Mon. Oct 21, 2024

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

9:00 AM - 10:15 AM JST | 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S09] AM-1

chairperson:Tomotake UENO(NIED), Shinako Noguchi(Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP))

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S09-01] Evaluation of seismic activity including shallow low-frequency and deep high-frequency events near Hakodate by means of frequency indices

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

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S09-02] Categorization of inland earthquakes in Japan by differential Frequency Index (dFI) and their spatial distribution

*Masahiro KOSUGA[1], Takuto MAEDA[1], Shinako NOGUCHI[2] (1. Grad. School Sci. Tech., Hirosaki Univ., 2. ADEP)

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

[S09-03] Stress field near the fault edges of the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO[1,2], Shinya Kato[4], Kazuhide Tomisaka[3], Masayo Sawada[3], Issei Doi[3], Shunta Noda[5] (1. NPO Abuyama, 2. Tohoku Univ., 3. DPRI, Kyto Univ., 4. ERI, Univ. Tokyo, 5. RTRI)

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

[S09-04] Evaluating earthquake criticality from frequency-magnitude distribution and seismic moment efficiency (2)

*Satoshi MATSUMOTO[1] (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-05] Shear strain energy changes during the seismic activity after the foreshock and the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Tomotake UENO[1], Tatsuhiko SAITO[1] (1. NIED)

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

10:30 AM - 11:45 AM JST | 1:30 AM - 2:45 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S09] AM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Tatsuhiko Saito(NIED)

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

[S09-06] Mechanically coupled areas in the Nankai Trough: Historical earthquakes, long-term slow slip events, and possible future earthquakes

*Tatsuhiko SAITO[1], Akemi Noda[2] (1. NIED, 2. JMA)

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

[S09-07] Seismic activity in the transition zone between the ordinary earthquake and shallow slow earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan

*Issei Hirata[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[1], Yukihiro Nakatani[3], Shuichiro Hirano[3], Hiroshi Yakiwara[3], Kazuo Nakahigashi[4], Kentaro Emoto[1], Satoshi Matsumoto[1], Shukei Oyanagi[2], Yoshihiro Ito[2], ChingYu Hu[5], Tomoaki Yamada[5], Masanao Shinohara[5] (1. Kyushu University, 2. Kyoto University, 3. Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. The University of Tokyo)

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

[S09-08] Spatio-temporal variation of the aftershock activity following the 2021 and 2022 intraslab earthquakes in off-Fukushima prefecture

*Ryo Osawa[1], Ryota Hino[1], Keisuke Yoshida[1] (1. Tohoku university)

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

[S09-09] Hypocenter Distribution and Migration preceding the 2021 M6.0 Ibaraki-Oki Earthquake Based on S-net Data

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Naoki Uchida[1], Ryota Hino[1] (1. Tohoku University)

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

[S09-10] Trial of hypocenter relocation using a new 3-D seismic velocity model around the Nankai Trough

*Katsuhiko SHIOMI[1], Makoto MATSUBARA[1], Ayako NAKANISHI[2], Gou FUJIE[2], Shoji SEKIGUCHI[1] (1. NIED, 2. JAMSTEC)

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

12:40 PM - 2:40 PM JST | 3:40 AM - 5:40 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S20] PM-1

chairperson:Yoshio MURAI(Faculty of Science, Hokkaido University), Yuji YAGI(University of Tsukuba)

12:40 PM - 1:20 PM JST | 3:40 AM - 4:20 AM UTC

[1A11-14-1add] Award ceremony

1:20 PM - 1:40 PM JST | 4:20 AM - 4:40 AM UTC

[S20-01] [Invited]Giant earthquakes of M~9

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

1:40 PM - 2:00 PM JST | 4:40 AM - 5:00 AM UTC

[S20-02] [Invited]Dynamic processes of ocean plate uncovered by active-source seismology

*Shuichi KODAIRA[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

2:00 PM - 2:20 PM JST | 5:00 AM - 5:20 AM UTC

[S20-03] [Invited]Diverse Machine Learning Approaches for Earthquake, Strong Ground Motion, and Crustal Deformation Analyses

*Tomohisa OKAZAKI[1] (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project)

2:20 PM - 2:40 PM JST | 5:20 AM - 5:40 AM UTC

[S20-04] [Invited]Statistical Seismological Study on the Activity of Earthquakes and Slow Earthquakes in Subduction Zones

*Tomoaki NISHIKAWA[1] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

2:50 PM - 5:00 PM JST | 5:50 AM - 8:00 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S20] PM-2

chairperson:Yoshio MURAI(Faculty of Science, Hokkaido University), Yuji YAGI(University of Tsukuba)

2:50 PM - 3:10 PM JST | 5:50 AM - 6:10 AM UTC

[S20-05] [Invited]Prediction of an Enigmatic Tsunami in October 2023 at Kii Peninsula, Japan

*Yuchen WANG[1], Kentaro Imai[1], Yutaka Hayashi[2], Hiroki Horikawa[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Meteorological Research Institute)

3:10 PM - 3:30 PM JST | 6:10 AM - 6:30 AM UTC

[S20-06] [Invited]Studies focusing on heterogeneity and uncertainty of subsurface structures through computational science and Bayesian methods

*Ryoichiro AGATA[1] (1. JAMSTEC)

3:30 PM - 3:50 PM JST | 6:30 AM - 6:50 AM UTC

[S20-07] [Invited]Development of practical wavefield-based earthquake early warning algorithms and their adaptation

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

3:50 PM - 4:10 PM JST | 6:50 AM - 7:10 AM UTC

[S20-08] [Invited]Elucidation of interplate slip behaviors in a subduction zone based on seafloor geodetic observations

*Fumiaki TOMITA[1] (1. IRIDeS, Tohoku University)

4:10 PM - 4:20 PM JST | 7:10 AM - 7:20 AM UTC

[S20-09] [Invited]High-performance and multifunctional tsunami simulation code: JAGURS

*Toshitaka BABA[1], Kenji Satake[2], Phil R. Cummins[3], Sebastien Allgeyer[3], Tatsuhiko Saito[4], Hiroaki Tsushima[5], Kentaro Imai[6], Kei Yamashita[7], Naotaka Chikasada[4], Masaaki Minami[5], Ayumu Mizutani[8], Toshihiro Kato[9] (1. Tokushima University, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Australian National University, 4. NIED, 5. MRI, 6. JAMSTEC, 7. then at Tohoku University, now at Nuclear Regulation Agency, 8. Tohoku University, 9. NEC)

4:20 PM - 4:30 PM JST | 7:20 AM - 7:30 AM UTC

[S20-10] [Invited]Present and future of observation seismology by development of ocean bottom seismometers

Toshihiko Kanazawa[1], *Hajime SHIOBARA[1], Masanao Shinohara[1], self-popup OBS development team[2] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. N/A)

4:30 PM - 4:40 PM JST | 7:30 AM - 7:40 AM UTC

[S20-11] [Invited]Development of real-time processing method for seismic intensity

*Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1], Hiromitsu Nakamura[1], Wataru Suzuki[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:40 PM - 4:50 PM JST | 7:40 AM - 7:50 AM UTC

[S20-12] [Invited]Large-scale friction experiments: What has been done and what will be done

*Eiichi FUKUYAMA[1,2], Futoshi Yamashita[1], Shiqing Xu[3], Kazuo Mizoguchi[4,1], Hironori Kawakata[5,1], Kurama Okubo[1], Sumire Maeda[6,1] (1. NIED, 2. Kyoto Univ., 3. SUSTech, 4. CRIEPI, 5. Ritsumeikan Univ., 6. AIST)

4:50 PM - 5:00 PM JST | 7:50 AM - 8:00 AM UTC

[S20-13] [Invited]Deep Seafloor Borehole Observation: development history and furure perspectives

*Eiichiro ARAKI[1], Tomokazu Saruhashi[1], Masanori Kyo[1], Yuya Machida[1], Toshinori Kimura[2], Kazuya Kitada[1], Shuhei Tsuji[1], Takashi Yokobiki[1], Noriaki Sakurai[1], Takahiro Yokoyama[1] (1. JAMSTEC, 2. TEPCO)

Room B | Regular session：S06. Crustal structure

9:00 AM - 10:15 AM JST | 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S06] AM-1

chairperson:Ryuta Arai(JAMSTEC), Makoto Matsubara(NIED)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S06-01] Deep structure of the Hidaka collision zone, Hokkaido Japan inferred from offshore-onshore integrated seismic survey (2)

*Noriko TSUMURA[1], Yoshio Murai[2], Hisatoshi Baba[3], Toshinori Sato[1], Eiji Kurashimo[4], Masanao Shinohara[4], Shintaro Abe[5], Yasuhito Uchida[6], Takuya Ishii[7], Nagisa Nakao[8], Kazuya Matsumoto[9], Takumi Asada[10], Takashi Ogami[11], Miwako Ando[4], Shinichi Tanaka[4], Aina Idoguchi[3], Keitaro Takamoto[12], Tomoya Hiramatsu[7], Naoki Momomoto[7], Yusuke Yamanaka[2], Tatsuya Nakagaki[13], Hiroaki Yamahana[14], Yojiro Sasagawa[7], Hayato Onuki[7], Saki Shibata[15], Issei Yasuhara[7] (1. Graduate school of Science, Chiba University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. School of Marine Science and Technology, Tokai University, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo , 5. ADEP, 6. Hokkaido Research Organization, 7. Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, 8. Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 9. Nikkodo Co. Ltd., 10. Department of Engineering, Muroran Institute of Technology , 11. AIST, 12. Department of Marine Science and Ocean Engineering Course of Marine Science and Ocean Engineering, Tokai University, 13. Graduate school of Science, Hokkaido University, 14. School of Science, University of Tokyo, 15. Faculty of Science, Chiba University)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S06-02] Lateral structural variation and seismic activity in the central part of the NE Japan Arc from the 2019 onshore seismic profiling -II

*Takaya IWASAKI[1], Hiroshi Sato[2], Eiji Kurashimo[3], Hirokazu Ishige[4], Hidehiko Shimizu[5], Tatsuya Ishiyama[3], Takashi Iidaka[6], Masanao Shinohara[3], Shinji Kawasaki[4], Susumu Abe[4], Naoshi Hirata[3] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JAPEX Research Center, Technical Division, JAPEX, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

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

[S06-03] Shallow crustal structure and slip tendency of normal faults in the outer rise of the Japan Trench

*Yue SUN[1], Ayumu Miyakawa[2], Koichiro Obana[3], Ehsan Jamali Hondori[4], Jin-Oh Park[1] (1. Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), The University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 4. Geoscience Enterprise Inc. (GSE))

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

[S06-04] Spatial variation in the origin of S-wave polarization anisotropy in the upper crust of the Tohoku region, NE Japan. (3)

*Ryotaro Fujimura[1], Tomomi Okada[1], Tatsuya Mizuta[1], Martha Savage[2], Ryota Takagi[1], Keisuke Yoshida[1], Shinichi Sakai[3], Kei Katsumata[4], Mako Ohzono[4,3], Masahiro Kosuga[5], Takuto Maeda[5], Yoshiko Yamanaka[6], Hiroshi Katao[7], Takeshi Matsushima[8], Hiroshi Yakiwara[9], Ayaka Tagami[1], Shuutoku Kimura[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Toru Matsuzawa[1] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku Umoversity Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, 3. ERI, Univercity of Tokyo, 4. Hakkaido University, 5. Hirosaki University, 6. Nagoya University, 7. DPRI, Kyoto University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University)

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

[S06-05] Shear wave splitting and seismic velocity structure in the onshore focal area of the 2024 Noto Peninsula earthquake, central Japan

*Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ayaka Tagami[1,5], Ryotaro Fujimura[1], Ryota Takagi[1], Keisuke Yoshida[1], Satoshi Matsumoto[3], Kentaro Emoto[3], Yoshiko Yamanaka[4], Kei Katsumata[5], Takuto Maeda[6], Motoko Ishise[7], Shin'ichi Sakai[8], Masatoshi Miyazawa[9], Hiroshi Yakiwara[10], Kazutoshi Imanishi[11], Naoki Uchida[1], Satoshi Hirahara[1], Shu'utoku Kimura[1], Toshiko Terakawa[4], Mako Ohzono[5], Takuo Shibutani[9], Takahiro Shi'ina[11], Yoshihiro Hiramatsu[12] (1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. Kyushu University, 4. Nagoya University, 5. Hokkaido University, 6. Hirosaki University, 7. Yamagata University, 8. University of Tokyo, 9. Kyoto University, 10. Kagoshima University, 11. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 12. Kanazawa University)

Room B | Regular session：S06. Crustal structure

10:30 AM - 11:30 AM JST | 1:30 AM - 2:30 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S06] AM-2

chairperson:Noriko Tsumura(Graduate school of Science, Chiba University)

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

[S06-06] Configuration of the Philippine Sea plate subducting from the Sagami Trough estimated with three-dimensional seismic velocity structures

*Makoto MATSUBARA[1], Shin'ichi Sakai[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S06-07] Geometry of subducting oceanic plate and its relation to overlying plate structure and seismicity in Nankai Trough

*Gou FUJIE[1], Kazuya Shiraishi[1], Takeshi Sato[2], Yanfang Qin[1], Gaku Kimura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC, 2. JMA)

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

[S06-08] Seismic Velocity Structure off the Kumano Basin ,the Nankai Trough derived from OBS data

*Tatsuya Fujinaka[1,2], Shuichi Kodaira[2,1], Ryuta Arai[2], Ayako Nakanishi[2], Yuka Kaiho[2], Yanfang Qin[2], Ryo Miura[2], Seiichi Miura[2], Yasuyuki Nakamura[2], Gou Fujie[2] (1. YNU, 2. JAMSTEC)

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

[S06-09] Detailed seismic structure of the tremor-to-trench area in the westernmost Nankai Trough inferred from full waveform inversion analysis

*Ryuta ARAI[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Tsutomu Takahashi[1], Yuka Kaiho[1], Yohei Hamada[1] (1. JAMSTEC)

Room C | Regular session：S04. Tectonics

9:00 AM - 10:15 AM JST | 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S04] AM-1

chairperson:Masataka Kinoshita(ERI, UTokyo), Genti Toyokuni(Tohoku University)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S04-01] Local heat flow variations on the outer rise of the Japan Trench: Implications for heterogeneous structure of the oceanic crust

*Makoto YAMANO[1,2], Masataka KINOSHITA[3] (1. AORI, Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. ERI, Univ. of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S04-02] The Stealth Hotspot Volcanoes -Hotspot volcanoes nestled within island arc volcanic chains that cause catastrophic eruptions-

*Genti TOYOKUNI[1], Dapeng ZHAO[1] (1. RCPEVE, Department of Geophysics, Tohoku University)

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

[S04-03] Deep structure of Java subduction zone: Comparing with Japan

*Dapeng ZHAO[1], F. Xie[2], Z.W. Wang[2] (1. Tohoku University, 2. Southern University of Science and Technology)

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

[S04-04] A year continued sluggish slip along the Izu-Bonin plate boundary

*Yoshio FUKAO[1], Tatsuya KUBOTA[2], Hiroko Sugioka[3], Ryo Furue[1] (1. JAMSTEC Yokohama Institute, 2. NIED, 3. Kobe Univ)

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

[S04-05] Toward detection of slow slips in Hyuga-Nada: Challenge with seafloor optical-fiber strainmeter

*Masataka KINOSHITA[1,2], Eiichiro Araki[2], Rie Nakata[1], Tomohiro Toki[4], Yoshitaka Hashimoto[3], Yohei Hamada[2], Yusuke Yokota[5], Yusuke Yamashita[6], Michiyo Sawai[7] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Kochi University, 4. University of Ryukyus, 5. Institute of Industrial Science, UTokyo, 6. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 7. Chiba University)

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

10:30 AM - 11:15 AM JST | 1:30 AM - 2:15 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S12] AM-2

chairperson: Kentaro Omura(NIED), Hiroyuki NODA(Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

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

[S12-01] Simulation on sample-size dependency of dynamic weakening of friction due to thermoelastic instability and local temperature-weakening

*Hiroyuki NODA[1] (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S12-02] Yielding and fracture of a complex fluid under accelerating shear

*Osamu KUWANO[1] (1. JAMSTEC)

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

[S12-03] In-situ stress at the basement under Osaka plain (8) - In-situ stress measurement at NIED Kyoto observation well by DCDA method -

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

Room C | Regular session：S05. Geothermal science

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S05] AM-2

chairperson: Kentaro Omura(NIED), Hiroyuki NODA(Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

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

[S05-01] The first Seismic Exploration using the optical fiber DAS in the geothermal borehole at Kijiyama geothermal field in Akita, Japan

*Junzo KASAHARA[1,2], Yoko Hasada[2,3], Masaru Suzuki[6], Tomohiro Takahashi[6], Hitoshi Mikada[4,2], Hiroshi Ohnuma[2], Yoshihiro Fujise[5] (1. Univ. Shizuoka, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Engineering, 4. Kyoto Univ., 5. WELMA, 6. TOUSEC)

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

9:00 AM - 10:15 AM JST | 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room D Medium-sized Conference room 201 (2F)

[S18] AM-1

chairperson:Noa Mitsui(Nagoya University), Yusuke Inoue

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S18-01] Significance of holding the event: 2024 summer school for school teachers at devastated areas by earthquakes in Osaka

*Hiroo NEMOTO[1], Ken'ichi ARAI[2], Shouichi IKEDA[3], Yasuyuki KANO[4], Osamu KUWANO[5], Akiko SATOH[6], Yasuharu SYURI[7], Makoto YAMANO[8], Masashige MINAMISHIMA[9], Naoko KITADA[10] (1. Ritsumeikan Univ., 2. Sakae Higashi UPR Sec. Sch., 3. Former public P Sch. teacher, 4. ERI, 5. JAMSTEC, 6. Goryougadai branch Sch. of Kaname LWR Sec. Sch., 7. Rakusei Sec. Sch., 8. AORI, 9. Ryogoku Sec. Sch., 10. GRI)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S18-02] The 23rd Earthquake, Volcano and Geology Children's Summer School in Yoshino River "Exploring the Secrets of the Yoshino River with YOKAI"

*Yusuke Inoue[1], Toru Ando[2], Tadahiro Shibata[3], Teito Takemoto[4], Ryosuke Doke[5], Azusa Tonotani[6], Kenichi Nakao[7], Kenichi Nishiyama[8], Toshitaka Baba[8], Tomoya Hiiro[9], Shintaro Yamasaki[10], Yoshie Yamada[11], Hikaru Yokoyama[12], Shuichi Hasegawa[13] (1. OYO, 2. Asutamuland, 3. ACA, 4. JMA, 5. Hirosaki Univ, 6. Miyoshi City Office (Miyoshi Geopark Project), 7. Tokushima Prefectural Museum, 8. Tokushima Univ, 9. Arakawa City Office, 10. Kyoto Univ, 11. TEPCO PG, 12. Hokusho Univ, 13. Kagawa Univ)

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

[S18-03] Public Awareness Survey on the Recognition and Response of Earthquake Hazard and Other Natural / Manmade Hazards

*Yoshinari HAYASHI[1], HIroaki Takahashi[2] (1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University, 2. Hokkaido Univ.)

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

[S18-04] Effects of prior science education on accepting of earthquake disaster and on the prevention consciousness after the disaster

*Noa MITSUI[1], Kumi Yoshitake[2], Kazuyuki Nakagawa[3], Hiroko Tsuboi[4] (1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2. University of human environments, 3. Jiji Press, 4. Nagoya City University)

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

[S18-05] Enhancing Interoperability of Disaster Information Using Knowledge Graphs

*Hiroki UEMATSU[1], Hideaki TAKEDA[2,1] (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics)

Room D | Regular session：S19. Seismology, general contribution

10:30 AM - 11:15 AM JST | 1:30 AM - 2:15 AM UTC | Room D Medium-sized Conference room 201 (2F)

[S19] AM-2

chairperson:Masumi Yamada(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University), Tesuo No(JAMSTEC)

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

[S19-01] Shallow slow earthquake activity in Nankai Trough off Muroto possibly caused by sequential seamount subduction

*Paul Caesar Flores[1,2], Shuichi Kodaira[1,2], Gaku Kimura[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Tetsuo No[1], Yuka Kaiho[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Yokohama National University)

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

[S19-02] Strong reflector in seawater identified from seismic reflection data off the east coast of Noto Peninsula

*Tetsuo NO[1], Hironori Otsuka[2], Mariko Hatta[3], Tomoharu Senjyu[4], Ayanori Misawa[5], YUE SUN[6], Noboru Yamakawa[6], Yuqi Lyu[6], Jin-Oh Park[6] (1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe Univ., 3. RIGC, JAMSTEC, 4. RIAM, Kyushu Univ., 5. GSJ, AIST, 6. AORI, Univ. of Tokyo)

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

[S19-03] Source mechanism analysis of the tsunami near Torishima on October 9, 2023

*Masumi YAMADA[1], Masaru Nakano[2] (1. DPRI, Kyoto University, 2. JAMSTEC)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S10. Active faults and historical earthquakes

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S10P] PM-P

[S10P-01] The collapse of Showa Bridge and testimony that “the riverbed cracked”

*Kazuo KAWAUCHI[1] (1. Niigata University of Pharmacy and Medical and Life Sciences)

[S10P-02] Investigation of gravity anomalies around the Morimoto-Togashi fault zone

*Akihiro Sawada[1], Yoshihiro Hiramatsu[1] (1. College of Science and Engineering, Kanazawa University)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S11. Various phenomena associated with earthquakes

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S11P] PM-P

[S11P-01] Search for microbaroms sources by a tripartite observation using newly developed microbarographs

*Yoshio FUKAO[1], Taewoon Kim[1], Takuma Ooi[2], Ayami Suzuki[2], Ryohei Ooi[2], Kiwamu Nishida[3] (1. JAMSTEC, Yokohama Institute Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Krone Corporation, 3. Univ. of Tokyo, ERI)

[S11P-02] Long-duration signal generated by volcanic activity at Nishinoshima detected by dense array observation at Hyuga Nada

*Shukei OHYANAGI[1], Yusuke YAMASHITA[2], Takeshi AKUHARA[3], Yasunori SAWAKI[4], Yoshihiro ITO[2], Tomoaki YAMADA[3], Masanao SHINOHARA[3] (1. Kyoto University, Graduate School of Science, 2. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute, 3. The University of Tokyo, Earthquake Research Institute, 4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

[S11P-03] Are There One or More Geophysical Coupling Mechanisms before Earthquakes? The Case Study of Lushan (China) 2013

*Yiqun Zhang[1,2], Kaiguang Zhu[2], Dedalo Marchetti[3], Jiancang Zhuang[1] (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Jilin University, China, 3. National Institute of Geophysics and Volcanology)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S12P] PM-P

[S12P-01] Estimated spatial stress pattern in the aftershock area of the 2016 Central Tottori earthquake

*Takaki IWATA[1], Yoshihisa Iio[2,3] (1. , Comprehensive Education Center, Prefectural Univ. of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University, 3. Abuyama Seismological Museum)

[S12P-02] Effect of internal fracture distribution on frequency dependence of elastic constants of granite under Atmospheric and Confining Pressure

*Hideto Takatsu[1], Shinichi Uehara[1] (1. Univ. of Toho)

[S12P-03] Analyzing short- and long-term friction effects through two-state variable modeling

*GUOHAO MA[1], Eiichi Fukuyama[1,2] (1. Kyoto University, 2. NIED)

[S12P-04] Velocity-dependent friction of rocks distributed in the 2016 Kumamoto earthquake region

*Kazuo MIZOGUCHI[1], Takahiro Iida[2], Sachiko Iizuka[2] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. CERES)

[S12P-05] Understanding the development process of boundary shear within faults through laboratory friction experiments and numerical analysis

*Minoru Kudose[1], Tetsuro Hirono[1], Mamoru Hatanaka[2], Akito Tsutsumi[2], Takeshi Miyamoto[2], Satoshi Yukawa[3] (1. Osaka Metropolitan University, 2. Kyoto University, 3. Osaka University)

[S12P-06] Measurement of the frequency dependence of voltage response due to piezoelectric polarization in artificial quartz crystal samples

*Kazuya Ogawa[1], Hironori Kawakata[1] (1. Ritsumei University)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S13. Crustal fluids and earthquake

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S13P] PM-P

[S13P-01] The features of DLTs Generation Zone Based on 3-D deep electrical resistivity structure beneath the Kii Peninsula, Southwestern Japan

*Akira Watanabe[1], Makoto Uyeshima[1], Satoru Yamaguchi[2], Yoshiya Usui[1], Hideki Murakami[3], Tsutomu Ogawa[1], Naoto Oshiman[4], Ryokei Yoshimura[4], Koki Aizawa[5], Ichiro Shiozaki[6], Takafumi Kasaya[7] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Osaka City University, 3. Kochi University, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 6. Graduate School of Engineering, Tottori University, 7. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S13P-02] Elucidating the causes of deep earthquakes in the lower crust around Higashihiroshima City

*Kotaro Sueki[1] (1. University of Hyogo)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S18. Education and history of seismology

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S18P] PM-P

[S18P-01] Efforts of Local Government Research Institution for Improving General Public's Disaster Literacy

*Ryou HONDA[1], Kei Odawara[1], Yutaka Nagaoka[1], Tatsuya Ishiyama[2], Hiroe Miyake[2], Makoto Matsubara[3], Nobuyuki Morikawa[3] (1. Hot Springs Research Institute, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S18P-02] Survey on the impact of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes on schools and reflections of local teachers on improving disaster education

*Yo FUKUSHIMA[1], Canay Dogulu[2], Takashi Oda[3], Emin Özdamar[4], Aiko Sakurai[5], Ryo Saito[1], Miwako Kitamura[1], Takeshi Sato[1] (1. Tohoku University, 2. TED University, 3. University of Tokyo, 4. Turkish Japanese Foundation, 5. Kobe University)

[S18P-03] Creating teachable moment presetations for recent earthquakes in Japan - - -Improvements from the prototypes- - -

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

[S18P-04] Development of models for observing the topography of ocean floorand land mede with 3D printers

*Ryoya Sato[1], Satoko Oki[1] (1. Bachelor of Arts in Environment and Information Studies,Keio Univ.)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S19. Seismology, general contribution

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S19P] PM-P

[S19P-01] An attempt to estimate an appropriate distance correction function for local magnitude calculation for the Philippines

*Tatsuhiko HARA[1], Johnlery P. Deximo[2] (1. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 2. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Department of Science and Technology)

[S19P-02] Analysis of the isotropy of the coda wavefield by using the strain seismogram

*Kentaro EMOTO[1], Takeshi Nishimura[2], Haruhisa Nakamichi[3], Kimiko Taguchi[2], Takashi Hirose[2], Hisashi Nakahara[2], Satoru Hamanaka[1], Syed Idros Bin Abdul Rahman[1], Kohei Yonemori[1] (1. Kyushu University, 2. Tohoku University, 3. Kyoto University)

Poster session (Oct. 21st) | Special session：S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S21P] PM-P

[S21P-01] On regularity of physics-informed neural networks in solving ill-posed Cauchy problems

*Daisuke SATO[1], Tomohisa Okazaki[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Institute of Physical and Chemical Research)

[S21P-02] Hackathon on Large Language Models and Earthquake Researches

*Hisahiko KUBO[1], Stephen Wu[2], Masayuki Kano[3], Shinya Katoh[4], Atsuko Oana[5], Tomohisa Okazaki[6], Nozomi Okada[7], Nobuki Kame[4], Yuki Kodera[8], Daisuke Sato[9], Kengo Shimojo[8], Koji Tamaribuchi[10], Makoto Naoi[11], Ryuichi Nishiyama[4], Kazuro Hirahara[6,12], Takashi Miyamoto[13], Masumi Yamada[14] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. Tohoku University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 5. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 6. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 7. Shizuoka University, 8. Meteorological Research Institute, 9. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 10. Japan Meteorological Agency, 11. Hokkaido University, 12. Kagawa University, 13. University of Yamanashi, 14. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S21P-03] Ateempt of detection of small earthquakes in Hakone volcano based on machine larning using multi-station data

*Ryo KURIHARA[1] (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

[S21P-04] Parallel GPU Deep Learning Framework for Seismology and Application for Seismic Waveform from Nankai Trough

*Daisuke Sugiyama[1,2], Yojiro Yamamoto[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Kagoshima University)

[S21P-05] A Deep Learning Estimation of Tectonic Tremor Location from Single-Station Waveforms

*Amane Sugii[1], Yoshihiro Hiramatsu[1] (1. Kanazawa University)

[S21P-06] Detecting and locating tectonic tremors using deep learning: Application to Hi-net stations in the Nankai subduction zone

*Yuya Jinde[1], Amane Sugii[1], Yoshihiro Hiramatsu[1] (1. Kanazawa University)

[S21P-07] Development of deep-learning methods for seismic event detection in seafloor DAS data: creation of training/validation datasets

*GERARDO MANUEL MENDO[1], HIROMICHI NAGAO[1], SHINYA KATOH[1], MASANAO SHINOHARA[2] (1. Research Center for Computational Earth Science, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S21P-08] Acquiring a Stochastic Differential Equation Representation to Characterize Tremors from Seismic Waveform Data Using Deep Learning

*Toshiro Kusui[1], Hiromichi Nagao[1], Shin-ichi Ito[1], Shinya Katoh[1], Tomoki Tokuda[1] (1. Univ. of Tokyo)

[S21P-09] Establishment and Result of Local Model through Transfer Learning of Deep Learning Detectors Using AN-net Data in Nagaoka Region

*Isao Kurosawa[1], Yuki kobayashi[1], Kodai Sagae[2], Takahiko Uchide[2] (1. INPEX CORPORATION, 2. Geological Survey of Japan. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Poster session (Oct. 21st) | Late-Breaking Session：S23. The 2024 Hyuga-nada Earthquake and its Effects

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S23P] PM-P

[S23P-01] Attenuation Characteristics of Bedrock Motions due to the 2024 Hyuganada Earthquake (M7.1)

*Tomonori IKEURA[1] (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

[S23P-02] Characteristics of significant wave groups observed in the Osaka Plain during the Hyuga-nada earthquake on August 8, 2024

*Takashi AKAZAWA[1] (1. Hanshin Consultants Co., Ltd.)

[S23P-03] Empirical relationship between distance from hypocenter to asperities and earthquake size

*Mitsutaka OHSHIMA[1] (1. Ohsaki Corporation)

[S23P-04] Source process of the 2024 Hyuga-nada earthquake deduced from strong motion records

*Ritsuya Shibata[1], Hisahiko Kubo[1], Wataru Suzuki[1], Shin Aoi[1], Haruko Sekiguchi[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S23P-05] Crustal deformation associated with the M7.1 earthquake in the Hyuganada on August 8, 2024.

*Hiroshi YARAI[1], Hiroshi MUNEKANE[1], Yuji HIMEMATSU[1], Shinzaburo OZAWA[1] (1. GSI)

[S23P-06] Ground tilt change before and after the Hyuga-nada earthquake on August 8, 2024

*Takeshi KIMURA[1], Youichi Asano[1] (1. NIED)

[S23P-07] Rapid estimation of co-seismic crustal deformation and fault models for the 2024 Hyuganada Sea earthquake by REGARD

*Mayumi Hashimoto[1], Takayuki Miyazaki[1], Keitaro Ohno[1], Shinsuke Murakami[1], Naofumi Takamatsu[1], Takahiro Wakasugi[1], Yusaku Ohta[2] (1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

[S23P-08] A validation of a procedure of continuous monitoring of unsteady deformation after large earthquakes

*Takahiro TSUYUKI[1], Akio KOBAYASHI[2] (1. Meteorological Research Institute, 2. Nagano Local Meteorological Office, JMA)

[S23P-09] CoRrelation Analysis of Crustal Deformation Immediately Before the 2024 Hyuganada Earthquake

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

[S23P-10] Geomagnetic pulsations amplified by magnetic storms and resonance phenomena caused by crustal discharges

*kimio uchino[1] (1. himawarinowa.lab)

[S23P-11] Real-time Disaster Prevention Warnings for Nankai Trough Megathrust Earthquakes and Tsunamis Using Physical Wavelets

*Fumihide TAKEDA[1,2] (1. Takeda Engineering Consultant, 2. Earthquake Prediction Institute)

[S23P-12] T-wave propagation associated with the Hyuga-nada Earthquake

*Ryoichi IWASE[1] (1. JAMSTEC)

[S23P-13] Earthquakes in the Early Modern Era with epicenter in Hyuga-nada

*Rei Mizuno[1], Yasuyuki Kano[2], Masaharu Ebara[1] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Univ. of Tokyo)

[S23P-14] On the probability of an M7-class earthquake in Hyuganada region to trigger an M8 or larger earthquake

*Yo FUKUSHIMA[1], Tomoaki Nishikawa[2] (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S23P-15] VLFE Activity in and around the Focal Area of the 2024 Hyuga-nada Earthquake

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

[S23P-16] Large-scale activity of very low-frequency earthquakes following the 2024 Hyuganada earthquake

*Naoki SUDA[1] (1. Earth and Planetary Systems Science Program, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University)

[S23P-17] Toward monitoring of tectonic tremor occurred along the Nankai trough using N-net

*Takayuki MIYOSHI[1], Kazuaki Ohta[1], Takanori Matsuzawa[1], Youichi Asano[1], Takashi Kunugi[1], Tetsuya Takeda[1], Shin Aoi[1] (1. NIED)

[S23P-18] Rapid identification of earthquake information based on three-dimensional seismic velocity structures and their utilization

*Katsuhiko SHIOMI[1], Shunsuke TAKEMURA[2], Makoto MATSUBARA[1], Takeshi KIMURA[1], Shoji SEKIGUCHI[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S23P-19] AIST's geodetic monitoring for Nankai Trough Earthquake Extra Information (Megathrust Earthquake Attention)

*Yuichi KITAGAWA[1], Satoshi ITABA[1], Tadafumi OCHI[1], Suguru YABE[1], Norio MATSUMOTO[1], Tsutomu KIGUCHI[1] (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST)

[S23P-20] Issues in geodetic monitoring for Nankai Trough Earthquake Extra Information (Megathrust Earthquake Attention)

*Satoshi ITABA[1], Yuichi KITAGAWA[1], Tadafumi OCHI[1], Suguru YABE[1], Norio MATSUMOTO[1], Tsutomu KIGUCHI[1], Takanori MATSUZAWA[2] (1. AIST, 2. NIED)

[S23P-21] Human risk assessments considering the Nankai Trough Earthquake Extra Information

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. NIED, 2. OYO)

[S23P-22] Investigation of effective use of Nankai Trough earthquake contingency information in local communities

*Kazuhito Fujisawa[1], Atsuko Nonomura[1], Mari Takahashi[1], Yoshiyuki Kaneda[1], Narumi Takahashi[2] (1. Univ. of Kagawa, 2. NIED)

[S23P-23] Effectiveness Evaluation of the Nankai Trough Earthquake Extra Information in terms of Earthquake Preparedness

*Yoshinari HAYASHI[1], Ryu OHTANI[2] (1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

[S23P-24] The surveys about the Nankai Trough Earthquake Extra Information in August 2024 and the results

*Akiko TAKEO[1], Hisahiko KUBO[2], Ryo KURIHARA[3], Kotaro TARUMI[4] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University)

[S23P-25] Survey on the response of some students in Kochi /Kagawa prefectures to Nankai trough special advisory information on August 8

*Yoshiyuki KANEDA[1] (1. IECMS Kagawa University)

[S23P-26] About the Hyuganada earthquake and its effects

*Takanobu HARA[1] (1. kagakugiken)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S03P] PM-P

[S03P-01] Take-over of the transponder array geometry for the long-term GNSS-A observation in the SGO-A

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

[S03P-02] Factors of waveform disturbance in acoustic ranging at SGO-A station

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

[S03P-03] Postseismic deformation after the 2011 Tohoku earthquake captured by GNSS, GNSS-A, and small repeating earthquakes

*Fumiaki TOMITA[1], Tianhaozhe Sun[2,3], Takeshi Iinuma[4], Motoyuki Kido[1], Yusaku Ohta[5], Naoku Uchida[5], Ryota Hino[5], Kelin Wang[2,3] (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, 3. School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. Graduate School of Science, Tohoku University)

[S03P-04] Temporal Changes in Seismic Attenuation after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake (Part 2)

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

[S03P-05] Unintuitive Displacement Field Caused by Reverse and Horizonal Fault Motion in an Elastic-Viscoelastic Layered Half-Space

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

[S03P-06] Characteristics of topographical changes associated with the 2024 Noto Peninsula Earthquake using airborne laser scanning data

*Satoshi Ishida[1], Shingo Kimura[1], Koji Nohara[1], Masaaki Hamada[1], Toko Takayama[2], Takahiro Yoshida[2], Hiroyuki Yamaguchi[3], Yoshihiro Hiramatsu[4] (1. Hokuriku Electric Power Co., 2. Asia Air Survey Co., 3. Natural Consultant Co., 4. Kanazawa University)

[S03P-07] Characteristics of Uplift Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough: Case Studies on Ports

*Yuji DOHI[1], Hiromitsu Nakamura[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Sho Akagi[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), 2. Mitsubishi Electric Software Corporation)

[S03P-08] Modeling Subdaily Occurrence of Slow Slip Events in Western Shikoku

*Kanto Kato[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S04. Tectonics

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S04P] PM-P

[S04P-01] Existing Probability of Triple Junctions Based on Plate Motion Angles

*Hironobu Fujisawa[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S04P-02] Tectonics and Island Shape of Izu and Bonin Islands

*Moe Hamana[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science Faculty of Science)

[S04P-03] Tectonic significance of the reverse fault type intraslab earthquake occurred beneath the Bungo Channel, southwest Japan

*Takayuki MIYOSHI[1], Takeshi KIMURA[1] (1. NIED)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S05. Geothermal science

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S05P] PM-P

[S05P-01] *Geothermal exploration using the optical fiber DAS in the geothermal borehole of the Takigami geothermal field*

*Junzo KASAHARA[1,2], Yoko Hasada[2,3], Shigetsugu Furuya[5], Masahiro Shimazaki[5], Hiroshi Mikada[4], Hiroshi Ohnuma[2], Yoshihiro Fujise[6] (1. Univ. Shizuoka, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Engineering, 4. Kyoto Univ., 5. Idemitu, 6. WELMA)

Poster session (Oct. 22nd) | Regular session：S06. Crustal structure

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S06P] PM-P

[S06P-01] An application of full waveform inversion to dense OBS seismic survey off Nemuro, Hokkaido

*Ryosuke AZUMA[1], Gou Fujie[2] (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. JAMSTEC)

[S06P-02] Subduction Structure from the Forearc Region Off Miyagi to the Central Part of Northern Honshu Arc Revealed by a Dense Seismic Observation

*Eiji KURASHIMO[1], Hiroshi Sato[2], Takaya Iwasaki[3], Takashi Iidaka[4], Tatsuya Ishiyama[1], Masanao Shinohara[1], Hirokazu Ishige[5], Hidehiko Shimizu[6], Shinji Kawasaki[5], Susumu Abe[5], Naoshi Hirata[1] (1. ERI, The University of Tokyo, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Association for the Development of Earthquake Prediction, 4. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 5. JGI, Inc., 6. JAPEX)

[S06P-03] Seismic reflection imaging and pore fluid pressures of the Japan Trench megathrust fault offshore Sanriku, NE Japan

*Yuqi Lyu[1], Tetsuo No[2], Ehsan Jamali Hondori[3], Park Jin-Oh[1] (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Geoscience Enterprise Inc.)

[S06P-04] Relation between deep crustal fluids, crustal seismicity and structure in North Ibaraki revealed by receiver functions?

*Admore Phindani MPUANG[1], Takahiro SHIINA[1], Yasunori SAWAKI[1], Takahiko UCHIDE[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S06P-05] Three-dimensional attenuation structure around the Hida Mountains

*Shoya Okada[1], Akio Katsumata[1], Kohe Hotta[1] (1. University of Toyama)

[S06P-06] Retrieval of persistent S reflections from the megasplay fault beneath C0010

*Takashi TONEGAWA[1], Eiichiro Araki[1], Shuhei Nishida[1], Aki Ito[1], Yuya Machida[1], Koichiro Obana[1], Gou Fujie[1] (1. JAMSTEC)

[S06P-07] Construction and Validation of a 3D Multi-parameter Model of the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[2], Ryoichiro Agata[1], Toshiya Fujiwara[1], Gou Fujie[1], Katushiko Shiomi[3], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[3], Takeshi Nakamura[4] (1. JAMSTEC, 2. HKU, 3. NIED, 4. CRIEPI)

[S06P-08] Anisotropic feature of the upper crust beneath Shikoku inferred from the receiver functions

*Katsuhiko SHIOMI[1] (1. NIED)

[S06P-09] Elastic structure and lithification of the upper crust in subduction zones

*Shinichiro Taka[1], Yohei Hamada[2], Arito Sakaguchi[1] (1. Yamaguchi University Guraduate School of Science and Technology for Innovation, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marin-Earth Science and Technology)

[S06P-10] Estimation of 3-D velocity structure beneath Kirishima volcano using seismic tomography

*Youhei YUKUTAKE[1], Yutaka Nagaoka[2], Takao Ohminato[1], Takahiro Ohkura[3] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 3. Graduate School of Science, Kyoto University)

[S06P-11] Characteristics of high concentration REY-rich mud distribution revealed by the distribution of sedimentary layers near Minamitori Is.

*Yuzuru Kaneko[1], Kazuo Nakahigashi[1], Mikiya Yamashita[2], Koichi Iijima[3] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology , 3. Japan Marine Science and Technology Center)

[S06P-12] High-resolution seismic reflection images of the Shatsky Rise, northwest Pacific

*Jin-Oh Park[1], Yue Sun[1], Yu Fan[1], Noboru Yamakawa[1], Yuqi Lyu[1], Ryota Murai[1], Ryoji Toda[1], Yoshiki Horiuchi[2], Kazutaka Yasukawa[3], Junichiro Kuroda[1], Erika Tanaka[4], KH-24-1 Shipboard Science Party[5] (1. AORI, University of

Tokyo, 2. Nippon Marine Enterprises, 3. School of Engineering, University of Tokyo, 4. Marine Core Research Institute, Kochi University, 5. N/A)

[S06P-13] Three-dimensional velocity-structure for hypocenter determination

*Akio Katsumata[1], Nishimiya Takahito[2] (1. University of Toyama, 2. MRI, JMA)

[S06P-14] An explore of crustal reflector based on comprehensive detection of S-wave later phase in Japan

*Takahiro SHIINA[1], Yuta AMEZAWA[2], Jun OGATA[3], Satoru FUKAYAMA[3], Hiroki KURODA[4], Takahiko UCHIDE[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. Artificial Intelligence Research Center, AIST, 4. Nagaoka University of Technology)

[S06P-15] What factors control D1, the magnitude difference between a mainshock and its largest aftershock?

*Akiko TANAKA[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S09. Statistical seismology and underlying physical processes

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S09P] PM-P

[S09P-01] Hypocenter determination of very-micro earthquakes in Showa-Shinzan volcano

*Akiko TAKEO[1], Motoko Ishise[2], Rikuto Kawaike[3], Kiwamu Nishida[1], Hiroshi Aoyama[4], Yosuke Aoki[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Yamaga University, 3. Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

[S09P-02] Recent seismic activity off Fukushima and Ibaraki using S-net data

*Azusa Nishizawa[1], Masashi Mochizuki[1], Kenji Uehira[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S09P-03] Characteristics of the M5.4 earthquake that occurred in western Kanagawa Prefecture, Japan, on August 9, 2024

*Yuki ABE[1], Ryo Kurihara[1], Ryou Honda[1], Yutaka Nagaoka[1], Kazuhiro Itadera[1] (1. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government)

[S09P-04] Shallow Volcanic Swarms near Izu Oshima in 2023

*Hinako Arakawa[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-05] Analysis of seismicity and crustal movement on the eastern side of Izu Peninsula

*Kazuyoshi Z. NANJO[1,2,3,4], Yohei Yukutake[5], Kumazawa Takao[3] (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. University of Tokyo)

[S09P-06] Comparison of 2008-2009 seismic activity and aftershocks in the northern end of the aftershock region of the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Yuya MACHIDA[1], Masanao Shinohara[2], Tomoaki Yamada[2], Kazuo Nakahigashi[3], Toshihiko Kanazawa[4] (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology, 4. Association for the Development of Earthquake Prediction)

[S09P-07] The long-term Noto seismicity revealed by ten-years-long continuous records and a few ten thousand template waveforms

*Moka Sasaki[1], Hironori Kawakata[1], Shiro Hirano[2] (1. Ritsumeikan University, 2. Hirosaki University)

[S09P-08] Estimation of stress field in the northeast Noto Peninsula: Influence of fluid on earthquake occurrence

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

[S09P-09] Long-term fluctuations of b-value around the Noto Peninsula using the JMA earthquake catalog

*Sota Maegawa[1], Toshitaka Baba[1] (1. Tokushima University)

[S09P-10] Shallow tectonic tremor activity in Hyuga-nada from April to July 2023

*Yusuke YAMASHITA[1], Masanao Shinohara[2], Tomoaki Yamada[2], Yukihiro Nakatani[3], Shuichiro Hirano[3], Hiroshi Yakiwara[3], Kazuo Nakahigashi[4], Takeshi Matsushima[5], Yoshihiro Ito[1] (1. DPRI, Kyoto University, 2. ERI, the University of Tokyo, 3. NOEV, Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. SEVO, Kyushu University)

[S09P-11] Automatic analysis of regular and slow earthquakes using DONET and distributed acoustic sensing data in the Nankai Trough, southwest Japan

*Satoru BABA[1], Eiichiro Araki[1], Akiko Toh[1], Ryoichiro Agata[1], Ayako Nakanishi[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S09P-12] Toward Precise Estimation of Stress Drop using DAS Data Recorded in the Central Shikoku, Japan

*Takumi Takahashi[1], Aitaro Kato[1], Ji Zhang[1], Masanao Shinohara[1] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[S09P-13] Exploring Classification Indicators of Seismic Signals Toward Understanding the Causes of Tectonic Tremors

*Akiko TO[1], Aitaro Kato[2], Eiichiro Araki[1] (1. JAMSTEC, 2. ERI Univ. of Tokyo)

[S09P-14] FAMT solutions of earthquakes off the northwest coast of Okinawa island by using a land-ocean unified 3D structure model

*Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[2], Taro Okamoto[3], Mamoru Nakamura[4], Shutaro Sekine[5], Shintaro Abe[5] (1. Okayama Gakuin University, 2. Okayama University, 3. Tokyo Institute of Technology, 4. University of the Ryukyus, 5. Association for the Development of Earthquake Prediction)

[S09P-15] Ocean bottom seismograph and pressure gauge observations in northern Cascadia subduction zone

*Koichiro OBANA[1], Hajime Shiobara[2], Hiroko Sugioka[3], Tsutomu Takahashi[1], Michael Riedel[5], Tianhaozhe Sun[4], Andrew Schaeffer[4], Karen Douglas[4], Michelle Côté[4], Tiegan Hobbs[4], Cooper Stacey[4], Kelin Wang[4], Martin Heesemann[6], Jesse Hutchinson[6] (1. JAMSTEC, 2. ERI, Univ. of Tokyo, 3. Kobe University, 4. Geological Survey of Canada, 5. GEOMAR, 6. Ocean Networks Canada)

[S09P-16] Microseismic activity around East Ongul Island, East Antarctica based on seismic array observations

*Manami HASHIMOTO[1], Masaki KANAO[2], Taishi HASHIMOTO[2] (1. ADEP, 2. NIPR)

[S09P-17] Detection of potential small-scale aseismic slip in the area of small repeating earthquakes

*Toshihiro IGARASHI[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S09P-18] Spatial-temporal variation in the simulated seismicity from multiscale patch model

*Hideo AOCHI[1,2], Takane Hori[3] (1. BRGM, 2. LG-ENS, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. JAMSTEC)

[S09P-19] Swarm-ness Analysis of Low-Frequency Earthquakes in Western Shikoku Using Modified ETAS Model

*Kaito Shimomura[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-20] Magnitude Dependency of ETAS Parameters

*Daichi Ishikawa[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-21] Detection of dynamically-triggered earthquakes using CNN model for seismic phase discrimination

*Kengo SHIMOJO[1] (1. Meteorological Research Institute)

[S09P-22] True b-value Estimation Using Recurrent Neural Network

*Naofumi ASO[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-23] Updating the seismic activity model for background earthquakes in probabilistic seismic hazard assessment

*Nobuyuki MORIKAWA[1], Jun'ichi MIYAKOSHI[2], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

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

Mon. Oct 21, 2024 9:00 AM - 10:15 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S09] AM-1

chairperson:Tomotake UENO(NIED), Shinako Noguchi(Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP))

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S09-01] Evaluation of seismic activity including shallow low-frequency and deep high-frequency events near Hakodate by means of frequency indices

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

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S09-02] Categorization of inland earthquakes in Japan by differential Frequency Index (dFI) and their spatial distribution

*Masahiro KOSUGA[1], Takuto MAEDA[1], Shinako NOGUCHI[2] (1. Grad. School Sci. Tech., Hirosaki Univ., 2. ADEP)

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

[S09-03] Stress field near the fault edges of the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO[1,2], Shinya Kato[4], Kazuhide Tomisaka[3], Masayo Sawada[3], Issei Doi[3], Shunta Noda[5] (1. NPO Abuyama, 2. Tohoku Univ., 3. DPRI, Kyto Univ., 4. ERI, Univ. Tokyo, 5. RTRI)

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

[S09-04] Evaluating earthquake criticality from frequency-magnitude distribution and seismic moment efficiency (2)

*Satoshi MATSUMOTO[1] (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-05] Shear strain energy changes during the seismic activity after the foreshock and the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Tomotake UENO[1], Tatsuhiko SAITO[1] (1. NIED)

Evaluation of seismic activity including shallow low-frequency and deep high-frequency events near Hakodate by means of frequency indices

*Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Kosuga Masahiro[2], Maeda Takuto[2]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. Hirosaki University

地震予知総合研究振興会が設置・運用する地域地震観測網AS-netによって，北海道函館市付近において地殻内の深さ10 kmより浅部で低周波地震と通常地震が混在する地震活動が確認された．この付近には深部低周波地震の活動領域も存在する．この特異な地震活動について詳細な調査を行うことは，低周波地震一般の発生メカニズムの解明や，地殻内地震との関係の解明のためにも非常に重要である．そこで地震予知総合研究振興会と弘前大学は2018年10月から当該地域で臨時地震観測を開始した．本研究では，臨時観測記録による震源再決定を行い，各イベントの周波数特性を定量的指標により評価した結果と合わせて，地震活動のメカニズムを探る．

地震の周波数特性として，低周波地震の検出に用いられる2指標を用いる．いずれも地震記録S波部分のフーリエ振幅スペクトルを用いる．指標のひとつはピーク周波数fpで，振幅スペクトルが最大となる周波数である．もうひとつは周波数指標FI（Frequency Index）で，スペクトル振幅のうち高周波数帯域の平均値を低周波数帯域のそれで割って対数をとったものである．対象イベントは，函館付近の浅部・深部の活動領域を含む領域で2018年10月から2022年8月に発生したすべての地震とする．

得られたfpとFIを比較したところ，fpが小さい（低周波数側である）イベントではFIも小さくなった．これは，同指標を用いて日本全国の地殻内で低周波地震の検出を行ったNakajima and Hasegawa (2021)の結果と同様である．Nakajimaらはfp < 4 HzかつFI < -0.75を低周波地震としているが，本研究で地震波形の特徴から目視により低周波地震と判断された浅部イベントのうち約半分，深部イベントの一部はこの基準から外れる結果となり，低周波地震としての特徴が必ずしも顕著ではないことを示している．

臨時観測による震源分布を用いてfpおよびFIの分布をみると，浅部の活動域では，fpおよびFIの大きなイベント（通常地震）が，そうでないイベント（低周波地震）と極めて近いものの，棲み分けた分布となった．この通常地震は，観測波形が酷似する繰り返し地震を含み，それらはほぼ同じ場所で発生したとみられる．この領域の通常地震の繰り返しは2015-16年にも発生し，こちらはYoshida et al. (2020)により地殻流体の関与が示唆されている．

一方，深部低周波地震活動では，fpやFIが大きく通常地震に近いイベントがいくつか検出された．これらの多くは深部の活動領域の最上部で発生したとみられるが，深部イベントは連続発生することもあり震源位置の不確実性が高い．深部高周波イベントは波形も通常地震に近く，震動継続時間も低周波イベントより短かった．また，初動付近は高周波数成分が強く，その後はより大振幅の低周波数成分が卓越するイベントもみられた．そのようなイベントは浅部活動域には存在しなかった．

深部でも低周波イベントと高周波イベントが発生するということは，深部の活動でも流体の関与が考えられる．ただし深部イベントの観測記録は浅部イベントと異なる伝播経路の影響を受けており，従来のFI等を用いて両者の単純な比較はできない．とはいえ深部にもかかわらず明らかに高周波の地震波が出ているのは間違いなく，その発生メカニズムについて，今後，発生深度の精度向上や伝播経路の影響の検討などを通して追求していく方針である．

謝辞

本研究では，気象庁，防災科学技術研究所，北海道大学，東北大学および青森県による地震観測データを使用しました．記して感謝いたします．

参考文献

© The Seismological Society of Japan

Nakajima, J. and A. Hasegawa, (2021), Prevalence of shallow low-frequency earthquakes in the continental crust. J. Geophys. Res., 126, e2020JB021391.
Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi and K. Kasahara (2020), Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, Geophys. J. Int., 223(3), 1724-1740.

© The Seismological Society of Japan

Categorization of inland earthquakes in Japan by differential Frequency Index (dFI) and their spatial distribution

*Masahiro KOSUGA[1], Takuto MAEDA[1], Shinako NOGUCHI[2]

1. Grad. School Sci. Tech., Hirosaki Univ., 2. ADEP

1. はじめに

最近，地震波の周波数特性を表すFrequency Index（FI）を用いて低周波地震の識別が行われるようになったことで，日本列島内陸での浅部低周波地震の発生状況が明らかになり，地殻深部も含めた低周波地震全般の発生メカニズムについての研究が進んだ．FIは地震波のスペクトル振幅から求められるので，震源スペクトルの特性や伝播経路の減衰構造の影響を受け，地震のマグニチュード（M）や震源距離に依存する．そのため，FIの空間分布についてはほとんど議論されてこなかった．

一方，震源スペクトルのモデルや応力降下量とコーナー周波数の関係式等を用いると，Mと震源距離に対応する理論的なFIを求めることが可能である．片山・他（2024）は日本海東縁部を対象に，観測FIと理論FIの差（本論ではdifferential FI, dFIと述べる）の空間分布を求めた．ここでは日本列島内陸下の地震を対象に，dFIの深さ分布を基に地震をカテゴリーに分け，各カテゴリーの地震の空間分布について議論する．

2. データと方法

観測FIは，気象庁によって低周波地震のフラグ付けがなされた全国の地震，およびその周辺で発生したM1–4の浅発地震（通常地震）に対して求めた．スペクトルを求める時間ウィンドウはS波到達の0.26 s前からの2.56 s間とし，低周波側は2–4 Hz，高周波側は10–20 Hzの周波数帯域を用いた．波形はHi-net観測点でのデータを用い，S波振幅とP波到達前の波動の振幅比で定義したS/N比が2以上の場合に，水平２成分の平均FI値を求めた．次に，それぞれの観測点で理論FIを計算し，観測値との差をdFIとした．最後に，観測点平均したdFIを地震のdFIとした．

理論FIを求めるには，震源および観測点周辺における均質無限媒質の仮定の下での平均S波速度，応力降下量，Q値を仮定する必要がある．これらの値を，通常地震に対する観測FIと理論FIの残差二乗和が最小になることを条件に，グリッド・サーチにより領域ごとに推定することを試みた．対象領域は，北海道，東北，関東・中部，近畿・中国，九州とした．推定すべきパラメータ間にはトレードオフがあることがわかったので，S波速度の範囲を狭めてパラメータを推定した．推定された応力降下量は東北地方で大きく，関東・中部および九州で小さく，Q値は近畿・中国と九州で大きいといった特徴が見られた．推定されたパラメータを用いて求めたdFIは，震源距離と地震のマグニチュードには依存しないことが確認できた．

3. dFIの空間分布

dFIの深さ分布には地域差があるが，大まかな特徴は共通することがわかった．その分布の特徴から，ここでは地震を4つのカテゴリーに分類した．

(1) カテゴリー１は浅発地震で，特定のdFIと深さの範囲にデータが集中している．dFIの上限はある深さまで上昇し，ピークに達した後は減少し，その形は地殻内の岩石の強度分布を連想させる．dFIの下限は深さとともに上昇し，Q値の深さ依存性を反映していると考えられる．

(2) カテゴリー２はカテゴリー１よりも深部の，いわゆる深部低周波地震である．

(3) カテゴリー３は浅部低周波地震で，カテゴリー1の下限よりもさらに低いdFIをもつ地震群である．カテゴリー1のdFIの下限が明瞭であることから，カテゴリー1と３の地震の発生メカニズムは異なることが示唆される．

(4) カテゴリー４は深部低周波地震の深さ範囲にあるがそれほど低周波ではなく，深部高周波地震とでも呼ぶべき地震群である．このカテゴリーの地震は多くないが，全国的に分布することが明らかになった．

地域ごとの違いとしては以下のようなことが挙げられる．カテゴリー1のdFIの上限がピークとなる深さは，北海道では深く，関東・中部では浅い．また，低周波地震が集中する領域が，関東・中部では深さ10–20

© The Seismological Society of Japan

km，近畿・中国では深さ25–35kmにある．一方，九州では特に低周波が卓越する地震は少ない．

震源分布については，カテゴリー1の低周波の地震は，2014年長野県神城断層地震，2016年鳥取県中部地震の震源域や，定常的に地震活動が活発な和歌山などに多く分布する．また，規模の大きな地震が発生した地域では高周波の地震も多いことから，発生する地震の周波数範囲が広いように見える．このように，地震波の周波数特性が地震活動と対応する例が見つかってきた．

4. おわりに

今回はdFIの深さ分布から地震を4つのカテゴリーに分類し，各カテゴリーの地震の空間分布を概観した．分類した地震の分布が，地震波速度構造，重力，地質構造等とどのように対応するかは今後の検討が必要であるが，地震波の周波数を考慮して地震活動が議論できるようになったことから，地震活動の物理的背景についての研究の進展が期待される．

謝辞：本研究では気象庁一元化処理の検測値と震源要素，防災科学技術研究所Hi-net観測点の波形データを使用した．以上の機関に謝意を表する．

© The Seismological Society of Japan

Stress field near the fault edges of the 2017 Southern Nagano Prefecture earthquake (Mj5.6)

*Yoshihisa IIO[1,2], Shinya Kato[4], Kazuhide Tomisaka[3], Masayo Sawada[3], Issei Doi[3], Shunta Noda[5]

1. NPO Abuyama, 2. Tohoku Univ., 3. DPRI, Kyto Univ., 4. ERI, Univ. Tokyo, 5. 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1~5kmで発生した逆断層型の地震である。断層の上端付近では、Vp/Vsの小さい顕著な低速度異常域が推定されていた(Doi et al.,2013)。
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おり(Iio et al., 1999)、2008年には満点地震計が追加された。満点観測網は、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。昨年秋の学会において、得られた大量の高精度の地震メカニズム解から断層周辺の応力場を推定し、余震域の北側、断層の北端付近で横ずれ型の余震が多い理由として、摩擦係数が小さい可能性を指摘した。今回は、上下の端付近の地震前の応力場について議論する。

2. 結果

最初に、M5.6の断層面を出来るだけ正確に推定した。稠密観測網によるメカニズム解の節面と平行な面の中で、余震の震源との距離の二乗和が最小となる面を求めた。次に、その面上において、矩形を仮定して断層面の大きさ、位置と向きを、下記の3通りの方法で推定した。i) 断層端に余震が集中するように手動で推定、ii) 断層端から余震の震源までの距離の和が最小となるように推定、iii) 断層直交方向も含めて断層面内の余震数と断層端の位置の関係を折れ線でfitした折れ曲がり点から推定。これらの方法で推定した断層面と断層端が、応力逆解析における解析領域の端になるように、各解析領域を設定して、応力場を推定した。M5.6の発生後、いずれの結果においても、断層の上下の端付近において、最大主応力の傾斜角が水平から回転することが見いだされた。一方、断層面内付近においてはそのような回転は見られず、安定した方位分布が見られた。
M5.6のすべり分布と初期応力を仮定して地震後の応力場の再現を試みた。その結果、断層の上下の端付近において地震前に差応力が非常に小さくないと、上記の主応力の回転を再現できないことが分かった。また、地震前には、断層付近において、このような主応力の回転は見られなかった。断層の上端付近においては、上記のように、顕著な低速度異常域が推定されていたが、M5.6の発生前に、断層の上下の端付近において、応力緩和が発生していた可能性が考えられる。あるいは、この断層の上下の延長部が存在した場合には、その部分の断層強度が小さかった可能性も考えられる。

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

Evaluating earthquake criticality from frequency-magnitude distribution and seismic moment efficiency (2)

*Satoshi MATSUMOTO[1]

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

マグニチュードと地震発生頻度の関係はグーテンベルグ・リヒター則におおむね従い，そのべき定数 b 値は時間空間的に変化することが多く報告されている．特に，b値は地殻中の差応力に逆比例する結果が得られている．Matsumoto et al.（2024）は高精度の発震機構解をもとにして，応力状態を示すモール円上に多数の地震をプロットし，その区分ごとにb値をもとめて，その場応力臨界状態に近づくとb値が小さいこと（規模の大きい地震が発生する）を示した．すなわち，b値は差応力と臨界状態に関係していることが明らかになった．
松本（2023）で示したように，多様な地震モーメントテンソルを足し合わせと個々の地震モーメントの和の比（地震モーメント比，Mst,/M0）を通してみる．弾性ひずみは主応力と45度をなす最大せん断方向の面で滑りが発生するとき最も“効率的”にひずみエネルギーが解放され，比は1になる．既存の亀裂が非最適面でかつ流体圧が高い場合，モーメント比は徐々に低下する．これは，モール円で考えると円の頂点に近い場合高く，内側に入ると低下することに対応する．ここから，地震で解放されるモーメントと解放される非弾性ひずみの比は地殻の臨界状態を示していると考えられる．
そこで本研究では，差応力と臨界状態に関係するb値とモーメント比の大地震前後における時間変化，さらに地震による非弾性変形レートを見ることで地震発生臨界度の評価を試みる．2016年熊本地震発生前10年間と本震発生後およそ3年間の発震機構解（Mitsuoka et al.（２０２２））と気象庁一元化カタログから得た震源データを用いた．震源域ではb値の小さい領域がみられたことは従来の研究で指摘されている．震源を含む深さ（10−20㎞）レンジでみると，最大前震発生前はおおむね誤差範囲で一定の値を持つ．本震発生後，b値やMst,/M0は大きくばらつくが，非弾性ひずみ速度が安定するとある一定値に落ち着く様子が見られる．地震断層付近では，震源領域で地震前に低b値，高Mst,/M0をとり，臨界状態であることが示されている．前後を見てみると，b値は大きくは変化していないがMstk/M0は低下している．そのほかのb所では地震前後でb値が上昇もしくは変化せず，Mstk/M0は低下する傾向がある．地震断層外では領域によって異なる．断層南部では地震前から低b値であったが地震後も変わらず，Mst,/M0が上昇する領域がみられた．北部や西部ではb値上昇もしくは変化なし，Mst,/M0低下もしくはほぼ変化がない．一方ひずみレートは上昇しており，活動の活発化がみられた領域もある．これら多様な様相は地震による応力変化だけではなく，流体圧上昇による強度低下に起因すると考えられる場合もあり，地震活動を分析するうえで重要な情報が得られることが示唆される．

© The Seismological Society of Japan

Shear strain energy changes during the seismic activity after the foreshock and the main shock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Tomotake UENO[1], Tatsuhiko SAITO[1]

1. NIED

地震活動の活動度は地震発生数や地震発生レート（例えば*Knopoff et al.*, 1996），積算モーメント解放量やその増加率などでも評価され（例えば*Savage and Simpson*, 1997)，断層運動などによる応力変化との関係性が指摘されている（例えば*King et al.*, 1994）．そこで，我々は応力や歪から推定されるせん断歪エネルギー変化量で地震活動を評価する試みを行う．本研究では2016年熊本地震に着目し，前震発生後から本震発生前までの地震活動（前震の余震）と本震後7年間の地震活動（余震）についてせん断歪エネルギーを求め，その変化量と空間分布の特徴を明らかにする．

地震を引き起こす原動力は弾性リソスフェアのせん断応力であり，地震活動を定量化するためには，地震活動によってリソスフェアから失われるせん断歪みエネルギーを調べることが重要である．地震発生によるリソスフェアのせん断歪みエネルギーの変化量を見積もるためには，断層運動に加え，背景応力場が必要である．本研究では，背景応力場の応力の主軸方向と応力比，そして，差応力を100MPaと仮定した．また，熊本地震の前震 (M_W 6.1)，本震 (M_W 7.1)の断層として，一様すべりの矩形断層を仮定した．前震の余震（24イベント）や本震の余震（240イベント）は，F-netモーメントテンソル解をもとに断層を設定した。

見積もったせん断歪みエネルギー変化は，前震，前震の余震，余震は~－10^{15} J程度，本震は~－10^{16} Jであり，本震以外のせん断歪みエネルギー変化量は，本震の1割程度であった．なお，前震の余震によるせん断歪エネルギーの変化量は前震と同程度であり，これは2016年熊本地震の前震活動の特徴である．また，前震活動のせん断歪エネルギー変化の空間分布は，前震と似たような分布となった．これは前震の数時間後に発生したMw6.0の地震の影響であると考えられる．一方，本震と余震のせん断歪エネルギー変化の空間分布は見かけ上似ていない．このように，せん断歪エネルギー変化の空間分布の特徴は前震の余震と余震で大きく異なる．また，前震，本震のせん断歪エネルギー変化の空間分布とそれぞれの余震活動の震源分布を比較すると，断層から離れ，せん断歪みエネルギーが増加している領域で地震数が多いことも確認でき，*Noda et al.* (2020)の結果とも調和的であった。ただし，前震の余震活動によって前震のせん断歪エネルギー変化を解消していない．これらのことを総合的に解釈すると，せん断歪エネルギー変化に与える影響が小さい地震が，前震のせん断歪エネルギー変化の増加域で多く発生していることが考えられる．そして，2016年熊本地震の一連の活動が開始する前に蓄えられていた歪エネルギー量が，前震やその余震活動では解消しきれず，本震が発生したと考えられる．

© The Seismological Society of Japan

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

Mon. Oct 21, 2024 10:30 AM - 11:45 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 1:30 AM - 2:45 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S09] AM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Tatsuhiko Saito(NIED)

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

[S09-06] Mechanically coupled areas in the Nankai Trough: Historical earthquakes, long-term slow slip events, and possible future earthquakes

*Tatsuhiko SAITO[1], Akemi Noda[2] (1. NIED, 2. JMA)

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

[S09-07] Seismic activity in the transition zone between the ordinary earthquake and shallow slow earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan

*Issei Hirata[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[1], Yukihiro Nakatani[3], Shuichiro Hirano[3], Hiroshi Yakiwara[3], Kazuo Nakahigashi[4], Kentaro Emoto[1], Satoshi Matsumoto[1], Shukei Oyanagi[2], Yoshihiro Ito[2], ChingYu Hu[5], Tomoaki Yamada[5], Masanao Shinohara[5] (1. Kyushu University, 2. Kyoto University, 3. Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. The University of Tokyo)

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

[S09-08] Spatio-temporal variation of the aftershock activity following the 2021 and 2022 intraslab earthquakes in off-Fukushima prefecture

*Ryo Osawa[1], Ryota Hino[1], Keisuke Yoshida[1] (1. Tohoku university)

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

[S09-09] Hypocenter Distribution and Migration preceding the 2021 M6.0 Ibaraki-Oki Earthquake Based on S-net Data

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Naoki Uchida[1], Ryota Hino[1] (1. Tohoku University)

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

[S09-10] Trial of hypocenter relocation using a new 3-D seismic velocity model around the Nankai Trough

*Katsuhiko SHIOMI[1], Makoto MATSUBARA[1], Ayako NAKANISHI[2], Gou FUJIE[2], Shoji SEKIGUCHI[1] (1. NIED, 2. JAMSTEC)

Mechanically coupled areas in the Nankai Trough: Historical earthquakes, long-term slow slip events, and possible future earthquakes

*Tatsuhiko SAITO[1], Akemi Noda[2]

1. NIED, 2. JMA

力学に基づき多様な大地震を想定する研究開発に取り組んできた．例えば，相模トラフにおける応力蓄積域を力学的固着パッチとしてGNSS解析によって同定し，元禄・大正関東地震とスロースリップのすべり分布モデルを構築した．そして，これらイベントの力学的固着パッチへの影響を考慮したうえで，将来起こりうる大地震の破壊シナリオとして６つのすべり分布モデルを構築した (Saito & Noda 2023 BSSA)．南海トラフにおいては，力学的固着パッチを同定したものの (Noda et al. 2018 JGR, Noda et al. 2021 JGR; Saito & Noda 2022 JGR)，歴史地震活動および長期的スロースリップイベントが力学的固着パッチに与える影響の定量評価は未完であった．そこで本研究では，南海トラフにおける歴史地震，長期的スロースリップイベントのすべり分布モデルを構築，力学的固着パッチに与える影響を評価したうえで，今後起こりうる大地震のすべり分布モデルを構築する．

GNSS解析による力学的固着域推定の解像度は海域で低下する．そのため，本研究では，スロースリップや浅部微動の発生域を考慮することで，力学的固着の位置と空間の拡がりを設定した．具体的には歴史地震のセグメント構造から５つのパッチ（室戸沖(Mu), 紀伊半島沖(Ki), 熊野灘(Ku), 遠州灘(En), 東海 (To)）を，豊後水道長期的スロースリップに対応するパッチ(Bu)を設定した．その後，GNSSデータのインバージョン解析によって，それぞれのパッチの応力蓄積速度を推定した．

得られた力学的固着モデルを使って，長期的スロースリップイベント，歴史地震，および，今後起こりうる大地震の破壊シナリオとしてすべり分布モデルを構築する．豊後水道のパッチ(Bu)へ蓄積される6年間ぶんの応力を解放することで，豊後水道スロースリップイベントの規模Mw 7を再現できる．また，パッチ (Mu, Ki, Ku, En, To) への応力蓄積を歴史地震の発生履歴から見積もり，５つの力学的パッチの連動パターンから多様な断層破壊を想定する．特に，パッチMu-Ki-Ku-Enの連動破壊によって1707年宝永地震を, Ku-En-Toにより1854年安政東海地震を，Mu-Kiによって1854年安政南海地震を，Ku-Enによって1944年昭和東海地震 (Mw 8.1)を，Mu-Kiによって1946年昭和南海地震 (Mw 8.4)のすべり分布モデルを作成した．比較的高い信頼度で推定されてきた昭和東南海・南海地震のすべり分布およびモーメントマグニチュードを，本研究で提案する手法によっておおよそ再現することができる．この手法では，すべりが起こる範囲を設定する必要がある．すべりが海溝まで達するとした場合，達しない場合と比べ，モーメントマグニチュードがおよそ0.1から0.2程度大きくなる．

さらに，2026年時点で蓄積されている応力蓄積量を見積もり，この応力解放によって起こりうる大地震を合成した．５つの力学パッチが全て破壊する場合 (Mu-Ki-Ku-En-To，Mw 8.44), 安政東南海地震型（Ku-En-To, Mw 8.14），南海地震型（Mu-Ki, Mw 8.31）の破壊シナリオを含む大地震の破壊シナリオを提案することができる．

今後，昭和・安政地震の地震記録・津波記録等を利用し，力学的固着モデルの検証を行えるようにすることが重要である．また，将来的に海域GNSS観測点が増えれば，より直接的な検証と改良を期待できる．

© The Seismological Society of Japan

Seismic activity in the transition zone between the ordinary earthquake and shallow slow earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan

*Issei Hirata[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[1], Yukihiro Nakatani[3], Shuichiro Hirano[3], Hiroshi Yakiwara[3], Kazuo Nakahigashi[4], Kentaro Emoto[1], Satoshi Matsumoto[1], Shukei Oyanagi[2], Yoshihiro Ito[2], ChingYu Hu[5], Tomoaki Yamada[5], Masanao Shinohara[5]

1. Kyushu University, 2. Kyoto University, 3. Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. The University of Tokyo

日向灘はユーラシアプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込んでいる領域で，通常の地震とスロー地震の両方が発生している．プレート境界地震が発生する深さ15-30 km の地震発生層のdown-dip側では長期的スロースリップが，up-dip側では浅部テクトニック微動や浅部超低周波地震が発生していることが測地観測や地震観測研究により，ここ10年の間で明らかとなっている．通常の地震については気象庁一元化震源カタログがあるが，日向灘で発生する地震は陸上観測点のデータのみで解析しているため，震源決定精度は低く，特に深さの詳細な分布は得られていない．そこで，2021年から2022年にかけて，日向灘の浅部スロー地震と通常の地震の発生領域境界部において，それぞれの現象がどの場所で発生しているのかを明らかにするため，海底地震計を用いた直上観測が行われた．
平田・他(2024, JpGU)では，この観測データを用いて，本研究領域で実施された地震波構造探査(Arai et al., 2023)の結果をもとに作成した一次元速度構造を使用し，一次元速度構造と観測点ごとの走時の系統的なずれを補正するために観測点補正も行ったうえで，気象庁一元化カタログに掲載されている通常の地震の震源再決定と発震機構解析を行い，震源分布や発震機構解の特徴について報告を行った．その結果，地震のクラスターが気象庁一元化震源と比較して水平方向で北西(陸の方向)に約10 km 異なる位置に決められたこと，それらが深さ15 km 付近に集中することを示した．しかし，クラスターを含め，対象としていた地震のほとんどが観測網の外側で発生していることが明らかとなり，観測点配置に依存していると見られる震源分布が得られるなど，得られた結果の解釈および議論には限界があった．
海底観測網の外側に決められた震源の絶対的な位置の精度を少しでも向上させ，発震機構解を精度良く求めるためには，震源に対して観測網のカバレッジを向上させることが重要である．そこで，これまで使用していた海底地震計のデータに加えて宮崎県沿岸の陸上地震観測点も使用し，現時点で使用可能な三次元速度構造を用いたdouble-difference法による震源決定を行うとともに，三次元速度構造を用いて計算された射出角を使って発震機構解析を行うこととした．陸上観測点は宮崎県南部沿岸の気象庁，防災科学技術研究所，九州大学，京都大学，鹿児島大学の10点を使用し，宮崎県沿岸部～海底地震観測網の間の領域で海底観測期間中に発生したM0以上の地震を気象庁一元化震源カタログから抽出して解析に用いる．対象となったイベント数は既に海底地震計のみで解析を行っていたイベント83個を含む408個である．陸上観測点のP波，S波の読み取り値は，気象庁の検測値がある観測点はそのまま使用した．大学独自の観測点においては，京都大学防災研究所宮崎観測所による読み取り値があれば使用し，ない場合は新たに読み取りを行った．海底地震観測点については読み取りが確実に行える観測点でのみ読み取りを実施した．初期震源の計算にはhypoMH(Hirata and Matsu’ura, 1987)を用い，三次元速度構造での震源計算にはtomoDD(Zhang and Thurber, 2003)を用いた．本発表ではこれらの結果を紹介するとともに，地震活動の特徴およびスロー地震と通常の地震の関係性についてについて考察と議論を行う予定である．

謝辞：本研究は文部科学省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」および文部科学省「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）」の一環として実施されました．解析には気象庁一元化震源カタログおよび検測値を利用しました．海底地震計の設置・回収は長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」および海洋エンジニアリング株式会社所属「第三開洋丸」によって行われました．両船の船

© The Seismological Society of Japan

員の皆様ならびに乗船された京都大学，九州大学，鹿児島大学，東京海洋大学，東京大学の皆様に感謝の意を表します．また，海洋研究開発機構の新井隆太博士には2020年の日向灘の地震波構造探査の測線データを提供していただきました．以上の方々に心より御礼申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal variation of the aftershock activity following the 2021 and 2022 intraslab earthquakes in off-Fukushima prefecture

*Ryo Osawa[1], Ryota Hino[1], Keisuke Yoshida[1]

1. Tohoku university

2021年2月13日、福島県沖の太平洋スラブで大地震（M7.3）が発生し、東北地方の広い範囲で強い揺れによる被害が発生した。その2021年の地震から約1年後の2022年3月16日には、2021年の地震の北側で再び大きなスラブ内地震（M7.4）が発生し、福島県と宮城県で再び大きな被害が発生した。これらの地震は、2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）の破壊領域の南縁に沿って発生し、東北地方全域に大きな地震後変形をもたらした。
本研究は、これら2つの地震の破壊領域周辺のスラブ内地震活動をより包括的に明らかにすることを目的とする。そのために、東北地方太平洋沖地震以前から最近までの長期にわたる地震の時空間分布を解析し、隣接して連続する2つの巨大なスラブ内地震の相互作用を検討する。また、巨大地震がスラブ内の地震活動に及ぼす影響についても議論する。
対象とする地震は気象庁一元化カタログに掲載されているM2以上の地震で、2003年3月から2023年6月までのものである。震源は波形相関を用いたDouble-difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2000) によって再決定した。再決定した震源に対して、DBSCAN (Ester et al. 1996) を用いてクラスター分析を行い、面的な形状を形成する震源の密集したクラスターを同定した。その際に、1回目の本震後から2022年の2回目の本震前の地震を「2021年地震の余震」、2回目の本震後の地震を「2022年地震の余震」と定義し、この2つのデータセットを個別に用いてクラスター分析を行い、それぞれの余震活動から面的なクラスターを抽出した。
「2021年地震の余震」を対象とした分析から4つの面的クラスターが、「2022年地震の余震」から2つの面的クラスターが定義された。これらのクラスタのそれぞれを近似する平面を定義して、これらを複数の断層面とみなすことにより、断層上での地震活動の特徴を調べた。クラスタ分析の対象とした期間外の地震も含めて、断層ごとに、それぞれに沿って発生した地震のカタログを作成した。その結果、2022年M7.4の本震震源（破壊の開始点）を含む断層沿いの地震は、2021年M7.3の地震が発生した直後から活動を始めていたことがわかった。2022年の地震発生までの期間での活動は、断層面上でも2021年の本震の破壊域に近い南側領域に限られ、2022年の本震震源近傍の狭い範囲での活動が持続していたことが特徴である。2021年M7.3震源断層上でも、本震発生直前のおよそ1ヶ月前から地震が複数回発生していた。しかし、2022年M7.4地震の発生前に見られたような、破壊の開始点周辺での集中的な前駆的活動を確認することはできなかった。
この領域のスラブ内では、2011年の東北沖地震発生直後から地震活動は活発化したが、本研究で抽出された2021・2022年の地震に伴って活動した断層に沿った震源の集中は、2021年M7.3地震の発生以前には見出されなかった。

© The Seismological Society of Japan

Hypocenter Distribution and Migration preceding the 2021 M6.0 Ibaraki-Oki Earthquake Based on S-net Data

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Naoki Uchida[1], Ryota Hino[1]

1. Tohoku University

茨城県沖プレート境界では，M6-7クラスの地震に先行して，度々前震活動が観測されている (例えば，Nishikawa & Ide, 2018)．2021年8月4日のM 6.0 地震についても，発生の約1日前から前震活動を確認できる．気象庁一元化震源によると，前震活動は，上盤プレート内とプレート境界付近にわかれて分布している．しかし，震央位置が最寄りの観測点から約20 km離れており，震源決定誤差が大きいために、この分布は実状を表していない可能性がある．東北日本の沖合では， 2016年からS-net観測網による海底地震計のデータが利用可能になり，2020年以降の気象庁一元化震源にも利用されている．しかし，S-netデータによりどの程度震源決定精度が向上したのかを詳細に評価した先行研究は少ない．本研究では，最初に S-net データによる震源決定の信頼性を検証したのち，相対震源決定により震源分布の信頼度を向上させ，2021年M6.0茨城県沖地震をトリガーしたメカニズムを調べる．

震源決定の不確定性の評価には相似地震を利用した．相似地震を抽出するために，対象領域に近いHi-net観測点 (N.TYOH) の観測波形の相互相関を計算した．2003/03/08 –2024/3/31に発生したイベントを対象に，2-5 Hzバンドパスフィルターを適用した28秒間の上下動成分の波形を用いて，相互相関係数が 0.98 以上を満たすペアを相似地震とみなし，グルーピングした．計算の結果，20個のイベントを含む相似地震グループを特定し，それらについて，S-net データを用いて推定した観測点補正値 (Matsumoto et al., 2024JpGU) を使用した震源決定を行った．その結果，S-netデータが使用できない相似地震の震源は，東西方向に約20 km広がり、深さ方向には10 –70 km の範囲に散らばった分布を示した．震源決定時の残差に基づき，観測点分布の違いによる震源の不確定性を調べたところ，S-net データが使用できない期間の地震については，震央の東西の抑えが効かず，深さに関してはほとんど拘束できないことがわかった．一方，S-net データを用いたイベントについては，震央位置を5 km以下に拘束できた．しかしながら，最寄りのS-net観測点からおよそ20 km離れるため，この場合にも，震央に比べて深さの不確実性が大きい (約20 km)結果が得られた．

震源の相対位置の精度を向上させる目的で，S-net データが利用可能な期間の地震 (2020/9/1 - 2024/3/31のM≧1.5の3021イベント)を対象に DD法 (Waldhauser & Ellsworth, 2000) による震源決定を行った．この結果，気象庁一元化震源で二つのクラスターに分かれていた震源は，プレート境界に平行な一枚の面上に集中した．これらの地震のF-netのメカニズム解は低角逆断層型を示し，節面と震源の並びから，各地震がプレート境界上で発生したことが示唆される．震源再決定後，近くに位置するイベントペア間の距離と観測波形の相互相関係数の間の相関もより明瞭になった．このことも，DD法により震源間の相対位置精度が向上したことを支持する．

2021年M6.0茨城沖地震の約30時間前から発生した前震活動もプレート境界に沿って分布しており，その活動は本震震源から約 7km updip側から始まり，その後本震震源の方に向かって拡大した．この震源 migration は，その活動の背後に存在する非地震的なメカニズム（流体移動，非地震性すべり等）を反映している可能性が高い．今回の前震の migration のパターンは，内陸地殻内で発生した鹿児島湾の M5.3地震の前震活動 (Matsumoto et al., 2021)のそれと類似しているが，鹿児島湾でのmigration速度が約 0.1 km/day であったのに対して，今回の前震活動の migration速度は約 10 km/day と約２桁高い．この傾向は，プレート境界の Permeabilityが地殻内断層のそれより遥かに大きいことを意味するのかもしれない．一方，今回得られた速度は，沈み込み帯プレート境界型巨大地震の発生前に観測された地震活動 (例えば，Kato et al., 2012)や，非地震性すべりにより誘発されたと考えられている群発地震活動のそれと類似する (例えば，Lohman & McGuire, 2007)．Nishikawa et al. (2023) は，2021年茨城沖地震の前震活動に先行する短期的 SSE や tectonic tremor を検出している．断層すべりと高圧流体の拡散が相互作用する可能性があり (Yamashita et al., 2017)，非地震性すべりの伝播や流体移動，あるいはその両方が2021年茨城沖地震の前震震源migrationに関与したことが示唆される．

© The Seismological Society of Japan

Trial of hypocenter relocation using a new 3-D seismic velocity model around the Nankai Trough

*Katsuhiko SHIOMI[1], Makoto MATSUBARA[1], Ayako NAKANISHI[2], Gou FUJIE[2], Shoji SEKIGUCHI[1]

1. NIED, 2. JAMSTEC

はじめに

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」（本PJ）において，我々は，南海トラフ及びその周辺で発生する地震の活動状況を迅速かつ精度良く把握出来るようになることを目指し，海域と陸域をあわせた三次元地下構造モデルの構築並びにそのモデルに基づいて自動的に震源位置を推定するシステムの整備を進めている．これまで，主に海域で実施された構造探査結果と海陸の観測データに基づく地震波走時トモグラフィ解析結果を統合，調整することで南海トラフ全域を対象とした新たなＰ波速度構造モデルを構築するとともに，様々なデータに基づく関係式を用いてこのP波速度構造を変換することにより，S波速度構造モデルを推定した．これにより，従来のモデルでは解像が十分でなかったトラフ軸周辺から陸域を含む三次元地震波速度構造のプロトタイプが得られた（例えば、Nakanishi et al., 2024; JpGU）．今回，このモデルを用いて，日向灘及び紀伊半島南東沖を対象とした震源再決定を試行したのでその結果を報告する．

解析方法・データ

本PJでは，防災科研が別途運用する一次元速度構造を用いた自動震源決定システム（Hi-netシステム）の出力をトリガーとして、三次元地震波速度構造を用いた震源再計算を自動的に実施するシステム（本システム）を整備した（汐見・他, 2022; SSJ）．今回の試行は、本システムにNakanishi et al.（2024）の構造モデルを適用し、過去震源再計算機能を稼働させることで実施した．震源計算には，Pseudo-bending法（Koketsu & Sekine, 1998）により走時を逐次計算する方法を用い，日向灘及び紀伊半島南東沖で2003年1月～2024年7月にHi-netシステムによって検知されたM2.5以上の地震を解析対象とした．Hi-netシステムによるこれらの地震の震源位置を初期震源位置とするとともに，Hi-netシステムに登録されている検測値をそのまま震源再計算に用いた．得られた震源再計算結果は，Hi-netシステムによる震源や気象庁一元化震源等との比較検討を行った．

結果・議論

日向灘は，南海トラフ巨大地震想定震源域の中でもっとも地震活動が活発な地域である．本海域において，再決定震源は全体的に初期震源よりも浅くなる特徴が見られた．日向灘北部では，海岸付近で発生する地震の震央がわずかに陸域に移動する傾向が確認された一方，沖合では震央の移動は顕著では無かった．これは四国側の観測点の存在が影響している可能性がある．日向灘南部で発生する地震活動に対し，Hi-netシステムで求めた震源は深さ20～45 kmの範囲にバラついて分布しており，良く求まっていない．再計算の結果，沖合の地震活動の震央は10～20 km陸側に移動するとともに，30 km以深に決まっていた地震は軒並み10～15 km程度浅くなるなど，大きな移動が確認された．

紀伊半島南東沖では，2004年９月5日にMw7.2及び7.5のプレート内地震が相次いで発生し，顕著な余震活動を伴った．Hi-netシステムでは深さ固定で震源決定されるイベントが多かったが，再決定後は深さ15 km付近と40~50 km付近の2層に分かれる傾向を確認した．この地域のOBSを用いた詳細震源決定結果（Sakai et al., 2005）によると，深さ5～15 kmと15~25 kmに地震活動が分布するとされている．この差異については，観測点補正値の設定等を含めた再検討が必要である．一方，2016年4月1日にはプレート境界においてMw5.8の地震が発生した．Hi-netシステムではこの地震の深さを19 kmとしていたが，新しい構造モデルを用いたところ，深さは13 kmに求まった．この震央のプレート上面の深さは11 km程度とされており（Nakanishi et al., 2024），プレート境界型の地震であることと矛盾しない結果となった．

今後は，各地震の震源決定状況の傾向の調査から，得られた震源分布の妥当性の検討を進めるとともに，観測

© The Seismological Society of Japan

点補正値を含む構造モデルの評価も進める予定である．

謝辞：本研究は，文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している．Hi-netシステムでは，気象庁・大学・産業技術総合研究所等の観測データを使用している．また，解析結果の比較検討に気象庁一元化震源カタログを使用した．

© The Seismological Society of Japan

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

Mon. Oct 21, 2024 12:40 PM - 2:40 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 3:40 AM - 5:40 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S20] PM-1

chairperson:Yoshio MURAI(Faculty of Science, Hokkaido University), Yuji YAGI(University of Tsukuba)

12:40 PM - 1:20 PM JST | 3:40 AM - 4:20 AM UTC

[1A11-14-1add] Award ceremony

1:20 PM - 1:40 PM JST | 4:20 AM - 4:40 AM UTC

[S20-01] [Invited]Giant earthquakes of M~9

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

1:40 PM - 2:00 PM JST | 4:40 AM - 5:00 AM UTC

[S20-02] [Invited]Dynamic processes of ocean plate uncovered by active-source seismology

*Shuichi KODAIRA[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

2:00 PM - 2:20 PM JST | 5:00 AM - 5:20 AM UTC

[S20-03] [Invited]Diverse Machine Learning Approaches for Earthquake, Strong Ground Motion, and Crustal Deformation Analyses

*Tomohisa OKAZAKI[1] (1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project)

2:20 PM - 2:40 PM JST | 5:20 AM - 5:40 AM UTC

[S20-04] [Invited]Statistical Seismological Study on the Activity of Earthquakes and Slow Earthquakes in Subduction Zones

*Tomoaki NISHIKAWA[1] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S20] PM-1

chairperson:Yoshio MURAI(Faculty of Science, Hokkaido University), Yuji YAGI(University of Tsukuba)
Mon. Oct 21, 2024 12:40 PM - 2:40 PM Room A (International Conference Hall (4F))

12:40 PM - 1:20 PM

[1A11-14-1add]Award ceremony

©Seismological Society of Japan

[Invited]Giant earthquakes of M~9

*Kenji SATAKE[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

１． はじめに
20年前の2004年12月にスマトラ・アンダマン地震（Mw 9.1）が発生し，この地震による津波はインド洋沿岸諸国で犠牲者数が約23万人という史上最悪の津波被害を生じた．それまではM8級の地震しか知られていなかったインド洋でM9級の超巨大地震が発生したことは，世界中の地震学者にとって大きな驚きであった．その後，2011年には東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）が発生し，これもまた日本の地震学者にとっては想定外であった．本講演では，M9級の超巨大地震に関する研究について振り返ってみたい．
M9級の超巨大地震の存在はKanamori(1977 JGR)によるモーメントマグニチュードMwの導入によって明らかになった．以下で述べる20世紀の超巨大地震について，Msはすべて8.5以下であり，発生当時には超巨大地震とは認識されていなかった．

2．20世紀のM９級地震
2.1 1960年チリ地震(Ms 8.3, Mw 9.5)
震源域の長さは約800 kmで20世紀最大の地震とされているが，その規模(Mw)は，地震波（地球自由振動を含む）から9.5～9.6程度なのに対して，地殻変動データからは9.1～9.3程度，地殻変動と津波データからも9.2～9.3程度とやや小さく推定されている（Kanamori et al. 2019 GJI; Ho et al. 2019 JGRなど）．歴史記録によれば，この地域では1575年，1737年，1837年にも巨大地震が発生しているが，津波堆積物の調査から，1575年の地震のみが1960年と同程度の規模であり，超巨大地震は約300年の繰り返し間隔で発生している（Cisternas et al. 2005 Nature）．

2.2 1964年アラスカ地震（Ms 8.4, Mw 9.2）
地震波（Kanamori 1970 JGR）からの推定値Mw 9.2は，地殻変動と津波（Johnson et al. 1996 JGR）からの値Mw 9.1とほぼ等しい．長さ500 km以上の震源域内の二つの大すべり域（アスペリティ）では，平均18 mと10mのすべりが推定されている．

2.3 1957年アリューシャン地震(Ms 8¼, Mw 8.6)
約1200 kmという余震域の長さからMw 9.1とされていたが，地震波・津波の解析からはMwは8.6, すべりのほとんどは震源域西側500 kmに集中し，最大すべりは7mと推定された(Johnson et al. 1994 Pageoph)

2.4 1952年カムチャツカ地震(Ms 8¼, Mw 9.0)
自由振動・長周期地震波から震源域の長さ600km，Mw 9.0とされている（Kanamori 1976 PEPI）が，津波波形からは長さ500km，最大すべり11m，Mw 8.8と推定された (Johnson and Satake 1999 Pageoph).

3．歴史記録・地質痕跡から探るM9級地震
3.1 1700年カスケード地震
北米北西部のカスケード沈み込み帯では巨大地震の発生は知られていなかったが， 1990年頃からの古地震学的研究によって地質学的な痕跡が発見され，平均繰り返し間隔は約500年，最新の地震は約300年前に発生したことが明らかになった(Atwater et al. 2005 “Orphan Tsunami”)．最新の地震によって生じた津波は，日本の歴史文書に記録されており，津波シミュレーションとの比較から，地震の発生時（1700年1月26日）と規模（Mw 8.7～9.2）が推定された(Satake et al. 1996 Nature).

3.2 17世紀の北海道東部地震

© The Seismological Society of Japan

千島海溝ではM8クラスの巨大地震が繰り返し発生しているが，北海道の太平洋岸沖における津波堆積物調査から，17世紀に超巨大地震が発生していたことがわかった(Nanayama et al. 2003 Nature)．この地震は，十勝沖・根室沖のプレート境界が連動し，さらに海溝軸付近で大きなすべりを持つ，Mw 8.8程度とされている(Satake et al. 2008 EPS; Ioki and Tanioka 2016 EPSL)．津波堆積物を残すような巨大地震はおよそ400年間隔で発生しており（Sawai et al. 2009 JGR）, 地震調査委員会による長期評価では，今後30年以内に発生する確率は7～40%と算定されている．

3.3 869年貞観地震
仙台平野では，869年に大地震が発生し家屋や住民に被害が出たこと，さらに津波が多賀城まで押し寄せ千人もの溺死者が出たことが，『日本三代実録』に記録されている．津波堆積物の分布とシミュレーションとの比較からMw 8.4以上の規模とされていたが，2011年の津波との比較からはMw 8.6以上とされた（Sawai et al. 2012 GRL; Namegaya and Satake 2014 GRL).

４．2004年スマトラ・アンダマン地震（Mw 9.1）
世界各地の検潮所や衛星高度計に記録された津波波形から，震源域の長さは1400km程度と推定されている（Fujii et al. 2021 Pageoph）．また， 2004年以降にインド洋沿岸諸国で実施された古地震・古津波調査により，同じような地震・津波が平均500年程度の間隔で発生していたことが明らかになってきた（Rubin et al. 2017 Nature Commなど）．

５．2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）
沖合や沿岸で記録された高精度の津波波形データの解析から，2011年東北地方太平洋沖地震の断層面上のすべり量の時空間分布が得られた．海溝軸付近では，破壊開始から3－4分後に最大69 mのすべりが生じ，三陸沖の海溝軸付近では，4分後以降に10 m程度のすべりが発生した．東北地方太平洋沖地震は，貞観地震モデルのようなプレート間深部の地震（M 8.8）と1896年明治三陸地震のような津波地震（M 8.8）とがほぼ同時に発生した，あるいは前者が後者を誘発したと解釈された (Satake et al., 2013, BSSA)

６．M9級地震の発生場所と時期
M 9級の超巨大地震の発生頻度は低く， 20世紀以降には発生したのは5回である．各地域における繰り返し間隔は数百年程度であり，このような超巨大地震は，これまでに発生が知られていない沈み込み帯でも発生する可能性がある．多くの沈み込み帯で，巨大地震（M8級）が数十年毎に，超巨大地震（M9級）が数百年毎に発生するという多様性があるようだ(Satake and Atwater, Ann. Rev. EPS; Satake, 2015, Phil. Trans.) .

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Dynamic processes of ocean plate uncovered by active-source seismology

*Shuichi KODAIRA[1]

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

海洋プレートは、その形成、移動、沈み込みの過程において様々な変動現象を伴い、その痕跡は地球内部の構造として残されている。また、地球内部の構造不均質がこれらの変動現象の原因ともなり得る。私は、海洋プレート運動に起因する地球内部変動現象を理解するために、地震学的地下構造探査を手段として用い、海洋プレート生成の場である海嶺、移動の場である太洋底、衝突・消失の場である沈み込み帯において研究を進めてきた。
地震学的地下構造研究の結果は、現在の地球上の構造に残された地球内部変動現象を示すスナップショットであり、地球内部変動現象の過程や原因を理解するためには、地震学、測地学、地質学、岩石学、地球化学などの様々な学問分野の研究者との議論が必要である。さらに、これらの分野の研究者も、基盤的な情報として地下構造の情報を必要としている。そのため、広大な海洋プレートの変動現象を研究するには、世界中の研究者との議論が不可欠であった。
本講演では、私がJAMSTECの地下構造研究グループの皆さんと共に進めてきた、沈み込み帯や海洋底の地下構造研究の成果を紹介する。受賞理由にも記載いただいたこれらの成果には、例えば南海トラフにおける沈み込む海山や海嶺の地下構造イメージングがあり、それらがプレート境界巨大地震断層の破壊伝播過程への影響やスロースリップの原因となること関する考察を行った。これらプレート境界での断層すべり挙動と地下構造の関係を議論した研究は、世界の沈み込み帯で類似の観測研究に繋がり、国際的にも大きな影響を与えた取り組みとなった。また、2011年東北沖地震の際には、JAMSTECが実施した緊急航海で取得されたデータから、地震時の断層すべりが海溝軸まで達し海底に突き抜けた直接的証拠を明らかにした。この成果は、東北地方太平洋沖地震調査掘削（JFAST）の計画立案の最も基盤的なデータとなった。
沈み込み帯の火山帯研究としては、伊豆・小笠原弧におけるプレート沈み込み帯での地殻形成過程に関しても重要な結果を示した。例えば、伊豆・小笠原島弧の火山フロントに沿った相模湾から硫黄島に渡る地下構造探査の結果、火山フロントに沿って中部地殻が一定波長をもってその厚さが変動していることを明らかにした。この結果は岩石学的研究と統合し、海洋性島弧の玄武岩火山において大陸的地殻が生成されていることを示す根拠となった。
一方、太洋底での地震探査研究からは、地震波速度異方性を示す最上部マントルとその直上の下部地殻内に確認された海嶺側に傾斜した反射面の存在から、プレートテクトニクスの原動力が海嶺でのマントル流動である可能性を提唱した。さらに、太洋底での長大測線探査データからマントル内から反射波を捉えることに成功し、海域地下構造探査によるマントル構造探査の可能性も示してきた。講演ではこれらの成果の紹介に加え、今後の地下構造研究の展望も述べたい。

謝辞：私の研究はすべて、プロジェクトに基づく組織的取り組みの成果であり、海域観測機器の開発・運用を進めてこられた先生方・先輩方、JAMSTECの地下構造研究グループの皆さん、一緒に研究をしてくれた学生の皆さんとの共同が無ければ成し得ませんでした。ここに記して感謝いたします。また、地震学会賞に推薦していただいた皆さんに心より感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Diverse Machine Learning Approaches for Earthquake, Strong Ground Motion, and Crustal Deformation Analyses

*Tomohisa OKAZAKI[1]

1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project

講演者は、自然科学への応用研究が進展している機械学習を、地震学関連分野に積極的に導入してきた。大規模データへの深層学習モデルの適用に限らず、データ駆動型アプローチ（機械学習）とモデル駆動型アプローチ（物理モデル）を相補的に融合した高効率・高精度なデータ解析手法の研究を実施してきた。多彩な機械学習を駆使して様々な地震学分野の課題に取り組んでおり、特に以下の研究に関して成果を挙げている。
・強震動物理学×最適輸送理論
・地震テクトニクス×ベイズ逆解析
・地殻変動×物理深層学習

強震動物理学×最適輸送理論
震源断層を特定した地震動予測において、標準のハイブリッド法では長・短周期波形が独立に計算されるという課題がある。講演者らは過去の地震記録の学習により、数値計算により得られた長周期波形を広帯域波形に整合的に変換する機械学習モデルを提案した[1]。最適輸送理論に基づく経時特性の比較および非線形次元削減による潜在空間の構成により、記録数が限られた現実の状況下で深層学習より高効率・高精度の予測を実現した。本研究で強震動物理学に先駆的に導入した最適輸送距離は、地震波形の類似度評価において汎用性の高い指標である。

地震テクトニクス×ベイズ逆解析
測地データから歪み速度場を推定するためにABICに基づく基底関数展開の方法を提案した[2]。客観的に平滑化強度を決定できることに加え、従来よく用いられてきた手法と比べ高解像度かつ安定な連続場が得られることを定量的に示した。日本列島の広域的な歪み速度場を推定することで、新潟神戸歪み集中帯に加え、北関東～愛知の低歪み域や東北日本の火山配置に符合する点状の高歪み域などを高精度で明らかにした。本成果は日本列島における高解像度の歪み速度地図を提供しており、変形・応力場の研究において参照用としての価値も持つ。
また、日本列島周辺の応力場の時空間変化を地震のCMTデータから逆解析により推定した[3]。特に、東北地方太平洋沖地震後に震源域の応力の時間変化が場所により異なることを明らかにした。従来の基底関数展開の方法では、時間変化を含めるとパラメタ空間が4次元となり計算量的に困難なため、計算量が解析次元に依存しないベイズ手法であるガウス過程を導入した。ここで，ガウス過程を逆問題に応用するために，推定する場が満たすべき共分散関係を新たに導出した。本手法により、従来は解析困難だった高次元の地球物理学データ逆解析が実行可能となった。

地殻変動×物理深層学習
地殻変動解析において、物理法則を組み込む深層学習モデル(physics-informed neural network, PINN)を提案した[4]。震源断層における変位場の特異性を極座標変換により解消し、非自明な断層形状・地形・地下構造において地震時変動の順解析を実施した。複雑な構造の解析には、従来の離散化手法では細分化されたメッシュ分割による大規模モデルが必要であるが、提案法では連続的な表現のためモデルを複雑化せずに高精度の解析を実現した。提案法は観測データを直接モデルに組み込めるため、陸海の測地観測など種々のデータを同化した地殻変動および地震発生評価の研究が可能となる。

Scientific machine learning (SciML)
これまで自然科学における深層学習の応用は、画像処理・自然言語処理などを目的に開発された汎用的モデル

© The Seismological Society of Japan

(convolutional neural network, transformer, etc.)を気象画像・地震波形などの観測データに活用する事例が主流であった。そこでは深層学習のスケール性や並列計算が着目され、自動化・高精度化・高速化といった性能を追求する方向に発展してきた。2020年頃よりPINNを代表として、深層学習に科学的知見を組み込むことで、限られた観測データから自然現象を解析するscientific machine learning (SciML)が、情報学と自然科学にまたがる学際的分野として活発に研究されている。SciMLの登場により、講演者は深層学習の別の側面に着目している。線形ソルバーや既存の逆解析・データ同化手法等と異なり、物理法則と観測データを損失関数として同等に扱い連続関数を最適化する。よって、構成法則や境界条件に関する知見が不完全である、観測データが疎で偏りがあるなど、従来手法では解析困難な課題に柔軟に対応できる可能性を持っている。SciMLの真価を見出すには機械学習の技術だけでなく、支配方程式の確からしさや観測データの特性など、対象となる物理現象への深い洞察と問題意識が重要になると考えられる。地震学者がSciMLに積極的に参入し、斬新な研究事例を蓄積していくことで、これまでと違った視点から地震現象の理解に迫れると期待している。

[1] Okazaki T, et al., *Geophys. J. Int.*, 227(1), 333–349 (2021).
[2] Okazaki T, et al., *Earth Planet. Space*, 73, 153 (2021).
[3] Okazaki T, et al., *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 127, e2022JB024314 (2022).
[4] Okazaki T, et al., *Nat. Commun.*, 13, 7092 (2022).

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Statistical Seismological Study on the Activity of Earthquakes and Slow Earthquakes in Subduction Zones

*Tomoaki NISHIKAWA[1]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

沈み込み帯では、多種多様な地震とスロー地震が発生する。これらの地震現象の活動を理解することは、将来発生する地震を予測する上で極めて重要である。我々は、これまで、世界各地の沈み込み帯を対象として、そこで発生する地震とスロー地震の活動の解明と、その特徴の理解に一貫して取り組んできた。本発表では、これまでに得られた下記の3つの顕著な成果を紹介する。

沈み込み帯において発生する地震の規模を決めるものは何か？これは、地震活動に関する最も基本的かつ重要な問いである。我々は、この問いに答えるべく、沈み込み帯で発生する地震の規模別頻度分布（特にグーテンベルグ・リヒター則のb値）が、どのような沈み込み帯の特徴量（プレートの収束速度、沈み込むプレートの年齢等）と相関するのか世界的に調査した（Nishikawa & Ide, 2014）。ここで、グーテンベルグ・リヒター則のb値とは、地震の規模別頻度分布の冪指数であり、統計地震学の最も基本的な指標である。

解析の結果、沈み込み帯のグーテンベルグ・リヒター則のb値は、主に沈み込むプレートの年齢に依存することが明らかとなった。b値とプレートの年齢は正の相関を示し、沈み込むプレートが古いほど、b値は大きく、小地震が発生する割合が大きい。逆に、沈み込むプレートが新しいほど、b値は小さく、大地震が発生する割合が大きい。プレートテクトニクスにおいて、プレートの年齢は、プレートの浮力を決定する重要な特徴量である。これを踏まえると、本研究の結果は、大きな浮力をもつプレートが沈み込む地域ほど、大地震が発生する割合が大きいことを示す。つまり、本研究は、沈み込むプレートの浮力が、沈み込み帯において発生する地震の規模別頻度分布を決めていること示唆する。その後、我々とは別の複数の研究グループによって、同様の解析が行われ、いずれも本研究と整合的な結果が報告されている（Bilek & Lay, 2018; Petruccelli et al., 2019）。

我々は、スロー地震の活動の解明にも注力してきた。特に、日本海溝沈み込み帯において顕著な成果を得た。西南日本の南海トラフ沈み込み帯におけるスロー地震研究の急速な進展とは対照的に、東日本の日本海溝沈み込み帯では、スロー地震活動の詳細は長らく不明であった。我々は、日本海溝海底地震津波観測網S-net、広帯域地震観測網F-net、GNSS連続観測システムGEONET等の陸海域の地震測地観測網のデータ解析と統計地震学的解析を通して、日本海溝沿いのスロー地震の活動の詳細な解明に取り組んだ。具体的には、三種類のスロー地震（テクトニック微動、超低周波地震、スロースリップイベント）を検出し、スロー地震と関連する二種類の地震（繰り返し地震、群発地震）の活動を調査した（Nishikawa et al., 2019）。本研究のような、多種多様な地震とスロー地震の活動を対象とした総合的地震活動研究は、世界的にも珍しい。

解析の結果、スロー地震と、その関連現象は、日本海溝沿いで発生した超巨大地震（東北地方太平洋沖地震）の大滑り域を南北から挟み込むように頻繁に発生していたことが、明らかとなった。これらの観測結果は、日本海溝北部（岩手県沖）と南部（茨城県沖）には、広大なスロー地震発生帯が存在しており、東北地方太平洋沖地震はスロー地震の活動が比較的低調である日本海溝中部のみを破壊し、北部と南部の広大なスロー地震発生帯を破壊することなく停止したことを示唆する。これは、超巨大地震の破壊停止プロセスに関する極めて重要な知見である。さらに、我々は、上記の研究の遂行過程で得た膨大な知見をレビュー論文にまとめた（Nishikawa et al., 2023）。このレビュー論文が、日本海溝沈み込み帯における今後の地震研究の知識的基盤となることを期待する。

近年、我々は、地震とスロー地震の活動をともに考慮することで、統計地震学的モデルを改良することにも取

© The Seismological Society of Japan

り組んでいる。ETASモデル（Ogata, 1988）は、地震活動の世界標準モデルであるが、スロー地震が地震の活動に及ぼす影響は考慮していない。地震とスロー地震の活動の関連性が明確になった現在では、ETASモデルを、スロー地震の効果を考慮したモデルへとアップデートする必要がある。そこで、我々は、スロー地震の中でも特にスロースリップイベントに伴う地震活動活発化の効果を、ETASモデルに初めて明示的に組み込んだ。そして、新たなモデルを、ニュージーランド・ヒクランギ沈み込み帯の地震活動に適用し、その有用性を確認した（Nishikawa & Nishimura, 2023）。これは、統計地震学の新たな発展の方向性を提示する成果であると考えている。

© The Seismological Society of Japan

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

Mon. Oct 21, 2024 2:50 PM - 5:00 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 5:50 AM - 8:00 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S20] PM-2

chairperson:Yoshio MURAI(Faculty of Science, Hokkaido University), Yuji YAGI(University of Tsukuba)

2:50 PM - 3:10 PM JST | 5:50 AM - 6:10 AM UTC

[S20-05] [Invited]Prediction of an Enigmatic Tsunami in October 2023 at Kii Peninsula, Japan

*Yuchen WANG[1], Kentaro Imai[1], Yutaka Hayashi[2], Hiroki Horikawa[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Meteorological Research Institute)

3:10 PM - 3:30 PM JST | 6:10 AM - 6:30 AM UTC

[S20-06] [Invited]Studies focusing on heterogeneity and uncertainty of subsurface structures through computational science and Bayesian methods

*Ryoichiro AGATA[1] (1. JAMSTEC)

3:30 PM - 3:50 PM JST | 6:30 AM - 6:50 AM UTC

[S20-07] [Invited]Development of practical wavefield-based earthquake early warning algorithms and their adaptation

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

3:50 PM - 4:10 PM JST | 6:50 AM - 7:10 AM UTC

[S20-08] [Invited]Elucidation of interplate slip behaviors in a subduction zone based on seafloor geodetic observations

*Fumiaki TOMITA[1] (1. IRIDeS, Tohoku University)

4:10 PM - 4:20 PM JST | 7:10 AM - 7:20 AM UTC

[S20-09] [Invited]High-performance and multifunctional tsunami simulation code: JAGURS

*Toshitaka BABA[1], Kenji Satake[2], Phil R. Cummins[3], Sebastien Allgeyer[3], Tatsuhiko Saito[4], Hiroaki Tsushima[5], Kentaro Imai[6], Kei Yamashita[7], Naotaka Chikasada[4], Masaaki Minami[5], Ayumu Mizutani[8], Toshihiro Kato[9] (1. Tokushima University, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Australian National University, 4. NIED, 5. MRI, 6. JAMSTEC, 7. then at Tohoku University, now at Nuclear Regulation Agency, 8. Tohoku University, 9. NEC)

4:20 PM - 4:30 PM JST | 7:20 AM - 7:30 AM UTC

[S20-10] [Invited]Present and future of observation seismology by development of ocean bottom seismometers

Toshihiko Kanazawa[1], *Hajime SHIOBARA[1], Masanao Shinohara[1], self-popup OBS development team[2] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. N/A)

4:30 PM - 4:40 PM JST | 7:30 AM - 7:40 AM UTC

[S20-11] [Invited]Development of real-time processing method for seismic intensity

*Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1], Hiromitsu Nakamura[1], Wataru Suzuki[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:40 PM - 4:50 PM JST | 7:40 AM - 7:50 AM UTC

[S20-12] [Invited]Large-scale friction experiments: What has been done and what will be done

*Eiichi FUKUYAMA[1,2], Futoshi Yamashita[1], Shiqing Xu[3], Kazuo Mizoguchi[4,1], Hironori Kawakata[5,1], Kurama Okubo[1], Sumire Maeda[6,1] (1. NIED, 2. Kyoto Univ., 3. SUSTech, 4. CRIEPI, 5. Ritsumeikan Univ., 6. AIST)

4:50 PM - 5:00 PM JST | 7:50 AM - 8:00 AM UTC

[S20-13] [Invited]Deep Seafloor Borehole Observation: development history and furure perspectives

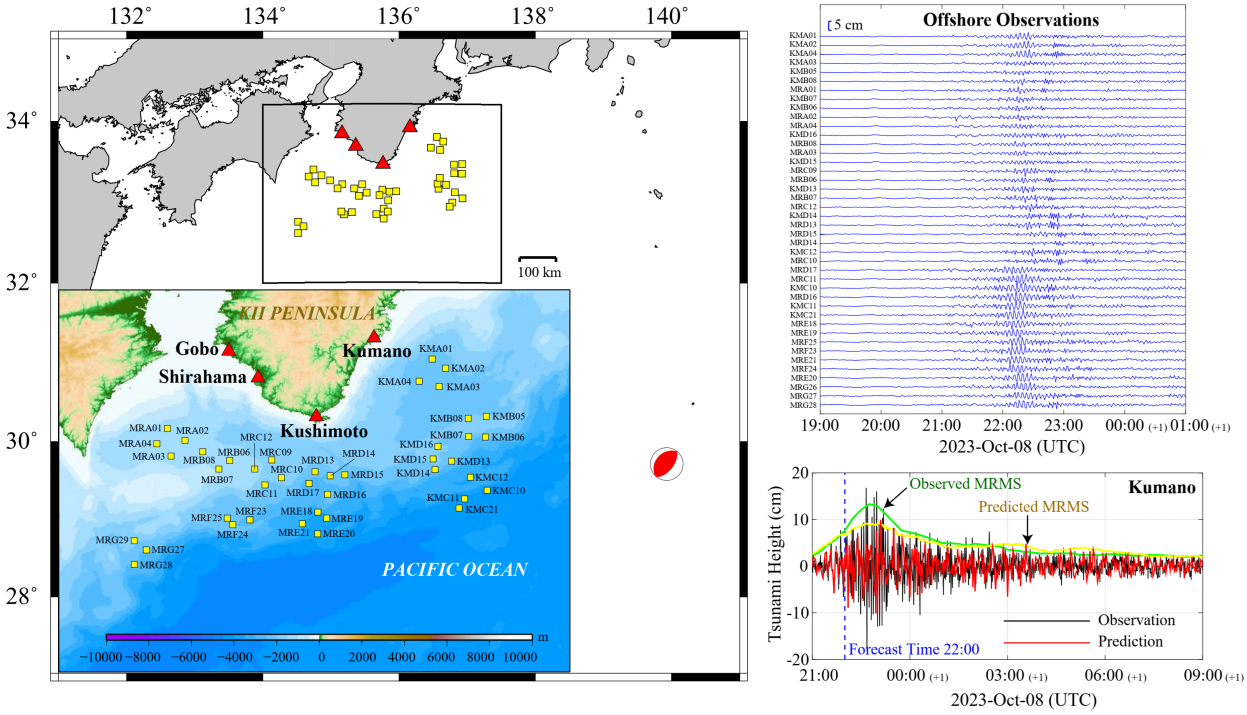
*Eiichiro ARAKI[1], Tomokazu Saruhashi[1], Masanori Kyo[1], Yuya Machida[1], Toshinori Kimura[2], Kazuya Kitada[1], Shuhei Tsuji[1], Takashi Yokobiki[1], Noriaki Sakurai[1], Takahiro Yokoyama[1] (1. JAMSTEC, 2. TEPCO)

[Invited]Prediction of an Enigmatic Tsunami in October 2023 at Kii Peninsula, Japan

*Yuchen WANG[1], Kentaro Imai[1], Yutaka Hayashi[2], Hiroki Horikawa[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Meteorological Research Institute

On October 8, 2023, a tsunami was observed along the Pacific coast of Japan, but its cause was complicated. We applied tsunami data assimilation, a forecast method that does not require wave source information, to predict coastal tsunami waveforms in the Kii Peninsula. We assimilated offshore observations recorded by DONET and reconstructed the wavefield before the tsunami arrived at the coast. The waveforms at Kumano, Kushimoto, and Shirahama were accurately forecasted at least 20 min before the tsunami arrival, indicating that data assimilation is applicable for tsunami early warning. Quantitative analysis showed that the score and accuracy index generally increased after 21:00 (UTC). Meanwhile, we investigated the tsunami decay process for tsunami warning cancellation by adopting the moving root mean squared (MRMS) amplitude. As data assimilation progressed, the prediction of tsunami later phase became increasingly accurate, and the errors between observed and predicted MRMS amplitudes decreased. Overall, the tsunami later phase was satisfactorily predicted at approximately 22:00 at coastal tide gauges. Hence, this data assimilation approach contributes to a comprehensive tsunami early warning process, from issuance to cancellation.



© The Seismological Society of Japan

[Invited]Studies focusing on heterogeneity and uncertainty of subsurface structures through computational science and Bayesian methods

*Ryoichiro AGATA[1]

1. JAMSTEC

地震現象を定量的に理解する上でボトルネックとなっているのは、地下構造の不均質性と不確実性である。しかし、従来の研究では、定式化の困難さや計算コストの問題により、これらの効果は無視されるか、考慮された場合でも限定的かつ近似的であった。講演者は、このボトルネックに対処すべく、計算科学、データ科学、機械学習の有用性に着目して研究を進めてきた。本講演では、このような着想に至った経緯に言及しつつ、講演者のこれまでの研究活動について紹介する。

１．地下構造の３次元不均質性を考慮した地殻変動・地震動モデリング

海溝型巨大地震等における断層すべりの空間分布、非地震時のひずみ蓄積過程、地震後の余効変動の成因等を明らかにするため、地下構造の３次元不均質性を考慮した精度の良い地殻変動モデリングを行うことが重要である。このようなモデリングに伴う計算コストを克服するため、大規模並列計算による地殻変動の有限要素解析に取り組み、断層すべり・地下構造パラメータ推定のための逆解析手法への拡張を行った(Agata+2016CAGEO,2018GJI)。さらに、地下物性の不均質性と非線形性に着目し、2011年東北地方太平洋沖地震後に観測された急激な余効変動の原因を明らかにするための順モデリングに取り組んだ。アセノスフェアが温度依存べき乗粘弾性構成則に従うと仮定した数値シミュレーションにより、地殻変動観測データから示唆されていたリソスフェア・アセノスフェア境界の低粘性領域が、地震に伴う応力変化による一時的な粘性低下によるものである可能性を指摘した(Agata+2019NatComms)。また、日本列島の3次元不均質モデルに基づく地殻変動データからの断層すべり逆解析を誰でも気軽に行えるよう、地殻変動の単位断層すべり応答関数を東北・西南日本について計算し、グリーン関数ライブラリとして公開した(Hori,Agata+2021EPS)。

２．地下構造モデルの不確実性を考慮した有限断層インバージョン手法の開発

１に取り組む中で、地下構造の３次元不均質構造モデルを妥当に設定することの困難さに直面した。そこで、構造モデル設定の任意性を、不確実性の定量的情報という形で地震現象のモデリングと有限断層インバージョンに反映させることを試みた。一般的な有限断層インバージョンは、地下構造が不確かな中で、地下構造の媒質モデルを前もって一つ仮定して実施される。このことは推定結果にバイアスを生じる原因となりうる。従来の研究では、データの共分散成分にモデリング誤差を導入することで、近似的にこの問題に対処してきた。これに対して、「不確かな地下構造」を多数のモデルからなるアンサンブルにより丸ごと表現することで、この問題をより直接的に解決し、「一つの地下構造モデル」の仮定を必要としない新しい有限断層インバージョン手法を構築した(Agata+2021GJI)。さらに、本手法をマルチモデルベイズ推定として実データ解析用に発展させ、豊後水道で発生した長期的スロー地震の断層すべりと応力変化を推定した。長期的スロー地震によって応力が高まっている領域で深部微動が発生していることが示唆された(Agata+2022JGR)。

３．地下構造モデルの不確実性を定量化する手法の開発

２の研究は、単純な地下構造モデルと不確実性の大まかな仮定に根差している。１と組み合わせた本格的な適用のためには、地下構造モデルとその不確実性自体をデータから推定することが必要となる。そこで、偏微分方程式に基づく逆解析に対して有用な新解法として注目されるPhysics-informed neural network(PINN)に着目

© The Seismological Society of Japan

し、地震探査などによる走時データから地下の地震波速度構造を推定するトモグラフィに着手した。逆問題としてのPINN解の不確実性についての実用的な研究事例はほとんどなかったため、PINNとベイズ推定を融合した新たな手法を構築し、トモグラフィの不確実性定量化を可能とした(Agata+2023IEEE-TGRS)。さらに、本手法を南海トラフ域の海域地震探査データに適用してＰ波速度構造をアンサンブル推定し、２で開発したマルチモデルベイズ推定の入力とし、2016年Mw5.9三重県南東沖地震の震源決定を行った。これにより、震源決定において不確かな地下構造を前提とすることの重要性を確認した(Agata+, under review)。このように、初歩的な段階ではあるが、１・２・３の融合を実現しつつある。これらの研究をさらに推し進めるため、PINNを包含する、機械学習と科学技術計算・科学データ解析の融合による新しい学術分野Scientific machine learning(SciML)に大きな期待を寄せており、講演ではその期待についても言及する。

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Development of practical wavefield-based earthquake early warning algorithms and their adaptation

*Yuki KODERA[1]

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

気象庁の緊急地震速報をはじめとする地震動即時予測の精度向上や迅速化を目指して研究開発を行い、より良い地震動即時予測手法を社会実装・運用することは、地震防災・減災に貢献するうえで重要なことのひとつである。緊急地震速報は2007年に一般提供が開始されて以降長年にわたり情報提供を行ってきたが、2011年東北地方太平洋沖地震などをきっかけとして技術的諸課題が明らかとなり、手法の改善が進められてきた。主要な改善のひとつが、震源推定をせずに観測された揺れから将来の揺れを波動伝播モデルに基づいて直接予測する手法（地震動伝播に基づく予測）の導入である。本講演では、発表者が携わってきた地震動伝播に基づく地震動即時予測の研究開発や運用状況などについて紹介する。

地震動即時予測において最も基本的な手法のひとつは、P波初動を検測したのち震源位置とマグニチュード推定を行い距離減衰式から揺れの分布を予測する手法（震源推定に基づく手法）である。この手法は点震源近似が成り立つ地震であれば効果的であるが、有限断層の効果や破壊開始点と強震動生成域のずれを考慮する必要のある、M8程度以上の巨大地震に対しては予測精度が低下する。また、連発地震により地震波がオーバーラップしてP波初動の検出が困難となるケースでは見逃しに繋がり得る。これらの技術的課題を解決するため、震源推定を必要としない地震動伝播に基づく予測という考え方が提案され（例えば、Hoshiba and Aoki, 2015）、発表者はその実践的な地震動即時予測手法であるPLUM法（Propagation of Local Undamped Motion法）の開発を行った（Kodera et al., 2018）。PLUM法は、リアルタイム震度（功刀・他、2013）の観測値で現在の揺れの場を代表させ、強震動は短距離（30 km以内）であれば減衰せずに伝わると仮定して将来の波動場を予測する手法であり、アルゴリズムの実装が容易であるというメリットがある。2011年東北地方太平洋沖地震に対するシミュレーションでは、M9.0の地震に対して震源推定に基づく手法では生じていた関東地方の震度の過小評価が改善され、またその後の活発な地震活動によって生じていた強震動の見逃し数も減少した。PLUM法は2018年3月から気象庁の緊急地震速報で運用が開始され、実運用中の期間においても警報の見逃しを減らすなどの改善につながっている（Kodera et al., 2021）。また、PLUM法はShakeAlertを運用している米国においても実証実験がなされており、既存の震源推定に基づく手法と比較して見逃しや過大予測が少ないことが示されている（例えば、Cochran et al., 2019）。

一方で、地震動伝播に基づく地震動即時予測手法にも技術的課題は存在し、様々な改善の余地がある。そのうちのひとつは迅速性である。地震動伝播に基づく手法は、観測データから推定した現在の波動場を、ある仮定した波動伝播モデルに基づいて時間発展させることで将来の揺れを予測しているが、強震動の予測は強震動そのものの実測を待つ必要があり、P波が観測された時点で震源位置やマグニチュード推定が可能な震源推定に基づく手法と比べると迅速性の面で課題がある。Kodera (2018)では、地震動伝播に基づく手法にP波の情報を取り入れる方法のひとつとして、S波の前に現れるP波からS波の震度をあらかじめ予測し、それをPLUM法の入力とすることを提案した（P波PLUM法）。同手法ではP波検出を常時行うため、初期破壊におけるP波のみならず、巨大地震発生時における後続破壊（強震動生成域）から放出されたP波もリアルタイムで検出可能であり、それらのP波を用いれば強震動生成域からの強震動も精度良く予測できることを示した。またKodera (2019)では、震度の局所的な距離減衰を周辺の震度分布からリアルタイムで求めることによってPLUM法の波動伝播モデルを拡張し、より遠方の観測点の震度予測を迅速に行える手法を提案した。最近では単独観測点の波形処理に機械学習を応用して波動の伝播方向を直接推定し、震度の距離減衰推定を早める手法開発なども実施している。

地震動即時予測は予測精度と迅速性のトレードオフがあるが、新しい手法や観測情報を取り込んでいくこと

© The Seismological Society of Japan

で、そのトレードオフを乗り越えていくことができる。地震動即時予測が地震防災・減災においてより有用なものとなるよう、引き続き新しい知見を取り入れながら研究開発を進めていきたい。

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Elucidation of interplate slip behaviors in a subduction zone based on seafloor geodetic observations

*Fumiaki TOMITA[1]

1. IRIDeS, Tohoku University

沈み込み帯プレート境界では，プレート間固着に加えて，多様なすべり現象（大小様々な規模のプレート間地震・スロー地震・ゆっくりすべりなど）が発生する．これらの現象を精密に捉え，その背後にあるメカニズムを追究することが「地震」という現象を理学的に解明し，かつ社会に影響を与える地震・津波ハザードを評価する上で重要であると考える．こうした究極的な目標の達成には様々な観測・理論・モデルを要するが，まずはどのような現象が現在起きているかを精密に捉えることが全ての第一歩になると考える．2011年東北沖地震をはじめとした沈み込み帯プレート境界での断層すべり現象の多くは海底下が発生源となるため海域観測が重要となる．海域観測の中でも，著者は GNSS音響測位による海底測地観測に注力して研究を進め，[1] 海底測地観測の実施・測位の高精度化による海底変位の検出，[2] 海底測地観測データの特性を生かした断層すべり推定手法の開発，を通して沈み込み帯プレート境界での断層すべり現象の解明に努めてきた．

[1] GNSS音響測位による海底測地観測の実施と測位解析手法の高精度化に従事した。主な観測成果としては，2011年東北沖地震後の海底での広域の地殻変動場を検出し，地震時主破壊域での粘弾性緩和による西向き，福島沖海溝近傍での余効すべりによると考えられる東向きの変動がそれぞれ現れることを明らかにした（Tomita+, 2017, Sci. Adv.）．また，近年では複雑な海中音速構造を仮定したGNSS-A測位手法の開発により測位精度の向上を図るとともに，開発した手法をオープンソースソフトウェアとして公開した（Tomita & Kido, 2024, EPS）．公開しているプログラムは，海中音速構造について時間変化しない単傾斜構造を仮定しているが，ベイズ推定により多様な事前分布を取り入れる改良を行い，時間変化や多層傾斜構造を取り入れた解析やそれらに様々な拘束条件を与えて解析手法を現在考案している（Tomita, 2024, Res. Squ.）．

[2] 著者はこれまで2つの断層すべりインバージョン手法を開発し，海域観測データの持つ情報を適切に引き出す試みを行なってきた．まず，粘弾性グリーン関数を断層すべりインバージョンに導入することで，地震後の測地観測データから地震時すべり分布の拘束が可能となることを示した．これを[1]で示した海域観測データを含む2011年東北沖地震時・地震後の地殻変動データに適用したところ，GNSS音響測位で得られた西向き変動範囲の北限から，従来求められていたよりも北側に延びた地震時すべり分布が推定された（Tomita+, 2020, EPS）．これは，地震後に設置した海底測地観測データが地震時の観測データのみでは解像できなかった海溝近傍でのすべりを，粘弾性緩和を介して検出できたためである．また，海域観測データを適切に扱うための，断層すべりにおける小断層配置の最適化にも取り組んでいる．海底測地観測データ，特にGNSS音響測位によって得られた観測データは，陸上のGNSS測位の成果と比べると概して空間的に観測網が疎でありかつ観測精度が低いが，シグナルそのものは大きいという特徴がある．こうした海陸の観測データを統合して断層すべり分布を推定する場合，プレート境界断層面でのすべりの解像度が空間的に大きく異なってしまう．そのため，一般的なすべりの平滑化条件（空間的に均等な小断層配置に対して一様なすべり平滑化条件を課す場合など）ではすべり解像度の空間不均質性に対応できず，「小断層配置の最適化」や「すべり平滑化の空間不均質」を考慮する必要がある．著者は，Trans-dimensional inversion (TDI)法を応用し，小断層配置をボロノイセルで表現し，その最適化を図った（Tomita+, 2021, JGR）．すべりパラメータがすべりの上限・下限を課したボックスカー型の一様分布に従うことを仮定した事前分布を与えており，それがなるべく少ないボロノイセルですべりを表現するスパースモデリングの効果をもたらしている．TDI法における事前分布の与え方はまだまだ検討の余地があり，様々な特性を持つ地球物理データに対して応用できる可能性がある．

以上のように， 著者はGNSS音響測位による海底測地観測自体の発展と，その観測データの持つ情報を適切に引き出すモデリング研究を進めてきており，今後はこれらの研究のさらなる加速，東北沖以外の観測領域への

© The Seismological Society of Japan

適用，新たなモデリングアプローチの開拓に取り組み，より地震学に貢献していきたい．

© The Seismological Society of Japan

[Invited]High-performance and multifunctional tsunami simulation code: JAGURS

*Toshitaka BABA[1], Kenji Satake[2], Phil R. Cummins[3], Sebastien Allgeyer[3], Tatsuhiko Saito[4], Hiroaki Tsushima[5], Kentaro Imai[6], Kei Yamashita[7], Naotaka Chikasada[4], Masaaki Minami[5], Ayumu Mizutani[8], Toshihiro Kato[9]

1. Tokushima University, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Australian National University, 4. NIED, 5. MRI, 6. JAMSTEC, 7. then at Tohoku University, now at Nuclear Regulation Agency, 8. Tohoku University, 9. NEC

津波シミュレーションコードJAGURSは，地震学会に所属する津波研究者および海外の研究者がこれまでに開発した計算モジュールを融合させる形で共同開発しているオープンソースである．津波ハザードマップの作成に使われる一般の津波モデルと比較して格段に高精度な解析が可能である．津波計算には，非粘性の３次元流体の支配方程式であるオイラーの式から非圧縮と長波の近似を用いて導出される平面２次元のモデルが用いられる．平面２次元のモデルはさらに，線形長波式，非線形長波式，線形分散波式，非線形分散波式の４つに区別される．断層のすべり分布の推定には津波の線形性を利用した線形インバージョンがよく利用されるが，ここには線形長波式，あるいは，線形分散波式が用いられる．津波の陸上への遡上計算には非線形性が無視できないため，非線形長波式が用いられる．長波式ではすべての波長の津波が一定の速度で進行するが，実際には津波の波長が短くなると波速が遅くなるので，これを補正するために線形/非線形分散波式を利用する．遠地津波に関しては，2011年東北地方太平洋沖地震の津波の走時が線形長波からの計算値よりも遅れたのは固体地球とのカップリングの効果によることや，2022年トンガ火山津波の際には大気圧変動によって津波が励起されるなど，最近新たな発見があった．JAGURSはこれらのすべてを扱うことができる有限差分法のコードであり，少なくとも遠地津波のシミュレーションにおいては，世界で最も優れたソフトウェアである．また，ノートＰＣで利用できる汎用性の高いコードであるとともに，MPIおよびOpenMPを用いて高度に並列化されスーパーコンピュータでもよく稼働する．並列化と近年の計算機の発展により大規模な計算が可能となり，津波研究の進展を支えている．例えば，JAGURSと高性能計算機を利用すれば，１万におよぶ津波シナリオ計算が可能で，その計算結果は機械学習や深層学習の教師データとして利用することもできるし，不確実性の高い津波現象において必須な確率論的なハザード評価を実現する．　2016年の完全オープンソース化以降，国内外で広く利用されている．高精度な津波計算を実現している点に加えて，ユーザーマニュアルも日本語，英語ともに整備しており，国内外の大学院生などの初学者も多く利用している．JAGURSを利用して研究を開始した学生が，JAGURSを基礎としてより高度なモデルを自ら開発し，秀でた研究成果を上げている例もいくつもある．さらに，津波研究の枠組みを超え，地震波シミュレーションとの連成計算の試みにも利用されている．　和歌山県，三重県，千葉県では津波即時予測システムをデータベース検索方式で自前運用しているが，この津波データベースの構築にはJAGURSが利用されている．地震調査研究推進本部津波評価部会の資料作成にもJAGURSが利用されている．民間企業（建設コンサルタントなど）での利用実績も増えており，社会への波及効果も大きい．　現在でも開発は継続しており，能登半島地震で注目された海底地すべりによる津波の計算モジュールや，津波とほぼ同じ方程式で計算できる高潮現象への拡張を行っている．講演では，JAGURSの名前の由来や開発史についても紹介させていただく．

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Present and future of observation seismology by development of ocean bottom seismometers

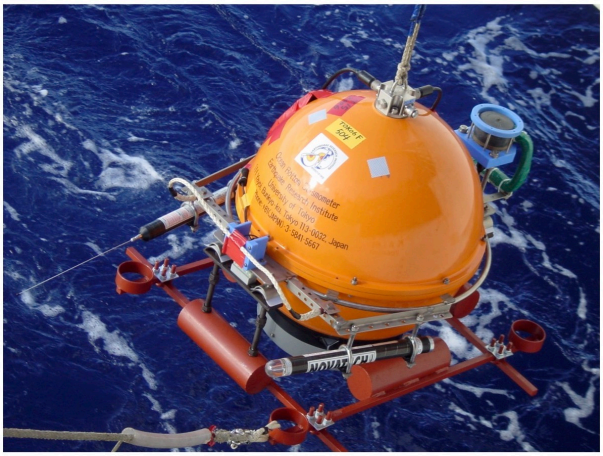
Toshihiko Kanazawa[1], *Hajime SHIOBARA[1], Masanao Shinohara[1], self-popup OBS development team[2]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. N/A

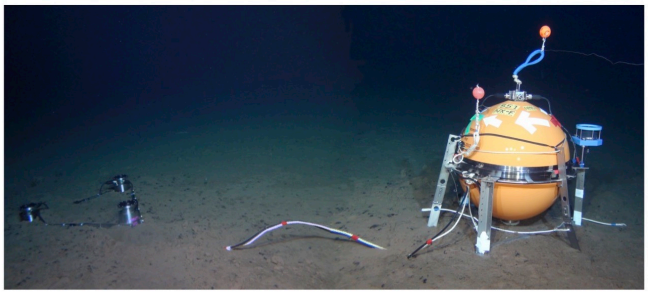
このたび「海底における長期・多点・広帯域地震観測の実現による地震学分野への貢献」として日本地震学会技術開発賞を受賞できたこと、著者一同大変うれしく思います。推薦者および選考委員の皆様に深く感謝いたします。これは、1990年代以降、陸上観測から進展してきた広帯域地震観測研究を念頭に、地表面全域を覆う広帯域地震観測網による観測研究を展望し、広範囲を占める海域での長期・多点・広帯域地震観測を実現するための自由落下・自己浮上方式の広帯域海底地震計（BBOBS）の開発を軸として推進してきたものです。陸域の広帯域地震観測と同等の観測帯域とデータ品質が必要という観点から、英国Guralp社に特注して低消費電力・軽量化したBBOBS専用の固有周期360秒の広帯域地震センサーCMG-3Tを主に採用しています。
BBOBS開発初期での解決すべき技術的課題は多岐にわたり、海水という金属腐食環境下での長期観測（１年程度）の実現、大きく重いCMG-3Tを鉛直かつ安定に保つための姿勢制御装置、大容量のデジタル記録装置、確実に自己浮上させて機器とデータを回収するための信頼性の高い錘切離機構、それと同時に海底との良好なカップリングの確保、底層流に起因して発生する振動雑音の低減、などがありました。
このBBOBS開発の直接的契機は、1996年にスタートした新プログラム（創成的基礎研究費）「海半球ネットワーク」（研究代表者　深尾良夫）において、機動的な広帯域地震観測を「西太平洋域（海半球）の地球深部を覗く新しい目」の一つとして組み込んだことです。この新プログラム推進の中核組織として翌年の1997年に地震研究所に「海半球観測研究センター（OHRC）」が設置されて本格的な開発がスタートしました。著者らが1980年代に実用化したガラス球OBSでの多くの技術的蓄積を持っていた、地震観測機能を耐圧容器に内蔵する一体化形状を基にし、CMG-3Tを載せた姿勢制御装置や多数の電池を搭載するために直径65cmのチタン球耐圧容器を使用する方向で開発を開始しました。1年程度という過去に経験のない海底設置（観測）期間への対処を室内・実地試験で進めつつ、著者らが蓄積してきた機器開発と観測技術の知見を活かすことで、1999年に最初のBBOBSを北西太平洋に設置、翌年に無事回収することが出来ました。その後、2005年頃までには実用的BBOBSの初期開発フェーズは完了しました。これで海底での広帯域地震観測データは得られるようになりましたが、より多くの研究者がデータを活用できる公開システムへの準備、BBOBSの安定した運用を確保するための保守整備と内部機器の更新を、継続的に行っています。このように研究者による主体的な新たな機器開発によって実用化されたBBOBSですが、この開発と運用があって初めて、その後の長期・多点の広帯域地震観測研究は、現在のような研究分野の一つを構成するレベルまで発展できたと思います。
今後の展望としては、当然ながら広帯域地震観測の一層の高度化です。一体型であるBBOBSの開発以降に進めてきた高度化のひとつは自己埋設方式センサーの実現です。初期のBBOBS観測データが得られた直後から、センサー部を海底面に埋設することでのデータ品質向上を検討してきました。2010年には潜水艇で設置回収する方式のBBOBS-NX、2017年には自己浮上型のBBOBSと同様な自律動作が可能なNX-2Gという新型機の長期試験観測が完了し、この埋設センサー方式も実用化されつつあるところです。その他にも、BBOBSの適応範囲を拡げるために、6000m以深へ対応する超深海型、測地学的周期帯域へ拡大した計測への開発が進んでいます。一方で、BBOBS開発初期から、小型の地震センサーを内蔵する50㎝チタン球を用いた長期観測用のOBSも実用化しており、近年には120秒センサーを搭載して2年間程度の長期観測が可能な小型の広帯域地震計も開発されました。また観測中の海底地震計から観測データを回収するための海底–海上間での通信手法も開発されつつあります。
先進的な観測研究の進展を展望するには、データ処理および解析技術の高度化だけでは無く、このような研究者による主体的な観測機器の高度化・新規開発による、新たな観測対象領域を切り開くことでの、全く新しいデータの取得は、今後も欠かすことはできません。自らの手で未知のデータ取得を志す若手研究者が、このような観測研究分野へ参画してくれることを期待します。

© The Seismological Society of Japan

自己浮上式海底地震計開発チーム
（構成員　杉岡裕子、一瀬建日、山田知朗、伊藤亜妃、中東和夫、望月将志、渡邉智毅、八木健夫）



自由落下・自己浮上方式の広帯域海底地震計(BBOBS)の外観(投入直前)



自己埋設方式センサーの広帯域海底地震計(BBOBS-NX)の深海底での観測状態

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Development of real-time processing method for seismic intensity

*Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1], Hiromitsu Nakamura[1], Wataru Suzuki[1], Nobuyuki Morikawa[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震に伴う揺れや被害の大きさ及び分布を発災直後に把握することは適切な初動対応をとる上で極めて重要である。このような目的で使用される地震動指標として日本において最も普及しているのは震度（計測震度）であり、多くの機関が震度で初動のレベルを定めているだけでなく、多くの国民が震度と揺れや被害の程度に関して相当程度の感覚を持っているなど、防災上極めて大きな役割を果たしている。従来震度は体感や被害で定められていたが、計測震度の定義により算出の自動化が図られた（平成8年気象庁告示第4号）。しかし計測震度は一定時間幅（多くの場合１分間）の地震動記録の蓄積を待って算出されることから、即時性が求められる用途には適していない。本講演では、この問題を解決するために開発された震度のリアルタイム演算法（本演算法）の概要といくつかの応用事例についての紹介を行う。
強震動指標の計算の多くは、強震記録にフィルタ処理（積分、応答計算等も含む）を行い、一定区間での最大値（計測震度の場合は継続時間を考慮する）を取るという処理を行っている。計測震度を逐次的に計算する場合の問題は、高速フーリエ変換を用いた周波数領域でのフィルタ演算が必要となることである。本演算法は、周波数領域のフィルタの代わりに、再帰型フィルタを複数段用いて、時間領域で近似的なフィルタ処理を行うことを特徴としている。結果として、この方法で求められる計測震度は本来のものとは異なる概算値となるが、多くの強震記録を用いた解析から、リアルタイム演算による概算値と本来の定義に基づく計測震度の違いは、99%以上の強震記録に対して0.1以内であることが確認されている。これは、SI値、最大速度、最大加速度等の強震動指標から、回帰式を用いて計測震度の換算を行う方法よりはるかに精度が高いものである。加えて、本演算法は、強震記録のサンプル毎に値を算出することで迅速性も備えるため、速報用途としての利用に適する。
本演算法は、防災科研の強震観測網（K-NET及びKiK-net）の強震計の他、気象庁や一部の自治体の装置にも実装されている。緊急地震速報において震源要素を用いず震度を予測するPLUM法は本手法を利用することで実現されており、地震の見逃しに起因する地震動の過小評価の低減等にも貢献している。一般の利用者が目にするところでは、日本列島の現在の揺れを表示する防災科研の「強震モニタ」や、民間企業によるWEBやスマートフォンアプリ上での情報提供サービス等での活用がなされている。また、大地震発生直後対応の意思決定を支援することを目的とした防災科研のリアルタイム地震被害推定システム（J-RISQ）においても迅速化のため本演算法を採用しており、2016年熊本地震や2024年能登半島地震をはじめ、推定結果を防災クロスビュー等で公開することで、自治体の災害対策本部等での活用も進みつつある。

謝辞　本演算法の開発および活用に携わった関係者各位に謝意を表します。

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Large-scale friction experiments: What has been done and what will be done

*Eiichi FUKUYAMA[1,2], Futoshi Yamashita[1], Shiqing Xu[3], Kazuo Mizoguchi[4,1], Hironori Kawakata[5,1], Kurama Okubo[1], Sumire Maeda[6,1]

1. NIED, 2. Kyoto Univ., 3. SUSTech, 4. CRIEPI, 5. Ritsumeikan Univ., 6. AIST

地震の開始、伝播、停止といった地震の破壊過程を議論する上で、断層摩擦は欠くことのできない要素である。しかしながら、断層摩擦は地震観測データからの推定が極めて困難な物理量である。それゆえ、1960年代ごろから世界各地の実験室において岩石摩擦実験が盛んに行われてきた。ただし、種々の実験上の制約により断層サイズの影響はうまく評価されてこなかった。

我々は、防災科学技術研究所に既設の大型振動台を利用した大型岩石摩擦試験機を構築し、1.5m長のすべり面を有する岩石摩擦実験を可能にした。この第１世代試験機は2012年2月に運用を開始し、2020年に大型振動台の運用が休止されるまで、21シリーズの実験が行われた。メートルサイズの岩石試料を用いた摩擦試験機は米国地質調査所や東京大学地震研究所においても開発されていたが、本試験機の最大の特徴は最大1m/sといった大きな載荷速度と、最大0.4mといった長いすべり距離であり、このような性能を有する試験機はこれまでになかった。しかしながら、共用施設である大型振動台を利用するため実験期間が制約されることが課題であった。そこで、2016年4月、実験期間に制限を受けない第２世代の試験機が構築された。第２世代試験機はハンドポンプとフラットジャッキを用いた非常にコンパクトでシンプルな載荷機構を有しており、第１世代試験機の２倍以上となる断層長4mのすべり面を利用できるという特徴がある。ただし、手動制御のため、載荷速度一定といった条件での実験は困難という課題があった。2023年、第２世代の試験機で実現困難であった一定載荷速度の実験を可能とし，さらには第１世代試験機の４倍の断層長を持つ第３世代の試験機を休止中の大型振動台建屋内に構築した。第３世代試験機は稼働を始めたところであるが、せん断載荷速度や載荷応力、法線応力分布に関して多様な制御が可能であり、また、種々のセンサーも稠密に設置されており、今後の展開が期待されるところである。

我々のグループは、これらの試験機を用いてさまざまな成果を出しつつ、世界中の研究者に影響を与えてきた。特に、従来のcmサイズの岩石摩擦実験では、空間不均質の効果は無視して議論が行われてきたが、本試験機を用いた実験により、すべり面の空間的強度不均質が断層すべりに及ぼす影響の重要性が指摘された(Yamashita et al., 2015, Nature; Xu et al., 2023, Nat. Geosci.).また、センサーを高密度ですべり面の周囲に配置することが可能となり、破壊伝播を正確に捉えることができるようになったため、従来は実験における検証が行われていなかった破壊先端のcohesive zoneの伝播速度依存性(Fukuyama et al., 2016, J. Seismol.)や２次元破壊フロントの存在(Fukuyama et al., 2018 Tectonophys.)といった新しい観測事実も得ることができるようになった。さらに、すべり面に薄いガウジパッチを設置し、制御された強度不均質分布のもとでの摩擦実験も始まっており(大久保・他, 2024,地震学会)、広い断層面を利用した先進的な実験研究への大きな窓を開いた試験機と言える。

今後は、第３世代試験機による各種の岩石摩擦実験が予定されており、より一層の岩石摩擦、ひいては、地震発生メカニズムへの貢献が期待される。特に、第３世代試験機では、光ファイバを用いての断層面内部の多点歪み測定が計画されており、破壊核の生成と不安定すべりへの移行過程への実験的な直接のアプローチが可能となることが期待される。

最後に、大型摩擦実験は、その試験機の構築に関わった多くの方々の応援がなければ成し得ないものであり、ここで全ての方々のお名前をあげられていないご無礼をお許しいただきたい。第１世代・第３世代試験機の構築に関わっていただいた(株)巴技研および(株)JTEKT、第１世代試験機の改造および第２世代試験機の製作に尽

© The Seismological Society of Japan

力いただいた(株)角田製作所、大型振動台のオペレーションを行っていただいた(株)AES、第１世代試験機から一貫して岩石試料の調達整形を担っていただいた関ヶ原イーテック(株)、第１世代から第３世代まで試験機設置やサポートを担っていただいた(株)杉山工業、特製センサーを作成いただいた(株)共和電業、(株)東京測器、試験機の構想段階からいろいろな局面において応援いただいた、嶋本利彦氏、野田博之氏、直井誠氏、東郷徹宏氏、箕輪親宏氏、御子柴正氏、防災科学技術研究所の各職員、技術開発賞に推薦していただいた廣瀬丈洋氏、高橋美紀氏、矢部康男氏、他、多数の皆様に感謝申し上げる。

© The Seismological Society of Japan

[Invited]Deep Seafloor Borehole Observation: development history and furure perspectives

*Eiichiro ARAKI[1], Tomokazu Saruhashi[1], Masanori Kyo[1], Yuya Machida[1], Toshinori Kimura[2], Kazuya Kitada[1], Shuhei Tsuji[1], Takashi Yokobiki[1], Noriaki Sakurai[1], Takahiro Yokoyama[1]

1. JAMSTEC, 2. TEPCO

海域は陸域と比べ観測網が乏しい一方で、海洋プレートの生成・沈み込みといった地球のダイナミクスが進行する最前線でもある。そのような場の観測ギャップを埋めるとともに、近接ないし、その場観測を行おうとする試みは、1980年代末のODP時代より、CORKと呼ばれる米加主導の観測の取り組みだけでなく、南海トラフへの温度計、日本海への広帯域地震計設置など日本がリードするチームのチャレンジを経て、90~2000年代には、日本海溝域の沈み込むプレート境界域の孔内観測アレイ、太平洋・フィリピン海プレートの長期孔内広帯域地震観測網の展開につながった。
これら初期の取り組みでは、孔内に観測センサーを設置し、ケーブルで海底のレコーダーまで接続を行い、海底のレコーダーを観測後無人探査機で回収するなどでデータを得ていたが、電池電源による長期間の連続観測と、シームレスなデータ取得に大きな課題があった。また、孔内へのセンサー固定は、国内外で様々な方法が試みられたが、安定な観測を念頭に、センサー設置区間にセメントを注入固定する方法を試み良い成果が得られたため、以来標準的な設置法として用いられるようになった。
2006年から開始した日本が建造した地球深部探査船「ちきゅう」によるIODP南海掘削計画では、南海トラフでの巨大地震発生のプロセスの研究のため、沈み込むプレートの地震断層を構造のサンプリングと、その断層のダイナミクスの長期観測を目指した。計画では。海底下数km 以深の固着する断層をまたぐ近傍観測を最終目標としたが、着実なステップを踏むために、南海トラフの沈み込みプレート境界域での地殻変動～地震ダイナミクスのモードの沈みこみに伴う変遷を観測するために3基の海底孔内観測点によるアレイ観測を計画した。計画にあたっては過去の経験から、当時開発が開始されていた海底ケーブル観測網DONETの拡張機能を使って、海底孔内観測点をDONETに接続することで、連続・長期的な観測をねらった。また、孔内センサーをセメントで恒久的に固定するためセンサーの故障時交換ができないことを考え、複数種の孔内センサー（孔内歪計・広帯域地震計・地震計および傾斜計・温度計アレイ・孔内間隙水圧ポート）をそれぞれ独立に海底まで接続する冗長性を持たせた。
このような長期孔内観測点の設置は、現地の速い黒潮によって最大1km 長にもなる孔内センサーシステムが大きな渦振動を励起して破損する問題の解決など、掘削技術者とともに問題解決を必要としたが、最初の観測点C0010が2010年にかけて設置観測開始したのを皮切りに、2018年設置のC0006点まで、順次孔内設置、DONETへの接続開発、接続・長期観測の開始と進んだ。最初のDONETの接続は、DONETの2010年の海底観測点稼働開始後に開発を開始し、2013年であった。
これらの海底孔内観測点の安定な観測環境で長期・連続観測を分布する複数点で行えたことで、陸上・海底面の観測では観測が困難な「浅部ゆっくり滑り」が繰り返す様子をとらえることができた（Araki et al., 2017他）。観測された「浅部ゆっくり滑り」は、同様なイベントが繰り返すなか、沈み込み先端部まで滑るものなど多様性もあり、現在、地震調査委員会等に観測報告を定例で行っているが、近接・多点・広域での観測が重要だと深く認識するに至った。
そこで広域の「浅部ゆっくり滑り」の発生状況を把握するため、南海トラフ広域への海底孔内観測点の展開とリアルタイム観測を企図した開発を行った。新しい開発では、安定な環境でゆっくり滑りが観測できることだけでなく、来るべき巨大地震も含め超広帯域・高ダイナミックレンジの観測を長期の確実に行うことを目指し、交換できない孔内に故障の要素を排し、孔内間隙水圧ポートと光ファイバによる歪センサシステムを構成した。新しい海底長期孔内観測システムは、2023年に紀伊水道沖に 1 基目を設置し、2024年から観測を開始したばかりであるが、安定した観測を行うことができている。今後四国沖・日向灘にも海底孔内観測点を展開し、海底ケーブル観測網にリンクしたリアルタイムの地殻変動観測を実現すべく、準備を進めている。
広域の展開を進める一方、南海掘削計画で企図した「地震断層のその場計測」は、付加体の掘削の困難などが

© The Seismological Society of Japan

あり、未完である。プレート境界域の海底掘削孔内での観測は安定した環境での観測もさることながら、地震断層近傍の非弾性的・水理的なプロセスなど、地震の発生過程を理解するために重要な観測を実現できる唯一の方法であり、海域プレート境界の掘削とその場孔内計測の実現に向け、さらなる努力が必要である。

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session：S06. Crustal structure

Mon. Oct 21, 2024 9:00 AM - 10:15 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S06] AM-1

chairperson:Ryuta Arai(JAMSTEC), Makoto Matsubara(NIED)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S06-01] Deep structure of the Hidaka collision zone, Hokkaido Japan inferred from offshore-onshore integrated seismic survey (2)

*Noriko TSUMURA[1], Yoshio Murai[2], Hisatoshi Baba[3], Toshinori Sato[1], Eiji Kurashimo[4], Masanao Shinohara[4], Shintaro Abe[5], Yasuhito Uchida[6], Takuya Ishii[7], Nagisa Nakao[8], Kazuya Matsumoto[9], Takumi Asada[10], Takashi Ogami[11], Miwako Ando[4], Shinichi Tanaka[4], Aina Idoguchi[3], Keitaro Takamoto[12], Tomoya Hiramatsu[7], Naoki Momomoto[7], Yusuke Yamanaka[2], Tatsuya Nakagaki[13], Hiroaki Yamahana[14], Yojiro Sasagawa[7], Hayato Onuki[7], Saki Shibata[15], Issei Yasuhara[7] (1. Graduate school of Science, Chiba University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. School of Marine Science and Technology, Tokai University, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo , 5. ADEP, 6. Hokkaido Research Organization, 7. Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, 8. Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 9. Nikkodo Co. Ltd., 10. Department of Engineering, Muroran Institute of Technology , 11. AIST, 12. Department of Marine Science and Ocean Engineering Course of Marine Science and Ocean Engineering, Tokai University, 13. Graduate school of Science, Hokkaido University, 14. School of Science, University of Tokyo, 15. Faculty of Science, Chiba University)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S06-02] Lateral structural variation and seismic activity in the central part of the NE Japan Arc from the 2019 onshore seismic profiling -II

*Takaya IWASAKI[1], Hiroshi Sato[2], Eiji Kurashimo[3], Hirokazu Ishige[4], Hidehiko Shimizu[5], Tatsuya Ishiyama[3], Takashi Iidaka[6], Masanao Shinohara[3], Shinji Kawasaki[4], Susumu Abe[4], Naoshi Hirata[3] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JAPEX Research Center, Technical Division, JAPEX, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

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

[S06-03] Shallow crustal structure and slip tendency of normal faults in the outer rise of the Japan Trench

*Yue SUN[1], Ayumu Miyakawa[2], Koichiro Obana[3], Ehsan Jamali Hondori[4], Jin-Oh Park[1] (1. Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), The University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 4. Geoscience Enterprise Inc. (GSE))

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

[S06-04] Spatial variation in the origin of S-wave polarization anisotropy in the upper crust of the Tohoku region, NE Japan. (3)

*Ryotaro Fujimura[1], Tomomi Okada[1], Tatsuya Mizuta[1], Martha Savage[2], Ryota Takagi[1], Keisuke Yoshida[1], Shinichi Sakai[3], Kei Katsumata[4], Mako Ohzono[4,3], Masahiro Kosuga[5], Takuto Maeda[5], Yoshiko Yamanaka[6], Hiroshi Katao[7], Takeshi Matsushima[8], Hiroshi Yakiwara[9], Ayaka Tagami[1], Shuutoku Kimura[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Toru Matsuzawa[1] (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku Umoversity Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, 3. ERI, Univercity of Tokyo, 4. Hakkaido University, 5. Hirosaki University, 6. Nagoya University, 7. DPRI, Kyoto University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University)

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

[S06-05] Shear wave splitting and seismic velocity structure in the onshore focal area of the 2024 Noto Peninsula earthquake, central Japan

*Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ayaka Tagami[1,5], Ryotaro Fujimura[1], Ryota Takagi[1], Keisuke Yoshida[1], Satoshi Matsumoto[3], Kentaro Emoto[3], Yoshiko Yamanaka[4], Kei Katsumata[5], Takuto Maeda[6], Motoko Ishise[7], Shin'ichi Sakai[8], Masatoshi Miyazawa[9], Hiroshi Yakiwara[10], Kazutoshi Imanishi[11], Naoki Uchida[1], Satoshi Hirahara[1], Shu'utoku Kimura[1], Toshiko Terakawa[4], Mako Ohzono[5], Takuo Shibutani[9], Takahiro Shi'ina[11], Yoshihiro Hiramatsu[12] (1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. Kyushu University, 4. Nagoya University, 5. Hokkaido University, 6. Hirosaki University, 7. Yamagata University, 8. University of Tokyo, 9. Kyoto University, 10. Kagoshima University, 11. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 12. Kanazawa University)

Deep structure of the Hidaka collision zone, Hokkaido Japan inferred from offshore-onshore integrated seismic survey (2)

*Noriko TSUMURA[1], Yoshio Murai[2], Hisatoshi Baba[3], Toshinori Sato[1], Eiji Kurashimo[4], Masanao Shinohara[4], Shintaro Abe[5], Yasuhito Uchida[6], Takuya Ishii[7], Nagisa Nakao[8], Kazuya Matsumoto[9], Takumi Asada[10], Takashi Ogami[11], Miwako Ando[4], Shinichi Tanaka[4], Aina Idoguchi[3], Keitaro Takamoto[12], Tomoya Hiramatsu[7], Naoki Momomoto[7], Yusuke Yamanaka[2], Tatsuya Nakagaki[13], Hiroaki Yamahana[14], Yojiro Sasagawa[7], Hayato Onuki[7], Saki Shibata[15], Issei Yasuhara[7]

1. Graduate school of Science, Chiba University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. School of Marine Science and Technology, Tokai University, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo , 5. ADEP, 6. Hokkaido Research Organization, 7. Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, 8. Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 9. Nikkodo Co. Ltd., 10. Department of Engineering, Muroran Institute of Technology , 11. AIST, 12. Department of Marine Science and Ocean Engineering Course of Marine Science and Ocean Engineering, Tokai University, 13. Graduate school of Science, Hokkaido University, 14. School of Science, University of Tokyo, 15. Faculty of Science, Chiba University

[背景]日高衝突帯の深部構造は反射法地震探査や自然地震波形の解析からいくつか推定されているものの，深さ40㎞以深については統一的な解釈が得られていない[e.g. Tsumura et al.,1999;Kita et al., 2012]。本研究では，主に反射探査の結果からTsumura et al.（1999）が提唱した，東北日本弧に衝突した千島弧地殻が裂けて下部地殻の一部が深部に沈み込む剥離が起こっているという作業仮説を検証するために浦河沖でのエアガン発震を陸域で受信する海陸統合探査を行って，既存反射断面では連続性が追えなかった剥離構造深部からの反射波を捉え，島弧間衝突の境界形状を約50㎞の深度まで明らかにすることを目指した。

[海陸統合地震探査]　2023年10月16日～11月14日まで，北海道浦河町から大樹町までの国道や林道沿いなどに陸域受信点を約250m間隔で210点設置し，現地で地動を連続収録した。サンプリング周波数は250Hzである。　海域での探査は東京大学大気海洋研究所白鳳丸共同利用研究航海（KH-23-8：2023年11月8日～12日）により実施された。海域測線は浦河の沖合い北東一南西直線上に設定され，測線の全長は50㎞，測線北東端が陸域観測点の南西端から約30㎞に位置する。海域測線下には2.5㎞～10㎞の間隔で8台の海底地震計も設置された。実際の発振は11月9日～10日に1500cu.inのエアガン4台で4ノット75秒間隔（約150m間隔）で行った。発震総数は1039である。

[観測結果]陸域で観測された波形を観測点記録として並べると，南西端の観測点では海域発震測線の全領域で撃ったショットの初動が往復走時10s～22s付近に見いだせた。また日高山脈を越えた帯広側の観測点でも，海域測線の陸側寄り20㎞付近で撃ったショットの初動が確認できた。得られた波形記録には往復走時25～26秒付近にも断続的に反射位相が見られ，その走時から，解析地域の下に沈み込んだ太平洋プレート上面付近からの反射波である可能性が考えられる。それよりも早い往復走時20秒付近にもいくつか反射波が見られ，東北日本弧内の下部地殻相当の深度に反射面が存在することが示唆された。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所共同利用B（2023-B-04）の援助を受けました。

© The Seismological Society of Japan

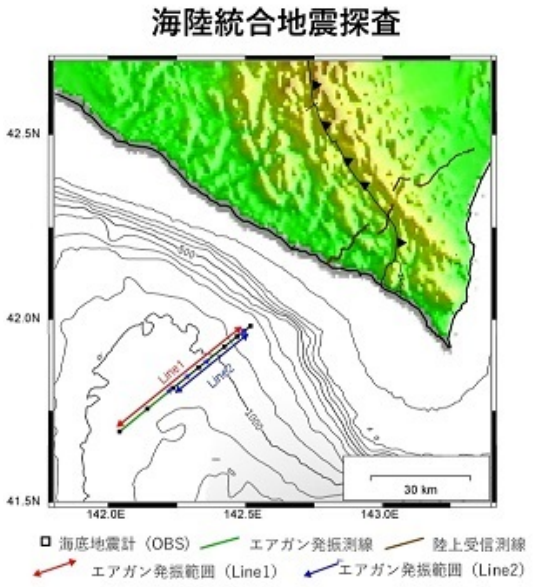
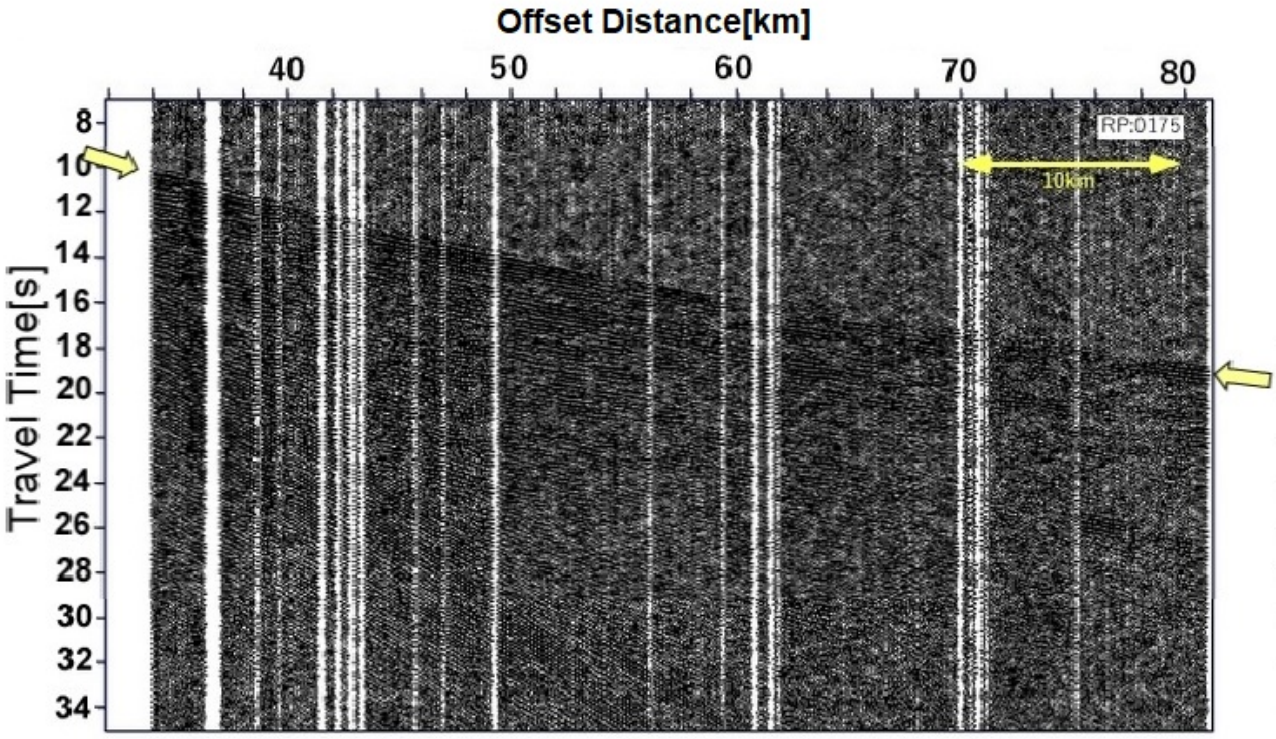


図1　海陸統合探査測線（上）と受振点記録（下）
受振点記録の黄色の矢印が初動



© The Seismological Society of Japan

Lateral structural variation and seismic activity in the central part of the NE Japan Arc from the 2019 onshore seismic profiling -II

*Takaya IWASAKI[1], Hiroshi Sato[2], Eiji Kurashimo[3], Hirokazu Ishige[4], Hidehiko Shimizu[5], Tatsuya Ishiyama[3], Takashi Iidaka[6], Masanao Shinohara[3], Shinji Kawasaki[4], Susumu Abe[4], Naoshi Hirata[3]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JAPEX Research Center, Technical Division, JAPEX, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

Detailed structural variation in the crust and upper mantle under Central NE Japan arc was obtained from a series of integrated analyses from 2020 for onshore seismic refraction/wide-angle reflection data (Iwasaki et al., 2024, 2023a,b). These data were acquired in 2019 as the onshore part of the extensive onshore-offshore seismic expedition from the Yamato bank in the Sea of Japan to the Japan trench (Sato et al., 2021a,b). Our model for the whole crust and uppermost mantle (Fig. 1) has following features.
(1) Upper crust : The uppermost crust, which corresponds to sedimentary and volcaniclastic rocks, consists of undulated layers with Vp=1.6~5.5 km/s. Their geometry is well correlated with fault and caldera systems developed under successive tectonic processes in the NE Japan arc. The upper crystalline crust is composed of two parts. The upper part, 1.5-2.5 km thick, has a velocity ranging from 5.65~5.8 to 5.8-5.9 km/s. The velocity at its top shows a higher value (5.8 km/s) in the western part (the backarc basin basalt area) but decreases to 5.65-5.7 in the central part of the profile. Beneath the felsic caldera complex area (Ou backbone range), there exist local reflectors at a depth of 4-6 km with a velocity contrast of ~0.1 km/s. The velocity in the lower part is estimated as 6.0-6.2 km/s. The easternmost part (Kitakami Mts.) is characterized by an upper crustal block with a high velocity (Vp~5.0-5.9-6.3 km/s) descending westward beneath the Kitakami river valley. Such a feature represents the major geological structures including the Sue fault, Asahiyama flexure and Kashimadai fault.
(2) Middle/lower crust : The middle crust in our model is expressed as a 6-7 km thick layer with a velocity of 6.3-6.5 km/s. The velocity contrast between the upper and middle crust is 0.1-0.15 km/s with lateral fluctuation. The lower crust, composed of three layers with velocities ranging from 6.6 to 7.1 km/s, is generally reflective. At the bottom of the lowermost crust, there exists a 2-km thick high velocity gradient zone of 1.5- 2 s^{-1}, probably representing transition from the uppermost mantle to the lower crust material.
(3) Moho and uppermost mantle : The Moho is situated at 30.5-32 km depth. The Pn velocity is about 7.7 km/s. Due to the transition zone mentioned above, the velocity contrast at the Moho becomes only 0.2~0.3 km/s. The uppermost part of the mantle contains two velocity discontinuities at depths of 38 and 46 km with a contrast of 0.1~0.2 km/s.

The seismic activity beneath our profile line is well correlated to the lateral structural variation mentioned above.
(1) The Kitakami river valley to the Kitakami Mts. : Most of crustal events are occurring at depths of 2~15 km. The recent significant activity in this region is the 2003 Northern Miyagi earthquake (Mj 6.4) occurring around the Sue fault. Following aftershocks are distributed in the western half of our higher velocity block (Kato, N et al., 2004). Along the western boundary of this block, we also see some seismic activity extending to 15-km depth. In contrast, the seismicity beneath the Kitakami river valley is very low, indicating that the structure between these two blocks forms a significant mechanical boundary as well as the geological boundary.
(2) The felsic caldera complex area : Earthquakes in this area are concentrated at shallower depths (< 7-8 km), probably due to a shallower brittle-ductile transition zone associated with the volcanic activity.

© The Seismological Society of Japan

(3) Backarc basin basalt area : This area is characterized by rather high and deep seismicity extending to the lower crust. This suggests westward descending brittle-ductile transition zone, but the corresponding structural feature has not been found in our research as yet.

(4) Low frequency earthquakes : Low frequency events are occurring at depths of 17-40 km just within the reflective zones in the lower crust and upper mantle, suggesting upward fluid migration.

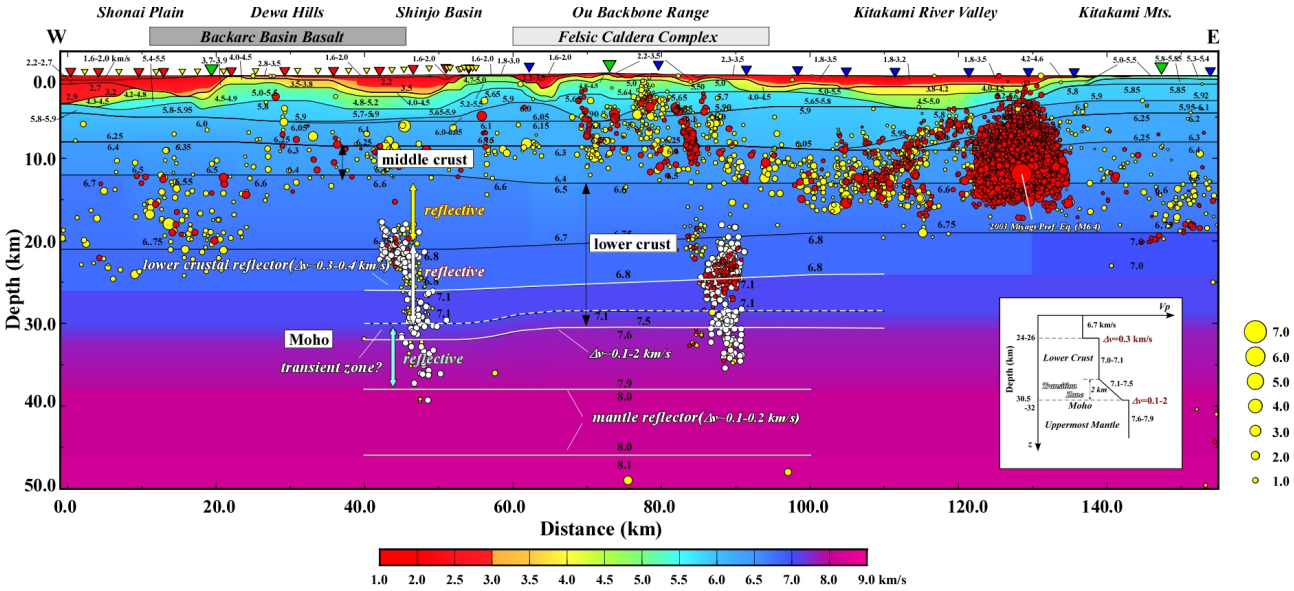


Fig. 1. Velocity structure model and seismic activity. Yellow circles: hypocenters from 2014-2023. Red circles: hypocenters from 2003 to 2004 incl. the 2003 Northern Miyagi earthquake and its aftershocks. White circles: low frequency earthquakes from 2010 to 2019. All of the hypocenters are provided from JMA.

© The Seismological Society of Japan

Shallow crustal structure and slip tendency of normal faults in the outer rise of the Japan Trench

*Yue SUN[1], Ayumu Miyakawa[2], Koichiro Obana[3], Ehsan Jamali Hondori[4], Jin-Oh Park[1]

1. Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), The University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 4. Geoscience Enterprise Inc. (GSE)

Many normal faults have developed in the outer-rise of the Japan Trench, including a mixture of recent faults caused by oceanic plate bending and reactivated faults that were created during plate formation. In the vicinity of the Japan Trench, outer-rise earthquakes (M8 class) which generated huge tsunamis had previously occurred after megathrust earthquakes. However, it is still unclear what kind of faults are most likely to trigger outer-rise earthquakes. It is important to understand the shallow crustal structure and geometry of the normal faults developing in the outer-rise of the Japan Trench, as well as the development process and activity of the normal faults in terms of evaluating the risk of earthquake occurrence under current stress filed. In this study, shallow crustal structure and fault geometry were studied using several MCS (Multi-Channel Seismic) profiles covering the seaward side of the Japan Trench. Fault strikes were extracted from the seafloor bathymetry map and dip angles were interpreted from the 2D seismic sections after a time-to-depth conversion of time-migrated profiles. To evaluate the activity of normal faults, the near-fault stress field was calculated from the earthquake catalog data, and the fault slip tendency was estimated with stress field and fault geometry. We found that the slip tendency in west-dipping faults is significantly higher than slip tendency in east-dipping faults. An area of low fault activity is recognized around 38.5˚-39˚N near the Japan Trench, where the magnetic anomalies do not continue and fracture zone faults are developing. Based on the fault activity analysis, this study shows that the earthquake occurrence in the outer-rise of the Japan Trench is spatially heterogeneous and more likely to occur on the west-dipping faults.

© The Seismological Society of Japan

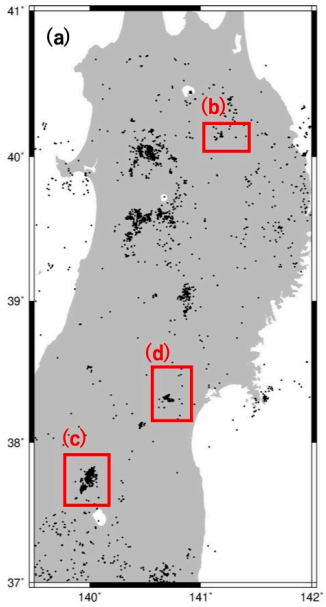
Spatial variation in the origin of S-wave polarization anisotropy in the upper crust of the Tohoku region, NE Japan. (3)

*Ryotaro Fujimura[1], Tomomi Okada[1], Tatsuya Mizuta[1], Martha Savage[2], Ryota Takagi[1], Keisuke Yoshida[1], Shinichi Sakai[3], Kei Katsumata[4], Mako Ohzono[4,3], Masahiro Kosuga[5], Takuto Maeda[5], Yoshiko Yamanaka[6], Hiroshi Katao[7], Takeshi Matsushima[8], Hiroshi Yakiwara[9], Ayaka Tagami[1], Shuutoku Kimura[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Toru Matsuzawa[1]

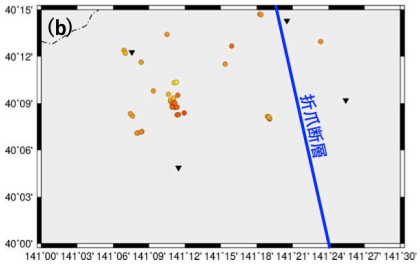
1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku Umoversity Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, 3. ERI, Univercity of Tokyo, 4. Hakkaido University, 5. Hirosaki University, 6. Nagoya University, 7. DPRI, Kyoto University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University

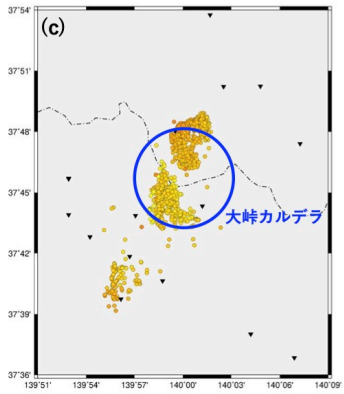
S波偏向異方性をもつ媒質中をS波が伝搬する際、振動方向が直行な二つのS波に分裂し, 異なる速度で伝搬する現象(S波スプリッティング)が生じる. この現象における速い波の振動方向は応力場や鉱物の結晶配向方向に従って変化する. 上部地殻では一般にSHmax（最大水平圧縮軸方向）に平行な方向の異方性が観測されるが, 断層や火山の近傍では広域応力場と異なる傾向も確認されている. また応力場の擾乱や断層の亀裂の回復に伴い異方性が時間変化することも知られている. 水田・他(JpGU, 2021)では, 東北地方全域にて広くS波スプリッティングを利用した異方性解析を行った. 特に2011年東北沖地震の前後での異方性の方向と大きさの変化を測定し, 地震活動の活発化と異方性の増大との関係を検証した. この解析には2008年12月から2016年4月の期間の定常・臨時地震観測データを利用し、MFAST(Multiple Filter Automatic Splitting Technique, Savage et al., 2010)を用いてS波スプリッティングのパラメータを測定した. また一部地域では2024年7月までに得られた波形を用いたパラメータ推定も行い, 異方性の時間変化の推定を行った.
本研究では, 水田・他(2021)にて得られたデータのうち, 断層平行の異方性が顕著に見られた岩手県内陸北部, 東北沖地震後に群発地震が発生した山形・福島県境と仙台大倉地域の3地域に注目した. 異方性と局所応力場, 地殻構造との詳細な比較を行うことで, 異方性方向の分布の特徴を再検討し, 異方性の起因推定を行なった. 応力場については, 岡田・他(2022)にて東北地方全域で推定されたメカニズム解から応力テンソルインバージョン(Michael,1987)を用いて推測された最大水平圧縮(SHmax)方向との比較を行った.
岩手県内陸北部では, 水田・他(2021)の他, 2022年以降に異方性の方向の時間変化も見られたため, 最近の地震の発生状況やメカニズム解から推測される応力場との対応も踏まえた異方性の検証も行った. およそ東西方向のSHmaxと南北方向の走向をもつ折爪断層のそれぞれに平行な異方性が見られた. 特に後者は断層を貫くような波線経路を通る地震波から顕著に検出されたことから, 断層平行のフラクチャによって生じる異方性であると考えられる.
山形・福島県境では、Yoshida & Hasegawa (2018a)にて再決定された震源カタログを利用した詳細な異方性媒質の分布を推測した.応力場と整合的な異方性の他に, 大峠カルデラおよびその付近での異方性の不均質性や, 猫魔火山近傍でのSHmax方向と異なる方向の異方性を検出した.
仙台市西部・大倉地域では東北沖地震直後から数年に渡り群発地震が発生しており, Yoshida & Hasegawa (2018b)にて震源再決定が行われ, 震源の面的分布から複数の断層の存在が推測された.再決定震源カタログを用いることで, 震源域近傍の局所的な異方性の分布を推測し, 断層毎に異なる異方性の傾向を得た.
In this study, we examined the spatial variation of shear wave splitting in some seismically active areas of northeastern Japan. We used shear wave splitting parameters, i.e., fast shear wave oscillation direction (FSOD) and delay time between the fast and slow shear waves estimated using MFAST (Savage et al., 2010) by Mizuta et al. (JpGU, 2021) and by this study. We estimated the maximum compressional stress orientation from stress tensor inversion (Michael, 1987) of focal mechanisms by P-wave initial motion (Okada et al., 2022) for comparison. The obtained FSODs showed the complex distribution of stress-induced and structure-controlled anisotropy in each area.

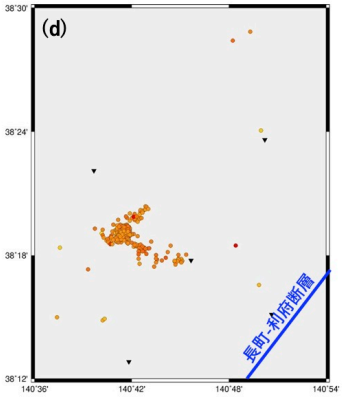
© The Seismological Society of Japan



(a) Mizuta (東北大修論, 2021)で用いられた震源分布(黒点)と対象領域(赤枠, 右図と対応)

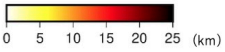






(b)岩手県内陸北部
(c)山形・福島群発地震 震源域
(d)仙台大倉群発地震 震源域

※1 観測点位置を▼, 震源を以下カラーバーの通りに深さで色付けして表示
※2 (b)では気象庁一元化震源, (c)及び(d)ではそれぞれYoshida & Hasegawa (2018)の再決定震源を使用



© The Seismological Society of Japan

Shear wave splitting and seismic velocity structure in the onshore focal area of the 2024 Noto Peninsula earthquake, central Japan

*Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ayaka Tagami[1,5], Ryotaro Fujimura[1], Ryota Takagi[1], Keisuke Yoshida[1], Satoshi Matsumoto[3], Kentaro Emoto[3], Yoshiko Yamanaka[4], Kei Katsumata[5], Takuto Maeda[6], Motoko Ishise[7], Shin'ichi Sakai[8], Masatoshi Miyazawa[9], Hiroshi Yakiwara[10], Kazutoshi Imanishi[11], Naoki Uchida[1], Satoshi Hirahara[1], Shu'utoku Kimura[1], Toshiko Terakawa[4], Mako Ohzono[5], Takuo Shibutani[9], Takahiro Shi'ina[11], Yoshihiro Hiramatsu[12]

1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. Kyushu University, 4. Nagoya University, 5. Hokkaido University, 6. Hirosaki University, 7. Yamagata University, 8. University of Tokyo, 9. Kyoto University, 10. Kagoshima University, 11. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 12. Kanazawa University

Introduction

The M7.6 Noto Peninsula earthquake occurred on 1 January 2024 in the Noto region of Ishikawa Prefecture. Seismic activity in the area has increased since around August 2020. Possible causes of the increased seismic activity include stress changes due to crustal deformation sources and increased fluid pressure. In this study, following the analysis in the seismic swarm area northeast of the Noto Peninsula (Okada et al., https://doi.org/10.1186/s40623-024-01974-0, 2024a), S-wave splitting using temporary and permanent stations in the epicentral area was investigated. Seismic wave velocity tomography analysis was also conducted to investigate the seismic wave velocity structure in the onshore source region.

Data and methods

Waveform data were collected from temporary stations in the source region from the end of June 2022 (Sakai et al., https://doi.org/10.5281/ZENODO.6767362, 2022; Okada et al., https://doi.org/10.5281/zenodo.10939231, 2024b) and from permanent stations. Seismographs were short-period (natural frequency: 1 Hz or 2 Hz) or broadband. Sampling frequencies are 100 Hz or 250 Hz.For S-wave splitting, this study uses MFAST (Savage et al., 2010), based on Silver and Chan (1991), which performs a cluster analysis of the results of analyses with time windows of various locations and lengths. This is expected to provide a stable and fast estimation of S-wave anisotropy.The double-difference tomography method is used for the seismic wave velocity structure (Zhang and Thurber, 2003, 2006); 8766 earthquakes from February 2020 to April 2024 were used in the analysis.

Results
Spatial distribution of S-wave polarization anisotropy

The predominant direction of anisotropy throughout the peninsula was NE-SW. This direction generally coincides with the strike direction of faults and folds and may be due to anisotropy caused by their tectonic properties. In addition, NW-SE anisotropy, which generally coincides with the direction of the axis of maximum horizontal compression (e.g., Terakawa and Matsu’ura, 2010; Tagami and Okada, 2024), and north-south anisotropy were also observed in some areas.

Seismic wave velocity structure

© The Seismological Society of Japan

A low Vs and high Vp/Vs region was identified in the hypocentral area at a depth of 18 km. Slightly larger P-wave velocities were obtained in this region compared to the surrounding area. The Tertiary igneous rocks are distributed in the target area, suggesting that the low Vs and high Vp/Vs region may represent an old magma reservoir and that fluids released from/through it are involved in the 2024 Noto Peninsula earthquake and proceeding swarmseismic activity that happened before the 2024 earthquake.In the shallow crust, the hanging wall of the fault has low velocities. This existence of a shallow low-velocity zone may be interpreted as the structure of a normal fault that once formed in this region.

Discussion

The low velocity in the shallow part of the hanging wall side of the fault and the anisotropy due to structural properties indicate a complex structure in which the structure of normal faults that developed in this region coexists with a compressional structure due to the present stress field. On the other hand, a region of low Vs and high Vp/Vs was identified deep in the epicentral area, suggesting a relationship with fluids.

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session：S06. Crustal structure

Mon. Oct 21, 2024 10:30 AM - 11:30 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 1:30 AM - 2:30 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S06] AM-2

chairperson:Noriko Tsumura(Graduate school of Science, Chiba University)

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

[S06-06] Configuration of the Philippine Sea plate subducting from the Sagami Trough estimated with three-dimensional seismic velocity structures

*Makoto MATSUBARA[1], Shin'ichi Sakai[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S06-07] Geometry of subducting oceanic plate and its relation to overlying plate structure and seismicity in Nankai Trough

*Gou FUJIE[1], Kazuya Shiraishi[1], Takeshi Sato[2], Yanfang Qin[1], Gaku Kimura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC, 2. JMA)

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

[S06-08] Seismic Velocity Structure off the Kumano Basin ,the Nankai Trough derived from OBS data

*Tatsuya Fujinaka[1,2], Shuichi Kodaira[2,1], Ryuta Arai[2], Ayako Nakanishi[2], Yuka Kaiho[2], Yanfang Qin[2], Ryo Miura[2], Seiichi Miura[2], Yasuyuki Nakamura[2], Gou Fujie[2] (1. YNU, 2. JAMSTEC)

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

[S06-09] Detailed seismic structure of the tremor-to-trench area in the westernmost Nankai Trough inferred from full waveform inversion analysis

*Ryuta ARAI[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Tsutomu Takahashi[1], Yuka Kaiho[1], Yohei Hamada[1] (1. JAMSTEC)

Configuration of the Philippine Sea plate subducting from the Sagami Trough estimated with three-dimensional seismic velocity structures

*Makoto MATSUBARA[1], Shin'ichi Sakai[2]

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

1. はじめに
関東地域の下には太平洋・フィリピン海スラブが沈み込み、三重会合点が東京の南東に位置する。陸域には多くの活断層も存在する。防災科学技術研究所(防災科研)の高感度地震観測網(Hi-net)や気象庁、国立大学等の定常観測網のデータや東京大学地震研究所(東大地震研)が設置し防災科研に移管した首都圏地震観測網(MeSO-net) (Hirata et al, 2009)のデータから地震波の到達時刻データを読み取り、トモグラフィー法を適用して三次元地震波速度構造を推定した。

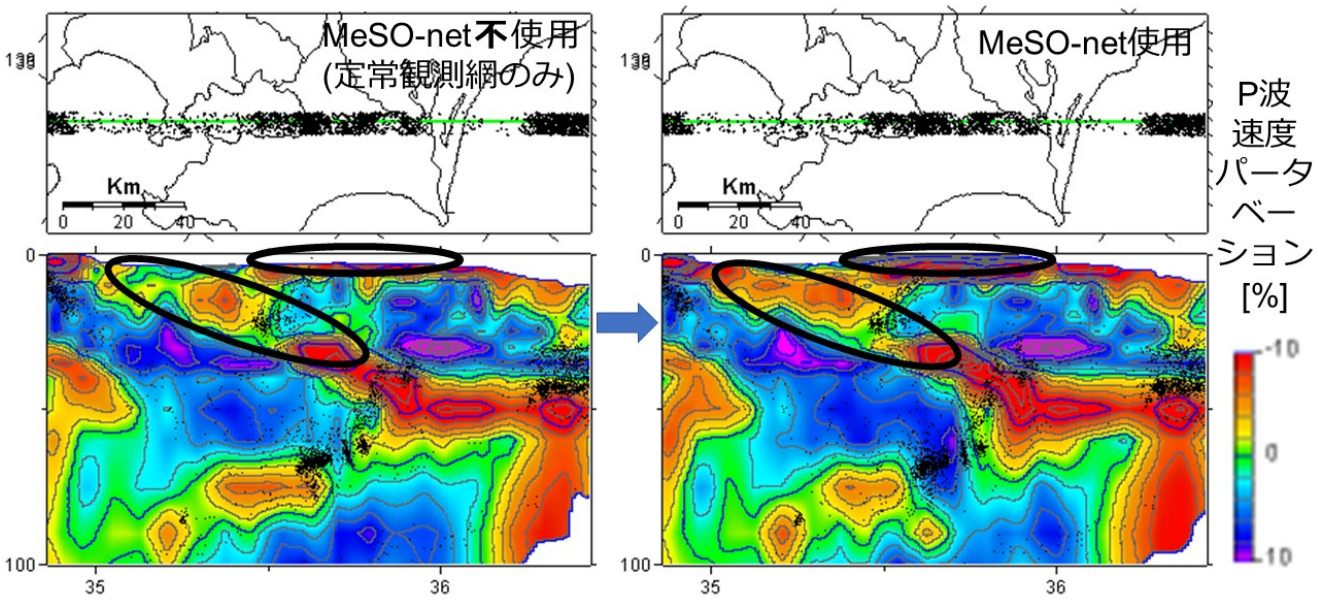
2. データ・手法
解析対象領域は北緯 34～37˚、東経138～142˚である。データは148,763個の地震から798観測点への6,296,216個のP波、4,463,943個のS波到達時刻である。Zhao et al. (1992)の手法にスムージングと観測点補正値を導入したMatsubara et al. (2004)のトモグラフィー法を用いた。日本全国を対象としたMatsubara et al. (2022)ではグリッド間隔は0.1˚、分解能0.2˚であったが、本解析ではグリッド間隔は0.05˚、分解能は0.1˚と精度を目指した。19回のインバージョンで、残差の二乗平均平方根P波で0.405 sから0.139 sへ、S波で0.665 sから0.185 sへ減少した。

3. 結果・議論
沈み込む太平洋・フィリピン海スラブは低速度な海洋地殻と高速度な海洋マントルの組み合わせとしてイメージングされた。東京湾下では深さ20～25km付近にフィリピン海プレートの上面境界が位置する。本解析ではMeSO-netデータを用いることにより、Matsubara et al. (2022)よりも分解能が向上し、さらに相模トラフから沈み込むフィリピン海スラブと陸側のユーラシアプレートの地殻浅部(深さ0～10km)の構造が解明できた。深さ40～60km付近では、フィリピン海プレートの深部では、太平洋プレートと会合する。Uchida et al. (2010)ではフィリピン海プレートは霞ヶ浦の北側まで沈み込んでいると考えられていたが、Ishise et al. (2020)ではフィリピン海プレートは霞ヶ浦の南側までで、霞ヶ浦以北はオホーツクプレートのマントルウェッジの異方性を示すと指摘されている。本解析結果ではフィリピン海プレート最上部の海洋地殻の低速度域の先端に鉛直方向に約30km北東南西方向に幅約20kmの低速度領域が存在する。フィリピン海プレート上面付近の微小地震活動は霞ヶ浦の中ほどで微小地震活動は先の低速度域の南西側までである。Vp/Vsでは海洋地殻では高い値が見られるが、霞ヶ浦下の微小地震域から北東側ではやや高い程度である。フィリピン海プレートの北東端については、トラフから北東側へ沈み込むフィリピン海スラブが北西へ向かって沈み込んでいる場所でもあり、先端の形状を含め、発震機構解等を含めたさらなる解析が必要である。

References
Hirata, N; Sakai, S.; Sato, H.; Satake, K.; Koketsu, K., 2009. An Outline of the Special Project for Earthquake Disaster Mitigation in the Tokyo Metropolitan Area -subproject I: Characterization of the plate structure and source faults in and around the Tokyo Metropolitan area. Bull. Earthq. Res. Inst. 84, 41-56.
Matsubara M.; Hirata, N.; Sato, H.; Sakai, S. 2004. Lower crustal fluid distribution in the northeastern Japan arc revealed by high resolution 3D seismic tomography. Tectonophysics 388, 33-45, doi:10.1016/j.tecto.2004.07.046.
Matsubara, M., T. Ishiyama, T. No, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, and S. Kamiya, Seismic velocity structure along the Sea of Japan with large events derived from seismic tomography for

© The Seismological Society of Japan

whole Japanese Islands including reflection survey data and NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, Earth, Planets and Space (2022) 74:171, doi:10.1186/s40623-022-01724-0



Geometry of subducting oceanic plate and its relation to overlying plate structure and seismicity in Nankai Trough

*Gou FUJIE[1], Kazuya Shiraishi[1], Takeshi Sato[2], Yanfang Qin[1], Gaku Kimura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC, 2. JMA

南海トラフの熊野灘は、世界で最も集中的に研究されているプレート沈み込み地震発生帯の一つであり、海底観測網(DONET)による常時地震・津波観測が世界に先駆けて2011年に導入されたほか、多くの二次元・三次元反射法地震探査や、海底地震計(OBS)を多数用いた稠密な二次元屈折法地震探査による集中的な地下構造探査観測、さらにはIODP(国際深海科学掘削計画)による大深度掘削も実施されている。これらの成果により、多様なスロー地震活動が不均質に発生している様相や、地震波速度(Vp)の低速度帯の存在など付加体内部の詳細構造が明らかになっている。なかでも注目される特徴の一つは、上盤プレート内に発達した巨大分岐断層(mega-splay fault)である。分岐断層とは、沈み込むプレート境界断層(海洋地殻上面)から上向きに分岐する断層で、南海トラフの他、日本海溝域など、他の沈み込み帯でも広く観測されているものである。しかし、熊野灘の分岐断層は、他の沈み込み帯はもちろんのこと、南海トラフの他の海域でも見られないほど巨大で地震波の反射強度が非常に強いという特徴がある。これは、熊野灘の分岐断層は、広範囲にわたる顕著な物性境界であることを示している。実際、反射法地震探査や屈折法地震探査の結果から、巨大分岐断層と海洋プレートの間には厚い低速度層が存在するほか、巨大分岐断層の上側には顕著な高速度帯が発達していることが分かってきた。しかし、なぜ熊野灘の分岐断層だけが、他の海域とは異なり特異的に発達しているのかについてはよく分かっていないのが現状である。

分岐断層は海洋プレートの沈み込みに伴いプレート境界付近に形成された構造境界であり、その発達過程の理解には海洋プレートの表層形状など沈み込み帯へのインプットである海洋プレートの実態把握も不可欠である。そこで本研究では、沈み込むフィリピン海プレートの表層付近までの地下構造を広域、詳細に把握することを目指して、既存の二次元屈折法地震探査データを波形インバージョン解析(FWI)によって再解析した。得られたVp構造モデルは、前弧海盆の形状やその内部に発達するBSR、巨大分岐断層、そして沈み込む海洋地殻の上部まで、複数の層境界を明瞭な速度値の境界としてイメージングできている。さらにFWIによるVp構造を時間断面に変換すると、別途地震波反射法構造探査によってイメージングされた層境界と非常によい一致を示すことから、反射法データもよく説明できるモデルである。得られたのVp構造で特に注目すべきは、深部の構造、特に海洋地殻上面、すなわち沈み込む海洋プレートの形状である。深度断面で見ると、前弧海盆の外縁部付近までは海洋プレートの傾斜(dip angle)はわずか2、3度程度で平坦であるが、その付近で急激に傾斜が変化し10度を越えることが明らかになった。この dip angle の変化点は巨大分岐断層が傾斜角を急激に上向きに変化させる位置に相当しているほか、それより深部でのみ巨大分岐断層の反射強度が大きく分岐断層の上側に高Vp帯が発達しているなど、分岐断層の発達やスロー地震活動の分布と興味深い相関を示している。これらの観測事実に基づき、我々は、プレート境界断層(海洋プレート形状)の急激な形状の変化が、その上に乗っているプレート内の応力分布に影響を及ぼし、巨大分岐断層直上の高Vp層の発達やスロー地震活動の広がりを規定している可能性を提案する。

© The Seismological Society of Japan

Seismic Velocity Structure off the Kumano Basin ,the Nankai Trough derived from OBS data

*Tatsuya Fujinaka[1,2], Shuichi Kodaira[2,1], Ryuta Arai[2], Ayako Nakanishi[2], Yuka Kaiho[2], Yanfang Qin[2], Ryo Miura[2], Seiichi Miura[2], Yasuyuki Nakamura[2], Gou Fujie[2]

1. YNU, 2. JAMSTEC

南海トラフでは、通常の地震と比べてゆっくりした断層滑りによる「スロー地震」が発生することが知られている。このうち、超低周波地震(VLFE)や低周波地震(LFE)は東南海地震や南海地震などの巨大地震の震源域より深い側と、トラフ軸近くの浅部でも発生することが知られている。熊野灘における浅部VLFEの発生は一様ではなく、中部から西部にかけてクラスター状に分布している(Takemura et al.,2023)。しかし、熊野灘周辺で発生するVLFEがクラスター状に分布する要因は未だに明らかになっていない。2022年に海洋研究開発機構（JAMSTEC）は、熊野灘沖周辺のVLFEの非活動域と地下構造の関係を明らかにするため、海底地震計(OBS)を用いた屈折法・広角反射法地震探査（OBS 探査）を実施した。この測線は、2006年に実施した探査測線の一部と重複しており、今回の探査データと統合することによって、トラフ軸付近から陸側では1.6km間隔のデータセットを構築した。本研究では、熊野灘周辺における地下構造を明らかにし、VLFE活動域で行われた先行研究の結果と比較することによって、VLFE活動を規定する構造要因を明らかにすることを目的とする。OBS探査データの解析には屈折波初動、及び反射波を用いた走時トモグラフィー（Fujie et al.,2006,2013)を行った。初期モデルは、南海トラフ中部の既存研究（Qin et al.,2020）を参照して構築し、屈折波初動とモホ面反射波を統合したトモグラフィーを行った。屈折波初動を用いた解析からは、陸側50km程度、深さ9km程度まで広がる上盤側の低速度域(P波速度4km/s)、沈み込む海洋マントルを示す陸側に傾斜したP波速度8km/sの速度領域、トラフから60km地点で周囲よりも約1km厚い海洋地殻等が確認できた。この最終モデルの7.8km/sの速度層を境界面に設定し、モホ面の反射波走時を統合したトモグラフィーでは、初期モデルが142.7(ms)であったが、最終モデルは61.8(ms)となった。モホ面については、トラフから陸側30km地点で急激に沈み込む形状や海側60km地点で長さ20km程度の凹む形状が確認された。今後は、より詳細な速度構造モデルを構築し、沈み込む海洋プレート上面の形状や上盤側の不均質構造等を求め、分解能評価や不確定解析を行いながら、本調査領域の地下構造とスロー地震活動の関係を議論する。

© The Seismological Society of Japan

Detailed seismic structure of the tremor-to-trench area in the westernmost Nankai Trough inferred from full waveform inversion analysis

*Ryuta ARAI[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Tsutomu Takahashi[1], Yuka Kaiho[1], Yohei Hamada[1]

1. JAMSTEC

南海トラフや日向灘、ニュージーランド・ヒクランギ海溝では、スロースリップや低周波微動といったスロー地震がプレート沈み込み帯浅部で発生することが確認されている（Akuhara et al. 2023; Yamashita et al., 2021; Iwasaki et al., 2022）。これらの現象は断層内の高圧流体と関連して発生すると考えられているが、発生域の構造や物性に関しては依然不明な点が多い。南海トラフ内においては熊野灘、室戸沖および日向灘・足摺沖で、浅部スロー地震の発生が確認されているが、東海沖のように発生が報告されていない場所も存在する。プレート境界で発生する多様な断層すべりのメカニズムを理解する上で、こうした発生場所の地域差が生まれる要因についても理解する必要がある。海洋研究開発機構海域地震火山部門では、2018年度以降、南海トラフ全域のプレート沈み込み構造を高解像度で明らかにし、プレート境界断層でのすべり現象の多様性を支配する要因を理解することを目的として、稠密な地震波構造探査を継続的に実施している。2021年度には、海溝軸近傍で低周波微動が発生する場所の一つである日向灘・足摺沖において反射法・屈折法地震探査を実施した。本発表では、低周波微動発生域を沈み込み方向に縦断する探査測線（HYU04測線）での解析結果に基づき、プレート境界周辺の詳細構造について議論する。
2021年に取得した屈折法データに2008年に同一測線上で実施した既存データ（HY01測線; Nakanishi et al., 2018）を統合し、海底地震計1.7 km間隔の稠密な屈折法データを作成した。このデータセットに対して初動走時トモグラフィおよび波形インバージョン解析を適用し高解像度のP波速度構造を推定したところ、深さ5–8 kmのプレート境界周辺に明瞭な低速度域が点在することがわかった。この低速度パッチは海溝軸から沈み込み方向に約50 kmの範囲に局在しており、また低周波微動の活動域（Yamashita et al., 2021）と整合的であることから、微動活動と関連した構造であることが示唆される。同様の構造的特徴として、熊野灘で発生した低周波微動の波形を解析したToh et al. (2023) は、数メートルから数十メートルスケールの微小な散乱体が微動発生域に多数分布するモデルを提示している。その地質学的実態としては、Hirose et al. (2021) が同じく浅部スロー地震の発生領域である室戸沖での掘削孔から噴出する流体を観測し、デコルマ面直下に数百メートル幅、数十メートル厚の高圧な帯水層が存在することを指摘している。本研究で検出された低速度パッチもプレート境界断層に局在した帯水層に関連した構造を反映している可能性がある。

参考文献
Akuhara et al. (2023) Geophys. J. Int., 235, 2727–2742
Hirose et al. (2021) J. Geophys. Res. Solid Earth, 126, e2021JB021831
Iwasaki et al. (2022) J. Geophys. Res. Solid Earth, 127, e2021JB022161
Nakanishi et al. (2018) in Geology and Tectonics of Subduction zones: A Tribute to Gaku Kimura, 69–86
Toh et al. (2023) Geophys. Res. Lett., 50, e2022GL101851
Yamashita et al. (2021) Earth Planets Space, 73, 196

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S04. Tectonics

Mon. Oct 21, 2024 9:00 AM - 10:15 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S04] AM-1

chairperson:Masataka Kinoshita(ERI, UTokyo), Genti Toyokuni(Tohoku University)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S04-01] Local heat flow variations on the outer rise of the Japan Trench: Implications for heterogeneous structure of the oceanic crust

*Makoto YAMANO[1,2], Masataka KINOSHITA[3] (1. AORI, Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. ERI, Univ. of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S04-02] The Stealth Hotspot Volcanoes -Hotspot volcanoes nestled within island arc volcanic chains that cause catastrophic eruptions-

*Genti TOYOKUNI[1], Dapeng ZHAO[1] (1. RCPEVE, Department of Geophysics, Tohoku University)

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

[S04-03] Deep structure of Java subduction zone: Comparing with Japan

*Dapeng ZHAO[1], F. Xie[2], Z.W. Wang[2] (1. Tohoku University, 2. Southern University of Science and Technology)

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

[S04-04] A year continued sluggish slip along the Izu-Bonin plate boundary

*Yoshio FUKAO[1], Tatsuya KUBOTA[2], Hiroko Sugioka[3], Ryo Furue[1] (1. JAMSTEC Yokohama Institute, 2. NIED, 3. Kobe Univ)

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

[S04-05] Toward detection of slow slips in Hyuga-Nada: Challenge with seafloor optical-fiber strainmeter

*Masataka KINOSHITA[1,2], Eiichiro Araki[2], Rie Nakata[1], Tomohiro Toki[4], Yoshitaka Hashimoto[3], Yohei Hamada[2], Yusuke Yokota[5], Yusuke Yamashita[6], Michiyo Sawai[7] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Kochi University, 4. University of Ryukyus, 5. Institute of Industrial Science, UTokyo, 6. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 7. Chiba University)

Local heat flow variations on the outer rise of the Japan Trench: Implications for heterogeneous structure of the oceanic crust

*Makoto YAMANO[1,2], Masataka KINOSHITA[3]

1. AORI, Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. ERI, Univ. of Tokyo

日本海溝海側のアウターライズ上では、沈み込む太平洋プレートの年齢に対して異常に高い熱流量が広範囲で観測されている（Yamano et al., 2014）。高熱流量は海溝軸から150 km付近まで及んでいるが、この範囲での値は一様ではなく、海底年齢に応じた50 mW/m^{2}程度から100 mW/m^{2}を超える値まで、大きな変動を示す。この地域では、海洋地殻～マントル最上部の地震波速度構造にも異常が見られ、沈み込みに伴う太平洋プレートの屈曲によって亀裂が生じ、水が入り込んだことを示すものと考えられている（Fujie et al., 2018）。熱流量と速度構造の異常の範囲がほぼ合致することから、海溝海側で海洋地殻が破砕されて浸透率が増加し、流体循環が発達して地殻深部から熱を効率的に汲み上げて高熱流量を生じる、というモデルが提案されている（Kawada et al., 2014）。

上記のように、このアウターライズ高熱流量帯での観測値には大きなばらつきが見られ、短い間隔での測定が行われた地域では、熱流量が数kmのスケールで変動することが判明している（山野・川田, 2017）。特に詳細な熱流量分布が得られているのは、北緯39.0度付近の海溝に直交する測線（東西方向）である。海溝軸からの距離60～80 km付近（正断層が発達していない領域）において、数百m間隔での測定により、3～5 kmのスケールで大きな増減（60～110 mW/m^2）を繰り返すという特徴が明らかになっている。このような短波長の変動を生じる原因は、変動のスケールから考えて、海洋地殻内にある。海洋地殻にはもともと不均質性があり、プレート屈曲による破砕も不均質に進行すると考えられる。そのため、破砕の及ぶ深さや浸透率が場所によって異なり、流体循環により汲み上げられる熱の量にも差があり、海底での熱流量の変動を生じていると推定される。

上に述べた変動は海溝に直交する方向のものであるが、海底地形に表れた断層の分布や走向にも見られるように、海洋地殻の構造や破砕過程は海溝に平行な方向にも不均質であると考えられる。これに対応して熱流量がどのように変化するかを調べるため、南北方向の2本の測線に沿って、数百m間隔の高密度での測定を行った。この2本の測線は、上記の東西方向測線（北緯39.0度付近）と、熱流量の山近傍と谷近傍で交わっている。得られたデータから、両測線ともに、東西測線と同様に数kmのスケールで熱流量が変動することが明らかになった。変動の振幅は、東西測線の熱流量の山を通る測線では東西測線と同程度であり、谷を通る測線ではこれより小さい。このような熱流量分布は、日本海溝アウターライズにおける海洋地殻の破砕とそれによる流体循環の発達は非常に不均質で、海溝に平行な方向にも大きく変化することを示唆している。

© The Seismological Society of Japan

The Stealth Hotspot Volcanoes -Hotspot volcanoes nestled within island arc volcanic chains that cause catastrophic eruptions-

*Genti TOYOKUNI[1], Dapeng ZHAO[1]

1. RCPEVE, Department of Geophysics, Tohoku University

過去に発生した破局噴火（VEI≧7）のほとんどは、プレート沈み込み帯の島弧火山列に位置する火山におけるものである。破局噴火を引き起こすメカニズムについては、これまで山体等の浅部構造や、浅部のマグマ輸送システムと関連づけて説明されることが多く、プレート下の上部マントル構造など深部構造を含めて議論されることはあまりなかった。

沈み込み帯における地震波トモグラフィーでは、沈み込むスラブの上のマントルウェッジ内と、スラブ下のマントルに低速度異常領域が見いだされるという共通した特徴がある。マントルウェッジ内の低速度は、コーナーフローや沈み込むスラブからの脱水で説明でき、通常の島弧火山の成因として盛んに議論が行われてきた。一方スラブ下の低速度の原因としては、沈み込みに伴うリターンフローである熱いマントル上昇流（SHMU; Subslab hot mantle upwelling）等が考えられている。近年はプレート境界型巨大地震やスロー地震の発生との関わりが議論されるなど注目度が高まっている[1]。

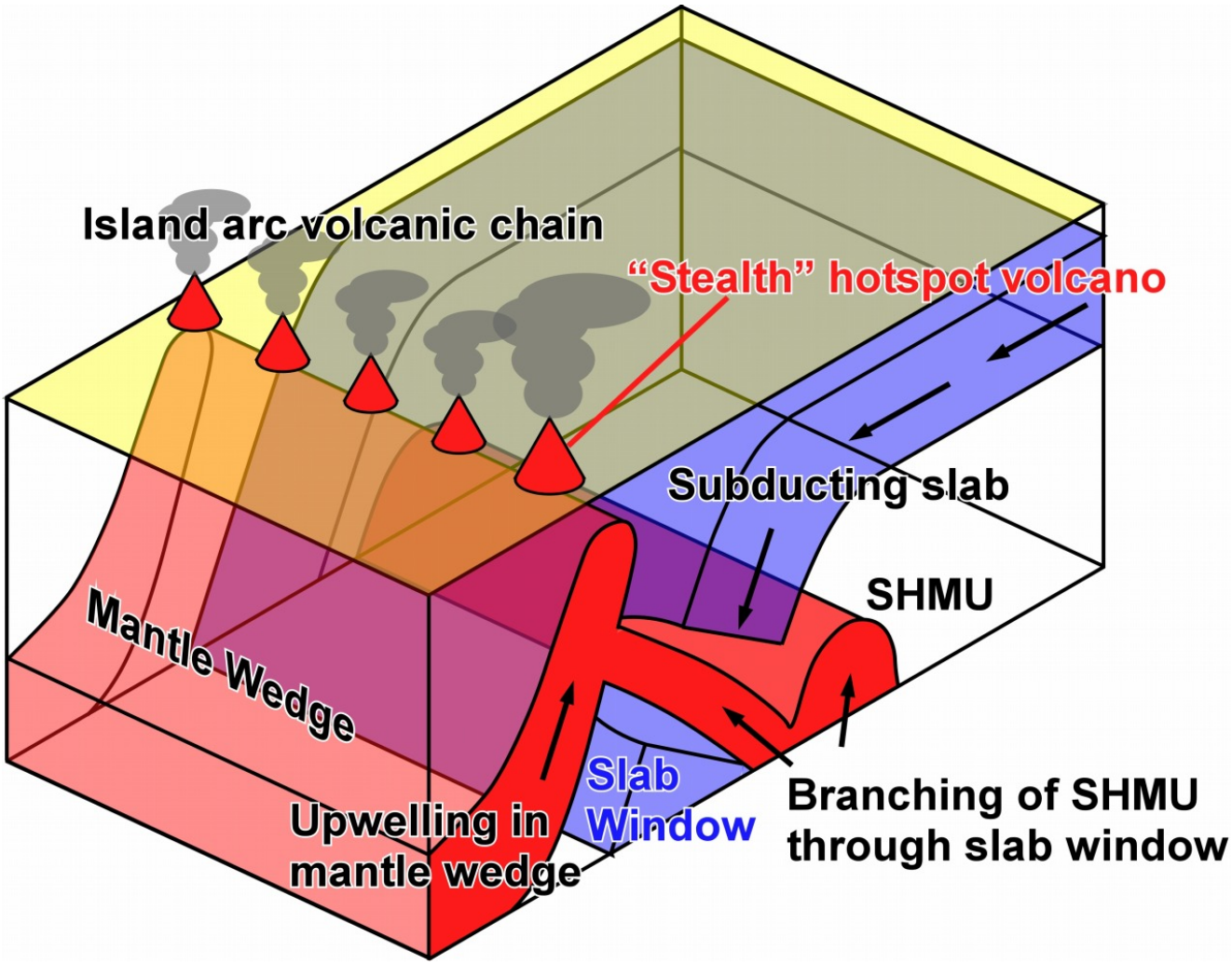
我々は東南アジア[2]、日本[3]、地中海東部[4]、オセアニア[5]、南米の5領域を対象に、地表から核・マントル境界までの詳細な*P*波トモグラフィーモデルを得て、破局噴火を引き起こす火山と上部マントル構造との比較を行った。用いたトモグラフィー手法は「マルチスケール・グローバルトモグラフィー法」と呼ばれるもので、対象地域下にグリッドを密に配置することで、グローバルトモグラフィーでありながらリージョナルトモグラフィーと同等の分解能を実現できる。またリージョナルトモグラフィーと異なり、全地球で絶対走時残差を取り扱うことができるため、遠地地震波線を用いる際に領域外不均質の影響を除去する仮定を必要としない。さらに直達*P*波だけではなく、4種類の後続波（*pP*、*PP*、*PcP*、*Pdiff*）も用いることで波線密度を向上させた。5領域それぞれで、インバージョンに使った到着時刻データ数は500～700万個である。

結果として、破局噴火を引き起こす火山のうち少なくとも半数は、スラブ・ウィンドウ（スラブの穴や裂け目）の直上か極めて近傍で、かつSHMUが発達した場所に位置していることが明らかとなった。このような場所では、マントルウェッジ内のコーナーフローとSHMUが、スラブ・ウィンドウを通して混合していると考えられる。またスラブ・ウィンドウがボトルネックとして働くことで、間欠的に大量のマントル物質が湧昇する可能性が高い。したがって沈み込み帯における破局噴火は、島弧火山列の火山のうち、こうした特殊な条件が重なった場所で発生すると考えることができる。SHMUは、スラブ下にトラップされたホットプルームの一種と考えることができるため、SHMUに関連した火山は、島弧火山列に紛れ込んだホットスポット火山（＝「ステルス・ホットスポット火山」）と捉えられる。このモデルの妥当性は今後さらに検討する必要があるが、破局噴火のリスクを深部構造から制約できる可能性があり興味深い。

[1] Fan, J., Zhao, D., 2021. Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes. Nat. Geosci. 14, 349–353.
[2] 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.
[3] Toyokuni, G., Zhao, D., Takada, D., 2024. Whole-mantle isotropic and anisotropic tomography beneath Japan and adjacent regions, in revision.
[4] Toyokuni, G., Zhao, D., 2024a. Whole-mantle tomography beneath eastern Mediterranean and adjacent regions, in revision.
[5] Toyokuni, G., Zhao, D., 2024b. Slab-plume interactions beneath Australia and New Zealand: New

© The Seismological Society of Japan

insight from whole-mantle tomography, under review.



© The Seismological Society of Japan

Deep structure of Java subduction zone: Comparing with Japan

*Dapeng ZHAO[1], F. Xie[2], Z.W. Wang[2]

1. Tohoku University, 2. Southern University of Science and Technology

The Java Island is located in the southern part of Southeast Asia, where the India-Australian plate is subducting beneath the Sunda plate. The strong plate convergence has resulted in clustered arc volcanoes and intense seismicity in Java. To better understand the arc magmatism and seismotectonics in the region, we use a tomographic method (*Zhao* 2015) to determine a high-resolution 3-D P-wave velocity (Vp) model of the crust and upper mantle down to 600 km depth beneath Java. The geometry of the subducting Australian slab is taken into account in the starting model to obtain a better tomographic result by inverting a large number of travel-time data of local and teleseismic events. Our results show lower intra-slab Vp anomalies at depths of ~100–200 km than other parts of the slab, which may reflect dehydration embrittlement and a slab hole. Weak low-Vp anomalies are revealed below the subducting Australian slab, which is probably due to the slab hole where subslab hot materials flow into the mantle wedge. This feature may be related to the occurrence of potassium-rich back-arc volcanoes and the lack of giant megathrust earthquakes (Mw 8.5) in Java. Our tomographic results also support the hot finger model for explaining the arc magmatism in Java, similar to that in Japan (*Zhao et al.* 1992, 2012). We also apply tilting-axis anisotropic tomography (*Wang & Zhao* 2021) to obtain a high-resolution 3-D Vp anisotropic model beneath the Java-Banda region. Our results show significant differences between Java and Banda in the pattern of anisotropy in both the subducting slab and its surrounding mantle, which reflect two distinctly different deformation modes in the two domains. Our results support the single-slab subduction model for the Banda region. In addition, trench-normal and upright fast-velocity-planes appear in the deep upper mantle, which may indicate material migrations in the big mantle wedge. Fast-velocity-planes in the shallow mantle exhibit a toroidal distribution, reflecting past counter-clockwise rotation and asthenospheric material extrusion.

References

Wang, Z.W., D. Zhao (2021). 3D anisotropic structure of the Japan subduction zone. *Science Advances* 7, eabc9620.

Zhao, D. (2015). *Multiscale Seismic Tomography*. Springer, 304 pp.

Zhao, D. et al. (1992). Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.* 97, 19909-19928.

Zhao, D. et al. (2012). Imaging the subducting slabs and mantle upwelling under the Japan Islands. *Geophys. J. Int.* 190, 816-828.

© The Seismological Society of Japan

A year continued sluggish slip along the Izu-Bonin plate boundary

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

1. JAMSTEC Yokohama Institute, 2. NIED, 3. Kobe Univ

１．序
伊豆・小笠原海溝におけるプレート沈み込みは非地震性滑りの代表例である。2015-2016にかけて、この海溝の内側深海底で水圧計8台による１年間のアレー観測（Fig.３）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（Kubota et al., 2021, GRL）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（Rapid Aseismic Slip）が発生したことを見出した(Fukao et al., 2021, JGR)。また前年度地震学会では、これらに先立って非地震性の早い滑りが何回か先行していたことを指摘した。今回は、(1)こうしたイベント的滑りと重なって年スケールのズルズル滑る成分が存在し、その時間推移はなる対数型の時間関数でよく近似できること、(2)滑りの始まり（t=0h）は 2015-05-30 の小笠原巨大超深発地震（Mw7.9, h=680km）の発震時に合致し、この巨大超深発地震を号砲として伊豆小笠原海溝のプレート間固着が広範囲に緩んだことを示す。
２．データ解析
小笠原巨大超深発地震の発生（t=0）から7時間後に小笠原海溝のOuter-riseでMw6.2の地震が発生、４週間後にはMw6.5の深発地震が起きた。この更に３か月後にはアレー直下でMw6.0の低角逆断層地震（Kubota et al., 2021, GRL）が発生した。アレー直下のプレート間滑りと小笠原深発地震との密接な関わりを示唆する記録例をFig.1に示す。この図はMw6.5の深発地震の発生を機にアレー直下の海底が一斉に隆起をしたことを示す。Fig.2Aは１年間にわたる海底の隆起沈降運動の経緯をまとめて示したものである。この図は、観測点間の水圧差を全ての観測点ペアについて求め、その１年を通した推移をプロットしたものである。この推移には なる対数型の時間関数が良くあてはまる。但し、t=0は2014-05-30 00:00:00、即ち、小笠原深発地震発生当日ゼロ時（UT）に対応する。観測点(i)と(j)の間の水圧差(Pj-Pj)を観測値とし、設定した断層面を縦横12x15の要素に分割し、各要素kの断層変位ベクトルDkを未知数とする逆問題を設定した。但し、観測点間の水圧差しかデータとして用いていないので、各要素断層変位の絶対値はユニークに決まらない。ここに得られている解は、プレート境界に沿って基本的には海溝側で大きな逆断層、陸側で相対的に小さな正断層のパターンである。得られた解に基づく海底水圧変化の推移をFig.2Bに示した。１年間の時間スケールと10-30kmの空間スケールの中で、観測とモデルが基本的に水圧差0-20hPaを識別していることがわかる。
３． まとめ
2015年伊豆小笠原海溝のずるずる滑り（Sluggish slip）は、5月30日のMw7.9小笠原巨大超深発地震をきっかけに始まった。・このずるずる滑りは１年近く続き、ときに高速滑りを伴った。最も顕著な高速滑りはMw6.0スラスト地震とそれに続く非地震性高速滑りである。ずるずる滑りにより観測点間の高低差は１年で最大20cmに達した。・滑りの時間推移は なる対数型の時間関数が良くあてはまる。このときt=0には小笠原巨大超深発地震の発震時が対応する。・小笠原巨大超深発地震の号砲によって、沈み込むスラブの先端から付け根のOuterriseまでがプレート間固着のタガを失い、我々の30kmアレーよりもはるかに大きなスケールでずるずる滑りが起きていたのではなかろうか？

© The Seismological Society of Japan

Fig.1

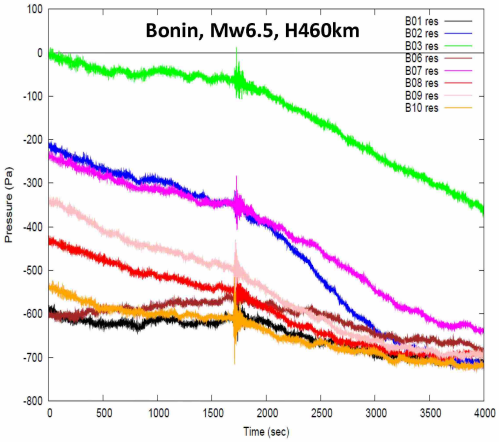


Fig.2A

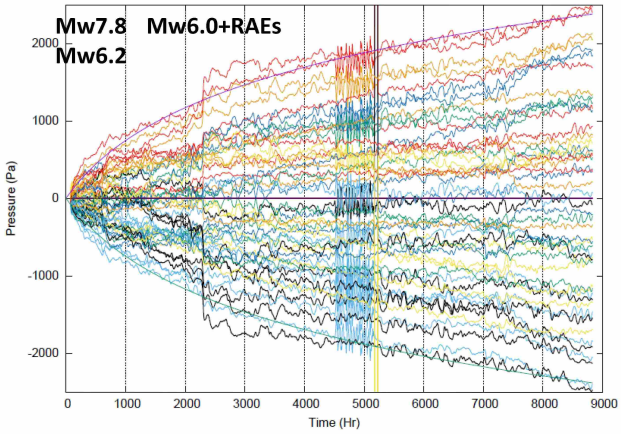


Fig.3

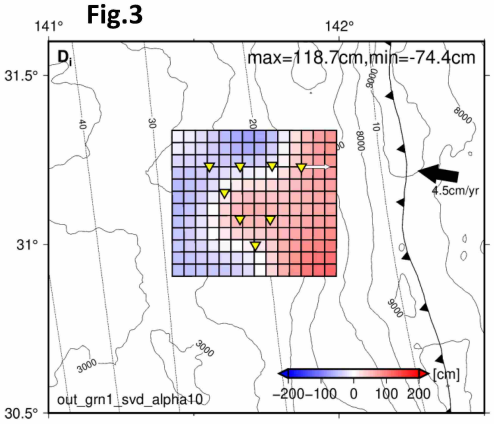
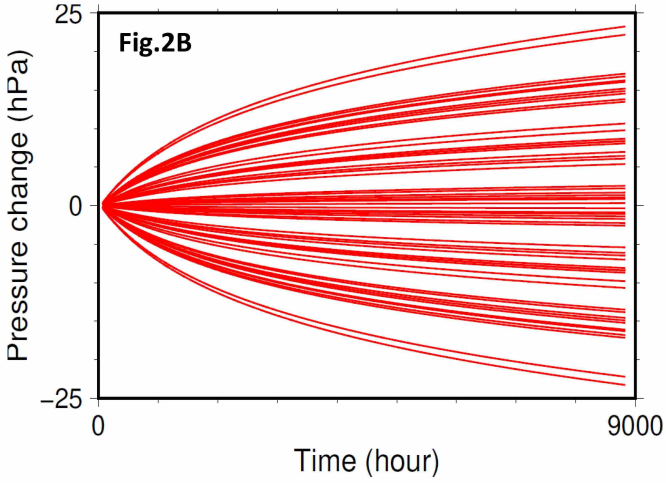


Fig.2B



© The Seismological Society of Japan

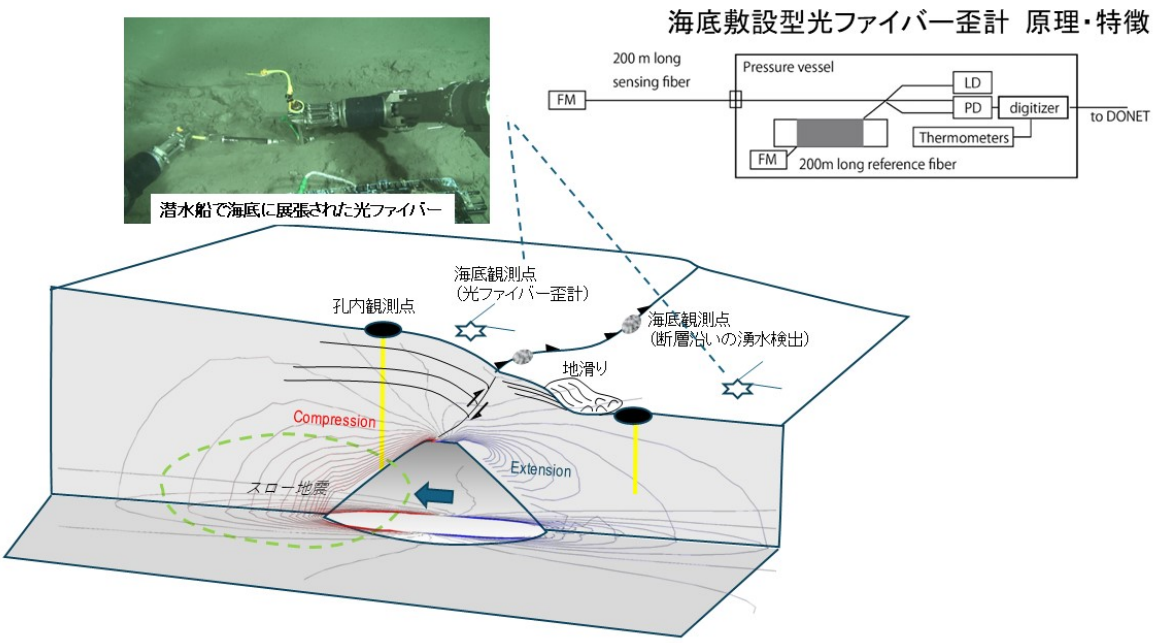
Toward detection of slow slips in Hyuga-Nada: Challenge with seafloor optical-fiber strainmeter

*Masataka KINOSHITA[1,2], Eiichiro Araki[2], Rie Nakata[1], Tomohiro Toki[4], Yoshitaka Hashimoto[3], Yohei Hamada[2], Yusuke Yokota[5], Yusuke Yamashita[6], Michiyo Sawai[7]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. Kochi University, 4. University of Ryukyus, 5. Institute of Industrial Science, UTokyo, 6. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 7. Chiba University

日向灘には、四国海盆と西フィリピン海盆の境界である九州ーパラオ海嶺（KPR）が沈み込んでいる。KPRとして沈み込んだ海山の周囲でスロー地震（微動・VLFE）が時折発生し，震源位置が数十 km/day 程度で移動することが知られている。一方、2024年8月8日16:43に発生した日向灘地震(M7.1)をはじめとするM7級地震の震央は、微動域のNW約50㎞にあり、KPRの延長上にある。スロー地震の発生原因の一つが間隙水圧異常とされる．一方海山や突起の沈み込みがスロー地震発生に大きく影響することも認識されてきた．海山等の沈み込みにより周囲の応力場が乱れ，破砕帯が形成され強度が低下して固着が弱まることを，海山直上の海底・掘削・陸上の観測により検証することを目的とした科研費（基盤研究S）「海山の沈み込みは巨大地震域の固着を弱めるか：南海トラフの2海山での検証」が，2024年から5年計画として採択された．海山沈み込みとスロー地震の関係を議論する上で、日向灘（海山・微動あり、SSE未検出）、室戸沖（海山・微動・SSEあり）、熊野沖（海山なし、微動・SSEあり）といったケースを比較検討する。日向灘ではこれまでYokota & Ishikawa (2019) による海底GNSS観測があるが、連続観測が存在しないため、SSEが存在するかどうかは不明である。そこで本プロジェクトでは、荒木らが開発し、南海トラフで設置実績のある海底設置型の光ファイバー歪計（OFS）2基を、日向灘に設置する計画である（図）。底設置型OFSは、光ファイバー200mを海底面上に展張し、その微小な長さ変化を計測してピコstrainの分解能を実現する。室戸沖では、7e-7 strain の変化が約3週間かけて観測され、SSEが発生したと解釈された（荒木、2022）。沈み込んだ海山周辺のSSEは、1kPa程度の水圧変動（約1e-7の体積歪変化）に相当すると予想している。ただし、海山付近で1e-7 strainが生じたとしても、海底に到達するまでに減衰する可能性があり、それも併せて検出可能性を探っている。設置地点として、微動・VLFEが密集している場所を中心に検討している。Araki et al. (2017)などによれば、より放出エネルギーが大きいSSEの発生に伴い、その周縁部で微動が発生する場合があるが、両者の関係はいまだ議論がある。設置にあたっては、限られた台数を、どこで起きるかわからないSSEに対して「敏感な」地点を選んで行うことが重要である。平坦性、斜面堆積物や基盤岩露出、断層帯の有無が判断の基準になる。海底地形図と合わせて、これまでに日向灘でえられた反射法地震探査測線データを詳細に検討した結果、日向灘の前弧域斜面には、海山が沈み込む前から存在した付加体の断層が、海山沈み込みにより再活動したと予想される背斜構造が見つかった。流体移動に関する情報としては、沈み込んだ海山周囲での微動の移動や、地震波低速度異常（Arai+2023, Akuhara+2023）が手掛かりとなる。海山の東に微動集中域があるが、流体が集中しているのであればSSE検出の重要な候補となる。一方我々は、KPRの東側で熱流量が高く、その西側では熱流量が極めて低いことを示した．特に熱流量が海山の周囲で特に低いことが判明した。海山沈み込みによる周囲の応力異常・水理擾乱に起因する流体循環により冷却されたと考えられる。その場合、海山の通過跡では上盤が破砕され、間隙率や浸透率が高く、また断層や破砕帯を流路とした，活発な流体移動が起きていることが予想される。いずれにせよ、SSEと流体移動を区別するために、OFS設置点付近には、明らかな流体湧出がないことが重要と考えている。　これらを考慮した結果、予稿執筆時点では、沈み込んだ海山の斜め前方（北東）が最適であろうと考えている。圧縮応力が卓越し、流体移動による低熱流量とスロー地震の発生の可能性が高いと想定される。なお、IODP3（次期国際深海掘削計画）で掘削予定の地点は、同じく沈み込んだ海山の北東側を想定している。OFS等の計測により、8月8日の日向灘地震に起因する地殻変動などが検出されるかもしれない。それが南海トラフ地震域に及ぼす影響を評価するためには、そもそも震源域の状態（応力や流体圧など）を知ることが必須である。本調査は、そのような基礎データ取得に主として貢献する。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

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

Mon. Oct 21, 2024 10:30 AM - 11:15 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 1:30 AM - 2:15 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S12] AM-2

chairperson: Kentaro Omura(NIED), Hiroyuki NODA(Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

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

[S12-01] Simulation on sample-size dependency of dynamic weakening of friction due to thermoelastic instability and local temperature-weakening

*Hiroyuki NODA[1] (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S12-02] Yielding and fracture of a complex fluid under accelerating shear

*Osamu KUWANO[1] (1. JAMSTEC)

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

[S12-03] In-situ stress at the basement under Osaka plain (8) - In-situ stress measurement at NIED Kyoto observation well by DCDA method -

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

Simulation on sample-size dependency of dynamic weakening of friction due to thermoelastic instability and local temperature-weakening

*Hiroyuki NODA[1]

1. DPRI, Kyoto University

室内摩擦実験と大地震が繰り返す天然の断層挙動を繋げる上で、岩石摩擦のスケール依存性の解明は非常に重要な課題である。Tsutsumi and Shimamoto (1997) による高速摩擦実験以来、実験室の条件で摩擦発熱が重要となる 0.1 m/s 程度以上の高速摩擦時の摩擦強度の急激な低下（動的弱化）に関して、cm サイズの試料に対して多くの実験的研究が行われてきた（例えば Di Toro et al., 2011）。Yao et al. (2016) は母岩の熱物性を変化させた摩擦実験を行い、動的弱化が滑り速度よりもむしろ温度上昇に伴う現象であることを突き止めた。一方 Yamashita et al (2015) は長さ1.5 m、幅 0.1 m を持つ大試料の摩擦実験を行い、動的弱化が 0.01 m/s 程度の比較的低速で発生する事を報告し、摩擦面における垂直応力 σの不均質によって局所的な動的弱化が発生した可能性を議論した。最近 Noda (2023) は、垂直応力の不均質がそれに伴う摩擦発熱と熱膨張の不均質により自発的に増大する「熱弾性不安定」（Thermoelastic instability, TEI (Barber, 1967; Dow and Burton, 1972)）に着目し、臨界滑り速度 V_{cr} が試料サイズに反比例し、室内実験で用いられる速度範囲内となる事を指摘した。ただし、摩擦実験で実際に発生する動的弱化は $V/V_{cr} = 10$ 程度で発生しており、より詳細な議論のためには数値シミュレーション等を援用した研究が必要であった。本研究では TEI を効率的に計算する手法を開発し、局所的には温度弱化の性質を持つ摩擦面に対して数値シミュレーションを行い、摩擦実験中における TEI の可能性をより定量的に議論する。

２つの半無限媒質の境界に平面の摩擦面を設定し、面外方向の一様滑りを考える。熱弾性に関しては uncoupled thermoelasticity の２次元準静的面内問題を考える。試料サイズのプロキシとして、摩擦面に垂直な周期境界を間隔 W で仮定する。Noda (2023) は σの時間発展に関して、スペクトル境界積分法を多数のメモリー変数を用いて近似する事により常微分方程式の逐次積分として計算する手法を見出した。今回はこれに加え、温度 Tの時間発展の計算を、スペクトル法と摩擦面と垂直方向の波数を対数的に取る (Noda and Lapusta, 2010) 工夫を用いて実装した。また摩擦面は引張の垂直応力を支えないので、各時間ステップにおいて静的熱弾性問題を解き局所的な開き分布についても計算した。

Yamashita et al. (2015) の摩擦実験と同様の σの平均値 6.7 MPa、および総滑り量を 0.4 m とした数値計算を行った。初期の垂直応力不均質として、Hurst 指数 0 で 0.1 m の波長の振幅を平均値の 2.5% として数値計算を行った。摩擦係数は常温で 0.75、温度弱化の割合は 3×10^{-4} /K とした。その結果、$W = 1$ mm では $V = 0.1$ m/s でも動的弱化は発生せず、不均質の存在しない場合の一様解とほぼ変化が無かった。$W = 1$ cm では $V = 1.8\times10^{-2}$ m/s ($V/V_{cr} = 1.44$) 程度、$W = 0.1$ m では $V = 7.9\times10^{-3}$ m/s ($V/V_{cr} = 6.43$) 程度で一様解からの乖離（弱化）が認められたが、弱化が顕著になるにはより大きな Vが必要となる。特に、弱化は部分的な摩擦面の開きが発生した辺りから目立つ様になった。部分的な開きは σの不均質の振幅が σの平均値と同程度になった事を示しており、不均質の振幅が重大となった事の現れと解釈する事ができる。ただし今回の数値計算では摩擦抵抗は σに比例するので、 σ 不均質のみでは一様解からの弱化を引き起こす事は出来ない。また線形温度弱化を仮定しているので、Tの不均質のみでは弱化の原因とならない。摩擦が温度弱化の性質を持つ場合、TEI によって引き起こされる σと T正の相関が、一様解からの弱化の原因となる。本研究によって摩擦実験中に TEI が発生している事が強く示唆された。今後、摩擦実験中の温度分布や垂直応力の分布の測定等を通じた実証が重要な課題である。

© The Seismological Society of Japan

Yielding and fracture of a complex fluid under accelerating shear

*Osamu KUWANO[1]

1. JAMSTEC

火山噴火におけるマグマの流動・破砕やプレート境界地震におけるスロー地震・断層の高速破壊ように、物質の流動から固体的な破壊への遷移は、固体地球科学において重要かつ未解明の現象である。われわれは流動状態にある物質が変形速度の増加によって固体的に破壊する現象に注目し、粘弾性効果の観察しやすいソフトマター材料を使用した室内実験を実施した。実験試料にはひも状ミセル溶液と合成スメクタイト水分散液を使用した。回転式レオメーターを用いて、粘弾性測定の後、せん断歪み速度を一定の加速度(0.1, 1, 10, 100 s-2)で増加させる加速せん断試験を実施した。その結果、流動から破壊への遷移は、従来のひずみ速度による規準では説明できないことがわかった。むしろ、流体の脆性破壊と降伏は、固体のように降伏応力や降伏ひずみによって記述された。微小歪みでのレオロジー測定による弾性的挙動の確認は、流体が脆性的に破壊するという解釈に不十分である。

© The Seismological Society of Japan

In-situ stress at the basement under Osaka plain (8) - In-situ stress measurement at NIED Kyoto observation well by DCDA method -

*Kentaro OMURA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

絶対的にデータの少ない日本列島の原位置地殻応力，特に地表の地形の影響の少ない深さ500mを越える深部デーをはばひろく取得することを目指し，掘削で採取された既存の岩石コアを用いた測定法による地殻応力測定を続けてきた．当測定では，Funato and Ito (2017, IJRMMS)で設計され，防災科研に整備された装置でコア形状を計測し，コア変形法（DCDA法, Diametrical Core Deformation Analysis法）を適用して応力値を推定した．コア変形法では，地下深部から採取された岩石コアが，応力解放により弾性変形(膨張)することから，その変形量を計測し，岩石の弾性定数と掛け合わせて応力値を推定する．先行研究により，1000mを超えるような深部岩石コアでは，採取後の弾性変形が大きく，コア変形法の適用できることが示されている．
これまで，防災科学技術研究所の大阪平野にある深層地殻活動観測井における一連の原位置地殻応力測定の結果を報告してきた．今回，大阪平野からははずれるが，隣り合う京都盆地にあたる，京都府の防災科研京都観測井(北緯35°00'34.0"，東経135°43'49.6"，掘削深度706.9m)を対象にした．深度40mまで礫質土からなる扇状地堆積物があり，そこから深度352mまでは第四紀大阪層群上部相当層となる堆積岩(含礫粘土，シルト，礫層狭在シルト)がおおい，その下に中生代丹波層群となる基盤岩(砂岩泥岩互層)が分布している．そこで，深度700.8-.9mで採取された基盤岩石コアを用いた．採取後，15年以上経過したものではあるが，外周にそって直径がおおよそサインカーブ状に変化し，岩石コア断面が応力開放にともない楕円状に弾性変形しているものと解釈した．岩石コアの弾性定数は，直接岩石コアの室内岩石試験による測定データ(ヤング率89.4GPa，ポアソン比0.21)とあわせて，同じ掘削井で実施されたPS検層による地盤のP波速度(4.82km/s)，S波速度(2.77km/s)と，孔内密度検層による密度(2.71g/cm3)を用いて計算される弾性定数を適用することを試みることにした．
本測定例では，岩石コアの採取深度が500mを越える深部であったことから，コア変形法により有意な応力値が得られそうで，今後の議論に活用できるものと期待される．しかし，一方で，これまで，同じ方法を適用した他の観測井の岩石コアと同様に，コア採取から時間が経過しており，経年の影響も慎重に検討する必要があるだろう．

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S05. Geothermal science

Mon. Oct 21, 2024 11:15 AM - 11:30 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 2:15 AM - 2:30 AM UTC | Room C Medium-sized Conference room 302 (3F)

[S05] AM-2

chairperson: Kentaro Omura(NIED), Hiroyuki NODA(Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

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

[S05-01] The first Seismic Exploration using the optical fiber DAS in the geothermal borehole at Kijiyama geothermal field in Akita, Japan

*Junzo KASAHARA[1,2], Yoko Hasada[2,3], Masaru Suzuki[6], Tomohiro Takahashi[6], Hitoshi Mikada[4,2], Hiroshi Ohnuma[2], Yoshihiro Fujise[5] (1. Univ. Shizuoka, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Engineering, 4. Kyoto Univ., 5. WELMA, 6. TOUSEC)

The first Seismic Exploration using the optical fiber DAS in the geothermal borehole at Kijiyama geothermal field in Akita, Japan

*Junzo KASAHARA[1,2], Yoko Hasada[2,3], Masaru Suzuki[6], Tomohiro Takahashi[6], Hitoshi Mikada[4,2], Hiroshi Ohnuma[2], Yoshihiro Fujise[5]

1. Univ. Shizuoka, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Engineering, 4. Kyoto Univ., 5. WELMA, 6. TOUSEC

1. **はじめに**2018年からNEDOの研究開発の一環として，地熱域の地下構造を調べるとともに将来の地熱開発に最適な場所を示す目的で，光ファイバーをセンサーとする分布型振動計測(DAS: Distributed Acoustic Sensing) (Hartog, 2017)と分布型温度計測(Distributed Temperature Sensing)を用い国内5か所（メディポリス，大沼，森，澄川，滝上）の地熱発電所周辺において地熱構造調査を行ってきた．今回は，2022年8月～9月秋田県木地山地区において東北自然エネルギー(株)が所有する地熱坑井内に挿入した光ファイバーシステムを用いた地熱地域の物理探査を実施した．2. 木地山での調査の概要今回調査した木地山地区の地質と比抵坑内などの結果は佐藤他(2011)，岡部他(2012)にまとめられており，地表から深さ500 m程度までには砂岩・シルト・凝灰岩が分布し，その下にデイサイト質溶結凝灰岩があり，深さ1,000 mより深部には安山岩質火山礫凝灰岩が分布するとしている．本調査ではKJ-5地熱坑井を用い，光ファイバーを坑底に近い深さ2,000 mまで挿入した．坑内井の北側では12か所の震源による起震を行った．地表には地震計26台を設置した．KJ-5坑井に挿入された光ファイバーを用い温度と地震波振動をDTSおよびDASにより計測した．中型震源の波形を480回重み付きでスタックした．IVI社製MiniVibによってKJ-5の伸長方向に振動する水平加振も行いS波を発生させた．3. 得られた結果KJ-5坑内の温度プロファイルを求めた．坑底2,000 mでは288℃と高温であった．坑口の北側に位置する12か所で震源に対するKJ-5坑内の光ファイバーによるDAS記録と地表地震計による地震波形記録を得た．坑口付近での起震(SP-2)のDAS記録と地質との対比しＰ波平均速度をもとめた．ここでのDAS波形には深さ1,000 m付近にVp走時の折れ曲がりがあり，これは地層境界と考えられる．皆瀬川層と泥湯層の境界とであろう．今回は水平加振機によるS波をDASによって記録した．1,200 mまでS波の到達がわかり、VpとVsの比V_P/V_Sは約1.75と求まった．測線に沿ったKJ-5のDAS記録中のP波初動，および地上地震計のP波初動記録を用いA-A’測線に沿ったVpの深さ分布をP波初動走時トモグラフィにより求めた．地表から深さ1.3 km付近まではVpは3.5 km/s～4.0 km/sである．Vp˜3.5 km/s層は北側で厚い．4. 議論とまとめKJ-5の坑底付近の温度は288℃であり，1,000 m付近で温度勾配の変化が見られた．その深さは坑口での起振に対するDAS記録中でVp速度勾配の変化する皆瀬川層と泥湯層の境界にも相当する．KJ-5の坑跡を含む断面A-A’に沿ったVpの深さ分布を求めた結果，北側は南側にくらべより遅いVp (3 km/s程度)を持つ層が厚い．深さ1 km までのVpの構造は地質構造と調和的であると考えられる．また東北自然エネルギー(株)の保有する坑内井内の地質構造ともほぼ調和的である．水平加振により求まったS波とP波によるVp/Vsを求めたところ約1.75であった．この値は通常の岩石の持つVp/Vsと同じであることから，1,200 mまでの深さではS波の水平振動方位に直交する断裂は著しくないと考えられる． 謝辞本研究はNEDO「地熱発電導入拡大研究開発・超臨界地熱資源技術開発・光ファイバーDASによる超臨界地熱資源探査技術開発」(JPNP21001)として実施した．謝意を表する．また，本調査にご協力いただいた東北自然エネルギー(株) (株)WELMA，(株)阪神コンサルタンツに感謝する．

© The Seismological Society of Japan

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

Mon. Oct 21, 2024 9:00 AM - 10:15 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 12:00 AM - 1:15 AM UTC | Room D Medium-sized Conference room 201 (2F)

[S18] AM-1

chairperson:Noa Mitsui(Nagoya University), Yusuke Inoue

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S18-01] Significance of holding the event: 2024 summer school for school teachers at devastated areas by earthquakes in Osaka

*Hiroo NEMOTO[1], Ken'ichi ARAI[2], Shouichi IKEDA[3], Yasuyuki KANO[4], Osamu KUWANO[5], Akiko SATOH[6], Yasuharu SYURI[7], Makoto YAMANO[8], Masashige MINAMISHIMA[9], Naoko KITADA[10] (1. Ritsumeikan Univ., 2. Sakae Higashi UPR Sec. Sch., 3. Former public P Sch. teacher, 4. ERI, 5. JAMSTEC, 6. Goryougadai branch Sch. of Kaname LWR Sec. Sch., 7. Rakusei Sec. Sch., 8. AORI, 9. Ryogoku Sec. Sch., 10. GRI)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S18-02] The 23rd Earthquake, Volcano and Geology Children's Summer School in Yoshino River "Exploring the Secrets of the Yoshino River with YOKAI"

*Yusuke Inoue[1], Toru Ando[2], Tadahiro Shibata[3], Teito Takemoto[4], Ryosuke Doke[5], Azusa Tonotani[6], Kenichi Nakao[7], Kenichi Nishiyama[8], Toshitaka Baba[8], Tomoya Hiiro[9], Shintaro Yamasaki[10], Yoshie Yamada[11], Hikaru Yokoyama[12], Shuichi Hasegawa[13] (1. OYO, 2. Asutamuland, 3. ACA, 4. JMA, 5. Hirosaki Univ, 6. Miyoshi City Office (Miyoshi Geopark Project), 7. Tokushima Prefectural Museum, 8. Tokushima Univ, 9. Arakawa City Office, 10. Kyoto Univ, 11. TEPCO PG, 12. Hokusho Univ, 13. Kagawa Univ)

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

[S18-03] Public Awareness Survey on the Recognition and Response of Earthquake Hazard and Other Natural / Manmade Hazards

*Yoshinari HAYASHI[1], HIroaki Takahashi[2] (1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University, 2. Hokkaido Univ.)

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

[S18-04] Effects of prior science education on accepting of earthquake disaster and on the prevention consciousness after the disaster

*Noa MITSUI[1], Kumi Yoshitake[2], Kazuyuki Nakagawa[3], Hiroko Tsuboi[4] (1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2. University of human environments, 3. Jiji Press, 4. Nagoya City University)

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

[S18-05] Enhancing Interoperability of Disaster Information Using Knowledge Graphs

*Hiroki UEMATSU[1], Hideaki TAKEDA[2,1] (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics)

Significance of holding the event: 2024 summer school for school teachers at devastated areas by earthquakes in Osaka

*Hiroo NEMOTO[1], Ken’ ichi ARAI[2], Shouichi IKEDA[3], Yasuyuki KANO[4], Osamu KUWANO[5], Akiko SATOH[6], Yasuharu SYURI[7], Makoto YAMANO[8], Masashige MINAMISHIMA[9], Naoko KITADA[10]

1. Ritsumeikan Univ., 2. Sakae Higashi UPR Sec. Sch., 3. Former public P Sch. teacher, 4. ERI, 5. JAMSTEC, 6. Goryougadai branch Sch. of Kaname LWR Sec. Sch., 7. Rakusei Sec. Sch., 8. AORI, 9. Ryogoku Sec. Sch., 10. GRI

１．はじめに

学校教育委員会は1996年度から教員サマースクール（以降，教員SSと略記）を毎年度開催してきている．COVID-19のため2020・2021と２年間中断したものの，2022年度から対面開催を再開し［根本・他(2022)，根本・他(2023)］，2024年度も対面で開催した．

２．2024教員SSの概要

第27回教員SSの概要は以下の通りである．

開催地：大阪市（オプショナルツアーは淡路島ほか）

日程：2024年８月21日（水）～ 22日（木）（～23日（金）（オプショナルツアー））

タイトル：平成７年（1995年）兵庫県南部地震による災害のその後と今後の大地震への備え in Osaka

目的：平成７年（1995年）兵庫県南部地震（以降，神戸地震と略記）により地盤が沈降しコンクリート護岸が失われたことによって生じた干潟等の観察，1854年６月14日，同年11月４・５日と立て続けに発生した大地震による被害を後生へ伝えるために建立された大地震両川口津浪記碑の見学などを通して，過去からの教訓，近い将来の発生が懸念されている南海トラフ地震での強震動による影響や津波襲来に思いを馳せ，あわせて大阪低地での高潮による影響との比較を通して，大阪低地での暮らしのあり方を考える．さらに，上町断層による地形の観察を通して，内陸型地震による都市域での被害や備えについても考え，湧水などの恵みと合わせ，防災・減災に対する意識を高める．

講師（敬称略）：北田奈緒子，藤江 徹（あおぞら財団）

３．2024教員SSの内容

2024教員SSでの観察ポイントを以下に示す．

初日：

津波・高潮ステーション展示棟・防災棟（過去の津波・高潮被害，大阪市域の地形等の学習）

尻無川水門（試運転）（津波，高潮への備えの様子を見学）

大地震両川口津浪記碑（過去の教訓からの学びと風化防止の考察）

上町断層フィールドトリップ（上町台地と大阪低地との境の地形および湧水の観察）

二日目：

矢倉緑地公園（神戸地震による震災遺構の観察）

（荒天時は，あおぞら財団ビル会議室にて講義受講．）

あべのハルカスバックヤード（耐震工学最前線の見学）

なお，雨天時等でのコース変更は，初日は雨天決行，二日目は矢倉緑地公園訪問の代わりに，あおぞら財団ピル会議室にて矢倉緑地公園の震災遺構に関する講義を受ける計画とした．

４．参加者の内訳

交通の便が良い地での開催だったためか，定員20名に対して参加申込者数は21名と定員超過となった．内訳は次の通りであった．

小学校教員１名

中学校教員１名

© The Seismological Society of Japan

高等学校教員10名（元職３名を含む）
中学高等学校，中等教育学校教員５名（元職１名を含む）
大学教員１名
教育委員会１名
学部学生１名
大学院生１名
地元（大阪府）の教員７名を含め各地から参加者が集まった．近畿圏からの参加者が10名と約半数であった．勤務校（元を含む）・在籍校がある都道府県名を北から順に並べると，埼玉，東京，千葉，神奈川，石川，滋賀，京都，大阪，香川であり，首都圏からの参加者が９名であった．

５．教員SS開催の意義と今後の開催時期

準備段階では，初日に講師を務める北田氏と下見を行った．その結果，行程案の見直しを行うこととなったことから，今年度も下見の重要性が確認できた．例年との違いとして，貸切バスを用いた移動を無くし，公共交通機関での移動を試みたことが挙げられる．しかし，最寄りの駅やバス停から遠いポイント（矢倉緑地公園）もあったことから，本ポイントから駅へ向かうルートではタクシー使用を取り入れた．これは，行きと同じ道を再度歩くことの無駄を省くことと合わせ，猛暑への対策を行ったことによる．

猛暑への対策として，2023年度に2024年度の開催時期見直し検討を行った．過去の参加者へ開催時期に関するアンケート調査を行い，その回答から夏期希望が一番多かったため，今年度も夏期開催とした．しかしながら，猛暑を考えると，開催時期に関して再検討が必要かもしれない．

オプショナルツアーに関すること，南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）発令を受けての対応，反省点や改善案等は発表にて報告する．

謝辞

津波・高潮ステーションの皆様，矢倉緑地公園での案内（荒天時には講義）をしてくださったあおぞら財団の藤江 徹 様，会場提供でお世話になったあおぞら財団の谷内久美子 様，矢倉緑地公園タクシー乗り入れに理解を示していただき，水門試運転見学の対応をしてくださった大阪府西大阪治水事務所の皆様，あべのハルカス見学にてお世話になった関係者の皆様，以上の皆様からご助力をいただきました．ここに記して深謝します．

参考文献

根本泰雄・他，2022，SSJ2022秋季大会，S18-03.
根本泰雄・他，2023，SSJ2023秋季大会，S18-06.

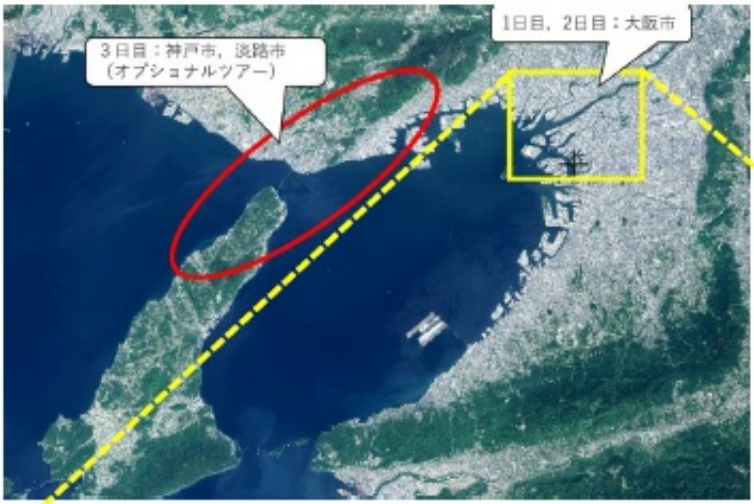
© The Seismological Society of Japan

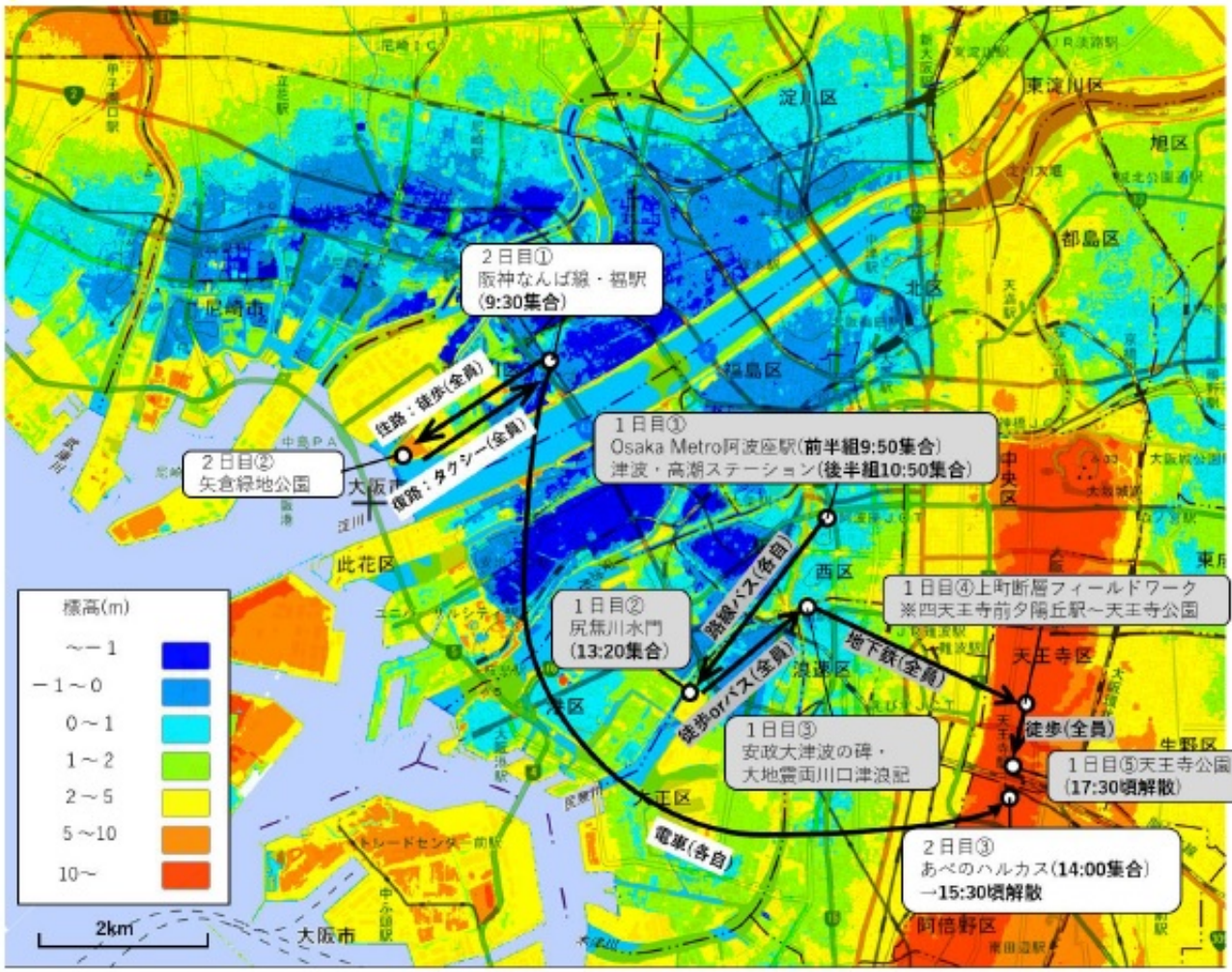
2024 年教員サマースクール

公益社団法人 日本地震学会

学校教育委員会 主催

平成７年(1995 年)兵庫県南部地震による災害のその後と今後の大地震への備え in Osaka





© The Seismological Society of Japan

The 23rd Earthquake, Volcano and Geology Children's Summer School in Yoshino River “Exploring the Secrets of the Yoshino River with YOKAI”

*Yusuke Inoue[1], Toru Ando[2], Tadahiro Shibata[3], Teito Takemoto[4], Ryosuke Doke[5], Azusa Tonotani[6], Kenichi Nakao[7], Kenichi Nishiyama[8], Toshitaka Baba[8], Tomoya Hiiro[9], Shintaro Yamasaki[10], Yoshie Yamada[11], Hikaru Yokoyama[12], Shuichi Hasegawa[13]

1. OYO, 2. Asutamuland, 3. ACA, 4. JMA, 5. Hirosaki Univ, 6. Miyoshi City Office (Miyoshi Geopark Project), 7. Tokushima Prefectural Museum, 8. Tokushima Univ, 9. Arakawa City Office, 10. Kyoto Univ, 11. TEPCO PG, 12. Hokusho Univ, 13. Kagawa Univ

1．はじめに
地震火山地質こどもサマースクール（以降、サマスクと称す）は、日本地震学会、日本火山学会、日本地質学会が共同で、小・中・高校生を対象に開催している行事で、地球科学分野ではわが国最大規模の体験学習講座である。サマスクは、1999年度から毎年夏に実施している。このサマスクでは、参加者のこどもたちが第一線の研究者の講師陣と共に開催地周辺の景色の中に隠された地球の活動を探し、大地や風景の成り立ちを考えることを目的としている。2024年8月には第23回サマスクを徳島県三好市池田エリアで開催した。
2．2024年度サマスクの概要
・開催日時：2024 年 8 月 7 日（水）・8 日（木）
・開催地：三好市池田総合体育館、三好市及びその周辺地域
・実行委員長：長谷川修一(香川大学)
・目的：四国を流れる大河「吉野川」を舞台に、吉野川沿いに変わっていく地形や風景を見ながら、その成り立ちや起こった災害、文化などを見ていく。風景の魅力や災害を乗り越えながら人々の生活が築かれたことなどを理解し、防災が自然科学やまちづくりと密接な関わりがあることを探究する。
・参加者：小学生11名、中学11名、高校生6名（計28名）
3．協力スタッフ構成
実行委員会は、各学会の講師と三好ジオパーク構想推進協議会，あすたむらんど徳島，サマスク運営委員から選出されたメンバーで構成した。スタッフはサマスク運営委員に加えて三好市職員農林政策課，地元の皆様，地元の学校教員，学生等で構成した．このような多様なメンバーの相互の協力により、円滑な行事の運営が実現できた．
4．2024年度サマスクの内容
開催地周辺は東西方向に中央構造線が貫いており、この断層運動によって土地が隆起し、讃岐山脈が形成された。これにより、吉野川の流路に変化が生じ、現在の地形が形成したと考えられている。参加者は4つのグループに分かれて、野外観察、実験、議論を通して、吉野川の大地の成り立ちや人々の暮らしのナゾについて考えた。向き合ったナゾは、「①吉野川はどう流れてきた？大地はどうできた？」、「②吉野川で人々はこれまでどう暮らしてきた？上流から下流までの川沿いの暮らしや災害について調べてみよう。」、「③-a 吉野川の百年先、千年先の未来を予想してみよう」、「③-b 吉野川の大地を思いっきり楽しむ3日間とは？」の3つである。以下にこどもたちが2日間で学んだ内容を示す。
1日目は、4か所の野外観察および実験を行った。野外観察では、吉野川の上流部から下流に向かって観察した。まず、大歩危峡へ移動し、遊覧船で地形の変化を観察した。次いで、山城町川口、池田湖水際公園、箸蔵近隣公園の河原にて、それぞれの場所で異なる種類の礫を5つ程度採取した。また、サイトごとの露頭の特徴の変化も観察した。さらに、池田湖水際公園ではドローンを航行させた。採取した礫は、採取場所による礫の特徴の違いや共通点等を整理した。野外観察の後は3つの実験を行った。雨の多い山地でどのような地形ができるかを観察する実験、地震時に地すべりが発生する様子を観察する実験、地下の活断層が動いた際に地表ではどのような変化が見られるかを観察する実験を行った。実験後の講義では、能登半島地震に関する最新の研

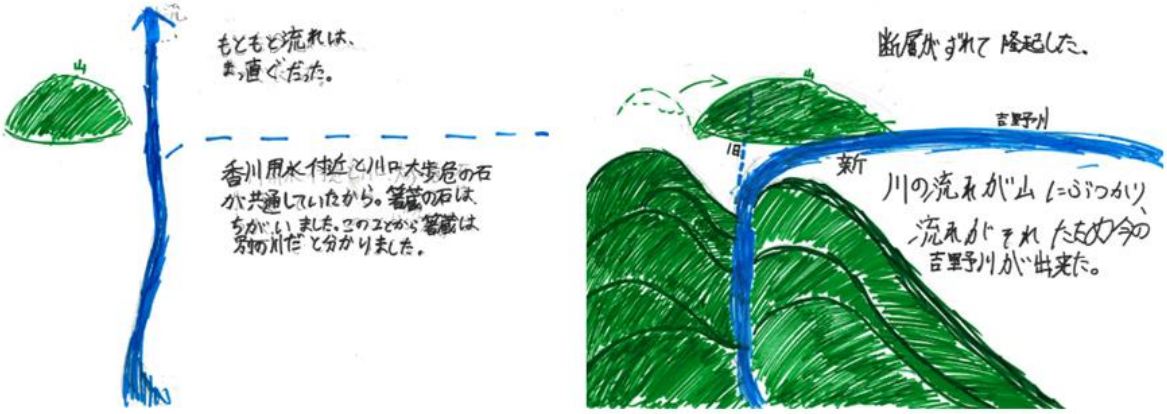
© The Seismological Society of Japan

究成果に触れた。温泉に入った後の夜の部では、ドローンを使った地質・地形調査の技術や深部低周波地震についての講義を受けた。
2日目は、まず、宿泊先のウマバ・スクールコテージ周辺を散策しながら、山の上“ソラ”から見える地形の様子を観察し、集落の石垣を構成している石はどこから来たものなのかなどを考えた。次いで、池田体育館に移動し、周辺の地形を観察した。さらに、吉野川周辺の暮らしや地すべりのメカニズムと対策工、防災に関する講義を受けた。
以上から発見したことをもとに、グループごとに3つのナゾを解き明かし、池田総合体育館サブアリーナでのフォーラムで、市長などの市関係者、保護者、一般向けに発表を行った。発表では、大地のできかたについて、礫の縞模様に着目して考察したグループや災害から守るための地下空間を利用した暮らしを提案したグループなどがあり、様々な視点からナゾについて解き明かされた。また、野外で採取した礫を示し、絵を取り入れて発表するなど、各グループで工夫が見られた。参加者の発表資料の一部を添付する。
サマスク終了後に、参加者向けのアンケートと講師・スタッフでの振り返りを実施した。本発表当日は、アンケートの結果、振り返りで出た意見、サマスクの実施による地元への効果についても報告する。
5. 今後の予定
2025年（第24回）は，長野県木曽町御嶽山周辺地域での開催を予定している．また，2026年度以降の開催地は募集中（2024年8月）である．
6. 謝辞
本事業は，日本地震学会，日本火山学会，日本地質学会の負担金の他に，ノエビアグリーン財団の助成を受け実施しました。ここに記して感謝いたします。

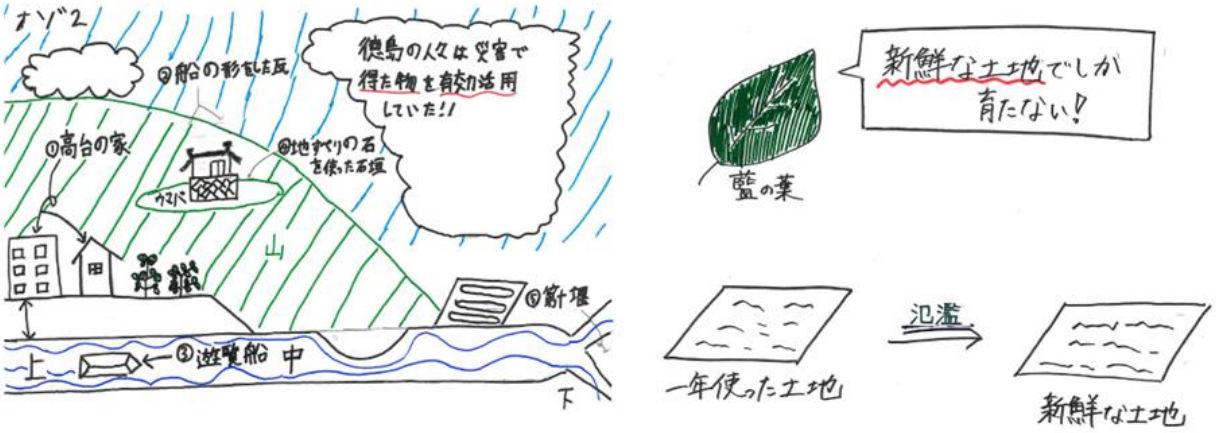
© The Seismological Society of Japan

【参加者の発表資料の一部】

ナゾ①「吉野川はどう流れてきた？大地はどうできた？」



ナゾ②「吉野川の人々はこれまでどう暮らしてきた？上流から下流まで川沿いの暮らしや災害について調べてみよう。」

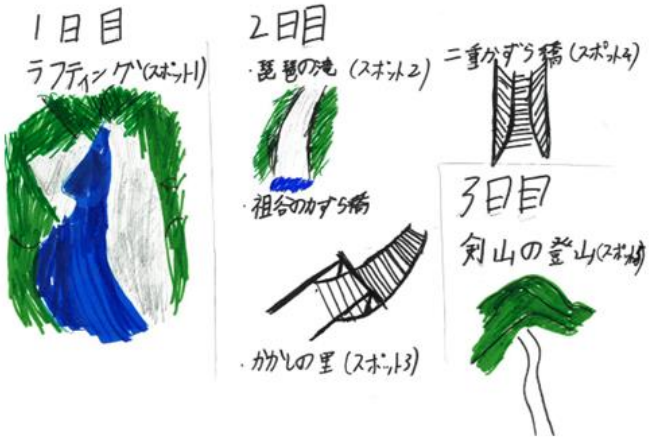


ナゾ③「吉野川の百年先、千年先の未来は？吉野川の大地を思いっきり楽しむ3日間とは？」

【地下空間を利用した暮らしの提案】



【吉野川を思いっきり楽しむ3日間のレジャープラン】



© The Seismological Society of Japan

Public Awareness Survey on the Recognition and Response of Earthquake Hazard and Other Natural / Manmade Hazards

*Yoshinari HAYASHI[1], HIroaki Takahashi[2]

1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University, 2. Hokkaido Univ.

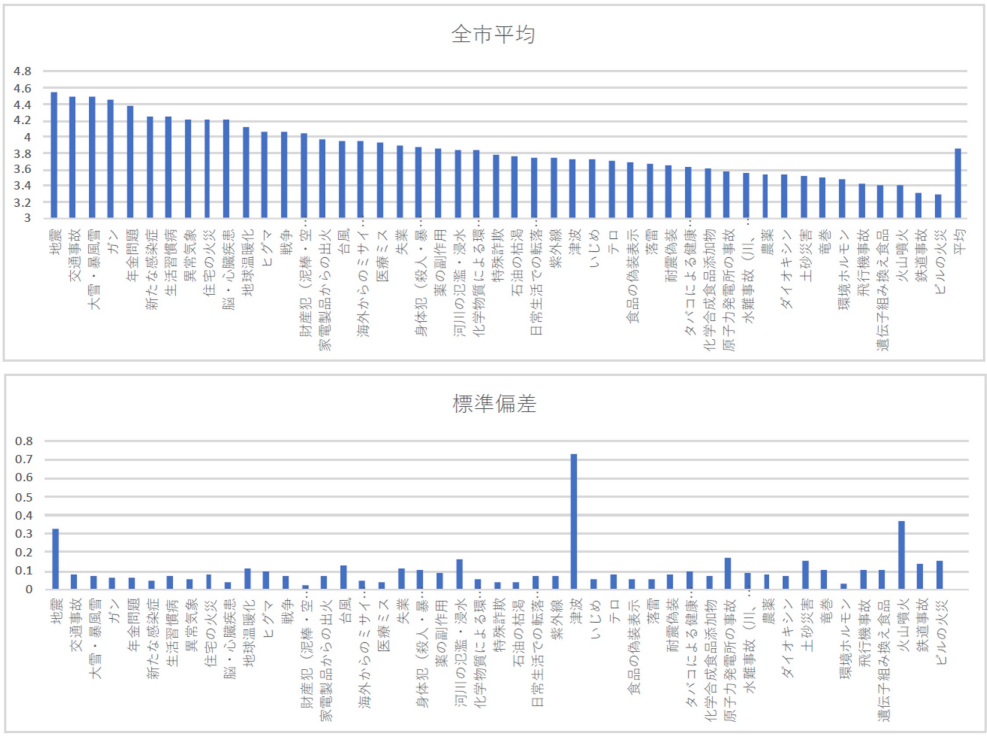
地震は自然災害、事故、疾病など多くのリスク要因の１つである。地震学を学び、その研究で博士号を取得して、地震研究を生業にしている我々は、地震について特別な関心をもっているが、これは市民感覚とはかけ離れている可能性がある。また、地震が発生する場所は地球レベルで見れば大きく偏在しており、日本列島に限定しても地震リスクの大小は地域によって異なっている。そこで本研究では、様々なリスク要因の相対的順位を明らかにすることと、その地域差、性差、世代差などに違いがあるかを明らかにするためインターネット調査を実施した。
アンケート調査は2023年11月7日～13日に実施した。これは2024年能登半島地震の前である。この調査は北海道・三陸沖後発地震注意情報の認知度調査の一部として実施したため、対象は北海道内の６都市圏である。人口の多い札幌市は単独で地域を選定したが、それ以外の５都市は市街地が一体化している周辺の町村も対象地域とした。具体的には旭川市には鷹栖町、東神楽町、当麻町、比布町、東川町を含み、函館市には北斗市、七飯町を含み、苫小牧市には白老町を含み、帯広市には音更町、芽室町、幕別町を含み、釧路市には釧路町、白糠町、鶴居村を含む。調査人数は、6都市圏の男女、5世代（20，30，40，50，60代），ごとに各30人、合計1800人である．なお，旭川市男性20代（14人），函館市男性20代（10人）、苫小牧市男性20代（10人）、同男性30代（23人）、同女性20代（18人）、帯広市男性20代（11人）、釧路市男性20代（8人）、同女性20代（27人）は，ここに示した人数のように30名のサンプルが集まらなかったので，不足分を同性他世代に割り振って各都市男女150人合計300名になるよう調整した．
中心となる質問は地震などのリスク要因について、6段階（非常にそう思う、そう思う、どちらかといえばそう思う、どちらかといえばそう思わない、そう思わない、まったくそう思わない）で主観的な不安感を回答してもらうものである。リスク要因は中谷内・島田(2010)にもとづき選定し、北海道の地域性を考慮して「大雪・暴風雪」「津波」「火山噴火」「竜巻」「ヒグマ」などを追加して、以下の47種類のリスク要因について回答を求めた。

地震、津波、火山噴火、大雪・暴風雪、河川の氾濫・浸水、土砂災害、異常気象、台風、地球温暖化、落雷、竜巻、住宅の火災、ビルの火災、ヒグマ、交通事故、原子力発電所の事故、鉄道事故、飛行機事故、日常生活での転落事故、水難事故（川、海、プール）、家電製品からの出火、年金問題、食品の偽装表示、紫外線、耐震偽装、脳・心臓疾患、生活習慣病、新たな感染症、薬の副作用、医療ミス、ガン、タバコによる健康被害、遺伝子組み換え食品、環境ホルモン、農薬、化学物質による環境汚染、化学合成食品添加物、いじめ、失業、石油の枯渇、ダイオキシン、戦争、テロ、海外からのミサイル攻撃、財産犯（泥棒・空き巣・詐欺）、身体犯（殺人・暴行・誘拐）、特殊詐欺

なお、提示の順番はランダムになるよう設定し、回答者ごとに異なった環境で回答をもとめている。
不安度の定量化は各回答に１から６の値を割り当て、数値が高いほど不安を強く感じていることを示している。図はリスク要因ごとの全回答者の平均値と標準偏差の結果である。リスクを高く評価されている上位５つは「地震」「交通事故」「大雪・暴風雪」「ガン」「年金問題」であった。
先行研究である中谷内・島田（2010）の上位５つは「地震」「地球温暖化」「ガン」「新たな伝染病」「交通事故」であり、元吉(2020)の上位5つは「地震」「年金問題」「ガン」「交通事故」「異常気象」となっている。「地震」は常に１位であり、今回の調査でも同じ結果となった。それ以外の上位に入るリスク要因はほぼ固定化されて同じであるが、北海道の地域性を反映して「大雪・暴風雪」が２位と高かった一方で、異常気象（8位）、地球温暖化（11位）の順位は低かった。
また、近年、北海道中で事故が多発している「ヒグマ」が12位となりリスクが高いと評価された。2006年に

© The Seismological Society of Japan

オホーツク管内佐呂間町における「竜巻」災害では、9人が死亡31人が重軽傷を負うという大きな被害が出ており、北海道において注目度の高いリスク要因とも考えられたが、41位という低い順位となった。
標準偏差の結果を見ると、「地震「津波」「火山噴火」の３つが突出して大きな値をとっていた。これは地域による違いが大きいことを示している。活火山に隣接している苫小牧市は「火山噴火」のリスクは15位となり、全体では45位だったものより高いリスクと認識されていた。また平常時の地震活動度が低く、地震動予測地図による長期評価でも地震リスクが小さいと評価されている旭川市では、他の5都市では1位となっている「地震」が14位であった。
本調査により、地震は他のあらゆるリスク要因よりも高いものと認識されていることが示され、この結果は２つの先行研究と変わらないことが明らかになった。しかし、旭川市だけを抽出すると、その傾向は違っており、日本国内においても地震リスクを第一と考えない地域があることが示された。



© The Seismological Society of Japan

Effects of prior science education on accepting of earthquake disaster and on the prevention consciousness after the disaster

*Noa MITSUI[1], Kumi Yoshitake[2], Kazuyuki Nakagawa[3], Hiroko Tsuboi[4]

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2. University of human environments, 3. Jiji Press, 4. Nagoya City University

１． 背景と目的

地震多発国の日本において、地震学の普及は重要であるが、人々の関心は被災生活にあるため、その差異を理解して専門知識を伝える必要がある。

この問題に対して本研究は、被災時に「なぜ自分がこのような辛い被災生活を経験しなければならないのか」を納得しやすくなる材料（光井、2018）としての地震学の重要性を探るべく、「2016年熊本地震の際に小学校当時の断層教育を思い出したことで気持ちが落ち着いた」という事例を調査している。これまでの概要を以下に示す。

・事例の概要（中川、2017）

益城町の小学校在籍当時（2000年頃）に理科の授業で、学校の直下にある布田川断層について学んでいた子供たちが、その後、熊本地震で被災した際に、地震を引き起こしたのがその布田川断層だったと思い出したことで気持ちが落ち着いた、という証言が複数名から得られた。

・教諭への面接調査（光井・吉武、2020）

事前の理科教育から被災時のストレス軽減に至る過程には多様な心理的プロセスが想定される。まず、事前の教育について、理科の専任教員として授業を担当したX教諭への面接を実施し、授業内容等を確認した。教諭が授業で主に重視していた点は「自分達の住む土地がどのようにできたか知る」「地球のダイナミックさを伝える」「野外等での観察を通じて地学現象のスケールの大きさを実感する」であった。また、地質図を見せながら『この辺を見てごらん、みんな、阿蘇の火砕流が積んだところだよ』など、自分達の住んでいる所の土地の成り立ちを説明し、布田川断層にも言及した。当時は、地震の発生をあまり現実的に思っていなかったため、『いざとなったら起こるかも』と話すと同時に『でも実際に起こる時は、断層からの距離はあまり関係なく一帯が揺れる』と説明した。

・教え子への面接調査（光井・他、2022）

X教諭の教え子への面接を実施し、授業内容や熊本地震発生時の心理状況等を確認した。断層教育の開始後に継続的に授業を受けていた15名中、6名が被災後に授業内容を思い出し、その全員が地震が起きたことに納得する傾向を示した。うち２名は（おそらく日奈久断層による）更なる地震も心配していた。その他、地盤の強さや断層の上盤/下盤と関連づけて被害の大きさを考える発言があった。一方、授業内容を思い出さなかった場合、人とのつながりのみによって被災経験を意味のあるものと捉える傾向がみられた。このことから、授業内容を思い出して被災経験を考える観点が増えたことで、被災後の心理状態に至る過程に差異が生じた可能性が示唆された。

その後、教え子への面接調査における会話内容を分析し、事前の理科教育から被災時の心理的状況に至るプロセスの仮説を生成した。以下にその分析内容を報告する。

２． 分析方法

会話内容の質的分析方法として解釈技法が体系化されている修正版グラウンデッド・セオリー・アプローチ（M-GTA）を用い、以下の設定にそって会話を分析した。

・分析テーマ：被災者が子どものころの地学教育を思い出し被災状況を受け止めるプロセスの研究
・分析焦点者：子どものころにX教諭の地学教育を受けた熊本地震の被災者

© The Seismological Society of Japan

面接中の会話で意味がある箇所を抽出して概念とその定義を設定していき、複数名に当てはまる概念のみを採用して概念間の関係をまとめた。複数の概念をまとめたカテゴリやサブカテゴリを生成して、それらの関係を結果図に表すとともに、ストーリーラインという文章で表して、心理的プロセスの仮説を得た。授業内容を思い出した群と思い出さなかった群に分けて分析し、両群に共通する項目を考慮して結果をまとめた。

３． 結果・今後の課題

ストーリーラインの概要を以下に示す（【　】はカテゴリ、［　］はサブカテゴリ）。

・思い出した群

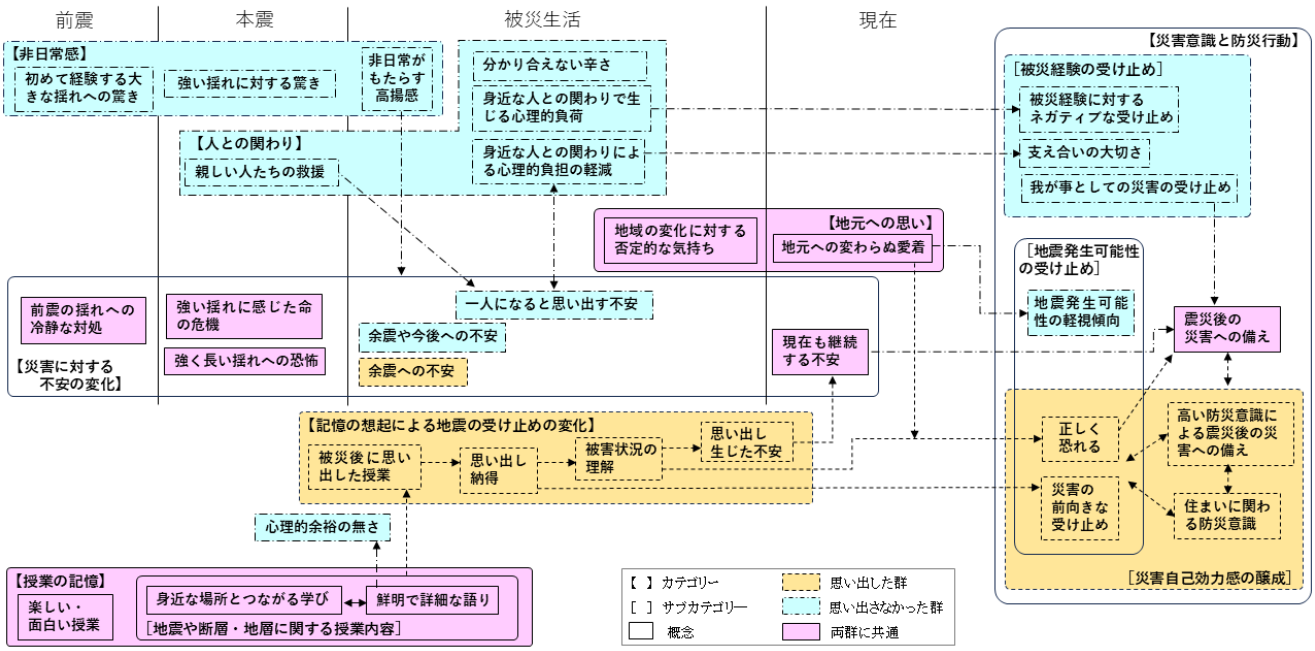
被災時の【災害に対する不安の変化】と並行して、小学生当時の【授業の記憶】を思い出し納得するなどの【記憶の想起による地震の受け止めの変化】が生じたことで、適切な［地震発生可能性の受け止め］が行われ、［災害自己効力感の醸成］を主とした【災害意識と防災行動】へとつながっていた。

・思い出さなかった群

揺れや被災生活に関する【非日常感】や身近な人々や他地域の人々などの【人との関わり】が【災害に対する不安の変化】に影響していた。また、【人との関わり】の良し悪しが、現在における［被災経験の受け止め］にも影響していた。これは、【人との関わり】以外に［被災経験の受け止め］に寄与するものが乏しいことに起因する。

以上から、地震や断層の知識は、被災経験の多角的な受け止めに寄与し、その後の地震発生可能性の受け止めなど、災害意識と防災行動にも影響を与えると考えられる。本研究ではその後、仮説の検証を目的としたアンケート調査を行った（吉武・他、2024）。分析を進めて事前の地学教育と被災時の心理状態との関係を明らかにし、学術的根拠をもって地震学の社会普及を目指す。

結果図



© The Seismological Society of Japan

Enhancing Interoperability of Disaster Information Using Knowledge Graphs

*Hiroki UEMATSU[1], Hideaki TAKEDA[2,1]

1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics

本研究では，Linked Dataの形式で地震の情報を記述した地震LODを用いて，地震とその地震によって発生した被害情報を接続することで，国内で公開されている災害情報の相互運用性の向上を目指す．
地震動は波形データとして記録され，震源パラメーターの推定，地下構造の推定などさまざまな研究に使われている。またこれらの大量に蓄積された波形データは近年地震学の分野で盛んに用いられる機械学習において，震度予測や，観測波形の分類，P波/S波の検測等の機械学習を用いた研究の教師データとして利用されている．機械学習には大量の良質な教師データが必要であるため，地震観測網で観測されたデータは有用だが，それらの収集には困難が伴う. 例えば，防災科学研究所の波形データの取得サイトにはAPI等は用意されておらず，ユーザが日付時刻や震源，観測点等を指定して手動で波形データをダウンロードする必要がある．また，研究者が独自に観測した波形データや，気象庁や地方自治体の観測網を横断して検索するためには，波形データを集約したデータベースの作成等が考えられる．しかし，波形データの再公開はできず，また波形データを一意に指し示すURIを持たないため，研究者独自のデータベースが乱立することとなり，再利用可能なオープンな波形データベースの作成は難しい．そこで，地震動を観測した観測点の情報や震度，観測時刻，また観測された波形から推定された震源の位置やマグニチュードなど，「地震」のメタデータを収集し，Linked Dataの形式で公開した（https://seismic.balog.jp/）．Linked Dataは事物や概念が一意のURIを持ち，リンク構造を持つことでデータ同士をつなぐことができる．Linked Dataでは，事物や概念のリンク構造をトリプルと呼ばれるモデルで表現し，Webサイトのリンクを辿ることと同様に，プロパティ（リンク）を辿ることで，データを辿ることができる．ここで，Webサイトのリンクは，単なるつながりを示しているが，Linked Dataのトリプルではリンクとなるプロパティも URIを持ちリンクの関係性を示している．本研究では，地震データに特化したプロパティとして，震源や震度，観測時刻など地震動に関する語彙や観測点に関する語彙を新たに定義する．例えば，「地震動」は，「震度」「マグニチュード」「発生時刻」等の語彙をプロパティとして持つ．また，「観測した波形」という語彙をプロパティとすることで，ある地震動を観測した波形のトリプルが作成され，「地震」そのものを観測することは難しいが，観測された地震動のリンク構造から「地震」を表現することが可能となる．
一方，地震を含めた災害や被害情報は，気象庁や消防庁，防災科学研究所といった機関が公開している．例えば，消防庁の災害情報には，地震によって発生した被害の情報や消防機関等の対応状況，避難指示や対策本部の設置情報などがPDF形式の文書として公開されている．災害情報や対応状況は，各機関からそれぞれの形式で公開されているため，発生源となった災害をキーに横断的に知ることは難しい．
本研究では，地震LODを基盤として、さまざまな機関が公開している災害情報や被害情報、対応状況を横断的に取得し、これらのデータを再利用することで、災害情報の相互運用性を高めることことを目指す．

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session：S19. Seismology, general contribution

Mon. Oct 21, 2024 10:30 AM - 11:15 AM JST | Mon. Oct 21, 2024 1:30 AM - 2:15 AM UTC | Room D Medium-sized Conference room 201 (2F)

[S19] AM-2

chairperson:Masumi Yamada(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University), Tesuo No(JAMSTEC)

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

[S19-01] Shallow slow earthquake activity in Nankai Trough off Muroto possibly caused by sequential seamount subduction

*Paul Caesar Flores[1,2], Shuichi Kodaira[1,2], Gaku Kimura[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Tetsuo No[1], Yuka Kaiho[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Yokohama National University)

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

[S19-02] Strong reflector in seawater identified from seismic reflection data off the east coast of Noto Peninsula

*Tetsuo NO[1], Hironori Otsuka[2], Mariko Hatta[3], Tomoharu Senjyu[4], Ayanori Misawa[5], YUE SUN[6], Noboru Yamakawa[6], Yuqi Lyu[6], Jin-Oh Park[6] (1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe Univ., 3. RIGC, JAMSTEC, 4. RIAM, Kyushu Univ., 5. GSJ, AIST, 6. AORI, Univ. of Tokyo)

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

[S19-03] Source mechanism analysis of the tsunami near Torishima on October 9, 2023

*Masumi YAMADA[1], Masaru Nakano[2] (1. DPRI, Kyoto University, 2. JAMSTEC)

Shallow slow earthquake activity in Nankai Trough off Muroto possibly caused by sequential seamount subduction

*Paul Caesar Flores[1,2], Shuichi Kodaira[1,2], Gaku Kimura[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Tetsuo No[1], Yuka Kaiho[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Yokohama National University

Shallow slow earthquakes in the Nankai Trough show a clustered distribution and this has been attributed to different factors such as seamount subduction, pore fluid pressure, fluid migration, and sediment input. However, the mechanism for slow earthquake generation remains unclear. At least four subducted seamounts have been reported off Muroto where slow earthquakes occur. We examined the seismic reflection profiles crossing these seamounts and compared them with sandbox and numerical simulations to infer possible mechanisms for slow earthquake generation. The seamounts are at different stages of subduction and the structural features previously reported in sandbox models such as underplated sediments and suture zones are also recognizable in the reflection profiles. The underplated sediments are interpreted to be comprised of fluid-rich trench fill sediments that were underthrusted together with the seamount. The suture zone separates the accretionary wedge before and after seamount subduction. By comparing with numerical simulations, we propose following upper plate deformation history and mechanism for slow earthquake generation: (1) subduction of the first seamount resulted in the underplating of a large volume of fluid-rich trench fill sediments, (2) the underplated sediments are undergoing horizontal compression from subsequent subduction of the three seamounts resulting in high pore pressure consistent with previously reported low velocity zones, and (3) the horizontal compression may also result in fluid expulsion and these fluids migrate updip and get trapped because the mudstones serve as an impermeable cap. Our proposed mechanism highlights the role of sequential seamount subduction and accounts all the aforementioned factors associated with slow earthquakes, which is not commonly discussed in previous studies, to explain the slow earthquake cluster off Muroto.

© The Seismological Society of Japan

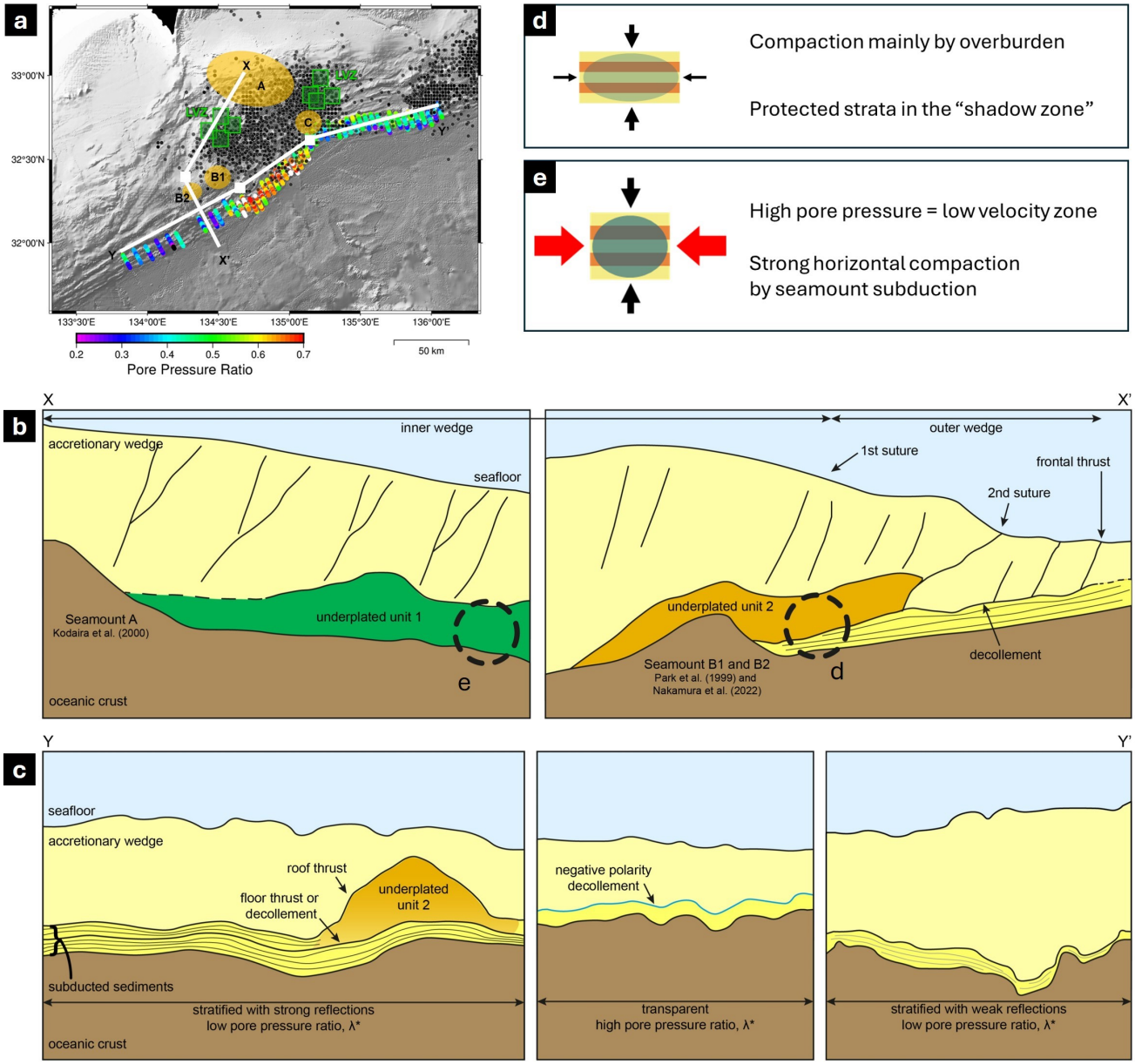


Figure 1. (a) Pore pressure ratio calculated by Flores et al. (2024) using p-wave velocity. Green boxes are low velocity zones identified by Tonegawa et al. (2017). (b) Cartoon cross section of line X-X' showing the deformation caused by the sequential subduction of seamounts A, B1, and B2 inferred from the reflection profiles. (c) Simplified cross section of the along-trough profiles showing the change in the reflection characteristics of the subducted or underthrusted sediments. Gaps in the cartoon sections indicate the kink of the cross sectional lines. (d,e) Schematic illustrations of the mechanical and hydrological conditions of the underthrusted sediments according to Miyakawa et al. (2022).

© The Seismological Society of Japan

Strong reflector in seawater identified from seismic reflection data off the east coast of Noto Peninsula

*Tetsuo NO[1], Hironori Otsuka[2], Mariko Hatta[3], Tomoharu Senjyu[4], Ayanori Misawa[5], YUE SUN[6], Noboru Yamakawa[6], Yuqi Lyu[6], Jin-Oh Park[6]

1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe Univ., 3. RIGC, JAMSTEC, 4. RIAM, Kyushu Univ., 5. GSJ, AIST, 6. AORI, Univ. of Tokyo

反射法地震探査は、地下の堆積層や地殻の構造を探るための観測手法として通常用いられ、海洋で実施された場合は海水中のデータを通常ノイズとして除去される。一方で、Seismic oceanographyとよばれる研究においては、その海水中のデータを用いて、反射法地震探査的な解析を行うことによって、海中をイメージングし、渦形成、内部波、乱流混合などの様々な海洋現象の研究に応用されている（e.g. Dickinson and Gunn, 2022, frontiers）。また、海底まで達している断層近傍で反射法地震探査を行った場合は、断層付近からの流体の放出が示唆される海中のイメージが得られているケースも報告されている（e.g. Tsuru et al. 2020, EPS）。
2024年1月1日に発生した能登半島地震は地形の変位も認められ、津波も発生していることから、地震断層が海底まで達している箇所も多いことが示唆される。そのため、仮に断層に沿った流体の移動が海底まで達していれば、断層近傍の海水中における反射法地震探査のイメージングに何らかの変化が生じている可能性も考えられる。そこで、地震発生後の2024年3月に白鳳丸による第三次緊急調査航海で実施された反射法地震探査（朴・他, 2024, JpGU; 朴・他, 2024, 本学会）のデータを用いて、震源域を含む能登半島東方沖の海水中のデータについて解析を行った。解析では、緊急航海で実施されたCTD観測やXCTD観測（朴・他, 2024, JpGU; 尾鼻・他, 2024, JpGU）の結果を参考に速度を仮定して、NMO補正やマイグレーションを行った。
その結果、探査測線下で推定されている断層付近において、現時点で海水中の変化は見つけることができていないが、測線の東側に位置している富山トラフ上の海面下200 m付近に非常に明瞭で直線状の反射面がイメージされた。この反射面について、探査測線近傍で実施されたCTD観測の結果と比較してみると、温度躍層及び密度躍層の位置に対応しているようにみえる。先行研究（e.g. 八田・他, 2005, 地球化学）を参照すると、その躍層は対馬暖流水と日本海固有水の遷移域に位置し、その領域に反射面がイメージされていると推定される。さらに、CTD観測で得られた速度・密度の値を参考に有限差分法による簡易的なモデリング（Kelly et al., 1976, Geophys.）を行った結果、強反射面の近い水深に反射面が得られるので、躍層が強反射面の形成に関与している可能性が高い。また、この反射面の位相は海底面の反射面と比べると反転しているように見える特徴もあるが、CTD観測の結果をみると、この遷移域を境に密度は下層へ向けて増加するが、速度は下層へ向けて低下するので、この速度の低下が位相の反転に影響しているとみられる。さらに、反射面の振幅が測線間で変化し、測線交点で反射面が合わないという特徴もあるが、それらは探査測線の領域における躍層の時空間の変化による影響の可能性が考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Source mechanism analysis of the tsunami near Torishima on October 9, 2023

*Masumi YAMADA[1], Masaru Nakano[2]

1. DPRI, Kyoto University, 2. JAMSTEC

On October 9, 2023, between 4:00 a.m. and 7:00 a.m. local time, a cluster of earthquakes occurred near Torishima Island, and a tsunami advisory was issued for the surrounding areas. A 60-centimeter tsunami was observed at 7:17 a.m. on Hachijojima, and other tsunamis were generated over a wide area on the Pacific Ocean side. Originally the size of the earthquake was unknown due to the unclear P-wave arrivals and contamination by the T-phases, hydro-acoustic waves traveling in the seawater. The main source of this tsunami was an uplift near the Sofugan volcano, suggesting the involvement of caldera activity in the tsunami generation (Sandanbata et al., 2024; Kubota et al., 2024). This tsunami source was estimated by the inversion analysis of tsunami waveforms.

In this study, we performed the seismic waveform inversion using the broadband seismograms recorded by the F-net operated by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED). The F-net seismograms show the 14 T-phase signals in the short-period component (2-8Hz), and corresponding surface waves in the long-period component (0.01-0.05 Hz). To determine the source mechanism, we performed seismic waveform inversion in the frequency domain (Nakano et al., 2008).

The spectra of the broadband data show a large amplitude at 0.02-0.05Hz with a peak at 0.04 Hz. The amplitude is high at 0.06-0.12 Hz and 0.2-0.5 Hz due to the microseisms. Therefore, for the waveform inversion, we used a 0.02-0.05 Hz window.

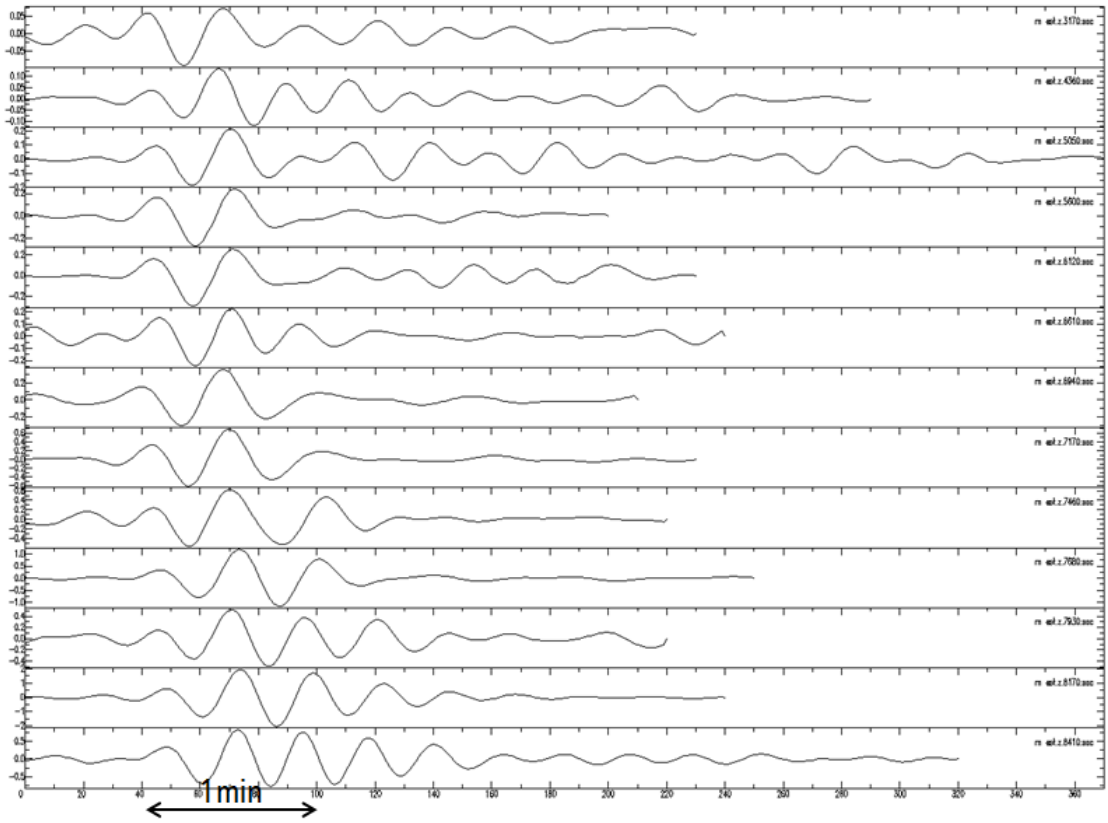
The inversion technique estimates the source time function (STF) acting on a fixed location by minimizing the difference between observed and synthetic waveforms. The synthetic waveforms are a convolution of the pre-computed Green's function and the STF. We fixed the mechanisms and location (29.7N, 140.0E, 0km depth). We assumed three source mechanisms, single-force, double-couple, and isotropic mechanisms.

The figure shows the STFs of the vertical component of the 13 inverted events assuming a single-force mechanism. The main period is about 25 seconds, and the shape is a harmonic function. The event duration is 1-2 min and depends on the event. The horizontal STFs are substantially smaller than the vertical component. We also tested double-couple and isotropic mechanisms. The residual of isotropic mechanism is larger than the single-force mechanism, but smaller than the double-couple mechanism. A force source symmetric about the Z axis, such as a single-force or isotropic mechanism, explains the waveform better than a double-couple mechanism.

Our analysis shows that this sequence of events has a similar mechanism with different amplitude and duration. The amplitude increased up to event 12 and decreased for events 13 and 14, which is consistent with the T-phase amplitude and tsunami STF (Sandanbata et al., 2024). The vertical STF is dominant for all events, so the source of the tsunami is either the uplift or subsidence of the seafloor caldera.

© The Seismological Society of Japan

STF (single-force 0.02-0.05Hz)



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S10. Active faults and historical earthquakes

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S10P] PM-P

[S10P-01] The collapse of Showa Bridge and testimony that “the riverbed cracked”

*Kazuo KAWAUCHI[1] (1. Niigata University of Pharmacy and Medical and Life Sciences)

[S10P-02] Investigation of gravity anomalies around the Morimoto-Togashi fault zone

*Akihiro Sawada[1], Yoshihiro Hiramatsu[1] (1. College of Science and Engineering, Kanazawa University)

The collapse of Showa Bridge and testimony that “the riverbed cracked”

*Kazuo KAWAUCHI[1]

1. Niigata University of Pharmacy and Medical and Life Sciences

１．はじめに

筆者は地震後三十数年を経過した1999年７月，地震当時新潟市内勤務の前田忠三氏から落橋の様子を，また氏を通じて当時の同行者の渡部薫氏の「川が割れて川底の泥がみえた」という目撃談を詳しく聞く機会を得た．また後に手記をいただいた．川底が割れたのは渡部氏だけが目撃した．

２．渡部氏の証言

『ギ、ギギイの音を聞きながら急ぎ足でペダルを踏んでいた時、突然、自転車とともに横滑りした感じで真横の車道の端まで10メートル余りも飛ばされ何が起きたのか一瞬わからん状態だった．高欄につかまり激しい揺れの中で川の下流側八千代橋方面を眺めていた．前田さんが,体育館が潰れると叫んだ後キノコ雲が見えボンと音がした直後、自分は「川の水がないぞー」「川底が見えたぞー」と続けて叫んだ．それは逃げる直前のほんの一瞬で「オッ、ワーッ」と言う感じで1～2秒の出来事だった．両岸に水が別れた感じだった．水が両側に避けたというか、われた、別れた感じで、下の方まで裂けた感じで下流側50メートル位までの川底の泥が見え下流側で水柱も上がった．それと同時に足元の目の前のジョイントが開き始めた．危ないと思った瞬間、桁が落ち始め水しぶきが上がるのを見るやいなや「逃げよう」と叫び夢中で逃げ出した．当日、職場に帰って話したら皆が「ばか言え、目の錯覚だよ．そんなことあるわけないよ」と言われ「そうかなぁ」と思い「以後は誰にも話さなかった」』(前田氏は司法書士の仕事をしていて，渡部氏の聞き取りの記録は精密である)

昭和大橋はP5とP6の２つの橋脚のみが「消失」した．それ以外の橋脚は立ち残った．二人はＤとＥの境付近（橋脚P5の上．図参照）の欄干に下流側に向かってしがみついていた．

３．もう一つの証言

前田氏，渡部氏の証言の20年後にもう一つの証言が得られた．これは新潟日報 2014.6.12 「新潟地震50年記憶未来へ」からの抜粋である．

高島忠男氏（地震時右岸側下流川岸の自動車整備工場勤務）の証言

『飛び出して川岸の砂利の山に．グーッと低い音が腹に響いた．振り返ると、昭和大橋の橋脚の一つが川に潜るよう消えた．上に渡されてあった橋桁は一瞬、宙に浮いてとどまっているように見えたが、すぐに真下に落ちた．橋に目がくぎ付けになっている間に、信濃川の水がだんだん引いて小川のようになった．むき出しになった川床では魚が跳ねた』

高島氏によれば，橋脚が消えたとか川底がむき出しになったとかいう話しをすると，人は皆笑って相手にしてくれなかったという．

４．秋田河水涸れ溝の如き細流となる

秋田河とは現在の雄物川のことである．昭和大橋下の信濃川で起きた現象は，天長七年（830年）出羽秋田地震の記述中にある地変と酷似している．これは研究者には比較的良く知られている記述だが，トンデモナイ内容なのであまり顧みられなかった．類聚国史を引用した小鹿島果の日本災異史により紹介する．

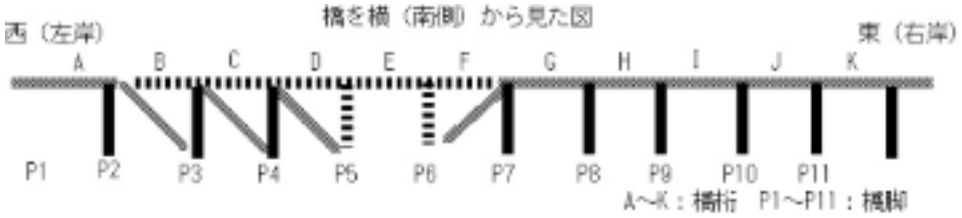
正月二十八日出羽國驛傳奏、今月三日辰刻、大地震動、響如
雷霆（中略）城辺大河曰秋田河水涸細流如溝、添川今玉川覇
川未詳闌岸崩塞其水氾濫

５．橋脚は割れ目に引き込まれた

P5,P6が割れ目に沈下して橋桁が次々とずれ落ちたことは疑いの余地がない．1828年三条地震では小泉其明が信濃川流域の庄瀬というところでの地面が波打つ様子を描いている．軟弱地盤では大地が波打って大河の川底が見えたり川底が裂けたりする現象が起きるのかもしれない．

本論の現象を珍事とせず，常識に囚われず，また「そんなことあるわけない」など言わず，貴重な他山の石としてこれまで経験したことがない将来の破局的震災に備えたい．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Investigation of gravity anomalies around the Morimoto-Togashi fault zone

*Akihiro Sawada[1], Yoshihiro Hiramatsu[1]

1. College of Science and Engineering, Kanazawa University

森本富樫断層帯は、金沢平野の南東縁を走る総延長約26kmにわたる北東走向の逆断層からなる活断層帯である。その平均変位速度は約1m / 1000年と推定されており（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2013）、また断層帯周辺には金沢市など人口密集地が分布していることからも、断層帯についてのより信頼性の高いデータを得ることは断層活動に伴う地震被害を推定する上で重要である。
2022年度から実施されている「森本・富樫断層帯における重点的な調査観測」の一環として、我々は断層帯周辺地域で重力測定を実施している。そして最新のDEMデータを合わせて用いることによって、高精度の重力異常データを得るとともに、重力異常データを用いた断層構造の推定等を行うことを目的とする。
2022年度から2024年8月までに森本・富樫断層帯周辺域に該当する金沢平野および断層帯東側の丘陵部にて新規に989点の重力測定を行ってきた。既存測定データを含めた重力測定データは、断層帯西部の平野において断層から距離5km以内の範囲のほとんどで1km^{2}あたり2点以上の測定点が設置され、断層帯東部の丘陵地についても測定可能な地域では同様の測定点密度が得られている。
重力異常分布の特徴としては、金沢平野は低重力異常を示しており、その低重力異常域を横切るように森本・富樫断層帯の地表部が分布しているが、重力異常分布は断層帯の分布よりも地域の地質分布の影響をより大きく示している。森本断層および野町断層については断層構造に起因する可能性のある重力異常および重力異常値の勾配分布が見られるが、富樫断層については重力異常からは断層構造の特徴は比較的不明瞭であった。 密度差が600kg/m^{3}の2層密度構造を仮定した3次元インバージョン解析の結果からは、金沢平野中心部の低重力異常域における基盤深度として1500～2000mが推定される。密度境界深度の等深線は森本断層付近では比較的走向に沿った向きを示すが、富樫断層周辺では等深線は断層の走向にあまり沿っておらず、富樫断層の断層変位による基盤深度の変化が小さいことを反映していると考えられる。
本発表では、これまでに得られた重力異常分布と断層帯周辺での推定密度構造についての解析結果について報告する。
本研究は、文部科学省「森本・富樫断層帯における重点的な調査観測」の一環として実施している。重力データとしてYamamoto et al. (2011)、産業総合技術研究所地質調査総合センター (2013)を使用した。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S11. Various phenomena associated with earthquakes

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S11P] PM-P

[S11P-01] Search for microbaroms sources by a tripartite observation using newly developed microbarographs

*Yoshio FUKAO[1], Taewoon Kim[1], Takuma Ooi[2], Ayami Suzuki[2], Ryohei Ooi[2], Kiwamu Nishida[3] (1. JAMSTEC, Yokohama Institute Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Krone Corporation, 3. Univ. of Tokyo, ERI)

[S11P-02] Long-duration signal generated by volcanic activity at Nishinoshima detected by dense array observation at Hyuga Nada

*Shukei OHYANAGI[1], Yusuke YAMASHITA[2], Takeshi AKUHARA[3], Yasunori SAWAKI[4], Yoshihiro ITO[2], Tomoaki YAMADA[3], Masanao SHINOHARA[3] (1. Kyoto University, Graduate School of Science, 2. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute, 3. The University of Tokyo, Earthquake Research Institute, 4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

[S11P-03] Are There One or More Geophysical Coupling Mechanisms before Earthquakes? The Case Study of Lushan (China) 2013

*Yiqun Zhang[1,2], Kaiguang Zhu[2], Dedalo Marchetti[3], Jiancang Zhuang[1] (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Jilin University, China, 3. National Institute of Geophysics and Volcanology)

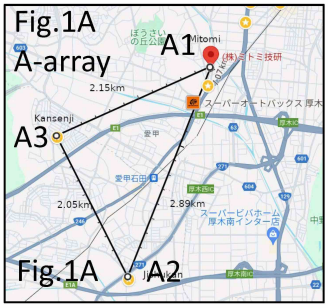
Search for microbaroms sources by a tripartite observation using newly developed microbarographs

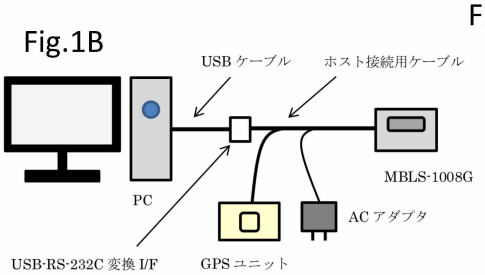
*Yoshio FUKAO[1], Taewoon Kim[1], Takuma Ooi[2], Ayami Suzuki[2], Ryohei Ooi[2], Kiwamu Nishida[3]

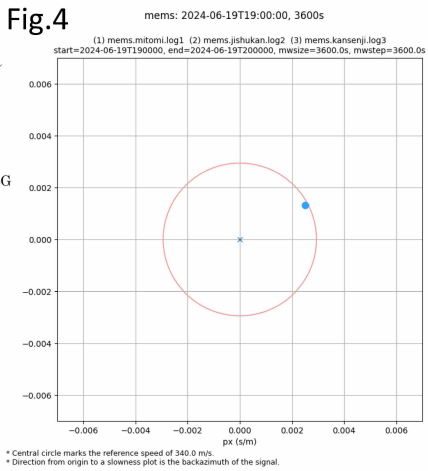
1. JAMSTEC, Yokohama Institute Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Krone Corporation, 3. Univ. of Tokyo, ERI

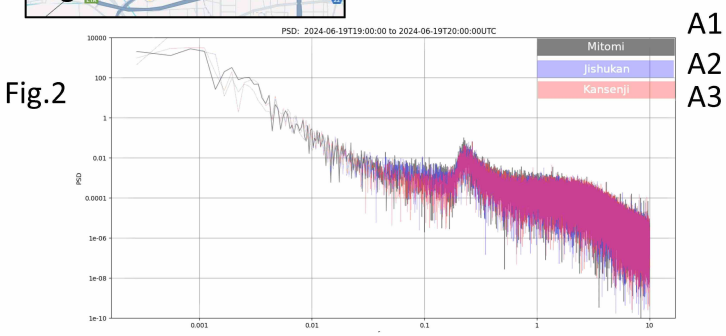
１．序
これまで、周期10～20秒の海洋波浪の非線形衝突により大気側に発生する半分周期の圧縮波が大気脈動であり、海側に発生する圧縮波（水中音波）が海底で地震波に変換されたものが脈動であると説明されてきた。しかし、これらが１つの地球振動システムとして働くことを示した観測例はない。特に大気脈動は波長が短く（~2km）且つ波形相関の良い時間が長く続かないため波源推定すら難しい。本研究は、この現象のより深い理解を目指して新型微気圧計を用いて開始した３点アレー観測の概要を報告するものである。
２．３点アレー（トリパタイト）と観測システム
Fig.1Aに、厚木市に展開した３点アレー(A1,A2,A3)の配置を示す（Google地図利用）。観測点間の距離を大気脈動１波長（約2km）強に取ることにより、波形相関に伴う困難を最小限に抑えた。Fig.1Bに観測システムの概要を示す。１観測点あたりのシステムは大気脈動が検出可能なノイズレベル10mPa程度の新型微気圧センサーと時刻同期用のGPS受信機、システムを制御するRaspberry Pi5はLinux OSとPythonで組まれたソフトで構成されている。気圧変化は20Hzでサンプリングされ、タイムサタンプ付き分解能0.1mPaの微気圧データとしてRaspberry Pi5にUSB接続されたSSDに記録される。現時点ではSSDは現地回収されている。観測が開始されて以来アブストラクト時点で3カ月が経過した。
３． データ解析Fig.2に2024-06-19の19-20時(UT)のPSD図を示す。３点(A1,A2,A3)ともスペクトル形状は細部まで殆ど変わらず、共通して周波数0.2Hz付近に顕著な大気脈動ピークを示す。Fig.3には、同日同時刻帯記録に0.2Hzを中心とするバンドパスフィルターを通した記録から５分間分を抜き出したものである。各観測点には、似たような振幅の波群が繰り返し到着するが、その到着時刻には多少のズレがあり、波群は先ずA1に到達し、次に互いに同程度の遅れでA2とA3に到達する。到来した波群を平面波で近似すると波群の水平伝播速度は約340m/sとなり大気音速にほぼ一致する。即ち観測された周期５秒の波群はターゲットである大気脈動であると同定される。2024-06-19の19-20時の時間帯全体についてより系統的な相関解析(Nishida et al., 2005,GJI)を行った結果をFig.4に示す。この図はアレーに入射してきた平面波のSlowness vector （位相速度ベクトルの逆数）の東西成分を横軸に、南北成分を縦軸にプロットしたものである。図は、周期５秒の波が１時間もの間、音波速度よりわずかに早い353m/sの水平速度で常に同じ方向から(北から時計回りに62度)入射し続けていたことを示す。Fig.5は、この大気脈動がどこから到来したものかを探ったものである。即ち、同じ日の気象庁発表の波浪高度分布図上を使って、大気脈動の入射方向を大円コースに沿って逆にたどってみた。波浪分布図によると、房総はるか沖に線状に連なる波浪高度の高い峰が存在するが、その走行は大気脈動の入射方向と並行し交差しない。波浪高度と大気脈動との関係を議論するには後者のデータが決定的に不足している。
４．謝辞
厚木市に展開した微気圧計アレー観測にあたっては、以下の機関・関係者の方々のお世話になっています。記して感謝します。
A1観測点：株式会社ミトミ技研、A2観測点：自修館中等教育学校、A3観測点：関泉寺

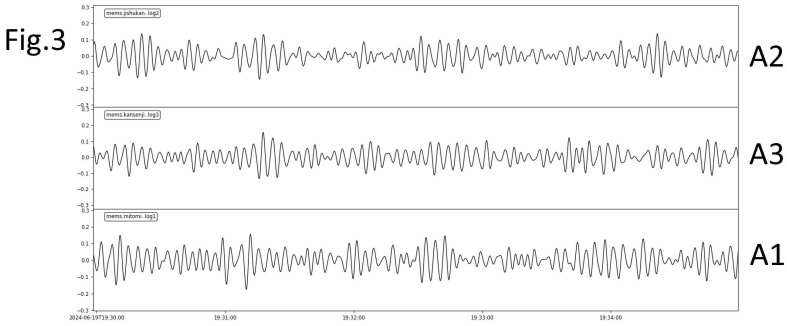
© The Seismological Society of Japan

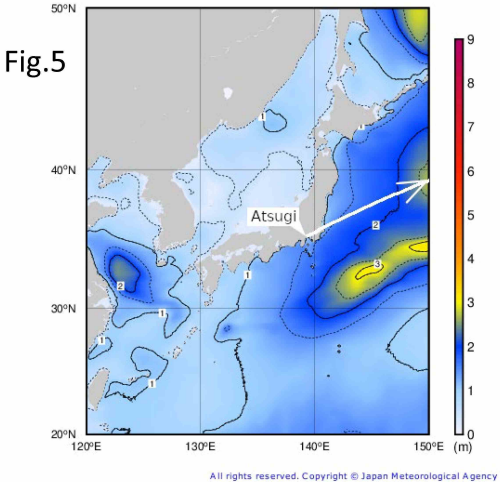












All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency

Long-duration signal generated by volcanic activity at Nishinoshima detected by dense array observation at Hyuga Nada

*Shukei OHYANAGI[1], Yusuke YAMASHITA[2], Takeshi AKUHARA[3], Yasunori SAWAKI[4], Yoshihiro ITO[2], Tomoaki YAMADA[3], Masanao SHINOHARA[3]

1. Kyoto University, Graduate School of Science, 2. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute, 3. The University of Tokyo, Earthquake Research Institute, 4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Hyuga Nada, a region offshore of Miyazaki Prefecture, is attracting widespread attention from seismologists due to its potential for a megathrust earthquake accompanied by a tsunami, as well as slow earthquake activity near the trench. From March 2018 to September 2018, we conducted a dense Ocean Bottom Seismometer (OBS) array observation in a region where active tectonic tremor activities [Yamashita et al., 2015; 2021] and Very Low Frequency Earthquake activities [Tonegawa et al., 2019] have been observed. The OBS array consisted of 10 OBSs, forming double concentric circles with radii of 1 km and 2 km. The primary objective of the observation was to investigate the seismic structure related to slow earthquake-genesis of this region. Receiver function images constructed based on the array records revealed a possible fluid reservoir on the Kyushu-Palau Ridge [Akuhara et al., 2023]. In addition to investigating the seismic structure, we performed array analysis using data from the dense OBS array. Although our primary target was to detect slow earthquake activity through the array analysis, we also detected a long-duration signals likely to be generated by volcanic activities at Nishinoshima, a volcanic island in the Izu-Mariana-Bonin arc.Array analysis, specifically array beamforming, is a method used to extract information such as the arrival direction and/or apparent velocity of waves observed by a dense array. It has been widely used in the field of telecommunications, but has also been adopted in seismology. One of the advantages of incorporating beamforming analysis in seismology is its high capability in detecting weak but coherent signals. To detect signals that are stable in space and time, we perform slant-stack beamforming [e.g., Rost and Thomas, 2002] on the OBS array data. First, continuous waveforms of the vertical component are band-pass filtered between 2 Hz and 4 Hz. The analyzed frequency band is selected based on the ambient noise characteristics of the observed data. Then, the waveforms are beamformed every 60 seconds using a half-overlapping moving time window. In the array beamforming process, the waveforms from multiple stations are time-shifted in the frequency domain based on assumed pairs of apparent velocities (1.4 km/s –40 km/s) and directions (0 - 360), and then stacked to enhance coherently observed signals.As a result of the analysis, we detected several substantially long-duration signals that may be related to the eruption of Nishinoshima. Starting on July 12, the array beamforming revealed the arrival of a signal near the noise level from a direction of 105, with an apparent velocity of 2.2 km/s. This signal remained stable for over 32 hours. The timing of the detection coincides with the eruption of Nishinoshima on July 12 [Marine Volcano Database, Japan Coast Guard], which was confirmed both aerially and by satellite observation of ground surface temperature. Although the island is nearly 950 km away from the array site, the temporal and directional coincidence suggests that the observed signal was possibly produced by the eruption at Nishinoshima. We interpret that the hydroacoustic wave generated during the eruption propagated through the ocean and was converted to a surface wave on the seafloor nearby the OBS array.The results of array beamforming suggest not only signals from a known volcanic activity but also a possible eruption that has not been documented. The eruptive activity at Nishinoshima was not confirmed by aerial observation after July 30 [Marine Volcano Database, Japan Coast Guard]. However, the array beamforming indicates high-frequency signals arriving from directions of 128 and 90 for 12 hours on August 10, similar to the

© The Seismological Society of Japan

event on July 12. The signal arriving from 128 had an apparent velocity of 1.5 km/s, and the signal from 90 had an apparent velocity of 2.4 km/s. The apparent velocities of these waves suggest that we observed both a hydroacoustic wave traveling through the ocean and a surface wave converted from the hydroacoustic wave. This event suggests a possible short eruption that could not be detected by satellite observation, which has limited capabilities for monitoring during daytime, or possible non-eruptive volcanic activity similar to the one previously documented at Nishinoshima [Baba et al., 2020].

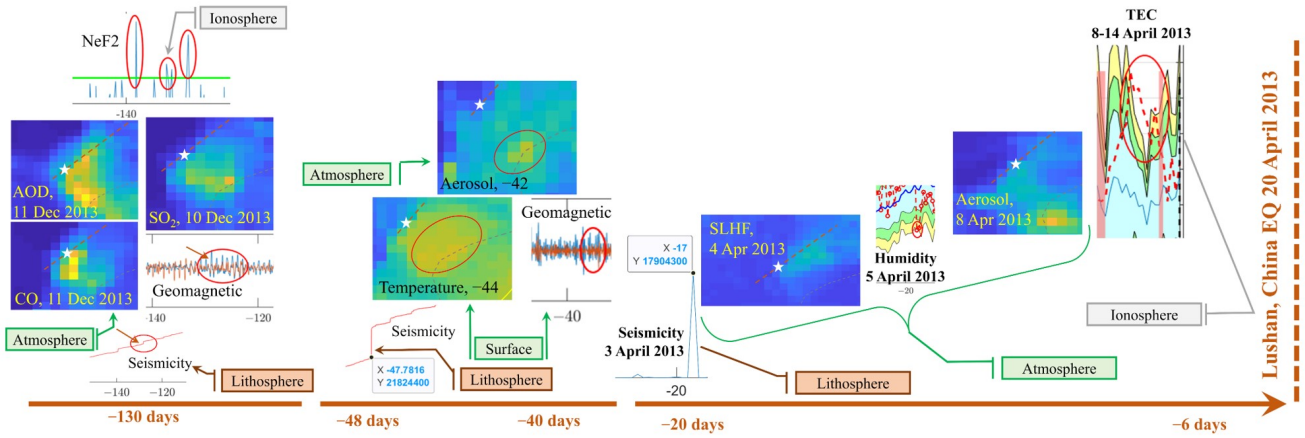
© The Seismological Society of Japan

Are There One or More Geophysical Coupling Mechanisms before Earthquakes? The Case Study of Lushan (China) 2013

*Yiqun Zhang[1,2], Kaiguang Zhu[2], Dedalo Marchetti[3], Jiancang Zhuang[1]

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Jilin University, China, 3. National Institute of Geophysics and Volcanology

Several possible lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling mechanisms before earthquake occurrence are presented in the literature. They are described by several models with different interaction channels (e.g.,electromagnetic, mechanics, chemical, thermal), sometimes in conflict with each other. In this paper, we search for anomalies six months before the Lushan (China) 2013 earthquake in the three geo-layers looking for a possible view of the couplings and testing if one or another is more reliable to describe the observations. The Lushan earthquake occurred in China’s Sichuan province on 20 April 2013, with a magnitude of Mw = 6.7. Despite the moderate magnitude of the event, it caused concern because its source was localized on the southwest side of the same fault that produced the catastrophic Wenchuan event in 2008. This paper applies a geophysical multi-layer approach to search for possible pre-earthquake anomalies in the lithosphere, atmosphere, and ionosphere. In detail, six main increases in the accumulated seismic stress were depicted. Anomalous geomagnetic pulsations were recorded in the Chengdu observatory, sometimes following the increased stress. Atmosphere status and composition were found to be anomalous in several periods before the earthquake, and, spatially, the anomalies seem to appear firstly far from the upcoming earthquakes and later approaching the Longmenshan fault where the Lushan earthquakes nucleated. The Formosat-3 data identified interesting anomalies in the altitude or electron content of the ionospheric F2 peak in correspondence with seismic and atmospheric anomalies 130 days before the earthquake. In addition, the total electron content showed high anomalous values from 12 to 6 days before the earthquake. We compared the anomalies and tried to explain their correspondences in different geo-layers by the lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling models. In particular, we identified three possible couplings with different mechanisms: a first, about 130 days before the earthquake, with a fast (order of one day) propagation delay; a second, about 40 days before the earthquake occurrence, with a propagation delay of few days and a third from 2.5 weeks until one week before the event. Such evidence suggests that the geo-layers could interact with different channels (pure electromagnetic or a chain of physical-chemical processes) with specific propagation delays.



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S12P] PM-P

[S12P-01] Estimated spatial stress pattern in the aftershock area of the 2016 Central Tottori earthquake

*Takaki IWATA[1], Yoshihisa Iio[2,3] (1. , Comprehensive Education Center, Prefectural Univ. of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University, 3. Abuyama Seismological Museum)

[S12P-02] Effect of internal fracture distribution on frequency dependence of elastic constants of granite under Atmospheric and Confining Pressure

*Hideto Takatsu[1], Shinichi Uehara[1] (1. Univ. of Toho)

[S12P-03] Analyzing short- and long-term friction effects through two-state variable modeling

*GUOHAO MA[1], Eiichi Fukuyama[1,2] (1. Kyoto University, 2. NIED)

[S12P-04] Velocity-dependent friction of rocks distributed in the 2016 Kumamoto earthquake region

*Kazuo MIZOGUCHI[1], Takahiro IIda[2], Sachiko Iizuka[2] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. CERES)

[S12P-05] Understanding the development process of boundary shear within faults through laboratory friction experiments and numerical analysis

*Minoru Kudose[1], Tetsuro Hirono[1], Mamoru Hatanaka[2], Akito Tsutsumi[2], Takeshi Miyamoto[2], Satoshi Yukawa[3] (1. Osaka Metropolitan University, 2. Kyoto University, 3. Osaka University)

[S12P-06] Measurement of the frequency dependence of voltage response due to piezoelectric polarization in artificial quartz crystal samples

*Kazuya Ogawa[1], Hironori Kawakata[1] (1. Ritsumei University)

Estimated spatial stress pattern in the aftershock area of the 2016 Central Tottori earthquake

*Takaki IWATA[1], Yoshihisa Iio[2,3]

1. , Comprehensive Education Center, Prefectural Univ. of Hiroshima, 2. DPRI, Kyoto University, 3. Abuyama Seismological Museum

山陰地方は日本において活発な地震活動が見られる地域の1つであり，*M*6および7クラスの地震が繰り返し発生している．しかし，こういった地震活動が見られる原因については不明瞭な点が多く，この地域の応力場について調べることは重要であろう．ここでは近年開発した手法により，近年同地域で発生した地震の1つである2016年鳥取県中部地震の余震域における応力空間パターンを求めることを試みた．

データは京都大学防災研究所の満点および0.1満点システム[飯尾・他, 2017; Iio et al., 2018]や東京大学地震研究所による臨時観測点及び気象庁や防災科学技術研究所の定常観測点によって得られた*P*波初動（押し引き）である[Iio et al., 2020]．解析対象地域は2016年鳥取県中部地震の本震震央を囲む東西・南北40kmの領域とした．満点および0.1満点システムを稼働した2016年10月22日午前6:33より同年12月15日までに得られたものの中から比較的読み取り精度のよいものとして*P*波の理論走時と実際のものとの差（*O-C* time）が0.2秒以内，また*S*波については読み取りがされていれば*O-C* timeが0.5秒以内のものを選んだ。結果として残された13,783個の地震（余震）から得られた392,227個の*P*波初動データを解析した

手法にはIwata[2018]を改良した岩田[2023]を用いた．Iwata[2018]は事前にメカニズム解を求めず*P*波初動から直接応力場を推定するHoriuchi et al.[1995]やAbers et al.[2001]の考え方を，ベイズ推定の枠組みにより，応力場の空間パターンを平滑化拘束条件の下で先験的な領域分けを行うことなく連続的に求められるよう拡張したものである．Iwata[2018]は応力場の空間パターンを，スプライン間隔一定の3次B-スプラインで表現していたが震央位置を頂点とするドロネー三角形分割に基づくスプラインを導入することで空間解像度を向上したものが岩田[2023]である．なお、ここでの「応力場」とは最大（σ_1）・中間（σ_2）・最小（σ_3）主応力軸の向きのことである．

推定結果として，各震央で推定されたσ_1軸の水平面内における方位角(Azimuth, 真北から時計回りに測った角度）を図(a)に示す．なおσ_1軸の水平面からの鉛直方向への傾き（plunge）は98%以上の位置において±25度以内であり，概ね水平であると言える．図(a)に示されるようにσ_1軸は全体的に西北西-東南東方向であり，山陰地方全体の平均的な応力場（例えばIio et al.[2018]）と調和的である．しかし，北北西-南南東方向に走る本震断層の南東端（*x*=4, *y*=-3近辺）および北西端（*x*=-3, *y*=6近辺）では東西あるいは東北東-西南西方向と，反時計方向に回転している．なお推定誤差（図(b)）は概ね10°未満であることから，この「回転」は有意である．

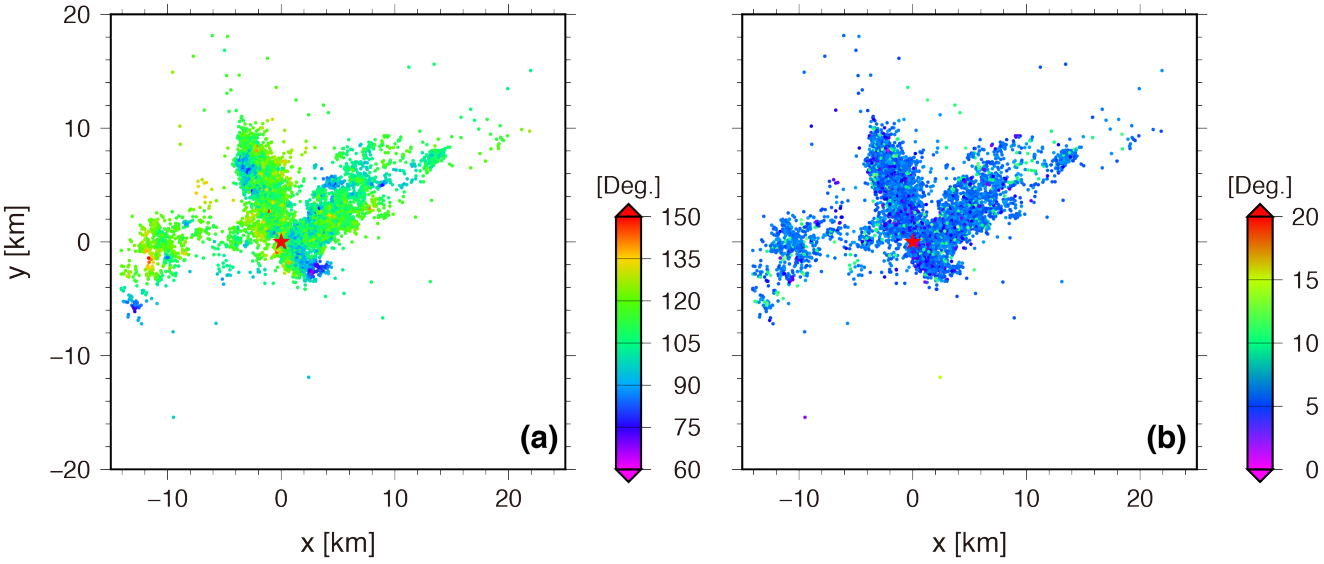
2016年鳥取県中部地震本震の断層運動は左横ずれで，伸張場となる主断層の南東端と北西端で期待される応力回転の向きは反時計方向となる．上述の「回転」はこれと合致している（Iwata[2018]のFig.11も参照）．またIio et al. [2021, 2023]では，これらの領域における余震の地震のメカニズム解とそれを元にした応力インバージョンから同様の回転が生じていることが示されており，それらと調和的である．なお、図1(a)にはこの「回転」以外にも細かい応力場の空間変動が見られ，これらについては今後の精査・考察が必要である．

参考文献

Abers et al., 2001, JGR, doi:10.1029/2001JB000437.
Horiuchi et al., 1995, JGR, doi:10.1029/94JB03284.
飯尾・他, 2017, 京都大学防災研究所年報, 60B, 382-389.
Iio et al., 2018, Tectonophys., doi:10.1016/j.tecto.2017.12.007.
Iio et al., 2020, EPS, doi:10.1186/s40623-020-01161-x.
Iio et al., 2021, Comm. Earth Env., doi:10.1038/s43247-021-00231-6.

© The Seismological Society of Japan

Iio et al., 2023, GJI, doi:10.1093/gji/ggac521.
Iwata, T., 2018, JGR, doi:10.1002/2017JB015359.
岩田貴樹, 2023, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG56-P04.



図：2016年鳥取県中部地震の余震域に対して求められた応力場. (a)最大主応力（σ1）軸の水平面内における方位角（真北から時計回りに測った角度）の空間分布と(b)その推定誤差.

© The Seismological Society of Japan

Effect of internal fracture distribution on frequency dependence of elastic constants of granite under Atmospheric and Confining Pressure

*Hideto Takatsu[1], Shinichi Uehara[1]

1. Univ. of Toho

背景・目的

地下の岩石の弾性特性は、地震波探査や自然の地震波（0.1 ~ 100 Hz）から推定される。その観測結果から、地下の岩石の種類や空隙率および亀裂分布、応力状態などを推定する際は、室内の弾性波測定（100 k ~ 1 MHz）に基づくことが一般的である。しかし、弾性波の周波数に依存することが知られている岩石の弾性特性を、何桁もかけ離れた周波数帯で比較し物質を推定する際には注意が必要である。例えば、岩石の弾性特性が周波数依存性を示す要因の1つに間隙流体と岩石の相互作用（Mavko & Jizba, 1991）が知られている。このことから、内部亀裂状態がその周波数依存性に影響を与えると考えられ、その性質を調べることを重要である。そこで本研究では、動的応力-ひずみ法を用いて亀裂分布が異なる花崗岩の弾性定数とその周波数依存性を調べることを目的とした。高周波帯（1 MHz）では、AEセンサーを用いた透過法測定により、Vp/Vs比からポアソン比およびヤング率の導出を行った。

実験手法

実験には、庵治花崗岩（香川県産）を、直径40 mm、長さ80 mmの円柱形に整形した試料を用いた。はじめに、異なる亀裂分布状態にすることを目的として、未加熱試料（間隙率 0.30%）、550℃に加熱し加熱炉内に静置することで緩やかに冷却した試料（間隙率 1.45%）の2種類を用意した。それぞれの試料について、軸方向に低周波（0.13, 1.3, 13 Hz）の弾性振動を与え、軸応力および軸・周ひずみを測定した。この測定は、試料の乾燥・飽和状態、また大気圧下および封圧下（2.5, 5, 10 MPa, 飽和未加熱試料のみ）それぞれで行った。試料に弾性振動を与えるために、ピエゾアクチュエーター（ピーアイジャパン社製 P-045.20P）を使用した。ピエゾアクチュエーターへの入力電圧信号には正弦波を用いた。測定データの応力および軸・周ひずみの振幅値や周波数スペクトルから、弾性定数の導出を行い、その周波数依存性を調べた。高周波（1 MHz）測定では、AEセンサーを用いた透過法により弾性波速度測定を行った。試料の両底面にAEセンサーの端子を接着させ、周波数1 MHz、電圧10 Vp-p、矩形波の電気信号をAEセンサーに入力し、オシロスコープで岩石を透過した矩形波の波形を確認した。

結果・考察

大気圧下においては、どちらの飽和試料においてもポアソン比・ヤング率・P波速度と周波数には正の相関が見られた。飽和未加熱試料（間隙率 0.3 %）は周波数が0.13, 1.3, 13 Hzと上がるにつれてヤング率が58.9, 65, 65.7 GPaと増加し、ポアソン比は0.24, 0.26, 0.28と増加した。飽和加熱後試料（間隙率 1.45%）はヤング率が41.5, 41.8, 43.6 GPaと増加、ポアソン比は0.25, 0.28, 0.31と増加した。この測定では、間隙率の違いと弾性特性の周波数依存性の差は見られなかった。未加熱試料よりも加熱後試料の方がポアソン比の値が高かったのはPimienta et al. (2018)の結果と矛盾しない。封圧下の飽和未加熱試料（間隙率 0.3%）おいては、どの封圧下でもポアソン比の周波数依存性は見られなかった。今後は飽和加熱後試料を用いた封圧下での測定と内部亀裂状態の観察を考えている。

© The Seismological Society of Japan

Analyzing short- and long-term friction effects through two-state variable modeling

*GUOHAO MA[1], Eiichi Fukuyama[1,2]

1. Kyoto University, 2. NIED

Introduction

The rate- and state-dependent friction law is a commonly used empirical equation in geophysics to describe the various process of fault slip. The friction coefficient μ of sliding surfaces evolves with the sliding velocity v and internal state variables θ. Though a single state variable can adequately describe the constitutive law with laboratory data in most cases, it is more appropriate to quantify this effect specifically using two state variables. For example, using two state variables to describe the state-variable dominated behavior at high velocities and flow-dominated behavior at low velocities (Reinen et al,1992; Blanpied et al,1998). In this study, we used two state variables to describe two mechanisms with different timescales in the frictional process, short-term and long-term responses. We used the friction obtained by a homemade apparatus (Ma et al., 2023, SSJ meeting) and estimated the friction parameters a, b_1, b_2, D_{c1} and D_{c2} with two state variables. We compare our results with those of previous studies using two-state variables RSF law and confirm the feasibility of using two-state variables RSF law.

Experiment methods

We performed velocity step change tests in a double-direct shear apparatus (Ma et al., 2023, SSJ meeting). The loading velocity is controlled by a servo-controlled uniaxial compression tester. We set up three logarithmically increasing velocity steps: 0.01 mm/s, 0.1 mm/s, and 1 mm/s, with each step covering a length of 2 mm slip. In addition, we designed different normal stress between 3.1 MPa and 6.3 MPa, which was achieved by four bolts that tighten a pair of fixed plates. We used metagabbro rock specimen from Tamil Nadu, south India whose nominal contact area is 60 mm long and 20 mm wide.

Results and conclusion

We used the Levenberg-Marquardt method to fit a nonlinear least-squares to experimental data (Skarbek and Savage, 2019, Geosphere). The a-b_1-b_2 values are estimated between -0.0038 and 0.0109. The D_{c1} is estimated between 0.54 μm and 20.02 μm and the D_{c2} values are estimated between 43.49 μm and 140.01 μm. We compared the values of a-b_1-b_2, D_{c1} and $D_{c2}$with previous studies which used two states variable (Reinen et al,1992; Blanpied et al,1998). We found that simply changing the normal stress and slip velocity has little effect on the friction parameters with two state variables, which is consistent with the results using one state variable (Linker & Dieterich,1992, Marone, 1998). The D_{c1} value mainly depends on the geometry of contact, which is similar to the characteristic slip distance D_c with one state variable (Scholz,1988). In contrast, the D_{c2} value represents the long-term response the distance required to rearrange the fabric on the rock surface (Pozzi et al., 2023). The value of D_{c2} is smaller than those by Blanpied et al. (1998) and Reinen et al. (1992). This could be because the total slip of 2 mm in each velocity step might not be sufficient; the long-term effects was not measured with adequate time and distance to evolve to a steady state. We will increase the length of each velocity step and remeasure D_{c2} in future work.

© The Seismological Society of Japan

Velocity-dependent friction of rocks distributed in the 2016 Kumamoto earthquake region

*Kazuo MIZOGUCHI[1], Takahiro Ilda[2], Sachiko Iizuka[2]

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. CERES

2016年に発生した熊本地震では，阿蘇から南西方向に延びる布田川断層全域と，益城町から南南西方向に延びる日奈久断層の北端部5km区間において断層変位が生じた．今回の地震の破壊域の北東端に関しては，阿蘇火山のマグマだまりが破壊のバリアーになったと考えられている（Yue et al., 2017, JGR）一方で，地震破壊が日奈久断層北端部分で停止した原因に関しては，Aoyagi et al.(2020)により高Vp/Vsゾーンとの関連性が議論されているものの未だ明らかにされていない．またこの破壊南端域では，地震後に顕著な余効すべりが発生しているが知られている（Hashimoto, 2020, EPS; 遠田ほか, 2012, 活断層研究）が，このような非地震性の挙動は，断層の摩擦特性が破壊中央部とは異なる可能性が示唆される．そこで我々は，熊本断層の破壊南端付近に分布する岩石を用いた摩擦実験を行い，それらの摩擦特性から今回の熊本地震時の断層挙動を説明できるかどうかを検討したい．

摩擦実験には，熊本地震の破壊南端部周辺に分布する，①前期白亜紀の肥後変成岩の変成砂岩，②三畳紀-ジュラ紀の低温高圧型の間の谷変成岩の緑色片岩及び泥質片岩，③前期白亜紀の肥後深成岩の花崗閃緑岩を用いた．各岩石を粉砕した後に篩掛けし，100μm以下の粉末試料を模擬断層ガウジとして準備した．縦50mm横50mm長さ80mm（中央は長さ100mm）の閃緑岩健岩ブロックを３段積み重ねて，各ブロックが接する50mm×80mmの２面に厚さ3mmのガウジ試料を敷き詰めた後に，電力中央研究所が所有する２軸剪断摩擦試験装置にセットし，中央部の岩石ブロックを変位させることで，各ガウジ層へせん断変位を与えた．実験中は垂直応力40MPaで一定に保持し，摩擦強度が定常状態に達する約0.3mm程度変位させた後に，変位速度0.3 μm/sから100 μm/sまで3.33倍ずつ速度を上げていくサイクルを3回繰り返し行い，速度急変時における摩擦係数の変化（摩擦強度のすべり速度依存性: a-b）を調べた．また今回の実験で用いたガウジ試料に対しては，炉乾燥を行っておらず，湿潤状態のものとなっている．このa-bが負の摩擦特性を断層が持つ場合には，地震発生につながるような断層の不安定滑りが生じるのに対して，a-bが正では，地震のような動的な破壊が発生するのを抑制し，断層クリープのような安定した断層滑りを促進させることが知られる（Scholz, 1998, Nature）．

実験結果により各試料で得られたa-bについての全体の傾向として，変位の増加に伴いa-bは減少する変位依存性が見られるとともに，変位量10mm以上においては，①変成砂岩及び③閃緑岩ではa-bは負を示す一方で，②の緑色片岩及び泥質片岩ではそれぞれ-0.001 ~ 0.0005，-0.0008 ~ 0.0006と幅広い値が得られている．また②の泥質片岩では，速度を急変させる速度が大きいほど，a-bが負から正へ変化する傾向が見られた．今回測定した試料の中で，唯一②の間の谷変成岩を構成する岩石においては，大きく変位させた後であってもa-bが正を示したことから，今回の熊本地震において，日奈久断層北端から以南へ断層すべり破壊が進展しなかった原因として，破壊南端付近に分布する間の谷変成岩がバリアーとして働いた可能性が示唆された．ただし今回の検討は，湿潤状態での実験結果に基づいたものであり，実際の地下環境とは大きく異なるため，今後は水飽和条件下での摩擦試験を実施していく予定である．

© The Seismological Society of Japan

Understanding the development process of boundary shear within faults through laboratory friction experiments and numerical analysis

*Minoru Kudose[1], Tetsuro Hirono[1], Mamoru Hatanaka[2], Akito Tsutsumi[2], Takeshi Miyamoto[2], Satoshi Yukawa[3]

1. Osaka Metropolitan University, 2. Kyoto University, 3. Osaka University

１．研究の背景と目的
地震時の断層すべり挙動の理解は、断層のすべり量の評価および解放されるエネルギーの推定において極めて重要である。地下の岩石がせん断を受けて断層を形成し、変位を増大させる過程において、リーデル面やY面といった特定の方向性をもつ面構造が発達することがあり、これらは複合面構造と呼ばれる。また、変位の増大に伴い、複合面構造の発達のみならず、剪断帯の厚化が生じることは広く知られている。さらに、剪断帯の内部には、複合面構造とは異なる、上盤もしくは下盤に沿って歪・変位が集中するboundary shearの形成が、フィールドでの断層の内部構造の観察や摩擦実験後の試料の観察により報告されている（例えば、Marone and Scholz, 1989; Niemeijer et al., 2010）。しかし、このboundary shearの発達の物理的描像およびその素過程について、ほとんど解明されていないのが現状である。そこで、本研究では、boundary shearの発達過程の解明を目的とし、以下に記す室内摩擦実験と数値解析を実施しつつある。

２．研究方法
室内岩石摩擦試験には、京都大学設置の回転式摩擦試験機を用いる。試料は粒径を24.95 μmに調整した人工石英砂を用い、すべり速度は0.07 m/s、垂直応力は5 MPa、すべり距離は最大10 m とする。実験開始時の模擬断層ガウジの厚さは約1 mm である。また、実験前後の試料の薄片を作成し、光学顕微鏡による変形組織の観察を行う。室内実験と並行して、フリーソフトウェアであるLIGGGHTSを用いて３次元個別要素法による摩擦実験を模擬した数値解析を行う。せん断の状態を定性的に表現する無次元量であるInertial numberを摩擦実験と数値解析においてほぼ同一にすることにより、スケール効果の除去を試みる。そのため、数値解析における粒子のヤング率とポアソン比は石英での実測値、時間ステップは0.0000007 s、粒径1, 1.5, 2 mm の粒子を計1700個（平均粒径1.2 mm）、すべり速度は0.16 m/s、垂直応力は25 MPaとする。この時、ガウジ厚は約17 mmであり、室内実験および数値解析におけるInertial numberの値はほぼ同一 (0.0004) である。

３．結果
室内摩擦実験は現在進行中であり、すべり距離を段階的にすることにより、その発達過程を精査する予定である。一方、数値解析では、摩擦係数の上昇、降下および定常状態という三段階の変化が見られ、定常状態の終盤においてガウジ層と圧力プレートとの境界付近に確認された粒子速度の明瞭な不連続面はboundary shearに相当すると考えられる（宮本ほか、2022）。

４．今後の計画
現在は摩擦実験実施に向けて斑糲岩を用いたブロックおよび実験中のシーリングのためのテフロンリングの製作を進めており、今後、実験に取り掛かる。発表ではその結果の速報と合わせて、数値解析の結果との比較から、boundary shearの発達と摩擦挙動、すべり距離、さらに粒子の状態（応力鎖や粒子速度の空間分布）の時間遷移との関係について精査した結果を報告する予定である。

参考文献
Marone, C. & Scholz, C.H. (1989). Particle-size distribution and microstructures within simulated fault gouge. Journal of Structural Geology, 11, 799-814.

Niemeijer, A., Marone, C., & Elsworth, D. (2010). Frictional strength and strain weakening in simulated

© The Seismological Society of Japan

fault gouge: Competition between geometrical weakening and chemical strengthening. Journal of Geophysical Research, 115, B10207.

宮本　英，廣野哲朗，湯川　諭，大橋聖和．(2022)．数値解析および実験的手法による断層内における変形構造発達過程の物理的描像の解明．SSS07-06，日本地球惑星科学連合2022年大会．

© The Seismological Society of Japan

Measurement of the frequency dependence of voltage response due to piezoelectric polarization in artificial quartz crystal samples

*Kazuya Ogawa[1], Hironori Kawakata[1]

1. Ritsumei University

地震発生のメカニズムを理解するために、多くの室内岩石破壊実験の研究が今までに行われてきた。その中で、岩石破壊時に電磁波の放出(例えば Yoshida et al., 1997)や発光現象(例えば Mitsui and Yanagidani, 2012)が観測されている。これらの現象の原因の一つとして、岩石中の石英の圧電効果が指摘されている。これまでの研究においては岩石試料内に含まれる石英粒子を対象に考察が行われており、その素過程については実験的に調べられた例は少なくない。
そこで本研究では、石英の圧電分極の性質について調べるために、石英と同じ組成であり結晶形態が既知である人工水晶に荷重を与えることで、印加した荷重と分極によって生じた電圧の測定を行った。そして、印加荷重、それを時間微分した荷重変化(率)、電圧の関係を評価した。
本研究では、人工水晶試料を使用し、載荷・除荷速度が水晶の圧電分極に与える影響を比較するため、２つの異なる手法を用いた載荷実験を行った。１つ目の実験では、分極が卓越する圧電軸に直交する対面を電極とし、その面に接触させたインパクトハンマーを別のハンマーで叩くことで高速載荷・除荷を行った。２つ目の実験では、１つ目の実験と同じ対面に対して一軸圧縮試験装置を用いてゆっくりと載荷していき、一定の荷重に到達後、その状態をしばらく保持した後に除荷した。どちらの実験においても、水晶に与えた荷重と電極間の電圧の測定を行った。

測定した結果、どちらの載荷実験でも荷重変化(率)と電圧は高い相関を示すことが明らかとなった。そして、それらの位相差スペクトルを求めた結果、１つ目の実験では、約1000 Hzから約2500 Hzの周波数帯において、電圧は入力した荷重変化(率)に対して約80マイクロ秒の遅れで高い相関を持つことが示された。約2500 Hzから約6000 Hzまでは信号レベルは十分だが位相差が周波数に対して線形ではなく、遅延時間は周波数に依存していた。なお、1000 Hz以下の帯域では、電圧の信号レベルの不足により信号の位相差を得ることができなかった。また２つ目の実験では、除荷時において20 Hz以下の周波数帯で十分なS/N比を持ち、この帯域では電圧は荷重変化(率)と高い相関があることが示された。ただし、低周波数帯であることもあり(80マイクロ秒は20 Hzでは0.01ラジアンに相当)、有意な位相差は得られなかった。なお、本研究では測定回路が閉じていた状態で水晶に荷重変化を与える設計としていたため、回路内の抵抗等の影響で回路に依存した充電および放電プロセスが発生し、それが遅延の違いに影響した可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S13. Crustal fluids and earthquake

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S13P] PM-P

[S13P-01] The features of DLTs Generation Zone Based on 3-D deep electrical resistivity structure beneath the Kii Peninsula, Southwestern Japan

*Akira Watanabe[1], Makoto Uyeshima[1], Satoru Yamaguchi[2], Yoshiya Usui[1], Hideki Murakami[3], Tsutomu Ogawa[1], Naoto Oshiman[4], Ryokei Yoshimura[4], Koki Aizawa[5], Ichiro Shiozaki[6], Takafumi Kasaya[7] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Osaka City University, 3. Kochi University, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 6. Graduate School of Engineering, Tottori University, 7. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S13P-02] Elucidating the causes of deep earthquakes in the lower crust around Higashihiroshima City

*Kotaro Sueki[1] (1. University of Hyogo)

The features of DLTs Generation Zone Based on 3-D deep electrical resistivity structure beneath the Kii Peninsula, Southwestern Japan

*Akira Watanabe[1], Makoto Uyeshima[1], Satoru Yamaguchi[2], Yoshiya Usui[1], Hideki Murakami[3], Tsutomu Ogawa[1], Naoto Oshiman[4], Ryokei Yoshimura[4], Koki Aizawa[5], Ichiro Shiozaki[6], Takafumi Kasaya[7]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Osaka City University, 3. Kochi University, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 6. Graduate School of Engineering, Tottori University, 7. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

西南日本の前弧側に位置する紀伊半島には，活発な地震活動領域（群発地震・深部低周波地震（微動）・スロースリップ）や多様な$^{3}He/^{4}He$同位体比の高温泉，深部まで伸びる巨大な酸性岩体などが存在する．これらについては，沈み込むフィリピン海スラブや深部流体との関連性が指摘されている．したがって，紀伊半島の地下は，深部流体と地震活動との関係を理解するための重要な鍵を握っていると考えられる．本研究では，Yamaguchi et al. (2009)で使用されたデータを含む紀伊半島において取得されたNetwork-MT法データ（電場及び地磁気）を再解析し，紀伊半島で初となるNetwork-MT法データを用いた3次元広域深部比抵抗構造モデルを推定した．得られたモデルは，紀伊半島の多様な特徴にも対応した，より信頼性の高いものと考えられる．その結果から導かれた紀伊半島の地下構造に関する考察は，以下の通りである．

１．広域深部比抵抗構造から推定される深部流体の湧出機構

紀伊半島の地下には，熊野大峰複合火成岩類に対応すると考えられる高比抵抗領域が存在し，地震波高速度領域や高重力異常領域ともよく対応する．また，その高比抵抗領域を囲むように低比抵抗領域が存在し，スラブ上面から地殻表層まで続く顕著な低比抵抗領域が存在している．このような低比抵抗領域の存在は，熊野大峰複合火成岩類の縁を囲むように湧出している高い$^{3}He/^{4}He$同位体比を示す高温泉がマントル起源であるという解釈と整合的である．このような地下比抵抗構造と地表における深部流体湧出箇所の特徴的な空間分布との対応から，紀伊半島の地下における流体の寄与が説明できる可能性がある．

２．深部低周波微動発生領域周辺における比抵抗構造

紀伊半島では，Yamaguchi et al. (2009)やKinoshita (2018)をはじめ，幾つかの比抵抗構造調査が行われてきた．しかし，それらの結果は一致した見解には至っておらず，同一断面における深部低周波微動発生領域において，Yamaguchi et al. (2009)では顕著な低比抵抗領域が認められるのに対し，Kinoshita (2018)では顕著な高比抵抗値を示すなど，大きく異なる特徴を示した．そうした中で，本研究のモデルは，Yamaguchi et al. (2009)やKinoshita (2018)と同じ断面において，熊野大峰複合火成岩類に対応する高比抵抗領域とフィリピン海スラブの境界で深部低周波微動が発生していることを示唆する結果となった．熊野大峰複合火成岩類がスラブからの流体の上昇流を妨げることで間隙流体圧が高まり，深部低周波微動の発生につながっている可能性が考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Elucidating the causes of deep earthquakes in the lower crust around Higashihiroshima City

*Kotaro Sueki[1]

1. University of Hyogo

東広島市周辺で発生する下部地殻深部地震の原因解明
兵庫県立大学大学院 減災復興政策研究科　居樹幸太朗

1．はじめに

中国地方では主に約20kmよりも浅い部分で地震が発生することが知られているが、東広島市周辺においては約30kmでの地震が集中的に発生している。(以下“クラスター”)今回の研究では、なぜこの地域のみ他と比較して深い部分で発生しているのかを調査した。

2．研究手法

クラスター発生の要因として、先行研究において流体が流入して断層が小さな応力で動きやすくなった(Terakawa et al.,2013, Imanishi and Uchide,2023)という仮説が立てられている。また、断層に流体が流入すると本来ならば断層がほとんど動かない方向にほとんど動かないはずの小さな力で動く(Terakawa et al.,2013,Nakagomi et al.,2021)ことが分かっている。さらに、沈み込み帯で深部低周波地震があれば流体が存在している(Shiomi et al.,2021）と推測できる。したがって、GMT6で通常地震と深部低周波地震の震源およびその発震機構解の平面的・空間的な分布を可視化した。なお、震源データは気象庁(一元化カタログ）、発震機構解データは防災科学技術研究所(F-net)よりいただいた。

3．結果・考察

【震源分布】

東広島市の地下約30km付近にてクラスターは、とがった部分が下に向いた円錐状に分布していることが分かった。また、クラスター内では主にM3未満の地震が多く発生しており、クラスターの真上では浅部の地震はほとんど発生していないことが分かった。このことは、先行研究における「流体があるならば、小さな地震が多く発生する」研究結果と整合的である。

【発震機構解】

山陰の発震機構解は、ほとんどのもので角度が揃っていた。しかしクラスターのものは、2つが紙面に垂直な方向を軸として約90°ずれていることが分かった。このことは、先行研究における「流体があるならば、軸がさまざまな方向に向いている発震機構解が検出できる」研究結果と整合的である。

【深部低周波地震】

深部低周波地震は低周波を発し、ずれ動く時間がとても長い地震のことであり、流体があると発生しやすい。しかし東広島市付近では深部低周波地震が発生していないにもかかわらず、クラスターが発生している(図)。海洋プレートは玄武岩が主であり、それが含水化すると蛇紋岩に変成する。蛇紋岩は約600℃以上となる40～100km付近で脱水をすること、フィリピン海プレートは比較的新しく温かいことを踏まえると、クラスター周辺では、40km付近で脱水が起きていると考えられる。そして脱水した付近に断層の先端があり、そこから流体が流入しているのではないかと考えている。

4．参考文献

弘瀬冬樹,”プレート形状“,HIROSE Fuyuki’s HP,2022,https://www.mri-jma.go.jp/Dep/sei/fhirose/plate/PHS.html, (参照2023-11-28)Baba et al. (2002, PEPI) (参照2023-11-28)Nakajima and Hasegawa (2007, JGR) (参照2023-11-28)Hirose et al. (2008, JGR) (参照2023-11-28)

5．謝辞

この研究を進めるにあたり、志藤あずさ先生から貴重なご指導とご助言をいただきました。謹んで御礼申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S18. Education and history of seismology

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S18P] PM-P

[S18P-01] Efforts of Local Government Research Institution for Improving General Public's Disaster Literacy

*Ryou HONDA[1], Kei Odawara[1], Yutaka Nagaoka[1], Tatsuya Ishiyama[2], Hiroe Miyake[2], Makoto Matsubara[3], Nobuyuki Morikawa[3] (1. Hot Springs Research Institute, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S18P-02] Survey on the impact of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes on schools and reflections of local teachers on improving disaster education

*Yo FUKUSHIMA[1], Canay Dogulu[2], Takashi Oda[3], Emin Özdamar[4], Aiko Sakurai[5], Ryo Saito[1], Miwako Kitamura[1], Takeshi Sato[1] (1. Tohoku University, 2. TED University, 3. University of Tokyo, 4. Turkish Japanese Foundation, 5. Kobe University)

[S18P-03] Creating teachable moment presetations for recent earthquakes in Japan - - - Improvements from the prototypes- - -

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

[S18P-04] Development of models for observing the topography of ocean floorand land mede with 3D printers

*Ryoya Sato[1], Satoko Oki[1] (1. Bachelor of Arts in Environment and Information Studies,Keio Univ.)

Efforts of Local Government Research Institution for Improving General Public's Disaster Literacy

*Ryou HONDA[1], Kei Odawara[1], Yutaka Nagaoka[1], Tatsuya Ishiyama[2], Hiroe Miyake[2], Makoto Matsubara[3], Nobuyuki Morikawa[3]

1. Hot Springs Research Institute, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

文部科学省では、令和5年度より3か年計画で「三浦半島活断層群（主部/武山断層帯）における重点的な調査観測」（研究代表者：東京大学地震研究所　石山達也准教授、参画機関：東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、神奈川県温泉地学研究所）を実施しており、温泉地学研究所はサブテーマ４「地域連携勉強会」を主として担当している。地域連携勉強会を通じて調査観測の成果を示すとともに、地震防災に対する課題やニーズを吸い上げることを目指すため、地方自治体やライフライン事業者との連携が不可欠である。本稿では、令和５年度および６年度の地域連携勉強会に関する活動について報告する。令和５年度まず本事業に対する理解を得るため、三浦半島活断層調査会定例会、神奈川県くらし安全防災局、神奈川県の県・市町村災害対策等検討会において事業説明を実施した。事業説明に併せて、自治体担当者を対象として地域連携勉強会についてのアンケートを実施した。また、ライフライン事業者に対してはメールにて同様のアンケートを送付した。アンケートは地域連携勉強会を実施するにあたって、担当者のニーズを把握することを目的とし、地震防災に関する一般的な質問と地域連携勉強会の実施方法についての質問を設けた。アンケートの結果を見ると、いくつか重要な課題があることがわかった。地震調査研究推進本部や内閣府などが発表する情報は地震防災対策を考える際の基礎的な情報として認識されている一方、内容が難解で理解に時間がかかる、情報量が多く必要な情報の選択が難しいといった意見が見られた。また、事業者によっては特定の地域（線区など）で解像度の高い情報を必要とすることがわかる。強震動予測や断層位置など、解析手法や調査地域における様々な制約から分解能に限界がある場合には、丁寧に説明する必要がある。今後の勉強会の方向性については、形式としては講演会や意見交換会、報告書といった形での情報共有の希望が多かった。ただし、内容としては単なる事業の成果報告ではなく、関東地域の地震や断層などより基礎的な部分を知りたいとの要望もあった。こういった結果を踏まえると、既存の事業成果は必ずしも理解しやすい、あるいは使いやすいものとなっていない可能性があることから、本事業での成果の情報共有を行う際には、受け取る側が理解しやすいような工夫をすることが重要である。令和6年１月には、本事業において構造探査がどのように行われるかを実際に見てもらい、具体的なイメージを持って理解を深めてもらうため、自治体担当者やライフライン事業者を対象として横須賀市武山において人工地震探査の現地見学会を実施した。参加者は地元自治体やライフライン事業者の５機関６名であった。現地見学会では、最初に石山准教授に本調査観測が三浦半島断層群 (主部/武山断層帯)の長期評価と強震動予測の高度化に資することや、反射法地震探査の概念と活断層のイメージングの方法、調査の概要（期間、測線、振源等）について説明していただき、起振車が実際に地面を叩いて振動を起こす様子や、受振点の設置状況を見学してもらった。参加者からは断層帯の長期評価が時空間的にどの程度高度化されるのかという質問があったほか、今回の調査結果が地震被害想定にどのように関係するのか興味を持ったという感想や、来年度以降も現地見学会を継続してほしいという要望が寄せられ、本調査観測に対する興味や理解が深まった手応えが得られた。令和６年度令和6年度は7月２６日に自治体防災担当者及びライフライン事業者に向けた本事業の進捗状況を説明する講演会（第１回地域連携勉強会）を開催した。各サブテーマの研究代表に講演を依頼したが、昨年度のアンケートを踏まえ、なるべく簡単な言葉でわかりやすい説明をしていただくようにお願いした。また、講演ごとの質問時間はとらず、参加者には講演ごとに疑問点などを紙に書きだしてもらい、それを司会が整理したうえで、最後にまとめて質問し、回答してもらう形をとった。このようなやり方によって、個別に質問を受け付けるよりも多くの質問が寄せられ、また講演者からの回答に司会が補足することでよりわかりやすい説明とすることができた。令和６年度は学校現場の地震防災教育に関するニーズを捉えるために教職員向けのアンケート調査も実施しており、本講演ではその結果についても概報したい。

© The Seismological Society of Japan

Survey on the impact of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes on schools and reflections of local teachers on improving disaster education

*Yo FUKUSHIMA[1], Canay Dogulu[2], Takashi Oda[3], Emin Özdamar[4], Aiko Sakurai[5], Ryo Saito[1], Miwako Kitamura[1], Takeshi Sato[1]

1. Tohoku University, 2. TED University, 3. University of Tokyo, 4. Turkish Japanese Foundation, 5. Kobe University

The 6 February 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7, 7.6) caused significant damage across Southeastern Türkiye and Northwestern Syria. Experiences and lessons learned from such a devastating disaster should be delivered to the people living in disaster-prone areas, both present and in the future, to minimize the impact of future disasters. In particular, providing effective training on disaster education to pre-service teachers is essential to ensure that preventive measures and responsiveness become ingrained in the society. Under such a scope, we conducted, with a support from the J-RAPID Collaborative Research/Survey Program for Urgent Research, a set of surveys and a workshop to collect data that can serve as the basis for developing new disaster education training material that reflects the lessons learned from the disaster.

Our first on-site surveys in September 2023 (seven months after the earthquakes) revealed similarities to the aftermath of the 2011 Great East Japan Earthquake disaster in several aspects. Specifically, we observed hesitation regarding when and how disaster and disaster risk reduction education should be delivered. From February to March 2024, approximately one year after the earthquakes, we conducted an online survey to teachers in the disaster-affected areas in Türkiye. This survey revealed that many teachers who experienced the disaster think that disaster education should be updated to reflect the lessons learned from the earthquake. Specifically, the importance of the following aspects was reiterated: more structured content with carefully assessed design including building safety, integration of disaster education into the curriculum, more practical way of teaching (using various types of materials including drills and games, more interaction and participatory engagement, etc.), and psychological aspects of earthquake consequences. In April 2024, we held a workshop with the local teachers. The insights shared during the workshop not only aligned with the online survey results, but also provided more in-depth discussion and specific ideas for teaching materials. For instance, one participant suggested the use of a YouTube video as a learning resource. The data collected through the project will serve as the basis for developing a new disaster education training program for pre-service teachers.

© The Seismological Society of Japan

Creating teachable moment presetations for recent earthquakes in Japan ---Improvements from the prototypes---

*Reiji KOBAYASHI[1]

1. Kagoshima University

1. 背景

理科の教材として時事的なものを扱うことがある。これは、授業内容と世間で話題になっていることとのつながりを学生に知ってもらうことで、授業内容に関心を持ってもらい、理解を深めてもらうことを目的としている。

アメリカの EarthScope （旧 Incorporated Research Institutes for Seismology (IRIS)）が、最近の地震についてteachable moment（「教える好機」と訳すことができる）のスライド教材を公開している。しかし、日本で発生した地震のうち、日本で大きく報道される地震でも、IRISのスライド教材が作られないことがある。そこで日本版のスライド教材を作成することにした。小林 (2018a, b) は、IRIS 版の作成方針を基に日本版の作成方針を検討し、以下の通りとした。

・日本で地学を学ぶ高校生や大学生を対象とする
・日本で発生した、新聞 1 面に掲載されそうな地震を取り上げる
・スライドの分量は、10 分前後で説明できるぐらいにする
・掲載情報は、地震の震源、マグニチュード、震度分布、被害の概要、面的な推定震度分布と震度遭遇人口、テクトニックな背景と過去の地震活動、震源メカニズム解、余震分布、地震波形、地震の特徴に応じた情報、とする
・地震発生から 12 時間以内の公開を目標にする
・作成時間は 1〜2 時間程度とし、そのためあらかじめ 8〜9 割雛形を決めておく
・教室でそのまま使え、カスタマイズ可能にする
・多くの人がアクセス可能な情報のみにし、出典を明記する
・個人の見解を控え、多くの地震学者が同意しそうな内容とする

以上の作成方針に基づき、これまで試作3件（小林, 2018a, b, 2019）を含む16件のスライド教材を公開した。本発表では試作以降に行った主な改良点を紹介する。

2. 改良点

2-1. フィードバック

利用者からのフィードバックを得ることを目的に、「間違い報告やお問合せ」と「スライド教材利用アンケート」の2つのウェブフォームを開設した。これまで「間違い報告やお問合せ」は4件、「スライド教材利用アンケート」は16件の回答があった。「間違い報告やお問合せ」により、指摘された間違いを修正し、訂正版を公開した。「スライド教材利用アンケート」によりスライド教材の利用実態を把握し、また要望があれば可能な範囲で改良につなげた。

2-2. テクトニックな背景の図

テクトニックな背景を説明する図については、IRISのInteractive Earthquake Browserで作成した図を利用していた。しかし、スラブの深さ分布や活断層分布がなかったことから、自作することにした。震源データは気象庁のものを、スラブの深さは気象研究所弘瀬冬樹さんがウェブで公開されているデータを、活断層は産業総合技術研究所の活断層データベースのものを利用した。

2-3. 地震波形

© The Seismological Society of Japan

地震波形として、防災科学技術研究所（防災科研）強震観測網 K-NET, KiK-netの波形記録を震央距離で並べた図を作り、P波、S波の伝わる様子を紹介している。試作では防災科研のソフトウェアStrong Motion Data Analysis 2で描いていた。作業時間の短縮のため、awk スクリプトとGeneric Mapping Tools (GMT)のスクリプトの組み合わせで描くことにした。また、最近では気象庁の走時表を使った計算走時も示すようにした。

2-4. そのほかの改良点

当初は個人サイトの中の暫定的なページで公開していたが、新しいサイトを立ち上げてそこで本格的に運用することにした (https://reijikan.sakura.ne.jp/retmj/)。また、最近の利用者からの要望により、スライドの末尾に情報源のURLをまとめて載せることにした。

3. 今後の展望

テクトニックな背景の図については、現在は毎回作成している。しかし、普段使う教材としても良い図であるので、各地方の図をすべて作って公開することを目指す。これによってスライド教材作成時の作業時間の短縮にもつながる。

参考文献

小林励司 (2018a): 最近の地震に関するスライド教材の試作－2018年9月6日北海道胆振地方中東部の地震を例にー, 日本地震学会2018年秋季大会, S25-P27. （緊急セッション「S25. 2018 年 9 月 6 日北海道胆振地方中東部の地震」のため要旨なし）
小林励司 (2018b): 日本で発生した最近の地震に関するスライド教材の開発, 鹿児島大学理学部紀要, 51, 43-51.
小林励司 (2019): 最近の地震に関するスライド教材の試作 (2) －2019年1月3日熊本地方の地震(M5.1)の例と前試作からの改良ー, 日本地球惑星科学連合2019年大会 , G03-07.

© The Seismological Society of Japan

Development of models for observing the topography of ocean floorand land mede with 3D printers

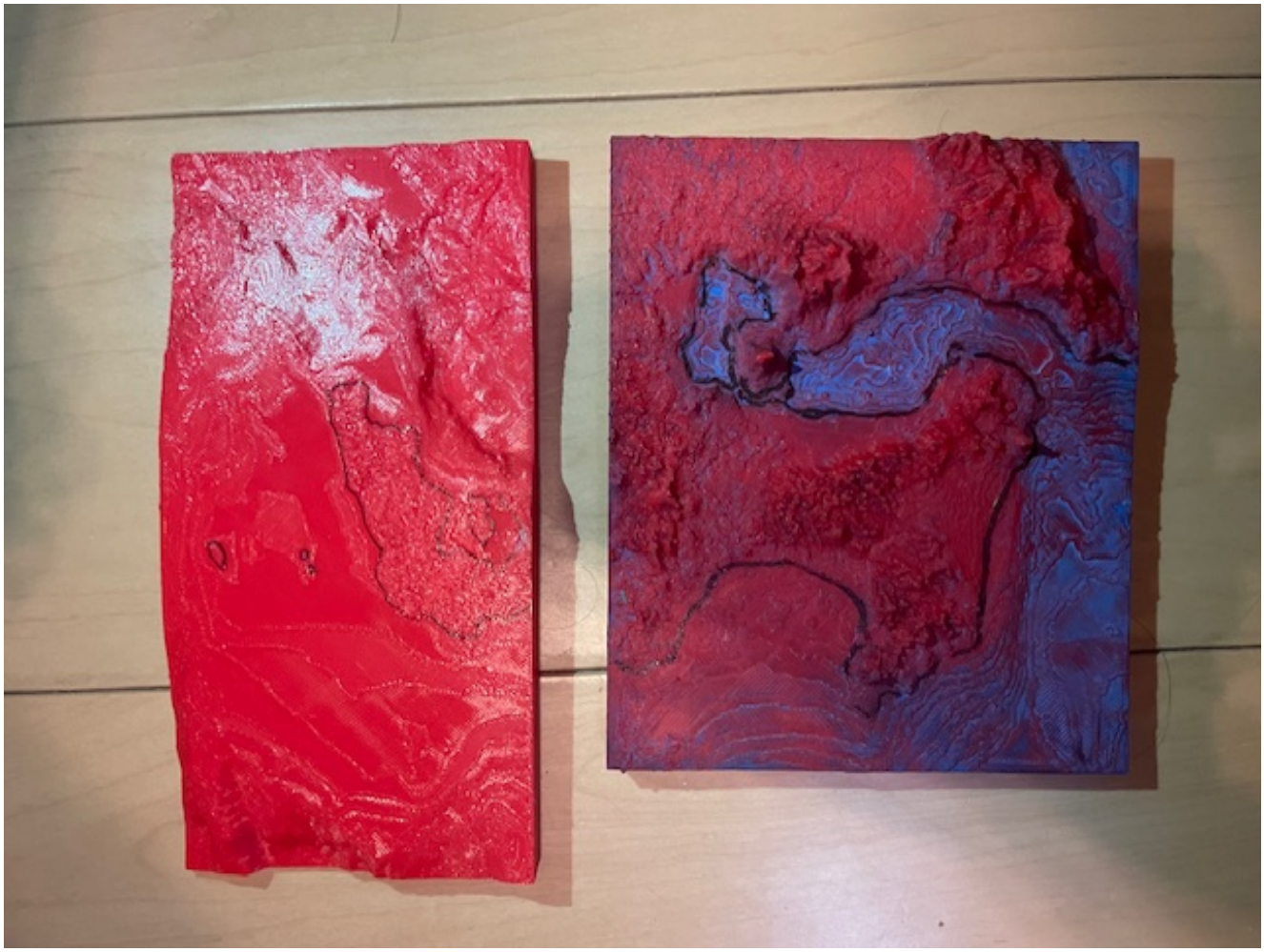
*Ryoya Sato[1], Satoko Oki[1]

1. Bachelor of Arts in Environment and Information Studies,Keio Univ.

はじめにわが国のような変動帯においては，陸上地形を観察することで地形の構造や成り立ち等の洞察を得ることができる．身の回りの地形から地球のダイナミクスを感じることができるという視点は，教育的観点からも価値が高い．災害の多いわが国において，知的好奇心として変動帯を感じることができれば，災害への備えの捉え方も変わってこよう．児童生徒への教材として地形の概念を導入する手段のひとつとして筆者らは，家庭用の簡易な3Dプリンターを活用した地形模型教材の開発に取り組んだ．特に海底地形は，陸上地形と異なり実際に現場で視認することが困難である．本発表では，海域と陸域を統合した3D実体モデルの開発について報告する． 海域と陸域の統合データおよび製作プロセス地形模型の試作として，a. 神奈川県南部および相模湾，b. 能登半島と周辺海域，c. 姶良カルデラ（桜島および錦江湾周辺）の３つを製作した．陸域データとしてはいずれも「基盤地図情報（数値標高モデル）10mメッシュ（標高）」を使用した．海域データについては，a. の試作の段階では「日本水路協会のｍ7000シリーズの350ｍメッシュデータ」を基に製作したが，b. および c. の試作段階においては，今後の汎用性を考えて他地域でも作成できるよう「J-DOSS（海上保安庁海洋情報部情報利用推進課 ／ 日本海洋データセンター（JODC））の500mメッシュ水深データ」を使用した．製作のプロセスは，陸域と海域の3次元メッシュデータを統合してQGISに取り込み，QGUSプラグイン「DEM to 3D」で3Dモデルのデータを作成，その後，スライサーソフトに導入した．家庭用3Dプリンターは積層方式のため，プリンターの設定次第で地形が変化してしまうことがある．そのため，後述するように，積層の厚みや縮尺の調節が必須となる．以下に３つの試作地形模型について述べる． 神奈川県南部および相模湾の地形模型この地形模型は，第22回地震火山地質こどもサマースクールの実験教材として製作した．同イベントにおける対象地域が大正関東地震の震源域であったため，神奈川県南部の陸域と相模湾を含む海底地形が必要となった．この段階では「日本水路協会のｍ7000シリーズの350ｍメッシュデータ」を基に作成し，また，試行錯誤の中で，Z軸方向を5倍に強調するのが観察に適していることが分かった．佐藤・他（2024）で報告の通り，イベントに参加している子供たちの理解を補う効果は十分にあることが示されただけでなく，海水面の高さまで水を張って観察し，海域と陸域との接続性を考えるなど，実験にも使える思考ツールとしての可能性が示唆された． 能登半島と周辺海域令和６年能登半島地震の震源域に相当する．この地震は，発震機構や津波の生成・伝搬が，海域の地形と陸域の地形に深く関わっている．特に津波の伝播については，津波の到達時刻や波高などが海底地形に関わることを踏まえれば，地形模型によってこれらを簡便に説明しうる有効な教材となるだろう．能登エリアの陸域と海域のデータセットを合成したところ，能登半島北岸エリアのデータが欠落していたことがわかった．筆者らはこのデータの補完を，GISで補完した．つまり，海岸線に沿ったデータ欠落域については，デジタルファブリケーションの手法で解決した． 姶良カルデラを含む海域モデル b. のような地震に関わるエリアの地形に加えて，海域にある火山地形として製作を行った．姶良カルデラは，その大半が錦江湾の海底にあり，当然ながらその全貌を目視することはできない．これを可視化する地形模型では，姶良カルデラ内に形成された御岳が生んだ島こそが桜島であることをたちどころに理解できる．地形模型は，桜島の成り立ちを理解する良い教材となるだろう．北岳の標高は1117m，錦江湾の水深は200mであるが，高さ方向の縮尺調整はこれまでと同様に5倍とした． まとめと今後の展望以上の通り，大地の成り立ちや，自然がもたらす恵みと災いに関する理解を深めるための教材として，3Dプリンターでの地形模型の製作を行った実際に製作を行った．製作過程では，陸域と海域の解像度の差や，海岸線に沿った空白域の存在など，2種類の異なるデータセットをいかに統合するかが課題になった．筆者らはこの課題をデジタルファブリケーションの手法で解決し，製作を実現した．今後は，試作した地形模型が子供たちにどのような理解を促すのかのより詳しい分析や，教材のより効果的な活用方法について研究を進めたい．プラスチック素材を使ったことで，水や液体，溶岩に見立てた粘性のある食材等と組み合わせた実験を行うことも可能であり，例えば，海底火山の火山列の確認，溶岩の海への侵入や，海底に続くプレート境界地形の観察など，広く活用でき

© The Seismological Society of Japan

るだろう．一方で，３Ｄプリンターの印刷物のサイズには制限があるため，フォーカスすべき地域ごとの最良な縮尺については，さらなる検討が必要である．



© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S19. Seismology, general contribution

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S19P] PM-P

[S19P-01] An attempt to estimate an appropriate distance correction function for local magnitude calculation for the Philippines

*Tatsuhiko HARA[1], Johnlery P. Deximo[2] (1. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 2. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Department of Science and Technology)

[S19P-02] Analysis of the isotropy of the coda wavefield by using the strain seismogram

*Kentaro EMOTO[1], Takeshi Nishimura[2], Haruhisa Nakamichi[3], Kimiko Taguchi[2], Takashi Hirose[2], Hisashi Nakahara[2], Satoru Hamanaka[1], Syed Idros Bin Abdul Rahman[1], Kohei Yonemori[1] (1. Kyushu University, 2. Tohoku University, 3. Kyoto University)

An attempt to estimate an appropriate distance correction function for local magnitude calculation for the Philippines

*Tatsuhiko HARA[1], Johnlery P. Deximo[2]

1. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 2. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Department of Science and Technology

We analyzed broadband waveform data from the Philippine Seismic Network to estimate a distance correction function for local magnitude calculation appropriate for shallow events in and around the Philippines. We used data from the shallow (up to 35 km) events that occurred between July 2012 and 2022 whose magnitudes are equal to or greater than Mw 4.5.
First, we calculated local magnitudes using the distance correction function for southern California (Hutton and Boore, 1987) with station correction obtained by the differential scheme (Uhrhammer et al., 1996). The magnitude residuals become smaller with respect to hypocentral distance at shorter distances and they become larger at longer distances for both horizontal and vertical records. This indicates the higher attenuation at the shorter hypocentral distances and the lower attenuation at the longer hypocentral distances. These changes occurred about 600-700 km and 500-600 km for the horizontal and vertical records, respectively. The amplitude data are mainly from S waves and their coda in the shorter distance range, while they are mainly from the time series from P arrivals to S arrivals in the longer distance range. This is likely to cause the observed changes of the magnitude residuals with respect to hypocentral distance.
Using horizontal component data recorded at hypocentral distances up to 600 km, we performed a grid search to estimate a single distance correction function with station correction estimation. We evaluated the grid search results by the root mean square of the magnitude residuals and their hypocentral distance dependence. The latter was represented by the maximum value among the averages of the magnitude residuals for each 100 km bin of hypocentral distance. The selected distance correction function is 1.1 log(r/100)+ 0.00285 (r-100)+ 3, where r is the hypocentral distance. We compared the local magnitudes to the moment magnitudes to find their correlations. The next step in estimating the distance correction function will be to expand the data set to include smaller events.

© The Seismological Society of Japan

Analysis of the isotropy of the coda wavefield by using the strain seismogram

*Kentaro EMOTO[1], Takeshi Nishimura[2], Haruhisa Nakamichi[3], Kimiko Taguchi[2], Takashi Hirose[2], Hisashi Nakahara[2], Satoru Hamanaka[1], Syed Idros Bin Abdul Rahman[1], Kohei Yonemori[1]

1. Kyushu University, 2. Tohoku University, 3. Kyoto University

地震波形の後半部分であるコーダは，伝播過程で媒質の不均質で散乱されて遅れて到達する散乱波によって構成されている．散乱波はさまざまな方向から観測点に到達するため，等方的な波動場となることが期待される．そのため，コーダ部分は空間一様なエネルギー場となり，サイト増幅の推定やコーダ波干渉法に用いられている．
光ファイバーケーブルを利用したDistributed Acoustic Sensing（DAS）による超高密度観測が近年行われるようになってきた．DASでは，ケーブルの任意の場所での歪や歪速度が時系列として出力される．これらは従来の地震計記録の空間微分に相当するため，媒質の不均質に敏感であるとされている．特に，高周波地震波は短波長不均質の影響を強く受け，強い散乱波により複雑な地震波形となるため，歪波形もより複雑なものとなる．多くの研究において，S波走時の２倍の時刻以降がコーダとして扱われてきた．これは経験則であるが，不均質に敏感な歪波形では，このコーダ開始時刻がどのようになるのかは経験的にもわかっていない．DASでは，ケーブルに沿った一方向の歪しか得られず，ケーブルへの入射角によって感度が異なる．コーダ部分が等方的になっていれば，ケーブル方向を無視した解析を行うことが可能となる．本発表では，2次元波動伝播シミュレーションにより，歪の等方性の時間変化の媒質不均質依存性を調べる．また，桜島で行ったDASのデータを用いて，ケーブル方位の違う部分で地震波の振幅を比較し，等方的になることを確認する．

不均質媒質として，特徴的スケール1 kmと5 km，ゆらぎのRMS値1 %, 5 %, 15 %の指数関数型自己相関関数で特徴づけられるランダムなゆらぎを考える．平均P波速度，S波速度をそれぞれ，6km/s，3.46km/sとし，２次元弾性体でのP-SVの運動方程式を有限差分法により解く．媒質のサイズは，一辺が約400kmの正方形とし，中心に震源時間関数（3Hz）の等方P波震源を設置する．震源から同心円上に30, 60, 90 kmに観測点を設置する．各距離においては10度間隔で36個の観測点が存在する．各観測点で，動径方向（R方向）とそれに直交する方向（T方向）の速度波形に加えて，RR成分，TT成分の歪波形を出力する．シードを変えた20個のランダム不均質媒質でシミュレーションを行い，統計的な特徴を調べる．

速度波形のR成分とT成分の振幅比は，P波到達後に1以下まで減少し後で増加に転じ，1に収束する傾向を示した．いずれの媒質でもS波走時の２倍となる時刻でほぼ1となったが，特徴的スケールが1 kmでゆらぎのRMS値が大きいほど1に近かった．一方，歪みのRR成分とTT成分の比は，P波到達後に単調減少し1に収束した．速度波形と同様の媒質依存性を示し，ゆらぎのRMS値が大きいほど収束速度が速い傾向が見られたが，その違いはわずかであった．また，速度波形の場合よりもばらつきが小さかった．

これらの結果は，特徴的スケールが小さいほど広角散乱が強く，ゆらぎのRMS値が大きいほど散乱が強いため，波動場が等方的になる時間が短い傾向にあると解釈できるが，その依存性は小さい．速度波形のR成分とT成分の比は，P波からS波への変換散乱によってT成分の方が一度大きくなっていると考えられる．一方，歪の場合にはTT成分の励起がT成分に比べて相対的に小さく，RR成分もTT成分のいずれもS波入射に対する感度がないため，速度の場合よりも比が安定し，ばらつきが小さいものと考えられる．そのため，歪のRR成分とそれを45度回転させた成分の比を調べると，速度のR成分とT成分の比と同様に比が1以下になってから増加する傾向が見られた．

2023年の11月から12月にかけて，桜島の野尻川沿いに敷設された光ファイバーケーブルを利用してDAS観測

© The Seismological Society of Japan

を行った．ゲージ長は10 m，チャンネル間隔は5 mである．ケーブルは道路沿いに埋設されており，90度曲がっている部分の前後それぞれ250 mの区間を解析に使用する．期間中に記録された地震のうち，近地で発生した5つの地震時の折れ曲がり前後で振幅比を2-4Hzの周波数帯で調べた．サイト増幅の影響を軽減するため，十分後半の時刻のコーダで振幅を規格化した．地震によりばらつきはあるものの，S波走時の2倍の時刻では，振幅比は1に近づくことがわかった．歪の場合でも従来の速度波形と同様に，S波走時２倍以降のコーダでは等方的になり，成分（ケーブル方向）の振幅の違いが見られなくなることが確認された．

DAS観測にあたっては，国土交通省九州地方整備局大隈河川国道事務所および桜島砂防出張所の方々にご協力いただきました．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Special session：S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S21P] PM-P

[S21P-01] On regularity of physics-informed neural networks in solving ill-posed Cauchy problems

*Daisuke SATO[1], Tomohisa Okazaki[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Institute of Physical and Chemical Research)

[S21P-02] Hackathon on Large Language Models and Earthquake Researches

*Hisahiko KUBO[1], Stephen Wu[2], Masayuki Kano[3], Shinya Katoh[4], Atsuko Oana[5], Tomohisa Okazaki[6], Nozomi Okada[7], Nobuki Kame[4], Yuki Kodera[8], Daisuke Sato[9], Kengo Shimojo[8], Koji Tamaribuchi[10], Makoto Naoi[11], Ryuichi Nishiyama[4], Kazuro Hirahara[6,12], Takashi Miyamoto[13], Masumi Yamada[14] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. Tohoku University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 5. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 6. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 7. Shizuoka University, 8. Meteorological Research Institute, 9. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 10. Japan Meteorological Agency, 11. Hokkaido University, 12. Kagawa University, 13. University of Yamanashi, 14. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S21P-03] Ateempt of detection of small earthquakes in Hakone volcano based on machine larning using multi-station data

*Ryo KURIHARA[1] (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

[S21P-04] Parallel GPU Deep Learning Framework for Seismology and Application for Seismic Waveform from Nankai Trough

*Daisuke Sugiyama[1,2], Yojiro Yamamoto[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Kagoshima University)

[S21P-05] A Deep Learning Estimation of Tectonic Tremor Location from Single-Station Waveforms

*Amane Sugii[1], Yoshihiro Hiramatsu[1] (1. Kanazawa University)

[S21P-06] Detecting and locating tectonic tremors using deep learning: Application to Hi-net stations in the Nankai subduction zone

*Yuya Jinde[1], Amane Sugii[1], Yoshihiro Hiramatsu[1] (1. Kanazawa University)

[S21P-07] Development of deep-learning methods for seismic event detection in seafloor DAS data: creation of training/validation datasets

*GERARDO MANUEL MENDO[1], HIROMICHI NAGAO[1], SHINYA KATOH[1], MASANAO SHINOHARA[2] (1. Research Center for Computational Earth Science, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S21P-08] Acquiring a Stochastic Differential Equation Representation to Characterize Tremors from Seismic Waveform Data Using Deep Learning

*Toshiro Kusui[1], Hiromichi Nagao[1], Shin-ichi Ito[1], Shinya Katoh[1], Tomoki Tokuda[1] (1. Univ. of Tokyo)

[S21P-09] Establishment and Result of Local Model through Transfer Learning of Deep Learning Detectors Using AN-net Data in Nagaoka Region

*Isao Kurosawa[1], Yuki kobayashi[1], Kodai Sagae[2], Takahiko Uchide[2] (1. INPEX CORPORATION, 2. Geological Survey of Japan. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

On regularity of physics-informed neural networks in solving ill-posed Cauchy problems

*Daisuke SATO[1], Tomohisa Okazaki[2]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Institute of Physical and Chemical Research

地球物理に現れる多くの問題は、解を求めるのに必要なだけの拘束条件を持たない。逆解析でいえば、データの数より多くのパラメターを決める問題がこれにあたる。例えば地震時断層滑りの推定は、断層上の任意座標点のすべりベクトルという、形式的には無限個のパラメターを推定する。断層破壊シミュレーション等の順解析でも、断層摩擦則といった、解くべき方程式それ自体の妥当性が問われる場面は少なくない。解を求めるだけの拘束条件がない方程式系を解くこれらの問題は、一般に劣決定(不良決定)問題と呼ばれ、その求解法の研究史は長い(Shishatskii et al., 1986)。劣決定問題を扱う際は、正則化と呼ばれる、補助条件の追加操作によって問は良決定形に書き直される。地震学者に馴染みのある、ベイズ推定における先験的拘束(Jackson, 1979)はその例である。正則化の補助条件(smoothing, 摩擦則, etc.)は全く恣意的なものだが、劣決定問題の解はこれに依存する。それゆえ、劣決定問題では正則化に由来する解のバイアスが問題である。実際、滑りインバージョンでは先験的拘束の選択に関して議論が尽きない (e.g., Gallovič et al., 2015)。

これと全く別に機械学習から、物理深層学習(Physics-Informed Neural Network, PINN)は、良決定問題を解くシミュレーション技法として現れた(Raissi et al., 2019)。だが驚くことに、PINNは特段の正則項の追加なしに劣決定問題を解けることがごく最近岡崎ほか(2024, 地震学会)で指摘されている。解けるだけの条件がないはずの問題が解けてしまうとは、暗黙のうちに問題に補助条件が付与されたことを強く示唆する。本研究は、このPINN解析の暗黙の正則化を、物理問題の変分原理の観点から追求し、理論予測を組み立てた後PINNの挙動と比較していく。

PINNは、座標を入れると値を返す関数として偏微分方程式の解を学習する一群のneural networkの一種であり、所与の偏微分方程式および境界条件からの残差を最小化するよう定式化される。万能近似(Hornik et al., 1989)でもって理想的にはneural networkがこの学習問題を完全に解けるなら、上記のPINN正則化の要因はこの定式化自体に帰せられる。このPINNの定式化は、関数(解)の形をずらす微分操作(変分)で目的関数の極値を求める変分解法になっている。片や、物理方程式の殆どは、元々が最小化関数(作用、エネルギー、etc.)の停留点として導かれ、これは物理方程式の変分原理として知られる。ラグランジュ未定乗数法を経由すると、物理方程式の変分原理は標準的PINN (o-PINN)と違う損失関数を使う別のPINNを与える(conservative PINN, c-PINN; Jagtap, 2020)。これを踏まえるに、o-PINNが本来c-PINN的に定義される物理問題の別解法であることは明らかだろう。

変分原理の目的関数は性質が良いので、我々はまずc-PINNの正則化から調べた。結果、c-PINNの運動方程式の損失関数の最小化が、運動方程式の成立に加えて、実は境界条件に正則化の拘束を課していることを見つけた。つまり、境界条件が完全に定まっている良決定問題ではc-PINNは問題の解を与えるが、境界条件が定まりきらない劣決定問題では、c-PINNは自身の正則化項を最小化するようにして解を正則化する。面白いことに、c-PINNの正則化は、静問題において、境界(外界)が系になす仕事の最小化(系のエネルギーの最小化)になっていた。系のエネルギー最小化が外界と接する閉鎖系の熱力学原理であることを思い出すに、c-PINNは力学原理というよりは熱力学原理を反映した解法であるわけだ。類似の正則化項が、o-PINNにも見られ、これはtraction-free conditionに類似のforce-free conditionであるらしい。断層破壊でいえば、これは非弾性歪を減らす正則化である。

さらに我々は、半平面面外滑り問題(2次元ラプラス方程式)を例に、理論予測を順・逆問題で検証した。まず、o-/c-PINNが良決定問題を解けるかを確かめた。意外にも、この設定ではo-PINNは解に収束しな

© The Seismological Society of Japan

かった。面外滑り問題においては、force-free constraintは離散長の逆二乗で重み付けられた滑りの勾配(転位)に関する減衰を課すことになり、o-PINNの正則項は変位不連続な解を再現するには強すぎるのだと解釈できる。Okazaki et al. (2022)のように、方程式損失に破壊先端からの距離の二乗を乗じて正規化した場合(正規化o-PINN)、この問題は回避された。一方、c-PINNは、一定滑りの問題(転位問題)では、損失評価の乱択近似から決まる実効的散化長よりも短波長で、破壊先端の滑りの値を丸める傾向があった。これは、歪エネルギー密度が発散する転位解をなます傾向として説明できる。このようにc-PINNは概ね理論通りだが、o-PINNは理論と相違する挙動も確認された。次に、境界条件の一部をマスクした劣決定な順問題で挙動を検証した。結果、正規化o-PINNはforce-free constraintが0になる破壊先端まで滑りが減らない(転位が生じない)ように、c-PINNは滑りがなす仕事を減らすように、解を正則化した。境界要素法で計算した最小仕事の理論解は、c-PINNの解と整合的であり、c-PINNは確かにエネルギー最小化で解を正則化しているらしい。逆解析の詳細はポスターで説明する。本発表で見た通り、劣決定問題において、損失関数の設計に依存する解の暗黙の正則化にPINNは影響されている。

© The Seismological Society of Japan

Hackathon on Large Language Models and Earthquake Researches

*Hisahiko KUBO[1], Stephen Wu[2], Masayuki Kano[3], Shinya Katoh[4], Atsuko Oana[5], Tomohisa Okazaki[6], Nozomi Okada[7], Nobuki Kame[4], Yuki Kodera[8], Daisuke Sato[9], Kengo Shimojo[8], Koji Tamaribuchi[10], Makoto Naoi[11], Ryuichi Nishiyama[4], Kazuro Hirahara[6,12], Takashi Miyamoto[13], Masumi Yamada[14]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. Tohoku University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 5. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 6. Center for Advanced Intelligence Project, RIKEN, 7. Shizuoka University, 8. Meteorological Research Institute, 9. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 10. Japan Meteorological Agency, 11. Hokkaido University, 12. Kagawa University, 13. University of Yamanashi, 14. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

ChatGPTに代表される大規模言語モデルに関する近年の技術革新およびサービス展開は目覚ましく、私たちの生活の様々な場面で幅広く使われている。研究や教育の分野でも徐々に取り入れられ始めているが、研究活動そのものへの適用は限定的であり、それぞれの学術分野において模索されている段階である。こうした背景の中、私たちは地震研究における大規模言語モデルの活用をテーマとしたハッカソンを2024年夏に実施する。ハッカソン自体は日本地震学会2024年度秋季大会への講演申込の締め切り後に行うため、ここではハッカソンに向けた準備を中心として記載する。ハッカソンは、様々なバックグラウンドを持つ人々が集まり、特定のテーマに関してのアイデアを短期間で形にするイベントである。今回は「大規模言語モデル×地震研究」というテーマで、2024年夏に一泊二日の予定で実施する。これに向けて、まず世話人である久保・Wu・加納・加藤にてハッカソンの立ち上げおよび具体化を2024年初頭から春にかけて行った。そして2024年5月下旬から6月上旬にかけて参加者を募集し、最終的には世話人含めて17名が参加することとなった。その後ハッカソンに向けた準備として以下を行った：・専門家による大規模言語モデルの仕組みの解説・大規模言語モデルのチュートリアルの実施・参加者からのアイデア出しおよびディスカッション・絞り込んだ課題ごとのグループディスカッションこれらの準備を経て、以下の4つの課題に絞り込み、それぞれのグループでアイデアの深化および実装に向けた議論を進めている：・多数のシミュレーション結果に関する特徴抽出・解説付与・地震に関するソーシャルデータの自動収集・解析・発生した地震に関する解説や想定問答の自動生成・シミュレーションコードの自動生成なおハッカソンの進行に応じてこれらの内容が変更される可能性がある。またチャットベースのコマンドプロンプトによる大規模言語モデルの活用だけでなく、Retrieval-Augmented Generationやマルチモーダル技術の活用も視野に入れた検討を行っている。日本地震学会2024年度秋季大会での発表時には、ハッカソンの成果も含めて詳細を報告する予定である。

© The Seismological Society of Japan

Ateempt of detection of small earthquakes in Hakone volcano based on machine larning using multi-station data

*Ryo KURIHARA[1]

1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

近年，機械学習技術の発展が進み，社会の様々な箇所で機械学習が使用されるようになった．地震学についても例外ではなく， PhaseNet(Zhu and Beroza, 2019)の開発や，機械学習を使用した網羅的なカタログが作成されている(例えばRoss et al., 2020)．近年の機械学習を用いた地震学の研究においては，各観測点のデータからPhaseNet等を使用してP波・S波をピックしたのちに，それらのピックを合わせるPhase associationと呼ばれる作業をするプロセス(例えばREAL(Zhang et al. , 2019)やGaMMA(Zhu et al., 2022)など)を実施し，その後にHypo DD (Waldhauser and Ellsworth, 2020)により震源再決定するような流れが一般化しつつあり，実際この結果として非常に良質なカタログ作成ができている(QuakeFlow, Zhu et al., 2023)．　一方で，スロー地震や火山性の特殊な地震など微小な地震を目視で検出する場合，ノイズの誤検出等との区別のため，複数観測点で波形を確認することが一般的である．神奈川県温泉地学研究所では，従来から通常の地震検測に加えて複数観測点を並べた波形画像の目視による地震検出を実施しており，検測により震源決定された数の約4倍の地震を記録している(板寺, 2023温泉地学研究所観測だより73号)．本研究では，複数観測点を入力して機械学習により地震波形が検出可能であるか検証を行った．　今回実装したのは，温泉地学研究所14観測点および防災科学技術研究所Hi-net1観測点の合計15観測点3成分の波形から，1.箱根の地震・2.その他周辺の地震・3.遠地地震・4. ノイズの4つに分類する学習モデルである．入力データは0.5秒毎のRMS振幅を30秒分とした．過去のデータから，4つの分類に当たるデータをそれぞれ4000個ずつ合計16000個のデータを用意して，そのうち12000個を学習用，4000個を検証用として分類を行った．　その結果，畳み込みニューラルネットワークを使用したモデルで正答率96%と高い精度が得られた．また，誤答には入力データのラベルが不適切であったものや，箱根とその他の地震とした境界付近で発生した地震が多く含まれ，明らかに分類が誤っているものは皆無であった．一方，このデータを2024年7月8日の1日分のデータに適用したところ，目視で発見されている地震の見逃しは無かったものの，風などによる単観測点のノイズに対する誤検出が発生した．これらの結果は，複数観測点のRMS振幅データを入力とした機械学習モデルが微小な地震の検出を可能にできることを示すが，学習データの精査が非常に重要であることも示す結果となった．そのため，今後は学習データの確認を進め，また風などのノイズの学習データをより多く用意することで精度の改善を目指す．また，モデルをVision transformerのモデルにした場合との比較や，入力データをRMS振幅から波形データに変更可能かなどについても検証を行う．

© The Seismological Society of Japan

Parallel GPU Deep Learning Framework for Seismology and Application for Seismic Waveform from Nankai Trough

*Daisuke Sugiyama[1,2], Yojiro Yamamoto[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Kagoshima University

南海トラフの海底観測網の数十TBにも及ぶ連続波形データを並列GPUで高速・効率的に深層学習、推定することができるフレームワークを開発した。構築したフレームワークにより、蓄積された連続波形データやそれらのP波S波の読取りデータを、情報科学分野の先端技術を活用して分析することが容易になる。南海トラフ海域では近い将来巨大地震の発生が懸念され、その破壊開始域と考えられる熊野灘と紀伊水道沖にDONET（Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis） と呼ばれる海底観測網[1] [2]が展開されている。各観測点は、ジンバル機構により水平に保たれた地動センシングシステムと圧力センシングシステムで構成される。前者は3成分強震計および3広帯域地震計を、後者は水圧計、ハイドロフォン、微差圧計、温度計を含む。これにより、微小振動から地震動、さらに地殻変動まで、広範囲の物理現象の検出が可能となる。データ取得レートは、強震計と広帯域地震計が100Hzまたは200Hz、ハイドロフォン・微差圧計が200Hz、水圧計が10Hz、温度計が1Hzである。これらの連続波形データは何十TBにも及び、これを元に海洋研究開発機構の研究者は通常地震や低周波微動など様々なイベントカタログを作成してきた。
発表者は、これらの蓄積されたデータを活用するため、情報科学分野で発展の目覚ましい深層ニューラルネットワークアーキテクチャの地震分野へ応用を推進している。しかし、現状ではこれらの巨大なデータは事前に教師データに変換する必要があり、また、事前の物理量変換、信号処理、深層学習向けのData Augmentation処理なども実装がなく、学習・推定時にリアルタイムで実行できない。そのため、学習・分析に大きなコストを要する。これは新しい深層学習モデルの開発や既存の先端モデルを用いた分析を行う際の課題となっている。この課題解決のため、本研究では、深層学習、機械学習、統計モデルへ柔軟なデータフィードを可能とし、直接、並列GPUで処理ができるデータ基盤フレームワークを構築することを試みた。
本発表では、構築したフレームワークを紹介するとともに、その性能をテストするため、既存の先端モデルであるEQTransfomer[3]などを用い、直接、DONET連続波形データへの自動波形読取りを試みる。海洋研究開発機構の保有するスーパーコンピューターであるES4のGPU（Graphics Processing Unit）ノードを複数用いて並列計算を行い、検出結果と実行速度を明らかにする。構築したフレームワークを用いた実験結果、およびフレームワークの応用の可能性については発表の際に述べる。

謝辞
この研究では海洋研究開発機構の計算機システムを用いました。記して感謝いたします。この研究ではDONETの観測データを用いました。DONETは海洋研究開発機構が開発・設置し、防災科学技術研究所によって運用されています。記して感謝いたします。本研究は科研費22K03768の助成を受けています。

引用
[1] Kaneda Y., Kawaguchi K., Araki E. et al., Development and application of an advanced ocean floor network system for megathrust earthquakes and tsunamis. In: Seafloor observatories, Springer, Heidelberg, pp 6433–666 (2015). https:// doi. org/ 10. 1007/ 978-3- 642- 11374-1_ 252
[2] Kawaguchi K., Kaneko S., Nishida T. et al., Construction of the DONET real-time seafloor observatory for earthquakes and tsunami monitoring, In Seafloor observatories, Springer, Heidelberg, pp 211–228 (2015). https:// doi.org/ 10. 1007/ 978-3- 642- 11374-1_ 10.
[3] Mousavi, S.M., Ellsworth, W.L., Zhu, W. et al., Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking, Nat Commun 11, 3952 (2020). https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w.

© The Seismological Society of Japan

A Deep Learning Estimation of Tectonic Tremor Location from Single-Station Waveforms

*Amane Sugii[1], Yoshihiro Hiramatsu[1]

1. Kanazawa University

・はじめに

スロースリップイベント、超低周波地震、低周波地震、および微動を含むスロー地震は、2000年ごろに沈み込み帯で発見された以来、巨大地震とスロー地震の関係を解明するために地震学や測地学で広く研究されてきた（例: Obara and Kato, 2016）。微動は通常、複数の観測点の波形データを使用して震源決定される。（例: Maeda and Obara et al., 2009; Obara, 2002）。しかし、観測点が少ない地域での微動の検出および震源決定は困難であり、スロー地震の理解を妨げている。高周波および低周波成分の相互相関を使用した方法が、単一観測点で微動を検出するために提案されている（Masuda et al., 2023）が、単一観測点で微動の震源を推定することはまだ達成されていない。最近の研究では、深層学習を用いた微動の検出（例: Nakano et al., 2019; Rouet-Leduc et al., 2020; Takahashi et al., 2021）、単一観測点データを用いて通常の地震の震央を数キロの誤差で推定することに成功している（例: Elsayed et al., 2023; Mousavi et al., 2020）。本研究では、深層学習を使用し単一観測点の波形データから微動の震央を推定する方法を開発する。

・データと方法

対象地域は紀伊半島および東海である。これらの地域で2013年から2016年に発生したテクトニック微動を使用した。2013年から2015年までのデータをモデルの学習と検証に使用し、2016年のデータをテストに使用した。微動の震央はエンベロープ相関法(Mizuno et al., 2019)によって決定されたものを正解値として使用した。本研究で使用した波形データは、これらの地域の49のHi-net観測点から取得した3成分速度波形である。各観測点から震央までの距離が45 km以内の微動を使用した。波形の時間窓は、微動カタログに記載された発生時刻から60秒に設定した。本研究では、ConvMixerの改良版（Trockman and Kolter et al., 2022）を使用し、損失関数としてMean Absolute Errorを使用した。モデルは、標準化された3成分速度波形を入力とし、観測点と微動震央の緯度と経度の差を出力する。このモデルは2,736,642個のパラメータを持つ。

・結果と考察

モデルは102,783個の3成分速度波形を用いて学習され、18,138個の検証データで最小の損失値を持つモデルが採用された。予測された震央と実際の震央との平均緯度差と経度差はそれぞれ0.0009度、0.0006度であった。また、平均震央距離差は10.8 km±9.3 kmであった。学習に使用されていない2016年の微動波形(31,093個)にモデルを適用した場合、平均緯度差と経度差はそれぞれ0.0009度と0.0004度であり、平均震央距離差は11.9 km ±10.2 kmであった。これらの結果は、モデルの高い汎化性能を示している。また、震央距離差が10 km以内のデータはテストデータの56%を占め、20 km以内では83%を占めた。これらの結果は、現在のところモデルの推論能力が中程度であることを示している。ノイズの多いデータを除去し、学習データを増やすことで精度が向上すると期待される。今後の課題は、モデルが震央を特定できる理由を調査し、震央位置の不確実性を定量化する方法を開発して信頼性を高めることである。

© The Seismological Society of Japan

Detecting and locating tectonic tremors using deep learning: Application to Hi-net stations in the Nankai subduction zone

*Yuya Jinde[1], Amane Sugii[1], Yoshihiro Hiramatsu[1]

1. Kanazawa University

はじめに

テクトニック微動（以下，微動）の検出法としては，エンベロープ相関法（Obara, 2002）が一般的である．しかし，この方法には通常の地震やノイズを微動と誤検出する欠点があり，判別精度向上のためには追加の処理が必要とされる．深層学習の一種である畳み込みニューラルネットワーク（CNN）は，周波数成分や継続時間などの信号特徴に基づき，ノイズ，微動，地震を高精度で区別できるため，この問題を解決可能である．さらに，CNNモデルはハイブリッドカタログ（Maeda and Obara, 2009）と比較して，より多くの微動を検出することができる(陣出・他, 2023 SSJ）．CNNによって新たに検出された微動の大部分は，従来手法では微動の検出能力が低い微動活動が活発な時期に発生し，従来手法の微動の震央特定に限界があることを示唆する．本研究では，深層学習を用いた新たな微動の震央決定手法を開発し，CNNで検出された微動に対して適用した結果について報告する．

手法

本研究では微動の検出と震央決定にCNNとニューラルネットワーク回帰モデルをそれぞれ使用する．CNNは1分間のスペクトログラムを処理し，観測点で記録されたイベントがノイズ，微動，地震である確率を出力する．回帰モデルは，CNNから出力された各観測点の確率（ノイズ，微動，地震）を用いて，微動の位置情報を出力する．回帰モデルの学習では，ハイブリッド法による微動位置（緯度経度を平面直交座標系に変換したもの）を正解値とし，微動発生時の各観測点におけるCNNの確率出力を学習データとした．この手法では，同じ場所で微動が発生した場合，観測点における微動確率の空間分布が同一であることを仮定している．
微動活動が活発な場合，多数の観測点において明瞭な微動波形が観測され，微動確率が1に飽和し震央決定精度が低下する可能性がある．この問題に対処するため，本研究では確率分布だけでなく，微動の振幅分布も取り入れたモデルも作成し比較を行った．

結果と議論

南海沈み込み帯の四国地方にあるHi-net観測点50点を用いて回帰モデルの学習を行った．2017年に発生した5096回の微動のデータを，それぞれ70%，15%，15%の割合で訓練セット，検証セット，テストセットにランダムに分割してデータセットを作成した．
確率分布のみ，振幅（時間長1分のRMS振幅）分布のみ，確率分布と振幅分布の両方を入力するモデルをそれぞれ作成した．エポック数を200とし，検証セットによる損失（損失関数は平均絶対誤差（MAE））が最小のモデルを選択した．
テストセットを用いて回帰モデルの予測とハイブリッド法による微動の震央位置の比較を行った結果，確率のみ，振幅のみ，確率と振幅両方の各条件における平均誤差はそれぞれ8.97km，8.81km，8.08km，誤差の標準偏差はそれぞれ6.54km，7.17km，6.50kmであり，確率と振幅の両方を用いたモデルが最も良い性能を示した．確率のみを使用したモデルでは，微動確率が飽和した観測点が多いイベントでは誤差が大きくなる傾向があったのに対し，振幅を使用したモデルでは誤差の増加が抑制できていることが確認できた．最良モデルである振幅と確率の両方を使用したモデルでは，最大誤差が57.3km，最小誤差が0.30kmであり，誤差が5㎞未満，10㎞未満，20㎞未満のイベントの割合は，それぞれ37.6%，73.6%，93.9%であった．訓練データ数が少ない地域で発生した微動は誤差が大きくなる傾向があり，データセットの追加により精度改善が期待できる．
このモデルを2012年の5月から6月にかけて四国西・中部で発生したETSイベントに適用した結果，ハイブリッドカタログで見られる微動の沈み込むプレートの走向方向の移動とクラスター状の震央分布が再現さ

© The Seismological Society of Japan

れ，ハイブリッドカタログの約2.6倍の微動の震央が決定可能であった．本手法における処理時間は，確率の出力に1イベントあたり1.23秒，震央の決定に0.03秒である．実行時間は計算機の性能に依存するが，本手法では波形の相関処理やグリッドサーチを行わないため，従来手法よりも高速な震央決定が可能である．
本発表では，追加データを用いた学習結果についても議論する．

謝辞
本研究では，Hi-netで記録された波形データ，ハイブリッド法（Maeda and Obara, 2009），ハイブリッド・クラスタリング法（Obara et al., 2010）によって作成された微動カタログを使用しました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Development of deep-learning methods for seismic event detection in seafloor DAS data: creation of training/validation datasets

*GERARDO MANUEL MENDO[1], HIROMICHI NAGAO[1], SHINYA KATOH[1], MASANAO SHINOHARA[2]

1. Research Center for Computational Earth Science, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Distributed Acoustic Sensing (DAS) is one of the promising technologies revolutionizing seismology for two reasons: 1) ground motion can be recovered from DAS recordings obtained fiber optic cables, and 2) the optical fiber cable can be considered as a multichannel array, allowing the recording of the wavefield radiated from earthquakes with very high resolution. Challenges such as manageability of large volumes of data and variable signal-to-noise ratio makes difficult to use conventional seismological processing techniques to detect and identify seismic traces from DAS traces. In order to address these issues, state-of-the-art research in DAS systems aims to develop AI-based algorithms to process DAS recordings. Deep-learning-based methods have been successful worldwide due to the availability of large earthquake catalogs created by human analysts through the years. However, there is still room for improvement. In this work, we present the results from applying the template matching algorithm to identify and retrieve seismic events from DAS traces. The aim to create training and validation datasets to use them in deep-learning methods for training and test stages. As starting templates, we used three types of signals: a 20-s time window that comprises a seismic event with both P and S phases and two 5-s time windows that comprise either a P or an S phase. We also use templates from earthquake signals where only S phase is distinguishable. Template matching was applied using both waveforms and signal envelopes. We search throughout the data from the seafloor cable located in Sanriku, Japan. Two main differences are observable: 1) correlation coefficients ranges from 0.2 –0.4 and 0.85 –0.95 using waveform and envelope correlation respectively, and 2) envelope correlation detects events farther from the cable. For events with source locations close to the cable, we successfully identify events with both waveform and envelope. We present the main results of this work, highlighting that this method can be useful to obtain good datasets to use in deep learning models.

© The Seismological Society of Japan

Acquiring a Stochastic Differential Equation Representation to Characterize Tremors from Seismic Waveform Data Using Deep Learning

*Toshiro Kusui[1], Hiromichi Nagao[1], Shin-ichi Ito[1], Shinya Katoh[1], Tomoki Tokuda[1]

1. Univ. of Tokyo

Non-volcanic low-frequency tremor has been observed in many subduction zones. These tremors are characterized by weak and intermittent seismic motion with dominant low-frequency (2-8 Hz) components and exceptionally long duration, often occurring in regions slightly deeper or shallower than typical megathrust earthquakes. Understanding tremors is significant for gaining insights into the mechanics of large earthquakes. However, due to their small amplitudes and continuous occurrence, it is challenging to directly capture the detailed characteristics of tremor waveforms. It is common to convert waveforms into root-mean-square (RMS) envelopes to capture their energy feature. In previous research, Ide (2008) modeled tremor waveforms using stochastic differential equations (SDEs), specifically considering its asperity as following an SDE. This suggests that the energy of tremors fluctuates probabilistically as described by SDEs. Inspired by this prior work, it is thought that the RMS envelope of tremors can also be modeled using SDEs, which consider the probabilistic fluctuations of tremor energy. To better understand the detailed features of tremors, we aim to develop a flexible, data-driven SDE model that uses neural networks for the drift and diffusion terms to represent the RMS envelope of tremor waveforms. Signature Kernel, known for capturing fine path properties effectively is used in learning. Our results demonstrate that the model trained with Signature Kernel-Based loss achieves a smaller error than existing models. Furthermore, we analyzed the obtained model, showing that the drift term captures the global behavior of tremors while the diffusion term captures the local behavior. Many properties observed in our model align with those of existing mathematical models. Our results indicate the significant potential of Signature Kernel-Based deep learning methods for modeling slow earthquakes.

© The Seismological Society of Japan

Establishment and Result of Local Model through Transfer Learning of Deep Learning Detectors Using AN-net Data in Nagaoka Region

*Isao Kurosawa[1], Yuki kobayashi[1], Kodai Sagae[2], Takahiko Uchide[2]

1. INPEX CORPORATION, 2. Geological Survey of Japan. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

近年、地球温暖化の最大の要因として、大気中のCO_2濃度上昇問題がある。CO_2濃度を削減する１つの有効な手段としてCarbon Capture and Storage（CCS）が期待されている。CCSを推進する上で、CO_2圧入による地震のリスク対策のため、常時微小地震観測と地震震源位置やマグニチュードの解析結果に基づくTraffic Light System（TLS）の構築と運用が想定される。現状の手法（地震イベントのマニュアル検測）でモニタリングや解析を行う場合、特に、小さな規模の地震を見逃す可能性があり、TLSを効果的に運用するためには、地震観測および解析精度のさらなる向上が望まれる。また、CCSは長期にわたる事業であり、マニュアル検測に要するマンパワーが大きな課題となることが想定されることから、可能な限り人力での解析を排し、自動化を推進し、低コストで運用可能な体制を構築する必要がある。上記両面において、機械学習を活用した自動地震イベントの検知や震源解析が有効なアプローチとなることが期待される。機械学習を導入することで、微小地震観測・解析の精度向上が期待され、従来と同様の観測網デザインであっても、従来以上の地震検知限界の達成や、従来観測点数よりも少ない観測点で従来精度を維持できる可能性もある。この可能性を検証すべく、長岡地域のAN-netデータを使用して、既存の深層学習検測器の転移学習を行い、その精度について評価した。SeisBenchに収められているPhaseNet（Zhu and Beroza, 2019）やEQTransformer（Mousavi et al., 2020）などの深層学習検測器は、日本国外のデータを用いた訓練済みのモデルが公開されている。同モデルを国内のデータに使用した場合でも一定以上のパフォーマンスは発揮するが、実際に使用するデータを用いて再学習や転移学習すれば、より高いパフォーマンスを発揮されることが報告されている（Kim et al., 2023）。そこで本研究では長岡地域にあるAN-netの検測値をもとに、広く利用されているPhaseNetの転移学習を実施し、検測値と比較した。訓練には2021年6月から2022年12月まで1.5年分のデータおよびマニュアル検測値情報を用いた。本期間中4047イベントが使用可能で、このうち80%を訓練データ、20%を検証データとして使用した。上記の方法でAN-netの検測値と波形をもとに訓練したローカルモデルに対してPrecision-recall curve作成して、性能を評価したところ、性能が向上したことが確認された。また、走時残差分布からは、AN-netの検測値に比べて、少し後方を読む傾向が見られた。 謝辞　本研究では公益財団法人地震予知総合研究振興会の地震観測網AN-netのデータとその検測値を使用した。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Late-Breaking Session：S23. The 2024 Hyuga-nada Earthquake and its Effects

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S23P] PM-P

[S23P-01] Attenuation Characteristics of Bedrock Motions due to the 2024 Hyuganada Earthquake (M7.1)

*Tomonori IKEURA[1] (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

[S23P-02] Characteristics of significant wave groups observed in the Osaka Plain during the Hyuga-nada earthquake on August 8, 2024

*Takashi AKAZAWA[1] (1. Hanshin Consultants Co., Ltd.)

[S23P-03] Empirical relationship between distance from hypocenter to asperities and earthquake size

*Mitsutaka OHSHIMA[1] (1. Ohsaki Corporation)

[S23P-04] Source process of the 2024 Hyuga-nada earthquake deduced from strong motion records

*Ritsuya Shibata[1], Hisahiko Kubo[1], Wataru Suzuki[1], Shin Aoi[1], Haruko Sekiguchi[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S23P-05] Crustal deformation associated with the M7.1 earthquake in the Hyuganada on August 8, 2024.

*Hiroshi YARAI[1], Hiroshi MUNEKANE[1], Yuji HIMEMATSU[1], Shinzaburo OZAWA[1] (1. GSI)

[S23P-06] Ground tilt change before and after the Hyuga-nada earthquake on August 8, 2024

*Takeshi KIMURA[1], Youichi Asano[1] (1. NIED)

[S23P-07] Rapid estimation of co-seismic crustal deformation and fault models for the 2024 Hyuganada Sea earthquake by REGARD

*Mayumi Hashimoto[1], Takayuki Miyazaki[1], Keitaro Ohno[1], Shinsuke Murakami[1], Naofumi Takamatsu[1], Takahiro Wakasugi[1], Yusaku Ohta[2] (1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

[S23P-08] A validation of a procedure of continuous monitoring of unsteady deformation after large earthquakes

*Takahiro TSUYUKI[1], Akio KOBAYASHI[2] (1. Meteorological Research Institute, 2. Nagano Local Meteorological Office, JMA)

[S23P-09] CoRrelation Analysis of Crustal Deformation Immediately Before the 2024 Hyuganada Earthquake

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

[S23P-10] Geomagnetic pulsations amplified by magnetic storms and resonance phenomena caused by crustal discharges

*kimio uchino[1] (1. himawarinowa.lab)

[S23P-11] Real-time Disaster Prevention Warnings for Nankai Trough Megathrust Earthquakes and Tsunamis Using Physical Wavelets

*Fumihide TAKEDA[1,2] (1. Takeda Engineering Consultant, 2. Earthquake Prediction Institute)

[S23P-12] T-wave propagation associated with the Hyuga-nada Earthquake

*Ryoichi IWASE[1] (1. JAMSTEC)

[S23P-13] Earthquakes in the Early Modern Era with epicenter in Hyuga-nada

*Rei Mizuno[1], Yasuyuki Kano[2], Masaharu Ebara[1] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Univ. of Tokyo)

[S23P-14] On the probability of an M7-class earthquake in Hyuganada region to trigger an M8 or larger earthquake

*Yo FUKUSHIMA[1], Tomoaki Nishikawa[2] (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S23P-15] VLFE Activity in and around the Focal Area of the 2024 Hyuga-nada Earthquake

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

[S23P-16] Large-scale activity of very low-frequency earthquakes following the 2024 Hyuganada earthquake

*Naoki SUDA[1] (1. Earth and Planetary Systems Science Program, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University)

[S23P-17] Toward monitoring of tectonic tremor occurred along the Nankai trough using N-net

*Takayuki MIYOSHI[1], Kazuaki Ohta[1], Takanori Matsuzawa[1], Youichi Asano[1], Takashi Kunugi[1], Tetsuya Takeda[1], Shin Aoi[1] (1. NIED)

[S23P-18] Rapid identification of earthquake information based on three-dimensional seismic velocity structures and their utilization

*Katsuhiko SHIOMI[1], Shunsuke TAKEMURA[2], Makoto MATSUBARA[1], Takeshi KIMURA[1], Shoji SEKIGUCHI[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S23P-19] AIST's geodetic monitoring for Nankai Trough Earthquake Extra Information (Megathrust Earthquake Attention)

*Yuichi KITAGAWA[1], Satoshi ITABA[1], Tadafumi OCHI[1], Suguru YABE[1], Norio MATSUMOTO[1], Tsutomu KIGUCHI[1] (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST)

[S23P-20] Issues in geodetic monitoring for Nankai Trough Earthquake Extra Information (Megathrust Earthquake Attention)

*Satoshi ITABA[1], Yuichi KITAGAWA[1], Tadafumi OCHI[1], Suguru YABE[1], Norio MATSUMOTO[1], Tsutomu KIGUCHI[1], Takanori MATSUZAWA[2] (1. AIST, 2. NIED)

[S23P-21] Human risk assessments considering the Nankai Trough Earthquake Extra Information

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. NIED, 2. OYO)

[S23P-22] Investigation of effective use of Nankai Trough earthquake contingency information in local communities

*Kazuhito Fujisawa[1], Atsuko Nonomura[1], Mari Takahashi[1], Yoshiyuki Kaneda[1], Narumi Takahashi[2] (1. Univ. of Kagawa, 2. NIED)

[S23P-23] Effectiveness Evaluation of the Nankai Trough Earthquake Extra Information in terms of Earthquake Preparedness

*Yoshinari HAYASHI[1], Ryu OHTANI[2] (1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

[S23P-24] The surveys about the Nankai Trough Earthquake Extra Information in August 2024 and the results

*Akiko TAKEO[1], Hisahiko KUBO[2], Ryo KURIHARA[3], Kotaro TARUMI[4] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University)

[S23P-25] Survey on the response of some students in Kochi /Kagawa prefectures to Nankai trough special advisory information on August 8

*Yoshiyuki KANEDA[1] (1. IECMS Kagawa University)

[S23P-26] About the Hyuganada earthquake and its effects

*Takanobu HARA[1] (1. kagakugiken)

Attenuation Characteristics of Bedrock Motions due to the 2024 Hyuganada Earthquake (M7.1)

*Tomonori IKEURA[1]

1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

【１】はじめに

2024年8月8日日向灘の地震(M7.1)では九州・四国・中国地方において強震動が観測された．これらの観測記録は南海トラフの巨大地震による強震動特性を考える上で貴重な情報となる．ここでは，この地震によるK-NET, KiK-netの観測記録[NIED(2024)]をもとに，西南日本における地震動距離減衰特性を検討した．

【２】相対サイトファクターの評価とそれを用いた観測地震動から基盤地震動への変換

観測地震動をもとに距離減衰特性を詳細に把握するには観測地点毎の揺れ易さの違いが障害となる．そのため，予め九州・四国・中国地方におけるK-NETとKiK-netの観測地点(741測点)に対して隣接観測点ネットワークによる広域相対サイトファクター評価法[池浦(2020)]を適用し，基準点に対する相対サイトファクター(RSF)としてS波区間のフーリエ振幅比を評価した．RSFの基準点としてはKiK-net伊方の地中観測点(GL-153m)を採用した．この観測点は，Vp=5.46km/s, Vs=2.78km/sの中生代の変成岩体の内部であり[NIED(2024a)]，地震基盤相当の観測点と考えることができる．そこで，観測地震動のS波区間のフーリエ振幅(OBS)を上記のRSFで除すことにより，各観測地点固有のサイトファクターをすべて基準点の地震基盤相当のサイトファクターに変換した地震動(BRM)を求め，その距離減衰特性を詳しく観察した．

【３】距離減衰特性の分析

距離減衰特性の検討では，まず，得られた全地点のBRMをもとに，ln$BRM(f)$に対して周波数帯域毎にln[r](*r*:震源距離)の多項式を当てはめ，平均的な距離減衰特性$\mu(r)$とばらつきσを評価した．その際に，多項式の次数は最大5次を上限として最小AICの条件で選択した．なお，帯域分割は0.3 Hz～30 Hzで対数等間隔の8分割とした．また，各地点におけるlnBRMの残差につき，$Zscore = \{\ln BRM(f) - \mu(r)\}/\sigma$を求め，その空間分布を観察した．

【４】結果

BRMの距離減衰分布はいずれの帯域でもOBSのそれに比べて分布がまとまり，距離減衰の特徴が明瞭となった．平均距離減衰曲線のばらつきは自然対数の標準偏差でσ = 0.32～0.65であり，概ね周波数とともに増大する結果であった．　0.7 Hz帯域のBRMの距離減衰分布（図１）を観察すると，近距離（r < 100 km）と中間距離（ r= 150 - 200 km）においてそれぞれ分布が2段に分離する特徴が認められる．Zscoreの空間分布によれば，これらの分離は近距離側が九州の前弧側における振幅差，および中間距離が九州北部と四国南西部の振幅差を反映している．F-netのメカニズム解[NIED(2024b)]に基づく水平動のラディエーションパターン係数$R_{\theta\phi}=\sqrt{(SH^2+SV^2)}$の分布（図３）は四国への方向（N030degE）に対して非常に小さい値となっており，九州と四国の振幅差が$R_{\theta\phi}$の方位特性で生じている可能性が考えられた．

一方，7 Hz帯域のBRMの距離減衰分布（図２）ではr = 100 km付近から遠方で距離減衰の勾配が急になる特徴と，r = 200～300 kmで分布が2段に分離する特徴が見られる．その空間分布（図４）では，前者が火山フロント背弧側の領域の観測地点の特徴，後者が遠方における前弧側と背弧側の振幅差を反映している．これに関連して，九州では大規模火山の周辺に局地的にLow-Q領域があるが，それらとBRMとの関係は明らかでない．今後の課題である．

【５】まとめ

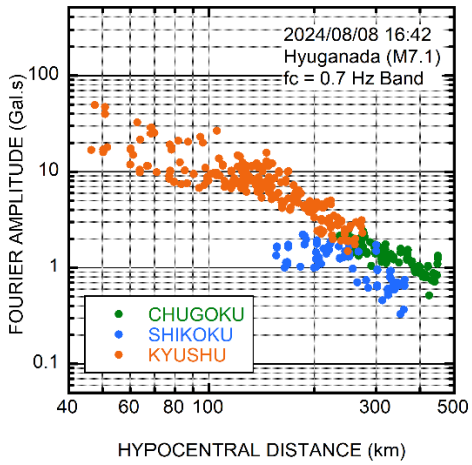
2024年8月8日日向灘の地震(M7.1)による基盤地震動の距離減衰特性を詳しく検討した．同一距離における振幅差（ばらつき）の要因として，低周波数領域では発震機構による放射係数$R_{\theta\phi}$の異方性，高周波数領域では火山フロントの前後の減衰性の違いを指摘した．

なお，低周波数領域で四国の揺れが非常に小さかった点については，沈み込み帯の構造的な要因も考慮する必要がある．また，地震規模のわりに観測加速度が小さかった印象があるが，沈み込みと反対の破壊進行方向の海域では大きかった可能性が高い．海底地震計データの分析が必要である．

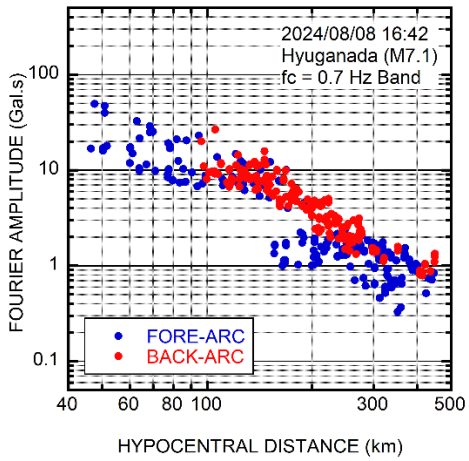
© The Seismological Society of Japan

【謝辞】防災科学技術研究所のK-NET・KiK-netのデータおよびF-netの震源メカニズム解を使用させていただきました．記して感謝します．
【参考文献】池浦（2020）地震工学会論文集，NIED(2024a)強震観測網（K-NET, KiK-net），NIED(2024b)広帯域地震観測網（F-net）

© The Seismological Society of Japan

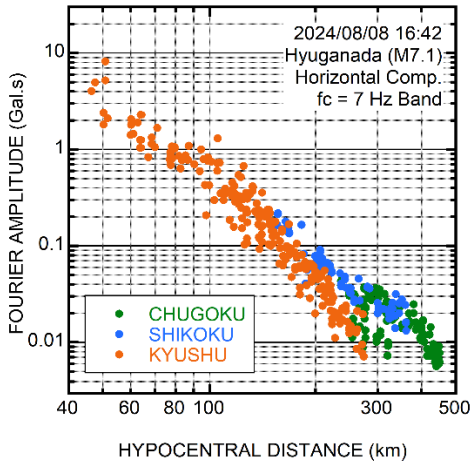


(1) 中国・四国・九州の地域分類

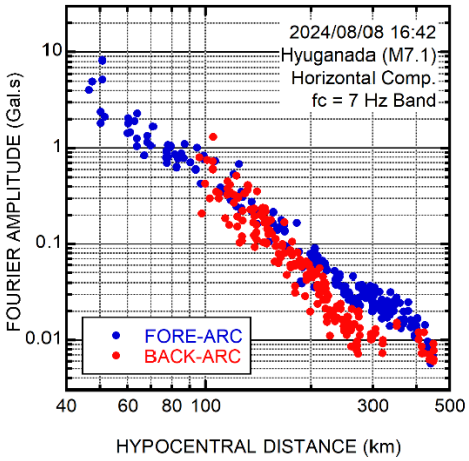


(2) 火山フロントの前弧・背弧分類

図 1　0.7 Hz 帯域における BRM の距離減衰分布．(1)によると，九州地方と中国地方はほぼ連続するが，四国地方はそれらに比べやや小さい．また(2)によると，複雑な分布が現れるのは前弧側の特徴かもしれない．



(1) 中国・四国・九州の地域分類



(2) 火山フロントの前弧・背弧分類

図 2　7 Hz 帯域における BRM の距離減衰分布．(1)の九州地方の距離減衰分布は 150km 付近で折れ曲がるが，(2)によると，これは九州地方火山フロントの前弧側と背弧側の切り替わりに対応する．前弧側の九州地方～四国地方～中国地方はほぼ直線的に連続しており，前弧側の距離減衰の傾きは大まかには一定である．

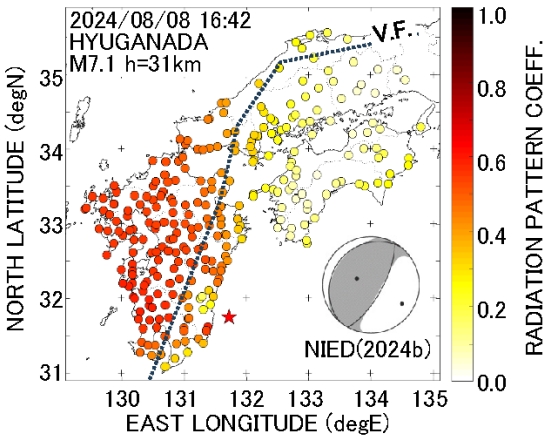


図 3　ラディエーションパターン係数の分布

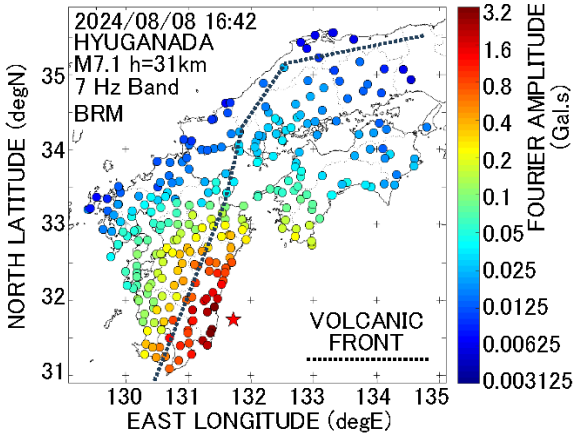


図 4　7 Hz 帯域の BRM の空間分布

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of significant wave groups observed in the Osaka Plain during the Hyuga-nada earthquake on August 8, 2024

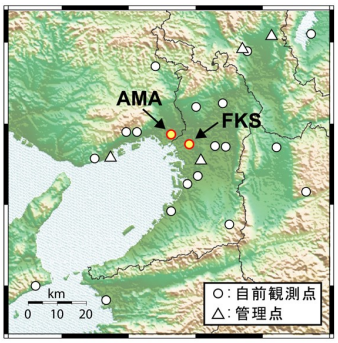
*Takashi AKAZAWA[1]

1. Hanshin Consultants Co., Ltd.

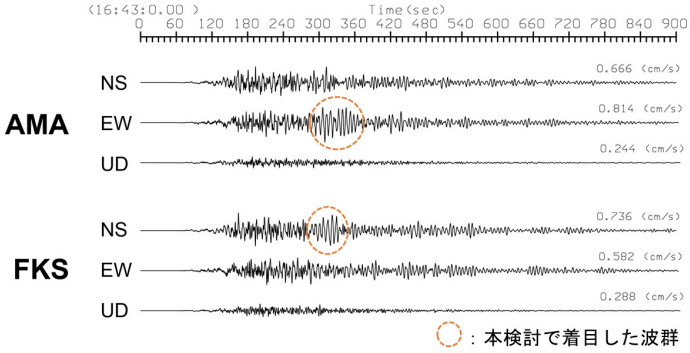
2024年8月8日16時43分頃に発生した日向灘を震源とする地震（Mj7.1；以下，対象地震とする）では，関西地域に展開されている関西地震観測研究協議会（関震協）の全観測点で地震動が捉えられ，大阪平野内を中心に多くの観測点で震度1相当の揺れが観測された。観測された速度波形より，大阪平野内では，これまでに観測された多くの地震動と同様，比較的大きい振幅の揺れが長時間継続したことが確認された。大阪平野内に設置されているAMA（尼崎）観測点では，S波初動が到達してから約3分後に東西成分で顕著な波群が現れ，関震協の全観測点の中で最大となる約0.8 cm/sの揺れが観測された。同観測点に近接するFKS（福島）観測点でも，成分は異なるが，南北成分でほぼ同じ時刻に比較的大きな波群が現れた。なお，2019年5月10日8時48分頃に，対象地震の震央から東に約25 km離れたやや浅い場所で，対象地震より規模がやや小さいMj6.3の地震が発生しているが，この地震により観測された速度波形には上述した波群は確認できなかった。疑似速度応答スペクトルにおける各観測点の卓越周期特性に着目すると，上述したAMA観測点とFKS観測点では，前者は東西成分が，後者は南北成分が，6～7秒付近で卓越したことが確認された。非定常スペクトル特性より，疑似速度応答スペクトルにおける卓越は，上述した顕著な波群に対応することが明らかとなった。この周期帯は，両観測点の地震計が設置されている地盤におけるLove波の卓越周期に対応する（宮腰・堀家，2006）。
4～10秒でバンド・パス・フィルター処理を施した観測速度記録の粒子軌跡より，AMA観測点とFKS観測点では，当該波群が出現し始める時刻の約1分前から，それまでの傾向とは異なり，西北西－東南東方向に揺れ始めていることが確認された。周辺観測点の粒子軌跡では、この波動は確認できなかった。比較的長い周期の揺れでAMA観測点とFKS観測点が長時間震動したことが当該波群の生成に繋がった可能性もあるが、成因については詳細な検討が必要である。

謝辞：本検討では関西地震観測研究協議会による強震観測記録を使用させていただきました。関係各位に感謝申し上げます。

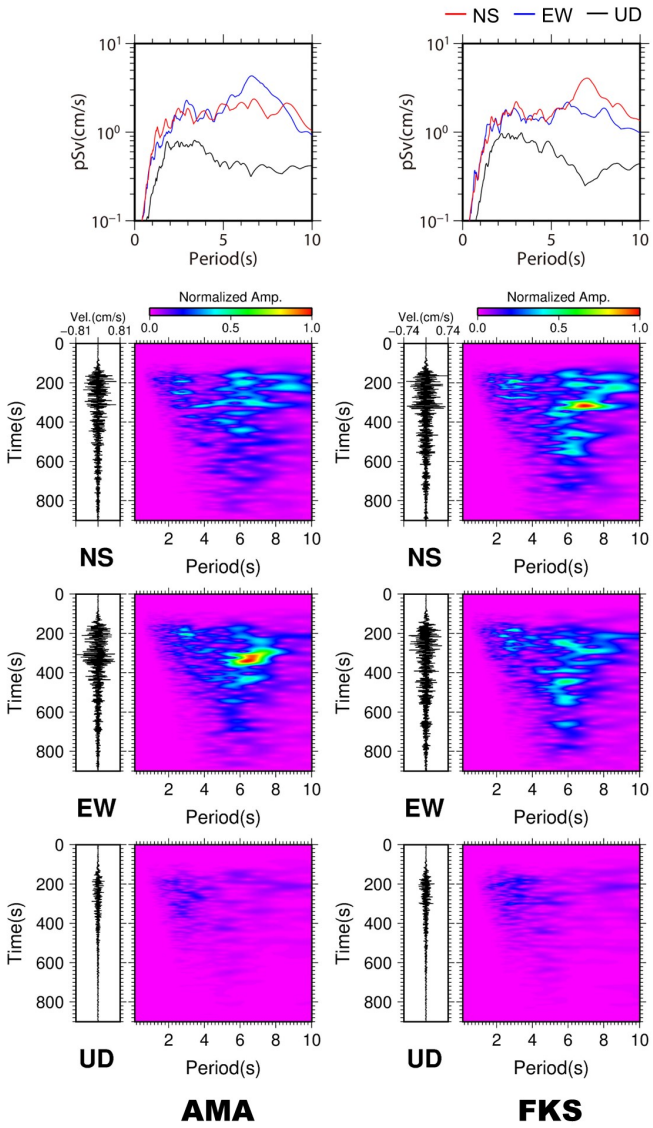
© The Seismological Society of Japan



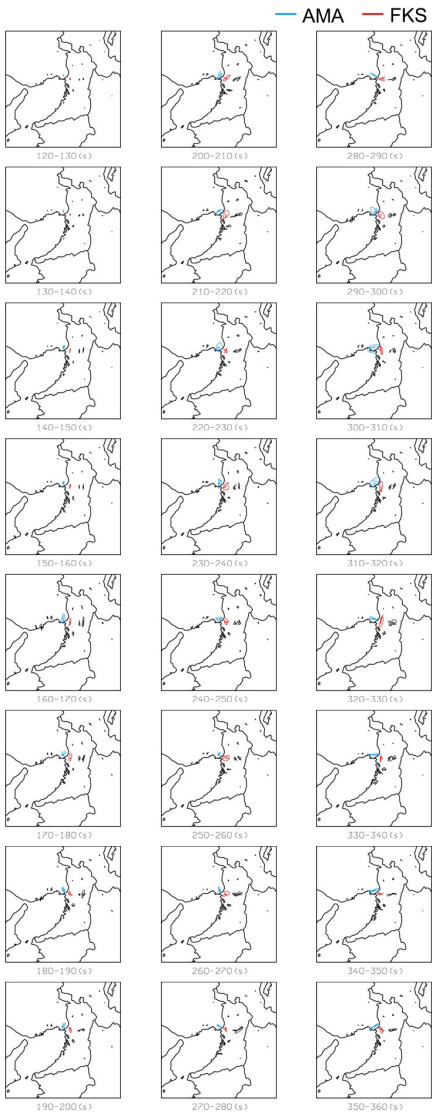
関震協の観測点分布



観測された速度波形



疑似速度応答スペクトル（上）と非定常スペクトル（下）



観測速度記録の粒子軌跡（4～10秒で
BPF処理；時間は速度波形の時間軸に対応）

© The Seismological Society of Japan

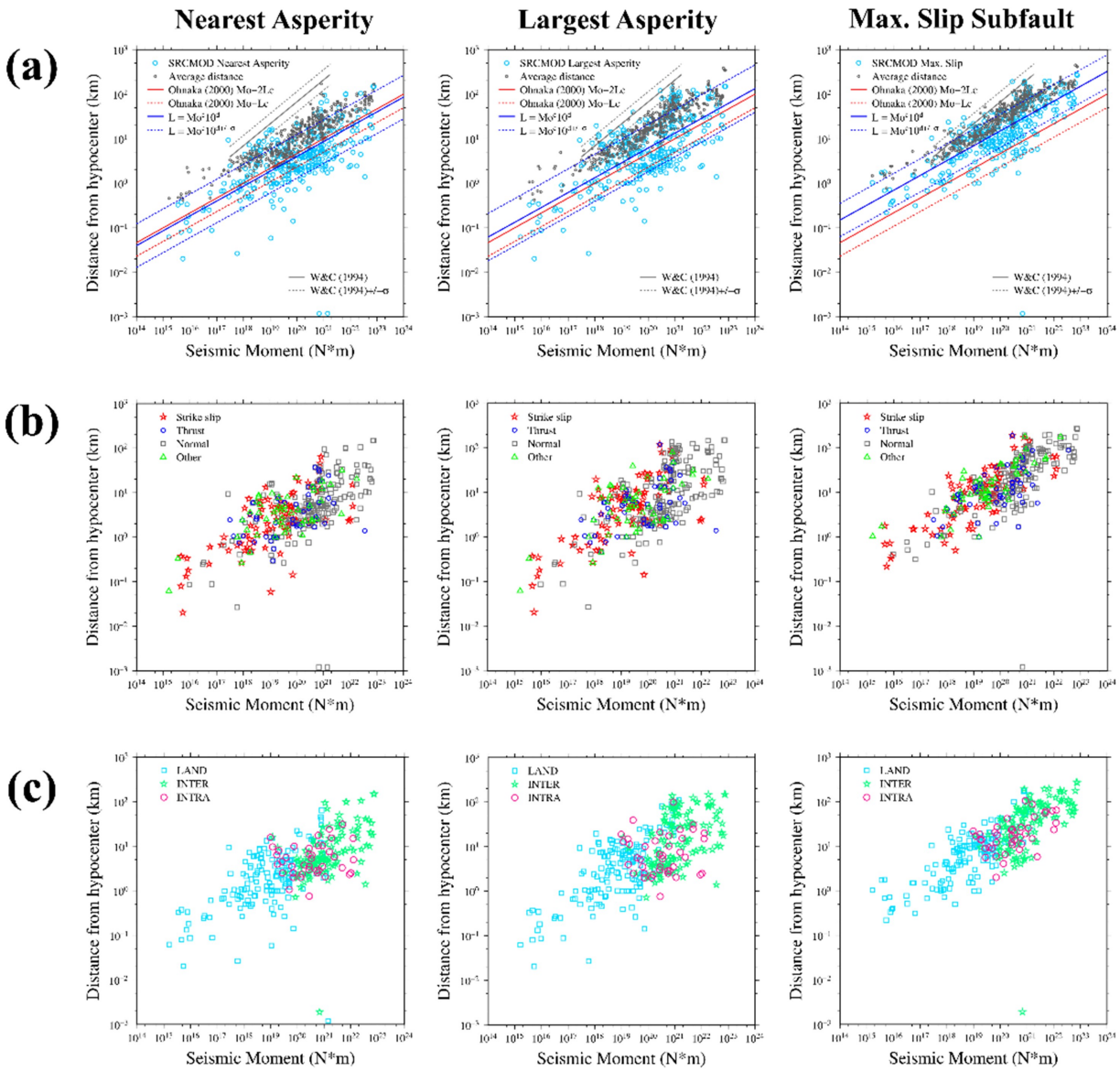
Empirical relationship between distance from hypocenter to asperities and earthquake size

*Mitsutaka OHSHIMA[1]

1. Ohsaki Corporation

【はじめに】2024年8月に日向灘地震(M7.1)が発生し、史上初の南海トラフ臨時情報（巨大地震注意）が発表された。南海トラフの地震等、社会的影響が大きな超巨大地震については、その強震動予測を精度よく行い被害を最小化する必要がある。断層面上のアスペリティの位置は、強震動に大きな影響を与える。強震動予測時の断層モデルにおいて、アスペリティの位置を実際の地震のデータに基づいて経験的に設定できれば、より高精度で現実に即した地震動予測が可能となる。Somerville et al. (1999)やMai et al. (2005)、Manighetti et al. (2005)は、震源から断層面上のすべりが大きな領域までの距離と地震規模の関係を調べた。しかし、Somerville et al. (1999)で用いられた地震の数は15個と少ない。Mai et al. (2005)やManighetti et al. (2005)が断層すべり量から抽出したものは、強震動予測に用いられるSomerville et al. (1999)の定義によるアスペリティではない。また、Mai et al. (2005)は震源からの距離を断層長さで規格化しており、断層長さと地震規模のスケーリング関係が変わる南海トラフ等の超巨大地震には適用できない。2020年から実施の本研究では超巨大地震までを適用範囲として、波形インバージョンによる断層すべり量からSomerville et al. (1999)の定義によりアスペリティを抽出し、震源からアスペリティや断層面上のすべり量最大の領域までの絶対距離と地震モーメントの回帰式を求めた。回帰式は断層メカニズムごとに求めた。 **【データ・解析】**本研究では、震源からアスペリティまたは最大すべり量を持つ地点までの距離と地震モーメントまでの距離の関係を調べた。Mai and Thingbaijam(2014)によるデータベース（SRCMOD）には、200地震の436個の断層すべりモデルが含まれている。アスペリティは、Somerville et al. (1999)の定義にしたがってSRCMODに収録された各地震のすべりモデルから抽出した。SRCMODの断層すべり分布のデータからアスペリティを抽出し、震源からアスペリティまたはすべり量最大の領域までの距離と地震モーメントの間の回帰式を求めた。アスペリティについては、震源から最も近いアスペリティ、断層面上で最大のアスペリティのそれぞれについて、断層メカニズムごとに回帰式を求めた。 **【結果と議論】**震源から、最も近いアスペリティ、断層面上で最大のアスペリティ、および断層面上のすべり量最大の領域までの距離は、いずれも地震モーメントの3乗根に比例することがわかった。またモンテカルロ的検証によりこれらの結果が、地震モーメントに応じて大きくなる断層面上に震源がランダムに分布していることによるものではないことが分かった。破壊伝播速度が断層面上で著しく変化しないと仮定すれば、本研究により得られた結果は、破壊が断層面上のすべり量最大の領域に達するまでの時間が地震モーメントの3乗根に比例するというIde and Aochi (2005)による動力学的断層破壊シミュレーションの結果と調和的である。本研究で分析した地震の大部分で核生成相が報告されていないが、震源からアスペリティやすべり量最大の領域までの距離と地震モーメントの間の回帰式は、核生成領域の大きさと地震モーメントの間のスケーリング関係（Shibazaki and Matsu'ura, 1998; Ohnaka, 2000）とかなり近く、震源ーアスペリティ間の距離が核生成領域のサイズに比例するように見える。震源ーアスペリティ間の距離と地震モーメントの関係を震源機構ごとに調べたところ、震源ーアスペリティ間の距離は横ずれ型地震で最大であった。Uenishi and Rice (2003)、Uenishi (2017)によれば、核生成領域のサイズはモード IIで最大となる。震源ーアスペリティ間の距離が核生成領域のサイズに比例するならば、本研究の結果はUenishi and Rice (2003) や Uenishi (2017)と調和的であり、興味深い。その他、本研究の結果、震源に最も近いアスペリティの70.5%が断層面上で最大のアスペリティであった。断層面上のすべり量最大の地点が震源に最も近いアスペリティ内、断層面上で最大のアスペリティ内にある割合は、それぞれ73.5%、86.8%であった。 **【謝辞】**本研究ではSRCMOD(Mai and Thingbaijam, 2014)のデータを使用しました。有益な助言を頂いた岡山大学の竹中教授、気象大学校の永田先生、清水建設の佐藤智美博士に感謝いたします。図の作成にはGeneric Mapping Tools (Wessel et al., 2013)を使用しました。

© The Seismological Society of Japan


Nearest Asperity
Largest Asperity
Max. Slip Subfault
(a)
(b)
(c)
Distance from hypocenter (km)
Seismic Moment (N*m)
SRCMOD Nearest Asperity
SRCMOD Largest Asperity
SRCMOD Max. Slip
Average distance
Ohnaka (2000) Mo=2Lc
Ohnaka (2000) Mo=Lc
W&C (1994)
W&C (1994)+/-σ
Strike slip
Thrust
Normal
Other
LAND
INTER
INTRA

Source process of the 2024 Hyuga-nada earthquake deduced from strong motion records

*Ritsuya Shibata[1], Hisahiko Kubo[1], Wataru Suzuki[1], Shin Aoi[1], Haruko Sekiguchi[2]

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

2024年8月8日、日向灘において気象庁マグニチュード7.1の地震が発生した。この地震は北東-南西に走向を持つ逆断層型の地震（F-netモーメントテンソル（MT）解、防災科研）である。震源の深さが31.22 km（気象庁）とプレート境界の深さと整合的なであることと低角逆断層のメカニズムであることを考慮すると、プレート境界面上で発生した地震であると考えられる。本研究では、この地震の震源過程を推定するため強震波形を用いた震源インバージョン解析を行った。
本解析においては、K-NET観測点10点の地表記録とKiK-net観測点5点の地中記録の計15観測点を利用した。観測された加速度波形は積分した後0.05–0.5 Hzのバンドパスフィルタを適用し、5 Hzにダウンサンプリングした。解析に用いるタイムウィンドウはS波走時の0.5秒前から25秒間とした。震源断層は42 km×33 kmの矩形断層とし，破壊開始点は気象庁震源（北緯31.7382度、東経131.7232度、深さ31.22 km）とした。走向、傾斜はF-net MT解のうち低角逆断層の節面に従いそれぞれ219度、19度とした。
本研究ではマルチタイムウィンドウ法（Olson and Apsel, 1982; Hartzell and Heaton, 1983）により震源過程の推定を行った。本手法においては、断層すべりを時空間方向に離散化し、断層面上で直交する二つのすべり方向成分に分解することで、時空間の断層すべり分布とすべり方向を線形の逆問題として解く。空間方向には、震源断層面を3 km×3 kmの小断層に格子状に分割することで離散化した。時間方向には、1.2秒幅のスムーズドランプ関数を0.6秒おきに8個並べることで、各小断層に5.4秒間すべりを許した。各小断層において破壊を開始可能な時刻は、破壊開始点から2.8 km/sで同心円状に仮想の破壊フロントが進展した場合の破壊フロントの到達時刻とした。すなわち、各小断層における破壊は仮想破壊フロントの到達時刻から5.4秒間に限定される。
本研究では、一次元地震波速度構造を仮定して、離散化波数積分法（Bouchon, 1981）と反射・透過係数行列法（Kennett and Kerry, 1979）により理論的に計算されるグリーン関数を用いた。小断層内部における破壊伝播の効果を考慮するために、各小断層内に25個の点震源を等間隔で配置した上で、それぞれの点震源についてグリーン関数を計算し、一定の重みにおいて合成したものを各小断層のグリーン関数とした。ここでは藤原・他（2009）による三次元地下構造モデルの各観測点直下の地下構造を観測点ごとに一次元速度構造として設定した。KiK-net観測点については速度検層による速度構造も考慮している。
インバージョンにおいては、時空間的な断層すべり分布と各小断層のグリーン関数から合成される理論波形と観測波形の残差が最小になるように、線形の最小二乗法を解く。ここでは、非負の拘束条件を適用した最小二乗法（Lawson and Hanson, 1974）を用いた。そのため、すべり角はF-net MT解のすべり角である96度から±45度の41度から131度の間に限定された。また、時空間のスムージングを導入し（Sekiguchi et al., 2000）、その強さは赤池ベイズ情報量規準（Akaike, 1980）が最小になるように決定した。
震源インバージョン解析の結果、破壊開始点から南西に約10 kmの位置において最大3.7m程度の大すべり領域が推定された。また、2024年8月8日に発生した気象庁マグニチュード2.5以上の余震は断層浅部と北東部に多く位置しており、本震の主すべり領域とは重ならないことを確認した。破壊伝播に着目すると、主破壊は南西に向かってユニラテラルに伝播し、12秒程度で収束していた。このユニラテラルな破壊伝播という特徴は観測波形にも表れている。具体的に、破壊が進展した南西方向にあるMYZH14、MYZ016、MYZ018では他の観測点に比べてみかけの震源時間が比較的短く、これはディレクティビティ効果を反映していると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Crustal deformation associated with the M7.1 earthquake in the Hyuganada on August 8, 2024.

*Hiroshi YARAI[1], Hiroshi MUNEKANE[1], Yuji HIMEMATSU[1], Shinzaburo OZAWA[1]

1. GSI

はじめに

2024年8月8日に日向灘でM7.1の地震が発生した。この地震に伴う地殻変動が電子基準点等のGNSS観測により観測された。本講演ではGNSS観測で得られた地震時および地震後の地殻変動と、地殻変動に基づき推定された震源断層モデルおよび余効すべりモデルについて報告する。

地震時の地殻変動と震源断層モデル

地震に伴う地殻変動が電子基準点等により観測された。水平変動では震央に向かうように東～南東方向の変動、上下変動では震源域に近い場所で沈降が見られた。震央に最も近い宮崎観測点で東南東方向に約14cmの変動、約8cmの沈降が観測された。

地震時の地殻変動に基づき、震源断層モデルを推定した。推定は矩形一様すべりの断層（矩形断層モデル）と、プレート境界面でのすべり分布（すべり分布モデル）の2種類のモデルで行った。

矩形断層モデルでは、MCMC法で各パラメータを推定した。断層の長さと幅を1：1に近づくように拘束した。推定された断層面は、震源分布と概ね整合している。また、Hirose et al.(2008)のフィリピン海プレート境界面とも良く整合している。推定された断層長（幅）は約25km、すべり量は約2mで、剛性率を40GPaと仮定するとMw7.1と求まった。

すべり分布モデルでは、プレート境界面を5km四方の小断層に分割し、すべり方向とすべり量を推定した。矩形断層モデルと同様に震央付近ですべりが推定され、最大すべり量は約2mとなった。

この付近では1996年10月と12月にM6.6の地震が発生している。Yagi et al.(1999)による地震波形から推定されたすべり分布と比較すると、今回の地震に伴うすべりは1996年の2つの地震のすべり域と隣接している。

余効変動と余効すべり

今回の地震後、震源域周辺で余効変動と考えられる東～東南東方向の地殻変動が観測されている。変動の大きさは、地震後の1か月間で最大2cm程度に達している。変動は地震後からゆっくりと進行し、時間経過と共に鈍化してきている。余効変動が見られる観測点は震源域周辺に限られ、時間が経過しても変動範囲には大きな変化は見られていない。

余効変動が全てプレート境界面でのすべりに起因すると仮定して、余効すべり分布の推定を行った。地震時変位を推定して時系列データから除去し、時系列上に余効変動のみが残る形にして時間依存インバージョンで解析を行った。解析の結果、本震震央付近にすべりが推定された。8月末までの最大すべり量は約12cm、主要なすべり域のMwは6.7となった。モーメントの時間変化を見ると、地震直後に急激に増加した後、やや緩やかになりつつ、8月末の時点では継続している。

この付近では1～2年程度の間隔で長期的SSEが発生している。また、1996年の10月と12月の地震後には顕著な余効変動が観測され、余効すべりが推定されている（例えばYarai and Ozawa, 2013）。これらと今回推定された余効すべりの位置関係を比較すると、1996年の地震後の余効すべりは、震央よりも深い側にすべりの中心が位置し、すべりの大きい領域が長期的SSEのすべり域と重なるのに対し、今回の地震後の余効すべりは8月末までの時点では震央よりも浅い側にすべりの中心が位置し、長期的SSEのすべり域でのすべりは顕著ではない。但し、今後、長期的SSEの領域でのすべりが大きくなる可能性もあり、継続的なモニタリングが必要と考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Ground tilt change before and after the Hyuga-nada earthquake on August 8, 2024

*Takeshi KIMURA[1], Youichi Asano[1]

1. NIED

2024年8月8日16時43分頃に日向灘を震源とするM$_J$7.1の地震がフィリピン海スラブ上面で発生した．気象庁は19時15分に南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）を発表し，政府は同月15日の17時まで「特別な注意の呼びかけ」を行った．このような状況では，南海トラフ沿いのプレート境界における地殻活動の状況を，測地学的，地震学的に出来うるだけ多項目でモニタリングすることが重要である．防災科学技術研究所（以下、防災科研）では，陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）等のデータを用いてさまざまな地殻活動のモニタリングを実施している。このうち広域かつ稠密に展開されているHi-netに併設されている高感度加速度計による傾斜変動データは，南海トラフ沿いのプレート境界で発生する短期的スロースリップイベント（SSE）の解析に使用される［Obara et al. 2004；Hirose and Obara, 2005］等，地殻活動のモニタリングに有用なデータの一つである．本研究では，日向灘の地震時のHi-net傾斜変動データの調査から，地震前後の地殻活動モニタリングにおける本データの利用可能性について検証する．解析には，南海トラフの巨大地震の想定震源域周辺の約200のHi-net観測点での傾斜変動データを利用した．傾斜変動データに含まれる潮汐応答成分を補正するため，日向灘の地震発生前の2024年5月10日～8月7日の1時間サンプルのデータからBAYTAP-G［Tamura et al. 1991］を用いて各観測点および成分の潮汐応答成分の振幅および位相を推定した．得られた振幅および位相から日向灘の地震後を含めた傾斜変動における潮汐応答成分を推定し，日向灘の地震前後のデータから潮汐応答成分を補正した．日向灘の地震時には，震源近傍のHi-net日南（NCNH）で15.1μradian（2成分合成）のステップ変化が見られるなど，九州地方の4観測点で1μradianを超える大きなステップ変化が見られた．また，ステップ変化後には継続時間が10日またはそれ以上のゆっくりとした変化が見られた．このゆっくりとした変化の大きさや継続時間は，直前のステップ変化の大きさと相関は見られない．強震動時のこの様な変化は地殻活動によるものではなく，振動により高感度加速度計がボアホール内で動いた可能性［佐藤・他，1980］や振り子の中立点のずれ［上田・他，2010］などが原因として考えられる．特に，ステップ変化後のゆっくりとした変化は，地震直後の地殻活動を捉える上で，大きな障害となる．一方で，九州地方以外ではステップ変化等は見られず，地震前後で観測能力に大きな違いは生じなかったと考えられる．実際に，日向灘の地震直後には紀伊半島北部から愛知県西部の観測点で短期的SSEによるものと考えられる約0.1μradianの傾斜変動が観測され，四国中部でも微動活動の活発に伴う傾斜変動が捉えられている．従って，大地震発生直後の傾斜変動データの利用にあたっては，振動によるステップ変化およびその後のゆっくりとした変化の発生を迅速に把握し，利用可否を判断することが重要である．

© The Seismological Society of Japan

Rapid estimation of co-seismic crustal deformation and fault models for the 2024 Hyuganada Sea earthquake by REGARD

*Mayumi Hashimoto[1], Takayuki Miyazaki[1], Keitaro Ohno[1], Shinsuke Murakami[1], Naofumi Takamatsu[1], Takahiro Wakasugi[1], Yusaku Ohta[2]

1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

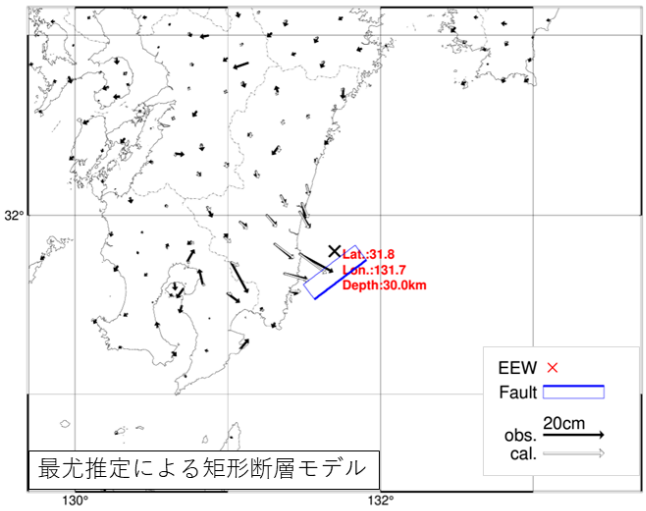
GNSS観測によって得られる変位データに基づき推定されるマグニチュードは、原理上、飽和しない。そのため、特に巨大地震の地震規模の即時推定において優位性を持つ。国土地理院では、2012年から東北大学大学院理学研究科との共同研究の下、国内約1,300点からなるGEONET（GNSS連続観測システム）のデータをリアルタイムに解析し、座標値を推定した上で、地震前後の座標差から有限断層モデルを自動推定する、電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）の開発を進めている。現行のREGARDでは日本海側の観測点を固定点としてリアルタイムキネマティック解析（RTK）を常時実施し、緊急地震速報をトリガーに2種類の有限断層モデル（矩形断層モデル・プレート境界におけるすべり分布モデル）を即時推定している。このうち矩形断層モデルは、最尤推定のほかMCMCを用いた推定を試験的に実施している。REGARDは2016年から本格運用されており、これまで2016年熊本地震や2024年能登半島地震をはじめとした多くの地震において地震発生後数分で断層モデルを推定した上で関係機関へ情報提供を行い、政府内の初動対応等に活用されてきた。2024年8月8日16時43分頃に発生した日向灘を震源とする地震では、推定された地震時地殻変動と有限断層モデル情報が、当日17時30分から臨時に開催された南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会でも活用された。本発表ではこれらの推定結果について報告する。

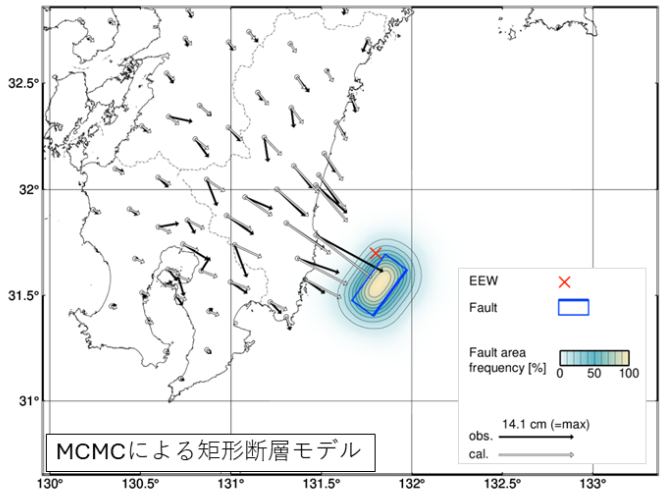
REGARDによって、震源に近い宮崎県南部の電子基準点で東～南東向きの水平方向の地殻変動を推定した。特に震源に最も近い電子基準点「宮崎」では、約9 cmの東南東方向の水平変動が推定された。また、上下については水平と比べて精度は劣るが、震源近傍では沈降する地殻変動が推定された。これらはGEONET定常解析（R5）による後処理解析と比較しておおむね整合する。

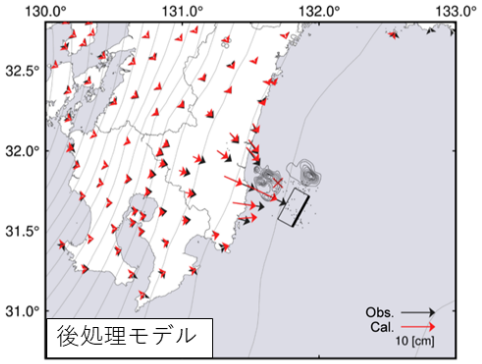
矩形断層モデルの推定では、最尤推定アルゴリズムによって走向が北東一南西の逆断層すべりを持つモデルが地震発生後約2分で推定された。同推定による断層モデルの地震規模はMw6.91であり、これは国土地理院による暫定の後処理モデル（Mw7.10、www.gsi.go.jp/common/000260639.pdf）と整合的である。一方で、推定されたモデルパラメータは、REGARDでは長さ約40 km・すべり角約114度が推定されたのに対し、後処理モデルでは、傾斜角20度に固定した上で、長さ約25 km・すべり角約85度が推定され、両者には差異が認められる。これは、断層推定に用いた変位場のノイズレベルの違い、特に外れ値的な変位の存在、また推定時の断層幾何の拘束の違いが影響していると考えられる。

また、MCMCによる断層モデル（Mw7.15）は地震発生後1分で形状も含めてより後処理モデルとおおむね一致する結果が得られた。加えて、観測点配置や地殻変動場のノイズを反映した推定の不確実性が可視化されている。国土地理院では、今後も断層モデル推定とその入力データとなる座標値算出の高度化を進め、REGARDの精度とシステム安定性の向上に取り組んでいく。

© The Seismological Society of Japan







各モデルの震源断層パラメータ

	Mw	VR [%]	緯度 [度]	経度[度]	上端深さ[km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [度]	傾斜角 [度]	すべり角 [度]	すべり量 [m]
REGARD (最尤推定)	6.91	44.4	31.75	131.91	15.7	40.4	12.7	233.0	25.2	113.9	1.92
REGARD (MCMC)	7.15	52.4	31.55	131.82	24.8	30.0	15.7	215.9	27.8	80.55	4.79
後処理モデル	7.10	80.2	31.72	131.92	18.1	24.5	※	207.1	20.0 (固定)	85.2	3.2

※Mwの計算における剛性率について、REGARDは30GPa、後処理モデルは60GPaと仮定
後処理モデルでは傾斜角を20度、断層長さ:断層幅は3:2に近づくように拘束

図　REGARDが推定した矩形断層モデルと断層パラメータ

© The Seismological Society of Japan

A validation of a procedure of continuous monitoring of unsteady deformation after large earthquakes

*Takahiro TSUYUKI[1], Akio KOBAYASHI[2]

1. Meteorological Research Institute, 2. Nagano Local Meteorological Office, JMA

気象研究所は気象庁本庁と連携し、GNSSデータを用いた日向灘を含む南海トラフ沿いの長期的スロースリップ（SSE）の客観検知の解析結果を南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会に毎月提出している。この客観検知手法は、GNSSの各成分データから直線トレンド、人為的オフセット、地震時オフセット、年周・半年周成分を除去した上で、日本海側の固定領域（南海トラフ沿いの監視の場合には中国地方、九州沿いについては九州北西部）の観測点の共通ノイズを全点から引き去り、フィリピン海プレート沈み込みと逆方向の変位を計算し、1年の傾斜期間を持つランプ関数との相関をとることにより、非定常変位を検知するものである［Kobayashi(2017), 小林(2023)］。

小林（2023）は、南海トラフ沿いで規模の大きな地震が発生した場合に、新たなすべりや緩和的な余効すべりから外れた時間経過のすべりは、引き続く地震に関係する現象として注目すべきとした。一方、Kobayashi(2017)の客観検知手法は、余効変動を含む非定常変位を検知するため、余効変動の中に新たなSSEによる非定常変位が含まれていても区別することが難しく、発生した地震に伴う余効変動を除去した地殻変動の監視が必要になるとして、具体的に余効変動の除去を行いながら監視を行う手順を提案している。

2024年8月8日に発生した日向灘の地震（M7.1）では、地震発生後に宮崎県南部を中心に余効変動と考えられる地殻変動を観測している（国土地理院）。本発表では、小林（2023）によって提案された手法にしたがって余効変動の除去を行い、地震後に別の非定常変位が検知されていないか確認した。地震発生から1か月程度の時点で、余効変動がGNSS日値を用いた非定常変位の検知に与える影響は小さい。今後、同様の手法をGNSS6時間値に適用していくことも検討しながら、地震発生直後の解析を行う上での問題点の検証についても行った。

© The Seismological Society of Japan

CoRrelation Analysis of Crustal Deformation Immediately Before the 2024 Hyuganada Earthquake

*Hiroki TANAKA[1], Ken Umeno[1]

1. Kyoto University, Graduate School of Informatics

We report the preliminary results of the analysis of crustal deformation data immediately before the Hyuganada earthquake in 2024. The area is in the Nankai Trough, where slow earthquakes are observed; the association between slow earthquakes and the occurrence of large-scale earthquakes is under discussion [1]. We used the rapid solutions of crustal deformation data at 5-minute intervals published by the Nevada Geodetic Laboratory (NGL) [2,3]. The displacements of observational stations from their reference point, which was set referring to the method of analyzing the crustal deformation data by Bletery and Nocquet [4], are the object of our analysis. To these displacements before the 2024 Hyuganada earthquake, we applied the method of CoRrelation Analysis (CRA) [5,6,7,8], which has been used to detect anomalies in the Total Electron Content (TEC) in the ionosphere before large-scale earthquakes [9] and has also been attempted to apply to crustal deformation data [10,11]. As a result, high correlation values were observed at close stations to the epicenter about two hours before the earthquake. However, after that high value, it gradually decreases as time approaches to the mainshock occurrence. Such a tendency is different from the accelerated increase in [4] and our results of the CRA for a pre-Tohoku-Oki earthquake [12], which may reflect the difference in pre-slip style in these areas. Also, high correlation values were observed sporadically at a distance from the epicenter. We plan to discuss these trends in the variation of correlation values in relation to earthquake occurrence.

[1] T. Nishikawa, S. Ide, and T. Nishimura, Prog. Earth Planet. Sci. 10:1, 1-51 (2023).
[2] http://geodesy.unr.edu/
[3] G. Blewitt, W. C. Hammond, C. Kreemer, Eos 99 (2018).
[4] Q. Bletery and J.-M. Nocquet, Science 381(6655), 297–301 (2023).
[5] T. Iwata and K. Umeno, J. Geophys. Res.: Space Phys., 121(9), 8969–8984 (2016).
[6] T. Iwata and K. Umeno, J. Geophys. Res.: Space Phys., 122(3), 3602–3616 (2017).
[7] S. Goto, R. Uchida, K. Igarashi, C. H. Chen, M. Kao, and K. Umeno, J. Geophys. Res.: Space Phys., 124(11), 9239–9252 (2019).
[8] K. Umeno, R. Nakabayashi, T. Iwata and M. Kao, Open J. Earthquake Res., 10(4), 105–137 (2021).
[9] K. Heki, Geophys. Res. Lett., 38(17) (2011).
[10] H. Tanaka and K. Umeno, Poster presented at JpGU Meeting (2023).
[11] H. Tanaka and K. Umeno, Poster presented at AGU Fall Meeting (2023).
[12] H. Tanaka and K. Umeno, EMSEV Meeting, October (2024).

© The Seismological Society of Japan

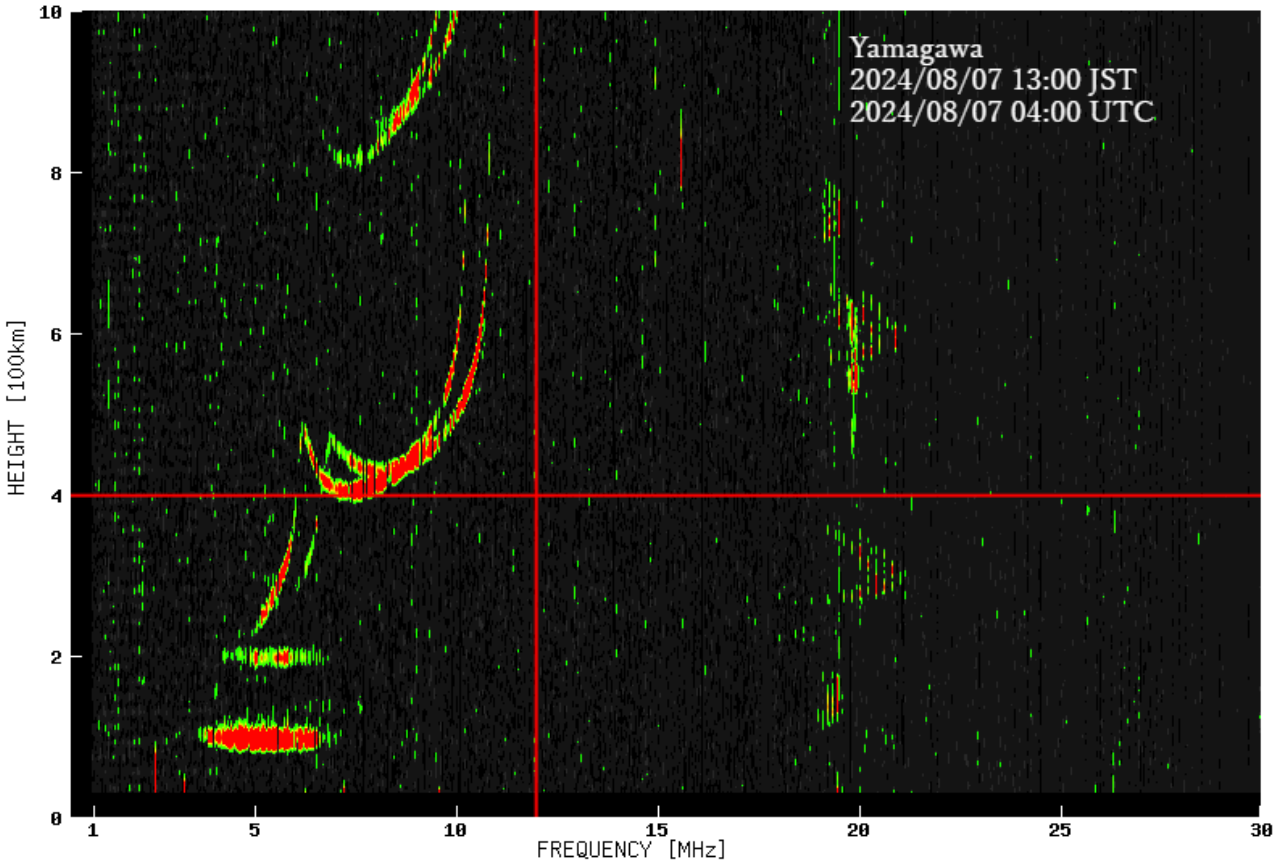
Geomagnetic pulsations amplified by magnetic storms and resonance phenomena caused by crustal discharges

*kimio uchino[1]

1. himawarinowa.lab

1,はじめに
連日のような太陽フレアの発生とその影響によると思われる猛暑の最中、いつものように「宇宙天気予報」の画像にマウスを走らせていた。何層もの平行に伸びる磁気嵐による定常波が現れていた。空を見上げると、いつ地震が発生してもおかしくない雲模様。「大きな地震が近い」と感じてEs層にチェックを入れていた。宮川観測所のデータに見たことがないような水平な弱い定常波が2本描き出されていた。
2,地球の何倍もの大きさの太陽フレアの放出する高エネルギーはジオスペースを暴れまくる。
a.地磁気圏内に到達した電波、Ｘ線、極端紫外線などの電磁波は、バンアレン外帯（プラス荷電粒子）、バンアレン内帯（マイナス荷電粒子）、電離層（プラズマ粒子、イオン粒子）、大気層（中性分子が主流、上部一部イオン化）へと到達し、各層を活性化する。⇒8月2日、4時55分UTに太陽面で4のLDE（継続時間の長い放射）フレア、4日10時時５０分UTM1.9のLDEフレア、8月5日15時27分UTにX1.７の巨大フレアがそれぞれ連続的に発生する。尚、8月2日のフレアは同日の7時30分にデリンジャー現象（突発性電離層擾乱）を起こす。
b.高速プラズマ粒子の到来は地球磁力線を一段と活性化させて、磁気嵐を誘発する。⇒8月4日、3時UTに緩始型磁気嵐が発生し、地磁気水平成分最大変量約117ｎT、5日17時UTに終了する。8月5日午後から6日午後にかけてプロトン（10、50、100MeVproton）をGOES衛星が観測する。8月4日の午前から5日の午前にかけてのKインデックス4から５が6回出現、地磁気擾乱を示唆する。
c.イオノゾンデ観測で磁気嵐による地球磁力線の擾乱が観測される。⇒8月6日、9時30分UTに地磁気擾乱が始まる。
d.スポット的な磁気擾乱が観測される。⇒８月７日、宮川観測所のデータから、高さ170㎞付近に約17MHzから22MHzの振動数を持つスポット的な共振現象と思われる磁気擾乱が発生する。日向灘地震の発生場所付近の地殻プレートから放射された電場と上空の電離層を振動する地磁気脈動との共振による水平磁力線と考えられる。（地震発生36時間前）、同日6時30分に400㎞上空付近、800㎞付近にスポット的な約14MHz～22MHｚの弱い磁気擾乱がみられる。
e.8月7日、4時UTに増幅された地磁気脈動と地殻から放電された電場とが、20MHz帯付近で高度300㎞、600㎞にスパイラル状態に共振し、弱い磁場を発生させている。14時間後に発生する地震の震源付近の上部と思われる。 f.同日10時30分、宮川観測所に近い上空に、8月5日から6日にかけて到来した荷電粒子プロトン（10、50、100MeV）がプラズマの運動エネルギーを大幅に加速させる。この高速プラズマが立体的に定常波を100㎞付近から900㎞付近までの電離層に何層もの定常波を形成している。平行平板コンデンサーの蓄電機能に近い。絶縁体としての大気は大きなエネルギーを蓄える。地磁気脈動や地殻はコンデンサーの上下平板としての役割を持つ。地殻の海洋型プレートの自由電子を増幅、放電させて、歪を開放する。8月8日７時43分UT、1の日向灘地震の発生である。
3,磁気嵐と巨大地震を結び付ける新しい手法としてを提案したい。地球も太陽の放射する波動エネルギーによって運動している。地球の自転は、ダイナミックな地磁気脈動を生み出す。そのダイナミックなエネルギーは巨大地震の源でもある。地磁気脈動の解明から地震予測の可能性を高めていきたい。参照資料　NICTー国立研究開発法人情報通信機構

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Real-time Disaster Prevention Warnings for Nankai Trough Megathrust Earthquakes and Tsunamis Using Physical Wavelets

*Fumihide TAKEDA[1,2]

1. Takeda Engineering Consultant, 2. Earthquake Prediction Institute

要旨

内閣府防災課や評価委員会は、東北沖巨大地震と津波の予測失敗の原因を十分に解明しないまま、従来の統計的手法を用いた南海トラフ巨大地震のシナリオを策定した。これに基づき、2024年8月8日の日向灘地震（M7.1）後、気象庁は「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）」を発表したが、このシナリオの科学的検証は不十分で、地域社会に経済的損失を与えた。例えば、松山道後温泉旅館の宿泊キャンセルが相次ぎ、経営に大損害を与えた。このような損害防止のため、科学的根拠のある新たな決定論的予測技術を多分野から取り込む必要がある。

2011年東北巨大地震や2024年能登半島地震の予測と地震防災警報発令も可能とした物理的ウェーブレット（PW）を用い、台風防災警報と類似した巨大地震・津波防災警報の確立された技術を紹介する[1-5]。

気象庁は台風発生と進路予測を行い、1～2週間前から警報を発令する。これと同様に、PWを用いることで、巨大地震や津波の生成プロセスを長期的に監視し、1～3ヶ月前からリアルタイムの防災警報を発令することが可能となる。

PWは、1980年代後半から、地震学と無縁な産業分野の異常予知診断と異常によるシステム破壊防止目的に開発、実用化したリアルタイム異常予知診断・破壊防止システム装置の頭脳である。異常予知診断時、ノイズだらけの信号から微弱な予兆を抽出し、その予兆に物理法則を与える。従って、物理情報を取り入れた機械学習(PIML)にも組み込み可能で、あらゆる自然災害の生成過程の物理法則を明確にし、防災警報発令の強力な支えとなる[5]。

決定論的物理モデル

安芸敬一氏は、2004 年 10 月にスペインで開催された、古い観測所の 100 周年を記念した国際会議で、大地震予測において統計的手法だけでなく、決定論的モデルが必要であると強調した。彼は、地殻変動の延性部分からの微弱な信号を捉えることが、正確な大地震予測と災害軽減に不可欠であると指摘した[2]。

物理的ウェーブレット（PW）

PWは、地殻変動の延性部分からの微弱な信号を捉えることができ、日本の地震計とGPSネットワークで収集した時系列データに存在する巨大地震や大地震の生成過程に明確な物理法則を与えてきた強力な数学演算子である[1-5]。

例えば、地震活動を時系列データに変換するとランダムに変化するが、PWは、最大3か月先までの大地震の位置、サイズ、断層の動き、発生日を物理法則で予測できる[2,3]。

PWは、GPS観測における環境ノイズだらけの地殻変動時系列データからも大地震、巨大地震の発生と津波の生成過程を、発生2~3ヶ月前から予測し、最大、発生3ヶ月先までの日々の津波災害警報発令を可能とする[1-5]。

地震観測網で検出された各地震イベントには、震源 (緯度 LAT、経度 LON、深さ DEP)、発生時刻 (イベント時刻)、マグニチュード MAG のプロパティがある。連続するイベントの時刻の間隔は、イベント間隔 (INT) となる。座標軸 c = LAT、LON、DEP、INT、MAG の 空間では、イベントを単位質量の仮想地震粒子とみなすと、次のイベントで、地震粒子は新しい場所に移動する。その動きはブラウン運動の様になり、時間履歴を {c}={d (c, 1), ., d (c, m), . } で表示すると、d(c, m) は時間 m における粒子の位置、時間は、時系列イベント インデックス m となる。d(c, m) は確率的だが、その位置情報は領域の主応力の3成分を含み、MAG Mc (Mc ≈ 3.5) のイベントを選択すると、主応力に付随する確率的ノイズ レベルが約 15 ～25% に低下する[2]。 PW と {c} の相互相関により、時間 τ でのノイズゼロの変位 D (c, τ) と加速度 A(c, τ) を定義できる。すると、地震

© The Seismological Society of Japan

活動は周期方程式 A(c, τ) = −K(c)×D (c, τ) で表せ、K(c) はインデックス時間 τ に弱く依存する正の定数となる。
A(c, τ) は、大地震や巨大地震の生成プロセスを明らかにできるので、正確な発生日を予測できる歪みエネルギーの密度 サイクルと共に利用し、大地震や巨大地震発生日を予知できる[1-5]。
PW は、GPS ステーションで観測された環境ノイズだらけの変位 {c}={d (c, 0), ., d (c, j), .} から、巨大地震と津波の物理法則に基づく生成過程を検出できる。d (c, j) は時刻 j （日数）における日々の変位で、座標軸は c = (E, N, h) で、E (東向き)、N (北向き)、h (上向き)となる[1]。

結論

物理的ウェーブレットによる予測は、従来の統計的手法では不可能である地震活動と地殻変動に出現する微弱な決定論的巨大地震の生成プロセスをリアルタイムで捉える事ができ、物理法則に基づいた巨大地震・津波防災警報の発令を可能にする。これにより、社会的混乱や経済的損失を最小限に抑え、より信頼性の高い防災対策を提供する。

参考文献

1. https://arxiv.org/abs/2107.02799
2. https://arxiv.org/abs/2201.02815
3. https://arxiv.org/abs/2208.09486
4. https://www.youtube.com/@Epi21Tec21
5. https://www.epi21.org　https://www.tec21.jp

© The Seismological Society of Japan

T-wave propagation associated with the Hyuga-nada Earthquake

*Ryoichi IWASE[1]

1. JAMSTEC

2024年8月8日に発生した日向灘の地震では、海底地震観測網である気象庁の東南海ケーブル式常時海底地震観測システム、紀伊半島から室戸岬の沖合にかけて設置されている防災科学技術研究所のDONET及び日本海溝沿いに設置されている同S-netの房総沖周辺の観測点において、深海サウンドチャネル(SOFAR)を伝搬したT波が観測されている。これに加え、伊豆・小笠原諸島及び南西諸島の陸上に設置された気象庁の一部の地震計でもT波が観測されている。
今回のような規模の地震以外では、通常、T波の信号レベルは陸上の地震計で観測されるほど大きくないが、陸上の観測点で極めて顕著なT波が観測された事例として、2023年10月9日早朝に発生した鳥島近海の地震が記憶に新しい。この時に各観測点において検出されたT波の到達時間差を比較すると、日本海溝沿いに設置されたS-netに比べ、DONETや南西諸島の陸上観測点におけるT波の遅延が大きい。加えて特に南西諸島の観測点ではそのばらつきも大きい。
一方、今回の日向灘の地震に伴って観測されたT波は、鳥島近海の地震に伴うT波に比べて、デュレーションが大きい点に注意する必要があるが、ばらつきが小さいものの、気象庁の伊豆・小笠原諸島の観測点では到達時間が早い傾向がみられる。この2つの事例の対比から、日本の南岸沖海域におけるT波の伝搬は、西向きの伝搬に際して遅延が大きく、東向きの伝搬に際しては逆に早まることが推察される。その要因として黒潮の影響が考えられる。
この2つの事例では伝搬経路が同一ではないことに注意するも必要があるため、他の地震に伴うT波の観測事例の調査も含め、今後詳細に検討する。

謝辞
本研究の実施に際し防災科学技術研究所の公開データ(https://doi.org/10.17598/NIED.0007、https://doi.org/10.17598/NIED.0008、気象庁観測データ)を利用しました。伝搬距離の計算には国土地理院のサイト(https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html)を利用しました。

© The Seismological Society of Japan

Earthquakes in the Early Modern Era with epicenter in Hyuga-nada

*Rei Mizuno[1], Yasuyuki Kano[2], Masaharu Ebara[1]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Univ. of Tokyo

2024年8月8日，日向灘を震源とするM7.1・最大震度6弱の地震が発生した．地震本部による日向灘で発生する地震を参照すれば，〈ひとまわり小さい地震〉に該当しよう．この地震の平均発生間隔は，1919年以降の103年間に5回となっている（地震本部2022）．
一方，歴史時代発生の地震で震央日向灘として確定的なのは，1662年10月31日（寛文二年九月二十日）発生の外所地震と，1769年8月29日（明和六年七月二十八日）発生の豊後・日向で被害が出た地震の二つのみである（地震本部2022）．20世紀以降の発生間隔から考えれば少なく，地震発生履歴の構築が求められる．しかし，九州南部は既刊地震史料集では史料調査が行き届いていない地域といえる．本報告では，近年の調査で新たに見つかった史料を踏まえて，日向灘を震央とする可能性をもつ地震の発生履歴を示す．一部成果については（水野ほか2023，以下前稿）として公表しており，その後の調査成果を含めたものとなる（以下，既刊地震史料集にない新出地震記録は下線を付す）．
まず19世紀前半の九州の比較的広域に有感記録をもつ地震か，もしくは九州南部に震動記録をもつ地震を中心にみる．
1815年4月25日（文化十二年三月十六日）地震は，高鍋，臼杵・大分，佐賀に有感記録がある．
1817年2月2日（文化十三年十二月十七日）地震は，佐賀，福岡，阿蘇，臼杵，広島，伊予小松で有感，かつ佐賀では強い震動を記録する．臼杵でも城内検分が行われており，震動の強さをうかがわせる．
1835年5月18日（天保六年四月二十一日）地震は，被害は発生していないものの，「大地震」を鹿児島，都城，阿蘇，高知，宇和島，善通寺で記録し，九州各地および東は岐阜や三重まで同時刻帯に発生記録をもつ．しかし前稿以降，紀伊田辺に「大地震」の記録を見出したため，地震像に検討の余地を残す．
1843年6月1日（天保十四年五月四日）地震は鹿児島，都城，阿蘇高森で「大地震」の記録が，佐賀と阿蘇南郷にも有感記録がある．
1844年6月24日（弘化元年五月九日）地震では，延岡と都城で家屋・土蔵に被害が出ている．各地の震動状況は，鹿児島・重富，三股・高原で二度の「大地震」が，臼杵も震動は大きく，熊本県域は「地震」が，佐賀・鹿島・嬉野で「大地震」が記録されている．このほか，朝倉・小倉，広島，伊予小松，萩などで有感記録がある．この地震における留意点は佐賀での「大地震」の記録で，九州南部の地震と同時刻帯に発生記録があるとはいえ，九州南北に「大地震」が記録される点は，別の地震だった可能性を残す．翌25日（五月十日）にも九州南北で地震が記録されている．
1848年2月7日（嘉永元年正月三日）地震は，高千穂で「大地震」が，加治木で「地震」が記録されている．1848年6月3日（嘉永元年五月三日）にも鹿児島，佐賀牛津に「大地震」の記録がある．
以上が，19世紀前半における日向灘を震央とする可能性をもつ地震となる．また，当該時期に鹿児島は比較的地震記録があり，鹿児島単独の記録として，1842年7月22日（天保十三年六月十五日）「大地震」，1843年10月7日（天保十四年九月十四日），1846年9月19日（弘化三年七月二十九日），1848年5月20日（嘉永元年四月十八日），1849年3月31日（嘉永二年三月八日），1850年3月18日（嘉永三年二月五日）がある．宮崎では同時期の新出記録はなく，課題となる．
一方，18世紀以前における九州南部での地震記録については，鹿児島では既知の地震は非常に少なく，1596年9月（慶長元年閏七月），1662年10月30日（寛文二年九月十九日）外所地震，宝永南海トラフ地震のみである．これに新出記録として，1609年2月3日（慶長十三年十二月二十九日）「大地震」，1609年9月17～20日（慶長十四年八月十九～二十二日）「大地震」，1650年7月4日（慶安三年六月六日）「大地震」，1728年7月9日（享保十三年六月三日）被害地震，1744年9月13日（延享元年八月七日）を追加できる．
宮崎では被害地震も知られており，1680年12月28日（延宝八年十一月八日）飫肥城被害，1684年12月22日（貞享元年十一月十六日）飫肥城被害，1698年10月24日（元禄十一年九月二十一日）大分・高鍋被害の地震

© The Seismological Society of Japan

がある．これに宇和島での「余程強」地震記録を追加できる．高鍋では1699年7月21日（元禄十二年六月二十五日）にも被害地震があり，翌1700年9月17日（元禄十三年八月五日）にも相応の地震が発生している．同時期，宇和島でも毎年複数回ずつ地震が記録されており，さらなる検討が求められる．新出の地震記録としては都城での1792年9月7日（寛政四年七月二十一日），1792年10月17日（寛政四年十月十七日），1793年5月15日（寛政五年四月六日）の有感記録がある．

18世紀以前の地震は単独の記録が多く，日向灘地震ではない可能性が多分にあり，地震記録の集積と分析は今後の課題となる．一方，19世紀前半は歴史地震記録の集積が進み，1840年代前後は九州南部の地震記録が比較的多い時期といえる．

© The Seismological Society of Japan

On the probability of an M7-class earthquake in Hyuganada region to trigger an M8 or larger earthquake

*Yo FUKUSHIMA[1], Tomoaki Nishikawa[2]

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

2019年5月から運用されている南海トラフ地震臨時情報（以下、「臨時情報」）発表の仕組みにおいては、日向灘地域を含む南海トラフ地震想定震源域内でMw7.0以上8.0未満（以下、「M7クラス」）の地震が発生した場合に臨時情報（巨大地震注意）が発表されることになっている。人は一般に、種々の認知バイアスはあれど、ある事象が起こるリスク（確率と起こった場合の事の重大さ）と何らかの対応行動を取るコストを無意識的・意識的に比較してその事象に対する態度を決め、行動するため、臨時情報が発表された場合の巨大地震発生の確率に関連して社会に知らされる数字は、個人や組織の対応行動に大きな影響を与えうる。本研究では、2024年8月8日に日向灘で発生したMw7.0の地震により、はじめて臨時情報（巨大地震注意）が発表されたことを受け、その際に目安として示されていた確率の妥当性や不確実性について検討した。

国は、M7クラスの地震が発生してから一週間以内にM8クラス以上の巨大地震（以下、「M8+地震」）が発生する確率について、「数百回に１回程度」（根拠となる数字から確率を計算すると、0.4%）という目安を示していた。この目安については、Fukushima et al. (2023, Scientific Reports) の追試的な解析により、概ね妥当であったことが示されている。しかし、目安となる数字は世界の事例から統計的に算出されたもので、これが日向灘地域における数字として妥当かどうかについては明確な答えがあるわけではない。地震の起こり方には、普遍的な法則があるとともに、場所に固有な性質があるからである（例えば、大きな地震は必ず余震を伴うが、余震活動が大変活発な場合も、余震活動がすぐ収束する場合もある）。上述の目安として示されている確率は、あくまで、世界で起こる地震の連鎖性に関する特徴が日向灘地域にもある程度は成り立っているとの前提での話であるということに留意する必要がある。

日向灘地域での確率を統計的に評価するには、日向灘地域で過去に起きた地震の発生履歴を用いる必要がある。日向灘地域においては、17世紀以降現在までにM7.0以上の地震が８回起こり、いずれも後続する巨大地震が伴わなかったことが知られている（1662年の地震はM8クラスだった可能性が最近指摘されたが、ここでは簡単のためそれは考慮しない）。「８回中0回」という事実からM7クラスの地震に続いてM8+地震が一週間以内に近隣で発生する確率の95%信頼区間を計算すると、0%～37%となる。つまり、純粋に統計理論に頼ると、標本数が少ないために、大きな不確実性は不可避である。

一方、国が示していた目安となる確率の根拠となった過去のM7クラスとM8+地震の連発事例は、チリ沈み込み帯など、いずれもプレート間の固着が強く、M7～M8クラスの地震が多く発生する地域で発生していた。日向灘地域は、プレート間固着は比較的弱い（つまり、定常的にすべっている領域が相対的に大きい）し、M7クラスの地震は多いがM8クラスの地震はほとんど知られていないということから、過去の事例があった地域と比べ、M7クラスとM8+地震の連発は起こりにくいという仮説が提示できる。今後、確率評価の不確実性を減らしていくためには、プレート間固着解析の解像度向上、地震発生シミュレーションの活用などを進め、M7クラスとM8+地震の連発の起こりにくさを定量化するような試みが必要であろう。

© The Seismological Society of Japan

VLFE Activity in and around the Focal Area of the 2024 Hyuga-nada Earthquake

*Youichi ASANO[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2024年8月8日に発生した日向灘の地震（M7.1）の震源域周辺では，M7.1の地震の発生後に浅部超低周波地震活動が発生した。本研究ではこの活動の時空間発展とともに，周辺域を含めた過去の活動との比較を行う．　データは，防災科研の広帯域地震観測網（F-net）の記録に加えて，鹿児島大学と実施している臨時観測の記録を使用した．ここでは2003年～2024年8月の観測記録に対してAsano et al. (2015, GRL)による波形相関解析法を適用し，既知イベントと似た記録波形を持つ未知イベントを検出して位置決定した．既知イベントとしては，モーメントテンソル解を推定することが可能な地震・超低周波地震22イベントを使用した（うち，１イベントは2024年8月の超低周波地震）．地震と超低周波地震との識別は，防災科研の震源カタログとの照合によって行った．　解析の結果，M7.1の地震の発生後に，日向灘を中心として北東側は足摺岬の南（宮崎県東方はるか沖）から奄美大島北東沖にかけての広い範囲で超低周波地震活動が起きていたことが分かった．地震発生直後は，M7.1の地震による後続波の振幅レベルが大きいため，それを超えるレベルの超低周波地震が検出され始めたのは8月9日0時頃であり，この9日のうちに，足摺岬の南や奄美大島北東沖を含む広い範囲で超低周波地震が検出された．これまでにこの地域で検出されてきた超低周波地震活動では，最初に活動が開始した地域から移動速度10～20km/日で活動域が拡大するマイグレーションが観測されてきた．しかし，今回の活動は短時間のうちに広い範囲で開始しており，地震時すべりによる静的応力変化や地震の揺れによる動的応力変化などよってほぼ同時にトリガーされたゆっくりすべりが，トラフ・海溝近傍で広域にあったものと推察される．　このように広い範囲で活動がみられたものの，活動の推移は一様ではなく，セグメント構造も見られる．すなわち，8月9日から日向灘から足摺岬の南で活発であった活動は16日頃にはほぼ収まり，22日以降に再び活動がやや活発になるも，この時期の活動の中心は大隅半島南東沖から種子島東方沖へと移った．このことから，今回の超低周波地震活動においては，日向灘でのすべりが先行して，近接する南の超低周波地震活動域に応力集中をもたらし，ここが遅れてすべったものと考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Large-scale activity of very low-frequency earthquakes following the 2024 Hyuganada earthquake

*Naoki SUDA[1]

1. Earth and Planetary Systems Science Program, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

2024年8月8日に発生した日向灘地震(M7.1)の震源域に近い浅部プレート境界には浅部超低周波地震(SVLFE)の活発な発生域があることが知られている(e.g. Asano et al. 2015)。この領域で今回の地震に続いてSVLFEの活動が活発化したことが防災科学技術研究所によりアレイ解析法(Asano et al. 2008)とテンプレート相関法(Asano et al. 2015)を用いて発生から数日後に示された。本研究ではこれまでに開発したバンドパス波形に対する相関法を用いて活動の詳細を明らかにしたので報告する。

一般に相関法では2観測点の波形から求めた相互相関係数の最大値を与える時間差を走時差データとして扱う。しかし狭帯域の波形では真の走時差に対して卓越周期の整数倍のずれが生じてしまうcycle skippingがしばしば起こる。また表面波の放射パターンにより2観測点で波形の極性が逆の場合もある。本研究の相関法では相互相関係数の極大値を与える複数の時間差を扱い，理論的な走時差との差を評価することでこれらの問題を克服している。使用したデータは紀伊半島・中四国・九州の27観測点からのF-net広帯域地震計記録の上下動成分で，20-50秒のバンドパスフィルターをかけてサンプリング間隔を1秒とした。解析は長さ300秒の解析区間を150秒ずつずらして連続的におこなった。理論走時差は波の見かけ速度を3.8 km/secとして計算した。求められた震央はブートストラップ法による標準誤差が7.5 km以下のものを結果として採用した。

活動期間は8月9日～16日と21日～29日の二つに分かれており，検出数はそれぞれ約800と約360であった。前半の活動では，震央は地磁気異常から推定される大規模な海山の沈み込むフロントを縁取るように分布していた。活動は南西-北東ラインで見たとき南西から開始して北東方向に足摺岬南方まで伝播した。これらの特徴は2010, 2015, 2023年に発生した大規模な活動と同様である。ただし活動開始から活動域の北東端に到達するのに要した時間は，これまでの大規模活動では20-30日であったのに対し，今回はわずか4日であった。これは活動の拡大速度が速かったわけではなく，活動が広範囲で同時に開始したことによる。また活動度は1日スケールでは最後の16日を除くとほぼ一定であった。後半の活動は前半に比べて不活発で，前半とは逆に活動は北東から開始して南西方向に伝播した。25日にはそれまでの活動域とは離れた種子島南東沖で活動が見られた。その後台風10号が活動域に最接近した29日0時の前後数時間に活動域の南西部で最後の活発な活動が見られた。

大規模なSVLFE活動は背景で発生しているスロースリップイベントのすべり域拡大を表している(Asano et al. 2015)。遠方の観測点でも信号が明瞭に捉えられるSVLFEのモニタリングは，プレート境界浅部における「通常と異なるゆっくりすべり」の監視手段として有効である。

謝辞：本研究ではF-netの記録を利用しました。防災科学技術研究所の関係各位に感謝します。

© The Seismological Society of Japan

Toward monitoring of tectonic tremor occurred along the Nankai trough using N-net

*Takayuki MIYOSHI[1], Kazuaki Ohta[1], Takanori Matsuzawa[1], Youichi Asano[1], Takashi Kunugi[1], Tetsuya Takeda[1], Shin Aoi[1]

1. NIED

2024年8月8日16時43分頃に日向灘を震源とするM$_J$7.1の地震（以下、日向灘の地震）が発生した。気象庁は同日の19時15分に南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）を発表し、政府は同月15日の17時まで「特別な注意の呼びかけ」を行った。防災科学技術研究所（以下、防災科研）では、陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）等のデータを用いてさまざまな地殻活動のモニタリングを実施している。2019年より高知県沖から日向灘に構築を進めてきた南海トラフ海底地震津波観測網（N-net）の二つのサブシステムのうち、2024年7月から沖合システムの試験運用を開始した。日向灘の地震発生時はN-netは試験運用中で、さまざまな地殻活動のモニタリングの準備を進めていた。

西南日本では、高感度地震観測網（Hi-net）のデータ解析により陸域において深部低周波微動が発見され（Obara 2002）、その活動がモニタリングされている(Maeda and Obara 2009; Obara et al. 2010)。紀伊半島沖から室戸岬沖にかけての海域においては、地震・津波観測監視システム（DONET）を用いて、エンベロープ相関法（Ide 2010; Ohta et al. 2019)により微動活動を網羅的に検出した（例えば、太田2021）。加えて、微動のエネルギーの空間分布（太田ほか 2022）や、DONETによる微動の検知能力（太田 2023）等の検討を行ってきた。また、日向灘ではHi-net及び広帯域地震観測網（F-net）のデータ解析によって超低周波地震が発生していることが明らかになっていたが（Asano et al. 2008; 2015）、自己浮上式海底地震計のデータ解析によって浅部の微動活動も明らかになっている（Yamashita et al. 2015）。これらの深部と浅部の微動は南海トラフ地震の想定震源域で発生するものであることから、その活動状況は南海トラフ地震臨時情報を発信するうえで重要な情報となり得る。防災科研では日向灘の地震後、MOWLASを活用したスロー地震のモニタリング成果を気象庁や地震調査委員会に随時報告したが、南海トラフの微動活動に対してはN-netの波形を示すにとどまっていた。本研究では、南海トラフ地震臨時情報へ貢献することも視野に早期にモニタリングを行うことを目的の一つとし、試験運用中のN-net沖合システムのデータを用いて南海トラフ浅部微動の検出と微動源の決定を試みた。

使用したデータは、N-net沖合システムの18観測点に整備された速度計3成分で、対象期間は2024年7月から8月とした。陸域および海域での微動の卓越周波数を参考に、連続波形に対して2-8Hzのバンドパスフィルタを適用し、目視によって波形を確認した。7月1日から日向灘の地震発生前には微動と思われる波形は確認できなかったが、日向灘地震の発生後に、日向灘から南海トラフ付近に設置した観測点で振幅が比較的小さいにもかかわらず継続時間の長い（１分以上）、微動と考えられる波形が確認できた。また、DONETでの微動モニタリング（太田 2021)と同様の手法を、同期間のN-net波形データに適用し、微動の検出と微動源の決定を行った。さらに、震源決定されたものに対し、既存の地震カタログと照合し、微動、地震、エアガンといった分類を行った。その結果、日向灘地震の発生後に微動が検出され、日向灘から南海トラフの海域に微動源が決定された。これらは試行的な結果であるものの、超低周波地震の解析結果や、地震波形との比較から、同領域の微動を捉えていることは確実といえる。

© The Seismological Society of Japan

Rapid identification of earthquake information based on three-dimensional seismic velocity structures and their utilization

*Katsuhiko SHIOMI[1], Shunsuke TAKEMURA[2], Makoto MATSUBARA[1], Takeshi KIMURA[1], Shoji SEKIGUCHI[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

南海トラフ想定震源域周辺で大地震が発生した場合，その地震の発生場所によって「南海トラフ地震臨時情報」の発表に大きな影響を与える．一方，南海トラフ海域は地下の比較的浅部に複雑な形状をしたフィリピン海プレート（PHS）が存在するため，一次元地震波速度構造（1D構造）に基づいてその震源位置や発震機構解を正確に求めることは難しい．例えば，現在ではプレート境界で発生した地震と評価されている2016年4月1日の三重県南東沖の地震（M_{JMA}6.5）だが，通常の震源決定で用いる1D構造を用いてこの地震の震源位置を求めると，PHS上面深度よりも有意に深く求まる．これはこの海域の特徴的な地下構造に起因する．また，1D構造により求めた初動解は正断層型を示すが，1D構造では海洋モホ面をヘッドウェーブとして伝播する地震波をうまく表現できないためである（Takemura *et al.*, 2016）．これらの問題を回避するためには，三次元地震波速度構造（3D構造）を用いた震源決定並びにCMT解析の実施が不可欠である．

CMT解の推定

Takemura *et al.*（2020）は，西南日本周辺で発生した地震に対してJIVSM（Koketsu *et al.*, 1992）に基づくグリーン関数を用いたCMT解析を実施することで，とりわけ海域で発生する地震の発震機構やセントロイド深さが，従来のカタログより正確に把握可能となることを示した．この成果を踏まえ，防災科研では，Takemura *et al.*（2020）により整備されたグリーン関数並びにCMT解析用プログラムを活用した自動処理システム整備を進めている．Hi-netシステムの震源情報を初期震源としてCMT解析を開始する．解析にはF-netの広帯域地震計記録を用いるが，一定以上の振幅を記録した観測点では速度型強震計記録に差し替える機能を加えた．また，予め用意したリストに基づき故障観測点を除去する機能，地震計及び収録装置の特性を補正する機能も追加した．さらに，1 Hzサンプリングの波形データで処理を行うことで，計算時間の大幅短縮を実現した．なお，仮運用中の現時点では，解析帯域は25～100秒に固定している．

震源位置の推定

現在，文科省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」において，3D構造を用いた自動震源決定システムを構築している（汐見・他, 2022）．本システムは，防災科研が運用する自動震源決定システムにより得られた震源情報を受信し，その情報が解析対象範囲等の計算条件に合致した場合に自動起動する．震源計算方法として，既存のPseudo-bending法（Koketsu & Sekine, 1998）により走時を逐次計算する方法のほか，予め走時表を整備し，参照する方法(例えば，関口, 2010）も採用している．3D構造として，海陸の観測データに基づくトモグラフィ解析結果（Matsubara *et al.*, 2019）や本プロジェクトで新たに整備した速度構造モデルを用いている．計算方法や計算に用いる3D構造，計算パラメタ等に応じて独立したサブシステムを構成させることとし，各サブシステムには1台の仮想マシン（VM）を充当している．なお，2003年以降に発生した地震について，Matsubara *et al.*（2019）の3D構造に基づく震源再計算を行い，カタログとして整備済みのため，即時的な利用にはMatsubara *et al.*（2019）の3D構造を用いた結果を採用することとしている．

「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」臨時会への対応

以上の自動解析システムはいずれも整備中であるため，随所で担当者によるオペレーションを必要とするが，2024年8月8日の日向灘の地震発生後，直ちに作業に着手することで，3D構造を用いたCMT解析結果を含む臨時会資料を地震発生から1時間程度で評価検討会事務局に提出することが出来た．さらに，3D構造を用い

© The Seismological Society of Japan

て再決定した地震発生後1.5時間分の余震活動を背景に追記した資料に更新，こちらも臨時会開催中に提供することが出来た．
今回は平日日勤帯に発生した地震のため直ちにオペレーションに入れたが，今後，処理の自動化，安定化を早急に進める必要がある．また，能登半島地震等を踏まえ，より大きな地震が発生した場合に想定される障害等も検討し，その回避策あるいは新たなアプローチも検討する必要があると考えている．

謝辞：本研究の一部は，文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している．当該地域の震源決定においては，気象庁・京都大学防災研究所・高知大学・九州大学・産業技術総合研究所等の観測データを使用した．

© The Seismological Society of Japan

AIST's geodetic monitoring for Nankai Trough Earthquake Extra Information (Megathrust Earthquake Attention)

*Yuichi KITAGAWA[1], Satoshi ITABA[1], Tadafumi OCHI[1], Suguru YABE[1], Norio MATSUMOTO[1], Tsutomu KIGUCHI[1]

1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST

産総研では南海トラフでの巨大地震の短期・中期予測研究のために紀伊半島～四国～九州周辺に地殻変動観測のための観測点の整備を進めている．これらの観測点では，深度の異なる3つの井戸（30m，200m，600mが標準）を掘削して観測機器を設置し，地下水や歪・傾斜・地震動の観測を行っている．近年は特にプレート境界で発生する深部短期的SSEのモニタリングを重点的に実施し，今後発生すると予測される南海トラフ巨大地震に向けた準備過程の解明を目指している．産総研の観測データのうち，歪データは2020年6月より気象庁による常時監視の対象にもなっており，「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」や南海トラフ地震臨時情報の発出にも貢献している．
2024年8月8日16時42分頃に日向灘を震源とする，プレート境界型の低角逆断層メカニズムを持つM7.1（気象庁速報値）の地震が発生した．この地震を受け，気象庁は臨時の評価検討会を開催し，南海トラフ地震の想定震源域で大規模地震が発生する可能性が平常時に比べて相対的に高まっているとして「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）」を発表した．産総研では，地震発生から南海トラフ地震臨時情報による特別な注意の呼びかけが終了した8月15日夜までの間，歪・水位データの確認や短期的SSEの解析等を継続的に行い，評価検討会や気象庁への情報提供を行うことによって，南海トラフ地震臨時情報の発出や南海トラフ地震関連解説情報の提供に貢献した，本発表では，今回の取り組みの概要を発表するとともに，今後の改善点などについて議論する．

日向灘の地震に対する産総研の地殻変動モニタリングの取り組み概要

2024/08/08
・地震発生・南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会（臨時）の開催通知を受けて，関連する産総研職員の緊急招集連絡
・北川が南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会（臨時）に出席するとともに，他の職員は観測データの確認を実施

2024/08/09
・６時間ごとにデータの確認を実施
・一部観測点で地震後に歪変化が観測されたが，過去に観測された地震後の変化と同様であり，プレート境界のすべりに伴うような広域の地殻変動ではなく，観測点周辺での環境変化（地下水流動や応力場の変化等）の可能性が高いと判断

2024/08/10～15
・半日ごとにデータの確認を実施
・紀伊半島周辺の観測点で認められた歪等の変化から短期的SSEの発生を確認し，断層モデルの推定を実施．過去にも同様な短期的SSEが発生してきた範囲であり，より浅い側のプレート間固着が強い領域への広がりは示唆されないことを確認
・一部の歪変化は磁気嵐によるものと判断

2024/08/15夜～
・特別な注意の呼びかけの終了に伴い，緊急対応体制を解除
・南海トラフ地震関連解説情報への貢献のため，1週間ごとにデータ・SSE解析の状況を気象庁に報告

© The Seismological Society of Japan

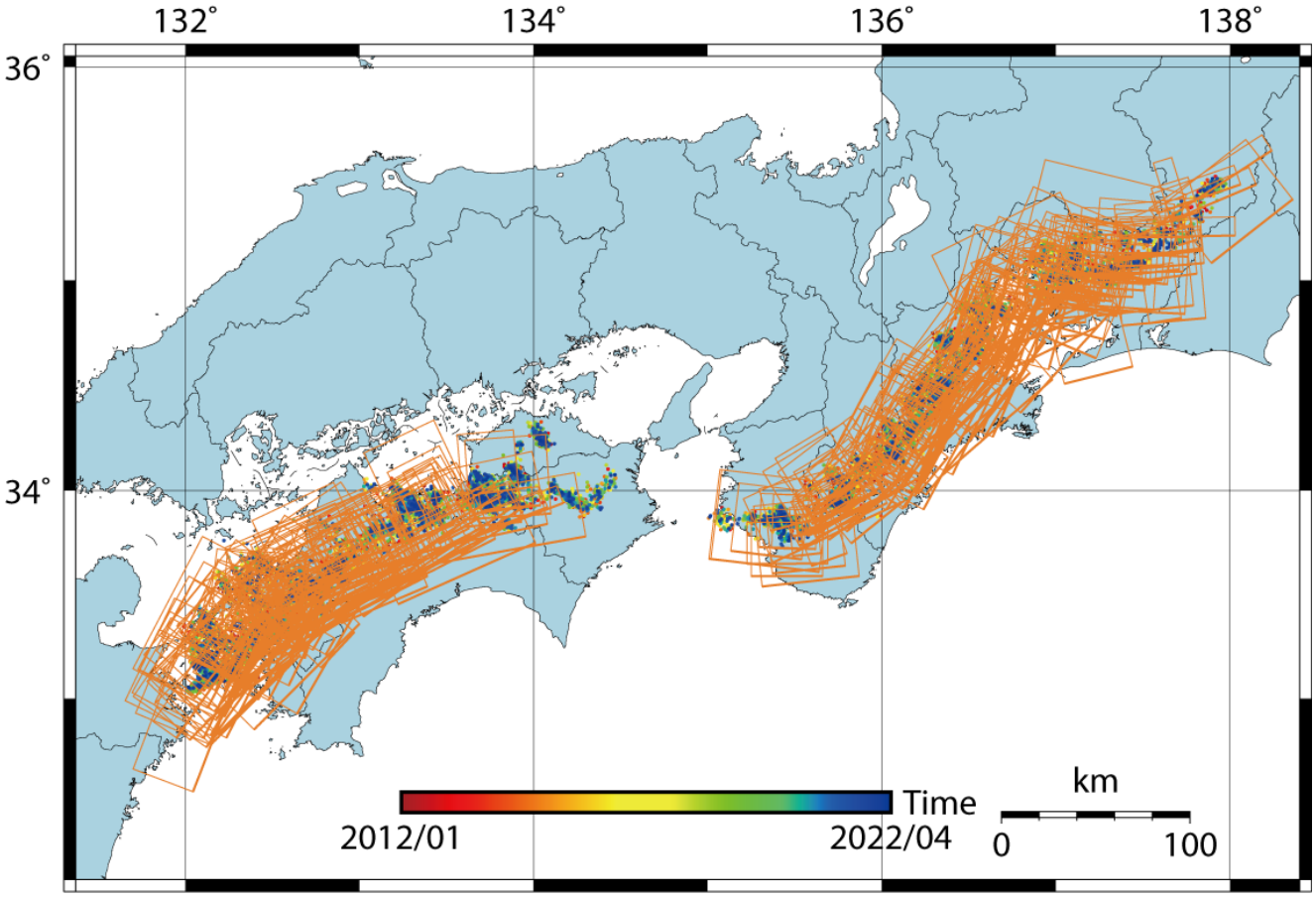
Issues in geodetic monitoring for Nankai Trough Earthquake Extra Information (Megathrust Earthquake Attention)

*Satoshi ITABA[1], Yuichi KITAGAWA[1], Tadafumi OCHI[1], Suguru YABE[1], Norio MATSUMOTO[1], Tsutomu KIGUCHI[1], Takanori MATSUZAWA[2]

1. AIST, 2. NIED

2024年8月8日16時42分頃に日向灘を震源とするM7.1（気象庁速報値）の地震が発生した．この地震を受けて気象庁は，南海トラフ地震の想定震源域で大規模地震が発生する可能性が平常時に比べて相対的に高まっているとして「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）」を発表した．巨大地震注意は，今回のように監視領域内においてMw7.0以上の地震が発生したと評価した場合のほか，想定震源域内のプレート境界面において通常と異なるゆっくりすべり（以下SSE）が発生したと評価した場合にも発表される．前者は基準がはっきりとしているのに対して，後者は必ずしも基準が明確にされているわけではなく，情報の発表に際しては難しい判断を迫られる可能性があると考えられる．
産総研では，愛知県・紀伊半島・四国において歪・地下水等の観測網を展開しており，2023年以降は九州でも観測網の整備を開始した．産総研のデータに加えて，気象庁の歪観測データや防災科研Hi-netの高感度加速度計（傾斜）データを併せて南海トラフ沿いで発生する短期的SSEのモニタリングを行っている．2012年に3機関・3種類のデータを用いた統合解析を開始してから10年以上が経過し，300以上のSSEについて断層モデルの推定を行っている．これまで推定したSSEについては，10以上の観測点で変化が検出されて精度の高い断層モデルを推定出来ていると考えられるものもあれば，3点程度の観測点のみで変化が検出されたり，SSE発生期間中や直前の大雨によってノイズが大きかったりして，断層モデルの精度が低いと考えられるものもある．また，今回のように規模の大きな地震が発生すると，観測点周辺の環境変化（地下水流動の変化等）によるローカルな歪変化が観測される観測点も存在する．
通常と異なるSSEの発生を評価するためには，通常のSSE発生状況を正しく知ると共に，発生するSSEの発生場所やすべりの範囲，すべり量などを正確に把握することが不可欠である．本講演では，SSEモニタリングの現状や課題について紹介する．

© The Seismological Society of Japan



図：2012年1月～2022年3月の間に推定された短期的SSEの断層モデルおよび微動の震源. 断層モデル推定には産総研・気象庁・防災科研Hi-netのデータを使用した. 微動震源は防災科研による.

© The Seismological Society of Japan

Human risk assessments considering the Nankai Trough Earthquake Extra Information

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Hiroyuki FUJIWARA[1]

1. NIED, 2. OYO

8月8日に発生した日向灘の地震の発生により、南海トラフ地震の想定震源域では、新たな大規模地震の発生可能性が平常時と比べ相対的に高まっているとされ、初めて南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）が呼びかけられ、防災対応として、日頃からの備えを再確認し、必要に応じて自主的に避難すること等が求められた。南海トラフ沿いで発生する地震には、地震規模や震源域の広がり、地震サイクルを構成する地震の発生回数に多様性があると評価されており、防災対応のあり方を考える際にはこれらの多様性を踏まえた検討が必要であり、今回の事象もその一例と考えることができる。南海トラフ沿いで発生する地震を対象としたリスク評価としては、中央防災会議をはじめとした国や地方公共団体による被害想定があるが、これらは日向灘から駿河湾にかけての南海トラフ全体を震源域とした最大規模の、いわゆる「全割れケース」を対象としたリスク評価となっている場合が多い。南海トラフ沿いで発生する地震の多様性を踏まえるためには、全割れケースを含む様々な地震の発生形態を考慮したリスク評価が必要である。
多様性のある南海トラフ沿いで発生する地震のうち紀伊半島沖を境界とするM8クラスの東西２つの震源域が時間差を伴って破壊する地震は「半割れケース」と呼ばれ、昭和や安政など過去の発生事例も知られていることから特に注目されている。例えば先行する半割れケースが発生した場合には気象庁より南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）が発表され、臨時情報に伴う防災対応ガイドラインも策定されている。
そこで、本研究では多様性のある南海トラフ沿いで発生する地震の中から、過去の発生事例を含め、臨時情報や防災対応ガイドラインが策定されている半割れケースの複数パターンを、モデルとして抽出して、防災対応ガイドライン等を踏まえた巨大地震警戒の呼びかけに伴う事前避難等による人口分布の変動も考慮して、半割れケース発生後の地震および津波による人的リスクを試算した。なお、本研究における地震発生可能性の長期評価をベースとしたリスク解析の枠組みでは、巨大地震注意という情報を踏まえても、リスク試算結果には影響がない。今後、今回の日向灘の地震に伴い巨大地震注意が発せされたように、一時的にその後の大規模な地震の発生する確率が普段より数倍程度高まるというような状況下での、短期的な時間依存性を考慮したリスク評価手法の構築が、臨時情報を活用した防災対応を検討する上で重要と考える。
謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© The Seismological Society of Japan

Investigation of effective use of Nankai Trough earthquake contingency information in local communities

*Kazuhito Fujisawa[1], Atsuko Nonomura[1], Mari Takahashi[1], Yoshiyuki Kaneda[1], Narumi Takahashi[2]

1. Univ. of Kagawa, 2. NIED

東日本大震災後に地震情報の体系が大幅に見直され,２０１９年３月から南海トラフ地震臨時情報の運用が始まった. 同年５月には，「南海トラフで巨大地震が発生する可能性が高まった」という臨時情報が出た場合の対応について、政府の中央防災会議によって、国の防災計画に盛り込まれた。運用が始まったが、発表されたとしても南海トラフ地震が発生しない空振りとなる可能性もあるなど, 不確実性の高い情報であることから，本情報が発表された場合の対応について具体的に検討しておくことは難しい。一方，南海トラフ地震で津波による浸水が懸念される地域では，地震が発生してから津波による浸水が始まるまでに避難を完了していることを目標として掲げても，避難に支援を要するよう人たちにとっては津波が来るまでに津波浸水想定区域の外への避難が難しいと考える人にとっては，南海トラフ地震臨時情報を活用した従来の避難計画の見直しなど、地域防災活動を考える上で有効な情報にとなるとも考えられる。

そこで，本研究では，香川県坂出市およびさぬき市において，地域コミュニティにおいて，南海トラフ地震臨時情報に関するワークショップを行い，ワークショップでの意見およびワークショップ前後で実施するアンケート調査データを用いて地域防災活動における南海トラフ地震臨時情報の活用手段について検討する。

香川県では，南海トラフ地震が発生すると，１時間半から２時間後に瀬戸内海沿岸に津波が到達すると想定されている。津波避難ビルが指定されている自治体もあるが，地震発生から津波到達まで時間的猶予があることから，これまで南海トラフ地震の際の避難について考えるワークショップでは，浸水区域外への避難について考える際には，浸水区域外への避難を第一の目標と掲げて話し合いを進めることが多いが，その場合，浸水区域外に徒歩で避難することが難しい高齢者や支援者は，浸水区域内であっても「自宅に留まる」ことを選択する人が少なくなかった。一方，南海トラフ地震臨時情報が発表されると，臨時情報で警戒を呼び掛けている間に南海トラフ地震が発生し，津波が来るかどうかは不確実ではあるが，前もって備える時間はある。このような情報を地域の防災・減災に落とし込めるかどうかについて検討する。また，２０２４年８月８日の日向灘地震後に発表された南海トラフ地震臨時情報に対する対応についても、地域の対応について報告する。

© The Seismological Society of Japan

Effectiveness Evaluation of the Nankai Trough Earthquake Extra Information in terms of Earthquake Preparedness

*Yoshinari HAYASHI[1], Ryu OHTANI[2]

1. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

2019年から発表されている「南海トラフ地震臨時情報」（以下，臨時情報）は，「巨大地震注意」と「巨大地震警戒」と２種類の情報があり，推奨される防災対応が両者で大きく異なるなど複雑な情報体系を持つ．また，巨大地震注意という強いインパクトを与える言葉が用いられているが，推奨される防災行動は「日頃の備えの再確認」「普段通りの生活」などとなっていて，この情報の背景を知らない人にとってはアンバランスで理解に苦しむものとなっている．
大谷・林(2024)では，8都府県を対象としたインターネットによるアンケート調査を実施して，巨大地震警戒，巨大地震注意の２つの情報の違いがほとんど識別されていないこと，情報発表時に想定されている地震の発生確率が過去の地震履歴から想定されるものよりも著しく高いことなどを明らかにした．
臨時情報の定着と普及がいまだ不十分だと考えられる状況下で，2024年8月8日に日向灘でMw7を超える地震が発生して，同日19時15分に臨時情報（巨大地震注意）が気象庁から発表された．その後，政府や自治体からは防災対応の呼びかけがなされたが，中には推奨される行動とは異なるものも見られ，一部の地域では混乱が生じた．
巨大地震注意では，これを機会に地震準備を再確認・強化することが期待される旨の説明がこれまで政府や防災関係者からなされてきた．地震は突発的に起こることが一般的であり，日頃から十分な防災対策を進めることが必要である．それゆえ，臨時情報発表を機会として地震準備の再確認・強化が進めば，臨時情報には一定の意味があったと評価できる．そこで，我々は2023年7月に実施した調査（大谷・林, 2024)と可能な限り同じ条件でのアンケート調査を実施して，今回の臨時情報発表によって「地震準備強化」が進んだかという観点から２回の調査結果を比較した．
アンケート調査は2024年8月20日～8月22日に実施した．対象は，東京都，静岡県，愛知県，大阪府，広島県，徳島県，高知県，宮崎県の8都府県の男女各40人の5世代（20，30，40，50，60代），合計3200人である．徳島県20代男性（16人），同女性（36人），高知県20代男性（11人），同女性（27人），宮崎県20代男性（11人），同女性（36人）に対しては，40人のサンプルが集まらなかったので，不足分を同性他世代に割り振って各県男女200人総計400人に調整した．
まず，情報の認知度について，「8月8日に気象庁から南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）が発表されました．その時点で，あなたはこの情報についてどの程度ご存じでしたか．」という質問をした．回答は「インターネットなどで確認し，よく知っていた」「テレビ番組の解説などで，どのような情報か聞いたことがあった」「耳にしたことはあったが，具体的にどのような情報かは知らなかった」「初めて知った」「発表されたことを知らない」の５択から選択するもので，最後の「発表されたことを知らない」を選ぶとそこで調査が終了になるスクリーニングの質問となっている．
結果は認知度の高い方から27.5%，44.7%，14.7%，8.1%，4.9%となり，発表されたことを知らなかったと回答した人は5%以下にとどまった．
2023年7月の調査では「インターネットなどで確認し，よく知っている」「テレビ番組の解説などで，どのような情報か聞いたことがある」「耳にしたことはあるが，具体的にどのような情報かはわからない」「知らない」の４択で聞いており，上から15.1%，29.5%，33.8%，21.6%となっていた．両者を比較すると，認知度が大きく上昇していることが明らかになった．これは質問では「発表された時点で」となっていたが，回答時点での認識を回答した可能性もある．認知度が高まったタイミングは不明であるが，いずれにしろ臨時情報の認知度は大きく高まっていた．
次に，臨時情報発表後の防災対策の実施状況について見る．「あなたのご家庭の防災対策についておたずねします．臨時情報による呼びかけが終了した現在の時点で，以下の対策をしていますか．」という質問で，「家

© The Seismological Society of Japan

具や食器棚が点灯しないようにしている」「災害に備えて飲料水を準備している」など18項目の対策実施状況を調査し，2023年7月と比較した．その結果，「災害に備えて飲料水を準備している」は53.8%から64.7%，「非常用のトイレを準備している」は24.8%から32.8%になるなど，物品の購入で完結する対策は顕著な上昇が見られた．また「家具や食器棚が転倒しないようにしている」は34.1%から37.2%，「災害時の家族との連絡方法を決めている」は30.6%から35.2%，「災害ハザードマップを見て避難場所を確認している」は54.1%から56.8%になるなど，これら項目についても一定の上昇が見られた．しかし全体としての実施率は依然高くなく，推奨行動の上位に位置付けられるものとしては改善の余地があると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

The surveys about the Nankai Trough Earthquake Extra Information in August 2024 and the results

*Akiko TAKEO[1], Hisahiko KUBO[2], Ryo KURIHARA[3], Kotaro TARUMI[4]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University

2024年8月8日、日向灘でモーメントマグニチュード7.0の地震があり、気象庁は南海トラフ地震臨時情報（調査中）を発表した。その後の検討委員会を経て南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）の発表と1週間の呼びかけが行われ、テレビでL字型の注意が出る、東海道新幹線の速度制限が行われる、一部地域で生活必需品や災害備蓄品が品薄になるなど、様々な社会的な対応・影響があった。本研究では、この南海トラフ地震臨時情報（以下、臨時情報）を地震学者がどう捉え行動したのか、また、一般の方々の捉え方や行動と大きく異なるのかを調べるため、緊急アンケートを行った。

アンケートは2回に分けて行った。1回目は研究者及び関係者を対象とし、2024年8月19日に開始し、27日午前に終了した。2回目は一般を対象とし、2024年8月27日に開始し、9月3日午前に終了した。どちらも導入用のWebページとアンケート本体であるgoogle formを用意し、関係者向けでは協力者のMLやSlackを通じて、一般向けではXを始めとする協力者のSNSを通じて展開を行った。関係者向けにおいて情報を送っていただいたMLや組織等は14箇所、交流Slack等が10箇所であり、送り先の総数は4600人ほど（重複含む）である。一般向けのXにおけるWebページへ誘導するポストの閲覧回数は8510回（重複含む）である。

質問項目は以下の5つの大項目にわけることができる。すなわち、「属性」（専門や年齢、居住地など）、「備え」（日頃から行っている、もしくは、臨時情報を受けて行った防災行動）、「行動」（臨時情報を受けて行った調査・情報発信など）、「知識」（臨時情報についてどこまで知っていたか）、「捉え方」（臨時情報の制度や各機関・社会の反応をどう思うか）の5つである。一般向けでは属性・行動・知識に関する項目をそれぞれ減らしたが、比較を行うため基本的な構成は同じである。

結果の公開に同意いただいた回答数は、関係者向けでは260件、一般向けでは133件である。2つのアンケートの結果を比べると、「備え」に関しては関係者向けの方が日頃から備えている割合が高く、特に緊急時連絡先の確認や非常用トイレの備え、家具の固定など特定の項目に違いが見られた。「知識」に関しても関係者の方が臨時情報制度の認知度が高いことが伺えた。「捉え方」については多くの項目で明瞭な違いが見られなかったが、新幹線の減速、海水浴場の閉鎖や旅行の再検討については関係者の方が必要ないと回答する傾向にあった。今後、これらの結果の違いが有意であるのか、他にどのような類似性・相違性があるのか解析・検証していく予定である。臨時情報をどう思うかに関する自由記述欄は、関係者向けでは回答数の約1/3にあたる80件、一般向けでは回答数の約1/4にあたる33件のコメントがあった。400字前後の長文コメントも多いことから、アンケートの回答者は臨時情報への関心が高い人が多い可能性には留意する必要がある。また、この自由記述についても今後集計していく予定である。

アンケートの共有や回答に協力していただいた方に、あらためてお礼申し上げる。

© The Seismological Society of Japan

Survey on the response of some students in Kochi /Kagawa prefectures to Nankai trough special advisory information on August 8

*Yoshiyuki KANEDA[1]

1. IECMS Kagawa University

２０２４年８月８日の南海トラフ地震震源域において日向灘地震（M7.1）が発生した。これを受けて気象庁は臨時情報（巨大地震注意）を発表した。これは気象庁から初めて発表された臨時情報（巨大地震注意）であり、結果として多くの行政・市民が動揺した状況が発生した。南海トラフ地震の被害想定地域の行政機関、特に沿岸域の自治体では様々な対応が見られた。四国地域では「よさこい祭り」、「阿波おどり」、「高松まつり」といった大きな規模の夏祭りが予定されており多くの観光客を迎える時期であることから、その対応が注目されたが十分な防災対策を取った上で予定通り実施され、大きな混乱もなく終了した。ただし、最大の津波が想定されている高知県黒潮町では避難所を開設し、第一波の津波到達時間が早い和歌山県白浜町では、ピークを迎えている海水浴時期にも関わらず海水浴場を閉鎖するといったように各自治体で様々な対応が取られた。　本来、臨時情報（巨大地震注意）が発表された際には、日常生活を特段変えることなく、迅速な避難が出来る態勢をとることであるが、初めての臨時情報（巨大地震注意）発表であり、これまでこの臨時情報の認知度が低かったこともあり、防災グッズや食料・水ならびにガソリンなど急いで求めた市民も少なくなかった。このような状況で、夏休み中であった学生たちはどのような対応をしたかを把握するため臨時情報に関するアンケート調査を実施した。このアンケート調査は、「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」における「創成情報発信研究」の１つである「情報リテラシー向上」研究課題に基づき実施した。対象は香川大学と一部の高校、高知大学の一部学生ならびに一部の小中学校である。アンケートの内容は、臨時情報発表直後の反応、発表後の対応および臨時情報発表終了後の反応である。本アンケートに関しては多くの学生が夏季休暇中であることから現在、集計・解析中であるが南海トラフ地震震源域に近接する高知県の学生と瀬戸内の香川県の学生の対応の違いが見られるか否かが「情報リテラシー向上」の研究課題においても重要な情報となる。本発表では現在進行中のアンケート調査の集計並び分析結果について報告し、今後の臨時情報の対応の向上を図るものである。

© The Seismological Society of Japan

About the Hyuganada earthquake and its effects

*Takanobu HARA[1]

1. kagakugiken

1．南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）の経緯について（本文参照）
気象庁は、8月8日16時43分頃に日向灘を震源とするマグネチュード７．１の地震が発生しました。 この地震の発生に伴って、南海トラフ地震の想定震源域では大規模地震の発生可能性が平常時に比べて相対的に高まっていると考えられたことから、8月8日19時15分に南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）を発表しました。
この地震の震源付近の地震活動は、当初は活発でしたが、時間の経過とともに低下しています。しかし、日向灘では過去に、最初の地震の１ヵ月半後にそれと同程度の規模の地震が発生したこともあります。
8月8日16日から8月29日12時までに南海トラフ地震の想定震源域（8月9日の地震の震源域周辺を含む）で発生した震度1以上を観測した地震の回数（速報値）は次の通りです。
8月8日16時から8月15日24時まで24回
（震度6弱：1回、震度3：2回、震度2：2回、震度1：16回）
8月16日00時から8月22日24時まで0回
8月23日00時から8月29日12時まで1回（震度１：1回）
8月24日09時32分に、四国沖でマグニチュード４．２の地震がありました。この地震以降、特段地震活動が活発化した様子はみられません。
ひずみ観測点では、マグネチュード７．１の地震に伴うステップ状の変化が観測されていますが、地震後に通常みられる変化以外は今のところ観測されていません。東海から紀伊半島及び四国の深部低周波地震（微動）活動に伴う変化が付近のひずみ計等で観測されていますが、従来からも繰り返し観測されてきた現象です。8月8日21時頃から、日向灘及び九州南東沖で浅部超低周波地震を観測しています。この現象は従来からも繰り返し観測されてきた現象ですが、発生頻度・規模等発生様式については今後も観測・研究が必要です。と記載されております。
２．南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）による影響による経済的損失について
従来、『南海トラフの地震は30年以内に発生する確率は70～80%』とされてきた ために、『まだまだ先の話だ』という意識がありましたが、身近に考える機会にはなったと考慮するしますが、夏休み期間であり盆休み期間で観光業界にとっては掻き入れ時であり 経済的損失は非常に大きくなったのではないかと推測されます。
観光庁長官は、南海トラフ地震臨時情報の発表に伴う旅館・ホテルの宿泊キヤンセル等の損失に関して、『直ちに保障することは現時点では難しい』との考えをしめした。一方で今後、政府で臨時情報の運用を検証する際には、観光への影響を示すデーターや分析を共有する必要があると指摘したとあります。
３．日向灘の地震（巨大地震注意）と仮説理論に基づく検証について
４月１６に発生すると予見していた地震が、４月１７日の２３時１４分豊後水道で震度６弱・深度５０ｋｍ・M（マグネｔｙード）６．６で発生しましたが、地震エネルギーの放出層の深度２０ｋｍの地震発生を経ずに収束しました。その後日向灘の地震が発生することがあり、豊後水道の地震の影響が、日向灘の地震に影響を与えることを懸念しておりましたが、７月３０日に１時２５分に震度４・深度４０ｋｍ・M５．２の地震が発生し、深度４０ｋｍの地震であることからより一層の懸念を強めておりました。
８月４日に、震度５以上・M５以上地震発生を予見しており、日向灘の地震発生を懸念していたが、８月３日にフィリピン付近（ミンダナオ島）でM７．１の地震が発生しました。 ８月４日は、２２時１９分に震度３・深度７０ｋｍ・M4.6の地震がありましたが、８月５日はM2.9・８月６日はM3.3であり、８月７日はM3.3以上と予見していたところ、M2.8と８月５日より小さいM2.8でありました。深度５以上・M５以上の地震発生を懸念していたところ、懸念していた日向灘における震度６弱・深度３０ｋｍ・M７．１の地震が発生し、１９時１５分に南海トラフ地震臨時情報（巨大地震注意）が発表されました。

© The Seismological Society of Japan

日向灘の地震は、５日間に亘り１２回の地震が発生し、深度２９ｋｍの地震が８月８日・１回、８月９日は連続６回、８月１０日は１回と、８月１２日は１回の計８回となっております。また８月８日からは、連続５日間の深度２０ｋｍ地震が発生し当面の地震エネルギーが放出されたものと解釈できます。

長期予見によれば、9月は震度5以上・Ｍ５以上の発生についての予見はありません。しかしながら、8月13日から8月29日まで17日間連連続して震度２０ｋｍの地震が発生していないことから、地震エネルギーが蓄積状況を示しておりますが、9月1日と9月4日に深度２０ｋｍの地震が発生したために現在はM5以上の地震は発生しておりません。しかしながら、2～3週間後にシンド以上・M5以上の地震が発生することがあり注意が必要と思われます。

長期予見で予見されていない地震については、短期予見においてフォローしていきたいと考えております。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S03P] PM-P

[S03P-01] Take-over of the transponder array geometry for the long-term GNSS-A observation in the SGO-A

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

[S03P-02] Factors of waveform disturbance in acoustic ranging at SGO-A station

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

[S03P-03] Postseismic deformation after the 2011 Tohoku earthquake captured by GNSS, GNSS-A, and small repeating earthquakes

*Fumiaki TOMITA[1], Tianhaozhe Sun[2,3], Takeshi Iinuma[4], Motoyuki Kido[1], Yusaku Ohta[5], Naoku Uchida[5], Ryota Hino[5], Kelin Wang[2,3] (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, 3. School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. Graduate School of Science, Tohoku University)

[S03P-04] Temporal Changes in Seismic Attenuation after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake (Part 2)

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

[S03P-05] Unintuitive Displacement Field Caused by Reverse and Horizonal Fault Motion in an Elastic-Viscoelastic Layered Half-Space

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

[S03P-06] Characteristics of topographical changes associated with the 2024 Noto Peninsula Earthquake using airborne laser scanning data

*Satoshi Ishida[1], Shingo Kimura[1], Koji Nohara[1], Masaaki Hamada[1], Toko Takayama[2], Takahiro Yoshida[2], Hiroyuki Yamaguchi[3], Yoshihiro Hiramatsu[4] (1. Hokuriku Electric Power Co., 2. Asia Air Survey Co., 3. Natural Consultant Co., 4. Kanazawa University)

[S03P-07] Characteristics of Uplift Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough: Case Studies on Ports

*Yuji DOHI[1], Hiromitsu Nakamura[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Sho Akagi[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), 2. Mitsubishi Electric Software Corporation)

[S03P-08] Modeling Subdaily Occurrence of Slow Slip Events in Western Shikoku

*Kanto Kato[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

Take-over of the transponder array geometry for the long-term GNSS-A observation in the SGO-A

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

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

海上保安庁のGNSS-A海底地殻変動観測網SGO-Aは，2000年以降，20年を優に超える長期にわたり定常的に運用されている．この間，2000年代後半の漂流観測から航走観測への観測方式の変化や，2010年代後半のマルチ測距の実現といった大きなハードウェアの更新に限らず，測線の変更や音響機器の定期的なメンテナンスが進められてきた．各観測点の海底に複数台（通常は４台）設置する音響ミラートランスポンダ（海底局）についても，音響素子の変更やその他マイナーな仕様変更等があった．海底局はバッテリ駆動型であるため，運用中の故障を除いても，長くとも10年程度で更新することとなる．この際，海底変位の時系列の継続性を担保するため，既存の海底局と新たに設置する海底局を同時に観測し，それぞれの位置を結び付ける引継ぎ作業が必要になる．しかし，この同時観測において特性の大きく異なるトランスポンダが共存した場合には，新または旧いずれか又は両方のアレイ形状が崩れる等，適切なアレイ引継ぎが行われず，時系列にオフセット等が生じる可能性が高くなる．

特に，GNSS-Aの解析においては，4台の海底局の相対位置（アレイジオメトリ）が不変であるとした拘束を課すことにより，音速推定及び測位解の安定性を高めているため，アレイジオメトリの適切性は重要である．そこで，我々は海底局の入出射角度特性を水槽実験等で調査し，それをアドホックに補正する手法であるAcoustic Ambiguity Reduction (AAR) 法（Yokota et al., 2024, EPS）を開発・導入し，精度の検証等を行っている．

また，現在のアレイ形状推定は，ルーチン解析におけるワークフロー単純化のため，全観測データを用いて，その平均値を採用する方式としている（Watanabe et al., 2020, Front. Earth Sci.）．しかし，この方法では，新・旧それぞれのみに対して個別に取得されたデータも含めて新旧のアレイ形状を求めることになり，同時観測によるアレイ形状の引継ぎの効果が小さくなるという懸念がある．そのうえ，観測データを取得する度にアレイ形状を推定しなおして全観測データを再解析する必要もある等，データが蓄積された現在においては，計算コスト上の問題も生じてきている．そこで，本研究ではAAR法で補正された観測データを用いて，新旧同時観測のみでアレイを固定する引継ぎ方法を試行し，その精度や安定性を検証する．

© The Seismological Society of Japan

Factors of waveform disturbance in acoustic ranging at SGO-A station

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

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

現在海上保安庁では，日本海溝や南海トラフに沿うように合計27点のGNSS-A観測網（SGO-A）を展開している． GNSS-A観測では，船舶に取り付けた海上局（トランスデューサ）と海底に設置した各点4局の海底局（ミラートランスポンダー）間の往復測距によって位置の決定を行っている．往復測距における，走時の読み取りについては，送信信号と受信信号の相関を計算して，読み取り位置を決定している（冨山, 2003, 海洋情報部技報）．

最初の観測点設置から既に20年以上が経過しているが，GNSS-A観測の海底局の寿命はこれよりも短いため，現時点で多くの観測点において海底局の更新をすることで観測を継続している．このような海底局の引継ぎで指摘される問題の一つとして，音響素子の変化が挙げられる（他の問題として，海底局アレイの引継ぎ方法についてはWatanabe et al., 2024（地震学会）で述べる．）．GNSSアンテナにおけるPCV（Phase Center Variation）のように，GNSS-A音響機器にも，各機器への音波の（天頂方向から算出する）入射角によって波形の形状が異なることが確認されている（Honsho et al., 2021, Front. Earth Sci.）．実観測のデータのみからこの角度依存性を議論するのは，複数の要因が絡み合っており困難である．そこで我々は水槽を用いた音響測距を行い，この角度依存性についての調査を行った．

水槽試験では，実際に観測に使用している海上局・海底局を含む，複数の形状の音響素子を用意した．これらにそれぞれハイドロフォンの取り付けを行い，収録した．それと同時に，実観測で使用している波形収録装置での収録も行いこれらのデータの比較をした．その結果として，Honsho et al., (2021)で指摘されていたような角度依存性を確認した（永江ほか, 2024, 超音波研究会）．

一方で，現在船底に取り付けられている海上局や，すでに製造されていない型式の海底局についてのこのような試験を行うことは困難である．また，このような角度特性は海上局-海底局の組によっても異なること，海上局-海底局の方向依存した波形形状の乱れがあること，海底局の設置深度による波形形状の変化も示唆されることなど，複数の要因が存在することが分かってきた．このような背景から，実験データを教師として読み取り位置を決定することは難しいため，我々は，GARPOS（Watanabe et al., 2020, Front. Earth Sci.）を用いた新たな波形読取りのアルゴリズムAAR法（Yokota et al., 2024, EPS）によって，SGO-A観測点の音響信号読み取り行い，測位解の解析を行った．

© The Seismological Society of Japan

Postseismic deformation after the 2011 Tohoku earthquake captured by GNSS, GNSS-A, and small repeating earthquakes

*Fumiaki TOMITA[1], Tianhaozhe Sun[2,3], Takeshi Iinuma[4], Motoyuki Kido[1], Yusaku Ohta[5], Naoku Uchida[5], Ryota Hino[5], Kelin Wang[2,3]

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, 3. School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. Graduate School of Science, Tohoku University

巨大地震後の地殻変動場は主に粘弾性緩和・余効すべり・プレート間固着によって支配されていると考えられている．2011年東北沖地震については，陸上GNSS観測や海域GNSS音響観測によって地震後10年に渡る時空間変動場が明らかにされてきた（例えば，Fujiwara+, 2022; Watanabe+, 2021) が，日本海溝沿い全体に及ぶ広域の海底地殻変動場は2016年以前までしか明らかにされていない（Honsho+, 2019）．本研究では，2011年東北沖地震について，海陸の最新の測地観測成果に加え，小繰り返し地震による非地震性すべりの推定も含めることで，地震発生後10年以上に渡る広域の余効変動メカニズムを明らかにする．
GNSS音響観測データには，東北沖に2012年9月に設置された20観測点において，東北大学・海洋研究開発機構によって2012年9月から2023年10月に収集したデータを用い，海中音速の水平勾配構造を仮定した測位解析（Tomita, under review）を行い，余震によるステップをCMT解からの計算変位によって取り除いた．また，同期間の海上保安庁による観測成果（Yokota+, 2018; Watanabe+, 2021）も活用した．陸域GNSSデータにはF5解（Takamatsu+, 2023）を用い，共通誤差成分・季節変動成分・ステップ変動を取り除いた．小繰り返し地震データには，Uchida & Matsuzawa (2013)を2020年12月31日まで更新したカタログを用いた．小繰り返し地震データは，各繰り返し地震系列での累積すべり量時系列に変換した上で，20 km×20 kmグリッドごとに累積すべり量時系列を平均化した．
海域GNSS音響観測（海溝から約100～150 km）は，地震時主破壊域（岩手沖南部～宮城沖）では顕著な陸向き変動が全期間に渡って継続し，その北側（岩手沖北部）と南側（福島沖～茨城沖）では海溝向きの変動が2016年ごろまで進行し，その後陸向きの変動に転じていることが分かった．また，小繰り返し地震で検出された非地震性すべりは，地震時主破壊域の北側と南側のプレート境界浅部で2016年まで顕著に現れた．すなわち，これらの領域では地震後5年以内に収束する短期の余効すべりが存在したことが測地・地震データの両方から確かめられた．一方で，地震時主破壊域下端側のプレート境界深部では小繰り返し地震カタログのある2020年末でも継続して余効すべりが存在していることが示されており，プレート境界の浅部と深部で余効すべりの時定数が異なることが分かった．陸上のGNSS観測は，宮城県から岩手県沿岸で顕著な海溝向きの変動が継続しており，これらの領域では粘弾性緩和に加え，長期の余効すべりの影響が含まれると考えられる．上下変動については，海溝のごく近傍を除いた地震時主破壊域で沈降傾向を示し，その上端と下端（海溝のごく近傍と海岸線沿い）で隆起傾向を示した．
得られた地殻変動場について，Wang+ (2018, Geosphere)の余効変動モデル（有限要素法を用いた粘弾性緩和モデルと断層すべりのフォワードモデルの組み合わせ）による再現を試みた．その結果，上記で示した海陸測地観測成果は水平・上下成分とも余効変動モデルによって十分再現可能であった．海域GNSS音響観測成果は，時定数の短い余効すべりと粘弾性緩和，プレート間固着で説明可能であり，余効すべり収束以降（概ね2019年以降）は粘弾性緩和とプレート間固着のみで再現できることが分かった．観測された上下変動場は，粘弾性緩和により示唆されるパターンと整合的であり，その寄与が大きいことが示唆された．また，プレート間固着は地震時主破壊域と1968年十勝沖地震の震源域を含む日本海溝沿い青森沖で必要とされる一方，福島沖～茨城沖では相対的に低い固着率であることが示唆された．この余効変動モデルによって全体的な地殻変動場は概ね再現されたものの，下記の将来的な課題が残された：[1] 海上保安庁FUKU観測点（福島沖）での継続的な沈降が説明できない，[2] 東北大学G04観測点（三陸沖北部）の継続的な隆起が説明できない，[3]地震時主破壊域下端域での余効すべりと粘弾性緩和の影響を分離できていない．[1]・[2]の解決には粘弾性緩和の駆動源として入力する地震時すべり分布の最適化や，余効すべりによる粘弾性応答の考慮，あるいは粘弾性構造の海溝平行方向の不均質性の導入などが必要であると考えられる．[3]については小繰り返し地震によって検出された非地震性すべりと整合性の取れた余効すべりモデルを今後構築する必要がある．

© The Seismological Society of Japan

Temporal Changes in Seismic Attenuation after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake (Part 2)

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

1. Tokyo Institute of Technology

東北地方太平洋沖地震後の地表変位を説明するためには，アフタースリップと粘弾性緩和，そして間隙弾性反発が必要であると考えられている．一方，それぞれの地表変位に対する寄与はトレードオフの関係にあるため，地表変位観測のみでは上記3つの大きさを分離することは難しいという問題がある．本研究で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から観測的制約を与えることを目的とする．
主に2011-2023年に東北地方太平洋沖地震の震源域で発生したM3.0-5.0の地震が解析対象であり，古い順に全地震数の1/3を選択し，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間距離≦5 kmで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，2つの地震の平均走時で割り，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（減衰が小さくなる場合）または負（減衰が大きくなる場合）の傾きを持つ．このように，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，データセットの地震を古い順に10個ずつ入れ替える毎に行い，減衰の時間変化を追跡した．
得られた結果は，本震後に減衰が指数関数的に減少したことを示している．いくつかの領域に分けて同様の解析を行ったが，本震の震源を含むデータセットの結果が，最も初動の減衰変化量が大きかった．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，数年以上）が必要であることが判明した．バーガーズモデルを用いて表現される粘弾性モデルでは，緩和時間が大きく異なる（主に数か月と数年以上）緩和現象が同時に進行する．さらに，間隙弾性反発は通常，数十日以内に収束する現象である．従って，本解析結果は粘弾性緩和による構造の時間変化を捉えた可能性がある．

© The Seismological Society of Japan

Unintuitive Displacement Field Caused by Reverse and Horizonal Fault Motion in an Elastic-Viscoelastic Layered Half-Space

*Koitaro Koide[1], Yukitoshi Fukahata[1]

1. Kyoto University

断層運動によって生じる変位場には，しばしば直観的には理解しにくいものがある．無限弾性媒質の場合には，ダブルカップルの力を与えたとき変位場は断層面について対称となり，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となる．これは自由表面の存在が強く影響している．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．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． 本研究では，弾性-粘弾性水平二層構造媒質中の断層運動が作る変位場を計算し，その変形メカニズムを考察した．粘弾性媒質としては，Maxwell粘弾性体を仮定した．計算にはFukahata & Matsu’ura (2005, 2006) の半解析解を用いた． まず，表層 (弾性層) の浅部，中間部，深部それぞれの深さに逆断層を置いたときに生じる地表面の変位場を計算した．この計算結果は昨秋の地震学会および今春のJpGUですでに発表している (小出・深畑, 2023; 2024)．浅部に逆断層を置いた場合には，上盤側が弾性変形で隆起し，その後の粘弾性緩和によって沈降が生じた．一方，弾性層の深部に逆断層を置いた場合には，弾性変形で全体的に隆起し，粘弾性緩和によってさらに隆起が大きくなった．この結果は粘弾性緩和が重力平衡を回復するように起きるといる理解が必ずしも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理解するために，内部変形場についても計算した．浅部に逆断層を置いた場合，緩和完了後には断層周辺で全体に下向きの変位が生じた．逆に深部に逆断層を置いた場合には，緩和完了後に断層周辺で全体に上向きの変位場が生じた．一般に，粘弾性緩和が完了した後には，粘弾性層 (Maxwell粘弾性体) が流体のように振る舞い，弾性層は弾性板として振る舞うこととなる．逆断層にかかる力は一般に水平圧縮の力である．弾性層の浅部か深部のどちらかにのみ断層が存在する場合，断層部分で強制的な短縮が起こることで短縮量の不均衡が生まれ，断層がある部分が凹むように弾性板が曲がる変形をし，上述の変形場が生じたと考えられる． 弾性層内の水平断層が作る変位場についても計算した．水平断層の上側が左に，下側が右に動く変位の食い違いを与えた．このときの地表面変位は，弾性変形により断層の左端直上付近で隆起し，右端直上付近で沈降するパターンとなった．その後，粘弾性緩和によってさらに隆起と沈降は大きくなった．なお，弾性層の中間部に低角の逆断層を置いた場合には，この水平断層と似た上下変位のパターンを示す．水平断層による内部変形場を見ると，粘弾性緩和の完了後には，断層の左側で全体に鉛直上向き，右側で鉛直下向きの変位場となった．粘弾性緩和完了後には弾性層が板のように振る舞うが，弾性媒質の厚みは上下方向には有限であるのに対し，水平方向には無限である．そのため，ダブルカップルの力のうち，鉛直方向の力が変形に大きく寄与し，断層の両端で対称な上下方向の変位が生じたと考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of topographical changes associated with the 2024 Noto Peninsula Earthquake using airborne laser scanning data

*Satoshi Ishida[1], Shingo Kimura[1], Koji Nohara[1], Masaaki Hamada[1], Toko Takayama[2], Takahiro Yoshida[2], Hiroyuki Yamaguchi[3], Yoshihiro Hiramatsu[4]

1. Hokuriku Electric Power Co., 2. Asia Air Survey Co., 3. Natural Consultant Co., 4. Kanazawa University

はじめに

2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震の震源断層は，能登半島北岸沿いに分布するセグメント（猿山沖セグメント，輪島沖セグメント，珠洲沖セグメント）（井上・岡村，2010）が活動したものである可能性が高いとされており，陸域では4mを超える隆起が確認されている（国土地理院，2024）。本研究では，地震後に能登半島北部全域で航空レーザ計測を行い，地震前後の点群データを用いて，広範囲の面的な地震時隆起量を調査した。また，能登半島沿岸の海棲生物指標を用いた隆起量調査等のデータも加え，令和6年能登半島地震に伴う地形変化の特徴について報告する。

データ

解析に使用した航空レーザ計測データは，沿岸部を2024年2～3月，山間部については雪解け後の2024年5月に計測を行った。地震前後の隆起量の推定にはCCICP(Classification and Combined Iterative Closest Point)手法を用い，本研究では， 50mメッシュで解析を実施した。なお，地震前のデータは2007～2010年に北陸電力が取得した航空レーザ計測データを使用したため，東北地方太平洋沖地震や2023年5月5日に発生した石川県能登地方の地震による影響を含んでいる。

海棲生物指標を用いた隆起量調査については，小林ほか（2024）で報告されており，本研究では，それらに追加して富山湾に面した沿岸部で現地調査を行った。

結果・考察

CCICP手法により算出した隆起量うち，最も大きな隆起は猿山沖セグメント西部の輪島市門前町吉浦～鹿磯付近で約4～5.5mとなり，次いで輪島沖セグメント東部付近の珠洲市大谷町～長橋町付近で約2～2.5mが確認された。それ以外のエリアの隆起量は約0～2mであった。北岸エリアの水平成分については，西～西北西方向に約1～2mの変動量を示し，猿山沖セグメント西部と輪島沖セグメント東部付近で鉛直成分の割合が大きく，輪島沖セグメント西部～猿山沖セグメント東部付近では水平成分の割合が大きくなる傾向が見られた。

沿岸部における隆起量については，航空レーザ計測データの地震前後の差分値に基づく隆起量と海棲生物指標を用いた隆起量は調和的な傾向が認められた。発表では内陸部の隆起量の変化について検討し，能登半島北部における全体的な変動傾向について考察を行う予定である。

参考文献

井上卓彦・岡村行信（2010）：能登半島北部周辺20万分の1海域地質図説明書，海陸シームレス地質情報集，能登半島北部，数値地質図S-1.

国土地理院（2024）：「だいち2号」観測データの解析による令和6年能登半島地震に伴う地殻変動（2024年1月19日更新）．https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_insar.html

小林航・石田聡史・野原幸嗣・浜田昌明・平松良浩・山口弘幸・吉田崇博・高山陶子（2024）：令和6年能登半島地震による能登半島沿岸部の地震時隆起量，日本地球惑星科学連合2024年大会，U15-P81.

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of Uplift Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough: Case Studies on Ports

*Yuji DOHI[1], Hiromitsu Nakamura[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Sho Akagi[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), 2. Mitsubishi Electric Software Corporation

近い将来の発生が懸念される南海トラフ巨大地震に対する事前の備え・対策の重要性は論を俟たない。事前の備え・対策に資するため、我々はこれまでに、南海トラフ巨大地震の空間的な多様性を表現する3,480個の波源断層モデル群を用いた津波伝播遡上計算を実施し、様々な津波ハザード情報を創出した（赤木・他、2023）。創出した津波ハザード情報は、災害シナリオの作成（中村・他、2023）、津波避難戦略ツールの開発（杉山・他、2023）等に利活用されている。一方で、令和6年能登半島地震では、地震動や津波に起因する被害に加え、地盤の隆起による漁港の被害が明らかとなった。過去の南海トラフ巨大地震においても、多くの地点で地盤の隆起が報告されている（例えば河角、1956）。隆起によって漁港・港湾が機能不全に陥った場合、漁業・物流への中長期的な影響のみならず、船舶を用いた緊急支援が困難になることも懸念される。そのため、南海トラフ巨大地震によって漁港・港湾でどのような隆起が生じるのか、その傾向・特徴を事前に把握し、防災対策に役立てることが求められる。

本研究では、南海トラフ巨大地震に対する津波ハザード情報を創出する過程で構築した、地震調査委員会（2020）が設定した波源断層モデルに最大クラスの地震を考慮した波源断層モデルを加えた、合計3,480個の波源断層モデル群（以下、全断層モデルと記す）に対してOkada (1992) の方法で求めた鉛直地殻変動量データを用いて、南海トラフ沿いの漁港・港湾における隆起の特徴を分析した。一例として、清水港を対象とした分析について述べる。国際拠点港湾の一つである清水港は、大型コンテナ船が着岸するコンテナターミナル、国際クルーズ船が着岸する客船ターミナル等の港湾施設を有する、全国有数の国際貿易港である。ここでは、清水港が南海トラフ巨大地震発生後に支援拠点として機能するか、また人流拠点として機能するか、という観点から隆起の特徴を分析した。具体的には、全断層モデルによる鉛直地殻変動量、清水港のバース水深、支援船の着岸に必要な水深を比較し、隆起の特徴を分析した。支援船の着岸に必要な水深は、大規模災害時の緊急物資等支援船に対応可能な港湾施設の諸元を整理した赤倉・小野（2016）に基づき、9m以上と考えた。なお、海底面の隆起以外による港湾施設の機能喪失は考慮していない。

清水港の北部に位置し、港内の公共埠頭のうち最も水深が深いコンテナターミナルである新興津埠頭（水深15m）の場合、6m以上の隆起が生じると支援船が着岸不可となる。新興津埠頭における、全断層モデルから得られた鉛直地殻変動量を分析すると、走向方向に駿河湾から土佐湾、あるいは駿河湾から日向灘に至る領域が破壊する、合計98個の波源断層モデル（Mw9.0~9.2）で6m以上隆起することが明らかとなった。すなわち、「全割れ」となる南海トラフ巨大地震が発生した場合、新興津埠頭を含む清水港内のすべての公共埠頭で支援船が着岸できず、清水港が支援拠点として機能しない状況となる可能性を示唆している。

清水港の中央に位置し、客船ターミナルである日の出埠頭（水深12m）（図1 (a)）の場合、3m以上の隆起が生じると支援船が着岸不可となる。日の出埠頭における、全断層モデルから得られた鉛直地殻変動量を分析すると、駿河湾から熊野灘、駿河湾から紀伊水道外域、駿河湾から土佐湾、あるいは駿河湾から日向灘に至る領域が破壊する、合計297個の波源断層モデル（Mw8.4~9.2）で3m以上隆起することが明らかとなった（図1 (b)）。すなわち、「全割れ」のみならず、東側で「半割れ」となる南海トラフ巨大地震が発生した場合、日の出埠頭で支援船が着岸できないため支援拠点として機能せず、また支援船と同規模の旅客船が着岸できないため旅客輸送の軸となる客船ターミナルとして十分に機能しない状況となる可能性を示唆している。

本研究で得られた漁港・港湾における隆起の特徴は、南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した全断層モ

© The Seismological Society of Japan

デルから得られた鉛直地殻変動量を用いた試行的な分析結果であることに注意されたい。また、漁港・港湾以外の地点における隆起について、さらには、沈降による０メール地帯への影響についても、重要な検討課題として残されている。今後、より詳細な分析に基づく隆起や沈降による影響の評価、そして、その結果を踏まえた事業継続計画の策定等による防災対策が求められる。

謝辞：本研究は「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施した。

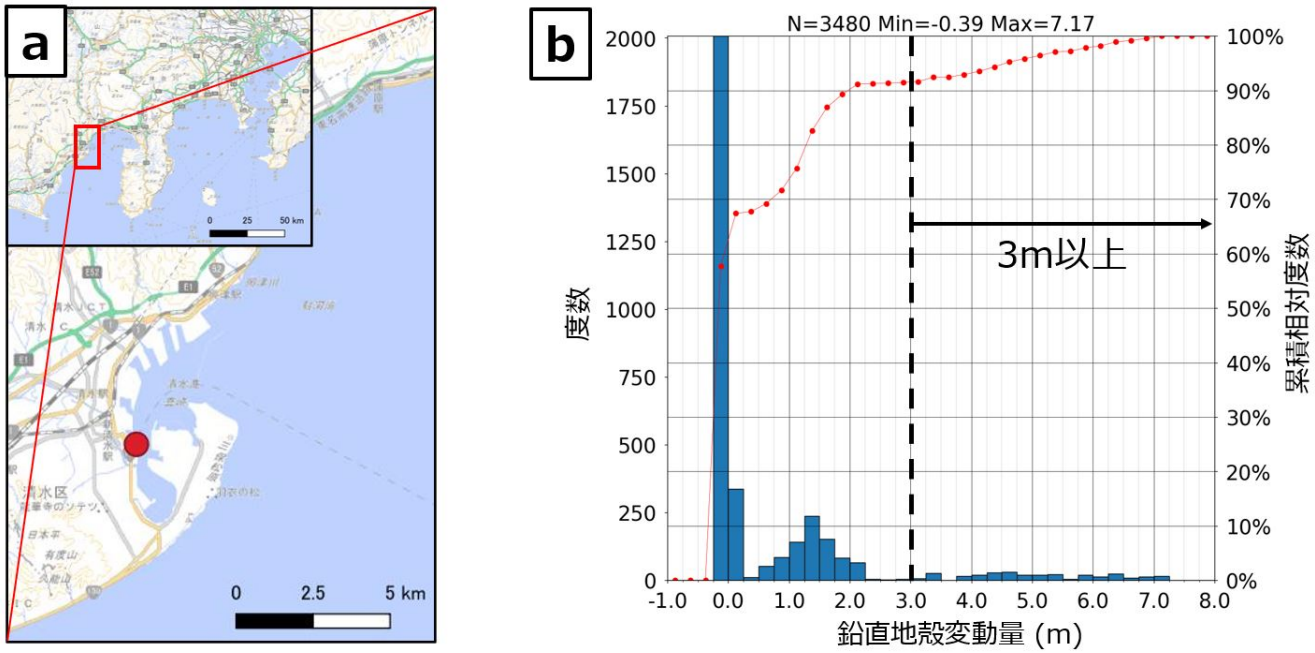


図1：清水港 日の出埠頭における隆起の特徴。(a) 日の出埠頭の位置 (赤丸)。地理院地図を使用した。(b) 日の出埠頭における、3,480個の波源断層モデルから得られた鉛直地殻変動量のヒストグラム。297個の波源断層モデル (Mw8.4~9.2) で3m以上の隆起が生じる。

© The Seismological Society of Japan

Modeling Subdaily Occurrence of Slow Slip Events in Western Shikoku

*Kanto Kato[1], Naofumi Aso[1]

1. Tokyo University of Science

スロースリップ（SSE）とテクトニック微動は四国西部をはじめとした世界各地で観測されている。具体的には、測地観測点において、固着期間には特定の方向に地表変位が確認され、SSEの期間には大規模な地震を伴うことなく地表変位が戻ることが確認される。このように、プレートの固着による応力の蓄積とその解放が繰り返し発生していることが測地観測から分かっている。また地震観測からは、SSEの最中または前後に、低周波地震（LFE）が発生していることが分かっている。地表変位はGNSS観測点の日々の座標値として測定されるため、測地データのみではSSEの1日あたりの発生時間を決定することは困難である。そのため、１日より短いスケールでのSSEの発生様相は、LFEやテクトニック微動の活動から類推する形で議論されてきた。しかし、SSEと微動は異なる帯域で観測される現象であるため、必ずしも両者が連動しているとは限らず、測地データのみから１日より短いスケールでのSSEの発生時間を推定することは重要な課題である。
本研究では、1日ごとの変位量の確率密度分布を解析することによって、１日より短いスケールでの情報を取り出すことを目指す。はじめに、2003年から2020年までのGNSS観測データを使用し、基準観測点から四国西部の観測点までの相対座標を計算した。次に、1日ごとの変位量についての共分散行列から固有ベクトルを求めることで、各観測点の主要な移動方向を決定した。その方向への変位量の頻度分布は、１日あたりのSSEの発生時間の頻度分布に相当するものであり、1日より短いスケールでの情報を与える。さらに、このとき得られた1日ごとの変位量の頻度分布を、ブラウン運動のようなセルオートマトンを用いてモデル化することを試みた。最後に、リサンプリングして時間間隔を変えたデータに対して同じ操作を行うことで、この手法の有効性を検証した。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S04. Tectonics

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S04P] PM-P

[S04P-01] Existing Probability of Triple Junctions Based on Plate Motion Angles

*Hironobu Fujisawa[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S04P-02] Tectonics and Island Shape of Izu and Bonin Islands

*Moe Hamana[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science Faculty of Science)

[S04P-03] Tectonic significance of the reverse fault type intraslab earthquake occurred beneath the Bungo Channel, southwest Japan

*Takayuki MIYOSHI[1], Takeshi KIMURA[1] (1. NIED)

Existing Probability of Triple Junctions Based on Plate Motion Angles

*Hironobu Fujisawa[1], Naofumi Aso[1]

1. Tokyo University of Science

3つのプレートが交わる三重会合点については、局所的なテクトニクスと関連付けた議論が、しばしば個別になされてきた。一方、三重会合点の全球的な研究は、定性的な議論に留まることが多かった。例えば、隣接するプレートの相対運動は、走向に水平な方向と垂直な方向の二成分の連続量を持っているのにもかかわらず、横ずれ・収束・発散の何れかに分類された上で議論される傾向があった。

本研究では、世界中の三重会合点を網羅的かつ定量的に解析する。隣接する2つのプレートの相対運動ベクトルは、大きさと方向の情報を持っている。その相対運動方向とプレート境界の走向との成す角を用いて、プレート運動のセンスを表す角度を評価する。個々の三重会合点について、接続する3つのプレート境界におけるプレート運動の角度をそれぞれ計算し、3つの角度を座標値とする三次元デカルト空間に投影する。その上で、三次元空間内の三重会合点の分布を評価する。プレート運動に伴う変形の大きさに対応する指標として、三重会合点近傍で発生した地震数やモーメント総和も算出し、比較する。

分布の様子からは、明確にグループに分類できるような目立ったクラスターは確認できなかった。一方、データの分布が一様ではないことも明らかになったため、その密度分布に注目した。

3つのプレート運動の角度が何れも+45˚を超える三重会合点は7つもあった。二項検定におけるp値は0.00084であり、プレート運動の角度が一様に分布しているという帰無仮説は棄却される。また、3つのプレート運動の角度が何れも−45˚から+45˚の範囲に収まる三重会合点が16もあった。更に、3つのプレート運動の角度が何れも−45˚を下回る三重会合点が3つしかなかった。これらの結果は、前者の二つのタイプの三重会合点は稀で、三番目のタイプの三重会合点が多くみられるというMcKenzie & Morgan (1969)の主張と矛盾する。本研究では、マイナーなプレートまで考慮しているが、今後は主要なプレート境界に絞った場合と比較することで、主要な三重会合点が安定に存在している物理的条件を明らかにしていきたい。

© The Seismological Society of Japan

Tectonics and Island Shape of Izu and Bonin Islands

*Moe Hamana[1], Naofumi Aso[1]

1. Tokyo University of Science Faculty of Science

日本列島は4枚のプレート境界に位置し、日本列島の地殻内はプレート運動による複雑な応力場によって支配されている。本研究では日本列島周辺のプレート運動による応力場を明らかにする新たなアプローチとして、島の形状、特に主軸の向きに着目した。

国土地理院の国土数値情報による海岸線の位置情報から、共分散行列について固有値と固有ベクトルを求めた。固有値の比は島の縦横比を表し、固有ベクトルから長軸の方位角を求めた。また、島を緯度経度0.5度ごとにグリッドに分け各グリッドに含まれている島の方位角の平均値を求めた。

その結果、小笠原諸島では長軸は南北方向を向く傾向が強いことがわかった。これは太平洋プレートとフィリピン海プレートのプレート境界の走向がほぼ南北を向いていることに対応していると考えられる。また伊豆諸島に関しては、小笠原諸島のような強い南北方向の傾向は見られず、北西方向や北東方向に向いているグリッドもあった。伊豆諸島に関しては、グリッドの幅を変えることで各グリッドにおける長軸の方位角の傾向も変化することから、2つの三重会合点が付近に存在しているため複雑な応力になっているのではないかと考えた。

今後は、今回の手法を用いて、南西諸島周辺や瀬戸内海についても島々の方位角とその傾向を調べ、応力場との関係を調べていきたい。

© The Seismological Society of Japan

Tectonic significance of the reverse fault type intraslab earthquake occurred beneath the Bungo Channel, southwest Japan

*Takayuki MIYOSHI[1], Takeshi KIMURA[1]

1. NIED

2024年5月12日14時34分、豊後水道の深さ54.9kmでM3.4の東西圧縮の逆断層型地震が発生した。南海トラフから豊後水道下に沈み込むフィリピン海プレートは、27-15Maに形成された四国海盆（例えば、Okino et al. 1994）のうち、比較的年代の古いプレートが沈み込んでいると推測されている。この地震が発生した場所のフィリピン海スラブ上面の深さは、三好・石橋(2004)によれば41.9kmで、フィリピン海プレート内部で発生したスラブ内地震であった。西南日本のフィリピン海スラブ内の起震応力場は、ほぼ東西伸張ないしスラブの走向に伸張で正断層型や横ずれ型の地震が多く発生しており、その成因とともに議論がなされている（例えば、Ukawa 1982; Wang et al. 2004; Shiomi et al. 2008）。しかし、この地震の発震機構解は起震応力場に矛盾する。本研究では、この地震とその周辺の地震について、発生位置、発震機構解、地震波形を用いて調査し、この地震のテクトニックな意義を議論する。

P波初動解は東西圧縮の逆断層型であったが、局所的な応力場を反映したものである可能性が残るので、モーメントテンソル解を決定した。本研究では、広帯域地震観測網（F-net）のデータを用いてMT解を求めた。防災科研から公開しているF-netのモーメントテンソルカタログと同じ手法により、３点の観測点を使用して決定した。中津（INN）、砥用（TMC）、豊田（YTY）観測点のデータを用いた解析結果では、深さ59km、Mw3.5、P波初動解と同様の東西圧縮の逆断層型と決定された。異なる観測点の組み合わせでも同様の逆断層に決まっており、逆断層の地震であったことは間違いない。

この地震の震源とスラブ上面との距離は約12kmで、厚さ約12kmの活動度の高い地震発生層とその下位にある厚さ約6kmの活動度が低い領域との境界域で発生していた。震源の深さが54.9kmと通常のプレート間地震より深いことと、スラブ内での発生位置から、逆断層のプレート間地震とは考えられない。また、周辺を含めた震源分布を検討したところ、震源分布断面図に局所的ながらスラブ内に二重地震面のような分布が認められた。

西南日本のスラブ内地震では、地震波形を用いて地震発生層が海洋性地殻であるか海洋性マントルであるかを推定できる（例えば、Ohkura 2000; Hori et al. 1985; Miyoshi et al. 2012）。この地震を含む近傍のM3クラスの7地震について、高感度地震観測網Hi-netの速度波形を用いて調べたところ、発生層の上部に位置する地震ではHead waveが観測されており、発生層の下限付近または下面に位置する地震ではHead waveが観測されていない。2024年5月12日の地震は後者に分類された。

これらの特徴は、尾根状のスラブである伊勢湾下（Miyoshi and Obara 2010）や谷状のスラブである紀伊半島中部（Miyoshi et al. 2012）での二重地震面の状況と類似しており、豊後水道においても尾根状のスラブ内で局所的ながら二重地震面を構成しているものと推定される。地震がどこで発生しているかを特定することは、南海トラフ地震の発生前、発生後の推移等を検討するうえで重要であり、今後さらなる検討を深める予定である。

謝辞：本研究では一部に気象庁一元化震源カタログを使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S05. Geothermal science

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S05P] PM-P

[S05P-01] *Geothermal exploration using the optical fiber DAS in the geothermal borehole of the Takigami geothermal field*

*Junzo KASAHARA[1,2], Yoko Hasada[2,3], Shigetsugu Furuya[5], Masahiro Shimazaki[5], Hiroshi Mikada[4], Hiroshi Ohnuma[2], Yoshihiro Fujise[6] (1. Univ. Shizuoka, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Engineering, 4. Kyoto Univ., 5. Idemitu, 6. WELMA)

Geothermal exploration using the optical fiber DAS in the geothermal borehole of the Takigami geothermal field

*Junzo KASAHARA[1,2], Yoko Hasada[2,3], Shigetsugu Furuya[5], Masahiro Shimazaki[5], Hiroshi Mikada[4], Hiroshi Ohnuma[2], Yoshihiro Fujise[6]

1. Univ. Shizuoka, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Engineering, 4. Kyoto Univ., 5. Idemitu, 6. WELMA

はじめに　著者らは地熱坑井内に設置した光ファイバーを用い、分布型音響センサー（DAS）により地熱フィールドの地熱構造を調べる研究を行っている。過去、鹿児島県メディポリス、秋田県大沼、北海道森、秋田県澄川の地熱発電所の地熱坑井を用いてDASによる地熱探査を行ってきた。2022年5月大分県九重町の出光大分地熱（株）所有の滝上蒸気生産井（TP-2）を用いて地震探査を行った。TP-2坑井内の深さ2000 にまで光ファイバーを挿入した。**結果**　坑井内の光ファイバーを用い分布型温度センサー（DTS）により温度の測定を行った結果、坑底付近では226℃であった。坑口からの深さ1000 m～1400 mは温度が緩やかに上昇し、これはシール層のもとになる粘土鉱物の脱水の程度を示唆すると考えられる。また、」滝上発電所周辺で12か所において起振機により地震波を発生させた。これによるDASデータと地上地震計波形記録を用い地震波速度構造を求めた。**結果**　滝上バイナリー発電所（生産１号基地）の付近を通るほぼ南北走向の垂直断層により東西で速度構造が異なる地下構造と解釈できることが分かった。これは重力分布と地熱坑井により得られている地質構造（竹中ほか、1995）と整合的である。断層の落差は1 kmに及ぶ。DASの波形記録には坑口から深さ1000 m付近に阿地原層と滝上層の地層境界が見られる。DASの波形記録から反射波を抽出しマイグレーション処理を行った。その結果、深さ約1 kmの反射波は非常に強いが、場所によりその反射強度は異なる。より深部の反射波は主に坑口の南西に位置している。深部の反射波は岩相の違いによるのではなく、断裂中の流体含有率の違いに起因するのかもしれない。DAS、地上地震計には阿蘇、大分を震源とする自然地震が記録された。いくつかの地震ではDAS記録中にS波も記録されており、S波の到着の前にP波の速度で伝わる波群が複数見られる。これらは地中でS波からP波へ変換した波（sP変換波）と解釈される。この変換を生じた深さは2.5 kmおよび1 km付近であると考えられる。この深さはDAS反射波のマイグレーション結果に見られる反射波の位置と一致する。地表地震計の上下動、水平動にもこれに対応するsP変換波がみられる。**謝辞**　本研究はNEDO超臨界地熱開発技術事業の一環として行った。謝意を表する。また、本調査にTP-2地熱坑井の使用と滝上地熱フィールドでの調査にご協力いただいた出光興産（株）、出光大分地熱（株）及びグループ各社に感謝を表する。調査にご協力をいただいた（株）WELMA、応用地質（株）、（株）阪神コンサルタンツに感謝する。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 22nd) | Regular session：S06. Crustal structure

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S06P] PM-P

[S06P-01] An application of full waveform inversion to dense OBS seismic survey off Nemuro, Hokkaido

*Ryosuke AZUMA[1], Gou Fujie[2] (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. JAMSTEC)

[S06P-02] Subduction Structure from the Forearc Region Off Miyagi to the Central Part of Northern Honshu Arc Revealed by a Dense Seismic Observation

*Eiji KURASHIMO[1], Hiroshi Sato[2], Takaya Iwasaki[3], Takashi Iidaka[4], Tatsuya Ishiyama[1], Masanao Shinohara[1], Hirokazu Ishige[5], Hidehiko Shimizu[6], Shinji Kawasaki[5], Susumu Abe[5], Naoshi Hirata[1] (1. ERI, The University of Tokyo, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Association for the Development of Earthquake Prediction, 4. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 5. JGI, Inc., 6. JAPEX)

[S06P-03] Seismic reflection imaging and pore fluid pressures of the Japan Trench megathrust fault offshore Sanriku, NE Japan

*Yuqi Lyu[1], Tetsuo No[2], Ehsan Jamali Hondori[3], Park Jin-Oh[1] (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Geoscience Enterprise Inc.)

[S06P-04] Relation between deep crustal fluids, crustal seismicity and structure in North Ibaraki revealed by receiver functions?

*Admore Phindani MPUANG[1], Takahiro SHIINA[1], Yasunori SAWAKI[1], Takahiko UCHIDE[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

[S06P-05] Three-dimensional attenuation structure around the Hida Mountains

*Shoya Okada[1], Akio Katsumata[1], Kohe Hotta[1] (1. University of Toyama)

[S06P-06] Retrieval of persistent S reflections from the megasplay fault beneath C0010

*Takashi TONEGAWA[1], Eiichiro Araki[1], Shuhei Nishida[1], Aki Ito[1], Yuya Machida[1], Koichiro Obana[1], Gou Fujie[1] (1. JAMSTEC)

[S06P-07] Construction and Validation of a 3D Multi-parameter Model of the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[2], Ryoichiro Agata[1], Toshiya Fujiwara[1], Gou Fujie[1], Katushiko Shiomi[3], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[3], Takeshi Nakamura[4] (1. JAMSTEC, 2. HKU, 3. NIED, 4. CRIEPI)

[S06P-08] Anisotropic feature of the upper crust beneath Shikoku inferred from the receiver functions

*Katsuhiko SHIOMI[1] (1. NIED)

[S06P-09] Elastic structure and lithification of the upper crust in subduction zones

*Shinichiro Taka[1], Yohei Hamada[2], Arito Sakaguchi[1] (1. Yamaguchi University Guraduate School of Science and Technology for Innovation, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marin-Earth Science and Technology)

[S06P-10] Estimation of 3-D velocity structure beneath Kirishima volcano using seismic tomography

*Youhei YUKUTAKE[1], Yutaka Nagaoka[2], Takao Ohminato[1], Takahiro Ohkura[3] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 3. Graduate School of Science, Kyoto University)

[S06P-11] Characteristics of high concentration REY-rich mud distribution revealed by the distribution of sedimentary layers near Minamitori Is.

*Yuzuru Kaneko[1], Kazuo Nakahigashi[1], Mikiya Yamashita[2], Koichi Iijima[3] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology , 3. Japan Marine Science and Technology Center)

[S06P-12] High-resolution seismic reflection images of the Shatsky Rise, northwest Pacific

*Jin-Oh Park[1], Yue Sun[1], Yu Fan[1], Noboru Yamakawa[1], Yuqi Lyu[1], Ryota Murai[1], Ryoji Toda[1], Yoshiki Horiuchi[2], Kazutaka Yasukawa[3], Junichiro Kuroda[1], Erika Tanaka[4], KH-24-1 Shipboard Science Party[5] (1. AORI, University of Tokyo, 2. Nippon Marine Enterprises, 3. School of Engineering, University of Tokyo, 4. Marine Core Research Institute, Kochi University, 5. N/A)

[S06P-13] Three-dimensional velocity-structure for hypocenter determination

*Akio Katsumata[1], Nishimiya Takahito[2] (1. University of Toyama, 2. MRI, JMA)

[S06P-14] An explore of crustal reflector based on comprehensive detection of S-wave later phase in Japan

*Takahiro SHIINA[1], Yuta AMEZAWA[2], Jun OGATA[3], Satoru FUKAYAMA[3], Hiroki KURODA[4], Takahiko UCHIDE[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. Artificial Intelligence Research Center, AIST, 4. Nagaoka University of Technology)

[S06P-15] What factors control D1, the magnitude difference between a mainshock and its largest aftershock?

*Akiko TANAKA[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

An application of full waveform inversion to dense OBS seismic survey off Nemuro, Hokkaido

*Ryosuke AZUMA[1], Gou Fujie[2]

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. JAMSTEC

稠密海底地震計（OBS）アレイによる探査データに周波数領域の音響波・全波形インバージョン（acoustic FWI）を適用した構造モデリングが、南海トラフなどの比較的浅海域において成果を上げつつある。弾性波（elastic）である実観測データを音響波（acoustic）で近似して扱うため、acoustic FWIでは弾性波の影響を無視できる初動付近の波形データに重心を置いて解析するのが一般的である。浅海域の場合、オフセット距離（OBSと震源の水平距離）が短い場所では浅層の堆積層からの屈折波が初動となり、オフセットが大きくなるに連れ深層の地殻やマントルからの屈折波が初動となるため、acoustic FWIでも浅層から深層までモデリングしやすい。一方、深海域では、浅層の堆積層からの屈折波は水中直達波の影に隠れるなどのために初動となりにくい。そのため、acoustic FWIで深海域の地下構造をモデリングするのは一筋縄ではいかない可能性がある。そこで、本研究では、浅海域から深海域までを含む長大測線で実施した稠密OBS構造探査の実データを用いることで、acoustic FWIの実用性や課題を把握するとともに、効果的な適用方法の確立を目指していく。本研究で用いるデータは、海洋研究開発機構の研究船「かいれい」KR19-07航海で取得された千島海溝の前弧域（水深200m）から海溝（水深7400m）を横切りアウターライズに至る全長208 kmの測線沿いにOBS 80台を約2 km間隔で設置して取得したものである。水深によるacoustic FWIの違いを検討するために、まずは解析領域をOBS 20台ずつの区間（区間1：海溝からの距離15～55 km、区間2：35～75 km、区間3：55～95 km、区間4：75～115 km、区間5：95～135 km）に区切って acoustic FWIを適用した。FWIの適用にあたり、すべての区間のデータについて、共通の前処理を施すとともに共通のパラメータを用いた。具体的には、前処理として2-20 Hzバンドパスフィルター、メディアンフィルター、RMS振幅による規格化、幾何減衰の補正、初動前の時間窓のミュートを施し、初期構造モデルとしては走時トモグラフィにより得られたP波速度モデル（既往モデル）を採用している。その結果、最も浅い区間5の解析では、期待通り安定してFWIによりモデルが更新されることが分かった。しかし、相対的に水深が大きい区間１～４では、計算の初期に浅層に非現実的な低速度帯などの偽造が作り出されるなど、画一的なacoustic FWIの適用方法では成功しているとは言い難い状況であることも明らかになった。今後、水深やデータに応じて時間ダンピング、平滑化パラメタ、初期構造、ミュートの設計などを変えることで、FWIの安定化を阻んでいる要因について検討を進め、様々な水深でも安定してacoustic FWIによって詳細構造をイメージングすることを目指していく。

© The Seismological Society of Japan

Subduction Structure from the Forearc Region Off Miyagi to the Central Part of Northern Honshu Arc Revealed by a Dense Seismic Observation

*Eiji KURASHIMO[1], Hiroshi Sato[2], Takaya Iwasaki[3], Takashi Iidaka[4], Tatsuya Ishiyama[1], Masanao Shinohara[1], Hirokazu Ishige[5], Hidehiko Shimizu[6], Shinji Kawasaki[5], Susumu Abe[5], Naoshi Hirata[1]

1. ERI, The University of Tokyo, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Association for the Development of Earthquake Prediction, 4. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 5. JGI, Inc., 6. JAPEX

はじめに

典型的な背弧海盆-島弧-海溝系の1つである東北日本弧やその周辺地域では，内陸地震や海溝型地震が発生している．内陸地震，海溝型地震の地震発生予測のためには，プレートの沈み込み運動によって内陸やプレート境界で地震発生に至るメカニズムを解明することが必要である．その為には，背弧海盆から島弧を経て海溝に至る領域の上盤プレートや沈み込むプレートの幾何学的形状や不均質構造に関する知見を基にして，プレート境界と島弧地殻/マントルの相互作用による地殻活動の理解を深めることが重要になる．しかしながら，日本海から東北日本を経て日本海溝へ至る構造を，海陸境界域を含めて連続的に明らかにするにはいたっていない．2019年に，日本海から東北日本を経て日本海溝へ至る構造を連続的に明らかにすることを目的とした東北日本弧横断海陸統合構造探査が実施された(Sato et al.,2020)．東北日本弧横断測線で取得された発破・バイブレータ震源データに反射法解析，屈折法・広角反射法解析等を適応することで，陸域測線下の詳細な地殻構造断面図が得られつつある(例えば, Sato et al., 2020; Iwasaki et al., 2024).また，陸域で得られた発破・バイブレータ震源と太平洋側でのエアガン発震による初動走時データを用いたトモグラフィー解析や反射波の走時解析等を実施し，東北日本弧から日本海溝宮城沖前弧域にかけての地殻構造が得られつつある(例えば,Kurashimo et al., 2022)．宮城沖のプレート境界における地震の発生メカニズムを考察する上で，宮城沖前弧域下のマントルウエッジや沈み込む太平洋プレートの，形状や地震波速度構造を明らかにすることは重要である．そのような深部構造を明らかにする為には，自然地震データを用いた解析が有効である．東北日本弧横断海陸統合構造探査では，稠密に設置された観測点で連続収録を実施した為，稠密自然地震データも取得されている．そこで，制御震源で得た初動走時データに，自然地震データから読み取った初動走時データも加えてトモグラフィー解析を実施した．本講演では，明らかになった日本海溝宮城沖前弧域から東北日本弧中部にかけての沈み込み構造について報告する．

観測とデータ処理

東北日本弧横断海陸統合構造探査の内，陸域測線は，山形県酒田市から新庄市を経て宮城県女川町に至る約300kmの区間に設定された．このうち庄内-新庄最上区間の測線上には50m間隔で1,167カ所，最上-女川区間の測線上には200m間隔で500カ所に固有周波数4.5Hzもしくは5Hzの上下動地震計を使用した臨時地震観測点が設置された．各観測点では，2019年8月7日～2019年8月15日までの期間で連続収録が実施されており，測線上の3か所での含水爆薬(薬量；200kg)による発震，21カ所での4台の大型バイブレータ震源を使用した集中発震(スイープ数；100～150回)を観測した．また，3か所の発破点と21カ所の集中発震点近傍には，固有周波数1Hzの3成分地震計を使用した臨時地震観測点を設置し，2019年8月7日～2019年8月15日までの期間で連続収録を実施した．気象庁一元化震源リストによると，連続収録を行った期間に，研究対象地域(緯度37.5°－39.25°N：経度139.3°－143.0°E)では591個の震源が決定されている．本探査で設置した臨時観測点で得た連続記録から，これら地震の震源時刻に従って，イベント毎へのデータ編集を実施した後，測線周辺の定常観測点(55か所)で得られている波形データとの統合処理を実施した．

解析と結果

© The Seismological Society of Japan

気象庁一元化震源リストに基づいた統合処理後のイベントデータから，測線近傍の74イベントを抽出し，P波・S波の手動検測を行った．得られた自然地震の初動走時データに，本探査で設置した臨時地震観測点と測線周辺の定常観測点で収録した発破データと，本探査で設置した臨時地震観測点で収録したバイブレータ震源による集中発震データから得た初動走時データを加えて，地震波トモグラフィー解析(Zhang and Thurber,2003)を実施した．トモグラフィー解析の初期モデルには，連携震源決定法(Kissling et al., 1994)を用いて得た1次元速度構造モデルを使用した．得られた測線下の速度構造と再決定された震源分布より，太平洋下から陸域測線下に向かって深さ30～80 kmに確認できる西傾斜の地震活動は，太平洋プレートの沈み込みに起因すると考えられる．この震源分布より深部側のVp/Vs値は大きくなる傾向があり，太平洋プレート内の構造を反映していると考えられる．また，この震源分布より浅部側のマントルウエッジ内のP波速度は8km/s程度に達しており，その先端付近で，地震活動が活発になっているように見える．

© The Seismological Society of Japan

Seismic reflection imaging and pore fluid pressures of the Japan Trench megathrust fault offshore Sanriku, NE Japan

*Yuqi Lyu[1], Tetsuo No[2], Ehsan Jamali Hondori[3], Park Jin-Oh[1]

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Geoscience Enterprise Inc.

The Japan Trench subduction zone offshore Sanriku region of northeastern Japan, is characterized by significant megathrust earthquakes and tsunamis. This region's tectonic and physical properties provide critical insights into plate dynamics and seismic hazard assessment. Notably, the 1896 Sanriku earthquake (M 8.5) is recognized as a typical tsunami earthquake, where the megathrust fault ruptured unusually at a shallow depth. This study aims to elucidate the detailed crustal structures of the Japan Trench subduction zone and estimate the pore-fluid pressures of the megathrust fault that potentially generating large earthquakes and tsunamis. To achieve this, multi-channel seismic (MCS) reflection data were collected along line KJ2204 by the R/V Kaimei during the KM22-07 cruise in 2022, using a large-volume (~174 liters) air gun array for deep-penetration seismic imaging. The MCS data, with a total record length of 16 seconds acquired using a 5800 m long streamer cable with 444 channels at 12.5 m group spacing, were processed using a series of conventional techniques to enhance signal to noise ratio prior to seismic depth imaging. An interval velocity model was constructed for Kirchhoff pre-stack depth migration (KPSDM) using pre-processed common midpoint (CMP) gathers. The velocity model was constructed following a layer stripping strategy, starting with a water velocity to obtain the optimal seafloor reflection on the KPSDM section with minimum residual moveouts on a horizontal semblance spectrum. Subsequently, manually interpreted layers were sequentially incorporated into the model by adjusting the velocity at the top of each layer and its increase rate (gradient), from top to bottom. Each layer is added through a loop of velocity adjustment and KPSDM application until a reasonable horizontal semblance is achieved. We identified horst-and-graben structures caused by normal faulting due to plate bending on the Japan Trench's outer slope. The megathrust fault at the top of the subducting Pacific plate was traced up to ~75 km landward from the trench. Lens-shaped structures were identified along the plate interface: a smaller lens and a megalens. The smaller lens is located approximately 11 km from the trench axis at a depth of around 8 km, with dimensions of roughly 6 km in length and a maximum thickness of about 500 meters. The megalens, positioned approximately 28 km from the trench axis at a depth of around 10 km, extends over a length of approximately 28 km and has a maximum thickness of about 1 km. These features may be associated with basal erosion mechanisms and material transfer processes of the forearc region. The interval velocity model was further utilized to estimate pore-fluid pressures along the megathrust fault, which will be compared with the 2011 Tohoku earthquake (M 9.0) to better understand the behavior of the shallow megathrust fault in generating large tsunamis.

© The Seismological Society of Japan

Relation between deep crustal fluids, crustal seismicity and structure in North Ibaraki revealed by receiver functions?

*Admore Phindani MPUANG[1], Takahiro SHIINA[1], Yasunori SAWAKI[1], Takahiko UCHIDE[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

The northern Ibaraki region in northeastern Japan is one of the regions that have seen an increased upper-crustal seismic activity following the 2011 Mw9.0 Tohoku earthquake. This seismic activity has been attributed to fluids in the lower crust (e.g. Shiina et al., 2024), but the structural relation between the lower crustal fluids and upper crustal seismic swarm remains unclear. To investigate possible tectonic structures and their association with fluid intrusion and earthquake generation in this region, we carry out a receiver function analysis. This method can resolve seismic velocity contrasts associated with tectonic structures (e.g. faults and shear zones) and fluid presence at depth, enabling the elucidation of the earthquake generation mechanism in this region. We analyze teleseismic waveforms of over 600 events recorded between 2016 and 2023 by stations located within and around the region of increased seismicity: 7 stations of the Geological Survey of Japan, AIST, and nearby Hi-net stations. To suppress low-frequency noise and noise amplification associated with the removal of instrument response during preprocessing, we use a deep neural network model for denoising teleseismic waveforms recorded by short-period seismometers (Feng et al., 2024). The denoising model is based on a multitask encoder-decoder denoising technique (Yin et al., 2022) for 3-components seismograms in the time domain. The resulting receiver functions calculated from denoised waveforms show enhanced and sharper coherent crustal phases at higher frequencies (~2Hz), enabling easier identification and further analysis of intra-crustal structures. At stations located within the upper-crustal seismic swarm area, we observe a strong negative phase in receiver functions with delay times of about 2.7 –3.5s after direct P arrival, seemingly increasing towards the NW. Additionally, we observe a phase with delay times within the first 2s exhibiting polarity reversal in the transverse component. The observed negative phase likely originates from the top of a low velocity zone in the lower crust, representing the upper boundary of a fluid rich layer reported by previous studies (e.g. Usuda et al., 2022; Shiina et al., 2024). Meanwhile, the phase observed within 2s suggests a sub-horizontal layer with possible anisotropy at preliminary depths no more than ~15km, near the bottom of the upper-crustal seismogenic zone. Based on our results, we discuss the possible presence of tectonic structures such as faults and shear zones which allow fluid migration from the lower crust to the upper crust, leading to by brittle deformation and subsequent triggering of earthquakes in this region.

Acknowledgement: This study is supported by MEXT Project for Seismology toward Research Innovation with Data of Earthquake (STAR-E) Grant Number JPJ010217. We used some data from the nationwide High-Sensitivity Seismograph Network, Hi-net.

© The Seismological Society of Japan

Three-dimensional attenuation structure around the Hida Mountains

*Shoya Okada[1], Akio Katsumata[1], Kohe Hotta[1]

1. University of Toyama

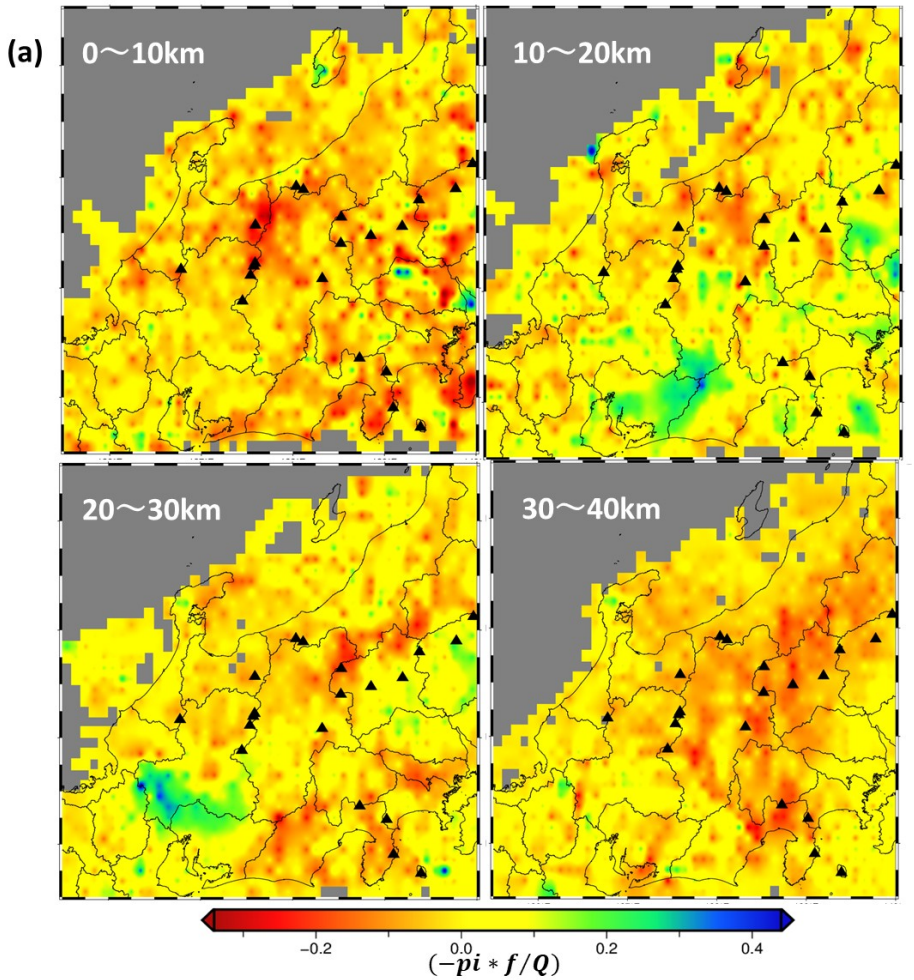
飛騨山脈の周辺では, 地震波が大きく減衰することが以前から知られている. 例えば, 溝上･他 (1983) では, 飛騨山脈西側で発生する地震波動の振幅の減衰は著しく, 東側では検知できない場合が多いことを指摘した. 飛騨山脈およびその周辺における地震波の異常減衰を理解するためには, その定量的, 空間的把握が必要となる. しかし, これまでの研究では, 解析領域が必ずしも飛騨山脈を主対象としていなかったり, 地殻のどの部分で減衰が激しいのか必ずしも明確とはなっていなかったりする. そこで本研究では, 減衰の程度を表すQs値をトモグラフィインバージョンにより推定し, 飛騨山脈及びその周辺の三次元減衰構造を明らかにすることを目的として解析を行なった.

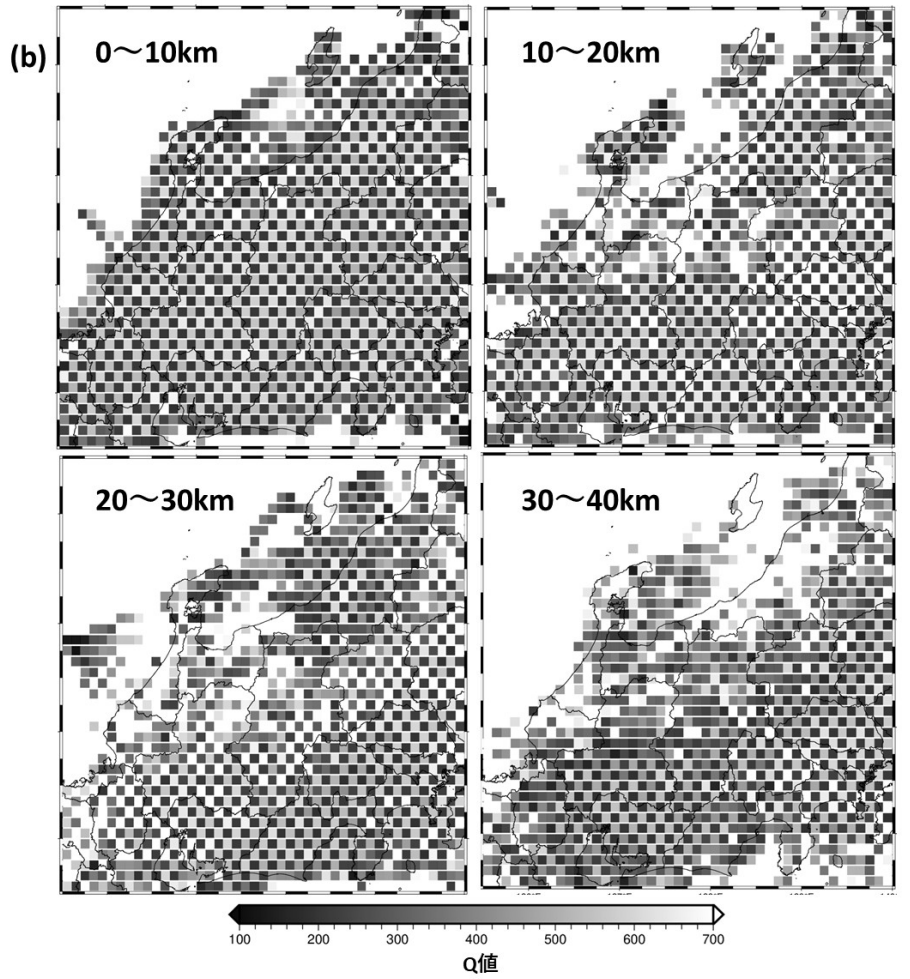
本解析に用いるデータとしては防災科学技術研究所 K-NET 及び KiK-net強震計の加速度強振記録を用いた. 震源の緯度, 経度, 深さ, モーメントマグニチュードは防災科学技術研究所F-netの値を用いる. 現状では 436 の地震データを解析に使用している.
本研究では, 三次元トモグラフィインバージョンによる手法 (中村, 2009) を用いて飛騨山脈及びその周辺のQs値の推定を実施した. このとき, 1ブロックの大きさを緯度0.1˚×経度0.1˚×深さ10kmとした. 地震jによる観測点iでの加速度フーリエスペクトルは以下のように表すことができる.
$\alpha_{ij}(f) = Sa_j(f) \cdot Ge \cdot (\rho_{SB}\,\beta_{SB} / \rho_j\,\beta_j)^{0.5} \cdot g_i(f) \cdot \exp(-\pi f \Sigma T_{ijk}/Q_k(f))$
ここで, $Sa_j(f)$は震源での加速度フーリエスペクトル, Geは震源距離の逆数, ρ_{SB}は地震基盤における密度, β_{SB}は地震基盤における地震波速度, ρ_jは震源での密度, β_jは震源での地震波速度, g_iは観測点におけるサイト増幅特性, $Q_k(f)$はk番目のブロックでのQs値, T_{ijk}はk番目のブロックを通過するのに要する時間である. LSQRプログラム(Paige and Sunders, 1982)を用いてブロック毎の$-\pi f/Q(f)_k$を推定した(図(a)). また, 解像度の解析としてチェカーボード解像度テストを実施した(図(b)).

深さ0-10kmでは, 飛騨山脈周辺に異常減衰が確認された. しかし, 深さ10km以降は大きく減衰していない. 一方, 深さ30-40kmでは, 高減衰域が長野県東部の火山フロント周辺に分布している. 飛騨山脈周辺では火山フロント沿いの火山と異なり, 浅い部分に高減衰領域が集中している. 今後はHi-netのデータを加えるなどして解析制度の向上を目指し, 飛騨山脈周辺の浅い部分における異常減衰の原因を明らかにしていきたいと考えている.

謝辞
本研究では防災科学技術研究所K-NET, Kik-netの観測データ, F-netのメカニズム解を使用した.

© The Seismological Society of Japan





© The Seismological Society of Japan

Retrieval of persistent S reflections from the megasplay fault beneath C0010

*Takashi TONEGAWA[1], Eiichiro Araki[1], Shuhei Nishida[1], Aki Ito[1], Yuya Machida[1], Koichiro Obana[1], Gou Fujie[1]

1. JAMSTEC

南海トラフ域において、2014年からC0002において鉛直地震計アレイが設置されている。この記録に地震波干渉法を適用し、Tonegawa et al. (2023, JpGU)では付加体中の分岐断層と沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻上面からの定常的な反射S波の抽出に成功した。反射S波の振幅は短期および長期で変化しており、この結果は分岐断層の海洋性地殻上面の間の低速度域内の流体の移動を示唆している。このような流体の移動をさらに詳しく調べるために、本研究では2023年9月から2024年2月までC0010に広帯域地震計を設置し、深部から反射S波が抽出されるかどうかを検証した。その結果、低速度域の上面と海洋性地殻上面からの反射S波を抽出することに成功した。さらに、C0010では分岐断層よりも深くまで掘削しているため、鉛直アレイはこの分岐断層をまたいでいる。高周波数帯域の常時ノイズ記録で地震波干渉法を適用した際には、この分岐断層からのPs変換波を抽出できた。これらの結果は、もしC0010に広帯域地震計を設置すれば、反射S波とPs変換波の両方を用いて異なる深さの地震波速度構造をモニタリングすることが可能である。熊野灘でのこれまでのスロー地震の繰り返し周期から、次は2025年にスロー地震が発生する可能性が高い。今後、C0010に加えてC0006でも広帯域地震計を設置して鉛直アレイを構築する予定である。C0002も併せて計3点の鉛直アレイで2025年のスロー地震を観測することが期待される。

謝辞本研究はJSPS科研費JP21H05202, JP21H05204の助成を受けたものです。

© The Seismological Society of Japan

Construction and Validation of a 3D Multi-parameter Model of the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[2], Ryoichiro Agata[1], Toshiya Fujiwara[1], Gou Fujie[1], Katushiko Shiomi[3], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[3], Takeshi Nakamura[4]

1. JAMSTEC, 2. HKU, 3. NIED, 4. CRIEPI

南海トラフ巨大地震震源域における地震・津波ハザード評価、強震動予測、高精度震源決定などに用いる地下構造標準化の試みとして、すでに提案されている沈み込むフィリピン海プレートの形状を含む3次元地震波速度構造モデル (Nakanishi et al., 2018)をベースに、これまで未活用だった屈折法地震探査(例えばArnulf et al., 2021)、反射法地震探査(Nakamura et al., 2022など)や自然地震トモグラフィー(Yamamoto et al., 2022など)、表面波の解析(Tonegawa et al., 2017)などの成果として得られる様々な地震波速度情報に基づく海陸統合3次元マルチパラメータ地下構造モデルの構築を2020年度後半から実施してきた。なお、マルチパラメータとは、現時点でP波速度、S波速度、密度情報を取り扱っている。また、陸域浅部については全国１次地下構造モデル(Koketsu et al., 2012)をとりいれ、海域陸域を問わず様々な用途に活用可能な３次元構造モデルの構築実現を目指している。モデルの構築および環境整備と併せて、理想的な３次元構造モデルへ近づけていくためのモデル修正や更新は、今後も長期にわたって繰り返し必要であることを想定し、モデルの評価、修正、更新についても、それぞれの段階ごとに、継続的に作業できるような方針を検討し、その手順と環境整備も実施した。

本発表では、海陸統合3次元マルチパラメータ地下構造モデルの妥当性を評価する方針の検討状況と、現状のモデルについての評価結果を示す。 まず、３次元P波速度構造モデルについては、走時トモグラフィによって提案された既存の３次元P波速度構造モデル(Arnulf et al., 2022)との差を示すことで評価を実施した。Arnulf et al.(2022)で用いた制御震源データのうち、いくつかの制御震源についての観測走時と本研究で構築した３次元P波速度構造モデルから計算される理論走時とを比較した。現時点で、その差は±0.5秒から1.5秒まで散らばるが、今後比較データを増やしつつ、その特徴について整理する。 ３次元S波速度および密度構造モデルの構築は、P波速度からS波速度および密度への経験的な変換式(例えば、Brocher, 2005，Ludwig et al., 1970)を適用する手法により進めてきた。３次元S波速度構造モデルについては、調査データに基づくS波速度構造情報(Liu et al., submitted., Tonegawa et al., 2017, Yamamoto et al., 2022など) との比較に基づく変換式の検証方針を検討し、既存モデル (Nakanishi et al., 2018)について適用したが（仲西ほか、地震学会2023年度秋季大会）、同様の比較を現状構築した３次元S波速度構造モデルについても実施し、変換式の妥当性について確認した。 さらに、３次元密度構造モデルについては、現状得られた３次元密度モデルから計算される重力異常と観測重力異常とを比較する方法についても整理し、検証を実施した。地殻浅部の密度構造の不均質性を確認するために、南海トラフ域の観測重力異常から沈み込むフィリピン海プレートの影響を取り除き(Furuse & Kono, 2003)、３次元密度構造モデルから計算される重力異常と比較した。

なお、海陸統合3次元マルチパラメータ地下構造モデルは、現在も修正構築が進行中で、今後も継続していくことになると想定される。そのため、新たなデータの追加や、データ自体の修正更新も可能となるモデル構築環境も整備した。多様なデータに対応できるような手順の整備も現状で想定できる範囲で用意した。また、P波に基づくS波速度と密度への変換式については、今回、海水、堆積層とそれ以深の３区分に異なる変換式を適用したが、今後、変換式の変更のみならず、地質解釈に従い、より多くの区分別（例えば、堆積物、付加体、海洋地殻など）、さらには地域別（例えば、日向灘、四国沖、紀伊半島沖、あるいは海陸別など）にも適用可能な仕組みを用意した。さらに、モデルは更新後にその都度、モデル評価し、その結果を示す必要がある。本発表で示した評価方針に従って評価する環境についても、モデルの更新や修正後に容易に対応できる仕組みを整えた。

本研究は、文部科学省による科学技術試験研究委託事業「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。また、本研究の一部は、昨年度までにJSPS科研費 JP19H01982の助成を受けた。

© The Seismological Society of Japan

Anisotropic feature of the upper crust beneath Shikoku inferred from the receiver functions

*Katsuhiko SHIOMI[1]

1. NIED

はじめに
地殻内では，最大水平圧縮軸に平行な微小クラックの存在により地震波速度異方性を有する媒質が形成されると考えられている．地震波速度異方性を推定する際，観測点近傍で発生する地震の記録を用いたS波スプリッティング解析が多用されるが，地殻内地震活動の空間的な偏りの影響を強く受ける．本研究では，四国内に設置された定常観測点並びに臨時観測点で収録された遠地地震記録からレシーバ関数（RF）を推定し，後続波の地震波到来方向依存性の調和成分を抽出，評価する方法を用いて，上部地殻の異方性構造（速い軸の方位）を推定した．

データ・解析方法
解析には，四国及びその周辺に設置された防災科研
Hi-net（doi:10.17598/NIED.0003），F-net（doi:10.17598/NIED.0005）の観測記録に加え，東京大学地震研究所，京都大学防災研究所，高知大学，気象庁，産業技術総合研究所が設置した定常点並びに文部科学省「南海トラフ広域地震調査研究プロジェクト」（FY2013-FY2019）の一環として設置した臨時観測点（doi:10.17598/NIED.0027）で収録された遠地地震波形記録を用いた．まず，USGSが公開している震源カタログから，2000年10月から2023年12月に発生したM5.8の地震のうち，各観測点からの震央距離が30˚-90˚となる地震を選択し，該当する波形記録を切り出した．S/Nの良好な記録を自動及び目視により選択した後，コーナー周波数1.5 Hzの低域通過フィルタを適用した．各観測点で得られたRFにHarmonic decomposition解析（例えば，Bianchi et al., 2010; doi:10.1029/2009JB007061）を適用し，得られた調和成分の二次項（180˚周期成分）の粒子軌跡に対して主成分分析を行うことで，上部地殻の異方性媒質の特徴を調べた．本成分は，水平面内の異方性構造の特徴を記録している．各観測点においてブートストラップ法による誤差評価を行い，標準偏差の2倍が22.5˚ (=360˚/16)を超える観測点の結果は採用しなかった．なお，解析対象の深さは5-15 kmとし，Matsubara et al.（2022; doi:10.1186/s40623-022-01724-0）による三次元地震波速度構造に基づいて，各観測点におけるRFの時間軸と深さの対応付けを行った．

結果
本研究では各観測点を独立に解析したが，近接する観測点で類似の傾向が見られたことから，概ね全域で安定した推定結果が得られたものと判断出来る．中央構造線以南では，多くの観測点で速い軸の方位は西北西－東南東方向を示した．徳島県南部や高知県東部の一部観測点で東西方向を示すほか，室戸岬周辺では北東－南西方向以北で北西－南東方向を示す観測点があった．一方，中央構造線以北の高縄半島及びその周辺では北西－南東方向を示した．これらの局所的な特徴は，小地震の発震機構から推定される最大水平圧縮軸方位（Uchide et al., 2022; doi:10.1029/2022JB024036）として解像されている領域と調和的な傾向にあった．一方，讃岐山脈周辺では，南北方向を示す複数の観測点がまとまって存在した．四国全域では地質帯が西南西－東北東方向の帯状配列を示すが，和泉層群のうち讃岐山地を構成する地質構造は南北方向の境界を有しており，両者の対応は興味深い．

今後は，異方性の強度の推定並びに深さ方向への拡張，他地域への展開を進める予定である．

謝辞：東京大学地震研究所，京都大学防災研，高知大学，気象庁及び産業技術総合研究所が設置した地震計のデータ，USGSが公表している地震カタログ（PDE）を使用しました．レシーバ関数のHarmonic decomposition解析には，Jeffrey Park教授が公開されているプログラムを一部改変して用いました．

© The Seismological Society of Japan

Elastic structure and lithification of the upper crust in subduction zones

*Shinichiro Taka[1], Yohei Hamada[2], Arito Sakaguchi[1]

1. Yamaguchi University Guraduate School of Science and Technology for Innovation, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marin-Earth Science and Technology

【研究背景】
固着すべりは、すべり面が速度弱化特性を有し、かつシステムの弾性が十分に小さい場合に生じる。沈み込み帯の地震発生帯に相当する深度では、摩擦面は速度弱化特性を持つため、固着すべりが発生するが、それより浅い領域については未固結堆積物が、速度強化特性を持つために、固着すべりは発生せず、安定すべりが生じるとされてきた（Scholz, 1998）。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震では断層面の浅い部分で累計50 mも変位した（Ide et al., 2011; Simons et al., 2011など）。これは非地震性であるとされている断層領域でも、大規模な地震性すべりが起きたことを示しており、速度弱化特性の有無が地震発生帯の領域を区分するわけではない可能性を示唆する。そのためすべり面の摩擦特性だけでなく、地震の周期や断層変位量に影響を与える地殻の弾性特性も定量的に評価する必要がある。弾性率はその大小によって断層の固着すべりの挙動が大きく変わる。沈み込み帯震源域の弾性率分布や、堆積岩が弾性率を獲得するメカニズムは、これまで明らかにされてこなかった。このような沈み込み帯の深度方向の弾性構造が明らかとなれば、地震発生時の断層運動を定量化することに役立つ可能性がある（Sallarès and Ranero, 2019）。また、たとえば南海トラフの巨大地震シミュレーションモデル（例えばHyodo and Hori, 2013）でも沈み込み帯の弾性構造モデルは必要とされているが、その情報は欠落したままであった。西南日本の四万十帯は、南海トラフ付加体の陸上延長であり、そこには過去の沈み込み帯の岩石が露出している。それは被熱温度にして110℃から320℃までの地質体であり、南海トラフにおける地震発生帯の温度領域と大きく重なる。本研究では、地震発生帯の過去の震源深度に相当する堆積岩を用いて三軸圧縮試験を行い、岩石の弾性率を測定する。その弾性率と地質体の被熱温度を対比させることで、沈み込み帯における深度方向の弾性構造を明らかにする。また、同様の試料の間隙率を測定し、求めた弾性構造と対比させ、堆積岩の岩石化プロセスを明らかにし、沈み込み帯の弾性率獲得の条件を制約する。
【手法】
露頭から新鮮な砂岩を採取し、高さ50 mm、直径25 mmの円柱形に成型加工する。圧縮試験には高知コア研究所に既設のK0三軸圧密圧縮試験装置（誠研舎製）を使用した。油圧による一定の封圧をかけながら任意の歪速度で垂直荷重を加え、その間の垂直変位を圧力容器内部の軸方向変位計を用いて測定した。本論では封圧40 MPa、載荷速度約0.0417 mm/minの条件下において弾性率を測定した。得られた弾性率と各採取地点の被熱温度との対比をおこなう。間隙率および密度は乾燥時と水飽和時における試料の重量の差から求めた。
【結果】
被熱温度約110℃の四国東部日和佐地域から4試料、被熱温度約150から250℃の四国中西部地域から13試料、被熱温度約320℃の九州東部延岡地域から5試料を採取して測定した。その結果、四国中西部および九州東部延岡地域の試料の弾性率は、36.2±5.2 GPaの範囲に集中した。このなかには地震発生深度の上限付近から下限近くのものまで含まれる。同一付加ユニット内で被熱温度が大きく異なる地質体や、被熱温度は同程度だが年代、岩相、構造の異なる地質体などの比較も行ったが、被熱温度150℃から320℃の地質体において、弾性率はほぼ一定であった。これに対して、被熱温度が約110℃である四国東部日和佐地域の地質体の弾性率は10 GPa前後と著しく低い値が得られた。また、ほとんどの試料で間隙率は0.5 %未満と非常に小さい値となった。
【考察】
被熱温度が約150℃から320℃の地質体においては、弾性率は被熱温度に関係なく36.2±5.2 GPaと高い値で一定であった。この温度領域は、プレート沈み込み帯における地震発生帯の温度領域150℃から350℃（Hyndman and Wang, 1995）と大きく重なる。その一方で被熱温度が約110℃と、地震発生帯よりも低い地

© The Seismological Society of Japan

質体の弾性率は約10 GPaとかなり低い値になった。すなわちプレート沈み込み帯の上盤地殻は、地震発生帯よりも浅い領域では、極端に小さい弾性を有するが、地震発生帯の150℃に達すると岩石は高い弾性を獲得し、それは地震発生帯の下限近くまで一定のまま保持されるという弾性構造であると考えられる。また間隙率は深度に関係なく非常に小さい値を示したことから、沈み込み帯では浅い領域の段階で岩石化が進行しており、地震発生帯の範囲内では岩石化の最終段階の堆積岩が広く分布していると考えられる。地震発生帯の範囲の高い弾性は十分に進んだ岩石化によってもたらされていることが考えられる。

【引用文献】

Hyndman, R. D. and Wang K. (1995) Thermal constraints on the seismogenic portion of the southwestern Japan subduction thrust. Journal of Geophysical Research, **100**, B8, 15373-15392.

Hyodo, M. and Hori, T. (2013) Re-examination of possible great interplate earthquake scenarios in the Nankai Trough, southwest Japan, based on recent findings and numerical simulations. Tectonophysics, **600**, 175-186.

Ide, S. et al. (2011) Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake. Science, **332**, 1426-1429.

Scholz, C., H. (1998) Earthquakes and friction laws. Nature **391** 37-42.

Simons, M. et al. (2011) The 2011 magnitude 9.0 Tohoku-Oki earthquake: mosaicking the megathrust from seconds to centuries. Science, **332**, 1421–1425.

Valentí Sallarès and César R. Ranero (2019) Upper-plate rigidity determines depth-varying rupture behaviour of megathrust earthquakes. Nature, **576**, 96-101.

© The Seismological Society of Japan

Estimation of 3-D velocity structure beneath Kirishima volcano using seismic tomography

*Youhei YUKUTAKE[1], Yutaka Nagaoka[2], Takao Ohminato[1], Takahiro Ohkura[3]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 3. Graduate School of Science, Kyoto University

九州南部に位置する霧島火山は20あまりの火山からなる第四紀の複合火山である。霧島新燃岳では2011年1月に準プリニー式噴火が発生し、2017年から2018年にかけて再びマグマ噴火が発生、また2018年4月には霧島硫黄山で水蒸気噴火が観測されるなど近年活発な火山活動が続いている。霧島火山でのマグマ供給過程を理解するうえで、火山内部の地殻構造を推定することが重要となる。霧島火山ではAizawa et al (2014)により3次元比抵抗構造の推定が行われ、新燃岳の北側に深さ10km付近から浅部にかけて鉛直に伸びるマグマ供給経路を示唆する低比抵抗帯の存在が明らかになった。さらに、Nagaoka (2020)は常時微動を用いた地震波速度トモグラフィーにより新燃岳の下深さ10km付近にマグマ溜りの存在を示唆する低速度域を検出した。また霧島火山南部に位置する御鉢の下深さ25km付近に発生する深部低周波地震活動について、浅部の火山活動に先行して活発化するため火山深部へのマグマ供給を反映していると解釈されている (Kurihara et al., 2019)。しかしながら、火山深部から浅部にかけてのマグマ供給経路については十分に理解がされていない。そこで本研究では自然地震を用いた3次元速度トモグラフィーを実施し、火山内部深さ20km以浅の地震波速度構造の推定を行った。本研究では、2011年1月末から2013年12月末までに霧島火山およびその周辺地域で発生した1666イベントを用いた。該当地域において東京大学地震研究所、九州大学、気象庁、防災科学技術研究所により設置された124点の定常地震観測点データに加えて、同期間に京都大学により霧島火山北部域に設置された9点の機動地震観測点の波形データを使用した。気象庁一元地震カタログおよび気象庁火山地震カタログの発震時刻を基準に、波形記録を切り出し、P波およびS波の到達時刻をPhaseNet (Zhu and Beroza 2019)コードを用いて読み取った。さらに気象庁一元化カタログの手動検測値も使用した。3次元速度構造の推定にはDouble-differenceトモグラフィー法 (Zhang and Thurber, 2003)を用いた。初期構造として三ヶ田 (1996)による霧島火山地域の1次元速度構造を用いた。霧島火山地域で水平方向に4km間隔、深さ20kmまでは鉛直方向に3km間隔のグリットを設定した。推定された速度構造では、新燃岳から硫黄山にかけての領域の下深さ6km～9kmにかけて顕著な低Vpおよび低Vs領域が検出された。この低速度領域の上部は高いVp/Vsを示しておりマグマたまりの存在を反映している可能性がある。また御鉢の下深さ25km付近の深部低周波地震発生域上部から新燃岳直下にかけて低Vpの領域が確認でき、火山深部から浅部へのマグマ供給経路を示唆している可能性がある。今後、別期間の検測データの整備及び解像度の検証を進めていく。

謝辞
本研究では、東京大学地震研究所、京都大学、九州大学、防災科学技術研究所、気象庁の地震観測点のデータを使用しました。気象庁一元一元化震源カタログおよび火山地震カタログを使用しました。本研究はJSPS科研費22K03752及び文部科学省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」の助成を受けたものです。

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of high concentration REY-rich mud distribution revealed by the distribution of sedimentary layers near Minamitori Is.

*Yuzuru Kaneko[1], Kazuo Nakahigashi[1], Mikiya Yamashita[2], Koichi Iijima[3]

1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology , 3. Japan Marine Science and Technology Center

南鳥島は東京都小笠原村に属する日本最東端の島であり、国内で唯一太平洋プレートの上に存在する島である。東京からの距離はおよそ1900 kmである。近年の調査研究によって、日本の排他的経済水域(EEZ)である南鳥島周辺海域は、マンガンノジュールやレアアースを多く含む堆積物(レアアース泥)などの多くの海底資源が発見されている。加藤(2015)は、南鳥島南方の調査地点において海底下3 m付近に、最高6500 ppmを超える超高濃度のレアアース泥が存在し、複数の地点で海底下10 m以内の浅い深度からレアアース泥が出現することを発見した。さらに、Nakamura et al.,(2016)は、サブボトムポロファイラーとピストンコアで得られたデータ・サンプルから、南鳥島周辺の代表的な表層地質構造断面図と海底表層に分布する堆積物の分布区分を示した。しかし、サブボトムプロファイラーで得られた地下構造よりも深い領域の構造をイメージングすることは、レアアース泥の成因過程を考察するために重要である。また、レアアース泥の分布と地下構造の関係を明らかにすることも重要である。　そこで本研究では、2015年に海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」を用いて実施された航海MR15-E01で取得された反射法地震探査データを用いた。解析の主な処理はジオメトリーの設定、シングルトレース、バンドパスフィルタ、NMO、一定速度解析、CMP重合、キルヒホッフ時間マイグレーション、トップミュートである。解析の結果、西測線では海底面が往復走時(TWT)7.5～7.6秒付近にあり、わずかに南側に傾斜している。また、音響基盤はTWT7.9～8.1秒付近にまばらに点在している。透明堆積層は非常に薄く一様に分布している。東測線は海底面がTWT7.6秒付近にあり、音響基盤は測線の中心部分(CMP1200付近)を境に不連続となっており、南側でTWT7.9秒付近、北側でTWT8.1秒付近に存在している。この不連続面を重力データと比較することで断層であると解釈した。また、TWT7.9~8.1秒付近に見られる音響基盤は、同海域で海上保安庁が実施した反射法・屈折法地震探査の結果から海洋地殻のトップ層であると考えられる(Kaneda et al., 2015)。そのため、本研究で解析した測線に見られる音響基盤も海洋地殻のトップ層と判断し、それよりも上層は堆積層であると解釈した。西測線と東測線の堆積層厚を検討すると、西測線で約400 m、東測線で断層を境に約160 mと約400 mとなる。そして、Nakamura et al.,(2016)の先行研究で得られているレアアース泥濃度分布図を解析した測線を重ねると、堆積層が厚いところでレアアース泥濃度が低く、堆積層が薄いところでレアアース泥濃度が高いことを明らかにした。

謝辞:本研究において解析したデータ取得を行っていただきました、MR15-E01航海の芥川船長をはじめ他乗組員の皆様、観測技術員の皆様、航海に関わったすべての皆様に感謝を申し上げます。反射法断面図を作成する上で解析するソフトを提供頂いた、株式会社地球科学総合研究所の皆様に深く御礼申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

High-resolution seismic reflection images of the Shatsky Rise, northwest Pacific

*Jin-Oh Park[1], Yue Sun[1], Yu Fan[1], Noboru Yamakawa[1], Yuqi Lyu[1], Ryota Murai[1], Ryoji Toda[1], Yoshiki Horiuchi[2], Kazutaka Yasukawa[3], Junichiro Kuroda[1], Erika Tanaka[4], KH-24-1 Shipboard Science Party[5]

1. AORI, University of Tokyo, 2. Nippon Marine Enterprises, 3. School of Engineering, University of Tokyo, 4. Marine Core Research Institute, Kochi University, 5. N/A

Shatsky Rise is one of the large igneous provinces (LIPs) on Earth that can provide information on mantle processes and composition. As an oceanic plateau, it is known to have formed in the Late Jurassic/Early Cretaceous between 147 and 135 Ma, providing a valuable record of Pacific paleoceanography. It consists of three broad bathymetric highs, the Tamu, Ori and Shirshov massifs. Around the Shatsky Rise, nutrient supply has been attributed to surface currents (i.e. Kuroshio Extension and Oyashio Current) and intensified westerly winds, accompanied by a supply of eolian dust. Recently, the nutrient supply system influenced by turbulence and upwelling has been re-evaluated in the Kuroshio area and in the oligotrophic area south of the Shatsky Rise, which is generated by bottom water current and "topographic high". However, observations have not confirmed that the dynamic topography acts as a physical barrier to deliver nutrients from the deeper to the shallower depths and to influence the composition of the sediments. On the southwestern flank of the Shatsky Rise, a sedimentary hiatus between the Pliocene and Cretaceous is confirmed, suggesting the existence of strong bottom currents in this area.During the R/V Hakuho-maru cruise (2-19 April 2024), we conducted a multichannel seismic (MCS) reflection survey to obtain high-resolution images of the shallow crustal structure in the southwestern flank of the Tamu Massif, Shatsky Rise. This was a revisit with a more advanced MCS system since the R/V Thomas G. Thompson cruise in 1994. We acquired good quality MCS data on 16 survey lines totalling ~688 km. We used one or two GI guns (~12 liters) with a 25 m shot interval to obtain high resolution MCS data. We recorded MCS data with a 10-sec recording length and 1 or 2 msec sampling interval using a 1,200 m long 48-channel streamer with 25 m group spacing, resulting in a standard CDP fold number of 24. Navigation data by Trigger Fish 2D was stored in UKOOA P1/90 and P2/91 formats. Quality control of the MCS data was performed using the onboard RadExPro seismic processing software. After applying UKOOA P1/90 navigation data to the MCS data for geometry setting, we performed velocity analysis using pre-conditioned CMP (common midpoint) gathers for quick normal moveout correction and performed CMP stacking to produce a conventional CMP stacked section. We also performed post-stack time migration using the CMP stacked data.We have carried out a lithostratigraphic interpretation of the MCS profiles in the Tamu Massif. Based on seismic reflection characteristics and results from Ocean Drilling Program Leg 198 Sites 1213 and 1214, we identify four specific seismic reflection units: Units A, B, C and D from top to bottom. Unit A, with Neogene nannofossil ooze and clay, shows transparent, continuous, low amplitude reflections. Unit B, composed mainly of Cretaceous chert and porcellanite, shows chaotic reflections. Unit C, composed mainly of Cretaceous chert, porcellanite and chalk, is characterized by transparent, partly continuous, high amplitude reflections. Unit D, an acoustic basement, is interpreted as Early Cretaceous to Late Jurassic basalt. In this talk we will present the preliminary results of the MCS survey.

© The Seismological Society of Japan

Three-dimensional velocity-structure for hypocenter determination

*Akio Katsumata[1], Nishimiya Takahito[2]

1. University of Toyama, 2. MRI, JMA

はじめに
三次元速度構造の下で震源決定を行なうために，日本列島下の速度構造の検討を行なってきている．これまでの調査において，三次元速度構造の使用により，堆積層が厚い領域などにおける震源決定精度の向上、沖合いの震源深さなどに改善が認められた。これまで分割して推定していた日本列島域の構造を一括推定として再構築した．

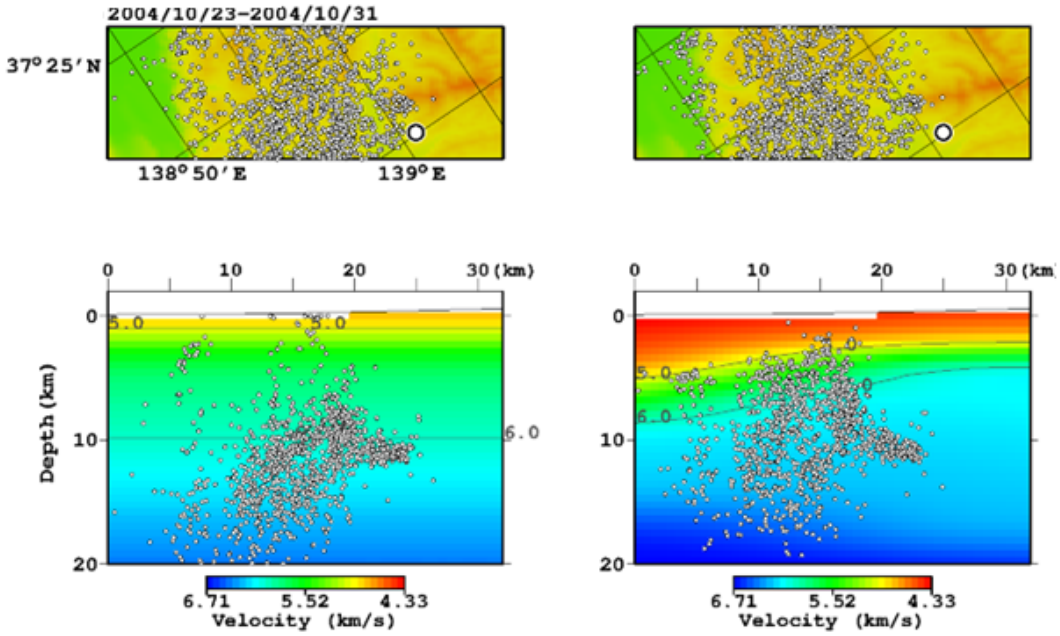
速度構造の推定
速度構造は，スローネスをBスプラインにより表現していた連続構造としている．モホ面深さやプレート内の高速度などは初期モデルとして考慮している．深さ方向の速度構造の相互影響を抑えるために，深さを7kmまで，20kmまで，50kmまで，100kmまでと制限した構造推定を順次行った．沈み込み帯の深い地震の場合には，遠方にしか観測点が存在しないために，絶対的な精度は低い．そのような地震の絶対的な位置精度を向上させるためにISCのEHBカタログの震源位置をほぼ固定として参照して構造を推定した．また，構造のスムーズ化・初期構造への復元作用も推定に導入している．

震源位置
再構築した不均質速度構造を用いることにより，以下の震源決定精度の向上が確認された．
・内陸地震における震源分布精度の向上(図(a))
・沖合いの地震における深さ精度向上(図(b))
・伊豆小笠原海溝の深発地震の絶対的位置精度の向上

謝辞
本調査には，国立研究開発法人防災科学技術研究所，北海道大学，弘前大学，東北大学，東京大学，名古屋大学，京都大学，高知大学，九州大学，鹿児島大学，気象庁，国立研究開発法人産業技術総合研究所，国土地理院，青森県，東京都，静岡県，神奈川県温泉地学研究所，横浜市及び国立研究開発法人海洋開発研究機構及のデータを利用している．

© The Seismological Society of Japan

(a)2004 年中越地震



(b)2005年宮城県沖地震

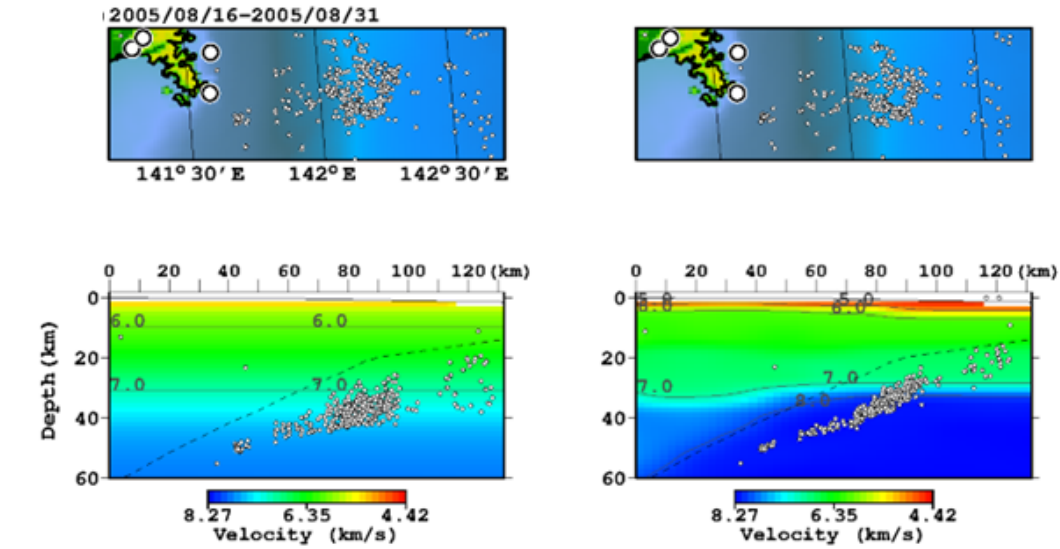


図 右：一次元構造(JMA2001)の震源分布, 左：不均質構造の震源分布
小丸：震源，大丸：観測点位置

© The Seismological Society of Japan

An explore of crustal reflector based on comprehensive detection of S-wave later phase in Japan

*Takahiro SHIINA[1], Yuta AMEZAWA[2], Jun OGATA[3], Satoru FUKAYAMA[3], Hiroki KURODA[4], Takahiko UCHIDE[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. Artificial Intelligence Research Center, AIST, 4. Nagaoka University of Technology

多点稠密な基盤的地震観測網が整備され，日々膨大な観測波形記録が蓄積されている．近年における教師あり深層学習の導入は，膨大な観測波形記録の効率的な処理を可能とした．特に直達波（P波およびS波）については高精度な検出や検測の自動化がほぼ達成された．一方，観測波形記録には直達波以外にも多様な波群がしばしば観測される．例えば，直達波に遅れて観測される実体波は後続波と呼ばれ，地震波速度不連続面など，地下に存在する顕著な不均質構造に関連して励起された波群である．膨大な観測波形記録から後続波を自動抽出して活用する技術を確立することで，地下構造イメージングにおける空間分解能の更なる向上や直達波のみでは困難な不均質構造の制約につながると期待される．
直達S波のコーダ波部分に観測されるS波後続波は，日本列島内陸部において特に報告の多い後続波であり，地下に存在する地震波反射面や散乱体を励起源とした後続波である．Amezawa et al. [under review]は秋田県森吉山地域の単一観測点で記録された群発地震の観測波形記録からS波後続波の教師データを作成し，深層学習によるS波後続波の自動検出モデル（LPS-detector）を構築した．その後，LPS-detectorを日本列島内陸の上部地殻内で発生した地震の観測波形記録に適用し，S波後続波の網羅的検出を行った[雨澤・他, 2023, 日本地震学会2023年秋季大会]．LPS-detectorは過去にS波後続波の観測報告がある地域（例えば，日光白根山周辺[e.g., Matsumoto and Hasegawa, 1996]や茨城県北部[e.g., Shiina et al., 2024]）に加えて，これまで報告がなかった大雪山周辺や鹿児島湾周辺でもS波後続波を検出した．
本研究ではLPS-detectorが網羅的に検出したS波後続波をS波反射波と仮定し，その励起源を概観する．励起源のイメージング手順の概要は以下の通りである．まず，LPS-detectorのモデル出力が0.65以上（最小0.0，最大1.0）となり，S波後続波を伴うと判定された観測波形記録[雨澤・他, 2023]を収集し，各観測波形記録について水平2成分エンベロープを合成する．次に，単散乱モデル[Sato, 1977]に基づき理論コーダ振幅を求め，直達S波到達から10 s間の残差エンベロープ波形を得る．その後，水平反射面での反射を仮定することでS波反射波の直達S波に対する遅延時間を深さに焼き直し，残差エンベロープ波形の振幅（以下，Brightness）をマッピングする．簡単のため，S波速度は一律の3.5 km/sを与えた．
イメージングの結果は，日本列島内陸部においてS波反射波の励起源が主に深さ10-15 kmの範囲に分布することを示唆する．雨澤・他 [2023]がS波後続波の観測を指摘した地域でBrightnessが高くなることから，LPS-detectorが実際に地殻内部に存在する不均質構造により励起された波群を検出していることが確認された．また，北海道留萌地方や茨城県北部，和歌山県付近などでは高Brightness域が広く分布する傾向が認められる．一方で，大雪山周辺をはじめとする火山周辺では高Brightness域の局在的な分布がみられる．これらの空間スケールの違いはS波後続波の励起源となる強い不均質構造や地殻流体の水平方向の分布スケールが地域ごとに異なることを示していると考えられる．

謝辞：本研究では気象庁，防災科学技術研究所，国立大学法人による観測波形記録，および，気象庁一元化震源カタログとその検測値を使用しました．また，本研究は文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）JPJ010217の助成を受けたものです．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

What factors control D1, the magnitude difference between a mainshock and its largest aftershock?

*Akiko TANAKA[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

余震は防災上からも関心が高い．余震の一つの指標である最大余震と本震のマグニチュードの差, D1, は，約1.2 であることは経験的に知られている (Bath's law)．D1 の地域性については，宇津 [1999] によりまとめられている．例えば，D1 は破砕地域では小さい [茂木, 1967]，プレート境界沿いの地震の方が背弧側より小さい [Tsapanos, 1990] などの報告がある．また，Doser [1989] や 古本 [2005] らにより， D1 と地殻熱流量が相関付けられ，関谷・他 [2018] は，D1 と地震の下限深度の関連性を示す結果を得ている．これらはいずれも D1 が地震発生場の脆性領域の性質によることを示唆する．このように，世界中の多くの地域で解析され，地域性や地球物理学観測量との相関を調べる試みはあるが，いずれも D1 の地域的なばらつきや観測量との相関も必ずしも明瞭ではなく限定的である．

そこで，これらの関係を同様のデータを用いることにより見直し，他のパラメータについての関連について考察する．古本 (2005) は1926-2004 年の間に日本列島の陸域下付近で発生したマグニチュード 6.5 以上の地震 27個について，D1 と地殻熱流量の相関を得ている．ここでは，解析期間や条件を見直すことでデータ数を増やし，他のパラメータとの相関も加味して，D1 の地震発生場を規定する構造・応力分布などの要因との関連を考察する．また，さらに，様々なテクトニックな場でのこれまでの解析例をまとめ，D1 は地震の発生する脆性領域の性質と関係しているのか，余震系列と本震との間に本質的な差があのか，などについて検討した結果を紹介する．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 21st) | Regular session：S09. Statistical seismology and underlying physical processes

Mon. Oct 21, 2024 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Oct 21, 2024 8:15 AM - 9:45 AM UTC | Room P Main Hall (2F)

[S09P] PM-P

[S09P-01] Hypocenter determination of very-micro earthquakes in Showa-Shinzan volcano

*Akiko TAKEO[1], Motoko Ishise[2], Rikuto Kawaike[3], Kiwamu Nishida[1], Hiroshi Aoyama[4], Yosuke Aoki[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Yamaga University, 3. Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

[S09P-02] Recent seismic activity off Fukushima and Ibaraki using S-net data

*Azusa Nishizawa[1], Masashi Mochizuki[1], Kenji Uehira[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S09P-03] Characteristics of the M5.4 earthquake that occurred in western Kanagawa Prefecture, Japan, on August 9, 2024

*Yuki ABE[1], Ryo Kurihara[1], Ryou Honda[1], Yutaka Nagaoka[1], Kazuhiro Itadera[1] (1. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government)

[S09P-04] Shallow Volcanic Swarms near Izu Oshima in 2023

*Hinako Arakawa[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-05] Analysis of seismicity and crustal movement on the eastern side of Izu Peninsula

*Kazuyoshi Z. NANJO[1,2,3,4], Yohei Yukutake[5], Kumazawa Takao[3] (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. University of Tokyo)

[S09P-06] Comparison of 2008-2009 seismic activity and aftershocks in the northern end of the aftershock region of the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Yuya MACHIDA[1], Masanao Shinohara[2], Tomoaki Yamada[2], Kazuo Nakahigashi[3], Toshihiko Kanazawa[4] (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology, 4. Association for the Development of Earthquake Prediction)

[S09P-07] The long-term Noto seismicity revealed by ten-years-long continuous records and a few ten thousand template waveforms

*Moka Sasaki[1], Hironori Kawakata[1], Shiro Hirano[2] (1. Ritsumeikan University, 2. Hirosaki University)

[S09P-08] Estimation of stress field in the northeast Noto Peninsula: Influence of fluid on earthquake occurrence

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

[S09P-09] Long-term fluctuations of b-value around the Noto Peninsula using the JMA earthquake catalog

*Sota Maegawa[1], Toshitaka Baba[1] (1. Tokushima University)

[S09P-10] Shallow tectonic tremor activity in Hyuga-nada from April to July 2023

*Yusuke YAMASHITA[1], Masanao Shinohara[2], Tomoaki Yamada[2], Yukihiro Nakatani[3], Shuichiro Hirano[3], Hiroshi Yakiwara[3], Kazuo Nakahigashi[4], Takeshi Matsushima[5], Yoshihiro Ito[1] (1. DPRI, Kyoto University, 2.

ERI, the University of Tokyo, 3. NOEV, Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. SEVO, Kyushu University)

[S09P-11] Automatic analysis of regular and slow earthquakes using DONET and distributed acoustic sensing data in the Nankai Trough, southwest Japan

*Satoru BABA[1], Eiichiro Araki[1], Akiko Toh[1], Ryoichiro Agata[1], Ayako Nakanishi[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

[S09P-12] Toward Precise Estimation of Stress Drop using DAS Data Recorded in the Central Shikoku, Japan

*Takumi Takahashi[1], Aitaro Kato[1], Ji Zhang[1], Masanao Shinohara[1] (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[S09P-13] Exploring Classification Indicators of Seismic Signals Toward Understanding the Causes of Tectonic Tremors

*Akiko TO[1], Aitaro Kato[2], Eiichiro Araki[1] (1. JAMSTEC, 2. ERI Univ. of Tokyo)

[S09P-14] FAMT solutions of earthquakes off the northwest coast of Okinawa island by using a land-ocean unified 3D structure model

*Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[2], Taro Okamoto[3], Mamoru Nakamura[4], Shutaro Sekine[5], Shintaro Abe[5] (1. Okayama Gakuin University, 2. Okayama University, 3. Tokyo Institute of Technology, 4. University of the Ryukyus, 5. Association for the Development of Earthquake Prediction)

[S09P-15] Ocean bottom seismograph and pressure gauge observations in northern Cascadia subduction zone

*Koichiro OBANA[1], Hajime Shiobara[2], Hiroko Sugioka[3], Tsutomu Takahashi[1], Michael Riedel[5], Tianhaozhe Sun[4], Andrew Schaeffer[4], Karen Douglas[4], Michelle Côté[4], Tiegan Hobbs[4], Cooper Stacey[4], Kelin Wang[4], Martin Heesemann[6], Jesse Hutchinson[6] (1. JAMSTEC, 2. ERI, Univ. of Tokyo, 3. Kobe University, 4. Geological Survey of Canada, 5. GEOMAR, 6. Ocean Networks Canada)

[S09P-16] Microseismic activity around East Ongul Island, East Antarctica based on seismic array observations

*Manami HASHIMOTO[1], Masaki KANAO[2], Taishi HASHIMOTO[2] (1. ADEP, 2. NIPR)

[S09P-17] Detection of potential small-scale aseismic slip in the area of small repeating earthquakes

*Toshihiro IGARASHI[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S09P-18] Spatial-temporal variation in the simulated seismicity from multiscale patch model

*Hideo AOCHI[1,2], Takane Hori[3] (1. BRGM, 2. LG-ENS, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. JAMSTEC)

[S09P-19] Swarm-ness Analysis of Low-Frequency Earthquakes in Western Shikoku Using Modified ETAS Model

*Kaito Shimomura[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-20] Magnitude Dependency of ETAS Parameters

*Daichi Ishikawa[1], Naofumi Aso[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-21] Detection of dynamically-triggered earthquakes using CNN model for seismic phase discrimination

*Kengo SHIMOJO[1] (1. Meteorological Research Institute)

[S09P-22] True b-value Estimation Using Recurrent Neural Network

*Naofumi ASO[1] (1. Tokyo University of Science)

[S09P-23] Updating the seismic activity model for background earthquakes in probabilistic seismic hazard assessment

*Nobuyuki MORIKAWA[1], Jun'ichi MIYAKOSHI[2], Hiroyuki FUJIWARA[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

Hypocenter determination of very-micro earthquakes in Showa-Shinzan volcano

*Akiko TAKEO[1], Motoko Ishise[2], Rikuto Kawaike[3], Kiwamu Nishida[1], Hiroshi Aoyama[4], Yosuke Aoki[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Yamaga University, 3. Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

昭和新山は1943–1945年の噴火において有珠火山の東に形成された標高約400mの火山である。最上部には溶岩ドームが露出しており、標高200m程度の屋根山と呼ばれる高台が山頂東部と北西部に存在する。Takeo et al. (2022 GJI)では、山の上及び麓に22台の短周期地震計を設置して1ヶ月の観測を行い、雑微動を用いた地震波干渉法を行った。その結果、山頂直下、東の屋根山、麓の3エリアにおいて1次元S波速度構造を推定し、山頂直下のS波速度は先行研究で重力・ミューオンを用いて推定された密度から予想されるよりも低く、内部にクラックなどが多数存在する可能性を示した。

一方、この1ヶ月の地震計記録からは予想外の地震活動も見つかっている。Takeo et al. (2020 JpGU) では、画像処理と目視により溶岩ドーム周辺でシグナル・ノイズ比の高い56イベントを選択した。エンベロープを利用した初動の自動読み取りを行い、10観測点以上で読み取りが行えた37イベントについて震源決定を行い、27イベントで山頂直下の深さ0–150 m周辺に震源が求まった。初動読み取り精度が悪く、震源が上空に求まったイベントも9イベントあった。

本研究では、この震源推定結果を改善するため、あらためて初動の手動読み取りを行った。麓ではほぼ見えなく山頂で大きい振幅傾向などから震源が溶岩ドーム内部に存在すると仮定し、使用する観測点を山頂付近及び溶岩ドーム周辺の11観測点に絞った。山頂付近とそれ以外ではS波速度構造が大きく異なることも観測点を絞った理由である。震源決定を行えた49イベントの合計読み取り数は423個である。走時残差は手動で推定した読み取り誤差で規格化し、グリッドサーチによる震源位置推定を行った。仮定するP波速度を変えて全イベント合計の走時残差を評価したところ、P波速度1.6 km/sの時に最も残差が小さくなった。全イベントにおいて溶岩ドームのほぼ内部に震源が求まり、山頂からの深さは50–250 mである。坪井式マグニチュードの推定値は-3.6から-1.6の範囲に求まり、多くのイベントで-3から-2.5であった。

震源位置の広がりについては議論の余地がある。イベントや観測点によっては初動があまり明瞭ではなく、0.05秒程度の読み取り誤差がある。P波速度から換算すると80m程度の位置推定誤差に相当する。さらに、S波到達は明瞭に見られず現時点で読み取ることができていない。ブートストラップ法によって推定した震源推定誤差は水平・鉛直方向ともに50–100 mであり、震源位置の広がりについて議論することは難しい。ただし、イベントによって初動到達の早い観測点に違いがあることから複数箇所で発生していると考えられる。

震源分布の広がりをさらに理解するため、相対震源位置決定も試みた。一般的にはイベント間の初動相対時刻差を測定してから相対位置を決定するが、本研究で対象とする地震は初動があまり明瞭ではない。そこで、全イベントペアの相互相関関数を予め計算し、絶対位置と震源発生時刻をパラメータとして相互相関係数の総和をSimulated Annealingにて最大化することを試みた。数値テストの結果は相対的な震央位置を決めることはできているが、深さの精度が改善せず、さらなる改良が必要である。震源精度改善にはS波初動時刻が必須である可能性が高く、テンプレートマッチング手法などによるイベントの検出とスタックによるS波到達の抽出なども検討する必要がある。

© The Seismological Society of Japan

Recent seismic activity off Fukushima and Ibaraki using S-net data

*Azusa Nishizawa[1], Masashi Mochizuki[1], Kenji Uehira[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

福島県沖から茨城県沖にかけては，プレート境界で発生する地震に加えて，陸側プレート内や沈み込む太平洋プレート内で発生する地震がしばしば大きな被害をもたらす．特に1938年にはM7クラスの逆断層および正断層型の地震が集中的に複数発生するなど，この領域の地震活動の詳細な実像を明らかにする必要がある．今回は，S-net（Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench：日本海溝海底地震津波観測網）データを用いて，2016年4月1日以降およそ8年間の福島から茨城沖における領域の震源再決定を実施し，福島県沖の2016年11月22日の地震（Mj 7.4，Mw 7.0）及び茨城県沖のM7クラスの地震がおよそ20年間隔で発生する領域とその周辺の地震活動について報告する．震源決定のコードはNonLinLoc（Lomax et al., 2000，2014）を使用し，S-netの各観測点に対してマルチチャネル反射法地震断面図から求めた堆積層厚に基づく補正（西澤ほか，2022）を行った．速度構造モデルは，各地域において実施された構造探査結果を参照し，沈み込む太平洋プレート（Iwasaki et al. (2015)及びLindquist et al. (2004)）を考慮した2.5次元構造を用いた．

福島県沖における2016年4月以降の顕著な地震活動の一つである2016年11月22日の地震は，北西－南東方向に張力軸を持つ正断層型で，陸のプレートの地殻内において南東方向に傾斜する断層面で発生した地震であった．この地震により津波が発生し，また海底地形調査や潜航調査からも海底活断層の存在が示唆された（例えばJAMSTEC, 2017）．再決定により得られた地震発生後24時間の震源分布から，本震はその近傍で傾斜40-45度で南東方向に傾斜している断層面の最浅部の深さ6 km付近に位置していることがわかった．震源分布の浅部延長は海底面調査から検出された断層地形の位置にほぼ一致する．一方，余震の震源の深さ分布は北東と南西では異なり，南西ではばらつきが大きく，より深く20kmまで達しており，15km付近には活動の低い領域がある．この分布の特徴は2024年3月まで継続している．

茨城県沖では群発的な地震活動が時々発生するほか，前震活動を伴ったM7クラスのプレート間地震が概ね20年に1度発生している．前回は2008年5月8日Mj7.0を含む地震活動であり，Mj6.3を含む活発な前震活動がその東側で発生していた．2016年4月以降の地震活動を見ると，東北沖地震の最大余震である2011年3月11日15時15分に発生した茨城沖地震（Mj7.6）のすべり域では地震活動が低い．このすべり域の北東では，2021年8月4日Mj 6.0，最大震度3の地震を含む活発な地震活動があり，震源の再決定の結果，地震発生後１ヶ月間の震源分布は海溝軸近傍で陸側プレート下に沈み込みつつある第１鹿島海山の西方の既に海底下に沈み込んだ海山の陸側に集中していた．2016年4月以降の震源分布は，この沈み込んだ海山の麓から西北西方向に地震活動の高い帯状の領域があり，1982年（Mj7.0），2008年（Mj7.0）の地震活動はこの帯状領域のプレート境界で発生していたことを示す．

© The Seismological Society of Japan

Characteristics of the M5.4 earthquake that occurred in western Kanagawa Prefecture, Japan, on August 9, 2024

*Yuki ABE[1], Ryo Kurihara[1], Ryou Honda[1], Yutaka Nagaoka[1], Kazuhiro Itadera[1]

1. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government

2024年8月9日19時57分ごろ神奈川県西部を中心に最大震度5弱を記録する地震（以降、本地震）が発生した（気象庁地震情報による）。神奈川県温泉地学研究所（以降、温地研）は、本地震について、防災科学技術研究所、東京大学地震研究所、気象庁、および温地研の地震観測網で得られた波形記録から読み取ったP波S波の到達時刻をもとに震源および発震時刻を推定した（震源：北緯35.4094度、東経139.1564度、深さ12.6 km、発震時刻：19時57分38.4秒）。また、各観測点の上下動振幅と震源からの距離に基づきマグニチュードを5.4と推定した。初動の押し引きの分布から推定したメカニズム解は、震源が北向きに26度あるいは南向きに64度で傾斜した断層面で発生した断層運動（逆断層）であり、北傾斜の断層面を仮定した場合は上盤が南向きに運動したことを示す。

本地震の震源は、弘瀬ほか(2008, 地震)および Nakajima et al. (2009, JGR)が推定したフィリピン海プレート上面付近に位置する。震源断層として北向きに26度で傾斜する面を仮定すると、断層面とプレート境界面とは傾斜が似ているが、フィリピン海プレートが北西方向に沈み込んでいる地域である(Seno et al., 1993, JGR)ことを考慮すると、下盤側の運動はそれに比べて北向き成分が大きい。本地震がプレート境界で発生した可能性はあるが、震源付近は沈み込みから衝突へと収束様式が変化しプレート境界面形状が複雑な地域であり、その判断は難しい。

また、本地震について前震と思われる地震活動を検出した。2009年以降本地震発生までの間に、温地研は本地震の震源から半径2 km以内の領域に30回の地震（マグニチュードは最小で0.4）を検出している。検出頻度は1年に約2回である。一方、本地震発生から約１時間前の18時53分から56分にかけて3回の地震（マグニチュード2.2, 2.4, 0.9）が検出されており、本地震発生直前に震源付近では地震活動が普段の状況から急激に高まっていたことがわかる。

本地震の震源付近は、プレートの収束過程や過去の被害地震の地震像が未解明であり(本多ほか, 2021, 温研報告)、本地震及び余震活動の詳細な調査から、応力場や断層面形状を正確に明らかにしてテクトニクスの理解につなげたい。また、本地震の震源は1923年の関東地震の震源(Kanamori & Miyamura, 1970, 地震研彙報)に近く、本地震と関東地震とは震源断層を共有している可能性もある。テクトニクスの理解に加え、本地震と前震との関連を明らかにすることや今後の地震活動の進展を注視することも重要であると考えられる。

本研究では、防災科学技術研究所、東京大学地震研究所、気象庁の地震観測データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Shallow Volcanic Swarms near Izu Oshima in 2023

*Hinako Arakawa[1], Naofumi Aso[1]

1. Tokyo University of Science

伊豆大島では、ここ数十年に亘って活発な地震活動が観測されている。そこで我々は、2023年9月に2台の地震計を設置し、2024年2月まで臨時観測を行った。この２台の地震計と防災科研のV-net観測点のデータを利用してテンプレートマッチングを行うことで地震の検出を試みた。まず、テンプレート波形として、10月2日から4日にかけて生じた群発地震に含まれている地震を選択したところ、9月12日から2月18日までの期間で、気象庁の約9倍の地震を検出することができた。ほとんどの地震は9月22日から23日までと10月2日から4日までの二期間に発生しており、この特徴は気象庁カタログでも確認できる。ただし、気象庁カタログでは、マグニチュード1以上の地震が多く占めているのに対し、今回の研究ではマグニチュード0以下の小さな地震も検出できていた。次に、テンプレート地震を近傍だが群発期間外のものに変えてテンプレートマッチングを行ったところ、検出された地震数が大幅に減少した。群発地震かどうかが地震波形の特徴に現れているということであり、時間的な群発性だけでなく、メカニズムにも違いがあることが示唆される。今後は、double-difference法を用いて震源を再決定することで、検出した地震の震源および時間分布を詳細に調べていきたい。

© The Seismological Society of Japan

Analysis of seismicity and crustal movement on the eastern side of Izu Peninsula

*Kazuyoshi Z. NANJO[1,2,3,4], Yohei Yukutake[5], Kumazawa Takao[3]

1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. University of Tokyo

The Izu Peninsula in central Japan is in the northern most part of the Izu Bonin Mariana Arc and is located in the collision zone with Honshu Island, where crustal deformation is active. This Peninsula is volcanically and seismically active. The eastern side of the Izu Peninsula is a monogenic volcano field where volcanoes are included in the Izu-Tobu Volcano Group. This Volcano Group is listed as an active volcano where the Japan Meteorological Agency (JMA) operates 24-hours monitoring in a real-time manner. In a region along and off the east coast of the Izu Peninsula, which we called the Izu-Tobu region in this study, earthquake swarms of high-frequency and ordinary earthquakes frequently occur at shallow depths, which is considered to be associated with magma intrusion. Beneath ordinary earthquakes, low-frequency earthquakes (LFEs) are infrequently observed.

Here, we conducted a timeseries analysis of both types of earthquakes during the time period 2005-2020, using a variant of the Epidemic-Type Aftershock Sequence (ETAS) model. For this analysis, we used the JMA catalog of ordinary earthquakes and the catalog of LFEs produced using the matched filter method. The observed result, which was common to both types of earthquakes, showed a significant change in seismicity, which became quiet, with the inflection point falling sometime between late 2009 and mid-2013, during which two out of three pronounced earthquake swarms occurred. We associated this seismic quiescence with changes in background rate to be low, where background rate, by removing the triggering effect of aftershocks, was interpreted as having been caused directly by the magma source, which can vary with time.

We then used surface displacement data obtained from the Geospatial Information Authority of Japan, and observed that the uplift due to magma intrusion was significant during the 1970s-1990s whereas it was in abatement or unobservable during the studied period (2005-2020). We also found that the seismic quiescence occurred without significant crustal movement during the studied period. Our implication from this finding is that magma source, which caused magma intrusion into the Izu-Tobu region, is in a transition phase, becoming less active, compared with the magma source during the 1970s-1990s. We pointed out that this implication is consistent with the history of repeated uplift events obtained from morphological and stratigraphic survey conducted in and around the Izu-Tobu region.

Preprint associated partially with this presentation is available at https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.19648 and http://ssrn.com/abstract=4921901.

© The Seismological Society of Japan

Comparison of 2008-2009 seismic activity and aftershocks in the northern end of the aftershock region of the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Yuya MACHIDA[1], Masanao Shinohara[2], Tomoaki Yamada[2], Kazuo Nakahigashi[3], Toshihiko Kanazawa[4]

1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology, 4. Association for the Development of Earthquake Prediction

日本海東縁部等のひずみ集中帯において、2024年1月1日に能登半島地震（Mj=7.6）が発生した。この地震は2020年12月頃から群発地震が活発に発生しており、これら一連の中で発生したと考えられている。またこの地震は能登半島の沿岸部で発生し、その余震域は上越沖まで発生しているが、この上越沖は海底における定常的な地震観測網がないため、本震が発生する以前の定常的な地震活動を高精度に把握することが困難な領域と考えられる。東京大学地震研究所では2007年中越沖地震などが発生したひずみ集中帯を含むより広範囲での定常的な地震活動の正確な把握を目的として上越沖に長期観測型海底地震計を設置し、2008年12月から2009年10月までの詳細な地震活動の把握を試みた（町田・他2024）。その結果2007年中越沖地震の北西側沿岸では深さ8-13kmにおいて比較的地震活動が活発であり、それより北西側である富山トラフ下では地震活動は低調であるなど上越沖においては定常的な地震は一様に発生していないことがわかった。さらに長期観測型海底地震計による観測を行った期間中、富山トラフの北西側において深さ18km付近で地震活動が局所的に活発な領域があり、周辺で実施した構造探査（Nakahigashi et al., 2011）と比較するとこの深さは下部地殻に相当する。その間上部地殻では地震活動はほとんど見られなかった。その後令和6年1月1日に能登半島地震が発生したが、地震発生直後より実施された海底地震計を用いた緊急海底観測により能登半島地震における詳細な余震活動分布が求められた（篠原・他, 2024）。その結果、本研究で示された深さ18km付近においても余震が多く発生しており、さらに余震観測期間においては2008年から2009年の間には見られなかったそれより浅い12km周辺においても地震活動が活発化していることが示され、深さ方向において地震活動が変化したことが考えられる。能登半島において2020年から発生した群発地震の発生では、下部地殻から上部地殻へ供給される流体の関与が示唆されているが（Nakajima et al., 2022）、令和6年能登半島地震の余震域においても余震域北端部で見られる深さ方向の地震活動の変化から、流体による寄与等の影響等がこの領域における地震発生の場に変化を与えることが示唆される。

© The Seismological Society of Japan

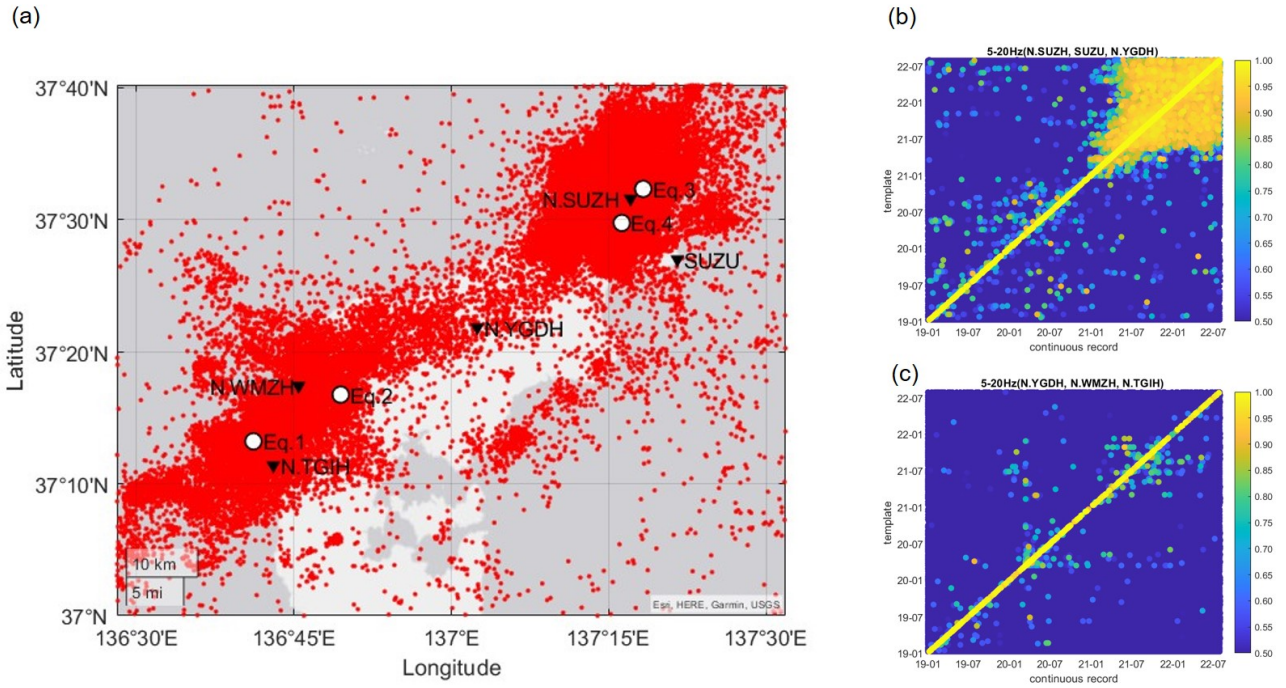
The long-term Noto seismicity revealed by ten-years-long continuous records and a few ten thousand template waveforms

*Moka Sasaki[1], Hironori Kawakata[1], Shiro Hirano[2]

1. Ritsumeikan University, 2. Hirosaki University

能登半島地域は日本のここ20年間の地震活動の中で最も地震活動が活発な地域の１つである．能登半島北西部では，2007年にMw 6.7の地震が発生した(2007年能登半島地震，図a，Eq. 1)．その後2020年3月に2007年能登半島地震の震源の東端側でMw 5.3 のイベントが発生した(図a，Eq. 2)．能登半島北東部では，2020年12月頃から地震活動が活発化し，2023年にはMw 6.2 のイベントが発生した(図a，Eq. 3)． さらに2024年1月1日に，余震域が長さ約150kmの範囲に広がるイベント(Mw 7.5)が発生した(2024年能登半島地震，図a，Eq. 4)．
能登半島地域での地震活動について，微小地震の検出を利用した時空間的な発展についてのこれまで発生したイベントごとの解析が行われてきた．2007年能登半島地震について，Doi and Kawakata (2013, EPS)は本震発生の12分前から本震近傍で互いに同じような波形を持つ前震が４つ発生していたことを示し，前震の時空間的な発生パターンが2008年の岩手・宮城内陸地震と類似していることを明らかにした．また，Kato and Obara (2014, GRL)は, 余震域の広がり方が段階的であることを明らかにした． 2023年のMw 6.2のイベントについて，Kato (2023, GRL)は，余震活動の時空間的なマイグレーションに地殻流体の湧昇が関係している可能性を示した．
気象庁カタログに記載されていない微小な地震を検出することは，地域的な地震活動の詳細を理解するための方法として有用である．微小地震の検出には，連続波形記録とテンプレート波形（テンプレート波形には既知のイベントの波形を使用する）との相互相関係数(Cross-correlation Coefficient; CC)やそれらを足し合わせたNCC(Network Correlation Coefficient)の計算が利用される(Gibbons and Ringdal，2006, GJI)．本研究では，能登半島地域の長期的な地震活動の背景について理解するために，10年超の連続波形記録を使用して，能登半島地域の長期間の時空間的な特徴について検討する．
解析期間はEq. 1からEq. 4までを含む2007年1月から2024年１月上旬とし，連続波形記録は能登半島に位置する防災科学技術研究所高感度地震観測網（Hi-net）と気象庁（JMA）の観測点(図１)の3成分連続波形記録を使用した．また，テンプレート波形を切り出す微小地震は気象庁一元化震源地震カタログを使用して選定した．今回，10年超の連続波形と数万のテンプレート波形が必要であるため，波形相関の計算を行うには計算処理に膨大な時間を必要とする．この問題を解決するために，NCC計算には，最新のFortranコードであるDallelXを採用した(Hirano & Naoi 2024, JpGU).
能登半島北西部から能登半島北東部に位置する全観測点の連続波形記録を使用してNCCを計算するには地震活動の活発な地域が広範囲であり，遠方の観測点では極微小地震の信号がノイズに埋もれてしまうことを考慮し，能登半島の北西側の３観測点と能登半島の北東側の３観測点の２つのネットワークに分けて解析を行った．図bと図cは，２つのネットワークで計算したNCC（本研究では9成分のCCの平均として定義）の結果の一部例を示す．この結果から，図cの示すように，2021年には2020年3月に発生したMw 5.3 のイベント(Eq. 2)と高いNCCを示すイベント候補が検出された．本発表では，能登半島に位置する観測点の10年超の連続波形記録を使用したNCCの計算結果を解析し，能登半島地域の長期間の時空間的な特徴について報告する．

© The Seismological Society of Japan



図a. 能登半島地域の地図. 赤点と白丸は2007年1月1日から2024年1月6日までに発生したイベントの震源位置で気象庁一元化震源カタログに記載されているイベントである. 黒い逆三角は使用した観測点の位置を示す.
図b. 能登半島東部に位置する3観測点の連続波形記録を用いたNCCの時系列分布(N.SUZH, SUZU, N.YGDH).
図c. 能登半島西部に位置する3観測点の連続波形記録を用いたNCCの時系列分布(N.YGDH, N.WMZH, N.TGIH).

© The Seismological Society of Japan

Estimation of stress field in the northeast Noto Peninsula: Influence of fluid on earthquake occurrence

*Sayaka Takano[1], Yoshihiro Hiramatsu[1], Yohei Yukutake[2]

1. Kanazawa University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

石川県能登半島北東部では2018年６月頃から地震が増え始め、2020年12月から地震活動が活発化した。震源域は４つのクラスターを形成し、南、西、北、東クラスターの順番で活発化が起きた。2023年５月５日にはMj6.5の地震が東クラスターで発生した。この群発地震の震源メカニズム解は、西・北・東クラスターでは、北西ー南東方向に主圧力軸を持つ逆断層型の震源メカニズム解が卓越し、能登半島北東部の広域応力場に調和的であった。一方、南クラスターでは横ずれ断層型や正断層型の震源メカニズム解が多く確認された（髙野・他, 2023, 地震学会）。本研究ではこれらの震源メカニズム解から推定された地震発生領域の応力場と各地震の震源メカニズム解から、Slip tendencyとミスフィット角を計算し、地震発生における流体の影響を議論する。

データおよび手法

気象庁の一元化震源データと験測値データ、定常観測点の地震波形データ（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、2018年から2024年2月に発生した地震にDD法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）を適用し再決定されたものである（Nishimura et al., 2023）。本研究では、気象庁一元化震源データにおいて2018年1月～2023年3月までに能登半島北東部で発生したMj2.8以上の地震解析対象とした。但し、各クラスターの活動初期のみMj2～3の地震も解析対象に含めた。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波の初動極性を再験測し、P波とS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（Ide et al.,2003; Imanishi et al., 2006; Yukutake et al., 2010）。本研究では、Kagan角（Kagan, 1991）の誤差が20度以下の震源メカニズム解のみを以下の解析に使用した。各クラスターの震源域の応力場の推定には、STRESSINVERSEコード（Vavryčuk, 2014）を使用した。Vavryčuk（2014）では震源メカニズム解の２つの節面のInstability（節面の不安定性）を計算し、Instabilityが高い値の節面を地震時の断層面と仮定し、応力テンソルインバージョンを行う。推定された応力場を用いて、震源メカニズム解のミスフィット角とSlip tendency（Yukutake et al., 2015）を計算した。

結果と考察

西・北・東クラスターの応力場は、北西ー南東の水平方向の最大主応力、鉛直方向の最小主応力であり、能登半島北東部の広域応力場（Terakawa and Matsu’ura, 2010）と調和的であった。この応力場で計算されたミスフィット角は小さく、Slip tendencyは大きい。また震源分布から、この３つのクラスターには広域応力場に調和的な主に南東傾斜の断層面の存在が示される（e.g., Amezawa et al., 2023; Yoshida et al., 2023）。Instabilityが高い節面（差が0.1以上）は、Slip tendencyの高い節面（差が0.1以上）やmisfit角の小さな節面（差が20度以下）と同様、特に北クラスターにおいて南東傾斜した断層面と一致する。これらから、西・北・東クラスターの地震は、広域応力場と調和的な応力場の下で、広域応力場に対して動きやすい向きである主に南東傾斜の断層に、流体が侵入したことで発生したと考えられる。また3Dモール円（Terakawa et al., 2010, 2013）上では、破壊基準線とモール円の接点付近に集中的にこれらの地震が分布することから、断層面に働く間隙流体圧は相対的に小さいと考えられる。南クラスターの応力場は他の３つのクラスターとは異なる向きであった。特に、南クラスターの深部（震源が15㎞以深）では、鉛直方向に近い最大主応力、北東ー南西の水平方向の最小主応力であり、局所的な応力場であることが確認できた。他のクラスターと比べて、この局所的な応力場から計算されるミスフィット角は大きく、Slip tendencyは小さい。したがって、南クラスター深部では、高い間隙流体圧により局所的な応力場に適さない向きの断層面上でも地震が

© The Seismological Society of Japan

発生したと考えられる。南クラスター深部での他のクラスターとは異なる結果は、地殻変動源による応力変化や高間隙圧の流体の影響が大きいと考えられる。なお、上記の結果はInstabilityもしくはSlip tendencyの大きな節面、またはミスフィット角の小さな節面のいずれを断層面として選択しても成り立つ。南クラスターの深部の地震では、地震活動が活発化した2020年末に大きかったミスフィット角がその後小さくなる傾向や、東クラスターにおいて、Slip tendencyの小さな地震が2021年に比べて2022年に増える傾向があるようにも見えるが、単なるデータのばらつきである可能性が高い。

謝辞

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しました。応力インバージョンは、Vavryčuk（2014）のSTRESSINVERSEコードを用いて計算しました。ここに記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Long-term fluctuations of b-value around the Noto Peninsula using the JMA earthquake catalog

*Sota Maegawa[1], Toshitaka Baba[1]

1. Tokushima University

b値変動は周辺の地殻応力場の変動を示していると理解され，地震予測への活用が期待されてきた．既往研究によれば2004年スマトラ島地震や2011年東北地方太平洋沖地震の発生に先立って震源域でb値が減少したとされる．しかしながら，解析領域が異なるとb値の変動するタイミングやその変動の具合が異なり，b値による地震予測は実用できるレベルには達していない．本研究では，地震発生とｂ値の時空間変化の関係を議論することを目的として，2007年にM6.9の地震，2020年12月からは群発地震活動が発生し，2024年1月にはM7.6の地震が発生した能登半島を対象にb値変動解析を行った．本研究では気象庁の震源データを利用した．解析期間はデータが十分存在する1991年から2024年中頃までの期間を対象とした．解析領域は2007年M6.9の地震が発生した能登半島南西部（領域１）と，群発地震活動が活発であった能登半島北東部（領域２），2024年M7.6の地震発生と共に拡大した地震発生領域（全体領域）であり，Mcを2.0に設定してb値の変動を求めた．解析結果を比較することで，群発地震と地震の地震活動にどんな差があるのかを確認した．本研究で求めたb値の経年変遷を見比べると，領域１ではM7.6の地震の発生前にb値が低下する変動が見られたが，領域２ではM7.6の地震の発生前にb値が上昇する変動が見られ，領域１と領域２のb値の変動パターンには逆相関が確認できた．また，M7.6の地震発生以降から2024年7月に至るまでの期間にも，領域１と領域２の間にb値変動の弱い逆相関が見られたが，期間が短いため今後も継続的な解析が必要である．しかしながら，これらの逆相関は領域１と領域２がM7.6の地震の前から関係していたことを示唆する．

© The Seismological Society of Japan

Shallow tectonic tremor activity in Hyuga-nada from April to July 2023

*Yusuke YAMASHITA[1], Masanao Shinohara[2], Tomoaki Yamada[2], Yukihiro Nakatani[3], Shuichiro Hirano[3], Hiroshi Yakiwara[3], Kazuo Nakahigashi[4], Takeshi Matsushima[5], Yoshihiro Ito[1]

1. DPRI, Kyoto University, 2. ERI, the University of Tokyo, 3. NOEV, Kagoshima University, 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, 5. SEVO, Kyushu University

日向灘のプレート境界浅部領域では，浅部スロー地震（浅部微動と超低周波地震）の活動が数年に1度の頻度で活発化することが知られており，南海トラフ沿いではもっとも活動が活発な領域である．2013年に海底地震計を用いた観測で浅部微動の詳細な震央分布が明らかになり，以降，文科省委託研究（南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト，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）や災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究において浅部スロー地震活動のモニタリングが行われてきた．この10年の間に最大の活動となったのは，2015年5月～7月にかけての活動で，足摺岬沖まで震源域がmigrationを伴いながら広がった活動であった．この活動は足摺岬沖のトラフ軸付近まで活動が広がっていたものの，2015年の観測ではトラフ軸より海洋プレート側に観測点がなかったため，実際の活動範囲の広がりがトラフ軸にどれだけ近いところまで広がっていたかを把握するのが難しかった．2022年より2015年の活動の再来を見据えて15台の海底地震計を用いた観測網を構築し，待ち受け観測を行っていたところ，2023年4月中旬～7月にかけて観測網直下で浅部微動活動があり，観測に成功した．浅部微動の震源決定は，2015年の解析（Yamashita et al., 2021）と同様に，震源の深さをNakanishi et al. (2018)のプレート境界モデルに固定したエンベロープ相関法（Obara, 2002）によって決定した．震源決定ができたイベントのうち，比較的精度良くも止まっていると考えられる誤差10km未満のイベントは9379個であった．2023年活動の時空間発展を確認したところ，2013年活動に見られた南から北への速いmigrationに始まり，沈み込む九州パラオ海嶺にさしかかったところから西から東へのmigrationに切り替わり，約1ヶ月をかけて足摺岬沖のトラフ軸近傍までmigrationした．その後，断続的に活動が続き，6月～7月の活動は足摺岬沖でほとんどが見られ、7月下旬に活動が終了した．2015年活動の特徴と比較すると，震源分布はほぼ似たような形をしており，2015年活動に見られた東経132.7度～132.9度付近にみられる活動度が低い領域も非常によく似ていることが分かった．宮崎市沖から足摺岬沖までの領域で浅部微動の活動の再現性が確認できたのは初めてで，この領域のプレート境界浅部では浅部微動活動をコントロールする構造的な特徴もしくは摩擦の特性が存在していると考えられる．また，2015年の活動で区別が付かなかったトラフ軸付近の活動については，誤差の範囲内でかなりトラフ軸に近いところまで広がっていることが確かめられた．九州パラオ海嶺の沈み込みより南側ではトラフ軸と浅部微動活動域には若干の空白域が存在するが，足摺岬沖ではトラフ軸のかなり近傍まで浅部微動がmigrationしていることから，背後に存在すると考えられる短期的SSEはトラフ軸近傍まで達している可能性が高い．2023年観測では小型広帯域海底地震計（CBBOBS：Shinohara et al., 2020）を多数設置しており，2015年活動では解析が難しかったVLFEの解析も実現できる見込みである．今後は浅部微動の精密な震源決定やVLFEの解析を行い，両者の位置関係などの議論を目指す．

謝辞：海底地震計の設置・回収航海は，長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」（教育関係共同利用）および海洋エンジニアリング株式会社所属「第三開洋丸」によって実施されました．両船の乗組員の皆さまには，作業実施にあたりご尽力いただきました．東京大学地震研究所の技術職員の皆さまには，海底地震観測の準備にご尽力いただきました．鹿児島大学・九州大学・東京大学・京都大学・東京海洋大学の学生諸氏には関係航海に乗船いただきました．本研究は，文部科学省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」およ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計画（第２次）」によって行われました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Automatic analysis of regular and slow earthquakes using DONET and distributed acoustic sensing data in the Nankai Trough, southwest Japan

*Satoru BABA[1], Eiichiro Araki[1], Akiko Toh[1], Ryoichiro Agata[1], Ayako Nakanishi[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

南海トラフは、マグニチュード8クラスの巨大地震が繰り返し発生しており、その周辺ではスロー地震が発生している。南海トラフ沿いの海域では、海域地震観測網DONETや、四国の室戸岬から沖合に120 kmの距離で伸びる海底ケーブルを使った分布型音響センシング（DAS）による連続観測が行われている。DASは、光ファイバーケーブルに沿って歪の変化を計測するもので、密な観測が可能であることから、近年、地震観測に使われるようになっている。2024年1月1日の能登半島地震（M7.6）の本震の3時間後から約9時間の間、南海トラフで発生した浅部微動の活動をDASおよびDONETで観測することができた。これらの震源を、エンベロープ相関とDASの歪振幅の空間分布の併用によって求めたところ、イベントの多くは、室戸岬沖の浅部スロー地震発生領域の西端に位置する、東経134.3º–134.5º・北緯32.3º–32.5ºに決定された。これらのイベントはDONETではわずかな点でしか捉えられておらず、DASを併用して観測することで、観測点数の増加を図ることができた。
このような南海トラフの通常の地震・スロー地震の発生は、プレート境界の応力状態の変化を示唆する可能性があり、これらの活動をモニタリングすることは重要である。本研究では、DASとDONETデータを使用した、自動地震検知・震源決定システムの構築に取り組んだ。通常の地震については、DASの歪速度波形とDONET広帯域地震計の速度波形を用いて、深層学習モデルPhaseNet（Zhu and Beroza, 2019）によるP波およびS波の到達時刻読み取りを行った。到達時刻読み取りには、PhaseNetのデフォルトモデルに、過去のDAS・DONETデータで得られた南海トラフの地震の波形データを追加学習させたモデルを用いた。PhaseNetによる到達時刻読み取りは、DAS・DONETデータの取得後自動で行い、2024年7月31日より自動解析を開始した。P波・S波の読み取り後、震源決定プログラムhypomh（Hirata and Matsu’ura, 1987）を用いた震源決定を行った。速度構造は、DONET域の1次元構造（Nakano et al., 2013）を用いた。また、スロー地震の検出を目的として、エンベロープ相関法（Mizuno and Ide, 2019）による自動解析も並行して行っている。
自動震源解析の開始直後である2024年7月31日13時17分28秒JSTに発生したマグニチュード1.1の地震の震央は、本システムで、気象庁地震カタログと約3 kmの差で決定できた。一方、深さは10 km近いずれが生じたので、今後構造の検討を行う。その一環として、3次元構造（Nakanishi et al., 2018）を用いたPhysics-informed neural networkに基づく走時計算（Agata et al., 2024 JpGU）による震源決定を導入する予定である。発表では、それまでに本研究の自動解析を使って検知できた地震の震源分布について議論する。

© The Seismological Society of Japan

Toward Precise Estimation of Stress Drop using DAS Data Recorded in the Central Shikoku, Japan

*Takumi Takahashi[1], Aitaro Kato[1], Ji Zhang[1], Masanao Shinohara[1]

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The precise estimation of corner frequency and stress drop of earthquakes is fundamentally important in understanding earthquake source physics. Distributed Acoustic Sensing (DAS) technique enables the enhancement of signal-to-noise ratio by stacking procedure due to its high spatial density measurements, resulting in the stable and reliable estimation of corner frequency for collocated earthquakes (e.g., Lior 2024).

In this study, we estimated stress drop using the empirical Green's function (EGF) deconvolution method. We conducted the DAS measurement from the middle of January to the end of March in 2024 using two fiber-optic cables along national road in central Shikoku. The total acquisition length was 53.8 km with a gauge length of 13.47 m, channel pitch of 4.96 m, and sampling frequency of 200 Hz. We applied EGF method to two co-located earthquakes (M2.4 & M0.3) which occurred nearby one of the cables.

We visually picked S-wave arrival times of the two collocated events and chose only less-noisy channels those does not contain large traffic noises. Based on the picked S-arrival time, we cut a 2.56 s time window to calculate the spectral ratio of the target earthquake and EGF event. To obtain more stable spectral ratio, we applied multiple time window approach by shifting the time window by 0.05 s and stacked a total of 10 spectral ratios for each available channel. Then, the spectral ratios were stacked with the available all channels and fitted with Boatwright and Brune source spectral models to estimate the corner frequency of the target event and its uncertainty. The fitting curve of the Brune model showed small uncertainty, and its corner frequency was smaller than that obtained by the Boatwright model. Assuming a circular fault model, we calculated the stress drop using the obtained corner frequency. Furthermore, we compared the stress drop by the DAS data with that estimated using waveform data recorded by regular seismometers of the nation-wide seismic network. The fitting curve of the seismometer data showed a slightly smaller corner frequency, but the spectral ratio at low- frequency range was almost equal to that by the DAS data. The current result demonstrates an effectiveness of DAS data to estimate more precise stress drop.

© The Seismological Society of Japan

Exploring Classification Indicators of Seismic Signals Toward Understanding the Causes of Tectonic Tremors

*Akiko TO[1], Aitaro Kato[2], Eiichiro Araki[1]

1. JAMSTEC, 2. ERI Univ. of Tokyo

プレート沈み込み帯浅部では、「普通地震」と「微動」の少なくとも二種類の地震イベントが発生する。二種類は観測される地震波形の特徴で区別されており、同程度のサイズの普通地震と比べて、微動のシグナルは①継続時間が長く、②立ち上がりが不明瞭で、③10Hz以上の高周波成分に枯渇することが知られている。更に、微動は④震央近傍における距離減衰が激しく、⑤しばしば超低周波シグナル（<0.1Hz）を伴う。大きなサイズの微動ではこれらの特徴は顕著で、普通地震との区別は容易である。他方、小さなサイズの微動では、観測点が少ない上にシグナル継続時間は普通地震のそれに近くなり、普通地震との区別が難しくなる。これらの小さな地震イベントを含めて分類を可能にする新しい指標を探索し確立することは、普通地震と微動の違いを生み出す成因の解明に向けた重要課題である。

本研究では、⑥似た波形の地震イベント発生の有無、⑦水平動の粒子軌跡の違い、の二つを新しい分類指標として検討する。これらの指標は、微動の震源近傍に地震波を強く散乱する短波長パッチ構造が局在するときに有効と期待される（Toh et al, 2023）。具体的には、震源近傍に強散乱構造がある時、小さな（e.g. 地震波長の1/3以下）震源位置のズレにより地震波形が大きく変化することが理論波形計算により示されている。従って、⑥について普通地震は互いに似た波形の地震イベントが見つかりやすいのに対し、微動はそうで無いことが期待される。また⑦について、微動の粒子軌跡は、震源近傍の強散乱構造を反映してあらゆる方向に振動することが期待される。

これまでに、南海トラフ浅部に展開されるDONETの記録を用いて、上述の⑥と⑦の有効性を検討した。2016年１年間の記録にエンベロープ相関法（Mizuno and Ide, 2019）を適用し、普通地震や微動を区別せずに約25000個の地震イベントを検出した。この結果には遠地地震やT相のイベントも含まれる。解析対象を、主に普通地震や小さな微動が含まれる、継続時間が15秒以下の13000個のイベントに絞った上で、Matched filter technique (Yamaguchi et al., 2019)を利用し、各地震イベント間の波形の相互相関係数を総当たりで求めた。これにより、13000個中に自身と似た波形（CC>0.7）の地震イベントが存在したグループと、存在しなかったグループに分けた。例えば、4月3日–29日にDONET下で微動が活発だった期間は、多くのイベントが後者に分類された。逆に4月1日三重県南東沖地震(M6.5)の余震は多くが前者に分類された。⑥は有効な指標となる可能性がある。⑦については、前者グループに線形な軌跡（普通地震）が多少多く見られるものの、それは震源から観測点が近い場合に限られる可能性がある。但し、⑦はT相イベントの特定には有用である。発表では、2016年１年間に検出された地震イベントに、複数の分類指標を適用した定量的な結果を議論する。

© The Seismological Society of Japan

FAMT solutions of earthquakes off the northwest coast of Okinawa island by using a land-ocean unified 3D structure model

*Masanao Komatsu[1], Hiroshi Takenaka[2], Taro Okamoto[3], Mamoru Nakamura[4], Shutaro Sekine[5], Shintaro Abe[5]

1. Okayama Gakuin University, 2. Okayama University, 3. Tokyo Institute of Technology, 4. University of the Ryukyus, 5. Association for the Development of Earthquake Prediction

本研究では2022年2月～6月に沖縄本島北西沖（沖縄トラフ下）で発生したM_{JMA}5.5以上の10個の地震の観測波形データから，モーメントテンソル・インバージョンを行い，地震の位置，規模，震源メカニズムを推定した．

インバージョンには短周期実体波と表面波を含む長周期波形を解析するFirst-motion Augmented Moment Tensor (FAMT) (Okamoto *et al.*, 2017, EPS)解析を用いた．グリーン関数の計算には陸上，海底地形を考慮できる3次元差分法の計算コードHOT-FDM (Nakamura *et al.*, 2012, BSSA)を使用した．沖縄本島北西沖に南北方向，東西方向，鉛直方向に各2 km間隔でセントロイド震源の候補点を設定し，相反定理を用いてグリーン関数を計算した．計算には沖縄本島南東沖の地震の解析（小松・他，2023，地震2）で使用した海陸統合の3次元地下構造モデルを使用した．陸上地形は国土地理院の250 mメッシュ(標高)を，海底地形はJTOPO30を導入し，海水層を考慮した．モホ面は反射法探査の結果 (Nishizawa *et al.*, 2019, EPSなど)をコンパイルした．これらの地震波速度や密度は公開されている広域モデル(たとえば，全国1次地下構造モデル)を参考に設定した．上部地殻より上の地盤はJ-SHIS深部地盤モデルを採用した．

本研究で使用したデータは防災科学技術研究所(NIED)が展開する広帯域地震観測網（F-net）の3観測点（AMM，KGM，ZMM），強震観測網(K-NET)の1観測点(OKN006)，地震予知総合研究振興会(ADEP)が設置した3観測点（A.OKED，A.MYKO，A.TRMA）で観測された波形である（観測点分布は図1(a)）．このうち，OKN006の波形は速度波形に積分し，すべての波形にバンドパスフィルタをかけて使用した．

解析した結果を図1(b)に示す．イベント番号は発生日時の順に付けた．本研究で求まった震源はこの地域に存在する海底活断層周辺の上部地殻内に位置し，気象庁一元化震源よりも浅い．メカニズムはいずれも北西ー南東方向に伸張軸を持つ正断層型で，周辺の海底活断層（この地域では正断層）に概ね整合する．なお，発表ではさらに波形記録の再現性とグリーン関数計算に用いた地下構造モデルについても議論する予定である．

謝辞：本研究では，防災科学技術研究所のF-net，K-NET，地震予知総合研究振興会の波形記録，国土地理院の数値地図250mメッシュ(標高)，JTOPO30，J-SHIS深部地盤モデルを使用しました．グリーン関数の計算は学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援により(課題番号: jh240056)，名古屋大学情報基盤センターの超並列スパコンFX1000を利用し，および東京大学地震研究所の共同利用における援助を受け(課題番号：2022-S-B102)，同大情報基盤センターのシステム(Wisteria)を利用しました．

© The Seismological Society of Japan

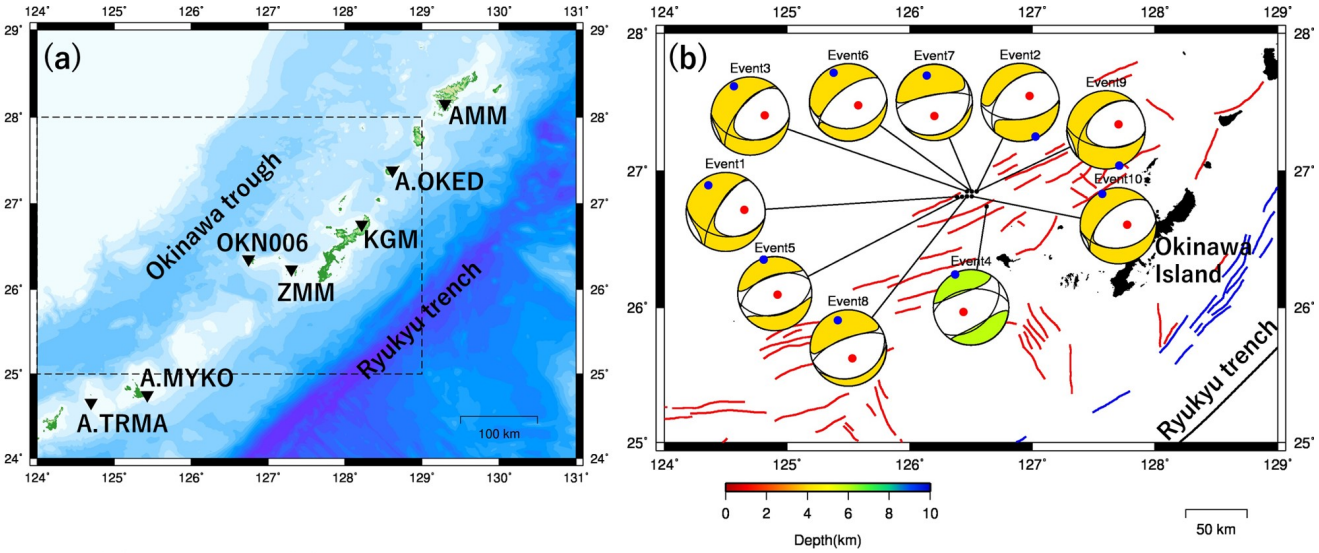


図1　(a)対象地域と(b)推定されたFAMT解．逆三角形はFAMT解析に用いた観測点，破線で囲まれた領域は(b)で示す領域．震源球の色は深さ，赤丸と青丸はそれぞれP軸とT軸を示す．赤線と青線は海洋研究開発機構(2016)による海底活断層（正断層と逆断層）を示す．

© The Seismological Society of Japan

Ocean bottom seismograph and pressure gauge observations in northern Cascadia subduction zone

*Koichiro OBANA[1], Hajime Shiobara[2], Hiroko Sugioka[3], Tsutomu Takahashi[1], Michael Riedel[5], Tianhaozhe Sun[4], Andrew Schaeffer[4], Karen Douglas[4], Michelle Côté[4], Tiegan Hobbs[4], Cooper Stacey[4], Kelin Wang[4], Martin Heesemann[6], Jesse Hutchinson[6]

1. JAMSTEC, 2. ERI, Univ. of Tokyo, 3. Kobe University, 4. Geological Survey of Canada, 5. GEOMAR, 6. Ocean Networks Canada

北米太平洋岸のカスカディア沈み込み帯では、Juan de Fucaプレートが北米プレートの下に沈み込んでおり、1700年に発生したM9の地震（Satake et al. 2003）を始め、巨大地震が繰り返し発生してきたことが知られている。カスカディア沈み込み帯では、プレート境界の固着域が海溝軸付近まで広がっている可能性が示されている（e.g. Lindsey et al. 2021）が、1700年の地震の震源域北端に位置するカナダ・バンクーバー島沖南部で行われた海底地震計(OBS)を用いた機動的な観測（Obana et al. 2015）や、海底掘削孔内での地震・地殻変動観測（McGuire et al. 2018）では、「普通の地震」だけでなく「スロー地震」活動もプレート境界浅部では観測されていない。一方、Juan de Fucaプレートと横ずれ断層であるNootka Faultで接するExplorerプレートが北米プレートの下に沈み込んでいるバンクーバー島沖北部では、バンクーバー島沖南部に比べて、活発な地震活動が発生している。
カスカディア沈み込み帯北端部の構造や地震活動は、巨大地震震源域の広がりを想定する上でも重要な情報である。「普通の地震」や「スロー地震」が全く観測されない、バンクーバー島沖南部では、プレート境界線部が強く固着しており、歪みが全く解放されることなく蓄積されている可能性が考えられる。一方で、海底圧力計（OBP）によるアレイ観測により、「普通の地震」や「スロー地震」と異なる「速いスロー地震」の存在が報告されている（Fukao et al. 2021）。カスカディアでこれまで行われてきた観測は、「普通の地震」や「スロー地震」を念頭に置いたものであったが、プレート境界浅部における歪みの蓄積解放過程を理解するためには、「速いスロー地震」を含む様々な時定数を持つ多様な滑り現象を考えることが必要である。また、比較的活発な地震活動が見られるバンクーバー島沖北部では、これまで海域の地震観測は十分行われておらず、詳細な震源分布の把握は、Explorerプレートの沈み込み形態を把握する上でも重要である。そこで、2022年から2024年にかけて、「速いスロー地震」に着目したOBS、OBPによるアレイ観測をバンクーバー島沖南部で行うとともに、バンクーバー島沖北部では、OBSによる海底地震観測を実施した。
OBS、OBPの設置は、2022年9月から10月に行われたドイツの調査船SonneによるSO294航海で実施した。SO294航海においては、海底地形調査や、エアガン、OBS、ストリーマーを用いた反射法ならびに屈折法構造探査、OBMTによる電磁気構造探査、堆積物サンプリングなども行われている。バンクーバー島沖南部におけるOBS、OBPのアレイ観測は、Ocean Networks Canada (ONC)によるケーブル式の海底観測点の周囲で実施し、OBS9台とOBP6台を設置した。また、バンクーバー島沖北部における海底地震観測のため、OBS11台を設置した。OBSとOBPの回収はカナダ沿岸警備隊の調査船John P. Tullyにより、2023年6月から7月（OBS）ならびに2024年7月(OBP)に行った。2023年に回収したOBSについては、Canada National Seismograph Network (CNSN)ならびにONCによる定常観測データと統合したデータセットを作成した上で、検測作業ならびに震源決定を進めており、バンクーバー島沖北部では、海陸境界付近の地震活動が捉えられている。
謝辞：本研究はJSPS科学研究費JP23K22609の助成を受けたものです。

© The Seismological Society of Japan

Microseismic activity around East Ongul Island, East Antarctica based on seismic array observations

*Manami HASHIMOTO[1], Masaki KANAO[2], Taishi HASHIMOTO[2]

1. ADEP, 2. NIPR

南極昭和基地やリュツォ・ホルム湾沿岸部では長年地震観測が行われてきた。南極域で発生する地震や世界各地で発生する遠地地震に加えて，東オングル島周辺部の局地的な地震が記録されている（Kanao and Kaminuma, 2006）。一方雪氷圏では氷震や微動も発生し，昭和基地周辺においては潮汐や氷山の移動によって発生していると報告されている（Murayama et al., 2017; Tanaka et al., 2019）。また氷震は氷河の流動や氷の温度変化によっても引き起こされると考えられているため，氷震活動のモニタリングは、地球温暖化などの環境変動の指標として重要である。これらの震動は遠地地震と比べると規模が小さいため，観測点間隔が広い既存の地震観測網のみではその発生の検出や震源位置の推定を行うことが難しい。そこで著者らは、第58次南極観測隊において東オングル島内の二箇所に地震計アレイ観測点(Array A, B)を設置した。
単点で設置されている既存観測点と異なり、密に設置されたアレイ観測点では入射する波の到来方向を推定することができる。本研究では二箇所のアレイ観測点のデータを組み合わせることで、従来の観測データでは推定することのできなかった微小震動（以下，イベント）を検出しその位置推定を試みた。イベント検出にはSTA/LTAを用いた。３成分地震計を設置したArray Aのデータを用いて各イベントのparticle motionを算出した結果，到達直後に直線状の振動が見られるP波とみられるものや、P/S波を明瞭に識別できるイベントが含まれていることがわかった。遠地地震の各波の到着時刻についてはJARE Data Reportsにより報告されているが、これらのイベントの時刻には該当する遠地地震のphaseはなく，S-P時間からも東オングル島周辺で発生した地震もしくは氷震と考えられた。そこでこれらのイベントに対して，Vp=6.0km/sとなるslowness範囲でセンブランス解析（Neidel, N. S. and M. T. Taner, 1971）を行い、波の到来方向と伝播速度を推定した。両方のアレイで到来方向が推定できたイベントについては，それぞれのアレイにより定めた到来方向へ伸ばした2本の直線の交点から簡易的に震央を推定すると、オングル島周辺の主に東側に分布する傾向が見られた。一方、Array Aではparticle motionと一致する方向からの伝播が推定されるが，Array Bでは複数のslownessについてセンブランス値のピークが現れ、到来方向を一意に推定することができないケースもあった。これは空間エイリアシングによる可能性のほか，定常的なノイズの混入が大きな要因として考えられる。波の相関度合いを示すセンブランスの場合，例え小さい振幅でも観測網全体で似たような波形が記録されていれば高い相関を持ち、ゴーストの原因となる。そこで今後は、アダプティブアレイ解析によって信号の振幅を考慮しつつ波の到来方向を推定し，空間へ投影して震源位置を推定する。

謝辞：本研究はROIS-DS-JOINT(049RP2023, 040RP2024)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

Detection of potential small-scale aseismic slip in the area of small repeating earthquakes

*Toshihiro IGARASHI[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

ほぼ同じ場所で繰り返し発生する小繰り返し地震は、発生域周辺の非地震性すべりを検出できるすべりセンサーの一種とみなされる。これまでも、小繰り返し地震の情報は、沈み込むプレートの境界において、余効すべりやスロースリップイベントのような短期間の変動から巨大地震発生サイクルに伴う固着状態の変化まで、様々な時間・空間的スケールをもつすべり変化を明らかにしてきた。一方、小繰り返し地震から見積もられるすべり量は1イベントあたり概ね10 cmを超えるため、ある程度規模の大きなすべりが生じない限り、同じグループで繰り返し発生することはない。数cm程度のすべり量をもつ小規模な非地震性すべりが発生したとしても、それに対応する小繰り返し地震は発生しない可能性がある。ただし、小繰り返し地震は地震クラスターを形成している領域内で発生していることが多い。同じ領域で発生しているその他の地震もまた、小繰り返し地震と同様のすべりの影響を受けているはずである。そこで本研究では、小繰り返し地震発生域で発生する地震活動の情報を用いて、小規模な非地震性すべりが発生した可能性がある場所、期間を調査した。

ここでは以下に示すの指標を組み合わせて調査を行った。まず、小繰り返し地震群について、基準イベントから震央距離10 km以内、10日以内に、1．異なるグループのイベントが発生、2．同じグループのイベントが繰り返し発生、あるいは、3．1と2の両方が発生、したかを調査した。3．は、概ね10 cm以上のすべり量をもつ大きなすべりが発生したことを示す。2．は、3．と同様にすべり量は大きいが、その範囲は狭いことを示唆している。ただし、バースト的な活動は急激な応力変化に伴う、近接領域が立て続けにすべった可能性もある。1．は、数cm程度の小さなすべりが生じたことを示唆している。ただし、偶然発生時刻が一致した可能性も否定はできない。そこで、領域を緯度、経度とも0.1˚ごとに区切り、各領域内で、 4．M5以上の地震が発生、あるいは、5．地震活動の活発化、したかを小繰り返し地震発生域で調査した。これらの指標は、比較的規模の大きい地震が発生する前の前駆すべりあるいは、直後の余効すべりの発生、あるいは、プレート間すべり速度が増加した可能性を示す指標となりうる。したがって、これらの活動が小繰り返し地震発生時期に発生していた場合は、非地震性すべりが発生している可能性が高い。本解析では、気象庁の一元化震源カタログに報告されている1989年1月から2024年7月までに発生したM2.0以上の地震を用いた。小繰り返し地震は、五十嵐（2020）に基づき、日本列島及びその周辺海域に展開されている地震観測網も用いて検出された結果を使用した。

解析の結果、プレート境界型地震発生域の多くで、複数の小繰り返し地震群が時空間的に近接して発生した期間が存在することが明らかとなった。小規模な非地震性すべりの発生区間は、より規模の大きいすべりの発生区間が近接している場合、厳密に区別することが難しいが、解析期間全体では、太平洋プレートで54領域、216区間、フィリピン海プレートでは、36領域、110区間で発生したことが認められた。2024年1月以降に発生した活動を見ると、太平洋プレートでは、2月に三陸沖（39.5˚N, 143.5˚E）、3月に福島県沖（37.1˚N, 141.4˚E）、5月に八丈島東方沖（33.1˚N, 141.8˚E）で小規模な非地震性すべりがあった可能性が示唆された。特に、3月の福島県沖の活動は、3月17日にM5.4の地震が発生しており、小規模な余効すべりが生じた可能性が高い。フィリピン海プレートでは、4月に奄美大島北東沖（29.3˚N, 130.5˚E）、5月に種子島南東沖（29.9˚N, 131.2˚E）でその可能性が示唆された。なお、2月から3月にかけて房総半島沖で発生したスロースリップイベントは、本解析では規模の大きい非地震性すべりが発生した区間として検出された。房総半島沖では2000年以降6回スロースリップイベントが発生しているが、本解析で規模の大きなすべりとして検出された区間は、今回と2007年のみである。他の4回は小規模なすべりとして検出された。一方、本解析結果は測地データでは検出されていない、2002年5月、2009年12月、2011年3月、2023年9月にも小規模なすべりの発生を示唆した。本解析は、カタログが入手でき次第比較的簡単に行い、すぐさま地図上に表せる。大小様々な規模をもつ非地震性すべりの発生を調査する足がかりとして役立つことが期待できる。

© The Seismological Society of Japan

Spatial-temporal variation in the simulated seismicity from multiscale patch model

*Hideo AOCHI[1,2], Takane Hori[3]

1. BRGM, 2. LG-ENS, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. JAMSTEC

マルチスケールパッチモデルは断層面の不均質構造を模擬するのに有効であり、すべり弱化摩擦法則や、速度・状態依存摩擦則と組み合わせて、地震のシミュレーションが行われている。地震活動のシミュレーションは、後者の摩擦法則と組み合わせて行われることが多いが、摩擦の回復過程を入れ応力蓄積過程を考えることで、前者の摩擦法則と組み合わせることも可能である。応力蓄積過程として、断層面一様に応力が高まる場合、パッチの大きさに応じて応力が蓄積される場合、あるいは全くランダムにされる場合、などが考えられる。いずれの場合にも、最大イベントが起こるには、システム全体に十分な応力蓄積が必要であり、それに向かって地震活動が増えていく。暫定的な結果として、地震活動の時系列変化には応力蓄積過程の違いが見られるようではない。今回は、空間的に応力蓄積過程の違いが見られるかに焦点をおく。時間幅は固定した上で、分割した断層面上で、ETASパラメータの推定と地震頻度分布のｂ値推定を行う。地震活動が時間とともに増えるという性質のため、ETASパラメータの背景の地震活動度が時間とともに増え、空間的にもある程度不均一であるが、断層面のパッチ構造ないし、最大イベントの開始と結びつけるのは難しい。一方、ｂ値は時間とともに、システム全体の応力蓄積量に伴って低下する。空間的にも不均一で、断層面一様に応力が高まる場合には、最大イベント震源域に有意なb値低下が見られた。観測された地震活動の統計的性質から、断層面上の不均質構造や応力蓄積過程を推測する上で理論的考察を与えると思われる。

© The Seismological Society of Japan

Swarm-ness Analysis of Low-Frequency Earthquakes in Western Shikoku Using Modified ETAS Model

*Kaito Shimomura[1], Naofumi Aso[1]

1. Tokyo University of Science

深部低周波地震は、発生場所や波形によって火山型とテクトニック型の２種類に大別される。火山型は地殻の進化に関連していると考えられている一方で、テクトニック型は巨大地震との関連が指摘されており、どちらも重要な現象である。火山型は短い時間間隔で繰り返し発生し、群発地震となることが多い。その一方、テクトニック型は継続的に発生し、その深さによって周期性が異なる。このように群発性や連発性は両タイプの低周波地震において重要な特徴だが、これまで群発性に着目した系統的な解析は行われてこなかった。そこで、本研究では低周波地震の群発性を体系的かつ定量的に解析する。
そのために、地震活動を定量的にモデル化する際に標準的な手法である ETAS（Epidemic-Type Aftershock Sequence）モデルを用いる。特に、修正 ETAS（Aso, 2023）は、拡散性に関連する地震の時間的な群発性を捉えることができる。本研究では、この修正 ETAS モデルを用いて、気象庁カタログに含まれる 2011 年から 2021 年にかけての四国西部の低周波地震を解析した。火山型とテクトニック型の違いだけでなく、ETAS パラメータの空間依存性、特にテクトニック型低周波地震の深さ方向の違いに注目した。

© The Seismological Society of Japan

Magnitude Dependency of ETAS Parameters

*Daichi Ishikawa[1], Naofumi Aso[1]

1. Tokyo University of Science

ETASモデルは、すべての地震が過去に発生した地震によるトリガリングと定常的な背景地震活動で説明できるという考えに基づいたモデルである。ETASモデルは、様々な地震系列に適用可能であり、地震活動予測にも用いられている。本研究では、本来はマグニチュード依存性を持たないとされているETASパラメータが本当にマグニチュード依存しないかに着目し、実データをもとに検証した。具体的には、下限マグニチュードを変えていくことでETASパラメータがどのように変動するかを調べた。

2024年1月1日にマグニチュード7.6の地震が発生した能登半島付近に着目し、最新の気象庁カタログが利用可能な2022年を解析した。この年には、6月19日にマグニチュード5.4の地震が発生している。このデータについて、粒子群最適化法と内点法を用いて、ETAS推定を行った。解析対象とする下限マグニチュードを1.7から2.7まで0.1刻みで大きくしていき、ETASパラメータの変化を調べた。

唯一、下限マグニチュードに依存して良いパラメータである、背景地震活動度を表すパラメータμは、下限マグニチュードを大きくすると小さくなり、その様子はマグニチュード頻度分布を表すb値に依存していると考えられる。下限マグニチュードを大きくしていくと、余震発生率のマグニチュード依存性を表すパラメータαは大きくなり、マグニチュードが大きな地震ほど顕著に余震を生み出しやすいことが示唆される。また、余震の時間減衰を表すパラメータpは、下限マグニチュードが2.2以下では、ほぼ一定の値をとったが、2.2より大きくなるにつれて値が大きくなった。余震発生数を表すパラメータKは、下限マグニチュードが2.2以下では、ほぼ一定の値をとったが、下限マグニチュードが2.2より大きくなるにつれて値が小さくなった。最後の2点については、大きな地震の後は検出能力が低下しているためだと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Detection of dynamically-triggered earthquakes using CNN model for seismic phase discrimination

*Kengo SHIMOJO[1]

1. Meteorological Research Institute

Temporary stress disturbances caused by the passage of seismic waves from a large earthquake can trigger local seismic activities in distant areas (several times the fault length of the main shock) (e.g. Hill et al., 1993). In Japan, it has become known that dynamically triggered earthquakes occur in geothermal and volcanic areas (e.g. Yukutake et al., 2011), along active faults where large inland earthquakes have occurred in the past (e.g. Enescu et al., 2016), and in the tectonic tremor region of the Nankai Trough (e.g. Miyazawa and Mori, 2005). Since seismic activity caused by dynamic stress changes would reflect the fluids and fault plane conditions in the area, capturing dynamically triggered earthquakes in detail may be useful for disaster prevention.

However, dynamically triggered seismic activities are difficult to detect automatically because the magnitudes are generally small and occur during times when the noise level is high due to subsequent waves after a large earthquake. Some studies have attempted automatic detection using techniques such as template matching (Peng and Zhao, 2009), but this method is not suitable in areas where the number of earthquakes is small, or where the distribution of template earthquakes is unbalanced, and in such area capturing dynamically triggered earthquakes relies on visual inspection.Therefore, we utilize a convolutional neural network for seismic wave discrimination to the observed velocity waveforms at the stations operated by JMA, MOWLAS, and universities all over Japan, and perform the automatic detection of dynamic triggered earthquakes using parameters (probability threshold for detection and filter-band for observed waveforms) that were tuned to resemble the distribution of the stations where triggered earthquakes were detected by visual inspection immediately after the 2016 Kumamoto earthquake (Enescu et al., 2016).

As shown in Figure, calculating β-value (Matthews and Reasenberg, 1998) for each station, we can obtain the distribution of stations similar in detail to the result of visual inspection. In addition, we will also present the results of applying this technique to earthquakes of M7 or larger occurring around the world, and the relationship between triggered areas and dynamic stresses.

© The Seismological Society of Japan

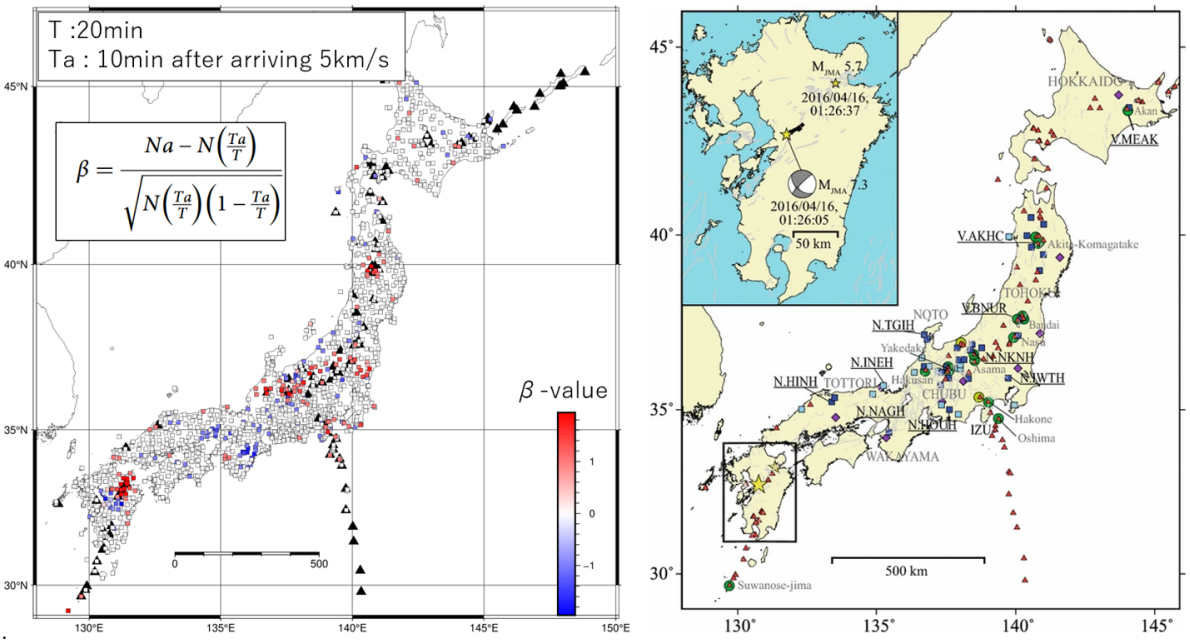


Figure
Left: Distribution of β values for each station when Ta is set as 10 minutes from the arrival time of the 5 km/s wave from the Kumamoto earthquake.
Right: Distribution of stations where triggered earthquakes were visually detected (Enescu et al., 2016).

© The Seismological Society of Japan

True b-value Estimation Using Recurrent Neural Network

*Naofumi ASO[1]

1. Tokyo University of Science

地震のマグニチュード頻度分布は、通常G–R則として知られる指数分布に従うことが知られており、この指数の大きさはb値と呼ばれている。b値の最尤推定は簡便であり、地震学においてb値を推定する研究は数多くあるため、推定されたb値は真のb値だと思われがちである。しかし、真のb値で特徴づけられるG–R則に従う母集団からサンプリングされたものが観測される地震であり、地震カタログから最尤推定されるb値は必ずしも真のb値と一致するわけではない。
地震を物理現象として理解する上では、言うまでもなく、推定されるb値よりも真のb値が重要である。したがって、できるだけ真値に近いb値を推定することが必要不可欠である。しかし、厳密な意味で真のb値を知ることはできないことが、大きな障壁となる。一方で、与えられたb値に従う人工的な地震カタログを生成することは可能である。こうした合成地震カタログを用いれば、真のb値が分かっているため、真値にできるだけ近い推定をする手法の開発と検証が可能になる。
本研究では、現実に近い人工的な地震カタログを作成するために、ETAS（Epidemic-Type Aftershock Sequence）モデルに従うETASシミュレーションを使用する。一定のb値を推定する場合は定常ポアソン過程で十分だが、今回はb値の時間変化を適切に考慮するため、非定常ポアソン過程に基づくETASシミュレーションを用いた。
時間変化するb値の推定には、再帰型ニューラルネットワーク（RNN）を採用する。RNNは時系列データの処理に適しており、データ内の時間的相関を捉えることが得意である。また、RNNは可変長のデータを柔軟に扱うことができるため、さまざまなイベント数を持つ地震カタログの解析に適している。
複数のRNNタイプを検討した結果、RNNの一種である長短期記憶（LSTM）ネットワークがより良い推定を実現するのに重要であることが確認された。LSTMネットワークは長期および短期の依存性を効果的に学習できるため、安定していながらも時間変動するb値の推定が可能である。この方法が、従来の研究で用いられている最尤推定よりも優れていることが確認できた。

© The Seismological Society of Japan

Updating the seismic activity model for background earthquakes in probabilistic seismic hazard assessment

*Nobuyuki MORIKAWA[1], Jun'ichi MIYAKOSHI[2], Hiroyuki FUJIWARA[1]

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

1. はじめに

地震調査研究推進本部（地震本部）による全国地震動予測地図2020年版（地震調査委員会，2021）が公表されて3年以上が経過した。その後、地震本部から新たな長期評価（地震調査委員会，2022a、2022b、2024）が公表されている。また、気象庁による地震カタログも年々追加され続けている。本稿では、これらの状況を踏まえて、確率論的地震動ハザード評価における震源断層を予め特定しにくい地震について、全国地震動予測地図2020年版からのモデルの更新に関する検討状況を示す。

2. 地震本部から新たに公表された長期評価に基づくモデルの更新

全国地震動予測地図の確率論的地震動予測地図における震源断層を予め特定しにくい地震のモデルでは、「地域区分する方法」と「地域区分しない方法」の両者が採用されているが、このうち、「地域区分する方法」の地域区分は、海溝型地震については海溝型地震の長期評価、陸側プレートの浅い地震については垣見（2003）に基づいて設定されている。

海溝型地震については、「日向灘及び南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価（第二版）」（地震調査委員会，2022b）が公表されたことを踏まえ、当該評価で示されている地域区分ならびに沈み込むフィリピン海プレート上面形状に修正することとする。また、南海トラフ域について、地震調査委員会（2013）において最大クラスの地震として日向灘の領域まで破壊が及ぶ地震が評価されたことから、震源断層を予め特定しにくい地震のモデルは日向灘の地震の長期評価の改定とあわせて更新する方針となっていた。そのため、南海トラフ域の地域区分及び沈み込むプレート形状モデルについても今回更新することとした。

陸側プレートの浅い地震の地域区分については、「日本海南西部の海域活断層の長期評価」（地震調査委員会，2022a）を踏まえて、当該評価領域を包含するように拡張する。また、地震調査委員会（2022b）を踏まえて南海トラフ域および南西諸島の地域区分形状も修正する。なお、日本海側の海域活断層の長期評価（地震調査委員会，2024）の評価領域については現状の地域区分で包含できていることを確認している。

3. 気象庁地震カタログの追加

震源断層を予め特定しにくい地震の発生頻度（確率）のモデル化には、1921年以前の地震については宇津カタログ（宇津，1982，1985）、1922年以後の地震については気象庁による地震カタログを用いている。全国地震動予測地図2020年版では、2017年末までの気象庁地震月報（カタログ編）が用いられているが、その後のデータの追加を反映する。具体的には2022年末までの気象庁による地震月報（カタログ編）を用いることとする。

4. その他のモデルの更新

以上の更新によって地震カタログから抽出された地震以外の地震について震源分布を作図したところ、九州から南西諸島海溝にかけての深発地震、日本海やオホーツク海域、伊豆諸島から小笠原諸島の西方海域において深さ60km程度まで地震があることが確認された。そこで、海域における陸側プレートの浅い地震について、地震カタログから抽出する震源深さの下限値を可能な限り深くする。ただし、これは当該地域の地震発生層を深くすることを意図するものではないことに留意が必要である。また、日本海棟縁部については、「日本海地震・津波調査プロジェクト」（東京大学地震研究所・文部科学省研究開発局，2021）によって設定されている震源断層モデルを包含するように地域区分の拡張もあわせて行う。

謝辞：本検討は防災科学技術研究所の「自然災害のハザード・リスクに関する研究開発」として実施した。

© The Seismological Society of Japan

参考文献：
地震調査委員会（2013）：
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf
地震調査委員会（2021）：
https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2020/
地震調査委員会（2022a）：
https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/offshore_active_faults/sw_sea_of_japan/
地震調査委員会（2022b）：
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/hyuganada_2.pdf
地震調査委員会（2024）：
https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/offshore_active_faults/sea_of_japan/
垣見・他（2003）：地震2，55，389-406.
東京大学地震研究所・文部科学省研究開発局（2021）：
https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/Japan_Sea/JSR2Report/index.html
宇津徳治（1982）：地震研究所彙報，57，401-463.
宇津徳治（1985）：地震研究所彙報，65，639-642.

© The Seismological Society of Japan