

Wed. Nov 1, 2023

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 TAKEMURA¹, Yohei Hamada², Hanaya Okuda², Yutaro Okada³, Kurama Okubo⁴, Takeshi Akuhara¹, Akemi Noda⁵, Takashi Tonegawa² (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 Sawi², *Saeko KITA¹, Roland Burgmann³ (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 Okuwaki¹, Wenyan Fan², Takanori Matsuzawa³, Shunsuke Takemura⁴ (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 KURIHARA¹ (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa prefecture)

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

*Mamoru NAKAMURA¹ (1. Univ. Ryukyus)

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

*Koji TAMARIBUCHI¹, Hisao KIMURA¹, Fuyuki HIROSE¹, Takeyasu YAMAMOTO¹ (1. Meteorological Research Institute)

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

*Kazuki MIYAZAKI¹, Junichi Nakajima¹, 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 AKUHARA¹, Yusuke Yamashita², Hiroko Sugioka³, Atikul Haque Farazi², Shukei Ohyanagi², Yoshihiro Ito², Eiichiro Araki⁴, Takashi Tonegawa⁴, Takeshi Tsuji¹, Ryosuke Azuma⁵, Ryota Hino⁵, Kimihiro Mochizuki¹, Shunsuke Takemura¹, Tomoaki Yamada¹, Masanao Shinohara¹ (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 MORIKAWA¹, Jun'ichi MIYAKOSHI², Hiroyuki FUJIWARA¹ (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 Zhu¹, Aitaro Kato², Yingfeng Ji¹ (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

*Hirotugu Yanagida¹, Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima³, Hiroshi Shimizu⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁶ (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 IGARASHI¹ (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 OHTA¹ (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 KATO¹, Motoo Ukawa² (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 Iwata¹ (1. Prefectural University of Hiroshima)

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

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹ (1. NIED)

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

*Mugi Yamamoto¹, Ken Moriwaki¹ (1. Japan Meteorological Agency)

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

*Sachiko TANAKA¹ (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 TAKAHASHI¹, Yasuhira Aoyagi¹, Haruo Kimura¹ (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 ANDO¹, Takashi Azuma², Community fault model voluntary group³ (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 INOUE¹, Naoko Kitada¹, Noriyuki Shibuya², Masashi Omata² (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)

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

*Hiroki Kawakami¹, Naoki Suda¹ (1. Hiroshima University)

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

*Akira Ueno¹, Tomoya Takano¹, Takuto maeda¹ (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 Yamato¹, Takuto Maeda¹, Tomoya Takano¹ (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 Okuwaki¹, Wenyan Fan² (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 Yano¹, Satoshi Ide¹ (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 TAKANO¹, Kiwamu Nishida² (1. Graduate School of Science and Technology, Hiroshima 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

*Yoshiaki ASANO¹ (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 OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (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 Someya¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

*Koyo Matsuda¹, Nana Yoshimitsu¹, Takuto Maeda², Yohei Yukutake³ (1. Kyoto University, 2. Hiroshima University, 3. Univ. of Tokyo, ERI)

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

*Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro Emoto² (1. Tohoku University, 2. Kyushu University)

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

*Kentaro EMOTO¹, Satoru HAMANAKA¹ (1. Kyushu University)

[S01P-10] Parallelization in Seismic Ray Tracing Programs

*Shutaro SEKINE¹ (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 ITO¹, Sawako KINOSHITA¹ (1. GSJ, AIST)

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

*Makoto OKUBO¹ (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 Yamamoto⁴, Keisuke Ariyoshi⁴, Hiroki Horikawa⁴, Shuichiro Yada⁴, 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 Funabiki¹, Masatoshi Miyazawa¹ (1. Kyoto University)

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

*Akiko TAKEO¹, Koji MIYAKAWA¹, Taro NISHIMOTO¹, Miwako ANDO¹, Ayaka SAIKI¹, Shinichi TANAKA¹, Hironori OTSUKA², Chikaaki FUJITA¹, Miki HAMAMOTO³, Ritsuya SHIBATA⁴, Shota KATO¹, Shinya KATOH¹, Koki MASUDA⁵, Masayuki KANO⁶, Shunsuke TAKEMURA¹, Kazushige OBARA¹ (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 OOI¹, Toshiyasu SHIMIZU², Mitsutsugu IGARASHI³, Narumi TAKAHASHI¹, Shoichi SHIOZAKI³, Takahiro HANDA², Kazumi ASAO¹ (1. NIED, 2. Toppan Inc., 3. Chiba Pref.)

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

*Yojiro YAMAMOTO¹, Hiroki Horikawa¹, Shuichiro Yada¹, Masaru Nakano¹, Keisuke Ariyoshi¹, Kentaro Sueki¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi² (1. JAMSTEC, 2. NIED)

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

*Tadashi YAMASHINA¹, Makoto OKUBO¹, Takao Tabei¹ (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 Ma¹, Eiichi Fukuyama^{1,2}, Futoshi Yamashita², Kurama Okubo² (1. Kyoto University, 2. NIED)

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

*Hideto Takatsu¹, Shin-ichi Uehara¹ (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 NODA¹, Kiyokazu Oohashi² (1. Kyoto Univ., 2. Yamaguchi Univ.)

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

*Garam Kim¹, Manami Kitamura², Michiyo Sawai¹ (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 FUKUSHIMA¹, Natsuko Chubachi¹, Shinichi Kuriyama¹ (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 Yazaki¹, Yugo Suzuki¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (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 SAWAZAKI¹ (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 NAOI¹, Shiro HIRANO², Youqing CHEN¹ (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University)

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

*Yuki Kurata¹, Hiroaki Matsukawa¹, Hiroto Tanaka¹, Yasuhiro Matsumoto¹, Mika Takekoshi¹, Takachika Yagi¹, Ryota Kiuchi¹, Yuta Taki¹ (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 KUBO¹, Katsuhiko SHIOMI¹ (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 AMEZAWA¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹, Jun Ogata², Satoru Fukayama², Hiroki Kuroda³ (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 Jinde¹, Amane Sugii¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

[S21P-07] You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes.

*GERARDO MANUEL MENDO PEREZ¹, HIROMICHI NAGAO¹ (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 KATOH¹, Yoshihisa IIO², Hiroshi KATAO², Masayo SAWADA², Kazuhide TOMISAKA² (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 Matsui³, Hiromichi Nagao⁴ (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 SAWAKI¹, Yoshihiro SATO^{2,3}, Takahiko UCHIDE¹, Haruo HORIKAWA¹, Takahiro SHIINA¹, Yuta AMEZAWA¹ (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 Kim¹, Yohei Yukutake³, Yuki Abe⁴ (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 OHTAKE¹, Aitaro KATO¹, Yutaro OKADA², Takuya NISHIMURA³ (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 NAKAMURA¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Shun-ichi Watanabe¹, Koya Nagae¹ (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 Kurosu¹, Motoyuki Kido² (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 Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (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 TANAKA¹, Shusaku GOTO² (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 TSURU¹, Tetsuo NO², Kazuo YAMAGUCHI³, Jin'Oh PARK⁴ (1. TUMSAT, 2. JAMSTEC, 3. AIST, 4. AORI)

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

*Tetsuo NO¹, Tetsuro Tsuru^{2,1}, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Kazuo Nakahigashi², Seishiro Furuyama², Ryo Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (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 Ishibashi¹, Kazuo Nakahigashi², Tomoaki Yamada³, Kimihiro Mochizuki³, Yoshio Murai⁴, Ryota Hino⁵, Ryosuke Azuma⁵, Toshinori Sato⁶, Masanao Shinohara³ (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 NAKAMURA¹, Gou FUJIE¹, Shuichi KODAIRA¹, Mikiya YAMASHITA², Koichiro OBANA¹, Tetsuo NO¹, Seiichi MIURA¹ (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 TAKAGI¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Kiwamu Nishida², Masanao Shinohara² (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 TONEGAWA¹, Katsuhiko Shiomi², Ryota Takagi³ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Tohoku University)

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

*Masanao Komatsu¹, Sohei Urakami², Hiroshi Takenaka³, Genti Toyokuni⁴, Mamoru Nakamura⁵, Shutaro Sekine⁶, Shintaro Abe⁶ (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 SHIOMI¹ (1. NIED)

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

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

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

*Kazuo YOSHIMOTO¹ (1. Yokohama City University)

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

*Ayako NAKANISHI¹, Yanfang Qin¹, Xin Liu², Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi³, Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi¹, Takeshi Nakamura⁴, Toshiya Fujiwara¹ (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 KURASHIMO¹, Takashi Iidaka², Noriko Tsumura³ (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 Onodera¹, Satoshi Tanaka², Hiroaki Shiraishi², Taichi Kawamura³, Takefumi Mitani², Hideki Murakami⁴, Ryuhei Yamada⁵, Shunichi Kamata⁶, Jun Kimura⁷, Hiroyuki Kurokawa⁸, Yasuhito Sekine⁸, Kiwamu Nishida¹, Takeshi Tsuji⁹, Mark Panning¹⁰, Ralph Lorenz¹¹ (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 Ganbat², Demberel Sodnomsambuu³, Ulziibat Munkhuu³ (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 TARUMI¹, 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 NORIMATSU¹, Shinji TODA¹ (1. IRIDeS, Tohoku Univ.)

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

*SAWAKO KINOSHITA¹, Shinobu Ito¹ (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 OHTAKE¹, Hiroo Nemoto², Shutaro Sekine³, Hirotohi Matsubayashi⁴, Shin'ichi Sakai⁵ (1. JMA, 2. Ritsumeikan Univ., 3. ADEP, 4. ANET, 5. ERI)

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 TAKEMURA¹, Yohei Hamada², Hanaya Okuda², Yutaro Okada³, Kurama Okubo⁴, Takeshi Akuhara¹, Akemi Noda⁵, Takashi Tonegawa² (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 Sawi², *Saeko KITA¹, Roland Burgmann³ (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 Okuwaki¹, Wenyan Fan², Takanori Matsuzawa³, Shunsuke Takemura⁴ (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 KURIHARA¹ (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa prefecture)

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

*Mamoru NAKAMURA¹ (1. Univ. Ryukyus)

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

*Koji TAMARIBUCHI¹, Hisao KIMURA¹, Fuyuki HIROSE¹, Takeyasu YAMAMOTO¹ (1. Meteorological Research Institute)

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

*Kazuki MIYAZAKI¹, Junichi Nakajima¹, 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 AKUHARA¹, Yusuke Yamashita², Hiroko Sugioka³, Atikul Haque Farazi², Shukei Ohyanagi², Yoshihiro Ito², Eiichiro Araki⁴, Takashi Tonegawa⁴, Takeshi Tsuji¹, Ryosuke Azuma⁵, Ryota Hino⁵, Kimihiro Mochizuki¹, Shunsuke Takemura¹, Tomoaki Yamada¹, Masanao Shinohara¹ (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 MORIKAWA¹, Jun'ichi MIYAKOSHI², Hiroyuki FUJIWARA¹ (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 Zhu¹, Aitaro Kato², Yingfeng Ji¹ (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 Yanagida¹, Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima³, Hiroshi Shimizu⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁶ (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 IGARASHI¹ (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 OHTA¹ (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 KATO¹, Motoo Ukawa² (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 Iwata¹ (1. Prefectural University of Hiroshima)

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

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹ (1. NIED)

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

*Mugi Yamamoto¹, Ken Moriwaki¹ (1. Japan Meteorological Agency)

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

*Sachiko TANAKA¹ (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 TAKAHASHI¹, Yasuhira Aoyagi¹, Haruo Kimura¹ (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

A comprehensive review of shallow slow earthquakes in Nankai

*Shunsuke TAKEMURA¹, Yohei Hamada², Hanaya Okuda², Yutaro Okada³, Kurama Okubo⁴, Takeshi Akuhara¹, Akemi Noda⁵, Takashi Tonegawa²

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 al., 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。

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

Paulo Pangan Sawi², *Saeko KITA¹, Roland Burgmann³

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 $M \sim 6$ (M_w 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 $\sim 5,000$ earthquakes, comprising substantially more earthquakes than found in the original earthquake catalog ($\sim 3,000$ 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 (M_w 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-identified 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?

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

*Ryo Okuwaki¹, Wenyan Fan², Takanori Matsuzawa³, Shunsuke Takemura⁴

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 (VLFs) 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, VLFs may occur under unique fault conditions that may reveal physical mechanisms of slow and fast earthquakes. However, the detection and location of VLFs 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 VLFs 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 VLFs at the Hyuga-nada region that were previously overlooked through other detection means. Further, we will model these VLF source mechanisms, including the seismic moment and the duration. We aim to gain new insight into the related fault conditions.

Detection of very shallow earthquakes and deep low-frequency earthquakes in Hakone volcano

*Ryo KURIHARA¹

1. Hot Springs Research Institute 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。

Changes in very low-frequency earthquake activity in the Southwestern Ryukyu Trench over 23 years

*Mamoru NAKAMURA¹

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。

Relationship between inland seismicity and crustal deformation after the 2011 Tohoku earthquake

*Koji TAMARIBUCHI¹, Hisao KIMURA¹, Fuyuki HIROSE¹, Takeyasu YAMAMOTO¹

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に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、 $M \geq 5$ 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、 $M \geq 1$, 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 $\max(|\varepsilon_{\text{max}}|, |\varepsilon_{\text{min}}|)$, (3) Savage and Simpson (1997) による $\max(|\varepsilon_{\text{max}}|, |\varepsilon_{\text{min}}|, |\varepsilon_{\text{max}} + \varepsilon_{\text{min}}|)$ 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。

Seismic imaging of the Metastable olivine wedge using receiver function

*Kazuki MIYAZAKI¹, Junichi Nakajima¹, 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。

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

*Takeshi AKUHARA¹, Yusuke Yamashita², Hiroko Sugioka³, Atikul Haque Farazi², Shukei Ohyanagi², Yoshihiro Ito², Eiichiro Araki⁴, Takashi Tonegawa⁴, Takeshi Tsuji¹, Ryosuke Azuma⁵, Ryota Hino⁵, Kimihiro Mochizuki¹, Shunsuke Takemura¹, Tomoaki Yamada¹, Masanao Shinohara¹

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。

Ratio of inter-plate to intraplate earthquakes in subduction zone around Japan

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Jun'ichi MIYAKOSHI², Hiroyuki FUJIWARA¹

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。

Slow earthquake distribution and thermomechanical modeling in the Izu–Bonin subduction zone

*Weiling Zhu¹, Aitaro Kato², Yingfeng Ji¹

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.

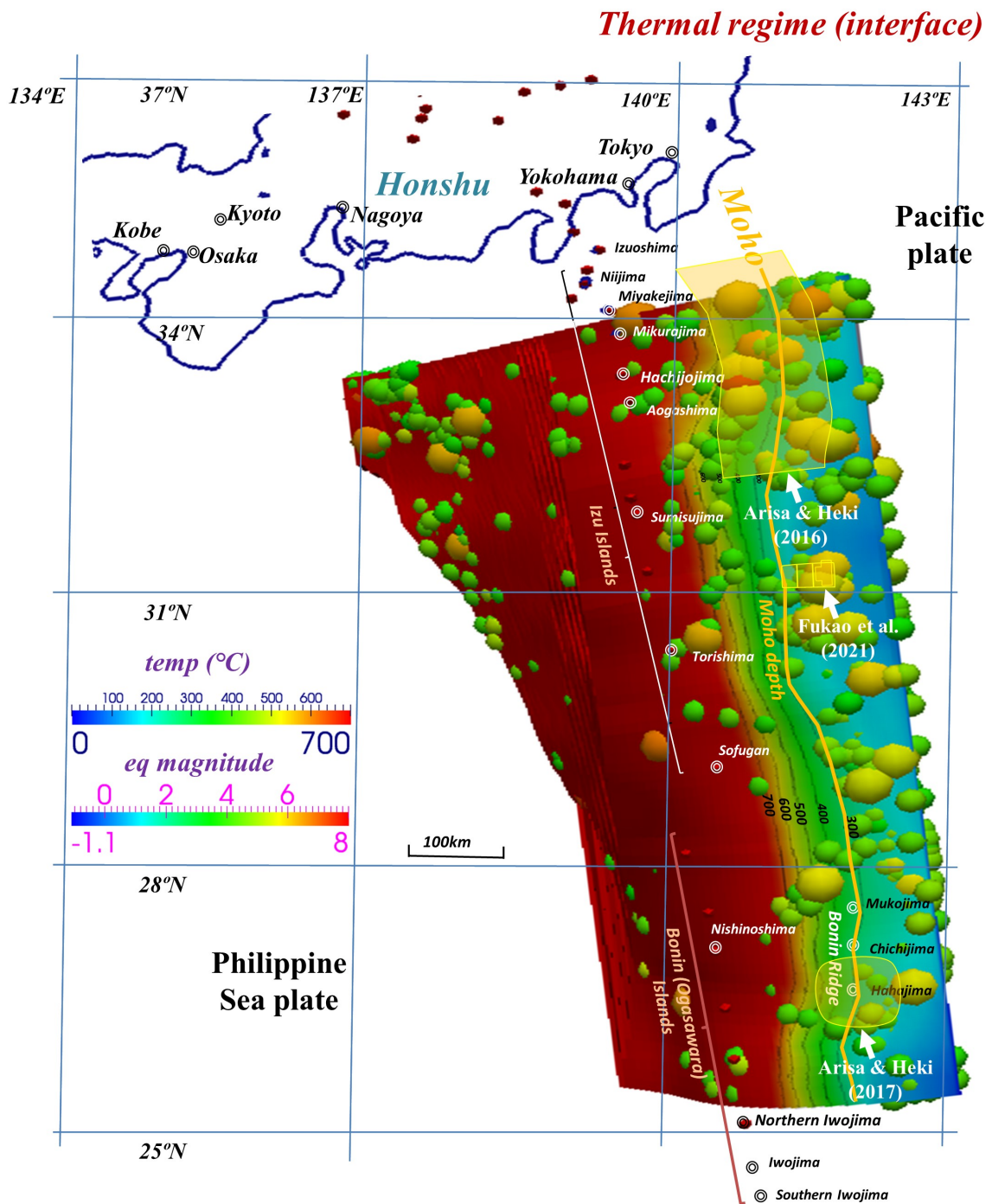
2. Model and method

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 km³ (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 °C, 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°C) are labeled. Colored spheres indicate M>3 earthquakes (IRIS, 2000~2010). Yellow transparent zones indicate the SSEs detected so far.



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

*Hirotsugu Yanagida¹, Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Reiichi Kobayashi¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima³, Hiroshi Shimizu⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Tomoaki Yamada⁶, Masanao Shinohara⁶

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關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關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。

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

*Toshihiro IGARASHI¹

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て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ル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。

Detectability of shallow tectonic tremor in the Nankai Trough based on the DONET data

*Kazuaki OHTA¹

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を作成し、2015年10月–2022年12月のデータを元に振幅中央値+3 σ 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 $\sim 10^{4-4.5}$ Jの値を取り、潮岬沖や室戸沖では $\sim 10^{5-5.5}$ 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 $10^{5-6.5}$ 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。

Shallow seismic activity in the northern Tokyo Bay and central Chiba Prefecture

*Naoko KATO¹, Motoo Ukawa²

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15km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2km）、同日14時13分M4.2（深さ1.5km）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30km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17～30km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17km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20km以内のMeSO-netの観測点の波形データも使い、P波とS波の到着時刻を再検出した。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3km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km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15 km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15km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3km以浅

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。

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

*Takaki Iwata¹

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.

Shear strain energy release for the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹

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 $\sim -2.6 \times 10^{15}$ J、前震の余震 $\sim -3.0 \times 10^{15}$ J、本震 $\sim -2.6 \times 10^{16}$ J、余震 $\sim -2.4 \times 10^{15}$ 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み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み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、せん断歪み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。

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

*Mugi Yamamoto¹, Ken Moriwaki¹

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150km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120kmの領域に達した。この約25日間の移動距離は約150km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。

Correlations between shear strain energy changes and aftershock locations depending on aftershock magnitudes

*Sachiko TANAKA¹

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。

Tectonic tremor activity near the boundary between the Hinagu segment and the Yatsushiro segment of Hinagu fault zone

*Hidenobu TAKAHASHI¹, Yasuhira Aoyagi¹, Haruo Kimura¹

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、高野一白旗区間、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一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。

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 ANDO¹, Takashi Azuma², Community fault model voluntary group³ (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 INOUE¹, Naoko Kitada¹, Noriyuki Shibuya², Masashi Omata² (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)

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

*Hiroki Kawakami¹, Naoki Suda¹ (1. Hiroshima University)

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

*Akira Ueno¹, Tomoya Takano¹, Takuto maeda¹ (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 Yamato¹, Takuto Maeda¹, Tomoya Takano¹ (1. Hirosaki University)

Toward development of the Community Fault Model

*Ryosuke ANDO¹, Takashi Azuma², Community fault model voluntary group³

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）で実績のあるものとした。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.

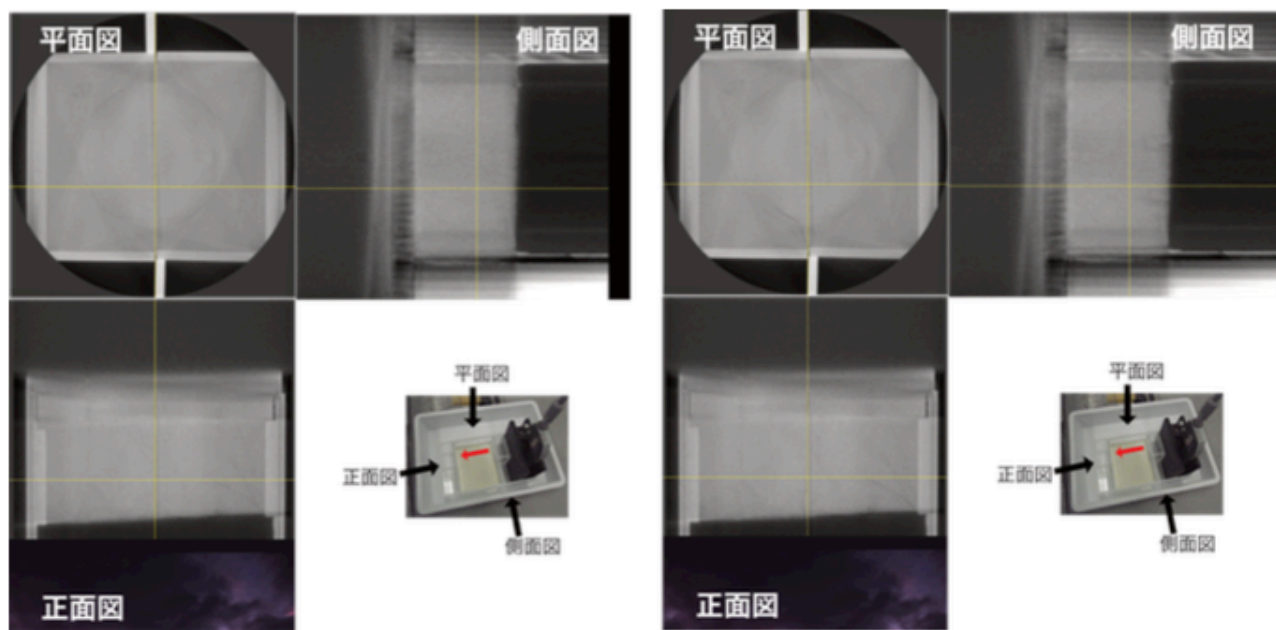
Fundamental study on fault structure development by X-ray CT imaging of analog experimental equipment

*Naoto INOUE¹, Naoko Kitada¹, Noriyuki Shibuya², Masashi Omata²

1. Geo-Research Institute, 2. PASCO

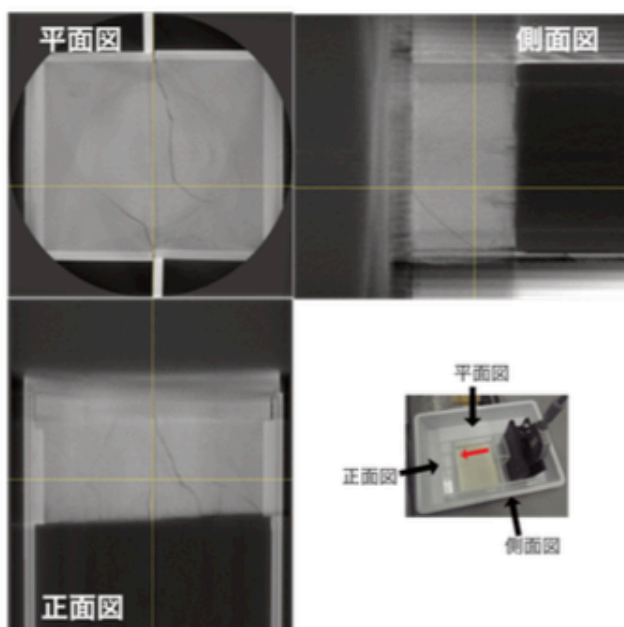
地震により地表地震断層が発生すると、断層主部(主断層)よりも離れた場所に副次的な断層(副断層)が発生することがある。原子力施設などの重要施設には副断層の発生範囲や変位量は、基本的に事前に分布が把握されている活断層より離れて発生するため、断層変位ハザードを考える上で重要な情報であるが、その発生メカニズムに関しては未解明な部分も多い。このために、表面で発生した断層構造が地下でどのような形状をしているのかを検討することは有用であると思われる。そこで、X線CT撮影装置で測定可能なサイズに縮小した縦ずれ断層型・横ずれ断層型の模擬実験装置について、京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻所有のマイクロフォーカス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。

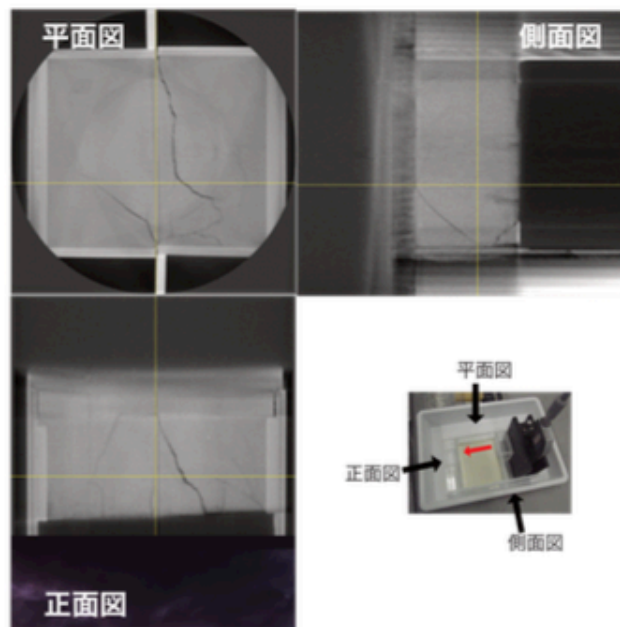


(a) 基底断層累積変位0.25mm

(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)

Source areas of primary microseisms strongly excited by major hurricanes

*Hiroki Kawakami¹, Naoki Suda¹

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。

Seismic noise amplitude variations caused by wind: A case study around Aomori prefecture, northeast Japan

*Akira Ueno¹, Tomoya Takano¹, Takuto maeda¹

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。

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

*Yuzuki Yamato¹, Takuto Maeda¹, Tomoya Takano¹

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（鯨ヶ沢・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。

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 Okuwaki¹, Wenyan Fan² (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 Yano¹, Satoshi Ide¹ (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 TAKANO¹, Kiwamu Nishida² (1. Graduate School of Science and Technology, Hiroshima 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 ASANO¹ (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 OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (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 Someya¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

*Koyo Matsuda¹, Nana Yoshimitsu¹, Takuto Maeda², Yohei Yukutake³ (1. Kyoto University, 2. Hiroshima University, 3. Univ. of Tokyo, ERI)

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

*Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro Emoto² (1. Tohoku University, 2. Kyushu University)

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

*Kentaro EMOTO¹, Satoru HAMANAKA¹ (1. Kyushu University)

[S01P-10] Parallelization in Seismic Ray Tracing Programs

*Shutaro SEKINE¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

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

*Ryo Okuwaki¹, Wenyan Fan²

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.

Determination of event features to compile a tectonic tremor catalog

*Seiya Yano¹, Satoshi Ide¹

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、規模が同程度の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ル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。

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

*Tomoya TAKANO¹, Kiwamu Nishida²

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。

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

*Youichi ASANO¹

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50km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。

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

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

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。)

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

*Masayoshi Someya¹, Takashi Furumura¹

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サーバ（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

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, $w_{\text{data}} : w_{\text{PDE}} = 1 : 1$ ）。

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。

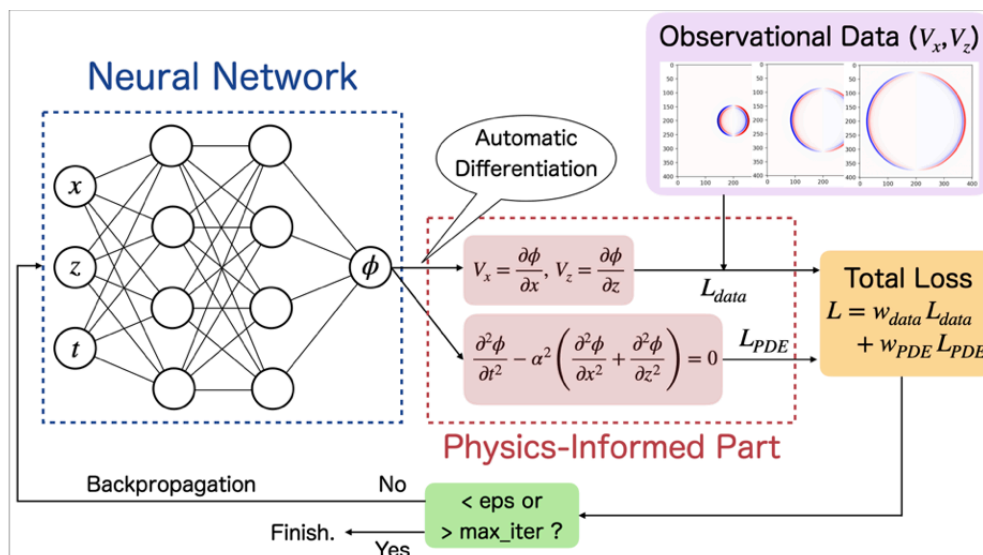


図1：数値実験の概念図。全結合型のNNにより、ポテンシャル ϕ を座標 (x, z) と時間 t の関数として近似し、速度波形データおよび音波方程式を満たすようNNのパラメータを最適化する。損失関数が閾値を下回るか、反復回数が上限を超えると学習を終了する。

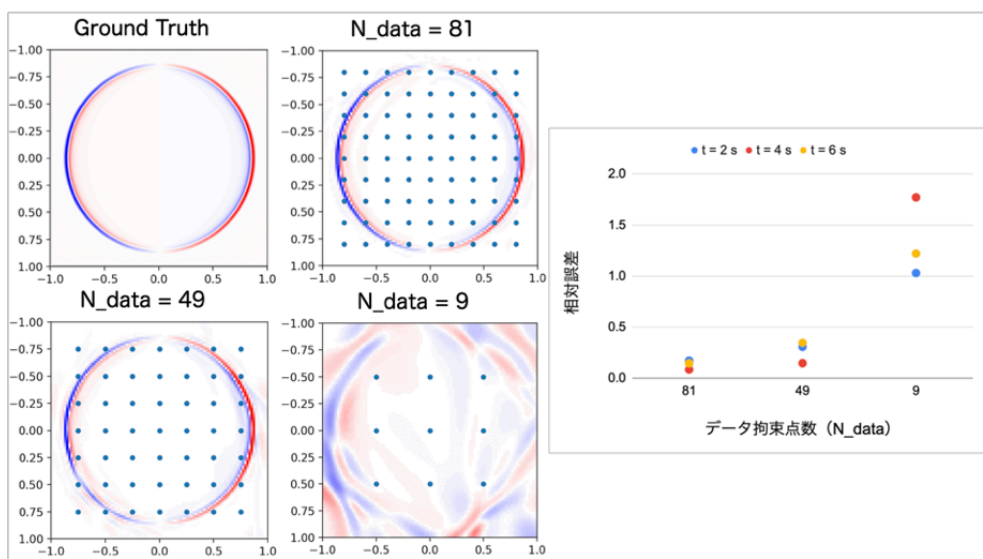


図2：（左）データ拘束点数を変えた場合の、 $t = 6s$ での V_x のスナップショット（青点はデータ拘束点）。（右）相対誤差の変化。なお、音波の卓越波長は 1.5 km であるのに対して、データ拘束点の平均間隔は $N_{data} = 81, 49, 9$ のときそれぞれ 4.4 km, 5.7 km, 13.3 kmである。

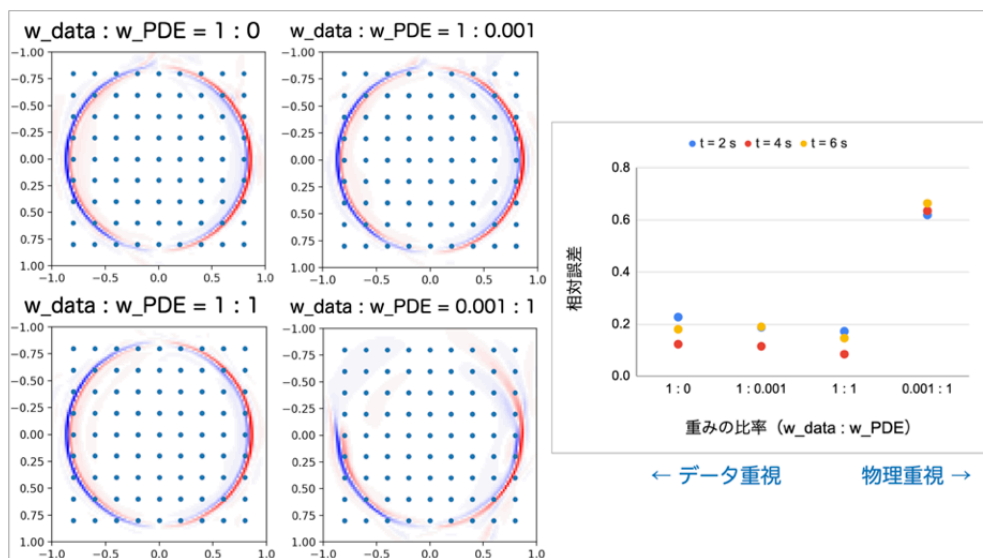


図3：（左） w_{data} と w_{PDE} の比率を変えた場合の、 $t = 6s$ での V_x のスナップショット。（右）相対誤差の変化。

Evaluation of Analysis Techniques for Scattering Attenuation Structure Estimates in Small Spatial Region

*Koyo Matsuda¹, Nana Yoshimitsu¹, Takuto Maeda², Yohei Yukutake³

1. Kyoto University, 2. Hirosaki University, 3. Univ. of Tokyo, ERI

—導入—

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。

—手法—

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。

—データ—

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乗合成エンベロップを用いた。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。

—結果と考察—

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

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でき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。

Energy partitioning into strain components in diffuse wave fields (2)

*Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro Emoto²

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 $\mathbf{r}$ における x 方向の軸歪のエネルギースペクトルは

$$\langle |e_{xx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; \omega)|^2 \rangle \propto 3/V_p^2 (\omega/V_p)^3 + 2/V_s^2 (\omega/V_s)^3 \quad (1)$$

となる。ここで、 V_p , V_s はP波速度、S波速度、 ω 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

$$\langle |e_{xy}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; \omega)|^2 \rangle \propto 1/V_p^2 (\omega/V_p)^3 + 3/(2V_s^2) (\omega/V_s)^3 \quad (2)$$

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十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。

Fluctuation of the strain waveform due to the small-scale heterogeneity

*Kentaro EMOTO¹, Satoru HAMANAKA¹

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。ランダムな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。

Parallelization in Seismic Ray Tracing Programs

*Shutaro SEKINE¹

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必要があると考えられる。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Core 7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。

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 ITO¹, Sawako KINOSHITA¹ (1. GSJ, AIST)

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

*Makoto OKUBO¹ (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 Yamamoto⁴, Keisuke Ariyoshi⁴, Hiroki Horikawa⁴, Shuichiro Yada⁴, 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 Funabiki¹, Masatoshi Miyazawa¹ (1. Kyoto University)

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

*Akiko TAKEO¹, Koji MIYAKAWA¹, Taro NISHIMOTO¹, Miwako ANDO¹, Ayaka SAIKI¹, Shinichi TANAKA¹, Hironori OTSUKA², Chikaaki FUJITA¹, Miki HAMAMOTO³, Ritsuya SHIBATA⁴, Shota KATO¹, Shinya KATOH¹, Koki MASUDA⁵, Masayuki KANO⁶, Shunsuke TAKEMURA¹, Kazushige OBARA¹ (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 OOI¹, Toshiyasu SHIMIZU², Mitsutsugu IGARASHI³, Narumi TAKAHASHI¹, Shoichi SHIOZAKI³, Takahiro HANDA², Kazumi ASAO¹ (1. NIED, 2. Toppan Inc., 3. Chiba Pref.)

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

*Yojiro YAMAMOTO¹, Hiroki Horikawa¹, Shuichiro Yada¹, Masaru Nakano¹, Keisuke Ariyoshi¹, Kentaro Sueki¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi² (1. JAMSTEC, 2. NIED)

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

*Tadashi YAMASHINA¹, Makoto OKUBO¹, Takao Tabei¹ (1. Kochi University)

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

*Shinobu ITO¹, Sawako KINOSHITA¹

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種類のアプローチで再検測を行う。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。これには一定程度的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

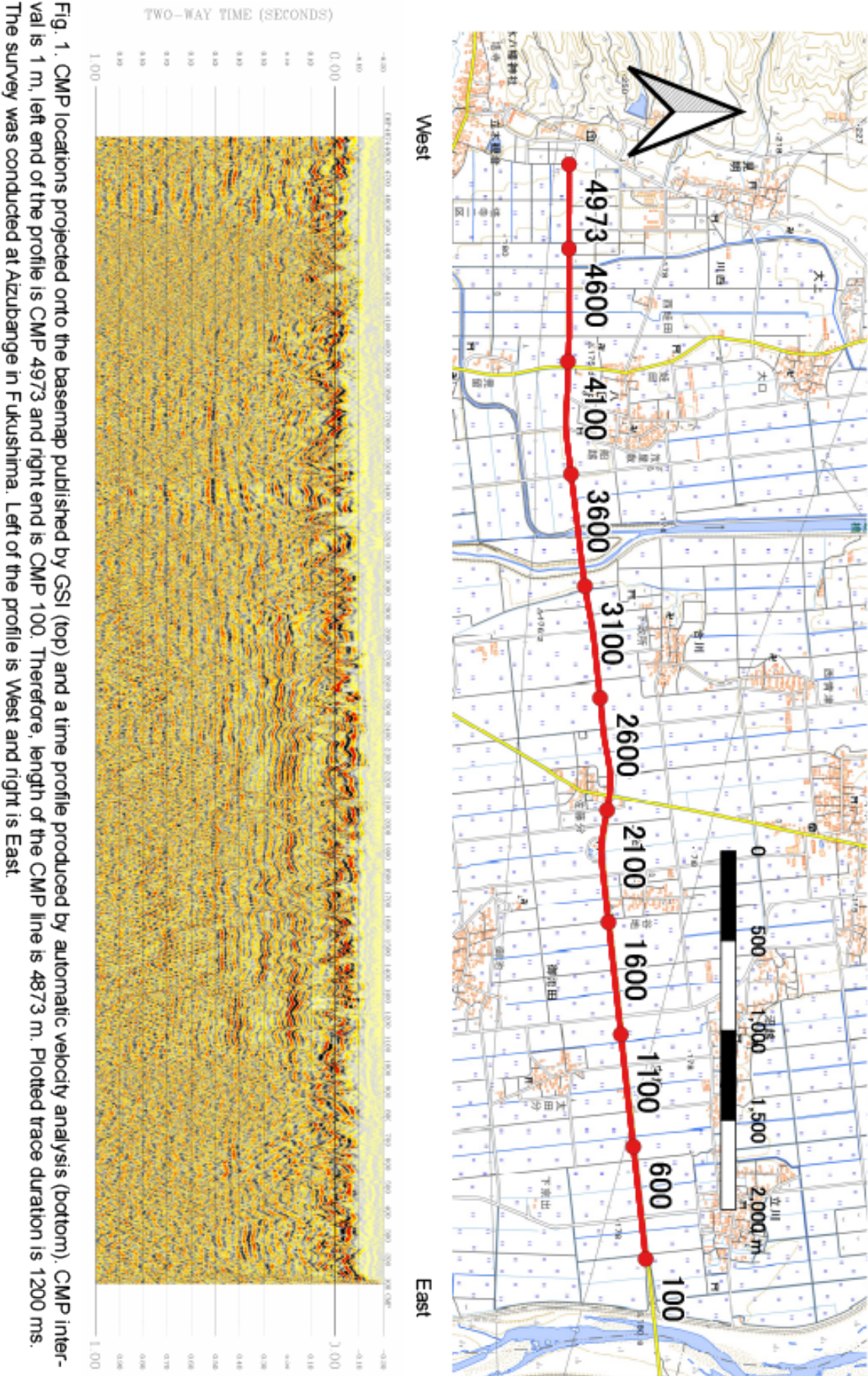


Fig. 1. CMP locations projected onto the basemap published by GSI (top) and a time profile produced by automatic velocity analysis (bottom). CMP interval is 1 m, left end of the profile is CMP 4973 and right end is CMP 100. Therefore, length of the CMP line is 4873 m. Plotted trace duration is 1200 ms. The survey was conducted at Aizubange in Fukushima. Left of the profile is West and right is East.

Working report of the definition for WIN waveform data transmission protocol

*Makoto OKUBO¹

1. Unit of Science and Technology, Kochi Univ.

WINシステム（ト部・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．

A study of earthquake detection capacity of DONET

*Kazuyoshi NANJO^{1,2,3,4}, Yojiro Yamamoto⁴, Keisuke Ariyoshi⁴, Hiroki Horikawa⁴, Shuichiro Yada⁴, 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.).

Observation of P-wave polarity with DAS recordings along Route 9

*Yuki Funabiki¹, Masatoshi Miyazawa¹

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、 $\pm 30 \mu\epsilon / \text{sec}$ 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の観測チャンネル同士で波形をスタックした。この際に、ノイズが多いチャンネルの影響を排除するため、地震発生前の各チャン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ンネルに関しては、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、隣り合うチャンネルのうち、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ンネルに関しては、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、それらの観測チャンネルを合わせた形でのスタックは行わなかった。

3. 結果

そして、代表するいくつかのスタックされたチャンネルにおいて、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ン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。

Broadband seismic campaign for the deep very low frequency earthquakes in the southwest Japan

*Akiko TAKEO¹, Koji MIYAKAWA¹, Taro NISHIMOTO¹, Miwako ANDO¹, Ayaka SAIKI¹, Shinichi TANAKA¹, Hironori OTSUKA², Chikaaki FUJITA¹, Miki HAMAMOTO³, Ritsuya SHIBATA⁴, Shota KATO¹, Shinya KATOH¹, Koki MASUDA⁵, Masayuki KANO⁶, Shunsuke TAKEMURA¹, Kazushige OBARA¹

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、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の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

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。

Development of Tsunami Evacuation Training System

*Masahiro OOI¹, Toshiyasu SHIMIZU², Mitsutsugu IGARASHI³, Narumi TAKAHASHI¹, Shoichi SHIOZAKI³, Takahiro HANDA², Kazumi ASAO¹

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れのか、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で、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、避難経路の危険箇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

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。

Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveform data (2)

*Yojiro YAMAMOTO¹, Hiroki Horikawa¹, Shuichiro Yada¹, Masaru Nakano¹, Keisuke Ariyoshi¹, Kentaro Sueki¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi²

1. JAMSTEC, 2. NIED

南海トラフでは100-200年程度の間隔でM8級の大規模な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

Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (3)

*Tadashi YAMASHINA¹, Makoto OKUBO¹, Takao TABEL¹

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一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、2011–2015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））が大きい場合、反射法などで明瞭な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

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 Ma¹, Eiichi Fukuyama^{1,2}, Futoshi Yamashita², Kurama Okubo² (1. Kyoto University, 2. NIED)

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

*Hideto Takatsu¹, Shin-ichi Uehara¹ (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 NODA¹, Kiyokazu Oohashi² (1. Kyoto Univ., 2. Yamaguchi Univ.)

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

*Garam Kim¹, Manami Kitamura², Michiyo Sawai¹ (1. Chiba university, 2. GSJ, AIST)

A simple direct shear friction apparatus using a uniaxial compression tester

*Guohao Ma¹, Eiichi Fukuyama^{1,2}, Futoshi Yamashita², Kurama Okubo²

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 $7.89 \times 10^7 \text{ N/m}$. 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 D_c is estimated between $9.9 \mu\text{m}$ and $20.8 \mu\text{m}$. 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.

Effect of internal fracture distribution on frequency dependence of elastic constants of granite

*Hideto Takatsu¹, Shin-ichi Uehara¹

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、 V_p/V_s 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

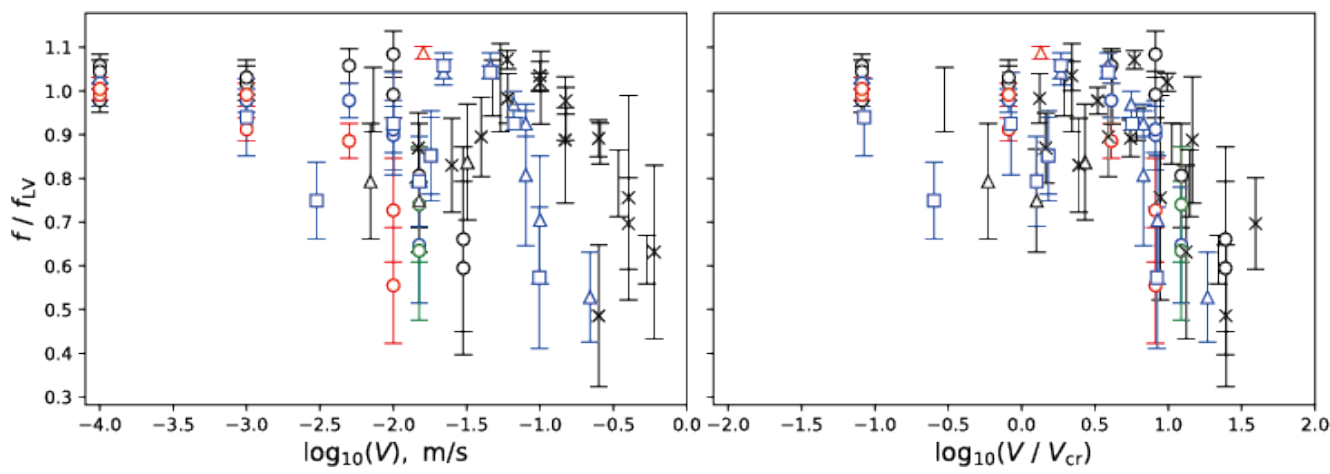
乾燥試料では弾性定数の周波数依存性は見られなかった。一方で、飽和試料では周波数とポアソン比には正の相関が見られた。飽和未加熱試料（間隙率 0.30%）のポアソン比は、周波数が0.1 Hzから10 Hzに増加するにつれて、0.327から0.341と増加し、飽和した550℃加熱試料（間隙率 1.45%）のポアソン比は、0.328から0.449と増加するという変化が確認できた。この増加量の違いは、低周波帯（0.1 – 100 Hz）で有効に働く間隙水と岩石の相互作用に起因したメカニズム（Mavko & Jizba, 1991）が関係している可能性がある。また、乾燥試料には周波数依存性が見られず、飽和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。

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

*Hiroyuki NODA¹, Kiyokazu Oohashi²

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.



Effects of effective pressure on fault reactivation due to fluid injection

*Garam Kim¹, Manami Kitamura², Michiyo Sawai¹

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を期待される。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。

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 FUKUSHIMA¹, Natsuko Chubachi¹, Shinichi Kuriyama¹ (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 Yazaki¹, Yugo Suzuki¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (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 FUKUSHIMA¹, Natsuko Chubachi¹, Shinichi Kuriyama¹

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。

Development of Citizen Seismic Network and Promotion of Sustainable Earthquake Disaster Prevention and Mitigation Projects

*Yukino Yazaki¹, Yugo Suzuki¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹

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。

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 SAWAZAKI¹ (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 NAOI¹, Shiro HIRANO², Youqing CHEN¹ (1. Kyoto University, 2. Ritsumeikan University)

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

*Yuki Kurata¹, Hiroaki Matsukawa¹, Hiroto Tanaka¹, Yasuhiro Matsumoto¹, Mika Takekoshi¹, Takachika Yagi¹, Ryota Kiuchi¹, Yuta Taki¹ (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 KUBO¹, Katsuhiko SHIOMI¹ (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 AMEZAWA¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹, Jun Ogata², Satoru Fukayama², Hiroki Kuroda³ (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 Jinde¹, Amane Sugii¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

[S21P-07] You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes.

*GERARDO MANUEL MENDO PEREZ¹, HIROMICHI NAGAO¹ (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 KATO¹, Yoshihisa IIO², Hiroshi KATAO², Masayo SAWADA², Kazuhide TOMISAKA² (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 Matsui³, Hiromichi Nagao⁴ (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 SAWAKI¹, Yoshihiro SATO^{2,3}, Takahiko UCHIDE¹, Haruo HORIKAWA¹, Takahiro SHIINA¹, Yuta AMEZAWA¹ (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 Kim¹, Yohei Yukutake³, Yuki Abe⁴ (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 OHTAKE¹, Aitaro KATO¹, Yutaro OKADA², Takuya NISHIMURA³ (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 NAKAMURA¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Shun-ichi Watanabe¹, Koya Nagae¹ (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 Kurosu¹, Motoyuki Kido² (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 Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (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 SAWAZAKI¹

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、大地震発生から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： $T=60(\text{s})$ 、 $N=60 \times T_1 - 5$

ケース2： $T=10 \times T_1(\text{s})$ 、 $N=[360-30/T_1]$

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 $T=60\text{s}$ 、 $N=355$ 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。

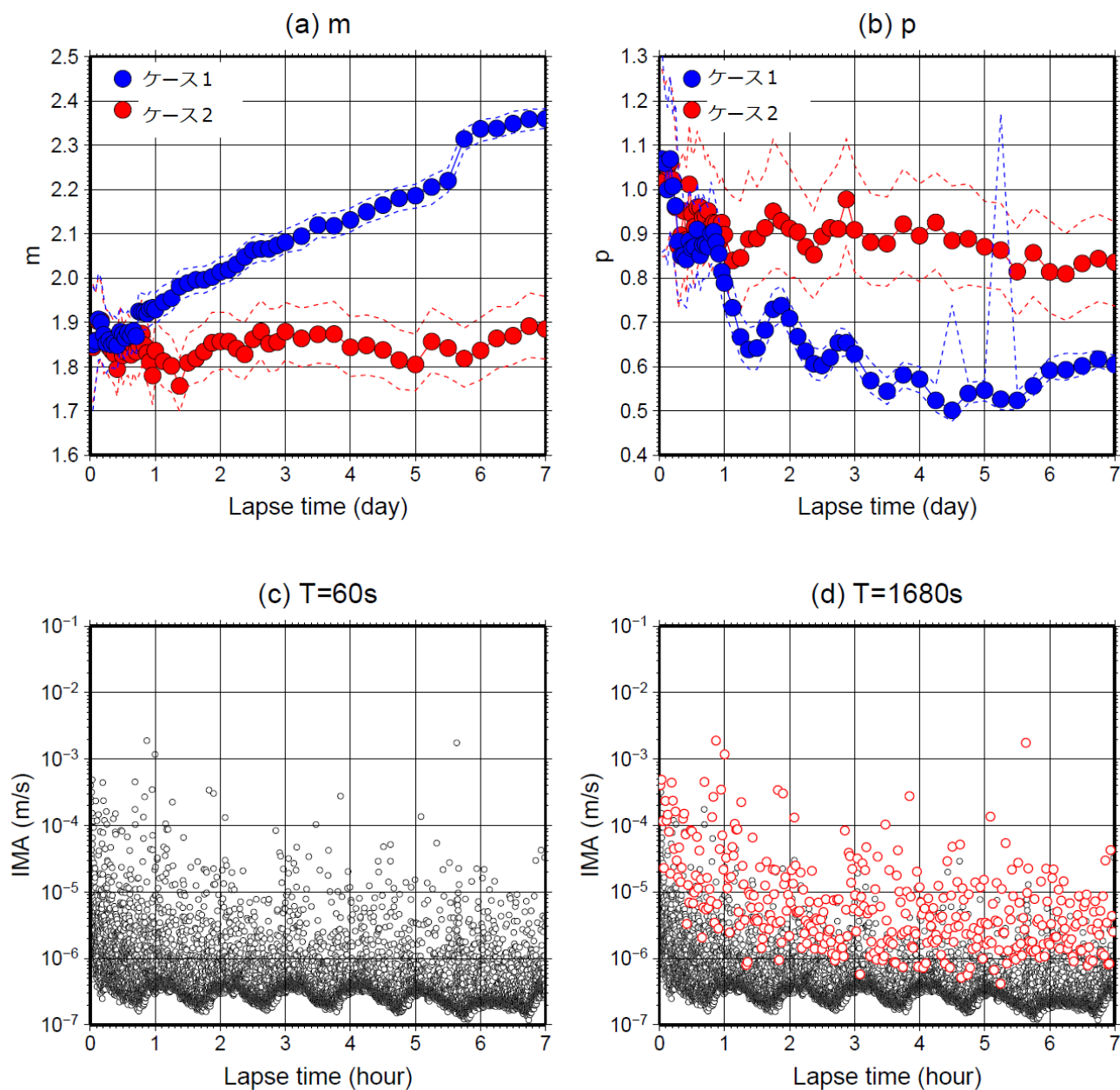
2008年岩手・宮城内陸地震（ $M_j 7.2$ ）と2018年大阪府北部の地震（ $M_j 6.1$ ）における、本震からの震源距離20km以内のHi-net観測点の3成分RMS振幅記録1週間分を解析に用いた。岩手・宮城内陸地震におけるHi-net観測点においては、ケース1と2でパラメータ推定の中央値に大きな違いはなく、多少の変動があるものの期間を通じてほぼ一定の値となった。ケース1では時間の経過とともに推定幅（5%と95%パーセンタイル値の差または比）が狭くなるのに対し、ケース2では推定幅に大きな変化はなかった。一方で、大阪府北部の地震におけるHi-net観測点においては、ケース1におい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

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=1680sの場合（T=60sの場合に赤丸で上書き））。



AE Catalog development by a deep hashing method and network correlation analysis

*Makoto NAOI¹, Shiro HIRANO², Youqing CHEN¹

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ケ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、室内水圧破碎実験で得た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チャン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チャンネル平均値(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。

Attempt to Predict Response Spectra from Fourier Spectra Using Machine Learning

*Yuki Kurata¹, Hiroaki Matsukawa¹, Hiroto Tanaka¹, Yasuhiro Matsumoto¹, Mika Takekoshi¹, Takachika Yagi¹, Ryota Kiuchi¹, Yuta Taki¹

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

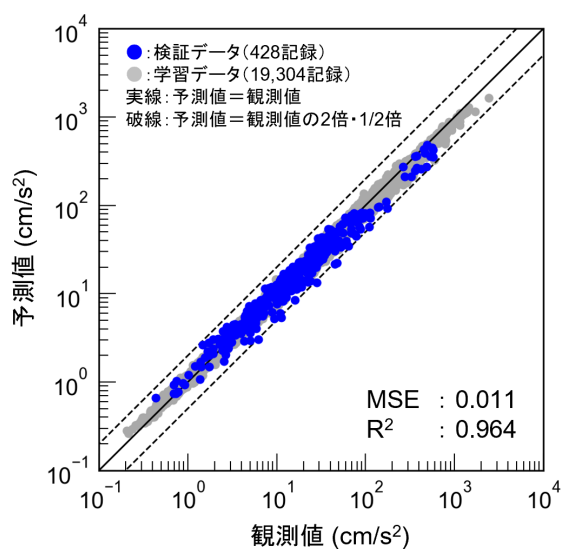
近において観測値と予測値の乖離が大きい。これは、灰色で示している学習データの密度が低い応答値であることに加えて、観測波形の位相特性としてパルス性が強いことが要因として考えられる。一方で、図2(a)に示すその他の周期帯や図2(b)に示す最大余震の全周期帯においては、観測値と予測値の間に顕著な差はない。

4. 今後の展望

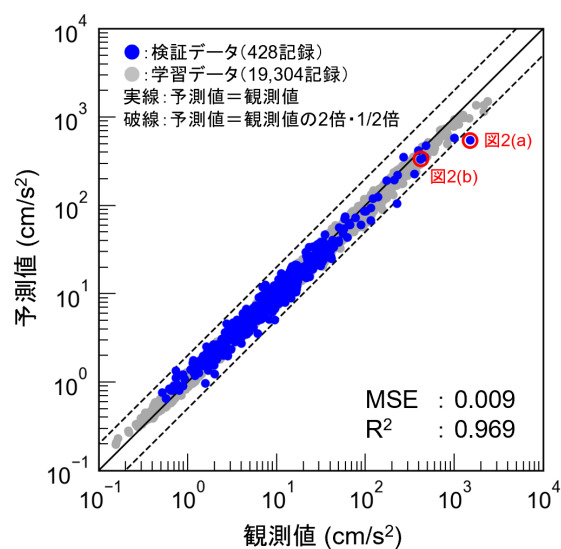
学習データが不足する応答が大きい観測値に対して、本研究のモデルによる予測値は過小評価となる傾向が見られた。データセットの偏りを低減するため、例えばフーリエ振幅スペクトルの最大値や積分値で目的変数と説明変数を正規化して学習することが考えられる。また、位相特性に関係するパラメータとして、地震規模や震源からの距離等を説明変数に追加することで、予測精度の向上が図れるか検討を進めたい。合わせて他の機械学習手法を用いた予測精度の検証についても行っていく予定である。

謝辞

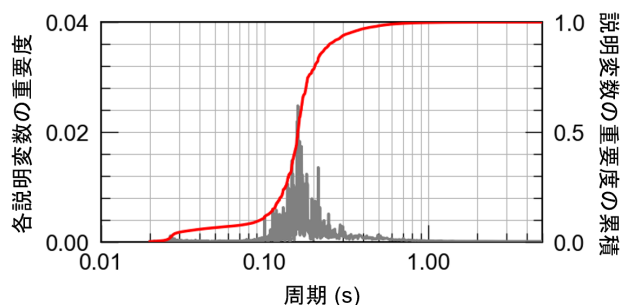
防災科学技術研究所の観測記録を利用しました。ここに記して感謝いたします。



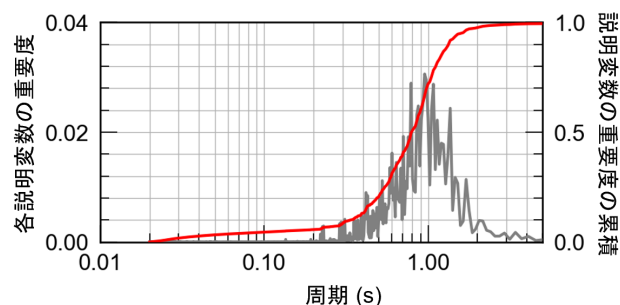
(a) PGAの観測値と予測値



(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

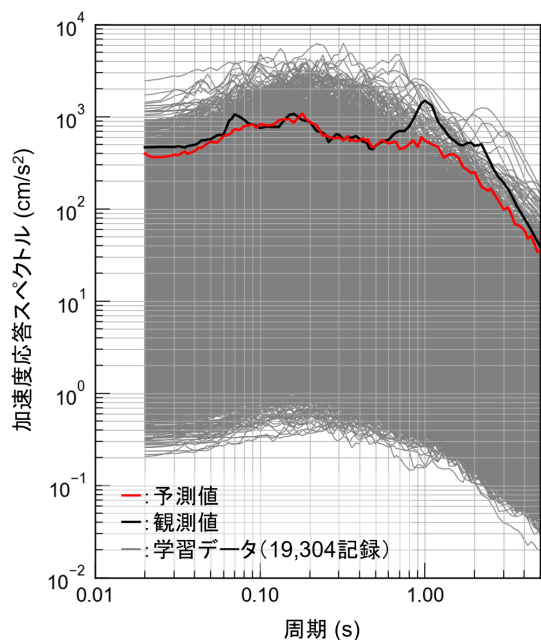


(c) PGAに対するフーリエ振幅スペクトルの重要度

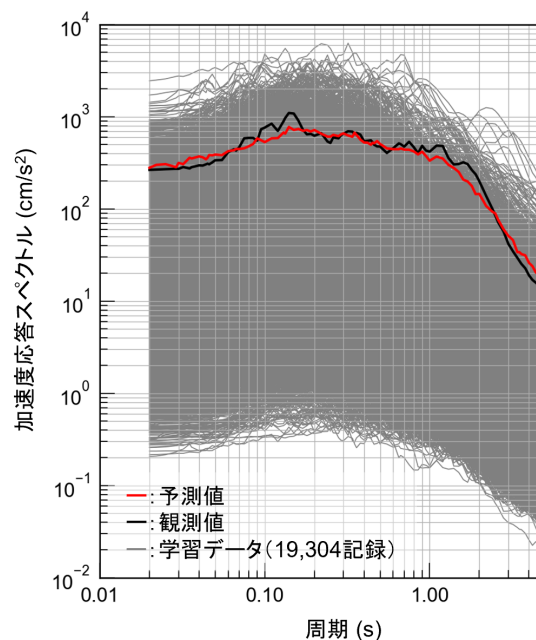


(d) 周期1秒の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)に対するフーリエ振幅スペクトルの重要度

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

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

*Hisahiko KUBO¹, Katsuhiko SHIOMI¹

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。

Comprehensive detection of later phase in S coda throughout the inland Japanese archipelago with deep learning

*Yuta AMEZAWA¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹, Jun Ogata², Satoru Fukayama², Hiroki Kuroda³

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

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。

Extraction of deep tectonic tremor waveforms using deep learning: Application to Hi-net stations in the Nankai subduction zone

*Yuya Jinde¹, Amane Sugii¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

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地震やノイズも検出する場合があります、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。

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。

You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes.

*GERARDO MANUEL MENDO PEREZ¹, HIROMICHI NAGAO¹

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.

Which is more suitable for polarity determination using deep learning, time series data or image data?

*Shinya KATOH¹, Yoshihisa IIO², Hiroshi KATAO², Masayo SAWADA², Kazuhide TOMISAKA²

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。

Fast Smoothing Method for Spatiotemporal Data and Its Application to Seismic Wavefield Reconstruction

*Yoshikazu Terada^{1,2}, Hidetoshi Matsui³, Hiromichi Nagao⁴

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。

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

*Yasunori SAWAKI¹, Yoshihiro SATO^{2,3}, Takahiko UCHIDE¹, Haruo HORIKAWA¹, Takahiro SHIINA¹, Yuta AMEZAWA¹

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

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。

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

*Yuji Nakamura^{1,2}, Ahyi Kim¹, Yohei Yukutake³, Yuki Abe⁴

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Precision, 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 Precision=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precision、Recall がそれぞれが98.6%, 96.2%となり、modelHKN をそのまま適用（P 波 Precision=96.8%, Recall=95.5%）するより地震波検測の精度が向上した

Machine-learning model of GNSS displacement rate estimation using seismic waveforms in western Shikoku

*Kazuki OHTAKE¹, Aitaro KATO¹, Yutaro OKADA², Takuya NISHIMURA³

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变化・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。

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

*Yuto NAKAMURA¹, Tadashi Ishikawa¹, Yusuke Yokota², Shun-ichi Watanabe¹, Koya Nagae¹

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。

Acoustic waveform analysis for GNSS-Acoustic observation using Machine Learning

*Naoki Kurosu¹, Motoyuki Kido²

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、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ある。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。

Development of a Seismic Phase Pick System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

*Yukino Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹

1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics

地震大国である我が国では、様々な機関において高密度振動観測網が展開され、各地点での震度の即時計算および効果的な地震速報の発令を可能にしている。しかし、現状では地震計の設置間隔である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/ltt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、precision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。

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 TANAKA¹, Shusaku GOTO² (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 TANAKA¹, Shusaku GOTO²

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履歴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履歴の推定を行った。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。

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 TSURU¹, Tetsuo NO², Kazuo YAMAGUCHI³, Jin'Oh PARK⁴ (1. TUMSAT, 2. JAMSTEC, 3. AIST, 4. AORI)

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

*Tetsuo NO¹, Tetsuro Tsuru^{2,1}, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Kazuo Nakahigashi², Seishiro Furuyama², Ryo Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (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 Ishibashi¹, Kazuo Nakahigashi², Tomoaki Yamada³, Kimihiro Mochizuki³, Yoshio Murai⁴, Ryota Hino⁵, Ryosuke Azuma⁵, Toshinori Sato⁶, Masanao Shinohara³ (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 NAKAMURA¹, Gou FUJIE¹, Shuichi KODAIRA¹, Mikiya YAMASHITA², Koichiro OBANA¹, Tetsuo NO¹, Seiichi MIURA¹ (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 TAKAGI¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Kiwamu Nishida², Masanao Shinohara² (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 TONEGAWA¹, Katsuhiko Shiomi², Ryota Takagi³ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Tohoku University)

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

*Masanao Komatsu¹, Sohei Urakami², Hiroshi Takenaka³, Genti Toyokuni⁴, Mamoru Nakamura⁵, Shutaro Sekine⁶, Shintaro Abe⁶ (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 SHIOMI¹ (1. NIED)

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

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

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

*Kazuo YOSHIMOTO¹ (1. Yokohama City University)

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

*Ayako NAKANISHI¹, Yanfang Qin¹, Xin Liu², Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi³, Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi¹, Takeshi Nakamura⁴, Toshiya Fujiwara¹ (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 KURASHIMO¹, Takashi Iidaka², Noriko Tsumura³ (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 TSURU¹, Tetsuo NO², Kazuo YAMAGUCHI³, Jin'Oh PARK⁴

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-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。

Time-lapse seismic reflection study off Tokachi

*Tetsuo NO¹, Tetsuro Tsuru^{2,1}, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Kazuo Nakahigashi², Seishiro Furuyama², Ryo Miura¹, Shuichi Kodaira¹

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

Seismic velocity structure off the east coast of Aomori Prefecture revealed by airgun ocean bottom seismometer survey.

*Tamaki Ishibashi¹, Kazuo Nakahigashi², Tomoaki Yamada³, Kimihiro Mochizuki³, Yoshio Murai⁴, Ryota Hino⁵, Ryosuke Azuma⁵, Toshinori Sato⁶, Masanao Shinohara³

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剥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1.6-4.8km/sのP波速度を持つ堆積層が見られ、その層厚は最大9kmである。堆積層の下にはP波速度がそれぞれ4.9-5.5km/s、5.5-6.3km/sを示す上部地殻、中部地殻が見られ、その層厚は2～8km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6.3-7.0km/sの下部地殻が見られ、その層厚は2～10km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。

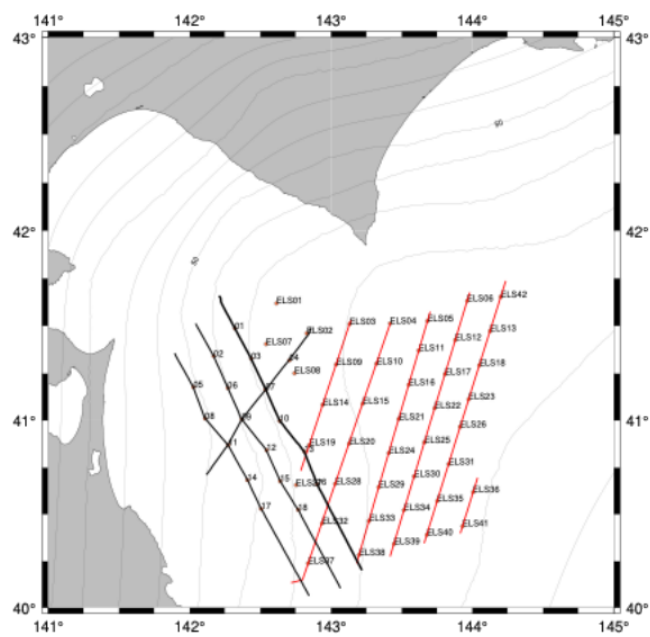


図1. 青森県東方沖における海底地震計設置位置
およびエアガン発信測線図。
黒が2005年、赤が2007年の測線を示す。
細線のコンタは太平洋プレート上面深度を示す。

Structural characteristics of the incoming plate in the Japan Trench and their correspondence to the megathrust slip styles

*Yasuyuki NAKAMURA¹, Gou FUJIE¹, Shuichi KODAIRA¹, Mikiya YAMASHITA², Koichiro OBANA¹, Tetsuo NO¹, Seiichi MIURA¹

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－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－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。地壘・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。

Estimation of shear velocity structure near the Japan and Kuril Trench junction using ambient noise records

*Ryota TAKAGI¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Kiwamu Nishida², Masanao Shinohara²

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。

Anisotropic structure at shallow depths near the Japan Trench

*Takashi TONEGAWA¹, Katsuhiko Shiomi², Ryota Takagi³

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コード波記録を活用し、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。

Ambient-noise cross-correlation analysis using three-components broadband continuous ground motion records in the Nansei Islands

*Masanao Komatsu¹, Sohei Urakami², Hiroshi Takenaka³, Genti Toyokuni⁴, Mamoru Nakamura⁵, Shutaro Sekine⁶, Shintaro Abe⁶

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取り、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）-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、時間一周波数解析を行い、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。

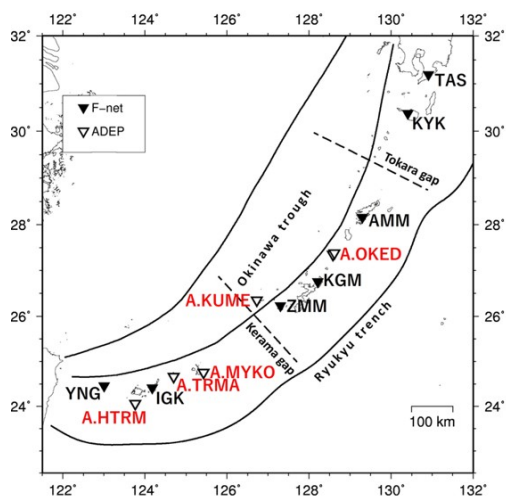
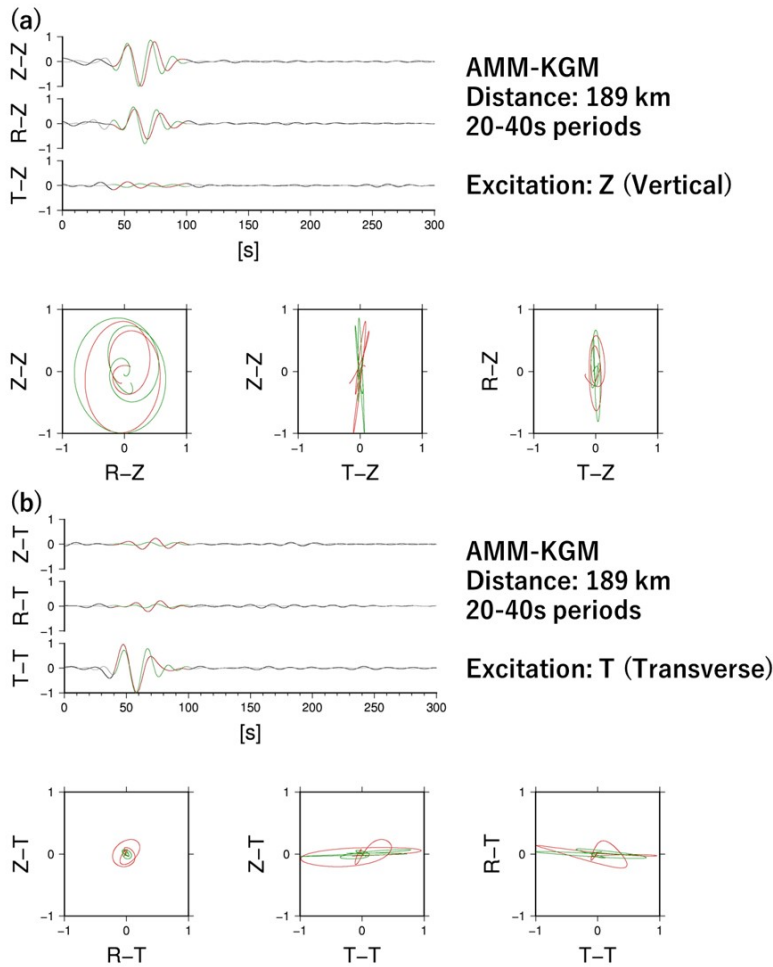


図1 観測点地図. 黒逆三角が防災科研のF-net, 白逆三角がADEPの観測点.

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.



Shallow crustal anisotropy in Eastern Türkiye based on the receiver function analysis

*Katsuhiko SHIOMI¹

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、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－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－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。

Temporal variations in seismic anisotropy above a megathrust zone following slow-slip events

*Yosuke Ito¹, Junichi Nakajima¹

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.

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

*Kazuo YOSHIMOTO¹

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ね合して求めた。

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。

Constructing a 3D seismic velocity model of the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI¹, Yanfang Qin¹, Xin Liu², Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi³, Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi¹, Takeshi Nakamura⁴, Toshiya Fujiwara¹

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。

A dense seismic array observation in the eastern part of Shikoku Island, southwestern Japan

*Eiji KURASHIMO¹, Takashi Iidaka², Noriko Tsumura³

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する知見を得るために、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カ所(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カ所)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。

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 Onodera¹, Satoshi Tanaka², Hiroaki Shiraishi², Taichi Kawamura³, Takefumi Mitani², Hideki Murakami⁴, Ryuhei Yamada⁵, Shunichi Kamata⁶, Jun Kimura⁷, Hiroyuki Kurokawa⁸, Yasuhito Sekine⁸, Kiwamu Nishida¹, Takeshi Tsuji⁹, Mark Panning¹⁰, Ralph Lorenz¹¹ (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 Ganbat², Demberel Sodnomsambuu³, Ulziibat Munkhuu³ (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 TARUMI¹, 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 Onodera¹, Satoshi Tanaka², Hiroaki Shiraishi², Taichi Kawamura³, Takefumi Mitani², Hideki Murakami⁴, Ryuhei Yamada⁵, Shunichi Kamata⁶, Jun Kimura⁷, Hiroyuki Kurokawa⁸, Yasuhito Sekine⁸, Kiwamu Nishida¹, Takeshi Tsuji⁹, Mark Panning¹⁰, Ralph Lorenz¹¹

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, 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索する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, タイタンを探索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。

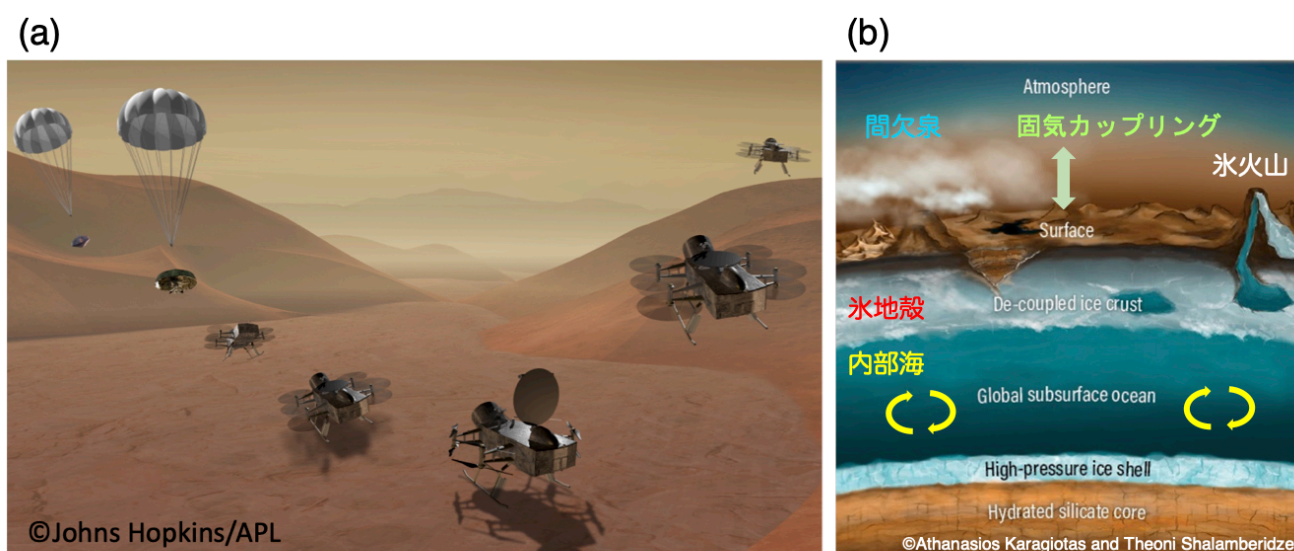


図1. (a)ドローンを用いた離着陸探査の概念図. (b)タイタンの内部構造の想像図.

Upper mantle structure beneath Mongolia: Implications for the western margin of the Amurian plate

*Kazunori YOSHIZAWA^{1,2}, Baigalimaa Ganbat², Demberel Sodnomsambuu³, Ulziibat Munkhuu³

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.

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

*Kotaro TARUMI¹, 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。

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 NORIMATSU¹, Shinji TODA¹ (1. IRIDeS, Tohoku Univ.)

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

*SAWAKO KINOSHITA¹, Shinobu Ito¹ (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 NORIMATSU¹, Shinji TODA¹

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。

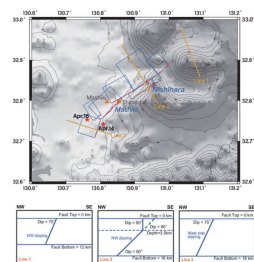
4. まとめと今後の予定

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ータについて、その影響を評価するためのパラメータスタディを行った。すべり速度パラメータ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。

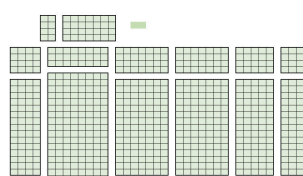
すべり速度パラメータ、アスペリティの位置に加えて、計算に用いる速度構造モデルの影響は大きいと考えられることから、今後は防災科学技術研究所（NIED）と当グループの共同研究の枠組みにおいて、NIEDから提供されるより詳細で最新のモデルである深部・浅部統合地盤モデルを用いることとする。また、この速度構造モデルを用いた有限差分法による3次元計算と建物被害率分布を比較することで、強震動と被害の関係についても検討する予定である。

（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。

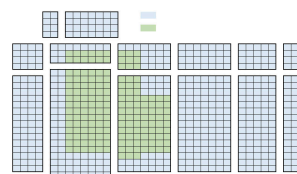
a) 使用した断層モデル



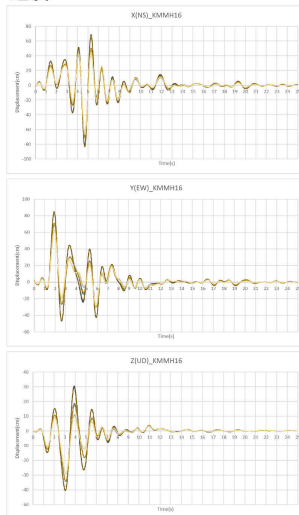
b) すべり分布（アスペリティ無し）



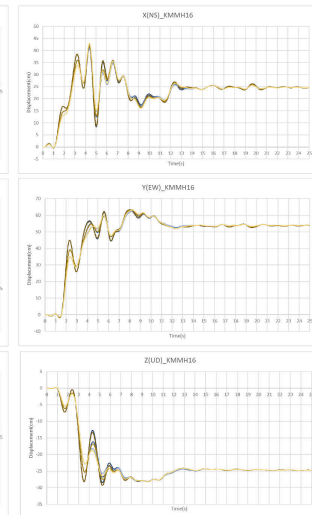
c) すべり分布（アスペリティあり）



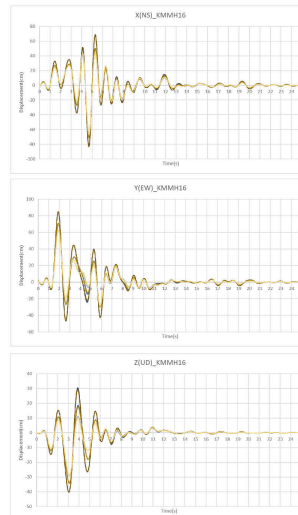
速度



変位



速度



変位

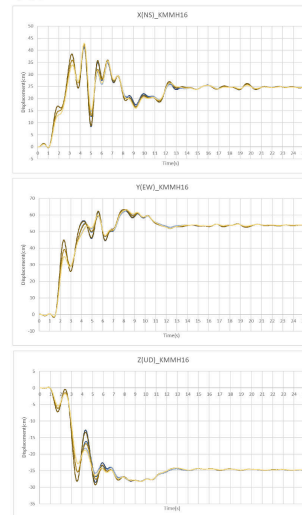


Fig. アスペリティ、すべり速度パラメータを変化させたパラメータスタディの一部

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

*SAWAKO KINOSHITA¹, Shinobu Ito¹

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ト(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ト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.

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 OHTAKE¹, Hiroo Nemoto², Shutaro Sekine³, Hirotoshi Matsubayashi⁴, Shin'ichi Sakai⁵ (1. JMA, 2. Ritsumeikan Univ., 3. ADEP, 4. ANET, 5. ERI)

Investigate earthquake sound (Part 3) - Analysis of audible “jinari” recording

*Kazuo OHTAKE¹, Hiroo Nemoto², Shutaro Sekine³, Hirotohi Matsubayashi⁴, Shin'ichi Sakai⁵

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。

