

Wed. Oct 26, 2022

Poster session (3rd Day) | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

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

[S09P] AM-P

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

[S09P-01] Analysis of seismic activity (Oct 2017-Sep 2021) beneath the Hakusan volcano.

*Masato Fukata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S09P-02] Stress change on inland faults in Southwestern Japan due to the 1944 Tonankai and the 1946 Nankai earthquakes

*Akinori Hashima¹, Takane Hori¹, Takeshi Iinuma¹, Souta Murakami², Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S09P-03] Tidal correlation of deep tectonic tremors rising during long-term slow slips in Bungo Channel

*Fuyuki HIROSE¹, Akio KOBAYASHI¹, Kenji MAEDA¹ (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research)

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

[S09P-04] Numbers and duration of aftershocks on inland earthquakes in Japan

*Taichi Honda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S09P-05] Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes after 2011 around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Toshihiro IGARASHI¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S09P-06] Temporal variation of seismic attenuation around the slow-slip events area in southwestern Ibaraki prefecture

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

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

[S09P-07] Earthquake swarm occurring in Noto Peninsula

*Akio Katsumata¹, Atsumoto Shima¹, Takahito Nishimiya² (1. Univ. of Toyama, 2. MRI, JMA)

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

[S09P-08] Temporal change in focal mechanisms of double seismic zone's events in the Pacific plate after the 2011 Tohoku EQ

*Shunsuke Kawabe¹, Toshinori Sato¹ (1. Chiba Univ.)

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

[S09P-09] Temporal variation in coda Q before and after the 2011 Tohoku earthquake around the Atotsugawa fault zone

*Maho Kawajiri¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S09P-10] Steep gradient zone of seismic velocity structure at the hypocenter of offshore Iwate events on March 18, 2022

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato², Shin Koshiya³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Faculty of Science and Engineering, Iwate University)

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

[S09P-11] Detection of low-frequency earthquakes at Mount Fuji and statistical analysis

*Kazuyoshi Z. Nanjo^{1,2,3}, Yohei Yukutake⁴, Takao Kumazawa³ (1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Univ. of Tokyo)

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

[S09P-12] Observation of shallow slow earthquake activity from December 2020 southeast off the Kii Peninsula using dense ocean bottom seismometer array.

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹ (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.)

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

[S09P-13] Slow Earthquakes in the Japan Trench

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Satoshi IDE², Takuya NISHIMURA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. School of Science, Univ. of Tokyo)

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

[S09P-14] Hypocenter distribution using S-net data during 2016 April – 2022 March

*Azusa NISHIZAWA¹, Masashi Mochizuki¹, Kenji Uehira¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-15] Dependence of earthquakes happen in the northern Osaka on depth

*Ryota Ono¹, Yoshihisa Iio² (1. Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09P-16] **Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay**

*Yannis PANAYOTOPOULOS¹, Shintaro Abe¹, Hisatsoshi Baba², Nagisa Nakao², Takahito Nishimiya³ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai University, 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

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

[S09P-17] Comprehensive extraction of tremor migrations in Nankai subduction zone, southwest Japan, and their characteristics

*Kodai SAGAE¹, Takahiko Uchide¹, Takanori Matsuzawa² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-18] Construction of the automatic hypocenter relocation system using the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko Shiomi¹, Makoto Matsubara¹, Shoji Sekiguchi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-19] Determination of the focal mechanism solution of swarm earthquakes in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S09P-20] **Detectability of very low frequency earthquakes in Nankai using F-net and DONET**

*Shunsuke TAKEMURA¹, Satoru BABA², Suguru YABE³, Yusuke YAMASHITA⁴, Katsuhiko SHIOMI⁵, Takanori MATSUZAWA⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-21] Spatiotemporal distribution of shallow very-low-frequency earthquakes between January and March 2022 detected by DONET2 seismic stations

*Yojiro Yamamoto¹, Shuichiro Yada¹, Keisuke Ariyoshi¹, Masaru Nakano¹, Takane Hori¹ (1. JAMSTEC)

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

[S09P-22] Centroid moment tensor inversion of earthquakes in the Japan Trench subduction zone using S-net ocean bottom seismometers

*Lina Yamaya¹, Hisahiko Kubo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Shunsuke Takemura² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S09P-23] Spatial distribution of moment magnitude anomalies in subduction zones: Comparison with seismic activity in the Kanto region

*Kazuo YOSHIMOTO¹, Takaya HASEGAWA¹ (1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University)

Poster session (3rd Day) | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-1 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S21P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-01] Automatic detection of S-wave later phase by 1D convolutional neural network*Yuta Amezawa¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-02] Event catalog development for AEs induced by hydraulic fracturing experiments in the laboratory*Makoto NAOI¹, Youqing Chen¹, Yutaro Arima² (1. Kyoto University, 2. JOGMEC)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-03] Towards Constructing a High-precision Phase picker for Volcanic Earthquakes Using Deep Learning: Performance Evaluation of Various Models*Yuji Nakamura¹, Ahyi Kim¹, Hiroki Uematsu¹, Yohei Yukutake², Yuki Abe³ (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-04] Estimation of volcanic earthquakes at Kirishima volcano using machine learning*Yohei YUKUTAKE¹, Ahyi KIM² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Yokohama City University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-05] Development of Seismic Wave Detection System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network*Yukino Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-06] Toward Efficient Pore Pressure Estimation along Plate Boundary Faults Using Deep Learning*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-07] Fault Plane Estimation from 3D Hypocenter Distribution by Two-step Clustering Considering Local Shape*Yoshihiro Sato¹, Haruo Horikawa¹, Takahiko Uchide¹, *Satoru Fukayama¹, Jun Ogata¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-08] Estimation of wave propagation direction from seismic waveforms using a deep learning model*Yuki KODERA¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-09] Towards Real-Time Seismic Intensity Prediction Using Deep Learning: Developing a Prediction Model with Relatively Little Observed Data*Momoko Nakamura¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu¹, Yukino Yazaki¹, Ahyi Kim¹, Hisahiko Kubo² (1. Yokohama City University, 2. NIED)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-10] Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning*Takashi FURUMURA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-11] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning —Part3 Simulation of response spectrum of crustal earthquake in Eastern Japan—

*TIANZENG WEI¹, KAI TERAZONO¹, HIDENORI KAWABE¹ (1. Osaka University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-12] Study on Prediction of Pseudo-velocity Response Spectrum Using Machine Learning -Part2: Response Spectrum Simulation of the 2016 Kumamoto Earthquake-

*Kai Terazono¹, Tianzeng Wei¹, Hidenori Kawabe¹ (1. Osaka University)

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities : S24.Committee activities for society

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-8

[S24] S24

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

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

Poster session (3rd Day) | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S22P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-01] Estimation of early postseismic slip following the 2003 Tokachi-oki earthquake by assimilating high-rate GNSS data

*Masayuki KANO¹, Yuji Itoh^{2,3} (1. Tohoku University, 2. ISTERre, Université Grenoble Alpes, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-02] Evaluation for hypocenter estimation error in the Kuril trench using seismic data

*Masayoshi ICHIYANAGI¹, Hiroaki Takahashi¹, Ryosuke Azuma² (1. ISV, Hokkaido University, 2. AOB, Tohoku University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-03] Three-dimensional Vs structure in the offshore forearc region along the Japan and Kuril trenches estimated by ambient noise tomography

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-04] Difference of tsunami sources by great earthquakes that occurred in the southern Kuril trench around the 17th and 13th centuries

*Kei IOKI¹, Yuki SAWAI¹, Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-05] A preliminary study on the western source area of the tsunami that struck the Pacific coast of Hokkaido, Japan, on April 25th, 1843

*Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology (IEVG), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-06] Nonlinear and linearized propagation characteristics of the 2003 Tokachi-Oki tsunami

*Yusuke YAMANAKA¹, Yuichiro TANIOKA¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Poster session (3rd Day) | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC | ROOM P-3 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S23P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-01] Minimum information dependence modeling for analyzing the dependence in mixed-domain data: Application to the dependence analysis of focal mechanisms and depths

*Keisuke YANO¹, Tomonari Sei² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-02] Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault

*Shin-ichi ITO¹, Masayuki KANO², Hiromichi NAGAO¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tohoku University)

Poster session (3rd Day) | Regular session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 12:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-1 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S09P] AM-P

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

[S09P-01] Analysis of seismic activity (Oct 2017-Sep 2021) beneath the Hakusan volcano.

*Masato Fukata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S09P-02] Stress change on inland faults in Southwestern Japan due to the 1944 Tonankai and the 1946 Nankai earthquakes

*Akinori Hashima¹, Takane Hori¹, Takeshi Iinuma¹, Souta Murakami², Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S09P-03] Tidal correlation of deep tectonic tremors rising during long-term slow slips in Bungo Channel

*Fuyuki HIROSE¹, Akio KOBAYASHI¹, Kenji MAEDA¹ (1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research)

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

[S09P-04] Numbers and duration of aftershocks on inland earthquakes in Japan

*Taichi Honda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S09P-05] Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes after 2021 around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Toshihiro IGARASHI¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S09P-06] Temporal variation of seismic attenuation around the slow-slip events area in southwestern Ibaraki prefecture

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

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

[S09P-07] Earthquake swarm occurring in Noto Peninsula

*Akio Katsumata¹, Atsumoto Shima¹, Takahito Nishimiya² (1. Univ. of Toyama, 2. MRI, JMA)

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

[S09P-08] Temporal change in focal mechanisms of double seismic zone's events in the Pacific plate after the 2011 Tohoku EQ

*Shunsuke Kawabe¹, Toshinori Sato¹ (1. Chiba Univ.)

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

[S09P-09] Temporal variation in coda Q before and after the 2011 Tohoku earthquake around the Atotsugawa fault zone

*Maho Kawajiri¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S09P-10] Steep gradient zone of seismic velocity structure at the hypocenter of offshore Iwate events on March 18, 2022

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato², Shin Koshiya³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Faculty of Science and Engineering, Iwate University)

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

[S09P-11] Detection of low-frequency earthquakes at Mount Fuji and statistical analysis

*Kazuyoshi Z. Nanjo^{1,2,3}, Yohei Yukutake⁴, Takao Kumazawa³ (1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Univ. of Tokyo)

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

[S09P-12] Observation of shallow slow earthquake activity from December 2020 southeast off the Kii Peninsula using dense ocean bottom seismometer array.

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹ (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.)

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

[S09P-13] Slow Earthquakes in the Japan Trench

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Satoshi IDE², Takuya NISHIMURA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. School of Science, Univ. of Tokyo)

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

[S09P-14] Hypocenter distribution using S-net data during 2016 April – 2022 March

*Azusa NISHIZAWA¹, Masashi Mochizuki¹, Kenji Uehira¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-15] Dependence of earthquakes happen in the northern Osaka on depth

*Ryota Ono¹, Yoshihisa Iio² (1. Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09P-16] **Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay**

*Yannis PANAYOTOPOULOS¹, Shintaro Abe¹, Hisatsoshi Baba², Nagisa Nakao², Takahito Nishimiya³ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai University, 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

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

[S09P-17] Comprehensive extraction of tremor migrations in Nankai subduction zone, southwest Japan, and their characteristics

*Kodai SAGAE¹, Takahiko Uchide¹, Takanori Matsuzawa² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-18] Construction of the automatic hypocenter relocation system using the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko Shiomi¹, Makoto Matsubara¹, Shoji Sekiguchi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-19] Determination of the focal mechanism solution of swarm earthquakes in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano¹, Yoshihiro Hiramatsu¹ (1. Kanazawa University)

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

[S09P-20] **Detectability of very low frequency earthquakes in Nankai using F-net and DONET**

*Shunsuke TAKEMURA¹, Satoru BABA², Suguru YABE³, Yusuke YAMASHITA⁴, Katsuhiko SHIOMI⁵, Takanori MATSUZAWA⁵ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S09P-21] Spatiotemporal distribution of shallow very-low-frequency earthquakes between January and March 2022 detected by DONET2 seismic stations

*Yojiro Yamamoto¹, Shuichiro Yada¹, Keisuke Ariyoshi¹, Masaru Nakano¹, Takane Hori¹ (1. JAMSTEC)

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

[S09P-22] Centroid moment tensor inversion of earthquakes in the Japan Trench subduction zone using S-net ocean bottom seismometers

*Lina Yamaya¹, Hisahiko Kubo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Shunsuke Takemura² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S09P-23] Spatial distribution of moment magnitude anomalies in subduction zones: Comparison with seismic activity in the Kanto region

*Kazuo YOSHIMOTO¹, Takaya HASEGAWA¹ (1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University)

Analysis of seismic activity (Oct 2017-Sep 2021) beneath the Hakusan volcano.

*Masato Fukata¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University

1) はじめに

白山火山は石川-岐阜両県境に位置する活火山である。東田ほか(1990)や高橋ほか(2003)など白山火山直下の地震活動に焦点を当てた研究では、解析期間における地震活動は山体直下の浅い領域に集中し、メカニズム解は広域応力場に調和的であった。また、2005年には4回の群発地震活動が認められ、各群発地震の発生領域は異なり、白山火山直下の地震としては最大のM4.5の地震が発生した(平松・和田, 2008)。近年、白山火山は地震数やベニオフ歪の増加傾向から地震活動が活発化している可能性があり、最後の噴火から350年以上が経過しているため、将来火山活動が再開する可能性がある。本研究では、白山火山直下で発生した地震を解析し、震源の空間分布や震源メカニズム解から地震活動について考察を行う。

2) データと手法

使用するデータは防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)と気象庁、京都大学防災研究所の観測点で得られた連続地震波形である。気象庁一元化震源リストから2017年から2021年の間で地震が多発する期間を選び、気象庁の連続地震波形記録から地震を目視で確認し、WINシステム[ト部・東田, 1992]により震源決定を行う。また、震源位置の相対精度を高めるため、観測点補正值とDouble Difference法[Waldhauer and Ellsworth, 2000]を用いて震源再決定を行う。その後、P波の押し引きが多数の観測点で確認できる比較的マグニチュードの大きい地震(M1.5以上)においてWINシステムを用いて初動の押し引きの検測を行い、Maeda(1992)のプログラムを用いて震源メカニズムを決定し、スコア0.9以上で決定された震源メカニズム解を使用する。

3) 結果と考察

震源決定は7期間(2017/10/10~11, 2017/11/29, 2019/01/12, 2019/03/06, 2020/03/28, 2020/06/19~20, 2021/09/21)で行った。震源決定の結果、気象庁一元化震源リストに比べ、約4倍の震源を決定することが出来た。震源分布は震源決定の際に用いたP波速度構造モデル[竹内, 1979]により気象庁一元化震源リストに比べ浅く決定された。観測点補正值とDouble Difference法を用いた各地震群の震源は2005年の群発地震の発生領域上に分布していた。また、震源メカニズム解の推定を行った結果、多くの地震は西北西-東南東方向に主圧力軸を持つ横ずれ断層型や逆断層型を示していた。防災科学技術研究所の広帯域地震観測網(F-net)により推定された周辺地域のメカニズム解と同様のメカニズム解を示したため、多くの地震はこの地域の広域応力場を反映していると考えられる。一部、正断層型のメカニズム解を示したが、過去に同様の領域で発生した地震も同様のメカニズム解を示している事からこの領域において地域性がある可能性がある。多くの地震群で震源領域の長径方向と震源メカニズム解の節面の方向が一致している事から震源分布領域に断層面があると考えられる。メカニズム解は広域応力場と整合的であったが、クーロン破壊応力変化(ΔCFF)から山頂直下の深さ5-10km付近に球状圧力源がある場合やダイクが存在する場合、多くの地震発生領域で正の ΔCFF 値が見られたため、地震活動の一時的な増加の要因として地下の圧力源やダイクの存在を否定するものではないと考えられる。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所、気象庁、京都大学防災研究所の各観測点の地震波形データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

Stress change on inland faults in Southwestern Japan due to the 1944 Tonankai and the 1946 Nankai earthquakes

*Akinori Hashima¹, Takane Hori¹, Takeshi Iinuma¹, Souta Murakami², Tsuyoshi Ichimura², Kohei Fujita²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

西南日本弧ではフィリピン海プレートが南海トラフで沈み込み、100-200年の再来間隔で巨大地震が発生している (Ando, 1975)。歴史地震記録によると、プレート境界の巨大地震発生50年前から10年後にかけて西南日本において内陸地震が活発化することが知られている (Utsu, 1974)。このような内陸地震発生の定量的な評価のためには、巨大地震サイクルによる内陸の震源断層への応力変化を見積もる必要がある。

巨大地震前の内陸地震発生に関連する応力蓄積は、地震前の固着 (すべり速度欠損) パターンから推定することができる。一方、巨大地震の発生後の応力変化は、巨大地震の破壊過程とその粘弾性効果に強く依存する。そのため、ありうる地震破壊のシナリオを事前に想定しておき、そのシナリオにおける応力蓄積パターンを見積もっておくことが必要である。

南海トラフ下の巨大地震破壊は様々な発生パターンを示している。直近の巨大地震は1944年 (M7.9 東南海) と1946年 (M8.0 南海) であり、東と西のセグメントが2年間隔で破壊する、いわゆる「半割れ」が発生したのちに比較的短い時間をおいて残りの部分でのすべりが起こることで、いわゆる「全割れ」とほぼ同等の応力変化が最終的にもたらされるパターンであった。これらの巨大地震の後、内陸域においては、1945年三河地震や1948年福井地震といったM7級の被害地震が発生した。特に1945年三河地震は、1944年の半割れの直後、1946年の残りの破壊の前に発生しており、このような破壊プロセスによる応力変化と内陸の地震発生の関連を調べるのが重要であることを示している。

2011年東北沖地震の陸域と海域を合わせた地殻変動観測により、M9級地震後の余効変動によるアセノスフェアの粘弾性緩和の影響が示されてきた (Sun et al., 2014; Watanabe et al., 2014)。有限要素法による粘弾性解析により、M9地震後の特徴的な余効変動パターンを再現するために、粘性構造、特に海陸の粘性率比や沈み込むスラブ下部の低粘性層を考慮することの必要性が示されている (e.g. Sun et al., 2014; Freed et al., 2017)。近年の数値解析手法の発展により、高詳細な地表地形や内部構造を取り入れた粘弾性解析も可能になってきている (Ichimura et al., 2016)。

従って、本研究では、1944年–1946年の破壊過程によって西南日本の各断層に生じた応力変化を見積もる。断層形状モデルは地震調査研究推進本部 (2009) を用い、応力変化の計算には、地下の粘性緩和の影響を考慮できる高詳細有限要素法 (Ichimura et al., 2016; Hori et al., 2021) を用いる。入力値として与える1944年東南海、1946年南海地震のすべり分布は、様々なモデルが提案されているが、紀伊半島南東岸に平行に分布する東南海地震のすべり分布、土佐湾から海溝にかけて分布する南海地震のすべり分布、と共通する特徴が認められる (e.g. Ichinose et al., 2001; Baba et al., 2005; Sagiya & Thatcher, 1999; Sherrill & Johnson, 2021)。そこで、本研究では、これら過去研究のすべり分布を5つの基本すべり領域の重ね合わせとして表現する。過去研究の様々なすべりパターンを考慮し、内陸地震の断層におけるクーロン応力変化 (ΔCFS) を計算した。

大局的に、1944年東南海地震による ΔCFS は中部～近畿地方の震源域周辺の断層において正の値をとり、その周りの断層で負の値をとる。引き続き1946年南海地震により、中央構造線および中国～近畿地方の断層の断層が正值となる。両地震の影響域の中間にある断層では、1946年南海地震およびその粘弾性緩和の影響により、 ΔCFS の符号が変化するものが見られた。このような断層では、東南海・南海の地震を通して、一旦静穏化したのちに活発化する、またはその逆といったように、大きく変化する。

Tidal correlation of deep tectonic tremors rising during long-term slow slips in Bungo Channel

*Fuyuki HIROSE¹, Akio KOBAYASHI¹, Kenji MAEDA¹

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research

1. はじめに

豊後水道では、巨大地震発生層の深部縁において継続時間半年～1年程度、Mw 6–7程度の長期的スロースリップイベント（LSSE）が数年間隔で繰り返し、それに同期して数Hzの卓越周波数を持つ深部微動が活発化している。微動は潮汐せん断応力（または摩擦係数が非常に小さなクーロン応力）との高い相関関係を示し〔例えば、Thomas et al., 2009, Nature; Houston, 2015, NatureGeo〕、位相（特に半日周）〔例えば、Ide, 2010, Nature, 2012, JGR; Katakami et al., 2017, GRL〕や振幅〔例えば、Lambert et al., 2009, JGR; Houston, 2015; Ide et al., 2015, GRL〕との関連が指摘されている。数日間のゆっくりすべり現象中の微動の潮汐応答についての調査は多いが、年オーダーの時間変化に着目した研究は知らない。そこで本研究では、豊後水道における深部微動と潮汐との相関の長期的な時間変化を調査した。

2. データ

本研究では、エンベロープ相関法で検出された深部微動の防災科研カタログ〔Maeda and Obara, 2009, JGR; Obara et al., 2010, GRL〕を用いた。解析に用いたデータは、2001年1月1日～2021年4月30日に豊後水道LSSEに近接する領域Ba（Obara et al. [2010]による領域分けに準拠）内で発生した深部微動1903個である。微動に対する理論潮汐応答を計算する際には、位置・発生時刻・断層パラメータの情報が必要となる。微動の位置については、震央はカタログ情報をそのまま使い、深さはプレート境界〔Hirose et al., 2008, JGR〕で発生していると仮定して設定した。発生時刻については、カタログ値をそのまま用いたが、時間分解能は1時間であるため、正時に発生したと仮定した。このことは、本質的にデクラスタされたデータセットを用いていることになる。断層パラメータについては、プレート形状とプレート収束方向〔DeMets et al., 2010, GJI〕を考慮してイベント毎に設定した。

解析期間中に豊後水道のLSSEは複数回発生している。本研究では、LSSEの開始及び終了の時期を、LSSEの中心（フィリピン海プレート上面の深さ25 kmコンターと東経132.4度線の交点）においてKobayashi [2017, EPSJ]による客観解析で相関係数0.8以上となる期間と定義した。その結果、LSSEは解析期間中に全部で4回発生している。

3. 解析手法

理論潮汐応力は、TidalStrain.2〔Hirose et al., 2019, JGR;

<https://mri-2.mri-jma.go.jp/owncloud/s/tjqx7HfK8bD3KQf>〕を用いて計算した。微動の各震源において仮定した断層面上における潮汐せん断応力($\Delta \tau$)と潮汐法線応力($\Delta \sigma$)について調査した。せん断応力については断層すべりを促進する方向を正、抑制する方向を負、法線応力については拡張を正、圧縮を負とした。

微動の潮汐感度は、Houston [2015]に倣って、以下の式の α 値で評価した。

$$N_{\text{obs}} / N_{\text{exp}} = e^{\alpha(S)}$$

ここで、 S は応力binの中間の値、 N_{obs} は潮汐力が応力bin内の値を取る期間に観測された微動数、 N_{exp} は同期間に潮汐と無相関に期待される微動数である。 α が大きいほど潮汐感度が大きい。

4. 結果

先行研究と同様に、潮汐せん断応力($\Delta \tau$)による潮汐感度が高く、潮汐応力値が大きいほど微動が発生する傾向を示した。潮汐法線応力($\Delta \sigma$)は微動のトリガーにはほとんど効いていなかった。LSSE期間中の微動の潮汐感度は、LSSE期間以外の期間（背景（BG）期間）のそれよりも概ね高かった（例外としてBGの4期目はやや高め）。

ただし、BG期間の潮汐感度は低いとは言え、帰無仮説「微動が潮汐とは無関係に発生」はKS検定により有意水準1%で棄却される。つまり生来潮汐せん断応力は微動のトリガー作用に関与しているということである。そして本解析により、LSSE期間にはそのトリガー効果が増幅されていることがわかった。潮汐は広域に同時に数時間にわたって影響を及ぼすため、微動域は勿論のこと、すべり速度が増加したLSSEによって隣接した微動域に与えるせん断応力が増加し、微動の潮汐感度も高くなった可能性がある。

Numbers and duration of aftershocks on inland earthquakes in Japan

*Taichi Honda¹, Takuji Yamada¹

1. Ibaraki University

1. はじめに

余震とは、本震後に本震の断層およびその近傍で起こる本震よりも小さな地震である。日本全国について地震数の時間変化をグラフ化すると、余震数と本震の規模には単純な相関がない印象を受ける。そこで本研究では、日本内陸部で2003年から2018年の間に発生したマグニチュード(M)5.5以上の13地震について、余震数と余震継続時間を解析し、本震の規模との関係を議論する。

2. 解析手法

余震の解析には、まず時空間的な余震の定義が必要である。空間的定義として、深さ0-30 km、本震の震央から距離R kmの円柱（余震域）を想定し、この余震域内に震源を持つ地震を余震の候補とした。このとき、Rは地震のスケーリング則を考慮し、とした。この余震の候補のうち、次の時間的定義を満たす地震を最終的に余震とした。時間的定義は2通りの手法を用いた。手法1として、まず、余震域内での本震前180日間の地震活動を「定常的な活動」と定義し、その地震数を集計した。そして、本震後t日からt+180日までの地震数を集計し、その地震数が「定常的な活動」の地震数以下になるtの値（整数値）を余震の継続時間とした。手法2として、余震活動が大森公式に従うと仮定した解析をおこなった。本震直後の余震数が発散しない改良大森公式は、次の(1)式で表される。

$$n(t) = K (t+c)^{-p} \quad (1)$$

ここで、cは通常1日以下の小さい値、pは1に近い値を取ることが知られている。c=0、p=1と仮定すると、(1)式は大森公式となり、単位時間あたりの余震数が経過時間tに反比例することが分かる。ここで、c=0、p=1を代入した(1)式の両辺を時間tで積分すると、次の(2)式を得る。

$$\int n(t) dt = K \log t \quad (2)$$

すなわち、左辺の積算余震数は、log tに対して傾きKの直線となり、余震が終了すると、この直線から外れるはずである。手法2では、この直線から外れるtの値を余震の継続時間とした。なお、解析対象地震の規模については、規模別頻度分布を作成して検討し、M2.0以上とした。

3. 結果および考察

「1. はじめに」で述べた当初の研究の契機とは異なり、解析の結果、日本の内陸地震では本震の規模と余震数に相関が見られることがわかった（図1a）。これは、本震直後の余震活動の活発さと余震の継続時間が逆走間になることで、結果として余震数と余震継続時間の相関関係が成り立っている可能性が考えられる。また、図1の回帰直線からのずれは、それぞれの地震およびその発生地域の特性が表れているのかもしれない。次に、本震の規模と余震の継続時間の関係には、2種類の異なる解析手法の結果の両者に、緩やかな正の相関が見られた（図1b,c）。これは、余震の継続時間には本震の規模以外の要素が関わっていることが考えられる。本震が発生しなければ余震は発生しないことから、今後、各地震の破壊の複雑さと余震活動の相関を考察することにより、これらの原因について検討を進めたい。

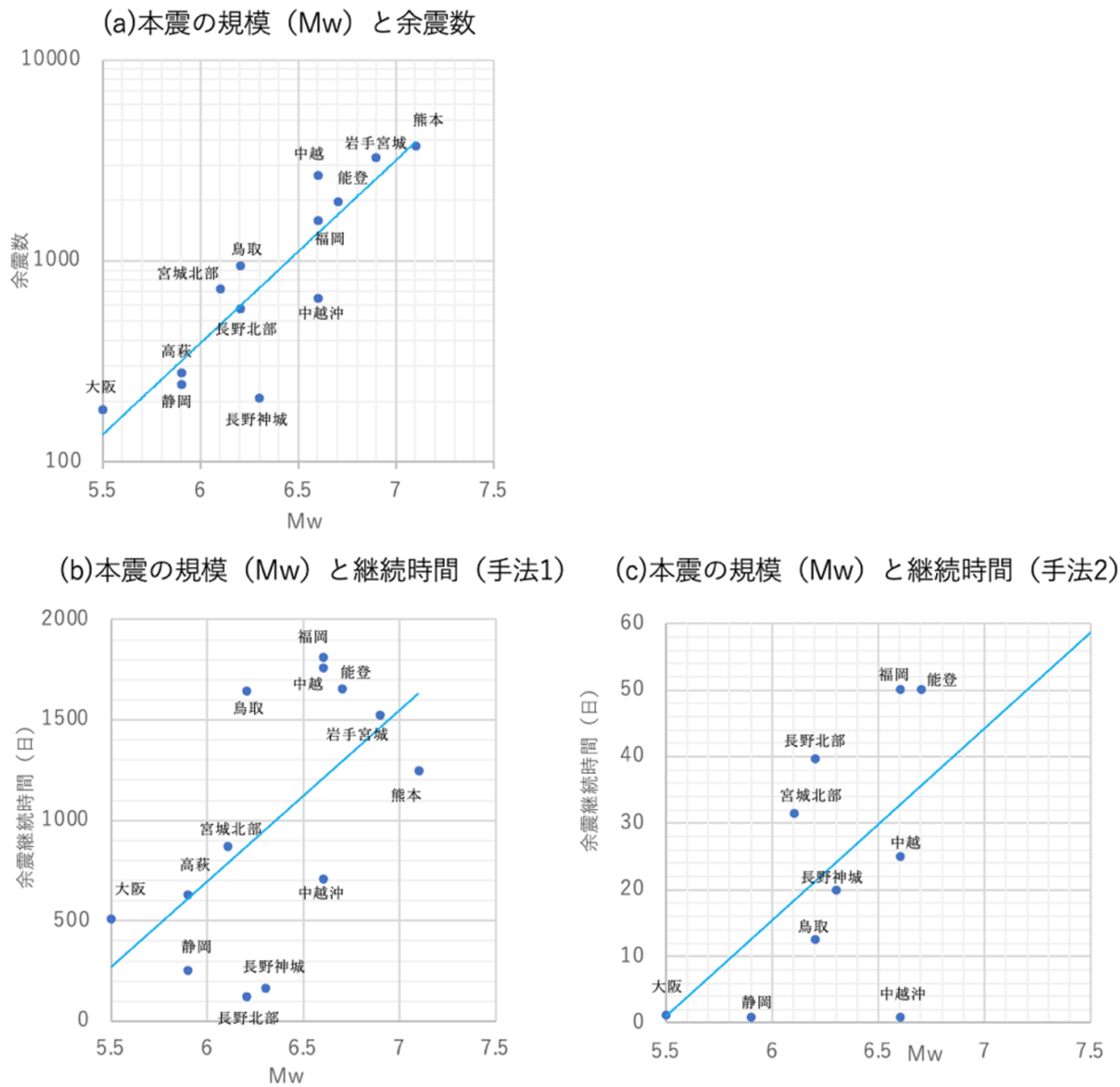


図 1.
(a)余震数と本震の規模の関係
(b)余震数と余震継続時間の関係手法 1 および(c)手法2
水色直線は、最小二乗法により求めた回帰直線を表す。

Inter-plate aseismic slip associated with large earthquakes after 2021 around the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Toshihiro IGARASHI¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2021年から2022年にかけて、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺では、M6からM7クラスのプレート間地震およびスラブ内地震が複数発生した。これらのうちの6つの地震は、宮城県沖から福島県沖にかけて比較的狭い範囲に集中している。そこで本研究では、ほぼ同じ場所で繰り返し発生している小繰り返し地震活動をを用いて、これらの地震によって生じたプレート間非地震性すべりの時空間変化を調査した。

小繰り返し地震は、日本列島に展開されている地震観測網で得られた地震波形の相互相関係数とS-P到達時刻差を基に抽出した。本研究では、既に報告している2019年までに発生した小繰り返し地震カタログに、2022年3月16日のM7.4福島県沖地震発生直後まで解析を進めた結果を加えて使用した。小繰り返し地震の再来間隔は、大規模な非地震性すべりが生じていない時期には数年程度となる。そのため小規模で短期的なすべり速度変化には応答しない可能性がある。そこで本解析では、繰り返し地震に隣接する地震活動が同一の断層面で発生し、その活動度の変化がすべり速度の時間変化と対応すると仮定して揺らぎを与え、短期間の時空間変化を推定した。

その結果、2021年以降に発生したいずれの大地震発生後においてもプレート間非地震性すべりの加速が見られた。特に、宮城・福島県沖で見られたすべりの時空間変化は、プレート内地震とプレート間地震の発生が、プレート間の非地震性すべりを介して相互に作用したことを示唆していた。まず、2021年2月の福島県沖スラブ内地震の前には、その東側でプレート間非地震すべりがわずかながら生じていた。2月の地震後、震源の南西側ですべりが加速し、その後、北側ですべり速度が増加した。2021年3月の宮城県沖プレート間地震までには、その震源付近まで広がった。3月の地震発生後、5月1日の宮城県沖プレート間地震の震源域を含む地域ですべりが加速した。その後、すべり域はさらに南側に広がり、5月14日の福島県沖プレート間地震の震源付近まで到達した。5月14日の地震後に生じた非地震性すべりは震源域の東側に局在しており、その西側の2022年3月にその西側で発生したスラブ内地震の震央側には広がらなかった。2022年3月のスラブ内地震発生後にはその震源域周辺にプレート間非地震性すべりが広がった。

このように、非地震性すべり域は、次に発生する大地震の震源まで広がっていく傾向が見られた。プレート間のすべりによる応力増加がスラブ内のダウンディップコンプレッション型地震の発生を増加させることは既に指摘されている。本解析の結果は、スラブ内大地震の発生によりプレート間の応力が増加し、非地震性すべりが生じ、また、プレート間地震が非地震性すべりの伝播によって誘発された可能性を示唆している。宮城・福島県沖地域は、プレート境界型地震とスラブ内ダウンディップコンプレッション型地震の両方が多数発生している。そのため、相互作用の影響が顕著に表れたのかもしれない。

2011年東北沖地震後には、その震源域周辺の広範囲で余効すべりが発生している。その積算すべり量は震源の西側に位置する宮城県沖北部で最も大きい。すべり速度は時間とともに減少する傾向は見られるものの、本震発生後11年以上経過した現在においても、プレート間の相対運動よりも速い状態が続いている。2021年の大地震発生後には一時的に再加速した可能性がある。一方、2021年以降に大地震が発生した宮城県沖南部から福島県沖を含むその他の地域では、加速したすべりは数年程度でほぼ収束しており、近年のすべり速度は、相対プレート運動速度よりも小さかった。巨大地震のすべり域に隣接する地域では、次の地震発生に向けた応力蓄積が起きている可能性がある。

今回推定された大地震発生後の非地震性すべりはいずれも短期間で収束しており、その積算すべり量は5-10 cm程度にとどまる。このすべり量は、繰り返し地震で用いられているスケーリング則においてM2.2の地震の再来に伴うすべり量にすぎない。そのため、小繰り返し地震が短期間で再来することは期待できない。微小地震活動と組み合わせた解析が短期的、局所的なすべりの変化を調査する際には重要となるだろう。地震活動解析から非地震性すべりの時空間変化に関する情報を得ることは、将来発生する大地震の発生可能性を推定する手助けとなるかもしれない。

Temporal variation of seismic attenuation around the slow-slip events area in southwestern Ibaraki prefecture

*Yosuke Ito¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

我々は、スロースリップ発生域周辺における地震波減衰構造及び地震活動の時間変化を調べることで、スロースリップの発生過程を考察している。茨城県南西部に沈み込むフィリピン海プレートの上部境界面では、スロースリップが深さ約50km付近で周期的に発生している。Nakajima and Uchida(2018)は、茨城県南西部で発生する繰り返し地震の活動から推定したプレート境界面の滑り速度と、その直上におけるP波の減衰構造の時間相関を調べ、1年周期のスロースリップの発生がプレート境界から上盤大陸プレートへの排水を引き起こすモデルを提案した。一方、Warren-smith et al.(2019)やKita et al.(2021)は、それぞれニュージーランドのヒ克蘭ギ沈み込み帯北部と西南日本の紀伊半島沖で発生するスラブ内地震活動を解析することで、スロースリップに先行して、沈み込むプレート内上部の間隙水圧が上昇していると考察した。本研究では、茨城県南西部において上盤プレートとスラブ内の地震活動と地震波減衰構造を調べることで、スロースリップ発生前後における水の挙動を定量的に考察し、より理解を深めることを目的としている。本研究では、次の2つの解析をおこなった。1つ目の解析はNakajima and Uchida (2018)では解析されていない上盤プレート内の Q_s^{-1} の推定、及び Q_p^{-1} と Q_s^{-1} の時間変化の定量的な比較である。二点目はスロースリップ発生域直下に位置する沈み込むフィリピン海スラブ内における地震波減衰構造の時間変化である。これらの解析は、スロースリップを引き起こす原因となりうる水の移動を理解する重要な手がかりとなる。本研究では、2009年から2021年の間に発生した349個の地震から、上盤-プレート境界地震の地震ペアと、プレート境界-スラブ内地震の地震ペアを使用し、スペクトル比を解析することで、上盤内の Q_p^{-1} 、 Q_s^{-1} とスラブ内の Q_p^{-1} を推定した（詳しい手法はNakajima and Uchida, 2018を参照）。また、それぞれのコーナー周波数は、上盤地震とプレート境界地震についてはスペクトル比法で推定したものを使用し、スラブ内地震については応力降下量（100MPa）を仮定して理論的に求めたものを使用した。解析に用いた地震波形はMeSO-netの8観測点において200Hzサンプリングで記録されたものである。周波数帯は20-45Hzを解析の対象とした。震源の情報は、気象庁1元化震源カタログと、Igarashi(2020)の繰り返し地震カタログから使用した。上記の解析から、3つの主要な結果を得た。1. Nakajima and Uchida(2018)で提案された約1年周期のスロースリップによる上盤プレートへの排水は、少なくとも2019年まで続いている 2. 上盤プレート内では Q_s^{-1} も Q_p^{-1} と同様な時間変化を示したが、 Q_p^{-1} よりも小さい値を示した。この結果は、水に起因する地震波の減衰メカニズムの理解につながる可能性がある。 3. スロースリップ発生域直下のスラブ内の Q_p^{-1} は時間変化し、スロースリップに先行して大きくなる。スロースリップの発生の前に、脱水反応によりスラブ内に水が蓄積される過程を示している可能性がある。

Earthquake swarm occurring in Noto Peninsula

*Akio Katsumata¹, Atsumoto Shima¹, Takahito Nishimiya²

1. Univ. of Toyama, 2. MRI, JMA

(1)はじめに

能登半島の北部にある石川県珠洲市では、2018年6月頃から現在まで、群発地震が発生している。群発地震の震源の位置を地図上にプロットすると、4つの地震活動が活発な領域が認められる(図)。本発表では、この地震の発生時系列の特徴や深さ分布などについて報告する。

(2)方法

本研究を行う上で、一元化震源データを用いた。地震活動が活発な4つの領域の地震群の位置の精度を高めるために、DD法を用いて震源の再計算を行った。震源決定で用いたDD法の計算には、アメリカ地質調査所(USGS)が公開しているHypoDDプログラムを使用した。震源位置の計算に用いた速度構造データには、1次元速度構造と勝間田・西宮(2022)が求めた3次元速度構造の2つを使用した。

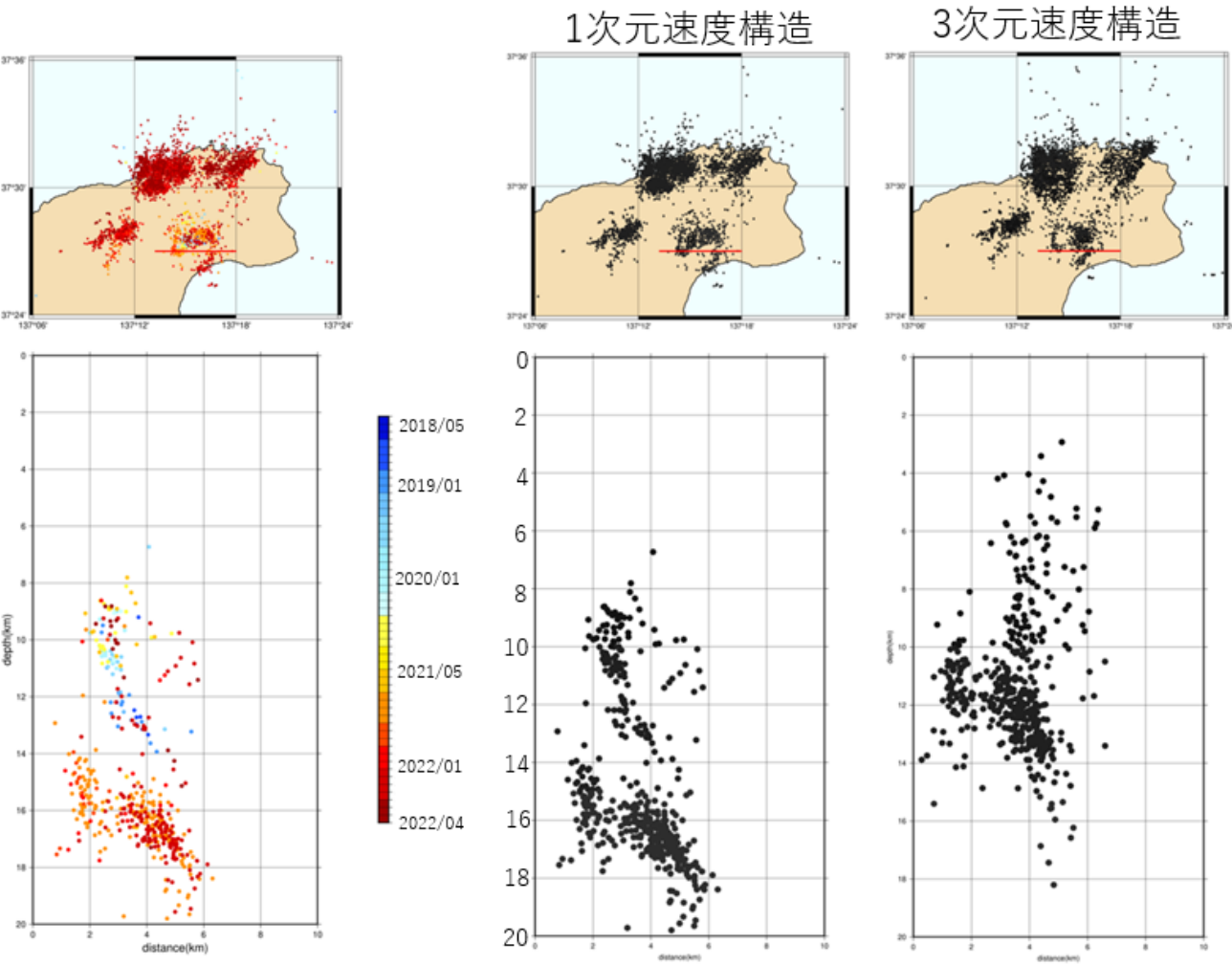
(3)結果

4つの地震群の名称を平松(2022)を参考として、東クラスター、北クラスター、南クラスター、西クラスターとする。まず、地震活動の推移を調べるために、時系列図を作成すると、2018、19年に起きた地震は、ほとんど南クラスターで発生している。2021年2月頃から西クラスターで地震が起こり始め、2021年5月には北クラスター、6月には東クラスターで地震が発生し始めた。それ以降では、北、東の2つのクラスターで活発に地震が発生している。次に、クラスターごとに震源断面図を作成し、時間の推移と深さの関係を調べた。南クラスターに注目すると、2018、19年では深さ9~14km、2020年は8~11km、2021年1~7月は13~19km、それ以降は9~20kmと、時間と共に地震の発生場所が変わっている。他のクラスターでは、このような顕著な差異は見られないが、時期により活動場所が違う。

上記の深さは、一元化速度構造モデルを用い、HypoDDで震源計算したデータである。速度構造モデルを3次元速度構造モデルを用いて計算すると、全体的に深さが2~4km浅くなる。具体的には、東、西クラスターで2km、北クラスターで2~3km、南クラスターで4km浅くなる。水平位置も速度構造によって違いは見られるものの、顕著なものではない。

謝辞

本調査では、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、国立研究開発法人海洋研究開発機構及び気象庁の地震データと、それを気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した一元化震源を使用しました。



Temporal change in focal mechanisms of double seismic zone' s events in the Pacific plate after the 2011 Tohoku EQ

*Shunsuke Kawabe¹, Toshinori Sato¹

1. Chiba Univ.

1. はじめに

日本付近で沈み込んでいる太平洋プレート内には、二重深発地震面が存在していることが知られている。佐藤・他 (JpGU2018) や陳・他 (JpGU2019) では、房総沖の太平洋プレート内の二重深発地震について、陸上観測と海底地震計観測のデータを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震前後での発震機構を調べた。東北地震後の約1年間で約4カ月ごとに分けて発震機構の変化を調べて時間変化をみたところ、上面では東北地震直後では圧縮 (down-dip compression) と引張 (down-dip extension) が拮抗し、その後引張が卓越していた。下面では東北地震直後は圧縮が卓越していたが、その後引張が優位になっていたことが報告された。本研究では、東北直下の二重深発地震の発震機構が、東北地震前後でどう時間変化したのかについて報告する。

2. データと解析方法

使用データはHi-netのイベントデータと、F-netのCMT解である。対象の地震は、東北地震で大きくすべった範囲の西側である北緯37.5°~39.5°、東経139°~142°、深さ60 km以上、マグニチュード1.0以上とした。また対象の期間を2010年3月~2013年3月と、東北地震前後合計3年とした。対象の地震を取るためにTSEIS (鶴岡、1998) を用いた。

対象の地震のうちマグニチュード3.5以上かつF-netにCMT解がある地震はそのまま使用した。マグニチュード3.5以下、もしくは3.5以上だがF-netにCMT解がない地震は、Hi-netから波形データをダウンロードして、微小地震検測支援ソフトWINシステム (ト部、東田、1992) を用いて解析を行った。WINの検測作業によって得られたP波の押し引きをもとにFPFIT (Reasenber and Oppenheimer, 1985) を使用して発震機構解を求めた。

3. 結果

現在解析中ではあるが、東北地震前1年間では、上面は圧縮の地震が引張の地震に比べ約2倍多くみられた。これに対して下面では、圧縮の地震よりも引張の地震が多くみられた。これらは沈み込むプレートの unbendingによって説明ができる。

東北地震後では、上面は地震直後の4か月では、圧縮と引張が拮抗していた。地震後4~8か月では引張がかなり卓越していた。地震後8~12ヶ月では、圧縮の数が増えているが、まだ引張が卓越していた。地震後1~2年では引張に比べ圧縮が約2倍と、東北地震前1年と類似した結果となった。東北地震によってスラブ全体に圧縮の応力が加わったと考えられるにも関わらず、引張の地震が増えたことは興味深い結果といえる。

下面では地震直後の4か月では圧縮が卓越していた。地震後4~8か月では引張が卓越していた。地震後8~12ヶ月では圧縮と引張が拮抗し、この傾向は、地震後1~2年でも続いていた。この結果は東北地震によって圧縮の応力場になったというところまでは説明ができるが、その後引張が卓越したあとに圧縮と引張の地震が拮抗していることは興味深い。また、これらの結果は房総沖での結果と類似しており、東北だけの地域的なものではない可能性がある。

謝辞

本研究では、解析を行うにあたって、Hi-net、F-netのデータを国立研究開発法人防災科学技術研究所よりダウンロードさせて頂きました。また、東京大学地震学研究所のWINシステムと地震解析プログラムTSEISを使用させて頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

Temporal variation in coda Q before and after the 2011 Tohoku earthquake around the Atotsugawa fault zone

*Maho Kawajiri¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University

はじめに

内陸地震を発生させる応力蓄積過程の解明のために新潟から神戸にかけての歪集中帯(新潟－神戸歪集中帯)(Sagiya et al., 2000) が注目されている。Iio et al. (2002) は、高歪速度の成因として、下部地殻の低粘性率領域の存在によって歪速度が集中するweak zone model を提案した。Hiramatsu et al.(2013)はNKTZ中央部のcodaQ分布を調査し、低周波数帯のcodaQが下部地殻の変形速度の指標となり、codaQと地震の間に良い空間的相関がみられることから高歪速度帯の原因が地殻の脆性-延性遷移帯以下の高変形速度に起因する可能性を示唆している。列島規模の変形場の変化により歪集中帯北東部のcoda Qが変化するか否かを明らかにすることは、この地域の地殻内の高変形速度領域の存在の検証に繋がり、歪集中帯の成因を考える上で重要であると考えられる。Dojo and Hiramatsu (2019)はNKTZ北東部におけるcoda Q の時空間変化を調査し、2011年東北地方太平洋沖地震前後でcoda Qの空間分布や他パラメータとの相関に有意な時間的変動は見られないと報告した。これは、高い速度での持続的な延性変形の存在が、NKTZの内陸部の高歪速度帯を発生させる主な原因である可能性が高いことを示唆している。本研究では、NKTZ北東部と歪集中帯の成因が異なる可能性が指摘されているNKTZ中央部において2011年東北地方太平洋沖地震前後におけるcoda Qの時間変化を調査し、NKTZ中央部における歪集中帯の成因について議論を行う。

データと手法

2008年3月から2011年12月 (Period 1) と2012年1月から2015年12月 (Period 2)、2016年1月から2019年12月 (Period 3) の3つの期間のcoda Qの時間変化を調査した。解析には防災科学技術研究所のHi-net、気象庁、国立大学の観測点を使用する。震源が30 kmより浅く、M1.8よりも大きな地震を解析対象とする。震央から30 km以内の観測点の地震波形データに一次後方散乱モデル (Aki and Chouet, 1975) を適用し coda Qを求め、各観測点で平均をとり、coda Qの時間変化を求める。この際、局所的なイベントの影響を除去するため、デクラスター処理を行った。M3以上の地震をそれぞれ本震であると仮定し、本震からある期間、ある距離内で発生している地震を除去する。このとき、除去するイベントは本震発生から5日以内、距離については一定応力降下量 (3 MPa) の円形断層モデル (Brune, 1970) から推定される震源半径の2倍とした。この結果、Period 1-2間、Period 2-3間共にcoda Qの空間分布のパターンに系統的な変化は見られなかった。また、跡津川断層付近の15の観測点でそれぞれの期間におけるcoda Qの平均と標準偏差を求め、隣り合う2つの期間の変化量と比較した。

結果

この結果、coda Qの減少、増加といった変化パターンが混在しており、調査領域全体で系統的な変化は見られなかった。標準偏差の値を上回るような変動を示す観測点は少数であり、Period 1-2間と2-3間で変化量などに明瞭な相違は見られなかった。さらに、coda Qの時間変化の有意性を確認するためにwelchのt検定とbootstrap法による並べ替え検定を行った。本研究では変化の有意性を判定する閾値を0.01とした。この結果、Period 1-2間では有意な変化を示す観測点が1-2 Hzで4点、2-4 Hzで5点、4-8 Hzで5点、8-16 Hzで3点、16-32Hzで2点確認された。また、Period 2-3間では1-2 Hzで2点、2-4 Hzで4点、4-8 Hzで3点、8-16 Hzで3点、16-32 Hzで3点確認された。

考察とまとめ

今回見られたcoda Q値の変動は両解析期間における震源分布の相違のなど、局所的な要因によるものであると考えられる。また、東北地方太平洋沖地震を伴うPeriod 1-2間と大規模な地震イベントを伴わないPeriod

2-3間のcoda Qの変動に顕著な相違は見られなかった。これらの結果から、跡津川断層帯周辺のcoda Qの空間分布は東北地方太平洋沖地震によって有意な時間変化はしていないと考えられる。これはDojo and Hiramatsu (2019)で示されたNKTZ北東部における結果と整合的である。2011年東北地方太平洋沖地震前後におけるcoda Q値が跡津川断層帯周辺全域で系統的な有意な時間変化を示さなかったことは列島規模の変形場の変化により歪集中帯中央部のcoda Qが変化していないことを示し、Hiramatsu et al. (2013) で指摘された跡津川断層帯周辺の地殻の脆性-延性遷移帯以深での高変形速度が持続的に存在し、高歪速度帯を形成していることが考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり防災科学技術研究所、気象庁、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所地震予知研究センターより地震波形データを提供していただきました。震源データとして気象庁の一元化カタログを利用させていただきました。記して感謝いたします。

Steep gradient zone of seismic velocity structure at the hypocenter of offshore Iwate events on March 18, 2022

*Makoto MATSUBARA¹, Hiroshi Sato², Shin Koshiya³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, 3. Faculty of Science and Engineering, Iwate University

1. はじめに

2022年3月18日23時25分頃にM JMA5.6の地震が発生し、最大震度5強を観測した。防災科学技術研究所（防災科研）では陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）を運用し、高感度地震観測網（Hi-net）や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）等も含めて震源決定を行っている。本研究では、余震を含めた周辺の地震活動について三次元地震波速度構造を用いて再決定するとともに、地震波速度構造や重力異常、地磁気異常、反射法地震探査データなどと比較した。

2. データ・手法

防災科研MOWLASのうちのHi-netやS-netに加えて、気象庁、国立大学等のデータも含めて解析した三次元地震波速度構造や観測点補正值（Matsubara et al., 2019）を用いて2016年4月以降の約5年間の地震の震源を再決定した。

3. 結果と議論

Hi-netによるP波初動解および防災科研広帯域地震観測網（F-net）によるモーメントテンソル（MT）解はともに東北東-西南西圧縮、北北西-南南東伸長の横ずれ断層型を示す。2022年3月18日～4月3日の地震活動は西北西-東南東の節面に沿って発生しており、鉛直断面ではほぼ垂直に分布している。P波速度は北側の高速度域と南側の低速度域の境界で発生していることが分かる。

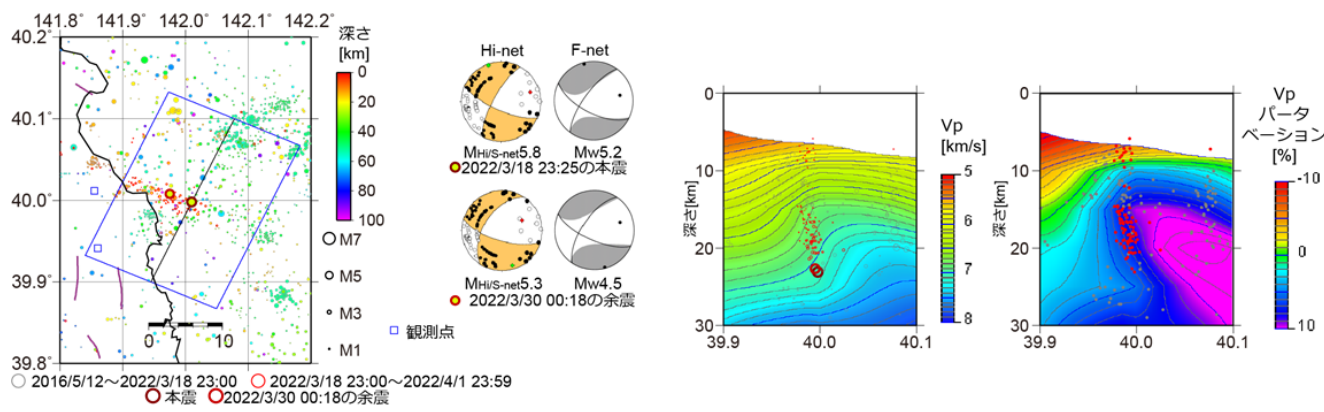
地磁気異常分布では、南西側の高磁気異常と北東側の低磁気異常の急勾配域と一致する。また、重力のブーゲ異常では、北東側の大重力と南西側の小重力の急変帯と一致する。この断層の東部延長では、石油資源探査から明らかにされている南側低下の地質断層が存在する（大澤・他, 2002）。これらのことから、2022年3月18日に発生した岩手県沖の地震(M JMA5.6)は、地質時代に形成された断層が再活動したものと判断される。

Matsubara et al. (2019) Seismic velocity structure in and around the Japanese Island src derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, Seismic Waves - Probing Earth System, IntechOpen, 1-19, <https://doi.org/10.5772/intechopen.86936>

大澤正博・中西敏・棚橋学・小田浩, 三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル, 石油技術協会誌, 67, 38-51

産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2005, 日本空中磁気データベース, 数値地質図 P-6.

産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013, 重力データベース, 数値地質図 P-2.



Detection of low-frequency earthquakes at Mount Fuji and statistical analysis

*Kazuyoshi Z. Nanjo^{1,2,3}, Yohei Yukutake⁴, Takao Kumazawa³

1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Univ. of Tokyo

富士山において発生する低周波地震を、マッチドフィルタ法(Peng & Zhao, 2009)を用いて検知し、その地震活動を統計解析した結果を報告する。

使用する検知システムは、箱根山の低周波地震の検知に用いられているシステムを(行竹, 2017; Yukutake et al., 2019)、富士山用に改良したものである。事前に、気象庁が維持管理する地震カタログから雛形(テンプレート)となる低周波地震を選択し、選択したテンプレート地震のテンプレート波形を準備する。本システムは、このテンプレート波形と富士山周辺の16観測点で2003-2019年に観測された連続波形記録との相関処理を行う。テンプレート地震と相関のあるシグナルが含まれている場合、テンプレート地震にマッチする地震が起きたと判断する。

本システムを用いて検知された地震の数は15,000を超える。相関係数は0.1から1まで取り得て、同係数の頻度分布は約0.2で頻度が最大になる傾向を示す。同係数0.2以上の低周波地震に、通常の地震の規模別頻度分布で成り立つグーテンベルグ・リヒター則(Gutenberg & Richter, 1944)が当てはまることを確認した。また、通常の地震の時間変化を定量的に扱うETAS モデル(e.g., Ogata, 1985, 1988; Kumazawa & Ogata, 2013)も低周波地震に応用できることを確認した。通常の地震、低周波地震に関わらず、これらの法則やモデルが適用可能である。

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震(マグニチュードM9.0)が三陸沖の太平洋を震源として発生し、その4日後に静岡県東部地震(M6.4)が富士山頂の南4km、深さ約15kmを震源として発生した。ETASモデルから、両地震の影響は気象庁カタログの低周波地震には見られなかったが、本研究で検知した低周波地震には静岡県東部地震のタイミングで活発化したことが見られた。富士山の低周波地震の発生域周辺では静岡県東部地震により応力変化があったと指摘されており(Fujita et al., 2013)、低周波地震の活発化のきっかけになった可能性がある。現在統計解析による追試を進めており、本発表では最新の結果を紹介する予定である。

Observation of shallow slow earthquake activity from December 2020 southeast off the Kii Peninsula using dense ocean bottom seismometer array.

*Motoki Negishi¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Takeshi Akuhara¹, Yusuke Yamashita², Sugioka Hiroko³, Masanao Shinohara¹

1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Kobe Univ.

紀伊半島南東沖の南海トラフ近傍のプレート境界浅部において、2020年12月から2021年1月まで浅部スロー地震が発生した。F-netやDONETなどの定常観測網により微動や超低周波地震が観測され、震源域の移動現象などの活動様式に関する研究が進んでいる（例えば、Ogiso & Tamaribuchi 2022; Takemura et al., 2022）。本研究では、この浅部スロー地震活動の特徴を詳細に把握することを目的とし、稠密海底地震計アレイで観測されたスロー地震波形の特徴を調査した。研究に用いた海底地震計アレイは、15台の固有周波数1Hzの3成分地震計から構成され、2019年9月20日から2021年6月1日の期間中、DONET1とDONET2の間に設置された。その中には、5台の地震計を観測点間隔約1kmで配置した十字型アレイが2セット含まれている。2020年12月1日から2021年1月31日までの2ヶ月間について上下動成分の観測データを、超低周波地震のシグナルが見られる0.05-0.10 Hz及び0.10-0.15 Hz(Tonegawa et al., 2020)の2つの低周波数帯と、微動のシグナルが顕著に見られる2-8 Hzの高周波数帯でプロットし、比較した。まずは、エピソードのうち活動域の拡大時期に相当する2020年12月12日について着目し、浅部スロー地震波形を周波数帯毎に比較した。その結果、波形の高周波数帯に約120個の微動シグナルが確認された。また、そのうち2割ほど0.10-0.15 Hz帯のシグナルが同期しており、さらにその半分以上が0.05-0.10 Hz帯のシグナルも同期していることを確認した。これらの時間的同期は、微動と超低周波地震が2020年12月12日のエピソード中に同期して発生したことを示唆し、海底地震計アレイにより広い帯域でスロー地震現象を確認できた。

Slow Earthquakes in the Japan Trench

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Satoshi IDE², Takuya NISHIMURA¹

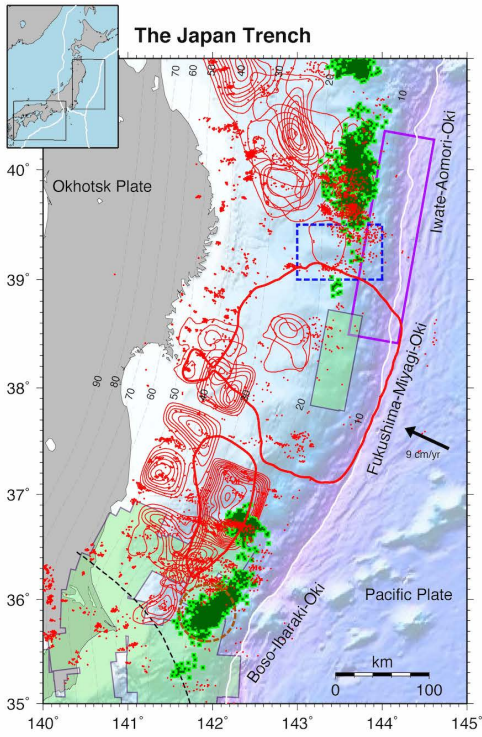
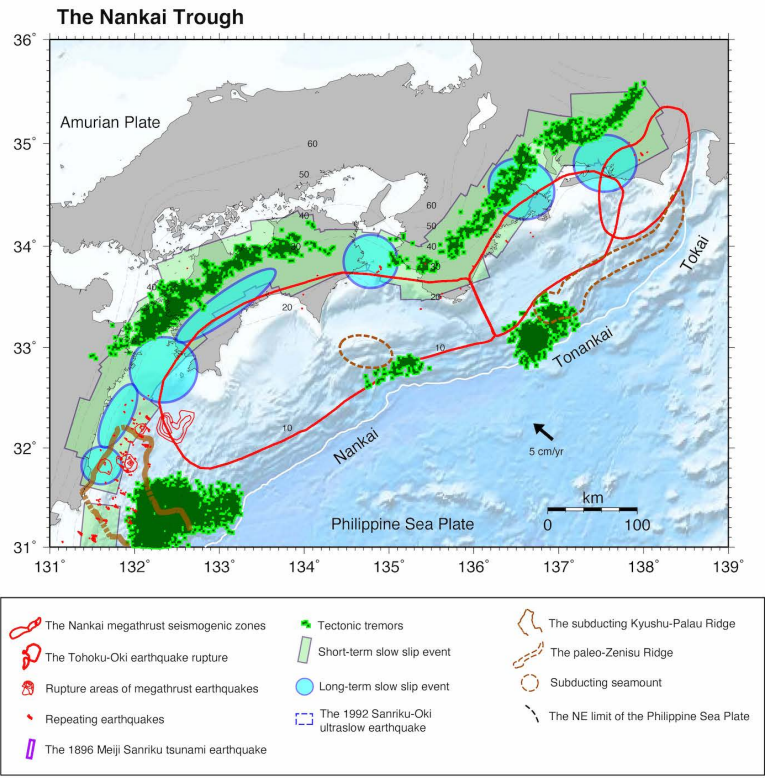
1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. School of Science, Univ. of Tokyo

Slow earthquakes are episodic slow fault slips at plate boundaries. They are fundamental components of interplate deformation processes along with fast, regular earthquakes. Recent seismological and geodetic observations have begun to reveal detailed slow earthquake activity along the Japan Trench, the subduction zone where the 11 March 2011 moment magnitude (M_w) 9.0 Tohoku-Oki earthquake occurred.

Here we review observational studies on slow earthquakes along the Japan Trench. Compiling the observations of slow earthquakes (e.g., tectonic tremors, very-low-frequency earthquakes, and slow slip events) and related fault slip phenomena (e.g., small repeating earthquakes, earthquake swarms, and foreshocks of large interplate earthquakes), we present the integrated slow earthquake distribution along the Japan Trench. Slow and megathrust earthquakes are spatially complementary in distribution, and slow earthquakes sometimes trigger fast earthquakes in their vicinities. An approximately 200 km-long along-strike gap of seismic slow earthquakes (i.e., tectonic tremors and very-low-frequency earthquakes) corresponds with the huge interplate locked zone of the central Japan Trench. The 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake ruptured this locked zone, but the rupture terminated without deeply propagating into the slow-earthquake-genic regions in the northern and southern Japan Trench. Slow earthquakes are involved in both the rupture initiation and termination processes of megathrust earthquakes in the Japan Trench.

We then compare the integrated slow earthquake distribution with the crustal structure of the Japan Trench (i.e., interplate sedimentary units, subducting seamounts, petit-spot volcanoes, sediment thickness at the trench, horst-and-graben structures, residual gravity, seismic velocity structure, and plate boundary reflection intensity) and describe the geological environment of the slow-earthquake-genic regions (i.e., water sources, pressure-temperature conditions, and metamorphism). As a result, we find some correspondences between the slow earthquake distribution and crustal structure (e.g., fluid-rich interplate sedimentary units, subducting seamounts entraining fluid-rich sediments, and strong plate boundary reflection suggesting the existence of a thin layer of aqueous fluids) and between the slow earthquake distribution and geological environment (e.g., the site where opal and smectite dehydrate).

The integrated slow earthquake distribution enables us to comprehensively discuss the roles of slow earthquakes in the occurrence process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. The correspondences of the slow earthquake distribution with the crustal structure and geological environment provide insights into the slow-earthquake-genesis in the Japan Trench and imply that highly overpressured fluids are key to understanding the complex slow earthquake distribution. Furthermore, we propose that detailed monitoring of slow earthquake activity can improve forecasts of interplate seismicity along the Japan Trench.



Hypocenter distribution using S-net data during 2016 April –2022 March

*Azusa NISHIZAWA¹, Masashi Mochizuki¹, Kenji Uehira¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

日本海溝および千島海溝域にS-net（Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench：日本海溝海底地震津波観測網）が設置され、沿岸から海溝軸外側（東側）にかけての海域における地動連続記録が安定的に取得できるようになった。これにより海域の地震活動はどの程度把握できるようになったかを調べるために、2016年4月1日から2022年3月31日までの6年間に発生したいくつかの顕著な地震活動域における震源分布を求めた。震源決定のコードはNonLinLoc（Lomax et al., 2000, 2014）を使用し、S-netの各観測点に対してマルチチャンネル反射法地震断面図から求めた堆積層厚に基づく補正（西澤ほか, 2022）を行った。速度構造モデルは各領域において実施された構造探査結果を参照し、沈み込む太平洋プレート上面の深さはIwasaki et al. (2015)及びLindquist et al. (2004)によるプレート境界の位置から設定した。また、各領域において震源決定に使用した全観測点に対して震源計算時の走時残差（O-C）から求めた観測点補正値を適用して最終的な震源分布を得た。

宮城県沖では2021年3月20日18時09分に M_{JMA} 6.9（最大震度5強, F-net: M_w 7.0, 深さ62 km）の地震が、また2021年5月1日には M_{JMA} 6.8（最大震度5強, F-net: M_w 6.7, 深さ56 km）の地震が発生した。これら地震の発震機構はいずれも西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震であった。1978年宮城県沖地震のすべり域を含むこれらの地震の活動域において、S-net及びHi-netの手動読取值データを使用して求めたそれぞれの地震の余震は最近6年間の地震活動分布から推定されるプレート境界にほぼ沿って分布しているが、本震の位置はプレート境界よりも5 km程度深く、破壊開始点が断層面の深部付近にあることを示唆する。また、 M_{JMA} 6.8の震源の深部には2011年4月7日（ M_w 7.1）の余震と考えられる活発な地震活動が見られる。

福島県沖において2022年3月16日23時34分に M_{JMA} 6.1の地震が発生し、2分後の23時36分には M_{JMA} 7.4（F-net M_w 7.4）の地震が発生した。 M_{JMA} 7.4の地震の発震機構は西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、震源の位置は太平洋プレート内部であり、2021年2月13日に発生した M_{JMA} 7.3の余震活動域内と推定された。S-net及びHi-netの手動読取值データを使用して求めた2022年3月16日の地震の余震分布は複数の断層面の存在を示唆し、その南端が2021年2月13日 M_{JMA} 7.3の地震活動域の北端部に重なり、2021年2月13日の地震発生後に活発化した余震活動の北端部西側の活動がさらに北へ延びたことを示した。2021年及び2022年のいずれの余震活動域も2016年4月以降2021年2月13日の地震発生前までの期間は地震活動が低い領域であり、2021年2月13日の地震発生以降はその余震活動は南方に延びたが北方には延びず、北方で2022年の地震が発生したことがわかった。

1994年12月28日三陸はるか沖地震（ M_{JMA} 7.6）及び2011年3月11日15時08分に発生した岩手県沖地震（ M_{JMA} 7.4）の余震域からアウターライズまでの領域のやや活発な地震活動についても、S-netの手動読取值データを用いて（海溝軸東側の地震についてはS6のデータ取得開始後の2017年4月13日以降について）震源決定を実施した。海溝軸東側には観測点が少ないためアウターライズ領域の震源の深さを正確に決めることは難しいが、2011年岩手県沖地震の余震域にあたる北緯39.5度近傍では地震活動がプレート境界に集中しており、海溝軸からプレート境界の深度10kmの間ではプレート境界に沿う地震活動が見られないことを示した。一方、1994年三陸はるか沖地震の余震域である北緯40.5度付近では海溝軸近傍浅部にも地震活動が検出されたが、震源の深さの決定精度について今後も十分な検証が必要である。

Dependence of earthquakes happen in the northern Osaka on depth

*Ryota Ono¹, Yoshihisa Iio²

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

2018年に発生した大阪府北部地震(M6.1)では、およそ深さ10kmから15kmの範囲内に余震分布が集中している。例えば、2004年の新潟県中越地震(M6.8)では、深さ15km程度を中心に、地表付近まで浅くなるにつれて徐々に分布域が広がっていくような、お椀状の余震分布が見られている(Shibutani et al., 2005)。また、2005年の福岡県西方沖地震(M7.0)では、同様に余震が深さ15km程度を中心に地表付近まで浅くなるにつれて分布するような方向が見られている(Uehira et al., 2006)。大阪府北部地震の余震の分布がこれらのような内陸地震の例とは異なっている理由について調べる。

一般に、断層の強度と深さとの関係は地域によって異なる。本研究では、断層の強度とG-R則から導かれるb値との間に関係があると考え、JMAデータによる定常的な大阪府北部地域での地震活動及び大阪府北部地震前後の活動における深さ方向のb値の変化に着目した。b値を求めるにあたって、コンプリートネスマグニチュード(Mc)の違いによる影響を考え、複数の手法(Wiemer and Wyss, 2000及びOgata and Katsura, 1993)による変化、対象とするデータ内における時間経過による変化を踏まえた。

こうして得られたb値から、当該地域における深さ方向の変化について議論し、断層の強度に関する考察を行う。

Report from 5 years Ocean Bottom Seismometer observations in Suruga Bay

*Yannis PANAYOTOPOULOS¹, Shintaro Abe¹, Hisatsoshi Baba², Nagisa Nakao², Takahito Nishimiya³

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Tokai University, 3. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Suruga Bay is evaluated as the location of the next major event on the Tokai segment of the Nankai-trough, which hasn't ruptured since the 1854 M8.4 Ansei-Tokai Earthquake. Recently, moderate size earthquakes have occurred in the Suruga Trough axial region (M4.9 in 1994, M6.5 in 2009 and M6.2 in 2011), that resulted in a prominent excitation of seismicity in the area. Paradoxically, the routine seismic observation network on both sides of the bay is particularly sparse, which results to great uncertainty regarding the earthquake location accuracy inside the Bay. In order to address the location accuracy problem, a total of 2 sets of 6 OBSs have been deployed in rotation every three months inside the Suruga Bay from spring 2017 and an additional one from spring 2019 to a total of 7 stations. We combined our OBS stations with the routine seismic observation network stations surrounding Suruga Bay and accurately relocated the observed seismic activity inside the Philippine Sea (PHS) plate using a pseudo-3D determination scheme and station corrections retrieved from the RMS travel time residuals. Our combined processing of inland and OBS stations revealed a 25° northwest dipping 2~5 km wide zone on which the regional seismic activity occurs. Overall, the seismic activity is observed to be 5~10 km shallower than that reported by the routine networks data only, bringing the seismogenic layer in the area at shallower depths than originally estimated. The striking feature of the analyzed activity is the presence of a prominent strike slip component in the genesis mechanism of the events with their P-axis almost exclusively oriented towards the north. Major events on both sides of the bay in the past 100 years also display a similar strike slip mechanism which is evidence that the co-seismic stress field is the same as the intra-seismic period.

Comprehensive extraction of tremor migrations in Nankai subduction zone, southwest Japan, and their characteristics

*Kodai SAGAE¹, Takahiko Uchide¹, Takanori Matsuzawa²

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

世界各地のプレート沈み込み帯で発生しているテクトニック微動の重要な特徴として、微動の震源位置が時間とともに移動する微動マイグレーションがある。微動マイグレーションはその現象を見る時間スケールによってさまざまな振る舞いを示し、数時間から数日のスケールではプレート走向方向に約10 km/day で移動するメインフロント (e.g., Obara, 2010), 数時間スケールでメインフロントとは反対方向に約 100 km/day で移動する rapid tremor reversal (RTR) (e.g., Houston et al., 2011) などがある。微動マイグレーションはプレート走向方向だけでなく傾斜方向にも移動するため上記のような特徴すべてを目視で判別するのは困難である。本研究では発表者が開発した時空間ハフ変換 (Sagae et al., 2021, JpGU) を用いて西南日本全域の微動マイグレーションを客観的に抽出し、その時空間的な特徴を調べることを目的とする。

時空間ハフ変換とは時空間 (経度, 緯度, 時間) における直線要素を抽出する手法であり、微動マイグレーションの位置情報・継続時間・進行方向・移動速度などを客観的に抽出することができる。具体的には、原点から直線までの距離 ρ , 天頂角 θ , 方位角 ϕ , 回転角 ψ の4つのパラメータ (ρ, θ, ϕ, ψ) を用いて時空間での直線を表現する。特に $\tan \theta$ は移動速度を、 ϕ は進行方向を示す。また、幅を持った直線 (円柱) を考えることで震源の不確かさ情報を考慮することができ、最も多くのイベントがその円柱内部に含まれるようなものを微動マイグレーションとして抽出する。さらに、時空間ハフ変換は複数の直線が入り組んでいる場合でも、それらパラメータ (ρ, θ, ϕ, ψ) をもとに直線を分離することができる利点がある。

解析するデータには、防災科学技術研究所がエンベロープ相関法 (Maeda and Obara, 2009) を用いて1分ごとに決定している微動カタログ (以降, NIEDカタログ) を使用した。解析期間は2010年1月1日から2019年12月31日までの10年間であり、解析地域は四国・紀伊半島・東海の3つの地域である。時空間ハフ変換をNIEDカタログに適用するために、 ϕ と ψ は10°の刻み、 θ は $\tan \theta$ が0.125-60 km/hr の範囲で1 km/hr の刻みで、 ρ は0-150 km まで0.25 km 刻みでパラメータを用意した。また、NIEDカタログの平均的な震源の不確かさ5 km を円柱の半径となるように設定した。解析手順はまず、1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24 時間の長さをもつ時間窓を用意し、それぞれの時間窓を解析期間内で重複させずに移動させる。そして、時間窓の中に10個以上のイベントが含まれるときに時空間ハフ変換を適用し、円柱内部に8個以上のイベントが含まれるものを微動マイグレーションとして抽出する。抽出された微動マイグレーションを構成するイベントを時間窓から取り除いた後、再度、微動マイグレーションの抽出を行う。この操作を時間窓の中のイベントが10個未満または円柱内部に含まれるイベントが8個未満になるまで繰り返す。最後に複数の時間窓で重複して抽出されたものを取り除き、微動マイグレーションのカタログを作成する。

解析の結果、10年間の微動カタログデータの中から四国では6,712個、紀伊半島では4,016個、そして東海では1,396個の微動マイグレーションを抽出することができた。抽出したすべての微動マイグレーションの進行方向・継続時間・移動速度に関する場所ごとの特徴を調べた。継続時間の中央値が6時間と相対的に長い場所では移動速度の中央値が1 km/hr (24 km/day) と相対的に低速であり、それはメインフロントの特徴と一致する。一方、移動速度が10 km/hr 以上と高速な微動マイグレーションはそれとは逆方向に進行する傾向が見られる。上記の結果はメインフロントやRTRが繰り返し起きている場所が存在していることを示唆している。本発表では微動マイグレーションの特徴と微動エネルギーの空間分布などを比較し、微動マイグレーションの振る舞いとプレート境界面上の不均質の関係について議論する。

Construction of the automatic hypocenter relocation system using the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko Shiomi¹, Makoto Matsubara¹, Shoji Sekiguchi¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

西南日本下の地下構造は、南海トラフから沈む込むフィリピン海プレートの存在などにより、三次元的な変化に富んでいる。これにより、この地域の詳細な震源情報を得るためには、適切な三次元地震波速度構造モデル（3D構造モデル）を用いて波線経路や走時を評価する必要がある。防災科研では、文部科学省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（防災南海PJ）において、3D構造モデルを用いた自動震源決定システムの構築を担っている。本システムは、南海トラフ及びその周辺域で発生する地震の活動状況を逐次的かつ適確に把握し、プレート固着状態等の現状評価に資する情報を提供することを目的とする。昨年度末に本システムのプロトタイプを構築し、試験稼働を開始したので、今回、本システムの概要ならびにシステムの性能評価の現状について報告する。

本システムは、防災科研が別途運用する自動震源決定システム（Hi-netシステム）により得られた震源情報を受信し、その情報が解析対象範囲やマグニチュード等の計算条件に合致した場合に起動する。震源計算方法として、既存の①Pseudo-bending法（Koketsu & Sekine, 1998, doi: 10.1046/j.1365-246x.1998.00427.x）により走時を逐次計算する方法のほか、予め仮想震源と観測点間の走時表を整備し、それを参照する方法として、②関口の方法（2010, doi: 10.24732/nied.0000120）と③NonLinLoc法（Lomax et al., 2000）を採用した。計算方法や計算に用いる3D構造モデル、計算パラメタ等に応じて独立したサブシステムを構成することとし、各サブシステムには1台の仮想マシン（VM）を充当した。必要な入力情報及びそのフォーマットは、計算方法ごとに異なる。本システムでは、まず、Hi-netシステムから全てのサブシステムでの処理に必要な情報を一括抽出した「共通ファイル」を作成し、この共通ファイルを各計算方法で用いる入力ファイルに変換した上で、各VMに転送することで震源決定が自動的に行われる。Hi-netシステムで妥当な震源情報が得られなかった地震やシステム停止中（含、稼働前）の地震等の震源再計算を行う場合、初期震源や検測値情報を「共通ファイル」形式で用意し、簡単なコマンドを実行することで、各サブシステム上にセットされた震源再計算を随時実行することも出来る。計算結果の出力も計算方法ごとに異なるが、出力ファイルについても、一旦、共通の保存フォーマットに変換した後、共通のデータベース（DB）に登録することとした。共通フォーマットを採用することで、DBとのインターフェイスを担うプログラムをひとつに限定することが出来る。DB上では、各地震に対して独立したインデックスを付与し、計算方法や計算条件の違いはサブインデックスで区分する形式とした。

2022年度時点では、3D構造モデルとして海陸の観測データに基づくトモグラフィ解析結果（Matsubara et al., 2019, doi: 10.5772/intechopen.86936）を用いているが、防災南海PJでは様々な情報を統合した高精度な3D構造モデルの構築も進めている（Nakanishi et al., 2022, JpGU及び本大会）。サブシステム①は構造モデルの更新に対応しやすいという特徴がある。一方、サブシステム②と③は、都度、走時表を再構築する必要が生じるが、予め走時表を保持することで計算時間の大幅短縮が見込まれる。最短経路法を用いた波線計算方法（Sekiguchi, 2021, doi: 10.1093/gji/ggab001）等、大きな計算コストを必要とするものの複雑な構造モデルに対して安定して波線経路を評価可能な方法を実装する際には、予め走時表を保持することは有効な実行手段と言える。

現在、サブシステム①の日向灘海域における結果を用いて、システムの動作確認並びに性能評価を進めている。2022年1月の地震活動については、3D構造モデルを用いることで、気象庁一元化震源よりも全体的に数km浅くなり、活動域上端がプレート境界に近接した。これは、当該地域の地下構造から予察される結果と整合的であった。

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

Determination of the focal mechanism solution of swarm earthquakes in the northeastern Noto Peninsula

*Sayaka Takano¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

1. Kanazawa University

1. はじめに

能登半島北東部に位置する珠洲市周辺では地震が2018年6月頃から増え始め、2020年12月以降は地震活動が活発化するとともに非定常地殻変動も観測されている。この群発地震活動の震源域は4つのクラスターを形成しており、地震活動は南部から始まり、その後、西部、北部、東部と活動域が広がり、2022年6月19日には最大規模となるマグニチュード5.4の地震が東部のクラスターで発生している。非定常地殻変動や震源移動、抵抗構造の解析結果からこの群発地震活動に流体が関与している可能性が指摘されている（e.g. 地震調査委員会, 2022）。断層面への流体移動が地震活動を励起すると、広域応力場と整合的ではない地震メカニズム解が観測されることがある。本研究では、能登半島北東部で発生した地震の震源メカニズム解について報告する。

2. データおよび手法

気象庁一元化震源データにおいて、2020年12月以降に珠洲市周辺で発生したマグニチュード3以上の地震を解析対象とした。ただし、2020年12月から2021年3月の間はこの条件を満たす地震が少ないため、マグニチュード2.5–3の地震も解析対象とした。WINシステム（ト部・束田, 1992）を使用して、P波とS波の到着時、P波の初動極性と最大振幅を再検出し、震源位置と震源メカニズム解を決定した。震源決定にはhypomhプログラム（Hirata and Matsu'ura, 1987）を使用し、速度構造は竹内（1978）のモデルを使用した。P波の初動極性をを用いた震源メカニズムの決定にはMaeda（1992）のプログラムを使用し、スコアが0.9以上のものを採用した。

3. 結果と考察

能登半島北東部で発生した地震の多くは、北西-南東方向または西北西-東南東方向の主圧力軸を持つ逆断層型の震源メカニズムであり、この地域の広域応力場と調和的である。しかし、横ずれ型の震源メカニズムを持つ地震も少なからず発生している。南部のクラスターでは明瞭な逆断層型の震源メカニズムは見られなかった。横ずれ型の震源メカニズムを持つ地震は、能登半島北東部沿岸に震源が位置し、北北西-南南東の主圧力軸であった。また逆断層型以外の震源メカニズム解を持つ地震は、地震発生数が多い2022年3月～6月の間に多く発生する傾向が見られる。この時期の地震活動には断層での流体移動の影響が大きい可能性が指摘されており（Nishimura et al., 2022）、逆断層型以外の震源メカニズム解を持つ地震の発生も流体移動と関係することが考えられる。

謝辞

本研究では、気象庁の一元化震源データと地震波形データ、防災科学技術研究所Hi-netの地震波形データを使用しました。記して感謝いたします。

Detectability of very low frequency earthquakes in Nankai using F-net and DONET

*Shunsuke TAKEMURA¹, Satoru BABA², Suguru YABE³, Yusuke YAMASHITA⁴, Katsuhiko SHIOMI⁵, Takanori MATSUZAWA⁵

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

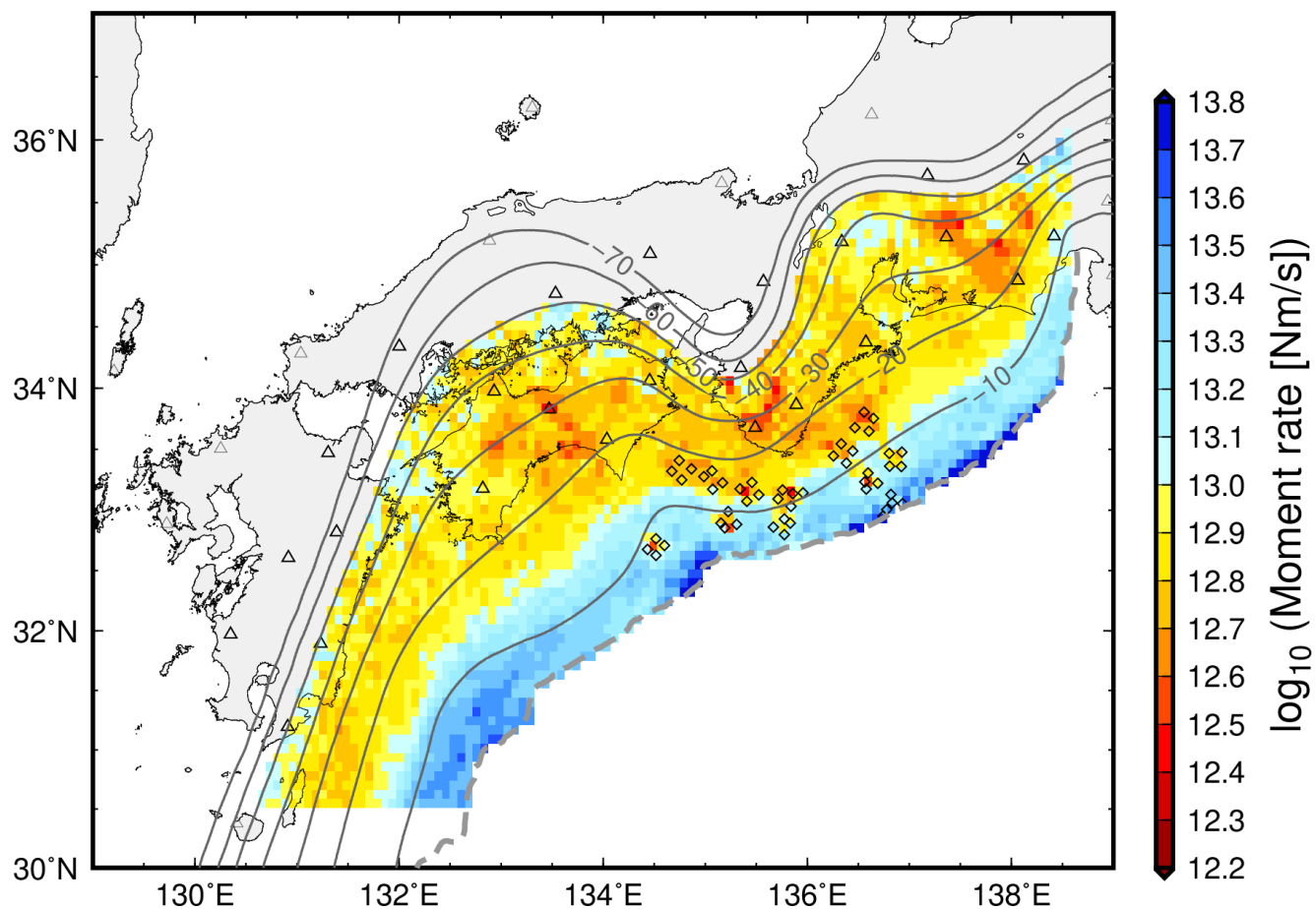
南海トラフや日本海溝の巨大地震発生域周辺の地震活動を適切にモニタリングおよび評価する際、特にスロー地震などの微弱な信号の検知下限を知ることは有用である。地殻変動については、水藤（2016）やAgata et al. (2019)などにより検討されている。本研究では、スロー地震のうち0.02-0.05 Hz帯で顕著に確認される超低周波地震(VLFE)の検知下限について、OpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いた3次元地震波伝播シミュレーションによる理論波形により検討した。

理論波形合成のための地下構造モデルは全国1次地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）を基本とし、固体領域の最小S波速度を1.5 km/sに変更して用いた。プレート境界に0.05°毎に仮定した仮想震源について、Baba et al. (2020)と同様にプレート形状と収束方向を考慮した逆断層型のメカニズムの理論波形を用意した。理論波形の最大振幅が基準値（ノイズレベルの1.5倍）を超える観測点が3点以上ある場合、検知可能とみなした。VLFEのモーメントレート関数は多様である（例えば、Ide et al., 2008; Takemura et al., 2022ab）。そこで、合成した理論波形にBrownian walk model（Ide, 2008; Ide & Maury, 2018; 以下、Brownian model）、Boxcar関数、Brune model（Brune, 1970）を畳み込み、最大振幅の変化を確認した。Brownian modelによるモーメントレート関数は、しきい値により切り出すことで様々な破壊継続時間のモーメントレート関数を用意した。破壊継続時間 t が5~200秒のモーメントレート関数を畳み込み、観測点における最大振幅を評価したところ、次のような特徴があった。地震モーメントを固定した場合、（1） t が長いほど最大振幅が小さくなる、（2） t の増加に対する最大振幅の減少率はモーメントレート関数のスペクトル形状に依存する。すなわち、 w^{-2} （ w は角周波数）で特徴づけられるBrune modelは t^{-2} で最大振幅が減少し、 w^{-1} で特徴づけられるBrownian modelとBoxcar関数は t^{-1} で最大振幅が減少する。VLFEと微動の特徴をBrownian modelで概ね再現できることから、VLFEの検知下限はモーメントレート（ M_0/t ）で議論することが可能であり、Boxcar関数で簡略化できることがわかった。

上記の検討を踏まえ、Boxcar関数を仮定し、 M_w 2.5~5且つ破壊継続時間 t が5~200秒のVLFE波形を合成した。F-netの解析周波数帯を0.02-0.05 Hzとし、基準値を上下動3 nm/s、水平動5 nm/sとして、F-netによるVLFEの検知下限を推定した。その結果、深部VLFEが観測される四国や紀伊半島の検知下限は $10^{12.5} \sim 10^{12.7}$ Nm/s程度となり、浅部VLFEが観測される海溝軸付近では $10^{13} \sim 10^{13.3}$ Nm/s程度となった。予測される浅部VLFEの検知下限は、F-netにより長期間の浅部VLFEを評価したTakemura et al. (2022a)のカタログのモーメントレートの下限と同程度であった。続いて、DONETを追加した場合の評価を行った（図参照）。海底地震計記録の0.03 Hz以下は海洋重力波の影響が大きい（Webb, 1998）ため、DONETについては0.03-0.05 Hzを採用し、基準値は上下動3 nm/s、水平動30 nm/sとした。DONET観測点を追加することで、DONET観測点近傍の検知下限は $10^{12.6}$ Nm/sへと改善するが、DONET1とDONET2の間（潮岬の南南東沖）や、DONETの各ノード間については明瞭な改善は見られなかった。これは、海底地震計の水平動のノイズレベルが陸域より高いこと、距離減衰と輻射特性の影響で震源近傍の観測点以外は振幅が急激に小さくなること（Toh et al., 2018）に起因する。DONETを用いることで浅部VLFEの高精度な位置決定や震源過程解析（例えば、Toh et al., 2020; Yamamoto et al., 2022）が可能だが、南海トラフ全域のVLFEを一定の検知力のもとで俯瞰的に解析するにはF-netなどの陸域広帯域地震計記録を用いたモニタリング（例えば、Asano et al., 2008; Baba et al., 2020）が有用であると考えられる。

謝辞

防災科学技術研究所が管理・運用するDONET <https://doi.org/10.17598/NIED.0008> とF-net <https://doi.org/10.17598/NIED.0005> の波形記録を利用しました。地震波伝播シミュレーションは東京大学情報基盤センターのWisteria/BDEC-01を利用しました。本研究は、JSPS科研費21K03696および21H05205の助成により実施されました。



Spatiotemporal distribution of shallow very-low-frequency earthquakes between January and March 2022 detected by DONET2 seismic stations

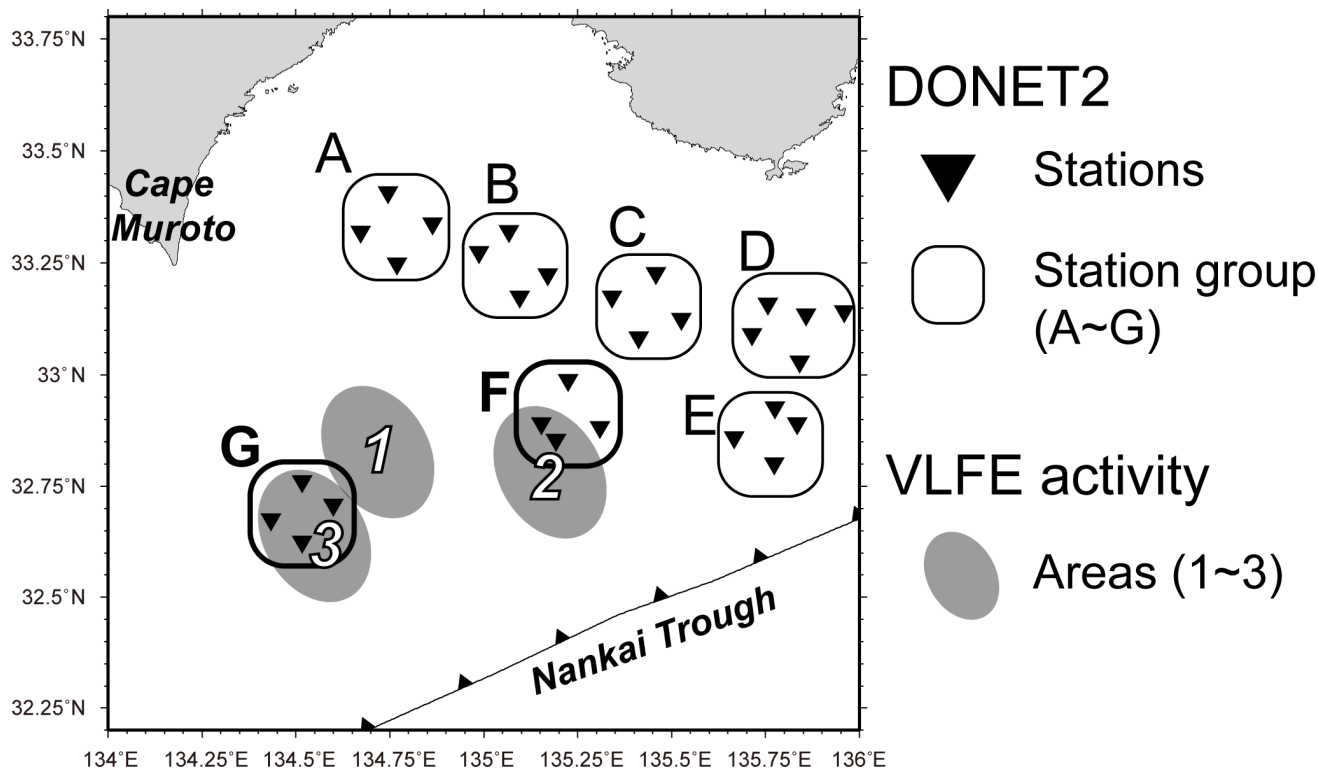
*Yojiro Yamamoto¹, Shuichiro Yada¹, Keisuke Ariyoshi¹, Masaru Nakano¹, Takane Hori¹

1. JAMSTEC

南海トラフ巨大地震震源域の浅部側に隣接したトラフ軸近傍の領域では、低周波微動や超低周波地震といったスロー地震活動が報告されている。これらの活動の時空間変化をモニタリングすることは、南海トラフ地震発生帯の状態把握のために重要である。2022年の1月から3月にかけて、紀伊水道から室戸岬沖に設置されている地震・津波観測監視システム、DONET2の広帯域地震計において、周期20秒周辺にエネルギーを持つ、超低周波地震（very-low frequency earthquake；以下、VLFE）と見られる波群を複数確認した。本研究では、ランニングスペクトルの目視によりイベント時刻を検出し、SWIFT（Nakano et al., 2008）を適用した、VLFE活動の時空間分布の推定結果を報告する。具体的には、広帯域地震計の波形に0.03-0.05 Hzのフィルターをかけ、2秒にデシメーション処理をした観測波形を計算し、これらを説明する震源位置および断層面解を、水平方向0.01°、深さ方向1 kmを刻み幅としたグリッドサーチによって推定した。

震央分布から、今回のVLFE活動の領域は、主に3つのエリアに分けることができる。活動の開始時期順にそれぞれエリア1、2、3と区別すると、エリア1は室戸岬沖に位置するDONET2の観測点グループGの北東側（32.8°E, 134.7°E付近）、エリア2は観測点グループFの南西側（32.8°N, 135.2°E付近）、エリア3は観測点グループGの直下から南側（32.65°N, 134.55°E付近）に位置する（図参照）。このうちエリア1およびエリア2は、2009年および2018年にVLFEが確認された領域（Takemura et al., 2019）と一致する。また、エリア2およびエリア3では、DONET2観測網により、それぞれ2015年と2016年にVLFE活動が確認されている（Nakano et al., 2018）。エリア1のVLFE活動は、1月2日に開始し、4日には一旦収まった。その後、1月27日までは活動はほとんど確認されなかったものの、1月28日に再び数個のVLFEが確認された。その後、1月30日からは、エリア1およびエリア3の両領域にまたがる範囲において群発的にVLFEが発生し、2月9日頃には、エリア1・3両方の活動は収束した。その後、3月末までの間、VLFE活動は確認されていない。エリア2では、1月4日に1イベントが確認されたあとは一週間ほど静穏であったが、1月12日、1月17日～19日、1月27日前後に群発的な活動が確認された。これらの群発活動の間にも、散発的な活動が確認されている。また、1月28日以降の活動は低調であったものの、2月21日、3月11日にそれぞれ複数のVLFE活動が確認されている。3月12日以降、3月末までの間には、VLFE活動は確認されていない。

震源深さについては、7～8 kmと推定されたものが最も多く、この深さは本研究領域のプレート境界面深度（Nakanishi et al., 2018）に近い。一方で、深さが3 kmと浅く推定されたものや、10 kmより深く推定されたものも、少数であるが存在する。断層面解は、プレート境界面を想定させる低角逆断層型のものが一定数あるものの、その他のものも含まれており、ばらつきがある。現在、ブートストラップ解析を実施中であり、震源位置および断層面解それぞれの誤差評価している。暫定的な結果をみると、ブートストラップによる震源位置の平均値はプレート境界を想定させる面上に沿って分布しているように見え、プレート境界より深い位置に決まっているイベントは深さの推定精度が低い傾向がある。今後、カタログの拡充と誤差評価を進めるとともに、時空間的な活動域の変化や、固着域および構造不均質との位置関係に関する議論を進める。



Centroid moment tensor inversion of earthquakes in the Japan Trench subduction zone using S-net ocean bottom seismometers

*Lina Yamaya¹, Hisahiko Kubo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Shunsuke Takemura²

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

地震発生機構の理解のために、地震のセントロイド・モーメントテンソル（CMT）解が広く推定されてきた。しかし、海溝型巨大地震の発生域である海域において、現状の主なCMT解カタログでは、震源から遠く観測点カバレッジの悪い陸域の観測網を使用しているため、決定されるCMT解の網羅性が不十分である。これに加えて、厚い海洋堆積層や沈み込んだ海洋プレートに伴う不均質性を無視した簡易な地下構造モデルを使用しているため、発震機構や深さを誤推定する可能性が指摘されている（例：Takemura et al., 2020）。近年、観測技術の発達に伴い、DONETやS-netのような定常的な海底観測網が整備されてきた。また、近年の大型計算機の発展に伴って、3次元地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションも容易になりつつある。そこで本研究では日本海溝を対象とし、2017年に全域での運用が始まったS-net海底地震計の加速度波形に対し、3次元地下構造モデルを使用した地震波伝播シミュレーションによるグリーン関数を用いて解析することで、地震のCMT解を推定した。S-net海底地震計の方位・回転角の補正には、Takagi et al. (2019) を用いた。グリーン関数の計算には防災科学技術研究所の大型計算機を利用した。地震波伝播シミュレーションにはOpenSWPC（Maeda et al., 2017）を使用した。3次元地下構造モデルとしては、全国1次地下構造モデル（Koketsu et al. 2012）を用い、固体領域の最小S波速度を1.0km/sとした。まずは、2017年以降に発生したマグニチュード4.0以上の地震を対象とし、S-net海底地震計の加速度波形の周期20-50秒を用いてCMTインバージョンを行った。求めたCMT解の発震機構をプレート境界面と、またセントロイド位置を3次元地下構造と比較することで、地震の発生場所を分類した。さらに、既存のCMT解カタログ（F-netカタログ、Takemura et al., 2021）と比較し、CMT解推定に対する海底観測網や3次元地下構造モデルの寄与を検討した。

Spatial distribution of moment magnitude anomalies in subduction zones: Comparison with seismic activity in the Kanto region

*Kazuo YOSHIMOTO¹, Takaya HASEGAWA¹

1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University

1. はじめに

地震の大きさを表わすモーメントマグニチュード M_w は、物理的意味が明確な地震モーメントを用いて算出されるため実用性が高い。しかしながら、地震モーメントの評価に使用する地下構造モデルに実構造とのずれがある場合、その影響で偏差が生じてしまう。例えば、Takemura et al. (2021)は、1次元と3次元の構造モデルを使用したモーメントテンソルインバージョン解析の比較から、スラブの地殻内で発生する地震では、構造モデルの不整合により M_w に0.2程度の差異が発生する可能性を指摘している。本研究では、地震活動が複雑でその解釈が難しい関東地方を対象として、地震発生場と沈み込むスラブとの関係を明らかにするために、F-net MT解の M_w と気象庁マグニチュード M_j のずれ（偏差）の空間分布の特徴を詳しく調べた。

2. 解析方法

関東地方（東経139.0°-140.5°、北緯35.0°-36.5°）を対象地域として、F-net MTカタログ（1997年1月-2021年12月）をもとに、783個の地震（深さ0-80 km, $3.5 \leq M_j \leq 4.5$ ）について、 M_w の M_j に対する偏差（以下、モーメントマグニチュード偏差）を求めた。F-net MT解は、深さ33-100 kmを均質な最上部マントルとする水平成層構造モデルを使用して求められている。このため、本研究では、深さ33 km以深で発生した地震のうち、スラブの沈み込みに関連して形成されと考えられる3つのクラスター（1. 千葉県北西部 深さ70 km; 2. 茨城県南部 深さ60 km; 3. 茨城県南西部 深さ40-60 km）に注目してモーメントマグニチュード偏差を調べた。

また本研究では、対象地域の地震波速度構造の情報を得るために、地震波トモグラフィー（Double-Difference Tomography法 [Zhang and Thurber (2003)]）を実施した。同解析には、気象庁一元化震源カタログ（1998年1月-2019年12月）に記載されている、約4万個の地震（ $1.6 \leq M_j \leq 4.0$ ）の418観測点における検測値データ（P波：約96万個、S波：約82万個）を使用した。

3. 結果および考察

既往研究 [例えば、弘瀬・他 (2008)]により、クラスター1と2の地震は太平洋スラブの上面の境界、クラスター3の地震はフィリピン海スラブの上面の境界で発生していると解釈されている。クラスター1と2の地震について、モーメントマグニチュード偏差を計算すると、平均値はともに0.2程度になる。この偏差（ $M_w > M_j$ ）は、クラスター1と2の地震が太平洋スラブの地殻（F-net MT解析で使用している構造モデルよりも低剛性率）で発生していることを強く示唆している。地震波トモグラフィーの結果も、これらのクラスターを低S波速度域に含むことから、この解釈と整合する。しかしながら、この結果とは対照的に、クラスター3の地震については、モーメントマグニチュード偏差がほとんど見られないことを確認できる。地震波トモグラフィーの結果でも、このクラスターは（少なくとも浅部は）低S波速度域に含まれない。この解析結果は、フィリピン海スラブの上面の境界で発生するクラスター3の地震については、低剛性率でない領域で発生していることを示唆する。

上述の解析結果は、減衰構造の影響などを考慮しないものであるが、モーメントマグニチュード偏差の精査によって、地震発生場の構造（数km程度のスケール）についての情報が得られる可能性を示している。本発表では、詳細な解析結果を踏まえて地震活動の解釈について議論する。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のF-net MTカタログおよび気象庁の一元化震源カタログを使用しました。トモグラフィー解析には、Wisconsin-Madison大学のC. H. Thurber氏にご提供いただいたtomoDDを使用しました。ここに記して感謝いたします。

Poster session (3rd Day) | Special session : S21. Advancing Seismology with AI

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-1
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S21P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-01] Automatic detection of S-wave later phase by 1D convolutional neural network

*Yuta Amezawa¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-02] Event catalog development for AEs induced by hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Makoto NAOI¹, Youqing Chen¹, Yutaro Arima² (1. Kyoto University, 2. JOGMEC)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-03] Towards Constructing a High-precision Phase picker for Volcanic Earthquakes Using Deep Learning: Performance Evaluation of Various Models

*Yuji Nakamura¹, Ahyi Kim¹, Hiroki Uematsu¹, Yohei Yukutake², Yuki Abe³ (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-04] Estimation of volcanic earthquakes at Kirishima volcano using machine learning

*Yohei YUKUTAKE¹, Ahyi KIM² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Yokohama City University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-05] Development of Seismic Wave Detection System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

*Yukino Yazaki¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu^{1,2}, Ahyi Kim¹, Masami Yamasaki¹ (1. Yokohama City University, 2. National Institute of Informatics)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-06] **Toward Efficient Pore Pressure Estimation along Plate Boundary Faults Using Deep Learning**

*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-07] Fault Plane Estimation from 3D Hypocenter Distribution by Two-step Clustering Considering Local Shape

*Yoshihiro Sato¹, Haruo Horikawa¹, Takahiko Uchide¹, *Satoru Fukayama¹, Jun Ogata¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-08] Estimation of wave propagation direction from seismic waveforms using a deep learning model

*Yuki KODERA¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-09] Towards Real-Time Seismic Intensity Prediction Using Deep Learning:Developing a Prediction Model with Relatively Little Observed Data

*Momoko Nakamura¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu¹, Yukino Yazaki¹, Ahyi Kim¹, Hisahiko Kubo² (1. Yokohama City University, 2. NIED)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-10] Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning

*Takashi FURUMURA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-11] Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning — Part3 Simulation of response spectrum of crustal earthquake in Eastern Japan—

*TIANZENG WEI¹, KAI TERAZONO¹, HIDENORI KAWABE¹ (1. Osaka University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S21P-12] **Study on Prediction of Pseudo-velocity Response Spectrum Using Machine Learning -Part2: Response Spectrum Simulation of the 2016 Kumamoto Earthquake-**

*Kai Terazono¹, Tianzeng Wei¹, Hidenori Kawabe¹ (1. Osaka University)

Automatic detection of S-wave later phase by 1D convolutional neural network

*Yuta Amezawa¹, Takahiko Uchide¹, Takahiro Shiina¹

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

はじめに

近年、機械学習を活用した直達波の検知および検測技術の開発が精力的に行われている（e.g., Zhu & Beroza; 2019）。これらは過去数十年にわたり蓄積された多量の地震波形データと、熟練した検測者によるラベル付き検測値に基づいた学習により、STA/LTA法などの従来法よりも高精度かつ網羅的なイベント検出を可能にした。一方、地下の顕著な速度コントラストに起因する反射波などの直達波以外の波（後続波）についても機械学習に基づく高精度な自動検出・検測が試みられている（Ding et al., 2022）が、研究例は少ない。後続波からはその発生源である地下の不均質構造に関する情報を抽出できる（e.g., Matsumoto & Hasegawa, 1996）。ゆえに、膨大な地震波形記録に蓄積された後続波の情報を活用することで、地下の不均質構造を詳細かつ網羅的に解析することができる。そのためには、後続波の検出・検測を自動化することが重要である。そこで本研究では、日本域における後続波解析自動化の端緒として、上部地殻内で発生した地震の地震波形記録に観測されるS波後続波（e.g., 堀・他, 2004）を対象に、その自動検出を試みた。

データ・手法

本研究では、東北地方北部の森吉山地域の群発地震について、その近傍のHi-net阿仁観測点（N.ANIH）で観測された地震波形記録を使用した。本地域では2011年から群発地震活動が継続しており、その地震波形記録のTransverse成分に顕著なS波後続波が報告されている（e.g., Kosuga 2014）。また、本地域におけるS波後続波の波形形状は時間変化しており（Amezawa et al., 2019）、同一の定常観測点において、後続波を含む波形と含まない波形を多数取得できるという利点がある。

まず、森吉山北方の群発地震クラスター内で発生した5,000個の地震について、N.ANIHで観測された地震波形記録の水平2成分からTransverse成分を合成して、6–24 Hzの帯域通過フィルタを適用し、S波最大振幅で規格化した上で、S波後続波を含むもの（3,935個）と含まないもの（1,065個）に目視分類した。これらを学習データ（80%）とテストデータ（20%）に分割し、さらに学習データの20%を検証データとして使用した。次に、1次元畳み込みニューラルネットワークに基づくS波後続波自動検知モデルを次のように作成した。畳み込み層とプーリング層の繰り返しに続き、全結合層を設定し、最後はsoftmax関数を用いて和が1となる非負の2つの数値を出力する。2つの出力は、それぞれS波後続波を含む場合と含まない場合の確率に対応させ、閾値を0.5としてS波後続波の有無を判断させた。モデルへの入力データは、目視分類を行った地震波形記録について、気象庁S波検測時の0.2秒前から5.12秒間の時間窓で切り出したS-coda部分とした。

結果・議論

本研究で作成したモデルをテストデータに適用した結果、正解率は0.89であった。モデルの評価のために、偽陽性率に対する真陽性率を様々な閾値のもとでプロットしたROC曲線を作成し、その下側面積であるAUC（理想的なモデルで1.0に、ランダムな分類に対し0.5となる指標）を計算した。その結果、AUCは0.89であり、作成したモデルはテストデータに対しS波後続波の有無を判断できていることがわかった。一方、閾値0.5における偽陽性率は0.1以下であるのに対し、真陽性率は約0.8であった。後者の結果は、S波後続波有りのラベル付きデータを2割ほど取りこぼしていることを意味する。

S波後続波有りのデータの取りこぼしの要因として、S波後続波の有無の判断に迷うようなデータ（例えば、S波後続波の振幅が小さい場合）が含まれていることが考えられる。また、S波後続波有りと無しのデータ数に不均衡があるため、モデルの学習時にそれを解消するようなデータに重みづけや under sampling を行ったが、いずれの場合も分類精度が低下した。その主要因としては、学習データ数の不足が考えられる。

今後は、複数観測点での地震波形記録の追加や data augmentation によって学習データを増やしつつ、最適

な学習方法を模索する。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所Hi-netによる地震波形記録、気象庁一元化震源カタログ、気象庁による手動検測値を使用しました。深層学習フレームワークはTensorFlowを使用しました。また、文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）[JPJ010217]の支援をいただきました。感謝いたします。

Event catalog development for AEs induced by hydraulic fracturing experiments in the laboratory

*Makoto NAOI¹, Youqing Chen¹, Yutaro Arima²

1. Kyoto University, 2. JOGMEC

地震計やAEセンサの連続波形記録から震源カタログを作成する場合、典型的にはイベント検出・走時検測・Phase Association・震源決定といった複数の処理が行われる。近年、これらの各プロセスに深層学習を始めとした機械学習技術の適用が進み、従来の自動化手法を超える性能が達成され、同じデータからより高品質の震源カタログが作成できるようになりつつある。本研究では、室内水圧破碎実験中に10MHzサンプリングで収録した24チャンネルAE連続波形記録から、深層学習を利用して震源カタログを作成した。

カタログ作成は、1) 24チャンネルAE波形をインプットとし、イベント確率値を時間の関数として出力する深層学習ネットワークによるイベント検出、2) PhaseNet (Zhu and Beroza 2019) に似たU-netタイプの深層学習ネットワークによる走時検測、3) REALアルゴリズム (Zhang et al. 2019) によるPhase association・震源決定を行い、4) 非線形最小二乗法によって震源を再決定する、という手順で行った。

1), 2) で用いた深層学習ネットワークの訓練には、STA-LTAによるイベント検出 (Allen 1978), AR-AICによる走時検測 (Tanakami and Kitagawa 1988), 非線形最小二乗法による震源決定という、古典的手法を組み合わせた自動処理手法 (Naoui et al. 2018) によって作成した、黒髪島花崗岩10供試体 (Tanaka et al. 2021), イーグルフォード頁岩2供試体 (Naoui et al. 2020) の実験に対して得られたAEカタログから、よく震源が求まったものに対する検測値等を用いた。イベント検出や走時検測のための深層学習ネットワークの訓練に用いるデータには手動処理結果を用いる場合が多いが、本研究では自動処理による結果からQuality Controlの基準を厳しく設定して選別した結果を用いた。

Phase Associationに用いたREALアルゴリズムは、震源に対するグリッドサーチをおこない、理論走時を中心としたある幅の窓内に含まれる走時の数をカウントし、予め設定した閾値以上の走時が適合する震源を採用する手法である。震源に対するグリッドサーチは計算コストが大きいので、本研究ではこの問題を差分進化アルゴリズムで解くことによって計算コストの削減を行った。

一連の手法を、深層学習ネットワークの訓練に用いていない、ウルフキャンプ頁岩供試体を用いた実験において得られたAE連続収録データに適用し、AEカタログを作成した。同供試体の実験データに対して、先に説明した古典的手法によるカタログ作成手法では、972個のイベントからなるAEカタログが作成されたが、深層学習による手法では、Quality controlに用いる基準に依存して2600-6300個のイベントからなるカタログが作成できた。

Towards Constructing a High-precision Phase picker for Volcanic Earthquakes Using Deep Learning: Performance Evaluation of Various Models

*Yuji Nakamura¹, Ahyi Kim¹, Hiroki Uematsu¹, Yohei Yukutake², Yuki Abe³

1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

火山地帯では度々火山活動に関連した活発な群発地震が発生し、それらの迅速な検出、検測は火山防災において非常に重要である。しかし現在、これらのプロセスは最終的には人間の判断に委ねられ、膨大な時間とコストを要し、リアルタイムでの詳細な検証は不可能である。本研究ではこの問題を解決するため、近年多くの地震観測で研究が進んでいる機械学習の適用を試みた。現在、すでに膨大な訓練データを用いた学習済みモデルがいくつか公開されている。それらをそのまま適用して問題無い事例もあるが、学習データの地域依存性も報告されている（Münchmeyer et al., 2022）。本研究のターゲットは火山地帯という特殊な地域で発生する地震であるので、主に地殻内地震の波形で学習した既存の学習済みモデルは適用が難しい可能性がある。本研究では箱根火山で発生する地震をより精度良く検出できるモデルの構築を目指し、まずZhu and Beroza（2018）によって構築されたPhaseNetのアーキテクチャを利用して、箱根火山で発生した1999年から2020年までの約22万個の地震波形に対して性能評価を行った。結果として箱根火山の地震データで学習したモデルの検出率は、既存のPhaseNetの学習済みモデルの検出率と比較して大幅に向上した。PhaseNetではU-Net（Ronneberger et al., 2015）の構造が採用されているが、次のステップとしてそれに再帰残差ユニットを追加したR2U-Net、注意機構を追加したAttention U-Net、再帰残差ユニットと注意機構の両方を追加したR2AU-Netを用いた学習モデルを構築した。さらに、これらのモデルをPhaseNetの学習時に用いた箱根データを用いて学習することで、その性能評価を行った。また、上記の学習済みモデルをベースとして転移学習を行うことにより、よりデータ数の規模が小さい別の火山地帯での精度の良い地震波検出モデルの構築を試みる。

Estimation of volcanic earthquakes at Kirishima volcano using machine learning

*Yohei YUKUTAKE¹, Ahyi KIM²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Yokohama City University

火山性地震はマグマや熱水の移動や応力場の変化などに反応し活発化し、火山内部状況を評価するうえで重要な情報となる。高精度な地震カタログの構築にあたり、従来はSTA/LTAなどの指標を用いて地震を検出し、目視による地震波の到達時刻や振幅の検測情報に基づき震源位置と規模を決定するという手順を踏むため膨大な時間を必要としていた。近年、機械学習のフレームワークを用いて、地震の検出及び検測を自動で高精度に行う手法が開発されている(例えば、Ross et al., 2018; Zhu & Beroza, 2018)。行竹・金(2022, JpGU)では、霧島火山地震観測網のデータに対して、Zhu & Beroza(2018)によって構築されたPhaseNetのアーキテクチャを利用し、さらに金ほか(2022, JpGU)により構築された火山性地震カタログに基づいた学習モデルを用いて、同火山地帯での火山性地震の検出と震源決定を行った。本研究では、霧島火山における火山性地震と火山活動との関連の理解を目的とし、上記の過程により検出された火山性地震の活動様式についてより詳細な検討を行った。JHD法(Kissling et al., 1994)により対象領域の1次元速度構造と観測点補正值を推定し初期震源位置を決定した後、Double-difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)による相対震源決定を実施した。2012年から2020年の期間で気象庁火山地震カタログの約7倍に相当し約37000イベントの火山性地震の震源が決定された。2017年から2018年にかけてマグマ噴火が発生した新燃岳では、火口直下海拔0m付近で多数の地震の震源位置が決定された。地震活動は噴火に先行して活発化するとともに、地震活動深さ上限が徐々に浅部に拡大する様子が見られた。またb値の時間変化を調べると、噴火に先行して数か月前からb値が増加する様子が見られた。2018年に水蒸気噴火が発生した硫黄山においても、類似した火口浅部での地震活動の増加が検出された。これらの地震活動は噴火準備過程における、火口直下での流体圧の増加を反映している可能性がある。また、霧島火山西部では解析期間中に頻繁に群発地震活動が発生しており、各群発クラスター内で震源位置の移動が認められ、火山性流体の寄与が示唆される。火山地域における地震活動について機械学習を用いることにより、高い精度で地震活動の描像を得ることが可能になってきた。

謝辞 本研究では、気象庁、防災科学技術研究所、九州大学、東京大学地震研究所により取得された地震波形記録を使用しました。気象庁から火山震源カタログを提供していただきました。本研究はJSPS科研費22K03752及び文部科学省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」の助成を受けたものです。

Development of Seismic Wave Detection System using Machine Learning for a Citizen Seismic Network

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

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

地震大国である我が国では、様々な機関において高密度振動観測網が展開され、各地点での震度の即時計算および効果的な地震速報の発令を可能にしている。しかし、現状では地震計の設置間隔である20kmより細かい解像度での震度計測は不可能であり、緊急地震速報も約30km圏内で発生した地震に関しては対処できない。また、近年、都市部では高層ビルやマンションの建設が急速に進んでおり、同じ建物内でも階や柱からの近さにより、被害の現れ方が異なる。つまり、人口が集中する都市部に対し、現行の大域的な震度予測だけでは被害状況の把握と予想には不十分である場合も考えられる。そこで、本研究では、既存の観測網に加えて一般家庭にも設置できる地震計を提案し、高精度な即時地震動検出の実現を目的とする。この地震観測網はCSN (Citizens Seismic Network) (金, 2016)と称し、神奈川県横浜市の複数箇所に設置を進めている。具体的な手順は次のようである。比較的安価に入手が可能であるMEMSセンサー(witmotion)に、小型の演算装置ラズベリーパイを接続し、3成分方向の加速度の逐次データを取得する。次に、このデータから地震を判定するモデルを作成する。最後に、モデルをラズベリーパイで演算可能とし、センサーが受け取った加速度データに対して、即時に地震の判定を行う。本発表では、上記のうち、地震動の検出モデルの構築に焦点を当てる。センサーデータに対し、古典的な地震検知法であるsta/lta比による地震判定を行ったところ、真の地震だけでなく、その倍以上の数のノイズを地震として判定した。この問題を解決するため本研究では機械学習モデルを使用したアプローチを検討する。使用するモデルは中村他(2022, 本大会)が性能評価を行なった4種類のモデル、1) U-net, 2) リカレント残差ユニットを追加したR2U-Net、3) 注意機構を追加したAttention U-Net、4) U-Netにリカレント残差ユニットと注意機構の両方を追加したR2AU-Netを用いた。CSNでは学習と検証に使用するデータに十分な量のデータが蓄積されていないので、防災科学技術研究所が運用する強震計ネットワークK-NETから取得したデータを使用する。学習には、データを加工せず使用する場合と、センサーのノイズの影響も考慮し、ランダムノイズを加えた場合の2通りの入力データを検討する。以上の複数通りのモデルとデータ加工により作成されたモデルを実際のCSNデータに適用、地震動の検出を試み、その性能を比較検証する。さらにそれらのモデルの運用についてラズベリーパイへの実装可能性も含めて検討する。

Toward Efficient Pore Pressure Estimation along Plate Boundary Faults Using Deep Learning

*Fan Yu¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc.

南海トラフ沈み込み帯では、フィリピン海プレートが北西方向に向けてユーラシアプレートの下に年間4 cmの収束速度で沈み込んでいる。歴史上で、南海トラフ沈み込み帯の巨大地震は強震動及び大津波を起こし、100-200年の再来期間を持つとされている。この壊滅的な巨大地震の震源断層として、プレート境界断層（つまり、デコルマ）が挙げられる。南海トラフの巨大地震の発生メカニズムを明らかにするために、南海トラフ海溝軸を横断する反射法地震探査は数多く行われてきたが、間隙水圧の推定に関する研究はわずかであった。過去の研究では、2011年にJAMSTECが紀伊半島潮岬沖の南海トラフで取得した2次元マルチチャンネル反射法地震（Multi-channel seismic; MCS）探査データ（測線KI01）を用いてP波速度構造モデルを構築し、そのP波速度モデルをもとに、デコルマに沿った間隙水圧や有効応力を推定するなど、デコルマの物性の解明を試みた（Yu et al., JpGU 2022 Abst.）。潮岬沖の測線KI01のMCSデータを用いた重合前深度マイグレーション処理の結果として得られた南海トラフ付加体の構造は、先行研究である室戸岬沖の付加体構造（Tobin and Saffer, 2009）とは異なり、タービダイト層がデコルマに沿って沈み込んでいることが判明した。P波速度モデルに基づいて推定した間隙水圧、有効応力などの物性を分析することで、潮岬沖では、間隙流体が静岩圧全体に対する割合が比較的に低く、堆積物からの排水が良好で、垂直有効応力が高いことが明らかになった。潮岬沖と室戸岬沖のデコルマ物性の違いはタービダイトの存否に起因すると考えられる。南海トラフでは、これまで反射法地震探査が盛んに行われてきたが、潮岬沖の測線KI01のような現場の物性を求めた研究はまだ数が少なく、デコルマに沿った間隙水圧推定の研究は進んでいない。一方、測線1本のMCSデータからP波速度モデルを決定するまでには膨大な時間と労力がかかるため、南海トラフ沈み込み帯の全域をカバーする多数の2次元MCSデータを処理するには、より効率的な手法が求められている。そういった事情を踏まえて、我々は、近年話題になっているディープラーニング技術を用いて、プレート境界断層の間隙水圧をより早く、かつ精度よく推定できる方法を考案した。ディープニューラルネットワーク(DNN)をMCSデータ処理作業に導入し、学習済みモデルを用いて、迅速なP波速度モデルの構築を目標として、南海トラフの広範囲においてデコルマの物性や構造の解明を目指す。

海溝軸付近の地質構造は複雑で、ショットギャザーから直接にP波速度モデルを生成するDNNモデルの訓練は現在の段階で困難な課題になっているため、本研究では、労力を費やす速度モデルの構築のステップに着目する。まずは、Marmousi2 modelを利用し、ランダムに生成した速度モデルから反射法地震探査データを合成した後、CDPギャザーから特徴（例えば残差速度）を抽出し、DNNモデルの訓練を実施する予定である。

Fault Plane Estimation from 3D Hypocenter Distribution by Two-step Clustering Considering Local Shape

*Yoshihiro Sato¹, Haruo Horikawa¹, Takahiko Uchide¹, Satoru Fukayama¹, Jun Ogata¹

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

震源分布により、地下における断層の形状を推定することは広く行われているが、断面図などによる可視化に基づいて主観的に行われることが通例である。震源分布は概ね平面的であるが、全体が湾曲したり、複数の面が交わっていたり、局所的には震源のばらつきが見えたりと、一定の複雑性があり、それが客観的な断層検出を難しくしている。

従来は、震源の3次元位置情報を用いた教師なし機械学習によるクラスタリング手法により断層面の3次元特徴を把握する手法 (e.g., Ouillon et al., 2008; Piegari et al., 2022) が提案されてきた。しかし、震源の位置情報のみを用いたクラスタリング手法では、実際の断層面構造とは異なる面を抽出する場合があるため、入力する震源数や解析する震源の分布範囲、学習パラメータを調整する必要があり、汎用性に欠点がある。

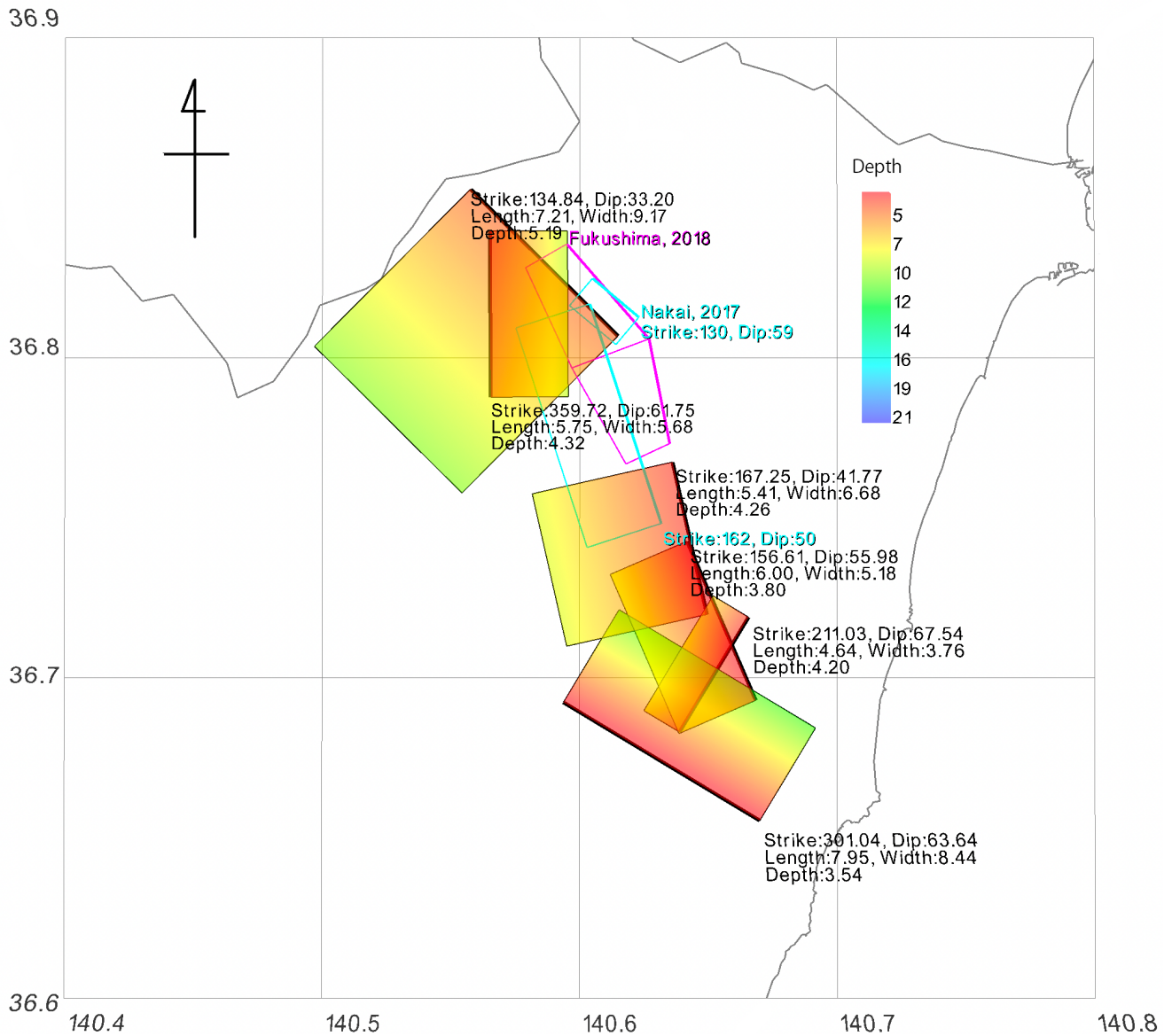
本研究では、震源の3次元位置情報に、震源分布を基に算出した法線ベクトル(3次元情報)を付与した6次元情報を用いて教師なし機械学習によるクラスタリングを行うことで、局所的な断層構造を検出する手法を提案する。具体的には、1段階目として法線ベクトルの3次元情報を用いた震源のクラスタリングを行う。2段階目では、分割されたクラスタごとに震源の3次元位置情報を基にさらに震源のクラスタリングを行う。これにより、複雑に構成される断層面の大局的な面構造を保持したまま断層面を細分化することができ、断層面の局所構造を把握に貢献すると考えられる。本研究では、事前にクラスタ数を設定することなく、ボトムアップにクラスタリングを行う階層型クラスタリングアプローチを採用し、1段階目のクラスタリングでは、法線ベクトルのコサイン類似度を用いて一定のクラスタ間距離を設定可能なAgglomerative clustering、2段階目のクラスタリングでは、震源分布における局所的な密度の違いに対応可能なHDBSCAN (McInnes et al., 2017) をそれぞれ適用した。

本提案手法をhypoDD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)によって再決定された茨城県北部の震源分布(71336個)に適用する。検出された断層面から同地域の微小地震の震源メカニズム解(Uchide et al., 2022) (38164個)と比較し、条件に一致する断層面を抽出する。抽出条件は、震源メカニズム解と断層面に垂直な距離が0.5km以内、震源メカニズム解のどちらかの節面と断層面のなす角が5度以内と設定した。

提案手法によって検出された断層面を図に示す。図では、提案手法によって検出された断層面をグラデーション付きの矩形として示し、グラデーションカラーは深度を示す。断層面周辺の黒文字では検出された断層面のパラメータを示し、1段目は検出された断層面の走向および傾斜、2段目は長さと幅、3段目は断層面の深度を示す。InSAR解析による2011年・2016年茨城県北部の地震の断層モデル (Fukushima et al., 2018; 仲井ほか, 2017) は、紫色および水色の矩形によってそれぞれ示す。提案手法では6枚の断層面が検出された。断層面の多くは概ね南北走向であるが、緯度36.8度以北では北西-南東走向に変わっている。この変化は、Fukushima et al. (2018)の断層モデルにも見受けられ、断層モデル周辺に検出された断層面の走向方向はほぼ一致している。仲井ほか(2017)の断層モデルでは、浅部の断層面が北西-南東走向、深部の断層面がほぼ南北走向となっている。そのような断層構造は、2011年・2016年の地震時に活動した区間よりも広域に及んでおり、茨城県北部の地震ではその一部が活動したことが示唆される。2011年・2016年茨城県北部の地震では主に西落ちの断層が破壊したと考えられるが(田中・岩切, 2017; 仲井ほか, 2017; Fukushima et al., 2018)、本研究では東落ちの断層面も検出した。緯度36.8度付近では断層面が検出されていないが、これは2011年・2016年茨城県北部の本震に破壊域に対応し、余震活動が極めて低調であったためであると考えられる。このような地震活動が低調な地域における断層面の検出は今後の課題である。

謝辞

本研究では、気象庁一元化処理検測値、産業技術総合研究所地質調査総合センターによる発震機構解データ(内出ほか、2022)を使用した。本研究は、文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト(STAR-Eプロジェクト) JPJ010217の助成を受けたものです。



Estimation of wave propagation direction from seismic waveforms using a deep learning model

*Yuki KODERA¹

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

巨大地震や連発地震発生時においても安定して地震動即時予測を行うため、近年では震源推定をせずに揺れから揺れを直接推定する手法が提案されている（例えば、Hoshiba and Aoki, 2015; Kodera et al., 2018）。これらの手法では、各観測点におけるリアルタイム震度（功刀・他, 2013）の観測値を入力として波動伝播の計算を行っているが、波の振幅だけでなく、伝播方向などの他の物理量の観測値も合わせて用いることができれば、より予測の迅速性や精度の向上につながると期待される。本研究では、波動伝播モデルに取り込める観測情報を増やすことを目的として、観測点の地震波形から波動伝播方向を深層学習によって推定する方法を開発する。波の到来方向はP波初動の震動軌跡を見ることでも推定することは可能ではあるが、この方法はP波初動を正確に検出できることを前提にしており、P波初動が不明瞭となる連発地震などではうまく推定ができない恐れがある。本研究では、初動部分だけではなく波形全体の形状から情報抽出を試みることで、よりロバストな伝播方向の推定を目指す。

対象観測点をKiK-netひたちなか（IBRH18）の地上点として手法の検証を行った。2010年1月から2022年7月までに観測された波形のうち、リアルタイム震度0.5以上かつ理論P波時刻の2秒前以前から収録されている波形を抽出した（約1500波形）。入力は2秒間の3成分加速度波形とし、理論P波時刻の2秒前から10秒後までを0.2秒ごとにスライドさせて学習用のデータセットを生成した。教師データとなる波動伝播方向は、観測点から見た震央方位に等しいとした。深層学習モデルはGRU（Gated Recurrent Unit）と全結合層からなるネットワークを採用し、データセットをtrain : validation : test = 6 : 2 : 2に分けて学習と評価を行った。学習済みモデルをテストデータに適用したところ、以下の傾向が見られた：（1）理論P波到達後2秒までの波形を入力した時点では、約4割の事例が $\pm 30^\circ$ 以内の精度で、約6割が $\pm 45^\circ$ の精度で伝播方向を求められた。（2）さらに後続の波を入力していくと、伝播方向の推定精度が徐々に悪化していくが、理論P波到達後10秒時点では、 $\pm 30^\circ$ 以内の精度で求まる事例が約1割、 $\pm 45^\circ$ の精度の事例が約3割あった。これらの結果は、後続波には到来方向が様々な多重反射や多重散乱の波が多く含まれているため伝播方向の推定は難しいものの、波形全体の形状を学習させることで、P波初動を陽に検出することなく伝播方向をある程度推定することが可能であることを示している。今後はモデルの改良を進めるとともに、連発地震などに対する評価も行う予定である。

Towards Real-Time Seismic Intensity Prediction Using Deep Learning: Developing a Prediction Model with Relatively Little Observed Data

*Momoko Nakamura¹, Yuji Nakamura¹, Hiroki Uematsu¹, Yukino Yazaki¹, Ahyi Kim¹, Hisahiko Kubo²

1. Yokohama City University, 2. NIED

地震発生時、速やかに震度の空間分布を予測することは防災上非常に重要である。予測精度向上のため、地震計を高密度に設置し多数の観測データを得る必要があるが、人的、経済的コストの面から難しい。また、観測データに加えて地質情報等の先験的知識を用いる手法もあるが、地質情報の精度等課題が多々ある。そのような背景から地質情報を用いない深層学習を用いた震度予測が提案されその有用性が示されている(Otake et al., 2020)。本研究では先行研究よりも格段に学習データの少ない横浜市の周辺において、深層学習の一種であるLong-short term memory(LSTM)を用いたリアルタイム震度(功刀, 2008, 以降Ir)の予測モデルの構築を試み、そのパフォーマンスの検証を行った。

本研究では、2つの手法を検証し比較を行った。1つ目の手法では、Otake et al. (2020)と同様に既存の防災科学技術研究所強震観測網K-NETの観測点を予測ターゲットとして、その周辺の4つのK-NET観測点のデータと共に学習し、学習に用いていないターゲットのIrとIrの立ち上がり順を予測するモデルを作成した。入力観測点4つにはKNG004、KNG012、TKY007、TKY021を選択し、ターゲットとしてKNG002を選択した。先行研究では東北地方の観測点を用いたため、2011年東北地方太平洋沖地震の余震が数多く確保でき、学習に用いる地震の数が約1000個にも登ったが、本研究では全観測点で共有する地震数は1996年から2021年までで249個と4分の1である。データの预处理として、記録開始から60秒の3成分の地震波形をIrに変換後、100Hzにリサンプリングした。学習における入力データは入力観測点のIrである。正解データにはKNG002のIrを用いた。モデルはマスク層、3層のLSTM層、LSTM層の間に存在するドロップアウト層、全結合層で構成される。損失関数はMSE、全結合層の活性化関数はlinearを使用した。今回学習したモデルは、LSTMのユニット数を50、バッチサイズ1000、学習率0.001とし、エポック20で学習した。データ全体の1割をテストデータ、残りの9割のうち1割を検証データ、9割を教師データに利用した。

初めにt-1秒からt秒までの観測データを使い、予測地点のt秒目のリアルタイム震度を予測し、加重平均と最大入力値を用いて比較を行った。加重平均は予測地点から入力観測点までの距離を重みとして算出した。最大入力値はPLUM法(Kodera et al., 2018)を模倣した値であり、各時刻で入力観測点4つのうち最も大きい値を予測地点の震度としIrを算出した。時系列全体での予測値と観測値のMAE値はLSTMモデルが1.62であり、加重平均の1.41、最大入力値の2.22と比べると、LSTMより加重平均の方が良い値を示した。次に、t-1秒からt秒までの観測データを使い、入力観測点からターゲット観測点までのS波到達までの時間を考慮しt+8秒目のIr予測を行った。入力観測点と予測地点の平均距離が32kmであるため、入力観測点の最初のトリガー時刻から約8秒でS波が到達するという仮定でt+8秒目の予測を行った。MAE値は1.60となった。Irの時系列に加えて立ち上がり順を予測していることから十分に学習させることができなかったため、2つ目の手法では時系列の形状のみを予測するモデルを作成した。

2つ目の手法では、入力観測点をTKY007、TKY021の2点、ターゲット観測点をKNG002とし、Ir時系列の形状のみを予測した。Irの立ち上がり順を考慮しないため、ターゲット観測点がトリガーした時点から予測を行うと仮定し、ターゲット観測点より先にトリガーすることができる2点を入力観測点として使用した。使用する地震数は、使用観測点3点全てが共有し、かつKNG002が最後にトリガーしている、1996年から2021年までの312個である。データの预处理やモデルは1つ目の手法と同様である。t秒目の予測ではMAE値が0.56、t+8秒目の予測では0.58と、入力観測点数が異なるため単純な比較はできないが、観測点数が2点と少ない学習データで、1つ目の手法と比べて良い値を示した。

時系列の形状のみを予測するモデルでは精度が向上した。しかしリアルタイムでの震度予測を行う場

合、1つ目のように立ち上がり順を考慮する必要がある。そのためにはデータ数を増やす事が不可欠であるので、本研究では解決策としてリアルタイム震度の立ち上がり部分の予測式（久保・功刀, 2022）を用いて訓練データを増やし、その性能について検証する予定である。

Experiment on Early Prediction of Long-Period Earthquake Motions Based on Deep Learning

*Takashi FURUMURA¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

深層学習に基づき、大地震の震源域近傍での強震観測波形データに基づき、遠地の離平野で生成する長周期地震動（周期2～20秒程度）の即時予測モデルを開発した。深層学習を強震動予測に適用した既往研究には、震源要素とサイト特性を入力とする最大加速度分布の予測（例えば、Kubo et al. 2020）や、震源近傍での地震波形データから遠地の地震動レベル（例えば、Jozinovic et al. 2020）及び応答スペクトルの予測（田屋・古村、2022-本大会）がある。本研究では、震源近傍での観測波形から、遠地の長周期地震動を予測する、“波形から波形の予測”を行った。これは、長周期地震動による構造物の影響評価において、速度応答スペクトル値に加え、揺れの包絡線形状や継続時間など、揺れ波形の特徴も重要な指標になると考えられるためである。

2. データ・手法

日本海溝沿いの大地震による長周期地震動予測をターゲットとし、F-net八溝観測点（YMZF；栃木県大田原市）の速度型強震計記録を入力データとして、南南西方向に141 km離れたHi-net 富岡観測点（YFTH；横浜市金沢区）の長周期地震動の予測を行った。この距離では、表面波の到着まで約50秒の猶予時間がある。予測モデルには、時系列データ処理に用いられるTemporal Convolutional Network (TCN)を採用し、Keras-TCNライブラリ(Remy 2020)を用いてpythonコードを作成した。TCNは、他の時系列処理モデル（RNNやLSTMなど）に比べて、長い入力データを少メモリ・計算量で処理可能である。ここでは、長時間の波形データを扱うために、畳み込み層のフィルタ項数を256、カーネルサイズを3, dilationsを2,4,...,128と大きく設定した。また、過学習を防ぐためにドロップアウト率を0.01に設定した。学習データには、東北地方太平洋沖地震の前（2004/4/1～2011/3/10）に発生した、Mw6.0以上の33個の地震のF-net, Hi-net波形データを使用した（図1）。Hi-netデータは振り切れがないことを確認し、地震計特性補正フィルタ（Maeda et al. 2017）により広帯域化した。波形データには周期1～40 sのバンドパスフィルタをかけた後に4 Hzにリサンプリングし、長さ600秒の学習データセットを用意した。学習は、東大情報基盤センターのWisteriaを用いて実行し、バッチサイズを10とする1000エポック数の繰り返し学習にはGPU計算で2分を要した。

3. 結果

学習済みTCNモデルを用いて、東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）と以後（2011/3/11～2018/1/24）に東北沖で発生した25個の地震（ $\geq$ Mw6.3）を対象に長周期地震動の予測テストを行った。予測は、WisteriaのCPU計算により1地震あたり0.06秒で完了した。図2に、(a)東北地方太平洋沖地震、(b)2005/12/12岩手県沖の地震（Mw6.9）、(c)2008年12月14日の福島県沖の地震（Mw6.1）の長周期地震動の予測波形と実際の観測波形の比較、及び入力波形を示す。全ての地震の予測テスト結果と観測波形との一致度は、1）速度応答スペクトルの強度比、2）弾性震動エネルギーの総和比、3）波形エンベロープの相関係数、の3つの指標で定量化し、その分布の四分位数を箱ひげ図を用いて示す（図2d）。指標1)～3)の平均値は、それぞれ0.7、0.52、0.5となり、全体的に過小評価気味ではあるが、速度応答スペクトルと経時特性の形状が良く再現された。一方、予測の外れ値（過大評価）は、YMZF観測点に近い福島県浜通りの地震に対する予測結果である。この地域では、東北地方太平洋沖地震後に活動が活発化しており、予測モデルの汎用化に向けて新たな観測データを追加した学習の更新が必要である。

4. 今後の課題

今回の予測実験では、関東平野での予測の入力地点として茨城県のYMZF観測点を使用した。予測の猶予時間を確保するためには、より遠地の入力に基づく予測が望ましい。一方、猶予時間と予測精度にはトレードオ

フがあるため、複数観測点を用いた予測や、観測データの取得状況に合わせた予測の随時更新など、予測システムの拡張が必要である。

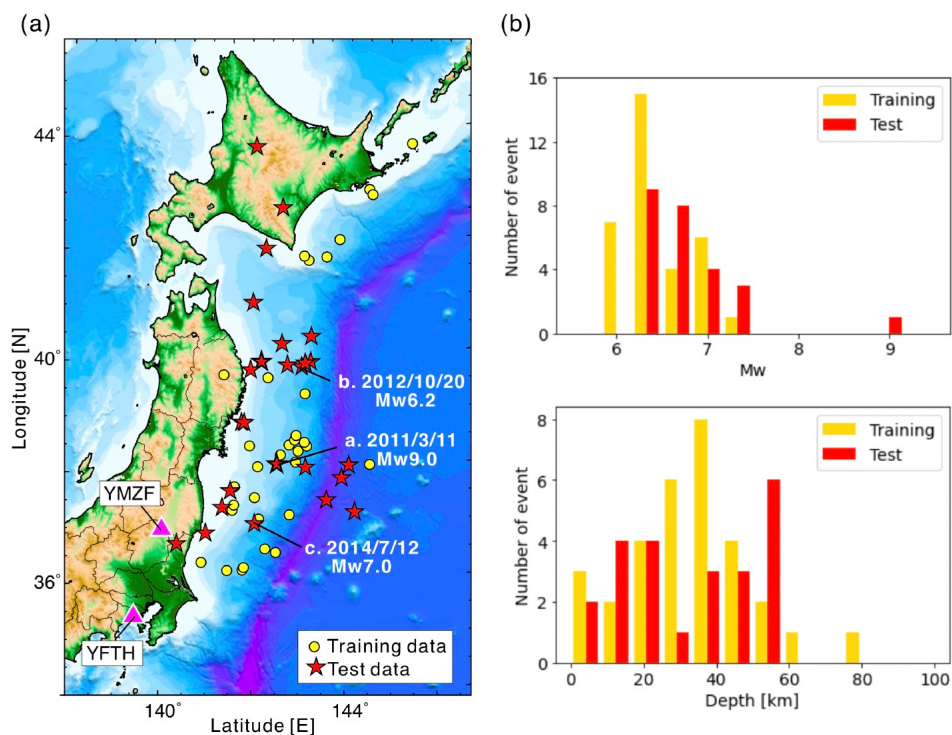


図1. (a)長周期地震動予測に用いる入力観測点 (YMFZ) と予測地点 (YFTH)。地図中の黄色○印は学習データ、赤色★印はテストデータに用いた地震を表す。(b) 学習データとテストデータの Mw と深さ分布。

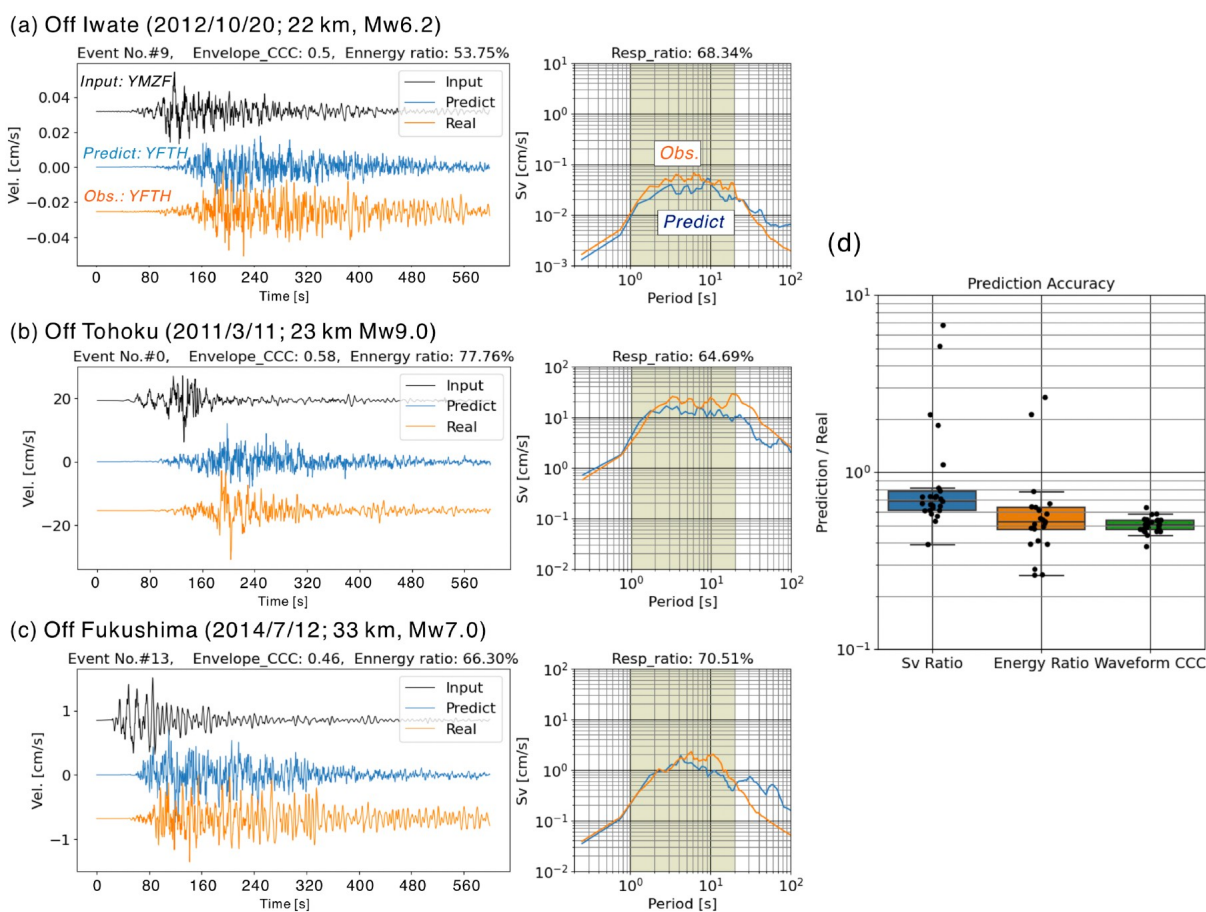


図2. 入力波形 (YMFZ 観測点; 黒)、予測波形 (YFTH 観測点; 青)、および観測波形 (オレンジ) の比較・右図は予測・観測波形の速度応答スペクトル (ハッチは予測対象周期範囲: 1~20 秒)。(a) 岩手県沖の地震 (Mw6.2)、(b) 東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) (c) 福島県沖の地震 (Mw7.0)。右図は予測・観測波形の速度応答スペクトル ($h=5\%$)。 (d) 25 個の地震の予測/観測比と相関係数の分布を四分位数にて表示 (左から、1. 速度応答スペクトル比、2. 弾性エネルギー総和比、3. 波形の相互相関係数の分布)。

Study on prediction of pseudo velocity response spectrum by machine learning —Part3 Simulation of response spectrum of crustal earthquake in Eastern Japan—

*TIANZENG WEI¹, KAI TERAZONO¹, HIDENORI KAWABE¹

1. Osaka University

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震が発生して以降、強震観測網の整備により得られた強震記録の数が大幅に増えている。膨大な強震記録を用いて精度の高い地震動予測を行う方法として、機械学習が近年注目されている。東日本では、2008年岩手城内地震や2011年東北地方太平洋沖地震など大規模な地震が多く発生している。構造物の地震被害を軽減するためには、耐震設計を行う際に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、本研究では東日本を震源とする地殻内地震を対象として機械学習を用いた擬似速度応答スペクトルの予測モデルを構築することを目的とする。

2. 使用する観測記録

1997年1月1日から2022年5月1日までの地震のうち、震源北緯 $34.0^{\circ} \sim 42.0^{\circ}$ 、震源東経 $138.0^{\circ} \sim 144.0^{\circ}$ の震源域の震源深さ40km以浅の地殻内地震を検討対象地震とする。地震タイプについては、気象庁の毎月の「地震活動及び火山活動について」¹⁾を参考に分類する。図に検討対象地震の位置及び規模を示す。防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-netの地表の記録のうち、水平成分の最大加速度が 2cm/s^2 以上の観測記録を使用する。その上で、P波の立ち上がりがない波形及びSN比が悪い波形を除外する。選定した観測記録を用いて減衰5%擬似速度応答スペクトルを0.25秒間隔で周期10秒まで計算する。

3. 解析概要及び解析結果

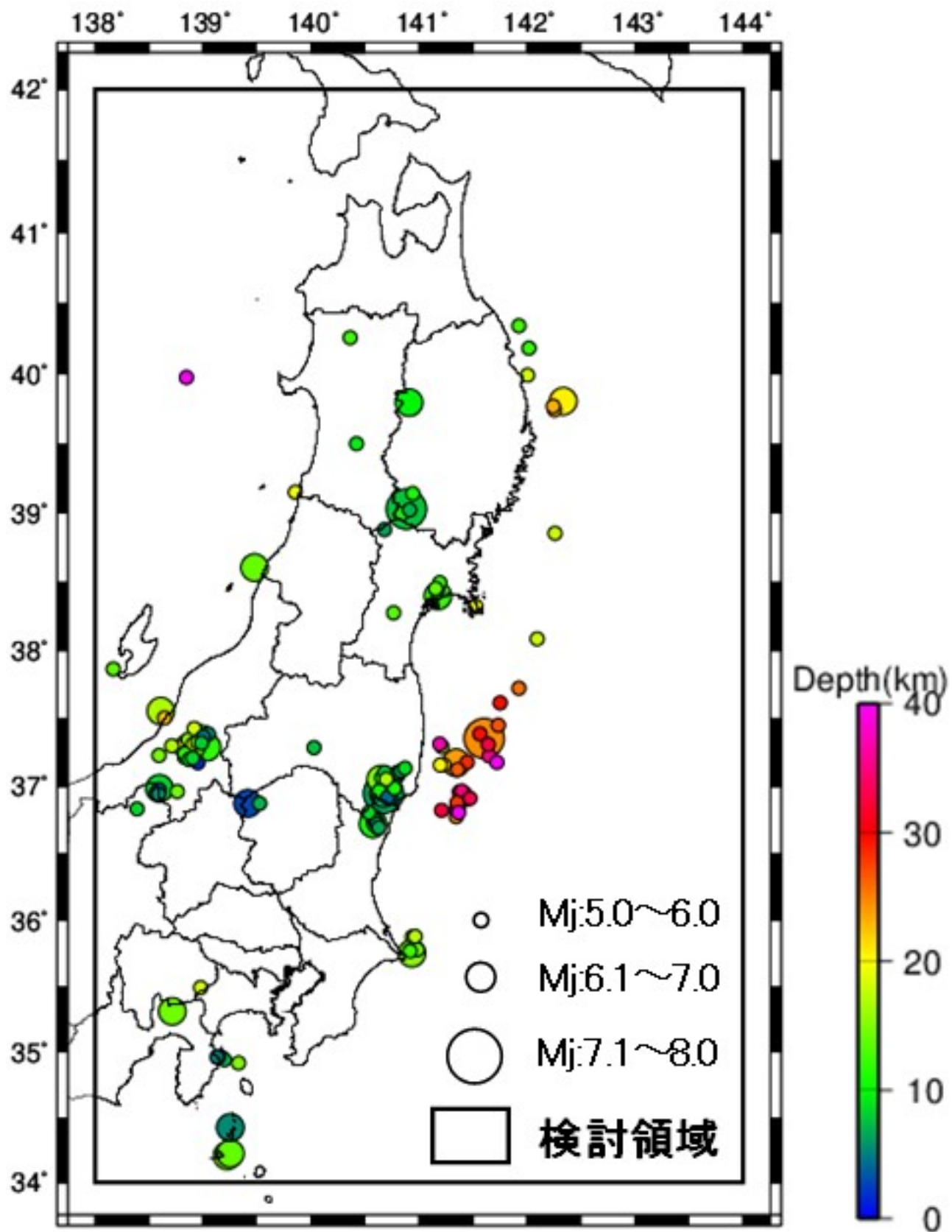
その2では観測点ごとに機械学習を用いて最適な予測モデルの検討を行ったが、その3ではその1と同様に対象地域の全ての観測点を対象として最適な予測モデルを構築する。震源の位置及びマグニチュード、震源のメカニズム解、観測点の位置、観測点の地下構造などの情報を組み合わせて複数の入力変数の組み合わせを設定する。ここでは、機械学習のアルゴリズムのうち、深層学習とXGBoostを用いて目的変数とする周期毎の擬似速度応答スペクトルの値の最適な予測モデルの作成を目指す。両手法の周期毎の予測精度を比較し、精度がより高い手法を用いて最終的な東日本の予測モデルを構築する。本発表ではこれらの検討結果を紹介する。

参考文献：

1)気象庁: 地震活動及び火山活動について, <https://www.jma.go.jp/jma/press/hodo.html>

謝辞：

本研究では、気象庁及び防災科学技術研究所のF-netの震源情報、K-NET及びKiK-netの地震記録、並びに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。



Study on Prediction of Pseudo-velocity Response Spectrum Using Machine Learning -Part2: Response Spectrum Simulation of the 2016 Kumamoto Earthquake-

*Kai Terazono¹, Tianzeng Wei¹, Hidenori Kawabe¹

1. Osaka University

1.はじめに

地震動予測の結果は、建物の耐震設計や地震による都市の被害想定などに利用されている。また、緊急地震速報では地震の揺れを迅速に予測し、揺れが到達する前に鉄道やエレベーターを止めるといった技術にも利用され始めている。予測の対象は震度、最大加速度や応答スペクトルなど様々な値があり、これらの値を精度よく予測することが求められている。既往の地震動予測の手法の1つとして、地震動予測式を使って最大加速度などの予測を行う手法がある。しかし、この手法では式の関数に用いられるパラメータ間の関係が決まっているため、関数に表すことのできない要素についてはその傾向を考慮して予測することができないという問題点がある¹⁾。そこで近年、機械学習を用いて地震動予測を行う研究が行われてきている¹⁾²⁾。機械学習には、様々な要素が影響しあう複雑な現象について、データに基づいて精度よく予測できるという特徴があり、地震動予測の分野においても予測精度の向上を目指して、機械学習を用いた研究が進められている¹⁾。すでに震度の予測などには機械学習が使用され始めているが、応答スペクトルの予測についてはまだあまり研究が行われていない。そこで、その2では、観測点ごとに機械学習を用いて応答スペクトルを予測する手法と、その最適な設定について検討する。

2. 解析の概要

本研究では地震は2016年熊本地震(前震、余震含む)の記録を用いて、九州地方を対象に機械学習を用いて減衰5%の疑似速度応答スペクトルの予測を目指し、その最適な設定について検討する。ここでは、機械学習の手法のうち深層学習を用い、ハイパーパラメータの最適な設定および、入力値の最適な組み合わせについて検討を行う。

3. データセットの作成

検討に用いる地震の検索範囲は、北緯32.0~33.5度、東経130.25~132.0度、震源深さ20km以浅、2016年4月14日 21時26分~2017年12月31日 23時59分、Mj4.0以上とし、この条件を満たす107地震を検討対象とする。検討に用いる観測点については、九州地方のK-NETおよびKiK-netの観測点のうち、観測記録数が一定数ある観測点を選定して検討を行う。検討に用いる観測点および検討対象とした107地震の震央位置を図に示す。これらの地震、観測点について気象庁およびF-netの震源情報、ならびに観測記録をもとに観測点ごとにデータセットを作成する。訓練データとテストデータの割合は8:2とした。

4. 入力値、予測値

本検討では入力層に入力するパラメータ(入力値)として、震源位置、気象庁マグニチュードおよび震源のメカニズム解を用いる。メカニズム解については、メカニズム解なし、CMT解、初動発震機構解、およびF-netのメカニズム解の4つを検討項目とし、それぞれの設定をモデル①~④とする。ハイパーパラメータについては、隠れ層のユニットの数を50,100,150,200個、隠れ層の数を1,2,3,4層とした計16ケースで検討を行う。学習率は0.001、ドロップアウトは有りとする。

5. 最適値の検討

4章で示した4つのモデルについて、それぞれ最適なハイパーパラメータの値を検討する。モデルごとに、計16ケースのうち評価関数Eの値が最も小さくなった最適な設定とそのときの評価関数の値を計算して、最も精度が良くなる最適な設定を求める。

謝辞

本研究を行うにあたり、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの地震記録およびF-netの強震観測データ、気象庁の強震観測データを使用させていただきました。作図にはGMTを使用させていただきました。ここに謹ん

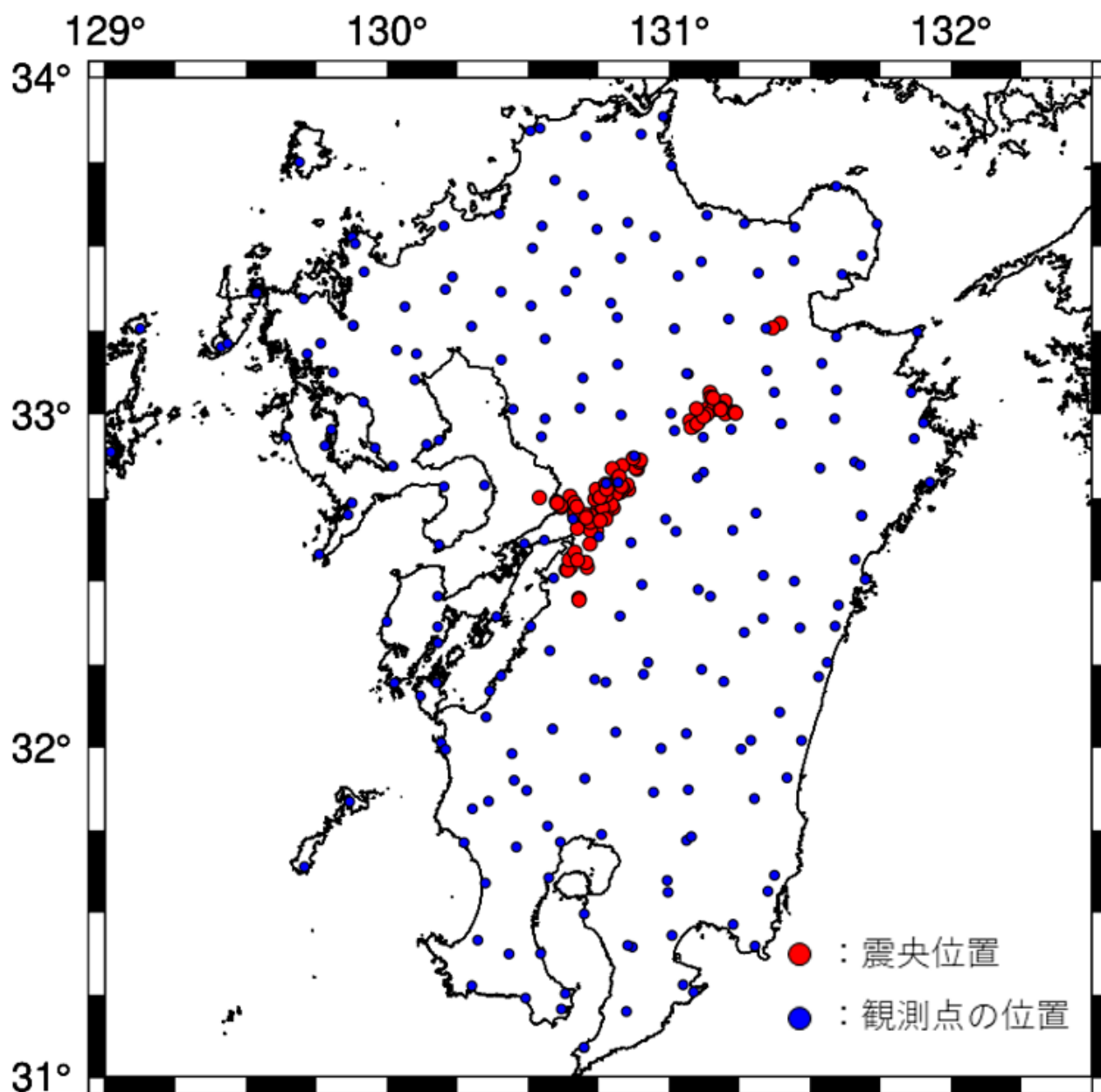
で、感謝の意を申し上げます。

参考文献

1) 地震本部: 機械学習と物理モデルのハイブリッドより良い地震動予測へ

https://www.jishin.go.jp/resource/column/column_20aut_p08/(参照日2022.3.10)

2) 小穴温子, 石井透, 和田健介: 機械学習による地震動評価モデルにおける特徴量の可能性, 人工知能学会全国大会論文集JSAI2020(0),3Rin403-3Rin403, 2020



Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities : S24.Committee activities for society

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏠 ROOM P-8
[S24] S24

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

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

9:30 AM - 4:00 PM JST | 12:30 AM - 7:00 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-01]Committee for Seismology Outreach

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-02]Disaster Investigation Committee

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-03]Newsletter Editorial Board

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-04]Geoparks Assistance Committee

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-05]Zisin Editorial Board

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-06]Public Relations Committee

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-07]Strong Ground Motion Committee

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-08]Committee for School Education

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-09]Committee on Summer School for Kids

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

Poster session (3rd Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 4:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 4:00 PM

[S24P-10]Kanamori Fund

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

Poster session (3rd Day) | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S22P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-01] Estimation of early postseismic slip following the 2003 Tokachi-oki earthquake by assimilating high-rate GNSS data

*Masayuki KANO¹, Yuji Itoh^{2,3} (1. Tohoku University, 2. ISTERre, Université Grenoble Alpes, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-02] Evaluation for hypocenter estimation error in the Kuril trench using seismic data

*Masayoshi ICHIYANAGI¹, Hiroaki Takahashi¹, Ryosuke Azuma² (1. ISV, Hokkaido University, 2. AOB, Tohoku University)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-03] Three-dimensional Vs structure in the offshore forearc region along the Japan and Kuril trenches estimated by ambient noise tomography

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-04] Difference of tsunami sources by great earthquakes that occurred in the southern Kuril trench around the 17th and 13th centuries

*Kei IOKI¹, Yuki SAWAI¹, Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-05] A preliminary study on the western source area of the tsunami that struck the Pacific coast of Hokkaido, Japan, on April 25th, 1843

*Yuichi NAMEGAYA¹ (1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology (IEVG), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S22P-06] Nonlinear and linearized propagation characteristics of the 2003 Tokachi-Oki tsunami

*Yusuke YAMANAKA¹, Yuichiro TANIOKA¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University)

Estimation of early postseismic slip following the 2003 Tokachi-oki earthquake by assimilating high-rate GNSS data

*Masayuki KANO¹, Yuji Itoh^{2,3}

1. Tohoku University, 2. ISTerre, Université Grenoble Alpes, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

巨大地震発生後の余効変動を正確に把握することは、地震後に発生する誘発地震の予測や次の巨大地震までの回復過程を理解する上で重要である。特に地震発生後数月から数年の間に卓越する余効すべりの正確な把握や推移予測には、地震発生直後（特に1日以内）の余効すべり（以下「初期余効すべり」と呼ぶ）の情報が必要であることが最近の研究により示されている（例えばTwardzik et al., 2019、Kano et al., 2020）。また初期余効すべりは断層のすべりを規定する摩擦構成則を理解する上でも重要である（Helmstetter and Shaw, 2009）。

Kano et al. (2020)は、GNSSによる地殻変動データを速度状態依存摩擦構成則を仮定して計算される断層すべりの数値シミュレーションにデータ同化する手法を開発し、2003年十勝沖地震（ M_w 8.0）の地震後一ヶ月の余効すべりを対象にすべりの再現と短期推移予測に成功した。しかしながら、この際同化したデータは地震翌日を初期時刻とした日ごとの変位データのため、地震直後から翌日までの情報は使用していない。また、最初の変位データが同化されるまでの1日間（すなわち地震の翌日から2日後）に不自然なすべり速度の加速が推定されたが、このすべりの加速の真偽を確かめるためには、より高サンプリングな観測データを用いる必要がある。そこで我々は従来より高サンプリングなGNSSデータに基づく地震直後の地殻変動データから初期余効すべりを推定するデータ同化手法を開発した。本講演では開発した手法を2003年十勝沖地震の初期余効すべり推定に適用した結果を報告する。

Evaluation for hypocenter estimation error in the Kuril trench using seismic data

*Masayoshi ICHIYANAGI¹, Hiroaki Takahashi¹, Ryosuke Azuma²

1. ISV, Hokkaido University, 2. AOB, Tohoku University

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋地震（M9.0）を契機として千島海溝から日本海溝にかけて防災科学技術研究所により日本海溝海底地震津波観測網（S-net）が設置された。気象庁では、2020年9月1日から気象庁一元化震源の震源決定にS-netのデータの利用が開始された。1999年に設置されたJAMSTECの釧路沖海底地震観測点3点を含むS-net観測網により北海道の千島海溝付近の十勝沖から根室沖にかけて発生する地震の震源決定精度の向上が期待される。本発表では、S-net観測網を利用することで、設置前と比較して、どの程度震源決定精度が向上したかを数値実験により評価する。十勝・根室沖で発生する地震の多くは沿岸寄りであるS-netと陸上の観測網の間で発生しているが、特にこの領域においてS-netの導入でどの程度震源決定精度の改善したのかを検討する。さらに、実際に十勝・根室沖で発生している地震の震源決定を行い、過去に行われた構造探査の結果と比較することで地震がプレート境界に対してどの位置で発生しているかを調査する。

2. 十勝・根室沖の数値実験による震源決定精度の検討

十勝沖から根室沖にかけて仮想震源を設定して各観測点への走時を計算し、P波とS波の読み取り誤差をランダムに複数発生させて走時に付与した後に震源決定を行うことで震源決定精度を検討した。使用した観測点は、S-net観測網内に仮想震源を配置した場合には、S-net観測点だけを用いた。また、陸上観測網とS-net観測網の間の沿岸寄りに配置した仮想震源に対しては、両観測網を用いた。走時計算と震源決定にはhypomh(Hirata and Matsu'ura, 1987)を用い、P波の読み取り値に0.1秒、S波の読み取り値に0.2秒の分散をもつ正規分布からランダムに誤算を発生させて1つの仮想震源に対して99通りの震源を計算した。その結果、誤差の与えたことにより、S-net観測網の中で発生した地震では水平方向で1km程度、深さ方向で8km程度のばらつきがあった。それに対して、S-net観測網と陸域観測網の間の仮想震源では、水平方向で5km程度、深さ方向で19km程度となった。S-net観測網内での震源決定精度のほうが沿岸部で発生した地震よりも誤差が小さい結果が得られた。

3. 堆積層補正値を考慮したS-net観測網での震源決定

次に、十勝沖の構造探査の結果（Iwasaki et al., 1989）を参考にして1次元P波速度構造を設定し、PS変換波から求めたS-net観測点とJAMSTECの釧路沖海底地震計3点の積層補正値（東・他, 2019）を使用し、S-net観測網内で発生した地震に対して、海底地震計だけを用いて震源決定を行った。Vp/Vs比は1.73を仮定した。2021年5月16日に発生した十勝沖の地震（M6.1：気象庁一元化震源の深さ8.4km）は、この震源決定によると深さ14.9kmに決定された。Iwasaki et al. (1989)でのこの位置でのプレートの深さは15kmであり、この地震は、ほぼプレート境界で発生したことになる。一方、最近の海底地震観測の結果（地震本部, 2009）から求めたプレート境界の位置は20kmとなっており、M6.1の地震はプレートの上盤側で発生したことになる。両観測結果によるプレートの深さの差は5kmであることから、数値実験で見積もられたの誤差（8km）よりも小さい。

本発表では更に、プレートの沈み込みを考慮した2.5次元の速度構造を用いて震源決定した結果も示す予定である。計算に使用した検測値及び震源データは、気象庁一元化震源データを使用しました。

Three-dimensional Vs structure in the offshore forearc region along the Japan and Kuril trenches estimated by ambient noise tomography

*Ryota Takagi¹, Kiwamu Nishida²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）によって東北日本と北海道の前弧海域下における通常地震やスロー地震の詳細な活動や震源特性が明らかになってきた（e.g. Nishikawa et al., 2019, Yoshida et al., 2022）。しかし、地震発生場の理解に重要である前弧海域におけるS波速度構造の理解は限られている。本研究の目的は、S-netで観測された常時微動表面波を用いたトモグラフィーによって、東北日本と北海道の前弧海域における3次元S波速度構造を推定することである。解析にはTakagi et al. (2021) によって得られた機器ノイズ除去済みの多成分相互相関関数を用いて、レイリー波基本モード・1次モードおよびラブ波基本モードの分散曲線を観測点ペア毎の1次元速度構造をモデルパラメータとするTakagi & Nishida (2022)の手法により推定した。次に、波線の屈曲と有限周波数効果を考慮した表面波トモグラフィー（e.g. Yoshizawa et al., 2004）により周波数毎の位相速度マップを推定した。周波数帯域はレイリー波およびラブ波の基本モードでは0.03-0.12 Hz、レイリー波1次モードでは 0.09-0.12 Hz である。その後、大円経路からの距離で重みをつけて観測点ペア毎の1次元速度構造を平均化することで3次元初期構造を作成し、局所分散曲線の線形化インバージョン（Herrmann, 2013）により深さ50 kmまでの3次元S波速度構造を推定した。推定されたS波速度構造は、特に深さ10 km程度以浅において、構造探査によるP波速度構造の特徴とよく一致する（e.g. Ito et al., 2004）。また、沈み込む海洋性地殻と考えられる低速度領域が深さ30 km程度までイメージされた。上盤内およびプレート境界付近のS波速度構造は日本海溝および千島海溝に沿って空間的に変化しており、スロー地震および通常地震分布とS波速度構造の対応関係を詳細に調べることで、地震発生場の理解をより深められると期待される。

Difference of tsunami sources by great earthquakes that occurred in the southern Kuril trench around the 17th and 13th centuries

*Kei IOKI¹, Yuki SAWAI¹, Yuichi NAMEGAYA¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

歴史記録や地質記録の研究により、千島海溝南部ではM8-9クラスの巨大地震が繰り返し発生してきたことが明らかになっている。北海道東部太平洋沿岸地域では、先史時代に堆積した津波堆積物が報告されており、最新の巨大津波は17世紀、その一つ前のものは13世紀頃に発生したと考えられている(Nanayama et al., 2003等)。本研究では17世紀および13世紀頃に発生した地震の規模評価のため、津波堆積物の分布と計算浸水範囲を比較し、繰り返し発生する巨大地震の発生メカニズムの多様性について考察した。

17世紀と13世紀頃の津波堆積物の分布が違うことは、先行研究によって指摘されている。例えば、北海道厚岸郡浜中町霧多布湿原の一番沢奥部においては、17世紀および13世紀頃の津波堆積物の分布範囲が比較・検討されており、Nanayama et al. (2003)等より内陸で17世紀の津波堆積物が確認され、それよりさらに内陸(海岸から約4 km内陸)で13世紀頃の津波堆積物が確認されている(中村ほか, 2019)。また北海道根室市別当賀フレシマ湿原においても、17世紀の津波堆積物と、さらに内陸で13世紀頃の津波堆積物が報告されている(七山ほか, 2004)。

以上のような津波堆積物の分布状況を再現するため、津波堆積物の分布範囲と計算した浸水範囲の比較を行った。Satake et al. (2008)やIoki and Tanioka (2016)の先行研究では、17世紀地震の波源は、根室セグメントより十勝セグメントの方がすべり量が大きい特徴を持つ。一方、浸水計算結果より13世紀頃の地震の波源は、十勝セグメントより根室セグメントの方がすべり量が大きい可能性があることがわかった。本研究の一部はJSPS科研費(20H01988)により実施した。

引用文献

- ・ Nanayama, F., K. Satake, R. Furukawa, K. Shimokawa, B. F. Atwater, K. Shigeno, and S. Yamaki, 2003, Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench, *Nature*, 424, 660-663.
- ・ 中村淳路, 澤井祐紀, 松本弾, 谷川晃一郎, 伊尾木圭衣, 2019, 北海道霧多布湿原一番沢における津波堆積物の分布, *第四紀研究*, 58, 4, 303-312.
- ・ 七山 太, 重野聖之, 三浦健一郎, 古川竜太, 2004, 北海道東部, 根室市別当賀低地において記載された4層の津波砂層と広域イベント対比, *活断層・古地震研究報告*, 4, 9-15.
- ・ Satake, K., F. Nanayama, and S. Yamaki, 2008, Fault models of unusual tsunami in the 17th century along the Kuril trench, *Earth Planets Space*, 60, 925-935.
- ・ Ioki, K., Tanioka, Y., 2016, Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 433, 133-138.

A preliminary study on the western source area of the tsunami that struck the Pacific coast of Hokkaido, Japan, on April 25th, 1843

*Yuichi NAMEGAYA¹

1. Research Institute of Earthquake and Volcano Geology (IEVG), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

天保十四年三月二十六日（1843年4月25日）に北海道太平洋沿岸を襲った津波（以下、1843年津波と記す）について、その波源の西側にかんする予察的検討を行ったので報告する。1843年津波は1952年十勝沖地震津波（以下、1952年津波と記す）とその高さの分布パターンが似ているとされている（例えば、羽鳥, 1984; Satake et al., 2005）。例えば、いずれの津波も北海道厚岸町周辺に波高の高いピークがあること、また三陸沿岸の青森県八戸市などで比較的大きな波高が記録されていることが挙げられる。しかしながら、八戸での実際の津波の高さは1952年津波で2 m（中央气象台, 1953）、1843年津波で3 m（都司・他, 2014）と推定されていることや、宮古市の宮古湾奥においては1952年津波で2.0-2.5 m（金浜集落, 中央气象台, 1953）、1843年津波で3.2 m（赤前集落, 都司・他, 2014）と推定されている。これらのことから三陸沿岸については1952年津波に比べ1843年津波のほうが津波の高さが大きい可能性がある。この津波の高さの違いがそのまま波源の大きさ等の違いを表していると考えた場合、1843年津波の波源モデルを検討するためには、同津波と波高分布が似ているとされる1952年津波の波源モデルを出発点に付加的な波源を追加することが一つの解決案ではないかと考えた。そこで1843年津波の波源モデルとして、1952年地震の断層モデル（Hirata et al., 2003）に加えて、Hirata et al. (2003)の最西側の断層（小断層A・B）を西側に延長するような形で100 km 四方の断層（小断層K）を設置し2 mすべらせた場合で沿岸における津波の高さを計算した。この結果、八戸沿岸においては小断層Kを設置することにより津波の高さが増加し、小断層Kを設置しない場合に比べ1.3-1.9 倍程度高い津波の高さが計算された。これらは1843年津波の実際の高さに近くなる結果であった。このような傾向は三陸沿岸のほかの地域にも見られ、小断層Kを加えた場合の高さが3倍程度高くなる場所もあった。また、小断層Kを加えた場合は、北海道函館において記録されている津波の高さ（0.5 m, 羽鳥, 1984）もおおむね再現することができた。一方で厚岸側に着目すると小断層Kを加えた場合でも沿岸における津波高さの変化はほとんどなかった。このことは1952年地震のすべり量分布に対してすべり量2 mの小断層Kの道東への寄与はほとんどないといえる。逆に言えば道東のデータからでは小断層Kの必要性が議論できないことを意味する。本研究で扱った小断層Kの存在は、その存在性についてもまだ検討の余地がある。そもそも道東における1952年地震のすべり量分布と1843年地震のすべり量分布を同じとして扱っていいのか、あるいは三陸海岸沿岸での歴史記録調査を含め、1843年や1952年津波の実際の津波の高さデータの精査などを行う必要があり、これらの結果によっては他の解が生じる可能性も十分にあり得るだろう。なお、本研究で行った津波の計算はJAGURS（Baba et al., 2015）を利用し、沿岸域周辺では5秒メッシュで計算を行いました。また、本研究の一部はJSPS科研費（20H01988）により実施いたしました。記して感謝いたします。

Nonlinear and linearized propagation characteristics of the 2003 Tokachi-Oki tsunami

*Yusuke YAMANAKA¹, Yuichiro TANIOKA¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

地震により発生した津波が検潮所で観測された場合、それを観測津波波形として用いて震源過程の逆解析が行われる場合がある。そのような逆解析を行う場合、まず震源域内の要素断層すべりによる津波のグリーン関数を線形理論に基づき推定する。それを検潮所地点において線形に重ね合わせることで、観測津波波形を最も妥当に再現できる要素断層のすべり量分布を推定することが多い。しかしながら、沿岸域における津波は非線形特性を有している。前述の手法では、線形重ね合わせの原理を用いた逆解析の理論的整合性を維持するために津波の波動を線形近似して推定するが、これが逆解析の結果に及ぼす影響は十分に検討されていない。本研究では、津波の非線形性が逆解析に与える影響を評価することを念頭に置き、2003年十勝沖地震津波を対象としてその数値波動特性を分析した。

先行研究によってすでに十勝沖地震のモデル化は行われており、検潮所で観測された津波波形に基づく断層モデルも構築されている。本研究ではその断層モデルによる津波の伝播を、線形長波方程式および非線形長波方程式に基づき推定し、北海道沿岸域の検潮所地点(苫小牧西, 苫小牧東, 十勝, 釧路, 厚岸, 花咲)において両者を比較した。その結果、線形および非線形長波方程式に基づきそれぞれ推定された第一波目の津波は、苫小牧西, 苫小牧東, 厚岸, 花咲では概ね一致したが、津波による水位変動が大きかった十勝および釧路では両者が明らかに乖離していた。推定される津波の振幅と周期に線形近似の影響が及んでいたことから、その影響を考慮しないまま逆解析を行えば、推定されるすべり量の大きさやその分布に無視できない誤差が生じる可能性があることがわかった。さらに十勝検潮所周辺海域において、非線形長波方程式に組み込まれている非線形性項の影響の大きさを数値的に分析した。その結果、海底摩擦損失項よりも移流項の方が推定波形に及ぼす影響が相対的に大きく、移流項の影響は検潮所が設置されている十勝港の内側および防波堤開口部で顕著になることがわかった。

以上の結果から、津波の特性と地形条件によっては第一波目の津波においても非線形効果が無視できず、それが線形逆解析の結果に不確実性をもたらす可能性があることがわかった。観測津波波形を用いた線形逆解析を行う際には、津波の非線形効果が観測された津波波形にどの程度反映されているかを分析し、その影響が比較的小さい観測波形をスクリーニングする必要がある。

Poster session (3rd Day) | Special session : S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 4:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 7:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-3
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S23P] PM-P

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-01] Minimum information dependence modeling for analyzing the dependence in mixed-domain data: Application to the dependence analysis of focal mechanisms and depths

*Keisuke YANO¹, Tomonari Sei² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 4:00 PM JST | 4:30 AM - 7:00 AM UTC

[S23P-02] Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault

*Shin-ichi ITO¹, Masayuki KANO², Hiromichi NAGAO¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tohoku University)

Minimum information dependence modeling for analyzing the dependence in mixed-domain data: Application to the dependence analysis of focal mechanisms and depths

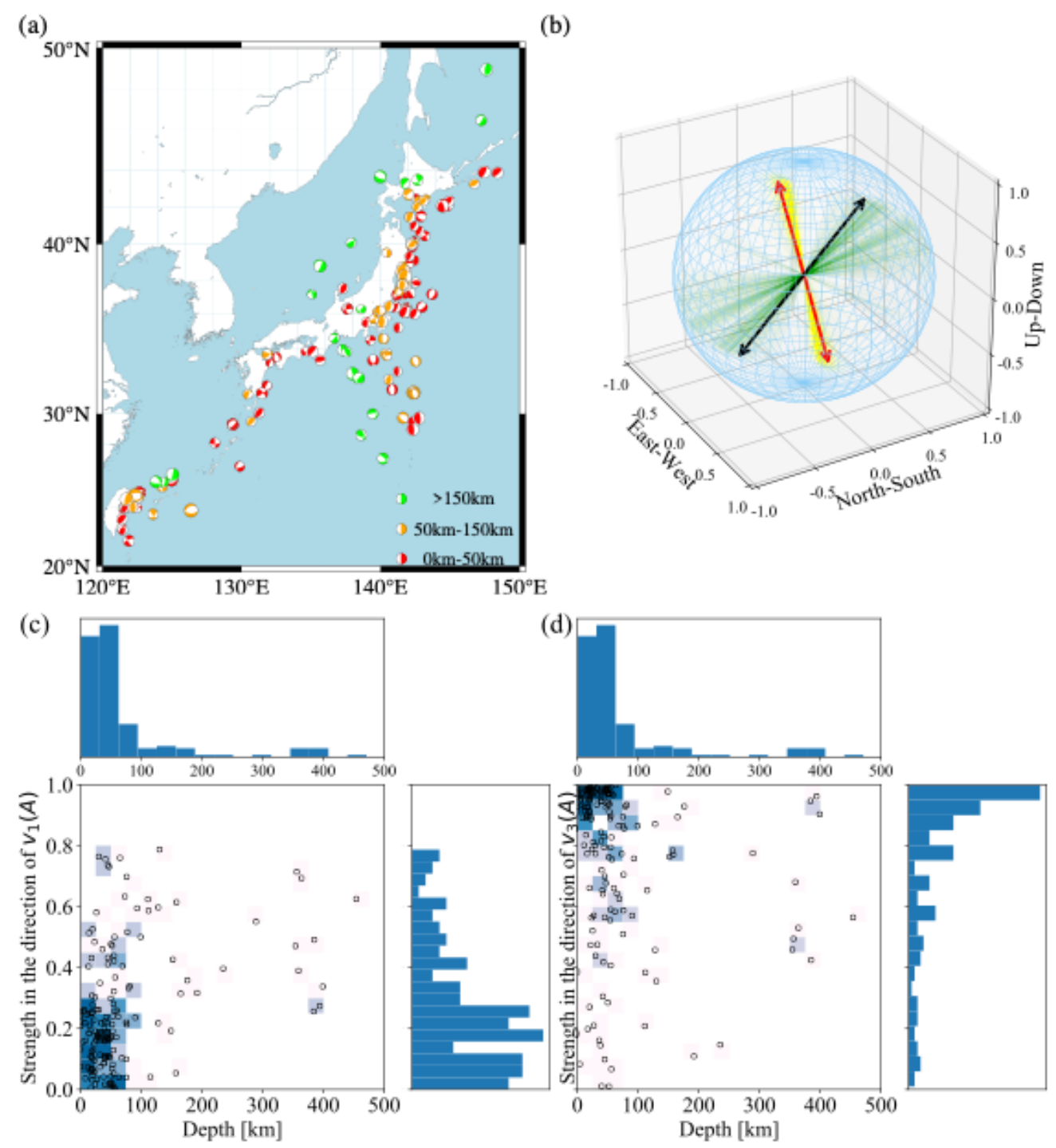
*Keisuke YANO¹, Tomonari Sei²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Univ. of Tokyo

地震学にはカテゴリーデータ・正值データ・角度データなど多種多様な形式のデータが存在する。本研究ではこれらの多種多様な形式のデータ間の依存関係を調べる統計モデル及び依存関係の推定法を提案する。提案手法のデモンストレーションとして、2021年の気象庁CMT解リストを用いて日本全土の初動発震機構解と深さの依存関係の解析事例を紹介する。

本研究では変数間の依存関係を表すパラメータと周辺分布を規定するパラメータを持つ最小情報従属モデルを提案する。このモデルのパラメータをデータから推定することによって、各変数間にどのような依存関係があるか、どのくらいの依存関係があるか、ということを定量的に評価することができる。しかしながら、尤度には複雑な項が含まれており、最尤推定することは非常に難しい。そこで、本研究では、尤度計算を必要としない依存関係のパラメータの推定法を提案する。提案する推定法は、周辺分布を規定するパラメータを用いず行うことができ、さらに最尤法と漸近的に同等である。

最小情報従属モデルを用いて、メカニズム解と震源の深さの依存関係を解析する。この適用では、2021年の気象庁CMT解リストに掲載されている158個の地震を用いた。震源の深さごとの震源球を図1(a)に表示している。この図から、メカニズム解と震源の深さの依存関係が定性的に確認される。そこで、最小情報従属モデルを用いて両者の依存関係の定量的な評価を試みる。まず、P軸とT軸を三次元空間上の直交枠(直交する二つの軸)と捉える。すなわち、P軸とT軸のペアはシュティーフェル多様体の要素であるとする。震源の深さは実数値と捉える。次に、P軸とT軸と震源の深さに対する最小情報従属モデルを考える。このモデルはP軸と深さの依存関係を表す未知の 3×3 の行列パラメータA・T軸と深さの依存関係を表す未知の 3×3 の行列パラメータBをもつ。A=B=0を仮説検定することでメカニズム解と震源の深さの独立性の検定を行うことができる。さらに、Aを固有値分解し、その固有ベクトルを求めることによって、P軸と深さとの依存関係が最も大きくなるあるいは最も小さくなる方向を同定することができる。Bを固有値分解することによって同様の解析をT軸に関しても行うことができる。まず、A=B=0を帰無仮説とする仮説検定のp-値は0.02となった。次に、データから推定されたP軸と深さの依存関係パラメータの固有ベクトルを図1(b)に示す。ここでは、Aを第2固有値が0になるように変換し、第1固有ベクトル(固有値が正の方向)及び第3固有ベクトル(固有値が負の方向)を示している。赤色の軸は推定第1固有ベクトルであり、周囲の黄色の軸はそのばらつきを表す。黒色の軸は推定第3固有ベクトルであり、周囲の緑色の軸はそのばらつきを表す。P軸データの第1固有ベクトル方向成分の大きさと震源の深さの2次元ヒストグラムを図1(c)に示す。P軸データの第3固有ベクトル方向成分の大きさと深さデータの2次元ヒストグラムを図1(d)に示す。図1(c)のヒストグラムから、震源が深くなるとP軸の鉛直に近い成分が0に近い地震が少なくなることが見てとれる。



Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault

*Shin-ichi ITO¹, Masayuki KANO², Hiromichi NAGAO¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tohoku University

Slip motion along a fault largely depends on the inhomogeneity of friction that occurs between the fault interfaces. Thus, it is a crucial task to estimate the spatial-dependent frictional features from the observations of the slip motion and then to identify essential parts that contribute to the principal slip motion by quantifying uncertainties involved in the estimates. This study considers an uncertainty quantification problem of the spatially-dependent frictional features based on a fault motion model that mimics the slow-slipping region along the Bungo Channel in the southwestern part of Japan. The fault motion model employs a rate-and-state dependent friction law, in which the frictional parameters are spatially dependent. Although uncertainty quantification in high-resolution is needed to attain the above task, such quantification based on the conventional statistical ways is computationally hard since the complexity exponentially increases with the spatial resolution. This study employs a variational data assimilation method based on a second-order adjoint method to avoid such complexity. Since the data assimilation method enables a selective extraction of the uncertainty of interest, we can attain a fast uncertainty quantification of the frictional parameters in high-resolution. The application of the data assimilation to the fault motion model together with the synthetic observational data of the slip velocity quantifies the spatial dependency of the uncertainty involved in the frictional parameters in high-resolution and reveals how the amount or quality of the observational data of the slip motion influences to the spatial distribution of the frictional parameters. Such quantification provides valuable information to the observational design.