## Thu. Oct 14, 2021

## ROOM P1

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P1 (ROOM P)

[S03P-01] Continuous estimation of the transition process from coseismic rupture to initial postseismic slip based on the PTS analysis

○Yusuke TANAKA[1], Yusaku Ohta[2], Shin'ichi Miyazaki[3] (1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Kyoto University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-02] Details on crustal deformation and gravity-inferred density structures at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

○Tomokazu KOBAYASHI[1], Koji MATSUO[1], Ryosuke ANDO[2], Takayuki NAKANO[1] (1.Geospatial Information Authority of Japan, 2.University of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-03] Application of an objective detection method for long-term slow slip events to Hyuga-nada

○Akio KOBAYASHI[1] (1.Meteorological Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-04] Systematic-detection of short-term slow slip events in the Alaska subduction zone

○Yutaro OKADA[1], Takuya NISHIMURA[2] (1.Graduate School of Science, Kyoto University , 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-05] Long-term SSE along the Nankai trough since 2018

○Shinzaburo Ozawa[1], Hisashi Suito[1], Hiroshi Munekane[1] (1.Geospatial Authority of Japan)

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-06] Decadal postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake observed with the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

○Shun-ichi WATANABE[1], Tadashi Ishikawa[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-07] Temporal variation in slip deficit rate at Nankai trough observed by the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

○Tadashi ISHIKAWA[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] (1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-08] Evaluation of the effects of underwater sound speed structure on GNSS-A observation using numerical simulation

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

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P2

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S06. Crustal structure

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P2 (ROOM P)

[S06P-01] Preliminary report on seismic reflection survey off the southeastern coast of Hokkaido, Kuril trench

○Tetsuo NO[1], Shuichi Kodaira[1], Gou Fujie[1], Yasuyuki Nakamura[1], Kazuya Shiraishi[1], Ryo Muira[1], Hiroto Yamaguchi[2,1], Yuka Kaiho[1], Jin-Oh Park[3], Yue Sun[3], Fan Yu[3], Masao Nakanishi[4], Megumi Fujimoto[5,6], Ryoya Kobayashi[5] (1.JAMSTEC, 2.Kobe Univ., 3.AORI, Univ. of Tokyo, 4.Graduate School of Science, Chiba Univ., 5.Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 6.SOEST, Univ. of Hawaii at Manoa )

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-02] Measurement of seismic velocity anisotropy in the Tohoku region, NE Japan by shear wave splitting analysis (4)

○Tatsuya MIZUTA[1], Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ryota TAKAGI[1], Keisuke YOSHIDA[1], Shin'ichi SAKAI[3], Kei KATSUMATA[4], Mako OHZONO[3,4],

©Seismological Society of Japan

Masahiro KOSUGA[5], Takuto MAEDA[5], Yoshiko YAMANAKA[6], Hiroshi KATAO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Takashi NAKAYAMA[1], Satoshi HIRAHARA[1], Toshio KONO[1], Toru MATSUZAWA[1], Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake （1.Univ. of Tohoku, 2.Victoria University of Wellington, 3.Univ. of Tokyo, 4.Univ. of Hokkaido, 5.Univ. of Hirosaki, 6.Univ. of Nagoya, 7.Univ. of Kyoto, 8.Univ. of Kyushu, 9.Univ. of Kagoshima）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-03] Philippine Sea plate structure inferred from SP converted waves: Preliminary analysis in the southwestern Tokyo metropolitan area

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

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-04] Three-dimensional velocity structure beneath Hakusan volcano estimated by double-difference tomography

○Rin Miura[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-05] Detailed seismic reflection structure mapping in the western Nankai Trough

○Yasuyuki NAKAMURA[1], Yuka Kaiho[1], Tetsuo No[1], Kazuya Shiraishi[1], Gou Fujie[1], Shuichi Kodaira[1], Gaku Kimura[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1], Ayako Nakanishi[1] （1.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-06] The characteristics of small normal faults developed on the subducting Philippine Sea Plate along Nankai Trough

○Mikiya YAMASHITA[1,2], Ayako Nakanishi[2], Seiichi Miura[2], Shuichi Kodaira[2], Yoshiyuki Kaneda[3,2] （1.Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3.Kagawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-07] Effects of insufficient back-azimuth coverage on the estimation of a dipping velocity discontinuity

○Katsuhiko SHIOMI[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S06P-08] Random velocity inhomogeneity at the western part of the Nankai subduction zone

○Tsutomu TAKAHASHI[1], Koichiro OBANA[1], Yasushi ISHIHARA[1], Seiichi MIURA[1], Shuichi KODAIRA[1], Yoshiyuki KANEDA[2] （1.JAMSTEC, 2.Kagawa Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P3

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P3 (ROOM P)

[S09P-01] Relation between activity of repeating earthquakes and slip-rate deficit under the Ryukyu Trench– Nanakai Trough

○Akinori HASHIMA[1], Hiroshi Sato[2], Tatsuya Ishiyama[2], Toshihiro Igarashi[2] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-02] Swarm earthquake activity in the northeastern Noto Peninsula

○Yoshihiro Hiramatsu[1] （1.Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-03] Numbers and duration of aftershocks for inland earthquake in Japan as a function of their size

○Taichi Honda[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-04] Relevance of Seismic activity near Wakayama City to the earth tides

○Funa Iizuka[1], Yasuhiro Yoshida[2] （1.Sapporo Regional Headquarters, JMA, 2.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-05] A trial digitization and spectral analysis of analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network for the analysis of tectonic tremor

○Takanori MATSUZAWA[1], Tetsuya TAKEDA[1]

©Seismological Society of Japan

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

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-06] Comparison of the regional characteristics of the magnitude-frequency distribution of earthquakes with interplate slip phenomena along Japan Trench

○Kohei Nagata[1], Koji Tamaribuchi[1], Fuyuki Hirose[1], Akemi Noda[1]（1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-07] Urgent ocean bottom seismic observation of earthquake swarms in the Tokara Islands initiated in April 2021

○Yukihiro NAKATANI[1], Hiroshi Yakiwara[1], Yusuke Yamashita[2], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1]（1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-08] Seismicity pattern before and after the 2016 Kumamoto earthquakes

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Jun Izutsu[4], Yoshiaki Orihara[5], Masashi Kamogawa[1]（1.Univ. of Shizuoka, 2.Shizuoka Univ., 3.Inst. of Stat. Math., 4.Chubu Univ., 5.Tokyo Gakugei Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-09] A preliminary study on low-frequency earthquakes below Mt. Fuji: Creation of an earthquake catalog using the Matched Filter method and quality evaluation of the catalog

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Yohei Yukutake[4]（1.Univ. of Shizuoka, 2.Inst. of Stat. Math., 3.Shizuoka Univ., 4.Univ. of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-10] Anomalous seismic activity including shallow low-frequency events near Hakodate: hypocenter distribution and characteristics of waveforms derived by dense seismic observation

○Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Masahiro Kosuga[2], Takuto Maeda[2]（1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Hirosaki University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-11] Stress field in the Tohoku region, Japan and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

○Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Shin'ichi Sakai[2], Mako Ohzono[2,3], Kei Katsumata[3], Masahiro Kosuga[4], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Shu'ichiro Hori[1], Toru Matsuzawa[1], . Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake（1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 4.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5.Graduate School of Encironmental Studies, University of NAGOYA, 6.Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 8.Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-12] Performance comparison of hash-based methods for similar waveform detection

○Yuki Takayama[1], Shiro Hirano[1], Hironori Kawakata[1]（1.Ritsumeikan University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-13] Along-strike variation of shallow very low frequency earthquake activity in the Nankai subduction zone

○Shunsuke TAKEMURA[1], Satoru Baba[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Katsuhiko Shiomi[4], Takanori Matsuzawa[4]（1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.Tohoku University, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-14] Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude

○Koji TAMARIBUCHI[1], Masashi OGISO[1]（1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-15] Aftershocks and shear strain energy changes caused by inland earthquakes in Japan

©Seismological Society of Japan

○Sachiko TANAKA[1] (1.NIED)

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-16] Three-dimensional tectonic stress field inferred from long-term data of seismicity with prior information

○Toshiko TERAKAWA[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2] (1.Nagoya Univ., 2.ISM)

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-17] Spatio-temporal distribution of the very-low frequency earthquake at Kumano-nada — Activity between Dec. 2020 and Jan. 2021—

○Yojiro Yamamoto[1], Keisuke Ariyoshi[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Takane Hori[1] (1.JAMSTEC)

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-18] Controling factors of along-dip segmatation of mega-thrust earthquakes in subduciton zones

○Kiyoshi YOMOGIDA[1] (1.Earth Planetary Dynamics, Grad Sch Sci, Hokkaido University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-19] Visualization of seismic activity anomalies - comparison of multiple methods

○Sumio YOSHIKAWA[1] (1.No affiliation (JMA, retired))

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-20] Scaling relations of moment magnitude and rupture area for intraslab earthquakes

○Xuelei Zhang[1], Makoto Nemoto[1], Nobuyuki Morikawa[2], Yuji Dohi[2], Kenji Hirata[2], Hiroyuki Fujiwara[2] (1.OYO corporation, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P4

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S13. Crustal fluids and earthquake

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P4 (ROOM P)

[S13P-01] Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan

○Tsuyoshi WATANABE[1], Shinya Hiratsuka[1], Koji Shimada[1] (1.Japan Atomic Energy Agency)

3:30 PM - 5:00 PM

[S13P-02] Crustal anisotropy structure around Mt Ontake derived from shear-wave splitting analysis

○Osamu MURAKAMI[1], Tsuyoshi Watanabe[1] (1.Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency)

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P5

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P5 (ROOM P)

[S15P-01] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of earthquakes around Fukushima Prefecture based on Block Inversion analysis using S-net data

○Yusuke TOMOZAWA[1], Tomoki Hikita[1], Tomonori Ikeura[1], Kentaro Kasamatsu[1] (1.Kajima Technical Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-02] **Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites**

○Yadab Prasad DHAKAL[1], Atsushi Wakai[1], Hiroaki Yamanaka[2], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-03] Modeling of a three-dimensional shallow S-wave velocity structure based on numerous microtremor arrays: A case study in and around Nishio City, Aichi Prefecture

○Ikuo CHO[1] (1.Geological Survey of Japan, AIST)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-04] Strong motion very close to the surface rupture during the 2016 Kumamoto earthquake

○Asako IWAKI[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1.NIED)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-05] Source Process of the Off Fukushima Earthquake of February 2021
- Analysis considering 3D subsurface structure -

○Kazuhito HIKIMA[1] (1.Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-06] Applicability of the strong ground motion prediction method to the 2021 Fukushima-oki earthquake (Mj7.3)

©Seismological Society of Japan

○Kiyoshi IRIE[1], Shohei YOSHIDA[1], Yasuo OKADA[1], Ken MIYAKOSHI[2], Kazuhiro SOMEI[2], Haruhiko TORITA[1] （1.Ohsaki Research Institute, Inc., 2.Geo-Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-07] Re-examination of scaling relationships of source parameters of the interplate earthquakes in Japan

○Ken MIYAKOSHI[1], Yujia GUO[1], Kunikazu YOSHIDA[1], Kiyoshi IRIE[2] （1.Geo-Research Institute, 2.Ohsaki Research Institute, Inc.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-08] Concept of Earthquake Disaster Prevention Infrastructure Simulator for the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

○Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Takahiro MAEDA[1], Yuji DOHI[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Harumi ISHIMARU[3] （1.NIED, 2.OYO RMS Corporation, 3.Mitsubishi Space Software Co.,Ltd.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-09] Long-duration and broadband ground motion simulation for the great earthquakes along the Nankai Trough

○Takahiro MAEDA[1], Asako IWAKI[1], Shin AOI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Kosuke SEKI[2], Ryuta IMAI[3] （1.NIED, 2.Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3.Mizuho Research &Technologies, Ltd.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-10] Tsunami Inundation Simulation Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough
- For Effective Use of Tsunami Hazard Information -

○Yuji DOHI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Katsuya YAMORI[2], Takashi SUGIYAMA[2] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-11] A trial of conditional hazard assessment based on Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

Hiromitsu NAKAMURA[1], ○Yoshinori Tokizane[2], Hiroyuki FUJIWARA[1], Satoshi SHIMIZU[2], Miki ASO[2] （1.NIED, 2.OYO RMS Corp.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-12] Number of earthquakes from seismic activity model of the probabilistic seismic hazard map for Japan starting from 2020

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

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-13] **Nonergodic Ground Motion Prediction Model Using Artificial Neural Networks**

○Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Asako IWAKI[2], Hiroyuki FUJIWARA[2], Naonori UEDA[1] （1.RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-14] Analysis and numerical modeling of local earthquake records obtained by the AN-net

○Hisashi NAKAHARA[1], Shutaro Sekine[2] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction）

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P6

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S19. Seismology, general contribution

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P6 (ROOM P)

[S19P-01] Picking of P and S waves and hypocenter determination of the Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake

○Katsuhiro Takasaki[1], Masanao Komatsu[2], Tomotsugu Watanabe[2], Hiroshi Takenaka[3], Mitsutaka Oshima[4] （1.Department of Earth Sciences, Okayama University (Current Affiliation: Japan Meteorological Agency), 2.Department of Earth Sciences, Okayama University, 3.Department of Earth Sciences, Okayama University, 4.Shimizu Corporation）

3:30 PM - 5:00 PM

[S19P-02] Research Project for Disaster Prevention on the great Earthquakes along the Nankai trough: Result and plan

○Shuichi KODAIRA[1], Hiroyuki Fujiwara[2], Narumi

©Seismological Society of Japan

Takahashi[1,2] (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P7

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S21. Seismic spectral analyses for earthquake source physics, earth structure estimation, and strong motion assessment

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P7 (ROOM P)

[S21P-01] Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

○Noriko KAMAYA[1], Masashi OGISO[1] (1.Meteorological Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S21P-02] Rupture propagation effects of moderate-sized earthquakes off Fukushima prefecture derived from source spectra

○Toshimi SATOH[1] (1.Shimizu Corporation)

3:30 PM - 5:00 PM

[S21P-03] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Spatial heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

○Tsukasa Masuda[1], Takuji Yamada[1] (1.Ibaraki University)

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P8

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S22. Advances in Seismology using AI

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P8 (ROOM P)

[S22P-01] Validation of Seismic Phase Picking Using Deep Learning Models Trained by Hakone Volcanic Earthquake Data

○Ahyi KIM[1], Yuji Nakamura[1], Umi Hatakeyama[1], Hiroki Uematsu[1], Yohei Yukutake[2], Yuki Abe[3] (1.Yokohama City University, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Hot Springs Research Institute, Kanagawa)

3:30 PM - 5:00 PM

[S22P-02] Automatic reading of P-wave first motion amplitudes of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory using a deep learning technique

○Makoto NAOI[1], Youqing CHEN[1], Rui TANAKA[1], Yutaro ARIMA[2] (1.Kyoto Univ., 2.JOGMEC)

3:30 PM - 5:00 PM

[S22P-03] Improvement of the Single Station Algorithm in Earthquake Early Warning Using Machine Learning Technique

○Shunta NODA[1], Masato UKAI[1] (1.Railway Technical Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

## ROOM P9

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

P

3:30 PM - 5:00 PM ROOM P9 (ROOM P)

[S23P-01] Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for understanding the current state of postseismic deformation and its short-term prediction following the 2003 Tokachi-oki earthquake

○Masayuki KANO[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Yoichi Ishikawa[3], Kazuro Hirahara[4,5] (1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Faculty of Science, Kyoto University, 3.JAMSTEC, 4.Riken, 5.Kagawa University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S23P-02] Estimation of depth-dependent variations in seismic velocity in the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake based on the MCMC approach

○Takahiro SHIINA[1], Masayuki KANO[2], Sumito KURATA[3], Aitaro KATO[4] (1.Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 4.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 5:00 PM

## Introduction of committee activities

©Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

## S24

3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities (ROOM P)

---

[S24P-01] Public Relations Committee

○佐藤 利典[1]（1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-02] Newsletter Editorial Board

○豊国 源知[1]（1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-03] Strong Ground Motion Committee

○干場 充之[1]（1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-04] Committee for School Education

○加納 靖之[1]（1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-05] Disaster Investigation Committee

○吾妻 崇[1]（1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-06] Committee on Summer School for Kids

○佐藤 明子[1]（1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-07] Geoparks Assistance Committee

○松原 誠[1]（1.The Seismological Society of Japan）

[S24P-08] Committee for Seismology Outreach

○久田 嘉章[1]（1.The Seismological Society of Japan）

©Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P1 (ROOM P)

[S03P-01] Continuous estimation of the transition process from coseismic rupture to initial postseismic slip based on the PTS analysis

○Yusuke TANAKA[1], Yusaku Ohta[2], Shin'ichi Miyazaki[3] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-02] Details on crustal deformation and gravity-inferred density structures at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

○Tomokazu KOBAYASHI[1], Koji MATSUO[1], Ryosuke ANDO[2], Takayuki NAKANO[1] （1.Geospatial Information Authority of Japan, 2.University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-03] Application of an objective detection method for long-term slow slip events to Hyuga-nada

○Akio KOBAYASHI[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-04] Systematic-detection of short-term slow slip events in the Alaska subduction zone

○Yutaro OKADA[1], Takuya NISHIMURA[2] （1.Graduate School of Science, Kyoto University , 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-05] Long-term SSE along the Nankai trough since 2018

○Shinzaburo Ozawa[1], Hisashi Suito[1], Hiroshi Munekane[1] （1.Geospatial Authority of Japan）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-06] Decadal postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake observed with the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

○Shun-ichi WATANABE[1], Tadashi Ishikawa[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-07] Temporal variation in slip deficit rate at Nankai trough observed by the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

○Tadashi ISHIKAWA[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2] （1.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2.Institute of Industrial Science, the University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S03P-08] Evaluation of the effects of underwater sound speed structure on GNSS-A observation using numerical simulation

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

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

©Seismological Society of Japan

# Continuous estimation of the transition process from coseismic rupture to initial postseismic slip based on the PTS analysis

*Yusuke TANAKA[1], Yusaku Ohta[2], Shin'ichi Miyazaki[3]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Kyoto University

地震時すべりから地震後の余効すべりに至る遷移過程の把握は，断層のすべり収支や摩擦特性の正確な理解に必要不可欠である．しかしながら地震時すべりの終了から余効すべりのごく初期の立ち上がりに至る，地震発生後の数分から半日程度の期間をGNSSで連続的に扱った事例は今のところ少数である．これは地表変位と大気遅延等の他の誤差要因との分離の困難性により，同時間スケールで既存の測位解析の精度が特に低下するためである．そこで我々は新たな手段として，GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する手法 (以降 PTS (Phase To Slip)) を用いた，広帯域断層すべりモニタリング技術の開発に取り組んでいる．PTSでは座標推定を行わず，生データである搬送波位相変化をグリーン関数と視線方向への幾何学的変換を介して直接断層すべりに結びつける．そして断層すべりと他の誤差要因の時間変化を一括で推定する．このような手法であれば未知パラメータの推定・分離状況の一体的な定量評価が可能であり，分離精度の改善において有利であると考えられる． 本研究では広帯域な断層すべり把握手段としてのPTSの性能評価を目的として，2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり・初期余効すべりの連続的な推定を試みた．推定では東日本の73のGEONET点の搬送波1秒データを使用し，3月11日の14時から16時 (JST，本震発生は14時46分) の2時間について解析した．まず静的なグリーン関数としてOkadaの式を用いた推定では，本震と岩手沖・茨城沖で発生した余震の断層すべり分布やマグニチュードが通常測位と同等の精度で推定された．得られた結果は地震波形インバージョンによる推定とも概ね調和的となった．さらに上記の3つの地震時すべりとは別に，本震後の時間帯に初期余効すべりの発生も推定された．初期余効すべりは主に本震で大きくすべった領域の深い側に隣接する，岩手・福島・茨城付近の陸寄りの断層域に推定された．すべり量は本震後の34分間で0.2-0.5mとなり，Munekane (2012) 等の先行研究と比べて大きいものの，すべり域の位置としてはよく一致した．これらの結果により，PTSを用いて地震時と地震後のすべりを一括して推定可能であることが示された．一方で現状の推定では静的なグリーン関数を用いているため，地震動の影響は適切に扱われていない．したがって地震発生直後の最初の数分間の部分については，詳細な議論に達していない状況にある．そこで本発表ではさらに発展的な解析として動的なグリーン関数を用い，本震の動的な破壊過程と引き続く余効すべりの立ち上がりの一括推定を試みた結果を紹介する．そして地震時から地震後のすべり現象の遷移過程や両者の関係性，および背景の物理について議論を行う．また広帯域な断層すべり把握手段としての，PTSの有用性について論じる．

© The Seismological Society of Japan

# Details on crustal deformation and gravity-inferred density structures at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI[1], Koji MATSUO[1], Ryosuke ANDO[2], Takayuki NAKANO[1]

1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo

**１．はじめに**

本研究の目的は，断層破壊の終端部及びその周辺に特徴的な地殻構造が存在するかを調べ，断層破壊の終焉を制御する要因について議論することにある．この目的のために，本研究では，2016年熊本地震を対象に，SARによる地殻変動から推定される断層運動の詳細と重力によって推定される地殻構造との間の空間的関係を調査した．

**２．データと解析**

まず初めに，ALOS-2衛星のSARデータを用いたInSAR解析を行い，断層付近を含む震源域の地殻変動を取得した．本研究では，標準的なInSAR法に加えて，レンジ及びアジマス成分の周波数を帯域分割して干渉処理する手法（SBI法）も適用した．アジマス成分に関する処理はMAI法として知られているが，本手法を適用することにより，標準的なInSARでは大きな変位勾配のために干渉性が低くなる震源域近傍においても，空間的に詳細な変位を取得できた．標準的なInSARでは変位計測できなかった領域にSBI法で得られた変位を補間することで，震源領域全体における完全な変動場を獲得できた．さらに，複数の軌道データから得られた変動データを用い，最小二乗法により上下，東西，南北3成分の地殻変動を得た． 続けて，重力データを用いた地殻構造の推定を行った．解析には，後述する布田川断層の破壊終端部周辺を中心にキャンペーン重力観測（60点）を行い，これらデータと既存の重力データを用いたインバージョン解析により地下の密度構造を推定した．地球の質量構造に起因しない重力の影響を除去し，ブーゲ補正や地形補正等を施して地球の内部不均質構造を反映する完全ブーゲ重力異常を得た後，重力インバージョン解析によって地下の密度不均質構造を推定した．密度不均質構造は，平行六面体の質量塊の引力を応答関数とし，密度コントラストを推定パラメータとする重み付き最小二乗法により3次元的に推定した．解析では，初期値として与える密度を様々なパターンで計算することで，初期値依存性を把握・考慮しながら，信頼性の高い解を得るようにした．

**３．結果**

地殻変動の解析から，断層運動起因と推定される変位境界が，布田川断層の東部延長上に伸展して，阿蘇カルデラ西縁部で主に2方向に分岐していることが認められた（図１a）．1つは布田川断層の東部延長上に右横ずれを伴いながら南東側の地盤が沈降する変動を，もう1つはほぼ東西方向に左横ずれを伴いながら北側の地盤が沈降する変動を示している．これらの変位境界・急変帯は比較的広範囲に広がり，かつ直線的に分布することから断層運動起因であることが強く示唆される． 一方，重力データから推定された密度構造の結果は，阿蘇カルデラの中心部に比較的広い低密度領域が分布していることを示す．さらに西側に注目すると，その低密度領域から舌状に延びるように，阿蘇カルデラ西部の浅い部分（深さ約1～2km）にくさび形の低密度体が存在することが分かった（図１b）．注目すべきは，SARによって推定された分岐断層が，その局所的な低密度体の側面およびその西部延長上に沿って位置しており，地殻変動の終端部はその低密度体とほぼ重なっていることである．低密度領域の実体については今後さらに検討する必要があるが，断層面を構成する何かしらの物理境界を示している可能性がある．

謝辞：　本報告で使用したALOS-2データの所有権は，JAXAにあります．これらのデータは，国土地理院とJAXAの間の協定及び地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動に基づいて，JAXAから提供されたものです．本研究はJSPS科研費JP18K03810の助成を受けたものです．

© The Seismological Society of Japan

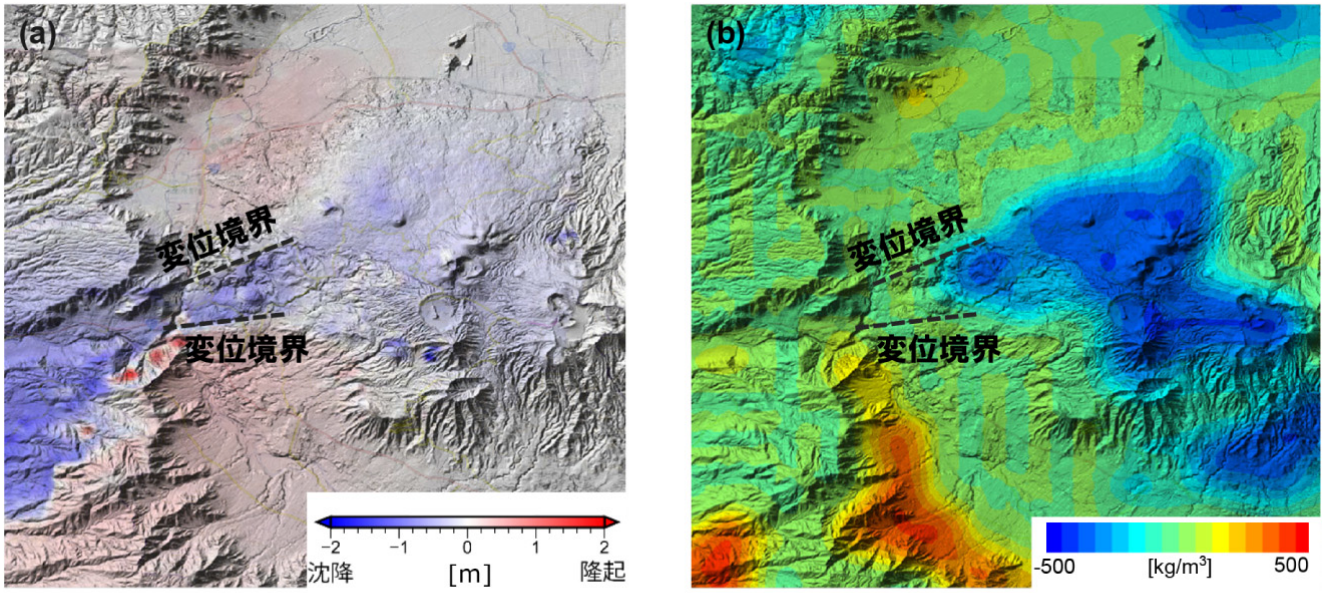



図1 (a) 干渉SAR解析から得られた上下変位. (b) 重力インバージョンによって推定された阿蘇カルデラ西縁周辺の地下密度不均質構造（深さ1.5㎞の水平断面）. 青色（赤色）は周囲よりも密度が低い（高い）領域を表す.

© The Seismological Society of Japan

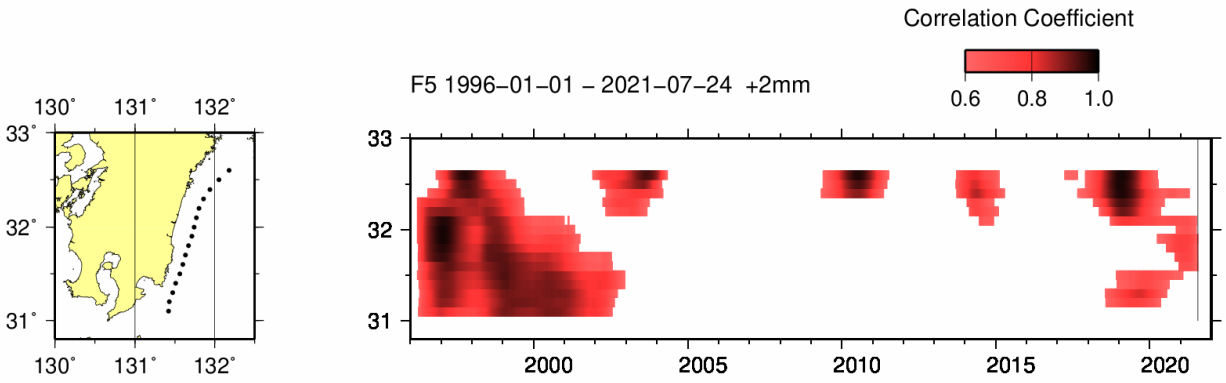
# Application of an objective detection method for long-term slow slip events to Hyuga-nada

*Akio KOBAYASHI[1]

1. Meteorological Research Institute

Kobayashi (2017)はGNSS日座標値（日値）を用いて、南海トラフ沿いの長期的スロースリップ（SSE）をランプ関数との相関値により客観的に検出する手法を開発し、それまで試行錯誤的に検出していたSSE現象を一定条件で検出した。検出領域の西端は豊後水道であるが、九州東岸の日向灘でもこれまでに長期的SSEが報告されている（Yarai and Ozawa, 2013; Takagi et al., 2019）。南海トラフ地震の想定震源域は日向灘を含むため、この領域で発生するSSEの監視も重要となる。このため、同手法の仕様を一部変更して日向灘で発生する長期的SSEを検出できるようにした。具体的な手順は以下の通り。
(1)観測点の成分ごとに直線トレンド、アンテナ交換などに伴うオフセットと主な地震に伴うオフセット、年周・半年周成分を除去する。
(2) 長期的SSEの影響がほぼ見られない九州北西部の観測点の共通ノイズを全点から引き去り、領域全体を固定する。
(3) 各観測点の水平成分からフィリピン海プレート沈み込みと逆方向（S55E）の成分を計算し、プレート等深線25 kmに沿って設定した緯度0.1度間隔の地点を南東端とする50×100 kmの矩形範囲内の各観測点の成分の平均値を求める。
(4) 2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)、2016年熊本地震(M7.3)、2019年5/10日向灘の地震(M6.3)の余効変動を除去する。なお、1996年10/19(M6.9)と12/3(M6.7)の日向灘の地震に伴う余効変動は検討中。
(5) 地点ごとの時系列と1年の傾斜期間を持つランプ関数との相互相関と、対象期間前後の2年間変化量を求める。
なお処理の仕様上、最新期間については、今後データ追加に伴い解析結果が変わる可能性がある。
また、小林（2021）の手順に従い、プレート境界上に置いた矩形断層でのすべりによる理論変位と比較することにより、長期的スロースリップの規模を推定した。
相関係数0.6以上の時空間分布を見ると、1996年の日向灘の地震に伴う余効変動に対応する非定常変位の他に、1997、2003、2010、2014、2019年の豊後水道長期的SSEに対応する変位、2020年からの日向灘南部の長期的SSEに伴う変位が見られる。2019年に鹿児島県東岸で相関の高い部分が見られるが、これは2019年1月に発生した種子島近海の地震（M6.0）に伴う余効変動が含まれている可能性がある。相関係数は0.6未満になるが、Yarai and Ozawa (2013)で指摘された2005年、2007年、2009年の日向灘長期的SSEに伴う変位、Takagi et al. (2019)による2013年の日向灘長期的SSEに伴う変位、Ozawa (2017)による2013-2014年、2015-2016年の日向灘長期的SSEに伴う変位に対応するやや相関の高い部分も確認できる。
本調査には国土地理院GEONETの座標値およびオフセット値を使用させていただきました。

© The Seismological Society of Japan




© The Seismological Society of Japan

# Systematic-detection of short-term slow slip events in the Alaska subduction zone

*Yutaro OKADA[1], Takuya NISHIMURA[2]

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

スロー地震は通常の地震と比べゆっくりと断層がすべる現象であり、環太平洋地域の複数の沈み込み帯で観測されている（e.g., Obara and Kato, 2016）。スロースリップイベント（以下、SSE）は測地観測機器により観測されるスロー地震の一種で、数か月間から数年間継続する長期的SSE（以下、L-SSE）と数日間から数週間継続する短期的SSE（以下、S-SSE）に大別される。また一部地域で発生するSSEは同じくスロー地震の一種であるテクトニック微動（Obara, 2002）と時空間的に同期することが知られており、この同期現象はEpisodic Tremor and Slip（以下、ETS）と呼ばれる（Rogers and Dragert, 2003）。北アメリカプレートの下に太平洋プレートが沈み込むアラスカ沈み込み帯では、L-SSEや微動が先行研究により検出されている（Ohta et al., 2006; Wei et al., 2012; Wech, 2016）。一方で、S-SSEが定常的に発生している可能性が微動活動とそれに同期する地表変位により示唆されているものの、この地域において個別のS-SSEとしてモデル化されたイベントは1例しかない（Rousset et al., 2019）。そこで、本研究ではアラスカ沈み込み帯において個別のS-SSE検出を系統的に実施することで、この地域のS-SSEの活動様式とL-SSEや微動との時空間的関係の解明を試みる。

本研究ではNevada Geodetic Laboratory（http://geodesy.unr.edu/）によって解析されたGNSS観測局86局の2007年4月から2021年3月までの期間の日座標時系列（Blewitt et al., 2018）を用いた。初めに、181日間の座標値とSSEの時間発展を模したテンプレートの間の相関係数を計算することで、各観測局・成分の時系列からS-SSEが発生したおおよその時期を抽出する。次に、SSEが沈み込むプレート境界面上で発生した場合に期待される地表変位で相関係数を重みづけして平均することで、S-SSEの候補となるイベントを検出する（Rousset et al., 2017; Okada et al., in prep.）。続いて候補イベントの矩形断層モデル（Okada, 1992）と継続期間を推定する。継続期間は座標時系列のノイズレベルと推定した断層モデルから計算される変位によって重みづけされた各観測局・成分の181日間の座標値を重合した時系列を用いて推定した（宮岡・横田, 2012; Rousset et al., 2017; Okada et al., in prep.）。最後に、断層モデルと継続期間の推定結果に閾値を適用することで、候補イベントをS-SSEへと分類した。

その結果、アラスカ沈み込み帯において14年間で28個のS-SSEの検出に成功した。検出されたS-SSEの大部分は西経151˚より東に分布し、西経150˚と西経148˚の深さ40 km付近にS-SSEのクラスターが発見された。S-SSEの空間分布は1964年に発生したアラスカ地震の余効すべり域（Suito and Freymueller, 2009; Huang et al., 2020）とおおよそ一致しており、また西側のクラスターはクック湾奥部のL-SSEのすべり域（Ohta et al., 2006; Fu and Freymueller, 2013）と一致していた。検出されたS-SSEの規模はMw 6.1から6.6であり、継続期間は2日間から57日間であった。また、S-SSEの地震モーメントと継続期間の分布は、スロー地震のスケーリング則（Ide et al., 2007）に大きく矛盾しない。検出されたS-SSEの一部は、Rousset et al.（2019）で示唆されたように、微動活動（Wech, 2016）と時空間的に同期するETS型のイベントであった。

**謝辞**

本研究ではAaron Wech博士に提供していただいたテクトニック微動カタログと、Nevada Geodetic Laboratoryによって解析されたGNSS日座標データを使用した。本研究で用いたGNSS観測局は、UNAVCO、University of Alaska, Fairbanks、United States Coast Guard、Alaska Volcano Observatory、Federal Aviation Administration、National Oceanic and Atmospheric Administrationにより設置されたものである。

© The Seismological Society of Japan

# Long-term SSE along the Nankai trough since 2018

*Shinzaburo Ozawa[1], Hisashi Suito[1], Hiroshi Munekane[1]

1. Geospatial Authority of Japan

要旨 GNSS観測により、2018年以降、九州・四国・紀伊水道域で遷移的な地殻変動が観測された。観測された地殻変動から南海トラフ域のプレート間滑りを推定した。その結果、2018年６月頃から2019年８月頃にかけて、日向灘北部・豊後水道域で長期的SSEが発生し、2019年初めころから2021年1月にかけて四国中部で長期的SSEが発生したこと、2020年７月頃から日向灘南部で長期的SSEが発生していることが推定された。また紀伊水道では、2019年４月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。 はじめに 豊後水道では５～６年ほどの周期で繰り返し長期的SSEが発生してきた。四国中部では1977-1980年に水準測量の結果から長期的SSEの発生が推定されている(Kobayashi,2012)。紀伊水道の長期的SSEは、1996, 2000, 2016年に発生している(Kobayashi,2014; Kobayashi,2017)。そのような中、2018年6月頃から、九州北部で遷移的な地殻変動が発生し、その後2018年10月頃から豊後水道周辺で遷移的な地殻変動が発生している。また四国中部で2019年初めころから豊後水道SSEに伴う地殻変動と異なった遷移変動が発生している。2020年７月頃から九州南部で遷移的な変動が発生し、2021年７月まで続いている。紀伊水道では、2019年４月頃から遷移的な変動が発生している。本研究では、GNSSで観測された地殻変動のデータから、四国・九州・紀伊水道域のプレート間滑りの時空間変化を推定した。 解析手法 九州域では豊後水道域で2006-2009年間、宮崎南部域で2007/1-2009/1間、種子島域で2008/3-211/3間の一次トレンドを除去している。四国中部、紀伊水道域では2017/1-2018/1間の一次トレンドを除去した。九州域に関しては、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震の余効変動を粘弾性緩和のシミュレーション結果に基づいて除去している（Suito 2017;水藤2017）。このようにして得られた東西、南北、上下の座標時系列データを用いて時間依存のインバージョン解析を九州・四国域、四国中部域及び紀伊水道域に関して行った。観測点は南海トラフ域の観測点約250点を使用した。弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状を九州・四国域、四国中部域の解析では三角形要素で表して解析に使用している。グリッド間隔は、20-40ｋｍ程度としている。プレート境界面上のすべりの方向はプレート収束方向になるように拘束をかけた。紀伊水道域に関しては、弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状をスプライン曲面で表し、滑り方向は東向きから南向きの範囲に拘束した。グリッド間隔は10km程としている。 結果と考察 2018年６月頃から2019年８月頃にかけて日向灘北部・豊後水道でSSEが発生している。豊後水道SSEと同時期に四国中部でSSEが発生し、2020年７月まで継続している。豊後水道SSEはMw6.9、四国中部SSEはMw6.1程度と推定された。豊後水道SSEはおおよそ５－６年周期と調和的で、四国中部は、1977-1980年に発生し、2013年に発生しているが、その繰り返し間隔はあまり周期的でないように見える。2018年末に日向灘南部で長期的SSEが発生し、2020年7月頃から日向灘南部で長期的SSEがまた発生している。紀伊水道のSSEは、2019年４月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。繰り返し間隔ははっきりしないように思われる。

© The Seismological Society of Japan

# Decadal postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake observed with the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

*Shun-ichi WATANABE[1], Tadashi Ishikawa[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

2011年に発生した東北沖地震の地震時・地震後プロセスを研究することで，日本海溝沿いの領域における地震サイクルに関して有用な知見を得ることができる．東北沖地震の震源域はほぼ全域が海底下にあったが，多くの海底観測装置が設置されていたことにより，地震時の破壊や地震後の緩和過程等のシグナルが高い空間分解能で取得されている．中でも，GNSSー音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測は，地震後の変形過程における粘弾性緩和の重要性を示し，震源域近傍の余効変動の理解において重要な役割を果たした（Watanabe et al., 2014, GRL）．しかし，海底測地観測点の空間カバレッジや観測期間が不足しており，地震時の挙動も含め，特に走行方向の広がりについてコンセンサスの得られるような地殻変動モデルの構築には至っていない．震源域周辺での経時的な余効変動，すなわち粘弾性緩和と余効すべり，による変動を分離することを目的とし，われわれは海上保安庁が運用するGNSS-A海底測地観測アレイ（SGO-A）において海底測地データを取得してきた．今回得られた10年間のGNSS-Aデータから，主破壊域の南北縁において余効すべりが生じ，それが概ね2–3年でほぼ減衰したことがわかった．これらの余効すべり域は非地震性の摩擦特性を持ち，それらが地震時の破壊の南北への伝播を止めたと考えられる．また，震源域南部（~37 °N）の福島県沖の観測点では，水平方向の余効変動が減衰した後も沈降が継続していることが確認された．この観測事実を説明するためには，それより東側の，海溝近くでの地震時すべりに駆動される粘弾性応答を考慮に入れる必要がある．つまり，地震時の測地観測データでは，福島県沖の海溝近くでの解像度が足りずに地震時のすべりが推定できていなかった（e.g., Iinuma et al., 2012, JGR）が，今回の観測結果から，そこですべりが生じていたことが明らかになった．これは津波データから推定されるすべり分布（e.g., Satake et al., 2013, BSSA）と整合的であり，それをサポートする結果である．さらに，こうした結果からは，長期的な粘弾性緩和による余効変動が，地震発生から10年が経過した現在においても継続しており，宮城県沖の主破壊域のみならず震源域南部の福島県沖においても顕著な影響を及ぼしていることも示された．なお，本研究の内容はWatanabe et al. (EPS, in press) として報告されている．

© The Seismological Society of Japan

# Temporal variation in slip deficit rate at Nankai trough observed by the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

*Tadashi ISHIKAWA[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

海上保安庁では、GNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底地殻変動観測を定常的に実施し、南海トラフ想定震源域におけるプレート境界の固着状態の把握のためのデータを収集している。観測成果は、気象庁の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」や地震調査研究推進本部の「地震調査委員会」に定期的に報告し、地震・地殻活動の現状評価に役立てられている。

これまでに、陸上GNSSと海底GNSS-Aの観測結果から得られた海陸の地殻変動速度場から、南海トラフ地震想定震源域のプレート境界におけるすべり欠損レートの推定が行われている(例えば、Yokota et al. 2016; Nishimura et al. 2018; Noda et al. 2018; Kimura et al. 2019など) 。その結果、陸上GNSSのみで解像できなかったすべり欠損レートの空間的不均質性が見えるようになった。南海トラフでは、スロースリップ (SSE)などの短期の非定常変動が度々発生しているため、時間変化を含めたプレート境界の状態を把握することが必須である。しかしながら、これまでの研究に用いられている海底の速度場は、ある特定の期間のデータの回帰分析から求めた平均値によるスナップショットであり、時間変化は考慮されていない。

十分長期のデータから求めた平均速度場は、プレート境界の摩擦特性の違いから生じるSSE発生域と強固着域の分布を把握するために有効である。平均を取る期間にSSE発生時期が含まれる領域では速度が相対的に遅くなるため、SSEが発生しない領域との速度差にコントラストが生まれ、SSE発生域と強固着域の分布が明確になることが期待される。しかしながら、現在のGNSS-Aデータは高々10年程度の蓄積しかなく、SSE発生域においても0～1回程度のイベントしか含まれていないと考えられるため、より正確な領域の分布の推定には、今後も観測を長期間継続しデータを蓄積する必要がある。本発表では、現時点のデータを用いた推定結果について報告する。

SSEのような非定常変動の推移を把握するためには、定常的な状態からのゆらぎとして顕れる変動を検知し監視していく必要がある。しかしながら、GNSS-A観測は、無人のオンライン連続観測が実現している陸上のGNSS観測網と異なり、観測の都度有人船で現場に赴く必要があることから、観測頻度が年に4－6回程度であり、時間分解能の高い監視を実施することは困難である。Yokota and Ishikawa (2020)は、過去のデータにAICを用いたモデル比較を適用し、SSE由来と考えられる非定常な時間変化を検出した。本発表では、速度場の移動平均を取ることで、すべり欠損レートの時間変化を推定した結果について報告する。

© The Seismological Society of Japan

# Evaluation of the effects of underwater sound speed structure on GNSS-A observation using numerical simulation

*Yuto NAKAMURA[1], Yusuke Yokota[2], Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1]

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）は、GNSS測位と海中音響測距を海上プラットフォームで結合することで、海底に設置した基準点の絶対位置をセンチメートル単位で決定する技術である。GNSS-A方式を用いた海底地殻変動観測により、日本海溝と南海トラフ沿いの海底下における様々な現象が明らかにされてきた。しかし、GNSS-Aは依然として陸域GNSS観測に比べ観測頻度と測位精度が大きく劣るという課題を抱えている（Yokota et al. 2021, under review）。時空間的により小さなイベントを検出可能にするためには、GNSS-A観測に影響する個々の誤差要因の評価が不可欠である。

GNSS-A観測における最大の誤差要因の一つとして、海中音速場の擾乱が挙げられる。海中音速場の時空間的な変動を適切に表現するため、これまでに様々な解析手法が開発されてきた。中でもベイズ統計的手法を用いて海中音速場と海底局位置を同時推定するGNSS-A解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al. 2020, FES）では、海中音速場を平均音速度、海上プラットフォームの位置に依存する成分（比較的上部における音速の水平傾斜場）、そして海底トランスポンダの位置に依存する成分（比較的下部における音速の水平傾斜場）に分解した海中音速度モデルを実装している。しかしながら、GNSS-A観測の時空間スケール（観測海域は数km四方、観測時間は1回あたり数時間程度のスケール）の中での海洋場の変動を観測することは困難であり、GARPOSで実データを解析して得られた海中音速度モデルの妥当性について詳しく検証することはできていない。

そこで本研究では、任意の海中音速場を与えることができる数値シミュレーターを用いてGNSS-A疑似データを作成し、これを解析することによりGARPOSの海中音速度モデルを検証した。本研究で用いた数値シミュレーターは、PythonのEikonal方程式レポジトリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いることで、与えられた海中音速場グリッドから三次元的な音波の伝播を計算する。これにより、鉛直のみならず水平方向の音波の屈折も考慮した、より厳密な音響走時のシミュレーションが可能である。数値実験では、まず水平傾斜場が存在しない時空間的に一様な海中音速場を与えることで、GARPOSの海中音速度モデルで時空間的に一定な場が再現されることを確認した。その後、様々な深さ・厚さの水平傾斜場を与えた海中音速場でシミュレーションを行い、与えた水平傾斜場に対するGARPOSの解析結果を検証した。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S06. Crustal structure

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P2 (ROOM P)

## [S06P-01] Preliminary report on seismic reflection survey off the southeastern coast of Hokkaido, Kuril trench

○Tetsuo NO[1], Shuichi Kodaira[1], Gou Fujie[1], Yasuyuki Nakamura[1], Kazuya Shiraishi[1], Ryo Muira[1], Hiroto Yamaguchi[2,1], Yuka Kaiho[1], Jin-Oh Park[3], Yue Sun[3], Fan Yu[3], Masao Nakanishi[4], Megumi Fujimoto[5,6], Ryoya Kobayashi[5] （1.JAMSTEC, 2.Kobe Univ., 3.AORI, Univ. of Tokyo, 4.Graduate School of Science, Chiba Univ., 5.Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 6.SOEST, Univ. of Hawaii at Manoa ）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S06P-02] Measurement of seismic velocity anisotropy in the Tohoku region, NE Japan by shear wave splitting analysis (4)

○Tatsuya MIZUTA[1], Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ryota TAKAGI[1], Keisuke YOSHIDA[1], Shin'ichi SAKAI[3], Kei KATSUMATA[4], Mako OHZONO[3,4], Masahiro KOSUGA[5], Takuto MAEDA[5], Yoshiko YAMANAKA[6], Hiroshi KATAO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Takashi NAKAYAMA[1], Satoshi HIRAHARA[1], Toshio KONO[1], Toru MATSUZAWA[1], Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake （1.Univ. of Tohoku, 2.Victoria University of Wellington, 3.Univ. of Tokyo, 4.Univ. of Hokkaido, 5.Univ. of Hirosaki, 6.Univ. of Nagoya, 7.Univ. of Kyoto, 8.Univ. of Kyushu, 9.Univ. of Kagoshima）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S06P-03] Philippine Sea plate structure inferred from SP converted waves: Preliminary analysis in the southwestern Tokyo metropolitan area

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

3:30 PM - 5:00 PM

## [S06P-04] Three-dimensional velocity structure beneath Hakusan volcano estimated by double-difference tomography

○Rin Miura[1], Yoshihiro Hiramatsu[2] （1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S06P-05] Detailed seismic reflection structure mapping in the western Nankai Trough

○Yasuyuki NAKAMURA[1], Yuka Kaiho[1], Tetsuo No[1], Kazuya Shiraishi[1], Gou Fujie[1], Shuichi Kodaira[1], Gaku Kimura[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1], Ayako Nakanishi[1] （1.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S06P-06] The characteristics of small normal faults developed on the subducting Philippine Sea Plate along Nankai Trough

○Mikiya YAMASHITA[1,2], Ayako Nakanishi[2], Seiichi Miura[2], Shuichi Kodaira[2], Yoshiyuki Kaneda[3,2] （1.Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3.Kagawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

## [S06P-07] Effects of insufficient back-azimuth coverage on the estimation of a dipping velocity discontinuity

○Katsuhiko SHIOMI[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S06P-08] Random velocity inhomogeneity at the western part of the Nankai subduction zone

○Tsutomu TAKAHASHI[1], Koichiro OBANA[1], Yasushi ISHIHARA[1], Seiichi MIURA[1], Shuichi KODAIRA[1], Yoshiyuki KANEDA[2] （1.JAMSTEC, 2.Kagawa Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Preliminary report on seismic reflection survey off the southeastern coast of Hokkaido, Kuril trench

*Tetsuo NO[1], Shuichi Kodaira[1], Gou Fujie[1], Yasuyuki Nakamura[1], Kazuya Shiraishi[1], Ryo Muira[1], Hiroto Yamaguchi[2,1], Yuka Kaiho[1], Jin-Oh Park[3], Yue Sun[3], Fan Yu[3], Masao Nakanishi[4], Megumi Fujimoto[5,6], Ryoya Kobayashi[5]

1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. AORI, Univ. of Tokyo, 4. Graduate School of Science, Chiba Univ., 5. Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 6. SOEST, Univ. of Hawaii at Manoa

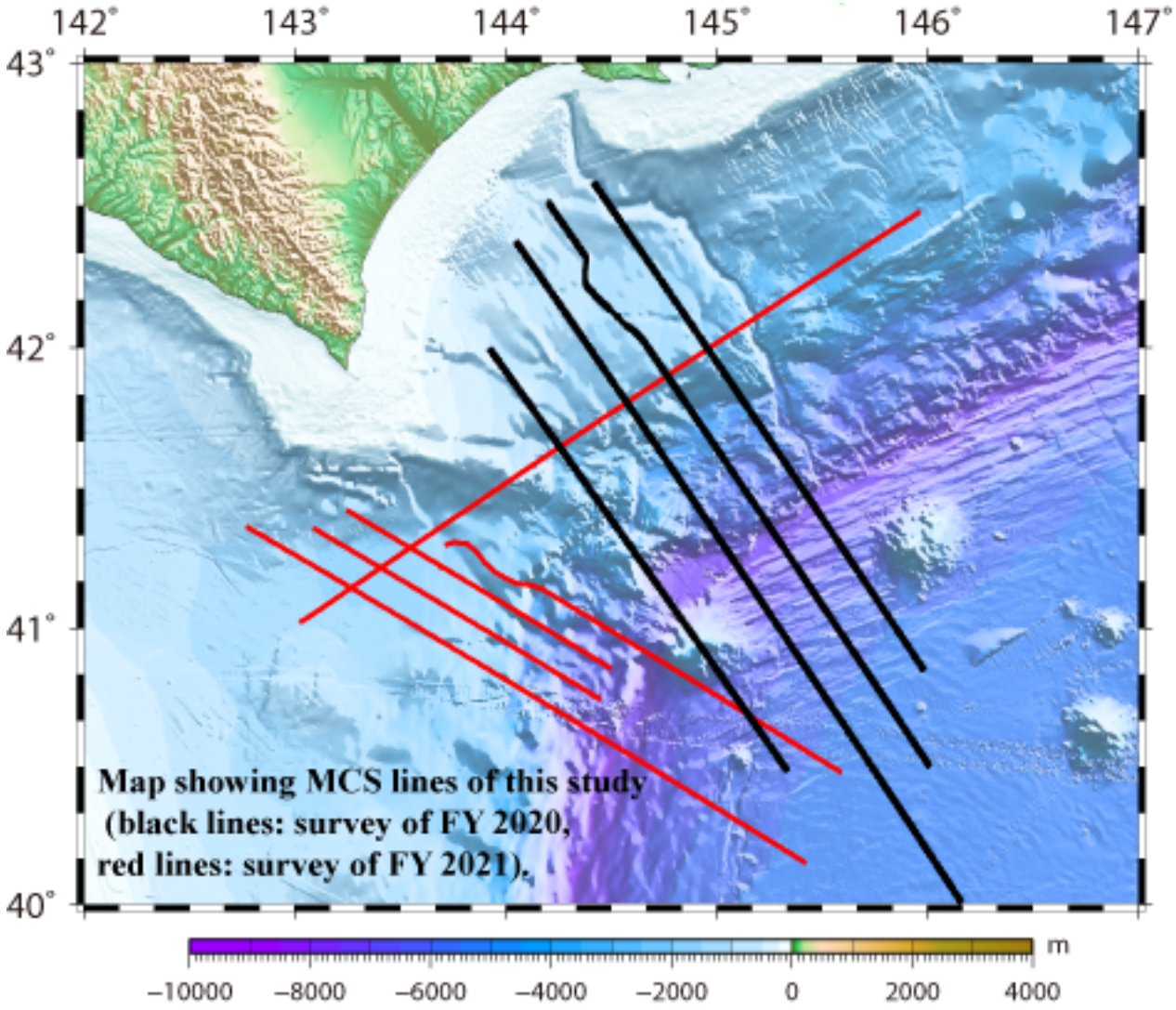
1990年代後半以降、日本周辺の沈み込み帯では南海トラフや日本海溝を中心に多くの地殻構造探査とそのデータを用いた研究が進められ、単に地殻構造研究のみならず、掘削科学や津波・地震サイクルシミュレーション等へも重要な役割を果たしてきた。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、日本周辺の地震発生帯に関する評価の再検討が進められ、千島海溝においても地震調査研究推進本部が2017年12月に「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版）」を新たに公表した。ただし、地殻構造探査の観点からみると、千島海溝周辺は南海トラフや日本海溝と比べるとデータが少なく、千島海溝周辺の長期評価をより高精度する上では、さらなる多くの観測・研究が必要な海域である。 東北地方太平洋沖地震以降、JAMSTECは2016年と2018年に深海潜水調査船支援母船「よこすか」で千島海溝の海溝底を中心に横切る測線を設定した高解像度反射法地震探査を実施し（中村・他, 2019, JpGU）、2019年には根室沖から釧路沖にかけて深海調査研究船「かいれい」を用いたMCS探査とOBSを用いた地震探査を行った（東・他, 2021, JpGU）。

そして、2020年10月と2021年7月には、釧路沖から日高沖にかけて、新たな調査測線を設定し、海底広域研究船「かいめい」による反射法地震探査を実施した（図）。新型コロナウイルスに関わる対応や調査海域での漁業活動・気象・海象の影響等はあったが、2航海で9測線のデータを取得することができた。これらの測線の一部は、日本海溝と千島海溝の接合部にも位置しており、もし千島海溝から日本海溝への構造変化を抽出できれば、この接合部での地震活動や震源断層と地殻構造の関係についての知見が得られる可能性もある。また、海溝海側に関しても、アウターライズ域での正断層型の大地震に関する震源断層の研究に対して貢献できるデータとなる。

なお、2020年と2021年の「かいめい」によるMCS探査の主なデータ取得仕様は、発震間隔50 m、エアガン総容量最大10600 cu.in.、エアガン曳航深度10 m、受振点間隔12.5 m、ストリーマーケーブル曳航深度12 m、受振チャンネル数最大444である。

本発表では、以上のデータ取得の概要と暫定的なデータ解析結果について報告する。

© The Seismological Society of Japan




© The Seismological Society of Japan

# Measurement of seismic velocity anisotropy in the Tohoku region, NE Japan by shear wave splitting analysis (4)

*Tatsuya MIZUTA[1], Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ryota TAKAGI[1], Keisuke YOSHIDA[1], Shin'ichi SAKAI[3], Kei KATSUMATA[4], Mako OHZONO[3,4], Masahiro KOSUGA[5], Takuto MAEDA[5], Yoshiko YAMANAKA[6], Hiroshi KATAO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Takashi NAKAYAMA[1], Satoshi HIRAHARA[1], Toshio KONO[1], Toru MATSUZAWA[1], Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. Univ. of Tohoku, 2. Victoria University of Wellington, 3. Univ. of Tokyo, 4. Univ. of Hokkaido, 5. Univ. of Hirosaki, 6. Univ. of Nagoya, 7. Univ. of Kyoto, 8. Univ. of Kyushu, 9. Univ. of Kagoshima

本研究では，地殻中の異方性媒質を地震波が通る時にS波が速い波と遅い波に分裂する現象であるS波スプリッティングを用いて，東北地方のS波偏向異方性の測定を行った．手法はSavage et al.（2010）で紹介されているMFAST（Multiple Filter Automatic Splitting Technique）を用いた．この手法では，各観測点で得られた地震波形3成分のデータに対し，あらかじめ用意した14個のバンドパスフィルターから最適なものを適用後，多数の時間窓でSC91（Silver and Chan, 1991）の手法で異方性の方向と大きさを測定し，多数の時間窓から測定された多数の測定値でクラスター分析（Teanby et al., 2004）を用い，結果の信頼性評価を行う．MFASTはこの一連の流れがプログラムで自動化されているため，従来の方法と比べて素早く多数のデータを処理することができ，客観的で信頼性の高い測定値を使うことができる．
解析は東北地方全域で行っているが，本講演では，主に秋田県内陸部の地震群発域と，岩手県内陸部から沿岸部で詳細な解析を行った結果を紹介する．データには，2011年東北地方太平洋沖地震緊急合同観測などの臨時地震観測データも利用した．秋田県内陸部では，2011年の東北沖地震の前後で解析を行った．東北沖地震の前後で異方性の方向はあまり変化しなかったものの，領域全体で様々な方向の異方性が観測された．異方性が小さなスケールで空間変化していることが示唆され，領域内に応力起因のものと断層などの構造性起因の異方性のどちらも存在していると考えられる．異方性の大きさを示す遅延時間は，東北沖地震前後ともに，領域全体で大きい値を示していたが，前後で比較すると東北沖地震後に地震が群発している領域では大きくなったものの，活火山である岩手山周辺では東北沖地震後に小さくなる結果となった．
岩手県内陸部から沿岸にかけての解析では，異方性の方向は秋田県内陸部と同様に領域全体で様々な方向が得られ，各々の場所により応力起因のものと断層などの構造性起因の異方性のどちらも存在していたと考えられる．一方，異方性の大きさは秋田県内陸部と比べて全体的に小さい結果となった．岩手県沿岸では深さ40kmよりも深い（プレート境界ないし沈み込むプレート内）地震も観測対象とした. 深さ毎に分けて検討すると，浅い領域では異方性は大きいが，深くなるにつれて異方性は全体的に小さくなる結果となりS波スプリッティングの原因となる異方性は主に地殻上部に分布していると考えられる．ただし，プレート境界ないしプレート内で発生している地震に対しては異方性が若干大きくなる傾向も得られた．

© The Seismological Society of Japan

# Philippine Sea plate structure inferred from SP converted waves: Preliminary analysis in the southwestern Tokyo metropolitan area

*Kazuo YOSHIMOTO[1]

1. Yokohama City University

## はじめに

首都圏下の地震活動は，相模トラフから沈み込むフィリピン海プレート（以下，PHSプレート）の構造により強く特徴付けられている [例えば，長谷川・他 (2013)]．このうち首都圏南西部（神奈川県およびその周辺）においては，相模トラフの走向に沿った方向（概ね東西方向）に地震活動の空間変化が見られ，その要因には，伊豆半島北部におけるプレート衝突や東西方向へのPHSプレートの構造変化（島弧地殻～海洋地殻）などが考えられる．しかしながら，伊豆衝突帯とその周辺のPHSプレートの構造については，その南方の伊豆・小笠原島弧の構造と比べて不明な点が多い．そこで本研究では，制御震源よりも大深度の構造推定に有利な自然地震を用いて，観測地震波形のSP変換波に着目し，首都圏南西部におけるPHSプレートの構造推定のための予備解析を実施した．

## データと解析方法

解析には，2008年5月から首都圏地震観測網（MeSO-net）の神奈川県や東京都などの観測点で記録されている，日本列島周辺で発生した深発地震の波形データを使用した．波形記録のSN比が高く，直達波（P波およびS波）の波形がパルス的なマグニチュード5～6程度の地震を選択した．MeSO-netの加速度波形は時間積分して，速度波形または変位波形に変換して解析した．解析した地震の変位波形のパルス幅は1～3秒程度である．水平成分の波形記録は，震源と観測点の位置関係をもとに，radial成分とtransverse成分に回転した．特定の観測点の波形記録には，S波の到達に先行して，上下動成分に卓越するSP変換波と考えられる波相が検出された．本解析では，神奈川県と東京都を横断するMeSO-netの２本の測線で収録された地震波形に注目して，これらの測線におけるSP変換波の振幅とS-SP時間の空間変化を詳しく調べた．

## 解析結果

例えば，2013年11月19日4時10分に遠州灘で発生した深発地震（$M_w$ 5.7，深さ340 km）については，発生時間が未明であり関東地方の最大震度が2であったことから，SN比の高い地震波形が収録されている．この地震について，神奈川・栃木県境から東京都東部まで西南西-東北東に約80 km連続する測線で観測されたSP変換波の特徴をまとめると以下のようになる．測線西端の丹沢山地に位置する観測点では，大振幅で明瞭なSP変換波が観測され，S-SP時間は5.5秒程度である．このSP変換波については，その振幅極性とS-SP時間から，上位（浅部）が相対的に低速度の地震波速度不連続面を形成する同地域のPHSプレートのモホ面によって励起されたものと解釈できる．なお，SP変換波は，丹沢山地（藤野木-愛川線を東縁とする）より東側で急に不明瞭になることから，関東平野に入るとその地震波速度不連続性は小さくなるものと考えられる．一方，関東平野の中央部に位置する測線東端に近い東京都内の観測点では，S-SP時間で5～7秒程度に，逆極性のSP変換波が1～2秒程度の走時差を伴って観測される．既往研究 [例えば，Nakajima et al. (2009)] より，これらのSP変換波はPHSプレート（スラブ）の地殻のほぼ上面と下面で発生しているものと考えられるが，詳細の解明については今後の課題である．本発表では，上述の地震ついて他の観測点で見られたSP変換波の特徴，および他の深発地震についての解析結果などを紹介する予定である．

## 謝辞

防災科学技術研究所・東京大学地震研究所・神奈川県温泉地学研究所による
MeSO-net（DOI：10.17598/NIED.0023）の地震波形記録を使用しました．震源情報は，防災科学技術研究所 F-net MTカタログ，気象庁一元化震源カタログを参照しました．

© The Seismological Society of Japan

© The Seismological Society of Japan

# Three-dimensional velocity structure beneath Hakusan volcano estimated by double-difference tomography

*Rin Miura[1], Yoshihiro Hiramatsu[2]

1. Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2. Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

１. はじめに

白山火山はフィリピン海プレートの沈み込み開始に伴い、流体起源が太平洋プレートからフィリピン海プレートに推移した活火山である。最終噴火記録は1659年であり、その後の経過時間の長さから長期的にはいつ活動を再開してもおかしくなく、現在は山頂直下での群発地震が度々観測されている。白山火山に焦点を当てた地震波トモグラフィー(高橋・他, 2004)では、深さ10～14 km付近にマグマ溜り、その深部に下部流体域が推定されているが、このマグマ供給系について詳細に明らかにされているとは言い難い。そこで本研究では、Double-Difference Tomography法を用いて白山火山周辺の３次元速度構造を推定し、マグマ供給系に関する新たな情報を得ることを目指す。

２. データと方法

気象庁一元化震源カタログに記載されている、2010年から2020年に発生した3590個の地震 (東経135.5-139度，北緯34.5-37.5度，震源深さ0-500 km, 2.0≦Mj≦9.0)，の験測値データを用いた。以上の地震と、全地震データから半径150 km以内の常時観測点を用いて連係震源決定(JHD) 法(Kissling et al. (1994))により一次元速度構造を決定した。地震波トモグラフィーにはDouble-Difference Tomography法(Zhang and Thurber, (2003))を用いた。これにより先行研究より震源が集中している地域においての解像度の上昇を図ることができる。また、チェッカーボードテストにより解像度を検討した。

３. 結果

得られた地下速度構造について、先行研究で発見された深さ10~14kmの低速度・高Vp/Vs領域に加え、今回は深さ6~10kmでP波低速度(-9%程度), S波低速度(-8%程度)領域を発見できた。また、この領域におけるVp/Vs値が1.68だったことから、先行研究に新たな解釈を加えることが必要だと考えられる。この特徴から水に富む領域が存在するのではないかと推測できるが、今後更なる考察を行なっていく予定である。

４. 謝辞

解析には気象庁一元化震源カタログを使用させて頂きました。解析について、東京大学地震研究所の行竹洋平博士にご助言いただいた。記して感謝いたします

© The Seismological Society of Japan

# Detailed seismic reflection structure mapping in the western Nankai Trough

*Yasuyuki NAKAMURA[1], Yuka Kaiho[1], Tetsuo No[1], Kazuya Shiraishi[1], Gou Fujie[1], Shuichi Kodaira[1], Gaku Kimura[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1], Ayako Nakanishi[1]

1. JAMSTEC

南海トラフはプレート境界型の巨大地震が繰り返し発生してきた沈み込み帯である。近年ではゆっくり地震の観測が報告され、プレート間滑り挙動の多様性や相互関係を研究する上で重要な領域である。超低周波地震と沈み込む海山の関連が指摘されるなど、沈み込み帯の詳細な地下構造は、プレート境界近傍での地震関連滑り現象を解明する鍵の一つであると考えられる。
我々は、2018年から南海トラフ沈み込み帯において稠密測線による反射法地震探査を主とした構造調査を実施し、これまでに、潮岬沖から足摺岬沖の海域において4-8km間隔の測線で反射法探査データを取得した。これら新規取得した測線に加え1990年代に取得した測線のデータを対象に重合前時間マイグレーション（PreSTM）、重合前深度マイグレーション（PreSDM）解析を実施し、高品質な反射断面を作成した。20年以上前に取得されたデータは、ケーブル長が短い、チャンネル間隔が長いなど、反射法解析には不利な条件のデータではあったが、近傍で新規に得られたデータの解析結果を参考にしつつ最新の解析技術を適用することで、過去のデータからも構造マッピングに使用可能な断面を作成することができた。
得られた断面には、沈み込むフィリピン海プレート上面やデコルマ面、付加体の変形、斜面堆積物、BSRなど、南海トラフに特徴的な構造が明瞭に描き出されている。稠密な測線で得られた断面の解釈を元に、これまでに無い高分解能での3次元的構造マッピングが可能となった。沈み込むフィリピン海プレート上面の形状は、浅部低周波地震活動が報告されている室戸岬沖周辺では起伏に富む一方、紀伊半島西部から紀伊水道沖および土佐湾沖では多少の起伏は認められるものの概ね滑らかであることがわかった。室戸岬沖には海山が沈み込んでいることがこれまでにも指摘されていたが、本研究の結果からそれらの海山は複数の頂部を持つような構造であることが示唆されるなど、プレート境界滑りに関わるより詳細な構造情報が得られつつある。
本研究では、PreSDMによって深度断面を作成した。約4.5-5.5km長のストリーマーケーブルによって得られたデータを用いているため、沈み込み帯深部における速度決定精度は低下する。これは反射断面にイメージされるプレートの沈み込み角度などに影響を与えると考えられる。今回の解析では、フィリピン海プレート上面からの反射波の連続性などを指標に速度推定を行ったが、今後、OBSを用いた速度構造との比較などによって、速度・深度の精度に関する議論も行っていきたい。

© The Seismological Society of Japan

# The characteristics of small normal faults developed on the subducting Philippine Sea Plate along Nankai Trough

*Mikiya YAMASHITA[1,2], Ayako Nakanishi[2], Seiichi Miura[2], Shuichi Kodaira[2], Yoshiyuki Kaneda[3,2]

1. Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3. Kagawa University

1．はじめに

巨大地震が繰り返し発生する南海トラフでは，これまで数多くの地殻構造探査が実施され沈み込むフィリピン海プレートの形状が詳細になってきた（Nakanishi et al., 2018）．また近年南海トラフ周辺では高密度・高精度の地震観測によって低周波地震・微動の分布が数多く報告されている（例えばYamashita et al., 2015）．プレート構造や物性と低周波地震・微動の分布を対比させることはプレート境界における地震性すべり域やスロースリップといった現象の理解に有効であり，また詳細なモデルを作成することで地震動予測などシミュレーション分野にも大きく貢献することが期待される．一方，南海トラフでは深部強反射面の発見（Park et al., 2002）やデコルマ面上の位相変化（Park et al., 2014）などのトラフ軸より陸側の研究例がほとんどで，日本海溝などで注目されている海溝海側の構造については研究例が報告されていない．低周波地震・微動の現象には高間隙水圧が関係影響しているが（Hirose et al., 2021），沈み込むフィリピン海プレートのどこからプレート内部へ水が供給されているのかは明らかになっていない．本研究では高分解能で取得された既存反射法地震探査測線を利用して，トラフ軸より海側に発達する正断層に着目してその特徴を報告する．

２．高分解能反射法地震探査

海洋研究開発機構が南海トラフで2013・2014年に海洋調査船「かいよう」によって四国沖から紀伊半島にかけて実施した高分解能反射法地震探査はトラフ軸周辺の微細構造解明が目的であった．取得した計23測線のうち13測線はトラフ充填堆積層を横断し四国海盆までデータが得られている．測線間隔は10～20㎞であり，本データを用いてトラフ軸よりも海側の構造に着目した正断層マッピングを行った．

３．結果

本研究では海底面で確認できるものを断層と同定し，解釈可能な13測線すべてで正断層が確認された．これらの正断層はトラフ軸で見られるプロトスラスト帯と同様に断層面に沿った大きな変位を伴わず，海底面での変位もほとんど見られなかった．断層の平均水平間隔は250mである．陸側に一番近い正断層のトラフ軸の前縁断層からの距離は10～25㎞であり，トラフ充填堆積層の分布幅と調和的であった．四国海盆の拡大軸周辺にある紀南海山の延長部にあたるHDNT123・125測線で最も発達しており，沈み込むフィリピン海プレートが断層発達に影響していると考えられる．さらに本研究では複素アトリビュート解析を適用することで，正断層群によるプレート内部の影響を評価していく予定である．

© The Seismological Society of Japan

# Effects of insufficient back-azimuth coverage on the estimation of a dipping velocity discontinuity

*Katsuhiko SHIOMI[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

**【はじめに】**
地下の地震波速度不連続面を検出する手法として、レシーバ関数 (RF) 解析法が広く活用されてきた。沈み込むプレート等、検出対象となる速度不連続面が傾斜している場合では、地震波の到来方向によってtransverse成分にも関連する変換波が記録される。Shiomi & Park (2008; JGR)によるグリッドサーチやBianchi et al. (2010; JGR)によるharmonic decomposition解析は、いずれもradialおよびtransverse両成分のRFの地震波到来好方向依存性に着眼し、観測点下の速度不連続面の傾斜方向や傾斜角、異方性構造の特徴を推定するための解析方法である。これらの解析方法は、RFの推定に用いる遠地地震記録が、全ての方位から均質に到来することで、安定した推定結果を得ることが可能になる。一方、日本列島を対象としたRF解析を行う場合、通常の解析に用いられる遠地地震は南東から南南西方向 (オセアニア～東南アジア) で発生するものが圧倒的に多く、逆に北東から東方向や北西方向から到来する遠地地震波形は皆無である。今回、日本のように地震波の到来方向に強い偏りがある場合に、上記の解析方法でどの程度安定した推定結果が得られるのかを改めて確認するため、簡単な構造を用いた理論波形を合成し、検証を行った。

**【計算方法】**
理論波形の合成にはRAYSUM (Frederiksen & Bostock, 2000; GJI) を用いた。今回は、傾斜する地震波速度不連続面推定において、一定の方位からの地震波が欠落している場合の影響を調査することを目的とした。そのため、モデルは下部地殻と最上部マントルに相当する単純な2層構造とし、その境界面に傾斜を与えた。傾斜方向 (strike) は0˚から345˚まで15˚おきに、傾斜角 (dip) は5˚から45˚まで5˚ごとに変化させた。地震波の到来方向は0˚から355˚まで5˚ごとに設定し、全ての方位から地震波が到来する事例 (ケース1) と、実際の観測結果同様、東方向に相当するN60˚EからN115˚Eおよび北西方向に相当するN320˚EからN345˚Eのデータを除外した事例 (ケース2) の2例を設定した。モデル下部への入射角は約25˚に固定した。なお、理論波形にノイズ（雑微動）は加算していない。

**【結果・議論】**
まず、得られたRFにharmonic decomposition解析を適用し、境界面の傾斜方向を推定した。ノイズを加算していないこともあり、全方位から地震波が到来するケース1では、設定した方位と寸分違わぬ結果が得られ、計算方法が妥当であることの確認が取れた。また、一部の方位の地震波を除外したケース2でも、全てのstrike / dipのモデルにおいて推定値と設定値の差分は2˚未満であった。結果を詳細に確認すると、境界面が南西から西方に傾斜する事例、すなわち境界面が浅くなる方向のデータが欠落している場合に設定値からの差分がやや大きくなる傾向が見えた。次に、グリッドサーチにより、境界面のdipを推定した。この場合、ケース1でも3˚程度の差分が生じるとともに、設定したdipが30˚を超えるあたりから、推定するdipの頭打ちが生じた。前者は変換波のパルス幅の取り方、後者はモデル下部への入射角よりも大きなdipを設定したことに起因すると考えられる。なお、元来、RF解析では急な傾斜角を持つ不連続面や大きな入射角の地震波の使用は想定されていない (e.g., Ammon, 1991; BSSA)。一方、この方法をケース2に適用すると、多くのモデルでは、設定値と推定値の差分は5˚以下であったが、設定したdipが20˚以下、かつ面が南西から西方に傾斜するモデルで推定値が設定値と10˚～35˚異なる事例を確認した。以上の結果から、現状、傾斜方向はある程度の確度で推定可能であるが、傾斜角は10˚程度の推定誤差を有すること、特に日本の場合では、西方に緩く傾斜する不連続面の傾斜角の推定は困難であることが分かった。汐見 (2020; SSJ FM) は、harmonic decomposition解析により、四国東部下の海洋モホ面が、従来のRF断面図やトモグラフィ解析からは見いだせなかった凹凸がある可能性を示した。今後は、より安定した傾斜角の推定方法を検討するとともに、四国の各観測点下の海洋モホ面の

© The Seismological Society of Japan

傾斜角の推定を実施し、より詳細なフィリピン海プレートモデル構築につなげる予定である。

© The Seismological Society of Japan

# Random velocity inhomogeneity at the western part of the Nankai subduction zone

*Tsutomu TAKAHASHI[1], Koichiro OBANA[1], Yasushi ISHIHARA[1], Seiichi MIURA[1], Shuichi KODAIRA[1], Yoshiyuki KANEDA[2]

1. JAMSTEC, 2. Kagawa Univ.

数Hz以上の地震波は，伝播距離の増大とともに波形が崩れ複雑な波群を示す．これはランダムな不均質構造による多重散乱として解釈され，波群の継続時間などを用いて速度不均質のパワースペクトル密度などを推定する研究が進められている．S波の初動到達から最大振幅到達までの時間差（ピーク遅延）は内部減衰の影響を受けにくく，ランダム不均質構造を推定するのに適していると考えられている．本研究では四国沖からトカラ列島周辺までの領域を対象とし，陸上観測点と海底地震計で得られた地震波形記録を用いてランダム速度不均質の三次元構造を推定した．解析に用いた地震数は492で，防災科学技術研究所のHi-net及びF-net，海洋研究開発機構が島嶼部に設置した臨時陸上観測点，265台の海底地震計の計485点で得られた約38000経路の波形記録を使用した．速度波形の水平動2成分からRMSエンベロープを合成し，4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hzにおけるピーク遅延を測定した．ランダムな速度不均質のパワースペクトル密度はvon Karman型を仮定し，スペクトルの勾配を規定するパラメータ($\kappa$)とパワースペクトル密度の振幅を規定するパラメータを未知数とした．構造推定にはreversible jump MCMC（Green 1995）を用い，未知数の数と空間配置を変えながら最適解を探索した．散乱の周波数依存性を考慮するため，同一波線の異なる周波数間の残差が相関をもつよう，尤度関数の共分散行列の非対角成分の一部を非ゼロとした．

解析の結果，地殻内の非火山地域では$\kappa$が0.8程度と推定され，速度不均質のパワースペクトル密度は波数15km$^{-1}$で$10^{-8}$ ~ $10^{-7}$ km$^3$ と比較的弱い不均質性が推定された．別府から島原の火山列や桜島付近の火山群の下は周囲に比べて不均質性が強く，深さ0-30kmでは$\kappa$ は約0.5，波数15km$^{-1}$でのパワースペクトル密度は約$10^{-6}$km$^3$と推定された．これらの火山の下では，深さとともに$\kappa$が減少し，パワースペクトル密度が大きくなる傾向が見られた．沈み込んだ九州パラオ海嶺付近では顕著な不均質性の変化は見られなかったが，九州パラオ海嶺付近に設置された海底地震計では16-32HzのS波が明瞭に観測されない傾向が見られた．これは散乱の影響を強く受けたために最大振幅がノイズレベルを下回った可能性を示唆し，高周波数域での多数の欠測により不均質性を過小評価した可能性が考えられる．

種子島・トカラ列島の東側では，波数15km$^{-1}$でのパワースペクトル密度が火山地域の地殻内と同程度の媒質が深さ0-20kmに分布していることがわかった．この領域では$\kappa$が0.5以上であり，スペクトルの特徴は火山域とは大きく異なる．この領域のプレート境界10-20kmと推定されており(Yamamoto et al. 2020)，主に上盤側の構造を反映していると考えられる．また中国地方西部の深さ20-40kmに火山周辺と類似した不均質性の強い領域が推定された．同様の構造は九州東部の深さ20-30kmにも分布する．これらの不均質性の強い構造の成因などは現時点では不明であり，今後他の領域での解析事例を増やすなどして解釈を進める必要がある．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P3 (ROOM P)

[S09P-01] Relation between activity of repeating earthquakes and slip-rate deficit under the Ryukyu Trench– Nanakai Trough

○Akinori HASHIMA[1], Hiroshi Sato[2], Tatsuya Ishiyama[2], Toshihiro Igarashi[2] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-02] Swarm earthquake activity in the northeastern Noto Peninsula

○Yoshihiro Hiramatsu[1] （1.Kanazawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-03] Numbers and duration of aftershocks for inland earthquake in Japan as a function of their size

○Taichi Honda[1], Takuji Yamada[1] （1.Ibaraki Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-04] Relevance of Seismic activity near Wakayama City to the earth tides

○Funa Iizuka[1], Yasuhiro Yoshida[2] （1.Sapporo Regional Headquarters, JMA, 2.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-05] A trial digitization and spectral analysis of analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network for the analysis of tectonic tremor

○Takanori MATSUZAWA[1], Tetsuya TAKEDA[1] （1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-06] Comparison of the regional characteristics of the magnitude-frequency distribution of earthquakes with interplate slip phenomena along Japan Trench

○Kohei Nagata[1], Koji Tamaribuchi[1], Fuyuki Hirose[1], Akemi Noda[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-07] Urgent ocean bottom seismic observation of earthquake swarms in the Tokara Islands initiated in April 2021

○Yukihiro NAKATANI[1], Hiroshi Yakiwara[1], Yusuke Yamashita[2], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1] （1.NOEV, Kagoshima Univ., 2.Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-08] Seismicity pattern before and after the 2016 Kumamoto earthquakes

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Jun Izutsu[4], Yoshiaki Orihara[5], Masashi Kamogawa[1] （1.Univ. of Shizuoka, 2.Shizuoka Univ., 3.Inst. of Stat. Math., 4.Chubu Univ., 5.Tokyo Gakugei Univ.）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-09] A preliminary study on low-frequency earthquakes below Mt. Fuji: Creation of an earthquake catalog using the Matched Filter method and quality evaluation of the catalog

○Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Yohei Yukutake[4] （1.Univ. of Shizuoka, 2.Inst. of Stat. Math., 3.Shizuoka Univ., 4.Univ. of Tokyo）

©Seismological Society of Japan

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-10] Anomalous seismic activity including shallow low-frequency events near Hakodate: hypocenter distribution and characteristics of waveforms derived by dense seismic observation

○Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Masahiro Kosuga[2], Takuto Maeda[2] （1.Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Hirosaki University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-11] Stress field in the Tohoku region, Japan and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

○Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Shin'ichi Sakai[2], Mako Ohzono[2,3], Kei Katsumata[3], Masahiro Kosuga[4], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Shu'ichiro Hori[1], Toru Matsuzawa[1], . Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake （1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 4.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5.Graduate School of Encironmental Studies, University of NAGOYA, 6.Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 8.Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-12] Performance comparison of hash-based methods for similar waveform detection

○Yuki Takayama[1], Shiro Hirano[1], Hironori Kawakata[1] （1.Ritsumeikan University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-13] Along-strike variation of shallow very low frequency earthquake activity in the Nankai subduction zone

○Shunsuke TAKEMURA[1], Satoru Baba[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Katsuhiko Shiomi[4], Takanori Matsuzawa[4] （1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3.Tohoku University, 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-14] Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude

○Koji TAMARIBUCHI[1], Masashi OGISO[1] （1.Meteorological Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-15] Aftershocks and shear strain energy changes caused by inland earthquakes in Japan

○Sachiko TANAKA[1] （1.NIED）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-16] Three-dimensional tectonic stress field inferred from long-term data of seismicity with prior information

○Toshiko TERAKAWA[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2] （1.Nagoya Univ., 2.ISM）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

[S09P-17] Spatio-temporal distribution of the very-low frequency earthquake at Kumano-nada — Activity between Dec. 2020 and Jan. 2021—

○Yojiro Yamamoto[1], Keisuke Ariyoshi[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Takane Hori[1]
（1.JAMSTEC）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-18] Controling factors of along-dip segmatation of mega-thrust earthquakes in subduciton zones

○Kiyoshi YOMOGIDA[1] （1.Earth Planetary Dynamics, Grad Sch Sci, Hokkaido University）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-19] Visualization of seismic activity anomalies - comparison of multiple methods

○Sumio YOSHIKAWA[1] （1.No affiliation (JMA, retired)）

3:30 PM - 5:00 PM

[S09P-20] Scaling relations of moment magnitude and rupture area for intraslab earthquakes

○Xuelei Zhang[1], Makoto Nemoto[1], Nobuyuki Morikawa[2], Yuji Dohi[2], Kenji Hirata[2], Hiroyuki Fujiwara[2] （1.OYO corporation, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Relation between activity of repeating earthquakes and slip-rate deficit under the Ryukyu Trench–Nanakai Trough

*Akinori HASHIMA[1], Hiroshi Sato[2], Tatsuya Ishiyama[2], Toshihiro Igarashi[2]

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

著者らは、さきの研究において、琉球ー西南日本弧における1998–2010年の測地データのインバージョンにより琉球海溝ー南海トラフにおけるすべり速度欠損の分布を求めた（橋間ほか, 2018, 日本地球惑星科学連合2018年大会）。すべり速度欠損は、南海トラフでは最大8 cm/yrとなり、過去の研究と調和的であった。一方、琉球海溝では、九州南部から南方に向けて負のすべり速度欠損（すべり速度余剰）が増加し、琉球海溝最南部で5 cm/yrに達した。琉球海溝におけるすべり速度余剰はスラブ後退の浅部における表れであり、沖縄トラフの背弧拡大を引き起こすものと考えられる。一方、琉球海溝においては、測地データとは独立に、繰り返し地震によるすべり速度が求められている（Igarashi, 2010, 2020; Igarashi & Kato, 2021)。そこで本研究では、測地データインバージョンによるすべり速度欠損分布を繰り返し地震によって検証する。繰り返し地震のすべり速度データとしては、観測期間を考慮し、Igarashi (2010)のカタログのものを用いた。繰り返し地震によるすべり速度はプレート相対速度に沿った向きであると仮定し、各点におけるプレート相対速度を差し引いてすべり速度欠損とする。プレート相対速度の計算にはNUVEL-1Aモデル（DeMets et al., 1994）を用いた。繰り返し地震によるすべり速度欠損はばらつきが2-3 cm/yrと非常に大きく、琉球海溝の最南部ではすべり速度欠損が3 cm/yrと-10 cm/yrを示す繰り返し地震が近接する例もある。測地データインバージョンのすべり速度欠損は、このばらつきの下限を画するように分布する。両者の解像度の違いを考えると、繰り返し地震によるすべり速度のばらつきは、測地データインバージョンでは捉えられない局所的な固着による影響を受けたものと考えられる。興味深いことに、1911年M8喜界島地震の震源域（後藤, 2013）付近では、測地データインバージョンのすべり速度欠損、繰り返し地震のすべり速度欠損の下限がともに0 –-1 cm/yrとなり、相対的な固着域となっている。一方、両すべり速度欠損分布と計器観測以前の1771年、1791年の～M8地震の震源域との間に明白な関連は見られなかった。

© The Seismological Society of Japan

# Swarm earthquake activity in the northeastern Noto Peninsula

*Yoshihiro Hiramatsu[1]

1. Kanazawa University

・はじめに
能登半島北東部の珠洲市では気象庁震度データベースによると2021年5月～7月に有感地震が13回発生し，明らかに過去の平均的な有感地震数（～数回／年）より多い．この地域での地震活動の活発化は2020年12月頃から始まっており，GNSSデータでもそのタイミングに合わせて奥能登で局所的な地殻変動が始まっていることを見ることができる（西村, 2021）．さらに遡ると，この地震活動の始まりは2018年5月頃である．本研究では，能登半島北東部の群発地震活動について報告する．

・データと方法
本研究で対象とする地域は能登半島北東部の珠洲市周辺地域で，北緯37.4～37.6度，東経137.1～137.4度の範囲である．気象庁の験測値データを用いて，JHD法（Kissling et al., 1994）にて一次元地震波速度構造を求め，その速度構造を用いてDouble Difference法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）にて震源再決定を行った．

・結果と考察
本研究地域の地震活動は珠洲市の南部（富山湾側），西部（内陸部），北部（日本海側）の3つの領域に大別できる．南部域では2018年5月から地震数が増加し，6月～8月にかけて集中的に地震が発生し，その後も地震活動が比較的高い状態が継続していた．2020年12月にそれまでの活動域を囲むような震源分布で地震数が急増した．震源の深さは3領域全てにおいて概ね～15 km程度であるが，2020年12月の南部域の地震については15 kmより深い地震が多いことやそれまでの活動域の外側にドーナツ状に地震発生域が広がっていることが特徴的である．西部域では2021年2月から，北部域では2021年3月から地震活動が目立つようになり，両地域ともに5月から地震数が急増し，特に北部域では2021年6月，7月にかけてさらに地震数が増え，マグニチュードも3～4と比較的規模の大きい地震が起こるようになった．

能登半島北東部のGNSSデータからは，2020年12月頃からこの地域において局所的に非定常地殻変動が起こっていることが分かる．西村(2021)は能登半島のGNSSデータの詳細解析から，この非定常地殻変動は茂木モデルを仮定すると，2020年12月からのドーナツ状の地震活動域の北西部付近の深さ12 kmの体積膨張源により説明できることを示した．この非定常地殻変動は現在も継続しており，2021年に一層の活発化を示した一連の群発地震の成因であると考えられる．

飯尾(1983)は群発地震の最大地震のマグニチュード（$M_{max}$）と活動域のリニアディメンジョン（$L_{swm}$）の関係式として，$M_{max}=\log_{10}L_{swm}+2.65$を提唱している．2021年7月末時点において，奥能登の3つの群発地震活動域について，観測された最大地震のマグニチュードと活動域のリニアディメンジョンの関係は飯尾(1983)の関係式と概ね整合的である．

・謝辞：本研究では気象庁の験測値データを使用しました．記して，感謝します．

© The Seismological Society of Japan

# Numbers and duration of aftershocks for inland earthquake in Japan as a function of their size

*Taichi Honda[1], Takuji Yamada[1]

1. Ibaraki Univ.

## 1.はじめに

余震とは、ある地震（以後、本震と記す）の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のことである。本研究では、余震数と余震の継続時間という２点に着目し、2003年以降に日本の内陸部で発生した、マグニチュード(M)5.5以上の13地震を解析した。

## 2.解析手法

定常的な活動の地震と余震を区別するために、時空間的な余震の定義が必要である。最初に、スケーリング則から本震の断層の長さを求めた。そして、深さ30 km以浅、本震の震央から断層の長さを半径とする円柱を余震域と定義し、余震域内に震源を持つ地震を余震の候補とした。また、時間的定義は以下とした。はじめに、余震域内での本震前180日間の地震活動を「定常的な活動」として定義し、その地震数を集計した。次に、本震後180日間の地震総数を1 日ずつ時間窓をずらしながら集計し、その地震数が「定常的な活動」の地震数を以下になった時点を余震活動の終了とした。以上の空間・時間的な定義を両方満たす地震を余震とした。なお、各余震域での地震活動の規模別頻度分布を考慮することにより、M2.0以上の地震を解析対象とした。

## 3.結果および考察

一般に、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。ところが解析の結果、日本の内陸地震に関しては、本震の規模と余震数には強い相関があることが明らかとなった（図1.a）。この結果は、本震直後の余震活動の激しさと余震の継続時間が逆相関の関係にあることを示唆している。また、Mが１大きくなると余震数はおよそ10倍になることから、余震数はグーテンベルク・リヒター則を満たすような値を取ることが確認された。しかし、本震の規模と余震数の相関から大きく外れる地震も存在している。本震が発生しなければ余震も起こらないことを考慮しながら、各地震の破壊の複雑性等との相関を吟味することにより、これらの原因について今後検討を進めていきたい。また、余震の継続時間と本震の規模の間には緩やかな正の相関があるものの、本震の規模と余震数の相関に比べると明確に弱い（図1.b）。これは、余震の継続時間には本震の規模以外の要素が重要であることが考えられる。一方、余震の時間的定義については、慎重に検討する必要がある。余震の時間変化がOmori公式に従うならば、余震の積算数は本震後の経過時間の対数に比例すること、現在の定義では180日以内で終了する余震活動が存在しないことなどを考慮しながら、余震の継続時間についても議論を深めたい。

© The Seismological Society of Japan

(a) 本震の規模（Mw）と余震数　　(b) 本震の規模（Mw）と余震継続時間

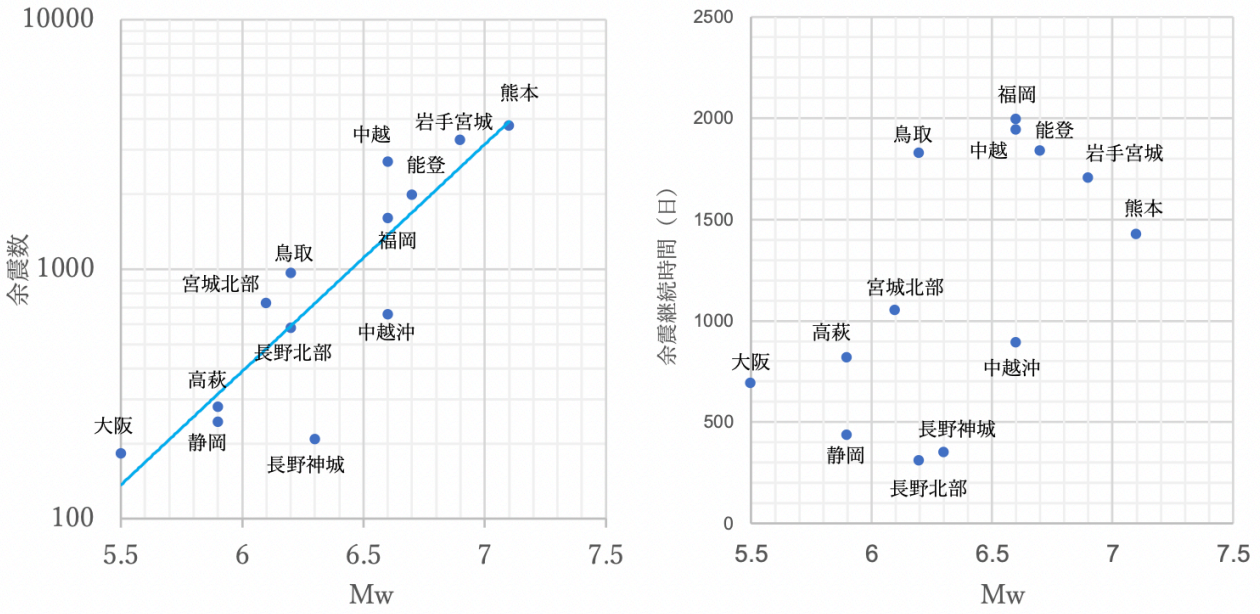



図 1 . (a)余震数および(b)余震継続時間と本震の規模の関係。(a)内の水色直線は、余震数が地震の規模の 1 次関数として表されると仮定した際に、最小二乗法により求められた回帰直線を示す。

© The Seismological Society of Japan

# Relevance of Seismic activity near Wakayama City to the earth tides

*Funa Iizuka[1], Yasuhiro Yoshida[2]

1. Sapporo Regional Headquarters, JMA, 2. Meteorological Research Institute

和歌山市付近の地震活動は非常に活発で、まわりに比べて震源が浅い、土地の膨張・隆起が観測されている、といった特徴があるものの地震の発生原因について詳しく調査した研究は少ない。本研究では、この領域での地震活動と地球潮汐との関係を調べることでこの地震活動が何に影響を受けているのかを解明することを目的とした。

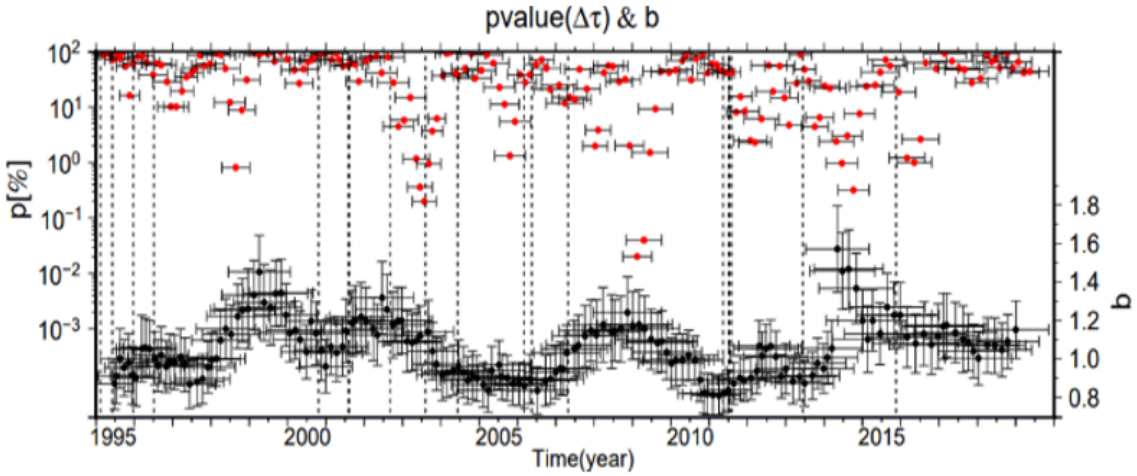
地震活動と地球潮汐の相関は、地震発生時の地球潮汐の応答を計算し（Hirose et al.,2019）、Schuster’s testの手法に基づいたｐ値などに基づいて判断する。この方法を使った解析の結果から地震活動と潮汐の相関がみられる時期について、対象領域の周辺で発生している低周波地震や長期的スロースリップ、地震活動のｂ値、地殻変動、地震発生場所との関連を調べた。

解析対象期間は1995年から2019年の25年間であり、期間中、潮汐によるせん断応力Δτと地震活動の相関が強く、1998、2003、2005、2008、2011、2015年の6つの時期に特に潮汐相関が高まっていることが分かった。低周波地震と潮汐相関の関係を調べたところ、大阪湾での低周波地震が活発化していた時期の数か月後にΔτのｐ値が低下している事例が数例観測された。この地域では地下から流体が上昇してきている可能性が指摘されており（Nakajima and Hasegawa,2007）、フィリピン海スラブの下から湧昇してきた流体が深さ20～30km で低周波地震を引き起こし、その流体が更に上昇してきて対象領域の下深さ約10kmの群発地震域に到達し、断層面に入り込むことで断層滑りが起こりやすくなり潮汐相関が高まったと考えられる。また、ｐ値とｂ値の時間変化を調べた結果が下図である。赤丸がp値(左軸)、黒丸がｂ値(右軸)の時間変化を示しており、その対応関係を調べたところΔτのｐ値の低下と地震活動のｂ値の上昇には弱い相関(r=0.371)が見られた。また、ｐ値が低下しているときにｂ値が高い領域での地震の発生率が高まっていたことが分かった。これは水やマグマといった高温物質が地下から上昇してきて断層面に入り込み差応力が小さくなることでｂ値が大きくなり、それと同時に断層面が滑りやすい状況になっていたために地球潮汐と地震活動の相関が強くなった考えられる。

このように、潮汐相関が高まっていた時期について大阪湾で発生した低周波地震、地震活動のｂ値との関係が見られた。両者とも上昇してきた流体が断層面に入り込み、断層滑りが起こりやすくなったことで地球潮汐という微小な応力変化による地震の誘発が見られた、というモデルを立てると観測事実を整合的に説明できる。以上のことから、和歌山市付近の浅発地震の発生には地下から上昇してくる流体が関わっている可能性が高いと考えられる。一方、紀伊水道での長期的スロースリップや紀伊半島下のフィリピン海プレート上面で発生する低周波地震、GNSSによる土地の膨張・隆起が捉えられていた時期との関連は見られなかった。

謝辞：本研究では気象庁が決定した震源及び発震機構のデータを使用しました。 また、気象研究所の弘瀬冬樹様から提供して頂いたプログラムTidal strain、気象研究所の小林昭夫様から頂いた地殻変動に関するデータ、気象大学校の木村一洋准教授のGNSSデータ解析ツールを使用させて頂きました。その他、本研究に対するご助言を賜りました気象研究所の皆様にも深く感謝申し上げます。

© The Seismological Society of Japan




図：ｐ値とｂ値の時間変化（赤丸がｐ値(左軸)、黒丸がｂ値(右軸)を表す）

© The Seismological Society of Japan

# A trial digitization and spectral analysis of analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network for the analysis of tectonic tremor

*Takanori MATSUZAWA[1], Tetsuya TAKEDA[1]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフにおける深部微動（以下，微動）の発見(Obara, 2002)以降，多くの研究者によってスロー地震が精力的に研究されてきた．一方数値シミュレーションの研究からは，大地震発生領域への応力蓄積過程に伴い，スロー地震活動の発生間隔に長期的な変化が見られる可能性が指摘されている(例えば，Matsuzawa et al., 2010)．東海地域における長期間のスロー地震カタログとしては，例えば東海地域の1984年以降についてひずみ計を用いた短期的スロースリップイベントに関する研究がなされているが（小林他，2006），とくに1998年以前については観測点数の問題から，詳細な位置推定は難しい．また，歪や傾斜といった地殻変動観測においては，降水などの影響を受けやすい点も，活動を網羅的にカタログ化する観点で課題となる．

防災科研は1970年代末から関東東海地殻活動観測網の運用を開始しており，ペンレコーダーによる地震計のアナログ記録が残されている．高密度に展開された地震観測網の地震波形記録が連続のデジタルデータとして保存されることが一般的になったのは2000年代以降であるため，それ以前のスロー地震活動状況を解明するには，こうしたアナログの地震波形記録が有用となる．我々はこの記録を用いた1980年代の愛知県東部の微動活動把握を目指し，目視による活動検出を実施した（松澤・武田, 2020）．しかし，客観的な基準で微動を検出し，微動源の位置を議論するためには，波形をデジタルデータ化して解析することが重要となる．また，数日間におよぶエピソード単位の活動の解析や，年単位の連続記録の網羅的な解析を目指す場合には，手作業でなく可能な限り自動化できることが望ましい．こうした目的のもと，我々は波形データの自動デジタイズの試みを開始した（松澤・武田，2021, JpGU)．しかしながら，スキャンされた画像の傾きが補正できない点，波形の振幅がトレース間の平均間隔の半分を越えた場合には周囲のトレースを含め正しくデジタイズできない点が，主な問題点となっていた．我々はこうした問題の解決を目指し，手法の改良を行った．

解析対象となる波形記録では，１枚の記録紙に２時間分の上下動地震波形がペンレコーダーで記録されている．記録は上下段および左右の４つのブロックに分かれ，上段が前半１時間，下段が後半１時間分となっている．左側は毎分0～35秒台の波形トレースが上から順に並んでおり，右側は30～65秒台の波形トレースが同様に並んでいる．各トレースにおいては，１秒毎にstreak状のタイムマークが上向きに入り，0秒台にはやや長いオフセットが入るようになっている．デジタル化を実施する波形画像については，松澤・武田(2021, JpGU)と同様，この記録紙を400dpiグレースケールのPNG(Portable Network Graphics)形式でスキャンしたものを使用した．

データのデジタイズにあたっては，プログラム上でビットマップデータを扱った．今回の方法では，まずこのビットマップデータについて画素毎に縦方向に，色のついた領域を抽出した．その後，抽出された領域について横方向に近接するもの同士をつなぐことで，それぞれ35秒間のトレースを得た．左右のブロックを分離した後，それぞれのトレースの傾きからブロック全体の傾きを推定し，ペンレコーダーによる記録時およびスキャン時の傾きの補正値とした．加えて，傾きと同時に推定される縦軸の切片情報を用い，トレースの間隔を推定するとともに，上下段の分離も行った．こうして得られた波形トレースをデジタルの波形のデータとして得た．

手法の検証として，防災科研Hi-netのデジタル地震計記録を用いて疑似的な紙記録イメージを作成したのち，このプログラムを適用し元データとの比較を行った．微動の発生が確認されている期間の記録については，高周波成分の情報は欠落しているものの，波形は概ね一致し，スペクトルの比較でも10Hz以下の帯域ではよく一致した．さらに，実際の波形への適用も試み，傾きが補正され，上下の隣のトレースと線が交わらない

© The Seismological Society of Japan

範囲内において，デジタイズ後の波形は元画像と概ね一致することを確認した．また，小林他(2006)で短期的スロースリップイベントが報告されている期間について適用したところ，1Hzとその倍音にピークは見られるものの，Hi-netと同様に数Hzに卓越するシグナルが確認できた．ただし，ここで得られたデータは1秒毎のタイムマークを含んでいるため，そのままエンベロープ相関法のような震源決定手法に適用することは難しい．今後，微動源の位置を議論するためには，こうした影響を回避する方法を検討する必要がある．

© The Seismological Society of Japan

# Comparison of the regional characteristics of the magnitude-frequency distribution of earthquakes with interplate slip phenomena along Japan Trench

*Kohei Nagata[1], Koji Tamaribuchi[1], Fuyuki Hirose[1], Akemi Noda[1]

1. Meteorological Research Institute

著者らは，地震活動の特徴を表す様々な指標の監視に基づき地殻活動の現在の異常度を表現することを主な目的とし，過去の地震活動から“ふつう”の地震活動の特徴を洗い出して，他とは有意に異なる指標値分布を持つ活動を統計的手法により抽出することを提案している．永田ほか [2021, JPGU] では，気象庁一元化震源を用いて，規模別頻度分布に関するGR則のｂ値とGR則からの逸脱を表すη値，体積ひずみの潮汐変動との相関，ETASモデルによる地震発生回数の期待値と実際の地震発生回数の差を指標とし，日本全国を矩形領域で分割した各領域について，領域内の連続する一定数毎の地震から推定した指標値の分布が領域外のすべての推定値の分布と有意に異なる場合の抽出を試みた．この結果，特に規模別頻度分布に関する指標について，他とは異なる指標値分布を持つ領域が抽出され，地域的な物理現象を反映していることが推察される．本発表では，これらの他とは異なる指標値分布がどのような物理現象と対応づけられるのかを確かめるため，主にプレート境界のすべりに関係すると考えられている既往研究による観測成果（Igarashi [2020, EPS] による相似地震カタログから推定される平均すべり量，Nishikawa et al. [2019, Science] によりまとめられている微動や超低周波地震）との比較を行った結果について報告する．

相似地震カタログ [Igarashi, 2020] から推定される平均すべり量との比較からは，以下のことが分かる．ア．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも低い領域では，領域中の地震数における相似地震の割合が高く，平均すべり量は小さい．イ．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも高い領域のうち，領域中の地震数における相似地震の割合が高いところでは，平均すべり量が大きい．ウ．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも高い領域であっても，領域中の地震数における相似地震の割合が低いもしくは無いところでは，平均すべり量は小さい．これらの領域を微動や超低周波地震の発生域 [Nishikawa et al., 2019] と比較すると，地震活動の解析を一定の空間領域内で行っているために空間分解能は良くないものの，上記ア．に対応する領域が微動や超低周波地震の発生域もしくはその周辺陸側に多くあることが分かる．このことと上記ア．イ.の結果を合わせて見ると，Nanjo & Yoshida [2018, Nature Communications] が指摘する南海トラフ沿いのすべり欠損速度とｂ値の負の相関と同様の関係が日本海溝沿いにおいても確認されたものと考えられ，そのうちｂ値の分布が全体に比べて有意に高い領域，低い領域が本手法により抽出できていることが強く示唆される．また，本解析の結果からは，このようなプレート間のすべりとの対応関係が，プレート間地震が主体の活動以外からは見て取れないことも分かる．上記ウ．は，プレート境界以外の地震活動が主体でｂ値が高い活動領域に対応すると考えられる．F-netカタログ（https://www.fnet.bosai.go.jp）によれば，これらの活動中には正断層型の地震が多く含まれており，Schorlemmer et al. [2005, Nature] が指摘する地震の発震機構の違いに対応するｂ値の分布のうち，全体に比べて有意に高い活動に対応するものと考えている．

これらの結果からは，統計的手法により抽出された特徴的な指標分布が，プレート間のすべり速度や，地震のメカニズムを支配する応力場といった地域的な特徴を反映していることが確認できたと言えるだろう．このことは，通常とは異なるプレート間のすべりや応力場の変化に対応する地震活動の変化を，地震活動の統計的手法により客観的に検出できる可能性を示唆する．発表においては，このような可能性についても議論したい．

引用文献

© The Seismological Society of Japan

Igarashi, T. (2020). Catalog of small repeating earthquakes for the Japanese Islands. Earth, Planets and Space, 72, 1-8.
Nanjo, K. Z., & Yoshida, A. (2018). A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes. Nature communications, 9(1), 1-7.
Nishikawa, T., Matsuzawa, T., Ohta, K., Uchida, N., Nishimura, T., & Ide, S. (2019). The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories. Science, 365(6455), 808-813.
Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. Nature, 437(7058), 539-542.

© The Seismological Society of Japan

# Urgent ocean bottom seismic observation of earthquake swarms in the Tokara Islands initiated in April 2021

*Yukihiro NAKATANI[1], Hiroshi Yakiwara[1], Yusuke Yamashita[2], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1]

1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ.

南西諸島北部のトカラ列島近海（鹿児島県十島村・小宝島付近）において，2021年4月9日23時台から顕著な地震活動が発生した．一連の地震活動は，開始から約3日間で200回以上の有感地震を伴う群発地震の様相を呈し，最大マグニチュード（M）は5.3，最大震度は4（悪石島）であった．島嶼部に展開された地震観測網を用いて，鹿児島大学地震火山地域防災センター附属南西島弧地震火山観測所（NOEV）が決定した震源の多くは深さ約10–20 kmであり，当該群発地震は陸側プレートの地殻内で発生したと考えられる．有感地震の活動としては，消長を繰り返しながら約10日間で計250回以上を観測し，4月22日以降は散発的な活動を示している．

今回の群発地震が発生した小宝島周辺では，過去にも群発地震活動が見られている．特に1995年12月に発生した活動域は今回と類似しており，最大Mが5.5，M2.5以上の地震が約10日間で250回以上観測された点でも共通している．多くの群発地震活動の背景の一つとして，地殻流体の移動が考えられている．小宝島周辺においては，熱水活動やガスプルームを伴う海底火山が確認されているほか，トカラ海峡付近で流体の流路となり得る構造的な不均質性も高いと考えられる．しかしながら，今回の群発地震の原因を検討するにあたり，現有の震源精度が悪い問題がある．これは，地震観測点が北東一南西方向に直線状かつ疎らに配列した島嶼部に限定されているためである．

NOEVと京都大学防災研究所宮崎観測所は，こうした背景を踏まえ，緊急の海底地震観測を開始した．新規に設置した海底地震計は4.5 Hz速度計を搭載した短期収録型海底地震計1台で，観測点配置は，曽根が多い急峻な海底地形も考慮しつつ，陸上観測点が存在する悪石島・宝島との3点で地震活動域を取り囲むように設定した．4月17日に設置が完了し，同日23時より観測を開始した．海底地震計の回収は，当初2021年6月～7月に計画していたが，海況不良やコロナ禍のため本予稿投稿時点では未実施で，8月下旬～9月上旬に予定している．本発表では，当該地震活動の特徴と海底地震観測の詳細について紹介するとともに，回収予定の海底地震計記録も用いた暫定結果を報告する．

謝辞：海底地震計の設置航海は，長崎大学水産学部附属練習船長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施されました．記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

# Seismicity pattern before and after the 2016 Kumamoto earthquakes

*Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Jun Izutsu[4], Yoshiaki Orihara[5], Masashi Kamogawa[1]

1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Chubu Univ., 5. Tokyo Gakugei Univ.

本講演では、平成28年(2016年)熊本地震の起きた布田川・日奈久断層帯周辺の地震活動のパターンについて解析した結果を報告する。2016年4月14日と16日に起きたマグニチュード(*M*)6.5と7.3の地震は、それぞれ、日奈久断層帯と布田川断層帯で起きた。これらの断層帯周辺では、熊本地震前から一定程度の地震活動はあったが、前者の*M*6.5地震の後の地震活動や、後者の*M*7.3地震の後の地震活動は更に活発だった。先行研究(Nanjo et al., 2016, 2019; Nanjo and Yoshida, 2017)では、個々の地震活動のパターンについて議論しているが、本研究ではそれらを総合的にまとめ、熊本地震前後の地震活動のパターンについて議論する。

本解析は、地震活動の時空間分布と、地震の規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター(GR)則(Gutenberg and Richter, 1944)、および余震の減衰様式を表す大森・宇津(OU)則(Utsu, 1961)に基づく。規模の大きい地震と小さい地震の数の比率に相当するGR則の*b*値は、岩石破壊実験では、差応力に反比例の関係があると示唆され、地球規模の事例でも、その関係を支持する傾向が見られる(Scholz, 1968, 2015)。また、OU則は、大きい地震(本震)の発生直後に増加した小さい地震(余震)の数は時間と共にべき乗で減少することを表す。速度・状態依存摩擦では(Dieterich, 1994)、OU則の冪指数$p$=1が仮定されているが、応力減少が速いか遅いかにより、$p$>1や$p$<1が観測されうる事を示している。

気象庁が維持管理する地震カタログ(一元化震源カタログ)を使用して解析した結果は、以下の様にまとめられる。(1)熊本地震が起きる前は、*M*6.5と*M*7.3の地震の震央付近における応力状態は高めであった。熊本地震の一連の活動が開始した後は、布田川・日奈久断層帯に沿った応力は大局的に減少傾向を示した。(2) *M*7.3地震前のプレスリップや同地震後のアフタースリップが断層帯に沿って起きた事が示唆される。これは、国土地理院のGEONETによる地殻変動の解析結果(Pollitz et al., 2017)や、応力テンソルインバージョン法による、熊本地震の震央周辺の応力場の特徴(防災科学技術研究所, 2016)と調和的である。

GR則を利用した最近の研究から(Gulia and Wiemer, 2019)、大地震後にそれが本震か、または将来に起きる更に大きな本震の前震かを判断するモデルが提案されている。本発表では、上記の熊本地震の結果から示唆されたプレスリップの効果をモデルに取り込む事が、モデルの精度向上になる可能性があると指摘する。

謝辞：本研究では、気象庁一元化震源カタログを使用した。また、日本学術振興会による科研費(20K05050)の助成、中部電力株式会社「原子力に係る公募研究」の助成、東京海上各務記念財団の研究助成、中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究IDEAS202111の助成、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」の助成を受けて、本研究の一部を実施した。

© The Seismological Society of Japan

# A preliminary study on low-frequency earthquakes below Mt. Fuji: Creation of an earthquake catalog using the Matched Filter method and quality evaluation of the catalog

*Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Yohei Yukutake[4]

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

通常の地震よりもゆっくりとした地震波を励起する低周波地震が、富士山直下の深さ10-25kmで観測されている(浜田, 1981; Ukawa et al., 2005)。富士山の低周波地震は常時起きているが、2000-2001年の活発化の様に(吉田他, 2006)、活動に変化が見られる。低周波地震の発生は、火山深部の流体の存在を示唆すると考えられている(例えば、Nakamichi et al., 2003)。例えば、富士山の山体膨張と低周波地震の関係性を示す報告があり、富士山直下のマグマ溜まりの圧力が高まって膨張歪を生じさせ、低周波地震も活発化したと説明されている(原田他, 2010)。一方で、箱根火山周辺での観測結果の様に、膨張歪に伴って、低周波地震の活発化が見えない事例もある(原田他, 2010)。本講演では、富士山の低周波地震と火山活動の関係について再検証することを目的として、富士山周辺で得られた地震波形記録にMatched Filter法(MF法)を適用し、低周波地震を詳細に把握することを目指す研究の序報を報告する。

MF法はS/N比の良い地震波形を雛形にして、連続地震波形と雛形地震波形との相関処理により、イベント検知を行う方法である(例えば、Peng & Zhao, 2009)。本研究では、箱根山の低周波地震を検知するMF法を用いたシステムを(行竹, 2017, Yukutake et al., 2019)、富士山に適用できる様に改良した。改良方法について、日本地球惑星科学連合2021年大会で楠城他 (2021)は報告したので、ここでは、その概要を説明する。(1)はじめに、気象庁の一元化震源カタログから雛形地震となる低周波地震を選択し、その地震の波形を雛形波形として準備した。(2)次に、雛形波形に対して、富士山周辺の32観測点で記録された2012-2020年の連続波形と相関処理を行い、雛形地震と相関のあるシグナルが含まれている場合に地震が起きたと判断して、地震を検知した。(3)最後に、検知された地震の震源情報をリスト化した(地震カタログの作成)。

低周波地震の詳細を把握する前に、その大まかな特徴を理解する必要があるという方針で、作成された地震カタログの性能を評価した。(i)2012-2020年の低周波地震はほぼ一定の割合で起きていた。同様の傾向は、気象庁の一元化震源カタログに収録されている低周波地震でも確認した。ただし、前者は年間約1,250個の割合で低周波地震が起きており、後者(年間約125個の割合)の約10倍に相当する。(ii)また、小さい低周波地震ほど数が多く、大きい低周波地震ほど数が少ない傾向にあった。これも、気象庁の一元化震源カタログに収録されている低周波地震で見られる特徴であることを確認した。

現在、2000年代の前半まで連続地震波形を遡って、地震カタログを再構築することを行っている。このことにより、長期間の低周波地震の発生様式が把握できることになる。また、富士山の膨張歪み変化は、2006年頃から少なくとも2009年末まで見られたが(原田他, 2010)、その歪み変化と低周波地震との関係を再検証する研究環境が整うことになる。

さらに、通常の地震の活動推移を把握するために使われている技術を、低周波地震へ適用できるように改良している。例えば、ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence)を用いて(Ogata, 1999)、低周波地震の活動推移を評価できるか、また、規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター則の*b*値を用いて(Gutenberg and Richter, 1944)、富士山直下の応力状態の変化を推定できるかなどについて検討している。

本講演では、現在進めている研究の速報も合わせて報告する予定である。

© The Seismological Society of Japan

謝辞：本研究では、気象庁一元化震源カタログ、気象庁、防災科学技術研究所及び東京大学地震研究所観測点における地震波形記録を使用した。また、本研究の一部は、公益社団法人ふじのくに地域・大学コンソーシアムの共同研究助成、日本学術振興会による科研費(20K05050, 21K04613)の助成、中部電力株式会社「原子力に係る公募研究」の助成、伊豆半島ジオパーク学術研究助成を受けて実施した。

© The Seismological Society of Japan

# Anomalous seismic activity including shallow low-frequency events near Hakodate: hypocenter distribution and characteristics of waveforms derived by dense seismic observation

*Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Masahiro Kosuga[2], Takuto Maeda[2]

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Hirosaki University

本発表では，北海道函館市付近で発生する特異な地震活動について，稠密地震観測によるデータを用いた解析結果について報告する．
北海道函館市沖では，地震予知総合研究振興会（以下，振興会）が設置・運用する地域観測網AS-netによって，地殻内の深さ10 kmより浅部で低周波地震が発生していることが確認された（野口・他，2018）．さらに，通常地震もこの低周波地震とほぼ同じあるいは極めて近接した位置で発生していると推定された．従来，低周波地震は，プレート境界浅部で発生するものや火山活動に伴うものを除けば，通常の地震が発生する脆性破壊領域ではなく，より深部の深さ約15~40 kmで発生すると考えられてきた．上記の函館浅部の特異な低周波地震活動は，こうした考えを覆すものである．なお，この特異な活動の領域から5-10 km東の深さ約15-35 kmには，深部低周波地震の活動領域も存在する．こちらは，内陸に点在する深部低周波地震活動の典型的な特徴を示す．
この特異な浅部低周波地震活動について詳細な調査を行うことは，低周波地震一般の発生メカニズムの解明や，地殻内地震との関係の解明のためにも非常に重要である．しかしながら，この地震活動では地震の規模が概ねM2かそれ未満と小さく，既存の観測網では詳しい調査のための地震観測点の密度が十分ではない．このため，振興会と弘前大学は，2018年10月より当該地震活動の周辺に臨時地震観測点の設置を開始した（野口・他，2020）．以降，同時に最大で14観測点が展開され，データの蓄積が進んだことから，得られた高密度データを活用した解析を開始した．
震源決定は，函館市付近の浅部の特異な低周波地震活動と，その東側の深部低周波地震活動のイベントを対象に行った．臨時観測点とともに周辺の既存の18観測点のデータを用いた．これら観測点についてWIN systemによる手動検測を行った．臨時観測点は地域が市街地に近く，波形にノイズが多いことから，観測波形によるイベント検出には使用せず，振興会が青森県～北海道南部において独自に決定している震源カタログ（野口・他，2016）の中から，対象のイベントの震源再決定を行った．
浅部の特異な低周波地震活動については，活動が低調なものの8件のイベントが震源決定された．これらの地震については，最も近い観測点（石崎神社，臨時）からの震央距離は1.5 kmほどだが，そこでのS-P時間は1秒未満であり，振興会のカタログによる震源深さよりさらに浅い可能性が示された．再決定された震源位置のばらつきの大きさは最大でも1 km程度であり，非常に狭い範囲で発生していることが示唆された．震源決定プログラムhypomhによる震源決定誤差は概ね0.2-0.5 kmであり，振興会カタログの誤差値のおおよそ半分程度であった．なお，これら8件が通常地震であるか低周波地震であるかについては，少なくとも2件の波形ではS波部分で高周波数成分を欠き継続時間が長いなどの低周波地震の特徴を示したが，その他については一見して判断が難しい波形であった．しかしその他の波形についても，付近の通常地震と比べて波形全体で高周波数成分を欠き，低周波数成分に富む傾向がみられた．気象庁一元化カタログでは，この8件中7件が記載されており，うち3件は低周波地震，他は通常地震とされていた．この3件の低周波地震は，低周波地震の特徴を示す上記2件のイベントを含んでいる．
一方，東側の深部低周波地震の活動については，23イベントが再決定された．これらの波形は典型的な低周波地震のものであり，しばしば連続して発生することから，読み取り精度は高くないが，観測点が増えたことで震源決定がより安定するようになった．
この函館付近の特異な地震活動については，Yoshida et al. (2020)が詳細な解析を行っている．既存観測点のデータで高精度の震源決定を行い，この活動の低周波地震と通常地震は極めて近接していると結論付けた．これは本研究の結果と同様である．また，特に2015-2016年に頻発した一連の通常地震がほぼ同じ場所で発生し

© The Seismological Society of Japan

ており，これらが地殻流体の間隙水圧の急変に伴う「繰り返し地震」であることを示唆している．このような現象は，稠密地震観測の期間では未だ捉えられていない．さらにこの浅部の活動は東側の深部低周波地震活動と関連しており，ともに地殻流体の移動に起因すると推定している．我々は今後も稠密地震観測を続けるとともに，高密度データを活かした解析を行い，こうした仮説の検証にも取り組んでいく予定である．

謝辞
臨時観測点の設置・運用にあたり，函館市をはじめとする関係各位には多大なご協力をいただきました．また，本研究では，防災科学技術研究所，気象庁，北海道大学，東北大学，青森県による地震観測データを使用しています．記して感謝いたします．

参考文献
Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi and K. Kasahara (2020), Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, Geophysical Journal International, 223(3), 1724-1740, December 2020.
https://doi.org/10.1093/gji/ggaa418
野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・石田貴美子（2016），AS-netによる青森県・北海道南西部の震源分布，日本地震学会2016年度秋季大会，名古屋，2016年10月，S09-P16.
野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・阿部信太郎・石田貴美子（2018），高密度観測網AS-netで捉えられた東北地方北部～北海道南西部の低周波イベントの分布と特徴，日本地震学会2018年度秋季大会，郡山，2018年10月，S23-P26.
野口科子・笠原敬二・小菅正裕・前田拓人・雨澤勇太・春山太一・石田早祐美・松野有希・大類樹（2020），函館市付近の浅部低周波地震と通常地震が混在する地震活動を対象とした稠密地震観測，日本地球惑星科学連合2020年大会，SSS13-P06.

© The Seismological Society of Japan

# Stress field in the Tohoku region, Japan and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

*Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Shin'ichi Sakai[2], Mako Ohzono[2,3], Kei Katsumata[3], Masahiro Kosuga[4], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Shu'ichiro Hori[1], Toru Matsuzawa[1], . Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 4. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5. Graduate School of Encironmental Studies, University of NAGOYA, 6. Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 8. Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University

**背景・目的**

現在の東北日本の応力場は逆断層型応力場が分布する（例、Terakawa and Matsu’ura, 2010）。東北日本には日本海形成時に発達した正断層が存在し(岡村・加藤, 2002; 岡村, 2010)、古い正断層が逆断層として活動するインバージョンテクトニクスが発生する（例、Okamura et al., 1995）。我々は東北日本で発生した大規模地震周辺の応力場に対する断層面のすべりやすさをSlip Tendency法を用いて検討した（例、田上・他、JpGU2021）。推定した応力場は2011年前後で最大圧縮方向（$S_{Hmax}$）が反時計回りに回転する傾向を示し、ST値から内陸地域ではすべりにくい面が実際にすべっていることを確認した。

本研究では①応力場とST値の関係の検討と②東北地方内陸地域の2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）後における応力場の変化の要因の検討を行った。

**検討①**

Synthetic slip（Neves et al., 2009）を使用し、応力場に対して断層面が活動するときのrakeを算出した（計算rake）。断層モデルのrakeと計算rakeの差をrake差とし、ST値と比較した。

**結果**

ST値0.5~1.0、rake差40°以内に集中する。内陸地域では2011年後にrake差が大きくなり、東北沖地震の影響を反映している可能性が考えられる。

**検討②**

Coulombプログラム（Toda et al., 2005; Lin and Stein, 2004）を用いて、東北沖地震による応力場の変化を求めた。地震時の応力変化によって計算された応力場と実際の地震から推定した東北沖地震後の応力場を比較し、それらが類似した条件を求めた。

**結果**

1998年岩手県雫石町の地震、2008年岩手・宮城内陸地震では東北沖地震後に見られた$S_{Hmax}$の回転と応力比の大きさの増加を再現することができた。2003年宮城県北部の地震においても再現することができたが、摩擦係数が小さかった。震源の空間分布の違いがあることから応力場の不均質を反映している可能性（Smith and Dietrich, 2010; Smith and Heaton, 2011）が考えられる。

**まとめ**

東北沖地震の断層モデルから応力場の傾向を再現することができたため、応力場の変化は大規模地震による応力擾乱の影響と考えられる。応力場の変化はST値に影響してしまうため、広域の応力場に変化をもたらす大地震の影響を除くことが望ましいと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

## Introduction

In northeastern Japan, stress fields of east-west oriented compression are widely distributed (e.g., Terakawa and Matsu'ura, 2010). It is frequently observed that tectonic inversion of old normal faults occurs acting as reverse faults (e.g., Okamura et al., 1995). In our previous studies, we evaluated the fault activity in the northeastern Japan by using the Slip Tendency (ST) method (e.g., Tagami et al, JpGU Meeting 2021). From the estimated stress field, we confirmed the rotate of maximum compression direction ($S_{Hmax}$) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (the Tohoku-oki earthquake). From the ST value, we suggested the fault planes were active in an unlikely to slip condition in the inland area.

In this study, we evaluated the relationship between the ST value and the stress field (Study 1). Furthermore, we investigated the factors of the changes in stress field after the Tohoku-oki earthquake (Study 2).

## Study 1

We use the Synthetic Slip (Neves et al., 2009) to calculate the rake angle (calculated rake) when the fault plane become active to stress field. The difference between “fault model rake” and “calculated rake” is defined as “rake difference” and compared with the ST value.

### Result

Distribution of ST value is concentrated in a range of 0.5 to 1.0 and rake difference 40˚. In the inland area, rake difference become large in the after the Tohoku-oki earthquake. This may reflect the influence of the Tohoku-oki earthquake.

## Study 2

We use the Coulomb program (Toda et al., 2005; Lin and Stein, 2004) to estimate changes in the stress field due to the Tohoku-oki earthquake. We compared the calculated stress field with the actual stress field, and seek the condition which both become similar.

### Result

In the case of the 1998 Shizukuishi earthquake and the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, we were able to reproduce the rotation of the $S_{Hmax}$ and increase of the stress ratio. In addition, even in the case of the 2003 northern Miyagi earthquake, we were able to reproduce the stress field. However, the friction coefficient is too small.

## Summary

We were able to reproduce the tendency of the stress field. Therefore, the changes might be due to the stress disturbance caused by the Tohoku-oki earthquake. When evaluating using Slip Tendency, we should eliminate the effect of a large earthquake which could change the stress field over a wide area.

## References

Neves, M.C., Paiva, L.T., and Luis, J., 2009, Com. & Geosci., 35(12), 2345-2352.
Okamura, Y. and Kato, Y., 2002, Univ. Tokyo Press, 47-69.
Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, R., and Satoh, M., 1995, Island Arc, 4(3), 166-181.
Smith, D.E., and Dietrich, J.H., 2010, Pure Appl. Geophys. 167, 1067-1085.
Smith, D.E., and Heaton, T. H., 2011, Bull. Seismol. Soc. Am. 101, 1396–1421.
Terakawa, T., and M. Matsu’ura, 2010, Tectonics, 29(6).

© The Seismological Society of Japan

# Performance comparison of hash-based methods for similar waveform detection

*Yuki Takayama[1], Shiro Hirano[1], Hironori Kawakata[1]

1. Ritsumeikan University

はじめに

これまで、Template matchingを用いて相似地震を検出する研究が多く行われてきた。相似地震とは、類似の波形を持つイベントとして定義される(Igarashi, 2020)。ただし、Template matchingでは、既知の波形の類似波形のみを見つけることしかできない。既知の波形をテンプレート波形として固定しない類似波形の検出を行うことで、Template matchingでは見つけ出せなかった新たな類似波形のペアを見つけ出すことが可能となる。そのような検出手法には、Auto correlation（AC）がある。この手法は連続波形をN個の波形ウィンドウに分割し、それらすべての組み合わせにおいて相関係数を計算するというものである。しかし, ACは解析する期間が長いと計算時間が$O(N^2)$に比例して、非常に長くなるという欠点がある。そこで、Yoon et al. (2015)は、画像検索や音声検索、Web検索エンジン等で利用されているハッシュ法を用いたFingerprint and Similarity Thresholding(FAST)という手法を開発した。ハッシュ法とは、ハッシュ関数を文字データや画像データなどの任意のデジタルデータに作用させることで、より簡易なデータ(ハッシュ値)に変換し、ハッシュ値をデータの要約として、データ同士の比較を高速化するという手法である。ここでハッシュ関数とは、個々のデジタルデータに何らかのビット列を割り当てる規約であり、類似性検索の場合には高速化のために元データよりも短いビット列を割り当てる。駒形ほか(2020)は、Fingerprintingよりも簡単に計算でき実行時間短縮が見込める、2bit-ahashとkhashの2つを提案した。

一方、ほぼ同じ場所で発生し、ほぼ同一の発震機構を持つ類似の地震を繰り返し地震と呼ぶ(Igarashi, 2020)。しかし、前段落のようにして検出される相似地震のうちどの程度が繰り返し地震であるかについては、検出される波形をもたらすイベントの小ささ故、詳しく調べられてこなかった。Uchide(2020)は、深層学習を利用して日本列島下で発生した小規模地震の初動メカニズム解を推定した。小さいイベントは、メカニズム解が決定できるとは限らないため、まずはメカニズムまで含めて既知のイベントについて類似度指標とメカニズム解の相関を見ることが必要となる。ノイズ(常時微動)とノイズやノイズとイベントは相関の低いものであり、余分な計算となってしまう。駒形ほか(2020)によりkhashならノイズは高確率で除去できることが確かめられているため、イベントとイベントについてのみメカニズム解と類似度の相関を考えることになる。

そこで、本研究では、駒形ほか(2020)が提案した2bit-ahashとkhashに着目し、この２つと相互相関係数を使用して波形の類似度を計算し、波形の類似度だけでなく、発震機構も使用することで、繰り返し地震に対して、どの程度有効となるかを1つの指標として、3つの類似度指標の比較を行うことを目的とする。

解析手法

解析データとして、2018年6月18日7:58に大阪府北部で発生したMj6.1の地震直後から16時間のHi-net交野、久御山観測点で記録された連続波形記録の3成分を用いた。サンプリング周波数は100Hz、周波数帯域は5~30Hzを使用した。まず、非定常的なイベントをピックし、それらについて3つの類似度指標それぞれで観測点ごと総当たり的にイベント同士の類似度を計算した。その後、Uchide(2020)で初動解が決定されているイベントのうち信頼性のたかいもののみについてUchide(2020)の初動解からP軸、T軸、N軸を計算した。イベント同士のP軸の内積とT軸の内積の絶対値の和を横軸に、イベント同士の類似度を縦軸に、イベント同士の震央間距離をカラースケールでとり、図を作成した。ここで、深さについては、決定精度が低い可能性があるため、無視した。

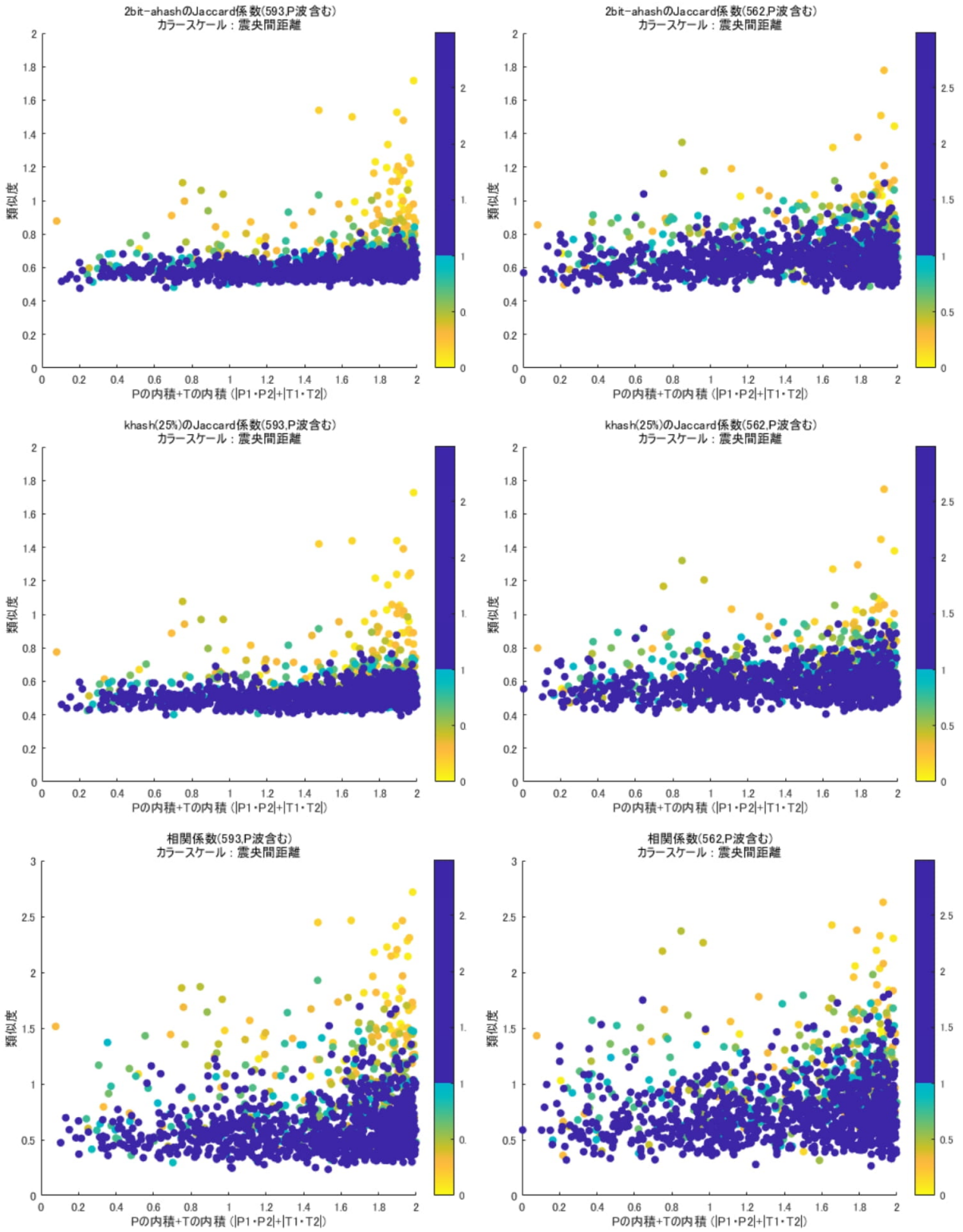
結果

図より、2bit-ahashとkhashは相互相関係数に比べて、イベント同士の震央間距離が遠いペアの類似度は相対的に低くなり、震央間距離が近いペアの類似度が相対的に高くなり、その境界が明確になることが明らかに

© The Seismological Society of Japan

なった。このことから、類似度閾値の設定を容易にすることが期待できる。また、相互相関係数よりも2bit-ahashやkhashの方が、震央間距離が遠いイベントについては、メカニズムが似ていたとしても、類似度が高くならないことが期待できる。また、解析の結果、3つの類似度指標間の順位相関(特に相互相関係数)が必ずしも高くならないことが明らかになった。波形が類似していることと、イベント間の震央間距離と震源メカニズムが似ていることが、どの程度一致するのかを知ることは、3つの類似度指標が繰り返し地震についてどの程度確証を持てるかの指標になる。今回の解析結果では、相互相関係数よりも2bit-ahashやkhashの方が繰り返し地震の判定に有効であることが考えられる。

© The Seismological Society of Japan




左：交野観測点　右：久御山観測点

上：2bit-ahash　真ん中：khash　下：相互相関係数

© The Seismological Society of Japan

# Along-strike variation of shallow very low frequency earthquake activity in the Nankai subduction zone

*Shunsuke TAKEMURA[1], Satoru Baba[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Katsuhiko Shiomi[4], Takanori Matsuzawa[4]

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tohoku University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフの巨大地震発生域の浅部側では浅部スロー地震活動が確認されている．浅部スロー地震は，プレート境界のすべり欠損速度（あるいはせん断応力変化）が大きい領域の周囲かつ地震波速度の低速度帯で活発な傾向がある（例えば，Tonegawa et al., 2017; Baba, Takemura et al., 2020）．そのため，浅部スロー地震活動は，プレート境界浅部の摩擦強度などの指標となると考えられている．武村・他（2021，JpGU）では，紀伊半島南東沖において高精度かつ長期的な浅部超低周波地震カタログを構築し，古銭洲海嶺の西端で特に活発であることを示した．本研究では，武村・他（2021, JpGU）の手法を室戸岬沖と紀伊水道沖の浅部超低周波地震活動へも適用することで，南海トラフの浅部超低周波地震活動の走向方向の変化とその原因を明らかにすることを目的とする．

広帯域地震観測網F-netの連続記録に対してTakemura, Noda et al. (2019)の手法を適用し，浅部超低周波地震の検知および震央再推定を行った．OpenSWPC（Maeda et al., 2017）の相反定理モードを用いて0.025º毎の仮想震源格子上，プレート境界型の逆断層のメカニズム，6秒のKüpper関数のシミュレーション波形を大量に作成した．震央位置は再推定した位置，深さはJIVSM（Koketsu et al., 2012）のプレート境界に固定した．浅部超低周波地震のモーメントレート関数が，6秒のKüpper関数の重ね合わせで記述できると仮定し，焼き鈍し法により推定した．

2004年4月から2021年3月の解析期間中、室戸岬沖と紀伊水道沖において483個の浅部超低周波地震を検知した．これらの浅部超低周波地震活動のうち，観測波形との一致度VR 30%以上のもののみで計算した積算モーメントは$5.5\times10^{17}$ Nmであり，Takemura, Matsuzawa et al. (2019)のCMTカタログの積算モーメントの3.6倍程度である．この差は，相互相関解析とモーメントレート関数の詳細推定により，小さいサイズのイベントあるいはサブイベントまで網羅的にモデル化できたことに起因する．再推定した震央位置は，Takemura, Noda et al. (2019)と同様に，30 km四方程度の狭い領域で集中的に発生していた．Yokota & Ishikawa (2020)により，2009年および2018年頃に室戸岬沖から紀伊水道沖にかけてMw 6.5程度の浅部スロースリップ（SSE）が検知されており，浅部SSE中に室戸岬沖から紀伊水道沖への浅部超低周波地震の活動域の移動が確認された．浅部SSE期間の浅部超低周波地震による積算モーメントはそれぞれ$1.6\times10^{17}$および$1.4\times10^{17}$ Nmと，浅部SSEの地震モーメントの1~5 %程度である．深部短期的SSE（以下、単に深部SSE）と同期間に発生した深部超低周波地震の積算モーメントも，深部SSEのモーメント1 %以下と報告されている（Ito et al., 2009）．

発表では，本研究で構築した室戸岬沖と紀伊水道沖の浅部超低周波地震カタログと武村・他（2021, JpGU）の結果を合わせることで，超低周波地震活動の走向方向の変化を詳細に議論する．

**謝辞**　防災科学技術研究所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に東京大学情報基盤センターのOakforest-PACSを利用しました。本研究は、JSPS科研費21K03696により実施されました。

© The Seismological Society of Japan

# Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude

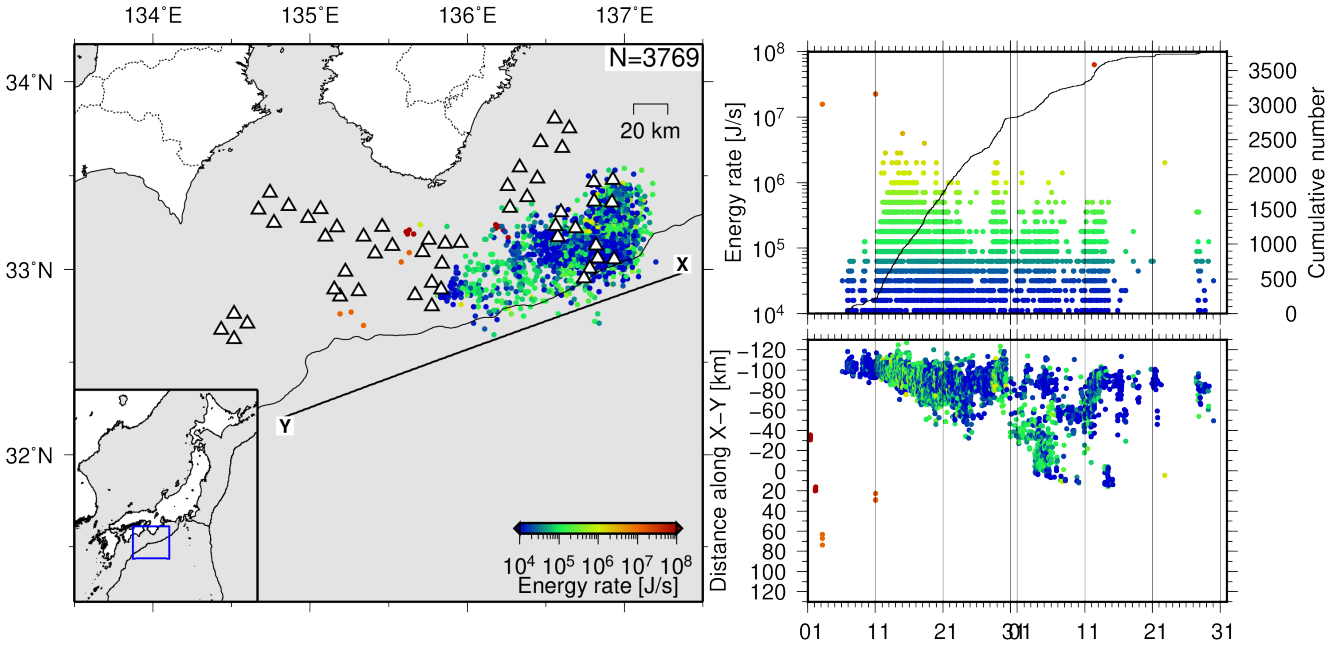
*Koji TAMARIBUCHI[1], Masashi OGISO[1]

1. Meteorological Research Institute

浅部低周波地震（微動）は，普通の地震に比べて低周波域が卓越し，継続時間が長い特徴があるすべり現象である．南海トラフ沿いでは，海溝軸付近で浅部低周波地震が海底地震観測により観測されている (e.g. Annoura et al. 2017, Tamaribuchi et al. 2019)．浅部低周波地震は，広帯域地震計で観測される超低周波地震や，測地観測によるスロースリップと同期して発生することが知られており (Nakano et al. 2018)，プレート境界あるいは分岐断層上で発生する断層すべりによるものと考えられる．これらのスロー地震は，1週間–1か月程度活発になり，その後数年間活動がないなど，エピソード的に発生する．さらに，遠方で発生した大地震，潮汐によって誘発されることがあるので，応力変化に敏感なストレスメータとしてふるまう．
近年ではDONET 等のケーブル式海底地震観測網の進展により，リアルタイムでの地震観測体制が構築されている．これまで，低周波微動の解析では主にエンベロープ相関法（Obara 2002）が用いられてきた．浅部の場合，ソースと観測点が深部に比べて近く，パスが観測点によって大きく異なることから，必ずしもエンベロープの相互相関が良いとは限らない．そこで本研究では，エンベロープ最大振幅も同時に考慮した震源決定プログラムを開発した．これにより，南海トラフ浅部のスロースリップの監視強化に寄与することを目的とする．
データは，DONETの広帯域速度波形の記録で，水平2成分を使用した．まず連続波形から微動を検出し，次に検出した時刻付近の波形を用いて震源推定を行う．連続波形から微動を検出する方法として，Frequency scanning method (FSM) (Sit et al. 2012, Katakami et al. 2017) を用いた．FSM は微動の特徴的な周波数帯である2-8 Hz が他の周波数帯に比べて卓越する時間帯を検出する．3 種類のバンドパスフィルタ（帯域T: 2–5 Hz, E: 10–15 Hz, S: 0.02–0.1 Hz）を適用し，$R=T^2/ES$を観測点ごとに求めた．R値の時系列から漸化式フィルタでSTA/LTAを求め，STA/LTAが2倍以上の場合に微動検出とした．
次に，エンベロープ波形からエンベロープ相関法 (Obara 2002) により相対走時を計算する．また，最大振幅分布から，震源位置を推定するAmplitude Source Location (Battaglia and Aki 2003) を併用して最尤法で震源を推定した．ここでは，相対走時と振幅は独立変数なので，単純にそれぞれの尤度を分散で規格化して積を取った．尤度関数には，正規分布の代わりに異常値にロバストなコーシー分布を採用した．また，震源誤差を見積もるため，最尤値探索には重点サンプリングを用いた．得られた震源分布から，クラスタリングを行った．クラスタリング条件は，一元化震源と比較して通常の地震を取り除き，1時間以内かつ震央距離20 km以内に震源が3個以上決定された場合に結果を出力した．
本手法を2020年12月～2021年1月の地震波形に適用した．暫定的な結果ではあるが，クラスタリング後で約3800個（クラスタリング前で約7000個）が決定された．震源分布は概ね海溝軸に沿って東西に分布しており，マイグレーションやRapid tremor reversalなどが観測された．振幅のみで決定した小木曽・溜渕（2021, 本大会）との結果と調和的である．
今後，リアルタイムモニタリングシステムを構築するとともに，長期間の解析を行い，微動検出や震源推定の安定性や精度などを確認する予定である．

謝辞
MOWLAS DONET (https://doi.org/10.17598/nied.0008) の地震波形を使用しました．サイト増幅特性にはYabe et al. (2021) を使用させていただきました．解析には東京大学地震研究所共同利用 (2021-F3-12) 大規模地震連続波形データ解析システムを利用しました．一元化震源を使用しました．

© The Seismological Society of Japan




© The Seismological Society of Japan

# Aftershocks and shear strain energy changes caused by inland earthquakes in Japan

*Sachiko TANAKA[1]

1. NIED

大地震が発生すると，震源域やその周辺では，引き続き，多数の余震が発生する．通常，余震の規模は本震と比べると一回り小さいが，追加的な被害を生じさせるような大きい余震が発生する場合もあり，余震活動の評価は被害の軽減の観点からも重要である．本研究では，余震活動の空間的な広がりの検討として，日本列島内陸域の地震について，本震による剪断歪みエネルギー変化と余震活動の対応関係を調査した．剪断歪みエネルギーは，応力テンソルの第2不変量や相当応力に関連する量で，その増加は，ランダムに分布する断層群の平均的な剪断応力の増加に対応する（Saito et al., 2018）．

用いた地震データは，気象庁一元化処理による震源リスト（2006年から2019年まで，深さ20 km以浅，M2.0以上）である．シングルリンク法（Frohlich and Davis, 1990）によるクラスタリング処理（時空間の変換係数1 km/day，時空間距離10 km以内）を行い，M6以上の地震を含むクラスタについて，最大規模の地震を本震，それ以降の地震を余震として定義した．本震による剪断歪みエネルギー変化は，Saito et al.（2018）の導出に従い，半無限均質弾性体を仮定し，Okada（1992）の方法を用いて計算した．本震の断層モデルは国土地理院による矩形断層モデルを採用した．背景の応力場は，防災科研高感度地震観測網Hi-netによるP波初動解（2004年から2020年まで，深さ20 km以浅）から応力テンソルインバージョン法（Michael, 1987）を用いて推定した．

以上の手法が適用可能な本震を8個選定し（M6.1～7.3），各余震について，本震による剪断歪みエネルギー変化を計算した結果，余震の総数に対して剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合が65%以上となる事例が4個あった．特に，2016年熊本地震（M7.3）では，剪断歪みエネルギーの増加域で約85%の余震が発生していた．一方，残りの4事例については，剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合は25～50%に止まり，剪断歪みエネルギーの増加との相関は認められなかった．

剪断歪みエネルギー変化と余震活動の対応関係について，相関の有無の観点から各事例を比較すると，本震規模や断層タイプによる違いは確認できなかった．一方，余震活動の空間的な広がりに注目すると，広がりの大きい事例でよい相関を示す傾向がみられた．実際，日本列島の内陸地震（M5.5～7.3）を対象に本震規模と余震域面積との間に得られた関係式（田中・他，2019）と比較すると，相関のある4事例はこの関係式より広い余震域，相関のない4事例は狭い余震域を伴っている．今回設定した単純な断層モデルでは，本震近傍の剪断歪みエネルギー変化を正確に評価できておらず，余震活動の広がりが小さい事例でその影響が特に大きく表れているのかもしれない．しかし，余震活動が広がりをみせるような事例では，このような単純なモデルでも剪断歪みエネルギー変化によって余震活動の広がりを十分評価できる可能性を示唆していると考えられる．

© The Seismological Society of Japan

# Three-dimensional tectonic stress field inferred from long-term data of seismicity with prior information

*Toshiko TERAKAWA[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2]

1. Nagoya Univ., 2. ISM

複雑な沈み込み帯に位置する日本列島の周辺域では，プレート運動が作り出すテクトニック応力場を反映した多様な地震活動が観測される．CMTデータインバージョン法（Terakawa & Matsu'ura, 2008）は，モーメントテンソルの定義に基づいてCMTデータと応力場を結び付け，ベイズの統計推論とABIC（Akaike, 1980）に基づくインバージョン手法（e.g., Yabuki & Matsu'ura, 1992）に従って3次元応力場のパターンを推定誤差と共に求める手法である．Terakawa & Matsu'ura (2010) は，CMTデータインバージョン法を防災科学技術研究所のF-netモーメントテンソル・カタログのデータに適用し，当時の最大限のデータセットから日本列島全域のテクトニック応力場のパターンを推定している．その後，2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震をはじめとした大地震が発生し，そのたびに地震前後の応力場の時間変化が議論されている．しかし，地震データの分布は空間的に強い不均質性を持ち，時々刻々変化する場合が多く，大地震前後の応力場の時間変化を議論することは難しい．

本研究では，長期間の地震データから安定的にテクトニック応力場を推定し，その時間変化を評価することを目指し，従来のCMTデータインバージョン法に「過去のデータの解析結果を直接的先験情報として取り入れる機能」を追加した（Terakawa & Matsu'ura, in prep.）．具体的には，Matsu'ura et al. (2007) の統合逆化公式に基づき，直接的先験情報とモデルパラメータの構造を規定する間接的先験情報を統一的に取り扱うことができるようにした．この定式化により，観測データ，直接的及び間接的先験情報の３種類の情報の最適な重みをABICに基づいて求め，応力場のパターンを推定する．既存のデータセットから得られた直接的先験情報に，新しい観測データを追加した解析を実施することで，一般には，応力場の推定精度が向上することが期待される．一方，新しいデータを追加したにも拘らず推定誤差が大きくなる場合は，応力場のパターンに時間変化があったことや局所的な断層強度の低下などにより特定の向きを持つ断層運動が活発化したことなどを示唆する．まず，模擬データを用いた解析により，これらのことが正しく再現できることを確認した．

次に，実データへの適用例として，24年分のF-netモーメントテンソル・カタログのデータ（1997年1月～2020年12月）から，2016年4月16日に発生した熊本地震の震源周辺域（水平：160 km×210 km, 深さ：0～20 km）の応力場を推定した．この期間のデータセットの中には，熊本地震の余震をはじめとした大量の余震データが含まれている．余震は本震による応力変化だけでなく間隙流体圧の変化も反映して発生するため，これらのデータから正しく応力場が推定されるとは限らない（Terakawa et al., 2013）．このため，Zaliapin & Ben-Zion (2013) の方法により，データを単独地震とグループ地震に分け，更にグループ地震を前震，本震，余震に分け，単独地震及び本震のみから構成されるデータセットを作成した．このデータセットを期間1（1997年1月～2016年3月）と期間2（2016年4月～2020年12月）の２つに分け，まず，期間別に従来法で応力場を推定した（解析1及び2）．次に，解析1の結果を直接的先験情報として取り入れ，期間2のデータを追加して応力場を推定した（解析3）．解析2と解析3を比較すると，情報が多い解析3の方が全体の推定誤差が小さくなった．また，解析1と解析3の応力場の結果を推定誤差と共に比較すると，両者の応力場のパターンに大きな違いは見られないが，震源断層の南西端の延長部の浅い領域（深さ 5 km）で，応力場のパターンの系統的な“時間変化”が見られた．この領域の地震時応力変化は0.1MPaオーダーと小さく，応力場のパターンの“時間変化”は地震時応力変化では説明できない．一方，この地域は熊本地震後に地震活動度が著しく上昇した領域であり，間隙流体圧の上昇が地震活動の活発化を促したことが示唆されている（Nakagomi et al. 2021）．二つの期間において，この領域で発生した地震のモーメントテンソルのCLVD成分の割合を計算したところ，熊本地震後の方がCLVD成分の割合が大きい傾向があることが分かった．この結果は，この領域に分布する既存断層に深部から高圧流体が流入することにより地震がトリガーされた可能性を

© The Seismological Society of Japan

示唆する（Matsu'ura & Terakawa, 2021）.

© The Seismological Society of Japan

# Spatio-temporal distribution of the very-low frequency earthquake at Kumano-nada —Activity between Dec. 2020 and Jan. 2021—

*Yojiro Yamamoto[1], Keisuke Ariyoshi[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Takane Hori[1]

1. JAMSTEC

南海トラフ沈み込み帯は、M8級の巨大地震が繰り返し発生する領域として知られ、現在も強く固着していると考えられている。通常の地震活動はその多くがプレート内地震である一方で、プレート境界では、さまざまな時定数を持つスロー地震活動が観測されている。スロー地震活動は強い固着域と安定滑り域の遷移域で発生すると考えられるため、それらの時空間分布を把握することは、プレート間固着状態をモニターする上で重要である。
2020年12月から2月にかけて、熊野灘のトラフ軸近傍においてスロースリップが発生した（例えば、Araki et al., 2021JpGU）。我々は、DONET広帯域地震計記録により、このスロースリップの活動期間中において、周期10～20秒の波が卓越する浅部超低周波地震（以下、VLFE）の発生を確認した。これらVLFE活動の時空間変化を調べるため、DONET波形記録の目視によるVLFE活動の検出と震源決定、発震機構解の推定を実施した。解析にはNakano et al. (2008)によるSWIFTを適用し、Nakano et al. (2018)と同様に、海域の1次元速度構造を仮定したグリーン関数を用いた。この解析により、合計736個のVLFEの震源位置と発震機構解を推定した。
推定したVLFEのうち、M3以上、かつ3観測点以上、上下動成分最低1つを含む5成分以上の波形データを利用でき、Variance reductionが0.3以下となったものは、290個である。これらを用いて、今回の活動の検討を行った。 まず、活動域の平均的なプレート境界形状である走向240度、傾斜角6度の逆断層を仮定した発震機構解と比較すると、2つの発震機構解の間の最小回転角を示すKagan角が30°以内となるものが大半であることから、VLFE活動の多くは低角逆断層型のプレート境界上の活動と解釈した。次に時空間分布を検討した。今回のVLFE活動には、2段階の空間発展がみられる。第一段階として、12月6日の夜にDONET1のBノード付近からVLFE活動が開始したが、この活動は3日間の活動を経て数日低調となった。この活動域は2015年10月におけるVLFE活動域とほぼ同じである（Nakano et al., 2018; Toh et al., 2020）。その後第二段階として、12月11日から、VLFEはBノードからみてトラフ軸平行方向南西側に位置するDノード付近、およびDノードの南東、トラフ軸近傍に位置するCノード付近まで活動域を拡大し、1月中旬まで活動は継続した。時空間分布からは、第一段階・第二段階ともにトラフ軸平行方向に活動域が広がっている様子が見られ、拡大速度は第二段階のほうが第一段階よりも速いようにみえる。また、第二段階の活動と領域が同じ2016年4月に観測されたVLFE活動（Nakano et al., 2018）においても、逆方向への拡大であるものの第二段階と同程度の拡大速度での空間発展がみられる。このことから、活動域の時空間拡大の速度は場所によって一定である可能性が考えらえる。また、12月28日にはRapid tremor reversal（RTR; Houston et al., 2011）が発生したように見える。
孔内観測による間隙水圧変化からは、スロースリップ現象は2021年2月中旬まで継続したようにみえる。一方で、2021年1月18日以降は、発震機構解の推定に十分なデータ数をもつVLFE活動は確認されていない。ただし、１～２観測点の波形記録においてVLFE活動が確認される例が、特にCノード付近で1月5日から2月2日まで確認される。このことから、スロースリップ活動の後半では、トラフ軸近傍において小規模なVLFEが発生していた可能性がある。

© The Seismological Society of Japan

# Controling factors of along-dip segmatation of mega-thrust earthquakes in subduciton zones

*Kiyoshi YOMOGIDA[1]

1. Earth Planetary Dynamics, Grad Sch Sci, Hokkaido University

沈み込み帯プレート境界のmegathrust地震に対して、海溝軸に沿っての断層面のセグメントの区分け（along-strike segmentation）は詳細な議論が長くなされてきた（e.g., Lay et al., 1982）。しかし、2011年東北沖地震では、全く異なった海溝軸に直角方向のセグメントの区分け（along-dip segmentation）が本質的な役割を担っていたことが多くの研究で明らかになった。超巨大地震の典型例と考えられてきた1960年チリ地震や2004年スマトラ地震では、この方向のセグメントは実質的に単一であり、だからこそalong-dip segmentationはそれまで考慮されてこなかった（along-dip single segmentatiom、以下single seg.と呼ぶ）。2011年東北沖地震では深い側のセグメントと浅い側のセグメントの破壊様式・発生前後での挙動のコントラスが明らかとなり（along-dip double segmentation, double seg.）、1964年アラスカ地震でも実はそのような特徴が内在していたことが判明した（Yomogida et al, 2011; Koyama et al., 2012）。

Double seg.の地震が発生する沈み込み帯は、海溝軸と陸側の海岸線にある程度の距離が必要で、海溝側の浅いセグメントは通常時の地震活動がほぼ皆無に対して、深いセグメントでは活発な活動と対照的である。さらに、double seg.の沈み込み帯では、海溝軸方向の隣接したセグメント間（along-strike）で発生様式や大地震時での滑り量が劇的に異なる点は、従来型のsingle seg.のmegathrust地震の概念とは異なっている（e.g., Feymueller et al., 2008）。例えば、東北沖地震の宮城沖では100mに迫る大滑り量のセグメントに対して、両側の三陸沖と福島沖では突然小さくなった。この海溝軸方向のセグメント毎の大きな変動は、沈み込むプレートの年代（温度構造）といった従来考えられてきた不均質性では説明がつかない。また、海山などの存在では、セグメント境界を規定する可能性のみで、セグメント境界をまたいでの差異の要因にはならない。

沈み込むプレートの探査が飛躍的に進み、例えば、東北沖で沈み込む前の太平洋プレート浅部に大きな構造の違いが最近発見された（e.g., Fujie et al., 2020)。東北沖地震での大滑り領域の沖合の太平洋プレートでの均質で厚いチャート層に対して、その北側ではpetit hot spotsによりチャート層が岩脈などで著しく乱されている。このプレート浅部の微細構造の違いが数百年以上にわたる歪み蓄積の有無を決して、通常の地震活動や東北沖地震での滑り量の違いをもたらしたとするFujie et al. (2020)の案は自然である。しかし、浅いセグメントのみならず、深いセグメントでも宮城沖と三陸沖では通常の地震活動で大きな差があり、それだけがプレート境界での地震発生・活動様式を支配する要因に限らない。

　沈み込むプレート浅部の構造のコントラストは、東北沖に限らず一般的に存在する。多くの沈み込み帯はsingle. seg.であり、セグメント間の劇的な相異は顕著でない。Double seg.は比較的古いプレートが沈み込み、プレート境界のカップリングが古典的な視点（2011年以前に日本海溝はそう思われていた）では弱い。古典的な視点でカップリングが強いsingle seg.の沈み込み帯（e.g., チリ、南海トラフ）では、沈み込むプレート浅部の不均質性の効果は限定的であろう。弱いプレート境界でのカップリングの沈み込み帯で、かつdouble seg.の浅いセグメントのみ、すなわち弱い背景応力場でかつ比較的低温のプレート境界面であるからこそ、沈み込むプレート浅部の微細構造が長期の歪み蓄積に本質的な役割をもたらすと考える。日本近海では千島海溝の南部がある。南海トラフのようなsingle seg.の沈み込み帯では、このような不均質性は大まかなセグメント区分けを規定するだけで、セグメント間の大きな違いはもたらさないと考える。

© The Seismological Society of Japan

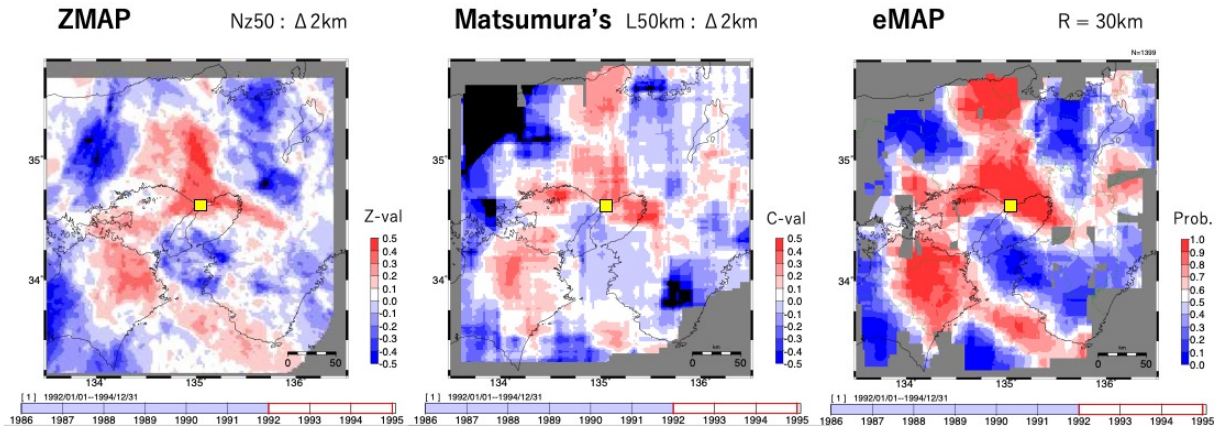
# Visualization of seismic activity anomalies - comparison of multiple methods

*Sumio YOSHIKAWA[1]

1. No affiliation (JMA, retired)

地震活動の変化を客観的に検出する方法として，震源分布そのものではなく地震活動の静穏化・活発化現象の視覚化を目的としたZMAP［Wiemer and Wyss (1994)］が開発されている．また同様の目的で，松村の方法［松村 (2002)］および eMAP［吉川・他 （2017］が開発されている．これらの方法の地震活動の変化に対する特性が明らかでなかったことから，吉川・他（2021）は３つの方法において地震活動に同じ変化を与えた場合の解析結果を比較した．それによると松村の方法とZMAPは地震活動の変化に対してほぼ同様に変化に応じた定量的性質を示す一方，eMAPは定性的ではあるが地震活動の変化をより高感度に捕捉できる結果を示した．この発表では，1995年1月17日の兵庫県南部地震（Ｍ７.３）発生前の地震活動の事例を用いて３つの方法による解析結果を比較した結果を示し，視覚化表示の有効性を再確認する．　それぞれの解析方法には基本的な違いがある．地震活動の基準期間と評価期間を設定することは同様であるが，ZMAPは両期間の地震計数率の相対差（Z値），松村の方法は両期間の地震計数率の相対比をそれぞれ用いるのに対して，eMAPは両期間の地震計数率に基づくポアソン確率を用いる．また地震活動を把握する領域に関しては，ZMAPと松村の方法では等間隔の円形および矩形要素をそれぞれ用いるのに対し，eMAPでは個々の震源位置を中心とする円形要素を用いる．　今回の調査は，気象庁震源カタログで近畿地方とその周辺における地殻内のＭ２.２以上の震源を対象とした．図は，1986年1月から1991年12月までの期間を基準に，1992年1月から1994年12月までの期間の活動変化を示す．いずれの解析結果も淡路島付近を中心とする静穏化域とそれを囲む活発化域を示しており，いわゆるドーナツパターンを示す．３者を比較するとZMAPは地域的な詳細変化を最も明確に表すことが分かる．またeMAPは静穏化・活発化域のコントラストを最も明確に示すのが明らかである．　以上の事例から，地震活動の視覚化は異常変化の客観的把握に効果的な方法であり，複数の解析手段を同時に適用することは評価の信頼性を確認するのに役立つということができる．

© The Seismological Society of Japan




Seismic rate changes visualized by ZMAP, Matsumura's method and eMAP. The analysis values of Z-val. and C-val. are normalized to be within the range of -0.5 to +0.5. Prob. is the Poisson probability. The square in each figure is the epicenter of the main shock.

© The Seismological Society of Japan

# Scaling relations of moment magnitude and rupture area for intraslab earthquakes

*Xuelei Zhang[1], Makoto Nemoto[1], Nobuyuki Morikawa[2], Yuji Dohi[2], Kenji Hirata[2], Hiroyuki Fujiwara[2]

1. OYO corporation, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Intraslab earthquakes that occur in the subducting slab have different source characteristics compare to those earthquakes that occur in the subduction interface. The systematic difference of fault rupture area between intraslab and interface events has been revealed by previous studies of scaling relations for fault rupture area and moment magnitude (Strasser et al.,2010). Such kind of difference has been supported by a later study by Allen and Hayes 2017 which only uses finite fault models in regression analysis. In the study of Strasser et al.,2010 and Allen and Hayes 2017, all data for intraslab earthquakes have complied in a single data set even though source characteristics might also be different between shallow and intermate depth intraslab earthquakes (Satatani et al., 2006). Recent years, more and more finite fault models for intraslab earthquake have been published online which make the discussion of the difference in centroid depth possible. In this study, we compile a data set of fault parameters from 56 finite fault models corresponding to 47 intraslab earthquakes. The fault dimension of each model has been estimated using effective length and width (Mai and Beroza 2000) based on the definition of the autocorrelation width (Bracewell 1986). As in previous studies, averaged effective length, width, and moment magnitude were taken for earthquakes with multiple models. Based on the circular crack model (Kanamori and Anderson 1975), we also calculated the averaged stress drop for each pair of fault rupture area and earthquake magnitude. The results of stress drop show 8 earthquakes have very low stress drop (less than 2MPa). By reviewing the slip distribution of those earthquakes, we noticed the slip of those earthquakes are widely distributed and most of them have multiple slipped areas. Since the distribution of slip of these earthquakes is different from the others, they should be considered in different scaling relations. By visualizing the distribution of centroid depth and Stress drop, we found that there is a gap at a depth around the depth of 80km. In the depth shallower than 80km, the stress drop increase with depth, and in the depth deeper than 80km, although the deviation is larger, generally the stress is independent with depth (Fig 1a). Based on the analysis shown above, scaling relations divided by a centroid depth of 80km is obtained (Fig 1b). The average stress drop for the deeper earthquakes is roughly double the number for shallower earthquakes. The difference of the stress drop of earthquakes at different depths is a result of a complicated combination of the physical properties of materials such as the coefficient of friction of the fault surface, elasticity, viscosity of surrounding rocks, and the forces applied by the bending of unbending of the slab, dehydration, and buoyancy. Although the detail of these factors is still unclear to us and further discussion is beyond the scope of this study, the result of the study shows that the depth dependence of stress drop needs to be considered in the scaling relation for intraslab earthquakes.

**Reference** Allen, T. I., & Hayes, G. P. (2017). Alternative rupture-scaling relationships for subduction interface and other offshore environments. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 107(3), 1240-1253. Bracewell RN (1986) The Fourier transform and its applications, vol 31999. McGraw-Hill New York Kanamori H, Anderson DL (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America* 65(5):1073-1095 Mai, P. M., & Beroza, G. C. (2000). Source scaling properties from finite-fault-rupture models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(3), 604-615. Sasatani, T., Morikawa, N., & Maeda, T. (2006). Source characteristics of

© The Seismological Society of Japan

intraslab earthquakes. Geophys. *Bull. Hokkaido Univ*, 69, 123-134. Strasser, F. O., Arango, M. C., & Bommer, J. J. (2010). Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude. *Seismological Research Letters*, 81(6), 941-950.

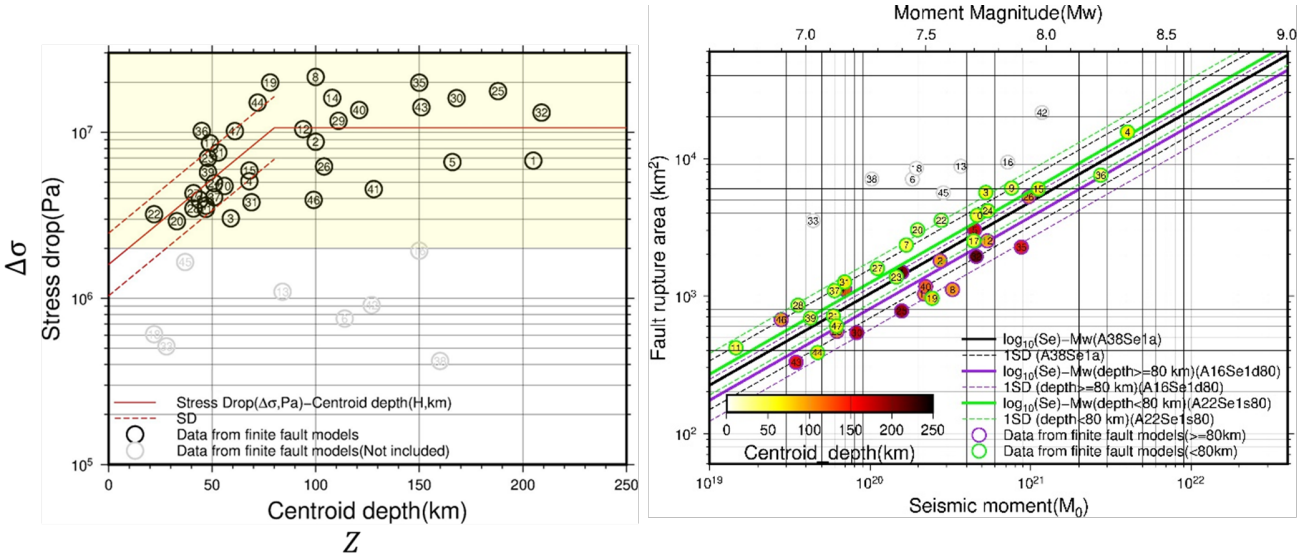



Fig1. (a)Black circles show the relationship between stress drop and Centroid depth. The red solid line and broken line at a depth shallower than 80km are the regression line and standard error derived from data, respectively. A Red solid line at a depth deeper than 80km indicates the averaged stress drop. (b)Solid lines show the scaling relation for moment magnitude and fault rupture area for intraslab earthquake The fill color of circles shows the centroid depth for earthquakes. Gray circles show the magnitude and fault rupture area of those earthquakes whose stress drop are smaller than 2MPa. These earthquakes are not used in the regressions. Green and purple circles are the earthquakes whose centroid depth is shallower and deeper than 80km, respectively. Green and purple lines are the regression lines for the data with the same color. The black line is the regression line for all data except for the gray circle.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S13. Crustal fluids and earthquake

# P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P4 (ROOM P)

## [S13P-01] Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan

○Tsuyoshi WATANABE[1], Shinya Hiratsuka[1], Koji Shimada[1] （1.Japan Atomic Energy Agency）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S13P-02] Crustal anisotropy structure around Mt Ontake derived from shear-wave splitting analysis

○Osamu MURAKAMI[1], Tsuyoshi Watanabe[1] （1.Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan

*Tsuyoshi WATANABE[1], Shinya Hiratsuka[1], Koji Shimada[1]

1. Japan Atomic Energy Agency

地殻内に存在する流体、とりわけ深部からの流体の流入は、地震発生を議論する上で重要なファクターであるとともに、地層処分事業においても、地層処分システムにおける閉じ込め機能の喪失という観点から懸念事項とされている。このような問題に対し、地震学などの地球物理学的観測から地下のイメージングを行い、流体の存在や移動経路を明らかにすることは有効であると考えられる。そこで、原子力機構では、S波が流体やクラックなどの異方性媒質中を通過する際、二つに分離するという特徴に着目し、S波スプリッティング解析を用いた地殻内流体の移動経路推定手法の開発に取り組んでいる。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、2011年東北地震）の発生後に地殻内の地震活動が活発になった福島県浜通りから茨城県北部にかけての地域を対象に実施したS波スプリッティング解析について報告を行う。

上記の領域では、2011年東北地震の発生後、2011年3月19日にM6.1、3月23日にM6.0、M5.8、M5.5、M5.8のいずれも西北西－東南東から東－西方向に伸張軸をもつ正断層型の地震が相次いで発生した（気象庁・気象研究所, 2011）。さらに、4月11日には、福島県浜通りで東北東－西南西方向に張力軸を持つ正断層型のM7.0の地震（福島県浜通りの地震）が発生し、活断層とされる井戸沢断層と湯ノ岳断層の一部で同時に破壊が生じ震源断層が現れている（堤・遠田, 2012）。また、この地震直後から、いわき市内の数か所で温泉の異常な湧き出しが報告され、その湧水は湧出量の変化を生じつつも、2018年以降も継続した（Sato et al., 2020）。

このような背景に基づき、本研究では、2011年東北地震及び福島県浜通りの地震発生前後の二つの期間に分けてS波スプリッティング解析を進めた。使用したデータは、これらの地震前（期間Ⅰ）については、2004年4月28日から2011年1月6日までに30 km以浅で発生したMj 1.5～3.2の675イベント、地震後（期間Ⅱ）については、2011年6月1日から2011年12月30日までに30 km以浅で発生したMj 1.5～1.9の4159イベントの地震波形である。また、利用した観測点は、福島・茨城・栃木県に位置する防災科学技術研究所の高感度地震観測網、気象庁、東北大学が運用する18観測点である。解析には、Silver and Chan（1991）による手法を用い、速いS波の振動方向（φ）と遅いS波が到達するまでの時間差（dt）の推定を行った。さらに、SP変換波によるS波到達時の位相擾乱を避けるため、鉛直下向きより各観測点への波線の入射角が35°以内となる震源と観測点の組み合わせを対象とした。そして、速いS波と遅いS波の波形の相関係数が0.9以上となる地震を採用し、φやdtの空間分布について調べた。

期間Ⅰでは、φ分布のヒストグラムを作成するにあたり、十分な地震数であるとは言い難いものの、沿岸部で最大水平圧縮応力や太平洋プレートの収束方向（Yoshida et al., 2015）である西北西－東南東方向ではなく、海溝に対し平行な方向への分布が卓越し、内陸部でも同様の特徴が示された。期間Ⅱについても、沿岸部で、おおむね海溝に対して平行な方向へのφ分布が卓越し、内陸部でも、最大水平圧縮応力や太平洋プレートの収束方向とは異なり、南北方向から北東－南西方向へのφ分布が示された。これらの結果は、先行研究（Iidaka and Obara, 2013; Iidaka et al., 2014）で示されたものと調和的であった。また、期間ⅠとⅡを通してφ分布の比較を行うと、数十度程度の違いが見られる観測点はいくつかあるものの、大きな変化はなかった。

続いて、地震数が十分に確保された期間Ⅱについて、dtを震源距離で規格化した値（距離規格化dt）の平均値に関する空間分布について調べた。この結果、ほとんどの観測点で距離規格化dtの平均値が0.005 sec/km以下となったが、観測点IWAKMZやHITACHで相対的に高い値が示されることが明らかとなった。とくに、観測点

© The Seismological Society of Japan

IWAKMZは、Sato et al.（2020）で示された湧水の継続している温泉付近に存在することから、地殻内に存在する深部流体の影響を反映し、他の観測点に比べて大きな距離規格化dtの平均値が得られたことが示唆される。なお、同観測点は、いわき市三和町の水石山（みずいしやま）公園内に設置されており、水石山の起源が、山頂に水が溜まっている石があり、日照りでも枯れることがないという言い伝えに由来している。このことからも、同領域付近は定常的に流体の豊富な地域であることが示唆され、今回の解析で得られた結果を支持する。

一方で、Umeda et al.（2015）は、2013年11月から12月に解析対象領域の南部で電磁探査を行っている。その結果では、太平洋沿岸の海岸線から陸域に向けて長さ約30 km程度、深さ20～30 kmの領域に低比抵抗領域が存在し、その直上に福島県浜通りの地震に関連した地震活動が集中している。この電磁探査の測線は、観測点N.JUOHとN.KIBHの間に位置することから、地殻内に流体が存在すると仮定した場合、距離規格化dtの平均値が相対的に高い値をとることが期待されたが、同観測点で相対的に大きな値は示されなかった。いくつかの理由として、電磁探査の測線を横切るような地震が今回の解析に含まれなかったこと、電磁探査で見えた低比抵抗領域が不連続な分布で島弧と平行な方向へ広がっていないことなどが考えられる。これについては、解析期間を延長するなどしてデータの拡充を行い、電磁探査の結果との対応関係についても議論を進めたい。

本発表は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の成果の一部である。

© The Seismological Society of Japan

# Crustal anisotropy structure around Mt Ontake derived from shear-wave splitting analysis

*Osamu MURAKAMI[1], Tsuyoshi Watanabe[1]

1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency

御嶽山周辺では，1979年の噴火以降，2007年，2014年にも小規模な水蒸気噴火が発生し，さらに1984年長野県西部地震や2017年長野県南部の地震（Mj5.6）をはじめとした御嶽山南東麓での活発な地震活動が見られる．このような様々なイベントが発生する領域では，かなり不均質な地殻構造が予想され，御嶽山近傍には地殻流体の存在も予想される．断層のような不均質構造や地殻流体の検出に有用なツールの1つとして，S波スプリッティング解析法が挙げられる．そこで本研究では，このような御嶽山周辺域における常設地震観測点で記録された連続地震波形データを用いたS波スプリッティング解析を行うことにより，領域内の地殻異方性構造の推定を試みた．
解析にあたっては，気象庁一元化震源カタログから，解析対象領域内で2004年4月1日から2019年12月31日までに発生したMj1.5以上の地震3223個（深さ20km以下）を選んだ．これらの地震について，御嶽山周辺域に展開されている常設地震観測点（Hi-net，気象庁，大学）で観測された連続波形データを用いた．はじめに，Nakajima and Hasegawa (2007)による地震波速度構造を用いて，各観測点における1次元速度構造を仮定した．この仮定した速度構造と気象庁一元化震源から，それぞれのイベントによる各観測点に到来する地震波の入射角を推定し，入射角35度未満の震源-観測点ペアのみに解析対象を限定した．これは，入射角が高角度な場合に生じうる，地表でのS-P変換波の影響（e.g., Booth and Crampin, 1985）を排除するためである．入射角35度未満の観測点-震源ペアについて，Silver and Chan (1991)の手法を適用して，速いS波の偏向方向および，速いS波と遅いS波とのarrival timeの差を推定した．
上述の解析の結果，多くの観測点でこの領域の最大水平圧縮応力の方向（WNW-ESE）と概ね平行な速いS波の偏向方向が得られたが，一部の観測点ではそれと直交するような速いS波の偏向方向が推定された．前者については応力起源の地震波異方性を，後者については構造起源の地震波異方性を反映しているものと考えられる．しかしながら，近接した観測点で互いに90度異なるような速いS波の偏向方向が推定されるケースも見られた．Crampin et al. (2004)は，90度異なる速いS波の偏向方向を異方性のある多孔質弾性体でモデル化し，観測点下におけるマイクロクラック分布の形状の，間隙流体圧の変化によるクラックの開口や閉口による再配列の結果，90度異なる速いS波の偏向方向が生じることを提唱している．発表では，本研究において近接する観測点で推定された90度異なる速いS波の偏向方向が，間隙流体圧の変化で説明可能かどうかを検討する．

謝辞: 本研究では，防災科学技術研究所 Hi-net，気象庁 地震・津波検知網，気象庁 火山観測網，東京大学地震観測網，名古屋大学地震観測網のデータを使用させていただきました．また，本研究は，経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和2~3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発)」の成果の一部である．

参考文献:
・Booth, D. C. and S. Crampin, Shear-wave polarizations on a curved wave- front at anisotropic free surface, Geophys. J. R. Astron. Soc., 83, 31–45, 1985.
・Crampin, S., Peacock, S., Gao, Y. and Chastin, S., The scatter of time-delays in shear-wave splitting above small earthquakes. Geophys. J. Int., 156, 39–44, 2004.
・Nakajima, J., and A. Hasegawa, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, J. Geophys. Res., 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770, 2007.
・Silver, P. G. and W. W. Chan, Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *J. Geophys.*

© The Seismological Society of Japan

*Res.*, 96, 16429–16454, 1991.

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S15. Strong ground motion and earthquake disaster

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P5 (ROOM P)

[S15P-01] Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of earthquakes around Fukushima Prefecture based on Block Inversion analysis using S-net data

○Yusuke TOMOZAWA[1], Tomoki Hikita[1], Tomonori Ikeura[1], Kentaro Kasamatsu[1] (1.Kajima Technical Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-02] **Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites**

○Yadab Prasad DHAKAL[1], Atsushi Wakai[1], Hiroaki Yamanaka[2], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-03] Modeling of a three-dimensional shallow S-wave velocity structure based on numerous microtremor arrays: A case study in and around Nishio City, Aichi Prefecture

○Ikuo CHO[1] (1.Geological Survey of Japan, AIST)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-04] Strong motion very close to the surface rupture during the 2016 Kumamoto earthquake

○Asako IWAKI[1], Hiroyuki Fujiwara[1] (1.NIED)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-05] Source Process of the Off Fukushima Earthquake of February 2021 - Analysis considering 3D subsurface structure -

○Kazuhito HIKIMA[1] (1.Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-06] Applicability of the strong ground motion prediction method to the 2021 Fukushima-oki earthquake (Mj7.3)

○Kiyoshi IRIE[1], Shohei YOSHIDA[1], Yasuo OKADA[1], Ken MIYAKOSHI[2], Kazuhiro SOMEI[2], Haruhiko TORITA[1] (1.Ohsaki Research Institute, Inc., 2.Geo-Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-07] Re-examination of scaling relationships of source parameters of the interplate earthquakes in Japan

○Ken MIYAKOSHI[1], Yujia GUO[1], Kunikazu YOSHIDA[1], Kiyoshi IRIE[2] (1.Geo-Research Institute, 2.Ohsaki Research Institute, Inc.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-08] Concept of Earthquake Disaster Prevention Infrastructure Simulator for the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

○Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Takahiro MAEDA[1], Yuji DOHI[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Harumi ISHIMARU[3] (1.NIED, 2.OYO RMS Corporation, 3.Mitsubishi Space

©Seismological Society of Japan

Software Co.,Ltd.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-09] Long-duration and broadband ground motion simulation for the great earthquakes along the Nankai Trough

○Takahiro MAEDA[1], Asako IWAKI[1], Shin AOI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Kosuke SEKI[2], Ryuta IMAI[3] (1.NIED, 2.Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3.Mizuho Research &Technologies, Ltd.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-10] Tsunami Inundation Simulation Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough
- For Effective Use of Tsunami Hazard Information -

○Yuji DOHI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Katsuya YAMORI[2], Takashi SUGIYAMA[2] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-11] A trial of conditional hazard assessment based on Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

Hiromitsu NAKAMURA[1], ○Yoshinori Tokizane[2], Hiroyuki FUJIWARA[1], Satoshi SHIMIZU[2], Miki ASO[2] (1.NIED, 2.OYO RMS Corp.)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-12] Number of earthquakes from seismic activity model of the probabilistic seismic hazard map for Japan starting from 2020

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

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-13] Nonergodic Ground Motion Prediction Model Using Artificial Neural Networks

○Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Asako IWAKI[2], Hiroyuki FUJIWARA[2], Naonori UEDA[1] (1.RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

3:30 PM - 5:00 PM

[S15P-14] Analysis and numerical modeling of local earthquake records obtained by the AN-net

○Hisashi NAKAHARA[1], Shutaro Sekine[2] (1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of earthquakes around Fukushima Prefecture based on Block Inversion analysis using S-net data

*Yusuke TOMOZAWA[1], Tomoki Hikita[1], Tomonori Ikeura[1], Kentaro Kasamatsu[1]

1. Kajima Technical Research Institute

**1．はじめに**

福島県沖で発生する海溝型地震の距離減衰特性は，例えば筧 (2015) や池浦 (2020) で議論されているように，プレート内部の地震波伝播の影響や低減衰領域の通過の影響等で特徴づけられている．2016年のS-netの観測開始以降，観測記録が蓄積されつつあり，海域での距離減衰特性や，震源特性のより高精度な推定に資するものと考えられる．本検討では，S-net，K-NET，KiK-net記録を用いたブロックインバージョン解析により福島県周辺で発生する地震の距離減衰特性を推定した．

**2．データセット**

福島県沖で発生した地震は，S-netとK-NET，KiK-netで同時に観測された地震を対象とした．対象期間はS-netの観測開始から2021年3月31日まで，$M_J$ 5.0以上，震源深さ100 km以下の地震を収集した．S-netの観測開始前ではあるが，福島県周辺の陸域で発生した内陸地殻内地震も収集した．内陸地殻内地震は，震源距離100 km，プレート間地震とプレート内地震は，震源距離200 kmまでの記録を収集した．地盤の非線形化の影響を避けるため，K-NETとS-netは100 cm/s$^2$以下の記録を用い，KiK-netは地中記録を用いた．S-netの観測記録は，Takagi et al. (2019) の姿勢角情報を基に回転補正を行った．地震による揺れの途中で加速度波形にオフセット変化を生じさせるような強震動を受けた観測点では，姿勢角に変化が生じたと判断して，それ以後に発生した地震の記録は用いないこととした．対象地震と観測点の分布を図1に示す．

**3．解析手法**

友澤ほか (2020) を参照して深さ方向と水平方向のQ値の不均質性を考慮したブロックインバージョン解析を行った．伝播経路特性は，深さ方向を大陸地殻，マントル，太平洋プレートの3層でモデル化し，各層の水平方向の不均質性を考慮してモデル化した．震源と観測点を結ぶ断面で2次元レイトレースを行って，各層の伝播距離を評価した．地震本部 (2012) を参照して各層の境界は第17層のマントル，第21層の海洋性地殻第2層（太平洋プレート）の上面深度を用いた．S波速度はそれぞれ3.4 km/s，4.5 km/s，4.6 km/sとした．レイトレースの例を図2に示す．本手法はブロックの統合と分割を行い，領域分割の再設定をしながらブロックインバージョンを繰り返し実行し，最適な領域分割を推定する．本検討では，最小ブロックサイズを0.4˚×0.4˚，各ブロックが満たすべき有意水準を5%とした．なお，本検討では伝播経路特性のみに着目し，震源特性とサイト特性については議論しない．

**4．解析結果**

推定した不均質減衰構造を図3に示す．大陸地殻の不均質減衰構造は，海域も含めて概ね均質なQ値が広がっており，活火山周辺が相対的にlow-Qの領域が推定された．マントルの不均質減衰構造は，対象領域の西側でlow-Qが推定された．ただし，本検討で用いた観測記録は，活火山直下よりも海溝軸側のマントル部分を伝播する波線が支配的である．太平洋プレートは水平方向の不均質性を推定する自由度を与えて解析したが，最終的には一様な領域分割が推定された．推定した不均質減衰構造を用いて，福島県沖で発生する深さ30 kmのプレート間地震と，深さ50 kmのプレート内地震を想定し，地震基盤面上での地震動振幅の面的評価を行った結果を図4に示す．図4に矩形で示した領域の距離減衰特性を図5に示す．なお，震源特性は基準化しているため，距離減衰特性の傾きのみに着目すると，傾きはプレート内地震＞プレート間地震であり，観測記録の特徴と整合する．

**謝辞**

防災科学技術研究所K-NET，KiK-net，S-netの観測記録を活用させていただきました．記して感謝します．

**参考文献**

© The Seismological Society of Japan

筧楽麿 (2015), 神戸大学都市安全研究センター研究報告. 池浦 (2020) , 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第7号. Takagi et al. (2019), Seismological Research Letters, Vol. 90, No. 6. 友澤裕介, 加藤研一, 塩田哲生 (2020), 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第7号. 地震調査研究推進本部 (2012), 長周期地震動予測地図2012年試作版.

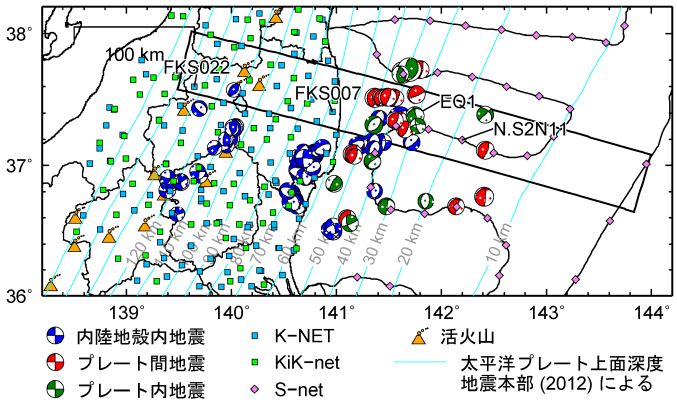



図 1　解析に用いたデータセット

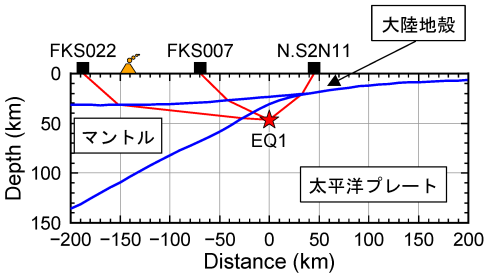



図 2　2 次元レイトレースの例

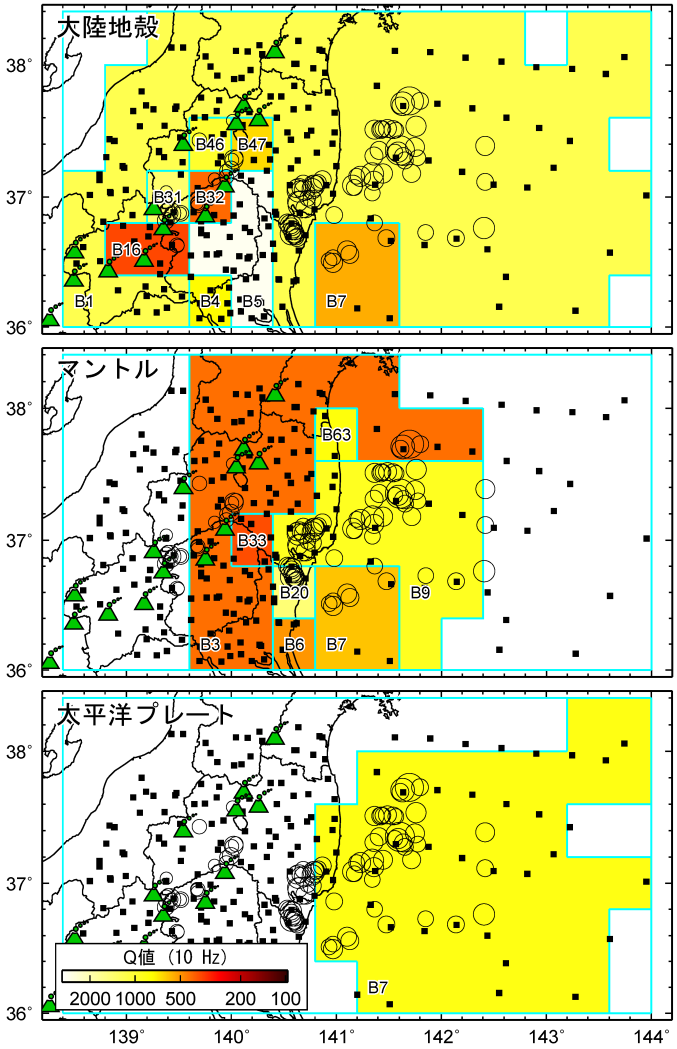



図 3　推定した不均質減衰構造（カラーは 10 Hz の Q 値）

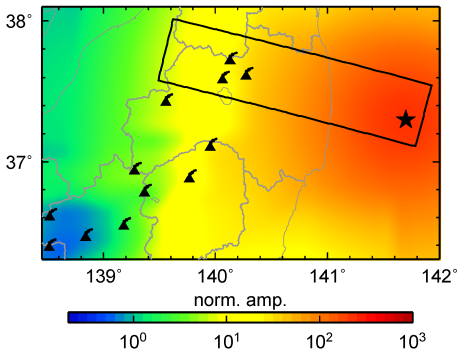



図 4　基盤面上の 10 Hz の距離減衰特性の面的分布（プレート内地震）

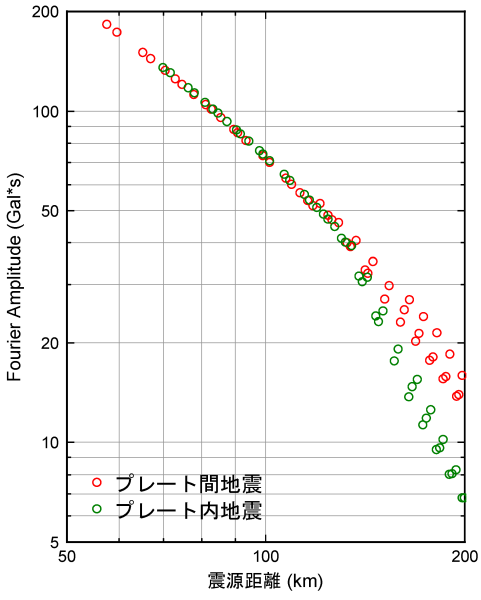



図 5　距離減衰特性の比較（10 Hz）

© The Seismological Society of Japan

# Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites

*Yadab Prasad DHAKAL[1], Atsushi Wakai[1], Hiroaki Yamanaka[2], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1]

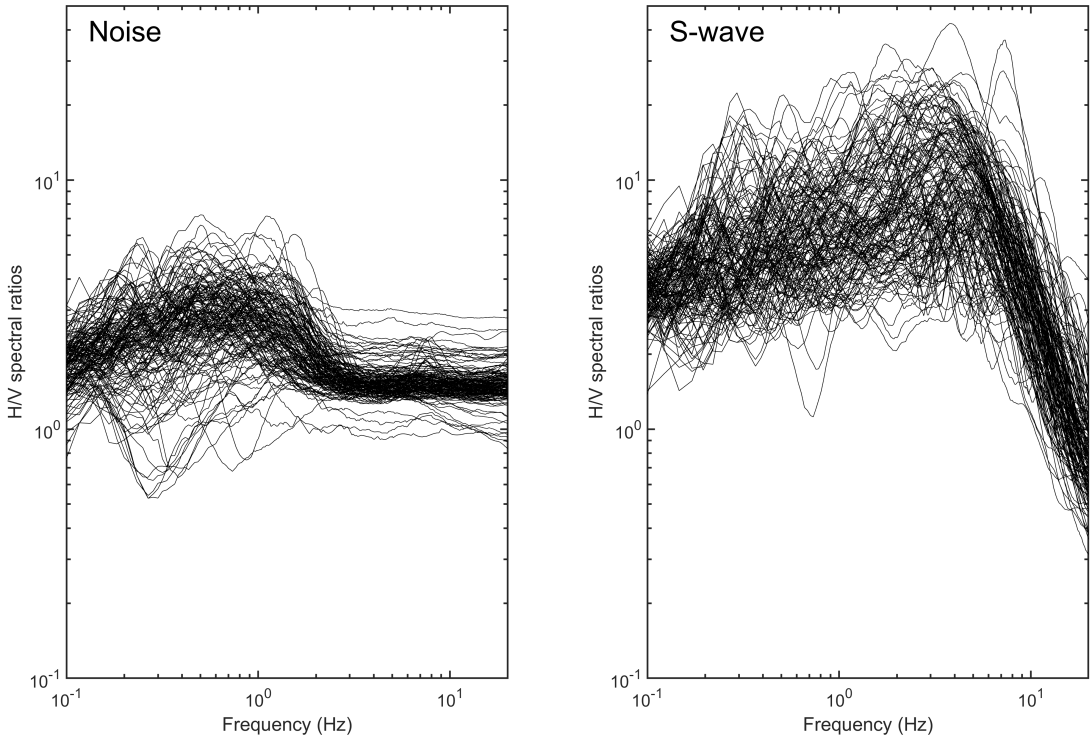
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokyo Institute of Technology

Studies about the horizontal-to-vertical spectral ratios (HVSRs) of ambient noises and earthquake motions are popular in Japan and many other earthquake-prone countries to estimate the dynamic properties of soils for earthquake disaster mitigation. In this study, we analyzed the HVSRs of ambient noises, referred to as noises, and earthquake motions at the S-net seafloor sites to understand the site effect on the recorded motions for the reliable prediction of ground motions for earthquake early warning. We processed the strong-motion records at the 150 stations of S-net from over 1000 earthquakes of Mj >= 4 and JMA focal depth < 70 km recorded between 2016 and 2019. We focused on the relatively low amplitude records (maximum value of peak accelerations of three components < 50 gals) to minimize the effects of rotations of sensor vessels and nonlinear site responses that may occur during large amplitude earthquake motions. The horizontal and vertical components of motions were obtained by finding the roll and pitch angles from the pre-event parts of the records and matrix operations described in Takagi et al. (2019). The S-wave onset times were estimated from the JMA2001 travel-time table (Ueno et al. 2002) to expedite the data processing, and a time window of 40.96 s was selected beginning 5 s before the S-onset time. We obtained the Fourier spectral amplitudes for each component, smoothed them using the smoothing function of Konno and Ohmachi (1998), and obtained the HVSRs as the square root of the sum of squares of the two horizontal components of motions divided by the vertical component of motions. The HVSRs for the noises were also similarly computed from the parts of the records before the earthquake origin time. We show the median values of the HVSRs for the noises and S waves (more accurately, extended S-wave portion) at all sites of the S-net in the attached figure. The plots of HVSRs of the noises gave gentle hump-shaped curves at frequencies between about 0.1 and 2 Hz at many sites, while they were flat at higher frequencies. In contrast, the plots of the S-wave HVSRs gave higher and wider hump-shaped curves including between 1 and 10 Hz. Some of the curves showed prominent peaks with steep slopes between 1 and 10 Hz. The maximum values of the HVSRs for the noises ranged between about 1.5 and 7, with the median value about 3.5. In contrast, the maximum values of the HVSRs for the S-waves ranged between about 5 and 40, with the median value about 10. The peak frequencies of the HVSRs for the noises mainly ranged between 0.1 and 2 Hz, with the median frequency of about 0.6 Hz, while they were mostly between 0.2 and 10 Hz for the S-waves, with the median frequency of about 3 Hz. The HVSRs of the noises at few sites displayed sinuous pattern with frequencies lower than about 1-2 Hz, especially in the shallow water regions (depths < 600 m). The S-wave HVSRs showed a steep decrease of the values after about 7-8 Hz. Some sites gave peak values of the S-wave HVSRs near the resonance frequency of the P waves in the water layer, while such peaks did not exist for the noise HVSRs. It has been argued that the HVSRs at the ground stations primarily reflect the effect of sediments. On the other hand, the values at the seafloor sites may reflect the combined effect of the sediments and water layer because the vertical components of motions are affected by the water layer. Further analysis is necessary to explain these observed features of the HVSRs to extract useful information for site characterization.

**Acknowledgments**: This study was supported by "Advanced Earthquake and Tsunami Forecasting Technologies Project" of NIED and JSPS KAKENHI Grant Number JP20K05055.

© The Seismological Society of Japan

Median values of H/V spectral ratios at the S-net sites




© The Seismological Society of Japan

# Modeling of a three-dimensional shallow S-wave velocity structure based on numerous microtremor arrays: A case study in and around Nishio City, Aichi Prefecture

*Ikuo CHO[1]

1. Geological Survey of Japan, AIST

産業技術総合研究所では，沿岸域の産業立地評価や地震防災施策等に資する調査手法指針の構築を目指し，海洋–沿岸–陸域におけるシームレスな地質情報の整備を実施している．本発表は，その一環として行われた伊勢湾・三河湾沿岸域の地質・活断層調査（2017–2019年度）のうち，愛知県西尾市周辺における微動アレイ探査結果についての報告である．

愛知県西尾市北部周辺の調査対象領域（3.7 km×4.4 km）で120地点の微動アレイ探査を実施した．各地点で半径0.6 mの三角形アレイ及び地震計間隔8–20 mの三角形／直線アレイを用いて15分間程度の観測を行なった．上下動微動波形からレーリー波位相速度（概ね2 –28 Hz；最大1.9 Hzから47 Hz）を同定し，深さ30 mまでの平均S波速度（AVS30）と 1次元S波速度（Vs）構造を推定した．長さ1.1–4.5 kmの12測線に沿うVs鉛直断面をそれぞれ作成し，調査対象領域浅部（平均最大深度28 m）の3次元Vs構造の概観を得た（図１）．調査対象領域南部の完新世低地ではVs 200 m/s以下の沖積層が深さ10–20 mまで堆積する一方，北部の更新世中位段丘でこの軟弱層は非常に薄いことが分かった（測線NS1）．また，領家変成岩の山地ではVs 数百m/s以上の基盤が地表付近に現れ，周囲に向かって徐々に深度を増す様子が捉えられた（測線EW1）．今後は他の種類の調査・探査結果を統合して地質地盤モデルとしての完成度を高める必要がある．

なお，現在実務で用いられているいわゆる微動アレイ探査は，2000年代の初めに実用化されたものであり，標準的な観測方式とデータ処理手順が確立されている（物理探査学会標準化検討委員会, 2008; 佐藤・岡田，2016）．本発表のケースもスペクトル解析は確立された手順に従うが，ごく小さな微動アレイを多くの地点で展開する稠密微動アレイ観測を基礎として浅部地盤の2次元ないし3次元速度構造をモデル化するような方式は，近年始まったばかりの試みである（長・先名, 2016；中澤ほか，2020）．したがって，その手順は必ずしも一般的ではなく，試行錯誤的な部分も多く含まれる．本発表では，このような新しいタイプの微動アレイ探査のケーススタディとして，標準化されていない観測方式やデータ処理手順について紹介する予定である．

微動観測点の選定及び解析結果の確認のために産総研 阿部朋哉氏との議論が参考となった．

物理探査学会標準化検討委員会 (2008) *物理探査適用の手引き，土木物理探査マニュアル*，111–126.
長　郁夫, 先名重樹 (2016) 極小微動アレイによる浅部構造探査システム：大量データの蓄積と利活用に向けて, *Synthesiolgy*, **9**, 86-96.
中澤努・長　郁夫・坂田健太郎（2020） ローム台地のS波速度構造と地盤震動特性，*地質学雑誌*，**126**, 311-326, doi:10.5575/geosoc.2020.0012.
佐藤浩章・岡田　廣 (2016) 微動利用の地下構造推定法，物理探査学会編，*物理探査ハンドブック増補改訂版*，第4章，229––248.

© The Seismological Society of Japan

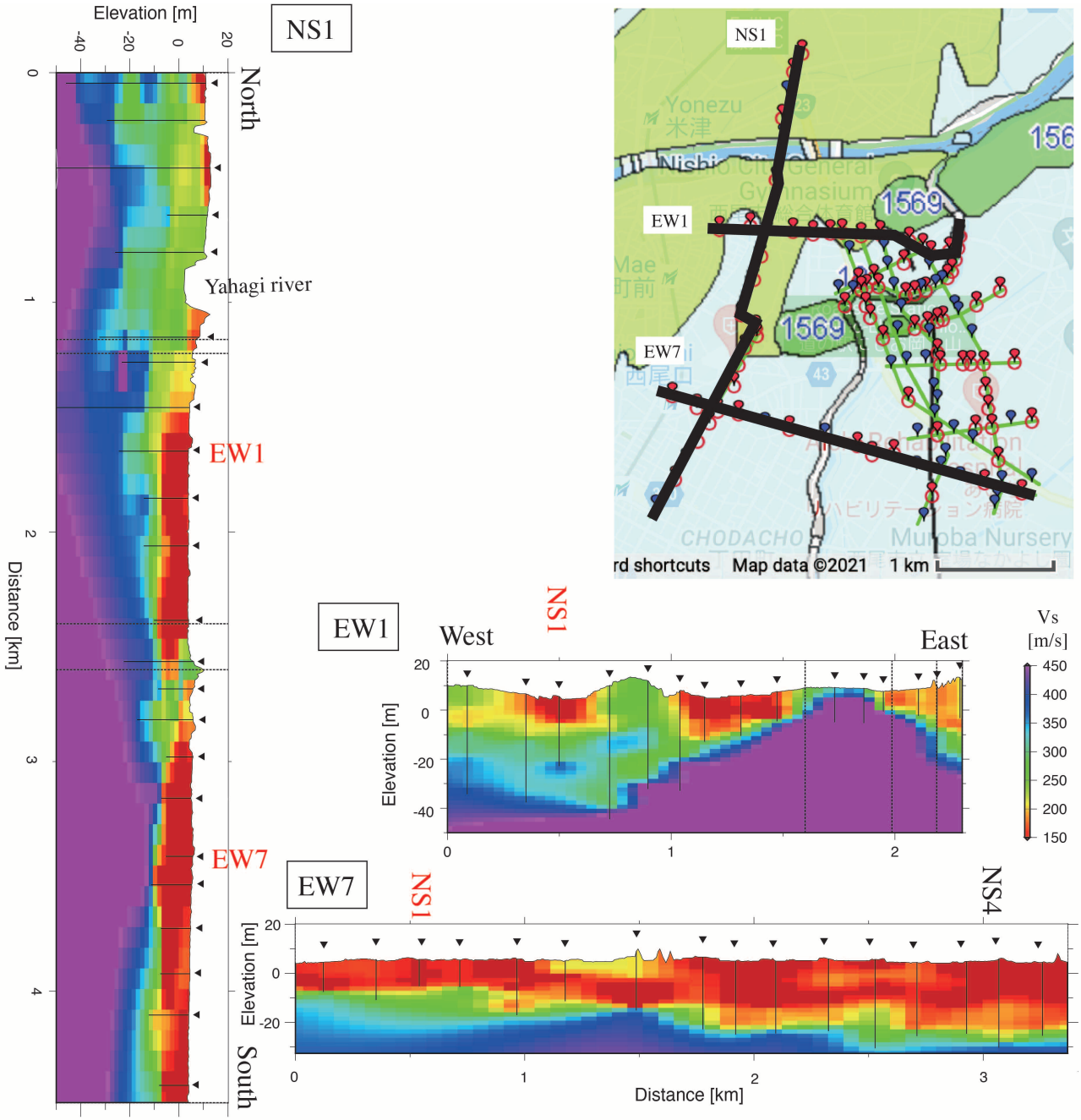



図 1 測線沿いのVs構造鉛直断面（測線NS1, EW1, EW7）. 右上の地質マップの太線は測線位置を示す. 速度断面の縦点線は測線の折れ曲がる箇所, 三角は観測点位置, 三角直下の縦棒は速度構造モデルの最下層までの深さを示す.

© The Seismological Society of Japan

# Strong motion very close to the surface rupture during the 2016 Kumamoto earthquake

*Asako IWAKI[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. NIED

2016年熊本地震で特に益城町中心部で建物被害が集中したことは広く関心を集めた．断層モデルを用いた強震動評価によって益城町中心部における強震動を断層内の比較的浅い領域に位置する強震動生成域によって説明するモデルが提案されている（例えば，貴堂・他，2019；Somei et al. 2020）．
この地震で益城町寺迫から同町広崎町に至る地表断層が新たに確認されており（都市圏活断層地図，2017），益城町中心部で特に甚大な建物被害の集中した地域を通っている．現地調査に基づく詳細な地表断層位置（鈴木・他, 2018）および航空写真・道路走行調査画像判読と建物登記簿調査に基づいた分析により，地表断層から100mの範囲に倒壊建物の約80%が集中しており断層から離れるに従い急激に倒壊率が下がることが報告されている（内藤・他, 2018; 中村・他2018）．
この地震について，詳細な地表断層形状を取り入れた断層モデルによる強震動計算により断層近傍の変位分布の再現性が向上することを示しており（岩城・他, 2021），強震動予測における事前情報としての活断層情報の有用性を検討している．しかし，使用した断層モデルにおいて数kmの広がりを持つ強震動生成域や断層浅部の食い違いは地表断層から数100ｍ～数km離れた位置に強い地震動を生じさせるものの，上述したような地表断層から100 m程度以内の集中的な被害を断層モデルで説明するためには，それらに加えて断層内部でさらにスケールの小さい機構が必要である可能性がある． そこで，その機構として地表付近のごく近傍域のみに存在する断層内部領域で生じている地盤変形の影響を考えた．この地盤変形は，観測された地表断層の変位量の断層運動で生じた変位量からの欠損分と仮定すると，地表付近での断層運動による変位を一部打ち消す方向に働く力に相当すると考えることができる．この地盤変形に対応する力として断層ごく近傍の地表付近に体積的な変形を近似的に表現するシングル力をおき，断層モデルと組み合わせた線形の強震動計算による簡単な数値実験により，断層面全体に連続的な食い違い量を持つ断層モデルだけでは説明できない地表断層ごく近傍に集中した強い地震動を生成できることを示した． 実際の建物倒壊率を説明するためには，この変形が建物倒壊に寄与するための力の大きさを地盤の非線形応答も含めて検討する必要がある．

© The Seismological Society of Japan

# Source Process of the Off Fukushima Earthquake of February 2021 - Analysis considering 3D subsurface structure -

*Kazuhito HIKIMA[1]

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

【はじめに】

2021年2月13日に福島県沖で発生したMj7.3の地震では福島県および宮城県では最大震度6強に達し多くの被害が発生した．この地震は西北西ー東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型で，太平洋プレート内で発生した地震である（地震調査委員会,2021）．スラブ内地震による生じる強震動を考える上で震源過程を知ることは重要であり，防災科学技術研究所(2021)による速報解をはじめ，既にいくつかの詳細な解析が行われている（津田・他，久保・他，染井・宮腰; 2021 JpGU，など）．

本発表では，既報と同様に強震記録を使い震源インバージョン解析を行った結果を報告する．解析に当たっては，余震の震源を再決定しその結果を考慮して断層面を設定するとともに，太平洋プレートを含む３次元速度構造の影響についても検討する．

【震源再決定】

震源インバージョン解析に先立ち，本震を含めて一連の地震の震源再決定を行った．本震発生後4週間以内に発生した地震について，防災科研のWebサイトで公開されている気象庁一元化処理による検測値を用いて，DD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により震源決定を行った．以下の解析に用いた本震の震源位置は(37.7259˚N, 141.6894˚E, 55.17km)である．

再決定された余震分布は主に北北東ー南南西方向に並びその範囲は40 km程度に及ぶ．多くの余震は東南東側に高角に傾き下がる面上に分布しているが，一部ではより低角な面上に並ぶ余震群も見られる．これは気象庁(2021)などによる再決定震源分布と同様である．なお，本震震源は震源域の北東端に近い位置にあり，破壊は南南西方向にユニラテラル的に進展したものと考えられる．

【震源過程解析】

震源域が海域に位置するためやや遠い観測点も含まれるものの，震源から120 km程度以内のKiK-netの波形記録を震源インバージョン解析に使用した．また，福島県内にある東京電力の地震観測点での観測記録も解析に加えた．なお，浅部地盤による影響を軽減するために地中記録の使用を基本とした．

通常の震源インバージョン解析の際には，グリーン関数の計算はKohketsu (1985)により行い，計算に用いる１次元水平成層構造は，全国１次地下構造モデル（JIVSM-V1; Koketsu et al., 2012）の各観測点直下の速度構造を抜き出したものを余震記録で若干のチューニングを行ったモデルを使用した．

震源解析には，加速度波形に0.03～0.6 Hz をフラットレベルとするバンドパスフィルタをかけて積分した速度波形を用い，インバージョンはマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al., 1996; 引間, 2012)により行った．

解析の際の断層面は，再決定した余震のうち，本震後24時間以内程度に発生した余震の分布をもとに，F-netによるメカニズム解なども参考にし，さらに予備的解析を行い観測波形と合成波形との残差も考慮して設定した．余震分布全体に拡がる主断層面は走向:37˚，傾斜:45˚の長さ40km，幅24kmの1枚の矩形断層とした．さらに，この面を仮定した解析に加えて，これらから離れた低角な余震の並びを考慮し，長さ14km．幅12kmの傾斜:20˚の副断層面も付加したケースについてもインバージョンを実施した．なお，小断層サイズは2 km×2 km とした．

【解析結果（１次元構造）】

主断層面のみを考慮した解析では，破壊は震源から南東側にほぼユニラテラルに進展し，震源から12～20 km程度離れたやや浅部に大きなすべりが求まった．その分布は既発表の解析結果と概ね整合している．最大すべり量は2m程度，地震モーメントは$4.7\times10^{19}$Nm (Mw7.0)となった．一方，副断層も設定した場合には，主断層面の最大すべり量は約1.8m，副断層では約1.6mのすべり量が求まり，全体では$M_0=5.3\times10^{19}$Nm (Mw7.1)とやや大きな値になった．

© The Seismological Society of Japan

観測波形の再現性の観点では，副断層面を設定した場合には特に福島県内での観測点の再現性が主断層面のみに比べると良好であった．インバージョン結果では副断層面上にも有意なすべりが求まっており，また，副断層面近傍の余震は本震直後から発生していることから，本震時には副断層面に相当する断層面もほぼ同時に活動したものと考えられる．

【３次元速度構造による波形計算】

１次元速度構造による震源インバージョン結果を用いて，３次元速度構造モデル（JIVSM）を使い波動伝播シミュレーションを行った．暫定結果ではあるが，観測波形の主要な特徴が良好に再現されることを確認した．これにより仮定した速度構造モデルは震源インバージョン結果を大きく変える程は影響を及ぼさないものと考えている．ただし，細部では再現が不足している地点も見られるため，３次元速度構造を用いた震源インバージョンを実施し，より詳細な震源過程を求める予定である．

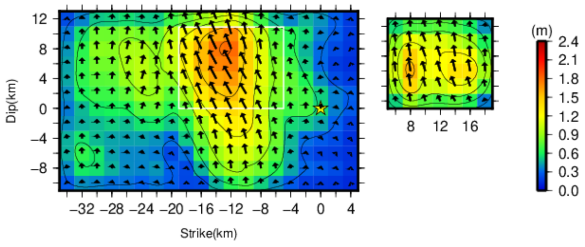
謝辞：本検討ではKiK-netおよびF-netメカニズム解，JMA一元化データを使用させて頂きました．

## 震源インバージョン結果（２枚断層）

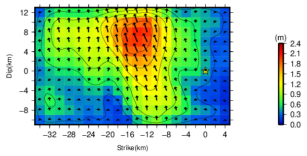
●1次元速度構造による暫定結果

走向: 37°，傾斜: 45°　[主断層]
走向: 37°，傾斜: 20°　[副断層]
$M_O$=5.3×10$^{19}$Nm ($M_W$7.1)
最大すべり量: 約1.8 m[主]，約1.6 m[副]

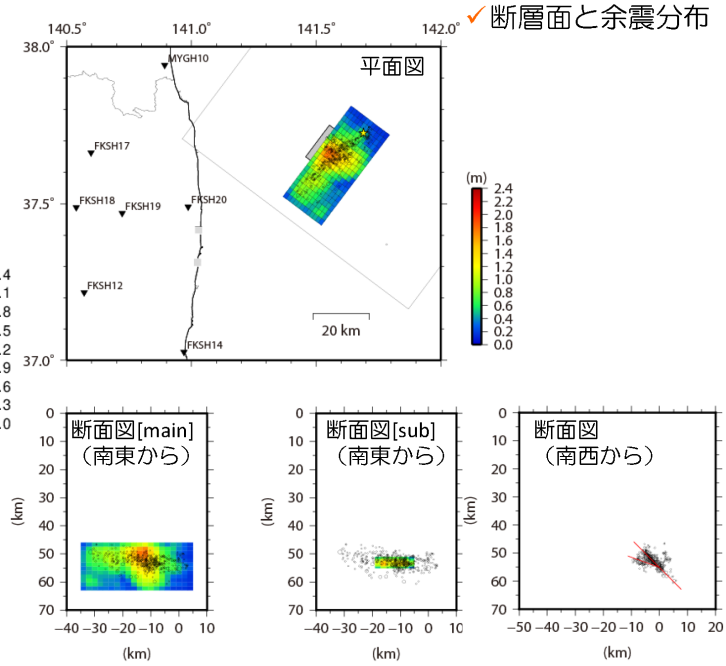
✓すべり分布（拡大図）




・参考：1枚断層のすべり分布



✓断層面と余震分布




© The Seismological Society of Japan

# Applicability of the strong ground motion prediction method to the 2021 Fukushima-oki earthquake (Mj7.3)

*Kiyoshi IRIE[1], Shohei YOSHIDA[1], Yasuo OKADA[1], Ken MIYAKOSHI[2], Kazuhiro SOMEI[2], Haruhiko TORITA[1]

1. Ohsaki Research Institute, Inc., 2. Geo-Research Institute

１．はじめに

2021年2月13日に福島県沖の地震（Mj7.3）が発生した．この地震は沈み込む太平洋プレート内に震源が位置するスラブ内地震であり，この地震によりKiK-net山元観測点（MYGH10）の地表において1,432 Gal（三成分合成）の地震動が観測された（地震調査研究推進本部（地震本部），2021）．スラブ内地震を対象とした特性化震源モデルの設定手法は，地震本部の強震動予測手法「レシピ」において提示されているが，実地震による地震動予測手法の検証例は他のタイプの地震に比べて多くない．そこで，本研究では2021年福島県沖の地震について既往の研究結果で求められた震源パラメータをスラブ内地震のデータベースと比較するとともに，既往の地震動予測手法に基づいて特性化震源モデルを構築し，強震動シミュレーションにより地震動予測手法の適用性について検討を行った．

２．2021年福島県沖の地震のパラメータ

2021年福島県沖の地震について，強震記録を用いた震源インバージョンによって震源過程が推定されている（たとえば，津田・他，2021；久保・他，2021；など）．一方，染井・宮腰（2021）や吉田・他（2021）は，経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより強震動生成域（SMGA）や短周期レベルを求めている．これらのパラメータ値を既往のスラブ内地震のスケーリングデータと比較した．ここで，既往地震のデータには，大崎総合研究所（2021）のスラブ内地震のデータベースを用いた．地震モーメントと短周期レベルの関係（暫定結果）を図1に示す．国内外のスラブ内地震のデータと比較するため，地震モーメントはGlobal-CMT解の値を用いた．同図より，染井・宮腰（2021）および吉田・他（2021）の短周期レベルは既往地震のばらつきの範囲内におさまっており，新井・他（2015）による太平洋プレートを対象とした関係式と調和的な値となっている．同様に，地震モーメントとSMGAの面積の関係についても，大崎総合研究所（2021）のデータベースと比較したところ，吉田・他（2021）のSMGA面積は笹谷・他（2006）の関係式に調和的な値を示しているのに対し，染井・宮腰（2021）のSMGA面積はやや小さい値を示しているが，既往地震のばらつきの範囲内にはおさまっていることが確認された．これらから，2021年福島県沖の地震のパラメータは既往のスラブ内地震と比べて特異な値ではないことがわかる．

３．特性化震源モデルの設定

笹谷・他（2006）および新井・他（2015）を用いた特性化震源モデルをそれぞれ設定する．断層走向，断層傾斜，アスペリティ位置は染井・宮腰（2021）等のSMGAモデルの先行研究を参考に設定する．

４．強震動シミュレーション

構築した特性化震源モデルを用いて，経験的グリーン関数法により強震動シミュレーションを行う．特性化震源モデルと強震動シミュレーション結果は発表時に報告する．

謝辞：

本研究は、原子力規制庁の委託研究「令和３年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業」の一環として実施しています．

参考文献：

新井・他 (2015) AIJ, 716, 1537-1547; 壇・他 (2001) AIJ, 545, 51-62; 地震本部 (2021) 2021年2月13日福

© The Seismological Society of Japan

島県沖の地震の評価; 大崎総合研究所 (2021) 令和2年度原子力規制庁委託成果報告書; 久保・他 (2021) JpGU, SSS11-17; 笹谷・他 (2006) 北海道大学地球物理学研究報告, 69, 123-134; 染井・宮腰 (2021) JpGU, SSS11-P24; Somerville *et al.* (1999) SRL, 70, 59-80; 津田・他 (2021) JpGU, SSS11-16; 吉田・他 (2021) AIJ大会梗概集（投稿中）.

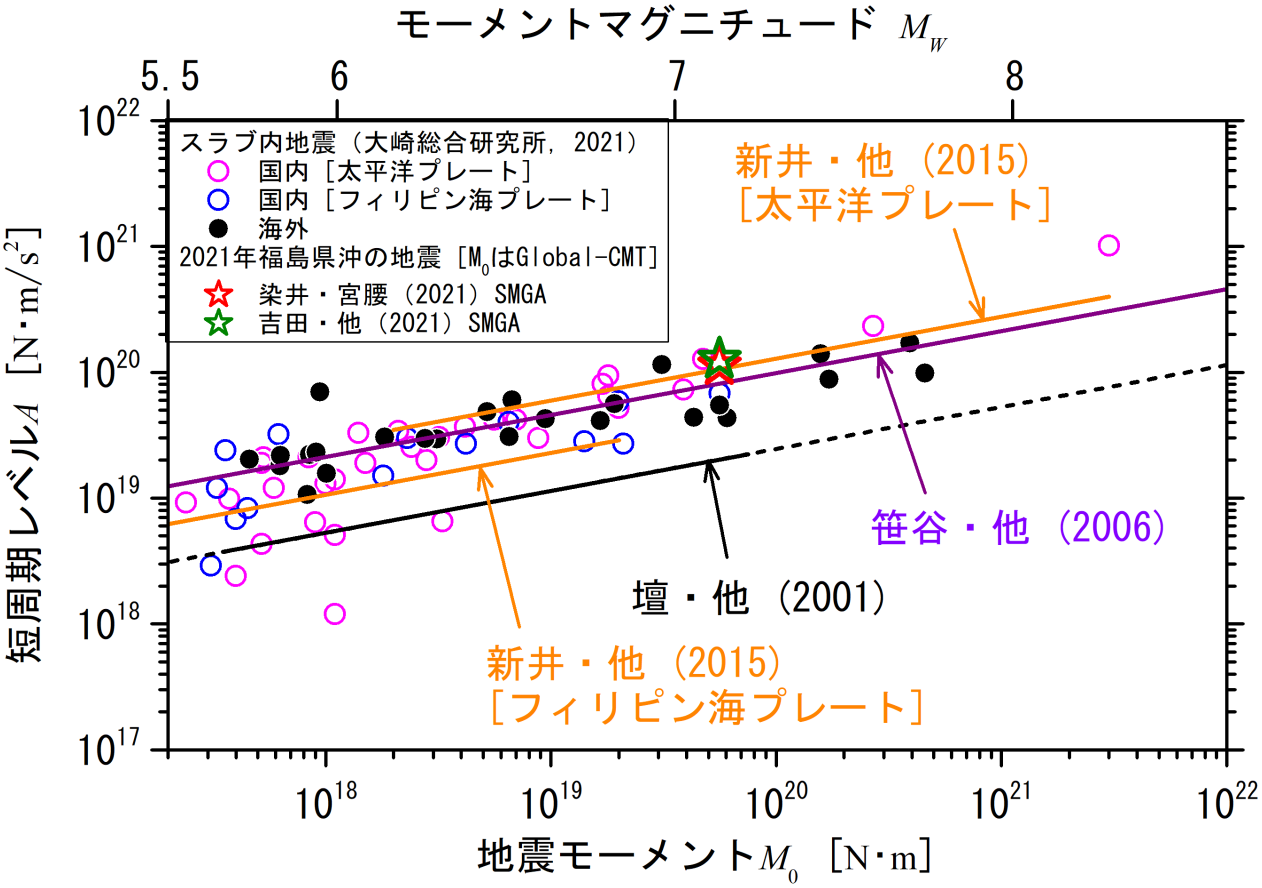



図1　スラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルの関係（暫定結果）

© The Seismological Society of Japan

# Re-examination of scaling relationships of source parameters of the interplate earthquakes in Japan

*Ken MIYAKOSHI[1], Yujia GUO[1], Kunikazu YOSHIDA[1], Kiyoshi IRIE[2]

1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

プレート間地震の震源スケーリング則として地震本部(2020)は，例えば佐藤(1989) や宇津(2001)などを挙げている．一方，Murotani et al. (2008, 2013)や田島他(2013)は，主に震源インバージョン解析による不均質すべり分布モデルに基づいた震源スケーリング則を提案している．佐藤(1989) と宇津(2001)は1498～1994年に国内で発生した地震(Mw6～8クラス)，Murotani et al. (2008, 2013)と田島他(2013)は1923～2011年に国内外で発生した地震(Mw6～9クラス)を対象にしている．これらの震源スケーリング則は震源断層面積に対して地震モーメントの2/3乗の比例関係(Mw<8.4)を仮定している．なお，田島他(2013)は断層幅の飽和(200km弱)を指摘し，Mw8.4以上の地震の震源断層面積は地震モーメントの1/2乗の比例関係となることを提案している．ところで，これらの震源スケーリング則はMw8.4以下で同じ傾き(2/3乗)を仮定しているにもかかわらず，宇津(2001)とMurotani et al. (2008)のy切片は異なる．すなわち，同じ地震モーメントに対して前者の震源断層面積は後者に対して約0.6倍と小さい．このような震源スケーリング則の差異は用いているデータセットの違い（例えば，解析手法や国内外の地震）が考えられることから，本検討では国内のプレート間地震(Mw6.7～9.0)に限って震源スケーリング則の再検討を行う．

震源スケーリング則を検討する上で，同質なデータセットを用いることは重要であり，Somerville et al. (1999)は断層全体の平均すべり量の0.3倍未満となる断層端部をトリミング操作して，それ以上のすべりを持つ領域を震源断層と規定する規範を提案している．本検討ではSomerville et al. (1999)の規範あるいはそれと同等な規範を用いた国内のプレート間地震のデータセットを収集・整理した．Somerville et al. (1999)の規範を用いた地震のデータセットとして①Somerville et al. (2002; SM2002), ②Murotani et al. (2008; MU2008), ③田島他(2013; TJ2013), ④Skarlatoudis et al. (2016; SK2016)がある．ただし，同じ規範を用いているにもかかわらず，SK2016についてはMU2008と同じ地震の一部で同程度の震源断層面積が得られていなかった．この原因は不明であるが，本検討ではこのようなデータは用いなかった．また，⑤Thingbaijam et al. (2017; TH2017)のデータセットはSomerville et al. (1999)とは異なるThingbaijam and Mai (2016)の規範でトリミングしたものを用いているが，宮腰他(2018)は同じ地震を対象に両者の規範によってトリミングされた震源断層面積は同程度となることを確認している．一方，⑥Allen and Hayes (2017; AH2017)は独自のトリミング手法によって震源断層面積を抽出しているが，同じ地震を対象にTH2017と比較した結果，AH2017はTH2017に比べてMw8程度以下で系統的に小さいことが認められた．本検討では同質なデータセットを用いることを重視し，①SM2002, ②MU2008, ③TJ2013, ④SK2016の一部，⑤TH2017の計5つのデータセットを用いた．なお，異なるデータセット間で同一研究者によるインバージョンモデルを持つ地震も複数存在するが，ここでは，それらを区別していない．

以上の国内のプレート間地震を対象に収集・整理した5つのデータセットと宇津(2001) ，Murotani et al. (2008) 及び田島他(2013)が提案する震源スケーリング則を比較した．その結果，Mw6.7～8.4の地震データセットに対し，宇津(2001)に比べてMurotani et al. (2008)の震源スケーリング則の方が整合的であった．一方，Mw8.4以上の地震データセットは少なく，宇津(2001)及び田島他(2013)のスケーリング則の整合性の検討は困難であった．ここまでは暫定的な結果であり，今後は，データセットと震源スケーリング則の差について定量的な評価を行うとともに，他の震源パラメータ（断層幅や長さ等）についても検討を進める予定である．

謝辞：本研究は原子力規制庁による令和3年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業の一環として実施されています．

© The Seismological Society of Japan

# Concept of Earthquake Disaster Prevention Infrastructure Simulator for the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

*Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Takahiro MAEDA[1], Yuji DOHI[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Harumi ISHIMARU[3]

1. NIED, 2. OYO RMS Corporation, 3. Mitsubishi Space Software Co.,Ltd.

地震調査研究推進本部（以降「地震本部」と称す）の長期評価は、南海トラフでは、約100～200年間隔で繰り返し大地震が発生し、同じ領域で同じような地震が繰り返し発生するのではなく、その規模や震源域の広がりは多様性に富んでいることを指摘している。また、これまでの科学的知見等に基づき、Ｍ８クラスの大地震が発生し、残りの領域においても連動して大地震が発生する可能性が高まることや、通常と異なるゆっくり滑り等が観測される可能性が中央防災会議防災対策実行会議報告書等において示されている。このような国難級の南海トラフ地震に備えるため、科学的・定量的なデータに基づき、「通常と異なる現象」の把握とその推移予測を、迅速かつ精度よく評価することを目指した評価・情報発信手法の開発や、発信された情報を被害軽減に最大活用するため、「通常と異なる現象」が観測された場合、住民や地域、企業等の防災対策のあり方や、防災対応を実行する方策について研究を実施する「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」が開始された（小平・他；地惑連合2021年大会）。 本研究では、前述の研究プロジェクトにおける将来を予測する基盤的情報として、「通常と異なる現象」発生後の時間推移についてもその地震発生の時空間的な多様性の一例として取り込み、地震や津波のハザードやそれによって引き起こされるリスク情報を提供可能とする地震防災基盤シミュレータの開発構想について述べる。具体的には、「通常と異なる現象」を地震発生の多様性の一例としてとらえ、それが起こった後の時間推移を考慮した条件付きリスク評価手法の開発を行う。また、地震本部の知見を採り入れつつ、地震発生の多様性を表現するために構築された時空間的に膨大な組み合わせからなる断層モデル群に対して、長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）や津波遡上を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法を開発し（前田・他、土肥・他；本秋季大会）、これらのハザード情報に基づいたリスク評価から事前避難、産業活動、大都市機能維持のそれぞれの地域性の観点から南海トラフの地震像を類型化する手法の開発を行い、類型化毎の代表的な広域災害シナリオを構築する（時実・他；本秋季大会）。このように創出したハザード・リスク情報を格納する情報基盤を、防災科研の地震ハザードステーション（J-SHIS）、津波ハザードステーション（J-THIS）、リアルタイム地震被害推定システム（J-RISQ）と連携できる形で地震防災基盤シミュレータとして構築し、想定する利用者の目的に適した形態で提供可能とするとともに、利活用を推進する活動を通して防災対策に活かすことを計画している。 謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© The Seismological Society of Japan

# Long-duration and broadband ground motion simulation for the great earthquakes along the Nankai Trough

*Takahiro MAEDA[1], Asako IWAKI[1], Shin AOI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Kosuke SEKI[2], Ryuta IMAI[3]

1. NIED, 2. Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3. Mizuho Research & Technologies, Ltd.

南海トラフのプレート境界ではこれまでマグニチュード8級の海溝型巨大地震が繰り返し発生しており、強震動や津波によって甚大な被害が引き起こされてきた。地震調査研究推進本部による南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）では、2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ、過去に発生したことが確認されていないものの現在の科学的知見に基づいて推定されうる「最大クラス」の地震も含む、地震の多様性が考慮されている。
文部科学省の「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」（小平・他；地惑連合2021年大会）の一環として、防災科学技術研究所では、時空間的に多様な南海トラフ地震による地震や津波のハザードやリスク情報を提供可能とする地震防災基盤シミュレータ（中村・他；本秋季大会）を開発しており、本研究では、地震防災基盤シミュレータに格納するハザード情報のひとつである長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法を開発している。
　海溝型巨大地震では震源から遠く離れた平野や盆地においても長大構造物が長周期地震動による被害を受けることが知られている。首都圏を含む大都市は平野上に発達しており、南海トラフの海溝型地震に対しては強震動と津波の評価のみならず長周期地震動の評価も重要である。我々はこれまで南海トラフ沿いで想定される多様な断層モデル群に対して差分法による長周期地震動シミュレーションを行ってきたが、計算タイムステップの増加とともに振幅が指数関数的に増大する発散現象のため長継続時間の地震動を計算することが困難な場合があった。そこで、本研究では防災科研が開発しているシミュレーションシステムであるGMS（地震動シミュレータ）による地震波伝播計算にImai et al.(2018)の波動場平滑化スキームを導入し、発散抑制効果を検証した。
波動場平滑化スキームは移流拡散方程式のアナロジーを応用し波動方程式に拡散項を付加した修正波動方程式を解くもので、拡散項（付加項）に乗ずる係数を適切に設定することで、ある周期よりも短周期成分を選択的に減衰させることができる。経験的に発散現象は、地震動計算として有効な周期帯域よりも短周期帯で生じており、波動場平滑化スキームにより発散の影響のみが除去され、長継続時間の地震動計算が可能となることが期待される。
　我々がこれまでに実施した差分法計算において発散が生じた計算モデル（3次元地下構造モデル＋震源モデル）を対象に、波動場平滑化スキームを実装したGMSを用いて計算を行ったところ、拡散項の係数をある幅の中で設定することで発散が抑制されることが確認できた。今後は、拡散項の係数の設定が波動場にどのような影響を与えているかを定量的に評価するとともに、係数の適切な設定方法に関する検討を行い、南海トラフ巨大地震による長継続時間地震動の計算を行う予定である。
謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© The Seismological Society of Japan

# Tsunami Inundation Simulation Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough - For Effective Use of Tsunami Hazard Information -

*Yuji DOHI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Katsuya YAMORI[2], Takashi SUGIYAMA[2]

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

近い将来の発生が懸念される南海トラフ巨大地震に対して、事前の備え・対策に資する、多様な津波ハザード・リスク情報を創出することは喫緊の課題である。地震調査委員会（2020）による「南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価」は、最大クラスの地震を除く、Ｍ８クラスからＭ９までの地震規模の南海トラフ巨大地震について、地震発生の空間的な多様性を考慮した波源断層モデル2,720個を設定し、海岸に来襲する津波に対する確率論的津波評価を実施した。また、藤原・他（2020；防災科学技術研究所研究資料）は、地震調査委員会（2020）が設定した波源断層モデル群に加え、最大クラスの地震を考慮した波源断層モデル3,480個を設定し、海岸に来襲する津波に対する確率論的津波評価を実施した。これらの既往研究では、地震発生の時空間的な多様性を持つとされる南海トラフ巨大地震に対して、多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群を用いた津波ハザード情報を創出しているものの、浸水域の拡がりや浸水深といった、陸域における津波ハザード情報は示されていない。事前の備え・対策に資する、より効果的な津波ハザード・リスク情報を創出するためには、陸域を遡上する津波の検討が求められる。
本研究では、地震調査委員会（2020）や藤原・他（2020）が設定した、南海トラフ巨大地震に対する空間的な多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群を用いた津波遡上計算を実施し、陸域における津波ハザード情報を含む、多様な津波ハザード情報を創出する。創出する津波ハザード情報は、南海トラフ巨大地震に対する事前避難、産業活動、大都市機能維持に資するハザード・リスク情報を整備する情報基盤「地震防災基盤シミュレータ」（中村・他、2021；本大会）に格納する予定である。また、南海トラフ巨大地震による建物被害・人的被害のリスク評価（時実・他、2021；本大会）や、「臨時情報」発表時における事前避難分析ツールの開発（杉山・他、2021；信学技報）等における利活用を想定している。本研究の概要を図１に示す。
本発表では、上述した研究全体の計画、進捗、さらに、現時点における津波ハザード情報の活用事例について報告する。

謝辞：本研究は「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。

© The Seismological Society of Japan

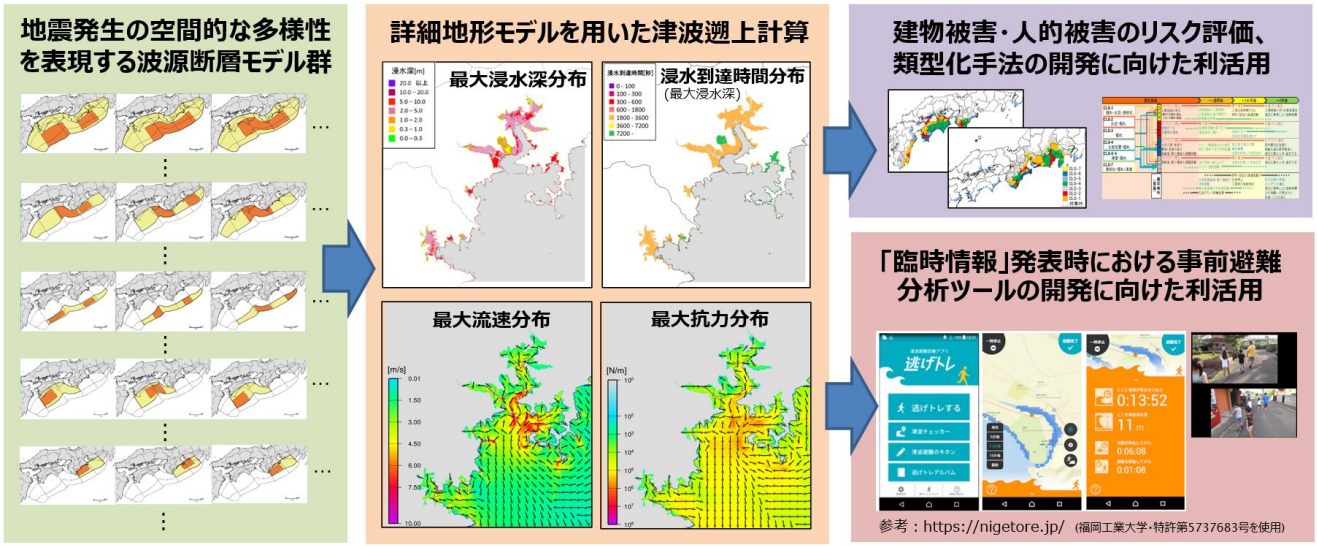



図１　本研究の概要。本研究では、南海トラフ巨大地震に対する空間的な多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群（図左側）を用いた津波遡上計算を実施し、多様な津波ハザード情報を創出する（図中央）。創出する津波ハザード情報について、建物被害・人的被害等のリスク評価、南海トラフ巨大地震の地震像に対する類型化手法の開発、「臨時情報」発表時における事前避難分析ツールの開発に向けた利活用等を想定している（図右側）。

© The Seismological Society of Japan

# A trial of conditional hazard assessment based on Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

Hiromitsu NAKAMURA[1], *Yoshinori Tokizane[2], Hiroyuki FUJIWARA[1], Satoshi SHIMIZU[2], Miki ASO[2]

1. NIED, 2. OYO RMS Corp.

南海トラフ沿いで発生する地震は、規模や震源域の広がりが多様であると評価（地震調査研究推進本部、2020）されており、防災対策のあり方を考える際にはこれらの多様性を踏まえた検討が必要と考えられる。これらの課題をうけて、「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」（小平・他；地惑連合2021年大会）では、時空間的に多様な南海トラフ地震によるハザードやリスクを取り込んだ地震防災基盤シミュレータの開発に取り組んでいる（中村・他；本秋季大会）。本研究では、地震防災基盤シミュレータの開発の一環として、膨大な地震および津波ハザード情報（前田・他、土肥・他；本秋季大会）に基づいたリスク評価を行い、事前避難、産業活動および大都市機能維持等の観点で、地震発生の多様性を有する南海トラフ地震を類型化する手法を開発するとともに、類型毎の代表的な広域での災害シナリオを構築する計画である。本発表では、研究計画を紹介することに加え、前述の災害シナリオ構築の基礎的な情報となる半割れケース発生後の条件付きハザード評価を試みたので報告する。ここでの「半割れケース」とは南海トラフ沿いのプレート境界で発生するＭ８クラス以上の地震のうち潮岬以東もしくは以西を震源域とする地震を指し、内閣府の「南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン」において発生後には南海トラフ臨時情報のうち巨大地震警戒が発表される地震に相当するものである。 半割れケース発生後の条件付きハザード評価は、確率論的津波評価(地震調査研究推進本部、2020)や地震動予測地図(地震調査研究推進本部、2021)の考え方を参考とした。まず半割れケース発生後に起こりうる地震の震源域の組み合わせとして、既に半割れした震源域を除いたいわゆる割れ残り領域のみから構成される震源域の組み合わせと、既に半割れした震源域を含む全ての震源域の組み合わせを考えた。次に、それぞれの組み合わせに対して地震動予測地図での事例を参考に重みを付与し、半割れケースが発生した場合におけるハザードと条件付き超過確率の関係を評価した。今後、これらのハザード評価に基づいて、事前避難等による人口分布の変化を考慮したリスク評価を行っていく予定である。 謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© The Seismological Society of Japan

# Number of earthquakes from seismic activity model of the probabilistic seismic hazard map for Japan starting from 2020

*Jun'ichi MIYAKOSHI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Hiroyuki FUJIWARA[2]

1. Ohsaki Research Institute, Inc., 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震調査研究推進本部地震調査委員会により公表されている「全国地震動予測地図」のうち確率論的地震動予測地図では、地震を複数に分類した上で、各々について地震発生の確率モデルが作成されている。確率論的地震動予測地図の妥当性検証の1つとして、地震活動モデルで表現されている規模別地震発生頻度と近年の地震カタログデータとの比較がある（例えば、森川・他，2019、日本地球惑星科学連合大会）。そこでは、確率論的地震動予測地図2018年版の地震活動モデルを対象としており、平成23年東北地方太平洋沖地震後のカタログの余震の扱いが一つの課題となっていた。本稿では、2017年までの地震カタログを用いた確率論的地震動予測地図2020年版における地震発生数を算定し、地震カタログデータおよび2018年版における地震発生数との比較を行う。

まず、確率論的地震動予測地図の地震活動モデルにおいて、2020年版での主な変更点は以下の通りである。

・日本海溝沿いの超巨大地震、青森県東方沖および岩手県沖北部のプレート間巨大地震、宮城県沖のプレート間地震について、多様な発生パターンを考慮している。

・南海トラフの地震（M8～9クラス）について、確率論的津波評価で設定した従来よりも多様な震源域の組み合わせと、それぞれの起こりやすさを考慮した重み付けを踏まえたモデルとしている。

・震源断層を予め特定しにくい地震の発生頻度の算定において、領域区分を一部変更、地震カタログとして宇津（1982）による1885～1921年のM 6.0以上の地震と1922～2017年のM 5.0以上の気象庁震源データに変更（2018年版は、宇津（1982）による1885～1925年のM 6.0以上の地震と1926～2010年のM 5.0以上の気象庁震源データ）、余震を除去する場合とカタログのすべての地震を用いる場合を併用、等である。

つぎに、確率論的地震動予測地図の地震活動モデルで表現される地震発生数として、30年間での期待値を規模ごとに算定し累積地震数で表す。手順は以下の通り。

・非定常な地震活動モデルが採用されている地震については、基準日から30年間の地震発生確率を地震数の期待値とする。

・多様な発生パターンを考慮している地震（南海トラフの地震（M8～9クラス）、相模トラフ沿いのM8クラスの地震、千島海溝沿いの超巨大地震（17世紀型）、十勝沖および根室沖のプレート間巨大地震、日本海溝沿いの超巨大地震、青森県東方沖および岩手県沖北部のプレート間巨大地震、宮城県沖のプレート間地震）については、30年間の全体の地震発生確率に各発生パターンの重みを乗じたものをそれぞれ30年間の地震数の期待値とする。

・ポアソン過程が採用されている地震については、地震発生頻度に基づく30年間の地震数を用いる。

・モーメントマグニチュード（Mw）でモデル化されている地震の規模について、主要活断層帯で発生する地震はM = (Mw-1.08) / 0.78、それ以外の地震は M = Mwにより気象庁マグニチュードMに変換する。

比較対象とする地震カタログについては、宇津（1982）による1885～1921年のM 6.0以上の地震と1922～2017年のM 5.0以上の気象庁震源データを組み合わせたものとする。このとき、確率論的地震動予測地図2020年版と同様に、余震を除去する場合とカタログのすべての地震を用いる場合との地震数を0.5：0.5の重みで算出する。

陸側プレートの浅い地震については、平均ケースの場合M7.4以下、最大ケースの場合M7.6以下においてカタログよりモデルの地震数がやや大きいが、それより大きな規模ではモデルの地震数が小さい傾向が見られる。

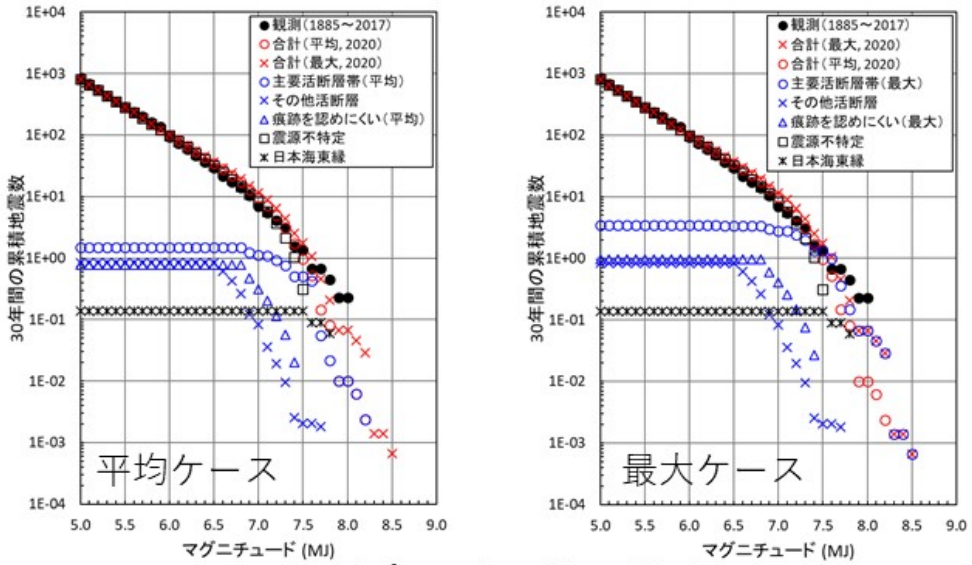
フィリピン海プレートの地震については、M8.0以下においてモデルとカタログの地震数が整合的であるものの、それより大きな規模ではモデルの地震数が極端に大きくなっている。これは南海トラフの地震（M8～9クラス）において時間予測モデルに基づいた大きな発生確率がモデル化されていることが影響している。ただ

© The Seismological Society of Japan

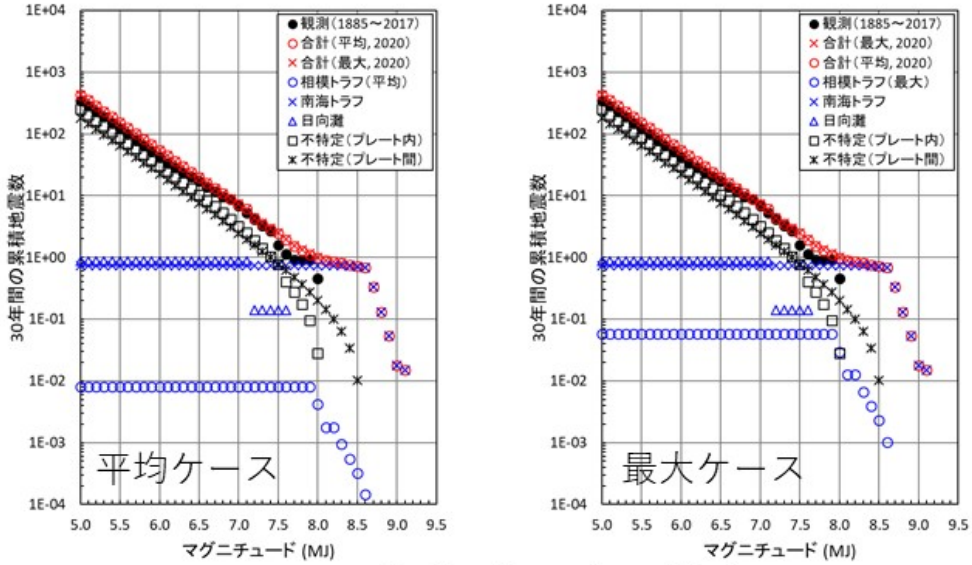
し、カタログにおける最大規模の地震は1946年の南海地震（M8.0）であり、それより大きな規模については直接カタログの地震数との比較はできない。

太平洋プレートの地震については、平均ケースの場合M8.4以下、最大ケースの場合M8.8以下においてカタログよりモデルの地震数がやや大きいが、それより大きな規模ではモデルの地震数が小さい傾向が見られる。ただし、カタログにおけるM8.6以上の地震は2011年の平成23年東北地方太平洋沖地震（M9.0）のみであり、カタログでは133年に1回発生したとして地震数を算定していることに注意されたい。

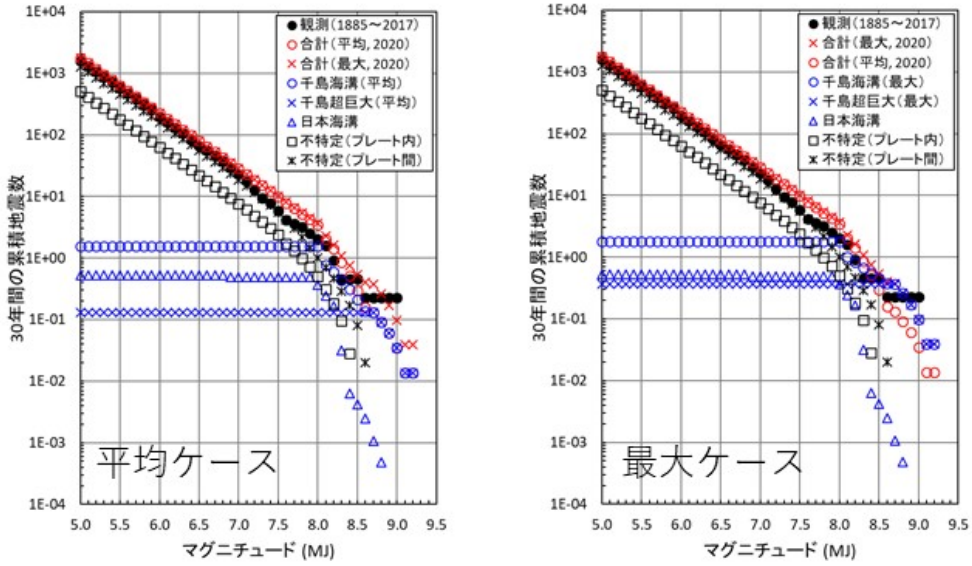
© The Seismological Society of Japan




陸側プレートの浅い地震




フィリピン海プレートの地震




太平洋プレートの地震

モデルとカタログの地震数の比較（2020年版）

© The Seismological Society of Japan

# Nonergodic Ground Motion Prediction Model Using Artificial Neural Networks

*Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Asako IWAKI[2], Hiroyuki FUJIWARA[2], Naonori UEDA[1]

1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震動予測式（距離減衰式）は、地震・観測点に関する少数の説明変数から強震動強さを推定する経験式であり、主に回帰分析による研究が進められてきた。地震動予測式は確率論的地震ハザード評価において重要な役割を持つ。2000年頃より地震・観測点の地理的位置を明示的に考慮する非エルゴード的予測式が、稀少な地震動に対するハザード評価において本質的であることが認識され、非エルゴード的予測式の開発が活発に行われている。

最近では機械学習のニューラル・ネットワークによるモデル化が多数提案されているが、その大部分は地理的位置を考慮しないエルゴード的予測式である。Okazaki et al. (2021, BSSA)は、観測点をone-hotベクトルで入力するサイト特定モデルを提案し、過適合を抑制しつつ観測点固有の特性を学習できることを示した。しかし、学習されたサイト特性には、震源・伝播経路の特性が含まれていることが観察された。

本研究では、ニューラル・ネットワークにより地震・観測点位置を指定するパス特定モデルの構成を試みた。その際、各特性の寄与を分離できるように、エルゴード的予測式・震源項・伝播経路項・サイト項を逐次的にモデル化した。発表においては、各項が示す地震学的知見について議論を行う。

© The Seismological Society of Japan

# Analysis and numerical modeling of local earthquake records obtained by the AN-net

*Hisashi NAKAHARA[1], Shutaro Sekine[2]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction

はじめに　AN-net（関根・他，2010）は，（公財）地震予知総合研究振興会により新潟県長岡地域の40カ所に展開された地震観測網で，ボアホール内に加速度計と速度計，地表に加速度計が設置されている．観測点間隔は5㎞から10㎞と小さく，やや長周期の地震波であればコヒーレントな伝播過程を調べることが可能であると期待される．そこで本研究では，観測網周辺で発生したM6程度の中規模地震を対象に，AN-netと防災科研K-NET, KiK-netで観測された表面波の伝播の特徴をまとめ，地震波伝播の数値モデリングにより，その特徴を再現することを試みた．

データ解析・結果 解析に使用した地震は２つで，2013年2月25日栃木県北部の地震（Mj6.3）と2019年6月18日山形県沖の地震（Mj6.7）である．一つ目の地震はAN-netから西に位置し，震央距離は60-120㎞程度である．2つ目の地震は，AN-netから北に位置し，震央距離は100-170km程度である．AN-netの地表の加速度記録，防災科研KiK-netの地表の加速度記録，K-NETの加速度記録を使用した． データ解析として，レコードセクションの確認，ランニングスペクトル解析，最大振幅や卓越周波数の空間分布の推定，粒子軌跡の計算，センブランス解析による位相速度と到来方向の推定，を行った． レコードセクションでは，長岡平野のAN-netの観測点ではやや長周期地震動の継続時間が伸びていることを確認できる．後続波の伝播は結構複雑で，平野内の往復するような様子を視認することは難しい．最大速度振幅は，AN-netの観測点の間で最大1桁程度変化している．その空間分布は，同じ周波数帯では，上下動成分のほうが水平動成分よりやや複雑な分布を示すように見える．後続波のスペクトルは，周波数0.2-0.6Hz程度が卓越することがわかり，長岡平野の北部では低く，南部では高い傾向にある．北に向かって地震基盤等の境界面の深さが深くなるためと推察される．この傾向は3成分すべてで確認されるが，特に上下動ではっきりと見える．水平動成分の表面波ではレイリー波とラブ波双方の寄与があるが，上下動成分ではレイリー波のみの寄与のためだと考えられる．また，隣接する複数の観測点を地震計アレイと見なしたセンブランス解析により，後続波部分では見かけ速度が概して1km/sより遅く0.5km/sに近い場合もある．表面波の卓越が考えられる．また到来方向は，最初は震源方向からの入射が見られるが，時間が経過するにつれて震源とは逆方向から入射するフェイズも見られるようになり，散乱された表面波であると考えられる．

数値モデリング 数値モデリングにはOpenSWPC（Maeda et al.,2017）を使用した．地震波速度構造はJIVSM（Koketsu et al., 2012）に基づく．点震源を仮定し，防災科研F-netのモーメントテンソル解を採用した．震源時間関数はKupper型とし，継続時間はGlobal CMT解のHalf-durationを2倍して用いた．現在は，グリッドサイズ0.2㎞，時間ステップ0.01sとして，最大周波数0.35Hz程度まで計算している．計算波形は観測波形に比べると比較的単純な形状をしている．そのため，レコードセクションを作成すると，観測とは異なり，震源方向から長岡平野に入射し平野の端で逆方向に向かって伝播していく様子を見つけやすい．最大速度振幅の空間分布については，低周波成分はそれなりに再現できている．しかし，高周波になるにつれて，観測と数値計算とのずれが出てくる．後続波のみかけ速度については，1km/sより遅い波が再現される．観測と数値計算で相違が出てくるのは，震源時間関数がもっと複雑であるのか，点震源の仮定が不十分なのか，あるいは現実の3次元地震波速度構造がより小さい空間スケールまで不均質であるのか，このような可能性が考えられる．今後，それぞれの影響について検討する予定である．

まとめ 本研究では，AN-netで観測された近地地震の波形の特徴をまとめ，数値モデリングによる再現を試みた．観測波形と計算波形との合わせこみにはまだ改良の余地が残っており，今後，震源時間関数や速度構造の調整を行う予定である．

© The Seismological Society of Japan

謝辞　防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netのデータを使用しました．また，地震波形の数値モデリングには，OpenSWPC（Maeda et al.，2017）と東京大学情報基盤センターのOakforest-PACSスーパーコンピュータシステムを使用しました．また，計算にあたっては，東京大学地震研究所共同利用 (2020-S-04) の助成を受けました．ここに記して感謝いたします．

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Regular session | S19. Seismology, general contribution

# P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P6 (ROOM P)

## [S19P-01] Picking of P and S waves and hypocenter determination of the Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake

○Katsuhiro Takasaki[1], Masanao Komatsu[2], Tomotsugu Watanabe[2], Hiroshi Takenaka[3], Mitsutaka Oshima[4] （1.Department of Earth Sciences, Okayama University (Current Affiliation: Japan Meteorological Agency), 2.Department of Earth Sciences, Okayama University, 3.Department of Earth Sciences, Okayama University, 4.Shimizu Corporation）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S19P-02] Research Project for Disaster Prevention on the great Earthquakes along the Nankai trough: Result and plan

○Shuichi KODAIRA[1], Hiroyuki Fujiwara[2], Narumi Takahashi[1,2] （1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Picking of P and S waves and hypocenter determination of the Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake

*Katsuhiro Takasaki[1], Masanao Komatsu[2], Tomotsugu Watanabe[2], Hiroshi Takenaka[3], Mitsutaka Oshima[4]

1. Department of Earth Sciences, Okayama University (Current Affiliation: Japan Meteorological Agency), 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Department of Earth Sciences, Okayama University, 4. Shimizu Corporation

2016年4月16日の熊本地震本震($M_{JMA}$7.3)で誘発された大分県由布市の地震($M_{JMA}$5.7) は、本震の後続波の影響で震源決定のために必要なP波、S波の初動読み取りの気象庁検測値データが少なく、その精度も良くない. 本研究では気象庁検測値がない観測点を含む大分県の観測点の波形記録から誘発地震の初動読み取りを行い、震源を再決定した.

波形記録は、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net、気象庁震度計、大分県内の自治体震度計によるものを使用した. P波、S波の読み取りには Oshima and Takenaka (2020, BSSA)の地震波振幅の確率密度関数に基づくP波、S 波のピッキング手法を用いた. この手法では記録された波形振幅の確率密度関数とランダム性の高い波の振幅分布に従うレイリー分布及びガウス分布との時間経過に伴う非類似性の変化をKullback-Leibler divergenceを計算して評価する. Kullback-Leibler divergenceはP波、S 波の初動部分で大きくなるため、それらの到達時間を検出できる. この方法で得られたP波、S 波の読み取り値を使用して、震源決定を行った. 気象庁が推定した震央周辺を水平方向、深さ方向にグリッドサーチし、観測点間の理論走時と読み取り走時の残差二乗和のRMSが最小となる点を震源とした. 理論走時の計算には気象庁の走時表（JMA2001）を用いた. なお、走時の観測点補正値は2016年04月29日に発生した$M_{JMA}$4.5の余震記録を使用し、各観測点の波形からP波、S波の初動を目視で読み取り、理論走時との差を計算することによって求めた. 余震の震源情報は、小割（2020, 岡山大学修士論文）によるものを用いた.

結果をFigure 1に示す. Figure 1(a)は、S波の検出例を示す. 誘発地震のS波の初動付近に明瞭なピークが見られる. Figure 1(b)は、震源決定の結果を示す. 本研究における震央は、気象庁が推定した震源より南西方向の由布院断層の西端付近に求められた. 誘発地震発生後、由布院断層沿いに余震が発生している（小割, 2020, 岡山大学修士論文）ことから、大分誘発地震は由布院断層の活動によって発生したと考えられる.

謝辞
本研究では防災科学技術研究所（K-NET、KiK-net）、気象庁、大分県の震度観測網の観測波形記録及び気象庁一元化処理震源データを使用させて頂きました. 誘発地震の余震の震源情報は、小割（2020, 岡山大学修士論文）によるものを使用させて頂きました.

© The Seismological Society of Japan

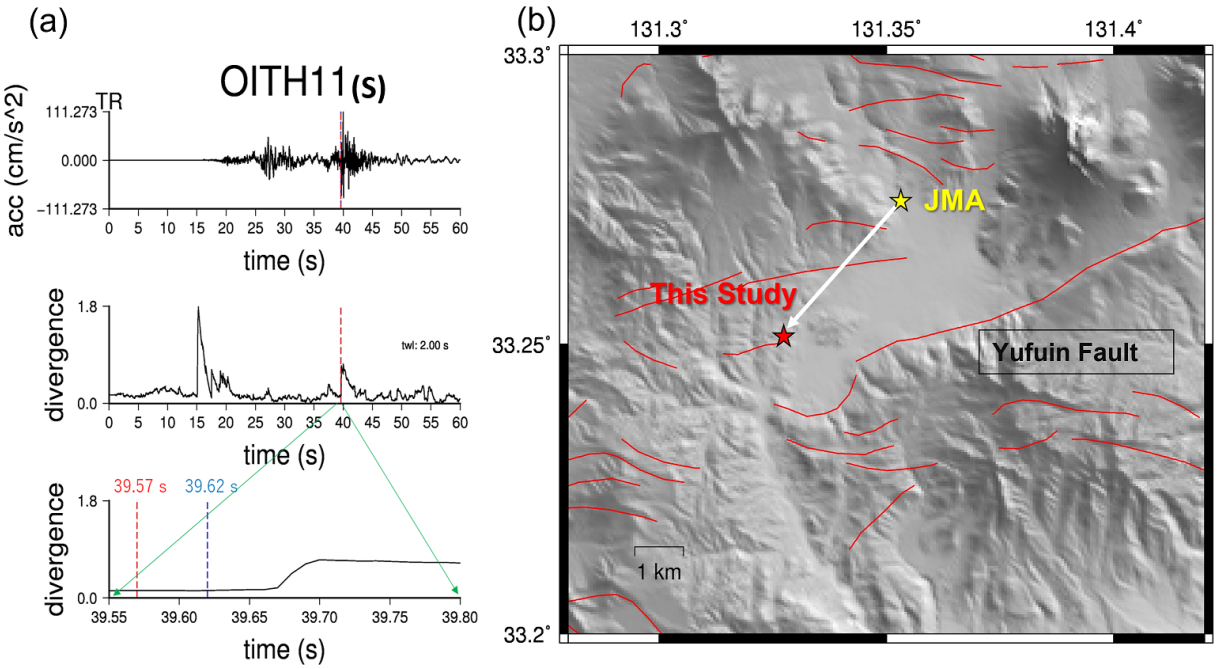



Figure 1. (a) An example of S-wave picking in OITH11. Red and blue dashed lines indicate arrival times of S-wave picked in this study (39.57 s) and reported by JMA (39.62 s), respectively. (b) Location of the triggered earthquake in this study. Red and yellow stars denote epicenters determined in this study and reported by JMA, respectively. Each of Red lines indicates the active fault in this region.

© The Seismological Society of Japan

# Research Project for Disaster Prevention on the great Earthquakes along the Nankai trough: Result and plan

*Shuichi KODAIRA[1], Hiroyuki Fujiwara[2], Narumi Takahashi[1,2]

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

最近の研究成果により南海トラフにおける多様な巨大地震発生様式や複雑なプレートすべり・固着の現状が指摘され、それら科学的な知見や観測データを取り入れた防災対応の検討が求められている。本プロジェクトは、南海トラフ地震に備えるため、2020年度より5カ年計画の予定で開始され、現在、以下の三つの課題を実施している。
「課題１地殻活動情報創成研究」目的：南海トラフの地殻活動の現状や通常と異なる現象を観測した際に、それら観測情報を迅速かつ精度よく評価し情報発信する手法を開発する。取り組み：最新の観測データに基づいて南海トラフ地震発生帯の海陸統合３Dモデルを構築し、そのモデルと海陸統合地震・地殻変動データを活用した地震活動・プレート固着すべりの現状把握・推移予測を行うシステムを構築する。
「課題２地震防災情報創成研究」目的：発信された情報を被害軽減に最大活用するためのシステムを構築し、平時や通常と異なる現象が観測された場合、防災対策のあり方、実行方策について検討する。取り組み：巨大地震や通常と異なる現象発生の多様性も取り込んだ地震や津波ハザードやリスクの防災情報基盤を創生し、それら情報を活用し、”命、地域産業、都市機能“を守るための総合的な研究を実施する。
「課題３創成情報発信研究」目的：課題１，２等で進めた研究成果が被害軽減の向上にどのように貢献したか定量的な評価を行い、地域防災・減災計画に向けた効果的な研究開発項目を明らかにする。取り組み：地域での情報発信検討会等を通して、地域防災力の向上のために事前準備、災害時対応、災害後対応の各ステージで地域防災に活用するための情報発信の在り方を検討する。
さらに、プロジェクト成果の最大活用に向けて、防災情報基盤で活用するための地震発生シナリオや地震発生帯モデルの構築などの課題間連携の強化も進めている。本発表ではこれら課題間連携の検討結果を含み、本プロジェクトのこれまでの成果と今後の計画について報告する。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S21. Seismic spectral analyses for earthquake source physics, earth structure estimation, and strong motion assessment

# P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P7 (ROOM P)

## [S21P-01] Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

○Noriko KAMAYA[1], Masashi OGISO[1] (1.Meteorological Research Institute)

3:30 PM - 5:00 PM

## [S21P-02] Rupture propagation effects of moderate-sized earthquakes off Fukushima prefecture derived from source spectra

○Toshimi SATOH[1] (1.Shimizu Corporation)

3:30 PM - 5:00 PM

## [S21P-03] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Spatial heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

○Tsukasa Masuda[1], Takuji Yamada[1] (1.Ibaraki University)

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

*Noriko KAMAYA[1], Masashi OGISO[1]

1. Meteorological Research Institute

１．はじめに

精度の高い強震動即時予測を実現するためには、予測対象地点のサイト特性を考慮する必要がある。そのサイト特性として、周波数に依存するサイト増幅係数を使用することの有効性が既往研究により示されている（例えばHoshiba (2013)やOgiso *et al.* (2016)）。それらのサイト増幅係数を算出する際に使われているのは高速フーリエ変換（FFT）であるが、FFTでスペクトルを求める場合、分析可能な最低周波数を引き下げるためには時間窓長を延ばす必要があり、短時間のシグナルデータから低周波のスペクトルを算出するのは難しい。また、FFTでは周波数軸で等間隔の分析結果が得られるため、低周波側は疎なデータになる。これに対し、過去のデータを元に将来のデータを予測するために使われる自己回帰（AR）モデルは、モデルの推定の際にスペクトルが得られ、そのスペクトルにはFFTにあるような制限がない。そこで、長周期地震動を含む地震動即時予測の精度向上のため、ARモデルによるスペクトル解析を用いた、地盤増幅率の周波数特性評価を試行した。

２．解析手法

北海道のKiK-net白糠南（KSRH09）観測点の、地表置き（標高27m）及び地下置き（深度100m）の強震計において観測された加速度データ（計６成分）の、8イベントのP波10秒間及び9イベントのS波20秒間のデータについてARモデルとFFTによるスペクトルを求め、地表と地下のスペクトルの振幅比を算出した（図１）。サンプリングレートは、2002年と2003年のイベントは200Hz、それら以外は100Hzである。ARモデルの係数は、Yule-Walker法で求めた。Yule-Walker法では、あらかじめARモデルの次数を決める必要があるので、最適次数を求めるために次数ごとの赤池情報量規準（AIC）を算出した。そうしたところ、次数が大きいほどAICが小さい傾向を示したこと（図２）や、低次のARモデルによるスペクトルは特に低周波領域で平滑化することから（図３）、取り得る最大次数（解析対象サンプル数－２）をARモデルの次数として用いることにした。なお、高次数のARモデルによるスペクトルは、FFTによるスペクトルと良く似た形状になる。今回の解析ではプログラミング言語pythonを使い、FFTは拡張モジュールNumPyのfft.fft()、AICはStatsmodelsのar_select_order().aic、Yule-Walker法に必要な自己相関はPandasのautocorrを使用して算出した。

３．結果

解析の結果、KSRH09観測点の地表/地下のスペクトルの振幅比は、ARモデルとFFTで大きな違いはないことや、詳しく見ると以下の傾向があることが分かった（図４）。

・P波（NS成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT
・P波（EW成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル≈FFT
・P波（UD成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT。特に低周波領域において顕著。
・S波（NS成分）：高周波領域以外では、ARモデル>FFT。特に低周波領域において顕著。
・S波（EW成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル≈FFT
・S波（UD成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT

また、低周波領域において、ARモデルの方がFFTよりもイベントごとのばらつきが大きいように見えた。

４．今後に向けて

今後は解析対象観測点を増やし、ARモデルによる地表/地下のスペクトル振幅比の持つ性質の検出とその原因の考察を行い、ARモデルのスペクトルが特に低周波領域での地盤増幅特性の評価に有効であるかどうか、検討していく予定である。

[謝辞]

国立研究開発法人防災科学技術研究所のKiK-netのデータ(防災科学技術研究所、2019)を使用させていただ

© The Seismological Society of Japan

きました。ここに記して感謝いたします。

[参考文献]

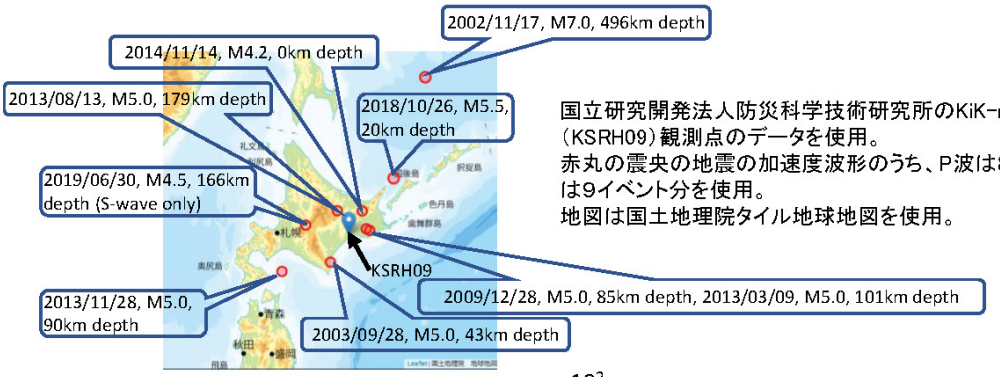
Hoshiba M (2013) Real-time correction of frequency-dependent site amplification factors for application to earthquake early warning. Bull Seismol Soc Am 103:3179–3188. doi:10.1785/0120130060
Ogiso M, Aoki S, Hoshiba M (2016) Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors. Earth, Planets and Space 68:83. doi:10.1186/s40623-016-0467-4
防災科学技術研究所 (2019) NIED K-NET, KiK-net. doi: 10.17598/nied.0004

© The Seismological Society of Japan

# 自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価の試行

Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

鎌谷紀子・小木曽仁（気象研究所）




国立研究開発法人防災科学技術研究所のKiK-net白糠南（KSRH09）観測点のデータを使用。
赤丸の震央の地震の加速度波形のうち、P波は8イベント、S波は9イベント分を使用。
地図は国土地理院タイル地球地図を使用。

図1. 解析に使用した観測点及び地震の震央

図2. ARモデル推定に使用する次数とAICの関係

次数が大きいほどAICが小さくなる。（2002/11/17のイベントのS波20秒間のNS成分を使用。サンプリングレートは200Hz, サンプル数は4000。）

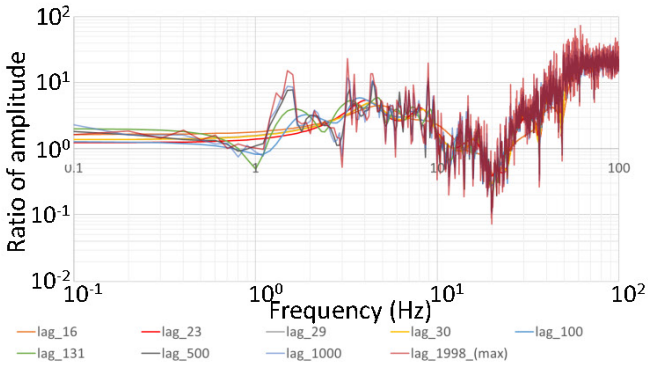



図3. ARモデルのスペクトルで見た地表/地下の振幅比の次数による違い

低い次数のARモデルのスペクトルは平滑化した形状を呈するので、地表/地下の振幅比のグラフも平滑化したものになる。特に低周波領域では低次数での平滑化の度合いが大きくなり、次数による振幅の違いが大きくなる。（2002/11/17のイベントのP波10秒間のNS成分を使用。サンプリングレートは200Hz, サンプル数は2000。）

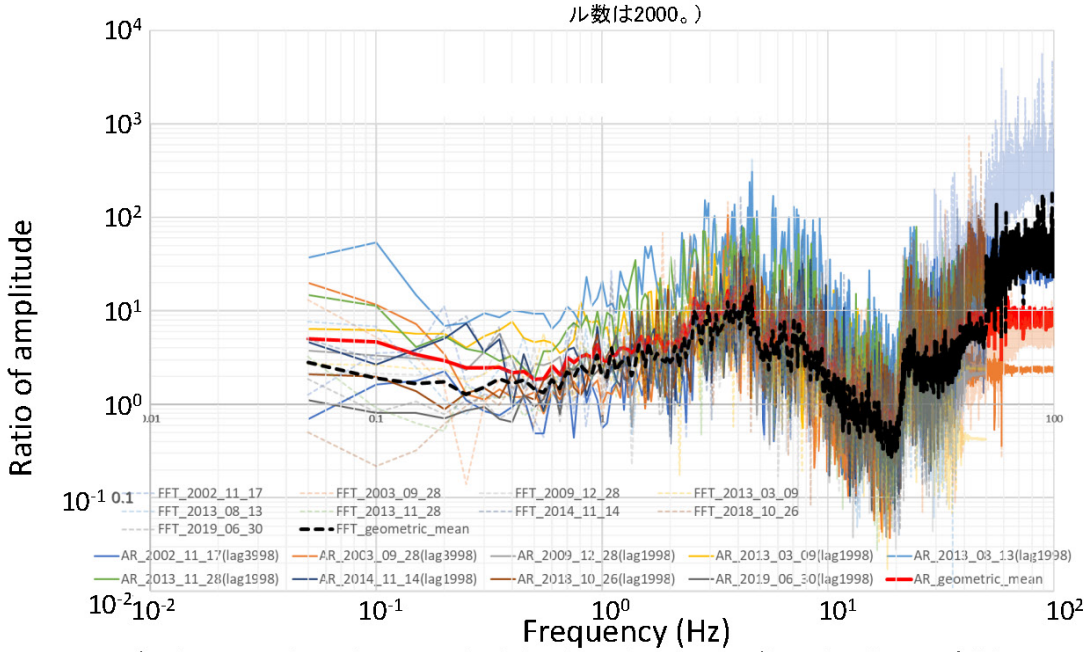



図4. ARモデルとFFTによるスペクトルで見た地表/地下の振幅比の比較（S波20秒間NS成分）

実線はARモデル、点線はFFTによるスペクトルから算出した地表/地下の振幅比。赤実線と黒点線は、それぞれARモデル及びFFTによる振幅比の幾何平均（相乗平均）を示す。振幅比はARモデルとFFTで大きな違いはないが、S波20秒間のNS成分のデータを使用した解析では、ARモデルは高周波領域以外ではFFTよりやや大きめであり、特に低周波領域においてその傾向が顕著であることが示された。

© The Seismological Society of Japan

# Rupture propagation effects of moderate-sized earthquakes off Fukushima prefecture derived from source spectra

*Toshimi SATOH[1]

1. Shimizu Corporation

本研究では、2016年8月から観測が開始されたS-netとK-NET、KiK-netの強震記録を用いて、2021年2月13日の福島県沖の地震(Mw7.0)の震源域の11の中規模地震の破壊伝播方向と震源スペクトルに寄与する破壊伝播効果について検討した。2016年8月から2021年3月までの震源深さ40～60kmの地震であり、本震と同タイプ(down-dip compression)の4つのスラブ内地震(Mw4.4-5.0)と7つのプレート境界地震(Mw4.7-6.3)を対象とした。このMwの範囲は、本震の強震動生成域を経験的グリーン関数法で推定するための要素地震の選択を念頭においたものである。震源距離150km以下の水平成分のS波部を対象とし、最大加速度が200cm/s2以上のデータは対象外とした。RT変換し、フーリエ振幅の2乗和の平方根を検討対象とした。 基準地震に対する同一観測点での他の地震のフーリエ振幅スペクトル比を距離補正して、観測震源スペクトル比を算出した。そして、すべり量とライズタイムが一定でユニラテラル破壊を仮定し、コーナー周波数より高周波数の震源スペクトル比が破壊伝播方向と震源での波線の方向のはさむ角に依存するモデルを用いて、破壊伝播方向を推定した。基準地震及び他の10地震の破壊伝播方向を-170°～180°を10°刻みで与えて、基準地震と他の10地震の断層面内での破壊伝播方向を、観測震源スペクトル比をターゲットにグリッドサーチで推定した。7つの周波数帯域(0.2-0.5、0.5-1.0、1-2、2-3、3-5、5-7、7-10Hz)で算出した観測震源スペクトル比は1-5Hzで方位依存性が大きく、特に、2-3Hzで顕著であった。観測震源スペクトル比から推定された対象地震のコーナー周波数は、ほとんどの地震で1-4Hzであることから、大規模地殻内地震で指摘されているディレクティビティパルスの周期の地震規模依存性と同様に、地震規模に依存していると考えられる。一方、0.2～0.5Hzの観測震源スペクトル比はラディエーションパターンの方位依存性と類似していた。そこで、本研究では、2-3Hzの観測震源スペクトル比を破壊伝播方向を推定した。なお、基準地震との方位角の差が45°以上のデータは除いた。S波速度に対する破壊伝播速度の比は0.7と0.8のケースを検討し、差は極めて小さいものの観測との残差が小さい方の0.7を用いた。 モデルスペクトル比は、観測震源スペクトル比の方位角依存性を震源距離150kmまで良く再現しており、4つのスラブ内地震はupdip方向の破壊伝播が推定された。すなわち、西の陸側に向かう伝播方向である。一方、プレート境界地震は5つはupdip方向、2つはdowndip方向の破壊伝播が推定された。downdip方向に伝播した1地震は、pure updip方向であるが、他の1地震はほぼ水平に近い方向であった。この水平に近い破壊伝播の地震と5つのupdip方向の破壊伝播の地震は、南方向に近い破壊伝播である。pure updip方向の破壊は、震源から西の陸側に向かう伝播方向である。4つのスラブ内地震の全無限弾性体のSV波とSH波の2乗和の平方根のラディエーションパターンは、いずれも震源の西側の陸域で大きく、破壊伝播でスペクトルレベルが大きくなる領域と重なっていることがわかった。したがって、観測震源スペクトル比は全観測点での平均より、陸域の観測点での平均が大きくなり、S-netでの平均は小さくなっている。陸域の観測点での平均をターゲットに短周期レベル(コーナー周波数より高周波数側の加速度震源スペクトルの一定レベル)を推定した結果、全観測点での平均をターゲットにした場合の2倍程度大きい値が推定された。一方、プレート境界地震のラディエーションパターンが大きくなる領域は、陸域では沿岸部ではなく震源から遠い内陸部であり、破壊伝播効果によりスペクトルレベルが大きくなる領域はほとんど重なっていない。したがって、陸側に破壊伝播する1地震を除き、全観測点での平均をターゲットにした場合と陸域の観測点での平均をターゲットにした場合の短周期レベルの違いはほとんどなかった。2021年福島県沖の地震が震源から同心円状に破壊したとすると、1日以内の余震分布や震源インバージョンによるすべり量の大きな領域に対応する破壊伝播方向に近いのは、2017年7月15日のスラブ内地震(Mj4.6)であり、全観測点の観測震源スペクトル比から推定されたコーナー周波数は3.16Hz、Bruneの応力降下量は27MPaであった。 謝辞：本研究では防災科学技術研究所のS-net、K-NET、KiK-net、F-net、気象庁の一元化震源情報を用いました。

© The Seismological Society of Japan

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

*Tsukasa Masuda[1], Takuji Yamada[1]

1. Ibaraki University

1. はじめに
茨城県・千葉県東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う地震が定常的に多数発生している。本研究では、2003年1月から2019年12月の期間に茨城県沖・千葉県東方沖で発生した小地震 (4.2 <= Mw <= 5.0) のうち、2. で説明するとおり、太平洋プレートの摩擦特性を反映していると考えられる576地震について、S波を用いて応力降下量を解析した。

2. 解析対象地震と解析手法
2003年1月から2019年12月に茨城県沖・千葉県沖で発生した 4.2 <= Mw <= 5.0 の地震の内、震源が太平洋プレート上面から15 km以内の地震について、Yamada *et al.* (2021)の手法を用いて応力降下量を解析した。まず、各解析対象地震に最も震源の近いMw 3.5の地震の観測波形を経験的グリーン関数とした。また、周波数領域にて解析対象地震の観測波形を経験的グリーン関数の波形で除し、観測点ごとにスペクトル比を求めることにより、震源の情報を抽出した。次に、地震の震源スペクトルはオメガ2乗モデル（Boatwright, 1978）に従うと仮定し、スペクトル比から解析対象地震および経験的グリーン関数地震のコーナー周波数を求めた。さらに、Madariaga (1976) の円形断層モデルに従って、コーナー周波数から応力降下量を推定した。この操作を解析対象地震すべてについて実行し、576地震の応力降下量を求めた。

3. 結果および考察
緯度経度0.1度ごとに平滑化した応力降下量の解析結果を図1に示す。茨城県中部沖 (図1. の領域A) で応力降下量の値が大きく、スロースリップの発生が報告されている千葉県沖 (領域B) で小さい特徴が見られる。この領域AとBの応力降下量の差は、t検定より危険率5%で有意な差であることが確認できた。また、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域 (図1. の領域C) では、応力降下量の値が大きい。これは、過去の大地震大すべり域で応力降下量が大きいと主張しているYamada *et al.* (2017) の結果と調和的であり、応力降下量の空間分布から剪断強度の不均質性の推定ができると主張しているYamada *et al.* (2021) の結果を支持する。今後、P波についても解析を行うとともに、応力降下量の時間変化の有無を確認しながら、摩擦特性の時間変化についても議論したい。

謝辞：本研究では、Hi-net （防災科学技術研究所）、気象庁、国土地理院、国立大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

© The Seismological Society of Japan

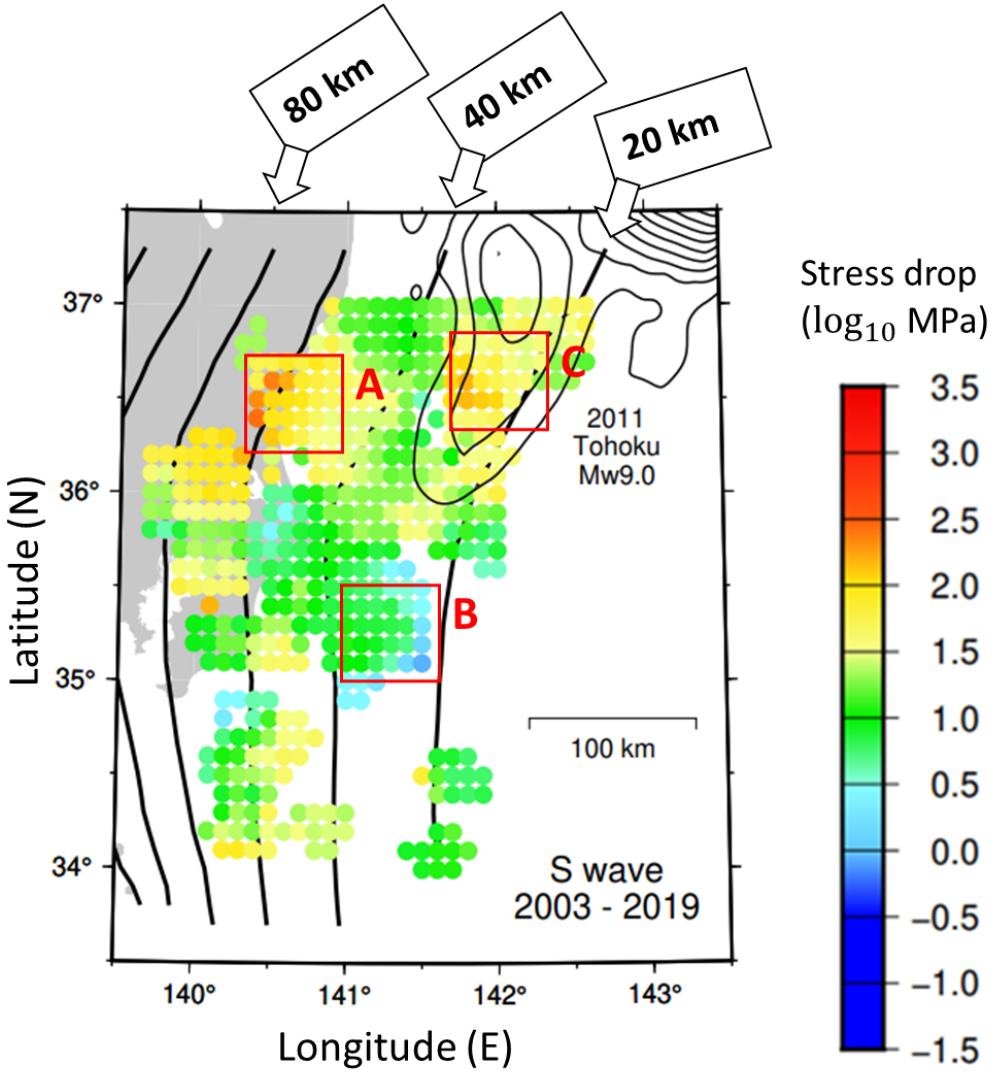



図１． S波の解析から得られた応力降下量の空間分布。グリッドポイント間隔は緯度経度0.1度ごとである。各グリッドポイントの値は、グリッドポイントから半径20 km以内の地震の応力降下量の平均値を示す。黒のコンターは、2011年東北地方太平洋沖地震のすべり分布を示し、その間隔は2 mごとである(Iinuma *et al.*, 2012)。太い黒線は、沈み込む太平洋プレート上面の深度を表しており、線間隔は20 kmである(Kita *et al.* 2010; Nakajima and Hasegawa 2006; Nakajima *et al.* 2009) 。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S22. Advances in Seismology using AI

P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P8 (ROOM P)

## [S22P-01] Validation of Seismic Phase Picking Using Deep Learning Models Trained by Hakone Volcanic Earthquake Data

○Ahyi KIM[1], Yuji Nakamura[1], Umi Hatakeyama[1], Hiroki Uematsu[1], Yohei Yukutake[2], Yuki Abe[3]
（1.Yokohama City University, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Hot Springs Research Institute, Kanagawa）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S22P-02] Automatic reading of P-wave first motion amplitudes of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory using a deep learning technique

○Makoto NAOI[1], Youqing CHEN[1], Rui TANAKA[1], Yutaro ARIMA[2] （1.Kyoto Univ., 2.JOGMEC）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S22P-03] Improvement of the Single Station Algorithm in Earthquake Early Warning Using Machine Learning Technique

○Shunta NODA[1], Masato UKAI[1] （1.Railway Technical Research Institute）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Validation of Seismic Phase Picking Using Deep Learning Models Trained by Hakone Volcanic Earthquake Data

*Ahyi KIM[1], Yuji Nakamura[1], Umi Hatakeyama[1], Hiroki Uematsu[1], Yohei Yukutake[2], Yuki Abe[3]

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

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（主に地殻内地震）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も問題無い事例もあるが、検出精度が有意に悪くなる例も報告されている。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、既存の学習済みモデルが適用が難しい可能性がある。そこで、本研究ではZhu and Beroza(2018)によって構築されたPhaseNetの学習済みモデル（model0）と、そのアーキテクチャを利用して、箱根火山で記録された1999年から2020年までの約3万個のイベントから約22万個の地震波形データを用い、ゼロから学習を行ったモデル（model1）とmodel0を初期値に前述の箱根データでファインチューニングしたモデル（model2）を作成し、その性能評価を行った。model1とmodel2の学習では220424個の地震波形をランダムに振り分け、75%を訓練データ、25%を検証用データとして用い、epoch100まで計算を繰り返し各モデルのパフォーマンスを検証した。その結果model1ではepoch8で、model2ではepoch89でF1値が最高となり、それぞれ、P波で0.870, 0.867, S波で0.782, 0.776という、わずかにmodel1で高いが、ほぼ同じ結果になった。同じ検証用データを用いてmodel0でのF1値を計算したところ、P波で0.832、S波で0.707となり、主にS波で大きな改善が見られた。また、これらのモデルを訓練にも検証にも用いていない2021年1月から5月まで記録された947個の波形に適用したところ、model0, model1、 model2でそれぞれ、P波、0.916、0.942、 0.941、S波、0.760, 0.817、0.814という結果になった。検証用データの時と同様にmodel1とmodel2でわずかにmodel１が良い値を示し、model0に比べて箱根の訓練データを用いて学習したモデルで良いパフォーマンスを示す事がわかった。検証用データで全体的に性能が落ちるのは2009、2011、 2015年の非常に活発な群発地震のデータを多く含むためである可能性がある。本研究では訓練データに多様性を持たせるために、オリジナルのPhaseNetでの訓練データ作成方法を踏襲し、波形をある程度長く（90秒）切り出し、そこからP、S波を含む30秒をランダムに切り出して訓練、検証用データとしている。しかし活発な群発地震では90秒の間でも他の地震が入り込むことがあり、判定の正誤検証に問題を招く場合がある。今後はそのような短いタイムウィンドウに多数のイベントを含むデータについて、該当箇所をノイズで置き換えるなどの処理を施し、再度学習検証を行う予定である。また、このモデル他の火山地帯での地震にも適用し、火山地帯の地震波検測への汎用化の可否を検証する。

© The Seismological Society of Japan

# Automatic reading of P-wave first motion amplitudes of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory using a deep learning technique

*Makoto NAOI[1], Youqing CHEN[1], Rui TANAKA[1], Yutaro ARIMA[2]

1. Kyoto Univ., 2. JOGMEC

指向性が公表されておらず，設置状態によって感度が変化するAEセンサの記録に対しては，振幅を用いた解析は簡単ではないが，これらの特性を適切に補正することで個々のAEイベントのモーメント・テンソル解（以下MT解）を推定できる．Yamamoto et al. (2019; GJI), Naoi et al. (2020; GJI), Tanaka et al. (2021; GJI)では，シェールガス・オイル開発における水圧破砕亀裂進展プロセスの解明を目的とした室内実験で記録されたAEに対し，P波初動極性・振幅を読み取り，個々のセンサ感度及び指向性を補正して逆解析を行うことで，MT解の推定に成功している．

Yamamoto et al. (2019)，Naoi et al. (2020)では，解析対象となるイベントが１供試体あたり多くても数百個程度だったため，極性・振幅は手動で読み取られたが，Tanaka et al. (2021)では，１供試体あたり数千個，合計10供試体で５万個に及ぶAEイベントを解析対象としており，手動処理は不可能であった．そこでTanaka et al. (2021)では，１次元の畳み込みニューラルネットワークを用いて up, downの二値分類問題としてP波の初動極性を読み取り，結果がup（down）であれば理論走時周辺の波形の最大（最小）値を初動振幅値とする，という方法で逆解析に用いる振幅値を取得した．しかし，この方法には，１）理論P波走時と初動ピーク値を取るタイミングの差が大きい場合に振幅値を誤って読み取る可能性が高い，２）波形のどの場所を参照したかの情報は得られないので，特にSN比が低い波形において，波形を目視で確認しても読み取りの妥当性が判断し難い，３）訓練・検証は SNの良い波形を用いて行っているのに対し，実際の推論はよりSNが悪いものに対しても適用しているので，検証データで得られた性能指標が，実際に適用する場合の読み取りの精度を表していない，という問題があった．

そこで本研究では，初動極性ではなく，初動ピーク値をとる時刻を読み取る深層学習ネットワークを構築し，訓練・検証・テストに，SNの良い波形とノイズ波形を合成したものを用いることで，上記の問題を改善して，MT解析に必要な初動振幅値を取得することを試みた．解析には，Zhu and Beroza (2019)が実体波の走時検測に用いたものと類似したUnet型（Ronneberger et al. 2015）のアーキテクチャを採用した．ネットワークへの入力は，10 MHz samplingで収録されたP波走時前後512 サンプルの波形を用いた．出力は512サンプルの波形の各ポイントがP波の初動ピーク時刻に対応する確率値とし，教師データにおいては，読み取り初動ピーク値のタイミングで１の値を持つ，幅1.0 μs（10サンプル）の三角形形状の確率値を与えて訓練を実施した．

訓練・検証・テストデータは，Naoi et al. (2020)が実施した米国産イーグルフォード頁岩で行った2実験，Tanaka et al. (2021)で実施した山口県産黒髪島花崗岩で行った10実験，及び新たに実施した香川県産庵治花崗岩で行った1実験で得られたAEデータの中からSN比が良い波形を選び，実験開始直後のAEシグナルが含まれていない時間帯のノイズ記録を合成することで作成した．このとき，シグナルが含まれている波形に適当な倍率をかけて振幅を調整することで，さまざまなSN比の波形を再現した．また，訓練データの作成においては，各シグナル波形に対して10個のノイズ波形と組み合わせることでデータを水増しし，合計423 732個の波形データを用意した．訓練後のネットワークをテストデータに適用した結果に対し，出力スコアの最大値が0.5以上でかつ読み取り時刻の走時差が2サンプル以下のものを正解と定義して性能を評価した結果，precisionが0.888，recallが0.965，accuracy が0.866，F1値が0.925であった．なお，テストデータにはSN比が非常に低いイベントが含まれており，読み取り時刻の振幅値のプレシグナルに対するSN比が1.5以上

© The Seismological Society of Japan

という条件でデータを選別したところ，precisionは0.962まで上昇した.

本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)，科研費 (16H04614；21H01191)，文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の援助により行われました.

© The Seismological Society of Japan

# Improvement of the Single Station Algorithm in Earthquake Early Warning Using Machine Learning Technique

*Shunta NODA[1], Masato UKAI[1]

1. Railway Technical Research Institute

気象庁の緊急地震速報や新幹線の早期地震警報システムでは、それぞれの観測点ごとに震央距離・方位やマグニチュードを推定するアルゴリズムが使用されている（以下、単独観測点処理；例えば、Yamamoto & Tomori [2013]）。単独観測点処理における問題として、他の地震計のデータを使わずに独立して推定を行うため、震央距離などの推定精度が低いという点が挙げられる（ただしその代わり、警報の即時性が高いなどのメリットがある）。

以前の新幹線早期地震警報システムでは、震央距離の推定においてB-Δ法と呼ばれる手法を使用していた（Odaka et al. [2003]）。現在はこの手法を更新し、C-Δ法と呼ばれる手法の使用が始まっている（岩田・他 [2016]）。この手法は、P波の極初動部分（1秒）の10Hz以上の加速度振幅の立ち上がり（＝傾き：Cと呼ぶ）が震央距離Δと負の相関を持つことを利用したものである（Okamoto & Tsuno [2015]）。

本研究では、単独観測点処理において、このC-Δ法の代わりにニューラルネットワーク法（例えば、He et al. [2016]）を用いて震央距離を推定し、推定精度の検証を行った。手法の適用にあたって学習させたデータは、（国研）防災科学技術研究所の強震観測網K-NETで観測されたMj4.0以上かつ震央距離200km以内の16,562個（データ全体の80%）の上下動成分加速度データ（P波開始から2秒間）である。検証に使用したデータは同条件の4,161個のデータである（学習に使用していない残り20%のデータ）。なお学習用と検証用のデータは無作為に分割している。なお、ここでは検証のため、P波開始時刻は手動で検測したデータを用いている。

ここではニューラルネットワーク法として、畳み込みニューラルネットワーク法（He et al. [2016]）を用いた。これにより推定された震央距離の精度は、対数誤差RMSで約0.25となった。C-Δ法による震央距離の推定精度は同指標で約0.31であるため、畳み込みニューラルネットワーク法の使用により、精度が約19%向上することが明らかになった。なお岩田・他[2016]は、B-Δ法（Odaka et al. [2003]）からC-Δ法へ手法を更新した際、6%程度推定精度が向上することを指摘しているが、本研究ではこれと比較してさらに大きな精度改善が期待される結果を示している。

今後はさらなる震央距離推定手法の改善、震央方位やマグニチュードなどへの適用性の検証、および新幹線早期地震警報システムへの機械学習法の導入に向けた検討を継続する計画である。

© The Seismological Society of Japan

Poster session (Oct. 14th) | Special session | S23. Deepening seismic data analysis and modeling based on Bayesian statistics

# P

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM ROOM P9 (ROOM P)

## [S23P-01] Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for understanding the current state of postseismic deformation and its short-term prediction following the 2003 Tokachi-oki earthquake

○Masayuki KANO[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Yoichi Ishikawa[3], Kazuro Hirahara[4,5] （1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Faculty of Science, Kyoto University, 3.JAMSTEC, 4.Riken, 5.Kagawa University）

3:30 PM - 5:00 PM

## [S23P-02] Estimation of depth-dependent variations in seismic velocity in the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake based on the MCMC approach

○Takahiro SHIINA[1], Masayuki KANO[2], Sumito KURATA[3], Aitaro KATO[4] （1.Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 4.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo）

3:30 PM - 5:00 PM

©Seismological Society of Japan

# Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for understanding the current state of postseismic deformation and its short-term prediction following the 2003 Tokachi-oki earthquake

*Masayuki KANO[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Yoichi Ishikawa[3], Kazuro Hirahara[4,5]

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Faculty of Science, Kyoto University, 3. JAMSTEC, 4. Riken, 5. Kagawa University

プレート沈み込み帯で観測される様々な時定数を持つ断層すべり現象は、主にプレート境界面の摩擦特性の違いを反映していると考えられる[例えばYoshida and Kato, 2003]。従って摩擦特性を観測データから推定することにより、より定量的にプレート境界のすべりの挙動を知ることができる。Kano et al. [2013]は、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、断層すべり速度を観測データとしてアジョイント法により同化し、プレート境界の摩擦特性を推定する手法を開発し、数値実験を行った。さらに、2003年十勝沖地震の地震後15日間の余効すべりの断層すべり速度[Miyazaki et al. 2004]を同化し、摩擦特性の空間分布の推定を通して、その後15日間の余効すべりの短期推移予測性能が向上することを示した[Kano et al. 2015]。しかしながら、Kano et al. [2015]において使用したデータは、運動学的インバージョンにより推定されたプレート境界における日毎の断層すべり速度であり、インバージョンの際のすべりの平滑化によるバイアスが含まれている可能性がある。そこで、Kano et al. [2020]では先行研究で開発したアジョイント法を改良し、GNSSデータの地震後の日毎の累積変位を直接データ同化することにより摩擦特性を推定し、断層すべりの現状把握と短期推移予測を行う手法を開発した。
その結果、地震後15日間のGNSSの累積変位を説明可能な摩擦特性が、Kano et al. (2015)と同様、A–B ~ O(10 kPa), A ~ O(100 kPa), L ~ O(10 mm)として推定され、摩擦特性の推定により、その後15日間のGNSSデータの短期推移予測精度が向上することが分かった。一方で、得られた摩擦特性のオーダーは同じものの、Kano et al. [2015]で推定された摩擦特性を用いると、GNSSデータの海溝方向の変位が最大数十%程度過小評価されることが分かった。これはデータ同化に用いる観測データの違い、すなわち断層すべり速度推定に用いるすべりの平滑化の影響、を反映していると考えられる。
また、摩擦特性に加え、数値シミュレーションにおける初期条件（地震発生直後の断層すべり速度）の同時推定を行い、摩擦特性の推定のみを行った場合の結果と比較した。よい初期条件が得られている場合には、GNSSデータの再現と短期推移予測という観点で両者の結果に大きな差異は見られなかった。実際の問題においては、運動学的インバージョンで得られた断層すべり速度を初期条件として用いるのが現実的であり、またこの初期条件には上述の通りバイアスが含まれていることから、初期条件と摩擦特性を同時に推定するのがよいと考えられる。

© The Seismological Society of Japan

# Estimation of depth-dependent variations in seismic velocity in the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake based on the MCMC approach

*Takahiro SHIINA[1], Masayuki KANO[2], Sumito KURATA[3], Aitaro KATO[4]

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震波速度構造は地震の震源位置を決定するために必要不可欠な情報であるとともに，震源域周辺の物質構造や物理特性を検討・議論する際の基礎となる．このため，地震波速度構造を精度良い推定およびその不確かさを定量的に評価することは地震発生場の環境や地震活動のメカニズムを理解する上で非常に重要となる．
椎名・加納 [2021, JpGU]ではマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）を用いた断層近傍，具体的には鉛直に近い速度境界面が存在する領域，において震源位置と境界を挟んだ異なる2つの1次元速度構造を同時に推定する手法を提案した．彼らの手法では，割り当てられる1次元速度構造をデータ駆動的に選択することで観測点をクラスタリングすることで，水平方向に速度構造が大きく変化する領域における震源位置や速度構造の特徴を精度良く推定することを可能とした．
本発表では，椎名・加納 [2021, JpGU]の手法を用いて2004年新潟県中越地震震源域周辺の速度構造の推定を行う．特に，2004年新潟県中越地震発生直後に行われた臨時観測で取得された稠密な地震観測データ[e.g., Kato et al., 2009]に基づき，震源域周辺における地震波速度構造の特徴を再検討する．なお，椎名・加納 [2021, JpGU]の手法では，観測点のクラスタリング結果から地表面における速度境界の分布を推測することができる．しかしながら，地下の速度境界面の形状に関する情報を直接得ることができない．そこで，MCMC法でサンプリングされたモデルパラメータをベースにした速度境界面の形状，特に地表面からの傾斜角の検出可能性についても議論する．

謝辞：本研究では新潟県中越沖地震合同観測グループにより取得されたデータを使用させていただきました．また，JST CREST [JPMJCR1763]の支援を受けました．記して感謝申し上げます．

© The Seismological Society of Japan

# S24

Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities (ROOM P)

## [S24P-01] Public Relations Committee

○佐藤 利典[1]（1.The Seismological Society of Japan）

## [S24P-02] Newsletter Editorial Board

○豊国 源知[1]（1.The Seismological Society of Japan）

## [S24P-03] Strong Ground Motion Committee

○干場 充之[1]（1.The Seismological Society of Japan）

## [S24P-04] Committee for School Education

○加納 靖之[1]（1.The Seismological Society of Japan）

## [S24P-05] Disaster Investigation Committee

○吾妻 崇[1]（1.The Seismological Society of Japan）

## [S24P-06] Committee on Summer School for Kids

○佐藤 明子[1]（1.The Seismological Society of Japan）

## [S24P-07] Geoparks Assistance Committee

○松原 誠[1]（1.The Seismological Society of Japan）

## [S24P-08] Committee for Seismology Outreach

○久田 嘉章[1]（1.The Seismological Society of Japan）

©Seismological Society of Japan

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-01] Public Relations Committee

○佐藤 利典[1] （1.The Seismological Society of Japan）

広報委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-02] Newsletter Editorial Board

○豊国 源知[1] （1.The Seismological Society of Japan）

学会情報誌編集委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-03] Strong Ground Motion Committee

○干場 充之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

強震動委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-04] Committee for School Education

○加納 靖之[1] （1.The Seismological Society of Japan）

学校教育委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-05] Disaster Investigation Committee

○吾妻 崇[1] （1.The Seismological Society of Japan）

災害調査委員会の活動を紹介します

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-06] Committee on Summer School for Kids

©Seismological Society of Japan

○佐藤 明子[1] （1.The Seismological Society of Japan）

普及行事委員会の活動を紹介します

---

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-07] Geoparks Assistance Committee

○松原 誠[1] （1.The Seismological Society of Japan）

ジオパーク支援委員会の活動を紹介します

---

(Thu. Oct 14, 2021 3:30 PM - 5:00 PM  Introduction of committee activities)

## [S24P-08] Committee for Seismology Outreach

○久田 嘉章[1] （1.The Seismological Society of Japan）

地震学を社会に伝える連絡会議の活動を紹介します

©Seismological Society of Japan