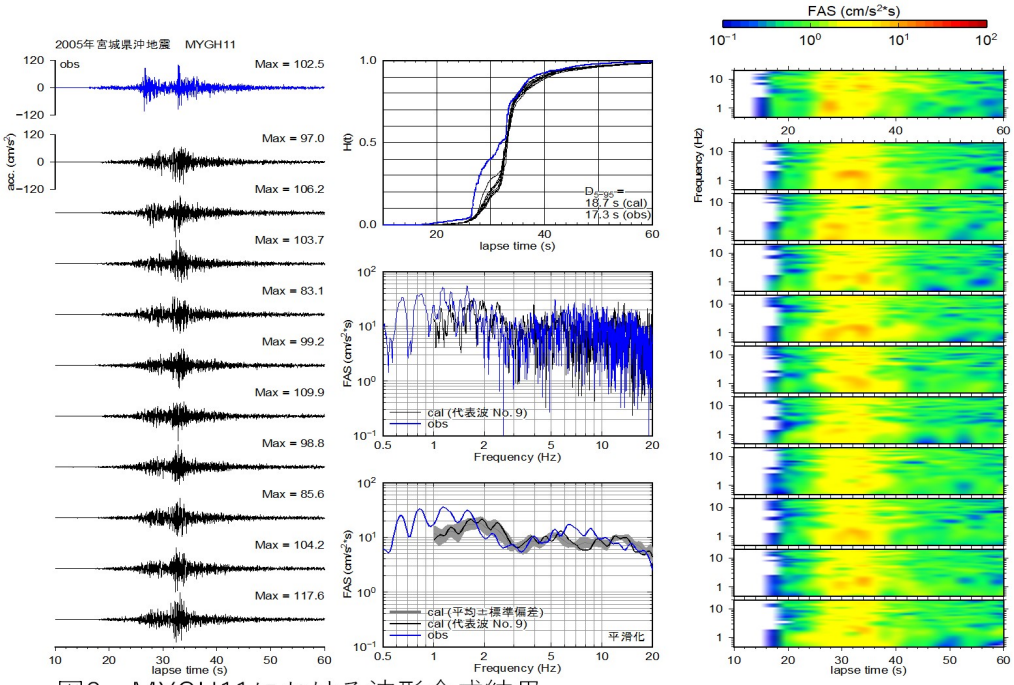


図2　MYGH11における波形合成結果
（経時特性と周波数特性を観測記録と比較）

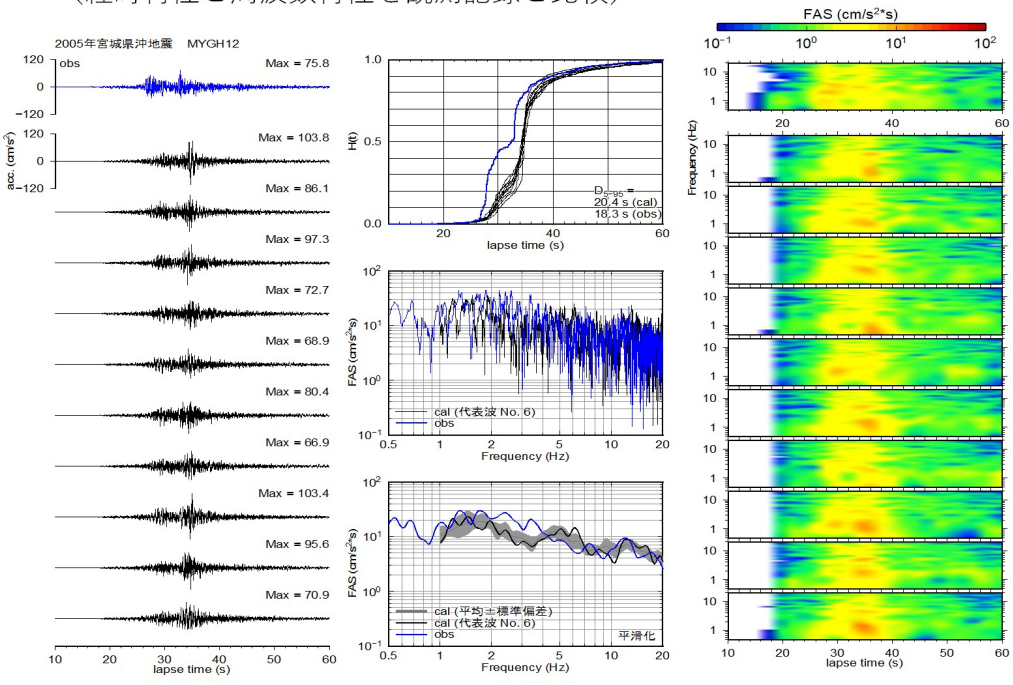


図3　MYGH12における波形合成結果
（経時特性と周波数特性を観測記録と比較）

© The Seismological Society of Japan

Construction of ground motion models using Bayesian neural networks

*Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki Morikawa[2], Hiroyuki Fujiwara[2], Naonori Ueda[1]

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

強震記録の回帰分析により、少数の説明変数から強震動指標を推定する地震動予測式が作成され、確率論的地震ハザード評価に活用されている。予測モデルの不確実性は、モデル設計や使用するデータに起因するepistemic uncertainty（認識論的不確実性）と地震現象の多様性に起因するaleatory uncertainty（偶然的不確実性）に分類され、これらを適切に定量化することが重要である。地震動予測式においては、ガウス過程を用いた不確実性評価が標準的方法として確立しつつある(Abrahamson et al., 2019)。 2000年代よりニューラルネットワーク(neural network, NN)を用いたデータ駆動型の地震動予測式が複数提案されているが(e.g. Derras et al., 2012; Okazaki et al., 2021)、不確実性評価は充分に研究されていない。そこで本研究では、ハミルトニアンモンテカルロ法(Hamiltonian Monte Carlo, HMC)を用いたベイジアンニューラルネットワーク(Bayesian neural network, BNN)による地震動予測式の構築を検討した。

解析にはK-NET・KiK-net強震動フラットファイルデータ（森川ほか2023）を元に日本周辺の233地殻内地震、1209観測点の35,031記録を使用した。地震のマグニチュード・震源深さ・断層最短距離・VS30を入力変数とし、最大加速度・加速度応答スペクトル（周期0.05, 0.5, 5秒）を出力変数とするエルゴード的予測式を構成した。まず確定的NNを交差検証により訓練し、HMCの事前分布（観測誤差・モデルパラメタの事前分散）とサンプリング初期値を得た。これを元にHMCを実行し100,000サンプルを生成した。

HMCにより得られた予測分布の中央値は既往研究と整合的であった。予測値の不確実性は全体的に小さいが、大地震・近距離において増加する傾向が見られた。観測記録に含まれない巨大地震(M8)の予測は不確実性が極めて大きく、データ駆動型モデルのため外挿能力が無いことが確認された。目的変数どうしの相関を調べると、スペクトル周期が近い変数ほど相関が高い傾向が見られた。さらにBNNにおけるepistemic/aleatory uncertainty の取扱いや、HMCの超パラメタ（leapfrog積分のステップ幅・回数）調整についても議論する。

© The Seismological Society of Japan

Correction at Long Distances through Integration of Statistical Green's Function Method and Ground Motion Prediction Equations

*Takahiro MAEDA[1], Hiromitsu Nakamura[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Sho Akagi[2], Kosuke Seki[2]

1. NIED, 2. MESW

広帯域地震動の評価では，統計的グリーン関数法による短周期成分と，差分法等により算出された長周期成分を組み合わせるハイブリッド合成法が用いられている．地震調査研究推進本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) 」に準じたハイブリッド合成法による広帯域地震動評価を震源距離70㎞以上の遠方まで適用すると，地震動予測式と比較して周期1秒以下の振幅が過小となることが指摘されている（Iwaki et al.,2016）．これは，震源距離が「レシピ」の適用範囲を超えていることが要因であるが，遠距離における計算波形に対して地震動予測式と整合するような補正を施すことができれば，遠距離での計算波形を活用できる可能性がある．遠距離まで適用範囲を拡張する手法として，統計的グリーン関数法の距離減衰特性を修正するという抜本的な対応も考えられるが，本研究ではハイブリッド合成法（あるいは，統計的グリーン関数法）による計算波形に対して短周期成分を地震動予測式による予測値に適合させる補正手法を検討する．

本研究では地点毎に地震動計算波形と地震動予測式を個別に整合させるのではなく，面的に計算された多数の時刻歴波形を対象として，特定の距離範囲に含まれる計算記録の平均値を地震動予測式による予測値と整合させる方法を採用する．これにより，計算記録の方位特性や地域性等の面的な特徴が保持されること目指す．また，地震動予測式との整合性は，フーリエスペクトルや応答スペクトルなど地震動の周期特性を表す指標に拠ることとし，本研究ではMorikawa & Fujiwara (2013) の地震動予測式による加速度応答スペクトルとの適合を図ることとした．具体的な手順としては，①特定の距離範囲に含まれる計算波形の応答スペクトルの平均と，地震動予測式による応答スペクトルの平均との比を求める．②①で得られたスペクトル比を個々の計算波形のフーリエスペクトルに乗じ，それらをフーリエ逆変換することで補正波形を求める．③②で得られた補正波形の応答スペクトルの平均が地震動予測式による応答スペクトルに適合しているかを判断する．④適合しない場合は①から③を繰り返す．この際，適合条件は告示スペクトルへの適合波の作成手法を参考に設定した，発表では，計算記録への本手法の適用例や課題について述べる．

謝辞：本研究は，文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われたものです．記して御礼申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Relationships between the peak accelerations and static rotations of the S-net sensors in the Japan Trench area

*Yadab Prasad DHAKAL[1], Takashi Kunugi[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

S-net is a large-scale cable-linked seafloor observation network for earthquakes and tsunamis around the Japan Trench area, established after experiencing the devastating effects of the 2011 Mw 9.1 Tohoku-oki earthquake in northeast Japan (Aoi et al. 2020). The network comprises six segments with 150 stations equipped with seismometers and pressure gauges and has been operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. Out of the 150 stations, 41 stations in the shallow-water regions (water depth < 1,500 m) were buried approximately one meter below the seafloor, whereas the other stations were laid freely on the seafloor in the deeper-water regions. One of the main objectives of the network was to enhance the Japan Meteorological Agency (JMA) earthquake early warning (EEW) and tsunami early warning systems.

It has been reported that the cable-linked sensor houses at the seafloors undergo larger rotations with the increase of peak ground acceleration (PGA) during earthquake motions (Takagi et al. 2019) and can influence the estimation of earthquake parameters for earthquake early warning systems (Hayashimoto et al. 2019). In the present research, we estimated the threshold peak acceleration required in order to induce rotation of the S-net strong-motion sensors by fitting the observed static rotation amounts with the peak acceleration values at each station separately using a larger data set. Firstly, we computed the changes in the orientation angles (hereafter written as rotations) of the sensors by evaluating the roll and pitch angles of the sensors from the pre-event and post-event parts of the 120,112 recordings from 1,878 earthquakes with Mj values greater than four, recorded between August 2016 and June 2022. The observed maximum value of the changes in the orientations was for the roll angle with a change value of approximately 16° at the S2N06 station during the 16th March 2022, Mj 7.4 event. In our data set, changes in orientations by more than 1° were observed in 17 event data, out of which nine event data were from nine separate stations of the S2 segment. The PGAs recorded for these nine cases were between approximately 150 cm/s^2 and 1,400 cm/s^2, and the largest rotation experienced by a station was not necessarily associated with the largest peak acceleration recorded at the station.

By observing that the rotations of the sensors were smaller and relatively flat until some threshold accelerations, we fitted the changes in the orientations with PGAs with two-line segments: one with a constant rotation angle until a certain threshold PGA and the other with increasing rotations for higher PGAs. The analysis showed that the rotations increase log-linearly with the recorded peak accelerations after some threshold accelerations of values between approximately 5 and 50 cm/s^2. No systematic differences were found in the threshold peak accelerations between the buried and unburied stations. However, the changes in the pitch angles were systematically smaller than those for the roll angles, and the threshold PGAs required in order to induce changes in the pitch angles were, on average, smaller than those for the changes in the roll angles at both buried and unburied stations. The detailed results and some discussions on the recorded peak accelerations for the 2022 Mj 7.4 event mentioned above are included in Dhakal et al. (2023).

References:
Aoi et al. (2020) Earth Planets Space, 72:126

© The Seismological Society of Japan

Takagi et al. (2019) Seismol Res Lett, 90(6):2175–2187
Hayashimoto et al. (2019) Q J Seismol, 83(1):1–10
Dhakal et al. (2023) J Disaster Res, 18:7 (in press)

© The Seismological Society of Japan

Characterization and Comparison Method of the Spatial Seismic Intensity Distributions Using Independent Component Analysis

*Takeshi KIMURA[1], Wataru SUZUKI[1], Hisahiko KUBO[1], Sho AKAGI[2], Rina SUZUKI[2]

1. NIED, 2. MESW

日本全国に展開している強震観測点により，地震発生後数分以内には各地の計測震度等の情報を入手できるようになっている．さらに，観測データとこれまで構築されてきた全国規模の地盤構造モデルを活用することにより，観測点が存在しない地点を含むメッシュ状の面的推定震度分布も防災科研や気象庁等から公開されている．これらの情報は，地震発生後の被害推定等に有用であり，災害対応を効果的に進めるために必要不可欠なものと言える．
一方で，被害地震の発生後に地震調査研究推進本部で行われる地震の評価では，主に地震が発生した位置や断層運動の様式，規模等の震源情報にもとづき，対象地震とその周辺で過去に発生した地震の比較が行われている．震源情報に加えて被害に直接関係する震度分布等の地震動の情報についても，その特徴を明らかにし過去の地震との類似性等を把握することで，より被害推定等に有効な地震の評価が行えるだろう．本研究では，強震観測データから得られる面的推定震度分布データを対象に，独立成分分析を適用し特徴の抽出を試みるとともに，分析結果にもとづいた類似度の評価を行った．
解析には，1997年から2019年までに震度5弱以上を観測した地震を対象とした．ただし全255地震のうち，対象地震以外の地震による影響のあった29地震は除き，最終的には226地震のデータを利用した．各地震の面的推定震度分布データの作成においては，防災科研のK-NET，KiK-netの観測データを活用した．各観測点の地震動データからリアルタイム震度を計算し，全観測点のリアルタイム震度を1秒ごとに約1km メッシュへ空間補間し，各メッシュで解析対象時間内の最大値をとることで，各地震の面的推定震度分布データを作成した．各震度分布データは38万1234メッシュ からなる．
各観測点のリアルタイム震度を1kmメッシュへ空間補間する際には，表層の地盤増幅率の不均質性を考慮し，以下の手順で実施した． 1）リアルタイム震度を最大速度に変換)， 2）J-SHISによる表層地盤増幅率を用いて工学的基盤相当の最大速度を推定， 3）逆距離加重法を用いて空間的に補間， 4）表層地盤増幅率により地表最大速度を推定， 5）地表最大速度を計測震度相当値に変換．
それぞれが複雑な分布を持つ面的推定震度分布データに対して独立成分分析を適用し，複数の独立成分と変換行列の積で面的推定震度分布データを表現する．ここで，独立成分数は50とした．得られた独立成分を確認すると，振幅の大きな領域が互いにばらついており，これらの線形和により日本周辺で発生した地震の震度分布を表現していると考えられる．
さらに，2005年宮城県沖の地震（M 7.2），2011東北地震の前震（M 7.3）および本震（M 9.0），2016年熊本地震の前震（M 6.5），本震（M 7.3），2016年4月16日に発生した余震（M 5.8）について，変換行列から各地震に対応する行ベクトルを取り出し，各独立成分の寄与を計算した．東北沖で発生した3地震と熊本で発生した3地震で，寄与の大きい独立成分の組み合わせに明瞭な差が確認できた．また，東北沖の地震の方が熊本の地震に比べて寄与している独立成分数が多かった．変換行列の分布が各地震の震度分布が持つ特徴を反映していると考えられ，その値を比較することにより，面的推定震度分布の類似度を評価できることが見込まれる．

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of the influence of Surface Topography on Earthquake Ground Motions

*Hidenori KAWABE[1], Hiroto YAMAMOTO[1]

1. Osaka University

1995年の兵庫県南部地震以降、3次元の地下構造モデルと差分法を用いた長周期地震動のシミュレーションが多く行われている。しかし、差分法を用いた地震動シミュレーションでは、起伏を有する地表面を考慮せず、フラットな地表を仮定して差分法の計算が行われることが多い。しかしながら、検討が行われ層構造を有する地下構造モデルでは地表面を各層の層厚を保ったまま水平に押し込んだモデルを用いて検討が行われることがほとんどであり、こうした場合、表層地形が地震動に与える影響を評価することができていない。 本検討では、二次元有限要素法を用いて、表層地形が地震動に与える影響を評価し、フラットな地表を仮定した場合と比較し、どの程度、地表の地震動が増加、または減少するかを検証する。 本検討では、まず、極表層の地盤について、仮想のモデルを用いて地表の地形が、地震動に与える影響を評価する。具体的には、水平成層地盤の地表のみ段差を有する地盤構造を仮定する。次に、地盤モデルの底面に鉛直上向きに平面波を入射し、地表の地震動の段差構造付近での変化を評価する。なお、この検討では、主に工学的基盤以浅の地盤を想定して検討を行う。検討の結果、最上層の地盤のS波速度は100m/s、段差の高さを3mとし、中心周波数１Hzのリッカー波をSV波として入力した場合、地表の地震動の最大速度は、段差の上側で、フラットの地表のモデルと比べ、最大25%程度大きくなった。 次に、実地盤モデルを用い、点震源を仮定して、地震動シミュレーションを実施し、地表の地形が、地震動に与える影響を評価する。ここでは、甲府盆地とその周辺地域を対象とした地震動シミュレーションの結果を示す。解析対象測線、後述の波形出力点および震央の位置を図1に示す。解析領域は図1に示すように、北緯35.63度、東経136.75度を西端とし、東西に190km、深さは標高-100kmまでの断面とした。波形出力点は解析領域の西端から169km離れた地点である。地下構造は23層の層構造で構成される地震本部（2012）のモデルを用いる。解析領域は深さ12km以浅とした。解析対象とした領域では、最上面の層は地震本部（2012）のモデルの第7層であった。解析の有効周期1秒以上とし、震源は1つの点震源を仮定し、震源深さ10km震源時間関数にはSmoothed Ramp Functionを用い、ライズタイムは有効周期を考慮し1.7秒とした。検討の結果、甲府盆地内の地震動について、フラットな地表を仮定した場合と比べ、地表の地形を考慮した場合では、地表の地震動の最大速度はEW成分で最大で40%程度、UD成分で100%程度大きくなった。 以上の結果は、地表の地形の地震動への影響は、場所によっては、大きくなる場合があり、地表をフラットとした場合の検討では危険側の検討になることがあることを示唆している。今後、より詳細な検討を実施し、どういった場合に、どういった場所で危険側の評価になるかを明らかにしていく予定である。 1995年の兵庫県南部地震以降、3次元の地下構造モデルと差分法を用いた長周期地震動のシミュレーションが多く行われている。しかし、差分法を用いた地震動シミュレーションでは、起伏を有する地表面を考慮せず、フラットな地表を仮定して差分法の計算が行われることが多い。しかしながら、検討が行われ層構造を有する地下構造モデルでは地表面を各層の層厚を保ったまま水平に押し込んだモデルを用いて検討が行われることがほとんどであり、こうした場合、表層地形が地震動に与える影響を評価することができていない。 本検討では、二次元有限要素法を用いて、表層地形が地震動に与える影響を評価し、フラットな地表を仮定した場合と比較し、どの程度、地表の地震動が増加、または減少するかを検証する。 本検討では、まず、極表層の地盤について、仮想のモデルを用いて地表の地形が、地震動に与える影響を評価する。具体的には、水平成層地盤の地表のみ段差を有する地盤構造を仮定する。次に、地盤モデルの底面に鉛直上向きに平面波を入射し、地表の地震動の段差構造付近での変化を評価する。なお、この検討では、主に工学的基盤以浅の地盤を想定して検討を行う。検討の結果、最上層の地盤のS波速度は100m/s、段差の高さを3mとし、中心周波数１Hzのリッカー波をSV波として入力した場合、地表の地震動の最大速度は、段差の上側で、フラットの地表のモデルと比べ、最大25%程度大きくなった。 次に、実地盤モデルを用い、点震源を仮定して、地震動シミュレーションを実施し、地表の地形が、地震動に与える影響を評価する。ここでは、甲府盆地とその周辺地域を対象とした地震動シミュレーションの結果を示す。解析対象測線、後述の波形出力点および震央の位置を

© The Seismological Society of Japan

図1に示す。解析領域は図1に示すように、北緯35.63度、東経136.75度を西端とし、東西に190km、深さは標高-100kmまでの断面とした。波形出力点は解析領域の西端から169km離れた地点である。地下構造は23層の層構造で構成される地震本部（2012）のモデルを用いる。解析領域は深さ12km以浅とした。解析対象とした領域では、最上面の層は地震本部（2012）のモデルの第7層であった。解析の有効周期1秒以上とし、震源は1つの点震源を仮定し、震源深さ10km震源時間関数にはSmoothed Ramp Functionを用い、ライズタイムは有効周期を考慮し1.7秒とした。検討の結果、甲府盆地内の地震動について、フラットな地表を仮定した場合と比べ、地表の地形を考慮した場合では、地表の地震動の最大速度はEW成分で最大で40%程度、UD成分で100%程度大きくなった。 以上の結果は、地表の地形の地震動への影響は、場所によっては、大きくなる場合があり、地表をフラットとした場合の検討では危険側の検討になることがあることを示唆している。今後、より詳細な検討を実施し、どういった場合に、どういった場所で危険側の評価になるかを明らかにしていく予定である。

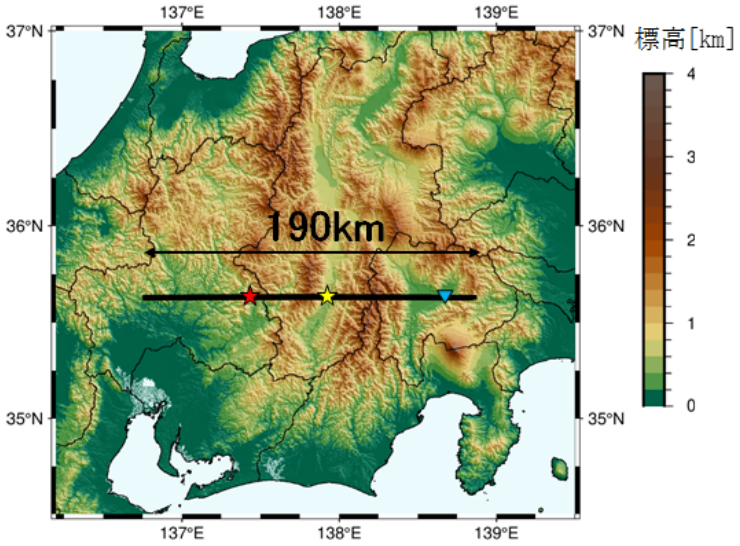


図1　解析対象側線および震央の位置

© The Seismological Society of Japan

Estimation of seismic bedrock motion using empirical site effects in time domain

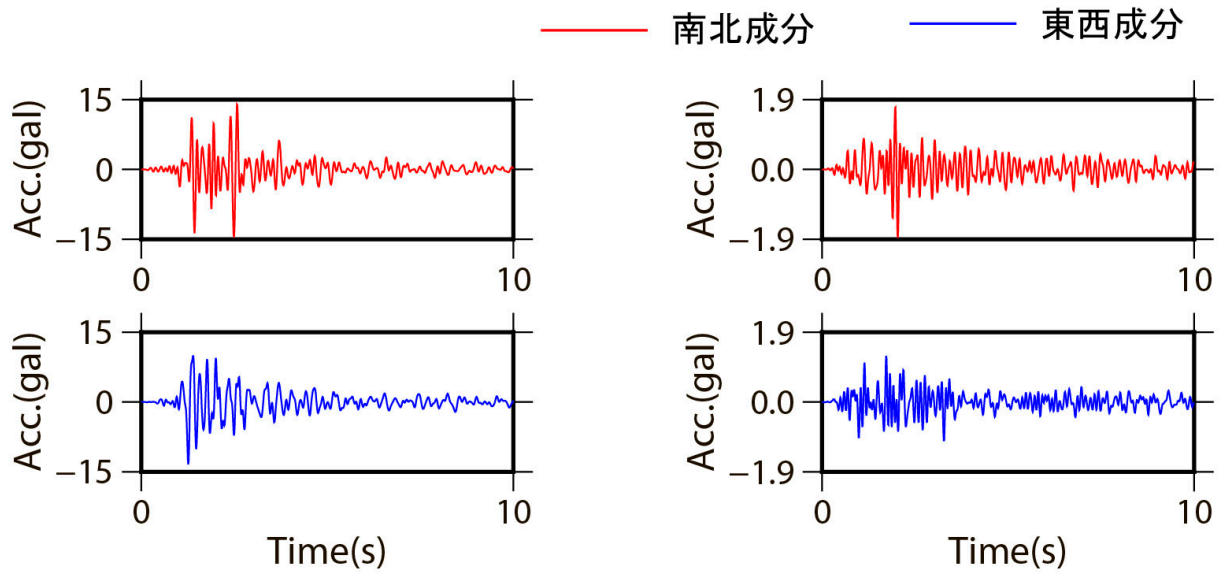
*Takashi Akazawa[1]

1. Geo-Research Institute

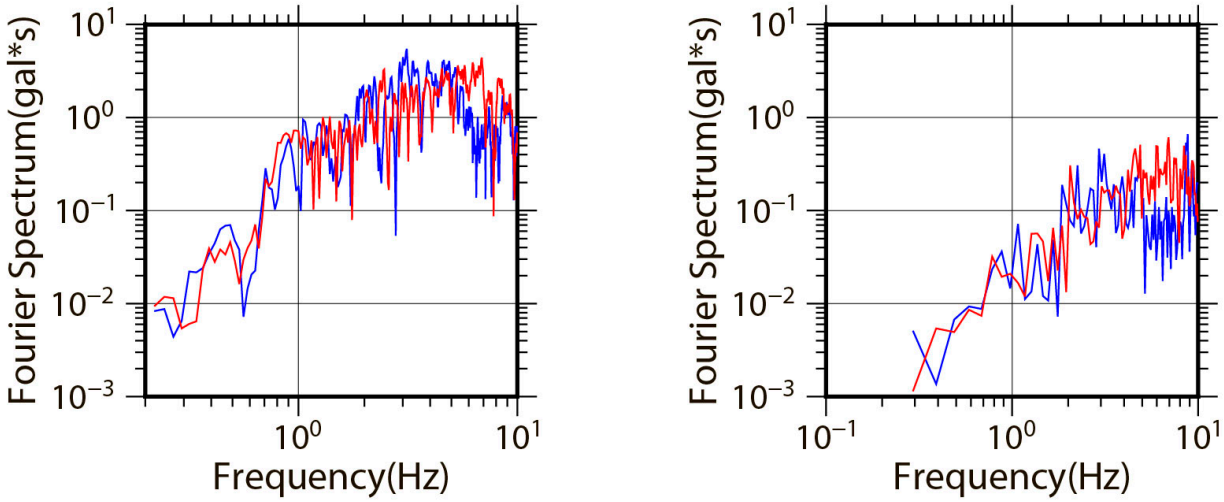
地盤特性は，地表付近の地盤構造によって特徴付けられ，硬質地盤では揺れの振幅は小さく継続時間は短いが，軟弱地盤では振幅は大きく揺れの継続時間は長い，という特性を有する。そのため，強震動予測を高精度で実施するためには，地盤特性の振幅特性（振幅の大きさ）と位相特性（継続時間）を定量的に評価・抽出する必要がある。赤澤・他(2009)は，ウェーブレット解析を利用し，複数の地震観測記録の地震動特性を時間領域で評価することで，地盤特性の時刻歴特性（非定常地盤特性）を定量的に抽出することができる経験的手法を提案した。同手法により抽出された非定常地盤特性は，振幅に対して周波数に依存した平均的な経時特性（包絡形状）を，位相に対して利用地震動記録に共通したコヒーレントな特性を有する。本検討では，非定常地盤特性と観測された地震動記録を利用して，地震基盤波（地震基盤での地震動）の推定を試みる。
非定常地盤特性は，対象地点直下の地震基盤からインパルス波が入射した時の，対象地点での応答として定義される。Akazwa and Irikura(2016)，赤澤・入倉(2018)は，この特徴を利用し，強震動シミュレーション手法の高精度化を目的として，非定常地盤特性を導入した統計的グリーン関数法を提案した。そして，提案手法を2011年東北地方太平洋沖地震に適用し，観測された地震動記録が適切に再現されることを示した。同手法では，統計的グリーン関数法を利用して計算された地震基盤波と非定常地盤特性を重畳することで，表層での地震動が計算される。本検討では，このプロセスを踏まえ，表層で観測された地震動記録を同地点の非定常地盤特性で逆重畳することで，地震基盤波を推定する。逆重畳には，地震動記録のフーリエスペクトルを非定常地盤特性のフーリエスペクトルで除する方法を利用する。
本検討では，防災科研の強震観測網K-NETの強震観測点であるKMM008観測点で得られた地震動記録を利用して，上記手法の有効性を検証する。非定常地盤特性は，地震動記録から震源特性と伝播経路特性の影響を除去することで抽出される。これら2特性については， 2016年熊本地震および一連の地震活動による地震動記録に対するスペクトルインバージョン解析（染井・他(2019)）により分離された震源スペクトルと伝播経路のQ値を，それぞれ理論式でモデル化して使用する。この方法によりKMM008観測点を対象に抽出された非定常地盤特性の振幅特性は，スペクトルインバージョンにより分離された地盤増幅特性と整合することを確認した。また，非定常地盤特性を小地震に適用することで，KMM008観測点の地震動記録が適切に再現されることも確認した。一方，本検討で提案した方法に沿って地震基盤波の推定を試みた結果，無視できない程度に大きなノイズによる振動を含む波形が得られた。これは，フーリエスペクトルの変動が大きく，分母である非定常地盤特性のスペクトルが落ち込む周波数が存在することで，逆重畳において本来の特性とは異なる特性が現れたことによると考えられる。この問題を解決するために，ウォーターレベル法を利用してノイズの軽減を試みた。非定常地盤特性のスペクトルの谷を切り上げる下限値は，計算される地震基盤波が大きく歪まない範囲で設定した。この方法を利用することで，ノイズがある程度軽減されることが確認された。

参考文献： 赤澤・他(2009)，日本建築学会構造系論文集，638，611-618． 赤澤・入倉(2018)，第15回日本地震工学シンポジウム，PS2-02-07． 染井・他(2019)，日本地震工学会論文集，19.6，6_42-6_54．
Akazwa and Irikura(2016), ESG5, P115A.

© The Seismological Society of Japan



加速度波形



加速度フーリエスペクトル

(a) 観測された地震動記録　　(b) 推定された地震基盤波

推定された地震基盤波の例（KMM008 観測点，2017 年 4 月 9 日 21 時 39 分に発生した熊本県熊本地方を震源とする地震（Mj3.6））

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P3 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S16P] PM-P

[S16P-01] Site amplification correction of OBS data for regular and slow earthquakes

*Shunsuke TAKEMURA[1], Kentaro Emoto[2], Suguru Yabe[3] (1. ERI, UTokyo, 2. Kyushu Univ., 3. AIST)

[S16P-02] Autocorrelation function from ground motion records: detecting for shallow sedimentary layers

*Tomotsugu Watanabe[1], Hiroshi Takenaka[1] (1. Okayama University)

[S16P-03] Microtremor exploration in Okayama City

*Nobuyuki YAMADA[1], Hiroshi TAKENAKA[2], Tomotsugu WATANABE[2] (1. Kochi University, 2. Okayama University)

[S16P-04] Characteristics of strong ground motion and subsurface structure of landslide area based on microtremor observation in the Taki area, Japan

*Tatsuya NOGUCHI[1], Masanori Kohno[1] (1. Faculty of Engineering, Tottori University)

[S16P-05] Spectral amplification of ambient vibrations due to topography: Instrumental evidence from Chiba and Yamanashi Prefectures, Japan

*Anirban Chakraborty[1], Daiki Yamashita[2], Kodai Kato[3], Ryota Otake[4], Hisakazu Sakai[1], Hitoshi Morikawa[5] (1. Hosei University, 2. Railway Technical Research Institute, 3. Kozo Keikaku Engineering Inc. , 4. Oriental Consultants Global Co., Ltd. , 5. Tokyo Institute of Technology)

[S16P-06] Examination of two-dimensional optimal S-wave velocity structure model for the KiK-net site of Kamaishi

*Kentaro KASAMATSU[1], Takashi Nozawa[1], Tetsushi Watanabe[2] (1. Kajima Corporation, 2. Kobori Research Complex Inc.)

Site amplification correction of OBS data for regular and slow earthquakes

*Shunsuke TAKEMURA[1], Kentaro Emoto[2], Suguru Yabe[3]

1. ERI, UTokyo, 2. Kyushu Univ., 3. AIST

臨時観測に加え，観測技術の発展によりDONETやS-netといった定常海底地震観測記録が増えてきた．長周期成分や1秒程度までのP波を用いることで，海域の地震や浅部超低周波地震のCMT解析が実施されている（例えば，Nakano et al., 2018; Yamaya et al., 2022; 山谷・他，本大会）．1秒以下の短周期を用いることで，微小地震や浅部微動の解析も進められている（例えば，Yabe et al., 2019, 2021）．短周期成分には海底面表層のサイト増幅効果が顕著に見られ，それらを補正することで地震現象の定量解析が可能となる．海底地震計の場合，コーダ波規格化法によるサイト増幅の補正は困難である（Takemura et al., 2023）ため，堆積層に対し鉛直下方から入射した実体波を用いたサイト増幅の推定手法が用いられる（例えば，Kubo et al., 2018; Yabe et al., 2019）．DONET観測点の特に水平動では，F-netと比べて5~20倍程度のサイト増幅が推定されている．しかし，浅部微動などの震源は浅く，輻射された地震波は海底下の厚い堆積層へ斜め入射し，堆積層内にトラップされ複雑な波形形状と振幅パターンを示す（Takemura et al., 2020）．浅部スロー地震の震源解析には，海底地震計データに含まれる厚い堆積層によるトラップ効果と海底下表層のサイト増幅の両方を丁寧に考慮する必要がある．そこで，合成波形を用いて海底面下表層のサイト増幅と堆積層の寄与を定量的に見積もることを試みる．

本研究では，DONET 1D（Nakano et al., 2013）の1次元P波構造にBrocher (2005, 2008)による経験則により他のパラメーターを与え，波数積分法（Herrmann, 2013）によりGreen関数を合成した．この構造モデルの最小S波速度は0.6 km/sであり，さらに低速度な層の影響は含まれていない．震源の深さを8.3 km（プレート境界），20 km，40 kmと3種類用意した．また，DONET 1D構造の堆積層を地殻物質に置き換えた，堆積層なしの1次元構造モデルも作成し、堆積層有無による波形の形状と振幅の差について調べた．1-2, 2-4, 4-8 Hzの周波数帯について特徴を調べた．

深さ20 kmと40 kmの場合，合成されたDONET1DのGreen関数はP波・S波がパルス的であり，厚い堆積層の影響で堆積層を仮定していないGreen関数と比べて，振幅は1.5倍程度大きくなった．すなわち鉛直下方入射を仮定し推定した海底地震計の10倍以上のサイト増幅の殆どは，海底下極表層によるものと考えられる．一方で，浅部微動を踏まえ，プレート境界に震源を仮定した場合，堆積層への斜め入射により堆積層内へ地震波がトラップされ，波形エンベロープの継続時間伸び，振幅も倍以上に大きくなった．これらの効果は，鉛直下方入射を仮定したサイト増幅推定には含まれておらず，厚い堆積層を仮定した合成波形エンベロープを浅部微動などの震源が浅い現象の解析に取り込むべきことを示唆する．

謝辞　防災科研DONET https://doi.org/10.17598/NIED.0008 およびF-net https://doi.org/10.17598/NIED.0005 を利用しました．本研究は、JSPS科研費21H05203，21H05205および21K03696の助成により実施されました．

© The Seismological Society of Japan

Autocorrelation function from ground motion records: detecting for shallow sedimentary layers

*Tomotsugu Watanabe[1], Hiroshi Takenaka[1]

1. Okayama University

波形記録を用いて地下構造を調べる方法の一つとして, 地震波干渉法がある. 近年では, 自然地震の観測記録から計算した自己相関関数を地下構造の情報の抽出に用いる試みが行われている. 自己相関関数は地表1点の観測記録のみで計算可能であり, まずはパワースペクトルを計算し, それをフーリエ逆変換することで簡単に求められる. 得られた波形のシグナルは地下からの反射波を表し, 反射法探査におけるゼロオフセットの反射断面に等価である. 特に地震波速度のコントラストが顕著である地盤と基盤の境界面からの反射波は大きなシグナルとして表れるため, 地下構造のチューニングに用いられている. ここでより鮮明な反射波を得るためには, この自己相関関数に対して適切なスペクトルホワイトニング処理やフィルター処理を施す必要がある. 前者は元の波形記録に含まれる震源の効果（入射波の効果）を軽減して地下構造における伝播の効果を強調するために施され, 後者は機器等のノイズの影響を取り除くために用いられる. これら2つの処理に関わるパラメータは既知の地下構造を参考にしながら試行錯誤的に決定される. しかし地下構造が明白ではない複雑な地盤構造において, どの境界面からの反射波であるかを自己相関関数から判断するのは困難な場合がある. 特に, 自己相関関数の時間軸のゼロ秒におけるピークはフィルター処理による影響を受けて, ゼロ秒付近に表れると考えられる浅い地盤面からの反射波を隠してしまう. そこで本研究では, このような浅い地盤構造からの反射波をより鮮明に抽出することを目的として, 以下の自己相関関数の波形処理方法を提案する.

まず, パワースペクトルの対数をとり, その波形をあたかも時刻歴波形であるかのように取り扱う. この波形をフーリエ変換し, 低次の周波数部分をゼロに置き換えて再びフーリエ逆変換すると, 元のパワースペクトルは1に近づくため, 実質的にはスペクトルホワイトニング処理と同様の効果が得られる. そして, この見かけ上の時刻歴波形にフィルター処理を適用すると元のパワースペクトルでは, 対象とする周波数帯域以外が1に収束していくことになる. 以上の処理をしたパワースペクトルにフーリエ逆変換を行い計算された自己相関関数の波形は時間軸のゼロ秒付近がデルタ関数に近似される. これにより, 自己相関関数のゼロ秒付近におけるフィルター処理の影響を軽減できるため, 特に浅い地盤面からの反射波の特定の助けになると考えられる. 本発表では, 地下構造モデルから算定された理論波形や実際の観測記録に提案手法を適用する具体的な手順と計算例を示す.

© The Seismological Society of Japan

Microtremor exploration in Okayama City

*Nobuyuki YAMADA[1], Hiroshi TAKENAKA[2], Tomotsugu WATANABE[2]

1. Kochi University, 2. Okayama University

中国地方の主要都市の一つの岡山市域では，危惧される南海トラフの地震などで，同南部の一部で強い揺れが想定されている（地震調査研究推進本部(2020)）．J-SHIS（防災科学技術研究所(2023)）による深部地盤モデルでは，例えば，岡山県庁，市役所や拠点病院，岡山駅など重要機関構造物の集まる地域のS波速度(Vs) 3000 m/s相当層の地震基盤（ここではVs 3100 m/s）上面は，深さ130～250 m程度，Vs 1100 m/s層上面は20～30 mの構造が示されており，地表面の地震動の増幅率は1.5～1.8倍前後である．また，それらの地域内のK-NET岡山(OKY011)でのボーリングでは，深さ15 mでVs 360 m/s，これらより中国山地寄りのKiK-net岡山(OKYH03)では，深さ20mでVs 1551 m/s，80 mでVs 2422 m/sの層に達するとされ，三者三様の構造が示されている．この地域の地震基盤上面深度は，数百mを超えるような構造にはなっていないと推察されるが，岡山都市圏での地震基盤構造をはじめ，地表部分の速度構造も明確にしておくことは，地震防災上重要なことと考えられる．

そこで，本発表では，岡山大学津島キャンパスにおいて，微動アレイ観測を実施し，そのデータをもとに速度構造を推定することを試みた内容を報告する．観測には，強震計（３成分計）を７台使用し，現場の状況に応じて任意形状の２つの大きさの三角形の頂点とその重心に設置することによって，微動データを収録した．この観測（2018年12月実施）では，『中規模のアレイ』として，大（機器間距離100～330 m）中（同50～180 m）小（同20～90 m）の３つの三角形アレイサイズに対して，20～60分間のデータ収録を行った．こうして得られたデータをFK法（Capon(1969)）により，周期0.5～2.0秒の範囲の位相速度を算出した．その際，周期ごとの位相速度の値にばらつきが大きかったため，アレイの中心点のH/Vスペクトル比をおおむね説明する速度構造を推定し，その構造モデルから算出した位相速度を参照にした．これを用いて，既存の複数の地下構造情報をもとに探索範囲を設定し，GAによる逆解析で速度構造を推定した（暫定モデル例：Vs 0.94, 1.55, 2.25, 3.38 km/s，各層厚0.17, 0.05, 1.613 km）．しかしながら，周期0.5秒以下の短周期の帯域の位相速度が得られなかったことから，中規模アレイの中心点とほぼ同じ場所を中心とした場所で数～十m程度の『小規模のアレイ』を組み，微動観測を2023年8月に追加実施した．そこでは，加速度計（1成分計)を4台使用し，それを正三角形の頂点および重心位置に設置して，短周期帯域に焦点をあてた位相速度を算出することとした．追加観測によるデータをSPAC法やCCA法(Cho(2020))などによって，『小規模のアレイ』の位相速度を見積もることができ，その両者は周期0.5秒付近で接続できそうである．再度逆解析を行うことによって，浅い部分の低速度層を含めた微動データに基づくS波速度構造を推定することができると考えられる．また，『中規模のアレイ観測』におけるアレイ内での１９点の機器間の地盤震動特性の比較もでき，過去のアレイ観測によるデータを活用した検討を盛り込む予定でもある．

微動アレイ観測には，岡山大学理学部の学生さんにもご協力頂きました．また，この研究の一部は，令和５年度拠点間連携共同研究およびJSPS科研費基盤(B) 22H01311の補助を受けています．関係者各位に記して，御礼申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of strong ground motion and subsurface structure of landslide area based on microtremor observation in the Taki area, Japan

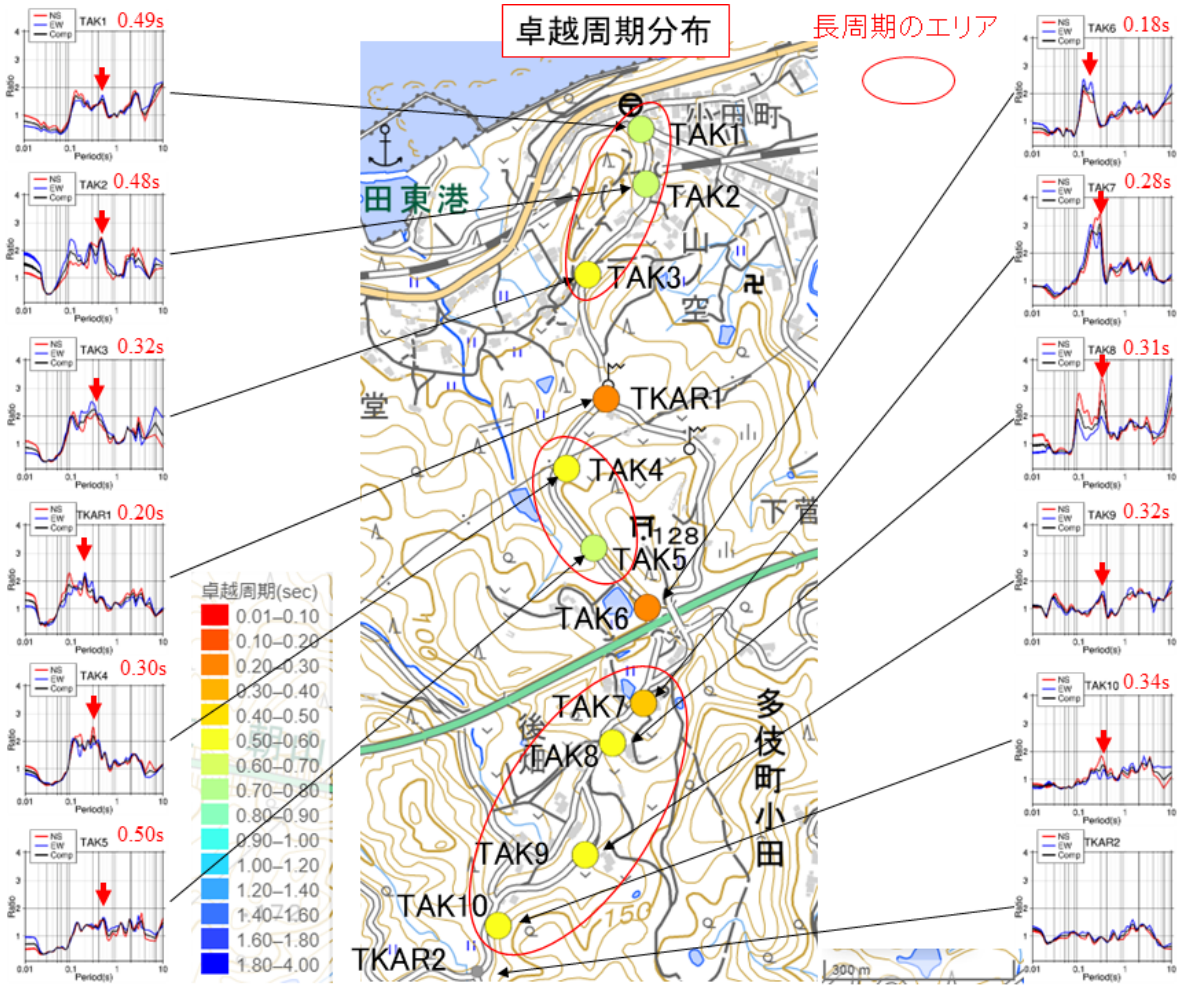
*Tatsuya NOGUCHI[1], Masanori Kohno[1]

1. Faculty of Engineering, Tottori University

1．はじめに
地震による大規模な地すべり被害を事前予測するためには，地すべり地域の地盤構造を調査することは重要である．本研究では，島根県多伎町の地すべり地域で微動観測を実施し，地盤震動特性の把握及び地盤構造の推定を行った．
2．観測方法
防災科学技術研究所（2006）による地すべり地形区分に判別された地域において，小田地区29点及び田儀地区11点，計40点で単点3成分観測を実施した．道路沿いに100～200m間隔で観測点を設けた．一部の観測点では，2～4台の地震計を用いて，直線上に2～8mの間隔で設置して観測した（直線アレイ観測）．また，小田地区2点，田儀地区2点の計4点で2～26mの間隔で直線アレイをL字上に組み合わせた観測も実施した（L字アレイ観測）．地震計はJU410（白山工業）を用い，サンプリング周波数は200Hzとし，観測時間は各地点で10～15分間としている．
3．解析方法
　単点3成分記録について，20.48秒間の区間を5区間以上選定し，各成分のフーリエスペクトルを求め，平均スペクトルとし，水平動2成分に対する上下動のスペクトル比（H/V）を求めた．H/Vの卓越周期，ピーク値，形状などの特徴を詳細に調べた．また，直線及びL字アレイ観測では，SPAC法（Aki,1957）もしくはCCA法（Cho et al.,2006）を用いて位相速度分散曲線を求めた．L字アレイ地点においては，得られた位相速度分散曲線とアレイ中心のH/Vを用いて，フォワードモデリングにより地盤構造を推定した．
4．微動特性と地盤構造
H/Vの特徴としては，0.1s付近，0.2～0.5s付近，2s付近の3箇所にピーク大小が確認でき，そのうち0.2～0.5s付近のピークが最も大きくなる傾向がみられた．0.2～0.5s付近の卓越周期やピーク大きさをみると，地すべりの移動体の中央付近，断崖壁部分でピークが大きくなる．推定された地盤構造モデルより，崖錐堆積物の層に相当するS波速度は，第1～3層が200～500m/s程度であり，その層厚は10～60mであった．
5．まとめ
島根県多伎町の地すべり地域において，微動観測により地盤震動特性の把握及び地盤構造の推定を行った．その結果，H/Vや地盤構造モデルが得られ，地すべり地域の地盤構造の変化が捉えられていることがわかった．今後は観測の追加や面的な卓越周期や表層厚の変化を調べるなどより詳細な解析を行い，この地域の地盤震動特性や地盤構造を把握していく．また，S波速度構造と地質物性データとの対応や地すべり危険度評価への利用などについても検討していく予定である．

参考文献
防災科学技術研究所，5万分の1地すべり地形分布図　第26集 「浜田・大社」図集，2006.
Aki, K.: Bull.　Earthq. Res. Inst., 1957.
Cho I., Tada T., Shinozaki Y.: Journal of Geophysical Research, 2006.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Spectral amplification of ambient vibrations due to topography: Instrumental evidence from Chiba and Yamanashi Prefectures, Japan

*Anirban Chakraborty[1], Daiki Yamashita[2], Kodai Kato[3], Ryota Otake[4], Hisakazu Sakai[1], Hitoshi Morikawa[5]

1. Hosei University, 2. Railway Technical Research Institute, 3. Kozo Keikaku Engineering Inc. , 4. Oriental Consultants Global Co., Ltd. , 5. Tokyo Institute of Technology

Amplification of earthquake ground motions due to topography has been observed during past earthquakes. This phenomenon could lead to highly damaging landslides in the mountainous areas. However, as the availability of ground motion data in mountainous regions is limited, the topographical amplification is still poorly understood. Numerical simulations drive most research related to topographical amplification. Recently, ambient vibration studies have been employed to understand this phenomenon. In the absence of earthquake ground motion data, these studies help instrumentally determine the natural frequency of topographical features. In this study, ambient vibration studies have been conducted in two mountains. The first mountain is in Chiba prefecture and has a prominence of 73 m. The second mountain is in Yamanashi prefecture and has a prominence of 327 m. These mountains are selected such that they are free-standing as much as possible. It is easier to make discussions with free-standing mountains so that the effect of extended features need not be included. However, free-standing mountains are very rare. Accelerometers are temporarily employed at the base and summit of the mountains, and spectral amplifications are estimated from the corresponding ratio of Fourier acceleration spectra. The spectral amplification plots in both cases show the clear presence of a peak. The role of resonance in explaining the peak of these spectral amplification plots has been investigated. The results are significant from the point of view of assessing the potential of earthquake-induced landslides when earthquake scenario ground motions are available.

© The Seismological Society of Japan

Examination of two-dimensional optimal S-wave velocity structure model for the KiK-net site of Kamaishi

*Kentaro KASAMATSU[1], Takashi Nozawa[1], Tetsushi Watanabe[2]

1. Kajima Corporation, 2. Kobori Research Complex Inc.

１．はじめに
表層地盤の影響を除去するはぎとり解析では，解析に用いる地盤モデルが重要となる。地盤モデルは，一般に，鉛直アレー地震観測記録を用いて測点間の観測伝達関数を算定し，鉛直入射の1次元波動論を仮定した最適化解析に基づいて評価される。しかし，全てのサイトで1次元解析が適用可能とは限らない。観測記録を十分に再現できないサイトは一定数存在し，その要因の一つとして，地盤構造の不整形性の影響が考えられる。本研究では，2次元解析に基づいて最適化地盤モデルを評価する手法について検討し，その手法を地盤構造の不整形性の影響が顕著なKiK-net釜石（以下，IWTH23）に適用した結果を報告する。

２．2次元地盤モデルの構築方法
SH波動場を対象とした2次元差分法に基づいて，鉛直平面波入射の地盤応答解析を繰り返し行い，観測伝達関数を最も良く再現する2次元S波速度構造モデルを構築する。S波速度（以下，Vs）はIWTH23のPS検層結果で固定し，速度境界の最適な2次元分布を逆解析で同定する。 IWTH23を中心に数十mの間隔で，5つの速度境界深度のコントロールポイントを設けて，各ポイントの最適な深度をグリッドサーチで探索する。ポイント間の境界深度は，スプライン関数で補間する。IWTH23の地中地震計はGL−103 mに設置されており，この深度以浅のS波速度構造は，地表よりVs=0.37, 0.6, 1.71, 2.2 km/sの4層（以下，No. 1〜4層）で構成される。本研究では，不整形の影響が顕著と考えられる周波数15〜17 Hzに着目し，この周波数の地震動特性に対して感度の高いNo. 1〜2の2層の下面深度の分布を同定する。減衰定数は，No. 1〜2層に対しては0.5*f**−1，No. 3〜4層に対しては0.25*f**−1を仮定する。 差分法による順計算は，格子間隔を水平0.5 m，上下1 mとして行う。Δ=N15〜45 deg.Eの地震のうち，比較的SN比が大きい50地震の観測記録から求めた平均伝達関数を逆解析の対象とする。周波数2〜25 Hzを対象に，観測と計算による振幅比と位相の一致度を評価する。

３．観測伝達関数
IWTH23は，旧・釜石市立小川小学校の敷地内に設置されている。北上高地の谷底に位置しており，IWTH23の南にはこの河谷を形成したと考えられる小川川が分布する。IWTH23の地震観測記録を用いて評価した平均伝達関数（GL／GL−103 m）を図(a)に黒色で示す。この観測伝達関数を用いて，従来法として1次元解析で地盤モデル最適化を検討した理論伝達関数を水色と青色で示す。PS検層によるS波速度構造に基づき，水色ではNo. 1〜4層の減衰定数のみを，青色ではこれに加えてNo. 1〜2層のS波速度を同定した。どちらの1次元解析でも，観測の周波数15〜17 Hz付近に見られる特徴的なピークを再現できない。また，20 Hz付近の位相の再現にも限界がある。 IWTH23で得られている地表最大加速度100 Gal未満の計1964地震の観測記録を用いて，記録ごとにTransverse成分の伝達関数を算定し，それぞれについて15〜17 Hz平均の振幅比を求めた。その振幅比を震央方位Δに対する分布として図(b)に示す。振幅比は，Δ=N30 deg.EとN210 deg.Eの地震で大きく，これらに直交するΔの地震で小さい。これらの4震動方向では，2次元解析で観測伝達関数を再現できると仮定し，ここではN30 deg.E方向の2次元地盤モデルを評価する。

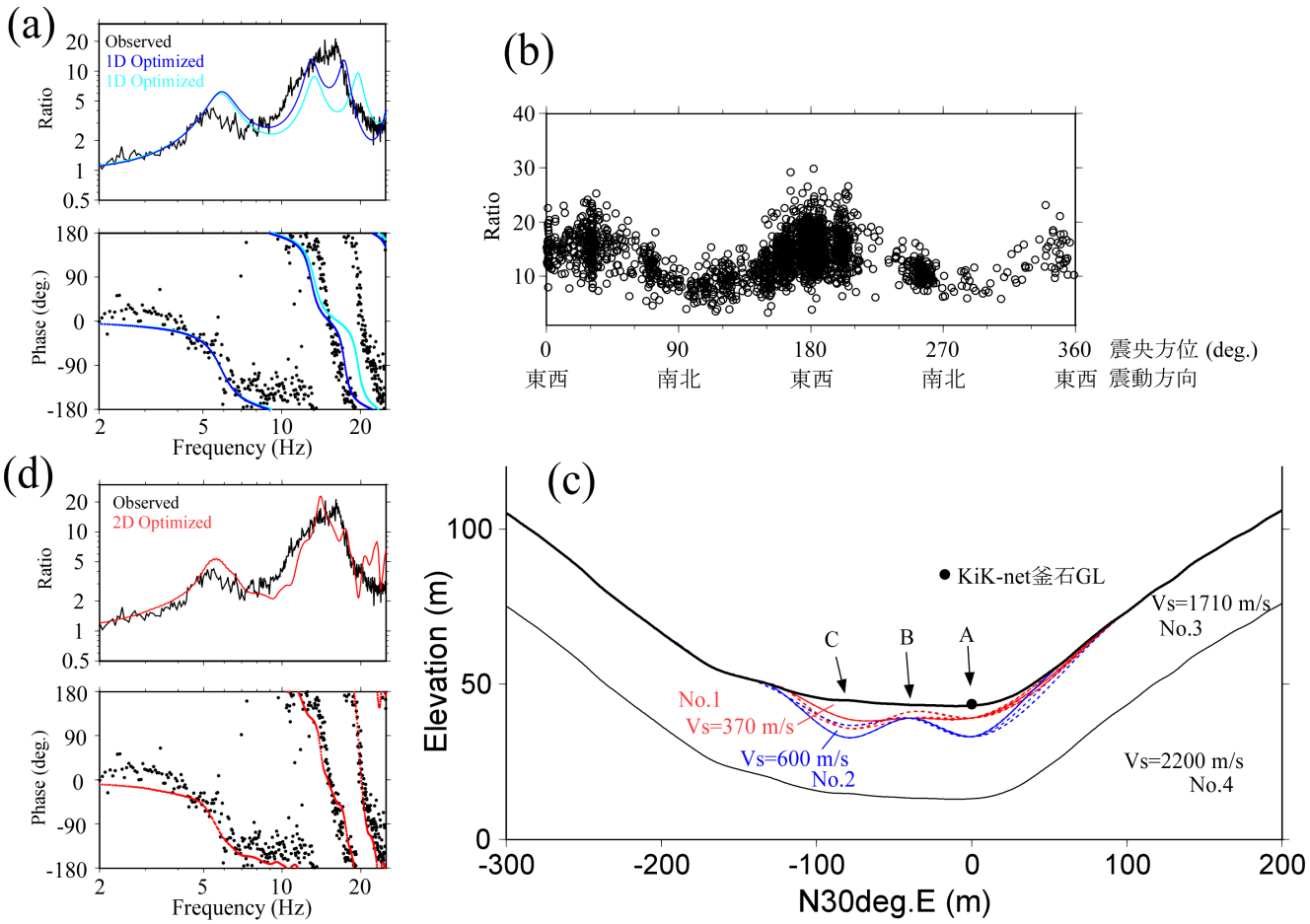
４．２次元地盤モデルの評価結果
2次元S波速度構造モデルの評価結果を図(c)に示す。約20000ケースの順計算を行い，誤差が最小となった解を実線で，その最小誤差から誤差10 %以内の解を点線で記している。逆解析にKiK-net 1地点の伝達関数しか用いておらず，解が一意に収束しない可能性が考えられたが，顕著な解のトレードオフは見られない。No. 1層は，IWTH23からN210 deg.E方向に向かい緩やかに厚くなり，小川川が分布する地点C付近で最も厚くなる。No. 2層は，地点Bを境に，地点AとCに向かい厚くなるモデルが得られた。 観測伝達関数の再現結果を図

© The Seismological Society of Japan

(d)に赤色で示す。1次元解析では再現が困難であった周波数15～17 Hzのピークは，地盤構造の2次元性を考慮することで再現される。20 Hz前後の位相も良く再現される結果が得られた。 推定結果の妥当性検証のために，図(c)の地点A, B, Cで微動観測を実施した。観測結果から求めた水平上下スペクトル比を，各地点直下の1次元構造から求めたレイリー波基本モードの楕円率と比較したところ，いずれの地点においても，ピークを形成する周波数は，概ね調和的であることを確認した。

５．おわりに

KiK-net釜石を対象に2次元地盤モデル最適化を検討し，従来の1次元解析よりも観測伝達関数を良く再現する地盤モデルを構築できることを示した。S波速度の揺らぎの考慮などが今後の課題と考えられる。



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Special session：S22. Earthquake swarms and M6.5 earthquake in/around the northeastern Noto Peninsula

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P4 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S22P] PM-P

[S22P-01] An offshore-onshore integrated seismic observation in the epicentral region of earthquake swarm in the northeastern Noto Peninsula

*Eiji KURASHIMO[1], Shin'ichi Sakai[2], Masanao Shinohara[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

[S22P-02] Relation between the Noto Peninsula earthquake swarm and earth tides considering background earthquake probability

*Fuyuki HIROSE[1], Koji TAMARIBUCHI[1], Akio KOBAYASHI[2], Kenji MAEDA[1] (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency)

[S22P-03] Driving processes behind hypocenter migration associated with earthquake swarms in the northeastern Noto Peninsula, Japan

*Kodai SAGAE[1], Yuta AMEZAWA[1], Takahiko UCHIDE[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S22P-04] Focal mechanisms and stress field of the earthquake swarm region in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Yohei Yukutake[2] (1. Kanazawa University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S22P-05] Stress drop of the earthquake swarm in the northeastern Noto Peninsula

*Mitsuteru Fukuoka[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Takuji Yamada[2] (1. Kanazawa Univ. , 2. Ibaraki Univ.)

[S22P-06] Crustal deformation and mechanism for an earthquake swarm in the northeastern part of the Noto Peninsula based on GNSS observations

*Takuya NISHIMURA[1], Yoshihiro HIRAMATSU[2], Yusaku OHTA[3] (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

[S22P-07] Space-time evolution of fault slip associated with transient deformation in the Noto Peninsula observed by dense GNSS networks

*Atsushige Doi[1], Takuya Nishimura[1], Shinichi Miyazaki[1] (1. KYOTO UNIVERSITY)

[S22P-08] Vertical crustal deformation associated with the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake, based on littoral biological remains

*Masanobu SHISHIKURA[1], Tomoo Echigo[2], Yuichi Namegaya[1], Hideaki Maemoku[3], Ryo Tateishi[4], Nagisa Sawada[5] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Kankyo Chishitsu Co. Ltd, 3. Hosei UNiversity, 4. University of Toyama, 5. Graduate School, University of Toyama)

[S22P-09] Initial report on strain measurement using TW-COTDR distributed optical fiber sensing in a tunnel in Suzu, Ishikawa, Japan.

*Eiichiro ARAKI[1], Masatoshi Miyazawa[2], Yoshiyuki Tanaka[3], Takashi Yokobiki[1] (1. JAMSTEC IMG, 2. DPRI, Kyoto University, 3. School of Science, the University of Tokyo)

[S22P-10] Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake

Part 2 Seismic damage of shrines and temples

*Yuto Sawada[1], Takuma Arakawa[1], Honoka Shibaguchi[1], Tatsuru Suda[1], Hiromi Sato[1], Akira Murata[2] (1. Kanazawa Institute of Technology, 2. Kanazawa University)

An offshore-onshore integrated seismic observation in the epicentral region of earthquake swarm in the northeastern Noto Peninsula

*Eiji KURASHIMO[1], Shin’ichi Sakai[2], Masanao Shinohara[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

能登半島北東部に位置する珠洲市付近では2018年頃から地震発生回数が増加傾向になり,2020年12月頃から地震活動がさらに活発化し，現在も継続している．また，2020年12月頃からの地震活動の活発化に同期するような珠洲市を中心とした局所的な非定常地殻変動が観測されている．この一連の地殻活動の中で，2022年6月19日にはマグニチュード5.4，最大震度6弱，2023年5月5日にはマグニチュード6.5，最大震度6強の地震が発生した．これまでの研究から，珠洲市付近の地震活動や地殻変動には地下深部に存在する流体の移動が関与する可能性が指摘されている(Nishimura et al., 2023). 2023年5月5日に発生したM6.5の地震は，それ以前の地震活動域の北端付近で発生し，それ以降の地震活動域は，珠洲市沖の海域に拡大し，これまでの地震活動とは異なる様相を示している．このM6.5の地震と地下の流体や構造、海底活断層との関係を明らかにし，この地域における地震発生過程を解明したい．最も基本的な情報になる高精度な震源分布を得る為には，震源域直上に地震計を配置した地震観測を行うことが望ましい．しかし，この震源域直上における海域の水深は100 m程度と浅く、水産活動等が活発な海域であるため，通常の海域観測に用いられる自由落下自己浮上式海底地震計による観測が難しい地域である．そこで，海域に広がった群発地震活動域の直上に，浅海用係留ブイ方式海底観測システム（篠原・他，本学会講演）を設置した．それと同時期に，陸域にも臨時地震観測点を集中設置することで稠密な海陸統合地震観測を実施した．
海陸統合地震観測の内，海域では，浅海用係留ブイ方式海底地震観測システムを珠洲市北方沖に約5 km間隔で4か所，珠洲市東方沖に1か所に設置した．観測は，2023年6月26日から7月5日まで実施し，無事に全台回収できた．各観測点では，固有周波数15Hzの 3成分地震計とハイドロフォンを使用した観測を行った．収録は，Geospace社製のレコーダであるOBX-750を用い，サンプリング周波数を500Hzに設定して連続収録を行なった．陸域では，珠洲市北岸から東岸の海岸線沿いと県道52号線に1㎞～5㎞間隔で12か所に臨時地震観測点を設置した．観測は，海域での観測期間を含む2023年6月22日から7月25日まで実施した．各観測点では，固有周波数1Hzの3成分地震計によって上下動及び水平動の3成分観測を行った．収録は，Geospace社製の独立型レコーダであるGSX-3を用い,サンプリング周波数を250Hzに設定して連続収録を行なった．
　海陸統合地震観測で得られた記録は良好で，明瞭な初動を確認することが出来る．気象庁一元化震源リストによると，海域での観測期間中には群発地震活動域を含む研究対象地域(緯度37.4°-37.75°N：経度137.13°-137.5°E)でM_j1.0以上の地震の震源が221個決定されている．本講演では，海陸統合地震観測の概要と，取得した海陸統合観測データの解析から得られた震源分布について報告する．

謝辞：本研究を実施するにあたり，文部科学省科学研究費助成事業（特別研究促進費）「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査」(代表:平松 良浩)と「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．石川県漁業協同組合すず支所，珠洲市役所危機管理室，珠洲市教育委員会，珠洲市建設課上下水道局，石川県珠洲土木事務所，そのほか珠洲市の多くの方々にご協力をいただきました．解析に使用した震源リスト作成には，気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した結果（気象庁一元化処理震源カタログ）を使用させて頂きました．ここに記して深く感謝の意を表します．

© The Seismological Society of Japan

Relation between the Noto Peninsula earthquake swarm and earth tides considering background earthquake probability

*Fuyuki HIROSE[1], Koji TAMARIBUCHI[1], Akio KOBAYASHI[2], Kenji MAEDA[1]

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

石川県能登地方では，2018年中頃から活動の盛衰を繰り返す群発地震活動の様相を呈している．2020年末頃からは地殻変動（膨張・隆起）も観測され，地殻流体との関連が指摘されている．我々は，地殻流体に関連した群発地震活動と潮汐との相関を調査することが，群発地震活動の発生メカニズムの解明に繋がると考えている．地震活動の潮汐相関を調査する場合，他の要因の影響を減らすため，余震活動のような直前の地震により誘発された地震をあらかじめ除外（デクラスタ）しておく必要がある．本研究では，非定常ETASモデルによる背景地震確率で地震を重み付けするデクラスタ手法を用いて，能登半島における群発地震活動と潮汐との関係を調査した．その結果，潮汐相関が示唆されたのは解析領域南部の深部（領域Sd）のみであった．領域Sdでは，深部流体の流入に伴い間隙水圧が上昇し，岩石の破壊強度が低下することにより，潮汐力の影響を相対的に受けやすくなった可能性がある．G-R則のb値が領域Sdで顕著に大きいことや，地殻変動の観測結果も，この解釈と整合する．

© The Seismological Society of Japan

Driving processes behind hypocenter migration associated with earthquake swarms in the northeastern Noto Peninsula, Japan

*Kodai SAGAE[1], Yuta AMEZAWA[1], Takahiko UCHIDE[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

群発地震は明瞭な本震をもたず, 時空間的にまとまって発生する地震活動である. 震源マイグレーション (地震活動域の時空間発展) は群発地震のもつ特徴の一つである. 群発地震活動域の最外縁部 (以降, swarm front) では, 原点となる震源からswarm front までの距離の２乗が時間に比例する震源マイグレーションが観測されており, それは間隙流体圧の拡散で説明されてきた (Shapiro et al., 1997). 震源マイグレーションの速さに着目すると, swarm front では約0.1 km/day, 群発地震活動域の内部 (以降, swarm interior) では 約10 km/day という著しい違いが報告されている (e.g., De Barros et al., 2020). そして, swarm interior で観測される震源マイグレーションを説明するには間隙流体圧の拡散だけでなく, スロースリップなどの他の駆動要因を考慮する必要があると指摘されている (e.g., Dublanchet & De Barros, 2020). 群発地震の駆動要因を理解するためには swarm front とswarm interior の両方で震源マイグレーションの特徴を調べることが重要であるが, 後者における検討は十分に行われていない. そこで本研究では, 能登半島北東部で起きた群発地震を対象に震源マイグレーションの系統的抽出を行い, その時空間的な特徴とその背後にある物理過程を検討した.

2018年以降, 能登半島北東部では群発地震活動が継続している. 群発地震の震源分布は,活動域ごとに南部・西部・北部・北東部のクラスタ (それぞれ, S, W, N, NEクラスタ) に大別される. 2018年に Sクラスタで始まった群発地震活動は2020年12月に活発化し, W, N, NEクラスタの順で活動域が広がった. Swarm front において, Sクラスタを除くすべてのクラスタで, 拡散係数が約 0.1 m^2/s の震源マイグレーションが報告されている (Amezawa et al., 2023). 一方で, Sクラスタでは地震活動が間欠的に発生しており, 震源マイグレーションの特徴は系統的に調べられていない.

本研究では, 2018年5月から2022年6月にかけて発生したマグニチュード 0.0以上の20,398個の地震について Double-Difference 法 (Waldhauser & Ellsworth, 2000) を用いて震源再決定された震源分布 (Amezawa et al., 2023) を使用した.
震源マイグレーションを以下の2段階に分けて客観的に抽出した. はじめに, 時空間ハフ変換 (Sagae et al., 2023, JGR) を用いて震央マイグレーション (2-D マイグレーション) を抽出した (Sagae et al., 2023, JpGU). 次に, 2-D マイグレーションに属する地震について深さと時間の線形回帰を行った. そして, 2-Dマイグレーションに深さの時間変化の情報を加えることで震源マイグレーションを抽出した.

解析の結果, 震源マイグレーションの移動距離 (L_{mi}), マイグレーション速度 (V_{mi}), そして継続時間 (T) との間に2つの異なるスケーリング則が成り立つことが分かった. 1つ目は震源マイグレーションが拡散的な成長を示す場合であり, $L_{mi} \propto T^{0.5}$, $V_{mi} \propto T^{-0.5}$ の関係が成り立つ. 2つ目は震源マイグレーションの移動距離が一定だが, 様々な速度を示す場合であり, $L_{mi} \sim const$, $V_{mi} \propto T^{-1}$ の関係が成り立つ. 前者の関係はSクラスタの15 km 以深で, 後者はSクラスタの15 km 以浅で観測された. また他のクラスタでは, 両方の関係が観測された.
Sクラスタの15 km 以深ではリング状の震源分布をしており, その分布に沿って上方方向へ向かう震源マイグレーションが間欠的に起きていることが分かった. その拡散係数は10 m^2/s を超える値を示すことから, リング状の震源分布に沿って急激かつ間欠的な間隙流体圧の時空間変化が起きたことが示唆される.
Nクラスタでは拡散係数 0.1 m^2/s の震源マイグレーションが観測されるとともに, L_{mi} が約1 km でV_{mi} が1 –10 km/day の震源マイグレーションも観測された. L_{mi} がほぼ一定となることは群発地震活動域のクラスタサイズに対応すると考えられ, そのサイズが飽和した状態では, スロースリップに伴う応力変化といった間隙流体圧の拡散以外の駆動要因が震源マイグレーションの背後に存在する可能性が示唆される.

謝辞：本研究はJSPS科研費 JP21H05205 の助成を受けたものです. 記して感謝申し上げます.

© The Seismological Society of Japan

Focal mechanisms and stress field of the earthquake swarm region in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Yohei Yukutake[2]

1. Kanazawa University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

１．はじめに

石川県能登半島の北東部では活発な４つのクラスターから成る地震活動が継続し、地震活動の活発化は南クラスターから始まり、西、北、東クラスターの順で起きている。これまでの研究によりこの群発地震発生には流体の関与が指摘されている（Ameazawa et al., 2023; Nishimura et al., 2023; Yoshida et al., 2023）。地震発生に流体が関与している場合、震源メカニズム解や応力場が広域応力場と整合的ではない結果になることがある（e.g., Terakawa et al.,2016; Yukutake et al., 2011）。本研究では能登半島北東部の群発地震の震源メカニズム解と地震発生領域の応力場を推定し、地震発生と流体の関係を議論する。

２．データおよび手法

気象庁の一元化震源データを参照し、2018年1月1日から2022年11月30日までに能登半島北東部で発生した地震を解析対象とした。本研究では気象庁一元化震源データ、気象庁験測値データ、地震波形データ（気象庁、防災科学技術研究所、東京大学、京都大学）を使用した。震源データはMj1.2以上の地震についてDouble-Difference法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）を用いて震源再決定されたものを用いた（Nishimura et al., 2023）。震源メカニズム解の決定は、Mj3以上の地震を解析対象とした。ただし、各クラスターの活動初期を重点的に解析するため、各クラスターの活動初期のみMj2－3の地震も解析対象としている。WINシステム（卜部・束田, 1992）を使用してP波とS波の到達時間、P波の初動極性と最大振幅を再験測した。その後、P波とSH波の振幅値データを同時に使って震源メカニズム解を推定した（e.g., Yukutake et al., 2011）。本研究では、DD法で震源が再決定され、P波初動極性データが５個以上得られている地震について、震源メカニズム解を推定した。Kagan角（Kagan, 1991）に基づいて推定した決定誤差が20度以下の震源メカニズム解データを、適切に推定された震源メカニズム解として以下の議論に使用した。本研究ではオープンアクセスのSTRESSIVERSEコード（Vavryčuk, 2014）を使用して応力テンソルインバージョンを行い、各クラスターの震源域の応力場を推定した。

３．結果と議論

西、北、東クラスターで発生した地震の多くは、西北西－東南東方向から北北西－南南東方向の主圧力軸を持つ逆断層型の震源メカニズム解であり、その節面の１つはDD法で決められた震源分布と良く一致する。応力テンソルインバージョンで推定された応力場は、最大主応力は北西-南東方向、最小主応力はほぼ鉛直方向であり、能登半島北東部の広域応力場（Uchide et al., 2022）と一致した。南クラスターでは、広域応力場と整合的な逆断層型の震源メカニズム解は少なく、広域応力場と整合的ではない正断層型や横ずれ断層型の震源メカニズム解が多く見られた。特に正断層型の地震は15 ㎞よりも深い場所に集中していた。震源が深さ15 km以浅の地震のデータを使って応力場を推定すると、最大主応力が北西-南東方向、最小主応力が北東-南西方向であった。震源が深さ15 ㎞以深の地震のデータを使って応力場を推定すると、最大主応力は北北西-南南東方向でplungeが約47 度、最小主応力は西北西-東南東方向でplungeが約5 度であり、これは広域応力場の向きと大きく異なる。南クラスターの深さ15 km以深には低比抵抗領域（吉村・他, 2023）や低速度領域（Nakajima et al., 2022; Matsubara et al. 2022）が存在し、流体に富む領域であることが指摘されている。また、深さ15 km以深の震源分布は環状であり、火山活動に伴い形成される環状岩脈との関連が指摘されている。南クラスターの深さ15 km以深では、この構造を使って移動した流体によって広域応力場とは異なる向きの局所的な応力場が形成された可能性がある。

謝辞

© The Seismological Society of Japan

本研究では、気象庁の一元化震源データ、気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・東京大学地震研究所・京都大学防災研究所の地震波形データを使用させていただきました。応力インバージョンは、Vavryčuk（2014）によって開発されたオープンアクセスのSTRESSIVERSEコードを用いて計算しました。科学研究費補助金（特別研究促進費22K19949）「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査」の補助を部分的に受けました。ここに記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Stress drop of the earthquake swarm in the northeastern Noto Peninsula

*Mitsuteru Fukuoka[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Takuji Yamada[2]

1. Kanazawa Univ. , 2. Ibaraki Univ.

はじめに

石川県能登半島の群発地震は2018年頃から地震回数が増加傾向となり、2020年12月頃から地震活動が活発化した。2023年5月5日にはM_{JMA}6.5の地震が発生した。この群発地震の成因として、地下の流体の存在と地震活動や地殻変動への流体の関与が指摘されている（e.g., Nakajima, 2022; Amezawa et al., 2023; Nishimura et al., 2023; 吉村ほか, 2023）。群発地震における応力降下量を解析した研究では、群発地震発生初期の応力降下量が小さいこと(Yoshida et al., 2019)や群発地震時の応力降下量が通常時の地震の応力降下量より小さいこと(Yamada et al., 2015)が報告されており、その原因として流体の関与が挙げられている。本研究では、珠洲市周辺で発生した群発地震の応力降下量の時空間的な変動を調べ、この群発地震活動の特徴を応力降下量の観点から明らかにすることを目的とする。

データと解析手法

本研究の解析期間は2018年1月1日～2022年11月30日である。震源データはDD法を用いて震源再決定されたデータを用いた(Nishimura et al., 2023)。波形データは気象庁、防災科学技術研究所Hi-net、東京大学、京都大学の地震観測点の速度型地震計で記録されたものであり、サンプリング周波数は100 Hzである。上記の期間内に能登半島北東部で発生した90地震（$3.0 \leqq M_{JMA} \leqq 5.4$）を解析対象とした。 本研究ではYamada et al. (2021)の手法を改良し、以下の手順で解析を行った。まず、観測波形に含まれる震源の情報以外の影響を除去するため、解析対象地震の震源近傍（対象地震から1km未満、マグニチュード差が0.5以上）で発生した複数の地震の波形を経験的グリーン関数（EGF）として選定した。次に、P波では上下成分、S波では水平2成分の波形のフーリエ変換により速度スペクトルを計算し、解析対象地震とEGF地震の速度スペクトルの比を求めた。その際、解の安定性を確保するため、3つの時間窓についてスペクトル比を計算している(Imanishi and Ellsworth, 2006)。具体的には、P波では2.56秒の長さの時間窓を0.16秒ずつずらしたもの、S波では長さ5.12秒間の窓を0.64秒ずつずらした3時間窓を用いている。さらに、３つの時間窓から計算されたスペクトル比とω^2モデルに基づく理論スペクトル比との残差の二乗和を最小にする放射パターン係数と地震モーメントの積、およびコーナー周波数をグリッドサーチを用いて推定した。最後に、解析対象地震の地震モーメントの値として、F-netのCMT解で求められている地震についてはその値を使用し、それ以外はM_{JMA}がM_wと等しいと仮定してM_{JMA}から地震モーメントの値を推定(Hanks and Kanamori, 1979)した上で、推定されたコーナー周波数から応力降下量を計算した(Madariaga, 1976)。各解析対象地震について、応力降下量が推定された全観測点の対数平均をとり、その地震の応力降下量および推定誤差を求めた。

結果と考察

5観測点以上で適切にコーナー周波数が推定された地震数は、P波の解析では82地震、S波では90地震であり、求められた応力降下量の値は、P波、S波の解析でそれぞれ13MPa(0.6～94MPa)、19MPa (1.1～94MPa)であった。本研究の結果は、地震モーメントとコーナー周波数のスケーリング則（$Mo \propto f_C^{-3}$）を満たす。また、応力降下量の空間分布は不均質であり、北、東クラスターの傾斜方向断面での応力降下量分布は、複数の断面において浅部端と深部端で大きい傾向が見られた。断層の浅部端と深部端は剪断強度の高い領域に相当するため、応力降下量が大きい地震が発生する一方で、断層中央部では断層内部への流体の貫入による間隙水圧の上昇によって剪断強度が低下し、地震時の応力降下量が小さくなった可能性が考えられる（Yamada et al., 2015）。 各クラスターでの活動初期にはM3以上の地震の発生数が少なく、Yoshida et al. (2019)のような活動初期に応力降下量が小さくなるような時間的変動は確認できなかった。

© The Seismological Society of Japan

謝辞
本研究の解析にあたっては、気象庁、防災科学技術研究所Hi-netおよびf-net、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所のデータを使用しました。また、本研究の実施にあたっては、科学研究費補助金（特別研究促進費22K19949）「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査」の一部を使用しました。記して感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

Crustal deformation and mechanism for an earthquake swarm in the northeastern part of the Noto Peninsula based on GNSS observations

*Takuya NISHIMURA[1], Yoshihiro HIRAMATSU[2], Yusaku OHTA[3]

1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University

・はじめに
能登半島とその周辺では2007年の能登半島地震(M6.9)や1993年の能登半島地震(M6.6)など過去に被害地震が発生している．2018年頃から始まり，2020年12月から活発化した能登半島先端部での地震活動は，2023年5月5日にM6.5という被害地震をピークとして，2023年8月現在においても地震活動が活発な状態が続くという特徴を有している．京大防災研と金沢大学では地震活動の活発化を受けて，群発地震震源域近傍に臨時のGNSS観測を行なっているが，さらに，ソフトバンク株式会社（以下，ソフトバンク）の独自基準点と国土地理院の電子基準点（GEONET）により得られたGNSSデータを統合解析することによって，地殻変動のモニタリングを行なっている．本研究では，GNSSデータの統合解析によって得られた地殻変動の特徴とその変動源モデルの推定結果について報告し，群発地震の発生メカニズムに関する考察を行う．
・データ解析手法及び観測された地殻変動
本研究では，各機関からRINEXデータの提供を受けて，GipsyX Ver 1.4（Bertiger et al., 2020）の精密単独測位法を用いてITRF2014準拠の日座標値を計算し，2020年11月以前の長期トレンド成分を除去して,非定常地殻変動を抽出した．地殻変動や地震活動の特徴に応じて,全体を６つの期間に分割し，それぞれの期間で変動源を推定した．非定常変動の抽出までの解析手法の詳細については，Nishimura et al.(2023)を参照願いたい．
2020年12月の活動開始当初から2023年５月のM6.5地震の直前までの地殻変動（図１（a））は，群発地震の震源域から放射状にひろがる最大約3 cmの水平変動と震源域周辺の隆起が特徴的である．最大の隆起量（約6 cm）は，珠洲市の内陸部で観測された．M6.5の地震時の地殻変動（図１（b））は，珠洲市北側の海岸付近に位置する観測点を中心に，概ね西方向へ最大約10 cmの水平変動と最大約18 cmの隆起が観測された．地震後は，地震時と同じような空間パターンの地殻変動（余効変動）が1ヶ月程度続き，７月にはかなり収まったが，北側の観測点では隆起が続いているように見える．
・地殻変動から考察した群発地震のメカニズム
地殻変動や地震活動の推移から，以下のようなメカニズムによって群発地震が引き起こされたと推測される(Nishimura et al., 2023)．2020年12月から始まった活動開始の初期に，深部から大量の流体($10^7 m^3$ オーダー)が深さ16 kmまで上昇し，それが南東傾斜の比較的透水性の高い断層帯内を通じて周辺に拡散した．これにより断層帯では流体圧が上昇し，通常地震が発生する深度（概ね14 km）よりも深部では、非地震性すべりが誘発され２年以上にわたり継続した。一方，深さ14 kmよりも浅く地震が発生する深度では、流体圧の上昇による断層強度の低下と深部における非地震性すべりの両方の影響により，M6.5の地震を含む活発な地震活動が引き起こされた可能性がある．M6.5の地震以降の地殻変動は，M6.5地震の震源断層における南東傾斜の逆断層における余効すべりによって概ね説明できる．
・参考文献：Nishimura, T., Y. Hiramatsu, and Y. Ohta (2023), Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, Scientific Reports, 13, 8381, doi: 10.1038/s41598-023-35459-z.
・謝辞：本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは，「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じてソフトバンク株式会社とALES株式会社より提供を受けたものを使用しました．国土地理院の電子基準点RINEXデータ，気象庁一元化震源データを使用しました．京都大学及び金沢大学のGNSS観測点の設置にあたり，珠洲市教育委員会，珠洲市企画財政課，珠洲市産業振興課，珠洲市総務課，能登町教育委員会及び奥能登国際芸術祭実行委員会にお世話になりました．本研究はJSPS科研費 JP22K19949, JP23K17482の助成及び文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第二次）」の支援を受けました．ここに記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

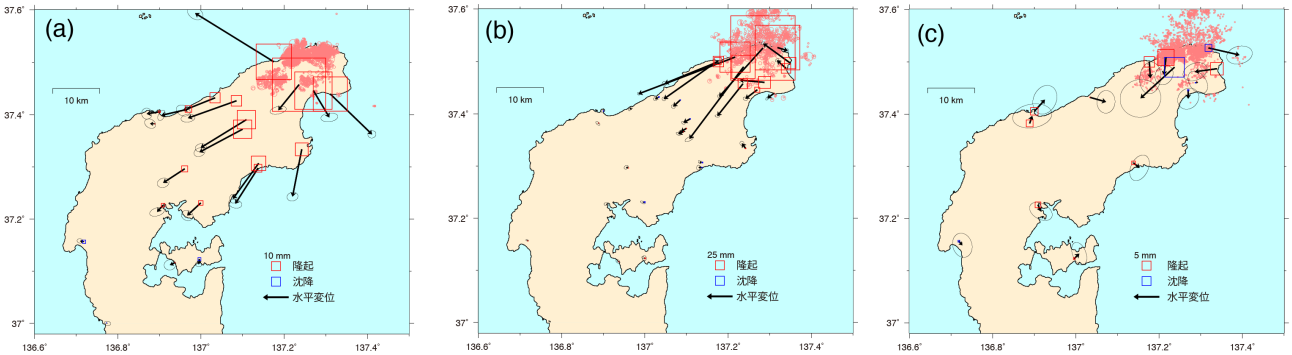


図1　GNSSによって観測された非定常地殻変動.赤丸はM1.5以上の再決定震源(平松、私信). (a)2020年11月から2023年5月5日の地震(M6.5)直前まで. (b) 2023年5月5日の地震(M6.5)時. (c) 2023年5月5日の地震(M6.5)直後から8月中旬まで.

© The Seismological Society of Japan

Space-time evolution of fault slip associated with transient deformation in the Noto Peninsula observed by dense GNSS networks

*Atsushige Doi[1], Takuya Nishimura[1], Shinichi Miyazaki[1]

1. KYOTO UNIVERSITY

石川県能登半島北東部では、2018年ごろから地震活動の増加が確認されるようになり、2020年12月ごろからは活発な群発地震活動が継続している。Nishimura et al.(2023)によれば、2023年2月末までで14,000回以上のM1以上の地震が観測され、2023年5月5日にはM6.5の地震が発生した。観測された群発地震の震源は発生時期や深さなどの特徴により4つのクラスター（北部・北東部・西部・南部）に分けることができ、初めに南部から地震が観測され時間経過とともに西部、北部、北東部の順で震源の移動が観測された。また、震源の深さの浅部への移動も観測された。能登半島北部における活断層は概ね南東傾斜の逆断層であると推定されており、群発地震の震源分布においても南東傾斜方向の分布が確認された。時間発展とともに震源が移動することがこの群発地震の特徴としてあげられる。地震活動に伴う地殻変動も設置されたGNSSで確認されており、2020年11月から2022年12月までで水平方向には放射状の変位パターンが観測され、震源域40km以内で広く隆起が観測された。

この能登半島における群発地震について、Nishimura et al.(2023)では、2020年11月から2022年6月までのGNSSの変位データを3つの期間に分けそれぞれの期間の累積の変位データから断層モデルを推定している。この論文では開口型と逆断層型の一様な矩形断層モデルを用いて推定を行っており、せん断すべりだけではなく開口成分とせん断すべりを組み合わせた断層モデルを用いると、観測された値に計算値がより近づくことが示されている。能登半島の地下に多量に存在する流体が群発地震活動に関与していることが示されていること（Yoshida et al., 2022, Amezawa et al., 2023）から、地下深部からの多量かつ長期間にわたって上昇してきた流体が透水性の高い断層帯を介して拡散し、断層のすべり強度が弱化することで断層の非地震性すべりを誘発したと考察されている。以上の考察を含めるうえで断層すべりを時間的に連続的に推定することが重要である。

Nishimura et al.(2023)では能登半島の地震活動を引き起こした一様な矩形断層のすべりや流体の影響について考察しているが、群発地震源の時間経過に伴う変化についての詳細な考察を十分されているとは言えず、断層運動の時間発展についてさらなる考察を深める余地が存在すると考えられる。そこで本研究では、Nishimura et al. (2023) が用いたGNSSデータに時間依存インバージョンを適用し、断層面の開口とせん断すべりの空間分布が時間的にどのように変化しているかを推定した。発表ではその結果と地震活動等の他のデータとの比較を行い、Nishimura et al. (2023) が提唱している流体の拡散ですべり弱化が生じるというモデルの妥当性について検討を行う。

謝辞：本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは，「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じてソフトバンク株式会社とALES株式会社より提供を受けたものを使用しました．また、金沢大学と国土地理院のGNSSデータも使用しました。ここに記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Vertical crustal deformation associated with the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake, based on littoral biological remains

*Masanobu SHISHIKURA[1], Tomoo Echigo[2], Yuichi Namegaya[1], Hideaki Maemoku[3], Ryo Tateishi[4], Nagisa Sawada[5]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Kankyo Chishitsu Co. Ltd, 3. Hosei UNiversity, 4. University of Toyama, 5. Graduate School, University of Toyama

2023年5月5日に石川県能登地方で発生したマグニチュード6.5の地震では，GNSS観測等により地殻変動が観測された．また陸域観測技術衛星２号「だいち２号」が観測した合成開口レーダー画像のSAR干渉解析結果（2022年4月21日と5月5日の比較および2022年4月9日と5月7日の比較）では，最大20 cm程度衛星に近づく地殻変動が検出され（国土地理院，2023），地盤の隆起が生じたことを示している．能登半島は長期的に見ると数10万年前から継続して隆起しており，筆者らは今回の地震以前より能登半島北部沿岸において，過去の海岸の隆起を記録した完新世海岸段丘や生物遺骸群集の調査を継続して実施してきた（宍倉ほか，2020）．今回の地震でも地盤の隆起によって海岸の離水現象が生じたとみられることから，地震直後の5月13日から15日にかけて現地調査を実施し，地震に伴う地殻上下変動について明らかにするとともに，海岸段丘の高度分布との関係について検討した．

筆者らは能登半島北部沿岸に分布する完新世海岸段丘および岩礁の固着生物遺骸群集について，2008年から2022年にかけて各所で高度を測定しており，基準となる地震前の高度データをすでに保持している．そこで今回の地震後に同じ地点でVRS-RTKを用いて再び高度を測定し，地震前後の高度変化から地殻上下変動量を見積もった．また現地では海面付近に生息するカンザシゴカイ類やオオヘビガイなどが，今回の地震による隆起で離水して死滅したり，石灰藻が白化したりする様子が観察されたことから，これらの高度についても測定し，地震後も生息している部分との高度差で地殻上下変動量を見積もった．

今回の調査では20箇所以上で地殻上下変動量のデータを取得することができた．その結果，最大の隆起を記録したのは高屋と折戸における24 cmである．これはSAR干渉解析で最大変動（約20 cm）の生じた位置とおおよそ一致するが，上下方向の変動（隆起量）としてはやや大きい値を示す．また最大の隆起を記録した地点から海岸沿いに西側に向かって隆起量は徐々に減少し，馬緤付近で10～15 cm，真浦付近で5 cmとなるが，これはSAR干渉解析結果と傾向は概ね一致する．一方，高屋や折戸より東側の海岸沿いでは隆起量は西側ほど減少せず，禄剛崎付近で19 cm，珠洲岬付近で18 cm，寺家付近で15 cmと比較的大きい．これはSAR干渉解析結果とは一致しない．この不一致については，実際に地震時の隆起が東側で大きかった可能性のほか，地震後現地調査までの1週間程度の間に東側のみ隆起する地殻変動を生じた可能性や，あるいは今回の地震の2年以上前から継続する群発地震活動等に伴う地殻変動ですでに離水が始まっていた可能性も考えられる．

次に今回明らかになった地震時の地殻上下変動と海岸段丘の高度分布との関係についてみてみる．本地域の海岸段丘は，更新世後期（MIS5e）の段丘，完新世段丘ともに馬緤付近で最も高度が高く，そこから東西に向かって高度を減じていく傾向にある（宍倉ほか，2020）．これを今回の地震の地殻上下変動の傾向と比べると，隆起のピークの位置が一致しない．したがって長期的に見ると能登半島北部の地殻上下変動は，今回の地震の地殻上下変動とは別の変動の要素も考慮する必要がある．今後さらに調査を進めて地震時および長期的な地殻変動の実態を解明し，様々な解析を通して震源との関係を探っていかなければならない．

© The Seismological Society of Japan

Initial report on strain measurement using TW-COTDR distributed optical fiber sensing in a tunnel in Suzu, Ishikawa, Japan.

*Eiichiro ARAKI[1], Masatoshi Miyazawa[2], Yoshiyuki Tanaka[3], Takashi Yokobiki[1]

1. JAMSTEC IMG, 2. DPRI, Kyoto University, 3. School of Science, the University of Tokyo

研究の背景
石川県珠洲市の群発地震活動とそれに伴う地殻変動の観測を目指し、珠洲市内の鉄道トンネル内に基線長90mの光ファイバー歪計と3成分地震計を設置し2022年11月1日より連続的に観測を行ってきた。この光ファイバー歪計では、2023年5月5日に発生したM6.5地震において、320μという、大きな地震時歪変動を観測した。これは90mの基線長に対して2.9cmという大きな変化であり、地震に伴う地殻変動として期待されるものと比べてもかなり大きい。周辺では家屋の倒壊などもみられることから、トンネルの一部構造が地震によってずれたために、このような大きな変動が観測されている可能性が考えられる。そこで、より妥当な地震時地殻変動量の計測を目指し、トンネルの歪を、90mという長い基線長全体で計測するのではなく、TW-COTDRという分布型光ファイバー計測技術を用いてより稠密にトンネルの各所で光ファイバーの歪計測を行い、局部的な構造変化を除いたトンネル全体の地殻変動量を計測することをねらった。

光ファイバーの敷設と計測
分布型光ファイバー計測技術を用いて計測する鉄道トンネル内の光ファイバーケーブルは、光ドロップケーブルと呼ばれる、陸上での光インターネット加入者引き込みに用いられているものと同じ光ファイバーケーブルを用いた。既設の光ファイバー歪計のトンネル南側壁面に展開されている部分では、約1cmの間隔をあけて並行に敷設し、区間での光ファイバー歪計記録と比較が行えるようにした。光ファイバーケーブルは総延長700m程度あったため、光ファイバーケーブルは、光ファイバー歪計が敷設されたトンネル南壁面だけでなく、北壁面バラスト境界部床に全体にバラスト礫およびセメントモルタルを用いて固定するとともに、南壁面バラスト境界部には特に固定せず敷設を行い、設置条件の違いによる観測記録の違いを調べることをねらった。 TW-COTDR光ファイバーセンシング計測はNeubrex社NBX-7033を用い、敷設した領域は、計測装置から30m~267mの範囲であったが、敷設した光ファイバー全体を10cmの空間分解能、約2分30秒に1回のレートで2023/7/26より計測を行い、計測データは計測機器に接続した処理装置で逐次処理した。

計測の結果と初期検討結果
敷設した光ファイバーケーブルの計測データには、各所で外気温の変化・風向の変化や、トンネル内への日射などに伴う光ファイバーの温度変化に伴うと考えられる大きな変化がみられた。トンネル壁面に敷設した光ファイバーケーブルは、敷設したトンネル壁面の温度変化を反映して変動しているものと考えられるが、床面にバラストを被せて固定した光ファイバーと比べて２～３倍程度大きな日変動を示しており、壁面の温度変化が思いのほか大きいことがわかった。一方、床面にバラストを被せず敷設した光ファイバーはより大きな変動を示しており、トンネル壁面は地温と気温の複合的な温度変化の影響下にあるものと考えられる。この温度変化の影響は、各点での気温とのカップリング度合いに応じて様々に変化するため、その影響をこれまでの光ファイバー歪計で試みたように少数の温度計測によって推測することはかなり困難と考えられる。長期的な地殻変動を計測するためには、温度変化の影響を観測データから十分に除去することが必要であるが、そのためには、歪変化に応答せず、温度変動のみに応答する観測データが必要であると考えられる。そのため、10月より、既設の光ファイバー歪計の観測2成分のうち1成分を温度変動のみに応答するものに取り換え、壁面温度の影響を補正した観測を行うことを計画している。同時に、TW-COTDRによる光ファイバーセンシングによる計測においても、今後、同じ方法によって壁面温度と歪の影響を分離した観測を行うことを計画している。本TW-COTDR計測の主目的である、地震に伴う地殻歪変動の観測については、これまでのところ、5/5に発生したような大きな地震は発生していないが、7/30には深さ約10kmでM3.2、最大震度3を記録した地震の前後のTW-COTDR歪計測記録が得られており、今後、詳細な解析を行う。

© The Seismological Society of Japan

謝辞
本研究では、観測の実施にあたり中川潤（京大防災研）、松尾凌、船曳祐輝（京大理）諸氏のご協力をいただきました。また、
本研究は、科学研究補助金23K17482, 21H05204および「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の助成を受けました。

© The Seismological Society of Japan

Investigation of earthquake damage to regional wooden buildings due to the 2023 Noto earthquake
Part 2 Seismic damage of shrines and temples

*Yuto Sawada[1], Takuma Arakawa[1], Honoka Shibaguchi[1], Tatsuru Suda[1], Hiromi Sato[1], Akira Murata[2]

1. Kanazawa Institute of Technology, 2. Kanazawa University

2023年5月5日に石川県能登半島沖を震源として発生した地震において、被害が顕著であった珠洲市正院地区を中心に建築物の被害調査を実施した。その1に引き続き、本報では社寺建築および同敷地内の建築物と工作物を対象に、外観目視調査に基づいた被害状況を報告する。
調査期間は5月24～25日および5月31日の３日間とし、日本建築学会北陸支部災害部会によって実施された。調査メンバーは金沢工業大学と金沢大学のそれぞれ教員と学生を中心に総計13人で構成した。調査方法は被害状況を把握するために調査シート [1)] に基づいて建物の外観目視による被害調査と被害状況の写真記録を行った。本調査に先だって5月5日に初動調査を実施しており、概観した被害状況から調査範囲を定めて、範囲内の寺院および神社建築物あわせて50件、161棟を対象に建築物の位置を確認しながら作成した調査シートにより建物概要および被害状況を記録した。主な調査項目は、周辺の地形状況、構造、構法、建物用途等の種類、屋根や基礎の仕様、階数など建物の構造特性に関する項目と周辺地盤、門扉、屋根、壁、基礎、腐朽劣化などの被害程度に関する項目とし、各被害を総合して被害程度 [1)] を倒壊、大破、中破、小破、軽微、無被害の6段階で判定した。
調査の結果、社寺建築物における本殿および本堂は無被害40%と小破32%となり、その他、数棟で大きな被害も受けているが倒壊した建築物はない。敷地内の本殿本堂以外の伝統木造建築物においても無被害56%であった。一方で鐘楼や手水舎のような、ほとんど壁が無く、柱4本で屋根を支える構造の建築物は無被害41%で最も多いものの、倒壊11%、大破4%と大きな被害程度となった。また鳥居および灯籠においては倒壊で最も大きく34%であり、特に石造による鳥居の倒壊は顕著であった。

謝辞　本調査にあたり、建物所有者の皆さまには被災直後にもかかわらずご協力いただき感謝申し上げます。関西大学西川英佑氏には調査に同行頂くと共にその後のデータ集計にご協力いただきました。ここに謝意を示します。

参考文献
1) 須田達、他：2011 年東北地方太平洋沖地震による木造建物の被害調査（その1）～（その3）、日本地震工学会・大会－2011梗概集、pp.68-73

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P5 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S03P] PM-P

[S03P-01] Spatiotemporal variation of strain field in the Niigata-Kobe Tectonic Zone: Long-term analysis using GNSS data

*Hiroki Kawabata[1], Shoichi Yoshioka[2,1] (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

[S03P-02] Time dependent modeling of the Nankai trough subduction zone, Japan since 2018.

*Shinzaburo Ozawa[1], Hiroshi Munekane[1], Hisashi Suito[1] (1. Geospatial Information Authority of Japan)

[S03P-03] Characteristics of deep short term slow slip events along the Nankai trough plate boundary

*Kenichi FUJITA[1], Hiroaki Katayama[1], Yasutaka Yamana[1], Minoru Funakoshi[1] (1. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency)

[S03P-04] Attempt to comprehensive detecting intermediate-term slow slip events in the shallow part of the Suruga Trough

*Yuji Kikuchi[1], Yuta Mitsui[2], Masayuki Kano[3] (1. Graduate School of Shizuoka University, 2. Shizuoka University, 3. Tohoku University)

[S03P-05] Slow-slip events of one-hour duration (4)

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

[S03P-06] Spatiotemporal evolution of Slow Slip Events along the Southern Ryukyu subduction zone during 2017-2022

*Hiromu SAKAUE[1], Yoshiyuki TANAKA[1], Masayuki KANO[2] (1. The University of Tokyo, 2. Tohoku University)

[S03P-07] Postseismic deformation due to the 2004 off Kii Peninsula earthquake: effect of 3-D viscosity structure

*Akinori HASHIMA[1], Takane Hori[2], Takeshi Iinuma[2], Kohei Fujita[3], Sota Murakami[3], Tsuyoshi Ichimura[3] (1. Tokyo Gakugei University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[S03P-08] On non-intuitive deformation fields caused by reverse faults in an elastic-viscoelastic medium

*Koitaro Koide[1], Yukitoshi Fukahata[1] (1. Kyoto University)

[S03P-09] GNSS-A seafloor positioning solution in SGO-A station

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

Spatiotemporal variation of strain field in the Niigata-Kobe Tectonic Zone: Long-term analysis using GNSS data

*Hiroki Kawabata[1], Shoichi Yoshioka[2,1]

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

１．はじめに

日本列島は、プレート運動による地殻変動が活発な地域であり、日本列島の広域では、太平洋プレートやフィリピン海プレートの沈み込みとプレート境界の固着を主な原因として、定常的な面積歪の収縮が続いている。Sagiya et al. (2000)は、国土地理院によるGNSS（Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム）による日々の座標値を用いて、日本列島における1997年～1999年の変位場・歪場を求め、NKTZ（Niigata Kobe Tectonic Zone / 新潟ー神戸歪集中帯）の存在を提唱した。 今日、GNSS時系列データは25年以上継続して得られており、より長期的な解析が可能となっている。そこで本研究では、過去26年間のGNSS時系列データを用いて、NKTZの長期的な変位場・歪場の時空間変化を明らかにすることを目的とした。

2．手法

GNSS時系列データの解析により、NKTZを含む日本列島中部の定常的な変位場を求め、1997年から2022年の終わりまでの26年間の1年ごとに蓄積された歪（主歪・面積歪・最大剪断歪）を計算した。 解析には、国土地理院のGEONET（GNSS Earth Observation NETwork System / GNSS連続観測システム）の日々の座標値（F5解）の水平成分を使用した。GNSS時系列データには、共通誤差成分、アンテナ交換によるステップ、地震時ステップ、年周・半年周変動、大地震に伴う余効変動が含まれており、これらの成分をGNSS時系列データから取り除くことで、定常的な地殻変動を抽出した。本研究では、大地震に伴う余効変動として、新潟県中越地震（2004年10月23日, Mw：6.5）、新潟県中越沖地震（2007年7月16日, Mw：6.7）、東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日, Mw：9.0）の3つの余効変動を除去した。このようにして変位場を求めたのち、Shen et al. (1996)の手法を用いて歪場を計算した。

3．結果

面積歪・最大剪断歪ともに、NKTZの北部（新潟県～北陸地方）において、歪の大きい値が定常的に確認され、NKTZの南部（近畿地方）では、北部に比べ、特徴的な歪の値は確認できなかった。主歪に関しては、NKTZ全体で西北西-東南東方向の圧縮が卓越しており、その大きさはNKTZ以外の領域よりも大きい傾向がみられた。 また、面積歪と最大剪断歪に関して、NKTZ領域における1年ごとの歪場の差分を取り、その残差のRMSを求めた。その結果、面積歪の方が最大剪断歪に比べRMSの値が大きい傾向にあり、北緯37°付近において、特にRMSが大きくなる傾向がみられた。

© The Seismological Society of Japan

Time dependent modeling of the Nankai trough subduction zone, Japan since 2018.

*Shinzaburo Ozawa[1], Hiroshi Munekane[1], Hisashi Suito[1]

1. Geospatial Information Authority of Japan

要旨 西南日本のGNSSデータを用いて、2018年以降の南海トラフ沿いのプレート間滑りを推定した。その結果、2018年７月頃から日向灘北部でSSEが発生し、2018年10月から2019年半ばにかけて豊後水道にSSE領域が広がったことが推定された。Mwは7.0程度と推定されている。また2018年末頃から2019年初めにかけて日向灘南部でSSEが発生しており、Mw6.0程度の規模と推定された。2019年初めから四国中部でSSEが発生し2023年7月時点まで継続している。Mw6.5程度のエネルギーが見積もられている。四国中部の長期的SSEは、四国北西部の短期的SSEと同期してモーメントが増加する場合がある。2019年４月頃から紀伊水道でSSEが発生し、2022年に終了している。Mwは6.3程度と推定された。2020年半ばから2021年半ばまで日向灘南部でSSEが発生しMw6.5程度のエネルギーが放出された。2023年１月から日向灘南部でSSEが発生し６月頃まで続いた。種子島沖合では、2019年種子島近海の地震後にアフタースリップが発生しMw6.6程度のエネルギーが放出されている。 はじめに 2018 年から南海トラフに沿って四国から九州までの領域で遷移的な地殻変動が検出された。先行研究では、2011 年の東北地方太平洋沖地震後と 2016 年の熊本地震後の余効変動を考慮していなかった。 本研究では、2011 年の東北地方太平洋沖地震と 2016 年の熊本地震の影響を粘弾性変形として計算し補正すると共に、解析領域を拡大して、2018 年以降のプレート境界面の状態の時空間進化を推定した。 解析方法 2011 年の東北地方太平洋沖地震と 2016 年の熊本地震の粘弾性変形を、Suito (2017), 水藤 (2017) の結果に従って補正し、2006-2009年の一次トレンドを元データから除去している。 240点のGPS観測点の東西、南北、上下成分を時間依存のインバージョンに使用した。プレート形状はHirose(2008)に基づきスプライン曲面で表している。解析期間は2018年１月～2023年7月までとした。 結論 豊後水道の滑りは、先行研究と調和的な結果が得られている。四国中部のSSEは2019年ころから始まり、2023年時点でまだ続いている。四国中部の長期的SSEは、四国北西部の短期的SSEの発生に同期してモーメント増加が認められた。推定モーメントはMw6.5程度と推定された。紀伊水道では、2019年頃から始まり2022年には終了している。Mwは6.3程度と推定された。日向灘南部のSSEでは2020年半ばから2021年半ばにかけてMw6.5程度のエネルギーが、2023年１月から6月にかけてM6.3程度のエネルギーが放出された。種子島沖合では、2019年種子島近海の地震（Mw6.4）後にアフタースリップが発生し、2020年以降でスロースリップが４度ほど発生しトータルとしてはMw6.6程度のエネルギーが放出されている。

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of deep short term slow slip events along the Nankai trough plate boundary

*Kenichi FUJITA[1], Hiroaki Katayama[1], Yasutaka Yamana[1], Minoru Funakoshi[1]

1. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

１．はじめに
気象庁では、南海トラフ域でのプレート境界深部において発生した短期的ゆっくりすべりについて、ひずみ波形に変化が見られた期間におけるひずみ変化量から断層モデルを解析し、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会等で結果を報告している。2011年から2022年までに、現在の手法により短期的ゆっくりすべりを解析した事例は250件を超えた。短期的ゆっくりすべりの断層モデルの特徴などを整理し、領域ごとの発生間隔や地震モーメントの積算などを統計的に把握することは、南海トラフ域での地殻変動等の監視にとって重要である。本発表では、これらの現時点での整理結果に基づいて、その特徴等を調査したので報告する。
２．手法
本調査における短期的ゆっくりすべりの解析では、産業技術総合研究所の手法（大谷・板場, 2013, 地質調査研究報告）と同様に、すべり位置の推定を2段階で行っており、第一段階の推定では断層位置とすべり量をグリッドサーチにより求めている。このとき、断層サイズは幅・長さともに20kmとし、深さはプレート境界に固定している。プレート境界は、Hirose et al.（2008, JGR）を基にしており、走向・傾斜はこの情報に基づきグリッドごとに設定している。すべり角は、フィリピン海プレートの沈み込みの向きと反対方向のすべりとなるようにグリッドごとに設定している。第二段階の推定では、第一段階で求まったグリッド位置から、あらかじめ設定した範囲で断層中心位置を動かすとともに断層パラメータ（走向・傾斜・すべり角・断層幅・長さ・すべり量）も一定範囲で動かし、理論変化量と観測値の決定係数を評価関数としたSCE-UA（Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona）法（Duan et al. 1992, Water Resource Research；田齋・他, 2006, 九大農学芸誌）を用いて最適なパラメータを推定している。第一、第二段階ともに、断層モデルは矩形断層の一様なすべりを仮定している。統計的に整理するにあたっては、深部低周波地震（微動）の群発的な活動領域を基に、ひずみ波形変化の特徴や断層モデルの中心位置などによって領域分け（長野県南部や愛知・長野県境など）を行っている。
３．結果・考察
各領域において、断層サイズやすべり量から計算した地震モーメントの積算では、多くの領域で時間経過とともに積算値が線形に増加する傾向が見られた。ただし、隣接する領域と同時期に短期的ゆっくりすべりが発生することが多い領域（愛知県東部と愛知県中部など）では、地震モーメントの積算の増加傾向にばらつきが見られた。これは複数領域で発生した短期的ゆっくりすべりが1つの領域の短期的ゆっくりすべりとして解析されたことに起因すると推測される。また、多くの領域で短期的ゆっくりすべりの規模とすべり量には相関が見られたが、規模と断層サイズについては明瞭な相関が見られなかった。
今回のような解析結果の整理は、発生した短期的ゆっくりすべりと過去の活動との規模や発生間隔などの定量的な比較が容易となるなど、より客観的な評価に資するものである。
４．謝辞
本調査には、静岡県及び産業技術総合研究所のひずみ計データを使用させていただきました。

© The Seismological Society of Japan

Attempt to comprehensive detecting intermediate-term slow slip events in the shallow part of the Suruga Trough

*Yuji Kikuchi[1], Yuta Mitsui[2], Masayuki Kano[3]

1. Graduate School of Shizuoka University, 2. Shizuoka University, 3. Tohoku University

西南日本の南海トラフ沈み込み帯では多くのスロースリップイベント(SSE)が発生している。深部SSEはGNSSやひずみ計・傾斜計に基づいて検出されてきた(例えばNishimura et al., 2013; Okada et al., 2022; Yabe et al., 2023)。近年は海溝に近い浅部でもSSE検出が試みられている。例えば、深部低周波地震の活動を基準にGNSSデータをスタッキングして短期的スロースリップイベント(S-SSE)の検出を試みた先行研究(Kano and Kato, 2020)は、駿河トラフの浅部で深部S-SSEと同時に発生する断層すべりを推定した。しかし、この結果は、南海トラフ沈み込み帯の広範囲でのS-SSE推定の一部であり、駿河トラフ浅部の断層すべりのみに焦点を当ててSSEの網羅的検出を目指した先行研究は存在しない。

本研究では、推定された駿河トラフ浅部における断層すべりを検証し、また、他の時期においても同様の断層すべりが生じていないかを調査するため、駿河トラフの上盤と下盤間のGNSS基線長変化および体積ひずみ計データを解析する。

解析データとして、国土地理院が提供するGNSSデータ(F5解)の水平成分について、2002年から2022年までの時系列データを使用した。アンテナ交換に伴う人為的オフセット、2009年8月11日駿河湾の地震に伴うオフセット、季節変動を予め除去した。

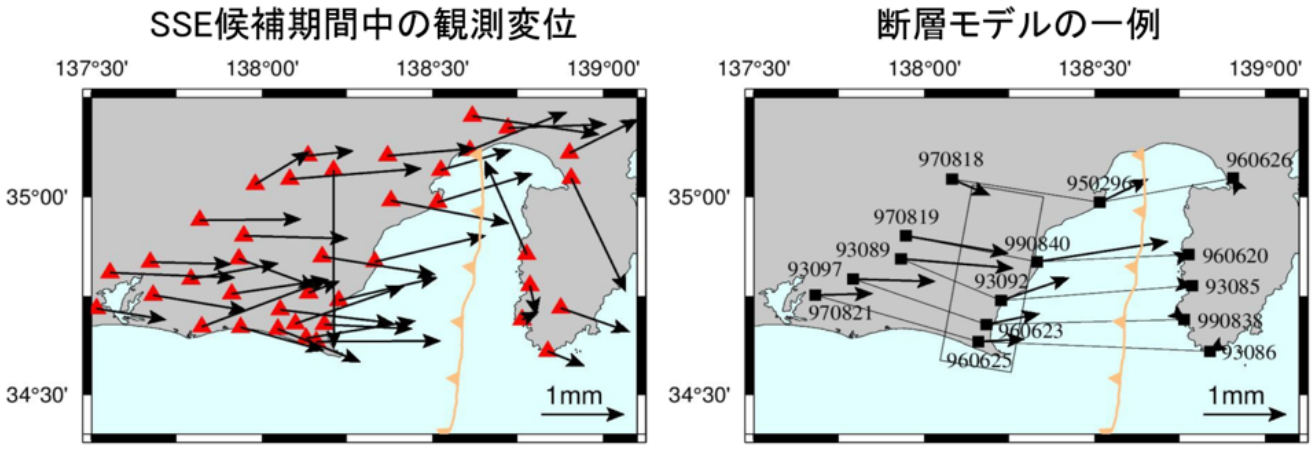
まず、駿河湾両岸のGNSS観測点間(5ペア)の基線長時間変化を算出する。先行研究(Kano and Kato, 2020)の解析手法に従い、2004～2009年に発生した11回の深部S-SSE発生日(Sekine et al., 2010; Nishimura et al., 2013)前後300日間の基線長データをデトレンドし、11回分をスタックした。深部S-SSE発生日を基準に、先行研究と同じ時間窓である20日間、本研究独自の100日間の基線長短縮量をそれぞれ算出した。この結果、駿河トラフ浅部のGNSS基線のうち南側では、深部S-SSEと同時期に、Kano & Kato (2020)の20日間時間窓よりも長い100日間程度の基線短縮が見られた。この100日間程度の基線短縮は、90%信頼区間において統計的に有意であった。Yokota & Ishikawa (2020)やTakemura et al. (2022)が南海トラフの紀伊半島沖浅部で比較的長期にわたるSSE(あるいは群発的な超低周波地震活動)を検出したことから、駿河トラフ浅部でも比較的長期にわたるSSEが単独発生していてもおかしくないと考えられる。

次に、駿河トラフ浅部で100日間程度継続するSSEが単独発生した可能性のある時期を探るため、複数の方法でSSE候補期間を絞り込む。例として、SSEによる地表変位を模擬したテンプレートとGNSS基線長の100日間移動平均データとを相関分析(テンプレートマッチング)した。また、GNSS基線長移動平均データをデトレンドしたものに100日間タイムウィンドウを設定した。タイムウィンドウに含まれるデータを用いて回帰直線をフィッテイングし、回帰直線の右端と左端の差を求めることで基線長の速度変換を行った。さらに、3次元半無限均質弾性体のグリーン関数(Okada, 1992)を用いて、駿河トラフ浅部へ設定した仮想の断層による仮想の基線長変化を計算し、データとの整合性が高い時期を抽出した。その結果、2002～2022年の間にいくつかのSSE候補期間が推定された。SSE候補期間のGNSSデータを基に、暫定的な断層モデルをフォワード計算で仮推定した。SSE候補期間中の観測変位は、駿河湾直下よりやや深部側に断層モデルを仮定することである程度説明できることがわかった。

SSE候補期間で、体積ひずみ計データにおいてもひずみイベントが見られるかどうかを検証するため、暫定的な断層モデルによる地表の体積ひずみ(理論値)と体積ひずみ計データ(観測値)との比較を行った。しかし現在のところ、暫定的な断層モデルから計算される地表の体積ひずみと、体積ひずみ計のデータとは必ずしも整合的

© The Seismological Society of Japan

ではないこともわかった。SSE候補期間中の観測変位を説明するような断層モデルの再検討など、さらなる精査が必要と考えられる。



© The Seismological Society of Japan

Slow-slip events of one-hour duration (4)

*Akio Katsumata[1], Kazuki Miyaoka[2], Takahiro Tsuyuki[3], Satoshi Itaba[4], Masayuki Tanaka[3], Takeo Ito[5], Akiteru Takamori[6], Akito Araya[6]

1. Univ. of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. Nagoya Univ., 6. ERI, Univ. of Tokyo

継続時間約1時間のスロースリップ(1H-SSE)現象について調査している．用いているのは，犬山観測点及び天竜船明観測点に設置されているレーザーひずみ計と気象庁・産業技術総合研究所が設置している及びボアホール型多成分ひずみ計のデータである．

これまでは、短期的スロースリップ(SSE)発生期間中について調査をしてきた。ひずみデータとランプ関数との相関係数に基づいて継続時間1時間程度のひずみステップ現象の検出を試みてきた．その結果，継続時間約1時間のひずみステップは，短期的スロースリップ発生中の一時的なすべり速度増加現象として確認されている．今回は，2016～2022年にわたって連続的に継続時間1時間程度のひずみステップの検出を行った．スタッキング手法(宮岡・横田, 2012)によって得られた時系列を用いることによって，よりプレート間すべりの可能性の高いひずみステップの検出を行った。スタッキング手法においては，断層すべりを仮定しておく必要がある．約10km間隔で断層を仮定してひずみステップの検出を行った。

スタッキング法を適用しても，ランプ関数と相関が高くなるイベントは数多く検出される。正の相関，つまりプレート間すべりと同極性を占める割合は相関係数が大きくなるほど高まる(図1)ので，検出されたひずみステップの中には，実際のプレート間すべりによるイベントが含まれているとみられる。更にプレート間すべり現象として可能性の高いイベントを選択する指標として、深部微動の回数積算変化とスタッキング波形との相関が高いこと、決定係数を用いて推定したすべり源位置と深部微動震源が近いことなどの条件を加えた場合に，条件を満足するイベントが2016～2022年の期間に10弱検出された(例，図2)．いずれのイベントも短期的スロースリップ発生期間中のものであった．このようにして検出される継続時間1時間のひずみステップは，短期的スロースリップのすべり速度増加現象であり，単独で発生するような現象を確認することはできなかった．なお，ランプ関数と正の相関を示すイベントの比率からみて，この期間に発生している継続時間1時間のプレート間すべり現象は数十ある(図1)とみられ，単独発生の継続時間1時間のプレート間すべり現象の存在を否定はできない．

© The Seismological Society of Japan

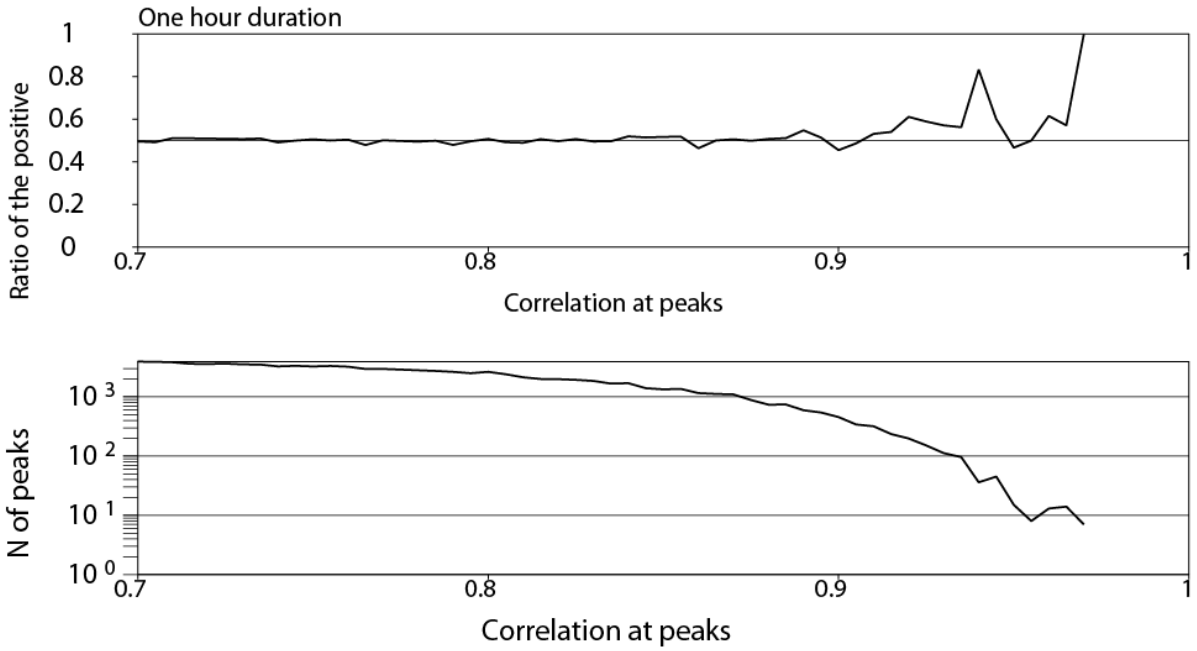


図１　スタッキング波形とランプ関数との相関のピークにおける正値の比率（上）とピークの総数（下）. 横軸はピークにおける相関係数.

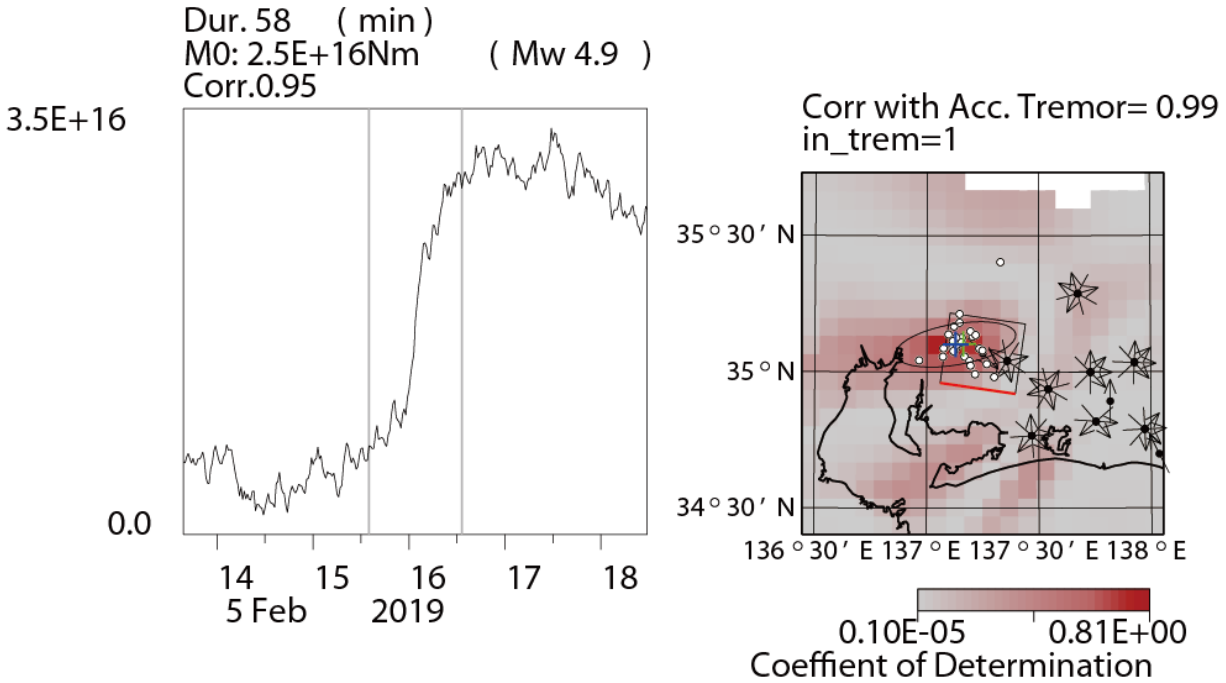


図２　スタッキング波形（左）と決定係数を用いたすべり源位置推定と微動震源の比較（右）. ○は 深部微動の震央.

© The Seismological Society of Japan

Spatiotemporal evolution of Slow Slip Events along the Southern Ryukyu subduction zone during 2017-2022

*Hiromu SAKAUE[1], Yoshiyuki TANAKA[1], Masayuki KANO[2]

1. The University of Tokyo, 2. Tohoku University

はじめに
八重山諸島は日本列島の南西端に位置し，フィリピン海プレートが琉球海溝に沿って北西に沈み込んでおり，その速度は南シナ海ブロックに対して8.0～8.5cm/年である（Sella et al. 2002）．また島々の北にある沖縄トラフ沿いでは背弧拡大が起きており（Sibuet et al. 1998），その速度は3.5～5.0cm/年と推定されている（Nishimura et al. 2004）．世界各地のプレート沈み込み帯では低周波地震（LFE）や超低周波地震（VLFE），スロースリップイベント（SSE）といったスロー地震が観測されており（Obara & Kato, 2016），琉球海溝でも同様に多様なスロー地震が観測されている．八重山諸島の深さ40km付近のプレート境界では，Mw～6.6のSSEが6～7ヶ月の間隔で繰り返し発生し，継続時間はおよそ20-50日である（Heki & Kataoka, 2008; Nishimura, 2014; Kano et al., 2018）．一方，八重山諸島の南方の深さ25km以浅のプレート境界でVLFEやLFEが検出されている（Ando et al., 2012; Nakamura, 2017）．西南日本の南海トラフ沈み込み帯では短期的SSEに同期して微動やLFEが観測されているが，八重山諸島ではVLFEとLFEの活動分布とSSEは空間的に相補的である（Kano et al., 2018）．SSEのすべり分布はよく似ているが，エピソードにより数日ですべりが成長するSSEと50日程かけてゆっくりとすべりが成長するSSEの時空間発展が報告されている（Kano et al., 2018）．本研究では，2017年以降に発生したSSEの時空間発展を推定し，Kano et al. (2018)で報告されたすべりの成長過程の違いが見られるかどうかを調査する．

データと解析手法
本研究では八重山諸島に設置されたGNSS観測点の国土地理院GEONETの8観測点と京都大学と九州大学によって設置管理されている10観測点のデータを使用した．京都大学防災研究所西村卓也教授により，RINEXデータからGipsyX Ver1.3/1.4の精密単独測位法により計算された日座標値を解析に使用した．2017年1月1日から2020年12月31日の日座標値時系列から年周・半年周及び線形トレンド成分を推定して時系列から取り除いた．2017年1月1日から2023年6月17日の期間の補正後の時系列に対し改良型のNetwork Inversion Filter（Fukuda et al., 2008）を適用しプレート境界におけるすべりの時空間発展を推定した．すべりを推定した断層はフィリピン海プレート境界面上として，プレート形状はHayes et al.（2012）を採用し，2733個の三角形小断層を用いて曲面を再現した．すべりの向きはアムールプレートに対するフィリピン海プレートの沈み込み方向（Sella et al., 2002）と平行に固定した．

結果と考察
2017年から2022年の6年間で，2017年5月から7月，2017年12月から2018年1月，2018年8月から10月，2019年1月から3月，2019年7月から9月，2020年1月から3月，2020年6月から12月，2021年3月から4月，2021年9月から11月，2022年6月から8月の10個の期間に西表島北西沖の深さ30～60kmにSSEによるすべりを推定した．推定されたすべり量は6-11 cm，SSEの規模はモーメントマグニチュード（M_w）6.5-6.7であった．SSEの継続期間はおよそ20-50日と先行研究で報告されているが，2020年6月から12月の期間に継続期間がおよそ60～150日のSSEが推定された．このエピソードは前処理として行った時系列から季節成分の補正の仕方で継続期間の長さと開始時期が変わってしまうが，前処理の方法を問わずこのSSEによって解放されたモーメント量は概ね同程度に推定された．2020年1月に発生したエピソードでは最初の20日ほど西表島北西沖ですべりが推定され，その後すべりの中心が6日ほどで約35km東へ移動する時空間発展が推定された．

謝辞

© The Seismological Society of Japan

国土地理院GEONETのGNSSデータを利用させていただきました．また，京都大学と九州大学により設置管理されているGNSS観測点のデータを利用させていただきました．これらの観測点の維持管理は文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A) Slow-to-Fast地震学の支援を受けています．また解析に使用した日座標値は京都大学防災研究所の西村卓也教授よりご提供いただきました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Postseismic deformation due to the 2004 off Kii Peninsula earthquake: effect of 3-D viscosity structure

*Akinori HASHIMA[1], Takane Hori[2], Takeshi Iinuma[2], Kohei Fujita[3], Sota Murakami[3], Tsuyoshi Ichimura[3]

1. Tokyo Gakugei University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2004年M7.1・M7.4紀伊半島沖地震は同日に起こったフィリピン海プレート内部の2つのスラブ内地震である。この地震による地殻変動は西南日本の広範囲のGNSS観測点で捉えられた。震源位置と地殻変動の規模から、この地震の余効変動は西南日本弧ー南海トラフ下の粘性構造を代表していると考えられる。水藤（2017）は3次元粘弾性構造モデルを用いてこの地震の余効変動を解析し、特にリソスフェアーアセノスフェア境界にそった薄層（LAB層）について粘性率5e18 Pa sの値を得た。しかし、この研究の解析で用いた観測点（10点）、観測期間（2007年1月ー2011年1月）は限定されたものであり、地震発生から20年弱経過した現在においては再検討の余地がある。一方、粘弾性有限要素モデルによる地殻変動の計算能力も向上し、もっともらしい粘性構造を用いて精度が保証された大規模計算が可能となっている（Ichimura et al., 2016; Fujita et al., 2017）。本研究では、Hori et al. (2021)、Murakami et al. (submitted)に基づいた有限要素モデルにより、2004年M7.1・M7.4紀伊半島沖地震の余効変動解析を行う。本研究で用いるモデルは地球楕円体を考慮し、詳細な地表地形と全国一次地下構造モデル（JIVSM）の弾性構造およびプレート境界形状を取り入れ、西南日本を中心とした2496 km ×2496 km ×1100 kmの大規模モデルである。両紀伊半島沖地震はプレート内部の地震であるため、震源は水藤（2017）の2面のモデル断層にダブルカップルの点震源を配することにより表現した。粘性構造については、陸側のウェッジマントル（WM）、スラブ下のLAB層、LAB層より深部の海洋マントル（OM）の3領域を考慮し、3領域で粘性が同じモデル（一様モデル）、LAB層はOMと同じ粘性率とし、WMとの粘性率の比を変えたモデル（海陸モデル）、海陸モデルに加えてLAB層に非常に低い粘性率（5e17 Pa s）を設定したモデル（海陸LABモデル）を設定した。それぞれの粘性構造モデルにおける各断層面の応答について計算結果を得た。Murakami et al. (submitted)で指摘されたとおり、LABの低粘性率の効果は震源にほど近い地域に現れる。本発表においては、3つのモデルの振る舞いの特徴および、地殻変動データとの比較結果について述べる。

© The Seismological Society of Japan

On non-intuitive deformation fields caused by reverse faults in an elastic-viscoelastic medium

*Koitaro Koide[1], Yukitoshi Fukahata[1]

1. Kyoto University

断層の作る変位場には，しばしば直観的に理解しにくいものがある．無限弾性媒質の場合には，断層について対称な変位場となり，ダブルカップルの力を考えることで容易に理解できる．しかし，例えば半無限弾性媒質中の逆断層が作る地表面変位は，上盤側が大きく隆起する一方下盤側の沈降量は隆起量に比べてはるかに小さいという非対称なパターンを示す．この非対称な変位場は，自由表面の影響を考慮することによって理解できる．さらに，岡田 (2003)は，逆断層運動が起こった場合でも，下盤側に沈降が生じないケースがあることを示した．
実際の地形においても非直観的な例はいくつか知られている．例えば，越後平野は新潟神戸歪み集中帯 (NKTZ) として知られる顕著な短縮場に位置しているが，非常に厚い堆積層が発達し長期的に沈降を続けている．地殻が短縮している場合には質量が過剰となり隆起が生じるのが当然と考えられるため，このような沈降運動は直観的には理解できない (飯尾, 2009)．飛騨山脈は，東側に松本盆地があり明瞭な地形境界が見られるが，山脈東麓に西傾斜の逆断層はなく，非直観的な地形発達である(池田, 1990; 原山ほか, 2003)．
このような非直観的な地形発達の理解を目指して，弾性-粘弾性の二層構造において，様々な逆断層が作る変位場を計算した．もちろん，媒質が粘弾性層を含む場合には，変形場の直観的理解がさらに難しくなる．計算にはFukahata & Matsu’ura (2005, 2006)の半解析解を使用した．
表層 (弾性層) を深さ方向に3分の１ずつ浅部，中間部，深部に分け，それぞれの深さに15°，30°，45°の傾斜角を持つ逆断層を置いて地表面変位場を計算した．浅部に逆断層を置いた場合には，弾性変形で隆起が生じ，その後の粘性緩和によってだんだんと沈降していくパターンが得られた．特に傾斜角が15°の場合には上盤側で大きく沈降するパターンとなり，傾斜角が急なときにも断層上端付近以外で全体に沈降場となった．中間の深さに逆断層を置いた場合，傾斜角が15°の場合には粘弾性緩和により振幅が大きくなっていく一方，傾斜角が45°の場合には粘弾性緩和後もほとんど弾性変形と変わらない地表面変位となった．表層の深部に逆断層を置いた場合には，全ての傾斜角で粘弾性緩和により弾性変形での隆起からさらに隆起量が大きくなっていくという結果が得られた．この結果は，粘弾性緩和は重力平衡を回復するように起きるという理解が常には正しくないことを示している． これらの変位場の特徴を物理的に解釈するために，内部変形についても計算した．傾斜角については45°の場合のみ計算した．浅部に逆断層を置いた場合，緩和完了後には地表面だけでなく弾性層全体で下向きの変形が生じた．逆に，深部に逆断層を置いた場合，緩和完了後には弾性層全体で上向きの変形が生じた．この2つの変形はどちらも断層から水平方向に離れるにつれて大きさは顕著に小さくなる一方，深さ方向にはほぼ一様に変形していることが分かった．一般に，粘弾性緩和の完了後には，粘弾性層が液体のように振る舞うために弾性層は板状に変形する．逆断層にかかる力は水平圧縮だが，弾性層の上か下かどちらかのみに断層が存在する場合には，断層部分で強い短縮が起きることで短縮の不均衡が生まれ，弾性板がバックリングしたように曲がる変形が生じ，上述のような変形場が生じたと考えられる．
粘弾性の影響を取り入れた場合，逆断層が作る地殻の変形は直観的に理解し難いものが多いが，その物理メカニズムを解明することで複雑な地形発達の理解につながるかもしれない．

© The Seismological Society of Japan

GNSS-A seafloor positioning solution in SGO-A station

*Koya Nagae[1], Yusuke Yokota[2], Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1]

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

GNSS-音響測距結合方式（以下GNSS-Aとする）は海底の絶対位置を測定する技術である，海上保安庁では，GNSS-Aを用いた海底地殻変動観測を20年以上にわたり実施しており，その観測網をSGO-A（Seafloor Geodetic Observation Array）と呼んでいる．現在のSGO-Aは日本海溝と南海トラフを中心に27の観測点からなっており，これらの測位解は，地震調査委員会等で定期的に報告している．

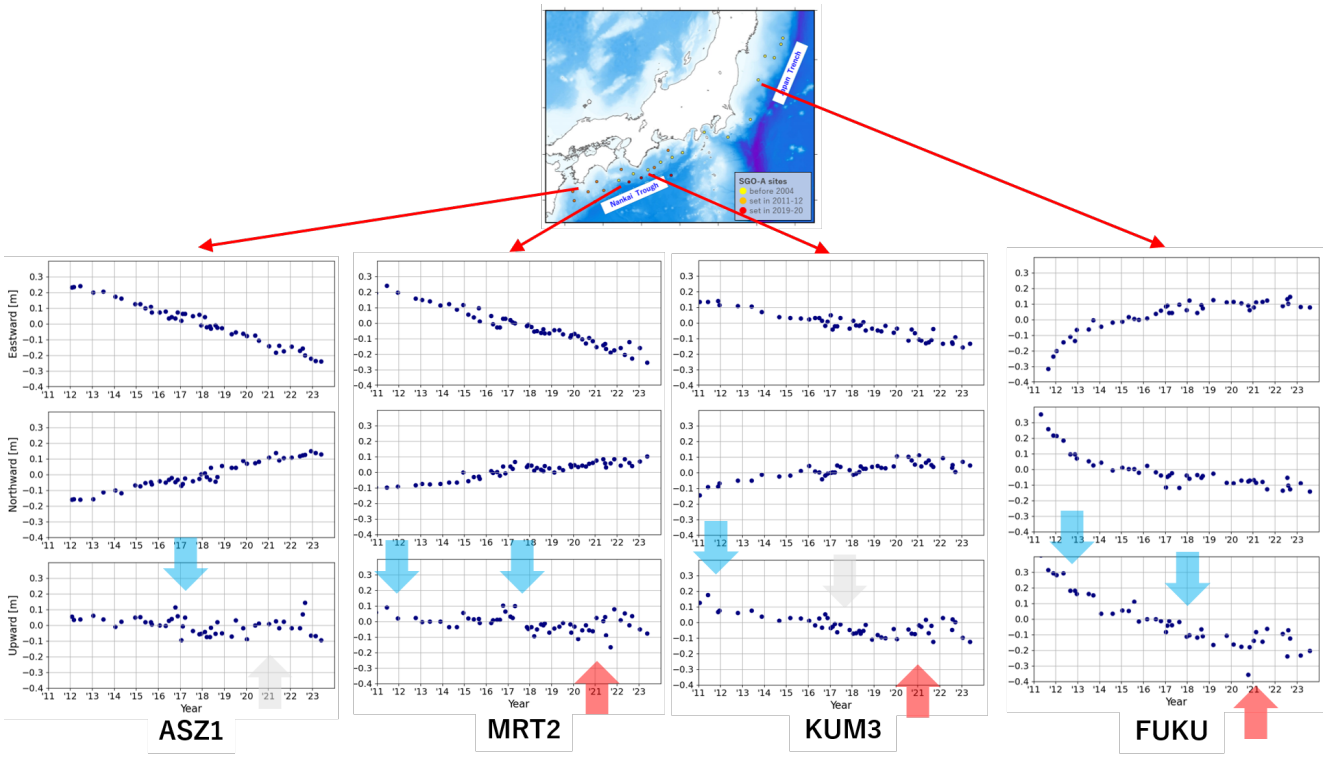
SGO-A観測点の測位解の一例を図に示す．この図では，ASZ1，MRT2，KUM3，FUKUの4点における東西・南北・上下方向の測位解を表している．ここで上下方向の測位解から，複数観測点で，隆起（赤矢印）や沈降（青矢印）が起きていることが読み取れる．しかし，このような上下変動は複数観測点で同時期に発生していることから，これは実際の地殻変動と解釈するのではなく，観測による誤差と考えられる．

そこで，我々は東京大学柏キャンパスの海洋工学水槽において実観測に使用しているトランスデューサー（海上局）やミラートランスポンダー（海底局）を用いて，その特性の調査を行った．その結果として永江ほか（JpGU2023）で述べたように，実観測の解析結果からも期待されていた，機器に依存して波形形状が変化し，また，機器ごとに音波入出角における角度依存性が異なる，という結果が得られた．

このような実験結果から本発表では，機器・角度に依存した音波の読み取り誤差を考慮した読み取りをSGO-Aの観測データに適用する．そもそも現在の読み取りは，冨山（2003）に基づいているが，この読み取り方法の問題点として以下の2つが挙げられる．1つ目は，当時は機器が少なかったために機器間の差異が考慮されていない，そして2つ目は，角度に依存した波形の違いを考慮していない，ということである．そこで本研究では，これらを考量するために，①観測毎に読み取り位置を個別に検討，②入射角ごとに波形をスタッキングして処理をおこなう．また，読み取りを容易にするために，よりpeakを鮮明に立たせることが期待される指標である，Honsho et al., (2021)でも用いられたPOC (Phase Only Correlation) を使用することとする（詳細は永江ほか（測地学会，2023）で述べる）．

本発表では，SGO-Aの各観測点における読み取り方法の変更に伴う測位解の変化についてを多数示す．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S14. Earthquake prediction and forecast

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P6 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S14P] PM-P

[S14P-01] Long Intervals between Felt Earthquakes are Not Precursors to Large Earthquakes

*Mamoru KATO[1] (1. GSHE, Kyoto Univ.)

[S14P-02] Investigation of estimation scheme for inland earthquake long-term evaluation using machine learning

*Tomoyuki Fujita[1], Hiroaki Takahashi[2], Ohzono Mako[2] (1. Graduate School of Science,Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

[S14P-03] A Study of Atmospheric Pressure Distribution Affecting Earthquake Occurrence in the Japan Islands

*Jouichi SAITOH[1] (1. No affiliation)

Long Intervals between Felt Earthquakes are Not Precursors to Large Earthquakes

*Mamoru KATO[1]

1. GSHE, Kyoto Univ.

国内で起きる有感地震の間隔が長くなるのは大地震の前ぶれである，という噂がソーシャルメディアで流れることがある．この噂は動画配信チャンネルやキュレーションサイトでも頻繁に扱われている．例えば「有感地震　止まる」で検索するといくつもの動画が見つかる．多くの人にとって地震とは有感地震を指す．大きな有感地震は地震災害の誘因であり，次の地震や地震災害への関心は常に高い．
このような噂が流れる背景には防災アプリなどを経由したプッシュ型の情報配信があるかもしれない．プッシュ型配信を利用するとすべての有感地震情報がリアルタイムで手元に届く．同様に緊急地震速報（予報）を手元で受け取ることもできる．この状態にいることで地震の回数を意識する機会が増え，また情報を受け取る間隔を意識する機会も増える．つまり地震の発生間隔が気になる人が増える．
たとえば，プレートの沈み込みによって貯まったエネルギーが地震時に解放される，と理解しているならば地震の発生間隔が次の地震の規模を決めると誤解することはあるかもしれない．弾性反発説の概念はなんとなく知っているがエネルギーの蓄積量や解放量の定量的な理解があいまいであるならば，とても短い地震サイクルを想起して地震の発生間隔が次の地震の大きさを決めると考えることもあるだろう．実際には余震など限られた例外を除けば，国内の有感地震が短い時間スケールで相互に影響を及ぼす可能性は無視できるだろう．
本報告では気象庁の地震カタログを用いて有感地震の発生間隔がその次の地震の大きさに関係していないことを確認する．地震の大きさの指標は観測最大震度とマグニチュードを用いる．過去の地震活動の公開されている地震カタログを用いて，地震に関する噂の真偽を確認する手法を提示することであるも本報告の目的のひとつである．

© The Seismological Society of Japan

Investigation of estimation scheme for inland earthquake long-term evaluation using machine learning

*Tomoyuki Fujita[1], Hiroaki Takahashi[2], Ohzono Mako[2]

1. Graduate School of Science,Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

内陸で発生する地震の長期評価として、地震本部が行っている主要活断層の地質調査等に基づくもの、GNSS観測による地殻ひずみ速度を用いたもの(Nishimura, 2002）、ETASモデルを用いたもの（Ogata, 2022）、地殻ひずみ速度と地震活動を用いたもの（Mazotti et al., 2011）などがある。主要活断層の評価では現在進行中の地殻活動のデータが反映されておらず、また、活断層が存在しない地域の評価は困難である。地殻ひずみ速度データでは、ひずみ速度の大部分を占める海溝固着による成分の評価や、ひずみ速度と応力速度の関係が未決課題である。地震活動データでは、地震活動が低調な領域の評価や、長期間継続する余震活動の影響の検討が必要となる。観測事実として、2008年岩手宮城内陸地震のように主要活断層がない場所や、山陰地方などのひずみ速度が大きくない場所、定常的な地震活動度が低い場所でも被害地震が発生している。 地震は、応力や断層強度などの力学的条件や、地殻構造や過去の履歴などの複数の要因が相互に関係した結果として発生に至ると考えられる。そのため、時空間的に得られる複数の地学的情報を同時に利用して地震発生を評価する手法を開発する必要がある。マルチパラメータを利用する先駆的な研究として、前田（1988）は決定木解析で多種類の前兆現象を帰納的に学習させて最大マグニチュード(M)を推定するスキームを提案した。近年の計算機の処理能力の向上により、複数の特徴量が生成する膨大な分岐パターンを学習し、目的変数を予測する機械学習の手法が進展しており、地震学の分野では地震動予測で成果を上げている（Kubo et al., 2020）。本研究では、機械学習を用いて内陸地震発生予測に関係するパラメータを推定するスキームを検討する。 内陸地震が複数のパラメータの分岐条件のもとに発生しているとの仮定に立ち、本研究では決定木を用いたアンサンブル学習であるランダムフォレストと勾配ブースティングの利用を検討する。日本列島を適当な大きさのグリッドに分割してグリッド内の各種パラメータ（特徴量）をリスト化した後、目的変数の推定を試みる。はじめは、特徴量（説明変数）のうち、最大Mのような適当なパラメータを目的変数とした教師あり学習を行って予測モデルの性能評価と改善を試行する。次に、ポアソン過程での地震確率評価に向けて、ある閾値M以上の単位時間の地震発生数を推定するが、実際の観測データを用いた性能評価を行うため、M4-5程度の中規模地震から予測を試みる。M7以上の大地震は発生頻度が低いため直接的な検証は困難と考えられるが、機械学習による直接的な発生頻度推定に加え、実データでの検証が行われた中規模地震の予測モデルによる発生間隔とGR則を組み合わせるなどの手法を検討する。 地震活動に関係すると考えられる特徴量として全国的なデータが整備されている以下のパラメータをピックアップした：１）歴史地震を含む既往地震（M6程度以上）の有無とM；２）活断層の有無；３）主要活断層の地震後経過率・最大M・平均活動間隔・平均変位速度；４）地殻ひずみ速度テンソル；５）GRのab値；６）ETASのμ値；７）応力場と断層方位やひずみ場との偏差；８）D95；９）地殻熱流量；10）地震波速度構造の空間勾配；１０）Vp絶対値；１１)既往地震の余震継続期間。 １）５）７）について、1919年以降は気象庁地震カタログを、それ以前は宇津カタログや宇佐美カタログを利用する。地震活動には、前回の地震の余震活動が含まれている可能性があり、また群発的な活動を示す指標が必要となる。日本列島の地殻ひずみ速度は、海溝での固着による弾性変形が卓越しているため４）では短波長成分の利用を検討する。８）９）は地殻の強度に関するパラメータ、１０）は大すべり域が地震波高速度帯に対応する事例を反映させている。地殻比抵抗構造は全国的なデータベースがなく将来的な課題としている。グリッドごとの特徴量の算出では、空間平均を取ることで、古い地震の震源精度や各特徴量の位置の不確かさを反映させる予定である。

© The Seismological Society of Japan

A Study of Atmospheric Pressure Distribution Affecting Earthquake Occurrence in the Japan Islands

*Jouichi SAITOH[1]

1. No affiliation

【背景】 地震学研究では黎明期から地震と気圧現象の関連性についてのテーマが取り上げられてきたが、どちらも偶然性の強い現象であり、個別の事象を対象とした検討結果では、統計的な有意性が得られないという厚い壁に阻まれてきた。 【目的】 日本列島は大陸プレートに海洋プレートが沈み込む境界に位置しているため、地球規模の大気循環に伴う多彩な大気圧現象とプレート境界の沈み込み運動に伴う頻繁な地震現象が発生する位置にある。これらの間の相互作用を明確にするために、本研究では日本列島上の気圧現象として、全国の時別海面気圧測定値の標準偏差を指数として、また、地震現象として年間十数万件に及ぶ気象庁震源リストから１時間毎に発生する地震件数を算出し、指数化した。これらの指数を基に気圧の状況と地震の発生状況の比較を行い気圧現象と地震現象の相関を探ることが本研究の目的である。 【方法】 年間の地震発生件数は気象庁HP震源リストより、1時間当たりの地震発生件数を算出して時別地震回数として、2000～2021年(閏日を除く)の平均値を指数とした。ただし2000年以降の年間地震発生件数は10万件超程度であるが、2011年(東北地方太平洋沖地震発生)では約31万件、2016年(熊本地震発生)では約31.3万件の地震回数が記録されていて平均値に対する影響が大きいため、これらの年を除いて19年間の平均を算出した。 また、気圧の標準偏差は気象庁HPの2000～2021年全国151地点の時別海面気圧より時別標準偏差平均値を算出し指数とした。 日々の気圧変動に伴う地震発生回数への影響を見るため、2015年1～6月の月毎の気圧標準偏差と地震発生動向の比較を行った。2015年は大きな地震が少なく余震の影響が少ないためである。 【結果】 2015年1～6月の時別地震回数の24点移動平均、全国151地点の時別海面気圧の標準偏差から、地震回数と気圧の標準偏差には逆相関の傾向が見られた(図１、図2)。 また、長期の平均値である2000～2021年(2011､2016年を除く19年間)の時別地震回数平均値と22年間の全国151地点の時別海面気圧の標準偏差平均値を比較すると、長期間の平均値においても逆相関の傾向が見られた(図3，図4)。 すなわち、日本列島上において気圧の標準偏差が大きくなり等圧線が混み合う状況では地震回数が減少し、逆にそれに対して気圧分布がフラットになると地震回数が増える傾向になった。 日毎の数時間単位の比較でも年間の季節変動の比較でも、この傾向は同様に観察された。 【考察】 時別地震回数の変動は気圧変動の影響によるとする仮説を考える。すなわち、日本列島上の大きな気圧傾度は、日本列島付近の地震発生を抑制し、地震発生回数を減少させる。また、気圧傾度がフラットになると抑制効果がなくなり地震発生回数が増加するという仮説である。これを基に有感地震発生時の気圧分布動向について考察してみた。 有感地震に対する気圧の影響を検討するにあたり、時別海面気圧データは日本列島の陸域のデータに限定され、沖縄諸島付近および北海道付近の有感地震については周辺気圧データが不十分である。このため、有感地震については九州～本州付近に限定して検討した。 気象庁HP地震リストで2000～2021年のM7以上の42回の地震中、九州から本州付近の16地震について地震発生時の気圧分布について調べたところ、これらの地震発生に伴って共通する下記の気圧現象が見られた。 ・低気圧通過に伴い大きな気圧傾度の抑制が緩むタイミングで有感地震が発生する傾向がある。 （たとえば台風や南岸低気圧の通過後に有感地震が発生するケースが多い。） ・有感地震発生の3～4日前から直前の期間のどこかで、一時的に日本列島付近の東経方向の相対気圧分布が直線状分布となる。同時に北緯方向に同緯度付近で大きな2つの気圧分布塊が見られた。 （震源域を含む日本列島付近の等圧線が一時的に南北方向に整列し、東西方向の大きな気圧分布塊間でモーメント力が働いている可能性がある。） ・有感地震発生時、日本列島付近の天気図上に、震源域を挟んで気圧傾度を生む高気圧と低気圧が存在する。 【結論】 地震研究の黎明期から、気圧現象は地震発生に影響する可能性がある因子として考えられてきた。今回の検討により微小地震を含む地震現象は、指数として捉えた場合、気圧現象との相関が推定され、仮説として設定した。この仮説から気圧傾度による地震発生の抑制効果と開放の機構が考えられ、抑制効果が減少する開放の過程で多くの有感地震が発生している可能性が考えられる。 また、実際の気圧と地震発生の経過を検討したところ、地震発生直前に等圧線が整列する現象が観察され、気圧によるモーメント力が働いている可能性が考えられる。 M7以上の地震はデータ

© The Seismological Society of Japan

数が限られているため、さらにM6以上の地震についても傾向を分析中であり、併せて報告予定である。 謝辞:　気象庁HPより震源リスト、時別海面気圧などのデータ、天気図などのデータを基に検討しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

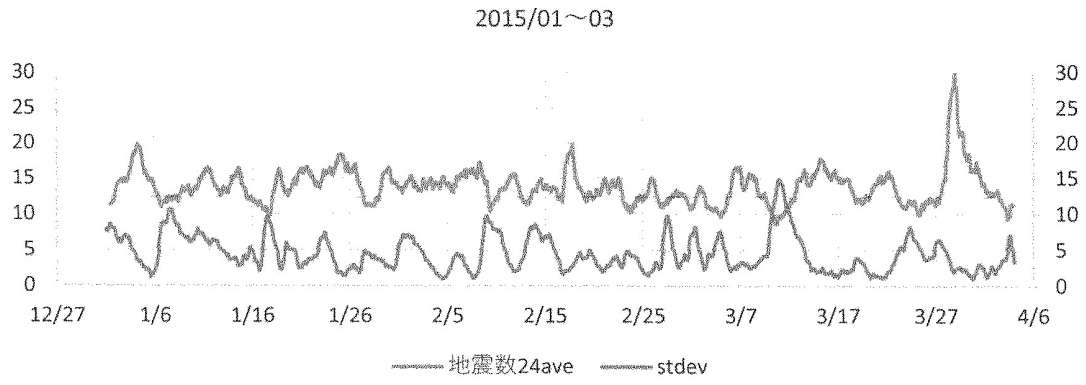


図 1　2015 年 1～3 月の時別地震回数とその 24 点移動平均 vs 時別海面気圧の 24 点移動平均

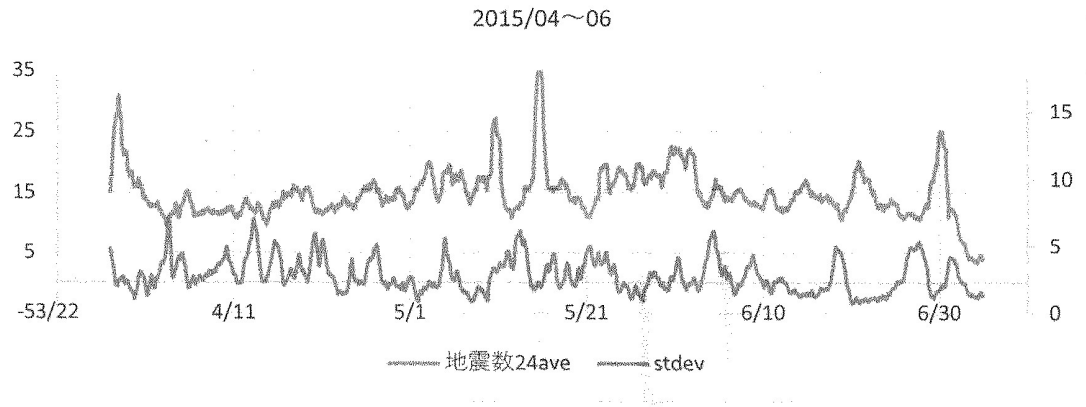


図 2　2015 年 4～6 月の時別地震回数とその 24 点移動平均 vs 時別海面気圧の 24 点移動平均

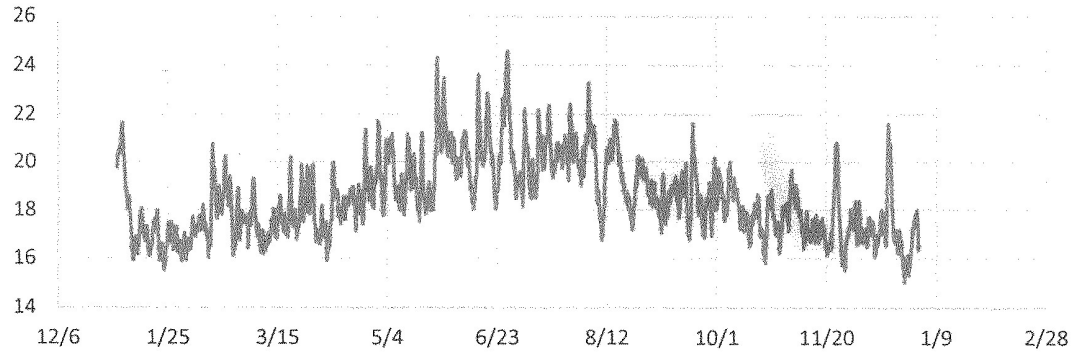


図 3　2000～2021 年(2011 と 2016 年を除く)の年間時別地震回数の平均値

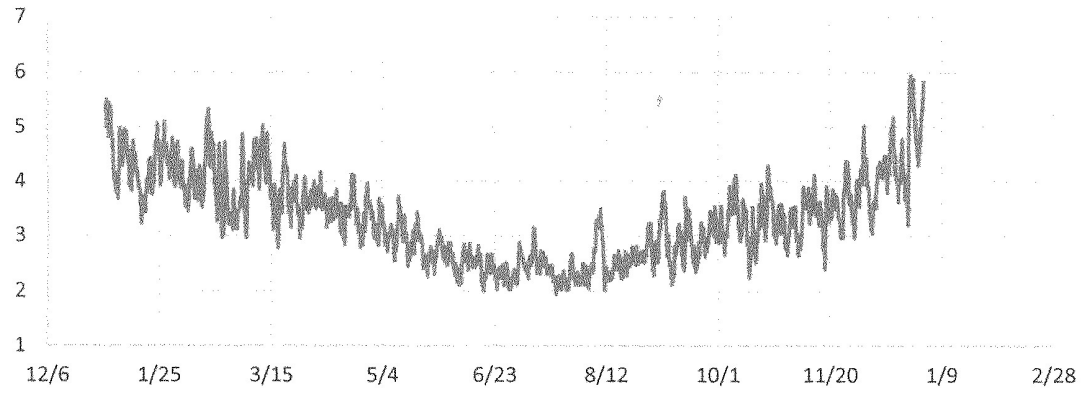


図 4　2000～2021 年時別海面気圧標準偏差の平均値

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Regular session：S17. Tsunami

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P7 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S17P] PM-P

[S17P-01] Progress and application of the synthesis of trans-oceanic tsunamis

*Shingo WATADA[1] (1. Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, Division of Monitoring Geoscience)

[S17P-02] Potential of significant later phases of tsunamis generated in the Pacific Rim: Estimation by numerical tsunami simulation

*Hiroaki TSUSHIMA[1], Takeyasu YAMAMOTO[1] (1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

[S17P-03] Applicability of real-time tsunami prediction by using offshore observation network and tsunami interferometry

*Kentaro IMAI[1], Tatsuhiko Tokuta[2,1], Yuchen Wang[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[3,1], Taro Arikawa[2] (1. JAMSTEC, 2. Chuo Univ., 3. NIED)

[S17P-04] Advanced development of real-time tsunami prediction system and its implementation

*Narumi TAKAHASHI[1], Kentaro Imai[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Japan agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S17P-05] Reexamination of the Initial Tsunami Source Model of the Meio Tokai Earthquake

*Satoshi KUSUMOTO[1], Kentaro Imai[1], Takane Hori[1] (1. JAMSTEC)

[S17P-06] Fault modeling and tsunami prediction for outer-rise earthquakes along the southern Kuril trench

*Toshitaka BABA[1], Tetsuo No[2], Koichiro Obana[2], Kentaro Imai[2], Naotaka Chikasada[3], Yuichiro Tanioka[4], Shuichi Kodaira[2] (1. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2. JAMSTEC, 3. NIED, 4. Hokkaido University)

[S17P-07] Tsunami source inversion of the 2020 Sand Point Earthquake

*Akino Naitoh[1], Toshitaka Baba[1] (1. Tokushima Univ.)

[S17P-08] Coastal boulder mapping based on deep learning, and boulder transport simulation: case study at Ilocos Norte, Luzon Island, Philippines

*Daisuke ISHIMURA[1], Keitaro Yamada[2], Toshitaka Baba[3], Naotaka Chikasada[4], Noelynna T. Ramos[6], Kenta Minamidate[5], Ace Matthew F. Cantillep[6], Clod Anne V. Punzalan[6] (1. Tokyo Metropolitan University, 2. Ritsumeikan University, 3. Tokushima University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Tohoku University, 6. University of the Philippines)

Progress and application of the synthesis of trans-oceanic tsunamis

*Shingo WATADA[1]

1. Earthquake Research Institute of the University of Tokyo, Division of Monitoring Geoscience

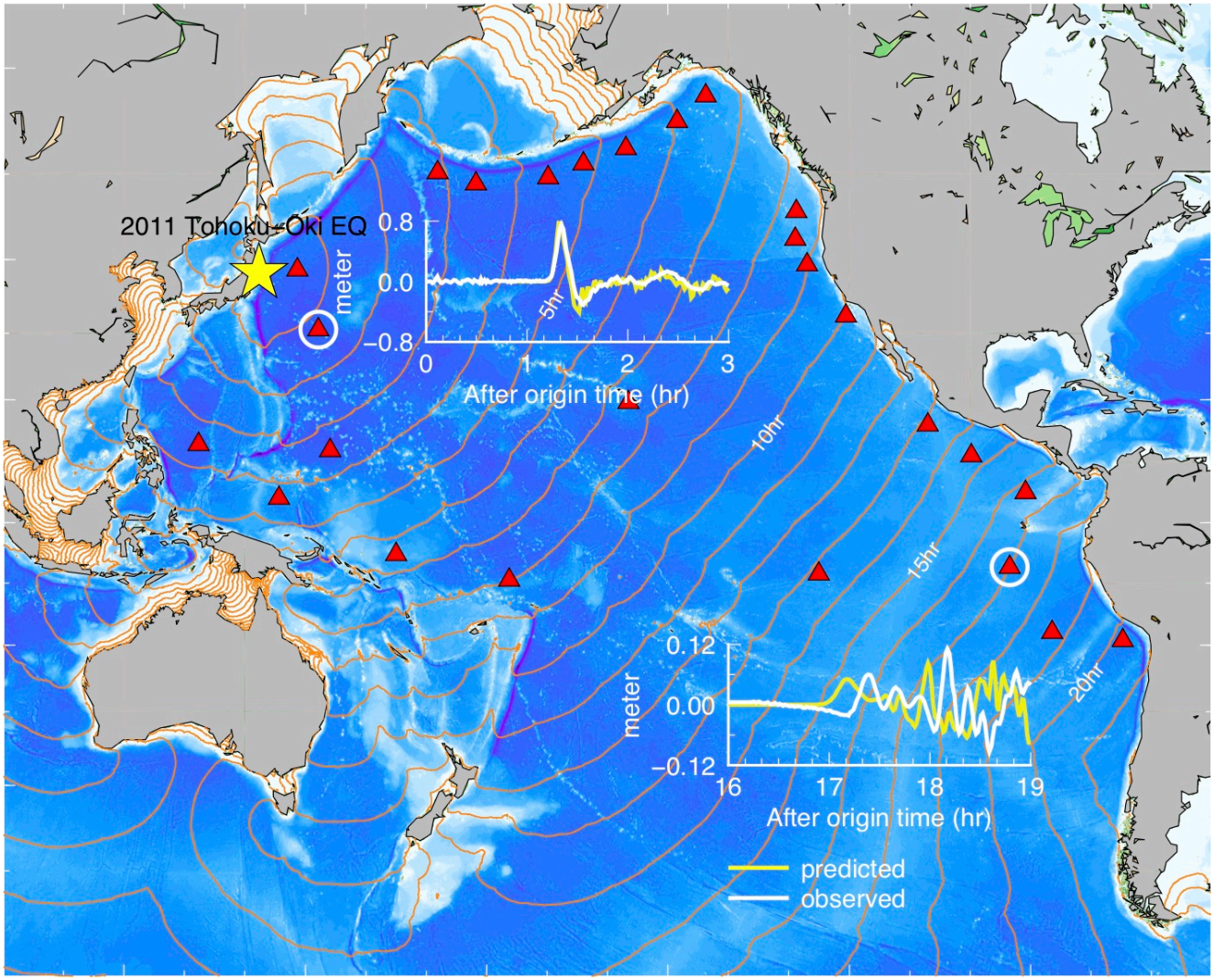
Abundant high-quality distant tsunami records from the 2010 Maule (Chile) and 2011 Tohoku-Oki earthquakes have revealed two distinctive features compared to long-wave tsunami simulations. The records show that the traveltime delay of the tsunami increases with distance from the earthquakes, and the initial phase reversal of tsunamis appears and grows systematically. The conventional tsunami theory cannot explain the observed waveforms and traveltimes of distant tsunamis, leading to the need for a new theory to explain and synthesize distant tsunamis. The propagating elevated sea surface of a tsunami compresses seawater and deforms the seafloor and the solid Earth. A propagating tsunami changes the mass distribution of the Earth and results in a spatiotemporal change in gravity, thereby altering the propagating tsunami itself. Incorporating these physics, we developed a new tsunami propagation theory in which a tsunami is naturally treated as a wave in a gravitationally and elastically coupled Earth system composed of solid Earth layers and an ocean layer. Two distinct tsunami simulation techniques based on the new tsunami propagation theory were introduced and confirmed to produce nearly identical tsunami waveforms. One technique treats tsunamis as free waves within a deformable Earth system, while the other treats tsunamis as external pressure and gravitational forces acting on the surface of a deformable Earth system. With the new techniques, the waveform and traveltime differences between the observed and simulated distant tsunamis disappear. Past distant tsunamis recorded by coastal tide gauges, which were not previously studied due to the traveltime and waveform mismatch problems, have become the focus of quantitative tsunami studies analyzing waveforms. New tsunami propagation techniques have been applied to the analysis of distant tsunami waveforms from the past 19 events and have helped to unveil the slip distributions of the past large earthquakes and to determine the earthquake origin time of the trans-Pacific tsunami events recorded by tide gauges since 1854.

Programs to compute tsunami normal modes for a spherically symmetric Earth model are available at https://github.com/WatadaShingo/mode-tsunami. Examples of simulation and phase correction for a dispersive tsunami are available at https://github.com/WatadaShingo/tsunami-1d.

2010年チリ地震と2011年東北沖地震で発生し、太平洋深海域で観測された豊富で高品質の遠地津波記録には、震源から離れるにつれ、津波の到達時刻は遅れ、津波の初期位相が反転する特徴が現れた。これら二つの特徴は従来の津波長波理論では説明できず、新しい津波理論が求められた。津波伝播中に海面が上昇すると、海水の荷重で海水が圧縮され、海底と固体地球が変形する。伝播する津波は地球の質量分布を変化させ、重力の時空間的変化を引き起こし、伝播する津波自体を変化させる。これらの物理過程を取り入れた、津波を固体地球層と海洋層から構成される重力・弾性結合した地球系の波として扱う新たな津波伝播理論が構築された。新しい津波伝播理論に基づき、２つの異なる津波シミュレーション手法が開発され、ほぼ同一の津波波形を生成することが確認された。一つのシミュレーション手法は津波を、重力・弾性結合地球系に内在する自由波として扱い、もう一つの手法は津波を、重力・弾性変形する固体地球の表面を伝播する固体地球への外部圧力源と重力源として扱った。新しい津波シミュレーション手法を用いると、観測された遠地津波とシミュレーション津波の波形と到達時刻の違いが解消した。これまで、到達時刻や波形の不一致の問題があったため、沿岸の潮位計によって記録された遠地津波は、定量的な津波波形研究の対象ではなかったが、新しい津波シミュレーション手法が、過去19の巨大地震で発生した津波波形の解析に適用され、各巨大地震の断層滑り分布が明らかにされた。また、江戸時代末期の1854年に日本付近で発生し、米国の潮位計に記録された太平洋横断津波イベントの地震発生時刻が特定された。

© The Seismological Society of Japan

球対称地球に対する津波ノーマルモードを計算するプログラムを以下に公開している。
https://github.com/WatadaShingo/mode-tsunami
分散性津波のシミュレーションと位相補正を計算するプログラム例を以下に公開している。
https://github.com/WatadaShingo/tsunami-1d



© The Seismological Society of Japan

Potential of significant later phases of tsunamis generated in the Pacific Rim: Estimation by numerical tsunami simulation

*Hiroaki TSUSHIMA[1], Takeyasu YAMAMOTO[1]

1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

背景と目的

津波が発生すると，第一波到達後，長時間が経ってから顕著に高い後続波が観測されることがある．日本の太平洋沿岸に注目すると，2006年千島列島沖の地震（Mw 8.3）では，天皇海山列で散乱された津波が，第一波到達後5時間以上経ってから最大波として観測された（たとえば，気象庁，2006）．さらに，遅れ時間が数十時間に及ぶ場合もある．1952年カムチャツカ地震（Mw 9.0）では，第一波到達後約48時間も経過した後に，第一波群の半分程度の振幅の後続波群が観測された．対馬・山本 (2021, 地震学会秋季大会)は，このカムチャツカ事例の後続波は津波伝播数値計算で再現することができ，その成因はチリからの反射波であることを示した．さまざまな沈み込み帯で発生する津波について，こうした顕著後続波が起きる可能性とその成因を明らかにすることは，津波波動特性への理解の深化につながるとともに，リアルタイム監視の一助になることが期待できる．そこで本研究は，環太平洋の沈み込み帯を波源とする津波の数値計算を行い，日本の太平洋沿岸で顕著後続波がみられるかを調べた．

方法

環太平洋の沈み込み帯に沿ってMw 8.7の矩形断層を網羅的に設定し，各断層からの津波伝播を数値計算した．断層位置と幾何形状は，NOAAが遠地津波予測用にプレート境界上に配置した断層群（Gica et al. 2008）を参考に設定し，計198枚の断層を配置した（図1a）．断層面積と平均すべり量は，Murotani et al. (2013)の相似則を用いてMw 8.7から見積もった．断層の長さと幅は2:1とした．津波伝播計算については，JAGURS (Baba et al., 2015)を用いて102時間の積分計算を行った．基礎式には非線形長波理論，海底地形はGEBCO2014を1分間隔に間引いたものを採用した．津波計算結果の評価対象地点は，気象庁が津波予測に用いる仮想の沖合観測点(Forecast Point: FP)で，北海道から九州にかけての太平洋岸に沿ったものを用いた．計算津波波形からMRMSエンベロープ（Hayashi et al., 2012）を計算し，グリーンの法則を適用して水深1 m地点の振幅に換算したのち，立ち上がり時刻を揃えて全FPでスタックした．この操作により，断層1枚につきエンベロープ1本が得られ，ここではそれを後続波群の評価に用いた．

結果と議論

千島海溝北部，アリューシャン海溝東部，トンガ・ケルマディック海溝を波源とする場合に，日本の太平洋沿岸で顕著な後続波群がみられた．エンベロープからは，第一波群の発現後にいったん振幅が減少したのち，再び増加に転じる様子が観察でき（図1b-dに例示），他地域を波源とする場合にはこうした傾向はみられない（図1e-gに例示）．後続波群の発現タイミングは，千島海溝北部の波源では第一波群の約48時間後（図1b），アリューシャン海溝東部とトンガ・ケルマディック海溝の波源では約30時間後（図1c, 1d）である．後続波群の原因について，千島海溝北部のケースはチリからの反射波であることが示されている（対馬・山本, 2021）．一方，アリューシャン海溝東部，トンガ・ケルマディック海溝のケースについては，最大津波高の面的分布において波源から南米にむかう強いエネルギーの帯がみられることから，千島海溝北部のケースと同様に，チリを含む南米からの反射波が成因であることが予想される．今後，南米を海に改変した仮想地形を用いた津波数値計算等により，この後続波群の成因を探っていく．

© The Seismological Society of Japan

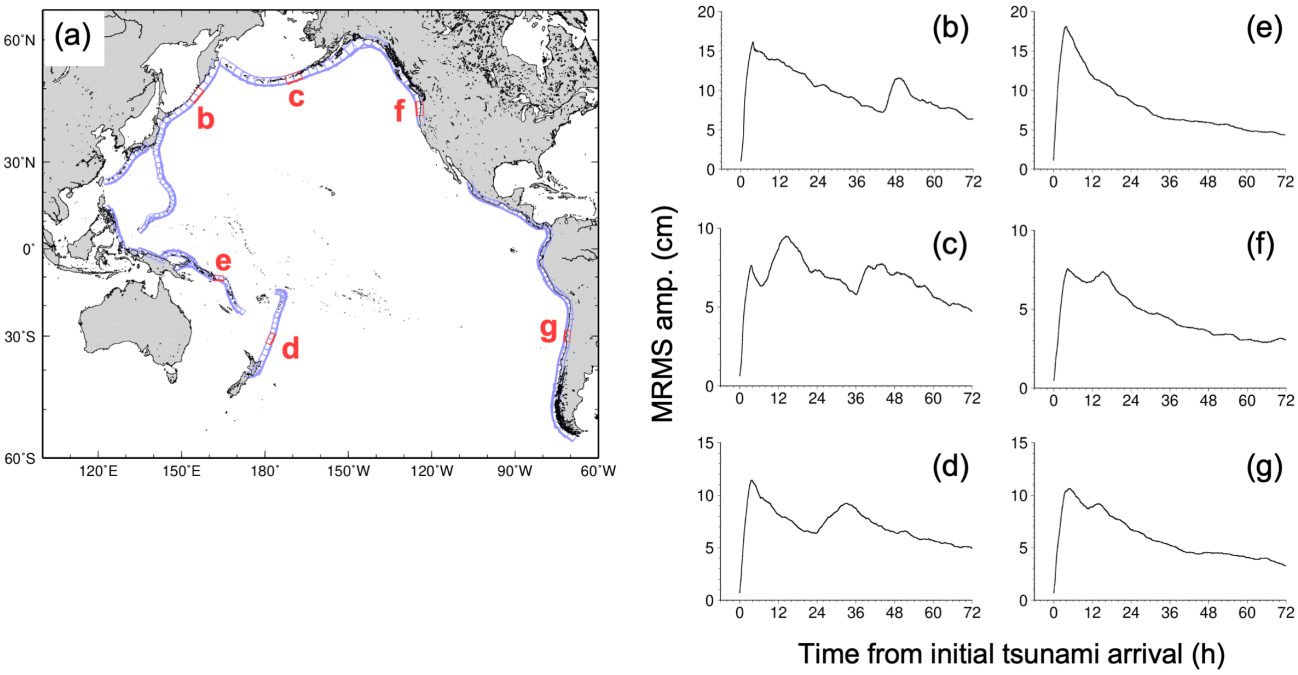


図1. 津波伝播数値計算結果の例．(a) 設定した断層群．矩形が各断層を示す．(b-g) 各断層からの津波伝播数値計算で得られたMRMSエンベロープの例．日本の太平洋岸に沿ったFPにおけるエンベロープをスタックしてある．(b)-(g)のラベルと，(a)の地図内のアルファベットが対応している．

© The Seismological Society of Japan

Applicability of real-time tsunami prediction by using offshore observation network and tsunami interferometry

*Kentaro IMAI[1], Tatsuhiko Tokuta[2,1], Yuchen Wang[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[3,1], Taro Arikawa[2]

1. JAMSTEC, 2. Chuo Univ., 3. NIED

2011年以降，日本列島太平洋沖にはDONETやS-netなどの稠密な沖合海底観測網が敷設され，現在ではリアルタイムで沖合に設置された地震計や水圧計による観測が実現している．この沖合観測データを利用した津波予測技術について研究開発は進められているが，リアルタイム観測網と津波干渉法を結びつけた検討は皆無であった．本研究では，DONET海域から和歌山県沿岸において，沖合観測網と津波干渉法を利用したリアルタイム津波予測の可能性について検討を行った． 本研究の検討対象地域はDONET1の設置海域とし，沿岸は和歌山県東牟婁郡那智勝浦町の浦神とした．沖合観測網は熊野灘沖のおおよそ水深2000～4000 mに設置されているDONET1の水圧データを利用した．浦神の沖合水深90 m地点にメモリー型水圧計を設置し，2020年12月1日から2021年11月30日までの1年間の連続水圧観測を行った．沿岸データは浦神湾奥に設置されている気象庁の検潮データを利用した．各観測点の水圧および潮位観測データに対し2-128 min のバンドパスフィルタ処理を行うことで潮汐成分を除去し，1 min間隔にデシメーション処理と振幅の2値化処理を行った．前処理を行った波形データを用いてグリーン関数を構築した．グリーン関数の構築は，ノイズ成分を対象とした相互相関処理（時間窓128 min，ラグタイム幅を1 min）を行い，各観測点間における相互相関関数を観測期間において重合処理することでグリーン関数とした． 津波干渉法による津波予測の妥当性について，2022年1月15日に発生したトンガ諸島付近のフンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ海底火山によって発生した気圧波に励起された津波を利用した．津波干渉法によるグリーン関数を用いて構築した合成波形と観測波形の比較から，長周期成分の位相はおおむね一致する結果が得られた．また, 津波の到達から終息までの振幅値のトレンドを概ね再現できることがわかった．一方で，浦神湾内で励起される副振動に起因した周期成分など，観測点間を伝播する過程で励起される成分の再現は困難であることがわかった．他のイベント波形を利用したさらなる検証は必要であるが，1年間の連続観測データを用いた波動干渉法によるグリーン関数と沖合観測データにより，津波予測に資する合成波形構築の可能性を示すことができた．

© The Seismological Society of Japan

Advanced development of real-time tsunami prediction system and its implementation

*Narumi TAKAHASHI[1], Kentaro Imai[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Japan agency for Marine-Earth Science and Technology

これまで地震・津波観測監視システム（DONET）や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）を用いた津波即時予測システムを用いて、津波の到着時刻、津波高、浸水深分布を即時的に予測するシステムを構築し、和歌山県、三重県、千葉県、中部電力などに導入、運用してきた（Takahashi and Imai, 2022）。このシステムは、海域の複数の観測点で観測された海底水圧値をもとに、その水圧値分布から予測対象地点の津波を即時的に予測するものである。津波発生域近傍に観測点があれば、地震直後の初期津波の段階で検知し、津波の成長ともに浸水域もそれに合わせて浸水エリアが拡大するような動きになる。このシステムでは、津波予測対象域に展開した多くの断層モデルを用いて津波波形を計算してデータベース化し、その中から複数の水圧観測値に近い断層モデルによる津波計算結果を抽出、可視化する。観測データのノイズの特性を把握した上で、リアルタイムデータの一次処理を常時行い、一定の閾値を設定して地震と津波を検知し、観測データの伝播状況から津波の到来方向を特定するなどにより断層モデル群を絞り込むことで、予測精度を確保している。 しかし、海域に展開される観測網は一様ではなく、東海沖など観測体制が不足している海域も存在する。東海地方で予測する場合、DONET海域で津波が発生する場合は予測が可能であるが、東海沖を含む海域で津波が発生した場合は、何らかの情報を利用して断層モデルを絞り込むことが必要になる。津波予測の精度は、観測点の有無やその配置や分布に影響を受ける。そのため、表面ブイによるリアルタイム観測データや、気象庁による緊急地震速報、あるいは、電離圏ホールの推定（鴨川他, 2022）などの情報を入力データとして利用できるように改良した。また、予測した結果の出力についても、サーバのコンソールやクライアントPCだけでなく、モバイル機器でも表示することができ、他のシステムへデジタルデータを伝送することもできる機能を付与した。これらはいずれもシステムの利用者の使い方に依存するため、利用者の運用方法をヒアリングしてからシステムを構築することとなる。また、潮位計や河川水位など、他の観測情報と比較して、予測結果の妥当性を適宜確認できる機能も付与した。 利用者が使いやすく、発災時でのスムーズに利用できるようにするためには、システムをできるだけコンパクトにしてハードウェアに係る経費を圧縮した上で、普段から避難訓練などに利用する運用が望ましい。このシステムでは、特定の断層モデルで計算した津波波形を登録しておけば、その津波が発生した時の予測の状況を再現できる。この機能を用いて、いくつかの基礎自治体では避難訓練を実施している。これによって、津波到着までの猶予時間内にどのような対策が可能であるか、実際に試すことができる。これまで実装を進めつつ、利用者のニーズに合わせて開発、チューニングしてきた詳細について報告する。

© The Seismological Society of Japan

Reexamination of the Initial Tsunami Source Model of the Meio Tokai Earthquake

*Satoshi KUSUMOTO[1], Kentaro Imai[1], Takane Hori[1]

1. JAMSTEC

南海トラフ巨大地震は南海トラフ沈み込み帯沿いで発生頻度が100～150年とばらつきのある海溝型地震である．1498年明応東海地震はその一つであり，この地震に伴う津波は静岡県沿岸部を中心に甚大な被害を及ぼした．これまで安中ほか(2003)や阿部(2017)による津波波源モデルの推定やKitamura et al. (2020)により海底地すべりが津波を励起した可能性が示唆されているが，昭和東南海・南海地震や安政東海・南海地震，宝永地震に比べて津波痕跡が少なく，波源推定にはさらなる検証の余地がある．そこで本研究では，津波痕跡データベース（東北大学・原子力安全基盤機構）に格納された津波痕跡を基に明応東海地震の津波波源モデルを再検討した． まず津波の初期波源推定にあたって，津波痕跡データベースに格納された痕跡信頼度B～Dの64点を利用した．このうち同一の集落で計測された痕跡点は平均と標準偏差を取り，21地点に集約した．浜名湖口の今切の地形は明応東海地震に伴う地殻変動によって湖と海の間が切れたことで生じたとする文献記録が多く存在している（例えば都司，1979）．同様に，磐田市太田川低地では明応東海地震で隆起したと考えられている（松多ほか，2015）．これらを地殻変動痕跡として，今切では沈降，太田川低地では隆起として拘束条件に加えた． これらの痕跡点を説明する各小断層のすべり量は誤差ノルムが最小となるようにSA（Kirkpatrick et al., 1983；SCIENCE）を用いて推定した．本地震は文献信頼度が全体的に低いことに加えて，津波痕跡高には観測誤差や本地震以外のものが含まれる可能性がある．そこで本解析では，この誤差を±10%程度と仮定して一様乱数により与え，1000回試行のアンサンブル平均処理を行い，各小断層のすべり量を評価した． 次に，南海トラフ全域50mメッシュの海底地形データ（Chikasada, 2020；NIED），国土地理院の数値標高モデル（5mメッシュ）や日本水路協会の海底標高デジタルデータ（およそ50 mメッシュ）を組み合わせた高分解能数値標高モデルと高性能津波計算コード（JAGURS; Baba et al., 2015；Ocean Model）を用意して，推定波源を基に津波伝播・浸水の数値シミュレーションを実行した．津波痕跡高を計算するにあたって海岸構造物の除去を除いて沿岸地形の復元は行っていない． 推定された波源断層のすべり量分布を図 1に示す．本モデルの地震規模はMw 8.6となった．津波痕跡高と計算津波高の整合度を示す相田(1978)の幾何平均は1.13，幾何標準偏差は1.60となり，津波痕跡高の分布を一部再現できたが，伊勢湾内（津：痕跡信頼度D，松阪：痕跡信頼度C～D）の津波遡上高を説明することはできなかった．地殻変動については今切で沈降（おおよそ1.5 m），太田川低地で隆起（おおよそ3 m）を示し，定量的な情報ではないが文献記録と整合する結果となった． 湖西市白須賀（Komatsubara et al., 2008）や磐田市太田川低地（Fujiwara et al., 2020；松多ほか，2015），焼津市浜当目（Kitamura et al., 2020）では明応東海地震に相当する津波堆積物や地殻変動の痕跡が見つかっているものの，伊豆半島西岸ではこれまで津波堆積物や地殻変動の痕跡を確認できていない．この地域で明応東海地震の痕跡が見つかればより現実に近い津波波源モデルを提案することができるだろう． 謝辞：本研究は R2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構　小平秀一）の一環として行われました．

© The Seismological Society of Japan

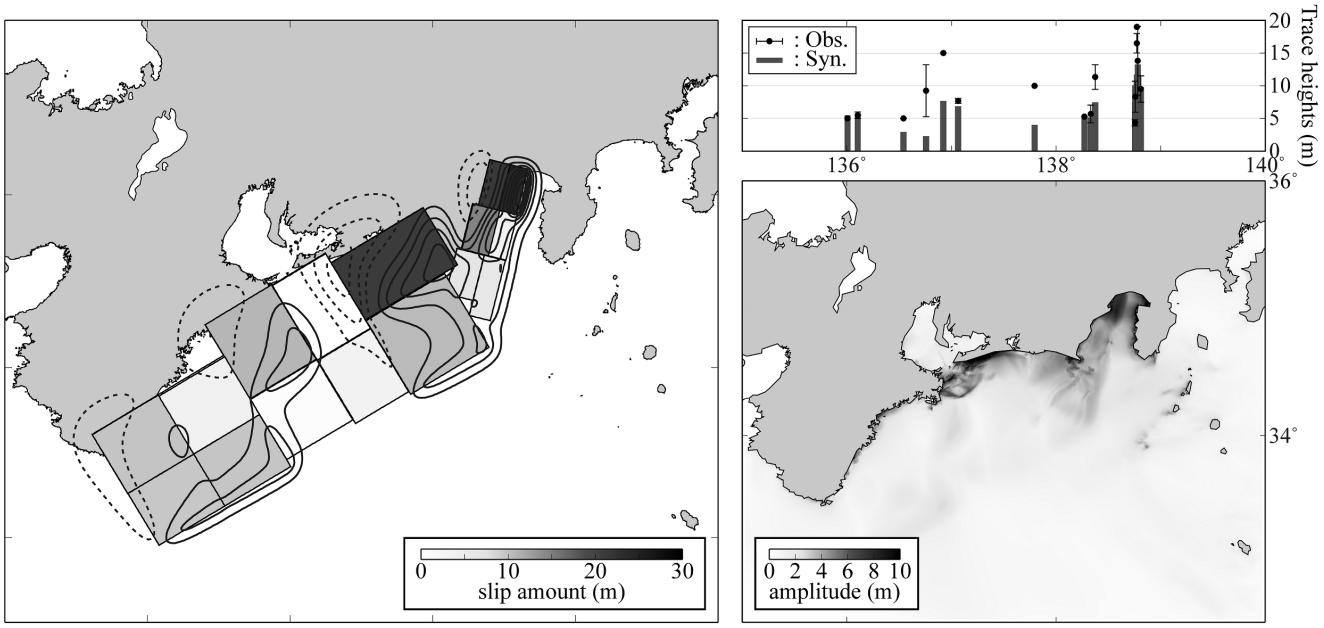


図1　明応東海地震のすべり量分布と津波痕跡高・計算津波高の比較．左図の実線・破線はそれぞれ地震時の隆起・沈降（コンターは1m間隔）を示す．右図の黒丸・エラーバーは津波痕跡高，灰色のバーは計算津波高をそれぞれ示す．

© The Seismological Society of Japan

Fault modeling and tsunami prediction for outer-rise earthquakes along the southern Kuril trench

*Toshitaka BABA[1], Tetsuo No[2], Koichiro Obana[2], Kentaro Imai[2], Naotaka Chikasada[3], Yuichiro Tanioka[4], Shuichi Kodaira[2]

1. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2. JAMSTEC, 3. NIED, 4. Hokkaido University

南部千島海溝沿いの択捉島沖から根室沖ではプレート間巨大地震の発生が危惧されている．地震調査研究推進本部によれば，色丹島及び択捉島沖ではM7.7～8.5前後の地震が今後30年以内の地震発生確率で60%程度，根室沖ではM7.8～8.5程度の地震が70%程度と想定されている．1896年明治三陸地震と1933年昭和三陸地震のように，プレート間巨大地震の後には海溝軸外側での正断層地震（アウターライズ地震）が発生することがある．千島海溝の海溝軸外側の地震の発生確率は不明と評価されていることからもわかるように，一般にアウターライズ地震の調査はプレート間地震の調査に比較して十分ではない．これを解決するために，我々は北海道沖のアウターライズ地震の調査を精力的に実施している．本研究では海域調査に基づいて構築した23本の断層モデルと，それを用いた津波予測計算について報告する．高分解能海底地形調査，マルチチャンネル法地殻構造調査，自然地震観測から，本海域でのアウターライズ断層の傾斜角は45–75°，走向は海溝軸に対してわずかに斜交していることが分かった．地震発生層の厚さの推定は難しいが，深さ25km程度までは正断層型の震源メカニズム解をもつ地震が観測期間内に発生している．モデル化したアウターライズ断層の断層長は最大で約260kmで，これはM8.4の地震を起こす規模に相当する．津波予測においては，高角で断層幅の短いアウターライズ断層であるため，波長の短い津波が励起される．このため，通常の津波予測で用いられる長波モデルではなく，分散波モデルあるいは三次元モデル（オイラーの式）を利用する必要があると考えられた．津波発生後15分までででこの３つのモデルを比較したところ，予想通り，長波モデルと分散波モデルあるいは三次元モデルでは得られる津波波形が異なり，後者２つのモデルでは津波の分散性が強くみられた．なお，分散波モデルと三次元モデルの解はほぼ一致した．分散波モデルを用いた津波発生後６時間の長時間津波計算から，アウターライズ地震による津波はプレート境界型地震と比較してより沖合で発生するために，海底地形による波の回折や屈折を受けやすいことが分かった．より具体的に言えば，襟裳岬に向かって津波エネルギーが集中しやすい傾向にある．津波の卓越周期と湾の固有周期が一致すると副振動により津波の振幅が増大することがあるが，海岸での計算津波波形から求めた卓越周期は10–15分程度で，プレート境界型の津波と比較して明らかに短かった．

© The Seismological Society of Japan

Tsunami source inversion of the 2020 Sand Point Earthquake

*Akino Naitoh[1], Toshitaka Baba[1]

1. Tokushima Univ.

アメリカアラスカ半島の沖では太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込んでおり，地震活動が活発である．この領域では2020年シメオノフ地震（M7.8）を皮切りに，2020年サンドポイント地震（M7.6），2021年チグニック地震（M8.2）が連続で発生した．これらは，多くの沈み込み帯で見られる連動型地震を理解する上で重要なイベントである． 2020年サンドポイント地震は横ずれ断層の地震で，複数のDART観測点で津波も記録された．USGSによる断層モデルを用いてこの津波を計算してみたが，DART観測点で得られた津波波形をうまく再現できなかった．本研究では，津波波形逆解析によって2020年サンドポイント地震の津波波源を推定し，この地震の特性を解明するための重要な情報を得ることを目的としている．USGS断層モデル付近にガウス分布で定義した複数の初期水位変動を与えてDART観測点での津波波形グリーン関数を計算し，それらにリッジ回帰を適用して津波波源（初期水位分布）を推定した．逆解析にも係わらず，津波の理論波形が観測津波高を明らかに下回り再現性が悪かった．そこで，DARTでの津波走時から津波逆伝搬図を描いてみたところ，USGSの断層モデルの東側に津波波源があっても良いことがわかった．津波波源を東に広げて津波逆解析を再度行ったところ，今回は観測津波波形をよく再現できる初期水位分布が求められた．得られた初期水位分布はUSGSの断層モデルよりも明らかに東側に広く，その東側には初期水位の沈降域がイメージングされた．このことから，DARTで観測された津波波形を再現するには横ずれ断層だけでは不十分で，東側に何らかの津波発生原因が必要であると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Coastal boulder mapping based on deep learning, and boulder transport simulation: case study at Ilocos Norte, Luzon Island, Philippines

*Daisuke ISHIMURA[1], Keitaro Yamada[2], Toshitaka Baba[3], Naotaka Chikasada[4], Noelynna T. Ramos[6], Kenta Minamidate[5], Ace Matthew F. Cantillep[6], Clod Anne V. Punzalan[6]

1. Tokyo Metropolitan University, 2. Ritsumeikan University, 3. Tokushima University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Tohoku University, 6. University of the Philippines

1. はじめに 海岸に分布する巨礫は、その大きさから運搬に大きなエネルギーが必要となる。そのため、通常の波浪では運搬されない大きさの巨礫は、過去に発生した津波や低頻度の高潮・高波などのExtreme wave event（EWE）を記録しているものとして研究が進められてきた（e.g., Goto et al., 2010; Minamidate et al., 2020; Namegaya et al., 2022）。特に巨礫の大きさと分布（海岸線からの距離）は、EWEの規模や巨礫の運搬過程を理解するためには重要な指標と言える。近年では、衛星画像やUAVを使用して巨礫のマッピングやサイズ計測が可能となっている（e.g., Boesel et al., 2020）。一般的に、海岸に分布する海岸巨礫を網羅的にマッピング・計測するためには膨大な時間と労力が必要とされ、特に海外などの調査期間が限られる場合には広域でのマッピング・計測は困難となる。そこで、本研究では、UAVによって撮影された画像に対して深層学習を適用することにより自動的な巨礫のマッピングを行い、UAV画像を用いたDSM（Digital Surface Model）データを用いて体積を計算した。これらを用いて、地震による津波を想定した礫移動計算を試みた。本発表では、その予察的な結果を報告する。このようなUAVと機械学習を用いたアプローチは今後の海岸巨礫マッピングの試金石となると思われ、本発表を通じてその利点や課題の整理も行う。 2. 研究地域 研究対象地域は、フィリピンのルソン島北西部に位置するイロコスノルテの海岸である。ルソン島北西部では、完新世の海成段丘が認められており、マニラ海溝もしくはより陸側の海底活断層による地震性隆起の可能性が指摘されている（Ramos et al., 2017）。また対象地域では、一部の巨礫がマッピングされており（Gong et al., 2022）、20～110トンの巨礫が打ち上がっている。またその中の一部で年代測定が実施されており、最近100年以内という新しい年代が得られている。本研究では、Gong et al. (2022)の調査地域ではベンチの幅が狭く、海岸線からの距離に応じた巨礫の分布を明らかにすることが難しいため、隣接するベンチが広く分布する地域において主にUAV撮影を行った。 3. 研究手法 本研究では，Mavic Air 2(DJI社製)を用いて高度30～50 mから海岸部の撮影を行った。撮影した画像はMetashape(Agisoft社製)を用いてDSMおよびオルソ画像の作成を行った。深層学習はMeta researchが開発するDetectron2(He et al. 2017)を用いてInstance segmentationを行った。学習データにはオルソ画像の一部を使用した。検出された礫はMatlabを用いて三軸や体積の計測を行い，実測データと比較した。そして、これらの計測結果を数値計算に供した。数値計算では、津波のみを計算し得られた津波水位と流速場の時系列から、Namegaya et al. (2022)の方法で礫に作用する慣性力とけん引力を求め、その合力が水没による浮力を考慮した礫底面の摩擦力を越えるかどうかを調査した。つまり、津波によって礫が滑動するか否かを判定した。 4.結果 作成した学習モデルを用いてオルソ画像のinstance segmentationを行ったところ，ベンチ上の礫の位置・輪郭を検出することができた。輪郭から計算された長・中間軸の長さは現地での実測と良い一致を示した一方で、DSMから測定された短軸の長さは現地での計測結果との違いが大きい傾向にあった。また，DSMから計算した体積は三軸から計算した体積と相関を示した。このことから，機械学習を用いることで直接計測と同程度以上に迅速かつ実態に即した巨礫の計測ができる可能性がある。一方、現段階では、調査範囲内に塩田が入っており、その領域では誤検出が認められた。一部、海岸のベンチ上の巨礫の未検出も認められた。本発表までに学習データの見直し等を行い、礫の検出や体積計算の精度・確度を向上させる予定である。 津波による礫の移動計算から、既往研究で提案されたマニラ海溝もしくはより陸側の海底活断層のモデルでは、十分に礫を動かすことができなかった。本研究で用いた礫の体積の算出法などモデルには改良の余地があるものの、さらに大きな地震による津波が発生していた可能性が示唆される。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sep. 16th) | Special session：S23. 100 years after the Great Kanto earthquake: development of earthquake research in the Kanto region

Tue. Oct 31, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P8 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S23P] PM-P

[S23P-01] Possibility of the occurrence of the 1433 Eikyo interplate Kanto earthquake 140 years after the preceding one

*Katsuhiko ISHIBASHI[1] (1. none)

[S23P-02] The geometry of the Moho of the Philippine Sea Plate in and around the Izu collision zone in central Japan

*Yuki ABE[1], Ryou Honda[1], Motoko Ishise[2], Shin'ichi Sakai[3], Yohei Yukutake[4], Ryosuke Doke[1] (1. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government, 2. Faculty of Science, Yamagata University, 3. The University of Tokyo, Interfaculty Initiative in Information Studies, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S23P-03] Estimation of natural period and damping ratio of the Imamura-type strong-motion seismograph by the Random Decrement Technique

*Takashi HAYAKAWA[1], Shunichi KATAOKA[2], Toshiaki SATO[3], Keiichi OKADA[1], Junichi MIYAKOSHI[3] (1. SHIMIZU Corp. Institute of Technology, 2. Hirosaki University, 3. Ohsaki Research Institute)

[S23P-04] Study on the seismic intensity of earthquakes beneath the Kanto region: Classification of earthquakes with an anomalous seismic intensity

*Motoko ISHISE[1], Ryoichi Nakamura[2], Shiina Takahiro[3] (1. Yamagata Univ., 2. Naka Earthquake Research, 3. AIST)

Possibility of the occurrence of the 1433 Eikyo interplate Kanto earthquake 140 years after the preceding one

*Katsuhiko ISHIBASHI[1]

1. none

●はじめに

Ishibashi (2020)は，1703年元禄地震より前の歴史上のプレート間関東巨大地震の候補として，1495年と1433年，1293年，878年の地震を挙げた．1495年明応地震については，金子（2012）が関東巨大地震だと主張しているが，石橋（2022）は1433年永享地震のほうがプレート間巨大地震の要件をより多く備えていると指摘した．ただし，どちらが関東巨大地震かは結論しなかった．今回，その後の検討結果として，永享地震が15世紀の関東巨大地震だろうという作業仮説を提唱する．

●1433年永享地震

史料： 用いる史料は（準）同時代史料のみで，関東地方の『鎌倉大日記（生田本）』（**A**），『神明鏡』（**B**），『喜連川判鑑』（**C**），『大宮神社古記録抄』（**D**），甲斐の『勝山記』（**E**），『王代記』（**F**），京都近郊の『看聞日記』（**G**），『満済准后日記（**H**）』である．

発生日時： 史料**A**～**F**では十五日と十六日の2通りの日付があり，**G**・**H**では両日に複数の地震記事がある．**G**・**H**の記事の検討から，本地震は永享五年九月十五日（1433.10.27）24時前後に発生したと判断する．

地震動被害： 鎌倉で山崩れ，すべての築地の崩壊（**A**），極楽寺の塔の九輪の落下（**B**）があったほか，京都の伝聞情報では堂舎が顛倒して死者が多かった（**G**）．相模国中央部の大山寺で仁王像の首が落ち（**B**），甲府盆地北東の山梨市で六地蔵の転倒や崖崩れらしき被害があった（**F**）．鎌倉の震度は少なくとも震度5強～6弱，山梨市付近の震度は5弱～5強と推定した．これらの震度分布は，本地震の*M*が8クラスだったことを示唆する．

余震活動： 鎌倉付近で朝までに30余度，その後20日間ほど，昼夜数十度の余震を感じた（**A**）．

津波： 京都の伝聞情報では，東京湾に注いでいた利根川が逆流した（**G**）．津波と思われるが，ほかに確かな津波記録はない．

内陸地震か： もし津波がなかったことが確定すれば内陸の上部地殻内地震と考えられる．鎌倉と山梨市の震度を考慮して，一番可能性の高い候補震源域と思われる伊勢原断層について検討した．しかし，既存のシナリオ地震の震度予測および地震動予測式から，伊勢原断層で最大の*M* 7地震では山梨市の震度が小さすぎる．完全に否定はできないが，伊勢原断層起源の可能性は低いと判断する．

富士山の噴火： **F**が，永享七年に「富士ノ火炎見ヘタリ」と記している．6合目以上で溶岩流を出す穏やかな噴火があった可能性がある（小山，1998）．

まとめ： 確実な津波記録がないのが問題だが，1495年地震に疑問点が多いことも考え合わせると，本地震が関東巨大地震だった可能性が高い．

●1495年明応地震の様々な疑問

金子（2012）は，伊東市宇佐美遺跡で発見された15世紀末と推定されるイベント堆積物を，『鎌倉大日記』が記す明応四年八月十五日（1495.9.3）の地震による津波堆積物と考えて，この地震がプレート間の関東巨大地震だと主張した．これに対して石橋（2022）は，(1)鎌倉が10ｍの津波で衰微したというのは過大推測，(2)京都の有感記録が鎌倉の地震によるかどうかは不明，(3)江の島の「地殻変動」はトンボロの消長の誤認，(4)宇佐美遺跡のイベント堆積物は海生珪藻化石の確認がなされていない，と指摘して金子説に疑問を呈した．今回さらに，(5)三浦・房総半島の地殻変動の記録はない，(6)関東・甲斐の同時代史料に記録が全くないのは不自然，(7)地震動被害と余震の記録が全くない，(8)宇佐美遺跡のイベント堆積物の出土遺物に大窯製品がないことから1485年頃より前の可能性がある，を加えて，関東巨大地震の可能性は低いと判断する．

●おわりに

一つの作業仮説として，1433年永享地震が相模トラフ巨大地震だろうと主張する．もしそれが正しければ，1293年正応（永仁）関東地震のわずか140年後にプレート間関東巨大地震が再来した事例があることにな

© The Seismological Society of Japan

り，1923年大正関東地震から100年経過した今日，防災上もきわめて重大である．実際，Satake (2023) と佐竹・石橋（2023）が，歴史上のプレート間関東巨大地震の候補のいろいろな組み合わせについて「30年地震発生確率」の時間変化を計算しているが，「1923・1703・1433・1293地震」の組み合わせでは現時点ですでに8.9%である．今後は，1433年永享地震が伊勢原断層起源ではないことの証明と，津波を伴ったことの実証が必要であり，野外調査によって，伊勢原断層の変位イベントの発生時間幅をできるだけ狭めることと，発生年代をできるだけ絞り込んで海起源であることを確認したイベント堆積物の発見が鍵になる．いっぽう，宇佐美遺跡のイベント堆積物の再調査（起源と年代観）もきわめて重要である．

© The Seismological Society of Japan

The geometry of the Moho of the Philippine Sea Plate in and around the Izu collision zone in central Japan

*Yuki ABE[1], Ryou Honda[1], Motoko Ishise[2], Shin'ichi Sakai[3], Yohei Yukutake[4], Ryosuke Doke[1]

1. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government, 2. Faculty of Science, Yamagata University, 3. The University of Tokyo, Interfaculty Initiative in Information Studies, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

フィリピン海プレートはその北側の大陸プレートに対して年間3 –4 cmの速度で北西方向に移動している（Seno et al., 1993, J. Geophys. Res.）。フィリピン海プレート北縁は、南海トラフや相模トラフから沈み込んでいるが、伊豆衝突帯では大陸プレートに衝突している。伊豆衝突帯付近は歴史的に被害地震が繰り返しているが、その中には地震を発生させるための応力の蓄積過程や断層面などが特定されていないものもある。それを明らかにし将来の地震災害リスクを評価するためには、伊豆衝突帯とその周辺における３次元的なプレート収束過程の詳細を明らかにすることが重要である。本研究ではそのことを念頭に、フィリピン海プレートのモホ面の３次元形状の推定を試みた。

フィリピン海プレートのモホ面

神奈川県とその周辺地域の地震観測点で得られた遠地地震のP波S波両方の波形からレシーバ関数を作成した。レシーバ関数の作成に用いた波形は、2007年から2017年までに、防災科学技術研究所、気象庁、東京大学地震研究所、および神奈川県温泉地学研究所によって観測された。レシーバ関数の作成には時間拡張型マルチテーパ（Shibutani et al., 2008, Bull. Seismol. Soc. Am.）を用い、Matsubara et al. (2019, InTech Open)の3次元地震波速度分布とJ-SHISの深部地盤構造を用いてレシーバ関数を深さ変換した。
深さ変換したレシーバ関数から、モホ面と解釈できる不連続面が、伊豆半島で30 –40 km、富士山北麓で50 –60 km、三浦半島で20 –30 kmの深さに検出された。Ishise et al. (2021, J. Geophys. Res.)が地震波トモグラフィを用いて推定した速度モデルによると、この不連続面の形状は7.5 –7.7 km/sのP波速度を持つ層の底面の形状とよく一致する。Kodaira et al. (2007, J. Geophys. Res.)は人工地震探査により、伊豆島弧地殻底面のP波速度を約7.6 km/sと推定しており、検出した不連続面がモホ面であると考えると、Ishise et al. (2021)の結果と整合的な解釈が可能である。
東京湾北部周辺と丹沢山地周辺ではモホ面は検出されなかったが、その領域のモホ面は7.5 –7.7 km/sのP波速度を持つ層（Ishise et al., 2021）の底面に一致すると考え、その底面の形状で補完した。

フィリピン海プレートの地殻の厚さとプレート収束過程

本研究で推定したモホ面形状と、Hirose et al. (2008, J. Geophys. Res.)、弘瀬ほか(2008, 地震)、Nakajima et al. (2009, J. Geophys. Res.)が推定したフィリピン海プレート上面の形状に基づいて、フィリピン海プレートの地殻の厚さ分布を推定した。その結果、伊豆半島から富士山にかけての地域では35 km以上の厚さの地殻が分布し、そこから遠ざかるにつれて地殻が薄くなっていくことがわかった。つまり、伊豆衝突帯では厚い島弧地殻が衝突し、前弧の沈み込み帯からは薄い地殻が沈み込んでいる。

現在のところ、伊豆島弧が本州弧に衝突する原因として、島弧地殻が低密度であること（青池ほか, 2001, 月刊地球)や、島弧地殻上面の摩擦が大きいこと(Seno, 2008, J. Geophys. Res.)が提案されているが、いずれにしても衝突しているフィリピン海プレートの内部に滑り面の存在が必要であると考えられており、地殻変動解析からは伊豆半島の15 –20 kmの深さに安定滑り面の存在が示唆されている(Seno, 2005, Earth Planets Space)。

本研究で得られたモホ面形状からは、伊豆半島の15 –20 kmの深さに見出されている安定すべり面は、伊豆島弧地殻の内部に十分収まることが示唆され、そこでは剪断破壊強度が非常に小さくなる条件が満たされているとする考え方と整合的である。

© The Seismological Society of Japan

謝辞
本研究では、防災科学技術研究所、気象庁、および東京大学地震研究所の地震波形データを使用しました。本研究の一部は、首都圏レジリエンスプロジェクト、東京大学地震研究所共同利用研究2022-B-05および科研費(22H05326)の助成を受けて実施しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of natural period and damping ratio of the Imamura-type strong-motion seismograph by the Random Decrement Technique

*Takashi HAYAKAWA[1], Shunichi KATAOKA[2], Toshiaki SATO[3], Keiichi OKADA[1], Junichi MIYAKOSHI[3]

1. SHIMIZU Corp. Institute of Technology, 2. Hirosaki University, 3. Ohsaki Research Institute

東京帝国大学構内に設置されていた今村式2倍強震計は1923年関東地震の本震記録を約20分間にわたって記録した．地震動が大きかったため，地震計の振り子が可動範囲を超えて衝突を起こしている．横田・他（1989）は，地震計の自由振動を衝突波形に加えることで衝突を補正し，さらに地震計の振り子応答を除去して約20分間の地動を推定している．推定において，今村式2倍強震計の固有周期と減衰定数が重要であるが，これらの値に十分な確証はない（片岡・他，2023）． 建築分野では，建物の固有振動数と減衰定数の推定にthe Random Decrement Technique（以後，RD法）が用いられる（例えば，建築学会，2020）．RD法は常時微動や風応答等の比較的長時間安定した外力による建物上部の波形から，建物の自由振動波形（以後，RD波形）を顕在化して振動特性を推定する．今村式2倍強震計の記録のうち，初動から11分経った後は，衝突もなく記録時間も長いためRD法が適用できる可能性がある． 東京江東区越中島にある清水建設技術研究所では，2011年東北地方太平洋沖地震の地震動が20分間記録されている．この長時間記録による一自由度系の応答を計算し，その応答波の後続動部分に対してRD法を適用して，一自由度系の固有振動と減衰定数が再現されるか検討した．その結果，ある程度の精度で再現できたため，RD法は今村式2倍強震計の固有周期と減衰定数の推定に有効であると考えられた． 最後に，今村式2倍強震計の1923年関東地震の記録の後続動部分に対してRD法を適用した．図１にRD波形を示す．RD波形のマイナス側はプラス側に折り返してプロットした．RD波形はきれいに減衰している．このRD波形のパワースペクトルのピーク周期を固有周期Tとした．また減衰定数hは，RD波形のピーク値（図1中●）をexp(-2π / T・ h・ t)と仮定して，最小二乗法を適用して求めた．暫定値ではあるが，固有振動数と減衰定数はN13W方向ではT=7.7sとh=9.1%，E13N方向ではT=7.8sとh=12.8%と推定された．今後，RD法のウインドウ処理方法等を変えて検討する予定である． 本郷の記録に限らず，貴重な歴史地震記象には地震計の定数が不明なことが多い．RD法はこの様な場合の地震計の振動特性の推定に有効であると考えられる。

1) 横田治彦・片岡俊一・田中貞二・吉沢静代, 1923年関東地震のやや長周期地震動，今村式２倍強震計記録による推定，日本建築学会構造系論文報告集，第401号，pp.35-45, 1989.
2) 片岡俊一，佐藤俊明，岡田敬一，宮腰淳一，早川崇：東京本郷に設置されていた今村式2倍強震計による関東地震の記録復元についての考察，第16回日本地震工学シンポジウム（印刷中）
3) 日本建築学会：建築物の減衰と振動，278p，2020

© The Seismological Society of Japan

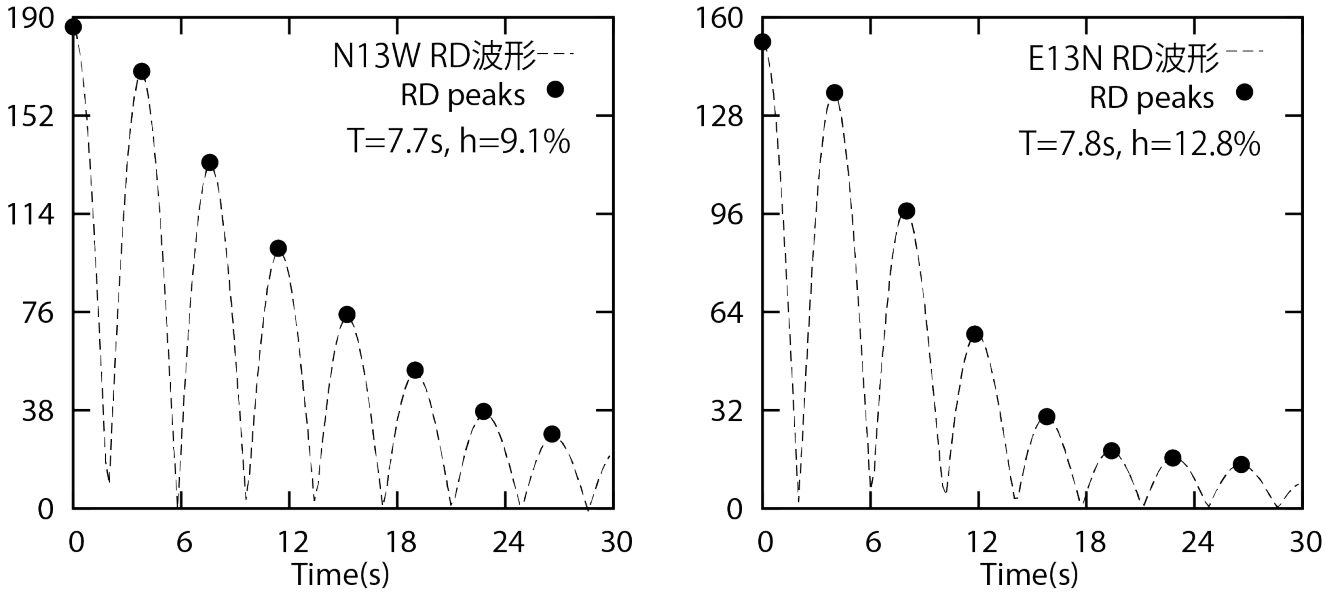


図1 1923年関東地震の記録の後続動部分から求めた今村式2倍強震計のRD波形

© The Seismological Society of Japan

Study on the seismic intensity of earthquakes beneath the Kanto region: Classification of earthquakes with an anomalous seismic intensity

*Motoko ISHISE[1], Ryoichi Nakamura[2], Shiina Takahiro[3]

1. Yamagata Univ., 2. Naka Earthquake Research, 3. AIST

■はじめに

一般に，地震時の揺れは震源直上で最も強く，そこから遠ざかるにつれ弱くなるような同心円状の震度分布が期待される．しかし，太平洋スラブ内の深発地震では，震央から離れた北海道から関東地方の前弧側の地域の震度が震央に近い日本海岸の地域に比べて大きくなることが知られていおり，そのような震度分布を異常震域と呼ぶ（例えば，Utsu, 1966：Furumura & Kennett, 2005）．非同心円状の震度分布は，関東地方の直下で発生する地震についても報告されている（Nakanishi & Horie, 1980; 中村・他，2007）．中村・他 （投稿中）は，そのような直下型地震に対する異常震域に深さ50 km程度以浅の減衰構造が強く影響していることを示唆した．しかしながら，深発地震の場合に比べて，異常震域の震度分布のパターンやそれをもたらす地震についての詳細な検討は進んでおらず，震度分布のパターンや地下構造との関係についてもよく分かっていない．そこで我々は，関東地方下で発生する地震の震度分布の特徴，地下構造，および地震活動の関連性についての検討に着手した．震源と震度分布の特徴の関係を明らかにすることは，震度分布に相当する情報のみが残されている過去の被害地震（安政江戸地震など）の震源推定への活用が期待され，近い将来において発生が危惧されている首都直下地震の被害軽減につながると考えている．本発表では，2000年以降の有感地震の震度データ（気象庁震度データベース検索）を用いて震源地ごとの震度分布の特徴を目視にて整理し，その特徴と減衰構造との関連性の予備的な検討結果を報告する．例として千葉県北西部を震源とする地震の震度分布の特徴，および減衰構造との関連性について示す．

■千葉県北西部の地震の震度分布の特徴

千葉県北西部を震源とする有感地震の震央は，①茨城ー千葉の県境付近（(a)深さ40～50km，(b)60～70km）②東京湾北東岸付近（東経140度以東の深さ60～70km），③東京湾北部から内陸にかけての地域（（a）深さ60～70km，（b）100km以深）に分布している．各々の震度分布には次のような特徴が見られる：① (a）深さ40～50kmの地震は県境の西端付近に集中しており，PHSスラブ上面の地震と考えられる．これらの震度分布には，震源の南東に位置する千葉県での震度が，震央から等距離にある他の地域と比べて小さくなる傾向がある．(b) 深さ60～70kmの地震は県境の中央部付近に集中しており，発震機構や震源位置からPACスラブ上面の地震と考えられる．これらの地震については，千葉～茨城一帯の震度が，震央距離が等距離の他の地域と比べて小さくなる傾向がある．また，サンプルは少ないが，深さ60km付近で発生する地震の震度は，震源よりも南側の地域（房総半島，埼玉県，東京都）で小さくなる傾向が見られる． ②PHSスラブ内部，太平洋スラブ上面・内部の地震が該当する．震度分布の特徴は，（a）震央付近で最大震度となり，東京湾西岸地域，茨城県および千葉県の順に震度が小さくなる，（b）震央付近の震度は大きく，東京湾西岸の北緯35.5度付近において周辺よりも震度が小さくなる（明瞭でないこともある），の２パターンが観測される．震源位置による震度分布のパターンの違いは明らかではない．③（a）震央付近で最大震度となり，東京湾西岸地域，茨城県および千葉県の順に震度が小さくなる（②aと同様）事例と，震央付近で最大震度となり，東京湾西岸地域で震度が大きく，茨城県で震度が小さくなる事例，がある．震源位置および発震機構から，前者はPHSスラブ内部の地震が主で，後者は太平洋スラブ上面の地震の特徴と考えられる．(b）太平洋スラブ上面の地震は，震央距離が等距離の他の地域と比べて千葉県と茨城県で震度が小さくなる特徴が見られ，より深い太平洋スラブ内部の地震については，震央よりも北の地域において震度が大きくなる傾向が見られた．

© The Seismological Society of Japan

■減衰構造と千葉県北西部の地震の震度分布の関係

表層地盤に基づく関東地域の地盤増幅率には顕著な地域性が見られ，これが地域的な震度に与える影響は大きいと考えられる．しかしながら，今回検討した震度分布には，氷層地盤から期待されるよりも広域的な変化が顕著に見られる．このことは，減衰構造が異関東地方で発生する地震の震度分布に強く影響していることを改めて示唆している．関東地域の深さ20～50kmには，千葉県一茨城県県境付近で東西に伸びる高減衰域，房総半島の中央部下の高減衰域，東京湾下に広がる低減衰域の存在が知られている（Nakamura et al., 2006；Nakajima, 2014）．このうち，高減衰域は，上述の震度が小さくなる地域と震源地との間に位置しており，震度が小さくなる原因が減衰構造と関係していることが示唆される．加えて，詳細な減衰構造（中村・他，投稿中）と同地域の震源位置を対応させたところ，震源の多くは高減衰域と低減衰域の境界付近に位置することが示された．

■今後の方針

今回は目視で震度分布の分類を行なった．今後は，計測震度値を用い，パターン認識などを活用することでより客観的に分類・分析を行う．

© The Seismological Society of Japan