

Tue. Oct 25, 2022

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

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

[S09] AM-1

chairperson:Mamoru Nakamura(Ryukyu University), Kazuyoshi Nanjo(University of Shizuoka)

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

[S09-17] Is the low b -value in the rift-axis of the southern Okinawa Trough accurate?

*Mamoru NAKAMURA¹ (1. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

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

[S09-18] b -value dependency on crustal strength inferred from precise focal mechanism data

*Satoshi MATSUMOTO¹, Yoshihisa Iio², Shinichi Sakai³, Aitaro Kato⁴ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S09-19] Seismic radiated energy and source spectra of the regular and deep low-frequency earthquakes in and around the source area of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Taka'aki Taira², Kentaro Emoto³, Akira Hasegawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, Berkeley, California, U.S.A., 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-20] Estimation of earthquake distribution and fault structure of normal fault earthquakes off Fukushima-Ibaraki using sP depth-phase

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Genti Toyokuni¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Tohoku University)

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

[S09-21] Static Coulomb stress transfer and seismicity rate change associated with the 2016 Kumamoto, Kyushu, Japan, earthquake

*Shinji TODA¹, Ross S. Stein² (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

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

11:00 AM - 11:45 AM JST | 2:00 AM - 2:45 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S09] AM-2

chairperson:Nana Yoshimitsu(Kyoto University)

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

[S09-22] What factors contribute to cut-off depth of crustal seismicity?

*Akiko TANAKA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S09-23] Evaluation of seismic activity characteristics at different depths through laboratory rock fracture experiments

*Nana YOSHIMITSU¹, Hironori KAWAKATA² (1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ.)

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

[S09-24] Verification of Seismic Gap by means of physical and statistical models

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹, Eugenio Lippiello² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Università della Campania "Luigi Vanvitelli")

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

11:45 AM - 12:30 PM JST | 2:45 AM - 3:30 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Akiko TOH (Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-01] Seismicity and its implications for fluid movement in the northern and central Hikurangi subduction zone, New Zealand*Kazuya TATEIWA¹, Calum Chamberlain², Martha Savage², Tomomi Okada¹ (1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington)

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

[S08-02] Fault valve action using ancient magma system caused the intense earthquake swarm in Northeast Noto peninsula, Japan*Keisuke YOSHIDA¹, Masaaki Uno², Toru Matsuzawa¹, Yohei Yukutake³, Yusuke Mukuhira⁴, Hiroshi Sato³, Takeyoshi Yoshida¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Environmental studies, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Institute for Fluid Science, Tohoku University)

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

[S08-03] Source process of moderate earthquakes off the east of Izu Peninsula in 2006 and 2009 : Relationship to previous swarm activities*Yukako Tanaka¹, Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

2:00 PM - 3:00 PM JST | 5:00 AM - 6:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson: Kazuya TATEIWA (Tohoku University), Keisuke Yoshida (Tohoku University)

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

[S08-04] Quantification of expansion rate of aftershock zone for M7-class earthquakes in Japan: Potential as differential stress meter*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA² (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University)

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

[S08-05] Stress Drop of Small Earthquakes in the Southeastern Kanto RegionKaho Hashimoto¹, *Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-06] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate*Tsukasa Masuda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-07] Shear strength and fluid over-pressure in world subduction zones estimated from the earthquake energy budget*Nelson PULIDO¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

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

[S08] PM-2

chairperson: Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology), Saeko Kita (Building research institute)

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

[S08-08] Nankai Trough Earthquakes Estimated from GIS-based Historical Documents in Mie Prefecture*Yoshiko YAMANAKA¹ (1. Nagoya Univ.)

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

[S08-09] Effects of long-term slow slip events on in-slab stresses in Bungo Channel, southwestern, Japan*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Roland Burgmann³, Suguru Yabe⁴, Youichi Asano⁵, Takeshi Kimura⁵ (1. Building Research Institute, 2. USC, 3. UC Berkeley, 4. AIST, 5. NIED)

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

[S08-10] Single-station detection of seismic slow earthquakes using their broadband characteristics*Koki MASUDA¹, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-11] Strongly scattering medium along slow earthquake fault zones, inferred by the new observations of short-duration tremors*Akiko TOH¹, Wu-Cheng Chi², Yann Capdeville³, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, 3. Nantes Université, CNRS, France)

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

[S08-12] Direct Evidence of Strike-Slip Motion for Low-Frequency Earthquake near Parkfield*Naofumi Aso¹, Miki ASO², David R SHELLY³, Satoshi IDE⁴ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. OYO RMS, 3. USGS, 4. University of Tokyo)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

4:45 PM - 6:00 PM JST | 7:45 AM - 9:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-3

chairperson:Tatsuya Kubota(NIED), Suguru Yabe(AIST)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S08-13] Synthetic tests of joint CMT analysis using translation and strain data*Suguru YABE¹, Kazutoshi Imanishi¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S08-14] Feasibility of detecting pre-P gravity elastic strain signals from earthquakes*Kantaro KAWAI¹, Nobuki KAME¹, Shingo WATADA¹, Akito ARAYA¹ (1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S08-15] Validating the Method Estimating Fault Slip Angles by Using Regional 3D Stress Field with the Wallace-Bott Hypothesis –Application to the focal mechanism solutions of microearthquakes –*Takeo Ishibe^{1,2}, Toshiko Terakawa³, Akinori Hashima⁴, Masashi Mochizuki⁵, Ritsuko S. Matsu'ura¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP) , 2. ISM, 3. Nagoya University, 4. JAMSTEC, 5. NIED)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S08-16] Stress field in the northwestern part of the South Island, New Zealand, and its relationship with faults of recent earthquakes (3)*Ayaka TAGAMI¹, Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Satoshi Hirahara¹, Shuutoku Kimura¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[S08-17] Distribution of azimuths of aftershock faults in the Western Tottori region deduced by the dense seismic observations*Yoshihisa IIO¹, Manten seismic observation group², Manten seismic observation group in the Western Tottori region² (1. Kyoto University, 2. N/A)

Room B | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

10:00 AM - 11:30 AM JST | 1:00 AM - 2:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S21] AM-1

chairperson: Hisahiko Kubo(NIED), Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.), Tomohisa OKAZAKI(RIKEN AIP)

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

[S21-01] [Invited] Detecting slow slip events and accompanying tectonic tremor in geodetic and seismic data, using machine learning

*Bertrand ROUET-LEDUC¹ (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S21-02] Detection of Deep Low-Frequency Tremors from Continuous Paper Records at a Station in Southwest Japan About 50 Years Ago Based on Convolutional Neural Network for Seismogram Images

Ryosuke Kaneko^{2,1}, *Hiromichi NAGAO^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Hiroshi Tsuruoka¹, Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

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

[S21-03] Application of Physics-Informed Neural Networks to spring-slider model

*Rikuto Fukushima¹, Masayuki Kano², Kazuro Hirahara^{3,4} (1. Kyoto University Faculty of Science, 2. Tohoku University Faculty of Science, 3. RIKEN, 4. Kagawa University)

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

[S21-04] Optimal Transport Distance Measure in Geophysical Inversion

*Tomohisa OKAZAKI¹, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN AIP)

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

[S21-05] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning
-Part1 Response spectrum simulation for crustal earthquake in Kinki district, Japan-*Hidenori KAWABE¹, Tianzeng WEI¹, Kai TERAZONO¹ (1. Osaka University)

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

[S21-06] Prediction of velocity response spectrum by using a 1-D convolutional neural network

*Daiki Taya¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

11:45 AM - 12:15 PM JST | 2:45 AM - 3:15 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] AM-2

chairperson: Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S23-01] Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake using automatic hypocenter determination

*Koji TAMARIBUCHI¹, Shota Kudo² (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

1:45 PM - 2:45 PM JST | 4:45 AM - 5:45 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-1

chairperson:Hiromichi Nagao(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:45 PM - 2:05 PM JST | 4:45 AM - 5:05 AM UTC

[S23-03] [Invited]Short-term Forecast of Repeating Earthquakes Considering Spatiotemporal Aseismic Slip Rate along Plate Boundary*Shunichi NOMURA¹, Naoki UCHIDA², Yoshihiko OGATA³ (1. Waseda University, 2. Tohoku University, 3. The Institute of Statistical Mathematics)

2:05 PM - 2:25 PM JST | 5:05 AM - 5:25 AM UTC

[S23-04] [Invited]Uncertainty quantification of seismic tomography based on physics-informed neural networks and particle-based variational inference in function space*Ryoichiro AGATA¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

2:25 PM - 2:45 PM JST | 5:25 AM - 5:45 AM UTC

[S23-05] [Invited]Data-driven reduced order model and sparse sensor optimization with its application to seismic wave field*Taku Nonomura¹ (1. Graduate School of Engineering, Tohoku University)

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

3:00 PM - 3:45 PM JST | 6:00 AM - 6:45 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-2

chairperson:Keisuke Yano(The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S23-06] Development of Observation Site Selection Method based on Sensitivity to Physical Model Parameters toward Process-driven Seismic Wavefield Reconstruction*Kumi Nakai^{1,2}, Takayuki Nagata², Keigo Yamada², Yuji Saito², Taku Nonomura², Masayuki Kano², Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-07] Application of compressed sensing using data-driven reduced-order model to seismic wavefield reconstruction*Takayuki Nagata¹, Kumi Nakai^{2,1}, Keigo Yamada¹, Yuji Saito¹, Taku Nonomura¹, Masayuki Kano¹, Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. Tohoku University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-08] Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources*Jiancang ZHUANG¹, Zhengya Si² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Beijing Earthquake Agency)

Room B | Regular session : S05. Geothermal science

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S05] PM-3

chairperson:Kenichi Tsuda(Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai(Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S05-01] Geophysical studies using optical fiber DTS and DAS in geothermal wells of Ohuma and Sumikawa geothermal fields In Akita*Jyunzo KASAHARA^{1,2}, Yoko Hasada^{2,3}, Hitoshi Mikada⁴, Hiroshi Ohnuma², Yoshihiro Fujise^{2,5} (1. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazard, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. Graduate School of Kyoto University, 5. WELMA)

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

4:30 PM - 5:45 PM JST | 7:30 AM - 8:45 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-3

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S15-01] Simple microtremor array survey at rock/hard-soil sites

*Ikko CHO¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S15-02] Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model II, Application to 2014 Northern-Nagano Earthquake

*Kenichi TSUDA¹, Hideo Aochi^{2,3}, Shohei Yoshida⁴ (1. Institute of Technology, Shimizu corporation, 2. BRGM, 3. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 4. Ohsaki Research Institute, Inc.)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S15-03] Extreme ground motion in K-NET and KiK-net strong-motion data over a quarter of a century

*Shin AOI¹, Takashi KUNUGI¹, Wataru SUZUKI¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S15-04] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 7 -
- Risky ground Movement Indications of Happening These Seismic Waves -

*Hiroshi MAEHARA¹ (1. Geosystem Research Institute)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S15-05] A Study on Earthquake Damage Prevention of Cultural Properties on Display: Vibration Experiment of Japanese Sword

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO¹ (1. Nagoya University, 2. Tokai Corporation)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

9:45 AM - 11:00 AM JST | 12:45 AM - 2:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-1

chairperson: Kiyoshi YOMOGIDA (Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University), Atsushi Nozu (Port and Airport Research Institute)

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

[S01-01] Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

*Atsushi NOZU¹, Yosuke Nagasaka¹ (1. Port and Airport Research Institute)

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

[S01-02] Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

*Hiromu Ohba¹, Ryoya Ikuta¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji³, Feng Chen², Toshiki Watanabe², Haruno Koike² (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

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

[S01-03] Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

*Masayuki NAKAYAMA¹, Hironori KAWAKATA¹, Issei DOI² (1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.)

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

[S01-04] Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

*Tatsuki Nara¹, Hiroyuki Goto² (1. Kyoto University Graduate School, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S01-05] Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

*Kiyoshi YOMOGIDA¹ (1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

11:15 AM - 12:30 PM JST | 2:15 AM - 3:30 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-2

chairperson: Hisashi NAKAHARA (Graduate School of Science, Tohoku University), Daisuke Sato (DPRI, Kyoto University)

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

[S01-06] Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S01-07] Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices*Takumi Miyajima¹, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo)

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

[S01-08] Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku*Shun FUKUSHIMA^{1,2}, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)

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

[S01-09] Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain*Hisashi NAKAHARA¹, Matthew M. Haney² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS)

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

[S01-10] Amplitude dependence of seismic wave attenuation*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

2:00 PM - 3:30 PM JST | 5:00 AM - 6:30 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] PM-1

chairperson:Kiwamu Nishida(ERI, the university of Tokyo), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

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

[S01-11] Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

*Yuki Ihara¹, Shiro Hirano¹, Hironori Kawakata¹ (1. Ritsumeikan University)

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

[S01-12] Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

*Masahiro KOSUGA¹ (1. Graduate School of Science and Technology)

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

[S01-13] Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

*Shota KATO¹, Kiwamu Nishida¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S01-14] On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

*Hitoshi KAWAKATSU^{1,2} (1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica)

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

[S01-15] Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

*Kiwamu NISHIDA¹, Takashi TONEGAWA², Tatsuya KUBOTA³, Mie ICHIHARA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED)

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

[S01-16] Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

*Kazunori YOSHIKAWA^{1,2}, Kotaro TARUMI² (1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University)

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

3:45 PM - 4:45 PM JST | 6:45 AM - 7:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-2

chairperson:Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

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

[S03-01] Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Hiroaki KAJIKAWA², Keisuke ARIYOSHI¹, Eiichiro ARAKI¹ (1. JAMSTEC, 2. AIST)

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

[S03-02] Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone*Yuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Araki Eiichiro¹ (1. JAMSTEC / IMG)

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

[S03-03] Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.*Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹, Satoru Baba¹, Yojiro Yamamoto¹, Mark Zumberge², Shuhei Nishida¹, Yuya Machida¹, Hiroyuki Matsumoto¹ (1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography)

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

[S03-04] Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active seismicity since the end of 2020*Yohei Kinoshita¹ (1. University of Tsukuba)

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

5:00 PM - 5:45 PM JST | 8:00 AM - 8:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-3

chairperson:Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S03-05] Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones – Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone*Takuya NISHIMURA¹ (1. Kyoto University)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S03-06] Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion*Yuanyuan Niu¹, Jiancang Zhuang^{2,1} (1. SOKENDAI, 2. ISM)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S03-07] Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka*Akiteru TAKAMORI¹, Akito ARAYA¹, Kouseki MIYO², Tatsuki WASHIMI³, Takaaki YOKOZAWA², Hideaki HAYAKAWA², Masatake OHASHI² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan)

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

9:30 AM - 11:00 AM JST | 12:30 AM - 2:00 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S16] AM-1

chairperson: Shinichi Matsushima (DPRI, Kyoto University), Kimiyuki Asano (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S16-01] On the variability of the horizontal site amplification factors extracted from the observed Fourier spectra of the S-wave part and the whole wave

*Hiroshi KAWASE¹, Kenichi NAKANO², Jiken WANG³, Eri ITO¹, Jikai SUN¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION, 3. Graduate School of Engineering, Kyoto University)

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

[S16-02] Cluster analysis of site amplification characteristics along Route 9 estimated by the distributed acoustic sensing (DAS).

*Kento Kumaki¹, Hisashi Nakahara¹, Kentaro Emoto², Masatoshi Miyazawa³, Takeshi Tsuji⁴ (1. Tohoku university, 2. Kyushu University, 3. Kyoto University, 4. University of Tokyo)

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

[S16-03] Construction of the Shallow Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins Using Boring Database and Microtremor Array Observations

*KimiYuki ASANO¹, Tomotaka IWATA¹, Teruyuki HAMADA², Kunikazu YOSHIDA², Kazuhiro SOMEI², Haruko SEKIGUCHI¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. Geo-Research Institute)

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

[S16-04] Ground motion characteristics during the 2022 Noto-Hanto earthquake (M_J5.4) and underground velocity structure at ISK00

*Tomotaka IWATA¹, Kimiyuki Asano¹, Takeshi Miyamoto², Mugen Ogata² (1. DPRI, Kyoto University, 2. Graduate School of Faculty of Science, Kyoto University)

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

[S16-05] Input motions on engineering basement during the 2018 Northern Osaka earthquake using shallow surface velocity models based on microtremor array observation

*Shota Goto¹, Kota Asano¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada² (1. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S16-06] The effect of the complex shape of the basin edge structure to the microtremor Horizontal-to-Vertical spectral ratios by numerical analysis

*Shinichi MATSUSHIMA¹, Zhiwei LIU², Jun'ichi MIYAKOSHI³ (1. DPRI, Kyoto University, 2. Former Department of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Ohsaki Research Institute, Inc.)

Room D | Regular session : S17. Tsunami

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

[S17] AM-2

chairperson:Yushiro Fujii

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

[S17-01] Modeling of the 2022 Tonga Eruption Tsunami Recorded on Ocean Bottom Pressure and Tide Gauges Around the Pacific*Yushiro Fujii¹, Kenji Satake² (1. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S17-02] Wave Separation of Tsunami Near Japan Induced by Air Pressure Pulse After the 2022 Tonga Volcanic Eruption*Tung-cheng Ho¹, Nobuhito Mori¹, Masumi Yamada¹ (1. DPRI, Kyoto Univ.)

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

[S17-03] The later phase of tsunami associated with the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption: source estimation using array-based analysis*Ayumu MIZUTANI¹, Kiyoshi Yomogida² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University)

Room D | Regular session : S17. Tsunami

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

[S17] PM-1

chairperson:Kentaro Imai(JAMSTEC), Yoshinori Shigihara

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

[S17-04] The slip distribution of the 2009 Samoa earthquake doublet estimated by a joint inversion ocean-bottom pressure and electromagnetic tsunami recordsHiroyo YOKOI¹, *Toshitaka BABA¹, Zhiheng Lin², Takuto MINAMI³, Hiroaki TOH² (1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. Kobe University)

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

[S17-05] Estimation of the scale of past submarine landslide tsunamis in the waters around Japan*Yoshinori SHIGIHARA¹, Masataka Inui¹, Ako Yamamoto¹, Hikaru Moriki², Takashi Kumamoto³ (1. National Defense Academy, 2. Okayama Univ., currently NRA, 3. Okayama Univ.)

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

[S17-06] Slip Distribution of the 1923 Kanto Earthquake Estimated from Tsunami waveforms, Coseismic Deformation Data and Tsunami Survey Heights*Yuichiro TANIOKA¹, Yusuke Yamanaka¹, Yumi Nakadai² (1. Hokkaido University, 2. Prev. Hokkaido University)

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

[S17-07] Problems related to Tsunami Source Model of the 1498 Meio Tokai Earthquake on the Coast of Shizuoka Prefecture*Satoshi KUSUMOTO¹, Kentaro Imai¹, Takane Hori¹, Daisuke Sugawara² (1. JAMSTEC, 2. Tohoku University)

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

[S17-08] The origin of tsunami trace height in Atashika during the 1944 Showa Tonankai Earthquake*Kentaro IMAI¹, Ryoko Obayashi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Yuichiro Tanioka² (1. JAMSTEC, 2. Hokkaido Univ.)

Room D | Regular session : S17. Tsunami

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

[S17] PM-2

chairperson:Yutaka Hayashi(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency), Toshitaka Baba(Tokushima University)

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

[S17-09] White bubbling tsunami: Its Hazard risk -Case of the 2011 Tohoku-Oki earthquake-

*Yuji ENOMOTO¹, Tsuneaki Yamabe¹, Shigeki Sugiura², Hitoshi Kondo² (1. Shunshu University , 2. Genesis Research Institute Inc.)

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

[S17-10] Evaluation of contribution of observation points to tsunami inundation prediction using machine learning

*Masato Kamiya¹, Toshitaka Baba² (1. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University, 2. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University)

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

[S17-11] Probabilistic Tsunami Hazard Assessment based on the long-term evaluation for earthquakes along Kuril and Japan trenches

*Kenji HIRATA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Hiromitsu NAKAMURA¹, Tsuneo OHSUMI¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Shin'ichi KAWAI¹, Takahiro MAEDA¹, Yuji DOHI¹, Shin NEMOTO², Nobuhiko TOYAMA², Tadashi KITO², Xuelei ZHANG², Yasuhiro MURATA³, Mariko KORENAGA⁴, Yuta ABE⁴, Teppei OHNO⁴ (1. NIED, 2. OYO, 3. KKC, 4. CTC)

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

[S17-12] Deep-sea bore: Trench-slope ascent of discontinuities in current speed, water temperature and pressure

*Yoshio FUKAO¹, Hiroko Sugioka², Hajime Shiobara³, Aki Ito¹, Taewoon Kim¹, Ryo Furue¹ (1. JAMSTEC , 2. Kobe Univ., 3. Univ. Tokyo)

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

[S17-13] Progress in Preparing a Draft 10-Year Research, Development, and Implementation Plan for Ocean Decade Tsunami Programme (2021-2030)

*Yutaka HAYASHI¹, Srinivas Kumar TUMMALA², Michael ANGOVE³, Sergio BARRIENTOS⁴, Silvia CHACON⁵, David COETZEE⁶, Christa von HILLEBRANDT-ANDRADE⁷, Alexander RABINOVICH⁸, Harkunti Pertiwi RAHAYU⁹, Francois SCHINDELE¹⁰, Amir YAHAV¹¹, Bernardo ALIAGA ROSSEL¹², Rick John BAILEY¹³, Denis CHANG-SENG¹², Angelos HAIDAR¹² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Indian National Centre for Ocean Information Services, 3. National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, 4. National Seismic Centre, University of Chile, 5. Costa Rica National Tsunami Warning System, National University of Costa Rica, 6. National Emergency Management Agency, New Zealand, 7. Caribbean Office, International Tsunami Information Center, NOAA, USA, 8. Tsunami Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 9. Institute of Technology Bandung, Indonesia, 10. National Tsunami Warning Center, Atomic Energy and Alternative Energies Commission, France, 11. National Emergency Management Authority, Israel, 12. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO, 13. Bureau of Meteorology, Australia)

Room D | Regular session : S04. Tectonics

4:30 PM - 5:15 PM JST | 7:30 AM - 8:15 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S04] PM-3

chairperson:Yukitoshi Fukahata(DPRI, Kyoto University)

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

[S04-01] Hypocenter relocations of earthquakes off Okinawa island with station corrections obtained from CMT solutions*Masanao Komatsu¹, Mei Kitamura², Hiroshi Takenaka¹ (1. Okayama University, 2. Okayama University (Current: Japan Meteorological Agency))

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S04-02] Effects of the hot plume on the bending of the Philippine Sea slab beneath Kyushu (2)*Natsuki Kozai¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,1} (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S04-03] *The geodynamic evolution of the Mexican subduction zone as an effect of the movement of the Chortís Block**Erika Moreno^{1,2}, Marina Manea^{2,1}, Vlad Manea^{2,1} (1. Kobe University, 2. Centro de Geociencias, Universidad Autónoma de México)

Poster session (2nd Day) | Regular session : S04. Tectonics

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

[S04P] AM-P

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

[S04P-01] Relationship between 3-D distributions of thermal structure and dehydration and megathrust earthquakes, regular earthquakes and volcanic chain in the southern Chile subduction zone*Kaya Iwamoto¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,1}, Francisco Hernan Ortega Culaciati³ (1. Faculty of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Department of Geophysics, Faculty of Physical and Mathematical Sciences, University of Chile)

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

[S04P-02] Low-velocity anomaly in the Pacific slab beneath the Kanto region*Kazuki MIYAZAKI¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Tech)

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

[S04P-03] **Seismic structure and seismotectonics of the East Japan forearc derived from seafloor S-net data***Dapeng ZHAO¹, Yu Katayama¹, Genti Toyokuni¹ (1. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S04P-04] Estimation of the crustal deformation using radiated energy of tectonic tremors in the northern Kii Peninsula*Tsukasa Yamamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S04P-05] Strain-rate field of Japan estimated from GNSS data using basis function expansion with ABIC*Yukitoshi FUKAHATA¹, Tomohisa Okazaki², Takuya Nishimura¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. AIP, RIKEN)

Poster session (2nd Day) | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P-1 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S02P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-01] Seismic intensity distribution structure estimated from hypocenter and magnitude*Shutaro SEKINE¹ (1. Association for the Development Earthquake Prediction)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-02] Applying simple hypocenter determination method using the back-propagating wavefront to real observed arrival times*Shoji SEKIGUCHI¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-03] Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveform data*Keisuke ARIYOSHI¹, Hiroki Horikawa¹, Shuichiro Yada¹, Masaru Nakano¹, Yojiro Yamamoto¹, Kentaro Sueki¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi² (1. JAMSTEC, 2. NIED)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-04] Amplitude of artificial vibration captured by DAS*Masayuki TANAKA¹, Akio Kobayashi¹ (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-05] Estimating crustal movements during slow slip events from ocean bottom pressure gauge data using oceanic models*Toshinori SATO¹, Masahiro Suzuki¹, Koichi Murata^{1,2}, Norihisa Usui³, Hajime Shiobara⁴, Tomoaki Yamada⁴, Masanao Shinohara⁴ (1. Chiba Univ., 2. OYO Corporation, 3. MRI, 4. ERI, Univ. Tokyo)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-06] Realtime Earthquake Damage Prediction System for Chiba Prefecture*Masahiro OOI¹, Narumi TAKAHASHI¹, Mitsutsugu IGARASHI², Kaoru YOSHIOKA², Shoichi SHIOZAKI², Kazumi ASAO¹ (1. NIED, 2. Chiba Pref.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-07] Realtime Tsunami Inundation Predicting System Using S-net Data for Chiba Prefecture*Narumi TAKAHASHI¹, Masahiro OOI¹, Mitsutsugu IGARASHI², Kaoru YOSHIOKA², Shoichi SHIOZAKI², Kazumi ASAO¹, Wataru SUZUKI¹ (1. NIED, 2. Chiba Pref.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-08] Development of real-time monitoring system for WIN using MQTT protocol*Hiroshi TSURUOKA¹ (1. ERI, Univ. Tokyo)

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities : S24.Committee activities for society

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P-8

[S24] S24

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

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

Poster session (2nd Day) | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC | ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S15P] AM-P

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

[S15P-01] Seismic Waveform Generation by Conditional Generative Adversarial Networks and Spectral Inversion Analysis

*Junki Yamaguchi¹, Yusuke Tomozawa¹, Yasuhito Yoshida¹, Toshihide Saka¹, Ryo Hatano¹ (1. Kajima Technical Research Institute)

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

[S15P-02] Application of Seismic Waveforms Created by Conditional Generative Adversarial Network to Inversion Analysis

*Yusuke Tomozawa¹, Tomoki Hikita¹, Junki Yamaguchi¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

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

[S15P-03] Estimation of source radiation energy using synthesized seismogram envelopes considering heterogeneous subsurface structure

*Masashi OGISO¹ (1. Meteorological Research Institute)

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

[S15P-04] Effect of seismogenic zone on hierarchy patch source model

*Hiroyuki Goto¹ (1. Kyoto University)

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

[S15P-05] Source model of the 2022 off Fukushima prefecture earthquake by the isochrone back-projection and empirical Green's function methods

*Toshimi SATOH¹ (1. Shimizu Corporation)

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

[S15P-06] Re-examination of source rupture process of the 2002 Denali, Alaska, earthquake (M_W 7.9) based on strong-motion waveforms and fault displacements

*Yujia GUO¹, Kunikazu Yoshida¹, Ken Miyakoshi^{1,2} (1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

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

[S15P-07] Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model I, Interpretation of the 2019 Mw4.9 Le Teil earthquake

*Hideo AOCHI^{1,2}, Kenichi Tsuda³, Shohei Yoshida⁴ (1. BRGM, 2. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. Institute of Technology Shimizu Corporation, 4. Ohsaki Research Institute Inc.)

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

[S15P-08] Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: A Study on the strong motion generation area in the northern Tokyo Bay

*Tetsushi WATANABE¹, Fumino SUZUKI¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹ (1. Kobori Research Complex)

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

[S15P-09] Long-period ground motion simulations in the western part of Shizuoka prefecture for large earthquakes in the Nankai trough

*Takeshi NAKAMURA¹ (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S15P-10] **Simultaneous estimation of source, path, and site spectra from the S-net strong-motion records in the Japan Trench area**

*Yadab Prasad Dhakal¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Hiroaki Yamanaka² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokyo Institute of Technology)

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

[S15P-11] Sedimentary basin structure estimated from receiver function in the Yufutsu Plain and ground-motion amplification

*Kunikazu YOSHIDA¹, Kazuhiro Somei¹, Ken Miyakoshi² (1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute)

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

[S15P-12] Evaluation of Response Spectra According to Recurrence Period in the Tokyo Metropolitan Area

*Takashi HAYAKAWA¹ (1. SHIMIZU Corp. Institute of Technology)

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

[S15P-13] Estimation of surface seismograms at MeSO-net seismic stations

*Shigeki SENNA¹ (1. NIED)

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

[S15P-14] Attenuation Characteristics of Long-Period Ground Motion Inferred from the F-net Broad-Band Strong Ground Motion Records

*Ken HATAYAMA¹ (1. National Research Institute of Fire and Disaster)

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

[S15P-15] Estimated seismic intensity history for 26 years in Japan

*Hiromitsu NAKAMURA¹, Yoshinori IWANAMI² (1. NIED, 2. MESW)

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

[S15P-16] Strong-motion characteristics in western edge of the Kyoto basin for the 2022 southern part of Kyoto prefecture earthquakes

*Takashi AKAZAWA¹ (1. Geo-Research Institute)

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

[S15P-17] Construction of a low-cost indoor 3D model using a depth camera and machine learning and its application to seismic behavior simulation

*Yuta TAKAHASHI¹, Hiroki UEMATSU¹, Ahyi KIM¹, Toshiyuki MASATSUKI², Yoshinari NAKANISHI² (1. Yokohama City University, 2. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)

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

[S15P-18] DAS observation of Mj6.6 earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan using optical fiber cable along railway

*Satoshi KATAKAMI¹, Shunta Noda¹, Masahiro Korenaga¹, Eiichiro Araki², Narumi Takahashi³, Naoyasu Iwata¹ (1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Poster session (2nd Day) | Regular session : S06. Crustal structure

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S06P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-01] Estimation of S-wave seismic velocity structure by using OBS data around the Nankai Trough*Ayako NAKANISHI¹, Xin Liu¹, Yanfang Qin¹, Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi², Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi², Takeshi Nakamura³ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-02] Subsurface structure in the Tokai slow event area*Tomotake UENO¹, Youichi ASANO¹, Tesuya TAKEDA¹, Kazushige OBARA² (1. NIED, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-03] Adjoint tomography of an accretionary wedge and shallow slow-slip regions in the North Island of New Zealand*Shun Adachi¹, Bryant Chow², Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University, 2. University of Alaska Fairbanks)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-04] Relationship between seismic activity and low-frequency earthquakes at Northern Tohoku and Southwestern Hokkaido using local seismic network, AS-net*Shinako NOGUCHI¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction Research Division for Earthquakes and Disaster Mitigation)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-05] Seismic reflection survey at Konan Town, Saitama Prefecture, Japan: linear dependence of the dip angles of reflection layers with depth*Toshiki OHTAKI¹, Naomi Kano², Takanobu Yokokura² (1. AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geology and Geoinformation, 2. formerly of AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geology and Geoinformation)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-06] An Attempt to Discriminate Reflections Using Neural Networks for Improving Seismic Attenuation Profiling in Seismic Reflection Survey*Haruka Kawabe¹, Tetsurou Tsuru¹ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-07] Seismic velocity structure at the Kairei Hydrothermal Vent Field near the Rodriguez Triple Junction in the Indian Ocean*Ayato Morii¹, Toshinori Sato¹, Hiroyoshi takada¹, Tomoaki Yamada², Masanao Shinohara² (1. Chiba University, 2. the University of Tokyo)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-08] V_{SV} and V_{SH} structures beneath Asama volcano*Yutaka NAGAOKA¹, Kiwamu NISHIDA², Yosuke AOKI², Minoru TAKEO² (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo)

Poster session (2nd Day) | Regular session : S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P-3 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S07P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S07P-01] Double Seismic Discontinuities at the Base of the Mantle Transition Zone below the Japanese Archipelago?*Keiko KUGE¹ (1. Department of Geophysics, Kyoto University)

Poster session (2nd Day) Regular session : S10. Active faults and historical earthquakes
--

2:00 PM - 5:30 PM JST 5:00 AM - 8:30 AM UTC ROOM P-4 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S10P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-01] Tectonic landforms along the eastern margin of the Ou Backbone Range, central part of Miyagi Prefecture: Potential of M7-class earthquake

*Masayoshi TAJIKARA¹, Tomoo Echigo² (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Kankyo Chishitsu Co.,Ltd)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-02] Tectonic landforms and slip-rate of the Shibetsu fault zone in the eastern part of Hokkaido, Japan

*Takashi AZUMA¹, Daisuke HIROUCHI² (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Shinshu University)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-03] Subsurface structure revealed by seismic reflection survey along the eastern margin fault zone of the Yokote Basin, northeast Japan

*Hidenobu TAKAHASHI¹, Haruo Kimura¹, Yasuhira Aoyagi¹, Motoshi Tomura², Katsuya Noda² (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Geosys Inc.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-04] Inversion of lateral faults in the Chugoku district explored by gravity anomaly: Case studies at the Chojagahara – Yoshii faults and the Oharako fault

*Akihiro SAWADA¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Yuki Matsui¹, Amane Sugii¹, Masato Fukata¹, Tsukasa Yamamoto¹, Ryo Honda², Shinsuke Okada³ (1. College of Science and Engineering, Kanazawa University, 2. Mount Fuji Research Institute, 3. Iwate University)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-05] Study on mitigation of earthquake disasters caused by inland active faults : Fault model improvement considering shallow geologic structure

*Kimie NORIMATSU¹, Yoko Yoshimi¹, Naoya Takahashi², Tomoki Nakamura², Takashi Ishizawa¹, Shinsuke Okada³, Haruhiko Suzuki⁴, Yasuo Ichikawa⁴, Hisanori Matsuyama⁴, Shinji Toda¹ (1. IRIDeS, Tohoku Univ., 2. Tohoku Univ., 3. Iwate Univ., 4. OYO Corporation)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-06] The Large Earthquake on Dec. 7, 1493 Preceded the 1498 Meio-tokai Earthquake

*Tomoya HARADA¹, Akihito NISHIYAMA², Akihiko KATAGIRI³ (1. N/A, 2. Nara National Research Institute for Cultural Properties, 3. Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata Univ.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-07] Discussion on the causes of tsunamis accompanied by the 1914 Sakurajima earthquake, Japan

*Reiji KOBAYASHI¹ (1. Kagoshima University)

Poster session (2nd Day) Regular session : S11. Various phenomena associated with earthquakes

2:00 PM - 5:30 PM JST 5:00 AM - 8:30 AM UTC ROOM P-5 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S11P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S11P-01] Dynamic Stress Transfer in a Layered Granular Slope

*Koji UENISHI¹, Shuto SASAUCHI¹, Dongyun XI¹ (1. Univ. of Tokyo)

Poster session (2nd Day) | Regular session : S13. Crustal fluids and earthquake

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P-6 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S13P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S13P-01] Consideration of slow crustal strain changes after earthquakes -In the case of TSS observation site-*Yuichi KITAGAWA¹, Norio MATSUMOTO¹ (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST)**Poster session (2nd Day) | Regular session : S19. Seismology, general contribution**

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC | ROOM P-7 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S19P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-01] Questionnaire survey on residents' awareness of disaster prevention due to seismic activity in the northeastern Noto Peninsula*Amane Sugii¹, Izumi Akasaka², Haruka Ohwashi², Kyosuke Sawatari², Takushi Bando², Akira Murata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University, 2. Ishikawa Prefectural Iida High School)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-02] How to use Martian seismic and meteorological data obtained by NASA's InSight*Keisuke Onodera¹, Taichi Kawamura² (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. IPGP)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-03] Influence of station corrections on hypocenter determination of off Fukushima Prefecture using S-net Data*Naoki Momomoto¹, Noriko Tsumura¹ (1. Chiba University)

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 10:45 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S09] AM-1

chairperson: Mamoru Nakamura (Ryukyu University), Kazuyoshi Nanjo (University of Shizuoka)

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

[S09-17] Is the low b -value in the rift-axis of the southern Okinawa Trough accurate?

*Mamoru NAKAMURA¹ (1. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

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

[S09-18] b -value dependency on crustal strength inferred from precise focal mechanism data

*Satoshi MATSUMOTO¹, Yoshihisa Iio², Shinichi Sakai³, Aitaro Kato⁴ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S09-19] Seismic radiated energy and source spectra of the regular and deep low-frequency earthquakes in and around the source area of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Taka'aki Taira², Kentaro Emoto³, Akira Hasegawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, Berkeley, California, U.S.A., 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-20] Estimation of earthquake distribution and fault structure of normal fault earthquakes off Fukushima-Ibaraki using sP depth-phase

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Genti Toyokuni¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Tohoku University)

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

[S09-21] Static Coulomb stress transfer and seismicity rate change associated with the 2016 Kumamoto, Kyushu, Japan, earthquake

*Shinji TODA¹, Ross S. Stein² (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

Is the low b -value in the rift-axis of the southern Okinawa Trough accurate?

*Mamoru NAKAMURA¹

1. Faculty of Science, University of the Ryukyus

南部沖縄トラフの中軸では、0.7以下の低い b 値が報告されている (Arai et al., 2021EPS)。このような低い b 値は、ダイク貫入による応力増加が影響していると解釈されている。しかし先行研究では、沖縄トラフ内におけるmagnitude completeness (M_c) の空間変動が考慮されていなかった。また南部沖縄トラフ付近では、気象庁の変位マグニチュード (M_D) より速度マグニチュード (M_V) の値が小さく決まる傾向がある。M4.0~5.0の地震で M_D 、 M_V 、および防災科学技術研究所F-Netのモーメントマグニチュード (M_w) を比較すると、 M_D は M_w より0.17大きく、 M_V は M_w より0.63小さい。つまり M_w を基準にすると、M4.0~5.0の地震に対して気象庁マグニチュード (M_J) として M_D が採用されればマグニチュードが0.17大きくなり、 M_V が採用されれば0.63小さくなる。結果としてM4.0~5.0の範囲の地震個数が見かけ上減少し、本来直線的であるはずのFrequency-Magnitude分布がこの範囲で下側に湾曲する。もし M_c が4.0付近であった場合、湾曲の影響で b 値を過小評価する可能性がある。しかし先行研究ではこの影響が補正されていない。そこでこれらを補正した上で、中南部沖縄トラフと琉球弧における b 値の空間変化を調べた。解析には2001年から2019年までの気象庁地震カタログを使用した。 M_c と b 値はZMAP7 (Wiemer, 2001SRL) を使用して計算した。計算は M_J を使用した場合と M_V を使用した場合の2種類で行った。

計算に M_V と M_J のどちらを使用した場合でも、中南部沖縄トラフ中軸付近の M_c は琉球弧での値 (1.0~2.0) と比べて高い値 (1.6~3.6) を示した。与那国リフトの東部では M_c が小さい (約1.4~2.2)。八重山リフトでは M_c が3.6に達する領域があった。宮古リフト (25.3°N, 125.3°E) では M_c が2.4~3.4であった。奄美大島西方では M_c は約2.0であった。各地の M_c は期間を通してほぼ一定であった。しかし、群発地震発生時に、その領域で M_c が増加した。宮古リフトでは2001年から2019年までの M_c が2.2~2.8であった。しかし2007年群発地震のときに M_c が3.3まで増加した。

b 値は M_V と M_J どちらを使用した場合でも八重山リフト西部を除いてほぼ同じ値を示した。 M_V による b 値は、南部沖縄トラフ中軸で0.7~1.2の範囲であった。与那国リフトの東部と八重山リフトの西部では b 値が0.7-0.9の範囲であった。しかし宮古リフトと八重山リフトの西側 (24.8°N, 122.5°E) は、 b 値がやや高い傾向があった (0.8~1.2)。奄美大島西方では b 値が0.8~1.2であった。

八重山リフト西部 (25.2°N, 124.0°E) での b 値は、使用するマグニチュードによって異なった。八重山リフトの西部では、 M_V と M_J どちらの場合でも M_c の値はほぼ同じ (3.3) であった。しかし、 M_J を用いた場合は b 値が0.4であるのに対し、 M_V を用いた場合の b 値は0.7であった。ここは2002年10月に発生した群発地震の領域である。 M_c が3.3と大きかったために、M4.0~5.0で生じるFrequency-Magnitude分布の湾曲の影響を受け、 b 値を過小評価した可能性がある。

全体的に、中南部沖縄トラフ中軸付近の平均的な b 値 (0.90~0.92) は、琉球弧の平均的な b 値 (0.83~0.84) とほぼ同じ値であった。このことは南部沖縄トラフ中軸の低い b 値分布は小さな M_c を用いたために生じた見かけ上のことであると考えられる。南部沖縄トラフ中軸の群発地震発生域では、それ以外の地域と比べて M_c が3.0以上である場所が多かった。南部沖縄トラフ中軸の群発地震発生域では定常状態のとき M_c が2.0であった。しかし群発地震活動時期 (数日間) の間だけ M_c が3.5以上に増加した。これは群発地震が活発化した際に地震の検知能力が短期的に低下していたことが原因である。中南部沖縄トラフ中軸部で b 値が低いことは、ダイク貫入による応力増加で生じる b 値低下だけでなく、それ以外の要因、例えば熱水活動による b 値増加の影響も含まれているかもしれないことを示している。

b-value dependency on crustal strength inferred from precise focal mechanism data

*Satoshi MATSUMOTO¹, Yoshihisa Iio², Shinichi Sakai³, Aitaro Kato⁴

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震発生数 n とマグニチュード M の関係はグーテンベルグ・リヒター則に従うことが知られている。 M 以上の地震の個数 N との関係は $\log_{10}(N) = a - bM$ として表されている。この b 値が時空間的に変化することが多く報告されている。特に、近年の地震観測網高度化に伴い、詳細な変化が求められてきた。特に、大地震前に b 値が減少することが報告されている（例えば、Nanjo et al, 2012）。岩石実験などにより b 値が差応力の上昇に伴い減少することや、テクトニック応力の違う領域での b 値の系統的な違いも報告されている。一方では b 値の違いを生み出すメカニズムについては詳しくはわかっていない。また、3次元的な広がりを持つ震源分布での b 値変化のメカニズムの検討はあまりされていない。そこで、本研究では詳細に決定された地震のメカニズム解を用いてこれらの考察を試みる。

2000年鳥取県西部地震震源域では本震発生直後の稠密観測や2017年の1000点観測（0.1満点地震観測）により、精度の高い発震機構解が得られている。本研究ではこれを用いた。 b 値の差応力や強度との関係を見るために、本研究では応力場と地震の断層面との関係を求めた。具体的には応力場に対応した単位モーメントを描き、その中での規格化せん断、法線応力を求め、これらの大きさごとにイベントを区分して b 値を推定した。応力場は震源域を空間ブロック（水平3x3x深さ2.5km）に分割して、それぞれ推定してもとめた。

b 値の推定は最尤法を用い、マグニチュードレンジは2000年が1.5–3、2017年が−0.3–2と設定した。規格化した差応力に対する b 値の変化は実験等で得られた逆相関（差応力が大きくなると b が小さくなる）のようを得られた。一方、規格化法線応力で見ると、 b 値は2000年が0付近で2017年が−0.6程度で最小となる。これらの結果から、 b 値はクーロン則に対して最適である断層面で大きい地震が起こりやすいことを示している。規格化応力でこのような傾向が見られたという意味は差応力の絶対値というよりむしろ断層強度に近いほど b 値が小さくなることを意味している。また、このような解釈が可能と考えた場合、2000年と2017年の規格化法線応力に対する最小 b 値の違いは摩擦係数の違いを反映していて、17年の時間経過で摩擦係数が回復したことを示唆している。

Seismic radiated energy and source spectra of the regular and deep low-frequency earthquakes in and around the source area of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Taka'aki Taira², Kentaro Emoto³, Akira Hasegawa¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, Berkeley, California, U.S.A., 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

深部低周波地震は、通常地震とは異なる特徴を持つ地震である。同程度の規模の通常地震に比べて、地震波の卓越周波数が低く、特徴的な後続部を持つことが多い。深部低周波地震の地震波放射過程の詳細は、断層破壊が原因であると解明されている通常地震と比べるとよく分かっていない。従って、深部低周波地震と通常地震の地震波のエネルギーを定量化し、比較することが、深部低周波地震の地震波放射過程を解明するために重要である。本研究では、2008年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周辺で発生した通常地震と深部低周波地震の震源スペクトルを推定し、規格化エネルギーを系統的に調べた。2008年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周辺では、地震発生域でも低周波地震（浅部低周波地震）が発生していることが報告されている（Nakajima and Hasegawa, 2021）。本研究では、これらも解析対象に加えた。地震波の観測スペクトルを用いて震源スペクトルの推定を行う。観測波形は、震源から観測点まで伝播する間に、地震波減衰 Q^{-1} や観測点直下のサイト特性の影響を受けてしまう。震源スペクトルをより正確に推定するためには、これらの影響を取り除く必要がある。本研究では、地震波の後続波を利用したコーダ規格化法（Aki, 1982; Aki and Chouet, 1975）を利用して、地震波減衰 Q^{-1} およびサイト特性を推定した（Takahashi et al., 2005; Yoshida et al., 2017）。この結果、通常地震 1464 個、深部低周波地震 169 個、浅部低周波地震 52 個の震源スペクトルを推定することができた。Snoke (1987) の方法を利用して、規格化エネルギー e_R を推定した。通常地震の $\log_{10}e_R$ の平均値および標準偏差は、それぞれ -4.3、0.39 であり、先行研究（e.g., Kanamori and Brodsky, 2004）と調和的であった。深部低周波地震と浅部低周波地震の $\log_{10}e_R$ の平均値はそれぞれ、-6.9、と -5.5、であった（標準偏差は、それぞれ 0.43 と 0.50）。低周波地震の規格化エネルギーは、通常地震のそれと比較して、一桁から二桁程度小さかった。通常地震と低周波地震の地震波放射過程の違いを反映していると考えられる。通常地震の規格化エネルギーの空間分布には、特徴が見られた。規格化エネルギーが比較的小さい通常地震が、2008年岩手・宮城内陸地震震源域近傍の火山近傍で多く発生しており、浅部低周波地震とも近接した場所で発生する傾向が見られた。2008年岩手・宮城内陸地震震源域近傍の火山周辺は、間隙水圧比が比較的大きい地域である。高間隙水圧が、地震波放射に影響を与えていることを表しているのかもしれない。本研究では、解析対象域の地震波減衰 Q^{-1} が空間的に均質であると仮定した。しかし、深部低周波地震は通常地震よりも深部で発生するため、実際には、深部低周波地震の代表する Q^{-1} が通常地震と異なる可能性がある。深部低周波地震発生帯と上部地殻の地震波減衰 Q^{-1} の違いが解析に与える影響を評価するため、深さ 15 km を境界とした地震波減衰 Q^{-1} の二層構造を仮定した。その場合に得られた規格化エネルギーを、空間的に均質な Q^{-1} を仮定した場合の結果と比較したところ、 $\log_{10}e_R$ の平均値が、0.1 程度変化しただけで、顕著な違いは見られなかった。地震波減衰 Q^{-1} の空間的均質性の仮定が、通常地震と深部低周波地震の違いに与えた影響は限定的であると考えられる。

Estimation of earthquake distribution and fault structure of normal fault earthquakes off Fukushima-Ibaraki using sP depth-phase

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Genti Toyokuni¹, Toru Matsuzawa¹

1. Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震（以降、東北沖地震）の発生後、東北日本沖合陸側プレート内では、それ以前までほとんど観測されていなかった正断層型の地震が活発に発生している。東北沖地震は、東北日本沖合陸側プレートを東西に伸長させた。Hasegawa et al. (2012) は、Moment tensor インバージョンにより得られた震源位置とメカニズム解に基づき、東北沖地震が上盤側プレート内の応力場を東西圧縮状態から東西引張状態に逆転させた可能性を指摘している。

小地震の震源分布や断層方向の情報は、断層構造や応力状態を把握するための重要な情報源である。しかしながら、海域部で発生する地震については、地震観測網が基本的に陸側のみにしか分布しないことから、地震発生位置・断層構造についての高解像度の情報を得ることが難しい。たとえば、東北沖地震後に福島-茨城沖合で発生するようになった正断層型地震を気象庁一元化震源でみると、プレート境界に共役な断層に沿って発生しているようにも見える (Imanishi et al., 2012)。しかし、この震源分布の並びが、実際の断層構造を反映しているのか、それとも震源の深さ精度による見かけのものなのかの判断は難しい。2016年以降、東日本太平洋沖では、S-netデータを用いた震源深さの推定が可能になってきているが、それ以前の地震の深さの決定精度は低いままである。本研究では、東北日本沖合、特に東北沖地震後から正断層型地震が多発している福島-茨城沖で発生した地震を対象に、depth-phase として知られている sP 波 (e.g. Umino et al., 1995) を使用することで、震源の深さを高精度に推定し、上盤側プレート内で発生している正断層地震の断層構造を明らかにすることを目的とする。

最初に、福島-茨城沖合浅部で発生している地震の観測波形を目視により調べた。その結果、多くの地震に、直達P波と直達S波の間に到着する明瞭な波が存在することが分かった。その振幅は上下動成分に卓越し、震央距離の異なる観測点でみてもP波からの遅れ時間が同程度となっており、震源からの放射後に地表で反射して観測点に到達したsP波を表すと考えられる。F-netによるCMT解の情報に基づき、Zhu & Rivera (2002) のcodeを用いて各観測点の合成波形を計算してみると、観測波形と近い時間で合成波形にも反射波が表れていることが確かめられた。本研究では、これらのsP波を用いて、地震の震源の深さを拘束する。

福島-茨城沖で発生したF-netによるCMT解が求まっている3.2 Mw 5の1297イベントを対象に解析を行った。波形データとしては、S-net設置以前から使用可能な陸上データのみを使用した。各地震に対し、観測波形のsP波の到着時刻を最も良く説明する深さを求めた。具体的には、合成波形を計算する深さを変えながら、P波到達1s前からS波到達0.5s前までの時間窓におけるエンベロープ同士の相関値が最大となる深さを探索した。

得られた震源の深さは、気象庁一元化震源よりも10km程度浅くなる傾向を示した。F-netで決定されている地震のセントロイドの深さは、気象庁一元化震源よりも系統的に浅い傾向があったが、本研究で推定した震源深さは、F-netによる震源深さよりも系統的に深くなった。本研究で得られた震源深さの場合でも、気象庁一元化震源と同様に、正断層型地震が東側に傾斜して分布しており、この構造が、震源決定精度に由来するみかけのものでないことを示唆する。

Static Coulomb stress transfer and seismicity rate change associated with the 2016 Kumamoto, Kyushu, Japan, earthquake

*Shinji TODA¹, Ross S. Stein²

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Temblor Inc.

日奈久断層北端～布田川断層の活動による2016年熊本地震（M7.3）から6年が経過した。同地震では、地震直後から約30-40km長の震源断層沿いだけではなく、北東には阿蘇、九重地域、南西には熊本市、有明海南部、八代市、八代海など、オフフォルト（off-fault）域での余震活動が顕著に認められた。これらの一部は、本震直後の由布でのM5.7など動的応力変化で誘発（Yoshida, EPS, 2016）された中規模地震とそれらの余震活動もあるが、多くが熊本地震の本震による静的クーロン応力変化（ ΔCFF ）と対応することが当初から指摘されていた（Toda & Stein, Temblor, 2016）。本発表では、このような広義の余震活動について、本震後6年間という長期的視点から検討を加えるものである。特に、本震後短期では検出し難い地震活動度の低下と負の ΔCFF との対応や、余震活動の時間減衰などについて言及する。まず、熊本地震からの6年を3年区切りで前半（2016/4/16-2019/4/15）と後半（2019/4/16-2022/4/15）に分け、余震活動の継続性の観点から後半の活動に注目した。その際に、最初の熊本地震（2016/4/14 M6.5）前の（2000/1/1-2016/4/14）を常時地震活動期間とみなし、熊本地震後の後半3年の活動度と比較した。その結果を図1bに示す。おおむね熊本地震の震源から北東の阿蘇周辺、南西の熊本市～八代市～八代海、宮崎県北西部（図1e）などでは、余震活動の長期化が明確である。これらは、東西走向の正断層と北東走向の右横ずれ断層の正の ΔCFF 解と調和的である。なお、地域的な大森-宇津則の余震減衰パラメータと常時地震活動を考慮して余震継続時間をマッピングした結果、これらのオフフォルト余震活動は20年以上にもおよぶことがわかった。数年以内に常時地震活動レベルに戻るオンフォルト余震と対照的である。一方で、熊本地震震源断層の北側と南側では広域で静穏化が認められる。ただし、本震に先行する期間に、局所的な本震一余震、群発地震活動があった場合、見かけの静穏化が検出されることもある。ここでは、静穏化地域の時系列（M0.5）を確認し、活動の低下が熊本地震に対応するかどうかを慎重に検討した。2つの例を図1c, dに示す。朝倉市-日田市周辺（図1c）では、2009年にM4.7とその余震活動があり、結果的に熊本地震後に極端な低下として強調されているが（図1b）、その活動を除いても熊本地震後に静穏化しているのは明確である。一方で、図1dは一見活動の低下が認められるが、静穏化開始には約半年の遅れがある。これは、従来から説明されているように、1) 本震の動的応力変化による中規模地震の誘発と関連の活動が数ヶ月以内に発生したこと、もしくは、2) レシーバ断層の多様性（Toda et al., Nature Geosci., 2013）による遅れ静穏化（delayed stress shadow）の可能性が考えられ興味深い。いずれにしても、熊本地震によるクーロン応力の正負と地震活動の活発化・静穏化はよく対応し、変化した地震活動は長期化している。

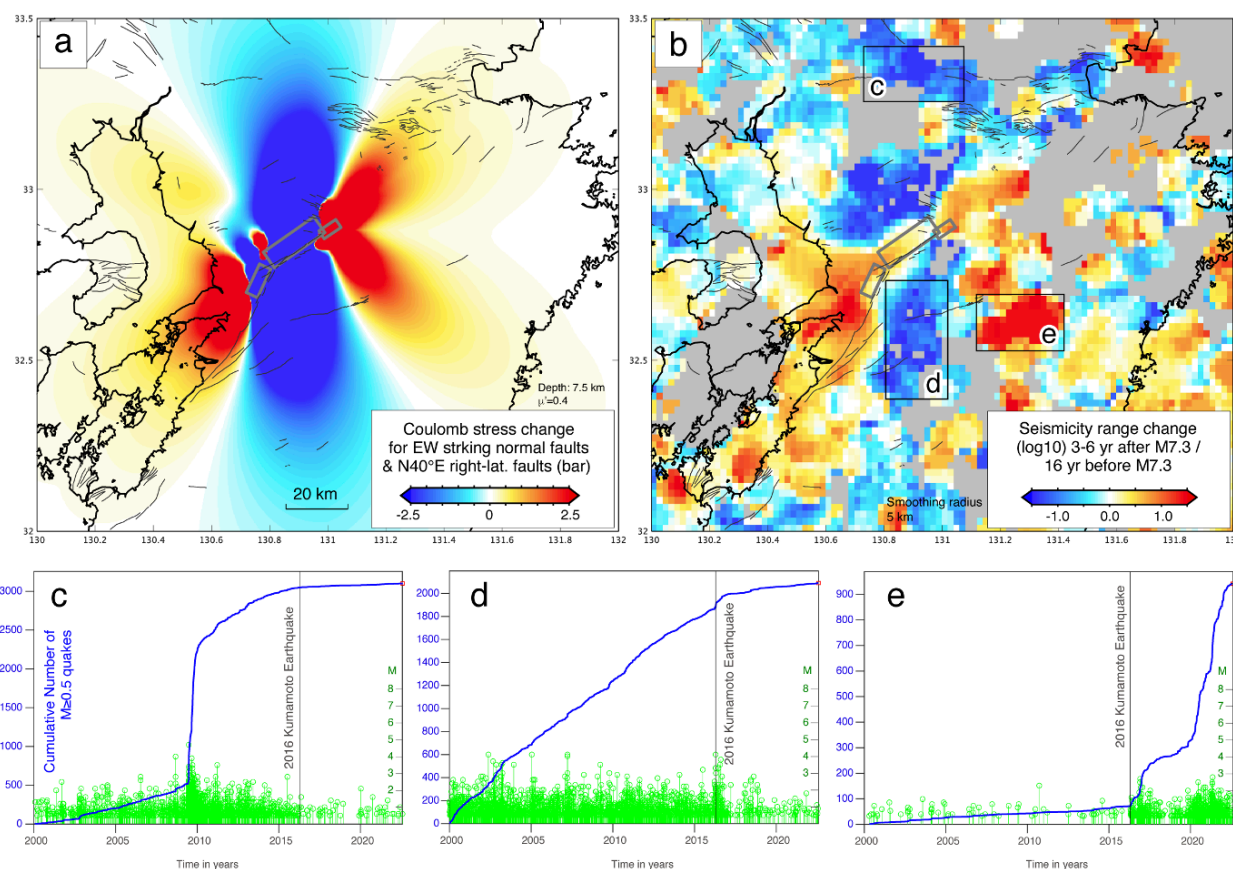


図1. 熊本地震による静的クーロン応力変化 (a) とその前後の地震活動度変化 (b) . 個々の小地域での地震活動応答時系列 (c-e) . 震源断層モデルには国土地理院 (2016) を用いた.

謝辞：地震活動の解析にあたっては気象庁一元化震源カタログ（暫定も含む）を使用した.

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:00 AM - 11:45 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:00 AM - 2:45 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S09] AM-2

chairperson:Nana Yoshimitsu(Kyoto University)

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

[S09-22] What factors contribute to cut-off depth of crustal seismicity?

*Akiko TANAKA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S09-23] Evaluation of seismic activity characteristics at different depths through laboratory rock fracture experiments

*Nana YOSHIMITSU¹, Hironori KAWAKATA² (1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ.)

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

[S09-24] Verification of Seismic Gap by means of physical and statistical models

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹, Eugenio Lippiello² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Università della Campania "Luigi Vanvitelli")

What factors contribute to cut-off depth of crustal seismicity?

*Akiko TANAKA¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

Heat flow data contribute to the imaging of the lithospheric thermal structure, which greatly influences tectonic and geological processes and constrains the strength of the lithosphere, the modes of deformation, and the depth distribution of earthquakes. To provide a more reliable estimation of the lithospheric thermal structure, some complementary approaches are possible.

One approach is to update and incorporate the existing thermal data. The compilation of global heat-flow data is currently under major revision by the International Heat Flow Commission (IHFC [<http://www.ihfc-iugg.org/>]) of the IASPEI/IUGG. The significant improvement over the former heat-flow database structure is the implementation of a parent-child system for heat-flow data determined at each location and an extended set of meta data fields, relevant to enable quality control, and supporting interoperability following FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) and open data principles. We updated and incorporated the existing thermal data in and around Japan. A new version of the database “Thermal Data Collection in and around Japan”, which contains continuously updated heat flow and geothermal gradient data and adds thermal conductivity data in and around Japan, has been released in 2019 [https://www.gsj.jp/data/G01M/GSJ_MAP_TDCJ_2019.zip]. This provides an opportunity to revisit the thermal state of the lithosphere along with other geophysical/geochemical constraints.

Another approach is based on the complementary interpretation of different geophysical data sets. One of the promising indicators is the cut-off depth of shallow seismicity. Several studies have been conducted to assess the inverse correlation between the cut-off depth and heat flow since it has been attributed primarily to the temperature. Some abrupt fluctuations in seismogenic depth may be caused by changes in lithology affecting rheology [e.g., Magistrale 2002]. Relative contributions of heat flow and lithology to controlling the cut-off depth will be discussed.



Evaluation of seismic activity characteristics at different depths through laboratory rock fracture experiments

*Nana YOSHIMITSU¹, Hironori KAWAKATA²

1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ.

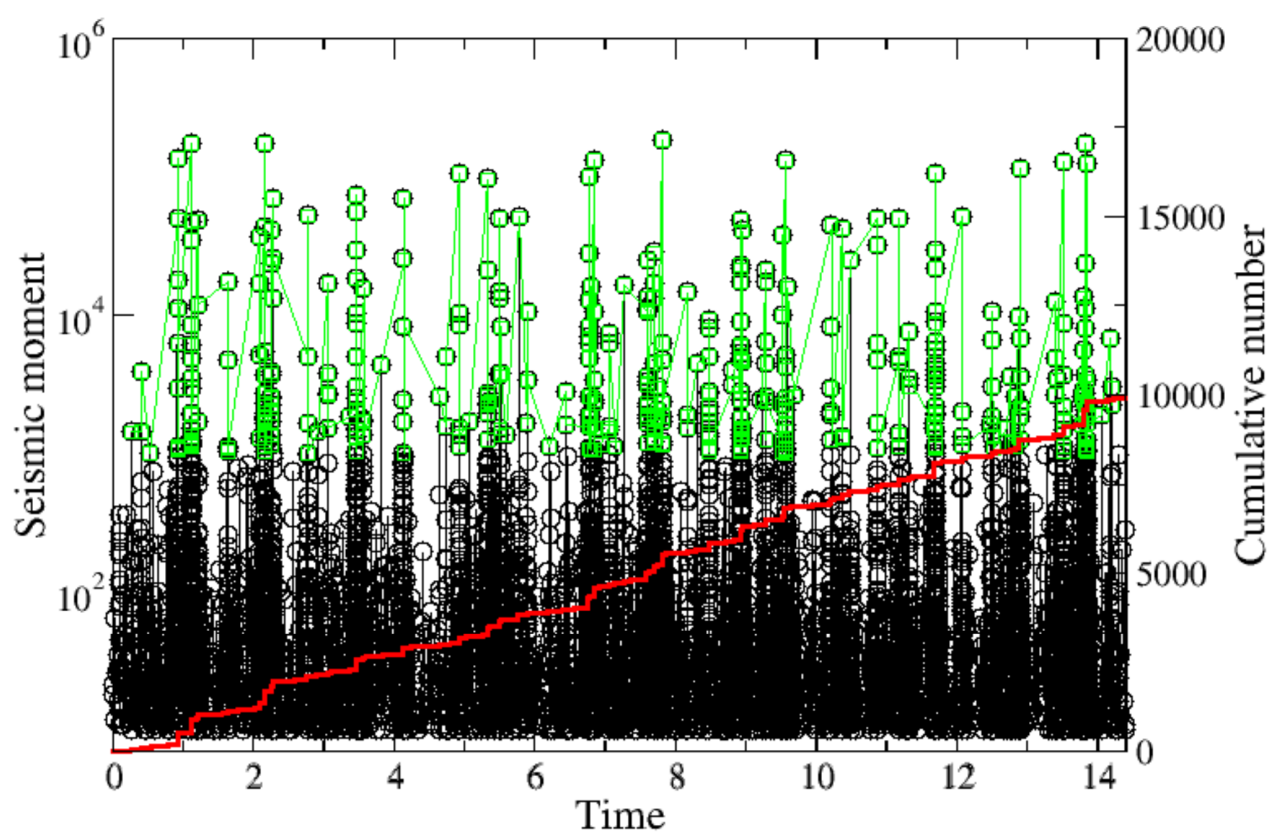
異なる深さ、つまり異なる応力環境において発生した地震が、どのような共通点や相違点を持つかは興味深い。近年は地震10 km以浅でも人間の工業活動の影響による地殻浅部における誘発地震の発生も増加しており、その活動特性の評価が重要となっている。本研究では、異なる封圧下における岩石の三軸圧縮破壊試験中に発生した微小破壊活動を比較することで、異なる深さにおける地震活動を観察する。岩石の圧縮試験中に発生する微小破壊はAcoustic Emission(AE)と呼ばれ、主破壊が発生する前の試料内で発生することから、その活動や波形情報は地殻の応力や不均質の状態を反映していると考えられる。我々は、10 MPaの封圧下におけるWesterly花崗岩の三軸圧縮試験を実施し、広帯域連続AE収録を実現するとともに(Yoshimitsu et al., 2014)、その後封圧50 MPa下における三軸圧縮試験にも成功した(Yoneda et al., 2017)。本発表ではこれらに加えて新たに封圧100 MPa下における実験を実施した。3つの実験には直径50 mm、高さ100 mmのWesterly花崗岩を利用した。室温条件下において目的封圧達成後に軸応力制御で強度の6割程度まで載荷した後、周変位制御による圧縮を数時間かけて実施し、破壊強度を迎えたのちにわずかに軸応力が低下したところで除荷した。実験中、試料側面に貼った8点(100 MPaの場合のみ7点)の広帯域センサ(富士セラミックス社製、100-2000 kHz)でAE波形を20 Mspsで連続収録した。得られた連続記録からAICにより次数選択したARモデルを用いて初動の立ち上がりと同定し、AE波形を切り出した。最小二乗法による震源決定を実施したところ、決定されたイベントは、10 MPaにおいて 6794、50 MPaにおいて約65000、100 MPaにおいて約70000であった。すべてのケースにおいて、イベント活動は圧縮開始直後には低調であり、AEはほとんど発生しなかった。その後、強度の80%程度まで圧縮が進むと地震活動は徐々に活発になり、最大強度を超えた後に急激にイベントの数が増える。AE活動の規模別頻度分布から推定したGutenberg-Richter則におけるb値は2程度の値を示した。これは一般的な自然地震活動から得られる1程度のb値に比べると大きく、群発地震や火山性地震においてみられる値に近い。10 MPa、50 MPaの両ケースにおいて、b値は最大強度に近づくとも0.3程度減少した。これらより、3つの異なる封圧下においてAEの発生数に違いはあるものの、その活動パターンは非常によく似ていることがわかった。実験試料内のAEは自然環境における前震に相当するものであり、最大強度に近づくまでほとんど活動が見られないという結果は、自然地震において本震のはるか前には活発な前震活動があまり見られないことが多いことと調和的である。いくつかの自然地震においては本研究で見られたのと同様の前震の活発化も見られているが(e.g., Jones and Molnar, 1979)、載荷レートが実験とは異なる可能性があり、直接的な比較には注意が必要である。本研究で取り扱った封圧10-100 MPaという圧力環境は、深さ1-3 km程度の地殻に相当する。したがって、本研究の結果は、浅部地殻において周辺岩盤の圧力は地震活動パターンに大きな影響を与えない可能性を示した。

Verification of Seismic Gap by means of physical and statistical models

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹, Eugenio Lippiello²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Università della Campania "Luigi Vanvitelli"

Spring-block models are a striking example of how implementing the right physical laws in a model, even with few parameters, it is possible to reproduce the statistical features of earthquakes. In fact, in recent years, the introduction of an additional parameter that regulates the elastic rebound after a large earthquake has also allowed the optimal description of the statistical laws of aftershocks. In the seismological community, the estimate of the occurrence probability of the next big shock on the basis of the time delay from the last earthquake still represents a big challenge. In fact, the real catalogs still contain few seismic events, therefore appears difficult to test the so called “Seismic Gap Hypothesis” in a statistically relevant way with current historical data. Instead, extensive numerical simulations can be obtained with up-to-date realistic spring-block model and allow us to test the Gap Hypothesis. Our numerical results support recent findings which have shown that important insights can be obtained from the spatial organization of aftershocks and its relationship to the mainshock slip profile. In particular, we show that large earthquakes do not regularly repeat in time, but it is possible to achieve insights on the time until the next big shock from the percentage of aftershocks occurring inside the mainshock slip contour. Finally, it is possible to describe the physical model numerical catalogs with other statistical-based models by means of Likelihood Maximization procedure. The results of the optimization for the Stress Release, Triggering and Self Exciting Long Term Correcting models confirm that in addition to the triggering process, the charge and discharge of stress due to the succession of events also plays an important role in seismic prediction.



Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:45 AM - 12:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:45 AM - 3:30 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Akiko TOH (Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-01] Seismicity and its implications for fluid movement in the northern and central Hikurangi subduction zone, New Zealand

*Kazuya TATEIWA¹, Calum Chamberlain², Martha Savage², Tomomi Okada¹ (1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington)

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

[S08-02] Fault valve action using ancient magma system caused the intense earthquake swarm in Northeast Noto peninsula, Japan

*Keisuke YOSHIDA¹, Masaaki Uno², Toru Matsuzawa¹, Yohei Yukutake³, Yusuke Mukuhira⁴, Hiroshi Sato³, Takeyoshi Yoshida¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Environmental studies, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Institute for Fluid Science, Tohoku University)

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

[S08-03] Source process of moderate earthquakes off the east of Izu Peninsula in 2006 and 2009 : Relationship to previous swarm activities

*Yukako Tanaka¹, Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

Seismicity and its implications for fluid movement in the northern and central Hikurangi subduction zone, New Zealand

*Kazuya TATEIWA¹, Calum Chamberlain², Martha Savage², Tomomi Okada¹

1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington

Introduction

Beneath the North Island of New Zealand, the Pacific plate is subducting under the Australian plate along the Hikurangi Trough, forming the Hikurangi subduction zone. In the Hikurangi subduction zone, some recent studies suggest that fluid movement from the oceanic crust to the plate boundary or into the Australian plate impacts various seismic activities such as SSEs (slow slip events), tremors, and earthquake swarms. Tateiwa et al. (2022, JpGU) relocated earthquakes in the northern Hikurangi (37S–39.5S) and classified them into those occurring within the Australian plate (AUS), within the Pacific plate (PAC), or at the interplate (INT). They found that PAC, INT, and AUS earthquakes were active during the pre- and co-SSE period, co-SSE period, and post-SSE period, respectively, which indicates fluid movements before and after the SSE. In this study, we extend the study area to the central Hikurangi (39.5S–41S), classify earthquakes into AUS, INT, or PAC, and investigate the relationship between earthquakes and SSEs.

Data and Method

We selected all earthquakes in the GeoNet catalog of $M > 3$ occurring between 2003 and 2020 in the northern and central Hikurangi and shallower than 150 km for analysis. The number of earthquakes used was 7,616. Data from GeoNet broadband (HH) and short-period (EH) seismometers were used for the study. The classification into AUS, INT, and PAC mainly consists of the three steps: (1) classification based on the re-determined hypocenters by this study, (2) classification based on the focal mechanisms from the P-wave polarity, and (3) classification based on the cross-correlation of the waveforms. The number of earthquakes classified in each step was 3,269 in the first step, 260 in the second step, and 244 in the third step. To find the occurrence of SSEs, we used all GNSS stations by the GeoNet within the same region as used in the relocation analysis. We defined the occurrence timing of SSEs as the timing that the GNSS transient eastward displacement occurs based on linear function fitting. We also defined the 20-day period, from 30 to 10 days before the transient displacement appeared, as the pre-SSE period, from 10 days before to 10 days after the transient displacement as the co-SSE period, and from 10 to 30 days after the transient displacement as the post-SSE period.

Result and Discussion

PAC earthquakes were distributed widely, while AUS and INT were distributed locally. Many AUS earthquakes in the northern Hikurangi were where the extensional areal strain was observed (Dimitrova et al., 2016), indicating that the extension increases the permeability of the crust and makes it easy for fluid-related earthquakes to occur. INT earthquakes were at the periphery of the SSE source regions. In and around the shallow SSE source region, AUS earthquakes were active during the post-SSE period, INT earthquakes were active during the co-SSE period, and PAC earthquakes were slightly active during the pre- and co-SSE period. This is the same as in the Northern Hikurangi (Tateiwa et al., 2022, JpGU). This characteristic temporal relation with SSE dependent on earthquake location can be explained by fluid movement. That is, fluid movement from the oceanic crust to the plate boundary or upper plate, as proposed by Nishikawa et al. (2021), may have triggered SSEs, tremors, and AUS or INT earthquakes.

Fault valve action using ancient magma system caused the intense earthquake swarm in Northeast Noto peninsula, Japan

*Keisuke YOSHIDA¹, Masaaki Uno², Toru Matsuzawa¹, Yohei Yukutake³, Yusuke Mukuhira⁴, Hiroshi Sato³, Takeyoshi Yoshida¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Environmental studies, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Institute for Fluid Science, Tohoku University

日本列島能登半島北東部において、現在、非常に活発な群発地震活動が発生している。地殻内における群発地震の発生には、しばしば火山活動に関係する流体移動が関わっていることが示唆されているが、この地域は現在是非火山地域である。本研究では、この群発地震活動の発生原因を調べる目的で、震源の時空間変化と地震波反射面を調べた。

震源の再決定の結果、震源域にみられる4つの地震クラスターの各々において、地震の震源が多数の面構造を用いて深部から浅部へ移動していく特徴が見られた。この特徴は、注水時の誘発地震活動や流体に関する自然の群発地震活動 (e.g., Yoshida & Hasegawa, 2018) と酷似している。S波反射面は、この地震活動開始地点付近、震源域の中で局所的に深い場所に検出された。Nakajima & Hasegawa (2007) による地震波速度トモグラフィ結果によると、この反射面の直下にマントルに続くS波の低速度域が存在する。このS波低速度域が一連の活動を生じさせた流体の供給源になっていることを示唆する。

この地震活動開始地点付近の震源分布は、特徴的な環状構造を呈し、陥没カルデラを伴うマグマだまり直上に生じる環状岩脈に類似してみえる。現在、この地域には火山活動は見られない。しかしながら、中期中新世の日本海拡大期においては、この地域には活発な火山活動が生じている。また、この周辺では、現在も周辺に温泉が分布しており、高いヘリウム同位体比 ($3\text{He}/4\text{He}$) も観測されている (Umeda et al., 2009)。過去のカルデラ火山活動の際に形成され現在も高い含水量を維持し続けている固化したマグマだまりが震源域深部に存在している可能性が考えられる。もしくは、同じマグマ供給系を使用して、現在の沈み込みに関係したマグマ活動が地下で進行している可能性もあるかもしれない。中期中新世あるいはあるいは現在のマグマ活動により深部からもたらされた流体が、中期中新世以降の海成層に埋もれた陥没カルデラ深部の環状岩脈に関係した裂隙を用いて上昇することにより、一連の地震が発生しだしたことを表している可能性がある。

この地震活動中には、地震活動だけでは説明できない顕著な地殻変動が観測されており (Nishimura et al., 2022)、これが地震の発生原因となっている流体の供給とも関係している可能性が考えられる。例えば、地震活動域中心部には地震の空白域がみられるが、そこで流体圧増加に起因する非地震性すべりや断層開口が生じたことを表すのかもしれない。実際に、そのような地殻変動が、最近、箱根の群発地震活動についても報告されている (Yukutake et al., 2022)。本研究の結果は、現在では非火山地域となっている能登半島北東部においても、中新世のリフト活動に伴うカルデラ火山活動や、現在の沈み込みに伴うマグマ活動に関係する流体が、地震活動および地殻変動を生じさせていることを示唆する。

Source process of moderate earthquakes off the east of Izu Peninsula in 2006 and 2009 : Relationship to previous swarm activities

*Yukako Tanaka¹, Takuji YAMADA¹

1. Ibaraki University

1. 序論

伊豆半島の東方沖では、1970年代後半以降、地殻変動を伴う群発地震活動が繰り返し発生している(e.g. Hayashi and Morita, 2002; Ueno et al., 2012)。1989年には群発地震活動の活発化と共に海底噴火が発生し、地震活動と地下の火山性流体との関係が議論されている(e.g., Okada and Yamamoto, 1991; Tada and Hashimoto, 1991; Ukawa and Tsukahara, 1996)。本研究では、伊豆半島東方沖で発生した群発地震活動のうち、2006年に発生した4地震($3.9 \leq M_w \leq 5.6$)および2009年に発生した2地震($4.8 \leq M_w \leq 4.9$)について、経験的グリーン関数(EGF)を用いた複数時間窓の波形インバージョンを行い、震源時間関数に見られる特徴を解析するとともに、過去の地震活動域との位置関係を比較し、特徴の背景を考察した。

2. データと解析手法

同じ年の群発地震活動中に発生した複数の小地震($3.4 \leq M_w \leq 3.9$)の観測波形をEGFとして用い、震源時間関数の解析を行った。各年とも、解析対象地震とほぼ同じメカニズム解を持つ2地震の他に、解析対象地震と異なるメカニズム解を持つ地震をEGF地震として用いることで、結果の信頼性を確かめている。解析対象の6地震、およびEGFとして用いた7地震は、いずれも横ずれ断層型であった。解析には、防災科学技術研究所(NIED)のK-net強震計記録を用いた。加速度波形記録を積分して速度波形とした後、0.1-1.0 Hzのバンドパスフィルタをかけ、さらにS波を含む10秒間を切り出して解析に使用した。

解析には、0.05 秒ずつずらした40個の時間窓を用いた。EGF地震の震源時間関数は破壊継続時間0.2 秒の二等辺三角形で表せると仮定し、解析対象地震のモーメントがNIEDのCMT解の M_w 値に一致するとの条件下、解析対象地震の震源時間関数を求めた。

3. 結果と考察

解析から得た6地震の震源時間関数を図1に示す。以降、解析対象地震は、発生年の下2桁と規模の大きい順に振った番号を、その地震の名称とする。2006年に発生した地震について、EQ06-1($M_w 5.6$)は、破壊開始後0.2秒程度でモーメントレートが最大になった後、1秒程度尾を引くような破壊を起こしている。EQ06-2($M_w 4.5$)とEQ06-3($M_w 4.3$)は共に2回の破壊が見られ、EQ06-2は2回の破壊が同規模である一方で、EQ06-3は2回目の破壊が明らかに小さいという特徴がある。EQ06-4($M_w 3.9$)は破壊継続時間0.2秒程度の単一の破壊であった。また、2009年に発生した地震については、EQ09-1($M_w 4.9$)は大きな破壊を起こした後、小規模な破壊が連続して発生している。一方でEQ09-2($M_w 4.8$)では、主破壊後、0.2 秒程度の間隔を空けて、小規模な破壊が発生している。

結果から得られた震源過程の特徴の違いは、震源の空間分布に関連すると考えられる。EQ06-1, EQ06-2は少なくとも20年程度群発地震が発生していない領域で起こった地震である。一方、EQ06-3は1998年に発生した群発地震活動の震源域に近接している。このことから、以下のような推論が可能である。過去に破壊が起こった領域では、既に存在する強度の低い部分を、破壊が比較的スムーズに進展するのに対し、過去に破壊の起こっていない領域では、フレッシュな強度の高い部分を破壊が進展するため、複雑な破壊過程を示したのではなかろうか。すなわち、たとえばUmeda(1990)が本震と余震の破壊過程の相違について言及しているように、過去の地震活動による破碎の有無が、解析した地震の破壊過程の相違として見られたと考えられる。

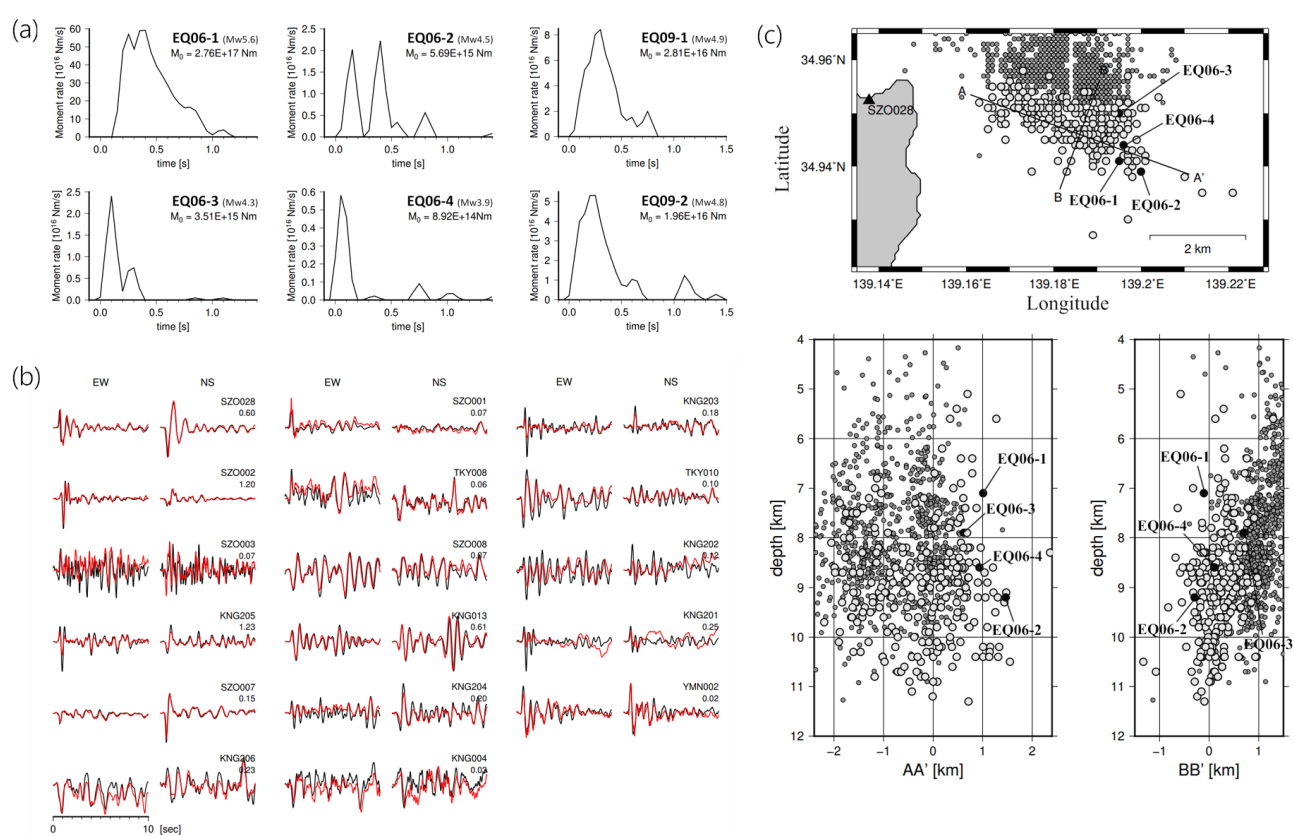


図1. (a) 解析対象の6地震の震源時間関数。縦軸はモーメントレート（単位： 10^{16} Nm/s）、横軸は時間（単位：秒）を表し、時刻ゼロは破壊開始時刻を表す。
(b) EQ06-3の観測波形（黒）と理論波形（赤）。(c) 2006年4月に発生した地震活動の震源分布。灰色小丸は1998年の群発地震の震源分布。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 3:00 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 6:00 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson: Kazuya TATEIWA (Tohoku University), Keisuke Yoshida (Tohoku University)

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

[S08-04] Quantification of expansion rate of aftershock zone for M7-class earthquakes in Japan: Potential as differential stress meter

*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA² (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University)

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

[S08-05] Stress Drop of Small Earthquakes in the Southeastern Kanto Region

Kaho Hashimoto¹, *Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-06] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

*Tsukasa Masuda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-07] **Shear strength and fluid over-pressure in world subduction zones estimated from the earthquake energy budget**

*Nelson PULIDO¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Quantification of expansion rate of aftershock zone for M7-class earthquakes in Japan: Potential as differential stress meter

*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA²

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University

2004年パークフィールド地震(M6)や2010年バハ・カリフォルニア(エルマヨール・クカパ)地震(M7.2)では、本震からの経過時間の対数に比例する形で余震域拡大が生じた(Peng and Zhao, 2009; Ross et al., 2017)。背景にある物理メカニズムの候補として、本震の余効すべりによる余震誘発が考えられている。余効すべりの伝播について多くの理論的研究が行われている(e.g., Ariyoshi et al., 2019)一方で、余震域の拡大速度についての定量的理解は必ずしも進んでいない。そこで本研究では、日本国内で発生した複数の大地震を例として、余震域の拡大速度を比較・検討する。

気象庁の地震カタログデータに基づき、2000年以降のマグニチュード6.9-7.4の地震を本震とした上で、本震から100日以内に震源近傍で発生したマグニチュード3以上の地震を余震と定義した。ただし、震源決定精度が低いため余震数が(見かけ上)少なくなっているアウトライズ地震と、大々的な動的誘発現象が生じた2016年熊本地震(e.g., Uchide et al., 2016)、さらにマグニチュード8以上の巨大地震直後の地震は、研究対象の本震から除外した。余震域の拡大を評価するために、本震震源からの3次元的な距離を用いた。この3次元距離を縦軸、本震からの経過時間(対数)を横軸としたグラフ上で、余震域が広がる様子を確認できる。拡大速度についてデータからの自動推定を行うため、経過時間を時間窓に分割した上で、外れ値を除去し、各時間窓の中で本震震源から最も遠い点を回帰する、というアルゴリズムを開発した。

解析の結果、余震域の拡大速度(対数時間に対する)と、余震から推定したGutenberg-Richter則のb値との間に、-0.7を超える強い負の相関があることがわかった。一方、拡大速度と本震の深さや大きさとの間に相関はないこともわかった。既存の経験的關係(Scholz, 2015)と合わせ、余震域の拡大速度から差応力を推測する關係式(差応力計)を得た。この式は、差応力が高いほど余震域の拡大速度が大きいという点で、力学的に合理的と考えられる。さらに、拡大速度は、本震がプレート境界地震の場合に大きく、プレート内地震の場合には小さい、という傾向が見られた。このことは、プレート境界地震の余震域がプレート内地震の余震域よりも高い差応力環境下(本震後)にあることを示唆するが、プレート境界地震とプレート内地震との断層成熟度の違いなど他の要因の影響も考えられる。また、以上の結果は、拡大速度の自動推定結果に依存している。この自動推定アルゴリズムは簡易的なものであり、改善の余地が残っているため、この点についての議論も行う。

Stress Drop of Small Earthquakes in the Southeastern Kanto Region

*Kaho Hashimoto¹, Takuji YAMADA¹

1. Ibaraki University

1. 目的と解析対象地震

関東地方南東部では、南からフィリピン海プレートが沈み込み、さらにその下には東から太平洋プレートが沈み込んでいる。これに関連して複雑な地震活動が見られ、千葉市や旭市、古河市などに地震活動が密集した地域（以後、クラスターと称す）が存在する（図1a）。本研究では、2003年から2020年の間に関東地方南東部で発生した $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ の311個の地震を対象に応力降下量解析を行い、クラスターごとの特徴や地震の深さとの関係を考察した。解析した地震の最大深度は112.5 kmである。

2. 解析手法

防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）の速度波形を利用し、Yamada *et al.* (2021) の手法を用いて解析を行った。手法の詳細は、以下の通りである。解析対象の $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ の地震に最も近接する $M_w 3.5$ の地震波形をEGF波形とし、まず、解析対象地震の波形およびEGF波形それぞれのスペクトルを算出した。次に、解析地震波形のスペクトルをEGF波形のスペクトルで割ることにより（デコンボリューション）、地震波の経路の影響、観測点近傍の地盤の影響、地震計特性を除去して、解析地震とEGF地震の周波数領域における震源特性の比を求めた。さらに、Boatwright (1978) のオメガ2乗のスペクトル式を用いてコーナー周波数を推定した。最後に、破壊伝播速度をS波の90%と仮定して、Madariaga (1976) のモデルから、応力降下量の値を得た。

3. 結果と考察

図1(b)は、本研究で得られた応力降下量の解析結果である。まず、クラスター間の違いについて考察する。解析地震の密集域を、図1(b)中の四角い枠に対応する6区域に分け、区域間の応力降下量の差についてWelchのt検定（危険率5%）を行った。その結果、茨城県西部クラスター（赤）は、ほぼ同一深度で発生した旭市付近のクラスター（青）に比べて応力降下量が大きく、この差は統計的に有意であった。前者はToda *et al.* (2008) で存在が示唆された「関東フラグメント」もしくはフィリピン海プレート上面、後者は太平洋プレート上面で発生した地震と考えられる。応力降下量は主として剪断強度の大きさの指標となるため（Yamada *et al.*, 2021）、上記2地域における相違は、フィリピン海プレート上面の剪断強度が、太平洋プレート上面のそれに比べて大きいことを示唆していると考えられる。

次に、各クラスター内の応力降下量空間分布について検討した。茨城県西部のクラスター（図1bの赤枠内）では北端と南端部に近い地震、また千葉市付近のクラスター（橙）では、より深い地震ほど応力降下量が多い傾向が見られた。この傾向を定量的に調べるため、クラスター中央からの距離あるいは震源の深さの関数として、応力降下量を図示した（図2）。

茨城県西部のクラスターでは、クラスター中央からの距離が異なるドーナツ型領域内で発生した地震の応力降下量と個数から平均応力降下量を算出した。ドーナツ型領域の幅を1 kmに固定したまま、半径を0.5 kmずつ拡大して平均応力降下量の推移を調べた。千葉市周辺のクラスターでは、気象庁の震源の深さ決定精度を考慮して深さの幅4 kmの領域を設定し、下方に1 kmずつずらしながら平均応力降下量の推移を調べた。図2aに示した茨城県西部のクラスター（図2a）では、図1で見られる傾向どおり、クラスター辺縁部の地震ほど応力降下量が多いことがわかる。千葉市周辺（図2b）では、応力降下量は深さとともに増加していることがわかる。ただし、地震ごとの応力降下量値のばらつきが大きいことにも注意が必要である。クラスターの縁辺部では剪断強度が大きいためその外側で地震が発生しづらいと考えられ、これは本研究で得られた応力降下量の空間分布と矛盾しない。また、断層の垂直応力が深さの関数となることを考えると、応力降下量に深さ依存性があることは自然であるが、依存性の有無については様々な報告があり、議論の余地がある（たとえば、Abercrombie *et al.*, 2021）。今後は、応力降下量を深さで規格化した上で、深さ依存性やクラスター内

の応力降下量分布について詳細な検討を行う予定である。

参考文献

- ・ Abercrombie *et al.* (2021), <https://doi.org/10.1029/2021JB022314>
- ・ Boatwright (1978), <https://doi.org/10.1785/BSSA0680041117>
- ・ Madariaga (1976), <https://doi.org/10.1785/BSSA0660030639>
- ・ Toda *et al.* (2008), <https://doi.org/10.1038/ngeo318>
- ・ Yamada *et al.* (2021), <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01326-8>

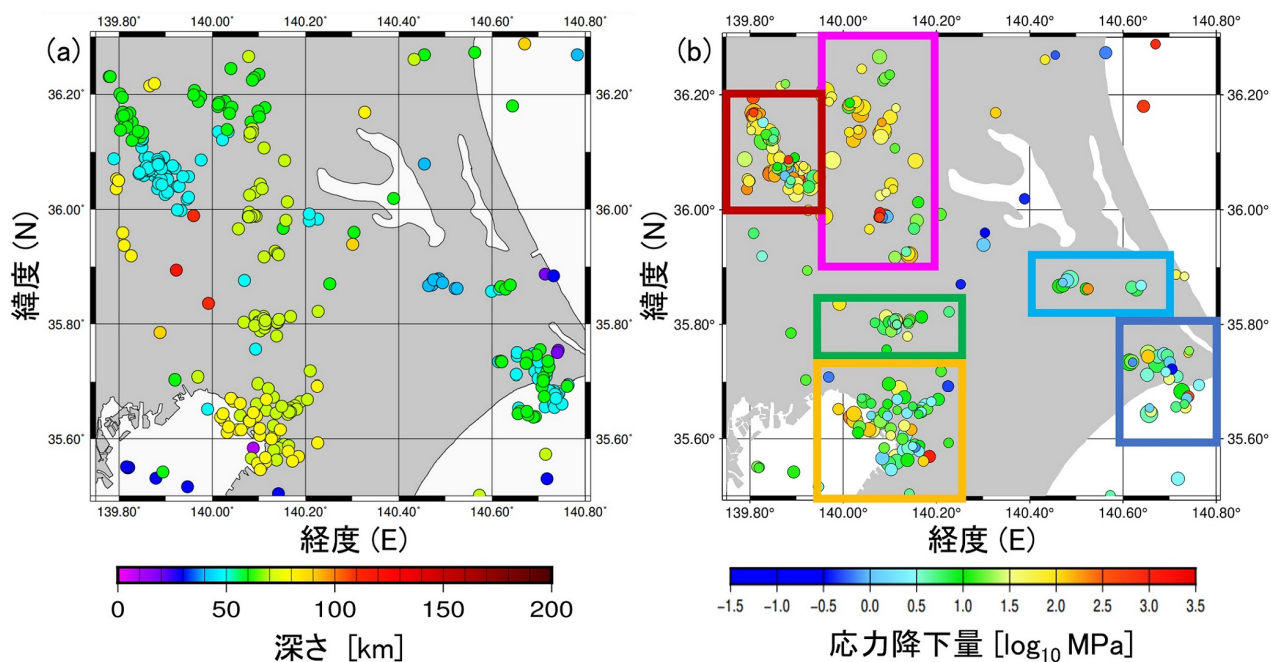


図 1. (a) 解析した地震の震央分布図。(b) 本研究で得られた応力降下量。図中の長方形はWelchのt検定や深さ依存性の議論に用いたクラスターに対応している。

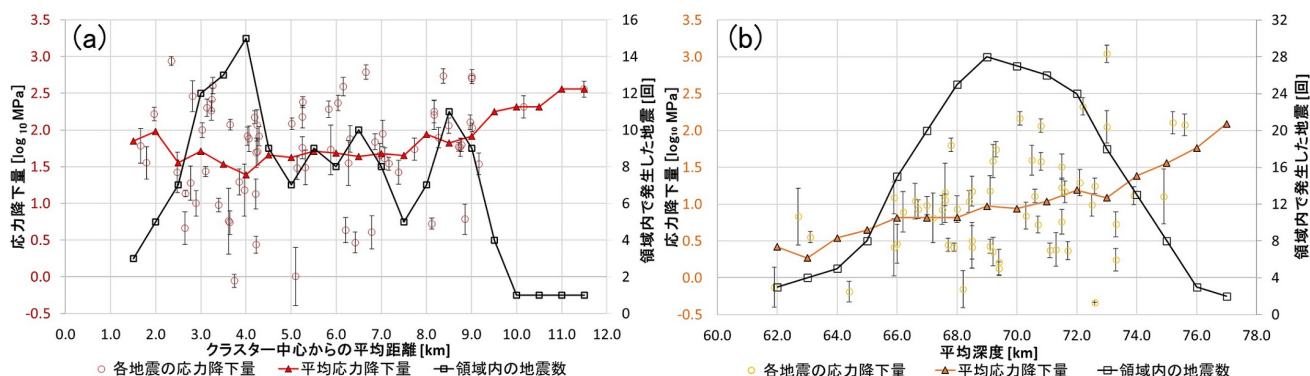


図2. (a) クラスタ中心からの距離の関数として表した、茨城県西部クラスターの応力降下量。赤丸、赤実線、黒実線はそれぞれ、解析に用いた各地震の応力降下量、平均応力降下量、領域内で発生した地震の数を示す。(b) 震源の深さの関数として表した、千葉県周辺の地震の応力降下量。黄色丸、橙実線、黒実線は(a)の場合と類似して、解析に用いた各地震の応力降下量、平均応力降下量、領域内で発生した地震の数を示す。

Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

*Tsukasa Masuda¹, Takuji Yamada¹

1. Ibaraki University

1. はじめに

茨城県・千葉県東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う地震が定常的に多数発生しており、1677年にはマグニチュード (M) 8.0 以上であったと推定される延宝地震も発生している。本研究では、2003年1月から2019年12月に茨城県沖・千葉県東方沖で発生した小地震 ($4.0 \leq M_w \leq 5.0$) のうち、2. で説明するとおり、太平洋プレートの摩擦特性を反映していると考えられる地震について、応力降下量を解析した。

2. 解析対象地震と解析手法

2003年1月から2019年12月に茨城県沖・千葉県沖で発生した $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ の地震のうち、太平洋プレート上面から ± 15 kmの深さの地震を対象とし、Hi-net (防災科学技術研究所)の速度波形記録を用いて、応力降下量を解析した。解析手法は、Yamada *et al.* (2021) と類似の手法を用いた。まず周波数領域において、各解析対象地震の速度波形を、それに最も震源の近い M_w 3.5の地震の観測波形 (以後、経験的グリーン関数と表記する) で除し、観測点ごとにスペクトル比を求めることにより、両地震の震源特性の比を取得した。次に、地震の震源スペクトルはオメガ2乗モデル (Boatwright, 1978) に従うと仮定し、スペクトル比から解析対象地震および経験的グリーン関数のコーナー周波数を求めた。そして、Madariaga (1976) の円形断層モデルに従って、コーナー周波数から解析対象地震の応力降下量を推定した。この操作を解析対象地震すべてについて実行した。

3. 結果および考察

緯度経度0.1度ごとに平滑化した応力降下量の解析結果を図1に示す。P波、S波ともに、千葉県沖に比べて、茨城県沖で応力降下量が多い傾向がみられた。また、結果を注意深く観察すると、その空間不均一性があることが分かる。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震の大すべり域 (Iinuma *et al.* 2012) で発生した小地震は、大きな応力降下量を持つことも明らかとなった。これは、先行研究と調和的であり、小断層の応力降下量はその場の摩擦特性を反映し、応力降下量の大小関係が剪断強度のそれに対応しているという主張を支持する。図1中の領域Aはアスペリティとされる領域で、応力降下量が比較的大きい小地震が発生しており、一方、図1中の領域Bの海山がある領域では、応力降下量が小さい地震が発生している。これは、アスペリティの存在と応力降下量の値が対応していると考えられ、また、海山自身がアスペリティになるわけではないという Mochizuki *et al.* (2008)の考えと調和的である。さらに、図1中の領域Cは1667年延宝房総沖地震の震源域 (羽鳥, 1975) に相当し、領域C内での小地震の発生数が少ないこと、領域Cの西端では応力降下量が比較的小さい地震が発生していることが分かった。これは、領域Cおよびその周辺の剪断強度が小さいことを示唆していると考えられ、1667年延宝房総沖地震が津波地震であったと推定されていることと調和的である。

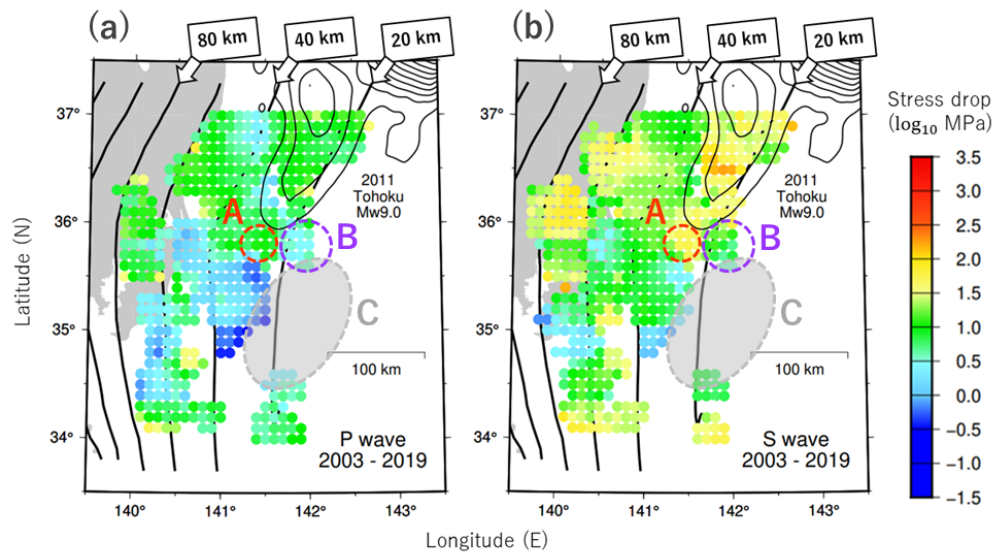


図 1. (a)P波, (b)S波から得られた応力降下量の空間分布. グリッドポイント間隔は緯度経度0.1度ごとである. 各グリッドポイントの値は, グリッドポイントから半径20 km以内の地震の応力降下量の平均値を示す. 黒のコンターは, 2011年東北地方太平洋沖地震のすべり分布を示し, その間隔は2 mごとである (Iinuma *et al.*, 2012). 太い黒線は, 沈み込む太平洋プレート上面の深度を表しており, 線間隔は20 kmである (Kita *et al.* 2010; Nakajima and Hasegawa 2006; Nakajima *et al.* 2009). 図中のA, B, Cの詳細は本文参照のこと.

Shear strength and fluid over-pressure in world subduction zones estimated from the earthquake energy budget

*Nelson PULIDO¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

I estimated fault shear strength of global subduction zones based on calculations of the seismic energy budget during large earthquakes. Estimates of shear strength are based on the calculation of the total energy released during earthquake rupture, which is partitioned into radiated energy, fracture energy (G) and frictional (heat) energy. Radiated energy can be readily obtained from radiated seismic waveforms or using information of the source time function of earthquakes. Accurate estimates of fracture energy are more difficult to obtain, and for this purpose I use the Finite Width Slip Pulse dynamic rupture model, combined with information of the heterogeneous fault rupture process of large earthquakes (208 fault rupture models of the NEIC finite fault slip database, from 1990 to 2022, and $M_w > 7$). Estimates of G are largely influenced by the heterogeneous distribution of fault rupture velocity, rise time and slip of earthquakes across the fault plane. In a previous study (AGU, 2021) I showed that fracture energy is underestimated by a factor of 5 when estimations do not account for the heterogeneity in fault rupture process of large earthquakes, as typically assumed by the calculations based on the difference between average stress drop and the apparent stress of earthquakes (known as G'). Furthermore, recent studies also suggest that megathrust earthquakes experience an almost complete strength drop during fault rupture (i.e. 2011 Tohoku). If a strong dynamic weakening typically takes place during fault rupture of large earthquakes (substantial stress undershoot) then frictional energy can be neglected, and therefore average shear stress and shear strength can be obtained. Based on this assumption I calculated lower bound estimates of shear strength across subduction regions and oceanic lithosphere worldwide. My results indicate a severe fault strength weakening during all megathrust earthquake ruptures (with a global average around 4 MPa), notably tsunami earthquakes belonging to the weakest faults (around 1 MPa), implying that fluids are extremely over-pressured across the majority of subduction regions worldwide. By using my shear strength results, I obtained a global average of λ (the fluid pore pressure to lithostatic pressure ratio) of 0.98, for subduction megathrusts. In contrast, I showed that oceanic lithosphere at ridges, transform faults and fracture zones is 5 to 10 times stronger. This considerable difference indicates that fluid pressure plays a major role in controlling strength of earth's lithosphere. Furthermore, my estimations of average shear stress during fault rupture also enable the calculation of seismic efficiency. I obtained that average seismic efficiency for megathrust subduction earthquakes, is smaller than the average value for earthquakes in oceanic lithosphere.

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

🗓 Tue. Oct 25, 2022 3:15 PM - 4:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:15 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology), Saeko Kita (Building research institute)

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

[S08-08] Nankai Trough Earthquakes Estimated from GIS-based Historical Documents in Mie Prefecture

*Yoshiko YAMANAKA¹ (1. Nagoya Univ.)

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

[S08-09] Effects of long-term slow slip events on in-slab stresses in Bungo Channel, southwestern, Japan

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Roland Burgmann³, Suguru Yabe⁴, Youichi Asano⁵, Takeshi Kimura⁵ (1. Building Research Institute, 2. USC, 3. UC Berkeley, 4. AIST, 5. NIED)

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

[S08-10] Single-station detection of seismic slow earthquakes using their broadband characteristics

*Koki MASUDA¹, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-11] Strongly scattering medium along slow earthquake fault zones, inferred by the new observations of short-duration tremors

*Akiko TOH¹, Wu-Cheng Chi², Yann Capdeville³, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, 3. Nantes Université, CNRS, France)

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

[S08-12] Direct Evidence of Strike-Slip Motion for Low-Frequency Earthquake near Parkfield

*Naofumi Aso¹, Miki ASO², David R SHELLY³, Satoshi IDE⁴ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. OYO RMS, 3. USGS, 4. University of Tokyo)

Nankai Trough Earthquakes Estimated from GIS-based Historical Documents in Mie Prefecture

*Yoshiko YAMANAKA¹

1. Nagoya Univ.

▼ はじめに

地震調査委員会長期評価報告書に掲載されている宝永地震の震度分布（H13度版は宇佐美他(1994); H25度版は松浦(2012)）をみると、たとえば高知の震度が震度6以上から震度5になっており、今後の地域防災を考える上で検証が必要と思われるが、どの史料から震度を判断したのかわからないためすぐには検証ができない。これまで刊行されている史料集の検索システムを構築してきた（山中, 2015, 2021）。これによって膨大な史料集からターゲットの地震の史料を取り出すことが可能になった。しかし現状ではそれらの史料がどこ被害を記述したものかわからないため、上記検証もかなりの時間を要する。

そこで、フリーのWEB-GISであるe-コミマップを用いて地方史や郷土資料、論文等の史料を整理することを試みた。

▼ e-コミマップの活用

史料に関する地名を調べるには、現在名称が残っていないことも多くかなりの時間を要する。現状では史料を使う研究者それぞれが同様の作業を行っており、非効率的である。そこでフリーのWEB-GISであるe-コミマップを用いて、場所を特定した史料を地図上に整理していく仕組みを考えた。e-コミマップはメンバー参加型で地図を作成でき、グループ内や外との情報共有が行えるWEBマッピングシステムである。

GISゆえ様々な地理空間情報を外部から呼び出し重ね合わせて統合して見ることができるため、史料を理解する上でも有益である。本研究では旧版地形図（明治期）をデジタル化したり、標高陰影図を作成し重ねて表示可能にした。そのほか国土数値情報や防災科技研によるJ-shisデータや産総研データなども併せて表示できる。昔の行政区分や旧版地形図で明治期に人が住んでいた場所などの情報は被害の大まかな場所の特定に大いに役立つ。

本システムでは、整理する項目を揺れ、津波、地殻変動・液状化、その他にわけてシンボルを変え、それぞれ史料名や史料内容、出典などを入力した。また地震毎に色を変えることで比較ができるようにした。

▼ 三重県への適用から震源域推定

手始めに三重県における明応地震、宝永地震、安政地震、昭和東南海地震について史料整理をしてみた。まだ入力途中で丁寧な考察はできていないが、いくつかの特徴が見えてきた。

安政東海地震では全般的に大きな津波被害を被っているが、これまでも指摘があるように（たとえば行谷・都司, 2005）南伊勢市東部では比較的被害が少ないことがわかる。また志摩半島の東側では最初に潮が大きく引いているのに対し、紀北以南では大きく引くことはなかったと言っている。さらに紀北以南での津波到来時刻を宝永と比較すると、宝永地震では揺れがおさまってから津波が来るまでに飯を炊くくらいの時間があつたが、安政地震ではすぐにやってくる。時間差はあるものの被害そのものは宝永、安政とも大きな被害がでており、これまでに推定された浸水高をみてもさほどの違いはない。このことから宝永の方が規模は大きかったことが想像される。昭和東南海地震でもこの地域には5~20分程度で津波がきている。これらことから、安政や昭和では少なくとも紀北以南に近いところに震源域があるが、宝永ではそこは滑っていないということができよう。

もし現在求められているアスペリティが繰り返し滑っているという考え方(Yamanaka&Kikuchi,2004)に基づいてYokota et al. (2016)で求められたアスペリティ分布で考えてみる。昭和東南海地震の波形解析から（山中, 2006）滑ったアスペリティは彼らの求めた遠州灘と熊野灘の大きなアスペリティにあたる。安政東海でも紀北に津波を早くもたらせたアスペリティは図中の熊野灘のアスペリティの可能性があるが、本当に安政と昭和で同じところが滑ったかどうかはもう少し情報の整理が必要である。

今後は和歌山県、愛知県、静岡県、高知県等の整理を進め、南海トラフ地震の震源過程について検討していく予定である。

Effects of long-term slow slip events on in-slab stresses in Bungo Channel, southwestern, Japan

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Roland Burgmann³, Suguru Yabe⁴, Youichi Asano⁵, Takeshi Kimura⁵

1. Building Research Institute, 2. USC, 3. UC Berkeley, 4. AIST, 5. NIED

In Kii peninsula, Kita et al. [2021] has reported that short-term slow slip events on the plate interface can change the stress field and seismicity within the subducting Philippine Sea plate, examining ~40 times slow slips events over 17 years. These results suggested that it is possible to indirectly monitor the reduction of locking on the plate boundary using time-space variations of in-slab seismicity. In the present study, we also examined relationships between in-slab events and shallow slow slip events (SSEs) in the Bungo channel, where there are in-slab earthquakes and long-term SSEs (L-SSEs) with recurrence time of ~7 years and ~1 year duration. We applied a stress-tensor inversion method to focal mechanisms of in-slab events for 19 years and examined time change of stress axis relative to the duration time of the three L-SSEs. In general, the Sigma 3 axes of inversion results strike in the east-west direction, whereas the Sigma 1 axes are close to vertical and parallel to the direction of plate motion of the subducting plate. During the period of one year just before the L-SSEs, the strike of the Sigma 1 of in-slab events rotated ~30 degrees clockwise direction and plunge of it rotate ~10 degrees becoming less vertical. Then, the plunge of the Sigma 1 rotated several degrees again becoming much less vertical and the strikes of it rotate back to the direction of the plate motion of the subducting plate after the initiation of the two L-SSEs. During the period of one year after the end of the L-SSEs, the plunge of the Sigma 1 rotated back to the initial position. Stress ratio R is generally ~0.5, but it become ~0.3 during the period of one year just after the end of the L-SSEs and become back to ~0.5 during the period of 1.5 years after it. The stress axis change in the southern portion of fault plane of the L-SSEs is generally larger than that in the northern portion of the fault plane of it. The stress ratio R before and after the L-SSEs is respectively ~0.8 and ~0.15 in the southern portion, whereas the ratio in the northern portion is almost constant (~0.5) before and after them. It suggests that the more stable sliding in the northern portion of the fault plane of the L-SSEs. These results suggest the potential of using in-slab events to anticipate the timing of the L-SSEs and to monitor ongoing reduction in locking of the plate boundary by aseismic slip.

Single-station detection of seismic slow earthquakes using their broadband characteristics

*Koki MASUDA¹, Satoshi Ide¹

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

地震性のスロー地震はそのシグナルの小ささからノイズレベルの小さい帯域での解析がよくなされており、1-10 Hzの帯域で観測されるものは低周波地震や微動と呼ばれ、0.01-0.05 Hzの帯域で観測されるものは超低周波地震と呼ばれてきた。これらの活動は時空間的に相関しており、超低周波地震から計算される地震モーメントレートと微動の帯域で計算される地震波エネルギーレートはほぼ常に比例している (Ide et al., 2008)。このような関係を満たすモデルとしてブラウン運動型のプロセスが考えられ、そのようなプロセスは0.01 Hzから10 Hzにおよぶ広帯域なシグナルを生み出す。実際、脈動が卓越する帯域である0.05-1 Hzをも含んだ広帯域な検出がなされており (e.g., Kaneko et al., 2018; Masuda et al., 2020)、このようなプロセスの存在を支持している。本研究ではスロー地震のこの性質を利用することで、スロー地震活動のモニタリングを一つの広帯域観測点で可能とするような手法の設計を行う。

ある観測点の広帯域地震計記録から、地震波エネルギーレートとして高周波成分 (2-8 Hz) の速度波形の二乗振幅を、地震モーメントレートとして低周波成分 (0.02-0.05 Hz) の変位波形を用いる。両者の相関係数を100秒の時間窓で10秒ごとに計算し、10000秒の移動平均をとる。この移動平均後の相関係数の時系列がある一定の閾値を超えた時間帯には広帯域なスロー地震のシグナルがあると見なす。

まず日本の広帯域地震観測網であるF-netの75観測点の18年分のデータに対して適用した。南海沈み込み帯の既に多くのスロー地震の検出がなされている場所に沿って、多数の検出があった観測点が並んだ。この空間的な相関はこの手法の有効性を示している。検出が期待されるものの検出できない観測点や、スロー地震活動があるとは考えられない場所で閾値を超える観測点もあるが、これらは放射パターンや気象の影響で説明できる。従って一定の注意のもとで、この手法は密な定常観測網が無いような場所にも適用できると考えられる。

Strongly scattering medium along slow earthquake fault zones, inferred by the new observations of short-duration tremors

*Akiko TOH¹, Wu-Cheng Chi², Yann Capdeville³, Satoshi Ide¹

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, 3. Nantes Université, CNRS, France

プレート沈み込み帯の浅部では、普通地震とTremorの二種類の地震が発生することが知られており、それらは波形の特徴により分類される。Tremorは普通地震と比べて、シグナル継続時間が長く、10Hz以上の地震波エネルギーに枯渇し、シグナルの立ち上がりが不明瞭である(Obana & Kodaira, 2009)。これまで、Tremorと普通地震の違いは震源過程の違いにあると考えられてきた。それ故、Tremorの長いシグナル継続時間は、長い震源時間過程を反映すると考えられてきた(e.g. Shelly et al., 2007)。

本研究では、DONET1海底観測網により震源の直近で得られた地震計記録の中から、遠方では典型的な長いシグナル(> 10 s)を呈する一方で、直上では継続時間の短いシグナル(< 3 s)を呈するTremorを発見したことを報告する。これらを”short-duration tremor”と呼ぶ。これらの特徴は、従来考えられてきた長い震源時間過程では説明できず、短いシグナルが示唆する短い震源時間過程から、継続時間の長いシグナルが作り出されるメカニズムを新たに考える必要がある。

ここでは、震源周辺に水平方向に広がり、地震波散乱によりシグナル継続時間を伸ばすような異常構造を考える。このような構造があれば、震源直上と遠方で継続時間の短いシグナルと長いシグナルがそれぞれ見られるはずである。候補となりうる構造は無数にあるが、ここでは、その内側で超低速S波速度を持つ多数の小さな介在物が震源周辺に局在する構造を考えた。構造内に震源をおき弾性波シミュレーションを実施した結果、観測されるshort-durationの特徴を捉えた結果を得ることができた。

他方、近年海底掘削により、Tremor震源域には幅数100メートルの高間隙水圧帯がパッチ状に点在することが示された(Hirose et al., 2021)。本研究で示した地震波構造モデル中の介在物は、地質学的に観察された高間隙水圧帯に相当する可能性がある。更に、Tremorはスロー地震の一種であり、広帯域で観測される他のスロー地震(VLFEやSSE)と断層を共有すると考えられている(Sugioka et al., 2012; Araki et al., 2017)。そうであれば、本研究で示したTremor震源周辺の構造は、スロー地震断層の構造そのものである筈で、この構造はスロー地震の支配要因である可能性がある。

謝辞 解析には防災科学研究所のDONETデータを使用させていただきました。

Direct Evidence of Strike-Slip Motion for Low-Frequency Earthquake near Parkfield

*Naofumi Aso¹, Miki ASO², David R SHELLY³, Satoshi IDE⁴

1. Tokyo Institute of Technology, 2. OYO RMS, 3. USGS, 4. University of Tokyo

サンアンドレアス断層に位置するパークフィールドは、地震研究が世界で最も盛んに行われてきた地域の一つである。将来の地震評価のためには、大きさは小さいものの頻繁に発生するスロー地震の知見を活かし、応力状態や断層形状を把握することが重要である。パークフィールドの深部低周波地震については、様々な活動の詳細が調べられてきたものの、微弱なシグナルであるが故に、断層運動の直接的証拠となる発震機構解は、未だに分かっていない。そこで我々は、Shelly(2017)により検出されている、100万以上の深部低周波地震に対して、新たな振幅評価手法を開発・適用することで、発震機構解の推定に取り組んだ。

発震機構解の推定には、地震計記録に含まれる地震波の振幅を正確に評価する必要がある。そこで、はじめに、同じファミリーのすべての地震の波形をスタックした。そして、スタック波形と観測波形を比較することにより、地震波振幅を評価した。最後に、地震の規模に依る影響を取り除き、成分（観測点三成分）およびフェーズ（P波とS波）ごとの相対振幅を得た。この相対的な振幅値は、ファミリーごとの発震機構解に依存する放射パターンとファミリーに依らない成分ごとの観測点補正值から構成されていると考えられる。我々は、一次元速度構造（Eberhart-Phillips, 2016）に対して波数積分法（Zhu and Rivera, 2002）で計算した理論波形と比較する形で、観測振幅を一番良く説明するような発震機構解をグリッドサーチにより求めた。

解析した88ファミリーのほとんどはサンアンドレアス断層での横ずれ運動と整合的である一方で、いくつかの相違も確認された（走向/傾斜/すべり角= $N35^{\circ}W \pm 35^{\circ}/50-90^{\circ}/\pm 40^{\circ}$ ）。ブートストラップテストを行ったところ、いくつかのファミリーについては推定が良くないことが分かった一方で、ほとんどのファミリーについてはロバストな解であることが分かった。この信頼できる発震機構解について、震源の位置や地震の規模のほか、潮汐応答性など他の特徴量と比較を行った。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 25, 2022 4:45 PM - 6:00 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 7:45 AM - 9:00 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-3

chairperson: Tatsuya Kubota(NIED), Suguru Yabe(AIST)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S08-13] Synthetic tests of joint CMT analysis using translation and strain data

*Suguru YABE¹, Kazutoshi Imanishi¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S08-14] Feasibility of detecting pre-P gravity elastic strain signals from earthquakes

*Kantaro KAWAI¹, Nobuki KAME¹, Shingo WATADA¹, Akito ARAYA¹ (1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S08-15] Validating the Method Estimating Fault Slip Angles by Using Regional 3D Stress Field with the Wallace-Bott Hypothesis –Application to the focal mechanism solutions of microearthquakes –

*Takeo Ishibe^{1,2}, Toshiko Terakawa³, Akinori Hashima⁴, Masashi Mochizuki⁵, Ritsuko S. Matsu'ura¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. ISM, 3. Nagoya University, 4. JAMSTEC, 5. NIED)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S08-16] Stress field in the northwestern part of the South Island, New Zealand, and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

*Ayaka TAGAMI¹, Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Satoshi Hirahara¹, Shuutoku Kimura¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[S08-17] Distribution of azimuths of aftershock faults in the Western Tottori region deduced by the dense seismic observations

*Yoshihisa IIO¹, Manten seismic observation group², Manten seismic observation group in the Western Tottori region² (1. Kyoto University, 2. N/A)

Synthetic tests of joint CMT analysis using translation and strain data

*Suguru YABE¹, Kazutoshi Imanishi¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

近年盛んに研究されているスロー地震や誘発地震の分野では、地震の発生に流体が大きく関与していることが指摘されている。そのような場における地震発生では、純粋な断層運動だけでなく体積変化を伴うような変形が起こることが予想される。そのような震源域における変形は、地震のモーメントテンソルの非Double-Couple (DC)成分として表現することができる。しかし、モーメントテンソルの非DC成分には大きな推定誤差が含まれることが指摘されており、地震発生における流体の影響について理解を深めるためには、モーメントテンソルの推定精度向上が重要な課題である。本研究では、通常使われるF-netの並進成分に加えて、産業技術総合研究所が西南日本において展開する歪観測網で取得される地震動記録（歪地震動）をCentroid Moment Tensor (CMT) 解析に取り入れることで、どの程度モーメントテンソルの推定精度が向上するかを理論テストにより検討した。理論テストでは、観測ノイズと地下構造の不確実性がモーメントテンソル推定にどの程度影響するかを主に調べた。観測ノイズは実際の地震動記録のノイズスペクトルから作成した。地下構造の不確実性は、グリーン関数の作成に使用したF-netの構造をベースに1次元地下構造の層厚や地震波速度をランダムに変化させて作成した構造を用いてターゲット波形を作成し、それを元のF-netの構造で作成したグリーン関数を用いて解析することで調べた。その結果、2種類の地震動記録をジョイントすることで、非DC成分を含むモーメントテンソル推定精度の向上が確認された。さらに、2021年12月3日に発生した紀伊水道での M_w 5.1の地震の実データに対して、ジョイントCMT解析を実施し、F-netなどで推定されているモーメントテンソル解と比較しながら非DC成分の有無を検討した。

Feasibility of detecting pre-P gravity elastic strain signals from earthquakes

*Kantaro KAWAI¹, Nobuki KAME¹, Shingo WATADA¹, Akito ARAYA¹

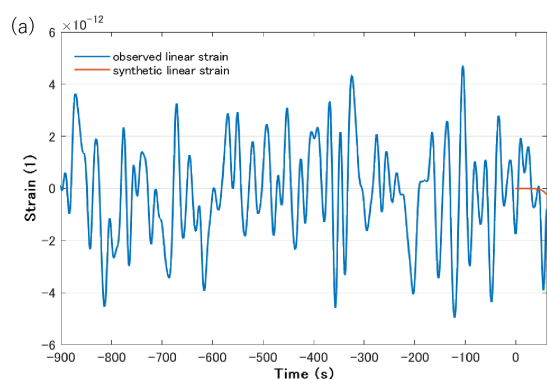
1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO

地震によって生じる重力場変動はP波より早くほぼ即時に観測点に伝わる。この重力変動の信号は広帯域地震計の加速度記録の中に検出されてきた (Vallée et al., 2017; Kimura et al., 2019; Vallée and Juhel, 2019)。P波到達前の重力場変動は加速度変化と同時に弾性歪み変形も引き起こす。本研究の目的は、このP波到着前に変化する弾性歪みの検出可能性について論じることである。

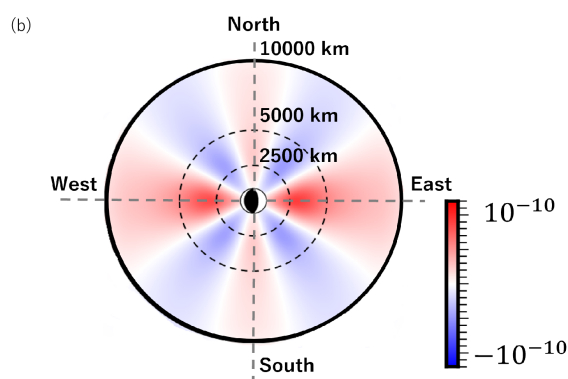
本研究では、観測データ解析と理論波形合成の2つのアプローチを行い、両者を比較する。データ解析には、地震研究所が神岡に設置した100 m 基線長レーザー歪計により記録された2011年M9東北沖地震のデータを用いて、パワースペクトル解析を行い観測地点の背景ノイズレベルの大きさを調べる。理論波形合成には Zhang et al. (2020)で提案された計算コードQSSP_PEGSを用いる。これはWang et al. (2017)の重力-弾性完全結合方程式に従う現実的な球対称地球モデルにおいて弾性・重力応答を計算するコードQSSPをP波前の重力・弾性応答を計算できるように拡張したものである。

解析の結果、従来のP波前重力信号解析で用いられた周波数バンド(帯域0.002-0.05 Hz)において歪みの背景ノイズ振幅は 10^{-12} 程度であった。一方、2011年東北沖地震に対して神岡観測点で理論的に予想される歪み振幅の大きさは 10^{-12} 程度であり、時間領域で実際の波形と比較すると全く信号は見えなかった(Fig. (a))。次に、東北地震クラスの巨大地震に対して様々な震源距離での理論波形を合成し、P波前に予想される歪レベルのコンターマップを作成した。すると、意外なことに震源距離が2000 km を超える範囲に 10^{-10} 程度のピークが現れることが分かった(Fig. (b))。この値は背景ノイズレベルと比較して50倍大きく、一点観測で十分に検出可能である。

P波到達前の重力場変動の計測可能性に関する既往研究は、地震計加速度センサーおよび重力勾配センサー (Torsion Bar Antennas) によるものがある。それぞれの理論信号のピークは、震源距離800km付近、および震央近傍であることが報告されている。一方、本研究の理論歪信号が震源距離2000 km を超える遠地でピークを持つ理由については、今後の検討課題である。なぜなら、歪み信号の距離減衰は単純な物理モデルからは重力勾配と同じになることが予想されるからである。現在、地震研究所はプロトタイプを遙かに超える1500 m 基線長のレーザー干渉計を稼働させている。今後、M9クラスの巨大地震が、本研究の理論的予測に従う震源距離で発生した場合には、歪計によるP波前重力変動の信号検出が期待できる。



(a) Comparison of the recorded strain and synthetic one calculated by the simulation method of Zhang et al. (2020).



(b) Synthesized pre-P elastic strain amplitude from a point source ($M=9$, dip=30 deg., strike=180 deg., rake=90 deg., $d=20$ km) located at the center of map.

Validating the Method Estimating Fault Slip Angles by Using Regional 3D Stress Field with the Wallace-Bott Hypothesis –Application to the focal mechanism solutions of microearthquakes –

*Takeo Ishibe^{1,2}, Toshiko Terakawa³, Akinori Hashima⁴, Masashi Mochizuki⁵, Ritsuko S. Matsu'ura¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. ISM, 3. Nagoya University, 4. JAMSTEC, 5. NIED

活断層調査に基づき将来発生する地震の現実的な強震動・津波予測には、入力データとなる断層形状や断層すべり角（ずれの向き）、断層すべり量などが実際に発生する地震のそれらと乖離しない事が求められる。近年、すべり方向が断層面に働くトラクションの剪断成分の方向に一致するとの考え方（Wallace-Bott仮説）に基づき、活断層調査から得られた断層形状と地震データから推定された広域応力場の情報から断層すべり角が推定され、強震動・津波予測に活用されている（例えば、日本海における大規模地震に関する調査検討会, 2014；武田・他, 2014；Satake *et al.*, 2022）。しかしながら、上記手法の妥当性の検証ならびに精度（誤差）について、十分な検討が行われていなかった。また一般に、活断層で発生する固有地震規模の地震の平均再来間隔は数千年から数万年のオーダーと推定されており、10年程度の地震学データから推定された広域応力場を、長期間のテクトニックな応力場のプロキシとして用いる事ができるのか、検討する必要があった。

上記の背景から、Ishibe *et al.* (2020) ではその手始めとして、防災科学技術研究所によるF-netメカニズム解等を対象に、広域的三次元応力場を用いWallace-Bott仮説から断層すべり角を推定する手法の有効性の検証ならびにその精度に関する検討を行った。その結果、東北日本内陸において2011年東北地方太平洋沖地震後に活発化した群発的活動などでWallace-Bott仮説から推定されるすべり角と実際に発生した地震のすべり角の間に乖離がみられる地震もあったが、これら一部の地震を除き、推定されたすべり角とF-netメカニズム解におけるすべり角のミスフィット角は概ね30°以内に収まり整合的であった。また、地震調査研究推進本部によって評価されている活断層（帯）を対象に、変動地形学的に推定された断層のずれの向きと種類（型）と、広域的三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説から推定される断層型が概ね整合的であることを確認した（石辺・他, 2020）。

近年、深層学習を用いた初動読み取りに基づく微小地震の発震機構解カタログが構築・公開された（Uchide, 2020）。そこで本研究では、より小規模の地震に対する検証ならびにその規模依存性の検討を目的として、Uchide (2020) によって推定された微小地震に対する発震機構解を対象に上記手法を適用した。カタログ期間は2005～2019年であり、F-netメカニズム解と同様に2011年東北地方太平洋沖地震の発生を跨ぐため、その前後の期間に分けて解析を行い、推定精度の高いランクAまたはBの発震機構解を用いた。

推定された発震機構解における断層すべり角と広域応力場からWallace-Bott仮説に基づき算出された断層すべり角とのミスフィット角を算出した結果、先行研究と同様に概ね30°以内に収まり整合的であった。ただし、紀伊半島南部から四国南部、宮崎県東部に沿った領域において比較的ミスフィット角が大きな領域が見られた。また2007年能登半島地震や2008年岩手・宮城内陸地震の余震活動に対しても広域応力場から算出される断層すべり角には乖離が見られた。前者は推定された三次元広域応力場が沈み込むプレートに伴う地震活動による影響を含む可能性が、後者は大地震発生に伴う応力変化の影響を含む可能性が考えられる。一方で、東北沖地震後の期間においてはF-netメカニズム解を用いた解析と同様に、その震源域ならびに近傍領域において顕著に大きなミスフィット角が見られたが、震源域から離れた西南日本などでは2016年熊本地震の震源域などを除き概ね調和的であった。微小地震に対する発震機構解を用いたミスフィット角は、F-netメカニズム解を用いたそれらと比べやや大きい傾向が見られ、また小規模地震に対する発震機構解ほどミスフィット角が大きい規模依存性を示す結果となった。一般に微小地震に対する発震機構解の精度は中～大規模地震に対するそれらと比べ低い傾向にあること、あるいは初動発震機構解とモーメントテンソル解の相違を反映している可能性を否定できないが、小規模地震はTerakawa and Matsu'ura (2010)で推定された三次元広域応力場の空間的

解像度よりも小スケールの応力不均質を反映して発生している可能性がある。本研究で得られた結果は、それぞれの規模（震源域のスケール長）の地震がどういった空間スケールの応力不均質を反映して発生しているのかについて、重要な示唆を与える可能性がある。

謝辞：本研究は、文部科学省による「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一環として実施された。また、Uchide (2020) による発震機構解を使用させていただいた。ここに記して感謝いたします。

Stress field in the northwestern part of the South Island, New Zealand, and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

*Ayaka TAGAMI¹, Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Satoshi Hirahara¹, Shuutoku Kimura¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard Sibson⁷

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand

目的

ニュージーランドでは北島から南島北部にかけてオーストラリアプレートに太平洋プレートが沈み、現在の南島北部ではおよそESE-WNW方向の圧縮応力場が分布する (Townend et al., 2012)。南島北西部では、タスマン海の形成とエメラルド海盆の形成に伴う引張応力場により発達した古い正断層が存在し、古い正断層 (高傾斜角面) が逆断層として活動する反転テクトニクスが、現在の東北日本と同様に確認されている (例えば Ghisetti et al., 2014)。

我々はこれまでにニュージーランド南島北西部で生じた二つの大規模地震 (1929年 Buller地震 Mw 7.3、1962年 Westport地震 Mw 5.6) を対象に応力場に対する断層のすべりやすさの検討を行った (田上・他, JpGU Meeting, 2022)。その結果、対象地域ではESE-WNW方向の圧縮応力場を確認した。また、60°未満の傾斜角を持つ東傾斜の面がすべりやすい傾向を示した。本研究では引き続き、2つの大規模地震 (1968年 Inangahua地震、1991年 Hawks Crag 地震) を対象に応力場に対するすべりやすさの検討を行なった。

データと手法

まず、対象領域における臨時観測点と定常観測点のデータを用いて応力場を推定した。次に、Anderson et al. (1993) で推定された大規模地震のメカニズム解の節面に対して、Slip Tendency法 (Morris et al., 1996) を用いて応力場に対する断層面のすべりやすさを評価した。

結果

1968年 Inangahua地震 (Mw 7.1)

2つの節面のうち、西傾斜の面が高いST値 (>0.7) を示し、応力場に対してすべりやすい傾向であった。Inangahua地震は西傾斜の断層面で活動したことが考えられている (Anderson et al., 1994) ことから、本研究で得られた傾向は実際の地震の断層面と整合的である。

1991年 Hawks Crag地震

前震 (Mw 5.8) と本震 (Mw 6.0) を対象にST値を算出した。結果、前震は低傾斜角の面が高いST値 (>0.7) を示したが、本震ではST値に大きな差はなかった。Ghisetti et al. (2014) では、本研究地域において低傾斜角の新しい断層が高傾斜角の断層の深部に発達していると示唆されている。このことから、応力場に対してすべりやすい低角傾斜面で前震のすべりが生じ、その後、本震は高角な面で活動したことが示唆される。

Introduction

In New Zealand, the Pacific plate is currently subducting below the Australian plate in the northern part of the South Island. Stress fields of ESE-WNW oriented compression are widely distributed in the northern part of South Island (Townend et al., 2012). Many old normal faults are widely distributed on the northwestern South Island. These old faults were developed due to the extensional stress fields associated with the formation of the Tasman Sea and the Emerald Basin (Ghisetti et al., 2014). As in northeastern Japan, a tectonic inversion in which old normal faults become reverse fault has been confirmed in this region (Sibson and Ghisetti, 2018).

Our previous studies focused on the two large to moderated-sized earthquakes (1929 Buller earthquake Mw 7.3 and 1962 Westport earthquake Mw 5.6) that occurred in South Island (Tagami et al., JpGU Meeting 2022). We confirmed that the eastward-dipping planes with a dip angle of less than are likely to slip. This study focused on two other large to moderate-sized earthquakes (the 1968 Inangahua earthquake and the 1991 Hawks Crag earthquake). We investigated the relationship between the fault planes of these earthquakes and the stress field.

Data and methods

First, we estimated the stress field using the focal mechanisms obtained by temporary and permanent stations (Okada et al., 2019; Matsuno et al., 2022) and the GeoNet moment tensor solutions. Then, using the Slip Tendency analysis method (Morris et al., 1996) we evaluated the likelihood of slip for both nodal planes of the focal mechanisms estimated by Anderson et al. (1993).

Results

1968 Inangahua earthquake (Mw 7.1)

The westward-dipping plane has a high ST value (>0.7) and is more likely to slip under the current stress field. Inangahua earthquake is considered to have occurred on the westward-dipping plane (Anderson et al., 1994). Our result is consistent with the previous study.

1991 Hawks Crag earthquake

We focused on foreshock (HC1, Mw 5.8) and an aftershock (HC2, Mw 6.0). In the case of HC1, the low dip angle plane has a high ST value (>0.7). In the case of HC2, both nodal planes have a similar ST value. In Ghisetti et al. (2014), new lower dip angle fault planes are developed in the deep part of the higher dip angle fault plane. Therefore, it is suggested that slip first occurred on the lower dip angle fault plane as the foreshock, and then slip with the high dip angle fault plane occurred as the aftershock.

References

- Anderson, H., Beanland, S., Buck, G., Darby, D., Downes, G., Haines, J., Jackson, J., Robinson, R., and Webb, T., 1994., *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 37, 59-86.
- Anderson, H., Webb, T., and Jackson, J., 1993, *Geophys. J. Int*, 115, 1032-1054.
- Ghisetti, F. C., and Sibson, R. H., 2006, *Journal of Structural Geology*, 28, 1994-2010.
- Ghisetti, F.C., Barnes, P. M., and Sibson, R. H., 2014, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 57(3), 271-294.
- Okada, T., Y. Iio, S. Matsumoto, et al., 2019, *Tectonophysics* 765, 172-186.
- Matsuno, M., Tagami, A., T. Okada, et al., 2022, *Tectonophysics* 835, 229390.
- Morris, A., Ferril, D. A., and Henderson, D. B., 1996, *Geology*, 24(3), 275-278.
- Sibson, R.H., Ghisetti, F.C., 2018, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 108, 1819-1836.
- Townend, J., Sherburn, S., Arnold, B. C., and Woods, L., 2012, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 353-354, 47-59.

Distribution of azimuths of aftershock faults in the Western Tottori region deduced by the dense seismic observations

*Yoshihisa IIO¹, Manten seismic observation group², Manten seismic observation group in the Western Tottori region²

1. Kyoto University, 2. N/A

1. はじめに

断層の走向・傾斜とすべり方向は、地震に関する基本的なパラメータであるが、小さな地震の断層については、メカニズム解の2つの節面から断層面を特定することが難しいため、断層の方位の分布についてはあまり調べられてこなかった。稠密地震観測により精度の良い応力場が得られた場合には、2つの節面におけるmisfit角(メカニズム解のすべり方向と面上の最大せん断応力の方向の差)から、断層面を特定することが可能である。鳥取県西部地震の余震域におけるデータから、断層面の方位分布の特徴を調べてみた。

2. 結果

2009年から島根・鳥取地域で行われている満点地震観測データ(50点、Iio et al., 2018)、2015年から鳥取県西部地域で行われている満点地震観測データ(81点、飯尾・他, 2017)、2000年鳥取県西部合同地震観測データ(Shibutani et al., 2005)と周辺の定常観測点のデータの中で手動読み取りされているものを用いて、応力場と断層の方位分布を推定した。応力逆解析の方法はIio et al.(2017)と同じくmisfitの二乗和を最小とするもので、各解析領域の大きさは水平・深さ方向とも基本は2kmであり、地震数が50個以下になるように、断層直交方向ではグリッドサイズを調整している。各解析領域内のメカニズム解の2つの節面について、推定された応力場によるmisfitを計算し、その差が小さい方の節面を断層面とした。ただし、2つの節面において同程度のmisfitを持つものは結構多く、misfitの差が、メカニズム解の誤差(複数解の分布範囲をKagan角から推定)を超えて大きいもののみを採用した。その結果、メカニズム解が精度よく決まった地震に関して、およそ半分の断層面を決定することができた。鳥取県西部地域では、余震の断層は基本的に鉛直の横ずれ型であるので、断層の走向の方位分布に着目した。余震分布の大局的な方向はN145°E程度であるが、この方向の断層は非常に少ないことが分かった。地震すべりが起こった領域(岩田・関口, 2002)における方位分布のピークはN120°Eくらいであり、余震分布とは20°ほど異なっている。このことは、Yukutake & Iio(2018)の結果と調和的である。一方、 σ_1 の方位分布のピークはN120°Eくらいであり、こちらとは一致している。最大主圧縮応力 σ_1 の方位に近い走向を持つ断層が多いということである。個々の断層とその点で推定された σ_1 とのなす角を調べると、特に大すべり域においては、その角度が25~55度であるものが非常に少ないことも分かった。本震すべりが及んでいないと推定される余震域北部においては、 σ_1 の方位から ± 40 度程度のところにピークを持つ方位分布となっており、この違いは顕著である。2000年の鳥取県西部地震の前に、震源付近でM5クラスの地震を含む群発地震が多数発生したが、そのメカニズム解はほぼ東西のP軸を持っていた(Shibutani et al., 2002)。つまり、群発地震の断層面の走向はN135°E程度であり、余震の断層の走向の方位分布はこの方向とも少し異なっている。一方、鳥取県西部地域においては、小断層の地質調査により、約千条の断層が記載されているが(Uchida et al., 2021)、これらの小断層の方位分布は、余震の断層の方位分布と良く一致していた。これらの観測結果の意味するところはよくわかっていないが、鳥取県西部地震の大すべり域で付近では、余震の発生域と地表において、小断層の方位分布がよく似ている。このことは、地表から地震発生域まで、断層の方位分布が同じであることを示唆している。地表から地震発生域まで一続きであるとする、通常は決して手に取ることができない、地震発生域の断層を地表で観察できることを示している。

Room B | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

📅 Tue. Oct 25, 2022 10:00 AM - 11:30 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 1:00 AM - 2:30 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S21] AM-1

chairperson: Hisahiko Kubo(NIED), Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.), Tomohisa OKAZAKI(RIKEN AIP)

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

[S21-01] [Invited] Detecting slow slip events and accompanying tectonic tremor in geodetic and seismic data, using machine learning

*Bertrand ROUET-LEDUC¹ (1. DPRI, Kyoto University)

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

[S21-02] Detection of Deep Low-Frequency Tremors from Continuous Paper Records at a Station in Southwest Japan About 50 Years Ago Based on Convolutional Neural Network for Seismogram Images

Ryosuke Kaneko^{2,1}, *Hiromichi NAGAO^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Hiroshi Tsuruoka¹, Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

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

[S21-03] Application of Physics-Informed Neural Networks to spring-slider model

*Rikuto Fukushima¹, Masayuki Kano², Kazuro Hirahara^{3,4} (1. Kyoto University Faculty of Science, 2. Tohoku University Faculty of Science, 3. RIKEN, 4. Kagawa University)

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

[S21-04] Optimal Transport Distance Measure in Geophysical Inversion

*Tomohisa OKAZAKI¹, Naonori Ueda¹ (1. RIKEN AIP)

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

[S21-05] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning -Part1 Response spectrum simulation for crustal earthquake in Kinki district, Japan-

*Hidenori KAWABE¹, Tianzeng WEI¹, Kai TERAZONO¹ (1. Osaka University)

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

[S21-06] Prediction of velocity response spectrum by using a 1-D convolutional neural network

*Daiki Taya¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

[Invited] Detecting slow slip events and accompanying tectonic tremor in geodetic and seismic data, using machine learning

*Bertrand ROUET-LEDUC¹

1. DPRI, Kyoto University

Faults can accommodate stress in a variety of slip modes, from dynamic rupture to slow slip events and aseismic slip. Among these slip modes, slow slip events and often-accompanying tremor remain among the most elusive and poorly understood.

Unraveling the interactions between slip modes is at stake: while laboratory experiments point to aseismic nucleation generally preceding dynamic rupture, observations in the field are far from systematic, and more the exception than the rule.

However, the difficulty in detecting transient slow slip events, either seismically or geodetically, points to a possible observational gap that may explain the rarity of slow deformation detected prior to dynamic earthquakes.

In this presentation, the use of machine learning to improve the detection of slow slip events and accompanying tectonic tremor will be explored, as a tool to fill this observational gap, both in seismic data and in geodetic data.

Detection of Deep Low-Frequency Tremors from Continuous Paper Records at a Station in Southwest Japan About 50 Years Ago Based on Convolutional Neural Network for Seismogram Images

Ryosuke Kaneko^{2,1}, *Hiromichi NAGAO^{1,2}, Shin-ichi Ito^{1,2}, Hiroshi Tsuruoka¹, Kazushige Obara¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

The establishment of the High Sensitivity Seismograph Network (Hi-net) in Japan has led to the discovery of deep low-frequency tremors. Since such tremors are considered to be related to large earthquakes adjacent to tremors on the same subducting plate interface, it is important in seismology to investigate tremors before establishing modern seismograph networks that record seismic data digitally. We propose a deep learning method to detect evidence of tremors from seismogram images recorded on paper more than 50 years ago. In our previous study, we constructed a convolutional neural network (CNN) based on the Residual Network (ResNet) structure and verified its performance through learning with synthetic images generated based on past seismograms. In this study, we trained the CNN with seismogram images converted from real seismic data recorded by Hi-net. The CNN trained by fine-tuning achieved an accuracy of 98.64% for determining whether an input image contains tremors. The Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) heatmaps to visualize model predictions indicate that the CNN successfully detects tremors without affections of a variety of noises, such as teleseisms. The trained CNN was applied to the past seismograms recorded at the Kumano observatory, Japan, operated by Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. The CNN shows the potential to detect tremors from past seismogram images for broader applications, such as publishing a new tremor catalog.

Application of Physics-Informed Neural Networks to spring-slider model

*Rikuto Fukushima¹, Masayuki Kano², Kazuro Hirahara^{3,4}

1. Kyoto University Faculty of Science, 2. Tohoku University Faculty of Science, 3. RIKEN, 4. Kagawa University

微分方程式を解く方法として、近年新たにPhysics-Informed Neural Networks (PINNs)が提唱された(Raissi et al., 2019)。これは物理法則に従う微分方程式と初期条件や境界条件を損失関数に取り込むことにより、その両方を満たすようなニューラルネットワーク(NN)を構成し、対象とする方程式の解を求める方法である。従って、PINNsにより得られた解は物理法則を満たすものであり、物理的に解釈が可能という点で従来のNNとは大きく異なっている。このように、PINNsによる微分方程式の解法は従来の求解法と大きく異なっているが、従来に比べて少ない計算量で大規模計算が可能、経験則を含む物理的に不完全なモデルにも対応でき柔軟なモデリングが可能、逆問題の解法が容易などの利点がある。地震学の分野においても、波動方程式を用いた地震波伝播の計算(Karimpouli et al., 2020)やdislocationモデルを用いた静的変位の計算(Okazaki et al., 2022)など、PINNsを用いた研究が行われ始めている。

本研究では、断層すべりの時空間発展の数値計算にPINNsを用いることを念頭に、PINNsをばねブロックモデルに適用しスロースリップ(SSE)の再現を試みた。初めに、時間ステップ可変のRunge-Kutta法を用いて準動的運動方程式と摩擦構成則を解き、SSEが再現可能な摩擦パラメータを試行錯誤的に探索した。その結果、再来間隔が2.5年程度、最大すべり速度がプレート速度の10倍程度、継続時間が150日程度のSSEの繰り返し再現可能な摩擦パラメータを求めた。以下で行うPINNsを用いた計算ではこの摩擦パラメータは固定する。また、再現されたSSEのうち1回のSSEのサイクルに注目し、すべり速度が最小になった時刻を初期時刻、その時のすべり速度と状態変数を真の初期値として定義し、その際計算される1回のSSEの時間発展をPINNsで再現することを目的とする。

このような設定の下、損失関数を真の初期値からのずれを表す初期条件の二乗平均誤差と、微分方程式に従った挙動からのずれの二乗平均誤差の重み付き和で定義し、損失関数が最小になるようにNNの学習を行う。初期条件の誤差と微分方程式の誤差の重みは試行錯誤的に決定した。この際、NNの入力はある1つの時刻であり、出力としてその時刻に対応したすべり速度、状態変数の2変数が返される。PINNsでは任意に選んだ多数の評価時刻を順に用いてNNの学習を行い微分方程式の解を求める。この学習に用いる評価時刻の選択には任意性があるため、ここでは、1) 事前の時間ステップ可変のRunge-Kutta法による計算から求まる不等間隔($\Delta t = 10 \sim 867$ hour)の評価時刻と、2) 時間間隔が一定($\Delta t = 50$ hour)の評価時刻、の2種類を用いて学習を行い、計算結果を比較した。なお時間をNNに入力する際は規格化を行っている。また本研究では9層の全結合NNを採用し、活性化関数としてtanh関数を用いた。各層のノード数は入力層が1、中間層がすべて20、出力層が2である。

その結果、等間隔・不等間隔の両方の評価時刻において、それぞれ適切な重みパラメータ下では安定して学習が行われ、正確にSSEの時間発展を再現することができた。また、等間隔においては用いる間隔の大きさを $\Delta t = 50$ hourから長めに变化させてそれぞれ計算を行ったが、最初に仮定した時間間隔の8倍($\Delta t = 400$ hour)を用いても正しい解が求められた。加えて、評価時刻以外の時刻、すなわちNNの学習に用いていない時刻を入力にした場合においても、正しくSSEのすべり速度を再現することに成功した。

Optimal Transport Distance Measure in Geophysical Inversion

*Tomohisa OKAZAKI¹, Naonori Ueda¹

1. RIKEN AIP

地震学の逆解析において、波形間の距離指標の定義が推定結果や計算効率に重要である。近年、確率分布間の距離であるWasserstein距離が従来のL2距離の欠点を解消しうる指標として注目されている。Sambridge ら (2022)は波形のグラフを2次元確率分布に変換した後、時間軸・振幅軸に周辺化した1次元確率分布のWasserstein距離を計算することで、波形を自然に確率分布に変換するとともに高い計算効率を実現した。しかし、正負の値を取る地震波形を確率分布に変換する方法に依然課題がある。

本研究ではSambridgeらの手法では、1次元確率分布への周辺化により距離指標に顕著な縮退が生じ、例えば、逆位相の正弦波の間の距離が0となるという問題を指摘する。その解決法として、計算効率を維持しつつ距離の頑健性を高めるため、sliced Wasserstein距離(Bonneel et al. 2015)の適用を提案する。Sliced Wasserstein距離は一般次元の確率分布に対し、ある方向に射影して得られる1次元確率分布のWasserstein距離を全方向にわたって積分平均することにより定義され、実用上は有限個の方向に対する平均で近似される。本研究では、Sambridge ら (2022)による時間軸・振幅軸に加え、それらと45度をなす2方向に射影した計4方向の1次元 Wasserstein距離の平均を用いることで、正弦波に対し距離の頑健性が向上することを示す。

Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning

-Part1 Response spectrum simulation for crustal earthquake in Kinki district, Japan-

*Hidenori KAWABE¹, Tianzeng WEI¹, Kai TERAZONO¹

1. Osaka University

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、強震観測網の整備が進み、強震記録の数が大幅に増えている。膨大な強震観測記録を用い精度の高い地震動予測を行う方法として、近年、機械学習が注目されている。大規模な地震の際に構造物の被害を軽減するためには、構造物の建設地点において精度の高い地震動予測が必要である。そこで、本研究では耐震設計を行う際に一つの指標として用いる擬似速度応答スペクトルを対象として、機械学習を用いた予測モデルの構築を目指す。その1（本稿）では、近畿地方の地殻内地震について、対象地域の全ての観測点を対象として予測モデルを構築を目指す。その2では、九州地方を対象として2016年熊本地震の記録を用い、観測地点ごとの最適な予測モデルについて検討する。その3では、東日本を対象として、地殻内地震の予測モデルについて検討する。

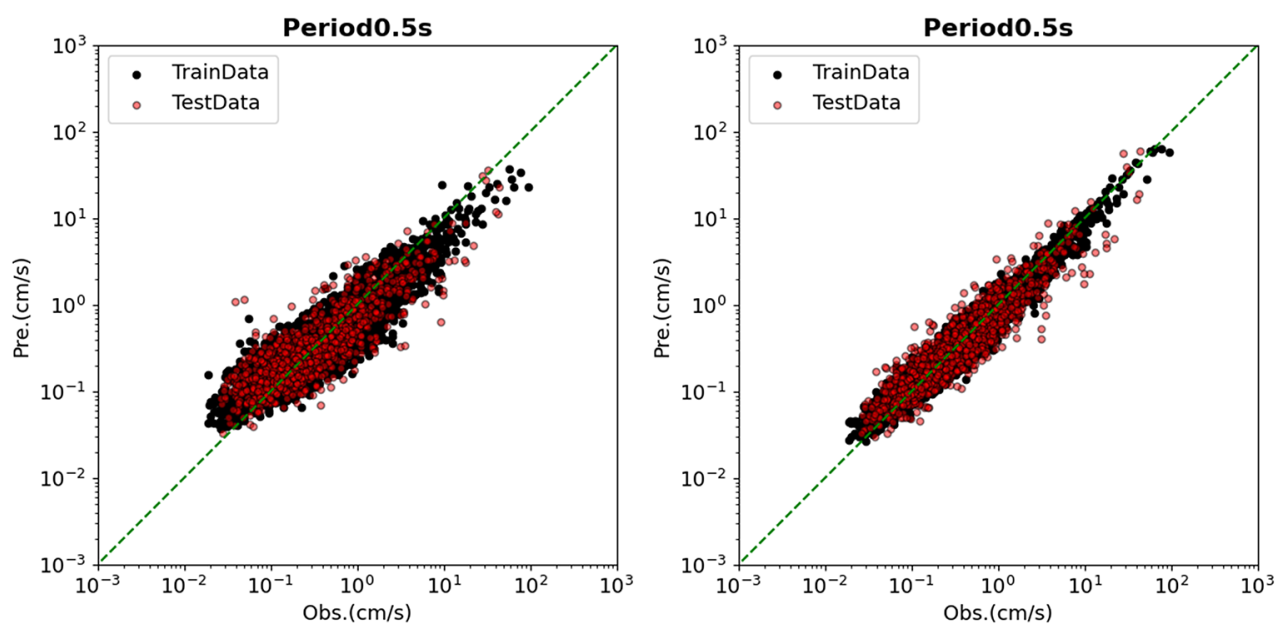
2. 検討対象地震及び観測記録

検討対象の地震は、1997年1月から2021年11月までに近畿地方で発生したMj4以上の地殻内地震とする。具体的には、東経134度から137度、北緯33度から36度、深さ20km以浅で発生した地震を対象とする。観測記録は、防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netの地表の記録を用いる。なお、P波の立ち上がり記録されていない波形及びSN比が悪い波形は除外する。結果として、98の地震に対して、計5580個の観測記録を選定した。

3. 解析の概要及び解析結果

予測の対象は水平2成分の減衰5%の擬似速度応答スペクトルとする。本検討では、擬似速度応答スペクトルの予測対象周期は0.25秒から10秒までとし、周期間隔は周期0.25秒とする。ここでは、機械学習のアルゴリズムのうち、深層学習とXGBoostを用いて目的変数とする周期毎の擬似速度応答スペクトルの値の最適な予測モデルの作成を目指す。両手法の周期毎の予測精度を比較し、精度がより高い手法を用いて近畿地方の擬似速度応答スペクトルの予測モデルを構築する。震源の位置及びマグニチュード、震源のメカニズム解、観測点の位置、観測点の地下構造などの情報を組み合わせて複数の入力変数の組み合わせを設定する。一例として、深層学習とXGBoostを用いて計算した観測点ごとの周期0.5秒の擬似速度応答スペクトルと観測記録から計算した擬似速度応答スペクトルの比較を図1に示す。なお、この図の計算では、入力変数（特徴量）を震央距離、方位角、Mj、震源深さ、AVS30、地震基盤深さとしたときの結果である。この図から、XGBoostを用いたほうが、観測記録の再現精度がよいことがわかる。本発表ではこれらの検討結果と最適な予測モデルについて紹介する。

謝辞：本研究では、気象庁および防災科学技術研究所のF-netの震源情報、K-NETおよびKiK-netの地震記録、ならびにJ-SHISの地下構造モデルを使用させて頂きました。ここに記して感謝いたします。



(a) 深層学習

(b) XGBoost

図 1 周期0.5秒の計算結果の比較

Prediction of velocity response spectrum by using a 1-D convolutional neural network

*Daiki Taya¹, Takashi Furumura¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. はじめに

大地震が生じた際に長周期地震動の早期予測を行うことは、高層ビルが密集する大都市圏の防災において重要な役割を持つ。2004年新潟県中越地震では関東平野において周期数秒の長周期地震動が強く生成し、都心の超高層ビルのエレベーターケーブルが一部損傷するなど被害が生じた。

機械学習は画像認識や自然言語処理の分野で広く活用されており、近年、地震学の分野でも機械学習の活用が進み、地震波形データからマグニチュード推定 (Ristea et al., 2021) や広域の最大加速度 (PGA) の予測 (Jozinović et al., 2020 ; Kubo et al., 2020) などへの活用が進められている。本研究ではこれらの既往研究を発展させ、震源域近傍での強震観測データから遠地の平野の評価地点の速度応答スペクトルを予測する機械学習モデルを検討した。

2. データ・手法

本研究では、新潟県周辺地域で発生した地震を対象として、Hi-net高山観測点 (TAYH : 群馬県高山村) での速度波形データから、Hi-net富岡観測点 (YFTH : 横浜市金沢区) の速度応答スペクトルの予測を行った。2観測点間は約150 km離れており、長周期地震動を形成する表面波の到達には約55 秒の時間差がある。なお、事前調査によりYFTHとTAYHとの観測波形とのコヒーレンシーが高い (0.9) ことを確認し、TAYHを予測の入力データ地点として選定した。

学習データには、東経136.4度~139.1度、北緯36.9~38.7度の範囲で2004年4月~2007年10月に発生したMw4.5以上の地震33個について、5分間のHi-net速度波形データを用いた。これらの震源およびMw分布を図1に示す。前処理として、Hi-net波形データには地震計特性補正フィルタ (Maeda et al., 2011) をかけて広帯域化し、0.05~2 Hzのバンドパスフィルターをかけた後に20 Hzにリサンプリングした。また、予測地点における周期0.05~100秒の範囲の速度応答スペクトル (減衰定数5%) を求め、入力波形データとペアとなる教師データセットを用意した。なお、入力波形データは最大速度 (PGV) 値で規格化を行った後に、 $\log(\text{PGV})$ を乗じて振幅の大小の情報を一部残した。また、速度応答スペクトル値も対数化し、振幅を1/10にすることで、予測データの値が0~1の範囲に収まるようにした。

予測モデルは、先行研究のJozinović et al. (2020) によるCNNモデルの構成を参考にしてPythonのKerasライブラリを用いて作成した。本モデルでは1次元データ長6000ポイントの地震波形を3段の畳み込み層に入力し、畳み込み結果を平滑化したのち全結合層を通してデータ長200ポイントの速度応答スペクトルを出力する。活性化関数にはRelu関数を用い、最後の全結合層は学習の収束のために ± 1 で頭打ちとなるtanh関数を用いた。損失関数は観測と予測応答スペクトルの二乗誤差を評価するものを用い、バッチサイズ32で70エポック数の学習を行い、損失率の収束を確認した。なお、ここでは1成分 (EW成分) の予測を行うものとするが、平行して他成分の予測も同様に行うことができる。

3. 結果

学習済みモデルを用いて、新潟県周辺で2011年以降に発生したMw4.5以上の11個の地震の予測性能を確認した。性能評価は、速度応答スペクトルの予測/観測比を周期1~15秒の範囲で平均した値を用いて行った。図2(a)に、2011年3月12日に新潟/長野県境で発生した長野県北部地震 (栄村地震) の予測結果 (赤) と観測値 (黒) を比較する。予測性能の評価値は0.96となり、速度応答スペクトルの良い予測が確認された。図2(b)に、予測を行った11個の地震の性能評価値の範囲の四分位数を、箱ひげ図を用いて示す。予測の四分位は0.6~1.4の範囲に入っており、やや幅はあるものの実用上十分な予測精度を持つと言える。

次に、地震観測期間とともに学習データを増やすことで予測精度の変化を確認した。2004~2007年の観測データを用いた学習済みモデルに対して、さらに2007~2010年に発生した24個の地震を学習データに追加した。追加学習は、先の学習済みモデルに対して、新たな学習データで再学習する転移学習により行った。図

2(b)右に転移学習モデルによる予測性能の評価値を示す。先の予測モデルによる結果と比較して、予測性能の四分位範囲が0.7～1.2に狭まっており、転移学習による予測性能の向上が確認された。

4. まとめと今後の展望

本研究で作成した機械学習モデルにより、震源近傍の観測点での波形データから遠地の平野の長周期地震動の速度応答スペクトルの予測を行った。地震観測データの蓄積に伴い、日常的に転移学習を繰り返し進めることで、予測性能の向上が期待できる。一方で、本予測モデルでは2019年山形県沖地震（Mw6.8）など、予測性能評価値が低い（0.59）ケースも確認され、これは転移学習後（0.55）も大きく改善されなかった。これは、山形県付近の地震活動が低いことが原因と考えられる。転移学習においても学習データのMw分布の偏りに注意が必要であり、Mwの小さな学習データを増やしすぎるとかえって大地震の予測性能が低下する可能性がある。

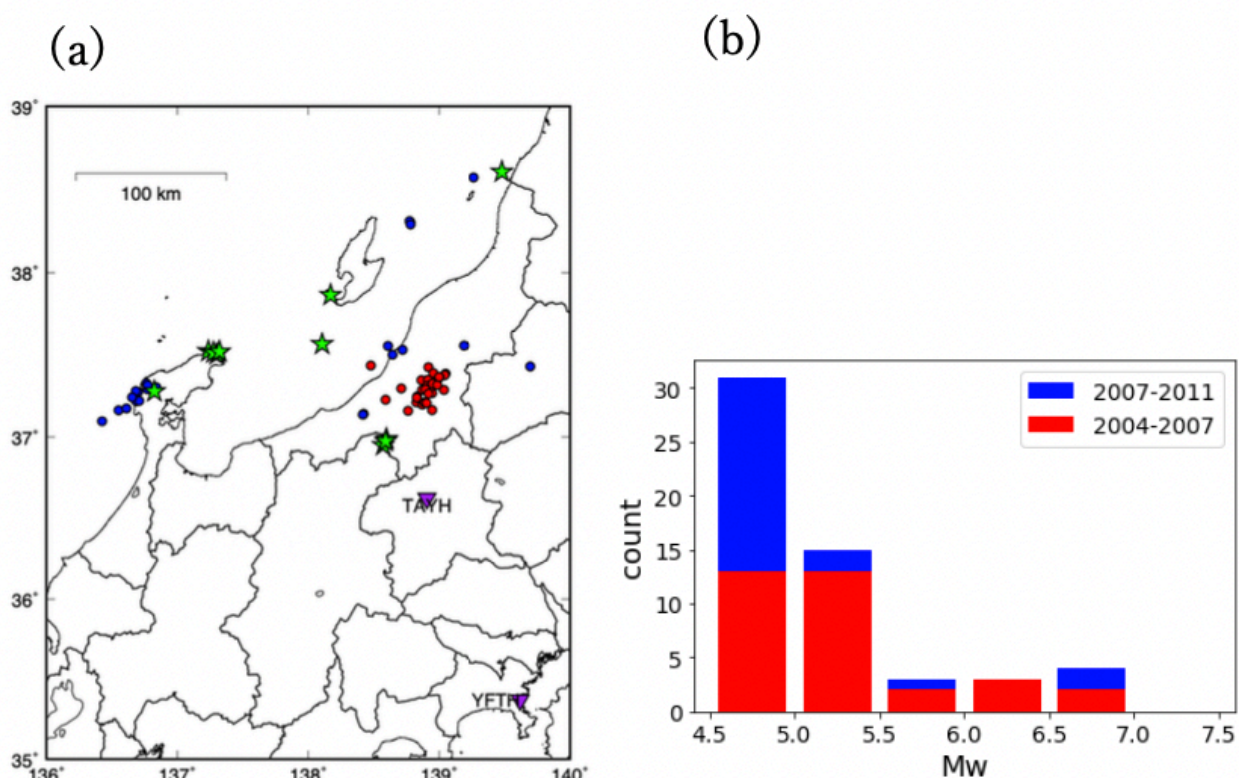


図1 (a) 学習に用いた地震の震源分布。赤○は2004～2007年の33個の地震、青○は転移学習に用いた2007～2011年の24個の地震。黄☆はテストに用いた11個の地震。(b)それぞれの地震の規模分布。

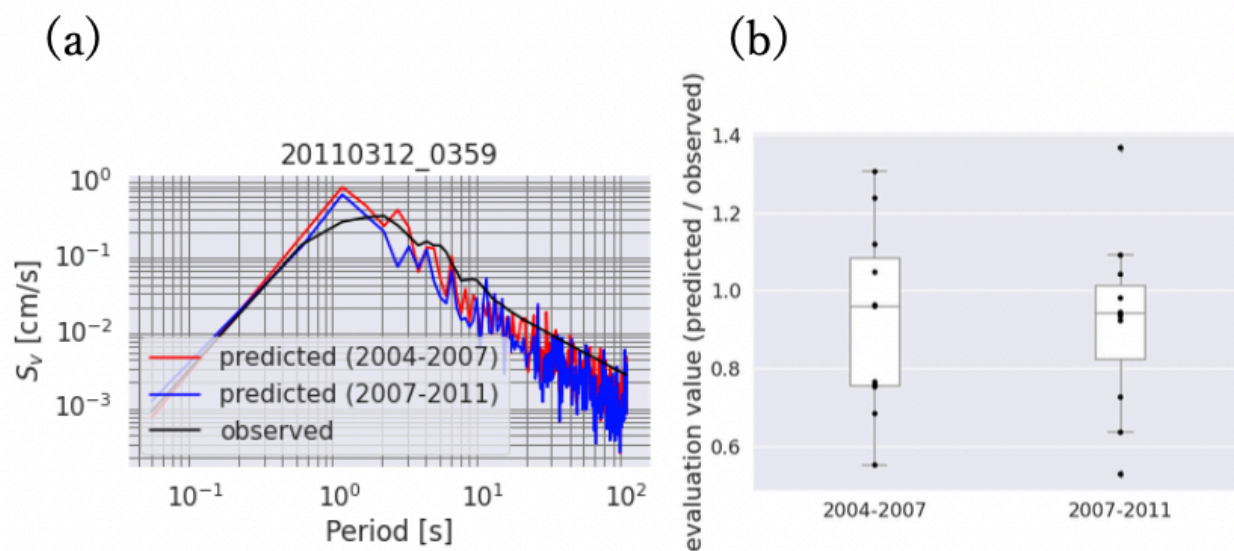


図2 (a) 横浜地点 (YFTH) における速度応答スペクトルの予測結果 (赤) と観測 (黒) の比較 (2011年3月12日長野県栄村の地震の例)。青線は、2007年～2011年の転移学習データを用いた予測結果。(b)11個の地震の速度応答スペクトルの予測結果の分布 (左:2004～2007年の地震による学習、右:2007～2011年の地震による転移学習)。

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:45 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:45 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S23] AM-2

chairperson:Aitaro Kato(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S23-01] Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake using automatic hypocenter determination

*Koji TAMARIBUCHI¹, Shota Kudo² (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake using automatic hypocenter determination

*Koji TAMARIBUCHI¹, Shota Kudo²

1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency

地震の発生時刻、場所、規模を記録した地震カタログは、地震研究や地震防災において、極めて重要なビッグデータである。しかし、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震以降は、膨大な地震が発生して処理M下限(余震域において海域M3、陸域M2)を設けたため、それ未満の微小地震は未だ十分にカタログ化されていない。そのような未カタログイベントを検出するため、溜淵・中川(2020)は同時多発地震に対応した自動震源決定手法(PF法)を2011年3月の地震波形に適用し、従来の一元化地震カタログの2倍以上に相当する自動震源カタログを作成した。さらに自動震源には数~10%程度の誤検出が含まれるため、機械学習の一種である教師ありアンサンブル学習を得られた自動震源の検測値に適用して誤検出の除去を試み、96.9%の正答率で地震とノイズを分類できることを示した(溜淵, 2021, JpGU)。本発表では、上記に加えて、深層学習の一種であるConvolutional neural network(CNN)を地震波検測のP, S, N(ノイズ)判別に活用することで、更なる誤検出の抑制に効果があるか検証したので報告する。

データ: 2011年3月から2012年2月までの1年間の地震波形(主に高感度速度波形)、約1400地点を解析に用いる。ここでは主に2011年3月の1か月の結果に着目する。なお、2011年3月11日から数日間、観測網の広域欠測により一時的に使用観測点数が3月11日17時台をボトムに1129地点まで低下した。

手法: 自動震源決定は、(1) 相読み取り、(2) 相組合せ探索(phase association)、(3) 震源計算、(4) 品質管理の主に4つのプロセスからなる。(1) 相読み取りはAR-AIC等の従来の検測手法を用いて検測した後、検測時刻周辺4秒間の3成分地震波形をCNNに入力して、P/S/N確率を得る。P/S/N確率のいずれが閾値以上の場合、それぞれ±2秒間に検測されたそれ以外の相を削除した。いくつか変更しながら震源決定数を検証し、閾値を0.9とした。具体的には、例えばP確率0.9以上の場合、±2秒以内のS相を削除した。CNNは工藤・他(2020, 地震学会)が学習したモデルを用いた。(2)(3) 重点サンプリングを用いて最適な相の組合せを探索(PF法)し、震源決定は気象庁一元化震源と同じプログラムを用いた。(4) 品質管理では、震源検測値の各種特徴量(震源誤差、P/S検測値等)を入力とし、LightGBMにより品質ラベル分類を行った。教師データは溜淵・中川(2020)で作成した自動地震カタログ(3月1日~16日の約2万イベント)を目視で波形を確認し、4つのラベルに分類した(A: 震源近傍で誤検測がない, B: 誤検測数が1~2つ, C: 誤検測数が3つ以上, D: ノイズ)。Tamaribuchi et al. (2021)ではモデルとしてAdaBoostを採用したが、その後さまざまなモデルで検討した結果、最も正答率が高かったLightGBMをここでは採用した。検測値だけでは、ラベルA, B, Cの判別ができず全体の正答率は81.9%だが、ラベルA, Dに限って正答率を算出すると97.8%であった。

結果: CNNデノイザの効果を検証するため、地震多発時(3月11日12-24時)と平常時(3月1日0-12時)のそれぞれ12時間の自動震源を、震源時5秒以内かつ震央距離50 kmの条件で一元化震源と比較した。その結果、相読み取りの総数は地震多発時も平常時もともに約3割削減されたにも関わらず、一元化震源と一致する自動震源の数はほぼ変わらなかった。これはノイズの誤検測を適切に除去できていることを示している。

2011年3月の期間に得られた自動震源は、112,004個であった。CNNデノイザ前後の震源分布を比較すると、島しょ部などで従来見られた誤検出が抑制されている。そのうち、品質管理処理による分類結果はA: 100,265, B: 5,882, C: 5,055, D: 802であった。CNNデノイザ導入前の自動震源(溜淵・中川, 2020)を同様に分類したところA: 104,253, B: 7,545, C: 6,848, D: 3,707であったので、導入前後の個数比はA: -4%, B: -22%, C: -26%, D: -78%となり、誤検測がないラベルAもわずかに減少したものの、誤検測を含むラベルB, C, Dを大きく減らすことができた。得られた自動震源のうちラベルA, Bの震源のうち、一元化震源カタログと一致しない(すなわちカタログ未掲載)の地震は67,438個であった。一元化震源は本期間で55,112個(低周波フラグ除く)だったので、両者をマージすることで従来の倍以上の地震数が得られた。自動震源(ラベルA, B)を一元化震源にマージしたカタログの規模別頻度分布を地域別にみると、多くの領域でMc(completeness magnitude)が低下し、秋田県などの東北地方の内陸では最大約8倍の震源数となった。

DD法でこれらの地域の相対震源決定を行うと、微細な断層構造を見ることができる。今後、さらに長期間の微小地震を含めたカタログを作成、解析することにより、巨大地震後の微小地震活動の特徴を調査する予定である。

謝辞

防災科学技術研究所，大学，関係機関，および気象庁の地震波形を使用しました。解析には東京大学地震研究所共同利用 (2022-F3-12) 大規模地震連続波形データ解析システムを利用しました。一元化震源を使用しました。

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

📅 Tue. Oct 25, 2022 1:45 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 4:45 AM - 5:45 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-1

chairperson: Hiromichi Nagao (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:45 PM - 2:05 PM JST | 4:45 AM - 5:05 AM UTC

[S23-03] [Invited] Short-term Forecast of Repeating Earthquakes Considering Spatiotemporal Aseismic Slip Rate along Plate Boundary

*Shunichi NOMURA¹, Naoki UCHIDA², Yosihiko OGATA³ (1. Waseda University, 2. Tohoku University, 3. The Institute of Statistical Mathematics)

2:05 PM - 2:25 PM JST | 5:05 AM - 5:25 AM UTC

[S23-04] [Invited] Uncertainty quantification of seismic tomography based on physics-informed neural networks and particle-based variational inference in function space

*Ryoichiro AGATA¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

2:25 PM - 2:45 PM JST | 5:25 AM - 5:45 AM UTC

[S23-05] [Invited] Data-driven reduced order model and sparse sensor optimization with its application to seismic wave field

*Taku Nonomura¹ (1. Graduate School of Engineering, Tohoku University)

[Invited]Short-term Forecast of Repeating Earthquakes Considering Spatiotemporal Aseismic Slip Rate along Plate Boundary

*Shunichi NOMURA¹, Naoki UCHIDA², Yoshihiko OGATA³

1. Waseda University, 2. Tohoku University, 3. The Institute of Statistical Mathematics

プレート境界などで見られる小繰り返し地震は大規模な繰り返し地震と比べてはるかに多く観測されており、なおかつ、はるかに短い周期で繰り返されている。それゆえ、小繰り返し地震は短期の予測でも高い発生確率が得られ、短期間で予測と実績とを比較して予測手法を検証することが可能である。予測手法の有効性が小繰り返し地震について実証されれば、大地震の予測への活用も期待できる。

しかし一方で、小繰り返し地震の予測は、周辺の大地震による余効すべりや、スロースリップと呼ばれる非地震性すべりの加速などの影響を受けて繰り返し周期が変化するという難点を抱えている。一定の繰り返し周期を仮定した定常なモデルによる予測は、そのような状況下では容易に破綻してしまう。そこで本研究では、非定常な更新過程モデルを用いた小繰り返し地震の予測手法を提案する。

提案モデルでは、プレート境界沿いに分布する小繰り返し地震群の活動変化から、その周辺域におけるプレート間非地震性すべり速度の時空間変化を推定する。すべり速度の時空間変化はテンソル積スプライン関数により表現した上で、平滑化罰則付き尤度の最大化により推定を行う。さらに、観測期間以降のすべり速度の時空間変化を線形補外することにより、短期的な将来期間における小繰り返し地震の発生確率を評価することができる。提案モデルを東北日本太平洋沖の小繰り返し地震カタログに適用し、小繰り返し地震の将来発生確率評価を試みる。

[Invited]Uncertainty quantification of seismic tomography based on physics-informed neural networks and particle-based variational inference in function space

*Ryoichiro AGATA¹

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

人工・自然の地震波の走時から地球内部の地震波速度構造を知るための地震波トモグラフィにおいては、速度構造自体の推定は当然ながら、推定値の不確かさを定量化することも、解析結果の信頼性を担保する上で重要である。ベイズ推定を地震波トモグラフィに導入することで、走時の観測データ、走時データに含まれるノイズ、対象地域の地震波速度に関する事前知識などにに基づき、推定した速度構造の事後確率分布を求めた研究例は多く存在する（Bodin et al., GJI, 2009など）。他方、微分方程式から拘束を与えた深層ニューラルネットワーク（DNN）により微分方程式や逆問題を解くPhysics-informed neural networks (PINN)(Raissi et al., JCP, 2019)が注目を集めている。PINNは、方程式に含まれる関数をDNNで直接近似し、関数が方程式を満たすようにDNNを自動微分を用いて最適化して求解を行う。地震波トモグラフィに関しても適用が進められ、拡張性の高さ、メッシュフリーであること、推定の際に地震波速度の初期モデルを必要としないこと、などの利点が示されている(Waheed et al., arXiv, 2021)。これより、PINNに基づいた地震波トモグラフィを、ベイズ統計学に基づく不確かさ定量化に拡張することは有意義であると考えられる。

本研究では、PINNに基づいた地震波トモグラフィにベイズ推定を導入することを試みる。これは、DNNを構成する重みパラメータをベイズ推定するベイズニューラルネットワーク(BNN)の問題に分類される。対象とする問題は、地震波トモグラフィに対するPINNのベイズ定式化と、適切なBNNの推定、の二つに分解できる。後者について、大規模問題への拡張を見据え、粒子ベース変分推論（例えばStein variational gradient descent, Liu et al., NIPS, 2016)のPINNへの導入(Sun et al., TAML, 2020)を考える。粒子ベース変分推論は、多数の粒子で近似的に表現した確率分布と真の事後確率分布との差を表す汎関数を、粒子を逐次アップデートしながら最小化し、近似的な事後確率分布を得る。BNNによく用いられるハミルトニアンモンテカルロ法などのサンプリング手法に比べ、アルゴリズムの並列性が高い点、またより少ない粒子（サンプル）数で効率よく事後確率分布を近似できる点で、大規模問題への拡張性が高いと考えられる。ただ、DNNがある程度複雑で、重みパラメータの事後確率分布の多峰性が強くなりやすい場合、粒子ベース変分推論によるBNNでは不確かさを過小評価しやすくなるとの報告がある(Wang et al., ICLR, 2019など)。そこで本研究では、重みの空間ではなく、DNNで近似する地震波速度などの関数の空間において、ベイズ・粒子ベース変分推論の定式化を行う。最適化の毎ステップにおいて、関数の値に対して計算される更新幅を重み空間に逐次変換することで、各DNN粒子を最適化していく(Wang et al., ICLR, 2019)。関数空間においては、事後確率分布の形状がより単純だと考えられることから、粒子ベース変分推論による事後分布推定がより容易に実施できると期待される。

既往研究（Zhang et al., JGR, 2020）を参考に、P波速度が2km/sの領域の中に1km/sの円形低速度領域が一つ存在する速度構造を、低速度領域を囲む発振点・観測点を用いて推定する数値実験を設定した。速度構造の事前分布には一様分布を用いた。提案手法である、関数空間における粒子ベース変分推論に基づくPINNを用い、P波到達時刻を用いた速度構造とその不確かさの推定を行った。重み空間についてベイズ推定する通常の粒子ベース変分推論に基づく手法を用いて同じ問題を解き、結果を比較した。双方について、速度構造の推定値として妥当なものが得られた。また不確かさ推定においては、波線の通る部分・通らない部分でそれぞれ不確かさが大きく・小さく推定された。一方、通常の粒子ベース変分推論に基づく手法では、波線の通る・通らないに関わらず、不確かさが過小評価されていることが示唆される結果を得た。提案手法において導入された関数空間に注目したベイズ推定が、PINNを用いた地震波トモグラフィの不確かさ定量化に対してより有効であることが示唆される。一方、提案手法であっても、従来の数値シミュレーションベースの推定結果（Zhang et al., JGR, 2020）と比べ、全体として不確かさが小さめに推定されたことは特徴的であった。これは、対象領域

のうち、走時データからの拘束が弱い（つまりデータの説明度合いに影響しない）領域について、DNNがより少ないパラメータで速度構造を表現するように学習した結果、不確かさが小さく推定されたものと考えられる。これはPINNによる速度構造や走時の関数の学習がブラックボックスなパラメータ化を伴っていることに起因しており、地震波トモグラフィ等の推定にPINNを用いる際にユーザが注意すべき点も併せて示唆されたといえる。

[Invited]Data-driven reduced order model and sparse sensor optimization with its application to seismic wave field

*Taku Nonomura¹

1. Graduate School of Engineering, Tohoku University

近年、流体力学などの大規模自由度場に対してデータ駆動型低次元モデルやスパースセンサ最適化技術を利用した解析が提案されつつある。講演者のグループではこれらの技術を地震波動場再構成に活用する研究を行っている。本発表では、これらの技術の概要を説明したうえで、流体力学におけるアプリケーションおよび地震波動場へ適用例を示したい。

本予稿では、データ駆動型低次元モデル、スパースセンサ最適化技術、地震波動場への適用に関して概説する。

【データ駆動型低次元モデル】流体力学場や地震波動場は非常に多くの自由度を持つが一方で少数のモードでこれらが表現できることが知られている。このようなデータ駆動型の解析で得られる空間モードを用いて全体場を少数の潜在変数で表現することで、低次元モデルを構築できる。ここでは固有直交分解（主成分分析）を利用して、空間モードを抽出し、モード係数を潜在変数として低次元モデルを構築する方法を説明する。

【スパースセンサ最適化技術】上述の低次元モデルで場が表現されるとすると、場の再構成にはモード係数（潜在変数）を同定すれば良いこととなる。このモード係数を求めるには、場のすべてを観測する必要はなく、モード係数を求めるために感度の高い疎な（スパースな）センサ点のみの観測で良い。この際に感度の高いセンサ点を求めるのがスパースセンサ最適化技術となる。具体的には、本問題はモード係数（潜在変数）の大きさを求める線形逆問題として定式化ができるため、実験計画法に基づき線形逆問題に対して、スパースセンサ点を最適化することができる。

【地震波動場への適用】上述の技術を利用して、プロセス駆動型およびデータ駆動型地震波動場再構成の研究を行っている。プロセス駆動型地震波動場再構成では、地震動シミュレーションの入力パラメタの変化に対して感度の高い観測点を選択し、未知のパラメタで実施したシミュレーションに対してこれらの観測値を利用することで入力パラメタがより精度よく求まることを示す。また、データ駆動型地震波動場再構成では、モード分解により少ない観測点の情報から精度よく地震波動場再構成ができること、さらにセンサ最適化技術と組み合わせることでより効率が上がることを示す。

Room B | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

📅 Tue. Oct 25, 2022 3:00 PM - 3:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:00 AM - 6:45 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S23] PM-2

chairperson: Keisuke Yano (The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S23-06] Development of Observation Site Selection Method based on Sensitivity to Physical Model Parameters toward Process-driven Seismic Wavefield Reconstruction

*Kumi Nakai^{1,2}, Takayuki Nagata², Keigo Yamada², Yuji Saito², Taku Nonomura², Masayuki Kano², Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-07] Application of compressed sensing using data-driven reduced-order model to seismic wavefield reconstruction

*Takayuki Nagata¹, Kumi Nakai^{2,1}, Keigo Yamada¹, Yuji Saito¹, Taku Nonomura¹, Masayuki Kano¹, Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³ (1. Tohoku University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S23-08] Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources

*Jiancang ZHUANG¹, Zhengya Si² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Beijing Earthquake Agency)

Development of Observation Site Selection Method based on Sensitivity to Physical Model Parameters toward Process-driven Seismic Wavefield Reconstruction

*Kumi Nakai^{1,2}, Takayuki Nagata², Keigo Yamada², Yuji Saito², Taku Nonomura², Masayuki Kano², Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震学におけるデータ駆動型モデリングやデータ同化を効率よく実施するため、観測点選択技術の開発は重要課題の一つである。これは、新たに観測点を設置する場合の最適位置や、大地震発生時の震度分布を十分な精度で推定するために必要な観測点セットを明らかにできる。そこで本研究では、流体力学分野で近年発展してきたスパースセンサ位置最適化技術を地震波動場に応用することで、プロセス駆動型アプローチによる高精度な地震波動場再構成のための観測点選択手法を提案する。

本提案手法は、地震動シミュレーションの入力である物理モデルパラメタの高精度推定に適した観測点を選択する。具体的には、各観測点候補の推定対象パラメタに対する感度を表す感度行列を作成し、感度行列の特徴量を最適実験計画法におけるD最適指標に基づき評価する貪欲法により、パラメタ感度の高い観測点を選択する。そして、選択された観測点における観測データに基づき物理モデルパラメタを推定、推定値を用いた地震動シミュレーションを実施し、地震波動場を再構成する。

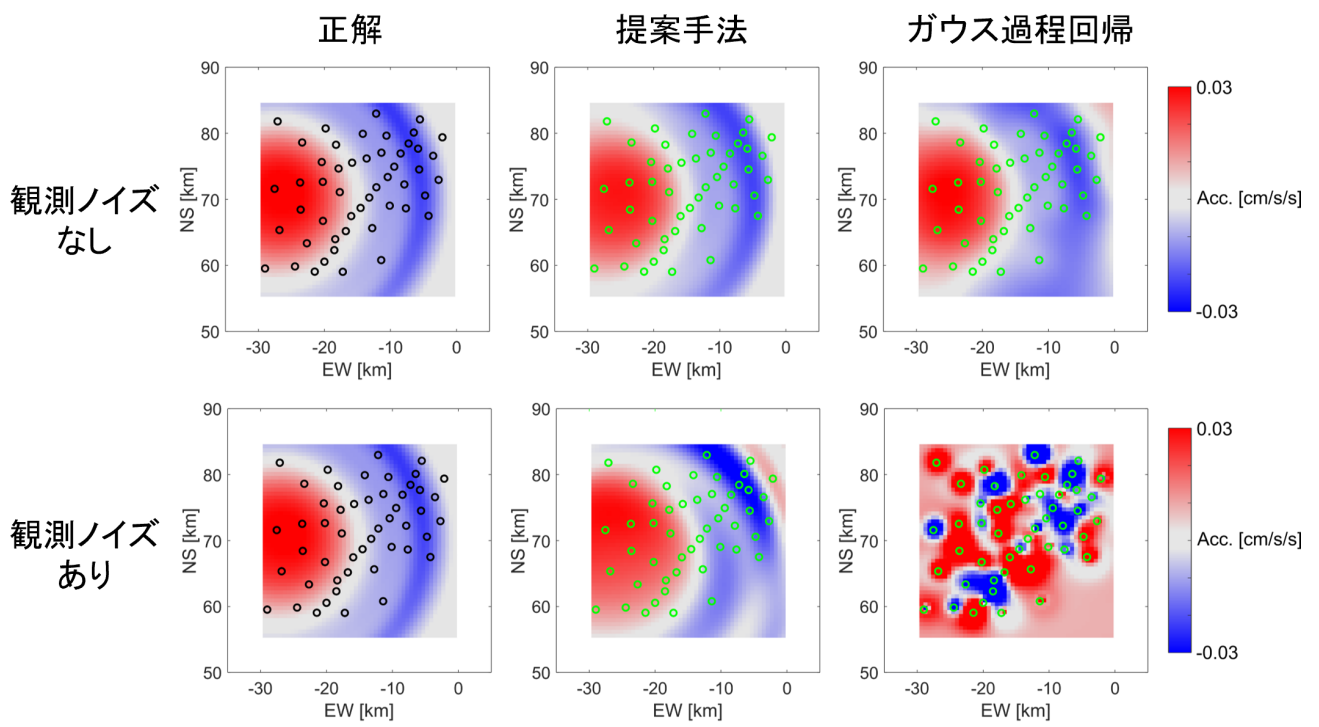
本研究では、地震動の理論波形を計算する低コストシミュレーションを用い、提案手法による観測点選択および地震波動場再構成の数値実験を、東京23区内のMeSO-net観測点50点を模擬した観測点群で行った。提案手法によって選択された観測点を用いた地震波動場再構成の精度を検証し、提案手法の有効性を示した。さらに、観測点候補の感度特性を調査し、地震波の伝播速度や地下構造の層の厚さ、震源位置などのパラメタ感度に対する物理的知見を得た。

Application of compressed sensing using data-driven reduced-order model to seismic wavefield reconstruction

*Takayuki Nagata¹, Kumi Nakai^{2,1}, Keigo Yamada¹, Yuji Saito¹, Taku Nonomura¹, Masayuki Kano¹, Shin-ichi Ito³, Hiromichi Nagao³

1. Tohoku University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震動分布の推定は、大地震発生時の被害予測における重要技術の1つである。特に、空間的に連続な波動場の即時再構成は、現地調査なしに被害状況を把握することを可能とし、災害対応の初期段階における意思決定に有益なツールとなり得る。高速・高精度の再構成には、事前情報の利用が不可欠である。近年、流体力学分野では、データ駆動型の低次元モデルを用いてスパースな観測から全場の状態を再構成する技術が発展してきた。本研究では、流体力学の分野で開発され、発展してきたデータ駆動型の低次元モデルを用いた圧縮センシングによる再構成フレームワークを地震波動場の再構成に適用し、その適用性を数値実験によって調査した。地震動のデータは計算コストを抑えるため、理論波形を計算する簡便なシミュレーションで生成した。数値実験では、東京都23区直下および茨城県南部を震源とし、東京23区に設定した矩形領域内の波動場をMeSO-netの観測点50点の情報から再構成した。データ駆動型低次元モデルは、一定の範囲内でランダムにパラメタを振った多数ケースの波動場データセットから特異値分解を使用して生成した。空間的に連続な地震波動場は、観測点での観測値とデータ駆動型低次元モデルを用いて再構築される。また、再構成に使用する観測点は、貪欲法に基づく線形逆問題のためのセンサー位置最適化手法によって選択した。数値実験では、提案手法による再構成とガウス過程回帰による再構成を比較した。ノイズのない観測に基づく再構成の場合、提案手法では再構成に使用する観測点数が制限され、かつランダムに選択された場合でも、再構成誤差は数点の観測点でモデル誤差まで減少する。これは、事前に生成する波動場の基底の恩恵により観測点の密度が疎でも高波数の波動場まで精度良く再構成できることを意味する。また、提案手法で得られる再構成誤差は、ガウス過程回帰により得られる再構成誤差よりも小さい。強い観測ノイズがある場合では、再構成された波動場は観測ノイズの影響により劣化し、ガウス過程回帰を用いた再構成では波動場の定性的な特徴さえ復元できないが、提案手法では一定の精度で再構成が可能である。また、全観測点を用いた場合よりも再構成誤差は大きいものの、観測点選択手法と組み合わせることで、再構成結果の劣化や推定結果のばらつきを最小限に抑えながら、より少数の観測点で再構成できることが分かった。



再構成結果の例:ある時刻の瞬時南北方向加速度分布

Bayesian merging of earthquake catalogs from multiple sources

*Jiancang ZHUANG¹, Zhengya Si²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Beijing Earthquake Agency

For the same earthquake, different seismic networks may give different solutions for its time, location, and magnitude. In particular, the differences in the estimated magnitudes are large due to many factors including correction of site responses, determination methods, and operation modes. Therefore, earthquake catalogs that are compiled by different networks cannot be merged into one by some simple operations. To solve this problem, we propose a Bayesian algorithm to solve this problem. By assuming that an observed magnitude follows a Gaussian distribution, with a mean of its unknown true value and a certain variance, both of which are dependent on the network and that the true magnitude follows a uniform trivial prior, we derive the posterior probability density of the true magnitude, based on the framework of Bayesian inversion. We use this method to merge the earthquake catalog recorded by a local temporary seismic network into the standard CENC catalog and to combine several Italian catalogs. The proposed method is fast and improves the stability and accuracy of the estimated magnitudes. The key point of this technique is making use of the consistency in magnitudes recorded by each network.

Figure 1: Revised magnitudes for the INGV ISIDe catalog (IV) and the Regional Seismic Network of North Western Italy catalog (GU).

Room B | Regular session : S05. Geothermal science

📅 Tue. Oct 25, 2022 4:15 PM - 4:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 7:15 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S05] PM-3

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S05-01] Geophysical studies using optical fiber DTS and DAS in geothermal wells of Ohuma and Sumikawa geothermal fields in Akita

*Jyunzo KASAHARA^{1,2}, Yoko Hasada^{2,3}, Hitoshi Mikada⁴, Hiroshi Ohnuma², Yoshihiro Fujise^{2,5} (1. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazard, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. Graduate School of Kyoto University, 5. WELMA)

Geophysical studies using optical fiber DTS and DAS in geothermal wells of Ohuma and Sumikawa geothermal fields In Akita

*Jyunzo KASAHARA^{1,2}, Yoko Hasada^{2,3}, Hitoshi Mikada⁴, Hiroshi Ohnuma², Yoshihiro Fujise^{2,5}

1. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazard, 2. ENAA, 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. Graduate School of Kyoto University, 5. WELMA

2018年以来、光ファイバーを用いて地熱坑井内でのDAS (Distributed Acoustic Sensor)による地震波の計測とDTS (Distributed Acoustic Sensor)による温度計測を行い、高精度の地熱探査を目指した研究開発を実施してきた。本報告では調査の方法と秋田県大沼、秋田県澄川で得られた結果を示し、その解釈の概要について述べる。2018年には南九州のメディポリス地熱フィールドにおいて、地熱坑井に光ファイバーを設置しても温度や地震波の計測ができるかどうかを確かめ、有効な温度と地震波の計測ができることが分かった。2019年に同じメディポリスの地熱坑井において人工震源による地震探査を行った結果、付近の深さ3.6 kmに地震波を反射する領域があることがわかり (Kasahara et al., 2020a), その領域が水の超臨界状態(374°C, 22.1MPa)にある可能性が示唆された(Kasahara et al., 2020b)。2020年には秋田県鹿角市大沼の地熱発電所の地熱坑井を利用しDASとDTSを用いた地熱フィールドの探査実験を実施した。その結果、深さ2.8-3.0 kmに地震波を強く反射する領域があることが分かった(笠原他, 2022a)。地震波の反射振幅からその領域は流体を含んでいると考えられる。2021年には北海道森町の濁川地区にある森地熱発電所のF-01地熱坑井を用いDASを用いた地熱探査を行った結果、深さ1,000 mの還元層に対応してDAS記録中のP波初動走時の異常があり、その深さでのP波の減衰が認められた(Kasahara et al., 2022)。同年10月には秋田県大沼地熱フィールドの西側に位置する澄川地熱フィールドにおいても同様な調査を行った。その結果南部の生産ゾーンと北部の還元ゾーンに対応する深さ1,500-2,000 mの領域に反射ゾーンがみられた。2022年5月大分県九重町の滝上地熱発電所周辺、同8月～9月秋田県木地山で同様な調査を実施している。

引用文献

Kasahara, J., Hasada, Y., and Kuzume, H. (2020a): Possibility of high Vp/Vs zone in the geothermal field suggested by the P-to-S conversion, 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

Kasahara, J., Hasada, Y., Kuzume, H., Mikada, H., and Fujise, Y. (2020b): The second seismic study at the geothermal field in southern Kyushu, Japan using an optical fiber system and surface geophones, 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

Kasahara, J., Hasada, Y., Kuzume, H., Ohnuma, H., Mikada, H., and Fujise, Y. (2022): A field experiment of temperature-tolerant distributed acoustic sensor in deep geothermal reservoir prospecting, *The Leading Edge*, **41**, 306-312.

笠原順三・羽佐田葉子・久詰晴康・三ヶ田均・藤瀬吉博 (2022a) : 秋田県大沼地熱発電所地熱井内のDASを用いた地熱探査, 日本地熱学会誌, **44**, 73-84.

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 4:30 PM - 5:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 7:30 AM - 8:45 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-3

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Takashi Hirai (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

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

[S15-01] Simple microtremor array survey at rock/hard-soil sites

*Ikuo CHO¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S15-02] Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model II, Application to 2014 Northern-Nagano Earthquake

*Kenichi TSUDA¹, Hideo Aochi^{2,3}, Shohei Yoshida⁴ (1. Institute of Technology, Shimizu corporation, 2. BRGM, 3. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 4. Ohsaki Research Institute, Inc.)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S15-03] Extreme ground motion in K-NET and KiK-net strong-motion data over a quarter of a century

*Shin AOI¹, Takashi KUNUGI¹, Wataru SUZUKI¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S15-04] Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 7 -
- Risky ground Movement Indications of Happening These Seismic Waves -

*Hiroshi MAEHARA¹ (1. Geosystem Research Institute)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S15-05] A Study on Earthquake Damage Prevention of Cultural Properties on Display:
Vibration Experiment of Japanese Sword

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO¹ (1. Nagoya University, 2. Token Corporation)

Simple microtremor array survey at rock/hard-soil sites

*Ikuo CHO¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

これまで微動アレイ探査は堆積層の厚い沖積低地・市街地では有効に活用されてきているが、岩盤・硬質地盤での適用例は少なかった。その一因として、岩盤では地震動の増幅が小さいことからサイト評価の優先度が低かったことが挙げられるかもしれない。しかし、ひとくちに「岩盤・硬質地盤」と言っても、全て同一の地震基盤S波速度（例えば、3 km/s）を持つわけではないし、風化や薄い堆積層の影響により、サイトごとに応答特性が異なるはずである。特に重要な構造物の周辺では詳細に評価したい場合もある。

発表者の推定になるが、岩盤・硬質地盤での適用例が少ない最大の理由は、「岩盤・硬質地盤サイトでは表面波が励起されない」ため微動アレイは不可と考えられてきたことにあるのではないだろうか。そして、実際に実施してもうまくいかないことが多かったため、問題が据え置かれてしまった可能性がある（「適用不可」という暗黙の了解）。実は、世界的には、この10年の間に、岩盤・硬質地盤での微動アレイ探査の問題に深く立ち入って問題を診断し、適用の可否を検討するような報告が見られるようになってきた。それらの成果を総括すると、「岩盤・硬質地盤での微動アレイ探査は可能」である。しかし、SNRが低いので慎重な観測が必要である。つまり、岩盤で表面波は励起されないのではなく、励起されているが、とても小さいので失敗しやすいということである。過去の成功例の多くは比較的大掛かりな微動アレイを用いており、これがSNRの問題の克服の要となっているとの考えが浸透しつつあるようである。

以上の背景により、本研究では、岩盤・硬質地盤サイトにおける微動アレイ探査の適用性を検証するとともに、それが非常に簡単なアレイで可能であることを示したい。SNRの問題は、微動アレイの規模（センサー数）ではなく、データ処理法の選択によって克服できる。具体的には、空間自己相関法（SPAC）の派生法であるゼロクロス法を適用すれば良い。ゼロクロス法はAki (1957)により発案され、地震波干渉法分野で多く用いられてきている方法である。著者は近年微動アレイ探査分野での利用可能性を検証した。

この方法はSPAC係数のスペクトル（以降、単にSPAC係数）—SPAC係数は第1種0次Bessel関数でモデル化されるのでそのスペクトルは一般に0線の周辺で振動する形状となる—がゼロを横切る周波数を用いて位相速度を同定する。SPAC係数はSNRが低いと振幅が過小評価されるので、SPAC係数から位相速度に変換する時にバイアスが生じる。しかし、ゼロクロス点の周波数はSNRに依存しないため、ゼロクロス法はバイアスを受けない。低SNRのサイトでは非常に効果的である。

簡易な微動アレイの適用については、直線アレイほどに単純（簡易）なアレイでは、岩盤・硬質地盤の微動アレイには波動場の方向性に起因するバイアス（方位エリアジング）が生じる可能性がある。岩盤・硬質地盤は一般に静穏なので、特定の振動源が卓越する可能性が高いからである。その場合、波動場の等方性の仮定が成り立たない可能性が高い。既存研究ではこれに大規模なアレイで対処したと考えることができるが、本研究では、方位エリアジングの系統的・理論的な評価に基づいて、簡単で実用的な微動アレイ形状を決定し、SPAC係数のゼロクロス点の読み取り法を改善した。

その結果によれば、3個のセンサからなる三角アレイでは、波動場によってはSPAC係数の最初の最小値よりも高周波数側（すなわち、第1ゼロクロス点よりもやや高い周波数側）でバイアスが生じる可能性がある。また、2つの独立な直線アレイ（別々の時刻に実施）からなるL字型アレイの場合、SPAC係数の最初のゼロクロス点よりすぐ上の周波数帯域でバイアスが生じる可能性がある。本研究では、この結果を踏まえ、バイアスの可能性を示す指標、すなわちゼロクロス点直後のSPAC係数の振幅によっては、後続のゼロクロス点を読み取らないことにした。また、系統的調査により、L字型アレイでは最初のゼロクロス点が不明瞭になることがあるが（例えば、ゼロラインを横切らずに触れるだけに見える）、2つの直線アレイの交差角が直角に近づくと方位エリアジングの影響が減少することが示された。そこで、本研究では、最もシンプルで実用的なアレイとして直角のL字型アレイを選択するとともに、最初のゼロクロス点の読み取り基準を工夫することとした。

上記の知見（理論）を観測データで検証するために北関東の15地点で取得された微動アレイデータを用いて位相速度の評価を行った。速度記録データに基づく深度30mまでの平均S波速度（Vs30）は182m/sから

1433m/sであり、14地点は岩盤・硬質地盤、1地点は比較的柔らかい地盤のサイトとなっている。微動アレイは、長さ 24 m の2つの独立した直線アレイ（別々の時刻に実施）で構成されるL字型アレイであった。各直線アレイは、4.5Hzのジオフォン7台の不等間隔配置で構成した。微動はそれぞれ約 20 分間記録された。得られた位相速度分散曲線に基づき、地盤パラメータ V_s10 、 V_s20 、 V_s30 とS波速度構造モデルを評価した。微動アレイデータの解析結果は、速度検層に基づく値と良く一致した。

Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model II, Application to 2014 Northern-Nagano Earthquake

*Kenichi TSUDA¹, Hideo Aochi^{2,3}, Shohei Yoshida⁴

1. Institute of Technology, Shimizu corporation, 2. BRGM, 3. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 4. Ohsaki Research Institute, Inc.

The influence of the depth-dependent stress variation on the rupture behaviour is important aspect for quantitative estimation of ground motions, although this feature has been rarely incorporated into ground motion simulation. Previously, we proposed the assumption that the stress is loaded according to the medium rigidity (Aochi and Tsuda, in revision, 2022). Consequently, stress is loaded only on a limited layer if a 1D structure model is applicable. On the accompanying presentation (Aochi et al., SSJ fall meeting, 2022), we numerically demonstrated the dynamic rupture process through 3D numerical simulations, particularly for the moderate size event, 2019 Mw 4.9 LeTeil (France) earthquake, showing a very shallow ruptured area with ground surface displacement. In this study, we extended this idea by making heterogeneous distribution of model parameters and apply it to the 2014 Northern-Nagano Earthquake (Mw 6.4). First, the depth-dependent stress distributions have been constructed based on the known layered structures derived from adjacent stations. We then allow heterogeneous distribution of dynamic stress level to be consistent with the simple characterised source model containing two asperity areas (Hikima *et al.*, SSJ meeting abstract, 2015). We used the Spectral-Element Method (e.g., Galvez *et al.*, GJI, 2014), reassuring the effective frequencies lower than 0.5 Hz. The resultant slip distribution is shown in Figure 1(a). The maximum slip is 3.8m and resultant moment magnitude considering area with over 0.1m slip as the fault surface is 6.4. We also show slip-rate functions at two typical points on the fault in Figure 1(b). Point 1, located around the edge of the asperity in the shallow, shows a very steep slip-rate function with large amplitude. This steep shape is different from Point 2, which shows a typical slip time function in the numerical simulations, namely a steep onset and the following decay). This fact might have big influence on the mechanism to generate short-period ground motions on the site close to the fault.

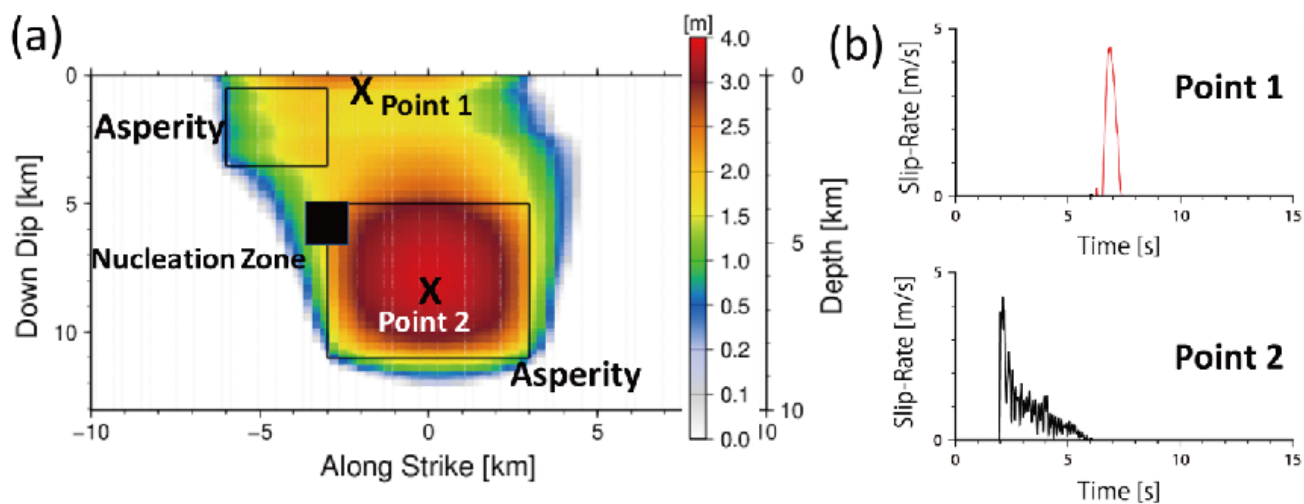


Figure1 (a) Simulated slip distribution based on the characterized source model by Hikima *et al.* (2015) (b) Slip-rate functions at two on-fault points whose positions are illustrated in Panel (a)

Extreme ground motion in K-NET and KiK-net strong-motion data over a quarter of a century

*Shin AOI¹, Takashi KUNUGI¹, Wataru SUZUKI¹, Hiroyuki FUJIWARA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

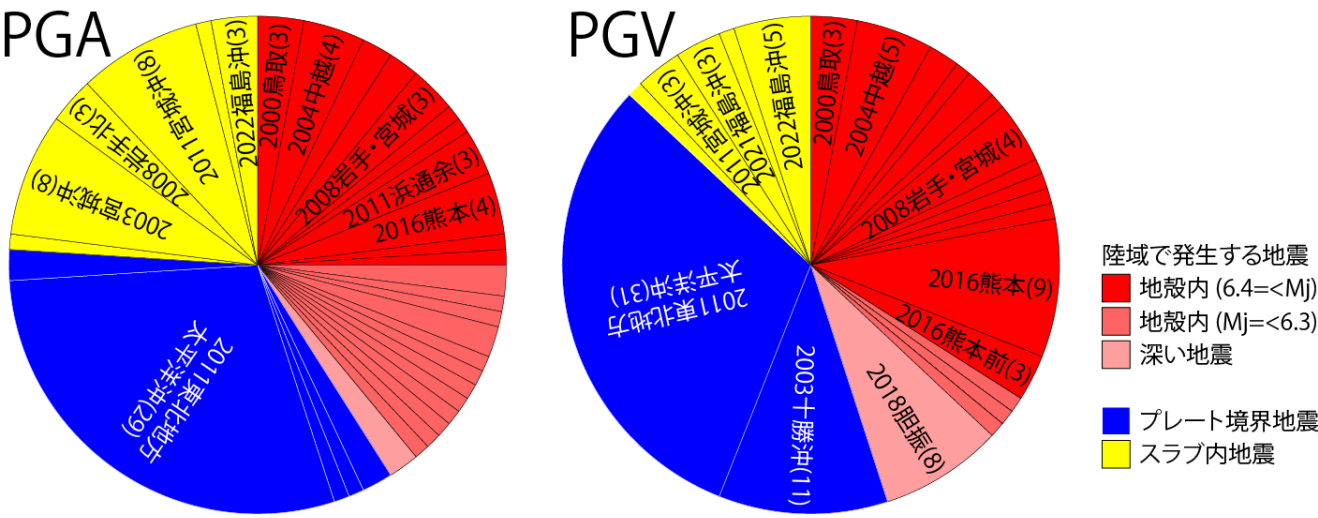
地震によるハザード・リスク評価にとって、地震動の上限とその特性を知ることは極めて重要な課題である。阪神・淡路大震災を契機に、全国を均質にカバーする1,750観測点余りからなる強震観測網K-NET及びKiK-netは、四半世紀余りの間に総地震数18,070、総記録数882,606に及ぶ膨大な強震記録を記録し蓄積してきた（1996/6/1～2022/6/30、以下同様）。K-NET及びKiK-netによる稠密な観測を持続的に実施することにより、過去知られていたよりかなり振幅の大きな地震動（いわゆる極大地震動）の存在が明らかになってきた。

地表における3成分合成の最大加速度（PGA）及び最大速度（PGV、0.1 Hzハイパスフィルター適用）の上位100記録（以下、Top100）のうち、PGAの最大と最小は2008年岩手・宮城内陸地震及び同地震の余震のIWTH25における4,022 cm/s/sと824 cm/s/sであり、PGVの最大と最小は2018年北海道胆振東部地震のHKD126における151 cm/s及び2021年福島県沖の地震FKSH11における53 cm/sである。本講演ではどのような地震で大振幅地震動が記録されたのかを知るため、Top100のデータを、陸域で発生する地震、プレート境界地震、スラブ内地震の三つに分類し、その特徴を考察する。

陸域で発生する地震の多くを占める地殻内地震は浅い場所で発生するため、特に大きな地震動が記録されるのは、地盤条件にもよるが、断層近傍である場合が多い。Mjが概ね6後半より大きな地震では複数の観測点でTop100内のPGAやPGVが記録されることがある。また、震央距離と震源深さがともに10 km程度以下の地震規模のやや小さな地震においても1gを越えるPGAが記録された地震が7地震ある。このような震源近傍の大振幅地震動の様相は、継続的に稠密観測網を行うことで観測機会が増えたことにより初めて捉えられるようになったと言える。また、陸域で発生し震源が深い地震として、2018年北海道胆振東部地震においてPGAは8観測点、PGVは2観測点でTop100内の地震動を記録している。

プレート境界地震としては、Mj9.0の2011年東北地方太平洋沖地震は極めて広域で大きな地震動が記録されており、PGAで29記録、PGVで35記録と、一つの地震としては圧倒的に多くの記録がTop100に入っている。PGVでは長周期が効きやすいため2003年十勝沖地震で11記録がTop100に入り、この二つの地震で半分近くを占めている。ただし、プレート境界地震は規模の大きな地震も多く発生するが、陸域から遠いあるいは深いなど震源距離が長い場合が多く、地震規模の割には必ずしも大振幅の地震動にはならず、他に大きな地震動を記録した地震は比較的少ない。

スラブ内地震は地殻内地震にくらべ震源が深いため、2003年及び2011年の宮城県沖の地震ではそれぞれ8観測点でTop100内のPGAを記録するなど、地震規模の割には比較的広域で大きな地震動が生じることがある。短周期が卓越する傾向があるためTop100の割合はPGAの方が多いがPGVが大きな地震も複数ある。2001年芸予地震と2022年日向灘の地震以外は全て東北地方で起きた地震である点も特徴的である。



Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 7 - - Risky ground Movement Indications of Happening These Seismic Waves -

*Hiroshi MAEHARA¹

1. Geosystem Research Institute

1.はじめに

昨年に続いて同じシリーズの主題の下に、副題を変えて発表します。昨年の予定では-その8-として、「衝撃的鉛直地震波動の新しい定義とその発生原因」を話すことでした。しかし、一つ前の発表の採択に手続きミスが生じたのと、現在の地殻変動の兆候は悠長な話をしている事態ではないことに、後述の通り5月になり気付きました。すでに-その5~7-は投稿済で、-その7-は採択漏れでしたので、2回の発表はそれぞれの副題に簡単に触れ、危険な地殻変動の後述の状況を緊急の話題として報告しました。ここでは-その7-として、表記の副題で緊急の報告をさせて戴きます。

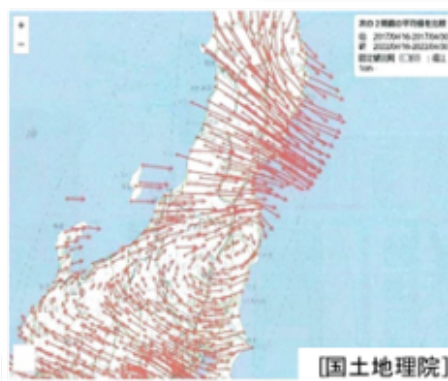
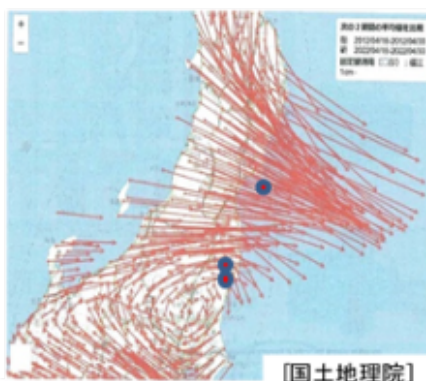
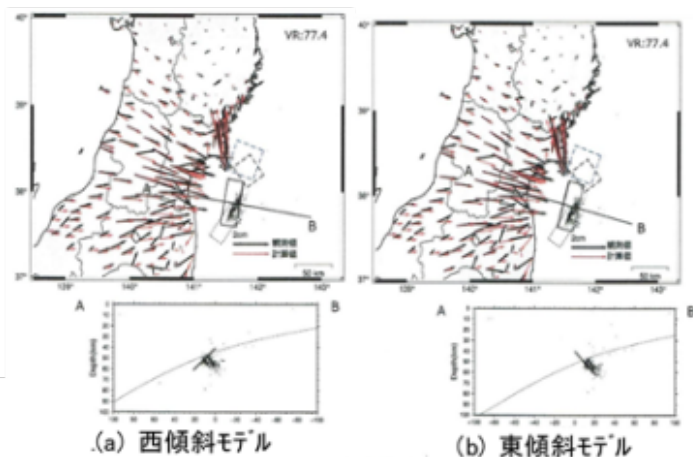
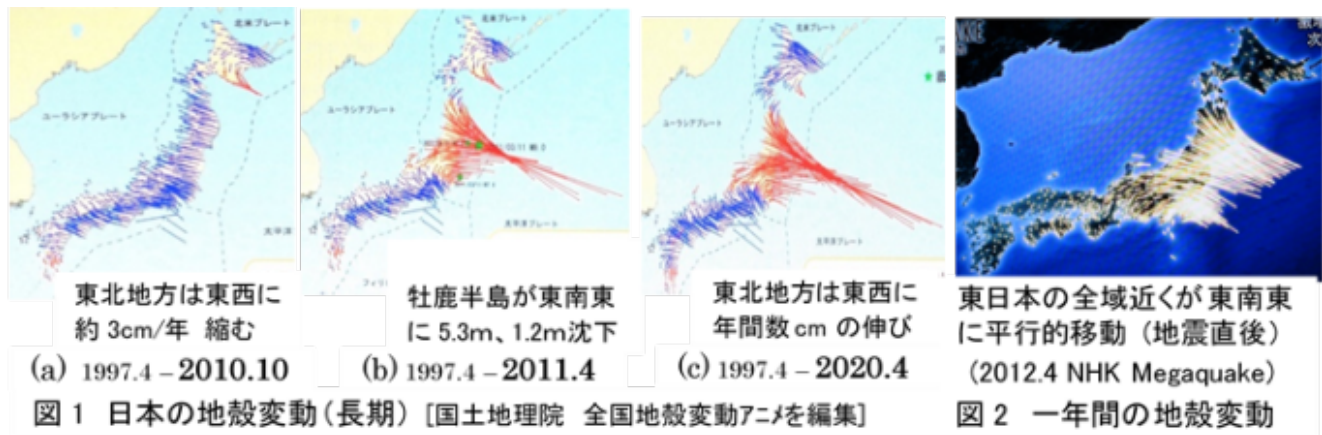
2. 衝撃的鉛直地震波動の発生メカニズムの骨子

この問題の地震波の発生原因自体は物質の相変化であることは明確なことです。未解明なのはそのメカニズムの詳細です。しかし、これまでの研究から地盤は弾性や塑性的な変形だけでなく、剛体的なブロックの動きをすることが分かりました。そしてこの波動は主震動の前、初期、最中及び終息後も発生し、多くは断層帯部や山体の境界部で生じており、そのメカニズムの骨子は次のように定まります。

- ・①地盤のブロック的な動きで、②ブロック境界の一部に周囲より低圧部(間隙)が発生し、③その低圧部内の遷移点や臨界点を超える物質の相変化が起き、④相変化に伴い体積が膨張し、⑤低圧部の収容体積を超える部分が、周囲より圧力が低い上方に噴出(膨張-の流動)して、⑥噴出物質が上方の閉塞面にぶつかり、上向きの圧縮波動(非線形的性質)として伝播する。

3. 強烈な衝撃的鉛直地震波動が発生し易い場所(危ぶまれる地盤変動の兆候)

問題の地震波動は地盤ブロックの境界で発生するので、地表の基準点の移動状況を分析すると、その候補地が探せるとの発想から、国土地理院の地殻変動情報を探しました。図1a-cは3.11東日本太平洋沖地震の、前後の日本の地殻変動図で少し長期間の図です。この地震直後は図2に示す図柄の印象(関東を含む東日本の大部分が並行的に東南東に移動)があるのですが、現実には図1b,cの通り東北部が酒田-石巻付近を軸に東南東に漏斗状に変動をしています。今年3月16日に福島県沖地震(M7.4)が起き、図3はその地表変動図で、福島県の海岸部は阿武隈山地とは動きが違っています。図4は震源断層の推定図です。ほぼ同じ場所で、昨年2月13日に地震(M7.3)が起き、牡鹿半島沖では昨年3月20日(M6.9)と5月1日(M6.8)に起き、近年大地震が続いています。図5, 6は東北地方の10年前と、5年前から現在の地殻変動状況で、酒田-石巻付近を軸にした東南東に漏斗状の変動の他に、その南側に渦状の変動があります。今年5月22日に茨城県沖地震(M5.8)起き、図7はその震度分布です。この図と町名の資料より猪苗代町から富岡町や双葉町の、内陸部から沿岸部に直線的な地盤の伏在弱線があることが分かりました。図7は図6の地盤変動図を拡大して、沿岸部の活断層位置[紫破線]と伏在弱線[青破線]を記入したものです。細い赤矢印は地盤変動で、青の丸印は原発の位置です。活断層と地盤の弱線が交わる付近は、地盤が小ブロック化します。地殻の渦変動で沿岸部は地盤の拡大域で地震を誘発し易くなっています。地殻の大余効変動の影響で、この周辺で大地震が起きると、強烈な衝撃的鉛直地震波動が多発することが危惧されます。この問題の地震波は耐震基準にはないので、地殻の大変動の現状から、柏崎や女川も含めた、原発と関連施設の衝撃的鉛直地震波動に対する安全性の確認と検証が急務です。



* 渦中心が移動 * 猪苗代町-富岡町付近に伏在弱線



印は福島第1, 第2原発(地盤拡張域)
5年間の変位 [赤矢印]
海岸部の活断層 [紫破線],
推定地盤伏在弱線 [青破線]

←図 8 福島沿岸部の変動状況と地盤の弱点

【緊急提言】 * 活断層と伏在弱線の交差部付近は地盤の小ブロック化が予想され、地盤は拡張場にある。付近で大地震が起きると強烈な衝撃的鉛直地震波動の多発が危惧され、近く原発と関連施設等の冷却設備を含めた安全性の確認が急務です。

A Study on Earthquake Damage Prevention of Cultural Properties on Display: Vibration Experiment of Japanese Sword

*Takashi HIRAI¹, Tomoko TEZUKA², Miki TAKANO¹

1. Nagoya University, 2. Token Corporation

近年、建物の耐震性の向上や制振構造・免震構造の普及にともない、地震時の建物の構造的な損傷による犠牲者は減少傾向にある。一方、建物内の設備や什器等の損傷防止については、人命にかかわる建物倒壊の防止と比較すると、優先度の低い課題として取り扱われてきたことは否めない。人命の保護が第一に重要であることは論をまたないが、人命を守ることができたならば、加えて建物内にある財産等の被害を抑えることにより、地震後の生活水準の維持や復興の促進に資することができる。発災直後にもっとも重要となるのは官公庁・医療機関・社会インフラ等の機能維持にかかわる設備の保護であろうが、長期的な視点に立てば、文化財等の価値あるものの保護もまた重要である。文化財は人類共通の宝であり、これを破損することなく次代へ伝えることが、国家および人類全体の文化水準の維持と向上をはかることになる。

本研究では、文化財の中でも特に刀剣類について、展示状態における地震時挙動の把握と損傷防止のための方策について検討する。刀剣類の特徴として、テグスによる展示台への固定が困難であることが挙げられる。これを地震の揺れから保護するには、建物や免震構造とすることや、免震台上での展示とすることが効果的である。しかし、文化財、それも刀剣類の場合は特に、個人所有のものが少なくなく、所有者の経済力も様々であるため、必ずしも免震建物や免震台等の整備を行うことができない場合もある。

そこで、本研究では、刀掛けを用いて展示されている状態の日本刀について、地震時の揺れに対する挙動の把握から始めることとし、振動台実験を行った。図1に実験の様子を示す。名古屋大学減災連携研究センター所有の水平2成分振動台「パレットぶるる」（白山工業株式会社製可搬型地震動シミュレーター「地震ザブトン」[1]）に台枠を取り付け、小型の家具転倒実験を可能としたもの）を使用し、アクリル製の一体型の刀掛けに模造刀を載せた状態で加振を行った。このとき、刀掛けをそのまま振動台に載せたものと、滑り止めマットを介して載せたものの2種類を用意した。加振波形は1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での強震記録（JMA神戸波）とその建物応答（固有周期1 s, 減衰定数5%）および2011年東北地方太平洋沖地震のK-NET築館での強震記録とし、振動台、刀掛け、刀身それぞれの加速度を測定した。

詳細な分析結果は紙面の都合上割愛し、ここではJMA神戸波の建物応答について、振幅倍率20%と40%での加振結果について記す。振幅倍率20%（振動台の計測震度5.7）では、滑り止めマットなしの刀掛けは振動台上で滑動し、載せていた刀身が落ちた。一方、滑り止めマット上の刀掛けは活動せず、刀身も落ちなかった。それに対して、振幅倍率40%（振動台の計測震度6.4）では、滑り止めマット上の刀掛けは滑動しなかったものの、刀身は落ちる結果となった。いずれの場合も、刀身は刀掛け上で長さ方向に大きく滑動し、切先側またはその反対側のどちらか一方から滑り落ちるという挙動を示した。刀身が長さ方向と直交する方向へ跳躍して落ちるという挙動はみられなかった。これは、用いた振動台の仕様上上下振動がなかったこと、アクリル製刀掛けと刀身との間の摩擦係数が小さいことが関係していると考えられる。上下振動の入力や木製刀掛けの使用によって異なる結果となる可能性がある。

今後、上下動を含む加振や正弦波による加振を行って刀掛けおよび刀身の詳細な振動挙動を把握するとともに、刀身の落下を防ぐ方策について継続的に検討を行っていく。

[1] 白山工業株式会社：可搬型地震動シミュレーター地震ザブトン,
https://www.hakusan.co.jp/products/eq_simulator/ (2022年8月18日閲覧)

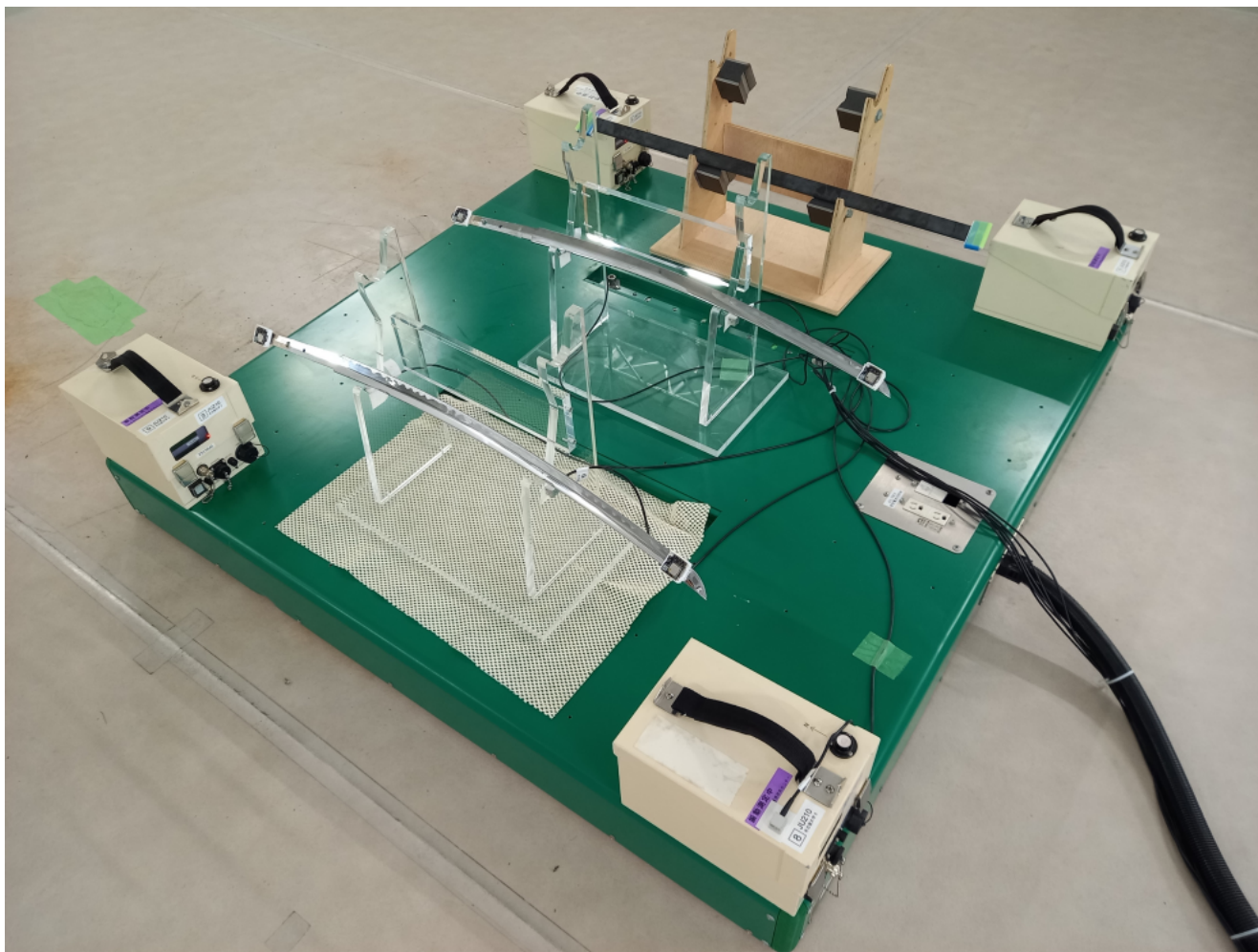


図 1 振動台実験の様子

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:45 AM - 11:00 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:45 AM - 2:00 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-1

chairperson: Kiyoshi YOMOGIDA (Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University), Atsushi Nozu (Port and Airport Research Institute)

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

[S01-01] Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

*Atsushi NOZU¹, Yosuke Nagasaka¹ (1. Port and Airport Research Institute)

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

[S01-02] Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

*Hiromu Ohba¹, Ryoya Ikuta¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji³, Feng Chen², Toshiki Watanabe², Haruno Koike² (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

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

[S01-03] Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

*Masayuki NAKAYAMA¹, Hironori KAWAKATA¹, Issei DOI² (1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.)

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

[S01-04] Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

*Tatsuki Nara¹, Hiroyuki Goto² (1. Kyoto University Graduate School, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S01-05] Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

*Kiyoshi YOMOGIDA¹ (1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University)

Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

*Atsushi NOZU¹, Yosuke Nagasaka¹

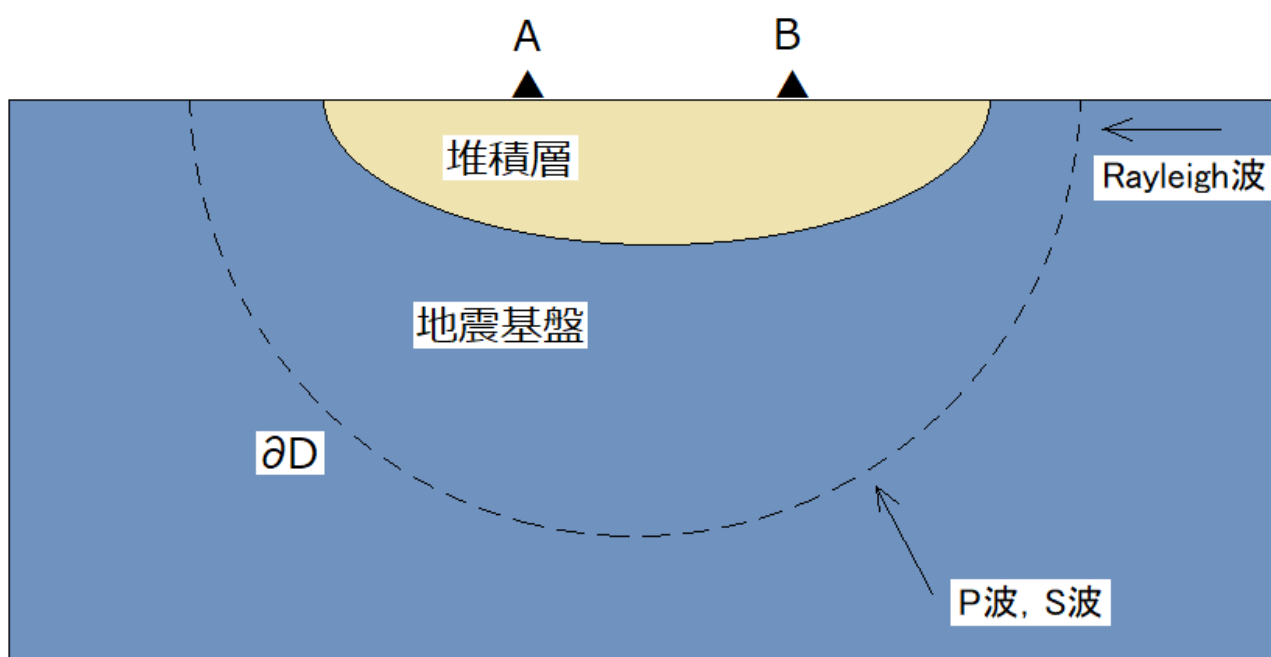
1. Port and Airport Research Institute

著者らは、常時微動 H/V スペクトルを実務上多用する者として、常時微動 H/V スペクトルに関する正しい認識を得たいと願っている。常時微動 H/V スペクトルの波動論的な解釈のうち最も興味深いものは Sanchez-Sesma et al. (2011)によるものであり、そこでは、常時微動 H/V スペクトルは載荷点と観測点が等しい場合のグリーン関数の比の平方根であると解釈されている。この解釈は、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化から直ちに導かれるので、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化が正しい限り、Sanchez-Sesma et al. (2011)による常時微動 H/V スペクトルの解釈も正しいということになる。そこで、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化を逐一追ってみると、遠方からP波、S波が入射する場合の定式化となっており、自由表面の存在を考慮する場合でも、Rayleigh波入射は考慮されていないことに気付く。Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化では、遠方では媒質は均質であると仮定しているが、この均質媒質は地震基盤であると考え、Sanchez-Sesma et al. (2011)の解釈を適用する上で都合が良い（図）。そのためには、この均質媒質は全無限でなく半無限であることが望ましく、それに伴い、Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化を拡張して、Rayleigh波入射も考慮できるようにすることが望ましい。

そこで、本研究では、遠方での媒質は半無限であると考え、Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化を拡張し、P波、S波、Rayleigh波の同時入射の下での地震波干渉法の定式化を行った。Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化が成立するための条件として、外部から入射するP波とS波の単位体積あたりのエネルギーの比は、 $E_s/E_p = 2(\alpha/\beta)^3$ でなければならないことは広く知られている。同様に、Rayleigh波の入射も考慮する場合は、Rayleigh波の単位面積あたりのエネルギーを E_R とすれば、 $E_R/E_p = (\pi/\omega) \alpha^3/C_R^2$ でなければならないことが本研究の結果として示された。ここに ω は角周波数、 C_R は半無限媒質におけるRayleigh波速度である。この比は、Weaver(1982; 1985)が拡散波動場におけるRayleigh波とP波のエネルギー比として示した値と同じである。

ただし、Weaverの論文は、ある周波数の近傍にある複数の振動モードのエネルギーがすべて同じになった状態を拡散波動場と定義した上で、その場合のRayleigh波とP波のエネルギー比に言及したものであり、現実の媒質においてそのようなエネルギー比が実現されることをどの程度期待して良いかは、Weaverの論文を読んだだけではわからない。P波とS波のエネルギー比については、これまで、媒質内部における散乱の観点(Ryzhik et al., 1996)や媒質表面における反射の観点(Egle, 1981; Nagasaka and Nozu, 2022)から検討がなされ、上述のエネルギー比が実現することの確からしさについて研究が進められているが、Rayleigh波とP波のエネルギー比については研究が不足していると言える。そこで、本研究では、その端緒として、P波とS波のエネルギー比に関連したAki(1992)の研究を拡張し、Rayleigh波とP波のエネルギー比について検討した。

Aki(1992)の研究は、全無限媒質中に局在する任意形状の散乱体を考え、この散乱体によるP波からS波への変換率とS波からP波への変換率の比が、P波速度とS波速度の比によって簡単に表されることを示したものである。その結果から、このような散乱体によって弾性波が繰り返し散乱されるうちに、S波とP波のエネルギー比は上述の割合に収束していくことが期待される。本研究では、半無限媒質の表面付近に局在する任意形状の散乱体を考え、この散乱体によるP波からRayleigh波への変換率とRayleigh波からP波への変換率の比について検討した。その結果によると、このような散乱体によって弾性波が繰り返し散乱されるうちに、Rayleigh波とP波のエネルギー比は上述の割合に収束していくことが期待される。



Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

*Hiromu Ohba¹, Ryoya Ikuta¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji³, Feng Chen², Toshiki Watanabe², Haruno Koike²

1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology

本研究では、ACROSS（Accurately Controlled Routinely Operated Signal System）と地震計アレイを用いて、降雨に伴う地震波速度の時間変化を観測した。

ACROSSは、精密に制御された地震波を長時間継続して送信することにより地下構造の時間変化を捉えることを目的とした震源システムである。本研究では静岡県森町に設置したACROSS震源装置に対して約3km離れた地点に設置した地震計を用い、降雨に対する地震波速度の応答を調査した。2017年と2018年にそれぞれ2台の地震計を用いた3週間ずつの予備調査を行い、2020年9月から2021年9月、同じ場所に小規模地震計アレイを展開して観測を行った。

地震波速度は地下水位に伴って変化する。近年、地震波干渉法を用いた地震波速度のモニタリング（例えば、Kim & Lekic, 2019、Clements & Denolle, 2018など）がこれを明らかにしてきたが、地震波干渉法では環境震動中に優占する地震波が強調されるため、特定の実体波や表面波の波群毎に地下水に対する応答を調べることは難しい。波源としてACROSSを導入し、地下水位の変動に対する様々な波群の応答を別々に解析することで、地下水が地震波速度を変化させるメカニズムの特定を試みる。また、観測された地震波速度の変動がどの範囲の地下水位の変動を反映するのかを知ることも重要な課題である（例えば、Liu et al. 2020）。ACROSSを用いることで、地下水位の時間発展の局所・広域の違いに対応した地震波速度の変動を高い時間分解能で解析できる。

2017年と2018年の観測では、パーティクルモーションから到達している波の種類を特定し、2.8秒付近に到達し（速度に直すと1.1 km/s）水平成分が卓越する波をラブ波的、3.8秒付近に到達し（0.79 km/s）鉛直面内でレトログレードを示す波をレイリー波的と考えた。これらの地震波の走時変化は、降雨量からタンクモデルで予測される地下水位変化との間に高い相関がみられた。この際、地震波走時変化を最もよく説明するのは、降雨に対して時定数20日の指数関数的減衰応答であった。2つの波群は地下水位に対する感度が異なり、2.8秒の波群では0.035ミリ秒/m (=1.25%/m)、3.8秒の波群では0.024ミリ秒/m (=0.86%/m)である。2020年9月から開始したアレイ観測では、半径4、8、16mの同心円上に3つの三角形を配したSPAC法の典型的なアレイ構成に、震源方向の波数分解能を高めるために南側と北側に各2点を追加して14点の地震計を設置した。ACROSS信号のアレイ解析の結果、予備観測で降雨に対する応答が大きかった2.8秒と3.8秒付近の地震波の見かけ速度は直達S波と同じ（～2.5 km/秒）であり、表面波ではないことが分かった。

走時変化の原因範囲について調査するため上記2つの波群の地震計アレイ内での速度の変化を算出したところ、降雨に対応した変動は認められなかった。アレイに到達している地震波の走時変化は、アレイ直下ではなく、ACROSS震源から地震計アレイまでの経路の途中の地下水位変化に応答しているものと推定される。

以上から、降雨に対する地震波走時変化の20日の時定数は、広域の水の流動を表している可能性がある。2022年8月から開始したアレイ直下の地下水位の実観測を開始した。これと河川流量、近傍のHi-net観測点の地震波走時変動の解析結果とあわせて、地下水が地震波速度を変化させるメカニズムを考察したい。

参考文献

Clements. T., Denolle. A. M., (2018), Tracking Groundwater Levels Using the Ambient Seismic Field,

Geophysical Research Letters, **45**(13), 6459-6465.

Kim. D., Lekic. V., (2019), Groundwater Variations from Autocorrelation and Receiver Functions, *Advancing Earth and Space Science*, **46**(23), 13722-13729.

Liu. C., Khurram. A., Eric. D., (2020), Seismic Velocity Changes Caused by Water Table Fluctuation in the New Madrid Seismic Zone and Mississippi Embayment, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**(8).

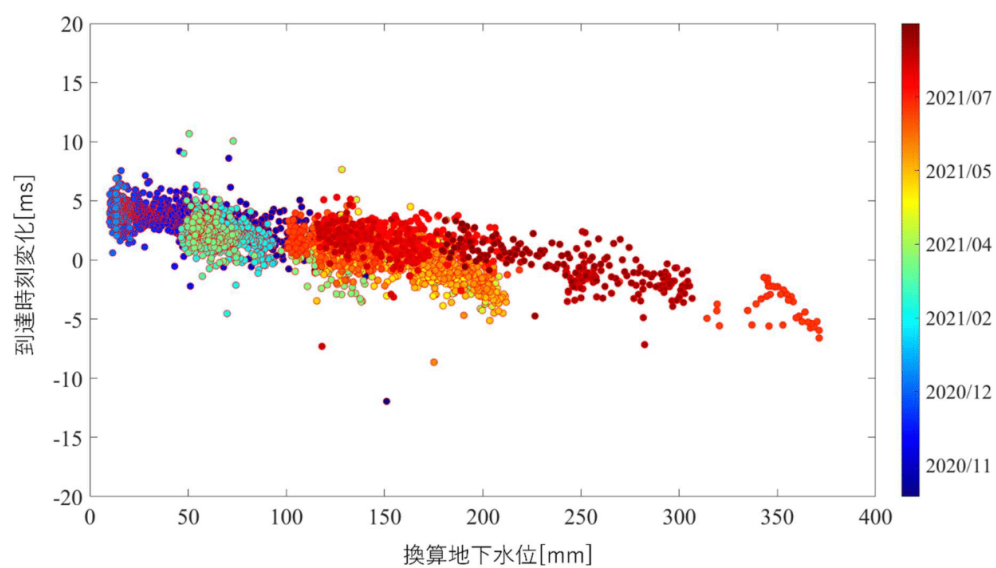


図. 2020 年以降における 2.8 秒の波群の到達時刻変化と換算地下水位の関係

到達時刻変化は正が早まりで負が遅れを示している。地下水位が 100mm 増加すると地震波は 2.3 ミリ秒遅れて到達する。

Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

*Masayuki NAKAYAMA¹, Hironori KAWAKATA¹, Issei DOI²

1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.

降雨や融雪による斜面の表層崩壊の機構解明などを目的として、弾性波を利用して地下水の挙動をモニタリングしようとする研究が行われている。例えば、Mainsant et al. (2012) は、過去に崩壊を経験した斜面での表面波の受動的観測をおこない、地震波干渉法を用いて、降雨にともなう斜面崩壊時の弾性波速度変化を調べた。弾性波速度は、主要な崩壊が発生する数日前から次第に低下していき、崩壊直前にはさらなる急激な低下を示した。しかしながら、地震波干渉法は励起源の分布が等方的でないことや季節によって変動することなどが指摘 (e.g., Stehly et al., 2006) されており、地下水の時空間変化を適切に把握するためには、震源が空間的だけでなく時間的にも安定していることが望ましい。地震学では、例えば弾性波アクロス (e.g., Ikuta et al., 2002) のような時空間的に安定した人工震源を用いた能動的弾性波モニタリングが試みられている。しかしながら、人工震源を用いたモニタリングは長期間同じ場所に設置され、地殻などの主に固結した岩盤を対象に長期モニタリングがおこなわれている。崩壊が予想される斜面や地震後に崩壊した斜面などにおいて短期的あるいは臨時的な観測をおこなうためには、機動的な観測システムが望まれるものの、人工震源を含む機動的な観測システムはほとんど例がなく、斜面表層での観測事例はほぼみられない。さらに、多孔質岩石試料において、試料内の含水量に応じて透過弾性波の伝播特性変化に周波数依存性が生じることが示唆されている (e.g., Müller et al., 2010)。もし斜面内部においても透過波の伝播特性に周波数依存性を生じさせるような現象がみられるならば、人工震源からの透過波のスペクトルを安定的にモニタリングすることによって、観測結果の周波数依存性も考慮した解釈が可能になる。そこで、本研究では斜面にて、降雨時を含む期間において人工震源を用いた能動的弾性波モニタリングをおこない透過波のスペクトルの安定性を調べた。

実斜面に1台の市販の振動スピーカー (以下加振器と呼ぶ) と、約2 m離れた位置に1台の加速度計AC9 (富士セラミックス社製S04SG2)、約8 m離れた位置に8台の同種の加速度計AC1-8を設置し多点アレイ観測をおこなった。入力信号として30秒間に10 Hzから310 Hzまで線形に変化するスイープ信号を採用し、ファンクション・ジェネレータ (以下、FG) を用いて加振器にくり返し印加した。なお印加する電圧は人工震源から放射される波が地盤に影響を及ぼさないように微弱なものとした。降雨時を含む2017年3月19日0時から2017年3月22日5時のおよそ3日間、サンプリング周波数51.2 ksp/sで透過弾性波を連続収録した。当該期間の降水記録は、気象庁の福岡観測点における降水量データを使用した。

収録波形はジッタにより信号の初期位相が周期的に変化しておりそのままではスタックできなかったため、加速度計AC9で得られた位相変化が震源スペクトルの位相変化に等しいと仮定し、全ての加速度計ACに対して位相補正後スタックした。以降の解析では、AC9において強度が高かった90~300 Hzの帯域の結果のみ議論する。スタック後の各ACのスペクトログラムをAC9でデコンボリューションし、S/N比が2以上となる場合のデータのみを使用して位相成分の時間変化を調べた。

スタック後のスペクトログラムについて、計測初期の値に対する位相差の時間変化の結果から、震源に一番近いAC8において比較的安定した結果が得られた (図1)。このときの速度は430~970 m/sの範囲に求めた。今後は、降雨後の速度の推定および得られた速度について精査する。

謝辞: 本研究は、JSPS科研費JP15H02996と26750315の助成を受けた。また、気象庁の降水量データを利用した。ここに感謝の意を表する。

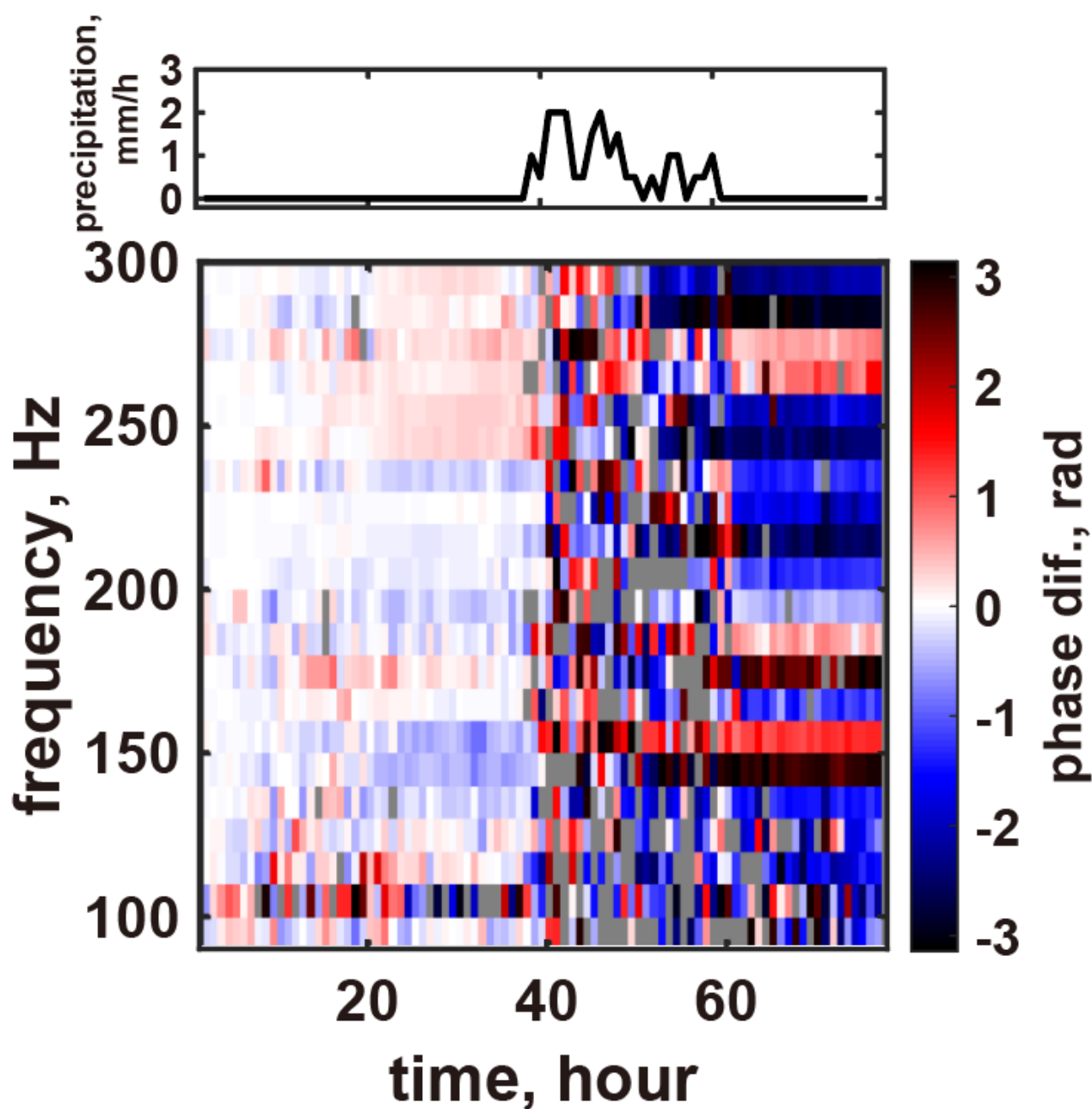


図1. 降水量と AC8 に関する計測初期の値に対する位相差の時間変化.
下図の灰色は S/N 比が 2 未満であったことを表す.

Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

*Tatsuki Nara¹, Hiroyuki Goto²

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

地震波形の類似度評価は地震学および地震工学における重要な要素の一つである。例えば、センブランス解析、震源インバージョンなどでは、地震波形の類似度評価が必要となる。現在、地震波形の類似度評価の指標として波形やその包絡線の平均二乗誤差を使用することが一般的であるが、近年になって最適輸送理論の一つであるワッサーズタイン計量 W_2^2 を適用することが提唱されている。そこで、本研究では W_2^2 を用いてセンブランス解析を行い、従来手法との比較を行った。

センブランス解析とは、地震計アレイにおける観測波形の走時差と地震計間距離から波群の伝播速度と到来方向を推定する解析手法をいう。解析過程において、波形の類似度を評価する必要があるが、その指標として平均二乗誤差と等価なセンブランス係数 S_e を用いるのが一般的となっている。ここで、 W_2^2 と S_e の性質の違いを考察するため、同一波形の時間ずれ(図1)に対する W_2^2 , S_e の挙動をそれぞれ示す(図2, 図3)。ともに類似度の最大点は時間ずれ0[s]となっているが、 S_e は時間ずれに対して細かく振動し、局所解が複数出現している。一方、 W_2^2 は時間ずれに対して凸性を示し、類似度の最大点を大域的に判断できることが分かる。

本研究では、2018年6月18日7時58分に発生した大阪府北部の地震を対象とし、大阪市福島区にある地震計アレイで観測された速度波形のUD成分を用いて、実体波に対するセンブランス解析を行った。解析結果の見方を図4に示し、解析結果を図5に示す。P波・S波の到達時には W_2^2 , S_e ともに北東方向に解が出現しており、地震計アレイから見て震源である高槻市が北東方向であることを踏まえると、整合性の取れた結果といえる。また、 W_2^2 の方が局所解が少ない傾向にあり、解析解の特徴を大域的に捉えられるということが分かる。

<参考文献>

- ・ Bjorn Engquist and Brittany D Froese. Application of the wasserstein metric to seismic signals. arXiv preprint arXiv:1311.4581, 2013.
- ・ Bjorn Engquist and Yunan Yang. Optimal transport based seismic inversion: Beyond cycle skipping. arXiv preprint arXiv:2002.00031, 2020.
- ・ 水上昌信, 鍬田泰子, 後藤浩之, 福島康宏. 大阪平野における高密度地震観測システムの構築. 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 2018.

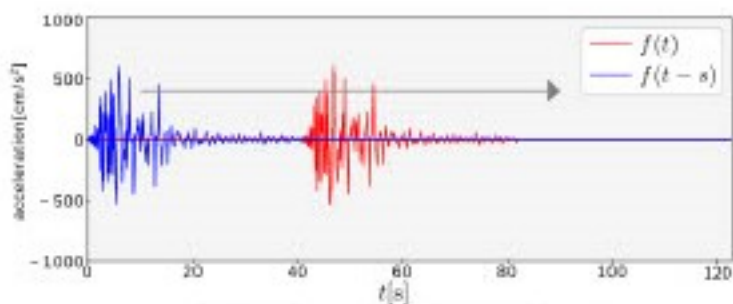


図 1. 同一の地震波形の時間シフト

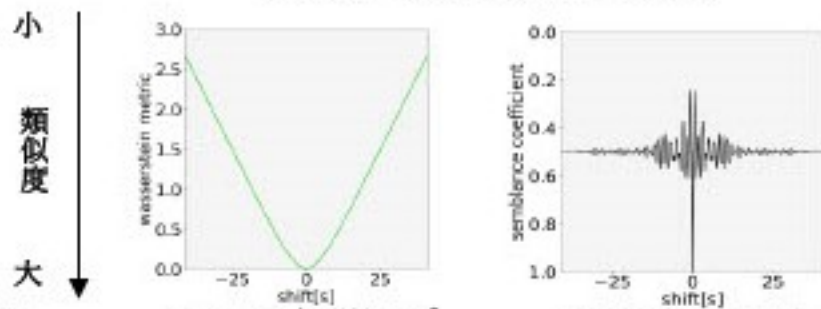


図 2. 二波形間の W_2^2

図 3. 二波形間の S_e

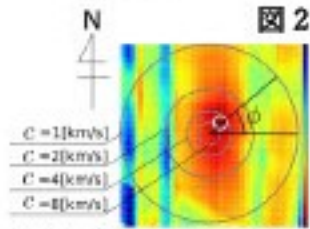


図 4. 解析結果の見方

赤色に近いほど波形の類似度が大きく、青色に近いほど波形の類似度が小さい。白丸は波形の類似度の最も大きい点を示しており、そのときの c, ϕ がそれぞれ実際の伝播速度と到来方向を示していると推定できる。

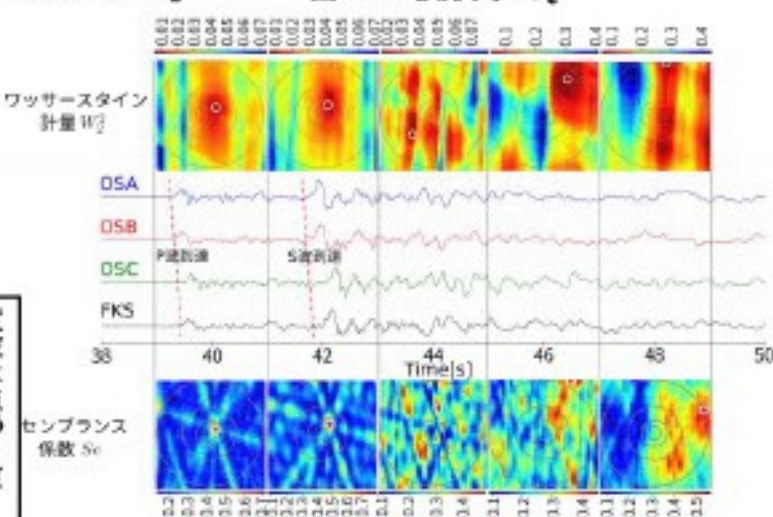


図 5. 実体波に対するセンプランス解析の結果

Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

*Kiyoshi YOMOGIDA¹

1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University

波形インバージョンなど地震学に用いられているモデルパラメータの推定において、最近では非線形性が高く複雑な問題を対象とする場合が多い。ローカルな極小値への収束や遅い収束速度を避けるための初期値の選択など、他分野でも様々な手法の提案がなされてきた（e.g., Wienerフィルタを介した波形や相互相関の最適化）。音源などの複雑な信号処理では、最適化への尤度関数から直接モデルパラメータを推定するのではなく、単純な代理関数（surrogate function）を導入し、これを反復操作で最適化する過程で安定したパラメータ推定が可能となる方法が利用されている。さらに、従来の推定法は単一の事象の場合には有効だが、複数の事象が混在しているデータ（例：複数のガウス分布が重なると混合ガウス分布となる（Fig. 1））では、これを直接の最適化の関数とすると、非効率で不安定な解法となってしまう。そのような場合、EMアルゴリズムと呼ばれる手法より、単純な反復操作の繰り返しで安定して各現象のパラメータが推定できる。地震学で類似の問題としては、複数の震源からの波形データや後続の散乱波が大きく複雑な場合などに当たる。本研究では、これらの他分野で発展中の手法を検討し、波形インバージョンなど地震学への応用を考察する。

複数の現象が混在したデータに対しては、各現象の確率密度関数pdfは重み α 付きガウス分布（平均 μ と標準偏差 σ ）の簡単な和である、式(1)やFig.1で表される（ θ は μ などの推定すべきパラメータ群とする）。これが最大となるような θ を求めるには、直接の計算は困難なので、従来は選んだ初期値からのTaylor展開での線形化により反復操作で求めた。これに対して、EMアルゴリズムではJensenの不等式（ f は一般の凸関数、式(2)）より、潜在変数 z を介して、式(3)の右辺で尤度関数を代用する。ここで、 λ を反復操作における k 番目ステップのパラメータ推定値 $\theta^{(k)}$ とした元の変数 x の条件付きpdfとおくと、式(4)となる。さらに、 $\theta = \theta^{(k)}$ の場合に等号となるので、右辺 $g(\theta)$ が最大となる θ を求め、それを $\theta^{(k+1)}$ として更新すれば良い。このような反復操作によって、最適な推定値が安定して得られる（Fig. 2）。式(4)は元のpdfである式(1)に比べて、容易に最適化が求められる形式を選ぶことができる点が重要である。式(4)の被積分関数内のlog関数の分子のみ θ が含まれるので、実際にはこの部分を代理関数 Q として、これを各ステップで最大となる θ を探索する。

混合ガウス分布の場合、各データが独立に生成されたと仮定できれば、 j 番目のガウス分布が生成される事前確率を α_j とすると、式(4)のうち、最適化すべき代理関数は式(5)となる。これを α, μ, σ での偏微分がゼロとして、 k 番目のステップの各パラメータが解析的に求まるので、十分に収束するまで単純に反復操作すれば良い。

代理関数を規定するJensenの不等式は、逆関数についての式(6)や対数関数に対する式(7)など様々な例がある。これらを活用すると、ガウス分布のみならず、一般のpdfの形式に適用できる。例えば、L1ノルム最小に対応する、平均の両側が指数関数的に減少するラプラス分布でも、式(5)と同様な定式化が可能となる。よって、波形インバージョンだけでなく、エンベロップや多次元のスペクトルグラム、f-kダイアグラム等、地震学で広い応用が可能である。

$$p(x, \theta) = \sum_{j=1}^M \alpha_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (1)$$

$$f\left(\sum_i \lambda_i \theta_i\right) \leq \sum_i \lambda_i f(\theta_i) \quad (2)$$

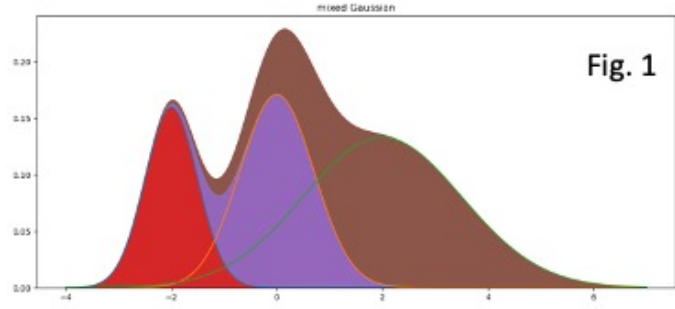


Fig. 1

$$\log p(x, \theta) = \log \int_z p(x, z, \theta) dz \geq \int_z \lambda(z) \log \frac{p(x, z, \theta)}{\lambda(z)} dz \quad \text{where} \quad \int_z \lambda(z) dz = 1 \quad (3)$$

$$= \int_z p(z|x, \theta^{(k)}) \log \frac{p(x, z, \theta)}{p(z|x, \theta^{(k)})} dz \equiv g(x, \theta, \theta^{(k)}) \quad (4)$$

$$Q(\theta, \theta^{(k)}) =$$

$$\sum_i \sum_j p(z_i \equiv j | x_i, \theta^{(k)}) \log \left(\frac{\alpha_j}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sum_i \lambda_i x_i} \leq \sum_i \lambda_i \frac{1}{x_i} \quad (6)$$

$$\log x \leq \frac{x}{x_0} + \log x_0 - 1 \quad (7)$$

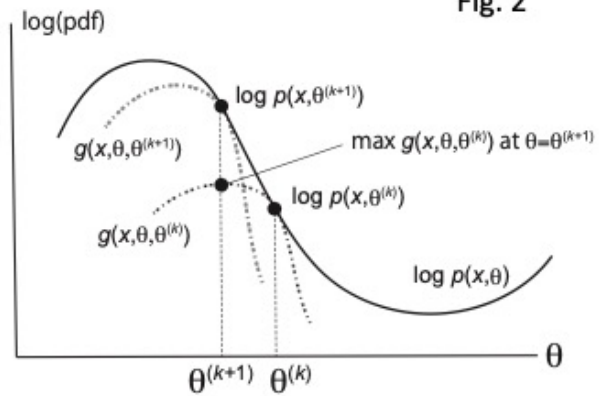


Fig. 2

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:15 AM - 12:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:15 AM - 3:30 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-2

chairperson: Hisashi NAKAHARA (Graduate School of Science, Tohoku University), Daisuke Sato (DPRI, Kyoto University)

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

[S01-06] Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S01-07] Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

*Takumi Miyajima¹, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo)

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

[S01-08] Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

*Shun FUKUSHIMA^{1,2}, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)

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

[S01-09] Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

*Hisashi NAKAHARA^{1,2}, Matthew M. Haney² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS)

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

[S01-10] Amplitude dependence of seismic wave attenuation

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

ベイズ推定では、観測データとモデルパラメータを理論的に関係付ける観測方程式とモデルパラメータに関する事前情報から、モデルパラメータの事後分布を構成する。フルベイズ推定では、観測方程式と事前分布によるモデルパラメータの拘束を重み付ける超パラメータについても事前分布（超事前分布）を考慮し、モデルパラメータと超パラメータに関する同時事後分布を構成する。同時事後分布はモデルパラメータと超パラメータの全統計的情報を記述するフルベイズ推定の形式解だが、ここからモデルパラメータの有用な情報を引き出す縮約の操作は必ずしも容易ではない。Sato, Fukahata, & Nozue (2022)は、同時事後分布から単純に計算した場合、モデルパラメータの標本平均が事後母平均へ収束するのにモデルパラメータ数の指数関数時間が必要になることを結論づけた。赤池のベイズ情報量規準(ABIC; Akaike, 1980)として知られる同時事後分布をモデルパラメータについて積分(周辺化)する方法が有効な縮約であることが同時に示されたが、非線形問題では通常ABICを解析的に計算できないという問題は残る。同時事後分布のモデルパラメータに関する周辺化を数値的に実行することも、モデルパラメータ数の指数関数時間を要するために実行は一般に現実的でない。

本研究では、非線形問題でABICおよび事後母平均を高速に計算するための新たなモンテカルロ法を提案し、その性能を検討する。新手法では、(i)モデルパラメータの条件付事後分布と(ii)超パラメータの周辺事後分布へと同時事後分布を形式的に分解する。超パラメータの周辺事後分布の解析形(閉形式)が既知である場合、(ii)は従来のABICの計算と同一であり、上記手法は入れ子構造をなしたMulti-Stage Monte-Carlo法として数値計算できる。さらに、超パラメータの周辺事後分布の閉形式が未知であるより一般の場合には、熱力学的積分法(Kirkwood, 1935)と呼ばれる、統計力学における自由エネルギーの高速計算法を応用する。熱力学的積分法は、未規格化確率(ボルツマン因子)の積分の対数(自由エネルギー)の超パラメータ微分が高速計算可能なボルツマン因子の対数(エネルギー; 損失関数)の平均になることを利用した、一種のlikelihood free推定である。超パラメータの周辺事後分布は、データ分布・モデルパラメータの事前分布・同条件付事後分布に対する3つの自由エネルギーの線型結合になっており、各項の超パラメータに関する微係数を熱力学的積分法で高速に、つまり非指数関数時間で計算できる。これにより、超パラメータ値の微小変化に対するABICの変化量(ベイズ因子)が得られ、前述のMulti-Stage Monte-Carlo法が非指数関数(多項式)時間解法として機能する。

発表では、上記手法を概略した上で、その性能を従来標準的に用いられてきたフルベイズモンテカルロ法の結果と比較する。これまでに、Sato, Fukahata, & Nozue (2022)と同様の線形逆問題で、モデルパラメータの事後平均の計算において新手法の方がより高速であることを確認している。さらに、新手法の応用として、同時事後分布が非ガウス分布になる、非負の拘束下 (ABICの閉形式が得られるためベンチマークとして利用できる)やスパース条件下での滑りインバージョンを取り上げる予定である。

Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

*Takumi Miyajima¹, Ryosuke Ando¹

1. The University of Tokyo

1.はじめに

時空間領域に関する境界積分方程式法を解くためには、境界要素数 N 、時間ステップ数を M として、積分核と滑り速度の畳み込みを愚直に計算すると $O(N^2M^2)$ の計算量と $O(N^2M)$ のメモリを使用することになる。我々は、巨大地震の導き破壊シミュレーションを高効率に行うため、Sato and Ando(2021)で構築されたFDP=H行列法を3次元問題に拡張するとともに、大規模並列計算に対応した実装とするためのコード開発を行なっている。FDP=H行列法とは、既存のFDP法(高速領域分割法, Ando(2016))で積分核の性質ごとにドメインを分割し、走時近似(Averaged Reduced Time: ART)によって時空間畳み込み積分を近似的に実行してH行列法を取り入れ、一部には量子化などの近似を用いる工夫を行うことで、 $O(N\log N)$ の計算量を達成するものである。今回は、3次元モデルを用いてFDP=H行列法で考慮する近似計算のうち、H行列の近似以外の部分を実装したため、その精度評価を行なった。

2. 手法

FDP法によって、積分核の因果律円錐はP波、S波の前線のDomain Fp, Domain Fsと、P波の到着後S波の到着までのDomain I, S波が過ぎ去ったあとのDomain Sの3つに分割される。

Domain Fは時間幅が $O(1)$ であり、グリーン関数の性質から応力核を時間方向に積分すると空間依存性の強い項と弱い項に分離できると考えられる。Domain Iは時間幅が広いため、応力核を時間方向にリサンプリングする量子化を行い、計算量やメモリを削減する近似を行う。H行列への実装を見越して、滑り速度の累積和(滑り)の差と積分核の積の形から、滑り速度の累積和と積分核の差の積の形に式変形を行なった。

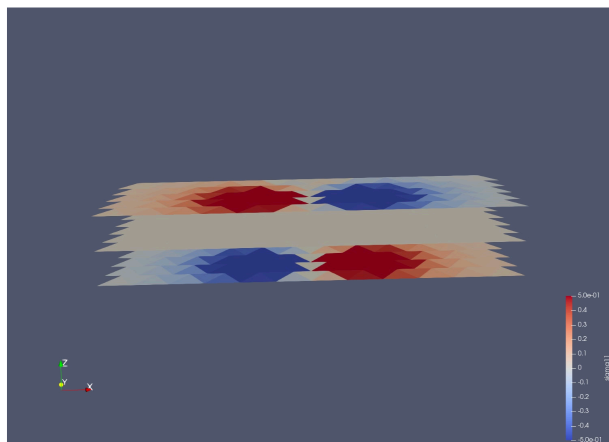
Domain Sは応力核が時間変化しない性質をもつ。本来は全ドメインに対して、空間依存の応力核行列の距離減衰の性質を用いたH行列近似を行うが、今回はH行列における分割を想定し、実空間の x, y, z 各軸方向に数等分の分割を行い、各クラスターの重心を観測点の代表とみなして走時の近似を行うARTの実装のみ行なった。精度評価のための問題設定は次のようなものである。まず、断層形状モデルとして、3枚の断層面を平行に配置したものを仮定する。次に、1つの断層の中央付近を一定の時間滑らせ、周囲の断層面上での応力変化を計算する。さらに、応力の時空間変化について、厳密に計算した場合と金次計算した場合をそれぞれのドメインごとに比較して、近似精度を評価する。

3. 予備的結果

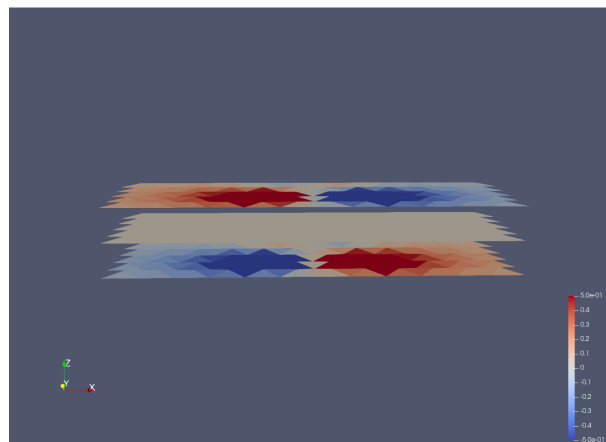
手始めに、上記クラスタサイズをそれぞれの軸方向に2分割して計8個のクラスターを設定し、応力時空間変化を計算した。その結果、Domain Sについては厳密解に近い結果が得られたが、それ以外のドメインについては誤差がより大きいという結果となった。学会発表では、クラスタリングや量子化、ARTなど複数ある近似の、最終的な応力値における誤差への依存性を詳しく評価した結果を報告する予定である。

$c_x=c_y=c_z=2$ σ_{11} 成分

厳密解



近似解

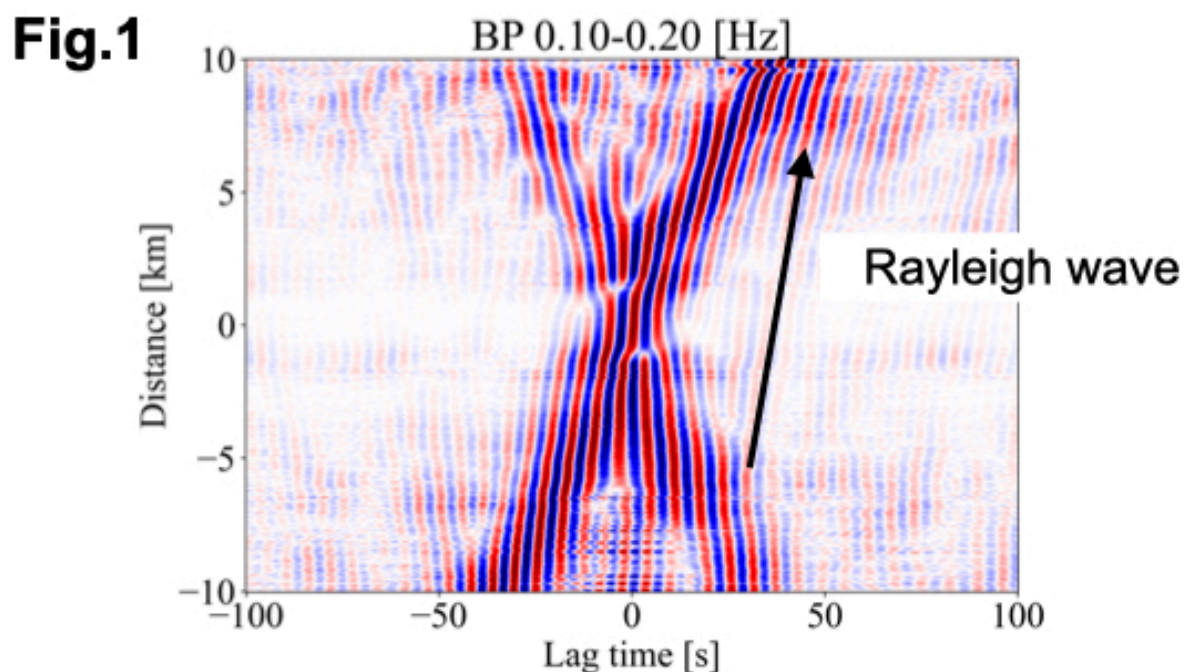


Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

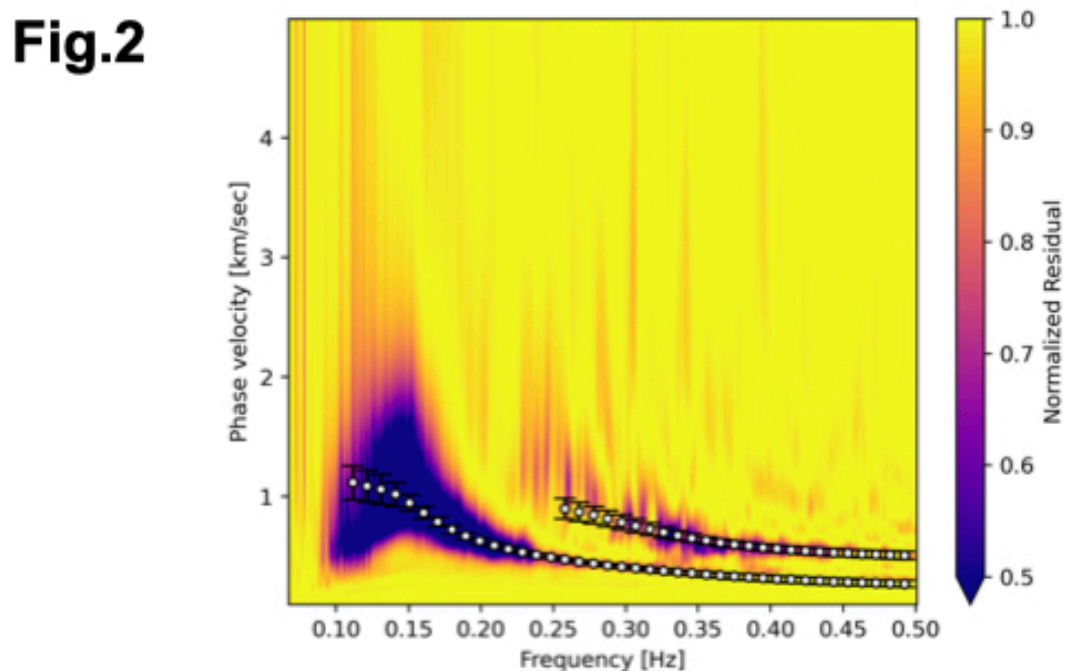
*Shun FUKUSHIMA^{1,2}, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences

近年、光ファイバをセンサとして、歪みを数m間隔で数十kmの長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing（以下 DAS）が地球科学分野に応用されつつある（e.g., Zhan 2019）。これまで、我々は海底ケーブルにおけるDASデータに対して地震波干渉法を適用し、抽出した表面波から堆積層・最上部地殻のS波速度構造を高分解能に推定してきた(Fukushima et al. 2022)。これまでの研究は、抽出される表面波はレイリー波であると仮定してきた(Fukushima et al. 2022)。しかし、Nakahara et al. (2020)は歪み記録のspatial autocorrelation (以下SPAC)の定式化により、DASデータに対して地震波干渉法を行った場合、レイリー波に加えてラブ波も抽出され、観測点間隔が波長に対して、十分に離れていない場合にはラブ波の影響は無視できない可能性があることを示した。しかしながら、DAS記録だけではファイバー軸方向1成分記録であるため、レイリー波とラブ波の分離が困難である。本研究では、DAS記録と3成分地震計間のSPACについて定式化を行い、その結果、ファイバー軸方向と地震計設置方向のなす角度に応じた補正項が必要であることがわかった。さらに、DAS記録と地震計上下動成分に対して地震波干渉法を行うことで、レイリー波だけが抽出され、DASと地震計のトランスバース成分の地震波干渉法では、ラブ波が主に抽出されることを示した。レイリー波のみを抽出するために、東京大学地震研究所が所有する光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用したDAS観測記録と同ケーブルシステム上の海底地震計(SOB01)の上下動記録に対して地震波干渉法を適用し(Fig.1)、レイリー波の位相速度を、定式化したSPACを適用して推定した(Fig.2)。これまでの研究(Fukushima et al., 2022)では、ラブ波を考慮していない歪みSPACからレイリー波の位相速度を推定している。本研究から求めたDAS-地震計上下動のSPACから推定した結果を比較した。その結果、周波数0.1-0.2Hz間では、それぞれの位相速度はブートストラップ法により推定した誤差の範囲内であり、研究対象地域の場合、DAS-DAS記録間で地震波干渉法を行った場合のラブ波の影響は小さいことが確認された。今後、DASと通常の地震計を組み合わせることで、海域における3次元的なS波速度構造を高分解能に推定できると考えられる。さらに、DASと地震計を組み合わせることでレイリー波とラブ波の分離が可能であるため、鉛直異方性構造の推定への応用が期待できる。



- Fig1. Calculated correlation between DAS and vertical component of OBS03 at the frequency range between 0.1-0.2 Hz. We will showed only Rayleigh waves can be extracted using the seismic interferometry between DAS data and a seismometer from formularization of SPAC.



- Fig2. Dispersion curves of fundamental and first-higher modes of the Rayleigh waves estimated from formulated SPAC in this study.

Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

*Hisashi NAKAHARA¹, Matthew M. Haney²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS

はじめに

分散型音響計測（DAS）は光ファイバーケーブルに沿った軸歪（速度）の時系列を長距離にわたって稠密に測定できることから、地震学分野でもその利用が広がっている。DASで測定される軸歪は、通常の地震計により観測される並進成分（変位など）とは異なるため、地震学でこれまでに使用されてきた手法を歪みに拡張する必要がある。我々は、DASで測定される軸歪に対して地震波干渉法を適用するための理論構築を行ってきた（Nakahara et al., 2021; Nakahara and Haney, 2022）。最近、DASの歪記録と通常の地震計記録とを併用した地震波干渉法解析が提案され、数値計算と実際のデータ解析が行われた（Nayak et al., 2021）。本研究では、SPAC法に基づいて、DAS記録と変位記録とのクロススペクトル（周波数領域での相互相関）を解析的に表現することに成功したので、その結果について報告する。

定式化と結果

問題設定は次のとおりである。原点にDASのチャンネルがあり、そこで軸歪 e_{rr} （方向は任意に設定可）を測定するものとする。また、原点からx軸方向に距離 r だけ離れた点に通常の地震計を置き、そこで変位3成分 u_r, u_θ, u_z を測定するものとする。これらの観測点に、さまざまな方向からレイリー波、ラブ波の平面波が入射するものとする。このような問題設定に対して、先行研究（Nakahara et al., 2021）の手法にほぼ従った定式化を行う。その結果、軸歪と変位3成分とのクロススペクトルを解析的に導出することができた。

その結果、変位の上下動成分と軸歪との相関は、レイリー波のみが寄与することが分かった。そのため、上下動成分を用いると、ラブ波の影響を受けずにレイリー波の分散曲線の推定を高精度に行えるものと考えられる。また、等方成分の項は偶数次のベッセル関数で表現される。一方、変位の水平動2成分を用いた場合、軸歪との相関には、レイリー波とラブ波の双方が寄与することが分かった。ただし、観測点間距離が波長に比べて長いFar-fieldでは、特にDASの光ファイバーの軸方向に対して45°の角度をなす方向にある観測点でのトランスバース成分を用いると、ラブ波をうまく抜き出せることが分かった。このことはNayak et al. (2021)により数値計算に基づきすでに指摘されていたが、本研究でも理論的に確認することができた。一方、観測点間距離が波長に比べて短いNear-fieldの場合は、レイリー波、ラブ波ともに卓越することがわかった。これは本研究が初めて指摘する結果である。また等方成分の項は、奇数次のベッセル関数を含み、上下動成分の場合とは異なる。

相互相関の物理的意味（等方的波動場の場合）

地震波干渉法の理論に基づくと、等方的波動場に対しては、相互相関（クロススペクトル）とグリーン関数との間に明確な対応関係があり、相互相関の物理的な意味を理解することができる。Nakahara and Haney (2022)と同様の解析に基づき、本研究でも解釈を行うと、軸歪と変位とのクロススペクトルは、原点での軸方向のダイポール震源に対する観測点での変位のグリーン関数であることが示された。これにより、クロススペクトルの物理的意味が明らかになり、実際に解析において得られたクロススペクトルの解釈を行う上で有用である。

結論

最近、DAS記録と通常の地震計記録とを併用した地震波干渉法解析が提案されており、本研究では、SPAC法に基づいてDAS記録と変位記録との相互相関について解析表現を得ることに成功した。また等方的波動場に対して、クロススペクトルの物理的意味を明らかにすることができた。

Amplitude dependence of seismic wave attenuation

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

Q 値とは非弾性減衰を表し、過去の観測や室内実験から弱い周波数依存性があることが知られている。そして実験的研究により、非弾性減衰の主なメカニズムは粒界すべりであること、 Q は大きなひずみ振幅に対して非線形な応答を示すことが明らかにされている。しかし、現在行われているあらゆる地震波の解析において、非弾性減衰が振幅に依存しないことを前提としている。そこで本研究では、地震波の非弾性減衰は本当に振幅に依存しないのかを、地震波の解析から求めることを目的とした。

2003 年宮城沖地震の余震と 2008 年岩手・宮城内陸地震の余震を解析対象とした。マグニチュードの幅は 3.0-5.3 である。まず震源が 5km 以内にある地震ペアを選択し、同一観測点における P 波初動のスペクトル比を計算した。次にそのスペクトル比を 2 つの地震の観測走時の平均で割り算し、震源距離の影響を取り除いた。最後に観測された振幅比がある幅（振幅比の常用対数で 0.2 毎）の中に入る全ての地震ペアをスタックすることで観測スペクトル比を計算し、それに理論スペクトル比をフィッティングすることで、観測振幅比の異なる地震間における平均的な Q^{-1} の差を決定した。

その結果、観測振幅比が 1 の地震ペアでは平均的な Q^{-1} の差はゼロであるのに対し、振幅比が大きくなるとその差が徐々に大きくなることがわかった。この観測振幅比と Q^{-1} の差に正の相関があるという結果は、地震波が非弾性減衰の振幅依存を強く示唆している。

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 3:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 6:30 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] PM-1

chairperson:Kiwamu Nishida(ERI, the university of Tokyo), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

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

[S01-11] Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

*Yuki Ihara¹, Shiro Hirano¹, Hironori Kawakata¹ (1. Ritsumeikan University)

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

[S01-12] Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

*Masahiro KOSUGA¹ (1. Graduate School of Science and Technology)

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

[S01-13] Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

*Shota KATO¹, Kiwamu Nishida¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S01-14] On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

*Hitoshi KAWAKATSU^{1,2} (1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica)

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

[S01-15] Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

*Kiwamu NISHIDA¹, Takashi TONEGAWA², Tatsuya KUBOTA³, Mie ICHIHARA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED)

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

[S01-16] Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

*Kazunori YOSHIZAWA^{1,2}, Kotaro TARUMI² (1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University)

Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

*Yuki Ihara¹, Shiro Hirano¹, Hironori Kawakata¹

1. Ritsumeikan University

地震の揺れは一般に、震央から離れるにつれて弱まるような同心円状の震度分布を示すが、例えば、スラブ内で地震が発生した際には、それとは異なる、「異常震域」と呼ばれる震度分布を示すことがある。遠方での地震動増大は、主に数Hz以上の高周波帯域において顕著に観察され、地下の散乱構造、非弾性減衰構造に起因するとされている (Furumura and Kennett, 2005)。日本陸域において異常震域は観測され議論がなされているが、陸域から海溝にかけての、海域については十分な議論がなされおらず、陸域を離れてどこまでの領域でどのように振幅が増大しているかなどは、よくわかっていない。このことは、海域における地震波観測網が充実していなかったことに起因するが、2016年8月15日以降は、防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網S-net (<https://doi.org/10.17598/nied.0007>) による観測データが公開されている。そこで本研究では、深発地震による地表面最大振幅を陸域-海溝にかけての、地表面の最大振幅分布を高感度地震観測網Hi-net (<https://doi.org/10.17598/nied.0003>) と日本海溝海底地震津波観測網S-netを用いて調べた。その結果、4~8Hzの帯域については、いわゆる異常震域のような振幅増大が陸域から海溝にかけて見られたが、0.25~0.5Hzの帯域については、陸域では振幅が減少し、海溝付近で振幅が増大する現象が見られたため、卓越周波数0.25Hzとして、深発地震についての2D波動伝播シミュレーションを行った。

深発地震の観測データとして、2017年7月13日4時48分頃に日本海で発生した、震源深さ603km, M6.3の地震と、2021年9月29日17時37分頃に日本海で発生した、震源深さ394.4km, M6.1を使用した。ただし、Hi-netとS-netでは計器の周波数応答が異なるため、Maeda et al. (2011) を参考に、S-netのHi-net化処理を行った。S波の最大速度振幅に着目し、海溝軸に直行する方向に最大振幅の分布を確認したところ、4~8Hzの帯域については、いわゆる異常震域のような振幅増大が陸域から海溝にかけて見られた。しかし図1aに例を示すように、0.25~0.5Hzの帯域については、陸域では振幅の減少、海域では振幅の増大が見られた。近地地震で同様の最大速度振幅の分布図を作成したところ、Hi-netとS-netで系統的には、それぞれ幾何減衰が見られるものの、陸域と海域間での明確なステップが確認できた。この原因として、陸域と海陸で地盤増幅率や計器と地盤とのカップリングが異なる可能性が考えられ、これらを除くために、2018年8月19日9時19分にフィジーで発生した、震源深さ600km, M8.2の遠地地震の観測データとの比をとった。そうしたところ、近地地震についてはHi-netとS-netで連続的に海溝にかけて単調に減少する結果が得られた。深発地震については、図1bに例を示すようにHi-net, S-netで震央から離れるにつれて最大振幅は減少していくが、海溝付近において振幅の増大が見られた。

この低周波での振幅増大がどのような地下構造によって引き起こされたものなのかを明らかにするために、卓越周波数0.25Hzとして、深発地震についての2D波動伝播シミュレーションを行った。また放射パターンの影響をなくすために、震源では等方S波を発生させ、数値計算にはMaeda et al. (2017) によるOpenSWPCを使用した。計算領域は、水平2500km、鉛直700kmの断面とした。速度構造はak135 model (Kennett et al., 1995) を参考に作成した。また、プレート形状は双曲線で近似し、プレート内部の値はFurumura et al. (2016) を参考に周囲よりも2%大きいとした。非弾性減衰を示すQ値はFurumura et al. (2016) を参考に、マントルウェッジを $Q_p=150$, $Q_s=100$, その他のマントルを $Q_p=450$, $Q_s=330$, プレート内部を $Q_p=1600$, $Q_s=1200$ とした。以下の4通りの組み合わせについてシミュレーションを行った：

- ①速度構造：均質、非弾性構造：無し、
- ②速度構造：1次元速度構造、非弾性構造：無し、

③速度構造：1次元速度構造&プレート形状，非弾性構造：無し，

④速度構造：1次元速度構造&プレート形状，非弾性構造：あり．

パターン②について，図1cに示すように，-300～0km辺りにおいて振幅増大が見られることから，プレート形状や非弾性減衰に依らず，1次元速度構造の影響により振幅増大が引き起こされていると考えられる．この振幅の増大は地表面でのsP変換がある地点で臨界角を迎え，さらにそれがモホ面やコンラッド面にトラップされることで引き起こされたと考えられる．しかし，この振幅増大域は観測結果よりも広範囲にわたって現れている．プレート形状の影響により，パターン③に示すように，海溝付近の比較的狭い領域で振幅増大が見られ，観測と比較的一致した(図1b)．パターン④について，振幅増大域はパターン③とほぼ一致したが，陸域での振幅の減少が見られない結果となった(図1b)．海溝付近で振幅が増大するという定性的な面は観測とシミュレーションで一致し，これは散乱や非弾性減衰の構造，震源の放射パターンに依らずとも再現が可能な現象であった．

謝辞：本研究はJSPS科研費JP22H01336の助成を受けたものである．

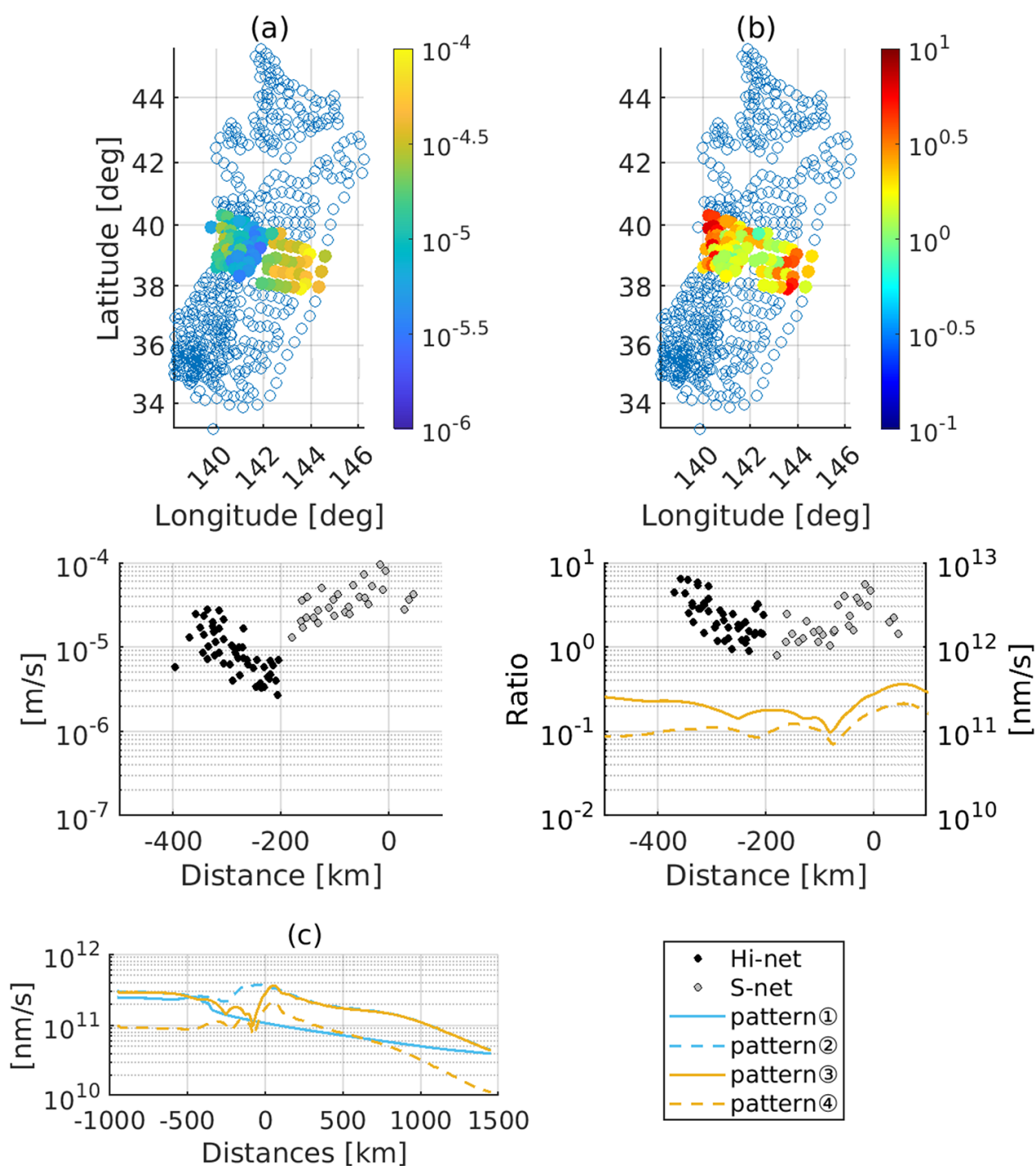


図1. (a) : 2017 年 7 月 13 日 4 時 48 分に日本海で発生した、震源深さ 603 km, M6.3 の深発地震の最大振幅分布図. 横軸は沖側を正とする、海溝からの距離. (b) : (a) を 2018 年 8 月 19 日 9 時 19 分にフィジーで発生した、震源深さ 600 km, M8.2 の遠地地震で規格化した図. (c) : シミュレーションによる地表面最大振幅図.

Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

*Masahiro KOSUGA¹

1. Graduate School of Science and Technology

1. はじめに

走時データを用いた震源決定において、震源上方に観測点が存在しない場合の震源深さは、地震発生時刻とのトレードオフのため精度良く推定することが困難である。これは海域で発生した地震において深刻な問題であった。それはS-net観測点でのデータを用いることで解消された地域があるとは言え、過去に発生した地震に対する状況は変わっていない。これまで、さまざまな地表（海面）変換波が海域地震の震源深さの精度向上に用いられてきたが、目視で確認できる周波数帯の利用に限られていたのに加え、変換波の波動場の利用例はほとんどない。一方、特性の揃ったHi-net観測網の波形記録を広帯域化すると、多数の後続波が空間的に連続した波動として検出できることがわかってきた。前報（JpGU2022）では、広帯域化した波形のslant-stackを行うことで各地震の波形を単純化し、波形相関によって分類された地震の空間分布・CMT解・波形の特徴の検討を行なった。今回は、3次元地下構造を仮定した波動伝播シミュレーションによって計算した波形に対しても同じ処理を行い、観測スタック波形がシミュレーションによってどの程度再現可能なのかを調べた。また、シミュレーションのスタック波形が震源深さに対して系統的に変わる性質が震源の深さ推定に適用可能なことがわかったので報告する。

2. データ処理

波形に対して、地震計の特性補正・フィルタリング・auto gain controlを行った後でスタッキングを行った。フィルターの帯域は0.02-0.2, 0.05-0.5, 0.1-1.0 Hzの3通りを用いた。スタッキングは見かけ速度7.0~9.0 km/sまで0.4 km/sごとの6通りに対して行った。スタッキングは震央からの距離が400 km以内で、エンベロープ振幅のS/N比が設定したしきい値を超えている観測点の波形に対して行った。シミュレーションにはOpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いた。3次元地下構造は全国1次地下構造モデル（JIVSM）（Koketsu et al., 2012）を用いた。震央から400 km以内のHi-net観測点に対して計算された波形に対しても、観測波形と同様な処理を行った。対象地震は、岩手県中部の沖（39.53N, 143.56E, 15.7 km, M5.0）、宮城県北部の沖（38.66N, 142.15E, 42.1 km, M4.5）、および宮城県中部の沖（38.13N, 143.49E, 16.3 km, M5.0）の、いずれもプレート境界付近で発生した地震とした。震源位置・マグニチュード・メカニズム解は、気象庁CMT解のセントロイド位置・モーメントマグニチュード・ダブルカップル成分を与えた。

3. 観測とシミュレーションによるスタッキング波形の比較

シミュレーションによるスタッキング波形は、長周期の波、それより大振幅の中間周期の波、および小振幅で短周期の波の重なりと見ることができる。長周期の波が明瞭なのは規模が大きい地震に対して長周期のフィルターをかけた場合で、周期は20 s程度、振動の継続時間は50 s程度である。中間周期の波の周期は5 s前後で、相対的に小さい見かけ速度でのスタッキング波形において明瞭である。観測スタッキング波形と比較すると、両者がよく似ているのは、見かけ速度の範囲が7.0~8.2 km/sで初動から30 s程度の時間範囲内であることがわかった。見かけ速度がそれよりも速くなると、シミュレーション波形の中間周期の波の振幅は次第に小さくなる。また、シミュレーション波形では初動から30 s以降にも振幅の大きい後続波が見られるが、観測波形では明瞭な波動は見られない。ただし、これが一般的な傾向かどうかは他の地震に対するシミュレーションも行って検討する必要がある。

4. 震源深さ推定の試み

震源深さを変えてシミュレーションを行い、スタック波形の変化を確認した。それによると、中間周期の波の山谷の間隔（周期）が、震源が深くなると系統的に長くなることがわかった。これは、震源から後続波生成源までの距離が深さとともに長くなるためと解釈できる。この性質を使うと、観測スタック波形との相関から

震源深さを推定することができる。すなわち、震源深さと相関係数の関係は単一の山を有する2次関数的な形になると期待されるので、相関係数を深さの多項式で近似することで、相関が最大となる深さを決めることができ、それを震源深さと見なすことができる。

5. おわりに

観測スタック波形の主要な部分はシミュレーション波形においても再現できることが確認できた。また、シミュレーション波形の中間周期の波の周期が仮定した震源深さとともに系統的に変わることがわかった。この性質を用いると、海域で発生した地震の震源深さを精度良く推定できる可能性がある。今後は多数のシミュレーションによってこれらの結果の一般性を確認し、3次元的な震源位置の推定方法の検討が課題である。

謝辞

本研究では防災科研H-netの観測波形と気象庁CMT解カタログを使用した。波動伝播シミュレーションには東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用した。（公財）地震予知総合研究振興会からは研究費の援助をいただいた。以上の機関に感謝します。

Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

*Shota KATO¹, Kiwamu Nishida¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

脈動は0.05-0.3 Hzの帯域で海洋波浪によって励起されるランダムな波動場である (e.g., Nishida, 2017)

。0.1-0.3 Hzの帯域の脈動はsecondary microseismと呼ばれ、波浪の非線形相互作用に伴う圧力変動によって励起される。そのためRayleigh波とP波の励起が卓越することが知られている。脈動は従来地震波形に対するノイズとして扱われてきたが、近年では地震波干渉法によって地球内部構造の推定に用いられるようになった (e.g., Shapiro et al., 2004, Poli et al., 2012)。地震波干渉法解析では、観測点間の観測波形の相互相関関数を計算することにより、観測点間のグリーン関数を抽出する (Snieder and Larose, 2013)。しかし、地震波干渉法によって観測点間を伝播する実体波を抽出し地球内部構造を推定する場合、脈動実体波の非一様な波源分布や観測網の配置によっては相互相関関数に見かけ上の波が出現し、グリーン関数の推定において問題となることが知られている (e.g., Pedersen and Colombi, 2018, Li et al., 2020)。

そこで、本研究では0.1-0.25 Hzでの脈動P波を空間的に局在化したイベントとみなし、レシーバー関数解析手法を適用し、日本列島直下の構造推定を試みた。ここで、脈動P波の波源は地震のように空間的に局在化しているが、震源時間関数は数日スケールで継続的であると仮定し、観測点下の不連続面でのP-s変換波を抽出するため、脈動P波に適した新たなレシーバー関数解析手法を開発した。

解析に用いた観測波形は、防災科学技術研究所の展開する高感度地震観測網Hi-netの北海道を除く687点の上下動・水平動の速度計記録である。解析対象とした脈動P波のイベントは、0.1-0.25 Hzの全球的な脈動P波カタログ (Nishida and Takagi, 2022) から信号/ノイズ比の良いもの6000イベントとした。波源の位置はカタログで仮定した継続時間 (6時間) 内で一定であると仮定した。全観測点の上下動波形記録から1024秒の時間窓を切り出し、脈動P波の走時に沿って足し合わせることで入射P波を推定し、震源時間関数とみなした。脈動P波の走時の計算には1次元速度構造モデルAK135 (Kennett et al., 1995) と日本列島の3次元速度構造モデル (Nishida et al., 2008) を用いた。各観測点でのレシーバー関数は水平動成分を震源時間関数でデコンボリューションすることで求めた。

この手法の有効性を検証するため、QSEIS (Wang, 1999) を用いて仮想的な脈動P波の波形を計算し同様なレシーバー関数解析を行った。速度構造をAK135とし鉛直方向のシングルフォースによるグリーン関数にランダムな震源時間関数を畳み込むことで仮想的な脈動P波波形を計算した。点震源を1つ置く場合、点震源が空間的に分布している場合の双方について計算を行った。計算の結果、点震源が空間的に分布している場合であっても十分な数の時間窓があれば点震源を1つ置く場合と同様P-s変換波を確認することができた。

次に、得られたレシーバー関数について深度変換を行った。速度構造AK135を仮定し、深さ200-1000 kmにおけるP-s変換波のPに対する相対走時を $\tau_{\text{P-s}}$ toolkit (Crotwell et al., 1999) によって計算し、計算したP-s変換波の相対走時に沿ってレシーバー関数を足し合わせることで深度方向への変換を行った。波源の領域 (北大西洋、北太平洋、南太平洋) ごとに全観測点のレシーバー関数の深度変換を行い重合した結果、共通して410 km不連続面、660 km不連続面に対応するピークを確認できた。さらに、深度変換したレシーバー関数から日本列島の東西断面図を作成したところ、連続的に410 km不連続面、660 km不連続面を確認することができた。今後は、不連続面の空間分布について議論を進める予定である。

On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

*Hitoshi KAWAKATSU^{1,2}

1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

For the investigation of the oceanic lithosphere-asthenosphere system employing regional OBS array data, it is essential to resolve azimuthal anisotropy as well as radial anisotropy (e.g., Takeo et al., 2018). Considering the presence of strong sub-Moho anisotropy both in P_n and S_n , it is important to analyze both P and S anisotropy for Rayleigh waves as the phase velocity is quite sensitive to the shallow-most P-wave structure. It is well established that, in the case of weak anisotropy, the sensitivity kernels of azimuthal anisotropy have the same form as those for the corresponding VTI parameters (Montagner and Nataf, 1986). This may be understood as that, within the framework of the first order perturbation theory, the eigenfunction is unchanged and thus the phase velocity change is expressed in terms of the equivalent VTI parameters within the plane of the wave propagation. Recently, Russell (2021, Ph.D. Thesis, Appendix E, F) discussed how parameterizations using Love parameters ($\delta A(B)$, $\delta L(G)$, $\delta N(E)$, $\delta F(H)$) due to (Montagner and Nataf, 1986) and those using velocity perturbation ($\delta \alpha_H$, $\delta \beta_V$, $\delta \beta_H$, $\delta \eta$) due to (Takeuchi and Saito, 1972) might be related for azimuthal anisotropy. After pointing out that solving for $\delta \beta_V / \beta_V$ (or $\delta \alpha_H / \alpha_H$) on its own is not equivalent to solving for G/L (or B/A) because of the presence of the δF -term, they suggest assuming $\delta \eta / \eta \sim 0$ for inversion. However, the assumption $\delta \eta / \eta = 0$ is exactly the reason why the usage of the conventional η introduces the unpreferable behavior of P-wave kernels that is contaminated by the S-wave sensitivities (Kawakatsu, 2016) and unjustifiable; also existing mantle fabrics show a strong azimuthal dependence for $\delta \eta / \eta$. Instead, we suggest using the parameterization involving the new fifth parameter η_κ , i.e., ($\delta \alpha_H$, $\delta \beta_V$, $\delta \beta_H$, $\delta \eta_\kappa$). Because the fifth parameter is difficult to constrain, it might be more practical to omit the corresponding term in the inversion, which is equivalent to assume $\delta \eta_\kappa / \eta_\kappa \sim 0$, meaning azimuthal independency of the "ellipticity" parameter η_κ that offers a physical background of the modeling. Also, the aforementioned fabrics show a much weaker azimuthal dependency for $\delta \eta_\kappa / \eta_\kappa$ compared to that for $\delta \eta / \eta$. This approach may be useful for the scaling of S- and P-wave azimuthal anisotropy to reduce the number of parameters in the Rayleigh wave inversion.

Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

*Kiwamu NISHIDA¹, Takashi TONEGAWA², Tatsuya KUBOTA³, Mie ICHIHARA¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED

2022年1月15日、海底火山であるフンガ火山で大規模な噴火が発生した。噴煙は中間圏までに達し、顕著な大気Lamb波を励起した。大気Lamb波は海面変動を引き起こし、特異な津波として観測された。このような大気波動と津波のカップリング現象は、1883年クラカタウ噴火時にも観測されたが、現代的な観測によって捉えられたことは初めての事であった。また、今回の2022年フンガ火山の噴火に伴う振動現象を理解する上で、大気波動と津波、地球自由振動など、多圏にわたるカップリングが重要な役割を果たしている事が分かってきた。

噴火を理解する上で、噴火の推移を推定することは重要である。火山近傍で地震・空振観測記録があれば理想的であるが、海洋島での観測は限られているのが現状である。例えば遠地の空振観測による噴火推移の推定もなされているが、伝播の複雑性が定量的な議論の妨げとなっている。今回の噴火では、特に長周期帯域(<10mHz)では、多圏にわたるカップリングが波動の伝播を複雑にしており、噴火の推移の推定の障壁になっている。海洋外部重力波の短周期成分(0.015-0.05Hz)は、津波と異なり位相速度が100m/s以下と遅いため、大気とのカップリングの効果が弱い。そのため、単純なモデリングによる定量化が可能である。本研究では、海洋外部重力波の解析から噴火の推移を制約する事を目的とする。

本研究では、まずS-net、DONETの水圧計を解析した。これらの観測点では0.015-0.05Hzの周波数帯域で正の分散性をもつ海洋外部重力波の検出に成功した。0.015Hzでは噴火からおおよそ2日後、0.04Hzではおおよそ5日後に到来している事を確認した。海洋島の広帯域地震計記録(青ヶ島、南大東島等)でも同様の波が記録されていた。これは、海洋外部重力波によって海洋島が荷重変形しており、これを広帯域地震計が捉えていたためである(e.g., Hanson and Bowman 2005)。噴火の規模を見積もるため、WKB近似によりGreen関数を推定し(e.g., Dahlen and Tromp 1998)、S-net波形記録をモデリングした。観測値を説明するには、おおよそ1E10N程度の大きさのランダムな鉛直方向のシングルフォースが必要であることが分かった。海洋外部重力波の励起はUTC 4:00からはじまり5時間ほど継続したのち、UTC8:40頃に小規模な噴火を励起していたことも分かった。またそれらに加え、5-10mHzの帯域で津波は、海洋外部重力波に比べて2時間ほど遅れて励起されていることも明らかとなった。今後、これらの観測事実をもとに、噴火の推移を考察する予定である。

Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

*Kazunori YOSHIKAWA^{1,2}, Kotaro TARUMI²

1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

2022年1月15日（UTC）に発生したフンガトンガ・フンガハアパイ火山の爆発的噴火では、大気波動や気象津波など、大気・海洋・固体地球に渡る種々の振動現象が観測された。この噴火で発生した地震波も世界中の観測点で明瞭に記録されている。振幅の大きい表面波の波形記録から、複数の爆発噴火の発生が示唆されるが、長周期の分散性表面波では、小規模な爆発噴火の発生時間も含めた噴火全体のプロセスを知ることは難しい。本研究では、遠地で記録されたP波のback-projection（BP）解析により、爆発噴火のシーケンスを推定し、大気-固体カップリングによる振動周期との関連性も調べる。

本研究では、0.03~0.08Hzの遠地P波を用いてBP解析を行った。IRIS DMCから入手した世界各地の地震観測点の鉛直成分記録について、最初に発生した大規模噴火を基準として、波形の相関処理を行った上で、241観測点での波形記録を抽出した。走時補正にはAK135モデルを用いる。また噴火による遠地P波の極性は方位によらないことから、震源はsingle forceによるものと仮定し、極性の補正は行わない。これらの波形記録を用いて4-th root stackの方法でBP解析を行った。その結果、他の地震波フェイズがP波と重なっている状況下でも、複数の爆発や地震に関連するイベントを検出できた。

BP解析の結果から、一連の爆発噴火のシーケンスは2つのグループに分けられることがわかった。1番目のグループは04:02 UTC頃に始まった後、04:15 UTC頃とその200-300秒後に大規模な爆発が起こり、04:35 UTC頃まで確認できる。2番目のグループは約4時間後（08:26 UTC）に始まり、08:31 UTC頃に最後の大規模な噴火が発生している。本研究で推定された爆発噴火の発生時刻は、周期100秒以下の表面波の波群とも整合的である。

特に1番目のグループに分類された大規模な爆発噴火の発生時間の間隔は主に約270秒であった。この発生間隔の周期は大気-固体カップリングモード(OS29)の固有振動数3.7mHzとほぼ一致する。この噴火で観測された鉛直成分の振幅スペクトルでは、よく知られているもう一つの大気-固体カップリングモード(OS37, 4.4mHz)に比べ、3.7mHzの方が特に顕著なピークを示している。本研究の結果から、爆発噴火の発生サイクルが、OS29モードの固有周期と強く同期していたことが示唆される。

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 3:45 PM - 4:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:45 AM - 7:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-2

chairperson: Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

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

[S03-01] Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard

*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Hiroaki KAJIKAWA², Keisuke ARIYOSHI¹, Eiichiro ARAKI¹ (1. JAMSTEC, 2. AIST)

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

[S03-02] Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone

*Yuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Araki Eiichiro¹ (1. JAMSTEC / IMG)

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

[S03-03] Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹, Satoru Baba¹, Yojiro Yamamoto¹, Mark Zumberge², Shuhei Nishida¹, Yuya Machida¹, Hiroyuki Matsumoto¹ (1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography)

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

[S03-04] Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active seismicity since the end of 2020

*Yohei Kinoshita¹ (1. University of Tsukuba)

Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard

*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Hiroaki KAJIKAWA², Keisuke ARIYOSHI¹, Eiichiro ARAKI¹

1. JAMSTEC, 2. AIST

DONETやS-netの圧力計は圧力変化を高分解能で計測できるため、巨大地震発生の準備過程で発生する鉛直方向の地殻変動を計測できることが期待されている。しかしながら、圧力計はドリフト（校正値の経時変化）が発生することが知られており、地殻変動を計測するためには圧力校正が必要である。このドリフトによる誤差を補正するために、加圧－大気圧開放（ゼロ）－加圧のパターンを繰り返し、ゼロ点でのドリフトで加圧時のドリフトを補正する手法（A－0－A方式）があり、すでに海域での試験報告がある（太田ほか、2021）。

本研究では、複数タイプの圧力計に重錘形圧力天びんから一定圧力を連続印加して、ドリフト特性について考察する。室内実験ではDONETやS-netで採用されている水晶振動子を受圧部にもつ「水晶振動式圧力計」と主に産業分野で採用されてきたシリコン単結晶の半導体素子を受圧部にもつ「シリコン振動式圧力計」を計測した。水晶振動式圧力計は3式の8B7000-2-005（Paroscientific社）を、シリコン振動式圧力計は4式のEJX610A（横河電機社）ならびに3式のMT300（横河計測社）を準備して、合計10式の圧力計に重錘形圧力天びんから同時に加圧した（図1）。圧力計はすべて室温環境に設置して計測を行った。8B7000-I-005とEJX610Aは絶対圧力計であるのに対し、MT300はシールドゲージ圧計である。室内実験では、A－0－A方式の加圧パターンで印加した。具体的には、水深2,000 mに相当する20 MPaを約1ヶ月間連続印加して、1日1回約15分間だけ大気圧（ゼロ点）に開放する（図2）。20 MPaを連続印加しているときは重錘形圧力天びんによる基準圧力と圧力計の出力値との偏差を計算し、ゼロ点に開放したときは約10分間待機した後、4分間計測し重錘形圧力天びん内の大気圧計による基準圧力との偏差を計算する。

それぞれの圧力計について、加圧時とゼロ点の基準圧力との偏差の時系列変化の一例を図3に示す。黒点は加圧時の計測データ、赤線は加圧2日目からの指数項と線形項を組み合わせた近似曲線である（Watts & Kontoyiannis, 1990）。薄い黒点はゼロ点の計測データ、青線はその近似曲線である。シリコン振動式圧力計はゼロ点に開放することで、再加圧の直後には一時的にヒステリシスが観測されるが、間もなく元のドリフト曲線に漸近することがわかる。図3は圧力計の種類にかかわらず、一時的にゼロ点に開放しても連続印加の特性は保持されることを示唆する。約1ヶ月間の計測でそれぞれの圧力計のドリフト特性が認識できる。図4に圧力計の雰囲気温度を示すが、8B7000-I-005とEJX610Aの圧力偏差は温度変化に相関していることがわかる。MT300に長周期のゆらぎが観測されているが、雰囲気温度との明瞭な相関は見られない。図3の赤線の線形項の係数がドリフトの特性を表すが、20 MPaを連続印加したときの圧力計の係数は、(a) -0.09 hPa/日、(b) -0.12 hPa/日、(c) -0.10 hPa/日となっている。なおこれらは代表値ではなく、圧力計により個体差がある。

次に、ゼロ点の偏差の時系列変化について考察する。図3に青線で示した近似曲線の線形項の係数は、(a) -0.10 hPa/日、(b) -0.19 hPa/日、(c) -0.09 hPa/日となった。これは上述の20 MPa印加時の係数と調和的である。室内実験でA－0－A方式により、水晶振動式圧力計のドリフト特性を評価した研究はある（Kajikawa & Kobata, 2019）が、シリコン振動式圧力計でも加圧時とゼロ点のドリフト特性が一致することを確認できた。実験室の温度環境で温度特性が計測データに重畳されたが、本研究の室内実験の結果はシリコン振動式圧力計でもA－0－A方式が適用可能なことを示唆する。

謝辞：本研究の一部は、JSPS科研費（JP19H02411）の支援を受けている。

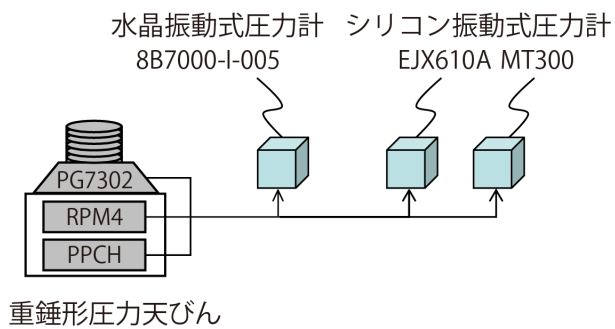


図 1：室内実験のダイアグラム図

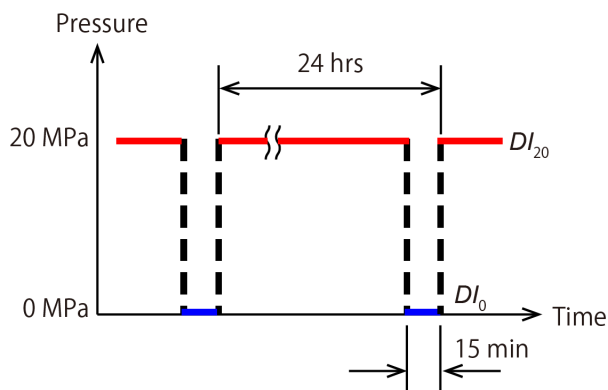


図 2：重錘形圧力天びんの加圧パターン

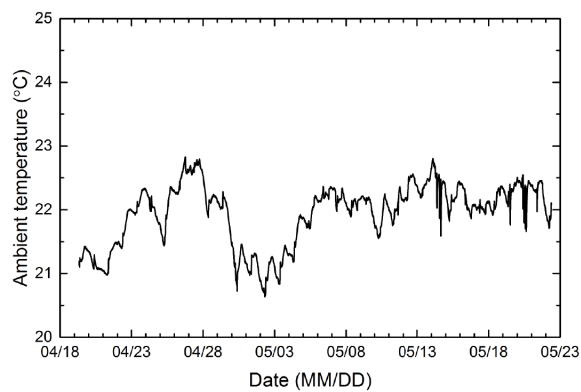
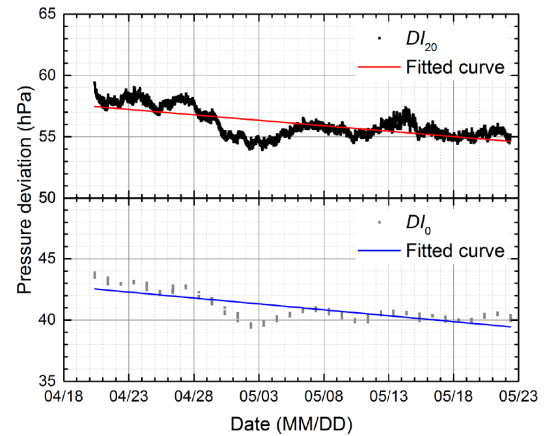
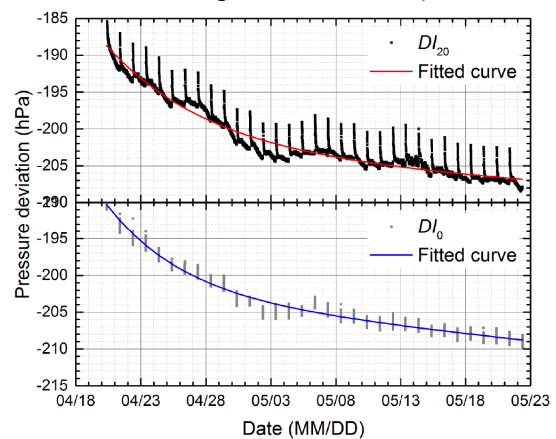


図 4：室内実験中の環境温度変化

(a) 8B7000-I-005/Paroscientific, Inc.



(b) EJX610A/Yokogawa Electric Corporation



(c) MT300/Yokogawa Test & Measurement Corporation

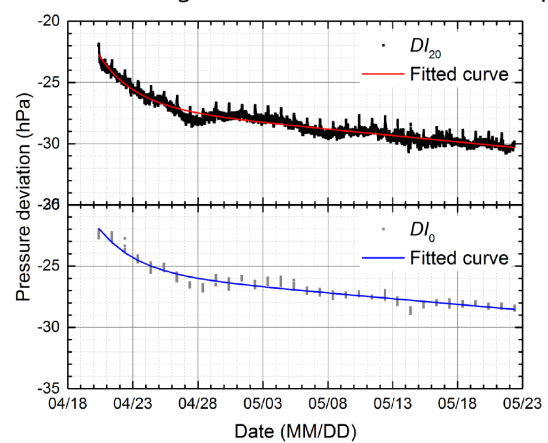


図 3：重錘形圧力天びんからの基準圧力との偏差。

(a) 水晶振動式圧力計、(b) シリコン振動式圧力計（絶対圧タイプ）、(c) シリコン振動式圧力計（シールドゲージ圧タイプ）

Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone

*Yuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Araki Eiichiro¹

1. JAMSTEC / IMG

海洋研究開発機構では南海トラフに展開されている地震・津波観測監視システム（DONET: Dence Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis）に接続された水圧計の校正を繰り返し実施し、水圧計に特有な機器ドリフト成分を水圧記録から切り分けることで長期的な海底地殻変動を捉える試みを行ってきた。DONET水圧計の校正には、絶対的な精度を持った水圧計とDONET水圧計が示す圧力を現場で比較する必要があるが、南海トラフでは年間1cm程度の地殻変動が期待されるため、校正作業を行うためには1cm以下の精度を持った高精度な水圧計が必要である。このため水圧計の計測の不確かさの主要因である圧力ヒステリシス、温度特性、姿勢の影響を最小にすることで高精度な計測を実現する移動式水圧構成装置を開発することで、現場での比較校正作業を実現した（Machida et al., 2019）。さらに現場における校正時にはDONET水圧計との水準差を計測することができ、その水頭差を把握することでDONET水圧計に対して絶対圧力を値付けすることができる。これまでDONET1, DONET2においてそれぞれ1観測点ずつ（MRC10, KMB08）のDONET水圧計の校正を重点的に繰り返し行ってきた。

校正の結果、DONET2海域に設置されたMRC10観測点では1.9cm/year（ ± 0.6 cm）の沈降、DONET1海域に設置されたKMB08観測点では1.2cm/yearの沈降を示した（1hPa = 1 cm）。南海トラフにおいては海上保安庁によるGNSS-A観測により海底地殻変動が繰り返し行われてきており（Yokota et al., 2018）、その中でMRC10観測点、KMB08観測点に近傍なSIOW観測点、KUM3観測点における長期地殻変動成分を比較したところ、KMB08観測点では整合的な変動成分が示された一方で、MRC10観測点においては水圧計による変動成分がやや大きく見られている。より定量的な沈降速度を評価するためには、沈降速度の短期的な変化の可能性や、DONET水圧計が測器の初期ドリフトのような影響を含んでいる可能性があるなど、より慎重な検討が必要である。

Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹, Satoru Baba¹, Yojiro Yamamoto¹, Mark Zumberge², Shuhei Nishida¹, Yuya Machida¹, Hiroyuki Matsumoto¹

1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography

南海トラフでのプレート沈み込み境界域の浅部では、繰り返しゆっくり滑りが発生することが掘削孔内の観測で明らかにされている(Araki et al., 2017). 広域でのゆっくり滑りの時空間的発生を検討するために、これまでの掘削孔の観測網の西側の南海地震震源域の沖合の、ゆっくり滑りの発生が想定される地域の近傍で海底ケーブル観測網 (DONET) に接続することで長期間連続観測が行える海底光ファイバー歪計(Zumberge et al., 2018)を開発し、観測を行ってきた。2022年1月12日~2月5日にかけて、海底光ファイバー歪計の観測データはゆっくりとした変化を示し、3週間ほどかけて 0.7μ 歪程度伸長を示した。また、この期間近傍で超低周波地震(VLFE)が観測されており、光ファイバー歪計の接続されているDONET-2Fノード近傍およびDONET-2Gノード近傍で活発なVLFE活動がみられた。さらに光ファイバー歪計では、近傍のDONET-2Fノード付近で発生したVLFEの多くについて、歪観測記録にゆっくりとしたステップ状の変化を観測した。うち、例えばDONETで地震波形インバージョンにより決定されたMw 4.4のVLFEについて光ファイバー歪計によって観測された海底面歪変化量は20n strain程度であった。これは、微小な変化ではあるが、VLFEの断層運動に伴う海底面変動を観測出来ているものと考えられる。また、観測されたVLFEにともなう歪変化は、VLFEの位置・メカニズムと光ファイバー歪計の位置によく関連した極性と推移を示しており、VLFEの断層近傍での歪計測によって、個別の超低周波地震における断層の滑り過程を議論することが可能であると考えられる。一方、3週間の間に観測されたゆっくりとした変化量は、これらのVLFEでの断層運動で説明することは困難であった。従って、観測されたゆっくりとした歪変動は、VLFEがみられたDONET-2Fおよび2Gの広域を跨ぐ可能性のある浅部ゆっくり滑りであって、その滑りによって個別のVLFE断層をローディングし浅部ゆっくり滑りと同時期のVLFEのバースト的なクラスターとなったのではないかと考えられる。VLFEの活動期間は観測された浅部ゆっくり滑りより少し遅れていることも、このようなVLFEの発生メカニズムをサポートするものと考えられる。

Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active scismicity since the end of 2020

*Yohei Kinoshita¹

1. University of Tsukuba

2020年末頃より、能登半島北部の珠洲市近郊にて地震活動の活発化が確認されている。また、地震活動の活発化と同時期より、国土地理院のGNSS連続観測網GEONETによって地震発生域周辺の観測点で局所的な地表面変位が始まったことが報告されている。西村ほか（2022, 日本地球惑星科学連合大会）はこれらGEONET観測データに加え臨時GNSS観測データを解析し、球状圧力源の膨張により地表面変位を説明できるとしている。しかしながら、GNSS観測は検出精度および時間分解能に優れているものの空間分解能は観測点密度に依存しており、本事例における地表面変位の空間的な詳細は明らかではない。本研究では高空間分解能に地表面変位を検出可能なSAR時系列解析を実施し、能登半島北部での地表面変位の空間的な詳細を明らかにするとともに、その結果に基づいて地表面変位の変動源について推定も行なったので、それら結果を報告する。

SAR時系列解析には、C-バンドSARのSentinel-1データを用い、ISCE ver.2ソフトウェアにより干渉解析を実施、得られたSAR干渉画像から時系列解析ソフトウェアLiCSBASにより面的地表面変位の時系列を推定した。C-バンドSARは植生等の影響による干渉性の低下が著しいため、マルチルッキング処理およびスペクトルフィルターを適用して干渉性を向上させている。上記SAR時系列解析を2つの異なる観測方向データに適用することで、2方向について地表面変位速度を求めた。なおSAR時系列解析で用いたSentinel-1Aおよび1BのうちSentinel-1Bについては2021年12月の観測を最後にセンサートラブルにより観測が停止しているため、本研究では2つの観測方向情報が利用可能な2021年12月までのSARデータで時系列解析を実施した。地表面変位画像を解釈しやすくするため、SAR時系列解析で得られた推定変位速度は2.5次元解析により準東西成分と準上下成分に投影した。SAR時系列解析で得られた変位速度の妥当性を検証するため、GEONETのF5解日座標値データを用いた。その際、変位の基準点として珠洲市より西方に位置し本事例による地殻変動の直接的影響が無いとみられる穴水（020972）を設定した。地表面変位の変動源推定には、Fukuda and Johnson（2008, GJI）のFully Bayesian Inversionを用い、SAR時系列解析の変位速度およびGEONETの変位速度を入力としたJoint inversionを実施した。変動源の候補として、本研究では反無限弾性体矩形断層モデルおよび球状圧力源モデルの2つを用いた。

SAR時系列解析および2.5次元解析の結果、珠洲市近郊で顕著な隆起およびその周辺で東西方向に拡大するパターンの変位空間分布が得られた。衛星SAR観測は南北方向の変位に感度が無いものの、東西方向および鉛直方向の推定変位速度については、GEONETで得られた変位速度と時間・空間ともに調和的なパターンが得られている。このSAR変位速度とGNSSの変位速度に対しInversion解析を実施した結果、矩形断層モデルと球状圧力源モデルのいずれでも同程度に地表面変位を説明できるモデルパラメータが推定された。観測変位とモデル変位のRMSEを比較したところ、球状圧力源モデルの方がわずかに良い結果が得られ、西村ほか（2022）の結果を支持する結果となった。ただし矩形断層モデルと球状圧力源モデルのいずれにおいても、SAR変位速度に対して4, 5mm程度のRMSE推定残差が見られていること、またGNSS観測点能都（960574）での1cm程度の南向きの変位を全く説明できていないことから、単一の矩形断層および単一の球状圧力源のみでは、InSAR観測とGNSS観測の両方を十分に説明することはできていないことが示唆される。

本研究はJSPS科研費JP22K19949の助成を受けたものです。

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 5:00 PM - 5:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 8:00 AM - 8:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-3

chairperson: Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S03-05] Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones – Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone

*Takuya NISHIMURA¹ (1. Kyoto University)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S03-06] Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion

*Yuanyuan Niu¹, Jiancang Zhuang^{2,1} (1. SOKENDAI, 2. ISM)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S03-07] Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka

*Akiteru TAKAMORI¹, Akito ARAYA¹, Kouseki MIYO², Tatsuki WASHIMI³, Takaaki YOKOZAWA², Hideaki HAYAKAWA², Masatake OHASHI² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan)

Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones –Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone

*Takuya NISHIMURA¹

1. Kyoto University

1. はじめに

日本列島で国土地理院によるGNSS連続観測網（GEONET）が構築され、地震間の変形速度分布が明らかになってから30年近くが経過した。この間、特に歪み速度が大きい「ひずみ集中帯」と呼ばれる地帯が日本各地に発見されており（例えば、Sagiya et al. 2000; Nishimura and Takada, 2014）、内陸地震の多発帯と一致することから注目されている、しかし、GEONETの平均観測点間隔は20km程度であり、ひずみ集中帯の詳細な分布や活断層との対応関係を詳細に検討することやひずみ集中のメカニズムの解明には十分とは言えない。そのため、観測点間隔を数km程度とするような稠密GNSS観測がひずみ集中帯の各地域で行われてきた（例えば、Sagiya et al., 2002）。新潟-神戸ひずみ集中帯の最西部に位置する大阪府北部の有馬-高槻断層帯は、地質学的な平均変位速度が1.5mm/年に達する右横ずれ断層である。GEONETデータに基づく測地学的平均変位速度より、この断層帯の深部で10mm/年程度のすべり速度が推定されている（Nishimura et al., 2018）。周辺で2018年に大阪府北部地震(M6.1)が発生したことを契機として、断層帯に直交方向のアレイを主とした11点の新規連続観測点を2019年8月に設置した。一方、山陰ひずみ集中帯の最西部に位置する島根県西部三瓶山周辺では、西北西-東南東走向のひずみ集中帯とは概ね直交する北北西-南南東走向の地震群が見られ、2018年にも同じ走向の地震（M6.1）が発生するなど興味深い地域である。この地域においては、地震分布とひずみ速度分布の対応関係を調べるために、9点の新規観測点を2020年7月に設置した。これらの観測点の設置から2年以上が経過し、データが蓄積したことで、高精度の変位速度を算出できるようになった。本発表では、有馬-高槻断層帯周辺及び三瓶山周辺でのGNSSデータを解析し、変位速度及びひずみ速度分布と簡単なモデル化を行なった結果について報告する。

2. データ及び解析方法

日座標値の計算には、GipsyX Ver 1.4によるバイアス整数化精密単独測位法を用いた。米国ジェット推進研究所（JPL）が提供している精密歴及び座標変換パラメータを用いてITRF2014準拠(IGS14)の座標値を得た。得られた座標値に線形・年周・半年周からなる関数をフィッティングし、約3年間の平均速度を最小二乗法で求めた。ひずみ速度の計算には、ABICを用いた3次Bスプラインの基底関数展開によって表された変位分布を空間微分するOkazaki et al.(2021)の手法を用いた。

3. 結果

有馬-高槻断層帯周辺の速度場からは、断層に平行な速度成分が断層帯を挟んでarctan型の変位分布が明瞭に認識され（図）、2次元の鉛直横ずれ断層の深部すべりモデル（Savage and Burford, 1973）を用いると、深部すべり速度は約9mm/年、固着域の深さは12kmと推定された。すなわち、数年程度の測地学的時間スケールでは、地質学的時間スケールよりもはるかに速く断層深部がすべっていることが確かめられた。一方、三瓶山周辺の速度場からは、顕著なひずみ集中域は見られず、陸域にひずみ集中域が観測されている鳥取県側（Meneses-Gutierrez and Nishimura, 2020）とは異なり、ひずみ集中域が海域にあることが示唆される。

謝辞：GNSS観測点の設置にあたり自治体の関係者には大変お世話になりました。国土地理院GEONET及び京都市埋蔵文化財研究所のGNSSデータを使用しました。後者のデータ提供にあたっては、宮原健吾様にご尽力いただきました。ここに記して感謝いたします。

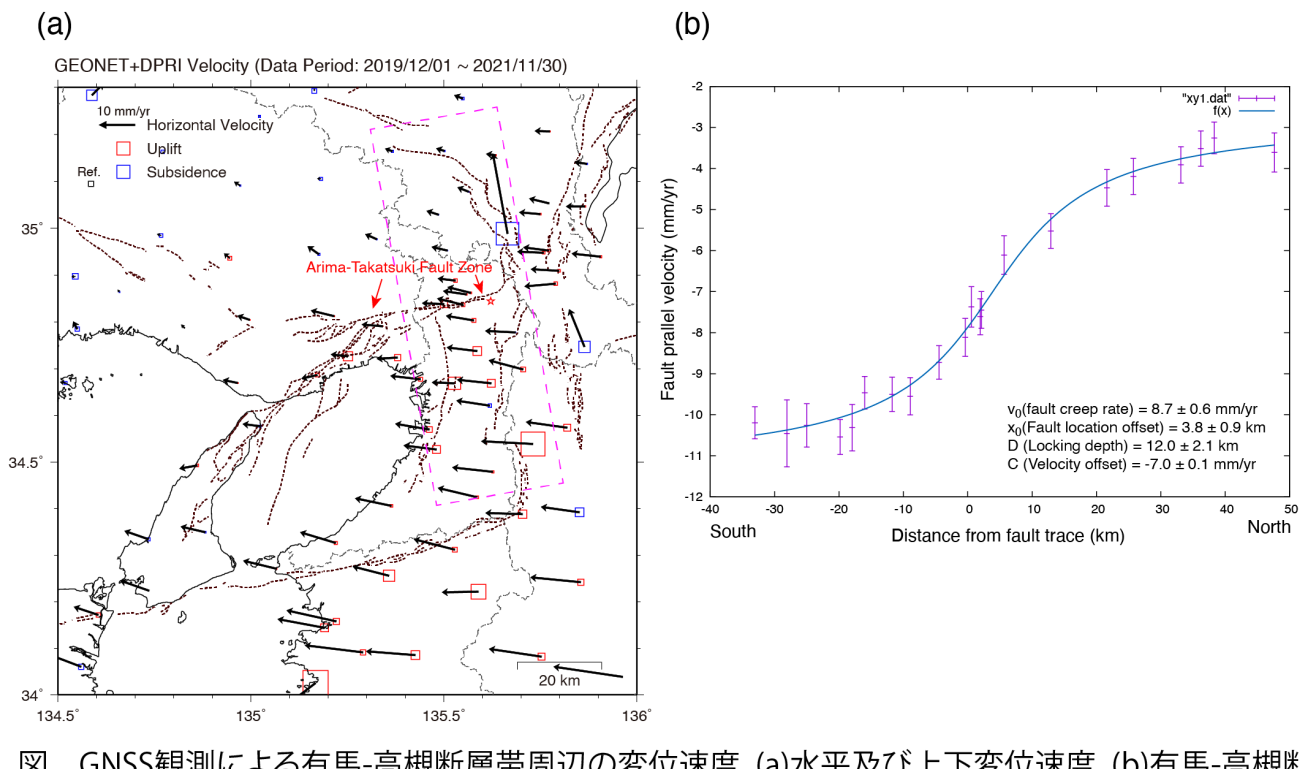


図 GNSS観測による有馬-高槻断層帯周辺の変位速度. (a)水平及び上下変位速度. (b)有馬-高槻断層帯に平行な速度成分. 青のカーブは, 鉛直右横ずれ断層の深部すべり(Savage and Burford, 1973)を仮定してフィティングした速度分布. (a)のピンクの矩形領域の観測点を使用.

Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion

*Yuanyuan Niu¹, Jiancang Zhuang^{2,1}

1. SOKENDAI, 2. ISM

Prior information is always used to add constraints in Bayesian geophysical inversions to solve the non-uniqueness problem of the solution. A commonly used constraint is on the smoothness (second-order derivative) of the model parameters. The smoothness is usually calculated through interpolation over regular grids for the reason of easy implementation in numerical calculations. When observed data are irregularly distributed such as in geodetic data, interpolation based on a Delaunay tessellation (DT) over the observation locations is popularly used to avoid additional interpolations and to maintain the flexibility in the resolution of the model solution. However, calculating the smoothness of a function based on DT-based interpolation is more difficult than calculating the flatness (first-order derivative). We propose two interpolation methods for calculating the smoothness with DT-based interpolators: the double linear and the quadratic interpolators. These two methods are tested through numerical experiments. We also apply the DT-based interpolation methods to a gravity Bayesian inversion problem, in which the Bouguer gravity anomaly and the near-surface density structure are estimated.

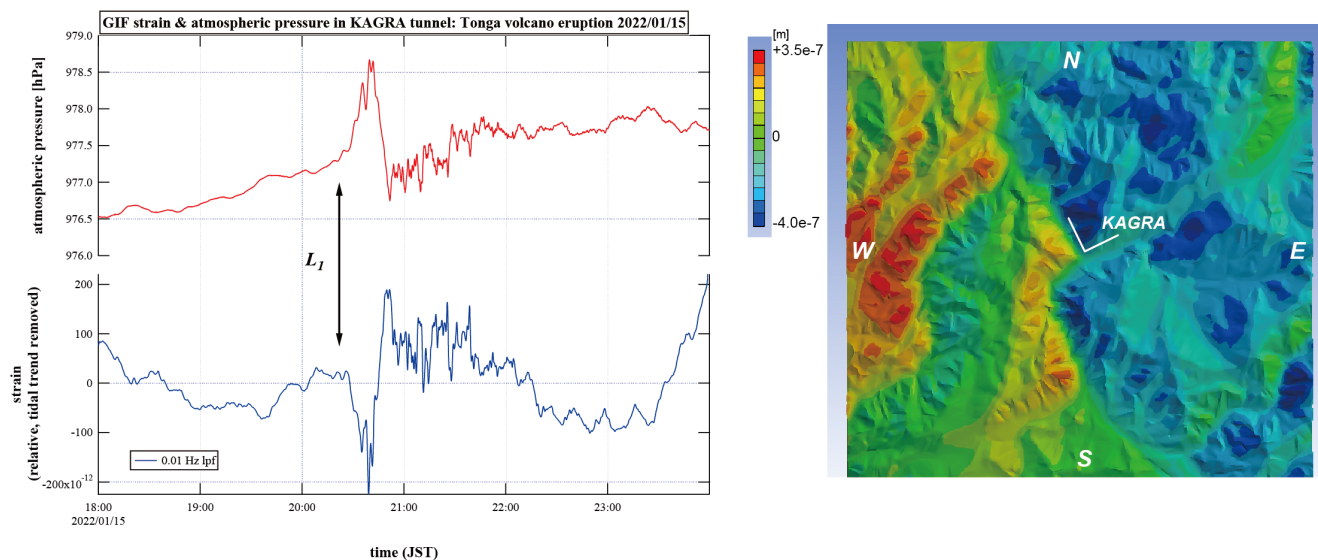
Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka

*Akiteru TAKAMORI¹, Akito ARAYA¹, Kouseki MIYO², Tatsuki WASHIMI³, Takaaki YOKOZAWA², Hideaki HAYAKAWA², Masatake OHASHI²

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan

我々は岐阜県飛騨市神岡町の重力波望遠鏡KAGRAのトンネル内に基線長1500 mのレーザー伸縮計（Geophysics Interferometer: GIF）を設置して2016年よりひずみ観測を行っている（Araya et al. 2017）。周波数安定化レーザーを用いることにより、GIFでは1 Hz以下の帯域で 10^{-12} 台のひずみ分解能を定常的に実現しており、これまでに潮汐や地震に伴うひずみステップなどの現象を観測してきた。また、0.1 – 1 mHzの周波数帯域では坑内の気圧とGIFのひずみスペクトルの形に高い類似性がみられた。そこで、両者の比例関係を仮定してひずみ観測値から気圧の寄与を差し引く補正を試みたところ、その効果は最も良い場合でも約1/3倍にとどまった。この結果は、ひずみが局所的な気圧変化だけで決まるのではなく、より広域の気圧変動の影響を受けていることを示唆していると考えられる（Akutsu et al. 2021）。

2022年1月15日のフンガ・トンガ海底火山の大規模噴火は、津波や電磁場の擾乱をはじめ地球規模で様々な影響を及ぼした。噴火によって発生した大気Lamb波が地球を周回する様子は気圧や潮位の変動として各地で観測された。KAGRAサイトでもLamb波による気圧変動やインフラサウンド等が捉えられ、GIFでは気圧に伴うひずみの変化を明瞭に観測することができた。また、気圧変化とひずみには負の相関がみられ、その係数はおよそ $-(2-3) \times 10^{-10}$ /hPaであった。本講演では、このイベントの観測結果を紹介するとともに、気圧の影響を定量的に分析するために作成した有限要素モデルによる解析等について報告する。ひずみ計設置点だけでなく、周辺領域に加わる気圧の影響を含むモデルは、将来的には先に述べた広域の気圧変化とひずみの関係の理解に役立つものと期待できる。



左図：KAGRA 坑内で観測された、フンガ・トンガ噴火によって発生した大気 Lamb 波による気圧変化（上）と GIF によるひずみ観測結果（下）

右図：有限要素モデルにより求められた、1 hPa の気圧変化に対する KAGRA 周辺の地表の東西方向の変位（西方向を正とする）

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 11:00 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:30 AM - 2:00 AM UTC | 🏠 ROOM D
5th floor (Training Room 520)

[S16] AM-1

chairperson: Shinichi Matsushima (DPRI, Kyoto University), Kimiyuki Asano (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S16-01] On the variability of the horizontal site amplification factors extracted from the observed Fourier spectra of the S-wave part and the whole wave

*Hiroshi KAWASE¹, Kenichi NAKANO², Jiken WANG³, Eri ITO¹, Jikai SUN¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION, 3. Graduate School of Engineering, Kyoto University)

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

[S16-02] Cluster analysis of site amplification characteristics along Route 9 estimated by the distributed acoustic sensing (DAS).

*Kento Kumaki¹, Hisashi Nakahara¹, Kentaro Emoto², Masatoshi Miyazawa³, Takeshi Tsuji⁴ (1. Tohoku university, 2. Kyushu University, 3. Kyoto University, 4. University of Tokyo)

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

[S16-03] Construction of the Shallow Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins Using Boring Database and Microtremor Array Observations

*KimiYuki ASANO¹, Tomotaka IWATA¹, Teruyuki HAMADA², Kunikazu YOSHIDA², Kazuhiro SOMEI², Haruko SEKIGUCHI¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. Geo-Research Institute)

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

[S16-04] Ground motion characteristics during the 2022 Noto-Hanto earthquake (M_J5.4) and underground velocity structure at ISK00

*Tomotaka IWATA¹, Kimiyuki Asano¹, Takeshi Miyamoto², Mugen Ogata² (1. DPRI, Kyoto University, 2. Graduate School of Faculty of Science, Kyoto University)

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

[S16-05] Input motions on engineering basement during the 2018 Northern Osaka earthquake using shallow surface velocity models based on microtremor array observation

*Shota Goto¹, Kota Asano¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada² (1. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S16-06] The effect of the complex shape of the basin edge structure to the microtremor Horizontal-to-Vertical spectral ratios by numerical analysis

*Shinichi MATSUSHIMA¹, Zhiwei LIU², Jun'ichi MIYAKOSHI³ (1. DPRI, Kyoto University, 2. Former Department of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Ohsaki Research Institute, Inc.)

On the variability of the horizontal site amplification factors extracted from the observed Fourier spectra of the S-wave part and the whole wave

*Hiroshi KAWASE¹, Kenichi NAKANO², Jiken WANG³, Eri ITO¹, Jikai SUN¹

1. DPRI, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION, 3. Graduate School of Engineering, Kyoto University

我々は一般化スペクトルインバージョン手法(Generalized Spectral Inversion Technique, GIT)を用いて、任意地点における地震基盤から上の地盤構造による水平動および上下動のフーリエ・スペクトルの増幅特性（サイト特性）を、我が国の強震観測データ（K-NET・KiK-net・JMA震度計ネット・JMA87型強震計ネット・関震協ネット）から分離・抽出してきた。その際に、まずS波部分のスペクトルを対象として、震源・伝播経路・サイトの各スペクトル特性を分離し、その後全波のスペクトルを対象として得られた震源および伝播経路特性の積でこれを割り込むことにより、全波のサイト特性を抽出している（仲野・川瀬, JJAEE2021）。これまで我々は得られたサイト特性の平均値に専ら注目してきたが、予測精度を考える上では個々のサイト特性における地震間のばらつきについても検討しておく必要がある。そこで本報告では、S波部分と全波部分に対して分離・抽出されたサイト特性の地震間ばらつきについて、各地点および全地点でのばらつき量を比較した。GITの手法については仲野・他（JJAEE2015）および仲野・川瀬（JJAEE2021）を参照されたい。基本式はi番目の地震のj地点でのフーリエ・スペクトル $F_{ss_ij}(f)$ は

$$F_{ss_ij}(f) = S_{s_i}(f) * P_{s_ij}(f) * H_{ss_j}(f) \quad (1)$$

で表される。ここで f は周波数、接尾語のSSは地表面上のS波部のスペクトルであることを表している。S波部とは、JMAのS波の走時表を用いて、S波初動以降をマグニチュードに応じた時間区間（ $M_{JMA} 6$ で5秒、 $6 < M_{JMA} 7$ で10秒、 $7 < M_{JMA}$ で15秒）で切り出し、前後に2秒のコサインテーパをつけたものである。一方、全波のフーリエ・スペクトル $F_{sw_ij}(f)$ を対象にした場合には、上記S波部の地震基盤波に対する相対的なサイト特性が得られるものとして

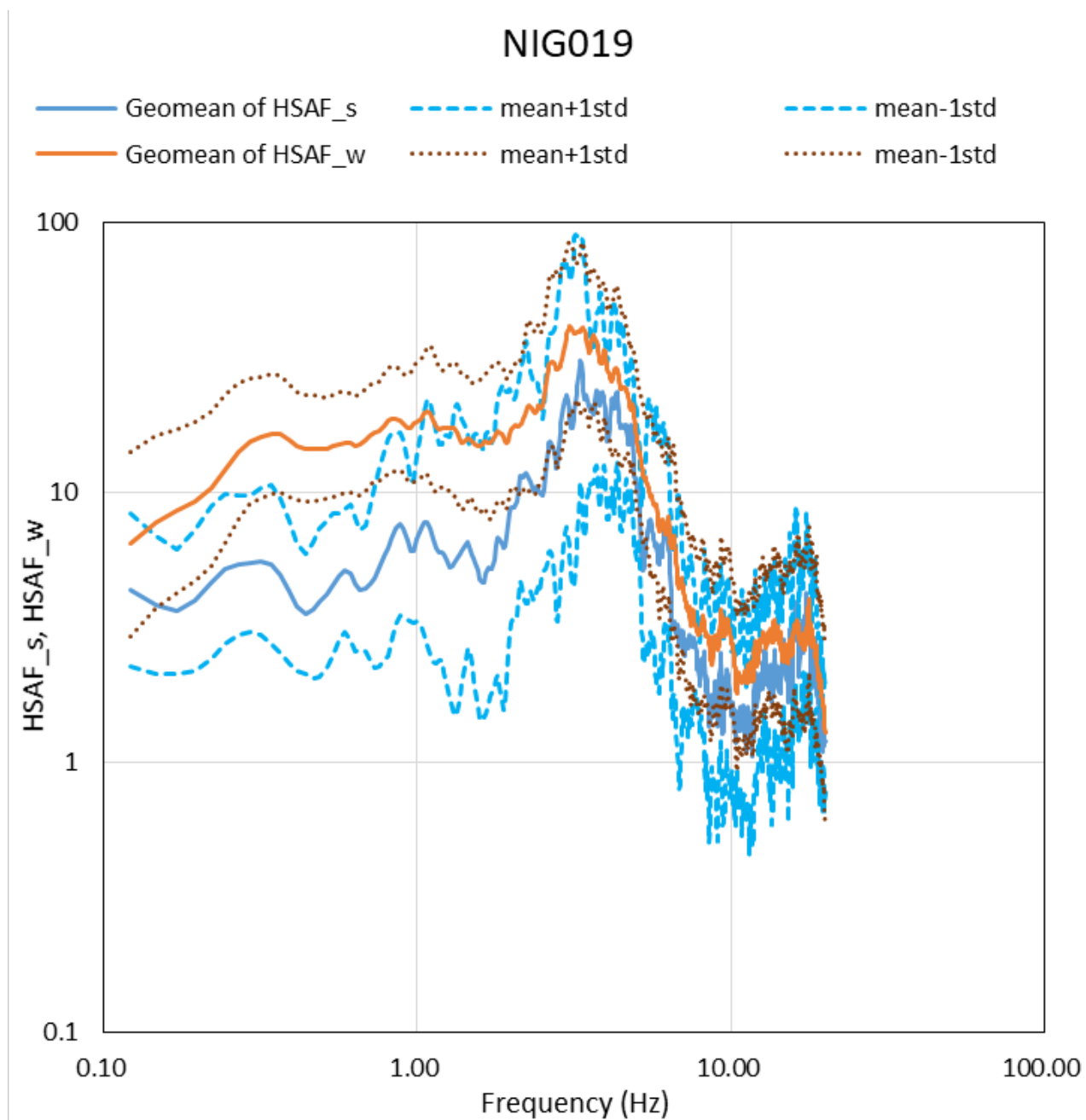
$$F_{sw_ij}(f) = S_{s_i}(f) * P_{s_ij}(f) * H_{sw_j}(f) \quad (2)$$

により全波サイト特性を求めている。この物理的意味は、S波の散乱で生じる後続のCoda波や盆地の端部でS波から変換された盆地生成表面波も含めて、全波の観測スペクトルを入射した地震基盤波に対する相対的な増幅が生じた結果として評価するということである。全波スペクトルを式(2)のように評価する理由は、単純に式(1)のように全波スペクトルを評価すると遠地のサイトで大きな盆地生成表面波が生じていた場合、伝播経路上で振幅の逆転が生じ、特に低振動数域で負のQ値が得られるからである。その場合のサイト特性は安定して求められなくなっている（ちなみに距離減衰式で多用されている応答スペクトルでは継続時間が長くなっても振幅は頭打ちするのでこのような現象は生じない）。なお我々のGITでは拘束条件としてYMGH01の地表地中比から地盤構造を同定し、それから得られる理論サイト特性を観測波のスペクトルから剥ぎ取って露頭地震基盤波としたものを1として用いているので、得られるサイト特性は地震基盤波に対する絶対的なサイト特性となっている。

このようにして得られたS波部のサイト特性と全波のサイト特性を比較すると、NIG019を例にとって添付図に示したように、低振動数側で増幅が大きくなっていることがわかる。2Hz以上の領域では高振動数になるに従って両者の差は段々と小さくなっており、5Hz以上では比はほぼ1.3倍程度になっている。このS波部と全波の平均サイト特性の比を我々はWSRと命名し、それが空間的に滑らかに変化しているため単純な空間補間によってこれを推定することを提案している（仲野・川瀬, JJAEE2021）。

ここでは両者のばらつきに注目する。この例では明らかにS波部のばらつきの方が全波のばらつきよりも大きくなっていることがわかる。S波のばらつきに対する全波のばらつきの比を取ると0.12Hz~20Hzの全周波数平均で0.9、最も小さい3Hz付近で0.4となった。全波のばらつきの全周波数平均値は（対数平均を取って実数に直した値として）1.88で、これがこの地点での予測精度と言える。このばらつきの平均値はサイトによって多少異なり、当然サイト特性の大きな地点の方が大きい傾向にあるが、範囲としては1.5~1.9の範囲にあって安

定した値である。S波部と全波のばらつきの平均値の比は90%前後となっている地点が多く、差としては小さいが、時間区間を短くして到来波動成分としてS波に限定したはずのS波部のサイト特性の方が、何も限定なく様々な波動を含んだ全波のサイト特性よりも予測誤差が大きいというのは意外な結果である。



Cluster analysis of site amplification characteristics along Route 9 estimated by the distributed acoustic sensing (DAS).

*Kento Kumaki¹, Hisashi Nakahara¹, Kentaro Emoto², Masatoshi Miyazawa³, Takeshi Tsuji⁴

1. Tohoku university, 2. Kyushu University, 3. Kyoto University, 4. University of Tokyo

分散型音響計測 (DAS) は、近年地震学の分野で注目が高まっている光ファイバーケーブルを用いた地震動観測手法である。DASには、全長数10 kmの測線に沿って 5-10 m 間隔で稠密に振動観測できること、レーザー光を入射してその後方散乱波を解析する装置を既存の通信用光ファイバーケーブルに接続することにより比較的容易に計測可能であること、等の利点があり、これにより低コストで従来よりも空間的に稠密な地震動の計測が可能となる。先行研究では、京都府内の国道9号線沿いに敷設された光ファイバーケーブルを使用した DAS観測 (宮澤・他, 2022) に基づき、自然地震の直達S波振幅から観測域の平均に対する相対的なサイト増幅特性の空間分布を求めた (熊木・他, 2022)。本研究では、先行研究の結果よりも周波数帯を細かく分割し解析を行い、さらにその結果を用いてクラスター分析を行ったので、その結果について報告する。

京都駅前の京都国道事務所から丹波IC辺りまでの国道9号に沿った長さ約50 kmの区間にわたり約5m間隔でケーブルに沿った軸ひずみ速度1成分を計測した。観測期間は2021年8月23日から同9月24日までの33日間、サンプリング周波数は500 Hzである。期間中に発生したマグニチュード 2.5から4.9の6個の自然地震を解析に使用した。解析対象の地震としては、レコードセクション上で地震波を確認でき、震源距離と輻射パターンによる影響を低減するため、測線から80から120 km程度離れたイベントを選んだ。震源は主に京都府大阪府境界付近、和歌山付近に分布している。国道9号は交通量が多く、夜間でも自動車による振動が含まれるが、解析対象地震を絞り、複数の地震記録を用いることで、その影響を軽減させる。

具体的な解析手順は次のとおりである。各場所のひずみ速度記録に0.1-1, 1- $\sqrt{2}$, $\sqrt{2}$ -2, 2-2 $\sqrt{2}$, 2 $\sqrt{2}$ -4, 4-4 $\sqrt{2}$, 4 $\sqrt{2}$ -8, 8-8 $\sqrt{2}$, 8 $\sqrt{2}$ -16 Hzのバンドパスフィルターを適用する。理論走時を基に、各周波数帯域において、S波初動の到達時の1秒前から5秒間のRMS値を計算する。測線区間の全チャンネルの平均値が1になるようにRMS値を規格化し、メジアンフィルタを9点ごとにかけ測線に沿った空間方向に平滑化を行った後、6個の地震の規格化RMS値の平均値を計算する。各チャンネル (観測点) で得られた9つの周波数帯域のRMS値を特徴量とするk平均法を用いたクラスタリングにより、9313点の観測点を分類し周波数特性を抽出する。その際、クラスター数は3から7つを試し、6つが最適として選択した。

クラスター分析により得られた6つのクラスターの特徴は次のとおりである。クラスター1は、RMS値が0.1から0.6と小さく、2-2 $\sqrt{2}$ Hz帯域で最小値をとる。クラスター2は、RMS値が0.5から1.5に分布し、4 $\sqrt{2}$ -8 Hz帯域以上の高周波数でやや卓越する。クラスター3は、RMS値が0.9から2に分布し、2 $\sqrt{2}$ -4 Hz 帯域で最大値をとる。クラスター4は、RMS値が1から5に分布し、2 $\sqrt{2}$ -4 Hz 以下の帯域で卓越する。クラスター5は、RMS値が0.8から3周辺に分布し、4 $\sqrt{2}$ -8 Hz 帯域で最大値をとる。クラスター6は、RMS値が全周波数帯域で3以上に分布する。図1は結果の可視化のために、PCAにより2次元に次元削減を行い各チャンネルの値をクラスターごとに色分けしプロットしたものである。クラスター1とクラスター2には、それぞれ4797点、2446点のチャンネルが属しており、測線全体を通して分布していたが、測線北西部である京丹波町周辺ではこれらのクラスターのみが主にみられた。これは京丹波町周辺の測線が山地を通過しており、地質や地形の特性が反映されていると考えられる。クラスター3は1141点のチャンネルから成り、測線全体に広く分布していた。また、クラスター4とクラスター5はそれぞれ399点と463点のチャンネルから構成され、亀岡盆地内に集中して分布していた。どちらも全周波数帯域でRMS値が比較的大きく、高周波数側にRMS値が卓越する箇所があるといった特徴がみられる。クラスター6は67点のチャンネルが属しており、京都市西大橋上のチャンネルが主に属していた。西大橋は揺れやすく、全周波数帯域で大きなRMS値であったため、他とは異なるクラスターに分類されたと考えられる。今後は各クラスターに対する考察をさらに深め、この地域のサイト増幅メカニズムの理解につ

なげていく必要がある。

謝辞

本研究は、京都大学防災研究所拠点研究（一般推進）、及びJSPS科研費JP21K18748の助成を受けました。光ファイバー通信ケーブルは、京都大学防災研究所と近畿地方整備局京都国道事務所との間で締結した覚書に基づき、京都国道事務所より借用しました。ここに記して感謝いたします。

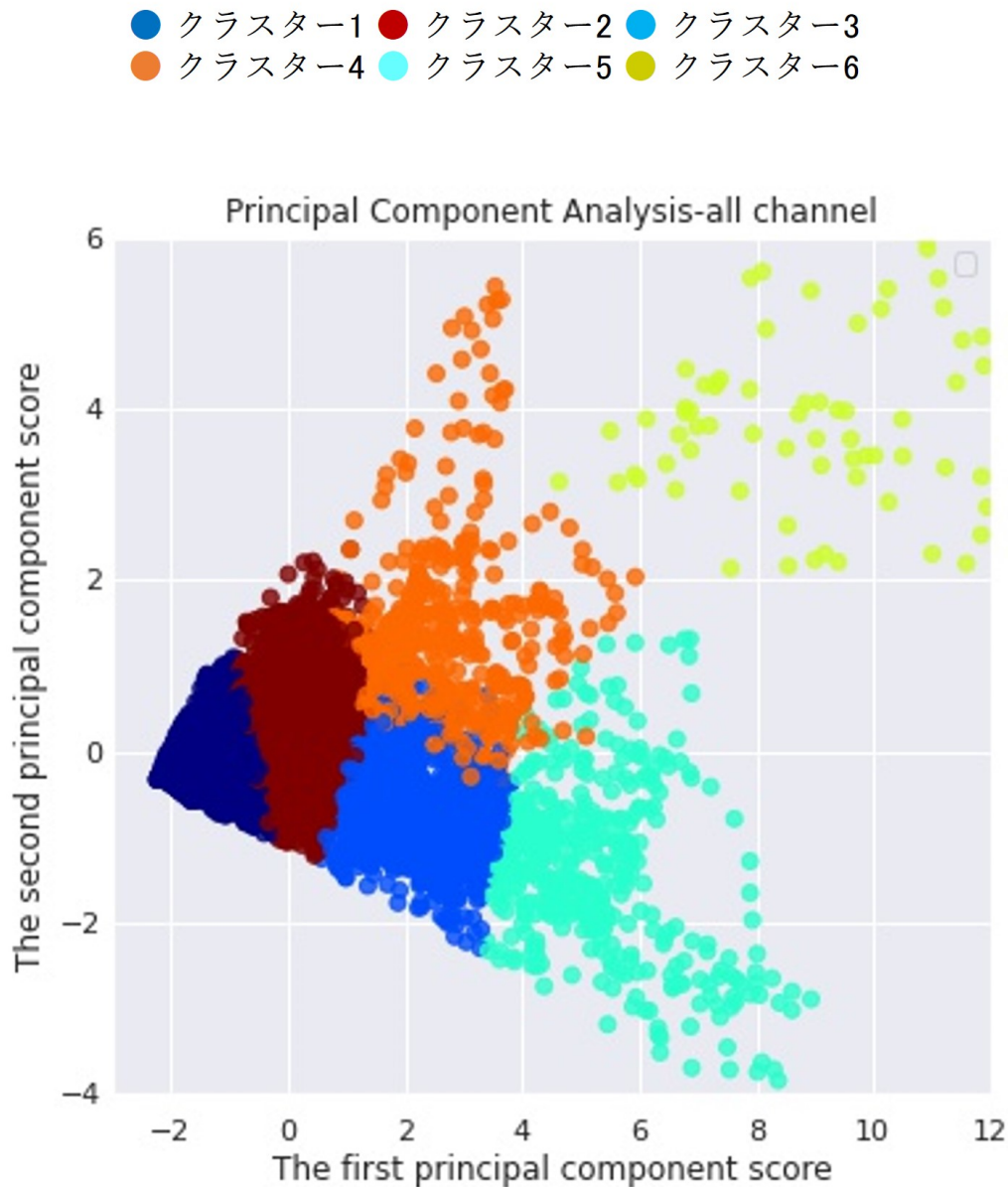


図1. 各周波数帯域のRMS値に対して、PCAを適用し2次元まで次元削減を行い、クラスターごとに色分けしてプロットした。

Construction of the Shallow Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins Using Boring Database and Microtremor Array Observations

*KimiYuki ASANO¹, Tomotaka IWATA¹, Teruyuki HAMADA², Kunikazu YOSHIDA², Kazuhiro SOMEI², Haruko SEKIGUCHI¹

1. DPRI, Kyoto University, 2. Geo-Research Institute

令和元年度から3年度にかけて実施した「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」（代表機関：京都大学防災研究所）では、奈良盆地東縁断層帯の地震を想定した強震動予測の高度化のため、奈良盆地東縁断層帯に近い京都盆地（山科盆地、山城盆地を含む）及び奈良盆地等の深部及び浅部の地盤速度構造モデルを新規に作成するための各種の調査・解析が実施された。本発表では、京都盆地から奈良盆地にかけての地域を対象とした浅部地盤速度構造モデルの作成について報告する。本研究では、ボーリングデータベースの解析に基づいて作成した地質モデルと微動アレイ観測による位相速度情報を統合して解析し、浅部地盤のS波速度構造を250 mメッシュでモデル化した。ここでは、工学的基盤相当のS波速度を350 m/sと設定し、それ以浅を浅部地盤として取り扱った。

まず、世界測地系の4分の1地域メッシュ（250 mメッシュ）毎に、ボーリングデータベースに基づく浅部地盤地質モデルを作成した。関西圏では、これまでも自治体の地震被害想定や地盤工学的研究を目的に、各地でボーリングデータベース解析による地盤モデル作成が行われている。京都市域の一部については全国電子地盤図（地盤工学会, 2014）によるモデルを活用し、京都市を除く京都府南部については平成17年度京都府地震被害想定調査（京都府, 2006）により作成されたモデルを関西圏地盤情報データベースに収録されたボーリングデータで検証・修正することで活用した。京都市域の残余（京都盆地の一部及び山科盆地）及び奈良盆地全域について、関西圏地盤情報データベース及び新規に収集したボーリングデータを用いて新たにモデル化した。モデル化の方法は全国電子地盤図と同様である。各メッシュでは工学的基盤まで深度1 m刻みで、優勢土質と平均N値をモデル化した。既存ボーリングデータのないメッシュについては、微地形区分（若松・松岡, 2020）が同じ周辺のメッシュのボーリングデータから補間することでモデル化した。

また、地表から工学的基盤付近までの地盤構造に関する位相速度情報の取得のため、極小半径（半径0.6 m）～小半径（半径2～10 m）の微動アレイ観測を面的に多数実施した。京都盆地南部から奈良盆地にかけての176地点で実施した。調査地点の選定に当たっては、調査対象地域の浅部地盤構造を面的に把握するため、地表地質分布も考慮しながら、概ね2 km間隔で選点した。調査地点の多くは、沖積層分布域であるが、宇治丘陵、平城山丘陵などの大阪層群分布域、堆積盆地縁辺の段丘面の一部でも調査を行った。各微動アレイ観測では、白山工業製JU410を4式用い、正三角形アレイによる4点同時観測を行った。取得した微動波形記録のうち、上下動成分を用いて、空間自己相関（SPAC）法（Aki, 1957）により、半径毎のSPAC係数を求めた。最後に、各半径のSPAC係数を統合し、拡張SPAC法（凌・岡田, 1993）によって位相速度の分散曲線を得た。ほぼすべての観測点で、位相速度が400 m/sを超えるあたりまで得ることができた。位相速度の対象周波数帯域としては概ね2 Hz以上である。

浅部地盤のS波速度構造をモデル化するため、土質毎にN値と有効土被り圧からS波速度を与える経験式を作成した。山本・他(2005)が大阪平野の沖積層を対象として提案した経験式の形を用い、この係数を土質ごとに与える。まず、本重点調査観測で収集及び既存データベースに搭載の計45地点のPS検層結果を整理し、粘性土、砂質土、礫質土のそれぞれの土質区分について、N値、有効土被り圧、S波速度の関係の経験式を求めた。得られた経験式を初期モデルとし、上述の極小～小半径の微動アレイ観測及び本重点調査観測で実施した小～大半径の微動アレイ観測により得られた計197地点の位相速度をRayleigh波基本モードの位相速度分散曲線で説明できるよう、経験式の係数を遺伝的アルゴリズムで最適化することにより、適切な浅部地盤S波速度構造モデルを得た。その際、工学的基盤以深の構造が位相速度に及ぼす影響を適切に考慮するため、S波速度が600 m/sを半無限層とし、浅部地盤構造モデルの基底とS波速度600 m/sの半無限層の間に中間層を1層設

定し、観測点毎にこの中間層の層厚とS波速度を求めた。中間層の層厚及びS波速度は、浅部地盤構造モデルの経験式の係数と同時に求めることは困難であるため、ここでは、浅部地盤構造モデルと中間層のパラメータを交互に求め、収束するまで反復した。

最終的に得られたモデルによる理論分散曲線は各微動アレイ観測点の観測位相速度を概ね説明することができた。盆地端部で残差が大きい地点もいくつか見られたが、全体として初期モデルに比べて、本検討で最終的に得られた浅部地盤速度構造モデルにより残差が改善している。

謝辞：本研究は令和元～3年度科学技術基礎調査等委託「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」により実施しました。

Ground motion characteristics during the 2022 Noto-Hanto earthquake ($M_j5.4$) and underground velocity structure at ISK00

*Tomotaka IWATA¹, Kimiyuki Asano¹, Takeshi Miyamoto², Mugen Ogata²

1. DPRI, Kyoto University, 2. Graduate School of Faculty of Science, Kyoto University

2022年6月19日に石川県能登地方で $M_j5.4$ の地震が発生して、K-NET正院(ISK002)では震度6弱を観測し、周辺で被害が生じた。この記録は周波数1 Hz程度が卓越していることが見てとれた。染井・他(2022)では、ISK002を含む北陸地方の強震観測点記録を用いて、スペクトルインバージョンにより観測点サイト増幅特性を求めているが、ISK002のそれは、地震基盤面相当の地表観測点のサイト増幅特性を2とした時に、解析周波数帯の0.2-10Hzにおいて、10倍以上の増幅特性を持っていることが示されている。染井・他(2022)では観測点サイト増幅特性を1次元重複反射理論に基づく理論増幅と仮定して、当該サイトのS波速度構造の推定も行っている。これらの結果からはISK002においては、工学的基盤面相当以浅の浅部地盤構造による地震波への影響が大きいと推定されている。

一方、珠洲の平野部においては、1993年能登半島沖地震($M_j6.6$)においても建造物被害が発生しているが、単点微動による地盤の卓越周波数特性から、被害を及ぼした地震波の特性と沖積層厚についての議論がなされていた(土質工学会・1993年地震災害調査委員会(1993))。

本研究ではこれらの調査結果を踏まえ、微動アレイ探査を実施し、当該地域の地質ボーリング資料などをもとに、ISK002及び周辺地域の浅部地盤構造と地震動増幅特性についての議論を行う。

参考文献：

社団法人 土質工学会・1993年地震災害調査委員会(1993), 1993年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告書, 404pp.

染井一寛・浅野公之・岩田知孝・大堀道広・宮腰 研(2022), 北陸地方の強震観測点におけるサイト増幅特性とそれを用いた速度構造モデルの推定, 京都大学防災研究所研究発表講演会, B120.

謝辞：

国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網(<https://doi.org/10.17598/NIED.0004>)のデータを利用しました。関係諸氏に感謝致します。本研究は令和4年度科学研究費(特別研究促進費)「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査」(22K19949, 研究代表: 平松良浩(金沢大学))によるサポートを受けました。記して感謝致します。

Input motions on engineering basement during the 2018 Northern Osaka earthquake using shallow surface velocity models based on microtremor array observation

*Shota Goto¹, Kota Asano¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada²

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

2018 年大阪府北部の地震における高槻市と茨木市の建物被害は局所的に被害の大きい地域があるが、既存の地盤増幅率の分布と対応しないことが浅野らにより示されている¹⁾。一方で、茨木市の一部を対象とした調査によると、常時微動の卓越周期と被害分布に対応が見られることが指摘されている²⁾。そこで本研究は震源域の地震観測点(図1)において常時微動アレイ観測を行い、表層地盤の影響と工学的基盤へ入射する地震動の影響とを分離することを試みる。

図1に示すTKT2を除く8か所で常時微動アレイ観測を行った。TKT2については既往研究によるデータ³⁾を用いた。なお、地震観測点でないIBR4で観測を行った理由は後述する。アレイ半径を2m, 5m, 10m(ただし、TKT0は2mと5m, IBR4は10mと2m)とし、正三角形の頂点と外接円の中心に加速度計を置き、3成分の観測を30分ずつ行った。得られたデータに空間自己相関法を用いて求めた位相速度分散曲線を満たすような地盤の速度構造を推定する。工学的基盤をS波速度350m/sと仮定し、その深部に500m/sの層も仮定する。H/Vスペクトルや近傍のボーリングデータを参照し得られた速度構造を初期値として遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行った。図2に各個体の速度構造(黒線)、最適モデル(赤線)、工学的基盤までの深さ(青矢印)を示す。IBR0とIBR1で他と比べて深い工学的基盤が認められたため、この中間位置において追加で常時微動アレイ観測を行った(IBR4)。この結果、IBR4ではIBR0やIBR1に比べて浅く、この差がどの程度有意であるかは引き続き検討が必要である。

表層地盤の速度構造を用いて、観測された地震動から工学的基盤上の地震動を推定する。解析にはDYNEQ⁴⁾を用い、動的変形特性はH-Dモデルを用いた。推定された工学的基盤波(NS成分)とNS, EW成分の最大速度を図3に示す。白川は万博や中穂積、東中条、玉島よりも震源に近いが、工学的基盤上の速度波形の振幅はこれらの震源から遠い場所よりも小さい。K-NET高槻や竹ノ内についても同じことが言える。この理由については破壊の前方指向性により南西方向に伝わる波の振幅が大きくなった可能性等が考えられるが、より詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 浅野晃太, 後藤浩之, 奥村与志弘, 澤田純男: 2018 年大阪府北部の地震における高槻市・茨木市の建物被害分布と高槻市の被害要因に関する地理学的考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 77 巻, 4 号, p. I_638-I_648, 2021
- 2) 森伸一郎, 小林巧: 2018 年大阪府北部の地震における茨木市内の震度と地盤卓越振動数の関係, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学)77 巻 4 号 p.I 490-I 502, 2020
- 3) Goto: Bayesian posterior mean velocity modeling as alternative to resolution guaranteed imaging, Proc.of the 6th IASPEI/IAEE International Symposium: Effect of Surface Geology on Seismic Motion, 2021
- 4) 吉田望: DYNEQ A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by EQUIVALENT linear method, Version 4.00, 2020, 関東学院大学

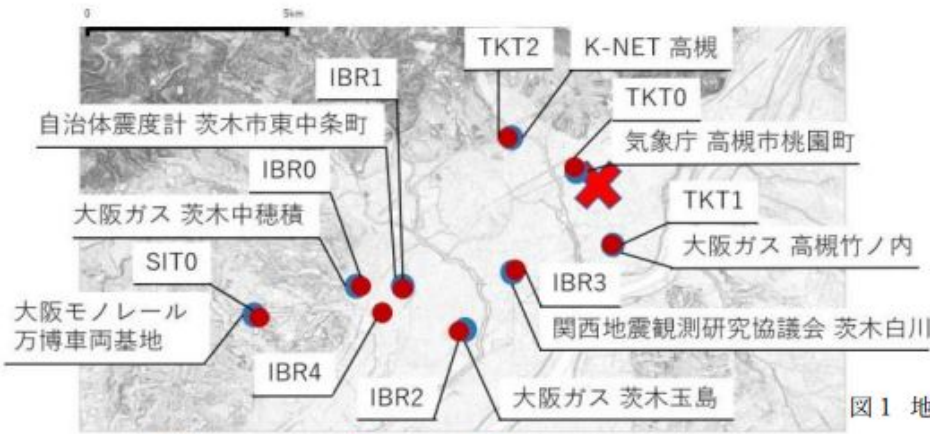


図 1 地震観測点と常時微動アレイ観測点

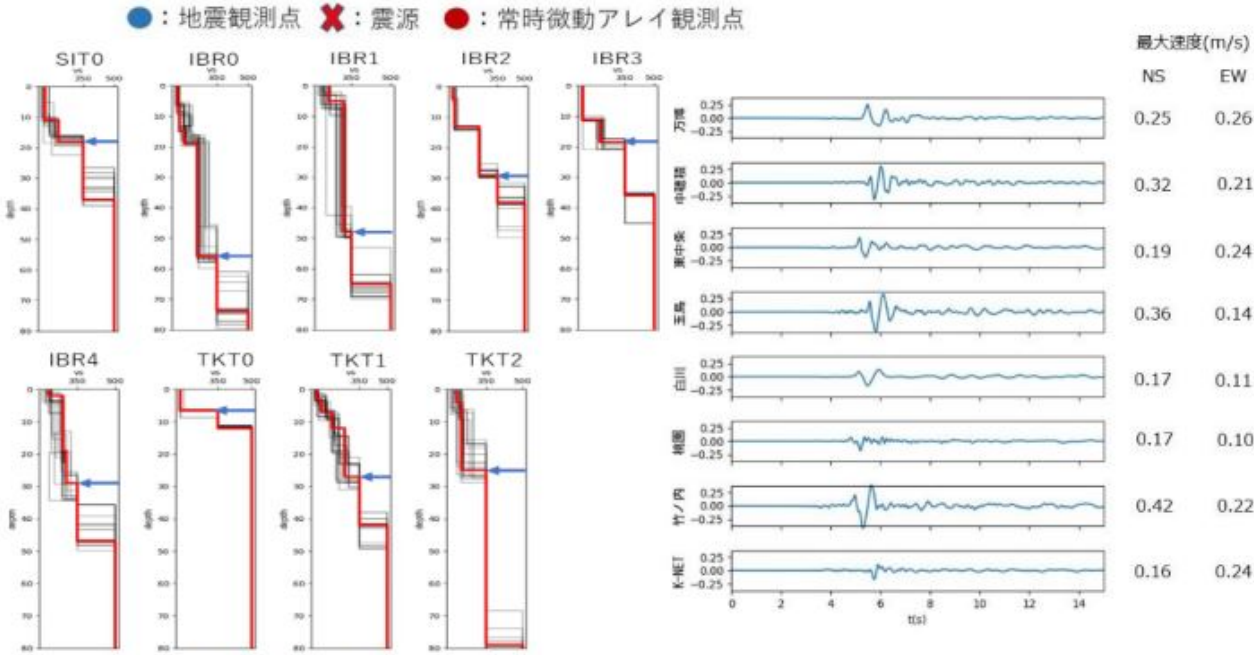


図 2 速度構造モデル

図 3 工学的基盤上の速度波形(NS)と最大速度

The effect of the complex shape of the basin edge structure to the microtremor Horizontal-to-Vertical spectral ratios by numerical analysis

*Shinichi MATSUSHIMA¹, Zhiwei LIU², Jun'ichi MIYAKOSHI³

1. DPRI, Kyoto University, 2. Former Department of Architecture and Architectural Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Ohsaki Research Institute, Inc.

平成7年（1995年）兵庫県南部地震の際にみられたように、盆地端部のように地下の地盤・基盤構造が急激・複雑に変化する場所では、盆地境界の形状によりその周辺の地震動特性に影響を与える。従って、地震動による被害を軽減するためには、地下の地盤・基盤構造と地震動特性との関係を把握することが必要である。一方、常時微動は比較的容易に観測ができ、地下の地盤・基盤構造を推定する経済的な手法の一つであり、多点を観測するのが容易なことから空間分布を調査することに長けており、地震動の空間分布との関係を検討するのに利用できるとすれば有用である。これまで、京都盆地、特に東山との盆地東部の境界部での盆地端部における微動水平上下スペクトル比（MHVR）にみられる方位依存性および形状と盆地端部における基盤の段差構造との関係を調べるために、京都盆地において微動観測を実施してきた（松島・宮腰, 2022）。この観測で得られた観測MHVRについて考察をすることに繋げるために、基盤の段差構造の形状との関係についてパラメトリックスタディを行った。基盤の段差構造の形状に関するパラメトリックスタディについては、Hamabe et al. (2019)などにおいて神戸市域を念頭に行われている。本研究では京都市消防局防災対策室(2002)においてコンパイルされた1998年からの調査結果を参考に、盆地端部における基盤段差構造について5種類の二次元モデルを作成し、これらのモデルに対し、数値解析MHVRを計算し、基盤段差構造の形状とMHVRの特徴の関係を整理した。5種類のモデルは、(a)垂直、(b)傾斜(21.8°)、(c)傾斜(11°)、(d)二段、(e)途中逆断層とした（Fig.1）。モデルは、盆地内を深さ200mの1層とし、基盤と合わせて2層速度構造モデルとした。モデルの物性値については、京都市消防局防災対策室(2002)の結果を参考にして、盆地内は $V_p=2000\text{m/s}$ 、 $V_s=630\text{m/s}$ 、 $\rho=2000\text{kg/m}^3$ 、基盤は $V_p=4500\text{m/s}$ 、 $V_s=2500\text{m/s}$ 、 $\rho=2500\text{kg/m}^3$ とした。基盤段差構造モデルの作成とメッシュ化はCUBIT(<https://cubit.sandia.gov/>)を使用した。計算には、EFISPEC3D (De Martin, 2011) を用いた。モデルサイズは5種類ともに長さ20km、幅20km、深さ12kmとし、最小メッシュサイズは盆地内で166m、基盤で500mとしてメッシュ内に Gauss-Lobatto-Legendre (GLL) ノードを $5 \times 5 \times 5 = 125$ 点を配置することで有効振動数を3.8Hzとした。入力関数としては、継続時間1sの双曲線正接関数の1階微分とし、拡散波動場理論 (Sánchez-Sesma et al., 2011, Matsushima et al., 2014) に基づいて数値解析MHVRを計算した。加振点と同じ場所での応答を計算し、応答を入力関数でデコンボリューションしてグリーン関数を計算した。継続時間は20秒とした。その結果、基盤構造の違いより、盆地境界からの距離が同様でも、理論MHVRの形状や振幅特性が大きく違うことが分かった。特に、傾斜モデル (b, c) の場合は傾斜角によらず、MHVRのピークはなだらかであり方位依存性が顕著ではないこと、二段モデル(d)では踊り場部分では方位依存性が顕著に現れること、途中逆断層(e)では逆断層部分で深くなった部分の影響で方位依存性が現れることが分かった。

参考文献：

De Martin, Florent, 2011, Verification of a spectral-element method code for the southern California earthquake center LOH.3 viscoelastic case, Bull. Seismol. Soc. Am., 101(6), 2855-2865, doi:10.1785/0120100305.

Hamabe, Ryota. et al., 2019, A Study on the Influence of the Basin Edge Structure to the Characteristics of the Basin-Edge Effect, Proceedings of the 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly.

浜辺亮太・他, 2019, 盆地端部における地震動特性に関する研究, 日本地球惑星科学連合2019年大会予稿集, SSS13-29.

京都市, 2002, 平成 13 年度 地震関係基礎調査交付金 京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書, (地震調査研究推進本部, H 14 京都市: 京都盆地の地下構造 <https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/KyotoCty7frm.htm>) .

松島信一・宮腰淳一, 2022, 京都盆地における観測微動水平上下スペクトル比と基盤構造との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) , 21039, 77-78.

Matsushima et al., 2014, The Effect of Lateral Heterogeneity on Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Microtremors Inferred from Observation and Synthetics. Bulletin of the Seismological Society of America, 104 (1), 381–393, doi: <https://doi.org/10.1785/0120120321>

Sánchez-Sesma, Francisco J., et al, 2011, A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. Geophysical Journal International, 186, 221-225, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x>

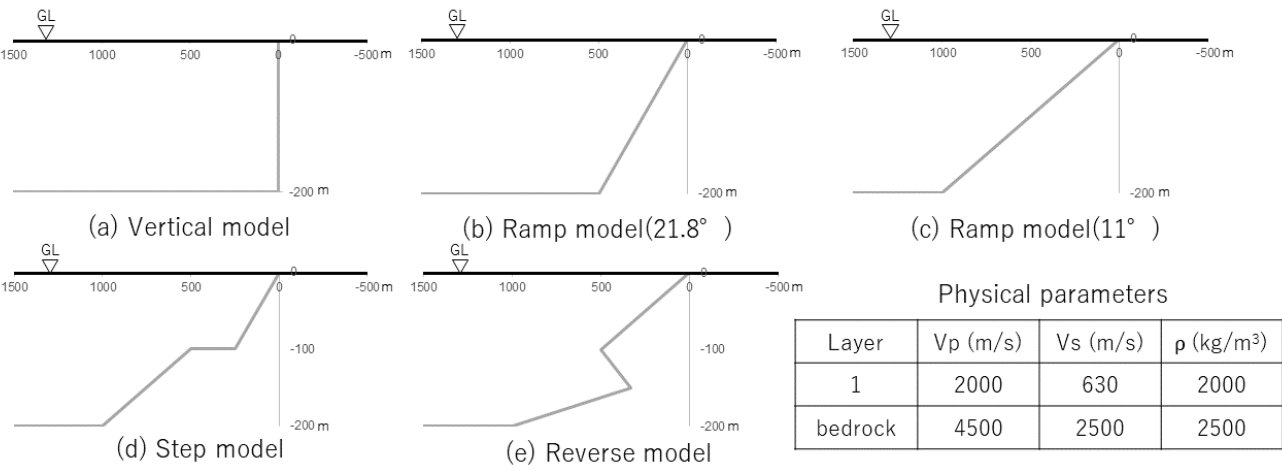


Fig.1 Sections of two-dimensional velocity structure models used for numerical analysis of microtremor Horizontal-to-Vertical spectral ratios

Room D | Regular session : S17. Tsunami

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:15 AM - 12:00 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:15 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM D
5th floor (Training Room 520)

[S17] AM-2

chairperson:Yushiro Fujii

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

[S17-01] Modeling of the 2022 Tonga Eruption Tsunami Recorded on Ocean Bottom Pressure and Tide Gauges Around the Pacific

*Yushiro Fujii¹, Kenji Satake² (1. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S17-02] Wave Separation of Tsunami Near Japan Induced by Air Pressure Pulse After the 2022 Tonga Volcanic Eruption

*Tung-cheng Ho¹, Nobuhito Mori¹, Masumi Yamada¹ (1. DPRI, Kyoto Univ.)

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

[S17-03] The later phase of tsunami associated with the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption: source estimation using array-based analysis

*Ayumu MIZUTANI¹, Kiyoshi Yomogida² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University)

Modeling of the 2022 Tonga Eruption Tsunami Recorded on Ocean Bottom Pressure and Tide Gauges Around the Pacific

*Yushiro Fujii¹, Kenji Satake²

1. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

2022年1月15日のフンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山噴火に伴う津波が、太平洋周辺の海底水圧計（DART）と検潮所で記録された。津波の第1波は、火山付近からの津波の伝播速度から推定される到達時間（ETA）よりもはるかに早く記録され、噴火による気圧波（ラム波：伝播速度は約310 m/s）に励起された津波であった。第2波も、一部の観測点ではETAより早く到達しており、伝播速度200～250 m/sの大気重力波によるものと考えられる。

本研究では、空間格子間隔24弧秒の球面座標系において、20時間の津波伝播を線形長波方程式で数値的に解いた。火山中心の1格子点から広がる環状の水位を津波伝播計算の入力とした。環状の水位の広がり、その伝播速度と波源での初期振幅によってパラメータ化され、計算領域内すべての格子点における振幅は、 $1/\sqrt{R \cdot \sin(\delta)}$ で距離減衰する。ここで、 R は地球の半径、 δ は震央距離（角距離）を示す。DARTで観測された第1波と計算波形の比較から、水位変化の立ち上がり時間を600秒と仮定して、上記2つの波源パラメータ、すなわち波源での初期振幅（3.83 m）と発震時刻（04:16 UT）をインバージョンによって求めた。インバージョンは3つの異なる伝播速度（305, 310, 315 m/s）で行ったが、310 m/sのときに観測波形と計算波形の一致度が最も良い結果が得られた。この時、同心円状に広がる水位の環の幅は約370 kmである。

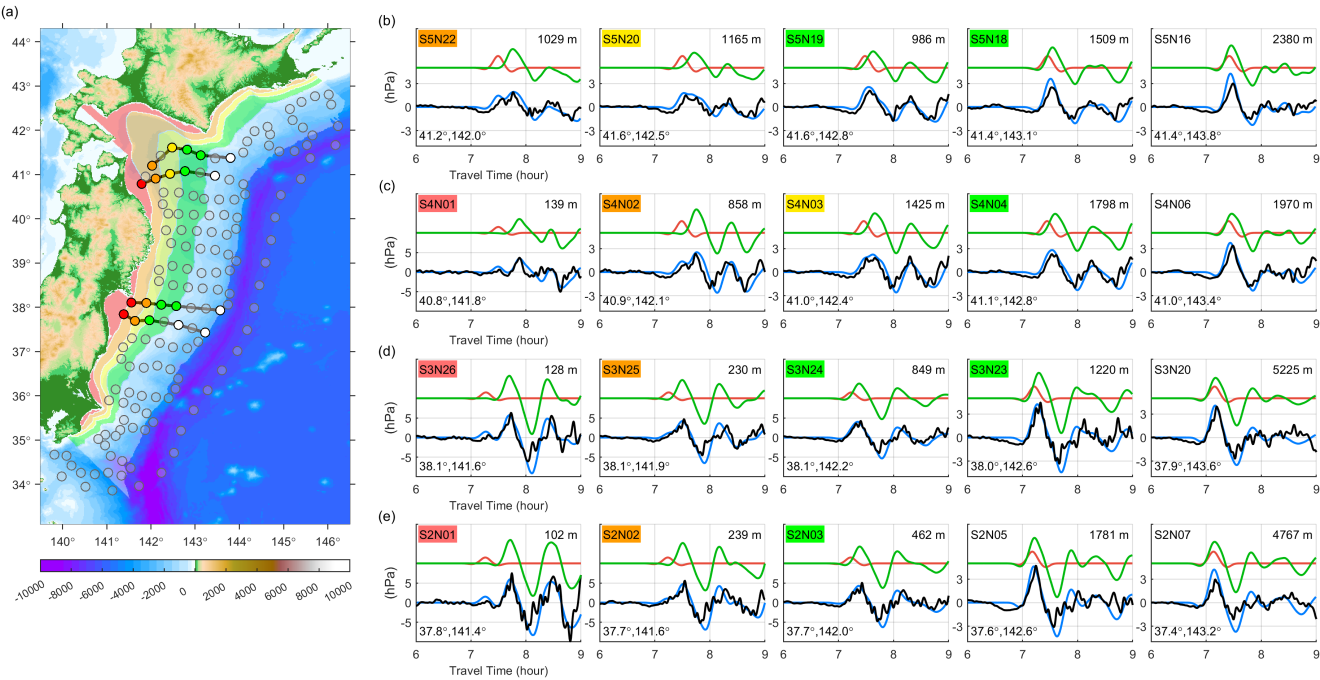
津波の第2波は、200～250 m/sの伝播速度で、負の初期振幅（-1 m）を持つ環状の水位の広がりによって計算した。計算波形と残差波形（観測波形から、第1波の計算波形を差し引いたもの）の相関係数が高くなるのは、第2波の伝播速度が日本と南アメリカに向かって速く（240～250 m/s）、北米に向けてやや遅い（200～210 m/s）場合であった。ラム波と大気重力波の2つの環状に広がる水位によって計算した波形は、日本など遠地の検潮所で記録された津波波形も後続波を含めて概ね再現できる。

Wave Separation of Tsunami Near Japan Induced by Air Pressure Pulse After the 2022 Tonga Volcanic Eruption

*Tung-cheng Ho¹, Nobuhito Mori¹, Masumi Yamada¹

1. DPRI, Kyoto Univ.

Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano erupted at UTC 04:14, 15 Jan. 2022. After the eruption, global tsunami monitoring systems and tide gauges observed tsunami signals earlier than expected tsunami waves (Carvajal et al., 2022). The recorded data revealed that the fast-traveling traveled at a velocity of about 300-315 m/s (Kubota et al., 2022; Yamada et al., 2022), which was much faster than the conventional tsunami average velocity of around 200 m/s. The eruption excited an air pressure pulse known as the Lamb wave (Matoza et al., 2022). The sea surface disturbances induced by Lamb wave (hereafter, pressure-forced wave) traveling with the Lamb wave at the same velocity. The pressure-forced waves were observed much earlier and are considered the fast-traveling tsunamis (Kubota et al., 2022). However, studies indicated that the pressure-forced waves could generate ocean gravity waves after a major water depth change, such as continental slopes. The generated ocean gravity waves were first instrumentally recorded after the eruption of the Krakatau volcano in 1883, where the ocean gravity waves were generated when air pressure pulse at major changes in depth (Garrett, 1970). After the eruption of Hunga Tonga, it was the first time that pressure-forced waves were widely observed by ocean bottom pressure gauges (OBPGs). Tanioka et al. (2022) reported the separated waves observed by the OBPGs near Japan Trench. Their synthetic test indicated that the separation effect is sensitive to the wavelength of the Lamb wave. Yamada et al. (2022) pointed out that compared to OBPGs, the sea surface disturbances were much delayed at tide gauges because the tsunami separated and traveled in ocean gravity wave after passing the continental slope. To understand the mechanism of the wave separation, we performed two-dimensional simulations of synthetic tests and the real bathymetry with the case of Hunga Tonga. Our simulations show that the separated waves were the pressure-forced wave, which traveled at the same velocity of Lamb wave, and the ocean gravity wave generated at changes in depth. Variation of water depth rescales the amplitude of the pressure-forced wave, and the amplitude change generates an ocean gravity wave due to conservation of mass. The generated ocean gravity wave travels at long wave velocity, which is slower than the Lamb wave. The velocity difference between the pressure-forced wave and the generated ocean gravity wave led to the wave separation. We reproduced different stages of separated waveforms recorded by S-net stations between Japanese east coast and Japan Trench. Our result suggests that any volcano may induce the fast-traveling tsunami, i.e., the pressure-forced waves and ocean gravity waves, as the volcanic eruption excites a significant air pressure pulse, such as 2022 Hunga Tonga or 1883 Krakatau. Our synthetic tests showed that the pressure-forced wave would be amplified as it travels to deeper water. The pressure-forced waves are small in shallow-water coastal areas, where the ocean gravity waves are usually larger. The wave heights of ocean gravity waves are associated with the change of depth. In other words, a larger depth change results in a larger amplitude change of pressure-forced wave, and the generated ocean gravity wave is larger. It implies that the induced tsunami wave height is limited when the air pressure pulse travels only in shallow water. Future works on the tsunamis in the Atlantic Ocean, such as the Caribbean Sea and the Mediterranean Sea, can help us understand the tsunami induced by the air pressure traveling from land.



The later phase of tsunami associated with the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption: source estimation using array-based analysis

*Ayumu MIZUTANI¹, Kiyoshi Yomogida²

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University

2022年1月に発生したHunga Tonga-Hunga Ha'apai火山の噴火に伴う津波は世界中で観測されており、特にその第一波については、噴火で生じた大気ラム波によって励起されたと考えられている(e.g., Carvajal et al., 2022; Kubota et al., 2022)。一方で、その後続波の励起メカニズムについては、これまでに火山周辺での海底変位や大気重力波と海洋の共鳴などが示唆されているものの、定量的な解析は十分になされていない。本研究では、DONET及びS-netの水圧記録に対して、アレイ解析手法の一つであるVespa解析を適用することで後続波の到達時刻と到来方向を求め、それを基に後続波の励起源の推定をおこなった。

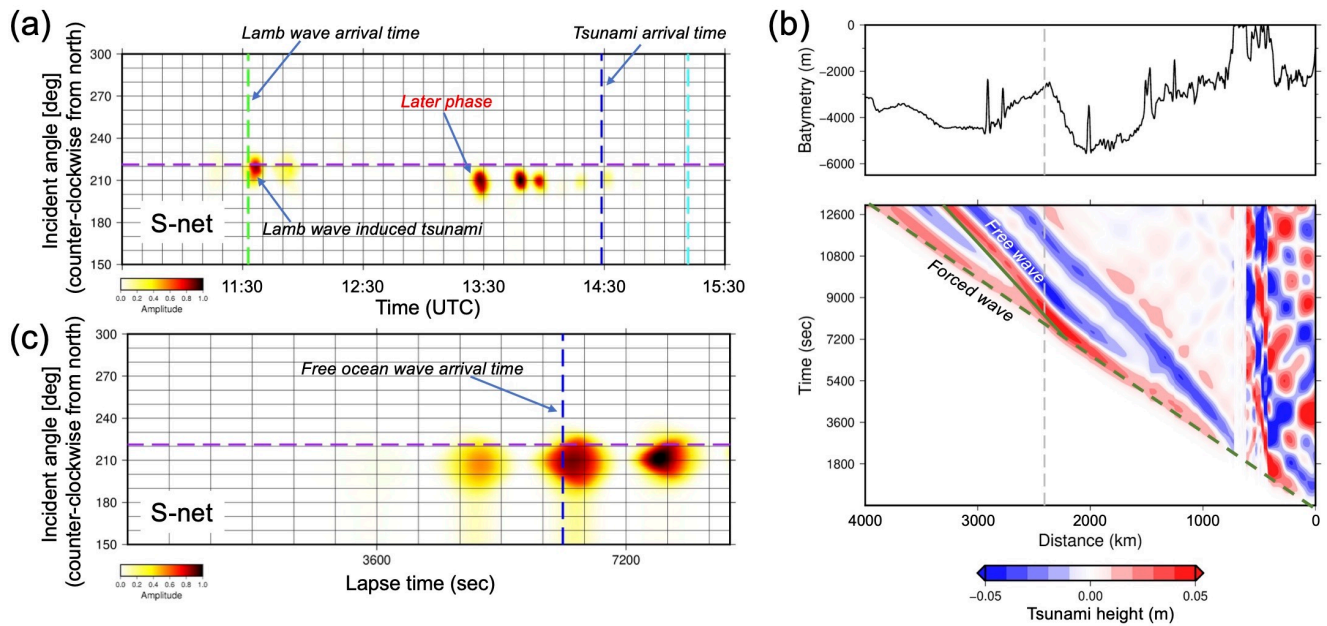
Vespa解析では、線形長波を仮定することでアレイ内の津波の位相速度を計算し、入射角ごとのSlant stackの強度分布(Vespagram)から、入射角の時間変化を推定する(e.g., Rost and Thomas, 2002)。得られたVespagramにおける後続波は、火山からの直達津波の予測走時より早く到達しており、その入射角はトンガーアレイ間の大円経路と異なる(図a)。つまり、後続波の励起源は、火山周辺の海底変位や大気重力波ではないことが示唆された。

Garrett(1970)では、大気波によって海洋に励起されるforced waveが、海底地形が大きく変化する領域を通過する際にfree waveへ変換することが指摘された。図aのVespagramにおける後続波の到来時刻を基にfree waveが発生する領域を推定したところ、南緯5度・東経165度付近となった。

次に、この領域と火山を結ぶ大円経路に沿った一次元海底地形(図b上)を用いて数値計算をおこなった結果、図b下のように、Vespagramから推定された領域周辺においてfree waveが発生することが確認できた。

さらに、一次元計算で得られたfree waveを波源としてJAGURS(e.g., Baba et al., 2016)を用いた二次元津波計算をおこなった。合成波形から計算したVespagramは観測記録から得られたものと調和的な結果となった(図c)。

まとめると、DONET及びS-netで観測された後続波には、噴火によって発生した大気ラム波がナウル島南部に位置する水深の浅い領域を通過する際に発生したfree waveが寄与していると考えられる。一方、一次元計算をもとにした合成波形の振幅は、観測波形と比較して1/20程度小さくなっている。観測された振幅を再現するためには、海底地形への斜め入射の効果などの三次元的なモデルを考慮する必要があると考えられる。



Room D | Regular session : S17. Tsunami

📅 Tue. Oct 25, 2022 1:30 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 4:30 AM - 5:45 AM UTC | 🏢 ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S17] PM-1

chairperson: Kentaro Imai (JAMSTEC), Yoshinori Shigihara

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

[S17-04] The slip distribution of the 2009 Samoa earthquake doublet estimated by a joint inversion ocean-bottom pressure and electromagnetic tsunami records

Hiroyuki YOKOI¹, *Toshitaka BABA¹, Zhiheng Lin², Takuto MINAMI³, Hiroaki TOH² (1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. Kobe University)

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

[S17-05] Estimation of the scale of past submarine landslide tsunamis in the waters around Japan

*Yoshinori SHIGIHARA¹, Masataka Inui¹, Ako Yamamoto¹, Hikaru Moriki², Takashi Kumamoto³ (1. National Defense Academy, 2. Okayama Univ., currently NRA, 3. Okayama Univ.)

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

[S17-06] Slip Distribution of the 1923 Kanto Earthquake Estimated from Tsunami waveforms, Coseismic Deformation Data and Tsunami Survey Heights

*Yuichiro TANIOKA¹, Yusuke Yamanaka¹, Yumi Nakadai² (1. Hokkaido University, 2. Prev. Hokkaido University)

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

[S17-07] Problems related to Tsunami Source Model of the 1498 Meio Tokai Earthquake on the Coast of Shizuoka Prefecture

*Satoshi KUSUMOTO¹, Kentaro Imai¹, Takane Hori¹, Daisuke Sugawara² (1. JAMSTEC, 2. Tohoku University)

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

[S17-08] The origin of tsunami trace height in Atashika during the 1944 Showa Tonankai Earthquake

*Kentaro IMAI¹, Ryoko Obayashi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Yuichiro Tanioka² (1. JAMSTEC, 2. Hokkaido Univ.)

The slip distribution of the 2009 Samoa earthquake doublet estimated by a joint inversion ocean-bottom pressure and electromagnetic tsunami records

Hihiro YOKOI¹, *Toshitaka BABA¹, Zhiheng Lin², Takuto MINAMI³, Hiroaki TOH²

1. Tokushima University, 2. Kyoto University, 3. Kobe University

2009年サモア地震（Mw 8.0）はアウターライズ地震とプレート境界型地震の双子地震であったとされる。先行研究によりいくつかの断層モデルが提案されているものの、どの断層モデルを用いても完全には津波遡上高を再現できないなど、いまだ改善の余地がある。精度のよい断層モデルを求めるには観測データの充実が必要である。2009年サモア地震の津波は、従来の海底水圧計（OBP）に加えて、海底電位差磁力計（OBEM）でも記録されていた。そこで本研究ではOBPとOBEMデータの双方を同時に用いた線形インバージョンにより2009年サモア地震の断層モデルを推定した。OBEMデータは津波鉛直磁場成分を海面変動に変換してからインバージョン解析に利用した。OBEMデータから変換された海面変動を特別な処理をすることなく解析に取り込むことができた。また、本研究では津波グリーン関数の生成には波数分散性と地殻の弾性の効果を考慮できる数値モデルを利用した。このため、より遠方で観測されたOBPデータをインバージョンに取り込むことができ、OBEM観測と合わせて多くの観測データを利用できた。得られたすべり分布において、最大のすべり量は7.1mでアウターライズ断層のほうにあらわれた。プレート境界断層の最大すべり量は6.2mであった。剛性率40GPaを仮定して、地震モーメントを計算するとアウターライズ断層では 4.33×10^{20} Nm（Mw 7.7）、プレート境界断層で 8.27×10^{20} Nm（Mw 7.9）で、全体で 1.26×10^{21} Nm（Mw 8.0）であった。計算津波波形と観測津波波形の比較において、RMSEは7.3 mm、Variance Reductionは79%で、本モデルは先行研究よりも観測波形をよく説明した。推定された2009年サモア地震の断層モデルは、先行研究で提案された断層モデルよりプレート境界のすべり領域が東西方向に狭く（幅約50km）、位置がプレート浅部（海溝軸方向）にやや移動した。すべり領域が東西方向に狭くなるのはOBEMデータに依存する。OBEMから推定された海面変動には比較的波長の短い津波が記録されておりこれが影響している。すべり域のプレート浅部への移動は波数分散性と地殻の弾性の効果により津波の伝播速度が低下することに起因する。本研究ではOBEMで観測された津波磁場の鉛直成分のみを利用したが、水平成分も津波の流速場の情報を含んでおり、今後は津波磁場の水平成分の利用を検討する予定である。

Estimation of the scale of past submarine landslide tsunamis in the waters around Japan

*Yoshinori SHIGIHARA¹, Masataka Inui¹, Ako Yamamoto¹, Hikaru Moriki², Takashi Kumamoto³

1. National Defense Academy, 2. Okayama Univ., currently NRA, 3. Okayama Univ.

1. 研究の目的 日本周辺海域では、大小さまざまな海底地すべりおよび崩壊地形が分布し、その近傍に分布する海底活断層の活動による地震に関連したものもあるとされている。当然、それらの中には津波を伴ったイベントも存在すると推察されるが、その詳細は不明である。沿岸部に発電所に代表される重要インフラ施設が点在する我が国の状況を鑑みると、今後、日本周辺海域で発生する可能性のある海底地すべり津波のハザードを推定する技術を確立することは、防災対策上非常に重要である。そこで本研究では、日本周辺海域の海底地すべり跡のデータを利用することにより、過去に発生した可能性のある海底地すべり津波の規模を推定することを試みた。

2. 解析手法 森木ら（2017）が海底地形アナグリフを用いて判読した海底地すべり跡に関するGISデータから、海底地すべりの諸元を求めた。同データは、約6,000地点における地すべりの面積、滑落崖の周長、地すべり斜面の原地形の傾斜角、地すべり発生位置の水深等の情報が海域ならびに海底地形ごとに整理されている。本研究では、これらのデータを基に海底地すべりの体積を地すべり面積（形状を矩形に近似）と層厚から構成される三角柱に仮定することにより、海底地すべり津波の推定に必要な変数として、地すべり幅、長さ、層厚を推定した。そして、海底地すべりによって発生する津波波源振幅（負の最大津波水位）をWatts et al. (2005)の経験式を用いて計算した。ここで、海底地盤の密度は、IODPの試錐コアデータから回帰される関数により求めた。

3. 結果と考察 日本海東縁と南海トラフに関して、海底地すべり面積と体積に対する津波波源振幅の関係を図1に示す。地すべりの規模には面積・体積共に対数スケールの比例関係にあり、両海域にそれほど顕著な違いは見られない。発生する津波の特徴としては、南海トラフでは地すべりの規模が大きいほど大きな津波イベント（10m以上～30m未満）が発生している。他方で、日本海東縁では10m超の津波イベントが南海トラフよりも多く発生しており、それらは必ずしも地すべりの規模に対応していない。特に面積が50km²付近では、30m以上の大規模な津波イベントも複数認められる。このような違いになる理由としては、地すべりの発生深さに起因すると考えられる。津波波源振幅は地すべり発生位置の水深に反比例する。両海域の水深の平均値は、南海トラフで約2,300mであるのに対し日本海東縁は約1,400mであり、さらに0～1,000mの範囲の発生頻度としては後者の方が多い。以上の結果から、日本海東縁では南海トラフと比較すると大規模な海底地すべり津波イベントが過去に発生していた可能性が示唆される。

謝辞 本研究は科研費（基盤研究（B）：22H01606）の一環で実施されました。ここに記して謝意を表します。

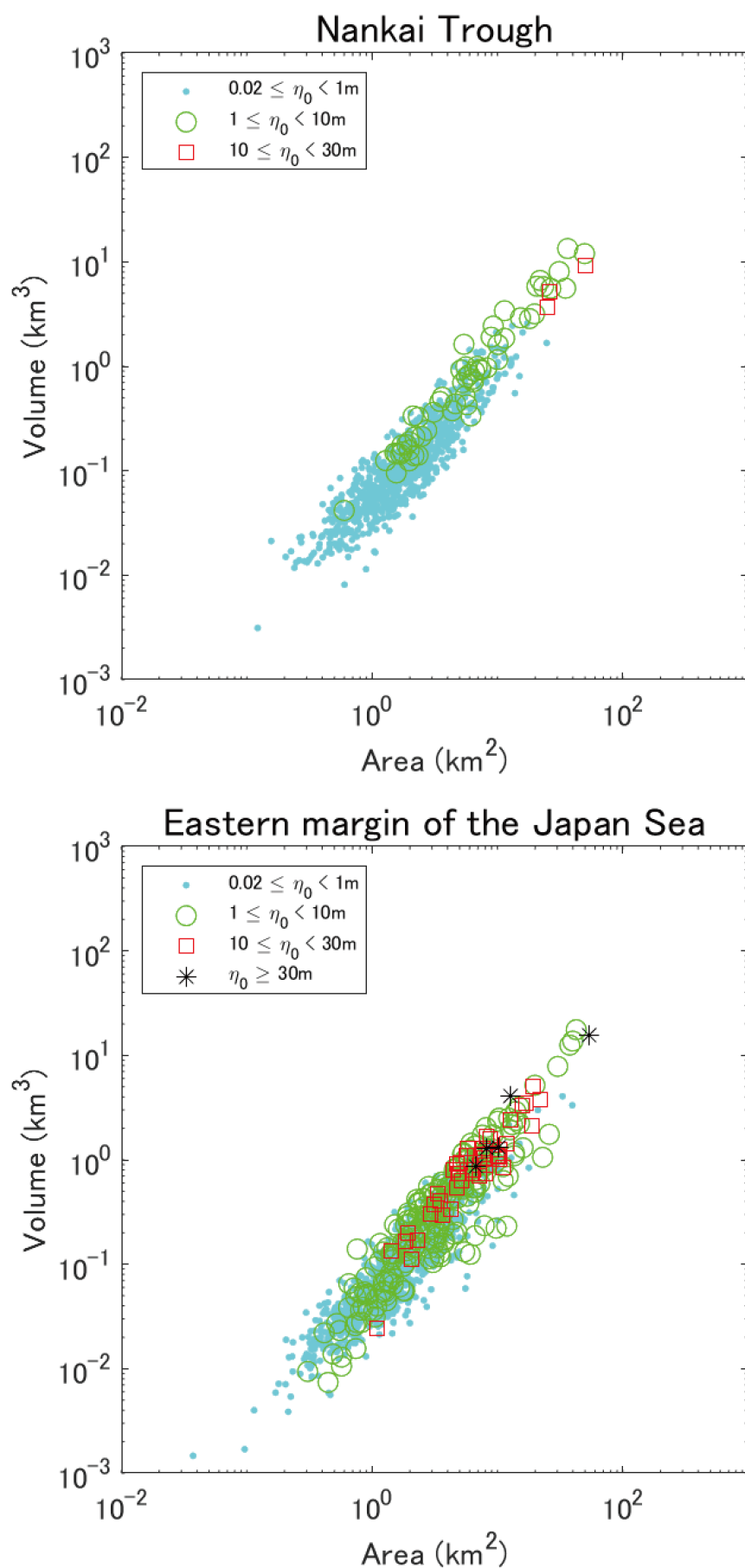


図1 地すべり面積，体積と津波波源振幅の関係（上：南海トラフ，下：日本海東縁）

Slip Distribution of the 1923 Kanto Earthquake Estimated from Tsunami waveforms, Coseismic Deformation Data and Tsunami Survey Heights

*Yuichiro TANIOKA¹, Yusuke Yamanaka¹, Yumi Nakadai²

1. Hokkaido University, 2. Prev. Hokkaido University

1. はじめに

1923年関東地震は首都圏で10万人以上の死者・行方不明者を出し、日本全体に甚大な被害が波及した大地震であった。この地震の震源過程はすでに多くの研究者によって推定されている。地震波形や地殻変動データを使用して推定されたすべり量分布は、首都直下のプレート境界で西側と東側に2つの大きなすべり域を持つことが明らかになっていた。ただ、相田（1993）は伊豆半島沿岸で調査された最大9mの津波遡上高がプレート境界での断層モデルでは説明できないとし、伊豆半島沖で西相模湾断裂上の断層が同時に破壊したとした断層モデルを提案した。さらに最近、中臺他（JpGU2022）は震源域近傍の検潮所で記録された津波波形記録と地殻変動データを用いたジョイントインバージョンにより関東地震のすべり量分布を推定した。その結果、これまで地震波形や地殻変動データから推定されたすべり量分布と大局的には同様であり、西側と東側に2つの大きなすべり域が推定された。しかし、西側の大すべり域は相模トラフ側（浅部域）に張り出しており、今までの結果との違いとして推定された。またこの部分のプレート境界は津波波形により良く拘束されていることも分かった。そこで本研究では、中臺他（JpGU2022）が推定したプレート境界西側浅部の大きなすべり（約9m）が相田（1993）の指摘した伊豆半島沿岸の高い津波遡上高の原因ではないかと考え、伊豆半島沿岸での津波遡上計算を実施した。

2. 手法

断層モデルとして中臺他（JpGU2022）により推定された関東地震のすべり量分布および、比較のためそのすべり量分布から西側浅部の小断層のすべり量をZeroとしたすべり量分布も用いた。津波数値計算は非線形長波近似式を用い、津波遡上計算を行った。格子間隔は2秒とした。また、伊豆半島沿岸の遡上が調査された地域の近傍の地形は地震発生当時の地形に修正した。

3. 結果

図に伊豆半島沿岸で調査された津波遡上高と計算遡上高の比較を示す。中臺他（JpGU2022）で推定されたすべり量分布を用いると調査された津波遡上高が上手く説明できることが分かった。また、プレート境界西側浅部のすべりが無い場合はやはり、伊豆半島沿岸の津波遡上高を説明できないことも明らかになった。つまり、相田(1993)により指摘された西相模湾断裂上の断層の破壊は無くても、プレート境界西側浅部のすべりがあれば伊豆半島沿岸の津波遡上高は説明でき、さらに検潮所での津波波形や陸上の地殻変動も説明できることが明確になった。

参考文献

相田（1993）、相模湾北西部に起こった歴史津波とその波源数値モデル、地学雑誌、102、427－436。

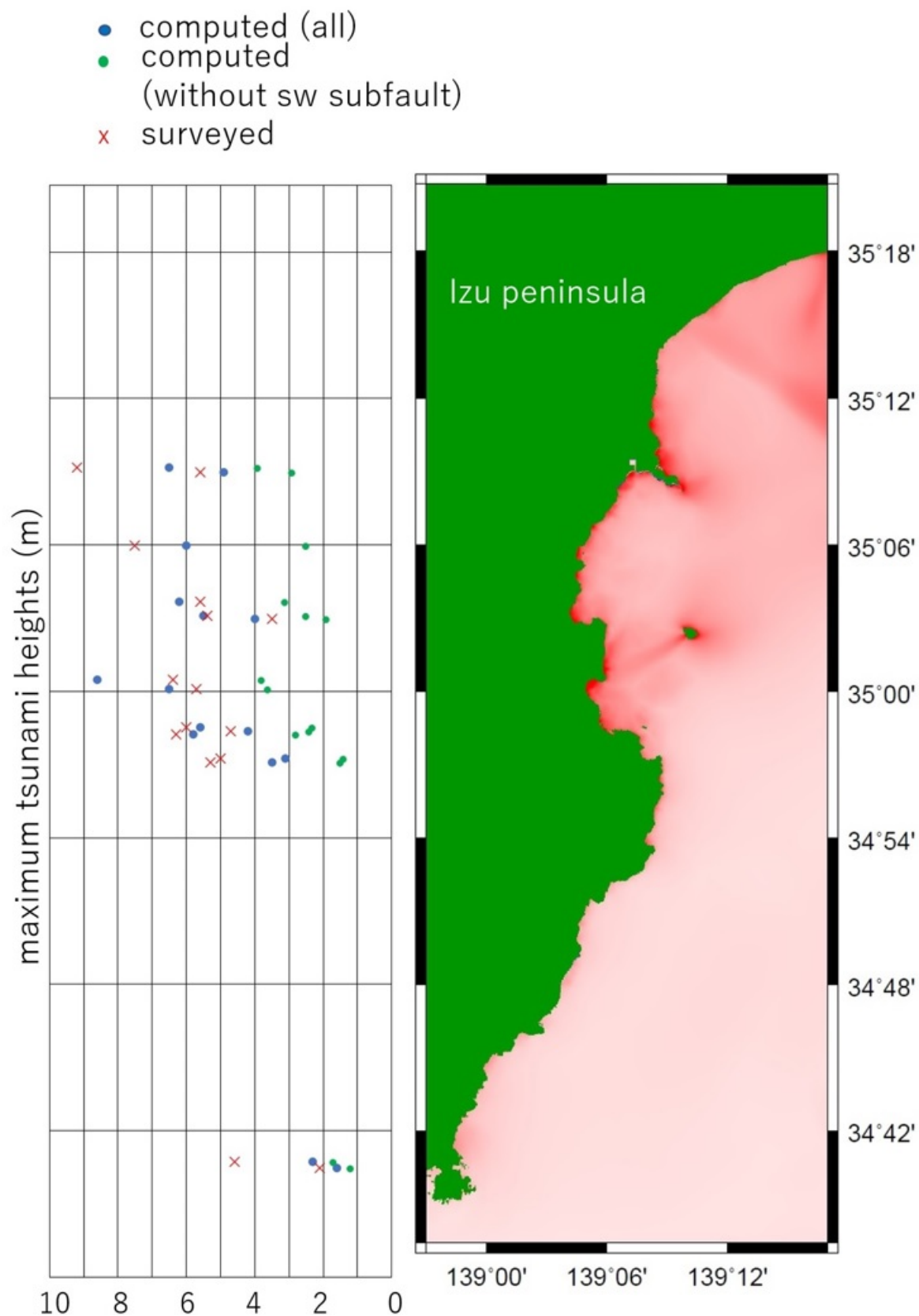


図 調査津波遡上高 (x) と計算遡上高 (●: 中臺他 JpGU2022 のすべり量分布) と計算遡上高 (●: 西側浅部小断層を除く) を比較

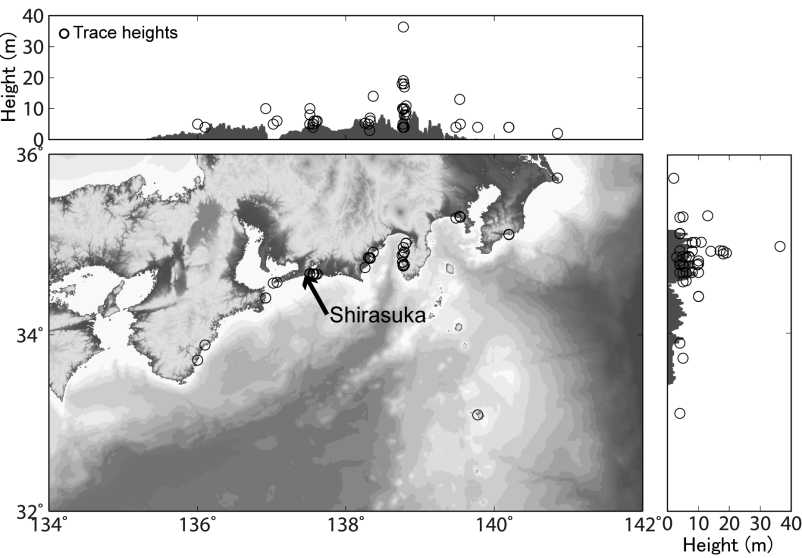
Problems related to Tsunami Source Model of the 1498 Meio Tokai Earthquake on the Coast of Shizuoka Prefecture

*Satoshi KUSUMOTO¹, Kentaro Imai¹, Takane Hori¹, Daisuke Sugawara²

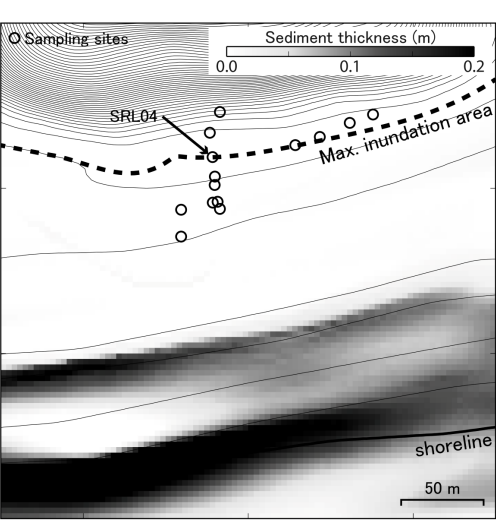
1. JAMSTEC, 2. Tohoku University

1498年明応東海地震は南海トラフで発生した海溝型巨大地震であり、その地震に伴って生じた津波は静岡県沿岸部を中心に甚大な被害を及ぼした。これまで安中ほか(2003)や阿部(2017)によって津波波源モデルの推定が試みられているが、一部の痕跡高を再現できないことからさらなる検証の余地がある。なお、阿部(2017)やKitamura et al. (2020)では、駿河湾内での海底地すべりの関与も示唆されている。明応東海地震は古文書記録の痕跡信頼度が低く、波源推定には文献記録だけでなく津波堆積物を活用する必要がある。そこで本研究では本地震の解明に向けて、文献記録と堆積物記録を数値シミュレーションとの比較により再検討した。まず文献記録に基づく検証では、津波痕跡データベースから痕跡信頼度B~Dのものを選び、このうち外海に面した計60地点を抽出した。日本近海の全域50mメッシュの海底地形データ(Chikasada, 2020)と安中ほか(2003)によって提案された津波波源モデルを基に高性能津波計算コード(JAGURS; Baba et al., 2017)を使って津波伝播の数値シミュレーションを実行した。その結果、計算津波高は痕跡高より全体的に低く、波源モデルは過小評価であることが分かった(図1a)。静岡県伊豆市小土肥集落にある栄源寺では、津波被害記述が残されており、都司ほか(2013)による現地測定の結果、津波痕跡高は18 mで、痕跡信頼度はDと結論付けた。現在の小土肥集落は海岸線からおよそ200 mの範囲に広がっており、これは大日本帝国陸地測量部五万分の一地形図と大差ない。明応東海地震発生当時の集落も現在と同じ位置にあったと仮定すれば、数値解析による検証が可能と考えられる。しかしながら、従来の波源モデルでは小土肥八幡神社まで津波は到達しない。次に堆積物記録に基づく検証では、明応東海地震の津波堆積物が確認されている静岡県湖西市白須賀(Komatsubara et al., 2008)において、同様に津波土砂移動計算(高橋・他, 1999; 高橋・他, 2011; Sugawara et al., 2019)を実施した。図1bに地震発生から3時間後における土砂堆積量を示す。津波堆積物を確認できる掘削地点(SRL04)まで津波は到達するものの土砂は全く堆積しなかった。これは白須賀の海岸に到達する津波が低く、掘削地点まで土砂を移動させるだけの流速を確保できないためである。以上の検証から、現在提唱されている明応東海地震の津波波源モデルは文献記録・堆積物記録どちらからみても過小評価となっていることが明らかとなった。南海トラフ巨大地震の推移予測のためにも早急に波源モデルも再検証を行う必要がある。また静岡県伊豆市小土肥集落では津波痕跡が確認されているにもかかわらず、堆積物調査が実施されていない。今後伊豆市によって調査されたボーリング調査の結果を精査したのち掘削調査を実施する予定である。図1. (a)明応東海地震の計算津波高と津波痕跡高。丸は実測された津波痕跡高、灰色の棒が最寄りの海岸線における計算浸水高をそれぞれ示す。(b) 静岡県湖西市白須賀における最大浸水範囲と津波土砂移動数値解析による土砂堆積量。地形コンターは1m間隔である。謝辞：本研究は R2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」(研究代表者：海洋研究開発機構 小平秀一)の一環として行われました。

(a) Comparison of tsunami trace and the simulated heights



(b) Sediment transport simulation at Shirasuka



The origin of tsunami trace height in Atashika during the 1944 Showa Tonankai Earthquake

*Kentaro IMAI¹, Ryoko Obayashi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Yuichiro Tanioka²

1. JAMSTEC, 2. Hokkaido Univ.

昭和東南海地震の波源断層モデルについては、津波波形逆解析に基づく検討（Satake, 1993; Tanioka & Satake, 2001; Baba et al., 2005）が行われている。一方、当該地震の津波痕跡高分布を説明するための波源断層モデルは矩形断層モデル（相田, 1979; 安中・他, 2003）による検討にとどまっている。

本研究では、当該地震による津波痕跡高分布を説明することのできる昭和東南海地震の波源断層モデルの再評価を行い、さらに三重県新鹿の13.6 mにおよぶ津波痕跡高の励起源について検討を行う。本研究で用いた津波痕跡高は既往報告（例えば、中央气象台, 1945; 表, 1946; 羽鳥, 1974; 飯田, 1977; 三重県, 1995）や三重県沿岸の当該地震津波に関する石碑情報（新田, 2016）を利活用して津波痕跡高の再調査を実施した。

断層構造は南海トラフ沈み込み帯の3次元構造モデル(Nakanishi et al., 2018)を参照し、地殻変動や津波高の痕跡分布を踏まえて東南海震源域に8枚の小断層を配置した。各小断層のすべりによる地殻変動はOkada (1985)の方法、津波は線形長波理論（空間格子間隔150 m, 時間間隔0.2 s）に基づき計算した。津波痕跡点については空間格子間隔の問題や精緻な地形復元作業を必要とする痕跡点、内海の痕跡点を除いた50点を利用した。地殻変動量については当該地震発生前後の観測値（Satake, 1993）を用い、三重県沿岸の18点を利用した。これらの痕跡を説明する各小断層のすべり量は、誤差ノルムが最小となるようにSA（Kirkpatrick et al., 1983）を用いて推定した。地殻変動や津波痕跡高には観測誤差や本地震以外の地殻変動成分が含まれると考えられる。本解析ではこの誤差を±10%程度と仮定して一様乱数により与え、1,000回試行のアンサンブル平均処理を行い、各小断層のすべり量を評価した。本モデルの地震規模はMw 8.1程度となり、地殻変動や津波高の分布をおおむね再現できた。一方、三重県南部沿岸の新鹿では海岸近くの徳司神社での浸水高（7.5 m）を再現することができる一方で、津波遡上高（13.6 m）を再現することはできなかった。津波痕跡高の分布を考えると、新鹿の遡上高は局所的に高まっており、断層運動から説明することは難しく、地震に伴った海底地すべりによる影響の可能性が示唆される。

以上を踏まえ、新鹿沖の陸棚斜面上における海底地すべり痕や崩落崖によって励起され得る津波について検討を行った。海底地すべり痕については森木・他（2017）による判読結果を利用した。崩落崖については海底地形や反射断面（産総研による）による判読に基づき検討を行った。これらの地形に対してWatts et al. (2005)の方法で海底地すべりによる初期津波振幅を評価した。その振幅が1 mを越える場合には地形復元作業を行い、これを初期条件として海底地すべり津波解析を実施した。この検討において、海底地すべり痕から励起され得る津波についてはWatts et al. (2005)の方法を用いて評価を行うと、各地すべり面上での津波振幅は1 cm以下となり有意な津波を励起しないことがわかった。

陸棚斜面表層の地質性状について、地形表面に観察されるgully、海底面から深さ100 m程度は不安定な堆積層で構成されていることが反射断面から読み取ることができたため、大規模な土砂崩れに起因した崩落崖を想定して検討した。このような崩落崖は陸棚斜面法先に数点存在し、新鹿沖の崩落崖に対して海底地すべり津波解析を行うと、新鹿沿岸で10 m程度、その周辺では1~2 m程度の津波となり、新鹿で局所的な津波の高まりを再現し得ることが判った。崩落崖の規模については検討の余地はあるが、新鹿の津波痕跡高の励起源としては陸棚斜面法先の崩落崖生成時に励起された可能性を定量的に示すことができた。

謝辞：本研究はR2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表

者：海洋研究開発機構 小平秀一），科学研究補助金（研究代表者：谷岡勇市郎，課題番号：19H01977）の一環として行われました。

Room D | Regular session : S17. Tsunami

🗓 Tue. Oct 25, 2022 3:00 PM - 4:15 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:00 AM - 7:15 AM UTC | 🏠 ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S17] PM-2

chairperson: Yutaka Hayashi (Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency), Toshitaka Baba (Tokushima University)

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

[S17-09] White bubbling tsunami: Its Hazard risk -Case of the 2011 Tohoku-Oki earthquake-

*Yuji ENOMOTO¹, Tsuneaki Yamabe¹, Shigeki Sugiura², Hitoshi Kondo² (1. Shunshu University, 2. Genesis Research Institute Inc.)

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

[S17-10] Evaluation of contribution of observation points to tsunami inundation prediction using machine learning

*Masato Kamiya¹, Toshitaka Baba² (1. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University, 2. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University)

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

[S17-11] Probabilistic Tsunami Hazard Assessment based on the long-term evaluation for earthquakes along Kuril and Japan trenches

*Kenji HIRATA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Hiromitsu NAKAMURA¹, Tsuneo OHSUMI¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Shin'ichi KAWAI¹, Takahiro MAEDA¹, Yuji DOHI¹, Shin NEMOTO², Nobuhiko TOYAMA², Tadashi KITO², Xuelei ZHANG², Yasuhiro MURATA³, Mariko KORENAGA⁴, Yuta ABE⁴, Teppei OHNO⁴ (1. NIED, 2. OYO, 3. KKC, 4. CTC)

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

[S17-12] Deep-sea bore: Trench-slope ascent of discontinuities in current speed, water temperature and pressure

*Yoshio FUKAO¹, Hiroko Sugioka², Hajime Shiobara³, Aki Ito¹, Taewoon Kim¹, Ryo Furue¹ (1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. Univ. Tokyo)

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

[S17-13] Progress in Preparing a Draft 10-Year Research, Development, and Implementation Plan for Ocean Decade Tsunami Programme (2021-2030)

*Yutaka HAYASHI¹, Srinivas Kumar TUMMALA², Michael ANGOVE³, Sergio BARRIENTOS⁴, Silvia CHACON⁵, David COETZEE⁶, Christa von HILLEBRANDT-ANDRADE⁷, Alexander RABINOVICH⁸, Harkunti Pertiwi RAHAYU⁹, Francois SCHINDELE¹⁰, Amir YAHAV¹¹, Bernardo ALIAGA ROSSEL¹², Rick John BAILEY¹³, Denis CHANG-SENG¹², Angelos HAIDAR¹² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Indian National Centre for Ocean Information Services, 3. National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, 4. National Seismic Centre, University of Chile, 5. Costa Rica National Tsunami Warning System, National University of Costa Rica, 6. National Emergency Management Agency, New Zealand, 7. Caribbean Office, International Tsunami Information Center, NOAA, USA, 8. Tsunami Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 9. Institute of Technology Bandung, Indonesia, 10. National Tsunami Warning Center, Atomic Energy and Alternative Energies Commission, France, 11. National Emergency Management Authority, Israel, 12. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO, 13. Bureau of Meteorology, Australia)

White bubbling tsunami: Its Hazard risk -Case of the 2011 Tohoku-Oki earthquake-

*Yuji ENOMOTO¹, Tsuneaki Yamabe¹, Shigeki Sugiura², Hitoshi Kondo²

1. Shunshu University, 2. Genesis Research Institute Inc.

黒い津波、白い泡津波：2011年東北沖地震で三陸沿岸を襲った”黒い津波”による災害リスクが注目された。土砂混じりのヘドロを巻き込んで衝撃による破壊力が増し、また溺れて吸い込めば「津波肺」と呼ばれる重度の健康障害を被るリスクである。この黒い津波による災害リスクはこれだけに留まらない。というのも、海底に溜まったヘドロのなかの有機物は、分解しメタンが発生する。実際、最近の調査研究で東京湾の海底から数mないし数十mの深さにメタン層が広がっていることが確認された（Tsuru et al., *EPS*, 2019）。ということはヘドロを巻き上げた津波がヘドロのなかに胚胎するメタンをも巻き込めば白く泡立つはずである。2011年東北沖地震では、まさにこのような光景が宮城県名取市沖合で空撮された。NHKスペシャル「黒い津波 知られざる実像」（2019年9月3日3日放映）では”白く泡立つ津波”も映し出されたが、これには特段の言及はなかった。図1は陸上自衛隊東北方面隊が地震直後に撮影した同じ海域での映像である。津波フロントに津波風にのった大量の泡があり、波頭はもうもうと水煙をたて、白く泡だった跡を残しながら陸に向かっていく。光る津波：東北沖地震は昼間の出来事であったが、明治三陸津波（1896/6/15 19:32）や昭和三陸津波（1933/3/3 02:30）はいずれも夜間の襲来で、このとき“光る津波”が目撃された。＜明治三陸津波＞「およそ30分後、巨大な黒い「波の壁」がごう音と青い光をともない三陸一体に襲来しました」（『津波を見た男』）。＜昭和三陸津波＞「地震があつてから湾口の所がいっぱいにモヤッと青赤く光った。それからまた地震があつた。すると白浪がまくれて来て、その後ろから高い真黒な浪が進んできた。」、「越村では、浪頭が白く直線になって光っていた。」（武者『地震なまず』）。すなわち、図1の光景は夜であれば青白く光る津波であったと推測できる。立ち上る水煙（海水ミスト）は正帯電しており、メタンが静電気着火したと考えられる。津波火災：大量のメタン泡が岸に打ち上げられ弾け消えることなくしばし滞留すると引火源になるし、静電気着火により自発発火の可能性もある。1993年北海道南西沖地震で奥尻島青苗港に停泊の5隻の漁船が津波を受けて甲板に大量のメタン泡が滞留して同時火災を起こした事例（Enomoto et al., *Geosciences*, 2019）はまさにメタンによる津波火災である。日本火災学会の調査によると東北沖地震で起きた津波火災件数159件のうち半数強は原因が不明とされていて、メタン・ハザードリスクへの考究はない。しかし気仙沼鹿折地区や名取市関上七丁目での津波火災は海底ヘドロからのメタン泡が火源の一つとなった可能性が高い。図1 白い泡津波：陸上自衛隊東北方面隊撮影、名取市沖



Evaluation of contribution of observation points to tsunami inundation prediction using machine learning

*Masato Kamiya¹, Toshitaka Baba²

1. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Tokushima University, 2. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University

機械学習の手法を適用して津波を予測する取り組みが行われるようになってきた。我々はこれまでに南海トラフの海底水圧計データを入力として、津波の浸水を多層パーセプトロンで予測する枠組みを提案したが、各観測点の予測モデルへの寄与度には着目しなかった。一般に機械学習モデルに利用する特徴量を制限することで、モデルの解釈性および汎用性の向上、学習時間の短縮が期待できる。各観測点の予測モデルへの寄与度を評価することは特徴量の選択だけでなく、津波観測計を新たに整備する際の指標としての観点からも重要である。本研究では南海トラフ巨大地震の津波を対象にLight Gradient Boosting Machine (LightGBM) と SHapley Additive exPlanations (SHAP) という手法を用いて各観測点の寄与度を評価した。LightGBMは決定木アルゴリズムに基づいた勾配ブースティングの機械学習フレームワークである。LightGBMではアンサンブル学習の手法の一つであるブースティングが用いられる。これは、学習した予測モデルが上手く予測できなかった学習データに重みをつけて更に学習を繰り返すことによって作成した複数の予測モデルを組み合わせる方法である。LightGBMにはLeaf-Wiseが採用されており、大規模データの学習に強く、モデルの学習速度が速いことが特徴である。SHAPは協力ゲーム理論のシャープレイ値を機械学習に応用した手法である。SHAPを用いることにより、予測モデルの予測結果に対するそれぞれの特徴量の重要度を求めることができる。SHAP値が大きいほど予測における寄与度が高いことを示す。これにより、ブラックボックスになりがちな機械学習モデルに対して解釈性や説明性を付与することが可能となる。

解析の手順は次のとおりである。まず先行研究が提案した3480ケースの断層シナリオのすべてについて津波計算を実施した。予測処理の負荷を軽減するため、k-means法を用いて浸水深がほぼ同じ領域を予めグループ化することにより予測点数を削減した。予測対象地域は徳島県阿南市周辺とした。西南日本沖の海底にすでに設置されている海底水圧計の55地点と現在構築中の36地点の計91地点の計算された水圧変動データを説明変数、k-means法によって分けられた領域内の浸水深の平均値と標準偏差を目的変数として、LightGBMにより津波浸水予測モデルを構築した。予測モデルの検証のため、別の11個のM9クラスの地震シナリオを使って、フォワード津波計算による真値と機械学習モデルの予測値を比較した。

予測値と真値のRMSEは約0.6mであり、浸水分布をほぼ再現できた。各観測点のSHAP値から、予測地点から比較的近い観測点が津波浸水予測に最も寄与度が高いことが分かった(図1)。一方で、予測地点から離れた地域でも、SHAP値が周辺より高い観測点がまばらに存在している。四国西部～九州沖では観測点2点が周囲の観測点と比較してSHAP値が高かった。

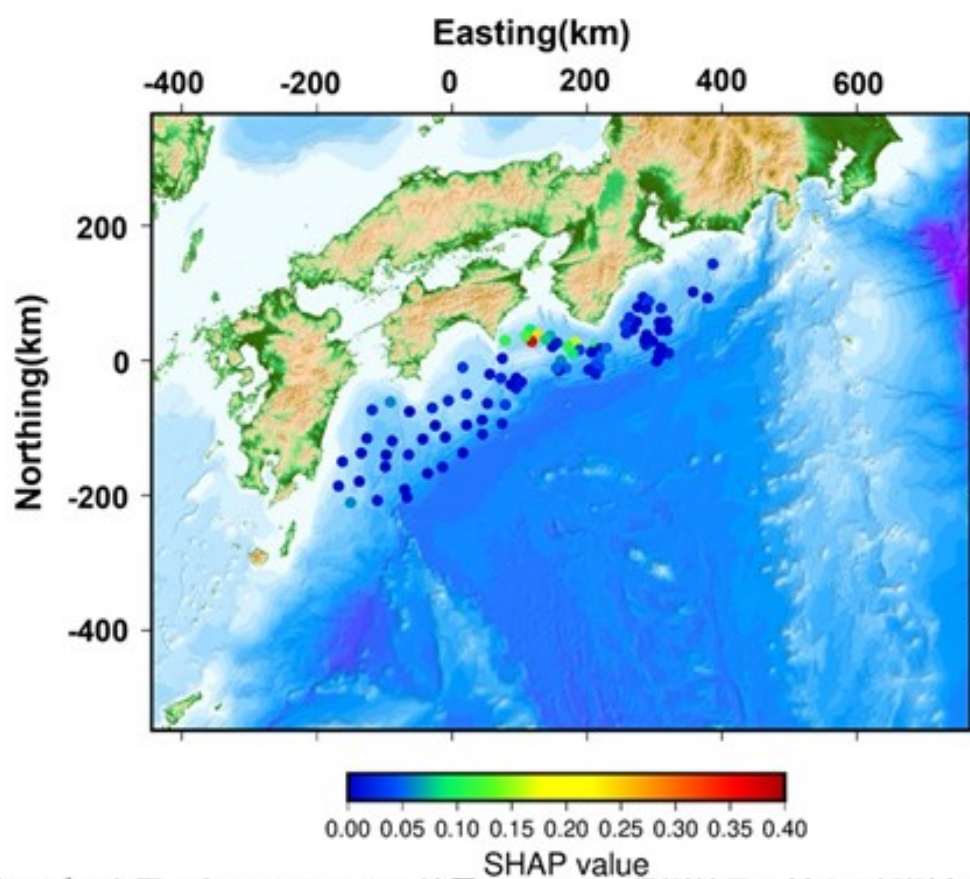


図1. 構築モデルを用いた3480ケースの地震シナリオの予測結果に対する観測点91地点の寄与度

Probabilistic Tsunami Hazard Assessment based on the long-term evaluation for earthquakes along Kuril and Japan trenches

*Kenji HIRATA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Hiromitsu NAKAMURA¹, Tsuneo OHSUMI¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Shin'ichi KAWAI¹, Takahiro MAEDA¹, Yuji DOHI¹, Shin NEMOTO², Nobuhiko TOYAMA², Tadashi KITO², Xuelei ZHANG², Yasuhiro MURATA³, Mariko KORENAGA⁴, Yuta ABE⁴, Teppei OHNO⁴

1. NIED, 2. OYO, 3. KKC, 4. CTC

はじめに 千島海溝沿い根室沖地震（M7.8-8.5程度）および超巨大地震（17世紀型、M8.8程度以上）の30年発生確率はそれぞれ、7~40%及び70%程度、また日本海溝沿い青森県東方沖及び岩手県北部の地震（M7.9程度）のそれは5~30%と切迫している（地震調査委員会,2017,2019）。今回、我々は、千島および日本海溝沿いで地震調査委員会によって長期評価された概ねM7.8程度以上の地震を対象に、統合確率論的津波ハザード評価（現時点でのハザード評価）を実施した。

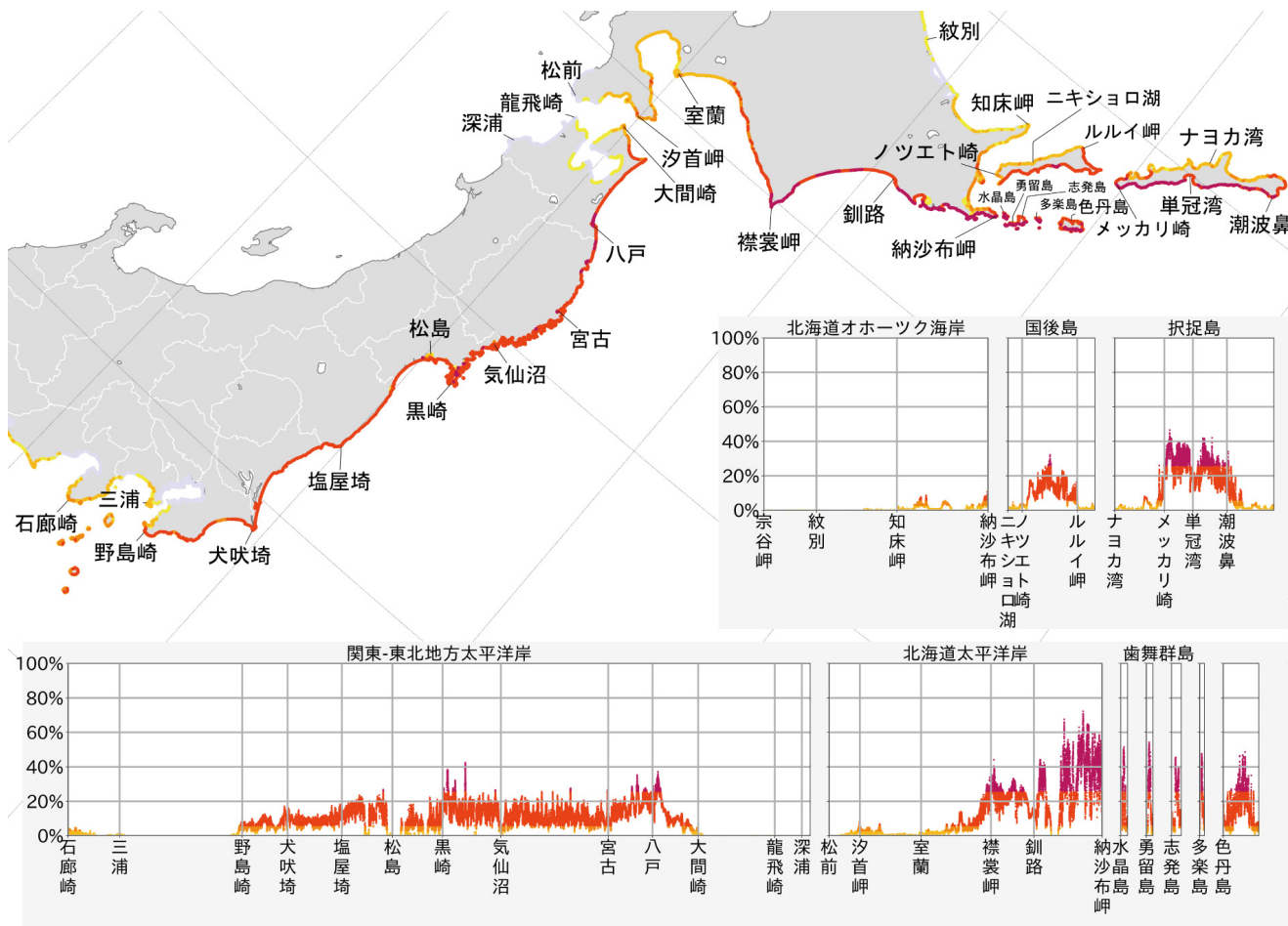
波源断層モデル群の構築 まず長期評価で設定された千島及び日本海溝沿いの地震発生領域に、沈み込む太平洋プレート三次元形状モデルを用いて、プレート間巨大地震、アウターライズ地震、スラブ内地震および津波地震の特性化波源断層モデル群を設定した。プレート間巨大地震および津波地震の波源断層モデルは約5km x 5km要素断層の集合として表現した。構築した特性化波源断層モデルはMw7.6からMw9.2までの合計3700個余りである。

津波伝播数値計算 Okada(1992)とTanioka&Satake (1996)の方法を用いて初期水位を計算、最小50m間隔の陸上・海底地形データのネスティング・グリッドを用いて、移流項、海底摩擦項、全水深項を含む非線形長波方程式に、陸側に遡上境界条件、海側に透過条件を課し、差分法を適用して津波予測計算を実施、海岸でのすべてのハザード評価地点60万点余りに対して最大水位上昇量を計算した。

地震発生確率モデル 長期評価（地震調査委員会,2017,2019）がそれぞれの地震に対して適用した地震発生確率モデルを基本的に採用した。30年発生確率に幅があると評価されている場合は中央値を用いた。千島海溝沿いの地震の長期評価で発生確率の言及がないアウターライズ地震の地震発生確率モデルは、当該地域の標準的なGR則を仮定し、定常ポアソン過程に従うと考えた。

確率論的統合 千島および日本海溝沿いで発生するそれぞれの地震の津波計算結果を確率論的に統合するために、以下のように考えた。1.基本的に地震は互いに独立に発生する。2.長期評価によって発生確率が評価された地震の破壊領域（震源域あるいは巨視的波源断層モデル）の位置および形状は多様であるため、破壊領域同士は互いに排反である。3.地震破壊時のすべり量分布は多様であるため、同じ破壊領域（震源域）において、異なるすべり量分布を持つ地震モデル同士は互いに排反である。

確率論的津波ハザード評価結果 現時点でのハザード評価結果の一例として、今後30年間で海岸の最大水位上昇量が3mを超える30年超過確率分布図を示す。概して北海道襟も岬以東の太平洋沿岸一帯で30年超過確率が20%以上、根室半島付近では40%以上と高く推定されていることがわかる。一方、東北地方太平洋岸では八戸付近の30年超過確率がやや高くなっている。今回の評価結果は、長期評価で評価された地震のみが発生した場合に限定される、条件付きのハザード評価結果である。今後、長期評価で評価されていない地震および長期評価で評価された地震規模以上の地震を加味し、実用上有益な現時点でのハザード評価を実施する予定である。本研究は防災科研の研究プロジェクト「ハザード・リスク評価に関する研究」の一環として実施している。



Deep-sea bore: Trench-slope ascent of discontinuities in current speed, water temperature and pressure

*Yoshio FUKAO¹, Hiroko Sugioka², Hajime Shiobara³, Aki Ito¹, Taewoon Kim¹, Ryo Furue¹

1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. Univ. Tokyo

1. 序

我々は2013年から2014年までの10か月、Paro社開発の水晶式傾斜計の試験観測を兼ねて、宮城沖の深海底（深さ約3400m）で傾斜観測を実施した（図1の地図参照）。その間、多くの傾斜イベントを検出したが、これらは海底傾斜現象ではなく純粋に海洋現象であった。即ち、（恐らくは内部潮汐波に伴って）海底斜面に発生する内部孤立波（ボア）が測器を通過する際に測器が傾く現象であった（Fukao et al., JGR-O, 2016）。ボアは大陸棚斜面で起こる現象として海洋学分野では良く知られているが、海溝斜面のような深い場所での観測例はこれまでなかった。そこで深海ボアの実態をより明らかにするために、表記発表者中の3人（H.S., H.S., A.I.）は2015年9月から2016年9月までの1年間、前回と同じ場所で従来観測項目に加えて、水温、水圧、2成分流速などの海洋物理観測を行った。こうした海洋物理観測を加えた結果、深海ボアの実態は前回と比べてはるかに明瞭となった。

2. 観測と記録解析

2015年9月から翌年9月までの1年間、宮城沖の日本海溝急斜面から深海平坦面への変換点（水深約3400m）において1点観測を実施した。海洋物理学的な観測項目は、絶対海底水圧計 PARO-8B7000-I-005（詳細はFukao et al., Sci. Adv., 2018）による水圧、Infinity-Deep（詳細はFukao et al., JGR-O, 2016）による水温と流速2成分（東西・南北）である。サンプリング速度は0.25Hzとした。得られた記録からボアを検出するため、全観測項目1年間分を縦横自在にスケールを変えて表示できるようにし、また1年間分の動画を用意した。その結果、ボアは小さいものも含めれば殆ど毎日のように起きていることが判明した。またJCOPE-Tを圧力のレファレンスに取ることにより、ボアによる微弱な圧力変化を検出することが可能となった。

3. 結果と議論

図1は観測期間中に起きた最大ボアの12時間記録である。以下、その特徴を図2と対応させて列挙する。図2は1年分の記録から得られる平均的なボアの描像である。

水温変化（図1青線）：Temperature change (Blue line)

ボアの到来前、水温は徐々に上昇し（図2-1）ボア到来直前は高止まりの状態になる（図2-2, 3）。ボア到来による水温低下は突然且つ急激に起こる（図2-4）。ボア内部の低温状態は長時間続く（図2-5）。

西→東流速（図1黒線）：Down-sloping current

ボアの到来前、流れは斜面を下る方向にある（図2-1）が徐々に流速を減じ、ボア到来直前にはほぼ静止流体状態となる（図2-2）。ボアの到来は突然の流速方向の反転（斜面上り流速の発生）によって予測することができる。この時点ではボアフロントを表す急激な温度変化は見られない（図2-3）。斜面上り流速がピークに達する頃、水温の極めて急速な低下が起こる（図2-4）。その後、水温が長く低温のままであるのに対し、斜面上り流速は急速に減速していく（図2-5）。

水圧（図1赤線）：Ocean bottom pressure

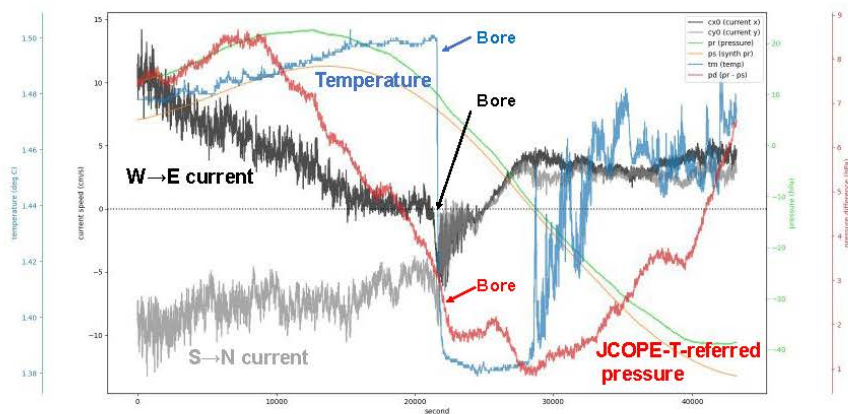
ボア到来に伴い水圧低下が起こる。水圧低下は水温低下と同時に起こることが殆どで（図2-4）、それに先立つことは殆どない。

ボアの終わり方は多様で、始まりのような共通性を見出すことは一般に難しい。

4. 結語

近年、津波観測や海底地殻変動観測に海底水圧計が多用されるようになり、今後は海底傾斜計観測も進むと考えられるが、ボアは測器の周りの水温、水圧、流速を突然変化させるため、得られたか海底観測記録の解釈には注意が必要である。

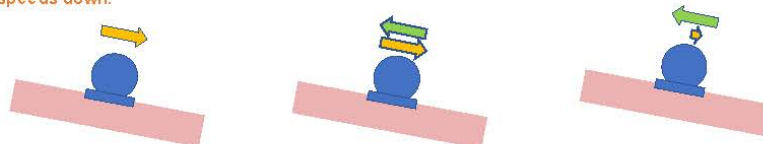
Figure 1. The largest bore through the observational period



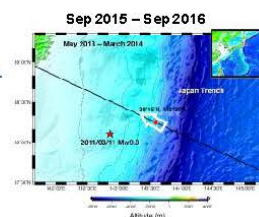
12 hours from 2015 -10-21-07:13:27

Figure 2. Suggested processes associated with deep -sea bore

- (1) Temperature gradually rises, Downslope current gradually speeds down. (2) Temperature at highest state, Current at nearly still state. (3) Upslope current abruptly starts without temperature change.



- (4) Temperature abruptly drops. Upslope current reaches maximum. Pressure begins to decrease. (5) Temperature remains cold. Upslope current weakens. Pressure-decrease terminates.



Progress in Preparing a Draft 10-Year Research, Development, and Implementation Plan for Ocean Decade Tsunami Programme (2021-2030)

*Yutaka HAYASHI¹, Srinivas Kumar TUMMALA², Michael ANGOVE³, Sergio BARRIENTOS⁴, Silvia CHACON⁵, David COETZEE⁶, Christa von HILLEBRANDT-ANDRADE⁷, Alexander RABINOVICH⁸, Harkunti Pertiwi RAHAYU⁹, Francois SCHINDELE¹⁰, Amir YAHAV¹¹, Bernardo ALIAGA ROSSEL¹², Rick John BAILEY¹³, Denis CHANG-SENG¹², Angelos HAIDAR¹²

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Indian National Centre for Ocean Information Services, 3. National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, 4. National Seismic Centre, University of Chile, 5. Costa Rica National Tsunami Warning System, National University of Costa Rica, 6. National Emergency Management Agency, New Zealand, 7. Caribbean Office, International Tsunami Information Center, NOAA, USA, 8. Tsunami Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 9. Institute of Technology Bandung, Indonesia, 10. National Tsunami Warning Center, Atomic Energy and Alternative Energies Commission, France, 11. National Emergency Management Authority, Israel, 12. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO, 13. Bureau of Meteorology, Australia

In December 2017, the United Nations General Assembly adopted the 'United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030)' resolution. It aims to significantly advance several research and technology development areas with a view to generating six societal outcomes (Ryabinin *et al.*, 2019) including 'A Safe Ocean'. In June 2021, the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) General Assembly established the 'Ocean Decade Tsunami Programme' (ODTP). The IOC also established the Scientific Committee (SC) as an advisory. The Working Group on Tsunamis and Other Hazards related to Sea Level Warning and Mitigation Systems (TOWS-WG) will act as the global steering committee of the ODTP. The implementation or coordination of roles for the regional aspects of the programme will be performed by four Intergovernmental Coordination Groups (ICGs). The SC has an advisory role to TOWS-WG for the duration of the ODTP.

Members (two-year terms, renewable) of the SC are nominated by the TOWS-WG and each of the TOWS-WG Task Teams. It currently consists of 11 members (including the Chairperson S. K. TUMMALA) from 10 countries. The initial task of SC is to develop the Draft 10-Year Research, Development, and Implementation Plan for ODTP (Draft 10-Year Plan) for endorsement by the TOWS-WG.

The committee has been preparing for the draft implementation plan by holding meetings in February and June 2022. It has extracted key issues on each area as follows: tsunami risk knowledge; monitoring, detection, and analysis and forecasting of tsunamis; warning dissemination and communication, preparedness, and response capabilities. The Draft 10-Year Plan will be promoting to advancing the monitoring, detection, analysis, and prediction of tsunamis, including those generated by non-seismic sources. The plan will include focus areas related to tsunami warning capabilities, such as the ITU/WMO/UNESCO-IOC Joint Task Force SMART Subsea Cables effort and collaboration with the Nippon Foundation-GEBCO Seabed 2030 project. The Draft 10-Year Plan will improve the societal outcome (A Safe Ocean) of the Ocean Decade with the aim of making 100% of the communities at risk of tsunami prepared for and resilient to tsunamis by 2030 through the implementation of the UNESCO/IOC Tsunami Ready Programme and other initiatives.

Once the first draft is compiled, it will be made available to the member states of the IOC, scientific communities, and other stakeholders for comments. A final draft will be compiled by the committee on the basis of the collected opinions. Thereafter, the approval procedure will commence in IOC.

References

Ryabinin, V., *et al.* (2019): The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development. *Front. Mar. Sci.* 6:470. doi:10.3389/fmars.2019.00470

Room D | Regular session : S04. Tectonics

📅 Tue. Oct 25, 2022 4:30 PM - 5:15 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 7:30 AM - 8:15 AM UTC | 🏢 ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S04] PM-3

chairperson: Yukitoshi Fukahata (DPRI, Kyoto University)

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

[S04-01] Hypocenter relocations of earthquakes off Okinawa island with station corrections obtained from CMT solutions

*Masanao Komatsu¹, Mei Kitamura², Hiroshi Takenaka¹ (1. Okayama University, 2. Okayama University (Current: Japan Meteorological Agency))

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S04-02] Effects of the hot plume on the bending of the Philippine Sea slab beneath Kyushu (2)

*Natsuki Kozai¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,1} (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S04-03] ***The geodynamic evolution of the Mexican subduction zone as an effect of the movement of the Chortís Block***

*Erika Moreno^{1,2}, Marina Manea^{2,1}, Vlad Manea^{2,1} (1. Kobe University, 2. Centro de Geociencias, Universidad Autónoma de México)

Hypocenter relocations of earthquakes off Okinawa island with station corrections obtained from CMT solutions

*Masanao Komatsu¹, Mei Kitamura², Hiroshi Takenaka¹

1. Okayama University, 2. Okayama University (Current: Japan Meteorological Agency)

本研究では沖縄本島南東沖で発生した地震の震源再決定を行う。地震の震源決定では、観測点が震源周辺に満遍なく分布していることが望ましい。しかし、南西諸島では観測点が島嶼にしかなく、震源に対してその分布には大きな偏りがある。この場合、震源決定の精度は悪くなる。震源決定の精度を向上するための方法の一つに、観測点の標高やその周辺の地下構造の不均質性が地震波の走時に与える影響を軽減する観測点補正值の利用がある。本研究では波形を用いるCMT解析により推定された地震の震源情報を用いて観測点補正を求め、震源再決定を行う。

本研究で使用したデータは、気象庁一元化処理検測値データに記載された、沖縄本島南東沖で発生した M_{JMA} 2.0以上の地震(2000年~2021年)のP波とS波の検測値データである。また、分析に用いた観測点は24点で、21点が気象庁、3点が防災科学技術研究所の広帯域地震観測網(F-net)の観測点である。この24観測点のうち3観測点以上でP波の初動が読み取られた地震について震源再決定を行った。高崎・他(2021, 地震学会秋季大会)と同様の手法により、気象庁が推定した震央周辺を水平方向、深さ方向にグリッドサーチし、観測点間の観測走時差と理論走時差のRMSが最小となる点を震源とした。これにより発震時を未知パラメータとせずに震源決定を行うことが可能である。理論走時の計算には、気象庁の走時表(JMA2001)を用いた。また、走時の観測点補正は、先行研究で得られている、2007年10月から2020年4月までに同じ地域で発生した10個の地震のCMT解析結果(小松・他, 2020, 地震学会秋季大会)によるセントロイド震源を用いて計算した。観測点補正值については2種類のアプローチを行った。CMT解析された全10イベントの観測点補正值の平均を用いる場合(アプローチ①)と、海洋地殻内で発生した8イベントを震源の位置によって3つのグループに分け、気象庁が決定した震央に最も近いグループ内のイベントの観測点補正值のみを用いる場合(アプローチ②)である。

図1は気象庁一元化震源ならびに震源再決定の結果を地図上にプロットしたものである。気象庁一元化震源の場合、沖縄本島から離れるにつれて震源の決定精度が悪くなり、海溝側で深さ50 km程度まで深くなるという不自然な特徴があった。しかし、今回の解析では2つのアプローチいずれの場合もフィリピン海プレートの沈み込みに沿って、海溝から沖縄本島に向かって震源が深くなった。また、海溝側では震央が南西-北東方向に帯状に分布することが明瞭に確認された。この地域は沖縄・ルソン断裂帯の北西端に位置しており、複数の海底活断層が南西-北東方向に延びている。活断層と震源分布はよく対応しており、海底活断層の活動との関連が示唆される。2010年2月27日に発生した M_{JMA} 7.2の地震(図1の星印)とその1日間の余震(図1の黒丸の領域)の再決定結果を別途地図上にプロットすると、震源分布は明瞭に東西方向に並んでおり、その長さは30 km程度である。気象庁や防災科学技術研究所等が推定したCMT解はいずれも東西方向に左横ずれ断層の成分をもつメカニズムであり、この方向に断層面を持つ地震と考えられる。最後に、2つのアプローチを比較すると、海溝側でアプローチ①よりもアプローチ②で震源が海溝寄りに決定され、深さは浅くなった。一方、沖縄本島側ではアプローチ②で島弧よりに決定され、両アプローチでの震源の位置の違いは小さい。アプローチ②では3つグループの境界付近で上記の特徴が分かれており、震源分布の空間的な隔たりも存在する。

謝辞：気象庁一元化処理震源ならびに検測値データを使用しました。本研究は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。

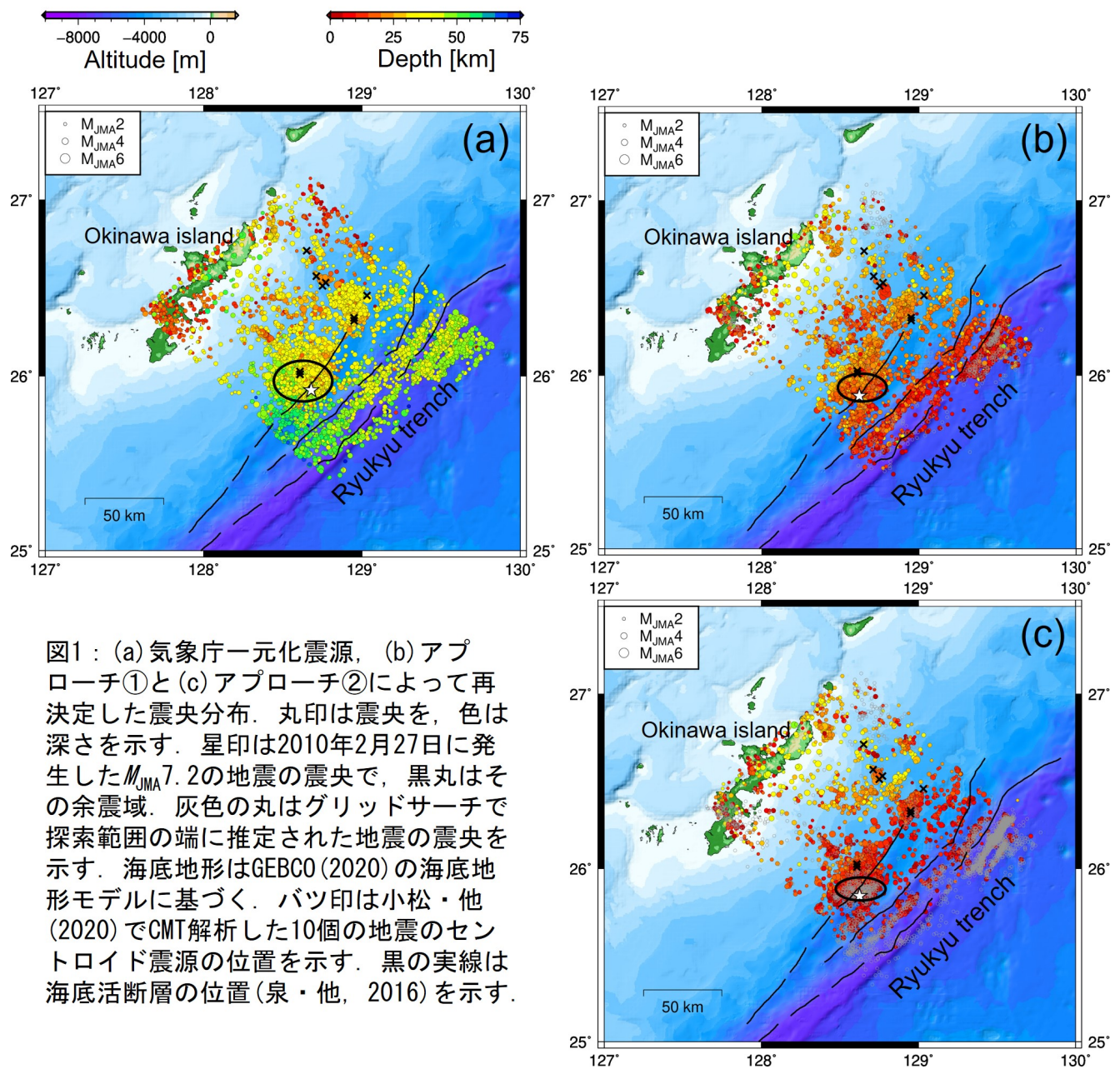


図1 : (a) 気象庁一元化震源, (b) アプローチ①と(c) アプローチ②によって再決定した震央分布. 丸印は震央を, 色は深さを示す. 星印は2010年2月27日に発生した $M_{JMA} 7.2$ の地震の震央で, 黒丸はその余震域. 灰色の丸はグリッドサーチで探索範囲の端に推定された地震の震央を示す. 海底地形はGEBCO (2020) の海底地形モデルに基づく. バツ印は小松・他 (2020) でCMT解析した10個の地震のセントロイド震源の位置を示す. 黒の実線は海底活断層の位置 (泉・他, 2016) を示す.

Effects of the hot plume on the bending of the Philippine Sea slab beneath Kyushu (2)

*Natsuki Kozai¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,1}

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

1. はじめに

九州下に沈み込んでいるフィリピン海（PHS）プレートは、深さ70km辺りで、急激に高角に沈み込んでいる（例えば、Wang and Zhao, 2006）。この原因として、北西九州下に存在したといわれているホットブルームが南東方向に水平に流れ、スラブを「く」の字型に押し曲げた可能性が指摘されている（Shinjo et al., 2000）。しかしながら、沈み込んだPHSプレートがこのような急激に折れ曲がる要因について未だ定量的に示された研究はない。本研究では、北西九州下から湧昇してきたホットブルームが、九州下に沈み込むPHSプレートの急激な屈曲に及ぼす影響について、数値シミュレーションを用いて定量的に評価することを試みた。本講演では香西他(2022, JpGU)のモデルに対し、新たにPHSプレートの沈み込み史を考慮したスラブ設定を行い、ホットブルームの温度や位置に関しても改良を加えてみたので、その結果について報告する。

2. モデル設定

本研究では、Torii and Yoshioka(2007)による手法を用いて、2次元箱型熱対流モデルを構築した。本モデルでは、北西九州下から湧昇するホットブルームと、九州の南東沖から沈み込むPHSプレートを数値シミュレーションで再現した(図1)。海溝から北西九州を通る測線に沿って計算を行い、モデル領域は水平方向800km、深さ方向500kmとし、流線の格子数はそれぞれ81、51とした。ホットブルームに関しては、温度を固定した熱源を設定した。温度範囲は Sakuyama et al. (2014)を参考に、深さ約50~100kmで1350~1500℃となるように設定した。また、その熱源を海溝から北西九州までの距離に相当する約400kmの位置に配置した。スラブに関しては、モデル領域の右側温度条件にプレート冷却モデル（McKenzie et al., 1969）を適用し、海溝軸から浅部では、PHSプレートの形状を模したガイドに沿ってプレートを沈み込ませ、その後自由に振舞わせた。13Myrまで計算を行い、PHSプレートの沈み込み速度はプレートの沈み込み史を考慮し、測線に沿って13Ma~3Maで7.7cm/yr、3Ma~0Maで6.4cm/yrとした。海溝における海底の年齢は、計算開始時は0Myrとし、時間の経過とともに徐々に古くなるようにし、4.5Maで九州一パラオ海嶺の沈み込みに伴い年齢が約45Myrと急激に古くなるように設定した。また粘性率の式にはBurkett and Billen (2010)を用いたが、温度依存性が高いため、粘性率の値に上限を設けて計算を行った。これらの計算を通して、九州の南東部で、北西方向からほぼ水平に流れてきたホットブルームとPHSスラブが衝突した際、スラブがどのように挙動するのかについて調べた。

3. 結果と考察

数値シミュレーションの結果、PHSプレートの沈み込みに伴い、厚さが時間的に変化するスラブが、湧昇するホットブルームに押されて折れ曲がる様子を確認することができた。PHSプレートの沈み込み方向にホットブルームがあるため、それを避けるように鉛直下方向へ曲がった可能性もある。また、プレートの沈み込みに伴い、マントルウェッジで時計回りの流れが発生し、ホットブルームがよりPHSプレートの方向へ引き寄せられる傾向が見られた。この現象はShinjo et al. (2000)でも言及されており、この効果によってスラブの屈曲が促進された可能性もある。本数値シミュレーションにより、PHSプレートの沈み込み史を考慮したモデルにおいても水平方向に流れるホットブルームにより、スラブを屈曲させることが可能であることが示すことができた。このことは、PHSスラブの深さ70km辺りで見られる急激な折れ曲がり、ホットブルームによる可能性があることを示唆している。

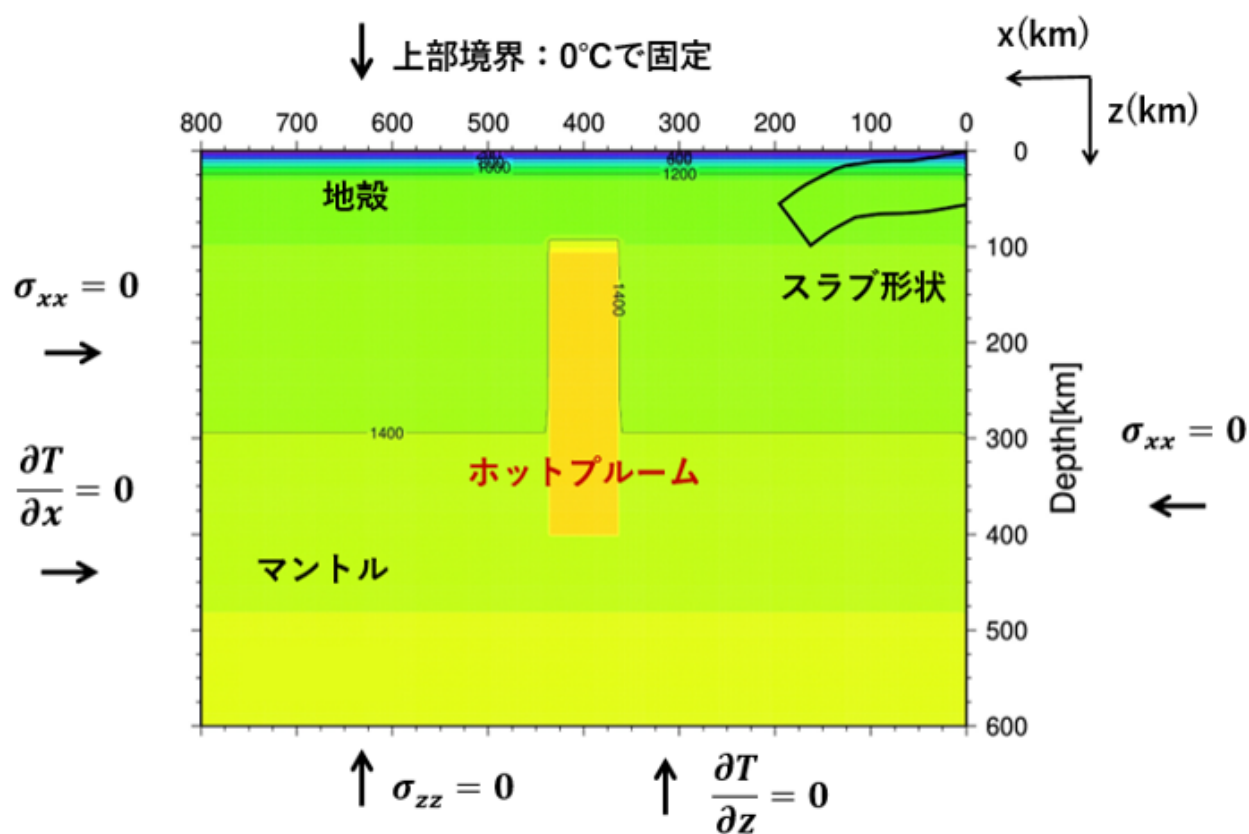


図 1 : 測線に沿った鉛直断面内におけるモデル領域、初期条件、境界条件の図。背景の色は、初期温度分布を、中央の橙色はホットプルームを表している。横軸(x)は水平距離、縦軸(z)は深さを示している。

The geodynamic evolution of the Mexican subduction zone as an effect of the movement of the Chortís Block

*Erika Moreno^{1,2}, Marina Manea^{2,1}, Vlad Manea^{2,1}

1. Kobe University, 2. Centro de Geociencias, Universidad Autónoma de México

The tectonic evolution of the Chortís block represents a central piece of information in the quest of understanding the geodynamic evolution of Southern Mexico and Central America. Previous studies (Pindell and Dewey, 1982; Mann 1999, 2007; Rogers, 2003; Rogers et al., 2007; Silva-Romo and Mendoza-Rosales, 2009; Ferrari et al., 2014; Molina Garza et al., 2019) have proposed that the Chortís Block was part of the North America plate in the southern Mexico during during the Cretaceous. This continental block was dragged along the South Mexican trench and after 20 Ma was captured by the Caribbean plate. Other studies, such as those of Keppie and Morán-Zenteno (2005) and Morán-Zenteno (2009), argue that the Chortis block separated from the Pacific plate and was pushed by the subduction of Farallon plate towards the East where it docked to its current position. Additional works, such as those of Meschede and Frisch (1998) and James (2006), suggest that the Chortís block is actually autochthonous to the Caribbean plate and moved little compared to its present position.

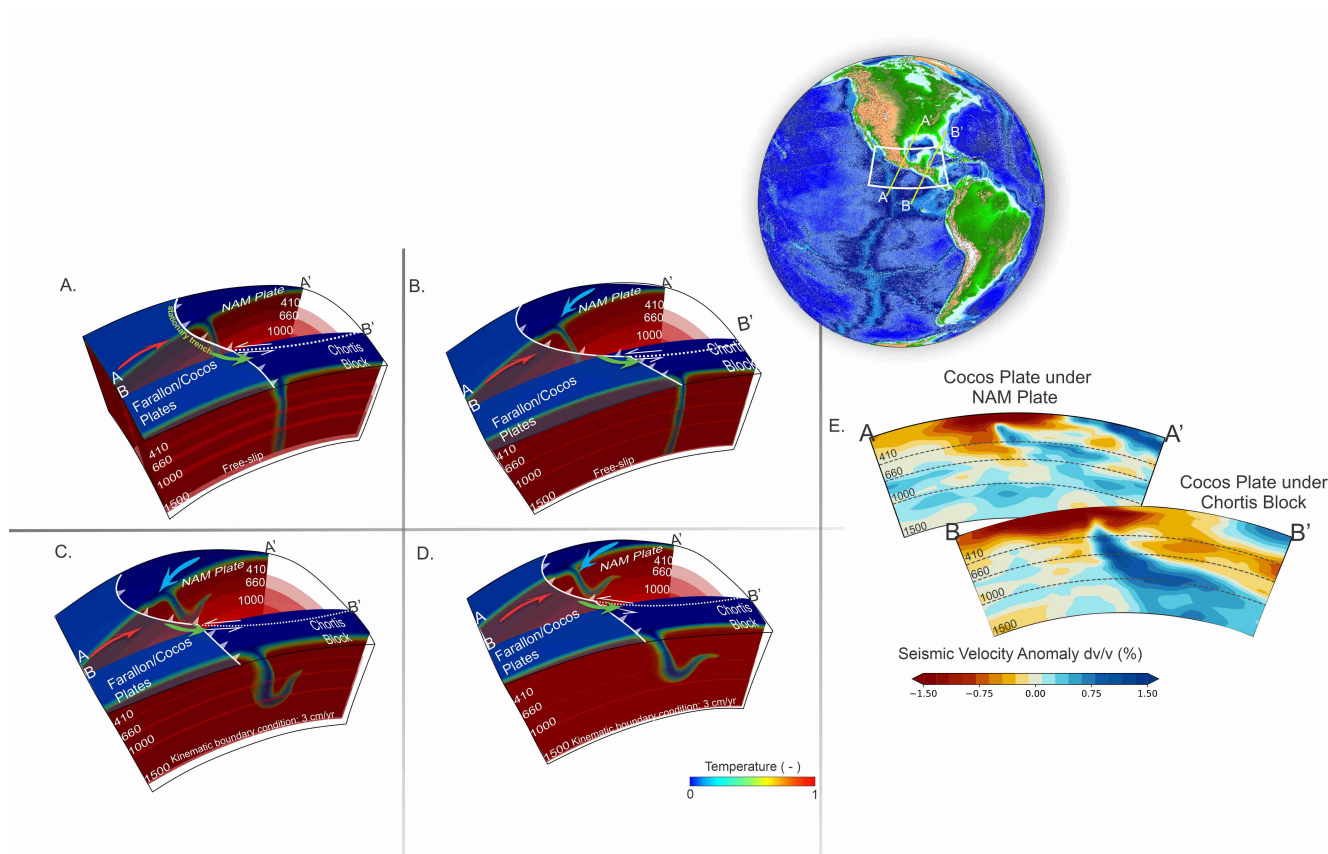
Currently, it is not clear if Chortis Block is autochthonous to the Caribbean plate or if, at some point in time, it moved from somewhere else and was captured by the Caribbean plate.

Likewise, it is not clear how the different motions proposed affected the geometry of the subducted plate. We reproduced numerically each of the aforementioned hypotheses and reveal how the different movements proposed for the Chortis block affect the dynamic subduction of Farallon-Cocos subduction system. We constructed 3D kinematic time-dependent numerical models and determined which of the three hypotheses produced slab geometries that are consistent the observations provided by seismic tomography of the study area.

Our models evolved during 45 Ma and revealed that, at high trench advance motion, the plate has negative dip below 660 km in the lower mantle. Therefore, such high trench motion for the Chortis Block as proposed by Keppie and Morán-Zenteno (2005) are not viable. Likewise, the high erosion rates for southern Mexico as proposed in the Pacific hypothesis are also not feasible because this inhibits the formation of flat subduction specific for central Mexico. Therefore, the Pacific hypothesis generated plates that are not congruent with what is observed in seismic tomography studies of the region.

Moreover, our numerical simulations show that flat subduction for central Mexico is not a consequence of sliding along the South Mexican trench of the Chortis Block but rather a consequence of the interaction between the retreat of the Middle America Trench, the advance of the North American plate, and the accommodation of the Cocos plate.

Our numerical results that best reproduce plate shapes comparable with seismic tomography of the study area, are those that incorporate the hypothesis that Chortis Block was adjacent to southern Mexico during the Cretaceous or relatively close to its present position.



Temperature profiles for the movement of the Chortis Block under the hypothesis that it was adjacent to southern Mexico. In this case, the Chortis Block moves along the South Mexican trench for 45 Ma. In Fig. you can see the different behaviors of the subducted plate when subjected to rotation angles between 30° and 20°. **A.** The trench on the Chortis Block rotates at an angle of 30° to the southeast while the trench on the North American plate remains stationary. **B.** The trench in the Chortis Block rotates at an angle of 30° to the southeast while the trench in the North American plate recedes at 1 cm/yr. **C.** The Chortis Block trench rotates at an angle of 30° to the southeast as the North American plate trench recedes at 1 cm/yr and the lower domain changes from a free-slip condition to a kinematic boundary condition. **D.** the trench angle of the Chortis Block decreases to 20° while maintaining the same conditions as C. **E.** The seismic tomography are based on the GAP_P4 Global P wave tomography model of Obayashi et al. (2013)

Poster session (2nd Day) | Regular session : S04. Tectonics

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 12:00 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:30 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-1
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S04P] AM-P

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

[S04P-01] Relationship between 3-D distributions of thermal structure and dehydration and megathrust earthquakes, regular earthquakes and volcanic chain in the southern Chile subduction zone

*Kaya Iwamoto¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,1}, Francisco Hernan Ortega Culaciati³ (1. Faculty of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Department of Geophysics, Faculty of Physical and Mathematical Sciences, University of Chile)

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

[S04P-02] Low-velocity anomaly in the Pacific slab beneath the Kanto region

*Kazuki MIYAZAKI¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Tech)

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

[S04P-03] **Seismic structure and seismotectonics of the East Japan forearc derived from seafloor S-net data**

*Dapeng ZHAO¹, Yu Katayama¹, Genti Toyokuni¹ (1. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

[S04P-04] Estimation of the crustal deformation using radiated energy of tectonic tremors in the northern Kii Peninsula

*Tsukasa Yamamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S04P-05] Strain-rate field of Japan estimated from GNSS data using basis function expansion with ABIC

*Yukitoshi FUKAHATA¹, Tomohisa Okazaki², Takuya Nishimura¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. AIP, RIKEN)

Relationship between 3-D distributions of thermal structure and dehydration and megathrust earthquakes, regular earthquakes and volcanic chain in the southern Chile subduction zone

*Kaya Iwamoto¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,1}, Francisco Hernan Ortega Culaciati³

1. Faculty of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Department of Geophysics, Faculty of Physical and Mathematical Sciences, University of Chile

1. はじめに

チリ沈み込み帯南部では、南米プレートの下にナスカプレートが沈み込んでいる。同地域では、1960年バルディビア地震 (Mw9.5) や2010年マウレ地震 (Mw8.8) に代表される海溝型巨大地震が繰り返し発生し、また、33°S~46°Sの範囲には南北方向に連なるSouthern Volcanic Zoneと呼ばれる火山列が存在する。本講演では、数値シミュレーションにより、ナスカプレートの沈み込みに伴うチリ沈み込み帯南部の3次元温度構造を求め、バルディビア地震やマウレ地震の地震時すべりの温度範囲を定量的に決定する。さらに、得られた温度構造とスラブを構成する含水鉱物の相図を用いて、スラブ内の含水量分布を求め、同地域で発生する通常地震の震源分布や火山分布と比較し、その関連性について議論する。

2. モデル設定

本数値シミュレーションでは、3次元箱型モデルを考える。水平面内において、沈み込み方向にx軸を、海溝軸に沿って北方向にy軸を、鉛直下向きにz軸をとり、モデルサイズはそれぞれ、450 km、1200 km、200 km、格子点間隔は10 km、10 km、3.3 kmとした (図1)。モデル領域内にスラブ形状を模したガイドを設定し、その中に海洋プレートの物質を徐々に流し込むことにより過去数千万年前から現在までの海洋プレートの沈み込みを実現した。ガイド上面の形状にはSlab 2モデル(Hayes et al., 2018)を使用し、ガイドの厚さは海溝での海洋プレートの年齢の関数として与えた。ガイドの位置、ナスカプレートの沈み込み速度とその方向は、過去のプレート運動モデルに基づいて時空間的に変化させて与えた。初期条件はYoshioka and Sanshadokoro (2002)に従って、半無限冷却モデルを仮定して与えた。境界条件に関しては、モデルの上面(-z面)では流れはないものとし、0°Cで一定とした。海洋プレートが沈み込む海溝側の鉛直面(-x面)では、透過条件を与え、温度はプレート冷却モデルを用いて深さと海洋プレートの年齢の関数で与えた。他の4つの面については透過条件を与え、断熱とした。このような設定のもと、過去数千万年前から現在までの温度場・流れ場の時間発展問題を差分法を用いて解いた。得られた現在(0Ma)の温度場は、地殻熱流量のデータと比較し、観測値と計算値の残差が小さくなるようなモデルを構築した。含水量分布の計算には、海洋堆積物はvan Keken et al. (2011)のタービダイトの相図を、海洋地殻とスラブマントルは、それぞれTatsumi et al. (2020)のMORBと超苦鉄質岩の相図を用いた。本研究では、スラブ上面(0 km)から厚さ2 kmを海洋堆積層、その下の厚さ5 kmを海洋地殻、その下からスラブ下面までをスラブマントルとした。

3. 結果と考察

最終的に得られた0Maでの数値シミュレーション結果から、モデル領域南部では、南米プレート下に沈み込んでいるチリ海嶺に近く、その結果、若い海洋プレートが沈み込むため、相対的に古い海洋プレートが沈み込む北部に比べてスラブ上面での温度分布は高くなる傾向がみられた。そのため、マウレ地震とバルディビア地震の地震時すべりの下限での温度を比較すると、バルディビア地震の温度の方が高くなった。また、本数値シミュレーションで得られた温度-深さの関係と、前述の含水鉱物の相図を用いてスラブ上面付近の含水量分布を求めた。そして、得られた含水量分布を2012年1月1日~2022年1月1日までの10年間に観測されたMw 2.5以上の通常地震の震源分布(USGS)と比較した。現時点で得られている暫定的な結果によると、プレート境界付近における通常地震の震源分布は、スラブ内の最大含水量がゼロになる深さよりも浅部側に震源が分布していた。このことから、流体の存在によって有効法線応力が下げられ通常地震が発生していると考えられる。

さらに、沈み込み方向に沿った単位長さ当たりの最大含水量の変化量（脱水勾配）を求めた。その結果、海洋地殻とスラブマントルでは顕著な脱水がみられた。海洋地殻の脱水分解反応はMORBがlawsonite blueschist相からlawsonite eclogite相へと相転移したことに対応している。一方、スラブマントルの脱水分解反応は、超苦鉄質岩がbrucite相からantigorite相、chrolite相、amphibole相へと順に相転移にしていくことに対応している。これらの脱水分解反応は、およそSouthern Volcanic Zoneの直下で発生していた。このことから、スラブに含まれる含水鉱物が脱水分解反応によって水を放出し、プレート境界やマントルウェッジでの融点を引き下げることによってマグマが生成され、その直上に火山が形成されたと考えられる。

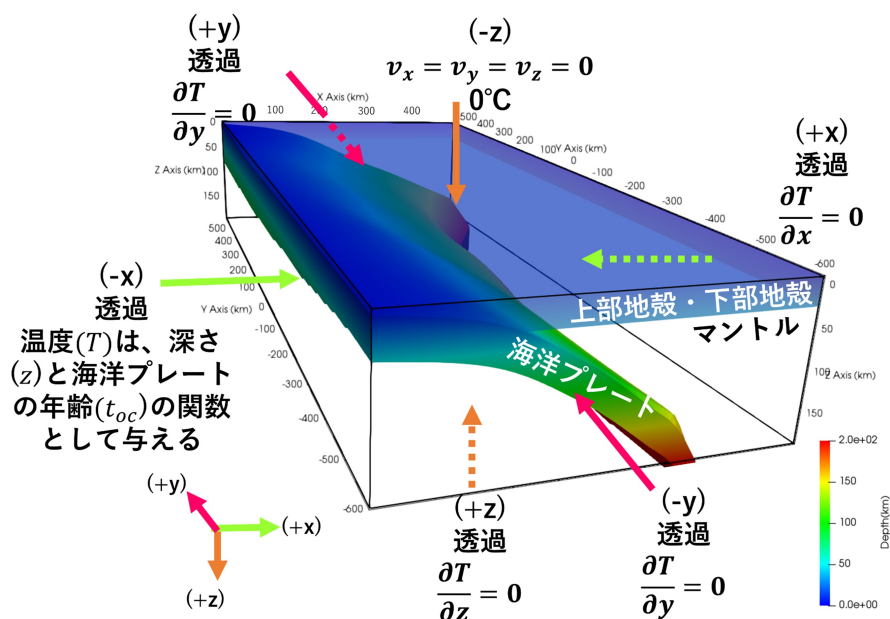


図1：3次元箱型モデルの領域と境界条件。モデル上部の濃い青色の領域は熱伝導層である上部地殻・下部地殻を表す。現在(0 Ma)のスラブ領域は深さで色分けして示している。海溝軸から内陸側にむかって+x軸をとり、海溝軸に沿って北方向に+y軸をとり、深さ方向に+z軸を取っている。黄緑色、ピンク色、オレンジ色の矢印は、それぞれ、±x軸、±y軸、±z軸方向を表している。

Low-velocity anomaly in the Pacific slab beneath the Kanto region

*Kazuki MIYAZAKI¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Tech

近畿地方から関東地方にかけての東日本を対象に地震波走時トモグラフィー(Zhao et al., 1992, JGR)を行ったところ、関東地方直下の太平洋スラブ内部に地震波速度が低速となる領域が存在することがわかった。そこで太平洋スラブ内部の速度構造をよりよく調べるため、気象庁で観測された太平洋スラブ内地震について次のような解析を行った。(1)ある観測点で観測されたあるスラブ内地震について理論波線を計算する。(2)波線上に別のスラブ内地震が存在する場合、それら2つのスラブ内地震を1つのペアとする。(3)これらの地震のペアについて震源間の距離を観測走時差で割ることで2つの地震間の地震波平均速度を計算する。(4)この操作を観測されたすべてのスラブ内地震について行う。以上の操作を関東・東北地方の太平洋側に設置された観測点全てについて行うことで、太平洋スラブ内部の地震波速度を詳細に求めた。

解析の結果、関東地方直下の太平洋スラブ内部における地震波速度は中部地方や東北地方直下のものと比べて低速であることが明らかになった。これはトモグラフィーで得られた結果と整合的である。関東地方は東北日本弧と伊豆一小笠原弧が会合する場所に位置しており、直下の太平洋スラブは尾根のように西側に突き出した形状をしていることが知られている。こうした太平洋スラブのジオメトリが本研究で明らかになった低速度領域の成因である可能性がある。また、関東地方直下には第一鹿島海山に代表されるような海山が沈み込んでおり、こうした地形の名残が低速度としてイメージされているかもしれない。

講演までに、同様の解析を北海道の島弧会合部にも適応する。加えて、関東地方下の低速度領域を通過する波線に対して地震波スペクトル比法を適応することで、同領域の減衰構造も推定し、太平洋スラブ内の異常構造の原因を考察する予定である。

Seismic structure and seismotectonics of the East Japan forearc derived from seafloor S-net data

*Dapeng ZHAO¹, Yu Katayama¹, Genti Toyokuni¹

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

A permanent seafloor seismic network (S-net) consisting of 150 stations has been recently installed in the East Japan forearc and the outer-rise area under the Pacific Ocean, which provides an unprecedented opportunity to investigate the detailed forearc structure and initial stage of plate subduction. Using P-wave arrival-time data of local suboceanic events recorded by the seafloor S-net, *Yu and Zhao (2020)* determined P-wave velocity (V_p) tomography off Hokkaido, *Hua et al. (2020)* obtained V_p tomography off Tohoku, and *Wang et al. (2022)* investigated 3-D V_p anisotropic structure off Tohoku. However, the 3-D S-wave velocity (V_s) structure of the forearc region has not been investigated using the S-net data, except for *Matsubara et al. (2019)*. In this work, we use a large number of P and S wave arrival times of local earthquakes beneath the Pacific Ocean and land areas recorded by both the S-net and the land-based Kiban seismic network to investigate the 3-D V_p and V_s structures of the East Japan forearc. Geometries of the subducting Pacific slab boundary and the Conrad and Moho discontinuities under the forearc are refined by referring to results of previous studies including active-source seismic soundings and seismicity located by the S-net. The obtained V_p and V_s images are quite similar to each other, suggesting that they reflect robust features of the 3-D seismic structure. The subducting Pacific slab exhibits high velocities, whereas significant low-velocity (low- V) anomalies are revealed in the overlying Okhotsk plate beneath the forearc, which may reflect accretionary materials containing abundant fluids. The subducting oceanic crust atop the Pacific slab is revealed clearly as a thin low- V layer extending from the trench axis down to ~100 km depth under the volcanic front. Our results of earthquake relocation using the 3-D velocity model indicate that the double seismic zone in the subducting Pacific slab occurs from the outer-rise area east of the Japan trench down to ~180 km depth under the eastern margin of the Japan Sea. The occurrence and focal mechanisms of the double seismic zone are caused by slab deformation during its subduction, such as slab bending or unbending, as well as other processes including hydration, dehydration, compositional variations, and phase changes in the subducting slab. Significant lateral variations of velocity structure are also revealed in the interplate megathrust zone, which show correlations with the distribution of large interplate earthquakes. These results shed new light on the seismic structure and subduction dynamics of the forearc region (*Zhao et al., 2022*).

References

- Hua, Y., D. Zhao, G. Toyokuni, Y. Xu (2020). Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake. *Nature Communications* 11, 1163.
- Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira et al. (2019). Seismic velocity structure in and around the Japanese island arc derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data. *Seismic Waves - Probing Earth System*, IntechOpen, 1-18.
- Wang, Z.W., D. Zhao, X. Chen (2022). Seismic anisotropy and intraslab hydrated faults beneath the NE Japan forearc. *Geophys. Res. Lett.* 49, e2021GL097266.
- Yu, Z., D. Zhao (2020). Seismic evidence for water transportation in the forearc off Northern Japan. *J. Geophys. Res.* 125, e2019JB018600.
- Zhao, D., Y. Katayama, G. Toyokuni (2022). The Moho, slab and tomography of the East Japan forearc derived from seafloor S-net data. *Tectonophysics* 837, 229452.

Estimation of the crustal deformation using radiated energy of tectonic tremors in the northern Kii Peninsula

*Tsukasa Yamamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University

はじめに

プレート境界浅部での地震発生過程を考察する上で遷移帯でのすべりや地震活動をモニタリングすることは重要である。テクトニック微動と短期的SSEは時空間的に同期して発生することが知られている。微動は地殻変動量の推定に使用でき、Maeda and Obara (2009)では微動の累積放射エネルギーの時間的なパターンが観測された傾斜量変化とよく一致することを示した。しかしながら、微動を伴わないすべりも観測されており (e.g. Wech and Bartlow, 2014)、微動とすべりの関係はいまだ不明瞭である。そこで、本研究では微動の震源位置と放射エネルギーを使用して地殻変動量を推定することを目的とする。

データと方法

本研究の対象地域は紀伊半島である。産業技術総合研究所のアレイ観測網の地震波形データを解析した Nakamoto et al. (2021)で報告された微動の震源と放射エネルギーを使用する。Nakamoto et al. (2021)で報告されたETSのうち微動のクラスターが十分多く、かつ測地データの解析から短期的SSEが1つのみ発生しているETSを選択する。まず、Shiomi et al. (2008)のプレート境界面モデルを使用し、10 km×10 kmの小断層を配置する。次に、各小断層に微動を分配して累積放射エネルギーを求める。累積放射エネルギーから地震モーメントへの変換にはscaled energyを使用し、さらに地震モーメントから小断層のすべり量を推定する。その後、各小断層の断層パラメータを使って地殻変動量を計算する。このとき、Scaled energyは各ETSの累積放射エネルギーとそのETS期間中に発生した地震モーメントの比として使用する。まず、Scaled energyを空間的に均質と仮定して走向、傾斜、すべり角の条件を以下の通りにする。①走向、傾斜はプレート境界面モデルを使用し、すべり角を90°とする、②ETS期間中に発生したSSEの走向、傾斜、すべり角を使用する、③①と同様に走向、傾斜はプレート境界面モデルを使用し、45°から135°の間で観測値と計算値の差が最小になるすべり角を各ETSで決める、④走向、傾斜はプレート境界面モデル、すべり方向を一定にしたときのすべり角を使用する、⑤プレート境界面モデルをIwasaki et al. (2015)に変更し、①と同様の条件を使用する。

結果と考察

各ETSにおいて、微動の累積放射エネルギーから推定した傾斜量は観測値と比較するといずれの条件でも数倍程度の違いとなった。観測値と計算値の違いを定量的に評価するために、傾斜量の東西成分と南北成分の観測値と計算値の差の二乗和を計算すると、③のすべり角を変化させたときに最も観測値との差が小さくなった。微動の累放射エネルギー分布は空間的に均質ではないため、変換係数であるscaled energyの空間分布を変化させることでより観測値と合う傾斜量が得られる可能性が考えられる。そこで、scaled energyが空間的に不均質な場合について考察する。全ETSの微動の累積エネルギーが 1.0×10^8 Jを超える小断層を高放射エネルギー領域とし、scaled energyを変化させた。その他の領域の0.1, 0.2, 0.5, 1, 10, 20, 50倍として①の条件で計算した。結果として、scaled energyが1倍、つまりその他の領域と同じ値のときに観測値と計算値の差の二乗和が最小となった。したがって、scaled energyは空間的に均質に分布すると考えられる。

Strain-rate field of Japan estimated from GNSS data using basis function expansion with ABIC

*Yukitoshi FUKAHATA¹, Tomohisa Okazaki², Takuya Nishimura¹

1. DPRI, Kyoto University, 2. AIP, RIKEN

GNSS観測により、各観測点におけるある観測期間の変位速度が得られる。得られたGNSS速度データから歪み速度場を推定する方法はいくつもあるが、最近、Okazaki et al. (2021)は、ABIC（赤池のベイズ情報量規準；Akaike, 1980）を用いた基底関数展開に基づく方法を提案した。この方法は、水準測量データから地殻の上下変動を推定したFukahata et al. (1996)の解析法をGNSSデータに応用したものである。具体的には、変位速度場を基底関数展開し、観測されたGNSSデータから平滑化条件付きでその展開係数を求めるインバージョン解析を行う。観測データと平滑化の重みはABIC最小の規準で客観的に決定する。微分可能な関数を基底関数として用いることにより、変位速度場が得られればそれを解析的に微分することで、直ちに歪み速度場を得ることができる。解析では、双三次のBスプライン関数を用いた。

解析には、国土地理院（GEONET）、海上保安庁、京都大学、国際GNSSサービス(IGS)、UNAVCO、韓国GNSSデータ統合センターから公開されているGNSS観測点データを使用した。各観測点の日座標値をソフトウェアGIPSY Ver. 6.4 (Bertiger et al. 2010)を用いて算出し、地球基準座標系ITRF2014に準拠したIGS14座標系に変換した。Okazaki et al. (2021)では、2006年1月から4年間のデータを解析したが、本研究ではそれに加えて、1997年1月から3年間、2017年10月から3年間のデータも併せて解析した。使用した観測点数は各期間ごとに880, 1337, 1340点である。得られた変位データから、国土地理院および気象庁より公開されている機器交換のタイミングで生じたオフセット、M6以上の大地震時に生じた変動などを除去した。但し、余効変動については除去していない。そのような補正を施した時系列変位データに対し、東西・南北の各成分ごとに線形トレンドおよび年周成分、半年周成分を最小二乗法で回帰し、得られた線形トレンドの係数を各期間の平均変位速度とした。

解析の結果得られた各期間の歪み速度場を比較すると、特に最後の期間には東北沖地震の余効変動が含まれていることもあり異なっている部分も多いが、全体的には時間的な変動はそれほど大きくはなく、似通った歪み速度場となった。即ち、日本列島では、最近の四半世紀について、大まかには一定の速度で歪みが進行していることが分かった。その一方、これまでも指摘されてきたように、空間的には大きな変動があることが分かった。日本海東縁～新潟神戸歪集中帯および奥羽脊梁山脈を初めとする地域で非常に速い東西短縮が生じている一方、中国地方および茨城県北部から北関東を経て愛知県北部に至る前弧域では歪み速度が顕著に小さい。この前弧の低歪み帯は常陸－三河前弧低歪み帯と名付けた。それ以外の多くの地域でも、これまでよりも高い解像度で歪み速度場が得られた。ポスター発表では、各期間の歪み速度場を貼り出すことで議論の助けとしたい。

なお、本研究の詳細は地学雑誌で印刷中である。

Poster session (2nd Day) Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 8:30 AM UTC | 🏢 ROOM P-1
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S02P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-01] Seismic intensity distribution structure estimated from hypocenter and magnitude

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

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-02] Applying simple hypocenter determination method using the back-propagating wavefront to real observed arrival times

*Shoji SEKIGUCHI¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-03] Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveform data

*Keisuke ARIYOSHI¹, Hiroki Horikawa¹, Shuichiro Yada¹, Masaru Nakano¹, Yojiro Yamamoto¹, Kentaro Sueki¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi² (1. JAMSTEC, 2. NIED)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-04] Amplitude of artificial vibration captured by DAS

*Masayuki TANAKA¹, Akio Kobayashi¹ (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-05] Estimating crustal movements during slow slip events from ocean bottom pressure gauge data using oceanic models

*Toshinori SATO¹, Masahiro Suzuki¹, Koichi Murata^{1,2}, Norihisa Usui³, Hajime Shiobara⁴, Tomoaki Yamada⁴, Masanao Shinohara⁴ (1. Chiba Univ., 2. OYO Corporation, 3. MRI, 4. ERI, Univ. Tokyo)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-06] Realtime Earthquake Damage Prediction System for Chiba Prefecture

*Masahiro OOI¹, Narumi TAKAHASHI¹, Mitsutsugu IGARASHI², Kaoru YOSHIOKA², Shoichi SHIOZAKI², Kazumi ASAO¹ (1. NIED, 2. Chiba Pref.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-07] Realtime Tsunami Inundation Predicting System Using S-net Data for Chiba Prefecture

*Narumi TAKAHASHI¹, Masahiro OOI¹, Mitsutsugu IGARASHI², Kaoru YOSHIOKA², Shoichi SHIOZAKI², Kazumi ASAO¹, Wataru SUZUKI¹ (1. NIED, 2. Chiba Pref.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S02P-08] **Development of real-time monitoring system for WIN using MQTT protocol**

*Hiroshi TSURUOKA¹ (1. ERI, Univ. Tokyo)

Seismic intensity distribution structure estimated from hypocenter and magnitude

*Shutaro SEKINE¹

1. Association for the Development Earthquake Prediction

はじめに

地震が発生すると、震源の位置とマグニチュード、そして各地の震度が発表される。しかし、多くの人にとっては、自分の住んでいる地域の震度がどれぐらいだったかに興味があると思われる。マグニチュードの推定に於いては観測点の最大振幅を用いて計算されている事が多く、最大振幅が大きければ、震度が大きく出ますが、直接的に計測震度に紐づいているわけではない。もし、震源の位置とマグニチュードから簡易的に震度分布をみる事ができるならば、あらかじめ地震の起こりそうな場所に震源を置いて任意の地点の震度を計算する事ができるようになる事で、防災上にも役に立つかもしれない。そこで、本研究においては、過去の地震における計測震度とマグニチュードから、震源分布を再現できるような構造（以下震度分布構造と呼ぶ）を、Sekine(2005)の手法を改良する事により求める事を試みた。

データおよび解析手法

気象庁の地震月報（カタログ編）にある震度データのうち、卓越周期等が記載されている2000年10月から2019年12月までのデータを用いた。これらのうち、震度1以上を記録した観測点が5点以上あるM5.5以下の21777個の地震のデータを用いる事にした。なお、記録している観測点は6795点である。地震の大きさをM5.5以下にしたのは、この大きさぐらいまでであれば、計算グリッドに対して破壊開始点と滑りの大きかった点が近傍であると近似できると考えたからである。これらのデータに対して減衰構造のインバージョンと同様の手法を用いる事により、震度分布構造を求めた。

結果

震度分布構造は、厳密に言えば物理的な意味はないものであると思われるが、発表においては、震度分布構造の特徴や物理量である減衰構造との比較を示す。

謝辞

本研究を行うにあたり、地震月報（カタログ編）のデータを使用いたしました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

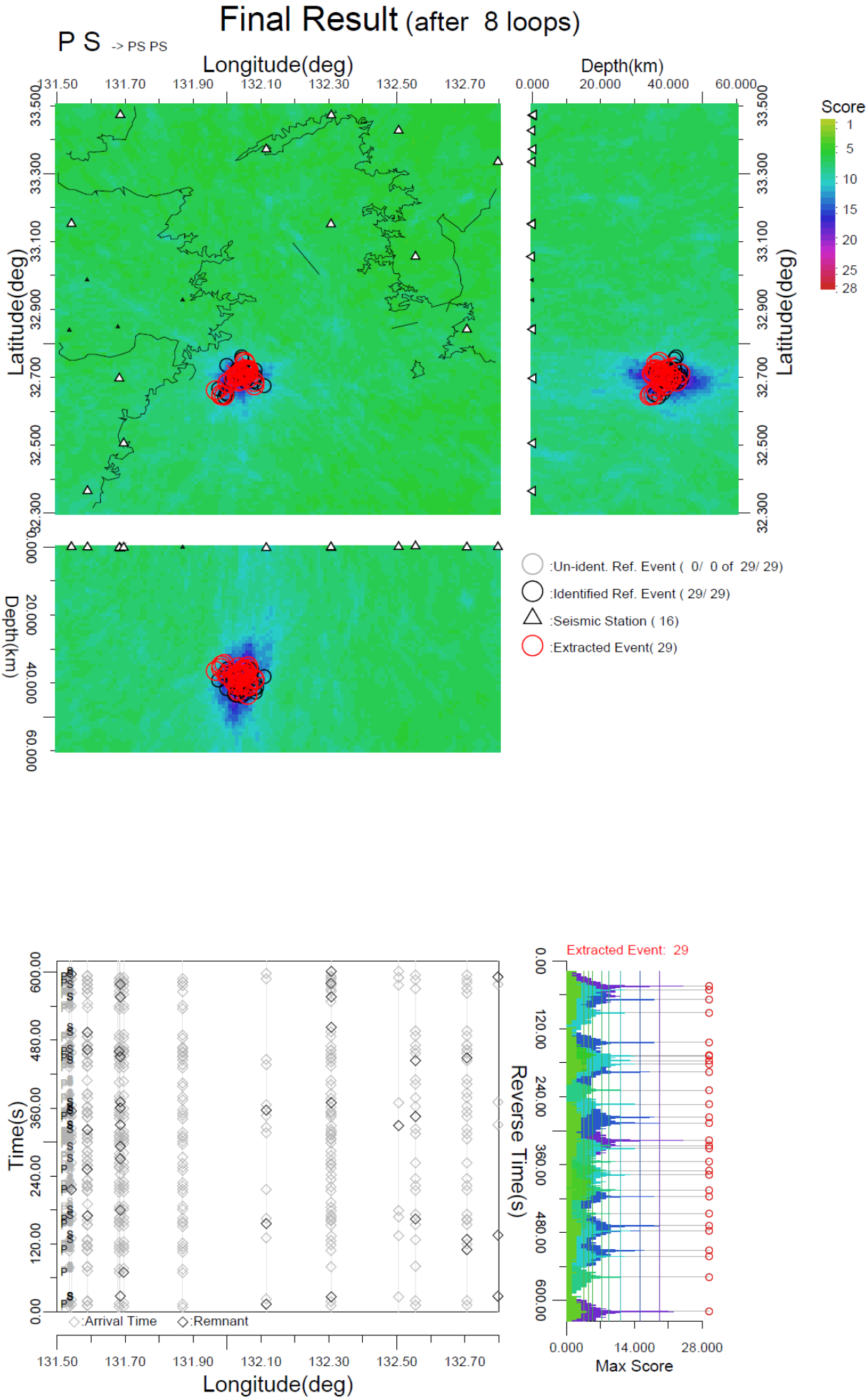
S.Sekine (2005): Tomographic Inversion of Ground Motion Amplitudes for the 3-D Attenuation Structure beneath the Japanese Islands, Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 68, 137-174

Applying simple hypocenter determination method using the back-propagating wavefront to real observed arrival times

*Shoji SEKIGUCHI¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2022年連合大会で発表したように、地震波到着時刻情報のみを使いP波S波関係なく観測点からP波とS波両方を伝播させ、波面がたくさん重なった点を震源と推定する簡便な震源決定方法を開発した。理論的な読み取り値に適用して計算時間も短く精度よく震源決定ができることを示した。今回はこの手法を実際の読み取りデータに適用したのでその結果を報告する。通常、観測点での地震波P相やS相の到着時刻の読み取り値を使って震源決定をするが、その際には、地震毎に読み取り値をまとめることや位相の分別をしなければならない。連続して地震が発生している場合はこのようなことが困難なことが多い。そこで今回開発した手法では、地震波は波線理論に基づいて各観測点からの走時をあらかじめ計算しておく。次に観測点ごとに実際の観測読み取り値の時刻をもとに、時刻をさかのぼって対象領域の波が届いている地点にポイントを与える。高スコアところが震源である可能性が高いので、適切な閾値を設定してこのスコアから震源を推定する。実際には時間も位置も離散化されており各格子点でスコアを評価する。さて、各格子点にポイントを与えるという単純な処理が必要になるが、処理すべき格子点の数が多いので実行上はここが最も計算時間がかかるところとなる。スコアを元に震源を抽出するところはさほど計算時間が必要ではない。ここでは読み取り値と計算値が一致するところに1ポイントを与え、ほかは0ポイントとし、ポイントを与える格子点だけに処理対象を絞れたので、処理時間を大幅に短縮できた。読み取り値と計算値の差が最小の点を探す、という通常の震源決定で用いられる基準を採用すると全格子点を処理対象にする必要が出てくるので、時間がかかりすぎてしまう。また、ポイント付与処理のところにはOpenMPによる並列化も適用しさらなる計算時間短縮を図っている。まず、日向灘で2022年1月22日に発生した地震に適用してみた(図参照)。格子間隔は 0.01° , 1km, 0.1sとした。観測点は周辺のHi-net16点、本震から約10分間の手動読み取り値を使用した。この間29個の地震がルーチン処理では決定されている。うち読み取り値が重なっている地震は21個(72%)ある。今回の手法を適用した結果、29個すべての地震を推定することができた。ルーチン処理の地震との差は平均0.75格子間隔、処理時間は49sであった。次に日本列島全体を対象に、特に際立った地震活動がない時期として2015年1月1日0時から4時までの読み取り値に本方法を適用してみた。観測点はHi-netのみとした。格子間隔は 0.1° , 10km, 1sとした。この間34個の地震がルーチン処理では決定されている。うち読み取り値が重なっている地震は10個(29%)ある。今回の手法を適用した結果、34個すべての地震を推定することができた。ルーチン処理の地震との差は平均1.93格子間隔、処理時間は3m18sであった。最後に2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の本震から4時間の東北日本の読み取り値に本方法を適用してみた。観測点はHi-netのみ231点とした。格子間隔は 0.1° , 10km, 1sとした。この間527個(領域外を含む)の地震がルーチン処理では決定されている。うち読み取り値が重なっている地震は462個(88%)ある。今回の手法を適用した結果、267個(領域内の地震425個に対して63%)の地震を推定することができた。ルーチン処理の地震との差は平均4.60格子間隔、処理時間は7m42sであった。ある程度限られた領域で集中して地震が発生した場合、日常的な地震活動の場合については、活動の概略を把握するには十分良い精度で震源決定ができると期待される。東北地方太平洋沖地震のように広範囲で多くの地震が発生する場合は、検出率が6割強と落ち、精度も悪化してしまう。検出されたほとんどの地震は実際の震源位置周辺に求められているがいくつかの地震は太平洋はるか沖合に決まってしまう傾向が見える。観測点が地震の西側に偏っていることが関係しているのかもしれない。このような傾向をあらかじめ理解しておけばこのような地域でも地震活動の把握に利用できる可能性がある。



Orientations of DONET seismometers estimated from seismic waveform data

*Keisuke ARIYOSHI¹, Hiroki Horikawa¹, Shuichiro Yada¹, Masaru Nakano¹, Yojiro Yamamoto¹, 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級の高溝型巨大地震が繰り返して発生しており、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]。高溝型巨大地震が高い確率で発生することが予測されている南海トラフにおいて、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ため、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、地殻活動のモニタリングと構造解明に利用されており、更に、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観測データが利活用されている。

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。しかしながら地震計は深海に設置されるため、ROV (Remotely Operated Vehicle)によって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、必ずしも容易ではないという課題があった。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った[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

中野は、その後さらにDONET2が構築されたことなどから、2017年に地震計方位の再推定を行っている[4]。その後も、海洋研究開発機構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、引き続き方位推定を行ってきた[5,6]。

本発表では、DONET地震計の方位推定結果の更新を行うと共に、孔内に設置されている地震計への適用も試みる予定である。

謝辞:本研究はDONET海中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

Amplitude of artificial vibration captured by DAS

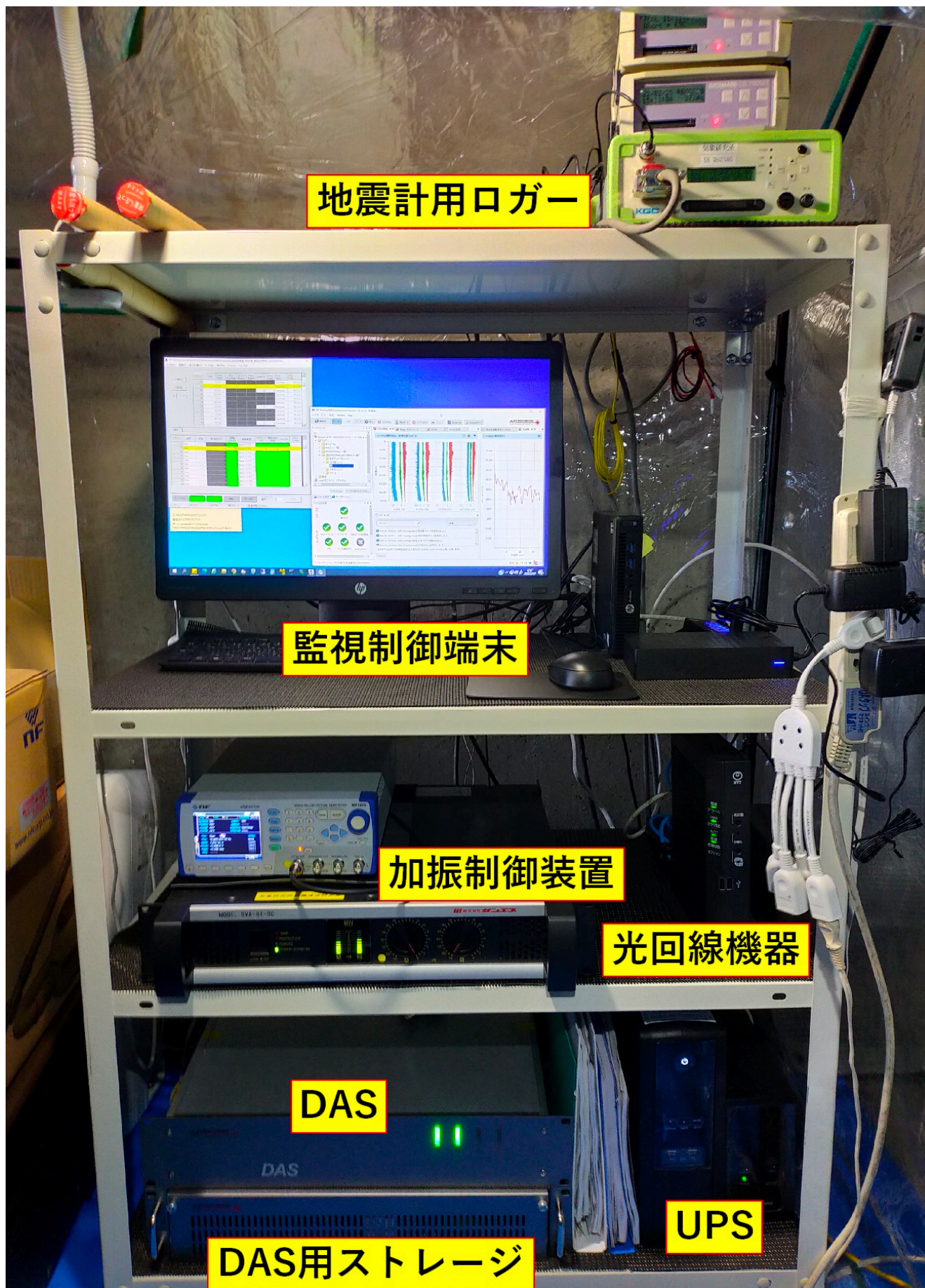
*Masayuki TANAKA¹, Akio Kobayashi¹

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

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

DASは振動強度に対して線形性を有しているかなどを調査するため、静岡県浜松市天竜区船明地区にあるトンネル内に敷設したシングルモード4芯1kmの光ファイバを使い、複数の周波数及び強度の振動を発生させることができる加振装置により、人工振動を発生させてDASや地震計でその振動を観測した。光ファイバ線は、モルタルセメントで埋めるなど、いくつかの敷設環境について調査した。DAS装置や加振装置の制御、観測したデータの回収などは通信回線を介してつくば市にある気象研究所から行った。

加振装置では2 Hz、4 Hz、8 Hz、12 Hzの周波数につき、大きさを段階的に変化させて40秒間振動を発生させた。DASが記録した振動の周波数の安定度は、2 Hzの振動に対しては安定的に観測されているが、4Hz、8Hz、12Hzと高周波になるに従いそれぞれの周波数からの分散が大きくなった。また、振動源から遠ざかるに従い観測される振動の強さが小さくなる点は、田中・他（2020、地震学会）で報告した、ハンマで地面を叩いて人工振動を発生させた時と同じ結果である。加振装置の振動の強さに限りはあるが、2 Hzの振動に対してDASで観測した振幅はある強さの範囲で線形性が見られた。当日はリファレンスで設置した地震計との対比なども紹介する。



Estimating crustal movements during slow slip events from ocean bottom pressure gauge data using oceanic models

*Toshinori SATO¹, Masahiro Suzuki¹, Koichi Murata^{1,2}, Norihisa Usui³, Hajime Shiobara⁴, Tomoaki Yamada⁴, Masanao Shinohara⁴

1. Chiba Univ., 2. OYO Corporation, 3. MRI, 4. ERI, Univ. Tokyo

1. はじめに

海底圧力計（OBP）は、海底の上下変動を連続的に観測でき、スロースリップ（SSE）などのゆっくりした変動を捉えることにも有効である。しかし、OBPの観測データには、地殻変動以外に、海洋潮汐、海洋変動、機器の永年変化（ドリフト）などが記録されていて、これらを適切に取り除く必要がある。清水、他（JpGU、2021）は、観測データと海洋モデルをマルチチャンネル特異スペクトル解析（MSSA）を用いて成分に分解し、相関のよい成分のみを用いて観測データから海洋変動を取り除くという方法を開発した。これは、海洋モデルの不完全さを取り除き、より観測データから地殻変動を取り出しやすくする方法である。本研究では、更新された海洋モデルにこの方法を適用し、SSEによる変動の抽出を試みた。

2. 方法

解析に使用した更新された海洋モデルは、気象庁気象研究所が開発した日本沿岸海洋再解析データセット「MOVE/MRI.COM-JPN Dataset」（広瀬、他、2020）である。OBPデータは房総沖SSE領域で観測したデータ（2013~2015、2016~2018）を使用した。このデータには、2014年と2018年のSSEが含まれている。

OBPデータからは、潮汐モデル「Baytap08」（Tamura et al. 1991）を用いて潮汐成分を取り除き、直線フィットでトレンドを取り除いた。潮汐とトレンドを除いたデータと海洋モデルを用いてMSSAを行い、成分ごとにデータとモデルの相関を出し、相関の良い成分のみを用いて海洋モデルを再合成し、これを潮汐とトレンドを除いたデータから差し引いた。その後、SSEによる変動や季節変動等を見積もるため、パラメトリックモデル（Sato et al, GRL 2017）を当てはめ、スロースリップによる変動の抽出を試みた。

3. 結果

更新された海洋モデルは、従来の海洋モデルと比較して非常によく観測データと合っていることがわかった。潮汐とトレンドを除いたデータから再合成した海洋モデルを差し引いたデータは、変動の標準偏差が1.81 hPaとなった。単純に海洋モデルをそのまま差し引いた場合の標準偏差は2.41 hPaであり、本研究の方法によって海洋変動がよりよく除けている可能性がある。再合成した海洋モデルを差し引いたデータに、パラメトリックモデルを当てはめると、残差の標準偏差は0.76 hPaとなった。推定されたスロースリップによる上下変動は、2018年のSSEに対して隆起域と考えられる場所で1.48 mm (-1.49 hPa)の隆起となった。

謝辞

本研究の遂行にあたり、海洋研究開発機構「白鳳丸」、「なつしま」、海洋エンジニアリング（株）「第三開洋丸」、「第五開洋丸」を使用させて頂きました。各船長以下、乗組員の方々に感謝します。本研究は文部科学省の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援および科研費(25287109)の補助を受けました。

Realtime Earthquake Damage Prediction System for Chiba Prefecture

*Masahiro OOI¹, Narumi TAKAHASHI¹, Mitsutsugu IGARASHI², Kaoru YOSHIOKA², Shoichi SHIOZAKI², Kazumi ASAO¹

1. NIED, 2. Chiba Pref.

1. はじめに

防災科学技術研究所は、平成19年3月より、千葉県の震度観測網と防災科学技術研究所の強震観測網K-NETの震度情報を用いて、震度分布や被害分布等を予測する「地震被害予測システムの開発に関する共同研究」を千葉県と実施している。地震被害予測システムは、千葉県の地震被害想定調査で整備された地盤データや建物データ等を有効活用しており、地震発生時の初動体制に有益な情報を提供することを目的としている。また、平常時は、設定した震源から得られた震度分布等を用いて、図上訓練等に利活用できる柔軟なシステムになっている。

2. 震度情報の活用

千葉県内で震度4以上の有感地震が発生した際、地震被害予測システムは、千葉県の震度観測網から分岐された震度情報と防災科学技術研究所からメール送信されたK-NETの震度情報を統合し、震度分布や被害分布を250mメッシュ単位で即時的に予測している。震度観測網の震度情報にK-NETの震度情報を取り込むため、両観測網の震度情報のマージは、K-NETから千葉県が分岐している観測点のトリガー時刻を用いて、同一地震の震度情報かどうか判定している。

現在の地震被害予測システムは、令和元年度に改修を実施しており、人口、建物、地盤の基礎データに加えて、建物被害分布、液状化危険度分布、人的被害分布の推定法は、平成26・27年度の千葉県地震被害想定調査に準じている。また、新たに避難者数や帰宅困難者数を推計できる機能を付加している。

3. SVGの利用

地震被害予測システムの震度分布等の表示は、JIS化されたSVG（Scalable Vector Graphics）のデータ構造を採用している。SVGとは、インターネットの標準化団体であるWorld Wide Web Consortiumが勧告したフォーマットであり、2012年に日本工業規格（JIS）になっている。

SVGは、ベクトル画像の描画に必要なデータや座標系、投影、レンダリングなどをXML（Extensible Markup Language）形式で記述できるとともに、インターネットとの親和性が極めて高く、EdgeやChrome等のWebブラウザで表示することができる。SVGは、ベクター形式の地図情報やラスタ形式の震度分布図等が扱えるとともに、XML形式のデータ記述によって、観測値情報などをメタデータとして埋め込むことができる。地震被害予測システムは、SVGの被害予測情報を市区町村や町丁目単位で出力・表示するとともに、市町村に被害予測情報をFAX送信できるようにモノクロ出力にも対応している。なお、背景地図は、基盤地図情報をSVGに変換した上で使用している。

4. 予測情報の配信

地震被害予測システムで得られたSVGの被害予測情報は、防災情報システムネットワーク経由で配信することにより、県庁内と県の関係機関（出先、市町村、消防本部等）の防災PCのWebブラウザで閲覧することが可能である。なお、地震被害予測システムの配信は、震度分布、液状化危険度、全半壊棟数の予測をはじめ、死傷者数や避難者数の市区町村集計、駅周辺の帰宅困難者数となっている。

千葉県は、地震被害予測システムと津波浸水予測システム（高橋ほか、本学会）を構築しているが、これらシステムの予測情報は、防災情報システムネットワーク経由で配信されるため、県庁や関係機関の防災PC以外では閲覧することができない。しかし、地震発生直後は、県職員のみならず、市町村職員や消防職員等が予測情報を知ることが重要である。この問題を解決するため、予測情報をインターネット経由で配信するクラウドシステムを構築しており、地震被害予測システムで得られた震度分布、液状化危険度、全半壊棟数の予測情報や震度情報は、ユーザーが所有するスマートフォンやタブレット等で閲覧することが可能である。

5. おわりに

千葉県は、地震や津波の発生時、市町村と予測情報を共有した初動体制が確立できるようにするため、地震

被害予測システムや津波浸水予測システムを用いた訓練を市町村と実施しており、今後も千葉県の地震津波防災の取組みに協力していきたい。

Realtime Tsunami Inundation Predicting System Using S-net Data for Chiba Prefecture

*Narumi TAKAHASHI¹, Masahiro OOI¹, Mitsutsugu IGARASHI², Kaoru YOSHIOKA², Shoichi SHIOZAKI², Kazumi ASAO¹, Wataru SUZUKI¹

1. NIED, 2. Chiba Pref.

千葉県では、日本海溝海底地震津波観測網（以下、S-net）を用いた津波浸水予測システムを構築し、現在運用されている。このシステムは和歌山県や三重県、中部電力に導入したシステムと同様のもので、S-netで津波を観測すると、その津波高さの空間分布に従い、各予測対象地点の津波到達時刻、津波高、浸水深分布と浸水エリアを即時的に示すものである。

千葉県では、2011年の東北地方太平洋沖地震のみならず、1677年の延宝地震、1703年の元禄地震など、これまでに多くの津波被害を繰り返し受けてきた。これらの経緯を踏まえ、想定する津波は、日本海溝から伊豆・小笠原海溝にかけての海域、ならびに、相模トラフ沿いの海域を対象としている。この海域にマグニチュード（M）7.5から8.5まで、深度と傾斜にばらつきを持たせ、2600ケース超の断層モデルを設定した。浅い断層モデルも設定しているため、浅部で海底地すべりが発生して局所的に大きな津波が発生したとしても、S-netで観測できれば予測に反映することができる。使用したS-net観測点は、運用コスト低減を念頭に、福島県沖以南の観測点のみとした。予測対象地点は、南房総市から銚子市に至る九十九里・外房地域としている。千葉県のシステムは、基本的な予測手法は既に実装している和歌山県や三重県と同じであるが、いくつかの点でシステムに機能を追加して予測への信頼性を強化した。

1つめは、観測点のノイズ対策である。このシステムは、長時間平均と短時間平均をリアルタイムで計算し、その比を取ることでトリガーをかけている。この方法により、長周期のノイズが混入しても、津波を適切なタイミングでトリガーをかけることが可能である。しかし、S-netは浅海から深海まで幅広い範囲に設置しているため、各観測点のノイズレベルがまちまちであること、インラインシステムとして水圧計を取り付けているため、ケーブルの回転に伴い津波の周期に近いノイズが混入することに対応する必要があった。また、津波のトリガーがかかると、その時刻からの相対水位が津波の観測値となるため、線形的に観測値のオフセットが増加するような観測点は予測の過大評価につながる。これらを踏まえ、各観測点のノイズの特徴を抽出し、津波予測に不適な観測点、高いノイズレベルにより観測値の誤差が大きいと考えられる観測点、精度の高い観測が実現できている観測点に分け、それぞれのノイズに対する閾値などのパラメータを設定した。津波の周期に近いノイズの混入については、混入直後の即時的な判断は困難であるため、観測した津波高の空間的な比較と、津波伝播の状況からノイズと判断できれば、津波トリガーをキャンセルする形を採用している。

次に、予測情報の可視化の高度化である。通常、県庁内にサーバを設置、各市町のユーザーからクライアントして接続することで、津波到達時刻や津波高、浸水深マップなどの予測情報を地域と共有するシステムとして運用している。しかし、これらの予測情報共有のための仕組みは、ユーザーの通常の業務形態や、端末の設置数、サーバとユーザー間の回線環境など、様々な要素の影響を受ける。今後は、消防をはじめとする地域防災を支える人材への展開を念頭におき、行政機関の建物内だけの可視化ではなく、支援に出た現場でも確認できるようにする必要がある。そのため、作成した予測情報や観測情報をクラウドに伝送し、千葉県職員が所有するスマートフォンやタブレット等のモバイル機器上でも確認できるアプリケーションを作成、ユーザーに配布する体制を技術的に構築した。また、サーバからクラウドまでは一般のインターネット回線を使用するため、伝送するデータ量やタイミングを最適化し、回線の混雑にも耐えられる耐障害性を強化した。加えて、モバイル機器から写真をアップロードできる機能も追加し、発災時に現地からの情報を収集しやすい機能を付与している。システムの運用にあたっては、観測の現状、予測情報作成の現状、回線の状態をユーザーが即時的に把握できる必要がある。これらを確認した上で、予測情報の信頼性を理解し、今後起こりうることを想定することができる。また、気象庁からのアデス情報や、アデス情報による配信制御、潮位計による予測値の検証も同時に可視化できるようにした。さらに、県内の震度計を用いた地震被害予測システム（大井ほか、本学会）とも連携し、地震被害予測と津波浸水予測の統合も進めた。この統合されたシステムを用いて、毎年、避

難訓練を千葉県下で実施し、発災時でのスムーズな運用に備えることとしている。

本システムの構築は海洋研究開発機構、和歌山県、三重県との連携によって、実現されました。ここに厚く感謝の意を表します。

Development of real-time monitoring system for WIN using MQTT protocol

*Hiroshi TSURUOKA¹

1. ERI, Univ. Tokyo

はじめに

WINシステムは、多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムで、UNIX上で動作する多くのプログラム群から構成されている。地震観測テレメータシステムにおいては、その波形フォーマットを含め、リアルタイムデータ交換のためのシステムとして広く利用されている。プログラム群の中には、データ交換の際に利用される共有メモリ上のデータをテキストで表示するプログラムshmdumpがあり、これと連携したTcl/Tkで作成された波形表示プログラム群(shmx, shmz, shmck)がある。波形表示プログラムは、Tcl/Tkで記述されているためマルチプラットフォーム対応となっている。Webによるリアルタイム表示システムは存在しているものの、1秒ごとに波形表示用のファイルを作成して、それらをJavaScriptのプロットライブラリによって表示するシステムなどは開発されている。今回M2MやIoTにおいてよく利用されているMQTTプロトコルを用いたWINシステム用リアルタイム表示システムを開発したので報告する。

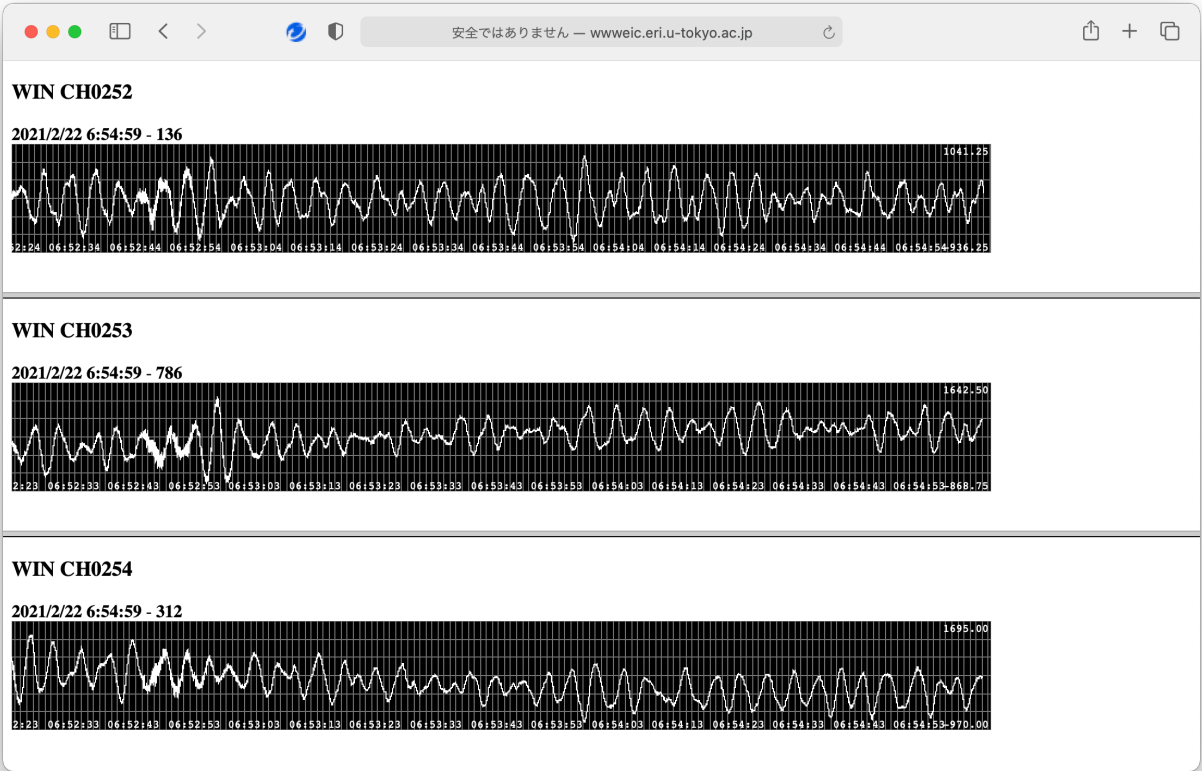
MQTTとは Message Queueing Telemetry Transport (MQTT) は、機械同士が通信を介して情報をやり取りする M2M (Machine-to-Machine) や家電や自動車など多種多様なモノがインターネットにつながりお互いに情報をやりとりする IoT (Internet of Things) においてよく利用されているプロトコルであり、シンプル、軽量、省電力という特徴を持っている。今回はその実装アプリでありmosquitto を用いたが、MQTTでは、パブリッシュ/サブスクライブ型モデルを採用しており、1対1はもとより多対多のやり取りが可能なプロトコルである。

リアルタイム波形モニタリングシステム

地震データのやり取りは、MQTTプロトコルを採用し、リアルタイムの波形表示については、<http://smoothiecharts.org>にあるJavaScriptライブラリのsmoothie.jsを採用した。さらに、mosquitto brokerへの配信データフォーマットとしては、WINテキストフォーマットをjson形式に変換して送信することとした。json形式への変換は、smoothie.jsでのプロットがシンプルになることによる。

実際例 実際に開発されたシステムのスナップショットを図に示した。ブラウザの負荷は非常に軽く、スマートフォンなどのブラウザでも表示できることを確認している。

今後の展望 今回は、mosquittoを利用したために、データ伝送はアスキー形式のみの対応となっているが、WINパケット（バイナリ）を送信できることがデータ転送サイズ等の面からも効率的である。また、MQTTプロトコルを採用することによりデータ送受信にアクセス制限をかけるなどが可能であり、より柔軟なデータ送受信を実現できる。また、MQTTプロトコルはrecv/send_rawに変わって利用できる可能性があり、その性能評価なども実施していく予定である。



Poster session (2nd Day) Introduction of committee activities : S24. Committee activities for society

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:30 AM - 8:30 AM UTC | 🏠 ROOM P-8
[S24] S24

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

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

9:30 AM - 5:30 PM JST | 12:30 AM - 8:30 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-01]Committee for Seismology Outreach

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-02]Disaster Investigation Committee

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-03]Newsletter Editorial Board

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-04]Geoparks Assistance Committee

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-05]Zisin Editorial Board

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-06]Public Relations Committee

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-07]Strong Ground Motion Committee

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-08]Committee for School Education

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-09]Committee on Summer School for Kids

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

Poster session (2nd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 5:30 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 5:30 PM

[S24P-10]Kanamori Fund

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

Poster session (2nd Day) Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster
--

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 12:00 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:30 AM - 3:00 AM UTC | 🏠 ROOM P-2
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S15P] AM-P

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

[S15P-01] Seismic Waveform Generation by Conditional Generative Adversarial Networks and Spectral Inversion Analysis

*Junki Yamaguchi¹, Yusuke Tomozawa¹, Yasuhito Yoshida¹, Toshihide Saka¹, Ryo Hatano¹ (1. Kajima Technical Research Institute)

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

[S15P-02] Application of Seismic Waveforms Created by Conditional Generative Adversarial Network to Inversion Analysis

*Yusuke Tomozawa¹, Tomoki Hikita¹, Junki Yamaguchi¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

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

[S15P-03] Estimation of source radiation energy using synthesized seismogram envelopes considering heterogeneous subsurface structure

*Masashi OGISO¹ (1. Meteorological Research Institute)

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

[S15P-04] Effect of seismogenic zone on hierarchy patch source model

*Hiroyuki Goto¹ (1. Kyoto University)

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

[S15P-05] Source model of the 2022 off Fukushima prefecture earthquake by the isochrone back-projection and empirical Green's function methods

*Toshimi SATOH¹ (1. Shimizu Corporation)

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

[S15P-06] Re-examination of source rupture process of the 2002 Denali, Alaska, earthquake (M_W 7.9) based on strong-motion waveforms and fault displacements

*Yujia GUO¹, Kunikazu Yoshida¹, Ken Miyakoshi^{1,2} (1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

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

[S15P-07] Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model I, Interpretation of the 2019 Mw4.9 Le Teil earthquake

*Hideo AOCHI^{1,2}, Kenichi Tsuda³, Shohei Yoshida⁴ (1. BRGM, 2. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. Institute of Technology Shimizu Corporation, 4. Ohsaki Research Institute Inc.)

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

[S15P-08] Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: A Study on the strong motion generation area in the northern Tokyo Bay

*Tetsushi WATANABE¹, Fumino SUZUKI¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹ (1. Kobori Research Complex)

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

[S15P-09] Long-period ground motion simulations in the western part of Shizuoka prefecture for large earthquakes in the Nankai trough

*Takeshi NAKAMURA¹ (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S15P-10] **Simultaneous estimation of source, path, and site spectra from the S-net strong-motion records in the Japan Trench area**

*Yadab Prasad Dhakal¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Hiroaki Yamanaka² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokyo Institute of Technology)

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

[S15P-11] Sedimentary basin structure estimated from receiver function in the Yufutsu Plain and ground-motion amplification

*Kunikazu YOSHIDA¹, Kazuhiro Somei¹, Ken Miyakoshi² (1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute)

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

[S15P-12] Evaluation of Response Spectra According to Recurrence Period in the Tokyo Metropolitan Area

*Takashi HAYAKAWA¹ (1. SHIMIZU Corp. Institute of Technology)

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

[S15P-13] Estimation of surface seismograms at MeSO-net seismic stations

*Shigeki SENNA¹ (1. NIED)

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

[S15P-14] Attenuation Characteristics of Long-Period Ground Motion Inferred from the F-net Broad-Band Strong Ground Motion Records

*Ken HATAYAMA¹ (1. National Research Institute of Fire and Disaster)

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

[S15P-15] Estimated seismic intensity history for 26 years in Japan

*Hiromitsu NAKAMURA¹, Yoshinori IWANAMI² (1. NIED, 2. MESW)

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

[S15P-16] Strong-motion characteristics in western edge of the Kyoto basin for the 2022 southern part of Kyoto prefecture earthquakes

*Takashi AKAZAWA¹ (1. Geo-Research Institute)

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

[S15P-17] Construction of a low-cost indoor 3D model using a depth camera and machine learning and its application to seismic behavior simulation

*Yuta TAKAHASHI¹, Hiroki UEMATSU¹, Ahyi KIM¹, Toshiyuki MASATSUKI², Yoshinari NAKANISHI² (1. Yokohama City University, 2. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.)

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

[S15P-18] DAS observation of Mj6.6 earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan using optical fiber cable along railway

*Satoshi KATAKAMI¹, Shunta Noda¹, Masahiro Korenaga¹, Eiichiro Araki², Narumi Takahashi³, Naoyasu Iwata¹ (1. Seismic Data Analysis Laboratory, Center for Railway Earthquake Engineering Research, RTRI, 2.

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Seismic Waveform Generation by Conditional Generative Adversarial Networks and Spectral Inversion Analysis

*Junki Yamaguchi¹, Yusuke Tomozawa¹, Yasuhito Yoshida¹, Toshihide Saka¹, Ryo Hatano¹

1. Kajima Technical Research Institute

1. はじめに

近年の機械学習技術の発達により、地震動を模擬した時刻歴波形の生成が可能となっている。既往の研究では、条件付き敵対的生成ネットワーク(cGAN)による生成の検討がされており、例えばLiら(2020)や松本ら(2022)などがある。しかし、時刻歴波形の形状を再現する検討例はあるものの、振幅は基準化されており、振幅特性を再現した検討はない。一方、我々は、不確かさを考慮に入れた地震動評価への応用を目的として、cGANとスペクトルインバージョン解析(岩田・入倉(1986))を組合せ、経時特性と振幅特性にある確率分布をもった時刻歴波形群を生成することを目指したい。そこで本研究においては、振幅特性の再現に加えて観測記録に見られる経時特性と振幅特性のばらつきまで再現する手法を提案する。

2. 経時特性と振幅特性のモデル構築と時刻歴波形の生成方法

計算フローを図1に示す。経時特性のモデル構築に用いるcGANは、音声生成分野で検討が進められているConditional WaveGAN(Leeら(2018))を引用し、入力パラメータは、Mw、震源距離、観測点とする。観測点はカテゴリ変数として扱い、観測点固有の経験的特性を推定する。学習データセットには東北地方太平洋沖で発生したプレート間地震を用いる。F-netによるMwが7.0未満、震源距離300 km以下、P波初動から得られている記録を対象とし、図2、図3に示す1,295地震、144観測点の45,145記録を用いる。加速度波形は地震発生時刻を時刻0秒とする163.84秒間の波形に統一し、振幅を-1~1に基準化してcGANで学習させる。振幅特性の平均と標準偏差のモデル構築には、伝播経路特性、サイト特性、 ω^{-2} モデルの震源スペクトルを用いた経験的なモデルを想定している。伝播経路特性とサイト特性にはスペクトルインバージョン解析等を用いた地点固有の特性を反映する。

あるMw、距離における時刻歴波形群の出力では、cGANにより生成した波形に含まれる高次元の情報をそのまま用いるため、時刻歴波形の振幅方向に係数倍(スケールファクターを乗じる)のみ行うこととする。本研究では、観測記録に見られるばらつきまで含めて再現するため、cGANにより生成した波形群の中から、ターゲットスペクトルの平均と標準偏差を同時に満たす波形群を選定する。選定する波形群の各波形に独立に与えるスケールファクターと、波形群としてターゲットの分布形に適合する組み合わせは非常に多数になるが、この波形群の選定は、Baker and Lee (2018) を参考にし、フーリエ領域の検討用に修正したアルゴリズムを用いる。ただし、本検討では周期間相関は考慮していない。

3. ばらつきを有する時刻歴波形の生成例

まず、cGANを用いて経時特性の生成を行う。Mw 5.0、震源距離80 kmの条件で生成した観測点ごとの時刻歴波形の例を図4に示す。cGANでは振幅が基準化された波形が生成されるが、観測点によって波形形状に違いがみられる。同条件で100波生成し、そのフーリエ振幅スペクトルの平均を比較した結果を図5に示す。例えばFKSH19では3 Hz付近に1次卓越周波数があり、地表H/Vスペクトルのピーク周期とも対応することを別途確認しており、観測点ごとの特徴を有した経時特性が再現されている。

次に、振幅特性の再現を行う。Mw 5.0、 $f_c = 1.7$ Hzの ω^{-2} モデルの震源スペクトルと、友澤・引田

(2022)によるブロックインバージョン解析結果の不均質伝播経路特性と観測点ごとの経験的サイト増幅率を用いて設定する。さらに、ターゲットスペクトルに対する標準偏差として、ブロックインバージョン解析の標準偏差を用いる。FKSH19を例にターゲットスペクトルの平均と標準偏差を同時に満たす10波の波形群を出力した加速度時刻歴波形を図6に示す。出力された10波を見ると、最大振幅が倍半分程度のばらつきを持っており、経時特性にもばらつきがあることがわかる。出力した10波とターゲットスペクトルの平均と標準偏差の比較を図7に示す。フィッティング範囲とした1~10 Hzでは再現度が高いが、低周波数側では課題がある。

4. 今後の課題と展望

本研究ではプレート間地震のみを対象としていたが、その他の地震タイプへの拡張や、地震波の伝播方向に着目したモデルの高度化が考えられる。生成した時刻歴波形群は、波形合成法のグリーン関数や、広帯域震源モデルの要素地震にも活用することを考えている。

謝辞

防災科学技術研究所K-NET、KiK-netの観測記録とF-netのメカニズム解を活用させていただきました。記して感謝します。

参考文献

Yuanming Li, Bonhwa Ku, Shou Zhang, Jae-Kwang Ahn and Hanseok Ko(2020), Sensors 2020.
松本雄馬, 糸井達哉, 肥田剛典, 八百山太郎, 李尚元 (2022), 日本建築学会大会学術講演会.
岩田 知孝, 入倉 孝次郎(1986), 地震 第2輯.
Chae Young Lee, Anoop Toffy, Gue Jun Jung, Woo-Jin Han (2018), Computer Vision and Pattern Recognition.
友澤裕介, 引田智樹 (2022), 日本地震学会秋季大会（本大会）.
Baker, J. W., and Lee, C. (2018), Journal of Earthquake Engineering, 22(4).

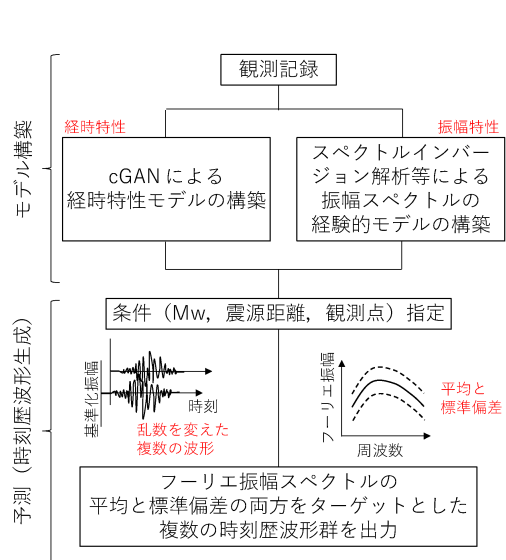


図1 計算フロー

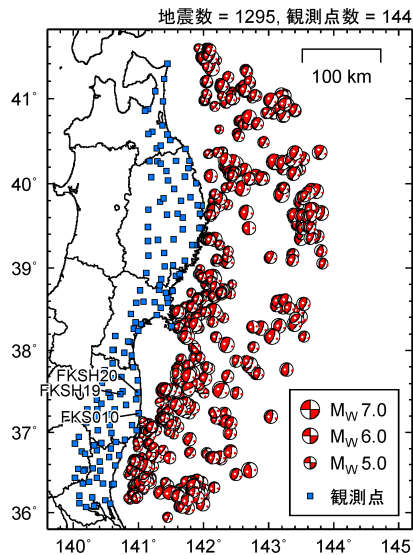
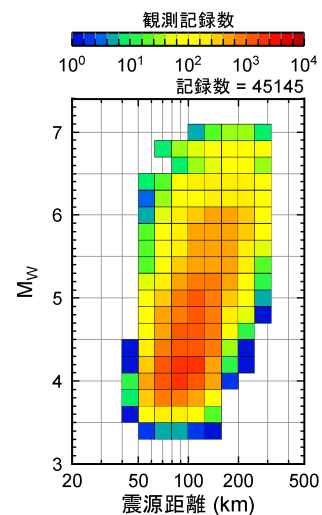
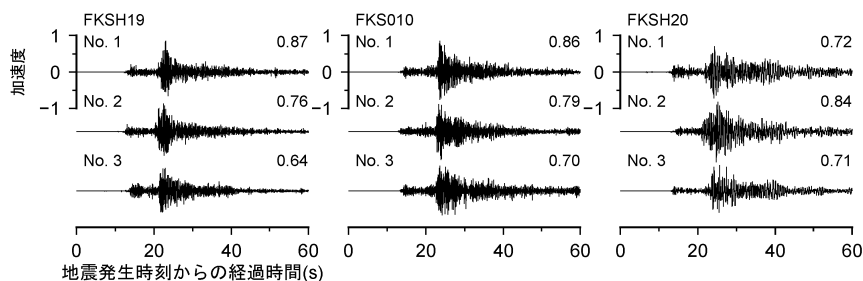
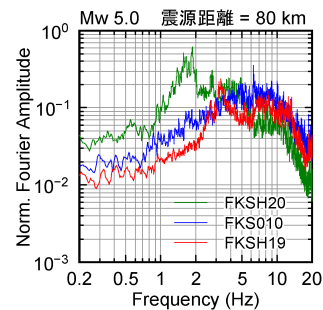
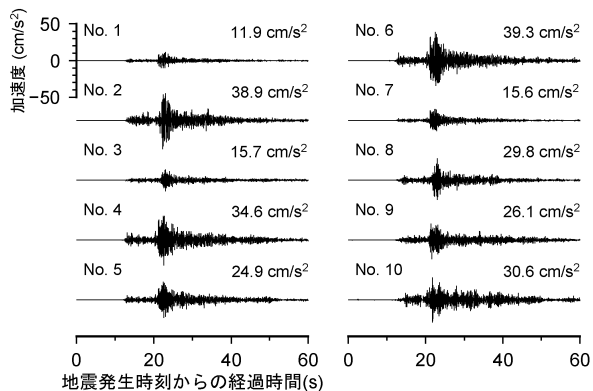
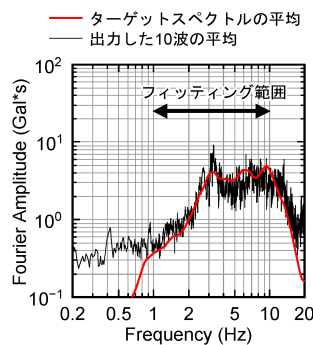
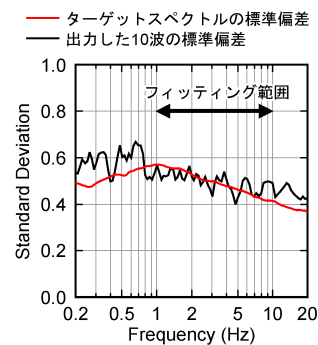


図2 解析に用いたデータセット

図3 データセットのM_w - 距離の分布図4 cGANにより M_w 5.0, 距離 80 km の条件で生成した観測点ごとの時刻歴波形の例図5 生成した時刻歴波形の
フーリエ振幅スペクトル図6 係数倍して出力した 10 波の時刻歴波形
(M_w 5.0, 距離 80 km, FKSH19)図7 出力した 10 波とターゲットスペクトルの
平均と標準偏差の比較 (M_w 5.0, 距離 80 km, FKSH19)

Application of Seismic Waveforms Created by Conditional Generative Adversarial Network to Inversion Analysis

*Yusuke Tomozawa¹, Tomoki Hikita¹, Junki Yamaguchi¹

1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

1. はじめに

条件付き敵対的生成ネットワーク (Conditional Generative Adversarial Networks; cGAN) とスペクトルインバージョン解析を組合せ、振幅特性と経時特性にある確率分布をもった時刻歴波形群を出力する手法の検討を進めている (山口・他, 本大会)。本報告では、この新しい提案手法に基づき生成した時刻歴波形の妥当性の確認の一つとして、生成した時刻歴波形群を用いて、観測記録を再現する破壊開始点の推定を行った。

2. 推定手法

観測点ごとの経験的特徴を反映した時刻歴波形群の生成は山口・他 (本大会) の手法を用い、観測点ごとの経験的地盤増幅率と、伝播経路特性の不均質Q値は友澤・引田 (本大会) の結果を用いた。インバージョン手法については、エンベロープインバージョン (Nakahara et al., 1998) 等の先行研究があるが、本検討では生成した時刻歴波形の妥当性の確認を主目的とし、以下のような簡易な逆問題を検討した。誤差関数は、加速度波形の全パワーで正規化された累積パワー曲線Pc (Husidプロット) の観測と計算の差で定義した。Mw等の震源特性を表すパラメータは、F-netの値や仮定した値で固定し、波形の経時特性を用いて破壊開始点の位置と破壊開始時刻の推定を行った。震源パラメータの推定は今後の課題である。

3. 解析結果

例題1として、2018年10月22日19時47分頃に福島県沖で発生したM_J 5.0, M_w 5.0 (F-net) の地震の破壊開始点を推定した。推定に用いた観測点分布と解の探索範囲を図1に示す。図中の16ポイントの中から最小誤差となる解をグリッドサーチで推定した。破壊開始点の推定結果は図1に併せて記しており、JMAカタログによる震央位置と整合した。Pcの比較を図2に示す。計算によるPcは、出力した30波の中央値と四分位範囲を示している。P波とS波の到達時刻は、精度よく推定できている。加速度波形の比較を図3に示す。計算による加速度波形はPcの中央値に最も近いサンプルを示している。主要動区間やコーダ部分の振幅に違いがある地点もあるが、時刻歴波形の形状は概ね再現できている。

例題2として、2011年9月17日に岩手県沖で2地震が近接して発生した例を検討する。16時33分54秒頃に1つ目の地震が発生し (M_J 5.5, F-netのM_wなし), その約22秒後の16時34分16秒頃に2つ目の地震が発生した (M_J 5.8, F-netのM_w 5.9)。K-NET, KiK-netの観測記録では、この2地震が1ファイルに収録されている。解の探索範囲と観測点分布を図4に示す。未知パラメータの数は、地震1と2の破壊開始点と2地震の時間差の3つである。1つ目の地震の破壊開始点は、JMAカタログと整合するが、2つ目の地震の破壊開始時刻は、JMAカタログよりやや早い1つ目の地震の20秒後、破壊開始点はやや沖合に推定された。Pcの比較と時刻歴波形の比較を図5, 図6に示す。1つ目の地震のP波とS波の到達時刻と、2つ目の地震のS波区間は、概ね観測記録と整合し、検討対象とした地震規模の範囲では、空間分解能や時間分解能を有することが確認された。今後は、振幅情報も併せたインバージョンの検討や、震源特性の推定の可能性についても検討する。

謝辞

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

参考文献

Nakahara et al. (1998), JGR, Vol. 103, pp. 855-867. 友澤・引田 (2022), SSJ秋季大会 (本大会). 山口・他 (2022), SSJ秋季大会 (本大会).

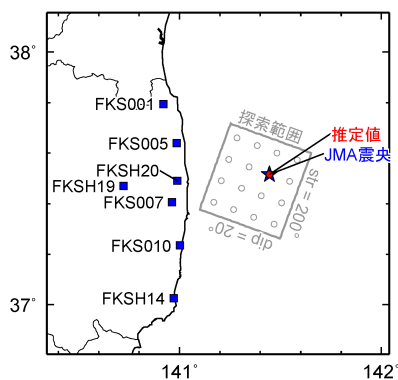


図 1 解の探索範囲と観測点分布

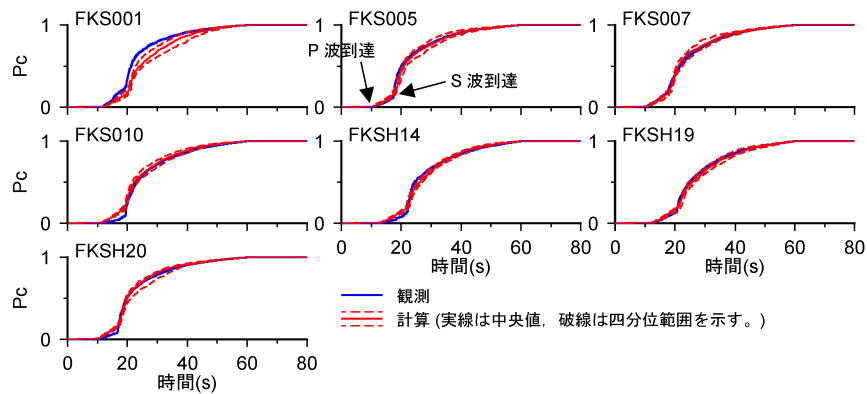


図 2 累積パワー曲線 Pc の比較

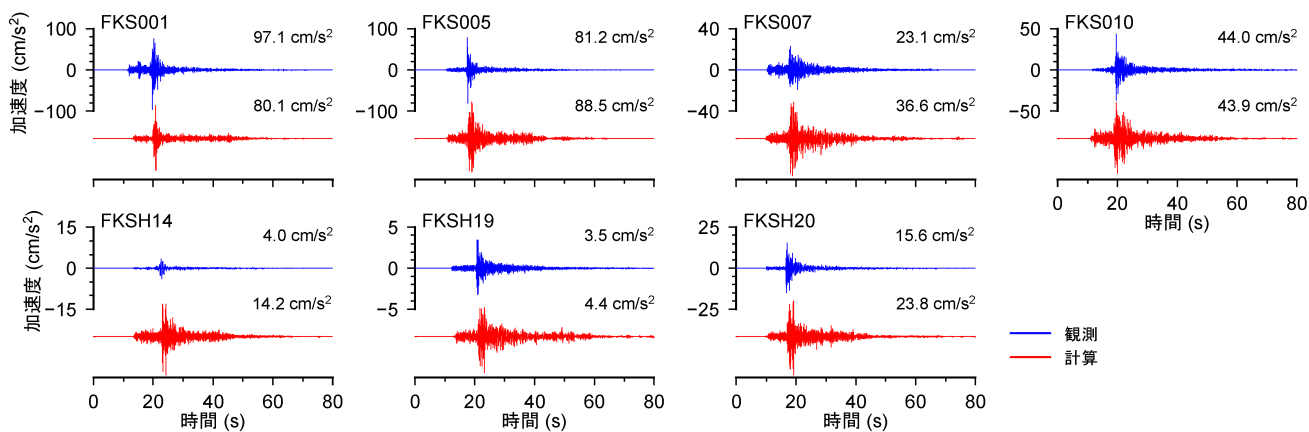


図 3 波形の比較

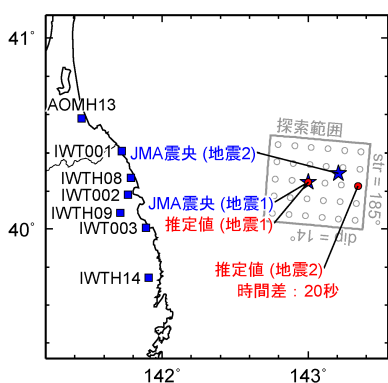


図 4 解の探索範囲と観測点分布

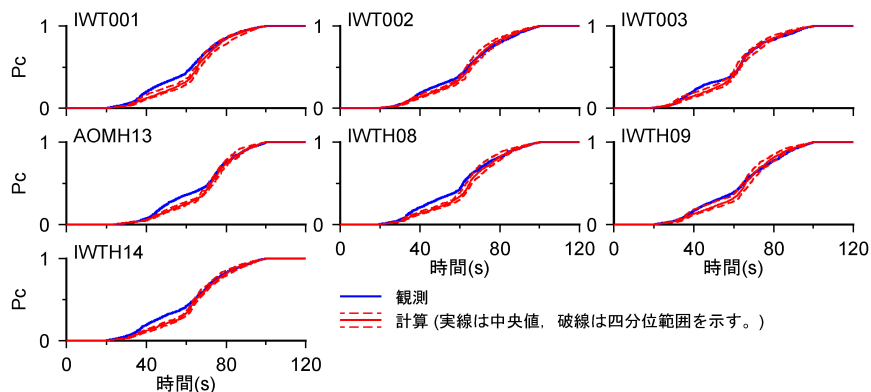


図 5 累積パワー曲線 Pc の比較

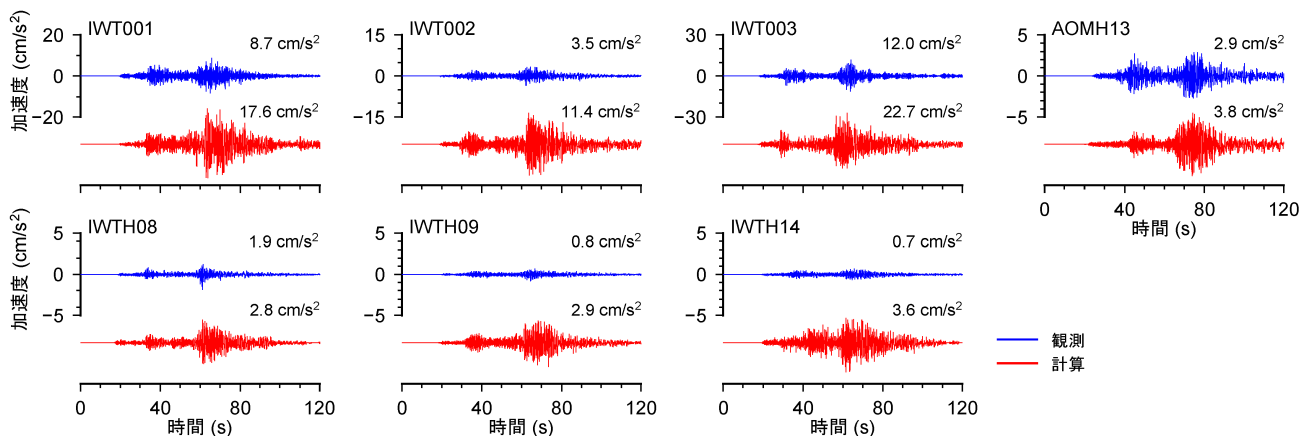


図 6 波形の比較

Estimation of source radiation energy using synthesized seismogram envelopes considering heterogeneous subsurface structure

*Masashi OGISO¹

1. Meteorological Research Institute

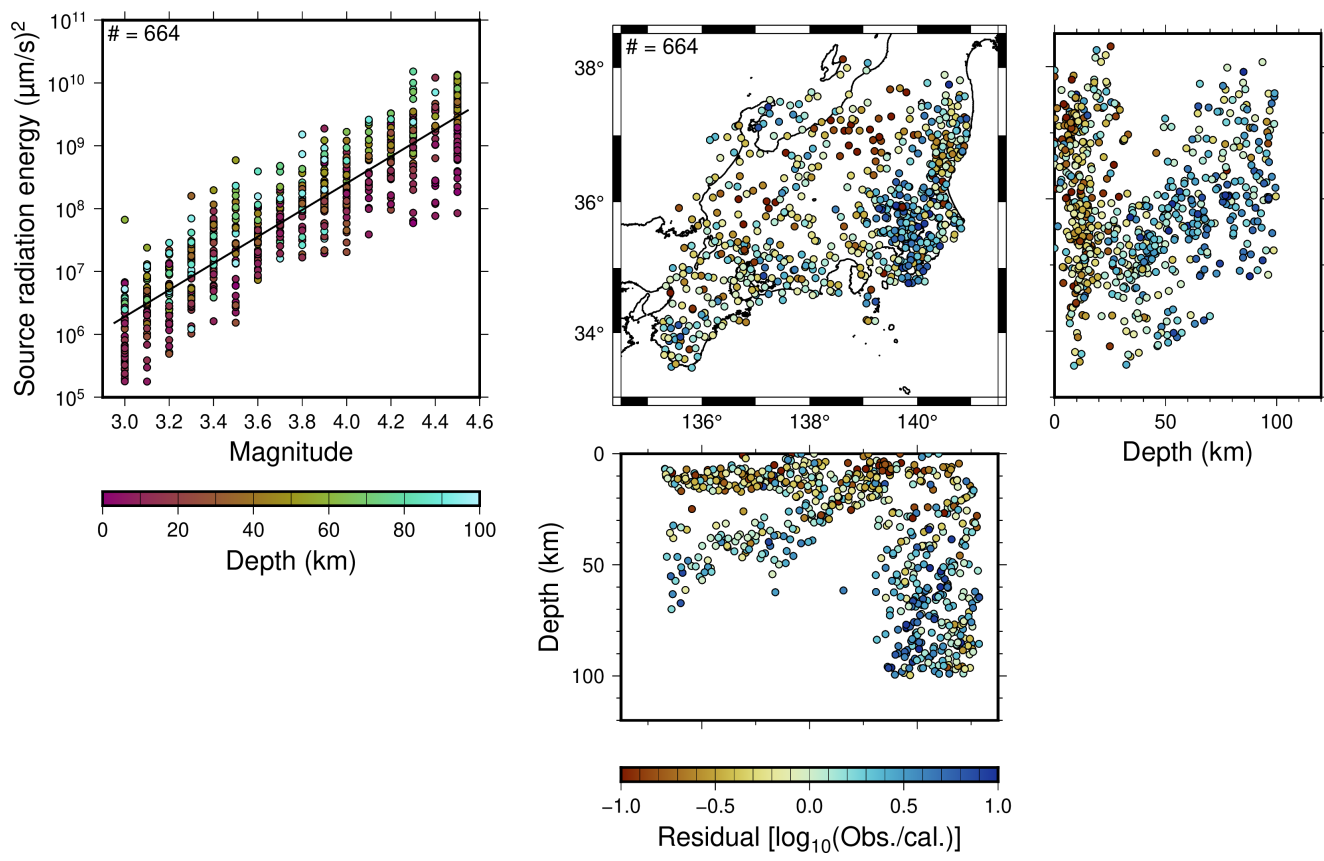
地震の発震時刻からある一定の時間が経過したのちの波動場は主に広角散乱波(コーダ波)から構成され、その地震波振幅は伝播特性の影響が小さく、主に震源特性とサイト特性に依存すると仮定されてきた。この性質を活用して、コーダ波を利用した震源特性やサイト特性の推定が数多くなされている。一方、近年の地震観測網の充実に伴い、日本列島周辺では地震波速度構造のみならず、地震波減衰構造や散乱構造の3次元不均質性が明らかになってきた。震源特性やサイト特性を推定する対象領域が狭い場合は伝播特性がコーダ波振幅に与える影響が小さいという仮定は妥当であるが、対象領域が広くなると伝播特性の影響は無視できない可能性がある。本研究では、関東・中部地方で発生したM3.0~4.5、深さ100km以浅の地震の震源放射エネルギー(1-2及び2-4Hz)を、不均質構造を考慮した合成エンベロープを用いて推定した。

関東・中部地方のHi-net観測点で観測された地震波形にバンドパスフィルタをかけ、3成分を合成してMSエンベロープを作成した。一方、輻射伝達理論に基づくモンテカルロ法を用いてエンベロープを合成した。速度構造は全国一次地下構造モデルの地震波速度を水平方向0.1度、深さ方向5kmでサンプリングし、線形補間したものを使用した。指数関数型のランダム媒質を仮定し、相関距離は1kmに固定したうえでS波到達時から80秒間のTime Windowにおける観測エンベロープの形状を最もよく説明する内部減衰と速度揺らぎのパラメータを探索した。この結果、各観測エンベロープごとに震源項とサイト特性項の積の値が得られるので、サイト特性に拘束条件をかけてこれらを分離した。

こうして得られた震源項の大きさとマグニチュードを比較したところ、マグニチュードが同一であっても震源深さが深い地震のほうが震源項の大きさが大きい傾向がみられた。この特徴は直達波のスペクトルを用いた解析(例えば中村、2009)と同様であり、本研究で得られた震源項がさらなる詳細な解析に活用可能であることを示唆している。今後は震源項の地域特性を詳細に検討する予定である。

本研究は防災科研Hi-net(<https://doi.org/10.17598/NIED.0003>)における観測記録を使用しました。また、JSPS科研費JP18K13622及びJP21K14002の助成を受けています。

(図: 1-2Hzの帯域における、マグニチュードと震源項の大きさの散布図、及び回帰直線からの偏差の空間分布)



Effect of seismogenic zone on hierarchy patch source model

*Hiroyuki Goto¹

1. Kyoto University

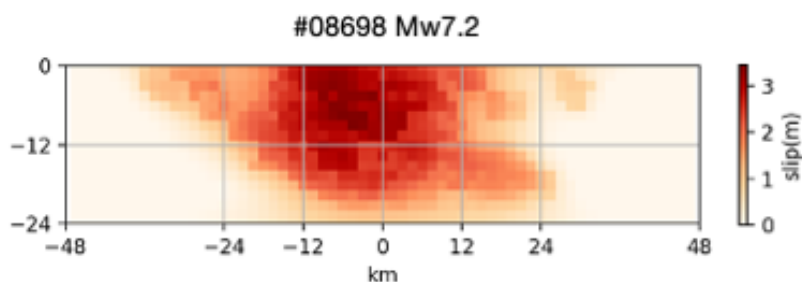
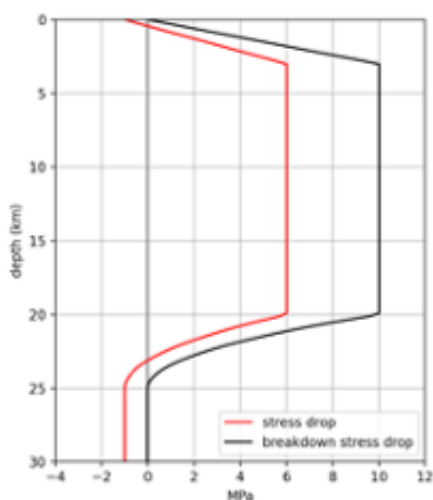
地震断層の破壊プロセスや生成される地震動について論じるとき、地表（自由表面）の存在を力学的条件として考慮することは重要である（Somerville, 2003; Pitarka et al., 2009; Wada and Goto, 2012; Yin and Denolle, 2021）。例えば、2016年熊本地震の本震で観測された断層近傍の特徴的な強震波形は、破壊プロセスと地表との相互作用により説明することができる（Kaneko and Goto, 2022）。一方、地表の影響を論じる場合には地震発生層の存在、すなわち地震発生層以浅や以深における応力降下量分布などの影響も無視することはできない。これまで階層パッチ構造を持つ震源モデルによる地表の影響について論じてきたが（後藤, JPGU, 2022）、本研究では、地震発生層を考慮してその影響について論じる。

地表等の影響が少ない理想的な地震（Ideal Quake）を基に、動力学震源モデルの力学的条件として地表および地震発生層を加えて影響を考察する。本研究におけるIdeal Quakeには、従来と同様に階層パッチ構造を持つ震源モデル（Ide and Aochi, 2005; Ide 2014）を採用する。地震に関するスケーリング（GR則、 M - τ 関係、オメガスクエア）が再現されるようパラメータを調整した上で、鉛直横ずれ断層型の多数の震源モデルを生成して特徴を論じた。最大すべり点と地表とですべり速度関数の形状が異なることや、断層長さに関するスケーリングとの対応等、いくつかの特徴を自然に説明できることが示される。一方、すべり速度のライズタイムが地表付近で伸びる現象は認められにくい傾向にある。Kaneko and Goto (2022)によって指摘されたように、速度構造の影響を考慮することが重要である可能性がある。

参考文献

Kaneko and Goto (2022) The origin of large, long-period near-fault ground velocities during surface-breaking strike-slip earthquakes. GRL. doi:10.1029/2022GL098029

後藤浩之（2022）階層パッチ構造を持つ震源モデルにより生成される地表断層地震の特性, JPGU2022, SSS10-04



Source model of the 2022 off Fukushima prefecture earthquake by the isochrone back-projection and empirical Green's function methods

*Toshimi SATOH¹

1. Shimizu Corporation

本研究では、S波部のエンベロープを用いたバックプロジェクション法によりブライトネス(強度)が大きい領域を推定することにより強震動生成域の位置の範囲を限定後、経験的グリーン関数に基づくグリッドサーチにより、2022年福島県沖の地震(MJ7.4)の広帯域震源モデルを構築した。

Pulido et al.(2008)は、近地の変位波形を対象としたFesta and Zollo(2006)のアイソクロンバックプロジェクション法をP波部の速度波形のエンベロープに拡張し、2007年能登半島沖地震に適用している。本研究では、これに以下の改良を加えた。ひとつめは、地盤増幅特性の補正である。本震の記録を近傍の中規模地震の記録でdeconvolutionした。また、震源近傍では地盤の非線形性の影響がみられるが、これらの記録を除くと震源近傍の観測点数が激減するため、本震と中規模地震のH/Vの比でも補正も行った。ふたつめは、Pludo et al.では、1次元地下構造モデルに基づく理論伝播時間と近傍の中規模地震の観測伝播時間との差を補正係数としているが、伝播時間の観測点補正を震源近傍の中規模地震のS波の伝播速度を用いて行うことである。2021年福島県沖の地震(MJ7.3)の経験的グリーン関数法による強震動生成域の推定(佐藤、2022)において、この考え方で ± 0.3 秒の範囲で速度波形の伝播時間を説明できていることから、0.5秒の時間ウィンドーで平滑化したエンベロープの補正には問題ないと考えた。

検討には、震源距離130km以下のS-net、K-net、KiK-net地中の水平成分の加速度波形の3~10Hzのエンベロープの2乗値を用いた。F-netのMT解に基づき断層面を設定し、気象庁の震源位置からの同心円状破壊を仮定し、破壊伝播速度を2.0km/sから3.0km/sを0.1刻みで仮定した11ケースで計算した。また、既往の研究と同様に、最初に得られたブライトネスを初期値として繰り返しを行い、断層面のブライトネスの総和を計算した。その結果、2回の繰返しで強度の総和はほぼ収束し、断層の北側浅部の2か所と、気象庁の震源の深さよりやや深い北側の1か所でブライトネスが明らかに大きい領域がみられた。また、ブライトネスの総和が最大となった破壊伝播速度は2.3km/sであった。本震記録の分析から、破壊開始点近傍に寄与は小さいものの強震動生成域があると考えられたため、ブライトネスが大きい3か所近傍と破壊開始点近傍の計4か所周辺に強震動生成域を設定し、経験的グリーン関数法(Dan et al., 1989)に基づくグリッドサーチで広帯域震源モデルを推定した。しかし、南側の観測点の最初の大きな振幅が説明できなかったため南側深部にも強震動生成域を設定し、再度、広帯域震源モデルを推定した。要素地震は、2022年3月19日の地震(MJ5.0)と2022年4月6日の地震(MJ5.2)である。S-netの7観測点、KiK-net地中の9観測点の加速度波形のエンベロープと速度波形を用いた。推定された南側深部の強震動生成域近傍はブライトネスは小さいものの、ブライトネスの変動係数が大きい領域であった。これは、S-net観測点も用いているものの陸域の観測点に比べてデータが少ないことが原因と考えられる。破壊開始点付近の深部の強震動生成域とこの南側深部の強震動生成域は、面積は他の3つの強震動生成域より大きいが応力降下量は小さかった。この2つの深部の強震動生成域は、2021年福島県沖の地震(MJ7.3)の破壊開始点付近の深部の強震動生成域の直下付近にある。応力降下量が一番大きかったのは北側深部の強震動生成域であった。また、北側浅部の2つの強震動生成域が、宮城県の大震災の大部分に寄与していることがわかった。この2つの浅部の強震動生成域は海洋性地殻内、他の3つの強震動生成域はマントルに位置している。2021年福島県沖の地震でも、1つの浅部の強震動生成域は海洋性地殻内にあり、応力降下量が相対的に小さく面積が大きい破壊開始点付近の強震動生成域と応力降下量が大きい南側の深部の強震動生成域はマントルに位置しているなど、両地震には類似の特徴がみられた。なお、破壊伝播速度は、バックプロジェクションによる最適値である2.3km/sと $2.3\text{km} \pm 0.1\text{km/s}$ の3ケースで計算した結果、2.3km/sのケースが最適となり、2021年福島県沖地震で推定された2.4km/sに近い値が得られた。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net、S-net、F-net、気象庁の一元化震源情報を用いました。

Re-examination of source rupture process of the 2002 Denali, Alaska, earthquake (M_w 7.9) based on strong-motion waveforms and fault displacements

*Yujia GUO¹, Kunikazu Yoshida¹, Ken Miyakoshi^{1,2}

1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

2016年熊本地震 (M_w 7.1) をきっかけに、地表地震断層を伴う内陸地殻内地震に対する浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルの設定が喫緊の検討課題となっている。このうち、浅部断層破壊を伴う震源断層の長さがきわめて長い地震に関しては、これまで発生数が比較的少なく、観測データを用いた研究事例も少ないことから、特性化震源モデルの設定手法が確立の途上にある。本研究は、浅部断層破壊を伴う長大断層地震に対する特性化震源モデルの設定手法の高度化へ向けた知見を蓄積することを目的として、長さ300 km以上に及ぶ地表地震断層が出現した2002年11月3日米国アラスカ州Denali横ずれ型内陸地殻内地震 (M_w 7.9) を対象に、震源過程解析を行い、震源特性を検討する。

震源過程解析は、10観測点の強震波形の長周期 (2-20秒) 成分を用いて、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法 (Hartzell and Heaton, 1983) により行った。震源近傍の観測データをより良く再現し、震源断層上のすべり量を精度良く評価するため、地表地震断層にできるだけ沿うように走向角が場所ごとに異なる曲面断層面 (長さ330.4 km, 幅18.9 km) を設定するとともに、解析に使用する速度構造モデル (Frankel, 2004; Eberhart-Phillips *et al.*, 2020) をM4クラスの小地震の波形記録を用いて検証し調整した。速度構造モデルの調整はYoshida *et al.* (2017) に準拠した手順で行い、理論波形は一次元水平成層構造を仮定し、離散化波数法 (Bouchon, 1981) および反射・透過係数行列法 (Kennett and Kerry, 1979) で計算した。また、この地震の断層全体の平均的な破壊伝播速度は震源域の媒質のS波速度 (3.5 km/s) を超えていないものの、部分的にはS波速度を上回るsupershearを起こす破壊領域が存在したとされる (e.g., Frankel, 2004; Asano *et al.*, 2005)。これを踏まえ、破壊伝播速度が場所によって変わりうることへの対応として、活断層調査の情報 (Plafker *et al.*, 1994) を参考に設定断層面を4個のセグメント (西側から, Susitna Glacier, Denali西, Denali東, Totschundaセグメントと呼ぶ) に分割し、セグメントごとに異なる破壊フロントの伝播速度を許容した。しかしながら、この地震の震源域の東側半分では断層近傍の強震観測点が少なく、強震観測点だけですべてのセグメントでの伝播速度を精度良く推定するのは困難であった。そこで、波形インバージョンで得られた断層浅部のすべり分布を地表踏査 (Haeussler *et al.*, 2004) による地表地震断層の永久変位量やその分布と比較し、最終的なすべり分布および伝播速度を試行錯誤的に推定した。

得られた震源モデルによる地震モーメントは 9.15×10^{20} Nm (M_w 7.9) であった。主たるすべりはDenali西および東の両セグメントに分布し、その最大すべり量は10 mを超える。すべり分布に対してSomerville *et al.* (1999) の規範を適用したところ、断層面積は6245 km²、平均すべり量は4.7 mとなった。この地震は3ステージ震源スケリング則の第3ステージ (Murotani *et al.*, 2015 ; 地震本部, 2020) の地震であるが、得られた断層面積はスケリング則に比べてやや小さく、平均すべり量は約1.6倍と大きかった。本研究に限らず、Asano *et al.* (2005) の震源過程解析も4 m以上の平均すべり量を推定しており、今後、第3ステージ地震の震源特性に関する知見をさらに蓄積していくことが重要であると考えられる。次に、同じくSomerville *et al.* (1999) の規範を適用し、断層面上の大すべり域 (アスぺリティ) を抽出した。このうち、抽出された地震発生層以浅の大すべり域 (Long-period Motion Generation Area: e.g., Irikura *et al.*, 2020) の平均すべり量は8.7 mであり、これは断層全体の平均すべり量の約2倍程度、地表地震断層の変位量の最大値 (~9 m) と同程度の値であった。

Denali東セグメントでは、破壊伝播速度を変えた試行錯誤の結果、破壊伝播速度が4.7

km/s (supershear ; S波速度の135%) のときのすべり分布が地表地震断層の変位量に対する再現度がもっとも良かった。既往研究 (Dunham and Archuleta, 2004; Frankel, 2004; Walker and Shearer, 2009; Zeng *et al.*, 2022) で報告されているsupershear破壊の伝播速度は5.0-5.5 km/s程度で、本研究による値はそれらに比べて若干遅い。この地震に限らず、1999年トルコIzmit地震 (M_w 7.6) や2001年中国西部Kunlun地震 (M_w 7.8) など、近年の他の長大な横ずれ型断層の地震でもsupershear破壊の報告事例がある (e.g., Bouchon *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2016)。今後、supershear破壊が長大な横ずれ型断層の地震に共通する地震特性であるかどうか検討を進めていくことが重要である。

謝辞 : COSMOS Virtual Data Center

(<https://www.strongmotioncenter.org/vdc/scripts/event.plx?evt=814>) およびIRIS Data Management Center (http://ds.iris.edu/wilber3/find_event) の波形記録を使用した。本研究は原子力規制庁の委託業務「令和3年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業」による成果の一部である。

Near-Field Ground Motion Simulation based on Depth-Dependent Stress Accumulation Model I, Interpretation of the 2019 Mw4.9 Le Teil earthquake

*Hideo AOCHI^{1,2}, Kenichi Tsuda³, Shohei Yoshida⁴

1. BRGM, 2. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. Institute of Technology Shimizu Corporation, 4. Ohsaki Research Institute Inc.

The earthquake rupture process is complex and heterogeneous related to the stress field and frictional condition in a fault system. The lateral heterogeneity is often discussed in relation to the fault geometry and past history. The depth variation of frictional rheological behaviour depending mainly on the temperature is well known, and this has been applied on modelling of characteristic earthquakes. However, many moderate earthquakes ruptured not the entire seismogenic zone depth but only a limited range of depth. The 2019 Mw4.9 Le Teil (France) earthquake showed a surface rupture along the known fault trace, and the ruptured area is limited in the first 2 km at most from the inversion results (e.g. Delouis et al., 2019; Ritz et al., 2020). From the viewpoint of seismic hazard assessment, it is a crucial question why this earthquake occurred in such unexpected, limited depth range. Previously, Aochi and Tsuda (in revision, 2022) constructed the on-fault stress field, which is loaded on the layers' rigidity. For the case of Le Teil earthquake, there is a stiff layer of high rigidity at the depths between 600 m and 1200 m according to the seismic inversion. We could interpret that this layer is only enough loaded by compressional principal stresses. The numerical simulation demonstrated that the lateral extension of the rupture at depth layer triggered the shallow part of the fault unfavourably loaded, but not the deeper part. In this study, we focus on the fact that the shallow part is ruptured with a delay, and this should be important in near-field ground motions. The variation in ground motion becomes smaller in the very near-field (Figure 1), as a strong directivity effect along dip disappears. It will be a further topic to establish the mechanical model of stress loading in slow deformation area, but our simple assumption allows to guess the probable stress field along the fault dip.

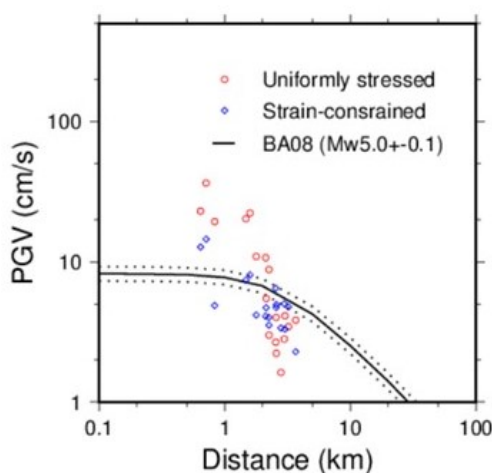


Figure1 (a) The comparison of the Peak Ground Velocity (1 component) in the randomly distributed receivers around the M4.9 earthquake model. The blue diamonds shows the model having the stress constrained by layer's rigidity, comparing to the model assuming the uniformly loaded plotted by red circles. The solid line shows an expected level from BA08 with a standard deviation by dotted lines.

Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: A Study on the strong motion generation area in the northern Tokyo Bay

*Tetsushi WATANABE¹, Fumino SUZUKI¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹

1. Kobori Research Complex

1. はじめに

鈴木ほか（2022）では、1923年関東地震の震度インバージョン解析による短周期エネルギー分布（神田・加藤，2019）を用いて、6つの強震動生成域（SMGA）から成る断層モデルを構築した。図1に示すように、震度を説明するSMGAは既往の波形インバージョン（例えば、Sato et al., 2005）によるすべりの周辺にあるものが多いが、東京湾北部のSMGA（SMGA5）は外れた位置にある。そこで本報では、震度や地震動への影響の観点から東京湾北部のSMGAについて考察する。

2. 震度インバージョンへの影響

神田・加藤（2019）で設定された断層面は東京湾北部を含むが、既往の波形インバージョンの断層面は東京湾北部を含まない。そこで、東京湾北部を含まないように断層面を南部に限定して震度インバージョン解析を実施した。震度の評価誤差は神田・加藤（2019）よりも大きく、加えて短周期エネルギー分布は歪んでおり、精度が得られなかった。震度の再現性の観点からは東京湾北部まで断層面を設定する必要があると考えられる。

3. 短周期地震動への影響

次に、鈴木ほか（2022）で震度を評価した統計的グリーン関数法による短周期地震動について、各SMGAの寄与を検討した。K-NET横浜（KNG002）では三浦半島のSMGA（SMGA3）の寄与が最も大きく、東京湾北部のSMGAの寄与は小さかった。一方、東京湾北部付近のK-NET篠崎（TKY025）では東京湾北部のSMGAの寄与が最も大きかった。東京の短周期地震動の評価においては東京湾北部のSMGAが必要であると考えられる。

4. 長周期地震動への影響

最後に、東京湾北部のSMGAの有無による長周期地震動（周期2～5秒）の違いを三次元差分法で検討した。断層モデルは鈴木ほか（2022）と同じであり、SMGAと同じ位置から長周期地震動が励起されると仮定した。地盤モデルの設定と検証については渡辺・加藤（2016）に示している。短周期地震動とは異なりK-NET横浜とK-NET篠崎で共通の傾向を示し、どちらの地点でも長周期地震動は東京湾北部のSMGAの有無で殆ど変わらなかった。より広域の今村式強震観測点の本郷、仙台、高田、岐阜でも同様の傾向が認められた。観測記録（横田ほか（1989）、武村ほか（1995）、武村・野澤（1996）、武村ほか（1994））と比較すると、本郷、仙台、高田で概ね同程度、岐阜でやや過小であった。

5. まとめ

1923年関東地震の震度の再現や短周期地震動の評価を行うためには東京湾北部のSMGAが必要であるが、このSMGAが既往の波形インバージョンで見られないのは長周期地震動への感度が小さく観測記録の再現性に影響しないためと考えられる。

参考文献

鈴木文乃，渡辺哲史，加藤研一，神田克久：1923年関東地震の強震動シミュレーション：断層モデルの再構築と詳細震度分布の推定，日本地震学会秋季大会，2022。
神田克久，加藤研一：震度インバージョン解析による首都直下の歴史地震の強震動生成域と短周期レベル，日

本地震工学会論文集，第19巻，第6号（特集号），91-104，2019.

Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, S. Harder: Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, 309, 462-464, 2005.

渡辺哲史，加藤研一：1923年関東地震のSMGAモデルに基づく日本各地の長周期地震動の再現，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，1149-1150，2016.

横田治彦，片岡俊一，田中貞二，吉沢静代：1923年関東地震のやや長周期地震動 今村式2倍強震計記録による推定，日本建築学会構造系論文報告集，第401号，35-45，1989.

武村雅之，工藤一嘉，野澤貴，佐藤俊明，片岡俊一：東北帝国大学向山観象所(仙台)で観測された1923年関東地震の本震・余震の記録，地震2，第48巻，297-306，1995.

武村雅之，野澤貴：高田測候所で観測された1923年関東地震の本震・余震の記録，地震2，第49巻，91-100，1996.

武村雅之，池浦友則，工藤一嘉，大沼啓人：岐阜測候所で観測された1923年関東地震の本震・余震の記録，地震2，第47巻，193-200，1994.

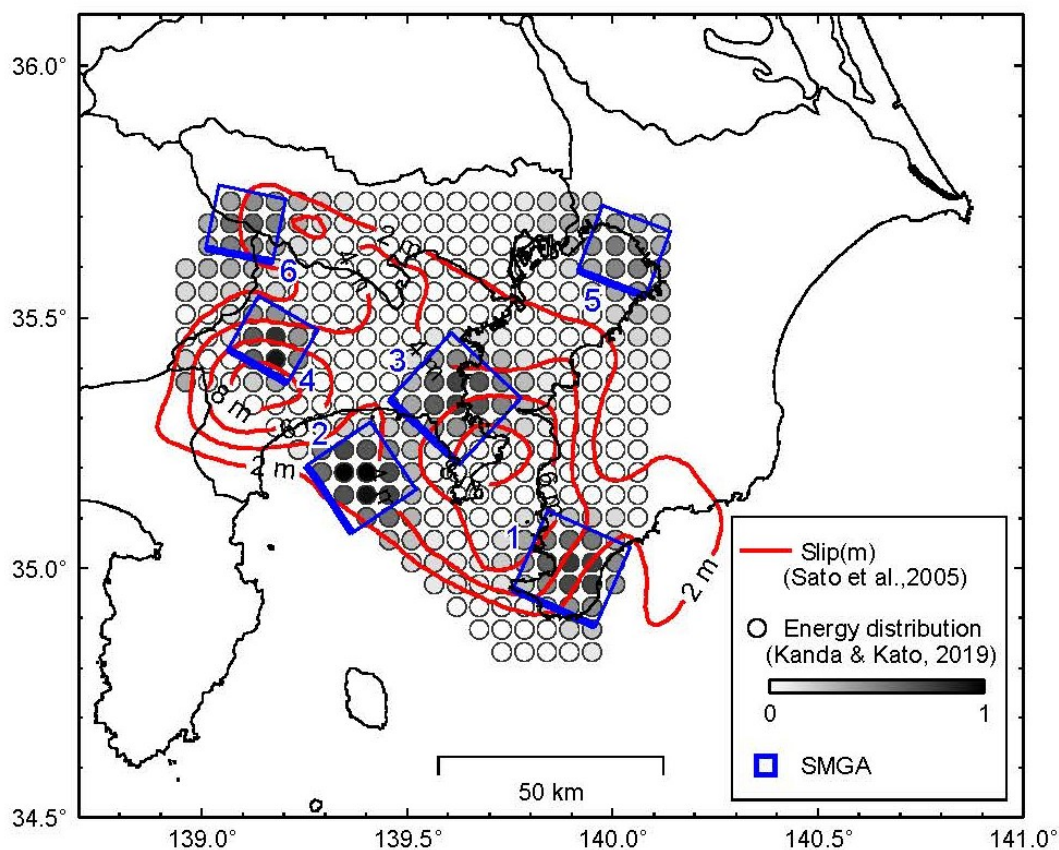


図1 1923年関東地震の震度インバージョン解析による短周期エネルギー分布（神田・加藤，2019），SMGAモデル（鈴木ほか，2022），既往の波形インバージョンによるすべり分布（Sato et al. (2005)）を参考に作図）

Long-period ground motion simulations in the western part of Shizuoka prefecture for large earthquakes in the Nankai trough

*Takeshi NAKAMURA¹

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

本研究では、南海トラフで繰り返し発生している大地震について、海域の3次元地下構造や海水層、海底地形を含む構造モデルを用いて、静岡県西部地方をターゲットにした長周期地震動のシミュレーションを実施した。静岡県西部は、牧之原台地から西方の遠州灘沿岸部で低地が続く、浜名湖から天竜川河口付近にかけて広がる浜松平野においては高さ100 m超の高層建築物が複数立地する。1944年東南海地震では、紀伊半島南部の破壊開始点から断層面上で破壊フロントが伝播する方向にあたり、また、それと平行して海洋堆積層がトラフ軸に沿って広がる方向に位置し、伝播経路上の堆積層で生成、増幅した表面波の伝播が予想される場所である。断層面上のすべり分布の不均質性が大きく破壊様式が多様な大地震の断層震源に対し、本研究では多数の震源モデルを用いてシミュレーションを行い、モデルの不確実性による振幅のばらつきを含めた評価を行った。

多数の震源モデルに対してシミュレーションを効率的に行うため、本研究では相反定理を用いて総計算量を削減した。観測点は防災科学技術研究所によるKiK-net SZOH28（浜松市）を対象とし、波形合成で必要となるグリーン関数の計算では、Nakamura et al. (2012)による3次元差分法を用いた。地下構造についてはJ-SHIS（藤原・他, 2012）および仲西・他（2021）等のモデル、陸上および海底地形についてはGEBCOによる15秒メッシュデータを用いた。震源モデルについては、Murphy et al. (2016)による手法に倣い、基準とする断層震源モデル（Ichinose et al., 2003; Kikuchi et al., 2003）のすべり量分布を確率密度関数として、マルチスケールの円形クラックを確率密度関数に従って配置した派生的なすべり分布モデルを50個準備した。各すべり分布モデルに対し、破壊伝播速度や破壊開始点などのパラメータを変えながら長周期帯（5秒以上）の波形振幅値を求めた。発表では、震源の各パラメータの不確実性が振幅のばらつきに与える影響や使用する構造モデルの違いによる波形振幅への影響について報告する。なお、本研究は、科研費19H01982の助成を受けたものである。

Simultaneous estimation of source, path, and site spectra from the S-net strong-motion records in the Japan Trench area

*Yadab Prasad Dhakal¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Hiroaki Yamanaka²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokyo Institute of Technology

We analyzed the strong-motion data recorded by S-net, which is a seafloor network of 150 observatories with seismometers and pressure gauges, covering the whole of the Japan Trench and the southern part of the Kurile Trench. The network has been in operation since 2016 (Aoi et al. 2020). The spectral inversion technique was used to separate the source, path, and site spectra from the strong-motion records in the least-square sense. To reduce the effect of the trade-off between the source and site terms in the inversion, theoretical site amplification factors estimated at two KiK-net stations were used. Strong-motion records with high S/N ratios from about 600 earthquakes having magnitudes between 3.5 and 7.0, and focal depths < 70 km, were used. Magnitude-dependent S-wave time windows of lengths 8 to 20 s were used, and zeroes were padded to compute the Fourier spectra with uniform frequencies. To avoid nonlinear site response and contamination of the records by rotations during strong motions, records having vector peak accelerations < 50 gals were only used. In our previous study (Dhakal et al. 2022), we determined the source, path, and site spectra from the mean spectra of two horizontal components. In the present study, we obtained the results from the single horizontal-component records aligned parallel to the long axes of the sensor houses, the cylindrical pressure vessels. Records from a few KiK-net stations, where site amplification factors were estimated reasonably well from surface and borehole records, were also employed in the spectral inversion to check whether the site amplification factors from the inversion were acceptable. We obtained the following results from the analysis. The obtained site spectra at the selected KiK-net sites matched well with the empirical site amplification factors derived at the sites based on the surface-to-borehole spectral ratios of the observed records. The path-averaged quality factors for the S wave were generally comparable with those reported in the previous studies. The source spectra obtained using the single horizontal component records (X components) and two horizontal component records were essentially the same. We fitted the source spectra with the omega-square source model by searching the corner frequency and flat level of the source spectra. From the flat levels of the source spectra, seismic moments and then moment magnitudes were estimated. We found that the estimated magnitudes generally matched well with the F-net catalog magnitudes. Also, the Brune-type stress drops varied with tectonic types and increased with focal depths, consistent with the previous studies using global and regional datasets (e.g., Allmann and Shearer 2009; Nakano et al. 2015). At several S-net sites close to the coast, the site factors were comparable to the theoretical amplification factors computed from the J-SHIS subsurface model. Even though the site factors estimated using the X-component records only and the two horizontal components were largely similar, they were different at many unburied sites at certain frequencies over about 4 Hz. Spurious site spectra, related to the resonance of the cylindrical pressure vessels, were present when using the two horizontal components (Sawazaki and Nakamura 2020). The spurious spectra between about 4 and 10 Hz, which were mainly from the Y components, were subdued when using the X-component records only. However, we recommend that the amplitude of the records should be used cautiously at frequencies higher than about 4 Hz.

Sedimentary basin structure estimated from receiver function in the Yufutsu Plain and ground-motion amplification

*Kunikazu YOSHIDA¹, Kazuhiro Somei¹, Ken Miyakoshi²

1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute

北海道中央部に位置する石狩低地帯には、最も厚い所で10 km前後の堆積層が存在していることが知られており、地表で観測される地震動はその堆積層の影響を大きく受ける。2018年北海道胆振東部地震を契機として、この厚い堆積層の構造を調べるため、吉田・他（2019）は石狩低地帯南部の勇払平野の強震観測点の観測記録を用い、レシーバー関数法および地表／地中スペクトル比により地下構造モデルを求めた。本研究では、吉田・他（2019）から対象観測点を増やし、解析条件を調整して求めた速度構造モデルをもとに各サイトの増幅特性を検討した結果を示す。

地下構造モデルの作成手順を述べる。KiK-net観測点では、地表／地中スペクトル比の0.2～20 Hzを対象に地表～地中地震計間の速度構造モデルを調整した。次に、観測記録からレシーバー関数を求め、それを説明する地震基盤（ $V_s=3.4$ km/sを仮定）までの速度構造モデルを求めた。レシーバー関数からの逆解析では、3通りの初期構造モデルを用い、最終的に速度構造モデルを3通り（A, J, I）求めた。レシーバー関数にはカットオフ周波数約3 Hzのガウシアンフィルターを適用した。求めた速度構造モデルは、理論地震波形の計算や、微動アレイ観測と比較し、妥当性を評価した。

深発地震を用いた観測増幅特性と、求めた速度構造モデルから計算した理論増幅特性を比較した。解析対象はK-NETおよびKiK-netの15観測点とした。観測増幅特性の評価には、厚い堆積層による低周波数までの増幅を評価するため、M7クラスの深さ4つの深発地震の記録を用いた。各地震の観測記録のうち、直達S波部分を含む40.96秒間を取り出しフーリエスペクトルを計算した。対象観測点のうちAVS30=1130 m/sと表層までS波速度の速いSRCH10を基準観測点とし、地震ごとに基準観測点のスペクトルに対する各観測点のスペクトルの比（観測増幅特性）を計算した。求めた1～4地震のスペクトル比から観測点ごとに対数平均と対数標準偏差を求めた。理論増幅特性には、レシーバー関数により求めた水平成層速度構造モデルの基盤に平面S波が鉛直入射した際の入射波動場に対する地表の増幅特性を計算した。観測と同様に、SRCH10の理論増幅特性に対する各観測点の理論増幅特性のスペクトル比を計算した（図）。図に示したSRCH10の増幅特性は、解放地震基盤面に対するSRCH10のスペクトル比である。

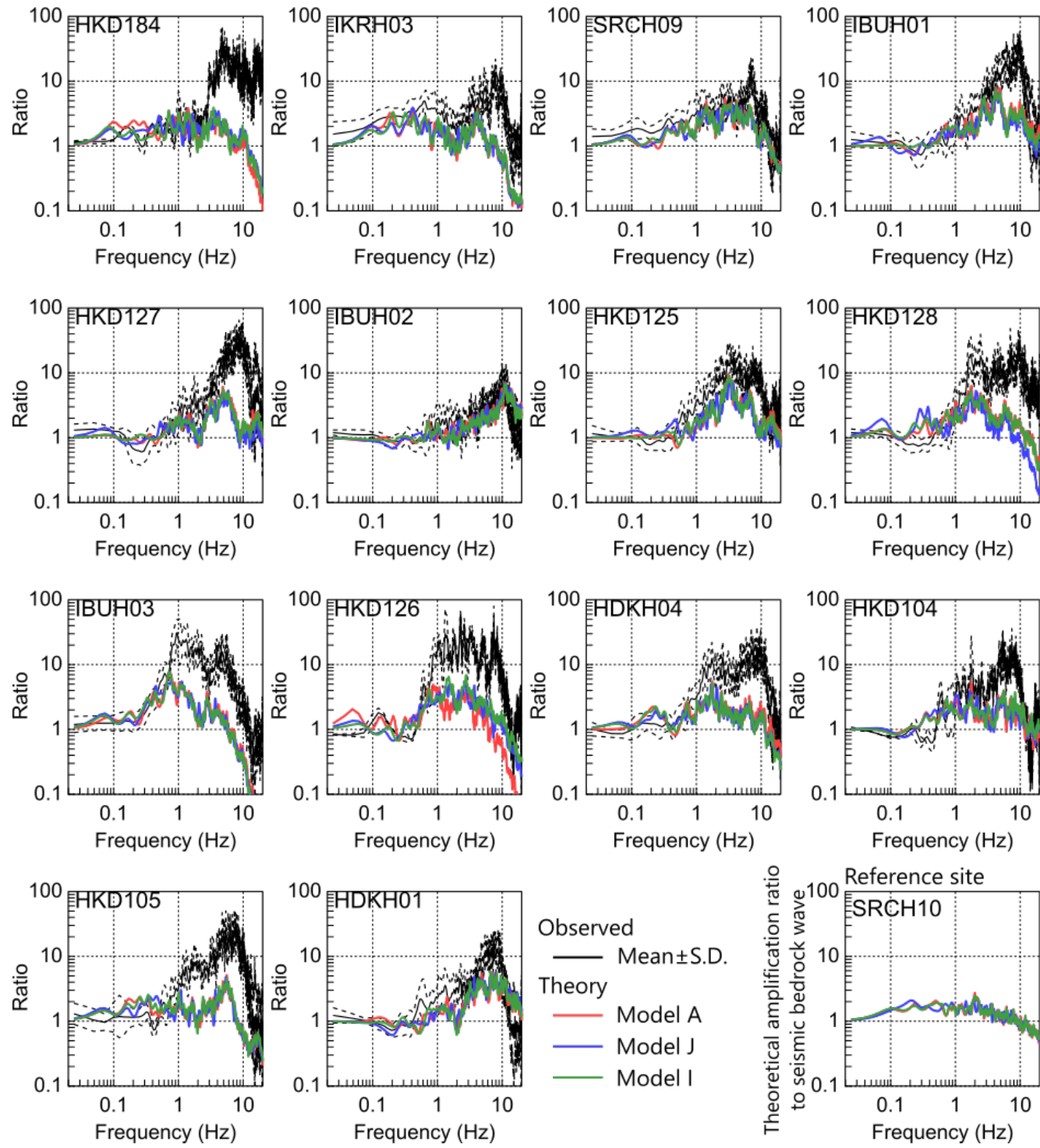
理論と観測のスペクトル比は、約1 Hz以下ではほとんどの観測点で良く対応する。1 Hz以上では観測点により状況は異なるが、レシーバー関数のカットオフ周波数の3 Hz程度までは対応の良い観測点も多い。3 Hz以上では理論が過小評価の観測点が多い。また、ほとんどの観測点で、低周波数側ではスペクトル比が小さく、高周波数側で大きいスペクトル形状を示す。スペクトル比が大きくなり始める周波数は観測点ごとに異なるが、ほぼすべての観測点で理論と観測はよく対応する。

理論と観測の1 Hz以下の長周期側のスペクトル比や、スペクトル比の増大し始める周波数がほぼ対応することは、基本的にはレシーバー関数により求めた速度構造モデルによる増幅特性が妥当であることを示している。観測点によっては0.1 Hz前後から数倍程度の増幅が見られ、勇払平野の厚い堆積層により低周波数側でも増幅されることが分かる。なお、KiK-net観測点の速度構造モデルは、地表／地中スペクトル比の20 Hzまでを解析対象として浅部の速度構造モデルを調整しているが、今回の計算結果では高周波数側で観測と理論が必ずしも対応しなかった。

地震動増幅特性の評価の観点からは、基準観測点のSRCH10の理論増幅特性の妥当性は別途検討する必要があるものの、基本的には1 Hz程度以下の低周波数側では、レシーバー関数法による速度構造モデルにより厚い堆積層による地震動の増幅を概ね説明できていると考えられる。高周波数側の理論と観測は必ずしも対応が良くないが、平野内部の不整形などで励起された表面波の影響などいくつかの要因が考えられる。

謝辞：本研究の一部は、原子力規制庁平成31年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震による地震動の評価手法の検討）業務の一部として実施した。

S-wave spectral ratio of soil site to reference site



Evaluation of Response Spectra According to Recurrence Period in the Tokyo Metropolitan Area

*Takashi HAYAKAWA¹

1. SHIMIZU Corp. Institute of Technology

・はじめに

防災科研のJSHIS¹⁾によると、フィリピン海プレートと太平洋プレートの震源が予め特定できない地震が都心の地震ハザードに大きく寄与する。性能設計²⁾は基本的な考え方として再現期間に応じた地震動強さに対して建物損傷をコントロールする。対象とする地震に対して性能設計を行う場合は、その地震動の再現期間と地震動強さの対応を明らかにする必要がある。本研究では、ばらつきを考慮した断層モデルを作成して、関東平野周辺のフィリピン海プレートおよび太平洋プレートの内部と上面で発生する地震を対象とした、再現期間に応じた工学的基盤における速度応答スペクトルを評価した。

・再現期間委応じた応答スペクトルの評価方法

地震本部と同様に定常ポアソン過程を仮定した。ある周期の速度応答スペクトル Y が t 年間に y を超える確率 P は(1)式で表される。 Y の再現期間 T は(2)式である。

$$P(Y>y) = 1 - \exp(-v(Y>y)*t) \quad (1)$$

$$T = 1/P(Y>y) \quad (2)$$

(1)式の $v(Y>y)$ は応答スペクトル Y が y を超える年あたりの頻度で(3)式で表される。

$$v(Y>y) = \sum_j \sum_k v_{j,k} \sum_i P_{j,k}(Y>y|m_i) P_{j,k}(m_i) \quad (3)$$

添え字 j,k は地震タイプと地震活動の小領域を表す。 $v_{j,k}$ はM5以上の年発生頻度である。地震タイプはフィリピン海プレートのプレート内か上面あるいは太平洋プレートのプレート内あるいは上面の地震である。 m_i は0.1間隔の規模(マグニチュード)である。 $P_{j,k}(m_i)$ は規模が $m_i \pm 0.05$ に収まる確率でGR式から算定する。 $P_{j,k}(Y>y|m_i)$ は規模が m_i の時に Y が y を超える条件付き確率で、 m_i 毎にばらつかせた断層モデルを設定し、評価地点の Y が各周期で対数正規分布すると仮定して算定する。

・地震動計算手法と地下構造

地震動計算には統計的G法を用いた。地震本部³⁾の三次元地下構造モデルから評価地点直下の構造を抽出した。

・地震活動領域、小領域と最大／最小規模

地震本部³⁾は太平洋プレートとフィリピン海プレートの震源が予め特定できない地震の活動域をそれぞれ16個と9個に区分している。これらの中から関東周辺の活動域を選び、それらを20km四方の小領域に分割した。この小領域が(3)式の k である。 $v_{j,k}$ は地震本部³⁾の0.1°メッシュの発生頻度データから求めた。地震本部は、M7程度以上の地震に対しては0.1°メッシュではなく矩形の断層面を一様に配置し、断層毎に発生頻度を付与している。そのような場合、地震本部の断層中心に断層を配置し、地震本部の断層毎の発生頻度を用いた。最大規模は地震本部の活動域毎の最大規模を用い、最小規模は $v_{j,k}$ が小さく影響が無視できたためM6.0前後とした。

・フィリピン海プレート内で発生する地震の震源断層

小領域毎に基準メカニズム(走向、傾斜、すべり角)を設定し、同メカニズムから断層面を張った。他の断層パラメータは中央防災会議に倣って設定した⁴⁾。フィリピン海プレート内部のP軸とT軸⁵⁾から基準メカニズムを設定した。断層モデルにばらつきを付与した。走向と傾斜は中規模の実地震のCMT解を分析して、基準メカニズムのP軸とT軸回りを $\pm 27^\circ$ 回転してばらつかせた。断層面は共役の2ケースを設定した。アスペリティは断層中心に設け、破壊開始点はアスペリティの底辺左右に設定した。

・フィリピン海プレート上面で発生する地震の震源断層

基準メカニズムの傾斜と走向はプレート沈み込みの方向とその直交方向、すべり角は 90° とした。断層パラメータの設定は地震本部レシビ³⁾に倣った。短周期レベルには経験式⁶⁾を用いた。断層の走向と傾斜は中規模の実地震のCMT解を分析して、基準メカニズムのP軸とT軸回りを $\pm 15^\circ$ 回転してばらつかせた。M6.8以下ではア

スペリティは1つで、破壊開始点はアスペリティ底辺の左右に設定した。M6.9以上では大小2つのアスペリティを設定し、左右を入れ替えたケース、破壊開始点は大アスペリティの底辺左右と小アスペリティの底辺中心に設定した。

・ **太平洋プレートのプレート内部と上面で発生する地震の震源断層**

基本的にフィリピン海プレートと同様に設定した。テキスト数の制限のため割愛し、発表時に述べる。

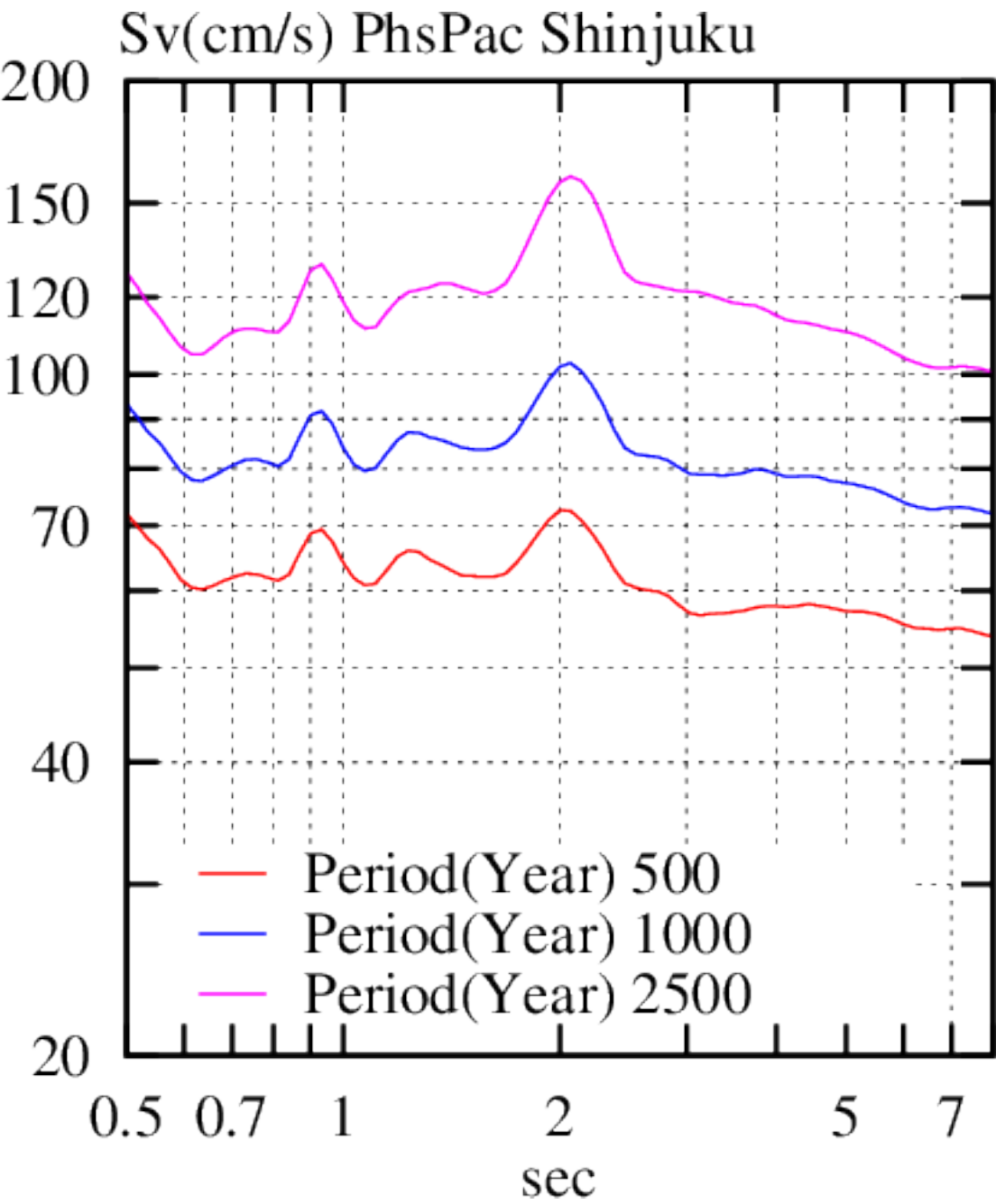
・ **新宿における結果**

再現期間が500年、1000年、2500年の応答スペクトルを示す。これらの再現期間は性能設計等で基準として多く用いられる再現期間である、高層建築や免震建物の固有周期である周期2秒以上では、再現期間1000年の速度応答スペクトルは70~100cm/s程度であった。

・ **今後の課題**

今回の本研究の断層モデルの走向と傾斜のばらつきには、中規模の実地震のばらつきを反映したが、より大きな地震のばらつきは更なる検討が必要である。また断層パラメータの設定に用いる経験式に関しても今後検討を進める。今回はまだ検討の初期段階であり、今後変更する可能性が高い。

- 1) <https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 2) 日本建築構造技術協会,2018
- 3) 地震調査委員会,2020
- 4) 首都直下地震モデル検討会,2013
- 5) Nakajima *et. al.*,2011
- 6) 佐藤,2016



Estimation of surface seismograms at MeSO-net seismic stations

*Shigeki SENNA¹

1. NIED

1. 研究の目的

本研究では、MeSO-netの地中設置型地震計のデータから地表の揺れの様子を高精度に予測するために、各観測点での微動観測や地表における臨時観測を行うことにより、地盤増幅特性の評価や地盤のS波速度構造の推定を行っている。MeSO-netは、センサを地下20mに設置することで周波数により3倍から30倍程度のノイズ低減が期待できることから¹⁾、震源決定や速度構造の推定には優れたデータである。一方、大地震時の地震動や即時被害推定を行うには地表における地震動をリアルタイムで得ることが必要である。このため、MeSO-net各観測点の地表において臨時地震観測や微動アレイ観測を行ない、地中の地震動データに対する地表地震動への伝達関数を明らかにし、連続収集している地中のMeSO-netの地震動データから逐次的に地表における地震動を予測することを可能とした。ただし本手法は一次元の線形応答を仮定したものであり、大地震時の大振幅による非線形応答や地盤の液化化などが発生した際には正しく地表地震動を推定できない。本研究では、各観測点で実施した地表における臨時地震観測及び微動アレイ観測と地盤増幅特性や地盤のS波速度構造の推定結果について述べる。

2. MeSO-net観測点における地表地震記録の取得と増幅特性の推定

各MeSO-net観測点の地表において2~3ヶ月の臨時地震観測を行い、地中におけるMeSO-netの観測データに対する地表スペクトル増幅率の推定を行った。臨時観測はMeSO-netの地中地震計と同じセンサーを持つ地震計（白山工業社製JU410等）を観測井近傍に設置して行った。観測結果に対し、増幅特性は各観測地点における地中および地表で得られた地震波形に0.1~30Hzのバンドパスフィルターをかけ、フーリエスペクトルを成分ごとに計算し、バンド幅0.05HzのParzenウィンドウで平滑化した上で、地中記録に対する地表記録の比をとった。その結果、比較的固いローム台地と軟弱な後背湿地や自然堤防の増幅特性の特徴の違いが明瞭となっている。ローム台地の観測点については5~10Hzの短周期で増幅度が大きくなっており、MeSO-net地震計の深さ20mよりも浅い場所で地盤構造に変化があるものと考えられる。一方、後背湿地・自然堤防の地形では、1~2Hz付近で顕著な増幅を示す。

3. 微動アレイ観測とS波速度構造などの地盤物性値の推定

地下50m程度までのS波速度構造を推定し、MeSO-netによる地中地震動記録に対する地表地震動の増幅特性を高度化するために、微動アレイ観測をMeSO-netの293観測点で実施した。観測にはJU410を使用し、各MeSO-net観測点の地中地震計直上において、アレイ半径60cmの4点極小アレイと1辺5~15m程度の3点不規則アレイを展開し、サンプリング周波数は200Hzで、全点同時に15分間程度の観測を行った。微動アレイ観測結果に対しSPAC法等を用いて位相速度解析を実施し、AVS30などの増幅特性の抽出、分散曲線の直接深度変換法、逆解析などの逆解析手法を用いてS波速度構造などの地盤物性値を推定した。地表地震観測による増幅特性の推定結果と同様に、比較的固いローム台地と軟弱な後背湿地の特徴の違いが明確になっている。

4. 地震記録による地表~地中の増幅特性とS波速度構造モデルによる増幅特性の比較

本研究では、地震計設置位置における地中~地表の増幅特性の検討として、震度増分（図1）を求めた。図1に示した震度増分では、ローム台の方が他の微地形区分よりも震度増分が大きい。全体としては、台地系で比較的大きくなっており、低地系で比較的小さい値を示していることがわかる。このことより、比較的固いローム台地等の台地系微地形区分では、そのほとんどが、工学的基盤層が深さ20m以内に現れており、一方で軟弱な埋立地や三角州などの低地系では、工学的基盤層が深さ40mを超える層まで現れていない事と相関があるものとする。

5. まとめ

本研究ではMeSO-net観測点の地表において、評価した観測地点における震度増分の特徴としてローム台地では震度増分が1.0～1.5程度、周波数3～10Hzにおける増幅率が大きく、低地系微地形区分（後背湿地・自然堤防等）では震度増分は0.5程度、周波数2～5Hzで増幅率が大きくなる傾向にあった。また、微動観測のS波速度による伝達関数と地震観測記録の大半は調和的な結果となっているが、一部の観測地点については結果に乖離があるため、S波速度構造モデルの見直しや、観測地点の地形・地質情報等による確認・修正を行い、地震観測記録と調和的になるように調整した。今後、得られたS波速度構造モデルと震度増分については、マルチインテグレーションシステムに搭載し、連続収集している地中のMeSO-netの地震動データから逐次的に地表における地震動を予測することが可能となる。

（謝辞） 本研究は、首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト サブテーマ(b)「官民連携による超高密度地震観測データの収集・整備」（2017年度～2021年度）において行われた。また、若井淳博士にはデータのとりまとめ等ご協力いただいた。

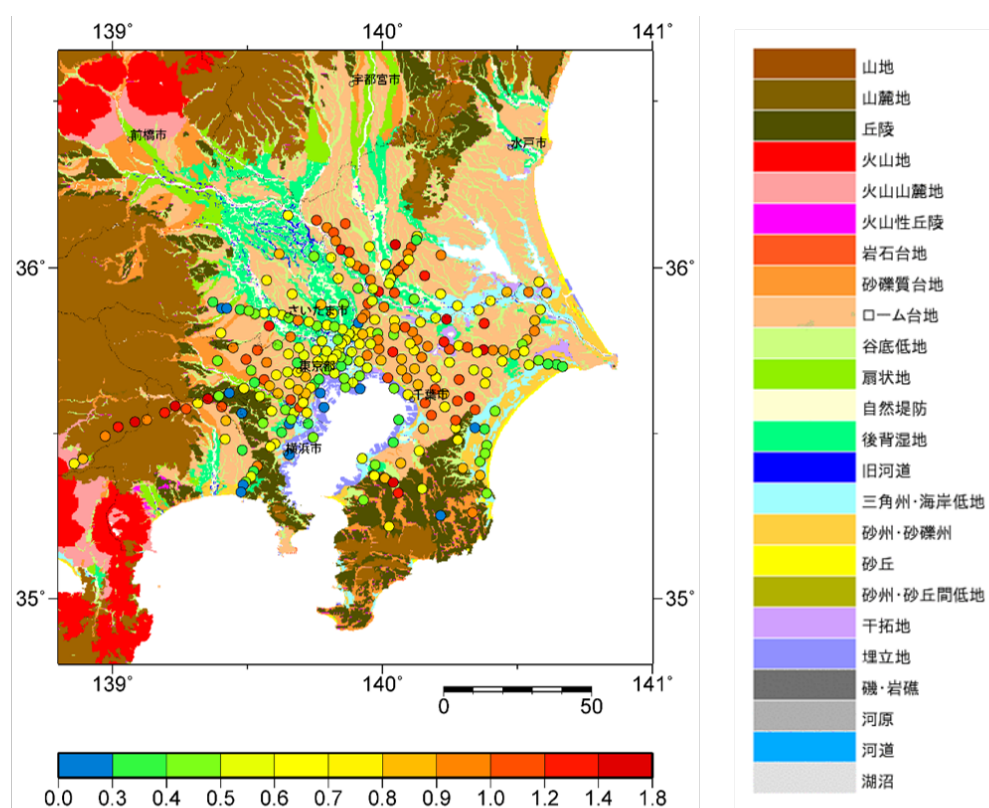


図1 MeSO-net地中～地表地震計による震度増分（背景は微地形区分）

Attenuation Characteristics of Long-Period Ground Motion Inferred from the F-net Broad-Band Strong Ground Motion Records

*Ken HATAYAMA¹

1. National Research Institute of Fire and Disaster

研究の動機

消防法令で定められている大型石油タンクの長周期地震動に対する耐震基準は、2003年十勝沖地震の際に苫小牧地域の石油タンクで火災、浮き屋根沈没等の甚大なスロッシング被害が発生したことを受けて、2007年に大きく改正された。その改正では、耐震基準上の長周期地震動レベルである「液面揺動の設計水平震度」が、石油タンク立地地域の長周期地震動スペクトル特性に応じて、最大2倍引き上げられた。そこでの判断材料となった長周期地震動スペクトル特性は、基本的に、座間(2000)など座間による一連の研究から編み出された経験的長周期地震動予測式から得られたものであった。ここで、座間(2000)の経験的長周期地震動予測式は、全国共通の標準スペクトルと、石油タンク立地地域と地震地体構造区分上の震央地域の組み合わせ毎に過去の地震記録から経験的に推定されたサイト増幅スペクトル（標準スペクトルに対する観測スペクトル比）との積という構造になっている。この地震動予測式は、近年発生した大地震（2003年十勝沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震も）の際の観測スペクトルをそれなりに再現するが、そのような良い結果にならない事例もある。2016年熊本地震の際、大分地域の浮き屋根式石油タンクではスロッシングが発生し、浮き屋根の浮き室が損傷した。この地震の際には、大分よりも震源から遠方の地域でも、遠方のわりには高いレベルの長周期地震動が観測され、ところによってはスロッシングも観測された。大分地域を含め、これらの地域で観測された長周期地震動のレベルは、のきなみ、座間(2000)の経験的長周期地震動予測式による予測値を数倍から10倍上回った。これは、長周期地震動の全体的なレベルを左右する標準スペクトルが、この地震に対してはうまく機能していないことを示唆している。座間(2000)の経験的長周期地震動予測式における標準スペクトルは、Kudo(1989)の提案式を改良したものとなっているが、（1）距離減衰項の中の減衰パラメータは、依然としてKudo(1989)が用いたMamula et al.(1984)の提案値であり、データが少ない時代の経験値であること、（2）震源深さが表面波励起強度に及ぼす影響が考慮されていない、などの問題点を指摘することができる。もっとも、これらのことで生ずる問題は、サイト増幅スペクトルが吸収し、地震動予測式としては、結局は一定程度つじつまが合うような構造になっているのであろうが、「標準スペクトル」なるものをより適切にモデル化することによって、より高い精度の地震動予測式を編み出せる可能性は期待できる。このような観点から、本研究ではまず（1）の問題を考えるべく、岩盤もしくは硬質地盤上で多数の良質な長周期地震動記録が蓄積されているF-net広帯域強震記録を用いて、長周期地震動の全国平均的な減衰特性を調べた。

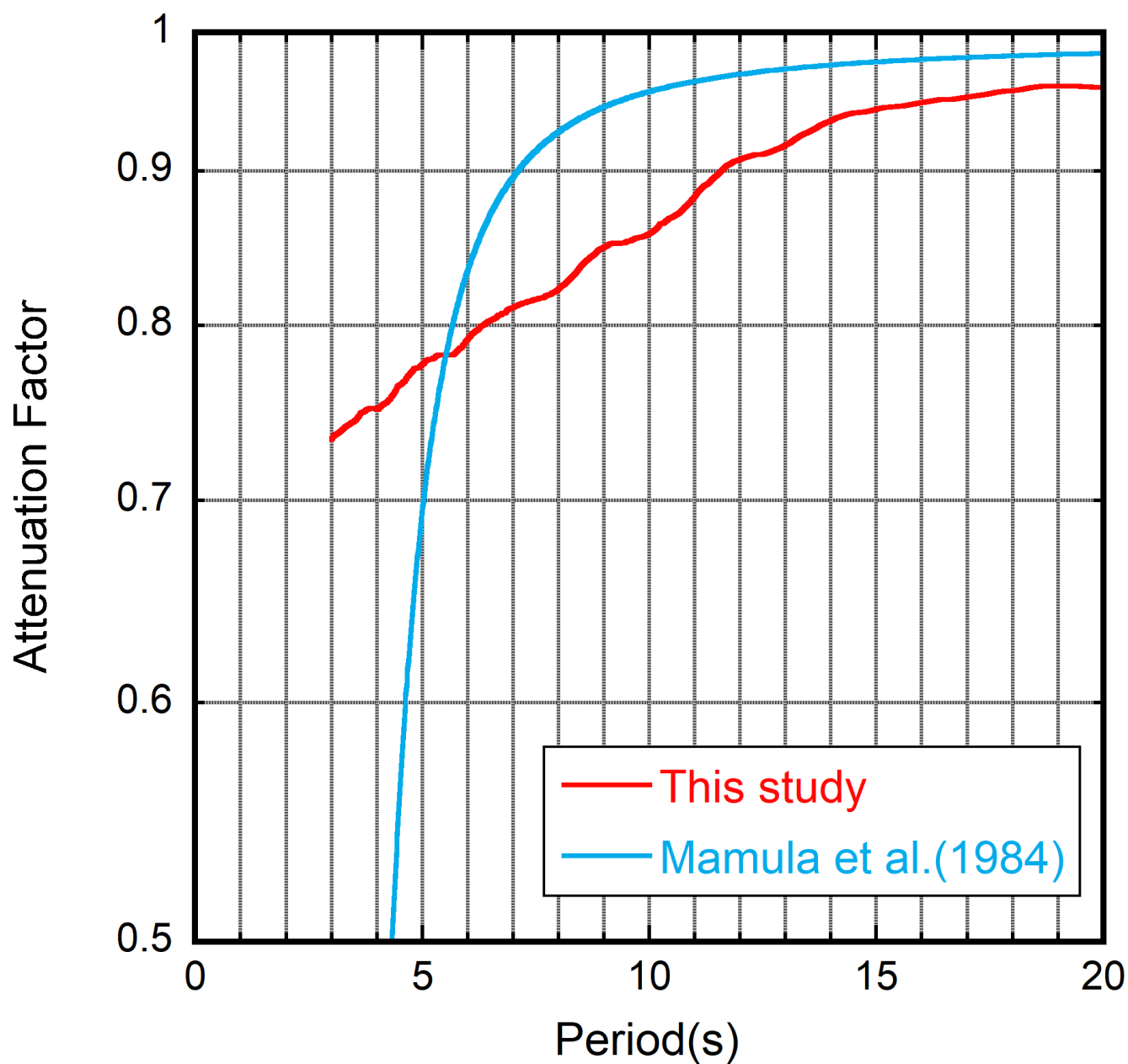
解析内容と結果

2003年9月26日の十勝沖地震以降、2020年3月までに日本周辺で発生したMw6.5以上の地震のF-net広帯域速度型強震計記録（サンプリング周波数20Hzのもの）のうち震央距離1,000km未満のもの対象として、岩田・入倉(1986)流のスペクトルインバージョン解析を行った。観測スペクトルに対するモデル式における距離減衰項は、Mamula et al.(1984)と同じく、 $\exp[-\alpha(T)/r]/r^{0.5}$ （ r ：震央距離、 T ：周期、 $\alpha(T)$ ：単位距離あたりの減衰強度）とした。解析対象周期は3～20sとした。観測スペクトルは、水平2成分の加速度フーリエ振幅スペクトルの幾何平均とし、スペクトル解析区間は、とりあえず、発震時からおおむね15分間（波形の立ち上がり時刻ではない）とした。各記録につき、記録長が短く地震動の主要動部分が記録されていないもの、波形がおかしいもの、ノイズが大きいもの、水平2成分合成振幅の最大値が20mm/s未満のものは除外した。さらに、解析対象地震は、5個以上の観測点で解析対象記録が得られているもの、解析対象観測点は、5個以上の地震で解析対象記録が得られているものとした。サイト増幅特性の基準点は、とりあえず、つくば観測点とし、全周期について増幅率1とした。結果、46個の地震、70個の観測点、1,718個の観測記録が解析対象となった。解析結果として、図に水平距離100kmに対する減衰率を示す。比較のため、Mamula et al.(1984)の提案値に対する減衰率も示す。ここでの解析方法、解析対象記録、解析条件等は暫定的なもので、今後見直し

を行う予定である。結果の議論はそれからにしたい。

謝辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所の広帯域地震観測網F-netのデータを使わせていただきました。記して感謝します。

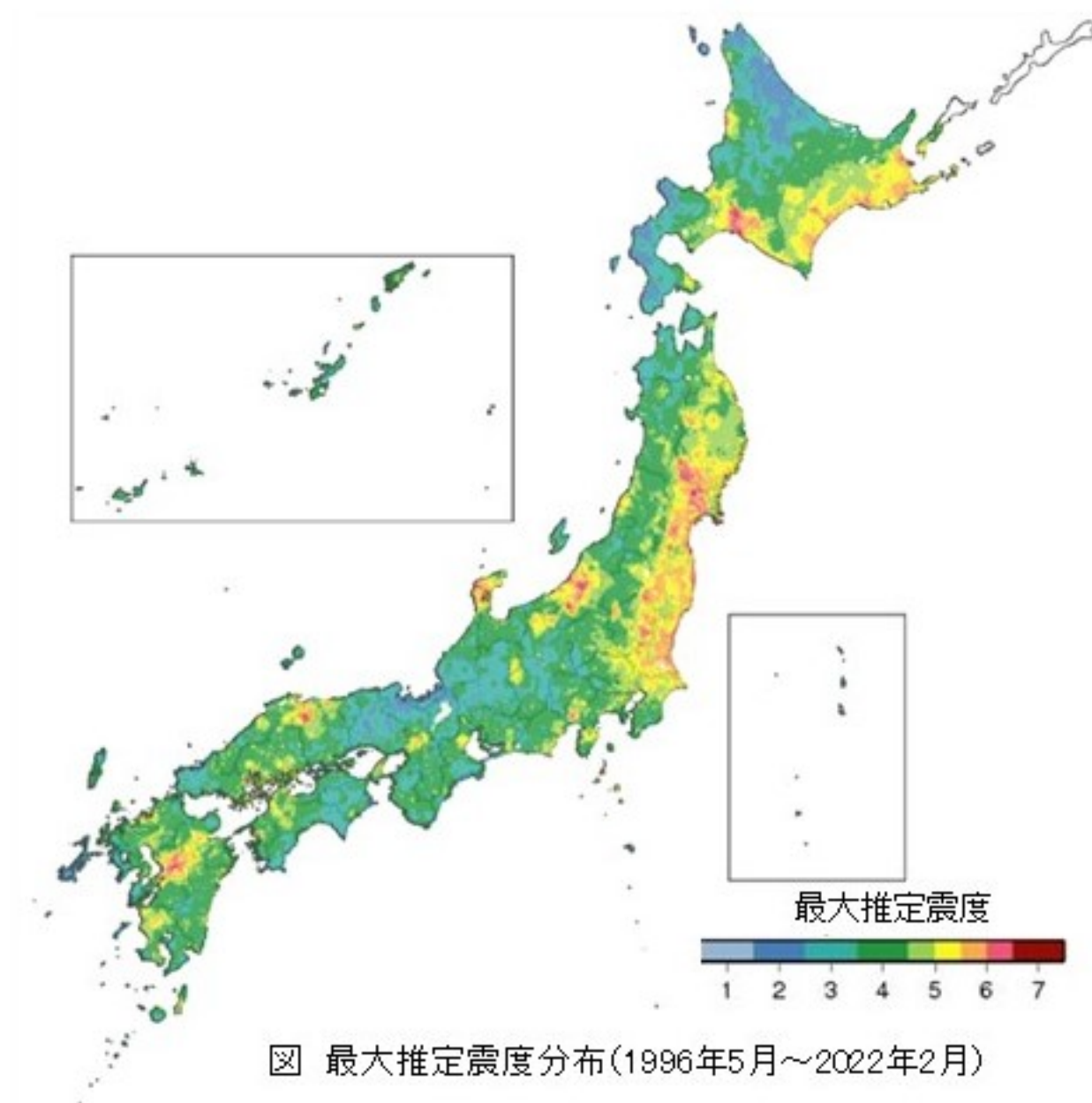


Estimated seismic intensity history for 26 years in Japan

*Hiromitsu NAKAMURA¹, Yoshinori IWANAMI²

1. NIED, 2. MESW

1995年の阪神・淡路大震災における俯瞰的な被害状況の把握や初動対応の遅れ等の反省から、全国を均質に覆う強震観測網や震度観測網の整備が行われ、25年以上が経過し、2011年東北地方太平洋沖地震のような海溝型の巨大地震や、2016年熊本地震のように内陸活断層の極近傍での貴重なデータが得られている。本研究では、このような稠密な観測網での観測が行われ始めた1996年以降の震度データを用い、地盤の増幅度を考慮した空間補間を行うことで、過去26年間の日本列島の揺れの履歴を推定することを目的とする。なお、対象とした地震は1996年5月から2022年2月の間に発生し、概ね震度3以上を観測した約5200地震である。震度の空間的な分布の推定については、まず地表で観測された計測震度データ（K-NET、KiK-net、気象庁及び地方公共団体の震度観測点）を藤本・翠川（2005）により、最大速度に変換し、地表での増幅率を除することで、工学的基盤最大速度を求める。このような処理で得られた観測点直下の工学的基盤の最大速度を、逆距離加重法（IDW）等を用いて250mメッシュに空間補間した後、増幅率を乗じて地表最大速度を推定し、震度の面的分布を算出する。なお、ここで用いる増幅率は、全国を対象として作成された地形・地盤分類250mメッシュマップから求められた地表から深さ30mまでの平均S波速度に基づくものである。図に求めた最大推定震度分布を示す。大半の人が、恐怖を覚え、物につかまりたいと感じると言われる震度5弱以上に見舞われた地域は、陸域の約34%となり、震度曝露人口（夜間人口）にすると6780万人（全人口の約53%）に相当していた。さらに、震度6弱以上に見舞われた地域は、陸域の6.9%程度、震度曝露人口は980万人（約7.7%）に相当していた。また、2011年東北地方太平洋沖地震発生直前までの10年間と、その後の東北地方太平洋沖地震を含む10年間で比較すると、陸域に占める震度5弱以上の地域の割合は18%と22%、震度6弱以上では2.5%と4.6%であった。最後に、本研究では250mメッシュで震度の推定を行っていることから、各地点の震度の履歴についても紹介したいと考える。謝辞：推定震度を求める際に、防災科研のK-NETとKiK-net、気象庁及び地方公共団体のデータを利用した。

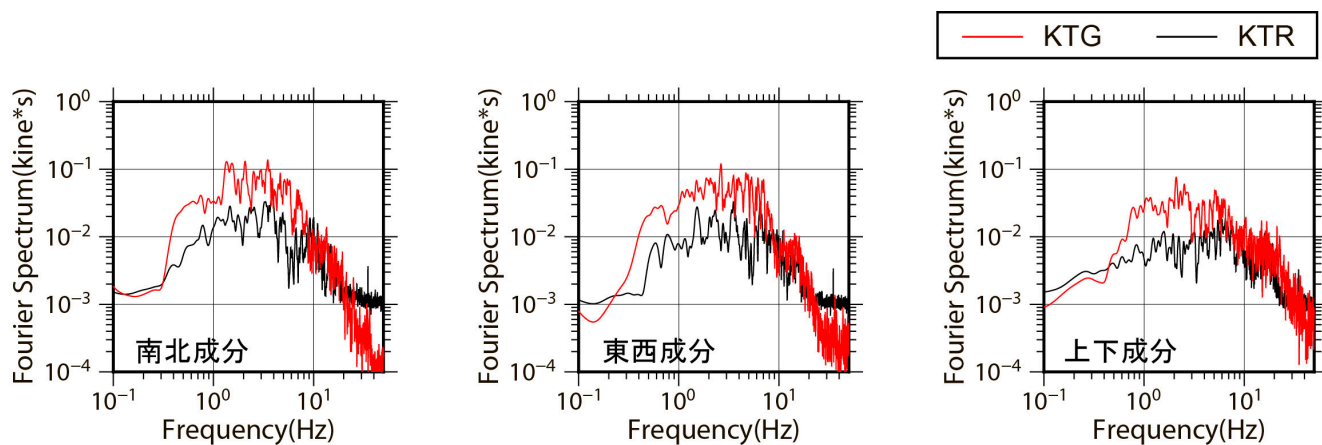


Strong-motion characteristics in western edge of the Kyoto basin for the 2022 southern part of Kyoto prefecture earthquakes

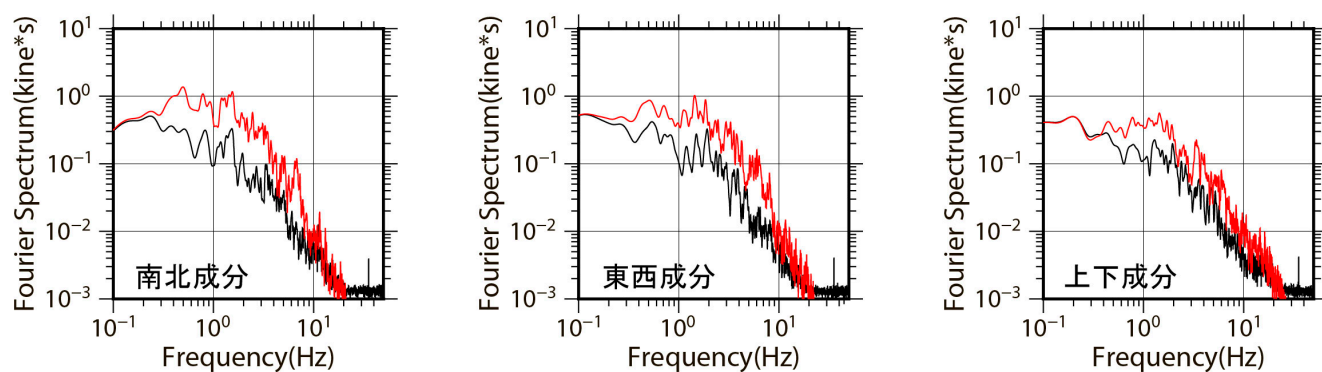
*Takashi AKAZAWA¹

1. Geo-Research Institute

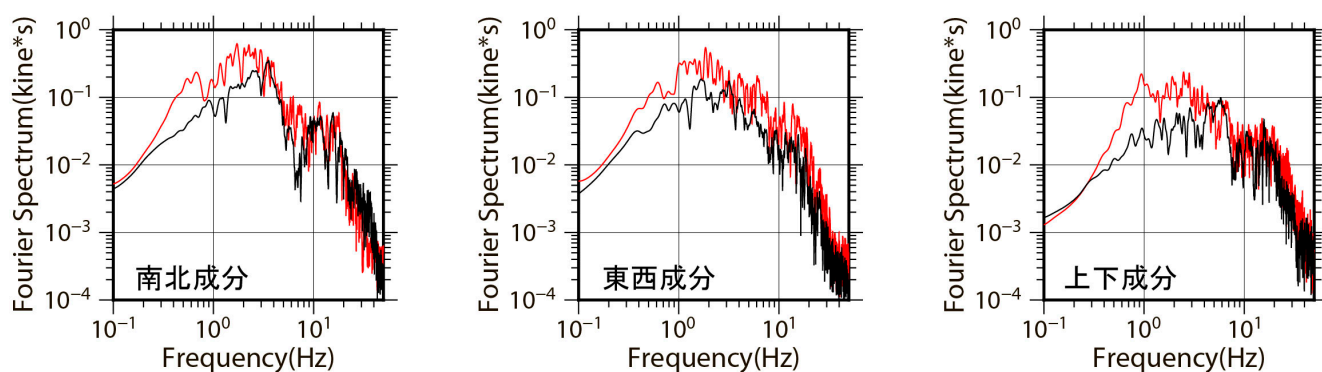
2022年の3月末から5月初めにかけて、京都府亀岡市北部付近を震源とする M_j4 前後の地震が複数回発生し、そのうち2回の地震（いずれも $M_j4.4$ ）では最大震度4を観測した。京都府南部を震源とする地震で震度4以上を観測したのは、2014年8月6日に本地震群のやや西方で発生した地震（ $M_j4.2$ ）以来である。本検討では、京都盆地西端に位置する関西地震観測研究協議会（関震協）の京都桎原（KTG）観測点と同協議会の管理点である京大桂（KTR）観測点を対象に、本地震群による地震動特性について分析した。KTG観測点が設置されている京都市西京区桎原蛸田町は、三方が天井川で囲まれた後背湿地を天井川の高さまで盛土して宅地化された地域であり、1995年兵庫県南部地震時には周辺地域と比較して木造建物に被害が集中した。一方、KTG観測点の西北西約1.5 kmに位置するKTR観測点は、硬質地盤上に建つ大規模建築物の中に設置されている。これまでに、両観測点で得られた観測記録から、KTG観測点の方がKTR観測点より揺れが大きい傾向があることが確認されている。本検討で、京都盆地周辺（対象地震群を除く）と最大で200 km程度離れた場所で発生した地震から、対象観測点を取り囲むように幾つか選定し、水平2成分と上下成分の速度時刻歴波形の最大値を両観測点で比較した結果、従来の知見通り、ほぼ全ての地震でKTG観測点の方がKTR観測点より大きい傾向を示すことが確認された。これらの観測記録のフーリエスペクトルを利用して比較した結果、広帯域に渡り、KTG観測点の方がKTR観測点より大きくなる傾向が見られた（例えば、図1(1), 図1(2)）。一方、対象地震群の観測記録の速度時刻歴波形の最大値は、東西成分は従来の知見通りKTG観測点の方が大きい、南北成分と上下成分は、従来の知見に反し、KTR観測点と同程度かやや小さくなる傾向が見られた。これらの観測記録のフーリエスペクトルを利用して比較した結果、南北成分が3~6 Hzで、上下成分が3 Hz以上で、KTR観測点はKTG観測点と同等かそれ以上の大きさとなる傾向を有することが確認された（例えば、図1(3)）。今後、KTG観測点とKTR観測点の近傍の観測点で得られている観測記録も利用しつつ、本検討で得られた結果の要因の特定を試みる予定である。



(1) 2014年6月11日19時52分頃に発生した京都市中部付近を震源とする地震 (M_J4.0)



(2) 2013年4月13日5時33分頃に発生した淡路島付近を震源とする地震 (M_J6.3)



(3) 2022年3月31日23時34分頃に発生した京都府亀岡市北部付近を震源とする地震 (M_J4.4)

図1 KTG観測点とKTR観測点で得られた地震観測記録の速度フーリエスペクトルの例

Construction of a low-cost indoor 3D model using a depth camera and machine learning and its application to seismic behavior simulation

*Yuta TAKAHASHI¹, Hiroki UEMATSU¹, Ahyi KIM¹, Toshiyuki MASATSUKI², Yoshinari NAKANISHI²

1. Yokohama City University, 2. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

地震時における自宅周辺の危険は自治体等が発行するハザードマップからある程度予測することができ、個人の防災、減災対策に非常に有効である。しかし、自宅の中における危険を予測することは建物内外の状況に強く影響されるため困難である。地震時における室内の危険を知る手法の1つに、室内空間を3Dモデルに置き換えてシミュレーションを行うことが挙げられるが、人的、経済的コストの関係上個人宅で気軽に行う事は容易ではない。この問題を解決する1つの案として、本研究では深度カメラと機械学習を用いて、3Dモデルの作成からシミュレーションまでの一連の作業を自動化する手法を提案する。具体的には、深度カメラで室内の点群と写真を撮影し機械学習によって家具を検出した後、それらを3Dモデル化し、適切な物理パラメータを与える事で地震動に対する挙動を再現するシミュレーションを行い、室内に潜む危険を予測する仕組みを構築する。家具などの部屋の構造物の3Dモデル化は以下の手順で行った。①深度カメラを用いて室内の写真とその距離情報から点群を撮影する。②室内の写真から機械学習によって家具の種類と位置を特定する。③機械学習によって特定した家具の位置から点群を抽出し家具を直方体の3Dモデルとして生成し、家具の種類と大きさから質量や摩擦係数などの物理パラメータを3Dモデルに割り当てる。このようにして生成した3Dモデルに地震動を入力する事で室内の家具の挙動をシミュレーションする。本発表では、3Dモデルの生成に関する上記②と③のシステムを作成し、E-ディフェンスの室内加振実験のデータを元にその性能を評価した。②の家具を検出するシステムでは、既存の学習済み物体検出モデルに対してファインチューニングを行いE-ディフェンスでの室内で評価を行った。訓練データとして1248枚、検証データとして313枚の家具が写った画像をファインチューニングした結果として、E-ディフェンスの家具を検出することが出来た。学習データを増やすことで、さらに検出精度の向上が見込まれる。③では、本来の手順である実際の室内から得られた点群を元に3Dモデルを作成する前段階のテストとして、仮想空間にE-ディフェンスの室内を再現し室内写真と点群を撮影し、それを元に3Dモデルの構築を行った。結果としてそれらの仮想空間内においての物品検出、検出された家具の位置に対応する点群の抽出に成功し、シミュレーションに用いる3Dモデルを生成することができた。上記で生成された家具の3Dモデルに対してE-ディフェンスでの振動実験時に計測された変位波形を与えシミュレーションを行い、振動実験の結果と比較したところ、今回のモデルでは実際の家具の挙動と異なる挙動を示した。これらの大きな原因は、作成した家具には実際の家具に入っていた物品などが考慮されておらず、重心の位置がずれている事が原因の一つであると推測された。今後は家具に入っている物品を考慮するなど、家具の挙動に影響が大きい情報を取得または補うなどして、シミュレーション精度を向上させていく予定である。

DAS observation of Mj6.6 earthquake in Hyuga-nada, southwest Japan using optical fiber cable along railway

*Satoshi KATAKAMI¹, Shunta Noda¹, Masahiro Korenaga¹, Eiichiro Araki², Narumi Takahashi³, Naoyasu Iwata¹

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

多くの地震が鉄道に大きな影響を及ぼしており、その影響は鉄道の一部で運行が制限・停止されるものから、広範囲で極端な被害を受け、脱線するものまで様々ある。2004年の新潟県中越地震（M6.8）、2011年の東北地方太平洋沖地震（M9.0）、2016年の熊本地震（M7.3）、2022年の福島沖地震（M7.4）では、新幹線が脱線した。さらに、上記より比較的規模の小さい地震において、特に都市部では点検に時間を要し、運転再開に多大な時間を要した事例もある（例：2018年大阪府北部地震（M6.1）、2021年千葉県北西部地震（M5.9））。鉄道の場合、地震発生直後は早期の地震動検知、地震動到達後は早期の沿線の揺れ具合の把握（構造物の被害推定）が重要である。

分散型音響センシング（DAS）は、光ファイバーケーブル内を進む後方散乱レーザーパルスの位相の変化を利用して、光ファイバーケーブルに沿った歪み変化を計測する（例：Miah and Potter, 2017、Ajo-Franklin et al., 2019、Sladen et al., 2019、Lindsey et al., 2020）。鉄道には、数千キロメートルにわたって線路の横にファイバーケーブルが敷設されているため、DASモニタリングに適している（Kowarik et al., 2020）。しかし、DASで記録された地震波形の振幅の信頼性を評価し、議論した報告は少ない。これは、DASで記録される振幅に影響を与える光ファイバーケーブルと設置面とのカップリング、波線の到来方向、ゲージ長などの判断が困難であるためである。

本研究の目的は、鉄道沿線の光ファイバーケーブルを用いた高密度地震観測網を構築することである。2022年1月22日に発生した日向灘のMj6.6地震の地震波形を、新幹線沿線に敷設された光ファイバーケーブルを用いてDASで観測し、その結果を紹介する。

DASは九州旅客鉄道が運営する九州新幹線沿線のケーブルに接続され、2022年1月12日から2月10日まで地震観測を実施した。新八代駅から新大牟田駅まで約75kmに渡って観測し、橋梁、高架橋、堤防、トンネルなど、さまざまな鉄道構造物が存在する。DASはAPセンシング社の製品（モデルN5200A）を使用し、interrogatorを新八代駅付近に設置した。時間sampling rateは500Hz、空間sampling間隔は5m、ゲージ長は10mであり、全15082チャンネルである。また、DASと地震計の観測波形を比較するために、鉄道構造物の上や下に5つの加速度計を設置した。

2022年1月22日に発生した日向灘のMj6.6地震とその余震（震央距離; 130-160km程度）をDASと並行して設置した加速度計で観測することに成功した。光ファイバーケーブルに隣接して設置された加速度計とDASのデータを比較し、今回の観測条件におけるDASの測定感度の限界を20galと推定した。また、記録値の標準偏差の分布等から、電架柱がDASに記録するひずみ値に大きな影響を与えている可能性があることが示唆された。鉄道沿線に既設の光ファイバーケーブルを用いたDASは、地震発生直後の早期警報の迅速化、地震動到達後の構造物損傷の検査区間をかなり高密度に制限することに役立つ。

Poster session (2nd Day) Regular session : S06. Crustal structure

🗓 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 8:30 AM UTC | 🏠 ROOM P-2
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S06P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-01] Estimation of S-wave seismic velocity structure by using OBS data around the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI¹, Xin Liu¹, Yanfang Qin¹, Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi², Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi², Takeshi Nakamura³ (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-02] Subsurface structure in the Tokai slow event area

*Tomotake UENO¹, Youichi ASANO¹, Tesuya TAKEDA¹, Kazushige OBARA² (1. NIED, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-03] Adjoint tomography of an accretionary wedge and shallow slow-slip regions in the North Island of New Zealand

*Shun Adachi¹, Bryant Chow², Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University, 2. University of Alaska Fairbanks)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-04] Relationship between seismic activity and low-frequency earthquakes at Northern Tohoku and Southwestern Hokkaido using local seismic network, AS-net

*Shinako NOGUCHI¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction Research Division for Earthquakes and Disaster Mitigation)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-05] Seismic reflection survey at Konan Town, Saitama Prefecture, Japan: linear dependence of the dip angles of reflection layers with depth

*Toshiki OHTAKI¹, Naomi Kano², Takanobu Yokokura² (1. AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geology and Geoinformation, 2. formerly of AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geology and Geoinformation)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-06] An Attempt to Discriminate Reflections Using Neural Networks for Improving Seismic Attenuation Profiling in Seismic Reflection Survey

*Haruka Kawabe¹, Tetsurou Tsuru¹ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-07] **Seismic velocity structure at the Kairei Hydrothermal Vent Field near the Rodriguez Triple Junction in the Indian Ocean**

*Ayato Morii¹, Toshinori Sato¹, Hiroyoshi takada¹, Tomoaki Yamada², Masanao Shinohara² (1. Chiba University, 2. the University of Tokyo)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S06P-08] V_{SV} and V_{SH} structures beneath Asama volcano

*Yutaka NAGAOKA¹, Kiwamu NISHIDA², Yosuke AOKI², Minoru TAKEO² (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo)

Estimation of S-wave seismic velocity structure by using OBS data around the Nankai Trough

*Ayako NAKANISHI¹, Xin Liu¹, Yanfang Qin¹, Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi², Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi², Takeshi Nakamura³

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI

海域地震の震源位置決定、海域で発生する地震による地震動の予測や地震発生シミュレーションの精度及び信頼性の向上のためには、海底下のP波速度(V_p)だけでなくS波速度(V_s)の情報が必要不可欠である。南海トラフ巨大地震震源域における地震・津波ハザード評価の実現には喫緊の課題であり、特に、高精度震源決定のためのDONET観測点の堆積層補正や、長周期地震動予測のためには海洋堆積層の V_s 構造を精度良く推定する必要がある。しかし、現時点では、地震探査においてS波を射出可能な制御震源の活用が困難であり、海域における V_s 構造の詳細な把握の事例は限られている（例えばTakahashi et al., 2002）。本研究では、P波からS波に変換されたPS変換波や常時微動を利用した解析など、主にS波に着目した手法を用いて、南海トラフ域の海洋堆積層における V_s 構造を推定することを試みた。まず、2018年に紀伊水道域で実施された稠密OBS（自己浮上式海底地震計）を用いた地震探査データにレシーバ関数解析を適用し、堆積層内におけるP-S変換波を抽出し、反射法地震探査断面でイメージングされているP波反射面分布との相関から変換面・反射面を同定した。その結果、比較的陸域に近い水深1500m～2000m程度の海域では、海底下500m程度までの浅層の V_p/V_s が4～5程度と推定された。一方で、2011年に紀伊半島沖で実施されたOBSを用いた地震探査と地震観測期間中にOBSで記録された常時微動データを用いた地震波干渉法解析により、2次元の地震探査測線下の V_s 構造推定も試みた(Liuほか、JpGU2022, SEG/AGU Geophysics of Convergent Margins Workshop2022)。その結果、海底下500–1000m程度までの浅層の V_s の平均値は400-600m/s程度だが、地質構造などに対応した不均質性もみられることがわかってきた。本発表では、上記の結果とともに、反射法地震探査から得られる堆積層の詳細な V_p 情報を用いた V_p/V_s の推定、レシーバ関数解析の適用およびその結果との比較に基づき、より信頼できる V_s 構造推定について報告する。現在、経験式（例えば、Brocher, 2005）に基づいて設計した変換式によって、既存の3次元 V_p 構造から3次元 V_s 構造モデルの構築が進行中であるが、本研究の成果は、この3次元 V_s 構造の検証や改善にも活用していく。なお、本研究は、JSPS科研費JP19H01982の助成を受けたものである。また、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」の一環としても実施している

Subsurface structure in the Tokai slow event area

*Tomotake UENO¹, Youichi ASANO¹, Tesuya TAKEDA¹, Kazushige OBARA²

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

環太平洋のプレート沈み込み帯では、繰り返し発生する巨大地震に加えて、その震源域周辺では長期的・短期的スロースリップ、超低周波地震、深部低周波微動や低周波地震などの様々なスロー地震が発生しており、特に巨大地震とスロー地震はすみ分けて活動していることがわかっている（例えばObara and Kato, 2016）。また、短期的スロースリップやそれに伴って発生する深部低周波微動や低周波地震は、プレート境界周辺の高Vp/Vs領域に関連して活動していることが分かっており、流体の関連性が示唆されている（例えばShelly, et al., 2006; Kato et al., 2010）。東海地域では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って発生する微小地震から巨大地震、各種スロー地震が発生している。これらの活動域について、地震学的な地下構造の特徴を調べるため、2008年に人工地震探査を実施した。

探査のレイアウトは、巨大地震の（想定）震源域、長期的スロースリップの活動域、短期的スロースリップやそれに伴う深部低周波微動や低周波地震の活動域であるプレート境界からの反射波を観測できるように設計されている。なお、探査は総測線長280 kmとなる4本の測線（A, E, W, T）と6箇所の発破点（薬量は全て500 kg）からなる。特に南北方向のW測線と北西－南東方向のE測線は、両測線の北端で交差する逆V字を形成しており、スロー地震の活発な領域上とその領域よりやや東に外れた領域上にそれぞれ配置されている。この交差する北端には、スロー地震活動域の構造的特徴をわかりやすく捉えられるよう共通の発破点（S3）が設けられている。使用した地震計は固有周波数2 Hzの地震計（A, E, W測線）および4.5 Hzのジオフォン（T測線）である。これらの地震計を500－650 m間隔でそれぞれの測線に配置し、100 Hzのサンプリング間隔で連続収録した。観測点全体のノイズレベルは中央値で170 nm/s程度であり、どの測線も良好な人工地震記録が得られ、明瞭な反射波も複数確認できた。本解析では、発破点－観測点間の2次元レイトレーシング法を用いて、発破記録の初動走時や明瞭な反射波の走時をよく説明できるような地下構造を推定した。この際、地下深部の反射構造については、得られた探査記録に振幅補正やnormal move out補正をした反射断面を作成し、おおよその反射体のイメージを得てこれを初期構造とした。

解析の結果、人工地震記録にみられた反射波の一部は、深さ10－15 kmおよび20 km程度に位置する地殻内の反射体によるものと推定される。この地域には、中央構造線や複数の活断層があるため、地殻内の反射体はこれらに関連した構造的特徴を示しているかもしれない。より深部からの反射波についてもW測線で明瞭に見られており、A測線やT測線では不鮮明ながらも確認することができる。この地下深部からの反射波は、深さ30－40 km程度に位置し、約10度程度の北傾斜を持つ反射体によるものと推定された。この地域に沈み込むフィリピン海プレートに伴って発生する地震は、この反射体よりもやや深い位置に分布し、その傾斜角も25度程度と相対的に高角であるため、この傾斜の緩い反射体と一致しない。しかしながら、精密に震源決定した深部低周波地震の分布（Ohta and Ide, 2011）と比較すると深さも傾斜も調和的であったため、人工地震探査で得られたこの反射体はプレート境界を示している可能性がある。一方で、W測線より東側のE測線では反射波が不明瞭であり、特に、E測線およびW測線の共通端点となる発破点S3による反射波の記録には明確な違いがでている。E測線のノイズレベルはW測線のノイズレベルと同程度であるため、このような反射記録の違いは、プレート境界付近の構造の違いによるものと考えられる。

Adjoint tomography of an accretionary wedge and shallow slow-slip regions in the North Island of New Zealand

*Shun Adachi¹, Bryant Chow², Yoshihiro Kaneko¹

1. Kyoto University, 2. University of Alaska Fairbanks

ニュージーランド北島のヒ克蘭ギ沈み込み帯には付加体や沈み込んだ海山、巨大地震を引き起こしうる固着したプレート境界が存在し、スロースリップが繰り返し発生している。先行研究であるChow et al. (2022a,b)は地震波トモグラフィーの手法の一つであるAdjoint tomographyをヒ克蘭ギ沈み込み帯に初めて適用し、ニュージーランド北島東岸の2つの高速度アノマリーをイメージングすることに成功した。これらの高速度アノマリーはこれまで知られていなかった深く沈み込んだ海山だと解釈されている。沈み込んだ海山の存在は海底の堆積物のデータや周囲の地球物理学的なアノマリーの存在などの独立した研究結果と調和的であり、海山の有無がスロースリップの発生領域と固着域が明確に分かれている要因である可能性を示唆している。

ニュージーランド北島近傍では2017-2018年にIODP(International Ocean Discovery Program)が海底掘削を実施したほか(Barnes et al., 2020)、2021年にはM7.3の地震が発生した(Okuwaki et al., 2021)。しかし、これらはいずれも先行研究の領域に含まれていない。そこで本研究ではChow et al. (2022a,b)の速度構造モデルを沈み込み帯に沿って北東方向に400km拡大し、両者を領域内に含めたモデルを使用する。領域内の60個の地震と88個の広帯域地震計のデータを用いてadjoint tomographyを適用し、6-30秒の周期の地震波形データに合うよう繰り返しモデルのアップデートを進めている。ヒ克蘭ギ沈み込み帯の付加体構造のイメージング結果やその解釈について、現在までの取り組みを報告する。

Relationship between seismic activity and low-frequency earthquakes at Northern Tohoku and Southwestern Hokkaido using local seismic network, AS-net

*Shinako NOGUCHI¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction Research Division for Earthquakes and Disaster Mitigation

地震予知総合研究振興会（以下、振興会）では、従来の地震観測網が疎であった東北地方北部から北海道南西部にかけて36点からなる地域地震観測網AS-netを整備し、2014年から当該地域の地震活動について震源決定を行ってきた（野口・他、2016）。本発表では、2014-2020年の震源決定により蓄積された検測値を用いたトモグラフィ解析による地下構造推定結果と、低周波地震を含む地域の地震活動との関連について述べる。トモグラフィ解析では、二重走時差トモグラフィ法（Double Difference tomography, Zhang and Thurber (2003)）を用いる。この手法で用いるP波およびS波の走時情報については、振興会の震源決定による検測値と、気象庁一元化震源の検測値を用いる。両者に含まれる観測点は合計165点となる。観測点振興会については2014-2020年の3,514地震、一元化震源については2000-2013年の4,832地震の読み取り値を使用する。これらによるP検測値は合わせて365,324、S検測値は同312,652となる。なお、振興会の震源決定対象領域は陸域下の狭い範囲なので、一元化震源は特に太平洋沖を含む広い範囲の地震を使用する。

解析の結果、推定された地下構造と、地殻内地震の分布や重力異常分布との関連がいくつかみられた。いくつかの地殻内地震活動は、地表付近の低速度異常領域とその下の領域の境界面からすぐ下に分布していた。また、浅部（深さ5 km）の速度異常分布は重力異常分布とよく対応しており、堆積層による走時遅れを反映していると考えられる。

また、対象地域にはいくつか低周波地震活動があり、八甲田山や岩木山など火山に関連するものの他、下風呂など非火山性のものもある。また、函館市鶴野付近の低周波地震活動は、浅部低周波地震も伴うなど注目されている（Yoshida et al., 2020）。なお、本研究の対象領域に隣接（一部重複）する北海道南西部において、Shiina et al. (2018)はトモグラフィ解析を用いて地殻内地震と深部低周波地震の発生メカニズムを考察している。本発表でも、Shiina et al. (2018)の結果と比較しつつ、地下速度構造と低周波地震活動との関連に焦点を当てる予定である。

謝辞

本研究では、気象庁、防災科研、北海道大学、東北大学、弘前大学、青森県により観測・提供された地震観測データを使用しています。また、気象庁による一元化地震カタログのデータを使用しています。記して感謝いたします。

野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・石田貴美子、AS-netによる青森県・北海道南西部の震源分布、日本地震学会2016年度秋季大会、名古屋、2016年10月、S09-P16.

Shiina, T., Takahashi, H., Okada, T., & Matsuzawa, T. (2018). Implications of seismic velocity structure at the junction of Kuril-northeastern Japan arcs on active shallow seismicity and deep low-frequency earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 8732–8747.

<https://doi.org/10.1029/2018JB015467>

Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara (2020). Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, *Geophysical Journal International*, 223, 1724-1740. doi:10.1093/gji/ggaa418

Zhang, H., & Thurber, C. H. (2003). Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5), 1875–1889.

<https://doi.org/10.1785/0120020190>

Seismic reflection survey at Konan Town, Saitama Prefecture, Japan: linear dependence of the dip angles of reflection layers with depth

*Toshiki OHTAKI¹, Naomi Kano², Takanobu Yokokura²

1. AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geology and Geoinformation, 2. formerly of AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geology and Geoinformation

我々は2001年に埼玉県大里郡江南町（当時、現熊谷市）の荒川近くの低地でP波震源を用いた3成分反射法探査を行った（加野・他、2003）。探査地域は関東平野のほぼ中央に位置する。荒川の右岸にあたり、周囲は水田が広がる平坦な地域で、厚い堆積層におおわれている。大滝・他(2022)に示した、この探査記録を再解析してえられた深さ1 km程度までのP波速度および反射断面を紹介する。

測線はほぼ東西方向でその長さは2 kmほどである。探査は2回にわけて行った。受振点は96点の固定展開とし、総受振点数は192点、総測線長は1,910 mである。それぞれの受振展開で発震点数は213点および234点であり、オフセットは最大で2,752 mおよび 2,021 mである。受振および発震点の間隔は10 mであり、CMPの間隔は5 mである。受振点には固有周期10 Hzの3成分受振器を使用した。P波発震源としてパイプレータ（model Y2400）2台を使用した。スイープ周波数は10–80 Hz、スイープ長は20 sであった。スイープ波形のコンボリューション後の観測記録長は6秒、サンプリングは500 Hzである。

上下動受振器の記録を使って屈折波静補正を行った後、VPの解析をCMP番号で50点おき（250 mおき）にCMP 50からCMP 450までの9地点で行い、暫定的な重合速度を求めた。速度を求める際には、CMPギャザ上で反射波を追跡し、反射波の計算走時が観測走時およびその距離依存性と合うように求めた。この際、反射面の水平方向の連続性も考慮した。この後、残留静補正を行い、速度を再解析した。えられた速度は表層で200–300 m/s、1,000 mで2,700–3,000 m/s程度となった。えられた速度を使い、CMP重合し、マイグレーションを行い、P波のマイグレーション時間断面をえた。この結果を深度変換したものをP波のマイグレーション深度断面とした。

えられた反射断面は複数枚の傾斜の異なる反射面が確認でき、その傾斜から測線下で西から東への傾斜構造が卓越していることが分かる。その測線方向の傾斜角は7–12°ほどであり、深くなるにつれおよそ5–6°/kmで増加している。このことは、傾動ひいては傾斜を起こした断層運動が一定のペースで進行していたことを示唆している。このような反射面が深くなるにつれその傾斜が増加する傾向は、時間断面でも見てとることができる。このため、この傾向は速度解析の誤差によるものではない。

この地域では、今回解析した測線と斜行する方向で山口ほか(2000)がP波反射法探査を行っている。この二つの測線は交差していないが、その距離は最も近いところで1 kmほどと比較的近い。彼らの反射断面にも傾斜構造が確認されている。測線間のなす角度、反射面の対応から、探査域下での真の傾斜方向を推定すると、およそ山口ほかの測線方向かそれより多少北向きとなった。この結果は、地層の一般走向から傾斜の方向は彼らの測線方向である北東方向に近いとした山口ほかの議論を裏付ける。

加野直巳・横倉隆伸・山口和雄・大滝壽樹 (2003) 傾斜成層構造のPS反射法調査。物理探査学会第108回学術講演会論文集, 227–230.

山口和雄・加野直巳・横倉隆伸・木口努・横田俊之・田中明子・佐藤比呂志 (2000) 深谷断層周辺における反射法地震探査 ――江南台地と妻沼低地の地下構造――。地震 第2輯, 53, 115–125, doi:10.4294/zisin1948.53.2_115.

大滝 壽樹・加野 直巳・横倉 隆伸 (2022) 埼玉県江南町で `の反射法探査 ――反射面傾斜角の深さ依存性の検出――, 地質調査研究報告, 第 73 巻, 第 1 号, p. 19–28.

An Attempt to Discriminate Reflections Using Neural Networks for Improving Seismic Attenuation Profiling in Seismic Reflection Survey

*Haruka Kawabe¹, Tetsurou Tsuru¹

1. Tokyo University of Marine Science and Technology

研究背景と目的

反射法地震探査において、断層は主に反射面がずれることで観測できる。すなわち、反射面の存在しない部分では断層の観測が困難である。このため、従来の地震探査断面図では、反射面が存在する堆積層では断層を観測できるが、振幅が小さく反射面がおぼろげな火山岩質海洋地殻内部などでは断層の観測が困難であった。これに対し、著者らは、反射波の振幅以外の情報、例えば、減衰率を利用して解析をする研究を行っている。減衰率を利用した手法は計算した減衰率をマッピングして断面図を作成するため、通常地震探査断面図と比較すると振幅の影響が少ない断面図を作成することができる。断層では岩石の破碎により、不均質な構造であり、減衰率が大きいと予測されるため、通常の解析では観測が困難だった部分においても、高減衰部として断層の可視化が期待できる。Tsuru et al.(2018)では減衰率計算手法が適用され、一部の断層下部に高減衰部が観測でき有効性が示された。しかし、正確な構造の可視化には至っておらず、精度の低さが課題となった。精度が低い原因の一つに、減衰率の計算に用いる時間ウィンドウに関して研究が進んでいないことが挙げられる。減衰率計算手法では、地震探査データを分割して時間ウィンドウを作成し、ウィンドウ毎に減衰率の計算を行う。ここで、振幅の小さい反射波や散乱波をとらえるには、細かく地震探査データを分割することで、ウィンドウ内に含まれるノイズを少なくし、目的のシグナルのエネルギーの比を高くすることが有効と考えられる。さらに、減衰断面図はウィンドウ毎に計算した減衰率をマッピングしたものであるため、ウィンドウの細分化は断面図の分解能の向上につながる。しかし、細かい幅で分割すると、反射波や散乱波が含まれていないウィンドウも多く作成される。そのようなウィンドウから計算した減衰率を解析に用いると結果に悪影響を与え、精度低下の原因となる。よって、反射波や散乱波を含んでいるウィンドウのみを選択し、計算に用いるべきである。しかし、人間により大量のウィンドウの判別を行うことは、現実的でなく、客観性に欠ける。そこで、本研究ではニューラルネットワークを用いてウィンドウに反射波が含まれているか判別を試みた。

研究方法

ネットワークの学習、テスト共に合成したデータによって行った。振源としてRicker波を使用し、往復走時、反射係数、減衰率の3つのパラメータを考慮し反射波として作成した波形に、正規分布ランダムノイズを加えることで合成記録を作成し、これを分割することで時間ウィンドウのデータを作成した。各反射波の最大値を含んでいるウィンドウを正解のウィンドウとした。判別には3層ニューラルネットワークを用いた。出力層の活性化関数にSigmoid関数を用い、出力を0から1の範囲内とし、これを反射波が含まれている確率の大きさとした。入力配列について、1つのウィンドウに複数の反射波が含まれていた場合に、時間領域では反射波の位置関係によってピークの位置が様々に変化するのに対し、スペクトルは形状が変化のみであり、判別が容易であると考えたため時間領域のデータを直接入力するのではなく、振幅スペクトルを入力した。学習したネットワークをテストデータに適用し、精度の評価を行った。

結果と今後の課題

正解ウィンドウのうち82.5%を出力値0.5以上と判別できた。出力値0.5以上と判別された中で、誤答だったものの(正解ウィンドウではなかったもの)は12.2%であった。また、正解ウィンドウの73.5%は出力値0.9以上であり、出力値0.9以上において誤答率は3.9%であった。誤答の中には、ノイズのみのウィンドウを選択した場合だけでなく、正解ウィンドウの前後に位置しており、反射波の一部が含まれてしまったウィンドウを選択した場合が存在し、出力値が大きい場合の誤答ほどその傾向が強かった。また、反射波の振幅が小さいウィンドウは出力値が小さい傾向となったが、前後のウィンドウと比較すると高い出力値となることが多いことが分

かった。今後の課題として、反射波全体は含まないが一部を含むウィンドウを誤答とするか考察を行い、正解データのラベル付けについて再考する必要がある。また、振幅が小さい反射波の判別において、前後のウィンドウと比較することで正答率を向上できないか検討する必要がある。加えて、ニューラルネットワークのモデルや、学習データの改善により精度が向上する可能性があるため、検討を行っていく必要がある。

参考文献 Tsuru T., Park J., No T., Kido Y., Nakahigashi K., 2018, Visualization of attenuation structure in volcanic area by seismic attenuation profiling, Earth Planets and Space.70:31

Seismic velocity structure at the Kairei Hydrothermal Vent Field near the Rodriguez Triple Junction in the Indian Ocean

*Ayato Morii¹, Toshinori Sato¹, Hiroyoshi takada¹, Tomoaki Yamada², Masanao Shinohara²

1. Chiba University, 2. the University of Tokyo

インド洋ロドリゲス三重会合点の北側に伸びる中央インド洋海嶺の第1セグメント東側には、きれいな熱水域があり、水素を豊富に含む熱水が噴出している。この熱水域は、白鳳海丘と呼ばれる玄武岩質の海丘にあるが、その周辺では斑れい岩やかんらん岩が確認されている。このような地下深部の岩石が海底面近くまで上昇し、海水との作用により蛇紋岩化することで水素に富んだ熱水が発生していると考えられている。この地域の地下構造等を解明するために、2013年海底地震計（OBS）と人工震源を用いた地震波探査を行った。これまで、高田・他（JpGU、2015）によってP波速度構造が報告され、白鳳海丘とその北側のYokoniwa Riseの地下1-2km付近でP波速度6.0km/sを超える高速度領域が確認され、地下深部の岩石の上昇が示唆されている。これらが蛇紋岩化しているかどうかなどを調べるには、S波構造を求めることが重要となる。そこで本研究では、人工震源及び自然地震を用いたP波とS波の両方の速度構造の解析を行った。

2013年1月27日から3月19日にかけて海洋研究開発機構、観測調査船「よこすか」を用いて人工震源構造調査および自然地震観測を行った（YK13-01航海、YK13-03航海）。地震波探査では、19台のOBSと1台のエアガン（G.I gun）、シングルチャンネルストリーマーケーブルを使用した。S波と思われるPhaseを見やすくするため、地震計の水平2成分をRadial方向とTransverse方向に回転させてS波到達時刻の読み取りを行った。この際必要となる地震計の方位は水中直達波の振動軌跡から推定した。3次元速度モデルの推定は、まず人工地震のみを用いFAST(Zelt and Barton, 1998)を使用して行った。続いて、人工地震で推定したモデルを初期モデルとして自然地震も含めて3次元モデルを推定した。このとき、tomoDD(Zhang and Thurber, 2003)を使用した。人工地震のみを用いた解析の結果、P波速度構造から見えていた白鳳海丘とYokoniwa Riseの下の高速度領域において、 V_p/V_s 比は2.0程度となった。これは斑れい岩の1.9、かんらん岩の1.7と比べると高い値である。蛇紋岩の V_p/V_s 比は、1.8-2.2程度といわれており、この結果は蛇紋岩化を示唆する可能性がある。この結果を基に自然地震を用いて3次元モデルを作成し震源の再決定も行った結果、人工地震のみを用いた結果と同様に2.0程度の高い V_p/V_s 比が熱水噴出孔周辺で見られた。また、自然地震の震源を見ると、熱水噴出孔とその北西数kmでクラスターが見られた。こうした地震を引き起こす断層が熱水の移動経路となっており、そこで熱水とかんらん岩が反応し蛇紋岩化していることが考えられる。

謝辞: 観測に関して、海洋研究開発機構の観測調査船「よこすか」の船長と乗組員の方々の協力を頂きました。本研究は科研費新学術領域 20109002 の助成を受けて行われました。

V_{SV} and V_{SH} structures beneath Asama volcano

*Yutaka NAGAOKA¹, Kiwamu NISHIDA², Yosuke AOKI², Minoru TAKEO²

1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

近年、トバ湖カルデラやイエローストーンカルデラ、霧島山といった大規模なカルデラやカルデラ縁の火山において、地下のS波速度構造の異方性 (V_{SV} と V_{SH} の不一致) が確認されている (Jaxybulatov et al., 2014; Jiang et al., 2018)。このような異方性はマグマだまりのシル状構造によって説明でき、一連のシル貫入によってマグマだまりが発達したことを示唆すると考えられている。しかし、どうしてシル状構造となるのか、またこのような構造は大規模なカルデラを形成する火山のみに共通な特徴であるのか、といったことは明らかになっていない。そこで本研究では、上記のような大規模なカルデラを形成していない浅間山について、マグマだまり内のS波速度異方性が見られるか調べた。

本研究では、地震波干渉法により浅間山周辺の観測点間を伝播する表面波を用いて速度構造を推定する。地震波干渉法は脈動などのランダムな波動場の相互相関関数を計算することによって観測点間の地震波の伝播を抽出する手法である。相互相関関数は観測点間の速度構造に敏感であるため、地震波干渉法は局所的な構造推定に適している。

解析には、浅間山周辺の46観測点（東大地震研、防災科研、気象庁）の3成分で記録された2005年7月～2007年7月の脈動記録を用いた。脈動記録の上下動成分の相互相関関数から観測点間を伝播するRayleigh波を、Transverse成分の相互相関関数からLove波を抽出した。抽出されたRayleigh波とLove波に対して、SPAC法（Aki, 1957）を用いて解析領域全体の平均的な1次元構造の位相速度分散曲線を測定した。分散曲線は0.1-0.5 Hzで安定的に測定でき、この周波数帯においてRayleigh波とLove波の位相速度は概ね一致する結果となった。マグマだまり内のS波速度異方性が確認された霧島山について、同様の手法により測定した平均的な1次元構造の位相速度分散曲線では、0.1-0.3 HzにおいてLove波位相速度の方がRayleigh波より最大1.2 km/s程度高速度となったが、浅間山ではこのようなRayleigh波とLove波の位相速度の違いが見られなかった。

次に、各パスの位相速度を領域平均構造に対する速度異常として測定し、各パスの位相速度を用いて表面波位相速度トモグラフィを行った（Rawlinson and Sambridge, 2005）。表面波位相速度トモグラフィは、4つの周波数帯（0.1-0.2 Hz、0.15-0.3 Hz、0.2-0.4 Hz、0.25-0.5 Hz）で行った。その結果、Rayleigh波の0.1-0.2 Hzでは浅間山の山頂より西側に低速度異常が見られ、0.15 Hzより高周波数帯では山体全体が低速度異常となった。一方Love波では、全ての周波数帯で山体全体が低速度異常となり、山頂の東側で低速度異常がより強い傾向が見られた。今後、線形化インバージョン（Tarantola and Valette, 1982）を行い、 V_{SV} 、 V_{SH} 構造を推定する。

Poster session (2nd Day) | Regular session : S07. Structure and dynamics of the Earth and planetary interiors

🗓 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 8:30 AM UTC | 🏢 ROOM P-3
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S07P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S07P-01] Double Seismic Discontinuities at the Base of the Mantle Transition Zone below the Japanese Archipelago?

*Keiko KUGE¹ (1. Department of Geophysics, Kyoto University)

Double Seismic Discontinuities at the Base of the Mantle Transition Zone below the Japanese Archipelago?

*Keiko KUGE¹

1. Department of Geophysics, Kyoto University

マントル遷移層底部を位置づける660km地震波速度不連続面は、マントルを主に構成するオリビン系鉱物の相変化で生じていると考えられている。一方で、深さ660km周辺に複数の地震波速度の不連続面が存在することが、反射波や変換波などを用いた地震波の解析から、マリアナ諸島やトンガ・フィジー諸島などでみつまっている（例えば、Tibi et al., GRL 2007; Zang et al., GRL 2006）。複数の660km地震波速度不連続面の存在は、マントル内のオリビン以外の鉱物による相転移に関係するとも考えられるため、複数の不連続面の有無やその不連続面の特性は、オリビン以外の鉱物の分布や種類、相を含めてマントルの特性を理解する上で重要である。

本研究では、サハリンで発生した深発地震について、日本の地震観測点で取得したデータを用いて、北日本下のマントル遷移層周辺を伝播したP波を調べる。本研究でみるP波は、西方へ沈み込む太平洋プレートから海側（沈み込む方向と反対側）に離れた場所に位置するマントルを伝播している。震央距離約9～13度の観測点の鉛直成分で、地震波速度モデルiasp91から予想される時刻に類似して、660km地震波速度不連続のtriplicationによると思われるP波の後続波がみられる。そして、さらに遠方の観測点で、みかけ速度の大きいP波の後続波が観測される。660km不連続のさらに深くの地震波速度不連続に起因するtriplicationによるものかもしれない。本発表では、この地震波の特性を紹介する。

Poster session (2nd Day) Regular session : S10. Active faults and historical earthquakes
--

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 8:30 AM UTC | 🏢 ROOM P-4
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S10P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-01] Tectonic landforms along the eastern margin of the Ou Backbone Range, central part of Miyagi Prefecture: Potential of M7-class earthquake

*Masayoshi TAJIKARA¹, Tomoo Echigo² (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Kankyo Chishitsu Co.,Ltd)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-02] Tectonic landforms and slip-rate of the Shibetsu fault zone in the eastern part of Hokkaido, Japan

*Takashi AZUMA¹, Daisuke HIROUCHI² (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Shinshu University)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-03] Subsurface structure revealed by seismic reflection survey along the eastern margin fault zone of the Yokote Basin, northeast Japan

*Hidenobu TAKAHASHI¹, Haruo Kimura¹, Yasuhira Aoyagi¹, Motoshi Tomura², Katsuya Noda² (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Geosys Inc.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-04] Inversion of lateral faults in the Chugoku district explored by gravity anomaly: Case studies at the Chojagahara – Yoshii faults and the Oharako fault

*Akihiro SAWADA¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Yuki Matsui¹, Amane Sugii¹, Masato Fukata¹, Tsukasa Yamamoto¹, Ryo Honda², Shinsuke Okada³ (1. College of Science and Engineering, Kanazawa University, 2. Mount Fuji Research Institute, 3. Iwate University)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-05] Study on mitigation of earthquake disasters caused by inland active faults : Fault model improvement considering shallow geologic structure

*Kimie NORIMATSU¹, Yoko Yoshimi¹, Naoya Takahashi², Tomoki Nakamura², Takashi Ishizawa¹, Shinsuke Okada³, Haruhiko Suzuki⁴, Yasuo Ichikawa⁴, Hisanori Matsuyama⁴, Shinji Toda¹ (1. IRIDeS, Tohoku Univ., 2. Tohoku Univ., 3. Iwate Univ., 4. OYO Corporation)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-06] The Large Earthquake on Dec. 7, 1493 Preceded the 1498 Meio-tokai Earthquake

*Tomoya HARADA¹, Akihito NISHIYAMA², Akihiko KATAGIRI³ (1. N/A, 2. Nara National Research Institute for Cultural Properties, 3. Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata Univ.)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S10P-07] Discussion on the causes of tsunamis accompanied by the 1914 Sakurajima earthquake, Japan

*Reiji KOBAYASHI¹ (1. Kagoshima University)

Tectonic landforms along the eastern margin of the Ou Backbone Range, central part of Miyagi Prefecture: Potential of M7-class earthquake

*Masayoshi TAJIKARA¹, Tomoo Echigo²

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Kankyo Chishitsu Co.,Ltd

奥羽脊梁山脈の東縁沿いには北上低地西縁断層帯や福島盆地西縁断層帯などの活断層帯が発達する（今泉・他編，2018等）。北上低地西縁断層帯と福島盆地西縁断層帯との間の地域では，奥羽脊梁山脈とその東方の相対的低地帯との地形境界が連続するにも関わらず，大規模な活断層（帯）は知られていない．この顕著な活断層が知られていない区間の北半部（岩手県一関市～宮城県大崎市付近）では，2008年に大規模な地震（岩手宮城内陸地震；Mj7.2）が発生しているが，地震後の調査によって，多数の小規模な活断層が散在すること（国土地理院，2009等），河成段丘に幅の広い撓曲状の変形が生じていること（田力・他，2009等）が明らかとなっている．岩手宮城内陸地震の震源域の南方の奥羽脊梁山脈東縁（宮城県加美町～仙台市青葉区付近）においては，奥羽脊梁山脈と東方の相対的低地帯との境界はやや不明瞭ながらも連続するにも関わらず，これまで愛子断層（大内，1973）以外の確実な活断層は知られていない．本研究では，この地域の詳細な空中写真判読および現地調査・地形測量を行い，断層活動による変位地形の抽出し，その確実性と活動性を検討した．

調査地域には，奥羽脊梁山脈から東方へ流出する河川が数多く分布するが，比較的大規模な河川沿いに河成段丘が良く発達する．今回の調査の結果，これらの河成段丘のいくつかの地点において断層活動によると思われる変位地形（断層崖や撓曲崖）が見いだされた．以下でいくつかの例について述べる．調査地域北部の宮城県加美町付近の鳴瀬川沿いには数段の河成段丘が発達しているが，それらの段丘面に西上がりの撓曲変位が認められた．それらの上下変位量は5～23 mで，高位の段丘ほど変位量が大きく，変位の累積性が認められる．この付近の河成段丘面は小池・町田編（2001）やMatsu'ura and Sugaya (2017)によって詳細な編年がなされており，それら既報の段丘面の年代から，上下変位速度は0.2～0.3 mm/yrと算出された．その南方の宮城県大町付近の吉田川沿いの河成段丘面においても撓曲崖状の変位が認められ，その変位量は2～3 m程度であった．吉田川沿いの段丘面の年代は今回の調査では明らかにすることはできなかったが，北方の鳴瀬川沿いの段丘面との対比から最終氷期の段丘面と推定され，確実ではないが上下変位速度は0.1 mm/yrと算出された．さらに南方の仙台市泉区福岡付近の七北田川沿いの段丘面にも3～4 mほどの変位が認められ，上下変位速度は0.2 mm/yr程度と算出された．仙台市青葉区愛子付近では広瀬川沿いに数段の河成段丘面が発達するが，ここにも西上がりの断層変位が認められる（愛子断層）．愛子断層は既知の活断層であるが，今回の調査によって，既報よりも長く，広瀬川の河谷全体を横断する活断層が存在することが明らかとなった．広瀬川沿いの河成段丘は編年学的研究が進んでおり（幡谷，2006；早田・八木，1989等），それらの年代に基づいて上下変位速度は0.1～0.2 mm/yrと算出された．

今回の調査の結果，調査地域の奥羽脊梁山脈東縁付近には，断続的ではあるが西上がりの断層変位が複数認められ，いずれも同程度の変位速度（0.1～0.3 mm/yr）を持つことが明らかとなった．地表の断層変位地形が明瞭でなく，断片的である理由は明らかではない．理由の一つとして，この地域では北上低地帯や福島盆地の西方の奥羽脊梁山脈に比べて，火山堆積物が広く厚く堆積しているために断層変位が地層中で吸収・分散して地表で認識しづらくなっている，という点が挙げられる．今回の調査地域は，地形（奥羽脊梁山脈と低地帯との地形コントラスト），地質（火山堆積物が厚く堆積），活断層の分布（短い活断層が断片的に分布），河成段丘の幅の広い撓曲変形（鳴瀬川沿い，Tajikara, 2004）等，岩手宮城内陸地震震源域と類似した性質を持っており，同様な西上がりの大規模な構造（南北50～60 km程度）が伏在し，岩手宮城内陸地震と同程度（M7クラス）の地震を発生させる可能性が考えられる．

本研究は令和3年度防災科学技術研究所委託研究「活断層の詳細位置情報等に関する調査研究」の成果の一部をとりまとめたものである．

Tectonic landforms and slip-rate of the Shibetsu fault zone in the eastern part of Hokkaido, Japan

*Takashi AZUMA¹, Daisuke HIROUCHI²

1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Shinshu University

北海道東部に位置する標津断層帯は、北東-南西走向で北西側が隆起する成分を持つ逆断層である。地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）による長期評価では、最新活動時期、平均変位速度および平均活動間隔のいずれもが不明となっていて、将来の地震発生確率を算出できていない。この活断層に沿っては、最終氷期に形成された扇状地が撓曲変形を受けている地点が多い。これらの扇状地を構成する礫層の層厚が厚いため、これまでに実施されたトレンチ調査等で明瞭な断層変形を地表付近で確認することができていない。そのため、地形面の形成年代と変形量に基づき、この活断層の上下成分の平均変位速度の推定を試みた。

今回の調査の結果、川北、武佐、俣落の3地区において、地形データと扇状地面の形成データを取得することができ、標津断層帯の平均変位速度（上下成分）の検討を行なった。川北地区では、現地測量に基づいて作成した地形断面図から上下変位量が約10 mと求められた。その測線上で掘削したKK-05のボーリングコアでは、Ma-Iの下位に層厚約2 mの風成ロームが確認されており、その中には目視できる範囲ではKc-1火砕流堆積物（約3.5～4 万年前）が含まれていないことから、4万年前以降に形成された地形面であると推定される。これらの上下変位量と地形面の形成年代の情報に基づき、川北地点における標津断層帯の平均変位速度（上下成分）は0.25 m/千年以上と算出した。武佐地区では、空中写真図化に基づいて作成した地形断面図から、上下変位量が約10 mと求められた。また、この測線に近接するMS-02の露頭では、Ma-Iの風成ローム中にアトサヌプリ火山灰（約2.3～2.6万年前）が挟在されていることが確認された。このことと、目視される範囲ではKc-1火砕流堆積物が認められないことから、MS-02の露頭が位置している地形面は約3～4万年前に形成されたと推定される。これらの上下変位量と地形面の形成年代の情報に基づき、武佐地点における標津断層帯の平均変位速度（上下成分）は約0.33～0.25 m/千年と算出した。俣落地区では、空中写真図化に基づいて作成した地形断面図から上下変位量が約52 mと求められた。この測線上で掘削したMO-01のボーリングを掘削したが、地形面の形成年代を決めるために有効な情報は得られなかった。仮に、川北地区や武佐地区と同程度の平均変位速度（上下成分）が俣落地区でも見られるのであれば、地形面の形成年代は15～20万年前となるが、それを支持するデータは今回の調査で得ることはできなかった。

今回の調査によって、標津断層帯の中部に位置する開陽断層において平均変位速度（上下成分）の検討を行ない、約0.3 m/千年（0.33～0.25 m/千年）と算出された。地形面の年代は摩周-Iより下位の風成ロームを詳しく調べることで、さらに年代の精度が向上することが期待される。なお、今回の調査では、平均変位速度の算出が主目的であったため、断層構造の存在を明らかにすることができていない。今後、活断層調査の成果を地震動評価や断層変位の事前評価に繋げるためには、標津断層帯の断層変位地形を形成した活断層の地下形状を確認するための調査が実施されることが望まれる。

本調査は、文部科学省受託研究「令和3年度 活断層評価の高度化・効率化のための調査」の一部として実施されたものである。

Subsurface structure revealed by seismic reflection survey along the eastern margin fault zone of the Yokote Basin, northeast Japan

*Hidenobu TAKAHASHI¹, Haruo Kimura¹, Yasuhira Aoyagi¹, Motoshi Tomura², Katsuya Noda²

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Geosys Inc.

高橋 他 (2022, JpGU) では横手盆地東縁断層帯について、1896年の陸羽地震(Mj= 7.2)の際に明瞭な地表変位を生じた(例えば、山崎, 1896; 松田ほか, 1980) 北部区間と、地表地震断層の出現が報告されていない南部区間で、地下構造の特徴にどのような違いがあるかを明らかにするために、断層の走向方向とほぼ平行な測線において反射法地震探査を実施した。本発表では、反射断面の北部区間に着目して千屋断層上盤側の断層構造と、反射断面と過去に実施された重力探査(木村 他, JpGU, 2021) により推定された密度断面との比較を通じた考察について報告する。

横手盆地東縁断層帯は、秋田県仙北市から同湯沢市に至る、南北走向で総延長約56 km、上下変位レートが1.0 mm/yr程度の活断層帯である(地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2005)。同断層帯は主として東側隆起の逆断層であり、大局的には横手盆地と東方の山地との境界に沿うように分布している。1896年の陸羽地震では、同断層帯の北部(約26 km, 白岩断層・太田断層・千屋断層・金沢断層北部)に沿って明瞭な地表地震断層が出現した(例えば、山崎, 1896; 松田ほか, 1980)。一方、同断層帯の南部(約30 km, 金沢断層南部・杉沢断層・大森山断層)では顕著な地表変位は報告されていない。

高橋 他 (2022, JpGU)では、秋田県仙北郡美郷町の善知鳥(うとう)付近から、みずほの里ロード沿線の南方へ至る約15 kmの測線でP波反射法地震探査を実施した。探査測線は、横手盆地東縁断層帯の地表トレース(今泉ほか, 2018)にほぼ平行に設定した。発震は大型バイブレータ震源(米国IVI社製のHEMI-40)で行い、標準発震点間隔は25 mである。標準受振点間隔は25 mとして、460 ch以上を同時収録し、サンプリング間隔は2 msである。データ収録には独立型レコーダ(米国Geospace社製のGSX, GSR)を用いた。取得データに対して、一般的な共通中間点重合法によるデータ処理(例えば、物理探査学会, 2016)を行い、マイグレーション深度変換断面から、深度約3 km程度までの地下構造をイメージングした。その結果、地表での破壊停止部を境界に北部では比較的連続性が良く、ほぼ水平な反射面が深さ2.5 km程度まで卓越しているのに対し、破壊停止部の南部では反射面は不明瞭であるという特徴の違いを明らかにした。

反射測線北部の4.2 km区間(CDP1~420; 善知鳥~六郷東根)で得られた反射断面の特徴について、既知の反射断面との比較を通じ考察する。このCDP区間は南端付近で千屋断層と斜交してその上盤側を通過する。区間南部のCDP350-420、深さ0-500 mの区間では見かけ上北へ傾斜する中角度の連続した複数の反射面が分布する。また、これらの反射面を深部方向へ追跡すると、傾斜が小さくなり、一部ではほぼ水平な反射面も見られた。こうした構造は、地下に低角な部分を有し浅部で高角化して地表に出現する逆断層形状に伴って生じたものであると考えられる。本探査測線の北方で千屋断層とほぼ直交する測線で実施された反射法地震探査(佐藤 他, 2006)でも、同様な地下構造が報告されている。ただし、本探査測線は千屋断層と斜交していること、千屋断層の東側には他にも複数の断層が分布すること、等も考慮する必要があり、佐藤 他 (2006)で見られた地下構造との連続性については、現在検討中である。また、CDP420までの測線北部では川口断層とその他小規模な地表地震断層のトレースを横切る。それら断層トレースと反射測線の直交部分はCDP160, 280に相当するが、その近傍で中角度に傾斜する反射面が確認された。これらの急傾斜する反射面も上記断層群に伴う地層の変形を示している可能性がある。

先行研究の重力探査に基づき推定された密度断面図(木村 他, 2021, JpGU)では、地表での破壊停止点を境界としてその北側では南側に比べて相対的に低密度な構造をもつ領域が存在する。反射断面においては、この低密度域と同程度の空間スケールで連続性の良い水平な反射面が観測されている。また、とくに深度1000 m程度までに関しては、横手盆地東縁断層帯に直交する測線での反射法地震探査が数多く実施されている。今後は、こうした地下構造情報に加えて、地質図・ボーリングデータ等の地質情報とも比較し、本探査断面の地質学的解釈を進める。

Inversion of lateral faults in the Chugoku district explored by gravity anomaly: Case studies at the Chojagahara –Yoshii faults and the Oharako fault

*Akihiro SAWADA¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Yuki Matsui¹, Amane Sugii¹, Masato Fukata¹, Tsukasa Yamamoto¹, Ryo Honda², Shinsuke Okada³

1. College of Science and Engineering, Kanazawa University, 2. Mount Fuji Research Institute, 3. Iwate University

・はじめに

中国地方西部では北東-南西方向のリニアメントが卓越しており、それに沿って地質境界や断層、破碎帯が認められ、それらの一部は地質断層が第四紀後半に再活動した活断層である可能性が指摘されている(森岡ほか, 2007)。この地域の活断層は概ね北東-南西から東北東-西南西方向に延びており、これらの活断層は白亜紀の南北圧縮応力場において形成された左横ずれ断層が現在の東西圧縮応力場でインバージョンして、右横ずれ運動をしていると示唆されている(e.g. 金折・遠田, 2007)。応力場の変化により断層のずれ方向が逆となるインバージョンテクトニクスについては逆断層での例がよく知られており、重力異常に基づく断層構造の解析結果から高角の逆断層や上盤の基盤深度が下盤の基盤深度より深い逆断層の存在が報告されている(e.g. Hiramatsu et al., 2019)。横ずれ断層についても重力異常分布からそのずれ方向を知ることが可能である(萩原, 1986; 萩原ほか, 1997; Matsumoto et al., 2016)。本研究では長者ヶ原-芳井断層および大原湖断層を対象として重力異常解析を行い、西南日本における横ずれ断層の運動方向のインバージョンについて重力異常の観点から報告する。

・データと方法

本研究では、長者ヶ原-芳井断層および大原湖断層周辺で2020~2022年にかけてそれぞれ212点と51点の重力測定を行なった。使用した重力計は金沢大学所有のScintrex社製CG-3M型重力計である。測定点の緯度、経度および標高はGNSSにより決定した。解析には金沢大学既存重力データに加え、国土地理院(2006)、西南日本重力グループ(2010)、Yamamoto et al. (2011)、産業総合技術研究所地質調査総合センター(2013)の重力データを使用した。地形補正とブーゲー補正に用いる仮定密度は長者ヶ原-芳井断層周辺については2550 kg/m³、大原湖断層周辺については2300 kg/m³である。重力データは通常の補正に加え、10mDEMによる地形補正、ローパスフィルター処理、トレンドの除去を行った。この重力異常に対して断層構造の特徴を捉えるために、方向微分(断層の走向方向および走向と垂直方向)の計算を行なった。

・結果と考察

長者ヶ原-芳井断層では、北東部および南西部において重力異常分布と走向方向の方向微分値分布から左横ずれのパターンが認められる。現在の応力場では長者ヶ原-芳井断層は右横ずれの断層運動をしているため、重力異常すなわち密度構造の観点から過去において左横ずれの断層運動を長者ヶ原-芳井断層がしていたことが確認された。一方、大原湖断層では、重力異常分布と走向方向の方向微分値分布からは場所により右横ずれあるいは左横ずれのパターンが認められ、断層帯全体でインバージョンを起こした活断層であるか否かの判断は困難である。大原湖断層についてはその大部分が険しい山地に延びており、重力測定点を密に配置することが難しいため、横ずれ断層の運動方向の情報を重力異常から得られなかった可能性もある。

謝辞：この研究を行うにあたり、国土地理院、西南日本重力グループ(2010)、Yamamoto et al. (2011)、産業総合技術研究所地質調査総合センター(2013)の重力データを使用しました。

Study on mitigation of earthquake disasters caused by inland active faults : Fault model improvement considering shallow geologic structure

*Kimie NORIMATSU¹, Yoko Yoshimi¹, Naoya Takahashi², Tomoki Nakamura², Takashi Ishizawa¹, Shinsuke Okada³, Haruhiko Suzuki⁴, Yasuo Ichikawa⁴, Hisanori Matsuyama⁴, Shinji Toda¹

1. IRIDeS, Tohoku Univ., 2. Tohoku Univ., 3. Iwate Univ., 4. OYO Corporation

1. はじめに

活断層による浅部地殻内地震では、断層近傍での強震動や地表変位による構造物の被害が想定される。1995年兵庫県南部地震や2016年熊本地震にみられるように、特に都市直下の活断層が活動した場合、その被害はきわめて甚大となる。このような都市直下の地殻内地震を対象とした防災対策を考える上では、構造物に大きな被害をもたらす要因とともに、起こり得る地震災害の種類や規模を詳細に予測することが重要となる。当研究グループは①建物に大きな被害をもたらす要因の特定、②強震動および変位の予測方法の検討、③断層近傍の地質・地盤の調査を行っている。本発表は②強震動および変位の予測方法の検討のうち、主に予測に用いる断層モデルの設定方法の改良案について報告する。

2. 浅部断層構造を考慮した断層モデル（熊本地震での再現）

強震動の想定に用いる断層モデルの設定で一般的な手法は、地震発生層内を対象とするが、熊本地震後の研究では地震発生層より浅い地表面付近での長周期卓越型の強震動が断層近傍での大きな揺れに関与したことが示唆された。本研究は熊本地震を例に、断層浅部の構造を詳細にモデルに反映することで断層近傍の変位や強震動を説明できるモデルの設定方法を検討した。

予備的検討として、地震発生層上端と地表面との間の断層モデル形状が変位や強震動の予測にどのように影響するのか感度解析を行った結果、断層から離れた場所ではほとんど影響が無い一方、断層上端から数kmのごく近傍では大きく影響することが示された。この結果から、先行研究で指摘されていた地震発生層より浅い部分での不均質性を含みすべり分布のみでなく、断層形状や構造も断層近傍の強震動や変位の予測に重要であることが示された。

予備的検討の結果をふまえて、断層モデルはKumahara et al. (2016) による地表地震断層分布から検討した断層上端形状と、Toda et al. (2016) のスリップパーティションを考慮した地下形状を用いることで、地質・地形情報を重視し詳細な形状や構造を反映した設定とした。

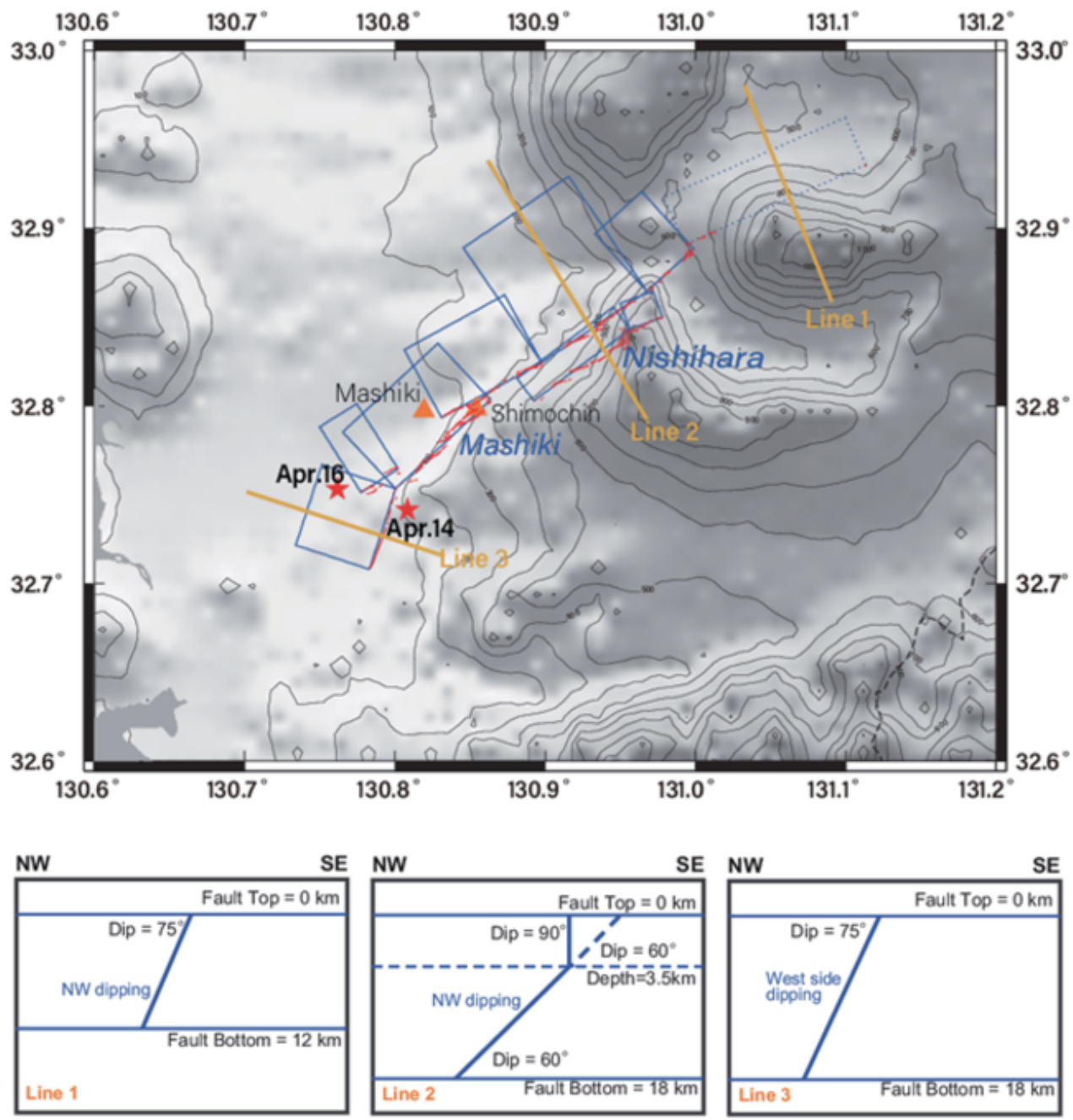
ディスロケーションモデル (Okada, 1992) を用いた変位計算の結果、布田川断層と出ノ口断層が並走する部分と益城町周辺に変位の集中がみられた。変位量は水平方向、上下方向ともに大きいところで約2mと、地殻変動観測 (地理院, 2016) や現地調査 (Toda et al., 2016) の結果とも整合している。当グループの関連研究である吉見・遠田 (2020) では建物被害の主要な要因を明らかにするため、建物被害率分布 (内藤ほか, 2018) と活断層分布 (鈴木ほか, 2017, 熊原ほか, 2017) や地表地震断層分布 (Kumahara et al., 2016), 地質図 (熊本県地質図編纂委員会, 2008) と比較し整理している。建物被害率が高まる箇所は断層が並走したり分岐するなど、構造が複雑になった箇所や断層の端部に集中しており、この分布の傾向は本研究の変位が集中する箇所と調和的である。この断層モデルで地震動の観測波形も説明可能であることを確認するため、KiK-net益城での観測波形と波数積分法 (久田, 1997) で計算した速度波形を比較した。断層近傍において地盤の永久変位を引き起こすような長周期の地震動に着目するため、0.8Hzのローパスフィルタを適用した。比較の結果はよく一致しており、定量的な指標として相関係数を求めると、どの成分も0.9前後と高い正の相関を示した。

これらの結果から、断層ごく近傍の地震動や変位の予測には活断層調査等の地質・地形情報を参照した詳細な断層モデルを用いることが有効であることが示された。地震前に知り得る情報である活断層データと地震後の情報である地表地震断層分布はよく整合しており、活断層情報から地表地震断層はある程度は予測が可能で

あると言える。

3. 浅部詳細断層モデルの既往活断層への展開

当研究グループでは断層近傍を対象とした強震動予測手法の高度化を目指しており、熊本地震の例で得た知見を既往の活断層に展開する。実践的な手法として検討するのに身近であり、詳細な調査が可能な活断層として宮城県の長町-利府線断層帯が挙げられる。仙台市を北東-南西方向に横切るこの断層帯は宮城県第三次地震被害想定（宮城県防災会議，2004）では長さ40km，幅20km，Mw7.14の断層モデルが想定されている。この断層モデルは40kmの長さを1枚の矩形で近似した単純なものであるが、実際の活断層分布は並走やステップ，走向の変化を伴い複雑であり，これらを反映した断層モデルを構築する。そのため，長町-利府線断層帯の形状や構造の詳細を明らかにする研究として，地形とボーリングデータを比較し断層の位置を見直す地形学的検討（高橋・遠田，2021）や断層帯を横断する測線での常時微動探査（鈴木ほか，2021）などを実施している。分かり得る情報をモデルに反映していくことが強震動予測に重要なことであり，地震災害の予測の向上につながることであることから，活断層や地盤情報等の調査データの充実が重要である。



The Large Earthquake on Dec. 7, 1493 Preceded the 1498 Meio-tokai Earthquake

*Tomoya HARADA¹, Akihito NISHIYAMA², Akihiko KATAGIRI³

1. N/A, 2. Nara National Research Institute for Cultural Properties, 3. Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata Univ.

1. はじめに

16世紀以前に発生した地震については、現存史料の筆者がおもに京都・奈良を中心とした地域に限定されるために、被害等の実態が不明な場合がある。このような地震は『日本被害地震総覧599-2012』（宇佐美・他,2013）等の歴史地震カタログに掲載されていない。例えば、天正十三年七月五日（1585年7月21日）の地震は、三河深溝（現愛知県幸田町）にいた松平家忠の日記に「百年已來之なへ之由申候」、京都・奈良の同時代史料に「大地震」と記録されており、規模が大きな地震だと考えられる。しかし、被害状況等が不明で歴史地震カタログには掲載されていない（松浦,2011）。このような地震であっても、新史料の発見や、地震記事の信憑性の確認によって、その実態が明らかになりつつある場合がある。片桐（2020,2021）は、京都・奈良に記録がある明応二年十月二十九日（1493年12月7日）の地震は、三河・遠江でも記録された大地震だと指摘した。本研究では、この地震の候補となる地震について検討した。

2. 明応二年十月二十九日の地震

〔古代・中世〕地震・噴火史料データベース（β版）〔<https://historical.seismology.jp/eshiryodb/db/>〕によれば、『親長卿記』〔甘露寺親長（1424-1500）の日記〕、『大乘院寺社雑事記』〔興福寺大乘院門跡の尋尊（1430-1508）等の日記〕といった京都・奈良で記された同時代史料に、明応二年十月二十九日の深夜から翌日にかけて複数回の「大地震」・「地震」、その後約1ヶ月間で数回の「地震」が記録されている。また、『常光寺年代記』（現愛知県田原市堀切の常光寺に伝わる年代記）には、明応二年に「十月廿九日、夜戌剋斗ヨリ大地震、十一月五日迄時々震其後モ一日二日ツツ震事及四五度、又十二月四日卯剋ト大地震」と記録されている。この年代記に被害記事はないが、京都・奈良と同様に「大地震」とその後の余震と思われる地震が記録されているので、広範囲に揺れを及ぼした大地震が周辺域で発生したと考えられる。しかしながら、『常光寺年代記』の原本は昭和20年の戦災で焼失したために、現在は同寺に寄贈された写本の翻刻（伊那・清田,1961）が使用されており、この地震記事が、同時代に書かれたものか、後年に書き加えられたものか不明であった。

3. 同時代史料としての『常光寺年代記』と『大唐日本王代年代記』

片桐（2020）は、『常光寺年代記』の昭和4年の影写本（原本の上に薄い紙を重ね、原本の文字の形を忠実に敷き写したもの。誤字・脱字がなく、筆跡や記述方法の違いも分かる）が大倉精神文化研究所附属図書館（横浜市港北区）に所蔵されていることを見出し、史料学的分析を行った。その結果、『常光寺年代記』は常光寺住職3世の樹王によってまとめられて以来、断続的な時期も挟みながら、代々の住職や寺の関係者によって書き継がれてきたことは間違いないとした。すなわち、樹王が生存した文正元年（1466年）以降の記事は、伝聞・風聞を除き同時代史料だと結論した。したがって、明応二年の地震記事も信頼できる記録として扱える。ただし、地震当時、樹王は常光寺ではなく遠江の普濟寺（現静岡県浜松市中区広沢）にいたので、その場所での記録となる。さらに、片桐（2021）は『大唐日本王代年代記』（現愛知県知多郡東浦町の乾坤院に伝来した年代記）についても史料学的分析を行い、文明七年（1475年）以降の記事は、尾張・三河・遠江の事柄を記した同時代史料であると結論した。そして、明応二年の「十月晦日、地大震、自寅刻至七度」という地震記事を発見し、明応二年十月二十九日の地震は、京都・奈良に加え、三河・遠江でも記録された大地震であると指摘した。

4. 明応二年十月二十九日の地震の候補

明応二年十月二十九日の地震は、京都～遠江の広範囲に揺れを及ぼした大地震であるが、被害等の他の地震記

録は未発見で、中部日本及びその太平洋側で発生した地震という程度しか分らない。しかし、この地震は1498年明応東海地震（M8.2～8.4）の約5年前に発生しており、1707年宝永地震（M8.6）の約11年前に発生した1686年遠江・三河の地震（M7.0±1/4）のような、南海トラフ巨大地震に先行した地震の可能性がある。なお、京都の日記と『大唐日本王代年代記』には、二十九日（厳密には翌三十日）寅刻（午前3時～5時）から一連の地震が始まったと記録されているが、『常光寺年代記』では同日戌刻（午後7時～9時）から始まったと記録されている。よって、震源は遠江に近い地域で、一連の地震の数時間前から前震的な活動が始まり出していた可能性も考えられる。他の候補として、複数のトレンチ調査から15～16世紀頃に活動したことが明らかにされている阿寺断層の大地震の可能性もあるかも知れない。阿寺断層は、1586年天正地震（M7.8±0.1）の際に活動したとされているが〔例えば、廣内・安江（2011）〕、伝承のみで同時代史料からそれを示す記録は見つかっておらず、松浦（2011）等は否定している。

Discussion on the causes of tsunamis accompanied by the 1914 Sakurajima earthquake, Japan

*Reiji KOBAYASHI¹

1. Kagoshima University

はじめに

1914年1月12日10時過ぎ、桜島の大正噴火と呼ばれる噴火が始まった。約8時間後の18時28分頃、噴火が継続している中、マグニチュード(M)7.1の地震が発生した(1914年桜島地震と呼ぶ)。1914年桜島地震に伴って、小津波があった。筆者はこれまでこの小津波の記述を整理した。その結果、津波は、(当時の)鹿児島港付近、谷山村、西桜島村の沿岸で目撃され、それ以外の鹿児島湾沿岸では目撃されていないことが分かった。津波は、鹿児島港付近と西桜島村で船を壊すほどであったが、谷山村では船を壊すほどではなかった。このことから、津波の波源は桜島と薩摩半島の間と推定された。津波は、本震直後(以降、直後の津波と呼ぶ)と、本震から20分後または1時間~1時間半後(以降、後から来た津波と呼ぶ)に目撃されている。

本発表では、これらの津波の原因を考察する。地震に伴う津波の原因として事例が多いのは、断層運動による海底の地殻変動である。一方、津波の発生原因は地滑りや火山活動に関連するものなどもある。これらを含めて検討した。

津波の原因

桜島地震の津波については、原因の候補として、地震による海底地殻変動、地滑り、火砕流、マグマだまりの収縮による地殻変動、が挙げられる。

地震による海底地殻変動については、M7.1であることと、震源が津波波源に近いこと、震源が浅いことから、十分に津波の原因になりうる。直後の津波については整合的である。しかし、後から来た津波については時間が合わない。

津波の第1波よりも、第2波等の後続波が大きくなることがある。この津波の場合、後続波が高くなるためには、鹿児島湾全体での反射や屈折が必要になる。しかし、鹿児島港付近、谷山村、西桜島村以外では津波が目撃されていない。したがって、鹿児島湾全体で反射や屈折をした可能性は低く、遅れてきた津波が後続波である可能性は低い。

後から来た津波は余震によって起こる可能性もある。しかし、後から来た津波の方が直後の津波より高いことから、本震直後よりも海底の上下変動が大きい地震である必要がある。Omori (1920)によると、この時間帯では20時11分に震度slight(微)の余震が観測されている。普通の地震であれば、マグニチュードは本震よりも小さく、海底の上下変動も小さいと思われる。津波地震の可能性は考えられる。しかし、本震から1時間42分後であり、津波の目撃が「1時間~1時間半後」であることを考えると少し遅い。

本震で誘発された地滑りについては、海底地滑りと、海岸での地滑りの海域への流入が考えられる。桜島地震では、内陸では地滑りが起こったことが知られている[例えば、鹿児島新聞記者十餘名共纂(1914)]。しかし、海底地滑りや海岸での地滑りについては知られていない。鹿児島市の北の吉野村沿岸で小規模な崖崩れがあった。ここは始良カルデラ壁であり、急峻な崖になっている。確認されている石の大きさは「三百才」(約8 m³) [九州鐵道管理局(1914)]程度である。仮にこれらが海中に落下しても、鹿児島港付近や西桜島村沿岸で船を破壊するほどの津波が生じる可能性は低いだろう。

海底での地滑りについては、調査が不十分であるために、知られていない可能性はある。もし、本震で誘発された海底地滑りが原因であった場合、直後の津波には整合的であるものの、遅れてきた津波には時間が合わない。遅れてきた津波については、大きな余震によって誘発された海底地滑りであれば、時間は合う。しかし、先述の震度slightの余震が観測されているのみで、海底地滑りが誘発されるとは思えない。

火砕流によっても津波が生じることが知られている。安井・他(2006)によると13日20時14分に最大規模の噴火(火砕流)とある。しかし、この時刻に津波の目撃証言はない。津波の目撃証言のある12日の18時半頃

から20時頃までの間だけ津波が生じたというのは不自然であろう。

マグマだまりが収縮し、それに伴って地殻変動が起こり、津波の原因となったことも考えられる。ただし、この地殻変動自体が、桜島地震本震発生の原因となっている可能性もある。もし、本震が地殻変動によるものであれば、本震直後の津波については、その原因が地殻変動か、本震による断層運動か、の区別がつかない。

遅れてきた津波については、問題は、津波を起こす程度の急激な地殻変動で地震波がでないかということである。先述の20時11分の余震はこれに相当する可能性もあるが、時間が少し遅い。あるいは地震波をほとんど放射しない程度にゆっくり、しかし津波を発生される程度には急激に変動した可能性も考えられる。

Poster session (2nd Day) | Regular session : S11. Various phenomena associated with earthquakes

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 8:30 AM UTC | 🏢 ROOM P-5
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S11P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S11P-01] Dynamic Stress Transfer in a Layered Granular Slope

*Koji UENISHI¹, Shuto SASAUCHI¹, Dongyun XI¹ (1. Univ. of Tokyo)

Dynamic Stress Transfer in a Layered Granular Slope

*Koji UENISHI¹, Shuto SASAUCHI¹, Dongyun XI¹

1. Univ. of Tokyo

In this series of experimental and numerical study using the technique of dynamic photoelasticity and the open source ESyS-Particle code (Uenishi and Goji, *Procedia Struct. Integr.*, 2018; Uenishi and Xi, *SSJ Fall Meeting*, 2021, *Procedia Struct. Integr.*, 2022), in order to clarify the generation mechanism of earthquake-induced slope failures that may involve large deformation, the basic dynamics of dry granular media under impact loading has been observed. In particular, with high-speed video cameras, dynamic stress transfer and particle motion have been traced inside two-dimensional model slopes that consist of penny-shaped birefringent particles prepared by a digitally controlled laser cutter. The granular slopes, standing on a rigid horizontal plane and having different inclination angles, have been subjected to dynamic impact on their top horizontal free surfaces. First, for the slopes without confining retaining walls, two distinct failure patterns, complete collapse or mass flow caused by unidirectional stress transfer and separation of the slope face (toppling) due to multi-dimensionally expanding waves, have been identified (Uenishi and Goji, *Procedia Struct. Integr.*, 2018). Then, in order to clarify the effect of static confinement on the dynamics of granular slopes under impact, additional solid plates have been set on some boundaries of the slopes. For these statically confined slopes, it has been found that dynamic stress transfer and particle motion are considerably governed by the additional solid boundaries resembling retaining walls, and buckling-like jump of particles owing to the presence of the confining retaining walls has been recognized (Uenishi and Xi, *Procedia Struct. Integr.*, 2022).

Here, furthermore, the effect of material heterogeneities on granular dynamics is considered. For this purpose, a (roughly) horizontal interface is introduced in the model. The interface is located between a top layer of smaller particles and a basement made of larger particles, or vice versa. Dynamic stress transfer and particle motion, with special attention to the mechanical behavior around interfaces, are observed for these dissimilar granular slopes with / without retaining walls.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 20K04680.

Poster session (2nd Day) | Regular session : S13. Crustal fluids and earthquake

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 8:30 AM UTC | 🏢 ROOM P-6
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S13P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S13P-01] Consideration of slow crustal strain changes after earthquakes -In the case of TSS observation site-

*Yuichi KITAGAWA¹, Norio MATSUMOTO¹ (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST)

Consideration of slow crustal strain changes after earthquakes -In the case of TSS observation site-

*Yuichi KITAGAWA¹, Norio MATSUMOTO¹

1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, AIST

産総研では南海トラフでの巨大地震の短期・中期予測研究のために、愛知県・紀伊半島・四国の観測点で地殻変動・地下水の観測を行い、特にプレート境界での短期的SSEのモニタリングに重点をおいて取り組んでいる。2019年5月10日の日向灘の地震（M6.3）の後に、土佐清水松尾観測点のボアホール歪計でゆっくりとした地殻歪変化が観測された。2009年1月から2022年7月の間で四国周辺でのM5以上の地震や土佐清水市で震度2以上の地震を対象に同様な地殻歪変化を調査したところ、土佐清水松尾観測点では計13例の地殻歪変化が見つかった（そのうち1例は後述する大雨による変化であった）。これらの地殻歪変化の水平成分は短期的SSEによる歪変化に似ており、足摺岬南東側のプレート境界の固着域でのすべりの可能性が考慮された。しかしながら、類似の歪変化が繰り返し発生することや地殻歪の鉛直成分が変化していないことから、プレート境界でのすべりではないと判断された。これら12例のうちの11例では同時に土佐清水松尾観測点の孔2観測井戸の水位が変化していた。このように同様な変化が何度も繰り返し発生するため、観測点周辺で生じた局所的な変化の可能性が高いと推測している。土佐清水松尾観測点では大雨の際にも地殻歪変化が観測されており、その水平成分は地震後のゆっくりとした変化に類似していることが判明した。一方、地殻歪の鉛直成分や孔2観測井戸の水位変化は地震後と大雨時で異なっていた。大雨時に生じる地殻歪変化と水位変化の定量的な関係を議論するとともに、地震後に観測点周辺で生じたと思われる局所的な応力場の変化（地下水流動を含む）の可能性についての議論を行う。

Poster session (2nd Day) Regular session : S19. Seismology, general contribution
--

🗓 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 5:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 8:30 AM UTC | 🏢 ROOM P-7
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S19P] PM-P

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-01] Questionnaire survey on residents' awareness of disaster prevention due to seismic activity in the northeastern Noto Peninsula

*Amane Sugii¹, Izumi Akasaka², Haruka Ohwashi², Kyosuke Sawatari², Takushi Bando², Akira Murata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University, 2. Ishikawa Prefectural Iida High School)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-02] How to use Martian seismic and meteorological data obtained by NASA's InSight

*Keisuke Onodera¹, Taichi Kawamura² (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. IPGP)

2:00 PM - 5:30 PM JST | 5:00 AM - 8:30 AM UTC

[S19P-03] Influence of station corrections on hypocenter determination of off Fukushima Prefecture using S-net Data

*Naoki Momomoto¹, Noriko Tsumura¹ (1. Chiba University)

Questionnaire survey on residents' awareness of disaster prevention due to seismic activity in the northeastern Noto Peninsula

*Amane Sugii¹, Izumi Akasaka², Haruka Ohwashi², Kyosuke Sawatari², Takushi Bando², Akira Murata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University, 2. Ishikawa Prefectural Iida High School

1. はじめに

能登半島北東部では2018年6月頃から地震の発生回数が増加傾向となり、2020年12月以降は4つの領域で順に活発化した。地震調査委員会（2022）では、地震活動の活発化の原因として流体が関与する可能性を挙げている。2021年9月16日の最大震度5弱（M5.1）の地震や2022年6月19日の最大震度6弱（M5.4）の地震では局所的な被害が生じた。現在でも群発的な地震活動は継続し、さらなる地震被害や海域での大地震による津波被害が危惧される。本研究の目的は、地震活動が活発な地域の石川県珠洲市に位置する石川県立飯田高等学校の教員、学生および保護者を対象とした地震津波防災意識に関するアンケート調査により、住民がもつ防災意識の現状と問題点を明らかにすることである。

2. 地震津波防災の意識に関するアンケート調査について

石川県立飯田高等学校の教員、学生および保護者を対象としたアンケート調査を実施した。調査期間はM5.4の地震発生約1ヶ月前の2022年5月18日から2022年5月24日である。調査方法は、Google Formsを用いたインターネット上での回答である。調査項目は、大別して4つの項目から構成されている。その内容は、1)居住環境（年代、性別、地域、小学校区分）、2)地震活動による行動や意識の変化、3)避難時における対策、4)津波に対する備えである。アンケートの有効回答数は413件であった。地震回数の増加が気になる人の割合は92%と大きく、能登半島北東部での地震活動の活発化による意識変化が見られた。また、地震回数の増加が気になると回答した人の中で73%が避難経路の確認などの行動変化が認められ、地震の増加によって意識変化だけでなく行動にも影響を与えることが分かった。さらに、震度1～3または4以上の地震を体験した場合の行動変化に関する設問では、震度4以上の地震を体験した人は震度1～3の地震のみしか経験していない人よりも「特になにもしない」という項目が6割減少し、行動に関する項目の回答が増加した。したがって、行動の変化は地震の発生回数だけでなく震度の大きさにも関連性があることが明らかとなった。津波に対して備えをしている人は全体の46%であった。このうち避難場所、避難経路の確認といった備えが最も多かった。また、「地震に対してどのようなことが不安ですか。」という設問に対して「津波が来る」という回答が2番目に多かった。年代、性別、地域、区分、各設問のそれぞれに関連性があるかを調べるため、自由記述の設問を除いた各項目ごとにクラメールの連関係数を算出し、相関の強弱について評価を行った。その結果、「奥能登の地震回数が増えたことが気になりますか」と「地震に対して不安はありますか」という設問の間に0.26程度の関連性が見られた。しかし、クラメールの連関係数からは珠洲市において地域の違いによる設問との強い関連性は見られなかった。また、クラメールの連関係数を計算するために使用した設問について「地域差が見られない」と仮定した上で、有意水準5%でフィッシャーの正確確率検定を行った。その結果、全ての設問に対して「地域差がみられない」ことを棄却することができなかった。このことから震度の違いによって行動変化は見られるものの、地震や津波に対する防災意識は地域によって有意な変化がないと考えられる。

3. まとめ

能登半島北東部における地震活動の活発化のため、地震被害や海域での大地震による津波被害が危惧される。そこで、住民がもつ防災意識の現状と問題点を明らかにするため、石川県立飯田高等学校の教員、学生および保護者を対象とした地震津波防災意識に関するアンケート調査を行った。解析した結果、震度の大きさによって防災行動に対して変化が見られることが分かった。地域と設問の間の関係について解析を行ったところ、地域による防災意識に差がない可能性があることが示唆された。

参考文献

- 1) 地震調査委員会（2022）：石川県能登地方の地震活動に関する「地震調査委員長見解」,
https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/2022_ishikawa_2.pdf

How to use Martian seismic and meteorological data obtained by NASA's InSight

*Keisuke Onodera¹, Taichi Kawamura²

1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. IPGP

1. InSightミッションの概要

2018年11月26日にNASAのInSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport)^[1]は、火星のエリシウム平原(4.5°N, 135.9°E)に着陸し、約3年にわたり地震および気象の準連続観測を実施してきた。火星表面には広帯域計(Very Broad-Band Seismometer: VBB)と短周期計(Short Period Seismometer: SP)が設置され、それぞれ0.01–10 Hz, 1–50 Hz帯に感度を持つ^[2]。通常観測ではVBBは20 Hz, SPは100 Hzサンプリングでデータを取得している^[3]。気象観測については、通常1Hzサンプリングで気温・気圧・風速・風向データを取得している^{[4][5]}。

2. 火星で観測された地震および気象現象

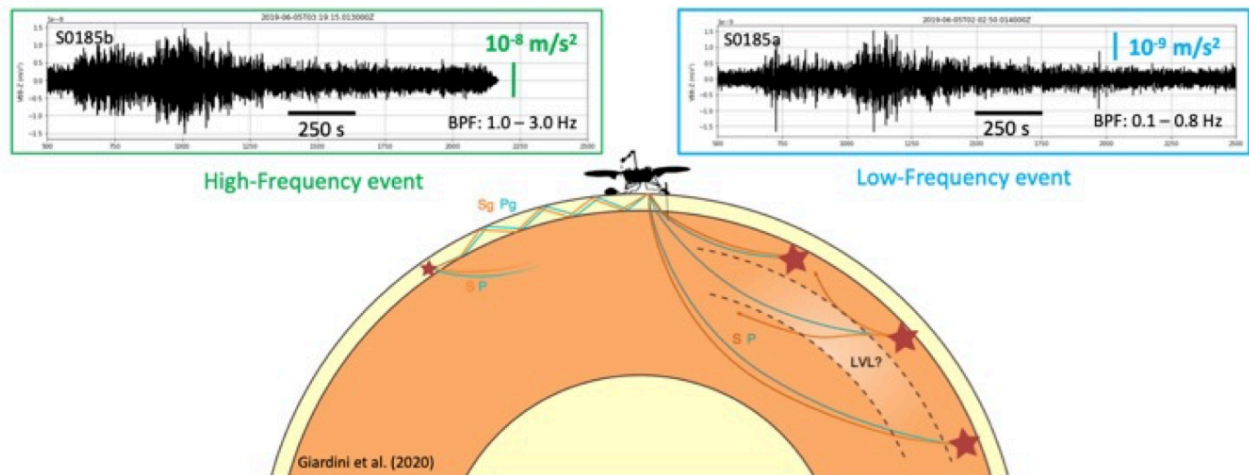
火星地震は大きく分けて二種類に分かれる。2.4 Hzを境にそれより低い周波数にエネルギーを持つ地震をLow-Frequency (LF) event, 2.4Hz以上にエネルギーを持つものをHigh-Frequency (HF) eventと呼ぶ^[6]。図1aにInSightで観測された地震データの例を示す。LFイベントは比較的散乱の影響が小さく、フェーズの読み取りが可能である。場合によっては、極性・線形性が確認でき、一点観測に基づく震源位置決定に大きく貢献している。HFイベントは非常に強い散乱の影響を受けており、地球の火山地帯や月で見られるような強散乱波形を示す。Giardini et al.^[7]はそれぞれの波形の特徴や推定された震央距離などをもとに、LFイベントはマントルを主に通過し、HFイベントは地殻内を多重反射・多重散乱して伝わる地震波であると解釈している。一方、大気現象に伴う地震動も観測されている。例えば、ダストデビル(局所移動低気圧の渦)の通過に伴う地面の変形が地震計および圧力計で同時観測されており(図1b)、地震・圧力データのスペクトル比から内部構造の推定も行われている^[8]。

3. データ利用案内

InSightの観測により、火星における地震ならびに内部構造への理解が飛躍的に進んできた。一方で、一点観測という非常に強い制約により、震源位置の決定や震源メカニズムなどについては不確定性が大きいのも事実である。本発表では、火星地震・内部構造への理解をさらに推し進めるため、日本の地震学コミュニティに惑星地震データの利用方法を広め、様々な視点から火星地震データの再解析・新手法の応用などを促すことを目的とする。InSightの地震および気象データは、NASAのPDS (Planetary Data System)やIRIS (Incorporate Research Institute for Seismology)でイベントのカタログと共に公開されている。本発表では、地震学コミュニティに馴染みのあるIRISからのデータ取得方法ならびに解析を行う上での注意点等について、実際の解析例を交えながら解説を行う。

参考文献 [1] Banerdt et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 183-189. [2] Lognonné et al. (2019), *Space Sci. Rev.*, 215, 12. [3] Lognonné et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 213-220. [4] Banfield et al. (2019), *Space Sci. Rev.*, 215, 4. [5] Banfield et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 190-198. [6] Clinton et al. (2021), *PEPI*, 310, 106595. [7] Giardini et al. (2020), *Nature Geosci.*, 13, 205-212. [8] Kenda et al. (2020), *JGR Planets*, 125, 6, e2020JE006387.

(a)



(b)

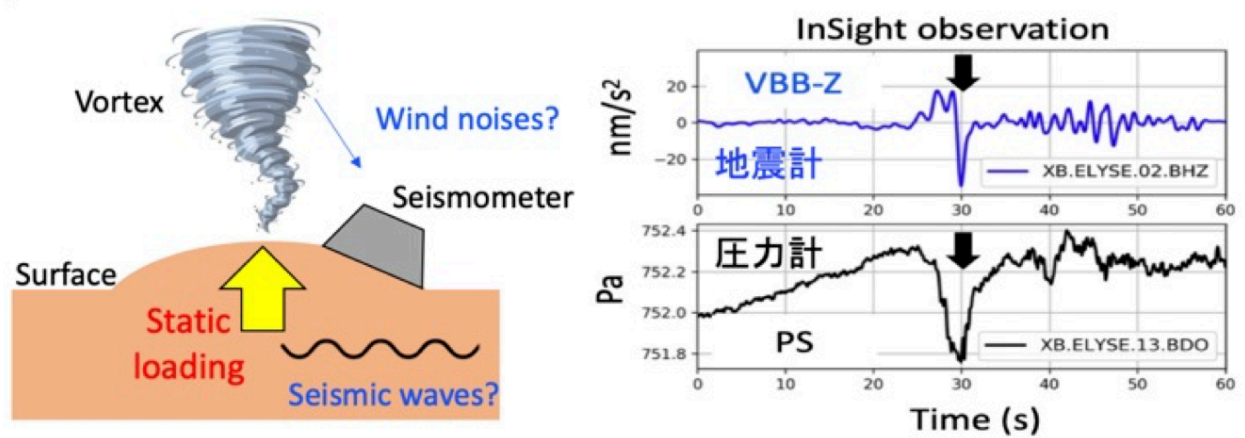


図1. (a) High-Frequency eventとLow-Frequency eventの波形例(上)とそれぞれのパスの概念図(下). (b) ダストデビルの概念図(左)と実際の観測データ例(右).

Influence of station corrections on hypocenter determination of off Fukushima Prefecture using S-net Data

*Naoki Momomoto¹, Noriko Tsumura¹

1. Chiba University

1.はじめに

これまでの研究で2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震が起こる前後で、東北地方太平洋側の地震活動度が変化していることが明らかになっており[Toda et al., 2011]、それは地下内部の応力変化を反映していると考えられている[Hasegawa et al., 2012]。本研究の対象地域である福島県沖では、周辺の宮城県沖や茨城県沖に比べて多くの地震が発生しているほか、プレート境界付近のみならず陸側プレート内部や海洋プレート内部でも地震が起こっているため、この地域での地震発生の理解には、正しい震源位置の情報が特に重要となる。日本海溝沿いに設置された海底地震観測網S-netによるデータは、このような正確な震源決定に貢献すると期待される。ただし、その場合にも、震源決定に用いるS-net観測点や地震波速度構造や、観測点近傍の堆積層の影響など考慮すべき事項が存在する。本研究では、上記のような条件を変更したとき、決定される震源がどのように変化するかを調べ、陸域のみの観測点を用いて気象庁が決定した震源と今回のS-net観測点データで求められた震源にどのような違いがあるのかを明らかにする。特に観測点近傍の堆積層補正について実データから求められた値[西澤ほか, 2022]を適用し、その影響を調べた。

2.データ・手法 2018年1月1日から2019年8月31日までに福島県沖で発生した沈み込むプレート境界およびその内部の地震のうち、431個のM3.0以上の地震を研究対象とした。まず、福島県沖のS-net観測点26点で得られたそれらの地震波形からP波とS波初動を読み取り、震源を求めた。震源決定には、気象庁が海域観測点データを用いて震源決定を行う際に使用される速度構造を深さ方向に1次元化し使用した。1で述べた条件を変更した場合の震源位置の変化を調べるため、震源決定に使用するS-net観測点を、震源から100 kmの範囲内にある観測点のみに絞って計算することも行った。また、観測点近傍に存在する未固結堆積層が震源決定に及ぼす影響について調べるために、マルチチャンネル反射法地震探査(MCS)で得られたS-net観測点下における走時データ[西澤ほか, 2022]を使用した。ここでは、堆積層の存在を考慮せずに震源を求めた場合の走時と、MCSで得られた堆積層内の走時を使って、堆積層に対する走時の遅れの補正値を求め、それを観測点補正値に加えて堆積層を考慮した場合の震源決定を行った。

3.結果 S-netの初動データを使い、堆積層による遅れを考慮して求めた震央分布を図1に、同図の長方形の領域内で発生した地震について堆積層の影響を考慮した場合としない場合に分けて求められた震源を鉛直断面（ $X-X'$ ）に投影したものを図2に示す。ここで図2の断面の黒実線はIwasaki (2015)によって推定されたプレート上面の位置である。図2からわかる通り、堆積層を考慮した場合の方が堆積層を考慮しなかった場合よりもほとんどの震源が数km~20 kmほど浅い深さに決定された。特に沖合側(X' 側)の震源の変化量は5 km以内のものも多く比較的小さいが、陸側(X 側)の方になるにつれて、震源の変化量は徐々に大きくなっていき、およそ10 kmほどの変化量が大きく占めるようになる。

4.考察 堆積層を考慮して求めた震源は速度の遅い層がある分、震源と観測点の距離が縮まるように、堆積層を考慮しないで決めた震源より浅く観測点よりの位置に変化した。特に本研究で震源決定に用いた観測点がS-net観測点のみであったため、陸側（ X 側）の震源は震源決定に使用する観測点が海溝側に偏っており、堆積層を考慮した場合の側方への変化が観測点のある海溝側になったと考えられる。今後は震源決定に使用する観測点の選定および3次元速度構造を用いた検討を行い、より正確な震源決定について考察する。

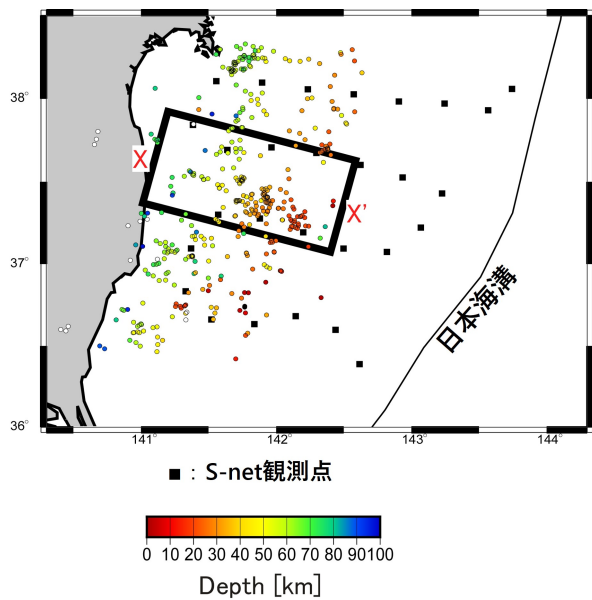


図 1 : S-netデータによる実際の震源分布。震源の深さを色ごとに分けて示している。

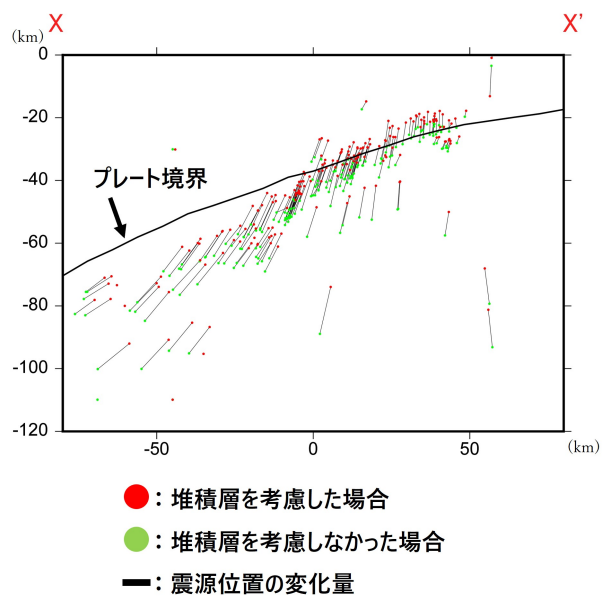


図 2 : 左図のX-X'範囲内の鉛直断面に震源を反映。さらに、観測点近傍の未固結堆積層を考慮することによって生じる結果の違いも表示。