

Mon. Oct 24, 2022

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

9:30 AM - 10:30 AM JST | 12:30 AM - 1:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S09] AM-1

chairperson: Takao Kumazawa (Institute of Statistical Mathematics), Kazuyoshi Nanjo (University of Shizuoka)

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

[S09-01] The research and application of the spherical space-time ETAS model

*ZIYAO XIONG¹, Jiancang Zhuang¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-02] Retrieving successive occurrence of earthquakes using ETAS -Largest and second largest earthquakes in series of earthquakes-

*Tetsuo HASHIMOTO¹, Takashi Yokota² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Aichi Institute of Technology)

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

[S09-03] Retrospective Monitoring of the Area Surrounding the Showa Nankai Trough Earthquakes

*Yosihiko OGATA¹ (1. Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-04] Analysis of the non-stationarity of the earthquake swarm activities in the Noto Peninsula

*Kumazawa Takao¹, Ogata Yosihiko¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

10:45 AM - 12:00 PM JST | 1:45 AM - 3:00 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S09] AM-2

chairperson: Yuta Amezawa (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Yukihiro Nakatani (Kagoshima University)

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

[S09-05] Long-living earthquake swarm at the NE of Noto peninsula –Hypocenter migration and driving mechanism–

*Yuta Amezawa¹, Yoshihiro Hiramatsu², Ayumu Miyakawa¹, Kazutoshi Imanishi¹, Makoto Otsubo¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University)

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

[S09-06] Mechanisms that cause swarm and crustal activity occurrences since the end of 2020 in the NE Noto Peninsula from perspectives of previous studies

*Masatoshi MIYAZAWA¹ (1. Kyoto Univ.)

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

[S09-07] Regular Earthquake Activities Accompanied by VLFE Activities along Ryukyu Trench, Southwestern Japan

*Youichi ASANO¹ (1. NIED)

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

[S09-08] Spatio-temporal relationship between regular earthquakes and shallow tremors in the east to northeast off Kikaijima Island observed by ocean bottom seismic network

*Yukihiro Nakatani¹, Hirotsugu Yanagida¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima³, Kazuo Nakahigashi⁴, Masanao Shinohara⁵ (1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 3. SEVO, Kyushu Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Science and Technology, 5. ERI, UTokyo)

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

[S09-09] Unusual slow earthquake activity for Nankai trough earthquake emergency information

*Kazushige OBARA¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

4:00 PM - 5:45 PM JST | 7:00 AM - 8:45 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S09] PM-2

chairperson:Kazuaki Ohta(NIED), Satoru Baba(University of Tokyo)

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

[S09-10] Temperature control of episodic tremors with slip in the Nankai subduction zone

*Ryoya IKUTA¹, Yui Kobayashi², Tatsuhiko Kawamoto¹ (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Shizuoka Higashi High School)

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

[S09-11] Spatial variation of shallow tectonic tremor energy radiation in the Nankai trough

*Kazuaki OHTA¹, Katsuhiko SHIOMI¹, Takanori MATSUZAWA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09-12] Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model

*Satoshi IDE¹, Shunichi Nomura² (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University)

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

[S09-13] Detection of Low-Frequency Earthquakes by Distributed Acoustic Sensing (DAS)

*Aitaro KATO¹, Hiroshi Tsuruoka¹, Masanao Shinohara¹, Kentaro Emoto², Tsunehisa Kimura³, Kenji Okamura⁴, Yutaka Kikuchi⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyushu University, 3. DAS Consultant (agent of Sintela), 4. Kochi University, 5. Kochi University of Technology)

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

[S09-14] Observation of slow earthquakes using distributed acoustic sensing off Cape Muroto

*Satoru BABA¹, Eiichiro Araki¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Takane Hori¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuhei Nishida¹, Takashi Yokobiki¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S09-15] Swarms of microearthquakes associated with tectonic tremor bursts in the northern Japan Trench

*Kazuma Matsumoto¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Masanao Shinohara³ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Tue. Oct 25, 2022

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, Yoshiko 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

*Ikuro 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)

Wed. Oct 26, 2022

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

9:30 AM - 11:00 AM JST | 12:30 AM - 2:00 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] AM-1

chairperson: Toshihiro Shimoyama (Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency), Kotoyo Tsuchida (Hanshin Consultants Co., Ltd.)

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

[S15-06] Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part (1)Mitsuhiro Toya¹, Sayumi Yoshida², *Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹ (1. Hanshin Consultants Co., Ltd., 2. N/A)

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

[S15-07] Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part(2)*Masanori HORIKE¹, Sayumi YOSHIDA², Mitsuhiro TOYA¹, Kotoyo TSUCHIDA¹ (1. Hanshin consultants., LTD., 2. N/A)

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

[S15-08] Updating proxy-based site amplification map in Osaka, Japan with soil borehole data: A Bayesian updating scheme based on Uncertainty Projected Mapping*Anirban Chakraborty¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada² (1. Hosei University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S15-09] Variation of long-period strong ground motions at Hitachi-Naka port depending on the epicenter regions*Tomiichi UETAKE¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

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

[S15-10] Study on prediction of long-period ground motion*Toshihiro SHIMOYAMA¹ (1. MRI, JMA)

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

[S15-11] Real-time forecast of long-period ground motions using Green's function based on seismic interferometry*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Room B | Regular session : S15. Strong ground motion and earthquake disaster**11:15 AM - 12:30 PM JST | 2:15 AM - 3:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)****[S15] AM-2**

chairperson: Asako Iwaki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), Yusuke Tomozawa (Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

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

[S15-12] Evaluation of scaling relations for subduction earthquake using source inversion models

*Fumiaki Nagashima¹, Hiroshi Kawase¹, Eri Ito¹, Jikai Sun¹ (1. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S15-13] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of Earthquakes Occurring off the Pacific Coast of Tohoku

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

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

[S15-14] An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of direct S-waves in the layered structure : Application to inland earthquakes in Chugoku region

*Tomonori IKEURA¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

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

[S15-15] Correlation between strong motion intensities based on the unified strong motion database by NIED

*Hongjun Si^{1,2}, Asako Iwaki³, Nobuyuki Morikawa³, Hiroyuki Fujiwara³ (1. Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, 2. Seismological Research Institute Inc., 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-16] Comparison of Ground-Motion Models based on the Strong Motion Database

*Asako IWAKI¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Tomohisa Okazaki², Hisahiko Kubo¹, Hongjun Si³, Atsuko Oana⁴, Toru Ishii⁴, Yusuke Tomozawa⁵, Tomoki Hikita⁵ (1. National Research Institute for Disaster Resilience, 2. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 3. Seismo Research, 4. Osaka Research Institute, 5. Kajima Technical Research Institute)

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

2:00 PM - 3:15 PM JST | 5:00 AM - 6:15 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-1

chairperson: Kazuhito Hikima (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.), Wataru Suzuki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-17] Automatic Hypocenter Determination with the IPFx method for the 2018 Hualien earthquake sequence

*Masumi YAMADA¹, Dayi Chen² (1. Kyoto University, 2. Central Weather Bureau, Taiwan)

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

[S15-18] Rupture processes of the 2021 and 2022 Fukushima-oki earthquakes: Reactivation of the faults in the subducting slab originally formed in the outer-rise region

*Hiroaki KOBAYASHI¹, Tetsushi Watanabe¹, Kazuki Koketsu² (1. Kobori Research Complex, 2. Graduate School of Media and Governance, Keio University)

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

[S15-19] Comparative study of strong motion distributions of the two *M*₇-class Off Fukushima earthquakes in 2021 and 2022*Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Takeshi Kimura¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-20] Source Processes of the Off Fukushima Intra-slab Earthquakes in March 2022 and February 2021 - Analysis using 3D subsurface structure -

*Kazuhiro HIKIMA¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., TEPCO Research Institute)

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

[S15-21] Ground motion in the Tokyo metropolitan area for the 2021 Northwestern Chiba earthquake

*Hiroe MIYAKE¹, Miki UEHARA¹ (1. ERI, Univ. Tokyo)

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

3:30 PM - 4:30 PM JST | 6:30 AM - 7:30 AM UTC | ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-2

chairperson: Yosuke Nagasaka (Port and Airport Research Institute), Fumino Suzuki (Kobori Research Complex INC.)

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

[S15-22] Preliminary analysis of residual data between strong-motion records and calculations by a ground motion model

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Asako IWAKI¹, Takahiro MAEDA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-23] Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: Remodeling of source parameters and estimation of detailed seismic intensity distribution

*Fumino SUZUKI¹, Tetsushi WATANABE¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹ (1. KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.)

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

[S15-24] Strong Motion Simulation of 2016 Kumamoto Earthquake Mainshock Using Dynamic Rupture Modeling

*JIKAI SUN¹, HIROSHI KAWASE¹, ARBEN PITARKA², FUMIAKI NAGASHIMA¹, ERI ITO¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Lawrence Livermore National Laboratory)

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

[S15-25] Reevaluation of strong ground motions during the 2016 Kumamoto earthquake sequence utilizing regional spectral inversion analysis

*Yosuke NAGASAKA¹ (1. Port and Airport Research Institute)

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

📅 Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 10:30 AM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:30 AM - 1:30 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S09] AM-1

chairperson: Takao Kumazawa (Institute of Statistical Mathematics), Kazuyoshi Nanjo (University of Shizuoka)

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

[S09-01] The research and application of the spherical space-time ETAS model

*ZIYAO XIONG¹, Jiancang Zhuang¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-02] Retrieving successive occurrence of earthquakes using ETAS -Largest and second largest earthquakes in series of earthquakes-

*Tetsuo HASHIMOTO¹, Takashi Yokota² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Aichi Institute of Technology)

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

[S09-03] Retrospective Monitoring of the Area Surrounding the Showa Nankai Trough Earthquakes

*Yosihiko OGATA¹ (1. Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-04] Analysis of the non-stationarity of the earthquake swarm activities in the Noto Peninsula

*Kumazawa Takao¹, Ogata Yosihiko¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

The research and application of the spherical space-time ETAS model

*ZIYAO XIONG¹, Jiancang Zhuang¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

The spherical space-time ETAS model is modified from the widely used planar space-time ETAS model (Zhuang et al., 2002; Zhuang, 2012). Different from the traditional space-time ETAS model is only suitable for studying within a small space range; the new version is applicable to analyze and forecast seismicity in high latitude regions or on a global scale. Apply the global CMT catalog to the new model, showing that the model can reasonably simulate the global seismicity variation. And the model supports better modeling of seismic activities and interactions in global regions. Moreover, we calculate the seismicity rates of the seismicity belt in the global area to further analyze the characteristics of earthquake sequences.

Retrieving successive occurrence of earthquakes using ETAS -Largest and second largest earthquakes in series of earthquakes-

*Tetsuo HASHIMOTO¹, Takashi Yokota²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Aichi Institute of Technology

【はじめに】地震が連動して発生しているという場合、時間的・空間的に近接している地震を指していると考えられるが、この近接しているというはあいまいで、Fuzzyという概念に通ずるものがある。そこで、Fuzzyのメンバーシップ関数として、2地震の発生時間間隔と震央距離をパラメータとするETASの強度関数（Ogata, 2011）を利用することにした。【連動の検索】ETASの強度関数としては $\lambda = \mu + K/(t-t_j+c)^p \cdot [(x-x_j, y-y_j)S_j(x-x_j, y-y_j)^t / e^{\alpha(M_j-M_c)} + d]^{-q}$ (Ogata(2011))で、 $M_c=5$ の等方的なモデルの数値（ $\mu=7.97e-06$, $K=8.79e-05$, $c=4.48e-03$, $p=0.891$, $\alpha=1.257$, $d=4.88e-03$, $q=1.763$ ）を利用した。今回、連動の条件として、 λ がバックグラウンドの地震活動の μ の3倍以上である場合としてみた。地震のデータは、ISCGEMv8の41711個を用いた。その結果、上記の条件を満たす地震の組み合わせは465794個のペアが見いだされた。

【グループ化】これらの地震ペアのデータを用いて、地震のグループ化を試みた。第1段階では1つの地震ペアごとを1つのグループとし、その1つのグループを種として、種と同じ地震を含むグループがあれば、それらを一つのグループとしてまとめ、地震ペアの全グループにそのような検索を行った。順次、グループ化されていない別のペアのグループを種として、グループ化し、すべての種を一巡してグループ化を行う。第2段階として、新たに出来たグループで、同様の処理を行った。6段階程度、この処理を繰り返すことで、グループが定常化していった。その結果、4866個のグループが得られた。上記のETASのパラメータでは、1900年初頭に発生した地震において、2000年代の地震まで連動しているという結果となってしまう、例えば1904年のアリューシャン列島の地震のペアを種として、日本の東北地方にまで及ぶ広範囲の地震を1つのグループとしてしまった。【検索条件の追加】ETASのパラメータ値を適宜変更していくことで、より連動のグループ化するのに適切なパラメータ値を検索する方法もあるが、ここでは、上記のモデルを用いながら、宇津の余震発生の活動レベルを推定する式($n=10^{0.85(M_1-M_s)-1.83} / (t+0.3)^{1.3}$, Usu, 1971)を用いて、 $M_s=M_4$ の発生が0.01個/日になる時間のまでで足切りをすることにした。その結果、74618個のペアが見出され、4593グループとなった。

【グループ化の結果】これらのグループにおいて、1グループに3個以上の地震があるグループは2022個あった。1グループの地震数で色分けした震央分布を図1上に示す(例えば1グループ地震数150地震以上が赤で示され、6グループが抽出されている)。多数の地震で構成されるものは概ね $M_w 8.55$ 以上の地震活動に対応しているように見える。フィリピンからニューギニアを経てニュージーランドに続く地震活動域では、超巨大地震がないものの、まとまった地震数のある地震のグループが見られる。北米西海岸や西アジアから地中海にかけた領域では大規模な地震が少なく、少ない地震数のグループとなっている。【最大地震と2番目の規模の地震】グループ内で、2番目の規模の地震が最大地震の前に発生した場合（マイナス）が最大の前震（590個、M差の平均0.33）、後に発生した場合（プラス）が最大余震（1432個、0.63）となる。M差が0.3以下のものは、前震的なもので357個、余震的なもので458個、M差が1.2以下のものは、それぞれ、574個と1238個となった。双子地震的なもの(M差0.3以下)を考えると、全体で見ると、812個/2022個(=0.4)が双子地震になる頻度となった。2番目の規模の地震が前震的に発生すると、357個/590個(=0.6)と、より双子地震になりやすいことになる。また、余震的なものでM差が1.2以下であるものは1238個/1432個(=0.9)で、その範囲に収まってしまうようである。【大規模地震の連動との比較】それらの最大地震と2番目の規模の地震の発生時間間隔(単位:日)をみた。発生時間間隔とその地震数をプロットしたものを図の左下に示す。最大地震の前後に2番目の規模の地震が多く発生していることが分かる。図の右下には、大規模地震の連動についての調査（橋本・横田、論文準備中）を同様にプロットしてみた。今回の手法で抽出した最大地震と2番目の規模の地震の発生時間間隔のものより、大規模地震の連動は、地震発生間隔がだらだらと長く続く傾向が見える。【おわりに】今回グループ化された地震については、まだ、広めの連動を抽出している場合も見受けられ、より精査していく必要がある。

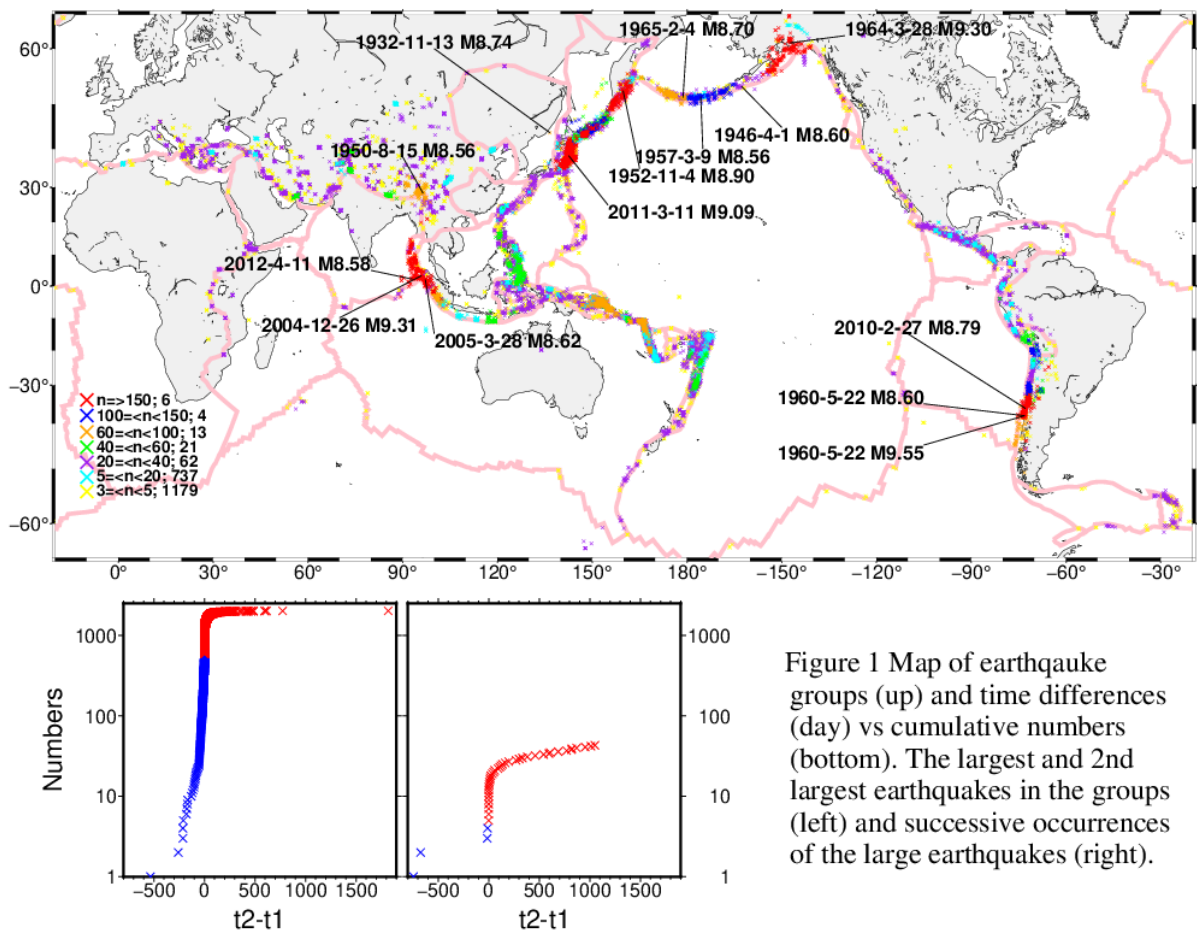


Figure 1 Map of earthquake groups (up) and time differences (day) vs cumulative numbers (bottom). The largest and 2nd largest earthquakes in the groups (left) and successive occurrences of the large earthquakes (right).

Retrospective Monitoring of the Area Surrounding the Showa Nankai Trough Earthquakes

*Yosihiko OGATA¹

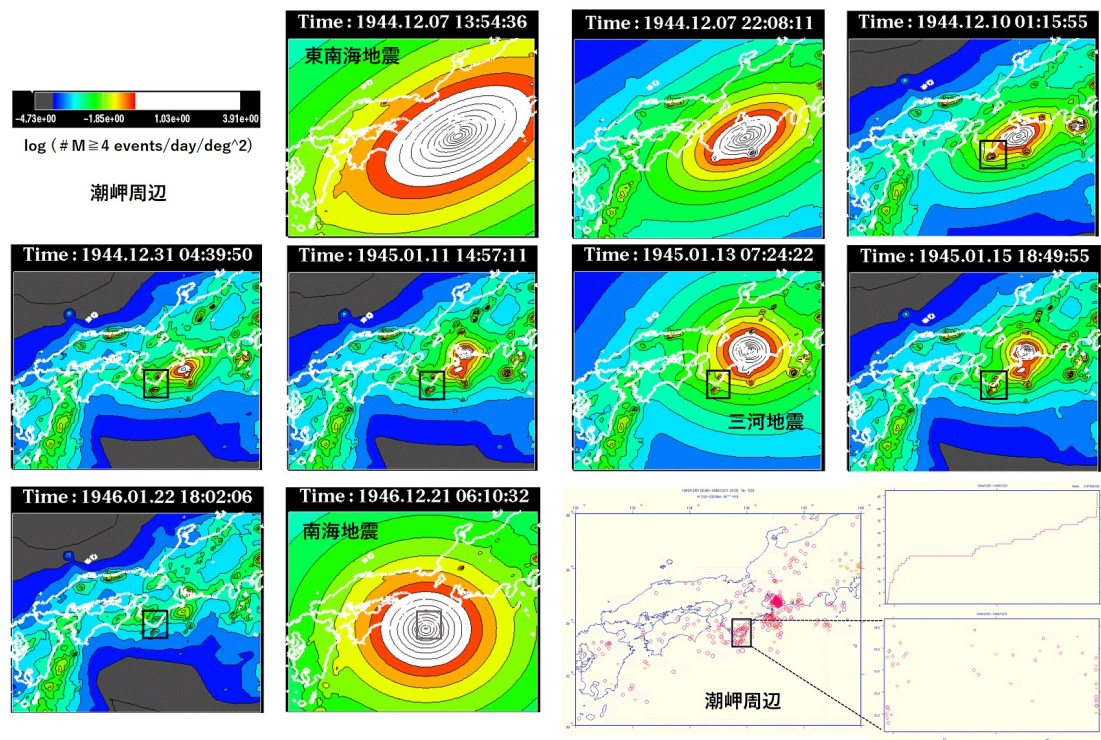
1. Institute of Statistical Mathematics

1944年前から1946年にかけて西日本のいくつかの地域で、地震活動の特徴的な変化（静穏化や活発化）が認められる。南海トラフの巨大地震前後の地震活動を解析するために、階層的時空間Epidemic Type Aftershock Sequence (HIST-ETAS) モデルを当てはめ、背景地震発生強度 ($M \geq 4.5$) に併せて連鎖的誘発活動の強度変化を示す。それらを動画として視覚化することで、地震活動の移動や、一過性の群発地震活動などを認知できる。たとえば1944東南海地震 ($M7.9$) 余震活動から内陸直下型の1945三河地震に至るマイグレーションが見られる。また紀伊半島南端付近で、東南海地震から1946南海地震 ($M8.0$) に至るまで、群発地震活動が減衰せず継続している様相がある。因みに中央気象台の潮岬測候所の地震原簿には、東南海地震の余震減衰途中から継続する300近い群発地震が記録されている。この間の持続的な活動は、地震活動が低下した他の地域には見られない特徴である。これは、東南海断層と近傍の南海断層面付近のプレート境界面における一部で非地震性すべり (slow-slip) を起こしていた可能性が考えられる。そこで、下記文献を再訪議論する。

1926年から1950年までの震源データを使って更に詳しく説明する。まず太平洋戦争末期および戦後にもかかわらず、地震検知率は一様であることを確認した。その結果、西日本地域では南海地震前に地震活動が減少していた。特に和歌山地方の活動低下は顕著である。この静穏化は和歌山測候所の有感・無感地震回数の時系列にも表れている。さらに、東南海地震と南海地震の断層モデルによると、それぞれの時期の西日本の各地域での地震活動変化はクーロン破壊応力変化CFFの値に良く対応する。すなわち、正のCFFの地域では巨大地震を契機に活動が活発化し、負のCFFの地域では静穏化している。そのうえで、東南海地震以前から和歌山市周辺地域、兵庫県南部地域、四国東部地域での静穏化、また東南海地震以後から南海地震までの紀伊半島南端地域の活発化（群発性）が目立つ。これらはそれぞれ東南海地震や南海地震の断層モデル近傍の深部領域でのslow-slipに起因した周辺部でのCFFの地域性パターンで説明が可能である。もし時間が許せば、西日本の各地域での余震の静穏化とその後の他の場所での地震の時空間的な確率的因果関係を示したい。

参考文献

尾形良彦 (2004) 1944東南海地震および1946南海地震前後の西南日本における地震活動変化について、地震予知連絡会会報 第70巻(7-3), pp. 378-383. <http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou70/07-03.pdf>
Ogata, Y. (2004) Space-time model for regional seismicity and detection of crustal stress changes, J. Geophys. Res., 109 (B3), B03308, doi:10.1029/2003JB002621.



Analysis of the non-stationarity of the earthquake swarm activities in the Noto Peninsula

*Kumazawa Takao¹, Ogata Yosihiko¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

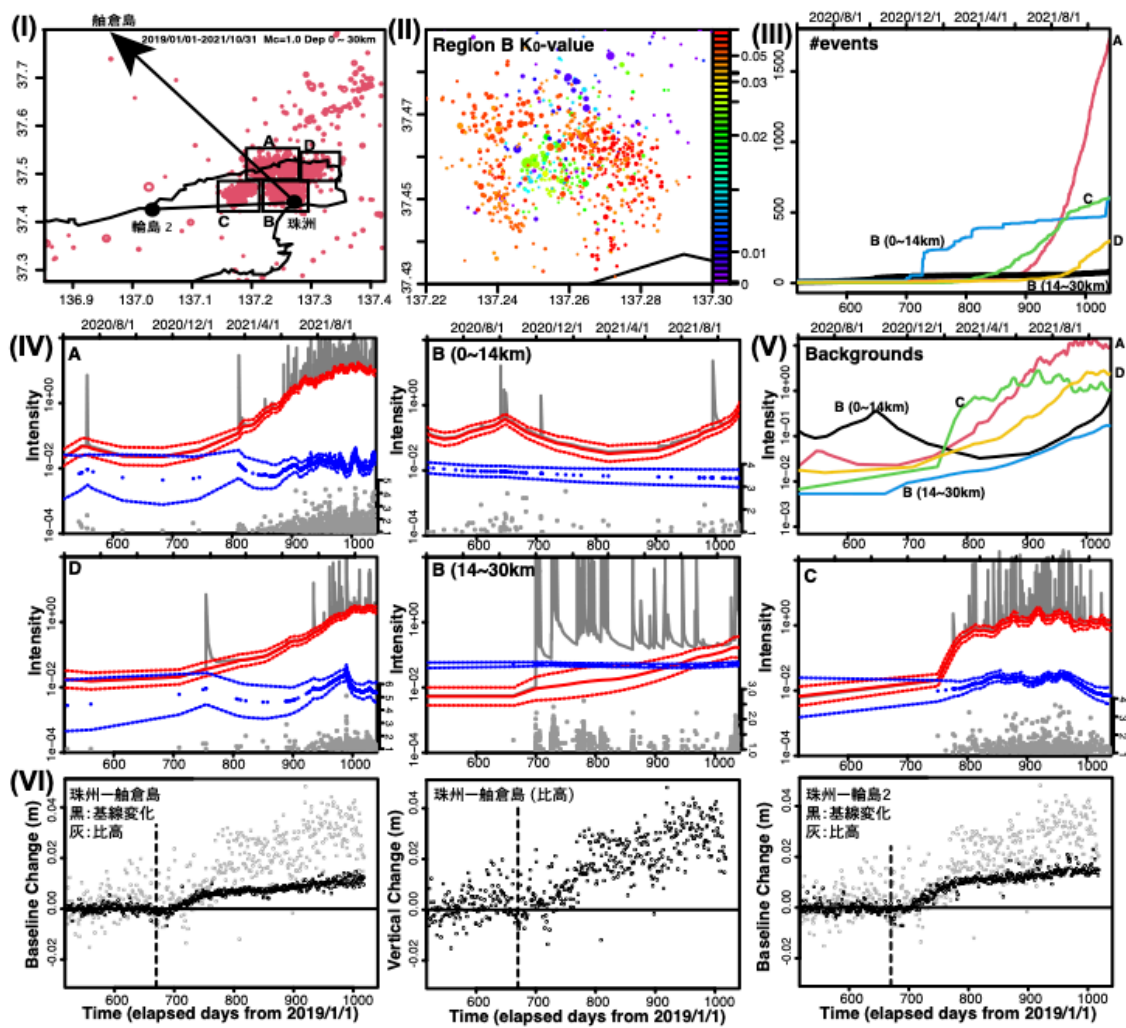
地震時系列データからは様々な統計量を抽出できるが、中でも背景地震活動強度は地震活動の予測の観点からも重要な意味を持つ。我々の研究ではETASモデルの背景地震活動度の時間変動をベイズ法で推定する点過程モデルを用い、2020年末から発生した石川県能登半島の群発地震活動に適用して、その地震活動の特徴を調べた。

能登半島では2018年ごろから地震回数が増加傾向にあり、2020年11月末から地震活動が活発化して現在に至っている。これらの活動は大きく4つの震央クラスターに分かれ、従来から活動していた南東部領域では2020年11月末に14km以深へ移動した。以降、他3領域で順次活発化している。2022年8月15日時点での最大地震は2022年6月19日に北部領域で発生したM_j 5.4である。GNSS観測では2020年11月末頃から非定常な変化が見られ、輪島2-珠州観測点および珠洲-舩倉島観測点の基線距離で約1 cm程度の増加、及び珠州観測点の舩倉島との比高ではバラツキ誤差が大きい3 cm程度の隆起が観測されている。

各領域の群発地震活動に非定常ETASモデル (Kumazawa and Ogata, 2014) を当てはめた。このモデルは従来のETASモデルの背景強度と余震的誘発率のパラメータが、時間に依存する関数と仮定し、これらをベイズ法で推定する。背景強度は対象領域全般のゆっくりした応力変化や流体貫入による断層弱化などに起因すると考えられる。余震的誘発率は主に領域内の先行地震による連鎖効果の変化 (余震的誘発率) を示す。

南東部領域の活動は初め領域の中央付近に分布していたが、2020年11月30日に活動が深部へ移動した際に静穏化した。同時に深部では、浅部の地震群をとり囲むようにドーナツ状に活発化し、背景強度は現在に至るまで増加傾向にある。

南東部領域深部の活発化以降、2ヵ月から3ヵ月遅れて先ず西部領域の活動度が上がり、次いで北部および北東部領域の地震活動度が順次上昇した。これらの領域の背景地震活動は、各領域の地殻変化を良く反映していると思われるGNSS 観測時系列の変動パターンと比較的対応が付く。



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

📅 Mon. Oct 24, 2022 10:45 AM - 12:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 1:45 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S09] AM-2

chairperson: Yuta Amezawa (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Yukihiro Nakatani (Kagoshima University)

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

[S09-05] Long-living earthquake swarm at the NE of Noto peninsula –Hypocenter migration and driving mechanism–

*Yuta Amezawa¹, Yoshihiro Hiramatsu², Ayumu Miyakawa¹, Kazutoshi Imanishi¹, Makoto Otsubo¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University)

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

[S09-06] Mechanisms that cause swarm and crustal activity occurrences since the end of 2020 in the NE Noto Peninsula from perspectives of previous studies

*Masatoshi MIYAZAWA¹ (1. Kyoto Univ.)

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

[S09-07] Regular Earthquake Activities Accompanied by VLFE Activities along Ryukyu Trench, Southwestern Japan

*Youichi ASANO¹ (1. NIED)

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

[S09-08] Spatio-temporal relationship between regular earthquakes and shallow tremors in the east to northeast off Kikaijima Island observed by ocean bottom seismic network

*Yukihiro Nakatani¹, Hirotsugu Yanagida¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima³, Kazuo Nakahigashi⁴, Masanao Shinohara⁵ (1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 3. SEVO, Kyushu Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Science and Technology, 5. ERI, UTokyo)

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

[S09-09] Unusual slow earthquake activity for Nankai trough earthquake emergency information

*Kazushige OBARA¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Long-living earthquake swarm at the NE of Noto peninsula –Hypocenter migration and driving mechanism–

*Yuta Amezawa¹, Yoshihiro Hiramatsu², Ayumu Miyakawa¹, Kazutoshi Imanishi¹, Makoto Otsubo¹

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University

はじめに

群発地震とは、群を抜いて規模の大きな地震（本震）を持たず、活動時系列が改良大森公式に従わない地震活動である。群発地震に伴い震源migration（地震活動域の時空間発展）が観測され、それらは流体圧の拡散モデルで説明可能であることが知られている。ゆえに、高圧の流体による間隙流体圧の時空間変化が群発地震の駆動に影響していると考えられている。また、群発地震の継続時間は数時間から数年と非常に多様であり、それが震源migrationの拡散係数に逆相関する可能性が報告されている（Amezawa et al., 2021）。しかし、数年に渡り長期化する群発地震については観測例が少なく、長期化要因の検討は不十分であった。長期化要因の検討は群発地震のメカニズムを理解するために重要である。

2018年に能登半島北東部で発生した群発地震は、2020年12月に活発化し、発生から4年以上継続している。本群発地震の震源分布は、活動域南部のSクラスタと、そこから西・北・北東部に位置するW・N・NEクラスタに大別できる。これまでの種々の解析で、本群発地震には地殻内流体が関連している可能性が判明した（地震調査委員会「石川県能登地方における地震活動の評価」）。本研究では、高精度に再決定した震源分布に基づき、各クラスタにおける震源migrationの評価と震源分布の時空間発展の解析から、本群発地震の駆動メカニズムと長期化要因を検討した。

データ・手法

2018年–2022年6月に発生したM0.0の20,542地震（気象庁一元化震源）について、Double-Difference法（Waldhauser & Ellsworth, 2000）を適用して震源再決定を行った。入力データである differential-time は、気象庁検測値から作成したものと、地震波形の相互相関解析に基づいて作成したものを使用した。なお、後者にはP・S波の理論走時±1秒で切り出した上下動成分について5–10 Hzの帯域通過フィルタをかけて地震ペア毎に相互相関係数を計算し、それが6観測点以上で0.8以上のものを用いた。

震源migrationの評価は、Amezawa et al. (2021)の手法に従い、各クラスタの拡散の時空間原点をグリッドサーチしつつShapiro et al. (1997) で提案された間隙流体圧の拡散モデルを当てはめ、拡散係数を推定するという方法で行った。

結果

活動初期の初期震源に使用した地震のうち20,399地震について震源再決定することができた。震源再決定の結果、Sクラスタの震源は深さ10–15 kmにかけて円柱状に分布し、深さ15–20 kmでは円環状に分布していることや、Nクラスタ内部には約30°で南東傾斜する長さ1 km程の面的な震源分布が複数存在すること等、これまでに震源分布の複雑な特徴を詳細に捉えることができた。

W・N・NEクラスタにおいて震源migrationが観測され、その拡散係数はそれぞれ0.098, 0.094, 0.12 m²/sであった。一方、Sクラスタの地震活動は複数の間欠的な活動で構成され、全体の時空間発展は一つの拡散モデルで説明できないが、間欠的な各活動について着目すると拡散的な震源migrationが確認された。

議論

地震活動の深さ方向の時間変化に着目すると、群発地震の発端となったSクラスタでは、活動開始から2020年11月頃まで震源の深さが浅くなる傾向を示す。これは、深部からの流体供給を示唆する。また、2020年12月にはSクラスタの深部15–20 kmで地震活動が発生し、拡散係数が ~ 50 m²/sの非常に高速な震源migrationが観測された。このことは、Sクラスタ底部において高圧になっていた流体が一気に解放され、新

たな流体供給路が形成されたことを示唆する。その結果、より多量の流体が供給されるようになり、間隙流体圧が本地域の最小主応力を超え、Sクラスタから他クラスタへの流体供給路が開き、他クラスタでの地震活動が発生したと考えられる。

その後、Sクラスタでは深さ15–20 kmで間欠的な地震活動が続いている。これは、クラスタ底部から定常的に流体が供給されているが、一度に他クラスタへ移動できる量が限られていることを示唆する。要因としては、封圧が高く間隙流体圧が少しでも拡散すると有効法線応力の低下が不十分となること等が考えられる。また、W・N・NEクラスタにおける震源migrationの拡散係数は比較的小さく、本群発地震域は低浸透率な環境であることが示唆される。以上から、本群発地震を長期化させている要因として、周辺への間欠的な流体移動および低浸透率な環境が考えられる。

謝辞

本研究では、気象庁一元化震源、気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・京都大学・東京大学の観測点で観測された地震波形、F-netのCMT解を使用しました。感謝いたします。

Mechanisms that cause swarm and crustal activity occurrences since the end of 2020 in the NE Noto Peninsula from perspectives of previous studies

*Masatoshi MIYAZAWA¹

1. Kyoto Univ.

・はじめに

2020年末頃から始まったと考えられる能登半島の群発地震活動は、2021年9月にM5.1地震と2022年6月にM5.4地震が発生するなど、複数年に及ぶ長期的な活発な活動となっている。GNSS観測によれば、珠洲を中心に地盤の隆起が続いている。定常的な地震・地殻変動観測に加え、2021年からは様々な調査が行われ始めており、それらを統合すれば、地震発生域である深さ10km程度の場所に膨張源があり、その地殻変動に伴い地震が発生していると考えられる（第375回地震調査委員会, 2022）。現在も調査研究が進められている中で、この活動の真相に迫るには限界があるが、これまでの知見を基に、なぜ今この場所でこのような群発地震活動が発生しているのかを考察する。

・能登半島と応力場

能登半島北東部には、古第三紀漸新世から新第三紀中新世前期（約3000万年前から約1500万年前）の日本海形成期から拡大期に形成された火成岩が分布しており（産総研地質調査総合センター, 2022）、この時代の火山活動の存在が示唆されている。また重力異常の分布は火山活動によるカルデラ構造の可能性を示している（山崎・河野, 1973）。ただし現在は火山活動が認められず、火山性の地震活動も観測されていない。このような場所で地殻活動が突然始まるには、なんらかのきっかけがあったと考えられる。1993年能登半島沖地震(M6.6)や2007年能登半島地震(M6.9)の影響もありうるが、2011年東北地震(M9.0)の影響が大きいと思われる。一般的に、プレート間で発生する大地震後には、沈み込んだプレートの上に乗る大陸プレートの陸域で、火山活動が活発化することが知られている（e.g., Hill et al., 2002, PhysToday）。その活動は、地震の直後だけではなく、十年という単位で遅れを伴って活発化している。これは上部マントルの粘弾性構造の影響を受けた準静的応力変化による。2011年東北地震に伴い日本列島では地震時のみならず、地震後も粘弾性の影響を受けた余効変動が観測され続けている。能登半島のみに着目すると、東北地震前はNW-SE圧縮の逆断層型の背景応力場であったのに対し、地震時にはE-W伸張の応力変化が推定されている（e.g., Terakawa & Matsu'ura, 2013, EPSL）。粘弾性を考慮したモデル計算では、E-W伸張の応力変化が時間発展する様子が推定されている（Becker et al., 2018, EPSL）。GNSS記録から推定した歪み速度場からは、NW-SEの背景圧縮場に対し、東北地震後（2017年から2020年）はNNW-SSE圧縮かつENE-WSW伸張場に変わったことが示されている（深畑ほか, 2022, 地学雑誌）。

・能登半島の地殻活動の源

2020年末から観測されている地殻変動は、地下約10kmの場所に変動源を置くと説明できると考えられている（第375回地震調査委員会, 2022; 西村私信）。モデルとして、断層滑り、球状圧力源、開口クラックのいずれでも説明可能である。限られたGNSS観測点数のため、客観的なモデルの優位性については議論の余地が残されているものの、開口クラックモデルが最も現象を説明しやすいと考える。推定されている開口クラックモデルは、NW-SE走向のSW傾斜の形状である。これは2011年東北地震後の応力場に対して整合的である。さらに開口クラックモデルを用いて静的応力変化を計算すると、現在活発な地震活動を示している西側、北側、東側領域で正値が求まり、地震活動の増加を説明することができる。ここで応力変化の影響を受ける地震活動のメカニズムは、この地域で発生している主な地震のメカニズム（NW-SE圧縮の逆断層型）であるとし、活断層の珠洲沖セグメント延長で発生していると仮定している。

・群発地震の発生メカニズム

以上をまとめて考えると、能登半島北東部では、2011年東北地震に伴う粘弾性変形により徐々に応力場が変化し、新たに形成されたNNW-SSE圧縮応力場に対応する開口クラックが深さ10 km程度に形成された。日本海拡大期の火山活動の名残として地殻内に残留していたと考えられる流体が、減圧に伴い浮力を得て、このクラックに沿って上昇し、地殻変動をもたらした。同時に、開口クラックと流体は周囲の応力場を変化させ地震活動を誘発し、群発地震活動（西側、北側、東側領域）として観測されている。南側領域の地震活動は深さ分布が他の3領域と異なっているため、流体の上昇と、開口クラックに起因する破壊が原因と考えられる。ここで言う開口クラックモデルとは、複雑な現象を1つのモデルに単純化させたものに過ぎないことに注意が必要である。今後の地殻活動は、地下からの流体の供給やその駆動となる応力場が続く限り、継続する可能性がある。

かつての火山活動の名残として、孤立型の準火山性スロー地震活動（Aso et al., 2013, Tectonophysics）があれば、流体の存在を支持する証左となりうる。気象庁一元化震源カタログによると、これまで能登半島北東部で低周波地震は観測されていない。ヒ克蘭ギ沈み込み帯では、遠地地震波によるテクトニック微動の動的誘発の発見(Fry et al., 2010, GRL)によって、背景微動活動が見つかった例があるが、能登半島では2003年十勝沖地震、2011年東北地震の表面波による動的誘発は見つからず、また今の群発地震活動中に起きた2021年アラスカ沖の地震(Mw8.2)でも確認できなかった。一方、2011年東北地震のP波による誘発地震活動の可能性は示唆されている(Miyazawa, 2012, EPS)が、スロー地震の存在を決定づけるほどのものでもない。

謝辞：本議論にあたり、平松氏（金沢大）、飯尾氏、西村氏、深畑氏、吉村氏（京大）からコメントをいただきました。

Regular Earthquake Activities Accompanied by VLFE Activities along Ryukyu Trench, Southwestern Japan

*Youichi ASANO¹

1. NIED

南海トラフ沿いの日向灘から南西諸島海溝に沿った領域では、プレート間における地震・超低周波地震活動が比較的活発である。この領域ではトラフや海溝の近傍でエピソード的な超低周波地震活動がしばしば発生しており、その活動域よりも北西側、すなわち深い側で通常の地震が概ね棲み分けるように発生している。著者らは、このエピソード的な超低周波地震活動と通常の地震活動が同期発生するケースの存在を報告するとともに [Asano et al. (2019AGU)]、超低周波地震と通常の地震の発生レート時系列の相関解析によって、日向灘から種子島・屋久島の東方沖にかけての広い範囲にわたる地震・超低周波地震活動の相関を明らかにした [浅野 (2021秋季大会)]。しかしながら、プレート間地震であることが判る規模が比較的大きな地震 (概ねMw3.5以上) について調べてきたため、活動の時空間的なふるまいを詳細に把握するには地震数が十分ではなかった。そこで本研究では、発震機構解が不明のものが多いながらも地震数が多い気象庁一元化処理震源カタログと我々による超低周波地震カタログとを比較して、地震・超低周波地震活動の同期が顕著であったいくつかのケースにおける活動の時空間推移を詳しく調べてみた。超低周波地震カタログの作成には2013年から2022年の防災科研F-netの記録 (一部期間、鹿児島大学との合同臨時観測の記録を含む) を使用した。通過帯域0.02~0.05 Hzのバンドパスフィルタを通した広帯域速度計の記録波形にAsano et al. (2015) の手法を適用し、発生時刻と位置が既知の地震 (主にセントロイド深さ20 km前後のプレート間地震) 17個、超低周波地震6個をテンプレートとして、これらと類似した波形を持つ未知イベントの探索と位置推定を行った。そして、ここで検出されたイベントのリストを気象庁一元化処理震源と照合し、対応する通常の地震が見出されないイベントを超低周波地震と識別した。解析した期間内で最も同期が顕著であった地震・超低周波地震活動の一つは、2013年9月以降の活動であった。この活動では、Mw4~5クラスの通常の地震5イベントを含む群発的な活動が種子島の南東沖で9月に発生し、約50km南西に離れたトカラ列島の沖でも通常の地震活動の活発化が見られた。時期をほぼ同じくして種子島の南東沖で開始した超低周波地震活動は、南西方向には約50kmのトカラ列島の沖へ、北東方向には約150kmの大隅半島の南東沖へと活動域を広げ、継続期間約1か月間にわたる活動となった。もう一つの顕著な活動は、2019年1月以降の活動であった。1月上旬の種子島近海の地震 (Mw6.3) が発生した後、この震源域近傍では余震活動が続くとともに、それよりも東側の海溝近傍では超低周波地震活動が開始した。超低周波地震は1か月程度で終息したが、通常地震の活動は1年間以上にわたり (発生前より) 活発な状態が継続した。また、Mw6.3の地震の約2週間後には、約50km南西に離れたトカラ列島の沖でも通常の地震活動の活発化して超低周波地震も観測された。このほかにも、規模こそ大きくはないものの、種子島・屋久島からトカラ列島の沖では2016年、2017年、および2018年にも地震・超低周波地震が同期する活動が見いだされた。日向灘や奄美大島沖ではこのような傾向は明瞭ではないことから、地震・超低周波地震の同期発生は種子島・屋久島からトカラ列島の沖を特徴づけるプレート間のふるまいである可能性がある。

Spatio-temporal relationship between regular earthquakes and shallow tremors in the east to northeast off Kikaijima Island observed by ocean bottom seismic network

*Yukihiro Nakatani¹, Hirotugu Yanagida¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Yusuke Yamashita², Takeshi Matsushima³, Kazuo Nakahigashi⁴, Masanao Shinohara⁵

1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ., 3. SEVO, Kyushu Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Science and Technology, 5. ERI, UTokyo

南西諸島（琉球）海溝沿いでは、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震活動およびプレート境界浅部のスロー地震活動が発生しており、他の沈み込み帯同様、両者の時空間的な対応関係が注目される。このうち南西諸島北部域では、近年の中長期的な海底地震観測により、島嶼部の限られた観測網のみでは明らかになっていなかった浅部微動が観測され、通常地震活動と空間的に棲み分けて発生している可能性が指摘されている。

地震活動と浅部微動活動の詳細な時空間パターンを理解するため、本研究チームでは2019年から喜界島東方沖～トカラ列島東方沖において機動的な海底地震観測を実施している。展開した観測網は、主に1 Hz計を搭載した自己浮上式長期観測型海底地震計（OBS）8台で構成され、観測点間隔約20 kmの小スパンアレイとして配置した。観測領域を年次的に移動しながらOBSアレイの設置・回収を繰り返し実施することで、観測領域全体が、南西諸島北部域における観測史上最大の地震である1911年マグニチュード（M）8.0喜界島地震の推定震源域をカバーできるよう計画されている。

本講演では、2019年4月から2022年4月までの計3期および現在進行中の第4期を含めた観測状況について示すとともに、OBSアレイを用いて震源決定した一部期間における地震活動の時空間分布および浅部微動との対応関係について議論する。地震の震源決定手法には、P波／S波到達時刻の手動検測による初期震源決定・PS変換波を利用した未固結堆積層による走時遅れの補正（観測点補正）・Double-Difference法を用いた高精度相対震源決定、の3ステップを実行した。微動の時空間分布は、同OBSアレイデータにエンベロープ相関法を適用したYamashita et al. (in prep.) の結果を参照した。

OBSアレイが1911年喜界島地震の推定震央直上に展開された第2期観測（2020年8月～2021年4月）においては、気象庁一元化震源カタログに比べて約2倍の震源数が求められたものの（約120イベント／約8か月）、得られた地震のほとんどが沈み込む海洋プレート内で発生するM3未満の微小地震であり、プレート間地震は低調であった。一方、プレート境界面上で発生すると想定されている浅部微動は、マイグレーションを伴う顕著なエピソードが複数回発生しており、通常地震と浅部微動の活動領域の棲み分けが示唆される。また、第1期観測（2019年4月～2020年8月）においては、微動エピソードの直前あるいは微動活動が低調な期間に通常地震がまとまって発生する時系列の関係性も確認された。

謝辞：海底地震計の設置・回収航海は、長崎大学水産学部附属練習船・長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施し、乗組員の皆様に多大なるご協力をいただきました。東京大学地震研究所・技術職員の皆様にはOBS準備等にご尽力いただき、鹿児島大学・九州大学・京都大学・東京海洋大学の学生諸氏には関係航海に乗船いただきました。本研究は、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」および東京大学地震研究所共同利用の支援を受けました。記して感謝いたします。

Unusual slow earthquake activity for Nankai trough earthquake emergency information

*Kazushige OBARA¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

南海トラフの大地震の切迫性が高まった可能性がある判断される場合、南海トラフ地震臨時情報が発出される仕組みが構築されている。その臨時情報の契機の一つとして、「通常とは異なるゆっくりすべり」の発生可能性が挙げられるが、その具体的基準はまだ明確ではない。そこで、本講演では「ゆっくりすべり」を「スロー地震」全体に拡張したうえで、「通常とは異なるスロー地震活動」とは何か、その判断に対して今の地震学の知見からどこまで貢献できるのか、さらに、今後我々はスロー地震の何を明らかにしなければならないのかについて考察する。

ここで取り扱うスロー地震は次の現象から構成されるものとする（小原，2009，地震2）。

- ・ 長期的および短期的スロースリップイベント（SSE）
- ・ 超低周波地震（VLF）
- ・ 低周波微動

なお、すべての現象に「スロー」を意味するキーワードが付されているのは、スロー地震ファミリーとしての統一性を示すためである。このうち、短期的SSEとVLF・低周波微動はEpisodic Tremor and Slip（ETS）として時空間的に同時発生すること、ETSは長期的SSEとは棲み分けるがそのすべり面からの距離に応じた影響を受けることなどが知られている。

Obara & Kato (2016, Science)によって指摘されたスロー地震と大地震との関連性やこれまでのスロー地震に関する研究成果を踏まえると、「通常とは異なるスロー地震活動」を評価するにあたり、次の3つの観点が重要である。

- ・ Stress transfer（応力転荷）：スロー地震によって再配分された応力が固着域に転荷されて大地震を促進する可能性。
- ・ Stress meter（応力指標）：大地震発生域内の応力集中による影響でスロー地震の活動様式が変化する可能性。つまり、スロー地震活動の変化が大地震の切迫度を反映する指標として利用できる可能性。
- ・ Creep meter（すべり指標）：小繰り返し地震（RE）と同様にプレート間すべりを反映する指標としてスロー地震を捉える可能性。

Stress transferの観点では、SSEの規模が評価項目として挙げられる。その物理的根拠はSSEによる応力再配分であるが、具体的な評価対象を個々のSSE規模とするか、あるいは積算規模またはその変化率とするかについては検討が必要である。もちろん、いずれの場合にも適切な基準値の設定が必要不可欠であることは言うまでもない。また、SSEのプロキシとしての低周波微動やVLFの活動度変化も評価項目として利用可能である。特に、SSEの規模が小さく地殻変動としての直接計測が困難な場合は、これらのサイズミックスなスロー地震による評価が重要である。これまで、低周波微動やVLFの活動度とSSE規模の関係性については、エピソード内の微動の数や継続時間と短期的SSEのモーメントとの線形性が議論されたが（Aguiar et al., 2009; Obara, 2010）、今後はより物理的量である微動エネルギーやVLFモーメントが適切である。なお、これらのサイズミックスなスロー地震の規模とSSEモーメントとの関係は地域依存性を有することが知られており、そのような不均質性の原因の解明はスロー地震の理解においても重要である。

Creep meterの観点では、REと同様に、各スロー地震がその震源域の周囲におけるすべりが進行する中での遅れ破壊との解釈に基づき、スロー地震活動度がプレート境界すべりを反映する評価項目となる。もちろん、各スロー地震の規模の定量的評価が重要であることは言うまでもない。

Stress meterとしては、活動間隔や移動パターンなど、スロー地震におけるあらゆる活動様式が評価項目とな

りうる。例えば、深部ETSはセグメントごとにある程度固有の活動間隔や移動方向を有しているが、それらの特徴がこれまでの平均的描像からずれることがあれば、通常とは異なる状況を示していると言えるかもしれない。実際に、短期的・長期的SSEと巨大地震を含めた数値シミュレーション研究では、巨大地震発生前にSSEの発生間隔が経年的に減少する結果が得られている（Matsuzawa et al., 2010）。しかし、スロー地震の様々な活動様式に関する観測事実はまだ十分に蓄積されておらず、物理的根拠も明確ではない。したがって、まずは各種スロー地震を確実に検出し、高精度なカタログを構築して、各スロー地震現象の様々な活動様式を明らかにし、通常と非通常を統計的に区別できるようにモニタリング研究を進めることが期待される。

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

📅 Mon. Oct 24, 2022 4:00 PM - 5:45 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 7:00 AM - 8:45 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S09] PM-2

chairperson:Kazuaki Ohta(NIED), Satoru Baba(University of Tokyo)

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

[S09-10] **Temperature control of episodic tremors with slip in the Nankai subduction zone**

*Ryoya IKUTA¹, Yui Kobayashi², Tatsuhiko Kawamoto¹ (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Shizuoka Higashi High School)

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

[S09-11] Spatial variation of shallow tectonic tremor energy radiation in the Nankai trough

*Kazuaki OHTA¹, Katsuhiko SHIOMI¹, Takanori MATSUZAWA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09-12] Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model

*Satoshi IDE¹, Shunichi Nomura² (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University)

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

[S09-13] Detection of Low-Frequency Earthquakes by Distributed Acoustic Sensing (DAS)

*Aitaro KATO¹, Hiroshi Tsuruoka¹, Masanao Shinohara¹, Kentaro Emoto², Tsunehisa Kimura³, Kenji Okamura⁴, Yutaka Kikuchi⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyushu University, 3. DAS Consultant (agent of Sintela), 4. Kochi University, 5. Kochi University of Technology)

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

[S09-14] Observation of slow earthquakes using distributed acoustic sensing off Cape Muroto

*Satoru BABA¹, Eiichiro Araki¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Takane Hori¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuhei Nishida¹, Takashi Yokobiki¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S09-15] Swarms of microearthquakes associated with tectonic tremor bursts in the northern Japan Trench

*Kazuma Matsumoto¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Masanao Shinohara³ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

Temperature control of episodic tremors with slip in the Nankai subduction zone

*Ryoya IKUTA¹, Yui Kobayashi², Tatsuhiko Kawamoto¹

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Shizuoka Higashi High School

南海トラフの深部微動の震源の空間分布を沈み込むプレートの運動と形状、温度の視点から検討し、その発生条件を制約した。

南海トラフの深部微動(≒ETS)は、カスケディア(e.g. Rogers & Dragert, 2003)、メキシコ(Husker et al. 2012)のETSと同様、巨大地震を生じる固着域のdown-dip側に帯をなして生じている。我々は南海トラフの深部微動の帯状の分布の二つの特徴に注目した。一つめはプレート境界に沿った深さのバリエーションである。微動がプレート境界で生じていると考え、その発生帯の深さは一定ではなく、30 kmから50 km程度の範囲で地域性をもって変動することが知られている(例えばShiomi et al. 2008, Hirose et al. 2008)。二つめの特徴は空白域である。微動の帯状の分布の中で、伊勢湾と紀伊水道には微動の空白域が見られる。これらの特徴に注目して微動の発生条件を考える。まず我々は3-Dの熱伝導、移流モデルを用い、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場の計算を行った。計算には有限差分法を用い、以下の条件を採用した。1. 熱は3次元の熱伝導とプレートの移動によってのみ移動し、マントルウェッジ対流は存在しない。2. プレートは一定の厚みを持った板であり、現在の形状に沿って現在のプレート収束速度で沈み込む。3. 初期状態は一次元半無限冷却モデルで与える。計算の結果、微動の震央位置は、プレート境界の等深度線より等温度線(450℃から500℃)によく一致した。プレート形状と運動からは更に、伊勢湾と紀伊水道に見られる微動の空白域について、前者は等温度線がマントルウェッジではなく大陸地殻と接すること、後者はプレートの運動方向を考慮すると空白域は狭く、微動の分布がプレート運動に直交する方向には連続している(空白域ではない)ことが示唆される。多くの先行研究が、微動を生じさせているのはスラブから特定の温度圧力条件で放出される水であることを示唆しているが(例えばYoshioka & Murakami 2007; Shelly et al. 2007; Nakajima & Hasegawa 2016等)、我々の結果は更に、水が出るのは特定の温度条件に達した一度で、水が放出された先にマントルウェッジが存在することが微動の発生条件であることを示唆している。特定の温度圧力条件で蛇紋岩の脱水分解により放出された水がプレート境界の間隙水圧を上昇させるとすると、微動を生じるためにはマントルウェッジは水で飽和している必要がある。Wada & Wang (2009)は、西南日本の下では60 kmより浅いマントルウェッジは沈み込むプレートとデカップルしていると主張している。60 kmより浅いマントルウェッジは長時間その場に留まることで、過去にスラブから放出された水で飽和していると考えられる。他方で微動の終端である日向灘より西では、プレート境界の等温度線が深くなりマントルウェッジのデカップリングの下限を下回る。スラブから放出された水がフレッシュなマントルウェッジに吸収されれば、間隙水圧を上げることはできない。

以上、プレート形状と運動、温度の計算から、微動が生じる条件は、特定の温度圧力条件により、スラブから水が放出されること、その水が既に飽和したマントルウェッジに供給されることであると考えられる。

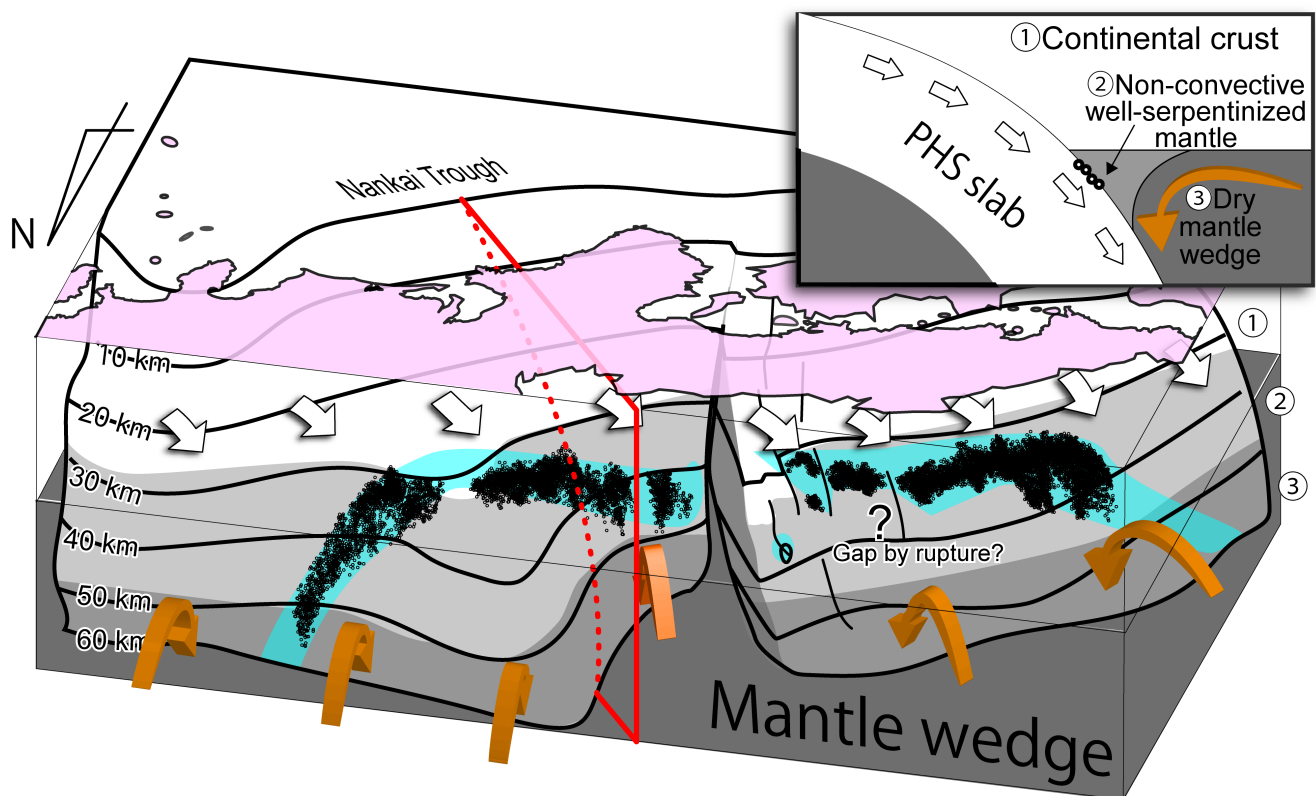


Figure. Schematic illustration showing slab motion (white arrows), torn and ruptured slab with isodepth contours, dehydrated water (blue), tremors (black circles), and deeper convective mantle (orange arrows).

Spatial variation of shallow tectonic tremor energy radiation in the Nankai trough

*Kazuaki OHTA¹, Katsuhiko SHIOMI¹, Takanori MATSUZAWA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフ沈み込み帯のプレート境界では巨大地震発生域をはさんで深部側と浅部側の双方の領域において、それぞれスロースリップや超低周波地震を伴う微動が発生している。浅部の微動の性質は、海底地震計データを用いた近年の研究により調べられており、地震波エネルギーの不均質な空間分布(Yabe et al., 2019, 2021)や、高エネルギー側で指数関数的に逸脱するグーテンベルクーリヒター則(tapered G-R則)に従う規模別頻度分布(Nakano et al., 2019; Nakano and Yabe, 2021)が知られている。しかし、これらの解析は時間的・空間的に限定された微動活動に基づいている。本研究では、南海トラフ浅部域における長期間の微動カタログを用いて微動の地震波エネルギーの時空間分布および規模別頻度分布を詳細に調べた。

防災科学技術研究所の運用する地震・津波観測監視システムDONET1およびDONET2の広帯域地震計記録を使用し、スペクトル解析によるエアガンノイズ除去とカタログ照合による遠地地震除去を施したエンベロープ相関法を適用して、南海トラフ浅部域の微動活動の網羅的なカタログを構築した。さらに、海底地震計のサイト増幅特性および地震波減衰を補正して、微動の周波数帯域(2-6 Hz)における地震波輻射エネルギーを推定した。補正値はYabe et al. (2019, 2021)で推定されたものを使用した。最後に、微動のエネルギーレートと累積継続時間に基づいて規模別頻度分布を調べた。

室戸沖から紀伊半島南東沖にかけての領域で、2015年10月から2022年6月の期間に6回の大きなバースト活動を含む15,000以上の微動を検出した。微動のエネルギーはプレート沈み込みの走向方向に明瞭な空間不均質を見せ、紀伊半島南東沖の海溝軸近傍に顕著にエネルギーの高い領域($\sim 10^6$ J/s)、紀伊水道沖に顕著にエネルギーの低い($\sim 10^3$ J/s)領域が確認された。微動の規模別頻度分布にも、走向方向に沿って特徴的な空間変化が見られた。沈み込み帯の東側の紀伊半島南東部の微動は、先行研究で報告されているtapered G-R則に従う一方、西側の紀伊水道沖や室戸沖の微動は典型的なG-R則に近い規模別頻度分布を持つことがわかった。これらの違いは、プレート境界浅部の摩擦特性や応力状態の空間的な違いを反映していると考えられる。

Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model

*Satoshi IDE¹, Shunichi Nomura²

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University

スロー地震は、世界各地で発見されており、巨大地震などとの関連性が示唆されるために、大きな注目を集めている。スロー地震の高周波成分であるテクトニック微動は、地震データによって震源決定可能であり、その情報は時空間的に高分解能なスロー活動のモニタリングに利用できる。さらにはその特徴、空間的セグメンテーション、準周期的活動、マイグレーション、潮汐依存性などを、定量的な標準モデルで表現することで、将来の活動予測も可能となる。本研究では、南海トラフの微動活動を対象として、活動の標準化のための更新過程モデルを作成、そのモデルを用いた予測実験を行う。

南海トラフの微動発生地域を、約20km四方の範囲に分割し、地域ごとにモデル作成を行う。地域ごとの微動発生間隔の分布はほぼ二峰性であり、短い間隔は近接した微動との相互作用、長い間隔は長期の応力蓄積過程の特徴的時間を、それぞれ表している。そこで、短い発生間隔と長い発生間隔に対して、それぞれ対数正規分布とBPT分布を仮定、その混合分布を更新過程の確率分布として採用した。12.5年分の微動カタログを、10年間の推定期間と2.5年間の予測期間に分け、推定期間のカタログを用いて、この更新過程モデルを特徴づける5つのパラメータを最尤法によって推定した。微動発生地域の7割程度で、パラメータを適切に推定することに成功した。

この更新過程モデルは、長期のスロースリップ現象に伴うような、微動活動の異常な活発化など、標準でない活動を定量的かつ客観的に抽出するために用いることができる。また推定されたパラメータの空間的な違いから、長期と短期の発生間隔の特徴的な時間、相対的なプレート運動、微動活動のエピソード性、微動継続時間を結びつけるスケーリング関係が導かれる。そしてこのモデルにより、ある基準時刻における次の微動の発生を確率的に予測できる。実際に予測期間のカタログを用いて実験を行い、その妥当性を確認した。このモデルは、スロー地震の高度な時空間予測のための複雑なモデル構築への第一歩となり得る。

Detection of Low-Frequency Earthquakes by Distributed Acoustic Sensing (DAS)

*Aitaro KATO¹, Hiroshi Tsuruoka¹, Masanao Shinohara¹, Kentaro Emoto², Tsunehisa Kimura³, Kenji Okamura⁴, Yutaka Kikuchi⁵

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyushu University, 3. DAS Consultant (agent of Sintela), 4. Kochi University, 5. Kochi University of Technology

近年、分散型音響センシング（DAS）技術を用いて、世界の様々なテクトニクス環境で、近地地震や遠地地震等を対象に地震波動場の観測が実施されている（e.g., Lindsey et al., 2017; Jousset et al., 2018; Wang et al., 2018; Zhan et al., 2019; Nishimura et al., 2021; Shinohara et al., 2021). 本研究では、徳島県から愛媛県にかけて発生している深部低周波地震による波動場を観測するために、四国中央部を概ね南北と東西に走る2本の国道沿いの光ファイバを用いて、DAS計測を約3ヵ月間実施した。四国地方整備局からご協力をいただき、上記の2本の光ファイバケーブルのDAS計測への利用が認められた。徳島県三好市内の国道維持出張所にDAS機材（Interrogator）を設置し、2021年12月から連続波形記録の取得を開始した。当初、時刻同期としてNTPを用いていたが、2022年2月上旬からGNSSによる時刻同期へと変更した。DAS計測中に、2本のケーブル沿いでタップテストを計20地点で実施し、良好な記録が取得できた。タップテストをもとに、ケーブル沿いの測定地点の位置決めを行った。

2022年1月上旬に発生した低周波地震活動の波動場を2本の光ファイバケーブルに沿って捉えることができたものの、DASの自己ノイズが高く、波動場の空間的な連続性は芳しくなかった。そこで、2月上旬よりノイズを低減した測定モードに切り替えて計測を実施した。但し、測定スペックの制約が生じ、測線長約12kmの1本の光ファイバのみを用いた計測となった。その後、2022年3月上旬に発生した低周波地震活動の波動場を明瞭に捉えることに成功した。測線の西端付近で発生したため、光ファイバに沿って波動場を概ね連続的に確認することに成功した。見かけ速度が速いため、ひずみ速度のSNが低下しやすい悪条件にも関わらず、10分程度継続する低周波地震の活動を観測できた。また、一部の低周波地震について、目視でS波を読み取り震源再決定を行った。

Observation of slow earthquakes using distributed acoustic sensing off Cape Muroto

*Satoru BABA¹, Eiichiro Araki¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Takane Hori¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuhei Nishida¹, Takashi Yokobiki¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

光ファイバーケーブルをセンサーとして歪みの変化を計測する分布型音響センシング（DAS）は、空間的に密な観測が可能であることから、近年地震学において広く使われるようになってきている。しかし、通常の地震よりも特徴的な時定数が長いスロー地震については、DASによる観測が行われた研究例は少ない。四国の室戸岬沖は、南海トラフの沈み込み帯で発生する巨大地震発生領域の一部となっており、そのupdip側ではスロー地震が観測されている（例えば、Nakano et al., 2018; Takemura et al., 2019）。スロー地震の発生する環境や構造との関係を明らかにするには、高い空間解像度でのスロー地震の観測が必要である。室戸岬沖では、室戸岬から55 kmの範囲で、AP SensingのDASによる観測が2022年1月より行われている。本研究では、室戸岬沖において密な観測が可能なDASと、地震・津波観測システム（DONET）の広帯域地震計データを用いて、スロー地震の一種である微動を観測し、それらの震源決定を行った。本研究は、DASで微動を観測した初めての研究である。

室戸沖のDASの歪みレート波形に2–8 Hzのバンドパスフィルターをかけた波形において、2022年1月30日から2022年2月8日までの期間で、約30個の微動が観測された。これらの微動のシグナルは、DONETでも広い範囲の観測点で広帯域地震計によって観測されている。DASで観測された微動のシグナルの継続時間は約40–60秒であり、これはDONETの広帯域地震計で観測された継続時間（約30秒）よりも長い。DASで観測された微動の歪み波形を詳細に見ると、微動のシグナルは数秒続くいくつかのいろいろな見かけ速度の相から構成されているように見え、これらの層がコヒーレントな範囲は50–100 m程度である。

微動の震源決定においては、DASの各チャンネルの歪み波形を速度波形に直したものと、DONET広帯域地震計の速度波形データに、2–8 Hzのバンドパスフィルターをかけ、2乗して0.3 Hzのローパスフィルターをかけたものを用いた。エンベロープ中の微動のシグナルの立ち上がりをピックし、理論走時と観測走時の残差が最も小さくなる位置をグリッドサーチによって求め、その位置を震源と定めた。多くの微動の震源は、DONETのGノードのやや北東部である、134.7°E, 32.8°N付近に決まった。ここは土佐ばえ海盆の南にあたり、Nakamura et al. (2022) によって調べられた構造と比較すると、沈み込んだ海山のupdip側になるため、先行研究（例えば、Sun et al., 2020; Toh et al., 2020）で示唆されたような、スロー地震活動と海山などの海底地形との関連性が示唆される。DASで微動が見えた時間のDONET広帯域地震計の0.02–0.05 Hzの波形では、超低周波地震（VLFE）のシグナルが観測され、室戸岬沖においては微動とVLFEが時間的に同期している。本発表では、微動とVLFEの時空間的関連性についても議論する。

Swarms of microearthquakes associated with tectonic tremor bursts in the northern Japan Trench

*Kazuma Matsumoto¹, Ryota Hino¹, Hidenobu Takahashi², Masanao Shinohara³

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

スロー地震の一種であるテクトニック微動（以下、微動）と通常地震が同じ深さ範囲で近接して発生している日本海溝沈み込み帯において、微動と通常地震の活動の時空間的な関係を詳細に明らかにすることは、スロー地震と通常地震の発生メカニズムを包括的に理解する手がかりを与えると期待される。本研究では、2007~2008年に日本海溝北部で発生した微動エピソード（Takahashi et al., in prep.）に伴って活発化した通常地震の時空間分布の詳細を明らかにした。本研究では、Takahashi et al. [in prep.]がエンベロープ相関法で検知したイベントのうち、継続時間が20秒より短いものを通常地震として、それらの震源をPおよびS波の到達時刻により再決定した。再決定することができた地震の数は3909個で、そのうち最小のものはM -0.4であった。ほとんどの微動エピソードに同期して、震源移動を伴う微動と通常地震の連動がみられた。通常地震の規模の時間変化は、これらの地震活動は本震-余震型というよりは群発的な活動であることを示す。空間スケールが最大の微動エピソードでは、微動の活発化が始まった後、小繰り返し地震（いずれもM 0.8~1.0）を含む通常地震が活発化し、微動と通常地震の震央が海溝の走向方向に移動する様子が顕著であった。震源移動の速さは約4 km/day程度で、他の小規模なエピソードでの震源移動も同程度の速さを示す。日本海溝南部では、微動活動が示す震源移動の延長上での通常地震の活発化が報告されている[Obana et al. 2021]が、本研究で示した日本海溝北部での観測事例と、微動が通常地震に先行すること、微動と通常地震の震源移動の速さ、といった点で類似性を指摘することができる。微動-通常地震の連動した活動にみられる特徴は、非地震性すべりイベントが隣接して分布する微動パッチと通常地震パッチの破壊を誘発していることを示唆する。また、日本海溝南部と北部で共通の特徴をもつ活動様態を示すことから、非地震性すべりに駆動される微動-通常地震の連動活動は日本海溝沿いの広い領域で発生している可能性がある。

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。

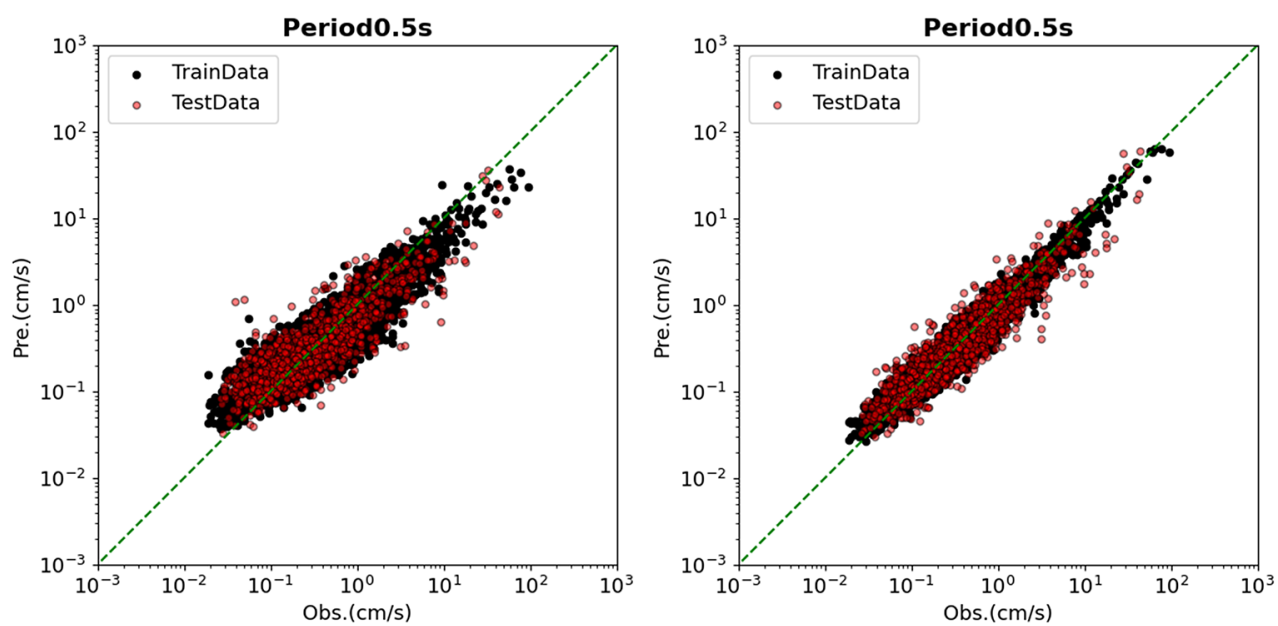
2. 検討対象地震及び観測記録

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波の立ち上がりが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。

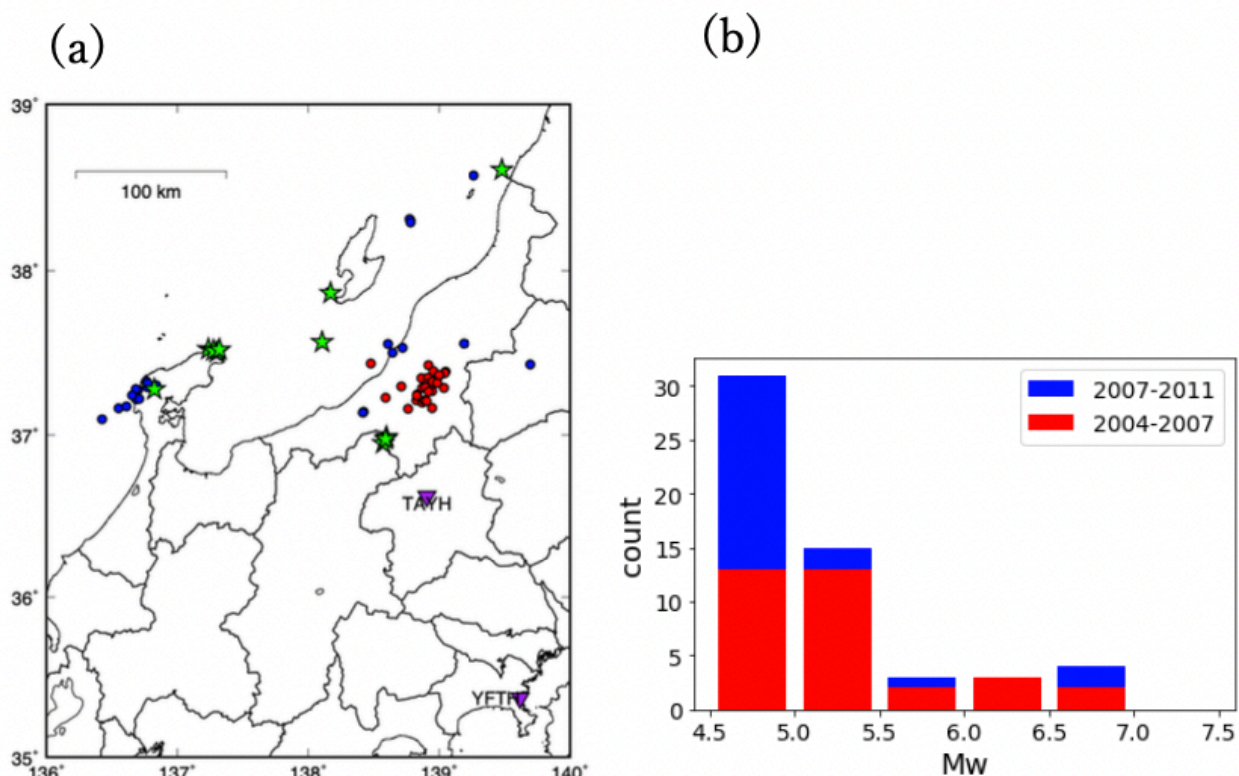


図1 (a) 学習に用いた地震の震源分布。赤○は2004～2007年の33個の地震、青○は転移学習に用いた2007～2011年の24個の地震。黄☆はテストに用いた11個の地震。(b)それぞれの地震の規模分布。

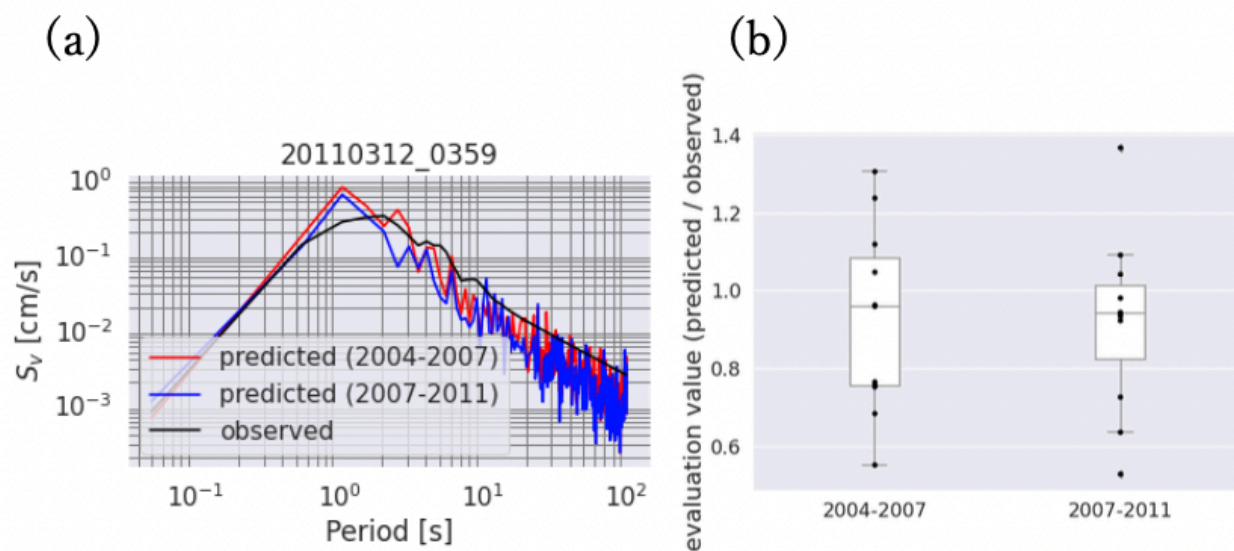


図2 (a) 横浜地点 (YFTH) における速度応答スペクトルの予測結果 (赤) と観測 (黒) の比較 (2011年3月12日長野県栄村の地震の例)。青線は、2007年～2011年の転移学習データを用いた予測結果。(b)11個の地震の速度応答スペクトルの予測結果の分布 (左:2004～2007年の地震による学習、右:2007～2011年の地震による転移学習)。

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。

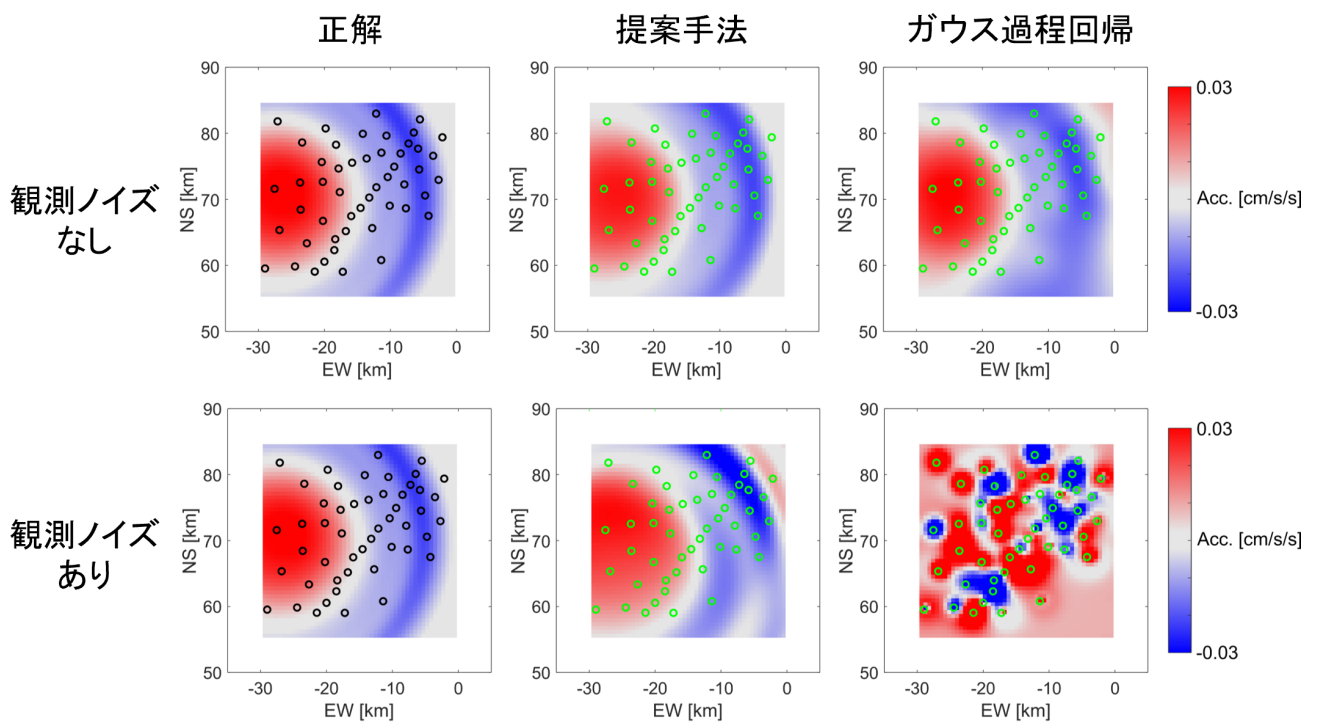
本研究では、地震動の理論波形を計算する低コストシミュレーションを用い、提案手法による観測点選択および地震波動場再構成の数値実験を、東京23区内のMeSO-net観測点50点を模擬した観測点群で行った。提案手法によって選択された観測点を用いた地震波動場再構成の精度を検証し、提案手法の有効性を示した。さらに、観測点候補の感度特性を調査し、地震波の伝播速度や地下構造の層の厚さ、震源位置などのパラメタ感度に対する物理的知見を得た。

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.

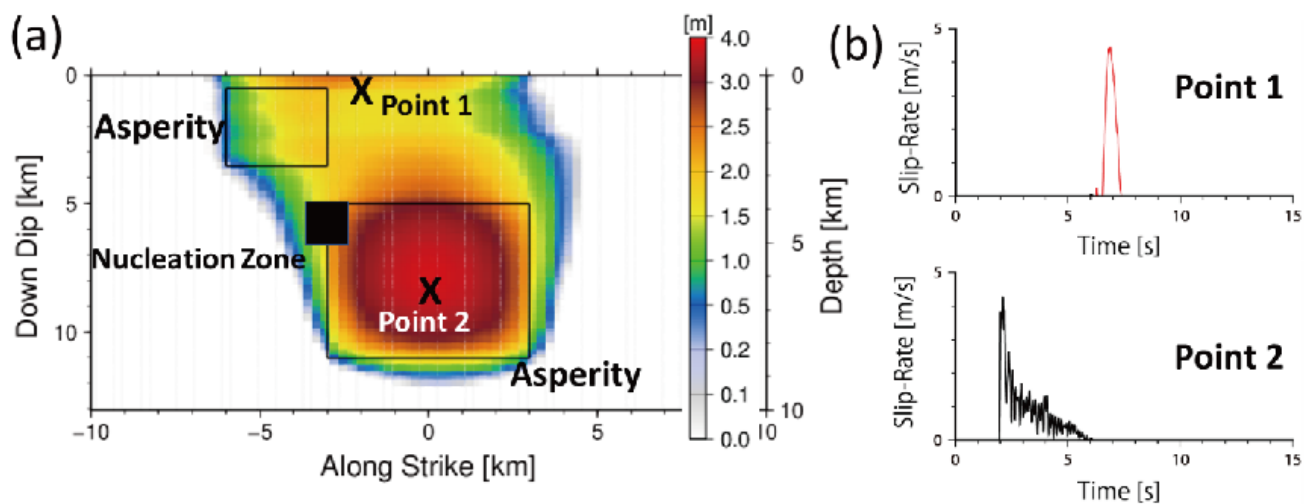


Figure1 (a) Simulated slip distribution based on the characterized source model by Hikima *et al.* (2015) (b) Slip-rate functions at two on-fault points whose positions are illustrated in Panel (a)

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

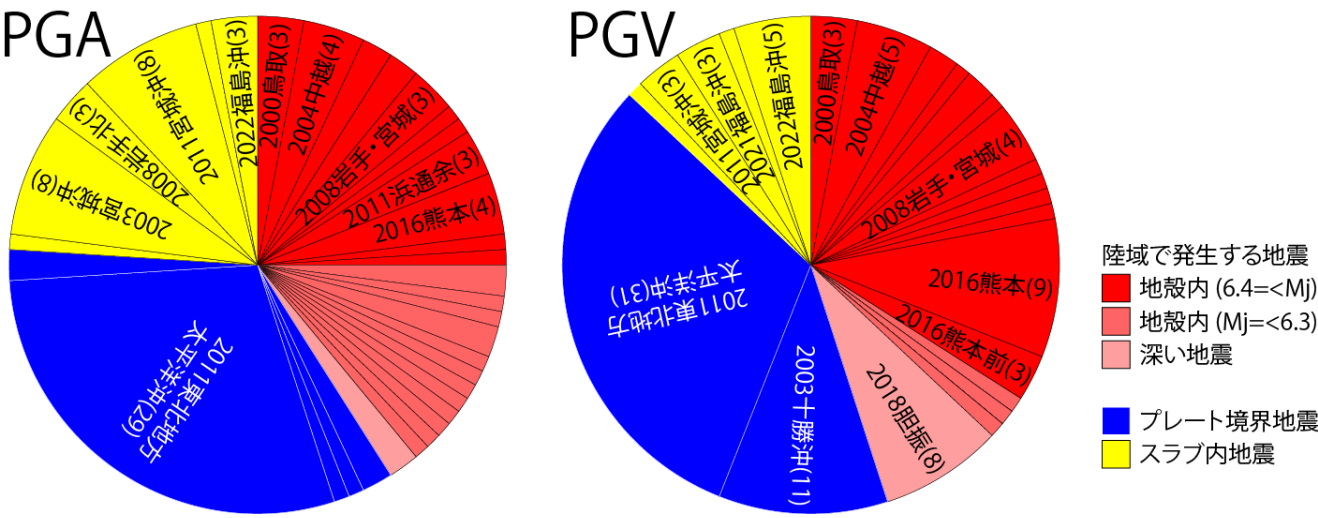
地震によるハザード・リスク評価にとって、地震動の上限とその特性を知ることは極めて重要な課題である。阪神・淡路大震災を契機に、全国を均質にカバーする1,750観測点余りからなる強震観測網K-NET及びKiK-netは、四半世紀余りの間に総地震数18,070、総記録数882,606に及ぶ膨大な強震記録を記録し蓄積してきた（1996/6/1～2022/6/30、以下同様）。K-NET及びKiK-netによる稠密な観測を持続的に実施することにより、過去知られていたよりかなり振幅の大きな地震動（いわゆる極大地震動）の存在が明らかになってきた。

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、断層近傍であることが多い。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。

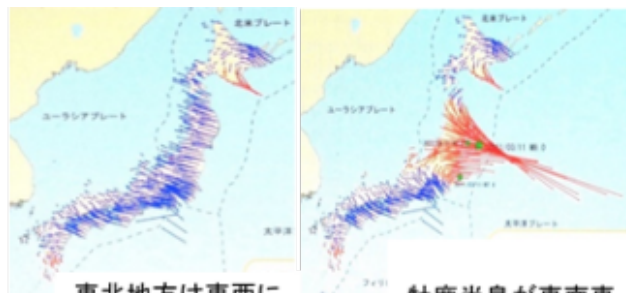
2.衝撃的鉛直地震波動の発生メカニズムの骨子

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。

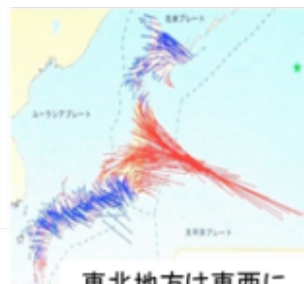
3.強烈な衝撃的鉛直地震波動が発生し易い場所(危ぶまれる地盤変動の兆候)

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。

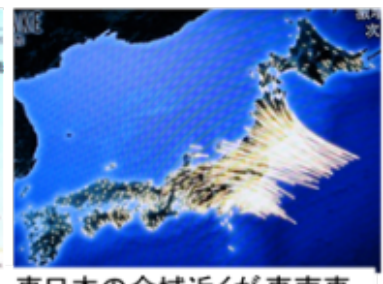


東北地方は東西に
約3cm/年 縮む
(a) 1997.4 - 2010.10

牡鹿半島が東南東
に5.3m、1.2m沈下
(b) 1997.4 - 2011.4



東北地方は東西に
年間数cmの伸び
(c) 1997.4 - 2020.4

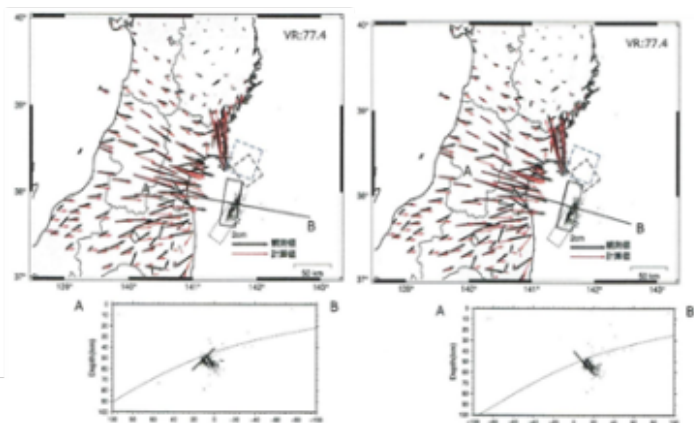


東日本の全域近くが東南東
に平行的移动(地震直後)
(2012.4 NHC Megaquake)
図2 一年間の地殻変動

図1 日本の地殻変動(長期) [国土地理院 全国地殻変動アニメを編集]



牡鹿半島(2.8cm)、南三陸は北に移動、
福島県海岸部(0.8cm)は南西-南南西に
図3 2022.03.16 福島県沖地震の地表変動



(a) 西傾斜モデル

(b) 東傾斜モデル

図4 推定された震源断層モデル

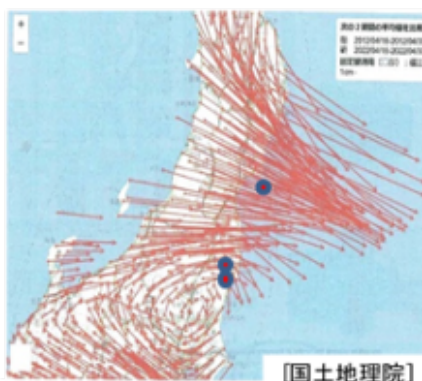


図5 地殻変動図(10年間)

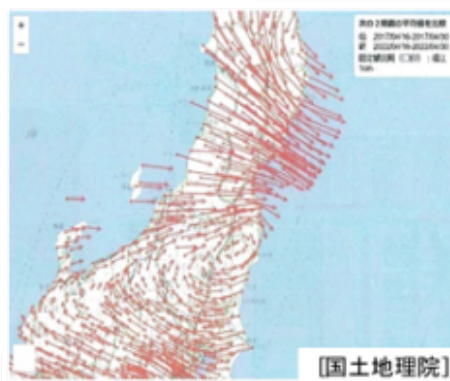


図6 地殻変動図(5年間)



図7 2022.05.22 茨城県沖地震

* 渦中心が移動 * 猪苗代町-富岡町付近に伏在弱線



[国土地理院]

■ 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、近くの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)

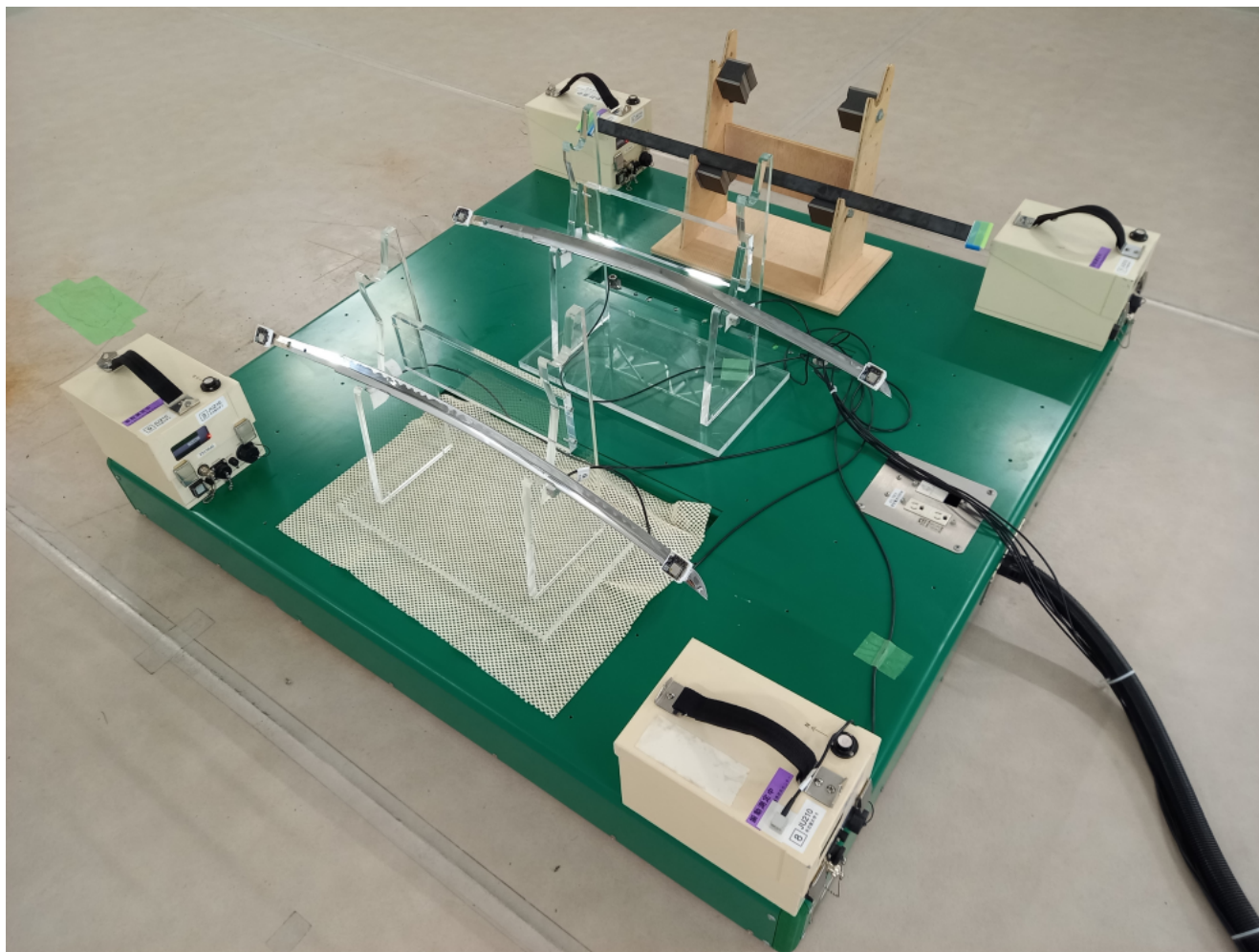


図 1 振動台実験の様子

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

🗓 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 11:00 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 2:00 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S15] AM-1

chairperson: Toshihiro Shimoyama (Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency),
Kotoyo Tsuchida (Hanshin Consultants Co., Ltd.)

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

[S15-06] Is it feasible to derive high-frequency EGTDS? part (1)

Mitsuhiro Toya¹, Sayumi Yoshida², *Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹ (1. Hanshin Consultants Co., Ltd., 2. N/A)

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

[S15-07] Is it feasible to derive high-frequency EGTDS? part(2)

*Masanori HORIKE¹, Sayumi YOSHIDA², Mitsuhiro TOYA¹, Kotoyo TSUCHIDA¹ (1. Hanshin consultants., LTD., 2. N/A)

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

[S15-08] Updating proxy-based site amplification map in Osaka, Japan with soil borehole data: A Bayesian updating scheme based on Uncertainty Projected Mapping

*Anirban Chakraborty¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada² (1. Hosei University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S15-09] Variation of long-period strong ground motions at Hitachi-Naka port depending on the epicenter regions

*Tomiichi UETAKE¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

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

[S15-10] Study on prediction of long-period ground motion

*Toshihiro SHIMOYAMA¹ (1. MRI, JMA)

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

[S15-11] Real-time forecast of long-period ground motions using Green's function based on seismic interferometry

*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part (1)

*Mitsuhiro Toya¹, Sayumi Yoshida², Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹

1. Hanshin Consultants Co., Ltd., 2. N/A

1. 初めに

点震源とみなせる震源から放射された地震動はモーメントテンソルとグリーン関数の空間微分のコンボリューションにより得られる。この二項を分離することは、震源と伝播経路のどちらの研究においても重要である。分離には、どちらかの項が既知でなければならないが、従来はグリーン関数を数値的な方法や経験的な方法で求めてきた。しかし、これらの方法には欠点がある。

数値的な方法として、周波数一波数積分法、差分法、有限要素法が提案されている。これらの手法は固有の長所と短所を有しているが、高周波数地震動の計算には短波長の不均質地下構造が必要となるため実用的な意味で計算できないという共通の困難も抱えている。

もう一つの方法は、観測波形をグリーン関数とみなす経験的グリーン関数法である。この手法では、高周波数までの利用可能性はあるが、発震機構や震源時間関数が異なる場合それらの補正を正確に行うのは難しい。

Plicka & Zahradnik (1998)は、上述した数値計算法や経験的グリーン関数法の欠点を克服する方法を提案した。具体的には、点震源と仮定できる領域内の複数の余震から放射された地震動波形からグリーン関数の空間微分を抽出する方法である。この手法では地下構造は必要なく、またグリーン関数の空間微分値 (EGTD) は点震源の条件を満たす高周波数成分まで含むことができる。EGTDが得られると、任意の発震機構とモーメントレート関数を持つ地震の地震動計算が可能となる。これにより、減衰や散乱等の伝播経路の性質を正確に評価できる。また、震源の性質の解明にも利用できる。例えば、震源インバージョンに用いると、高周波数地震動の発震域を特定できる。さらに、このインバージョン結果を用いれば、断層の摩擦則のパラメータ、特に Dc (critical distance) を精度よく推定できる可能性もある。

このようにEGTDが推定できれば伝播経路や震源研究の有力なツールとなると期待できるが、実用化に向けた研究は不足している。実用化には、以下の3課題を解決する必要がある。(1) 震源位置、断層パラメータ、モーメントレート関数の正確な決定、(2) どの程度の範囲内にある余震群からどのくらいの高周波数までのEGTDが推定可能か、(3) 使用する震源時間関数の選択、である。ここでは課題(1)について述べ、課題(2)、(3)については、その(2)で述べる。

2. EGTD推定に必要な震源パラメータの決定

EGTDの推定には様々な震源に関するパラメータが必要となる。ここでは、これらの推定について述べる。まず、使用した波形データについて述べる。我々は熊本地震余震の臨時観測を2016年5月6日から6月27日まで行った。この臨時観測のデータと気象庁一元化カタログに掲載されているこの期間に発生した M_j 2程度以上の地震を対象として、Hi-netや気象庁などの定常観測点での波形データを統合したものをを用いて震源パラメータを決定した。密な観測点を用いるため高精度の震源位置と震源パラメータの決定が期待できる。

震源決定では、まずWIN システムを用いて得た波形データからP 波およびS波到達時刻、P 波の初動極性の読み取りを行った。次に読み取ったP 波・S 波走時から、WIN システムに含まれている震源決定プログラム hypomhを用いて震源決定を行い、最後にdouble-difference(DD)法を用いて震源再決定を行った。

震源決定で読み取った地震のうち、P 波の初動極性が10点以上ある地震を対象として断層パラメータ (走行、傾斜、滑り角) を推定した。断層パラメータの推定は、Hardbeck and Sheare (2002)によるプログラム HASH1.2 を用いている。最終的に解が収束し、ある程度精度の良い結果となった640個の余震の断層パラメータを得た。推定された断層パラメータのタイプ分けを行うと、正断層横ずれタイプが多いことが分かった。また、推定した断層パラメータの信頼度を3段階で表示した。

決定した震源位置を用いて、EGTD推定に使用する直径1kmと2kmの範囲内に6余震以上ある余震群を探した。その結果、直径1kmの範囲内では2グループあり、以後これらをA1グループ、A2グループと呼ぶ。直径2kmの範囲内でも3グループあり、それぞれB1グループ、B2グループ、B3グループと呼ぶ。モーメントレート

関数を決める。具体的には、関数そのものではなく地震モーメント M_0 とコーナー周波数 F_c である。5グループ39余震を対象として、観測記録のスペクトルのインバージョンを用いて、余震の放射震源スペクトルを求めた。この際、地表と岩盤の観測点のスペクトル比を付加条件とした。放射震源スペクトルが ω^{-2} 則に従うと仮定して、フィッティングにより M_0 と F_c を求めた。

3. 最適な震源パラメータ

前節で述べた震源に関するパラメータの推定法は様々な仮定に基づいており真の値ではない。そこで、この研究では遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて得られる震源パラメータの最適値によるEGTD推定を行う。具体的には、地震モーメント、震源時間関数の時間パラメータ、断層の走行、傾斜、滑り角の5パラメータの最適値を求めた。

Is it feasible to derive high-frequency EGTDs? part(2)

*Masanori HORIKE¹, Sayumi YOSHIDA², Mitsuhiro TOYA¹, Kotoyo TSUCHIDA¹

1. Hanshin consultants., LTD., 2. N/A

1. 初めに

その(1)で述べたように、高周波数EGTDの推定が可能となると、伝播経路の性質の推定研究や震高周波数震源インバージョンやその結果として動的モデルの研究にも大きく寄与する。したがって、地震動から安定的に高周波数EGTDを取り出す方法を確立することは重要である。このためには、以下の課題を解決する必要がある。(1)どの程度の範囲内にある余震群からどのくらいの高周波数までのEGTDが推定可能か、(2)使用する震源時間関数の関数形の選択、(3)震源位置、断層パラメータ、震源時間関数のパラメータの決定の3課題である。課題(3)についてはその(1)で述べたので、ここでは課題(1)、(2)について述べる。EGTD推定に使用するデータは、熊本地震のMj1.5~3.5の余震で、熊本県とその周辺に設置されたHi-net観測点(震源距離10km~50km)において5月6日から6月27日までに記録されたものである。

震源位置からEGTD推定のために5余震グループを作成した。2グループは直径1kmの範囲に余震が分布し、それぞれA1, A2グループと呼ぶ。残りの3グループは直径2kmの範囲に分布しB1, B2, B3とそれぞれ呼ぶ。異なる範囲の余震グループを作成した理由は、余震の分布範囲の影響を調べるためである。

2. 解析

課題(1)のために、各グループ内のすべての余震とすべての観測点の記録を用いて余震グループとすべての観測点間の3成分のEGTDを推定した。さらに、それらのEGTDを用いて観測記録の再現を試みた。高周波数限界を調べるために3つのローパスフィルタを準備した。具体的には高周波数限界として、4Hz, 8Hz, 16Hzとした。EGTDを用いた計算波形の観測記録の再現性の評価には両者の相互相関係数を用いた。この相関係数を用いて高周波数の限界と余震群の範囲について検討する。EGTDの推定では、GAを用いて最適な断層パラメータと震源時間関数に対するEGTDを求めた。世代数は1000、染色体数は500とした。検索範囲はその(1)での値を基準として適切な範囲に設定した。なお、この処理を再現解析と呼ぶ。

課題(2)のために二つのステップからなる解析を行った。まずグループ内の1余震を除いた残りの余震からEGTDを推定した。次に、仮定した震源時間関数と推定したEGTDを用いて除外した余震の予測波形を計算し、観測波形の再現の程度を相互相関係数で評価した。なお、両ステップでGAを用いている。この解析を予測解析と呼ぶ。

予測解析を震源時間関数としてステップ関数と双曲線正接関数(tanh)の和である時間関数(SSF関数)と二等辺三角形の時間関数(TAF関数)を用いて行った。どちらがよりよく観測記録を予測できるかを比較し、この手法により適切な震源時間関数の選択が可能かどうかを調べた。

3. 結果

まず、A1グループのSSF関数を仮定した再現解析の結果について述べる。このグループでは、きわめて高い類似度を示した。全余震の全観測点で3成分波形の相関係数は16Hzでほぼ0.8以上、8Hzで0.9以上、4Hzで0.95以上となった。A2グループでは、7余震のうち1余震の相関係数がどの観測点でも低いためA1グループほどの再現性はないが、それでも4Hzでは相関係数は0.8以上となった。なお、相関係数の低い1余震を除くとA1グループと同程度の再現性を示した。

余震の分布範囲が2kmのB1, B2, B3グループでは、相関係数は低く4Hzでも0.8以下となる場合がかなりあった。この結果は余震分布範囲が大きいほど、点震源の仮定が成り立たないためEGTDの精度が悪くなることと対応している。

震源時間関数の影響を調べるためTAF関数を用いて再現解析を行った。結果は、SSF関数とほぼ同じ程度の観測記録の再現性を示した。これは、異なる震源時間関数を用いても観測記録をかなりよく再現できる高周波数EGTDが推定できることを意味すると同時に、真の高周波数EGTDを得るためには真の震源時間関数を用いる必要があることも意味する。実際二つの震源時間関数から得たEGTD波形を比較すると明らかに異なっていた。以上の再現に関する検討は、真の震源時間関数を用いれば高周波数EGTDが推定できることも示唆してい

る。したがって、次の課題は真の震源時間関数を見つける手法はあるのか、さらにその方法はどのようなものかである。異なる震源時間関数でも同程度の再現性が得られる理由は、震源時間関数とEGTDの合積（あるいは、周波数領域の掛け算）が同じものとなっているためと考えられる。

先述した予測解析により震源時間関数の優劣を決められるかを検討する。二つの震源時間関数（SSF&TAF）を仮定して、予測解析を行った。予測精度は相互相関関数で評価した。どちらの震源時間関数を用いてもほぼ同程度の予測となった。この結果は、提案した予測解析で震源時間関数の優劣を決定することは難しいことを意味する。

この研究では、震源時間関数が求めれば半径1km程度の範囲内にある余震を用いて高周波数（10Hz程度）の高精度EGTDが求まる可能性を示した。また、真のあるいはそれに近い震源時間関数を用いなければ、正確なEGTDは求まらないことも示した。さらに、予測解析による既存の震源時間関数の優劣の決定の可能性を調べたが、難しいことが分かった。

Updating proxy-based site amplification map in Osaka, Japan with soil borehole data: A Bayesian updating scheme based on Uncertainty Projected Mapping

*Anirban Chakraborty¹, Hiroyuki Goto², Sumio Sawada²

1. Hosei University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Proxy-parameters like engineering geology, Vs30 (the time-averaged shear wave velocity (Vs) to a depth of 30 m), etc. are frequently used for preparing site amplification maps. However, these proxy-based maps do not always reflect the in-situ conditions. During the 2018 Mw 5.6 Northern Osaka earthquake in Japan, damage distribution in Ibaraki and Takatsuki cities of Osaka significantly deviated from the site amplification estimations of proxy-based Japan seismic hazard information system (J-SHIS) map. One possible explanation for the deviation is the difference between proxy-based and in-situ site amplification values. The other reasons could be strong ground motion, source effect, age of buildings, etc. In this study the role of site amplification in the damage distribution is investigated with the evaluations from available in-situ data. A Bayesian updating scheme is proposed for updating the proxy-based J-SHIS map with soil borehole data. The proposed scheme is based on uncertainty projected mapping (UPM), where spatial resolution corresponds to the denseness or sparseness of the available data. The study area is in Ibaraki and Takatsuki cities of Osaka, located close to the epicentre of the earthquake, where dense borehole data from Kansai Geo-informatics Network are available. In-situ site amplification at the borehole locations is evaluated using equivalent linear ground response analysis with non-linear soil modelling. The updated map or the posterior in Bayesian inference is generated with proxy-based J-SHIS values as priors, and evaluated in-situ site amplifications as likelihoods. The updated map with borehole data shows increased spatial granularity of low and high amplification regions. Several regions with relatively low amplification appeared in the previously high-amplification zone of proxy-based J-SHIS map. The appearance of relatively high amplification regions in previously low-amplification zones of proxy-based J-SHIS map might explain a couple of earthquake damage locations. However, the majority of damage locations cannot be explained by the updated map. It may be concluded that site factor alone is not sufficient, and factors like the source effect, age of buildings etc. should be considered for understanding the near-source damage distribution.

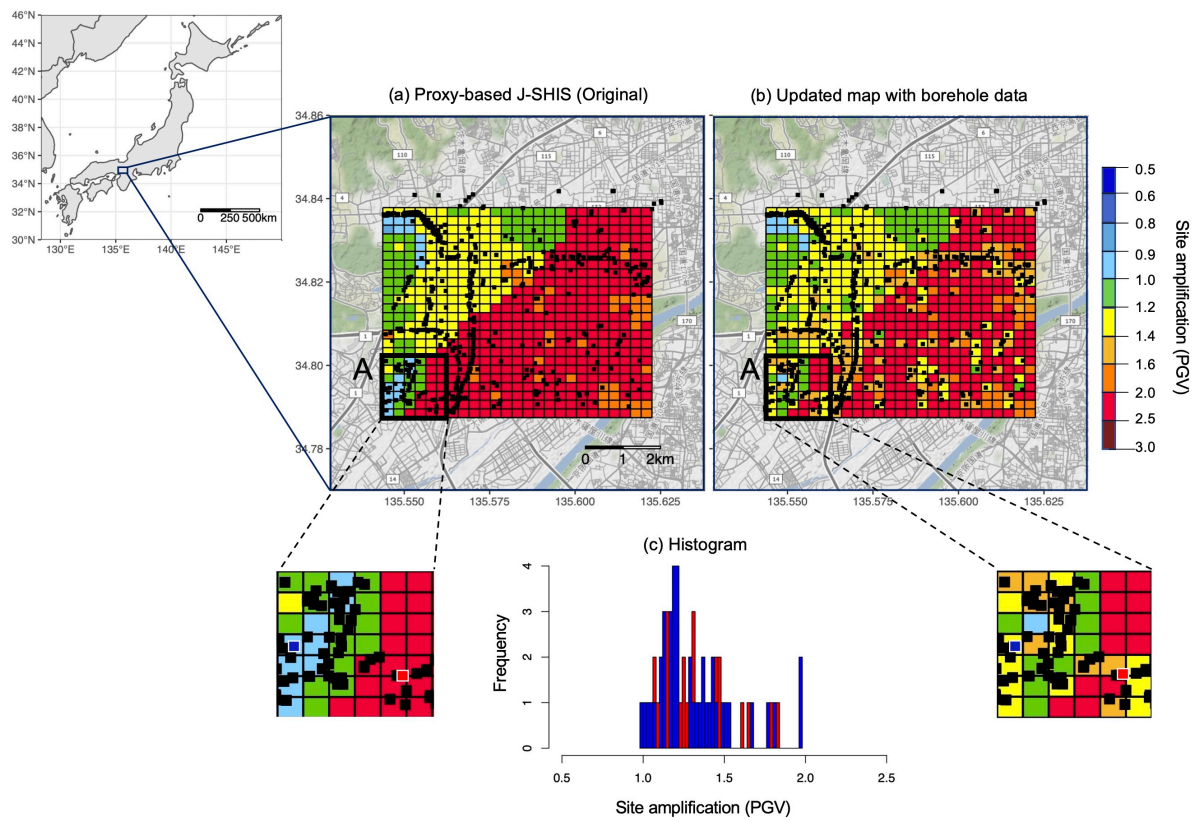


Figure 1. Comparison of site amplification in Osaka, Japan shown by (a) Proxy-based J-SHIS map and (b) Updated map with soil borehole data. (c) Histogram plot confirms the statistical significance of updated (higher spatial granularity) map resolutions in zone A

Variation of long-period strong ground motions at Hitachi-Naka port depending on the epicenter regions

*Tomiichi UETAKE¹

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

やや長周期帯域（周期数秒から十数秒）の地震動は、観測点直下の地下構造に加え周辺地域の地下構造の影響を受けるため、観測点から見て特定の方角の地震により特徴的な波群が確認されることがある。植竹(2017)は、2016年12月28日茨城県北部の地震(M6.3)により常陸那珂火力地点（HTN）で観測された周期2秒の後続波群について、周辺地域の観測記録を分析し、この波群が地下構造モデル〔例えば、地震調査研究推進本部（2021）〕が茨城県北部（HTNの西側）に示唆する地震基盤の窪地で発生した可能性を示した。また、植竹(2018)は、HTNから100 km圏で発生したM6～7クラスの地震に対し速度応答スペクトルの分析を行い、茨城県北部・福島県東部・栃木県北部で発生した地震では、上下動に周期2秒の後続波が認められるが、千葉県東方沖から福島県沖の海域で発生した地震ではそれが認められないことを報告した。今回は、より広域で発生したM6～8クラスの地震について、水平動を含めてスペクトル特性の変化を調べ、地震基盤の浅いKiK-net〔NIED(2019)〕のひたちなか観測点（IBRH18）に対する相対的な増幅特性を調べた。なお、HTNとIBRH18は約8 km離れているが、今回検討対象とした地震では、両地点の入射波は同等と見なした。

今回の検討のきっかけは、2022年1月22日の日向灘の地震（M6.6）である。この地震によるHTNの記録は、震央距離が短い東京湾岸の観測点より大きな速度振幅を示し、周期3～4秒の震動が卓越していた。あらためて過去の記録を検討すると、西日本で発生した2016年熊本地震（M7.3）、2016年鳥取県中部（M6.6）の記録でも周期3～4秒の卓越が確認された。2013年栃木県北部の地震（M6.3）では、水平動の周期3～4秒のピークとともに上下動に周期2秒のピークが確認できる。茨城県北部・福島県東部の浅い地震では、上下動の周期2秒に顕著なピークが認められる。一方、千葉県東方沖から宮城県沖で発生した地震では顕著なピークは認められなかった。さらに、2015年5月30日の小笠原諸島西方沖の深発地震(M8.1、深さ682km)の応答スペクトルでも顕著なピークは認められなかった。このように応答スペクトルの特徴には震源地域の依存性が認められる。

HTNにおいて水平動の3～4秒にピークの見られた2013年栃木県北部の地震（M6.3）、上下動の2秒にピークの見られた2016年茨城県北部の地震（M6.3）、顕著なピークの見られなかった2011年7月31日福島県沖の地震（M6.5）、2015年小笠原諸島西方沖の地震(M8.1)について、HTNとIBRH18の速度波形、スペクトル特性の比較を行った。両地点の速度波形を比較すると、いずれの地震でも両地点での主要動は類似しているが、HTNのやや長周期帯域に顕著なピークが見られる栃木県北部や茨城県北部の地震では、HTNの記録には遅れて出現するやや長周期の後続波群が認められる。また、いずれの地震でもIBRH18のスペクトル特性には、やや長周期帯域に顕著なピークは認められないことから、HTNにおけるピークの生成は震源に起因するものではないと考えられる。HTNとIBRH18のフーリエスペクトル比を図に示す。解析区間は、主要動を含む160秒間で後続波群も含んでいる。スペクトル比には、それぞれの観測点直下の構造の違いの影響も含まれているが、栃木県北部と茨城県北部の地震で振幅の大きな周期帯には、表面波と推定される後続波群が重要な役割を果たしていると考えられる。HTNの西側で発生した地震に対し、HTNとIBRH18の後続波の違いが顕著になる。

HTNは茨城県北部域の地震基盤の窪みと海側の地震基盤の深まりがつながるチャンネル上に位置しており、西側の窪みで成長した表面波はHTN付近を通過して東に向かう。こういった構造の影響が、HTNにおけるやや長周期帯域での地震動特性の震源地域依存性に影響していると考えられる。

文献：

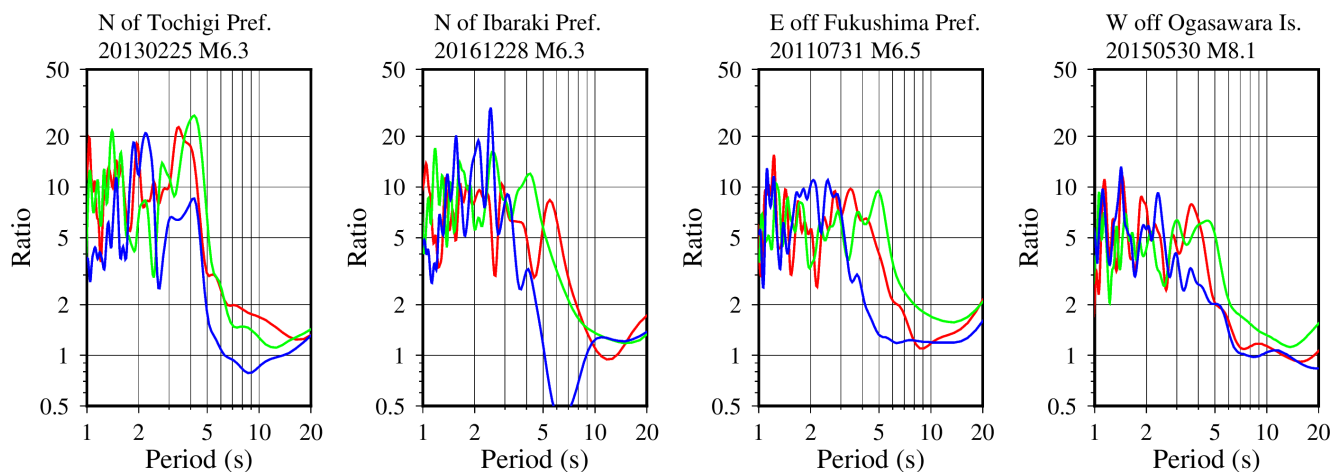
地震調査研究推進本部（2021）、関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル（2021年版）。

NIED (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004.

植竹(2017), 2016年12月28日茨城県北部の地震により常陸那珂港で観測された顕著な後続波群, 日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集, 165-166.

植竹(2018), 常陸那珂港で観測される周期2秒の顕著な後続波群, 日本地震学会2018年秋季大会講演予稿集, S15-06.

Fourier Spectral Ratio of HTN to IBRH18 (Red:NS, Green:EW, Blue:UD)



Study on prediction of long-period ground motion

*Toshihiro SHIMOYAMA¹

1. MRI,JMA

気象庁の緊急地震速報は、地震による揺れの広がり（地震動）が続いている途中で、その後の揺れ（地震動）を予測して発表する。揺れの予測は、その時点で得られている地震動のデータから、１．震源の位置・発震時刻・マグニチュードを即時に推定し、それら推定情報を元に予測する手法と、２．震源の位置などは求めずに揺れ（地震動）を波動伝播としてとらえ波動伝播理論に基づき予測する手法、これら二つの手法を組み合わせで行っている。波動伝播理論に基づき予測する手法は、計算機資源をあまりかけずシステムに組み込みやすくした手法であるPLUM法を導入している（PLUM法は2018年3月から導入）。

2022年度後半には、緊急地震速報に、長周期地震動の予測に基づいた基準が追加される。これまでの震度を対象とした予測（短周期地震動の予測）に加え、長周期地震動階級の予測によっても発表するものである。この予測に用いている手法は、１．震源の位置・発震時刻・マグニチュードから、長周期地震動を予測する手法であり、２．波動伝播理論による長周期地震動の予測手法は導入されていない。

そのため、本発表では、長周期地震動の予測についても「２．波動伝播理論による予測」を行うための一つの方法として、短周期の地震動予測に用いているPLUM法のような手法を適用できるかを検討する。検討は、過去に長周期地震動階級４を観測した地震（例：2022年3月16日23時36分の福島県沖の地震（M7.4、最大の長周期地震動階級４、最大震度６強）など）を対象として、

- １．長周期地震動の観測状況の整理、分析
 - ２．絶対速度応答時刻歴の分析
 - ３．適用範囲の検討（近傍観測点の比較）
- により行う。

Real-time forecast of long-period ground motions using Green's function based on seismic interferometry

*Teppei Enari¹, Takashi Furumura¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

地震波干渉法から求めたグリーン関数を用いて、震源域近傍の強震観測データを入力値として遠地の平野で生成する長周期地震動を即時に予測する手法を検討した。

既往研究では、震源域近傍の基準観測点と予測地点の間のグリーン関数（伝達関数、応答関数）は、自然地震の波形データ（Nagashima et al., 2008; 倉橋ほか, 2014）あるいは地震波伝播シミュレーション（吉本・武村, 2018）から求められてきた。これに対し本研究では、基準観測点と予測地点の微動の相互相関を求める地震波干渉法により、2地点間のグリーン関数を作成した。地震波干渉法によるグリーン関数の導出は、近年Viens et al. (2017) やDenolle et al. (2018) らにより有効性が示されており、解析データを長期間スタックすることで自然地震を用いた場合よりも長周期側のS/N比の向上が期待される。さらに、自然地震の観測記録がない場所でもグリーン関数を算出できる点や、シミュレーションで見られる速度構造モデルの不正確性の影響を受けない点もメリットである。なお、地震波干渉法によるグリーン関数の絶対振幅は震源一観測点間の地下構造と非弾性減衰（Q）により規定されることが知られており（地元・山中, 2012）、本研究ではDenolle et al. (2018) に倣い、微動のグリーン関数と自然地震のグリーン関数の振幅を比較することで、振幅補正係数を得た。

2. データと手法

解析には防災科学技術研究所のHi-netのデータを用いた。基準観測点はN.AKWH（愛川）観測点とし、観測点間距離400 km以内、方位角210度から260度（南海トラフ地震の想定震源域の方向）に位置する88点のHi-net観測点（Fig. 1a）を予測対象地点として相互相関を計算した。Viens et al. (2017) の手順を参考とし、50 %のオーバーラップの下で長さ60分に分割した微動データに対して、4 Hzのダウンサンプリング、トレンド除去、コサインテーパ適用を行った上で、FFTを用いて各予測地点の波形記録から基準観測点の波形記録をdeconvolutionした。これを2022年5月1日～30日までスタックして、基準観測点一各予測地点間のグリーン関数を求めた。

次に、得られたグリーン関数の振幅補正係数を求めるため、茨城県南部を震源とするM 5.6の地震についてdeconvolutionにより基準観測点一各予測地点間のグリーン関数を計算し、最大振幅を調べた。地震波干渉法による微動のグリーン関数との振幅比は、基準観測点と各観測点の平均的な速度構造や減衰構造を反映するものであり、距離依存性があると考えられる。しかし、本研究で対象とする長周期地震動ではQの影響は小さいと考え、全予測地点における最大振幅比の平均値（64.9）を振幅補正係数として用いた。

3. 結果

地震波干渉法により得られた基準観測点（N.AKWH）から各予測地点への地震波伝播のグリーン関数（EW成分）をFig. 1bに示す。図では、得られたグリーン関数に周期2-10 sのバンドパスフィルターをかけ最大値で規格化したものを、N.AKWHからの距離順に200 kmまで並べている。縦軸はN.AKWHから各観測点の距離、横軸はLag timeである。グリーン関数のシグナルは、 $t > 0$ のcausal partにおいて明瞭に表れており、微動が主に基準観測点の東側から到来したことを意味している。

得られた微動のグリーン関数を、各予測地点と基準観測点の並びの延長線上近傍で起きた茨城県南部の地震（M 5.6、深さ47 km）の基準観測点での観測波形に対してconvolutionし、振幅補正係数をかけることで、各地点における長周期地震動波形を予測した。Fig. 2に結果の例として、基準観測点N.AKWHでの入力波形、11 km及び138 km離れた予測地点N.KIYH（清川）とN.KG3H（掛川3）とのグリーン関数、及び2つの予測地点における予測波形・速度応答スペクトル（ $h=5\%$ ）を示す。また、比較のために実際の観測波形と速度応答ス

ペクトルを赤線で重ねて示す。

予測波形と観測波形は良い一致を示し、波形の最大振幅比はN.KIYHで1.0、N.KG3Hで0.9となり、振幅補正係数を含めて適切に予測できていることが確認できた。周期2-10 sにおける速度応答スペクトルの計算／観測比は、N.KIYHで1.26、N.KG3Hで0.85となり、この他の地点においても6割で0.4～2.5の範囲であった。一方、波形の山谷を含めた一致は難しく、N.KG3Hの予測波形はP波の立ち上がり時刻が観測波形よりも早くなったほか、2地点とも予測波形のSコーダ波の振幅は観測波形よりも大きくなり、観測波形と予測波形の相関係数は、N.KIYHで0.36、N.KG3Hで0.18のやや小さい値となった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、長周期地震動の即時予測に向けて、地震波干渉法により得られたグリーン関数を用いた地震動予測の実現性を確認した。グリーン関数の高精度化に向けて、微動データのスタック期間の影響や、振幅補正係数の震源や伝播経路の依存性など、より詳細な検討が必要である。また、今回は関東地方の地震を対象に西南日本の地点の地震動の予測を行ったが、大きな被害が予想される南海トラフや日本海溝沿いの巨大地震への応用に向け、これらの想定震源域で発生した地震を用いた予測手法の検証が必要である。

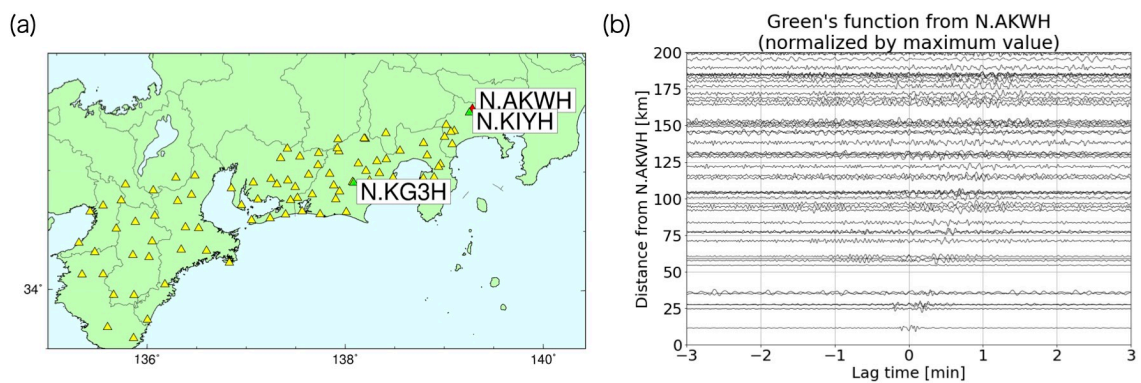


Figure 1. (a) Distribution of Hi-net stations used in this study. (b) Record section of Green's functions based on seismic interferometry.

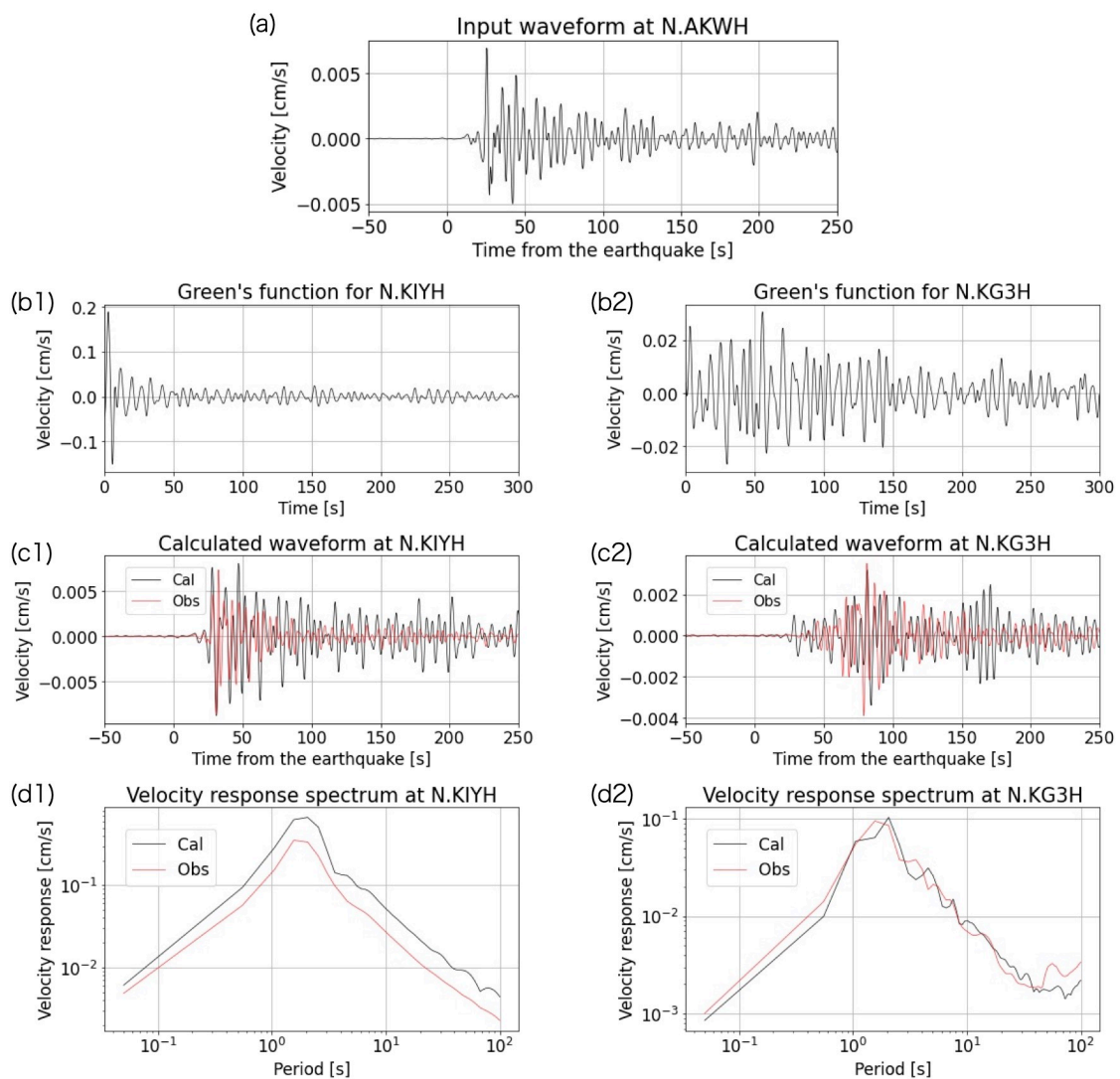


Figure 2. (1) Input waveform at N.AKWH. (b1) Green's function, (c1) calculated waveform and (d1) velocity response spectrum at N.KIYH. Red lines in (c1), (d1) are observed data. (b2-d2) Same figures for N.KG3H.

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:15 AM - 12:30 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:15 AM - 3:30 AM UTC | 🏢 ROOM B
4th floor (Large Conference Room)

[S15] AM-2

chairperson: Asako Iwaki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), Yusuke Tomozawa (Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

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

[S15-12] Evaluation of scaling relations for subduction earthquake using source inversion models

*Fumiaki Nagashima¹, Hiroshi Kawase¹, Eri Ito¹, Jikai Sun¹ (1. Disaster Prevention Research Institute)

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

[S15-13] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of Earthquakes Occurring off the Pacific Coast of Tohoku

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

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

[S15-14] An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of direct S-waves in the layered structure : Application to inland earthquakes in Chugoku region

*Tomonori IKEURA¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

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

[S15-15] Correlation between strong motion intensities based on the unified strong motion database by NIED

*Hongjun Si^{1,2}, Asako Iwaki³, Nobuyuki Morikawa³, Hiroyuki Fujiwara³ (1. Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, 2. Seismological Research Institute Inc., 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-16] Comparison of Ground-Motion Models based on the Strong Motion Database

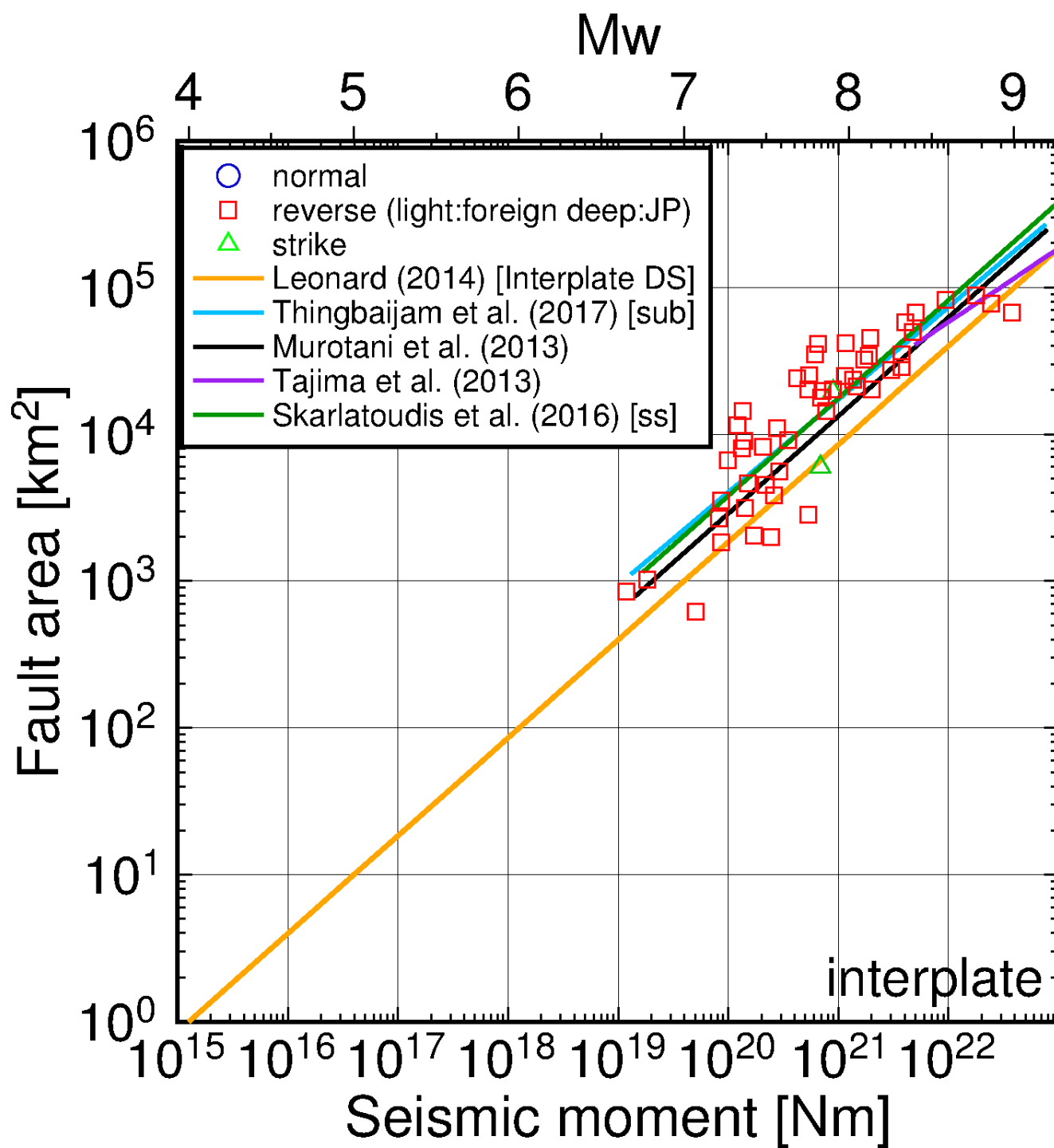
*Asako IWAKI¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Tomohisa Okazaki², Hisahiko Kubo¹, Hongjun Si³, Atsuko Oana⁴, Toru Ishii⁴, Yusuke Tomozawa⁵, Tomoki Hikita⁵ (1. National Research Institute for Disaster Resilience, 2. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 3. Seismo Research, 4. Osaka Research Institute, 5. Kajima Technical Research Institute)

Evaluation of scaling relations for subduction earthquake using source inversion models

*Fumiaki Nagashima¹, Hiroshi Kawase¹, Eri Ito¹, Jikai Sun¹

1. Disaster Prevention Research Institute

地震モーメントと震源断層のサイズおよび滑り量の関係、いわゆるスケーリング則は、将来の地震発生とそれによる強震動を予測する上で極めて重要な関係式であり、物理的考察を背景にして、そのできるだけ正確な相互関係を把握することは定量的強震動予測のための重要な第一歩である。我々は震源インバージョン結果を用いて海溝型地震のスケーリングを評価し、既往のスケーリング則の妥当性を検討した。Martin Mai博士らによる震源断層モデルデータベースSRCMOD(Mai and Thingbaijam, 2014)で公開されている震源インバージョン結果の中から、各インバージョン結果の参考文献やUSGSのWebサイト上の情報を参考に地図上での位置も確認しつつ海溝型地震を選択した。地震タイプ(Interplate・Intraplate)についても同様に参考文献等から判別して本研究のデータセットを構築した。収集した震源インバージョン結果にSomerville et al. (1999)のクライテリアでトリミングを施し、地震モーメント M_0 についてはトリミング前後で平均剛性率を保存してトリミング後に再計算した。トリミングしたモデルからSomerville et al. (1999)のクライテリアでアスペリティを抽出し、アスペリティ面積とアスペリティ内の平均すべり量を求めた。メカニズムについては一般的な平均すべり角を用いて分類し、同一地震に複数モデルがある場合には各パラメータの幾何平均を求めた。データセットは海外49地震94モデル、国内15地震50モデルを含み、多くの地震がInterplateの逆断層型地震であった。各地震の震源深さについてはIntraplate地震のいくつかで深さ100kmを超えているが、多くの地震が深さ50kmより浅い場所に分布した。 M_0 に対する断層長さ L ・断層幅 W ・断層面積 S ・平均すべり量 D ・アスペリティ面積 S_a ・アスペリティ平均すべり量 D_a について既往のスケーリング則と比較した。 M_0 - L では、Interplate地震ではLeonard (2014)やThingbaijam et al. (2017)のスケーリング則と本研究のデータセットの対応は良い。Intraplate地震やOuter rise地震の地震数は少ないが、Interplate地震よりIntraplate地震の断層長さは小さめとなった。 M_0 - W では、Interplate地震では $10^{20} < M_0 < 10^{21}$ Nmでデータのばらつきが大きく、その区間の中で大きい値に対してはSkarlatoudis et al. (2016)やThingbaijam et al.が整合的であった。Interplate地震よりIntraplate地震の断層幅は小さかった。 $W=200$ kmでの頭打ちについては、該当する地震規模の地震数は少ないながらも確認された。 M_0 - S では、図に示すようにInterplate地震では $10^{20} < M_0 < 10^{21}$ Nmで M_0 - W と同様にばらつきが大きく、 10^{21} Nm周りでデータセットよりスケーリング則の方が小さい。 $M_w > 8.4$ では、地震数が少なく評価が難しいものの、データセットの分布の傾きが $M_w < 8.4$ よりも小さくなっているように見える。断層面積についてもIntraplate地震はInterplate地震より小さい。Intraplate地震ではIwata and Asano (2011)と整合的であった。 M_0 - D では、既往のスケーリング則はデータセットと比べてやや過大評価となった。Intraplate地震の平均すべり量はInterplate地震よりも大きく、Intraplate地震では既往のスケーリング則はデータセットより小さめとなった。抽出したアスペリティの S_a/S や D_a/D は0.24倍から0.28倍、1.95倍から2.3倍となり、Murotani et al. (2013)のPlate-boundaryの $S_a/S=0.2$ や $D_a/D=2.2$ と対応した値となった。 M_0 - S_a や M_0 - D_a ではIwata and Asanoの M_0 - S_a や M_0 - D_a 、既往の M_0 - S スケーリング則の0.22倍や M_0 - D スケーリング則の2.2倍と比較を行った。 M_0 - S や M_0 - D の場合の分布傾向と同様に、 M_0 - S_a のInterplate地震の $10^{20} < M_0 < 10^{21}$ Nmでばらつきが大きく、 $M_w > 8.4$ での傾きが小さくなり、Intraplate地震の S_a はInterplate地震よりも小さく、Iwata and Asanoと整合的である。 M_0 - D_a はInterplate地震ではスケーリング則の方が大きめであり、Intraplate地震のデータはInterplate地震よりも大きく、データセットと比べIwata and Asanoは小さめとなった。



Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of Earthquakes Occurring off the Pacific Coast of Tohoku

*Yusuke Tomozawa¹, Tomoki Hikita¹

1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

1. はじめに

近年の強震観測記録の増加に伴い、地震動予測式の回帰係数に空間変動を考慮した研究が行われている (例えば, Landwehr et al., 2016; 引田・他, 2020)。高精度な地震動予測モデルを構築するためには、空間変動の要因となる震源励起特性の地域性や伝播経路特性の不均質性を詳細に評価することが重要となる。本検討では、これらのうち伝播経路特性に着目し、東北地方太平洋沖で発生する地震の空間変動の基礎的情報となる海洋プレートを含む三次元不均質減衰構造 (不均質Q値構造) をブロックインバージョン解析により推定した。

2. データセット

東北地方太平洋沖で発生した地震のうちK-NET, KiK-net, S-netで観測された以下の条件に適合する記録を収集した。対象期間は、観測開始から2022年3月31日まで、 M_w 4.5以上7.0未満。震源距離範囲は、内陸地殻内地震では100 km以下、プレート間地震とプレート内地震では、200 km以下。地盤の非線形化の影響を避けるため、K-NETとS-netは100 cm/s^2 以下の記録を用い、KiK-netは地中記録を用いた。S-netの観測記録は、Takagi et al. (2019) の姿勢角情報を基に回転補正を行った。地震による揺れの途中で加速度波形にオフセット変化を生じさせるような強震動を受けた観測点では、姿勢角に変化が生じたと判断して、それ以後に発生した地震の記録は用いないこととした。対象地震と観測点の分布を図1に示す。

3. 解析結果

解析手法は、友澤ほか (2021) と同様である。伝播経路特性は、深さ方向を大陸地殻、マントル、太平洋プレートの3層でモデル化し、各層の水平方向の不均質性を考慮してモデル化した。震源と観測点を結ぶ断面で2次元レイトレースを行って、各層の伝播距離を評価した。地震本部 (2012) を参照して各層の境界は第17層のマントル、第21層の海洋性地殻第2層 (太平洋プレート) の上面深度を用いた。S波速度はそれぞれ3.4 km/s, 4.5 km/s, 4.6 km/sとした。推定した不均質減衰構造を図2に示す。大陸地殻の不均質減衰構造は、東北地方北部の火山帯周辺でlow-Qの領域が推定された。本検討のデータセットには、東北地方で発生した内陸地殻内地震を多く含んでいないため、宮城県以南の活火山周辺の減衰構造の不均質性の推定はできていないと考えられる。マントルの不均質減衰構造は、主に活火山直下で相対的にlow-Qの領域が広がっている。太平洋プレートでは、深さが深い領域ほど相対的にhigh-Qとなる傾向が得られた。推定した不均質減衰構造を用いて、宮城県沖で発生する深さ40 kmのプレート間地震を想定し、地震基盤面上での地震動振幅の面的評価を行った結果を図4に示す。火山フロントを通過すると地震動が減衰し、振幅が同心円所に広がらない異常震域が再現されている。今後は、推定した不均質減衰構造を考慮に入れた地震動予測モデルの構築を検討する。

謝辞

防災科学技術研究所K-NET, KiK-net, S-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

Landwehr et al. (2016), BSSA, Vol. 106, No. 6. Takagi et al. (2019), SRL, Vol. 90, No. 6. 地震調査研究推進本部 (2012), 長周期地震動予測地図2012年試作版. 友澤・他 (2021), SSJ秋季大会, S15P-01. 引田・他 (2020), 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第2号.

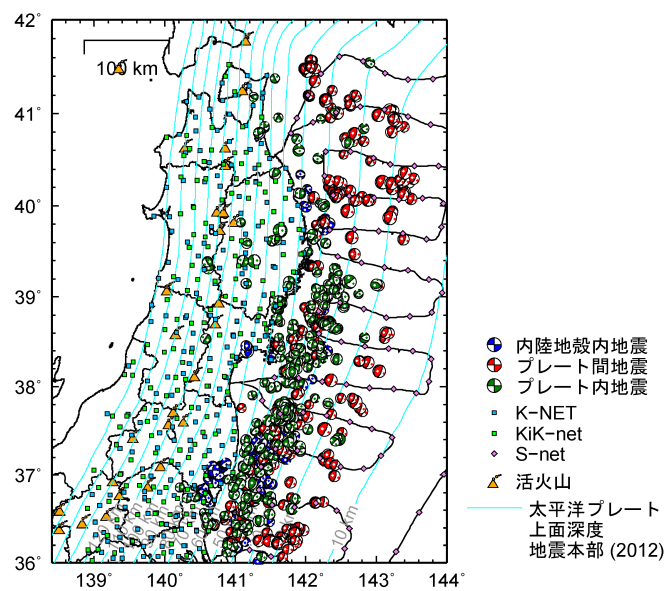


図 1 解析に用いたデータセット

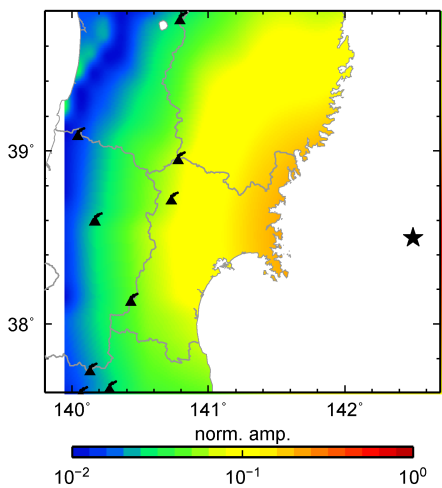


図 3 基盤面上の 10 Hz の距離減衰特性の面的分布（プレート間地震）

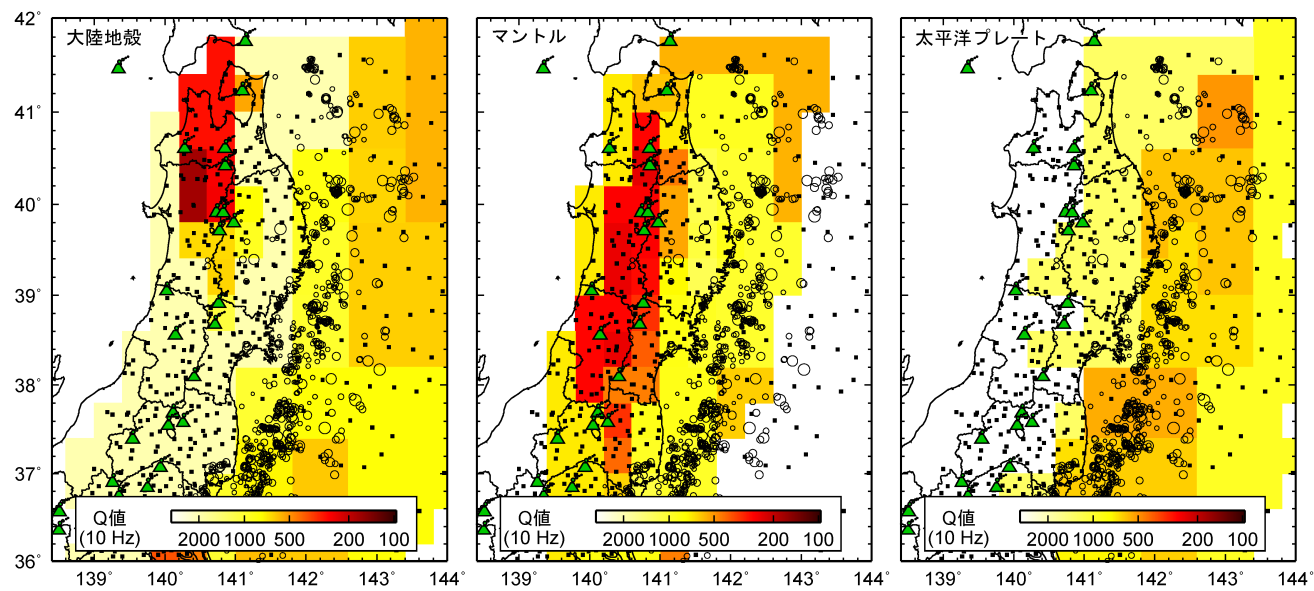


図 2 推定した不均質減衰構造（カラーは 10 Hz の Q 値）

An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of direct S-waves in the layered structure : Application to inland earthquakes in Chugoku region

*Tomonori IKEURA¹

1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

■はじめに

内陸地震の震源近傍地震動の予測は工学的に重要な課題の一つである。震源近傍では震源からの直達S波(DS)が最大の入射成分であるが、DSは成層構造内の透過率(CTR)の影響で震央距離(Δ)とともに急減するため、遠方では地殻内部で反射・屈折を経た間接的なS波群(IS)が支配的となる¹⁾。そこで本研究では、DSとISの距離減衰モデルをそれぞれ設定し、両者の和によって地震動全体の距離減衰特性を表すモデル化を試みている。既往研究^{1), 2)}では近畿地方、福島県浜通・茨城県北部において適用性を検討し、震源近傍地震動の再現性の観点で有効性を確認した。今回は中国地方に適用した結果を報告する。

■距離減衰特性のモデルと解析法

本研究ではS波部分の観測地震動(OBS)を観測地点の相対サイトファクター(RSF)で除して得られる基盤地震動(BRM)を扱う³⁾。震源距離 r における周波数 f のBRMの振幅を $A_{\text{BRM}}(f)$ とし、これをDSの振幅 $A_{\text{DS}}(f)$ とISの振幅 $A_{\text{IS}}(f)$ を用いて次式で表す。

$$A_{\text{BRM}}^2(f) = A_{\text{DS}}^2(f) + A_{\text{IS}}^2(f) \cdots (1).$$

また、 $A_{\text{DS}}(f)$ と $A_{\text{IS}}(f)$ はそれぞれ次のように表す。

$$A_{\text{DS}}(f) = S_{\text{DS}}(f) \times r^{-1} \text{CTR}(h, \Delta) \exp[-b_{\text{DS}}(f)r] \cdots (2), \quad A_{\text{IS}}(f) = S_{\text{IS}}(f) \times r^{-0.5} \exp[-b_{\text{IS}}(f)r] \cdots (3).$$

ただし、 $S_{\text{DS}}(f)$ と $S_{\text{IS}}(f)$ はDS、ISの地震項であり、両者の間に一定の倍率： $C_{\text{IS}}(f) = S_{\text{DS}}(f) / S_{\text{IS}}(f)$ を仮定する。また、 $\text{CTR}(h, \Delta)$ はJMA2001⁴⁾を仮定した場合のDSの透過率、 $b_{\text{DS}}(f)$ と $b_{\text{IS}}(f)$ はそれぞれDSとISのQ値効果による距離減衰係数である。

このモデルを観測データに当てはめる場合、未知数は地震毎の $S_{\text{DS}}(f)$ と全地震共通の $C_{\text{IS}}(f)$ 、 $b_{\text{DS}}(f)$ 、 $b_{\text{IS}}(f)$ であり、対数振幅のrms誤差を評価関数として非線形最適化手法を適用して求める。

なお、BRMの算出(OBS/RSF)は線形地盤応答が前提であるが、震源近傍の大振幅記録では地盤応答が非線形化する問題がある。今回は $\text{PGA} \geq 200 \text{ Gal}$ の地表記録を対象に、KiK-net地点では地表/地中(GL/DH)、K-NET地点では水平/上下(H/V)について、小振幅時の平均値に対する強震時の比 $R_{\text{NL}}(f)$ を求め、 $\text{OBS}(f)/R_{\text{NL}}(f)$ によって線形化補正を試みた。

■データ

今回は表1に示す $M \geq 5.0$ の10地震を対象とし、既検討²⁾と同様に $r \leq 90 \text{ km}$ の記録を扱った。震央と観測地点の分布を図1に示す。また、解析データの例として、7Hz帯域における線形化補正前後のBRM振幅の距離減衰分布を図2に示す。

■結果

2000/10/06鳥取県西部地震の7Hz帯域を例にして得られた距離減衰曲線とBRMとの対応関係を図3に示す。DSは震源近傍で卓越するが $r = 40 \text{ km}$ 付近で消失し、遠方ではISが主要な成分となる。

最適化による $C_{\text{IS}}(f)$ を他の地域の結果^{1), 2)}と合わせて図4に示す。 $C_{\text{IS}}(f)$ はいずれの地域でも概ね0.1前後の値である。また、各地震の $S_{\text{DS}}(f)$ を図5に示す。 $S_{\text{DS}}(f)$ の大小関係は概ね M_w に従っている。図6では2016/10/21鳥取県中部の地震($M6.6$)の $S_{\text{DS}}(f)$ 、 $S_{\text{IS}}(f)$ を波形インバージョン⁵⁾による震源スペクトル $S(f)$ と比較した。 $S_{\text{DS}}(f) > S(f) > S_{\text{IS}}(f)$ の傾向は他地域^{1), 2)}と同様である。

図7はDSとISのQ値と従来の線形回帰($\ln A = c - \ln r - br$)によるQ値であり、それぞれ大振幅データに線形化補正をした場合(Corrected Data)、しなかった場合(Observed Data)の結果を示している。DSのQ値だけが線形化補正で大きく変わっている。

■誤差

全距離範囲ではモデルや線形化補正による誤差の違いは小さい(図8)。しかし、震源近傍($r \leq 20\text{km}$)では、従来法(LSQ)が高周波数側で過小評価になること(図9)、線形化補正が高周波領域のばらつき低減に効果があること(図10)が分かる。

■まとめ

本研究の距離減衰モデルの震源近傍における適用性を確認し、大振幅記録に対する線形化補正が高周波数領域の精度向上に関して有効であることを確認した。

■謝辞

防災科学技術研究所K-NET, KiK-net, F-netのデータを使用させていただきました。記して感謝します。

■参考文献

1)池浦(2021)地震学会年大会, 2)池浦(2022)JpGU, 3)池浦(2020)日本地震工学会論文集, 4)上野他(2002)験震時報, 5)気象庁(2017)国内の地震の解析結果

表1 解析地震の諸元

No.	Date Time	North Lat. (degN)	East Long. (degE)	Depth (km)	M_J
#01	1997/06/25_18:50	34.4415	131.6662	8.3	6.6
#02	1997/09/04_05:15	35.2620	133.3767	8.9	5.5
#03	2000/10/06_13:30	35.2742	133.3490	9.0	7.3
#04	2000/10/08_13:17	35.1393	133.1502	6.8	5.6
#05	2000/10/08_20:51	35.3688	133.3107	8.3	5.2
#06	2002/09/16_10:10	35.3700	133.7393	9.6	5.5
#07	2016/10/21_14:07	35.3805	133.8562	10.6	6.6
#08	2016/10/21_14:53	35.3613	133.8678	8.9	5.0
#09	2018/04/09_01:32	35.1847	132.5867	12.1	6.1
#10	2018/06/26_17:00	34.9315	132.8718	11.6	5.0

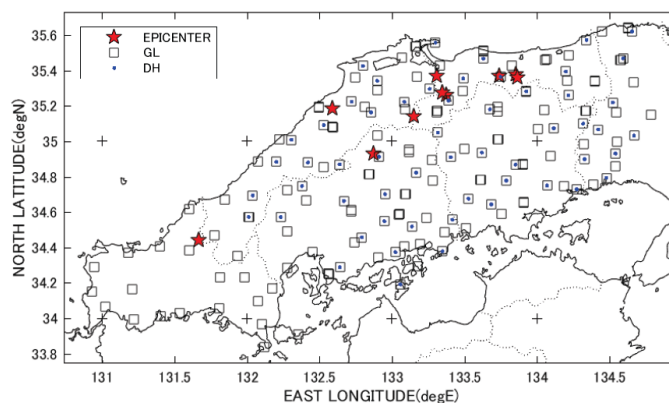


図1 震央と観測地点の分布

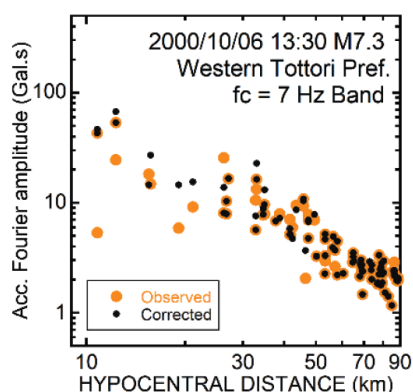


図2 BRM 振幅の距離減衰分布

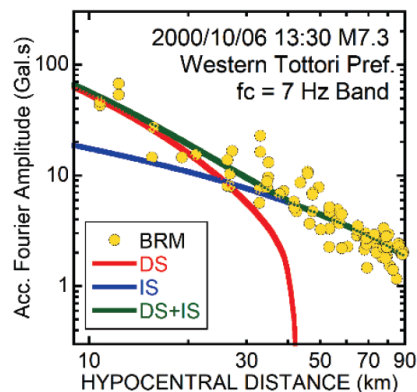


図3 BRMと距離減衰曲線

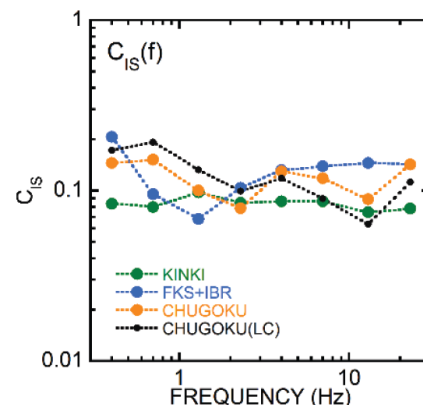
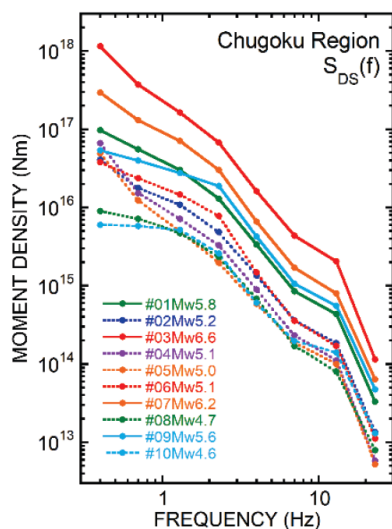
図4 $C_{IS}(f)$ 

図5 DSの震源スペクトル

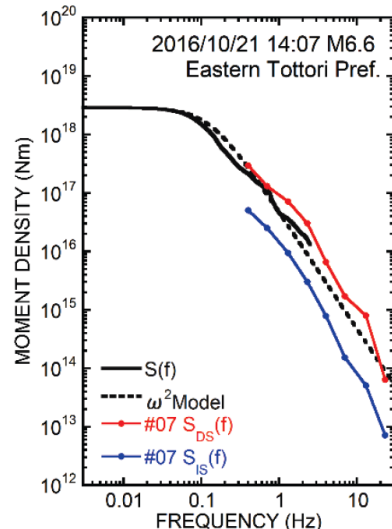


図6 #7地震の震源スペクトル

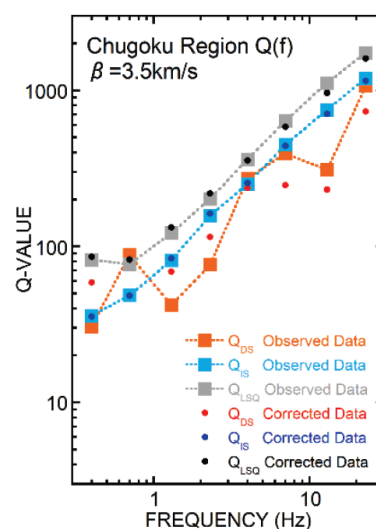


図7 Q値

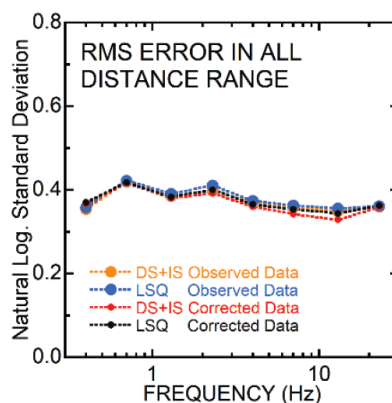


図8 全距離範囲誤差

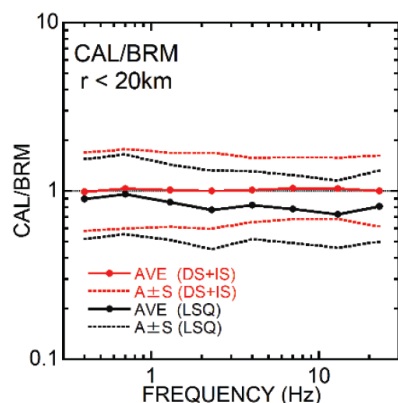


図9 震源近傍の計算/BRM

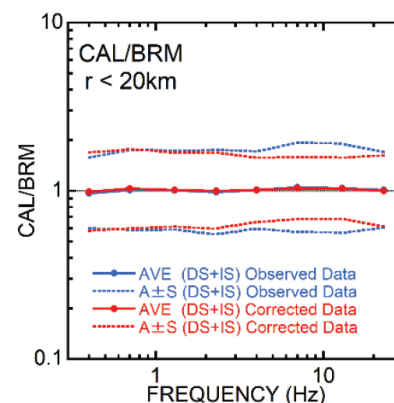


図10 線形化補正の効果

Correlation between strong motion intensities based on the unified strong motion database by NIED

*Hongjun Si^{1,2}, Asako Iwaki³, Nobuyuki Morikawa³, Hiroyuki Fujiwara³

1. Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, 2. Seismological Research Institute Inc., 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

簡易的な地震動予測方法として地震動モデル (Ground Motion Model; GMM) は広く用いられているが、GMMは過去に発生した地震による観測記録を用いて回帰分析等を行い、経験的に構築されるものである。通常、GMMは目的変数である地震動強さのパラメータ (最大加速度、最大速度、応答スペクトルなど) をマグニチュード、震源距離などの説明変数の関数として構築されている。これまでに世界中に多くのGMMが提案されているが、これらのGMMでは、目的変数となる地震動強さのパラメータの定義はさまざまであり、例えば同じ水平地震動の最大値でも水平2成分の最大値のうち、大きいほうの値なのか、その平均値なのかで異なる。そのため、GMMを用いた地震動評価を行う際に、地震動強さパラメータの補正が必要になる。これまでの研究では、福島(1993)によるレビュー論文では、Campbell (1985)を引用した形で地震動強さパラメータ間の関係を議論されているが、検討の詳細は明らかにされていないようである。そこで、本研究では、森川・他 (2022)による強震動データベースに収録されている豊富な観測記録を利用して、地震動強さパラメータ間の関係を調べたので、その結果を報告することとした。検討対象になるのは、下記のものとする。

(1) 地震動最大値のうち、水平2成分のうち大きいほうの値とその平均値の違い (2) 地震動最大値 (PGA、PGV) と応答スペクトルとの関係 (3) 計測震度とその他の地震動パラメータ (PGA、PGV、SI値等) の関係

本研究により、暫定的な検討結果として、以下のことが分かった。

(1) 地震動最大値のうち、水平2成分のうち大きいほうの値PGAmとその平均値PGAvの関係は、 $\ln PGAv = 0.995 \cdot \ln PGAm - 0.156$ で表すことができる。

(2) PGAは5%減衰0.02秒加速度応答スペクトルのRotD50にほぼ等しいことが分かり、PGVは5%減衰0.5秒～1秒加速度応答スペクトルのRotD50のうち、5%減衰0.6秒のRotD50との相関関係 (Pearson相関係数) が最も強いことは分かった。

(3) 計測震度とPGA、PGV、SI値の関係のうち、PGA、SI値との相関が高く、Pearson相関係数では、それぞれ0.60と0.54の値となった。今後、強震動データベースの詳細をさらに調べを行い、より詳細な解析を実施したいと考えている。

Comparison of Ground-Motion Models based on the Strong Motion Database

*Asako IWAKI¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Tomohisa Okazaki², Hisahiko Kubo¹, Hongjun Si³, Atsuko Oana⁴, Toru Ishii⁴, Yusuke Tomozawa⁵, Tomoki Hikita⁵

1. National Research Institute for Disaster Resilience, 2. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 3. Seismo Research, 4. Osaki Research Institute, 5. Kajima Technical Research Institute

強震動観測記録に基づく経験的な地震動予測モデル（Ground Motion Model; GMM）は確率論的地震ハザード評価(Probabilistic Seismic Hazard Assessment; PSHA)の基盤となる。日本国内では豊富な強震記録に基づいて多くのGMMが作られ分析が進められてきたが、作成条件やデータセットの異なるGMM同士はデータ処理方法や地震動指標値が異なるため定量的比較が難しい場合があり、強震動予測やPSHAにおける認識論的不確定性を増加させる要因となっている。そこで、強震観測記録を統一的に扱うことのできる共通基盤としての強震動データベースとそれに基づく複数のGMMを構築する取り組みを進めている（森川・他, 2022）。本研究では、GMMのばらつきや認識論的不確定性の定量化を目指し、防災科研のK-NET, KiK-net観測記録による地震動指標値、防災科研J-SHISの地盤情報も含めた観測点情報、気象庁一元化処理震源及び防災科研F-netの震源情報からなる強震動データベース（森川・他, 2022）を用いて作られた複数のGMMについて、定量的な比較と特徴付けの方法を検討する。本検討で用いるGMMは以下の6つである。これらのGMMには、定式化を伴う回帰分析をベースにしたもの（モデルA, B, F）、定式化を伴わない機械学習によるもの（モデルC）、それらの組み合わせによるもの（モデルD, E）が含まれる。

モデルA：Morikawa and Fujiwara (2013; MF13式)に遠方補正を適用したモデル（森川・他2021）

モデルB：司・翠川(1999)をM8.3以上の大地震に対応させたモデル（司・瀬瀬・三宅2016）

モデルC：一部の入力変数（M・距離・VS30）に単調依存性を課したNeural networkによるモデル (Okazaki et al. 2021)

モデルD：MF13式とExtremely Randomized Treeの組み合わせによるモデル（Kubo et al. 2020）

モデルE：MF13式による出力も説明変数に加えた勾配ブースティング木のモデル（小穴・他, 2022）

モデルF：ブロックインバージョン解析による地殻の不均質Q値を反映させ伝播経路特性の不均質性を考慮したモデル（友澤・引田2022）

一般にGMMには地震動特性を長期間・広範囲で捉えた時の平均値の安定性を仮定して全観測点で得られた記録を使用したエルゴード的なGMMのほか、観測点固有のサイト特性を反映させたGMMや、豊富な観測記録を活用し震源位置や対象地点を特定することによりさらにばらつきを低減させたGMMも開発されている。特に、特定地点のPSHAの目的においては、観測点固有のサイト特性を反映したGMMの重要性は高い。上記6モデルのサイト特性の反映方法はさまざまであり、またモデルEとFはGMMの入力に観測点・震源位置の両方を指定するモデルとなっている。本検討では、このように作成方法や特徴の異なる複数のGMMについて特徴を比較するため、いくつかの指定した観測点において、いくつかのタイプの地震に対する地震動予測結果を比較する。その際、GMMへの入力変数として

(1)該当観測点の地盤情報を反映したパラメータ（VS30など）のみを用いる場合

(2)該当観測点固有の情報（位置情報等を含む）を用いる場合

のいずれかまたは両方について、各モデルの出力結果の比較を行い、それぞれの違いを考察するとともに、観測点固有のサイト特性の反映方法が予測結果に及ぼす影響を検討する。

謝辞：本研究はJSPS科研費(20H00292)の助成を受けたものである。

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 2:00 PM - 3:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 5:00 AM - 6:15 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-1

chairperson: Kazuhito Hikima (Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.), Wataru Suzuki (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-17] Automatic Hypocenter Determination with the IPFx method for the 2018 Hualien earthquake sequence

*Masumi YAMADA¹, Dayi Chen² (1. Kyoto University, 2. Central Weather Bureau, Taiwan)

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

[S15-18] Rupture processes of the 2021 and 2022 Fukushima-oki earthquakes: Reactivation of the faults in the subducting slab originally formed in the outer-rise region

*Hiroaki KOBAYASHI¹, Tetsushi Watanabe¹, Kazuki Koketsu² (1. Kobori Research Complex, 2. Graduate School of Media and Governance, Keio University)

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

[S15-19] Comparative study of strong motion distributions of the two *M*7-class Off Fukushima earthquakes in 2021 and 2022

*Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Takeshi Kimura¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-20] Source Processes of the Off Fukushima Intra-slab Earthquakes in March 2022 and February 2021 - Analysis using 3D subsurface structure -

*Kazuhito HIKIMA¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute)

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

[S15-21] Ground motion in the Tokyo metropolitan area for the 2021 Northwestern Chiba earthquake

*Hiroe MIYAKE¹, Miki UEHARA¹ (1. ERI, Univ. Tokyo)

Automatic Hypocenter Determination with the IPFx method for the 2018 Hualien earthquake sequence

*Masumi YAMADA¹, Dayi Chen²

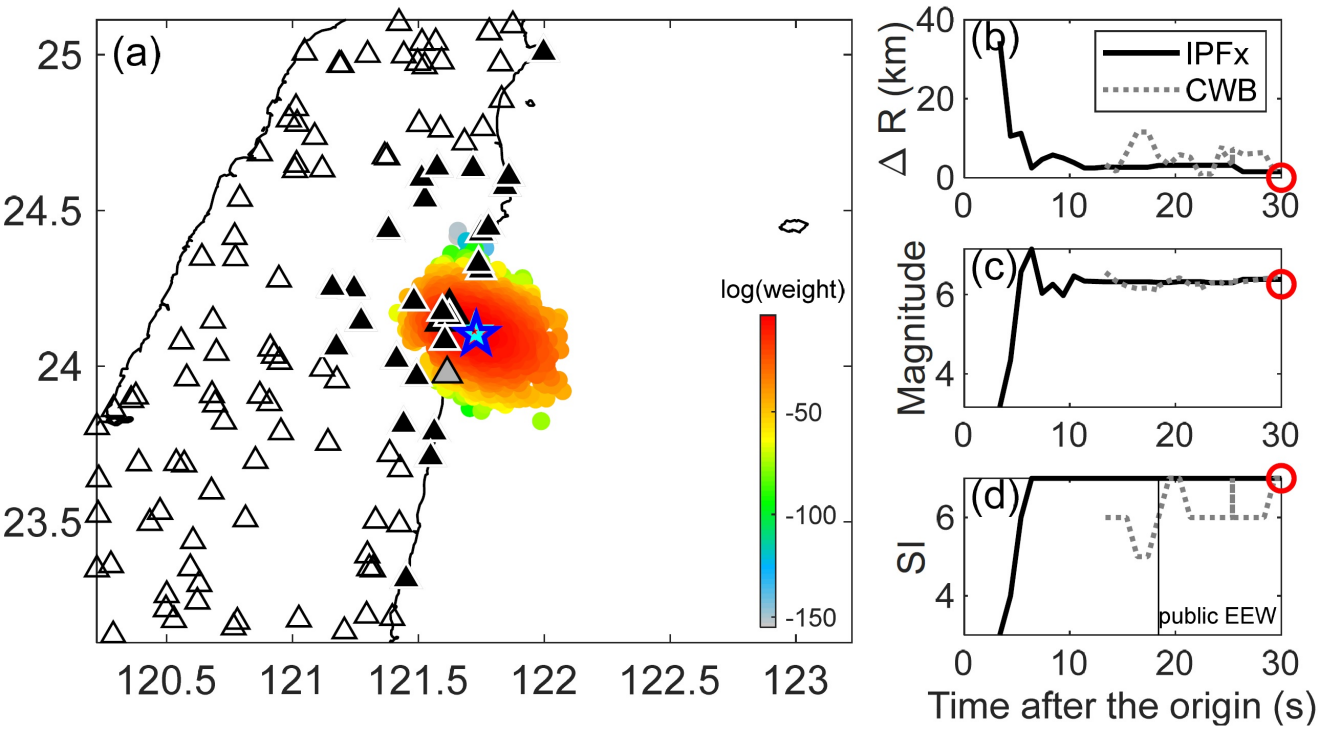
1. Kyoto University, 2. Central Weather Bureau, Taiwan

The extended integrated particle filter (IPFx) method is an automatic source determination algorithm designed for the Japanese earthquake early warning (EEW) system. The method improved earthquake source determination during active seismicity by incorporating the smart phase association scheme. We applied this method to the 2018 Hualien earthquake sequence and evaluated its performance by comparing it to the manual catalog.

We used 1-month continuous waveforms from February 2018 at 170 stations. Owing to the higher noise level, we improved the phase association algorithm to avoid noise contamination. The IPFx method detected the Hualien mainshock 9 s faster than the CWB EEW system and would have provided the warning 12 s earlier (Figure 1).

The detectability of the IPFx method was sufficient for use in EEW. Out of 127 earthquakes with a seismic intensity 4, 105 were successfully detected in one month, of which 103 had good accuracy with a location error of <30 km. Earthquakes in the manual catalog with magnitude 5 were mostly detected, while earthquakes with a magnitude between 2 and 5 were missed if they occurred immediately after large earthquakes. Except for the earthquakes with an interval <5 s, the detectability of the IPFx method agrees with the CWB manual catalog. The method was also applied to the 1-day continuous data on April 18, 2021, and detected 14 earthquakes with a magnitude ~2 that were not on the manual catalog.

Currently, the Central Weather Bureau in Taiwan uses the effective epicenter method to locate earthquakes for the EEW system. However, source determination for offshore events is difficult as most of the stations are on land. We expect the IPFx method to provide better location estimates for offshore earthquakes and during the period of active seismicity. It also provides an earlier warning as it sends the first message when three stations are triggered. This new method can potentially improve the speed and accuracy of the Taiwanese EEW system.



Rupture processes of the 2021 and 2022 Fukushima-oki earthquakes: Reactivation of the faults in the subducting slab originally formed in the outer-rise region

*Hiroaki KOBAYASHI¹, Tetsushi Watanabe¹, Kazuki Koketsu²

1. Kabori Research Complex, 2. Graduate School of Media and Governance, Keio University

2021年と2022年に福島県沖で発生した M_{JMA} 7.3と M_{JMA} 7.4の2つのスラブ内地震は、共に宮城県と福島県で最大震度6強が観測され、人的・住家被害が出た。余震分布などから、これら2地震はスラブ内で隣接する領域を破壊したと見られる。本研究では、これら2地震の断層構造と破壊過程を把握するため、強震・遠地・測地データを用いて震源過程解析を行った。

強震波形はK-NET, KiK-net, JMAのデータを用いた。解析には0.05-0.4 Hzのバンドパスフィルタをかけた速度波形を用いた。遠地波形はIRIS-DMCからデータを入手した。解析には0.01-0.4 Hzのバンドパスフィルタをかけた変位波形を用いた。測地データは、国土地理院のGEONETの日々の座標値 (F5解) を用いた。地震時の変位はGEONET岩崎 (950154) を固定し、地震前後7日間の平均値の差を取ることで求めた。

震源インバージョン手法はマルチタイムウィンドウ線形インバージョン法(Yoshida et al. 1996; Hikima and Koketsu, 2005)を用いた。観測点が震源から見て片側にしかないため、ジョイント時は強震・測地のデータセットの重みは遠地の半分を設定した。強震・測地・遠地のグリーン関数の計算には、それぞれKoketsu (1985), Kikuchi and Kanamori (1991), Zhu and Rivera (2002)の手法を用いた。グリーン関数の計算に用いた1次元地下構造モデルは、強震観測点および遠地の震源付近の構造については全国一次地下構造モデル(JIVSM, Koketsu et al., 2008; 2012)を基に構築した。その際、陸側のマントルまでと海洋性マントル (深さ43 km以深に一律に挿入) を考慮した。遠地観測点付近の構造はJ-Bモデルとし、測地観測点は強震観測点MYG011の速度構造モデルを共通して用いた。

断層モデルの構築にあたり、まずHypoDD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により、それぞれの余震を同時に再決定した。その後、それぞれ本震後24時間の震源分布および各機関のメカニズム解を参考に断層モデルを構築した。2021年については、震源付近に西北西傾斜の面 (strike 190°, dip 35°と60°), 震源より南西側に東南東傾斜の面 (strike 32°, dip 32°と52°) を仮定した。面はそれぞれ震源深さ付近で傾斜方向に折り曲げている。震源付近の低角の面は余震分布からは不明瞭であるが、JMAの初動解をもとに設定した。断層長さはそれぞれ10 kmと35 kmとし、幅は共通して20 kmとした。2022年については、東南東傾斜の面 (strike 15°, dip 40°と52°) を仮定し、こちらも2021年と同様に震源深さ付近で傾斜方向に折り曲げた。断層長さは50 km, 幅は25 kmとした。また、余震分布に整合させるために北半分については東側に数 km程度ずらしている。インバージョン解析では断層を5 km×5 kmの小断層に分割し、基底関数としては幅1秒の箱型関数を設定した。

解析の結果、2021年はまず西北西傾斜の面上で破壊が始まり、その後東南東傾斜の面が破壊した。破壊はup-dip方向および南南西方向に進んだ。また、東南東傾斜の面の中央付近に最大すべり量4.4 mが得られた。震源時間関数は破壊開始後9秒程度に最大となり、地震モーメントは 6.1×10^{19} Nm (M_w 7.1)と推定された。なお、第一タイムウィンドウの破壊開始時刻を決める V_r は2.9 km/s, 各小断層のウィンドウ数は6とした。2022年については、震源から主に北北東およびup-dip方向に破壊が伝播した。断層中央付近に最大すべり量4.9mが得られた。震源時間関数は破壊開始後6秒後と13秒後程度に2つのピークを持ち、主に断層中央と北部のすべりに対応するが、破壊開始後12s程度以降に震源付近が遅れて破壊しており、後者のピークはその寄与もあるとみられる。地震モーメントは 1.4×10^{21} Nm (M_w 7.4)と推定された。第一タイムウィンドウの破壊開始時刻を決める V_r は2.5 km/s, 各小断層のウィンドウ数は12とした。

近年の東北沖アウターライズ領域の調査によると、アウターライズ領域の断層のDip角は浅部で最大75°, 深部では45~60°程度である (e.g., Baba et al., 2020)。Iwasaki et al. (2015)のプレート境界モデルでは、今回2つの地震が発生した領域のプレートの傾斜は20°程度である。したがって、2021年と2022年の断層面のプ

レート境界面からの角度は余震分布からは不明瞭な2021年の破壊開始点付近の断層を除いて40~70°程度となり、アウターライズ領域の断層のDipと概ね整合的で、2011年の宮城県沖のスラブ内地震（Nakajima et al., 2011; Ohta et al. 2011）と同様に、スラブ内地震がアウターライズ領域で形成された断層の再活動であるという説（e.g., Silver et al., 1995; Jiao et al., 2000）を支持する。

Comparative study of strong motion distributions of the two $M7$ -class Off Fukushima earthquakes in 2021 and 2022

*Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Takeshi Kimura¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2021年2月13日に福島県沖で $M_w7.1$ のスラブ内地震が発生し、2022年3月16日には再び福島県沖で $M_w7.3$ のスラブ内地震が発生した。本稿では前者をEQF2021、後者をEQF2022とする。気象庁一元化震源情報に基づく2つの地震の震央間の距離は約8 km、深さはともに約56 kmであり、破壊開始点は非常に近接していた。防災科研AQUA-CMTによるセントロイドの水平位置の距離は約23 km、セントロイド深さの差は3 kmと破壊開始点に比べるとやや離れている。防災科研K-NET及びKiK-netによる三成分合成最大加速度（以下、PGA3）の分布を比較すると、震源域西方から南西の方向に位置する福島県内ではEQF2021とEQF2022で大きく変わらず、観測点によってはEQF2021の方が大きいケースも見られた。震源域北方の宮城県から北海道にかけてはEQF2022の方が大幅に大きく、PGA3が2倍以上となる観測点が100点弱に及ぶ。福島県以南では最大加速度が2倍以上となる観測点は兵庫県の1点を除き存在せず、南方の観測点では北方の観測点に比べてEQF2022とEQF2021のPGA3の比は大きくない。スラブ内地震どうして M_w では0.2、地震モーメントでは2倍ほどEQF2022の方が大きいところ、PGA3の分布は単純に一律にEQF2022の方が大きい訳ではないことは興味深い。消防庁の被害状況集計によると、福島県と宮城県のEQF2021に対するEQF2022の住家被害棟数はそれぞれ約1.2倍と約1.5倍であり、EQF2022により特に宮城県が強い揺れに見舞われたことに対応していると考えられる。本研究ではこの近接して発生した2つの福島県沖の地震による強震動分布を比較分析して、その特徴及びその成因について検討を行った。

周期0.05秒から10秒までの加速度応答値（減衰5%）のEQF2021に対するEQF2022の比の分布を見ると、0.05～0.5秒ではPGA3と同様の特徴を示すが、0.6～1.0秒では福島県から関東地方内陸部さらに中部地方にかけてEQF2021の方が大きい観測点が増加する。さらに周期1.5秒以上では一転して東日本全体でEQF2022の方が大きく、この長周期帯域では地震モーメントの差が大きく影響していると考えられる。最大加速度の比較において地震モーメントの違いを補正した比較を行うため、まず観測された水平最大加速度とMorikawa & Fujiwara (2013) の地震動予測式による予測との比をとり、その比についてのEQF2021に対するEQF2022の比をとった。PGA3の比では震源域北方で一様にEQF2022が大きかったが、この分布では空間的に短波長に変化しており、EQF2022は宮城県中部から北部、そして岩手県の沿岸部にかけての揺れが特徴的に大きい様子が見られた。また振幅の大小の影響を抑えて分布形状そのものを分析するため、EQF2021からEQF2022の間に福島県沖で発生しK-NET及びKiK-netで100点以上の記録の得られた地震に対するEQF2021とEQF2022のPGA3の比をとり、比ができるだけ一定となる場合に分布が似ていると考えて比の対数標準偏差を最小とする地震を抽出した。EQF2021に対しては2021年2月15日21時26分に発生した $M_w5.3$ の地震（以下、EQ0215）、EQF2022に対しては2021年12月8日16:22に発生した $M_w4.7$ の地震（以下、EQ1208）が対数標準偏差を最小にした。EQ1208の震央位置とセントロイド位置はEQF2021の震源とセントロイド、EQF2022の震源位置に近接している一方、EQ0215の震源位置とセントロイド位置はそれらの領域より南～南西に20 km程度離れており、EQF2021に比べてEQF2022のPGA3分布が北方に延びていることに対応していると考えられる。

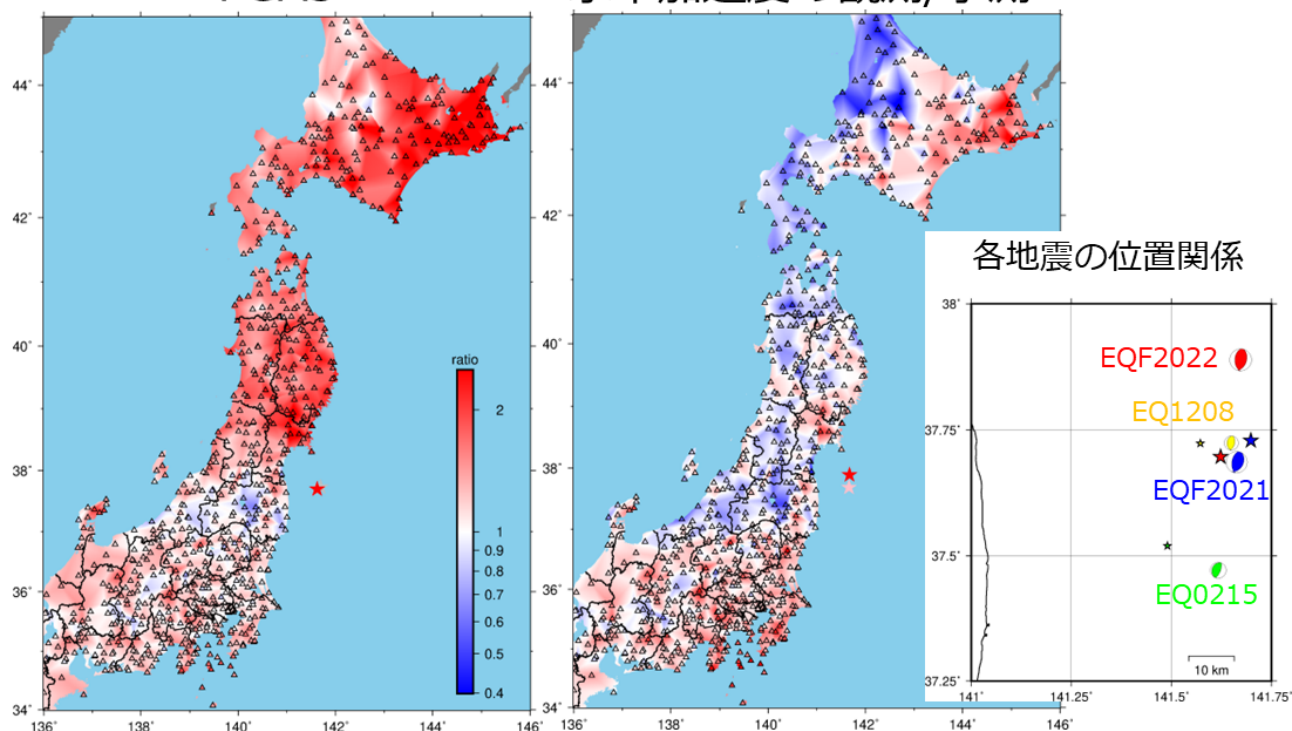
本研究では近傍で発生した地震どうしによる強震動分布の比を用いているため、パス及びサイト特性は相殺され震源特性に起因する地震動分布の差異を分析しているとみなせる。震源インバージョン解析ではEQF2021は破壊開始点から南西に、EQF2022は北に破壊が進展したと推定されており、本研究による結果と定性的には整合する。震源特性のうち、破壊伝播効果、強震動生成位置の違い、放射特性もしくはその他の効果のいずれがEQF2021とEQF2022の地震動分布の差異の主因であるかの検討は今後の課題である。

謝辞：気象庁による震源情報と消防庁による被害状況集計を利用しました。

EQF2021に対するEQF2022の比の分布

PGA3

水平加速度の観測/予測



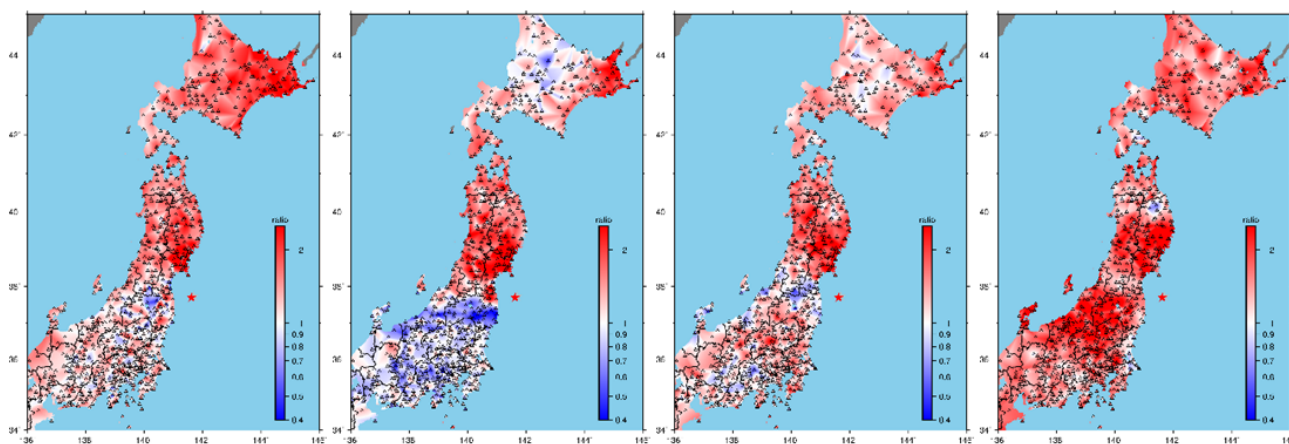
加速度応答値

0.5秒

0.9秒

1.5秒

4秒



Source Processes of the Off Fukushima Intra-slab Earthquakes in March 2022 and February 2021 - Analysis using 3D subsurface structure -

*Kazuhito HIKIMA¹

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute

【はじめに】

2022年3月16日に福島県沖でMj7.4の地震が発生した。この地震の震源の近傍では、昨年、2021年2月13日にもMj7.3の地震が発生しており、わずか1年余りでM7クラスの地震が発生したことになる。いずれの地震でも福島県・宮城県で最大震度6強が観測され多くの被害が発生した。これらの地震は西北西－東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型で、太平洋プレート内で発生した地震である（地震調査委員会,2021,2022）。

我々は、2021年の地震に対して、強震波形を使い太平洋プレートを含む3次元速度構造を考慮したGreen関数による震源インバージョン解析結果を実施した(引間, 2021)。本報告では、2022年3月の地震に対して同様の手順で震源解析を行った結果を示すとともに、2021年の地震も再解析し2つの地震の相違などについても議論する。スラブ内地震による強震動を考える上でも、震源過程の解析が必要である。

【震源再決定】

震源インバージョン解析に先立ち、本震・余震の地震の震源再決定を行った。2022年、2021年ともに本震発生後4週間以内に発生した地震について、防災科研のWebサイトで公開されている気象庁一元化処理による検測値を用いて、DD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により震源決定を行った。(Fig.1)

再決定された余震分布はどちらも北北東－南南西方向に並びその範囲は40 km程度に及ぶ。2022年の震源は2021年の震源よりも若干北に位置する。一方で2022年の地震では余震は主に震源よりも北北東で発生しているのに対して、2021年の地震では震源の南南西で発生した余震が多い。すなわち、2022年の破壊は北北東方向に、2021年の破壊は南南西方向にユニラテラル的に進展したものと考えられる。

どちらの余震も東南東側に高角に傾き下がる面状に分布しているが、それらの並びはある程度の幅を有している。特に、2021年の地震ではより低角な平面状に並ぶ余震群も見られた。

【震源過程解析】

震源域が海域に位置するためやや遠い観測点も含まれるものの、震源から120 km程度以内のKiK-netの波形記録を震源インバージョン解析に使用した。また、福島県内にある東京電力の地震観測点での観測記録も解析に加えた。なお、浅部地盤による影響を軽減するために地中記録の使用を基本とした。加速度波形に0.03～0.6 Hz をフラットレベルとするバンドパスフィルタをかけて積分した速度波形を解析に用い、インバージョンはマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al., 1996; 引間, 2012)により行った。

解析の際の断層面は、再決定した余震のうち、本震後1日以内に発生した余震の分布やF-netによるメカニズム解を参考に、さらに予備的解析を行い観測波形と合成波形との残差も考慮して設定した。2022年の地震は余震分布からは局所的に異なる面が存在する可能性は考えられるものの、それらを特定することは難しいため、走向:30°、傾斜:40°の長さ44 km、幅30 kmの1枚の矩形断層を設定してすべり分布を求めることとした。2021年の地震は引間(2021)と同様に、主断層面は走向:37°、傾斜:45°の長さ40 km、幅24 kmの矩形断層とし、長さ14 km、幅12 kmの傾斜:20°の副断層面を付加した。なお、小断層サイズは2 km×2 km とした。

【3次元速度構造による波形計算】

Green関数は3次元速度構造モデル(JIVSM; Koketsu et al., 2012)を使い、3次元差分法により計算を行った。Green関数の計算は相反定理を用いて行った。格子点間隔は水平方向に200 mの等間隔、鉛直方向には50～200 mの不等間隔、時間刻みは0.005 sとした。

【解析結果】

2022年の地震では、震源付近と走向方向に12～24 km程度北北東に離れた付近に大きなすべりが求まった(Fig.2)。最大すべり量は約3.1 mである。2021年の地震では、震源から南西側に12～20 km程度離れたやや浅

部に大きなすべりが求まった。最大すべり量は2.8 m程度、副断層では約1.8 mである。地震モーメントは2022年の地震は 1.03×10^{20} Nm (M_w 7.3), 2021年の地震は全体で $M_0 = 5.45 \times 10^{19}$ Nm (M_w 7.1)と求まった。なお、これらは震源付近の3次元速度構造を考慮した値である。いずれも、JIVSMによる太平洋プレート海洋性マントル内に震源が存在し、主要な断層すべりは海洋性地殻第2層以深に止まっているように見える。2021年、2022年の一連の地震はスラブ内地震の複雑性を示しているが、今回の震源解析結果は断層モデルを考える上で参考となるものと考えられる。

謝辞：本検討ではKiK-netおよびF-netメカニズム解、JMA一元化データを使用させて頂きました。

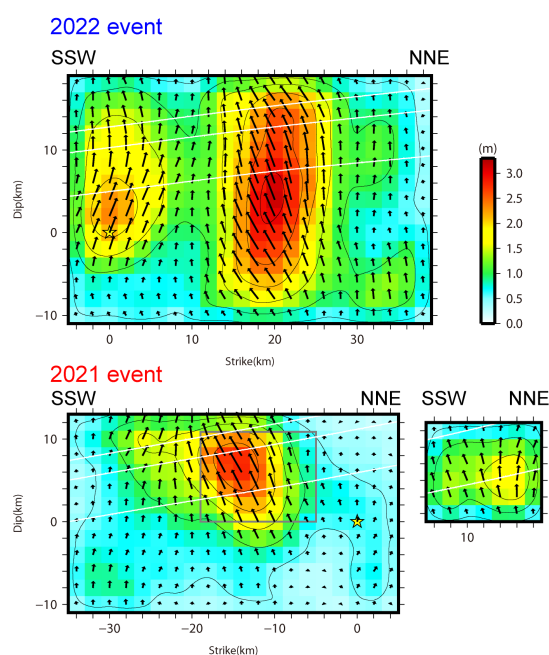
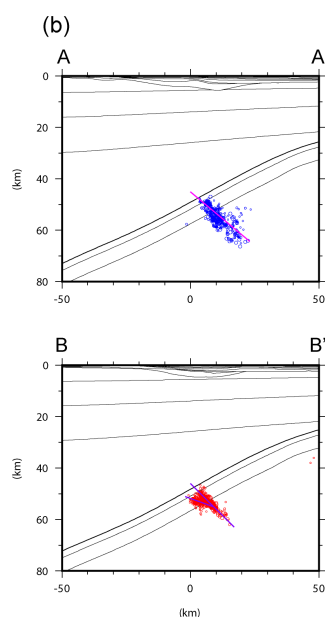
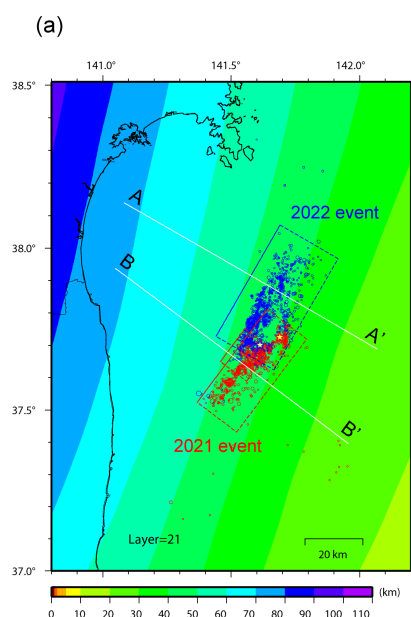


Fig. 1 (a) Aftershock distribution for the 2022 event (blue) and the 2021 event (red). The aftershocks occurred within 4 weeks after the mainshock are relocated using the DD method, respectively, and the events larger than $M_{2.5}$ are plotted. The fault positions are also depicted using the corresponding color. The color contour denotes the depth of upper boundary of the Pacific plate. (b) The cross sections at the white lines in Fig. (a). The boundary of subsurface structure model, the aftershock distribution, and the sections of the fault models are plotted.

Fig.2 Slip distributions on the faults for the 2022 and 2021 events. The arrows show the slip of the hanging wall. The white lines denote the boundary of the layers in the subducting plate of the JIVSM. The fault of the 2021 event consists of two planes, and the projected position of the subfault is shown as gray lines in the main fault. The yellow stars denote the hypocenters.

Ground motion in the Tokyo metropolitan area for the 2021 Northwestern Chiba earthquake

*Hiroe MIYAKE¹, Miki UEHARA¹

1. ERI, Univ. Tokyo

2021年10月7日に千葉県北西部の深さ75 kmで気象庁マグニチュード5.9 (Mw 5.9~6.0) の地震が発生した。この地震は、2005年7月23日に千葉県北西部の深さ73 kmで発生した気象庁マグニチュード6.0 (Mw 5.9~6.0) の地震の繰り返し地震と考えられ、それ以前の太平洋プレートの沈み込みに伴うM6クラスの地震との類似性(地震調査委員会, 2005, 2021; 鎌谷・勝間田, 2022)も指摘されている。

2021年と2005年の地震の地震動を比較すると、いずれの地震も最大震度は5強で、これらの高震度は自治体震度計により観測されている。2021年と2005年の地震の計測震度は、東京足立区伊興で5.1と5.0、埼玉川口市三ツ和(旧鳩ヶ谷市)で5.0と4.5、埼玉宮代町笠原で5.0と4.5であり、これらの3観測点においては、2021年の地震の計測震度の方が大きかった。

東京大学地震研究所の首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)では、自治体が運用する震度計等の観測波形データを、研究利用に限定して取得している。東京足立区伊興では、東西成分卓越する地震動が観測されており、計測震度の差は0.1であるが、周期1秒において2021年の東西成分の擬似速度応答は100 cm/sに達し、2005年の応答の約2倍となっている。また、観測点の移設等はないことを確認している。埼玉県2観測点についても、いずれも2021年の東西成分が大きく、高震度の原因となっている。

2021年と2005年の地震の観測記録については、鎌谷・勝間田(2022)は、東京大手町の気象庁震度計の東西成分を対象に相関係数0.93を求めているが、前述の高震度観測点の変位波形における相関係数はいずれもこの値よりも低く、2011年東北地方太平洋沖地震に起因する地盤特性の速度低下および時間変化等の影響が示唆される。本発表では、これらの地震の首都圏における強震動分布の特徴と空間相関係数の周期依存性について紹介する。

謝辞: 本研究ではK-NET・KiK-netの強震記録と、首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)を通して、東京都・東京消防庁・神奈川県・横浜市・埼玉県・千葉県・山梨県・群馬県・栃木県・茨城県・長野県・静岡県および東大地震研の強震計・震度計の観測波形データを利用しました。

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

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:30 PM - 4:30 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:30 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM B 4th floor (Large Conference Room)

[S15] PM-2

chairperson:Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute), Fumino Suzuki(Kobori Research Complex INC.)

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

[S15-22] Preliminary analysis of residual data between strong-motion records and calculations by a ground motion model

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Asako IWAKI¹, Takahiro MAEDA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S15-23] Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: Remodeling of source parameters and estimation of detailed seismic intensity distribution

*Fumino SUZUKI¹, Tetsushi WATANABE¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹ (1. KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.)

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

[S15-24] Strong Motion Simulation of 2016 Kumamoto Earthquake Mainshock Using Dynamic Rupture Modeling

*JIKAI SUN¹, HIROSHI KAWASE¹, ARBEN PITARKA², FUMIAKI NAGASHIMA¹, ERI ITO¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Lawrence Livermore National Laboratory)

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

[S15-25] Reevaluation of strong ground motions during the 2016 Kumamoto earthquake sequence utilizing regional spectral inversion analysis

*Yosuke NAGASAKA¹ (1. Port and Airport Research Institute)

Preliminary analysis of residual data between strong-motion records and calculations by a ground motion model

*Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹, Asako IWAKI¹, Takahiro MAEDA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

我々はこれまで、様々な強震動予測モデルの構築、改良、検証を可能とする強震動データベースを試作（森川・他、2020；JpGU）するとともに、モデルの改良とばらつきの分析を目的としてMorikawa and Fujiwara (2013)の地震動予測モデル（以下、MF13）の予測値に対する振幅比から成る「残差データ」を作成してきた（森川・他、2020；地震学会秋季大会）。さらに、この「残差データ」をもとに、MF13の適用範囲をモーメントマグニチュード（Mw）5.5未満の地震、断層最短距離200km以遠に拡張する追加補正項を求めた（森川・他、2021；地震学会秋季大会）。

本検討では、2018年3月から2021年末までのK-NET、KiK-netデータを追加し、地震タイプ（地殻内地震、海溝型プレート間地震、海溝型プレート内地震）に関する信頼性を向上させた強震動データベース（森川・他、2022；JpGU）を用いてあらためてMF13の地震動予測モデルに対する残差のデータセットを作成する。残差のデータセットの作成において予測値を求める際には、地盤増幅および観測点から火山フロントまでの距離をパラメータとした異常震域に関する補正項は考慮しない一方で、フィリピン海プレートの海溝型プレート内地震に対する追加補正（森川・藤原、2015；JpGU）と上述の森川・他（2021）による追加補正を適用した。

このようにして作成した残差データについて、Morikawa et al. (2008)に基づき「地震間」と「地震内」の残差への分離を行い、その特徴について分析する。「地震間」の残差については地震ごとにMwと震源深さとの関係を調べたところ、震源が50km程度から200km程度にかけて深くなるほど残差が大きい（観測値が予測値より大きい）傾向が海溝型プレート内地震の最大加速度をはじめとした短周期成分において見られた。ただし、それ以外の震源深さや周期1秒程度以上、他の地震タイプでこの深さ依存性は見られない。一方、「地震内」の誤差について観測点ごとにMwと震源深さに加え断層最短距離との関係を調べたところ、断層最短距離に対して「残差」の依存性が見られる点が存在している。このことは、特定地点を対象とした、あるいは伝播経路の違いによる減衰の違いを考慮した地震動予測モデル構築の有効性を示している。以上より、海溝型プレート内地震に対して震源深さに関する補正項を求めることでエルゴード的なMF13モデルのさらなる改良が見込まれる。また、観測点ごとに見られる「残差」の距離依存性を取り込む非エルゴード的なモデルの構築などの予測値の中央値（あるいは平均値）に関する改良の方向性が示された。

今後は別の地震動予測モデルを用いた場合についての検討を行うとともに、「残差」の分布形状と地震規模、断層最短距離などとの関係についての分析を進める予定である。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費(20H00292)の助成を受けたものである。

Strong ground motion simulation of the great 1923 Kanto earthquake in the Tokyo metropolitan area: Remodeling of source parameters and estimation of detailed seismic intensity distribution

*Fumino SUZUKI¹, Tetsushi WATANABE¹, Kenichi KATO¹, Katsuhisa KANDA¹

1. KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.

1. はじめに

首都圏に甚大な被害を及ぼした1923年関東地震に関して、著者らは震度データに基づく断層モデルの構築と統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを行ってきた。既報のSuzuki et al. (2020)では、多重クラックモデルにより断層モデルを構築していたこと、評価地点がK-NET、KiK-netの強震観測点に限られていたことが課題であった。そこで本報では、断層モデルを多重アスペリティモデルに基づき再構築した上で、K-NET、KiK-netの強震動シミュレーション結果による震度分布を面的補間し、詳細な震度分布を推定する。

2. 多重アスペリティモデルによる断層モデルの再構築

強震動予測のレシピにおいて、多重クラックモデルは応力降下量に関して動学的断層モデルと必ずしも整合的ではないことなどから、多重アスペリティモデルに基づくレシピの再構築が行われた（入倉ほか、2002）。本報でも、多重アスペリティモデルにより、神田・加藤(2019)の震度データに基づき推定された断層全体の地震モーメント M_0 と短周期レベルA、小断層ごとのエネルギー放出分布とそこから抽出されたSMGAの領域を与条件として、断層モデルを再構築する。具体的には、 M_0 、A、全SMGAの総面積の等価半径 r から、Boatwright (1988)および壇ほか(2001)の単一アスペリティモデルの理論的關係により断層全体面積の等価半径 R を算出し、Eshelby (1957)の円形クラックの關係から断層全体の静的応力降下量 $\Delta\sigma$ を算出した。 $\Delta\sigma$ と断層全体と全SMGAの面積比からMadariaga (1979)の關係式により全SMGAの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を算出した。単一アスペリティモデルは多重アスペリティモデルに拡張可能であるため、 i 番目のSMGAと背景領域の地震モーメント M_{0ai} 、 M_{0b} を全体の M_0 からエネルギー放出分布の割合に比例して分配した上で、各SMGAの応力降下量 $\Delta\sigma_{ai}$ は壇ほか(2002)に基づき $\Delta\sigma_{ai} \propto D_{ai}/S_{ai}^{0.5}$ (D_{ai} と S_{ai} はそれぞれ各SMGAのすべり量と面積)となるよう $\Delta\sigma_a$ を分配した。

3. クリギング法による詳細震度分布の推定

3. 1 推定手法

上記の断層モデルのSMGAを用いてSuzuki et al. (2020)と同様に強震観測点の波形を評価し計測震度を算出した。クリギング法によりこれらの震度を面的に補間する。震度を単純にクリギング法で補間すると、距離に近い強震観測点に近い震度になるが、距離が近くてもその地点の地下構造が異なれば震度は異なると考えられる。そのためここでは補間地点の地盤情報と震源距離を反映して補間する。具体的には、強震観測点の震度を地盤情報と震源距離で回帰し、回帰残差をクリギング法により補間した上で、補間地点の地盤情報と震源距離から求めた回帰式により震度を評価する。震源距離も用いる理由としては、クリギング法は空間相関を持つ分布の補間に適しており、震源距離の影響も除いた残差の方が除かない残差よりも空間相関が見られるためである。地盤情報は面的なデータが公表されているJ-SHIS V4の表層30m平均S波速度と、深部地盤の情報としてJ-SHIS V3.2のVs 1000 m/sの下面深度を用いた。震源距離には等価震源距離を用いた。

3. 2 推定結果

推定した詳細震度分布を図1に示す。神奈川南部や千葉南部で震度6強～7、東京東部で震度6弱～6強となる傾向や、埼玉東部まで震度6弱が広がっている傾向などは、諸井・武村(2002)による木造住宅全壊率に基づく広域な震度分布を概ね良好に再現している。さらに、地域ごとに詳細な震度分布を評価している諸井・武村

(2001)、武村・諸井(2001、2002)、高浜ほか(2001)、武村(2003)とも比較を行い、各地域内での詳細な震度の違いについても対応を確認した。また本報の結果によれば、1923年当時は陸地として存在しなかった地点として、羽田空港などの東京湾岸の埋め立て地は当時の東京市と同等の揺れが予想される。

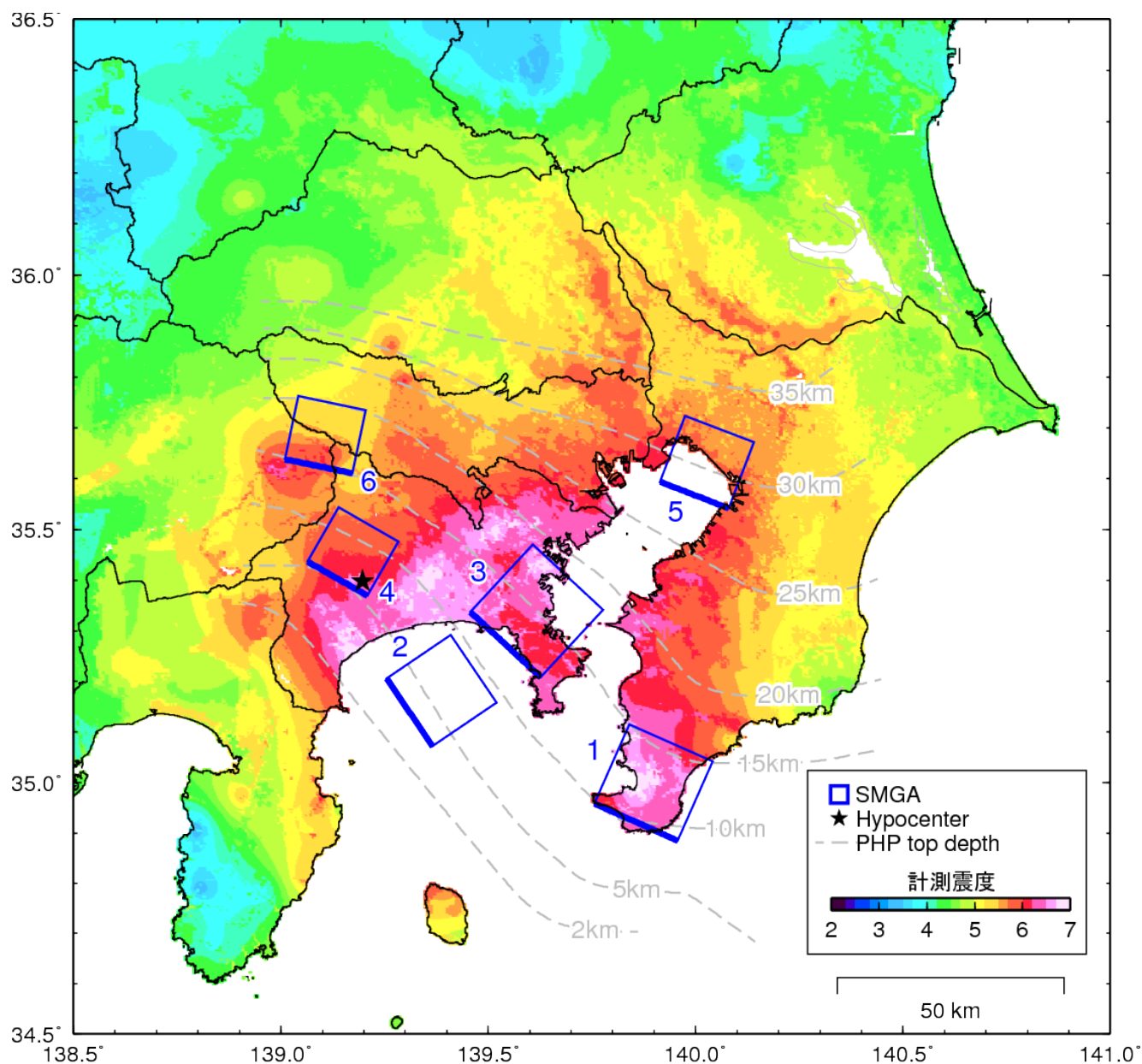


図1 クリギング法により推定した1923年関東地震の首都圏の詳細震度分布

Strong Motion Simulation of 2016 Kumamoto Earthquake Mainshock Using Dynamic Rupture Modeling

*JIKAI SUN¹, HIROSHI KAWASE¹, ARBEN PITARKA², FUMIAKI NAGASHIMA¹, ERI ITO¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Lawrence Livermore National Laboratory

Mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake (M_w 7.0) occurred on April 16, 2016 at 01:25 (JST) in the Kyushu Island (Yoshida et al., 2017), on the Futagawa and Hinagu fault system. The kinematic rupture modeling of the Kumamoto earthquake was applied in several studies (Yoshida et al., 2017; Asano and Iwata, 2021) to investigate the rupture process and simulate the strong ground motion for the mainshock. Near-fault ground motions generated by the earthquake were recorded with high accuracy by the NIED strong-motion network (K-NET and Kik-net), the Japan Meteorological Agency (JMA), and the local-government seismic-intensity network.

In this study, the dynamic rupture modeling (Pitarka et al., 2021) was applied to investigate the earthquake rupture process and to simulate the recorded near-fault ground motions. The dynamic rupture is modeled using a split-node method of Dalguer and Day (2007), implemented in the 3D staggered-grid finite-difference method of Pitarka (1999) and a linear slip-weakening friction law (e.g., Andrews, 1976). Following the research results of Yoshida et al. (2017) and Asano and Iwata (2021), we generated 500 and 1020 rupture models including three strong motion generation areas (SMGAs) with elevated stress drops, located on the Futagawa and Hinagu fault zones.

Locations of three SMGAs were randomly generated in the large slip distribution areas specified based on the kinematic inversion results by either Yoshida et al. (2017) or Asano and Iwata (2021). The 3D Japan integrated velocity structure model (JIVSM) (Koketsu et al., 2012) was used in modeling the elastic wave propagation. A simple linear regression method was applied to the eight end points of four fault segments, to define the location of a single, 45 km long rupture plane in this model. The top-left and bottom-right boundaries were determined by 13 km offset from the rupture plane, the bottom-left and top-right boundaries were offset 10 and 5 km from the outmost-edge foot points on the linear regression line. 26 strong-motion stations are located in the target area which observed the mainshock, 2 Kik-net sites, 4 K-net sites, 3 JMA sites, and 17 Kumamoto-ken local shindokei sites. Two kinds of goodness of fit (GOF) function were used to find the optimal simulation within 1520 scenarios; the authors' original GOF and the MO-GOF (Olsen and Mayhew, 2010) from Anderson's GOF (Anderson, 2004). After several preliminary investigations in comparing the estimation and observations, the authors' original GOF considers the misfit ratio of the peak ground velocity (PGV) and cross-correlation coefficient (CCC), while the MO-GOF was consist of ten factors of seismic wave and spectral characteristics. Moreover, the authors' defined GOF and GOF of PGV and acceleration response spectrum (SA) in MO-GOF were found to be efficient to search for the optimal simulation. We found that three SMGAs of the optimal simulation were located relatively close to the hypocenter and a large shallow SMGA was located on the Futagawa fault. Comparing the observed and estimated strong motions in 0.1-1.0 Hz, 16 of 26 sites displayed good wave fits, while the other 10 sites displayed not so good fits, which were mostly located in the distant area from the edge of the fault. The optimal scenario shows that a large peak slip rate appears in the deeper area (-15 km), which is as large as 7 m/s. However, the large slips are located at -8 km, in the shallow and large SMGA, which is as large as 4 m (Fig. 1). Analysis of the rake angle for the mainshock was found to be in 20-30 degrees, which was confirmed in the previous kinematic inversion reports.

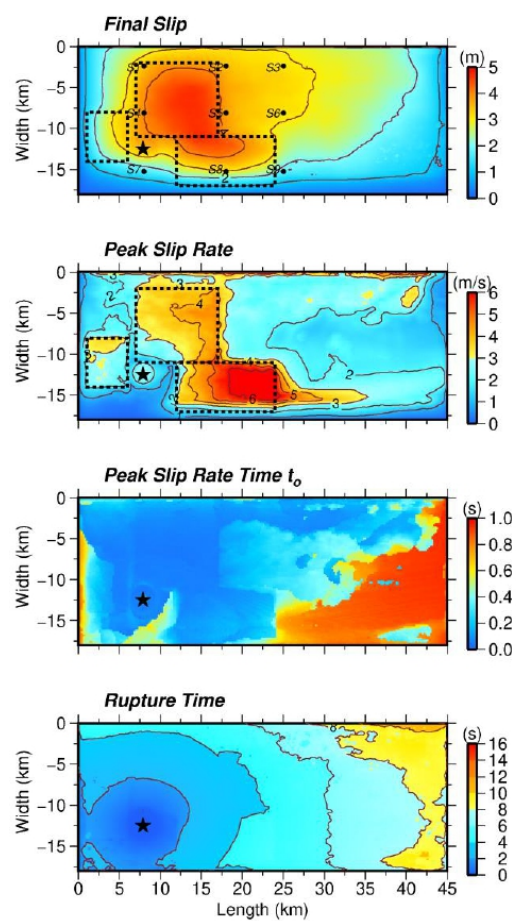


Fig. 1. Simulation of final slip, peak slip rate, peak slip rate time, and rupture time on the fault plane during the mainshock.

Reevaluation of strong ground motions during the 2016 Kumamoto earthquake sequence utilizing regional spectral inversion analysis

*Yosuke NAGASAKA¹

1. Port and Airport Research Institute

2021年に開催されたESG6において行われた強震動シミュレーションに関するブラインドプレディクションで筆者が行った検討について、事後検討を行った結果を報告する。対象地震は2016年4月16日3時3分熊本県の地震($M_j 5.9$)、2016年熊本地震の前震、本震の3つである。対象地点はJR熊本駅から約1.5km南の観測点(KUMA)である。対象地点における2016年熊本地震前後の中小地震記録が事前に配布されており、予測に使用できる。本検討では修正経験的グリーン関数法(野津・菅野, 2008)により対象地点とその周辺での強震動について検討した。この方法は、地震動の振幅スペクトルを震源、伝播経路、サイト増幅特性の3つを掛け合わせることで合成し、位相特性は中小地震記録をそのまま使うという方法である。震源スペクトルはオメガスクエアモデルを仮定し、規模の大きい地震に対しては矩形のアスペリティを用いる。伝播経路特性は幾何減衰とQ値を用いた非弾性減衰(Boore, 1983)を考慮する。サイト増幅特性は多数の地震記録を用いたスペクトルインバージョンによる経験的な増幅特性(たとえば野津・長尾, 2005)を用いる。KUMA近辺には気象庁の地震観測点があるが、本検討では用いていない。ブラインドプレディクション当初は、KUMAについてはK-NET観測点であるKMM006との同時観測記録の比による補正からサイト増幅特性を求めている。しかし、KUMAとKMM006と約8km離れており、この2点が震源特性、伝播経路特性を共有しているとは限らない。また、周辺地点では野津・長尾(2005)による経験的サイト増幅特性を用いていたが、いくつかの地点は移設により特徴が変化していると考えられる。Q値は加藤(2001)による $104f^{0.63}$ を用いていた。この値は熊本で発生した地震を含めた解析の結果であるが、主な対象地域は鹿児島県北西部の地震の周辺であり、さらに1Hz以上が対象である。そこで、本検討ではまず熊本地震の震源域で発生した地震を対象とした地域的なスペクトルインバージョンによる伝播経路特性、サイト増幅特性の再評価を行った。スペクトルインバージョンは多くの記録を用いるため、よりバイアスのないサイト増幅特性の評価となることが期待できる。また、伝播経路特性のQ値もより熊本周辺に適したものになる。移設のない地点での野津・長尾(2005)によるサイト増幅特性を拘束条件として与え、Q値は未知数とした。強震動シミュレーションで用いることを考え、後続波を含めた波形を対象とした1段階の解析を行った。その結果、KUMAや移設地点では従来とは異なるサイト増幅特性が得られた。また、推定されたQ値は低周波数帯で通常用いられる a^p の形から外れたため、フィッティングしたQ値ではなくインバージョンにより得られたQ値をそのまま用いることとした。強震動シミュレーションにあたってはさらに各地震の震源パラメータが必要だが、これらは周辺地点の観測記録に合うように設定した。事後検討であるためKUMAの記録も含めて設定している。4/16 3:03の地震については疑似点震源モデルを、前震と本震については矩形アスペリティを用いたモデルをそれぞれ用いた。これらを用いた強震動シミュレーションを行ったところ、特にフーリエスペクトルについて当初のモデルよりも全体的に観測との一致度が改善される結果が得られた。地域的なスペクトルインバージョンによるサイト増幅特性と伝播経路特性は地震前に評価できるため、今後の強震動予測にも活用できると考えられる。このような解析は以前より行われているが、ブラインドプレディクション当初は異なる解析により得られた伝播経路特性とサイト増幅特性を組み合わせていた。それぞれ少しずつ異なる条件での解析であったため、本検討では同一の解析で推定した伝播経路特性とサイト増幅特性を用いたことが良い結果を得られた要因であると考えられる。また、推定されたQ値をそのまま使うことも本検討では有効であった。