Wed. Nov 1, 2023

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

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

[S08] AM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), Toshiko Terakawa(Nagoya University)

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

[S08-16] Effects of long-term slow slip events on intraplate stresses in Bungo Channel and Tokai region

*Saeko KITA[1], Heidi Houston[2], Suguru Yabe[3], Sachiko Tanaka[4], Youichi Asano[4], Takeshi Kimura[4] (1. BRI, 2. USC, 3. AIST, 4. NIED)

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

[S08-17] Stress Change Driven Afterslip Following the 2016 Central Tottori Earthquake

*Angela Meneses-Gutierrez[1], Tatsuhiko Saito[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S08-18] Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy and stress rotation

*Toshiko TERAKAWA[1], Kimiyuki Asano[2], Yumi Urata[3] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Disaster Prevention research Institute, Kyoto University, 3. AIST)

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

[S08-19] Estimation of the spatial distribution of the "internal friction coefficient" in the crust beneath the Japanese Islands

*Yuta MITSUI[1] (1. Department of Geosciences, Shizuoka University)

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

[S08-20] Stress drop variations of repeating earthquakes

*Junichi NAKAJIMA[1], Akira Hasegawa[2] (1. EPS Department, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

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

[S08] AM-2

chairperson:Yuji YAGI(University of Tsukuba), Yasuhira AOYAGI(Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S08-21] Spatial pattern on stress drop of small earthquakes in the eastern margin of the Sea of Japan west off the Tohoku region, Japan

*Misa Tanaka[1], Takuji Yamada[1] (1. Ibaraki University)

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

[S08-22] Frictional properties on the upper surface of the subducting Pacific plate off the south-east of Hokkaido, Japan

*Nanako Nemoto[1], Takuji Yamada[1] (1. Ibaraki University)

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

[S08-23] Hierarchical Rupture Growth Revealed by High-Degree-of-Freedom Seismic Source Models

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

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

[S08-24] A complex source process during the 2021 South Sandwich Islands earthquake

*Ryo Yamaguchi[1], Yuji Yagi[1], Ryo Okuwaki[1] (1. University of Tsukuba)

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

[S08-25] Rupture Termination at the Northeastern End of the Source Fault of the 2016 Kumamoto Earthquake inferred from Seismic Velocity Structure

*Yasuhira AOYAGI[1], Haruo Kimura[1] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

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

[S08] PM-1

chairperson:Keisuke Yoshida(Tohoku University)

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

[S08-26] Change in scaling relations of source parameters around M_W 5.1 for crustal earthquakes

*Shota Shimmoto[1], Hiroe Miyake[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S08-27] Precise hypocenter determination around the 2016 Mw 7 normal fault earthquake off Fukushima and Ibaraki prefectures: S-net data analysis

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Naoki Uchida[1,2], Tatsuya Kubota[3], Toru Matsuzawa[1] (1. Tohoku University, 2. ERI, University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-28] Microearthquakes in the lower crust and their generation mechanism: The case of deep cluster activity beneath western Hiroshima prefecture

*Kazutoshi IMANISHI[1], Takahiko Uchide[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-29] The 2023 M6.5 Suzu, Japan, Earthquake that occurred during a Fluid-Induced Swarm Activity

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

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

2:30 PM - 3:00 PM JST | 5:30 AM - 6:00 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-1

chairperson:Keita Chiba

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

[S09-01] Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan (2)

*Shiro OHMI[1], Hiroshi INOUE[2], Nityam NEPAL[3], Karma NAMGAY [3], Dowchu DRUKPA[3] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Department of Geology and Mines, Ministry of Energy and Natural Resources, Bhutan)

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

[S09-02] Visualization of the transition of the Japan Meteorological Agency’s seismic stations from the Meiji to Showa eras.

*Tetsuo Hashimoto[1], Satoko Murotani[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. National Museum of Nature and Science)

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

3:15 PM - 4:45 PM JST | 6:15 AM - 7:45 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Satoru Baba

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

[S09-03] Realtime seismological observation around the Tsugaru Strait by distributed acoustic sensing, northeastern Japan

*Satoru BABA[1], Eiichiro ARAKI[1], Takashi YOKOBIKI[1], Kei KAWAMATA[2], Keisuke UCHIYAMA[2], Takuji YOSHIZUKA[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Electric Power Development Co.,Ltd.)

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

[S09-04] Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation

*Chingyu Hu[1,2], Masanao Shinohara[2], Yusuke Yamashita[3], Tomoaki Yamada[2], Takeshi Akuhara[2], Kimihiro Mochizuki[2] (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-05] Seismicity in trench-outer rise region of the southern Kuril Trench off Hokkaido, Japan, obtained from OBS observations

*Koichiro OBANA[1], Tetsuo No[1], Ryo Miura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Kentaro Imai[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC)

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

[S09-06] Detection of immediate aftershocks following the 2011 Tohoku Earthquake using MeSO-net data

*Takuro Imadera[1], Aitaro Kato[1], Shin'ichi Sakai[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

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

[S09-07] Focal mechanisms based on the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko SHIOMI[1], Makoto MATSUBARA[1], Shoji SEKIGUCHI[1] (1. NIED)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S09-08] Spatiotemporal characteristics of foreshock sequences of magnitude M3-4 earthquakes in the western Nagano Prefecture region

*Yuki NODA[1], Hiroshi KATAO[2], Yoshihisa IIO[2] (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

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

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room B F201

[S02] AM-1

chairperson:Masanao Shinohara, Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S02-01] Development of anchored buoy seafloor seismic observation system for shallow water and evaluation of real data

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

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

[S02-02] Time Adjustment for Short-Period Ocean Bottom Seismometers Using Ambient Noize Cross-Correlation Functions

*Hiroaki Yamahana[1], Yoshio Murai[2], Masanao Shinohara[3] (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S02-03] Traceable calibration of a broadband seismometer using a laser interferometer

*Tomofumi Shimoda[1], Wataru Kokuyama[1], Hideaki Nozato[1] (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (3)

*Shigeki NAKAGAWA[1], Hiroshi AOYAMA[2], Hiroaki TAKAHASHI[2], Takuto MAEDA[3], Mare YAMAMOTO[4], Hiroshi TSURUOKA[1], Yosuke AOKI[1], Naoki UCHIDA[1], Yuta MAEDA[5], Shiro OHMI[6], Haruhisa NAKAMICHI[6], Makoto OKUBO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Katsuhiko SHIOMI[10], Kenji UEHIRA[10], Hideki UEDA[10], Toshihiro SHIMOYAMA[11], Koji TAMARIBUCHI[12], Kazuo OHTAKE[13], Ryo HONDA[14], Shutaro SEKINE[15] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kochi University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 11. Japan Meteorological Agency, 12. Meteorological Research Institute, JMA, 13. Kakioka Magnetic Observatory, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

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

[S02-05] Detection of submarine volcanic activity at Kaitoku Seamount using S-net

*Ryoichi IWASE[1] (1. JAMSTEC)

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

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

[S02] AM-2

chairperson:Masayuki Tanaka(MRI, JMA), Shuhei Tsuji

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

[S02-06] Vibration Monitoring in the Off-Tonankai Cable by Distributed Acoustic Sensing

*Masayuki TANAKA[1] (1. Meteorological Research Institute, JMA)

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

[S02-07] Passive seismic data in surface-deployed DAS measurement with helically wound fibers and straight fibers

*Shogo Masaya[1], Ryohei Naruse[1], Yuki Kobayashi[1] (1. INPEX CORPORATION)

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

[S02-08] A comparative study of seismic data measured by surface-deployed DAS with two interrogators and different cable deployment conditions

*Ryohei Naruse[1], Shogo Masaya[1], Yuki Kobayashi[1] (1. INPEX Corporation)

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

[S02-09] Development of the Earthquake Early Warning Algorithm Utilizing DAS with Optical Fiber Cables along the Shinkansen Railway

*Satoshi KATAKAMI[1], Eiichiro Araki[2], Narumi Takahashi[3], Shunta Noda[1], Masahiro Korenaga[1], Naoyasu Iwata[1] (1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S02-10] Automatic arrival time picking of coda waves recorded by DAS seismic observation

*Shigeki Horiuchi[1], Yuko Sato[1], Yoshiharu Hirayama[2], Tsutomu Yamate[2], Satoshi Ikui[2], Minoru Yoshida[2], Yasuhiro Asai[3], Yoshio Nakajima[3], Yoichiro Naito[3], Hiroyuki Fujiwara[4] (1. Home Seismometer Corporation, 2. Hakusan Corporation, 3. Tokyo Power Tecnology, 4. NIED)

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

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

[S02] PM-1

chairperson:Satoshi Katakami

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

[S02-11] Development of seafloor deep borehole long-term observation system and the deployment plan in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI[1], Yuya Machida[1], Takashi Yokobiki[1], Shuhei Tsuji[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Shuhei Nishida[1], Satoru Baba[1], Kan Aoike[2], Yasuyuki Nakamura[1], Keisuke Ariyoshi[1], Takane Hori[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC IMG, 2. JAMSTEC Mare3)

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

[S02-12] Development of seafloor borehole fiber optical strainemter

*Yuya MACHIDA[1], Eiichiro Araki[1], Yokobiki Takashi[1], Tomokazu Saruhashi[1], Shuhei Tsuji[1], Hiroyuki Matsumoto[1] (1. JAMSTEC)

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

[S02-13] Initial test of borehole fiber optic strainmeter at Kamioka Mine

*Shuhei TSUJI[1], Eiichiro Araki[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Yuya Machida[1], Takashi Yokobiki[1] (1. JAMSTEC)

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

[S02-14] Analysis of long-term pore pressure data acquired at a 20 m borehole in the Kamioka Mine

*Hiroyuki MATSUMOTO[1], Yuya Machida[1], Shuhei Tsuji[1], Takashi Yokobiki[1], Keisuke Ariyoshi[1], Eiichiro Araki[1] (1. JAMSTEC)

Room B | Regular session：S14. Earthquake prediction and forecast

3:15 PM - 4:15 PM JST | 6:15 AM - 7:15 AM UTC | Room B F201

[S14] PM-2

chairperson:Masajiro Imoto (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] Comments on the Brownian Passage Time distribution model for recurrent paleoearthquakes

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

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

[S14-02] Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the southwest Japan

*Taro Hara[1], Hiroaki Takahashi[2] (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S14-03] Application of an Earthquake Early Warning with the PLUM Method to the 2023 Türkiye-Syria Earthquake

*Masaru Morinaga[1], Masumi Yamada[2] (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S14-04] No Evidence of Magnitude Dependence in Earthquake Triggering

*Giuseppe Petrillo[1], Jiancang Zhuang[1] (1. Institute of Statistical Mathematics (ISM))

Room C | Regular session：S17. Tsunami

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

[S17] AM-1

chairperson:Yuchen Wang(JAMSTEC), Osamu Sandanbata

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

[S17-01] Tsunami and Megathrust Earthquake Predictions: Real-time Monitoring of the Genesis Processes with Physical Wavelets

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

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

[S17-02] Study of the 1605 Keicho Tsunami Source Models for the Sea Areas along the Nankai Trough and the Izu-Bonin Trench

*Yoshinori Satou[1], Naoto Kihara[2], Katsuhide Katou[3] (1. Unic, 2. CRIEPI, 3. CEPCO)

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

[S17-03] Estimation of Fault Models Using Nonlinear Inversion for the 1946 Nankai and the 1944 Tonankai Earthquakes

*Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[2] (1. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University, 2. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University)

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

[S17-04] Detecting small volcanic tsunami signals from Kita-Ioto Caldera using dense DONET ocean-bottom pressure records

*Osamu SANDANBATA[1], Tatsuhiko SAITO[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Room C | Regular session：S17. Tsunami

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

[S17] AM-2

chairperson:Osamu Sandanbata, Yuchen Wang(JAMSTEC)

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

[S17-05] Ocean-wave gradiometry (part 2): Propagation features of the 2022 Hunga Tonga tsunami inferred from apparent amplitude decay

*Masashi Ogiso[1], Hiroaki Tsushima[1] (1. Meteorological Research Institute)

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

[S17-06] Consideration of New Friction Calculation to Represent Accurate Decay in Numerical Tsunami Calculations

*Masaaki MINAMI[1] (1. Meteorological Research Institute)

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

[S17-07] Examination of the Predictability of Tsunami Warning Cancellation based on Data Assimilation Approach

*Yuchen Wang[1], Kentaro Imai[1], Hiroki Horikawa[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S17-08] Numerical experiments of tsunami wavefield estimation based on adjoint equations

*Takuto MAEDA[1] (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

Room C | Regular session：S06. Crustal structure

1:30 PM - 3:00 PM JST | 4:30 AM - 6:00 AM UTC | Room C F202

[S06] PM-1

chairperson:Kazuya Shiraishi(JAMSTEC), Shun Fukushima(ERI, Univ. of Tokyo)

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

[S06-01] Spatio-temporal variations in seismic structure detected by seismic interferometry using OBS records and their interpretation

*Takehiro Sato[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Takagi[1], Ryota Hino[1], Masanao Shinohara[2] (1. Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S06-02] Estimation of P-wave velocity and Vp/Vs structure of upper crust off Sanriku, Japan by distributed acoustic sensing data

*Shun FUKUSHIMA[1,2], Masanao SHINOHARA[2], Kimihiro Mochizuki[2], Tomoaki Yamada[2], Ryota Hino[3], Ryosuke Azuma[3], Yoshihiro Ito[4], Yusuke Yamashita[4] (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 3. Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruption, Graduate School of Science, Tohoku UniversityEarthquake and Volcanic Eruption, Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S06-03] Lateral structure variation across the central part of the NE Japan Arc deduced 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[3], 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. JOGMEC)

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

[S06-04] 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. AORI, The University of Tokyo, 2. AIST (Advanced Industrial Science and Technology), 3. JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), 4. Geoscience Enterprise)

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

[S06-05] Crustal structure in the 17th century Kuril earthquake and its linkage to the occurrence of the large shallow slip

*Ryosuke AZUMA[1], Shuichi Kodaira[2], Ryota Hino[1], Gou Fujie[2], Koichiro Obana[2], Fumiaki Tomita[3], Yusaku Ohta[1] (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. JAMSTEC, 3. IRIDeS, Tohoku Univ.)

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

[S06-06] Detailed structure of the old accretionary sediments revealed by reprocessing of OBS survey data in Nankai Trough

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

Room C | Regular session：S06. Crustal structure

3:15 PM - 3:45 PM JST | 6:15 AM - 6:45 AM UTC | Room C F202

[S06] PM-2

chairperson:Ryosuke Azuma

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

[S06-07] Integrated data analysis of MCS reflection and OBS wide-angle seismic surveys in the Nankai Trough

*Kazuya SHIRAISHI[1], Gou Fujie[1], Ryuta Arai[1], Yasuyuki Nakamura[1] (1. JAMSTEC)

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

[S06-08] Subduction structure of the Kyushu-Palau Ridge that causes upper-plate fracture zones and weak interplate coupling

*Ryuta ARAI[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Dan Bassett[2], Tsutomu Takahashi[1], Yuka Kaiho[1], Yohei Hamada[1], Kimihiro Mochizuki[3], Rie Nakata[3], Masataka Kinoshita[3], Yanxue Ma[3], Yoshitaka Hashimoto[4], Kyoko Okino[5] (1. JAMSTEC, 2. GNS Science, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Kochi University, 5. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

Room C | Regular session：S05. Geothermal science

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC | Room C F202

[S05] PM-2

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

[S05-01] Heat flow anomalies as indicator for subseafloor excess pore fluid promoting slow earthquakes around seamounts

*Masataka KINOSHITA[1], Yoshitaka Hashimoto[2], Yohei Hamada[3], Rie Nakata[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kochi University, 3. JAMSTEC)

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

4:00 PM - 4:30 PM JST | 7:00 AM - 7:30 AM UTC | Room C F202

[S12] PM-2

chairperson:Yasuo Yabe

4:01 PM - 4:16 PM JST | 7:01 AM - 7:16 AM UTC

[S12-01] Effect of water vaper on the microphysical processes of friction of quartz gouge

*Yasuo YABE[1] (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

[S12-02] In-situ stress at the basement under Osaka plain (7) - In-situ stress measurement at NIED Osaka observation well by DCDA method -

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

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

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room D F204

[S15] AM-1

chairperson:Keishi NOGUCHI, Masumi Yamada

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

[S15-01] Integration of multiple hypocenter determination methods for Earthquake Early Warning into the IPF method

*Keishi NOGUCHI[1], Koji TAMARIBUCHI[2], Naoki HAYASHIMOTO[1], Yuki KODERA[2] (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S15-02] Real Time Forecast of Long Period Ground Motions Using Strong Motion Records: A Numerical Experiment

*Teppei Enari[1], Takashi Furumura[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S15-03] Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan

*Hong Peng[1], Stephen Wu[1,2], Masumi Yamada[3,4] (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. The Graduate University for Advanced Studies, 3. Kyoto University, 4. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S15-04] To what extent are multiple earthquakes separable?

*Masumi YAMADA[1] (1. DPRI Kyoto University)

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

[S15-05] Effect of station density on the maximum observed seismic motion

*Shin AOI[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Hisahiko Kubo[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

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

[S15] AM-2

chairperson:Susumu Kurahashi(Aichi Institute of Technology), Hiroyuki Goto

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

[S15-06] Estimation of the EGTD for prediction

*Masanori HORIKE[1] (1. Hanshin consultants co., LTD.)

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

[S15-07] Scaling of Fault Rupture Process Simulated from Hierarchy Patch Source Model

*Hiroyuki GOTO[1] (1. Kyoto University)

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

[S15-08] Comparative study of temporal variation of coseismic velocity in Korea and Japan

*Tae Woong Chung[1], Faisal Umer[1], Kazuo Yoshimoto[2] (1. Sejong University, 2. Yokohama City University)

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

[S15-09] Relationship between strong ground motion and dynamic parameters inferred from dynamic source inversion of the 2016 Kumamoto earthquake

*Takeshi MIYAMOTO[1], Kimiyuki ASANO[2], Tomotaka IWATA[2] (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DPRI, Kyoto University)

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

[S15-10] Extraction of effective source areas based on comparison between calculated waveforms before and after trimming of slip distribution

*Susumu KURAHASHI[1], Ken Miyakoshi[1] (1. Aichi Institute of Techonology)

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

1:30 PM - 3:00 PM JST | 4:30 AM - 6:00 AM UTC | Room D F204

[S15] PM-1

chairperson:Atsuko OANA, Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute)

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

[S15-11] Strong motion characteristics of the 2023 southeastern Turkey earthquakes with surface faults

*Takao KAGAWA[1] (1. Tottori University, Faculty of Engineering)

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

[S15-12] Source process characteristics of the 2023 Turkey earthquake (M_w 7.7) inferred from pulse-like near-fault ground motions

*Yosuke NAGASAKA[1], Atsushi Nozu[1] (1. Port and Airport Research Institute)

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

[S15-13] SIMULATION OF THE NEAR-FAULT RECORDS OF THE 2023 KAHRAMANMARAS, TURKEY EARTHQUAKE (M_W7.7) BASED ON A CHARACTERISZED FAULT MODEL

*Toshimichi Kidoh[1], Masayuki Nagano[2], Ken Miyakoshi[1], Kensuke Arai[1], Toshiaki Satoh[1] (1. Ohsaki Research Institute, 2. Tokyo Univ. of Science)

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

[S15-14] Strong Motion Simulation Focused on Rupture Velocity of the 2023 Turkey Subsequent Earthquake (Mw7.6) Based on Characterized Fault Model

*Sei Kanayama[1], Toshimichi kido[2], Hong Liu[1], Masayuki Nagano[1] (1. Tokyo University of Science, 2. OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC.)

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

[S15-15] Broadband Strong Ground Motion Simulation of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake Using the Empirical Green's Function Method.

*Hidetoshi Kasugai[1], Yoshiaki Hisada[1], Shinya Tanaka[2] (1. Kogakuin University, 2. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)

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

[S15-16] Study on the Shallow Fault Slip of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake (Mw6.9) Based on Characterized Fault Models

*Atsuko OANA[1], Ken Miyakoshi[2], Shohei Yoshida[2], Toshiaki Sato[2] (1. Shimizu Corporation, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

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

3:15 PM - 4:00 PM JST | 6:15 AM - 7:00 AM UTC | Room D F204

[S15] PM-2

chairperson:Takashi Hirai(University of Hyogo)

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

[S15-17] A Study on Behavior of Japanese Swords on Display during Earthquake Based on Vibration Experiment

*Takashi HIRAI[1], Tomoko TEZUKA[2], Miki TAKANO[3], Jun TOBITA[3] (1. University of Hyogo, 2. Token Corporation, 3. Nagoya University)

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

[S15-18] Improvement of ground motion prediction equation by non-ergodic approach considering regional characteristics

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

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

[S15-19] Differences in site amplification for each plain based on the ground motion prediction equation

*Hiroto Tanaka[1], Ritsuko S. Matsu'ura[2], Mitsuko Furumura[2], Tsutomu Takahama[1] (1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction)

Room D | Regular session：S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

4:00 PM - 4:45 PM JST | 7:00 AM - 7:45 AM UTC | Room D F204

[S16] PM-2

chairperson:Ikuo Cho(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S16-01] Peak-frequency map of horizontal-to-vertical spectral ratios in the Kanto region: Addition of content to the Urban Geological Map

*Ikuo CHO[1], Shigeki Senna[2], Susumu Nonogaki[1], Tsutomu Nakazawa[1], Junko Komatsubara[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S16-02] Estimation of Shallow Structure Along the Hinagu Fault Using Seismic Wave Interferometry in DAS Observations of National Route 3

*Satoru Hamanaka[1], Kentaro Emoto[2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Faculty of Science, Kyushu University)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S16-03] Comparative Analysis of Ground Motion Monitoring Performance through DAS Test Observations Using Multiple Instruments

*Hiroyuki FUJIWARA[1], Hiromitsu Nakamura[1], Takashi Kunugi[1], Shohei Naito[1], Shigeki Senna[1], Masato Sato[1], Ken Sakurai[2], Chisato Konishi[2], Haruhiko Suzuki[2], Masaki Takebe[3] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO Corporation, 3. Mitsubishi Electric Software Corporation)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S09. Statistical seismology and underlying physical processes

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P1 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S09P] PM-P

[S09P-01] A comprehensive review of shallow slow earthquakes in Nankai

*Shunsuke TAKEMURA[1], Yohei Hamada[2], Hanaya Okuda[2], Yutaro Okada[3], Kurama Okubo[4], Takeshi Akuhara[1], Akemi Noda[5], Takashi Tonegawa[2] (1. ERI, UTokyo, 2. JAMSTEC, 3. Kyoto Univ., 4. NIED, 5. MRI)

[S09P-02] Machine-learning-based analysis: Spatiotemporal evolution of aftershocks following the 2019 Cotabato and 2019 Davao del Sur earthquakes

Paulo Pangan Sawi[2], *Saeko KITA[1], Roland Burgmann[3] (1. Building Research Institute, 2. DOST-PHIVOLCS, 3. UC Berkeley)

[S09P-03] Using dense triad sub-arrays to detect and locate very low-frequency earthquakes in Japan

*Ryo Okuwaki[1], Wenyuan Fan[2], Takanori Matsuzawa[3], Shunsuke Takemura[4] (1. University of Tsukuba, 2. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

[S09P-04] Detection of very shallow earthquakes and deep low-frequency earthquakes in Hakone volcano

*Ryo KURIHARA[1] (1. Hot Springs Research Insitute of Kanagawa prefecture)

[S09P-05] Changes in very low-frequency earthquake activity in the Southwestern Ryukyu Trench over 23 years

*Mamoru NAKAMURA[1] (1. Univ. Ryukyus)

[S09P-06] Relationship between inland seismicity and crustal deformation after the 2011 Tohoku earthquake

*Koji TAMARIBUCHI[1], Hisao KIMURA[1], Fuyuki HIROSE[1], Takeyasu YAMAMOTO[1] (1. Meteorological Research Institute)

[S09P-07] Seismic imaging of the Metastable olivine wedge using receiver function

*Kazuki MIYAZAKI[1], Junichi Nakajima[1], Shoichi Yoshioka[2,3] (1. Tokyo institute of Technology, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Faculty of Science, Graduate School of Science, Kobe University)

[S09P-08] Tectonic tremor distribution and migration at Kumano-nada: insights from ocean-bottom seismometer deployment between DONET1 and 2

*Takeshi AKUHARA[1], Yusuke Yamashita[2], Hiroko Sugioka[3], Atikul Haque Farazi[2], Shukei Ohyanagi[2], Yoshihiro Ito[2], Eiichiro Araki[4], Takashi Tonegawa[4], Takeshi Tsuji[1], Ryosuke Azuma[5], Ryota Hino[5], Kimihiro Mochizuki[1], Shunsuke Takemura[1], Tomoaki Yamada[1], Masanao Shinohara[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. Kyoto Univ., 3. Kobe Univ., 4. JAMSTEC, 5. Tohoku Univ.)

[S09P-09] Ratio of inter-plate to intraplate earthquakes in subduction zone around Japan

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

[S09P-10] Slow earthquake distribution and thermomechanical modeling in the Izu–Bonin subduction zone

*Weiling Zhu[1], Aitaro Kato[2], Yingfeng Ji[1] (1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 2. University of Tokyo)

[S09P-11] Spatio-temporal characteristics of micro-earthquake activity in the east to northeast off Kikaijima Island observed by OBS network

*Hirotsugu Yanagida[1], Yukihiro Nakatani[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Reiji Kobayashi[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[3], Hiroshi Shimizu[4], Kazuo Nakahigashi[5], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[6] (1. Grad. Sch. Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Fac. Sci., Kyushu Univ., 4. NIED, 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6. ERI, UTokyo)

[S09P-12] Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

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

[S09P-13] Detectability of shallow tectonic tremor in the Nankai Trough based on the DONET data

*Kazuaki OHTA[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

[S09P-14] Shallow seismic activity in the northern Tokyo Bay and central Chiba Prefecture

*Naoko KATO[1], Motoo Ukawa[2] (1. Nihon University, College of Humanities and Sciences (Present address: Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), 2. Nihon University, College of Humanities and Sciences)

[S09P-15] Estimation of the temporal change of background stress based on the rate- and state-friction seismicity model

*Takaki Iwata[1] (1. Prefectural University of Hiroshima)

[S09P-16] Shear strain energy release for the 2016 Kumamoto earthquake sequence

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

[S09P-17] Detection of shallow very low frequency earthquakes around Hyuga-nada since April 2023 using a matched filter technique

*Mugi Yamamoto[1], Ken Moriwaki[1] (1. Japan Meteorological Agency)

[S09P-18] Correlations between shear strain energy changes and aftershock locations depending on aftershock magnitudes

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

[S09P-19] Tectonic tremor activity near the boundary between the Hinagu segment and the Yatsushiro segment of Hinagu fault zone

*Hidenobu TAKAHASHI[1], Yasuhira Aoyagi[1], Haruo Kimura[1] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S19. Seismology, general contribution

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P10 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S19P] PM-P

[S19P-01] Toward development of the Community Fault Model

*Ryosuke ANDO[1], Takashi Azuma[2], Community fault model voluntary group[3] (1. University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. N/A)

[S19P-02] Fundamental study on fault structure development by X-ray CT imaging of analog experimental equipment

*Naoto INOUE[1], Naoko Kitada[1], Noriyuki Shibuya[2], Masashi Omata[2] (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)

[S19P-03] Source areas of primary microseisms strongly excited by major hurricanes

*Hiroki Kawakami[1], Naoki Suda[1] (1. Hiroshima University)

[S19P-04] Seismic noise amplitude variations caused by wind: A case study around Aomori prefecture, northeast Japan

*Akira Ueno[1], Tomoya Takano[1], Takuto maeda[1] (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

[S19P-05] Anomalous seismic ground motion associated with a torrential rainfall event in and around Aomori prefecture, NE Japan, in August 2022

*Yuzuki Yamato[1], Takuto Maeda[1], Tomoya Takano[1] (1. Hirosaki University)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S01. Theory and analysis method

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

[S01P] PM-P

[S01P-01] What (seismically) happened before, during, and after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption?

*Ryo Okuwaki[1], Wenyuan Fan[2] (1. University of Tsukuba, 2. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego)

[S01P-02] Determination of event features to compile a tectonic tremor catalog

*Seiya Yano[1], Satoshi Ide[1] (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

[S01P-03] Stable estimation of clock time errors and seismic velocity changes with a state-space model of cross-correlations of ambient noise

*Tomoya TAKANO[1], Kiwamu Nishida[2] (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 2. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

[S01P-04] Consistency between S/P Amplitude Ratios and P-wave Polarities Observed at the NIED S-net and H-net Stations

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

[S01P-05] Modeling ocean-bottom seismograph (S-net) waveforms for the full waveform tomography of the 2011 Tohoku-Oki earthquake source area

*Taro OKAMOTO[1], Hiroshi Takenaka[2], Takeshi Nakamura[3] (1. Tokyo Institute of Technology, 2. Okayama University, 3. Central Research Institute of Electric Power Industry)

[S01P-06] Forecasting Seismic Wave Propagation by Physics-Informed Neural Network (PINN): Numerical Experiments in a 2-D Acoustic Wavefield

*Masayoshi Someya[1], Takashi Furumura[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

[S01P-07] Evaluation of Analysis Techniques for Scattering Attenuation Structure Estimates in Small Spatial Region

*Koyo Matsuda[1], Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Yohei Yukutake[3] (1. Kyoto University, 2. Hirosaki University, 3. Univ. of Tokyo, ERI)

[S01P-08] Energy partitioning into strain components in diffuse wave fields (2)

*Hisashi NAKAHARA[1], Kentaro Emoto[2] (1. Tohoku University, 2. Kyushu University)

[S01P-09] Fluctuation of the strain waveform due to the small-scale heterogeneity

*Kentaro EMOTO[1], Satoru HAMANAKA[1] (1. Kyushu University)

[S01P-10] Parallelization in Seismic Ray Tracing Programs

*Shutaro SEKINE[1] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S02. Seismometry and monitoring system

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

[S02P] PM-P

[S02P-01] An attempt to efficiently process low-quality and large-volume seismic reflection data - case of Aizubange -

*Shinobu ITO[1], Sawako KINOSHITA[1] (1. GSJ, AIST)

[S02P-02] Working report of the definition for WIN waveform data transmission protocol

*Makoto OKUBO[1] (1. Unit of Science and Technology, Kochi Univ.)

[S02P-03] A study of earthquake detection capacity of DONET

*Kazuyoshi NANJO[1,2,3,4], Yojiro Yamamoto[4], Keisuke Ariyoshi[4], Hiroki Horikawa[4], Shuichiro Yada[4], Narumi Takahashi[5,4] (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. The Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S02P-04] Observation of P-wave polarity with DAS recordings along Route 9

*Yuki Funabiki[1], Masatoshi Miyazawa[1] (1. Kyoto University)

[S02P-05] Broadband seismic campaign for the deep very low frequency earthquakes in the southwest Japan

*Akiko TAKEO[1], Koji MIYAKAWA[1], Taro NISHIMOTO[1], Miwako ANDO[1], Ayaka SAIKI[1], Shinichi TANAKA[1], Hironori OTSUKA[2], Chikaaki FUJITA[1], Miki HAMAMOTO[3], Ritsuya SHIBATA[4], Shota KATO[1], Shinya KATOH[1], Koki MASUDA[5], Masayuki KANO[6], Shunsuke TAKEMURA[1], Kazushige OBARA[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kobe Ocean-Bottom Exploration Center, Kobe University , 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 5. School of Science, the University of Tokyo, 6. Graduate School of Science, Tohoku University)

[S02P-06] Development of Tsunami Evacuation Training System

*Masahiro OOI[1], Toshiyasu SHIMIZU[2], Mitsutsugu IGARASHI[3], Narumi TAKAHASHI[1], Shoichi SHIOZAKI[3], Takahiro HANDA[2], Kazumi ASAO[1] (1. NIED, 2. Toppan Inc., 3. Chiba Pref.)

[S02P-07] Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveform data (2)

*Yojiro YAMAMOTO[1], Hiroki Horikawa[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Keisuke Ariyoshi[1], Kentaro Sueki[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[2] (1. JAMSTEC, 2. NIED)

[S02P-08] Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (3)

*Tadashi YAMASHINA[1], Makoto OKUBO[1], Takao TABEI[1] (1. Kochi University)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P13 (F203) Hall Annex

[S12P] PM-P

[S12P-01] A simple direct shear friction apparatus using a uniaxial compression tester

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

[S12P-02] Effect of internal fracture distribution on frequency dependence of elastic constants of granite

*Hideto Takatsu[1], Shin-ichi Uehara[1] (1. Toho University)

[S12P-03] High-velocity friction experiments for samples of various size: Scale effect in the critical slip rate for dynamic weakening

*Hiroyuki NODA[1], Kiyokazu Oohashi[2] (1. Kyoto Univ., 2. Yamaguchi Univ.)

[S12P-04] Effects of effective pressure on fault reactivation due to fluid injection

*Garam Kim[1], Manami Kitamura[2], Michiyo Sawai[1] (1. Chiba university, 2. GSJ, AIST)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S18. Education and history of seismology

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

[S18P] PM-P

[S18P-01] Preliminary systematization of earthquake countermeasures with reference to the approach of behavior change on health promotion

*Yo FUKUSHIMA[1], Natsuko Chubachi[1], Shinichi Kuriyama[1] (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University)

[S18P-02] Development of Citizen Seismic Network and Promotion of Sustainable Earthquake Disaster Prevention and Mitigation Projects

*Yukino Yazaki[1], Yugo Suzuki[1], Hiroki Uematsu[1,2], Ahyi Kim[1], Masami Yamasaki[1] (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

Poster session (Sept. 17th) | Special session：S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

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

[S21P] PM-P

[S21P-01] On the effects of time width used to count interval maximum amplitude of a seismogram on the extreme value analysis

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

[S21P-02] AE Catalog development by a deep hashing method and network correlation analysis

*Makoto NAOI[1], Shiro HIRANO[2], Youqing CHEN[1] (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University)

[S21P-03] Attempt to Predict Response Spectra from Fourier Spectra Using Machine Learning

*Yuki Kurata[1], Hiroaki Matsukawa[1], Hiroto Tanaka[1], Yasuhiro Matsumoto[1], Mika Takekoshi[1], Takachika Yagi[1], Ryota Kiuchi[1], Yuta Taki[1] (1. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)

[S21P-04] Predicting the probability of seismic motion exceedance based on short-term earthquake probability information after a large earthquake

*Hisahiko KUBO[1], Katsuhiko SHIOMI[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S21P-05] Comprehensive detection of later phase in S coda throughout the inland Japanese archipelago with deep learning

*Yuta AMEZAWA[1], Takahiko Uchide[1], Takahiro Shiina[1], Jun Ogata[2], Satoru Fukayama[2], Hiroki Kuroda[3] (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology , 3. Department of Information and Management Systems Engineering, Nagaoka University of Technology)

[S21P-06] Extraction of deep tectonic tremor waveforms 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] You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes.

*GERARDO MANUEL MENDO PEREZ[1], HIROMICHI NAGAO[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S21P-08] Which is more suitable for polarity determination using deep learning, time series data or image data?

*Shinya KATOH[1], Yoshihisa IIO[2], Hiroshi KATAO[2], Masayo SAWADA[2], Kazuhide TOMISAKA[2] (1. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

[S21P-09] Fast Smoothing Method for Spatiotemporal Data and Its Application to Seismic Wavefield Reconstruction

*Yoshikazu Terada[1,2], Hidetoshi Matsui[3], Hiromichi Nagao[4] (1. Osaka Univ., 2. RIKEN, 3. Shiga Univ., 4. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo)

[S21P-10] Hypocenter-based Visualization of Multiscale Earthquake Faults:
Application to Crustal Earthquakes in Japan Islands

*Yasunori SAWAKI[1], Yoshihiro SATO[2,3], Takahiko UCHIDE[1], Haruo HORIKAWA[1], Takahiro SHIINA[1], Yuta AMEZAWA[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Tokyo City University, 3. Artificial Intelligence Research Center, AIST)

[S21P-11] Construction of a high-performance volcanic earthquake phase detection model using deep learning and examination of its transfer learning

*Yuji Nakamura[1,2], Ahyi Kim[1], Yohei Yukutake[3], Yuki Abe[4] (1. Yokohama City University, 2. activecore, Inc., 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

[S21P-12] Machine-learning model of GNSS displacement rate estimation using seismic waveforms in western Shikoku

*Kazuki OHTAKE[1], Aitaro KATO[1], Yutaro OKADA[2], Takuya NISHIMURA[3] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Kyoto University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S21P-13] Evaluation of GNSS-A positioning accuracy using a simple numerical model and the PyMC library

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

[S21P-14] Acoustic waveform analysis for GNSS-Acoustic observation using Machine Learning

*Naoki Kurosu[1], Motoyuki Kido[2] (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute for Disaster Science, Tohoku University)

[S21P-15] Development of a Seismic Phase Pick System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

*Yukino Yazaki[1], Yuji Nakamura[1], Hiroki Uematsu[1,2], Ahyi Kim[1], Masami Yamasaki[1] (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S05. Geothermal science

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

[S05P] PM-P

[S05P-01] Ground surface temperature history reconstruction from borehole temperature data off-shore of the Kii Peninsula to Shikoku region

*Akiko TANAKA[1], Shusaku GOTO[2] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. GREEN, Geological Survey of Japan, AIST)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S06. Crustal structure

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

[S06P] PM-P

[S06P-01] A time-lapse analysis of multi-channel seismic reflection data using seismic attenuation profiling

*Tetsuro TSURU[1], Tetsuo NO[2], Kazuo YAMAGUCHI[3], Jin'Oh PARK[4] (1. TUMSAT, 2. JAMSTEC, 3. AIST, 4. AORI)

[S06P-02] Time-lapse seismic reflection study off Tokachi

*Tetsuo NO[1], Tetsuro Tsuru[2,1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Kazuo Nakahigashi[2], Seishiro Furuyama[2], Ryo Miura[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology)

[S06P-03] Seismic velocity structure off the east coast of Aomori Prefecture revealed by airgun ocean bottom seismometer survey.

*Tamaki Ishibashi[1], Kazuo Nakahigashi[2], Tomoaki Yamada[3], Kimihiro Mochizuki[3], Yoshio Murai[4], Ryota Hino[5], Ryosuke Azuma[5], Toshinori Sato[6], Masanao Shinohara[3] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Academic Research Faculty, Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Institutw of seismology and Volcanology Faculty of science, Hokkaido University, 5. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 6. Graduate School of Science, Chiba University)

[S06P-04] Structural characteristics of the incoming plate in the Japan Trench and their correspondence to the megathrust slip styles

*Yasuyuki NAKAMURA[1], Gou FUJIE[1], Shuichi KODAIRA[1], Mikiya YAMASHITA[2], Koichiro OBANA[1], Tetsuo NO[1], Seiichi MIURA[1] (1. JAMSTEC, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

[S06P-05] Estimation of shear velocity structure near the Japan and Kuril Trench junction using ambient noise records

*Ryota TAKAGI[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Hino[1], Kiwamu Nishida[2], Masanao Shinohara[2] (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S06P-06] Anisotropic structure at shallow depths near the Japan Trench

*Takashi TONEGAWA[1], Katsuhiko Shiomi[2], Ryota Takagi[3] (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Tohoku University)

[S06P-07] Ambient-noise cross-correlation analysis using three-components broadband coutinuous ground motion records in the Nansei Islands

*Masanao Komatsu[1], Sohei Urakami[2], Hiroshi Takenaka[3], Genti Toyokuni[4], Mamoru Nakamura[5], Shutaro Sekine[6], Shintaro Abe[6] (1. Okayama Gakuin University, 2. Formerly Okayama University, 3. Okayama University, 4. Tohoku University, 5. University of the Ryukyus, 6. Association for the Development of Earthquake Prediction)

[S06P-08] Shallow crustal anisotropy in Eastern Türkiye based on the receiver function analysis

*Katsuhiko SHIOMI[1] (1. NIED)

[S06P-09] Temporal variations in seismic anisotropy above a megathrust zone following slow-slip events

*Yosuke Ito[1], Junichi Nakajima[1] (1. Tokyo Institute of Technology)

[S06P-10] Estimation of crustal structure in southeastern Kanagawa Prefecture using P-wave correlation analysis of distant earthquakes

*Kazuo YOSHIMOTO[1] (1. Yokohama City University)

[S06P-11] Constructing a 3D seismic velocity model of the Nankai Trough

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

[S06P-12] A dense seismic array observation in the eastern part of Shikoku Island, southwestern Japan

*Eiji KURASHIMO[1], Takashi Iidaka[2], Noriko Tsumura[3] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo, 3. Faculty of Science, Chiba University)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

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

[S07P] PM-P

[S07P-01] Seismic exploration on Titan by NASA's Dragonfly mission

*Keisuke Onodera[1], Satoshi Tanaka[2], Hiroaki Shiraishi[2], Taichi Kawamura[3], Takefumi Mitani[2], Hideki Murakami[4], Ryuhei Yamada[5], Shunichi Kamata[6], Jun Kimura[7], Hiroyuki Kurokawa[8], Yasuhito Sekine[8], Kiwamu Nishida[1], Takeshi Tsuji[9], Mark Panning[10], Ralph Lorenz[11] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IPGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology , 11. Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

[S07P-02] Upper mantle structure beneath Mongolia: Implications for the western margin of the Amurian plate

*Kazunori YOSHIZAWA[1,2], Baigalimaa Ganbat[2], Demberel Sodnomsambuu[3], Ulziibat Munkhuu[3] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences)

[S07P-03] Bayesian inferences of upper mantle discontinuities using azimuth-dependent receiver functions and multi-mode surface waves

*Kotaro TARUMI[1], Kazunori YOSHIZAWA[1,2] (1. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S10. Active faults and historical earthquakes

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

[S10P] PM-P

[S10P-01] Study of slip-velocity parameters in calculation of strong ground motion near inland active faults; example of Kumamoto earthquake, 2016

*Kimie NORIMATSU[1], Shinji TODA[1] (1. IRIDeS, Tohoku Univ.)

[S10P-02] S and P-wave seismic reflection survey in the Ama area, Minami-Awaji City, Hyogo Prefecture, Japan

*SAWAKO KINOSHITA[1], Shinobu Ito[1] (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S11. Various phenomena associated with earthquakes

5:00 PM - 6:30 PM JST | 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P9 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S11P] PM-P

[S11P-01] Investigate earthquake sound (Part 3) - Analysis of audible "jinari" recording

*Kazuo OHTAKE[1], Hiroo Nemoto[2], Shutaro Sekine[3], Hirotoshi Matsubayashi[4], Shin'ichi Sakai[5] (1. JMA, 2. Ritsumeikan Univ., 3. ADEP, 4. ANET, 5. ERI)

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

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

[S08] AM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), Toshiko Terakawa(Nagoya University)

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

[S08-16] Effects of long-term slow slip events on intraplate stresses in Bungo Channel and Tokai region

*Saeko KITA[1], Heidi Houston[2], Suguru Yabe[3], Sachiko Tanaka[4], Youichi Asano[4], Takeshi Kimura[4] (1. BRI, 2. USC, 3. AIST, 4. NIED)

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

[S08-17] Stress Change Driven Afterslip Following the 2016 Central Tottori Earthquake

*Angela Meneses-Gutierrez[1], Tatsuhiko Saito[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S08-18] Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy and stress rotation

*Toshiko TERAKAWA[1], Kimiyuki Asano[2], Yumi Urata[3] (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Disaster Prevention research Institute, Kyoto University, 3. AIST)

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

[S08-19] Estimation of the spatial distribution of the "internal friction coefficient" in the crust beneath the Japanese Islands

*Yuta MITSUI[1] (1. Department of Geosciences, Shizuoka University)

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

[S08-20] Stress drop variations of repeating earthquakes

*Junichi NAKAJIMA[1], Akira Hasegawa[2] (1. EPS Department, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

Effects of long-term slow slip events on intraplate stresses in Bungo Channel and Tokai region

*Saeko KITA[1], Heidi Houston[2], Suguru Yabe[3], Sachiko Tanaka[4], Youichi Asano[4], Takeshi Kimura[4]

1. BRI, 2. USC, 3. AIST, 4. NIED

Relationships between in-slab events and two slow slip events (SSEs) were examined in the Tokai region, where there are in-slab earthquakes and long-term SSEs (L-SSEs) of several years' duration. Such relationships were compared for the Bungo channel by Kita et al. [2022, SSJ meeting]. A stress-tensor inversion method of focal mechanisms of 20 years of in-slab events was applied and temporal changes of stress axis relative to the duration times of the two L-SSEs were found. Basically, the Sigma 3 axes of inversion results strike in the east-west direction beneath fault planes of L-SSEs, whereas the strikes of the Sigma 1 axes beneath the fault planes can be divided into two portions by the Median Tectonic Line which corresponds to the boundary between Aichi and Shizuoka prefectures. The Sigma 3 axes are close to vertical in western portion, whereas they are horizontal in the eastern portion. The stress ratio R of the inversion became maximum (0.53 to 0.55) during the period between the two L-SSEs in both of the regions. This suggests that the fault plane became more locked in the period, compared to periods of L-SSEs slip. During the periods of the two L-SSEs slips, the plunges of Sigma 1 axes decreased, becoming less vertical in the western portion and close to the plunge of the plate interface in the eastern portion. The stress ratio R decreased during the periods of slip in the both of the regions, which was also observed in three L-SSEs in the Bungo channel. These results suggest to detect in-slab events to monitor ongoing reduction in locking of the plate boundary by aseismic slip.

© The Seismological Society of Japan

Stress Change Driven Afterslip Following the 2016 Central Tottori Earthquake

*Angela Meneses-Gutierrez[1], Tatsuhiko Saito[1]

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

The analysis of GNSS observations in the coseismic and postseismic period of the 2016 Central Tottori earthquake (M_w6.2) revealed a complementary spatial pattern between the coseismic and postseismic slip distributions on the fault plane (Meneses-Gutierrez et al., 2019 JGR). These results suggested afterslip driven by coseismic stress change, in agreement with velocity-strengthening friction laws, often invoke to explain postseismic deformation (Marone et al., 1991). However, a quantitative relation between the coseismic deformation and the mechanism driving postseismic deformation of the 2016 Central Tottori earthquake has not been established.

We perform a geodetic inversion of a dense GNSS network to estimate the coseismic slip distribution on the fault plane of the 2016 Central Tottori earthquake in an elastic half-space using the method of Yabuki and Matsu’ura (1992). Using the stress change calculated from the aforementioned coseismic slip distribution, we construct the expected afterslip stress drop in the postseismic period (Saito and Noda, 2022 JGR). For this purpose, we assume that the observed positive coseismic stress change at shallow depths (~1 MPa) works as the stress drop in the afterslip. Next, we obtain the afterslip distribution by inverting the stress drop distribution. In doing this, we assume that the slip direction in the postseismic period is consistent with that of the subfaults in the coseismic period.

Large afterslip is restricted to shallow depths (<3 km) in agreement with previous studies. The maximum postseismic slip is 20 cm and the moment magnitude is M_w 5.3 (1.47×10^{17} N·m) when we assume a rigidity of 30 GPa. The moment magnitude of our slip distribution constructed from the coseismic stress change is smaller than the resulting from the conventional geodetic data inversion (M_w 5.55, 2.17×10^{17} N·m), however, we found that our model can well reproduce the horizontal postseismic displacement near the source region, quantitatively demonstrating the afterslip driven by coseismic stress change.

© The Seismological Society of Japan

Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy and stress rotation

*Toshiko TERAKAWA[1], Kimiyuki Asano[2], Yumi Urata[3]

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Disaster Prevention research Institute, Kyoto University, 3. AIST

地震は，地下に蓄えられた弾性歪エネルギーを，断層運動により一気に解放する物理過程である．弾性歪エネルギーは絶対応力の関数であり，地下の応力状態を把握できれば，地震の発生メカニズムの解明に大きく貢献する．しかし，震源域の応力を直接測定することは難しく，とりわけ，偏差応力の大きさを推定することが本質的な課題となっている．偏差応力を拘束する情報としては，応力インバージョンによる大地震前後の応力の向き変化，動的破壊の再現，剪断歪エネルギーの変化の総量等が提案されている．2016年熊本地震の震源域では，これらの３種類の情報に基づき，偏差応力の大きさが見積もられているが，統一的な見解は得られていない（Yoshida et al., 2016; Mitsuoka et al. 2020; Urata et al., 2017; Noda et al., 2020）．
本研究では，熊本地震震源周辺域の絶対応力６成分のモデリングを通じて，剪断歪エネルギーの変化と地震前後の応力の向きの変化の両方を分析し，地震前の偏差応力の大きさを調べることを目的とする．具体的には，まず，熊本地震発生直前（一連の地震活動のスタートとなった最大前震発生直前）の震源域周辺域の背景応力場を，実効摩擦係数を支配する無次元間隙流体圧パラメータ（C = 0.0, 0.5, 0.8）を変化させて３ケース計算した（Terakawa & Hauksson, 2018）．C = 0.0, 0.5, 0.8に対応する実効摩擦係数は，m’ = 0.38，0.18，0.08である．次に，熊本地震の本震と最大前震のすべり分布（Asano & Iwata, 2016）からすべりによる応力応答関数（Fukahata & Matsu’ura, 2005）を用いて地震時応力変化を計算した．地震前の背景応力場と地震時応力変化を合わせれば，仮定した３つの実効摩擦係数に対応して，地震後の絶対応力場を計算することができる．地震前後の全応力成分が得られることで，地震前後の弾性歪エネルギーや地震前後の理論的な応力の向きの変化を直接計算することができる．
エネルギーバランスを考慮すれば，地震で解放される剪断歪エネルギーは少なくとも放射エネルギーよりも大きい必要がある．剪断歪エネルギーの解放量は地震前の偏差応力レベルが高いほど大きくなるが（Noda et al., 2020; Terakawa et al., 2020），熊本地震の場合，最も偏差応力の小さい場合でも放射エネルギーの推定値（Kanamori et al., 2020; Kaneko & Goto, 2022）を超えており，エネルギーの解放量だけでは偏差応力レベルを推定することは難しい．また，すべりに伴う断層面上の剪断応力の変化のパターンは偏差応力レベルには依らない．しかし，剪断応力の代わりに偏差応力の大きさをとると，数kmより浅い部分での振る舞いにモデル間で違いがみられた．偏差応力が大きく，地殻に剪断歪エネルギーが十分蓄えられている場合は（C = 0.0, 0.5），偏差応力を小さくするようにすべりが進行する（C = 0.5の震源域南部の浅部の一部を除く）．一方，偏差応力が最も小さいケース（C = 0.8）では，偏差応力がすべりと共に増加するか，または一旦減少した後に再び増加する．これは，すべりの途中で応力の向きが変化し，すべることで剪断歪エネルギーを増加させてしまうためである．地震はすべりにより剪断歪エネルギーを解放する物理過程であるため，大きくすべった領域では偏差応力が減少するモデルの方が合理的である．
また，熊本地震前後の絶対応力場から，理論的な応力の向きの変化を調べた．偏差応力が最も小さい場合でも，顕著な応力変化が予想されるのは震源断層のごく近傍に限られる．本震後の絶対応力場３ケースに対して，本震後約3年間に震源断層から10km以内で発生した地震のメカニズム解のミスフィット角を計算したところ，C = 0.0, 0.5, 0.8に対してその平均値は23.9度，23.6度，30.5度となった．つまり，剪断歪エネルギーと応力場の時間変化に基づく分析の結果は，どちらも偏差応力の大きい２つのケースの方が偏差応力の最も小さいケースより合理的であることを示した．この結果，熊本地震震源周辺域の実効的摩擦係数は，少なくとも0.2程度以上である．これは，従来，応力インバージョンによる推定結果よりも有意に大きい．本震後の地震のデータセットの約３割はどの応力場の下でも説明できず，応力以外の要因で発生した地震の可能性がある．これらを応力インバージョンのデータに含めてしまうと，本震前後の応力の向きの変化を過大評価し，偏差応力レベルを過小評価することになるのかもしれない．

© The Seismological Society of Japan

Estimation of the spatial distribution of the "internal friction coefficient" in the crust beneath the Japanese Islands

*Yuta MITSUI[1]

1. Department of Geosciences, Shizuoka University

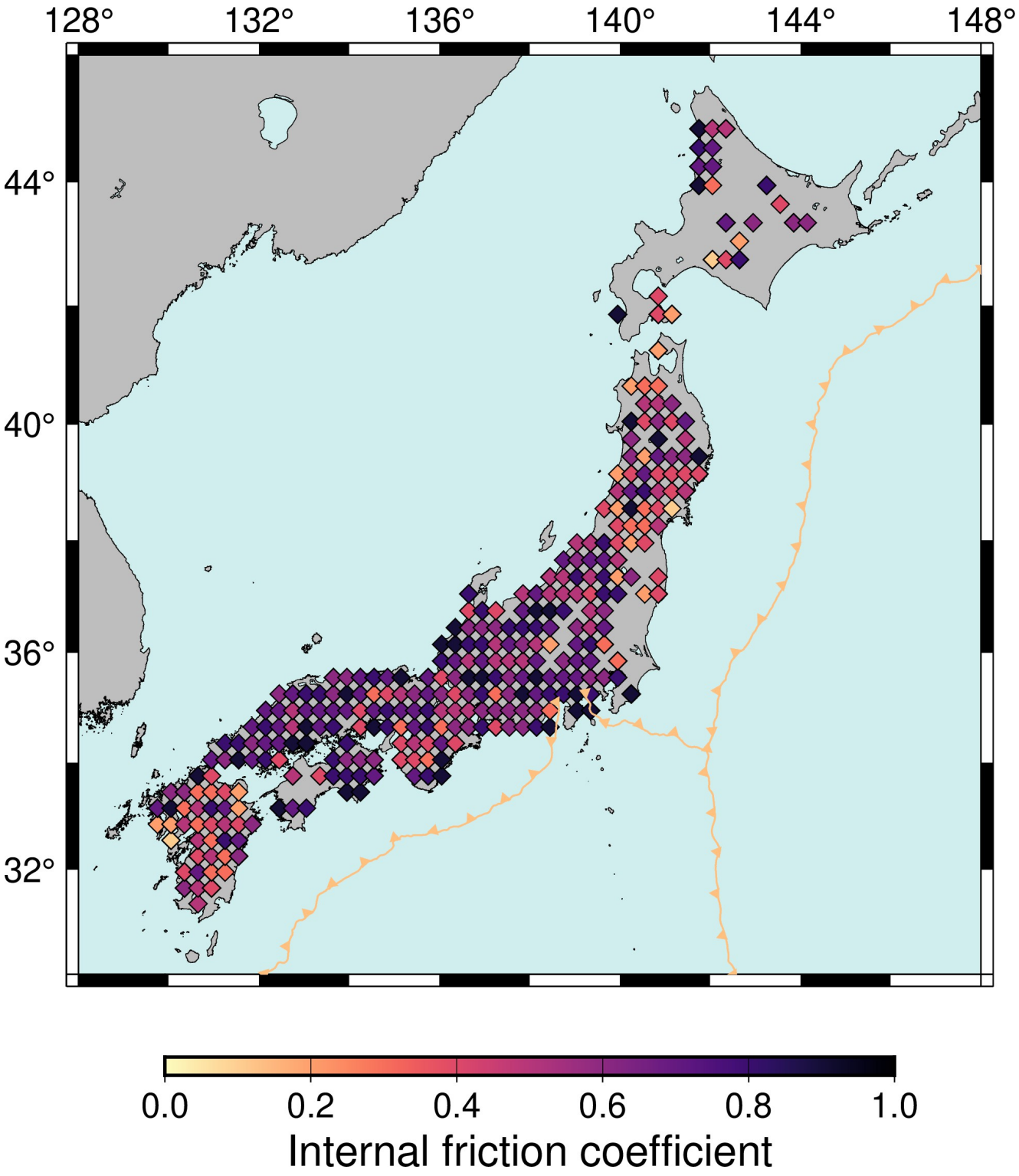
メカニズム解などの地震学的データから地下の主応力の向きや応力比を推定するための応力インバージョン手法は数多く開発され(岩田・他, 2019)、日本列島下の応力状態も3次元的に推定されるようになった(e.g., Terakawa and Matsu’ura, 2010; Yukutake et al., 2015; Uchide et al., 2022)。これらと少し異なった試みとして、Iio [1997]は、メカニズム解データからモール・クーロン破壊基準の内部摩擦係数を推定する先駆的な研究をしている。そして、Vavrycuk [2014]では、メカニズム解の2つの節面のどちらが真のすべり面か、モール・クーロン破壊基準からの「近さ」を基準に決める応力インバージョン手法を提案しており、この際に内部摩擦係数についてもグリッドサーチすることで最適値を推定している。この、モール・クーロン破壊基準からの「近さ」を基準に真のすべり面を決めるという概念は、Terakawa and Matsu’ura (2010)などのCMT解自体に基づくインバージョン手法の原理とも矛盾しない。本研究では、このVavrycuk [2014]の手法に基づいて、日本列島下の地殻内地震のメカニズム解から内部摩擦係数を推定する。

メカニズム解のデータとして、Uchide et al. [2022]による、日本列島下の深さ20km以浅のP波初動発震機構解を用いる。空間グリッドを0.3度ずつ取り、スムージングをかけず、各グリッド内の全メカニズム解に対して素朴に応力インバージョン解析を行った。内部摩擦係数のグリッドサーチを0.1から0.9の範囲で行い、3次元のモール円上でモール・クーロン破壊基準と各メカニズム解との距離の平均が最小となるものを最適値とした。Vavrycuk [2014]の手法は、2つの節面のどちらが真のすべり面かを決める部分以外は、古典的なMichael [1984]の手法を踏襲している。本研究でも、応力インバージョン自体の結果(主応力の向き・応力比)に特筆すべきところはなく、Uchide et al. [2022]が行った応力インバージョンと概ね同様の結果が得られたことを確認した。

その上で、同時に推定された内部摩擦係数の分布を図に示す。この結果は、2002年元旦から2011年東北地方太平洋沖地震の発生前までのメカニズム解データに基づいている。各グリッドの値の推定誤差は小さくないと考えられるため、空間的傾向のみを議論する。全体として、南海トラフ沿いの中国・四国地方から中部地方にかけて高い値が推定された一方、九州地方の一部と東北地方から北海道南部にかけての一部で、0.2以下の低い値が推定された。九州地方の中で特に内部摩擦係数の低い場所は別府湾周辺地域および雲仙天草地域であり、正断層系の発達した場所である。このことには何らかの意味があるかもしれない。しかし、同じく内部摩擦係数の低い東北地方から北海道南部にかけての一部には、このような地域的特徴はない。

先行研究(e.g., Yukutake et al., 2015)で示唆された、地表活断層に沿っての高いslip tendencyに類する結果は、本研究の内部摩擦係数の推定では得られていない。また、低い内部摩擦係数の原因が岩石物性の違いなのか、あるいは間隙流体圧(e.g., Sibson and Xie, 1998)の影響なのかについて、現時点で判断する材料もない。これらについては、より空間的に範囲を絞った、詳細な解析が必要と考えられる。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Stress drop variations of repeating earthquakes

*Junichi NAKAJIMA[1], Akira Hasegawa[2]

1. EPS Department, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

注水実験で検出された繰り返し地震（リピータ）では、マグニチュードが１以上異なるイベントが同一のグループ内で発生するという報告がある（Bourouis & Bernard, GJI, 2007; Lengline+, JGR, 2014; Cauchie+, GJI, 2020）。これらの研究では、波形相関と震源域の重なりの2つの基準でリピーター判定がなされており、実際に同一のグループでマグニチュードの異なるイベントが発生していると考えられる。このことは、同一の孤立したアスペリテイパッチで応力降下量の異なるイベントが発生することを示している。一方、自然地震については、同様な報告がいくつかある（Harrington & Brodsky, BSSA, 2009; Bouchon+, Science, 2011; Lin+,GJI, 2016）が、これらの研究では波形相関と震源域の重なりの2つの基準でリピータ判定をしておらず、近接して発生した地震が含まれている可能性がある。最近、Nakajima & Hasegawa (JGR, 2023）は喜多方群発地震及び2003年宮城県沖地震の余震の中のリピータについて調査し、同じグループ内で応力降下量が1桁以上変化するリピータが確かにあることを明らかにした。

本研究ではNakajima & Hasegawa (2023)の対象を広範囲に広げ、日本列島全域を対象としてプレート境界地震、スラブ内地震、内陸地震の全てのリピータを系統的に調査した。その結果、いずれの領域においても同一のリピータグループでマグニチュードの異なるイベントが発生している事例が多数あることが明らかになった。応力降下量の異なるイベントが同一のアスペリテイパッチで発生する原因は、間隙流体圧の時間変化に伴う有効法線応力の違いにあると推定される。また、同一グループのマグニチュードの差は大きくて２程度であり、これは応力降下量で３桁の差に対応する。このことは、通常の地震で見積もられている３桁程度の応力降下量のばらつきの主な原因の一つが間隙流体圧の違いであることを示唆している。

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

Wed. Nov 1, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room A F205+206

[S08] AM-2

chairperson:Yuji YAGI(University of Tsukuba), Yasuhira AOYAGI(Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S08-21] Spatial pattern on stress drop of small earthquakes in the eastern margin of the Sea of Japan west off the Tohoku region, Japan

*Misa Tanaka[1], Takuji Yamada[1] (1. Ibaraki University)

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

[S08-22] Frictional properties on the upper surface of the subducting Pacific plate off the south-east of Hokkaido, Japan

*Nanako Nemoto[1], Takuji Yamada[1] (1. Ibaraki University)

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

[S08-23] Hierarchical Rupture Growth Revealed by High-Degree-of-Freedom Seismic Source Models

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

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

[S08-24] A complex source process during the 2021 South Sandwich Islands earthquake

*Ryo Yamaguchi[1], Yuji Yagi[1], Ryo Okuwaki[1] (1. University of Tsukuba)

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

[S08-25] Rupture Termination at the Northeastern End of the Source Fault of the 2016 Kumamoto Earthquake inferred from Seismic Velocity Structure

*Yasuhira AOYAGI[1], Haruo Kimura[1] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

Spatial pattern on stress drop of small earthquakes in the eastern margin of the Sea of Japan west off the Tohoku region, Japan

*Misa Tanaka[1], Takuji Yamada[1]

1. Ibaraki University

1. 研究背景・目的

地震計による地震観測が始まって以降、太平洋側だけでなく、日本海側でも複数の巨大地震が観測されている。一方で、オホーツクプレートとアムールプレート間の相対運動速度が遅いため地震数が少ないこと、両プレート境界の形状が不明瞭であること等を理由として、太平洋側と比べて日本海側の地震には不明点が多い。しかし、日本海側は太平洋側よりもプレート境界が沿岸に近いと考えられるため、防災対策のためにも、地震研究が重要である。本研究では北日本の日本海東縁域における摩擦特性の空間的特徴を把握することを目的として、2003年から2021年に同地域で発生した4.0≦M≦5.0の97地震について応力降下量を解析した。

2. 研究手法

Yamada *et al.* (2021)と同様の手法を用いて、以下の手順により解析を行った。まず、防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)で観測された時間領域の地震波形をフーリエ変換し、周波数領域に変換した。その後、解析対象地震に近接するM3.5の地震の観測波形を経験的グリーン関数(EGF)として用いることにより、解析対象地震のスペクトルをEGFのスペクトルで割り、解析対象地震の震源特性の比を抽出した。最後にBoatwright (1978)のオメガ2乗モデルを用いてコーナー周波数を推定し、円形断層モデル(Madariaga, 1976)を仮定して応力降下量を算出した。

3. 結果・考察

本研究で得られた応力降下量の空間分布を図 1 に示す。応力降下量には空間不均質性が見られ、1983年日本海中部地震(Mw7.7)の震源域における応力降下量の値が大きい一方、1993年北海道南西沖地震(Mw7.9)の震源域は小さな応力降下量の値を示していることがわかる。また、2つの地震の震源域に挟まれた領域(図 1 中のA領域)では応力降下量が大きく、高い剪断強度がさらなる破壊の進展を妨げたと考えられる。本研究の結果は1993年北海道南西沖地震の震源域における剪断強度が低いことを示唆しているが、過去の研究により推定されている両地震の断層面積とすべり量の関係から、本震時の応力降下量は1993年北海道南西沖地震のほうが大きかったと考えられ(地震予知連絡会 1994)、調和的に対応しない。現段階では解釈が難しいが、1993年の震源断層は東傾斜と西傾斜の両方を含む可能性が指摘されている(Murotani *et al.* 2022)ことから1993年北海道南西沖地震の破壊の複雑性が、震源域における小地震の応力降下量が小さい原因かもしれない。

© The Seismological Society of Japan

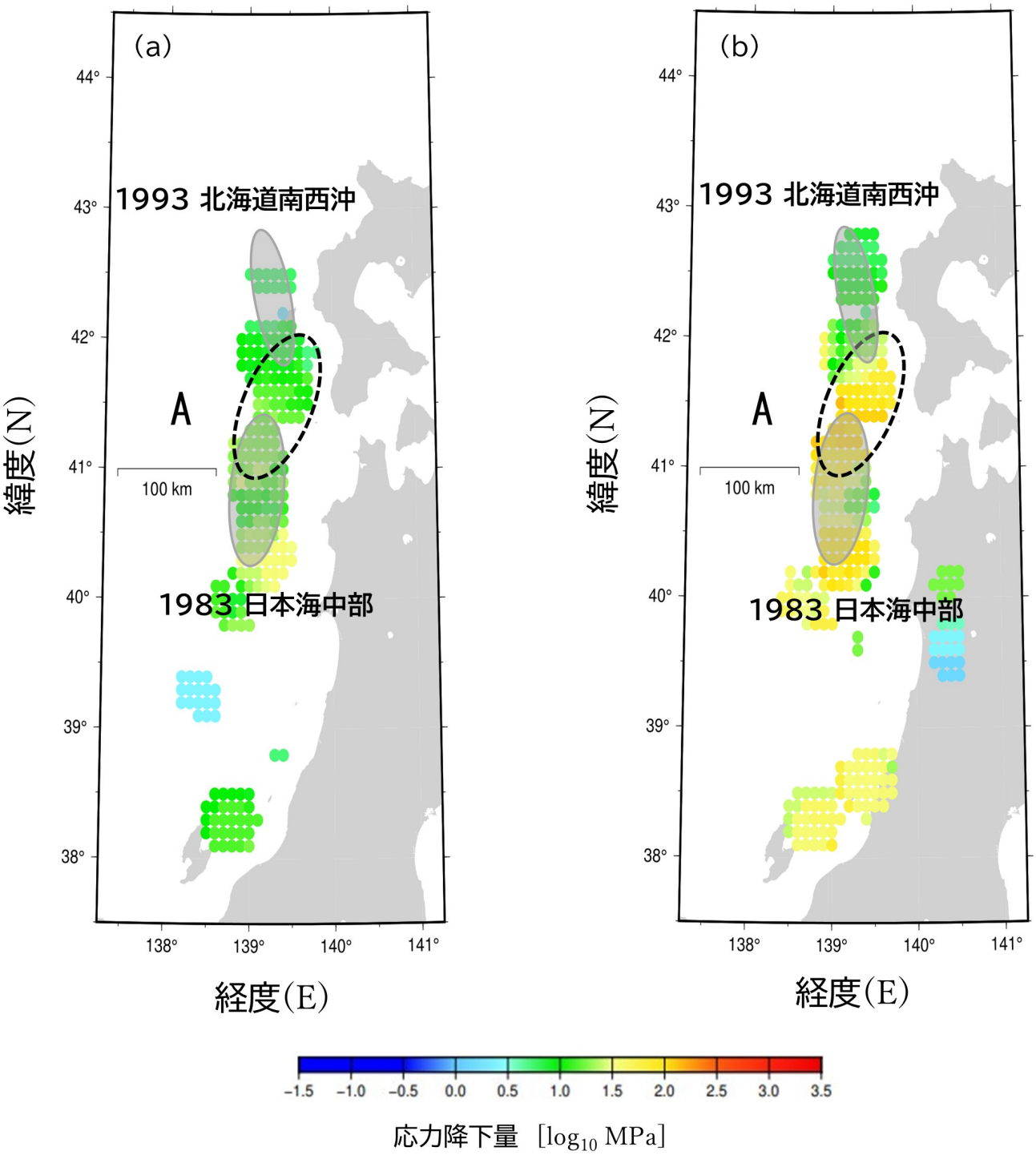


図1：本研究で得られた応力降下量の値を、緯度経度0.1度ごとに平滑化した結果。(a)P波および（b）S波から求めた応力降下量の空間分布と、1983年日本海中部地震の震源域、1993年北海道南西沖地震の震源域を比較して示す。領域Aは、両地震の震源域に挟まれた高応力降下量領域を示す（本文参照）。

© The Seismological Society of Japan

Frictional properties on the upper surface of the subducting Pacific plate off the south-east of Hokkaido, Japan

*Nanako Nemoto[1], Takuji Yamada[1]

1. Ibaraki University

１．研究背景・目的

北海道南東沖は太平洋プレートがオホーツクプレートの下に沈み込んでいる地域であり、プレート境界における地震活動が活発である。Yamada et al. (2017)では、同地域の2002年6月～2015年12月に発生した小地震の応力降下量解析を行い、その空間分布が過去の大地震のすべり分布と調和的であり、時間変化が見られないことを報告している。一方、東北地方太平洋沖の小地震の応力降下量を解析したYamada et al. (2021)は、2011年東北地方太平洋沖地震前後において、一部の地域で応力降下量に時間変化が見られることを報告している。本研究では、2016~2021年に北海道南東沖で発生した小地震の応力降下量を解析し、Yamada et al. (2017)の結果と比較することにより、その時空間的特徴を議論する。

２．研究手法

本研究では、防災科学技術研究所のHi-netで観測された157地震の波形データを解析した。解析対象地震の条件として、Yamada et al. (2017)と同地域の、震源がプレート境界から±15kmかつマグニチュードが4.0以上5.0以下の地震と定めた。解析手法はYamada et al. (2017; 2021)と同様に、以下のとおりとした。まず、震源が解析対象地震の近傍であるM3.5の地震波形を経験的グリーン関数（EGF波形）として用い、解析対象地震の波形及びEGF波形のスペクトルをそれぞれ算出した。続いて、解析対象地震のスペクトルをEGF波形のスペクトルで割る（デコンボリューション）ことにより、震源特性を抽出した。その後、Boatwright (1978)のオメガ二乗モデルを用いて、各観測点のスペクトル比からコーナー周波数を推定し、これらのlog平均を解析対象地震のコーナー周波数とした。最後に、Madariaga (1976)の円形断層を仮定し、コーナー周波数から応力降下量を推定した。さらにその結果を緯度経度0.1度ごとに平滑化することで、解析対象地域における応力降下量の空間分布を求めた。

３．結果・考察

応力降下量の解析結果を図１に示す。Yamada et al. (2017)と同様に、北海道南東沖における太平洋プレート上面の摩擦特性に不均質性が見られた。また、1968年十勝沖地震すべり域で発生した地震の応力降下量は、その周辺の領域で発生した地震よりも高い値を示した。このことも、Yamada et al. (2017)の結果と調和的である。応力降下量の時間変化については、解析地域の中西部では大きな変化は見られなかったが、根室沖に関しては、2020年ころから低下が見られる（図2）。岩石実験では、将来の震源付近で剪断強度が下がることが報告されている(Ohnaka and Shen, 1999)ことを考慮すると、根室沖において次の大地震の発生が迫っていることを示しているのかもしれない。なお、同地域では2023年2月にM6.0の地震が発生しているが、現段階ではこの地震と2020年以降の応力降下量低下の関連は不明である。

© The Seismological Society of Japan

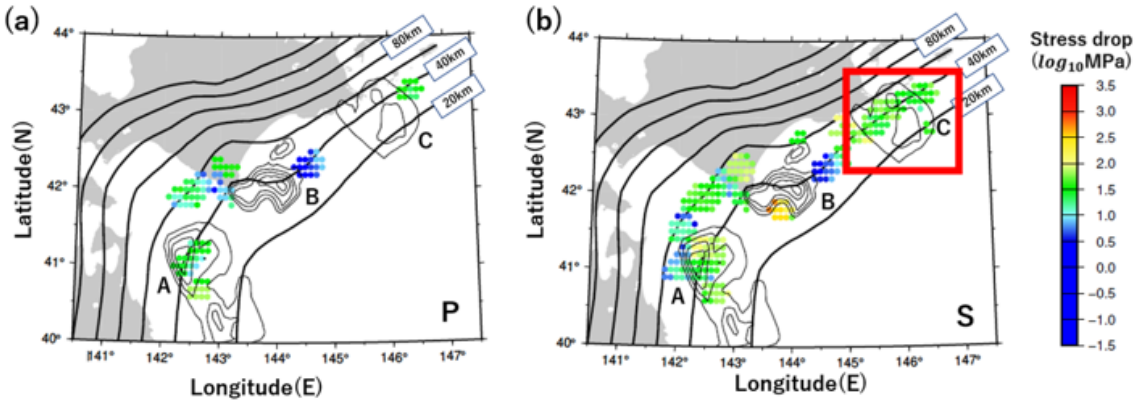


図１．P波、S波からそれぞれ求めた応力降下量の空間分布。太い実線は沈み込む太平洋プレート上面の深さを表す。細実線で表されたコンターはそれぞれ、(A)1968年十勝沖地震(永井ほか, 2011)、(B)2003年十勝沖地震(Yamanaka and Kikuchi, 2003)、(C)1973年根室沖地震(山中, 2006)の地震時すべりを1mごとに示したもの。図中の赤枠は、図2に示した地震の空間範囲を表す。

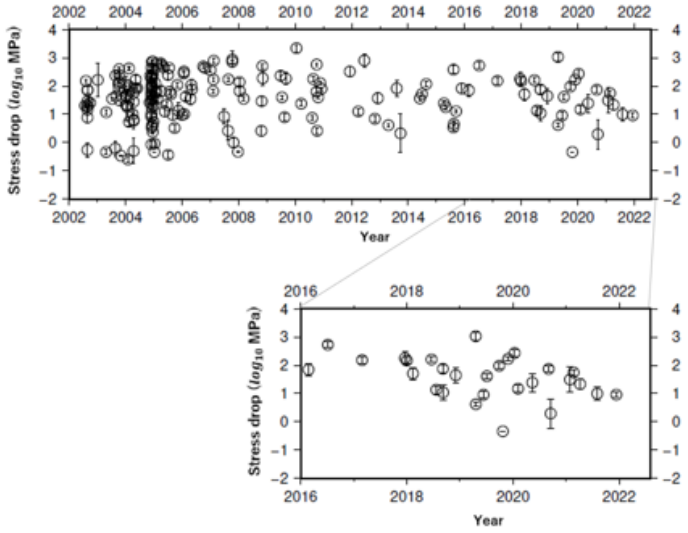


図２．1973年根室沖地震すべり域周辺(図1の赤枠内)における、応力降下量の時間分布。縦軸は応力降下量を、横軸は時間を表す。

© The Seismological Society of Japan

Hierarchical Rupture Growth Revealed by High-Degree-of-Freedom Seismic Source Models

*Yuji YAGI[1], Ryo Okuwaki[1]

1. University of Tsukuba

地震は断層上で破壊が伝播する現象であり、有限断層インバージョン等の方法により、その震源過程を推定することができる。1980年代に登場した有限断層インバージョンでは、基本的に、破壊フロントは揺らぎながらも震源から遠ざかるように伝播すると仮定し、また断層形状は平面もしくは曲面で定義でき、断層滑りベクトルは断層面の法線ベクトルと直交する方向に制限している。ちなみに断層滑りベクトルは、この制限に加えてリファレンスとするベクトル周辺に分布すると制限されることが多い。観測データの質と量が不十分な場合は、従来型の有限断層インバージョンは観測データを説明できるため、この枠組みに疑問を持つことは少なかったと思われる。しかし、観測データの質と量が向上することによって、従来の有限断層インバージョンで観測データが説明できないケースが多いことが明らかになりつつあり、地震像を正しく理解するためには高自由度な震源過程モデルが必要不可欠になってきている。
私たちのグループが提案しているポテンシー密度テンソルインバージョン（PDTI）は、観測データの質と量の向上に対応できるように、モデルの自由度を高める方向に開発されたものである。PDTIでは、断層面ではなくモデル平面を設定し、断層滑りを５成分の基底ダブルカップルで表現している。このことによって、“断層滑りベクトルは断層面の法線ベクトルと直交する方向に制限される”という、当たり前のように用いられていた強い拘束条件を用いることなく解析することができる。このような自由度の高いモデルを用いても安定に解析できるのは、グリーン関数の不確定性をデータの共分散成分に取り入れることによって、タチの良いデータに改善しているからに他ならない。PDTIでは、モデルの自由度を向上させるために、破壊フロントが反転する現象も許容する震源過程モデルが用いられることが多い。断層構造や強度分布に階層性が存在する場合は、破壊フロントの進行方向が反転する現象も起こりうるため、破壊伝播方向に自由度を持たせることは重要である。PDTIは多くの地震に適用されてきたが、その中でも、2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake、2014 Mw 6.2 Thailand earthquake、2016 Mw 7.1 Romanche transform fault earthquake、2016 Mw 8.0 Kaikoura earthquake、2018 Mw 8.1 Gulf of Alaska earthquake、2019 Mw 8.0 Peru intraslab earthquake、2022 Mw 7.1 Taitung, Taiwan, earthquake、2023 Mw 7.9 South-Eastern Türkiye and Syria earthquake の8つの地震で、破壊フロントの進行方向が反転する現象が観測されている。これらの破壊フロント進行方向の反転は、初期破壊から主破壊への移行時に発生しており、階層的な破壊成長が発生していることを示している。また、断層形状が複雑な領域では非ダブルカップル成分が卓越し、複数の断層が同時破壊している様相が捉えられている。本発表では、PDTIの解析結果をレビューし、階層的な破壊成長について議論する。

© The Seismological Society of Japan

A complex source process during the 2021 South Sandwich Islands earthquake

*Ryo Yamaguchi[1], Yuji Yagi[1], Ryo Okuwaki[1]

1. University of Tsukuba

2021年8月12日，英国領サウスサンドウィッチ諸島沖合，サウスサンドウィッチ沈み込み帯の浅い領域で，2021年サウスサンドウッチ諸島（SSI）地震 (M_W 8.5) が発生した．サウスサンドウィッチ沈み込み帯では，南米プレートがサンドウィッチプレートへ東南東方向に70–78 mm/yr の速度で沈み込んでいる．この沈み込み帯は構造侵食型に分類されるが，一部には付加体も存在し，海溝軸は東に凸に湾曲している．米国地質調査所（USGS）によると2021年SSI地震発生後4分間にM_w 7.5, M_w 8.1, mb 6.7の３つの低角逆断層型の地震が同定されているが，Global CMTプロジェクトの2021年SSI地震の解析結果では300秒の継続時間を持つM_W 8.3の一つの低角逆断層型地震のみが同定されている．これらの事実は，2021年SSI地震は複数のサブイベントから構成されており，その破壊継続時間はスケーリング則から予測される値より有意に長いことを示唆する．なお，この地震では東に約7000 km離れたモーリシャス島の観測点で約0.4 m の潮位変化が観測されるなど広い範囲で津波に伴う潮位変化が観測されている．

一般に，継続時間が長い地震を解析する場合，グリーン関数の不確実性が時間と共に増加するため，安定的に震源過程像を得ることは難しい．また，沈み込み帯で発生する複雑な震源過程を理解するためには，スプレー断層や破砕帯などのプレート境界以外の場所で断層すべりが起きている可能性を考慮して解析を行うことが重要である．近年になって，グリーン関数の不確実性の影響をデータに取り入れることで継続時間が長い地震を安定に解析することを実現し，かつ，断層面の形状に関する事前の仮定を排することで，湾曲した断層面や複数の異なった断層面における破壊の推定を可能にするPotency Density Tensor Inversion (PDTI) が提案された．そこで本研究はPDTIを用いて2021年SSI地震の複雑な震源過程を明らかにする．

解析には，IRIS Data Management Centerよりダウンロードした47観測点における遠地実体波P波の上下動成分を使用した．これらの波形は，地震計特性を取り除いた後に1.5秒間隔でリサンプルした．震源域の速度構造はCRUST 1.0のデータを用いて設定し，グリーン関数を計算した．余震分布を参考にして非矩形のモデル面を設定し，各要素震源の深さはSlab2.0によるスラブ表面の深度データを用いた．

ポテンシー密度テンソル分布を時空間で積分することによって得られたモーメントテンソル解は25.2 %の非ダブルカップル成分を含む低角逆断層型を示し，地震モーメントは6.5×10^{21} Nm (M_W 8.5) である．各要素震源のすべり速度を時間方向に積分して得られたポテンシー密度分布は主に震源付近から南に約300 kmの範囲に分布しており，震源から南南東に約140 km地点の，海溝が最も東に張り出している領域周辺にピークを持つ．各要素震源のメカニズム解について，スラブ表面の形状に近い節面のスリップベクトルを求めると，震源から南に向かうにつれて時計回りに回転する傾向が見られる．破壊継続時間は約280秒であり，モーメント速度関数は10個以上のスパイクを有している．震源過程モデルから合成した理論波形は，解析に使用していないデータポイントを含めた観測波形の特徴を再現している．震源付近で開始した破壊は，震源の南に約35 kmの付近で約15秒間，震源の南南東に約150 kmの付近で約75秒間の停滞を伴いながら，南方向へ伝播している．東側の浅い領域において，低角逆断層に対応する節面のスリップベクトルは，海溝軸の湾曲に対応して，海溝軸に直交する方向に時間変化する傾向が見られる．また，傾斜角は海溝軸付近の浅い領域ほど高くなる傾向が見られ，スラブ形状から推定される傾斜角と乖離している．

本発表では，PDTIによって得られた震源過程モデルに基づき，2021年SSI地震における不規則な破壊伝播と海底地形の関係や、スプレー断層の破壊の可能性について議論する．

© The Seismological Society of Japan

Rupture Termination at the Northeastern End of the Source Fault of the 2016 Kumamoto Earthquake inferred from Seismic Velocity Structure

*Yasuhira AOYAGI[1], Haruo Kimura[1]

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

１．はじめに

長大な活断層系における起震断層の端部を評価する上では，実地震で破壊が停止した断層端部の特徴が参考になる。2016年熊本地震では，布田川ー日奈久断層帯の北部で破壊が生じたが，日奈久断層帯の中部～南部区間へは破壊が伝播しなかった。Aoyagi et al.（2020EPS）は，震源断層南端には日奈久断層を横断する地震波速度の急変部が存在し，そこで地震発生層が上下に食い違っていることが断層の破壊停止要因になったと指摘している。一方，震源断層北東端については，重力異常や比抵抗構造に基づいて，阿蘇カルデラ内の上部地殻に存在するマグマだまりが破壊の停止要因になったという見方が多い（例えば，Miyakawa et al., 2016EPS）。ただし，阿蘇カルデラ内の地下構造と断層活動との関係については未解明な点が多く残されている。

本研究では，震源断層北東端付近の地下構造と断層活動の解明を目的として，稠密臨時地震観測に基づく地震波トモグラフィ解析を実施した。本報告は，P波速度構造に関する暫定結果（青柳, 2022, 活断層学会2022年度秋季大会）に対して，使用データを増やしてS波速度構造まで含めた検討を行った結果である。なお，2016年熊本地震の地表地震断層は，従来図示されていた布田川断層の北東端部より東北東に4～5 km延伸してカルデラ内まで達した（Shirahama et al., 2016EPS）。また，Kobayashi et al.(2018)が地殻変動から推定した断層モデルでも，断層北東端の位置は地表地震断層とほぼ一致している。本論では，この位置を震源断層の北東端として地下構造との関係を議論する。

２．臨時地震観測とトモグラフィ解析

稠密臨時地震観測は，2018年3～9月の約半年間，2016年熊本地震の震源域北部～阿蘇カルデラ周辺に約5 km間隔で計30点の臨時観測点（近計システムEDR-X7000＋KVS-300）を設置して行った。得られた地震観測記録からP波，S波到達時刻を験測し，周辺にあるHi-netなどの定常観測点の験測値とも併合処理して，tomoDD（Zhang and Thurber, 2003BSSA）により地震波トモグラフィ解析を行った。この際，分解能の向上を図るため，Aoyagi et al.(2020)による震源域南部の臨時観測で得られた験測値の一部や，2001～2021年における臨時観測期間外の気象庁一元化震源カタログの験測値も併合処理した。解析に用いた地震総数は5098個である。解析空間は，震源断層の北東端部付近を中心とし，布田川断層の方向に長軸をもつ48 km×24 km，深さ20 kmまでの範囲とした。グリッド間隔は，水平方向4 km，深さ方向2.5 kmである。

３．断層北東端部の速度構造と破壊停止要因

チェッカーボードレゾリューションテストの結果，深さ2.5 km～12.5 kmの範囲で4 kmの空間分解能が確認された。この深度における，震源断層北東端部付近の地震波速度構造の特徴，およびそこから考察される断層破壊停止要因は次の通りである。

(1) 阿蘇カルデラの外側（西側）では，布田川断層を挟んで南側に高速度領域（Vp～6.5 km/s），北側に低速度領域（Vp<6km/s）が認められ，両者の境界は約60度で北傾斜している。余震は両者の境界に沿って分布している。

(2) 一方，阿蘇カルデラ内の南西部には，Vp<5.0 km/sの顕著な低速度領域が地表付近から深さ10 km以上まで円柱状に認められる。この低速度領域は水平方向に8 km程度の広がりを持ち，中央火口丘西側の海抜-1000mで推定されている150℃の高温領域（NEDO, 1995）とよく対応する。この低速度領域は，その分

© The Seismological Society of Japan

布，形態的特徴から，比較的最近の火山活動に伴う火道，あるいはピストンシリンダー型のカルデラを示すと考えられる。
(3) 熊本地震の破壊域北東端では，断層下盤側の構造が(1)から(2)に置き換わっている。この円柱状の低速度領域は，低Vp/Vs領域であるため，マグマだまりではなく，熱水領域である可能性が高い。地温勾配からは深さ2 kmで300℃になると予想され，石英あるいは長石のレオロジーから想定されている地震の下限深度の温度300～450℃（たとえば，Sibson, 1984）に比較的浅部で達すると考えられる。このため，この脆性破壊を生じにくい高温の低速度領域が，地震時の断層破壊を停止させたと解釈できる。

© The Seismological Society of Japan

Room A | Regular session：S08. Earthquake physics

Wed. Nov 1, 2023 1:30 PM - 2:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 4:30 AM - 5:30 AM UTC | Room A F205+206

[S08] PM-1

chairperson:Keisuke Yoshida(Tohoku University)

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

[S08-26] Change in scaling relations of source parameters around M_W 5.1 for crustal earthquakes

*Shota Shimmoto[1], Hiroe Miyake[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S08-27] Precise hypocenter determination around the 2016 Mw 7 normal fault earthquake off Fukushima and Ibaraki prefectures: S-net data analysis

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Naoki Uchida[1,2], Tatsuya Kubota[3], Toru Matsuzawa[1] (1. Tohoku University, 2. ERI, University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-28] Microearthquakes in the lower crust and their generation mechanism: The case of deep cluster activity beneath western Hiroshima prefecture

*Kazutoshi IMANISHI[1], Takahiko Uchide[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-29] The 2023 M6.5 Suzu, Japan, Earthquake that occurred during a Fluid-Induced Swarm Activity

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

Change in scaling relations of source parameters around M_w 5.1 for crustal earthquakes

*Shota Shimmoto[1], Hiroe Miyake[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

本研究では、応力降下量、見かけの応力、放射効率および破壊エネルギーのスケーリング則を検討した。まず、日本の中小規模(M_w 3.2–6.0)の地殻内地震の地震波の放射エネルギーと応力降下量をスペクトル比解析から求めた。解析にはHi-netの速度波形データを使用した。地震波の放射エネルギーは、地震モーメントと観測スペクトル比のコーナー周波数からω^{-2}モデルを仮定して推定した。一方、応力降下量は、Shimmoto (2022)が開発したスペクトル比法を適用して推定した。この手法では、各観測点で得られたスペクトル比から均質な長方形震源の面積や破壊伝播速度等の有限震源特性を推定する。この手法で推定される有限震源特性は、地震すべり量が大きい局所領域（最大アスペリティ領域）に対応する。この結果を踏まえ、従来の中小規模の地震の解析で広く使われている均質な円形震源に対して、高い応力降下量が集中する局所領域を一つ有する不均質震源モデルを導入し、応力降下量を計算した。この際、Somerville et al. (1999)による最大アスペリティの面積が平均的に破壊領域全体の17.5%であるという結果を利用した。推定した応力降下量と放射エネルギーを用いて放射効率と破壊エネルギーを算出した。
次に、本研究の結果と既往研究による小規模地震(M_w<3.0)と大規模地震(M_w >6.0)の震源パラメータの推定結果を合わせて震源パラメータのスケーリング則を検討した。既往の小規模地震の研究では、応力降下量は震源スペクトルのコーナー周波数の方法で推定されている。コーナー周波数の方法では、震源モデルを仮定してコーナー周波数と応力降下量を結びつける定数(以下、k値)を決める必要がある。しかしながら、仮定する震源モデル(k値)によって、コーナー周波数から推定される応力降下量は著しく異なる。例えば、広く使われている円形震源モデルにBrune (1970)とMadariaga (1976)があるが、これらの震源モデルは同じコーナー周波数に対して5.6倍異なる応力降下量の推定値を与える。コーナー周波数の方法における k 値の選択の任意性は、応力降下量のスケーリング則を調べる際に問題となる。本研究では、観測スペクトル比のコーナー周波数から推定した応力降下量と、Shimmoto (2022)の手法から推定した応力降下量の中央値を比較してk値を求め、既往研究の小規模地震の応力降下量を再計算した。
　既往研究と本研究に基づく震源パラメータの推定結果と合わせて、応力降下量、見かけの応力、放射効率のマグニチュード依存性を検討し、次の結果を得た：(1)応力降下量と見かけの応力はM_w 5.1付近まではマグニチュードとともに増加し、M_w 5.1より大きくなるとマグニチュードに依存しなくなる。(2)放射効率はマグニチュードにおおむね依存しない。観測された応力降下量、見かけの応力、放射効率、破壊エネルギーの地震すべり量依存性は、Rice (2006)による地震時の摩擦発熱による間隙圧上昇(Thermal pressurization)の影響を考慮したすべり弱化モデルによって概ね再現できることが分かった。今後、地震時の摩擦発熱による間隙圧上昇を含め、他のメカニズムの震源パラメータのスケーリング則に対する影響についてのさらなる研究が望まれる。

© The Seismological Society of Japan

Precise hypocenter determination around the 2016 Mw 7 normal fault earthquake off Fukushima and Ibaraki prefectures: S-net data analysis

*Yoshiaki Matsumoto[1], Keisuke Yoshida[1], Naoki Uchida[1,2], Tatsuya Kubota[3], Toru Matsuzawa[1]

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

地震発生の理解のために地球内部の断層構造や応力状態の把握が必要である．小地震の震源分布は，断層構造や応力状態を把握するための情報源として利用できるが，海域で発生する地震に関しては，震源直上に観測点がほとんどないことから，詳細な震源分布が得られないでいた． 2016年以降，東北日本沖合において，海底ケーブル式観測網 (S-net) のデータが使用できるようになった．S-netデータを活用することにより，東北日本海域部で発生する地震の高精度な震源決定が可能になり，海底下のより詳細な断層構造や応力状態の情報抽出が可能であると考えられる．

2016年11月22日に福島-茨城沖の地殻浅部においてMw7.0の正断層型地震が発生し，津波を生じさせた．Mw 9.0東北地方太平洋沖地震の発生以降，東北日本沖合の上盤プレート内では正断層型地震が多発しており，その要因としてMw 9.0地震の発生による上盤プレート内の応力状態の変化が考えられている(e.g. Hasegawa et al., 2012)．本研究では，Mw7.0の正断層型地震の発生機構を理解するために，S-netデータを使用した波形相関による高精度な震源決定を行うことで，本震震源周辺の詳細な震源分布を調べる．併せて，本震の震源パラメータの推定を行い，本震破壊の特徴の抽出を試みる．

まず， 2016年8月15日から2020年8月31日までに福島-茨城沖で発生した9,090個のM_{JMA}≧２のイベントを対象に，波形相関を用いて地震波の到達時刻差を求めた．対象領域内に位置するS-net観測点6点に加えて，陸上観測点17点で得られた波形データを使用した．震央間距離が3ｋｍ以内の地震ペアについて，２ - 5Hzのbandpass filterを適用した速度波形の相互相関を計算し，相関係数が0.75以上であった場合，到達時刻差を求めた．波形相関から得られた到達時刻差データに加えて，読み取りによる到達時刻差データに対し，Double-Difference法(Waldhauser & Ellsworth, 2001)を用いた震源再決定を行った．ただし，本震震源については読み取りによる到達時刻差データのみを使用した．初期震源には，鈴木 (2022) が陸上観測点に加えS-net観測点における到達時刻も使用して推定した震源カタログを使用した．

震源再決定の結果，初期震源ではばらつきをもって分布していた本震周辺の震源が，明瞭な面上に集中した．その主要な面は，北東-南西走向の南東傾斜を示し，本震のメカニズム解の節面の一つと整合的であった．この面は本震の断層面を表していると考えられる．得られた震源分布を，Kubota et al (2022) が津波データ解析に基づき推定したすべり分布と比較すると，本震震源はすべり量が大きい領域の北東端に位置し，余震震源は本震のすべり量が大きい領域を取り囲むように分布した．このことは，本震と余震による主要な応力解放領域が空間的に異なることを示唆する．

次に，本震の地震波放射過程の情報を抽出する目的で，本震近傍で発生した余震15個 (4.5≦Mw≦5.8)の波形を用いたデコンボリューション (Liggoria & Ammon, 1983)によりApparent moment rate function (AMRF)の推定を行った．データにはF-net の12観測点における速度型強震計データを使用した．得られたAMRFは２つのピークを持ち，北側の観測点ほどピークの間の時間差が大きくなる傾向が確認できた．本震破壊が北東から南西方向に伝播したことが示唆され，本震震源が断層の北東部に位置することと整合的である．

得られたAMRFを用いて，Mw7.0地震の規格化エネルギーを推定した．推定された規格化エネルギーの中央値は4.5×10^{-5} であり，この値は，先行研究により推定された同規模地震についての値と同程度である(Venkataraman & Kanamori, 2004; Yoshida & Kanamori, 2023)．本研究で得られた規格化エネルギーに加えて，Kubota et al (2022)が津波データ解析から推定した応力降下量の平均値4.2 MPaを用いて，Mw7.0地震の破壊による放射効率を推定すると，放射効率の値として0.64が得られた．Venkataraman & Kanamori (2004)によるMw＞6.7地震の典型的な値の範囲内に含まれるものの，やや大きい．本震周辺の余震震源が明瞭な面上に集中して発生したことと併せて考えると，Mw7.0福島-茨城沖地震が成熟した断層で発生したことを示唆しているのかもしれない．このことは，福島-茨城沖合浅部における正断層地震活動が，これまでにも繰り返し発生してきた可能性を示唆する．

© The Seismological Society of Japan

Microearthquakes in the lower crust and their generation mechanism: The case of deep cluster activity beneath western Hiroshima prefecture

*Kazutoshi IMANISHI[1], Takahiko Uchide[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

陸域においては通常、地震は深さ約15kmよりも浅い上部地殻で発生するが、それよりも深い下部地殻でも起こることがある。例えば、南カリフォルニアの断層帯直下では、超稠密な地震計アレイにより、下部地殻から上部マントルまで連続する地震活動が明らかにされている（Inbal et al., 2016）。日本においても広島県西部直下の深さ約30kmにおいて、直径10kmほどの地震クラスターが存在することが報告されている（高橋・山田, 2010; 志藤, 2021）。下部地殻で発生するこの種の地震は、内陸地震の発生にも関係していると考えられるが、その発生メカニズムは依然として良くわかっていない。我々は今年のJpGUにおいて、広島県西部の地震クラスターを対象に、M1.5以上の地震のモーメントテンソル解を推定した。その結果、クラックの開口成分が卓越する時期と閉口成分が卓越する時期が約10年弱の周期で交互に現れることを報告した。そして、クラックが開口するには流体の関与が考えられることから、クラスター内に高間隙水圧の流体が周期的に注入され、これが深部クラスターを引き起こす要因になっている可能性を指摘した。地震の活動度も開口成分が卓越する時期にやや多い傾向があり、流体と地震活動の関連が示唆される。

本研究では、さらに小さな地震にまでモーメントテンソル解析を適用するとともに、応力降下量の推定も行い、この活動の発生メカニズムをさらに詳しく調査することとした。解析対象は、2004年以降に発生したM1.0以上の地震（約240イベント）である。マグニチュードの下限を1.5から1.0まで引き下げたことで、推定対象が3倍以上に増加した。モーメントテンソル解析は、Dahm (1996)の相対モーメントテンソル法を改良した逐次相対モーメントテンソル法（Imanishi and Uchide, in preparation）によって行った。予備的な結果からは、マグニチュードが小さいと推定精度は悪くなるものの、クラックの開口・閉口成分が周期的な変動を示す傾向は確認できた。次に、地震波の減衰補正を慎重に行いながら、地震波スペクトルにω2モデルを当てはめてコーナー周波数を推定し、応力降下量を見積もった。推定値は概ね1～100MPaの範囲に分布し、上部地殻内の地震と同程度か、やや大きな値を持つことがわかった。応力降下量の時間変化を見ると、応力降下量の大きい地震は開口成分が卓越するタイミングに、一方で応力降下量の小さい地震は閉口成分が卓越するタイミングに、それぞれ概ね調和して発生する傾向があることが明らかになった。一般的には流体が注入されて間隙水圧が上昇すると強度低下が生じるため、応力降下量は小さくなると期待されるが（e.g., Goertz-Allmann et al., 2011）、それとは逆センスである。下部地殻を構成する岩石の性質や温度圧力条件も含めた検討が必要である。

謝辞：解析には防災科研Hi-net、気象庁、東大地震研究所、産総研の地震波形データ、気象庁一元化カタログを使用しました。本研究はJSPS科研費20K04141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

The 2023 M6.5 Suzu, Japan, Earthquake that occurred during a Fluid-Induced Swarm Activity

*Keisuke YOSHIDA[1]

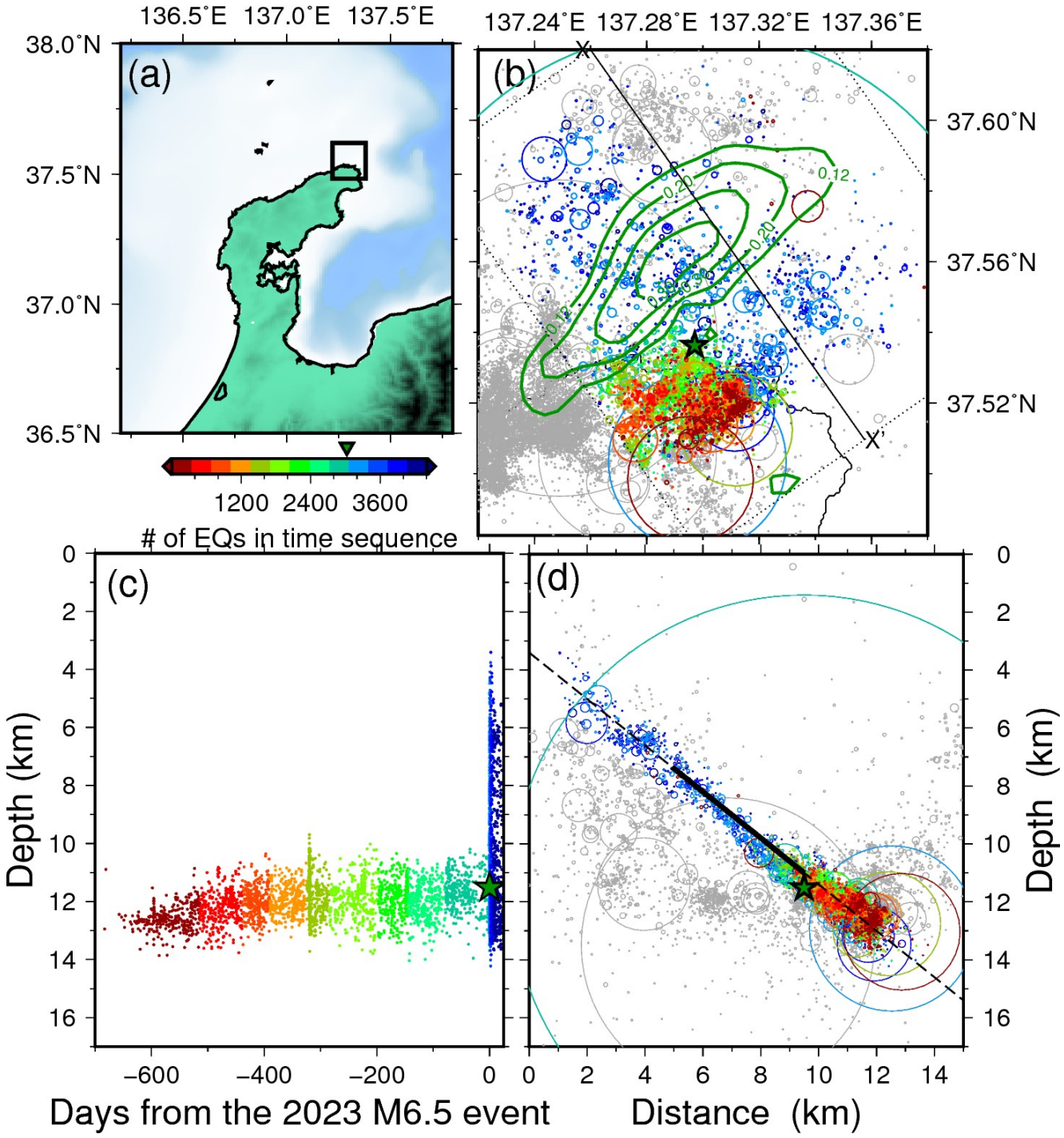
1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University

2023年5月5日、石川県能登半島の北東端部において、M_{JMA} 6.5の地震が発生した。この地域では、2020年末頃から地震活動度が急激に増加しており、2022年 6月 19日にも MJMA 5.4の地震が発生したことから、その動向に注目が集まっていた。特筆すべきことに、この群発地震活動時には、複数のクラスターの複雑な断層ネットワークを経由した震源域の浅部側への移動がみられていた (Yoshida et al., 2023, JGR)。

本講演では、本震の震源過程の推定と微小地震 (2003-2023/7)の震源再決定を行った結果について紹介する。本震の震源過程は防災科学技術研究所 F-net強震地震波形記録を用いて推定し、微小地震の震源は気象庁および NIED Hi-netの観測波形の相互相関により求めた到達時刻差データを用いて再決定した.
得られた結果は、M_{JMA} 6.5本震の破壊が、それ以前から継続していた群発地震の面構造のうちの一つの北部・浅部端付近で開始し、更に浅部側で主すべりを起こしたことを示した。余震の多くは本震断層に対応すると考えられる南東傾斜の面構造に集中しており、本震以前に地震が発生していた深さよりも (z > 10 km)も更に浅部側で発生した (z 5-10 km)。

得られた結果は、2023年 5月5日の M_{JMA} 6.5の地震が、地殻深部から断層帯を通って上昇してきた流体と、それに誘発された非地震性すべりや微小地震による応力変化により引き起こされた可能性を想起させる。流体起因で発生する地震は群発地震活動になりやすく、大地震には至りにくいという考えもあるものの、今回の観測は、流体起因の群発地震活動の中で M>6の被害地震を発生させ得ることを示している．本震震源は、2022年6月に M_{JMA} 5.4地震を発生させた断層帯中の地震活動の浅部端付近に位置するように見える。その断層帯では、本震以前から震源の migrationが見られていたが (Yoshida et al., 2023)、直前には migrationに明瞭な異常は見られなかった (ただし、本震一日以内に震源 1 km以内の距離でM1-2.3の小地震が 6つ発生した)．この周辺域では、1993年にもM_{JMA} 6.6の地震が発生している。しかしながら、その震源域は陸上の観測点から離れているため、震源深さの推定精度が悪く、現在の地震活動との 3次元的な位置関係ははっきりしていない。本震後の地震活動の多くは、同じ面構造の浅部延長 (北部側)で発生している。本震破壊により、断層の更なる浅部に流体が供給されるようになった可能性も考えられる。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 2:30 PM - 3:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 5:30 AM - 6:00 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-1

chairperson:Keita Chiba

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

[S09-01] Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan (2)

*Shiro OHMI[1], Hiroshi INOUE[2], Nityam NEPAL[3], Karma NAMGAY [3], Dowchu DRUKPA[3] (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Department of Geology and Mines, Ministry of Energy and Natural Resources, Bhutan)

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

[S09-02] Visualization of the transition of the Japan Meteorological Agency’s seismic stations from the Meiji to Showa eras.

*Tetsuo Hashimoto[1], Satoko Murotani[2] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. National Museum of Nature and Science)

Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan (2)

*Shiro OHMI[1], Hiroshi INOUE[2], Nityam NEPAL[3], Karma NAMGAY [3], Dowchu DRUKPA[3]

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Department of Geology and Mines, Ministry of Energy and Natural Resources, Bhutan

１．はじめに ：ブータン・ヒマラヤ地域は、インドプレートとユーラシアプレートの衝突帯に位置しており、世界で最も地震活動が活発な地域のひとつであると考えられている。我々は、2013年以来、複数のプロジェクトの支援を受けながら、ブータンにおける恒久的な地震活動監視観測網の構築を行ってきた。本稿では、ブータンの地震観測網構築の経緯と現在の稼働状況、ならびに観測結果の速報的な報告をおこなう。

２．観測網の概要： 本計画の当初の段階では、地質鉱山局(DGM)の観測網は6点のオンライン観測点と3点のオフライン観測点（以後、DGM-NETとよぶ）から成り、短周期高感度地震計、強震計、広帯域地震計等を設置して運用することが計画された。これらのうち、オンライン観測点は、自動車により近傍までアクセスが可能な点を選点し、2015年から2017年にかけて稼働を開始した。オフライン観測点は短周期高感度地震計のみで構成され、通信環境が劣悪で自動車アクセスが困難な北部国境地域を中心に、2017年から2019年にかけて最初期の観測を実施し、2023年3月末までに一旦撤収した。データは、首都ThimphuのDGMのデータセンターにて、GFZ/Gempaによる地震データ解析処理プログラムSeisCompにて解析を行うこととした。また、DGM-NETの構築と並行して、Bangkokに本拠があるRIMES (Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System)による独立プロジェクトとして、2017年から8点の広帯域地震計と強震計からなる観測網も構築が進められた（以下、RIMES-NETとよぶ）。そのため、2023年3月末現在では、ブータン国内では合計14点のオンライン地震観測点が稼働していることになる。2021年から2023年にかけては、RIMES側の了解を経て、これらの14点のオンライン観測点データをSeisCompにより統合処理するシステムの構築を目指した。

３．運用上の問題点：DGM-NETの構築・運用は多くの困難に直面した。その大部分は、通信回線の脆弱さに起因するもので、オンライン観測点と銘打っていながら、リアルタイムでのデータ収集が充分に行えていない状況が続いている。当初の設計では、これら6点のオンライン点は、地上回線でのデータ伝送が可能という事前調査結果に基づき地点選定を行ったが、その後の情勢の変化により、Cellular 回線に転換せざるを得ない状況になり、地上回線とCellular回線では視通やサービス地域等の選点の条件が異なるため、稼働状況が悪化している。そのため、データ伝送状況の悪い観測点については、定期的に現地でのデータ回収を試みていたが、2020年以降はCOVID-19の影響により、それもままならない状況が続いた。2023年現在は、地上伝送回線を同国のICT部門直轄の回線に転換する計画が進んでおり、その結果に期待しているところである。また、RIMES-NETは当初からCellular回線による伝送を行なっているが、必ずしも伝送状況は良好ではなく、今後はこちらも伝送状況の改良を試みる必要がある。

４．得られたデータの解析：構築した観測網の稼働率が必ずしも高くないため、稼働中の少数の観測点のデータのみでも震源決定等の作業が効率的に行えるように 2021年から2023年にかけてSeisCompのlocal earthquake monitoring用のモジュールとして、scanlocとscevalの有償モジュールを導入してシステムの改良を行った。2016年2月から2020年5月までの、利用可能な全てのデータに、IRIS DCから入手可能な近隣国のデータとして、Nepal/KathmanduとIndia/Shironのデータを加え、local monitoring 用にパラメタを調整したSeisCompで自動処理したところ、この期間に約1600個の地震を検出・震源決定することができた。この期間の地震活動の最も顕著な特徴は、インドのアッサム/西ベンガル州からブータンの南西部を通り、同じくインドのシッキム州にかけての帯状に分布する地震帯で、ISCのカタログや他の過去の研究でも既に確認されている。このほか、ブータン中部から西部、東部でも活動が見られる。なお、データ通信環境が貧弱なため、データ品質が時間的に均質ではなく、現段階では検出率や精度が時間的にも空間的にも一様でないことに

© The Seismological Society of Japan

留意する必要がある。観測網の稼働率が不充分な現状でも、ISC等のグローバルなカタログと比較して同等以上の地震を検出・震源決定できていることから、懸案であるデータ通信インフラの品質改善を図ることにより、比較的短期間に、同国の地震活動監視が可能になることが期待される。

© The Seismological Society of Japan

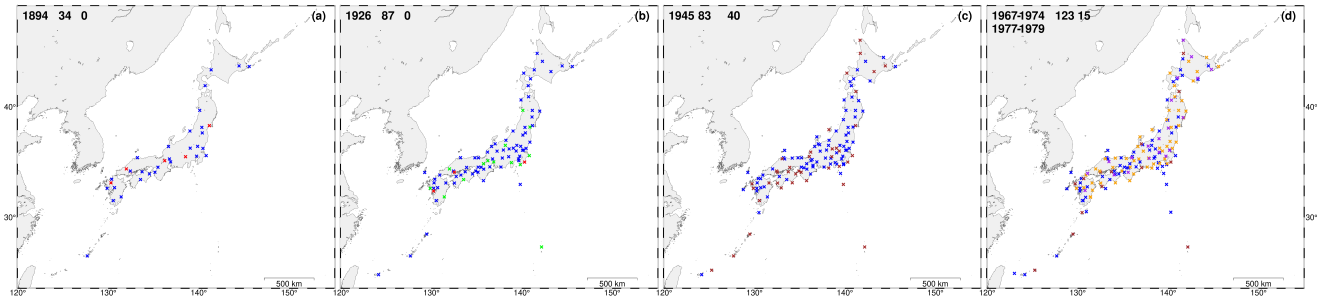
Visualization of the transition of the Japan Meteorological Agency’s seismic stations from the Meiji to Showa eras.

*Tetsuo Hashimoto[1], Satoko Murotani[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. National Museum of Nature and Science

地震計で観測された明治以降の古い地震を調べるにあたって，当時，どのような観測点があったかを目視できるようにしてみたいと考えた．東京気象台に明治８年1875 年にパルミエリ地震計が設置されたのをはじめとして，その後，地震計は測候所等に徐々に展開されていった．なお，初期には，内務省地理局に設置されて，測候所に引き継がれたようなものもある．ここでは，地震観測業務履歴（地震火山部, 2002，以下，業務履歴と呼ぶ）に基づき，測候所等の開所と廃止の年月日，住所，緯度経度，諸地震計による観測の開始と終了，および，地震計による観測（ここでは地震観測とする）が全くできなかった休止期間などの情報について整理した．明治の地震の調査（橋本，JpGU2023）に関連して，その当時や昭和の半ばぐらいまでの観測点分布をみるため，データ入力を始めていたが，今年関東大震災から100年を迎えたのを機に，100年間の地震観測点分布の変遷を見ることにもつなげるため，まずは機械式の残存する1990年代半ばまでの期間を入力することにした．図の(a)に1894年の東京地震の頃の1894年の1年間，(b)にウィーヘルト地震計が展開されていた頃の1926年，(c)に終戦の1945年，および(d)に67型磁気テープ記録式電磁地震計と76型磁気テープ記録式地震計（以下，67型と76型）が展開されていた概ねの期間として1967-74年と1977-79年の地震観測点を示す．青色は地震計が稼働している観測点，赤色は地震計がその年に導入された観測点，茶色は数か月以上休止した観測点，緑色はウィーヘルト地震計がその年に導入された観測点，黄色は67型，紫は76型である．薄ピンクは測候所等の開所した年にプロットされている．図のそれぞれ左上の数値は年，稼働観測点数，休止した観測点数を示す．図(d)には赤，薄ピンクは表示せず，観測点の稼働休止は，1967-74年の期間のものを示す．図(a)の1894年では，全国で34カ所とまばらに分布しており，関東地方においては，東京，銚子，水戸，前橋の4カ所で地震観測が行われており，また，中部の名古屋・岐阜・金沢でも既に行われているが，業務履歴によると，この3カ所は1891年濃尾地震の前の1887年から地震計が設置されていた．1926年にはウィーヘルト地震計が導入された観測点は図(b)に示すように14カ所（内2カ所1926年以前）ある．岡田武松の「測候瑳談」のウィーヘルト地震計の項に「関東大震災後に地震の観測を確かりやる・・・地方は測候所は十三個所で乃ち根室，札幌，秋田，仙台，銚子，沼津，長野，濱田，長崎，宮崎，高知，洲本，名古屋である．附属測候所では，七個所で柿岡，富江，八丈島，父島，潮岬，名瀬，石垣島・・・」とある（濱田，験震時報，2002）．業務履歴によると，これらの観測点では1924年柿岡から始まり，1931年名瀬に導入されて目標は達成されている．一方，上記の地点を除いて，東京に1912年に初めて購入され，神戸で1923年5月と早く，盛岡，前橋，熊谷にも1924年に導入され，1930年までで16カ所展開されており，測候所の独自性も感じられる．その後，1950年代から気象庁一倍強震計(50型，51型，52型)や1960年代にはウィーヘルト地震計の後継機の100倍の59型直視式地震計と500-1000倍程度の59型光学式地震計が展開されている．図(d)に示すように1960年代後半から，1000倍の高感度地震計である67型が気象台等の50カ所に展開されたが，地震の検知能力には，あまり効果がなかったようである．太田他（験震時報，2002）によると76型で検知能力が向上したとされている．また，様々な事情で地震観測が中断することがあるが，業務履歴の記載に，空襲，戦災，あるいは紙不足という記述があったりして，比較的長く中断していた観測点が多かったのが，1945年であり（図(c)），翌年も同程度の箇所が長期の休止となっていた． 謝辞：水戸地方気象台の南海トラフ地震防災官の菊池康友氏には，気象台に保管されている記象紙を調査していただき，感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 3:15 PM - 4:45 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:15 AM - 7:45 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Satoru Baba

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

[S09-03] Realtime seismological observation around the Tsugaru Strait by distributed acoustic sensing, northeastern Japan

*Satoru BABA[1], Eiichiro ARAKI[1], Takashi YOKOBIKI[1], Kei KAWAMATA[2], Keisuke UCHIYAMA[2], Takuji YOSHIZUKA[2] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Electric Power Development Co.,Ltd.)

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

[S09-04] Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation

*Chingyu Hu[1,2], Masanao Shinohara[2], Yusuke Yamashita[3], Tomoaki Yamada[2], Takeshi Akuhara[2], Kimihiro Mochizuki[2] (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-05] Seismicity in trench-outer rise region of the southern Kuril Trench off Hokkaido, Japan, obtained from OBS observations

*Koichiro OBANA[1], Tetsuo No[1], Ryo Miura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Kentaro Imai[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC)

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

[S09-06] Detection of immediate aftershocks following the 2011 Tohoku Earthquake using MeSO-net data

*Takuro Imadera[1], Aitaro Kato[1], Shin'ichi Sakai[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

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

[S09-07] Focal mechanisms based on the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko SHIOMI[1], Makoto MATSUBARA[1], Shoji SEKIGUCHI[1] (1. NIED)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S09-08] Spatiotemporal characteristics of foreshock sequences of magnitude M3-4 earthquakes in the western Nagano Prefecture region

*Yuki NODA[1], Hiroshi KATAO[2], Yoshihisa IIO[2] (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

Realtime seismological observation around the Tsugaru Strait by distributed acoustic sensing, northeastern Japan

*Satoru BABA[1], Eiichiro ARAKI[1], Takashi YOKOBIKI[1], Kei KAWAMATA[2], Keisuke UCHIYAMA[2], Takuji YOSHIZUKA[2]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Electric Power Development Co.,Ltd.

巨大地震の震源域は海域に存在することが多いため、海域で地震観測を行い、その活動をモニタリングすることは重要である。しかし、海域は陸域と比較すると定常的な観測点が少ないため、地震の検出能力や震源決定の解像度は低いと考えられる。近年、光ファイバーケーブルに沿って歪または歪速度の時間変化を計測する分布型音響センシング（DAS）という技術が、空間的に密な観測が可能であるという利点を活かし、地震学において広く使われるようになっている。既存の海底光ファイバーケーブルを使ったDAS観測を行うことによって、ケーブル近傍の海域の地震活動を詳細に観測し、リアルタイムでモニタリングできる。本研究では、DASによる地震検知能力の評価、DASデータに基づく震源決定、DASの観測する歪速度とマグニチュードの経験的な関係式の導出を目的として、2022年度および2023年度に津軽海峡において、AP Sensing社のモデルを使ったDAS観測を行った。

2022年度は、2022年10月から2023年2月までの約４ヶ月間で連続観測を実施し、1101個のイベントが観測された。そのなかにはケーブル近傍で発生したマグニチュード1未満の地震（最小でマグニチュード0.3）を含むほか、気象庁地震カタログに掲載されていない小さい地震のシグナルも捉えることができており、DASの高い地震検知能力が確認できた。ケーブル近傍の地震について、P波・S波の到達を150 mおきに手動で読み取り、震源決定プログラムhypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）による震源決定を行ったところ、気象庁地震カタログによる震源と数 kmの違いで求まり、DASのデータのみで震源を決定できるポテンシャルがあることが示された。観測された地震について、DASで計測されたS波の最大歪速度振幅・震源・マグニチュードの経験的な関係式を求めたところ、震源距離が1桁大きくなると、S波の最大歪速度振幅は1.8桁小さくなった。この関係式を使うことで、DASで観測されたS波の歪速度から、マグニチュードを推定することができる。また、DASで観測されたS波の最大歪速度振幅と、陸域の観測点で計測された最大加速度振幅を比較したところ、これらの振幅の関係は、平面波を仮定した場合に約710 m/sのS波見かけ速度によって説明できると考えられる。

2023年度は、2023年6月より連続観測を行っている。地震のシグナルの検知能力は2022年度より上がっている傾向があり、理由としては、夏の方が冬よりも波や風によるノイズが小さいことが考えられる。2023年度の観測では、リアルタイムでの地震活動のモニタリングを目指し、地震の自動走時読み取りおよび震源決定を行っている。自動走時読み取りには、深層学習モデルPhaseNet（Zhu and Beroza, 2018）を用い、2022年度に観測された津軽海峡の地震のDASの歪速度波形を学習させている。震源決定には、2022年度と同様に、hypomhを用いている。今後は、震源決定をより高い解像度で行えるよう、自動で読み取られたP波・S波のピックの精度の検証を行なっていく。

© The Seismological Society of Japan

Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation

*Chingyu Hu[1,2], Masanao Shinohara[2], Yusuke Yamashita[3], Tomoaki Yamada[2], Takeshi Akuhara[2], Kimihiro Mochizuki[2]

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The Nankai trough region has numerous historically devastating earthquakes. However, a earthquake greater than magnitude 8 has not been recorded in the Hyuga-nada region covering the westernmost area of the Nankai trough. A lack of a large earthquake may be attributed to a coupling between the subducting Philippine Sea plate and a landward plate. It is widely known that low-frequency tremors and very low frequency earthquakes frequently occur in the region. Accurate distribution of normal earthquakes is one of important information for understanding the plate subduction in the study region. To gain insights into it, several Long Term Ocean Bottom Seismometer (LTOBS) networks were deployed to observe seismic activities. This study focuses on the analyses of three datasets among these observations in 2015-2016, 2017-2018 and 2022, respectively.

The very first step for data processing is to extract three minutes of the waveform to include the event from collected raw data. Since that raw data were continuous time series waveforms, establishing a reference for event detection was essential. The Japan Meteorological Agency (JMA) provided an earthquake catalog based on terrestrial observations, which included date and time information. Utilizing this catalog, we identified origin times from the JMA catalog, setting a reference three seconds prior to origin time for extracting the seismic waveforms. After cutting out the waveform, we manually picked up P-wave and S-wave arrivals, S-wave converted S-P wave arrivals, first arrival polarity, and maximum amplitude. P- and S-wave arrivals and maximum amplitude were employed in a location program that integrated absolute travel times and a 1-D velocity structure. During this process, station corrections were applied to compensate for structural heterogeneity beneath the LTOBSs, and station corrections were the calculation result of difference between S-wave arrival and S-P arrival, P-wave velocity from initial velocity model and assumed S-wave velocity in sediment layer, etc. Subsequently, we relocated the events by a program which determines hypocenters and 3-D velocity structure simultaneously using a double-difference technique, to enhance the location accuracy. Furthermore, data on first arrival polarity were inputted into the computer program to infer focal mechanisms.

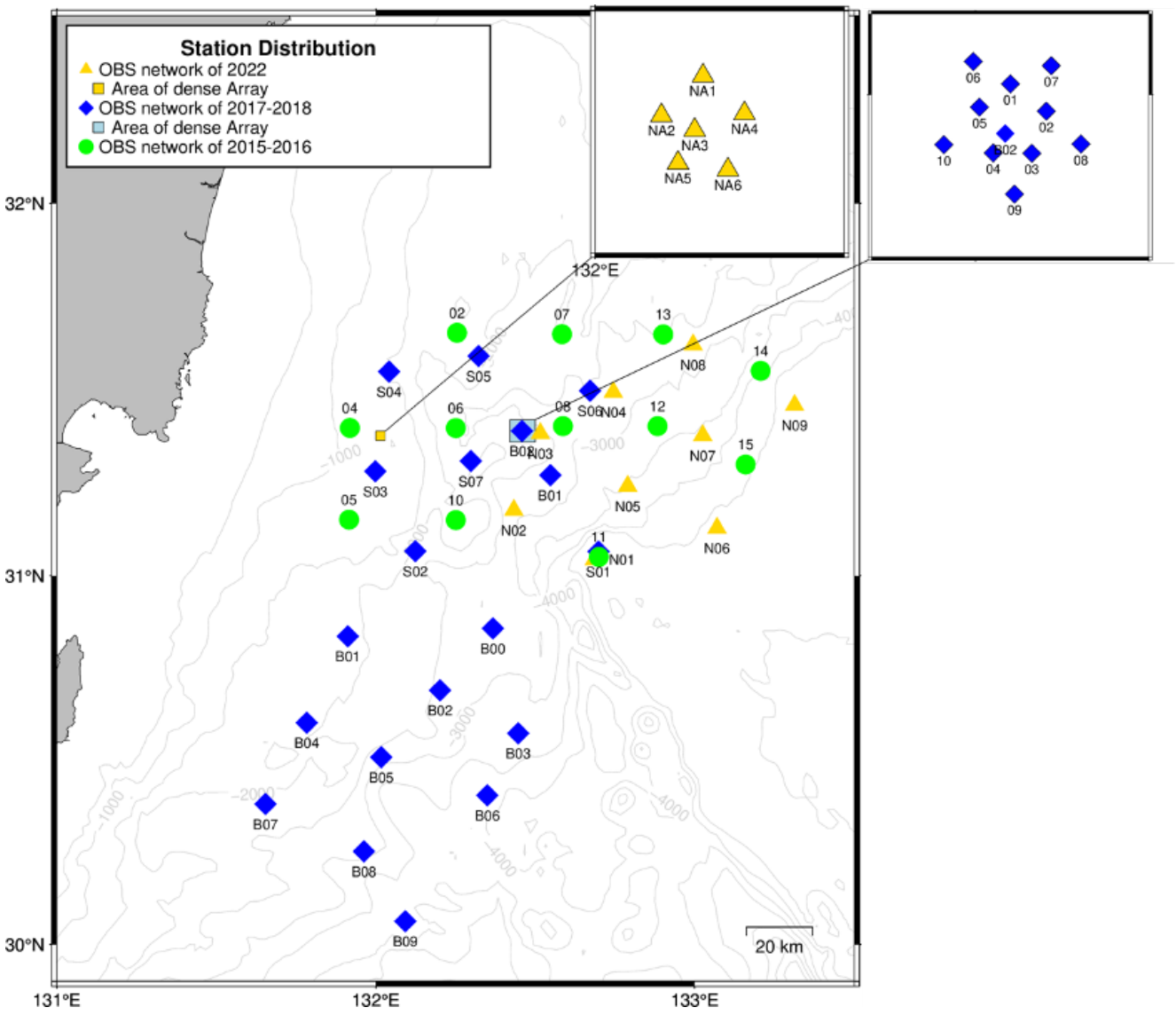
The first dataset was collected by LTOBSs deployed from January 9, 2015, to January 6, 2016, in the westernmost part of the Nankai trough. The relocated result revealed that the earthquakes occurred within the Philippine Sea Plate. Although some earthquakes had thrust-fault type focal mechanisms, the dominant focal mechanisms were normal-fault and/or strike-slip types.

The second dataset was obtained by LTOBSs in the northernmost part of the Ryukyu trench adjacent to the first analysis, and we processed data from July 25, 2017, to September 30, 2018. According to the result of this dataset, we found that most events concentrated in small regions and occurred during limited time periods. These hypocenters were also positioned within the subducting plate. The focal mechanisms of the events were predominantly strike-slip and/or normal faulting.

The third dataset was collected by LTOBSs in the same area to the first analysis, which deployed in 2021 and 2022. We then selected the 13 events occurred within the network between January 9, 2022, to August 13, 2022. Since that only 13 events could be selected to be processed, the double-difference technique has limitations due to event pair scarcity. We obtained hypocenter distribution by applying to a location program utilizing absolute travel times. As the result, it shows similar to the results from

© The Seismological Society of Japan

observation from 2015 to 2016.



Seismicity in trench-outer rise region of the southern Kuril Trench off Hokkaido, Japan, obtained from OBS observations

*Koichiro OBANA[1], Tetsuo No[1], Ryo Miura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Kentaro Imai[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC

海溝軸周辺から海溝海側アウターライズ域では、海溝からの沈み込みに伴う海洋プレートの屈曲により海洋性地殻を断ち切る正断層によってホルスト・グラーベン構造が発達するとともに、一般に「アウターライズ地震」と呼ばれる沈み込む海洋プレート内を震源とする正断層地震が発生することが知られている。アウターライズ地震の発生頻度は海溝型巨大地震に比べると低いものの、日本海溝北部で発生した1933年昭和三陸地震のように、地震にともなって発生した津波により大きな被害をもたらす場合がある。
千島海溝沿いでは2017年に地震調査研究推進本部により公表された「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版）」において、北海道東部に巨大な津波をもたらす超巨大地震(17世紀型)が今後30年以内に発生する確率が7~40%とされるなど、海溝型巨大地震の発生が懸念されている。アウターライズ地震はしばしば海溝型巨大地震に伴って発生しており（e.g. Lay et al., 2011）、千島海溝中部でも2006年11月のMw8.4の海溝型地震の2ヶ月後の2007年1月にMw8.1のアウターライズ地震が発生した例がある(Lay et al., 2009)。一方、海岸線から遠く離れたアウターライズ域の詳細な震源分布を得ることは、陸上の地震観測網のデータからは困難である。近年、防災科学技術研究所による日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の観測が開始されているが、海溝軸海側の観測点は限られている。そこで、海底地形や構造探査データと組み合わせたアウターライズ地震の潜在断層マッピングや津波想定への活用を念頭に、OBSによる海底地震観測を北海道沖の千島海溝南部の海溝軸周辺から海溝海側において、2022年4月から6月にかけて実施した。
解析では地震観測のために設置した24台の海底地震計に加え、千島海溝を横切る構造探査側線上に設置された78台のOBSのうち、10台を使用した。これらのうち7台は水深6000m以上の海域に設置可能な超深海型のOBSを使用している。また、防災科学技術研究所が運用するS-net(https://doi.org/10.17598/NIED.0007)のうち13観測点のデータも、Takagi et al. (2019)に従って上下動と水平動（南北、東西）の３成分に補正した上で使用した。統合したデータセットから検出したイベントに加え、気象庁一元化震源に含まれるイベントについて、winを用いた手動検測を行い震源決定するとともに、P波初動極性を用いて震源メカニズムを推定した。
解析の結果からは、千島海溝の海溝軸海側（南側）約100km程度の範囲で地震活動が見られる。千島海溝にほぼ平行なホルスト・グラーベン構造に沿う線状分布や、T軸が千島海溝にほぼ直交する正断層型の震源メカニズムが得られており、千島海溝からの沈み込みに伴う海洋プレートの変形を反映していると考えられる。一方2012年3月にMw6.9の地震が発生した襟裳海山周辺では、日本海溝にほぼ平行な線状分布や、T軸が日本海溝に直交する正断層型の震源メカニズムも推定されている。千島海溝と日本海溝の接合部において、海洋プレート内で複雑な変形が生じていることが示唆される。 謝辞：本研究はJSPS科学研究費JP20H00294の助成を受けたものです。

© The Seismological Society of Japan

Detection of immediate aftershocks following the 2011 Tohoku Earthquake using MeSO-net data

*Takuro Imadera[1], Aitaro Kato[1], Shin'ichi Sakai[2]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

2011年東北地方太平洋沖地震では非常に活発な余震活動が観測された。その余震活動では大規模な地震も数多く発生し、それらによって生じた波動場によって中小規模の地震の検出が阻害され、既存の地震カタログから数多く漏れている可能性があると考えられている。実際に、気象庁の地震カタログに記録されている中小規模の地震はグーテンベルグ・リヒター則から推定される数よりも少なくなっている。こうした検出から漏れた地震を改めて検出しようという試みも行われており、Lengliné et al. (2012)は東北地方と関東地方のHi-net観測点の波形記録を用いたMatched-Filter Methodを実行し、本震発生後12時間について解析を行なっている。

本研究では、関東地方に設置されている地震観測網であるMeSO-netの観測点のうち茨城県、埼玉県、千葉県の3県にある85観測点で得られた波形記録を用いてMatched-Filter Methodを実行し、余震の検出を試みる。Hi-net等の観測網では津波による被害や停電などにより観測を停止する観測点があった一方、MeSO-netではそうした観測点が少なかったことから時間的に安定した地震検出能力が期待される。テンプレートには気象庁カタログに記録されている本震発生後から2012年3月までの地震の波形記録を使用した。研究対象期間の連続波形記録とテンプレートに1-8Hzのバンドパスフィルタを適用し、計算の高速化のために200Hzから25Hzにデサンプリングして相関の計算を行った。そして得られた相関の各日1日分の時系列データの中央絶対偏差を計算し、その10倍の値を検出閾値として地震イベントの検出を行った。

こうした解析の結果、本震から100時間以内、M4.5以上において気象庁カタログの約3倍の地震イベントを検出した。また、検出イベントカタログで見られた余震活動の時空間発展では、活動域の南端のマイグレーションが既往研究（Lengliné et al., 2012）や気象庁カタログに比べてよりスムーズであった。観察された活動域の南端の移動速度は約5km/hであり、太平洋プレートとフィリピン海プレートの接触域付近で停止している。この活動域の南端のマイグレーションは本震および同日15時15分頃の茨城県沖の地震(Mj7.6)のアフタースリップによって駆動されたと考えられる（Lengliné et al., 2012）。

© The Seismological Society of Japan

Focal mechanisms based on the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko SHIOMI[1], Makoto MATSUBARA[1], Shoji SEKIGUCHI[1]

1. NIED

プレートの沈み込み帯において，地震が発生した場所を評価するための重要な情報のひとつとして発震機構解がある．初動発震機構解（初動解）は，初動極性を読み取った観測点の分布に強い影響を受けるものの，MT解／CMT解に比べて規模が小さい地震も評価できること，計算量が少ないこと等の利点がある．一方，南海トラフ周辺のプレート境界付近で発生する逆断層型の地震に対し，一次元地震波速度構造（1D構造）を用いて求めた初動解は正断層型を示すことがある（Takemura et al., 2016; doi:　10.1186/s40623-016-0527-9）．これは，観測点への射出角評価の際，低角で沈み込むフィリピン海プレートの影響を正しく考慮していないことに起因する．

防災科研では，文部科学省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（防災南海PJ）において，三次元地震波速度構造モデル（3D構造モデル）を用いた自動震源決定システムの構築を担っている．構築済のプロトタイプシステムで採用している震源計算方法のひとつに，昨年度，各観測点への射出角を3D構造モデルに基づいて計算し，初動解を推定する機能を追加した．この機能を用いて，南海トラフ周辺海域で発生する地震で得られる初動解を調査したので，その結果を報告する．

評価対象には，Takemura et al.（2016）が検討した5地震のほか，2019年5月10日の日向灘の地震等，南海トラフ周辺の海域で発生した地震Mw4.5以上の6地震を抽出した．3D構造モデルとしては，海陸の観測データに基づくトモグラフィ解析結果（Matsubara et al., 2019, doi: 10.5772/intechopen.86936）及び地震本部ウェブサイトで公開されている全国1次地下構造モデル（暫定版）をグリッド形式に再構築したモデルを用意した．比較対象としては，1D構造モデルに基づく防災科研Hi-netの初動解，防災科研F-netによるMT解，AQUA-CMT解，気象庁CMT解，3D構造モデルに基づくCMT解（3D CMT解）を用いた．

2011年8月12日の遠州灘の地震は，CMT解析により北西－南東圧縮の低角逆断層型の解が得られているが，1D構造モデルによる初動解は北西－南東伸張の正断層型であった．全国1次地下構造モデルを用いて初動解計算を行ったところ，プレートが沈み込む方向（御前崎－浜名湖－愛知県東部）の観測点への射出角が適切に評価されたことにより，CMT解と類似の初動解が得られた．一方，2009年7月の四国地方南方沖の地震や2016年4月の紀伊半島南東沖の地震では，若干の改善は見られたものの，3D構造モデルを用いても正断層型のままであった．ただし，震源球上に配置した各観測点の極性分布は各MT解/CMT解と大きな矛盾は無かったことから，防災南海PJにおいて現在構築中の新たな3D構造モデル（Nakanishi et al., 2022）ならびに整備中を含む海域地震観測網のデータを活用することで，海域で発生する地震の初動解推定精度向上が期待出来る．日向灘等，プレートの傾斜角がやや急角な地域のプレート境界付近で発生する地震の場合，1D構造モデルでも逆断層型の初動解が得られた．この地域の地震に対して3D構造モデルを用いた解析を実施すると，走向や傾斜がよりCMT解と一致する傾向が見られた．

今後，3D CMT解のカタログと相補的に活用することで，より信頼性の高い地震発生場所の評価につなげることが出来るよう，新たな3D構造モデルが構築され次第，初動解カタログの整備を進めていく予定である．

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．3D構造モデルを用いた震源位置及び発震機構解推定には，気象庁，大学，産業技術総合研究所及び防災科研の観測データを使用した．解析結果の比較検討に気象庁CMT解カタログを使用した．3D CMT解計算にあたっては，武村俊介より提供頂いたプログラム及びグリーン関数を用いた．

© The Seismological Society of Japan

Spatiotemporal characteristics of foreshock sequences of magnitude M3-4 earthquakes in the western Nagano Prefecture region

*Yuki NODA[1], Hiroshi KATAO[2], Yoshihisa IIO[2]

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

大きな地震（本震）が発生する前に，その震源の近傍で複数の小さな地震（前震）が発生することがあり，前震が本震と時空間的に近接して発生することは，その背後にある破壊核形成過程の存在を示唆している．しかし現在の科学では地震が発生したときに，それがより大きな地震の前震かどうか識別することはできない．また，前震の発生がどのような物理過程を表しているのかという解釈については，地震同士の応力伝達により前震が次々と発生しているという見方と，断層面上のゆっくりとしたすべりや流体の移動などといった，非地震性の過程によって前震が引き起こされているという見方とがある．ただし，これまでに行われてきた多くの地震観測では使用可能な観測点数の制約やデータの精度などの問題もあり，どのような説明が実際の過程を正確に表しているかについては議論の余地がある．

長野県西部地域では1995年6月から稠密地震観測網が展開されていて，観測点は1984年に発生した長野県西部地震の余震域の東部を中心に設置されている．その中で10kHzのサンプリング周波数でデータを記録しているものが最大で57ヶ所に設置された．これほどまでの高サンプリングレートで長期間において自然地震を稠密観測している地域というのは他に例を見ない．さらに，この地域で発生する地震は震源が浅いものが多く，さらに観測点の周囲が静かでノイズレベルが小さいため，多数の高品質な微小地震データが得られている．

この稠密地震観測で得られた10kHz波形データを使用し，1995年の観測開始から2008年7月までに発生したM3.7～M4.1の6つの地震（本震）について，それぞれの周囲で発生した地震の破壊開始点の相対震源をmaster event法（Ito, 1985）およびDouble Difference 法（Waldhauser & Ellsworth, 2000）のそれぞれで高精度に再決定した．いずれの方法で再決定した場合でも，震源分布が鮮明な平面状になっていて，先の前震ですべったところで後の前震の破壊が始まっている可能性のある活動や，震源分布に空間的なギャップがあり，先の前震によりほとんど応力が増加していないと考えられるところでも後の前震の破壊が始まっている可能性のある活動が見られた．これらの地震活動は地震間の応力伝達だけでは説明できない可能性が高い．

© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Nov 1, 2023 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room B F201

[S02] AM-1

chairperson:Masanao Shinohara, Shigeki Nakagawa(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S02-01] Development of anchored buoy seafloor seismic observation system for shallow water and evaluation of real data

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

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

[S02-02] Time Adjustment for Short-Period Ocean Bottom Seismometers Using Ambient Noize Cross-Correlation Functions

*Hiroaki Yamahana[1], Yoshio Murai[2], Masanao Shinohara[3] (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S02-03] Traceable calibration of a broadband seismometer using a laser interferometer

*Tomofumi Shimoda[1], Wataru Kokuyama[1], Hideaki Nozato[1] (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S02-04] Development of multi-platform next-generation WIN system (3)

*Shigeki NAKAGAWA[1], Hiroshi AOYAMA[2], Hiroaki TAKAHASHI[2], Takuto MAEDA[3], Mare YAMAMOTO[4], Hiroshi TSURUOKA[1], Yosuke AOKI[1], Naoki UCHIDA[1], Yuta MAEDA[5], Shiro OHMI[6], Haruhisa NAKAMICHI[6], Makoto OKUBO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Katsuhiko SHIOMI[10], Kenji UEHIRA[10], Hideki UEDA[10], Toshihiro SHIMOYAMA[11], Koji TAMARIBUCHI[12], Kazuo OHTAKE[13], Ryo HONDA[14], Shutaro SEKINE[15] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kochi University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 11. Japan Meteorological Agency, 12. Meteorological Research Institute, JMA, 13. Kakioka Magnetic Observatory, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

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

[S02-05] Detection of submarine volcanic activity at Kaitoku Seamount using S-net

*Ryoichi IWASE[1] (1. JAMSTEC)

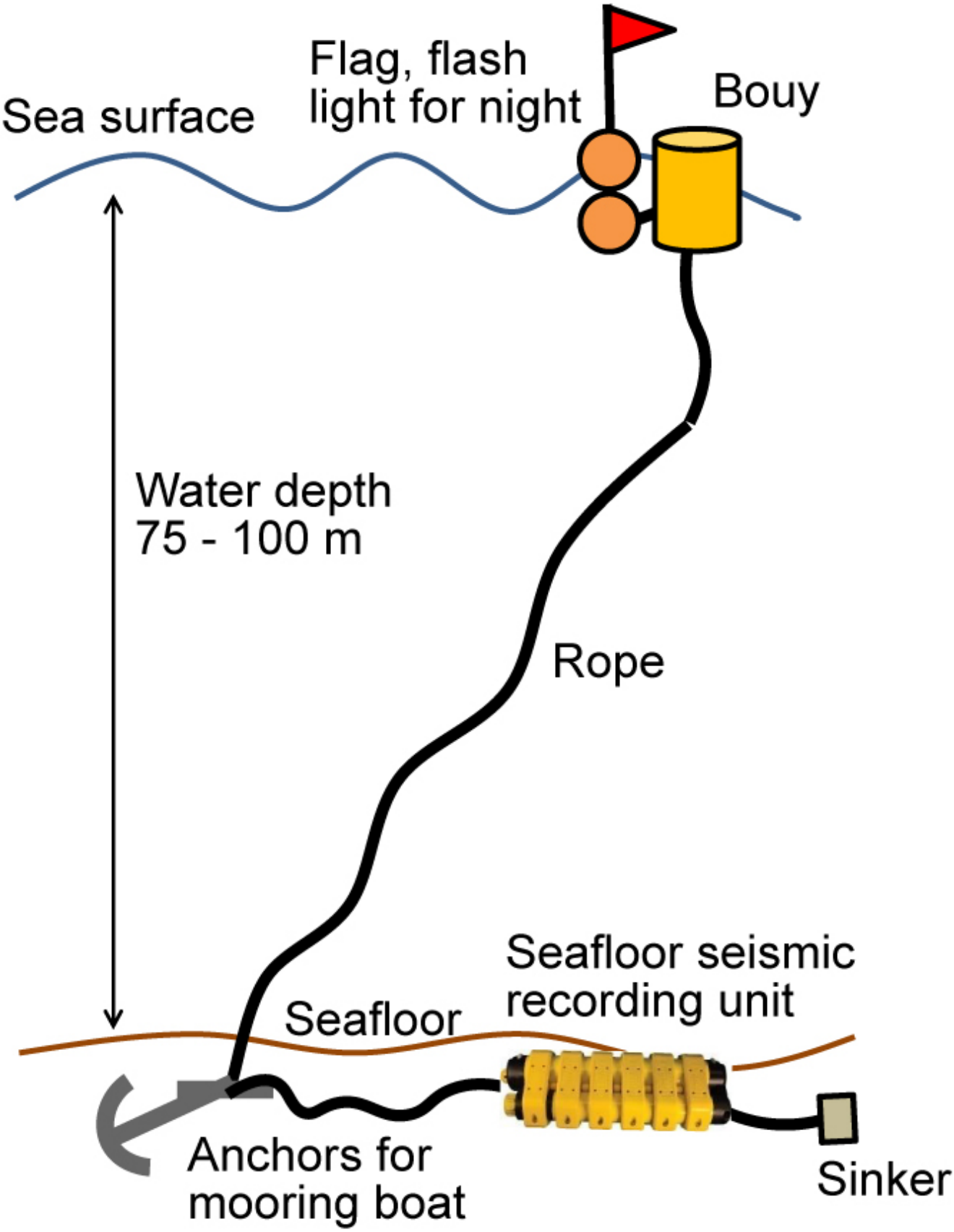
Development of anchored buoy seafloor seismic observation system for shallow water and evaluation of real data

*Masanao SHINOHARA[1], Shin'ichi SAKAI[2,1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

日本海東縁沿岸海域では大地震が度々発生している。近年では、2019年6月18日に山形県酒田市沖の深さ約14 km を震源とする気象庁マグニチュード(Mj) 6.7の地震が発生した。また、2023年5月5日には能登半島沿岸沖の深さ約12 kmにおいて、Mj6.5の地震が発生した。この2つの地震の発震機構は、いずれも逆断層型であり、いわゆる内陸型地震と考えられている。日本海東縁部には、ひずみ集中帯と呼ばれる活構造が存在しており、これらの地震はこの構造の一部が関係していることが推定されている。このような沿岸海域を震央とした浅い地震とその地震発生場の特徴を正確に把握するためには、陸域の高密度地震観測網の近くであるが、震源域直上における海底臨時地震観測が必要である。しかしながら、震源域直上の海底は水深100 m程度と浅く、水産活動等が活発な海域である。そのため、通常海底観測に用いられる自由落下自己浮上式海底地震計による海底観測は難しい。また、海底からの高さがある自己浮上式海底地震計では、雑微動が大きい。そこで、沿岸域は水深が浅いことを利用し、簡便な係留ブイ方式によるS/N比のよい海底地震観測システムを新たに開発した。開発した係留ブイ方式海底地震計は、2019年6月の山形県沖の地震および2023年5月の能登半島沖の地震の余震観測に利用した。ここでは、新たに開発した係留ブイ方式海底観測システムの概要と、得られたデータの評価について、述べる。 浅海用係留ブイ方式海底地震計システムに採用した海底地震観測装置は、米国Geospace社のOcean Bottom Recorder (OBX-750）である。この観測装置は、固有周波数15Hz 3成分速度型地震計(GS-ONE OMNI)とハイドロフォンを搭載して、750mまでの水深で自立した観測が可能である。搭載している地震計は置かれている姿勢に関係なく計測可能であるために、レベリング装置を搭載していない。地震計の姿勢を知るために、2軸の傾斜計と方位計が付加されている。ハイドロフォンは10Hz以上の周波数について、平坦な特性となっている。地震計およびハイドロフォンからの信号は24bit-A/Dされ、メモリーに連続収録される。内蔵電池により約30日間の連続観測が可能である。大きさは、52 x 21 x 11cmであり、重量は空中約11kg、水中約4kgの小型な装置である。特徴としては、全体として板の形状をしているため、海底における海水流の影響を受けにくく、S/N比がよい記録が可能である。刻時については、OVCXO（恒温電圧制御水晶発振子）を用いており、設置直前および回収直後に内部時計とGNSSによる標準時計との差を計測する。観測中の時刻差は、これらのデータの直線補間により決定する。設置方法については係留ブイ式を採用した。ブイが海上にあることにより、海底に設置物があることを周知する。係留システムは、まず、ロープ先端に安定のための錘(数kg程度）をつけ、約1.5 m離して、OBXを取り付ける。その先に、船止め用のアンカー（重さ8kg程度）を2 m離して2個、または重量20kgの大型アンカーを1つ取り付け、海底部とする。船止め用アンカーを用いることにより、風や波浪による位置の移動を防止する。船止め用アンカーは、底質などの環境を考慮して選択する。全長約200mのロープ末端にブイとアンカーを繋いだ。2019年6月の山形県沖の地震の余震観測では、この浅海用係留ブイ方式海底地震計3台を、5kmおよび8.5km程度の間隔で震源域直上に設置した。水深は70mから80mである。余震観測であること、設置水深が100m以下と浅いことを考慮し、OBXのアナログ部の増幅度は下げ、500Hzのサンプリング周波数にて収録を行った。7月5日に設置を実施し、回収は7月13日に行った。このうち2台から良好なデータが回収された(Shinohara *et al.*, 2022)。2023年5月の能登半島沖の観測では、4台を約5 km間隔で半島北方沖に、１台を東方沖に設置した。水深は75 mから100mである。収録パラメータは、2019年7月の観測と同一とした。2023年6月26日から観測を開始し、7月5日に全台回収し、良好なデータが得られた。 2019年の観測では、傾斜計と方位計のデータから観測中の姿勢はほぼ安定していることがわかった。沿岸の気象データとの比較では、強風時には姿勢がやや変化していた。傾斜計と方位計のデータを用いて、3成分記録を上下動、東西動、南北動に変換し、雑微動のスペクトルを計算した。その結果、沿岸の臨時地震観測点とほぼ同じ雑微動レベルであり、時間変化が小さいことがわかった。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Time Adjustment for Short-Period Ocean Bottom Seismometers Using Ambient Noize Cross-Correlation Functions

*Hiroaki Yamahana[1], Yoshio Murai[2], Masanao Shinohara[3]

1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

自由落下自己浮上式海底地震計（OBS）による地震観測データを解析するためには，自立した地震計の時計を標準時刻に補正する必要がある．多くの場合はOBSによる観測期間の直前・直後に，標準時刻であるGPSの時計とOBSの内部時計との時刻差を計測し，OBS内部時計の線形変動を仮定して時刻補正を行う．一方で雑微動の相互相関関数(CCF)による手法では，2観測点間の内部時計の相対時刻差を推定する．この手法を使用すればGPSによる時刻補正ができなかった状況でも，時刻補正済みの他の観測点との相対時刻差を推定することで，標準時刻からの時刻差の変化率（ドリフトレート）を求めることがきる．それゆえCCFの利用はGPSによる時刻補正法を補うための手法として重要である．CCFにおいて２観測点間の内部時計の相対時刻差は，CCFにより抽出される脈動帯域の波動の走時として現れるため，これまで本手法は主に広帯域OBSに対して使用されていた。例としてTian *et al.* (2021) は，GPSによる時刻補正に失敗した広帯域OBSに対して本手法を使用し，複数の時刻補正済みの広帯域OBSデータとの間でCCFを求めた．その際には複数の成分・周波数帯域を用いてCCFの数を増やすことによって，１台のOBSに対して多数の走時変化を得ており，それらの平均をとることで最終的なドリフトレートの推定精度を向上させている．

本研究では脈動帯域における感度が低い，固有周期4.5Hzの短周期OBSに対して，Tian *et al.* (2021) の手法を用いて時刻補正を試みた．OBSの設置海域は北海道南東の釧路沖である．観測データは24時間ごとに分割し，１日単位で走時を計算することとした．まず前処理として計算量減少のため観測データを100 Hzへダウンサンプリングしたのち，大振幅である地震の影響を除去するためにバンドパスフィルターの適用，振幅等値化，スペクトル白色化を行った．ここで走時変化を多数求めるため，バンドパスフィルターの周波数帯域は脈動帯域を中心に少しずつずらして複数用意した．その後，全観測期間の約10分の１にあたる5日分のCCFをスタックした．ここでのCCFのピーク位置の変化が走時の変化である．ただしSN比が低いCCFを除外するために，全期間スタックしたCCFにおけるピーク値が設定した値より大きいもののみを採用した．選択された複数のCCFから得られた走時変化を用いて重み付き平均をとり，得られた平均的な走時変化の回帰直線の傾きをとることで，時刻補正対象のOBSのドリフトレートを求めた（図1）．

CCFから推定される主な波動の伝播方向は，陸側から離れる東・南向きである傾向が見られた．その波動の伝播速度は0.2 Hzにおいておよそ0.26 km/sであった（図2）．またドリフトレート推定結果を検証するため，GPS時計との時刻差計測により標準時刻に補正済みの複数のOBSに上記の手法を適用した．ここでは時刻補正済みのデータを使用しているので，求まるドリフトレートは0になることが期待される．結果としてどのOBSにおいてもドリフトレートはその95 %信頼区間が0を含み，期待通りほぼ0と一致する値を得ることができた．この結果から，短周期センサーを使用したOBSにおいても低周波帯域でのCCFを利用できる可能性が示された．

© The Seismological Society of Japan

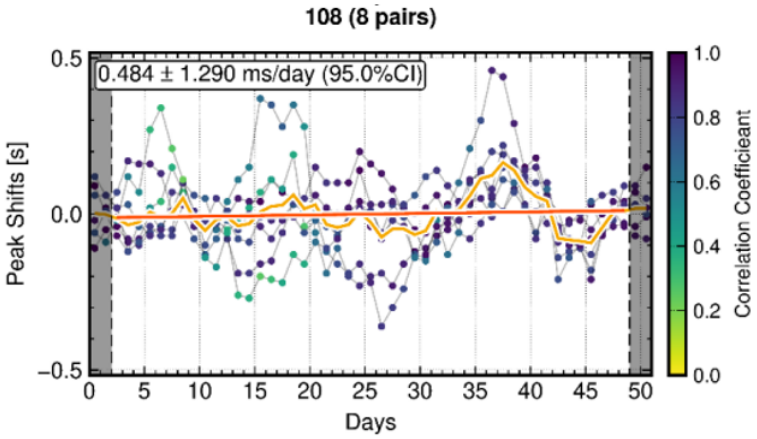


図1. ドリフトレート推定の例. 線で結んだ点が各 CCF の走時変化, 橙線が重み付き平均の結果, 赤線が平均結果の回帰直線. 回帰直線の傾きがドリフトレートとなる.

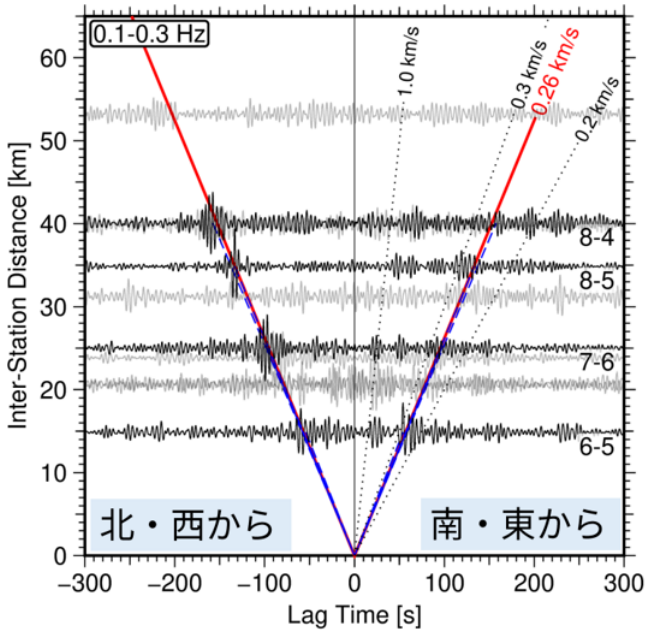


図 2. OBS の距離ごとに並べた全期間スタック CCF. CCF のピーク値が小さいものは色を薄くしている.

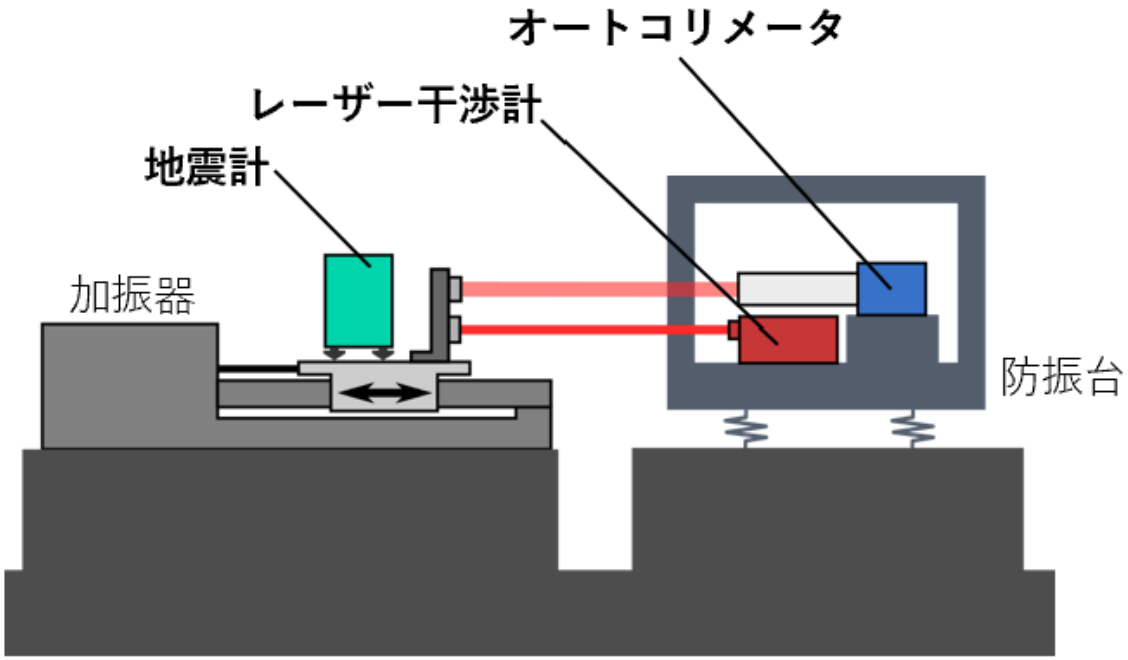
© The Seismological Society of Japan

Traceable calibration of a broadband seismometer using a laser interferometer

*Tomofumi Shimoda[1], Wataru Kokuyama[1], Hideaki Nozato[1]

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

広帯域地震計は地震観測に広く用いられているが、計測対象の振動に対する出力電圧信号の感度については、必ずしも正確に校正されていない。ほとんどの場合メーカーの校正値が用いられるため、センサ特性に経時変化等があった場合にデータの正確性が落ちてしまう。センサに組み込まれたコイルを用いて電気的な評価を行うことができる地震計も多いが、電磁力を基準とするものであり、実振動に対する正確な応答は分からない。観測データの信頼性を維持するためには、地震計の特性を評価するための正確な振動標準が必要である。
産総研計量標準総合センターでは、振動加振器とレーザー干渉計を用いた振動校正システムを保有しており、これまで加速度センサ等の校正を行ってきた。同システムでは振動加振器でセンサに振動を加え、レーザー干渉計でモニタした基準振動とセンサ出力信号を比較することで、センサの感度・位相遅れの特性を評価する。実際に振動を加えて評価するため、センサの使用時とほぼ同じ条件での特性を測ることができる。数年前から地震計を対象とした低周波域（数mHzから数10 Hz）の校正技術を開発しており、現在までに5 mHzまでの技術が整備されている。校正の不確かさは5 mHz帯で数%、0.1 Hzで0.15 %程度と見積もられている。レーザー波長等を基準にした信頼性の高い標準となるため、地震観測の精度向上や、観測網のメンテナンス、新規開発地震計の特性評価等に貢献できると期待される。
本発表では、振動校正システムを用いた地震計の校正技術について紹介するとともに、今後の展望について述べる。



© The Seismological Society of Japan

Development of multi-platform next-generation WIN system (3)

*Shigeki NAKAGAWA[1], Hiroshi AOYAMA[2], Hiroaki TAKAHASHI[2], Takuto MAEDA[3], Mare YAMAMOTO[4], Hiroshi TSURUOKA[1], Yosuke AOKI[1], Naoki UCHIDA[1], Yuta MAEDA[5], Shiro OHMI[6], Haruhisa NAKAMICHI[6], Makoto OKUBO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Katsuhiko SHIOMI[10], Kenji UEHIRA[10], Hideki UEDA[10], Toshihiro SHIMOYAMA[11], Koji TAMARIBUCHI[12], Kazuo OHTAKE[13], Ryo HONDA[14], Shutaro SEKINE[15]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kochi University, 8. Kyushu University, 9. Kagoshima University, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 11. Japan Meteorological Agency, 12. Meteorological Research Institute, JMA, 13. Kakioka Magnetic Observatory, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction

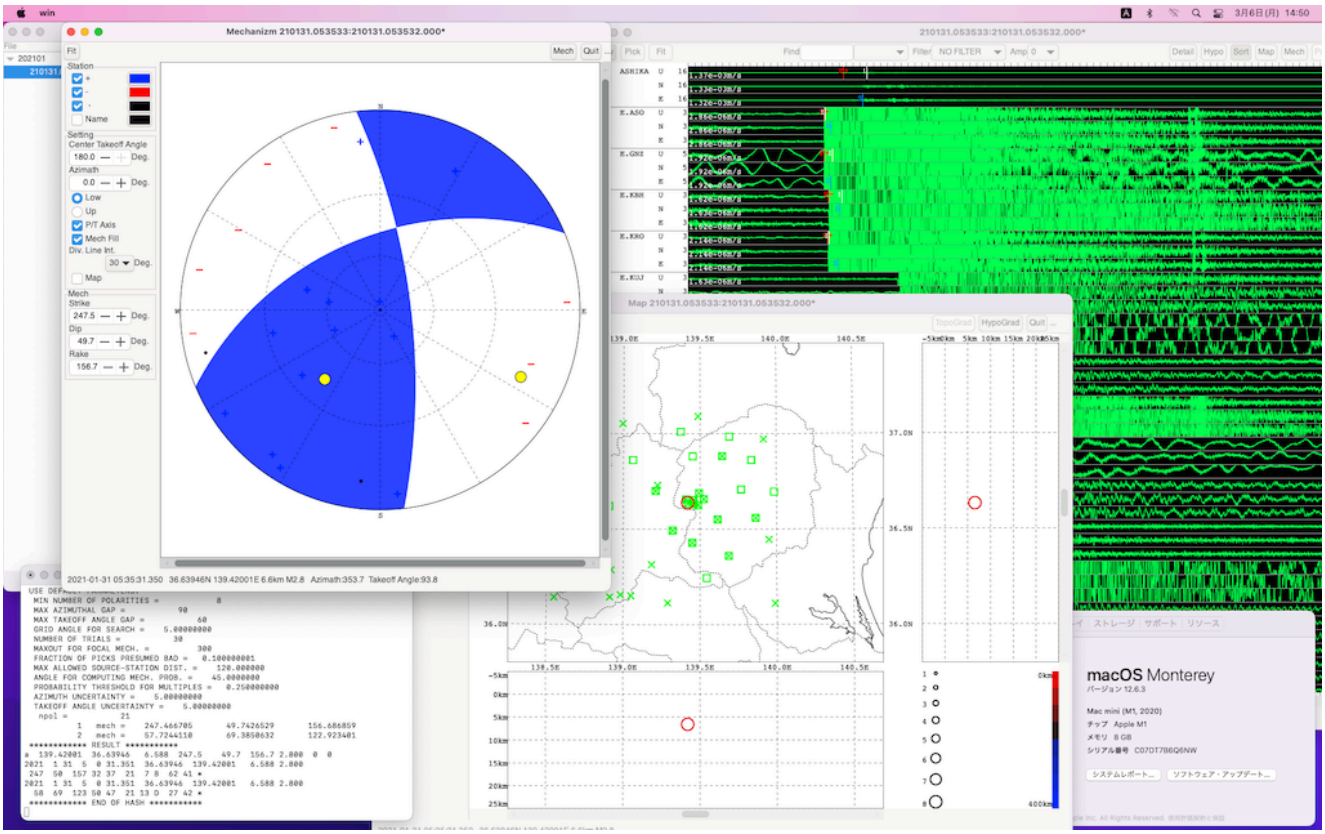
１．はじめに
地震・地殻変動等の時系列データの伝送や検測処理に広く用いられているWINシステム（卜部・束田，1991；卜部・束田，1992；卜部，1994など）は，大学等の基幹システムとして30年近くにわたって使い続けられている．特に現在の対話検測処理ソフトウェアは機能向上を図ることが難しく，検測処理の高度化や迅速な情報発表を図る上での障害となりつつある．一方，この四半世紀で，ハードウェアの性能が大幅に向上したほか，マルチプラットフォームに対応した言語や対話処理に優れた入力デバイスの開発・淘汰が進み，ハードウェア環境に依存しないソフトウェア群の構築が可能になってきた．そこで，マルチプラットフォームのソフトウェア群（次世代WIN）の開発を進めている．
これまで対話検測ソフトウェアとして必要な機能を実装した新たなソフトウェアを試作してきた（中川・他，地震学会，2021，中川・他，地震学会，2022）．WINフォーマット波形データの読み込みと表示，帯域制限フィルターの適用，手動検測，震源計算プログラムの実行，震源計算結果や震源データを地図上にカラー表示する機能を持ち，1つのソースコードからUnix (Linux, FreeBSD)，Windows，macOS の複数プラットフォーム上で動作するネイティブバイナリをそれぞれの環境下でコンパイルできる特徴を有する．任意の震源計算プログラムを利用できるようにするために，外部コマンド実行機能を実装した．これにより，他の外部コマンドを用いた機能拡張が可能となった．

２．発震機構解計算機能の追加
外部コマンド実行機能を用いて，発震機構解計算プログラムを外部コマンドとして実行し，その結果を表示する機能を追加した．今回は，初動極性から発震機構を求めることもできるHASH (Hardebeck and Shearer, 2002)を計算プログラムとして利用できるように，WINの検測値ファイル（pickファイル）にあるHYPOMHの出力を読み込んでHASHのサブルーチンに引き渡すラッパープログラムを新たに作成した．計算結果は，従来WINシステムで予約されていた#m行を用いてpickファイルに書き込むことにした．
求めた発震機構解は，別ウインドウを開いて表示させた（図）．初動極性や観測点名，地図を重ねて表示させることもできる．また，図上で発震機構解を修正することも可能とした．

３．まとめ
従来のWINシステムでは，初動極性の分布を表示できたものの，断層の走向や傾斜角等を求めて図示する機能は無かった．今回，HASHはユーザが別途用意する必要があるものの，波形読み込み，検測，震源決定，発震機構解推定まで一貫して行うことができるようになった．関連する研究者や技術者等で試用しながら，更なる機能拡張を進めていきたい．
本研究で作成した対話検測ソフトウェアは，今年度中には地震研究所のWEBサイト等を通じて一般への公開を予定している．また，伝送系システムについても検討を進めていきたい．これらの運用試験や機能拡張，システム製作等に協力いただける方は著者までご連絡ください．

© The Seismological Society of Japan

謝辞：本研究では，国立研究開発法人防災科学技術研究所，北海道大学，弘前大学，東北大学，東京大学，名古屋大学，京都大学，高知大学，九州大学，鹿児島大学及び気象庁の地震観測データを用いました．ここに記して感謝します．なお，本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第２次）」の支援を受けました．



© The Seismological Society of Japan

Detection of submarine volcanic activity at Kaitoku Seamount using S-net

*Ryoichi IWASE[1]

1. JAMSTEC

海徳海山では、2022年8月以降、航空機による海面の変色水の確認などの海底火山活動が報告されている(海上保安庁, 2022)。一方、同じ8月以降、防災科学技術研究所が構築した「日本海溝海底地震津波観測網」(S-net)の海底地震計の観測波形には、S-netの南側から深海サウンドチャネル(SOFAR)を伝搬してきたと考えられる波形が断続的に記録されている。岩瀬(2023)では、この波形が海徳海山の海底火山活動に起因するものではないことを示し、S-net各観測点への信号の到達時間差から、信号源(音源)の位置を小笠原諸島南端付近の海溝斜面上と推定した。他方、Tanaka et al. (2023)では、Wake島沖に設置されているハイドロフォンアレーの観測から、この信号が、北マリアナのAhyi海底火山の活動に伴う信号であると指摘するとともに、これとは別に、海徳海山の火山活動に伴うと推定される海中伝搬波を検出したことも報告されている。
そこで今回、Tanaka et al. (2023)を参照し、S-net海底地震計の観測波形を用いて、海徳海山の火山活動に伴う海中伝搬波の検出を試みた。
使用したデータは岩瀬(2023)と同じく、S-netの各観測点を構成する2種類の地震計のうち速度計を使用し、もう一方の地震計である加速度計で計測される重力の方向をもとに鉛直成分を算出した波形データである。解析対象期間は、Tanaka et al. (2023)を参照し、海徳海山からの海中伝搬波が検出される可能性の高い2022年9月1日とした。速度計の鉛直成分算出のための重力成分は、9月1日00:00 JSTから3時間の加速度計データを時間平均して求めた。
まず、海徳海山の位置に海中伝搬波の音源があると仮定し、岩瀬(2022a)と同様、観測点毎に伝搬時間分時間軸をずらした地震波形のスペクトログラムの対比を実施したが、海徳海山の火山活動に対応する信号は検出できなかった。次に岩瀬(2022b)の結果に基づき5-10 Hzのバンドパス・フィルタを原波形に適用した後、伝搬距離順に並べた図を作成した。なお、伝搬時間は伝搬距離(大円距離)を、岩瀬(2022b) において海中伝搬波の音速として推定した1472 m/sで割って求めた。
作成した図の例をFig. 1に示す。微弱ながら12:20頃を中心にほぼ直線状に縦に並ぶ信号が確認でき、海徳海山の火山活動に対応する信号と判断される。海徳海山では福徳岡ノ場のような顕著な噴火活動は確認されていないが、同程度の火山活動でもS-netで検出可能なことを示している。

謝辞
本研究の実施に際し防災科学技術研究所の公開データ(https://doi.org/10.17598/NIED.0007)を利用しました。伝搬距離の計算には国土地理院のサイト(https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html)を利用しました。

参考文献
海上保安庁(2022), https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r4/k220823/k220823.pdf
岩瀬(2023)，JpGU2023，SVC34-05
Tanaka et al. (2023), JpGU2023, SVC34-P01.
岩瀬(2022a)，JpGU2022，SVC31-21
岩瀬(2022b)，日本地震学会2022年度秋季大会，S02-02

© The Seismological Society of Japan

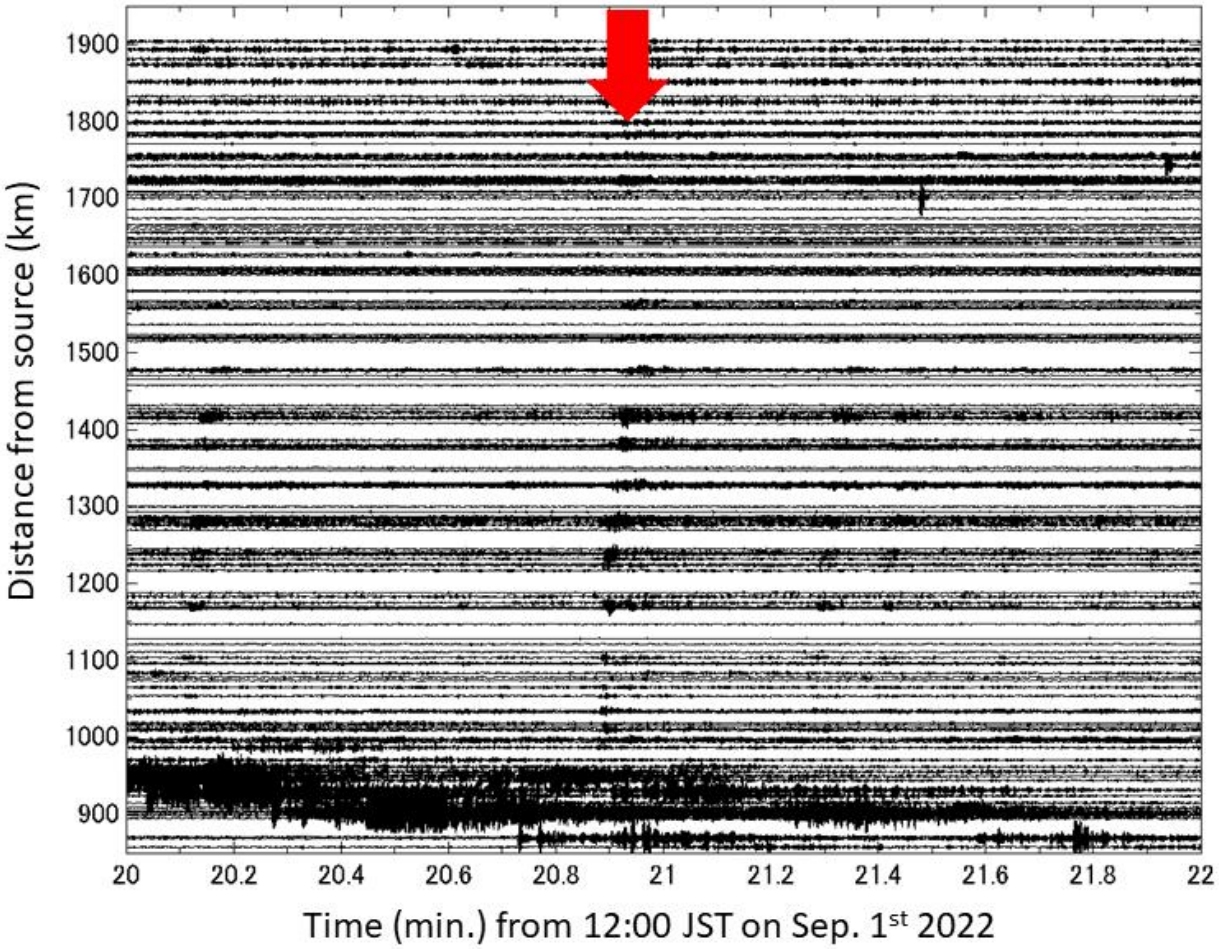


Fig. 1 Profiles of waveform of S-net stations aligned by distance. Time in horizontal axis is projected in the source time.

© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room B F201

[S02] AM-2

chairperson:Masayuki Tanaka(MRI, JMA), Shuhei Tsuji

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

[S02-06] Vibration Monitoring in the Off-Tonankai Cable by Distributed Acoustic Sensing

*Masayuki TANAKA[1] (1. Meteorological Research Institute, JMA)

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

[S02-07] Passive seismic data in surface-deployed DAS measurement with helically wound fibers and straight fibers

*Shogo Masaya[1], Ryohei Naruse[1], Yuki Kobayashi[1] (1. INPEX CORPORATION)

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

[S02-08] A comparative study of seismic data measured by surface-deployed DAS with two interrogators and different cable deployment conditions

*Ryohei Naruse[1], Shogo Masaya[1], Yuki Kobayashi[1] (1. INPEX Corporation)

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

[S02-09] Development of the Earthquake Early Warning Algorithm Utilizing DAS with Optical Fiber Cables along the Shinkansen Railway

*Satoshi KATAKAMI[1], Eiichiro Araki[2], Narumi Takahashi[3], Shunta Noda[1], Masahiro Korenaga[1], Naoyasu Iwata[1] (1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S02-10] Automatic arrival time picking of coda waves recorded by DAS seismic observation

*Shigeki Horiuchi[1], Yuko Sato[1], Yoshiharu Hirayama[2], Tsutomu Yamate[2], Satoshi Ikui[2], Minoru Yoshida[2], Yasuhiro Asai[3], Yoshio Nakajima[3], Yoichiro Naito[3], Hiroyuki Fujiwara[4] (1. Home Seismometer Corporation, 2. Hakusan Corporation, 3. Tokyo Power Tecnology, 4. NIED)

Vibration Monitoring in the Off-Tonankai Cable by Distributed Acoustic Sensing

*Masayuki TANAKA[1]

1. Meteorological Research Institute, JMA

分布型音響センシング（DAS; Distributed Acoustic Sensing）の技術を用いた地震観測事例は国内でも最近数多く見られるようになった。DASの特徴としては、①一度の測定でファイバ全域にわたる稠密な一次元のひずみ速度計測が可能である。②光ファイバに入射する光パルス幅により決まる空間分解能があり、光パルス幅より狭い範囲の変化は平均化された値で観測されるため、点の計測は困難である。③ファイバ内の不純物や欠陥により発生する散乱光は微弱な光であり、ノイズ低減のために加算平均等の処理が行われている。④サンプリング周波数により決まる距離限界がある。⑤ファイバの伝送損失により、より遠方の散乱光の信号強度は装置の近傍よりも弱く、最大測定可能距離は存在し、かつより遠方ほど測定精度が劣る。等があり、DASで観測されるデータの物理量は、地震計で得られる物理量とは異なるひずみ速度で、かつある区間の平均化された値である。

昨年までは静岡県浜松市天竜区船明地区にあるトンネル内に敷設したシングルモード4芯1kmの光ファイバを使い、自然地震の観測及び加振器を用いた人工振動で振幅の線形性や安定性を調べた。今年からは静岡県御前崎市から沖合に南海トラフに沿って敷設されている東南海沖ケーブルのダークファイバを使って観測を行っている。東南海沖ケーブルは昨年12月に御前崎沖約４km付近でケーブルが損傷するトラブルがあり、現在、観測可能なDAS装置から約5kmの区間で観測を行っている。陸上局から約1kmの区間のケーブルは陸上で概ね道路下に敷設されており、約1kmから先は海底に敷設されている。陸上では車の往来、海域では天候対応する風浪などに起因する様々な振動を捉えている。当日は東南海沖ケーブルでのDAS観測の現状を紹介する。

© The Seismological Society of Japan

Passive seismic data in surface-deployed DAS measurement with helically wound fibers and straight fibers

*Shogo Masaya[1], Ryohei Naruse[1], Yuki Kobayashi[1]

1. INPEX CORPORATION

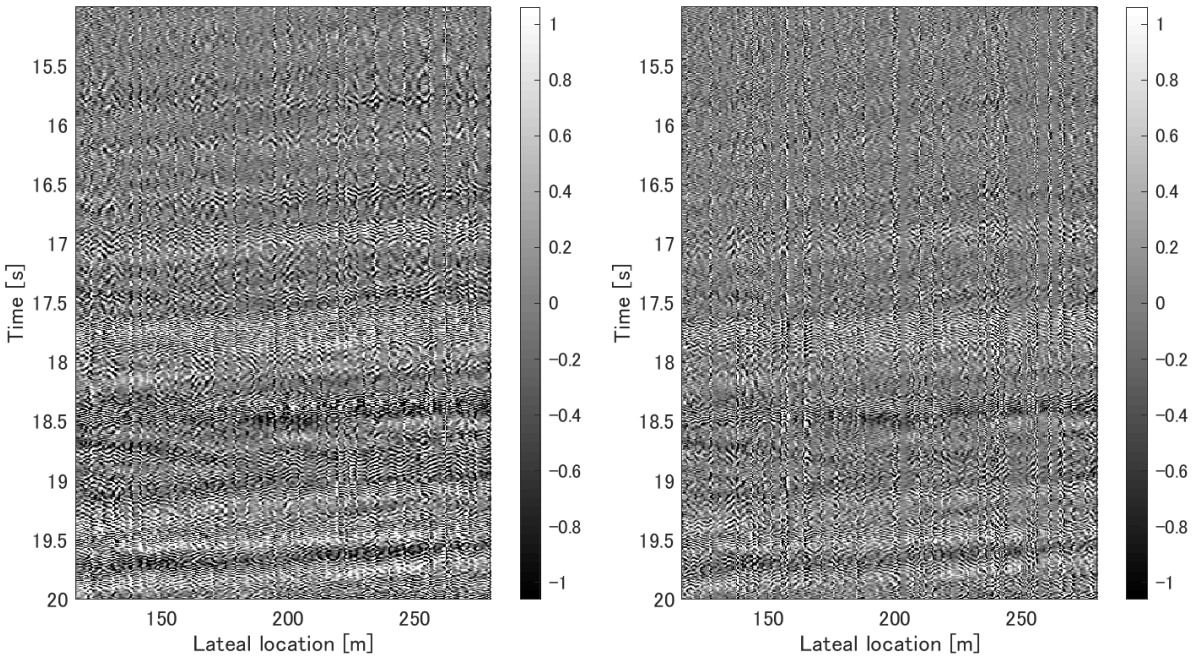
近年、distributed acoustic sensing（以下DAS）は、従来の地震計等のセンサーに基づく観測システムと比して高密度な観測システムを実現し得る、新たなセンシング技術の1つとして注目されており、地震、火山、地下探査を含めた様々な分野に応用が検討されている（例えば[1-3]）。DAS計測に用いる光ファイバケーブルの利用・設置方式も複数検討されており、地震や火山の分野では、陸海問わず、通信用光ファイバケーブルなどの既設のファイバ（いわゆるdark fiber）の利用に関する研究が多く報告されており（例えば[4-5]）、資源開発の分野では、地下モニタリングの目的で、掘削した坑井内に新たに敷設する光ファイバケーブルを用いたDAS計測が普及し始めている（例えば[3]）。
Dark fiber含め、地表付近に設置された光ファイバケーブルを利用するDAS計測における課題の1つとして、DASで計測されるエネルギーは、ファイバの軸方向の成分が、その垂直方向の成分と比べて支配的となるため、地表に対して鉛直方向に伝搬する波を計測することが制約となる。この課題を克服し、鉛直成分のエネルギーも十分に計測することが可能となれば、計測方向の依存性が低減し、例えば、地震探査の反射波の記録の改善が期待できる。
この課題の解決を目指すアプローチの1つとして、ファイバを直線ではなく螺旋状の形状とすることにより、軸方向に対して垂直方向の感度を向上させる、螺旋型光ファイバケーブルが提案されている[6]。しかし、このアプローチにも課題があり、新たに専用の光ファイバケーブルを敷設する必要があり、新たな敷設が必要ないdark fiberと比べるとコストが増大することが挙げられる。従って、目的に依って利用が限定される可能性があり、地表に螺旋型光ファイバケーブルを敷設して実施したDAS計測に関する先行報告は、世界的にもまだ数少ないため[7-8]、その有効性は十分に議論されていないと言える。
その有効性の検証を目的として、本研究では、新潟県で螺旋型および直線型の光ファイバケーブルを敷設して、地下探査に併せてDAS計測を実施した。本発表では、当DAS計測における、地震および微動（表面波）の計測結果に焦点をあてて、双方のファイバで取得された記録の比較について報告する。

図：新潟県に敷設した直線型（左図）および螺旋型（右図）の光ファイバケーブルを用いたDASにより計測された、千葉県東方沖地震（2023年5月26日19時3分）の一部記録の比較例。図中の17秒付近がP波に相当する。尚、直線型と螺旋型のケーブルは全長に差異があるため、横軸はリサンプリングによりサンプル数を同一としている。

参考文献
[1] N. J. Lindsey et al., “Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields,” Geophysical Research Letters, 44, 11792-11799 (2017).
[2] T. Nishimura et al., “Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system,” Scientific Reports, 11, 6319 (2021).
[3] T. M. Daley et al., “Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring,” The Leading Edge, 32, 699-706 (2013).
[4] J. B. Ajo-Franklin et al., “Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broad-band Seismic Event Detection,” Scientific Reports, 9, 1328 (2019).
[5] Z. Zhan et al., “Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables,” Science, 371, 931-936 (2021).
[6] B. N. Kuvshinov, “Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves,” Geophysical Prospecting, 64, 671-688 (2016).

© The Seismological Society of Japan

[7] A. Bakulin et al., “Evaluating HD weathering surveys and surface seismic with DAS in a sand dune environment,” in Proceedings of 2nd International Meeting for Applied Geoscience & Energy, 621–625 (2022).



© The Seismological Society of Japan

A comparative study of seismic data measured by surface-deployed DAS with two interrogators and different cable deployment conditions

*Ryohei Naruse[1], Shogo Masaya[1], Yuki Kobayashi[1]

1. INPEX Corporation

光ファイバーケーブルをセンサーとして用いるDistributed Acoustic Sensing（以下DAS）計測は、高密度なデータ取得が可能である利点により、地震計等に基づく観測システムと比して空間分解能を向上できるセンシング技術として注目され、地下探査、地震や火山による振動のモニタリングの分野でも広く活用され始めている（例えば[1-3]）。また、DAS計測に用いる光ファイバーケーブルの敷設方法は複数検討されており、近年、地震・火山の分野では、いわゆるdark fiberと呼ばれる通信用光ファイバーケーブルなどの既設のファイバーを利用したDAS関する研究が多数報告されている（例えば[4, 5]）。しかし、dark fiberは計測場所を自由に選択できない等の制約もあり、新たに地表に光ファイバーケーブルを敷設してDAS計測を行う事例も報告され始めている（例えば[6]）。

他方で、DAS計測においては、光ファイバーケーブルに対して光波出力および後方散乱光解析を担う機器、いわゆるインテロゲーターが重要な要素の1つとして考えられ、例えば、バイブレータを用いたvertical seismic profileのテストにより、使用するインテロゲーターの差異がDAS記録の影響を与えることが示唆されている[7]。また、新たに敷設する場合の光ファイバーケーブルの敷設条件についても複数の方法による記録の違いについて言及されているが[6]、地震波の実データを用いた先行研究は限られる。

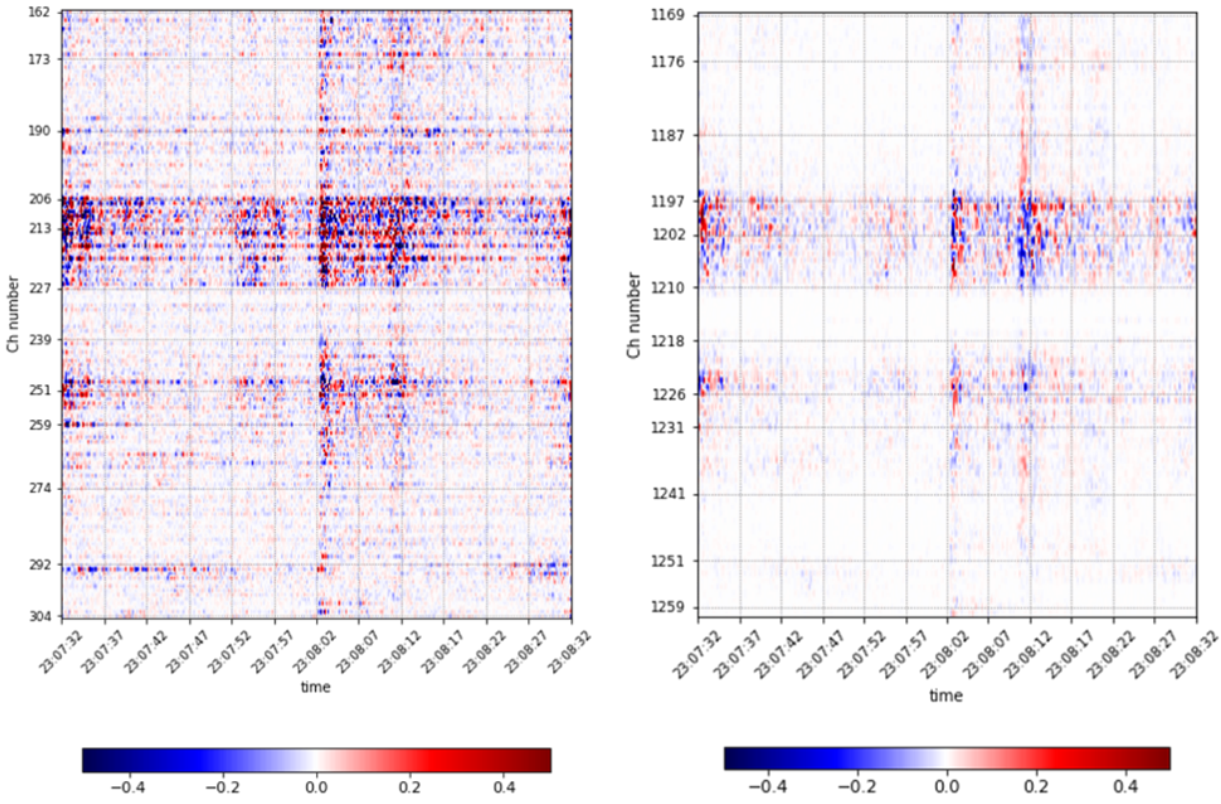
本研究では、地表でのDAS計測における、2台のインテロゲーターおよび異なるケーブルの敷設条件によるDAS計測記録の違いを検証するため、2芯のファイバーが挿入された光ファイバーケーブルを約70mの区間で地表に敷設し、それぞれの芯に異なるインテロゲーターを接続して同時・同地点の連続DAS計測を行った。光ファイバーの敷設条件としては、10cm程度の深さで埋設、地表に敷設してペグにより一定間隔で固定、ペグに加えて上にプロテクターを設置、の3パターンの区間を用意した。本発表では、当DAS計測において取得した地震の計測結果を用い、インテロゲーターの差異、および光ファイバーケーブルの敷設条件の差異から生じる記録の違いについて報告する。

図：INPEX技術研究所敷地内にて約70m区間に光ファイバーケーブルを1往復（全長約160m）させDAS計測した結果
2023年4月25日23時7分に東京湾で発生したM2.9の地震記録

参考文献

[1] T. M. Daley et al., “Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring,” The Leading Edge, 32, 699-706 (2013).
[2] N. J. Lindsey et al., “Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields,” Geophysical Research Letters, 44, 11792-11799 (2017).
[3] T. Nishimura et al., “Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system,” Scientific Reports, 11, 6319 (2021).
[4] J. B. Ajo-Franklin et al., “Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broad-band Seismic Event Detection,” Scientific Reports, 9, 1328 (2019).
[5] Z. Zhan et al., “Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables,” Science, 371, 931-936 (2021).
[6] J. E. Monsegny et al., “A comparative study of data from different DAS interrogators,” SEG Technical Program Expanded Abstracts, 483-487 (2021).
[7] N. Harmon et al., “Surface deployment of DAS systems: Coupling strategies and comparisons to geophone data,” Near Surface Geophysics, 4, 465–477 (2022).

© The Seismological Society of Japan



(a) Interrogator A (a) Interrogator B

2023/4/27 23:07:51.7 M2.9 @Tokyo Bay

© The Seismological Society of Japan

Development of the Earthquake Early Warning Algorithm Utilizing DAS with Optical Fiber Cables along the Shinkansen Railway

*Satoshi KATAKAMI[1], Eiichiro Araki[2], Narumi Takahashi[3], Shunta Noda[1], Masahiro Korenaga[1], Naoyasu Iwata[1]

1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

序章

新幹線の地震計で使われている早期地震警報（EEW）の地震諸元推定アルゴリズムは、単独観測点データから震源距離（Δ）やマグニチュード（M）などを推定している。この方式は、推定精度は落ちるが、複数点のデータを使うよりも早く警報を出すことができる。新幹線のEEWアルゴリズムは、沿線（20km毎）や海岸に設置された地震計で取得されるP波初動直後の短いデータ（通常1～2秒）を用いて地震諸元を推定する。しかしながら、震央距離は倍半分、震央方位は±30°、マグニチュードは±0.6程度の推定誤差があり、出力される警報は単独観測点の推定結果に依存する。 Distributed Acoustic Sensing（DAS）は、光ファイバーケーブル内を進む後方散乱レーザーパルスの位相の変化を利用して、光ファイバーケーブルに沿った歪み変化を計測する。本技術は数m毎にデータを計測できるため、ほぼ同時刻（例えば0.5秒以内）に地震波を複数点で検知することが可能である。したがって、各点のデータを用いて推定された地震諸元の結果を統計的（例えば、平均や中央値など）に評価することができ、警報の高精度化に繋がる可能性がある。本研究では、新幹線沿線の既設光ファイバーケーブルに適用したDASを用いて取得された地震データを使用し、地震波検知後、迅速に地震諸元を推定する手法を紹介する。

観測

九州新幹線沿線の既設光ファイバーケーブルにDASを適用し自然地震観測を実施した。観測期間は、2022年1月から2月および2023年2月から3月であり、2022年は新八代駅から新大牟田駅の約75km、2023年は新八代駅から久留米駅の約100kmの既設ケーブルを使用した。観測範囲には、橋梁・高架橋・トンネルなど様々な鉄道構造物があり、橋梁や高架橋は線路横のトラフ内に、トンネル内では壁面に光ファイバーケーブルが設置されている。DASはAPセンシング社のものを使用し、interrogatorを最南端の新八代駅に設置した。

手法

本発表では、リアルタイムで震源距離とマグニチュードを推定し、鉄道沿線から何km離れた地点でどの程度のマグニチュードの地震が生じたか算出する手法の開発を実施した。また、早期警報に使用するために、計算コストをできるだけ抑えることにも注意した。Yin et al. (2023) において、DASで計測されたひずみ速度と、マグニチュードおよび震源距離の回帰式が示されている。九州新幹線沿線のDAS観測で取得した地震データの最大ひずみ速度と、震源距離、気象庁マグニチュードの値を用いて、上記回帰式のパラメータを設定し、九州新幹線沿線のDASデータにおけるマグニチュードスケーリング式を取得した。次に、震源距離をリアルタイムで推定するために、STA/LTAを基本としたP波到来時刻およびS波到来時刻をロバストにリアルタイムで決定する手法を開発した。読み取ったS波とP波の到来時刻差から震源距離を推定する。また最初にP波を検知したチャンネルから両側数キロのデータのみを用いることで即時性を維持した。

結果・考察

観測期間中に発生したMj2.5以上、震源距離150km以下で発生した地震データ（地震数は10）に対し開発した手法を適用した。DASで推定したマグニチュード（M_{das}）と気象庁マグニチュードを比較すると、今回対象とした地震では、2022年1月22日に日向灘で発生したMj6.6の地震を除き、±0.5程度の誤差でM_{das}を推定していることがわかった。Mj6.6の地震のM_{das}の推定結果は、S波の到来時刻が正確に決定できていないことで震源距離が小さく求まり、M_{das}を大きく過小評価していた。これは、cycle skippingの影響でP波とS波のひずみ速度値の差が小さかったことが原因である。今後は、追加観測を実施することでDASによる地震データを増やすことや、P波のみの情報で地震諸元を推定する手法の開発等に注力する。

© The Seismological Society of Japan

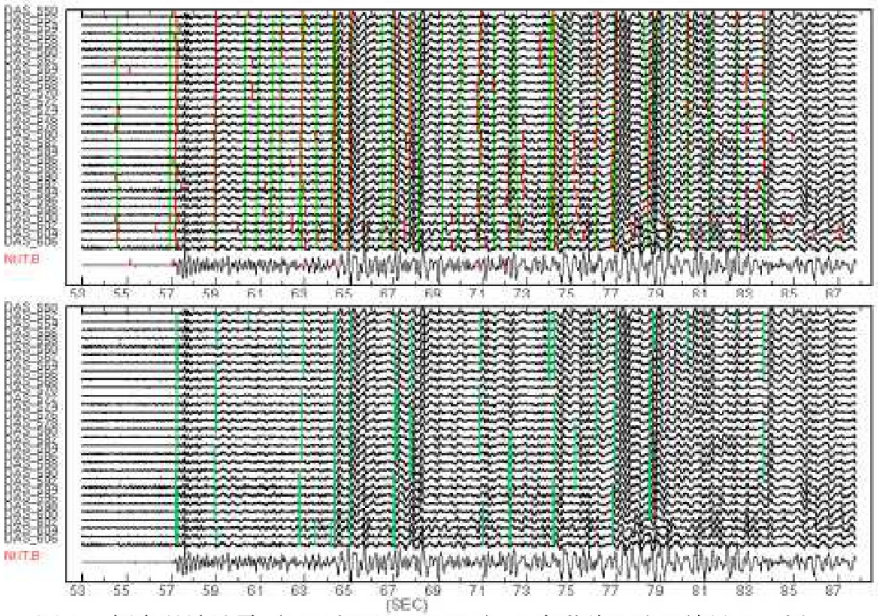
Automatic arrival time picking of coda waves recorded by DAS seismic observation

*Shigeki Horiuchi[1], Yuko Sato[1], Yoshiharu Hirayama[2], Tsutomu Yamate[2], Satoshi Ikui[2], Minoru Yoshida[2], Yasuhiro Asai[3], Yoshio Nakajima[3], Yoichiro Naito[3], Hiroyuki Fujiwara[4]

1. Home Seismometer Corporation, 2. Hakusan Corporation, 3. Tokyo Power Tecnology, 4. NIED

１．はじめに　光ファイバーケーブル全体をセンサーとするDAS（分散型音響計測）は，ケーブルに沿って、数m間隔の地震観測を行うことができ、この数年で観測事例が急速に増えており、従来の地震観測がDASに置き換わる可能性もあると指摘されている。DASによる観測は、高密度、多チャンネルであることから、相関の高い後続波が観測され、初動のみならず、後続波を用いることにより、詳細な地下構造の推定が可能であると期待されている。本報告では、DASにより観測されるP波、S波の他に、後続波の到着時刻を自動で読み取るための手法開発を行ったので報告する。 **２．データ**　東京パワーテクノロジーと白山工業は、新潟工科大学の深井戸に、光干渉法を利用した光センサーを設置し、地震観測を行っており（藤原他、2023）、2022年7月27日ー8月4日の期間には、DASを用いた観測も行った。本解析では、DASによる観測データを用いた。DASによる観測の、観測点間隔、ゲージ長、チャンネル数、サンプリング間隔は、それぞれ、3.19m、6.38m,637点、1kHzで、最深点の深さは1977mである。本解析では、気象庁一元化震源による予測震度が、-1.0以上の地震の波形を切り出して用いた。このデータセットには、マグニチュード3.4の能登半島の地震や、マグニチュード5.6の、福島県沖の地震等が含まれている。 **３．コーダ波到着時刻の読み取り**　堀内他(2019)は、数ｍから数10ｍ離れた２地点の、観測波形のconvolutionを連続的に計算（以下convolution波形と呼ぶ)すると、到着時刻の読み取りや、地下構造推定に適した記録が得られると指摘している。コーダ波の到着時刻読取りでは、convolution波形に、AGC(Auto Gain Control) フィルターを通したものを用いた。AGCフィルターの振幅が閾値(*Cagc*)を超えた場合に、その時刻を到着時刻の初期値とし、堀内他（2009）による到着時刻自動読み取り手法を用いて、読み取りを行うようにした。そして、到着時刻前後の、convolution波形のS/N（*SNc*）と、生波形のそれ（*SNr*）を計算し、両者が閾値を超えた場合に、解として採用するようにした。採用した閾値は、*Cagc*=5.0, *SNc*=3.0, *SNr*=1.3 である。 **４．見かけ速度と到来時刻の推定** 図１．に示すように、上述の方法を用いることにより、多数の後続波の到着時刻が読み取られるようになった。地下構造の推定では、これらの、読み取りデータを用いて、顕著で、空間的に連続性のあるコーダ波の見かけ速度と、オフセット時刻を求める必要がある。図1. に示されているように、空間的に連続性のあるコーダ波は、多数存在することから、個々の波群について、それに対応する到着時刻を自動的に選び、見かけ速度と、オフセット時間を計算する必要がある。そこで、以下の方法で、これらを求めるようにした。ｋ番目のコーダ波群のi観測点の到着時刻*Pki*と,理論走時*Tki*との差*Eki*を、 $Eki=Pki-(Tk + Hi/Vk)$ (1) と置く。Hiはi観測点の深さである。 $Sc=\Sigma\exp(-Eki^2/c^2)$ (2) として、*Sc*が最大となるオフセット時刻*Tk*　と、見掛け速度*Vk*を数値的に求めるようにした。(2)式の*Eki*が *c* に比べ大きい場合は、expの値が小さくなり、(2)式の最大値は、特定の見掛け速度と、オフセット時間に一致する読み取りデータを用いて、解を求めることに対応している。コーダ波群は多数存在することから、解が求められたら、その解を満足する*Pki*を削除し、再度、(2)式を最大とする解を求め、これを繰り返すことにより、全ての波群についての、解を求めるようにした。図１に示す直線は、求められた解をプロットしたものである。（２)式の*C*の値は、経験的に0.1秒を与えた。 ３．で示した方法で、コーダ波の読み取りは行えるが、波形相関を用いると、更に、高精度の読み取りが可能である。そこで、（２）式で求められた、複数の見掛け速度と、オフセット時間を満足する時刻の波形を切り出し、数10m間隔毎に、センブランスを計算し、自動読み取りデータの修正を行うようにした（図１）。 **５.結論**　堀内他（2019）によるconvolution 波形を用いて、DASで観測されるコーダ波の到着時刻を自動で読み取るための手法開発を行い、精度の高い読み取りが行えることが示された。波形相関を用いて、読み取りデータを修正することにより、コーダ波の到着時刻データが、詳細な地下構造推定に利用可能になると期待される。 謝辞：本研究での地震観測は、新潟工科大学の深井戸を使わせて頂きました。

© The Seismological Society of Japan



55

図１．福島県沖地震（2022年8月4日M5.6）の自動読み取り結果の一例。
上　赤線：自動読み取り到着時刻、緑線：理論、
下　緑線：相関による到着時刻

© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 1:30 PM - 2:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 4:30 AM - 5:30 AM UTC | Room B F201

[S02] PM-1

chairperson:Satoshi Katakami

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

[S02-11] Development of seafloor deep borehole long-term observation system and the deployment plan in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI[1], Yuya Machida[1], Takashi Yokobiki[1], Shuhei Tsuji[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Shuhei Nishida[1], Satoru Baba[1], Kan Aoike[2], Yasuyuki Nakamura[1], Keisuke Ariyoshi[1], Takane Hori[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC IMG, 2. JAMSTEC Mare3)

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

[S02-12] Development of seafloor borehole fiber optical strainemter

*Yuya MACHIDA[1], Eiichiro Araki[1], Yokobiki Takashi[1], Tomokazu Saruhashi[1], Shuhei Tsuji[1], Hiroyuki Matsumoto[1] (1. JAMSTEC)

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

[S02-13] Initial test of borehole fiber optic strainmeter at Kamioka Mine

*Shuhei TSUJI[1], Eiichiro Araki[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Yuya Machida[1], Takashi Yokobiki[1] (1. JAMSTEC)

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

[S02-14] Analysis of long-term pore pressure data acquired at a 20 m borehole in the Kamioka Mine

*Hiroyuki MATSUMOTO[1], Yuya Machida[1], Shuhei Tsuji[1], Takashi Yokobiki[1], Keisuke Ariyoshi[1], Eiichiro Araki[1] (1. JAMSTEC)

Development of seafloor deep borehole long-term observation system and the deployment plan in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI[1], Yuya Machida[1], Takashi Yokobiki[1], Shuhei Tsuji[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Shuhei Nishida[1], Satoru Baba[1], Kan Aoike[2], Yasuyuki Nakamura[1], Keisuke Ariyoshi[1], Takane Hori[1], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC IMG, 2. JAMSTEC Mare3

南海トラフ沈み込み地震発生帯の熊野灘にIODPで設置された海底深部長期孔内観測システムによって、浅部沈み込みプレート境界域で発生するゆっくり滑りの発生が明らかとなった。海底ケーブルに接続した3点の長期孔内観測システムにより、浅部ゆっくり滑りのモニタリングがなされるようになった。一方、南海トラフの広域では、GNSS/Aなどにより、ゆっくり滑りの発生が示唆される地域もあり、VLFE等からゆっくり滑りの発生も示唆される一方、高感度かつリアルタイムな海底地殻変動観測点がないため、浅部ゆっくり滑りの発生時系列は広い領域で今なお不明である。 そこで、私たちは、広域での浅部ゆっくり滑りの発生を捉えることを目指し、熊野灘でのIODP長期孔内観測システムでの観測の経験を踏まえ、広域で浅部ゆっくり滑りを捉えることが期待できる新たな長期孔内観測システムを開発した。現在、紀伊水道沖、四国沖、日向灘のゆっくり滑りの発生が期待できる地域計3か所への設置展開を年次的に計画しており、紀伊水道沖への最初の設置とDONETへの接続・連続観測開始を2023年11月「ちきゅう」航海～2023年12月新青丸航海での実施を予定している。最初の設置にあたり、ゆっくり地震の発生状況、地殻構造探査データや、海底調査データを検討し、掘削点をDONET-2Fノードの南方およびDONET-2Gノードの近傍に選定し、「ちきゅう」航海の実施へ向けて現在準備を進めている。 開発した長期孔内観測システムは、海域で高感度にゆっくり滑り、VLFE, 低周波微動～地震を捉えるため、海底下の堆積層500m程度まで掘削した孔内で間隙水圧と歪を広帯域で計測するものである。間隙水圧はこれまで熊野灘に設置したものと同様の仕組みであるが、歪は、孔内にセメント固定したコイル状の200m長の光ファイバーケーブルの伸縮を基準長光ファイバーと光干渉法により比較計測する方式の「孔内光ファイバー歪計」を新たに開発・採用した。この新開発の孔内光ファイバー歪計によって、微小地震～ゆっくり滑りに伴うゆっくりとした歪変動を高感度に観測できると同時に、巨大地震のような大きな歪変動に対しても振り切れず忠実に観測が可能となる。光ファイバー歪計は、孔内には光ファイバー部品のみを配置することによって、耐故障性を高めた。孔内の同一測定区間には温度応答の異なる同等の歪計用光ファイバーが2式孔内設置され、冗長構成とするとともに、計測歪への孔内温度変化の影響を取り除くことができるようにした。孔内間隙水圧および孔内光ファイバー歪計は、DONET孔内インターフェースを通じDONETに接続することで、長期・リアルタイム観測を行う。 今回の開発では、孔内光ファイバー歪計の計測区間に並行した、光ファイバーセンシングを行える光ファイバーも巻線した。この光ファイバーは200mの外界歪と温度変動に応答する部分と400mの温度変動のみに応答する部分から構成されており、海底から孔内へ接続する光ファイバーと合わせ、DAS（地震）やTW-COTDR（歪・温度）、DTS（温度）等の様々な方式で孔内光ファイバー計測が行えるものである。今後、「ちきゅう」や「新青丸」航海中、船上の光ファイバー観測装置を孔内ファイバーに接続し観測を試みる予定である。また、将来的には、海底で動作する光ファイバー観測装置を開発・設置し、連続的な光ファイバー観測を実施する計画である。 海底孔内への設置に先立ち、岐阜県神岡鉱山内に新たな海底長期孔内観測システムと同等の模擬観測システムの設置を2023年3月に実施し、現在試験検証観測を行っている。間隙水圧・孔内光ファイバー歪計による観測と並行して、DAS及びTW-COTDR技術による光ファイバーセンシングを実施し、光ファイバーの外界歪に応答する部分で光ファイバー歪計と同等の地震・歪変動の観測が行えるほか、温度のみに応答する部分により、周囲温度変動の高分解能な計測が行えることが確認できた。また、TW-COTDRでの10cm分解能の稠密な観測データからは、光ファイバーセンシングによって孔内多成分歪の観測が実施しうることを示す結果が得られた。

© The Seismological Society of Japan

Development of seafloor borehole fiber optical strainemter

*Yuya MACHIDA[1], Eiichiro Araki[1], Yokobiki Takashi[1], Tomokazu Saruhashi[1], Shuhei Tsuji[1], Hiroyuki Matsumoto[1]

1. JAMSTEC

2023年11月に南海トラフにおけるゆっくり滑りの広域把握、および高精度化を目的として紀伊半島沖に長期孔内観測システムを設置する予定である。この観測システムは新規で開発を行った孔内光ファイバ歪センサと、熊野灘の長期孔内観測システムで設置実績のある間隙水圧計で主に構成される。孔内光ファイバひずみセンサは、センシング部の200mファイバと基準長200mファイバ間の光路長の変化を光干渉方式により比較計測することで、200mの光ファイバの長さの変化を1nmの分解能で観測することを実現する。センシング部は円筒形のステンレス管に光ファイバケーブルを螺旋状に巻き付けたものである。このセンシング部は孔内に設置後にはセメンチングされ、周囲の地殻変動を計測することができる。孔内光ファイバ歪センサでは、光干渉計測を行う光ファイバについて2種類の温度係数の異なるシングルモード光ファイバを用いている。これは地殻変動による変化と温度変化による変化を切り分けることを目的としており、仮に水の流れなどによる変化が計測された場合は光ファイバの温度係数に応じた変化量を示すことを利用したものである。ゆっくり滑りによる歪変化は非常に微小なものであるため、温度による変化と予め切り分けできる機構は重要となる。また設置時にはセメンチングを行うが、セメントによる影響は数か月から数年にわたり影響があることが考えられる。2023年3月からは神岡鉱山内20m孔において、孔内光ファイバの評価を実施するために孔内光ファイバ歪センサの実証試験装置を設置し、データ評価を行っている。実証試験装置の記録では、設置直後より指数関数と線形成分による長期的な変化を示しており、海底孔内掘削孔に設置時においてもこの影響が予想される。このため現場で使用するセメントを利用して2023年9月から10月にかけて評価試験を実施する予定である。本発表では光ファイバケーブルの温度応答評価、およびセメント試験に関して議論を行う。

© The Seismological Society of Japan

Initial test of borehole fiber optic strainmeter at Kamioka Mine

*Shuhei TSUJI[1], Eiichiro Araki[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Yuya Machida[1], Takashi Yokobiki[1]

1. JAMSTEC

地殻変動観測のための新たな海底深部長期孔内観測システムが2023年秋に、地球深部探査船「ちきゅう」によって紀伊水道沖の南海トラフに設置される予定である。この長期孔内観測システムは、孔内計測用に新たに開発した光ファイバー歪計と従来の海底深部長期孔内計測システムでも採用され、実績のある間隙水圧計(例えば、Araki et al., 2017)により構成されている。本研究では、光ファイバー歪計について、その特性を把握するために神岡鉱山で行っている陸上試験の結果を報告する。
孔内計測用の光ファイバー歪計は、周辺地殻と接するセンシングファイバーと耐圧容器内に格納される基準ファイバーから構成され、両ファイバーの長さの差をマイケルソン干渉を用いて精密に計測することにより歪を測る。センシングファイバーは円筒形のフレーム上の約2mの区間に巻き付けられており、掘削孔の孔壁とはセメントで固着させる。そのため、センシングファイバーは鉛直方向に中心軸を持つらせん形状に敷設される。この光ファイバー歪計は機械的な駆動部がないため、長期的な運用に関して信頼性が高いことが期待される。さらに、センサーがらせん形状であるため、直線状の同様の歪計と比較して様々な方向の歪みを計測することができると期待される。一方、従来の地震・地殻変動計測機器とは特性が異なるため、観測される物理量を理解する必要がある。
特性を把握するため、岐阜県の神岡鉱山にあるテストサイトで、長期孔内観測システムで利用する測器と同等の模擬観測システムを用いた試験観測を行っている。模擬観測システムは、2023年3月9日にテストサイト内の深さ約20mの掘削孔内に設置された。テストサイトでは、広帯域地震計(CMG3TC, 固有周期360s)や、南北方向に直線状に展張された光ファイバー歪計も同時に観測している。
試験観測では、模擬観測システムによって脈動や遠地地震、近地地震を観測し、広帯域地震計や直線状の歪計による観測と比較することができた。ノイズのパワースペクトルを計算したところ、脈動のピークが確認でき、その周波数帯域は、直線状の光ファイバー歪計と一致していた。一方、振幅は直線状の光ファイバー歪計より大きかった。これは、直線状の歪計が展張方向の歪成分を計測するのに対し、模擬観測システムのらせん状の光ファイバー歪計は様々な方位の歪が合成されたものを計測しているためと考えられる。遠地地震について、観測期間内に起きた最大の地震(2023年5月19日にLoyalty Islandsの南東で発生した地震, M_W=7.7)の直達S波を、200秒から100秒の長周期に注目し、波形を比較した。その結果、模擬観測システムの歪波形の振幅は直線状の光ファイバー歪計の歪波形の振幅より約1.2倍大きく、その形状は広帯域地震計の東西・南北成分の速度波形の特徴が混ざって見られた。近地地震について、2023年3月12日から2023年6月23日までの期間について、気象庁の日々の震源リストから、テストサイト周辺100km四方に震源を持つ地震の震源時刻を取得し、観測波形でP波の立ち上がりを読み取ることができるか調べた。その結果、実証試験装置は333個、広帯域地震計は303個の地震についてP波初動を読み取ることができ、広帯域地震計では確認できない微小な地動もとらえることができることが分かった。一方、広帯域地震計では読み取れたが模擬観測システムでは読み取ることができなかった地震も存在していた。
今後はこれらの観測記録をより定量的に比較し、模擬観測システムのらせん形状の光ファイバーの観測する物理量の推定を試みる予定である。

© The Seismological Society of Japan

Analysis of long-term pore pressure data acquired at a 20 m borehole in the Kamioka Mine

*Hiroyuki MATSUMOTO[1], Yuya Machida[1], Shuhei Tsuji[1], Takashi Yokobiki[1], Keisuke Ariyoshi[1], Eiichiro Araki[1]

1. JAMSTEC

2023年秋に地球深部探査船「ちきゅう」により南海トラフに設置が計画されている長期孔内観測システムは、光ファイバひずみ計と間隙水圧計などの観測機器から構成される。「ちきゅう」で設置する観測機器の性能検証のために、実証試験装置（プロトタイプ）を神岡鉱山の20 mボアホール内に設置して連続観測を行っている。神岡鉱山の位置は図1に示す。2023年3月に20 mボアホールの下部に光ファイバひずみ計を設置し、2023年4月にボアホール底部からの間隙水圧計測用の圧力ポートに圧力計（Paroscinetific, Inc., 8B7000-I-005）を接続して連続観測を開始した。長期孔内観測システムの光ファイバひずみ計はゆっくり地震や低周波微動などの広帯域の地動検出を目指しており、並行観測する間隙水圧計との比較は重要である。そこで、本研究では神岡鉱山の20 mボアホール内の間隙水圧計のデータを解析し、地震時の光ファイバひずみ計の観測と比較して両者の関係を考察した。

20 mボアホールの間隙水圧の計測は、ボアホール底部に存在する貯水セクションに圧力配管の片端を差し込んでもう一方の片端に圧力計を接続して、ボアホール底部から圧力計までの閉そく系内の圧力変化を計測する。観測開始から8月中旬までの間隙水圧計の観測データを図2に示す。約4ヶ月の連続観測データから、間隙水圧は概ね1ヶ月周期で変動していることが判明した。7月上旬から観測された圧力変動が最大で150 hPaあった。間隙水圧の観測と神岡鉱山で計測している湧水側溝水量の水位のデータを重ねてプロットした（図2）。両観測は1週間程度の位相差はあるがよく相関していることから、間隙水圧のバックグランド（静水圧成分）の主要な変動は20 mボアホール付近の地下水位の変化に起因すると推察される。

次に、間隙水圧計と光ファイバひずみ計で遠地地震と近地地震の発生時に観測されたデータを解析する。観測期間中に発生した遠地地震のうち最大規模のものは2023年5月19日02時57分（UTC、以下も同様）にRoyalty諸島で発生したM7.7の地震であった（図1(a)）。20 mボアホール内の光ファイバひずみ計と間隙水圧計で観測された1時間分の波形を図3に示す。間隙水圧計では、両振幅で1.5 hPaの圧力変動を観測した。観測波形には、P波、S波、Rayleigh波の各フェーズの到達がそれぞれ03時08分、03時16分、03時28分に明瞭に観測されている。光ファイバの位相とひずみの関係式から、図3のひずみが大きくなることは光ファイバが縮むことを意味する。間隙水圧が上昇すると光ファイバが縮むことになるので、光ファイバひずみ計は適切に間隙水圧を観測していることがわかった。

近地で発生した地震のうち、2023年5月5日05時42分に能登半島沖で発生したM6.5の地震が最大であった。地震時の20分間の観測波形を図4に示す。地震時に間隙水圧計で25 hPaの短周期の圧力変動を観測している。地震時に光ファイバひずみ計は、光ファイバが伸びる方向に約30 nanoひずみに相当するオフセットを観測した。一方、間隙水圧計のデータは間隙水圧が上昇する方向に約2 hPaオフセットしている。光ファイバひずみ計は、地震発生の1時間前にセメント固結に関連するステップ状のオフセットを観測しており、地震時のオフセットの解釈にはさらに考察が必要である。

両地震で観測されたデータのパワースペクトル密度を比較したものを図5に示す。卓越エネルギーの分布は、間隙水圧計と光ファイバひずみ計とで広帯域で調和的である。岩盤が非排水条件で均質等方弾性体と仮定すると、間隙水圧変化と体積ひずみ変化は比例する（加納ほか、2014）。地震時の光ファイバひずみ計と間隙水圧計の観測データから比例係数（伝達関数）を求めると、単位ひずみあたり5 GPa程度となる。既往の研究（竹本ほか、2003）から求まる神岡鉱山の岩盤の体積弾性係数は51.4 GPaなので、光ファイバひずみ計による計測は体積ひずみ変化に対して10倍程度の相違があることを示唆する。

謝辞： 神岡鉱山の水位データは、神岡鉱業（株）に提供していただいた。

© The Seismological Society of Japan

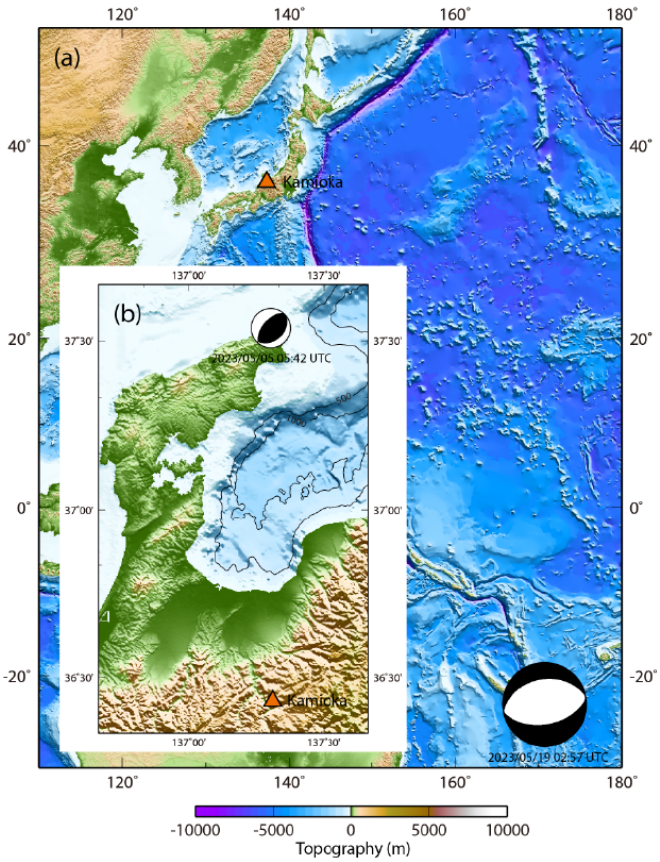


図 1：神岡鉱山と本研究の対象地震の位置。(a) Royalty Islands 地震（M7.7）、(b) 能登半島沖地震（M6.5）

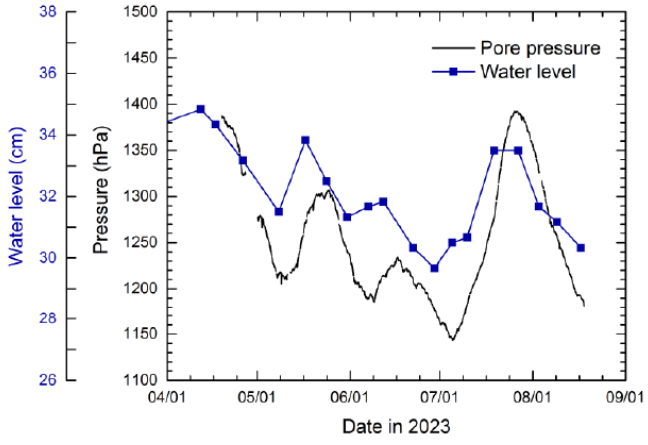


図 2：20 m ボアホールの間隙水圧観測と神岡鉱山での計測水位

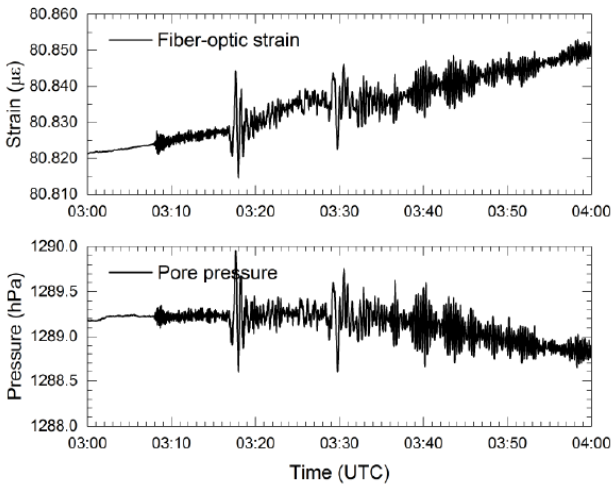


図 3：Royalty Islands 地震のときの光ファイバひずみ計と間隙水圧計の波形

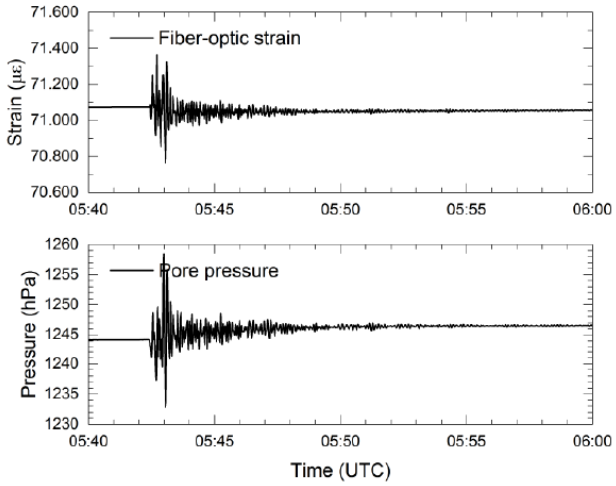


図 4：能登半島沖地震のときの光ファイバひずみ計と間隙水圧計の波形

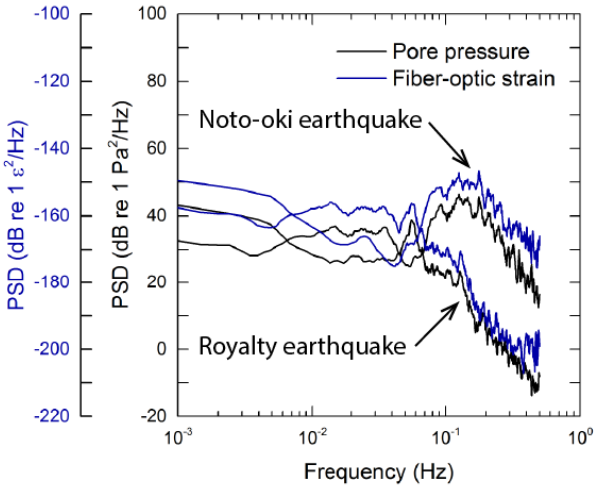


図 5：パワースペクトル密度の比較

© The Seismological Society of Japan

Room B | Regular session：S14. Earthquake prediction and forecast

Wed. Nov 1, 2023 3:15 PM - 4:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:15 AM - 7:15 AM UTC | Room B F201

[S14] PM-2

chairperson:Masajiro Imoto (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] Comments on the Brownian Passage Time distribution model for recurrent paleoearthquakes

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

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

[S14-02] Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the southwest Japan

*Taro Hara[1], Hiroaki Takahashi[2] (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S14-03] Application of an Earthquake Early Warning with the PLUM Method to the 2023 Türkiye-Syria Earthquake

*Masaru Morinaga[1], Masumi Yamada[2] (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S14-04] No Evidence of Magnitude Dependence in Earthquake Triggering

*Giuseppe Petrillo[1], Jiancang Zhuang[1] (1. Institute of Statistical Mathematics (ISM))

Comments on the Brownian Passage Time distribution model for recurrent paleoearthquakes

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

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

発生年が不確定となる古地震の時系列は認識論的不確定なデータと捉えることができる．このようなデータに基づく地震発生確率の算出方法はまだ確立されていない．我が国における先行研究のいくつかは，地震間隔の不規則性を過小評価している．認識論的不確定な時系列を更新過程の解析に用いる手法として，不確定な時系列から想定される地震間隔を全て用いたモデルパラメータの推定（尤度幾何平均推定値）を我々は提案している．関東M8クラス地震や太平洋沖型地震の解析おいて，この推定値に基づく地震発生確率（条件付き30年確率）の推移は，各地震発生期間から無作為抽出された多数の時系列による発生確率の平均値・中央値の推移とよく一致する．ここでは，この一致の根拠について考える．

地震間隔累積分布関数

無作為抽出時系列k（k=1,2,...,n）の地震間隔に階段関数の累積分布関数$S_k(t)$をあてはめる．同様に，全地震間隔に関する累積分布関数を階段関数$S_G(t)$とする．両者には式(1) (表1) の関係がある．これらの累積分布関数に対する相補累積分布関数（信頼度関数）を$R_G(t)$, $R_K(t)$で表すと，式(2)となる．経過期間tまで地震が発生していないという条件の下で，t以後の期間dt以内に地震が発生する確率（条件付き確率）$P_G(t,dt)$は，信頼度関数$R_G(t)$を用いて式(3)で表される．無作為抽出時系列の確率$P_k(t,dt)$も同様に表される．式(3)は$P_k(t,dt)$を用いて式(4)となる．式(4)は信頼度関数を重みとした$P_k(t,dt)$の加重平均となっている．実際の解析では，Brownian Passage Time分布を適合させているので式(4)は厳密には成立しないが，近似的に成立することが考えられる．また，式(4)の重みがほぼ同じと見なせる場合，式(4)から近似式(5)が得られ，上に述べた一致の根拠を得る．

実例

実例として，有馬高槻断層帯と関谷断層について，式(2)の成立と式(5)の関係をみる．図１において，条件付き確率の推移と地震間隔累積分布関数を比較する．図1aは有馬高槻断層帯について，累積分布関数，式(1)左辺の尤度幾何平均推定値（赤線）と右辺の無作為抽出時系列平均（青線）を比較している（下図）．ここでn=10000である．2つの分布には大きな乖離はない．上図では，条件付き確率の推移（期間120年確率），式(5)左辺の尤度幾何平均に基づく確率（赤線）と右辺の無作為抽出時系列平均確率（青線）を比較している．さらに，不規則性を表すパラメータ（ばらつき）に拠って無作為抽出時系列を1000個毎の10組に分け，各組の平均確率の推移を黒線で表す．経過年数2000～4000年で2～3%の乖離が認められるが，黒線の広がりに比べると小さい．

図1bに関谷断層の結果を示す．累積分布関数の比較（下図）では，尤度幾何平均推定値と無作為抽出時系列の平均で明確な違いが認められる．条件付き確率の推移比較（上図）では，両者の差は顕著である．10組に分けた各組の平均確率の推移は，経過年数4000年付近で15～90%に渡る．確率の平均値計算では信頼度関数値が10^{-4}以下の時系列を除外しているため，平均確率の推移（黒線）が途中で消える場合が生じている．

尤度幾何平均推定値に基づく確率の推移は，原理的には無作為抽出時系列による確率の平均値の近似といえるが，事例によって誤差の程度は異なっている．

© The Seismological Society of Japan

(1)	$S_G(t) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} S_k(t)$
(2)	$R_G(t) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} R_k(t)$
(3)	$P_G(t, dt) = \frac{R_G(t) - R_G(t+dt)}{R_G(t)}$
(4)	$P_G(t, dt) = \frac{\sum_{k=1}^{n} P_k(t, dt) R_k(t)}{\sum_{k=1}^{n} R_k(t)}$
(5)	$P_G(t, dt) \approx \frac{\sum_{k=1}^{n} P_k(t, dt)}{n}, \quad for\ R_k(t) \approx R_1(t)\ (k = 2,3, \ldots n)$

表 1　数式一覧

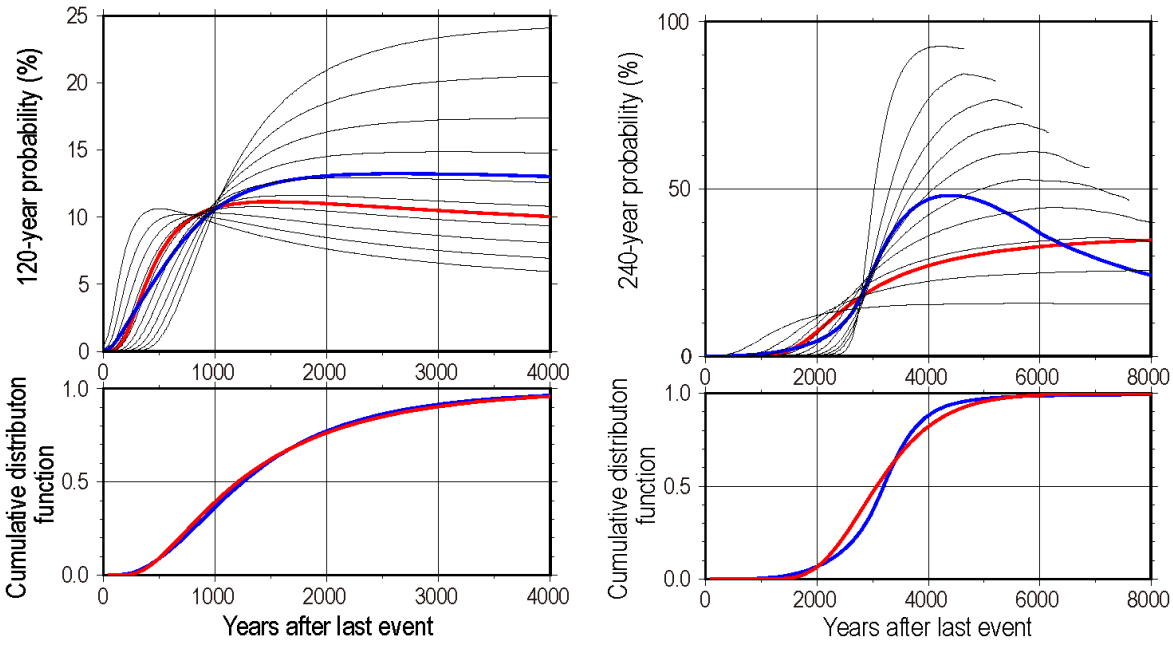


図 1　条件付き確率推移(上図) と地震間隔累積分布関数（下図）.
上図：尤度幾何平均推定値による確率の推移（赤）と　無作為抽出時系列（10000 個）による平均確率推移（青）. 無作為抽出時系列（1000 個）10 組の平均確率推移（黒）.
下図：尤度幾何平均推定値による地震間隔累積分布関数（赤）. 無作為抽出時系列(10000 個)の累積分布平均（青）.
図 1a　有馬高槻断層帯における 120 年条件付き確率.
図 1b　関谷断層における 240 年条件付き確率.

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the southwest Japan

*Taro Hara[1], Hiroaki Takahashi[2]

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

はじめに
内陸地震発生の長期的な評価として、主要活断層の確率予測や活断層の地域評価が地震本部によって行われている。これらの長期評価では、地質学的手法による活断層調査に基づくデータが主に用いられていて、地震活動データは参考として示されているが、測地データは用いられていない。地域評価では、地表の長さが短い活断層も評価対象となっているが、伏在活断層や、そもそも活断層が存在しない地域での評価が課題となっている。Nishimura (2021)では、GNSS速度データから得られるひずみ速度の空間分布を用いて西南日本の内陸地震の発生確率の推定が行われているが、南海トラフのプレート間固着の影響をモデルに基づき除去したデータを用いている。日本列島の地殻変動場には、海溝でのプレート間固着や地震時・地震後の余効変動の影響が時空間的に複雑に内包されており、定量的な評価が課題である。一方、地震活動度を用いた評価も試みられており（Ogata, 2022）、歴史地震を含む地震活動カタログの利用や、余震の減衰時間と応力速度や地震の繰り返し間隔との関係も検討されている（Toda and Stein, 2018）。本研究では内陸地震発生確率評価に向けて、GNSS速度データから求められるひずみ速度の空間分布と、応力速度との関係が指摘されている余震継続時間の特性の検討を行う。

地殻変動データによるひずみ速度の空間分布の推定と短い空間波長成分の抽出
国土地理院F5座標データから、東北地方太平洋沖地震が発生する直前の2011年3月10日までの西南日本のGNSS観測点の水平成分速度を推定した。南北・東西変位速度ごとに、10kmごとのグリッドでクリギング法を用いて空間補間を行い、ひずみ速度に変換した。クリギング法では、既知のデータから求められた空間相関性をバリオグラムとしてモデル化し、任意の地点での最良線形不偏推定量を求める。今回は通常クリギング法を用いた。小林(2009)によると、クリギング法は長・短波の変動が混在する地殻変動場の空間特性を保ったまま補間することが可能である。一方、GNSSから得られるひずみ速度を直接的に地震発生確率評価に用いるためには、その場所の永年的な応力蓄積に寄与しない成分の客観的な評価が必要である。内陸で起こる地震の規模は最大でもM8で一般的には活断層のサイズで規定され、活断層がない場所では最大でもM7程度と考えられる。推定されたひずみ速度分布に移動平均法の適用を行い、短波長成分の抽出を行った。様々な距離で移動平均法を適用し、地震活動の空間分布との比較を行った。

地震カタログによる余震継続時間と定常的な地震活動
Toda and Stein (2018) やStein and Liu (2009)では、余震継続時間と応力速度や活断層での繰り返し間隔の関係が示されている。気象庁地震カタログを用いて過去30年以内に発生したM6.0以上の全国の主要な内陸地震の余震継続時間を、大森公式を利用して推定を行った。余震継続時間は、38年～9300年と地震によって大きく異なる値を示した。

結果と今後の展望
クリギング補間された中国・四国・九州地方のひずみ速度分布は、Okazaki et al.(2020)による結果と同様の空間特性を示し、地震活動が活発な山陰～山口県や徳島県で相対的に大きな地域が見られる。また、大分県～鹿児島県付近にも比較的大きな地域が見られる。移動平均法を適用し短波長成分のみを抽出すると、山口県付近や山陰地方、鹿児島県で局所的にひずみ速度が大きな地域が確認された。2005年福岡県西方沖地震や1997年山口県北部地震の震源付近では余効変動による大きなひずみ速度がみられた。2016年熊本地震や2016年鳥取県中部地震の震源付近では大きなひずみ速度の値は見られなかった。余震の減衰においては、活断層付近で発

© The Seismological Society of Japan

生した地震の余震継続時間のほうが、活断層が見つかっていない場所での地震よりも短い傾向を示し、活断層付近で大きな応力速度が示唆される。今後は移動平均法で抽出した短波長成分をNishimura (2021)の手法を適用し、内陸地震の発生確率の推定につなげていきたいと考えている。その際、地震履歴や定常地震活動度、活断層の密度と長さ等の先駆的情報を、当該地域の先天的な地震発生能力を示す指標として、中規模地震の余震減衰時間を応力速度の指標として評価することで、地震発生確率評価手法に組み込むことを検討している。また、地震発生能力を示す指標として、Sharma et al. (2020)のように蓄積されたひずみ速度と大地震によって解放された地震モーメントとの間のモーメント欠損の値についても組み込むことも検討している。

© The Seismological Society of Japan

Application of an Earthquake Early Warning with the PLUM Method to the 2023 Türkiye-Syria Earthquake

*Masaru Morinaga[1], Masumi Yamada[2]

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

PLUM法 (Propagation of Local Undamped Motion method) は，日本の早期地震警報システムにおいて用いられている手法の一つである．この手法は，震源や地震規模の推定を行わずに，周辺の震度観測を参照して震度予測を行うものである．それゆえ，特に，震源域の広い地震が起きた際に役に立っている，しかし，現行のスキームでは，対象地点から30km圏内の観測点を利用するので，少なくとも30km間隔よりも高密度の観測網が必要となる．しかしながら，日本以外の国では，このように高密度な観測網が整備されていない国も多い．そのため，疎な観測網にも適用可能なPLUM法のスキームの設計が，当座の課題となっている．

そこで，現在まだPLUM法が運用されていないトルコで起きた地震 (the 2023 Türkiye–Syria Earthquake, Mw 7.8) に対して，試験的にPLUM法を適用した．この地震は2023年2月6日 01:17:34 (UTC)に発生し，震央は37.226°N 37.014°E，震源の深さは10.0 kmであった．用いた地震計のデータの期間は01:17:07 から 01:26:19まで，有効な観測点の数は275個であった．

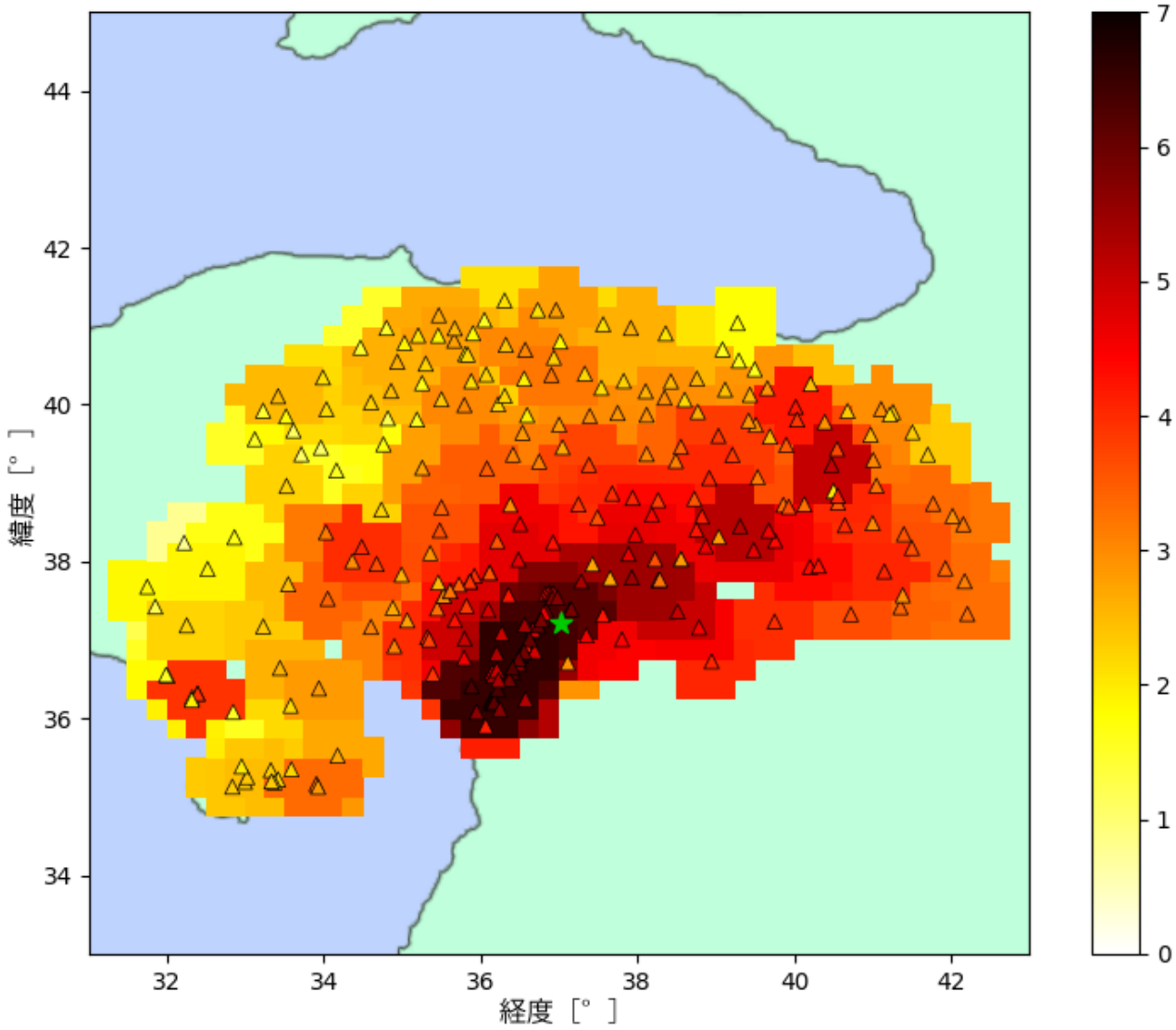
現行のPLUM法のスキームでは，対象地点を囲む半径R = 30 km の円内の観測点の震度と，その地域の地盤特性を用い，各観測点から対象地点に伝播する地震動の震度をそれぞれ計算して，その中の最大値を対象地点の予測震度としている．

しかしながら今回のデータでは，30km圏内に他の観測点が一つもない観測点が74点 (27%)，一つしかない観測点が87点 (32%) あり，カバレッジは十分とは言えない．そこで今回は，従来手法に加えて，予測に使う観測点の距離を 30km 以内から 50 km 以内に広げてシミュレーションを行った．また，当該地域の地盤特性は解明されていないので，地盤増幅を無視して計算を行った．さらに，震度については，日本の気象庁で用いられているリアルタイム震度と同じ手法を，今回のデータにも適用した．

その結果，予測に使う観測点の距離を長く取ると，カバレッジが改善される一方で，各点の最大観測震度と最大予測震度のRMSE (Root-Mean-Square Error) が大きくなることが確認できた．今後はこのような，観測点が疎な地域で活用できる，新たなPLUM法のスキームを模索していきたいと考えている．

© The Seismological Society of Japan

〈50km 圏内の観測点を用いた PLUM 法の，最大予測震度と最大観測震度の比較〉



色が表しているのはリアルタイム震度の値で，そのスケールは JMA 震度階級と共通．四角形のグリッドが予測値，三角形のプロットが観測値，緑色の星型が震央．

© The Seismological Society of Japan

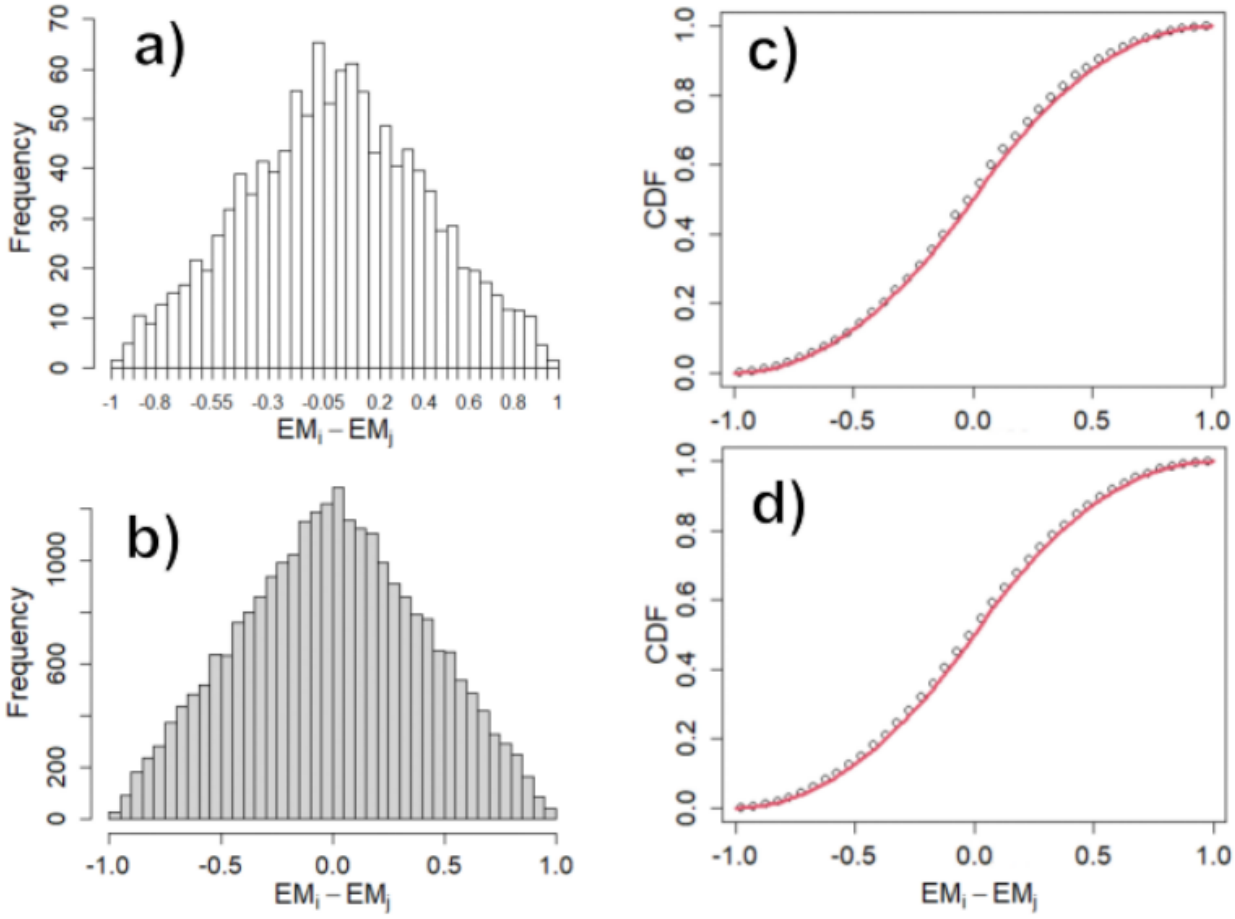
No Evidence of Magnitude Dependence in Earthquake Triggering

*Giuseppe Petrillo[1], Jiancang Zhuang[1]

1. Institute of Statistical Mathematics (ISM)

The question of whether earthquakes can be predicted is a complex one, and the answer is likely to depend on a variety of factors. One important factor is the presence of correlations between seismic magnitudes. Some researchers have reported evidence of such correlations, while others have argued that they are caused by incomplete data. We study the magnitude correlations for a synthetic seismic catalogue produced with a 2-layer OFC model, which is able to produce a realistic earthquake statistics. We also propose a direct correlation analysis of a machine learning high-resolution catalogue for the Amatrice-Norcia (2016) sequence in Italy. By using stochastic declustering technique, we are able to calculate correlations weighting the results based on the probability of the two events being correlated. After establishing the completeness magnitude of the catalog and performing statistical analysis on correlated pairs, we can check whether the magnitude correlation hypothesis can be rejected with an high level of confidence.
Our results suggest that there is no evidence of magnitude correlation in either the synthetic or real catalogs. This is in contrast to some previous studies, which have reported evidence of such correlations, but they are consistent with the results of other studies that have found no evidence of magnitude correlation.
This study has important implications for the development of seismic forecasting models. If there is no evidence of magnitude correlation, then traditional ETAS models, which do not account for such correlations, may be sufficient for seismic forecasting. However, further research is needed to confirm our results and to understand the reasons for the apparent discrepancy between our results and those of previous studies.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S17. Tsunami

Wed. Nov 1, 2023 9:30 AM - 10:30 AM JST | Wed. Nov 1, 2023 12:30 AM - 1:30 AM UTC | Room C F202

[S17] AM-1

chairperson:Yuchen Wang(JAMSTEC), Osamu Sandanbata

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

[S17-01] Tsunami and Megathrust Earthquake Predictions: Real-time Monitoring of the Genesis Processes with Physical Wavelets

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

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

[S17-02] Study of the 1605 Keicho Tsunami Source Models for the Sea Areas along the Nankai Trough and the Izu-Bonin Trench

*Yoshinori Satou[1], Naoto Kihara[2], Katsuhide Katou[3] (1. Unic, 2. CRIEPI, 3. CEPCO)

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

[S17-03] Estimation of Fault Models Using Nonlinear Inversion for the 1946 Nankai and the 1944 Tonankai Earthquakes

*Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[2] (1. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University, 2. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University)

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

[S17-04] Detecting small volcanic tsunami signals from Kita-Ioto Caldera using dense DONET ocean-bottom pressure records

*Osamu SANDANBATA[1], Tatsuhiko SAITO[2] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Tsunami and Megathrust Earthquake Predictions: Real-time Monitoring of the Genesis Processes with Physical Wavelets

*Fumihide TAKEDA[1,2]

1. Takeda Engineering Consultant Inc., 2. Earthquake Prediction Institute

Japan's seismograph and GPS network, located on the subduction zones, provide comprehensive records on earthquakes (EQs) in the form of displacement time series data $\{c\}$, which is stochastic or noisy. For example, the GPS time series is represented as $\{c\}=\{d(c, 0), ., d(c, j), .\}$, where $d(c, j)$ denotes the daily displacement at a GPS station's position with the geographic axis c representing E (eastward), N (northward), and h (upward) in right-handed coordinates (E, N, h) and at time j expressed in days. Environmental factors make $d(c, j)$ noisy and non-differentiable.

Physical Wavelets (PWs) are mathematical operators denoted by $DDW(t-\tau)$, $VDW(t-\tau)$, and $ADW(t-\tau)$ in equations (1) –(3). The PWs define displacement $D(c, \tau)$, velocity $V(c, \tau)$, and acceleration $A(c, \tau)$ at time τ on such non-differentiable $\{c\}$. $D(c, \tau)$ provides the average of $d(c, j)$ over a time interval of $j=\tau \pm w$, and s represents a differential time. The time-reversal operation changes τ to $-\tau$ and confirms that $D(c, -\tau)=D(c, \tau)$, $V(c, -\tau)=-V(c, \tau)$, and $A(c, -\tau)=A(c, \tau)$, affirming the differentiable property of the $D(c, \tau)$ and $V(c, \tau)$ derived from the non-differentiable $d(c, j)$.

The plate driving forces describe the megathrust EQ's genesis process through PWs, enabling the EQ rupture time prediction with remarkable accuracy within a day, up to three months preceding the EQ event[1]. The 2011 Tohoku M9 EQ and the tsunami resulted from complex interactions between the subducting and overriding plates, which caused bulge-bending deformation (BBD) over the Tohoku subduction zone. The BBD refers to the gradual bending of the overriding plate of Tohoku by the eastward continental plate-driving force, causing the overriding crust of Tohoku to bulge downwards and upwards by a few millimeters. The BBD suddenly appeared from the consistent deformation expected over the preceding three hundred years. Figures 1 and 2 illustrate a schematic cross-section of the deformation, which grew in three phases over 15 months:

·An initial phase of Fig. 2a

· A transitional phase of Fig. 2b

·A final phase of Fig. 2c

The initial had regular slow deformation changing the west coast deformation from non-elastic to elastic, which generated a restoring force of the compressed west coast with gradual subsidence of 1 to 2.8 mm across Tohoku starting in January 2010. The east coast subsided by 2.8 mm during segment S0 in Fig. 3a, effectively gripping significant barriers on fault (increasing the static friction).

The transition was from the regular to a BBD of segment S1 in Fig. 3a with further gradual subsidence of 3 mm. During S1, the east coast pulled down the subducting Pacific Plate, as indicated by a dot-arrow on the fault in Fig. 2b, while firmly grasping the fault. The overriding eastward plate-driving force compression on the west coast elastically pulled the east coast westward. The westward pulling ($A(E, \tau)<0$) started to drag the subducting oceanic plate in July 2010, accelerating the oceanic plate motion to reach the highest westward $V(E, \tau)=-0.69$ mm/day on December 22, 2010, as shown in Fig. 3b.

The final phase began in November 2010 with a gradual upheaval growth of 1.2 mm on the east coast during segment S2, generating the lifting force as shown $A(h, \tau)>0$ above a dot-line in Fig. 3a. The lifting force buildup on the east coast along the Tohoku subduction zone eventually caused the shear stress to exceed the static frictional strength of the subduction interface, causing the overriding and subducting plates to decouple. The lifting force on the entire Tohoku region helped the decoupling process, releasing a massive recoil force of the compressed west coast against the eastward-plate-driving

© The Seismological Society of Japan

force. The recoil rapidly restored the BBD of the east and west coasts, elastically compressed by the overriding plate-driving eastward force. This rapid restoration led to the Tohoku M9 earthquake and tsunami on March 11, 2011.

The pulling action of the east coast during segments S1 and S2 in Fig. 3a, coupled with the subducting oceanic plate motion (westward), as shown in Fig. 3b, was recorded at Chichijima in the Northwest Pacific Ocean. The movement paths on the $D(E, t) - V(E, t)$ and $D(E, t) - A(E, t)$ planes can automatically detect the abnormal oceanic plate motion, serving as a real-time tsunami warning up to the event.

The final phase of S2 (after M7.9 EQ in Fig. 3b) can provide real-time information on the impending megathrust EQ and tsunami, allowing for the most effective disaster prevention warnings and hazard mitigations.

The findings suggest they can deterministically predict the anticipated megathrust EQ and tsunami, like Cascadia and Nankai-Trough events.

1. Takeda, F. (2022). https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.09486

© The Seismological Society of Japan

Physical Wavelets (PWs)

$$D(c,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}\{c\}\,DDW(t-\tau)dt=[1/(2w+1)]\sum_{j=-w}^{w}d(c,\tau+j), \quad (1)$$

$$V(c,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}\{c\}\,VDW(t-\tau)dt=[D(c,\tau+s/2)-D(c,\tau-s/2)]/s \quad (2)$$

and

$$A(c,\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}\{c\}\,ADW(t-\tau)dt=[V(c,\tau+s/2)-V(c,\tau-s/2)]/s$$
$$=[D(c,\tau+s)-2D(c,\tau)+D(c,\tau-s)]/s^2. \quad (3)$$

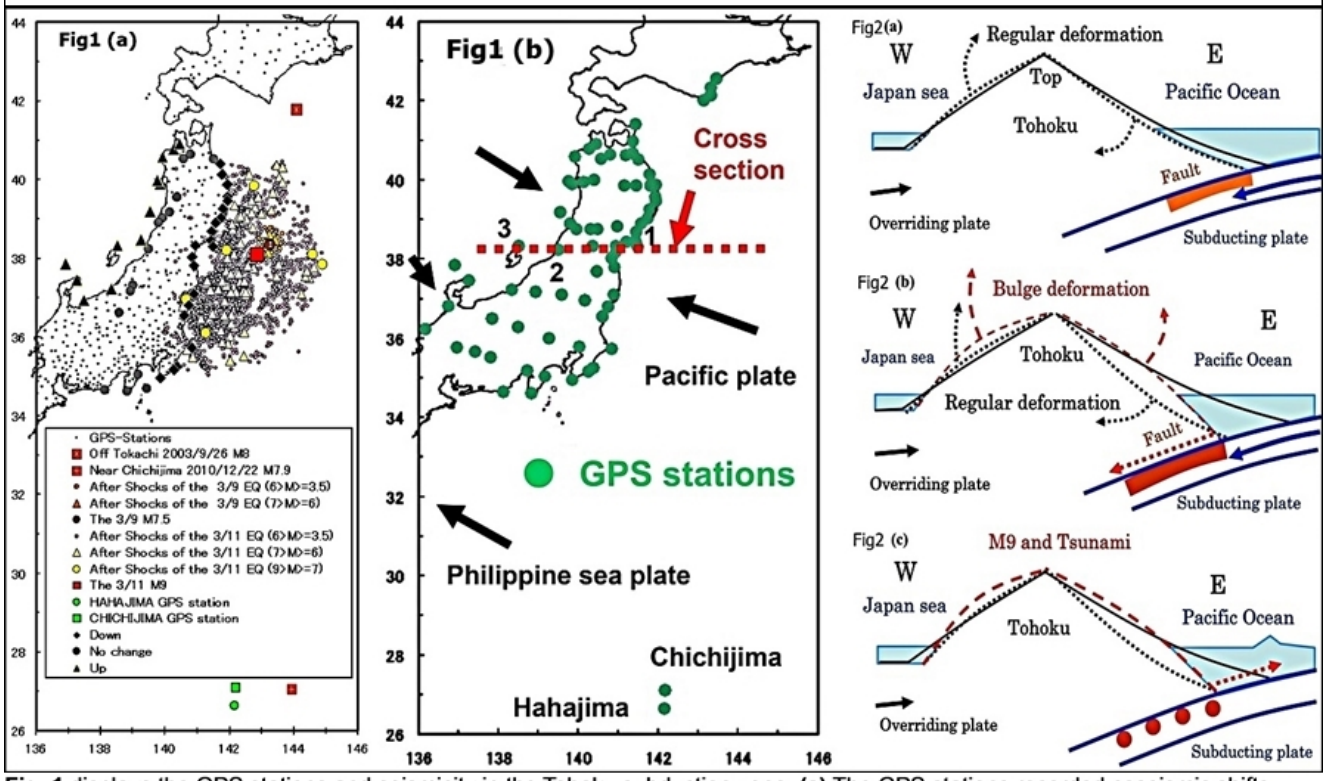


Fig. 1 displays the GPS stations and seismicity in the Tohoku subduction zone. **(a)** The GPS stations recorded coseismic shifts down on the east coast, no change on TOP, and up on the west coast. **(b)** The three GPS stations, 1, 2, and 3, are referred to as the east coast (Onagawa station), the Top (Murakami station), and the west coast (Ryoutsu2 station), respectively. **Fig. 2** displays a schematic cross-section at the dotted line in Fig. 1b, with stations 1, 2, and 3 referred to as E (east coast), Top, and W (west coast), respectively. **(a)** Initial phase. **(b)** Transitional phase. **(c)** Final phase.

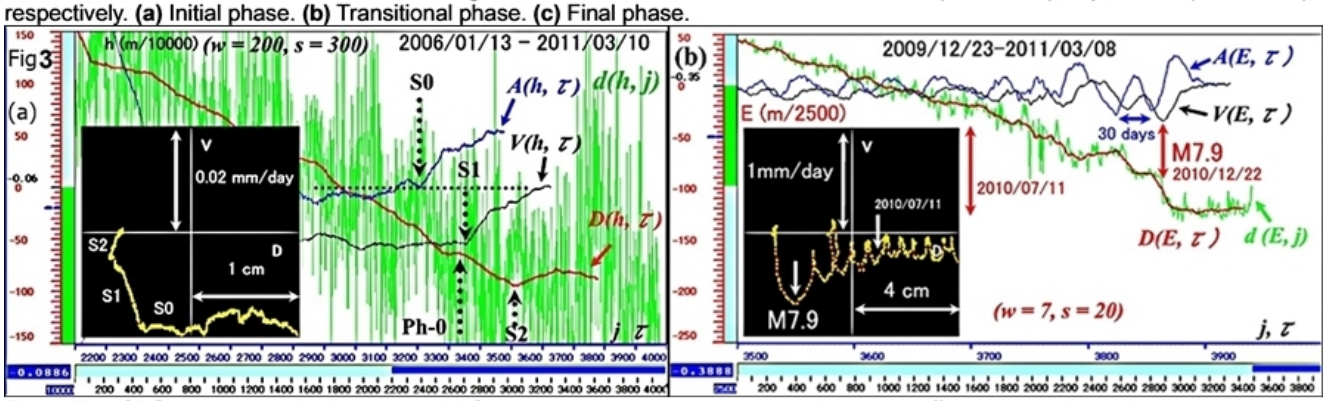


Fig. 3. The GPS observed $d\,(c, j)$ in green. (a) Onagawa station. A horizontal dot-line at the offset origin 0 (− 0.06) is the abscissa for $V\,(h, \tau) = A\,(h, \tau) = 0$ on relative scales. The westward bend-onset characterized by the directional change of $A\,(E, \tau) > 0$ (eastward) to $A\,(E, \tau) < 0$ is at Ph-0. (b) Chichijima station. The lunar synodic tidal force loading (29.5-day period) appears as a period of 30 days at acceleration $A\,(E, \tau)$. The date label 2010/07/11 corresponds to the $D\,(E, \tau)$ trend change at $\tau = 3700$ (July 11, 2010) initiated by the east coast pulling action of segment S1 in part a. The maximum $V\,(E, \tau)$ is − 0.69 mm/day on 2010/12/22.

© The Seismological Society of Japan

Study of the 1605 Keicho Tsunami Source Models for the Sea Areas along the Nankai Trough and the Izu-Bonin Trench

*Yoshinori Satou[1], Naoto Kihara[2], Katsuhide Katou[3]

1. Unic, 2. CRIEPI, 3. CEPCO

1. はじめに

1605年慶長地震は，日本各地での津波記録は残っているものの地震による被害記録がなく，波源域の特定が困難な地震の一つである．これまで相田(1981)や古村ほか(2010)において南海トラフ沿い海域を波源とする研究や，最近では原田ほか(2013)や文部科学省ほか(2020)において伊豆・小笠原海溝沿い海域を波源とする可能性も指摘されている．本研究では，南海トラフ沿い海域と伊豆・小笠原海溝沿い海域でそれぞれ波源モデルを設定し，同一の津波痕跡データと津波計算条件下で比較を行い，1605年慶長地震における両海域の津波波源の可能性について検討した．

2. 津波痕跡データと津波計算条件

1605年慶長地震の津波痕跡データは，東北大学災害科学国際研究所の津波痕跡データベースにおける痕跡信頼度A,B,Cのデータを使用した（一部除外地点あり）．採用した痕跡地点位置を図1に示す．津波計算条件は，沿岸を最小50m格子とし，波源付近は800mもしくは1600m格子として，非線形長波理論による平面二次元解析とした．波源の初期水位分布は，Mansinha and Smylie(1971)による地殻変動計算結果にTanioka and Satake(1996)の水平地殻変動による鉛直水位変動を考慮し，さらにKajiura(1963)によるフィルターを適用した．

3. 南海トラフ沿い海域の津波波源モデルの検討

南海トラフ沿い海域のモデルは，内閣府(2012)の断層モデルを使用した．1605年慶長地震は地震の被害記録がないことを踏まえ，津波への寄与の大きい大すべり域の主要な位置を検討するため，東海～南海領域（地震本部2013におけるABCD領域）の浅部（トラフ軸～深さ10km）に限定してすべり量を検討した．同範囲のすべり量を試行錯誤で設定し，相田(1977)によるKおよびκの値が良好となるようにすべり量を調整した．その結果，図1に示すすべり量5m,15m,5m,15m(M_W8.65)とした波源モデルで，相田(1977)によるK=0.99およびκ=1.37の結果が得られた（図2を参照）．

4. 伊豆・小笠原海溝沿い海域の津波波源モデルの検討

伊豆・小笠原海溝沿い海域のモデルは，Slab2.0(Hayes et al.,2018)によるプレート境界深度データを用いて，海溝軸～深さ60kmの範囲に約5km四方の小断層を配置した．大すべり域の主要な位置を検討するため，海溝軸方向を図1のとおり9分割，深さ方向を浅部（海溝軸～断層幅100km）と深部（深さ20km～60km）の2パターンとし，すべり量を一律10mとした計18波源による津波解析を行い，相田(1977)によるKおよびκの値が最良となる波源位置を特定した．その結果，波源位置5(北緯30～30.5°付近)の深部の波源が最良となり，文部科学省ほか(2020)の検討結果とも整合した．更なる再現性の向上を目的に，すべり量と海溝軸方向の波源範囲を調整し，図1に示す波源位置5と4の南半分の深部にすべり量15m(M_W8.54)とした波源モデルで，相田(1977)によるK=1.06およびκ=1.57の結果が得られた（図2を参照）．

5. 考察

相田(1977)によるKおよびκの値より，1605年慶長津波の波源が，南海トラフ沿い海域もしくは伊豆・小笠原海溝沿い海域であった可能性を否定しない結果といえる．一方，今回検討した２つの波源モデルはいずれも，津波への寄与の大きい大すべり域の主要な位置を検討したものであり，津波への寄与の小さい背景領域を含めた波源域は，さらに深さ方向もしくは海溝軸方向に広がっている可能性がある。

謝辞　本研究は電力10社による原子力リスク研究センター共研として実施した成果であることを付記するとともに，土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(委員長 高橋智幸関西大学教授)の委員各位に研究成果をご議論頂き，有益なご助言を賜りました．

© The Seismological Society of Japan

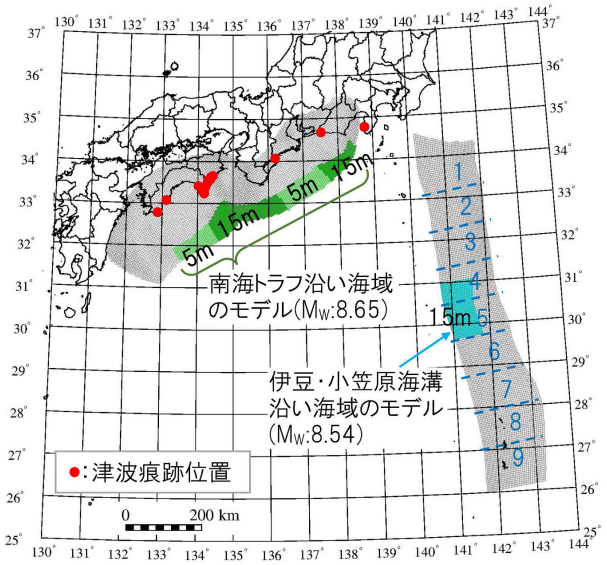
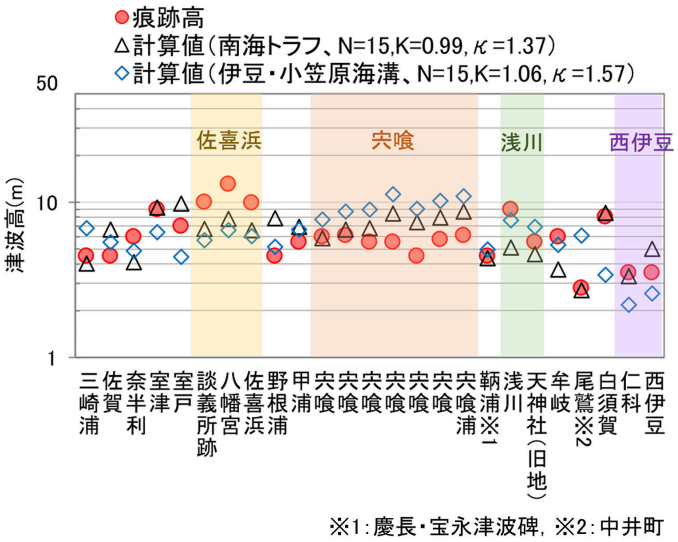


図1　各海域の1605年慶長津波波源モデルと津波痕跡位置．図中の数値(m)はすべり量．M_Wは剛性率 4.1×10^{10}(N/m^2)とした場合の値．



※1：慶長・宝永津波碑，※2：中井町

図2　各海域の1605年慶長津波の再現性の比較．網掛け4地域は，各範囲に含まれる地点のKの平均値を1地点として扱い，相田(1977)のKとκを算出．

© The Seismological Society of Japan

Estimation of Fault Models Using Nonlinear Inversion for the 1946 Nankai and the 1944 Tonankai Earthquakes

*Masato Kamiya[1], Toshitaka Baba[2]

1. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University, 2. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University

本研究では，非線形長波式を解き，津波痕跡高データに対して断層モデルのすべり量をレーベンバーグ・マーカート法により逐次的に修正する非線形インバージョン法を新たに開発した．この手法を1946年昭和南海地震と1944年昭和東南海地震に適用して，津波痕跡高を説明する波源断層モデルの推定した．

提案手法の仕組みは次の通りである．大型計算機で非線形長波式による津波の伝番・遡上を含めた数値計算を繰り返し行い，イタレーションごとに断層パラメータのすべり量を元に計算した理論値と観測値の残差から，レーベンバーグ・マーカート法ですべり量の修正量を求めることで，断層パラメータのすべり量を逐次修正する．

安中ほか(2003)で提案された1946年昭和南海地震及び1944年昭和東南海地震の断層モデルに基づいて，8枚の小断層に分割した断層モデルを作成した．津波計算は非線形長波式を用い，18秒，6秒，2秒の格子間隔を持つ地形データで3層ネスティングを組み，計算時間を3時間，時間幅を0.1秒とした．海底斜面の水平変位による津波励起とKajiuraフィルターを考慮した．断層モデルのすべり量の初期値として，安中ほか(2003)の断層モデルのすべり量を使用した．津波痕跡高は東北大学津波痕跡データベースのうち，昭和南海地震に関しては信頼度A，昭和東南海地震に関しては信頼度A，B，Cのデータを使用した．昭和南海地震に関しては，是永ほか(2013)による津波痕跡高の選定方法を参考に津波痕跡高を選別した．昭和東南海地震に関しては，是永ほか(2013)による津波痕跡高の選定方法に加えて，新たに10m以上の高さとなった痕跡高を除いた．この基準で選別した結果，昭和南海地震の津波痕跡高のデータ数は122，昭和東南海地震の津波痕跡高のデータ数は99となった．

昭和南海地震の解析結果は，安中ほか(2003)モデルの計算値と痕跡高に対するK-κ，RSS(m²)は1.08-1.37，82.6であったことに対して，本研究の 8枚の小断層モデルのK-κ，RSS(m²)は0.99-1.26，43.8であり，残差二乗和が47%向上した．新たな断層モデルでは既存のモデルと比べて四国沖から紀伊水道沖にかけて大きなすべりが見られ，最大すべり量は7.16mとなった．新しい断層モデルの地震モーメントは6×10^21 (N・m)であり，Baba et al. (2005)のモデルの3.5×10^21 (N・m)を上回り，安中ほか(2003)のモデルの7×10^21 (N・m)より小さい値となった．

昭和東南海地震の解析結果は，安中ほか(2003)モデルの計算値と痕跡高に対するK-κ，RSS(m²)は1.35-1.51，360.1であったことに対して，本研究の8枚の小断層モデルのK-κ，RSS(m²)は0.79-1.38，113.7であり，残差二乗和が68%向上した．新たな断層モデルでは既存のモデルと比べて，紀伊半島から志摩半島にかけて断層のすべりが見られることが共通している．紀伊半島東部から志摩半島にかけてのアスペリティの最大すべりは7.56mであった．新しい断層モデルの地震モーメントは3×10^21 (N・m)で，Baba et al. (2006)のモデルの2×10^21 (N・m)を上回り，安中ほか(2003)のモデルの4×10^21 (N・m)より小さい値となった．

さらに，是永ほか(2013)津波痕跡高の選定基準を適用しないで昭和南海地震に関しては信頼度がA，昭和東南海地震に関しては信頼度がA，B，Cのすべての津波痕跡高データを使って解析した．この場合．昭和南海地震は，安中ほか(2003)モデルの計算値と痕跡高に対するK-κ，RSS(m²)は1.05-1.54，133.6であり，本研究の

© The Seismological Society of Japan

8枚の小断層モデルのK-κ，RSS(㎡)は0.94-1.33，90.6であった．昭和南海地震の新しい断層モデルは津波痕跡高を良好に再現した．昭和東南海地震は，安中ほか(2003)モデルの計算値と痕跡高に対するK-κ，RSS(㎡)は1.31-1.69，1215.7であり，本研究の8枚の小断層モデルのK-κ，RSS(㎡)は0.94-1.58，497.9であった．どの断層モデルにおいても，三重県熊野市新鹿町で観測された10mを超える5点の津波痕跡高(10.48m，11.47m，12.21m，15.21m，19.58m)を再現することができなかった．これは今井ほか(2022,地震学会)で指摘されたように，新鹿町の局所的に高い津波痕跡高は断層運動のみでは説明することは難しく，海底地すべりの影響を考慮する必要があると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Detecting small volcanic tsunami signals from Kita-Ioto Caldera using dense DONET ocean-bottom pressure records

*Osamu SANDANBATA[1], Tatsuhiko SAITO[2]

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

北硫黄島カルデラは，伊豆・小笠原諸島弧のカルデラ構造を持つ海底火山で，その近傍では近年2～5年ごとに非ダブルカップル成分に富んだ地震(M_w 5.2–5.3)が観測されている．我々の先行研究(Sandanbata & Saito, 2022, JpGU)では，2008年と2015年地震直後に，日本南方沖合のDART(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunami)システムの単一の海底圧力計が，ミリメートル振幅の津波を記録していたことを報告した．この津波記録の解析によって，海底カルデラ内で「トラップドア断層破壊」と呼ばれる，地下のマグマ溜まりの高圧化に起因するカルデラ内断層破壊が発生し，津波を引き起こしていることを示した．一方，先行研究で用いた海底水圧計は，最近の2017年(M_w 5.2)，2019年(M_w 5.3)のNDC地震時を含む期間の高時間分解能データを喪失しており，これらの地震の震源メカニズム調査には用いることができなかった．

本研究では，2017年・2019年地震の震源メカニズムの調査のため，DONET(Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)の高密度観測点の複数の海底圧力計記録を用いて，両地震に伴う津波シグナルの検出を試みた．個々の海底水圧記録では，S/N比が悪く明確な津波信号が同定できなかったため，以下のように津波波形のスタッキングを行った．まず，2008 年地震のトラップドア断層破壊モデルを仮定して津波発生・伝播の数値計算を行い，各観測点における津波計算波形を得る．次に，計算波形の最初のピーク値を読み取り，各点における津波到達時間を予測する．最後に，複数点の海底水圧計の波形トレースを，予測到達時間差でシフトして，波形の重ね合わせ(スタッキング)を行う．一方で比較のため，2008年地震モデルの計算波形に対しても，同様の手法で波形スタッキングを行った．

その結果，2つの地震後の海底水圧計記録のスタック波形から，明確な海底水圧変動が検出した．これらの変動の特徴として，以下の二点が挙げられる：（１）予測された到達時間以降に見られる，（２）それらの周期や位相が，計算津波波形から得たスタック波形のそれらとおおよそ類似する．これらのことから，スタック波形の海底水圧変動は，北硫黄島カルデラから伝播してきた小振幅の津波シグナルと解釈ができ，2017年・2019年地震が，2008年地震と同様，トラップドア断層破壊の震源メカニズムで発生したことを強く示唆する．一方，2017年と2019年の地震後のスタック波形内の海底水圧変動波形の形状は若干異なっており，海底カルデラ内の断層の位置や長さなど，二つの地震の震源特性の違いを反映すると考えられる．本研究で示したような，微小な火山性津波の検出技術を用いることで，従来の監視システムで見落とされていた海底火山活動を検出し，より広範および詳細な海底火山活動の把握へと繋がることが期待される．

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S17. Tsunami

Wed. Nov 1, 2023 11:00 AM - 12:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 2:00 AM - 3:00 AM UTC | Room C F202

[S17] AM-2

chairperson:Osamu Sandanbata, Yuchen Wang(JAMSTEC)

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

[S17-05] Ocean-wave gradiometry (part 2): Propagation features of the 2022 Hunga Tonga tsunami inferred from apparent amplitude decay

*Masashi Ogiso[1], Hiroaki Tsushima[1] (1. Meteorological Research Institute)

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

[S17-06] Consideration of New Friction Calculation to Represent Accurate Decay in Numerical Tsunami Calculations

*Masaaki MINAMI[1] (1. Meteorological Research Institute)

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

[S17-07] Examination of the Predictability of Tsunami Warning Cancellation based on Data Assimilation Approach

*Yuchen Wang[1], Kentaro Imai[1], Hiroki Horikawa[1] (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S17-08] Numerical experiments of tsunami wavefield estimation based on adjoint equations

*Takuto MAEDA[1] (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

Ocean-wave gradiometry (part 2): Propagation features of the 2022 Hunga Tonga tsunami inferred from apparent amplitude decay

*Masashi Ogiso[1], Hiroaki Tsushima[1]

1. Meteorological Research Institute

アレイ解析は波動現象の特徴抽出に有効な手法のひとつである。一般的なアレイ解析は各観測点間の位相差を用いて波動場のスローネスベクトルを推定するが、近年、振幅の空間勾配に着目して、スローネスに加えて振幅の空間変化に関する情報も推定するWave gradiometry (Langston, 2007, Liang et al., 2023)という手法が提案されている。また、従来は臨時観測網がアレイ解析に用いられることが多かったが、稠密な定常観測網の整備に伴い、近年はこれらの定常観測網を用いたアレイ解析も可能な状況になっている。

2022年1月15日のフンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の噴火に伴う津波は、近年の津波観測事例の中では特異なものであった。全世界で観測された潮位変動の第一波は大気ラム波に強制励起された海面変動と、その伝播過程で変換された自由波(津波)で構成されること(Kubota et al., 2022)、後続の大きな潮位変動は大気ラム波よりも伝播速度の遅い大気重力波と海洋波の相互作用によって説明できること(Mizutani and Yomogida, 2023)、などが明らかにされている。この津波はS-netやDONETといった日本近海の稠密海底水圧観測網でも観測され、そのアレイ解析により、海面変動に対する大気ラム波の拘束が解けて自由波として伝播する過程などがとらえられている(例えばTonegawa and Fukao, 2022; Yamada et al. 2022など)。

本研究では、Wave gradiometryをトンガ津波のS-net水圧観測記録に適用して、特に振幅項に着目してS-net観測網内での津波伝播過程を検討する。S-net観測記録へのWave gradiometryの適用は前報(Ogiso and Tsushima, 2023)でも実施したが、その際はスローネスのみに着目しており、振幅情報は未活用であった。振幅情報の活用はより詳細な伝播過程の解明につながるとともに、津波高の即時予測にも有効であると期待される。

まず、トンガ付近に波源を設定して、線形長波理論によって合成した津波波形に対してWave gradiometry解析を実施した。推定された見かけ幾何減衰項はS-net観測網のほぼ全域にわたって正の値、すなわち沿岸に近づくにつれて振幅が増加する傾向がみられた。これは津波の浅水変形と解釈できる。また、海底地形がなめらかでエネルギー流束が保存すると仮定し、グリーンの法則を用いて振幅を補正した津波波形を解析したところ、見かけ幾何減衰の絶対値は小さくなり、また、空間的に特徴のある正負の分布が得られた。この空間分布パターンは海底地形によるエネルギーのfocusing等を反映していると考えらえる。

次に、トンガ津波の実観測記録にグリーンの法則で振幅を補正したのちWave gradiometry解析を適用した。あわせて、株式会社ウェザーニューズが運用する陸上の稠密な気象観測網であるソラテナの気圧記録にもWave gradiometry解析を適用し、気圧変動の伝播の特徴を計算した。大気ラム波が日本周辺を通過した1月15日12:40(UTC)頃、及び沿岸で大きな潮位変動が観測された1月15日15時(UTC)頃の見かけ幾何減衰項(添付図参照)の絶対値は、合成波形の場合より大きい傾向がみられた。この結果は、トンガ津波の際の海底水圧変動の空間変化に海底地形以外の要因が寄与していることを示唆する。12:40頃の時間帯では、海底水圧変動の伝播速度が大気ラム波の値に近い海溝軸付近で見かけ幾何減衰項が正、沿岸で負となる傾向があった。一方、15時頃の時間帯では、12:40頃と比較すると共通する傾向の領域もあるが、全般的に見かけ幾何減衰が正となる領域が多く、また、絶対値も大きい傾向がみられた。この時間帯の大気重力波の伝播速度はばらつきが大きいものの大気ラム波よりは津波の伝播速度に近いので、先行研究で指摘されているような大気・海洋結合系で津波の増幅があり、その結果、見かけ幾何減衰が正の値となったのではないかと考えられる。

謝辞
本研究では防災科学技術研究所が運用するS-netで観測された水圧記録、及び、株式会社ウェザーニューズが運用するソラテナで観測された気圧記録を解析に使用しました。また、林豊氏から有益な助言をいただきました。記して感謝します。

© The Seismological Society of Japan

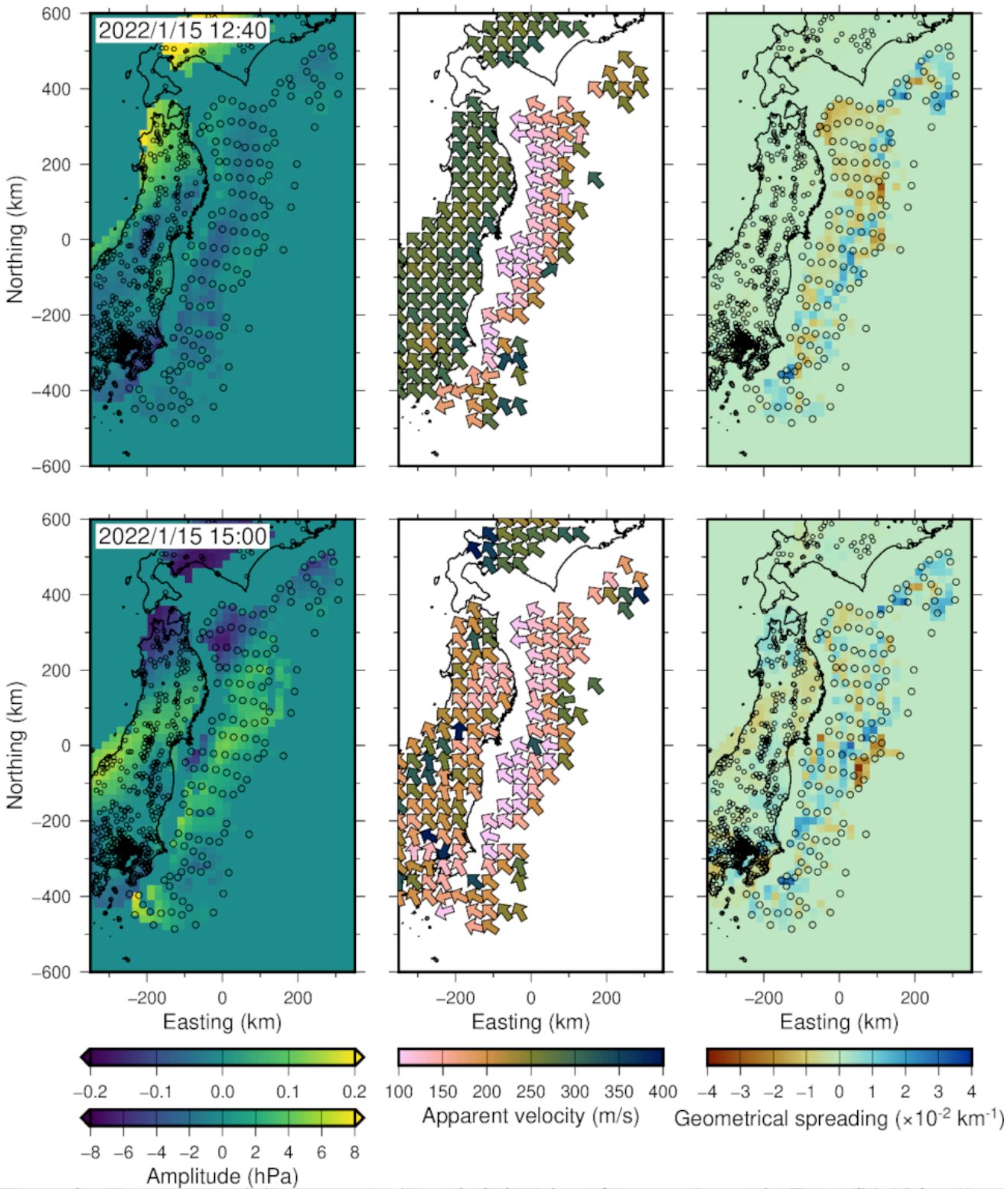


図 2022年1月15日12:40(上段)と15:00(下段)の(左)振幅分布、(中)スローネス、(右)見かけ幾何減衰の分布。時刻はUTC。振幅分布のカラースケールは陸上気圧計は上段、海底水圧計は下段。

© The Seismological Society of Japan

Consideration of New Friction Calculation to Represent Accurate Decay in Numerical Tsunami Calculations

*Masaaki MINAMI[1]

1. Meteorological Research Institute

津波警報の解除時期の判断や、津波の見通し情報を発表するためには、津波の減衰過程を正確に把握する必要があるが、現在の津波数値計算技術では、それらに足る精度を有する津波数値計算はこれまで行われていない。
現在、津波数値計算の多くは、非線形長波(分散波)方程式を有限差分法や有限体積法で解くもの(Imamura et al. 2006やBaba et al. 2015など)が用いられている。この方程式の中で数値計算誤差を除いて、エネルギーの減衰を伴う項は摩擦項のみであり、これらの方程式を用いた津波数値計算において、減衰の精度をあげるためにはこの摩擦項の計算方法を改善する必要がある。Imamura et al. (2006)やBaba et al. (2015)では、この摩擦項の計算にマニング則が用いられている。これはマニング則は簡便で、水路等の実験等でその精度が確かめられていることによる。そうであるにも関わらず、上記の通り、津波数値計算においては、そのエネルギーの減衰は実際に観測された減衰とは合わない。その中でTinh et al. (2021)では、津波数値計算においては、定常流を仮定したマニング則が適用できるのは水深5mより浅い領域のみで、それより深い領域では境界層モデルを使う事が適切であると指摘している。しかしながら、これらの方法を既存の津波モデルに適用することは計算速度や実装の問題から効率的とは言えない。そこで、本稿ではこれまでのマニング則の計算方法から大きく計算方法を変えずに、実際の津波減衰を計算で表す方法について検討した。
方法として、まず粗度係数を大きくして計算することによって、より摩擦力を増やし減衰しやすくする方法が考えられる。そこで、南,2019(日本地震学会秋季大会口頭発表）では、粗度係数を通常使われている値より大きくしたケースで計算を行ったが、単純に粗度係数を上げて計算を行うと、確かにより減衰しやすくはなるが、津波予測で最も重要である第一波、最大波の高さが、粗度係数を上げる毎に小さくなってしまい、単純に粗度係数を上げるだけでは目的に達することは出来なかった。そこで、本稿では南,2019(日本地震学会秋季大会口頭発表）で用いたもう一つの方法である、日本国内において津波が観測された事例において、マニング則を用い、異なる粗度係数で複数回津波数値計算を行い、それによって各時間窓におけるエネルギーの総量と粗度係数との関係を表す式を導き、その式と実際の観測値とを比較し、観測値を最も良く表す粗度係数を求める方法を用い、その時間変化について考察した。それによって求めた粗度係数の時間変化を示したものがFig. 1である。この図から分かるように、観測を最もよく表す粗度係数は、第1波到達時が最も小さく、時間がたつにつれてより大きな粗度係数でなければ観測値を表現することが出来なくなっている。つまりこれまで用いられてきた粗度係数0.025では、時間がたつにつれて減衰が合わなくなるという結果であり、これまでの津波数値計算モデルでは減衰が弱いという事実と整合的であった。これらの計算を様々な事例でも行った結果、それぞれの事例で概ね同様の傾向であった。以上の結果から、対象とする観測点での津波到達時刻までは、これまで用いられていた粗度係数(0.025)を用い、津波到達時刻以降については、徐々に摩擦を大きくするように計算を行うと、第一波や最大波の波高が小さくなることなく、より正確な減衰を表現した津波数値計算を行うことが出来る。今回の実験ではJAGURS(Baba et al. 2015)を用いたが、JAGURSにおいては、ステップ計算を行うことにより、現行のプログラムを一切変更することなく、これらの計算が可能である。もちろん、事前にどの時間からどの程度の時間をかけて粗度係数を上げていくかの検討は必要であり、それらがどの事例でも適用できるのか、波高依存性はないのかなどの検討も今後の検討課題であるが、今回の方法により、現行の津波数値計算プログラムをそのまま用い、精度を損なわずに、より減衰を正しく表す計算の可能性を示すことが出来た。

© The Seismological Society of Japan

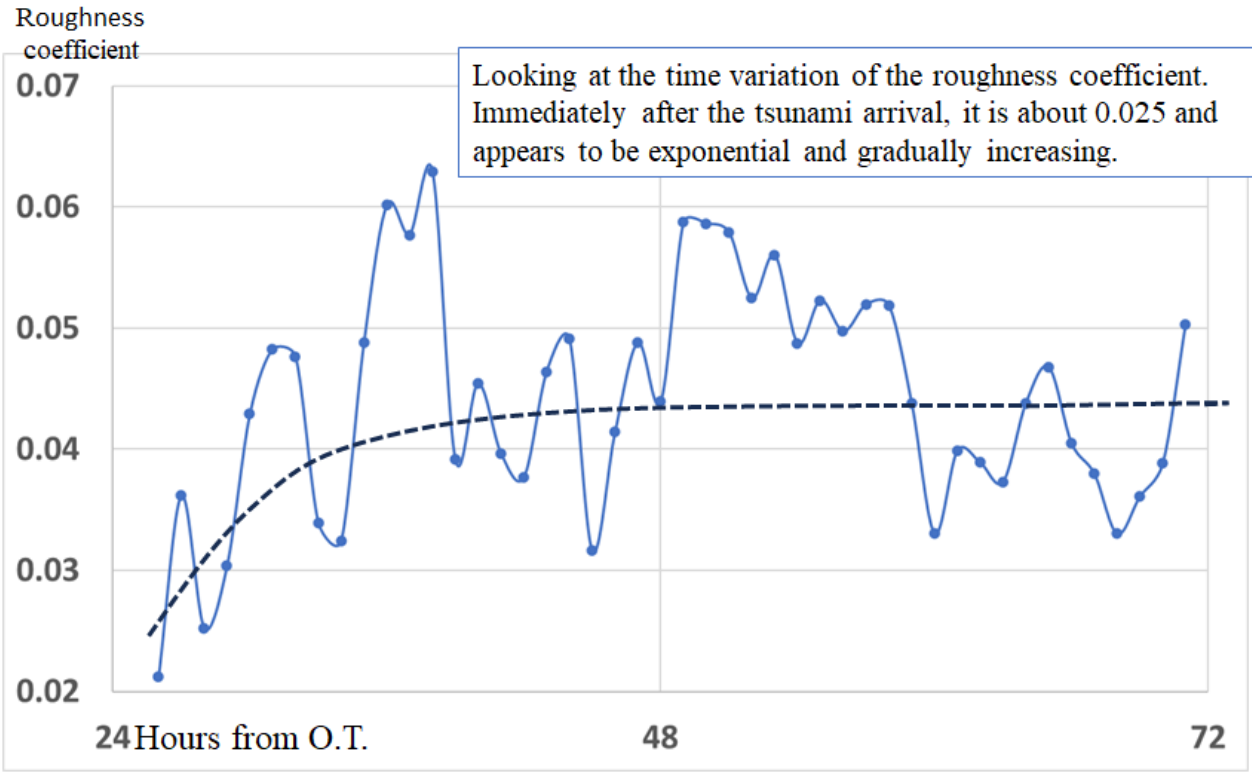


Figure 1. Roughness coefficient time variation with tsunami in 2010 Chile earthquake.The data used were from Japanese tide gauges.

© The Seismological Society of Japan

Examination of the Predictability of Tsunami Warning Cancellation based on Data Assimilation Approach

*Yuchen Wang[1], Kentaro Imai[1], Hiroki Horikawa[1]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

津波警報解除とは，特定の基準に基づいて，津波の脅威が特定の地域で収束または低下したことが確認された際，発令された警報を取り消す行為を指す．これは，津波に関わるリスクを軽減し，不要な経済的制約と持続的な緊急対応の負担を回避する上で重要な役割を果たす．過去の研究によれば，津波の減衰特性を定量的に記述する要素（移動平均二乗振幅など）が津波警報解除の科学的根拠として寄与する可能性が指摘されている（林, 2010）．しかしながら，津波警報解除は，明確で合理的な科学的基準がないため，主観的かつ経験的な判断に依存しているのが現状である．本研究では，警報発令と対となる警報解除に向けた津波データ同化を活用した新たなアプローチによる津波警報解除の予測可能性について検討を行う．
これまでに，データ同化による津波予測は警報発令への利用を主として想定して検討されてきており（例えば，Maeda et al., 2015），海底圧力計などの沖合津波観測データを活用することで震源情報に依存しない形で津波予測を実現できる（例えば，Wang et al., 2023）．本研究では，津波来襲後の沿岸津波の挙動推移を予測することに焦点を絞り，データ同化による津波警報解除の予測可能性について検討を行った．津波警報において，最大津波高の時間推移に関する情報は極めて重要な判断基準となる．本研究では「今後XX時間における最大の高さ」（Maximum Height in the Following XX hours）という概念を提唱する．例えば，「MHF12 = 1 m」という表記は，今後12時間以内において該当の観測地点での最大の高さが1メートルと予測されることを示し，この数値は，津波警報の解除において重要な判断材料となり得る．
試行実験として，2011年東北地方太平洋沖地震津波を事例とし，DONET 1の周辺海域である紀伊半島沿岸において検討を行った．このイベント時にはDONET 1は運用段階にあり，海底圧力計10箇所で津波が記録された．これらの海底圧力計の観測値を用いてデータ同化を行い，沿岸における最大津波高推移の計算値と観測値の比較を行った．この手法により予測されるMHF12は，観測されたMHF12の値と顕著な一致性が示された．このことは，データ同化が津波警報解除の指針として重要な洞察をもたらす可能性を示唆している．さらに，東北地方太平洋沖地震津波に類似する数値実験を実施し，DONET 1およびDONET 2における計算波形に基づいたデータ同化では，紀伊半島沿岸と四国沿岸に対して正確なMHF12の予測性能を持つことが確認できた．
本研究では，津波警報解除予測に初めて津波データ同化手法を導入し，その利用可能性について検討を行った．これまでの研究と異なり，本手法は予め計算されたシナリオベースや観測に基づく減衰特性を使用せずに津波警報解除に向けた明確で合理的な科学的基準を提供することが可能となる．今後の更なる展開として，データ同化プロセスに非線形波動モデルを組み込み，津波警報解除の予測精度向上に向けた検討を行う．

© The Seismological Society of Japan

Numerical experiments of tsunami wavefield estimation based on adjoint equations

*Takuto MAEDA[1]

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

稠密な観測網の記録から強い揺れや津波を即座に推定し，対象とする地点において波の到達前にそれを予測する即時技術手法の1つとして，震源や波源のイベント発生時にこだわらず，任意時点における波動場の状態を直接推定するデータ同化に基づく手法をこれまで開発してきた．特に近年我々は，支配方程式に従う予測波形と観測波形の有限時間区間における2乗残差からなる目的関数を最小化する条件から，支配方程式に対するアジョイント方程式を導出し，その時間反転解が，時間区間の初期状態の推定値を更新するための目的関数の勾配になることを明らかにしてきた．本研究ではこの波動場推定法を津波即時予測問題に適用すべく，東北地方を模した現実的な海底地形モデルにおける数値実験を行った．

数値モデルは東北日本太平洋沖の東西700 km・南北1200 kmの領域を仮定し，海底地形モデルとしてはGlobal tsunami Terrain Modelをカーテシアン座標系に投影した上で1 km間隔に再サンプリングしたものを用いた．まず，北北東方向の長軸に200 km，それに直交する方向に100 kmの特徴的空間スケールを持つcos関数型の初期水位を仮定し，線形長波津波モデルを空間グリッド間隔1 km，時間ステップ１sの差分法で解くことでS-net観測点を模した位置における模擬津波記録を作成した．この空間離散的な記録のみを用いて，アジョイント方程式による方法で津波波動場の推定を行った．アジョイント方程式による推定では，まず何らかの初期状態をもとに実時空間における津波の予測を数値シミュレーションにより行う．次に，観測点から観測波形と予測波形の残差を放射させつつ時間を逆方向に解き，波動場状態を推定したい時刻におけるアジョイント方程式の解から，実時空間における波動場を更新する．必要に応じて再び実時空間における予測とアジョイント方程式による波動場更新のイタレーション計算を行う．

アジョイント方程式の解からモデル状態を逐次的に推定する際には，モデル状態更新の大きさの適切な選定が必要である．更新が少なすぎると収束まで時間がかかり即時予測の目的には適さず，一方で大きすぎる場合には数値的な発散を起こし，モデル推定そのものが破綻する事例が多数観測された．そこで本研究では，可変刻み法の一種であるArmijoのルールを採用し，更新後の目的関数が更新前よりも必ず小さくなることの要請から，モデル状態更新の大きさを支配するパラメタを動的に変更する方針を採用した．実際には，シミュレーションのサイズ，グリッド間隔，目的関数に用いる観測記録の時間長などにより，モデル状態更新の大きさはほぼ一定値に収束することが観察された．

まずは津波発生の瞬間から一定時間長の記録を用いて，通常の津波インバージョンのように初期水位の推定を試みた．グリーン関数を使わず，かつ拘束条件なしにすべての数値グリッドを推定するという極端な劣決定状態であるにもかかわらず，解析時間窓長300秒以上において，Variance Reduction（VR）の値が99%を超える，ほぼ完全な初期水位分布が再現された．ただし，観測点グリッドからそのまま残差波形を放射する場合には最大1000回程度のイタレーションが必要であった．しかし，数値実験によると多数回のイタレーションは主として波動場の短波長成分を減衰させていく効果を持つことが確認できたため，観測点から輻射する残差波形自体に5x5グリッドの平滑化を実施したところ，収束までのイタレーション数を1/10以下と劇的に減らすことができた．

一方，本手法は原理的には任意の時刻の波動場が推定できるはずであるにもかかわらず，津波発生から500秒～1000秒の状態を直接推定することは叶わず，真の波動場に類似はしているものの，曲がりくねった形状をもつ偽の波動場に収束してしまった．それでもVR値は90%を超えてしまうため，有限の記録を真の解に近いくらい良く説明ができるような局所解に落ち込んでしまったものと考えられる．すなわち，適切な波動場推

© The Seismological Society of Japan

定を行うためには，その真の解にある程度近い適切な初期状態から始めるか，あるいは局所最小を乗り越える高度な推定アルゴリズムを用いるかのどちらかが必要となることが示唆される．

そこで本研究では，これまでの予備的な検討を踏まえ，アジョイント方程式による推定を1度行うたびに，推定対象とする時刻と利用する観測時間窓をそれぞれ1時間ステップ未来に平行移動する，という方法を採用した．これは，各時間ステップにおける波動場状態の推定の初期値として，それまでに推定された状態からの予測値を用いるということでもある．推定すべき波動場の状態は時々刻々と変化していくことになるが，その変化よりも素早く状態の推定がなされ，実時間にして数分の経過時間のうちに同化されたモデル波動場の状態が真の波動場に追随するようになり，津波発生から一定時間後の状態もほぼ完璧に再現することに成功した．逐次的なモニタリングに適しているという波動場推定の有用性は維持しつつ，有限の時間幅の記録をもってより適切な波動場の推定ができる本手法は，津波の現況モニタリングならびに即時予測の手法の一つとして有効に用いることができると期待される．

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S06. Crustal structure

Wed. Nov 1, 2023 1:30 PM - 3:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 4:30 AM - 6:00 AM UTC | Room C F202

[S06] PM-1

chairperson:Kazuya Shiraishi(JAMSTEC), Shun Fukushima(ERI, Univ. of Tokyo)

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

[S06-01] Spatio-temporal variations in seismic structure detected by seismic interferometry using OBS records and their interpretation

*Takehiro Sato[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Takagi[1], Ryota Hino[1], Masanao Shinohara[2] (1. Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S06-02] Estimation of P-wave velocity and Vp/Vs structure of upper crust off Sanriku, Japan by distributed acoustic sensing data

*Shun FUKUSHIMA[1,2], Masanao SHINOHARA[2], Kimihiro Mochizuki[2], Tomoaki Yamada[2], Ryota Hino[3], Ryosuke Azuma[3], Yoshihiro Ito[4], Yusuke Yamashita[4] (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 3. Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruption, Graduate School of Science, Tohoku UniversityEarthquake and Volcanic Eruption, Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S06-03] Lateral structure variation across the central part of the NE Japan Arc deduced 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[3], 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. JOGMEC)

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

[S06-04] 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. AORI, The University of Tokyo, 2. AIST (Advanced Industrial Science and Technology), 3. JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), 4. Geoscience Enterprise)

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

[S06-05] Crustal structure in the 17th century Kuril earthquake and its linkage to the occurrence of the large shallow slip

*Ryosuke AZUMA[1], Shuichi Kodaira[2], Ryota Hino[1], Gou Fujie[2], Koichiro Obana[2], Fumiaki Tomita[3], Yusaku Ohta[1] (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. JAMSTEC, 3. IRIDeS, Tohoku Univ.)

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

[S06-06] Detailed structure of the old accretionary sediments revealed by reprocessing of OBS survey data in Nankai Trough

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

Spatio-temporal variations in seismic structure detected by seismic interferometry using OBS records and their interpretation

*Takehiro Sato[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Takagi[1], Ryota Hino[1], Masanao Shinohara[2]

1. Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震波干渉法を用いた常時微動解析により，地震活動などに伴う観測点周囲の地下構造の時間変化が抽出可能である (e.g., Hobiger et al., 2012)．我々はこれまでに，日本海溝・千島海溝会合部で行われた2006～2007年の海底地震計 (ocean bottom seismometer, OBS) 連続記録の地震波干渉法解析をおこない (Sato et al., AGU, 2022; Sato et al., JpGU, 2023)，(1) 中規模の近地地震 (Mj 6.2) に伴う地震波速度の最大0.2%程度の低下と地震後の回復，(2) 2回の千島列島沖巨大地震 (Mw 8.3のプレート境界地震，Mw 8.1のアウターライズ地震) の後には海溝近傍の観測点に限定的に相関係数の低下，という変化が認められた．一方で，解析時の時間平滑化の影響により地震波速度や相関係数低下の時間スケールを正確に把握できておらず，こうした変化のメカニズムの議論が不十分であった．また，こうした大きな地震動入力時の変化とは異なり，(3) 観測網直近で発生した３回のテクトニック微動活動 (Kawakubo, 2021) 期間中には地震波速度，相関係数とも変化は認められなかった．この結果は，微動活動に伴って構造変化が観測された南海トラフ (Tonegawa et al., 2022) やヒクランギ (Wang et al., 2022) の事例と異なる．日本海溝・千島海溝会合部で変化が検出されなかった原因に，先行研究の地域と比較して活動の規模が小さい，あるいは震源域が深い，という２つの仮説が考えられる．

本発表では，地震波速度や相関係数低下の時間スケールについてより詳細に考察するため，時間平滑化をかけずに解析をおこなった．その結果，地震波速度変化の分解能は約0.2%となり，15日の時間窓で平滑化した場合の約0.05%から大幅に劣化したものの，近地地震に伴う地震波速度低下が地震発生日にステップ的に起こっている様子が確認できた．一方で，遠地巨大地震に伴う相関係数の低下は，Mw 8.3のプレート境界型地震では3日間程度，Mw 8.1のアウターライズ地震では1日間にみられ，その後はすぐに回復したことがわかった．相関係数が低下していた期間が，２つの巨大地震直後にMw 6 以上の余震活動が活発だった期間と対応することから，相関係数の低下の原因には，本震と規模の大きい余震からの地震動が観測波動場に混入したため，観測点周囲の波動場が時間変化したことで，相関係数の低下が生じたと考えられる．

スロー地震に伴う構造変化については，観測事例を増やすことを目的として，研究対象領域を三陸沖の海域まで拡張した．三陸沖では2007～2008年に49台のOBSからなる稠密な観測網が展開された．この領域でも日本海溝・千島海溝会合部と同様にテクトニック微動活動を伴った非地震性の活動が活発である (Takahashi, 2021; Matsumoto et al., AGU, 2022) ことから，日本海溝におけるスロー地震活動と構造変化の関係について議論を深めるための知見が得られることが期待される．

© The Seismological Society of Japan

Estimation of P-wave velocity and Vp/Vs structure of upper crust off Sanriku, Japan by distributed acoustic sensing data

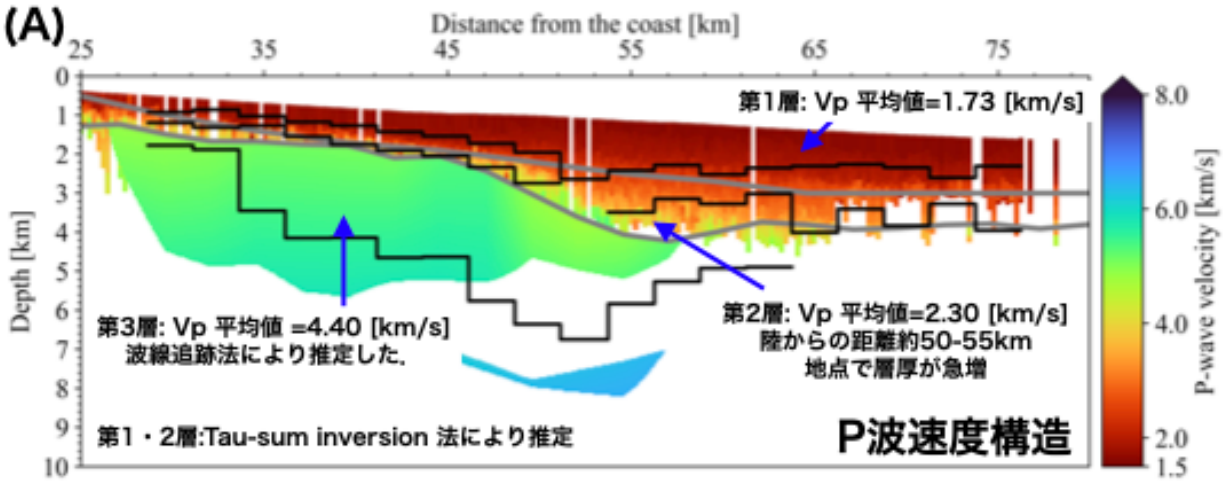
*Shun FUKUSHIMA[1,2], Masanao SHINOHARA[2], Kimihiro Mochizuki[2], Tomoaki Yamada[2], Ryota Hino[3], Ryosuke Azuma[3], Yoshihiro Ito[4], Yusuke Yamashita[4]

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 3. Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruption, Graduate School of Science, Tohoku UniversityEarthquake and Volcanic Eruption, Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

近年，光ファイバをセンサとして，歪みを数m間隔で数十km以上の連続長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing(以下 DAS)が地球科学分野に応用されつつある(e.g., Zhan 2019)．地震学的な手法を稠密なDASデータに適用することにより，これまでとは格段に空間分解能が高い地震波速度構造を推定できると考えられる．特に高空間分解能構造決定がこれまで難しかった領域，例えば海域における最上部地殻（深さ10km以浅）のVp/Vsの詳細な２次元構造(ケーブル直下の鉛直+水平２次元構造)などに効果的と思われる．そこで，本研究では，岩手県三陸沖に敷設された光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用したDAS観測記録を用いて，ケーブル下の最上部地殻の詳細な地震波構造を推定した．
まず，2020年に行われた制御地震探査DAS・海底地震計(OBS)データを用いてP波速度構造を推定した．制御震源にはエアガン4基を使用し，発震間隔は約100m，DASの観測点間距離は約5mである．最浅部のP波速度構造はTau-sum inversion法 (e.g. Shinohara et al. 1994) により推定した．DAS記録とOBSに対して共通受信点記録を作成し，それぞれ距離-時間領域からτ(intercept time)-p(ray parameter)領域への変換を行った．DAS記録については，超稠密であることを利用して，隣接する51受信点のDAS記録を重合してτ-p領域変換を行い，1次元P波速度構造を求めた．また，DASデータは長い区間に渡って，連続的に収録されていることから，約250m間隔に1次元P波速度構造を推定し，それらを配置することで，測線下の二次元P波速度構造を作成した(図A)．受震点にOBSを用いた場合は，OBS直下の一次元構造に限定されるが，DASは長距離に渡って，観測点密度が飛躍的に高いため，空間的に連続した1次元速度構造を推定することにより，2次元構造を求めることができる．続けて，深部のP波速度構造をOBSとDASによる初動走時を用いて，破線追跡法 (Zelt and Smith 1992) により推定した．DAS記録を破線追跡法に用いることで，波線が大幅に増え，構造推定の空間分解能が向上する．推定されたP波速度構造は，4層からなっており，第1 –3層目のP波速度の平均値は, それぞれ, 1.73 2.30, 4.40 km/sであり，各層の境界の深さは，それぞれ, 2 km以浅，2 –4 km，そして2 –7 kmである(図A)．各層のP波速度の水平方向不均質を0.05, 0.8, 0 .21km/sの精度が把握することができた．また，層厚についても，例えば，第2層は，0.5 km程度から1kmに水平距離50 –55 kmで急増することが把握された．このように，DASデータに対して制御地震探査を適用することで，水平分解能が向上し，堆積層内における水平方向の不均質を明らかにすることができた．
S波速度構造についてはDAS記録に対してSpatial auto-correlation法(SPAC法，Aki 1957, Nakahara et al. 2021)を適用して得られた表面波の位相速度から推定した(Fukushima et al. 2022)．S波速度構造にはブートストラップ法により推定した誤差も含めて有意な3つの速度不連続面があり，制御地震探査により推定したP波速度構造と各層厚は整合的である．第 1 –3層目のS波速度は, 0.44, 0.80, 1.40 km/sである．第４層目のS波速度は2 km/sより大きい．
稠密なDASデータに対して地震学的な手法を適用することによって，従来の海底地震計を用いた構造探査では求めることが難しかった海底下浅部のP波およびS波速度構造を空間分解の数kmで求めることができた．これらの結果から，さらにVp/Vsの詳細な空間分布を推定可能である．そこで，各層ごとのVp/Vs比の空間分布を，S波速度構造の分解能で求めた．第1– 3層目のVp/Vs値は，それぞれ4.27, 2.88, 3.15であった．第1– 3層のVp/Vs値の空間的な標準偏差は，それぞれ，1.28， 0.33，0.40と第2層が最もばらつきが小さい結果になった．第4層については，S波速度は確定していないため，議論しない．第１層は，海岸からの距離55 km以遠において海底からの深さ1.5 km以内はVp/Vs値が6以上であるように，空間的な不均質は強く，Vp/Vs値の

© The Seismological Society of Japan

ばらつきも最も大きい．第1層と第2・3層を比較すると，第２・3層の方がVp/Vsの平均値は低い．また，空間的なVp/Vs値のばらつきも第一層と比較して小さい．第２層と第３層の速度境界は，P波およびS波速度は認識できる一方，ばらつきを考慮するとこれらの層の間ではVp/Vs値に有意な変化はない． 第1–3 層はS波とP波速度，Vp/Vsの値から堆積層であり，第4層は火成岩層から構成されると解釈される．これらの解釈は，これまでの研究と調和的である(e.g., Takahashi et al. 2004, JAMSTEC 2004, Regalla et al 2013).



(A)岩手県三陸沖に敷設された光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用したDAS観測記録に対して制御地震探査を適用して推定したP波速度構造．黒線はS波速度境界面を示す．灰色線はP波速度境界面を示す.

© The Seismological Society of Japan

Lateral structure variation across the central part of the NE Japan Arc deduced 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[3], 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. JOGMEC

Since 2021, we have conducted intensive analyses for seismic data which were collected in 2019 on the onshore seismic reflection/refraction line across the central part of the NE Japan arc (Sato et al., 2020a, b). This line,150 km in length, was laid out from the Shonai Plain on the coast of the Sea of Japan to the eastern margin of the Kitakami Mountains on the Pacific coast. A velocity structure model so far obtained shows interesting structural features including the highly deformed sedimentary layers, the complicated Moho with a 2-km thick transition zone and the upper mantle reflectors at 38 and 46 km depths (Iwasaki et al., 2021a,b, 2022a,b, 2023).

Geologically, the surveyed area has been seriously affected by several tectonic processes since the Miocene backarc spreading (Sato et al., 2020a, b). Although our model shows the highly complicated sedimentary structure in the uppermost crust, the lateral structural variation, probably existing also within the crystalline upper/middle crust, has been left unclarified. Since 2022, we have reanalyzed our data to elucidate such structural heterogeneity by combining travel-time analysis and amplitude calculation based on the asymptotic ray-theory (Iwasaki et al., 2022b, 2023).

As the first step of the present study, we reevaluated the seismic velocity at the top of the crystalline crust. After removing trave-time fluctuations on the individual seismic traces arising from the shallow and local structure by using time-terms obtained along the profile (Iwasaki et al., 2022b), we made stacked section to enhance the first arrivals travelling the uppermost crust. This enabled us to trace the first arrivals 5-10 km further as compared with the original (unstacked) section and confirm our travel-time picking. The upper crustal velocities obtained through this process were almost consistent with the previous results (Iwasaki et al., 2022b, 2023).

Next, we calculated synthetic seismograms for 22 additional shots in the seismic reflection line (the western part of the profile) as well as 24 large energy shots used in the previous analyses. This calculation was aimed to identify shallow structural variation and local reflectors. The seismic data from the added shots revealed more precise structure of the sedimentary part in the western part of the profile. Particularly in the westernmost part, the uppermost low velocity layer with 2.2~3.1 km/s in the previous model is separated to the upper high velocity gradient part and lower part of low velocity gradient. A high velocity contrast (~0.8 km/s) existing in the sedimentary package at a depth of 3.5-4 km produces large amplitude reflection within an offset of 5-10 km. Such structural features are clearly different from those further east. The upper crystalline crust is divided into two parts. The upper part, 1.5-2.5 km thick, has a velocity of 5.65~5.8-5.8-5.9 km/s This velocity is relatively high (5.8 km/s) in the western part (the backarc basin basalt area) but slightly decreases to 5.65~5.7 km/s in the middle and eastern parts beneath the felsic caldera complex (Ou backbone range) and the Kitakami river valley. In the felsic caldera complex, we recognized local reflectors with a velocity contrast of ~0.1 km/s at a depth of 4-6 km. The velocity contrast between the upper and lower parts is 0.1-0.2 km/s probably with a slight lateral change along the profile.

The uppermost crust in the easternmost part of the profile (beneath the Kitakami Mts.) is characterized by a very thin sediment and higher velocity crystalline part (5.8-5.9 km/s). This high velocity block descends to the west beneath a thick sedimentary package beneath the Kitakami river valley. Such structural

© The Seismological Society of Japan

geometry is constrained down to about 5-km depth both from the travel times of the first arrivals and later phases.
Now our analysis is being focused on the middle crustal level. The boundary between the uppermost and middle crust is estimated to be at a depth of 10 km, while the boundary between the middle and lower crust at around 12-14 km depth. Wide-angle reflections from these interfaces were recognized in some shot records in the central and eastern parts of the profile, indicating that their depths and velocity contrasts show lateral change of 1-2 km and 0.1-0.2 km/s, respectively.

References

Iwasaki et al., 2021a. 2021 JpGU Meeting, SCG49-05. Iwasaki et al., 2021b. 2021 Fall Meeting of SSJ, S06-03. Iwasaki et al., 2022a. 2022 JpGU Meeting, SCG50-04. Iwasaki et al., 2022b. 2022 Fall Meeting of SSJ, S06-06. Iwasaki et al., 2023. 2023 JpGU Meeting, SCG62-P02.Sato et al., 2020a. 2020 JpGU-AGU Joint Meeting, MIS03-P05. Sato et al., 2020b. 2020 Spring Meeting of JAPT, 016.

© 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. AORI, The University of Tokyo, 2. AIST (Advanced Industrial Science and Technology), 3. JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), 4. Geoscience Enterprise

日本海溝付近では，海溝型巨大地震が発生した後に，連動して巨大津波を引き起こすアウターライズ地震が発生している．例えば，海溝型地震である1896年明治三陸沖地震の後に，1933年に付近のアウターライズ地域では正断層型地震である昭和三陸沖地震が発生した．これらの地震の発生様式を解明するために，日本海溝アウターライズの浅部地殻構造を調査すること，そしてアウターライズで発達する正断層の現状解明することは重要な課題である．

日本海溝周辺における地質調査は長い間続けられていて，海底面下の構造を解明するのに多チャンネル反射法地震探査(MCS)が重要な役割を担っている．本研究は，日本海溝周辺において海洋研究開発機構(JAMSTEC)が1997年から取得したMCSデータおよび，東京大学大気海洋研究所が所有する可搬式MCSシステムを学術研究船に搭載し2019，2020，2022年3回の航海で取得したMCSデータに対し，深度変換などを施しMCS深度断面図を作成した．MCSデータを処理した結果，日本海溝アウターライズ地域広範囲の浅部地殻は，遠洋性堆積物・チャート・音響基盤層（玄武岩）の三つの層から成っていることが確認できた．そして正断層群が発達し，明瞭なホルスト・グラーベン（地塁・地溝）構造が発達している．注目すべきは，一部の地域でチャート層の反射面が消失し，音響基盤が異常に不連続で低周波数となる現象が確認した．プチスポット火山の存在によってMCS測線の音響基盤がかく乱されている現象は多数の先行研究でも報告されているが，今回は三陸沖付近で広範囲の音響基盤異常が確認されてた．

本研究はMorris et al.(1996)で提唱されたSlip tendency *(Ts)* を利用し日本海溝アウターライズに発達する正断層群の活動性を評価する．*Ts* は各断層面に作用するせん断応力と垂直応力の比であり，*Ts* 値が大きいほど断層は再活動し易く，地震発生のリスクも高いことが先行研究で報告されている．*Ts* の計算方法としては，まず地震の発震機構を用い，Yamaji et al. (2006)で提唱された応力インバージョン法を利用し断層周辺の応力場を推定する．使用する地震発震機構データはJAMSTECが日本海溝周辺に設置した海底地震計(Obana et al. 2018, 2019, 2021)および防災科研(NIED)の広帯域地震観測網(F-net)によって記録されている，岩手沖及び宮城沖のアウターライズで発生した地震のメカニズム解データである．その後，MCS深度断面図及び海底地形図を利用し断層の方位角及び傾斜角を測定することで，断層面に作用するせん断応力と垂直応力を求める．

日本海溝周辺の海底地形図とMCSデータを分析した結果，1）日本海溝周辺の断層の走向分布は海溝軸方向，磁気異常線方向，磁気異常線と垂直する方向の三つに集中している；2）西傾斜を持つ断層は東傾斜を持つ断層より高い*Ts* を持つ傾向がある；3）東北沖地震影響の領域では高い*Ts* を持つ断層の割合が高いことが分かった．

© The Seismological Society of Japan

Crustal structure in the 17th century Kuril earthquake and its linkage to the occurrence of the large shallow slip

*Ryosuke AZUMA[1], Shuichi Kodaira[2], Ryota Hino[1], Gou Fujie[2], Koichiro Obana[2], Fumiaki Tomita[3], Yusaku Ohta[1]

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. JAMSTEC, 3. IRIDeS, Tohoku Univ.

北海道十勝沖～根室沖では500年周期で活動する巨大地震の発生が高い切迫度で危惧される。17世紀地震の断層モデルには海溝から数十キロの範囲のすべり量が深部側よりも相対的に大きい特徴があり、東北沖地震の事例と類似するため、千島海溝地震も浅部大すべりを起こす可能性がある。日本海溝宮城沖では、浅部大すべり域に限定して上盤内部に顕著な反射帯が観測され、浅部すべりの発生条件が構造によって規定される可能性が示唆される。以上を背景に、東北沖地震と17世紀地震でプレート境界浅部のふるまいが類似するならば、千島海溝においてもすべりの空間変化に対応する構造変化があると考え、17世紀地震震源域の構造、特に根室沖の既往探査 (Nakanishi et al., 2004) で技術的な制約のために未把握であったプレート境界浅部の把握を、稠密OBS・MCS構造探査の解析により進めてきた (東・他、JpGU、2023)。本発表では得られた２次元Vpモデルの特徴の抽出と解釈を進め、17世紀地震断層モデルとの空間比較からプレート境界深部／浅部すべりの境界を規定する構造とその役割を考察する。

東・他（JpGU、2023）による初期値依存性を考慮した２次元走時トモグラフィにより、既往探査では未把握であった島弧地殻よりも海溝側の、海溝から60 kmの範囲においてプレート境界の上盤の速度構造が著しく変化する様子が把握されている。千島前弧の先端部構造は、0–30 kmにVp < 3.5 km/sのウェッジ堆積物、30–60 kmにVpが海溝側 (4 km/s) から陸側 (5.5 km/s) へ水平方向に大きく増加する遷移帯で構成される。遷移帯内部には、MCSイメージングにより、厚さ5 kmほどにわたり積み重なって分布する不連続な反射面群が存在し、反射面のジオメトリが速度変化の向きと平行である様子からは、走時解析では解像の難しい薄い低速度層のような貫入構造の存在が示唆される。

本研究により把握された遷移構造における速度差（4.0–5.5 km/s）の実態は、付加した古いウェッジ堆積物の固結具合に応じた速度増加 (Jamali Hondori and Park, 2022)、あるいは、島弧地殻先端部の水圧破壊による速度低下 (von Huene et al., 1994) を示すものと考えられる。一方、遷移帯内部の反射性の成因には、遷移帯の下端付近の温度環境 (65 km付近で100℃、Nakanishi et al., 2004) で活発化するプレート間堆積物の脱水反応 (Kimura, 2012)、あるいは、遷移帯が古いウェッジ堆積物で構成される場合には圧密による排水によって供給されるであろう水の存在が考えられる。そうした水の分布域から海底面への排水路がない場では、静水圧より高い状態の間隙圧が維持される (Jamali Hondori and Park, 2022)。実際、反射面群から海底へ伸びるような反射構造はみとめられず、遷移帯が高間隙圧状態にあると推察される。

このようなVp遷移帯はN断層とS断層の境界部に位置しており、両断層間の地震時の振る舞い方の違いへの関与が伺える。津波地震を含む浅部すべり域の上盤プレート構造には、一般的に、Vpが ~6 km/sより遅く海溝に近づくほど減少するために、剛性率が著しく低下する傾向がある (Sallarés and Ranero, 2019)。根室沖のS断層上に、~6 km/s よりも有意に低速度の遷移帯とウェッジが分布する様子は、Sallarés and Raneroの示したトレンドに矛盾せず、他の津波地震発生場と同様の地震学的構造の特徴を有することを示唆する。一方、根室沖に認められる構造ーすべりの空間的な対応性は、東北沖における力学的固着強度の変化域 (Kubota et al., 2022) と反射帯 (Kodaira et al., 2017) との間にも酷似してみられる。こうした対応関係の共通性から、顕著な内部反射構造を持つVp遷移帯の形成がプレート境界の固着範囲を規定するひとつの要素であることが示唆され、根室沖S断層が東北沖において固着の弱い浅部大すべり域に対応すると考えられる。宮城沖では、JFAST掘削試料の摩擦実験(Ujiie et la., 2013) やプレート境界摩擦発熱の計測 (Fulton et al., 2013)、プレート境界すべり面の間隙圧分布 (Jamali Hondori and Park, 2022) によって、浅部大すべり域の摩擦強度が極めて低いことが指摘されており、同じような特性を根室沖のS断層も備えているかもしれない。

© The Seismological Society of Japan

Detailed structure of the old accretionary sediments revealed by reprocessing of OBS survey data in Nankai Trough

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

1. JAMSTEC, 2. JMA

南海トラフ・熊野灘海域では、ケーブル式の海底地震津波観測網(DONET)により海底観測が10年以上も継続されているほか、2019年にはプレート沈み込み巨大地震発生帯の実態把握を目指した超深度科学研究掘削も実施されているなど、世界でもっとも注目され、詳しく研究されているプレート沈み込み帯の一つである。人工震源を用いた海域地震探査についても例外ではなく、大規模な三次元反射法地震探査(2003年、2006年)に加えて、海底地震計(OBS)を稠密(1km間隔)に展開した屈折法地震探査(2004年)も実施されているなど、地下構造イメージング研究でも先端的・大規模な調査が集中して実施されてきた海域である。

海域地震探査は海底下の構造を把握するもっとも効果的なアプローチであり、その解析技術は常に進歩し続けている。たとえば、熊野灘の三次元反射法地震探査データは、2007年にMoore et al. (2007, Science)が当時の最先端の技術で詳細な地下構造のイメージングに成功した後、2019年には Shiraishi et al. (2019, G3)が10年の解析技術の進化を生かすことで、沈み込みプレート境界付近に厚い高速度層の詳細を把握するなど、沈み込みプレート境界付近の描像を刷新することに成功した。

稠密OBS探査データについては、まず2008年に古典的な走時解析による長波長P波速度構造モデルが報告された後(Nakanishi et al., 2008, JGR)、2012年には波形インバージョン(FWI)解析による高解像度地震波速度構造モデルが報告された(Kamei et al., 2012, EPSL)。Kamei et al. (2012)のFWI解析は、走時解析ではまったく確認できなかったプレート境界付近の低速度層を検出することに成功するなど、走時解析とは文字通り桁違いの高い解像度でP波速度構造をモデル化できることを示した画期的な研究成果であった。しかし、これらの先行研究から既に10年以上が経過し、解析技術の更なる高度化が進むとともに、実データへの適用に関する知見の蓄積も進んできた。

そこで本研究では、過去10年間にJAMSTECで得られたFWIの実データ適用に関する知見をフル活用して、稠密OBS探査データを再解析した。その結果、BSRなど前弧海盆の詳細な堆積層構造などFWI解析によって捉えられた浅部の地震波速度構造は地震波反射法探査結果と非常に整合的であることが明らかなった。さらに、プレート境界付近では、Kamei et al (2012) が指摘した低速度層の他に、Shiraishi et al. (2019)が三次元地震波反射法データに基づいて指摘した高速度層も存在していることが明らかになった。また、超深度掘削点(C0002)における Logging データと比較したところ、FWI解析結果は Logging データと非常によい一致を示すことも分かった。このように、最先端のFWI解析技術を用いることで、過去10年に進展した反射法や掘削研究と整合性の高い地震波速度構造モデルを得ることができた。

さらに、我々の新しいFWI解析結果は、これまで他の研究では検出できなかった興味深い構造的な特徴も描き出している。もっとも注目される点の一つは、古い付加体堆積物内に覆瓦構造(imbricated structure)が明瞭にイメージングされた点である。これまでにも反射断面で観測される断片的な反射波から古い付加体内の覆瓦構造の存在は示唆されていたが、連続的・明瞭に覆瓦構造をイメージングできたのは画期的である。興味深いことに、覆瓦構造を構成する各 thrust は厚い高速度層の上面付近に収斂し、その下にある低速度層である underthrust sediment には到達していないように見える。この観測事実は、underthrust、高速度層を含めた付加体の形成史を紐解くための一つの重要な鍵となることが期待される。

本講演では、FWI解析の詳細や信頼性を示すとともに、得られた地下構造モデルに基づき、巨大地震やスロー活動と地下構造の関係性や高速度層など特徴的な構造の形成に関して議論する。

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S06. Crustal structure

Wed. Nov 1, 2023 3:15 PM - 3:45 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:15 AM - 6:45 AM UTC | Room C F202

[S06] PM-2

chairperson:Ryosuke Azuma

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

[S06-07] Integrated data analysis of MCS reflection and OBS wide-angle seismic surveys in the Nankai Trough

*Kazuya SHIRAISHI[1], Gou Fujie[1], Ryuta Arai[1], Yasuyuki Nakamura[1] (1. JAMSTEC)

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

[S06-08] Subduction structure of the Kyushu-Palau Ridge that causes upper-plate fracture zones and weak interplate coupling

*Ryuta ARAI[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Dan Bassett[2], Tsutomu Takahashi[1], Yuka Kaiho[1], Yohei Hamada[1], Kimihiro Mochizuki[3], Rie Nakata[3], Masataka Kinoshita[3], Yanxue Ma[3], Yoshitaka Hashimoto[4], Kyoko Okino[5] (1. JAMSTEC, 2. GNS Science, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Kochi University, 5. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo)

Integrated data analysis of MCS reflection and OBS wide-angle seismic surveys in the Nankai Trough

*Kazuya SHIRAISHI[1], Gou Fujie[1], Ryuta Arai[1], Yasuyuki Nakamura[1]

1. JAMSTEC

沈み込み帯の地質構造や発達過程を理解するためには、沈み込む海洋プレートと付加プリズムの大局的形状のみならず、付加体内部の詳細な変形構造を知ることが重要である。しかしながら、前弧海盆堆積物に被覆された、複雑な変形構造が想定される古い付加体内部の不均質構造は、一般的な反射法データ解析手法で描像するのは困難である場合が多い。また、海上反射法探査で曳航するハイドロフォンストリーマーケーブルの長さの制約により、付加体内部の特に深い部分では速度情報の推定に不確定性が伴い、海洋地殻上面などの深部構造からの反射波の結像が低下する場合や、海底地震計による広角反射法探査から推定される速度構造および構造境界の解釈深度に相違が生じる場合がある。そこで、本研究では、南海トラフ室戸沖および日向灘において近接する約100kmの測線で実施された、海上反射法探査および海底地震計による広角反射法探査で取得されたデータを対象として、反射波信号の高S/N化処理および統合的解析の適用により、反射波プロファイルの改善を試みた。
対象とするデータセットは、室戸沖SIN136測線は海溝と直交、日向灘HYU01測線は海溝とほぼ並行な方向に位置する。それぞれ異なる調査航海で取得され、海上反射法探査では、総容量7,800cu.in.（127.8ℓ）または10,600 cu.in.（173.7ℓ）のエアガンアレイによる50m間隔の発震を、曳航長5.5kmのハイドロフォンストリーマーケーブルで観測し（「かいれい」室戸沖KR19-E03航海、「かいめい」日向灘KM20-05航海）、広角反射法探査では、総容量10,600 cu.in.（173.7ℓ）のエアガンアレイによる200m間隔の発震を、2km間隔で設置した海底地震計により観測した（「かいめい」室戸沖KM19-09航海および日向灘KM20-05航海）。既存解析では、海上反射法探査は、一般的なデータ前処理として、多重反射波や多様なノイズを抑制するための各種処理、エアガンバブルやゴースト反射を抑制する処理などを適用し、反射波速度解析を通じて時間領域および深度領域の重合前マイグレーションまで実施された（Nakamura et al., 2022）。また、海底地震計広角反射法探査データについては、長大オフセットを活かした初動走時トモグラフィに加えて波形インバージョンを適用することで高解像度な広域速度構造が得られた（藤江ほか, 2022; Arai et al., 2023）。
本研究で実施した追加解析では、海上反射法探査データに対する上述の一般的な前処理に加えて、まず、反射波データから抽出される地震波アトリビュートに基づき、共通中点から一定範囲内の地震波トレースを重合して反射波信号の高S/N化を図る、異傾斜反射波の重畳に対応した共通反射面重合法（multi-dip reflection surface method, MDRS法）(Aoki et al., 2010; 楢原ほか, 2021)を適用した。次に、海底地震計による広角反射法データから波形インバージョンで推定された速度情報を基にして、高S/N化された海上反射法探査データを用いた速度モデルの最適化と重合前深度マイグレーションを適用した。
追加解析の結果、既存解析の描像では不鮮明であった付加体内部には、室戸沖では多重の断層と褶曲を伴う変形構造や日向灘では複数の急傾斜な構造を示唆する、空間連続的な反射波群が明瞭になった。また、これらの構造はいずれも、海底地震計探査データの波形インバージョンから推定された地震波速度の空間変化によく対応している。追加処理前後の入力データを同一速度モデルで解析した結果の比較から、MDRS法による反射波データの品質改善効果を確認できた。また、既存解析結果で最大数kmの相違が見られた沈み込んだ海洋地殻上面の深度について、海底地震計による広角反射法探査から推定された速度構造を基にすることで、反射波の結像する深度および形状が補正され、両者で整合的な深度を示す反射波プロファイルが得られた。これらの結果は、海上反射法探査の反射波プロファイル改善と共に、海底地震探査データの波形インバージョンによる速度推定結果の妥当性も示すもので、海上反射法探査と海底地震計探査の統合的な解析が相互に有効であることが示された。

© The Seismological Society of Japan

Subduction structure of the Kyushu-Palau Ridge that causes upper-plate fracture zones and weak interplate coupling

*Ryuta ARAI[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Seiichi Miura[1], Shuichi Kodaira[1], Dan Bassett[2], Tsutomu Takahashi[1], Yuka Kaiho[1], Yohei Hamada[1], Kimihiro Mochizuki[3], Rie Nakata[3], Masataka Kinoshita[3], Yanxue Ma[3], Yoshitaka Hashimoto[4], Kyoko Okino[5]

1. JAMSTEC, 2. GNS Science, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Kochi University, 5. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

九州パラオ海嶺が沈み込む日向灘海域では、海溝軸近傍において低周波微動が発生するだけでなく（Yamashita et al., 2015, 2021）、海底に泥火山が広く分布することから (Ujiie, 2000)、海山沈み込み・スロー地震発生・流体挙動のそれぞれの因果関係について広く議論されている。例えば、Akuhara et al. (2023) は海底地震観測データのレシーバー関数解析に基づいて、低周波微動発生域直上の上盤プレート内（深さ3－4 km）に流体を示唆する低速度帯が存在することを示した。Arai et al. (2023) は稠密な屈折法探査データの解析によって、深さ10－13 kmに位置するプレート境界から海底面まで鉛直につながる幅数kmの低速度体が複数存在することを発見した。この低速度体は九州パラオ海嶺が沈み込むことで生じた破砕帯と解釈され、流体を豊富に含むとされるスロー地震の発生領域と連結していることから、プレート境界からの流体の上昇経路となっており、その一部は流体の出口となる海底面に泥火山を生じている、と考えられている。本発表では、Arai et al. (2023) による解析対象域をさらに東方に広げることで、上記の上盤プレート内の破砕帯が分布する範囲を明らかにするとともに、それらと相関するスラブの不均質構造について議論する。

海洋研究開発機構海域地震火山部門では、南海トラフ全体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多様なすべり現象の発生要因を理解することを目的として、2018年度より稠密な地震波構造探査を実施している。2021年度には、鹿児島県東方沖から南海トラフに平行な方向に延びるHYU01測線（Arai et al., 2023）の東方延長に海底地震計50台を2 km間隔で展開し（HYU03測線）、屈折法データを取得した。

これらHYU01測線とHYU03測線を統合した屈折法データに対して波形インバージョン解析を適用することでP波速度を高解像度で推定したところ、先行研究で指摘した上盤プレート内の低速度体が南海トラフに平行な方向に約100 kmにわたって存在することがわかった。この約100 kmという幅は海底地形から推定される九州パラオ海嶺の幅より数倍広い。また、この低速度体の直下に沈み込むフィリピン海プレートの地殻の厚さは約10 kmと推定され、通常の海洋性地殻よりも有意に厚いことがわかった。さらに、HYU01-03測線周辺の既存反射法探査データを用いて沈み込む直前のフィリピン海プレートの構造を確認したところ、基盤の起伏が大きい領域が九州パラオ海嶺より約60 km東方まで存在することもわかった。これら一連の結果は、九州パラオ海嶺の東縁部に特異な地殻が数10 kmにわって存在し、これらが沈み込んだ際に九州パラオ海嶺の本体と合わせて上盤プレート内の破砕帯の形成に関わっていることを示唆している。

HYU01-03測線の東端は高知県足摺岬の南方沖まで到達するが、ここでは日向灘海域とは対照的に大きなすべり欠損が存在することが指摘されている（Yokota et al., 2016）。上記の上盤プレートの破砕帯の分布およびフィリピン海プレート構造の空間変化は、このプレート間固着の東西方向（トラフと平行な方向）に不均質な分布ともよい相関がある。つまり、上盤プレートの不均質構造と同様に、プレート境界における地震発生様式の多様性も九州パラオ海嶺およびその周辺の特異なスラブ構造によって規定されている可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

Room C | Regular session：S05. Geothermal science

Wed. Nov 1, 2023 3:45 PM - 4:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:45 AM - 7:00 AM UTC | Room C F202

[S05] PM-2

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

[S05-01] Heat flow anomalies as indicator for subseafloor excess pore fluid promoting slow earthquakes around seamounts

*Masataka KINOSHITA[1], Yoshitaka Hashimoto[2], Yohei Hamada[3], Rie Nakata[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kochi University, 3. JAMSTEC)

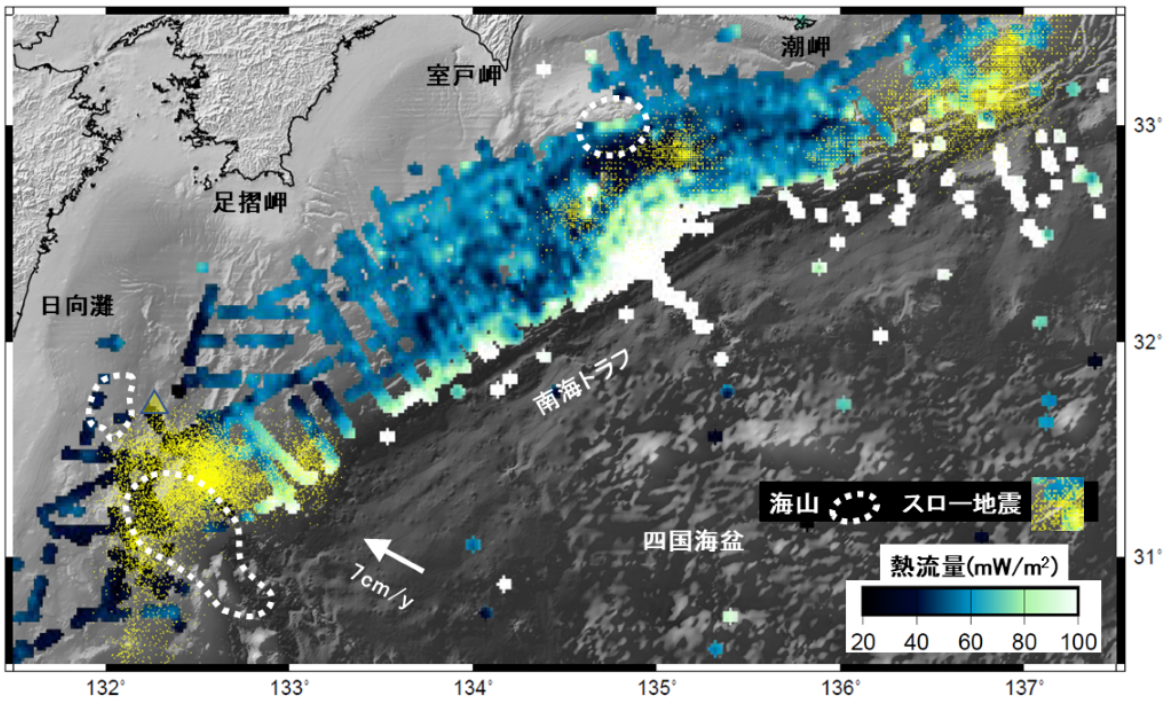
Heat flow anomalies as indicator for subseafloor excess pore fluid promoting slow earthquakes around seamounts

*Masataka KINOSHITA[1], Yoshitaka Hashimoto[2], Yohei Hamada[3], Rie Nakata[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kochi University, 3. JAMSTEC

沈み込み帯では，プレートの境界面の一部が定常的に滑り，他は固着ー地震滑りを繰り返すという単純なモデルは，固着域の周囲で繰り返し発生するスローー地震の発見により根本的に見直されることとなった．スローー地震の原因の一つが地下の流体による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ー地震発生に大きく影響することが認識されてきた（Barnes+, 2020など）．露頭観察・数値計算・実験により，海山沈み込みが上盤地層を変形・破砕し，応力や強度の不均質を生じることが推定された(Dominguez 1998 Tectonophys.; Sun+, 2020 Ngeo)．Wang & Bilek (2014 Tecto.)は，地震・測地研究から，沈み込み境界面の起伏が大きい場所では，プレート間の滑りはクリープが支配的だとした．海山周辺の高間隙流体圧がプレート間の固着を弱めクリープしている可能性も指摘された(Mochizuki+, 2008 Science; Ellis+, 2015 GJI)． 宮崎沖日向灘，室戸岬沖などの前弧斜面下で頻繁にスローー地震が起きている（図）が，そこは海山などの「突起」が沈み込んだ場所と密接に関係するように見える．南海トラフの西端にあたる日向灘は，世界でも類を見ない複雑な現象が起きている沈み込み帯である．かつて島弧であった九州ーパラオ海嶺（KPR）が沈み込んでいることが，地下構造の異常(Yamamoto+,2013 Tecto)や地磁気異常(Nakata+,2020 JpGU)から推定された (図3)．KPRを境として，北東側には若く平坦な四国海盆が沈み込み，南西側では古く凹凸に富む西フィリピン海盆が沈み込む．海溝の陸側では，北東側では固着が強く大規模な地震が発生するのに対し，その南西側はM8級の巨大地震の記録は残っていない(Lallemand+2018 G3)ことから，固着が弱いとされる(Wallace+,2009 Geology)．またKinoshita+（2020,JpGU）は，KPRおよびその西側では熱流量が極めて低く，東側で熱流量が急激に高くなることを示した． KPR上に位置する海山の周囲で微動・超低周波地震が時折発生し，震源位置が30-60 km/day 程度で移動していることが観測された(Yamashita+,2021 EPS; Tonegawa+,2020 GJI)．その原因として海山上面やその上盤内の間隙流体の移動が提案されている．一方，沈み込んだKPRの詳細な状況が，構造探査（Park+ 2009 EPS）や地震波トモグラフィ（Arai+ NatureCom）によりマッピングされてきた．Arai+は沈み込む海嶺が作る上盤プレート中に，スローー地震発生域から海底面までつながる流体経路を発見した． 一方室戸沖は，土佐ばえ下にある沈み込んだ海山の南側で微動が頻発しており，さらに海山の上の熱流量が，付加体先端部（40㎞～）に比べて有意に低いことが示された．その転移は海山の海側わずか4㎞の範囲で起こり，海側に向かって熱流量が倍増している．これは地形効果や堆積・浸食効果では説明が困難であり，その周囲に見いだされる断層や破砕帯を流路とした，流体の流出入の存在が想定される．沈み込んだ海山の周囲で微動・低熱流量という特徴は日向灘にも共通し，海山周辺の変形・破砕や，それら起因する流体移動が起こり，プレート境界の滑り様式が海山などの沈み込みによって大きな影響を受けることを示唆する．しかしながら，これまでの調査で，流体移動の直接的な証拠は得られておらず，スローー地震と流体の関与を結びつけることができていない． そこでまず，3次元有限要素法により，海山沈み込みによる応力場の擾乱を計算し，downdip側で圧縮，updip側で引張場になることが確認された．一方海山とその周辺に適当な浸透率分布を与え，KPRを境に沈み込むプレートの年代が海山をはさんで急変する熱的影響を評価したところ，海山内部を高浸透率に設定すると，海山内部で熱水循環が発生し熱流量が部分的に低くなることが示された．本発表ではこれを発展させ，応力擾乱を原動力として加えた多孔質弾性体による熱・流体移動シミュレーションを行う．その際．海山の通過跡（海側）に破砕を想定し，間隙流体吸い込みによる低熱流量が再現できるかテストする予定である． 図　紀伊半島以西の熱流量分布、スローー地震分布と沈み込んだ海山、熱流量分布．(Nakamura+,2022; Takemura+,2019,2022, Yamamoto+,2022, Nakano+,2018, Yamashita+,2015,2021, Tamaribuchi+,2022, Ogiso+,2022ほか）．

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 4:00 PM - 4:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 7:00 AM - 7:30 AM UTC | Room C F202

[S12] PM-2

chairperson:Yasuo Yabe

4:01 PM - 4:16 PM JST | 7:01 AM - 7:16 AM UTC

[S12-01] Effect of water vaper on the microphysical processes of friction of quartz gouge

*Yasuo YABE[1] (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

[S12-02] In-situ stress at the basement under Osaka plain (7) - In-situ stress measurement at NIED Osaka observation well by DCDA method -

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

Effect of water vaper on the microphysical processes of friction of quartz gouge

*Yasuo YABE[1]

1. Graduate School of Science, Tohoku University

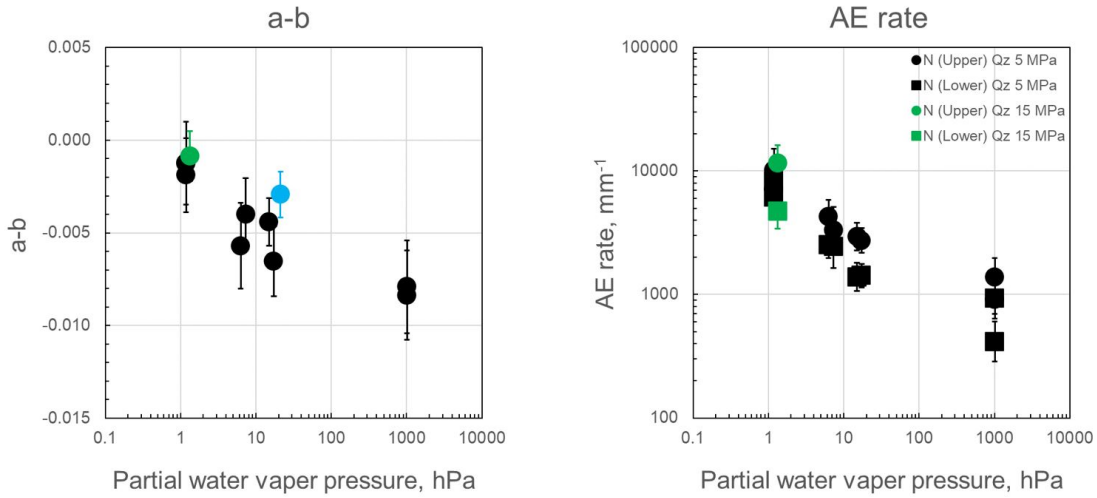
はじめに： 石英ガウジの摩擦特性は，真実接触点の変形過程を反映しており，試料表面の吸着水や実験雰囲気中の水蒸気の有無に影響を受けることが知られている（例えば，Dieterich and Conrad, 1984; Frye and Marone, 2002）．しかし，変形過程の詳細は不明な点が多い．本研究では，湿度を制御した雰囲気中で，石英ガウジの摩擦すべり実験を行い，その摩擦特性とAE活動の湿度依存性を明らかにする．また，その結果に基づいて，真実接触点の変形過程について考察する．

実験方法：実験は，東北大学地震・噴火予知研究観測センター所有のロータリー式せん断試験機を用いて，乾燥状態（相対湿度7 %），室内状態，湿潤状態（相対湿度100 %），加水状態（間隙水圧は制御しない）の４通りの雰囲気中で行った．法線応力は5 MPaで一定に保った．石英ガウジは，セメント強さ試験用の標準砂（石英が98 %）を乳鉢ですりつぶし，目開き106 μmのふるいを通したものを使用した．ガウジはあらかじめ1 gごとに取り分けて，相対湿度5 %の容器で保管する．実験の際には，このガウジを，内径20 mm，外形30 mmの接触面を持つステンレス製の載荷ブロック間に素早く挟む．加水状態の実験では，この時に，0.25 mlの精製水を加えた．載荷ブロックに挟まれたガウジは，ステンレス製の容器で覆われ，容器内には湿度を調整した空気を送入して雰囲気を制御する．この状態で，一晩（約17時間）放置してから，法線応力を印加し，さらに1時間の圧密の後に実験を行う．すべり速度は，3-100 μm/sの間で，すべり量1-2 mmごとに0.5桁刻みで変化させた．最大すべり量は約140 mmである． ２つの状態変数を持つ速度・状態依存摩擦則を用いて，すべり速度変化に伴う摩擦係数の変化の観測値と理論値を，目視によりフィッティングして，摩擦構成則のパラメータを推定した．ガウジ層で発生するAEは，載荷ブロック内に設置したAEセンサーで観測する．AE活動は，単位すべり量当たりの発生数と振幅分布を特徴づける石本ー飯田の*m*値により評価する．

結果：実験開始直後は，ガウジの圧密等に伴うと思われる摩擦係数やAE活動の変動が大きいので，累積すべり量が50-120 mmのデータの平均値を水蒸気分圧に対してプロットする．水蒸気分圧は，実験中の室温と相対湿度の平均値から計算した．乾燥状態，室内状態，湿潤状態のそれぞれの水蒸気分圧は約1 hPa，6-7 hPa，15-17 hPaであった．加水状態の水蒸気分圧は1013 hPaとした．水蒸気分圧が増加の増加に伴い，(1) 摩擦構成則の*a*はわずかに減少し，(2) *b*は増加した結果，(3) *a-b*は，˜0から˜-0.08へ減少した．一方，水蒸気分圧によらず，(4) 摩擦係数は˜0.7で一定であり，(5) 状態変数の遷移距離（*Dc*）も一定であった．AE活動については，水蒸気分圧の増加に伴い，(6) AEの発生レートは減少するが，(7) *m*値は2.0-2.2で一定であった．

議論と結論：結果の(6)と(7)から，水蒸気分圧の増加に伴い，ガウジ層内部の変形過程が，脆性的なものから塑性的なものに変化していくことが示唆される．その結果，真実接触面積の接触時間依存性が強まり，結果の(3)と(5)が示すように，ガウジ層全体としては不安定性が増加すると考えられる．

© The Seismological Society of Japan



Effects of the partial water vaper pressure on (left) the rate dependence of friction (*a*-*b* of the rate- and state-dependent friction law) and (right) the number of AE events per unit sliding distance (AE rate). Black and green symbols represent experimental results for 5 MPa and 15 MPa normal stress, respectively. Blue circle in the left panel indicates that for a granite test piece under 5 MPa normal stress. Solid circles and solid squares in the right panel stand for AE rate measured by AE sensor in the upper and the lower forcing block, respectively.

© The Seismological Society of Japan

In-situ stress at the basement under Osaka plain (7) - In-situ stress measurement at NIED Osaka observation well by DCDA method -

*Kentaro OMURA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Earthquake and Tsunami Research Division

日本列島の原位置の絶対応力に関するデータ，特に深さ500mを越える深部データは，陸域においても，数少ない状況にあるなか，掘削で採取された既存の岩石コアを用いた地殻応力測定法を適用し，信頼性の高い地殻応力データをはばひろく取得することを目指してきた．本発表では，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する．本測定では，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，大阪平野における深層観測井の2つの例を報告してきたが，今回，新たに，大阪府の防災科研大阪観測井(北緯34˚42'57.3"，東経135˚31'11.6"，掘削深度1012.5m)を対象にした．深度615mまでは第四紀の大阪層群となる堆積岩(粘土，シルト，砂礫)がおおい，その下に中生代領家帯となる基盤岩(花崗閃緑岩から閃緑岩)が分布している．そこで，深度1110.15-.30mで採取された岩石コアを用いた．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ことが示された．岩石コアの弾性定数は，直接岩石試験による測定データがないため，同じ掘削井で実施されたPS検層による地盤のP波速度(5.5km/s)，S波速度(3.0km/s)と，孔内密度検層による密度(2.7g/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，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，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 D | Regular session：S15. Strong ground motion and earthquake disaster

Wed. Nov 1, 2023 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Nov 1, 2023 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room D F204

[S15] AM-1

chairperson:Keishi NOGUCHI, Masumi Yamada

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

[S15-01] Integration of multiple hypocenter determination methods for Earthquake Early Warning into the IPF method

*Keishi NOGUCHI[1], Koji TAMARIBUCHI[2], Naoki HAYASHIMOTO[1], Yuki KODERA[2] (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S15-02] Real Time Forecast of Long Period Ground Motions Using Strong Motion Records: A Numerical Experiment

*Teppei Enari[1], Takashi Furumura[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S15-03] Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan

*Hong Peng[1], Stephen Wu[1,2], Masumi Yamada[3,4] (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. The Graduate University for Advanced Studies, 3. Kyoto University, 4. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S15-04] To what extent are multiple earthquakes separable?

*Masumi YAMADA[1] (1. DPRI Kyoto University)

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

[S15-05] Effect of station density on the maximum observed seismic motion

*Shin AOI[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Hisahiko Kubo[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Integration of multiple hypocenter determination methods for Earthquake Early Warning into the IPF method

*Keishi NOGUCHI[1], Koji TAMARIBUCHI[2], Naoki HAYASHIMOTO[1], Yuki KODERA[2]

1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute

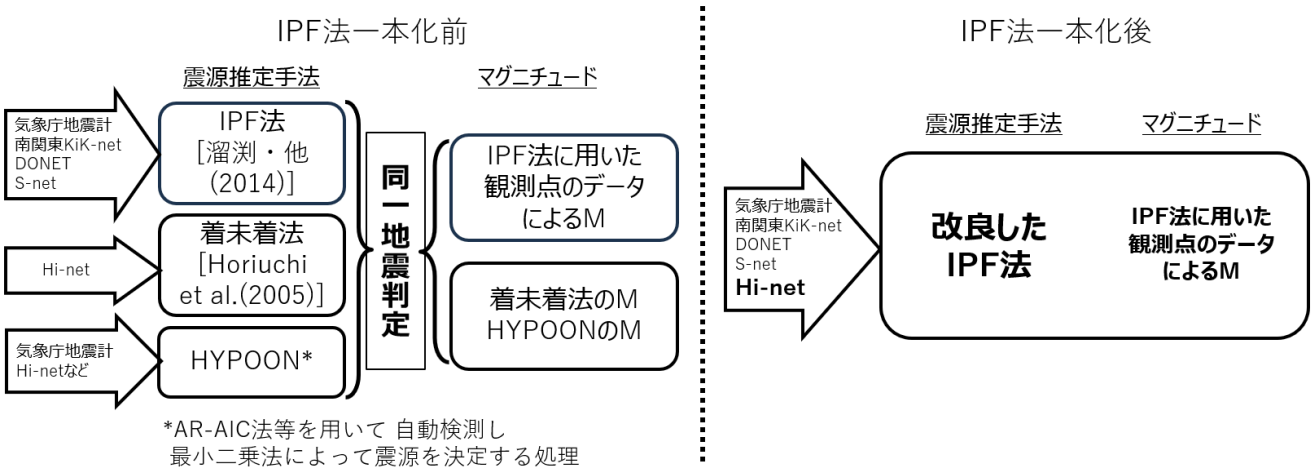
１．はじめに
緊急地震速報の震源推定では観測網に応じた複数の震源推定手法を併用しており、最初に精度良く推定できた震源を使って第１報を発表し、より精度の良い震源が推定できた場合には震源を更新して続報を発表するという方法を用いてきた。そのため、複数の手法が推定した震源について、緊急地震速報として発表する際にそれらが同じ地震かどうかを判定する必要があった（同一地震判定）。しかし、この同一地震判定の際に、同時多発地震やノイズを誤って１つの地震と判定した結果、過大な警報を発表する事例があった。この問題を解決するため、震源推定手法の１つであるIPF法 [溜渕・他(2014)]に、複数の観測網を統合して解析できるように改良を加えた上で、緊急地震速報の震源推定手法のIPF法への一本化を行った。本発表では、その改良内容と検証結果について紹介する。

２．IPF法の改良
IPF法への一本化を行う前の緊急地震速報では、それぞれ異なる入力データを用いた複数の震源推定手法を併用していた（左図）。震源推定手法をIPF法へ一本化するためには、すべての入力データをIPF法で処理する必要があり（右図）、Hi-net の高感度速度波形を加速度波形へ変換すること、処理観測点数の増加に対応するため観測点選別による負荷軽減を行うこと、及び同一判定ロジックの見直しなどを検討してきた[野口・他(2020)]。一方で、すべてのデータをIPF法に入力しただけでは、過去に発表した緊急地震速報と比較して深発地震など一部の地震で震源推定精度が悪くなることがあり、これに対応するためIPF法の尤度関数の改良を行った。
IPF法は以下の４つの残差について、残差が0のとき最大となるような尤度関数を設定している。
・主成分分析[横田 (1985)]と震央方位の残差（以下、震央方位残差）
・B-Δ法[Odaka et al.(2003)、束田・他(2004)]と震央距離の残差（以下、震央距離残差）
・振幅から計算したMと震源Mの残差（以下、M残差）
・検測時刻とP波理論走時の残差（以下、走時残差）
これらそれぞれの残差について、実データを用いてその傾向を分析したところ以下の特徴が得られた。
・震央距離残差は対数正規分布でバイアスがある
・震央方位残差、震央距離残差、及びM残差の標準偏差は震源距離によらずほぼ一定
・走時残差の標準偏差は震源距離依存がある
これらの特徴をもとに尤度関数の再設計を行った。

３・検証結果
2011年3月11日から4月30日、および2016年1月1日から2022年12月31日における、観測震度３以上の地震または当時緊急地震速報を発表した事例について検証を行った。その結果、改良したIPF法は、当時の緊急地震速報が誤った同一地震判定により過大な警報を発表した事例に対して、同時多発地震やノイズを適切に分離し正しく処理できることを確認した。また、当時の緊急地震速報と比較して同等以上の震源推定精度と迅速性を担保できることを確認した。課題となっていた深発地震の震源推定精度についても、走時残差の尤度関数に震源距離による観測点の重みを導入したことにより改善することを確認した。

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

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Real Time Forecast of Long Period Ground Motions Using Strong Motion Records: A Numerical Experiment

*Teppei Enari[1], Takashi Furumura[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

1. はじめに

大地震において遠地の平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けて、震源域近傍ー予測地点間の伝達関数に基づく予測の可能性を数値実験により検討した。本研究ではこれまで、微動の連続観測データを用いた地震波干渉法により伝達関数を求めたが、今回の発表では、自然地震から得られる伝達関数の活用を検討した。

これまでHoshiba (2013) や倉橋ほか（2013）は、伝達関数を用いて計算した観測点ー評価地点の地震動を、Kirchhoff-Fresnel（以下K-F）積分により多数の観測点分を足し合わせることで予測が可能であることを説明している。しかし、これらの研究の事例では地震波の平面波近似による１観測点での入力波形からの予測結果が示され、実際にK-F積分は用いられていない。本研究では、平面波近似を用いずに、震源から予測地点に至る様々な波線経路のうち第１Fresnel Zone内に位置する多観測点の波形データをK-F積分した長周期地震動予測の効果を検証した。

2. データと手法

本研究では、東北地方の浅い大地震により発生する関東平野の長周期地震動（周期４～10秒）を予測の対象とした。まず、実データに適用する前に、３次元地下構造モデル（JIVSM；Koketsu et al., 2012）と３次元差分法（OpenSWPC；Maeda et al., 2017）を用いた数値シミュレーション波形を用いて予測手法の妥当性を検討した。神奈川県横浜市のHi-net YFTH観測点を予測地点とし、そこから150 km程度離れた茨城県・栃木県に位置する５つのHi-net観測点を地震動の入力地点とした（Figure 1）。

５つの入力地点と予測地点のペアについて、２点を結ぶ直線の延長上で発生した中規模地震（M5-6程度）の地震波形を用いて２点間の地震波伝播の伝達関数を算出した。伝達関数は、それぞれの波形から表面波の部分を200秒間抜き出し、予測地点の波形から入力地点の波形をデコンボリューションして求めた。

次に、得られた伝達関数に大地震における入力地点の波形をコンボリューションし、これをK-F積分により足し合せて予測地点の地震波形を求めた。ここでK-F積分による予測は、予測地点を取り囲む閉曲面上の入力地点に到達した波に、入力地点から予測地点の伝達関数をコンボリューションし、閉曲面に対する入射角・出射角に応じて重み付けしながら表面積分することで行われる。長周期地震動を生成する表面波は地表付近でエネルギーが大きいため、表面積分は地表に沿ってのみ（すなわち線積分により）実施した。

3. 結果

数値シミュレーションから求めた2008年岩手・宮城内陸地震（M7.2）の地震波形データを用いて、伝達関数とK-F積分による長周期地震動の予測を行った。シミュレーションは、防災科学技術研究所F-netによる震源のメカニズム解とライズタイム4.0秒のTriangle型の震源時間関数を用いて行った。

Figure 2に、遠地（YFTH観測点）での長周期地震動の予測結果（黒実線）と、期待される波形（赤実線）を比較する。予測結果は、表面波の振幅において良い一致を示し、継続時間は若干短いものの、震動特性をよく説明することが確認できた。Figure 3には、擬似速度応答スペクトル（減衰定数５％）の比較を示す。予測結果のピークは 3.5 - 4 s 程度であり、期待されるスペクトルよりも短周期側に寄った結果となった。これは、シミュレーションで用いた中規模地震（ライズタイム１- 1.5 s）の地震波形から求めた伝達関数が長周期成分の卓越した大地震の伝達関数を適切に評価できていない可能性もあり、検討が必要である。

4. 今後の課題

これまで本研究で用いた微動の地震波干渉法による伝達関数の推定に対して、自然地震による伝達関数の推定には、連続記録ではなくイベントトリガー記録の強震波形を利用する必要がある。また、中小地震の強震観測記録の長周期側のS/N比が低い可能性があり、今後はこれらの課題と微動利用との長所・短所を比較した上で、二つを組み合わせた新たな手法の可能性を検討したい。また、数値シミュレーション実験で確認された事

© The Seismological Society of Japan

項に基づいて、実際の観測波形を用いた長周期地震動予測に進む予定である。実際の即時予測では、震源の位置が未知である状態での入力観測点の選定やK-F積分の実施法などについての検討が課題として残される。

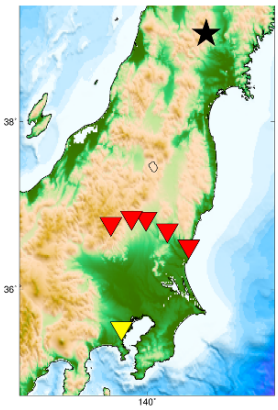


Figure 1. Locations of hypocenter of 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake(★), input stations (▼) and target station (▽).

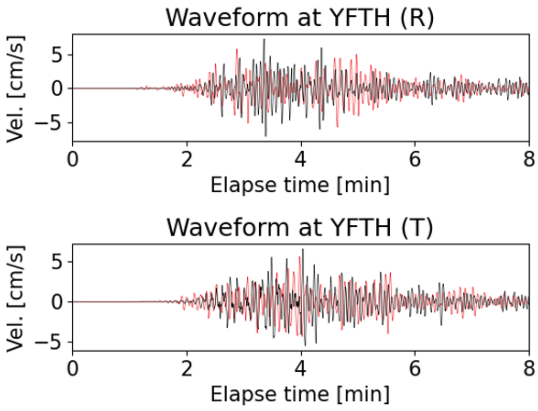


Figure 2. Velocity records of radial (R) and tangential (T) motions at the target station (YFTH; yellow triangle). Black traces are derived from Kirchhoff-Fresnel integration of waveforms at five input stations (red triangles), and red traces are expected waveforms.

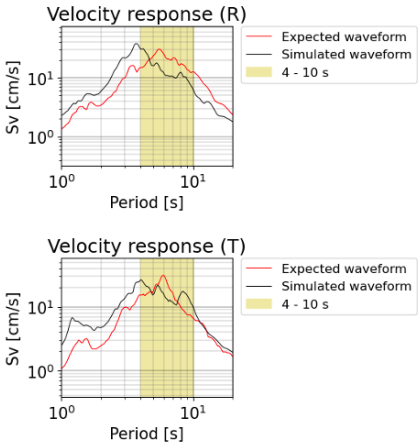


Figure 3. Velocity response spectra retrieved from each waveform in Fig 2.

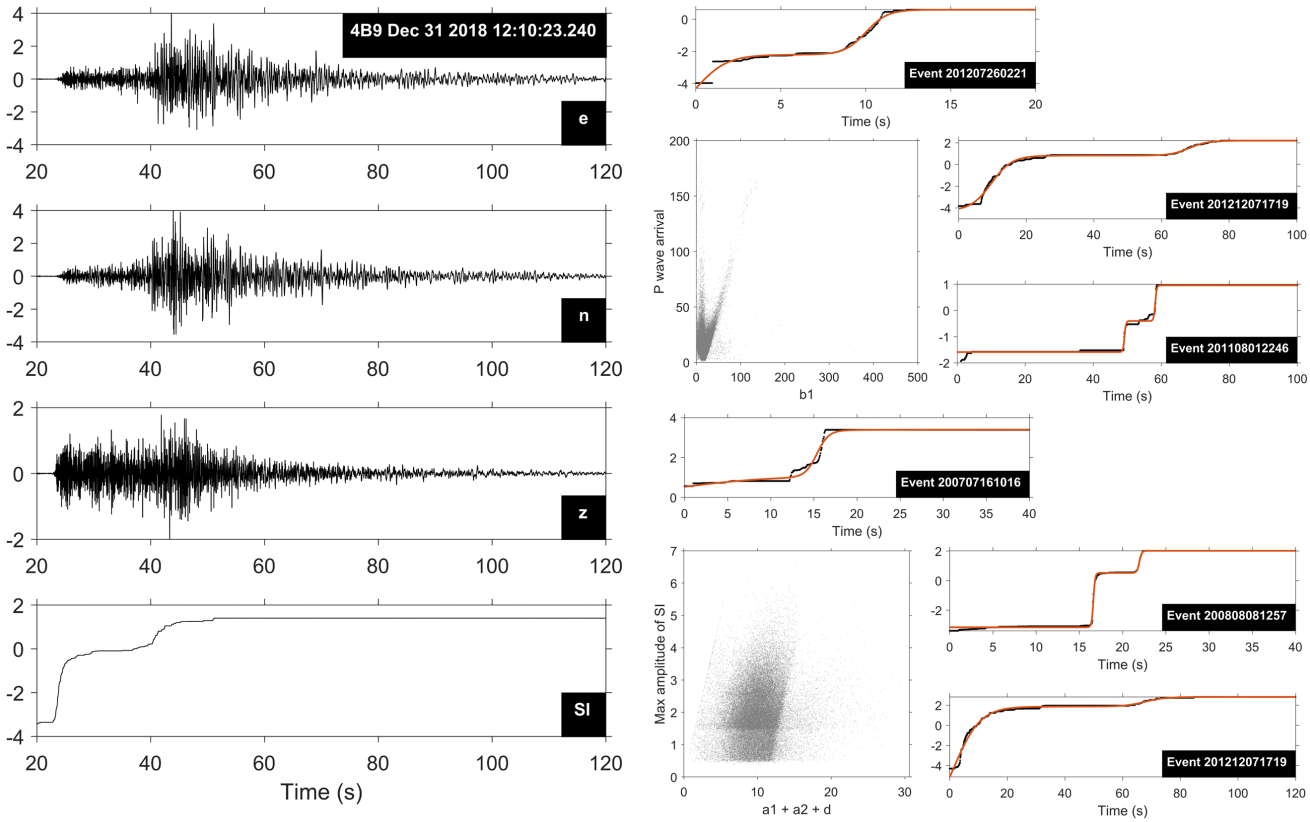
© The Seismological Society of Japan

Constructing an empirical envelope function of seismic waveforms for the evaluation of EEW in Japan

*Hong Peng[1], Stephen Wu[1,2], Masumi Yamada[3,4]

1. Institute of Statistical Mathematics, 2. The Graduate University for Advanced Studies, 3. Kyoto University, 4. Disaster Prevention Research Institute

In Japan, earthquake early warning (EEW) system analyzes the data from seismic networks and predicts the seismic intensity (SI) at locations where the strong ground motions are expected to arrive within seconds or minutes. Integrated particle filter (IPF) and propagation of local undamped motion (PLUM) are the two operating EEW systems providing public warnings. IPF predicts the SI through seismic source inversion, while PLUM directly predicts the SI using waveform propagation theory on real-time seismic waveform data. As a result, warnings from IPF are generally faster but less accurate than PLUM. Regarding the hazard assessment, Japan Meteorological Agency (JMA) select the largest SI among the two systems and broadcasts a single warning to the public. In this study, we aim at improving the selection of the final warning by evaluating the performance of the two systems in real-time based on a new empirical envelope function. We fit a double sigmoid function to SI curves extracted from seismic event data, which obtains about 500,000 waveform records from JMA, K-net and KiK-net in the past 20 years. Our preliminary results demonstrated high potential to use such a simple approach as a reliable performance metric for comparing different EEW systems in real-time.



© The Seismological Society of Japan

To what extent are multiple earthquakes separable?

*Masumi YAMADA[1]

1. DPRI Kyoto University

2022年3月16日に発生した福島県沖地震では、2つの大きな地震（M6.1とM7.4）が約2分間隔で発生した。この2つの地震はほぼ同じ場所で発生し、最初の地震に対しては緊急地震速報が適切に発表された。2つ目の地震では緊急地震速報そのものは発表されたが、震源決定が適切に行われなかった。このため、震源推定（IPF法）に基づく警報は発表されず、波動伝播に基づくPLUM法のみが緊急地震速報に用いられた。もし震源が適切に推定されていれば、もっと広い範囲でより早く緊急地震速報を出すことができたはずである。この地震では、福島県内で運行中の新幹線が脱線する事故が発生した。事故の被害を防ぐためにも、緊急地震速報システムの改善が必要である。

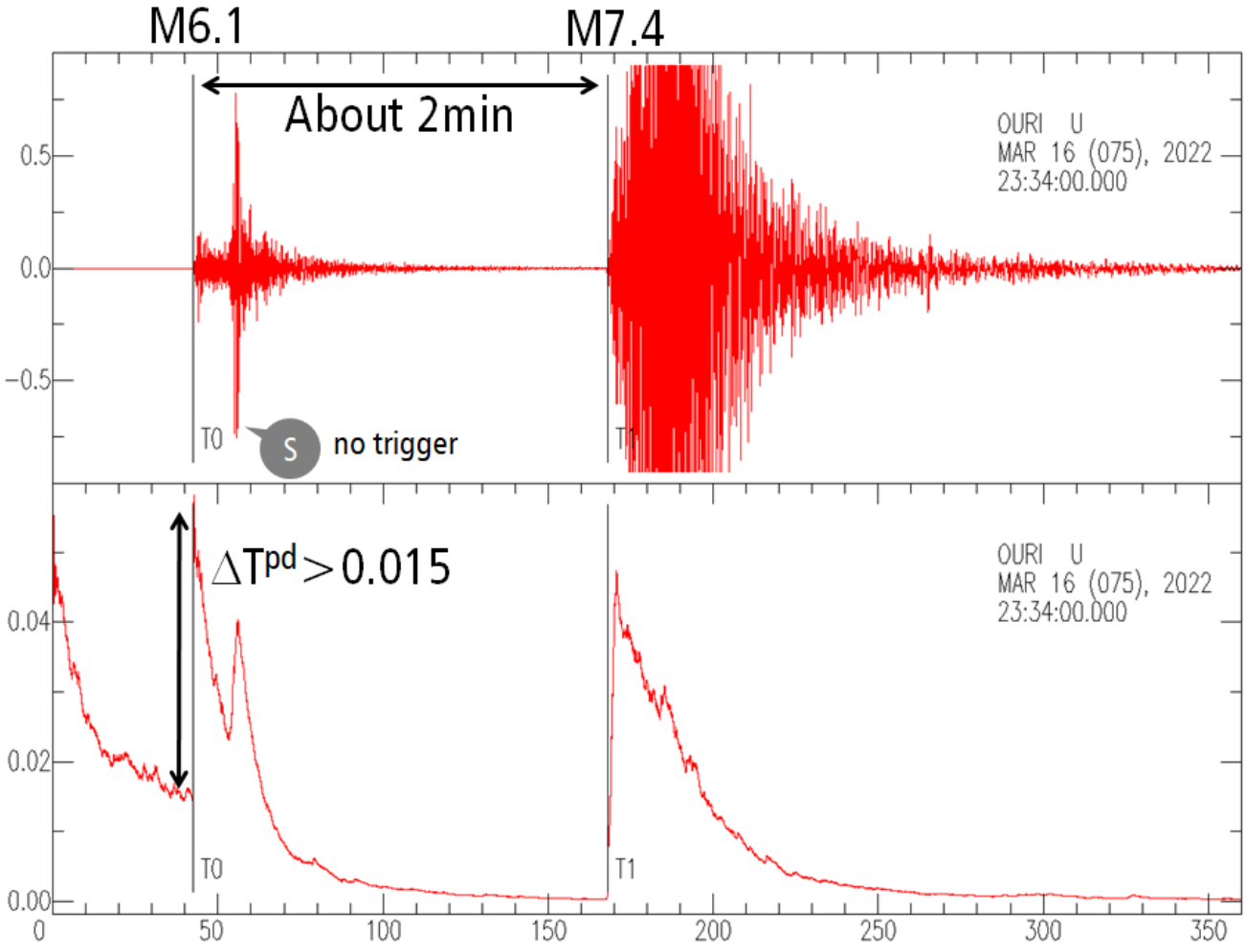
本発表では、IPF法のようにP波検知情報（トリガー）に基づいて地震を検知する手法について検討する。複数の地震が時間的・空間的に近い場所で発生した場合、地震の検出分解能は低下する。特に、最初の地震の揺れが続いている間（3分程度）は、新たなトリガー情報が最初の地震に起因するものなのか、別の新たな地震に起因するものなのかを判断する必要がある。また、最初の地震の揺れが続いている時に、新たなトリガを検出する閾値も重要である。ここでは、(1)最初の地震の揺れが続いているときにP波を検出する閾値、(2)新しいトリガを最初の地震と新しい地震のどちらに分類するか、について議論する。

我々は、P波検出をよりロバストに行うためにTpd法（Hildyard et al., 2008）を用いた（Yamada and Mori, 2021）。Tpd法はSTA/LTAと同様に異なる周波数成分の比を使用する。図1に速度とTpd波形の例を示す。本アプローチのポイントは、Tpdの絶対値ではなく、3秒間のTpdの最大変化量を閾値とすることである。一般に、P波到達時はTpdの変化が最も大きく現れるため、P波到達の判定が容易となる。また、P波検出直後は、閾値を大きく設定し、より大きくTpdが変化したときのみトリガとする。このようにすることで、S波によるトリガを回避しつつ、後続する地震のP波を見逃さないようにする。ただし、2つ目の地震が1つ目の地震より小さい場合、すなわち1つ目の地震のコーダ波によって信号が埋もれてしまう場合は、2つ目の地震のP波を見逃す可能性がある。

P波のトリガが検出されると、既存の地震と別の新しい地震に分類される。溜渕ら (2013) で示されたように、IPF法のトリガのグルーピングは(1)P波の到達時間と(2)P波到達後5秒間の振幅 によって行われる。これらの値が既存の地震から推定される理論値から3σ以内であれば、トリガは既存の地震として扱われる。これらの値が3σ以上の場合、すなわちP波到達時刻の誤差が3σ以上の場合は、別の地震として扱われる。したがって、2つ目の地震のトリガが、ちょうど1つ目の地震のP波の走時と重なってしまうと、1つ目の地震に吸収されてしまう危険性がある。このリスクを回避するため、溜渕ら (2013) の判別条件に加えて、1つ目の地震から十分遠方で、予測される振幅がノイズレベルの1/10以下である場合は、別の地震とする条件を追加した。

福島県沖地震の1時間連続波形を拡張IPF法で検証した。拡張IPF法では，現在気象庁が採用している従来のSTA/LTA法の代わりに，Tpd法を利用してP波検出を行っている。図1に示すように、1つ目と2つ目の地震のP波が適切に検出された。IPF法で開発されたトリガのグルーピング法は、この2つの地震のトリガーを適切に分離することができる。時間的・空間的に近い複数の地震を分離するためには、P波検出の閾値を適切に設定すること、適切なグルーピングを行うことが重要である。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Effect of station density on the maximum observed seismic motion

*Shin AOI[1], Takashi Kunugi[1], Wataru Suzuki[1], Hisahiko Kubo[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

近年、これまで知られていなかった様な極めて大きな地震動、いわゆる極大地震動が頻繁に取得されている。1995年兵庫県南部地震以降の25年余りに、K-NET及びKiK-netだけでも、最大加速度PGA（3成分合成、以下同様）が1000galを越える記録が50記録、最大速度PGVが50cn/sを越える記録が110記録、観測されている。また、様々な機関により、相当値を含め震度7は少なくとも14回（正式な震度としては6回）観測されている。

大きな地震動が記録されるようになった要因として、地震活動（特にマグニチュードの大きな地震の発生状況）や観測機器の高性能化（以前に比べ高周波まで観測可能となった）などが考えられるが、なかでも、阪神・淡路大震災を契機に強震観測点の数が増え、震源近傍においてお強震動が観測される機会が劇的に増加したことが大きく貢献していると考えられる。強震動の分布は、震源から放射された地震波エネルギー量だけでなく、放射特性、指向性、伝播特性、増幅特性など様々な要因が重なり合い、複雑な様相を示す。強震動の上限を知ることは強震動地震学の究極の課題の一つであるが、強震動の上限を捉えるためにどの程度の空間的密度の観測が必要であるかを定量的に把握することは、十分な観測密度で観測を行わない限り、極めて困難である。

本講演では、自治体震度情報ネットワークにより取得された計測震度値のデータベースをもとに、観測点密度が観測される地震動の最大値に与える影響を評価する。自治体震度情報ネットワークは、気象庁（約670地点）、防災科研K-NETのうち約800地点、都道府県等の自治体（約2900地点）の合計約4370地点からなる、世界で最も高密度な全国規模の震度観測網である。ある地震で観測された全地点の計測震度を対象に、乱数により観測地点を選択された際の計測震度の最大値を評価することで、任意の数の観測網により観測されることが期待される計測震度の最大値のシミュレーションをモンテカルロ法により行う。例えば、1500点近くの地点で計測震度が計測された2004年新潟県中越地震では、新潟県の自治体震度計で震度7（計測震度6.5）が観測されたが、1990年代前半の震度観測点数である150点を仮定した試行回数10,000回のモンテカルロシミュレーションでは中央値が計測震度5.3となった。つまり、震度7の地震が、1990年代前半の震度観測密度は震度5強程度と評価された可能性があるということを示している。本講演では様々な地震を対象に、モンテカルロシミュレーションにより観測点密度が観測される最大計測震度に与える影響を評価する。

謝辞：気象庁、防災科研、都道府県等の自治体により観測された計測震度をもとに気象庁によりとりまとめられた震度データベースを使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room D F204

[S15] AM-2

chairperson:Susumu Kurahashi(Aichi Institute of Technology), Hiroyuki Goto

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

[S15-06] Estimation of the EGTD for prediction

*Masanori HORIKE[1] (1. Hanshin consultants co., LTD.)

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

[S15-07] Scaling of Fault Rupture Process Simulated from Hierarchy Patch Source Model

*Hiroyuki GOTO[1] (1. Kyoto University)

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

[S15-08] Comparative study of temporal variation of coseismic velocity in Korea and Japan

*Tae Woong Chung[1], Faisal Umer[1], Kazuo Yoshimoto[2] (1. Sejong University, 2. Yokohama City University)

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

[S15-09] Relationship between strong ground motion and dynamic parameters inferred from dynamic source inversion of the 2016 Kumamoto earthquake

*Takeshi MIYAMOTO[1], Kimiyuki ASANO[2], Tomotaka IWATA[2] (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DPRI, Kyoto University)

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

[S15-10] Extraction of effective source areas based on comparison between calculated waveforms before and after trimming of slip distribution

*Susumu KURAHASHI[1], Ken Miyakoshi[1] (1. Aichi Institute of Techonology)

Estimation of the EGTD for prediction

*Masanori HORIKE[1]

1. Hanshin consultants co., LTD.

１．初めに
前回の発表では、観測記録の再現を目的とするEGTDの推定について主に述べた。再現のEGTDは、伝播経路の性質を求めるために用いる。一方、地震動予測や力学的震源インバージョンでは、予測に用いるEGTDが必要となる。この発表では予測のEGTDの推定について述べる。予測のEGTDの推定の前に、余震群中の一余震を仮想未来地震に指定し、残りの余震からサブ余震群を作り、この余震群から予測のEGTDを抽出する。抽出したEGTDを検証は、それを用いて合成した波形が仮想未来地震の観測記録を精度よく予測ですることで行う。この研究の一つの目的は、予測の高周波数EGTDが推定可能性調べることにある。 もう一つの目的は、最も精度よく予測できる震源時間間を、現在提案されている震源時間関数の中から選択できるかを調べることである。EGTDの推定は因果律を満たす任意の震源時間関数に対して可能である。これは、推定したEGTDの震源時間関数依存性を意味し、伝播経路の性質のみを反映すること矛盾する。このようなEGTDは、受け入れられない。震源時間関数として、断層破壊の物理に基づくものを採用すべきであるが、残念ながらそのようなものは存在していないように思われる。ここでは現実的な方法として、地震動観測記録と仮定した震源時間関数を用いて推定したEGTDにより合成した地震動間の誤差が最も小さくなる震源時間関数を既存の時間関数から選択する。この研究では、予測の高周波数EGTD推定と予測誤差が最小となる震源時間関数の選択の2課題を検討する。用いる余震群は、直径1 km内に８余震と７余震が分布するグループA1とA2である。EGTDの周波数帯は、遮断周波数を４Hz, 8Hz, 16Hzとする３つとした。
２．予測のための高周波数EGTDの推定
　震源時間関数を平滑化ステップ関数(SSF)とした場合のグループA1の結果について述べる。８余震のうち一つを仮想未来地震に指定して、サブ余震群から予測のEGTDを抽出した。次に、抽出したEGTDを検証するため、仮想未来地震の「観測記録」をEGTDを用いて合成した波形により予測した。予測の精度は観測記録と予測波形の相互相関係数(CCC)により評価した。このEGTD推定のプロセスを仮想未来地震として８余震各々を指定して８回繰り返した。 遮断周波数が4Hzの場合のみほとんどすべての余震とすべての観測点でCCCは0.7以上となった。これは、遮断周波数が4Hz或いはそれ以下の場合のみ余震域と各観測点間の予測のEGTDが精度よく得られたことを示している。前回の学会では再現のEGTDは、遮断周波数が16HzでもEGTD精度よく推定できることを述べたが、予測のEGTDは再現のEGTDに比較して、遮断周波数がかなり低い。これは、予測のEGTDでは予測する余震（仮想未来地震）はEGTDを推定するサブ余震群に含まれていないためである。 グループA2の結果について述べる。グループA2では、CCCはグループA1よりさらに悪い。但し、それを見ると二つの理由があることがわかる。一つは、特定の１余震がどの観測点でもCCCが低い。これは、この低CCCの原因がこの余震の震源にあることを示している。もう一つは、特定の１観測点のすべての余震に関する相関係数が低い。これは、この観測点の観測システムまたは観測点近傍の観測条件が変化したことを意味する。これら２つの原因が除去されれば、CCCはグループA1と同程度になることが期待できる。従って、低CCCの余震のグループからの除去や他の余震で置き換えることはEGTDの精度向上に重要である。また、低CCCの観測点の除去も重要である。
３．震源時間関数の選択 高周波数EGTDの推定における最も重要な課題は、震源時間関数の採用である。震源時間関数としては断層破壊の物理に基づいたものを採用すべきであるがそのようなものはないと思われる。ここでは次善の策として、現在利用されている震源時間関数のうち最も精度よく仮想未来地震の地震動を予測するものを震源時間関数として選択する。ここでは、予備的研究として二つの震源時間関数を用いて、予測精度の比較を行う。具体的には、平滑化ステップ関数（SSF）と三角形関数（TAF）である。震源時間関数SSFの予測精度はすでにCCCを用いて評価済みなので、以下では震源時間関数TAFの予測精度の評価をCCCを用いて行う。震源時間関数TAFとした場合の二つの余震グループのCCCは、震源時間関数SSFと同じ特徴を示した。目視による二つの震源時間関数のCCCの差異を確認するのはむつかしい。そこで、対応する二つのCCCの比を求

© The Seismological Society of Japan

め、定量的に予測精度の差を調べた。比は３つのどの遮断周波数でも１付近に集中していた。各観測点において余震に関する平均値はほぼ１であった。この結果は、二つの震源時間関数の予測精度は同じであること示しており、予測精度の違いにより震源時間関数を選択することはむつかしいことを意味する。 ４．まとめ この研究では以下の二つの結論が得られた

１．予測のための高周波EGTDは推定可能である。但し、予測精度の悪い余震の置き換えや削除により精度向上が可能である。

２．予測精度の比較により既存震源時間関数から予測精度の高い震源関数を選択することはむつかしい。

© The Seismological Society of Japan

Scaling of Fault Rupture Process Simulated from Hierarchy Patch Source Model

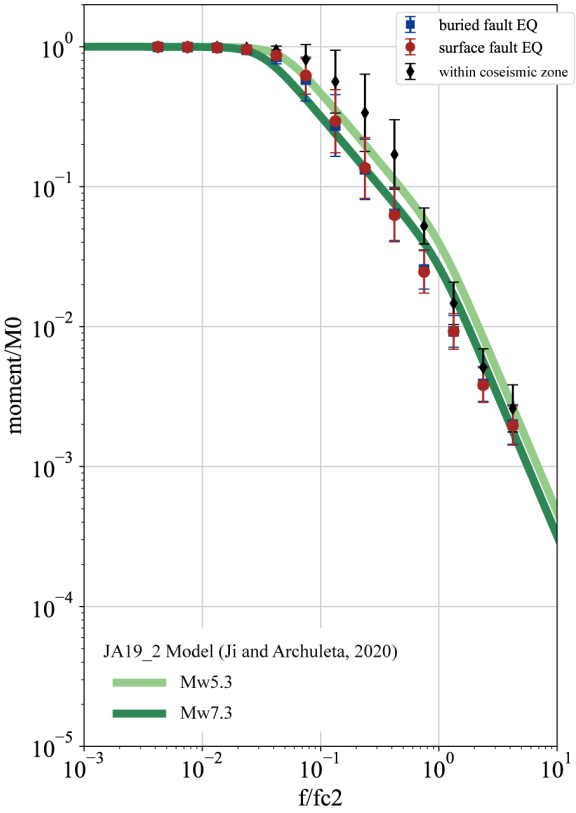
*Hiroyuki GOTO[1]

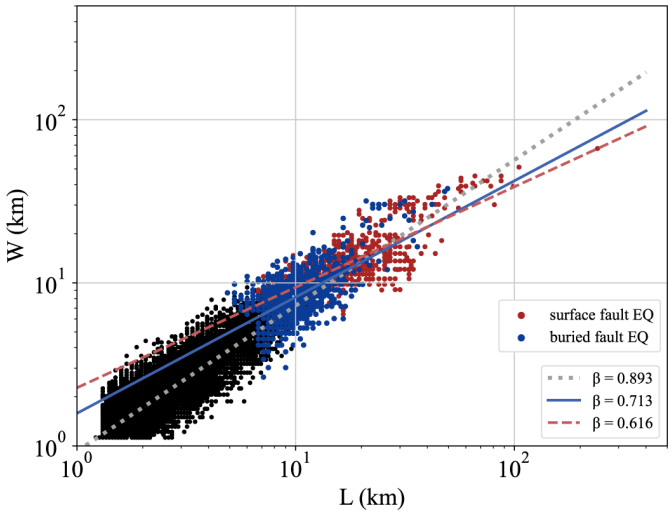
1. Kyoto University

地震ハザード評価や耐震設計において，破壊開始点やすべり分布等の地震シナリオを具体的に設定した断層破壊プロセスのモデル化が行われている．近年，断層破壊プロセスのモデル化に動力学モデルを採用する研究も進められているが，本研究ではIde and Aochi(2005)による滑り弱化距離の階層構造を持つパッチが断層にランダムに配置されるモデルによる方法に着目する．階層パッチモデルはGR則を自然に表現できることから，自然地震の物理と矛盾しないシンプルなモデルとして興味深い．一方で，階層パッチモデルがどのような断層破壊プロセスを生成するかは，十分に調べられていなかった．本研究では，滑り弱化距離の階層パッチモデルを用いた動力学モデルにおいて生成される破壊プロセスについて，特にスケーリングの観点から議論した．

地震発生層を考慮した半無限媒質中の垂直横ずれ断層を対象として数値解析シミュレーションを行い，多数の断層破壊プロセスを生成する．生成された断層破壊プロセスの震源スペクトルは概ねω-2モデルに従う．しかし，自由表面と地震発生層を考慮すると，震源スペクトルはコーナー周波数付近で過小評価される傾向にある．この形状は，二重コーナー周波数の震源スペクトルモデル（JA19_2モデル）によく一致する．また，生成された破壊プロセスの断層長さとマグニチュードの関係は，Leonard(2010)のモデルに整合する．このモデルは，M5程度を超える地震において断層幅が断層長さの2/3乗に比例することを主張するものであるが，本研究で生成された断層破壊プロセスも同様の傾向を示した．等方ランダムに円形のパッチを配置した異方性のないモデルであるため，地震発生層内部に破壊が留まるような規模の地震では断層幅は断層長さにほぼ比例する．このため，本研究で示される断層長さとマグニチュードの関係は，地震発生層の存在により実現したものと解釈できる．

© The Seismological Society of Japan





© The Seismological Society of Japan

Comparative study of temporal variation of coseismic velocity in Korea and Japan

*Tae Woong Chung[1], Faisal Umer[1], Kazuo Yoshimoto[2]

1. Sejong University, 2. Yokohama City University

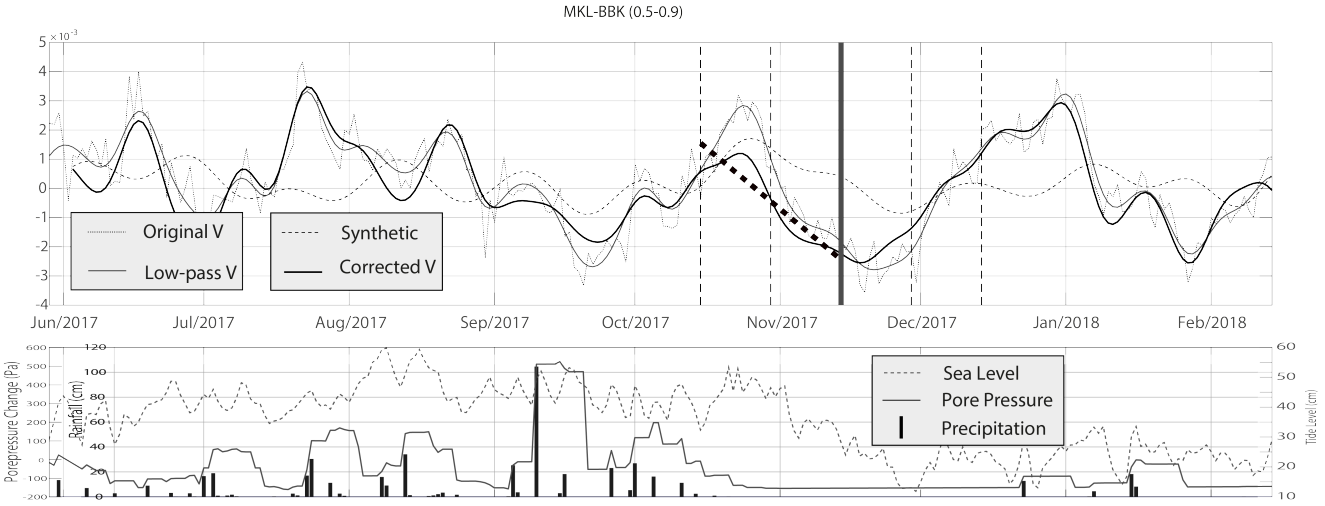
<Abstract>

Post-earthquake temporal variations can provide insightful information about dynamic processes and the state of crust around seismic area. Larger variations of earthquakes were naturally observed in large magnitude, and moderate Korean earthquake after long seismically quiet period showed larger variation in strong Japanease earthquake (Iqbal et al., 2021). For the quantitative study of variation, the technique of Ambient Noise Interferometry (ANI), which consists of cross-correlating continuous noise records from a stations pair acting as doublets, has been widely applied to numerous earthquakes. As done by Iqbal et al (2021), this study using ANI selected earthquakes with three kind magnitude –major, strong, and moderate. Major and strong earthquakes are Kumamoto (M_L 7.3) and Tottori earthquake (M_L 6.6) occurred in Japan at 2016, respectively, and moderate is Gyeongju (M_L 5.8) and Pohang earthquake (M_L 5.4) occurred in Korea at 2016 and 2017, respectively. Our study corrected synthetic seasonal velocity changes (Wang et al., 2017), which was not incorporated in the previous studies. The analyzed data ranged continuously from approximately 2 to 9.5 months before and 2 to 4 months after the earthquake. The velocity reduction was observed within the classes of 15 and 30 days before and after the earthquake day, respectively. Additionally, two further classes of 30 and 60 days, i.e., the sum of 15 and 30 days before and after the earthquake, respectively, were included in the analyses. The linear fitting applied to these classes with a regression value of R^2 0.5 showed the values of velocity drops for the targeted frequencies of 0.1-0.6 Hz, 0.5-0.9 Hz, and 0.1-0.9 Hz, respectively. The largest interstation velocity drop values obtained from the six classes showed that their distribution correlates well within the epicentral proximity of the Tottori and Gyeongju earthquakes. For Kumamoto earthquakes, the highest velocity variations were concentrated near the Aso volcano, while for the Pohang earthquake, these variations were significant near the Gyeongju earthquake epicentre that preceded it a year ago. For the seasonal corrections, two environmental factors: pore pressure change and sea level changes, were considered based on the observations in Korean data. The pore pressure was obtained from precipitation records (Talwani et al., 2007), and along with sea level changes, two factors were filtered with band-pass between 0.0073 and 0.05 cycles. The velocity time series, on the other hand, was smoothened by a low-pass filter at 0.05 cycles/day and correlated with two factors for correlation coefficients. The pore pressure was, additionally, shifted within ten days to obtain the best minima correlation and was combined with sea level changes to produce a synthetic curve. The smoothened velocity drop was considered only for interstation pairs with significant drop values for six classes, and the velocity drop was corrected by subtracting the synthetic curve from the observed drop values. The corrected results naturally showed reduced values of velocity changes compared to the uncorrected values. For the Gyeongju earthquake, high-velocity variations were prominent near the epicentre. On the other hand, noticeable distribution of high values around the hypocentre of the Gyeongju earthquake was observed after the Pohang earthquake. This significant velocity variation around preceded earthquakes may be explained by the fact that cracked crust due to the previous earthquakes was easily influenced by the later earthquakes. A similar phenomenon was observed at repeated seismic regions as greater variations induced by the smaller magnitude earthquakes than those by larger magnitude ones preceded earlier (Brenguier et al., 2008; Yu et al., 2020)

<Acknowledgement>

This work was funded by Research Project in 2021 Sejong University

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Relationship between strong ground motion and dynamic parameters inferred from dynamic source inversion of the 2016 Kumamoto earthquake

*Takeshi MIYAMOTO[1], Kimiyuki ASANO[2], Tomotaka IWATA[2]

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. DPRI, Kyoto University

これまで，比較的規模の大きな地震が発生すると，観測波形をデータとした運動学的震源インバージョンなどにより震源の破壊過程が推定されてきた．K-NETやKiK-netをはじめとする強震観測網の下で発生した大規模な内陸地震として，平成28年熊本地震が挙げられる．熊本地震では，M_{JMA} 6.5の地震（以下，最大前震）の約28時間後にM_{JMA} 7.3（以下，本震）の地震が発生し，益城町では震度７を２度観測するなど大きな被害が生じた．一方，強震記録を用いた震源過程の解析も多く実施され，断層近傍での観測記録との関係が議論されてきた．

本震を対象とした動的破壊シミュレーションによる研究として，Tsuda (2021) は既往の特性化震源モデルを参考に３つの強震動生成域 (SMGA) を配置した布田川断層の動力学的震源モデルを提案し，深さ約2–8 kmに位置する２つのSMGAのいずれかを除いたモデルや一方の長さを半分にしたモデルで波形を合成した結果，西原村における速度波形の断層平行成分の振幅が大きく変化した．このことから，これら２つのSMGAの有無やサイズが観測された強震動の生成に影響していることを指摘した．Kaneko and Goto (2022) は，布田川断層に比較的単純な動的パラメータ分布を与え，その近傍に位置する４地点での観測記録を再現するモデルをパラメータスタディにより求めた．結果，西原村で観測されたような断層近傍における大振幅かつ周期数秒程度の速度波形は，震源からの破壊フロントと地表で反射した破壊フロントとの相互作用により，速度波形の断層平行成分が強まることで説明できることを示した．

強震動生成メカニズムの根本的な理解には，運動学的観点に加えて断層の破壊過程を支配する動的パラメータといった動力学的観点からの考察を通じたその背景物理の解明が必要である．また，Tsuda (2021) とKaneko and Goto (2022) は，断層近傍の観測記録のみに着目して，動力学的震源モデルを推定している．

そこで本研究では，断層近傍のみならず，より広範囲の観測記録を再現できる動力学的震源モデルを求めるために，観測波形から動的パラメータを推定するdynamic source inversionを熊本地震の最大前震に適用することを試みる．現在は手法の開発段階であり，将来的な本震への適用を視野に入れ，単純な震源モデル (Asano and Iwata, 2016) が提案されている最大前震を最初の適用例とする．

本研究で用いる手法は，主にGallovič *et al.* (2019) に倣った．具体的には，（１）モデルパラメータ（ピーク摩擦係数と動的摩擦係数の差，初期せん断応力，臨界すべり変位量）をランダムに更新し（提案モデル），（２）各モデルパラメータの値とstrength excessに関する条件の判定を行い，適合する場合にのみ，（３）その震源モデルを用いて動的破壊シミュレーションを行う．続けて，（４）得られた震源時間関数とグリーン関数との畳み込みにより波形を合成し，（５）観測波形と合成波形から事後分布を求め，Metropolis-Hastings algorithmにより，提案モデルを採用または却下する．（６）手順（１）～（５）を繰り返し，観測波形と合成波形から計算されるVariance Reductionも参考にしながら事後分布の収束を判断し，計算を終える．本手法において，動的破壊シミュレーションには，Gallovič *et al.* (2019) と同様に，三次元スタッガードグリッドに基づく差分法コード (fd3d_TSN; Premus *et al.*, 2020) を用いた．グリーン関数は離散化波数法 (Bouchon, 1981) と反射・透過係数行列(Kennett and Kerry, 1979) により計算した．地下構造モデルは，「平成２８年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」により作成された三次元速度構造モデル（浅野・他，2019）と全国一次地下構造モデル (JIVSM; Koketsu *et al.*, 2009, 2012) をもとに，各観測点直下の一次元地下構造モデルを与えた．

今後，仮想的な動力学的震源モデルを用いて本手法の妥当性を評価し，熊本地震の最大前震に適用する．

© The Seismological Society of Japan

Extraction of effective source areas based on comparison between calculated waveforms before and after trimming of slip distribution

*Susumu KURAHASHI[1], Ken Miyakoshi[1]

1. Aichi Institute of Techonology

1. はじめに 断層面上のすべり量や震源断層の面積と地震モーメントの関係性を示すスケーリング則は，強震動の予測のために非常に重要な関係式である．このスケーリング則はいくつかの関係式が提案され，Miyakoshi et al.(2018, 2020)や長嶋他（2021）などにより検証がなされている．長嶋他（2021）による海外内陸地殻内地震のインバージョン結果をデータベースとした検討結果では，震源断層の面積と地震モーメントのスケーリング則のデータへの適合度は，どのスケーリング則も尤もらしさの度合いを比較評価できるほどの有意な差はないことが示されている． 震源断層の面積と地震モーメントのスケーリング則に用いられる震源断層の面積は，Somerville et al.(1999)によるトリミング規範、すなわち、波形インバージョン等で得られた不均質震源モデル全体の平均すべり量から，0.3倍未満となる領域を削除し，最終的に残った領域を震源断層領域とするものである． Somerville et al.(1999) のトリミング規範は、断層面上のすべり量のみで実施できるため簡易であるが、波形インバージョンにより推定される不均質震源モデル（すべり量分布）では、グリーン関数の精度不足によりすべり量分布の端に主要な強震動に関係にない見かけ上のすべりが表れる可能性が否めない。そこで本研究では、見かけ上のすべりの部分をトリミングすべく，すべり量分布から計算される波形に着目し，トリミング前の計算波形とトリミング後の計算波形を比較し，主要な波形やパルス波形に影響のない領域をトリミングする手法を試みる． 2．本研究で試みるトリミング手法 本研究のトリミング手法を以下に示す． 1）オリジナルの波形インバージョンのすべり量分布による計算波形と，トリミング後のすべり量分布による計算波形の残差を計算する． 2）ある閾値αよりも残差が小さい場合は，トリミングされた領域は計算波形に対して影響度が小さいため，“トリミング可能な領域“と判断する．一方で，ある閾値αよりも残差が大きい場合は，トリミングされた領域は主要な波群やパルスへの影響度が大きい，すなわち，波形再現に必要な断層すべり運動の領域と考えられるため“トリミング不可な領域”と判断する．対象観測点の残差平均が閾値αよりも小さい場合，その行または列をトリミングする． 本研究では，予備解析等の検討により試行錯誤的にα＝0.1とした．トリミングした震源断層の地震モーメントとF-netの地震モーメントは概ね一致している。3）最終的にトリミングができない領域を主要な波形を生成する震源断層領域とする． 図１に2019年山形県沖の地震の震源インバージョンを例に、トリミング前の計算波形とトリミング後の計算波形の比較を示す。図１（a）から（d）は，トリミング前（オリジナルのすべり量分布）および左端から１列ずつトリミングしたケースのYMT004とNIG006観測点における計算波形を示す．左端から１列ずつトリミングすると、YMT004の計算波形には大きな変化はみられないが、NIG006ではトリミングする列が増えるごとに計算波形が変化することがわかる。これは，その領域がNIG006の計算波形に対して影響が大きく，すなわち“トリミングすべきでない領域”であることを示している。この作業を波形インバージョンで用いられた観測点で実施し、各観測点のトリミング前後の残差の平均がα＝0.1よりも小さい場合，波形への影響度の小さい領域としてトリミングする。 ３．解析結果 図２にトリミング結果の一例として，2019年山形県沖の地震の結果を示す．図２（a）は，各観測点におけるオリジナルのすべり量分布による計算波形と，すべり量の上端，右端，下端，左端のそれぞれの行または列をトリミングした領域による計算波形の残差を示しており，最下行がその残差平均である．残差平均が0.1より小さい，上端１行，下端１行，左端１列がトリミングされた．図２（b）に示すように，すべり量分布の端にみられたすべりの比較的大きな領域もトリミングされていることがわかる． 1997年から2019年に日本で発生したMw5.7から7.0の10地震に対して実施した結果，トリミング後の震源断層領域は，Somerville et al.(1999)のスケーリング則と大きくはずれないことを確認した． なお，用いる観測点の震央距離による影響や，観測波形と比較などは今後の検討課題である．

© The Seismological Society of Japan

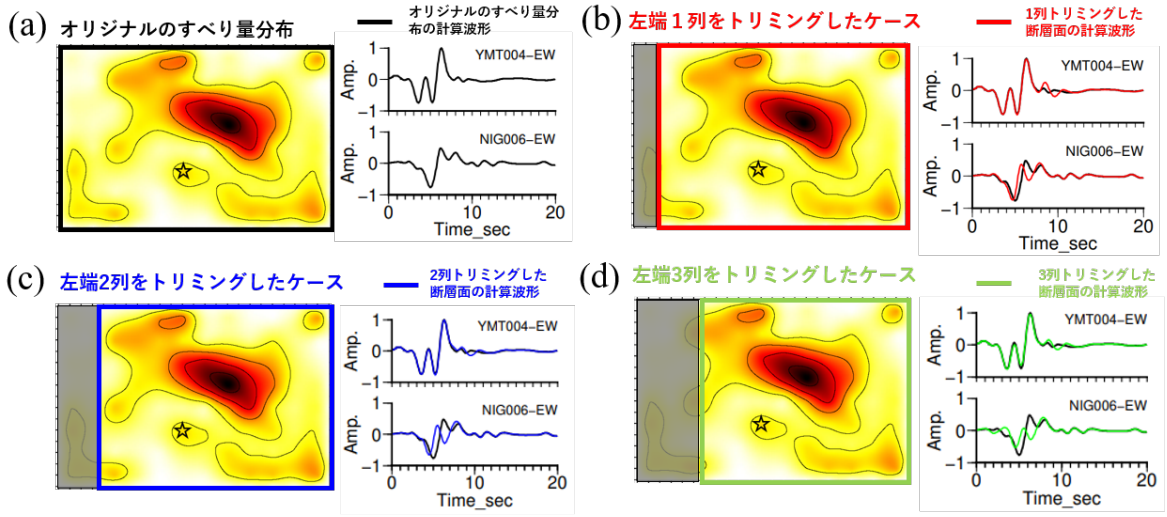


図１　トリミング前（オリジナルのすべり量分布）の計算波形とトリミング後の計算波形を比較．(a)から(d)は，トリミング前（オリジナルのすべり量分布）および左端から１列ずつトリミングしたケースのYMT004とNIG006観測点における計算波形を示す．

(a)

	上端				右端				下端				左端			
	1列	2列	3列	4列	1列	2列	3列	4列	1列	2列	3列	4列	1列	2列	3列	4列
YMTH09	0.04	0.10	0.29	1.02	0.29	0.58	0.67	0.56	0.06	0.18	0.31	0.54	0.05	0.03	0.07	0.17
NIG006	0.10	0.18	0.74	1.38	0.08	0.23	0.37	0.47	0.02	0.02	0.05	0.08	0.27	0.54	0.54	0.74
NIGH04	0.08	0.26	1.18	1.79	0.03	0.13	0.23	0.30	0.01	0.02	0.04	0.10	0.05	0.12	0.15	0.24
YMT001	0.03	0.08	0.15	0.53	0.10	0.41	0.75	1.10	0.19	0.49	0.97	1.69	0.01	0.01	0.03	0.08
YMT004	0.04	0.07	0.26	0.97	0.13	0.19	0.35	0.41	0.09	0.09	0.38	0.50	0.01	0.01	0.02	0.06
YMTH12	0.03	0.08	0.39	1.10	0.09	0.22	0.35	0.58	0.06	0.11	0.27	0.59	0.03	0.04	0.06	0.14
YMTH13	0.04	0.15	0.36	1.16	0.06	0.08	0.13	0.40	0.03	0.04	0.13	0.32	0.04	0.05	0.08	0.13
YMTH14	0.07	0.13	0.38	1.15	0.08	0.11	0.22	0.45	0.04	0.06	0.20	0.33	0.04	0.06	0.07	0.13
J47250	0.20	0.48	0.88	0.97	0.30	0.53	0.68	0.62	0.10	0.06	0.18	0.20	0.11	0.25	0.46	0.71
NIG007	0.09	0.29	1.12	1.35	0.11	0.25	0.49	0.37	0.03	0.05	0.11	0.12	0.04	0.11	0.23	0.40
YMT003	0.12	0.24	0.34	1.02	0.11	0.24	0.32	0.60	0.07	0.23	0.66	1.66	0.03	0.02	0.04	0.09
sum	0.84	2.06	6.09	12.44	1.38	2.97	4.56	5.86	0.70	1.37	3.30	6.13	0.68	1.24	1.75	2.89
ave	0.08	0.19	0.55	1.13	0.13	0.27	0.41	0.53	0.06	0.12	0.30	0.58	0.06	0.11	0.16	0.26

(b)

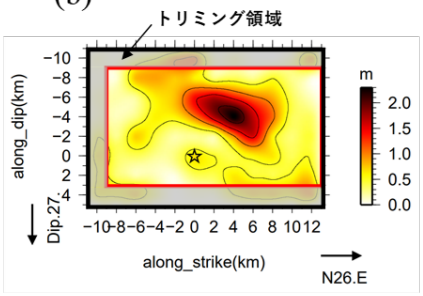


図２　2019年山形県沖の地震におけるトリミング結果．(a)各観測点のトリミング前後の計算波形の残差，(b)すべり量分布におけるトリミング領域

© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 1:30 PM - 3:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 4:30 AM - 6:00 AM UTC | Room D F204

[S15] PM-1

chairperson:Atsuko OANA, Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute)

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

[S15-11] Strong motion characteristics of the 2023 southeastern Turkey earthquakes with surface faults

*Takao KAGAWA[1] (1. Tottori University, Faculty of Engineering)

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

[S15-12] Source process characteristics of the 2023 Turkey earthquake (M_W 7.7) inferred from pulse-like near-fault ground motions

*Yosuke NAGASAKA[1], Atsushi Nozu[1] (1. Port and Airport Research Institute)

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

[S15-13] SIMULATION OF THE NEAR-FAULT RECORDS OF THE 2023 KAHRAMANMARAS, TURKEY EARTHQUAKE (M_W7.7) BASED ON A CHARACTERISZED FAULT MODEL

*Toshimichi Kidoh[1], Masayuki Nagano[2], Ken Miyakoshi[1], Kensuke Arai[1], Toshiaki Satoh[1] (1. Ohsaki Research Institute, 2. Tokyo Univ. of Science)

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

[S15-14] Strong Motion Simulation Focused on Rupture Velocity of the 2023 Turkey Subsequent Earthquake (Mw7.6) Based on Characterized Fault Model

*Sei Kanayama[1], Toshimichi kido[2], Hong Liu[1], Masayuki Nagano[1] (1. Tokyo University of Science, 2. OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC.)

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

[S15-15] Broadband Strong Ground Motion Simulation of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake Using the Empirical Green's Function Method.

*Hidetoshi Kasugai[1], Yoshiaki Hisada[1], Shinya Tanaka[2] (1. Kogakuin University, 2. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)

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

[S15-16] Study on the Shallow Fault Slip of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake (Mw6.9) Based on Characterized Fault Models

*Atsuko OANA[1], Ken Miyakoshi[2], Shohei Yoshida[2], Toshiaki Sato[2] (1. Shimizu Corporation, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

Strong motion characteristics of the 2023 southeastern Turkey earthquakes with surface faults

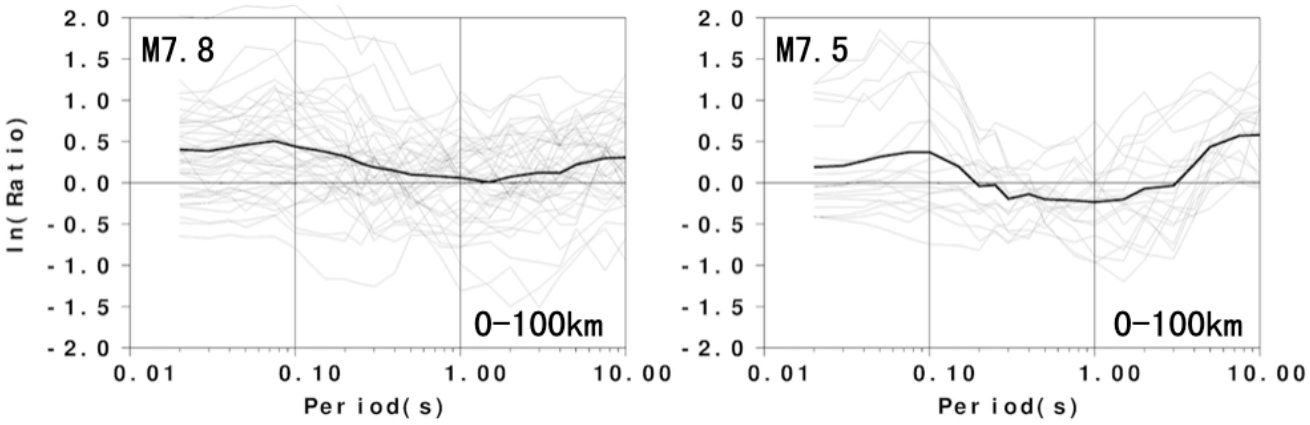
*Takao KAGAWA[1]

1. Tottori University, Faculty of Engineering

１．はじめに
2023年2月6日にトルコ共和国南東部を震源とするM7.8およびM7.5の地震が続けて発生し，それぞれ東アナトリア断層南西部およびチャルダク断層に沿った地表地震断層が報告されている。トルコ北東部では1999年にKocaeli地震(M7.6)が発生して地表地震断層が確認されたが，その現地調査において断層変位による建物被害のごく近傍で大きな地震動が想定されない建物も観察された。また，Somerville (2003)は既往のスペクトル距離減衰式と周辺の観測記録を比較し，平均よりも地震動が小さかったことを指摘している。今回の地震でも同様の現象が見られるのか，トルコ共和国内務省災害緊急事態対策庁（AFAD）が公開している強震観測データを用いて解析を試みたので報告する。
２．解析の概要
公開地震記録から震源距離で150km以内のものを用い，アメリカ地質調査所（USGS）のFinite Faultモデルから断層最短距離を求め，Abrahamson and Silva (2008)のスペクトル距離減衰式と比較する。その際，地盤条件としてAVS30が得られていない，あるいは350m/sよりも小さいサイトは用いないこととした。さらに，地震の全体を捉えていない記録や異常が見られる記録は割愛した。その結果，断層最短距離100km以内において，M7.8の最初の地震について41点，M7.5の地震については18点の記録が抽出された。Abrahamson and Silva (2008)の適用にあたっては，横ずれの本震，また上盤効果を考慮しない，などとしてパラメータを設定した。
３．解析結果
結果を図に示す。左がM7.8，右がM7.5の場合である。細線が各点におけるAbrahamson and Silva (2008)に対するスペクトル比，太線が平均を示す。M7.8は平均が全周期で１を上回っているが，M7.5は周期0.3から２秒の帯域で平均を下回る結果となった。M7.8では断層に沿って多くの記録が得られており，特に破壊進行によって揺れが大きくなった領域での記録が多い。一方で，地表地震断層ごく近傍で建物被害が生じていないと見られる破壊開始点近傍での記録が得られていない影響が懸念される。M7.5は逆に断層線に沿った記録が少ないことが影響していることも考えられる。
４．おわりに
現時点では暫定結果であるが，建物被害（断層変位によるものと強震動によるもの）との関連，AVS30が得られていない地点の地盤状況など，現地調査の成果を参照することにより，強震動と被害の実態について検討を進めたい。

参考文献
Somerville, P. G., Phys. Earth Planet. Int., 137, 201–212, 2003.
Abrahamson, N. A. and Silva, W. J., Earthquake Spectra, 241, 67-97, 2008.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Source process characteristics of the 2023 Turkey earthquake (M_w 7.7) inferred from pulse-like near-fault ground motions

*Yosuke NAGASAKA[1], Atsushi Nozu[1]

1. Port and Airport Research Institute

2023年2月6日に発生したトルコ地震（M_w 7.7, AFAD）では東アナトリア断層に沿った断層近傍で強震動が多く記録された．これらの強震動を調べることで強震動の特徴だけでなくその発生要因についても知見を得ることができ，被害分析や今後の強震動予測の参考になると考えられる．大地震では複雑な震源過程が強震動に影響を与えることが知られているが，トルコ地震の断層近傍記録を見るとその多くがパルス状の速度波形に代表される比較的シンプルな特徴を示しており，震源過程にについても同様にシンプルなモデルで代表的な波形の特徴を捉えられると期待される．一方，波形の振幅や形状は地点や区間によって少しずつ異なり，震源過程を反映しているものと考えられる．そこで，本検討では2023年トルコ地震(M_w 7.7)の断層近傍強震動の生成について調べることを目的として，フォワードモデリングによる震源過程のモデル化を行った．インバージョンによる震源過程解析はある定式化の下で最適な解を得られるという利点があるが，本検討ではフォワードモデリングによるシンプルな震源過程から強震動を理解する試みであり，インバージョンによる震源過程と相補的な役割を果たすことを目指している．本検討では震源近傍で多数の強震記録が得られた震源から南西部のみを対象とした．余震分布と地表地震断層に沿った断層面を仮定し，破壊伝播速度，すべり量，震源時間関数を与えて離散化波数法により波形合成を行った．断層面は走向の変化を考慮して4つのセグメントに分け，断層幅は10㎞とした．破壊伝播速度は主に波形の到達時刻から決定し，すべり量と震源時間関数は振幅と波形が合うよう設定した．必要に応じて走向方向に変化するパラメターの分布を与えた．観測記録の時刻がずれていると思われる地点が見られたため，P波初動の到達時刻を用いて簡易的な時刻補正を行った波形を対象波形として使用した．地盤構造については十分な情報が得られなかったためモデル化は半無限地盤で行い，サイト特性の影響は余震記録を用いて経験的サイト増幅特性を推定することでその影響を考察することとした．その結果，断層近傍で特徴的なパルス状の波形の多くはモデル化した断層に沿って連続的に断層が伝播すると仮定したシンプルなモデルで概ね説明できることが示された．また，これらの観測点における経験的サイト増幅特性はパルス状の波形に対応する周波数には大きな増幅を示さなかった．Narliセグメント近傍の強震動は地表地震断層沿いの断層面によって説明された．Amanosセグメントの一部では4km/sを超える破壊伝播速度が必要となった．また，Amanosセグメントの断層ステップオーバー付近では，表面付近での破壊の停止と再開が示唆された．本検討では多くの断層近傍地点に見られる特徴的なパルスを主なターゲットとしており，2708，2712，Antakyaの地点等で観測されたより鋭いパルス状の波形の再現には小規模な不均質性を考慮する必要があると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

SIMULATION OF THE NEAR-FAULT RECORDS OF THE 2023 KAHRAMANMARAS, TURKEY EARTHQUAKE (M_W7.7) BASED ON A CHARACTERISZED FAULT MODEL

*Toshimichi Kidoh[1], Masayuki Nagano[2], Ken Miyakoshi[1], Kensuke Arai[1], Toshiaki Satoh[1]

1. Ohsaki Research Institute, 2. Tokyo Univ. of Science

2023年2月6日4時17分(現地時間)にトルコのナルリ-パザルジュク断層(以下，NPF)を発震断層とし，東アナトリア断層帯(以下，EAF)に破壊が乗り移りM$_W$7.7(トルコ首相府災害緊急事態対策庁，以下，AFAD)の地震(以下，M$_W$7.7地震)が発生し，地表地震断層近傍で貴重な多数の強震観測記録が得られた。さらに引き続いて，同日13時24分(現地時間)にチャルダック断層でM$_W$7.6(AFAD)の地震(以下，M$_W$7.6地震)が発生した。両地震では大規模な地表地震断層が確認されており，相対変位でM$_W$7.7地震では最大約6.6m，M$_W$7.6地震では最大約7.5mの地表変位であった(CEDA[2023])。

M$_W$7.7地震やM$_W$7.6地震については既に強震波形，遠地地震波形やハイレートGPS記録による永久変位をターゲットとした震源インバージョン解析が多数行われており，種々の不均質すべり分布を有する断層モデルが多数提案されている(例えば, USGS[2023], Melgar et al.[SEISMICA, 2023], Mai et al.[TSR, 2023], Jia et al.[SCIENCE, 2023]等)。一方で，地震本部(2020)の強震動予測では，大きなすべり量や応力降下量を持つSMGA(Strong Motion Generation Area, 強震動生成域)とそれ以外の背景領域からなる特性化震源モデルを用いるが，M$_W$7.7地震やM$_W$7.6地震について特性化震源モデルに基づく地震動評価は未検討である。

2016年熊本地震(M$_W$7.0)では地表地震断層が確認されるとともに，地表地震断層近傍で強震観測記録が得られたことから，地震発生層内だけではなく地震発生層以浅をモデル化した特性化震源モデルの検討が行われている(例えば, 貴堂・永野[AIJ, 2019],田中・他[AIJ, 2018], Irikura et al.[PAG, 2019]等)。M$_W$7.7地震でも主に断層南西部(クルクハン～ターコル)において，地表地震断層に沿って約5km以内の近傍で多数の強震記録が得られている。このような断層近傍の強震記録を再現可能な特性化震源のモデル化は，M7~M8クラスの強震動予測を目的とした地震発生層以浅を含む震源の特性化を検討する上で重要と考える。 今回EAFで発生したM$_W$7.7の地震では、断層南西部において，地表断層に沿って多数の強震記録が世界で初めて得られたことから，ここでは、M$_W$7.7地震に対して貴堂・永野[AIJ, 2019]の考え方を適用し、SMGA及び背景領域に中村・宮武のすべり速度時間関数[地震2, 2000]，LMGA (Long-period Motion Generation Area, 長周期地震動生成域)(Irikura et al.[PAG, 2019])には二等辺三角形のすべり速度時間関数を与えた特性化震源モデルによる地表地震断層近傍の強震観測記録の再現解析を行い，地震発生層以浅を含めたモデル化の適用性を検討する。

地震動計算は速度波形だけでなく，永久変位の再現も目的とするため理論的手法を選択する。水平成層地盤構造を対象として断層近傍の永久変位も評価可能な薄層法(貴堂・他[JAEE,2020])により地震動を計算する。理論地震動計算の有効振動数の上限は1.0Hzまでとした。再現解析の対象とする観測点は発震断層のNPFとEAFの南西側の地表地震断層近傍に位置する計18観測点とした。各観測点における水平成層地盤構造はGuvercin et al.[GJI,2023]のS波，P波速度構造を使用した。

既往の震源インバージョン解析[例えば，USGS(2023)]ではNPFとEAFの交点付近を中心に北東側と南西側に大きなすべり量が求まっており，その最大すべり量は10m前後となっている。地表地震断層分布や震源インバージョン解析のすべり分布を参考に地震発生層内のSMGAと地震発生層以浅のLMGAを設定する。SMGAやLMGAのすべり量，すべり速度時間関数の形状等は観測記録の再現性をみながら，フォワードモデリングにより推定する。

M$_W$7.7地震の特性化震源モデルの巨視的断層面は断層モデルの上端が地表に到達するように設定した。特に断層近傍の観測点が，断層モデルの地表トレースに対して上盤側か下盤側かが重要であるため，複数のセグメントを設定する際，可能な限りUSGSの地表地震断層分布に沿うように留意した。傾斜角はUSGSの震源イン

© The Seismological Society of Japan

バージョン解析に基づく不均質震源モデルを参考に設定した。対象観測点及び特性化震源モデルの地表投影図を図1に，特性化震源モデルを図2に示す。SMGAとLMGAのすべり量は3～7mとなっている。強震観測記録を良好に再現するために断層モデルはNPFの初期破壊開始点を含めて計8個の破壊開始点から同心円状に破壊が伝播すると仮定するMulti hypocenter型モデルを採用し，それぞれ破壊遅延時間と破壊伝播速度(3.1km/s～3.2km/s)を試行錯誤的に設定した。

断層モデルのすべり速度時間関数の設定も試行錯誤的ではあるが，断層近傍の強震観測記録を良好に再現することができた。代表例を図3に示す。また，断層モデルに基づいて永久変位の面的分布を試算したが，大局的な傾向はAn et al.[remote sensing, 2023]と整合的な結果となることを確認した。今後は解析結果の理論地震動の分析を通じ，長大断層近傍の強震動についての解釈を進める。

謝辞：AFADの強震記録及びUSGSの地表地震断層分布のデータを利用させていただきました。本研究を進めるにあたり，大崎総合研究所の山崎文雄先生，小川幸雄博士，津田健一博士，ドルジャパラム・サロル博士，吉田昌平博士には多くのご助言をいただきました。理論地震動計算は東京理科大学永野研究室のWSを利用させていただきました。図の作成には一部GMTを利用させていただきました。記して謝意を表します。

© The Seismological Society of Japan

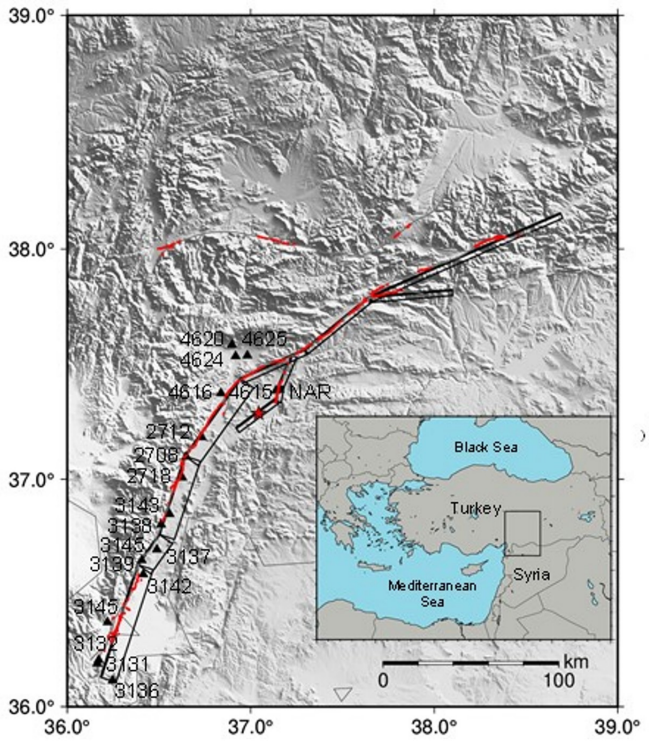


図 1　対象観測点と特性化震源モデルの地表投影図

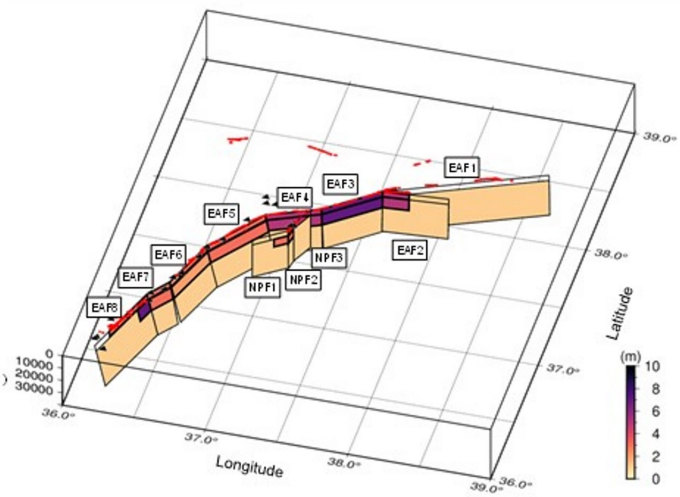
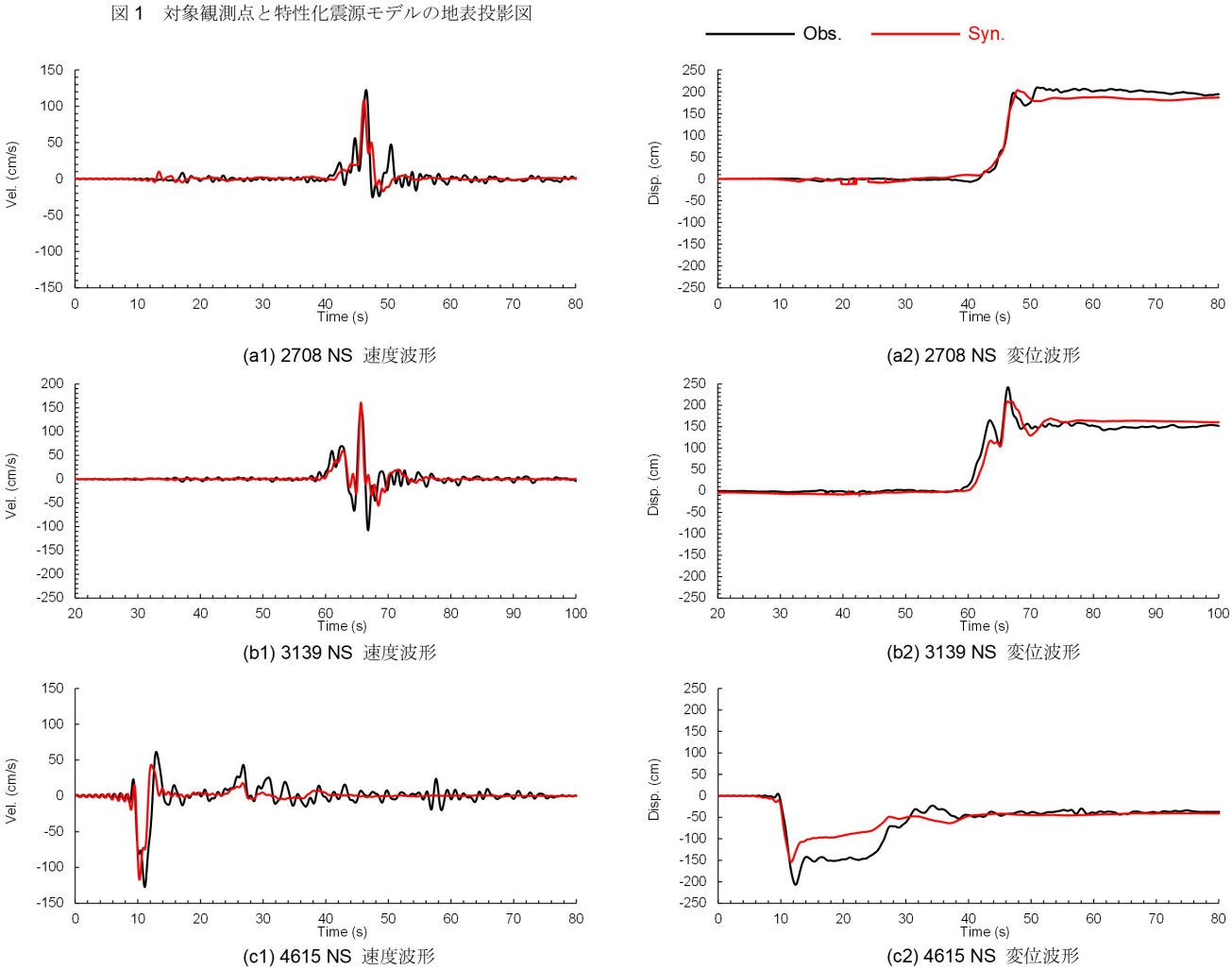


図 2　特性化震源モデル



(a1) 2708 NS　速度波形

(a2) 2708 NS　変位波形

(b1) 3139 NS　速度波形

(b2) 3139 NS　変位波形

(c1) 4615 NS　速度波形

(c2) 4615 NS　変位波形

図 3　再現解析の例

© The Seismological Society of Japan

Strong Motion Simulation Focused on Rupture Velocity of the 2023 Turkey Subsequent Earthquake (Mw7.6) Based on Characterized Fault Model

*Sei Kanayama[1], Toshimichi kido[2], Hong Liu[1], Masayuki Nagano[1]

1. Tokyo University of Science, 2. OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC.

2023年2月6日10時24分(UTC)頃にトルコ南東部を震源としてMw7.6の地震(エルビスタン地震)が発生した。この地震は2023年2月6日1時17分(UTC)頃に発生した本震(Mw7.7)の後発地震とされている地震であり，本震・後発地震ともに広域で地表地震断層が確認された。本震では東アナトリア断層沿いの南西部で多数の強震記録が得られたものの，後発地震においては断層極近傍での記録は殆ど得られていない。また，Melgar et al. (2023)によれば本震では破壊伝播速度が3.2 km/s程度であるが，後発地震においてはチャルダック断層西側で破壊伝播速度がS波速度を大きく上回るスーパーシアとなっていた可能性があるとしている。過去の地震においてもスーパーシアが確認された地震は少なく，そのときの断層近傍等における地震動特性や建物被害との関係を議論することは重要である。本研究では，エルビスタン地震時に得られた断層近傍を含む強震記録を整理するとともに，チャルダック断層の特性化震源断層モデルを構築し，理論地震動計算により断層近傍の観測記録の再現を試みた。この際，震源位置を境にチャルダック断層西側の破壊伝播速度を変化させ，強震記録との対応からチャルダック断層西側で解釈されているスーパーシアと断層近傍地震動との関係について基礎的な検討を行う。

エルビスタン地震の断層活動の特徴としては，震源付近での大きなすべり量や，幅20km，長さ80kmに及ぶ断層のすべりが挙げられる。USGSの震源インバージョン解析によれば，震源付近の最大すべり量は11.5mであり，長大断層のすべりは平均して5, 6m程にもなる。エルビスタン地震で得られた断層極近傍の強震記録は4612のみであるが，比較的断層近傍に位置する0129, 3802, 4406, 4611を加えて速度軌跡の卓越方向について確認した。解析でサブシアとなっている断層東側では断層直交方向に速度パルスが卓越する傾向が見られたが，スーパーシアである断層西側では速度パルスの卓越方向は不明瞭であった。震央からスーパーシア側への走行に沿った速度ペーストアップからは，パルス波が伝播する様子が明瞭に確認できた。また， 4612の近傍では地表地震断層が確認されている。該当点については加速度の基線変化補正を行って残留変形を評価し，その値がGNSSの地表変位記録より大きく外れていないことを確認している。

次に特性化震源モデルを用いて，チャルダック断層による理論地震動を評価した。巨視的断層面は，断層モデル上端が極力USGSの地表地震断層に沿うようにして設定した。震源以西の破壊伝播速度の違いによる比較を行うため，チャルダック断層東側に該当するセグメントについては震源を境に2枚のセグメントで構成した。破壊伝播速度Vrについては，Melger et al. (2023)では断層西側ではVr=4.8 km/s，東側ではVr=2.8 km/sとなっている。今回は，震源より断層西側をスーパーシアとなるVr=4.8 km/s の場合とサブシアとなるVr=2.8 km/sの場合について検討を行い，断層東側は両ケースともVr=2.8 km/s で統一した。地表地震断層が確認されている地域の浅部はLMGAとして設定し，地表地震断層が確認されていない浅部において断層すべりは発生しないものとした。SMGAについては既往の震源インバージョン解析のすべり分布を参考に設定した。理論地震動計算には断層近傍の地震動評価が可能な三次元薄層要素法を用い，最大振動数は1.0 Hzとした。水平成層地盤構造はGuvercin et al.(2023)を参照し，各断層のすべり速度時間関数は波形の再現性を見ながら設定した。試行錯誤的な特性化震源モデル，すべり速度時間関数の与え方ではあるものの，理論地震動計算に基づく地震動シミュレーション解析によりエルビスタン地震時の強震記録の再現を試みると同時に，破壊伝播速度が断層近傍の地震動特性に与える影響を検討した。

謝　辞

AFAD，ESMによる強震記録，USGSの地表地震断層分布のデータを利用させていただきました。一部図の作成にはGMT4を利用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

© The Seismological Society of Japan

Broadband Strong Ground Motion Simulation of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake Using the Empirical Green's Function Method.

*Hidetoshi Kasugai[1], Yoshiaki Hisada[1], Shinya Tanaka[2]

1. Kogakuin University, 2. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

１．はじめに
我が国では強震観測網[2)]などにより観測記録が蓄積され、近年では長周期成分を含む高精度な記録が得られ始めているが、その記録は十分活用されているとは言えない。経験的グリーン関数法（EGF）は予測可能な周期帯域が小地震のS/N比に依存するため、近年の記録を活用して広帯域の予測も可能である。しかし、EGFは表面波を含む長周期地震動に関する実績が多くない。そこで本研究では、余震記録が豊富な2000年鳥取県西部地震を対象とし、EGFによる広帯域の強震動シミュレーションを行なう。

２．検証に用いる地震
図1に池田ほか[1)]によるEGFを用いた2000年鳥取県西部地震の震源モデルを示す。以下ではこのモデル、入倉・釜江(1997)によるEGFを用いて再現を試みる。要素地震として用いる余震は、池田ほか[1)]が用いた10/17(Mj=4.2, 深さ8km)の余震に加え、震源メカニズムが本震と類似しており、震源が比較的浅い10/8(Mj=5.0, 深さ5km)の余震を用いる。

３．震源近傍における強震動シミュレーション
まず始めに、震源近傍の本震波形の再現を試みる。震央距離30km以内では、10/17ではSMNH01、10/8ではSMNH02で強震記録が得られている。図2に本震波形と合成波形の比較を示す。10/17では、加速度波形の包絡形状、速度波形のパルス波形の性状をよく再現できている。一方、10/8の余震では、加速度波形は過小評価であるが速度波形の位相や振幅は再現できている。

４．震源遠方における強震動シミュレーション
次に、震源遠方の本震波形の再現を試みる。図3にHRSH06、SMNH10における本震波形と合成波形の比較を示す。HRSH06において、10/17では低周波数域では過小評価であるが高周波数域では比較的再現が出来ている。10/8では低周波数域では比較的再現が出来ているが高周波数域では過小評価である。この理由は、やや深い10/17では長周期地震動の励起が弱いこと対して、比較的浅い10/8では短周期地震動の発生は弱いが、表面波と考えられる長周期地震動は強く励起しているためだと考えられる。一方、SMNH10では、10/17ではTransverse成分に関して低周波数域で過小評価あり、10/8ではどの成分においても過大評価となっている。SMNH10ではより大きな表面波が本震・余震ともに観測されており、10/8では長周期波形のコヒーレントな重ね合わせにより、過大評価となった原因であると考えられる。なお、10/17のRadial、UD成分に関しては低周波数域まで比較的再現できており、深い余震であっても表面波が含まれていれば広帯域の再現が出来ると考えられる。

５．要素地震の使い分けによる検証結果の比較
震源が深い10/17では実体波による短周期波形の発生、浅い10/8では表面波による長周期波形の励起が強いことを示した。そこで、深いAsperity1を10/17、浅いAsperity2を10/8として要素地震を使い分けた場合の検証を行なう。図4に要素地震を使い分けない場合、使い分けた場合による本震波形と合成波形のフーリエスペクトル比の平均値を示す。全体の観測点を用いた平均値では、10/17では低周波数域まで1に近い値となっているが、要素地震を使い分けた場合と10/8では低周波数域でやや過大評価となっている。また、震央距離60km以上の観測点を用いた平均値も同様である。 しかし、10/17では震央距離60km以内の観測点を用いた平均値では、低周波数域で過小評価となっており、要素地震の使い分けによる有効性を示唆していると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

６．まとめ

2000年鳥取県西部地震、池田ほか[1)]による震源モデルを用いてEGFによる広帯域地震動の再現を試みた。その結果、10/17では深いAsperity1からの実体波による短周期波形の再現性が高いが、10/8では浅いAsperity2からの表面波の励起が強く、表面波が卓越する観測点では、要素地震のコヒーレントな重ね合わせにより、長周期成分が過大評価となった。また、深いAsperity1を10/17、浅いAsperity2を10/8とし要素地震を使い分けた場合、10/17と比べて低周波数域で平均値の振幅は大きくなることが明らかとなった。今後は、各観測点の詳細な確認、長周期波形の重ね合わせ方の検討を行なっていく予定である。

謝　辞　本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網による観測波形を使用させていただきました。

参考文献

1)池田隆明ほか(2002)：日本建築学会構造系論文集, 第561巻, 37-45
2)防災科学技術研究所 強震観測網：https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/

© The Seismological Society of Japan

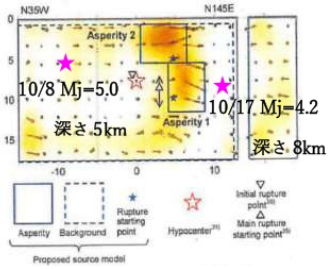
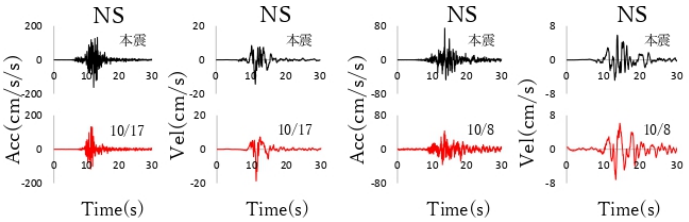
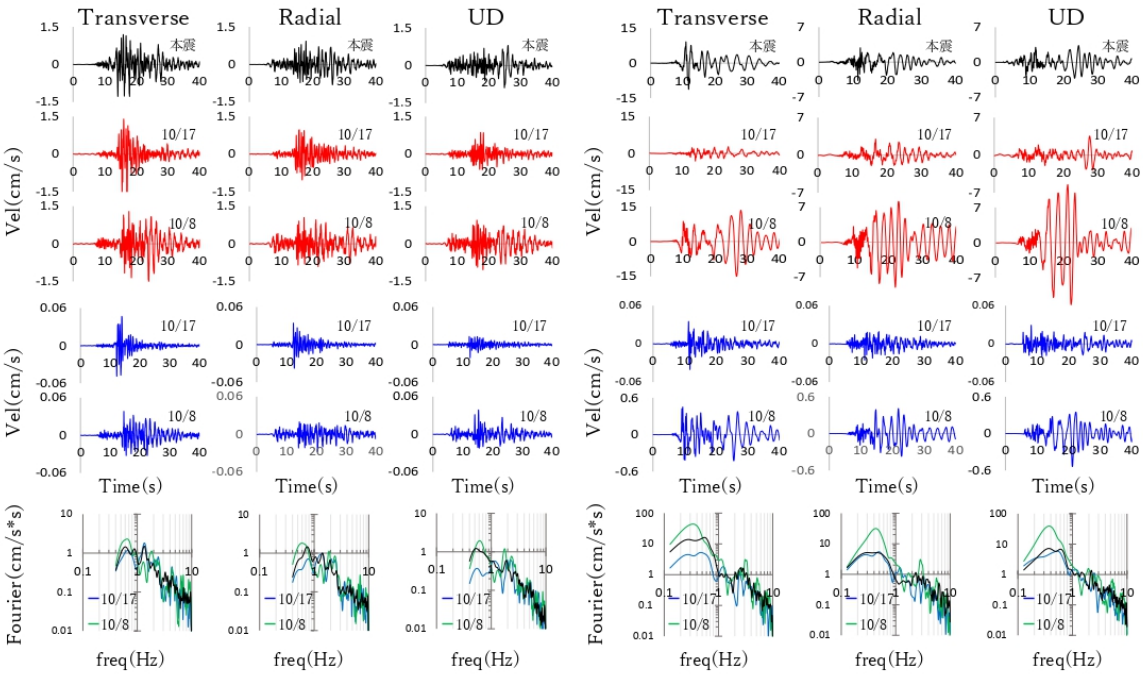


図 1　最適震源モデル[池田ほか [1)]]
より抜粋し一部加筆



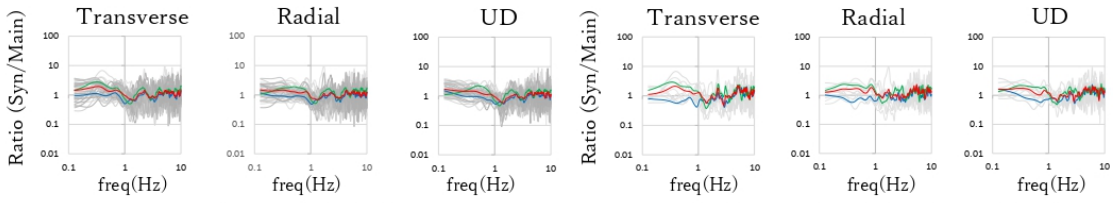
(a)SMNH01 (8km)　(b)SMNH02 (24km)

図 2　震源近傍の検証結果（ー：本震　ー：合成）

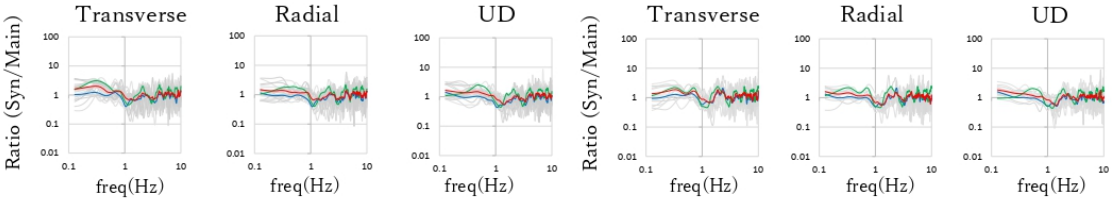


(a)HRSH06 (56km)　(b)SMNH10 (31km)

図 3　震源遠方の検証結果（ー：本震　ー：合成　ー：余震）



(a) 全体（計 43 点）　(b) 本震震央距離 30～60km（計 9 点）



(c) 本震震央距離 61～120km（計 21 点）　(d) 本震震央距離 121～180km（計 13 点）

図 4　合成波形と本震波形のフーリエスペクトル比（合成／本震）
（ー：使い分けの平均　ー：10/17(Mj=4.2)の平均　ー：10/8(Mj=5.0)の平均　ー：使い分けの算出値）

© The Seismological Society of Japan

Study on the Shallow Fault Slip of the 2022 Taitung, Taiwan, Earthquake (Mw6.9) Based on Characterized Fault Models

*Atsuko OANA[1], Ken Miyakoshi[2], Shohei Yoshida[2], Toshiaki Sato[2]

1. Shimizu Corporation, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

1. はじめに
2022年9月、台湾南東部においてMw6.9（USGS[2022]）の地震（以下、2022年台東地震）が発生し、地表に断層が出現するとともに、その断層沿い約2 km程度以内の観測点において、速度波形に長周期パルス（周期約4秒）が、変位波形に永久変位が記録された。
地震調査研究推進本部[2022]は、2016年熊本地震の観測記録に基づき、既往の強震動予測手法の検証を行い、中間報告としてその結果を公開している。その中では、震源断層近傍における長周期パルスや永久変位を再現することを目的として、従来の強震動予測レシピでは考慮されていなかった地震発生層よりも浅い領域に震源断層を拡張したモデルを用いた検討事例が示されるとともに、モデルの改良・高度化のためにはさらなる検討が必要と述べられている。
本稿では、上記の検討の一例と位置づけ、2022年台東地震を対象に、地震発生層以浅を含む特性化震源モデルを用いて震源断層近傍における地震動を計算し、観測記録の再現性への影響について評価する。

2. 特性化震源モデル
台東地域には、南北に並走する西傾斜の中央山脈断層と東傾斜の縦谷断層の二つの主要な活断層が存在する。既往の震源インバージョン結果では、主に中央山脈断層を考慮したもの（USGS[2022], Yagi et al.[2023]）と、中央山脈断層と縦谷断層の両方を考慮したもの（Lee et al.[2023]）が提案されている。後者の場合でも主要なすべりは中央山脈断層に集中していることを踏まえ、ここではUSGS[2022]の震源インバージョン結果を参考にしつつ、断層モデルの上端が地表地震断層（Central Geological Survey[2022]）に概ね沿うように、かつUSGS[2022]の巨視的断層面の範囲を極力尊重するように、2セグメントから成る特性化震源モデルを作成した。
地震発生層以浅の浅部断層すべりが震源断層近傍の地震動に与える影響度合いを評価するため、地震本部[2022]を参考に、3通りの特性化震源モデルを設定した。一つ目はSMGA（Strong Motion Generation Area、強震動生成域）、背景領域、およびLMGA（Long-period Motion Generation Area、長周期地震動生成域）（Irikura et al.[2019]）から成るモデル1（深部＋浅部（LMGAあり））、二つ目はモデル1のLMGAを背景領域に置換したモデル2（深部＋浅部（背景領域））、そして三つ目は地震発生層以浅の浅部断層を取り除いたモデル3（深部のみ）である。モデル1を図1に示す。特性化震源モデルの各領域のすべり量とすべり角は、USGS[2022]の震源インバージョン結果のすべり分布に基づき平均的な値とした。深部断層のSMGAと背景領域のすべり速度時間関数は中村・宮武[2000]の近似式とし、与条件として必要となる応力降下量は強震動予測レシピ（地震本部[2020]）に従い仮定した。浅部断層のLMGAと背景領域のすべり速度時間関数はSmoothed ramp関数とし、そのライズタイムは震源近傍記録におけるベル型の速度パルス幅から設定した。破壊開始点はマルチハイポセンターとし、破壊伝播様式はそれぞれのセグメントで同心円状を仮定した。破壊伝播速度は2.1 km/sで均質とした。

3. 地震動評価結果
波数積分法（Hisada and Bielak[2003]）を用いて理論地震動を計算した。地下構造モデルには、Huang et al.[2014]の北緯23.3度、東経121.32度における速度構造モデルを用いた。地震動評価結果には0.5 Hzのローパスフィルタをかけた。地表地震断層から約200 mに位置するEYUL（玉里）における観測記録と計算結果の比較を図2に示す。モデル2とモデル3は全体に過小評価であり、観測記録に見られる特徴的な速度パルスや永久変位を再現できていない。一方、モデル1は、周期特性などの再現精度には課題が残るものの、地震動レベルは観測に近づいており、浅部断層のLMGAの寄与が大きいことが窺える。

© The Seismological Society of Japan

以上より、2022年台東地震においても、震源断層近傍の観測記録を再現するためには、地震発生層以浅に震源断層を拡張する必要があること、浅部断層のすべり量は背景領域と同等では必ずしも十分ではない場合があることが確認された。

謝辞：台湾中央気象局のTaiwan Geophysical Database Management System GDMS-2020で公開されている強震観測網CWBSN、TSMIPの加速度時刻歴データを利用させて頂きました。工学院大学久田嘉章教授が研究室WEBサイトで公開されている波数積分法のプログラムを使用させて頂きました。

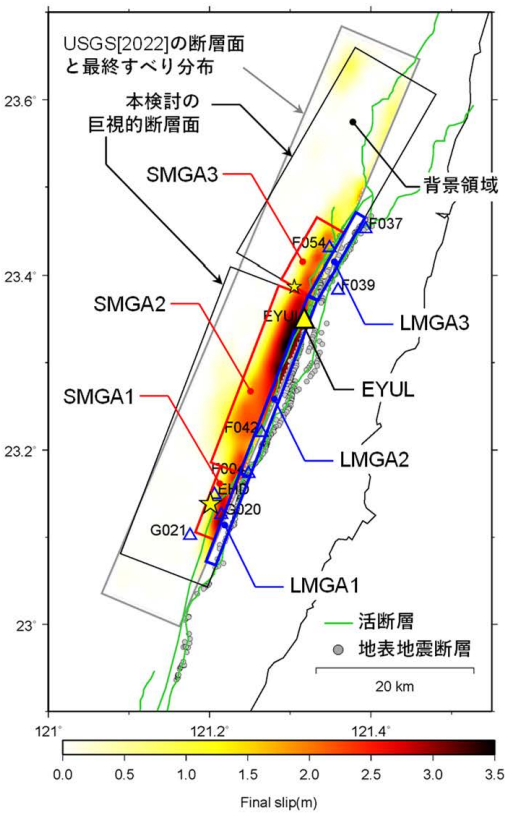


図1　特性化震源モデル（モデル1）

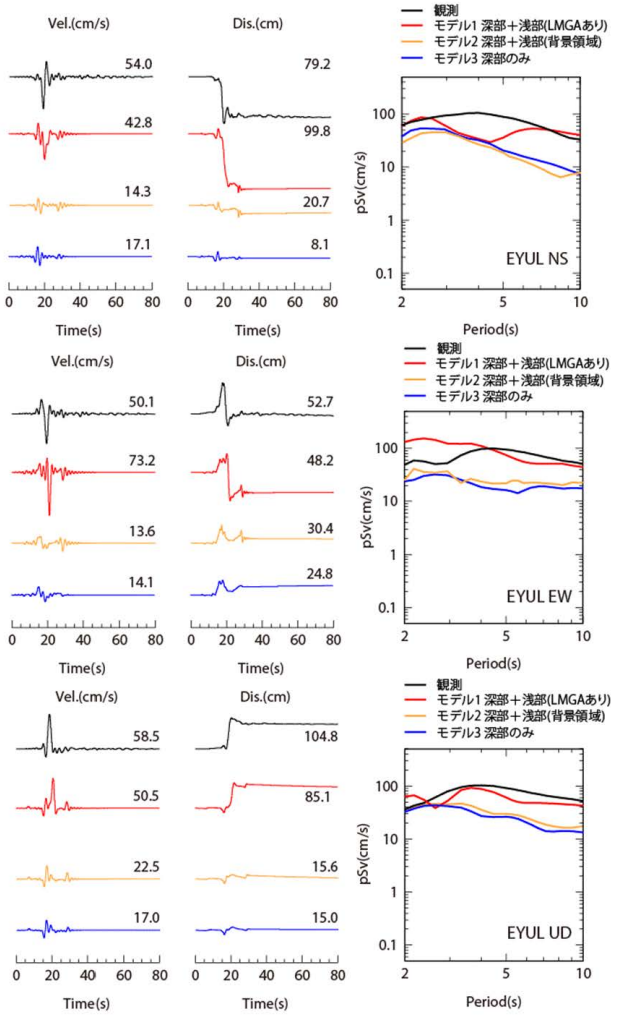


図2　震源近傍の観測点EYUL（玉里）における観測記録と計算結果の比較

© The Seismological Society of Japan

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

Wed. Nov 1, 2023 3:15 PM - 4:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:15 AM - 7:00 AM UTC | Room D F204

[S15] PM-2

chairperson:Takashi Hirai(University of Hyogo)

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

[S15-17] A Study on Behavior of Japanese Swords on Display during Earthquake Based on Vibration Experiment

*Takashi HIRAI[1], Tomoko TEZUKA[2], Miki TAKANO[3], Jun TOBITA[3] (1. University of Hyogo, 2. Token Corporation, 3. Nagoya University)

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

[S15-18] Improvement of ground motion prediction equation by non-ergodic approach considering regional characteristics

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

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

[S15-19] Differences in site amplification for each plain based on the ground motion prediction equation

*Hiroto Tanaka[1], Ritsuko S. Matsu'ura[2], Mitsuko Furumura[2], Tsutomu Takahama[1] (1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction)

A Study on Behavior of Japanese Swords on Display during Earthquake Based on Vibration Experiment

*Takashi HIRAI[1], Tomoko TEZUKA[2], Miki TAKANO[3], Jun TOBITA[3]

1. University of Hyogo, 2. Token Corporation, 3. Nagoya University

地震災害への対策を考えるうえでもっとも優先されるのは人命の保護であるが、人類が長い時間をかけて創造し守り伝えてきた文化財についても、損傷を極力防止しなければならない。これを破損することなく次代へ伝えることが、復興後の地域や国家ひいては人類全体の文化水準の維持と向上に資することになる。

著者らは、文化財の中でも特に日本刀をはじめとする刀剣類について、その展示状態における地震時の挙動と損傷防止のための方策について検討してきた。多くの場合、刀剣類は刀掛けの上に寝かせる形で展示される。地震時に跳躍、落下、あるいは他の展示物と衝突することにより刃こぼれが、また刀掛けの上で滑動することによりひけ疵（ひっかき傷）が生じるおそれがある。刀剣類は一般的な文化財と異なり、刃物であるためテグス等による固定が不可能であることに加え、個人所有のものが多いため建物の免震化や展示用免震台の調達が費用面で難しいことが多い。それゆえ、安価に実施できる工夫や、刀掛けへの免震機構の組み込みなどが望まれる。これまでに、模造刀を用いた振動実験により、刀掛けの種類や白布の有無による挙動の違い、水平方向の正弦波加振による刀身の滑動の様子、刀掛けと刀身との摩擦係数等を明らかにしてきた [1] [2]。

本研究では、これまでの検討を踏まえて、3次元の非定常的な地震動に対する刀身の挙動を把握することを目的として、詳細な振動実験を行った。

図1に実験の様子を示す。試験体となる模造刀の設置条件として、3種類を設定した。写真の左手前側より、(1) 刀掛けの上に白布を介して刀身を載せたもの、(2) 刀掛けの受け部分に簡単なクランプを設置して刀身を固定したもの、および (3) 受け部分にウレタン素材を用いて摩擦係数とクッション性を向上させた展示ケースに刀身を設置したものである。いずれも刀掛けと展示ケースは振動台に固定した。各模造刀の両端に3軸加速度計を設置し、振動台に設置した加速度計との比較から、刀掛けに対する刀身の相対的な動きを測定した。加振内容としては、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での強震記録、2004年新潟県中越地震のK-NET小千谷での強震記録、2016年熊本地震本震のKiK-net益城での地表強震記録、および想定南海トラフ地震による愛知県での地震動を入力した。

実験の結果、試験体2と3については刀掛けと刀身との相対的な動きはほとんど生じなかった。ただし、試験体3においては、刀身が受けの上で前後方向にわずかに揺れる挙動が見られた。試験体1については、刀身が刀掛けの上で長さ方向に大きく滑動し、ほとんどの加振ケースで最終的に刀身が落下した。一方、刀身の刀掛け上での跳躍や、前後方向に振動して落下する現象は見られなかった。これは、入力した地震動の下向きの加速度が1 Gを超えなかったことと、白布やウレタン素材によるクッション性が作用した結果と考えられる。建物内での展示の場合には上下動よりも水平動が卓越するため、損傷要因となりうる現象としてもっとも発生しやすいのは長さ方向の滑動であることが分かる。

今後、刀身の動きを力学モデルによって表現し、シミュレーションを援用して地震時の損傷を効果的に防止する方策について検討する。また、本実験での試験体2と3についてはおおむね刀身は無事であったが、これは地動入力に対しての結果であり、建物応答に対しての安全性は不明である。この点も、今後の課題である。

謝辞
本研究の実施にあたり、名城大学の武藤厚教授の御厚意により振動台設備を使用させていただいた。また、刀箱師の中村圭佑氏より展示ケースの試験体を制作、提供いただいた。それぞれ、謝意を表する。

参考文献
[1] 平井敬, 手塚朋子, 高野美希：展示状態の文化財の地震時損傷防止に関する検討　ー日本刀の振動実験ー, 日本地震学会2022年秋季大会, C000212 (2022)
[2] 手塚朋子, 平井敬, 高野美希, 山田銀河：日本刀を事例とした文化財の地震時損傷防止対策, 日本ミュージア

© The Seismological Society of Japan

ム・マネージメント学会研究紀要, 27, pp.49-57 (2023)

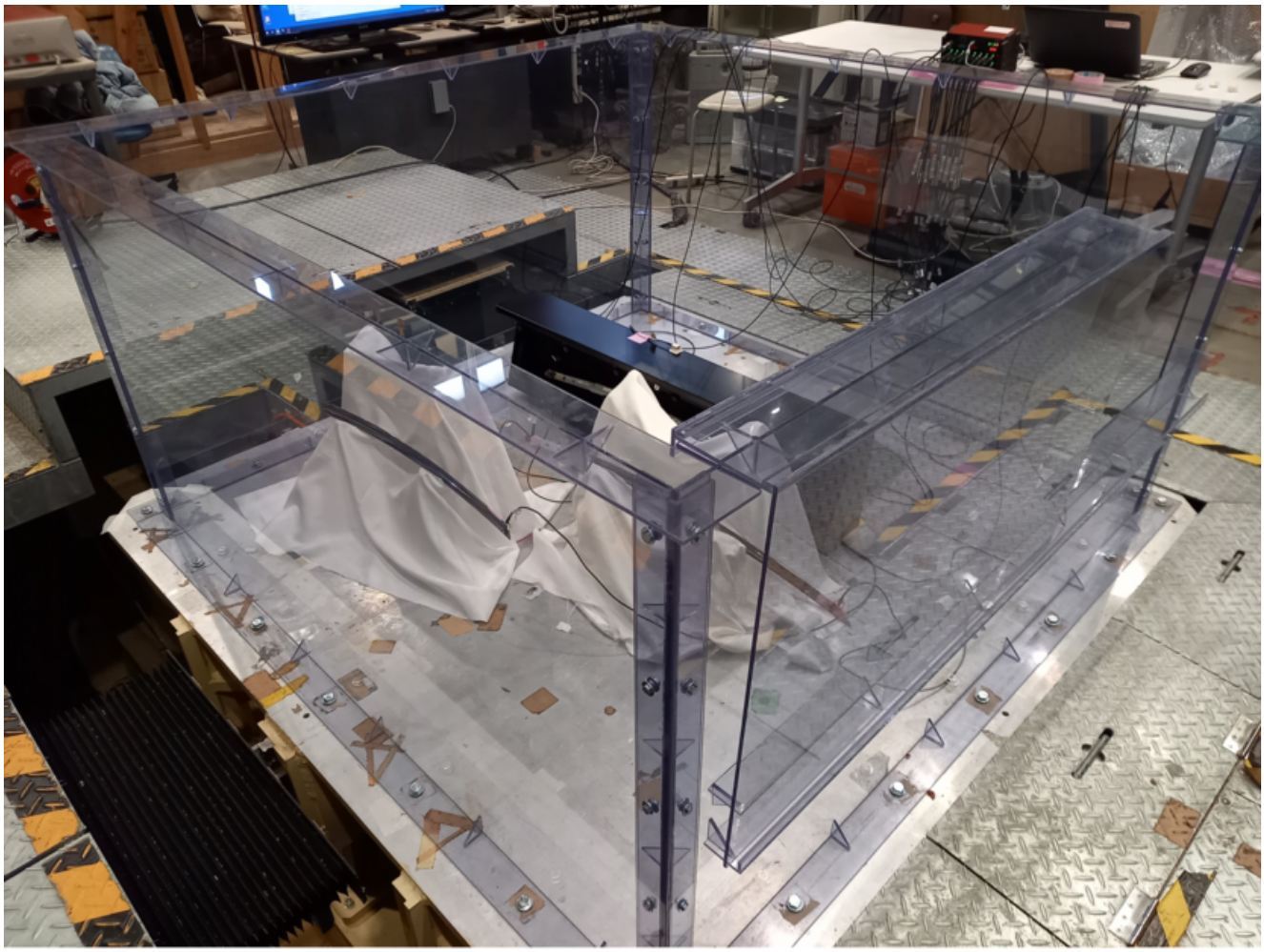


図 1　振動台実験の様子

© The Seismological Society of Japan

Improvement of ground motion prediction equation by non-ergodic approach considering regional characteristics

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

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

日本列島及びその周辺における3次元的な地震波減衰（Q値）構造が複雑であることが明らかとなりつつある。地震動予測においてこのような複雑な伝播経路特性が適切に考慮されることは、ばらつきや不確実さの低減に必要不可欠である。具体的な例として、北海道のえりも岬周辺では短周期（高周波数）地震動の減衰に関してLow-Q構造が比較的狭い範囲で推定されており、森川ほか（2004；防災科研研究資料）でもえりも岬付近の3地点のみ観測された地震動の短周期成分を説明するためには、局所的なLow-Q領域の設定が必要とされている。 近年における膨大な数の地震動記録の蓄積により、3次元的なQ値構造の推定における解像度の向上や、非エルゴード的な地震動予測モデル構築の検討などが進められつつあるが、伝播経路特性が十分に分離（抽出）されているとは現状では言い難い。一方で我々は、地震動予測式による予測値と観測値との残差を地震ごとのばらつきと観測点ごとのばらつきに分離し、それらをそれぞれ「補正項」とすることで地震動予測のばらつきを低減できることを示している（Morikawa et al., 2008; Journal of Seismology）。 本検討では、特定の震源域で発生した地震による観測値と地震動予測式（Morikawa and Fujiwar,2013; Journal of Disaster Research）による予測値との残差のばらつきの分離を行い、その結果に基づいて地域性地震動予測モデルに拡張することを試みる。Morikawa et al. (2008)では6つの震源域にのみ適用したが、その後の蓄積されたデータと規模の小さな地震の記録も用いることで、より多くかつ狭い震源域を対象とできることが期待できる。本検討によって地域的な地震動予測式の構築が可能となれば、既存の他の地震動予測式にも適用できる。

© The Seismological Society of Japan

Differences in site amplification for each plain based on the ground motion prediction equation

*Hiroto Tanaka[1], Ritsuko S. Matsu'ura[2], Mitsuko Furumura[2], Tsutomu Takahama[1]

1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Earthquake Research Center, Association for the Development of Earthquake Prediction

１．はじめに

地震調査研究推進本部による全国地震動予測地図では、これまで主に最大速度や震度を指標とした地震動ハザード評価が行われてきたが、近年、工学的利活用のために応答スペクトルを指標とした評価に向けた検討が進められている。超高層建築物や免震構造は大都市の平野部に集中しており、これらの構造物の評価に重要となる長周期側の応答スペクトルの推定精度を高めるためには堆積盆地構造による地盤増幅を適切に考慮することが重要である。

地震動ハザード評価に用いられている既往の地震動予測式（例えば、Morikawa and Fujiwara, 2013やNGAプロジェクト）では長周期側の地盤増幅を考慮するために、観測点直下の堆積層の厚さをパラメータとした補正項が提案されている。しかし、堆積盆地における地盤増幅は3次元的な構造の影響を受けるため、堆積層の厚さだけでなく平野の規模や地層構成も地盤増幅に関係すると考えられる。本研究では、地震動予測式と観測値の残差を分析し、平野毎の地盤増幅の違いについて検討した。

２．回帰分析

観測点毎の地盤増幅特性を抽出するために、震源特性と伝播特性のみに対して地震毎に地震動予測式の回帰分析を行った。Matsu'ura et al.(2020)の地震動予測式の構築に用いられた地震のうち、概ね100観測点以上の観測記録が得られている85地震の27,957記録を対象とし、地震動予測式は次式のモデルを用いた。

$$\log_{10} Sa = A - b\,\Delta - \beta \log_{10}\Delta - d \min[\delta, 250]$$

ここで、Saは水平動の加速度応答スペクトル（h=5%）としてRotD50[cm/s^2]（Boore, 2010）を用い、周期0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0秒の5点を対象とした。Δは断層最短距離[km]、δは観測点直下のプレート上面までの深度[km]である。A, b, β, dは回帰係数であり、地震タイプや減衰傾向を鑑みて地震毎に回帰する係数の組み合わせを調整した。地震毎の地震動予測式の回帰分析によって得られた観測値との対数残差を観測点毎に平均することで、観測点毎の地盤増幅特性を算出した。

次に、地盤増幅の平野毎の違いや、浅い地盤構造と深い地盤構造の周期による影響度の違いを明らかにすることを目的に、5記録以上得られている1,606地点の観測点毎の地盤増幅特性（観測値との残差の平均）について回帰分析を実施した。具体的には、Vs30とD1400をパラメータとした次式のモデルで、浅部の補正項（第1項）と深部の補正項（第2項）を同時に求めた。

$$Residual = g_V \log_{10}(\min[Vs30, V_{th}]/ V_0) + g_D \log_{10}(\max[D1400, D_{th}]/D_0)$$

ここで、Vs30はPS検層結果を基に翠川・野木(2015)の方法で推定した地表から30mの平均S波速度[m/s]、D1400は防災科学技術研究所J-SHISの深部地盤構造モデル（V3.2）においてS波速度が1400m/s以上となる深度[m]である。データセットの分布を鑑みてV_{th}=1000m/s、V_0=350m/sに固定した。g_V, g_D, D_0は回帰係数であり、D_{th}はグリッドサーチにより求めた。

３．結果

地盤補正項による残差の変化について、図1に周期0.5秒と5.0秒の例を示す。補正項による残差の改善が確認でき、短周期側の周期0.5秒は浅部の補正項による改善効果が、長周期側の周期5.0秒は深部の補正項による

© The Seismological Society of Japan

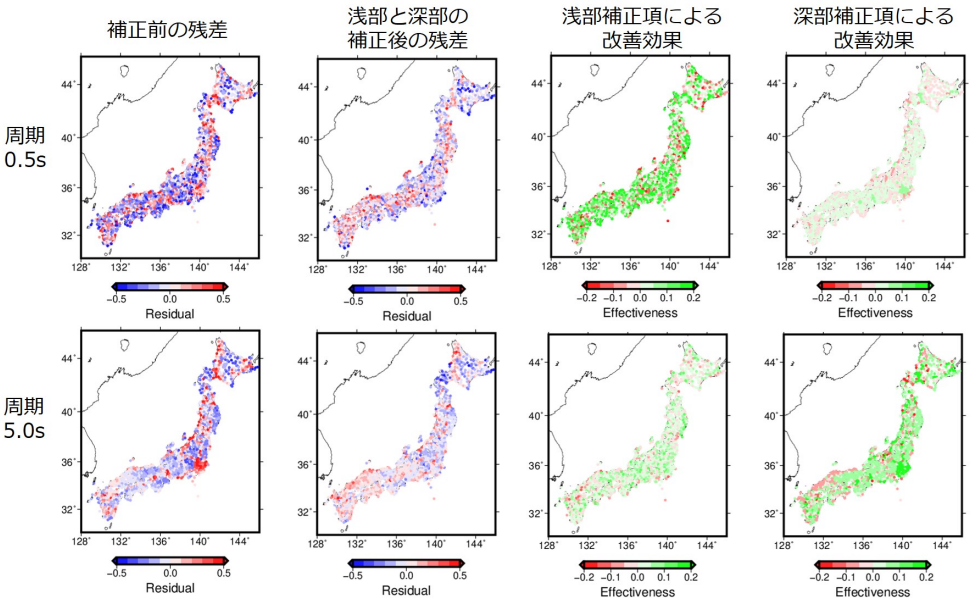
改善効果がそれぞれ大きい傾向が見られている。浅部と深部の改善効果の大小は、周期1～2秒程度で入れ替わることが確認された。なお、中国地方では2秒以上の長周期側において深部の補正項により残差が悪化した。これは、中国地方は堆積層が薄くD1400が小さいため補正は応答を小さくする側に働くが、実際は表面波の卓越により観測の応答が大きいことが要因として考えられる。

本研究ではD1400の分布を参考に図2に示す7地域の平野（盆地・台地を含む）に着目し、地域間での残差の違いを確認した。図3に補正項の適用前後の残差を地域毎に平均して周期毎に示す。水色で示す大阪平野では周期2秒以上において、補正前の残差が他の地域に比べて大きい。補正項による改善効果は見られるが、他の地域に比べて効果が十分とは言えない。一方、青色の根釧台地では周期1～3秒において、補正前の残差が他の地域に比べて小さく、補正項により残差が悪化する場合がある。このことは、地域によってVs30やD1400と地盤増幅の関係性（補正項の傾き）が異なる可能性を示唆しており、地域毎の特性を考慮した地震動予測式の構築に向けて今後さらなる検討を進めたい。

４．謝辞

本研究は「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一部として文部科学省からの委託によって実施しました。防災科学技術研究所の観測記録を利用しました。図の作成にはGMTを用いました。ここに記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan



左図：Residual = 観測値－予測値
右図：Effectiveness = 補正前残差の絶対値－補正後残差の絶対値

図1 観測点毎の残差と改善効果（上段：周期0.5s、下段：周期5.0s）

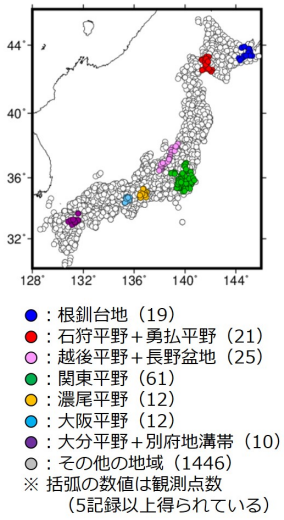


図2 着目した平野
（盆地・台地を含む）

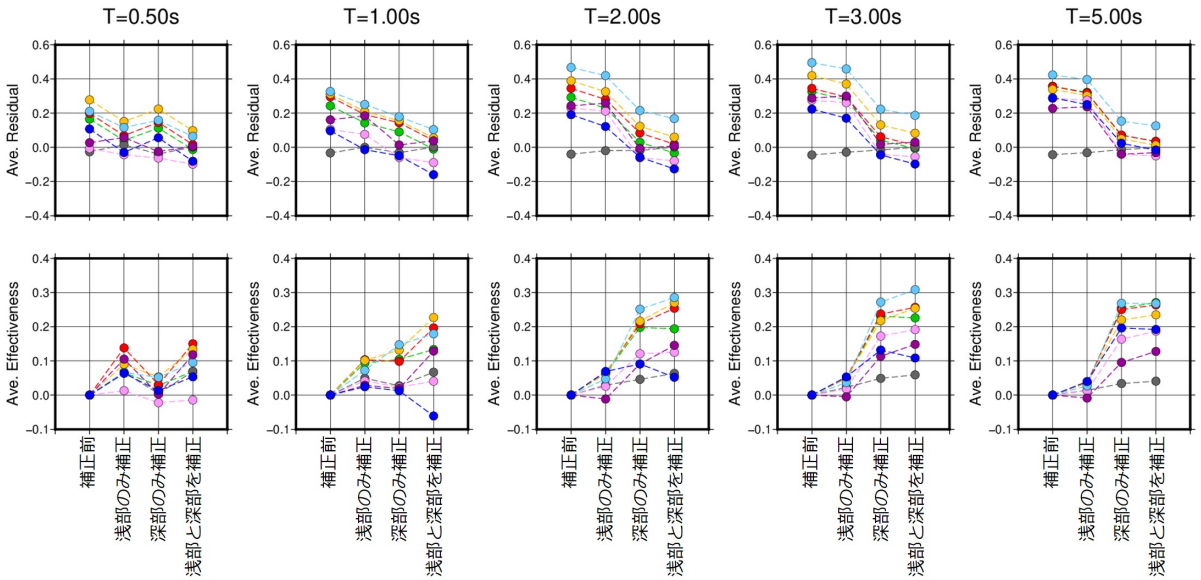


図3 平野毎の平均残差（上段）と改善効果（下段）

© The Seismological Society of Japan

Room D | Regular session：S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

Wed. Nov 1, 2023 4:00 PM - 4:45 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 7:00 AM - 7:45 AM UTC | Room D F204

[S16] PM-2

chairperson:Ikuo Cho(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S16-01] Peak-frequency map of horizontal-to-vertical spectral ratios in the Kanto region: Addition of content to the Urban Geological Map

*Ikuo CHO[1], Shigeki Senna[2], Susumu Nonogaki[1], Tsutomu Nakazawa[1], Junko Komatsubara[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S16-02] Estimation of Shallow Structure Along the Hinagu Fault Using Seismic Wave Interferometry in DAS Observations of National Route 3

*Satoru Hamanaka[1], Kentaro Emoto[2] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Faculty of Science, Kyushu University)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S16-03] Comparative Analysis of Ground Motion Monitoring Performance through DAS Test Observations Using Multiple Instruments

*Hiroyuki FUJIWARA[1], Hiromitsu Nakamura[1], Takashi Kunugi[1], Shohei Naito[1], Shigeki Senna[1], Masato Sato[1], Ken Sakurai[2], Chisato Konishi[2], Haruhiko Suzuki[2], Masaki Takebe[3] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO Corporation, 3. Mitsubishi Electric Software Corporation)

Peak-frequency map of horizontal-to-vertical spectral ratios in the Kanto region: Addition of content to the Urban Geological Map

*Ikuo CHO[1], Shigeki Senna[2], Susumu Nonogaki[1], Tsutomu Nakazawa[1], Junko Komatsubara[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

産業技術総合研究所（産総研）地質調査総合センターは，経済産業省の知的基盤整備計画に基づき，3次元（3D）地質地盤図を整備している．3D地質地盤図は，従来の平面の地質図では表現が難しかった都市部の地下の地質構造を，大量のボーリングデータを利用した3Dモデリングによって立体的に可視化したものである．地下数10 mまでの地質構造を立体図や任意の箇所の地質断面図として表示できる機能を有する．地震防災・減災やインフラ整備，地質汚染対策への利活用を見込み，産総研のウェブサイト「都市域の地質地盤図」https://gbank.gsj.jp/urbangeol/で誰もが無償で閲覧可能となっている．
3D地質地盤図構築のプロジェクトは2011年東北地方太平洋沖地震をきっかけとして着手され,2018年に首都圏のモデル地域としてまず千葉県北部地域（柏～成田～船橋～千葉近辺），2021年に東京都区部が公開された．今後は対象地域を拡大し，最終的には首都圏主要部を覆う予定である．
一方，防災科学技術研究所（防災科研）は，ほぼ同時期に関東地域のリアルタイム地震被害推定用の地盤モデルを構築した（藤原他，2019）．その際，膨大な量の常時微動観測が行われ，その結果は地盤モデルの基礎データの１つとされた．具体的には，関東地域の平野部で面的にほぼ5 km間隔（半径数十～400 mの大アレイ）あるいは首都圏でほぼ1 km郊外で2 km間隔（半径0.6～10 mの極小アレイ）で微動アレイ観測が実施された．
我々は，上述の微動データと産総研独自の微動データを基礎として，H/Vスペクトルのピーク周波数を評価し，3D地質地盤図のコンテンツとすることを計画している．H/Vスペクトルのピーク周波数は地盤の卓越周期として把握され，耐震設計のための地盤種別判定，地震災害軽減のための地震ゾーニングあるいは地震動増幅特性の評価にも用いられている．地質構造と地盤構造そして地盤震動特性は互いに密接に関連するので，我々は，H/Vスペクトルのピーク周波数マップを作成して3D地質地盤図と比較できる環境を構築し，誰でも自由に閲覧できる仕組みを提供するという立場で，地震防災・減災意識の啓発や地盤モデルの高度化に寄与することを目指している．
本発表ではまず3D地質地盤図について説明する．次に，微動のH/Vスペクトルのピーク周波数を決めるためのピークの同定手順を説明する．最後に，ピーク周波数の空間分布をシームレスマップ化し，地形・地質との対応を例示する．
例えば，一般的に期待される通り，大河川の河口付近の低地では，ピーク周波数が低い一方，その周辺の台地では周波数が高い傾向があることが分かる．東京都区部を例にとると，3D地質地盤図では沖積層の基底に相当する埋没地形（埋没谷底，埋没平坦面1～4）が詳細に描き出されている．これとH/Vスペクトルのピーク周波数マップを対応させると，沖積層が厚く分布する湾岸域の埋没谷軸部の周辺ではピーク周波数が低く1 Hz以下となることが分かる．
武蔵野台地においては，3D地質地盤図では，従来「東京層」と一括りにされていた地層が堆積サイクルに基づき3層（下位より薮層，上泉層，東京層）に区分された．このうち薮層，上泉層の海成砂層が分布するところではピーク周波数は5 Hz以上となることが多いことが分かる．3D地質地盤図には台地下でも谷状に軟弱泥層（東京層下部）が分布する領域があることが示されているが，この谷埋め泥層の分布域の一部は1 Hz程度の低周波数領域に対応することが分かる．また，台地内の所々にピーク周波数が低いところがあり，それらの一部は谷底低地に対応することなども確認できる．
その他，埼玉県東部の旧利根川の流路沿いの中川低地に１Hzあるいはそれ以下の明瞭な低周波数領域が南北に連続する一方，江戸時代以降の治水工事で流路変更した現在の利根川沿いには低周波数の卓越が目立たないことなども分かる．むしろ旧鬼怒川の流路である現在の小貝川低地（茨城県つくばみらい市～竜ヶ崎市～河内町付近）で明瞭な低周波数領域が観察される．また，西方では，多摩川の河口付近から上流側に遡るにつれて河川沿いに堅固な地盤となりむしろ周辺の台地よりもピーク周波数が高くなる傾向が現れることが分かる．

© The Seismological Society of Japan

以上のように，3D地質地盤図にH/Vスペクトルの情報を追加することで，多くの興味深い事実が一見して明らかとなっている．地形・地質と地盤震動特性との関係が「見える化」され，専門家，研究者の詳細かつ定量的な分析に寄与することはもちろんのこと，一般のユーザーにとっても防災教育・啓発的な意味合いで寄与できるようになると期待する．

藤原他：全国を概観するリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発，防災科学技術研究所研究資料，第432号,65p, 2019.

© The Seismological Society of Japan

Estimation of Shallow Structure Along the Hinagu Fault Using Seismic Wave Interferometry in DAS Observations of National Route 3

*Satoru Hamanaka[1], Kentaro Emoto[2]

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

浅部の地下構造をイメージングすることは、建築計画や地下空間の利用といった、都市開発を進める上で非常に重要である。特に断層付近の地域等では、地盤の崩落や地震動の増幅によって大きな被害を受ける可能性があり、浅部構造の情報が地盤特性を評価するために必要である。浅部構造推定のために微動探査が一般に行われているが、広範囲での実施には多大な労力が必要であり、市街地での観測も難しい。近年、光ファイバーケーブル自体をセンサーとしてある場所での歪および歪速度を時系列で測定する、Distributed Acoustic Sensing（DAS）が地球科学分野において観測手法として普及している。DAS観測は低コストかつ超高密度で多点観測を行え、市街地でも既存ケーブルを利用して実施できる利点がある。例えば、火山性地震の震源決定やサイト特性の評価（Nishimura et al., 2021）や、都市部での浅部イメージングや交通ノイズ検知（Song et al., 2021）、断層帯のイメージング（Yang et al., 2022）など様々な研究にDASによる観測が利用されている。

本研究では2023年2月から3月までの約1ヶ月間、国土交通省熊本維持出張所にSilixa社のインテロゲーター（iDAS）を設置し、南方向の国道3号線に沿って国土交通省八代維持出張所まで約40kmの光ファイバーケーブルに接続し、DAS観測をおこなった。チャンネル間隔は4 m、ゲージ長は10 m、サンプリング周波数は400 Hzとし、総チャンネル数は9984チャンネルであった。期間中、22個の地震を観測することができた。しかしイベントの規模が小さいこと、そして国道を通る車両のノイズが多く含まれていたため、雑微動を用いて地下構造を推定する。

観測されたデータから日奈久断層沿いにあるチャンネル区間において、昼の時間帯（13時から15時）の3時間分のノイズ記録を用いた。まずデータはトレンドを除去し、1-30 Hzでバンドパスフィルタをかけ100 Hzにリサンプリングした。次にそれを10分間の時間窓で分割し、波形の1ビット化、スペクトルホワイトニングをした後、相互相関関数を計算し、最後に時間窓毎の相互相関関数を位相重み付けスタッキング（PWS）した。しかし、この通常の地震波干渉法のデータ処理では、非一様・非定常なノイズ源分布により安定した相互相関関数を得ることが難しかったため、さらにTSI法（Three-Station Interferometry）を採用した。TSI法は3つの観測点を使用し、1点を仮想震源、他2点を観測点とした相互相関関数を用いて、繰り返し地震波干渉法を適用し、抽出される表面波のSN比を向上させる手法である（Curtis and Halliday 2010, Song et al., 2022）。TSI法で計算した相互相関を使用し、表面波マルチチャンネル解析により分散曲線を推定した。推定した分散曲線から波長が36 mの時のレイリー波位相速度を求め、経験式（Brown et al., 2000）に基づき表層30 mの平均S波速度を示すV_{S30}を導出した。

TSI法を適用した結果、元の相互相関関数よりSN比が向上し、長距離まで表面波を抽出することができた。TSI法は繰り返し適用することが可能であるが、1回だけで十分な結果が得られた。推定したV_{S30}は、およそ360 m/sであり、J-SHISの表層地盤のデータとほぼ整合的であった。区間によってV_{S30}の変動が見られたが、この詳細に関しては誤差評価を含め、さらに解析をする必要があると考えられる。

TSI法を用いても、表面波の抽出が困難な区間もあり、今後はノイズ源の考察や解析手法の向上を行い、測線全体における浅部構造の空間分布を推定する予定である。

（謝辞）今回の観測にあたりまして、国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所のご協力のもと、国土交通省所有の光ファイバーケーブルを使用させていただきました。

© The Seismological Society of Japan

Comparative Analysis of Ground Motion Monitoring Performance through DAS Test Observations Using Multiple Instruments

*Hiroyuki FUJIWARA[1], Hiromitsu Nakamura[1], Takashi Kunugi[1], Shohei Naito[1], Shigeki Senna[1], Masato Sato[1], Ken Sakurai[2], Chisato Konishi[2], Haruhiko Suzuki[2], Masaki Takebe[3]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO Corporation, 3. Mitsubishi Electric Software Corporation

光ファイバDASと微動探査の融合による高密度・高精度な広域での詳細地盤モニタリングのための基礎的な基盤技術を開発することを目指し，既存の光ファイバや地震観測施設を利用することにより，光ファイバDASによる地盤モニタリング技術，長期間連続モニタリング技術，及び，微動探査や地震波干渉法と融合した解析手法の開発に着手した．地震災害を低減する上で，大都市が立地する堆積平野の地震動特性を高精度に予測することは極めて重要である．防災科研では地震動予測のための地盤モデル高度化を進めており，開発された全国250mメッシュの地盤モデルは地震ハザードステーション（J-SHIS）を通じて公開されている．しかし，現行モデルでは地盤の不均質構造の細部を再現できているとは言い難く，空間分解能のさらなる向上が期待されている．一方，近年では通信用に敷設されている光ファイバケーブルを活用し高密度な歪計測を行うDAS（Distributed Acoustic Sensing）が注目されている．この技術を用いて既設の光ファイバケーブルをセンサーとして利用した計測を行うことにより，地盤の振動特性を10m以下の高分解能で把握することができれば，従来の強震観測記録や微動アレイ探査等に基づいて構築された地盤モデルの空間分解能を飛躍的に向上させることが期待される．本研究では，研究の第一段階として，地盤モデルの高度化に資するデータ取得・解析技術開発を目的に，シングルモード，マルチモードを含めた複数種類のケーブルおよび複数のインテロゲータを利用してDASによる試験観測を行い，常時微動観測記録との比較などにより複数の機材を用いたDAS試験観測での地盤振動モニタリング性能の比較を行った．

茨城県つくば市内の試験フィールドにおいて，シングルモードの通信用ケーブルおよびひずみ計測用ケーブル各2種類，およびマルチモードの通信用ケーブルを含め計5種類の光ファイバケーブルによる計測を行った．4種類のシングルモードケーブルは同じ長さのものを融着により連結して1本にした後，縦25m，横105m，深さ30cmに掘られたL字の溝に沿って敷設し，ケーブル連結部で折り返して各種類のケーブルがL字状に配置されるようにした．シングルモードケーブルの長さは，計測小屋のインテロゲータに接続するための延長ケーブル20mと合わせ，約620mである．また，マルチモードケーブルはケーブル長約500mのものを使用し，折り返しにより同じ位置を3回通過するようにした．これらのケーブルは保護管無しで敷設後，現地発生土で埋め戻しを行った．DAS計測のためのインテロゲータは計測小屋内に設置し，ケーブル端に接続したコネクタの差し替えによりシングルモード，マルチモードを切り替えて計測を行った．また，インテロゲータは異なる3社の製品X，Y，Zを利用し，同一の観測を行った．なお，X，YとZでは出力形式が異なるが，動的な変化である地震動評価にあたってはひずみ速度を計測する方が適していると考え，ひずみ速度に変換した上で比較した．観測期間は各インテロゲータにおいて24時間以上の連続する期間とし，かけやによる起振や常時微動観測等を行った．比較用として光ファイバのＬ字測線の長軸方向に沿って20台の微動計を5m間隔で設置し同時測定を行った．DASで出力されるひずみ速度と比較するために，隣同士の微動計速度記録の空間差分を微動計間の距離で除すことによりひずみ速度に変換した．微動計の記録と比較した結果，いずれのケーブル・インテロゲータにおいても約1～2Hz以上の周波数帯域においては，常時微動を利用した位相速度の推定等に活用可能であることが確認された．

さらに，高感度地震観測施設（Hi-net）真岡観測点における鉛直ボーリング坑（深さ約1,648m）における既設のマルチモード光ファイバを3種類のインテロゲータに接続し，それぞれ約24時間ずつ試験観測を行った．また，相模湾地震観測施設の海底ケーブルにおける総延長約120kmの既設光ファイバを利用し，２種類のインテロゲータによる計測をそれぞれ約2日間実施した．

謝辞　本研究は，防衛装備庁「安全保障技術研究推進制度」の支援を受けて実施されました．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S09. Statistical seismology and underlying physical processes

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P1 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S09P] PM-P

[S09P-01] A comprehensive review of shallow slow earthquakes in Nankai

*Shunsuke TAKEMURA[1], Yohei Hamada[2], Hanaya Okuda[2], Yutaro Okada[3], Kurama Okubo[4], Takeshi Akuhara[1], Akemi Noda[5], Takashi Tonegawa[2] (1. ERI, UTokyo, 2. JAMSTEC, 3. Kyoto Univ., 4. NIED, 5. MRI)

[S09P-02] Machine-learning-based analysis: Spatiotemporal evolution of aftershocks following the 2019 Cotabato and 2019 Davao del Sur earthquakes

Paulo Pangan Sawi[2], *Saeko KITA[1], Roland Burgmann[3] (1. Building Research Institute, 2. DOST-PHIVOLCS, 3. UC Berkeley)

[S09P-03] Using dense triad sub-arrays to detect and locate very low-frequency earthquakes in Japan

*Ryo Okuwaki[1], Wenyuan Fan[2], Takanori Matsuzawa[3], Shunsuke Takemura[4] (1. University of Tsukuba, 2. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

[S09P-04] Detection of very shallow earthquakes and deep low-frequency earthquakes in Hakone volcano

*Ryo KURIHARA[1] (1. Hot Springs Research Insitute of Kanagawa prefecture)

[S09P-05] Changes in very low-frequency earthquake activity in the Southwestern Ryukyu Trench over 23 years

*Mamoru NAKAMURA[1] (1. Univ. Ryukyus)

[S09P-06] Relationship between inland seismicity and crustal deformation after the 2011 Tohoku earthquake

*Koji TAMARIBUCHI[1], Hisao KIMURA[1], Fuyuki HIROSE[1], Takeyasu YAMAMOTO[1] (1. Meteorological Research Institute)

[S09P-07] Seismic imaging of the Metastable olivine wedge using receiver function

*Kazuki MIYAZAKI[1], Junichi Nakajima[1], Shoichi Yoshioka[2,3] (1. Tokyo institute of Technology, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Faculty of Science, Graduate School of Science, Kobe University)

[S09P-08] Tectonic tremor distribution and migration at Kumano-nada: insights from ocean-bottom seismometer deployment between DONET1 and 2

*Takeshi AKUHARA[1], Yusuke Yamashita[2], Hiroko Sugioka[3], Atikul Haque Farazi[2], Shukei Ohyanagi[2], Yoshihiro Ito[2], Eiichiro Araki[4], Takashi Tonegawa[4], Takeshi Tsuji[1], Ryosuke Azuma[5], Ryota Hino[5], Kimihiro Mochizuki[1], Shunsuke Takemura[1], Tomoaki Yamada[1], Masanao Shinohara[1] (1. Univ. of Tokyo, 2. Kyoto Univ., 3. Kobe Univ., 4. JAMSTEC, 5. Tohoku Univ.)

[S09P-09] Ratio of inter-plate to intraplate earthquakes in subduction zone around Japan

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

[S09P-10] Slow earthquake distribution and thermomechanical modeling in the Izu–Bonin subduction zone

*Weiling Zhu[1], Aitaro Kato[2], Yingfeng Ji[1] (1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 2. University of Tokyo)

[S09P-11] Spatio-temporal characteristics of micro-earthquake activity in the east to northeast off Kikaijima Island observed by OBS network

*Hirotsugu Yanagida[1], Yukihiro Nakatani[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Reiji Kobayashi[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[3], Hiroshi Shimizu[4], Kazuo Nakahigashi[5], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[6] (1. Grad. Sch. Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Fac. Sci., Kyushu Univ., 4. NIED, 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6. ERI, UTokyo)

[S09P-12] Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

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

[S09P-13] Detectability of shallow tectonic tremor in the Nankai Trough based on the DONET data

*Kazuaki OHTA[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

[S09P-14] Shallow seismic activity in the northern Tokyo Bay and central Chiba Prefecture

*Naoko KATO[1], Motoo Ukawa[2] (1. Nihon University, College of Humanities and Sciences (Present address: Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), 2. Nihon University, College of Humanities and Sciences)

[S09P-15] Estimation of the temporal change of background stress based on the rate- and state-friction seismicity model

*Takaki Iwata[1] (1. Prefectural University of Hiroshima)

[S09P-16] Shear strain energy release for the 2016 Kumamoto earthquake sequence

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

[S09P-17] Detection of shallow very low frequency earthquakes around Hyuga-nada since April 2023 using a matched filter technique

*Mugi Yamamoto[1], Ken Moriwaki[1] (1. Japan Meteorological Agency)

[S09P-18] Correlations between shear strain energy changes and aftershock locations depending on aftershock magnitudes

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

[S09P-19] Tectonic tremor activity near the boundary between the Hinagu segment and the Yatsushiro segment of Hinagu fault zone

*Hidenobu TAKAHASHI[1], Yasuhira Aoyagi[1], Haruo Kimura[1] (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

A comprehensive review of shallow slow earthquakes in Nankai

*Shunsuke TAKEMURA[1], Yohei Hamada[2], Hanaya Okuda[2], Yutaro Okada[3], Kurama Okubo[4], Takeshi Akuhara[1], Akemi Noda[5], Takashi Tonegawa[2]

1. ERI, UTokyo, 2. JAMSTEC, 3. Kyoto Univ., 4. NIED, 5. MRI

2000年代前半にプレート境界で発生するスロー地震の発見後，プレート境界のすべり特性把握や巨大地震との関連を明らかにすべく，精力的にスロー地震に関する研究が進められてきた．ここでは，深さ10 km以浅で発生するものを浅部スロー地震，深さ30-40 kmで発生するものを深部スロー地震と分類する．主に陸域で発生する深部スロー地震は陸域観測や露頭調査などによる研究が進んでおり，レビュー論文もいくつか出版されている（例えば，Beroza & Ide, 2014; Obara & Kato, 2016; Obara, 2022）．一方で，陸から離れた海域で発生する浅部スロー地震については未知な点が多い．本講演では，南海トラフ浅部スロー地震に焦点をあて，浅部スロー地震の分布，活動様式，発生場の特徴について，地震学，測地学，地質学および室内実験の研究成果から概観する．

南海トラフで発生するスロー地震現象に多様性はあるが，日向灘から東海まで深部スロー地震は連続的に分布しているのに対し，浅部スロー地震は日向灘，室戸岬沖～紀伊水道沖，紀伊半島南東沖に局在している（検知下限に注意しつつ，例えば超低周波地震で見るとBaba et al. 2020）．それらは，測地学的に推定されるプレート境界のせん断応力変化のピーク域の周囲に相当し（Noda et al., 2018; Takemura, Noda et al., 2019），浅部スロー地震発生域は周囲と異なる摩擦特性ではないかと期待される．一方で，南海トラフプレート境界に沿って沈み込む物質は，火山灰や粘土鉱物で主に構成されており，これらの物質的特徴は走向方向にあまり変化しない（例えば，Hüpers et al., 2015）．さらに，浅部スロー地震が発生する深さでこれらの堆積物の摩擦特性を表す（a-b）は正の値となる（Okuda et al., 2023）．すなわち，摩擦特性だけでは浅部スロー地震の局在化を説明するには不十分である． そこで，浅部スロー地震と地下構造の関係について詳細に比べた．

近年，海洋プレート上面形状が詳細に推定され，浅部スロー地震と海山の関係もいくつか提案されている（例えば，Sun et al., 2020; Toh et al., 2020; Baba et al., 2022）．しかし，高精度なフィリピン海プレート上面モデル（Nakamura et a., 2022）と浅部スロー地震の分布を比較しても，すべての浅部スロー地震活動が海山と関連しているようには見えず，浅部スロー地震の局在化の原因とはできない．一方で，浅部スロー地震発生域には地震波速度の低速度層がイメージングされており（例えば，Tonegawa et al., 2017; Akuhara et al., 2020），周囲と比べて間隙流体圧が高いことが示唆される．また，浅部スロー地震活動に伴う地下構造変化（Tonegawa et al., 2022）が検知されており，これらは流体の移動と関連していると解釈されている．流体圧の過渡的な変化があると多様なすべり現象を引き起こせることが実験室で確認されており（Faulkner et al., 2018），浅部スロー地震は流体移動現象と密接に関係していると解釈できる．浅部スロー地震の局在化は，走向方向に不均質に分布した間隙流体とその流体圧の過渡的な変動が引き起こしているとまとめられる．

高精度な浅部スロー地震カタログと詳細な地下構造モデルの構築に加え，浅部スロー地震断層付近の流体移動のモニタリングが重要な課題となる．また，日本海溝ではスロー地震発生域が破壊のバリアとして機能した（例えば，Nishikawa et al., 2023）と考えられているが，南海トラフでは海溝軸沿いのコアサンプルにおいて高速と低速破壊の両方の痕跡が見つかっており（Kimura et al., 2022），将来発生する巨大地震ではどのような挙動を示すか，さらなる研究が必要である．

謝辞　本研究は、JSPS科研費21H05201, 21H05202, 21H05205および21H05206の助成により実施されました．

© The Seismological Society of Japan

Machine-learning-based analysis: Spatiotemporal evolution of aftershocks following the 2019 Cotabato and 2019 Davao del Sur earthquakes

Paulo Pangan Sawi[2], *Saeko KITA[1], Roland Burgmann[3]

1. Building Research Institute, 2. DOST-PHIVOLCS, 3. UC Berkeley

In the Cotabato and Davao del Sur area of the southern Philippines, there was an earthquake sequence involving five M˜6 (Mw 6.4, 6.6, 5.9, 6.5, and 6.7) inland earthquakes with strike-slip focal mechanisms, which occurred during from October to December 2019. A deep-neural-network-based phase picker, PhaseNet [Zhu and Beroza, 2019], was applied to seismic waveform data from 18 stations within 200 km of the epicentral area in order to obtain the arrival time of P and S waves of the five largest events and their aftershocks. The obtained phases were first associated and initially located using Rapid Earthquake Association and Location (REAL) [Zhang et al., 2019]. Subsequently, the earthquakes were relocated using VELEST [Kissling et al., 1994], and the hypocenters were further refined using the relative hypocenter relocation method hypoDD [Waldhauser & Ellsworth, 2000]. Through these analysis procedures, we successfully determined ˜5,000 earthquakes, comprising substantially more earthquakes than found in the original earthquake catalog (˜3,000 events) by the DOST-PHIVOLCS which relied only on manually picked phases. The obtained relocated hypocenters of the earthquake sequence show a clear cross-fault geometry involving multiple conjugate faults having a cross-point of the initial large magnitude event (Mw 6.4), though the hypocenters by the DOST-PHIVOLCS only showed a very scattered hypocenter distribution. [RB1] The cross-fault hypocenter alignments in the SW-NE direction are generally parallel to mapped active faults, whereas the other alignment in the NW-SE direction looks to transfer seismic activity from Makilala-Malungon fault to Tangbulan fault. [RB2] This newly created earthquake catalog reveals spatial and temporal changes in seismicity following each significant event and uncovers detailed patterns in the clustering of the aftershocks, which are likely linked to complex fault system structures that may have contributed to the seismic activity[RB3] . [RB1]I am not sure what this is trying to describe. [RB2]This is again a bit hard to follow without a map. Does SSJ allow for including a figure? The fault orientations seem to be SW-NE and SE-NW, not EW & NS? [RB3]It seemed that the two geodetic modeling studies might have miss-identifed the orientation of one of the events (#2?), so the importance for establishing the geometry of the coseismic rupture asperities might be good to mention too?

© The Seismological Society of Japan

Using dense triad sub-arrays to detect and locate very low-frequency earthquakes in Japan

*Ryo Okuwaki[1], Wenyuan Fan[2], Takanori Matsuzawa[3], Shunsuke Takemura[4]

1. University of Tsukuba, 2. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo

Very low frequency earthquakes (VLFEs) share a high resemblance with ordinary (fast) earthquakes in long-period seismic radiation, whilst their lack of high-frequency radiation is one of the characteristics of slow earthquakes. Thus, VLFEs may occur under unique fault conditions that may reveal physical mechanisms of slow and fast earthquakes. However, the detection and location of VLFEs have been challenging attributed to their lack of clear body wave phases, and the associated seismic signals are similar to those from coupled systems of the solid Earth, the ocean, and the atmosphere. To identify VLFEs from continuous seismic waveforms, previous studies often rely on template-matching techniques, which can be limited by the available templates.

Here, we apply a modified surface wave detector that is based on the Automated Event Location Using a Mesh of Arrays (AELUMA) method to explore unconventional seismic sources near Japan. The AELUMA method can effectively detect and locate seismic sources using local coherence across a triad sub-array. The method does not require phase-picking, prior knowledge of source types, or an accurate velocity model to calculate the travel times. Therefore, our method is ideal for identifying unconventional seismic sources that are commonly missed in standard catalogs. The dense seismic networks in Japan provide an excellent opportunity to use this method to investigate unconventional seismic sources.

We will present our recent development of the AELUMA method using the F-net broadband data and the Hi-net high-sensitivity accelerometer (tiltmeter) data. We will demonstrate our approach by detecting example VLFEs at the Hyuga-nada region that were previously overlooked through other detection means. Further, we will model these VLFE source mechanisms, including the seismic moment and the duration. We aim to gain new insight into the related fault conditions.

© The Seismological Society of Japan

Detection of very shallow earthquakes and deep low-frequency earthquakes in Hakone volcano

*Ryo KURIHARA[1]

1. Hot Springs Research Insitute of Kanagawa prefecture

箱根火山では多くの地震が発生し、頻繁に群発的な地震活動も観測されている。特に、2015年の水蒸気噴火時や2019年の火山活動の活発化時に群発的な地震活動が観測され、これらの地震は箱根火山のカルデラ内の地表付近から深さ5 km程度に広く分布している(cf.原田他2015,行竹他2020)。群発地震発生時以外も、箱根山では通常の地震が多く発生しており、神奈川県温泉地学研究所(以下、温地研)ではその観測を行なっている。また、更に深部である深さ20−−-30 kmでは深部低周波地震と呼ばれる地震が発生しており、この地震は2015年の噴火前後に増加したことがわかっている(Yukutake et al., 2019)。 2022年以降、大涌谷周辺の深さ-1kmから0kmという地表付近を震源とする地震が多く観測された。また、2023年4月には、気象庁の一元化カタログにおいて、深部低周波地震の発生域で低周波フラグのつかない、通常の周波数帯の地震が大量発生する事象があった。この時期には前述の地表付近の地震も顕著に活発している。本研究では、これらの通常の波形読み取りでは検出の難しい微小な地震をマッチドフィルタ法で検出し、2014年から2023年までの期間での活動状況の変化を調べた。 その結果、極浅部の地震は2015年5–7月頃、2017年4–5月頃、2019年2-10月頃に活発期があり、2020年以降は2023年にかけて連続的に活発であるということがわかった。前者3回の短期間の活発化は地殻変動など他の火山現象によく対応している。2020年以降は他に火山現象の変化がなく、浅部の地震が単独で活発化している。一方、深部低周波地震の増加は2015年3–6月頃、2015年12月頃、2019年10–12月頃、2021年の5–8月頃を中心に見られる。深部低周波地震の増加は概ね地殻変動の発生時期と対応しているが、2019年では地表の活動に比べて半年遅れるなど、時間のずれがある場合もある。また、深部低周波地震についても2021–2023年にかけて、長期的にやや多い状態が見られる。2023年に起きたような深部低周波地震発生域での通常の周波数の地震は2015年の噴火直前にも見られた。異なる深さの地震であるが、活動の傾向に類似点がいくつか見られることから、これらの地震はマグマの供給などといった大局的な火山活動を反映している可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

Changes in very low-frequency earthquake activity in the Southwestern Ryukyu Trench over 23 years

*Mamoru NAKAMURA[1]

1. Univ. Ryukyus

琉球海溝南西部では超低周波地震（VLFE）が定常的に発生している（Nakamura and Sunagawa, 2015）。VLFEの活動はプレート間結合の状態や沈み込むプレート面の摩擦状態を反映していると考えられる。そこで、長期的なVLFE活動を調査し、琉球海溝南西部でのプレート間すべりの状態を明らかにした
　VLFEの検出はF-NetとBATSの広帯域地震波形記録を使用した。期間は2000年から2022年である。テンプレートマッチング法でVLFEを検出した。各観測点での3成分波形を0.02-0.05Hzでバンドパスフィルタリングし、テンプレート地震との相互相関を計算した。テンプレート地震には、通常の低角逆断層型地震とVLFEを用いた。気象庁のカタログに掲載された地震と遠地地震を除去した後、相互相関が0.6以上のイベントをVLFEと判定した。VLFEのマグニチュードと頻度分布の関係をもとに、Magnitude completenessを3.6とした。
得られたVLFEは海溝軸に沿ってスラブ深度10-15 kmで分布していた。123.0˚E～124.25˚Eではスラブ深度15 kmにVLFEが集中しており、この領域でのVLFE活動は非常に活発であった。一方、124.25˚～125.25˚Eでは、VLFEがスラブ深度10 kmに分布していた。VLFE活動は2000～2004年と2015～2019年に特に活発で、2000～2004年の活発化は123.0˚E～124.0˚Eで最も顕著で、2015年は123.0˚E～125.0˚Eで広範囲で活発化した。
琉球弧南部では，2002-2006年と2013年以降に西表島周辺の地震活動とスロースリップイベントの発生率が増加した（Nakamura and Kinjo, 2018; Tu and Heki, 2017）。この活動増加は、それぞれ2002年のアフタースリップと沖縄トラフでの2013年のダイク貫入によって引き起こされた。しかし2002年のアフタースリップが発生した時、VLFEは既に活発であった。また2015年のVLFE活発化と2013年のダイク貫入は2年ずれている。2015年には台湾東方沖でM6.4の地震が発生した。そのタイミングはVLFEの活発化と一致している。しかし、このM6.4の地震によるVLFE発生領域での応力変化は1 kPa未満で、VLFE活動の活発化には不十分であった。同様に、2002年以前からVLFEが活発であった可能性があり、琉球弧の地殻活動を活性化させた要因以外でVLFEが活発化してきた可能性がある。このことは、プレート間カップリングの変化や長期的スロースリップ現象が南西琉球海溝軸付近で時折発生していた可能性を示唆しているかもしれない。

© The Seismological Society of Japan

Relationship between inland seismicity and crustal deformation after the 2011 Tohoku earthquake

*Koji TAMARIBUCHI[1], Hisao KIMURA[1], Fuyuki HIROSE[1], Takeyasu YAMAMOTO[1]

1. Meteorological Research Institute

平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震 (以下，東北地震) が発生した際，震源域周辺のみならず日本全国の内陸でも地震活動が活発化した (例えば，Hirose et al., 2011)．局所的な地震活動の変化については，東北地震の本震による応力変化や地殻流体に伴う断層強度の低下などと関連付けて解釈されている (例えば，Yoshida et al., 2012; Terakawa et al., 2013) が，それ以外の”ふつう”の地震活動の変化はカタログ欠損の影響もあり，未だ十分に評価されていない．将来的に日本周辺で発生する可能性のある海溝型巨大地震が内陸の地震活動に与える影響を予測するためには，内陸地震活動の平均的な変化を定量化することは重要である．
一方，Shen et al. (2007)，Nishimura (2022) はGNSSデータに基づいてひずみ速度が長期間にわたって大きい領域では，M≧5の内陸地震の発生頻度が高いことを指摘している．また，Hardebeck (2022) は大地震後の余震活動と各種の地殻物性との比較から，余震活動とひずみ速度との間に正の相関があることを示した．そこで本研究では，東北地震後の1年間について東日本を対象に，内陸微小地震活動とひずみ速度などの地殻変動や構造パラメータとの比較を行い，地震活動の変化とその要因について報告する．
使用した地震カタログは，一元化震源およびTamaribuchi et al. (2023, under review) による2011年3月から2012年2月までの1年間の微小地震カタログを用いた．このカタログは，機械学習を併用した自動震源決定手法によって，従来の地震カタログの3倍に相当する微小地震を検出したものである．まず，2000年1月から2011年2月までの一元化震源 (内陸，M≧1，深さ≦30 km) を用いて，0.4度グリッドごとにETASモデルパラメータを推定した．ここで，ETASモデルパラメータ (μ, K, α, c, p) はグリッドごとに時間変化しないことを仮定する．推定したETASパラメータから，2011年3月から2012年2月の各月1日を中心とした前後計27日間の地震発生数 (N_{obs}) とETASモデルによる予測数 (N_{exp}) の比を地震活動度の指標として用いた．
次に，GNSSデータから，Shen et al. (1996, 2015) の手法を用いてひずみ速度を計算した．2011年3月から2012年2月の各月1日を中心とした前後計27日間のGNSS 1 か月階差の平均から，各月のひずみ速度 (主ひずみ速度の最大 ε_{max}，最小 ε_{min}，最大せん断ひずみ速度 γ) を推定した．同様に，2000年1月から2011年2月までのGNSSデータから東北地震前の平均的なひずみ速度を推定した．使用したひずみ速度の指標は，Nishimura (2020) が用いたひずみ速度とモーメントレートの関係式と同様に，(1) Kostrov (1974) の最大せん断ひずみ速度 γ，(2) Ward (1994) によるmax($|\varepsilon_{max}|$, $|\varepsilon_{min}|$)，(3) Savage and Simpson (1997) によるmax($|\varepsilon_{max}|$, $|\varepsilon_{min}|$, $|\varepsilon_{max}+\varepsilon_{min}|$)を検討した．
2011年4月の地震活動度は，グリッドごとにばらつきはあるものの，平均的にみるとETASモデルの予測よりも2-3倍程度多く発生した．得られた各月の地震活動度とひずみ速度の指標(1)-(3)式，東北地震からの震央距離，D90，地震波速度構造などとの空間相関を計算した．その結果，ひずみ速度の指標と地震活動度との空間相関が最も高く，0.3-0.4程度の正の相関がみられた．ひずみ速度が東北地震前に比べて100倍に増加すると，地震数はETASモデルの予測よりも約3倍多く発生した．ひずみ速度の指標(1)-(3)式のいずれでも相関係数に明確な違いは見られなかった．直接的な因果関係は別の側面から検討が必要だが，GNSSデータから推定されるひずみ速度を組み込んだETASモデルが地震発生予測に有効となる可能性がある．

謝辞：気象庁，防災科研，大学等の一元化関係機関の波形および一元化震源を利用しました．国土地理院のGEONET最終解 (F5) を利用しました．地震波速度構造，D90はOmuralieva et al. (2012) を利用しました．ETASパラメータの推定にはKasahara et al. (2016) のetas_solveを用いました．ひずみ速度の計算にはShen et al. (1996，2015) の手法を用いました．

© The Seismological Society of Japan

Seismic imaging of the Metastable olivine wedge using receiver function

*Kazuki MIYAZAKI[1], Junichi Nakajima[1], Shoichi Yoshioka[2,3]

1. Tokyo institute of Technology, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Faculty of Science, Graduate School of Science, Kobe University

いくつかの研究によってマントル遷移層におけるスラブ内部のオリビン準安定領域（Metastable olivine wedge）の存在が明らかにされている(Kawakatsu and Yoshioka, 2011, EPSL; Jiang and Zhao, 2011, Asian Earth Sci) 。しかしながら、これらの研究は特定の2次元鉛直断面に限られており、オリビン準安定領域の３次元的な連続性や空間変化についてはよくわかっていない。そこで、本研究では中部日本に沈み込む太平洋プレートを対象にレシーバー関数解析を用いることで、オリビン準安定領域の3次元的な空間変化を調べる。

本研究では2003年4月から2016年12月までに発生したM6以上の地震のうち震央距離が30˜90度であるものの波形を用いた。機器補正(Maeda et al., 2011, JGR)を行った後、c=0.001とするwater level法を用いて0.1 Hz˜0.5 HzにおけるRadial方向およびTransverse方向のレシーバー関数をそれぞれ計算した。

太平洋プレート表面における屈折を考慮し、得られたレシーバー関数を2次元断面上にスタックした。その結果、沈み込む太平洋プレート上部境界面と410 km不連続面、およびオリビン準安定領域に対応すると考えられる構造がイメージされた。これらの特徴は先行研究(Kawakatsu and Yoshioka, 2011, EPSL)で得られた結果とおおむね一致している。この解析を中部日本の複数の測線に沿って行い、比較することによってオリビン準安定領域の空間変化について議論を行う。

© The Seismological Society of Japan

Tectonic tremor distribution and migration at Kumano-nada: insights from ocean-bottom seismometer deployment between DONET1 and 2

*Takeshi AKUHARA[1], Yusuke Yamashita[2], Hiroko Sugioka[3], Atikul Haque Farazi[2], Shukei Ohyanagi[2], Yoshihiro Ito[2], Eiichiro Araki[4], Takashi Tonegawa[4], Takeshi Tsuji[1], Ryosuke Azuma[5], Ryota Hino[5], Kimihiro Mochizuki[1], Shunsuke Takemura[1], Tomoaki Yamada[1], Masanao Shinohara[1]

1. Univ. of Tokyo, 2. Kyoto Univ., 3. Kobe Univ., 4. JAMSTEC, 5. Tohoku Univ.

テクトニック微動の分布を正確に把握することは，スロー地震の発生メカニズムのよりよい理解につながると期待される．西南日本沈み込み帯の中央に位置する熊野灘は，海底ケーブル地震観測網（DONET1および2）が稼働しているうえ，構造探査の豊富な実績があり，スロー地震活動に影響を及ぼす地下構造の要因を調査するための絶好の研究対象域となっている．この利点をさらに活用するために，2019年9月から2021年6月にかけて，DONET1と２の間の領域に15台の海底地震計（OBS）を設置し，自然地震観測を行った．この観測期間中，2020年12月6日に大規模なスロー地震活動が発生した．一連の活動はDONET1の範囲内で始まり，南西方向に伝播し，OBSが設置された領域へと到達した．Akuhara et al. (2023, preprint in EarthArXiv)は，これらのOBSとDONETのデータに対してベイジアンインバージョン手法を適用し，テクトニック微動の震源決定および誤差推定を行った．

本発表では，このようにして求められた震源分布やマイグレーションに見られる特徴を紹介する．テクトニック微動はおおむね，アウターリッジよりも海溝側の海底地形が比較的平坦な部分で発生し，海溝軸に沿ってほぼ一定の幅を持つ震源域を形成する．発生域の東端では例外的に幅が狭くなっている．この微動非活動域は，2004年の紀伊半島南東沖地震の余震域とよく対応する．ただし，テクトニック微動はプレート境界で起きていると考えられる一方で，余震はスラブ内で起こっており，この対応関係の原因は明らかではない．

テクトニック微動の震源はおおまかに東部・中部・西部の3つのクラスターに分かれて分布する．東部と中部のクラスター間は約5 km離れており，中部と西部のクラスター間は約10 km 離れている．このうち，西部のクラスターの領域では，少なくとも2004年以降，テクトニック微動の活動が確認されていない．一連の微動活動は，東部クラスターの北東端，沈み込んだ海嶺の近くで始まり，西方に伝播して中部クラスター域へと達した．興味深いことに，伝播フロントが東部ー中部クラスター間の微動非活動域に到達すると，伝播速度が見かけ上増加するように見えている．この西方への伝播はその後も継続し，西部クラスターへと到達する．ここでも，クラスター間の微動空白域において，伝播速度の見かけ上の増加が確認された．これら伝播速度の増加と微動非活動域の対応は，プレート境界面上の局所的な不均質構造に起因する可能性が考えられ，詳細な調査が待たれる．本地域における充実した構造探査モデルと，高精度に決定された微動活動を併せることで，スロー地震活動に影響を及ぼす地下構造の要因が明らかになると期待される．

© The Seismological Society of Japan

Ratio of inter-plate to intraplate earthquakes in subduction zone around Japan

*Nobuyuki MORIKAWA[1], Jun'ichi MIYAKOSHI[2], Hiroyuki FUJIWARA[1]

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

海溝型地震には、沈み込む海洋プレートと陸側の大陸プレートの境界で発生するプレート間地震と、沈み込むプレート内部で発生するプレート内地震がある。プレート内地震により観測される地震動の短周期成分（おおむね周期1秒以下）は、同一規模のプレート間地震よりも大きいことが知られている。従って、地震ハザード評価において区別することが必要となる。地震調査研究推進本部（地震本部）の「全国地震動予測地図」では、南海トラフ沿いの大地震などの一部の地震を除き、海溝型地震は震源断層を予め特定しにくい地震としてモデル化されている。その発生頻度は、プレート間地震とプレート内地震を合算した地震カタログデータに基づいてb値を0.9と仮定したグーテンベルグーリヒターの関係式によりモデル化し、地域ごとに定められたプレート間地震とプレート内地震の比率で分配することでそれぞれの頻度を算出している。その比率は、特に太平洋プレートの地震に関しては、ほとんどの地域において震源位置のみから推定されたものであった。 一方で、近年の地震観測網の整備とデータの蓄積により、震源メカニズム解が推定される地震は増加しており、地震調査委員会による評価も蓄積されている。これらに基づいて森川・他（2023）では強震動データのフラットファイル作成の一環として、震源ファイルに地震種別（地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震）の分類を行った。本検討では、このフラットファイルにおけるプレート間地震とプレート内地震の比率について分析した結果を報告する。

© The Seismological Society of Japan

Slow earthquake distribution and thermomechanical modeling in the Izu–Bonin subduction zone

*Weiling Zhu[1], Aitaro Kato[2], Yingfeng Ji[1]

1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 2. University of Tokyo

1. Introduction

Slow earthquakes have been identified by instrumental measurements in the Izu–Bonin arc. For instance, the continuous Global Navigation Satellite System (GNSS) stations on the Izu Islands were found to be moving horizontally eastward by up to ~1 cm/year relative to the stable part of the Philippine Sea plate behind the northern part of the arc (Arisa and Heki, 2016). During 2007–2016, five slow slip events (SSEs) repeated quasi–periodically with similar displacement patterns and an average fault slip of ~5 cm at the Bonin Islands (Arisa and Heki, 2017). However, the subduction thermal regime responsible for generating seismic and aseismic slip on the subducted Pacific Plate in the Izu-Bonin arc remains enigmatic, which is fundamental to the transition from the cold forearc to the hot arc and the range and depth of the cold nose. Therefore, this study attempts to focus on the three–dimensional slab thermal state and hydraulic distribution in the Izu–Bonin arc and to investigate the distributions of observed fast–slow earthquakes on megathrusts.

2. Model and method

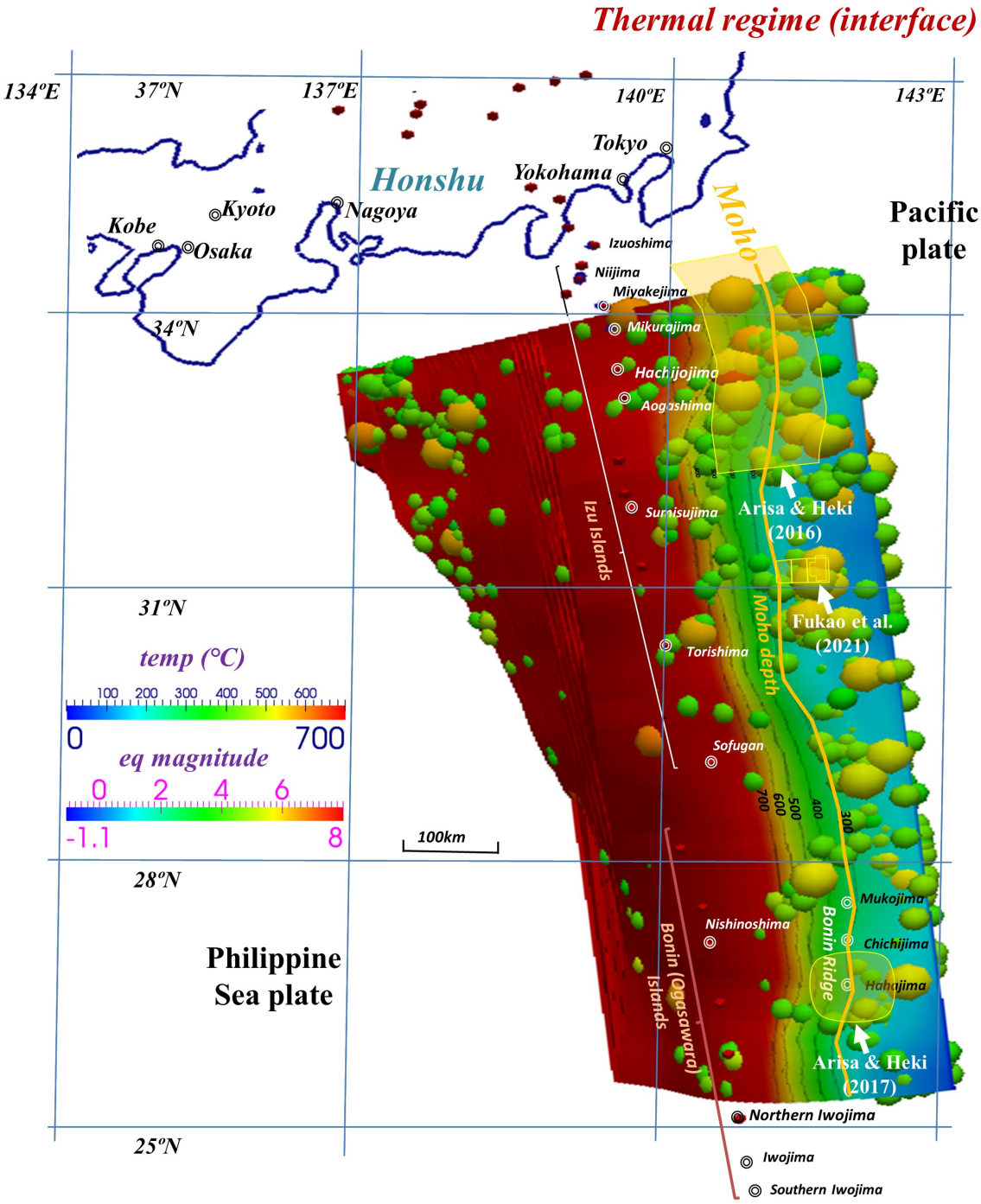
To characterize the Izu-Bonin slow slip events and its geographically distributed hydrothermal state, we constructed a 3–D, time–evolving thermomechanical model developed from Stag3D code (Tackley and Xie, 2003) for the Izu-Bonin subduction zone. An anelastic liquid approximation and the equations of conservation of mass, momentum, and energy are used in this study (e.g., Ji et al., 2016). The model region has dimensions of 1000×500×400 km^3 (length×width×depth) and simulates the simultaneous penetration of the incoming plate over 15 Myr. The geometry of the subducted plate is well constrained by Slab2 (Hayes et al., 2018), and it is extrapolated within the modeled domain to ensure full subduction and comparatively steady slab thermal conditions. Based on thermomechanical models, we focus on the hydrothermal regime in the Izu-Bonin arc and the distributions of fast and slow megathrust earthquakes.

3. Results and discussion

SSEs detected so far along the Izu-Bonin arc are distributed along the Moho depth of the subduction interface at approximately 300 ℃, where large earthquakes have repeatedly occurred. Instrumental measurements are also based on stations on islands and thus are largely limited to the vicinity of islands, such as the northern Izu and northeastern Bonin Islands (Fig. 1). Fukao et al., (2021) deployed an array of ocean bottom pressure gauges and detected two large aseismic SSEs in September 2015 in the south-central Izu islands with a depth of 15~30 km (Fig. 1). Therefore, according to our study, we suggest that the plate interface near the Moho depth (30 km) should host the source region of active SSEs. For the >50 km depth below the Izu-Bonin arc, the subarc plate interface possibly accommodates certain SSEs where the Pacific slab releases a great amount of fluid from the eclogitization of subducted rocks, which influences the occurrence of fast to slow earthquakes.

Fig. 1 The modeled up-to-date geometry of the subducted Pacific Plate beneath Izu-Bonin in our 3-D thermal model. The isotherm contours (300~700℃) are labeled. Colored spheres indicate M>3 earthquakes (IRIS, 2000~2010). Yellow transparent zones indicate the SSEs detected so far.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Spatio-temporal characteristics of micro-earthquake activity in the east to northeast off Kikaijima Island observed by OBS network

*Hirotsugu Yanagida[1], Yukihiro Nakatani[1], Hiroshi Yakiwara[1], Shuichiro Hirano[1], Reiji Kobayashi[1], Yusuke Yamashita[2], Takeshi Matsushima[3], Hiroshi Shimizu[4], Kazuo Nakahigashi[5], Tomoaki Yamada[6], Masanao Shinohara[6]

1. Grad. Sch. Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Fac. Sci., Kyushu Univ., 4. NIED, 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. and Tech., 6. ERI, UTokyo

南西諸島海溝沿いでは、フィリピン海プレートの沈み込みに伴い、他の沈み込み帯と同様に通常の地震活動およびプレート境界浅部におけるスロー地震活動が発生している。本研究の対象領域である南西諸島北部域では、過去の広域かつ準定常的な海底地震観測により通常地震と浅部微動とのプレート境界面上における空間的な棲み分けが示唆された一方で、両者の時空間分布について議論するためには、島嶼部の観測点や広域の海底地震観測網では震源決定精度や検知能力が十分なく、より稠密な海底地震観測が不可欠である。

鹿児島大学・他は、2019年より喜界島東方沖～トカラ列島東方沖において年次的な機動的海底地震観測を実施している。そのうち、本研究での解析対象期間は第１期（2019年4月～2020年7月）、第２期（2020年8月～2021年4月）、および第３期（2021年4月～2022年4月）である。第１期・第２期観測網は1 Hz計センサを搭載した８台の自己浮上式長期観測型海底地震計（LOBS）、第３期は６台のLOBSと２台の小型広帯域海底地震計（CBBOBS）でそれぞれ構成されており、すべての期間で観測点間隔は約20 kmである。なお、本研究ではLOBSデータのみを用いた。

本研究では、上記観測で得られたLOBSデータに対し、以下①～③の手順で通常地震の震源決定を行った。①P波・S波到達時刻の手動検測による初期震源の決定、②未固結堆積層による走時遅れの補正（観測点補正）、③Double-Difference（DD）法を用いた高精度相対震源決定（最終震源の決定）。また、通常地震と浅部微動との時空間的関係について議論するため、本研究と同一データにエンベロープ相関法を適用して求めたYamashita et al. (in prep.)の微動カタログを参照した。

得られた初期震源は、第１期では566イベント、第２期では163イベントであり、多くの地震はM1–3程度の微小地震であった。観測点補正およびDD法の適用により、第１期においては、気象庁一元化震源で深さ約20–60 kmに分布していた震源が、最終震源では深さ約30 km以浅のプレート境界付近に求まった。観測点補正前には観測網の西側および南西側に散在していた震央分布も最終震源では引き締まった分布となり、局所的な地震活動域の存在が明らかになった。第１期の北東に隣接する第２期では、約60%のイベントが海洋プレート内（プレート境界深度＋7 km以深）で発生するM2未満の微小地震であることがわかった。このように、第１期・第２期ともに高精度な震源分布が得られたことで、微小地震の活動状況が明らかになっただけでなく、微動の時空間分布との詳細な比較が可能となった。その結果、第１期では微動エピソードに先行する微小地震の震源移動が、第２期では微動エピソード同士の時空間領域を埋めるような微小地震の震源移動が確認された。

本講演では、第３期の微小地震活動解析結果も報告するとともに、第１期～第３期における微小地震と微動との時空間的な関係をさらに検証し発表予定である。

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・長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施し、乗組員の皆さまにご協力をいただきました。東京大学地震研究所・技術職員の皆さまにはOBS準備等にご尽力いただき、鹿児島大学・九州大学・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）」および東京大学地震研究所共同利用の支援を受けました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Toshihiro IGARASHI[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺では、M6以上の地震が多数発生している。特に、2021年2月から2022年3月には、宮城県沖から福島県沖にかけた比較的狭い範囲で集中して発生した。そこで、本研究では、ほぼ同じ場所で繰り返し発生する小繰り返し地震活動を用いて、巨大地震発生後のM6からM7クラスの大地震によって生じたプレート間非地震性すべりの時空間的特徴を調査した。

本解析で使用する小繰り返し地震は、日本列島およびその周辺海域に展開されている地震観測網で得られた地震波形の相互相関係数とS-P到達時刻差を基に検出した。本研究では、2023年7月31日までに発生した小繰り返し地震を既存のカタログに加えて使用した。すべり量・すべり速度は、地震の規模とすべり量との間のスケーリング則および地震の再来間隔を用いて推定した。さらに本解析では、繰り返し地震に隣接する地震活動度の変化がすべり速度の時間変化と対応すると仮定して揺らぎを与え、小規模で短期間にのみ生じた時空間変化の推定を行った。

まず、2011年東北地方太平洋沖地震発生から3年程度の期間は、この地震の余効すべりと思われるすべりの加速が、大すべり域の周辺一帯で生じていた。特に、震源の西側に位置する宮城県沖北部では、本震発生後12年以上経過した現在でもプレート間相対運動よりも速い状態が続いている。そのため、巨大地震の余効すべりが見られる場所では、より規模の小さい地震による非地震性すべりを評価することは難しい。2014年の後半以降に発生したいくつかの大地震については、その発生後にプレート間非地震性すべりの加速が見られた。ただし、推定される地震発生後の非地震性すべりは、いずれもあまり広範囲には広がらず、また、短期間のうちに収束する傾向が見られた。2020年頃までは、震源域周辺では全体的にすべり速度が低下していく傾向が見られている。周辺域での固着の進行に伴い、より小規模な地震の余効すべりが抑制されたのかもしれない。

2021年以降に宮城県沖・福島県沖で発生した6つの大地震のうち、2021年2月と2022年3月に福島県沖で発生した地震はいずれもスラブ内地震であった。これらの地震は余震が多数発生しており、その中にも繰り返し地震が見られる。そこで、スラブ内地震の地震の影響を避けるため、2021年2月の地震発生前から継続して発生している繰り返し地震群のみを用いて、プレート間非地震性すべりの推定を試みた。その結果、2021年以降に発生したいずれの大地震発生後においてもプレート間非地震性すべりの加速が見られた。2021年2月の福島県沖スラブ内地震発生後のすべりは、その震源域の南側で短期間発生していた。2021年3月の宮城県沖プレート間地震後のすべりは、その南側では5月1日の宮城県沖プレート間地震の震源域を含む地域で加速するとともに、その北側に位置する2011年以降続く余効すべり域の再加速ももたらした。5月1日の地震と5月14日の福島県沖プレート間地震発生域間では、この発生間で顕著な加速は見られないものの、それ以前から比較的長期にわたってすべり速度が上昇していた。この上昇域は、2022年3月の福島県沖スラブ内地震の近傍まで広がった可能性がある。2022年3月のスラブ内地震発生直後は顕著なすべりの加速は見られなかった。ただし、発生1か月を経過した後になって、震源域の北側で加速が見られた。

本解析の結果は、スラブ内大地震の発生によりプレート間の応力が増加し、非地震性すべりが生じ、また、プレート間のすべりによる応力増加がスラブ内のダウンディップコンプレッション型地震の発生を促した可能性を示唆している。ただし、検出した非地震性すべりの量、速度ともに小規模であるため、これらの相互作用の寄与についてはさらなる検討が必要であろう。

© The Seismological Society of Japan

Detectability of shallow tectonic tremor in the Nankai Trough based on the DONET data

*Kazuaki OHTA[1]

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

南海トラフ沈み込み帯のプレート境界では，巨大地震発生領域をはさんで深部側および浅部側の双方でスロー地震が発生している．浅部においては，室戸岬沖から三重県南東沖の広い領域にかけてスロースリップおよび超低周波地震を伴う微動が発生している．浅部の微動の性質は海底地震観測網の発展によって飛躍的に解明が進んだが，一方で空間に不均質な震源およびエネルギーの分布は陸域ほどのカバレッジを持たない海域の観測網の影響を受けていると考えられる．そこで本研究では，DONETデータを用いて南海トラフ浅部域の微動を検出する際の微動エネルギーの下限値の推定を試みた．
防災科学技術研究所の運用する地震・津波観測監視システムDONET1およびDONET2の各観測点において，観測可能な微動の振幅と継続時間の下限値を設定した．各観測点の連続速度波形記録に対して，微動の周波数帯域（2–8 Hz）のバンドパスフィルタを施した3成分合成エンベロープ波形波形を作成し，2015年10月–2022年12月のデータを元に振幅中央値+3σを検出下限振幅とした．下限振幅は観測点によって異なるが，概ね30–60 nm/sであった．継続時間の下限値は20秒とした．微動がプレート境界で発生すると仮定し，仮定した震源において観測下限値に相当する微動の地震波輻射エネルギーをフォワード計算した．エネルギー計算手法はYabe et al. (2019, 2021)に基づき，プレート境界モデル(Nakanishi et al., 2018)を使用した．震源は微動の発生域を含む領域において0.01°刻みのグリッド上に仮定し，震源から100 km以内の観測点を計算に使用した．
推定された微動エネルギー下限値は観測点分布の影響を受けて不均質に分布し，観測点が密なDONET1およびDONET2直下の三重県南東沖と紀伊水道沖では~$10^{4\text{-}4.5}$ Jの値を取り，潮岬沖や室戸沖では~$10^{5\text{–}5.5}$ Jの値となった．検出される微動の個数密度が高い領域は検出エネルギー下限値が低い傾向にあり，検出下限値の影響を受けていると考えられる．この理論的なエネルギー下限値の分布を実際に観測された微動エネルギーの下限値の分布 (太田ほか, 2022)と比較したところ，概ね整合的であった．ただし，これらのエネルギーは微動がぎりぎり検出可能なエネルギーの下限値であり，コンプリートネスを満たしているとは考え難い．振幅下限値を100 nm/sに仮定すると，期待されるエネルギーは$10^{5\text{–}6.5}$ Jとなる．これらは微動のエネルギー頻度分布から見積もられるコンプリートネスエネルギーとも概ね整合的であるため，コンプリートネスエネルギーの分布と考えて良さそうである．

© The Seismological Society of Japan

Shallow seismic activity in the northern Tokyo Bay and central Chiba Prefecture

*Naoko KATO[1], Motoo Ukawa[2]

1. Nihon University, College of Humanities and Sciences (Present address: Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), 2. Nihon University, College of Humanities and Sciences

はじめに：東京湾北部から千葉県中部にかけて、震源の浅い地震が2011年の東北地方太平洋沖地震後に活発化した。気象庁カタログによると、これらは深さ15㎞程度から地表付近まで震源が帯状に分布し、その中には比較的規模の大きい2012年2月18日13時56分に発生したM3.8（深さ2㎞）、同日14時13分M4.2（深さ1.5㎞）の地震が含まれている。この地域は人口密集地域であり、このような地表付近にまで達する地震の分布が実際の地震活動を表しているのかは防災上、重要である。またこの地域の先新第三系基盤深度は2.5～3.5 kmであり（鈴木, 2002；林ほか, 2006）、深さ2km以浅でM4クラスの地震が発生したのが事実であれば、第三系や第四系の堆積層内で地震が発生したことになり、地震発生機構の点からも注目すべきである。
そこで本研究ではこれらの地震に関して、首都圏地震観測網(MeSO-net)・高感度地震観測網（Hi-net）のデータを用いて震源を再決定することにより、東京湾北部から千葉県中部にかけて発生する浅発地震の特徴を調査した。
首都圏は堆積層が厚く、観測点の走時もその影響を受ける。また、使用する観測点の違いにより震源決定の結果が影響され、特に深さへの影響が大きいことが考えられる。そのため、観測点を限定し、適切な速度構造を推定して震源を求めた。

時系列の特徴：対象地域の30㎞以浅の地震活動は2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震以降から微小～小規模程度の地震が増加したが、2017年以降は発生数が少ない。気象庁カタログのM1以上の月別地震数を見ると深さ17～30㎞の地震活動は東北地方太平洋沖地震後に地震数が増加したのち、数か月で地震数が急激に（5分の１程度に）減少したが、深さ17㎞以浅の地震では地震数が増加した後、2年以上かけて緩やかに減少し、地震活動の時間変化には深さによる違いが見られることが分かった。

震源再決定：震源再決定にあたってはHi-netのイベント波形データに収録されている観測点に加えて気象庁による震源から震央距離20㎞以内のMeSO-netの観測点の波形データも用い、P波とS波の到着時刻を再検測した。震源決定の標準走時計算には水平成層の地震波速度構造を用いた。今回はMeSO-net観測点の数が多いことから、まずは深層観測井のデータ（鈴木, 2002）から推定された関東平野の浅部地震波速度構造を参考に、深さ3㎞以浅でP波速度が2km/s程度、S波速度が1km/s程度の構造をいくつか仮定し、震源決定への影響を検討した。

［2012年2月18日の地震］木村(2012)よれば13時56分に発生した地震は深さ7.3 km、14時13分に発生した地震は深さ6.6 kmとしている。今回の震源再決定の結果、13時56分の地震について、深さ7.8-10.5 km、14時13分の地震については深さ7.0-9.4 kmとなり、木村（2012）よりやや深くなり、また気象庁カタログより数㎞深い震源が得られた。

［その他の地震］2020年6月2日15時41分　M3.4 深さ7.8 km（気象庁）の地震に関して同様の解析を行った結果、深さは11.6 –14.9 kmとなった。また、東京湾中部で発生した2015年12月26日 23時20分 M3.5 深さ22.9 kmの地震に関しては 深さ20.7 –25.6 kmとなった。

いずれも暫定的な結果でさらに解析数を増やす予定であるが、現時点では、気象庁カタログにおいて15ｋｍより浅部で発生したとされている震源はより深く決定された。よって、気象庁による震源に見られる深さ15㎞から地表付近に伸びる帯状の震源分布は震源決定の誤差に起因するものである可能性が高い。また深さ3㎞以浅

© The Seismological Society of Japan

の先新第三系基盤の上面より浅い場所で発生した地震ではないことも分かった。

本研究では、気象庁一元化震源カタログ、防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）・首都圏地震観測網(MeSO-net) ・気象庁・東京大学の地震観測データを利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

Estimation of the temporal change of background stress based on the rate- and state-friction seismicity model

*Takaki Iwata[1]

1. Prefectural University of Hiroshima

摩擦構成則に基づく地震活動モデル [Dieterich, 1994]（以下Dieterichモデル）を用いることで，大森・宇津公式 [Utsu, 1961]で示される余震活動の時間的なべき減衰を再現することが出来ることが知られている．但し，背景応力の時間変動レートを一定とすると，再現される時間減衰はべき指数（大森・宇津公式のp値）が1である場合のみとなり，実際の余震活動に現れる$p \neq 1$の場合に対応出来ない．これについてDieterich [1994]は，本震からの経過時間の対数に（概ね）従うような背景応力の時間変動を導入することで，様々なp値に対応した余震活動の時間減衰を作り出せることを示している．しかし，大森・宇津公式は実際の余震活動によく適合することは事実であるがあくまで「近似」であり，実際の余震活動はより複雑な様相を示す．そういった複雑な余震活動に対応した背景応力の時間変動も複雑なものであると考えられ，これを実際の余震活動から推定することを試みた．

背景応力の時間変動推定の概要は以下の通りである．まず，余震活動は「クラスター成分」と「（比較的）長期的な活動の変動（トレンド）成分」に分解できるものとする．前者は「余震による余震（二次余震）」に相当するものであり，これはETASモデル [Ogata, 1988]で表す．また後者をDieterichモデルで表す．そして背景応力の時間変動レートは，時間的に隣合う2つの地震間では一定で，地震発生時刻においてのみ値が変わり得る階段関数で与えることとする．地震発生時刻における応力変動レートのステップ的な変化はなるべく小さくなるような平滑化拘束を課した上で，このモデルを実際の余震活動に適用し，背景応力の時間変動推定を行った．

推定においては平滑化拘束の重みをどう与えるかが重要であり，多くの場合はベイズ的な枠組みの下で周辺化（対数）尤度（あるいはABIC）を用いて客観的に重みを定める．しかし本研究の場合はDieterichモデルが持つ非線形性のため周辺化尤度を計算することが困難である．そのため，複数の重みを与え，それぞれの場合についてマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて背景応力の時間変動とETASおよびDieterichモデルのパラメータを同時推定することとした．

一例として1995年兵庫県南部地震の余震データに適用したところ，平滑化拘束の重みに依らず，推定された背景応力の時間変動は本震からの経過時間の対数に従うようなものとなった．但し，単純に経過時間の対数に従うのではなく，細かい点で複雑な時間変動を含んでおり，余震活動の複雑さに呼応したものとなっている．

参考文献

- Dieterich, 1994, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/93JB02581.
- Ogata, 1988, *J. Amer. Stat. Assoc.*, doi:10.2307/2288914.
- Utsu, 1961, *Geophys. Mag.*, 30, 521–605.

© The Seismological Society of Japan

Shear strain energy release for the 2016 Kumamoto earthquake sequence

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

1. NIED

大地震が発生し、地震活動が活発化すると、マグニチュードや地震モーメント、そして、活動度の評価には地震数などを用いた評価がなされている。本研究では、歪みエネルギーを使った本震および余震活動の評価を試みた。
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るため、地震活動を定量化するために、地震活動によってリソスフェアから失われたせん断歪みエネルギーを用いる。そして、2016年４月に発生した熊本地震を例に、本震と余震活動のせん断歪みエネルギー変化に着目した。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、背景応力場を、応力の主軸方向と応力比、そして、差応力を100 MPa（静岩圧270 MPa、有効摩擦係数~0.2 相当）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 ~−2.6×10^{15} J、前震の余震~−3.0×10^{15} J、本震~−2.6×10^{16} J、余震~−2.4×10^{15} Jとなった。本震によるせん断歪みエネルギー減少量に対して余震活動による歪エネルギー減少量の割合は10%程度であった。一方、前震では、前震に対して前震の余震によるせん断歪エネルギーの減少量の割合は約120%となった。前震の余震活動は、せん断ひずみエネルギーの解放の観点からも活発であったことがわかる。
また、せん断歪エネルギー変化の空間分布は、前震や本震の断層面上ではせん断歪みエネルギーの減少を示す。本震断層から離れ、せん断歪みエネルギーが増加している領域で、余震数が多いことも確認できる(Noda et al., 2020 GRL)。一方で、余震活動によってせん断歪みエネルギーが解消された領域は、必ずしも本震によってせん断歪みエネルギーが増加した場所と対応しない。従来のΔCFSを用いた研究事例から、本震による応力変化が余震数の増加として余震活動に影響を与えることはよく知られている。しかし、余震による歪みエネルギー解放量と本震との関連は明らかではない。余震による歪みエネルギー解放量・活動規模の物理を解明するためには、本震だけでは無く、背景応力場を含めた更なる検討が重要である。

© The Seismological Society of Japan

Detection of shallow very low frequency earthquakes around Hyuga-nada since April 2023 using a matched filter technique

*Mugi Yamamoto[1], Ken Moriwaki[1]

1. Japan Meteorological Agency

はじめに

南海トラフ地震の想定震源域においては、三重県南東沖や日向灘周辺（種子島東方沖、大隅半島南東沖、日向灘及び宮崎県東方はるか沖）などの固着域よりも浅部側で浅部低周波地震（微動）や浅部超低周波地震（VLFE）などのスロー地震活動が繰り返し発生していることが知られている。これらの浅部のスロー地震活動は、三重県南東沖ではプレート境界での浅部スロースリップと同期して観測された事例が報告されており[Nakano et al.(2018)]、これらの発生状況を把握することはプレート境界の固着状況を監視したりスロー地震の発生様式などの理解を進めたりする上で重要である。そのため気象庁では、南海トラフ沿いのスロー地震活動の発生状況を監視するために準備を行ってきた。西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震（微動）[森脇(2017)]と三重県南東沖における浅部低周波地震（微動）[Tamaribuchi et al.(2022)]の監視はすでに実施しており、結果を南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会で報告している。浅部VLFEについてはAsano et al.(2015)やBaba et al.(2020, 2021)を参考にして、VLFE震源決定手法の開発を行っている。本発表では、現在開発中の手法を2023年4～6月に日向灘周辺で発生した浅部VLFE活動に適用した結果を報告する。

データ・解析手法

VLFEの検出には、気象庁の深部低周波地震の検出に使われているマッチドフィルター法（MF法）[森脇(2017)]を適用した。データとしては国立研究開発法人防災科学技術研究所の広帯域地震観測網F-netの西南日本の14観測点の連続波形を使用した。14観測点の3成分の連続波形に対して0.02～0.05Hzの通過帯域を持つバンドパス・フィルターを施し、100Hzから1Hzにリサンプリングし、解析波形とした。MF法で用いるテンプレートは、OpenSWPC[Maeda et al.(2017)]で計算した理論波形とした。理論波形を計算する際の地震波速度構造は全国1次地下構造モデル(JIVSM)[Koketsu et al.(2012)]とした。理論波形をテンプレートとすることにより、VLFEがこれまで観測されていない新たな領域での検知が可能となることが期待できる。テンプレートは、Hirose et al.(2008)のデータに基づきプレート境界面上とトラフの周辺の領域に0.4度間隔で配置した。MF法ではテンプレートと解析波形の相関を1秒間隔で計算し、全ての観測点の相関係数の総和が閾値を超えた時にイベント検出したとする。さらに、MF法により検出したイベントの精密な震源を決定するために、テンプレートの周りに仮想震源を配置し、テンプレートと仮想震源の震央位置の違いに応じた走時差を考慮したグリッドサーチを行った。検出したイベントについては、目視で通常地震や遠地地震を除外し、最終的な震源リストを作成した。

結果

本手法で検出されたVLFEの活動は、2023年4月15日頃から種子島の東方約150㎞のトラフ軸付近で始まり、5月10日頃までトラフ軸の走向に沿ってゆっくりと北東側へ移動し、足摺岬の西方約120㎞の領域に達した。この約25日間の移動距離は約150㎞で、移動速度は約6km/日であった。その後、活動は静穏化・活発化を繰り返しながら断続的に続き、5月29日頃から約10日間休止した後、6月11日に活動が再開したものの、6月20日以降VLFEは検出されていない。また、VLFEの震源は、種子島東方沖から大隅半島南東沖、日向灘及び宮崎県東方はるか沖までの南海トラフ軸に沿って決定され、震央分布は逆L字型の形状をなしている。震源域はAsano et al.(2015)の日向灘における2010年の浅部のVLFEの震源域とほぼ一致している。

謝辞

東京大学地震研究所の小原一成教授と武村俊介博士には、解析にあたって有益な助言を頂きました。本解析では独立行政法人防災科学技術研究所広帯域地震観測網 F-netの連続地震波形記録を使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

Correlations between shear strain energy changes and aftershock locations depending on aftershock magnitudes

*Sachiko TANAKA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震が発生すると，震源域やその周辺では，引き続き，多数の余震が発生する．通常，余震の規模は本震と比べると一回り小さいが，追加的な被害を生じさせるような大きい余震が発生する場合もあり，余震活動の評価は被害の軽減の観点からも重要である．日本列島内陸域の地震について，本震による剪断歪みエネルギー変化と余震の対応関係を調査した結果，対象とした12個の本震（M6.1～7.3）のうち6個で，剪断歪みエネルギーの増加と余震の発生位置との間に相関が認められた（Tanaka, 2023）．剪断歪みエネルギーは，応力テンソルの第2不変量や相当応力に関連する量で，その増加は，ランダムに分布する断層群の平均的な剪断応力の増加に対応する（Saito et al., 2018）．本研究では，剪断歪みエネルギー変化と余震の対応関係について，余震の規模による差異の検討を行った．

用いた地震データは，気象庁一元化処理による震源リスト（2003年から2021年まで，深さ20 km以浅，M2.0以上）である．シングルリンク法（Frohlich and Davis, 1990）によるクラスタリング処理（時空間の変換係数1 km/day，時空間距離10 km以内）を行い，M6以上の地震を含むクラスタについて，最大規模の地震を本震，それ以降の地震を余震として定義した．本震による剪断歪みエネルギー変化は，Saito et al.（2018）の導出に従い，半無限均質弾性体を仮定し，Okada（1992）の方法を用いて計算した．本震の断層モデルは国土地理院による矩形断層モデルを採用した．背景の応力場は，防災科研高感度地震観測網Hi-netによるP波初動解（2003年から2020年まで，深さ20 km以浅）から応力テンソルインバージョン法（Michael, 1987）を用いて推定した．

以上の手法が適用可能な本震12個について，本震による剪断歪みエネルギー変化を計算した結果，余震の総数に対して剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合が60%以上となる事例が6例確認された．これらについて，対象とする余震のマグニチュードの下限値を0.5ずつ増加させながら同様の調査を行ったところ，いずれも，剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合は高い値を維持したままであったが，3例については，マグニチュードの下限値が大きいほど，割合が高くなり，相関が強くなる傾向がみられた．一方，剪断歪みエネルギーの増加との相関が認められなかった6例についても，マグニチュードの下限値が大きくなると，剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合が増加する傾向が3例で確認された．剪断歪みエネルギーの増加が余震の発生位置に及ぼす影響は，規模の大きい余震に対して顕著である可能性が考えられる．

© The Seismological Society of Japan

Tectonic tremor activity near the boundary between the Hinagu segment and the Yatsushiro segment of Hinagu fault zone

*Hidenobu TAKAHASHI[1], Yasuhira Aoyagi[1], Haruo Kimura[1]

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

１．導入

日奈久断層帯は全長80 kmに及ぶ長大活断層で，高野ー白旗区間，日奈久区間，八代海区間に区分される．2016年熊本地震では高野ー白旗区間が破壊された．震源断層の規模予測に際し，隣接する断層の連動性評価や断層セグメント境界の構造的特徴を理解することは重要である．熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査（文部科学省研究開発局・九州大学，2019）では，日奈久区間と八代海区間の境界を境に，地震活動と断層の走向方向の変化が報告されており，セグメント境界が構造上重要であると考えられる．また，日奈久区間と八代海区間の境界近傍では，2012年スマトラ地震に誘発されたテクトニック微動の存在が報告されている（Miyazaki, 2016; Chao & Obara, 2016）．その一方で，観測事例はそれらのみで，より長期間の活動の実態は不明である．本発表では，日奈久断層帯日奈久区間と八代海区間の境界近傍における微動の検出とその活動の時空間発展の詳細，またその発生要因に関する議論を行う．

２．データ

本研究では，八代海区間と日奈久区間の境界における地下構造の特徴の把握を目的に臨時微小地震観測を実施した．観測に用いた速度型地震センサ （KVS-300） は固有周期2 Hz，サンプリング周波数は250 Hzである．地震観測点は，八代海を囲うように約10km程度の間隔で御所浦島や獅子島などの離島も含め30か所で陸上に設置した．観測期間は2022年10月から2023年8月のおよそ10か月間で，観測期間中の３月に全観測点でバッテリーとCFカードの交換を行っている．それら臨時観測点に加え，定常地震観測記録も使用した．

３．手法

微動検出を目的に，エンベロープ相関法 (e.g., Ide (2010); Ohta (2019))を適用した．初めに震央誤差は5 km以内のイベントの中から，典型的な微動波形の特徴である長い振動継続時間 （>20秒） を持つイベントを抽出した．また，プレート境界周辺で発生する微動は続発することが多く，本研究でも10 km以内，かつ１時間以内に２つ以上発生するイベントをクラスタリングし，微動と定義した．

４．結果

観測期間中，計３回の微動クラスタとして12個の微動が検出された．ひとつの微動クラスタの活動継続期間は15-30分であった． 微動の震央は，日奈久断層帯日奈久区間と八代海区間の境界近傍に集中しており，観測期間中の気象庁一元化震源カタログに基づく通常地震が深さ15 km 以浅に分布するのに対し，微動震源は20-25 kmに集中した．

５．議論

はじめに，先行研究により観測された八代海における微動との比較を行った．本研究で観測された微動震源は，2012年スマトラ地震によって誘発された微動と震源は極めて近い．一方，2012年にも設置されていた定常地震観測点を使用し，本研究で検出された微動のエンベロープ波形の振幅を比較すると，本研究で観測された微動の振幅は遠地地震による誘発微動の1/10程度であった．本研究で観測された微動は，スマトラ地震によって誘発された微動に比べ規模が小さかった可能性が高い．セグメント境界には，構造的な不連続部があり，時期によらず微動の発生域になっている可能性がある．また，本研究で観測された３つの微動クラスタの発生期間は，微動震源に近い八代と水俣の潮位予測値による干潮のピーク時間から１時間３０分以内であった．八代海における微動が断層面上で発生していたと仮定すると，南海トラフ沈み込み帯の一部地域で観測された微動活動 （Ide & Tanaka, 2014） 同様，海水面の変動によるせん断応力の変化に関連している可能性があげられる．

謝辞

太田和晃博士にはエンベロープ相関法のプログラムを提供して頂きました．気象庁一元化震源，防災科学技術研究所・気象庁・九州大学の各観測点の地震波形記録を使用させて頂きました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S19. Seismology, general contribution

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P10 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S19P] PM-P

[S19P-01] Toward development of the Community Fault Model

*Ryosuke ANDO[1], Takashi Azuma[2], Community fault model voluntary group[3] (1. University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. N/A)

[S19P-02] Fundamental study on fault structure development by X-ray CT imaging of analog experimental equipment

*Naoto INOUE[1], Naoko Kitada[1], Noriyuki Shibuya[2], Masashi Omata[2] (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)

[S19P-03] Source areas of primary microseisms strongly excited by major hurricanes

*Hiroki Kawakami[1], Naoki Suda[1] (1. Hiroshima University)

[S19P-04] Seismic noise amplitude variations caused by wind: A case study around Aomori prefecture, northeast Japan

*Akira Ueno[1], Tomoya Takano[1], Takuto maeda[1] (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

[S19P-05] Anomalous seismic ground motion associated with a torrential rainfall event in and around Aomori prefecture, NE Japan, in August 2022

*Yuzuki Yamato[1], Takuto Maeda[1], Tomoya Takano[1] (1. Hirosaki University)

Toward development of the Community Fault Model

*Ryosuke ANDO[1], Takashi Azuma[2], Community fault model voluntary group[3]

1. University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. N/A

活断層の3次元形状モデルは，地震発生や地震災害を含む地震・活断層現象に関する大凡の研究の基本を成すものである．国内においては，地形学・地質学的研究により地表トレースのモデル化，活断層図の作成は大きく進展してきた．それに対して，地下の断層形状については，観測や解釈の難しさから全国一律モデルの作成は道半ばである．現状，全国一律の3次元断層形状モデルとしては，地震調査研究推進本部により地震動予測地図作成のため震源断層モデル（J-SHISモデル）が公開されているが，概ねM7規模（長さ30km程度）の空間解像度を単位とした矩形表現であり，複雑な形状を持つ地表トレースと大きくずれている断層も多い．一方，米国（https://www.scec.org/article/1017）やニュージーランド(NZ)では，地表トレースとも整合的な高解像度の3次元断層非平面形状モデル構築の取り組みが進んでいる．近年の観測・理論研究の進展により，地下の断層形状が震源破壊過程や強震動放射，地表変位にあたえる影響の大きさが明らかとなっており，3次元断層形状のモデル化への要求が高まっている．

今年度より，地震・活断層コミュニティで一定のコンセンサスのある国内の3次元断層形状モデルの作成を目的として，「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）」の拠点間連携課題として取り組みを開始した．モデル構築の手順やコンパイル基準は，NZの先行事例（Seebeck et al., 2023）で実績のあるものをした．NZは日本とも島弧のテクトニックな条件や観測条件が似通っているところも多く参考になる．現在，全国の主要活断層帯の約半数について，地表トレースと断層傾斜角などについての既往データ，モデルに基づいて，3次元形状モデルの試作を行っている．これは，米国での例（15年以上更新を続け最新はVer. 6.0 (2023)）のように，今後の観測や解釈の発展によりモデル更新していくものの端緒として位置付けられる．今回の発表では，諸外国での取り組みのレビューと国内モデル作成の進捗状況を報告する．

来年には，ワークショップ形式などで，試作モデルの評価と修正を広くコミュニティに公開して行うことを検討している．コミュニティ各位には，個別断層の評価者としてご協力いただくとともに，基礎研究から応用研究まで多様な観点からコメント頂き，さらにコアメンバーとして参画して頂ければ幸いである．本モデルが，今後10-20年の日本の地震・活断層研究の基盤となるものにできることを期待している．

Seebeck et al., 2023, The New Zealand Community Fault Model –version 1.0: an improved geological foundation for seismic hazard modelling, New Zealand Journal of Geology and Geophysics.

© The Seismological Society of Japan

Fundamental study on fault structure development by X-ray CT imaging of analog experimental equipment

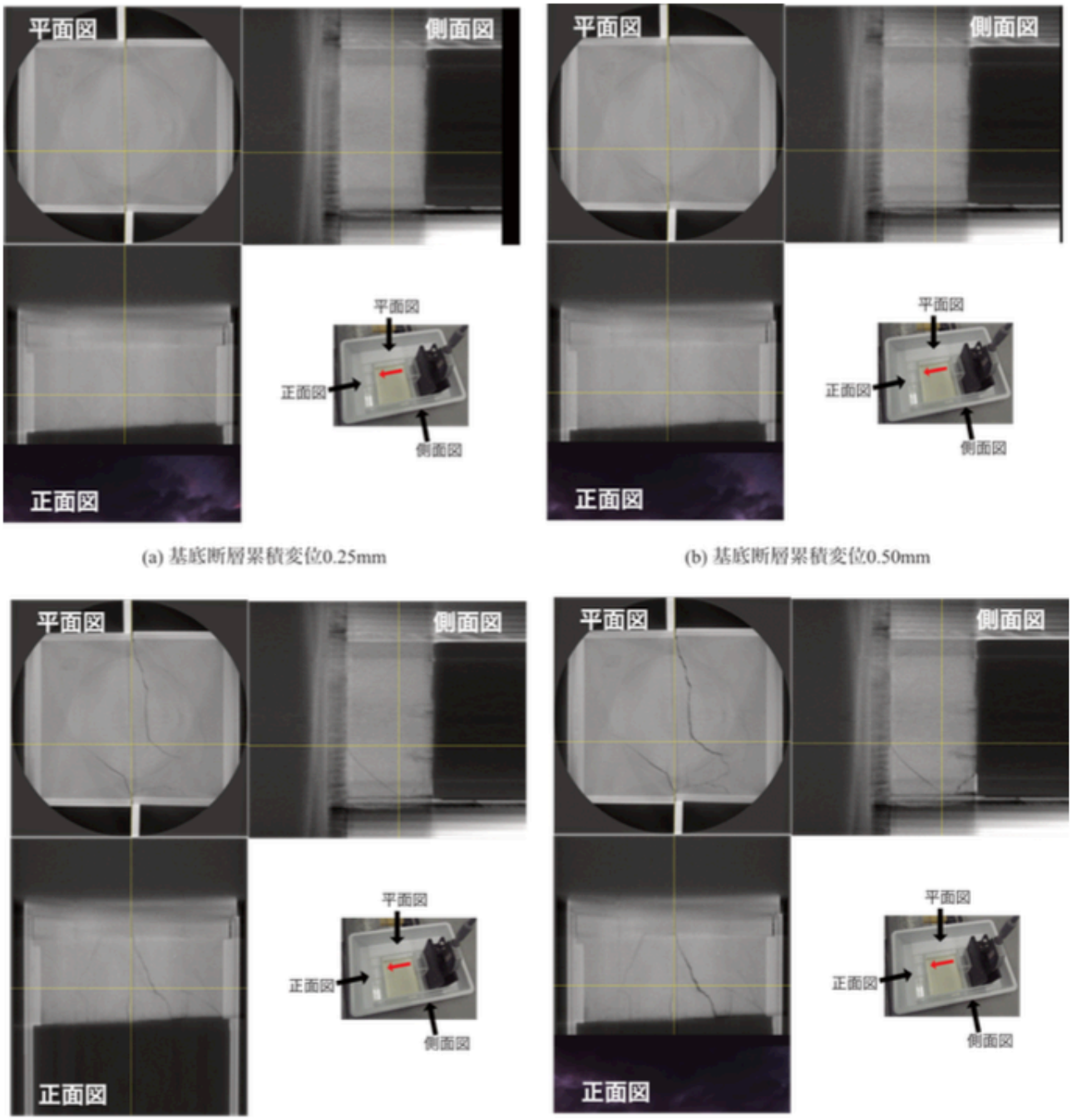
*Naoto INOUE[1], Naoko Kitada[1], Noriyuki Shibuya[2], Masashi Omata[2]

1. Geo-Research Institute, 2. PASCO

地震により地表地震断層が発生すると，断層主部(主断層）よりも離れた場所に副次的な断層（副断層）が発生することがある．原子力施設などの重要施設には副断層の発生範囲や変位量は，基本的に事前に分布が把握されている活断層より離れて発生するため，断層変位ハザードを考える上で重要な情報であるが，その発生メカニズムに関しては未解明な部分も多い．このために，表面で発生した断層構造が地下でどのような形状をしているのかを検討することは有用であると思われる．　そこで，X線CT撮影装置で測定可能なサイズに縮小した縦ずれ断層型・横ずれ断層型の模擬実験装置について，京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻所有のマイクロフォーカスX線CT装置により，形成される断層帯の内部構造の撮影を行った．縦ずれ断層型を用いた実験結果では，基底断層延長部での亀裂およびそこから分岐する亀裂が形成される様子が確認できた．正断層では基底断層直上にも亀裂が形成され，基底断層での変位の増大に伴い，基底断層直上の亀裂が主に変位している様子が明らかになった．この傾向は既往の正断層の室内模擬実験結果と整合的であった．一方，逆断層では既往の室内模擬実験結果でみられた上盤側のバックスラストに相当する構造は確認できなかった．基底断層での変位がバックスラスト形成に至るまで達していなかった可能性がある．横ずれ断層型の実験 結果では，基底断層から表面に向かういわゆるフラワーストラクチャー状の亀裂が確認でき，その変位が増加している様子が捉えられた．内部構造を検討することにより，基底断層と表面に発生した亀裂・断層との関係を整理することができるため，副断層の知見を整理するにあたり，室内模擬実験装置のX線CT撮影は有効な手法であると思われる．小麦粉を用いた室内模擬実験では，基底断層で与える累積変位量を小さくしてX線CT撮影を行うことで，内部の亀裂進展を詳細に解明することができると期待される．

謝辞：本検討は令和4年度原子力施設等防災対策等委託費（断層変位評価に係る調査）事業によるものである．また，X線CT撮影を行っていただきました京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻土木施工システム工学分野　肥後陽介教授，京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学分野　木戸隆之祐助教に感謝致します．

© The Seismological Society of Japan



(a) 基底断層累積変位0.25mm

(b) 基底断層累積変位0.50mm

(c) 基底断層累積変位0.75mm

(d) 基底断層累積変位1.00mm

図　横ずれ断層型模擬実験装置の内部構造(三面図)

© The Seismological Society of Japan

Source areas of primary microseisms strongly excited by major hurricanes

*Hiroki Kawakami[1], Naoki Suda[1]

1. Hiroshima University

一次脈動は、およそ0.05-0.10 Hzの周波数を示す地震計バックグラウンドノイズの一つであり、海洋波と海底地形のカップリングにより発生すると考えられている（Nishida *et al.*, 2008; Fukao *et al.*, 2010; Saito, 2010）。特に、熱帯低気圧の接近時には一次脈動の振幅が大きくなることが観測されている。しかし、その発生源やメカニズムについては議論の余地を残している。先行研究では、南シナ海周辺に接近した台風で励起された一次脈動の発生源が一か所に集中することが示された（Park & Hong 2020）。また、日本に接近した強い台風で励起された一次脈動には特に強く励起される領域があることが示された（河上・須田2022地震学会）。このような局所的な一次脈動の強い励起は、台風だけでなくハリケーンやサイクロンなど、世界中で発生する熱帯低気圧についても同様に観測されると考えられる。本研究では、北アメリカ大陸に接近した大型ハリケーンについて、一次脈動が強く励起される領域を広帯域地震計データの解析から推定した。

地震計データとしては、GSNおよびUSNSNの全69個の観測点から一次脈動のピークが顕著な観測点を選択し、その三成分記録を用いた。ハリケーンについては、National Hurricane Centerのデータベースを参照し、2017年から2021年の5年間に大西洋で発生してカテゴリー３以上で北アメリカ大陸沿岸に接近した12個の大型ハリケーンを対象とした。強い励起源の推定には、Park & Hong (2020)と同様にRayleigh波の極性を利用する方法を用いた。この方法では、ある方位に回転させた水平成分と位相を$\pi/2$シフトさせた上下動成分との相互相関係数が最も大きいとき、その方位に発生源があると考える。今回は北緯10度～50度、 西経50度～100度の範囲において0.5度間隔で仮想的な震源を地表に設定し、各仮想震源に対して相互相関係数の観測点平均を計算することで強く励起された一次脈動の発生源を推定した。

解析の結果、メキシコ湾にハリケーンが進入した際に、ルイジアナ州の沿岸部で一次脈動が特に強く励起されることが明らかになった。この結果から、ルイジアナ州周辺の浅く複雑な海底地形が一次脈動を強く励起したと考えられる。発表では、海洋波と海底地形から推定した海底圧力分布との比較も行う予定である。

© The Seismological Society of Japan

Seismic noise amplitude variations caused by wind: A case study around Aomori prefecture, northeast Japan

*Akira Ueno[1], Tomoya Takano[1], Takuto maeda[1]

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

【はじめに】
地震記録の中には断層運動にともなう地震波以外のさまざまな振動が記録されている．通例これらはまとめてノイズとして扱われるが，その原因は様々である．そのような振動のうち主要なものとしては海洋起源の脈動が周期1秒から周期20秒の周波数帯に存在することは広く知られている．一方，大気の運動，すなわち風と地震動との関係も広い周波数帯で報告されているものの，その発生メカニズムは詳細に分かっていない．本研究では，一年を通して国内でも特に風の強い青森県周辺において，地震波ノイズと風速との関係を調査した．

【手法】
本研究では，青森県周辺にあたる東経139.5–142.0˚および北緯40.0–41.0˚における，2022年9月の1ヶ月間の高感度地震観測網Hi-netの3成分速度波形記録とAMeDAS観測点平均風速記録を利用した．地震波と平均風速の比較のため，Hi-net地震計に最も近いAMeDAS観測点の風速計をペアとしてカウントし，計28個のペアで地震波振幅レベルと風速との対応関係を調査した．
地震波ノイズの変動は，パワースペクトル密度関数（PSDF）の時間変動により調査した． 断層運動による地震波やその他の原因による突発的な振幅増加などの影響を最小化するため，10分間の時間窓中のPSDFの最小値をもってその時間窓の代表値とし，その時間窓を1分ずつずらしながら振幅の時間変動を調べた．解析周波数帯は0.1–16 Hzとし，それを6分割して解析した．さらに，このPSDFの最小値と同時刻に風速計で測定された10分間平均風速の相互相関を求めた．

【結果・議論】
風とPSDの相互相関は概ね海岸付近で強く，内陸で弱くなる傾向が見られた．ほぼ全ての観測点で相互相関は1–8 Hzでピークを持ち，海洋に近い観測点では1–2 Hzでピークとなる観測点が多く見られた．海岸付近で1–2 Hzに相関が大きくなることは風により励起された海洋波が原因であると考えられる．一方で海岸付近でも相関が弱く，内陸でも強い相関を持つペアが存在した．
ペアごとの地震波ノイズのPSDFはばらつきが大きいものの，風速に依存してその取りうる値の最低値が系統的に大きくなっている様子が観察された．そこで，風速の一定区間ごとのPSDFの最低値に対して最小二乗法を適用し，PSDFの最低値に対する風速の傾きSを算出した．ペアごとにSを求めることでPSDFへの風速の影響を調べた．計算したSでは相互相関の結果とは異なり内陸で大きくなる結果となった．これは風の風向や観測点付近の傾斜が影響していると考えられる．

【まとめ】
風による地震波ノイズレベルの変動を地震波ノイズのPSDFと平均風速の比較から調査を行った．これらのデータから相互相関を算出し，その地域特性を調べた．概ね全域の地震観測点において風速と地震波ノイズの相関が見られた.特に周波数1–2 Hzの間では海岸付近の観測点で相関が強くみられた．これは風により励起された海洋波に起因していると考えられる．一方，傾きSでは明確な地域による傾向が見られず，地形の傾斜や植生などのより詳細な地域特性が影響している可能性がある．

© The Seismological Society of Japan

Anomalous seismic ground motion associated with a torrential rainfall event in and around Aomori prefecture, NE Japan, in August 2022

*Yuzuki Yamato[1], Takuto Maeda[1], Tomoya Takano[1]

1. Hirosaki University

固体地球は断層運動以外にも、大気・海洋と固体地球の相互作用や人間活動などによって絶えず振動している。近年これらの固体地球内部以外に起源を持つ振動を解析する研究や、その振動を通常の地震以外のさまざまな現象のモニタリングに使う研究が進んでいる。そのなかで降水は、地球内部の構造をわずかに変化させる一因になっていることは広く知られているが、降水によって直接地面が揺れた報告は限られており、降水により地震動が励起されるメカニズムはいまだよくわかっていない。 2022年8月8日から9日にかけて北日本に前線が停滞し、青森県と秋田県の周辺で24時間降水量が200 mmを越える集中豪雨が発生した。我々はこの期間に十和田湖西岸の地表で臨時地震観測を行っており（観測点HR.TWD）、降雨が強まると地震波振幅が大きくなり、弱まると小さくなるといった、降水に伴うと思われる異常な地震動を観測した。この記録にはP 波・S 波といった断層運動による明瞭な地震動は見られず、高周波数帯での平均的な振幅の増大がみられた。さらにこの記録を踏まえて集中豪雨時前後の地震波形記録を目視により確認した結果、降水にともなう地震動が、臨時観測点から300 mの距離にあるボアホール孔底に設置されたHi-net小坂観測点（N.KOSH）でも明瞭に観測されていることを見出した。 そこで本研究では、2022年8月1日から8月31日の集中豪雨期間において、上記の十和田湖周辺を含む青森県近傍の8つの地震観測点で、AMeDAS雨量計および秋田県大川岱雨量計の降水量と、その近傍の地震観測点における周波数帯ごとの地震波振幅とを比較した。降水量は、計測間隔が10分である降水量の記録から、40分積算降水量を計算した。地震波振幅は、サンプリング周波数が100 Hzのデータに、0.5-1 Hz、1-2 Hz、2-4 Hz、4-8 Hz、8-16 Hz、16-32 Hzのオクターブ幅の6つの周波数帯のバンドパスフィルタをそれぞれ適用した。その後、降水量の計測サンプリングに合わせて10分毎の地震波振幅の中央値を抽出し、その時間窓における代表値とした。この処理により通常の地震による大振幅の混入を防ぐことができる。その結果、HR.TWDでは、16-32 Hzの周波数帯で地震波振幅が降水量によく対応した。また、N.KOSHでも、HR.TWDと同様の振幅と降水量の対応関係が見られた。これは、雨水が地震計を直接叩くことにより生成した振動でなく、雨水が地震波として地中の地震計に伝播したと考えられる。その他6つのHi-net 観測点では、雨量が多い時間に振幅がそれに応答する観測点（大鰐・岩木）と、応答しない観測点（鯵ヶ沢・八戸・野辺地・大間）があった。また、雨量に呼応した地震波が見られた観測点において、地震波振幅は降雨後に3日から10日ほどかけて緩やかに減衰することが観測された。我々の知る限りこの振幅減衰現象は既往研究にも報告がなく、その原因は未解明である。降雨による地震波の励起メカニズムを明らかにするためには、振幅が降雨に応答しやすい観測点の特徴や、振幅の緩やかな減衰が観測される観測点の特徴、また降雨後の地震波振幅の減衰過程等を調べる必要がある。そのため、今後地震波干渉法や土壌水分量の観測による地下構造の時間変化の推定を行う予定である。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S01. Theory and analysis method

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P11 (F203) Hall Annex

[S01P] PM-P

[S01P-01] What (seismically) happened before, during, and after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption?

*Ryo Okuwaki[1], Wenyuan Fan[2] (1. University of Tsukuba, 2. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego)

[S01P-02] Determination of event features to compile a tectonic tremor catalog

*Seiya Yano[1], Satoshi Ide[1] (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

[S01P-03] Stable estimation of clock time errors and seismic velocity changes with a state-space model of cross-correlations of ambient noise

*Tomoya TAKANO[1], Kiwamu Nishida[2] (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 2. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo)

[S01P-04] Consistency between S/P Amplitude Ratios and P-wave Polarities Observed at the NIED S-net and H-net Stations

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

[S01P-05] Modeling ocean-bottom seismograph (S-net) waveforms for the full waveform tomography of the 2011 Tohoku-Oki earthquake source area

*Taro OKAMOTO[1], Hiroshi Takenaka[2], Takeshi Nakamura[3] (1. Tokyo Institute of Technology, 2. Okayama University, 3. Central Research Institute of Electric Power Industry)

[S01P-06] Forecasting Seismic Wave Propagation by Physics-Informed Neural Network (PINN): Numerical Experiments in a 2-D Acoustic Wavefield

*Masayoshi Someya[1], Takashi Furumura[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

[S01P-07] Evaluation of Analysis Techniques for Scattering Attenuation Structure Estimates in Small Spatial Region

*Koyo Matsuda[1], Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Yohei Yukutake[3] (1. Kyoto University, 2. Hirosaki University, 3. Univ. of Tokyo, ERI)

[S01P-08] Energy partitioning into strain components in diffuse wave fields (2)

*Hisashi NAKAHARA[1], Kentaro Emoto[2] (1. Tohoku University, 2. Kyushu University)

[S01P-09] Fluctuation of the strain waveform due to the small-scale heterogeneity

*Kentaro EMOTO[1], Satoru HAMANAKA[1] (1. Kyushu University)

[S01P-10] Parallelization in Seismic Ray Tracing Programs

*Shutaro SEKINE[1] (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

What (seismically) happened before, during, and after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption?

*Ryo Okuwaki[1], Wenyuan Fan[2]

1. University of Tsukuba, 2. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego

On 15 January 2022, the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano erupted, devastating Tonga and nearby regions. The event produced atmospheric waves and tsunami that traveled worldwide. Additionally, the eruptions generated a series of seismic events. Monitoring these seismic events can offer insights into the magmatic and deformation processes before, during, and after the eruption. However, near-field observations of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano are limited due to its remote oceanic location. Furthermore, seismic signals resulting from volcanic activities often lack clear high-frequency body waves, making it challenging to effectively monitor volcanic events using standard detection algorithms.

We use global broadband seismic records and the Automated Event Location Using a Mesh of Arrays (AELUMA) method to investigate seismic events related to the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. Our procedure has successfully detected and located non-regular earthquake sources using regional arrays, such as the USArray and NIED F-net. Using global data improves the array azimuthal coverage and detection sensitivity for unconventional seismic sources. We analyze Rayleigh waves recorded at ~1924 broadband seismic stations from the FDSN and F-net networks between 2021-11-01 and 2022-07-01, resulting in ~979 triad subarrays. We bandpass filter the data at 20–50 s period band to focus on seismic sources that can produce intermediate period surface waves. We detect a total of 902 reliable seismic events at the volcano during the eight-month study period. Notably, 162 seismic events were previously undetected and are not registered in the ISC catalog. We plan to further explore the connections between the seismic activity and the volcanic eruptions, including the seismicity preceding the main eruptions and the post-eruption seismic activity.

We also investigate the source mechanisms of the most energetic eruption series, which occurred from 2022-01-15T04:14:45 to 2022-01-15T04:22:45. We use the three components of broadband teleseismic data and a frequency-domain inversion method. The source models include both a moment tensor and a single force component, accounting for possible volumetric deformation as well as mass movement. We identify at least four distinct sub-events during the first 480 s from the origin time. These sub-events are characterized by the dominant isotropic component moment tensors and vertical single forces. We confirm the robustness of the results with a bootstrapping uncertainty exercise. Our results indicate that neither the moment tensors nor the single forces on their own can adequately explain the data, suggesting a complex interplay of explosions, implosions, and mass movements.

© The Seismological Society of Japan

Determination of event features to compile a tectonic tremor catalog

*Seiya Yano[1], Satoshi Ide[1]

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

テクトニック微動は西南日本で初めて発見されて以降, 沈み込み帯をはじめとする世界各地で検出されており (e.g. Obara, 2002; Nadeau and Dolenc, 2005; Payero et al., 2008), 巨大地震震源域の物性や応力状態を詳細に理解するための重要な手掛かりとして注目されている.
微動は, 規模が同程度な通常の地震に比べて継続時間が長い傾向にある. また, 通常の地震よりも局所化した時空間分布を持つ(Idehara et al., 2014). そのため, 従来の微動検出手法では, エンベロープ波形の相互相関に基づいて微動の候補となるイベントを検出したのち, 継続時間の基準値を設定したり, 孤立したイベントを棄却することで微動を選別するという手法がとられてきた(e.g. Wech & Creager, 2008).
しかし, 微動は継続時間の短い低周波地震によって構成されるため, 全ての微動の継続時間が長いとは限らない (Shelly et al., 2007). また, 微動の継続時間の長さは, 必ずしも微動の発生プロセスによるものとは限らず, 震源周辺の異常構造に起因する可能性も指摘されている(Toh et al., 2023).
そこで本研究では, 主観的な選別基準を設定することなく, イベントの特徴量に基づいて定量的に微動を検出するためのスキームを構築した. 具体的な特徴量としては, 継続時間, マグニチュード, 深さ, 速度スペクトルの特徴量, 最近接イベント情報などを検討した.
まず, エンベロープ波形の相互相関と最尤法に基づくアルゴリズム(Mizuno & Ide, 2019)を用いて, 微動の候補となるイベントの位置, 震源時間, マグニチュードを決定した. また, エンベロープ継続時間を, エンベロープ波形の振幅がある基準値を超える時間幅として決定した.
次に, イベントの震源決定に使用した各Hi-netチャンネルの速度波形データから, エンベロープ継続時間の2倍にあたる期間を抽出し, 2-8 Hzのバンドパスフィルタをかけ, 2乗したうえで時間積分を行った. その積分値の50 %を占めるような最小の時間幅をチャンネルごとに決定し, それらの中で最小なものを, そのイベントのエネルギー継続時間とした.
また, 同じ速度波形から速度スペクトルを求め, 3.0-6.0 Hzと10-20 Hzという二つの帯域におけるスペクトル強度の違いから, イベントごとに特徴量を抽出した. これは, 微動の卓越周波数が1.0-10 Hzと, 同規模な通常の地震に比べて低い一方で, 10-数10 Hzの帯域は通常の地震の方が卓越することを利用している(Shelly et al., 2007).
さらに, 最近接イベント情報については, イベントの時空間距離に基づいて通常の地震をクラスタリングしたZaliapin & Ben-Zion(2013)の手法を微動にまで拡張することで得た.
最後に, これらの特徴量に密度ベースのクラスタリング手法を適用することで, 検出されたイベントから微動を抽出した.
本手法を西南日本に適用したところ, Mizuno & Ide(2019)が作成した微動カタログの倍以上の微動を検出した. また, その中には従来のカタログでは棄却されていた, 継続時間の短い低周波地震とみられるイベントも数多く含まれていた. さらに, 今回の手法で決定したエネルギー継続時間はこれまで参照されてきたエンベロープ継続時間に比べて系統的に短く, マグニチュードと比較することで, 微動と通常の地震とのスケーリング則の違いについて, これまでは議論できなかった0.5秒程度の領域まで議論することが可能になった. 今後は, このスキームを用いて構築した微動カタログに基づき, スロー地震のより詳細な理解やモデル化を目指す.

© The Seismological Society of Japan

Stable estimation of clock time errors and seismic velocity changes with a state-space model of cross-correlations of ambient noise

*Tomoya TAKANO[1], Kiwamu Nishida[2]

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

地震波干渉法に基づいて，繰り返し得られる常時微動の相互相関関数の位相差から地震波速度の時間変化が幅広く調べられている．これまで，大地震や火山活動，季節変動等による地殻構造の時間変化が推定されてきた．ここで，相互相関関数の位相差は地震波速度変化だけでなく地震計の時刻ずれによっても変化する．したがって，地殻構造の時間変化をより精度よくモニタリングするためには，地震計の時刻ずれが地震波速度変化の推定にどの程度寄与するのか評価する必要がある．これまで，地震計の時刻ずれによる相互相関関数の位相差は相互相関関数の非対称性から推定されてきた．しかしながら，地震波速度変化と地震計の時刻ずれはそれぞれ切り分けて推定されており，互いにどの程度影響するのか不明である．そこで本研究では，常時微動の相互相関関数の時系列データから状態空間モデルを構築し，カルマンフィルタを用いて地震計の時刻ずれと地震波速度変化，相関関数の振幅変化及びそれらの誤差共分散を評価することを目指す．
東京大学地震研究所及び防災科学技術研究所により霧島山に設置された8つの地震観測点で記録された常時微動を解析する．観測期間は2010年4月から2021年9月までであり，観測期間中に噴火活動により火口近傍の観測点では機器の交換等のメンテナンスが行われた．1日ごとにスタックした常時微動の相互相関関数９成分を観測値として，リファレンス波形の振幅変化，速度変化，時刻ずれを状態変数として状態空間モデルを構築した．ここでモデル関数は非線形であるので拡張カルマンフィルタにより状態変数を求めた．また，Nishida et al. (2020)に従って地震波速度変化の降雨応答と2016年熊本地震児の速度変化を説明変数として加え，これらの説明変数を最尤法により推定した．本手法により，観測機器のメンテナンスのためデータロガーの電源を落とした観測点において，0.15秒程度の微小な時刻ずれが検出された．この時刻ずれは，本地震観測網を用いて震源決定を行う際に数百m程度の誤差となり得る．また，振幅変化と速度変化，時刻ずれの誤差共分散の間には明瞭なトレードオフは見られなかった．観測された常時微動の相互相関関数に対して正規分布に従うノイズを加えた擬似波形を作成し，従来の手法と本手法で時刻ずれと速度変化を推定し，本手法の性能を検証した．本手法では，経過時間ごとの位相差を用いる従来の手法に比べて安定して微小な変化も推定できることがわかった．

© The Seismological Society of Japan

Consistency between S/P Amplitude Ratios and P-wave Polarities Observed at the NIED S-net and H-net Stations

*Youichi ASANO[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

初動極性の読み取り値が少ない微小地震の発震機構解の高精度な推定に、Ｐ波やＳ波の振幅や振幅比がデータとして用いられることがある。このような手法の海域地震観測に対する適用可能性を調べることを目的として、東北地方の沖で発生する地震のＳ／Ｐ振幅比と初動極性の空間分布の対応を調べた。 本研究では、2019年から2023年7月の期間に北緯39度～41度、東経141.5度～147度で発生した振幅M3以上の地震886個を解析した。より具体的には、防災科研Ｓ-netおよびHi-netの連続記録から各地震の震源時刻を先頭する記録長60秒間の３成分速度波形を切り出し、バンドパスフィルター（通過帯域8-16Hz）に通した後に、震央距離200km以内の各観測点におけるＳ／Ｐ振幅比［例えば、Hardebeck and Ｓhearer (2003)］を評価した。ここでは簡単のために、Ｐ波振幅値はＰ波到達時刻から2秒間の上下動成分記録のRMＳ振幅として、Ｓ波振幅値はＳ波到達時刻から2秒間の水平動２成分記録のRMＳ振幅としてそれぞれ評価し、Ｓ波振幅値／Ｐ波振幅値をＳ／Ｐ振幅比とした。 評価されたＳ／Ｐ振幅比の多くは1～20程度であった。この振幅比はＰ波初動極性の節線（地表観測点における押し引き分布が切り替わる境界線）付近の観測点で大きい値をとることが期待される。そこで、Ｐ波初動極性の空間分布からみた節線とＳ／Ｐ振幅比の空間分布とを比較した。その結果、震源と観測点がともに143度以西に位置する場合については、節線付近でＳ／Ｐ振幅比が大きいという良好な対応がみられた。一方、震源と観測点がともに143度以東に位置する場合には、上述のような対応が不明瞭なケースも数多く見られた。そのようなケースにおいては、震央距離が50㎞以内と比較的近い震源と観測点の組み合わせにおいても節線と振幅比の関係とが不明瞭であり、海溝近傍の強い不均質媒質によって短い震源経過時間のうちに震源輻射の情報が（エネルギー密度の空間分布から）失われているものと推察される。この結果は、Ｓ／Ｐ振幅比を発震機構解の推定に用いる場合に、不均質媒質の影響が少ないデータを選別する、或いは不均質媒質の影響も考慮することが重要であることを示唆している。

© The Seismological Society of Japan

Modeling ocean-bottom seismograph (S-net) waveforms for the full waveform tomography of the 2011 Tohoku-Oki earthquake source area

*Taro OKAMOTO[1], Hiroshi Takenaka[2], Takeshi Nakamura[3]

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Okayama University, 3. Central Research Institute of Electric Power Industry

沈み込み帯の短波長3次元構造モデルを構築することは、周期約10秒以下の地震波波形を再現する上でも、また、波形解析によって不均質構造と震源過程の相関関係を研究する上でも重要である。しかし沈み込み帯の強い不均質性は波形に大きな影響を与える可能性がある。しかも地震観測点は主に陸上に展開されていることから、観測点分布には偏りがある。これらの背景のために、沈み込み帯に全波形トモグラフィーを適用することは容易ではない。これらの困難の下で全波形トモグラフィーの初期震源パラメータを推定するために、我々はFirst-motion Augmented Moment Tensor（FAMT）解析を提案した（Okamoto et al, EPS, 2018）。この方法では初期3次元構造モデルのもとでの地震波波形シミュレーションに基づいて計算波形を生成し、短周期（4-40秒）のP波初動波形と長周期（10-40秒）の表面波を含む全波形を用いて震源位置や震源パラメータを推定する。しかし、このようにして得られた最適震源パラメータを用いても、観測点分布の偏りのために2011年東北沖地震震源域のトモグラフィーでは、海溝付近の分解能が悪化することを我々は見出した（Okamoto et al., 地震学会2022年秋季大会）。この問題に対応するために、本研究では日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の波形データを導入することとした。まず、S-net波形を用いたFAMT解析の例として、陸上観測点（F-net, KiK-net）の3成分データとS-net海底地震計（加速度計）の3成分データを同時に利用してアウターライズ地震（2017年、Mw 6.2）の解析を行った。このイベントは観測網の内側で発生した地震であることから、海底地震計の向きの変化をチェックした。すなわちS-net加速度計データについて地震波到達前と地震波通過後の200秒間を用いてTakagi et al. (2019) の方法により地震計のRoll角度とTilt角度を地震波通過の前後で推定し、解析対象とした全ての観測点で地震波通過の前後で角度がほぼ変わらないことと、Takagi et al. (2019)で得られた角度との相違が小さいこと（0.1度未満）の両方を確認した。これらのチェックのうえで、最終的には Takagi et al. (2019) で得られた3つの角度を用いて回転した観測波形を利用した。FAMT解析で得られた長周期計算波形は、解析に用いた18個のS-net観測点のうち半数弱の観測点でS-net観測波形を良好に再現した。波形の一致が良好ではない観測点については今後の検討が必要である。また、震源位置やモーメントテンソルなどの震源パラメータは、陸上観測点データのみを使用して得られたものと大きな違いはなかった。例えば推定された震源位置の相違は水平方向に約5.1kmであり、これは震源の断層サイズ（～10数km）よりも小さい。この例は、トモグラフィー解析にS-netの海底地震計波形データを利用できる可能性を示すものと考えられる。発表では、S-net海底地震計波形データを追加して得られた分解能行列と推定パラメータ（P波およびS波の弾性率、密度、QpおよびQs）に基づいて、2011年の東北沖地震震源域に適用した全波形トモグラフィーの初期結果を紹介する。（NIEDによる波形データ提供、およびTakagi et al. (2019)によるS-net地震計方位角度データ提供に感謝します。この研究は、JSPS KAKENHI（20K04101）、およびJHPCNプロジェクト（jh200059-NHA、jh210054-NAH、jh220060、jh230068）によってサポートされています。）

© The Seismological Society of Japan

Forecasting Seismic Wave Propagation by Physics-Informed Neural Network (PINN): Numerical Experiments in a 2-D Acoustic Wavefield

*Masayoshi Someya[1], Takashi Furumura[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

1．背景・目的
近年，機械学習を活用した数値モデリング手法である「Physics-Informed Neural Network（以下，PINN）」が注目されている（Raissi et al. 2019）．通常の機械学習とは異なり，PINNはデータだけでなく物理方程式も学習の拘束条件として用いることで，学習と予測がデータと物理法則の双方に従うことが保証され，高精度な予測の実現が期待できる．
本研究では，地震波伝播を学習したPINNの予測能力を検証するため，2次元の音響波動場を対象として数値実験を行った．差分法で計算した波形データを用いてPINNを訓練し，学習済みモデルを用いて任意の地点と時刻の波動場の再構築（予測）を試みた．

2．手法
40 km x 40 kmの2次元平面を数値実験領域に設定し，6秒間の音波伝播を評価する．まず，空間4次・時間2次精度のstaggered-grid差分法を用いて時間ステップと格子サイズを0.01 sと0.1 kmとする音響波動場を計算し，各gridでの速度波形データを合成した．音波速度は一様（3 km/s）とし，破壊継続時間0.5 sの震源から放射される音響波動場の卓越波長は1.5 kmである．
次に，PINNのPythonライブラリ：DeepXDE（Lu et al. 2021）を用いて，隠れ層4層，各ニューロン数50で，tanh関数を活性化関数とする全結合型ニューラルネットワークを作成し（図1），以下の損失関数Lを最小とするよう学習を行った．
L = w_data*L_data + w_PDE*L_PDE
ここで，L_dataはPINNによる予測と波形データの平均二乗誤差（データ拘束），L_PDEは音響波動場を表す音波方程式の平均二乗誤差（物理拘束），w_dataとw_PDEは各拘束の重みである．なお，optimizerにはAdam法を用いた．10万epochの学習に，東大情報基盤センターのWisteria/BDEC-01スハ゜コン（8GPU並列）で5分程度を要した．

3．結果と考察
領域内のデータ拘束点（L_dataを計算する点）におけるt=0 sからt=6 sまでの速度波形を学習した後，学習済みモデルを用いて予測した音響波動場を数値シミュレーション結果と比較した．データ拘束点の数，物理拘束点（L_PDEを計算する点）の数，w_dataとw_PDEの比率を変え，予測された波動場の精度を調べた．予測の精度は，数値シミュレーション結果と予測結果の平均二乗誤差として評価した．また，データ拘束のみを損失関数の計算に用い，物理拘束を用いない学習（w_PDE=0，すなわち通常の機械学習）との比較も行った．
なお，実際の地震観測点の分布は不均一であるが，拘束点の偏りに起因する予測精度のバイアスを避けるため，本数値実験ではデータ・物理拘束点ともに規則的に配置し，両者の密度の違いによる波動場の予測精度を評価した．

まず，データ拘束点の密度を変えた実験では，データ拘束点の平均間隔が音波の卓越波長と同程度の場合は精度よく予測できた（図2，N_data = 81, 49）が，波長に比べて1桁大きくなると精度の悪化が認められた（N_data = 9）．
同様の傾向は物理拘束点の密度を変えた場合についても確認されたが，データ拘束点の数が十分多ければ，物理拘束点の数が少なくとも精度低下は小さいことがわかった．
データ拘束（w_data）と物理拘束（w_PDE）の比率を変えた実験（図3）では，物理拘束の重みを増やすに従って予測精度の向上が確認できた．ただし，物理拘束の重みを非常に大きく設定し，データ拘束の寄与を小

© The Seismological Society of Japan

さくすると精度は悪化し，2つの重みを等しく設定した場合に最も良い精度が得られることが確認できた（図3，w_data : w_PDE = 1 : 1）．
以上の結果から，予測精度を高める上で物理拘束を加えたPINNは有効であるが，その場合でも，予測にはある程度のデータ拘束が必要であることが示唆された．

4．今後の展望
今回行ったPINNの数値実験は，波形データを学習した時間内の波動場の再構築（内挿予測）であり，さらに未来の波動場の予測（外挿予測）の性能評価を行う予定である．また，PINNの先行研究（Rasht-Behesht et al. 2022）では，震源からの音波伝播が始まった直後の2つの時刻の波動場のスナップショットから，その後の時刻の波動場が予測できることが示されており，現実的な少ない観測点と限られた観測時間の下での，波動場の予測可能性とその要件について，さらなる数値実験を進める予定である．さらに，PINNではPDEの未知パラメータ推定が可能であるため，波動場の推定とともに速度構造インバージョンへの適用可能性も検討する．

© The Seismological Society of Japan

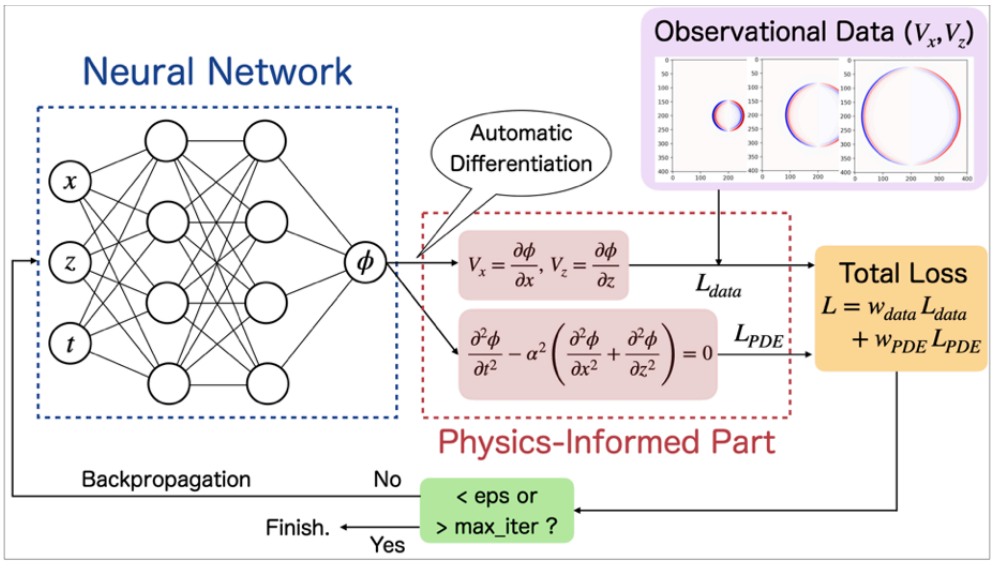


図1：数値実験の概念図．全結合型のNNにより，ポテンシャル ϕ を座標 (x, z) と時間 t の関数として近似し，速度波形データおよび音波方程式を満たすようNNのパラメータを最適化する．損失関数が閾値を下回るか，反復回数が上限を超えると学習を終了する．

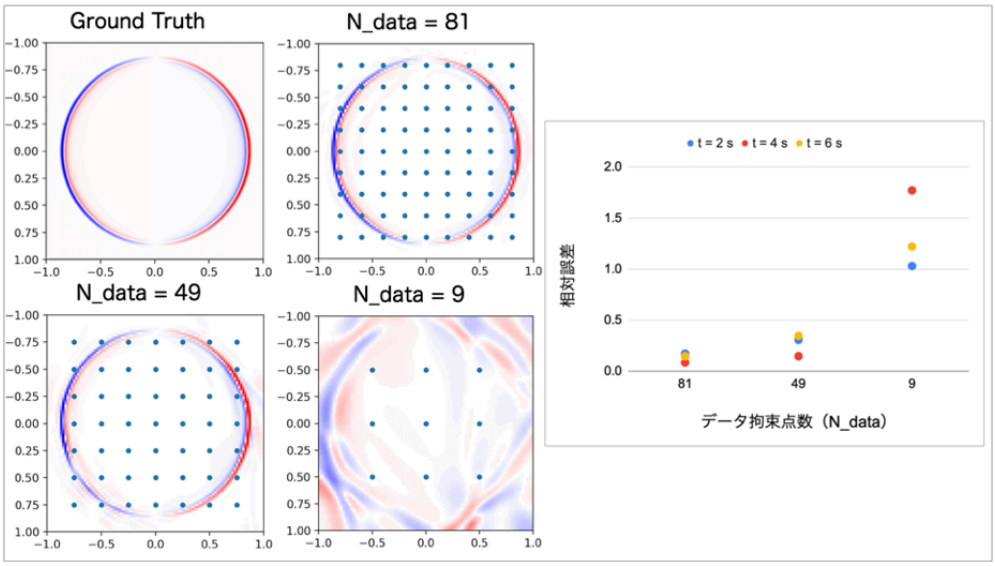


図2：（左）データ拘束点数を変えた場合の，$t = 6$ s での V_x のスナップショット（青点はデータ拘束点）．（右）相対誤差の変化．なお，音波の卓越波長は 1.5 km であるのに対して，データ拘束点の平均間隔は N_data = 81, 49, 9 のときそれぞれ 4.4 km, 5.7 km, 13.3 kmである．

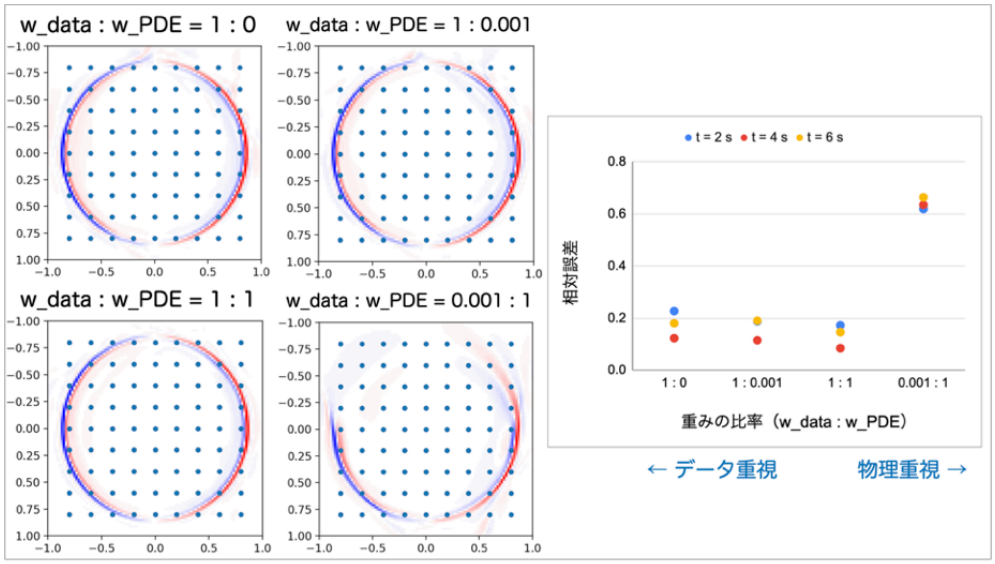


図3：（左）w_{data} と w_{PDE} の比率を変えた場合の，$t = 6$ s での V_x のスナップショット．（右）相対誤差の変化．

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of Analysis Techniques for Scattering Attenuation Structure Estimates in Small Spatial Region

*Koyo Matsuda[1], Nana Yoshimitsu[1], Takuto Maeda[2], Yohei Yukutake[3]

1. Kyoto University, 2. Hirosaki University, 3. Univ. of Tokyo, ERI

ー導入ー
地熱発電には高温の流体を含む亀裂の集合体である地熱貯留層の探査が必要である．地震波散乱波の解析による亀裂を含む不均質構造の推定は，低コストで実施可能な探査法として期待できる．これまでの散乱波解析は大きな空間スケールで行われた例が殆どであり（Hoshiba et al., 1993; Carcole and Sato, 2010），地熱貯留層の探査に応用するためには同手法の小空間領域に対する適用可能性について慎重に検討する必要がある．そこで，本研究では解析法の改良を試みるため，火山地帯で発生した微小地震観測記録を用いて検証を行った．

ー手法ー
地震波の振幅は，散乱現象に起因する散乱減衰と媒質によるエネルギー吸収に起因する内部減衰によって時間的に減衰する．地震波形から不均質構造による散乱の効果を抽出するためには，全減衰から散乱減衰のみを分離する必要がある．本研究では，散乱減衰と内部減衰を分離推定する手法として，Multiple Lapse Time Window 法（以下MLTW法; Fehler et al., 1992）を採用した．この方法では地震波の直達波からの経過時間によって内部減衰と散乱減衰の影響が互いに異なることを踏まえ，観測された地震波形記録を，直達波を含む部分と後続波を含む部分，およびその中間部分の3つのタイムウィンドウに分割して各ウィンドウの平均エネルギーを観測量とする．観測値と理論値とを各ウィンドウで同時に比較することで，散乱減衰と内部減衰とを分離推定することができる．我々は理論モデルとして，輻射伝達理論に基づく近似解析解（Paasschens, 1997）を用いた．
広い領域を解析対象とする場合，震源距離が長く規模の大きい地震は振幅が減衰するまでに数十秒かかることから，Hoshiba et al.（1993）が震源距離120 km以下の地震に対して用いた15 秒のウィンドウ幅が適用されることが多い．本解析で扱う震源距離が20 km以下と短く規模も小さい波形データは，5秒から15秒程度でノイズレベルに減衰してしまうため，より短い窓幅を適切に設ける必要がある．今回は
1.0秒，1.5秒，2.0秒，3.0秒，4.0秒の5種類の窓幅を検討した．

ーデーターー
解析には，神奈川県温泉地学研究所によって観測された箱根火山周辺の微小地震を利用した．同地域では2015年の4月下旬から11月にかけて特に活発な地震活動が観測されており，期間内のマグニチュード-1.7から3.4の微小地震，計4373イベントを用いた．震源はYukutake et al.（2017）によって高精度再決定されている．イベントは全てが箱根カルデラの内部に位置しており，深さは約5 km以浅である．使用した15点の観測点はカルデラ内外に広く分布しており，サンプリング周波数は100 Hzまたは200 Hzである．これらのデータの震源距離は約1 km-20 kmであった．解析には，2 Hz-4 Hz, 4 Hz-8 Hz, 8 Hz-16 Hz, 16 Hz-32 Hzのフィルターをかけた3成分速度波形の2乗合成エンベロープを用いた．全波形データから解析窓内で複数のイベントが重複している記録を目視で除外した上で，SN比が2以上であるデータのみを抽出した．

ー結果と考察ー
既往研究では，解析から得られる震源距離とエネルギーの関係において，直達波を含む第一ウィンドウだけが他のウィンドウに比べて大きなエネルギーを持つとともに，第二・第三ウィンドウとは距離に対する異なる変化が見られた．二つの減衰がよく分離できている場合，内部減衰が第一ウィンドウのみに，散乱減衰が全ウィンドウに影響を及ぼすことからこのような振る舞いを見せる．本研究の解析結果では，震源距離の変化に対して第二・第三ウィンドウのエネルギーは既往研究と同様の傾向を示した．その一方で，第一ウィンドウも第二・第三ウィンドウとよく似た分布を示し，解析窓による明瞭な違いは見られなかった．また，周波数によ

© The Seismological Society of Japan

る大きな傾向の違いは見られなかったが，2 Hz-4 Hzの低周波数帯域では，第一ウィンドウの距離に対する変化が他のウィンドウと僅かに違う様子が確認された．5種類のウィンドウ幅を検討したが，傾向の違いは明瞭ではなかった．この結果から，解析ウィンドウを短くしただけでは散乱減衰と内部減衰の効果を十分に分離しきれていないことが示唆された．
一方，この解析を通じて特定の震源距離にエネルギーの大きい特徴的なデータが見出された．これは特定の領域にある震源群から放射された地震波が局所的な減衰構造の異常から受けた影響を反映している可能性を示唆しており，MLTW法が地震波エンベロープの時空間的特徴を検出する手法となり得ると考える．減衰の分離性能や減衰パラメータの空間割り当てに関して更なる検討を重ねていく必要があるが，地熱貯留層探査に対する散乱波解析の有効性が見込まれる結果となった．

謝辞: 神奈川県温泉地学研究所よりデータのご提供を頂きました．感謝申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

Energy partitioning into strain components in diffuse wave fields (2)

*Hisashi NAKAHARA[1], Kentaro Emoto[2]

1. Tohoku University, 2. Kyushu University

はじめに　無限媒質において震源から輻射された実体波は，媒質の不均質構造によりP波とS波の変換散乱を繰り返し，充分時間が経過した後にはエネルギー等分配状態に達することが予測される．この時，P波とS波のエネルギー比が初期状態によらず一定値になること（例えばWeaver, 1982）や変位3成分へのエネルギー分配も一定値となることが予測される (たとえばSanchez-Sesma and Campillo, 2006) ．近年，分散型音響計測（DAS）により歪地震動の計測が行われるようになってきた．そこで著者らは，DASの歪記録を理解するための基礎研究の一つとして，歪の各成分へのエネルギー分配について検討をはじめている．中原（2023，連合大会）は，2次元無限媒質中における歪各成分のエネルギー分配を考え，各成分にそれぞれ異なるエネルギーが分配されることを明らかにした．その続きとして，本研究では3次元無限媒質における歪各成分へのエネルギー分配について検討した．

原理　Nakahara and Haney (2022, GJI)は，波動場が等方かつエネルギー等分配状態にある場合，2観測点間の歪成分間のクロススペクトルとグリーン関数との関係を理論的に明らかにした．特に，震源と観測点が同じ場合，歪テンソルの(*i, k*)成分であるe_{ik}のエネルギースペクトルは，モーメントテンソルM_{ik}とM_{ki}成分に対するe_{ik}のグリーン関数の和に比例する．また，歪テンソルの(*i, i*)成分e_{ii}と(*k, k*)成分e_{kk} とのクロススペクトルは，モーメントテンソルM_{kk}成分に対するe_{ii}のグリーン関数に比例する．これらの関係式で，グリーン関数として3次元無限均質媒質中のものを用いると，歪テンソルの各成分のエネルギースペクトルを具体的に計算することができる．

結果　デカルト座標系で，観測点**r**におけるx方向の軸歪のエネルギースペクトルは

$$\langle |e_{xx}(\mathbf{r},w;\mathbf{r})|^2 \rangle \propto 3/V_p^2 (w/Vp)^3 + 2/V_s^2 (w/Vs)^3 \quad (1)$$

となる．ここで，Vp, VsはP波速度，S波速度，wは角周波数である．また，等方的な波動場を仮定しているので，y軸方向，z軸方向の軸歪も同じ値をとる．一方，せん断歪e_{xy}のエネルギースペクトルは

$$\langle |e_{xy}(\mathbf{r},w;\mathbf{r})|^2 \rangle \propto 1/V_p^2 (w/Vp)^3 + 3/(2V_s^2)(w/Vs)^3 \quad (2)$$

である．以上より，例えばポアッソン媒質の場合，せん断歪のエネルギーは軸歪のエネルギーの約0.713倍となることがわかる．これは2次元無限一様媒質の結果である約0.833倍（中原，2023）と比べると少し小さい．

結論 ３次元無限一様媒質における歪各成分へのエネルギー分配について定式化を行った．その結果，せん断歪へのエネルギー分配は，軸歪に比べて約0.713倍であることが分かった．今回の原理では，エネルギー等分配が期待される充分に時間が経過した後の状態のことしかわからない．今後，差分法に基づくランダム媒質中の波動伝播の数値計算により，この状態への遷移が時間的にどのように行われるのかについて検討することが必要である．

© The Seismological Society of Japan

Fluctuation of the strain waveform due to the small-scale heterogeneity

*Kentaro EMOTO[1], Satoru HAMANAKA[1]

1. Kyushu University

地震波は地下の短波長不均質構造による散乱により複雑な波形として観測される。この短波長不均質は背景構造に重畳するランダムなゆらぎとしてモデル化される。そのため、背景構造が一様であり、震源距離が同じであっても、場所が異なれば波形も異なる。本講演では、そのような短波長不均質のパターンのみが異なる場合での波形をアンサンブルとして、その統計的な性質について考察する。波形はコヒーレント成分とインコヒーレント成分に分けることができ、コヒーレント成分は、波形のアンサンブル平均として求めることができる。コヒーレント成分の二乗のアンサンブル平均であるコヒーレント強度と、元の波形を二乗したもののアンサンブル平均である全強度との比は、伝播距離とともに指数関数的に減少する。そのときの係数を1/2したものが散乱係数（散乱平均自由行程の逆数）である（Shapiro & Kneib, 1993）。ここで、比を用いることで、内部減衰の影響は除去され、散乱減衰のみの影響を取り出すことができることが特徴である。この考えを、地震計アレイで記録した遠地地震（Ritter et al., 1998）や、雑微動の干渉波形（Chaput et al., 2015）に適用して、短波長不均質構造が推定されてきた。近年普及してきた光ファイバーケーブルを利用したDAS（Distributed Acoustic Sensing）観測では，歪や歪速度が出力される。等間隔で稠密な記録であるため、上述の手法を適用しやすい状況であるものの、歪波形の散乱減衰と媒質パラメータの関係がまだ確立されていない。歪は変位の空間微分であり、微細不均質に敏感であり、散乱の影響を強く受けると考えられる。

本講演では、2次元（x-z平面）での地震波伝播シミュレーションを行うことで、数値的に歪波形のばらつき（コヒーレント成分の減衰）を調べる。ランダムゆらぎをもつ短波長不均質媒質に対し、z方向に伝播する平面P波が入射する状況を考える。ランダムなゆらぎは指数関数型自己相関関数で特徴づけられるとし、特徴的スケールを2, 5, 10 km、ゆらぎのRMSを2, 5 %と変えて計算を行う。入射する平面波は、中心周波数が1.5, 3.0 Hzの２パターンを用いる。伝播距離2 kmおきにx方向にずらした観測点を9個ずつ配置し、速度と歪速度を記録した。各伝播距離においてコヒーレント強度と全強度との比を計算し、これを伝播距離の関数として指数関数で最小二乗フィッティングし、その係数を推定した。

いずれの媒質・周波数においても、比は伝播距離と共に1から減少する傾向にあった。速度波形から推定した散乱平均自由行程は、中心周波数1.5 Hz, 特徴的スケール2 km, ゆらぎのRMSが2 %のときが350 kmと一番大きく、中心周波数3 Hz, 特徴的スケール10 km, ゆらぎのRMSが5 %のときが8 kmと一番小さく、これらの値は媒質から期待される理論値とほぼ一致した。一方、歪速度から計算したみかけの散乱係数は、いずれの場合においても、速度から計算したそれよりも約1.3倍大きく、散乱の影響が強く現れることが確認できた。この値は、1.5 Hzの場合の方が、3 Hzの場合より若干小さい値となったが、有意な差であるかどうかはさらなる解析が必要である。歪速度は速度の空間微分であるにもかかわらず、周波数にほぼ依存しないことは意外な結果であった。

今後は歪速度と速度で生じる差を説明する物理的な背景を考察する予定である。また、この手法を、日奈久断層に沿った国道3号線沿いで行ったDAS記録の雑微動相関関数に適用し、短波長不均質の空間分布を調べる予定である。

© The Seismological Society of Japan

Parallelization in Seismic Ray Tracing Programs

*Shutaro SEKINE[1]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction

はじめに

三次元の震源決定やトモグラフィの計算を行うにあたり，震源から観測点までの波線算する必要があるが，実行時間の多くは，大量の波線計算に費やされることが知られている． 計算機の進化に伴い，一つのCPUの速度が上がるだけでなく，CPU内にいくつものコアを持つことで，並列処理が行われるようになったのだが，トモグラフィ等のコードはその技術が成熟化する前に作成されて使われているため，その恩恵に預かっていないように思われる．そこで，最終的には，その問題を解決するために，まずはこの手法の問題点を洗い出す事が必要であると考えられる．そこで，本研究では，以前作成していたParameterized Shooting 法（以下Parashootとする）のコードに対して，OpenMPを用いて並列化の手法およびそのコーディングをした場合のパフォーマンスとコーディングに際して注意すべき点等について述べる事とする．

解析手法

ParashootのコードをOpenMP で並列化するためにPlagma を入れ込んだコードを作成した．このようにPlagmaで分岐するコードは，OpenMP のライブラリをコンパイル時に入れなければ，並列化にならないコードとなる為，並列化の有無によるコードの比較がしやすい事が特徴である．

結果

DellのOptiplex 9020 (Intel Core7) で計算を行った．このマシンは第４世代のCore７であり，コアは８個ある．今回は，震源９個から，観測点1611点に向けての計算を行った．コア8個を使った計算では，CPU使用率が650%になった．OpenMPでは，使用するコア数を指定できるため，使用するコア数を陽に指定して計算を行ったところ，今回の場合にはコア4個での分割計算でのパフォーマンスを境にして，システムのオーバーヘッドが大きくなる現象が発生した．また，計算結果は，1個の時はシーケンシャルに出力されるが，計算の順序で出力される為，結果を確認する際には，ひと工夫が必要になりそうである．

まとめと今後

震源計算やトモグラフィのコードにおいては，波線計算及び波線上の偏微分係数の計算においては，行列計算を行う前に，一度行列を整理する工程が入っているため，波線1本ごとにおける計算が正しければ，それほど問題にはなりそうもない．システム上で多少のオーバーヘッドがあっても，分割されていた方が早いので，今後は震源計算やトモグラフィのコードに適応する事を考えていく．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S02. Seismometry and monitoring system

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P12 (F203) Hall Annex

[S02P] PM-P

[S02P-01] An attempt to efficiently process low-quality and large-volume seismic reflection data - case of Aizubange -

*Shinobu ITO[1], Sawako KINOSHITA[1] (1. GSJ, AIST)

[S02P-02] Working report of the definition for WIN waveform data transmission protocol

*Makoto OKUBO[1] (1. Unit of Science and Technology, Kochi Univ.)

[S02P-03] A study of earthquake detection capacity of DONET

*Kazuyoshi NANJO[1,2,3,4], Yojiro Yamamoto[4], Keisuke Ariyoshi[4], Hiroki Horikawa[4], Shuichiro Yada[4], Narumi Takahashi[5,4] (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. The Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S02P-04] Observation of P-wave polarity with DAS recordings along Route 9

*Yuki Funabiki[1], Masatoshi Miyazawa[1] (1. Kyoto University)

[S02P-05] Broadband seismic campaign for the deep very low frequency earthquakes in the southwest Japan

*Akiko TAKEO[1], Koji MIYAKAWA[1], Taro NISHIMOTO[1], Miwako ANDO[1], Ayaka SAIKI[1], Shinichi TANAKA[1], Hironori OTSUKA[2], Chikaaki FUJITA[1], Miki HAMAMOTO[3], Ritsuya SHIBATA[4], Shota KATO[1], Shinya KATOH[1], Koki MASUDA[5], Masayuki KANO[6], Shunsuke TAKEMURA[1], Kazushige OBARA[1] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kobe Ocean-Bottom Exploration Center, Kobe University , 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 5. School of Science, the University of Tokyo, 6. Graduate School of Science, Tohoku University)

[S02P-06] Development of Tsunami Evacuation Training System

*Masahiro OOI[1], Toshiyasu SHIMIZU[2], Mitsutsugu IGARASHI[3], Narumi TAKAHASHI[1], Shoichi SHIOZAKI[3], Takahiro HANDA[2], Kazumi ASAO[1] (1. NIED, 2. Toppan Inc., 3. Chiba Pref.)

[S02P-07] Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveform data (2)

*Yojiro YAMAMOTO[1], Hiroki Horikawa[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Keisuke Ariyoshi[1], Kentaro Sueki[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[2] (1. JAMSTEC, 2. NIED)

[S02P-08] Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (3)

*Tadashi YAMASHINA[1], Makoto OKUBO[1], Takao TABEI[1] (1. Kochi University)

An attempt to efficiently process low-quality and large-volume seismic reflection data - case of Aizubange -

*Shinobu ITO[1], Sawako KINOSHITA[1]

1. GSJ, AIST

近年，地震探査システムの高性能化や記録メディアの高容量化等にともなって，取得されるデータ量が増大している．反射法地震探査のデータ処理は対話的に実施されるため，データ量に比例して処理に時間がかかるのが一般的である．通常は，処理能力を考慮して探査を計画するものであるが，様々な事情により処理能力を超えるデータ量を取得するような調査を実施せざるを得ないケースもある．結果として，優先度の低いデータが十分に処理されず放置されることになる．主として社会的要請の低いデータや品質に問題のあるデータの優先度が低くなる．
一方，反射法データ処理は，近年の計算機処理能力の向上やAIの普及等により，各過程での自動化が進められている．一部の商用処理システムの処理例を見ると，オペレーターが対話的に処理した結果と比較して遜色のない，非常に良好な結果を得られているようである．このような自動処理システムを用いて未処理データの処理を進めることが期待される．しかしながら，上述したように未処理となっているデータは品質に問題のあることが多く，必ずしも良好に自動処理が実施できるとは限らない．我々は2017年10月に福島県会津坂下町で実施した反射法地震探査のデータ（伊藤ほか，2018a）について，自動処理の適用を試みた（Fig. 1.）．
会津坂下町での探査では，測線長約4.8kmに対し，発震・受振点間隔は2mとし，総発震・受振点数は2400点にも及ぶ．このため，各点での発震は3回にとどめざるを得なかった．また，事前に情報を得ていたコメの収穫時期が実際と異なっていたため，大型農業機械の発するノイズの影響を受けた．さらに，探査の時間を節約するために衝撃型震源を用いたため，ノイズの影響を低減させることができなかった．一応の処理は実施したものの，期待した結果を得ることはできなかった（伊藤ほか，2018b）．
我々の使用している処理システムには，AIを利用した初動ピックの評価・再検測ソフトウェアおよび自動速度解析ソフトウェアが実装されている．これらのソフトウェアを利用して処理を実施した．
再検測ソフトウェアは，2種類のアルゴリズムで再検測を行う．ひとつは，良好なピックを教師データとして学習し，それ以外のデータに適用するものである．もうひとつは，良好なピックからすべての発震・受振点の組み合わせの残差を最小にするもので，オペレーターが発震点ギャザーと受振点ギャザーを確認しながら齟齬がないように検測することを計算機に任せることに相当する．これらの再検測を繰り返し実施することにより，ピックを収束させる．これらの再検測を有効に作用させるためには，ある程度良好な初期ピックを用意すること，可能な限りノイズ低減処理を実施しておくことが重要であった．これには一定程度の手間がかかるものの，すべてを手動で検測することと比較すると大幅に手数を省略することができた．
速度解析ソフトウェアはほぼブラックボックスである．オペレーターが対話的に実施する速度解析では多くのパネルを用い，先験的な情報も考慮しながら速度モデルを構築する．しかしながら，ソフトウェアは先験的な情報を利用することはなく与えられたデータのみから速度モデルを構築するため，不自然と思われるようなモデルであっても棄却しない．その結果，空間的に相の連続性は著しく向上するが，現実ではあり得ないような複雑なモデルを構築することもある（Fig. 1.）．このようなことは，速度モデルの格子点の設定を調整することで回避することができるかもしれない．あるいはソフトウェアが構築したモデルを対話的に調整することも可能であろう．そのような手間を加えたとしてもソフトウェアの利用には大きな優位性があると考えられる．

文献
伊藤忍・木下佐和子・山口和雄・内田洋平・石原武志（2018 a） 福島県会津坂下町における反射法地震探査，日本地球惑星科学連合2018年大会 講演予稿集 SSS11-P03
伊藤忍・木下佐和子・山口和夫・内田洋平・石原武志・竜沢篤ノ助（2018 b） 反射法地震探査による会津盆地の地下構造，日本地震学会2018年度秋季大会 講演予稿集 S06-P02

© The Seismological Society of Japan

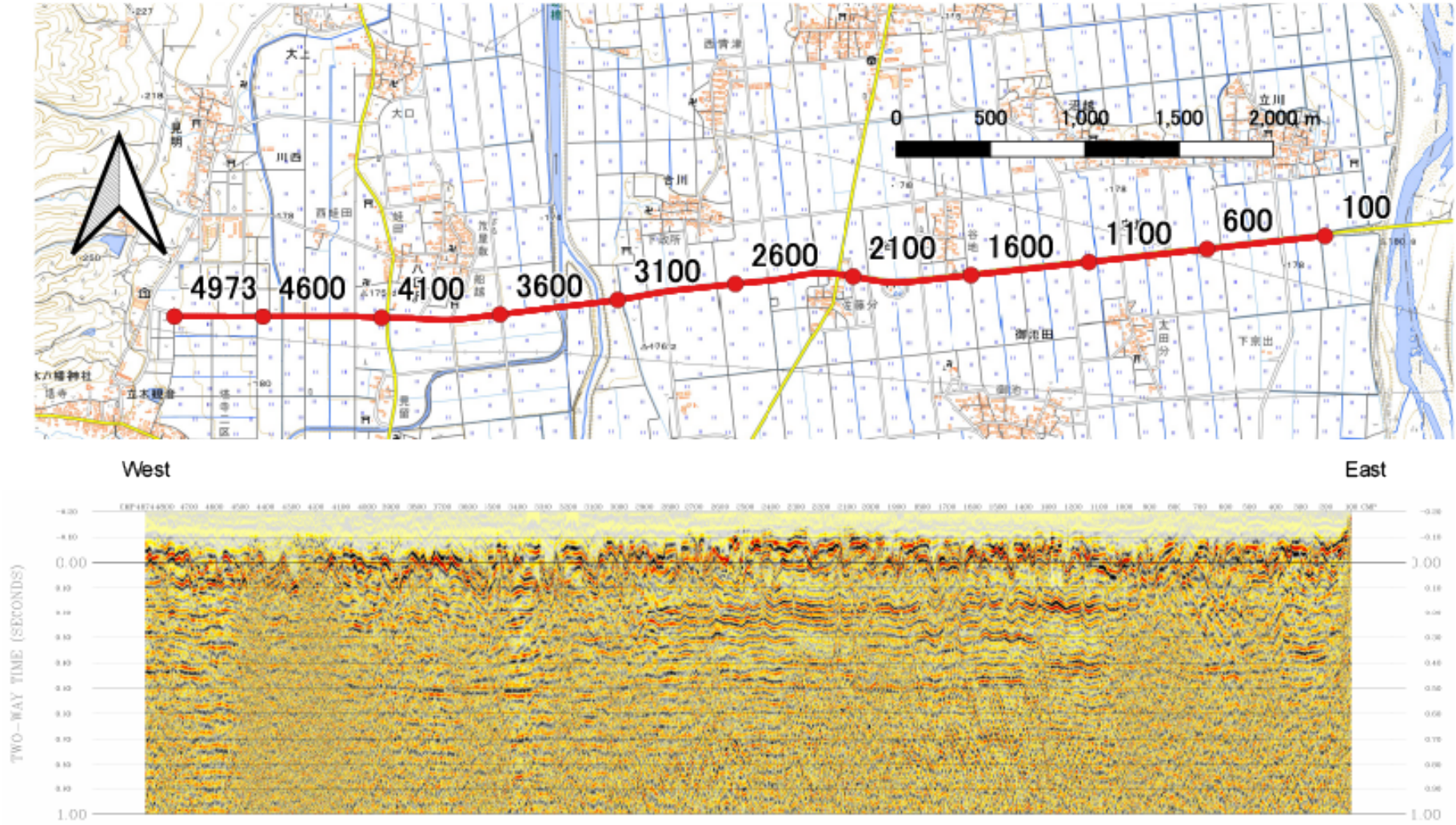


Fig. 1. CMP locations projected onto the basemap published by GSI (top) and a time profile produced by automatic velocity analysis (bottom). CMP interval is 1 m, left end of the profile is CMP 4973 and right end is CMP 100. Therefore, length of the CMP line is 4873 m. Plotted trace duration is 1200 ms. The survey was conducted at Aizubange in Fukushima. Left of the profile is West and right is East.

© The Seismological Society of Japan

Working report of the definition for WIN waveform data transmission protocol

*Makoto OKUBO[1]

1. Unit of Science and Technology, Kochi Univ.

WINシステム（卜部・束田，1992）は日本側からの供与を除けば，日本国内のみで用いられる地震波形・伝送・収録・解析ツールである．WINシステム群中でもデータ伝送部分は、日本国内の大学・研究機関で行われている地震動観測のほとんど全てのデータ流通をになっている，基幹システムといっても良い．しかしながら、その伝送プロトコルの設計は古く，非常に脆弱（波形データフォーマットにパケット整理番号を付与し，無手順でデータをブロードキャスト）である．ただし，簡易なプロトコルのおかげもあり，送信システムは簡略化でき観測機器に実装しやすく，導入の容易な受信システムはWINデータが流通しているネットワーク（SINETやJGNを利用したクローズドなネットワークであるが，）に接続すれば日本国内の誰でも波形データを利用できる環境をもたらしている．一方，国際的なデータ流通やデータ利用を考えれば，国外から，国外へのデータ流通の大きな足枷である．先ごろ行われたIUGG2023でも，SEEDフォーマットを利用する解析システム（SeisComp, Seisan, Episodeなど）のセッションが設けられ，システム更新・発展や活発な議論行われる一方，WINシステムは完全にガラパゴス化している状況である．このような足枷を少しでも打破すべく，現状のWINシステムの枠組みの範疇で、地震波形データ以外のデータの流通も試みたが（大久保，2018，大竹，2019など），送受信を限定した，利用者の範囲内での改変に限られている．また，国際的には，地震波形データやGNSS時系列データは，サーバ＝クライアント型で大規模データストレージを集中的に運用し，利用者は結果のみを利用するSaaS(Software as a Service)が主流となっている．海外での共通システムのより良い部分を素早く取り入れるためにも、世界標準の取り組みも参考にしていく必要がある。
我々は東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会の進める建議、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の一課題として，次期WIN伝送プロトコルの策定を試みた（KOC_02）．はじめに、現状のWIN伝送との互換性を担保しつつ、新たに策定するWIN波形データ伝送プロトコルを運用するためには，無手順のデータ伝送ではなく，きちんと決められた仕組み（プロトコル）に従い，伝送させるデータについての情報交換をはじめに行う仕組みが必要であることが判明した．このような伝送プロトコルを運用すれば，さまざまな伝送データに対するプロトコル判定ののち，最終的にどの手順にも該当しない場合に現状のWINデータ伝送を試みるなど，伝送システムの互換性を担保できるだけでなく，データフォーマットに依存しない伝送プラットフォームとしても動作しうる． 加えて，さまざまなデータの同時伝送に対応するためにも，伝送プロトコルとして，VPN（仮想ネットワーク）を（単一／複数）構成する仕組みを組み込む．これにより，海外へ，海外からのデータ送受信も容易になり，複数のVPN経路の末端で異なる収録システム（データ伝送帯域，システム能力にも依存するが，）を利用することで，機密性の高いデータ流通にも対応する．これにより，現状クローズドなネットワークのみで運用されている伝送経路を拡張でき，クラウドストレージ・サーバでの運用等への対応や，データ利用の国際化，オープンデータ化が可能となる．
以上が，５年間の課題遂行の上で検討した次期WIN伝送プロトコルの概要である．発表では、現状の到達点，問題点について示し，WINデータ伝送に関わるもしくは，新たな伝送プラットフォームに関心がある方々の意見を聞き取り，プロトコル（最終）策定に向ける．

© The Seismological Society of Japan

A study of earthquake detection capacity of DONET

*Kazuyoshi NANJO[1,2,3,4], Yojiro Yamamoto[4], Keisuke Ariyoshi[4], Hiroki Horikawa[4], Shuichiro Yada[4], Narumi Takahashi[5,4]

1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. The Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

A reliable estimate of the magnitude of completeness, above which all events are assumed to be detected by a seismic network, is critical for many seismicity-related studies, because they evaluate the statistical properties of seismicity that strongly depend on correct completeness estimates. Here the PMC (Probability-based Magnitude of Completeness) method was adopted with a case analysis of the Nankai Trough. A seismicity catalog that includes events in the Nankai Trough observed by DONET (Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis) was created by JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology). Using seismicity data for 2015-2019, the spatiotemporal variability of the magnitude of completeness was found. The magnitude of completeness was lower than 1 in one of the areas where stations are densely deployed, whereas it was larger than 2 at the periphery and outside of the DONET area. Next, the temporal evolution of the magnitude of completeness was evaluated, highlighting how the failure of sets of observing stations influenced the magnitude of completeness if not repaired. Then, the possible use of PMC was explored as a tool with simulation computation of node malfunction, where stations are aggregated around the 12 nodes (hubs that connect the stations) and connected through the two oceanfloor backbone cables to JAMSTEC. A simulation showed that the magnitude of completeness in the area near failure nodes was about 1 magnitude larger. If such failure occurred for nodes near the region which straddles the rupture zones of the previous Tonankai and Nankai earthquakes in 1940's, it would most pronouncedly affect earthquake monitoring among nodes' failures. It is desirable to repair these nodes or replace with new ones when their malfunction occurs. Next, an example of how to use information on the magnitude of completeness as prior knowledge to seismicity-related studies was demonstrated. The *b* value of the Gutenberg-Richter frequency-magnitude distribution was computed, taking the magnitude of completeness into consideration. It was found that the spatial and temporal changes in *b* were strongly correlated to the magnitude-6 class slow slip that grew over two years on the Nankai Trough plate boundary. Based on this finding, the *b* value was interpreted as a proxy that can help to image stress heterogeneity when there is a slow slip event.

Acknowledgments: This study was partially supported by Chubu Electric Power’ s research based on selected proposals (K.Z.N., K.A., Y.Y., N.T.), the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan, under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program (K.Z.N.) and under the STAR-E (Seismology TowArd Research innovation with data of Earthquake) Program Grant Number JPJ010217 (K.Z.N.), and JSPS KAKENHI Grant Number 22K03766 (Y.Y.).

© The Seismological Society of Japan

Observation of P-wave polarity with DAS recordings along Route 9

*Yuki Funabiki[1], Masatoshi Miyazawa[1]

1. Kyoto University

1. はじめに
光ファイバーを分布型ひずみセンサーとするセンシング技術、通称DAS(Distributed Acoustic Sensing)が、地震学における観測技術として近年急速に広まっている。DASとは光ファイーバーケーブル内を伝播するレーザー光の後方散乱の位相を測定し、地震波動場によってケーブルに引き起こされる軸ひずみを計測する新技術であり、近年地震観測にも応用され始めている。DASにおいては、ケーブル自体が地震計として機能し、ケーブル沿いの任意の区間を地震計と同等に扱える。このために、地震計をおよそ数km~数十kmおきに一点ずつ設置する必要はなく、超高密度に地震波動場を捉えることが可能になっている。
このDASの非常に高い空間分解能を生かし、様々な地震学的研究が進められている。Li et al., 2021では、標準的なカタログの６倍の余震を検出した。Nishimura et al., 2021では火山性地震の震源位置を決定した。Fukushima et al., 2022では地震波干渉法をDAS記録に適用し、三陸沖のVs構造とVp/Vs構造を推定した。
また、DASを用いて震源メカニズムを推定する研究も試みられている。初動発信機構解を得るためにはP波初動極性を求める必要があり、従って、初動P波極性の読み取りが震源メカニズムの研究には必要である。Li et al., 2023では、隣り合うDAS観測点同士の相互相関を取り、その正負をもって相対極性を判断し、これを繋ぎ合わせることで、全てのチャンネルでの一貫した極性を導き出し、全体の正負の補正を光ファイバーケーブルの近くの地震計の上下成分記録極性ピックにより行った。
DASを用いて震源メカニズムの研究を行うにあたって、いくつかの問題がある。第一のネックは、DASにおける実体波のS/N比の悪さにある。既に敷設されている光ファイバーケーブルを用いる場合、DAS記録は周囲のノイズの影響を受けやすくなる。特に、例えば日本の旧一級国道の場合は交通ノイズが大きい。第二に、光ファイバーケーブルのジオメトリの複雑さにある。特に地上から光ファイバーが見えない場合、その経路を直接は確認できず、そのため、それぞれのDAS観測点の位置がおおまかにしか特定できない。第三に、DASが見ているのがレーザー光の後方散乱の位相差だという点にある。位相変化を見るので、$-\pi$からπの変化しか分からず、従って光の波長以上の長さの変位が生じると、サイクルスキップが発生してしまう。このために、DASで大きな信号を読み取ることが困難となっている。
今回、我々はこれまでに比べ高い時空間サンプリング間隔でDAS記録を取ることで、目視で確認できる程度のP波の波形を得た。以下ではその手法及び結果について記す。
2. 手法
今回我々が使用した光ファイバーケーブルは国道9号沿いに設置されており、国土交通省京都事務所から京丹波町役場前までの約50000ｍの長さに及ぶ。これを用いて、京都府南部の地殻内にて2022年10月19日の11:00と11:02にそれぞれ発生したM3.2とM3.4の地震を観測した。なお、我々が今回使用したDAS記録はゲージ長、空間サンプリング間隔ともに約5m、時間サンプリング間隔500Hzと、いずれもこれまでの地震観測に用いられてきたDAS記録に比べて短く、サイクルスキップ（本研究の場合、±約30$\mu\varepsilon$/secを超えるとサイクルスキップが発生する）が起きにくい。
前処理について。P波が到達した時刻を含む2秒間における連続波形から地震波を取り出すため、0.5~8Hzの範囲でバターワースフィルタをかけた。そして、波形のS/N比を上げるため、隣り合う10の観測チャネル同士で波形をスタックした。この際に、ノイズが多いチャネルの影響を排除するため、地震発生前の各チャネルのノイズを計測し、その絶対量がある一定の値を超える観測チャネルに関しては、スタックから取り除いた。また、ジオメトリの複雑性を排除するため、今回観測した2つの地震の距離が近いことを踏まえ、隣り合うチャネルのうち、その波形の相互相関係数がM3.2とM3.4いずれの地震に対しても負の値を取るチャネルに関しては、P波初動の正負の入れ替わりではなくジオメトリによるものと考え、それらの観測チャネルを合わせる形でのスタックは行わなかった。

© The Seismological Society of Japan

3. 結果
そして、代表するいくつかのスタックされたチャネルにおいて、震源メカニズムにおける理論予測と観測波形に基づく極性を比較した。その結果、波形を目視で確認できる範囲では、理論予測と観測波形の極性の正負が概ね一致することを確認した。一方、P波の読み取りが難しい信号も一定数存在したが、これについては周囲のDAS記録とも照合した結果、車によるノイズが影響するものと思われる。
この結果は、S/Nが良い場合、DASの波形を直接観測することで震源メカニズムの推定が可能であることを示唆している。今後はスタックした全てのチャネルについて初動極性を確認したい。
謝辞 本測定に際し、京都国道事務所より光ファイバーケーブルをお借りしました。本研究はJSPS科研費JP21K18748の助成を受けたものです。

© The Seismological Society of Japan

Broadband seismic campaign for the deep very low frequency earthquakes in the southwest Japan

*Akiko TAKEO[1], Koji MIYAKAWA[1], Taro NISHIMOTO[1], Miwako ANDO[1], Ayaka SAIKI[1], Shinichi TANAKA[1], Hironori OTSUKA[2], Chikaaki FUJITA[1], Miki HAMAMOTO[3], Ritsuya SHIBATA[4], Shota KATO[1], Shinya KATOH[1], Koki MASUDA[5], Masayuki KANO[6], Shunsuke TAKEMURA[1], Kazushige OBARA[1]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kobe Ocean-Bottom Exploration Center, Kobe University , 3. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 4. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 5. School of Science, the University of Tokyo, 6. Graduate School of Science, Tohoku University

西南日本では、多種多様なスロー地震現象が主に定常的な観測網によって発見されてきた。例えば、深さ35km程度で発生する深部超低周波地震についてはF-net広帯域地震観測網やHi-netに付随する高感度加速度計の水平動2成分が大きな役割を果たしてきた。観測点間隔はそれぞれ50kmと20km程度である。しかしながら、深部超低周波地震の微弱なシグナルをより広帯域に捉えてスロー地震の周波数特性を明らかにするためには、震源直上近傍での広帯域地震計3成分、特にノイズレベルが低い傾向にある上下動成分による稠密な地震観測観測が必要である。そこで、本研究では西南日本の合計20点において広帯域地震計を用いた観測を行ってきた。使用した地震計はNanometrics社のTrillium 120PA/QAやTrillium Horizon、もしくはGuralp社のCMG-3Tである。どの観測点においても温度変化や風の影響を避けるために深さ1–1.5m程度の底に地震計を設置している。

2015年および2017年に四国西部と九州において開始した観測は、豊後水道(Bungo Channel)の頭文字を取ってBCシリーズと呼んでいる。合計6観測点において直径1m程度のマンホールを地中に設置し地震計を設置した。記録はWIN形式、商用原電を引き込み、データをリアルタイムに東京大学地震研究所の受信サーバーに送信している。一部有線を用いていたが現在は全てモバイル化している。

2019年から2020年にかけて四国西部・紀伊・東海地方に設置した合計14観測点の観測はBroadband Campaign for Deep Extent of Nankai Slow Earthquakeの頭文字を取ってBC-DENSE観測と呼んでいる。BC-DENSEは2年程度の臨時観測を想定し、地震計を蓋つき塩ビ管で覆った後に周囲を土で埋め戻す形をとった。BCシリーズとは異なり、記録はSTEIM2形式、ソーラーパネルで電源を供給し、モバイルでデータを送信している。受信サーバーはレンタルサーバーに独自に構築している。

この2つの観測網を既存観測網と合わせることで局所的には5–10km間隔の観測網を実現した。データの質に関して地中設置の効果は高く、特に上下動成分の周期20-50秒において定常観測網F-netと遜色のない記録が取れている。予備的な解析では、西南日本全体で年間約400の超低周波地震を検出することができている。一部観測点においては周期50–100秒においてもF-netと同等の記録が取れており、スロー地震の周波数特性解明が期待される。

一方で、長期間の観測では様々な問題も発生している。例えば、地中の電力ノイズを拾ってしまったケースでは、アースの設置に工夫を行った。Trillium 120PA/QAについてはコネクタの浸水対策に試行錯誤が必要であった。CMG-3Tについては故障が相次ぎ、地震計交換を合計9回行った。モバイル電波の強度が不十分なためアンテナ交換を行った観測点や、GPSアンテナの接合部が故障し交換した観測点もある。このような経緯をふまえ、3観測点については2021年に撤収し、現在は17観測点を維持している。

得られたデータについては公開準備を進めているところである。1観測点ではGPSの不調により時刻ズレが生

© The Seismological Society of Japan

じたため地震波干渉法を利用して時刻補正を行なった。また、地震計交換によって機器特性が変わるため、SEED形式のレスポンスファイルを作成した。今後は時刻補正を適用した上で、オリジナルと同じ100Hzサンプリングの記録と1Hzサンプリングの記録を用意し、東京大学地震研究所の海半球プロジェクトデータセンターにて公開予定である。

© The Seismological Society of Japan

Development of Tsunami Evacuation Training System

*Masahiro OOI[1], Toshiyasu SHIMIZU[2], Mitsutsugu IGARASHI[3], Narumi TAKAHASHI[1], Shoichi SHIOZAKI[3], Takahiro HANDA[2], Kazumi ASAO[1]

1. NIED, 2. Toppan Inc., 3. Chiba Pref.

1．はじめに

国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下、防災科研）と凸版印刷株式会社（以下、凸版印刷）は、令和2年度から令和4年度に「全天周実写画像を用いた津波避難訓練システムに関する研究」を実施した。

津波が発生した際、どのように津波が居住エリアに浸水してくるのかなど、住民一人ひとりが日頃から浸水リスクを理解した上で、避難行動を自分事として考える必要がある。しかし、国や自治体が作成する津波ハザードマップは、2次元の津波浸水予測図として提供されているため、自分の生活圏内において何が起こるのか、理解しづらいのが現状である。

千葉県は、日本海溝海底地震津波観測網（以下、S-net）による津波浸水予測システムを構築し、現在運用している（高橋他、2022年度日本地震学会秋季大会）。このシステムは、S-netが津波を観測すると、その津波高の空間分布に従い、各予測対象地点の津波到達時刻、津波高、浸水深分布図を即時的に示すものである。

津波浸水予測システムの津波浸水シミュレーションを津波避難訓練で活用するため、津波避難訓練システムは、3Dデジタルマップと住民目線での全天周実写画像（360度画像）に対して、刻一刻と変化する津波浸水シミュレーションを重ね合わせることで、自宅から避難所に至る経路の津波浸水を体験することができる。

2．津波避難訓練システムと津波体験VR

国や自治体では、建物や地形の高さがわかる3Dデジタルマップを活用し、津波発生時の浸水予測や住民の避難誘導などに役立てることが期待されている。そこで本研究では、NTTデータ（RESTEC）のAW3Dを用いて、JAGURSで計算された10mメッシュの津波浸水シミュレーションをデジタルツイン上に可視化するとともに、AW3Dの3DデジタルマップとGoogle Street Viewの画像を重ね合わせることにより、全天周実写画像上で津波浸水の可視化ができる津波避難訓練システムを開発した。

津波避難訓練システムは、パソコンやスマートフォンのWebブラウザを用いて、避難経路の危険個所等の情報が共有できる機能も実装されており、実践的な津波避難訓練や防災教育に活用することができる。また、津波避難訓練システムは、住民の生活圏内における津波浸水予測を2次元の地図上で俯瞰し、住民目線の全天周実写画像上で確認できるため、一人ひとりの津波避難計画の検討に役立てることができ、下記の4つの特徴を有している 。

（1）住民目線でGoogle Street Viewに津波浸水を可視化するビューア機能
（2）避難所までのルートと時間を地図上に可視化する避難シミュレーション機能
（3）地図上で危険箇所を共有するタグ付け機能
（4）地図上で住民の防災情報を整理する管理機能

千葉県では、津波発生時における県民の早期避難等の行動を促すため、津波体験VRの動画を作成し、YouTube「千葉県公式PRチャンネル」で公開している。津波体験VRの動画の作成は、防災科研と凸版印刷が協力しており、地震による津波の被害及び避難について、360度の視点で疑似体験することができる。千葉県民以外の方々にも、津波ハザードマップを自分事として理解するため、津波が迫る状況下での避難行動を津波体験VRで体験してほしい。

3．津波避難訓練での実証

津波発生時における住民の避難行動や情報伝達等の検証と県民の津波に対する意識の高揚を図るため、令和4年10月30日に勝浦市と千葉県の共催による津波避難訓練が実施された（五十嵐他、2023年度地球惑星科学連合大会）。勝浦市の実践的な津波避難訓練では、千葉県の地震被害予測システム（大井他、2022年度日本地震学会秋季大会）や津波浸水予測システムとともに、津波避難訓練システムの津波浸水映像は、市中の定点カメラ映像として津波浸水状況の把握等に活用された。

2011年東北地方太平洋沖地震による津波が発生してから12年が経過しており、外房地域の市町村では、津

© The Seismological Society of Japan

波を経験していない小学生や津波の記憶が薄れた中高生が多くなっている。市民向けの防災フェアでは、津波体験VRを市民に体験してもらうとともに、津波避難訓練システムで自宅周辺の津波浸水映像を確認してもらい、避難が遅れた場合は、住宅2階の高さまで津波が浸水することや、津波ハザードマップで確認できる浸水深を実際の町並みと重ねることにより、津波の恐ろしさを理解してもらった。

4．おわりに

本年度から新規に立ち上げた凸版印刷との共同研究では、Webブラウザ上で全天周実写画像に様々な災害シミュレーションを可視化できる「リアルハザードビューア」を開発するとともに、災害シミュレーションに基づいた実践的な防災訓練や防災教育、災害時の初動対応などに活用できるリアルハザードプラットフォームに関する研究を実施する予定である。

© The Seismological Society of Japan

Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveform data (2)

*Yojiro YAMAMOTO[1], Hiroki Horikawa[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Keisuke Ariyoshi[1], Kentaro Sueki[1], Takane Hori[1], Narumi Takahashi[2]

1. JAMSTEC, 2. NIED

南海トラフでは100-200年程度の間隔でM8級の海溝型巨大地震が繰り返し発生しており, 今後30年以内にM8~9程度の地震が発生する確率は南海トラフ全域で70~80%程度と非常に高い値が報告されている[1].
このような背景を踏まえ, 地震計・水圧計を海底に直接設置し,リアルタイムで地震・津波データを観測することを目的とし, 地震・津波観測監視システムDONET(Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)の構築が進められた．2011年より熊野灘のDONET1が運用を開始[2], 2016年からは紀伊水道沖のDONET2が運用を開始した．現在は, 防災科学技術研究所が運用する陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）の一部として，合計51観測点において地震・津波データの観測が行われている. これらの観測データは, 地震・津波の早期検知や地殻活動のモニタリングと構造解明を目的とした理学的研究に利用されるとともに, 気象庁による緊急地震速報や津波警報の発令や地方自治体による津波即時予測においても利活用されている.
DONET観測点で得られた地震動波形の解析においては，正確な地震計方位の把握が重要である. しかし，地震計はROV (Remotely Operated Vehicle)によって深海に設置されるため，意図した方位に精度良く設置する事や, 設置後の方位をROV搭載カメラの映像を元に測定する事は,容易ではない.
この課題に対し, 中野ほかは2012年に, DONET1の20観測点の地震計に対して以下に示す3種類の方位推定を行い、波形を用いて推定された地震計の方位は，各推定におけるばらつきの範囲でよく一致していることが示された [3].
(1) 遠地地震の陸上観測記録との相互相関による方位推定
(2) 遠地地震のP波初動の振動方向を用いた方位推定
(3) エアガンによる振動波形を用いた方位推定
その後、中野ほかは2017年に(2)の手法に従ってDONET2まで含めた再解析を行った[4]．それ以降，海洋研究開発機構では，防災科学技術研究所からのDONET運用受託業務の一環として，中野・他（2017）と同様の手法を適用することで，継続的に方位推定を実施するとともに，学会報告を行ってきた [5,6,7].
昨年度の報告以降，2023年3月に観測点の再設置（MRF23）と埋設処置（MRG26）が実施された．本大会では、これら2点について海域作業後の方位推定を実施するとともに，他の観測点についても昨年度の報告以降のデータを追加し、更新された方位推定結果を報告する。さらに、推定方位の変動要因についても議論する予定である.

謝辞:本研究はDONET海中部装置の保守業務として実施しました. また, 解析には防災科学技術研究所のDONETデータを使用させていただきました. 観測網を維持, 管理されている皆様に感謝いたします.

[1] 地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 長期評価による地震発生確率値の更新について, 2022年1月13日
[2] 川口 勝義. 荒木 英一郎. 金田 義行, DONET-海底におけるリアルタイム長期連続モニタリング手法の確立, Journal of Advanced Marine Science and Technology Society. Vol 17. No.2. pp 125-135. 2011
[3] Masaru Nakano, Takashi Tonegawa, and Yoshiyuki Kaneda. Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveforms. JAMSTEC Rep. Res. Dev., Volume 15, September 2012, 77-89
[4] 中野 優・他, 地震動波形から推定したDONET2地震計の方位, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, STT59-P03
[5] 西山 岳洋・他, 地震動波形から推定したDONET地震計方位の精度向上, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS17-P02
[6] 矢田 修一郎・他, 地震動波形から推定したDONET地震計方位の精度向上, JpGU-AGU Joint Meeting 2021, SSS06-P01
[7] 有吉 慶介・他, 地震波形データを用いたDONET地震計の方位推定, 日本地震学会 2022 年度秋季 S02P-03

© The Seismological Society of Japan

Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (3)

*Tadashi YAMASHINA[1], Makoto OKUBO[1], Takao TABEI[1]

1. Kochi University

我々は、インドネシア、スマトラ島北部のスマトラ断層の断層面を推定するために断層近傍で得られた地震波形記録に地震波干渉法による地下構造推定法であるSITES法（Seismic Interferometry Tomography for the Estimation of tectonic Structure）（大久保, 2009）を適用し、断層面からの反射波と考えられる信号が抽出できることを報告している（Yamashina et al., 2019；山品・他, 2020, 2021）。解析に用いたSITES法は、地震波干渉法を実際の反射波の到来方向である受震点ー発震点方向について適用するために3成分の記録全てを用いるように発展させた解析手法であり、地震波反射面（例：断層、帯水層）の空間的な広がりを単独観測点での記録からも評価可能である利点を持つ。解析には、2011ー2015年にスマトラ島北端部Aceh州を中心にスマトラ断層のセグメントであるAceh、Seulimeumの両セグメント近傍で行われた臨時地震観測で得られた3成分連続速度記録を用いた。
既報の反射面については、スマトラ断層の位置や地下構造が明確でないこと、また適切な観測・解析条件の検討が十分になされておらず、結果の妥当性の評価に問題が残っていた。そこで、山品・他（2023）では、反射面（断層）や地下構造の情報が反射法地震探査や地質調査などからある程度得られている中央構造線断層帯近傍での観測記録に対し解析条件を変えてSITES法を適用し、観測や解析における制約条件を検討した。その結果、
・ 自己相関関数を計算する際のラグ（lag）による影響はあまり見られないことから，想定する対象までの距離に応じて設定すれば良い。すなわち、感度の許すかぎりの対象範囲設定が可能
・ 速度記録および加速度記録における差は見られない
・ 深夜帯や郊外、日祝日など都市型振動（人的活動）（例えば、相澤・他（2008））が大きくない場合、反射法などで明瞭はフェーズが見られるようなものが対象ならば、1時間以上の観測で示唆する結果が得られる可能性がある、
などが分かった。
今回、
（１）スマトラ断層近傍での観測記録に対して山品・他（2023）と同様の条件での解析を行うことで評価対象事例を増やし、その適切性を評価
（２） スマトラ断層Aceh、Seulimeumの両セグメントに対し、（１）をもとに改めてSITES法による断層面探索
を行ったので、本発表ではこれらの結果について示す。

謝辞：
本研究では、科研費JP24403005、JP17H04577によって得られたデータや成果を利用しました。

文献：
相澤隆生・他, 2008, 物理探査, 61, 121-132, doi:10.3124/segj.61.121
大久保慎人, 2009, JpGU 2019, S157-015
Yamashina, T. et al., 2019, AGU Fall 2019, S11D-0373
山品匡史・他, 2020, SSJ Fall 2020, S10P-12
山品匡史・他, 2021, SSJ Fall 2021, S16P-11
山品匡史・他, 2023, JpGU 2023, STT41-P04

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P13 (F203) Hall Annex

[S12P] PM-P

[S12P-01] A simple direct shear friction apparatus using a uniaxial compression tester

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

[S12P-02] Effect of internal fracture distribution on frequency dependence of elastic constants of granite

*Hideto Takatsu[1], Shin-ichi Uehara[1] (1. Toho University)

[S12P-03] High-velocity friction experiments for samples of various size: Scale effect in the critical slip rate for dynamic weakening

*Hiroyuki NODA[1], Kiyokazu Oohashi[2] (1. Kyoto Univ., 2. Yamaguchi Univ.)

[S12P-04] Effects of effective pressure on fault reactivation due to fluid injection

*Garam Kim[1], Manami Kitamura[2], Michiyo Sawai[1] (1. Chiba university, 2. GSJ, AIST)

A simple direct shear friction apparatus using a uniaxial compression tester

*Guohao Ma[1], Eiichi Fukuyama[1,2], Futoshi Yamashita[2], Kurama Okubo[2]

1. Kyoto University, 2. NIED

Introduction

Measurements of rock friction is crucial to evaluate the fault stability around the area conducted unconventional resources extraction such as shale oil and gas and enhanced geothermal system. The initiation of the slip on a fault does not always lead to an earthquake. Whether a fault slips seismically or aseismically depends on the characteristic of fault friction. That means that measuring fault friction parameters to evaluate fault stability could be widely demanded in the engineering field. Many types of friction machines have been proposed to conduct friction experiments, such as the double direct shear apparatus and rotary shear apparatus. However, the design of these apparatus is complex and not standardized so that it is not popular in engineering applications. Therefore, here, we would like to propose a simple, cost-effective and accurate friction apparatus to perform friction experiments with a commonly available uniaxial compression testing machine.

Experiment system

We used a uniaxial compression tester installed at Kyoto University (MTS 50t press with FlexiTest SE) as a part of loading system of the direct shear friction apparatus. The loading process of the rock is controlled by the function generator through the servo-controlled system of uniaxial tester. The shear stiffness of the apparatus is 7.89×10^{7}N/m. The center rock specimen (A) is a cuboid with a height of 8cm and a width of 2 cm. And the two outer rock specimens (B) are also cuboids whose height is 6 cm. The normal and shear stress on the sliding surface is measured by two loadcell (The measurement range is 50kN for normal load and 100kN for shear load). The outer specimens B are supported by the u-shaped metal pad to ensure the sufficient displacement to slide for the center rock A. During the experiments, the normal stress ranged from 2.4 MPa to 7.2 MPa, provided by four bolts that tighten a pair of fixed plates. At this moment, we used metagabbro rock from Tamil Nadu, south India for the experiments for the validation of the apparatus.

Some results and conclusion

We conducted velocity step change tests and slide hold slide tests to estimate the rate- and state-dependent friction parameters a, b and D_c of the metagabbro specimen. We used the Levenberg-Marquardt method to fit a nonlinear least-squares to experimental data(Skarbek and Savage, 2019, Geosphere).The a-b values are estimated between 1.3×10^{-3} and 12.7×10^{-3}. The characteristic slip distance Dc is estimated between 9.9 μm and 20.8 μm. The estimated a-b value is more or less consistent with that by previous studies using different apparatus but using the same rocks (e.g., Urata et al., 2017, PAGEOPH), suggesting that this simple apparatus provides reasonable friction values in spite of its simplicities. In summary, we constructed a compact friction apparatus using uniaxial compression tester and conducted two conventional friction experiments. We confirmed that our friction apparatus could be available for engineering purpose due to its efficiency in cost and accuracy.

© The Seismological Society of Japan

Effect of internal fracture distribution on frequency dependence of elastic constants of granite

*Hideto Takatsu[1], Shin-ichi Uehara[1]

1. Toho University

1. 背景・目的
岩石の弾性特性を知ることは、地下の構造形態を推定する地震波探査など様々な分野において重要である。そのような岩石の弾性特性は、室内実験の静的試験または音波測定（100 kHz –1 MHz）や地震波探査（0.1–10 Hz）から推定される。しかし、内部の空隙状態や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ことは容易ではない。とくに現時点では、地震波探査や自然地震の低周波帯(0.1-10 Hz)で行われた室内実験はあまり多くなく、大陸地殻の大部分を占めている花崗岩で行われた研究は少ない。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比からポアソン比の導出を行った。

2. 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(0.1, 1, 10 Hz)の弾性振動を与え、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・飽和状態でそれぞれ行った。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。測定の際には、試料の上にピエゾアクチュエーターを載せ、20 MPaの軸応力をかけ固定した。その後、ファンクションジェネレーターの電気信号をアンプで増幅させ、ピエゾアクチュエーターに電気信号（電圧600 V, 伸長範囲18 μm）を送り、試料の軸方向に低周波の弾性振動を与えた。測定したデータにはノイズが含まれているため、5波を1セットとした測定データを15回スタッキングすることによりS/N比の向上を試みた。スタッキングし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、周波数との相関を確認した。
AEセンサーを用いた透過法により、高周波（1 MHz）における弾性波速度測定を行った。試料の軸方面の弾性波透過特性を調べるために、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。

3. 結果・今後の展望
乾燥試料では弾性定数の周波数依存性は見られなかった。一方で、飽和試料では周波数とポアソン比には正の相関が見られた。飽和未加熱試料（間隙率 0.30%）のポアソン比は、周波数が0.1 Hzから10 Hzに増加するにつれて、0.327から0.341と増加し、飽和した550℃加熱試料（間隙率 1.45%）のポアソン比は、0.328から0.449と増加するという変化が確認できた。この増加量の違いは、低周波帯（0.1 –100 Hz）で有効に働く間隙水と岩石の相互作用に起因したメカニズム（Mavko & Jizba, 1991）が関係している可能性がある。また、乾燥試料には周波数依存性が見られず、飽和試料で周波数依存性が見られたという結果は、Tisato & Madonna (2012)の結果と矛盾しない。しかし、他文献に比べ花崗岩のポアソン比の値が高いため、その原因を解明することが課題である。今後は、三軸圧縮試験機を用いた封圧下での測定と、透過法の結果を加味した弾性定数の周波数依存性を調べる。また、除去できなかったAC電源由来と思われる50 Hzのノイズをローパスフィルターによって除去することを考えている。

© The Seismological Society of Japan

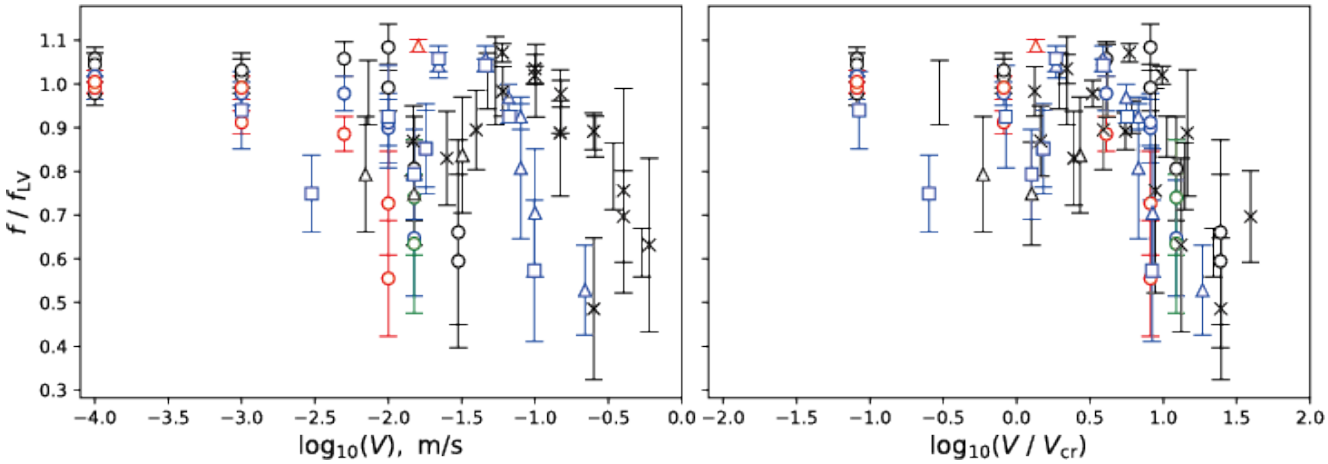
High-velocity friction experiments for samples of various size: Scale effect in the critical slip rate for dynamic weakening

*Hiroyuki NODA[1], Kiyokazu Oohashi[2]

1. Kyoto Univ., 2. Yamaguchi Univ.

There is a large difference in length scale between laboratory and natural large events. Then it is crucial to study the scale effect in friction and evaluate applicability of lab-experiments. It is known that friction decreases dramatically at coseismic slip rate due to frictional heating and various associated physico-chemical effects (e.g., Tsutsumi and Shimamoto, 1997 (TS97); Di Toro et al., 2011). High-velocity friction experiments for centimeter-scale samples showed the dynamic weakening at slip rates V of the order of 0.1 m/s. On the other hand, recent experiments by Yamashita et al. (2015) (Y+15) demonstrated that a large sample with 1.5 m-long and 0.1 m-wide frictional surface showed the dynamic weakening at V of the order of 0.01 m/s, arguing existence of the scale effect on the weakening slip rate V_w. Noda (2023) pointed out that it can be explained by concentration of frictional power due to thermoelastic instability (e.g., Dow and Burton, 1972). Heterogeneous thermal expansion of wall rocks of a frictional surface due to heterogeneous normal stress causes unlimited growth of the heterogeneity at $V>V_{cr}$, where V_{cr} is the critical slip rate proportional to the wavenumber of the heterogeneity. A larger sample hosts heterogeneity of a smaller wavenumber, and thus should weaken at a lower slip rate. In this case, V_w is expected to be inversely proportional to the sample size. Here, we present our preliminary results of high-velocity friction experiments for samples of various size conducted in order to confirm the scale effect and the hypothesis of the thermoelastic instability. We used gabbro of sub-millimeter grain size (“Zimbabwe black”) which may be comparable to experiments by TS97 and by Y+15. Because thermal properties of the apparatus matters (Yao et al., 2016), we used the same apparatus that TS97 used, which is now at Yamaguchi University. Width of the frictional surface W is 4.5 mm in TS97, 0.1 m and 11.5 mm in Y+15. So far, we conducted experiments with W of 3 mm and 13.5 mm. The experimental conditions are similar to TS97; the normal stress was kept at 1.5 MPa and successive positive velocity steps of a factor of about 1.5 were applied every about 50 m of slip. The sample with W=3 mm weakened at V=0.4 m/s, while that with W =13.5 mm did at V=0.25 m/s. When plotted together with TS97 and Y+15, V_w ranges for about 2 orders of magnitude. Normalization of the slip rate by V_{cr}, which is inversely proportional to W, reduces this variation to about 1 order of magnitude (Figure). The comparison indicates the existence of the scale effect, reconfirming the discovery by Y+15 and inferring significance of thermoelastic instability although more data is needed.

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan

Effects of effective pressure on fault reactivation due to fluid injection

*Garam Kim[1], Manami Kitamura[2], Michiyo Sawai[1]

1. Chiba university, 2. GSJ, AIST

地熱開発やガス・オイルの抽出などにおける地下への流体の注入は、しばしば誘発地震を伴うことが知られている（例えば、Ellsworth, 2013; Grigoli et al., 2018）。断層の挙動を考える上で重要なパラメータの一つに有効圧があるが、地下への注水により既存断層へ流体が流れ込むと、間隙水圧が上昇し有効圧が低下することで断層すべり運動が促進されると考えられる。つまり、注水による有効圧の変化と断層すべり運動の関係を明らかにすることは、注水誘発地震の理解につながることが期待される。そこで本研究では、多様な有効圧条件下で室内注水実験を実施し、有効圧の変化に伴い断層すべり運動がどのように変化するのかを検証している。
実験試料には、軸方向から30°に傾斜した模擬断層面を入れた円柱形の稲田花崗岩試料を使用した。試料は300℃で熱処理したものと、熱処理をしていないインタクト試料を用いて熱クラックの有無による断層運動の違いも検討した。実験は、産業技術総合研究所の油圧式三軸圧縮装置を使用し、封圧は約33.6 MPa、下流側の間隙水圧は約2.0 MPa一定で、注水速度0.05 mL/minで上流側から間隙水圧を約2.0 MPaから30.0 MPaまで段階的に上昇させた。本研究では、応力一定制御で実施している。試料の側面には26個のPZT（1 MHz）端子を貼り付けて弾性波測定も実施している。パルス波を入力波とし、透過法を用いて実験中の試料内の弾性波速度を求めた。
まだ予察的研究段階であるが、300℃で熱処理した試料では、有効圧が24.6 MPaから17.6 MPa、13.0 MPa、7.0 MPaへと低下するに伴い、注水による応力降下量は3.3 MPaから2.7 MPa、2.3 MPa、1.4 MPaへと減少した。インタクト試料でも同様に、有効圧が17.5 MPaから10.5 MPa、4.8 MPaと減少するに伴い、注水由来の応力降下量は2.9 MPaから2.2 MPa、0.9 MPaと減少傾向を示した一方、有効圧が24.8 MPaの時は応力降下が起こらなかった。これらの結果は、注水時の応力降下量は、低有効圧条件下で減少することを示唆している。また、注水開始から応力降下までの時間は、インタクト試料の方より300℃で熱処理した試料の方が短く、これは熱処理による熱亀裂の影響を反映していると考えられる。本実験は応力一定制御の実験のため、注水由来のすべりに引き続き、固着すべりの発生が認められ、両試料において、高有効圧条件下（24.6 MPa、17.6 MPa）では急激なすべり（1~2秒あたり約~0.024 mmの変位量）が支配的となるのに対し、低有効圧条件下（約10.6 MPa）ではゆっくりとしたすべり（6~19秒あたり約0.003~0.007 mmの変位量）となることが明らかとなった。つまり、有効圧が注水時の応力降下量だけでなく、それに引き続くすべり挙動に対しても影響を及ぼす可能性が示唆された。
弾性波速度については、断層面を通過する経路の場合、PZT経路が上流注水側に近いほど低い値を示し、かつ有効圧が低くなるほど弾性波速度が低下することが認められた。また、300℃で熱処理した試料においては、注水側から遠い経路の弾性波速度の反応が近い経路での反応に比べてわずかに遅れるような結果を示しており、現在解析を進めているところである。講演では弾性波速度に関する詳しい結果も合わせて報告したい。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S18. Education and history of seismology

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P2 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S18P] PM-P

[S18P-01] Preliminary systematization of earthquake countermeasures with reference to the approach of behavior change on health promotion

*Yo FUKUSHIMA[1], Natsuko Chubachi[1], Shinichi Kuriyama[1] (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University)

[S18P-02] Development of Citizen Seismic Network and Promotion of Sustainable Earthquake Disaster Prevention and Mitigation Projects

*Yukino Yazaki[1], Yugo Suzuki[1], Hiroki Uematsu[1,2], Ahyi Kim[1], Masami Yamasaki[1] (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

Preliminary systematization of earthquake countermeasures with reference to the approach of behavior change on health promotion

*Yo FUKUSHIMA[1], Natsuko Chubachi[1], Shinichi Kuriyama[1]

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

災害リスクに対する行動は命・財産・暮らしに直結するため、防災のためには、災害リスクに対する行動変容が重要である。健康分野においては、行動変容促進のための手法の確立やたばこ対策などへの実践の実績がある。健康と防災分野には、「個人や集団の行動変容をリスク減につなげられる可能性が高い」という共通点があり、従って、健康分野の行動変容促進のアプローチを援用して防災に関する多様な取り組みを体系的に整理することは、今後の課題抽出などに有効であると考えられる。本研究において、これまで行われている地震防災に関する取り組みをProchaskaの変容ステージモデル（無関心期、関心期、準備期、実行期、維持期）を用いて整理した結果、健康分野に比べ、実行期・維持期の個別支援が薄いことが示唆された。今後、変容ステージモデルを用いた体系整理の有効性の検証や、抽出された課題に対する健康分野を参考にした新たなアプローチの検討などを進めていくことが有効であると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Development of Citizen Seismic Network and Promotion of Sustainable Earthquake Disaster Prevention and Mitigation Projects

*Yukino Yazaki[1], Yugo Suzuki[1], Hiroki Uematsu[1,2], Ahyi Kim[1], Masami Yamasaki[1]

1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics

地震防災や減災に関するプロジェクトを持続させる最も重要な課題として、そのプロジェクトに関わる人材の確保がある。横浜市立大学金研究室では、市民に向けた低コスト地震計ネットワークの構築プロジェクトを推進しているが、このプロジェクトを継続するにはデバイスやデータの管理、サーバの保守、データ解析など様々な分野での人員を途切れる事無く確保する必要があり、それらを一時的な資金での雇用や研究室に所属する学生で賄うのはリスクが高い。そこで、このように持続させることが不可欠なプロジェクトの継続的な人員確保の一案として、以下を提案し実証研究を行った。前提として、大学内での一研究室が地域で持続可能な地震計ネットワークを運営するプロジェクトを立ち上げているとする。大学内には様々なバックグラウンドや専門性を持つ学生がいる。それらの地震学を専門としない学生へもプロジェクト内容を周知し、興味を持ってもらう事でプロジェクト参入への門戸を広げ、様々な角度からの参加を促すことでプロジェクトの運営を持続可能なものとする。その一案として、地震計で取得されたデータの利活用アイデアコンテストを開催し、地震データの新たなユースケースを募り、地震学や防災へ興味関心を深め、研究参加を促すための啓蒙活動を行った。参加者に対しては地震関連の知識を一切問わず、地震計センサーネットワークの意義や設置条件といった最低限の情報のみを開示し、自由な発想を促した。データ利活用アイデアに関しては地震学分野での活用に留まらず、情報学や経営学等、他分野の知識と融合したアイデアを推奨している。このアイデアコンテストの継続的な開催で地震計ネットワークを学内全体での認知してもらい、専門外の学生や教員を地震学研究に引き込むためのサイクルをデザインした。本発表では地震計ネットワークプロジェクトの概要、それらの学内への周知方法、アイデアコンテストの実施内容、運営方法、開催結果及び、その中から実際に地震計プロジェクトに加えられた他分野からのアイデアの事例について紹介する。さらに、アイデアコンテストで発表された一案を企画および実装に繋げ、大学構内に小規模センサーネットワークを構築し、構内で誰でもモニタリングできるスペースの試作をおこなっている。その具体的手法と、試作展示において得られた意見を紹介する。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Special session：S21. Acceleration of seismological research through integration with information science

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P3 (F205 and 6 side foyer) Hall Annex

[S21P] PM-P

[S21P-01] On the effects of time width used to count interval maximum amplitude of a seismogram on the extreme value analysis

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

[S21P-02] AE Catalog development by a deep hashing method and network correlation analysis

*Makoto NAOI[1], Shiro HIRANO[2], Youqing CHEN[1] (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University)

[S21P-03] Attempt to Predict Response Spectra from Fourier Spectra Using Machine Learning

*Yuki Kurata[1], Hiroaki Matsukawa[1], Hiroto Tanaka[1], Yasuhiro Matsumoto[1], Mika Takekoshi[1], Takachika Yagi[1], Ryota Kiuchi[1], Yuta Taki[1] (1. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)

[S21P-04] Predicting the probability of seismic motion exceedance based on short-term earthquake probability information after a large earthquake

*Hisahiko KUBO[1], Katsuhiko SHIOMI[1] (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

[S21P-05] Comprehensive detection of later phase in S coda throughout the inland Japanese archipelago with deep learning

*Yuta AMEZAWA[1], Takahiko Uchide[1], Takahiro Shiina[1], Jun Ogata[2], Satoru Fukayama[2], Hiroki Kuroda[3] (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology , 3. Department of Information and Management Systems Engineering, Nagaoka University of Technology)

[S21P-06] Extraction of deep tectonic tremor waveforms 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] You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes.

*GERARDO MANUEL MENDO PEREZ[1], HIROMICHI NAGAO[1] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S21P-08] Which is more suitable for polarity determination using deep learning, time series data or image data?

*Shinya KATOH[1], Yoshihisa IIO[2], Hiroshi KATAO[2], Masayo SAWADA[2], Kazuhide TOMISAKA[2] (1. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

[S21P-09] Fast Smoothing Method for Spatiotemporal Data and Its Application to Seismic Wavefield Reconstruction

*Yoshikazu Terada[1,2], Hidetoshi Matsui[3], Hiromichi Nagao[4] (1. Osaka Univ., 2. RIKEN, 3. Shiga Univ., 4. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo)

[S21P-10] Hypocenter-based Visualization of Multiscale Earthquake Faults:
Application to Crustal Earthquakes in Japan Islands

*Yasunori SAWAKI[1], Yoshihiro SATO[2,3], Takahiko UCHIDE[1], Haruo HORIKAWA[1], Takahiro SHIINA[1], Yuta AMEZAWA[1] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Tokyo City University, 3. Artificial Intelligence Research Center, AIST)

[S21P-11] Construction of a high-performance volcanic earthquake phase detection model using deep learning and examination of its transfer learning

*Yuji Nakamura[1,2], Ahyi Kim[1], Yohei Yukutake[3], Yuki Abe[4] (1. Yokohama City University, 2. activecore, Inc., 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

[S21P-12] Machine-learning model of GNSS displacement rate estimation using seismic waveforms in western Shikoku

*Kazuki OHTAKE[1], Aitaro KATO[1], Yutaro OKADA[2], Takuya NISHIMURA[3] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Kyoto University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

[S21P-13] Evaluation of GNSS-A positioning accuracy using a simple numerical model and the PyMC library

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

[S21P-14] Acoustic waveform analysis for GNSS-Acoustic observation using Machine Learning

*Naoki Kurosu[1], Motoyuki Kido[2] (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute for Disaster Science, Tohoku University)

[S21P-15] Development of a Seismic Phase Pick System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

*Yukino Yazaki[1], Yuji Nakamura[1], Hiroki Uematsu[1,2], Ahyi Kim[1], Masami Yamasaki[1] (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

On the effects of time width used to count interval maximum amplitude of a seismogram on the extreme value analysis

*Kaoru SAWAZAKI[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

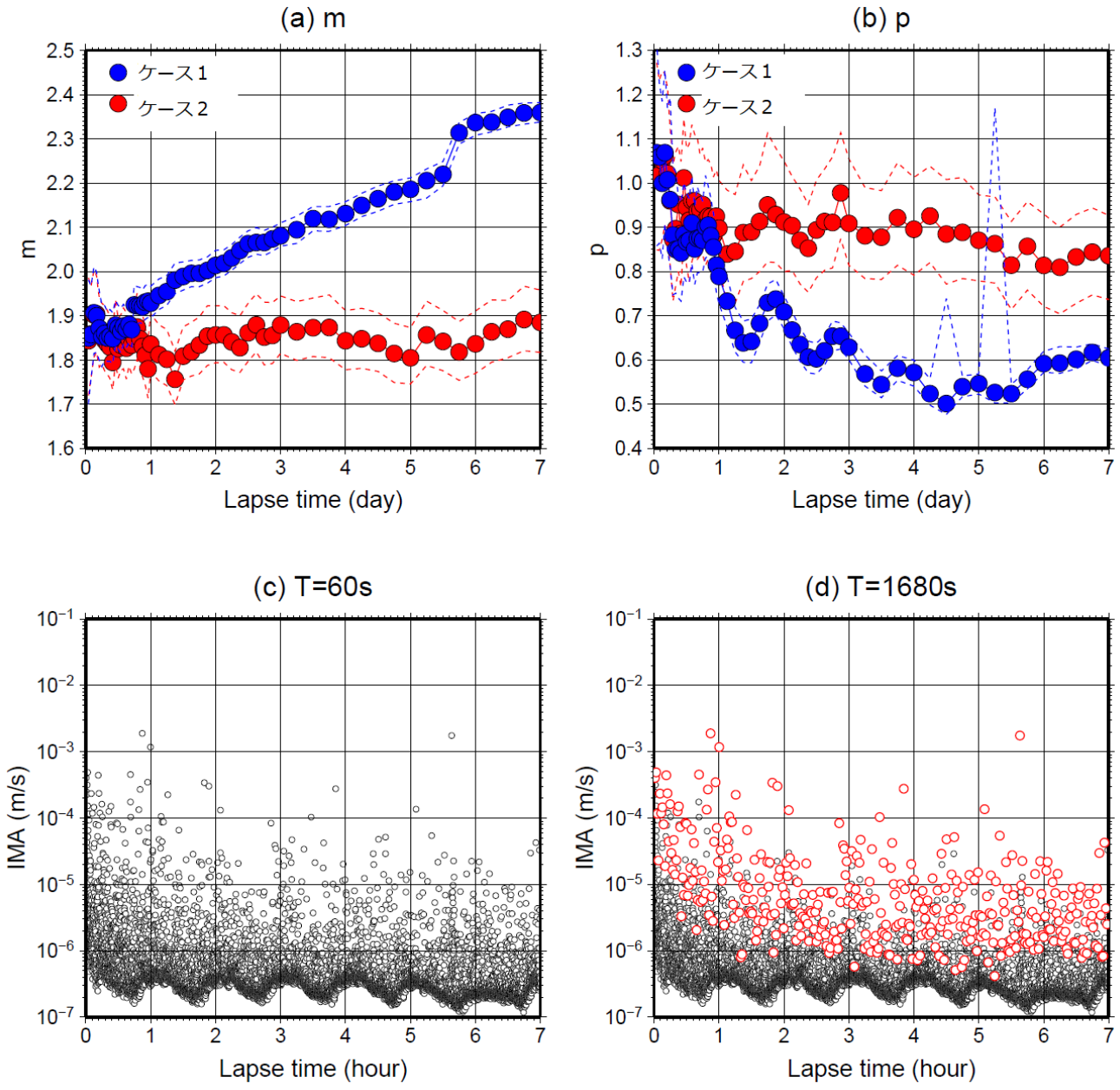
極値統計解析においては、最大値をとる区間が長いほど正確な標本データを得られるが、その分得られる標本の数が減るため、極値分布パラメータの推定精度は悪くなる。これを地震計記録に基づく余震活動予測の問題に当てはめると、区間最大振幅をとるデータ長Tをどのように決めるかという問題に帰着する。Tが短すぎると、同じ地震の地震動記録から２回以上区間最大振幅を読み取る（P波とS波のピークなど）、Tの間にノイズレベルを超える地震動が発生せずノイズの最大値を読み取るなどの理由から、区間最大振幅が極値分布から逸脱した分布形状を示す可能性が高くなる。一方で、Tが長すぎると、大地震直後においては解析に使える標本数が足りず、パラメータ推定の精度が落ちる。Sawazaki(2021)は、ノイズレベルを超える地震動の継続時間が概ね1分程度であることから、Tを1分間に固定して解析を行っている。しかし、余震の頻度は大森・宇津式に従い本震からの時間の経過に伴い減衰するため、経過時間に応じてTを変化させるのが妥当であろうと予想される。
そこで本研究では、大地震発生の６時間後から１週間後までの地震計記録について、（１）Tを1分間に固定し続けた場合と、（２）Tを経過時間に比例させた場合の２つのケースについて、極値分布のパラメータ推定結果がどのように異なるかを調べた。ケース１、２について、Tおよび区間最大振幅の数Nはそれぞれ以下のとおりである。
ケース１：$T=60(s)$、$N=60\times T_1-5$
ケース２：$T=10\times T_1(s)$、$N=[360-30/T_1]$
ここでT_1は本震からの経過時間（時間）、[x]はxの整数部分を表す。本震発生からの最初の５分間は、本震による地震動のコーダ波が含まれる可能性を考慮し、解析対象から除いた。T_1=6時間では、両ケースともT=60s、N=355で共通であるが、T_1＝７時間以降は、ケース1ではTが60秒固定でNがT_1に比例して増え、ケース2ではTがT_1に比例して増えてNがほぼ固定（355-359の範囲）となる。
2008年岩手・宮城内陸地震（M_J7.2）と2018年大阪府北部の地震（M_J6.1）における、本震からの震源距離20km以内のHi-net観測点の３成分RMS振幅記録１週間分を解析に用いた。岩手・宮城内陸地震におけるHi-net観測点においては、ケース１と２でパラメータ推定の中央値に大きな違いはなく、多少の変動があるものの期間を通じてほぼ一定の値となった。ケース１では時間の経過とともに推定幅（5%と95%パーセンタイル値の差または比）が狭くなるのに対し、ケース２では推定幅に大きな変化はなかった。一方で、大阪府北部の地震におけるHi-net観測点においては、ケース１において時間の経過と共にパラメータ推定の中央値が系統的に変化した。具体的には、石本・飯田式のm値および大森・宇津式のp値は、時間の経過と共にそれぞれ増加、減少した（図a, b）。ケース２ではその変化が顕著には見られなかった。岩手・宮城内陸地震の場合と同様に、パラメータの推定幅はケース１では時間と共に狭くなり、ケース２では大きな変化は見られなかった。
ケース１の場合、本震からの時間が経つにつれてT＝１分間にノイズレベルを超える地震動を観測する機会が減り、ノイズレベルそのものの最大振幅をカウントする機会が増える。この傾向は余震活動が比較的低調だった大阪府北部の地震において、より顕著であった。ノイズレベルは本震からの経過時間に依存せず、周囲の社会活動を反映して、昼間に増加し夜間に減少する周期性を示す（図c）。この特徴は地震動の区間最大値がしたがうべき極値分布には反映されない。極値分布で再現しきれない周期性などのデータの特徴を無理やり極値分布で当てはめようとした結果、パラメータ推定値が経過時間と共に変化したと考えられる。m値の上昇はノイズレベルが極端な値をとりにくい（ノイズは正規分布などの「裾野が狭い」分布に従う）ことを、p値の減少は区間最大振幅の下限が「頭打ち」したことを説明しようとして生じたと考えられる。また、ケース１の場合には、尤度関数がローカルミニマムを生じることにより、MCMC法によるパラメータのサンプリングがうまくいかない場合も見られた。
以上の結果から、地震活動の規模によらずに安定した推定を行うためには、時間長Tを経過時間に比例させる

© The Seismological Society of Japan

ことで区間最大振幅が確実に極値分布に従うように調整できる、ケース２を採用する方が妥当と考えられる。

謝辞：本研究は科研費基盤C（課題番号21K03686）および情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-E、課題番号JPJ010217）の支援を受けています。

図：大阪府北部の地震時のHi-net N.OSKH観測点における、本震後１週間のパラメータ推定値（a：m値、b：p値）、および区間最大振幅（c：T=60sの場合、d：T=1680 s の場合（T=60sの場合に赤丸で上書き））。



© The Seismological Society of Japan

AE Catalog development by a deep hashing method and network correlation analysis

*Makoto NAOI[1], Shiro HIRANO[2], Youqing CHEN[1]

1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University

既知のイベント波形をテンプレートとして，連続記録から高い相互相関係数を持つ窓を探索するテンプレートマッチングは検出イベント数を10倍に増加させることもあり，高い分解能で地震活動を解析するための重要なツールとなっている．しかし，波形相関に基づく方法は計算コストが大きく，大規模データへの適用が難しいため，前震活動など限られたシークエンスを対象として解析を行うのが一般的である．この問題を効率的に解く方法として，直井・平野（2023；JpGU）は，近年音声・画像認識分野で用いられている，深層学習モデルによるHashing（深層Hashing）を利用した類似波形探索技術を，室内水圧破砕実験で得たAcoustic Emission連続波形データに適用した．約30分（100 Hz換算にすると約5.8年分のデータポイント数に対応）16チャネル分のデータに対し，古典的手法の組み合わせで作成した6057イベントからなるカタログの波形を用いて深層Hashingによるテンプレートマッチングを行い，得られた候補窓内の波形に対して，Double Difference法によって，25,692個の震源を得ることに成功している．
このように直井・平野（2023）は，深層Hash法でカタログの質を向上させられることを示したが，波形相関に基づくテンプレートマッチング法との性能比較は不十分であった．本研究では，同じテンプレートと連続波形の組み合わせに対して，Network Cross Correlation（NCC）による類似波形探索を実施し，性能の比較を行った．我々のコードは深層Hash法がGPUを用いて．NCC法は並列CPUを用いて演算するように実装しているため単純な比較が不可能だが，連続波形から1024 サンプルの窓を50%重複させて切り出した計35,128,124個の窓に対して，全Hashコードを取得するために要する時間は3.5時間（NVIDIA製A40x2利用時）， 6057個のテンプレートと上記の全窓との間のNCCを計算するのに要する時間（AMD Ryzen Threadripper 3990Xによる120スレッド並列化下での評価）は12時間であった．これらの演算は，いずれも全ての連続波形をメモリに読み込むプロセスが発生し，O(N)オーダーの計算時間を必要とするが，全てのテンプレート波形がメモリに載らない規模の問題では，NCCを評価する方法では同じデータに対して繰り返しswap-in/swap-outを行う必要が生じるため，所要時間の乖離が大きくなる（この極端なケースが全ての窓同士の類似度判定を行うAuto correlation法である）．なお，深層Hash法では，テンプレート波形と連続波形との間の類似度をHamming距離の16チャネル平均値(d_h^{av})で評価するため，類似波形の同定には追加演算が必要だが，この計算コストは同じ波形ペアのNCC計算の1/1000で済むことがわかっており，上記の問題設定（6057個のテンプレート）においては連続波形に対するHash値取得にかかるコストに比べて十分に小さい．
得られたNCCの分布から，その形状が変わるNCC=0.2（標準偏差の7.25倍に対応）の値を閾値としてイベント候補の窓を選び，Double Difference法を適用して震源を求めた所，深層Hash法による解析結果の2.5倍の数（63,702個）の震源が得られた．得られた震源分布の観察では，従来の解析結果では，雲状に広がって見えたAEの分布が，実際はAE密度が高い3 mm程度以下の大きさのクラスタが多数集まって形成されていることがわかった．岩石供試体中の鉱物分布等との関連が疑われる．
次に，深層Hash法の解析で得られたテンプレート波形と全窓の間のd_h^{av}とNCC値の関係を調べた所，d_h^{av} = 20–35かつNCC = 0–0.2の領域に全体の99.9%のペアが集中するピークが存在することがわかった．これは関係のない波形同士の組み合わせによるものと考えられ，このピークを避けて解析しないと，大量の偽陽性が発生して処理効率が大きく低減する．NCCによる解析では閾値を0.2に設定するとこのピークをうまく避けられる一方，d_h^{av}値に例えば20の閾値を設定すると，NCC値が0.75程度と比較的高い値のペアが多数残り，大量の偽陰性が発生する，このことが深層Hashing法に基づく解析の質を低下させているとみられる．深層Hash法をより効果的に使用するためには，偽陰性率を低減させるためのHashingの能力改善が必要である．

© The Seismological Society of Japan

Attempt to Predict Response Spectra from Fourier Spectra Using Machine Learning

*Yuki Kurata[1], Hiroaki Matsukawa[1], Hiroto Tanaka[1], Yasuhiro Matsumoto[1], Mika Takekoshi[1], Takachika Yagi[1], Ryota Kiuchi[1], Yuta Taki[1]

1. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

１. はじめに

地震動は震源特性、伝播経路特性、サイト特性によって表現され、理学分野ではスペクトルインバージョンにより各特性を分離する等のフーリエ振幅スペクトルに基づく分析が行われることが多い。一方で、工学分野ではPGA、PGV、応答スペクトル等の指標が用いられることから、理学分野の研究成果を工学分野に利活用するためには、フーリエ振幅スペクトルを工学的指標に精度良く変換できる方法が有用である。既往文献（例えば尾崎・高田, 2003）ではランダム振動論に基づき、パワースペクトル密度関数と応答スペクトルを相互変換する理論的な手法が提案されているが、波形に非定常性を有する地震記録に対して適切な継続時間を設定する必要がある。一方で、本問題を回帰問題と考えればノンパラメトリックな機械学習手法を用いることにより、地震学や物理学的な仮定を置くことなくこれらの変換を行うことができる可能性がある。そこで本研究では、機械学習手法の1つであるランダムフォレストを用いて、地震観測記録のフーリエ振幅スペクトルからPGA、PGV、及び加速度応答スペクトル（減衰定数5%）の各周期における応答値の予測を試みる。

２. データ・手法

本研究では、1997年1月～2022年4月までに発生したMw5.5以上（防災科学技術研究所のF-net参照）の地震の内、震央距離100km以内の10観測点以上で観測記録が得られている内陸地殻内地震を学習データとしてモデルを構築した。構築したモデルに対して、2023年5月5日に石川県能登地方で発生した本震（14時42分、Mw6.2）と最大余震（21時58分、Mw5.7）の記録を用いて精度の検証を行った。観測記録は防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netの地表記録（水平動2成分）を用い、S/N比が小さいデータを取り除くため震央距離200km以内の記録を対象とした。学習データの前処理として、JMA走時表（上野・他, 2002）を参考に、S波到達の5秒前から40.96秒をトリミングした。なお、サンプリング周波数が200Hzの記録は100Hzにリサンプリングし、継続時間が40.96秒未満の記録は除外した。最終的に、学習データは計52地震19,304記録、検証データは計2地震428記録を選定した。

本研究では、機械学習手法の中でも目的変数に対する各説明変数の重要度を分析することができるランダムフォレストを用いてモデルを構築した。予測対象とする目的変数は、PGA、PGV、加速度応答スペクトル（減衰定数5%、周期0.02～5.0秒の94点）の計96変数である。これらの工学的指標を予測するための説明変数は、各周期（周期0.02～40.96秒の2,048点）のフーリエ振幅スペクトルとした。なお、目的変数及び説明変数はそれぞれ常用対数を取った値を学習に用いた。

３. 結果

検証データ（2023年5月5日石川県能登地方の地震；本震と最大余震の2地震）における観測値と予測値を比較した例として、図1(a)(b)にPGAと周期1秒の加速度応答スペクトルの結果を示す。それぞれの結果について予測値の大半は、破線で示す観測値の1/2～2倍以内に収まっており、対数軸上の平均二乗誤差MSEの値が小さく決定係数R^2が1に近い値を示すことから、全体として概ね精度の良いモデルが構築できていると考えられる。また、図1(c)(d)に目的変数に対する説明変数（フーリエ振幅スペクトル）の重要度の結果を示す。PGAでは周期0.1～0.3秒程度の短周期側のフーリエ振幅スペクトルの重要度が大きく、周期1秒の加速度応答スペクトルでは周期0.5～2秒程度のフーリエ振幅スペクトルの重要度が大きい。これらの傾向からも、妥当なモデルが構築できていると考えられる。一方で、観測値が大きい記録に対する予測値は全体的にやや過小評価の傾向が見られる。図1(b)において最も観測値が大きく、予測値との乖離も大きいK-NET正院（ISK002）のEW成分について、本震と最大余震それぞれの加速度応答スペクトルを図2に示す。図2(a)に示す本震の周期1～3秒付

© The Seismological Society of Japan

近において観測値と予測値の乖離が大きい。これは、灰色で示している学習データの密度が低い応答値であることに加えて、観測波形の位相特性としてパルス性が強いことが要因として考えられる。一方で、図2(a)に示すその他の周期帯や図2(b)に示す最大余震の全周期帯においては、観測値と予測値の間に顕著な差はない。

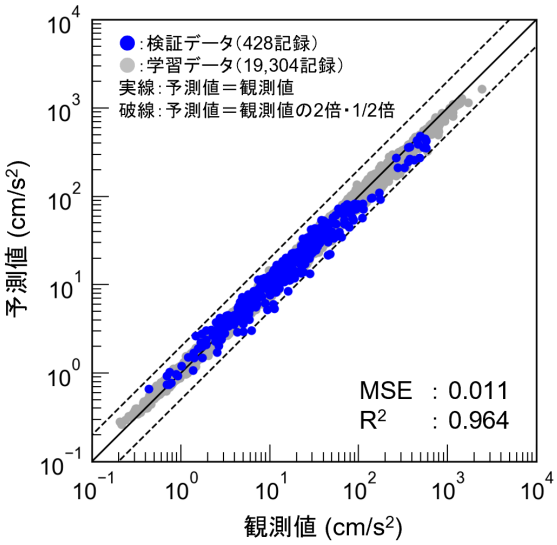
4. 今後の展望

学習データが不足する応答が大きい観測値に対して、本研究のモデルによる予測値は過小評価となる傾向が見られた。データセットの偏りを低減するため、例えばフーリエ振幅スペクトルの最大値や積分値で目的変数と説明変数を正規化して学習することが考えられる。また、位相特性に関係するパラメータとして、地震規模や震源からの距離等を説明変数に追加することで、予測精度の向上が図れるか検討を進めたい。合わせて他の機械学習手法を用いた予測精度の検証についても行っていく予定である。

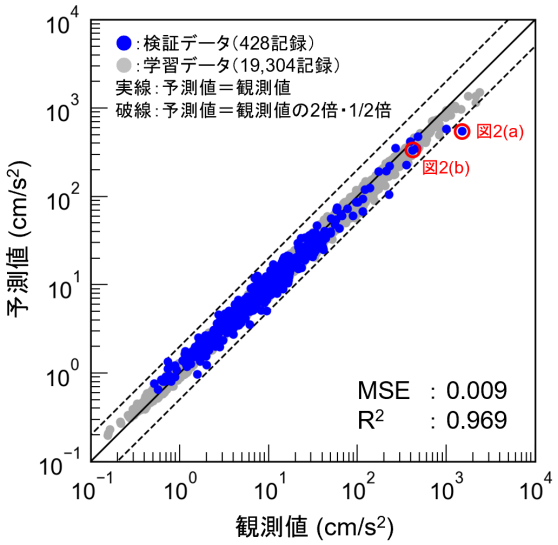
謝辞

防災科学技術研究所の観測記録を利用しました。ここに記して感謝いたします。

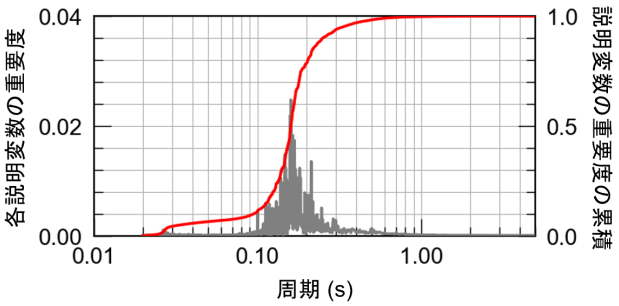
© The Seismological Society of Japan



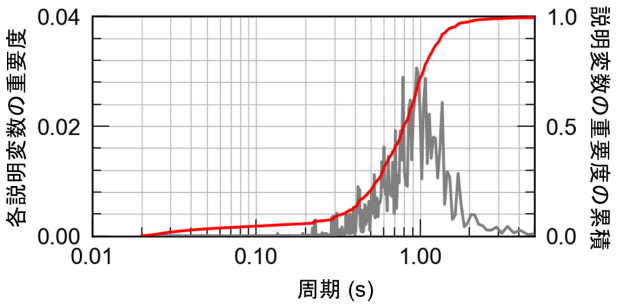
(a) PGAの観測値と予測値



(b) 周期1秒の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の観測値と予測値

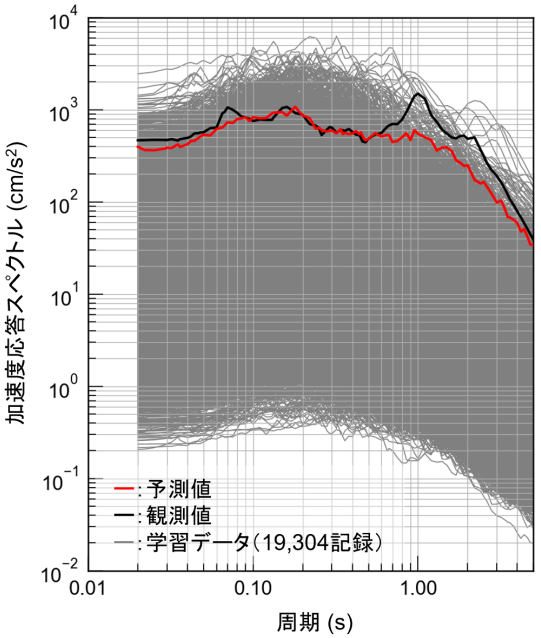


(c) PGAに対するフーリエ振幅スペクトルの重要度

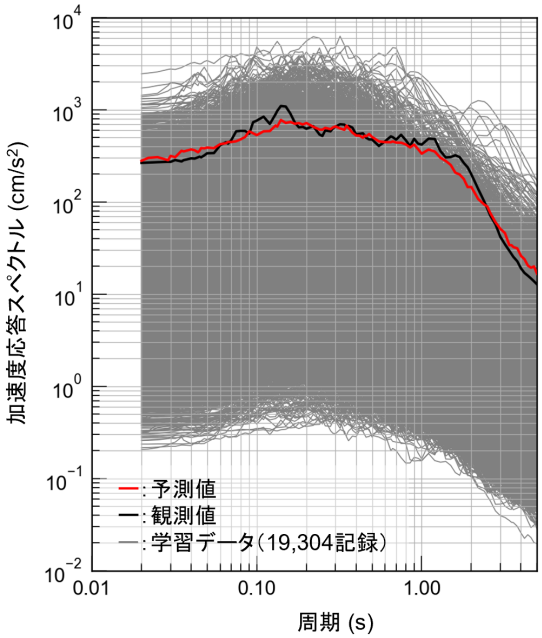


(d) 周期1秒の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)に対するフーリエ振幅スペクトルの重要度

図1　目的変数(PGA、周期1秒の加速度応答スペクトル)の観測値と予測値の関係、及び目的変数に対する説明変数(フーリエ振幅スペクトル)の重要度の例



(a) ISK002の本震(EW成分)



(b) ISK002の最大余震(EW成分)

図2　加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の観測値と予測値の例

© The Seismological Society of Japan

Predicting the probability of seismic motion exceedance based on short-term earthquake probability information after a large earthquake

*Hisahiko KUBO[1], Katsuhiko SHIOMI[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

ひとたび大地震が発生すると、その地震による強い揺れなどで被害が生じていたところに、震源域周辺で活発化する地震活動によって更なる揺れがもたらされる。大地震発生後の初期段階では避難や救助、復旧などの防災行動が取られるが、このフェーズにおいて「今後数日間」といった短期的な揺れの見通しに関する予測情報のニーズは高い。本研究では、大地震発生後の初期段階で得られる短期的な地震発生確率を礎とし、大地震発生から数日間の地震活動による地震動超過確率を予測するためのスキームを提案する。
大地震発生直後は地震カタログの質および量が著しく低下するため、平常時に用いられている統計的な予測手法をそのまま適用することは難しい。この大地震発生直後の地震カタログの不完全性に対応するために、Omi et al. (2013)は地震発生からの経過時間で変化する地震検知率とグーテンベルク・リヒター則のb値をベイズ推定によって同時推定し、さらに大森-宇津法則に基づいて地震発生確率を算出するという手法を提案した。防災科研では、Omi et al. (2013)の解析方法を防災科研Hi-netの自動震源カタログに適用し、近い将来を対象とした余震発生確率を自動的に予測するシステムの試験稼働を行っている（Omi et al., 2018）。同システムでは、防災科研Hi-netの震源決定処理システムでマグニチュード5.0以上の地震が検知されると、その3時間後から1時間ごとに地震発生確率の計算を行っている。本研究では、同システムを通して得られる、マグニチュードMの地震が予測対象期間内に発生する確率を地震発生確率情報として用いる。
次に、地震発生確率情報に基づく地震動予測を考える。予測対象は計測震度とする。大地震の震源域およびその後の地震の発生域は有限な広がりを持ち、またそれらは完全に重なるわけでもない。ここでは簡単のために、全ての地震を点震源として扱い、さらに大地震後に発生する地震は最初の大地震と同じ場所 で発生すると仮定する。この仮定によって、地震と予測対象地点の位置関係は常に固定して地震動予測を行うことができる。地震動予測手法は、現行の緊急地震速報における「震源とMによる震度予測手法」の「予測震度の算出」（気象庁 2020）を参考にした。M・最短距離・震源深さを入力として司・翠川（1999）の地震動予測式によって算出した予測対象地点での基準基盤上における最大速度から、予測対象地点でのVs30情報に基づいた地盤増幅度を用いて地表での最大速度を算出し、さらに翠川ほか（1999）の変換式によって地表での計測震度を求める。これに確率論的地震動予測アプローチ（例えば藤原ほか2005, 儘田ほか2021, 藤原ほか2023）を組み合わせることで、あるMの地震が予測対象期間内に引き起こす揺れが閾値を超える確率を求めることができる。さらに様々なMでの確率情報を足し合わせることで、地震活動全体として予測対象期間内に発生する揺れが閾値を超える確率を得ることができる。
発表では実地震への適用および実際の震度観測情報に基づく揺れの頻度との比較を行う。
【謝辞】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。

© The Seismological Society of Japan

Comprehensive detection of later phase in S coda throughout the inland Japanese archipelago with deep learning

*Yuta AMEZAWA[1], Takahiko Uchide[1], Takahiro Shiina[1], Jun Ogata[2], Satoru Fukayama[2], Hiroki Kuroda[3]

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Artificial Intelligence Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology , 3. Department of Information and Management Systems Engineering, Nagaoka University of Technology

多点稠密な基盤的地震観測網が整備され、日々蓄積され続ける大量の観測波形記録の自動処理技術の開発が重要となっている。近年、教師あり深層学習の導入によりP・S波についての検出・検測等の高精度な自動化がほぼ達成されたが、観測波形記録には、直達波以外の位相も含まれている。そのうちの一つに、後続波（地下の顕著な速度コントラストにより直達波が反射あるいは強く散乱され生じる地震波）がある（e.g., 堀・他, 2004）。膨大な地震波形記録に蓄積された後続波の情報を活用することで、その発生源である地下の不均質構造を高い分解能で網羅的に解析することが可能になるが、教師データが存在しない等の理由により後続波処理の自動化はほとんど進んでいない（Ding et al., 2022）。

我々は、明瞭なS波後続波の観測報告がある東北地方北部の森吉山地域の群発地震の観測波形記録から教師データを作成し、畳み込みニューラルネットワークによるS波後続波の自動検出モデルを構築した（雨澤・他, 日本地震学会2022年秋季大会）。本モデルは単一観測点のデータで学習・テストを行ったものであるが、学習に使用した観測点以外のデータに対してもS波後続波を検出可能であることを少量のデータセットを用いて確認している。そこで本研究では，構築したモデルを用いて日本列島内陸域におけるS波後続波の網羅的検出を行い、その観測状況を把握するとともに、モデルの汎用性を検討した。

本研究では，2000年10月から2023年5月に日本列島内陸の深さ15 km以浅で発生した約45万地震（M1.0以上4.0以下）について、気象庁S波検測値が存在する100 Hzサンプリングの観測点における東西・南北動速度波形記録を用いた。これらに対し、S波検測時の0.2秒前から10.24秒間の波形を切り出し、4–32 Hzの帯域通過フィルタをかけた波形をモデルの入力とした。以上の入力に対し、本モデルは0.0–1.0の範囲の実数を出力するが、テスト結果に基づきモデル出力値が0.65以上で、S波後続波検出となるように閾値を設定した。また、検出結果について目視による確認を行った。

これまでにS波後続波が報告されていた奥羽脊梁山脈・茨城北部・日光白根・伊豆半島・箱根・能登半島・紀伊半島・有馬高槻・鳥取西部においては、本研究による自動処理でもS波後続波が検出された。以上に加え、これまでに報告がないと思われる北海道北部・大雪山・群馬北部・長野中部・宮崎・鹿児島・熊本などにおいてもS波後続波が新たに検出された。解析データ数によらずに福島県西部・紀伊半島南部で特に検出数が多く、それぞれ4千個以上のS波後続波が検出された。S波後続波が多く検出された地域は活火山の分布に概ね対応するが、能登半島・紀伊半島・鳥取など必ずしも活火山に近接しない場合もある。また、2008年岩手宮城内陸地震や2000年鳥取県西部地震などM6.5以上の地震の震源近傍でS波後続波が多く検出された。

これまでの研究でS波後続波の発生源として、地殻内流体貯留層の存在が指摘されている（e.g., 堀・他, 2004; Amezawa et al., 2019; Yoshida et al., 2023）。また、地殻内流体が豊富であると考えられる活火山近傍で検出数が多い。以上は、本研究で得られたS波後続波の検出数の空間分布が地殻内流体の多寡を反映している可能性を示唆する。また、内陸大地震の震源近傍でも検出数が多いことは、内陸地震の発生に流体が影響しているという議論（e.g., Hasegawa et al., 2005）とも調和的である。

本研究では、単一観測点のデータのみで学習したモデルを他地域・他観測点に適用した。その結果、日本列島

© The Seismological Society of Japan

内陸域において概ね良好にS波後続波を検出できていることを確認した。また、これまで未報告のS波後続波を検出することに成功した。一方、S波後続波の波形形状（S波との振幅比・卓越周波数など）が、モデルの学習に用いた森吉山地域のものと同様な場合はモデル出力が高い（0.9以上）が、そうでない場合はやや低くなる（0.3–0.6）ことを確認した。今後、本モデルでより信頼度の高いS波後続波検出を行うにあたり、今回の結果を参考にしつつ教師データを拡充し、モデルのファインチューニングを行って汎化性能の向上を行う必要がある。

謝辞：本研究では、気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・国立大学法人による観測波形記録、気象庁一元化震源カタログ、気象庁による手動検測値を使用しました。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

Extraction of deep tectonic tremor waveforms 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

1．はじめに
テクトニック微動（以下，微動）は卓越周波数が1～10 Hz，継続時間が数分～数時間の微弱な振動現象であり，P波やS波の検出が困難という特徴を持つ．したがって，通常の地震検出法を微動に適用することは難しく，微動の検出には，エンベロープ相関法（Obara, 2002）や，ハイブリッド法（Maeda and Obara, 2009）が用いられることが多い．しかし，これらの方法では通常の地震やノイズも検出する場合があり，目視検査が必要であった．この問題点を解決するため，先行研究では深層学習を用いた地震波形の識別が行われており，高い精度でノイズ・微動・地震波形の識別が可能であることが報告されている(e.g. Nakano et al., 2019)．しかし，深層学習を用いた系統的な微動波形の抽出や，抽出された微動を用いた解析はまだ行われていない．そこで，本研究では深層学習ベースの微動解析手法の確立を目指し，深層学習を用いた微動の抽出と，抽出された微動から微動サイズの基本的な指標となる微動継続時間の決定を行った．

2．データと手法
本研究ではHi-netで記録された3成分速度波形を使用した． 先行研究と同様に，深層学習モデルとして畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を採用した．1分間の波形記録に2 –30 Hzのバンドパスフィルタを適用後，時間窓5秒，オーバーラップ80%，最大・最小正規化の条件で作成したスペクトログラム3成分を入力データとした．CNNモデルは2層の畳み込み層，プーリング層と，3層の全結合層からなり，出力層ではノイズ・微動・地震の確率値をそれぞれ出力する． モデルの学習では，Hi-net観測点21点で記録された波形データを使用し，期間は2004年4月～2019年12月までである．ノイズ・微動・地震イベント各13,800枚，合計41,400のスペクトログラムを使用しモデルの学習を行った．学習後のモデルの性能評価には，各イベント4,600枚，合計13,800枚からなるテストデータを使用した．モデルの学習，テストに使用したイベントは，地震は気象庁一元化震源カタログ，微動はハイブリッドカタログ（Maeda & Obara, 2009）を参照し，目視で選択を行った． 微動の抽出では，Hi-net観測点71点を使用し，期間は2016年1年間とした．南海沈み込み帯を東海，紀伊北部・中部・南部，四国東部・中部・西部の７つの領域に分割し，領域ごとに微動の抽出を行った．本研究では，モデルが3観測点以上で微動と識別し，2分以上継続したイベントを微動と定義した．

3．結果
テストデータへの適用結果では，モデルは正解率98.0 %を記録した． 微動抽出の結果，東海では6,064個，紀伊北部では3,139個，中部では2,202個，南部では953個，四国東部では3,586個，中部では3,757個，西部では5,864個のイベントが得られた．同期間でハイブリッドカタログに記載されたイベント数は東海で6,906個，紀伊北部で7,210個，中部で1,648個，南部で1,885個，四国東部で6,269個，中部で4,432個，西部で8,121個であり，本研究で抽出されたイベントには，東海で2,625個（38.0%），紀伊北部で4,598個（63.8%），中部で771個（46.8%），南部で427個（22.7%），四国東部で2,651個（42.3%），中部で2,222個（50.1%），西部で3,028個（37.8%）のカタログ記載イベントを含んでいる． 最も継続時間が長いイベントの継続時間は521分であった．イベントの累積継続時間からは，ステップ状の増加が見られ，S-SSEの発生と同期していることが明らかになった．S-SSEのMwとS-SSE期間中に発生した微動の累積継続時間の関係を調べた結果，東海では0.42，紀伊では0.57，四国では0.80の相関係数が得られ，全地域共通して正の相関が見られた．また，CNNモデルを用いた微動抽出では，従来の波形相関に基づく手法では未検出となることが多い，微動活動が活発な時期の波形を微動として抽出できることが明らかになった．今後，新たに抽出された微動の震源決定の可否について調査・検討が必要となる．

© The Seismological Society of Japan

4. 謝辞
本研究では，防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）の地震観測データ，微動カタログとしてハイブリッド法によるカタログ(Maeda and Obara, 2009)，ハイブリッド・クラスタリング処理(Obara et al., 2010)によるカタログ，地震カタログ作成には，気象庁の検測値データおよび一元化震源カタログ，S-SSEは，地震予知連絡会会報に記載されたイベントを使用しました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes.

*GERARDO MANUEL MENDO PEREZ[1], HIROMICHI NAGAO[1]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The occurrence of slow earthquakes is a phenomenon of interest due to its direct relation to large megathrust earthquakes in subduction zones around the world. Since the discovery of this type of seismicity by Hirose et al. (1999) and Obara (2002) in Japan Trench and Nankai Trough respectively, active research has been done to understand the source, occurrence, and relation to “fast” seismicity. Specially, the detection of slow earthquakes is a challenging area of research due to the relatively low amplitude of these signals and the specific bandwidths in which they are found. For this reason, many detection and processing methodologies have been developed, and some of these are already being applied with successful results and high accuracy. **In this work, we explore and propose an alternative workflow to detect low frequency earthquakes and tectonic tremor.** In this methodology we create an initial catalog of events by applying an RMS amplitude-based detector and classify the initial detections using clustering techniques to discriminate between events and noise. The coherent families of events are selected as templates in a template-matching procedure using information from both spectral and temporal domains. At this point, we present the preliminar results of the initial stage of the framework using Morlet wavelets embedded in Gaussian noise and observed waveforms.

© The Seismological Society of Japan

Which is more suitable for polarity determination using deep learning, time series data or image data?

*Shinya KATOH[1], Yoshihisa IIO[2], Hiroshi KATAO[2], Masayo SAWADA[2], Kazuhide TOMISAKA[2]

1. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University

地殻応力場の推定は、テクトニクスや地震発生を理解する上で不可欠である。地殻応力場を推定する一つの手段として、微小地震のメカニズム解を用いる方法がある(Iio et al., 2018; Imanishi et al., 2019)。観測された鉛直成分のP波初動の極性を用いてメカニズム解を推定するが、これまでP波極性は主に人間が手動で決定していた。しかし、稠密地震観測網の展開に伴い、観測点が増加し、P波初動の極性の判定量が増え、全てのデータを人間が処理するのは時間的側面から非効率的になってきた。

近年、地震学における深層学習の応用が増えてきており、P波初動の極性判定を人間と同等の精度で行う深層学習モデルが開発されている(Ross et al., 2018; Hara et al., 2019; Uchide, 2020)。これらのモデルは、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を使用し、極性がUPまたはDOWNか(+判別不能か)を分類する。これらのモデルへの入力データは鉛直成分の時系列データ(一次元データ)であり、CNNモデル内での特徴量の取得には1次元フィルタが主に使用されている。

一方、画像分類などが目的のCNNは2次元フィルタを使用するのが一般的である。2次元フィルタは、二次元データ(画像)の特定のピクセルを中心に、その周囲のピクセルの情報を取得する設計になっている。このフィルタを使って画像上をスライドさせることで、ピクセル間の関係やパターンを捉えることができる。そのため、P波初動の振幅の方向を判断する際、UPかDOWNの振幅を判定するためには、直感的に2次元フィルタを使用した方が適しているように思える。実際に、人間は波形を画像として表示してから極性の判断をしている。しかし、先行研究では1次元フィルタが主流であった。

そこで、本研究では、極性判定を目的としたCNNモデルにおいて、一次元フィルタと二次元フィルタのどちらが適しているのかを検証した。具体的には、(1)入力データが時系列データ(1Dデータ)のモデル、(2)入力データが画像データ(2Dデータ)のモデル、及び(3)入力データは1Dであるがモデル内で転置畳み込みを行い2Dデータに変換したモデル、の3つのモデルを作成した。これらのモデルは基本的に入力データの違いを除き、モデル構造に大きな違いはない。使用したデータは、満点地震観測網(三浦・他, 2010; 飯尾 2011; 飯尾・他, 2017)とその周辺の定常観測点や臨時観測点(Hayashida et al., 2020; Iio et al., 2021)から得られた波形で、極性の判定は人手で行われた。モデルの出力はUP, DOWNまたは判定不能の3クラスそれぞれの確率値である。

3つのモデルの検証には次の (1)人間の決定精度との比較と(2)メカニズム解を求めたときの一致率の比較の二つの方法を使用する。(2)のメカニズム解はマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた最適化によって求める。そして、この時、出力確率値によってメカニズム解推定に使用するかどうかの閾値の決定も行なった。

本発表では、3つのモデルを比較し、極性判定に最も適した入力データの形状について議論を行う。

© The Seismological Society of Japan

Fast Smoothing Method for Spatiotemporal Data and Its Application to Seismic Wavefield Reconstruction

*Yoshikazu Terada[1,2], Hidetoshi Matsui[3], Hiromichi Nagao[4]

1. Osaka Univ., 2. RIKEN, 3. Shiga Univ., 4. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

計測技術の発展に伴い, 時空間データの取得が容易になっている. 様々な分野で時空間データの解析の重要性が増している.本発表では, 限られた観測地点の時系列データから未観測時点の時系列データを予測・補完する時空間データに対する平滑化問題を扱う. 一般に, 時空間データに対する平滑化法は, 計算コストが高いという問題点がある. 例えば, クリギング法では, 未観測地点ごとにパラメータを推定する必要があり, 地震波動場再構成への応用では計算コストが問題となる. また, クリギング法は定常性の仮定が適切ではない場合に, 精度が良くない. そこで, 本研究では, 未観測地点ごとのパラメータ推定を必要としない基底関数展開に基づく平滑化法に注目する. まず, いくつかの既存の平滑化法を統一的な視点から俯瞰し, それらの関連性を明らかにする. そして, 直交化した基底関数を用いた高速な平滑化法を提案する. 数値実験を通じて, 既存手法と比較を行うことで, 提案手法を用いることで推定精度を落とさず大幅な高速化が可能となることを示す. また, 提案手法を長周期地震動に対する地震波動場の再構成問題へと応用する.

© The Seismological Society of Japan

Hypocenter-based Visualization of Multiscale Earthquake Faults: Application to Crustal Earthquakes in Japan Islands

*Yasunori SAWAKI[1], Yoshihiro SATO[2,3], Takahiko UCHIDE[1], Haruo HORIKAWA[1], Takahiro SHIINA[1], Yuta AMEZAWA[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Tokyo City University, 3. Artificial Intelligence Research Center, AIST

詳細な断層面形状を調べることは，地殻の変形や局所応力場，地殻内流体の挙動といった地震テクトニクスの理解に欠かせない．地震は断層面における高速すべりであるため，地震活動の三次元分布，つまり震源分布は，断層面形状を反映していると期待される．また，地震活動は主断層だけでなく，共役断層や小断層などでも発生することから，震源分布を詳細に調べることで，様々なスケールの断層構造が抽出できる可能性がある．

断層面の三次元形状を客観的に推定する手法として，教師無し機械学習による震源クラスタリングを用いる手法が提案されている．Ouillon et al. (2008) は，k-means法による震源クラスタリングによって，一枚の初期断層面から細分化した断層面の位置とパラメータ，およびその枚数を動的に決定するアルゴリズムを開発した．逆にKamer et al. (2020) は，“ボトムアップ”式の凝集型クラスタリングによって，初期の小規模構造から大きな構造を生成する手法を提案した．Truttmann et al. (2023) は，震源決定誤差を用いた震源のモンテカルロ・サンプルに対して，重心からの近傍点位置を主成分分析にかけて断層面を推定するアルゴリズムを考案した．これらの手法はそれぞれ，大断層面から小さいスケールの断層面まで推定しているものの，震源位置に対してのみクラスタリングを実施しているため，局所構造が存在する場合それらを適切に区分できない可能性があった．

そこでSato et al. (in prep.) は，仮想断層面の法線ベクトルと震源位置による二段階クラスタリング法を提案した．この手法では，予め全てのイベントが何らかの断層面上で発生すると仮定し，その法線ベクトルのクラスタリングを行うことで，複雑な断層面の大局的な面構造を保持したまま断層面を細分化し，断層面の局所構造を把握できる．本研究では，Sato et al. (in prep.) の手法を改良して日本国内で発生した地殻内地震に適用し，様々なスケールの断層面の客観的検出を試みた．

Sato et al. (in prep.) の解析は次の手順で行われる．まず前処理として，個々のイベントに対して法線ベクトルを求める．具体的には，着目しているイベントの周囲から，予め設定した数の最近傍震源を選び，震源位置の主成分分析を行い，得られた最小固有値に対応する固有ベクトルを抽出する．この固有ベクトルを，各イベントの法線ベクトルと定義する．次に，得られた法線ベクトルに対して，コサイン距離を用いた凝集型クラスタリングを行い，法線ベクトルの向きが近いイベントのクラスタを作成する．そして，個々のクラスタに対して，震源位置によるクラスタリングをHDBSCAN (Campello et al., 2013) を用いて行い，距離的に近い小クラスタを作る．この小クラスタに主成分分析を実施して面を作成し，断層面の候補とする．最後に，推定した面を既存の断層モデルやメカニズム解と比較し，検出条件に合う面を断層面として抽出する．

本研究では，Sato et al.の手法のうち，クラスタリングや面検出条件等を改良した．また，気象庁一元化震源カタログからMj 1.0以上のイベントを抽出し，HypoDD (Waldhauser & Ellsworth, 2000) による走時情報のみを用いた相対震源再決定を行った．対象として，本震–余震型の内陸大地震が発生した地域の地震活動と，顕著な群発地震活動が発生する地域に着目した．内陸大地震の例では，2000年鳥取県西部地震(Mw 6.8)や新潟県中越地震(Mw 6.8)などの地震活動カタログに適用した．鳥取県西部地震では，北北西–南南東の主断層と複数の共役断層が知られているが(e.g., Fukuyama et al., 2003; Kato et al., 2021)，当手法でもこれらの断層面を検出できた．また，群発地震にも面構造が見受けられる場合があるため，和歌山県北部や能登半島の群発地震活動(e.g., Nakajima, 2023; Amezawa et al., 2023)に対しても当手法を適用した．推定された面構造と地震

© The Seismological Society of Japan

活動の空間関係について議論する．

なお，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ある．また，気象庁一元化震源カタログを使用した．

© The Seismological Society of Japan

Construction of a high-performance volcanic earthquake phase detection model using deep learning and examination of its transfer learning

*Yuji Nakamura[1,2], Ahyi Kim[1], Yohei Yukutake[3], Yuki Abe[4]

1. Yokohama City University, 2. activecore, Inc., 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

火山地帯では度々火山活動に関連した活発な群発地震が発生し、それらの迅速な検出、検測は火山防災において非常に重要である。しかし現在、これらのプロセスは最終的には人間の判断に委ねられ、膨大な時間とコストを要し、リアルタイムでの詳細な検証は不可能である。この問題を解決するため、近年多くの地震観測で機械学習モデルが開発されその有用性が確かめらおり、すでに膨大な訓練データを用いた学習済みモデルがいくつか公開されている。それらをそのまま適用して問題無い事例もあるが、学習データの地域依存性も報告されている（ Münchmeyer et al., 2022）。特に本研究のターゲットは火山地帯という特殊な地域で発生する地震であるので、主に地殻内地震の波形で学習した既存の学習済みモデルは適用が難しい可能性が指摘されている（Kim et al., 2023）。本研究では箱根火山で発生する地震をより精度良く検測できるモデルの構築を目指し、U-Net の構造に再帰残差ユニットと注意機構の両方を追加したR2AU-Net を用いた学習モデルを構築し、箱根火山で発生した1999 年から2020 年までの約30,000 イベント（波形数約170,000）の地震波形に対して性能評価を行った。結果として箱根火山の地震データで学習したモデルのP 波検測のPresicion, Recall はそれぞれは93.0%, 94.8%となり、既存のPhaseNet（ Zhu and Beroza, 2018）のアーキテクチャを使用して本研究と同じ箱根の観測データを用いて学習したモデル(Kim et al., 2023)の検出性能（P 波 Presicion＝90.9%, Recall＝86.5%）と比較して大幅に向上した。また、本研究の学習済みモデル(modelHKN)前半のエンコーダ部分の重みを固定し、後半のデコーダ部分の重みを初期化することで、学習済みモデルの転移学習を行う事が可能である。転移学習ではイベント数が2,300 程度とデータ数が箱根の13 分の1 である霧島火山の地震を用いた(ModelKSM)。それらを学習に用いていない霧島の観測データに適用した結果、modelKSM ではP 波のpresicion、Recall がそれぞれが98.6%, 96.2%となり、modelHKN をそのまま適用（P 波 Presicion＝96.8%, Recall＝95.5%）するより地震波検測の精度が向上した

© The Seismological Society of Japan

Machine-learning model of GNSS displacement rate estimation using seismic waveforms in western Shikoku

*Kazuki OHTAKE[1], Aitaro KATO[1], Yutaro OKADA[2], Takuya NISHIMURA[3]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Kyoto University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

南海トラフのプレート境界では、固着域と深部安定すべり域の遷移領域においてスロー地震が起きている。スロー地震には、測地学的帯域で観測されるSSEと、地震学的帯域で観測されるtremorやLFE等が知られており、巨大地震との関連が指摘されている(Kato and Obara, 2016)。近年、継続時間が数日程度の短期的SSE（S-SSE）が、GNSSデータを用いて検出されるようになったものの(Nishimura *et al.*, 2013, Okada *et al.,* 2022)、傾斜計やひずみ計に比べてGNSSデータは感度が低いためS-SSEの検出が難しく、特に小さな規模のSSEは見逃している可能性がある。一方で、SSEとtremorの同期現象は、カスカディア沈み込み帯で発見され(Rogers and Dragert, 2003)、その後西南日本でも見つかった(Obara and Hirose, 2006)。Rouet-Leduc *et al.* (2019)は、カスカディア沈み込み帯の連続地震波形記録に機械学習を適用することで、GNSS観測点の変位速度を推定できることを示した。本研究では、西南日本の連続波形記録を用いて、機械学習により南海トラフ沿いで発生するSSEをより高精度に検出することを目指す。ここでは、その第一歩として、四国西部の連続波形記録を用いて、機械学習により四国西部のGNSS観測点の変位速度を推定する。

2. 機械学習による連続波形記録の特徴量に基づくGNSS変位速度の推定

ここでの目的は、四国西部の連続波形記録の統計的特徴量を用いて機械学習を行い、地表のGNSSの変位速度を推定できるかどうかを調べることである。

連続波形記録は、四国西部の複数のHi-net観測点のデータを用いる。1日ごとに切り出し、平均の除去とデトレンドを行う。5-6 Hz、6-7 Hz、･･･ 14-15 Hzというように1Hz刻みでバンドパスフィルターをかけたデータを作成する。各帯域のデータに対し特徴量として、データの範囲、RMS、モーメント、パーセンタイル（百分位数）を計算する。特徴量は10日間移動平均をとり、さらにそれぞれの特徴量の時間変化を計算して、これらも特徴量として追加する。

測地データは、四国のHi-net観測点の近くにあるGEONET観測点を用いる。Okada *et al.* (2022)の方法で、機器メンテナンスによる人為的変化・大地震・噴火等によるオフセットを補正し、91日間移動平均でデトレンドし、共通誤差（Common Mode Error）を取り除く。このデータから観測点の変位速度を最小二乗法による線形回帰により求め、10日間移動平均をとる。

地震データの特徴量を学習データ、GNSS変位速度を教師データとして機械学習を行い、四国西部の連続波形記録の特徴量から、SSEにともなうGNSSの変位速度を推定するモデルを構築する。

3. 今後の展望

複数のGNSS観測データについても学習を行い、観測点ごとに変位速度推定モデルを構築する。Nishimura *et al.* (2013)やOkada *et al.* (2022)で検出されたS-SSEが検出できるか、さらに既存の手法では検出できないS-SSEが機械学習で検出できるか調べる。連続波形記録を用いた機械学習によるS-SSE検出手法を確立し、将来的には南海トラフ以外の地域にも適用することを目指す。

© The Seismological Society of Japan

Evaluation of GNSS-A positioning accuracy using a simple numerical model and the PyMC library

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

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

GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）はGNSSと海中音響測距を海上プラットフォームで結合することで海底の絶対位置をセンチメートル単位で測定する技術であり，陸域GNSSでカバーできない海底の地殻変動を捉えることができる．GNSSの誤差要因として，電波の大気遅延やマルチパス等が知られているが，GNSS-AはGNSSの誤差に加えて海中音速場の擾乱による音響測距への影響や，音響機器の特性に起因する測距誤差など，音響測距部分の様々な誤差要因が測位解に影響している．

GNSS-Aの音響測距部分の誤差を低減するため，近年は水槽実験によるソナーの機器特性由来の誤差の調査（永江ほか2023，地震学会）といったハードウェアの評価が進められている．その一方で，数値シミュレーションを用いてGNSS-A疑似データを作ることにより，海中音速場等の誤差要因の影響を評価する試みが行われてきた． Nakamura et al. (2021, FES) ではSnellの法則に基づいた音線計算アルゴリズムを用いて作成した疑似GNSS-Aデータから，海上プラットフォームが航行する測線の形状・面積や，海底に設置した音響基準局のアレイの面積がGNSS-Aの測位解の及ぼす影響について評価し，現在の海上保安庁のGNSS-A観測における測線配置の妥当性について議論した．また，音波の三次元的な屈折を考慮し，PythonのEikonal方程式ライブラリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いたGNSS-A数値シミュレーターを開発しており，これまでに海中音速場の水平傾斜層に由来する測位誤差について検討を行ってきた（中村ほか2022，地震学会など）．

本研究では，音線の屈折による影響を考慮しないシンプルなGNSS-A数値モデルを用いて，GNSS-Aの様々な誤差要因について改めて検討する．作成した疑似データはマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC）を取り扱うPythonライブラリ「PyMC」を用いて構築したモデルにより解析した．得られた測位解の事後分布を基に，GNSS-Aの測位解の精度について議論する．

© The Seismological Society of Japan

Acoustic waveform analysis for GNSS-Acoustic observation using Machine Learning

*Naoki Kurosu[1], Motoyuki Kido[2]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute for Disaster Science, Tohoku University

海底の地殻変動を計測する方法の一つであるGNSS-Acoustic (GNSS-A) 観測は、電波を用いて海上の船のグローバル座標を決定するGNSS測位と、海中音波を用いて船からの海底基準点の位置を決定する音響測距とを組み合わせて、cmの精度で海底基準点のグローバル座標を決定する手法である。このうち音響測距では、船から発信した音波を、海底基準点を構成する複数の海底局がミラー応答する。これを船で受信することで音波の往復時間から両者間の距離を求める。船の位置を変えながら測距を繰り返し１日程度のデータを統合することで海底基準局の位置を推定する。最大で10kmの距離に達する音響測距には海水の吸収減衰が少ない10kHz、波長にすると約15cmの比較的低い周波数の超音波を使用する必要がる。波長の1/10に相当する0.01msの精度で往復走時を計測するため、10kHzの搬送波をM系列に従う疑似乱数のタイミングで位相変調した音響信号を用い、送信波・受信波間の相互相関関数（相関波形）にサイドローブの少ない明瞭なピークが立つように設計してある。しかし、実際の相関波形の形状は、反射波の混入などの影響で多くのサイドローブが現れ、最大ピークが真の走時でない場合が殆どである。現状ではこの問題に対して、熟練者が正しいピークをサイドローブの中から選定し、それをテンプレートと定めた後、マッチング処理により走時を自動で検出していた。しかし、テンプレートの作成者によって結果が異なることがある点や、波形のバリエーションが大きかったりするとテンプレートマッチングが十分機能しないことがあるなどの課題があった。そこで、本研究では機械学習の一つであるConvolutional Neural Network (CNN) を利用し、相関波形から音波の往復走時を自動決定する仕組みを作ることを目的とした。なお、相関波形の形状は音波の射出角や利用船舶、観測点水深に依存するが、今回は対象とする船舶を無人観測機であるWave Glider に限定することで、問題を単純化して取り組んだ。本研究では、三陸沖の海底に設置された18ヶ所の観測点で2020～2022年に実施された、計6回の観測で得られたデータを使用した。相関波形の１波長相当を便宜上8サンプルで表現して解析を実施した。CNNへの入力値には、最大相関となるサンプル位置を中心とした前後120サンプルずつ（データ長：241サンプル=241×10^{-5} s）を、最大相関値で規格化した相関波形データを使用した。正解値は、従来のテンプレートマッチング手法により決定されたピークの位置とした。観測で得られたデータのうち、1～4回目の観測で得られたデータの8割をCNNの学習用に、2割をCNNの精度の検証に使用した。学習を終えたCNNに2割の検証用データを流した結果、従来手法とCNNによる走時検出の差異のRMSは2.10サンプル（= 2.10×10^{-5} s）となり、両者でほとんど同じピークを検出することが分かった。学習を終えたCNNに最新の2回の観測で得られたデータを流した結果についても調べたところ、検証用データを流した結果とおおむね同様な結果であった。一方で、一部の観測点では従来手法と異なるピークをCNNが検出するデータも見られた。このデータのテンプレートと、従来手法とCNNとでほとんど同じピークが検出された別のキャンペーンで得られたデータのテンプレートとで、熟練者の判断したピークの位置を比較した。その結果、従来手法とCNNとで異なるピークが検出されたデータのうち、CNNによって検出されたピークの位置の方が、従来手法とCNNとでほとんど同じピークが検出されたデータのテンプレートにおいて熟練者が判断したピークの位置と一致することが分かった。このことから、CNNの検出ピークの方が正しく、従来手法の検出ピークに誤りがあることが発見された。 今後、よりバリエーションに富んだ音響波形についてもCNNの有用性を検証するため、千島海溝根室沖の海底に設置された３ヶ所の観測点で2019～2022年に実施された、計6回の観測で得られたデータをトレーニング済みのCNNに流すことを検討している。

© The Seismological Society of Japan

Development of a Seismic Phase Pick System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

*Yukino Yazaki[1], Yuji Nakamura[1], Hiroki Uematsu[1,2], Ahyi Kim[1], Masami Yamasaki[1]

1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics

地震大国である我が国では、様々な機関において高密度振動観測網が展開され、各地点での震度の即時計算および効果的な地震速報の発令を可能にしている。しかし、現状では地震計の設置間隔である20 kmより細かい解像度での震度計測は不可能であり、緊急地震速報も約30 km圏内で発生した地震に関しては対処できない。また、近年、都市部では高層ビルやマンションの建設が急速に進んでおり、同じ建物内でも階や柱からの近さにより、被害の現れ方が異なる。つまり、人口が集中する都市部に対し、現行の大域的な震度予測だけでは被害状況の把握と予想には不十分である場合も考えられる。 そこで、本研究では、既存の観測網に加えて一般家庭にも設置できる地震計を提案し、高精度な即時地震動検出の実現を目的とする。この地震観測網はCSN（Citizens Seismic Network）(金, 2016)と称し、神奈川県横浜市の複数箇所に設置を進めている。具体的な作成手順は次のようである。比較的安価に入手が可能であるMEMSセンサー(witmotion)に、小型の演算装置ラズベリーパイを接続し、3成分方向の加速度の逐次データを取得する。次に、このデータから地震を判定するモデルを作成する。最後に、モデルをラズベリーパイで演算可能とし、センサーが受け取った加速度データに対して、即時に地震の判定を行う。 本発表では、上記のうち、地震動の検出モデルの構築に焦点を当てる。センサーデータに対し、古典的な地震検知法であるsta/lta比による地震判定を行ったところ、真の地震だけでなく、その倍以上のノイズを地震として誤判定した。この問題を解決するため本研究では機械学習モデルを使用したアプローチを検討する。位相検出モデルは中村他(2023, 本大会)が性能評価を行なったR2AU-Netを用いた。このモデルは学習に火山地震波形を使用しているため、STEAD(Mousavi,2019)でスクラッチ学習を行い、学習パラメータや学習率、閾値を変化させて最適なモデルを検討した上で、性能評価を行う。また、類似研究であり、台湾の地震動データを学習したARRU(Wu et al.,2019)におけるSTEADでの学習結果とも比較する。validデータでの評価において、presicioonはp波,s波検測ともに99.9%を達成し、recallはp波,s波検測ともに99.8%という結果が得られた。ただし、これはピックサンプルの閾値0.5秒、出力確率の閾値0.3として、ARRUと同様の閾値を用いた結果である。閾値を含む学習パラメータの探索および検討が必要である。 さらに、CSNでは学習と検証に使用するデータに十分な量のデータが蓄積されていないので、防災科学技術研究所が運用する強震計ネットワークK-NETから取得したデータを使用する。このデータにはP/S波の情報がないため、機械的または人為的に位相検出したデータが必要である。はじめに、大規模のK-NETデータに対して、ObsPyライブラリのar_pickerメソッドを用いて位相検出したデータを使用して学習モデルで検証したが、低い精度結果となった。これは、ar_pickerモジュールの位相検出がうまくいっていなかったことが原因である。そこで大規模のK-NETデータを使用せずにモデルを構築するため、第一段階の学習には世界中の様々な観測点で取得された大規模検測済みデータSTEAD(Mousavi, 2019)を用いる。作成したモデルは、実際のCSNデータに適用して地震動の検出を試み、その性能を比較検証する。さらにモデルの運用についてラズベリーパイへの実装可能性も含めて検討する。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S05. Geothermal science

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P5 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S05P] PM-P

[S05P-01] Ground surface temperature history reconstruction from borehole temperature data off-shore of the Kii Peninsula to Shikoku region

*Akiko TANAKA[1], Shusaku GOTO[2] (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. GREEN, Geological Survey of Japan, AIST)

Ground surface temperature history reconstruction from borehole temperature data off-shore of the Kii Peninsula to Shikoku region

*Akiko TANAKA[1], Shusaku GOTO[2]

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. GREEN, Geological Survey of Japan, AIST

地表面温度の時間的変動は地下の温度プロファイルに影響を及ぼす．地殻熱流量を求める際には，地表面の温度変動は温度プロファイルへノイズを与えることになる．逆にこのノイズを，地表面の温度変動の情報をもたらすシグナルと考えることもできる．この考えに基づき，坑井温度プロファイルの解析を通して，過去の地表面温度の変動披瀝を推定することが可能となる．この "borehole climatology" は，ヨーロッパや北米において盛んに研究されてきた．しかし，日本を含むアジア地域のデータは乏しい．本発表では，日本周辺域に存在する坑井温度プロファイルを活用し，データの空白域を埋めようとするものである．地域差を考慮したグローバルな温度変動が明らかになる．

紀伊半島～四国周辺の地下水等観測施設 14 点における 600m の深さを原則とした観測井戸のデータ [小泉・他，2009] を用いて過去の地表面温度の変動披瀝の推定を行った．温度プロファイルを，Horner plot 法により補正し，この補正された温度データと新たに測定した熱伝導率を元に，Goto et al. [2009] による方法を用い，地表面温度履歴復元を行った．予察的に行った結果では，その場の地質構造・得られている柱状図や，他のデータなどとも調和的である．

最初の熱流量測定が 1957 年に行われて以来，精力的に測定が行われ，1970 年頃までには, 日本列島付近の熱流量分布の大まかな特徴が明らかになっている [山野・他，1997]． また，日本列島の地殻表層の温度構造を示すデータの一つとして，300m 以深の坑井の温度データによる地温勾配値のコンパイルがなされている [田中・他 (2019)]．さらに，防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net) の掘削孔において温度検層が約 800 点においてなされ，地殻熱流量が調べられている [e.g., Matsumoto, 2008]．しかし，依然として，紀伊半島～四国周辺の陸域の温度構造を規定するデータに乏しい．ここで得られた 地殻熱流量はこれらを補完するために重要な情報ももたらす．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S06. Crustal structure

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P6 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S06P] PM-P

[S06P-01] A time-lapse analysis of multi-channel seismic reflection data using seismic attenuation profiling

*Tetsuro TSURU[1], Tetsuo NO[2], Kazuo YAMAGUCHI[3], Jin'Oh PARK[4] (1. TUMSAT, 2. JAMSTEC, 3. AIST, 4. AORI)

[S06P-02] Time-lapse seismic reflection study off Tokachi

*Tetsuo NO[1], Tetsuro Tsuru[2,1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Kazuo Nakahigashi[2], Seishiro Furuyama[2], Ryo Miura[1], Shuichi Kodaira[1] (1. JAMSTEC, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology)

[S06P-03] Seismic velocity structure off the east coast of Aomori Prefecture revealed by airgun ocean bottom seismometer survey.

*Tamaki Ishibashi[1], Kazuo Nakahigashi[2], Tomoaki Yamada[3], Kimihiro Mochizuki[3], Yoshio Murai[4], Ryota Hino[5], Ryosuke Azuma[5], Toshinori Sato[6], Masanao Shinohara[3] (1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Academic Research Faculty, Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Institutw of seismology and Volcanology Faculty of science, Hokkaido University, 5. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 6. Graduate School of Science, Chiba University)

[S06P-04] Structural characteristics of the incoming plate in the Japan Trench and their correspondence to the megathrust slip styles

*Yasuyuki NAKAMURA[1], Gou FUJIE[1], Shuichi KODAIRA[1], Mikiya YAMASHITA[2], Koichiro OBANA[1], Tetsuo NO[1], Seiichi MIURA[1] (1. JAMSTEC, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

[S06P-05] Estimation of shear velocity structure near the Japan and Kuril Trench junction using ambient noise records

*Ryota TAKAGI[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Hino[1], Kiwamu Nishida[2], Masanao Shinohara[2] (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

[S06P-06] Anisotropic structure at shallow depths near the Japan Trench

*Takashi TONEGAWA[1], Katsuhiko Shiomi[2], Ryota Takagi[3] (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Tohoku University)

[S06P-07] Ambient-noise cross-correlation analysis using three-components broadband coutinuous ground motion records in the Nansei Islands

*Masanao Komatsu[1], Sohei Urakami[2], Hiroshi Takenaka[3], Genti Toyokuni[4], Mamoru Nakamura[5], Shutaro Sekine[6], Shintaro Abe[6] (1. Okayama Gakuin University, 2. Formerly Okayama University, 3. Okayama University, 4. Tohoku University, 5. University of the Ryukyus, 6. Association for the Development of Earthquake Prediction)

[S06P-08] Shallow crustal anisotropy in Eastern Türkiye based on the receiver function analysis

*Katsuhiko SHIOMI[1] (1. NIED)

[S06P-09] Temporal variations in seismic anisotropy above a megathrust zone following slow-slip events

*Yosuke Ito[1], Junichi Nakajima[1] (1. Tokyo Institute of Technology)

[S06P-10] Estimation of crustal structure in southeastern Kanagawa Prefecture using P-wave correlation analysis of distant earthquakes

*Kazuo YOSHIMOTO[1] (1. Yokohama City University)

[S06P-11] Constructing a 3D seismic velocity model of the Nankai Trough

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

[S06P-12] A dense seismic array observation in the eastern part of Shikoku Island, southwestern Japan

*Eiji KURASHIMO[1], Takashi Iidaka[2], Noriko Tsumura[3] (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo, 3. Faculty of Science, Chiba University)

A time-lapse analysis of multi-channel seismic reflection data using seismic attenuation profiling

*Tetsuro TSURU[1], Tetsuo NO[2], Kazuo YAMAGUCHI[3], Jin'Oh PARK[4]

1. TUMSAT, 2. JAMSTEC, 3. AIST, 4. AORI

１． はじめに

反射法地震探査データは、しばしば地殻構造の幾何学的形状を調べる手法として用いられている。層構造や、その空間変化を調べるのに有効な手法である。また、反射波の側方方向のズレ（オフセット）を検知することにより、断層の発達を特定できる。また、断層破砕帯の間隙圧の検知にも利用される。地震による断層活動に伴う水の移動などによって断層破砕帯内部の間隙圧が上昇した場合、反射法地震探査データ上では反射波の振幅が変化する。しばしば、位相が反転した強振幅の反射波が観察され、いわゆる振幅異常と呼ばれる現象が見られる。しかし、その断層が正断層や横ずれ断層で、傾斜が高角である（急傾斜である）場合、反射波を正確に捉えることが難しい。そのような場合は、たとえ間隙圧が上昇していたとしても、反射法地震探査データ上では何ら振幅異常が観察されないことになる。そのような背景のもと、我々は、反射法地震探査データの減衰特性に着目して岩石物性を推定する解析（seismic attenuation profiling：SAP）を試みている。今回は、日本海溝三陸沖の同一測線において異なる時期に収録された3つのデータセットを用いて、SAP解析を実施した結果について報告する。

２．解析および結果

解析に使用したデータは、1997年10月（測線名SR101）、2009年11月（測線名：A3obs）および2011年9月（D19）の3つであり、いずれも同じ測線上で観測された反射法地震探査データである。それらに対してSAP法（たとえば、Tsuru et al. 2018, EPS）を適用し、減衰特性の空間変化に加えて時間変化を追跡できないか試みた。この手法は、反射法地震探査データから相対的なQ値を求め、その空間変化変化に基づいて岩石の減衰特性を評価するものである。なお、Q値の推定にはスペクトル比法を使用している。解析対象エリアは、日本海溝アウターライズにおいて正断層が多く発達する場所である。解析目的は、その場所においてPark et al. (2021, scientific reports)によって発見された正断層を介した地殻ーマントル間の大規模流体循環の時間変化を追跡することである。解析の結果、1997年と2009年のデータでは減衰特性に特に異常は見られなかったものの、2011年のデータには明らかな高減衰異常が見られた。

３．考察

今回の解析結果に現れた高減衰異常を、断層に沿った流体移動による間隙圧上昇に起因する現象であると仮定すれば、その流体移動を招いた地震として、地震の規模から考えると、まずは2011年3月の東北地方太平洋沖地震（Mw9.1）あるいはその余震が候補としてあげられるであろう。特に、この高減衰異常が見られた場所の約95km南南西では、本震の約40分後にMw7.6の正断層型地震が発生しており、地震断層はマントルまで達している(e.g., Obana et al. 2012, GRL)。現時点では未だ検討中であるが、今回検出された高減衰異常は、この地震のようにマントルまで達する大規模な断層活動によって発生した破砕帯およびそこに上昇してきた流体による間隙圧の上昇を捉えている可能性を示唆しているのではないかと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Time-lapse seismic reflection study off Tokachi

*Tetsuo NO[1], Tetsuro Tsuru[2,1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Kazuo Nakahigashi[2], Seishiro Furuyama[2], Ryo Miura[1], Shuichi Kodaira[1]

1. JAMSTEC, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology

十勝沖はM8前後のプレート境界型の大地震がここ100年で複数回発生していて、直近で発生したのは今からちょうど20年前の2003年9月である。この地震に関連した研究の１つとして、Tsuru et al. (2005)は、海洋研究開発機構（JAMSTEC）の深海調査研究船「かいれい」に搭載されているマルチチャンネル反射法地震探査システムを用いて、地震発生前の2000年6月と地震発生後の2003年12月に実施した反射法地震探査のデータを用いて、地震前後での反射面のイメージの変化の抽出を試みた。その結果、2003年十勝沖地震の震源域付近に相当する位置における反射面でイメージの変化を抽出することに成功した、この反射面における反射率の変化は約2.7倍と見積もられ、P波速度の1.9%減少、空隙率の1.6%増加、剪断応力の2.2～5.6MPa減少に相当すると評価し、震源域付近での流体の移動によって生じた可能性を示唆した（Tsuru et al. 2005）。
2003年の地震発生以降、十勝沖においては、2008年に2003年の本震近傍でM7.1の地震が発生し、2012年には海溝海側斜面に位置している襟裳海山南東部で地震活動が活発化し、M6クラスの地震も2度発生した。また、地震調査研究推進本部は2017年12月に「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版）」を新たに公表し、それを受けてJAMSTECでは千島海溝北海道南東沖の地殻構造探査データの新たな取得を進めるために、2019年～2022年に「かいれい」や海底広域研究船「かいめい」を用いた調査を実施した。その調査の中で、Tsuru et al. (2005)の研究と同一測線にて、2020年に「かいめい」を用いて、新たな反射法地震探査データを取得することができた。
Tsuru et al. (2005) で用いた2000年と2003年のデータは、当時「かいれい」に搭載されていた同じデータ取得システム（エアガン・ストリーマーケーブルなど）を用いて、データ取得仕様（発震間隔・受振点間隔・曳航深度など）もほぼ同じ形で取得されたが、2020年の「かいめい」のデータは、データ取得システムは全く異なり、データ取得仕様も発震間隔を除くと異なっているパラメータが多い。そこで、データ解析上でできる限り2000年や2003年のイメージングに合わせたフローチャートで実施した。
本発表では、十勝沖で3回行った繰り返し反射法地震探査のデータを用いたイメージングの変化の抽出の試みについて、報告する。

参考文献：Tsuru et al. (2005) Did expanded porous patches guide rupture propagation in 2003 Tokachi-oki earthquake?, GRL, doi:10.1029/2005GL023753

© The Seismological Society of Japan

Seismic velocity structure off the east coast of Aomori Prefecture revealed by airgun ocean bottom seismometer survey.

*Tamaki Ishibashi[1], Kazuo Nakahigashi[2], Tomoaki Yamada[3], Kimihiro Mochizuki[3], Yoshio Murai[4], Ryota Hino[5], Ryosuke Azuma[5], Toshinori Sato[6], Masanao Shinohara[3]

1. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2. Academic Research Faculty, Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Institutw of seismology and Volcanology Faculty of science, Hokkaido University, 5. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 6. Graduate School of Science, Chiba University

1. はじめに

青森県東方沖は北米プレートに太平洋プレートが沈み込む海域であり、走向の異なる日本海溝と千島海溝の接合部の西方にあたる領域である。中期中新世以降、東北日本弧と千島弧が衝突し、このプロセスは日高衝突帯下での層間剝離構造など複雑な地殻構造の形成に関連している。また、青森県東方沖では過去には1896年の明治三陸地震、1933年の昭和三陸地震、1968年の十勝沖地震、1994年の三陸はるか沖地震が発生している。千島海溝では津波堆積物研究からM9レベルの大地震の発生可能性が指摘されている。このように複雑なテクトニクスが働いていると考えられるこの海域で地殻構造を明らかにすることは、地震の発生過程や特性を理解する上でも重要である。そこで青森県東方沖のテクトニクスや地震活動と不均質構造の関係を考察するために、海底地震計(OBS)とエアガンを用いて行われた構造探査のデータを解析した。

2. データ・解析

解析に用いたデータは、2005年10月10日から12日にかけて実施された、18台のOBSによる受震器、容量25Lのエアガン3台による発震源で構成する十勝沖地震、三陸はるか沖地震震源域での4測線、および、2007年5月28日～6月4日に実施された42台のOBSによる受震器と、容量25Lのエアガン1～3台による発震源で構成する海溝寄りの4測線の探査データである(図1)。

解析でははじめに得られた走時データから屈折波初動読み取りを行い、1次元モデルを作成し、続いて過去に周辺海域で行われた調査も参考にしながら2次元初期モデルを作成した。その後レイトレーシングプログラムRAYINVR(Zelt and Smith, 1992)によって２次元モデルから計算される屈折波と反射波の理論走時を計算した。観測走時と理論走時を比較し、走時残差が小さくなるようにモデルの修正を試行錯誤的に行うことによって最終モデルを決定した。

3. 結果・考察

解析の結果、測線下25kmまでのP波速度構造をイメージングすることができた。最上部には1.6-4.8㎞/sのP波速度を持つ堆積層が見られ、その層厚は最大9㎞である。堆積層の下にはP波速度がそれぞれ4.9-5.5㎞/s、5.5-6.3㎞/sを示す上部地殻、中部地殻が見られ、その層厚は2～8㎞の間で変化している。さらに中部地殻の下部にはP波速度6.3-7.0㎞/sの下部地殻が見られ、その層厚は2～10㎞の間で変化している。このように本研究領域の陸側地殻は、層内の水平方向の速度変化や層厚変化が大きいことが分かった。地殻内には層境界が不明瞭になるなど速度構造が特に不均質である領域がみられるが、これらは日高衝突帯と横ずれ断層が存在している領域の延長線上に位置する。また、下部地殻内にはP波速度が6.4km/sから7.0km/sに大きく変化する領域が見られるが、この領域は十勝沖地震の２つのアスペリティの間に当たり、この不均質構造はアスペリティの不連続と関連する可能性がある。このように青森県東方沖の複雑な地殻構造が地震活動に影響を及ぼしている可能性がある。

4. 謝辞

本研究を行うにあたり、観測の際に白鳳丸・新世丸、第五海工丸の船長以下乗組員の皆様には多大なご協力を頂きました。厚くお礼申し上げます。

© The Seismological Society of Japan

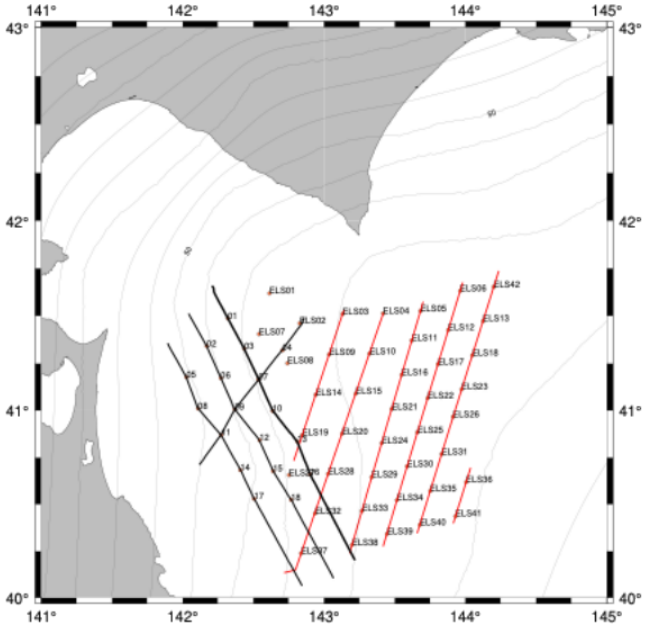


図1. 青森県東方沖における海底地震計設置位置および工アガン発信測線図。
黒が2005年、赤が2007年の測線を示す。
細線のコンタは太平洋プレート上面深度を示す。

© The Seismological Society of Japan

Structural characteristics of the incoming plate in the Japan Trench and their correspondence to the megathrust slip styles

*Yasuyuki NAKAMURA[1], Gou FUJIE[1], Shuichi KODAIRA[1], Mikiya YAMASHITA[2], Koichiro OBANA[1], Tetsuo NO[1], Seiichi MIURA[1]

1. JAMSTEC, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

日本海溝沈み込み帯では2011年東北地方太平洋沖地震（東北地震）を含む多くのプレート境界型地震が発生してきた。また近年、超低周波地震や微動、スロースリップなどの観測も報告されており、沈み込み帯における地震関連滑り現象を研究する上でも重要な場所である。我々は東北地震発生以降、日本海溝の海溝軸近傍で稠密測線による高分解能反射法地震探査を実施し、鹿島海山から襟裳海山付近までのほぼ日本海溝全域をカバーする測線でのデータを取得した。100本以上の反射断面の解釈を元に、海溝軸近傍の構造マッピングを行った結果、太平洋プレート上の堆積層厚さや地溝・海溝充填堆積物の分布、正断層の分布などのインプット構造の不均質性と、東北地震滑り域や微動・超低周波地震発生域との間には一定の対応があることがわかった。具体的には以下のとおりである。
・インプット構造の特徴から日本海溝は北緯37.5度以南、北緯37.5度ー北緯39.5度、北緯39.5度以北の3つのセグメント（北からそれぞれ、北部、中部、南部セグメント）に大きく分けることができる。
・東北地震での滑りが大きかった領域は中部セグメントの大部分にあたる。この領域に沈み込む構造は、堆積層が比較的薄く（約150-350m）、北部や南部に比べて西落ちの正断層が多い。充填堆積物はところどころに見られるが、顕著ではない。沈み込み帯の巨大地震は厚い堆積層が沈み込んでいる場所で起こるとされているが、東北地震はこれにあたらない。
・北部・南部セグメントでは微動や超低周波地震が観測されており、比較的厚い堆積物（約300m以上）が沈み込んでいる。ここでは東落ち正断層が多く、東落ち正断層の麓にあたる地溝の海溝寄りに充填堆積物が溜まっている。
・中部セグメントの北緯38.8度付近には水平方向約10kmスケールの範囲でみかけの堆積層厚さが薄く海洋地殻基盤が高まっている箇所がある。この西側の沈み込み帯でも微動や超低周波地震が観測されている。中部ー北部セグメント境界の北緯39.5度付近の海溝軸付近には、おそらくプチスポット活動由来と思われる約50kmスケールのみかけ堆積層厚さが薄い箇所があるが、この西側でも微動や超低周波地震が観測されている。

上記のように、日本海溝のインプット構造と沈み込み帯でのさまざまな断層滑り現象とには一定の対応が見られるが、たとえば微動・超低周波地震域には堆積層が厚い箇所と（見かけ上）極端に薄い（基盤の高まりがある）場所の双方が対応するなど、その関係性は複雑であるように見える。同じ太平洋プレートが沈み込む千島海溝は、特にその西端付近では海溝充填堆積物が非常に厚く（最大約500m）溜まっており、陸側斜面下では微動が観測されている。地塁・地溝構造を持つ海洋プレートが充填堆積物を含む厚い堆積層が溜まった状態で沈み込むことで、特に地溝内の柔らかい堆積物が沈み込み、プレート境界近傍の間隙水圧を上昇させるなどして微動や超低周波地震を起こしやすい環境を形成している可能性がある。これに加え、沈み込むプレートの基盤上の高まりは、小規模であっても微動や超低周波地震の発生に寄与しているのかもしれない。

© The Seismological Society of Japan

Estimation of shear velocity structure near the Japan and Kuril Trench junction using ambient noise records

*Ryota TAKAGI[1], Ryosuke Azuma[1], Ryota Hino[1], Kiwamu Nishida[2], Masanao Shinohara[2]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

日本海溝・千島海溝会合部では微動に代表されるスロー地震と通常地震が空間相補的に発生している。プレート走向方向に分布する微動発生帯には空白域（北緯40～41度）が存在し、その領域に1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の破壊開始点及びその余震が分布する(Tanaka et al., 2019)。この日本海溝・千島海溝会合部におけるプレート境界滑り様式の空間変化の要因を明らかにするため、本研究では、常時微動を用いた表面波解析により同領域のS波速度構造を推定する。使用するデータは、2006年10月から2007年6月までに実施された自己浮上型海底地震計を用いた海底地震観測による連続記録である。観測点間隔は約20 kmであり、S-netに比べてプレート傾斜方向に2/3程度、走向方向に1/3～1/2程度とより稠密である。まず、水平成分の方位を推定・補正し、常時微動の相互相関関数の全観測期間平均を計算した。その結果、周期10～20秒において、鉛直成分と Radial成分からレイリー波基本モードを、Transverse成分からラブ波基本モードを抽出した。次に、Takagi & Nishida (2022)の手法を用いて、抽出した表面波の位相速度分散曲線を推定した結果、例えば周期14秒のレイリー波基本モードでは観測網北部の微動発生域で2.76±0.05 km/s、南部の微動空白域では3.34±0.07 km/sと、微動空白域における位相速度が微動発生域に比べて20%程度速いと推定された。この位相速度の空間変化は、上盤内及びプレート境界付近のS波速度構造が微動発生域と微動空白域で異なることを示しており、構造不均質によるプレート境界における滑り様式への制約が示唆される。今後日本海溝・千島海溝会合部におけるより詳細なS波速度構造を推定し、S-netを用いて推定した広域3次元S波速度構造と合わせて解釈することで、日本海溝・千島海溝会合部における不均質構造とプレート境界における滑り現象の関係の理解を深められると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Anisotropic structure at shallow depths near the Japan Trench

*Takashi TONEGAWA[1], Katsuhiko Shiomi[2], Ryota Takagi[3]

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Tohoku University

日本海溝近傍から日本列島にかけて「日本海溝海底地震津波観測網」が展開されており、海底地震計のデータが2016年9月から使用可能となっている。利根川・汐見（2023, JpGU）では、この観測網の日本海溝外側に設置された海底地震計の遠地Pコーダ波記録を活用し、堆積層および海洋性地殻の異方性構造を推定した。本研究では、その手法を日本海溝内側の水深2,500 mより深いところに設置された海底地震計記録に適用し、浅部堆積層の異方性構造を推定した。また、利根川・汐見（2023, JpGU）では異方性構造の速い軸の方位のみをマップ上に表示していたが、本研究ではそれに加えて遅延時間の情報も考慮して表示した。つまり、日本海溝外側・内側の両方について、浅部堆積層の異方性構造のマッピングを試みる。 堆積層の底からのPs変換波を抽出するために、radial成分をvertical成分でdeconvolutionし、レシーバ関数を計算した。Vertical成分に海水層の多重反射波が混入するのを防ぐため、P波到達時刻からXX秒間のみの記録をdeconvolutionに使用した。水深2,500 mより浅い観測点の場合、直達P波と海面からの反射波との到達時間が近くて両者の分離が困難であるため、水深の深い観測点のデータのみを使った。周波数帯域は1-3 Hzである。異方性構造解析にはPs変換波に相互相関法を適用した。 結果について、日本海溝外側では遅延時間の大きさによってローズダイアグラムの大きさを変えてみたが、遅延時間にそれほど大きな変化はなく、結果の印象は変わらなかった。つまり、堆積層について、海溝外側の南側では速い軸は海溝軸に平行となり、北側では斜交するという結果になった。また、日本海溝外側の海洋性地殻についても遅延時間にそれほど大きな変化はなく、ほぼ海溝軸に平行という結果となった。その一方で、日本海溝内側の堆積層では、おおよそ太平洋プレートの沈み込み方向に平行となったが、福島県沖では直交、その他数カ所で遅延時間が小さくなるという結果になった。沈み込み方向に平行なのは上盤側の応力場を反映していると考えられるが、strike方向の変化は海底堆積物の堆積・変形過程の影響を受けていると考えられる。

© The Seismological Society of Japan

Ambient-noise cross-correlation analysis using three-components broadband coutinuous ground motion records in the Nansei Islands

*Masanao Komatsu[1], Sohei Urakami[2], Hiroshi Takenaka[3], Genti Toyokuni[4], Mamoru Nakamura[5], Shutaro Sekine[6], Shintaro Abe[6]

1. Okayama Gakuin University, 2. Formerly Okayama University, 3. Okayama University, 4. Tohoku University, 5. University of the Ryukyus, 6. Association for the Development of Earthquake Prediction

近年，地震波干渉法を用いた地震波速度構造の研究が盛んに行われている．この手法を用いることにより，2地点間を伝播するグリーン関数を抽出することができる．たとえば，抽出したグリーン関数から，表面波の群速度を見積もることができる．これらは群速度トモグラフィや既存の速度モデルの評価に用いられ，モデルの更新に役立てることができる．鹿児島県南部から沖縄県に及ぶ南西諸島において，数は多くないが構造探査や地震波トモグラフィなどにより，三次元速度構造が推定されてきている．また，この地域は地震活動が活発であり1771年の八重山地震など，被害地震も存在する．この地域において将来発生が予想される大地震の地震動予測のためには，速度構造の評価および検討が必要である．既往研究（邱・他，2017，地震学会秋季大会）では，南西諸島に設置された防災科研のF-netの7観測点で3年間観測された連続波形記録の上下動成分に対して地震波干渉法を適用し，各観測点ペアにおけるレイリー波の群速度を試みた．本研究では，F-netに加えて地震予知総合研究振興会（ADEP）が設置した地震観測点の波形記録を使用し，南西諸島で観測された3成分連続地動記録に対して地震波干渉法を適用し，各観測点ペアにおけるグリーン関数を抽出する．九州南端および南西諸島に設置されているF-netの7観測点とADEPの5観測点について（図1），2017年1年間の連続波形記録を使用した．連続波形を1638.4秒間ずつ切り取り，FFTの後に地震計特性の補正を行う前処理を施した．前処理を施した周波数領域のデータを用いて66観測点ペアについて相互相関関数をとり，この処理を1年分全てのデータについて行った．求めた相互相関関数をスタックし，逆FFTを行うことで時間領域に戻し，グリーン関数を抽出した．各グリーン関数には明瞭なピークが見られ，観測点間距離で並べると，表面波の伝播ならびに周期による表面波の分散が認められた．得られたグリーン関数（観測波形）に対して，3次元地下構造モデル（小松，2018）を用いて差分法により計算されたグリーン関数（理論波形）と比較するとたとえばAMM（F-net奄美大島）ーKGM（F-net国頭）ペアにおいて(図2)，周期20-40秒では両波形がよく一致しており，粒子軌道についてもRadial成分とVertical成分について，レイリー波の特徴を示すきれいな楕円軌道を描いていることがわかる．本研究ではさらに，抽出したグリーン関数について，時間ー周波数解析を行い，Rayleigh波とLove波の群速度を推定し，南西諸島の地下構造について考察する．

謝辞：防災科研のF-netならびに地震予知総合研究振興会の連続波形記録を使用しました．記して感謝いたします．本研究は東京大学地震研究所共同利用 (課題番号：2023-S-B102)，科学研究費助成事業（基盤研究(B) 課題番号22H01311）による援助を受けました．

© The Seismological Society of Japan

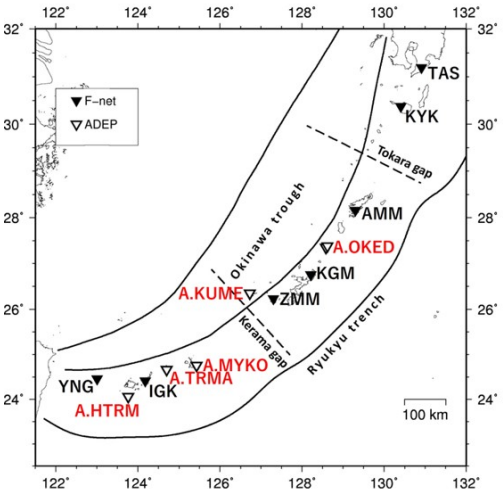


図1 観測点地図．黒逆三角が防災科研のF-net，白逆三角がADEPの観測点．

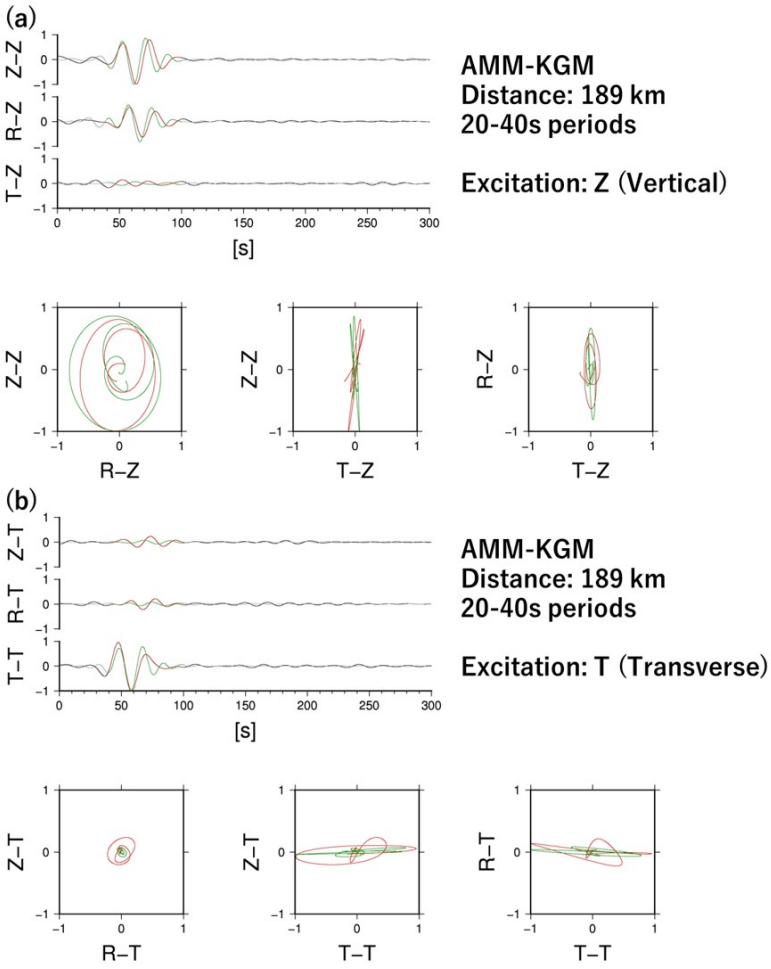


図2 AMM・KGMペアの観測波形(赤線)と理論波形(緑線)の比較．(a)Vertical方向加振，(b)Transverse方向加振．それぞれの上図は時系列の比較，下図は粒子軌道の比較．観測点名と成分名のうち，右側が加振点名と加振の向き，左側が受信点名と成分名．ZがVertical（下向き正），RがRadial，TがTransverseを表す．

© The Seismological Society of Japan

Shallow crustal anisotropy in Eastern Türkiye based on the receiver function analysis

*Katsuhiko SHIOMI[1]

1. NIED

地殻における応力場を把握する方法のひとつとして，地震波速度異方性がある．地殻内では，最大水平圧縮軸と平行な微小クラックが発達し，これ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ことに起因する．本研究では，トルコ共和国東部周辺に設置された広帯域地震計による遠地地震波形からレシーバ関数（RF）を推定し，そ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地殻浅部の異方性構造（速い軸の方位）を推定した．

解析には，トルコ・Kandilli地震観測所（KOERI），首相府災害緊急事態対策庁（AFAD）ならびにドイツ・ポツダム地球科学研究センター（GFZ）が設置し，公開している47地点の広帯域地震計記録を用いた．まず，USGSが公開している震源カタログから，各観測点において震央距離が30°から90°となるM5.8の地震を抽出し，IASP91モデルに基づく理論的なP波到着時刻の30秒前から2分間のデータをダウンロードし，S/Nの良好な記録のみを解析に用いた．RFの推定にあたっては，f_c=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に対してHarmonic decomposition解析（HD解析．例えば，Bianchi et al., 2010）を適用し，得られた調和成分に対して主成分分析を行うことで，地殻浅部の異方性媒質の特徴を調べた．なお，当該地域において詳細な三次元地震波速度構造モデルは公開されていない一方，表面波等による様々な解析により，地殻構造に強い地域性が存在することが示されている．そのため，各観測点同一の時間ウィンドウでHD解析結果を評価すると，観測点によって異なる特徴を有する媒質を比較してしまう可能性がある．ここでは，評価の対象を地殻最上部とし，まず，各観測点において，経過時間0.1秒から4秒を対象に±0.3秒（=0.6秒）の時間ウィンドウを移動させながら調和成分の固有ベクトルの方位を求めた．この固有ベクトルの方位はあるタイミング*t*で大きく変化する．この変化する深さまでが近く最上部を構成する媒質であるとし，0.1秒から*t*秒までをその観測点の解析ウィンドウとした．

求まった速い軸の方位は，大局的にはGNSSから推定される反時計回りの回転運動（Weiss *et al.*, 2020）に沿った北西ー南東方向を示す観測点が多い．しかし，東アナトリア断層周辺では，南北または北北東ー南南西に近い方向を指す観測点も存在した．当該断層がアナトリアブロックとアラビアプレートの境界であることを考慮すると，アラビアプレート北進の影響を受けている可能性がある．一方，2023年2月にM7.8及びM7.5の地震が発生したトルコ南東部では，1観測点のみであるが東西方向を示した．これが正しければ，局所的な回転の場を形成しているように見える．主成分分析で推定された固有値の大きさが異方性の強さに対応すると考えると，トルコ中部の地殻浅部の異方性は相対的に弱いものの，その方位は活断層の走向と良い一致を見せており，地形の影響を強く反映していると考えられる．

謝辞：本研究は科学技術研究費22K21372「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」の一環として実施しました．解析には，KOERI，AFAD及びGFZが公開している観測記録を使用しました．レシーバ関数のHarmonic decomposition解析には，Jeffrey Park教授が公開し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

Temporal variations in seismic anisotropy above a megathrust zone following slow-slip events

*Yosuke Ito[1], Junichi Nakajima[1]

1. Tokyo Institute of Technology

沈み込み帯において、海洋性プレートからの脱水によって上盤プレートへ水が供給されることが知られている。Nakajima and Uchida (2018)やIto and Nakajima (2023)は、茨城県南西部直下における地震波減衰構造の時間変化とスロースリップ活動の時間変化を比較し、スロースリップの発生に伴うプレート境界から上盤プレートへの繰り返し排水を示唆している。しかしながら、上盤プレート内における水の移動プロセスはよくわかっていない。本研究では、同領域における地震波異方性（S波スプリッティング）の時間変化を推定し、上盤プレート内における水の移動プロセスを考察した。 261個のプレート境界地震に対し、直上に設置されたMeSO-net (Metropolitan Seismic Observation network)の3観測点で収録された加速度波形を解析し、S波スプリッティングを示すパラメータ(φ, dt)を推定した。その結果、最もS/Nの良い観測点において、速いS波の振動方向（φ）は北東40˜60˚方向を示し、速いS波と遅いS波の到達時刻差（dt）は、0.04～0.18秒の間でばらつきを示した。さらに、繰り返し地震活動から推定されたプレート境界の平均滑り速度の時間変化とdtの時間変化の定量的な比較を行ったところ、平均滑り速度の増加から0.1˜0.2年遅れてdtの増加が見られた。この結果は、先行研究で得られた、プレート境界の平均滑り速度の上昇に応じてプレート境界から水が上盤に放出され、直上の地震波減衰構造が増加するという解釈と概ね整合的であった。本研究の結果とモデル計算を比較することで、対象領域におけるフラクチャーサイズおよびフラクチャー密度の時間変化を推定することができるかもしれない (Chapman, 2003; Maultzsch et al., 2003)。

引用元： Chapman, M. (2003). Frequency-dependent anisotropy due to meso-scale fractures in the presence of equant porosity. Geophysical prospecting, 51(5), 369-379. Ito, Y., & Nakajima, J. (2023). Temporal Variations in and Above a Megathrust Following Episodic Slow-Slip Events. Geophysical Research Letters, 50(14), e2023GL103577. Maultzsch, S., Chapman, M., Liu, E., & Li, X. Y. (2003). Modelling frequency-dependent seismic anisotropy in fluid-saturated rock with aligned fractures: implication of fracture size estimation from anisotropic measurements. Geophysical Prospecting, 51(5), 381-392. Nakajima, J., & Uchida, N. (2018). Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip. Nature Geoscience, 11(5), 351-356.

© The Seismological Society of Japan

Estimation of crustal structure in southeastern Kanagawa Prefecture using P-wave correlation analysis of distant earthquakes

*Kazuo YOSHIMOTO[1]

1. Yokohama City University

関東地方の地殻構造は，関東堆積盆地の伏在などにより複雑であることが知られているが，付加体の地質構造が見られる三浦半島を含む神奈川県南東部（例えば，江藤・小沢, 2009）では，著しく複雑である可能性が指摘されている．これまで，深さ数km程度までの地殻構造については，近地地震のS波相関解析（Yoshimoto et al., 2008）などによる報告はあるが，より深部の構造については依然として不明である．

本研究では，近地地震のS波相関解析と比較して，大深度の構造推定が容易で，解析結果もロバストであると考えられる，遠地地震のP波相関解析により，神奈川県南東部における地殻構造の推定を試みた．具体的には，遠地地震のP波相関解析により，観測点直下におけるP波の反射強度と反射面分布を評価して，その結果をもとに地下構造を推定した．解析方法は，Viens et al. (2022)で関東堆積盆地構造の推定に使用された方法を参考にした．

解析には，首都圏地震観測網 MeSO-netの29観測点の記録を使用した．遠地地震は，USGS地震カタログから，2017年5月～2023年4月の期間に，震央距離30˚～90˚で発生したマグニチュード6～7の466イベントを選出した．実際の解析には，これらの地震のうち，全観測点の平均でP波の最大振幅がノイズのRMS振幅の5倍以上ある85イベントを使用した．解析周波数帯は1 Hz～5 Hzとした．P波の相関解析では，P波着信前後それぞれ15秒間と30秒間を含む45秒間の記録を使用した．各観測点のP波反射応答は，全ての地震の相関解析の結果を重合して求めた．

多くの観測点のP波反射応答には，ラグタイム3秒程度までに，負の極性をもった大振幅の反射波位相が確認された．この位相は，横浜市より北側では，発現時間がほぼ一定（2秒程度）であり，地震基盤からの反射P波に対応するものと考えられる．一方，その南側では，この位相の発現時間は明らかに様相が異なり，相模湾沿岸から北に向かって連続的に増大する．この解析結果は，同地域における北落の付加体構造の存在を示唆するものかもしれない．P波反射応答（疑似P波反射断面）のより大きいラグタイムにおける特徴などについては，発表時に報告する．

謝辞：本研究では，防災科学技術研究所の首都圏地震観測網MeSO-netデータ（https://doi.org/10.17598/NIED.0023）を使用させていただきました．記して感謝致します．

© The Seismological Society of Japan

Constructing a 3D seismic velocity model of the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[2], Gou Fujie[1], Katsuhiko Shiomi[3], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[1], Takeshi Nakamura[4], Toshiya Fujiwara[1]

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)、表面波の解析などの成果（Liu et al., 2022）として得られる様々な地震波速度情報を取り入れた海陸統合3次元地震波速度構造モデルの構築を2020年度後半から実施してきた。多様な調査、解析による速度構造情報の統合、海域と陸域の速度構造情報の統合は単純ではなく、実現には解決しなければならない課題が存在する。例えば、反射法地震探査による成果の中には、時間領域のみの情報しか存在しない場合がある。一方で、多様な解析によるプレート形状は深度領域の情報しか存在しないことが殆どである。また、海域、陸域の速度構造情報は、殆どが深度領域の情報だが、解析手法ごとに異なる形式で存在している。具体的には、不均質な速度場としての情報である場合や、層内が一定の速度である層構造である場合などがあり、分解能が異なる。一方、緯度、経度ではなく平面直角座標系を用いている場合もある。ここでは、これらの多様な構造情報の統合についての課題に対応した現状の南海トラフ域における海陸統合3次元速度構造モデルの構築状況について紹介する。また、当初、海域におけるS波速度構造情報が限定されていた（例えばTakahashi et al., 2002）ため、南海トラフ域に適用できるP波速度からS波速度への経験的な変換式（例えば、Brocher, 2005，Ludwig et al., 1970）によって3次元S波速度構造モデルを作成することとした。併せて、調査データに基づくS波速度構造情報（Tonegawa et al., 2017など） を収集し、さらに、新たな解析による構造推定（昨年度地震学会秋季大会にて報告）も進めてきた。それらの調査データに基づく推定構造情報と、経験的なP波速度からS波速度への変換式によって作成された構造情報との比較を行い、変換式の妥当性の検証を実施したので、その結果についても報告する。 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、JSPS科研費JP19H01982の助成を受けたものである。

© The Seismological Society of Japan

A dense seismic array observation in the eastern part of Shikoku Island, southwestern Japan

*Eiji KURASHIMO[1], Takashi Iidaka[2], Noriko Tsumura[3]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo, 3. Faculty of Science, Chiba University

はじめに

四国沖南海トラフは，フィリピン海プレートが西南日本弧下に沈み込むプレート収束域である．過去南海トラフ周辺域では，巨大地震が繰り返し発生している．巨大地震震源域近傍では，スロー地震と呼ばれる，時間スケールの異なる様々なすべり運動がプレート境界面上で観測されている(例えば，Obara and Kato, 2016)．プレート境界におけるすべりの挙動をコントロールする構造要因を明らかにすることは，沈み込み帯のダイナミクスを理解する上で重要である．プレート境界に存在する流体は，断層すべり挙動を理解する上で重要な要素のうちの一つである(例えば，Saffer and Tobin, 2011)．流体に起因した不均質構造に関しての知見を得るために，地震波速度構造や反射波の振幅強度等の特性を把握することは有効である．四国東部地域では，1999年と2002年に制御震源を用いた地殻構造探査が実施され，沈み込むフィリピン海プレートの形状やP波速度構造に関する知見が得られている（例えば，蔵下・他，2002；Kodaira et al., 2002; Ito et al., 2009）.しかしながら，流体の存在を推定する上で重要な情報となる詳細なVp/Vs構造は得られていない．そこで，プレート境界面近傍の詳細なP波速度構造，Vp/Vs構造等を得る為に，稠密自然地震観測を四国東部のスロー地震活動様式に違いがある領域を含む地域で実施した．本講演では，稠密自然地震観測の概要と，得られた稠密自然地震観測データに対して，トモグラフィー解析を行うことによって得た四国東部下の地震波速度構造について報告する．

観測とデータ処理

スロー地震活動様式に違いがある四国東部の徳島県三好市から神山町に至る「東西測線」（測線長：約60 km）上の30カ所（観測点間隔：約2 km），徳島県阿波市から海陽町に至る「南北測線」（測線長：約70 km）上の70か所（観測点間隔：約1 km）に臨時地震観測点を設置し，稠密自然地震観測を実施した．観測は2021年12月14日から2023年3月7日まで実施し，2022年6月までは，すべての観測点で固有周波数4.5Hzの地震計によって上下動及び水平動の3成分観測を実施した．2022年6月以降は，深部低周波地震の活動域直上に設定した東西測線上の地震計を固有周波数1Hzの3成分地震計に変更した．収録は，Geospace社製の独立型レコーダであるGSX-3を用い，サンプリング周波数を250Hzに設定して連続収録を行なった．気象庁一元化震源リストによると，観測期間中に研究対象地域（緯度33.5˚-34.2˚N：経度133.7˚-134.4˚E）ではM_j0.5以上の地震の震源が503個決定されている．稠密自然地震観測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（47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．得られた記録は良好で，イベント毎での波形記録からは，明瞭な初動及び後続波を確認することが出来る．

解析と結果

統合処理後のイベントデータから測線近傍の110イベントを抽出し，P波・S波の手動検測を行った．測線下の地震波速度構造を得る為に，得られた走時データを用い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Vp/Vs構造の鉛直断面図からは，深部低周波微動活動が活発な領域は，低調な領域に比べてVp/Vs値が高くなる特徴が見られる．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P7 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S07P] PM-P

[S07P-01] Seismic exploration on Titan by NASA's Dragonfly mission

*Keisuke Onodera[1], Satoshi Tanaka[2], Hiroaki Shiraishi[2], Taichi Kawamura[3], Takefumi Mitani[2], Hideki Murakami[4], Ryuhei Yamada[5], Shunichi Kamata[6], Jun Kimura[7], Hiroyuki Kurokawa[8], Yasuhito Sekine[8], Kiwamu Nishida[1], Takeshi Tsuji[9], Mark Panning[10], Ralph Lorenz[11] (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IPGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology , 11. Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University)

[S07P-02] Upper mantle structure beneath Mongolia: Implications for the western margin of the Amurian plate

*Kazunori YOSHIZAWA[1,2], Baigalimaa Ganbat[2], Demberel Sodnomsambuu[3], Ulziibat Munkhuu[3] (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences)

[S07P-03] Bayesian inferences of upper mantle discontinuities using azimuth-dependent receiver functions and multi-mode surface waves

*Kotaro TARUMI[1], Kazunori YOSHIZAWA[1,2] (1. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University)

Seismic exploration on Titan by NASA’s Dragonfly mission

*Keisuke Onodera[1], Satoshi Tanaka[2], Hiroaki Shiraishi[2], Taichi Kawamura[3], Takefumi Mitani[2], Hideki Murakami[4], Ryuhei Yamada[5], Shunichi Kamata[6], Jun Kimura[7], Hiroyuki Kurokawa[8], Yasuhito Sekine[8], Kiwamu Nishida[1], Takeshi Tsuji[9], Mark Panning[10], Ralph Lorenz[11]

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IPGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology , 11. Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University

アポロ計画における月での地震観測(1969-1977)を皮切りに地球以外での地震活動やその内部構造に関する研究分野が萌芽した。近年, NASAのInSightミッションにて火星での地震観測(2018–2022)が成功を収めたことで, 現在惑星地震学は大きな発展期を迎えている。こうした状況の中, 2030年代に土星衛星のタイタンを探査するNASAのDragonflyミッションにてJAXAの短周期地震計の搭載が計画されており, 人類初となる氷衛星での地震観測が現実味を帯びてきている。

土星衛星タイタンでは, 過去のリモートセンシング探査や地上観測により表面に液体が安定的に存在し, 大気には生命の源となる窒素やメタンが豊富に存在することが知られている。こうした環境は原始地球に似通っており, タイタンを探査することで宇宙における生命存在可能性だけでなく, 地球における生命発生プロセスへの理解が進むことが期待される。Dragonflyミッションでは, 大型のドローンを用いた離着陸探査を想定しており(図1a), その名の通りトンボのようにタイタン表面を転々としながら化学分析・気象観測・地球物理観測を実施することで, 生命前駆物質の存在量やそれらの物質の生成を促す環境を明らかにすることを目標としている。特に我々のチームは地球物理観測の地震観測を担当し, タイタンの表層および深部の構造推定を試みる(図1b)。

本発表ではDragonflyミッションの概要とともに, 我々の開発した地震計の紹介, 現状タイタンで想定されている地震活動について議論する。

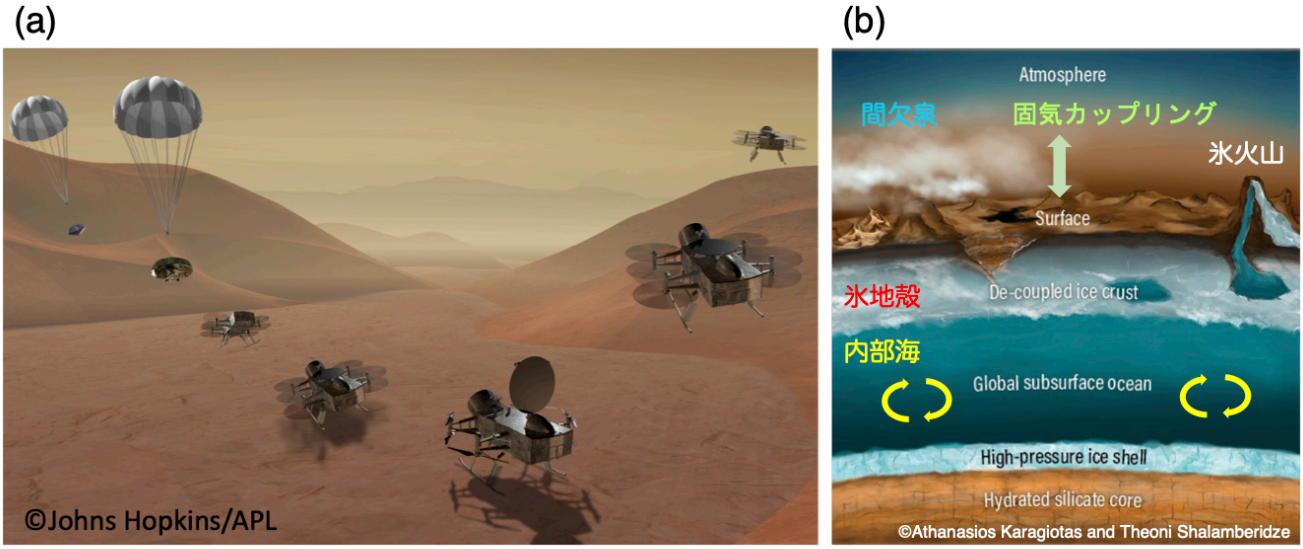


図1. (a)ドローンを用いた離着陸探査の概念図. (b)タイタンの内部構造の想像図.

© The Seismological Society of Japan

Upper mantle structure beneath Mongolia: Implications for the western margin of the Amurian plate

*Kazunori YOSHIZAWA[1,2], Baigalimaa Ganbat[2], Demberel Sodnomsambuu[3], Ulziibat Munkhuu[3]

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences

Multi-mode phase speeds of Love and Rayleigh waves are used to construct a new radially anisotropic S wave model in the middle Eurasian and Mongolian regions. Our dataset includes seismic waveforms of over 2151 teleseismic events with a magnitude greater than 5.8 from 2009 to 2021, recorded at permanent and temporary broad-band seismic stations in and around Mongolia. The multi-mode dispersion curves of Love and Rayleigh waves were extracted using the nonlinear waveform fitting method for individual seismograms. We then reconstructed phase speed maps for each mode and frequency, incorporating finite-frequency effects of surface waves. Finally, localized multi-mode dispersion curves derived from the phase speed maps were inverted for local anisotropic 1-D S-wave speed profiles, which eventually form a 3-D shear wave model.

Our new model exhibits significant lateral variations of S wave speeds at 70-100 km depth beneath Mongolia, i.e., slow anomalies in the tectonically active western Mongolia and fast anomalies in stable eastern Mongolia. In the radial anisotropy model, SH waves are faster than SV waves in almost the entire Mongolian lithosphere above 100 km depth, except for the northern Altay Mountains region. The Hangay Dome region is characterized by significantly slower velocities, indicating the asthenospheric upwelling that causes the uplifting of this region. This study reveals distinct lateral variations of S wave speeds across the boundary between the Amurian and Eurasian plates, characterized by the prominent fast anomaly of the dipping lithosphere at the western edge of the Amurian plate, which may indicate the delamination or dripping of the Amurian lithosphere in its western margin.

© The Seismological Society of Japan

Bayesian inferences of upper mantle discontinuities using azimuth-dependent receiver functions and multi-mode surface waves

*Kotaro TARUMI[1], Kazunori YOSHIZAWA[1,2]

1. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

リソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)やリソスフェア内不連続面(MLD)等，上部マントル内部の地震波速度不連続面は，大陸や海洋リソスフェアの成長や移動の過程を理解する上で貴重な手がかりとなる．近年，表面波の位相速度分散曲線（SWD）と実体波レシーバ関数（RF）を同時に用いたベイズ推定による速度構造解析が広く行われている (e.g., Calo et al., 2016, EPSL; Taira & Yoshizawa, 2020, GJI)．RFを用いたインバージョン解析では，一般に観測点直下の水平成層構造を仮定する．しかし，大陸縁辺部や沈み込み帯等，観測点直下の周辺において，急激な速度構造の横方向変化が生じる地域では，遠地実体波の入射方位によって入射波から変換波への変換位置が変わるため，RFが顕著な方位依存性を示す．本研究では，このようなRFの方位依存性を活用し，SWDとの同時インバージョンを行い，観測点周辺域の上部マントルS波速度構造と不連続面の高精度推定を試みる．特に，高精度なマルチモード表面波の位相速度分布が得られている豪州大陸の観測点を中心に応用を行う．

インバージョンの手法には，可変次元階層ベイズ推定法を用いる．この手法では，層構造モデルのパラメータ数（層数）や各データの誤差などの超パラメータも未知変数として扱うため，モデルの層数や異種データ間の重みが適切に調整される．1次元速度構造の復元に用いるモデルパラメータは，境界面の深さと，SV波およびSH波速度の摂動とし，表面波トモグラフィーから得られる観測点下の速度モデルを基準とする．速度摂動の事前分布にはガウス分布を用い，それ以外の事前分布には一様分布を用いる．

この手法を豪州東部の定常観測点に適用した結果，RFの入射方向に応じて，観測点下の速度構造に，特に顕著な不連続面深度の変化が見られた．特に，豪州東部ではLABに相当するP-to-S変換点が，観測点の東部から西部に向け，深くなる様子が確認できた．これは既存の表面波トモグラフィーから推定されるリソスフェアの厚さの変化とも調和的である．また豪州南部の観測点では，深さ70kmと100km付近でSV波速度の低下が観測され，LABが段階的に変化する可能性も示唆される．本手法をより稠密な広帯域観測網に応用していくことで，不連続面の詳細な空間マッピングが可能となることが期待できる．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S10. Active faults and historical earthquakes

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P8 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S10P] PM-P

[S10P-01] Study of slip-velocity parameters in calculation of strong ground motion near inland active faults; example of Kumamoto earthquake, 2016

*Kimie NORIMATSU[1], Shinji TODA[1] (1. IRIDeS, Tohoku Univ.)

[S10P-02] S and P-wave seismic reflection survey in the Ama area, Minami-Awaji City, Hyogo Prefecture, Japan

*SAWAKO KINOSHITA[1], Shinobu Ito[1] (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Study of slip-velocity parameters in calculation of strong ground motion near inland active faults; example of Kumamoto earthquake, 2016

*Kimie NORIMATSU[1], Shinji TODA[1]

1. IRIDeS, Tohoku Univ.

１．はじめに

内陸活断層近傍における地震被害軽減のため，強震動および変位予測に有効な断層モデルの設定方法および計算手法の検討を，2016年熊本地震を例として実施している．熊本地震は基地の活断層の位置でおおむね地表地震断層が確認され，断層近傍における地表変位および強震動観測データ，建物被害分布等の情報が豊富であり，手法改良のための後ろ向き（レトロスペクティブ）予測とその検証に最適な地震である．当研究グループでは，熊本地震で改善した手法を2023年トルコ・シリア地震などの既往の内陸活断層地震に適用し，手法の妥当性をさらに確認した上で，長町・利府線断層帯などの一般的な内陸活断層に適用する計画である．

２．浅部断層構造を考慮した断層モデルの検討

本研究で用いる震源断層モデルは，Kumahara et al., (2016)やToda et al. (2016)などの地質・地形情報をもとに構築した独自のモデルである．強震動計算において一般的に用いられる断層モデルは震源分布等を参考に想定される単純な形状のモデルが主であり，検討の範囲は地震発生層上端より深い場所での破壊が中心である．本研究の断層モデルは現地調査で明らかになった断層浅部構造を重視し，より詳細な形状を設定したモデルとなっている（乗松ほか，2022：地震学会秋季大会）．この断層モデルについて，主断層の北東端は不明である．地表地震断層は九州東海大学・阿蘇ファーム付近まで確認され，さらに北東に位置するJR豊肥本線宮地駅付近でもわずかであるか確認されている．しかしカルデラ内の連続性は確認されていない．阿蘇地域における大規模露頭調査（見ほか，2022；活断層学会秋季大会）では断層が過去に何度か活動した痕跡が確認されたが露頭は2016年熊本地震の主断層上ではないため，直接的な痕跡を確認できていない．よって本研究ではカルデラ内に大きく延長しないモデルとして設定した．

３．断層浅部のすべりに着目したすべり速度パラメターの検討

熊本地震では断層浅部（地震発生層上端よりも浅い部分）においても，地震波を発生させるようなすべりが起こり，それらが断層近傍において永久変位を引き起こす長周期な揺れにつながったとされる（田中ほか，2017，2019；Irikura et al., 2020；など）．浅部においては長周期の揺れが特徴であれば，一般的な地震発生層上端以深と以浅では強震動を計算する際のすべり速度時間関数は異なるものを想定することが妥当である．本研究では強震動の計算は断層近傍の揺れを精度よく計算できる波数積分法（久田，1997）を採用した．すべり速度時間関数は，地震発生層上端以深には中村・宮武関数（中村・宮武，2000）を用い，地震発生層以浅には規格化Yoffe関数（Yoffe, 1951；Tinti et al., 2005）を用いた．中村・宮武関数のパラメターは応力降下量，破壊伝播速度，断層幅等の関係式から計算した．その際，応力降下量を計算する際に用いる剛性率と破壊伝播速度は複数パターンを想定した．規格化Yoffe関数のパラメターは震源インバージョン結果を参照した上で，複数の組み合わせを想定し計算した．これら，深部および浅部の計算パターンの組み合わせと，断層面上のすべり分布（アスペリティの位置）についてもいくつかのパターンを準備し，これらのパラメターの計算結果への影響度を確認した．すべり速度パラメターのばらつきの影響はあまり大きくないものの，断層面上のアスペリティは振幅や波形形状のローカルな部分に少なからず影響する様子がみられた．特に，横ずれ変位が主体の地震であるため，水平成分への影響がある．

４．まとめと今後の予定

© The Seismological Society of Japan

これまでの研究で検討してきた熊本地震の断層モデルについて，阿蘇地域での現地調査の結果からカルデラ内に大きく延長しないものとし，北端を仮定した．新たに実施した重力探査および微動測定の結果についても今後は断層モデルに反映していく予定である． 波数積分法により強震動を計算する際のすべり速度パラメターについて，その影響を評価するためのパラメタースタディを行った．すべり速度パラメターの影響は少ないものの，アスペリティの位置については振幅および波形形状に影響する様子が見られるため，熊本地震の強震動の再現のため，更にパターンを増やした検討を行うこととする．

すべり速度パラメター，アスペリティの位置に加えて，計算に用いる速度構造モデルの影響は大きいと考えられることから，今後は防災科学技術研究所（NIED）と当グループの共同研究の枠組みにおいて，NIEDから提供されるより詳細で最新のモデルである深部・浅部統合地盤モデルを用いることとする．また，この速度構造モデルを用いた有限差分法による3次元計算と建物被害率分布を比較することで，強震動と被害の関係についても検討する予定である．

（謝辞）本研究は応用地質（株）の寄付金および協力により実施している．また今後，（国研）防災科学技術研究所との共同研究によりデータ提供を受けて実施する．

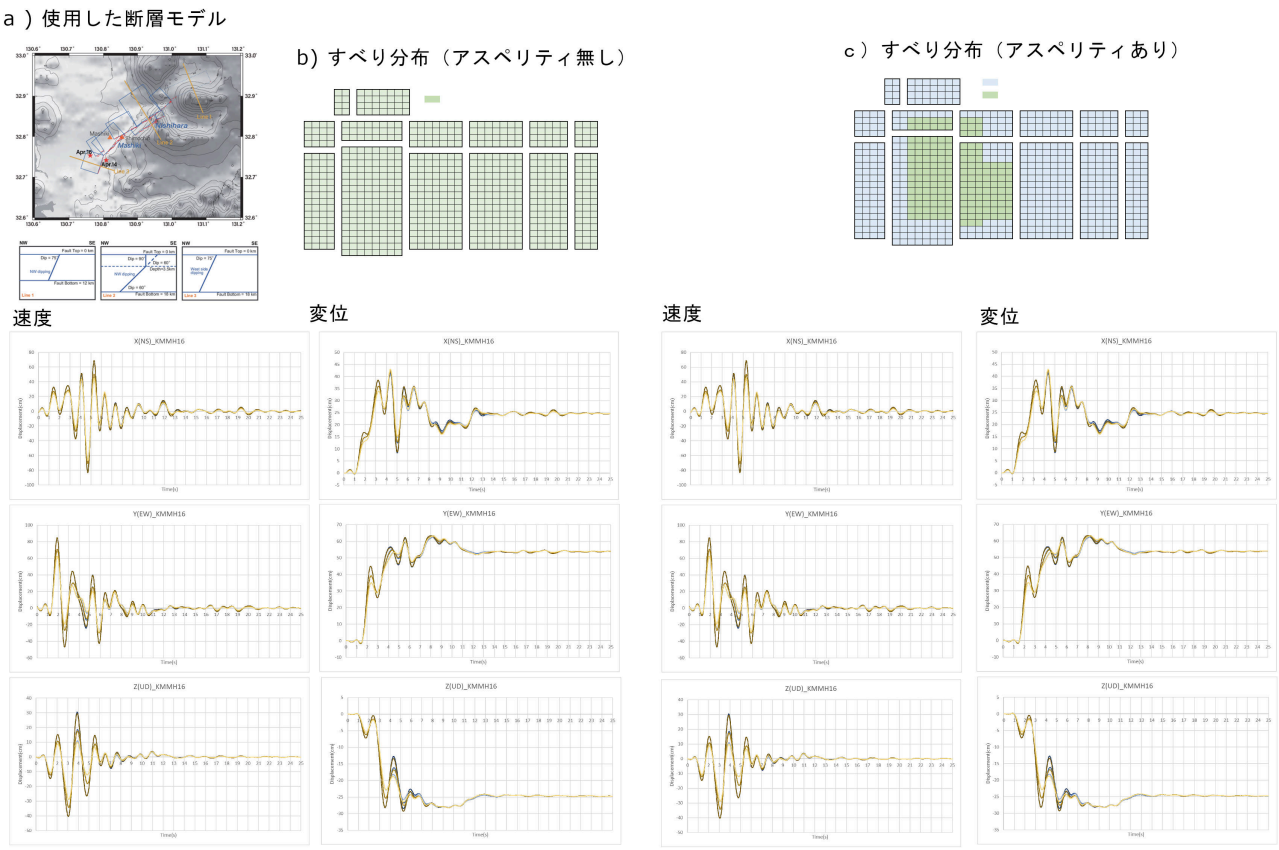


Fig. アスペリティ，すべり速度パラメターを変化させたパラメタースタディの一部

© The Seismological Society of Japan

S and P-wave seismic reflection survey in the Ama area, Minami-Awaji City, Hyogo Prefecture, Japan

*SAWAKO KINOSHITA[1], Shinobu Ito[1]

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

産業技術総合研究所の沿岸域の地質・活断層プロジェクトでは日本全国の大都市圏沿岸地域を対象に，地質情報の整備を行っており，令和2年度からは紀伊水道沿岸域を対象に調査を実施している．本発表では，令和4年度に兵庫県南あわじ市で実施した複数の浅部地下構造調査のうち，阿万西町から東町にかけて実施したP波反射法地震探査，S波反射法地震探査の概要，初期解析結果に関して報告する．
淡路島南西部に位置する西淡山地は主に和泉層群より構成され，山地東に分布する三原平野の境界付近に湊-本庄断層が推定されている(兵庫県，1982)．水野・吉岡（1996）は，湊-本庄断層周辺地域で反射法地震探査等を実施し，断層の中央部において地下の大阪層群の変形構造を認めたが，断層南部の阿万地区においては，断層推定位置の西側のみ調査が実施されたため，断層の位置や変位構造は不明である．本調査は，阿万地区において，地下浅部構造，湊-本庄断層の位置等を明らかにするために，S波，P波反射法地震探査を実施した．
本調査は2023年2月16日から23日に実施した．調査測線（以下，南阿万測線とする）は阿万海岸海水浴場付近の市道沿いに，阿万東町から阿万西町にかけて設定した．南阿万測線の方向は概ね東-西で，総延長は807 mである．震源には小型油圧インパクタ(JMS-mini65-2,地球科学総合研究所製)を使用した．JMS-mini65-2は，P/S両用でシリンダ軸を進行方向右側に最大60度傾けることでS波を発震することができる．P波反射法地震探査の発震回数は各点5回を基本とした．S波反射法地震探査の発震回数は測線の進行方向に対して右側に傾けた方向から各点5回を基本とし，10測点ごとにインパクタを反対方向に向けて，逆方向に5回発震した．受振機は，S波反射法地震探査は固有周波数10Hzの水平動ジオフォン（Geospace社製，GS-32CT内蔵）を使用し，水平動成分が測線の方向に直交になるように設置した．P波反射法地震探査には固有周波数2Hzの上下動ジオフォン(SUNFULL社製， PS-2B内蔵)を使用した．受振機間隔はS波反射法地震探査に関しては1 m，P波反射法地震探査に関しては2 mに設定した． 総受振点はS波反射法地震探査が808点，P波反射法地震探査が404点となった．探鉱機はテレメトリ型地震探査システムDSS-12（サンコーコンサルタント製）を使用し，サンプリングは0.5 ms，収録時間は2 sに設定した．
取得データのうち不良トレースを削除し，ウィンドウ長1000 msのダイバーシティスタックを用いて垂直重合した．S/N比は良好で初動は最大オフセットまで確認できた．その後，ジオメトリを定義し，バンドパスフィルタ，予測デコンボリューション等の処理を実施した．定速度でNMO補正，CMP重合を実施し，予備的な時間断面図を作成したところ，S波反射法地震探査では往復走時約500 msまで，P波反射法地震探査では約200 msまで反射面をイメージングすることができた．全体的に反射面の連続性は良く，強振幅のイベントが複数認められた．測線上で実施されたボーリング調査（中谷ほか，2022）と比較すると，時間断面図で認められた強振幅イベントは主に大阪層群内の反射面，または和泉層群上面と表すと考えられる． 今後，屈折波静補正，速度解析，CMP重合等の処理を進め，マイグレーション深度断面図を作成する予定である．ボーリング調査の結果と比較して，湊-本庄断層の南部における断層位置や変形構造等を議論したい．
参考文献
兵庫県（1982）：土地分類基本調査「由良・鳴門海峡」，表層地質図（5万分の1）ならびに同説明書．兵庫県，75p.
水野清秀・吉岡敏和（1996）：淡路島南西部，湊-本庄 断層のボーリング，浅層反射法弾性波探査等による活動調査（平成 7 年度活断層調査報告 no. 10），地質調査所研究資料集，no.234.
中谷是崇・羽田裕貴・水野清秀・中島 礼（2022）：兵庫県淡路島南部における湊-本庄断層付近の第四系ボーリング調査，地質調査総合センター速報 No.83，令和3年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告，p.61–76.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Sept. 17th) | Regular session：S11. Various phenomena associated with earthquakes

Wed. Nov 1, 2023 5:00 PM - 6:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 8:00 AM - 9:30 AM UTC | Room P9 (F201 and 3 side foyer) Hall Annex

[S11P] PM-P

[S11P-01] Investigate earthquake sound (Part 3) - Analysis of audible “jinari” recording

*Kazuo OHTAKE[1], Hiroo Nemoto[2], Shutaro Sekine[3], Hirotoshi Matsubayashi[4], Shin'ichi Sakai[5] (1. JMA, 2. Ritsumeikan Univ., 3. ADEP, 4. ANET, 5. ERI)

Investigate earthquake sound (Part 3) - Analysis of audible “jinari” recording

*Kazuo OHTAKE[1], Hiroo Nemoto[2], Shutaro Sekine[3], Hirotoshi Matsubayashi[4], Shin'ichi Sakai[5]

1. JMA, 2. Ritsumeikan Univ., 3. ADEP, 4. ANET, 5. ERI

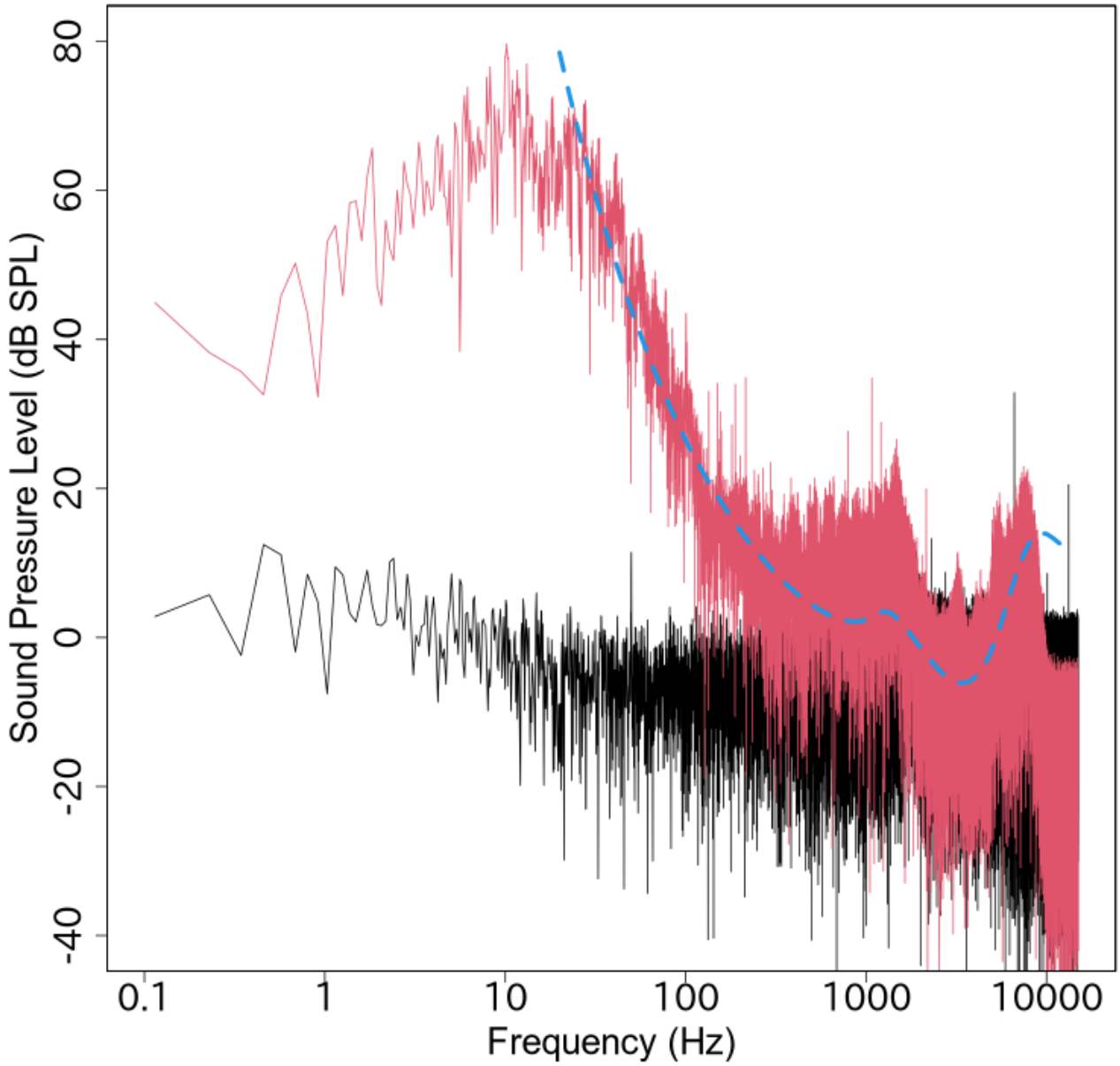
概要
古来より、地震動に伴って地鳴りを感じたという記録は日本だけでなく中国や英国等の文献にも見受けられる。しかし地鳴りの成因は明らかでなく、デジタル処理による地震と地鳴りの同時記録および解析は寡聞にして当グループ以外の実施を知らない。関根・他(2018)では東京大学地震研究所筑波地震観測所の建屋内部で収録された音を使って解析を行なったが、地震によって生じた地鳴りと地震の揺れで建物が揺れた音（家鳴り）が混在しており、地鳴りそのものの音を取得したかどうかには検討の余地があった。本研究では屋外にて地震と地鳴りの同時観測を実施し、その音圧が可聴域を超えた（＝地鳴りとして聞こえたと推定できる）事例を得たので報告する。

観測システムの概要
東京大学地震研究所筑波地震観測所の中庭に既報(大竹・他2016)の通りのシステムを設置し、観測を行なっている。ただし、
・屋外での観測としたこと
・20Hzから8kHzまでフラットな特性のマイクでの観測としたこと
・マイク4式を立体的に配置したこと
という改善を加えている。

観測された地鳴りについて
2023年7月22日10:52に発生した茨城県沖の地震(M4.8, 深さ52km)において地震に伴う音声を収録することができた。P波に対応する時間の音声を切り出し、FFTをかけて周波数領域での信号強度を得る。これを音圧に対応させ、ISO 226:2003に示される最小可聴値と比較した。 添付図は観測された地鳴りのP波に相当する部分のフーリエ解析結果である。黒線は地震が発生していない状況での音声（通常時のノイズに相当）、赤線が今回の地震に伴う音声である。1～100Hzにかけて大きく音圧が出ていることがわかる。青点線はISO 226:2003による最小可聴値であり、おおむね20Hz以上で可聴値を超えていることがわかる。すなわち、現地にいれば地鳴りとして聞こえたと推定できる。また、本観測は屋外で実施しているため家鳴りの影響はないと考えられる。 本発表ではこの地鳴りについてのさらに詳細な解析結果を示す予定である。

謝辞
本研究のシステム開発にあたっては、JSPS 科研費 15H00316 の助成を受けました。合わせて JSPS 科研費 15K12394, 19K03173 の一部も使用しました。

© The Seismological Society of Japan



© The Seismological Society of Japan