

Mon. Sep 16, 2019

Poster session (Sept. 16th) General session : S01. Theory and Analysis Method

5:15 PM - 6:45 PM JST 8:15 AM - 9:45 AM UTC ROOM P International Conference Halls II and III
--

S01P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-01] The fundamental nature of a transient elastic response to prompt gravity perturbations

*NOBUKI KAME¹, Masaya Kimura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-02] Comparison between ray paths calculated by the pseudo-bending method and those calculated by the shortest path method

*Shoji Sekiguchi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-03] XFEM simulation of rupture direction on branching fault

*Daiki Yamashita¹, Hiroyuki Goto¹, Sumio Sawada¹ (1. Dynamics of Foundation Structures, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto university)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-04] Numerical simulations of weak localization of scalar waves based on the finite difference method

*Masanobu Sato¹, Jun Kawahara¹ (1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-05] Estimation of surface wave velocities by using the rotation and divergence of seismic wavefield in the Kanto sedimentary basin

*Kaori Shimazu¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura² (1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-06] Fractional fluctuation of crustal medium parameter and seismic amplitude fluctuation: A study based on finite-difference simulations

*Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura² (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-07] Spatial variation of seismic response due to the Kanto sedimentary basin inferred from teleseismic S waves

*Yue Nakagawa¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura² (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-08] Relation between temporal variation on Auto Correlation Function of Ocean-Bottom Seismometers' records and wind vectors above the sea

*Miyuu Uemura¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Ryota Hino³, Masanao Shinohara⁴ (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 4. Earthquake Research Institute, Tokyo University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-09] One-step waveform inversion of ScS reverberations for the upper mantle discontinuity.

*Jumpei Maruyama¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Nozomu Takeuchi¹ (1. Earthquake research institute, the University of Tokyo)

Poster session (Sept. 16th) | General session : S02. Seismometry and Monitoring System

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S02P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-01] Performance Investigation of The JMA Strong Motion Velocity-type Seismographs

*Masayuki Tanaka¹, Akio Katsumata¹ (1. Meteorological Research Institute)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-02] The development of a spread type seismic intensity meter equipped with an MEMS acceleration sensor and the application.

*Jun Uchida¹, Masahiro Ooi², Kaoru Yoshioka³, Yoshiya Ouchi¹, Keizo Motohashi¹ (1. Kinkei System Corporation, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Chiba Prefectural Government)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-03] Basic Characteristics of Accelerometer made with Crystal Oscillator (Part 2)

Shigeo Matsuda², Kazuyuki Nakasendo³, *Hitoshi Morikawa¹, Kahori Iiyama¹ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. Clover Tech Inc., 3. Seiko Epson Corporation)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-04] Experimental observation toward the realization of low-cost and high-density strong-motion observation network (2)

*Takashi Akazawa¹, Takamori Ito² (1. Geo-Research Institute, 2. aLab Inc.)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-05] Seismic observation using fiber optics and DAS at Azuma volcano – Estimation of heterogeneities using a dense observation

*Kentarō Emoto¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹, Satoshi Miura¹, Mare Yamamoto¹, Shunsuke Sugimura¹, Takahiro Ueda¹, Ayumu Ishikawa¹, Tsunehisa Kimura² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Schlumberger)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-06] Construction of the seismic observation network around the Sea of Genkai, northwest Kyushu, Japan

*Manami Nakamoto¹, Yoshihiro Sawada¹, Keiji Kasahara¹, Panayotopoulos Yannis¹, Shutaro Sekine¹, Shintaro Abe¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-07] Development of a WIN/WIN32 format seismic waveform data reader

*Takuto Maeda¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-08] Development of software for strong-motion seismometers using RaspberryPi

*Takamori Ito¹ (1. aLab Inc.)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-09] **An investigation into the optimal number of bins for phase picking based on the probabilistic density function of seismic wave amplitudes**

*Mitsutaka Patrick Oshima¹, Hiroshi Takenaka² (1. Shimizu Corporation, 2. Okayama University)

Poster session (Sept. 16th) | General session : S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S03P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-01] Detection of vertical motion caused by 2018 Boso slow slip using ocean bottom pressure gauges

*Koichi Murata¹, Toshinori Sato¹, Hajime Shiobara², Tomoaki Yamada², Masanao Shinohara² (1. Chiba University, 2. ERI)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-02] Characteristics of laser extensometers and their detection ability of slow slips

*Akio Katsumata¹, Akiteru Takamori², Akito Araya², Masayuki Tanaka¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA, 2. Univ. of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-03] Systematic detection of slow slip events in Kanto, Japan

*Ryota Takagi¹, Naoki Uchida¹, Kazushige Obara² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-05] **Earthquake potential in Costa Rica based on GNSS observations using three scenarios for the geometry of the Central Costa Rica block.**

*Luis Alejandro Carvajal Soto¹, Takeo Ito², Marino Protti³, Hiroshi Kimura¹ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 3. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), Universidad Nacional de Costa Rica)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-06] Postseismic vertical movement in the past 25 years since the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake in the Okushiri Island

*Masanobu Shishikura¹, Takahiro Miyauchi², Tomoo Echigo³, Tanio Ito⁴, Ryoyu Arai⁵, Yoshio Soeda⁶, Daisuke Takeda⁷, Satoshi Kuribatashi⁸, Taiiku Kobayashi⁹, Hideaki Maemoku¹⁰, Yuzuko Tsukahara² (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Chiba University, 3. Geo-Research Institute, 4. Association for the Development of Earthquake Prediction, 5. Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 6. West Japan Engineering Consultants, Inc., 7. PASCO CORPORATION, 8. Tokushima Prefecture, 9. Kanagawa Prefecture, 10. Hosei University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-07] Development of a real-time buoy observation system for tsunami and crustal displacement and its bottom pressure continuous records

*Narumi Takahashi¹, Kentaro Imai², Motoyuki Kido³, Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda², Yasuhisa Ishihara², Hiroshi Ochi², Ryota Hino³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-08] Deployment of new GNSS-A seafloor geodetic observation stations in 2019

*Yuto Nakamura¹, Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yusuke Yokota² (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-09] Gravity change due to glacier melting in Southeast Alaska: numerical modeling and resultant viscoelastic structure

*Kazuhiro Naganawa¹, Takahito Kazama¹ (1. Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-10] Convergence boundary and velocity between Amur and Okhotsk plates in northern Hokkaido inferred by GNSS velocity data

*Chihiro Ito¹, Hiroaki Takahashi², Mako Ohzono², Nikolay Vasilenko³, Alexander Prytkov³ (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate of Science, Hokkaido University, 3. Institute of Marine Geology and Geophysics, Russian)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-11] Post-seismic crustal deformation on the Aso caldera associated with the 2016 Kumamoto earthquake based on PALSAR-2 time-series analysis

*Yuji Himematsu¹, Taku Ozawa¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-12] GNSS observation at southern Kyushu active shear zone and numerical modeling

*Tsuyoshi Watanabe¹, Koichi Asamori¹ (1. JAEA, Tono Geoscience Center)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-13] EnKF estimation of viscoelastic deformation and viscosity structure - Numerical experiments

*Makiko Ohtani¹ (1. GSJ, AIST)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-14] Estimation on fault slip distributions through viscoelastic inversion using Reversible-jump MCMC

*Fumiaki Tomita¹, Takeshi Iinuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-15] The effect of rheology and geometry on postseismic deformation

*Hiroyuki Hoshino¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Makiko Ohtani², Kazuro Hirahara³ (1. Kyoto University Graduate School, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Kagawa University)

Poster session (Sept. 16th) | General session : S05. Geothermal Science

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S05P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S05P-01] Seismic study using optical fiber and surface seismometers in the Medipolis geothermal field located in southern Kyushu

*Junzo Kasahara^{1,2}, Yoko Hasada^{3,2}, Haruyasu Kuzume², Yoshihiro Fujise⁴, Hitoshi Mikada⁵, Keigo Yamamoto⁵ (1. Shizuoka University, 2. ENAA (Engineering Advancement Association of Japan), 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. WELMA Co. Ltd., 5. Kyoto University)

Poster session (Sept. 16th) | General session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S09P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-01] Detection and relocation of shallow very low-frequency earthquakes along the Nankai Trough based on cross-correlation analysis

*Shunsuke Takemura¹, Youichi Asano², Takanori Matsuzawa², Akemi Noda², Tatsuya Kubota², Katsuhiko Shiomi² (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-02] Comprehensive detection of very low frequency earthquakes in southwest Japan

*Satoru Baba¹, Shunsuke Takemura¹, Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-03] Application of a tremor detection method to the OBS data in Suruga bay

*Takahito Nishimiya¹, Akio Kobayashi¹, Koji Tamaribuchi¹, Hisatoshi Baba² (1. Meteorological Research Institute, 2. Tokai University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-04] Distribution of shallow very low frequency earthquakes influenced by a subducting-ridge

*Akiko Toh¹, Wan-Jou Chen², Wu-Cheng Chi², Doug Dreger³, Satoshi Ide¹ (1. Univ. of Tokyo, 2. Academia Sinica, 3. UC Berkeley)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-05] Trial detection of tremor in eastern Aichi in 1980s using analog seismograms of the Kanto-Tokai observation network

*Takanori Matsuzawa¹, Tetsuya Takeda¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-06] Earthquake activity following very low-frequency earthquakes in the central Ryukyu Trench

*Mamoru Nakamura¹ (1. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-07] Spatial distribution of the variation in characteristic amplitudes of deep low frequency tremors accompanied by L-SSEs.

*Keita Nakamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takanori Matsuzawa² (1. Univ. of Kanazawa, 2. NIED)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-08] Spatio-temporal characteristics of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano

*Takuma Ikegaya¹, Mare Yamamoto¹ (1. Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-09] **Numerical modeling of characteristic waveforms of deep low-frequency earthquakes in volcanic areas: effect of wave resonance**

*Taichi Haruyama¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hiroshima University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-10] Realtime monitoring of seismicity anomaly around Japan using the ETAS model

*Tomoaki Nishikawa¹, Takuya Nishimura¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-11] Small repeating earthquake activities in the inland areas of the Japanese Islands

*Toshihiro Igarashi¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-12] Characteristics of similar earthquakes in the northern part of the Nansei Islands determined by ocean bottom seismometer data

*Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Kazunari Uchida², Takeshi Matsushima², Hiroshi Shimizu², Yusuke Yamashita³, Kazuo Nakahigashi⁴, Tomoaki Yamada⁵, Hideji Abe⁶, Masanao Shinohara⁶ (1. Kagoshima Univ., 2. Kyushu Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 5. ERI, UTokyo (now at JMA), 6. ERI, UTokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-13] Estimation of a plate boundary derived from seismic observations on sea bottom and land in and around northern part of Nansei Syoto islands (6)

*Hiroshi Yakiwara¹, Yukihiro Nakatani¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Yusuke Yamashita², Kazunari Uchida⁴, Takeshi Matsushima⁴, Hiroshi Shimizu⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Kodo Umakoshi³, Hideji Abe⁶, Satoshi Ikezawa⁶, Yoshihito Suwa⁷, Tomoaki Yamada⁷, Masanao Shinohara⁶ (1. Kagoshima Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Nagasaki Univ., 4. Kyushu Univ., 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 6. ERI, Univ. of Tokyo, 7. ERI, Univ. of Tokyo (now at JMA))

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-14] **Role of pore fluid pressure in aftershock occurrence of the 2016 Kumamoto earthquake**

*Kodai Nakagomi¹, Toshiko Terakawa¹, Satoshi Matsumoto², Takahiro Ohkura³, Kazutoshi Imanishi⁴, Masayuki Yoshimi⁴, Takahiko Uchide⁴, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake⁵ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 5. Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-15] The seismic activity at 13 km or more depth range around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Ayaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoto², Azusa Shito², Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-16] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

*Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-17] Inelastic deformation in the lower crust and seismic activity of the Kyushu, Japan

*Yuhei Yuasa¹, Satoshi Matsumoto², Shigeru Nakao³, Takeshi Matsushima², Takahiro Ohkura⁴ (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-18] Waveform twins of equal time difference in seismic ambient noise

*Kei Katsumata¹, Masayoshi Ichianagi¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-19] Evaluation of automatic hypocenter determination (PF method) using dense ocean bottom seismographs

*Koji Tamaribuchi¹, Yuriko Iwasaki², Kazuhiro Iwakiri², Hiroshi Ueno² (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-20] Temporal change in near-source seismic velocity in an earthquake region due to the pore pressure change after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Keisuke Yoshida¹, Akira Hasegawa¹, Yohei Yukutake², Toru Matsuzawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-21] Temporal changes in the scattered wave packets associated with earthquake swarm activity beneath the Moriyoishi volcano

*Yuta Amezawa¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-22] Observation of Microearthquake around Tokuyama Dam (3rd Report)

*Takayuki SANO¹, Mamoru TSUKAMOTO¹, Hideki SODA², Takashi MITSUZUKA³, Fumiaki KANTOH³, Hiroshi KATAO⁴ (1. Japan Water Agency, 2. Japan Institute of Country-ology and Engineering, 3. Chishitsu Keisoku Co., Ltd., 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-23] Uncertainty quantification via large-scale 4DVar data assimilation for frictional inhomogeneity in a slow-slipping fault

*Shin-ichi Ito^{1,2}, Masayuki Kano³, Hiromichi Nagao^{1,2} (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 3. Graduate school of Science, Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-24] High-accuracy mechanism and non-double couple component detection in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake(M7.3)

*Yuto Hayashida¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴, Group for "0.1 Manten" hyper dense seismic observation (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-25] Stress tensor inversion in the focal area of the 2016 M_w 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand (2)

*Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Stephen C Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Jarg Pettinga⁶, Richard H Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, 6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7. University of Otago, Dunedin, New Zealand)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-26] Spatiotemporal characteristics of aftershock activity of the 2011 M9 Tohoku earthquake

*MEITONG DUAN¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-27] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes in Japan: analyses of JMA catalogue**

*Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹ (1. Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-28] Estimating seismic moment of inland earthquakes using the Hi-net and the F-net record

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹, Akemi NODA¹ (1. NIED)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-29] Aftershock areas of inland earthquakes in Japan

*Sachiko Tanaka¹, Tatsuhiko Saito¹, Akemi Noda¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-30] Spatial-temporal and seismogram characteristics of foreshock and aftershock activities for tsunami earthquakes

*Yifeng Liu¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Satoshi Katakami¹ (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Poster session (Sept. 16th) General session : S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

5:15 PM - 6:45 PM JST 8:15 AM - 9:45 AM UTC ROOM P International Conference Halls II and III
--

S15P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-01] Two-sensor microtremor SPAC method: potential utility of imaginary spectrum components

*Ikuko Cho¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-02] Migration of seismic scatterers before and after the 2016 events in Southeastern Korea

*Muhammad Zafar Iqbal^{1,2}, Tae Woong Chung¹ (1. Sejong University, 2. Microseismic Studies Program (MSSP), Islamabad, Pakistan)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-03] Seismic response change of a sand soil after strong motion, revealed by a laboratory transmission experiment

*Tsurugi Kakutani¹, Hironori Kawakata¹, Shiro Hirano¹ (1. Ritsumeikan University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-04] **Identification of Nonlinear Site Responses of Vertical Motions Using Strong Motion Records Observed at the Ground Surface***Toshimi Satoh¹ (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-05] On the liquefaction site distribution of The 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and the examination of damage rate by recent earthquakes

*Shigeki Senna¹, Shigeki Senna¹ (1. NIED)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-06] Consideration of seismotectonic province map by multivariate analysis for sophistication of probabilistic seismic hazard analysis

*Kozo Onishi¹, Takashi Kumamoto¹, Kyoko Mori² (1. Okayama University, 2. Geospatial Information Authority of Japan)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-07] A preliminary waveform tomography for the Tohoku-Oki area of the Japan Trench, Japan, based on a land-ocean unified 3D structure model

*Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3. Earthquake and Tsunami Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-08] Estimation of strong motion generation area source model during the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

*Susumu Kurahashi¹, Kojiro Irikura¹ (1. Aichi Institute of Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-09] Characterized source model for evaluating long-period (more than 2s-) ground motions during the 2014 Northern Nagano earthquake (Mj6.7)

*Yasuhiro Matsumoto¹, Ken Miyakoshi², Kojiro Irikura³ (1. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc., 2. Geo-Research Institute, 3. Aichi Institute of Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-10] Source and strong-motion characteristics of the 2017 Puebla, Mexico, intraslab earthquake (M_W 7.2) based on a waveform inversion*Yujia Guo¹, Ken Miyakoshi¹, Masato Tsurugi¹ (1. Geo-Research Institute)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-11] Estimation of strong motion generation area of the 1985 Michoacan, Mexico, earthquake

*Hiroaki Kobayashi¹, Kentaro Motoki¹, Kenichi Kato¹, Tetsumi Watanabe², Naoya Ishikawa², Yoshiho Kawai² (1. Kobori Research Complex Inc., 2. Chubu Electric Power Co., Inc)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-12] Strong ground motion simulation in the Tokyo metropolitan area of the 1923 Kanto earthquake's strong motion generation area

*Fumino Suzuki¹, Kenichi Kato¹, Tetsushi Watanabe¹, Yusuke Tomozawa¹ (1. KOBORI RESEARCH COMPLEX)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-13] Examination about setting of outer and inner fault parameters for near-fault records simulation at the 2016 Kumamoto earthquake main shock

*Toshimichi Kido¹, Masayuki Nagano² (1. Tokyo University of Science Graduate School, 2. Tokyo University of Science)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-14] Friction law for shallower region than the seismogenic layer: Application to characteristic source model

*Yuko Kase¹, Kiyoshi Irie², Kazuo Dan², Haruhiko Torita² (1. GSJ, AIST, 2. ORI)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-15] Implementation of a forward scattering model in the Numerical Shake Prediction scheme: a case of 2016 Kumamoto earthquake

*Masashi Ogiso¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-16] Seismic isolation system for furniture

*Tesshin Noma¹, Syuntaro Hayashi¹, Ken'ichi Arai¹ (1. Sakae Higashi High School)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-17] Characteristics of strong ground motion records in the Kochi area

*Nobuyuki Yamada¹, Makoto Okubo¹ (1. Kochi University, Faculty of Science and Technology)

Poster session (Sept. 16th) | General session : S18. Education and History of Seismology

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S18P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S18P-01] Practical lesson of earthquake education for private nursery school in Wakayama city

*Nobuyuki Yamada¹ (1. Kochi University, Faculty of Science and Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S18P-02] The 1944 Tonankai Earthquake and the Seismology at That Time

*Masayuki Takemura¹ (1. Nagoya University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S18P-03] Active Fault Research by High School Student, College Student and Citizen

*Takuo Okamoto¹ (1. National Institute of Technology, Fukui College)

Poster session (Sept. 16th) General session : S19. Seismology General and Miscellaneous Contribution
--

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC | ROOM P International Conference Halls II and III

S19P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S19P-01] On smoothing of time series for high frequency seismic signal duration measurements

*Tatsuhiko Hara¹ (1. ISEE, BRI)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S19P-02] Another view of the JMA unified catalog

*Shutaro Sekine¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S19P-03] Development of automatic data acquisition Web application of distributed accelerometer

*Makoto Furuzono¹ (1. Tokyo Denki University)

Poster session (Sept. 16th) | General session : S01. Theory and Analysis Method

📅 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏢 ROOM P
International Conference Halls II and III

S01P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-01] The fundamental nature of a transient elastic response to prompt gravity perturbations

*NOBUKI KAME¹, Masaya Kimura¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-02] Comparison between ray paths calculated by the pseudo-bending method and those calculated by the shortest path method

*Shoji Sekiguchi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-03] XFEM simulation of rupture direction on branching fault

*Daiki Yamashita¹, Hiroyuki Goto¹, Sumio Sawada¹ (1. Dynamics of Foundation Structures, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto university)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-04] Numerical simulations of weak localization of scalar waves based on the finite difference method

*Masanobu Sato¹, Jun Kawahara¹ (1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-05] Estimation of surface wave velocities by using the rotation and divergence of seismic wavefield in the Kanto sedimentary basin

*Kaori Shimazu¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura² (1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-06] Fractional fluctuation of crustal medium parameter and seismic amplitude fluctuation: A study based on finite-difference simulations

*Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura² (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-07] Spatial variation of seismic response due to the Kanto sedimentary basin inferred from teleseismic S waves

*Yue Nakagawa¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura² (1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-08] Relation between temporal variation on Auto Correlation Function of Ocean-Bottom Seismometers' records and wind vectors above the sea

*Miyuu Uemura¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Ryota Hino³, Masanao Shinohara⁴ (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 4. Earthquake Research Institute, Tokyo University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S01P-09] One-step waveform inversion of ScS reverberations for the upper mantle discontinuity.

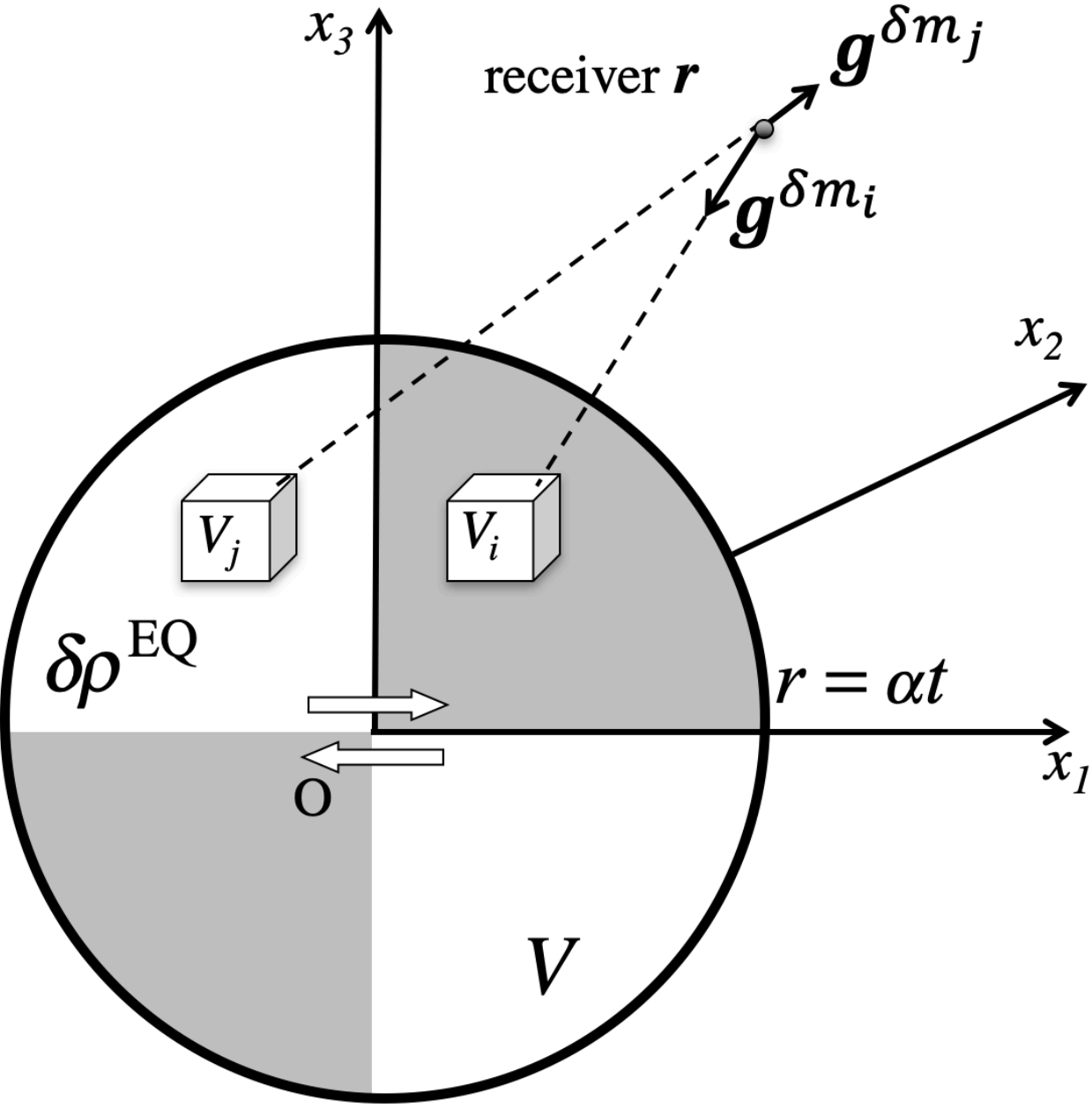
*Jumpei Maruyama¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Nozomu Takeuchi¹ (1. Earthquake research institute, the University of Tokyo)

The fundamental nature of a transient elastic response to prompt gravity perturbations

*NOBUKI KAME¹, Masaya Kimura¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Seismic waves radiated from an earthquake cause the redistribution of mass in the Earth, which in turn induces prompt elastogravity perturbations at all distances before the first arrival of seismic waves. Here we derive an analytic solution for the transient elastic response to prompt elastogravity perturbations induced by a portion of earthquake mass redistribution in an infinite homogeneous isotropic non-self-gravitation elastic medium. This solution discloses the fundamental nature of a so-far unnoticed unusual net-inner-force-free deformation regime that emerges between the onset of an earthquake and P-wave arrival, which we find inherent in action at a distance with the inverse-square law. Our analysis provides physical insights into why a gravimeter installed in the Earth is characterized by significantly decreased sensitivity to earthquake-induced prompt elastogravity perturbations. Reference: Kame, N & M. Kimura, The fundamental nature of a transient elastic response to prompt gravity perturbations, *GJI*, **218(2)**, 2019, 1136–1142, doi:10.1093/gji/ggz196



Comparison between ray paths calculated by the pseudo-bending method and those calculated by the shortest path method

*Shoji Sekiguchi¹

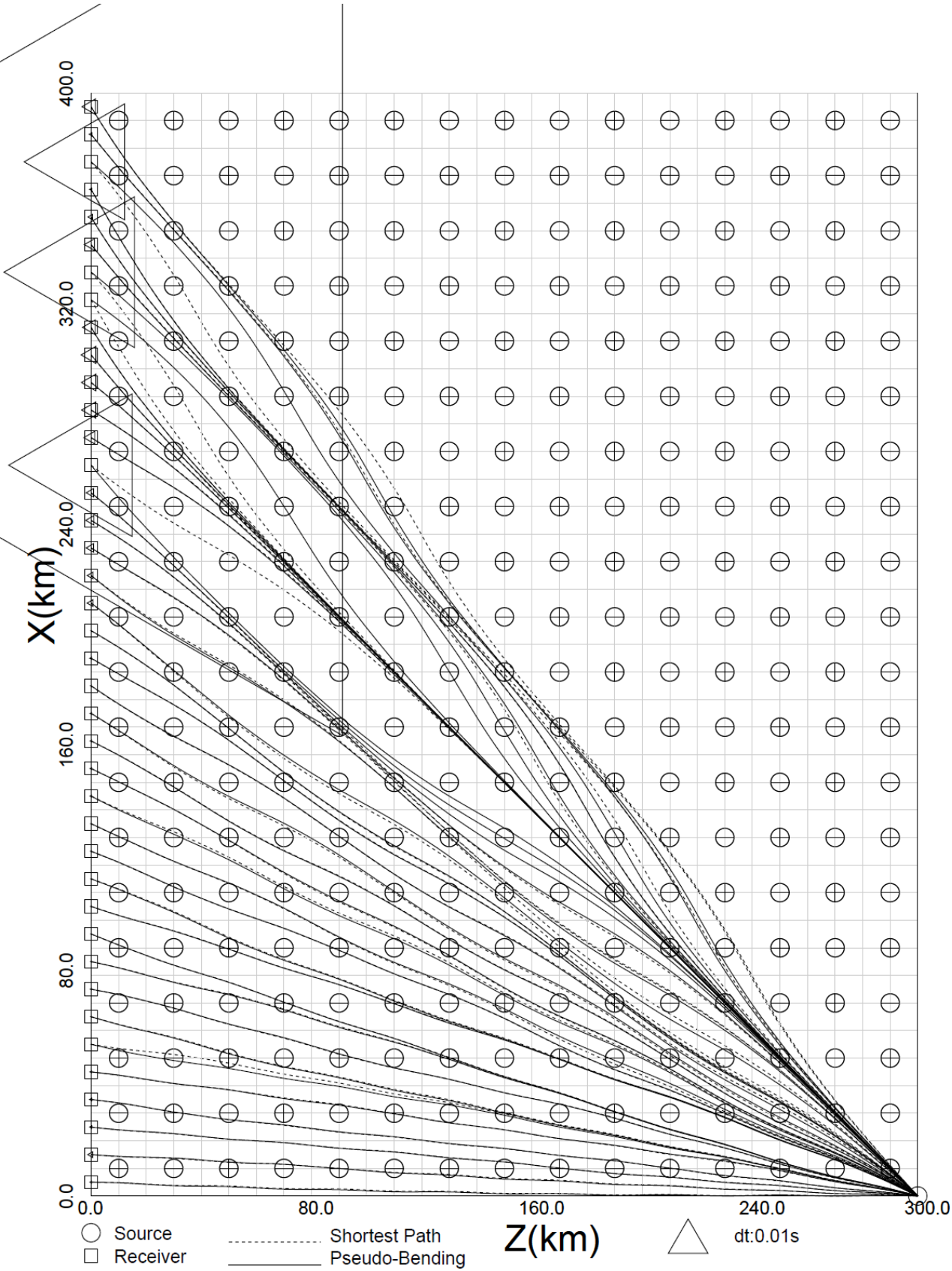
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

不均質構造のなかでの震源から観測点まで波線を計算する場合、得られた波線がglobal minimal solution か local minimal solutionかどうかは常に懸念されていることである。波線計算にpseudo-bending method (Um & Thurber, 1987) はその計算効率の良さから非常に頻繁に利用されているが、得られた解がlocal minimal solutionである可能性は排除しきれない。一方でshortest path method (Nakanishi & Yamazaki, 1986)では計算時間はかかるが得られた解はglobal minimal solutionとなる。本研究では特定の不均質構造において両方法により計算した波線を比較することによりその可能性を検討する。

具体的には2次元のcheckerboard patternの速度構造を想定する。深さ(z) 300km、横(x)の広がり 400kmの矩形領域であり、基準速度は10km/sとし、10km間隔の格子点ごとにx, z各方向にdv: 0km/s, 0.5km/s, 0km/s, -0.5km/sを周期的に与え、格子間は線型補間する。震源位置は(x, z) = (0km, 300km)とする。pseudo-bending methodの場合の初期波線は震源と各観測点を結ぶ直線とする。また、 $P=0.0001s$, $F=1.9$ とした。計算結果を図に示す。図ではshortest path method で得られた波線をpseudo-bending methodで得られた波線で上書き表示している。x=250km付近から遠い観測点では波線経路のずれが大きく走時の差も大きくなっている。tomography解析ではこのようなcheckerboard pattern構造の復元具合を見て解像度について議論する場合が多い。この例のように通過する波線経路が大きくずれている場合が頻発するとその結果について慎重に検討する必要があるだろう。震源から離れた観測点で出やすいのであれば、より震央距離の近い観測点のみを用いるようにする等の改善手段も考えられる。

次にpseudo-bending methodの初期波線をshortest path methodで得られた波線から近接点を除いたものを使用した場合について計算した（図はない）。この場合、波線経路に乖離は見られず走時の差も非常に小さく0.01sより小さい。ただ、x=300km付近の観測点での走時の差が若干大きくなっているが、その理由は不明である。ここに届いている波線を見てみると震源からdv=0.5km/sの高速度領域を真っ直ぐ辿ってきていて深さ100km付近から枝分かれしている。このことに何か関係があるのかもしれない。

以上の例から、pseudo-bending methodでは採用する初期波線によって最終波線がlocal minimal solutionに陥る可能性があることがわかった。また、shortest path methodより得られた波線を初期波線にすることによりその危険を避けられる可能性があることもわかった。



XFEM simulation of rupture direction on branching fault

*Daiki Yamashita¹, Hiroyuki Goto¹, Sumio Sawada¹

1. Dynamics of Foundation Structures, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto university

近年,耐震設計において地震の断層破壊プロセスを考慮した入力地震動が導入されつつある.このとき,断層の破壊方向については中田他 1) により提案された方法が参照されることが多い.例えば,断層トレースが(Fig.1)のような分岐を持つ場合,破壊は分岐に向かって進展すると仮定されるが,2016 年熊本地震本震は,布田川断層と日奈久断層が接続する分岐部から破壊が始まり,阿蘇方面に向かって進展したことが知られている.これは上の仮定と異なる事実である.そこで本研究は,分岐断層の破壊方向の決定条件を明らかにすることを目的とし,断層強度や応力条件のばらつきに着目して拡張有限要素法(XFEM)による数値解析を実施した.

XFEMは,変位の近似式に不連続性を与えるエンリッチ関数を導入することで,クラックや断層といった不連続な変位場を要素分割とは独立に与えることができる手法である.一般的には,節点にエンリッチノードを追加して変位場を表現するが,隣接する要素間でエンリッチノードを共有するためアルゴリズムが煩雑でかつ計算コストの大きいものとなる.そこで,本研究では要素毎に独立な自由度を与える方法で不連続な変位場を表現する(式(1)). u は要素毎に与えられる自由度である.またエンリッチ関数 g は(式(2))のように形状関数 N_j を用いて定義する.形状関数の一般的な性質から変位の不連続面で $g(x)$ による不連続量が常に1となるため,自由度にすべり量といった物理的意味を持たせることができる.

断層が分岐を持つ場合,2つの断層が交わるような特別な要素を用意する必要がある.既往の研究では Junction Element 2)という特別な表現がなされてきたが,より複雑で一般的な状況を表現しようとするのが扱いが容易でなくなる.本研究では要素に自由度を付加するような表現を用いているため,より一般的で簡便な方法を提案する(Fig.2).まず,断層の分岐や屈曲といった状況を,断層先端を1つのみ含む tip 要素の重ね合わせで表現する.このように考えることで,要素内に3枚以上の断層が集まる場合や,より複雑な状況も表現することができる. tip 要素は,エンリッチ関数に不連続面からの角度 ϕ で定義される関数 $h(\phi)$ を乗じて表す.これにより,断層の延長上で不連続が解消される.また,同じ位置に先端を有し,2つの不連続面のなす角が π であるような2つの tip 要素の重ね合わせは,平面断層と同じエンリッチ関数とならなければならないため, $h(\phi)$ の関数形状は(式(3))のようであればならない.この表現の妥当性を数値実験により確認した結果,問題ないと判断されたため,以降の数値解析に用いることとした.

様々な条件下で分岐断層の破壊方向がどのように変化するかを確認するため,分岐断層の応力条件および強度にばらつきを与えて,得られる破壊パターンについて取りまとめた.対象とする断層モデルは,2016年熊本地震の本震に関与したと考えられている布田川断層と日奈久断層の形状を模したものである(Fig.3).ただし,本研究での検討は2次元の数値解析であるため,地表の断層トレースのみを参照した.また,計算コストの大きな問題であるため,断層サイズは実際の 1/2 とした.

初期応力場は,熊本地震を対象に検討された実際の応力場 3) を参考にした.具体的には,主応力方向を 53° から 83° の間で一様分布を持つように,ケース毎に主応力軸の方向にばらつきを与えて設定した.また各セグメントの強度は, von Karman 型の空間ランダム性(相関距離1km)を持つものとし,様々に乱数を変えて生成した.これらの応力場,強度分布を与えることで,ランダムに選ばれた強度の低い箇所から動的に破壊が進行する.

解析結果のうち,セグメント 1 を全て破壊した93ケースのみを抽出した.93ケースのうち72%はセグメント 1 で破壊が始まり,セグメント 3 に破壊が乗り移った.また,93ケースのうち8.6%はセグメント 3 からセグメント 1 に破壊が伝播した.その他のケースでは解析開始時点で両セグメントで破壊が生じた.熊本地震で見られた分岐断層を起点とするような破壊もいくつか表れたが,その割合は多いとは言えない.

2016 年熊本地震で見られた断層破壊の様子はこのような稀な現象として表れたものなのか,あるいは別の力学的メカニズムを背景に持つのか,今後より詳細な力学的検討を進めて,分岐断層における破壊現象を明らかにしたい.

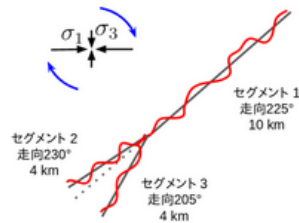
Fig.1 分岐を持つ断層の破壊方向の考え方¹⁾

Fig.3 対象とする分岐断層モデル

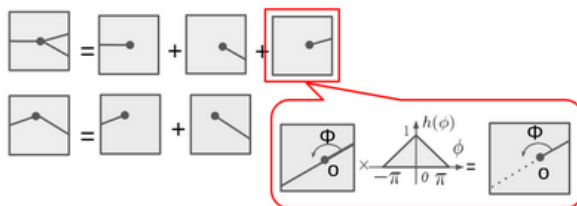


Fig.2 tip 要素の重ね合わせによる分岐の表現方法

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{u}_{node} + g(\mathbf{x})\mathbf{R}\Delta\mathbf{u} \quad (1)$$

$$g(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{j \in J^-} N_j(\mathbf{x}) & \text{for } \mathbf{x} \in \Omega^+ \\ -\sum_{j \in J^+} N_j(\mathbf{x}) & \text{for } \mathbf{x} \in \Omega^- \end{cases} \quad (2)$$

$$h(\phi) = 1 - \frac{|\phi|}{\pi} \quad \text{for } -\pi < \phi \leq \pi \quad (3)$$

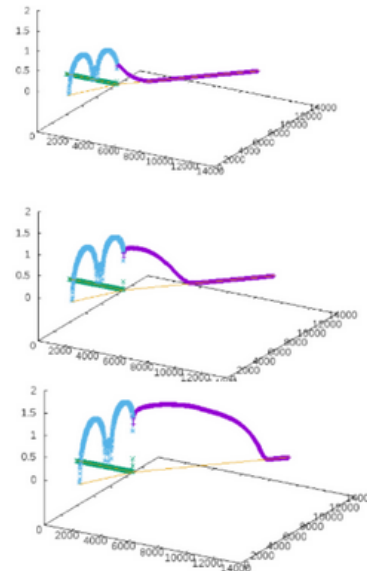


Fig.4 解析結果の例

参考文献

- 1) 中田高, 島崎邦彦, 鈴木康弘, 佃栄吉: 活断層はどこから割れ始めるのか, 地学雑誌, Vol.107, pp.512-528, 1998.
- 2) Daux, C., N. Moës, J. Dolbow, N. Sukumar, and T. Belytschko: Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method, *Num. Meth. Engng.*, Vol.49, pp.1741-1760, 2000.
- 3) Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Saito, Y. Asano, S. Tanaka, K. Sawazaki, Y. Urata and E. Fukuyama: Stress rotations due to the M6.5 foreshock and M7.3 main shock in the 2016 Kumamoto, SW Japan, earthquake sequence, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.43, pp.10097-10104, 2016.

Numerical simulations of weak localization of scalar waves based on the finite difference method

*Masanobu Sato¹, Jun Kawahara¹

1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

はじめに

地球の地殻のランダムな短波長不均質構造は地震波を散乱し、近地地震のコーダ波生成の原因となっている。多くの場合、散乱された地震波はインコヒーレントと見なされ、コーダ波エンベロープを輻射伝達理論によってエネルギー論的に記述することが一般に行われている。

一方で、波源と観測点が一致している場合、2回以上散乱して観測点に戻ってくる波に対して、同じ経路を逆向きに伝わる波が必ず存在する。この一組の波は位相が同じであり、経路の詳細にかかわらず建設的に干渉する。このような波の組は時間とともに増加し、干渉の効果は顕著化する。この現象は、光学や音響学の分野で weak localization(以下、WL)またはコヒーレント後方散乱として知られているが、地震学の分野での研究例は少ない。Margerin et al. (2001)は、点震源から放射されるスカラー波のWLを理論的に解析し、WLによる波動エネルギーの増幅が震源でちょうど2倍であること、増幅が見られる領域の直径が入射波長程度であること、増幅が始まる経過時間は散乱の平均自由時間で規定されること、これらの現象は非弾性減衰に左右されないことなどを示した。Larose et al. (2004)は、ハンマーによる地面の加振を用いた野外観測によって地震波のWL現象を初めて観測し、レイリー波散乱の平均自由行程の推定に成功した。しかし、数値波動シミュレーションに基づく地震波のWL現象の研究例は見当たらない。

そこで本研究では、2次元スカラー波の差分法シミュレーションによるWL現象の再現を試みた。また、モデルパラメータを変えることで、WL現象の現れ方がどのように変化するかを調べた。

シミュレーションの概要

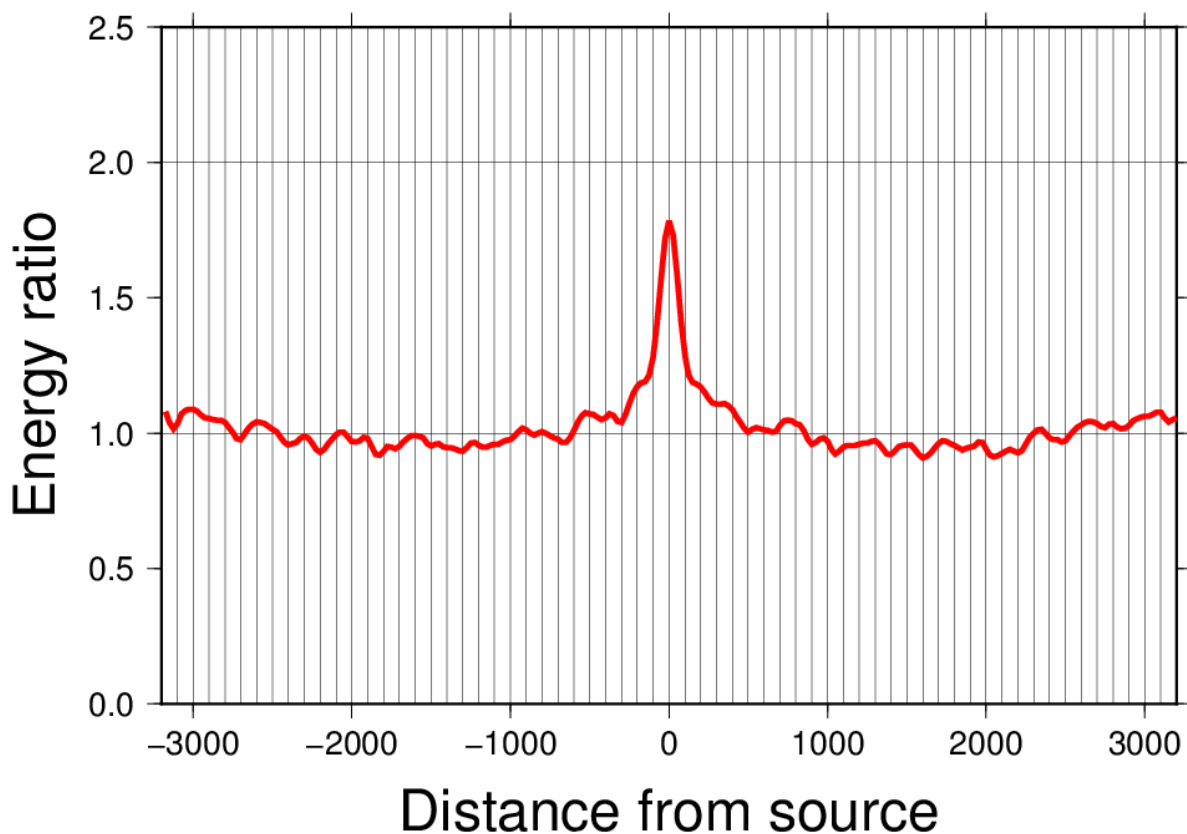
本研究では、スタガード格子と速度-応力スキームを用いた差分法 (Virieux, 1984) を採用し、乱数を用いて κ 次フォンカルマン型ランダム媒質を作成した。媒質のパラメータのうち、スカラー波速度の平均を17.3、相対的な速度揺らぎの標準偏差を10%に固定し、揺らぎの相関距離と次数 κ を変化させた複数のケースを検討した。それぞれのケースについて、乱数列を変えることにより、3000通りのランダム媒質を作成した。

シミュレーションでは、それぞれの媒質の計算領域の中心部に、軸対称形のリッカー波（卓越波長約400）を初期波形として与えることで、スカラー波を等方輻射させた。波源の中心を通る直線上に観測点を等間隔に並び、各時間ステップで観測点ごとに波の振幅を二乗した。最後に、3000通りのランダム媒質について自乗振幅値のアンサンブル平均を取った。この値を、震源から十分に遠くWLの効果が現れないと思われる観測点における値で規格化した（以下、エネルギー比率と呼ぶ）。この手法はLarose et al. (2004)による観測データの解析手順に則っている。ピーク幅やWL現象が現れる時間は今のところ目視で測定を行った。

結果と考察

図は $\kappa = 0.5$ 、相関距離200のケースにおける、ある一定時間経過後（直達波の影響が見られなくなる時

点)のエネルギー比率を波源の中心からの距離でプロットしたものである。ここで横軸の原点は波源の中心に相当し、横軸の値が-825の観測点での値で規格化している。図では震源付近に2に近いピークが見られ、WL現象が再現できたと考えられる。ピーク幅は入力波の卓越波長の2倍弱程度で、予想より大きい。ただしピークの値と幅は経過時間とともにかなり揺らぐため、今のところ定量的な評価は十分にできていない。WLの出現時間についても、経過時間70程度からピークの出現が見られたものの、時間的な揺らぎのために精度良い推定に至っていない。他のケースについても同様な結果が得られたが、定性的には相関距離が長く次数 n が大きい(短波長不均質が相対的に弱い)ほど、WLの出現時間が延びる傾向が見られた。今後の課題として、ピークの幅と出現時間の定量的な測定方法を検討し、理論的に推定される散乱の平均自由行程との比較を行う。



Estimation of surface wave velocities by using the rotation and divergence of seismic wavefield in the Kanto sedimentary basin

*Kaori Shimazu¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura²

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

はじめに

関東堆積盆地を含む大規模な堆積盆地では、周期数秒以上のやや長周期地震動（以下、単に長周期地震動）が頻繁に観測される。堆積盆地内では、堆積層と地震基盤の3次元的な構造変化の影響を受けて、長周期地震動を引き起こす表面波（Love波およびRayleigh波）が空間的に複雑に励起・伝播することが知られている[例えば、向井・他(2018)]。我々は、自然地震による表面波の伝播特性の解明と堆積盆地構造の推定を目指して、東京湾岸北部を対象にシミュレーション波形を用いたLove波の位相速度推定を3成分（EW, NS, UD成分）ビームフォーミング法[Riahi *et al.* (2013)]によって試みた[島津・他(2019, JpGU)]。しかしながら、地震の方位や輻射特性によってはRayleigh波も強く発生するため、安定した解析が困難であった。そこで本研究では、波動場の回転成分と発散成分を計算することでLove波とRayleigh波を分離し、単成分ビームフォーミング解析による両表面波の位相速度推定を行った。

データと解析方法

震央方位と発震機構の異なる2011年3月19日の茨城県北部の地震（ M_w 5.8）、2013年2月25日の栃木県北部の地震（ M_w 5.8）、2014年11月22日の長野県北部の地震（ M_w 6.3）の3つの中規模地震を解析対象とした。差分法による地震動シミュレーションでは、地震波速度構造モデルSBVSM[増田・他(2014, 地震学会); Takemura *et al.* (2015)]とF-net MT解によるダブルカップル型点震源を用いて、2次元的に展開された4356点の仮想観測点（北緯35.5～35.9度、東経139.4～139.9度、750 m間隔；以下、高密度仮想観測点）における地動速度波形を合成した。

Love波とRayleigh波を分離するために、地動変位波形から波動場の回転成分(Z成分を使用)と発散成分を計算した[Shapiro *et al.* (2000), Maeda *et al.* (2016)]。波動場の回転成分はLove波、発散成分はRayleigh波に由来するものと仮定し、それぞれに対して単成分ビームフォーミング解析を行った。同解析においては、高密度仮想観測点の観測点を用いて局所的な小アレイを構成した。小アレイのサイズは解析周期

（5.7, 6.4, 7.3, 8.5, 10.2, 12.8秒）によって観測点間隔1.5～6.75 km、辺長6.0～13.5 kmの範囲で変化させた。解析時間窓は、解析成分の波形エンベロープが最大になる時間を中心に25.6秒間とした。

解析結果

波動場の回転成分と発散成分を用いて評価した位相速度の大きさは、SBVSMを局所的に水平成層構造で近似して求めたLove波とRayleigh波の基本モードの位相速度の大きさと概ね一致した。この結果は、本解析の前提である上述の仮定の妥当性を支持するものであり、波動場の回転成分と発散成分に着目することで混在するLove波とRayleigh波の伝播を分離して評価できることを示している。

Love波の位相速度の評価では、地震によらず周期5.7, 6.4, 7.3秒において位相速度を安定して求めることができ、分散性も明瞭に確認できた。Rayleigh波の位相速度についても同じ周期帯で位相速度を求めることができたが、Love波の場合と比べて地震による位相速度の推定値のばらつきが大きかった。また、解析周期を長くすると、ビームフォーミング解析で評価した位相速度が小アレイ直下の局所的な地盤構造から求めた位相速度から僅かに乖離する傾向が見られた。これは、表面波の周期（または波長）が長くなると堆積盆地構造の水平方向の不均質性の影響が無視できなくなるためと推測される。今後の研究では、本解析手法により観測地震波形を用いてLove波とRayleigh波の位相速度の分離推定が可能であるか検証したい。

謝辞

地震動シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。地震の発震機構解には防災科学技術研究所のF-net MT解を使用しました。

Fractional fluctuation of crustal medium parameter and seismic amplitude fluctuation: A study based on finite-difference simulations

*Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura²

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

1. はじめに

高周波数（1 Hz以上）の地震波の振幅は、地殻構造のランダム不均質性による地震波散乱で大きくばらつく（以下、ばらつき）。このばらつきは、強震動予測における予測精度に影響を及ぼすため（佐藤・翠川 2016）、その特徴の定量的な評価が求められている。先行研究（Yoshimoto et al. 2015 EPS）により、スカラー波の物理モデルでは、点震源から輻射され、一様なランダム不均質媒質中を伝播する波のばらつきの大きさが、ランダム不均質の揺らぎの大きさに比例することが示されている。本研究では、この予測の妥当性を検証するために、ランダム不均質な地殻構造モデルとダブルカップル型点震源を用いた地震動シミュレーションに基づいて、P波とS波の振幅のばらつきの特徴を評価した。

2. 地震動シミュレーション

3次元差分法による地震動シミュレーションでは、 $204.8 \times 204.8 \times 204.8 \text{ km}^3$ の空間領域を0.05 km間隔で離散化し、2.5 msのタイムステップで波動伝播を評価した。均質な背景構造（P波速度6.0 km/s, S波速度3.5 km/s）に一様なランダム不均質性を重畳した構造モデルを作成し、その中心部に横ずれ断層を模擬したダブルカップル型点震源を配置した。測定点は同じ深さに格子状に2 km間隔で分布させた。ランダム不均質性の表現には指数関数型モデルを採用し、Birch則を仮定した。相関距離は、1, 2, および3 km, 揺らぎの大きさは、0.01, 0.02, 0.03, 0.04, および0.05に設定した。ランダム不均質モデルのシード数は5とした。

3. 解析方法

計算速度波形にバンドパスフィルタ（周波数1-2, 2-4, および4-8 Hz）を適用し、P波とS波の3成分合成最大振幅を測定した。測定には初動から1 sと5 sの時間窓を使用した。本研究のシミュレーション条件では、P波とS波の震源輻射係数は方位角に対して4象限型の対称性を持つので、測定値を90°毎に重合して解析できる。このことから、9（方位角：0-10, 10-20, ..., 80-90°） $\times$ 9（震源距離：10-15, 15-20, ..., 50-55 km） $\times$ 4（周波数：1-2, 2-4, および4-8 Hz）の324区分を設定し、測定値の方位角変化・震源距離変化・周波数変化を調べた。また本解析では、地震波散乱による振幅のばらつきに着目するため、幾何減衰・散乱減衰の補正を行った。具体的には、各震源距離区分で、各測定値を震源輻射係数0.8以上を満たす3成分合成最大振幅の平均値を用いて規格化し、P波振幅およびS波振幅とした。

4. 結果・議論

P波振幅とS波振幅のばらつきは一定の震源距離（相関距離、揺らぎの大きさ、および周波数で変化）までは距離とともに大きくなる。その距離変化率は高周波数ほど大きい。方位角・震源距離・周波数を固定して、ランダム不均質の揺らぎの大きさとばらつきの関係を調べると、P波とS波について、前述の一定の震源距離内において比例関係が成り立つことが確認された。この関係は、自然対数振幅のばらつきの標準偏差が0.4程度以下において見られた。以上の結果は、P波だけでなくS波についても、ランダム不均質の揺らぎの大きさを用いてばらつきの大きさを評価できる可能性を示すものである。

吉本・武村（2018 地震学会）の指摘のように、本解析の規格化処理によって、P波振幅とS波振幅はそれぞれの震源輻射係数のまわりにばらつくことが示される。ばらつきの大きさは震源輻射係数の大きさに比例する。この結果は、地震波の伝播が点震源からスポーク状であるとみなすと、ばらつきを引き起こすランダム不均質性による地震波散乱の効果は、各スポーク（波線）の周りに限定されることを示唆している。このことは、数%程度のランダム不均質性をもつ媒質について震源付近の振幅のばらつきを評価する場合、近似的には波線追跡した地震波の振幅に地震波散乱の効果を付け加えれば良いことを意味する。

謝辞

地震動シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用しました。本研究は、JSPS科研費18K03786の助成を受けています。

Spatial variation of seismic response due to the Kanto sedimentary basin inferred from teleseismic S waves

*Yue Nakagawa¹, Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura²

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

はじめに

大規模な堆積盆地では、中規模以上の浅発地震によって周期数秒以上のやや長周期地震動（以下、長周期地震動）が発達することが知られている。長周期地震動の卓越周期や振幅の地域変化の特徴は、堆積盆地構造と密接に関係しており[例えば、Yoshimoto & Takemura (2014)], 大型建造物の被害推定などにおいて重要である。これまで、関東堆積盆地については、周囲で発生した浅発地震を解析対象とし、堆積盆地構造や長周期地震動の発生メカニズムに関する研究が行われてきたが、発震機構解や地殻構造モデルの不確定性の影響について検討する必要があった。そこで本研究では、遠地地震を解析対象とし、ほぼ鉛直下方から入射するS波に対する関東堆積盆地の応答に関する研究を行った。

観測波形とその特徴

関東堆積盆地から震央距離 $30^{\circ} \sim 100^{\circ}$ で発生した遠地地震を解析対象とした。この震央距離では、実体波は主にマントル内を伝播し、多くの波相が時間軸上で適度に分離して観測される。F-net およびMeSO-net で記録された2018年1月23日（JST）のアラスカ沖地震（Mw 7.9）の周期5～50秒のS波（速度波形）に注目したところ、関東堆積盆地内ではその直後に顕著な後続波が見られた。関東堆積盆地外のF-net TSKFと同盆地内のMeSO-net観測点の波形の振幅を比較すると、同盆地内で記録されたS波および後続波の振幅のほうが有意に大きく、堆積盆地による増幅の効果が確認された。

地震動シミュレーション：手法

関東堆積盆地への遠地地震のS波入射を模擬した地震動シミュレーションを実施した。関東堆積盆地を含む $375 \times 375 \times 250 \text{ km}^3$ の領域を0.25 kmの空間格子で離散化した。Koketsu *et al.* (2012)による3次元地下構造モデルを採用し、OpenSWPC[Maeda *et al.* (2017)]を用いて、鉛直下方から平面S波を入射させた。このとき、堆積盆地構造（堆積層）のあるモデル（モデルA）とないモデル（モデルB）2種類を使用した。

関東堆積盆地の応答の評価では、基準観測点をF-net TSKFに設定した。応答の指標値として速度振幅の2乗を時間積分した値を用いた。時間積分の範囲は、①S波の到着10秒前から60秒間（直達波）、②S波の到着50秒後から50秒間（後続波）とし、直達波と後続波のエネルギーを求めた。これらの値について基準観測点とその他の観測点の比（以下、地震動エネルギーの増幅率）を求め、その空間変化について調べた。

地震動シミュレーション：結果

モデルAでは、堆積層の厚い（地震基盤の深い）観測点でのみS波直後に振幅の大きい後続波が確認できた。一方で、モデルBではそのような空間変化は見られず、どの観測点の計算波形もほぼ同じであった。これらの結果は、遠地地震のS波直後に見られた大振幅の後続波は、関東堆積盆地の堆積層によって励起されたことを示唆している。モデルAについて地震動エネルギーの増幅率を評価したところ、堆積層の厚さに対応し、どちらの時間窓（①と②）の増幅率も5～20倍程度の値を示すことがわかった。このような増幅率の空間変化の特徴は、2018年1月23日のアラスカ沖地震の観測波形においても同様に確認できる。

今後の研究では、MeSO-netの稠密な観測点で記録された他の遠地地震の波形についても解析し、S波直後に見られる後続波と関東堆積盆地の構造（地震波速度構造）との関係を明らかにしたい。

謝辞

防災科学技術研究所のF-netおよびMeSO-netの地震波形記録を使用しました。地震動シミュレーションには東京大学地震研究所地震火山情報センターの計算機システムを利用しました。

Relation between temporal variation on Auto Correlation Function of Ocean-Bottom Seismometers' records and wind vectors above the sea

*Miyuu Uemura¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Ryota Hino³, Masanao Shinohara⁴

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 4. Earthquake Research Institute, Tokyo University

大地震やスロースリップ(Slow Slip Event: SSE)に伴う地震波速度変化の検出に有効な手法の一つとして地震波干渉法が挙げられる。これまでに地震波干渉法によって様々な地域で大地震やSSEに伴う地震波速度低下が検出されてきた(例えば、Wegler et al., 2009; Zhen and Song, 2009; Rivet et al., 2011; Sawazaki et al., 2016; Nimiya et al., 2017)。

Uemura et al. (2018)では宮城県沖に設置されていた複数の自己浮上式海底地震計(Ocean Bottom Seismometer: OBS / 固有周波数4.5Hz, サンプリング周波数100Hz)の連続記録の雑微動部分を用いた自己相関関数(Auto-Correlation Function: ACF)の時間変化から周辺の地震波速度の変化を評価した。その結果、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に伴う地震波速度低下が検出された。一方、本震域内で本震に先行して発生したSSEの発生期間にも地震波速度の小さな揺らぎが検出された。しかしながら、地震やSSEが起きていない期間にも同程度の揺らぎが検出されていることから、この揺らぎがSSEに関連した地震波速度変化であるとは断言できない。

上記の研究と同地域を対象に5年間のACFの時間変化を調べたところ、ACFにおおよそ規則的な年周変化が検出された。OBSの連続記録から作成したACFの時間変化には海象が大きく影響している可能性が高く、検出したACFの年周変化は海象の一つである潮汐に関係している可能性が高い。しかしながら、OBSから海水面までの距離がACFの時間変化に影響する場合、ACFの年周変化やその他の揺らぎは海水面までの距離(=潮位)により引き起こされている可能性があり、潮汐以外の海象の影響も考慮する必要がある。そこで本研究では、潮汐に加え、潮位を変化させる一因である風(風速や風向など)とACFの時間変化の関係性について議論する。

One-step waveform inversion of ScS reverberations for the upper mantle discontinuity.

*Jumpei Maruyama¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Nozomu Takeuchi¹

1. Earthquake research institute, the University of Tokyo

ScS波とその多重反射はマントル内の不連続面の特徴を調べる上で有用であり、410km不連続面や660km不連続面といった主要な不連続面に加えて、512km不連続面のようなより小さなものや、Gutenberg不連続面(G)のような海洋地域に特有の浅い不連続面についての情報を得ることができる。従来の研究で用いられた解析手法 (Revenaugh & Jordan, 1991)は、1段階目に主要ScS波の走時、地殻の厚さと反射系数、マントルの平均的なQ値のパラメータをインバージョンを解くことで推定し、その結果を利用して2段階目にマントル内不連続面の反射系数の深さプロファイルを計測するものであった。

しかし、海洋で考えられているような浅いGの存在下で数十秒より長周期のフィルタをかけた場合、1段階目のインバージョンを解く際に、Gからの反射波と主要ScS波の干渉をマントルの平均的なQ値の変化として解釈してしまい、結果としてQ値とGの反射係数といったパラメータを系統的に誤って推定してしまう可能性があることが分かった(丸山, 2018, 修士論文)。特にGの深さが過去に推定されたような80km程度であった場合、マントルの平均的なQ値が15%近く過大評価され、結果としてGの反射系数が本来の値の7割程度に過小評価されてしまう。

この問題を回避するための新たな手法として、ScS波の波形から従来のパラメータに加えて直接Gのような浅い不連続面の深さと反射係数を同時に推定する波形インバージョン手法を用いる。このような手法の効果を検証するため、波形計算ソフトウェアDSM(Takeuchi et al. 1996)を用いてG不連続面をもつ1次元モデルから理論波形を生成し、これに対して予備的な解析を行った。その結果、従来の手法ではマントル全体の平均的なQ値が大きく過大評価されるのに対し、本手法では不連続面の深さの初期値がモデルの値に十分近ければ、Q値の推定が大きく改善されることが分かった。

Poster session (Sept. 16th) | General session : S02. Seismometry and Monitoring System

📅 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏢 ROOM P
International Conference Halls II and III

S02P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-01] Performance Investigation of The JMA Strong Motion Velocity-type Seismographs

*Masayuki Tanaka¹, Akio Katsumata¹ (1. Meteorological Research Institute)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-02] The development of a spread type seismic intensity meter equipped with an MEMS acceleration sensor and the application.

*Jun Uchida¹, Masahiro Ooi², Kaoru Yoshioka³, Yoshiya Ouchi¹, Keizo Motohashi¹ (1. Kinkei System Corporation, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Chiba Prefectural Government)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-03] Basic Characteristics of Accelerometer made with Crystal Oscillator (Part 2)

Shigeo Matsuda², Kazuyuki Nakasendo³, *Hitoshi Morikawa¹, Kahori Iiyama¹ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. Clover Tech Inc., 3. Seiko Epson Corporation)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-04] Experimental observation toward the realization of low-cost and high-density strong-motion observation network (2)

*Takashi Akazawa¹, Takamori Ito² (1. Geo-Research Institute, 2. aLab Inc.)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-05] Seismic observation using fiber optics and DAS at Azuma volcano – Estimation of heterogeneities using a dense observation

*Kentaro Emoto¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹, Satoshi Miura¹, Mare Yamamoto¹, Shunsuke Sugimura¹, Takahiro Ueda¹, Ayumu Ishikawa¹, Tsunehisa Kimura² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Schlumberger)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-06] Construction of the seismic observation network around the Sea of Genkai, northwest Kyushu, Japan

*Manami Nakamoto¹, Yoshihiro Sawada¹, Keiji Kasahara¹, Panayotopoulos Yannis¹, Shutaro Sekine¹, Shintaro Abe¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-07] Development of a WIN/WIN32 format seismic waveform data reader

*Takuto Maeda¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-08] Development of software for strong-motion seismometers using RaspberryPi

*Takamori Ito¹ (1. aLab Inc.)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S02P-09] **An investigation into the optimal number of bins for phase picking based on the probabilistic density function of seismic wave amplitudes**

*Mitsutaka Patrick Oshima¹, Hiroshi Takenaka² (1. Shimizu Corporation, 2. Okayama University)

Performance Investigation of The JMA Strong Motion Velocity-type Seismographs

*Masayuki Tanaka¹, Akio Katsumata¹

1. Meteorological Research Institute

津波地震(スロー地震)は、同じ規模(地震モーメント)の通常の地震に比較して地震波の短周期成分の励起が低い現象である(Kanamori, 1972)。その結果、気象庁マグニチュード M_J や表面波マグニチュード M_s などの周期数秒~20秒の地震波の振幅から直接決められるマグニチュードがモーメントマグニチュード(M_w)よりも小さくなる。1992年ニカラグア地震(M_s 7.2, M_w 7.6)は、 M_w が8未満であるのに破壊継続時間が100秒を超えており、津波地震と考えられている(例えば、Satake et al., 1993)。このような地震は、発生メカニズム解析や地震の規模推定等において長周期の地震波に注目する必要がある、広帯域地震計による観測データはとても期待されている。国立研究開発法人防災科学技術研究所が運用する広帯域地震観測網(F-net)では、日本各地に広帯域地震計と速度型強震計を併設し、広帯域かつ広ダイナミックレンジの観測を可能としている。広帯域地震計は温度変化の影響を受けやすく、速度型強震計と一緒に奥行きのある横坑の最奥部に設置されている。先行研究では、国内で発生する津波地震に対して、F-netの速度型強震計を規模推定に活用できそうであることが分かった(例えば、田中・勝間田, 日本地震学会2017年度秋季大会, 田中・勝間田, JpGU Meeting 2018, 田中・勝間田, 日本地震学会2018年度秋季大会)。気象庁も全国に併設ではないが広帯域地震計(以下、JMA-STs)と速度型強震計(以下、JMA-SVEL)を設置している。しかしながら、一部を除き、横坑内の設置ではないなど観測環境はF-netほど整っていない。そこで、JMA-SVELの連続波形記録を使い、バックグラウンドのノイズレベル(パワースペクトル密度)を調査したところ、普段は地動ではなくA/D変換器による量子化ノイズを記録していることが判明し、別の手段による調査が必要であることが分かった(JpGU Meeting 2019)。JMA-STsまたはJMA-SVELは、加速度計(以下、JMA-ACC)や1Hz短周期地震計等の津波地震早期観測網と同じ土台に設置されている。同じ地震イベントであれば、地震計特性を取り除いたJMA-STsやJMA-SVEL、JMA-ACCの記録を積分した速度や変位の記録は、ほぼ同じ形状になるはずである。そこで、JMA-ACCの記録と比較することを検討した。

検討は、気象庁一元化震源カタログにあるM5.0以上の地震を対象に、同じ地震イベントで計測されたJMA-STsとJMA-SVEL及びJMA-ACCの波形記録を用いて、それぞれの速度の振幅値を計算し、その値を比較することでJMA-STsやJMA-SVELの地動の検出レベルを調べた。その際、基線の補正、JMA-STsとJMA-SVELについては地震計特性の除去、JMA-ACCについては積分に台形式を用い、加速度記録を1階時間積分して速度記録を作成した。そして、津波地震の規模推定には、速度記録を更に2階時間積分した変位を積分した記録に周期200秒のハイパスフィルタを通したものの使用を検討しているので、すべての波形記録に周期200秒のハイパスフィルタを通した。2019年5月から6月までの間に発生した地震イベントについて調べた結果は、速度記録で振幅が0.001m/s以上は、JMA-STsまたはJMA-SVELとJMA-ACCの振幅値が非常に対応している(図1)。

謝辞

本調査は、気象庁一元化震源を使用しました。

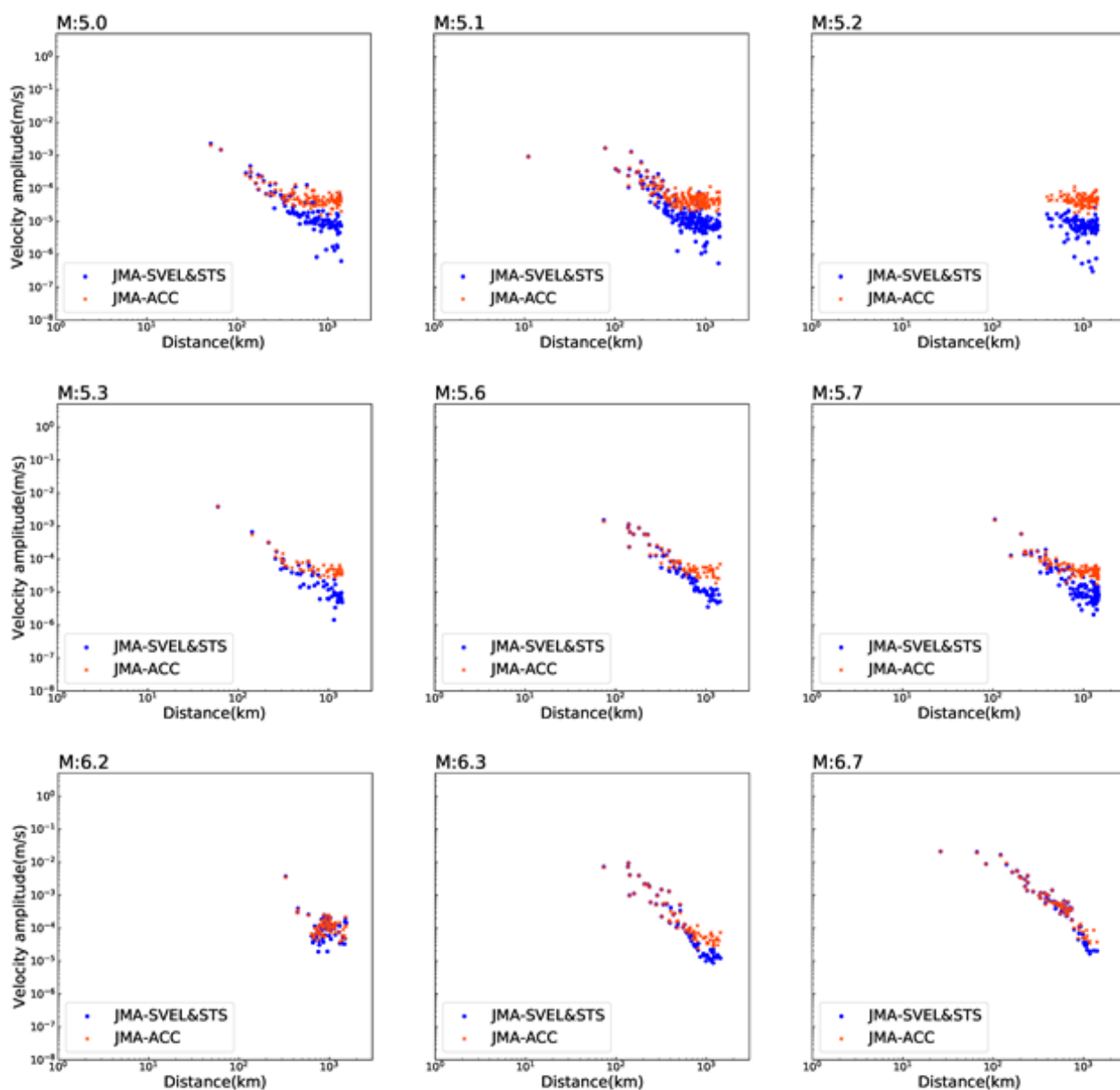


図1. 広帯域地震計(JMA-STs)・速度型強震計(JMA-SVEL)と加速度計(JMA-ACC)の速度振幅を比較した図

[期間：2019年5月～6月、地震数：15個(M5.1, 5.7は各3個、M5.0, 5.2は各2個、他は各1個)、比較波形数：866波形(波形総数：1732波形)]

The development of a spread type seismic intensity meter equipped with an MEMS acceleration sensor and the application.

*Jun Uchida¹, Masahiro Ooi², Kaoru Yoshioka³, Yoshiya Ouchi¹, Keizo Motohashi¹

1. Kinkei System Corporation, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Chiba Prefectural Government

近年、MEMS加速度センサの性能、特に低ノイズ化においては目覚ましい発展が見受けられる。アナログデバイス社のMEMS加速度センサ(ADXL355)は、低ノイズ密度($25\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$)、低消費電力($200\mu\text{A}$)を特長とした20bitADC内蔵の3軸の加速度センサである。私たちは、この低ノイズ密度に着目し、ADXL355を搭載した普及型計測震度計を開発するとともに、高層建築物の振動モニタリングを行っている。

本発表では、MEMS加速度センサを搭載した普及型計測震度計の開発、および防災科学技術研究所との共同研究で実施している高層建築物の振動モニタリングシステムの構築について報告を行う。

【普及型計測震度計の開発】

地震防災機器として普及させるには、①震度計検定合格機、②安価、③各種制御可能などが挙げられる。当初、ラズベリーパイ等のシングルボードコンピュータの汎用品による低価格化を検討したが、地震防災機器として求められる信頼性・耐久性をより十分に確保するため、専用ボード(新規設計)による“普及型計測震度計”(以降、KSI-100と略す)を開発した。

KSI-100は地震波形記録機能(起動波形・連続波形)に加えて、気象庁指定アルゴリズムにて得られた震度階や最大合成加速度値をより効果的に地震防災に役立てるため、設定された震度階や加速度値に応じて発報する警報接点出力(7a)、LAN接続による外部表示器出力と地震情報電文(8行電文)出力機能を有している。警報接点出力は各種制御(自動放送設備・電気錠開錠・起動/停止)に活用でき、地震情報出力は他システムへの情報配信に活用可能である。

上述した機能は標準仕様であり、外部表示器やモバイル通信(LTE: 将来は5G対応)によるデータ送信機能は、必要に応じて追加できるオプション機能とすることで基本構成の低価格化を実現している。

なお、KSI-100は2019年7月に気象庁検定を受審し合格している。

【振動モニタリングシステムとしての活用】

KSI-100は、大型構造物や高層建築物等の“振動モニタリングシステム”として活用することを想定し、オプションとしてモバイル通信(LTE)によるリアルタイムデータ通信機能が選択できる仕様となっている。

KSI-100は個別でデータ通信ができるため、ケーブルレスによる振動モニタリングシステムの構築が可能である。さらに、DC12V電源による運用が可能であり、商用電源による電源供給が行えない場所でも独立電源(またはバッテリー駆動)による振動モニタリングシステムの構築が可能である。

現在、平成30年昨年11月より、防災科学技術研究所との共同研究(研究課題「高層建築物等の地震応答モニタリングに関する研究」)を実施中である。

Basic Characteristics of Accelerometer made with Crystal Oscillator (Part 2)

Shigeo Matsuda², Kazuyuki Nakasendo³, *Hitoshi Morikawa¹, Kahori Iiyama¹

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Clover Tech Inc., 3. Seiko Epson Corporation

1. はじめに

振り子の振動を直接測定するのではなく、弦重力計のように重力加速度の違いによって振動子の固有周波数が変化することを利用して、弦の振動の周波数の変化を測定することで加速度を得ることも可能である(たとえば、小泉1983)。このような固有振動数の変化を測定する方法では、振動子の固有周波数が測定対象とする振動の振動数帯域に比較して十分に高ければ、高い分解能で加速度の変化を測定できるものと期待される。著者らはこれまでに、このような原理によって加速度を測定する加速度計として水晶振動子を用いた超小型センサーの性能評価を行い、有感地震から無感の微小な地震動に至るまで精度よく測定可能であることを確認している。その一方で、微動レベルの測定を行うにはノイズレベルが高く精確な測定が難しい事も明らかになっている(松田ほか, 2014)。

上記の問題に対して、従来の水晶振動子センサーに比してノイズレベルを大幅に低減した水晶振動子センサーが新たにリリースされるため、改めてその性能評価を行った。また、デジタルデータを直接出力するため、データロガー側にAD変換器を必要としないセンサーの特徴を活かしたデータロガーを開発し、センサーだけでなくデータロガーまで含めたオーバーオールでの基本性能を評価した。

2. 水晶振動子による加速度センサーのためのデータロガー

水晶振動子センサーの動作原理および仕様については、松田ほか(2014, 2018)に詳しいが、このセンサーは内蔵されたMPU (micro-controller)によって水晶振動子の固有振動数をカウントする周波数カウンタの出力をデジタル領域で処理したうえで、振動子とは別の水晶振動子を用いたクロックに同期して信号を出力する。また、外部からのクロック信号に同期することも可能であるため、外部にGPSやOCXO (オープンコントロール水晶振動子)等の高精度なクロックを実装してこれに同期して信号を出力させることもできる。これは、信号の高度な同時性を必要とするアレー観測などには有効な機能である。

センサーを構成する水晶振動子は非常に微細な構造によって支持されており、振動子につながった錘がうけた加速度の変化を固有振動数の変化に変換するシステムである。水晶そのものが衝撃に弱いだけでなく、システム全体もその微細な構造ゆえに壊れやすいという欠点を有している。従来の水晶振動子センサー(以下、A351)に比べて耐衝撃性を高め、またノイズレベルを低減してS/N比を向上させた新型センサー(以下、A352)が計画されている。A351では測定が困難であった微動レベルの震動をA352では精度よく測定できることが期待される。

また、水晶振動子はMPUによってデジタル処理された信号をデジタルのまま出力するため、記録装置側にAD変換器を必要としない。電圧変化をAD変換して記録する従来のデータロガーではなく、直接デジタル信号を受けて記録するシステムが必要となる。これは、一般的なPCでも容易に信号を記録できるという手軽さの反面、異なるクロックがセンサーとロガーで別々に走っていることにより、信号の記録時刻を厳密に管理しなくてはならない地震観測やアレー観測に用いるためにはセンサーかロガーのクロックの一方を他方に同期させる仕組みが必要となる。

そこで、水晶振動子センサーが外部クロックに同期できることを利用して新たにデータロガーを開発した。すなわち、センサーからの信号の出力のタイミングをデータロガーに搭載したクロックに同期させることで信号の高度な同時性を確保しようとするものである。データロガーのクロックはGPSまたはネットワーク上のNTPサーバーに同期させる。GPS信号の受信時はGPS受信機が出力する1PPSに同期させることで高い精度でクロックを走らせることができるものの、NTPサーバーを用いる場合は参照すべき高精度な信号が必ずしも存在

しないため、安定してクロックを供給できるようOCXOを実装できるよう配慮している。

3. 観測

新たに開発したデータロガーに水晶振動子を用いた新旧2種類の加速度センサー(A351, A352)を接続してそれらの基本的な性能を確かめるための簡単な観測を行った。特に微動レベルの信号がどの程度正しく記録されるかを、高感度のフィードバック型加速度計(Nanometric社製 Titan)との比較によって調べた。工学的基盤相当の地盤に埋設された静穏で自動車等の人工的な外来震動の影響が非常に少ないトンネル内にセンサーを設置して連続観測を実施した。

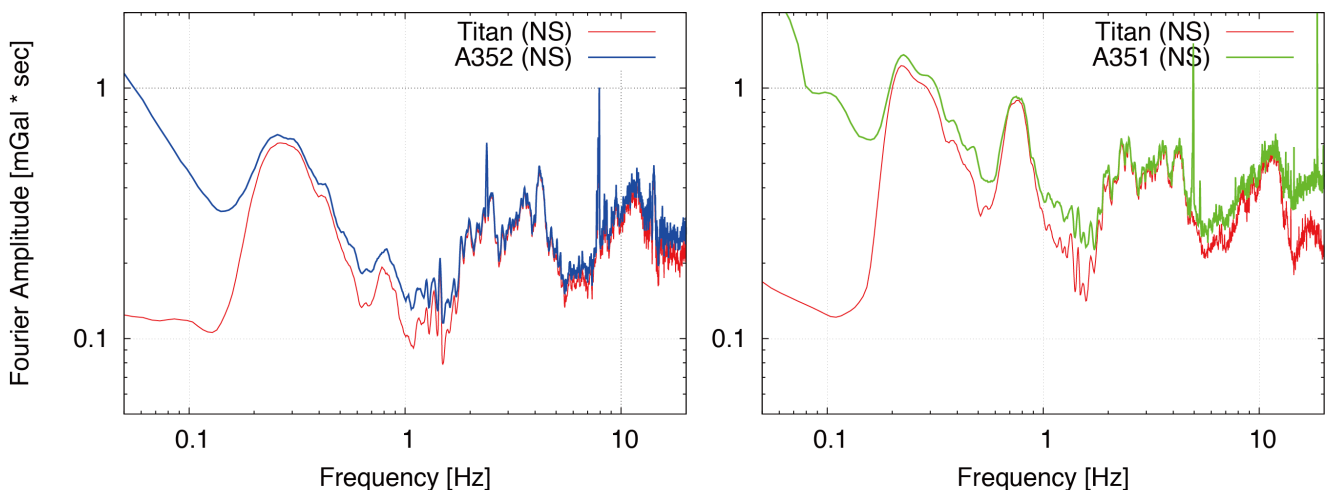
A351とA352の記録は異なる日時に得られているため直接の比較は難しいが、それぞれのフーリエスペクトルをTitanによるそれと共に図1に示す。いずれも、1時間分の微動記録から163.5秒の区間を複数切り出してフーリエ変換してその平均をとったものである。図1より5/21の微動のスペクトルのほうが6/23のそれよりも長周期側でレベルが高いことがわかる。それにもかかわらずA351によって得られたスペクトルは0.5 Hz付近や1~2 HzにおいてTitanに比べて大きくなっており、Titanの記録に見られるスペクトルの谷部分を正しく表現していない。一方、A352によって得られたスペクトルは、A351と同様の傾向はあるものの、微動のレベルそのものが低いにもかかわらず、A351よりもより低い振幅レベルまでTitanの記録とよく整合している。A351とA352のスペクトルの1/fノイズに相当すると考えられるレベルは定性的には後者は前者のおよそ半分程度であるように見える。

参考文献

小泉(1983), 弦重力計の安定性について, 測地学会誌, Vol.29, No.2, pp.94-100.

松田ほか(2014), 水晶振動子を用いた加速度計の特性に関する基礎的検討, 日本地震学会 2014年秋季大会予稿集, S02-P06.

松田ほか(2018), 水晶振動子による加速度センサーの感度特性に関する一検討, 土木学会論文集A1特集号, Vol.74, No.4, pp.I_302-I_312.



(a) A351 と Titan (2019/05/21 1:00am)

(b) A352 と Titan (2019/06/23 2:00am)

図1 新旧2種類の加速度センサーによって記録された微動のフーリエスペクトル

Experimental observation toward the realization of low-cost and high-density strong-motion observation network (2)

*Takashi Akazawa¹, Takamori Ito²

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

著者らは、IT強震計試作機相当の廉価なITKセンサを開発し、それをVPS（Virtual Private Server）とVPN（Virtual Private Network）を用いた廉価な地震計ネットワークの試験運用（伊藤・他(2019)）の一環として利用する傍ら、既存の強震計と併設して強震計としての性能を評価するための試験観測を実施している（赤澤・伊藤(2019)）。このセンサは、Raspberry Piにアナログデバイス社のMEMS加速度センサADXL355を接続することで、廉価（部品代1万5千円程度）にIT強震計試作機（約60万円）以上の機能を実現している。本報告では、開発したITKセンサでこれまでに収録された記録（常時微動記録と地震記録）を解析し、記録が有する精度を評価した。なお、観測を開始してから半年以上経過したが、これまでに、作成した6台のセンサにトラブルは発生していない。

まず、同一地点に設置した2台とそれとは異なる地点に設置した1台で同時に収録された常時微動記録を解析した。ここで、後者は、常時微動の振幅レベルが比較的大きい場所である。解析の結果、波形の振幅と振幅スペクトルは、同一成分で、3台ともほぼ同じとなった（水平成分：約0.2 gal，上下成分：約0.3 gal）。また、振幅スペクトルは、周波数に依存せずほぼフラットとなり、ホワイトノイズとしての特性を示した。この結果は、開発したITKセンサで得られた「常時微動」記録は自己ノイズ（つまり、ノイズレベルは水平成分で約0.2 gal，上下成分で約0.3 gal）であり、このセンサを地盤での微動計測に利用することは難しいことを示している。

次に、同一地点に設置した2台とそれに併設する2台の高精度な強震計（1台は広帯域速度型強震計）で同時に収録された地震記録を解析した。ITKセンサ同士の記録を比較した結果、波形と振幅スペクトルはほぼ同じ特性となり、センサ毎の個体差はほぼ無いことが明らかとなった。また、それらを、併設する高精度な強震計で収録された記録と比較した結果、自己ノイズのレベルを上回れば、波形・振幅スペクトル共に高精度な強震計とほとんど同じ特性が得られた。これまでに震度2を上回る地震記録は得られていないが、開発したITKセンサで収録される地震記録は、震度1～2程度の揺れに対し、0.2～5 Hz付近で高精度な強震計並みの分解能を有することが明らかとなった。

参考文献 赤澤・伊藤(2019), 日本地球惑星科学連合2019年大会, STT43-P02. 伊藤・他(2019), 日本地球惑星科学連合2019年大会, STT43-P01.

Seismic observation using fiber optics and DAS at Azuma volcano –Estimation of heterogeneities using a dense observation

*Kentarō Emoto¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹, Satoshi Miura¹, Mare Yamamoto¹,
Shunsuke Sugimura¹, Takahiro Ueda¹, Ayumu Ishikawa¹, Tsunehisa Kimura²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Schlumberger

光ファイバーケーブル中を伝播する光パルスの後方散乱を解析することで、ケーブルの温度、ひずみ、振動等を検出する試みが1970年代から行われ、サーバーの故障箇所やパイプラインの破損箇所の検出に用いられてきた。2011年頃から物理探査の分野でもこの計測方法が注目され始め、光ファイバーケーブルにより地震動を記録するための技術開発が行われてきた（Distributed Acoustic Sensing: DAS）。この計測方法のメリットは、ケーブルに沿って数mから数十m間隔の空間分解能で計測データが得られることである。しかし、これまでに地震学で使用された例では、地震計と比べるとS/N比が低いといった点が指摘されている（例えば、Yu et al., 2019）。この原因の一つとして、光ファイバーケーブルと地面とのカップリングが挙げられる。我々は、吾妻山において、磐梯吾妻スカイライン沿いに敷設されている光ファイバーケーブルを用いた地震動計測を行った。並行して数台の地震計を設置することで、両者の比較を行い、火山観測における光ファイバーによる地震動観測の有用性を検証した。また、高空間分解能な記録が得られることを利用し、地下の不均質構造推定に向けた解析を行った。

ケーブルは国土交通省所有のシングルモードファイバーケーブルで、土湯温泉ゲートから浄土平まで伸びる総長14.2kmである。土湯温泉ゲート側にシュルンベルジェ社のhDVS（heterodyne Distributed Vibration Sensing）計測装置を接続し、約10m間隔での地震動を測定する。hDVSは後方散乱の位相を用いる点が特徴であり、従来のDAS観測よりも高いS/N比が得られるとされる。出力データは各点の歪み速度であり、時間サンプリングは1msである。地震計はケーブル沿いに、3成分広帯域地震計1台と3成分短周期（2Hz）地震計を3台設置した。また、歪み測定用に、光ファイバーケーブルに沿って直線アレイを設置し、光ファイバーと地震計の波形を直接比較する予定である。

7月4日に観測を開始し、吾妻山で発生する火山性地震に加えて、福島県沖や岩手県沖のプレート境界型地震が記録されている。これらのプレート境界型地震はマグニチュード4クラスであり、地震計とhDVSで捉えられたスペクトルを比較すると、1Hz以下から10Hz程度まで、両者のスペクトルは類似していたため、火山観測において光ファイバーケーブルを用いた観測が有用であることが示唆される。hDVSのチャンネル間での波形の相互相関係数を調べると、チャンネル間距離とともに急激に減少し、数十mから100m程度で一定値に収束する様子が見られた。この形状は、地下の微細不均質構造に依存するため、地形や微細不均質を考慮した数値モデルと比較することで、吾妻山における微細不均質構造の特徴的なパラメータを推定することが可能であると考えられる（Horike & Takeuchi, 2000）。また、一様な速度・内部減衰の場合、経過時間が十分に経過したコーダ部分では、振幅分布が一様になるが、観測された振幅分布は空間的に不均質であった。今後、解析事例を増やし、コーダ振幅の不均質分布と地質構造を比較することで、吾妻山における不均質構造の推定につながることを期待される。

謝辞

国土交通省の光ファイバーを借用した。観測に当たって、福島河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた。

Construction of the seismic observation network around the Sea of Genkai, northwest Kyushu, Japan

*Manami Nakamoto¹, Yoshihiro Sawada¹, Keiji Kasahara¹, Panayotopoulos Yannis¹, Shutaro Sekine¹, Shintaro Abe¹

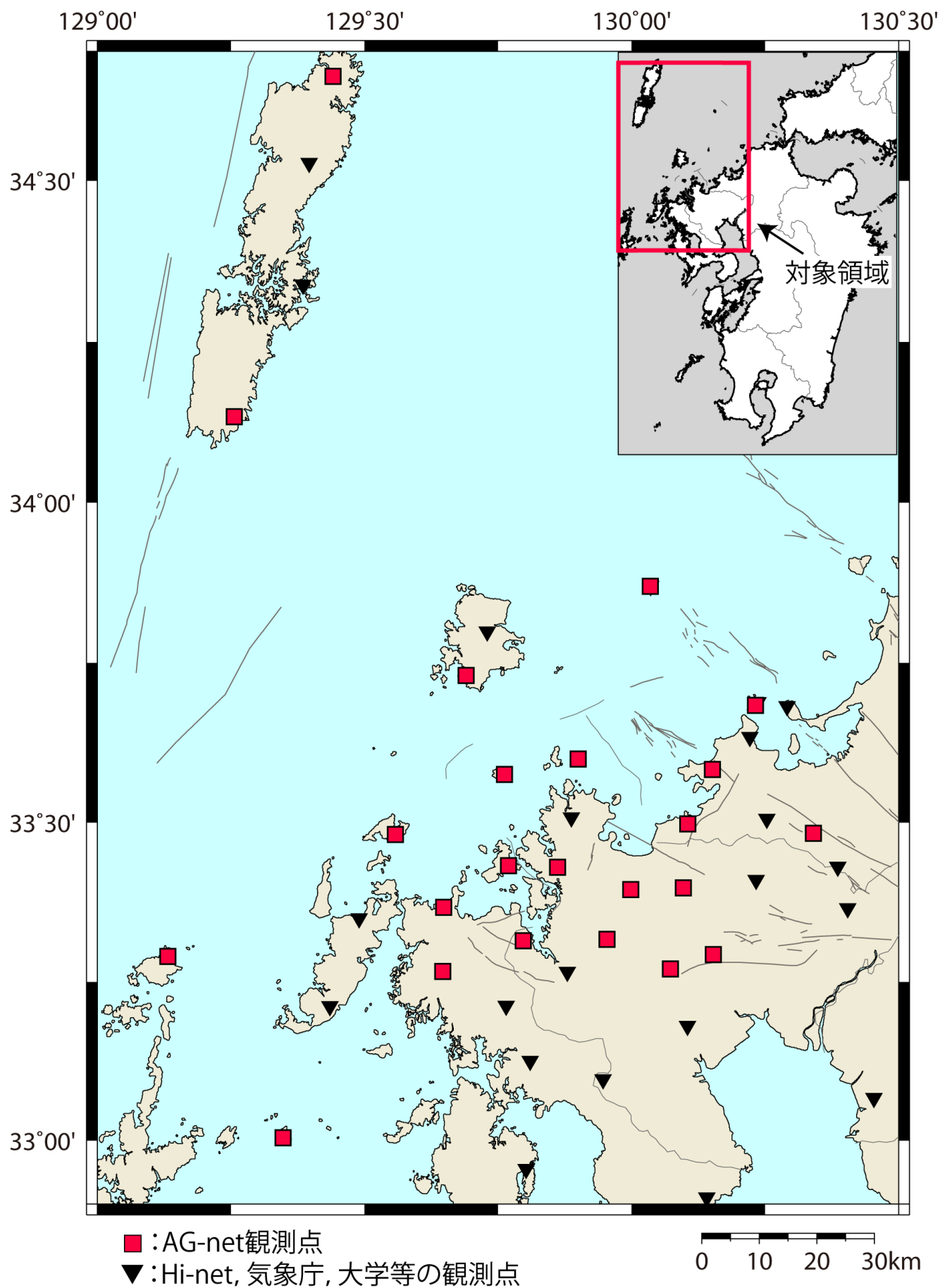
1. Association for the Development of Earthquake Prediction

九州北西部地域では防災科学技術研究所、気象庁、大学等の地震観測点によって微小地震が観測されており、2005年福岡県西方沖地震の余震域を除くと比較的地震活動度の低い地域である。しかしながら、海域部には観測点は少なく必ずしも十分に地震が検知できているとは言えない。また活断層の活動に伴う極微小地震活動や地震発生層の上限深度に関してより詳細に検討するためにはより密な地震観測網が必要である。そこで地震予知総合研究振興会（以後、振興会）は当該地域における地震活動の常時モニタリングを行う為に、九州北西部陸域及び玄界灘周辺の離島に新たに地震観測点を設置し、高密度の微小地震観測網（以後、AG-net）を構築した。ここではこのAG-netの概要について述べる。

AG-netは福岡県、佐賀県、長崎県において既設のHi-net観測点、気象庁及び大学の観測点を補完するように配置した。2018年7月から2019年3月にかけて離島を含めて23点の地震観測点を新規に設置した（図参照）。各観測点の間隔は既設点も含めると10から20km程度である。各地震観測点ではノイズレベルを下げ地震の検知能力の向上を図るため、15mから40mのボーリングを掘削し、その孔底に地震計を設置した。設置した地震計は極微小地震から大地震まで対応できるよう固有周期1秒の高感度速度計（Lennartz社製、LE-3DLite MKIIIもしくはLE-3DB/H）、固有周期120秒の広帯域地震計（Nanometrics社製、Trillum Compact 120）及びサーボ型加速度計（Nanometrics社製、Titan）の3種類である。加速度計は震度計としても用いるため、地表に打設した基礎上に設置している。観測点からのデータはリアルタイムで振興会本部に送信され、このうち短周期地震計のデータは東京大学地震研究所、JDX-netを介して全国の地震観測網ネットワークに送信される。さらにTDX（Tokyo Data exchange）経由にて気象庁と防災科学技術研究所にもデータが配信されている。AG-netのデータは2019年4月より正式に送信を開始した。これらのデータと周辺他機関の地震観測点のデータと合わせることで、今後玄界灘周辺での微小地震活動や詳細な地震波速度構造等が明らかになることが期待される。

謝辞：AG-netの構築に際しては、地震観測点の設置等に関して現地住民の方及び各自治体に多大なご協力をいただきました。記して深く感謝申し上げます。

九州北西部の地震観測点分布



Development of a WIN/WIN32 format seismic waveform data reader

*Takuto Maeda¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hirotsuki University

WINファイルはト部・他(1990)により開発された地震波検測システム（WINシステム）の地震波形ファイルである。防災科学技術研究所によって制定されたWIN32を含めたWIN/WIN32（以下まとめてWINと略す）ファイル形式は、現代の日本国内における連続地震波形流通における事実上の標準である。WINはデータ容量の小ささやデータの結合性など優れた点を持つが、その反面ファイル形式はやや難解であり、WINシステムで地震波形を使う場合以外には、他フォーマットへの波形記録変換ツールを介するのが常であった。しかし、観測網が稠密化したいま、大容量・連続地震波形記録の解析においては、この波形フォーマットの変換がデータ解析における最大のボトルネックであり、その傾向は今後ますます顕著になっていくと予想される。そこで本研究では、これまでよりもはるかに高速にWINファイルの読み出しができるライブラリを作成した。

本ライブラリは、Fortran2008言語のモジュールとして作成した。FORTRANは古典的な言語ではあるが、Fortran2003/2008といった最近の規格では、動的なメモリ確保やオブジェクト指向といった現代的な機能が含まれている。特に、Fortran2008で規格が制定され、最近になって多くのコンパイラで実装された非同期入出力は、WINファイルのような複雑かつ多数のファイルの入力にきわめて有効である。本研究で開発したライブラリでは、他形式へのファイルの変換・保存や、複数のWINファイルの結合などの処理を一切必要とせず、時間的に連続した複数のWINファイルから目的のチャンネルの記録をFortranの配列として直接取得できる。中間処理が不要になったことで、処理の単純化のみならず高速化に対して劇的な効果が見込まれる。さらに、本ライブラリはWIN形式とWIN32形式の両方に対応し、ファイル形式の簡易自動判定機能も備えている。

また、開発したライブラリでは、WINファイルのファイル内容をそのままメモリイメージとして読み込むロード部分と、メモリ上に格納されたWINファイルから必要なデータを抽出するデコード部分を分離実装した。これらとFortran2008の非同期入出力機能を用いて、あるファイル内容のデコード中に次のファイルをメモリに読み込む並列動作を実現した。このことにより、ロードとデコードのうち片方の処理時間を隠蔽することができ、多数のファイルを読み込む場合に高速化が期待される。このような隠蔽処理は並列数値計算においてCPUやGPU間の通信時間の隠蔽にしばしば用いられてきたが、本報告ではこれをファイル入力に対して活用した。

開発したライブラリの性能を評価するため、WIN32波形を読み込むdewin_32プログラムを比較対象とした実験を行った。防災科学技術研究所Hi-netにより収録された任意の日付時刻の連続速度波形ファイル1時間分を対象とし、そこに含まれる全てのチャンネルを読み出す。WIN32ファイルはLAN上のNASに格納されているものとする。dewin_32と同等の機能を持つツールを今回開発したライブラリに基づいて作成し、読み込み速度を比較した。

実験の結果、dewin_32で1時間分のファイルの全チャンネルの読み込みと出力に最大621秒かかったところ、本ツールでは、非同期入力なしで267秒、非同期入力ありで236秒で読み込めた。また、Fortran言語上で利用する場合は、そもそも読み込んだデータを一旦ファイルに保存する必要がない。そこでデータの出力に掛かる時間を無視すると、読み込み時間は非同期入力なしで38秒、ありで21秒まで短縮された。実際の解析でHi-net全チャンネル1時間分データが利用可能になるまでの時間は、本研究で開発したツールではdewin_32と比べて最大約20倍短縮されたことになる。読み込みのみに限定すると、非同期入力の導入によって性能がおおむね倍になった。

比較に用いたWIN32ファイルの1時間分の総容量は約1GBであり、この結果はデータ通信速度に換算すると約

400Mbpsに相当する。これは実験環境におけるLAN（1Gbps）の通信の実効速度の上限に近い。すなわち、ネットワークファイルシステムに連続記録が配置されている環境においては、もはやこれ以上の劇的な速度向上は望めない。

本研究で開発したライブラリは、周辺ツールや利用マニュアル等を整備の上、オープンソースとして公開する予定である。講演ではアルゴリズムの詳細の説明、高速データ読み込みとその利用の実演、およびコードの公開を行う。

謝辞 本研究では防災科学技術研究所により登録ユーザーに対して配布されているwin32toolsを利用しました。記して謝意を表します。

Development of software for strong-motion seismometers using RaspberryPi

*Takamori Ito¹

1. aLab Inc.

IT強震計(鷹野他 2004)では、自助共助を目的とした「草の根型地震防災情報システム」を実現することを目指していた。その目的のためには、システムの標準化とともに、装置・運用コストの低価格化が必要とされていた。運用コストの低廉化については、VPS(virtual private server)とVPN(virtual private network)を用いた運用試験を実施している(伊藤他 2019)。

このネットワークに接続する地震計の一部に、RaspberryPiにアナログデバイセズ社のMEMS加速度センサのADXL355を接続して使用している。微動観測には能力不足だが強震観測には十分な精度を持ち(赤澤他 2019)、部品代15000円程度でIT強震計試作機(約60万円)以上の機能を実現できるので、現時点で製作可能で能力的に実用的な強震計では最も安価なものといえる。材料は一般に入手可能なもののみのため、誰でも部品を集めて組み立てることができる。ソフトウェアも、RaspberryPiがLinuxマシンなので必要な処理を自作すれば何でもできるが、ハードウェアの組み立てに比べて難易度が高い。RaspberryPiは起動ドライブが(micro)SDカードとなっており、このイメージをコピーすればシステムを簡単に複製できる。そこで、必要な機能を全てインストールしたSDイメージを作成し、関係者で共有するとともに、一般配布することとした。テレメータ機能に関する部分はWINシステムをそのままインストールしている。そのため、WINシステムの知識があれば、データ転送や保存の設定は容易に追加できる。表示機能は、旧来のIT強震計のもの(伊藤他 2006)をベースに、JavaScriptを用いたWeb経由の表示(伊藤 2018)を実装している。RTCやGPSモジュールを接続すれば機能するように設定しており、ネットワーク非接続の運用にも対応している。OpenVPNもインストールしており、サーバで作成した証明書と鍵ファイルをインストールすればすぐに低コストでVPN接続できる。ADXL355を接続しなくても(自身はセンサにならない)、既存のwinロガーの出力を受けてVPNでトンネルした経路を用いてサーバに送るという運用に用いることもできる。

イメージの初期状態は、有線LANはDHCP設定で波形記録はSD上、GUIモードで起動する。この状態では、家庭のテレビにHDMI接続してブラウザを起動することで波形等表示ができる。また、WiFiをアクセスポイントとして設定しているので、スマートホン等接続して操作することも可能になっている。この状態から必要に応じて、記録メディアの変更(SDの劣化防止)、CUIモードへの変更(負荷低減)、IPアドレスの固定化、VPN設定、WiFi接続設定などを行い、利用環境に合わせて運用できる。

小型低価格といえども、RaspberryPiはLinuxマシンであり、サーバと同じソフトウェアを実行できる。負荷の大きい表示も、Web利用のためRaspberryPiそのものの負担は大きくない。今後、サーバと共通の演算・表示機能の開発を進めていく。それらは、他の環境にも容易に移植可能であり、IT強震計の当初の目的に沿った自助・共助のためのアプリケーションの研究・開発に利用できる。

このRPI-ITKのSDイメージファイルは、

<http://itk.seism.jp/download/>

で配布している。

(参考)

鷹野・伊藤・原(2004), IT強震計-その概念と試作-, 地震学会, 2004.10

伊藤・鷹野・林(2006), IT強震計用に開発したWeb利用の動的表示技術, 地震学会, 2006.10

伊藤(2018), JavaScriptによる地震波形表示の試み, 連合大会, 2018.5

伊藤(2018), WINシステムで利用可能なWeb利用のリアルタイム波形表示, 地震学会, 2018.10

伊藤 他(2019), 廉価・容易に構築できる地震計ネットワークの提案, 連合大会, 2019.5

赤澤・伊藤(2019), 廉価な高密度強震観測ネットワークの実現に向けた試験観測, 連合大会, 2019.5

ITK Wave Viewer (winPrint.js), (<http://seism.jp>)

An investigation into the optimal number of bins for phase picking based on the probabilistic density function of seismic wave amplitudes

*Mitsutaka Patrick Oshima¹, Hiroshi Takenaka²

1. Shimizu Corporation, 2. Okayama University

◆ はじめに

著者らは、地震波形の振幅の統計分布に基づいて地震波形中の直達P波、直達S波の到達時刻を検出する新たな方法を提案している。提案手法では、地震波形中の各部の振幅の統計分布（確率密度関数）と、コーダ波などのランダム性の高い波の振幅分布であるRayleigh分布やGauss分布の確率密度関数との違いの大きさを計算することにより、P波およびS波の到達時刻を求める。

本来、データの確率密度関数を求めるには、クロスバリデーションにより誤差を最小化するようなガウスカーネルを求め、これを用いてデータを平滑化するなどの作業が必要となる。しかしながら、提案手法では、各時刻において確率密度関数を求める必要があるため、確率密度関数を高速に計算する必要がある。そこで本研究では、度数分布（ヒストグラム）を用いて確率密度関数を近似することとした。

度数分布で確率密度関数を近似する際には、あらかじめ階級数を決めておく必要があるが、この階級数によって得られる確率密度関数の形状は変化する。これは、階級数の設定によって提案手法のP波及びS波の到着時刻の読み取り誤差が変化することを意味する。このため、本研究では読み取り誤差を最小化するための最適な階級数の設定方法について検討を行った。

◆ 手法の概略

近地地震の観測地震波形は、震源から観測点まで最短距離を伝搬して到達する直達波が初めに現れ、続いて、屈折波、反射波、散乱波といった波が現れる。つまり、直達波が到達してからの時間が長くなるにつれて、地震波は、直達波から、様々な場所で反射、屈折、散乱等を繰り返し、直達波よりも長い距離を伝搬した波の集合体になっていく。これに伴い、地震波の振幅が従う統計分布も変化するようになる。

ランダム位相を持つ波の集合のrmsエンベロープの振幅分布はRayleigh分布に従い（例えば、Wallace, 1953、Levanon, 1988）、コーダ波のエンベロープの統計的性質とRayleigh分布の関係についてはTakahara and Yomogida（1992）に理論的に詳細な説明がなされている。一方で、地震波形の後半部分は、さまざまな場所で散乱された波が足しあわされてできた、加法的に生成された波であることから、その振幅分布は中心極限定理からGauss分布に近くなる。このことから、時間の経過に伴う、地震波形振幅の確率密度関数とRayleigh分布あるいはGauss分布との類似度の変化を調べることで、直達P波、直達S波を検出することができる。

提案手法では、地震波形振幅の確率密度関数とRayleigh分布あるいはGauss分布との類似度は、Kullback-Leiblerダイバージェンス：KLD（Kullback and Leibler, 1951）により計算する。KLDの確率密度関数についての非対称性を修正したJensen-Shannonダイバージェンスも用いることができるが、得られる結果が両方で殆ど変わらないため、KLDを用いる。

◆ 検討内容

本研究では、P波およびS波の読み取り誤差が最小化となるような階級数を行うための方法として、統計学においてしばしば用いられている、度数分布を求める際の階級数の決め方を検討した。具体的には、① Square-root choice, ② Sturges' formula, ③ Scott's choice, ④ Freedman–Diaconis' choiceの適用性を検討した。①、②はサンプル数に応じて階級数を決めるもので、サンプル数が同じであれば、データの分布には関係なく階級数は同じになる。③、④はデータに応じて階級数を適応的に定めるものであり、サンプル数が同じでも、データの分布の標準偏差や四分位範囲により階級数は変化する。

本研究では、①～④の指標を用いて計算した確率密度関数を用いてP波、S波の読み取りを行い、それらを気象庁から公開されている検測情報と比較することで読み取り誤差を求めることにより、読み取り誤差を最小化する指標を調べた。

◆ データ

2017年熊本地震の余震の近地強震波形記録を用いた。強震波形記録は、一回積分して速度波形記録とした。P波、S波の到着時刻の読み取りを行う際には、各種のフィルターを掛けることがあるが、本研究ではフィルターは使用していない。

◆ 発表予定

発表ではここに示していない提案手法の詳細を示すとともに、今回行った検討の結果を紹介する予定である。

◆ 謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net観測点の強震波形記録を使用させて頂きました。また、P波、S波の読み取り誤差の計算には、気象庁による検測情報を使用させて頂きました。記して御礼を申し上げます。

Poster session (Sept. 16th) | General session : S03. Crustal Deformation, GNSS, Gravity

📅 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏠 ROOM P
International Conference Halls II and III

S03P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-01] Detection of vertical motion caused by 2018 Boso slow slip using ocean bottom pressure gauges

*Koichi Murata¹, Toshinori Sato¹, Hajime Shiobara², Tomoaki Yamada², Masanao Shinohara² (1. Chiba University, 2. ERI)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-02] Characteristics of laser extensometers and their detection ability of slow slips

*Akio Katsumata¹, Akiteru Takamori², Akito Araya², Masayuki Tanaka¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA, 2. Univ. of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-03] Systematic detection of slow slip events in Kanto, Japan

*Ryota Takagi¹, Naoki Uchida¹, Kazushige Obara² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-05] **Earthquake potential in Costa Rica based on GNSS observations using three scenarios for the geometry of the Central Costa Rica block.**

*Luis Alejandro Carvajal Soto¹, Takeo Ito², Marino Protti³, Hiroshi Kimura¹ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 3. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), Universidad Nacional de Costa Rica)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-06] Postseismic vertical movement in the past 25 years since the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake in the Okushiri Island

*Masanobu Shishikura¹, Takahiro Miyauchi², Tomoo Echigo³, Tanio Ito⁴, Ryoyu Arai⁵, Yoshio Soeda⁶, Daisuke Takeda⁷, Satoshi Kuribatashi⁸, Taiiku Kobayashi⁹, Hideaki Maemoku¹⁰, Yuzuko Tsukahara² (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Chiba University, 3. Geo-Research Institute, 4. Association for the Development of Earthquake Prediction, 5. Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 6. West Japan Engineering Consultants, Inc., 7. PASCO CORPORATION, 8. Tokushima Prefecture, 9. Kanagawa Prefecture, 10. Hosei University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-07] Development of a real-time buoy observation system for tsunami and crustal displacement and its bottom pressure continuous records

*Narumi Takahashi¹, Kentaro Imai², Motoyuki Kido³, Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda², Yasuhisa Ishihara², Hiroshi Ochi², Ryota Hino³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-08] Deployment of new GNSS-A seafloor geodetic observation stations in 2019

*Yuto Nakamura¹, Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yusuke Yokota² (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-09] Gravity change due to glacier melting in Southeast Alaska: numerical modeling and resultant viscoelastic structure

*Kazuhiro Naganawa¹, Takahito Kazama¹ (1. Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-10] Convergence boundary and velocity between Amur and Okhotsk plates in northern Hokkaido inferred by GNSS velocity data

*Chihiro Ito¹, Hiroaki Takahashi², Mako Ohzono², Nikolay Vasilenko³, Alexander Prytkov³ (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate of Science, Hokkaido University, 3. Institute of Marine Geology and Geophysics, Russian)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-11] Post-seismic crustal deformation on the Aso caldera associated with the 2016 Kumamoto earthquake based on PALSAR-2 time-series analysis

*Yuji Himematsu¹, Taku Ozawa¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-12] GNSS observation at southern Kyushu active shear zone and numerical modeling

*Tsuyoshi Watanabe¹, Koichi Asamori¹ (1. JAEA, Tono Geoscience Center)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-13] EnKF estimation of viscoelastic deformation and viscosity structure - Numerical experiments

*Makiko Ohtani¹ (1. GSJ, AIST)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-14] Estimation on fault slip distributions through viscoelastic inversion using Reversible-jump MCMC

*Fumiaki Tomita¹, Takeshi Iinuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S03P-15] The effect of rheology and geometry on postseismic deformation

*Hiroyuki Hoshino¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Makiko Ohtani², Kazuro Hirahara³ (1. Kyoto University Graduate School, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Kagawa University)

Detection of vertical motion caused by 2018 Boso slow slip using ocean bottom pressure gauges

*Koichi Murata¹, Toshinori Sato¹, Hajime Shiobara², Tomoaki Yamada², Masanao Shinohara²

1. Chiba University, 2. ERI

1. はじめに

地震による災害を軽減するためには、地震発生過程を解明し、地殻活動のシミュレーションを通じて地震発生予測を行うことが不可欠である。地震発生モデルを構築するためには、実際の地震にモデルを適用、予測し、実際とのずれからモデルを修正するという作業を繰り返す必要があるが、普通の地震に適用すると数百年以上の時間がかかってしまう。この作業を数年に1回発生する房総沖スロースリップ（SSE）を用いて行えば、モデル構築が15年程度で出来ることになる。SSEの滑り分布を精度よく決定するために、海底圧力計（OBP）による観測が行われている。2013年12月から2014年1月にかけて発生したSSEについて、佐藤・他（地震学会、2016）、Sato et al. (GRL, 2017)は、OBPデータ解析に解析的な関数をfittingする方法でSSEの変動を抽出し、村田・他(地震学会、2018)はマルチチャンネル特異スペクトル解析法(MSSA)の適用によりSSEの変動の抽出を試みた。今回は2018年6月に発生したSSEについて、OBPデータを解析し海底の上下変動の抽出を試みた。

2. 観測と解析

観測は東大地震研所有のOBPを用いて行った。圧力計はParoscientific社の8B7000-2を用いた。2016年8月に海洋調査船「第三開洋丸」によって設置したOBP4台を、2018年9月に海洋調査船「第五開洋丸」によって回収した。観測期間中、2018年6月に房総沖SSEが発生している。

解析では、先行研究で用いられた2点（BOSO2,KAP3）に加え、BOSO1,KAP2の2点を用いた(図1)。

3. 結果

現在、解析途中であるが、OBPのデータにSato et al. (GRL, 2017)と同様の関数をfittingした結果を図2に示す。SSEの期間中、BOSO1で1 cm程度の沈降、他の3点では1 cm程度の隆起の変動があるように見える。関数のfittingによる解析では、2013-2014年のSSEにおいてBOSO2での変動は見られなかった。発表ではMSSAを適用した場合の結果や2013-2014年SSEと2018年SSEとの比較についても議論する。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、第三開洋丸、第五開洋丸を使用させていただきました。両船長以下、乗組員の方々に感謝します。本研究は文部科学省の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援および科研費（25287109）の補助を受けました。

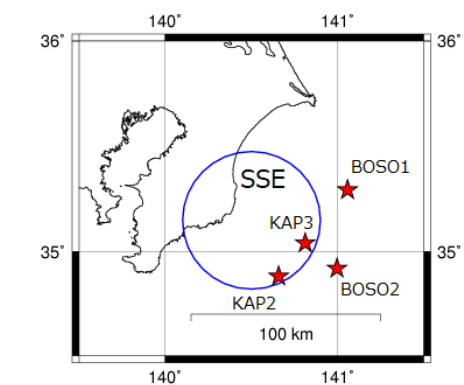


図1.使用したOBPの配置とSSEの発生領域

星印：各OBPの位置

青丸：SSEの大まかな発生領域

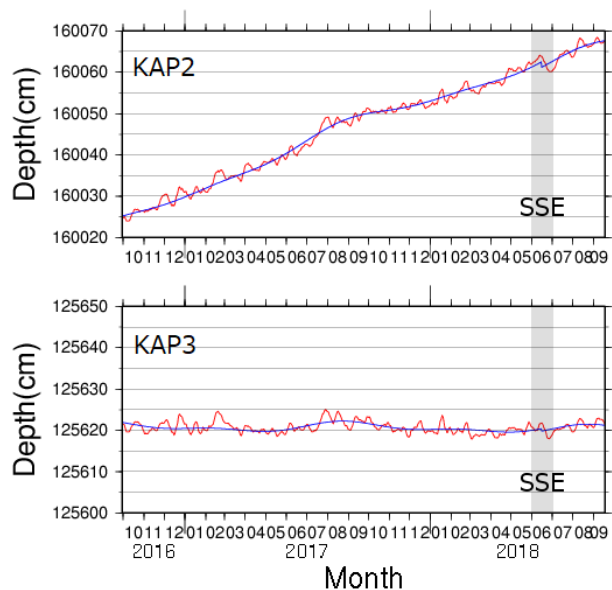
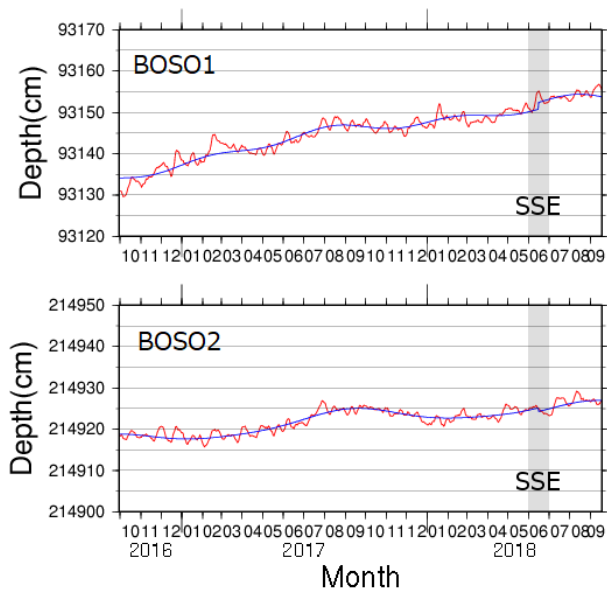


図2.各OBPデータに対し、関数をfittingした結果

赤線：OBPデータ

青線：fittingした曲線

Characteristics of laser extensometers and their detection ability of slow slips

*Akio Katsumata¹, Akiteru Takamori², Akito Araya², Masayuki Tanaka¹

1. Meteorological Research Institute, JMA, 2. Univ. of Tokyo

長基線レーザー伸縮計のネットワークを構築し、他の地殻変動観測機器や地震計などによっては観測されていない周波数・振幅範囲の信号の検出を試みている。Katsumata et al. (2010)によって浜松市天竜区の船明トンネルに構築された基線長400mのレーザー伸縮計に、Araya et al. (2002)によるヨウ素安定化YAGレーザーを導入にして、レーザー伸縮計を再構成し2018年3月から観測を始めた。また、犬山観測点の基線長30mのレーザー伸縮計のデータ収録システムを更新し、同時期から観測を行っている。ともに変動速度の速い伸縮に対応するため、データ収録は10kS/sと高速化した。これまでに得られた約1年間のデータについて、気圧応答・潮汐応答・近傍のダム水位応答に関する基本的な補正を行い、データの基本特性の確認を行ってきた。

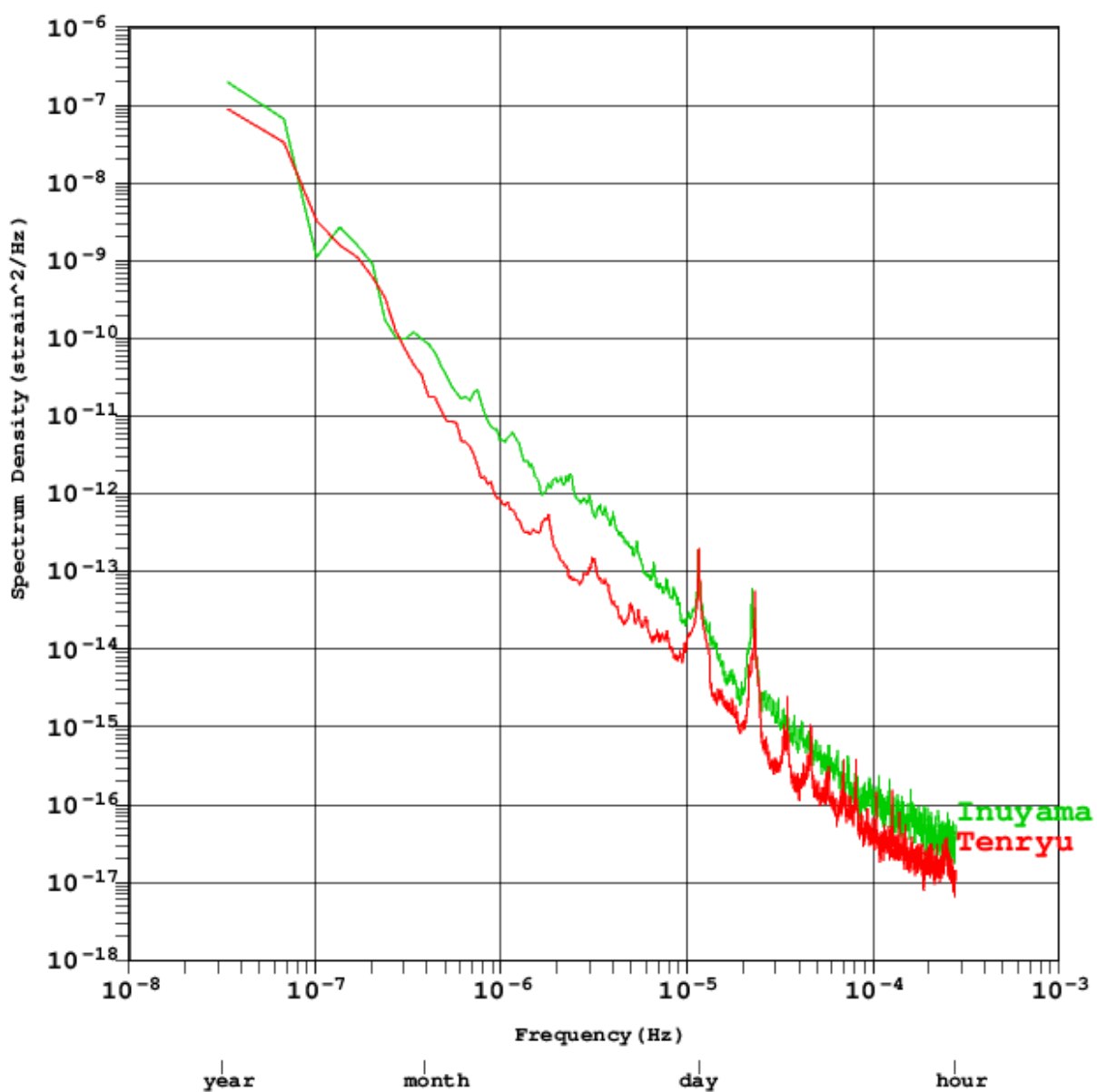
天竜船明レーザー伸縮計について、システム更新後に得られたデータを以前(2007-2008年)に得られていたノイズスペクトルレベルと比べてみると、1時間から1週間の周期帯において今回得られた補正後のひずみノイズレベルはパワースペクトル密度にして1桁ほど小さくなっている。気象環境や処理方式等も影響するので、これが有意な差であるかどうかは断定できない。今回得られた天竜船明観測点のノイズスペクトルと犬山観測点のノイズレベルを比較すると、1時間から1ヶ月の周期帯において、天竜船明観測点のノイズレベルの方が犬山観測点のノイズレベルよりもやや低いレベルとなっている(図)。しかし、その差はパワースペクトルレベルにして1桁よりも小さい。両レーザー伸縮計の基線長には10倍以上の差があるが、両者のノイズレベルに大きな差はないようである。また、1ヶ月から1年の周期帯のスペクトルレベルにはほとんど差が認められない。

天竜船明レーザー伸縮計は、短期的スロースリップと同程度のひずみレートをもつ現象は1日で検知可能な能力を持つと見積もられている。また、長期的スロースリップについても2~3ヶ月で検知可能と見積もられている。犬山観測点のレーザー伸縮計のノイズレベルは天竜船明観測点のノイズレベルとほぼ同等であり、犬山観測点のスロースリップ検出能力もほぼ同等であると考えられる。

Ide et al. (2007)は、スロー地震の地震モーメントがその継続時間に比例していることを示した。地震モーメントと継続時間が比例しているということは、スロー地震のひずみ変化のレートは規模によらずに一定と解釈される。また、現在までのところ、超低周波地震(VLFE)と短期的スロースリップの間のイベントは知られていない。天竜船明観測点と犬山観測点を併せて使用することにより、これまでよりも短い継続時間のスロースリップ現象の検出の可能性があると考えられる。

謝辞

当研究は科学研究費補助金(17H06207)を活用して実施した。



Systematic detection of slow slip events in Kanto, Japan

*Ryota Takagi¹, Naoki Uchida¹, Kazushige Obara²

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

関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上部境界では、房総半島沖において数年おきにスロースリップイベント（SSE）が発生していることが知られている。本研究では、より小さなイベントまで含めたSSE活動様式を理解するため、GNSSデータに基づくSSEの系統的な検出を試みた。使用したデータは国土地理院GEONETの188観測点における1998年から2018年までの日座標値である。SSEの検出には、一枚矩形断層によるモデル時系列と観測時系列の差を最小にするように断層位置をグリッドサーチする手法（Takagi et al., 2019）を用いた。その結果、これまでもよく知られている2002年・2007年・2011年・2013年・2018年の房総半島沖のSSEに加えて、2009年末にも同様の領域において小規模なSSEが発生していた可能性が見出された。2009年12月には小繰返し地震を含むプレート境界付近の地震活動が若干増加し、ごく小規模のSSEがHi-net傾斜計の一観測点で検出されている（防災科学技術研究所, 2010）。本研究により複数のGNSS観測点においても非定常変動を検出したこと、および、小繰返し地震から見積もったすべりレートがやや増加していることから、2009年末の小規模SSEの発生とそれに伴うプレート境界地震の活動増加がより確からしいことが示された。また、2008年末にはより内陸側の房総半島下においてSSEが発生していた可能性も検出され、関東地方のフィリピン海プレート上で発生するSSEは、これまで考えられて以上に複雑な発生様式を持つ可能性がある。

Earthquake potential in Costa Rica based on GNSS observations using three scenarios for the geometry of the Central Costa Rica block.

*Luis Alejandro Carvajal Soto¹, Takeo Ito², Marino Protti³, Hiroshi Kimura¹

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 3. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), Universidad Nacional de Costa Rica

1. Introduction

The Central Costa Rica Deformed Belt is a diffuse predominant northwest dextral-strike and conjugated northeast sinistral-strike faulting area, that represents the western border of the Panama Microplate (PM). This diffuse boundary crosses Central Costa Rica (CCR) from the Caribbean Coast, including the active Cordillera Volcanica Central, the Metropolitan Area (most dense population area in Costa Rica) and the Central Pacific coastline to intersects the Meso American Trench along the subduction of the Cocos Plate (CO).

2. GNSS Observation Data Set

We use 139 GNSS observation sites for inversion. The crustal deformation in Costa Rica is mainly arranged in three groups: 1). Northwestern Costa Rica is dominated by a northward deformation with rates up to 30 mm/yr, rotating and decreasing up to 20 mm/yr northwestward following the Central American Forearc. 2). Southeastern Costa Rica shows deformation to the North-eastward up to 40 mm/yr (opposite to northwestern Costa Rica). 3). Central Costa Rica is characterized by a diffuse deformation pattern oriented mainly to northward, with deformation rates up to a half of those observed in northwestern and southeastern Costa Rica.

3. Models and Method

We integrated interseismic geodetic data with seismicity records and inland faulting traces in order to evaluate earthquake potential in 3 kinematic models with different spatial geometries of the tectonic configuration around Central Costa Rica. Crustal deformation in Central Costa Rica and surroundings is modeled as result: i) kinematic effects of rigid block motions, ii) elastic deformation due to the interaction on subduction and inland tectonic interfaces and iii) internal strain of each tectonic block. We adopted the Markov Chain –Monte Carlo method in order to estimate the Euler poles of each tectonic block, slip deficit rates (SRD) on block interfaces, and internal strain of each block.

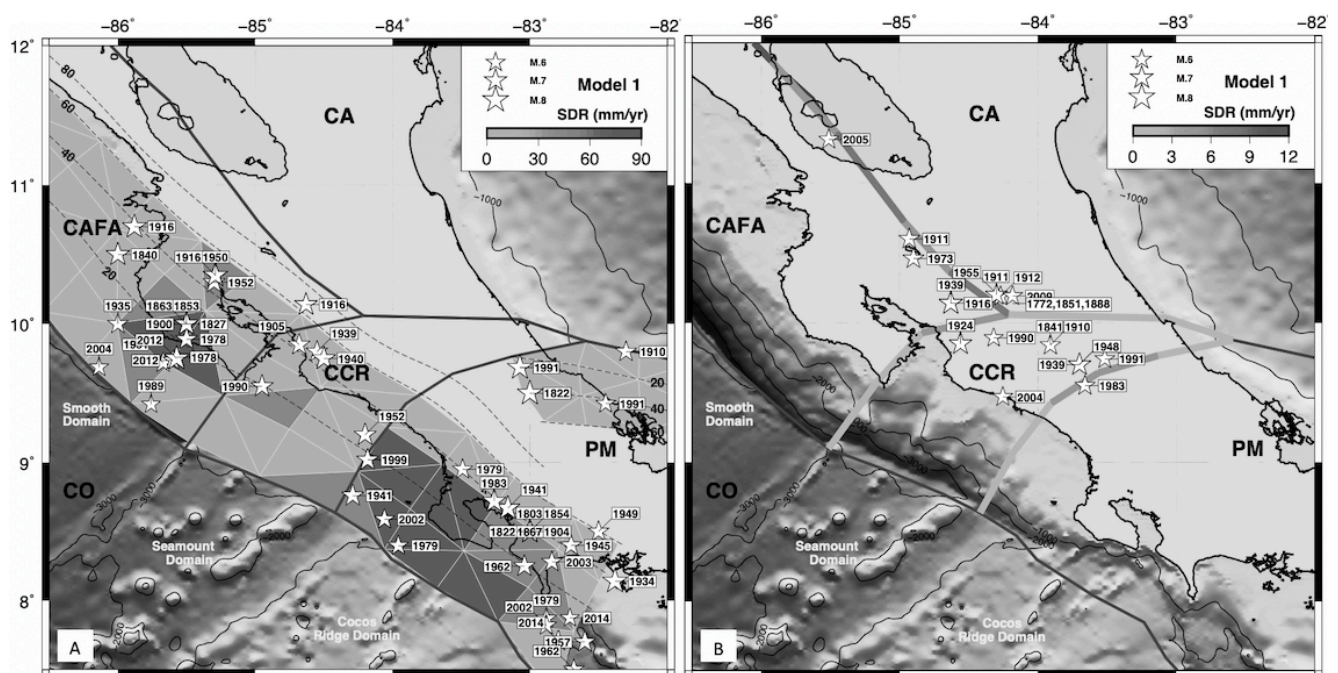
In order to evaluate the earthquake potential, we compare the seismic moment accumulation rate as $Mo = \mu A SDR$ (where μ is the rigidity, and A represent the locked area), with the seismic moment release rate based on a list of $M > 6$ earthquakes from 1798 for subducting earthquakes and from 1772 for inland earthquakes, obtained from previous studies.

4. Results and Discussion

In the Nicoya Peninsula (NP), we calculated a seismic moment deficit rate of $7.05 \pm 0.35 \times 10^{18}$ J/yr, enough deficit to produce an M_w 8.2 earthquake every 318 ± 16 years. In the Osa Peninsula (OP), we determined a seismic moment deficit rate of $27.4 \pm 2.5 \times 10^{18}$ J/yr, this seismic moment deficit rate is comparable to an M_w 8.5 earthquake every 231 ± 21 years. In inland boundaries of Central Costa Rica (CCR), we found up to a seismic moment accumulation rate of $33.4 \pm 3.0 \times 10^{16}$ J/yr equivalent to an M_w 7.3 earthquake with a recurrence period of 299 ± 27 years.

We assume that the seismic moment in a whole segment or patch is accumulated only as elastic strain and is released co-seismically. This assumption represents an upper limit of the earthquake potential since additional effects may contribute to the release of accumulated slips, such as the post-seismic deformation, plastic deformation, and the occurrence of slow slip events.

Figure Caption: Results of the Slip Deficit Rate (SDR) for subduction boundaries (A), inland boundaries (B) and historical seismicity. Figure shows inland boundaries of Model 1 (best model).



Postseismic vertical movement in the past 25 years since the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake in the Okushiri Island

*Masanobu Shishikura¹, Takahiro Miyauchi², Tomoo Echigo³, Tanio Ito⁴, Ryoyu Arai⁵, Yoshio Soeda⁶, Daisuke Takeda⁷, Satoshi Kuribatashi⁸, Taiiku Kobayashi⁹, Hideaki Maemoku¹⁰, Yuzuko Tsukahara²

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Chiba University, 3. Geo-Research Institute, 4. Association for the Development of Earthquake Prediction, 5. Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 6. West Japan Engineering Consultants, Inc., 7. PASCO CORPORATION, 8. Tokushima Prefecture, 9. Kanagawa Prefecture, 10. Hosei University

【はじめに】

1993 年北海道南西沖地震（M7.8）では、奥尻島において顕著な地殻変動が観測された（国土地理院，1994）。宮内ほか（1994）は、地震の約1週間後に奥尻島の海岸に分布する汀線指標の測量を行った結果、島の北端部で約30cm、南端部で約100 cm の沈降量を伴い、南へ傾動したと報告した。一方、奥尻島に発達する更新世中期以降の海成段丘の多段化とそれらの旧汀線高度分布は、地質学的時間スケールでは島の累積的な南東への傾動隆起を示す（宮浦，1975）。両者の垂直変動様式が異なることから、太田(1994)はこの地震を例外的な活動としており、小疇ほか編（2003）は、1993年の地震とは別に傾動隆起を伴う地震発生の可能性を指摘している。

このように奥尻島における1993年地震時の地殻変動と長期的な地殻変動の様式は一見矛盾するようであるが、長期的変動（累積変動）における地震性地殻変動の寄与を評価するには、余効変動の推移を継続的にモニターし、地震サイクルに関連づけて検討する必要がある。そこで筆者らは、地震時およびその後の変動を観測するために、島内 25 か所で独自に測量基準点を設置し、その標高について、地震発生からの 25 年間に 6 回の測定を実施した。

【調査方法】

1993 年 7 月 12 日の地震発生から 6~8 日後に、奥尻島の海岸部の 25 か所に測量基準点を設置し、海面からの高度を測定した。その後 1993 年 8 月（1 ヶ月後）、1997 年 7 月（4 年後）、2003 年 7 月（10 年後）、2013 年 7 月（20 年後）、2018 年 7 月（25 年後）の計 5 回にわたり、海面からの高度および標高の測定を実施した。一部の測量基準点では、この 25 年の間に港湾施設の改修や波浪侵食等で消失したものもあるが、近接地点に測量点を復元して改測を行った。測量に使用した機材は、ハンドレベル、オートレベル、トータルステーション、GNSS による VRS-RTK など、各地点で時間海面から各測量基準点までの比高測量に潮位補正を加えて絶対標高に換算した。近傍に水準点がある場合は、水準点から測量基準点までの水準測量を実施した。VRS-RTK では、水準点での測定を実施して測量精度の検証を行った。

【調査結果】

測量実施期間ごとに観測された上下変位量について、島の北部（北海岸）、東部（東海岸）、西部（西海岸）に分けて以下にまとめた。

- ・1993年7月～8月（地震直後の約1カ月間）

島の全域で沈降傾向にあり、北海岸で最大 30 cm 程度、西海岸で 10~20 cm 程度の沈降が認められる。

- ・1993年8月～1997年8月（地震から約4 年後）

島の全域で10~20 cm 程度の沈降（2.5~5.0 cm/年）が継続している。

- ・1997年8月～2003年7月（地震4年後から10年後までの6年間）

北海岸で1~5 cm程度の隆起（0.2~0.8 cm/年）が確認されたが、その他の地点では10 cm未満の沈降（<1.7 cm/年）となった。

- ・2003年7月～2013年7月（地震10 年後から20年後までの10年間）

北海岸では僅かに沈降，東海岸でも10 cm未満の沈降（ <1.0 cm/年）が継続しているが，西海岸では4～8 cm程度の隆起（ $0.4\sim0.8$ cm/年）が認められた．

・2013年7月～2018年7月（地震20 年後から25年後までの5年間）

北海岸および東海岸で隆起傾向にあり，最大で10 cm程度の隆起（ 2.0 cm/年）が認められる．西海岸では逆に10 cm程度沈降（ 2.0 cm/年）した地点がある．

これらの結果は，測定誤差（数cm以内）を考慮しても有意な数値として評価することができる．地震後20年間の垂直変動は，島の西部や北部で隆起傾向にあり，海岸段丘の高度分布が示す南東への傾動と一見調和的である．しかし，2013-2018年の最近5年間の変動はそれまで沈降傾向にあった島の東部が逆に隆起に転じていることから，それまでの垂直変動の傾向とは異なっている．この地殻変動の傾向の反転が一時的なゆらぎなのか，今後も継続していくのか，引き続き定期的な観測を続けて検討を進める予定である．

本調査は，科学研究費基盤(B)「岩石海岸地形の総合カタログに基づく地震隆起・地震発生予測に関する研究」（研究代表：宮内崇裕）による成果を含む．

引用文献

小疇 尚・野上道夫・小野有五、平川一臣編（2003），日本の地形 2 北海道，東京大学出版会，359p

国土地理院（1994），北海道南西沖地震後の地殻変動（GPS 観測結果），地震予知連絡会会報,51, 01-10, p 67-70

宮内崇裕・伊藤谷生・宍倉正展・荒井良佑（1994），1993 年北海道南西沖地震と奥尻島の第四紀地殻変動，科研費A「平成 5 年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究」，p21-26

宮浦 正（1975），奥尻島の海成段丘と第四紀地殻変動，第四紀研究，14, 23-32.

太田陽子（1994），海成段丘からみた奥尻島の第四紀地殻変動の傾向と 1993 年地震の例外制，号外海洋 7『北海道南西沖地震と津波』，p70-73

Development of a real-time buoy observation system for tsunami and crustal displacement and its bottom pressure continuous records

*Narumi Takahashi¹, Kentaro Imai², Motoyuki Kido³, Yusaku Ohta³, Tatsuya Fukuda², Yasuhisa Ishihara², Hiroshi Ochi², Ryota Hino³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Tohoku University

南海トラフの東南海地震と南海地震の発生域には、地震・津波観測監視システム（DONET）が整備され、緊急地震速報や津波警報・注意報の発表や地方自治体やインフラ事業者による津波即時予測システムによる津波予測に使用されている。日本海溝域には日本海溝海底地震津波観測網（S-net）が整備され、緊急地震速報や津波警報・注意報への利活用も始まった。しかし、日本列島は多くの沈み込み帯に囲まれており、未だDONETやS-netのような海底観測網が整備されていない地域もある。そこで、補完できるシステムの一つとして、ブイシステムを用いた津波・地殻変動観測ブイシステムを開発してきた（Takahashi et al., 2014; 2015; Imano et al., 2015; Imai et al., 2018）。このシステムを用いた海域試験が行われ、1年間の連続観測を実現した。本講演では、この海底水圧計等を用いたデータ解析の結果を報告する。

この津波・地殻変動観測ブイシステムは、海底で水圧データを取得し、音響通信を用いてブイにてデータを中継し、イリジウム通信を用いて陸上にデータを伝送するものである。海底水圧データは、0.023 Hzのローパスフィルターをかけて15秒サンプリングでデータを取得している。津波と地殻変動の観測のダイナミックレンジは8メートルを確保し、津波を検知した場合は15秒間隔でデータを伝送する。このブイシステムでは、ブイにAquadoppsセンサーによる流向・流速観測、気象センサーによる温湿度、気圧、風向・風速、降雨量の観測、更に、Precise Point PositioningによるGNSS測位観測も同時に行っている。海底水圧データには、海流による海水密度変化や気象による気圧変化等の影響も受けるため、気象、海象、津波、地震等地下で発生するイベント、地殻変動等による観測データの分離が課題である。

海域試験は、2015年12月から1年間にわたって、南海トラフの熊野灘沖海域で行われた。設置地点の水深は約2,900メートルである。上述のデータの連続観測の他に、海底に6台のトランスポンダーを設置し、GPS/A観測も実施している。本研究では、海底水圧計データに2-4分、4-8分、8-16分、16-32分、32-64分、64-128分、128-256分のバンドパスフィルターをかけ、観測された現象の特性を調べ、海底で観測された様々な現象の解釈を試みた。

海底水圧計には、いくつかの種類のシグナルが記録されている。特に多く観測されたのは、16分以下の周波数成分を多く含むシグナルで、500秒程度の継続時間を持つ。GNSS測位データや気象データとの相関は見られないため、この信号は、スローイベント等の地下からのシグナルと考えられる。また、低気圧や台風などの気圧の変化は、128-256分の周波数成分の記録とよく相関している。また、3日程度の継続時間を持つシグナルも観測された。このシグナルは2-16分の周波数成分を持ち、平均して月1-2回の頻度で観測された。数日間の継続時間を持つシグナルとしては、タービダイトが考えられる。このブイ設置海域の東側には天竜海底谷があり、熊野灘から天竜海底谷に合流する小規模の海底谷がある。カリフォルニア沖（Bowen et al., 1984）やカナダ東部沖（Stow and Bowen, 1980）でも数日間継続したシグナルとしてタービダイトを観測したことが知られている。今後、DONETデータにも同様の処理を通じてこのシグナルを検出し、温度センサーによる変化の検出を試みる。

Deployment of new GNSS-A seafloor geodetic observation stations in 2019

*Yuto Nakamura¹, Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yusuke Yokota²

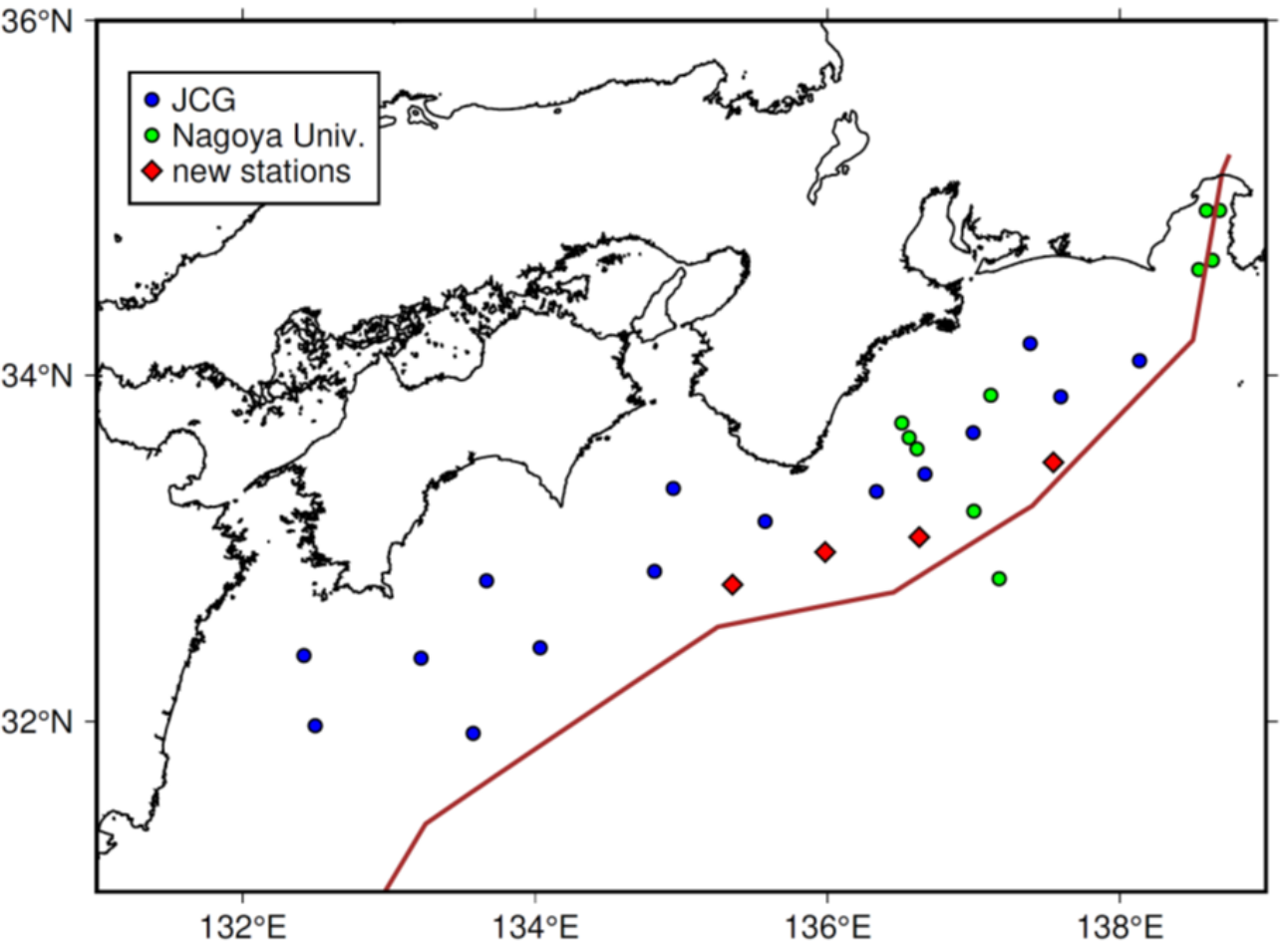
1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

海上保安庁では、南海トラフと日本海溝の陸側海域にGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）を用いた海底地殻変動観測網を展開し、測量船による定期的な観測を実施している。これまでの観測から、これらの海域における海底地殻の動きや、広範囲で未解明であった陸側と海側のプレート間の固着具合の分布を明らかにするなど成果を挙げている。2019年度は新たに紀伊半島の南西沖から南東沖にかけてのトラフ軸沿いに4点の観測点を設置し、観測網を更に拡大する予定である。本発表ではこれらの新規観測点の予定されている位置を提示し、設置する地震学・測地学的意義について議論する。

潮岬沖と熊野灘に現在設置されている観測点（SIOW、KUM1、KUM2、KUM3）は沿岸部に比較的近い海域に分布が偏っており、より沖合のトラフ軸近傍の海域は観測網の整備が進んでいない。そのため、これらのトラフ軸近傍の海域には海底の動きやプレート間の固着具合の分布が未だに明らかにされていない領域が存在する（Yokota et al. 2016）。今年度設置を予定している観測点は既存の観測点より沖合に設置される予定であり、これらの新規観測点を継続的に観測することでトラフ軸近傍の海底の動きやプレート境界浅部の固着具合が明らかになることが期待される。

参考文献：

Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, A. Asada (2016): Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, doi:10.1038/nature17632



Gravity change due to glacier melting in Southeast Alaska: numerical modeling and resultant viscoelastic structure

*Kazuhiro Naganawa¹, Takahito Kazama¹

1. Kyoto University

1. 氷河融解に伴う固体地球の変形

温暖化による現代の氷河融解は海面上昇の要因の一つとして大きな関心ごとであり、これまで高度計・重力計・GNSSなどの測地観測によって、その変動が監視されてきた。しかし、これらの測地観測では様々な固体地球の応答が重畳して観測されるため、現代の氷河融解の寄与を測地観測データだけから定量的に把握するのは困難である。特に、氷河融解は地球表層での質量分布変化だけでなく固体地球の変形(GIA: Glacial Isostatic Adjustment)をも伴うため、様々な時空間スケールで海水準変動・地殻変動・重力場変動などを引き起こす。すなわち、現代の氷河融解量を正確に把握するには測地データの取得だけでは不十分であり、過去～現代の氷河融解に伴う固体地球変動を数値的にモデル化するなどの工夫が必要である。また、GIAの大きさは上部マントルの粘性率などの地下構造パラメータにも強く依存する。このことはGIAモデリングによって対象地域の地下構造を把握できることを意味しており、この点からGIA変動は地殻ダイナミクス研究においても非常に興味深い研究対象と言える。

2. アラスカ南東部のGIAモデリングに関する先行研究

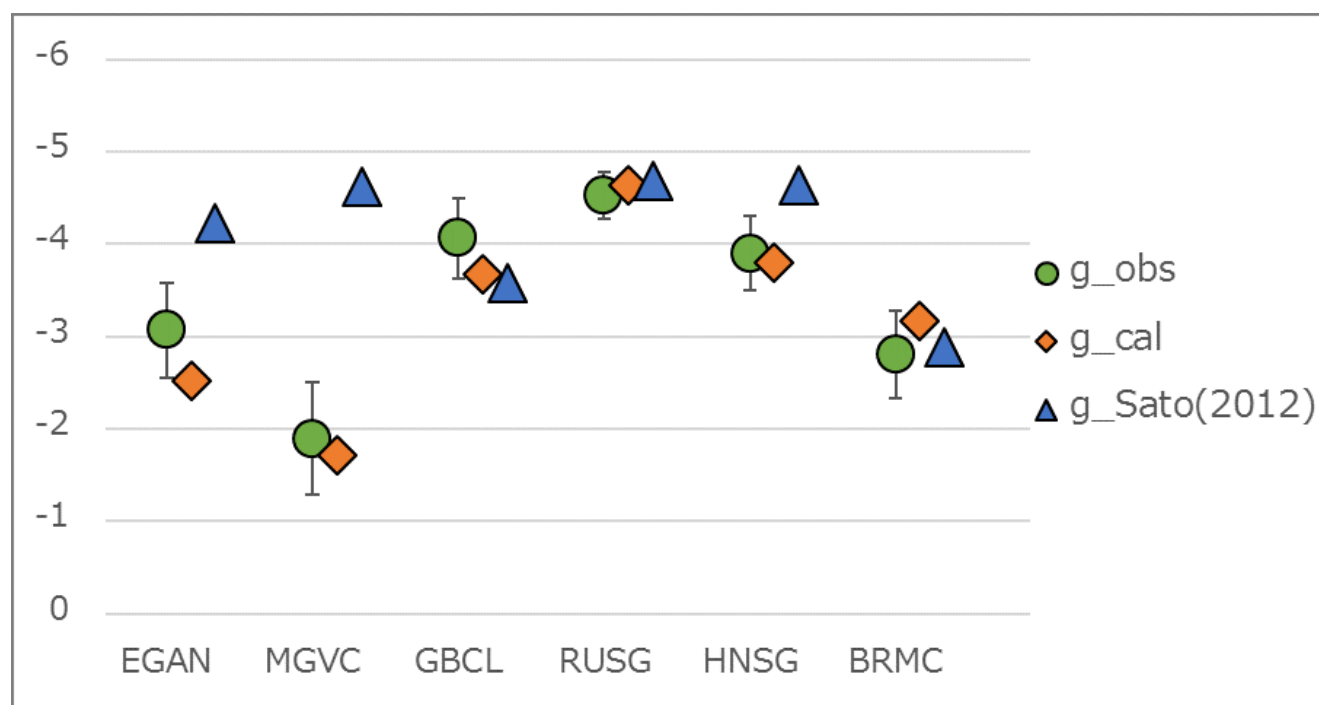
本研究の対象地域であるアラスカ南東部は現在約 $16 \text{ km}^3/\text{yr}$ の氷河が融解しており(Larsen et al., 2007)、氷河融解の更なる加速の可能性も指摘されている(Arendt et al., 2002)。当地域では2000年代以降から稠密なGNSS網が整備され、最大約 3 cm/yr の地表隆起が観測されてきた(Larsen et al., 2004)。この観測結果を用いて、Larsen et al. (2005)やSato et al. (2012)などの先行研究は、地球内部モデルに基づく荷重グリーン関数と過去～現在の氷河融解分布の時空間的な畳み込み積分によって当地域のGIA変動を数値的に計算し、その結果地殻変動データを精度良く再現することができた。一方で、当地域では2006年より絶対重力計による観測が繰り返し行われており、 $-2 \sim -5 \text{ microGal/yr}$ の絶対重力変化が観測されてきた(Sun et al., 2010; 風間ほか, 2015)。しかしながら、これらの先行研究では重力変化を定量的に再現するような数値モデルは十分に構築されておらず、モデルと観測に乖離が存在するままであった。そもそも重力変化は質量分布の変化を意味しており、特に氷河域での観測では現代の氷河融解を直接的に把握できるという利点がある。すなわち、アラスカ南東部で観測された絶対重力変化を精度良く再現することで、現代の氷河融解をはじめとした諸変動をより正確に理解できると期待される。

3. アラスカ南東部重力変化の数値的モデリング

そこで本研究は、当地域の重力場変動を説明しうるGIA数値モデルの構築を行った。当地域のGIA効果は「現代の氷河融解の寄与」、「過去のグローバルな氷河融解の寄与」、「過去のローカルな氷河融解の寄与」の3つに分けられる。まず、現代の氷河融解の寄与は、地球内部構造1066A(Gilbert and Dzwinski, 1975)から得られる弾性荷重グリーン関数(Matsumoto et al., 2001)と、アラスカ南東部における現代氷河融解モデルUAF07(Larsen et al., 2007)およびUAF05(Arendt et al., 2002)を空間的に畳み込み積分することで推定した。次に、過去のグローバルな氷河融解の寄与は、地球内部構造VM5a(Peltier et al., 2015)を用いて粘弾性荷

重グリーン関数を作成し(Peltier et al., 1974; Spada et al., 2008)、それを氷河融解史モデルICE-6G(Peltier et al., 2015)と時空間的に畳み込み積分することで推定した。最後に、過去のローカルな氷河融解の寄与を計算する際には、まず先行研究で推定されている地下構造(Sato et al., 2012)のうち「リソスフェアの厚さ」と「上部マントルの粘性率」の2つを可変パラメータとし、この2つのパラメータの任意の組み合わせによって100個の地下構造モデルを作成した。その後、各地下構造モデルを用いて粘弾性荷重グリーン関数を作成し(Peltier et al., 1974; Spada et al., 2008)、それをLarsen et al. (2004,2005)の氷河融解史モデルと時空間的に畳み込み積分することで当地域の重力変化を推定した。このような計算を100個全ての地下構造モデルに対して実行し、重力変化の推定値と観測値の残差が最小になるような地下構造モデルを最適モデルとして採用した。

以上の方法によって推定された重力変化速度(g_{cal})は、絶対重力計で観測された重力変化速度(g_{obs})と残差RMS0.326 micorGal/yrで一致しており、先行研究(Sato et al., 2012)の結果($g_{Sato(2012)}$, RMS=1.265 microGal/yr)と比べて残差RMSが7割以上減少した(下図参照)。また、本研究で推定された地下構造パラメータのうち、上部マントルの粘性率は先行研究と同じ値(1.0×10^{21} [Pa s])であったものの、リソスフェアの厚さは60 km→56 kmと、従来の推定値よりも更にリソスフェアが薄い可能性が示唆された。今後は当地域のテクトニクスも踏まえ、更なるモデルの向上と議論を進めていきたい。



Convergence boundary and velocity between Amur and Okhotsk plates in northern Hokkaido inferred by GNSS velocity data

*Chihiro Ito¹, Hiroaki Takahashi², Mako Ohzono², Nikolay Vasilenko³, Alexander Prytkov³

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate of Science, Hokkaido University, 3. Institute of Marine Geology and Geophysics, Russian

東アジア、特に日本列島周辺のテクトニクスはプレート運動の相互作用を受け複雑である。日本海東縁部で発生する地震はいくつかのプレートの相互作用によると考えられているが、北海道北部の西方沖、1940年積丹沖地震(M7.0)と1971年サハリン南西沖地震(M7.1)の間には地震空白域が存在する。また、陸域にあたる北海道北部の日本海側にはサロベツ断層帯が位置し、地震調査研究推進本部による長期評価においてM7.6程度の地震が発生する可能性が指摘されている。プレート境界モデルは多くの研究で提案されており、サハリン南部から北海道北部にかけての陸上にプレート境界が存在する可能性も示されている。さらに、震源分布や地質構造から、北海道は東西で異なる構造を持つこと明らかになっている。この境界の有無を検証し、測地学、地震学、地質学の異なる側面からの見解を考慮した包括的な議論をするため、本研究ではOkada(1992)の解析解を用いて衝突帯にディスロケーションモデルを適応し、GNSS観測による速度データ(国土地理院GEONET)から境界の位置、走向、収束速度、弾性層厚さを同時推定した。最適解の決定にはグリッドサーチを使用し、残差が最小になるパラメータの組み合わせを最終的な解とした。本研究では断層傾斜の推定や、GNSS速度から算出した歪み速度を用いた解析も行った。無限に長く、鉛直な断層を仮定した場合に推定された境界位置は、東北東-南南西方向で概ね震源分布、地質構造の境界と一致した。推定弾性層厚さは21.6 kmであり、地震発生下限の深さを示すD90は北海道北部で20-30 km、モホ面の深さはおよそ30 kmである。このモデルにおける厚さの推定精度はほかのパラメータに比べると低いが、地震学的な不連続面の深さと同程度の値であることから、境界位置や速度の推定精度を保証していると考えられる。推定された収束速度は16.5 mm/yrであり、この値は測地学的データを用いたプレート間相対速度を推定したいくつかの先行研究と一致する。本研究では測地学、地震学、地質学データ、3つの独立したデータにより推定された境界位置が概ね一致することから、この地域に何らかの境界が存在する可能性を支持する結果となった。

Post-seismic crustal deformation on the Aso caldera associated with the 2016 Kumamoto earthquake based on PALSAR-2 time-series analysis

*Yuji Himematsu¹, Taku Ozawa¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2016年熊本地震はおよそ45 kmにわたって布田川・日奈久断層が破壊され、最大2m超の地殻変動を伴った。干渉合成開口レーダ (InSAR) などの観測により、布田川断層の破壊領域の北東端は阿蘇カルデラ内にまで到達したことが報告されている。地震に伴い阿蘇中岳を含むカルデラ中央部では40 cm程度の沈降が観測された。九州全体が南北方向の引張応力場下にあることから、阿蘇中岳を含むカルデラ中央部の沈降を断層運動で説明するためには断層の傾斜が南東である必要がある。これは阿蘇カルデラの南西に位置する布田川断層の傾斜方向（北西傾斜）とは一致しない。一方、阿蘇火山は2014年の小規模噴火以降、火山活動が活発な状態が継続している。2016年10月には36年ぶりの爆発的噴火が発生し、2019年5月にも小規模噴火が発生した。2016年以降の阿蘇火山における純粋な火山性地殻変動を抽出・評価するためには、観測結果に重畳している地震後地殻変動との分離が不可欠である。本研究の目的は①地震時・地震後地殻変動の検出と数値計算による再現を通して阿蘇カルデラの変形様式を明らかにし、②2016年以降の阿蘇火山における火山性地殻変動の抽出することにある。本発表では衛星SARが明らかにする熊本地震後の阿蘇カルデラにおける地殻変動の描像と、その時空間変化について報告する。本研究では2016年熊本地震の地震後地殻変動を検出するためにALOS-2/PALSAR-2が撮像したSARデータに、SAR時系列解析手法であるStacking法とSmall Baseline Subset (SBAS) 法を適用する。いずれの手法も対流圏伝搬遅延による影響を軽減し、微小な地殻変動の抽出を実現する。PALSAR-2はSAR画像の撮像に植生の影響を受けにくいL-bandのマイクロ波 (波長23.6 cm) を用いており、植生に富んだ日本の火山における地殻変動観測には優れている。標高依存成分は国土地理院提供の10mメッシュ数値標高モデル (DEM) を用いて補正した。

予備解析として熊本地震後から2018年前半までの期間において、異なる軌道 (Ascending, Descending軌道) の2つの観測パスから撮像されたSARデータ (Path 20, 23, 130, 131) に対してStacking法を適用した。各観測軌道における衛星視線方向の累積変位量に2.5次元解析を適用することにより、独立した2組の準上下・準東西方向の変位量を推定した。準東西変位においては地震時に阿蘇カルデラ北西部に存在が示唆された南東傾斜の断層上端位置に沿って変位の不連続が検出された。阿蘇中岳を含む阿蘇カルデラの中心からカルデラ東側の領域で8 cm程度の西向き変位を示した。一方、変位の不連続の北西側では顕著な準東西変位は検出されなかった。ここは本震に伴う側方流動により、およそ北向きに1m以上の地殻変動が生じていた領域である。阿蘇中岳からカルデラ南西部にかけて、準東西成分が西向きから東向きになだらかに変化していたことも確認した。準上下変位においてはカルデラ北西部から中岳にかけて10 cm程度の沈降が観測された。一方、地震時に検出された変位の不連続の位置において、明瞭な変位の不連続は検出されなかった。沈降領域が北西－南東方向にのびる空間分布は地震時に観測された沈降範囲とおおむね一致し、上述の側方流動が生じていた領域でも沈降が観測された。カルデラ南西部では5 cm程度の隆起が観測され、これは阿蘇カルデラ外の布田川断層北側・出ノ口断層南側にかけて連続的に分布している。地震時に観測された地殻変動の描像とはやや異なる。予備解析ではStacking法を適用したため、位相変化の足し合わせに用いた最初と最後の干渉画像に含まれる対流圏伝搬遅延成分が残っている。ここでは各干渉画像に対して対流圏伝搬遅延量を補正していなかった。しかし独立した2組の準上下・準東西変位場はおおむね同じ空間パターンと同程度の変位量を示しており、ある程度信頼できるといえる。様々な干渉画像を用いて各画像撮像期間における変位速度を最小二乗的に推定するSBAS法との結果を比較することにより、検出した地震後地殻変動の確からしさを検証する。また熊本地震と阿蘇火山の火山活動の関係を議論する上で、カルデラ内の断層が中岳 (草千里ヶ浜) 直下の浅部マグマ供給源に到達しているか否かで、断層運動が浅部マグマ供給源に及ぼす影響は大きく異なると言われている。地震時・地

震後地殻変動の描像の比較を通して，カルデラ内の断層形状についても議論する．

GNSS observation at southern Kyushu active shear zone and numerical modeling

*Tsuyoshi Watanabe¹, Koichi Asamori¹

1. JAEA, Tono Geoscience Center

近年のGNSS速度場を用いたひずみ速度の解析から、南九州には 10^{-7} /yrを上回るせん断ひずみ速度の大きな領域（以下、南九州せん断帯という）の存在が明らかにされている。同領域は、北緯32度付近を幅約50 kmにわたって九州を東西に横切るように分布している。また、同領域では1997年に鹿児島県北西部地震

（M6.5、M6.3）、1994年に鹿児島県北部地震（M5.7）、1968年にえびの地震（M6.1）などのM5～6クラスの内陸地震が発生しているが（宮町ほか, 1998）、これらに対応する明瞭な活断層の分布が認められていないことなどから、これらの地震は活断層や地質学的な断層として知られてはいないものの、被害地震を引き起こす断層が地下に存在することを示唆（村田, 1999）しているのかもしれない未成熟な未知の断層の運動によるもの可能性も指摘されている（村田, 1999）。本研究では、このような地形的に活断層の存在が不明瞭な領域での地殻変動を明らかにするため、南九州せん断帯を南北に横断するように10ヶ所のGNSS観測点を設置し、2016年2月より地殻変動観測を開始した。2016年4月～2018年11月に得られた変位速度を用いて、鉛直横ずれ断層モデル（Savage and Burford, 1973）に従って、断層の固着域の深さ・すべり速度などを推定したところ固着域最深部が15～16 km、深部のすべり速度が12～14 mm/yrで左横ずれの運動が生じていることを明らかにした（渡部ほか, 2019）。

続いて、このような深部すべりが地殻浅部の変形にどのような影響を及ぼすかについて考察した。既往研究では、地下深部の横ずれの断層運動によりその直上の地殻内部には花弁状のすべり面（フラワー構造）が発達し、地表に雁行状のリーデルせん断帯が形成される（Naylor et al., 1986）ことが知られている。そこで、本研究では、南九州せん断帯の形成過程について、“リーデルせん断帯の形成”という観点から有限差分法を用いた三次元の数値シミュレーションを行った。モデルについて、媒質は、モール・クーロンの破壊基準に従う弾塑性帯（物性パラメータは、図1-A内に記載）を仮定し、縦方向100 km、横方向400 km、深さ方向15 kmの領域を設定した。そして、深さ15 kmの底面にGNSS観測より得られた7 mm/yrの左横ずれの相対運動を与えた。また、相対運動と直交する境界面にはローラー条件を課した（図1-A）。その結果、既往研究より得られていた深部から立ち上る花弁状の構造や地表の雁行状のリーデルせん断の形成が確認できた。定性的ではあるが、この結果を1997年鹿児島県北西部地震の余震分布（Miyamachi et al., 1999）と比較すると、東西方向の2本の平行に並ぶ余震分布はリーデルせん断に対応し、南北方向の断面に見られる深部から浅部にかけて広がる余震分布は花弁状の構造に対応しているようにも見える（図1-B）。ただし、地表では活断層は分布していない（村田, 1999）。この結果は、物性パラメータや地下の不均質構造、摩擦や水の影響に関する検討は今後必要ながらも、地形的に活断層の存在が不明瞭な地域における未成熟な断層の形成・成長を考える上で本研究のアプローチが有効な手法となり得る可能性を示している。

本発表は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成29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確証技術開発）」及び「平成30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

宮町ほか (1998): 北海道大学地球物理学研究報告, vol.61, pp.85-97.

村田 (1999): 構造地質, vol.43, pp.93-97.

Savage and Burford (1973): Journal of Geophysical Research, vol.78, pp.832-845.

渡部ほか (2019): 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS16-P22.

Naylor et al. (1986): Journal of Structural Geology, vol.8, pp.737-752.

Miyamachi et al. (1999): Earth Planets Space, vol.51, pp.233-246.

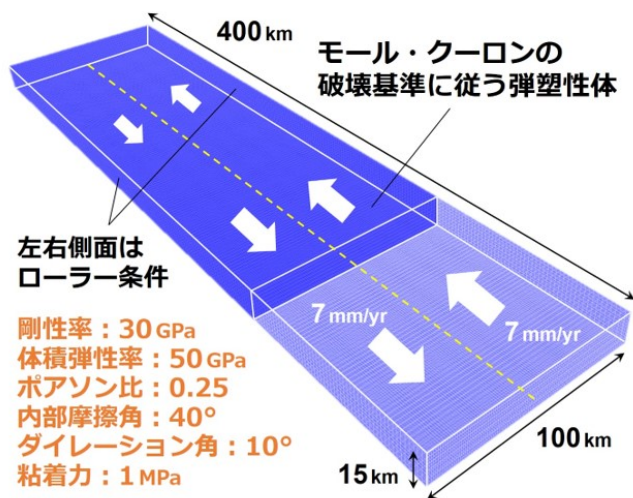


図1-A) モデルの設定概要

図1-A) モデルの設定概要

モデル領域の底面に左横ずれの変位速度を与えてシミュレーションを行った。

図1-B) せん断ひずみ速度分布

複数存在したせん断ひずみ速度の大きな線状の領域が、時間の経過とともに、一本の直線に集約してゆく様子が再現され、ある断面においては、せん断ひずみ速度の大きな領域が深部から浅部に向かって花弁状に広がる様子を見ることができる。

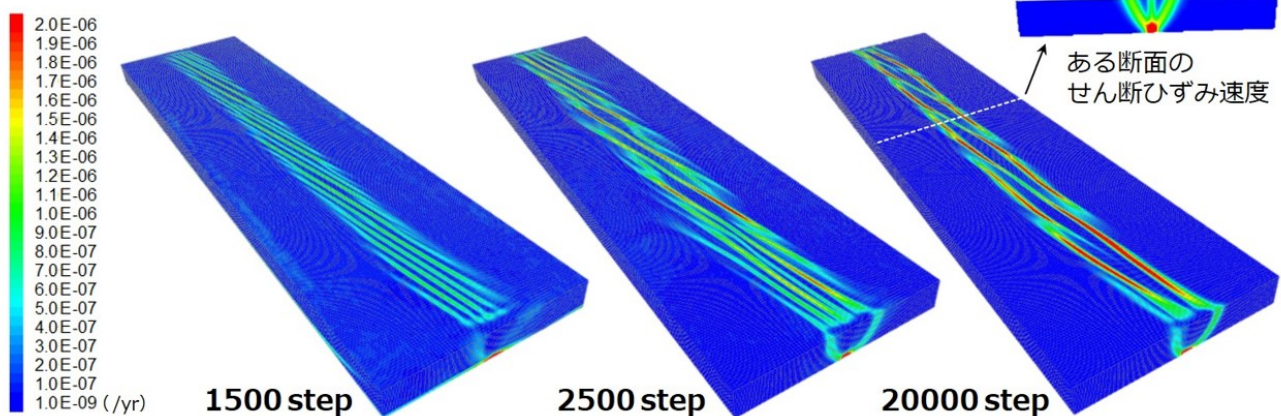


図1-B) せん断ひずみ速度分布 (シミュレーション結果)

EnKF estimation of viscoelastic deformation and viscosity structure - Numerical experiments

*Makiko Ohtani¹

1. GSJ, AIST

巨大地震発生後、地殻・マントル内では生じた応力変化によって粘弾性変形が起こり、余効変動の一部として地殻変動が観測される。巨大地震発生域の周辺の断層では、地震時すべりだけでなく、深部の粘弾性変形による応力の載荷を長期間受ける。例えば西南日本では過去の南海・東南海地震の前後で内陸地震活動度の変化が指摘されており(Hori & Oike 1999)、これには深部の粘弾性変形が重要な役割を果たしていることがモデル研究から示唆されている(Shikakura et al., 2014)。地震後の粘弾性変形を見積もることは、将来どこで地震が起こりやすいかを評価する上で重要である。

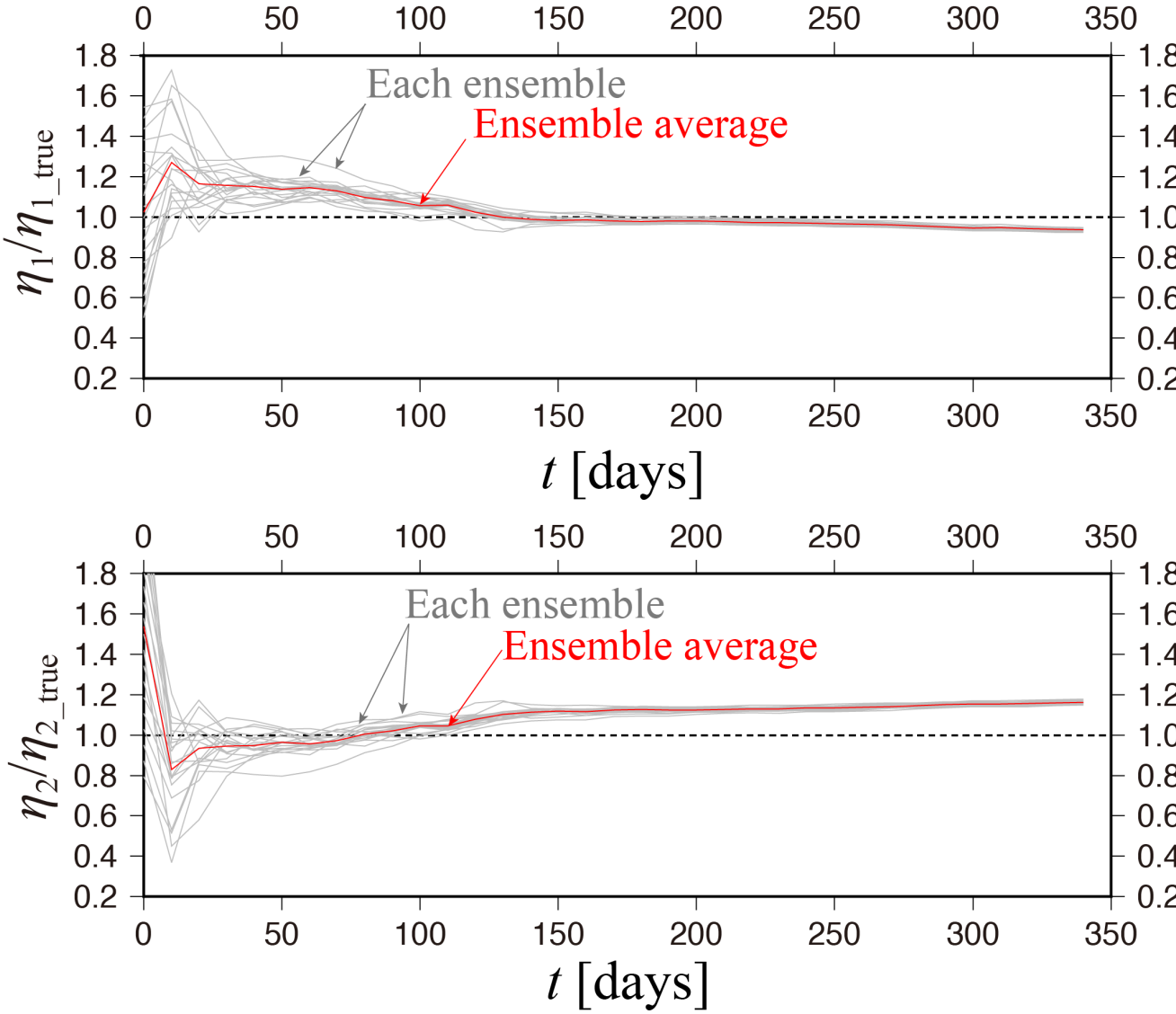
巨大地震発生後の粘弾性変形の時間発展を求めるには、地下の粘性構造を知る必要がある。地殻変動のデータから地下の物性・物理量を求める手法として、近年、データと背景の物理モデルの両方に依拠した解を得るデータ同化手法が使われ始めている。錦織(2018)では、逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を用いて、SSE発生域のすべり及びその摩擦特性を推定する手法を開発し、豊後水道で繰り返し発生するSSEを想定した数値実験によってその有効性を示した。EnKFでは物理モデルに従って時間発展する未知の変数・パラメタの組(アンサンブル)によって予報のばらつきを表現する。データが得られる毎に、適切な重み付けによりモデルの修正を行いより尤もらしい解を得る。本研究では地震後の地殻変動にEnKFを適用し、地下の粘性・巨大地震後の非弾性歪みの時間発展を推定する手法の開発を行った。

粘弾性変形の時間発展を計算する手法として、等価体積力法(Barbot and Fialko, 2010; Lambert et al., 2016)を用いた。等価体積力法では領域を立方体セルに分割し、各セルの非弾性歪みを等価な体積力に置き換え、弾性体中の歪み-応力関係を示すグリーン関数を用いて粘弾性歪みを考慮した応力場を計算する。ある時刻の粘弾性歪み・応力の時間微分が、その時刻の変数の値で表されるため、EnKFの適用に適している。時間発展の計算では粘弾性媒質の離散セル数 N_{visco} に対して計算量が $O(N_{\text{visco}}^2)$ であり、またEnKFでは各アンサンブルに対してそれぞれ時間発展を計算する必要があるため計算負荷が高い。そこで密行列圧縮手法であるH行列法(Hackbush, 1999)を適用し計算量の削減を行った(大谷・平原, 2017)。本研究では、以下に示す単純なモデルを設定し、模擬データを用いたEnKF推定の数値実験を行ったので、これについて紹介する。

走行・傾斜方向に10 km × 10 km・傾斜角30度の長方形の断層を考える。断層の走行方向に x_1 、水平面でこれと直交する方向に x_2 、深さ方向に x_3 軸をとり、断層を $x_1 = 0 - 10$ km, $x_3 = 0 - 5$ kmの位置に置いた。媒質として $x_3 < 20$ kmを弾性体、 $x_3 \geq 20$ kmをMaxwell粘弾性体とする。粘弾性体のうち $x_1 < 5$ kmを粘性 $\eta_1 = 1.0 \times 10^{18}$ Pa·s ($= \eta_{1_true}$)、 $x_1 \geq 5$ kmを粘性 $\eta_2 = 0.7 \times 10^{18}$ Pa·s ($= \eta_{2_true}$)とした。時刻 $t = 0$ で断層に傾斜方向に1 mのすべりを与え、その後 $t > 0$ で断層面上のすべりをゼロとする。このとき地表に5 km間隔で120点模擬観測点をおき $t \geq 0$ の変位の時間発展を計算し、これに適当なノイズを加えて模擬データとした。

この模擬データに対して、 $t = 0$ 時点での粘弾性体の非弾性歪み・応力は既知であるとして、粘性 η_1 , η_2 を $0.5 \times 10^{18} - 1.1 \times 10^{18}$ Pa·sの間でばらつかせた初期アンサンブルを20個用意し、EnKFで逐次に模擬データとモデルとの同化を行った。図に η_1 / η_{1_true} , η_2 / η_{2_true} の変化を示す。 $t \sim 150$ 日で各アンサンブルの η_1 , η_2 はおおよそ収束し、 η_2 は真値 η_{2_true} からは少しずれてはいるものの、これらは真値の近くの値に収束する。今後、粘弾性構造や観測ノイズ、初期アンサンブルの取り方が解の推定にどのように影響するかを調べていきたい。

謝辞: 弾性体中の歪み-応力のグリーン関数を計算するプログラムをBarbot氏に提供していただきました。記して感謝いたします。



Estimation on fault slip distributions through viscoelastic inversion using Reversible-jump MCMC

*Fumiaki Tomita¹, Takeshi Inuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

地殻変動観測データを用いた断層すべり分布の推定には、断層すべりの平滑化条件を課した最小二乗法が行われ、その平滑化度合いを調整するハイパーパラメータをABICなどの基準により決定することが一般的である [e.g., Yabuki & Matsu'ura, 1992]. しかし、地震時すべり分布と地震後すべり分布を同時に推定する粘弾性インバージョン [Tomita et al., 2018] では、すべり量のパラメータ数が求めたい時間窓の数に比例して増大するうえ、ハイパーパラメータを平滑化条件のみならず観測データの重みにも与える必要があり、その数も時間窓の数だけ増大するために、グリッドサーチ的にハイパーパラメータを最適化する従来の手法では計算コストが極めて高くなってしまふ。また、すべり量が物理的にありえない値を取ることを避けるため、解の非負拘束を課した最小二乗法もしばしば行われるが、非負拘束を課した場合にはABICが解析的に正しく計算できないことに加え [Fukuda & Johnson, 2008], 計算コストが通常の最小二乗法に比べて劇的に増大する場合がある。

本研究では、多時間窓の粘弾性インバージョンでも効率的に解を得るため、Reversible-jump MCMC (Rj-MCMC [Green, 1995]) の適用を試みる。MCMCは、ハイパーパラメータも通常のパラメータと同様に自動的に探索可能な手法であり、ハイパーパラメータを探索するか否かで計算コストは大きく変わらない。一方で、通常のパラメータ数自体が増大しすぎると（例えば、断層すべりのインバージョンで小断層の数が数百個を超えるような場合）探索に長時間を要してしまう。そこで本研究では、未知パラメータの数も同時に探索することで、最小限の未知パラメータ数で計算可能なRj-MCMCによる解析が有用かどうかを検討する。

本研究では、Bodin & Sambridge [2009]と同様にVoronoi cellを用いた空間分割を行い、彼らの定式化に沿って解析を行なった。Rj-MCMCの空間分割により、平滑化のハイパーパラメータは不要となるため、各観測期間での観測データの重み支配するハイパーパラメータのみを各cellでのすべり量と同時に推定した。Rj-MCMCでは、空間分割が局所解に陥ることを避けるため、最適化手法であるSimulated Annealing (SA) [e.g., Andrieu et al. 2000] や、複数の連鎖によるParallel Tempering (PT) [e.g., Dettmer et al., 2014] を採用することが多い。今回は、SAによるRj-MCMCを短い連鎖 (3×10^4) で実行することで最適化を試みた。その際、入力データとしてBootstrap法による複数のレプリカを用いることで、より局所解の影響の少ないPTの結果に近く、かつ容易に誤差評価が可能になるようにした。1つのレプリカごとに連鎖の終わりの2000個をサンプルし、50個のBootstrapレプリカを用意することで、最終的なサンプル数は 1×10^5 となった。

複数の断層すべりパッチからなる地震時すべり分布と地震後すべり（余効すべり）分布を仮定してSyntheticデータを作成し、Rj-MCMCによる粘弾性インバージョンですべり分布が再現できるかを検討した。沈み込み帯プレート境界断層を模した、傾斜角15度・幅300 km・長さ500 kmの断層面を仮定し、20 km $\times$ 20 kmの小断層を配置した。Syntheticデータ、およびGreen関数の計算には、Fukahata et al. [2005; 2006] による二層粘弾性構造を仮定した計算プログラムを用いた。計算する時間窓は、地震時1つと地震後3つの計4つであり、地震後の時間窓は全て1年間分を仮定した。観測点配置は、粘弾性インバージョンの効力の検証も兼ねて、地震時では沈み込み帯における陸域のみとし、地震後には海域の観測点を追加した状況を仮定した。地震時の断層すべりで2成分、地震後の断層すべりでdip方向のみの1成分を未知パラメータとして推定すると同時に、これらの合計5成分についてそれぞれ断層面の空間分割を行なった。結果として、Rj-MCMCによる粘弾性インバージョンにより、概ね仮定した断層すべりの特徴を再現することに成功した。空間分割によって、元々1875個あった未知パラメータが50個程度に縮約された。ただし、この空間分割数は、仮定したすべりパッチの配置によって変わることは留意する必要がある。

次に、2011年東北沖地震時の変位データにRj-MCMCによるインバージョン手法を適用した。実データに対して粘弾性インバージョンを行うためには、詳細な粘弾性構造に基づく粘弾性Green関数が必要となるため、今回は地震時変位のみを用いて地震時すべり分布の推定を行なった。結果として、地震時すべり分布は25個程度の未知パラメータで表現された。得られたすべり分布は同様の観測データを用いて求められた既存の研究結果[e.g., Iinuma et al., 2012]と似たような特徴を示し、宮城県沖の海溝近傍で50 m程度の地震時すべりを示した。

今後、断層すべり分布を推定し、誤差評価を行う上でのレプリカ数の設定や各レプリカでの連鎖数、あるいはPTの適用の必要性などを検討していく必要があるものの、上記のSyntheticテストや実観測データの適用結果から、粘弾性インバージョンを行う上でRj-MCMCの活用は有用であると言える。

The effect of rheology and geometry on postseismic deformation

*Hiroyuki Hoshino¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Makiko Ohtani², Kazuro Hirahara³

1. Kyoto University Graduate School, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Kagawa University

2011年東北地方太平洋沖地震について、その余効変動に関する研究が数多く報告されてきた。これまで、震源域近傍の海底域に設置された観測点データ等をもとに、地震直後の余効変動メカニズムにおける粘弾性緩和の寄与に関する議論が行われてきた。例えば、Sun et al.(2014)では、スラブの沈み込み構造等の現実にも則したジオメトリ構造のもと、線形Burgers粘弾性体を用いてモデル化を行い、粘弾性緩和による余効変動への寄与の大きさを示した。また、Agata et al.(2019)では、非線形のBurgers粘弾性体を用いることで、余効変動場についての再現を行った。このように、より現実にも即した複雑なモデルを用いることで、2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動についての詳細な検討がなされてきたが、地殻内のレオロジーについてのはっきりとした知見は現状得られておらず、余効変動のモデル化を行うには、どのようなレオロジーやジオメトリ構造が適当であるかについての検討が必要である。また一方、Yamagiwa et al.(2015)では、弾性-Maxwell粘弾性の二層構造という単純なモデルに近似することで、余効変動データを用いた地震時すべり及びアフタースリップの同時インバージョンを行った。このような近似したモデルを導入する場合には、各パラメータが余効変動の変位場にどのような影響を及ぼすかについての研究が必要であると考えられる。

Barbot and Fialko (2010)は、応力擾乱によって生じる非弾性変形の時間発展を計算する理論を構築した。この理論のもと、地震の発生に伴う各種の余効変動（粘弾性緩和、アフタースリップ、及び、間隙弾性反発）の時系列変化を統一的に計算することが可能である。本研究では、Barbot and Fialko (2010)の理論に基づき、地震の発生に伴う余効変動を計算する数値計算プログラムを作成した。このプログラムにより、粘弾性緩和については、線形粘弾性体及び非線形粘弾性体を用いた計算を行うことが可能となった。

本発表では、これまでに作成したプログラムを用いて、様々なレオロジーやジオメトリ構造を用いて粘弾性緩和による余効変動の時系列変化を計算し、それぞれのパラメータが変位場に対してどのような影響を与えるかについて整理する。

また、現在、この作成したプログラムを用い、2011年東北地方太平洋沖地震をモデル化することを目標に研究を行っている。東北地方のような広域にわたる地表面変位をモデル化するにあたり、コンピュータのメモリ使用料の低減化が課題となる。本研究においてはH行列の導入を検討し、これを採用したプログラムの作成を今後行う予定である。2011年東北地方太平洋沖地震に伴う余効変動について、線形粘弾性体及び非線形粘弾性体を導入し、変位モデルを作成しその結果について検討を行いたいと考えている。

Poster session (Sept. 16th) | General session : S05. Geothermal Science

📅 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏢 ROOM P
International Conference Halls II and III

S05P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S05P-01] Seismic study using optical fiber and surface seismometers in the Medipolis geothermal field located in southern Kyushu

*Junzo Kasahara^{1,2}, Yoko Hasada^{3,2}, Haruyasu Kuzume², Yoshihiro Fujise⁴, Hitoshi Mikada⁵, Keigo Yamamoto⁵ (1. Shizuoka University, 2. ENAA (Engineering Advancement Association of Japan), 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. WELMA Co. Ltd., 5. Kyoto University)

Seismic study using optical fiber and surface seismometers in the Medipolis geothermal field located in southern Kyushu

*Junzo Kasahara^{1,2}, Yoko Hasada^{3,2}, Haruyasu Kuzume², Yoshihiro Fujise⁴, Hitoshi Mikada⁵, Keigo Yamamoto⁵

1. Shizuoka University, 2. ENAA (Engineering Advancement Association of Japan), 3. Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., 4. WELMA Co. Ltd., 5. Kyoto University

Introduction

Supercritical water is drawing the attention of members of the global geothermal community as an important future renewable energy source for the world. The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) is promoting supercritical geothermal exploration as an important future energy source. There have been several efforts to use the fiber-optic distributed acoustic sensor (DAS). The DAS method is sensing strain or strain rate caused by seismic waves and the sensing spacing is a few meters (e.g., Hartog, 2017). We evaluated the usefulness of DAS technology on land and concluded that it is comparable to using geophones (Kasahara *et al.*, 2018). In order to study supercritical water reservoirs, we carried out a simulation using full-waveform inversion (FWI) (Kasahara *et al.*, 2019). It was found that physical properties such as V_p , V_s , and density in the reservoir were well retrieved.

Field study

To evaluate our approach in a real geothermal field, we carried out a field study in the Medipolis geothermal field in Kyushu, Japan in fall, 2018. The fiber-optic cable was deployed down to a 977 m depth in the IK-4 borehole. We conducted the distributed temperature sensor (DTS) temperature and DAS seismic measurements in the borehole using the same fiber-optic cable. We also installed 20 sets of seismometers along the 2 km long EW line at approximately 100 m spacing.

Results

The maximum temperature in the IK-4 borehole was measured as 264 °C at 914 m. The DAS data were obtained continuously at every 1 m for 4.5 days. We observed seven natural earthquakes between $M = 0.8$ and $M = 5.2$. by the DAS mode. The P first arrivals of the M5.2 earthquake was observed at a hole depth of 977 m to 0 m for every 1 m location. Although the temperature at the 914 m depth was 264 °C, any evident seismic attenuation was not observed. In some earthquake records, some surface seismometers showed large amplitudes on horizontal components at 0.8 seconds after the P first arrivals in the vertical component. Using the DAS waveforms, we estimated the apparent P interval-velocity surrounding the borehole. The apparent P interval-velocities for northern and southern incident earthquakes show 4.5-3.0 km/s and 3.0 km/s, respectively. Considering the well deviation, the P interval-velocity was estimated to be approximately 3.0 km/s between 800–977 m.

Discussion and conclusions

Although the temperature at a 914 m depth was as high as 264 °C, no significant attenuation of P arrivals was observed. It seems no effects by the high-temperature zone. The reason for these measurements might be explained by the wavelengths of natural earthquakes being longer than the thickness of the

high-temperature zone. We evaluated well deviation and it can explain the difference of apparent P interval-velocity between norther and souther incidents. The P interval-velocity in the borehole shows approximately 3.0 km/s between 800 m and 977 m.

We observed seven natural earthquakes, but we did not see reflected phases from the deep reflectors. Surface geophones suggest the presence of P-to-S converted waves. The conversion can be explained by the presence of low S velocity layer below the Medipolis geothermal field.

Although further studies are needed, the DAS system could supply a very dense vertical seismic array, and with the DAS seismic system and the FWI method, we could image the deep-seated supercritical geothermal reservoirs if they exist.

Acknowledgements

This study is supported by NEDO. Medipolis Energy Co. kindly allowed the use of their IK-4 geothermal well for this study.

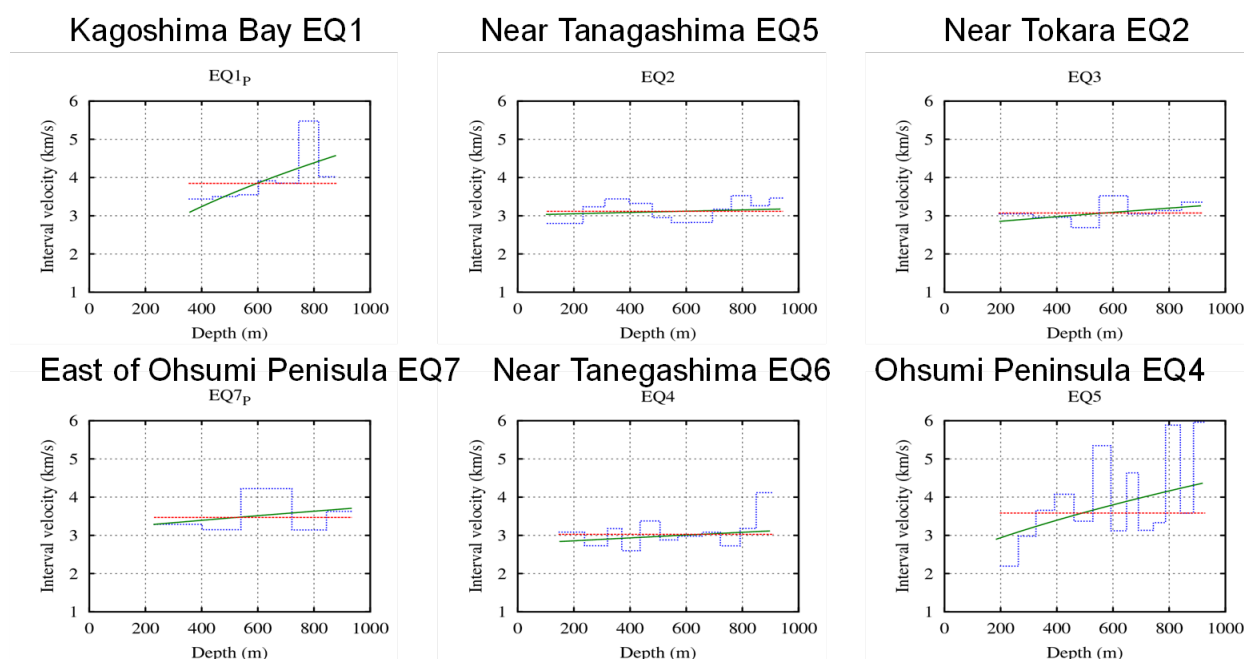


Figure : Results of apparent interval Vp profile for six earthquakes. The vertical and the horizontal axes of each figure are apparent interval Vp in km/s and depth in meter, respectively. Green line: Vp obtained by the first arrivals fitted by smooth curves, Red line: mean Vp from the bottom to the shallowest depth. Blue line: Vp obtained by the picking of arrival times. EQ1 and EQ4 came from the north and EQ2, EQ5, and EQ6 came from the south.

Poster session (Sept. 16th) | General session : S09. Statistical seismology and underlying physical processes

🏠 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏠 ROOM P
International Conference Halls II and III

S09P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-01] Detection and relocation of shallow very low-frequency earthquakes along the Nankai Trough based on cross-correlation analysis

*Shunsuke Takemura¹, Youichi Asano², Takanori Matsuzawa², Akemi Noda², Tatsuya Kubota², Katsuhiko Shiomi² (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-02] Comprehensive detection of very low frequency earthquakes in southwest Japan

*Satoru Baba¹, Shunsuke Takemura¹, Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-03] Application of a tremor detection method to the OBS data in Suruga bay

*Takahito Nishimiya¹, Akio Kobayashi¹, Koji Tamaribuchi¹, Hisatoshi Baba² (1. Meteorological Research Institute, 2. Tokai University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-04] Distribution of shallow very low frequency earthquakes influenced by a subducting-ridge

*Akiko Toh¹, Wan-Jou Chen², Wu-Cheng Chi², Doug Dreger³, Satoshi Ide¹ (1. Univ. of Tokyo, 2. Academia Sinica, 3. UC Berkeley)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-05] Trial detection of tremor in eastern Aichi in 1980s using analog seismograms of the Kanto-Tokai observation network

*Takanori Matsuzawa¹, Tetsuya Takeda¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-06] Earthquake activity following very low-frequency earthquakes in the central Ryukyu Trench

*Mamoru Nakamura¹ (1. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-07] Spatial distribution of the variation in characteristic amplitudes of deep low frequency tremors accompanied by L-SSEs.

*Keita Nakamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takanori Matsuzawa² (1. Univ. of Kanazawa, 2. NIED)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-08] Spatio-temporal characteristics of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano

*Takuma Ikegaya¹, Mare Yamamoto¹ (1. Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-09] Numerical modeling of characteristic waveforms of deep low-frequency earthquakes in volcanic areas: effect of wave resonance

*Taichi Haruyama¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-10] Realtime monitoring of seismicity anomaly around Japan using the ETAS model

*Tomoaki Nishikawa¹, Takuya Nishimura¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-11] Small repeating earthquake activities in the inland areas of the Japanese Islands

*Toshihiro Igarashi¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-12] Characteristics of similar earthquakes in the northern part of the Nansei Islands determined by ocean bottom seismometer data

*Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Kazunari Uchida², Takeshi Matsushima², Hiroshi Shimizu², Yusuke Yamashita³, Kazuo Nakahigashi⁴, Tomoaki Yamada⁵, Hideji Abe⁶, Masanao Shinohara⁶ (1. Kagoshima Univ., 2. Kyushu Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 5. ERI, UTokyo (now at JMA), 6. ERI, UTokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-13] Estimation of a plate boundary derived from seismic observations on sea bottom and land in and around northern part of Nansei Syoto islands (6)

*Hiroshi Yakiwara¹, Yukihiro Nakatani¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Yusuke Yamashita², Kazunari Uchida⁴, Takeshi Matsushima⁴, Hiroshi Shimizu⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Kodo Umakoshi³, Hideji Abe⁶, Satoshi Ikezawa⁶, Yoshihito Suwa⁷, Tomoaki Yamada⁷, Masanao Shinohara⁶ (1. Kagoshima Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Nagasaki Univ., 4. Kyushu Univ., 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 6. ERI, Univ. of Tokyo, 7. ERI, Univ. of Tokyo (now at JMA))

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-14] Role of pore fluid pressure in aftershock occurrence of the 2016 Kumamoto earthquake

*Kodai Nakagomi¹, Toshiko Terakawa¹, Satoshi Matsumoto², Takahiro Ohkura³, Kazutoshi Imanishi⁴, Masayuki Yoshimi⁴, Takahiko Uchide⁴, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake⁵ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 5. Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-15] The seismic activity at 13 km or more depth range around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Ayaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoto², Azusa Shito², Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-16] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

*Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-17] Inelastic deformation in the lower crust and seismic activity of the Kyushu, Japan

*Yuhei Yuasa¹, Satoshi Matsumoto², Shigeru Nakao³, Takeshi Matsushima², Takahiro Ohkura⁴ (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-18] Waveform twins of equal time difference in seismic ambient noise

*Kei Katsumata¹, Masayoshi Ichiyanagi¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-19] Evaluation of automatic hypocenter determination (PF method) using dense ocean bottom seismographs

*Koji Tamaribuchi¹, Yuriko Iwasaki², Kazuhiro Iwakiri², Hiroshi Ueno² (1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-20] Temporal change in near-source seismic velocity in an earthquake region due to the pore pressure change after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Keisuke Yoshida Yoshida¹, Akira Hasegawa¹, Yohei Yukutake², Toru Matsuzawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-21] Temporal changes in the scattered wave packets associated with earthquake swarm activity beneath the Moriyoshi volcano

*Yuta Amezawa¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹ (1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-22] Observation of Microearthquake around Tokuyama Dam (3rd Report)

*Takayuki SANO¹, Mamoru TSUKAMOTO¹, Hideki SODA², Takashi MITSUZUKA³, Fumiaki KANTOH³, Hiroshi KATAO⁴ (1. Japan Water Agency, 2. Japan Institute of Country-ology and Engineering, 3. Chishitsu Keisoku Co., Ltd., 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-23] Uncertainty quantification via large-scale 4DVar data assimilation for frictional inhomogeneity in a slow-slipping fault

*Shin-ichi Ito^{1,2}, Masayuki Kano³, Hiromichi Nagao^{1,2} (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 3. Graduate school of Science, Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-24] High-accuracy mechanism and non-double couple component detection in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake(M7.3)

*Yuto Hayashida¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴, Group for "0.1 Manten" hyper dense seismic observation (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-25] Stress tensor inversion in the focal area of the 2016 M_w 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand (2)

*Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Stephen C Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Jarg Pettinga⁶, Richard H Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, 6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7. University of Otago, Dunedin, New Zealand)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-26] Spatiotemporal characteristics of aftershock activity of the 2011 M9 Tohoku earthquake

*MEITONG DUAN¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-27] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes in Japan: analyses of JMA catalogue**

*Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹ (1. Tohoku University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-28] Estimating seismic moment of inland earthquakes using the Hi-net and the F-net record

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹, Akemi NODA¹ (1. NIED)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-29] Aftershock areas of inland earthquakes in Japan

*Sachiko Tanaka¹, Tatsuhiko Saito¹, Akemi Noda¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S09P-30] Spatial-temporal and seismogram characteristics of foreshock and aftershock activities for tsunami earthquakes

*Yifeng Liu¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Satoshi Katakami¹ (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Detection and relocation of shallow very low-frequency earthquakes along the Nankai Trough based on cross-correlation analysis

*Shunsuke Takemura¹, Youichi Asano², Takanori Matsuzawa², Akemi Noda², Tatsuya Kubota², Katsuhiko Shiomi²

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

1. はじめに 南海トラフの巨大地震の発生領域の浅部で発生する浅部超低周波地震のメカニズム解や発生位置の空間的な広がり、プレート境界浅部の応力蓄積および摩擦特性を知る上で重要な手がかりとなる（例えば、Saffer and Wallace, 2015; Obara and Kato, 2016）。Takemura et al. (2019)により、室戸岬沖から紀伊半島南東沖にかけての領域の浅部超低周波地震のCMTカタログ（以下、単にCMTカタログ）が整備されたが、CMT解析は水平方向に0.1°毎のグリッドサーチ法を基にしているため、詳細な活動パターンの議論は難しい。そこで、CMTカタログに含まれている浅部超低周波地震をテンプレートとして利用し、Asano et al. (2015)による相互相関解析を用いて浅部超低周波地震の検知と相対震央位置の推定を行い、詳細な活動パターンの解明を試みた。

2. 手法 Takemura et al. (2019)によるCMTカタログから、各震源グリッドで観測波形とのVariance Reductionが最大かつ65 %以上のCMT解の計算波形をテンプレートとして用いた。周期20-50秒のF-net速度波形とテンプレート波形との相互相関関数を計算後、Asano et al. (2015)に従って3.8 km/sで相互相関関数のback projectionを行った。0.025°毎に設定した震源グリッドに対して1秒ごとにback projectionを実施し、相関係数が0.45以上の時に浅部超低周波地震として検知した。相関係数のしきい値については試行錯誤的に決めた。重複検知を避けるため、震央距離差100 km以内で検知時刻の差が60秒に満たないものは同一のイベントと見なした。

3. 結果 試験的な解析として、2015年9月に紀伊水道沖、2016年4月に紀伊半島南東沖で発生した浅部超低周波地震について、相互相関解析を行った。CMTカタログには2015年と2016年でそれぞれ9個と14個の浅部超低周波地震が含まれていたが、相互相関解析によって23個および50個とおおよそ倍以上の数の浅部超低周波地震を検出できた。Nakano et al. (2018)によりDONETで推定された浅部超低周波地震カタログと比較をすると、Mw 3.4以上の浅部超低周波地震の震央位置および積算個数の時間変化と良い一致を示している。

手法とCMTカタログに関する参考文献

Asano et al. (2015), <https://doi.org/10.1002/2014GL062165>

Takemura et al. (2019), <https://doi.org/10.1029/2019GL082448>

謝辞 防災科学技術研究所F-netの観測波形記録（<https://doi.org/10.17598/NIED.0005>）を利用しました。Nakano et al. (2018)のカタログは、スロー地震データベース（Kano et al., 2018; <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>）よりダウンロードしました。テンプレート波形の計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用しました。この研究は、JSPS科研費17K14382および19H04626による助成を受けました。

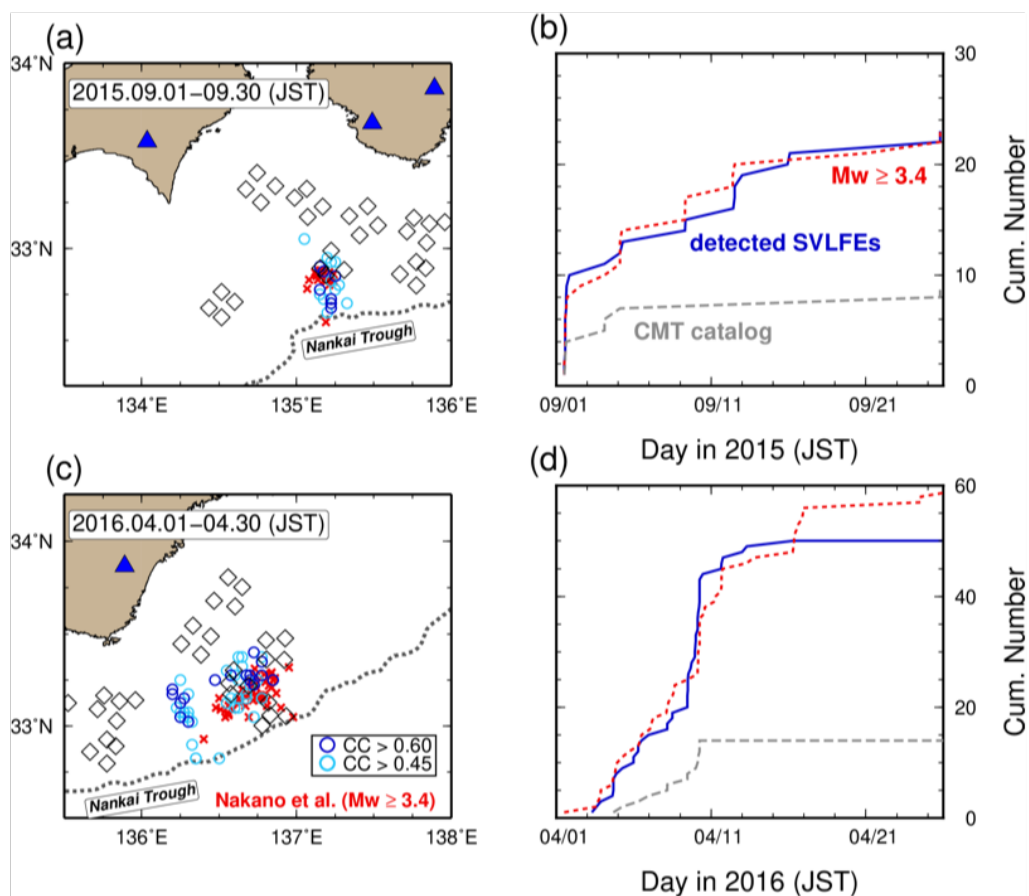


図1. 2015年9月に紀伊水道沖、2016年4月に紀伊半島南東沖で発生した浅部超低周波地震へ相互相関解析を適応した結果。相互相関解析で検知された浅部超低周波地震を青色の○と青線で示す。Nakano et al. (2018)のカタログから、2016年4月に発生した浅部超低周波地震のうちMw 3.4以上のものを赤色の×と線で示す。CMTカタログにより得られた積算個数は灰色線で示す。青色の三角形はF-netの観測点位置、ひし形はDONETの観測点位置を示す。

Comprehensive detection of very low frequency earthquakes in southwest Japan

*Satoru Baba¹, Shunsuke Takemura¹, Kazushige Obara¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

超低周波地震（VLFE）は、沈み込み帯の巨大地震発生域の周辺で発生するスロー地震の一種であり、0.02–0.05 Hzの周波数帯で特に強く観測される。西南日本のVLFEには、フィリピン海プレートの巨大地震発生域よりも深部延長で発生する深部VLFEと、巨大地震発生域よりも浅部延長で発生する浅部VLFEが存在する。深部VLFEは、微動や短期的スロースリップイベントと同じ領域で発生し、かつ類似のメカニズム解を示すことがわかっている（e. g., Ito et al., 2007）。浅部VLFEは、Asano et al. (2008)によるセンブルンス解析によって全国的に検出が行われている。それらの中の室戸岬・紀伊半島沖で発生する浅部VLFEは、詳細な震央位置とメカニズム解の推定が行われており、沈み込むフィリピン海プレートのプレート境界におけるすべり欠損速度や間隙流体の分布と、浅部VLFEの空間分布との関連性が指摘されている（Takemura et al., 2019）。しかし研究の進展の一方で、西南日本の深部VLFEと浅部VLFEを統一的な手法によって網羅的に検出した研究例はない。本研究では、西南日本におけるプレート間のすべり分布を明らかにするために、マッチドフィルター法を用いて、南海トラフ沿いの西南日本の沈み込み帯全域におけるVLFEの網羅的検出を行なった。

本研究では、2003年1月から2018年7月までのF-netの連続波形データに、0.02–0.05 Hzのバンドパスフィルターを適用したものを用いた。Koketsu et al. (2012) のフィリピン海プレートのプレート境界に196点の仮想震源グリッドを設定し、プレート境界面の形状およびNuvel-1Aによるフィリピン海プレートの沈み込み方向から計算されたメカニズム解を使って、各仮想震源から近い10点のF-net観測点で理論波形を計算し、テンプレートとした。理論波形はKoketsu et al. (2012) の3次元不均質構造を用いて、3次元差分法（OpenSWPC; Maeda et al., 2017）により計算した。テンプレートと波形データとの相関係数を1秒おきに計算し、相関係数の全成分の平均の解析期間における中央絶対偏差の8倍をしきい値と定め、しきい値を超えた時間にイベントが発生したと判定した。

深部VLFEは、プレート境界面の深さ30–40 kmの範囲に分布し、暫定的な結果として、四国西部で966個、四国東部で294個、紀伊半島で562個、東海地方で253個が検出された。浅部VLFEは、プレート境界面の深さ10 km以浅の範囲に分布し、暫定的な結果として、日向灘で33559個、室戸岬沖で2604個、紀伊半島沖で3311個が検出された。VLFEが検出された領域は、先行研究の結果と整合的であった。四国沖の、プレート境界面の深さ10–25 kmには、VLFEの検出数が極めて少ない領域が存在し、そこはプレート同士が強く固着していると考えられる。

Application of a tremor detection method to the OBS data in Suruga bay

*Takahito Nishimiya¹, Akio Kobayashi¹, Koji Tamaribuchi¹, Hisatoshi Baba²

1. Meteorological Research Institute, 2. Tokai University

2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖の地震 ($M_j7.4$) のあと、気象研究所は、正確な余震分布の調査のため自己浮上式海底地震計 (短周期型) (OBS) による観測を実施した。観測結果の解析によれば、余震に加え、多くの低周波微動が発生していた (溜淵 他, 2019, JpGU)。多数の地震と低周波微動が混在している波形から低周波微動を適切に検出することは重要である。

低周波微動の検出については、低周波微動用・通常の地震用・バックグラウンドノイズ用の3種類の周波数帯域のフィルタを観測記録に適用した後それぞれエンベロープを算出し、それらの比の大きさに基づいて微動検出を行うfrequency scanning method (FSM) (Sit et al., 2012, EPSL) や、FSMを短周期型OBS向けに改良したmFSM (Katakami et al., 2017, GRL) がある。これらは単独観測点で検出が行えるという特徴を有する。そこでまず、通常の地震及び低周波微動の検測結果がある前述のOBS観測の記録に対して、これを以下に示す手順で適用を試みた。

(1) OBSの上下動成分の記録を用いる。

(2) Katakami et al.(2017) のmFSMと同様に、ローカルな地震についてはコーダ波が指数関数的に減少するものとして、指数関数と相関のよいエンベロープの範囲を前もって比の値がゼロになるように設定する。

(3) Katakami et al.(2017)と同様に、低周波微動用(2-4Hz)・通常の地震用(10-20Hz)・バックグラウンドノイズ用(0.5-1Hz)のフィルタを観測記録に適用し、エンベロープを求める。

(4) Sit et al.(2012)と同様にエンベロープを5秒窓で平均し、その比を連続値として算出する。算出にあたり、Katakami et al.(2017)を参考に、バックグラウンドノイズ用の周波数帯のエンベロープについては、平均的な値 (中央値) よりも小さい場合は平均的な値に置き換えた。

(5) その5秒間ごとの比について観測の全期間に渡って観測点ごとに算出し、その中央値を観測点におけるノイズレベルの代表的な比の値と考え、代表的な値に対する倍率に基づき低周波微動であるかの評価基準とする。具体的には、倍率と地震及び低周波微動の検測結果とを比較して頻度分布を整理(Fig.1a)し、ROC曲線を作成(Fig.1b)して最適と思われる閾値を算出した。

その結果、閾値は、観測点ごとには30~100程度の範囲でばらつきはあるが、全点では60程度となり、通常の地震が一部混じるものの8~9割程度の割合で低周波微動を検出できることがわかった。

一方、気象研究所では、駿河湾中部において東海大学と共同で7年以上に渡り1~4地点程度OBSを設置して観測を行ってきた。そこで上記を参考に閾値を設定し、駿河湾中部直下で $M_j4.6$ の地震が発生した2015年9月8日

以降の4地点のOBS観測記録に上記方法を適用した。その結果、1週間程度の間でも閾値を超えるケースが複数みられ、波形や地震の発生状況を確認したところ、いずれも低周波微動ではなく、震央距離が200km程度以上離れた遠方の地震もしくはローカルな地震による震動であった(例をFig.2)。

現在、手法の改善や、駿河湾のOBS観測記録へのさらなる適用と閾値を超えた場合の波形の確認を行っており、大会当日は、それら結果について報告する。

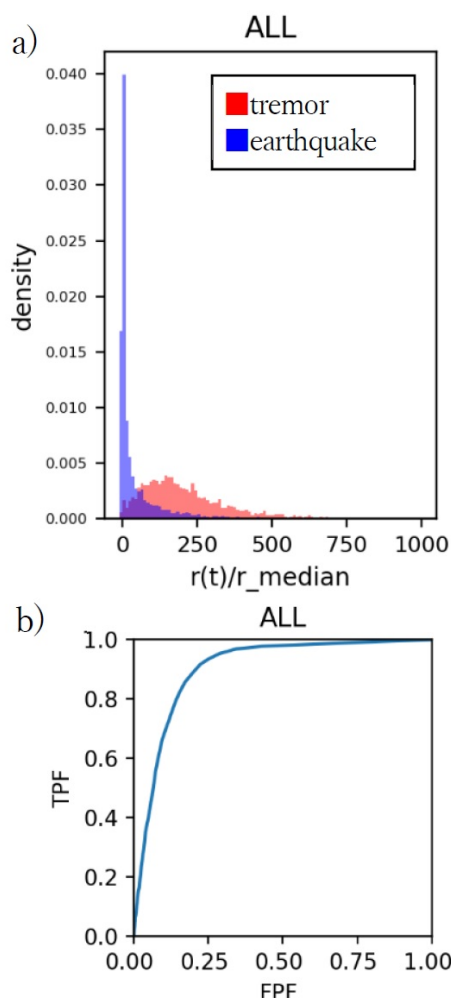


Fig.1 2004年9~11月の紀伊半島南東沖OBS解析

- a) OBS 観測点全点の観測記録に基づくエンベロップ比の倍率の規格化度数分布
- b) a)のROC 曲線

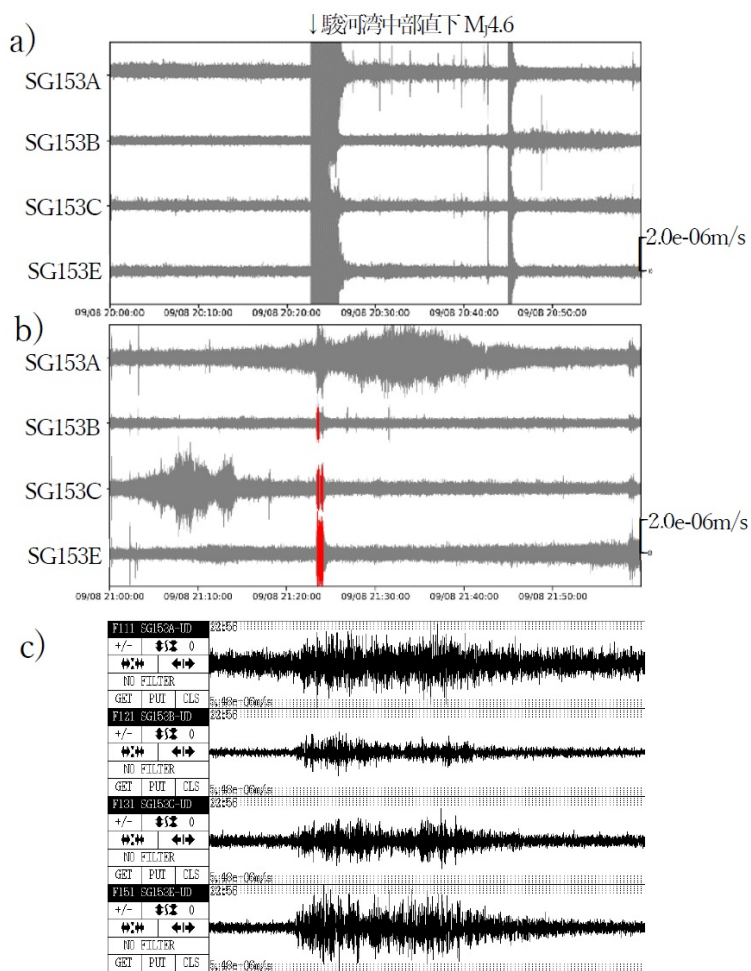


Fig.2 2015年9月8日20~22時の駿河湾OBS(SG153A,B,C,E 4地点)の観測記録(閾値を超えたと評価された部分を赤で示す)

- a) 20~21時
- b) 21~22時
- c) b)のうち赤で示した区間付近の拡大(鉾子付近 $M_j 3.7$ の地震による波形)

Distribution of shallow very low frequency earthquakes influenced by a subducting-ridge

*Akiko Toh¹, Wan-Jou Chen², Wu-Cheng Chi², Doug Dreger³, Satoshi Ide¹

1. Univ. of Tokyo, 2. Academia Sinica, 3. UC Berkeley

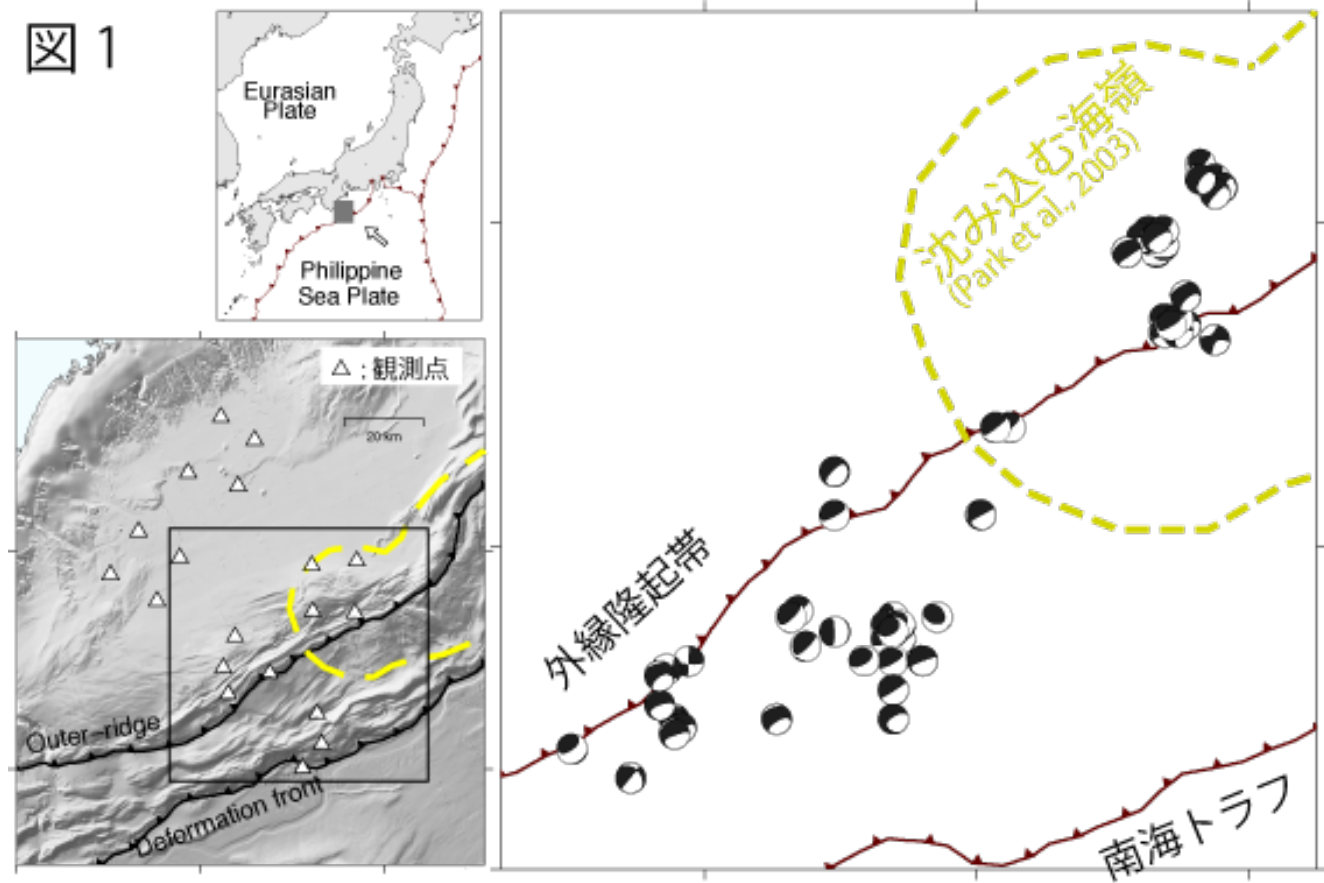
はじめに 南海トラフの沈み込み帯で発生する浅部低周波地震(VLFE)は、直上に展開される広帯域海底地震計観測網の近地波形記録の解析結果に基づき、プレート境界断層における低角逆断層型地震として説明されてきた(Sugioka et al., 2012; Nakano et al., 2018)。他方、同海域においてプレート境界より浅い分岐断層におけるVLFE発生の可能性や(To et al., 2015)、南海トラフ東部に沈み込む海嶺のVLFE分布への影響も指摘されている(Toh et al., 2018)。本研究では、これらの指摘を踏まえて、南海トラフ東部における浅部VLFEの震源メカニズム分布の詳細を推定することを目的とした。

データ 南海トラフ東部で2015、2016及び2017年にそれぞれ1-3週間発生したVLFE群発活動のDONET1広帯域地震計記録の三成分を利用した。複数の周波数帯域においてシグナルの有無を確認する明確な基準(To et al., 2015)を適用し、まず947個のVLFEを検出した。6観測点以上でシグナルが観測されたVLFEは355個あった。

手法 観測波形と理論波形のVariance Reduction(VR)を最大化するセントロイドの震源位置と時刻、及びモーメントテンソル5成分を、震源の位置(水平方向0.01°、深さ方向1km)と時間(1s)に対してグリッドサーチし、モーメントテンソル解については各グリッドで時間領域における波形インバージョン(Dreger, 2003)を実施して求めた。構造モデルは、同海域の2次元構造探索モデル(Nakanishi et al., 2008)を水平方向に平滑化して利用した。Green関数は波数積分法(Herrmann, 2003)により求めた。本研究では時間と空間の両方で点震源を仮定している。VLFEの長い震源時間を考慮するために、それぞれのVLFEに対し三種類のバンドパスフィルタ(16-32s、20-50s、25-80s)を試した。長周期フィルタほどS/N比が低下する。利用可能な観測波形数が一定数以上となるような長周期のフィルタをイベント毎に選択した。

結果と議論 65%以上のVRが得られた50個のVLFEの分布を図1に示す。

1. 海嶺の沈み込みが無い(プレート境界面が滑らかな)南西側では、VLFEは外縁隆起帯の直下からトラフ軸側に分布する。VLFEがプレート境界断層における低角逆断層のメカニズムを持つ地震であるとする既存研究結果(Sugioka et al., 2012; Nakano et al., 2018)と、概ね調和的な結果を得た。但し、最も陸側に位置するものの中にプレート境界よりも~2km浅く震源が推定されるVLFEが紛れている。これらのVLFEと分岐断層の関係については、震源位置の深さ方向の解像度を精査し、今後明らかにしていきたい。
2. 海嶺が沈み込む北東側では、構造探索で示される海嶺(Park et al., 2003)の高まりの直上、及びその陸側にVLFEが分布する。この領域は外縁隆起帯直下とその陸側に相当し、外縁隆起帯のトラフ軸側にVLFEが分布する南西側と対比的である。また、南西側の外縁隆起帯下のVLFEと比較して、北東側では震源の深さが~2km程浅く、To et al., (2015)の報告と調和的である。但しこれは、分岐断層における発生というよりも、寧ろ北東側において海嶺の沈み込みによりプレート境界そのものが持ち上げられていることに起因するとも考えられる。
3. 沈み込む海嶺のようなプレート境界面の凸構造は、上盤のプレートにfractured networkを形成することが指摘されている(Wang and Bilek, 2011)。また、海嶺の陸側の裾において、剪断応力及び間隙圧は増加する筈である。従って、本研究で得られたDONET1の北東側と南西側におけるVLFE分布の違いは、海嶺の沈み込みによって生じると考えられる応力場の変化により整合的に説明可能である。本研究結果は、過去に津波を発生させてきたこの領域の歪み蓄積解放様式を推定する上でも重要である。



Trial detection of tremor in eastern Aichi in 1980s using analog seismograms of the Kanto-Tokai observation network

*Takanori Matsuzawa¹, Tetsuya Takeda¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震の発生域への応力集中過程を反映して、スロー地震活動の繰り返し挙動が変化する可能性が数値シミュレーション研究から指摘されているが（例えば、Matsuzawa et al., 2010）、こうした議論を行うためには、長期にわたるスロー地震カタログが必要となる。南海トラフ沿いでは、深部低周波微動が繰り返し活発化しており、デジタルの連続記録の解析から、その活動状況が現在モニタリングされている。しかし1990年代以前については、デジタル記録として連続波形を保存することが容易でなかったため、アナログ波形記録を活用することが活動状況の把握において重要となる。防災科研は1979年から関東・東海地殻活動観測網の定常処理を開始しており、その後も順次観測点が増加している（Okada et al., 2000）。本観測網はすでに終了しているが、上下動成分の連続地震波形は、ペンレコーダーによるアナログ波形記録として、防災科研内に保管されている。これまで我々は過去記録の利用について予察的な検討を行ってきたが（松澤・武田, 2016; Matsuzawa and Takeda, 2017）、以下では同観測網の下山観測点の記録を利用し、1980年4月から1987年までの愛知県東部における微動活動検出を試みた結果を紹介する。

活動の検出については、アナログ波形記録の目視により実施した。まず目視による活動把握能力の確認を行うため、既存の微動カタログとの比較を行った。Maeda and Obara (2009)のHi-net地震計記録の波形相関・振幅ハイブリッド法によって推定された微動源位置を、Obara et al. (2010)の方法により1時間毎にクラスタリングした結果について、24時間以内に3つ以上のクラスタリング処理結果が得られている微動活動エピソードを対象として選び出した。この期間のHi-net下山観測点のデジタル波形記録について、ペンレコーダーによる波形記録を模した画像を作成し、検出可能性を確認した。振幅の情報もペンレコーダーと同一とし、一秒および一分のティックマークも出力し、画像解像度を100dpi相当とした画像を用いた。活動が小規模なものについては、遠地の地震波形等との判断が難しいものの、活発な活動については、数Hzに卓越する微動シグナルが数分間以上継続する特徴的な波形が、数日にわたって消長を繰り返すことから、認識することが可能であった。特に夜間についてはノイズレベルも低く、十分明瞭なシグナルとして視認できた。

1984年以降の愛知県東部の短期的スロースリップイベント(SSE)の活動については、歪計記録を用いて検出が行われ、結果が報告されている（小林他, 2006）。小林他により短期的SSEが検出された期間（1984年8月, 1986年12月, 1987年5月）についてはこれまでの発表において活動を確認したことを報告しているが、それ以外の期間についても、例えば1980年10～11月, 1981年6月, 1983年5月, 1986年4月などに微動活動とみられる波形が確認された。現在に比べ1980年代の振幅値自体に顕著な差異は認められないが、距離減衰の効果等が考慮されていないため、より詳細な議論のためには、活動域の推定が必要となる。活動の発生間隔の議論についても同様に活動域の情報が重要であり、他観測点の記録も活用し、波形のデジタイズ等を通じた精査を行う必要がある。ただし、波形のデジタイズにおいては、通常地震と異なり継続時間の長い現象であるため効率的なデジタイズ手法の確立が大きな課題である。ここに示したようにアナログ波形記録は深部低周波微動活動の把握において有用であるが、カタログとしての一様性の観点からは、目視でなく機械的処理等による客観化された方法が必要であり、今後の検討課題である。

Earthquake activity following very low-frequency earthquakes in the central Ryukyu Trench

*Mamoru Nakamura¹

1. Faculty of Science, University of the Ryukyus

奄美大島と沖縄島にかけての琉球海溝（南西諸島海溝）の海溝軸付近では、2016年以降、M5以上の地震が頻繁に発生するようになった。最大地震のマグニチュードが5.0以上であった主な地震活動は、2016年5月（最大M5.6）、2018年9月（最大M6.2）、2019年4月（最大M5.6）である。いっぽう、周囲の超低周波地震活動も2016年付近から活動が増加している。この超低周波地震活動の発生時期に海溝軸付近でM5クラスの地震が発生する傾向がある。そこで超低周波地震の活動と海溝軸付近の地震活動の関連を調べた。

超低周波地震カタログとしてNakamura and Sunagawa (2015)のカタログを2019年4月まで延長したものを使用した。地震のカタログは気象庁のものを使用した。期間は2004年1月から2019年4月までである。地震の検知能力を考慮して、気象庁マグニチュード2.5以上の地震を用いた。

解析の結果、地震活動が海溝軸付近で起こり始める約1か月前に周辺域で超低周波地震活動が発生する傾向が2016年以降見られた。2004～2015年にも超低周波地震活動に対応するように見える群発地震活動がみられる（2005年、2009年、および2010年）。しかし、1か月毎の個数を用いて求めた2004～2015年の超低周波地震活動とM2.5以上の地震活動の相関係数は0.2と低く、あまり関係があるとは言えない。一方、2015～2019年の期間では、群発超低周波地震活動から約1ヶ月後に海溝軸で地震活動が発生し始めた。さらに、この期間の1か月毎の個数を用いて求めた超低周波地震と地震活動の相関は中程度（0.4）であった。2016年の地震活動では、5月上旬に超低周波地震の群発活動が奄美大島付近で始まり、断続的に沖縄島側に向かって移動した。その約30日後、群発地震が海溝軸近くで始まった。2018年9月の群発地震では、超低周波地震の群発活動が8月中旬に沖永良部島付近で始まり、その約1か月後に海溝軸付近の群発地震活動が発生した。

海溝軸付近で発生する群発地震は、いずれも沈み込むフィリピン海プレート内で発生する正断層型地震であった。そこで超低周波地震発生時にスロースリップイベント（SSE）がプレート面で発生していると仮定して、SSEによるCoulomb failure stress (ΔCFS)を計算した。その結果、SSEの滑り（100 mmを仮定）が海溝軸近くまで到達した場合、プレート内の正断層運動を加速させる ΔCFS が正（20～40 kPa）となることがわかった。これらのことは、SSEによる ΔCFS の変化が沈み込んだプレート内の正断層型地震活動を誘発した可能性があることを示している。

Spatial distribution of the variation in characteristic amplitudes of deep low frequency tremors accompanied by L-SSEs.

*Keita Nakamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takanori Matsuzawa²

1. Univ. of Kanazawa, 2. NIED

はじめに

西南日本の沈み込み帯の遷移領域では短期的スロースリップ(S-SSE)や長期的スロースリップ(L-SSE), さらには深部低周波微動(微動)といった様々なスロー地震が観測されている[Obara, 2002]. さらにL-SSEの滑り域はS-SSEや微動と比較より浅部に位置しており, 豊後水道及び東海にて発生するL-SSEは微動やS-SSEを誘発している[e.g., Hirose and Obara, 2005].

中本他[地震学会, 2018]ではL-SSEが発生している四国西部と東海領域においてL-SSEの発生している期間の微動の特徴的な振幅の変化について調査した. その結果, 豊後水道L-SSEの滑り域近隣においてはL-SSE期間に特徴的振幅が大きい微動が発生する割合が増加, 東海領域と豊後水道L-SSEの滑り域から少し離れた領域ではL-SSE期間に特徴的振幅の小さいイベントが増加するという結果を得た. 本発表では上記の内容に加えて, クラスタリング処理による微動イベントの分類及び, 矩形断層の一樣すべりを仮定したL-SSEのすべりによる周囲の応力変化と微動誘発との関係性についても報告する.

データ・解析手法

解析には防災科研Hi-netの連続地震波形記録を使用した. 特徴的振幅は, 幾何減衰を補正したRMS振幅の振幅と継続時間の関係が指数関数となる[Watanabe et al., 2007]ことを利用したフィッティングを行い, 指数 λ を算出した後, λ の逆数から計算した. クラスタリング処理については, 任意の二つのハイブリッドクラスタリング法により決定された震源(HBC震源)が24時間以内かつ震央距離が10km以内のペアを同じクラスタに入れるという作業を繰り返し行った. 本研究では, 最終的なクラスタに10個以上のHBC震源を含む場合を"Major-episode", 10個より少ない場合を"Minor-episode"とした. 本研究で使用している微動イベントをMajor-episodeに属するかMinor-episodeに属するかを分類することで4つのパターン(L-SSE期間+Major-episode), (L-SSE期間+Minor-episode), (inter-L-SSE期間+Major-episode), (inter-L-SSE期間+Minor-episode)の特徴的振幅の中央値の空間分布を作成した.

結果と考察

四国西部の特徴的振幅の変化のプレート境界の走向方向のコントラストを図1(左)に示す. A領域は ΔCA (L-SSE期間の特徴的振幅の中央値 - inter-L-SSE期間の特徴的振幅の中央値) が正を示しているため, L-SSE期間に特徴的振幅の大きいイベントの割合が増加していることを示し, B領域では ΔCA が負を示しているため, L-SSE期間に特徴的振幅の小さいイベントの割合が増加していることを示す. さらに領域は ΔCA が0付近でばらついていることから, L-SSEはC領域の微動活動にほとんど影響を与えていないと考えられる.

L-SSE期間のHBC震源の時空間分布から, 孤立したイベント(Minor-episodeに属しているイベント)の発生状況が微動活動の空間変化の成因である可能性が考えられるため, Minor-episodeに属しているイベントに注目し, それらの特徴的振幅の空間分布のL-SSEに伴う変化を調べた. その結果, 四国西部のA領域では, inter-L-SSE期間のMinor-episodeでは特徴的振幅の中央値が小さくなっており(図1中央), L-SSE期間では高くなっていることを確認した(図1右). 一方Major-episodeの特徴的振幅の中央値ではMinor-episodeほどの明瞭な変化は確認されなかった.

Inter-L-SSE期間に孤立的に発生するイベントの特徴的振幅の中央値が小さいことを考えると, A領域では大きい振幅のイベントはMajor-episodeのような大規模なETSの際にしか発生していないと考えられる. しかし, L-SSE期間には孤立的に振幅の大きなイベントが発生している. この振幅の大きなイベントはL-SSEのすべり自体によって誘発され発生している可能性が示唆される. 実際に, Ozawa et al. [2013]ではL-SSEのすべり分布と誘発される微動の震源分布の対比において, L-SSEが微動活動域周辺で大きくすべった時に微動活動が活発化していると報告している. さらにNakata et al. [2017]において, 本研究におけるA領域はL-SSE期間に10-20cm程度のすべりが発生していることを報告している.

L-SSEがおおよそ一定のすべり速度で発生していると仮定すると, L-SSEの滑り速度はcm/monthのオーダーであり, 非常にゆっくりとしたすべり速度である. つまり, 振幅の大きな微動活動は非常に遅い応力変化速度においても誘発されうると考えられ, 振幅の大きな微動イベントの発生を支配しているパラメーターは応力変化速度ではなく応力変化の絶対値量である可能性が考えられる.

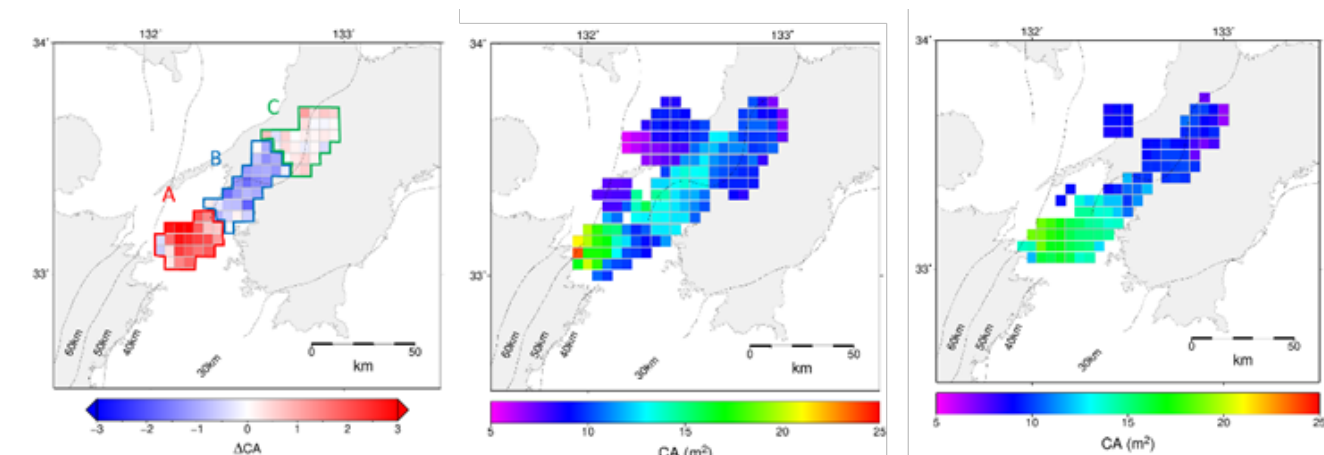


図 1

(左) : ΔCA の空間分布

(中央) : Minor-episodeに含まれるイベントの特征的振幅(CA)の中央値の空間分布(inter-L-SSE期間)

(右) : Minor-episodeに含まれるイベントの特征的振幅(CA)の中央値の空間分布(L-SSE期間C)

Spatio-temporal characteristics of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano

*Takuma Ikegaya¹, Mare Yamamoto¹

1. Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の発生により、東北地方では広域にわたり歪・応力の変化が生じ、地殻内部の火山性流体も影響を受けたと考えられる。深部火山性流体の挙動を表すと考えられている深部低周波地震の活動を調べることは、巨大地震後の中長期的な火山活動を考える上で重要である。そこで、本発表では、東北地方太平洋沖地震後に火山活動の活発化が見られる蔵王山について、深部低周波地震活動の時空間的特徴を解析した結果を報告する。

東北地方太平洋沖地震後、蔵王山直下では2012年初頭から深部低周波地震が増加し、2013年には浅部 (深さ約2 km以浅) における火山性地震や長周期地震が発生し始めた。さらに、2015年には浅部の火山性地震活動の活発化により蔵王山で初めて火口周辺警報 (噴火警戒レベル2と同等) が発表された。その後、地震活動は数か月間隔で消長を繰り返し、2018年1月に火口周辺警報が再度発表されたものの、全般的には火山活動は静穏になりつつある。このような一連の火山活動活発化の期間における深部低周波地震の活動様式を明らかにするために、Ikegaya and Yamamoto (2019, JpGU) では、相関を用いたイベント検出法であるMatched Filter法を連続波形に対して適用し、気象庁一元化震源カタログの約7倍にあたる数の深部低周波地震の検出に成功した。さらに、2012年と2015年に活動度が活発化した地震と2016年に活発化した地震の波形特性が異なることを明らかにした。そこで本研究では、先行研究で検出した深部低周波地震の分類を行い、蔵王山における深部低周波地震の時空間的な特徴を明らかにすることを目的とする。

解析には、2012年1月～2016年9月における気象庁一元化震源カタログ記載の深部低周波地震146個 (テンプレート) とIkegaya and Yamamoto (2019, JpGU) で検出・震源決定された2012年1月～2018年5月に発生した深部低周波地震1056個の計1202イベントを使用した。震源位置や波形の特性が類似したイベントを抽出し、タイプ別のグループを作るためにイベント間の波形相関を用いた分類を行った。分類には、東北大学七ヶ宿、釜房、防災科学技術研究所Hi-net 上山の3観測点3成分における1–8 Hz帯の波形データを使用した。テンプレートについて3観測点3成分の相関の平均値が0.4以上のイベント群でグループを作り、Ikegaya and Yamamoto (2019, JpGU) による検出イベントについては相関が最大となるテンプレートと同じグループに分類した。

相関によるイベント分類の結果、1202イベントのうち939個を7つのグループに分類できた。主要なグループは浅部クラスターで発生するグループA (241個)、グループB (222個) と深部クラスターで発生するグループC (295個) である (図1a)。グループA, BはOkada et al. (2015) による地震波トモグラフィーの高Vp/Vs領域の側面及び内部に位置する一方、グループCは高Vp/Vs領域の下部に位置する。これらのグループは、Ikegaya and Yamamoto (2019, JpGU) で波形の特徴をもとにイベント分類を行ったもののうち、低周波成分のみが卓越する波形タイプ (グループA, B) と高周波成分が重畳する波形タイプ (グループC) に概ね一致する。

これらの各グループの活動の推移に着目すると、図1bに示すように、深部低周波地震活動の活発化が始まった2012年には深部におけるグループCの活発化が見られ、震源領域が相対的に浅いグループA, Bの活動がやや遅れて増加し始めたことが分かる。その後、火山浅部 (深さ約2 km) における地震活動の活発化や深さ約5 kmを変動源とする山体膨張 (Miura et al., 2019, JpGU) が2015年前半に観測された時期にグループCの活動が再活発化し、翌2016年には、グループA, Bの活動が活発化した。このように深部低周波地震の発生領域や活動に火山活動の推移と対応した時空間的変動が認められ、深部マグマの活動と浅部火山活動の相互作用が示唆さ

れる．また，グループCとグループA，BそれぞれのP波・S波のスペクトル比を推定したところ，前者はダブルカップル成分に富む一方，後者は体積変化成分を含む震源メカニズムであることも明らかとなった．

今後，各グループの深部低周波地震の震源メカニズムをさらに精査することで，蔵王山における深部火山性流体の挙動の時空間変化について明らかにできることが期待される．

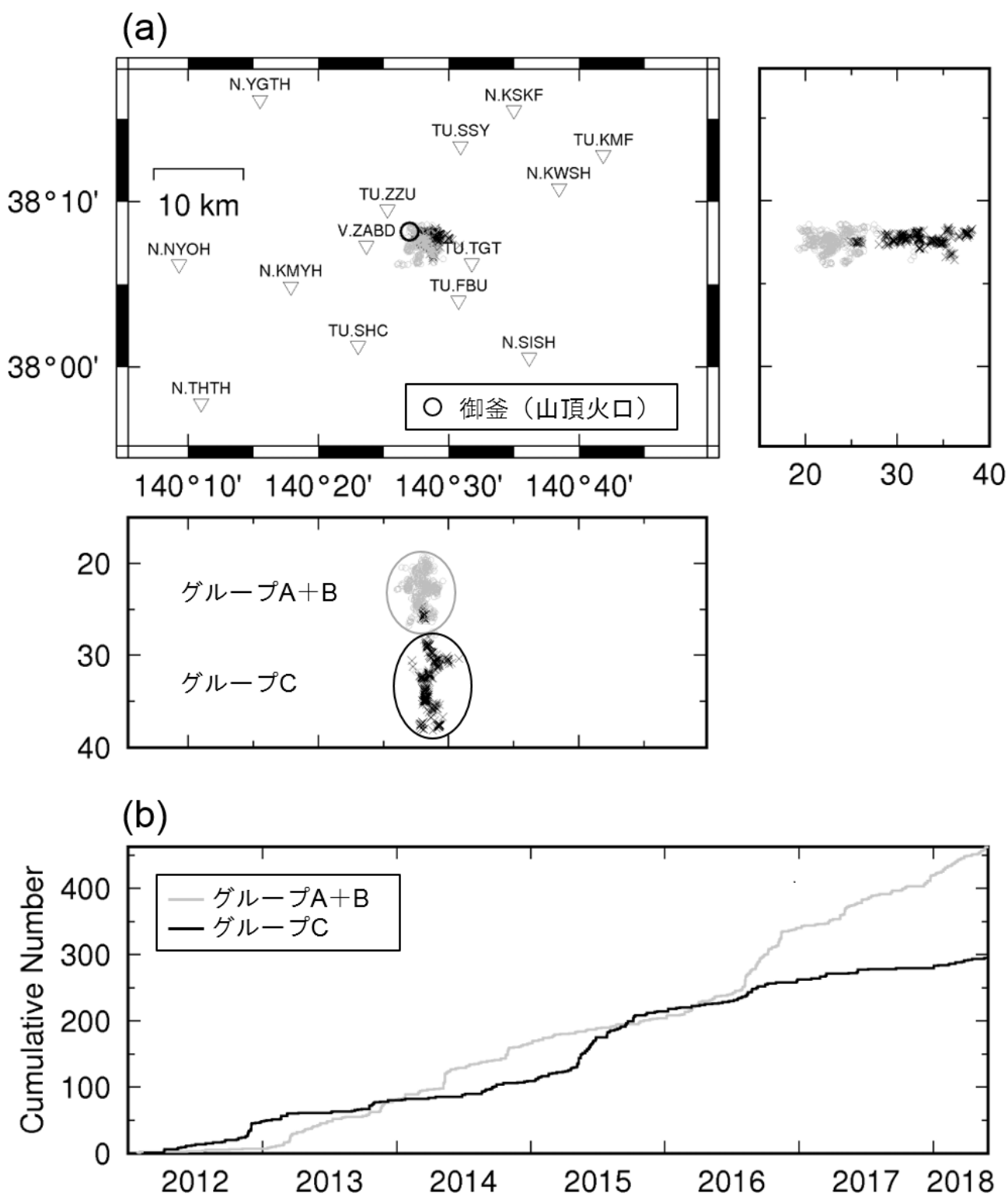


図1. 蔵王山深部低周波地震グループA+BとグループCの (a) 震源と (b) 累積数時間変化

Numerical modeling of characteristic waveforms of deep low-frequency earthquakes in volcanic areas: effect of wave resonance

*Taichi Haruyama¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hiroshima University

1. はじめに

深部低周波地震は、波形の卓越周波数が地震の規模に比して顕著に低く、脆性-塑性境界よりも深部で発生することから、断層運動とは異なるメカニズムで発生すると考えられている。そのメカニズムの解明を目指す研究が数多く行われてきた。モーメントテンソル解析は主に初動部分の波形を説明しようとするものであるが、深部低周波地震の振動継続時間が長いことも説明する必要がある。そのような波形の典型的な例である、特定の周波数が卓越して振幅が徐々に大きくなる現象は、共鳴による振動の可能性がある。そこで本研究では、共鳴効果による波動を数値シミュレーションによって検討した。

2. 方法

本研究では、共鳴体として円柱型の地震波低速度領域を置き、その中または外に力源があるモデルを設定した。低速度領域は深さ30km付近に置き、 $V_p=1.5\text{km/s}$ 、 $V_s=1.0\text{km/s}$ とした。低速度域以外の速度構造モデルはJMA2001を用いた。力源はシングルフォースとし、震源時間関数はKüpper waveletとした。シミュレーションでは、低速度領域の大きさ、震源位置、シングルフォースの向き、震源時間関数を変えて、地表観測点での波形を計算した。計算には3次元波動伝播シミュレーションコードOpenSWPC (Maeda et al., 2017)を用いた。

3. 単独の震源パルスによる波形

シミュレーションでは、震源位置が低速度領域の中にあると継続時間の長い波形が出現した。特に、震源が低速度領域の中心軸の近くに位置し、震源から低速度領域の側面・底面までの距離がS波の波長より短いときには、継続時間がより長く、特定の周波数が卓越する減衰振動が現れた。一方、距離がS波の波長より長いときには、複数の周波数が卓越する減衰振動が現れた。前者は低速度領域内で基本モードが卓越し、後者は高次モードが卓越するためと考えられる。高次モードの卓越周波数は震源時間関数に応じて変化した。また水平方向のシングルフォースを与えた場合、与えた方向と平行および鉛直方向に振動し、鉛直方向のシングルフォースを与えた場合は3成分の振動が現れた。

4. 複数の震源パルスによる波形

単独の震源パルスでは単純な減衰振動となり、紡錘型の波形となる場合があることが説明できない。そこで、それが複数の震源パルスによって説明できるかを検討した。単独の震源パルスで基本モードが卓越する条件で、同じ震源位置に複数の震源パルスを与えた。この場合、前のパルスによる波動が震源位置に戻ってくるタイミングで次の震源パルスが作用したとき、振幅が増幅し、紡錘型の波形を再現することができた。最大振幅の出現時刻は与える震源パルスの個数により変化した。また、振幅が小さく継続時間が短いパルスを最初に与えるとP波部分に高周波の波が現れ、より現実的な観測波形を再現することができた。

したがって、特定の周波数が卓越し継続時間の長い紡錘型波形は、低速度領域内で複数の震源パルスが作用し、基本モードの共鳴が重なり合う特別な場合に出現することが示唆される。多くの場合にはこのような条件が満たされないため、多様な波形が出現すると考えられる。今後は、スペクトルや振動極性についても定量的に観測波形と比較し、発生メカニズムを検討していく必要がある。

謝辞

本研究では東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用しました。

Realtime monitoring of seismicity anomaly around Japan using the ETAS model

*Tomoaki Nishikawa¹, Takuya Nishimura¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

異常な地震活動を検出し、モニタリングすることは地震活動を支配する物理を理解する上で重要である。2011年東北地方太平洋沖地震や2014年チリ・イキケ地震の数週間前には、通常の本震-余震系列とは異なる群発的な地震活動が観測された(Kato et al., 2012; Kato et al., 2016)。このことから、異常地震活動のモニタリングは大地震の予測精度の向上にも役立つことが期待される。そこで、本研究はEpidemic-type aftershock-sequence (ETAS)モデル (Ogata, 1988) を用い、地震活動の異常性をモニタリングするシステムを構築した。また、このシステムを2019年4月から現在(2019年7月)まで継続的に運用することで、地震活動の異常性をリアルタイムでモニタリングした。

ETASモデルは、地震発生レートを定常背景レートと余震の大森・宇津公式の重ね合わせで表現するモデルである。本研究は、ETASモデルから予測される地震発生数と実際に観測された地震発生数を比較することで地震活動の異常性を評価する。本研究では、日本周辺の5つの海溝（日本海溝、千島海溝、南海トラフ、琉球海溝、伊豆海溝）における地震活動を解析の対象とし、これらの海溝を全11個の解析領域に分割した。例えば、日本海溝は茨城沖、宮城沖、三陸沖の3領域に、南海トラフは東海・東南海、南海の2領域に分割した。これらの11領域に加え、2016年熊本地震震源域周辺、2019年山形県沖の地震震源域周辺の2領域も解析した。

まず、各解析領域内で過去（日本海溝では過去1年間、日本海溝以外の海溝では過去3年間、熊本、山形県沖では過去20年間）に発生した M_j3 以上の地震を気象庁一元化カタログと最近の地震活動（速報値）から抽出し、ETASモデルの5つのパラメタを推定する。次に各領域内でETASモデルから予測される地震発生数（変換時間）を計算する。最後に実際に観測された地震発生数と予測される地震発生数を比較し、ETASモデルに従わない地震系列を異常な活発化として検出する。具体的な手順は以下の通りである。

1. 活発化か否かの判定の対象となる地震（判定対象地震）を1つ決める。
2. 判定対象地震から20個前までの地震に対して、その地震から判定対象地震発生時刻までの期間内にETASモデルによって実現される地震発生数の確率分布を計算する。
3. その期間内に実際に観測された地震発生数以上の地震発生数がETASモデルによって実現される確率を2の確率分布から計算する。
4. 2と3の計算を判定対象地震から20個前までの地震全てに繰り返す。
5. 計算された20個の確率のうち最も小さいものを判定対象地震に割りあてる。この確率が0.1%未満であったとき対象地震は異常な活発化であると判定する。1-5の手順を領域内の全ての地震に繰り返す。

以上の解析の結果、2018年6月の房総沖スロースリップに伴う群発地震活動や、2018年9月、10月の沖縄本島沖の群発地震活動、2019年3月の日向灘の $M_j5.4$ のダブルットなどを顕著な活発化として検出した。また、本システムを2019年4月から現在(2019年7月)まで継続的に運用し、2019年6月に熊本県芦北町で M_j3 クラスの群発地震活動をリアルタイムで検出した。これらの結果はWebページ上で公開され、毎日更新されている(<https://sites.google.com/site/tomoakinishikawahomepage/home/>今日の地震活動)。

また、上記の解析を過去のいくつかの大地震の前震活動に適用し、本システムが前震活動を異常な活発化として検出できるか調べた。その結果、1982年 $M_j7.0$ 茨城県沖地震、2008年 $M_j7.0$ 茨城県沖地震、1996年10月 $M_j6.9$ 日向灘の地震、2016年 $M_j7.3$ 熊本地震の前震活動を活発化として検出した。一方、2011年東北地方太平洋

沖地震の3月6日以前の前震活動は活発化の基準（0.1%未満）を満たしはしなかったものの、ETASモデルで実現できる確率が0.15%であり比較的異常な活動であった。今後、本システムを継続的に運用することで、同様の前震活動をリアルタイムで検出できるかもしれない。

Small repeating earthquake activities in the inland areas of the Japanese Islands

*Toshihiro Igarashi¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

近年、ほぼ同じ場所で繰り返し発生する相似地震が日本列島やアリューシャン列島、スマトラ島沖など、世界中のプレート境界型地震発生域で多数検出されている。それらの活動は、大地震発生前の前駆的滑り、発生後の余効滑りやプレート沈み込みの揺らぎに応じた時間間隔で発生しており、プレート間固着状態が世界各地で推定できる可能性を示唆している。その一方で、相似地震活動は、内陸の活断層域でも発生していることがいくつか報告されている。そこで本研究では、日本列島の上盤側プレートで発生する相似地震活動の特徴を調べた。また、これらの活動を基に各地域における断層滑り推定の可能性について検討した。

2. 相似地震データ

本研究では、気象庁の震源カタログを基に、日本列島全域に展開されているテレメータ地震観測点で観測されたM1.5以上の地震波形記録を用いて継続的に行っている小規模相似地震の検出結果を使用した。滑り量の推定には、プレート境界で使用しているNadeau and Johnson(1998) による関係式と、応力降下量一定を仮定したSomerville et al. (1999)による関係式を使用し、比較検討を行った。

3. 結果

日本列島域では、地殻内で発生した大地震の余震活動や群発地震活動の中に相似地震活動を見つけることができた。そのほとんどは、大きめの地震が発生した後に出現し、その余震活動の減衰とともに急激に活動度が減少する、バースト的な活動を示す。本解析では主にM2からM4クラスの小規模相似地震が抽出されている。これらの地震を用いた滑り量の値は、プレート境界で使用している関係式を使用した場合には、応力降下量を一定と仮定した関係式の約10倍の大きさをもつ。そのため、大規模な余効滑りが確認されていない多くの地域では、プレート境界で使用している関係式を使用すると滑り量を過大評価してしまう傾向にあった。

一方で、プレート境界で使用している関係式の使用の是非を更に検討すべきと思われる地域もいくつか存在する。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震発生後に地震活動が活発化した茨城県北部地域では、6年弱の間にM6クラスの地震がほぼ同じ場所で発生した。この地域の余震活動中には多数の相似地震が発生しており、その活動は2019年現在も継続している。これらの相似地震から計算される積算滑り量は、プレート境界で使用している関係式を使用した場合、M6クラスの地震の滑り量と同程度と見積もられる。このような地震活動は千葉県銚子市付近でも見られており、相似地震群から推定される滑りの時間変化は、各断層面において大規模な余効滑りが生じていることを示唆している。仮に、応力降下量を一定と仮定した関係式を用いた場合でも、これらの地域における地震発生後1年間の滑り量は3 cmとなる。いずれにしても、これらの地域の地殻活動を把握する際には、上盤側プレート内の変動が無視できないことを示している。地震発生域の非地震性滑りが上部地殻にのみ偏在する場合は、比較的短期間のみ小さく滑る一方、下部地殻の粘弾性変形を伴う場合は、深部の大きな変動に合わせて滑りが長期間継続するのもかもしれない。

長期間継続する相似地震活動は、1995年兵庫県南部地震後や2016年熊本地震の前後などでも見られる。今後、これらの活動をより詳細に調べることにより、内陸域で発生する相似地震活動の原因が明らかになることが期待される。

Characteristics of similar earthquakes in the northern part of the Nansei Islands determined by ocean bottom seismometer data

*Yukihiro Nakatani¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Kazunari Uchida², Takeshi Matsushima², Hiroshi Shimizu², Yusuke Yamashita³, Kazuo Nakahigashi⁴, Tomoaki Yamada⁵, Hideji Abe⁶, Masanao Shinohara⁶

1. Kagoshima Univ., 2. Kyushu Univ., 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 5. ERI, UTokyo (now at JMA), 6. ERI, UTokyo

南西諸島海溝域では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う定常的な地震活動に加え、低周波微動や短期的スロースリップイベントといったスロー地震活動も確認されている。主に島嶼部で構成される陸上観測網によってそれらの震源を求めると、南西諸島北部域では、地震がクラスター状に発生している場所があるほか、活動空白域となっているような場所も見取れる。スロー地震に目を向けると、短期的スロースリップイベントや低周波微動は、沈み込むフィリピン海プレートの浅部境界で広く活動していることが、地震・地殻変動観測によってわかってきた。しかしながら、南西諸島北部域におけるすべり現象は、100 km以上離れた、かつ南北に点在する島嶼部からの観測によってのみ拘束されている。そのため、地震およびスロー地震の活動がともに確認されている日本周辺海域の中でもとりわけ、両者の時空間的な対応関係やプレート境界におけるすべり特性の議論が進展していない。

そこで著者らは、トカラ列島東方海域において長期収録型海底地震計を用いた繰り返し海底地震観測を実施してきた。2014年に開始した本観測は、2015年以降、観測点間隔が約40–60 kmの6台の自己浮上型海底地震計によって、約1年周期で回収・設置を繰り返しながら観測を継続している。尚、2019年8月の回収航海をもって、当該配置による第一次の観測体制は終了する。

本研究では、普通の地震、特に相似地震に着目することで、クラスター状に分布していると見られる活動を、その特徴に応じて分類し、それぞれの活動様式を議論する。微小な相似地震も分類するために、Matched-Filter法を採用し、波形相関により地震を検出した。上述の海底地震計および島嶼観測点の3成分連続波形データを使用した。テンプレート波形は、鹿児島大学南西島弧地震火山観測所が作成した地震カタログを参照し、マグニチュード3以上の地震を選択した。Matched-Filter法の適用に先立ち、テンプレート地震の震源精度を向上させるため、海底地震計データからP波・S波の到達時刻を手動検出し、島嶼観測点の既存読取値と統合して震源再決定した。相似地震解析の結果、大別して3つの活動様式に分類された。1つ目のパターンは、ある期間に集中的に発生する地震群、2つ目は繰り返し地震のように、ある程度定期的に発生する地震群、3つ目はランダムなタイミングで発生していると見られる相似地震群である。本発表では、各地震群の空間分布についても示す。

2019年4月からは、喜界島東方海域において観測点間隔20 km（計8台）のより稠密な第二次の海底地震観測を開始した。本発表では当該観測についても報告する。

謝辞：

観測航海は、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。本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」および「同計画（第2次）」の支援を受けました。また、東京大学地震研究所共同利用の援助を受けました。加えて、公益財団法人東京海上各務記念財団の地震研究助成を受けました。記して感謝いたします。

Estimation of a plate boundary derived from seismic observations on sea bottom and land in and around northern part of Nansei Syoto islands (6)

*Hiroshi Yakiwara¹, Yukihiro Nakatani¹, Shuichiro Hirano¹, Reiji Kobayashi¹, Hiroki Miyamachi¹, Shigeru Nakao¹, Yusuke Yamashita², Kazunari Uchida⁴, Takeshi Matsushima⁴, Hiroshi Shimizu⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Kodo Umakoshi³, Hideji Abe⁶, Satoshi Ikezawa⁶, Yoshihito Suwa⁷, Tomoaki Yamada⁷, Masanao Shinohara⁶

1. Kagoshima Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ., 3. Nagasaki Univ., 4. Kyushu Univ., 5. Tokyo Univ. of Marine Sci. & Tech., 6. ERI, Univ. of Tokyo, 7. ERI, Univ. of Tokyo (now at JMA)

南西諸島北部の種子島・屋久島と奄美大島との間は、海溝軸から 200 km 以上背弧側に離れた小規模孤立型離島が直線状に位置する。日向灘に隣接するこの領域のプレート境界域テクトニクスに関する理解を進展させるためには、海域及び島嶼域での地震観測により推定したプレート境界面の形状を、島嶼域のGNSS観測データを用いた地殻変動モデリングに取り込み、プレートの固着域・固着率、及びそれらの時間変化の推定する必要がある。著者らは、南西諸島北部域の3観測点において、OBSを繰り返し投入することによる準定常海底地震観測を2014年4月に開始した。LOBSを順次投入し、2015年7月には現行の6観測点による観測網を構築した。この海域地震観測は2019年8月初旬で完了する。

八木原・他（2018, 地震学会）は、この時点で取得済であった2015年7月～2018年4月中旬の約2年9か月に得られた海域・島嶼域データの解析結果を報告した。深さ40 km 以浅については、プレート境界域から背弧側にかけて上盤側で広範囲に発生したと推測された深さ10～20 km の地震が多いため、M4.0 以上の地震を対象に震源メカニズム解析を行い、低角逆断層型の地震の分布からプレート境界の深さ分布を推定した。結果として、1枚のnodal plane の走向が海溝軸とほぼ平行な低角逆断層型の解が得られた地震として17個のみが得られた。これらの地震の深さ分布は深さ13～37 kmで、Arai et al. (2017) の測線付近に発生した3個の地震の震源は、いずれも構造断面のプレート境界付近に推定され、深さの誤差の範囲で整合する。

一方、陸域観測網の中長期の微小地震観測データを用いた解析で相似地震活動が検出され、準静的すべり速度が推定された領域（後藤、私信）の背弧側の端は、八木原・他（2018, 地震学会）のプレート境界面の深さ40 km等深線と概ね一致する。さらに海溝軸から背弧側に50 km（プレート境界の20 km等深線よりは前弧側）の範囲では相似地震活動が検出されていない。八木原（2018, 地震学会）で得られた低角逆断層型の地震の深さ範囲を併せて考慮すると、固着域の深さ範囲は概ね15～40 kmと推測される。すなわち、島嶼域GNSSの地殻変動データモデリングの際には、この深さ範囲のプレート境界面形状が重要であることが示唆される。

本発表では、2018年4月16日～2019年8月1日の期間のデータを加えて、最終的にデータが揃った段階での再解析結果を示す。M4.0 以上の地震を対象とした場合、低角逆断層型の地震の数や空間分布が限られる。対象とするマグニチュードのしきいを下げ、さらに初動の押し引き分布が低角逆断層型のメカニズム解と矛盾しない地震も抽出して参考とすることで推定したプレート境界の形状について報告する。

謝辞 OBSの回収と再投入のための航海は、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。また本研究を実施するにあたり、気象庁のデータを使用しました。さらに、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。以上の各機関の皆様に謝意を表します。

Role of pore fluid pressure in aftershock occurrence of the 2016 Kumamoto earthquake

*Kodai Nakagomi¹, Toshiko Terakawa¹, Satoshi Matsumoto², Takahiro Ohkura³, Kazutoshi Imanishi⁴, Masayuki Yoshimi⁴, Takahiko Uchide⁴, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake⁵

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 5. Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1. はじめに

余震は古くから知られている現象であるが、その発生メカニズムはよくわかっていない。クーロン破壊関数の変化 (ΔCFF) は、ある断層面での剪断応力の変化と面に働く有効法線応力の変化を介した断層強度の変化を評価したもので、余震の発生を理解するために広く用いられてきた (e.g., King et al., 1994)。多くの場合、 ΔCFF は本震によって引き起こされた応力場の変化から見積もられる。しかし、本震による間隙流体圧の上昇は、断層強度を著しく低下させ、余震の発生を引き起こす可能性がある (e.g., Nur & Booker, 1972, Sibson, 2007, Terakawa et al., 2013)。本研究では、2016年4月16日に発生した熊本地震を対象とし、地震メカニズムトモグラフィー法 (FMT法, Terakawa et al., 2010) による本震前の間隙流体圧分布の推定と、本震前後の地震活動度の変化の分析を通して、余震の発生における間隙流体圧の役割の理解を目指す。

2. 熊本地震発生前の間隙流体圧分布の推定

FMT法は、応力場と地震時の断層運動の関係から、地殻内の間隙流体圧場を三次元的に推定する手法である。本研究では、熊本地震の震源域を含む九州中央部 (緯度: 130.2°N~131.6°N, 経度: 32.0°E~33.4°E, 深さ: 0km~15km) を対象とし、FMT法により本震前の間隙流体圧分布を推定誤差と共に求めた。解析には、Matsumoto et al. (2018) による2236個のメカニズム解 (1996年1月24日~2016年4月7日) と、防災科研のF-netカタログに掲載されている90個のメカニズム解 (1997年1月1日~2016年4月13日) を使用し、重複を防ぐようにデータセット (2248個) を作成した。

これらのデータから、まず、CMTデータインバージョン法により九州地方の広域応力場を推定した (Terakawa & Matsu'ura, 2008; Terakawa et al., in prep.)。次に、この応力場の下でメカニズム解の各節面に働くトラクションの方向から理論的なモーメントテンソル (MT) を計算し、実際のMT (メカニズム解から変換したもの) との内積を計算した。こうして、内積の値が大きい方の節面を真の断層面として選択し、FMT法に適用した。得られた結果から、Asano & Iwata (2016) による震源断層面に相当する場所での間隙流体圧分布を調べた。この結果と本震のすべり分布を比較すると、本震すべりの大きかったところで間隙流体圧が小さくなった。これは、本震断層の強度とすべり量の関係を示しているかもしれない。

3. 熊本地震前後での地震活動度の変化の分析

気象庁の震源カタログを用いて、九州中央部における本震前の3年間 (期間1: 2013年4月13日~2016年4月13日) と本震後の3年間 (期間2: 2016年4月16日~2019年4月16日) の地震数と、本震前後の地震活動度の変化を調べた。まず、深さ 5, 10, 15kmの平面内に5km間隔で地震活動の評価点2463個を設定した。次に、各期間で、各評価点を中心とした半径5kmの球の中に含まれる地震数を求め、期間1の地震数に対する期間2の地震数の比を算出した。この結果、本震後に地震活動度が減少する領域が、震源域を挟んだ南北方向に分布することがわかった。これは、先行研究による ΔCFF (Nishimura, 2018) の結果とも調和的である。しかし、 ΔCFF が負であるにも関わらず地震活動度が増加した地域が約240地点あり、これらの地域の余震の発生には間隙流体圧の上昇が重要な役割を果たした可能性がある。

4. 余震の発生における間隙流体圧の役割の分析

ΔCFF からの予想に反して地震活動度が増加した地域（3節）に対して、本震前後での応力場に対するメカニズム解のタイプの変化を調べた。分析には、2節で使用した本震前のメカニズム解に加え、今西他による熊本地震合同余震観測で得られたメカニズム解495個（2016年4月16日～2019年2月10日）とF-netカタログ（2016年4月16日～2019年2月18日）のメカニズム解208個を使用した。分析の対象となった地域のうち、本震前後の両期間で十分なデータがあったのは、震源域西部の南方の3地点だけであった。これらの地域のメカニズム解と応力場の関係から各地震を駆動した間隙流体圧係数 C （間隙流体圧の静水圧からのずれを規格化したもの）を計算し、その値を本震前後で比較した。このうち2地点で、 C の値は0.59から0.93、0.42から1.1へと大きく増加した。この結果は、間隙流体圧の上昇がこの地域の余震の発生を促した可能性を支持する。

The seismic activity at 13 km or more depth range around the hypocentral area of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Ayaho Mitsuoka¹, Satoshi Matsumoto², Azusa Shito², Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

2016年熊本地震は、布田川・日奈久断層帯で右横ずれ、正断層型の応力場において発生した。最大前震(Mj 6.5)、本震(Mj 7.3)発生後も広範囲で非常に活発な地震活動が観測された。Shito et al. [2017]の3次元速度構造をもとに、震源再決定を行うと、最大前震・本震発生後の余震は何枚か面状の分布を示しており、これらの震源分布から断層面形状を決定した[Mitsuoka et al., 2019]。

この余震活動の中でも布田川・日奈久断層の接合部付近、13 km以深で発生した地震活動は非常に特徴的である(図1)。これらは日奈久断層の走向に沿うように帯状に分布しており、2016年熊本地震以前に観測された震源分布では見られない活動である。この深部で発生する地震活動は2019年現在まで、局所的ではあるが継続している。またこの活動が継続している領域の震源分布を詳細に見ると、震源は3つの南から北にかけて深くなる帯状の分布をしていると考えられる。これらの地震の発震機構解を決定すると、横ずれ断層型あるいは正断層型地震の地震であることがわかった。正断層地震は、15 km以浅に多く、15 km以深だと布田川断層側で起こっている。日奈久断層側は右横ずれ地震が多く発生している。

この特徴的な震源分布は、13 km以浅の震源分布には見られず、また、地震前にも見られないことから、最大前震・本震発生による影響があることが予想される。13 km以深で発生したそれぞれの地震の震源位置で岡田モデル[Okada, 1992]を用いて最大前震と本震による応力変化を計算すると、差応力が数10MPa~100MPa程度の非常に大きい応力変化が働いたことがわかった。しかし、応力変化テンソルと地震断層面との関係を調べると、応力変化のみによって地震断層面に働く剪断応力方向とは逆向きに地震すべりが生じている地震が多くあることがわかった。2016年熊本地震以前の絶対偏差応力場は、Mitsuoka et al. [2019]によると、正断層応力場と右横ずれ応力場が不安定に混在する領域であり、それらの差応力は数10 MPa~100 MPa程度であることが推定されている。この地震前の応力場と応力変化の和である応力状態が各地震断層に働いていると考えることができるので、その和の応力テンソルが各地震断層に及ぼす剪断応力の計算を行った。各地震のすべり方向は、約75%が剪断応力方向にすべっており、全地震の90%程度が数MPa~数10 MPaの大きさの剪断応力が働いて地震が発生したことがわかった。断層モデルは、再決定された震源分布から得られた断層面にAsano and Iwata [2016]のすべり分布モデルを投影したモデルを採用した。

また、発震機構解からは観測極性が理論極性と一致しない非ダブルカップル成分を含むメカニズムがいくつかあることがわかった。Hayashida et al. [2019]によるとこれらの地震はダブルカップル成分に加え、断層クラックの開口によって非ダブルカップル成分を持つことが示されており、本研究の対象領域内の地震活動もこのような発生機構を持つ可能性がある。また、この帯状の分布は低比抵抗帯[Aizawa et al., 2019]に沿うように分布しており、低比抵抗帯の存在との関係があることが考えられる。

これらの結果より流体の関与の可能性もあることから、地震断層に働く応力状態を含め、この深部地震活動の発生について議論を行う。

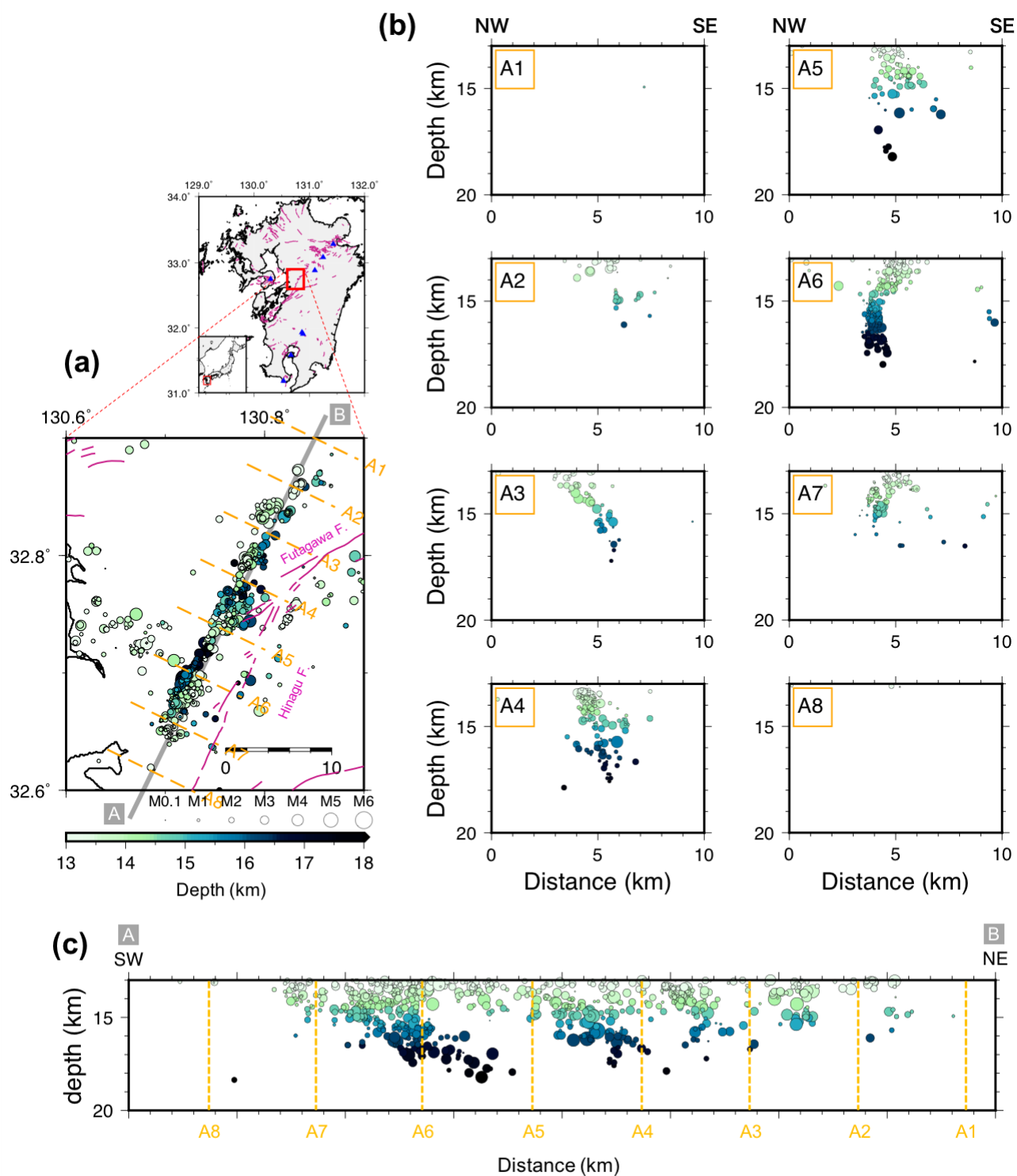


Figure 1. (a) Map showing relocated hypocenter distribution at the target area in this study. (b),(c) Vertical cross sections plotting the relocated hypocenters. Circles indicate the location of the hypocenters with the colors indicating the depth of that. Blue rectangles and pink lines indicate the active volcanos and the active faults, respectively.

Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

*Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

2016年の熊本地震発生後、およそ深さ13km以深において、日奈久断層の走向に沿うような形で直線的な震源分布が見られるようになった[Mitsuoka et al., 2019]. これは地震発生前には無かった震源分布の特徴である。熊本の地下18kmにおける比抵抗の水平分布を見ると、前述の震源分布と近い形で低比抵抗領域が存在することが分かっており[Aizawa et al., 2019], 震源分布と比抵抗構造との間には何らかの関連性があるものと考えられる。

地震が発生した際、その地震の震源の特徴を理解するには、震源パラメータ(地震モーメント、コーナー周波数、応力降下量など)の推定が重要な鍵となる。また、震源スケーリングや応力降下量を調べることは、震源物理の理解や将来発生するであろう地震の強震動予測の向上に必要である。

そこで本研究では、2016年熊本地震系列における前述の震源分布に焦点を当て、そのうちの22地震を対象として、それらを3つのグループに分けて、S波コーダスペクトル比法を用いて震源パラメータの推定を行い、応力降下量のばらつきやその要因について調べた。解析は、基本的にSomei et al.[2014]の手順に倣って、観測記録から震源スペクトル比を求めた。得られた観測震源スペクトル比は概ね ω^{-2} モデル[Aki, 1967]に基づく理論曲線によって説明することができた。SN比が2以上の周波数帯のデータを用いて、地震モーメント比・大地震と小地震のコーナー周波数をグリッドサーチで推定した。大地震の地震モーメントは気象庁が決定したマグニチュード M_{JMA} を地震モーメント M_0 に換算した値で固定し、地震モーメント比から小地震の地震モーメントを推定した。

解析の結果、大地震のコーナー周波数 f_{cl} はグループ1で4.9[Hz](68%信頼区間はそれぞれ -1σ で4.1/+1 σ で5.7[Hz]), グループ2で2.6[Hz](-1σ で2.3/+1 σ で2.9[Hz]), グループ3で2.9[Hz](-1σ で2.2/+1 σ で3.6[Hz])となり、小地震のコーナー周波数 f_{cs} は3.0~16[Hz]の間に、地震モーメント比は6~328の間に推定された。なお、地震モーメントはコーナー周波数に対して $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係に従う様子が見られた。

推定されたコーナー周波数と地震モーメントを用いて、地震断層を円形クラックと仮定して応力降下量を推定した[Eshelby, 1957; Brune, 1970,1971]. 対象とした22地震の応力降下量は0.495~59.4MPaの間でばらついており、過去の日本における内陸地震のばらつき[Somei et al., 2014]の範囲内であった。応力降下量の深さ依存性を調べたが、全体として震源が深くなるにつれて応力降下量の値が大きくなる傾向が見られた。

これらの結果の妥当性を検証するために、観測点毎の推定値のばらつきや、グリッドサーチによる理論曲線のフィッティングの精度などについても議論する。

謝辞：解析において、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net、気象庁のデータも利用しました。記して感謝申し上げます。

Inelastic deformation in the lower crust and seismic activity of the Kyushu, Japan

*Yuhei Yuasa¹, Satoshi Matsumoto², Shigeru Nakao³, Takeshi Matsushima², Takahiro Ohkura⁴

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

地震は地殻に蓄積された応力（弾性歪み）を解放する現象であり、地震を含む非弾性変形は周囲に応力変化（弾性歪み変化）を引き起こす。したがって、地震の発生と地殻変動のプロセスを理解するためには、応力集中と緩和の過程を理解する必要がある。また測地学的観測によって得られる地表面での歪み変化はプレート沈み込みによる弾性応答や地殻内部で進行する非弾性変形、もしくはそれによって生じた歪み変化である。しかしながら、両者によって生じる歪み変化には時空間的に差異があるため、地殻中の応力集中・解放過程をより詳細に議論するためには両者の影響を分けて考える必要がある。従って、本研究ではGNSS観測によって得られたデータを用いて下部地殻の非弾性変形とプレートのすべり欠損の推定を試みた。

プレート境界に対してはOkada (1992)の矩形断層、下部地殻とマグマだまりでの非弾性変形はBarbot et al. (2017)のグリーン関数を用いることでモデル化を行った。九州における2004年から2014年の11年間のGNSS観測によって得られた変位速度から推定された歪み速度場をデータとして、観測方程式をたて最小二乗法によってプレート境界での滑り欠損速度、下部地殻、マグマだまりの非弾性変形速度を推定した。プレート境界上での滑り欠損速度は豊後水道から足摺岬周辺にかけて50 - 60 mm/yrであり、先行研究によって報告されている値と同程度である。また、高い非弾性歪み速度が推定された領域はMoore et al.(2017)によって推定された低粘性領域とおおむね一致した。プレート境界での滑り欠損と下部地殻の非弾性変形によって内陸の上部地殻に生じる応力変化を計算すると、前者による応力変化は後者よりも低く、九州ではプレートの沈み込みは内陸地震にあまり影響を与えていないと考えられる。次に下部地殻の非弾性変形によって上部地殻に生じる応力変化テンソルと背景応力場を比較すると下部地殻の非弾性変形によって九州の大部分の上部地殻では応力集中が進行している一方で応力緩和傾向の領域もみられることが分かった。この緩和傾向の領域においては地震活動が低調であることが震源分布との比較から分かった。また主要活断層に対してこの応力変化による Δ CFFを計算すると、その多くが正の値である一方で応力集中領域であっても Δ CFFの値が負になる断層帯が得られた。こうした断層帯周辺での地震活動も比較的低調である。以上から九州においては下部地殻の非弾性変形が上部地殻への応力集中過程や地震活動に対して重要な役割を果たしていることが考えられる。

研究の一部は、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」「H28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」および東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けた。ここに記して感謝する。

Waveform twins of equal time difference in seismic ambient noise

*Kei Katsumata¹, Masayoshi Ichiyanagi¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

1. はじめに

前震には相似波形が多いという報告が複数ある（例えば、Pechmann and Kanamori, 1982, JGR ; Motoya and Abe, 1985, Earthquake Prediction Research）。高周波数まで波形の相関が良いことから、震源が非常に近接していると解釈された。そこで本研究では、地動ノイズの中から相似波形を探索し、前震の検出を試みた。

2. データと解析

2018年9月6日午前3時7分頃、北海道胆振東部地震(Mj6.7)が発生した。この地震の発生前の期間、2018年8月25日00時00分から9月6日03時06分までの7観測点の連続波形データを使用した（図1）。7観測点の内、TKOとSKJが北海道大学の観測点、それ以外の5つは防災科学技術研究所のHi-net観測点である。今回解析したのは上下動成分のみで、サンプリング周波数は7観測点共に100Hzである。なお、9月5日02時00分から16時59分までは欠測観測点があるので解析対象から外した。

解析手順は以下の通りである。

- ① ある1つの観測点において、1分間の上下動成分を用意する。以下②および③の処理はこの1分間のデータに対して行うものとする。
- ② 生データに8-16Hzのバンドパスフィルターをかける。
- ③ 0.5秒間の時間窓を1サンプルずつずらして、全ての組合せについて相関係数を計算する。相関係数の絶対値が0.8以上の組合せの時刻をT1, T2とする
- ④ ①～③の処理を7観測点について行い、以下の3条件が満たされた場合をイベントとして認定する。
 - (a) 7観測点でのT1が±3秒以内で一致している
 - (b) 7観測点での時間差 $\Delta T = T2 - T1$ が±0.03秒以内で一致している
 - (c) ΔT が10秒以上である

3. 結果

検出されたイベントの1時間毎の数を図2に示す。イベント数は、昼間に多く、夜間に少ない傾向が見られる。また、日曜日（8月26日と9月2日）に少なく、それ以外の平日に多い傾向も見られる。胆振東部地震直前の9月6日00:00～03:06に検出されたイベントはなかった。また、図2で20個以上のイベントを検出した時間帯は、遠地地震が観測されていて、その波形内にイベントが存在している。

4. 検出されたイベントは前震か？

イベント数の時間変化は、地動ノイズの高低の時間変化とよく一致しているので、地動ノイズが起源のイベントであると推測される。ごく小さい前震がほぼ同じ場所を震源として1分以内に連続発生したとも考えられるが、その場合は、ノイズレベルの低い夜間にイベント数が多く、ノイズレベルが高い昼間はイベント数が少なくなるはずである。したがって、検知されたイベントが前震である可能性は低い。しかし、上記④の3条件(a)～(c)を満たすイベントは非常に特異な現象であり、7観測点のT1を用いて相似波形の発生位置（震源）を推定する予定である。

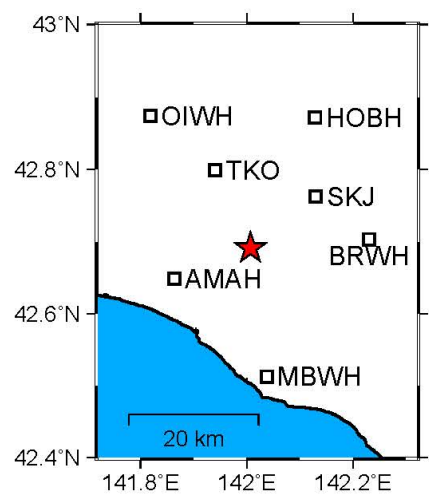


Figure 1. Study area. Squares indicate seismic stations used in this study and a red star indicates the main shock of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake.

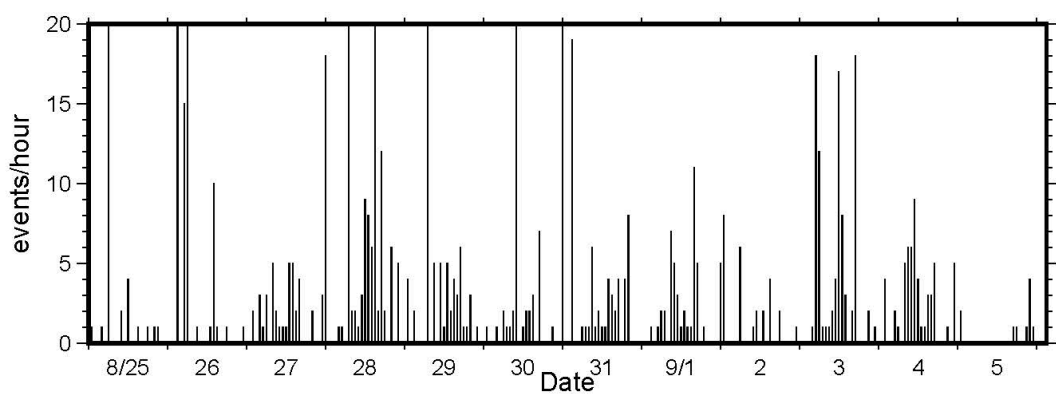


Figure 2. Number of events detected in this study between 25 August 2018 and 6 September 2018.

Evaluation of automatic hypocenter determination (PF method) using dense ocean bottom seismographs

*Koji Tamaribuchi¹, Yuriko Iwasaki², Kazuhiro Iwakiri², Hiroshi Ueno²

1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency

気象庁では、気象庁及び関係機関の高感度地震観測データをリアルタイムで一元的に収集し、震源決定等の処理を行い、地震カタログとして公表している（以下、「一元化震源」という）。近年、日本海溝及び南海トラフの海域では、稠密かつ高感度なケーブル式海底地震観測網（S-net, DONET）が展開されている。これらのデータを有効に活用し、海域における詳細な震源分布を得ることは、調査研究はもとより防災上も極めて重要である。本稿では、2016年4月から導入された一元化震源の自動処理（PF法、溜淵・他（2016, 験震時報）, Tamaribuchi (2018, EPS)）に、日本海溝海底地震観測網S-netを導入した場合の検証を行ったので報告する。

S-netを活用するにあたって、上野・他（2019, JpGU）に合わせて、以下の処理を行った。(1) S-net地震計の3軸は水平と上下からずれて設置されているため、姿勢角情報を基に水平と上下成分にベクトル変換を行う、(2) 走時計算を適切に求めるため、海域ごとに3つ（日本海溝陸寄り、日本海溝アウターライズ、南海トラフ）の異なる速度構造及び未固結堆積層に相当する補正值を用いる、(3) S-net用の速度マグニチュード補正值を用いる。

上記の対応を行って自動震源計算を行った結果、日本海溝周辺では、従来（S-netなし）に比べて、震源決定数は約2倍となった。また、海溝軸付近で発生した地震の深さの精度が大幅に良くなったと考えられる。これにより、海域で発生する地震についても、b値等の詳細な地震活動解析に活用できる可能性がある。さらに、断層面の推定精度が向上するため、震源過程解析や津波予測の初期値として自動震源を活用できる可能性がある。

一方で、エアガンや海中音波など、陸上観測点とは異なるシグナルも多数検出することから、これらを適切に除外することが、自動震源の精度を高めるうえで重要となる。また、変換波が多数検出されるため、S相を適切に検出することも重要である。そのためには、相の判別を適切に行うことが今後の課題である。

Temporal change in near-source seismic velocity in an earthquake region due to the pore pressure change after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Keisuke Yoshida¹, Akira Hasegawa¹, Yohei Yukutake², Toru Matsuzawa¹

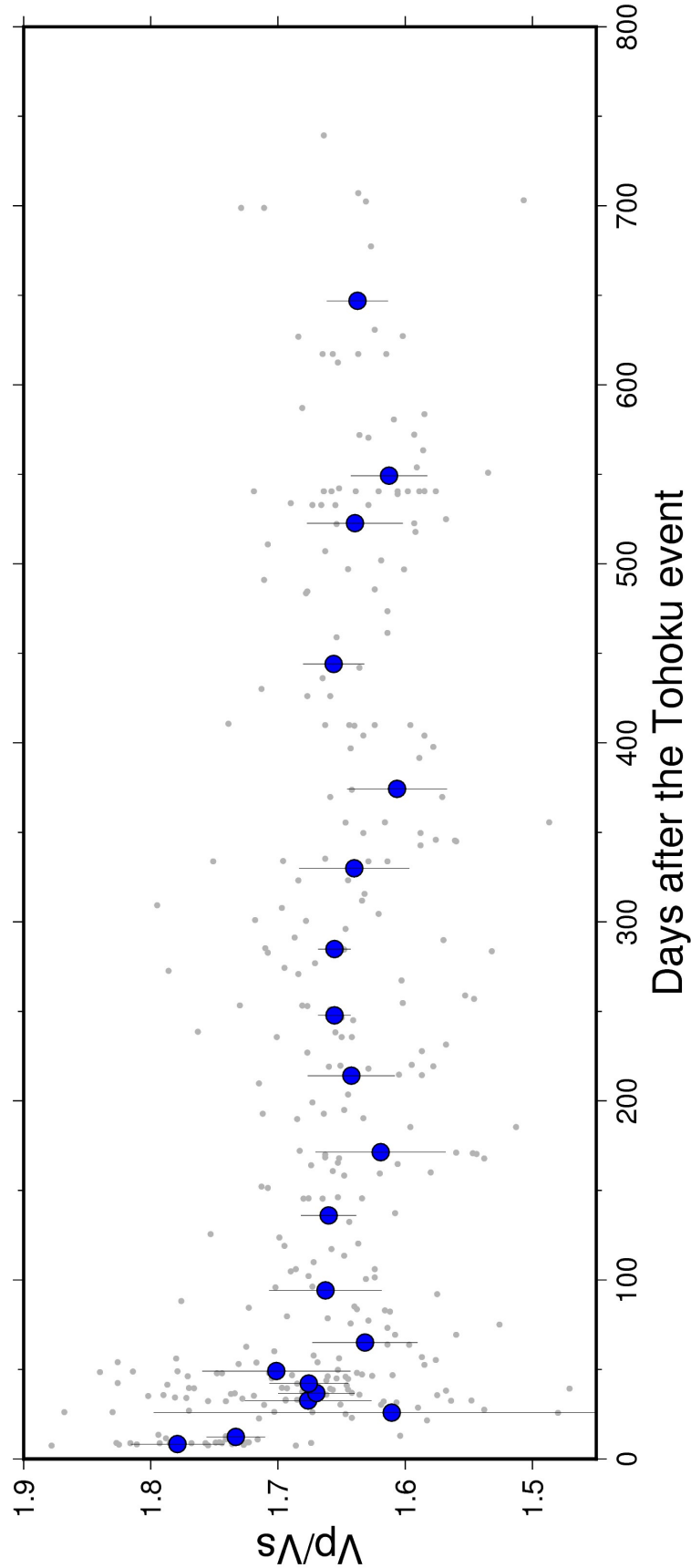
1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, 2. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

地震の発生に、地球内部の流体による断層強度の低下の効果が強く影響している可能性が指摘されてきている (e.g. Hasegawa, 2017; Hasegawa et al., 2005; Hubbert and Rubey, 1959; Nur and Booker, 1972; Sibson, 1992)。その顕著な例として、2011年東北沖地震後に東西圧縮応力の減少した東北日本の内陸部において活発化した群発地震活動が挙げられる。それらの活動は、2011年東北沖地震後の流体圧の増加による断層強度の低下により生じたと推定されており (Terakawa et al., 2013; Okada et al., 2016, Yoshida et al., 2016, 2017, 2018)、震源の深部から浅部へ向かう顕著な migrationが見られる。断層強度、応力降下量、b値、地震活動度の顕著な時間変化も検出され、それは震源域における間隙流体圧の時間変化に起因すると推定されている (Yoshida et al., 2016, 2017; Yoshida & Hasegawa, 2018)。本研究では、2011年東北沖地震後震源域の間隙水圧変化について異なる情報から調べる目的で、震源域の地震波速度の時間変化を推定した。

対象としたのは、2011年東北沖地震後に山形-福島県境で活発化した群発地震活動である。この活動は、東北沖地震後の流体圧変化により引き起こされたと推定されている活動の中で最も規模が大きい。Vp/Vsの推定には、複数地震のP波とS波の到達時刻差データに基づくLin & Shearer (2007)の手法を用いた。ここで、到達時刻差データにはYoshida & Hasegawa (2018)が、波形相関により高精度で求めたものを使用した。対象とした地震は2011年から2018年までの期間において発生した M>2の地震 2,458個である。

結果、610個の地震について信頼性の高いVp/Vsの値が推定された。得られたVp/Vsは、群発地震活動の初期に大きめの値を取り (~1.75)、100日程度まで減少し、その後およそ一定値 (~1.65)を取る (図1)。推定のばらつきが大きいものの、仙台大倉で生じた同種の群発地震活動についても同様のVp/Vsの時間変化の傾向が見られた。その時間変化のパターンは先行研究により独立に推定された断層強度 (Yoshida et al., 2016)・応力降下量・b値 (Yoshida et al., 2017)・定常地震活動度 (Yoshida et al., 2018)と同期するように見える。このことは、この群発地震活動が間隙流体圧の急激な上昇に起因することを示すもう一つの観測的証拠と考えられる。

図1. 推定したVp/Vsの時間変化。灰色の丸で個々の推定値を、青色の丸で平均値を、縦の線分で標準偏差に基づいて推定した95%信頼範囲を示す。



Temporal changes in the scattered wave packets associated with earthquake swarm activity beneath the Moriyoshi volcano

*Yuta Amezawa¹, Masahiro Kosuga¹, Takuto Maeda¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hiroshima University

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震発生後、東北日本内陸各地で群発地震活動が活発化した (e.g., Okada et al., 2015). 東北地方北部に位置する第四紀火山の森吉山地域は、東北地方太平洋沖地震発生から8年余り経過した今なお群発地震活動が継続している地域の一つである。この群発地震活動の震源は複数のクラスター状に分布し、森吉山北方約5 kmの最も活発なクラスターでは震源のマイグレーションが観測されている (e.g., Kosuga, 2014)。また、本地域で観測される群発地震の地震波形記録のSコード中に8 Hz以上の高周波に卓越し1秒程度の振動継続時間を持つ特徴的な後続波が現れる。これは、森吉山周辺に局在する強散乱体へ入射したS波の多重散乱によって生じた波群であると考えられている (Kosuga, 2014)。本研究では、後続波の波形形状の時間変化に着目し、その系統的な解析とこれまで得られた種々の観測事実に基づいて森吉山地域における群発地震の誘発要因を議論する。

2. データと解析方法

本研究では、森吉山北方の震源クラスター内で2011年3月から2016年11までに発生した3609地震について Double difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) で再決定した震源を用いた。まず、後続波の波形形状を目視で3種類に分類するとともに、対応する震源位置の空間分布を調査した。次に、直達波部分の波形相互相関に基づいて、震源位置および震源メカニズム解がほぼ同じと考えられる地震を抽出し、その中での後続波部分の波形の時間変化を調べた。

3. 結果

後続波の波形形状を (A) 単一のピーク、(B) 複数のピークおよび、(C) ピークが不明瞭な場合の3パターンに大別すると、それぞれの割合は順に33.8%, 63.8%, 3.2%であった。各パターンに対応する震源位置は棲み分けせず、(A) および (B) に関してはクラスター内に一様に分布している。(C) のみはクラスターの北東側に偏って分布している。

また、直達波部分の波形形状はよく類似したグループ内の波形であっても、後続波部分の波形の振幅・ピーク数・継続時間は複雑な時間変化を呈した。さらに、後続波の波形形状は十数時間から数日という短期間のうちに変化する可能性があることが判明した。

4. 議論

後続波の波形形状が時間変化する要因として、震源位置および震源メカニズム解の違いと、後続波の発生源の時間変化が考えられる。後続波の波形形状の各パターンに対応する震源がクラスター内で棲み分けしていないことは、震源位置の違いのみでは後続波の波形形状の変化を説明できないことを示している。また、震源位置および震源メカニズム解がほぼ同じ地震を抽出した場合、同一グループ内での直達波部分の相関係数は0.85以上であるが、後続波部分の相関はそれよりも有意に低い。以上から、後続波の波形形状の時間変化は、その発生源の時間変化によるものと考えられる。観測された短期間での急激な波形形状の変化を考慮すると固体的な発生源の時間変化は考え難く、地殻流体の関与が示唆される。一方、後続波のピークが不明瞭な地震は空間的に局在しており、後続波の発生源に後続波を発生させない要因があるか、あるいは観測点に後続波が到達しない震源・観測点間のジオメトリの影響があると考えられる。

後続波の発生源は、森吉山北方クラスターのほぼ直下約13kmに位置すると推定されている (雨澤・小菅, 2017SSJ)。また、Okada et al. (2015)による地震波トモグラフィーの結果によると、発生源推定位置の直下には地震波低速度領域が存在する。以上の観測事実と後続波の波形形状の時間変化を考慮すると、後続波

の発生源には地殻流体が存在している可能性が高く、それは入射波に対し強散乱体として振る舞い特徴的な後続波を励起し、散乱体の時空間変化が後続波の波形形状の時間変化をもたらすと考えられる。

このように、森吉山北方のクラスター下には地殻流体の貯留域が存在しており、東北沖地震による応力場の変化により中間主応力軸が鉛直方向を向いたこと（e.g., 小菅・他, 2012）で鉛直方向のフラクチャーが発達しやすい状態となり（Sibson, 1997）、それを通して地殻流体が上昇し、震源のマイグレーションを伴う群発地震活動を駆動したと考えられる。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所高感度地震観測網Hi-netの地震波形データを使用しました。

Observation of Microearthquake around Tokuyama Dam (3rd Report)

*Takayuki SANO¹, Mamoru TSUKAMOTO¹, Hideki SODA², Takashi MITSUZUKA³, Fumiaki KANTOH³, Hiroshi KATAO⁴

1. Japan Water Agency, 2. Japan Institute of Country-ology and Engineering, 3. Chishitsu Keisoku Co., Ltd., 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

徳山ダムは、独立行政法人水資源機構（JWA）が2008年に完成した堤高161m、総貯水容量660百万m³の大規模ロックフィルダムである。同ダムは岐阜県揖斐川町の揖斐川上流に位置し、洪水調節、新規利水、発電等を目的としている。ダム周辺には濃尾地震を引き起こした根尾谷断層、及び活断層とされる揖斐川断層が存在するため、JWAでは、湛水による地震活動への影響を監視する目的で、1976年から微小地震観測を行ってきた。本稿は、ダム完成から10年を経過した2018年までの貯水池周辺の地震観測記録に基づき、湛水による地震活動への影響を評価するものである。

2. 地震観測の概要

観測は1976年当初3地点で開始し、2002年に8地点、2006年に9地点になり、2016年以降は徳山ダム近傍5地点で実施している。記録形式は当初トリガー起動により磁気テープに記録していたが、2002年末にデジタル連続観測（地震計は固有周波数2Hz地表設置型）に移行し、現在に至る。当該地域は山間部で電源と通信手段の確保が困難なため、各点で独立に収録したwin形式の地震記録を定期的に回収し、目視による験震を実施してきた。図1に、2002年12月から2018年6月までの震央分布を示す。図1右の範囲は、ダムを中心とした±20km、深度20kmまでであり、地震総数は35,028個である。気象庁一元化震源カタログによる同エリア、同期間の地震総数は6,864個で、およそ5倍の地震を検知している。ダムおよび貯水池の近傍には地震が少なく、東側の根尾谷断層沿い、西側の岐阜・滋賀県境沿いおよびダムサイト南側で地震活動が活発である。以降の評価はJWAの観測結果による。

3. 地震活動の評価

図2左に、JWAの観測記録による徳山ダム貯水池周辺エリア内（図1緑色枠内）を震源とするM>0.5地震の月あたり地震発生数とダム貯水位を、図2右に湛水前後のG-R図を示す。地震発生数はランダムに変動しているが時間経過に伴う増減傾向はない。G-R図も、湛水前のb値0.97に対し湛水後は0.94であり、湛水前後で明確な変化はない。湛水後の観測期間を累積地震数が同程度になるよう分割した小期間のb値も、多少の変動はあるものの増減傾向は認められなかった。

4. 今後に向けて

ダム完成から10年以上が経過し、湛水前後の地震活動に明確な変化は認められなかった。これをふまえて2019年からは、JWAの2観測点とHi-netの3観測点の記録を統合処理することで気象庁一元化震源よりも高い験震精度を確保できる体制に移行した。観測継続については、今後の気象庁一元化震源の験震精度や既設観測機器の寿命をふまえて判断する予定である。

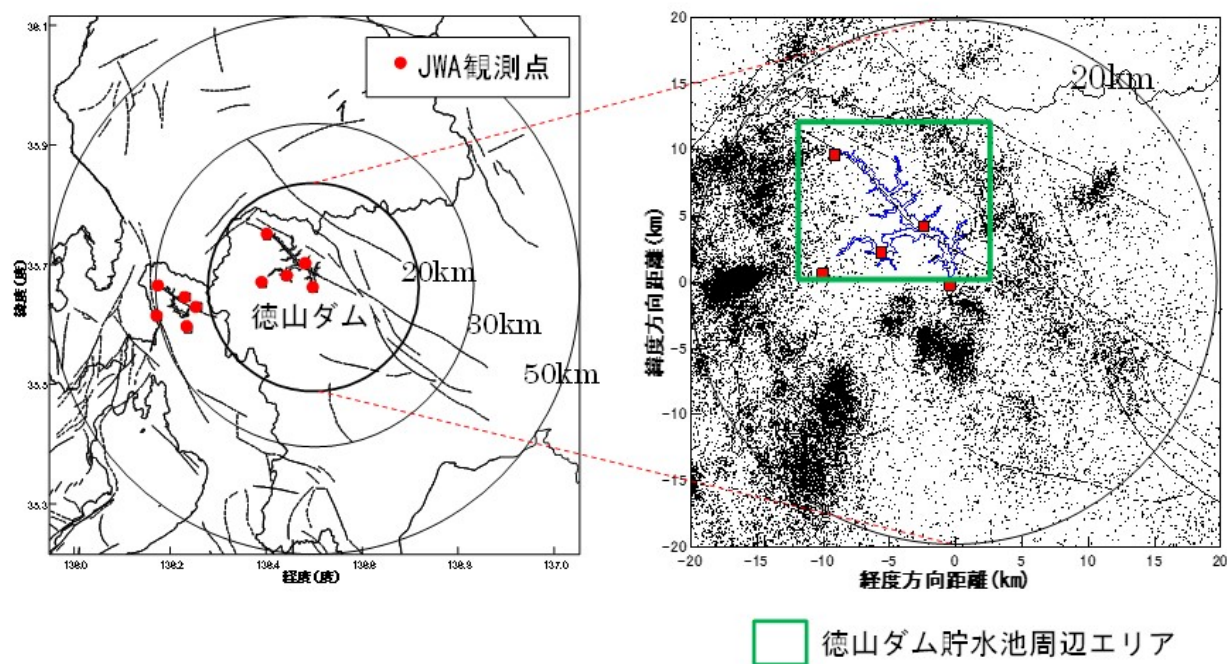


図1 徳山ダム周辺の震央分布 (2002.12~2018.6, 各図中央が徳山ダム)

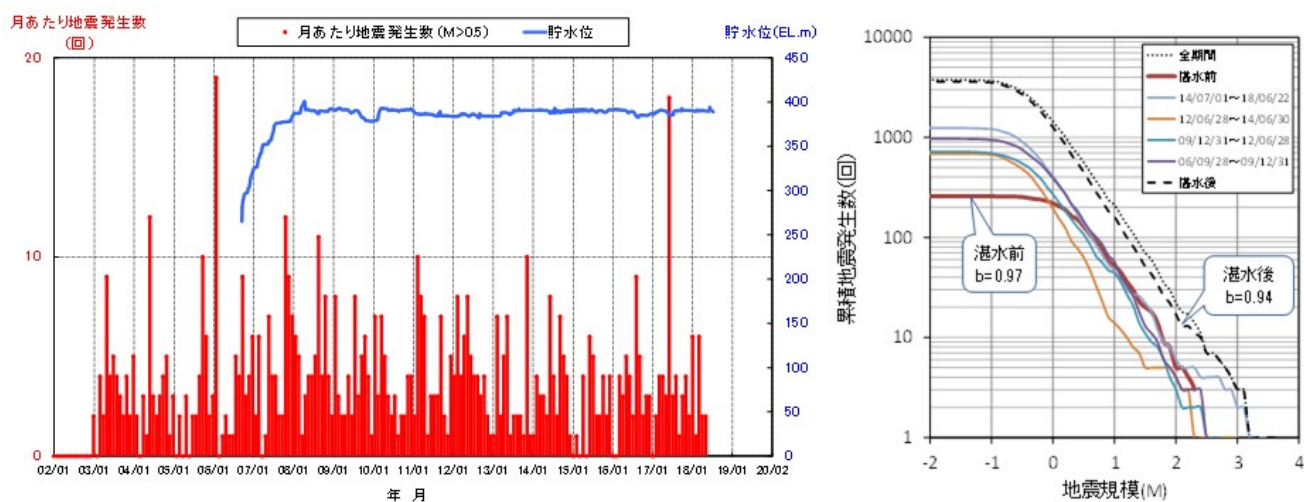


図2 徳山ダム貯水池周辺エリア内での月あたり地震発生数とG-R図

Uncertainty quantification via large-scale 4DVar data assimilation for frictional inhomogeneity in a slow-slipping fault

*Shin-ichi Ito^{1,2}, Masayuki Kano³, Hiromichi Nagao^{1,2}

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 3. Graduate school of Science, Tohoku University

断層の運動は断層面間に発生する摩擦の特性によって支配され、その動力学は、摩擦力の断層面内速度に対する非線形な依存性によって定性的に説明される。しかしながら、現実の断層運動は、摩擦特性の空間的な不均一性により、空間一様な摩擦特性を仮定した断層運動とは大きく異なる挙動を示す。そのため、そのような複雑な断層運動を数理的に理解するためには、「観測された断層運動が実現するためには摩擦特性の空間分布はどうあるべきか」を推定し、その推定値のゆらぎ(不確実性)を評価することにより、「空間的に不均一に分布している摩擦特性のどの部分が主要な断層運動に寄与しているか」を定量化することが重要な課題となる。

データ同化は、シミュレーションモデルと観測データをベイズ統計に基づいて融合する計算技術であり、ベイズ事後分布を構成・評価することにより、直接観測できない系の内部状態やパラメータ空間分布などの推定や、その不確実性評価を可能にする。近年、データ同化の元々の土壌であった気象・海洋分野から大きく適用範囲を広げ、固体地球科学現象への応用もかなり浸透してきた。しかしながら、既存のデータ同化手法を固体地球科学で用いられる大規模なシミュレーションモデルに適用する場合、「次元の呪い」により、モデル変数の自由度に対して計算量が組み合わせ爆発的に増大するため、現実的な計算機資源の下で推定値およびその不確実性を正確に評価することが極めて困難になるという問題を抱えている。この問題を解決するため、近年我々は、気象予報における主力のデータ同化手法である4次元変分法(4DVar)を発展させ、次元の呪いに囚われることなく推定値および不確実性を高速かつ高効率に評価する新しいデータ同化法を構築した[1,2]。このデータ同化手法は2nd-order adjoint法と呼ばれるベイズ事後分布の曲率を評価する手法を用いることで、モデル変数の自由度に依存しない計算量での不確実性評価を実現するため、大規模シミュレーションモデルに対しても現実的な計算量でデータ同化を行なうことを可能にする。

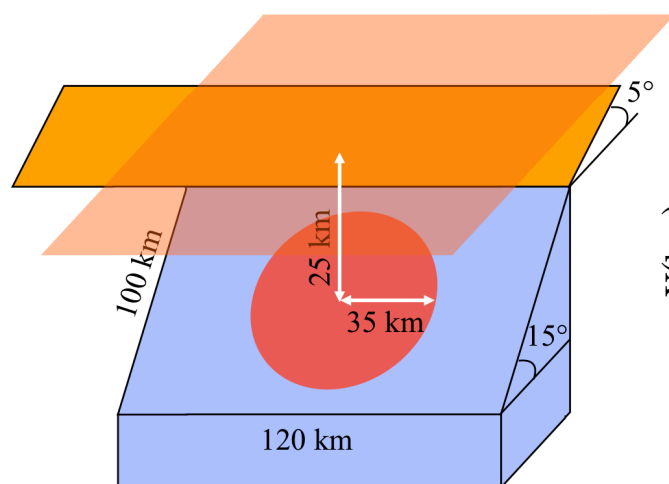
本研究では、この新規データ同化法を、豊後水道スロースリップ発生域を模擬した図(a)に示すような断層面内の運動のみに着目したモデル[3] (以下、断層モデル)に適用し、スロースリップの動力学と摩擦特性の空間不均一性の不確実性との関係を調べる。この断層モデルでは、摩擦則として、固着度合いを表す状態変数と呼ばれる時間特徴量と断層面内速度に依存した速度状態依存摩擦則を用い、状態変数の発展則としてaging則を用いる。さらに、速度状態依存摩擦則に含まれるパラメータを空間に依存した場の変数として扱うことで摩擦特性の空間依存性を表現する。結果としてこのモデルは、速度場+状態変数場+パラメータ場を変数に持つモデルになり、既存のデータ同化手法では取り扱うことが困難な超大規模なシミュレーションモデルとなる。本研究では、この断層モデルのシミュレーションから生成された速度場の時間発展を擬似的なデータとして用いて、上述の新規データ同化法を用いたデータ同化を行ない、図(b)のように、仮定した断層運動が実現するためのパラメータ空間場およびその不確実性を評価する。これにより、スリップの動力学とパラメータ空間場の不確実性の関係を定量化する。我々のデータ同化手法は一般の大規模シミュレーションモデルへの応用が可能であるため、将来的には断層面間の摩擦特性の不均一性だけでなく、そのまわりの地下構造の不均一性も考慮した大規模有限要素モデルなどへの展開が期待できる。

参考文献

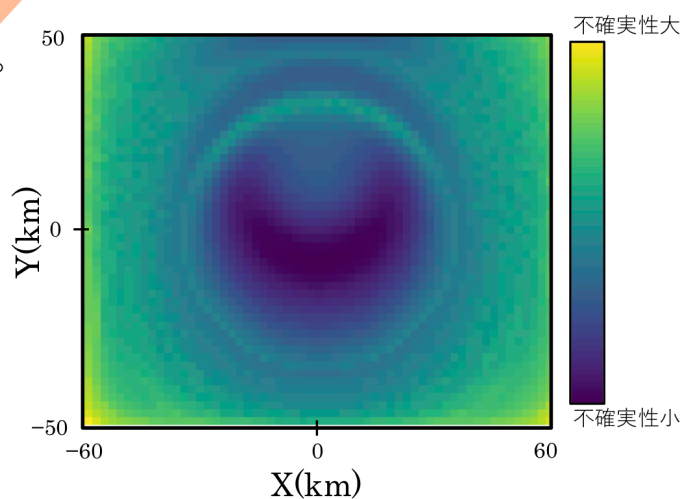
- [1] S. Ito, H. Nagao, A. Yamanaka, Y. Tsukada, T. Koyama, M. Kano, and J. Inoue, Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method, *Physical Review E*, 94, 043307, doi:10.1103/PhysRevE.94.043307, 2016.
- [2] S. Ito, H. Nagao, T. Kasuya, and J. Inoue, Grain growth prediction based on data assimilation by

implementing 4DVar on multi-phase-field model, Science and Technology of Advanced Materials, 18, Issue 1, 857-869, doi:10.1080/14686996.2017.1378921, 2017.

[3] K. Hirahara and K. Nishikiori, EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on a LSSE fault -numerical experiments-, JpGU2018, SCG53-17, <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2018/subject/SCG53-17/advanced>, 2018.



(a) 断層モデルの模式図



(b) 推定された摩擦パラメータAの不確実性

High-accuracy mechanism and non-double couple component detection in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake(M7.3)

*Yuto Hayashida¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴, Group for "0.1 Manten" hyper dense seismic observation

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

我々は2000年に発生した鳥取県西部地震震源領域に約1000点の地震計を設置し、2017年3月から約1年間観測を行った。発生した地震のイベントのメカニズム解を推定したところ、ダブルカップル型では十分に説明できない極性のミスフィットが節面、ヌル軸付近に確認された。林田他, 2019, JpGUにおいて、tensile crackや複数破壊も仮定することで、非ダブルカップル型のメカニズム解を推定することができている。そこで、本研究では、林田他, 2019, JpGUで解析されているイベントを用いて、Matched filter法（MF法）を用いて、ごく近傍のイベントを検出し、ダブルカップル型と非ダブルカップル型の地震で特徴を探ることを目的とした。

本研究では、0.1満点観測で得られた約1000点の上下動成分の地震計の連続波形記録を使用した。テンプレート地震として林田 他, 2019, JpGUで解析されているイベントを用い、イベント検出基準は合計した相関係数が全観測点数の20%以上とした。さらに、検出したイベントについて、各観測点で独立に検出時刻から±1秒の幅で波形相関をとり、最も大きい相関係数の値とその時の時間差 Δt を計算した。検出されたイベントの震源を、 Δt とテンプレート地震の震源位置から、マスターイベント法（ME法）を用いて相対的に決定した。

テンプレート地震発生日の前後3日間で、MF法、ME法による解析を行った。その結果、マスターイベント付近で発生した地震の震源を決定することができた。また、それぞれのイベントにおいて相関係数を観測点にコンターマップに示すことで、テンプレート地震とスレーブ地震とのメカニズム解の違いを把握することができた。特に、非ダブルカップル成分の割合の違いによって、ヌル軸付近に相関の値が小さいイベントや、メカニズム解が違うイベントを確認できた。

謝辞 本研究は平成26-30 年度文部科学省新学術研究領域「観察・観測による断層帯の発達過程とミクロからマクロまでの地殻構造の解明」（代表：竹下 徹、課題 番号26109004）によって助成されました。

Stress tensor inversion in the focal area of the 2016 M_w 7.8 Kaikoura earthquake, New Zealand (2)

*Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Stephen C Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Jarg Pettinga⁶, Richard H Sibson⁷

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, Wellington, New Zealand, 6. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7. University of Otago, Dunedin, New Zealand

本研究では、ニュージーランドの南島北部で発生したカイコウラ地震を研究対象とし、地震のメカニズム解を複数決定することによって、本震前後の応力場を求めた。本震断層面上で余震が多く起きている場合、断層面が偏りを持って分布している可能性があるため、本震断層面上で発生した余震メカニズム解の影響を検討する必要がある。そのため、Hamling et al. (2017)で設定された20の断層モデルと余震メカニズム解とのKagan角(Kagan, 1995)を用いて、断層面上で起きていると考えられる余震を取り除いた後、応力テンソルインバージョンを行った。本震前の地震を用いた応力テンソルインバージョンの結果、Townend et al. (2012)で得られていた結果と同様の最大水平応力軸方向を得た。本震後の地震を用いた応力テンソルインバージョンの結果、南島北部のLondon hill断層付近の地域やKekerengu断層付近の地域では、Kagan角の閾値に依らず安定した横ずれ断層型となった。また水平最大圧縮軸方向はおおよそN115Eであり、本震前について得られている方向と概ね変わらなかった。本震の震源付近ではより細かく分割して応力インバージョンを行った結果、南部の一部地域では逆断層型の応力場が推定され、その領域では本震時に逆断層の滑りが生じていたと推定される。今後は、本震の震源付近の地域や本震前の地震についてもメカニズム解を増やして安定した応力場を得られるようにし、更に細かい領域での応力場を推定する必要がある。

We study spatio-temporal changes of stress field surrounding the 2016 Kaikoura earthquake rupture in the northern South Island of New Zealand. Data from 51 temporary stations and 22 GEONET stations were used. Data collection was from March 2011 to December 2017. We derived focal mechanisms using HASH (Hardebeck and Shearer, 2002). By focal mechanism solutions of earthquake, we estimated the stress fields of main shock before and after Kaikoura earthquake. We used SATSI (Hardebeck and Michael, 2006) for stress tensor inversion. By using Kagan angle between main shock fault model and each focal mechanism, we remove aftershocks on the faults, and perform stress tensor inversion. We use the fault model of Hamling et al. (2017). The stress regime after the main shock in the areas near the London Hill Fault and near the Kekerengu fault are strike-slip fault type with S_{Hmax} orientation of ~N115E, which is almost same as for before the Kaikoura earthquake (e.g., Sibson et al., 2012; Townend et al., 2012), and stress tensors before and after the main shock didn't appear to change after the earthquake beyond the estimation error. In some areas of the south near the hypocenter of the main shock, the obtained stress tensor inversion is of this area. As a future study, we plan to obtain results of a stable stress tensor for before the main shock and in the area near the hypocenter of the main shock by increasing the number of focal mechanisms of earthquakes that we examine.

Spatiotemporal characteristics of aftershock activity of the 2011 M9 Tohoku earthquake

*MEITONG DUAN¹, Takuji Yamada¹

1. Ibaraki University

1.はじめに

大地震が発生すると、その後震源域周辺に余震が発生する。Omori(1894)は、余震数がおおむね大地震からの経過時間の逆数に比例して減少することを発見した。その後Utsu(1961)により、余震数と経過時間の関係は $n(t)=K[(t+c)^{-p}]$ でよく近似されることが明らかとなった。ここで t は大地震からの経過時間、 $n(t)$ は単位時間あたり地震数、 c は有限の短い時間であり、 K , p 値はそれぞれ余震活動の活発さと時間経過による余震数減少の特徴を表す変数である。大きい p 値は時間とともに余震数が急減することを表し、日本周辺では一般に $0.9 \sim 1.5$ 程度の値をとることが知られている (Omi, 2015)。

本研究では、2011年東北地方太平洋地震後（以下、2011年東北地震と記す）の余震活動を解析し、 p 値の空間分布の特徴を調べるとともに、2011年東北地震の地震時すべり分布・地震前の地震活動度との関連を議論する。

2.データおよび p 値解析結果

気象庁によって震源が決定された地震のうち、北緯 $34.0 \sim 42.0$ 度、東経 $141.0 \sim 145.0$ 度、深さ $0.1 \sim 90.0$ km の範囲で起きた2003～2018年のマグニチュード (M) $3.0 \sim 9.9$ の地震を解析に使用した。解析領域を緯度・経度 1.0 度ごとの小領域に分け、各小領域で2011年東北地震の余震の p 値を解析し、その空間分布を求めた。その結果、 p 値は $0.47 \sim 0.97$ の値をとることが明らかとなった。求めた p 値の空間分布および *Linuma et al.* (2012) による2011年東北地震の地震時すべり分布を Fig. 1 に示す。

3.議論および今後の解析

Fig. 1aより、2011年東北地震の大すべり域北部（領域C5）およびすべりの北端部（B7,C7）で小さな p 値を示すことが分かる。これらの理由は不明だが、比較的総余震数が少ないため、時々起こる大きめの余震に付随する「余震の余震」の影響により、見かけ上、小 p 値が得られているのかもしれない。A4領域でもやや小さい p 値が得られているが、この領域では2016年11月22日にM7.4の地震が起きている。このM7.4地震の余震が解析地震に含まれているため、小 p 値が得られたと考えられる。今後は、これらの影響を取り除いた解析も行う予定である。また現段階では、地震の選定の際、深さ方向に大きな制約を与えていない。今後は、*Nakajima and Hasegawa* (2006) により得られた太平洋プレート上面の深さ分布などを参考に、解析地震を絞り込んだ上で p 値を解析することを考えたい。さらに、 K 値の空間分布も解析し、 p , K 値それぞれについて2011年東北地震のすべり分布や地震前の地震活動度と比較し、余震発生の特徴により深く踏み込んだ議論を行いたいと考えている。

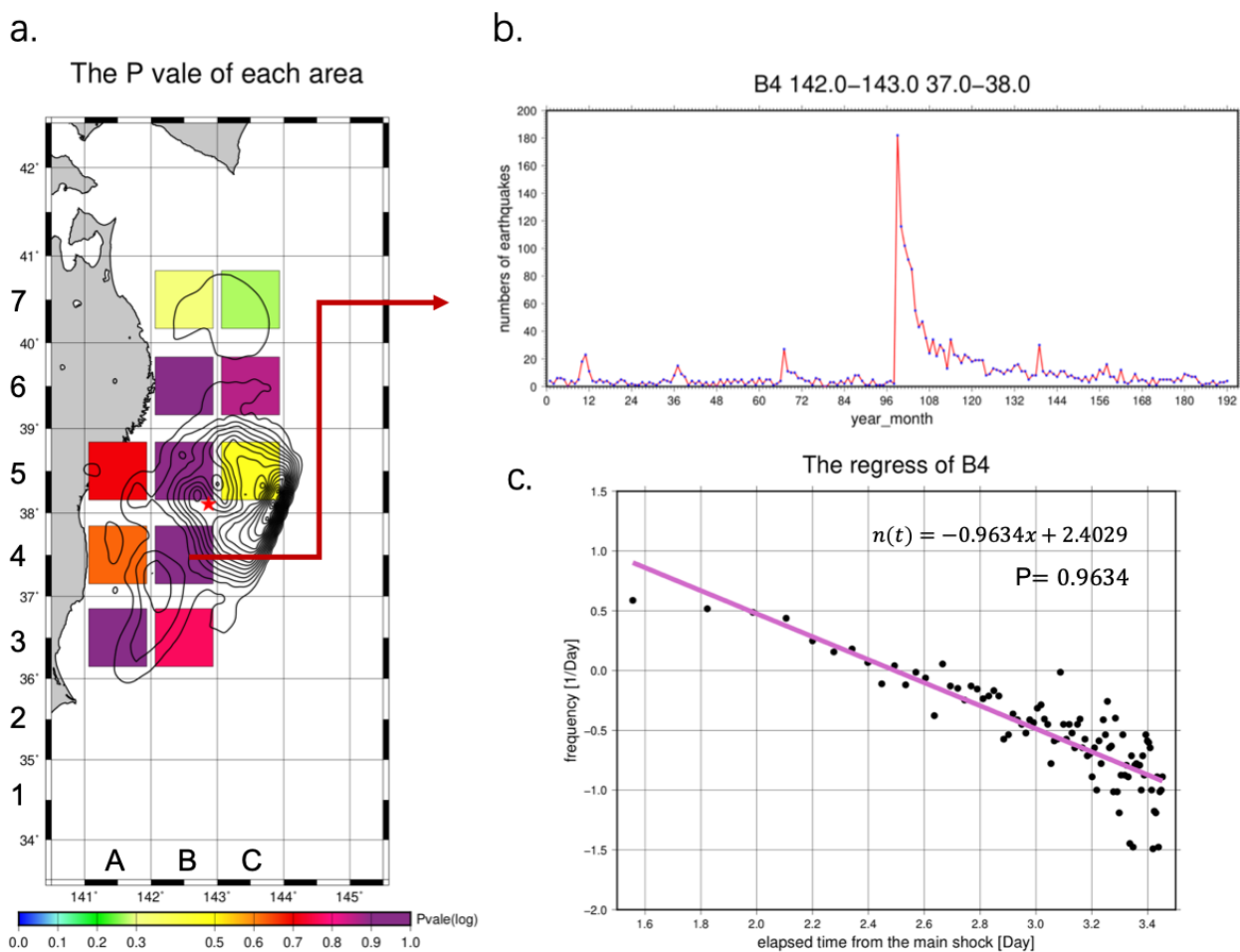


Figure 1. (a) Spatial distribution of p value for aftershocks of the 2011 M9 Tohoku earthquake, whose epicenter is shown as a red star. Black contours indicate coseismic displacement at an interval of 2 m derived by linuma et al. (2012). (b) Temporal characteristic of earthquakes that occurred in the area B4 shown in (a) from 2003 to 2018. (c) Relationship between the elapsed time from the 2011 Tohoku earthquake and the logarithmic number of daily aftershock $\log_{10} n(t) = \log_{10}[K(t^{-p})]$ in the area of B4. Slope of the purple best-fit line shows the p value indicating the temporal decay rate of the aftershock activity

Spatio-temporal clustering of successive earthquakes in Japan: analyses of JMA catalogue

*Thystere Matondo Bantidi¹, Takeshi Nishimura¹

1. Tohoku University

This study analyzes earthquakes closely occurring in space and time in Japan in order to clarify their characteristics. We group the earthquakes that occur in a given space-time window from a target earthquake into a cluster (i.e., a group of the earthquakes successively occurring), and count the number of the clusters. To examine whether or not these successive earthquakes occur randomly, we compare the results with simulations in which earthquakes are set to randomly occur in time (but same in locations). We analyze shallow earthquakes with depths of ≤ 70 km from Japanese Meteorological Agency catalogue (JMA) for the period from 1998 to 2017 with magnitudes ($5.0 \leq M_w < 6.0$), and compare the results to those that was previously determined from the global CMT catalogue for the period from 1976 to 2016 (Bantidi and Nishimura, JpGU 2019). The results show an eminent homogeneity of spatial clustering behaviors around Japan for both global and regional catalogues; and the spatio-temporal distribution of cumulative number of clusters exhibit similar features in logarithmic scale. Earthquakes in the magnitude range $5.5 \leq M_w < 6.0$, are found to be triggered at the distance between 60 - 190 km in JMA catalog and 70 - 210 km in the CMT catalog within 365 days. Furthermore, within 365 days, the JMA catalogue shows that successive earthquakes occurring close to the target fault account for about 3% of the total number of earthquakes around Japan. These consistencies suggest that the JMA catalog can be used for the analyses of smaller earthquakes with magnitude of less than 5 which are not easily analyzed by using global data set.

Estimating seismic moment of inland earthquakes using the Hi-net and the F-net record

*Tomotake UENO¹, Tatsuhiko SAITO¹, Akemi NODA¹

1. NIED

地震の発生は、地殻内に蓄積されてきた弾性歪（応力）が断層運動によって、応力を伴わない非弾性歪みへと変換するプロセスと見なすことが出来る。地震活動による非弾性歪みを推定するためには、地震の発生数だけではなく断層運動の規模を表す地震モーメントとその総和を知ることが重要となる。これまで、日本周辺で発生したM3.5以上の地震の地震モーメントについては、広帯域地震観測網（F-net）の波形データを用いて推定されたモーメントテンソルから評価されている。しかしながら、M4未満の地震になると、F-netの観測点密度やグリーン関数の精度の問題でモーメントテンソルの推定が困難になることもあり、結果として地震モーメントが求められていない地震もある。M4未満の地震活動は活発的であるがそれより大きい地震はあまり発生しない地域もあるため、小規模地震の地震モーメントを推定することも重要になる。そこで、本研究では観測点密度の高いHi-netを用いて、S波の変位スペクトルからM3クラスの地震モーメントの計算をし、日本の内陸地域における地震モーメントとその総量の推定を試みた。

用いたデータは2013年から2017年の5年間に陸域で発生した深さ20km以浅の地震とした。ある地震に対して、震央距離が100km以内の観測点を選び、計器特性を補正したS波記録に対して、到達時の1秒前から10秒間の波形を切り出して、変位スペクトルを計算した。さらに、サイト増幅特性と距離減衰およびS波の減衰を補正し、地震波の平均的な放射特性と媒質のS波速度と密度を仮定して震源スペクトルを推定した。そして、 ω^2 モデルを仮定して、周波数無限小の振幅値である地震モーメントを推定した。 ω^2 モデルの推定には、0.1Hから20Hzまでのスペクトル振幅に対し、シグナルノイズ比が10倍以上あるデータを用いた。また、初動極性で求められているメカニズム解をもちいて、モーメントテンソルにした。さらに、地震を緯度・経度方向に0.4度毎のグリッドに振り分けて、グリッド毎に求められているモーメントテンソルの総和を求め、地震モーメントを計算した。

2013年から2017年の5年間に於いて検知できたM3クラスの内陸地震の内、約95%近くになる2819個の地震モーメントを推定することができた。これらの結果をF-netのモーメントテンソルインバージョンによって求められている地震モーメントと比較したところ、両者の差はモーメントマグニチュードに換算して 0.1 ± 0.1 程度であった。また、内陸地域で限定すると、Hi-netから求めたM3からM4の地震モーメントの総和が得られた面積は、F-netから推定されている地震モーメントの総和のグリッド数に比べて1.8倍近く多かった。この差分はどこかの地域で顕著というよりはむしろ全国的にまばらに存在する。このことは、Hi-netでのみ地震モーメントを推定できたM4クラス未満の地震活動域が広く分布していることを示唆している。Hi-netデータから推定したM3クラスの地震モーメントとF-netで求められているM4以上の地震の地震モーメントをまとめて総和したところ、期間中に大地震のあった九州中部や中規模地震のあった山陰、信越地方を除くと、例えば北海道胆振地方や秋田県内陸部、福島茨城県境付近から日光周辺、銚子周辺や長野岐阜県境付近、淡路島や徳島県南部などで地震モーメントの総和がグリッドあたりで 10^{16} Nmを越えていることが分かった。

Aftershock areas of inland earthquakes in Japan

*Sachiko Tanaka¹, Tatsuhiko Saito¹, Akemi Noda¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震が発生すると、震源域やその周辺では、引き続き、多数の余震が発生する。通常、余震の規模は本震と比べると一回り小さいが、追加的な被害を生じさせるような大きい余震が発生する場合もあり、余震域の広がり の想定は、余震規模の特性や発生頻度の高低と併せて、余震活動を評価する上で極めて重要である。余震域の広がり は古くから調査が行われ、本震の規模が大きいほど余震域が広がる傾向が確認されている（例えば、Utsu, 1969）。本研究では、近年の高精度な地震データを用いて、日本列島下の内陸地震について、余震域の広がりを改めて検討した。

用いた地震データは、気象庁一元化処理による震源リスト（1997年10月–2017年12月、深さ30 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、陸域で発生したM5.5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。また、本震後1日間の余震の震央分布について、2次元正規分布を仮定し、95%以上の地震が含まれる等確率楕円を求め、余震域とした。

クラスタリング処理により、26個の本震（M5.5–7.3）が抽出された。そのうち、逆断層型の地震は15個、横ずれ断層型の地震は10個、正断層型の地震は1個である。従来の研究で示されているように、本震の規模が大きいほど余震域が広がる傾向が確認された。回帰分析の結果、余震域の面積（ S ）と地震規模の間に、 $\log(S) = 0.97M - 4.15$ の関係式が得られた。これは、Utsu（1969）によって陸域の地震（M5.5–7.5）について得られた関係式（ $\log(S) = M - 4.1$ ）と概ね一致する。また、横ずれ断層型の地震（ $\log(S) = 0.83M - 3.46$ ）に比べ、逆断層型の地震（ $\log(S) = 1.12M - 5.01$ ）の余震域が広がる傾向がみられた。ただし、横ずれ断層型の地震のうち、1998年長野県中部の地震（M5.6, $S = 59 \text{ km}^2$ ）および2016年熊本地震（M7.3, $S = 2220 \text{ km}^2$ ）は例外的に広い余震域を伴っている。

Spatial-temporal and seismogram characteristics of foreshock and aftershock activities for tsunami earthquakes

*Yifeng Liu¹, Yoshihiro Ito², Kazuaki Ohta², Satoshi Katakami¹

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

津波地震は実体波から推定されるマグニチュードに比して、大きな津波が観測される地震である。それゆえ、沿岸部で観測・計測される震度が小さく、住民の直接の避難行動につながりにくいため甚大な津波被害へと発展する可能性がある。しかしながら、津波地震の観測事例は、通常の地震に比べて少なく、その詳細な発生メカニズムは未だ明らかではない。本研究では、津波地震の発生メカニズムの解明に向けて、津波地震の前震および余震群に津波地震と同様の特徴を示す地震（マグニチュード5以上）の有無を検証することを目的とする。特に、過去に発生した3つの津波地震(ニカラグア(1992/09/02, Mw7.7)・ジャワ島(2006/07/17, Mw7.7)・メンタワイ(2010/10/25, Mw7.8))の前震・余震活動を調べたについて調査を行った。

はじめに、ISCやUSGSなどで公開されている地震カタログから前震並びに余震活動を抽出し、時空間的特徴の評価を行った。その結果、特にニカラグア本震の発生前には、震央から約10km離れた西側でMb5前後の前震(1992/08/10 06:09:20 Mb 5.2, 1992/08/10 06:34:14 Mb4.7, 1992/08/11 05:23:51 Mb 5.1, 1992/08/13 08:41:17 Mb 4.7)が四つ発生していることがわかった。また、20年間(1983-2012)の地震カタログに示される地震活動について、津波地震の震源を中心とした5度*5度の領域を1度刻みで分割し、各領域について地震活動度を調べた。地震活動を累積頻度分布に基づき評価した結果、ニカラグア津波地震の本震域の周辺では静穏期が存在していることが分かった。特に、ニカラグア地震の余震に関しては、前震と同じ領域内で余震活動が前後の期間に比して低調になる時期も検出された。また、ニカラグア地震の本震発生前には、本震の震源域付近の前震活動にマイグレーションが観測された。

静穏期やマイグレーションが観測された領域内に含まれる地震の波形について、本震（津波地震）のの波形と比較し、本震と同様の特徴が含まれるか調査した。震源域付近の地震観測記録はIRISからダウンロードした。ここでは、本震域内(11.245°~12.245°、-86.866°~-87.866°)で発生したM5以上の地震に対して、本震域周辺の4つの観測点の地震記録に対して、変位波形にバンドパスフィルタを(0.01~0.1Hz)を施したのち、表面波とSV波の最大振幅の比を求め、これらの値を比較した。その結果、特にニカラグア地震の領域内で発生した3つの地震（前震8/11(Mb5.1)と余震9/5(Mb5.3)、9/6(Mb5.3)）が津波地震の本震と同様の特徴（4000km以内の観測点で震央距離の増加に伴い振幅比の値が高くなる）を示すことがわかった。これは、津波地震の発生直前と直後に津波地震と同様の特徴を示すやや小規模な地震が発生していた可能性を示唆する。

Poster session (Sept. 16th) | General session : S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

📅 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏢 ROOM P
International Conference Halls II and III

S15P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-01] Two-sensor microtremor SPAC method: potential utility of imaginary spectrum components

*Ikuo Cho¹ (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-02] Migration of seismic scatterers before and after the 2016 events in Southeastern Korea

*Muhammad Zafar Iqbal^{1,2}, Tae Woong Chung¹ (1. Sejong University, 2. Microseismic Studies Program (MSSP), Islamabad, Pakistan)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-03] Seismic response change of a sand soil after strong motion, revealed by a laboratory transmission experiment

*Tsurugi Kakutani¹, Hironori Kawakata¹, Shiro Hirano¹ (1. Ritsumeikan University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-04] **Identification of Nonlinear Site Responses of Vertical Motions Using Strong Motion Records Observed at the Ground Surface**

*Toshimi Satoh¹ (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-05] On the liquefaction site distribution of The 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and the examination of damage rate by recent earthquakes

*Shigeki Senna¹, Shigeki Senna¹ (1. NIED)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-06] Consideration of seismotectonic province map by multivariate analysis for sophistication of probabilistic seismic hazard analysis

*Kozo Onishi¹, Takashi Kumamoto¹, Kyoko Mori² (1. Okayama University, 2. Geospatial Information Authority of Japan)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-07] A preliminary waveform tomography for the Tohoku-Oki area of the Japan Trench, Japan, based on a land-ocean unified 3D structure model

*Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3. Earthquake and Tsunami Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-08] Estimation of strong motion generation area source model during the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

*Susumu Kurahashi¹, Kojiro Irikura¹ (1. Aichi Institute of Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-09] Characterized source model for evaluating long-period (more than 2s-) ground motions during the 2014 Northern Nagano earthquake (Mj6.7)

*Yasuhiro Matsumoto¹, Ken Miyakoshi², Kojiro Irikura³ (1. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc., 2. Geo-Research Institute, 3. Aichi Institute of Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-10] Source and strong-motion characteristics of the 2017 Puebla, Mexico, intraslab earthquake (M_W 7.2) based on a waveform inversion

*Yujia Guo¹, Ken Miyakoshi¹, Masato Tsurugi¹ (1. Geo-Research Institute)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-11] Estimation of strong motion generation area of the 1985 Michoacan, Mexico, earthquake

*Hiroaki Kobayashi¹, Kentaro Motoki¹, Kenichi Kato¹, Tetsumi Watanabe², Naoya Ishikawa², Yoshiho Kawai² (1. Kobori Research Complex Inc., 2. Chubu Electric Power Co., Inc)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-12] Strong ground motion simulation in the Tokyo metropolitan area of the 1923 Kanto earthquake's strong motion generation area

*Fumino Suzuki¹, Kenichi Kato¹, Tetsushi Watanabe¹, Yusuke Tomozawa¹ (1. KOBORI RESEARCH COMPLEX)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-13] Examination about setting of outer and inner fault parameters for near-fault records simulation at the 2016 Kumamoto earthquake main shock

*Toshimichi Kido¹, Masayuki Nagano² (1. Tokyo University of Science Graduate School, 2. Tokyo University of Science)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-14] Friction law for shallower region than the seismogenic layer: Application to characteristic source model

*Yuko Kase¹, Kiyoshi Irie², Kazuo Dan², Haruhiko Torita² (1. GSJ, AIST, 2. ORI)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-15] Implementation of a forward scattering model in the Numerical Shake Prediction scheme: a case of 2016 Kumamoto earthquake

*Masashi Ogiso¹ (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-16] Seismic isolation system for furniture

*Tesshin Noma¹, Syuntaro Hayashi¹, Ken'ichi Arai¹ (1. Sakae Higashi High School)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S15P-17] Characteristics of strong ground motion records in the Kochi area

*Nobuyuki Yamada¹, Makoto Okubo¹ (1. Kochi University, Faculty of Science and Technology)

Two-sensor microtremor SPAC method: potential utility of imaginary spectrum components

*Ikuro Cho¹

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

微動アレイ探査でSPAC法が適用される場合、円周上に3台の地震計を配置したアレイが用いられることが多い。しかし、もしも微動の波動場が等方場であれば地震計2台で構成される2点アレイを利用できるので、観測労力を大幅に削減できる。これに関連して、記録を長時間とることで等方場の仮定が満たされやすくなる可能性が指摘されている。しかし、必要な観測時間は微動が生成される環境に依存するので、一般的な基準を作るのは難しい。

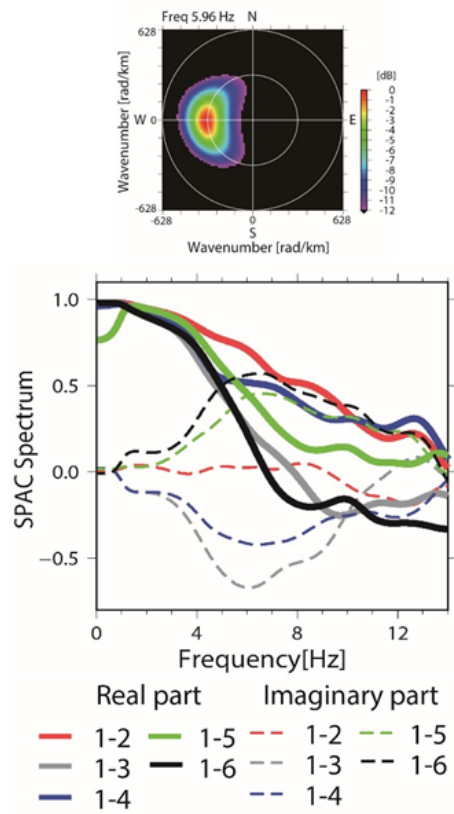
つまり、2点アレイの簡便さを活かすには非実用的な長時間観測による等方場の担保から逃れる必要がある。この目標のために利用可能性を確認しておきたい要素の1つとして「SPACスペクトル（コヒーレンシー関数の方位平均）の虚部」がある。SPACスペクトルの虚部は微動の波動場の方位特性やノイズに関する情報を含むように見えるとの報告がある。しかし、期待される結果が得られないとの報告もある。このような曖昧な状態は、理論モデルがないために、定量的な評価がなされていないことが大きな問題と考えられる。

そこで本研究では微動の波動場として、振動源が遠方にある場合の定常場—すなわち円周上に3台の地震計を配置した通常のアレイならば問題なく解析できるような一般的な波動場—を想定し、そのような波動場に対する2点アレイの適用性を、SPACスペクトルの虚部を用いて検討するための理論モデルを提示した。このモデルは、観測データを用いて検証された（添付図）。同図は、観測データから得られる2点アレイのSPAC係数と虚部の関係が本研究の理論モデルにより良く再現されることを示している。

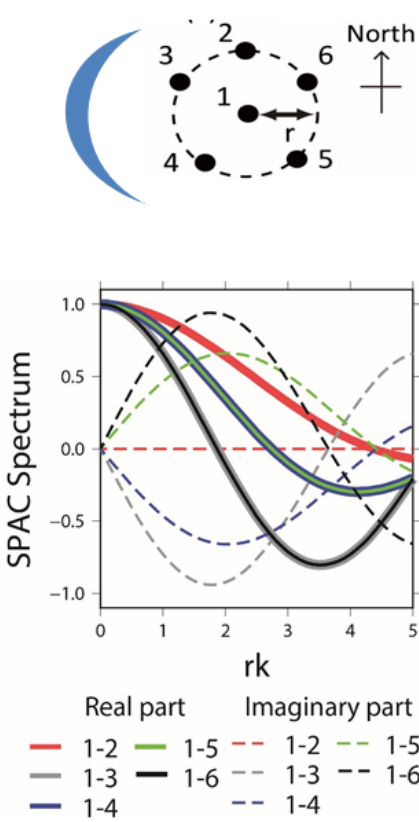
本研究の理論モデルを基礎とすると、虚部の絶対値がごく大きい場合（閾値は半径と波数の積 rk に依存する）、微動の波動場は単一方向から到来する波が卓越すること、そしてSPAC係数は一般に過小評価されると考えられる。一方、虚部の絶対値がごく小さい場合、(i)単一方向から到来する波が卓越してSPAC係数がかなり過大評価されているケースと(ii)等方場に近いたためSPAC係数はバイアスされていないケースの2通りがあると考えられる。この場合、虚部の情報だけからSPAC係数の推定値を補正するのは難しい。この予想の妥当性については、個別のデータを確認するだけでなく、極小サイズ（半径1m）のアレイ400個からなるデータセットを用いた統計的検証も実施した。

観測データによる検証

木場の観測データ処理



理論計算



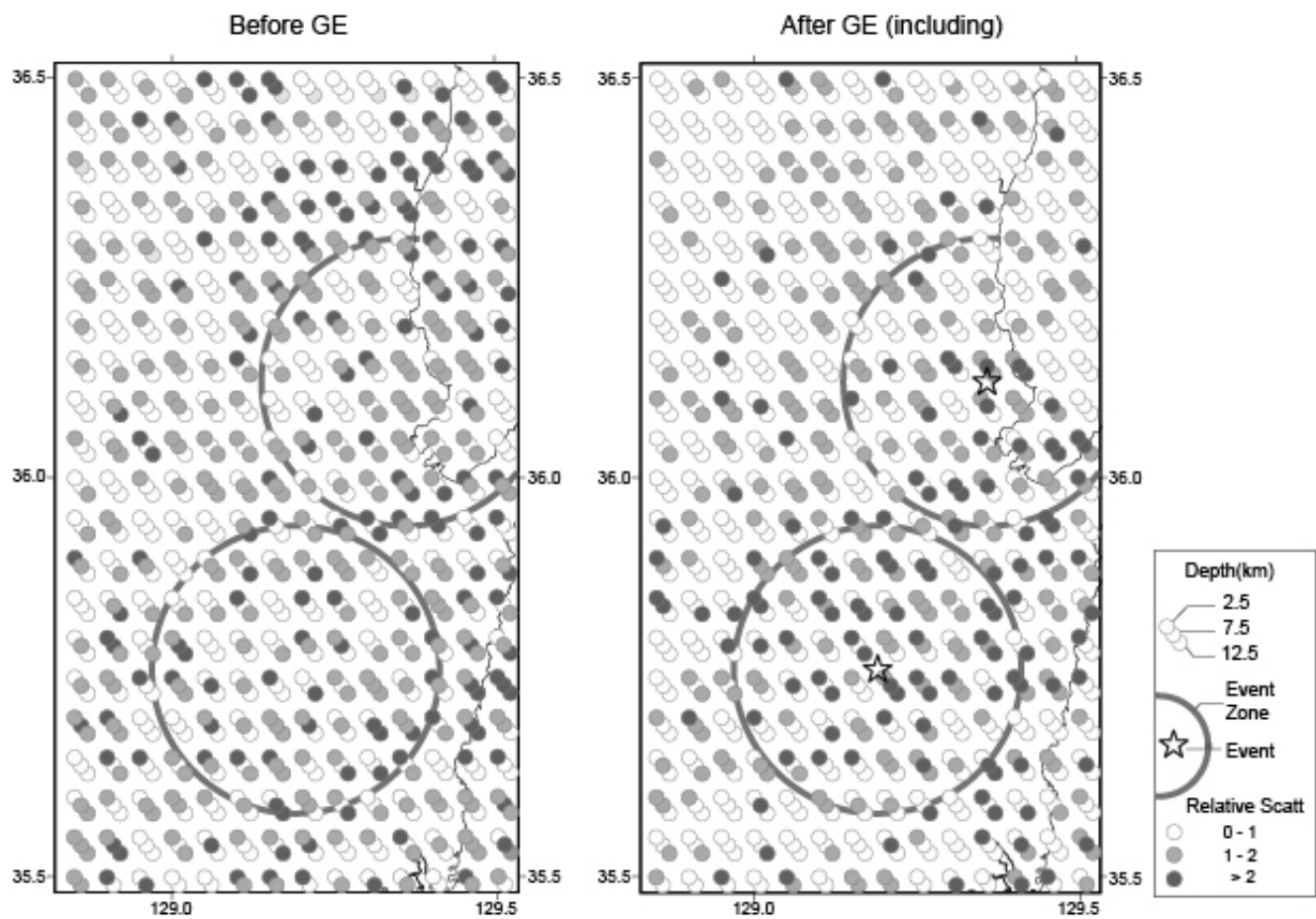
Migration of seismic scatterers before and after the 2016 events in Southeastern Korea

*Muhammad Zafar Iqbal^{1,2}, Tae Woong Chung¹

1. Sejong University, 2. Microseismic Studies Program (MSSP), Islamabad, Pakistan

Crustal heterogeneity related to seismic fault was revealed by spatial scattering difference by coda envelope inversion, developed by Nishigami (1991). This method, however, has not applied to migration of seismic scatterers due to difficulty in detecting the appropriate time of change in tectonically active regions. In 2016, the M_L 5.8 Gyeongju Earthquake (GE) may present temporal variation of southeastern Korea because this region was stable area without M_5 class events over several centuries. After GE, seismicity increased and the M_L 5.4 Pohang earthquake occurred in this region on 2017. For the period of before GE and after GE including origin time, 97 and 110 earthquakes (M_2) provided 590 and 818 coda traces, respectively. These were recorded as vertical component on 196 stations. In S-wave coda observations, numerous seismograms showed large amplitude reverberations caused by reflections at free surface (RFS): 214 and 378 for the period of before GE and after GE including origin time, respectively. Coda time window avoided RFS by shifting starting coda time as 2 times the S-wave traveltimes, which were originally as 1.5 times. The maximum length of window was <40 s as the S-wave traveltimes, which appears to be limit time to reduce the effect of multiple scattering. The residuals were averaged in windows of $\delta t = 0.5$ s. The study region were selected for 35.5 to 36.5°N and 128.5 to 129.5°E with a depth of 50km, and the volume was divided into $20'20'10$ blocks with about 5 km on one side. Heterogeneities of each blocks were obtained not only S-to-S-wave conversion but also reflection at free surface from each source. The ray paths were obtained by ray method for the model with 4 crustal layers with S-wave velocities for 3.29, 3.45, 3.85, and 4.55km/s separated at depths of 5.1, 16.7 and 31.9 km. The observations were solved using the simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT). SIRT with iterations of 2389 showed the remarkable difference between before GE and after GE including origin time (Figure). Relatively high scattered area correlated with topography for before GE, regardless of Gyeongju and Pohang earthquake zones which are land areas within a radius of 20 km centered on two events, respectively. This correlation became weak for after GE including origin time, and the higher values were observed for the earthquake zones. This variation may reflect the effect of two moderate earthquakes.

This study was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSSIT) (No. 2018R1A2A3074595).



Seismic response change of a sand soil after strong motion, revealed by a laboratory transmission experiment

*Tsurugi Kakutani¹, Hironori Kawakata¹, Shiro Hirano¹

1. Ritsumeikan University

§はじめに

強震動によって浅部地盤の地震波速度や増幅係数のピーク周波数が低下するなどの地盤特性の変化が見られる時がある。その変化についてSawazaki et al. (2009) は、2000年鳥取県西部地震の余震記録を用い、そのコーダスペクトル比から本震直後に浅部地盤の増幅係数のピーク周波数が低下したことを検出した。又、数日から数年をかけてピーク周波数が回復することも検出し、岩石試験から提案されているスローダイナミクスとの類似点を指摘している。

スローダイナミクスの様なサイトの地盤特性の変化を理解することは、地震動の予測に重要となる。しかし、実地震においては余震記録を用いるため、余震発生数に依存して時間分解能が落ちてしまう。これについては、弾性波モニタリングできる室内実験が有効だと考える。更に、室内実験では振動の強さや周波数などがコントロール可能である。

室内実験について、TenCate et al. (2000) は、直径50 mm、長さ300 mmの細長い円筒形岩石試料に一定時間の弾性波を加えた後に、一次元棒と見立てた時の試料の基本共振周波数（約3900 Hz）の前後100 Hz幅のスイープ信号を加えモニタリングすることで、試料の共振周波数の低下を観測した。その後、時間をかけて最終的に共振周波数は元に戻ったと報告している。しかし、モニタリング波が狭帯域で基本共振周波数以外の周波数帯については述べられておらず、より広帯域で観測する必要がある。なお、先行研究によればスローダイナミクスの詳細は不明なままでモデルがないので数値シミュレーションを行うことが難しい。

以上のことから本研究では、模型砂層地盤に強震動を与える実験を実施し、地盤の変化、回復のモニタリングを行った。モニタリングに用いるSweep信号を繰り返し与えることで時間分解を上げ、Sweep信号の帯域を広くとった。

§実験方法

アルミ板(40×40×20 mm)を底に取り付けた容器（150×280×165 mm）に厚さ30 mmのモルタルを流し込み固めた。これは工学的基盤を模したものであると同時に、容器の底に直接取り付ける震動源（シェーカー）の変位そのものが砂層地盤に局所的で不可逆的な変形を生じさせることを避けるためである。その後、モルタルの上に厚さ75 mmのシリコンを含んだ砂を敷きつめ、浅部地盤を模した砂層を作成し、加速度センサーを砂層内部に鉛直に、モルタル基盤との境界から高さ10 mm、40 mm、70 mmの箇所にA1, A2, A3の順に設置した（図1）。

容器の底からシェイカーでモニタリング波としてのSweep信号（0~20 kHz、100 mVpp）と強震としてのsine波(0.1 kHz、1700 mVpp)を繰り返し（Sweep 8分→sine2分→Sweep60分→sine2分→Sweep60分→sine2分→Sweep60分）砂層に入力した。

§結果

実験結果により得られた弾性波速度からSweep信号の波長は砂の直径よりも1桁以上大きく、砂層サイズに対しては最少で波数が3であることを確認した。鉛直に設置した加速度センサーA1, 2, 3で振幅スペクトル比、速度比を表すと各々図2、3のようになった。図2より、砂層の共振周波数が強震後に約12.5 kHzから約12 kHzに低下した。その後、20分程かけて、12.5 kHz付近まで回復していく過程を確認することができた。図3より、強震により砂層の共振周波数が低下するのに伴い、12 kHz付近の弾性波速度が0.5%程低下し、回復していく過程を確認することができた。今回の実験では強震、モニタリングともに弾性波としてP波的な振動を用いているが、コーダ波を用いたSawazaki et al.(2009)とよく似た地盤の増幅係数のピーク周波数の低下、回復を確認することができた。

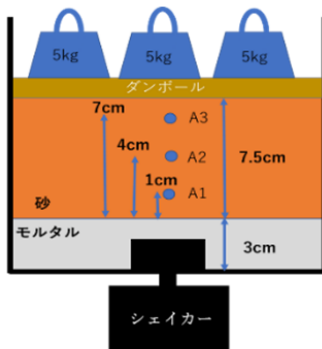


図1. 実験装置の概念図。

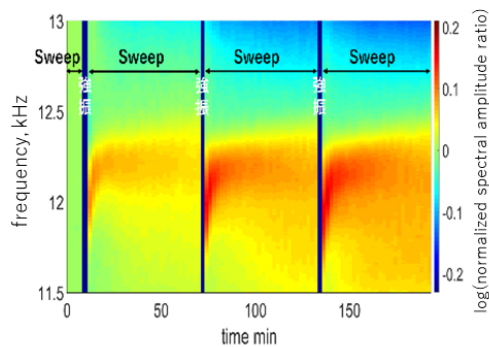


図2. 加速度センサーA1に対するA2の振幅増加率。青い帯で与えた3つの時間帯に強震動を与えた。

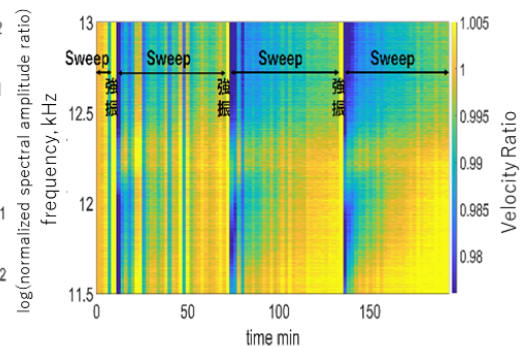


図3. 加速度センサーA1に対するA2の位相速度変化率。黄色の帯で与えた3つの時間帯に強震動を与えた。

Identification of Nonlinear Site Responses of Vertical Motions Using Strong Motion Records Observed at the Ground Surface

*Toshimi Satoh¹

1. Institute of Technology, Shimizu Corporation

強震時には地盤が非線形化し、強震記録の水平動にはその影響がみられることは多数報告されている。上下動については、強震記録からその影響が顕著にみられることを示した研究は少ない。本研究では、以下のよう
に、KiK-net強震記録に基づき、上下動の地盤増幅特性の非線形性の有無が、地表での上下動の観測加速度波形
を積分した速度波形の形状で識別できることを示している。

1997～2018年のKiK-net強震記録から、地表での3成分合成の最大加速度が 300cm/s^2 以上のデータを強震動
として選択した。加速度波形をプリアイベントメモリの平均値で零線補正後、時間領域で積分して速度波形を算
出した。その結果、振幅が大きい場合には直線状のトレンドが生じる場合が多かったが、一部の上下動の速度
波形には、図1に示すように負の方向にステップ状に一定になる、あるいは、負の方向に直線状のトレンドが
生じた後ほぼ一定となるデータが存在していた。ほぼ一定となる速度の絶対値を V_{non} と呼ぶ。図1の8ケタの
数字は地震の発生年であり、TTRH02(日野)のように V_{non} が生じた後にやや負方向に緩やか勾配もつ場合
や、正方向に緩やか勾配もつ場合もあったが、多くは一定となっている。図1は、地殻内地震で $V_{\text{non}} \geq$
 2.5cm/s となった6つの上下動の速度波形とモデルを、下から V_{non} の大きな順に示したものである。302個の
強震動のうち、 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった上下動は35個であった。 V_{non} が最大のデータは2011年東北地方太平
洋沖地震のTCGH16(芳賀)、2番目は図1に示した2018年北海道胆振東部地震のIBUH01(追分)、3番目は図1に
示した2000年鳥取県西部地震のTTRH02であった。いずれも、震度7相当である。図1の2016年熊本地震本震
と前震のKMMH16(益城)は、最大速度が大きいため、この図のみからは V_{non} が明瞭にはみえないが、地殻内
地震の中では V_{non} が5番目、6番目に大きかった。

$V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった強震動の地中に対する地表のスペクトル比と、弱震動のスペクトル比の平均値と平均
±標準偏差の比較を行った。図2には、例として2018年北海道胆振東部地震のIBUH01と2016年熊本地震本震
のKMMH16を示す。強震動の水平動のスペクトル比 H/H_g のみならず、上下動のスペクトル比 V/V_g も弱震動と
は異なっており、上下動の地盤増幅特性にも非線形性があることがわかる。 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった強震動に
は、同様の特徴がみられた。したがって、地表の上下動の速度波形の形状から、上下動の地盤増幅特性の非線
形性の有無を識別できると考えられる。

図2の、上下動のピーク周波数の1/2の周波数付近に水平動のピーク周波数がある。また、 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ と
なった強震動には、水平動と上下動の加速度波形の粒子軌跡が、上に凸となる特徴がみられた。さら
に、 V_{non} が大きい上下動の速度波形には、正方向に鋭く振幅の大きなピークを、負方向にやや幅の広いピーク
をもつ特徴がみられた。これらの特徴は、既往の研究(森尾・他, 2017)の解析に基づく、負のダイレイタン
シー(体積収縮)の特徴である。また、不飽和地盤では、繰返し载荷により体積収縮が発生し、水平加振で水平
動の2倍の周波数で上下動が発生することが実験でも指摘されており(例えば、大嶋・渡辺, 1994)、この弾塑
性現象が大振幅時に発生した可能性がある。ただし、 V_{non} が生じる速度波形の形状に関する物理的・力学的な
証明は今後の課題である。 $V_{\text{non}} \geq 1.0\text{cm/s}$ となった強震動の V/V_g は、極軟弱層がある場合を除き、10Hz程度
以下では弱震動より大きい場合が多く、非線形化することで上下動が増幅することがわかった。 V/V_g の1番目
のピークでの弱震動に対する強震動の比は、平均3.7倍であった。また、図2に示したように、上下動の V/V_g
のピーク周波数の1/2の周波数付近に存在する水平動のピークレベルも、弱震動より大きい場合が多かった。こ
のように、ダイレイタンシーが生ずる場合には、水平動も周波数帯域によっては、弱震動より地盤増幅が大き
くなる場合があった。

佐藤(2015)では、2011年東北地方太平洋沖地震のTCGH16の地盤増幅特性を弱震動のものに置き換えた場合、震度は7相当にはならないことを指摘している。森尾・他(2017)ではTCGH16の粒子軌跡から、ダイレイタンスの影響の可能性を指摘している。本研究の結果からも、TCGH16の震度7相当にはダイレイタンスによる非線形地盤増幅が寄与したと考えられる。図2のKMMH16では、 V/V_B のピーク周波数の1/2の周波数である0.8HzにEW成分のピークがあり、この周波数は $V_{non} \geq 1.0 \text{ cm/s}$ となったデータのうちで最も低周波であり、建物被害に寄与した可能性がある。中澤・他(2018)は、益城町での被害が大きかった領域は地下水位が浅く、KMMH16周辺は地下水位が深いことを示している。被害の大きかった地域では、地下水位の違いの影響を受けた浅部の黒ボク(火山灰質粘性土)のダイレイタンスによる非線形地盤増幅が大きな地震動に寄与した可能性がある。

謝辞：本研究ではKiK-net強震記録とその地盤構造、気象庁の一元化震源情報を用いました。記して感謝致します。

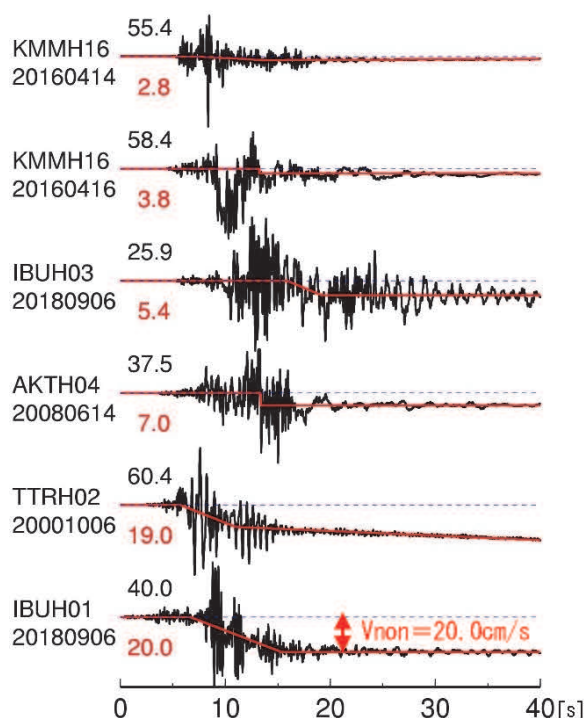


図1 地殻内地震で $V_{non} \geq 2.5 \text{ cm/s}$ の地表での上下動の速度波形(黒)とモデル(赤). 赤の数字が V_{non} [cm/s], 黒の数字が最大速度 [cm/s].

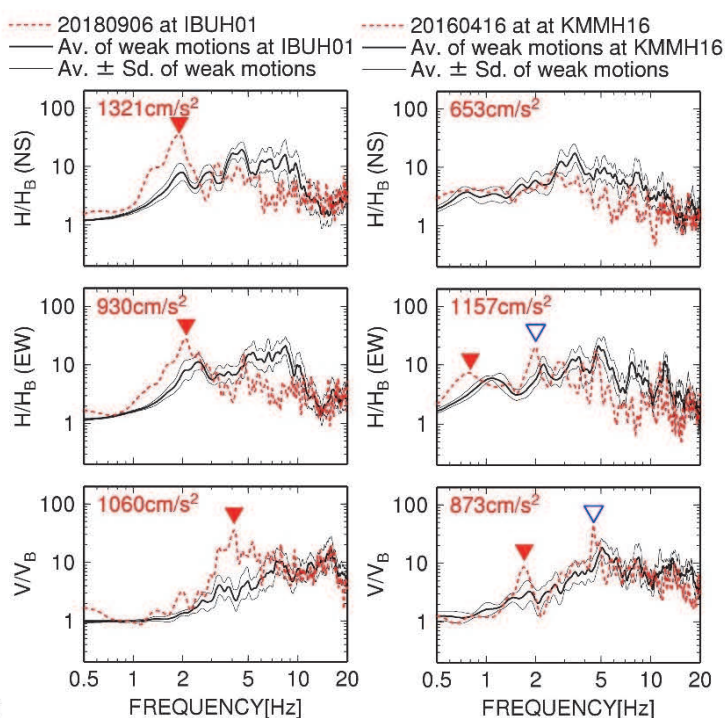


図2 強震動と弱震動の地中に対する地表のスペクトル比の比較 (▼, ▼は、上下動のピークとその周波数の1/2の周波数の水平動の1番目, 2番目のピーク)

On the liquefaction site distribution of The 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and the examination of damage rate by recent earthquakes

*Shigeki Senna¹, Shigeki Senna¹

1. NIED

平成30年北海道胆振東部地震では、最大震度7を観測した厚真町を中心に、太平洋側の苫小牧市や日高町から日本海側の石狩市にかけた広い範囲で震度5弱以上の強い揺れを観測しその多くの地域で液状化が発生した。昨年に本地震による液状化地点の発表は行っているが、データ収集中の暫定的なものであった。本研究では、液状化地点の情報をさらに収集し、本地震による液状化地点を確定させた。また、その液状化地点に基づき、建物被害等の収集した情報から、近年の液状化が発生した地震から求められた液状化発生率との比較・検討を行った。

液状化地点は地震発生後に撮影された国土地理院や株式会社パスコの高解像度航空画像、および、GoogleEarthから公開されている衛星画像から読み取りを行った。噴砂地点を液状化地点としている。また、現地調査等からも液状化地点の情報を収集した。これらのデータに基づき、過去の地震と同様に約250m、約50m、約25mメッシュ単位のデータを作成した。液状化地点数は5301点であり、メッシュ数は順に1102, 2982, 4915メッシュになる。

液状化は、震源地付近の震度6弱以上の強い揺れがあった厚真町・安平町・むかわ町・苫小牧市等で発生しており、山間部の川沿いにも発生している。また、震源地から離れているが、震度5弱や5強の揺れに見舞われた地域でも発生しており、太平洋側では震源から約70kmの白老町の海岸付近や、日本海側では震源から約80km離れた石狩川河口付近でも液状化が見られた。札幌市も震源からは約50km以上離れているが、液状化被害報道の中心となった清田区里塚だけではなく、ほかの地区でも液状化が起こり建物に被害が発生している。微地形区分別にみると、火山山麓地・ローム台地・谷底低地・後背湿地で数が多く発生していた。火山山麓地での液状化は、ほとんどが札幌市清田区付近である。

液状化発生率に関しては、過去に2011年東北地方太平洋沖地震と2016年熊本地震の液状化のデータより液状化発生率計算式（フラジリティー）を作成している。その結果を今回の平成30年北海道胆振東部地震の液状化発生率と比較すると、特定の微地形でデータ数が少ないことから、ばらつきが大きくなっている個所もあるが、ほぼ調和的な結果となった。今後は建物被害分布データとの比較・検討を進める予定である。またフラジリティーのさらなる高精度化を目指し水域(河川等)との関係の調査を進めている。

本研究では、平成30年北海道胆振東部地震の液状化地点分布を分析し、過去に検討した液状化発生率計算式（フラジリティー）との比較等を行い、結果の妥当性を検討する予定である。

<謝辞>

解析の一部に関しては、株式会社構造計画研究所の橋本光史氏、神奈川大学の落合務氏にご協力いただいた。建物被害の情報については、札幌市等各自治体より提供いただいた。関係各位に謝意を表します。

<参考文献>

- ・先名重樹・小澤京子・杉本純也・山田和樹、近年の液状化被害を踏まえた液状化発生率の検討、日本地震学会秋季大会、2018.10
- ・先名重樹・小澤京子、平成30年北海道胆振東部地震の液状化地点分布とその特徴、日本地震学会秋季大

会, 2018.10

・先名重樹・小澤京子, 近年の液状化被害を踏まえた液状化被害率の検討, JpGU2019, 2019.6

Consideration of seismotectonic province map by multivariate analysis for sophistication of probabilistic seismic hazard analysis

*Kozo Onishi¹, Takashi Kumamoto¹, Kyoko Mori²

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

日本では1995年の兵庫県南部地震(M_{JMA} 7.3)の発生をきっかけに地震調査研究推進本部(以後、「地震本部」という。)が設置され、地震の被害の軽減のために、地震の調査や研究の推進およびその成果の普及が行われている(例えば、地震本部, 2018)。この中で、地震発生前には発生源である活断層が地表に現れておらず、位置や規模の特定が困難な「予め震源を特定しにくい地震」は、事前に個別の発生場所、地震規模、発生確率を特定することが困難なため、地震群としての特徴を統計的なモデルで取り扱うことで評価されている。このとき、観測データから地震群を抽出するにあたっては、地震地体構造に基づき、地震活動の特徴が類似すると考えられる領域に区分したモデルの設定、もしくは、矩形あるいは円形の一定面積の領域を対象範囲に敷き詰めるモデルの設定が必要となる。これらのモデルに対し、区分内の地震活動について、

Gutenberg-Richter (G-R) の関係から想定される発生頻度と区分内で発生し得る最大規模地震の設定から地震ハザードが評価される。従って、前者の評価手法については、地震地体構造をどのように区分するかが地震ハザード上では重要な課題となる。地震本部の地震動予測地図における内陸地殻内地震の予め震源を特定しにくい地震の評価では、垣見ほか(2003)の地震地体構造区分を基にした領域区分に加えて、ある区分内で観測地震数がG-Rの関係を議論するのに十分ではないという不確実性を考慮するために、従来よりも大きな領域区分も追加で採用されている(地震本部, 2014)。一方、こうした地震地体構造区分については、領域の境界上に位置する活断層の設定を含めた境界の設定に恣意性が残ることに加え、境界付近で地震活動が著しく異なるモデル化がなされる可能性がある。一方、領域区分せずに地震活動をモデル化するsmoothed seismicityの考え方(例えば、Frankel, 1996: 地震本部, 2014)でも、想定する地震の最大規模は、地震地体構造区分の設定に依拠している。従って、いずれにせよ地震地体構造が適切に評価されている必要があり、領域設定の信頼性向上を図るために、定量的なデータと統計的な手法の導入が地震ハザード評価の高度化に資すると考えた。

こうした地震地体構造の領域設定に定量的なデータと統計的な手法の導入した研究として、塚田ほか(2010)やKumamoto et al. (2016)による定量的な地震地体構造区分が挙げられる。これらの議論では、重力異常データ、地震発生層データ、活断層からのモーメント放出量データ、地震活動からのモーメント放出量データの4つのパラメータを用いた主成分分析を行った。次いで、主成分の得点について、国土地理院の2次メッシュを基にした分布図を作成するとともに、得られた各主成分に対して地震活動との関連を検討した。具体的には、地体区分を定量的に行うために、この主成分得点から群平均法を用いたクラスター分析を行い、各メッシュを数種類のクラスターに分類し、その分布図から新しい地震地体構造区分を議論した。Kumamoto et al. (2016)の地震地体構造区分では、西南日本において、例えば垣見ほか(2003)で特定断層とされた中央構造線断層帯を、構造区の境界としてではなく、中央構造線断層帯に代表される1つの地震地体構造区としている。これは、遠田(2013)による中央構造断層帯沿いで広域的な歪み開放を効率的に行って周辺に小規模な断層が少ないとする考え方と整合的であり、Kumamoto et al. (2016)による定量的な区分手法が定性的な概念をうまく表現できる可能性を示唆している。ただし、これらの議論で用いられたパラメータは、事象の大きさを表す指標のみであったことから、方向性を有するような構造を区分に反映できていなかった。例えば、GNSS観測データによる山陰歪み集中帯(Nishimura and Takada, 2017など)は領域区分に考慮されておらず、プレートテクトニクスの枠組みの中で地震に関連した諸現象の地域性に関する走向や方向性に関する議論は十分ではなかった。

そこで、本研究では、内陸地殻内地震の予め震源を特定しにくい地震の地震ハザード評価の高度化を目的として、従来の重力異常データ、地震発生層データ、活断層からのモーメント放出量データ、地震活動からのモーメント放出量データに、震源分布、断層、地殻変動といった走向や方向性を有するパラメータを加えたデータについて統計的な処理を行って、新たな地震地体構造の区分を試みた。本研究によるデータおよび手法

を用いることで、区分の境界を特定の活断層が担うこと、同一区分内における地震活動の密度差が生じることや山陰歪み集中帯のような連続する構造の区分等について改良が可能であり、領域設定の信頼性向上に資する見込みが得られた。

A preliminary waveform tomography for the Tohoku-Oki area of the Japan Trench, Japan, based on a land-ocean unified 3D structure model

*Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

1. Department of Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3. Earthquake and Tsunami Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

沈み込み帯の地震からの**地震波波形**を計算することは、強震動の研究や予測においても、また破壊過程や地震の震源分布・発震機構解等を研究するうえでも重要な分野となる。しかし沈み込み帯は海底地形のような不規則形状を持つ層境界面と、地震波速度が遅い海水層や堆積物層などの不規則厚さの多数の層から構成される**強い3次元不均質性**を持っている。この不均質性により伝播経路が歪められるなど、**地震波には大きな影響**がある（例えば Wiens *JGR* 1989; Okamoto *EPS* 2002）。そして、この影響を考慮しない場合には破壊過程解析結果に誤差が発生する可能性がある（Okamoto *EPS* 2009）。不均質性の影響により震源の深さや発震機構解にも系統的な誤差が発生する現象も指摘されている（Takemura et al. *EPS* 2016）。

そこで我々は、計算波形が観測波形をどの周期帯まで再現できるかという**地震波再現性**の問題に取り組んできた。東北沖の地震に関する我々の解析（Okamoto et al. *EPS* 2018）では、陸上観測点で得られた表面波を主体とする全波形については周期10秒程度以上、P波初動部分に限定した波形では周期4秒程度以上では再現性が良好であり、推定される震源位置も構造モデルと整合的であった。しかし最適震源パラメータを用いても**短周期のS波部分については再現性が低下すること**も見えてきた。これはS波速度構造モデルの精度が充分ではないことを示唆する。S波速度構造は剛性率と直接関係するため、その知見に限界があれば破壊現象や地震発生場を考察する上で困難をもたらす可能性がある。

そこで本研究では、東北沖地域での周期数秒程度までの波形再現性を向上させることを目的として、波形トモグラフィーによって構造モデルを改良することを試みる。本研究ではK-NET、KiK-netの強震動波形データとF-netの広帯域波形データを利用する。本研究は以下のようなステージからなる。[1] 陸海統合3次元構造モデル：本研究では、地形モデル（岸本 *GSJ Open-file Report* 2000）、J-SHIS深部地盤データV2（藤原・他 *NIED Technical Note* 2009）、全国一次モデル地下構造モデル（暫定版）（地震調査研究推進本部 2012; Koketsu et al. *Proc. WCEE* 2008, 2012）を利用して、これまで我々が用いてきた構造モデルをアップデートした。[2] 波形計算：我々が開発したHOT-FDM（Nakamura et al. *BSSA* 2009）を用いて陸海統合3次元構造モデルのもとでの地震波波形を生成する。[3] FAMT解析：我々が提案した First-motion Augmented Moment Tensor 解析（Okamoto et al. *EPS* 2017, 2018）によって初期モデルのもとでの地震パラメータを決定する。この手法は震源パラメータの波形インバージョンにおいて、通常利用される**長周期の全波形**（表面波まで含む）に加えて、P波初動付近のみから成る**短周期実体波波形を追加**して解析することが特徴である。これにより初動走時や震源時間関数などの情報を短周期実体波波形によって増強することが可能となる。[4] 感度カーネル：構造パラメータを改良するための感度カーネルをアジョイントの方法（Tanimoto *GJI* 1990）によって計算する。本研究では周波数領域のカーネルを用いる。[5] 波形トモグラフィー：周波数領域の波形残差をデータとして、感度カーネルを用いた波形トモグラフィーを実行し、構造モデルの改良を試みる。

本研究では、上述のHOT-FDMのマルチGPU対応版（Okamoto et al. *EPS* 2010; Okamoto et al. *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering* 2013）を利用する。計算には東工大TSUBAME-3.0を利用する。本研究のFDMパラメータは、計算領域605km×422km×104km、格子間隔150m、上限周波数0.39 Hzであり、GPU（Tesla P100）は56基を用いた。本研究ではF-netとKiK-netの計12観測点の3成分を対象にして、上記のパラメータによるHOT-FDM計算を合計36回実施した。計算時間は

TSUBAME-3.0の14ノードを利用して1計算あたり1.5時間、出力波形データサイズは1計算あたり421GBである。発表では、FAMT解析によって東北沖の浅い地震の最適震源パラメータ（モーメントテンソル・震源時間関数・震源位置・発震時）を推定し、その推定結果を用いて計算した感度カーネルの特徴や地震波波形の再現性、および波形トモグラフィーの暫定結果などを議論する。

謝辞 本研究では防災科学技術研究所の波形データ（K-NET, KiK-net, F-net）を利用させていただきました。また岸本氏、防災科学技術研究所、地震調査研究推進本部の地形データと構造モデルを利用させていただきました。本研究には科学研究費補助金（16K05535）を利用させていただきました。記して感謝いたします。

Estimation of strong motion generation area source model during the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake

*Susumu Kurahashi¹, Kojiro Irikura¹

1. Aichi Institute of Technology

1.はじめに

2018年9月6日3時7分、北海道胆振東部地震（Mw6.6）が発生し、最大震度7が北海道厚真町で観測され、震度6強が北海道安平町、北海道むかわ町で観測された。この地震は、震源深さが37kmと非常に深いにもかかわらず非常に大きな揺れが観測されたことは大変興味深い。また、この地域は、日高衝突帯の前縁付近で発生したことが指摘されており、いわゆる日本で発生する内陸地殻内地震とのテクトニクスの違いによる既往のスケールリング則との関係性について議論することは、今後の強震動予測において非常に重要である。本研究では、本地震の強震動の生成メカニズムの解明を目的として、経験的グリーン関数法により強震動生成域（Strong motion generation area: SMGA）の構築を行った。

2. 強震動の特徴

観測された波形の特徴として、震源の南部のHKD126で最大速度158cm/sが観測されており、非常に大きなパルス的な波形が特徴である。また、震源の北部に位置するHKD127（K-NET追分）では、最大加速度1796gal（3成分合成値）を観測しており、また、少なくとも3つの波群が確認できる。

3. 強震動震源モデルの構築

3-1 強震動生成域の破壊開始点の推定

観測記録に見られる3つの波群は、強震動生成域から放出されたものと仮定をして、この3つの波群の再現を再現するモデルとして、経験的グリーン関数法（Irikura, 1986）により3つの強震動生成域モデルを構築する。はじめに、強震動生成域の破壊開始点を推定する。推定方法は、震源を囲むKiK-net地中の4観測点において波群のS波の立ち上がりを読み取り、back-propagationによりその放出する場所を推定した。探索方法はAsano and Iwata(2012)の式を用いた。なおこの式では、理論波形が必要となるが、その波形の計算には全国1時地下構造モデル（Koketsu et al., 2012）を用いた。また、S波の立ち上がりの読み取りには、局所定常ARモデルによる方法（赤池・北川, 1994）を用いた。

断層面は防災科研によるDD法を用いた震源再決定の余震分布（防災科研, 2018）を参考に、3枚の断層面を設定した。その結果、波群1は震源の南部のセグメント、波群2は北部セグメント、波群3は中央セグメントの浅部と推定された。

3-2 経験的グリーン関数法による強震動震源モデルの構築

3-2-1 要素地震の諸元の推定

次に、要素地震の面積と応力降下量を推定する。要素地震は、SMGAが南側と北側に存在することからそれぞれ一つずつの余震を選択した。要素地震の選定には、①SMGAと要素地震の震源が近い、②要素地震のメカニズムが本震のメカニズムと近似していることを条件とした。本震のメカニズム解は、八木（2018）による断層面上におけるメカニズム解の結果を利用した。

面積と応力降下量は、震源スペクトル比法（三宅他, 1999）により要素地震のコーナー周波数を抽出し、円形クラックモデルから算出した。結果的に、北部の要素地震（Mw4.0、震源深さ34.3km）と南部の要素地震（Mw3.7、震源深さ41.4km）において、面積と応力降下量は、1.69km²、0.4MPa、1.21km²、5.0MPaとなった。

3-2-2 SMGAの面積と応力降下量の推定

最後に経験的グリーン関数法によりSMGAを構築した。

SMGAのパラメータは、足し合わせ数、SMGA内の破壊開始点の位置、破壊伝播速度、要素地震のライズタイム、応力パラメータとして、観測波形と合成波形の残差が最小となるモデルを求めた。評価関数は、三宅他（1999）を参考に、KiK-net地中の記録については加速度エンベロープと変位波形とした。ただし、非線形の影響がある可能性のある地表記録（K-NET観測点の記録）については、非線形の影響が出にくい速度波形と変位波形の残差とした。解析対象とした観測点数は12観測点、解析対象周波数は0.5-10Hzとした。

解析の結果、推定された3つのSMGAは震源の南側、北側、浅部に位置している。それぞれの応力パラメータは20~25MPa、SMGA面積は136km²であった。地震モーメントとSMGAの面積のスケーリングは、既往のスケーリング則よりも若干過小評価であった。これは、応力パラメータが既往の地震よりも高いことと整合している。なお、応力パラメータがばらついていることについては、現在分析を進めているところである。震源の南部のHKD126にみられる特徴的なパルスは、SMGAの破壊の進行方向にあり、いわゆるディレクティブティの影響と考えられる。詳細な震源モデルについては、引き続き解析を進める。

Characterized source model for evaluating long-period (more than 2s-) ground motions during the 2014 Northern Nagano earthquake (Mj6.7)

*Yasuhiro Matsumoto¹, Ken Miyakoshi², Kojiro Irikura³

1. KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc., 2. Geo-Research Institute, 3. Aichi Institute of Technology

1.はじめに

2014年11月22日に発生した長野県北部の地震（M_j6.7）では、地表地震断層が神城断層に沿って約9 kmの区間で確認された（例えば、石村・他, 2015, 勝部・他, 2017）。この地震の震源断層は北北東－南南西の走向をもつ東傾斜の逆断層であったと推定されている（地震本部, 2014）。中村・他 (2015)は地表地震断層より西側に1～2 km程度離れた下盤側の強震観測点（NGN005とNGNH36地表）で得られた観測加速度波形から変位波形を評価した。永久変位の向きは両地点ともに南東方向で沈降を示し、近隣のGNSS白馬観測点と同様の傾向であった。これらの強震観測点の変位量は地表地震断層に近いNGN005の方が大きく、このような変位は断層運動に伴って生じたと予想される。

一方、2016年熊本地震本震（M_j7.3）においても地表地震断層が現れ、その極近傍で観測された加速度波形から評価した変位波形には永久変位が確認できる（岩田, 2016）。このような永久変位は断層浅部にLMGAを設定することで評価可能とされ（Irikura and Kurahashi, 2017）、同様の検討がこれまでに多くなされている（例えば、入倉・倉橋, 2017, 田中・他, 2017, 納所・他, 2017, 松元・他, 2017, 岩城・他, 2018, 倉橋・入倉, 2018, 小穴・他, 2018, 貴堂・他, 2018）。

地表地震断層が現れた地震について、その近傍の永久変位を含む長周期地震動を評価できる震源モデルを検討し、その知見を蓄積していくことは、将来の地震による強震動予測を考える上で重要であると考えられる。そこで、本検討では2014年長野県北部の地震を対象に、永久変位を含む長周期（2秒以上）地震動評価のための特性化震源モデルの構築を試みる。地震動評価手法は波数積分法（Hisada and Bielak, 2003）を用いる。

2.特性化震源モデル

断層面の幾何形状はKobayashi *et al.* (2018)を参考に、深さ1 kmを境に異なる傾斜角を設定した（図1）。設定した傾斜角は深さ1 km以浅は30°、それ以深は50°である。本検討の特性化震源モデルはSMGAと断層浅部のLMGAからなるものとし、SMGAとLMGAの位置やパラメータは倉橋・他 (2016)を参考に、SMGAの上端はLMGAの下端と一部で接続し、その深さは3kmとした。LMGAの上端位置は地表踏査に基づく地表断層位置と概ね整合している。大きさはSMGAが8 km × 6 km, LMGAが4 km × 4.6 km, すべり量はSMGA, LMGAともに1 mとした。ライズタイムはSMGAが1.2秒, LMGAは3秒で、LMGAの方が長い。このような傾向は引間・他 (2018)のインバージョン結果とも調和的である。破壊開始点はPanayotopoulos *et al.* (2016)による震源位置とし、破壊伝播速度は倉橋・他 (2016)の2.3 km/sを設定した。

図2にNGN005とNGNH36地表の周期2秒以上の観測波形と合成波形の比較を示す。両地点とも、速度波形の再現性は良好であり、変位波形についても永久変位や立ち上がり部分は概ね再現できている。

3. まとめと課題

地表地震断層近傍の観測点の永久変位を含む長周期（2秒以上）地震動は、断層浅部にLMGAを設定した特性化震源モデルで評価可能であることを示した。今後、LMGAを含む特性化震源モデルの精度向上のためには、空間的な変位分布との比較が必要と考えられる。その方法として、例えば、背景領域も追加設定した特性化震源モデルを用いて評価した空間的な変位分布と、InSARで観測された地殻変動の比較が挙げられる。

謝辞

本研究は原子力規制庁の平成30年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震による地震動の評価手法の検討）事業による成果の一部である。地震動データは防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET, KiK-net）の強震データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

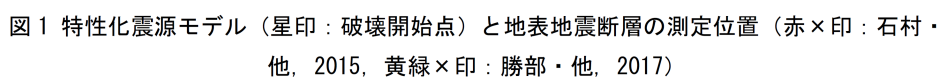


図2 波形の比較（2秒以上）（黒：観測，赤：合成）

Source and strong-motion characteristics of the 2017 Puebla, Mexico, intraslab earthquake (M_w 7.2) based on a waveform inversion

*Yujia Guo¹, Ken Miyakoshi¹, Masato Tsurugi¹

1. Geo-Research Institute

近年、2001年芸予地震 (M_w 6.8)、2003年宮城県沖の地震 (M_w 7.0)、2008年岩手県沿岸北部地震 (M_w 6.8) など、陸域直下でM7程度のスラブ内地震が度々発生している。これらの地震は同規模のプレート境界地震に比べて、しばしば強い地震動や被害をもたらしてきた。そのようなスラブ内地震の強震動予測のための特性化震源モデルの高度化において、国内外を問わず既往地震の観測記録を解析し、そこから得られる震源に関する知見を一つでも多く蓄積し、それを基にモデルの検証を積み重ねることが重要である。本研究は、2017年9月19日にメキシコ中部のPuebla州直下の深さ約50 kmを震源として発生した地震 (M_w 7.2; 以降「Puebla地震」と呼ぶ) を対象に、強震波形記録を用いた震源インバージョンにより断層破壊の時空間的すべりを推定し、震源特性について検討した。

Puebla地震は、北米プレートに沈み込むココスプレートの内部のフラットスラブの先端において、曲げ応力 (Melgar *et al.*, 2018) によって発生した正断層型のスラブ内地震である。震源から90 kmほど離れたPuebla市および120 kmほど離れた首都メキシコシティでは、200–300 Galの最大加速度、20–30 Kineの最大速度を持つ地震動が観測され、全壊建物約50棟、犠牲者約370名の被害が出た。観測された最大加速度の値は、この地域のスラブ内地震に対して提案された距離減衰式 (Garcia *et al.*, 2005) から予測される値とおおむね対応しているが、日本の距離減衰式 (司・翠川, 1999) に比べると小さい。また、最大速度の値は特にメキシコシティなどでGarcia *et al.* (2005) の予測値よりも大きい。

本研究の震源インバージョンは、余震分布の広がり、スラブの厚さ (Hayes *et al.*, 2018) を考慮し、長さ60 km・幅36 kmの北東傾斜の震源断層面を仮定し、マルチタイムウィンドウ・線形波形インバージョン法 (Hartzell and Heaton, 1983) により行った。メキシコ国立自治大学 (UNAM) より入手した13観測点の三成分加速度波形を速度波形に積分し、0.05–0.4 Hz (周期2.5–20秒) のバンドパスフィルターを施したものをデータとして使用した。グリーン関数は一次元水平成層構造を仮定し、マントル・地殻はSpica *et al.* (2016) のモデルを、地震基盤以浅の堆積層はEstrella and Gonzalez (2003) のモデルを使用し、離散化波数法 (Bouchon, 1981) と反射・透過係数行列法 (Kennett and Kerry, 1979) で計算した。

震源インバージョンの結果、解放された地震モーメントは 6.9×10^{19} Nm (M_w 7.2) と推定され、この値はGCMT解 (Ekstrom *et al.*, 2012) の 6.5×10^{19} Nm (M_w 7.1) と同程度であった。今後、本研究によって得られた各震源パラメータについて、過去に起きた地震の断層モデルに基づいて提案された震源スケーリング則と比較して議論し、メキシコシティなどで大きな最大速度が観測された原因についても検討する予定である。

謝辞：UNAM (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>) の波形記録を使用した。本研究は、原子力規制庁の委託業務「令和元年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震による地震動の評価手法の検討）事業」による成果の一部である。

Estimation of strong motion generation area of the 1985 Michoacan, Mexico, earthquake

*Hiroaki Kobayashi¹, Kentaro Motoki¹, Kenichi Kato¹, Tetsumi Watanabe², Naoya Ishikawa², Yoshiho Kawai²

1. Kobori Research Complex Inc., 2. Chubu Electric Power Co., Inc

1985年9月19日に発生したメキシコ地震(M_w 8.0, GCMT)は、プレート境界地震であるが、震源が陸域に近いことから、震源域直上で加速度記録が得られている。本地震については、友澤・他(2018)がスペクトルインバージョン解析により断層面全体に対する短周期レベルや応力降下を推定している。しかし、観測記録には波群が2つ確認できることや、既往の波形インバージョン解析からも、少なくとも2つの大すべり域が推定されていることから、本地震の震源特性を探るためには、面的な広がりを考慮したより詳細な検討が必要だと考えられる。そこで、本研究では、経験的グリーン関数法に基づき、震源近傍の強震観測記録からインバージョン解析により複数のSMGAを推定した。また、推定されたSMGAの位置をMendoza and Hartzell (1989) (以下、M&H, 1989とする。)の震源インバージョン解析によるすべり分布に基づく特性化震源モデルと比較し、短周期と長周期の励起位置の関係を検討した。さらに、推定結果のSMGAから求めた短周期レベルを既往研究と比較・検討した。

観測記録はCOSMOS(Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems)から取得した。解析に使用した強震波形は震源域直上の4点(CALE, VILE, UNIO, AZIH)の水平成分とした。要素地震は2つ選定し、それぞれを用いて解析を行い、観測をよりよく説明できるほうを最終的に用いる要素地震とした。前述のとおり、観測記録に2つの波群がみられることから、SMGAの数は2とした。SMGAの推定は、ハイブリットヒューリスティック法(山中, 2007)を用いた逆解析手法(元木・他, 2019)を用いた。SMGAの探索範囲はM&H(1989)の断層面と同一面上とし、解析周波数帯は0.2-10.0Hzとし、誤差関数の計算には加速度エンベロープとフーリエ振幅を用いた。

2つのSMGAは、震源付近と震源の南東側にそれぞれ概ね安定して求まり、観測波形とその擬似速度応答スペクトルは良好に再現できた。SMGA位置とM&H(1989)のすべり分布から求めたアスペリティ位置を比較したところ、短周期と長周期の励起位置は少しずれているものの、完全に別ではないことが示唆された。SMGAの面積は既往研究の M_0 - S_{SMGA} の関係(Miyake et al., 2003)と比べてやや大きく、短周期レベルは既往研究の M_0 - A 関係(壇・他, 2001)と比べてやや小さく求まった。震源付近、震源の南東側のSMGAの応力降下量の値はそれぞれ3.0MPa, 1.5MPaと求まった。これらの値は東北地方太平洋沖地震のSMGA(例えば、佐藤, 2012)と比べると一桁小さい。一方で、SMGA解析ではないものの波形解析に基づく既往のメキシコ地震の研究(例えば、Mendez and Anderson, 1991)で示された応力降下量の値とはおおむね整合する結果となった。

Strong ground motion simulation in the Tokyo metropolitan area of the 1923 Kanto earthquake's strong motion generation area

*Fumino Suzuki¹, Kenichi Kato¹, Tetsushi Watanabe¹, Yusuke Tomozawa¹

1. KOBORI RESEARCH COMPLEX

1. はじめに

首都圏に甚大な被害を及ぼした1923年関東地震は、今後も繰り返し同様の地震が発生することが懸念されるため、当時の強震動を再現することが防災上重要である。著者らは神田・加藤(2018)が被害に基づく震度（諸井・武村、2002）のインバージョン解析により評価した強震動生成域と短周期レベルをもとに6個のSMGAから成る震源モデルを構築し、数地点の強震動を統計的グリーン関数法により評価した（鈴木ほか、2019）。本稿では、上記と同様の方法で、被害に基づく震度が評価されている地点を対象に面的な強震動評価を行い、震度の再現性を検討する。

2. 評価条件

震源モデルは鈴木ほか(2019)で構築したSMGAモデルを用い、ここでは詳細を省略する。評価地点は被害に基づく震度が評価されている地点とする。地盤モデルは地震発生層から工学的基盤相当までのモデルとして、地震調査研究推進本部の長周期地震動予測地図2009年試作版(2009)を用いる。3次元地下構造モデルから評価地点の直下の地下構造を抜き出した1次元地下構造モデルとし、斜め入射を考慮した理論増幅特性を与える。Q値は中央防災会議(2004)を参照し $100f^{0.7}$ （ f は振動数）とする。統計的グリーン関数法により工学的基盤における地震動を評価し、これらの計測震度に横田ほか(2005)の地盤の非線形性を考慮した震度増分を与えることで、簡易的に地表の計測震度を求める。横田ほか(2005)の震度増分は表層30mの平均S波速度AVS30の関係式であるため、ここではJ-SHISの表層地盤のAVS30を用いる。

3. 評価結果

地表の震度の評価結果は、神奈川県の下平や鎌倉周辺、千葉県の館山周辺、東京都23区の東部などが他の地域に比べて大きく、これらは被害に基づく実震度と定性的に一致している。しかし、本評価の震度は実震度と比べて全体的に過小評価となっている。特に実震度が7の領域が多い神奈川県南部や、実震度が5弱から6強となっている埼玉県東部で過小評価の傾向が強い。

4. 議論

過小評価の要因としては、本評価で仮定しているQ値や地盤増幅率が実際の値と異なる可能性が考えられる。友澤・加藤(2018)は関東直下の減衰構造の不均質性を仮定してブロックインバージョンを行っている。その評価結果は、震源域から神奈川県南部や埼玉県東部の領域のQ値が本評価で仮定している $100f^{0.7}$ よりもやや大きく、この地域の経験的地盤増幅率は本評価で用いた理論増幅率と震度増分から考えられる増幅率よりも大きい傾向にある。

そこで埼玉県東部のK-NET久喜（SIT003）について、友澤・加藤(2018)の不均質減衰構造に基づく等価なQ値と経験的地盤増幅率を与えて地表の地震動を評価した。評価結果の震度は6弱であり、実震度が得られている最も近い地点と整合する結果となった。今後は同様の評価を面的に行い、被害に基づく震度の再現性を検討する予定である。

参考文献

神田克久, 加藤研一: 震度インバージョン解析による首都直下の歴史地震の強震動生成域と短周期レベル, 第15回日本地震工学シンポジウム, GO02-01-02, 2018.

地震調査研究推進本部: 長周期地震動予測地図2009 年度試作版, 2009.

鈴木文乃, 加藤研一, 神田克久, 池田孝: 震度インバージョン解析に基づく1923年関東地震の震源モデルの構築と首都圏の強震動評価, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS13-14, 2019.

友澤裕介, 加藤研一: 領域分割に着目した関東直下の不均質減衰構造の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21371, 2018.

中央防災会議: 首都直下地震対策専門調査会 (第12回) , 2004.

諸井孝文, 武村雅之: 関東地震(1923年9月1日)による木造住家被害データの整理と震度分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第2巻, 第3号, pp. 35-71, 2002.

横田崇, 稲垣賢亮, 増田徹: 数値実験による地盤特性と増幅率の関係, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, B064, 2005.

Examination about setting of outer and inner fault parameters for near-fault records simulation at the 2016 Kumamoto earthquake main shock

*Toshimichi Kido¹, Masayuki Nagano²

1. Tokyo University of Science Graduate School, 2. Tokyo University of Science

2016年熊本地震本震時の震源過程を推定する震源インバージョン解析がこれまで数多く行われている。

これらの震源インバージョン解析に基づく不均質震源モデルの断層面は主に余震分布や地表地震断層の分布を参考に設定されていて、共通して日奈久断層帯と布田川断層帯がモデル化されている。

例えばAsano and Iwata(EPS,2016)や引間(JAEE,2016)は日奈久断層と布田川断層に対応する2枚のセグメントから構成されている。Kubo *et al.*(EPS,2016)は3つの矩形セグメントとそれらの遷移セグメントからなる曲面断層モデルを構築している。Kobayashi *et al.*(GRL,2017)では日奈久断層,布田川断層及び出ノ口断層をモデル化し,計5枚のセグメントから構成される震源モデルとなっている。Yoshida *et al.*(EPS,2017)は日奈久断層と布田川断層について4枚のセグメントからなるモデルを示している。

このように2016年熊本地震本震を対象とした不均質震源モデルはさまざまな巨視的断層面が示されている。

また,これらの不均質震源モデルの巨視的断層パラメータやすべり分布を参照した特性化震源モデルによる検討も数多く行われている(例えば,佐藤[AIJ,2017],田中・他[AIJ,2018],松元・他[JES,2018]など)。これらの特性化震源モデルを用いた検討では,SMGAとLMGA(入倉・倉橋[JAEE,2017])と呼ばれる地震発生層以浅のすべり破壊により震源近傍の速度パルスを再現できることがわかってきた。このような特性化震源モデルに基づく震源近傍における再現強震動においては,震源モデルの巨視的断層面の設定は計算結果に大きく影響するため,震源モデルの巨視的・微視的断層パラメータの設定は震源近傍の理論地震動を議論するうえで重要である。熊本地震の巨視的断層パラメータの設定について,出ノ口断層の影響や阿蘇カルデラ内のセグメントについては議論がなされているが(例えば,Kobayashi *et al.*[2017],田中・他[2018],Yoshida *et al.*[2017]),日奈久断層や布田川断層の南西部(布田川断層と日奈久断層の接続区間や木山断層)の巨視的断層パラメータの設定についてはそれほど議論されていないように思われる。例えば,益城町の観測点(KiK-net益城,益城町宮園)とK-NET熊本の距離は僅か4km程度であるが,それぞれの地点で観測された強震動は大きく異なる。これらの違いについては,地下構造の差異による影響もあるが,益城町の観測点とK-NET熊本は日奈久断層と布田川断層の接続区間に位置することから,複雑な断層運動による影響も大きいことが推測される。

そこで本検討では,既往の震源インバージョン解析に基づく不均質震源モデル,不均質震源モデルをベースに設定された特性化震源モデル,測地データを基に構築された地殻変動分布を再現するための均質すべり震源モデル(例えば,Ozawa *et al.*,EPS,2016)やShirahama *et al.*(EPS,2016)による地表地震断層分布等を参照し,震源モデルの巨視的・微視的断層パラメータに関して,強震動再現,永久変位分布再現の観点からケーススタディを行った。

Yoshida *et al.*とOzawa *et al.*の巨視的断層パラメータを参照し,益城町付近で確認される2条の地表断層(日奈久断層帯から布田川断層帯へ接続する区間と木山断層帯区間)について,2条の断層すべりと上向きの破壊伝播効果を考慮すると,益城町や熊本市内の観測点における強震動の再現精度が向上することを確認した。日奈久断層の巨視的パラメータの設定として,例えば引間(JAEE,2016)の日奈久断層のすべり破壊は益城町の観測点における強震動にほとんど寄与しない。一方で,Asano and Iwata(EPS,2016)やKobayashi *et al.*(GRL,2017)のような日奈久断層の巨視的パラメータを用いた場合は,益城町における再現強震動に日奈久断層のすべり破壊の影響が少なからず含まれると考えられる。益城町における大振幅速度パルスについて,多くの震源インバージョン解析に基づく不均質震源モデルで示されている上向きの破壊伝播効果がもたらすDirectivity Pulseの影響が大きいと考

えられているが、日奈久断層の巨視的・微視的断層パラメータの設定によっては日奈久断層からの横ずれ断層の破壊が走向方向に伝播することによる、所謂通常のDirectivity Pulseによっても速度パルスを再現することができる。これらの設定の差異は震源近傍観測点の強震動再現に対して与える影響の差異は大きい、震源遠方の観測点に対する影響の差異は小さいため、それぞれのモデルの妥当性を示すことは現状では困難である。

阿蘇カルデラ内の巨視的断層パラメータとして、北西傾斜、南東傾斜のケースについて、永久変位の面的分布との比較からYoshida *et al.*と同様に南東傾斜モデルであれば、阿蘇カルデラ内の沈降の傾向を再現できることを確認した。長周期で卓越する地震動を観測したK-NET一の宮の再現強震動について阿蘇カルデラ内のセグメントに2つのSMGAを設定することで再現精度が向上することを確認した。一方で、阿蘇カルデラ内に位置する観測点や、KMM004より更に東に位置する93006への阿蘇カルデラ内のセグメントのSMGAによる寄与は小さく、Yoshida *et al.*と同様の傾向となった。

謝辞：防災科学技術研究所強震観測網(K-NET, KiK-net), 気象庁, 熊本県地方公共団体による強震記録を利用させて頂きました。東京電力ホールディングスの引間和人博士にはインバージョン解析のデータを提供して頂きました。防災科学技術研究所HPで公開されているKubo *et al.* (EPS, 2016)の震源モデルのデジタルデータ, 京都大学防災研究所の浅野公之博士のHPで公開されているAsano and Iwata (EPS, 2016)の震源モデルのデジタルデータを利用させて頂きました。記して謝意を表します。

Friction law for shallower region than the seismogenic layer: Application to characteristic source model

*Yuko Kase¹, Kiyoshi Irie², Kazuo Dan², Haruhiko Torita²

1. GSJ, AIST, 2. ORI

従来の地震動予測では、地震発生層以浅（表層）のすべりは、地震動に対する寄与は小さいとして、モデル化の対象とされてこなかった。しかし最近では、2016年熊本地震の本震で観測された、断層近傍の長周期地震動や永久変位を説明するためには、従来の強震動生成域に加えて、地表近傍にライズタイムの長い長周期地震動生成域を設定する必要があることが指摘されている（例えば、松元ほか、2016；入倉、2018）。この長周期地震動生成域を動力的震源モデルに導入するためには、摩擦構成則を設定する必要があるが、地震発生層を対象に設定されるすべり弱化則（例えば、Ida, 1972；Andrews, 1976）をそのまま適用すると、長いライズタイムと大きなすべりを再現することが難しい。加瀬ほか（2018）では、すべり弱化則に加えて、あるすべり速度以下ですべり速度硬化となる摩擦構成則を仮定することで、小さいすべり速度で大きなすべりを生じさせる破壊過程を得られることを示した。それを受けて、本稿では、すべり弱化・すべり速度硬化の摩擦構成則をアスペリティと背景領域から成る特性化震源モデルに適用することを試みる。

2層構造の媒質中に、長さ25 km、幅18 kmの鉛直な左横ずれ断層を想定し、地震発生層上端の深さは2 kmとする。地震発生層内にある2つのアスペリティの応力降下量は11 MPa、背景領域の応力降下量は0 MPa、表層の応力降下量は-3.0～0 MPaの範囲とし、地震発生層内（アスペリティと背景領域）はすべり弱化、表層内はすべり弱化・すべり速度硬化の摩擦構成則を仮定する。摩擦構成則のパラメータを変えて、片方のアスペリティに置いた破壊開始領域から始まる自発的破壊を計算し、表層内のすべり速度時間関数や断層近傍の波形がどのように変化するかを調べる。

表層の強度が大きいほど、表層内の最大すべり速度は小さく、すべり速度硬化量が大きい、すなわち、実質的な負の応力降下量が小さいほど、表層内の最大すべり量は大きくなった。また、すべり硬化の臨界すべり速度が大きいほど、表層内の最大すべり速度と最大すべり量は大きくなるが、このパラメータによる影響は、強度や応力降下量に比べて小さかった。このことから、長いライズタイムと大きなすべりを再現するためには、破壊が地表に達することができる範囲で、大きい強度と小さい負の（もしくは0の）応力降下量を設定し、それを満たすようなすべり速度硬化のパラメータを設定する必要があることがわかる。アスペリティ上端の深さが2 km（地震発生層上端と同じ）の場合と、5 km（地震発生層内）の場合とを比較すると、アスペリティ上端の深さが5 kmの場合は、表層内で破壊が急激に減速し、表層全体を破壊できない場合があり、表層内のすべりやすべり速度が小さくなるものの、全体的な傾向は2 kmの場合と同様である。ただし、断層近傍のすべり速度のフーリエスペクトルを比較すると、アスペリティ上端の深さが5 kmの場合の方が、2 kmの場合よりも低い周波数から落ち始めるなどの違いが見られる。

謝辞：本研究は、国立研究開発法人産業技術総合研究所と株式会社大崎総合研究所との共同研究「地震動予測の高度化に資する動力的断層モデルの研究」として実施されました。

Implementation of a forward scattering model in the Numerical Shake Prediction scheme: a case of 2016 Kumamoto earthquake

*Masashi Ogiso¹

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

地震波動場の実況そのものに基づく地震動即時予測(Hoshiba and Aoki, 2015, *BSSA*; Koder et al., 2018, *BSSA*)は、巨大地震や複数の地震が同時に発生しているような状況においても予測が可能であることから、ロバストな地震動即時予測手法のひとつとして有望である。Hoshiba and Aoki (2015)が提唱した「揺れの数値予報」では未来の地震動を計算する際に輻射伝達理論と等方散乱モデルを用いているが、等方散乱モデルは地震波エンベロープのコーダ部分をよく再現するものの、主要動部分を説明することはできないため、主要動部分をより再現できる計算手法を「揺れの数値予報」に採用することで地震動の予測精度が向上すると期待できる。そこで、本研究では地震波エンベロープ全体をよく再現できる前方散乱モデル(e.g., Wegler et al., 2006, *PAGEOPH*)を「揺れの数値予報」に導入し、2016年熊本地震の本震(Mj7.3)を対象とした地震動即時予測シミュレーションを実施して、等方散乱モデルの結果と比較することによってその効果を調査した。

前方散乱を表現するため、媒質速度に指数関数型のパワースペクトルで表現されるランダムな揺らぎがあると仮定し、ボルン近似に基づいて非等方な散乱係数を計算した。この非等方な散乱係数を輻射伝達理論に取り入れることにより、主要動部分も含めた地震波エンベロープ全体を計算することができる。なお、ランダム媒質を表現するパラメータは、相関距離を1km、速度揺らぎのRMS値を0.05とした。

前方散乱モデルを用いた予測結果と等方散乱モデルに基づいた予測結果(Ogiso et al., 2018, *BSSA*)を比較したところ、最大値の予測はほぼ同等であるが、コーダ波部分の予測精度が向上した。これは、地震動即時予測において最大値のみならず地震動の継続時間の予測可能性を示す重要な結果である。等方散乱モデルにおいても、モーメント輸送散乱係数(e.g., Sato et al., 2012)を用いることでコーダ波部分のエンベロープの予測精度を向上させることは可能であったが、その場合、一部の観測点で直達波近辺の予測エンベロープが不自然となる例が見受けられた。すなわち、等方散乱モデルでは最大振幅またはコーダ部分のどちらかを合わせる予測となるのに対して、前方散乱モデルを用いることで主要動からコーダ部分までの地震波エンベロープ全体を予測することが可能であることがわかった。本研究は一様な減衰・散乱構造を用いているが、不均質な減衰・散乱構造の効果を取り込むことでさらに地震動の予測精度が向上することが見込まれる。

謝辞

本研究では防災科研K-NET、KiK-net、Hi-netの波形を使用しました。本研究の実施にあたり、JSPS科研費JP18K13622及びJP17H02064の援助を受けています。

Seismic isolation system for furniture

*Tesshin Noma¹, Syuntaro Hayashi¹, Ken'ichi Arai¹

1. Sakae Higashi High School

近年、地震対策として、免震装置が多くの注目を得て多用されている。免震装置の最大のメリットは、建物自体の被害はもちろんとして建物内の被害まで抑えられることにあるだろう。私は、もしこれが家具に導入できたらどうだろうかと考えた。

ここで食器棚を例にとって考えてみよう。建物自体が食器棚で、建物内のものが食器である。食器棚には免震装置が導入されている。このとき、免震装置が導入されていることによって食器棚の転倒を抑えてかつ中の食器が割れることを防げるということになる。現在、家具は固定して転倒を防ぐというのが推奨されているがこれでは中の食器まで守ることはできない。

家具の下に取り付けることから考えて、免震装置は積層ゴム構造を用いる。積層ゴム構造とは、柔らかい素材と硬い素材の板状のものを層状に積み重ねて作った免震構造のことである。硬い素材が間に挟まれているので、垂直方向の圧力には強くなっている。これを柱として使うことで、支えるものの固有振動数の揺れをできるだけ抑えることにより、免震をしようというわけである。

本研究の目的は、高さ2mほどの大型家具に対する家具用免震装置の素材を見つけることである。寺屋・他(2015)によると、(表1)のような2つの本棚で、床材がじゅうたんの場合は0.6Hz、1.0Hzで転倒し、フローリングの場合は0.6Hzで加速度が大きくなる傾向があった。よって0.6~1.0Hzの揺れを抑えることができれば、免震ができるのではないかと考えた。

(図)の実験装置は家具の模型2つを台車の上に設置したものである。片方の模型の下には免震装置、もう片方には単なる木材が柱として入れてある。この実験装置全体を矢印の方向に動かし、模型に振動を加える。

合計3台のスマートフォンを模型の上と台車の上に取り付ける。(図)の実験装置全体を矢印の方向に手で動かす。スマートフォン内の加速度センサーで50Hz、512点の加速度データをとる。このとき、データとノイズの区別をしやすくするため、1つの免震装置につき0.6~0.8Hzと0.8~1.0Hzまでにピークがくるような揺れを20回ずつ与える。この範囲のみが信用できるデータとする。このデータをそれぞれフーリエ変換し、(免震装置が入っている模型のデータ) / (免震装置が入っていない模型のデータ) をする。これを常用対数で表し、平均をとる。本研究ではこれを「変化率」と呼ぶことにする。ただし1%の増減は誤差とするから、0.002以上であれば揺れが増幅、-0.002以下であれば軽減、その間であれば変化なしということになる。また、もう1つの指標としてSSを使う。SSとはSign Sumの略であり、本研究で命名したものである。今回の場合(0.002以上のデータ数) - (-0.002以下のデータ数) のことである。

「変化率」とSSが両方とも負を示せば、その周波数の揺れが軽減されたと言って差し支えないだろう。

以上の方法を用いて実験をする。今回は研究の第一歩として(表2)に示す2種類の免震装置を用いた。

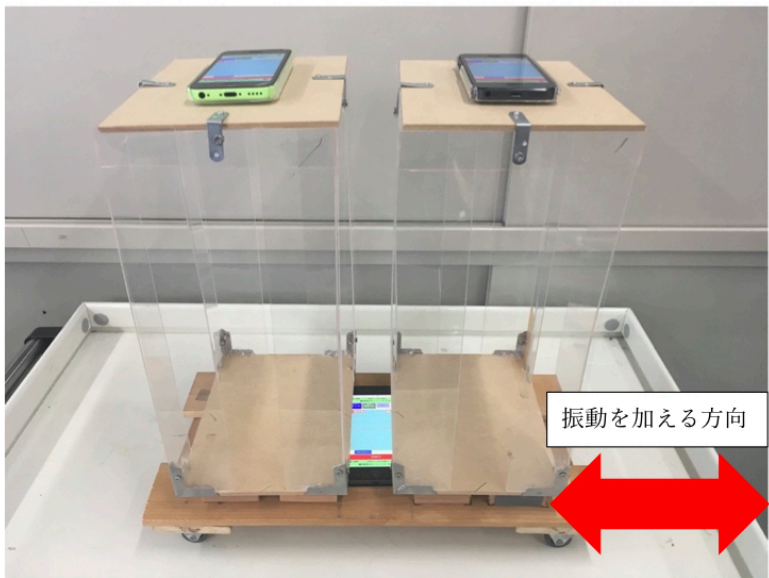
今後は模型に重りをつけて実際の条件とできるだけ近づけることも検討していきたい。

(表 1)使用した家具の詳細(寺屋・他(2015))

	寸法(mm) (幅×奥行き×高さ)	質量(kg)	備考
本棚 1	900×300×1800	32.0	棚板耐荷量 20kg 地板は転倒防止の為 80mm 前方に突出
本棚 2	450×290×1800	18.5	棚板耐荷量 10kg

(表 2)使用した免震装置の詳細

	寸法(mm) (幅×奥行き×高さ)	素材
免震装置 1	50×50×25	・ゴム(厚さ 2.0mm) ・アルミ(厚さ 0.5mm)
免震装置 2	50×50×25	・発泡 PP(厚さ 2.0mm) ・アルミ(厚さ 0.5mm)



(図)家具の模型の実験装置

Characteristics of strong ground motion records in the Kochi area

*Nobuyuki Yamada¹, Makoto Okubo¹

1. Kochi University, Faculty of Science and Technology

高知県は想定される南海トラフの地震の震源域直上に位置し、有事の際には、大震度の揺れに見舞われる可能性がある[地震調査研究推進本部(2019)]。そこで得られる強震記録は、震源域近傍における地震・防災研究にとって貴重なものになると考えられる。しかしながら、想定地震の被害想定[高知県(2013)]によれば、県内の強震観測点のうち、人口が集まる沿岸部地域にある地点の大半は、地震後の津波等による浸水想定区域内にある。これらの観測点は、水没により長期間機能不全に陥る恐れがあり、さらに強震動や津波等によって、観測点周辺の状況が現状と著しく変化する可能性もあり得る。

防災科学技術研究所の強震観測網は、1996年の運用から間もなく四半世紀を迎える。その間、日本各地で被害地震が多数発生しているが、高知県内においては顕著な被害に見舞われることなく今日に至っている。高知県の各地では、普段、地震の揺れを感じることも少なく、震度観測点で過去数十年間、震度5強相当以上の記録もない[気象庁震度データベースより]。従って、強く揺らされた経験のない対策が不十分な既存の各種中小の住家等については、中程度の地震動でも甚大な被害が生じる可能性があり、それらによってその後の避難行動にも大きな支障をきたす恐れもある。

こうした背景から、本報告では、想定地震発生前に地震動・地盤などの関連情報を蓄積させておくとともに、実記録に基づく地域の防災に繋げることを目指すために、高知県内の強震観測点(現段階ではK-NETの17地点)の約24年間の記録を対象に精査し、その特徴を抽出することを試みた。対象データは、1996年6月から2019年7月15日の間で最大加速度5 gal以上とした。データ数は、KOC015(宿毛)で突出して多く160個で、他は平均50個程度であり、全点の合計は979個であった。これまでの強震記録の最大振幅値は、KOC008(本川)で 537 cm/s^2 がある。また、速度応答値では、最大でも10数 cm/s程度であり、県内のすべての地点でこの傾向は同じである。現在までに得られている記録による傾向として、応答スペクトル形状には、特徴的な様相を呈する地点が見られ、地震の規模や位置によらず、その形状は類似しており、またそのピーク周期の変化は非常に小さくなっていた。今後、こうした傾向をあらためて抽出し、表層地盤構造や常時微動記録の情報等を交え考察する予定である。

なお、ここでの内容では、防災科学技術研究所のK-NETのデータ

(<http://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>) を利用させて頂きました。記して感謝申し上げます。

Poster session (Sept. 16th) | General session : S18. Education and History of Seismology

📅 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏢 ROOM P
International Conference Halls II and III

S18P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S18P-01] Practical lesson of earthquake education for private nursery school in Wakayama city

*Nobuyuki Yamada¹ (1. Kochi University, Faculty of Science and Technology)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S18P-02] The 1944 Tonankai Earthquake and the Seismology at That Time

*Masayuki Takemura¹ (1. Nagoya University)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S18P-03] Active Fault Research by High School Student, College Student and Citizen

*Takuo Okamoto¹ (1. National Institute of Technology, Fukui College)

Practical lesson of earthquake education for private nursery school in Wakayama city

*Nobuyuki Yamada¹

1. Kochi University, Faculty of Science and Technology

本報告では、10年ほど継続的に取り組んできた保育園・幼稚園での地震防災教育の実践活動のうち、2019年2月に実施した和歌山市内に立地する保育園（園児数80名）での例について報告する。大規模地震災害の発生が危惧される地域の一つである和歌山県北部地域での園を取り巻く実態把握と私立保育施設での実践をもとに、今後の乳幼児とその周りの大人を対象にした防災教育（地震教育も含め）について新たな展開をしたいと考えている。

これまでの実践では、地震防災保育が、行事の一環として捉えられないように、また、各園の保育の特色や地域の特性に配慮し、保護者の協力を仰ぎ家庭教育に繋げることや0～6歳の異年齢の子どもたちの生活の中で発達過程に応じた保育にすることに留意し取り組んできた（そのため防災教育や教室ではなく、防災保育と称している）。特に、日常の活動との関わりを重視し、遊びや体感、関わりあいを交えた各種防災体験ツールを2010年から製作し、関西圏の園を中心に取り組み、実践を重ねるたびにステップアップを図ってきた[例えば、山田・丁子（2018, 保育学会）]。一連の防災保育では、子どもたちが劇を見たり、歌とダンスを交えて学んだり、災害事象を疑似体験する活動ができる「手作り」のアトラクションを用意し、それらを園児が1つずつ乗り越えていくように設定した。5才児クラスなどでは、保育者による「ふり返し活動」を行ってもらい、参加したすべての子どもたちへの活動の印象づけを強くし、家庭でも話題提供のきっかけにすることも行った。

防災保育の実践による子どもたちの育ちの様子や保育の効果を把握するために、保護者向けと保育者向けのアンケート調査も継続的に実施してきている。今回は、小規模園のため数は少ないものの保護者25件、保育者14件の回答を得た。保護者も保育者ともに園での防災保育の必要性については理解を頂けているようで、親子での参加や継続的な実施をなど、肯定的な意見の割合がより高かった。また、家庭に帰った後の親子での会話から、教育的効果を暗示させるコメントが散見された。また、この実践後には、園長らとの関連する座談会を行い、相互に意見交換や信頼形成の時間も設定した。

この発表では、対象園での防災保育の実践と事後アンケート結果について報告し、考察する。一連の実践を通じて、子どもたちと保護者と保育者の3者間でのより質の高い効果をもたらすことに繋がると考えられ、園の立地環境や特性によるニーズを踏まえた防災保育のプログラムの多様化と実践、園独自にできる・やってみようという保育者への動機付け、および防災に関する保護者・保育者への再教育の3点が必要であるということが再認識できた。今後も、子どもたちを守るための取り組みを蓄積し、子どもたちにとってより有益な内容方法を模索していきたい。

なお、本報告の実践・アンケートは、和歌山市大谷「かぜのこ保育園」の関係者の皆さまと和歌山大学教育学部の丁子かおる准教授ならび同左の学生さんたちにご協力頂きました。また、本研究は、JSPS科研費(16K00971)の一部を活用しました。関係者各位に記して感謝いたします。

The 1944 Tonankai Earthquake and the Seismology at That Time

*Masayuki Takemura¹

1. Nagoya University

1944年12月7日に発生した東南海地震は戦時中の厳しい統制の中で調査研究を充分行うことができなかった。そんな印象を持っている人が多い。「隠された災害」などというイメージがさらに拍車をかけているようである。実態はどうだったのだろうか？

まずは、当時の日本の地震学の実力を見てみよう。大正12年の関東大震災後、日本の地震学は大きな転換を遂げる。統計や計測を中心とした従来の地震学から、地震を地球物理学的現象として学理的に取り扱おうとする地震学への転換である。その立役者は、大正14年に新しく設立された地震研究所と岡田武松台長の元に力を付けた中央気象台の台頭である。両者の共通点は予知だの防災だのという前に、地震の本性を知るための基礎的研究に邁進したことである。特に中央気象台は、全国の測候所に標準地震計としてウィーヘルト式地震計を配し、中野、本多、和達らが、今日の震源断層理論やプレートテクトニクス理論に迫る発見を次々にし、地震研究所とともに世界の地震学をけん引した。

昭和10年代になると、次第に戦争の影響が現れる。主なものは、昭和12年ころに陸軍から文部省に対して、全国の気象台等気象機関の一元統制の要請がなされ、測候所がそれまでの県営他から国有化される。さらに中央気象台を陸軍に編入する要求もあったが、岡田やその後継の藤原はこれを拒否した。このことは終戦にあたり観測器機や記録紙などのデータが廃棄されることを防いだ他に、昭和16年の太平洋戦争開戦と同時に停止されていた天気予報が、終戦からわずか一週間後に復活したことにも大きく貢献している。その代わりに一方では、昭和13年に新設された陸軍気象部に、台長は嘱託、技師は技術将校として協力、さらに昭和18年には中央気象台を新設の運輸通信省に編入させた（現在、気象庁が国土交通省にあるのはこの為）。一方、地震研究所では所員を応召から守り、研究費を確保するための苦肉の策として、妹澤所長（昭和17年から）は「爆震爆風」と「地震探査」部門の新設と所員（教授と助教授）全員を陸軍臨時嘱託として第三陸軍航空技術研究所付とした。

東南海地震の主な調査報告書は3つある。一つは名古屋大学理学部が名古屋地方気象台の要請に基づき合同で行った現地調査の報告書。もう一つは中央気象台によるもので、全国の測候所による地震観測結果をまとめ、4班の現地調査チームを編成し、神戸海洋気象台の協力を得て、和歌山県から静岡県までの被災地全域を調査した結果の報告書。さらに地震研究所が当時若手の宮村、表、金井の3名を中心にテーマごとに現地調査をした報告書である。それぞれどのチームも調査を開始したのは地震発生翌々日の12月9日である。全ての調査は12月中にほぼ終了している。その後、それぞれが報告書を取りまとめたのが翌年1月から2月にかけてである。被災地が広範囲に及んでいること、遠距離の鉄道移動が制限されていたこと、さらにはその間、本土空襲が次第に本格化することなどを考えると、調査の迅速性には頭が下がる思いである。

ほぼ一月の調査結果は、全国61カ所の測候所の観測結果をもとに決めた震源位置と地震規模の評価や余震活動の把握、さらには地盤条件による揺れの違いと被害の関係、津波の波高分布と到達時刻の分布、津波波源域の推定、地殻変動による紀伊半島沿岸の沈降量分布、南海トラフでの地震の履歴、特に安政東海地震との関係など、現在われわれが知る東南海地震に関する知見のほぼ全てがその時点で明らかにされていたことが分る。

戦後、この地震の被害データの収集整理は飯田によって精力的に行われるが、その核となったのは、宮村による直後から始まる調査結果である。またそれらを再整理して武村・虎谷は詳細震度分布を求めている。また、近年山中や谷岡らがを行っている地震波形や津波波形の震源インバージョンも、地震時にしっかりとした地震観測や潮位観測が行われていたからできることである。戦時統制下であっても研究者魂や測候所魂は健在

で、できうるかぎりの調査がなされていた。さらにそれらが当時の高度な地震学のレベルの上に成り立っていたということを結論としたい。決して調査が十分行われていなかった訳ではない。

本報告は、名古屋大学減災連携研究センターで、2018年から実施した東南海地震プロジェクトの成果の一部である。成果の全体は名古屋大学減災連携研究センター（2019）『昭和19年東南海地震』全188頁を参照されたい。

Active Fault Research by High School Student, College Student and Citizen

*Takuo Okamoto¹

1. National Institute of Technology, Fukui College

はじめに

福井平野（福井県北部）には、福井平野東縁断層帯や西縁部には断層地形が存在する（岡本，2018）。現在でも、福井地震の余震活動と思われる地震活動が発生している。藤島高校や武生高校（SSH指定校）のSSH研究では、福井平野東縁断層帯の地下構造や鯖江断層の詳細を、独自の地震観測網のデータを用いて継続的に調べ（岡本他の指導）、結果を、SSH発表会、地球惑星連合大会の高校生の部門や防災士の会の研修会で発表している（前回の地震学会で紹介）。高専生も、卒研や防災に関する取材結果を市民に示している。この結果、彼らの行動が各住民の防災へのモチベーションの向上に繋がっていく可能性を見い出せたので、報告する。

データ・解析方法

SSHで使用している地震計は満点システムで、基本的な解析はWinシステムを利用し、結果をエクセル上で処理している。現在の地形の海拔高度に関しては自治体より、個人より提供を頂いた明治時代の地図からは過去の地形の情報として、使用している。

まとめ

藤島高校の結果では、福井平野西縁部において、藤島高校でのS波のsplittingの解析より、断層構造の可能性が分かった。推定断層付近では、S波の後の後続波を捉えることができ、研究結果として報告された（地球惑星科学連合大会）。現在、詳細な解析を継続中である。平成28年度より、鯖江断層の南端の解析に関する武生高校でのSSHの研究指導を始め、また、福井高専生による鯖江市内での地震解析結果と合わせて、鯖江断層の総合的な研究の取り組みを行っている。高専生や高校生達の研究を防災士や市民に紹介することは、地域の方の意識向上につながり、子供達の防災や地学への興味へのきっかけにもなる。講演では、高専生や高校生達による防災士の研修会や市民の防災講座での発表による地域貢献の様子を、主に報告する予定である。

謝辞

京大防災研、気象庁（福井地台）、石川有三博士よりは、震度、波形、活動情報を頂いております。解析については、井元政二郎博士（元防災科研）、古川信雄博士（元建研）、前田直樹教授（関東学院大）、飯尾能久教授、片尾浩准教授（京大防災研）にお世話になっています。SSH指定校の先生方や福井高専地球物理学研究会の諸氏には、全般にわたり協力を頂いています。



Poster session (Sept. 16th) General session : S19. Seismology General and Miscellaneous Contribution
--

🏠 Mon. Sep 16, 2019 5:15 PM - 6:45 PM JST | Mon. Sep 16, 2019 8:15 AM - 9:45 AM UTC | 🏠 ROOM P
International Conference Halls II and III

S19P

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S19P-01] On smoothing of time series for high frequency seismic signal duration measurements

*Tatsuhiko Hara¹ (1. IISEE, BRI)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S19P-02] Another view of the JMA unified catalog

*Shutaro Sekine¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

5:15 PM - 6:45 PM JST | 8:15 AM - 9:45 AM UTC

[S19P-03] Development of automatic data acquisition Web application of distributed accelerometer

*Makoto Furuzono¹ (1. Tokyo Denki University)

On smoothing of time series for high frequency seismic signal duration measurements

*Tatsuhiko Hara¹

1. IISEE, BRI

Hara (2007) developed a procedure to measure high frequency seismic signal durations (hereafter referred to as HFSDs) from broadband seismograms recorded in the teleseismic distance range. In this procedure, the narrow high band-pass filter (2-4 Hz) is applied to a broadband seismogram, and the squares of each data point is calculated; then the moving window average is applied to smooth the time series, and a HFSD is measured using the smoothed time series. The width of the window is set to one sixth of the time from the arrival of a P wave to the time when the amplitude of the squared time series is the maximum, which is referred to as a peak time by Hara (2008). Hara (2008) showed that the frequency distributions of the peak times normalized by twice the centroid time shift showed the peaks around 50 per cent, which supports the effectiveness of this smoothing procedure.

Since an estimate of a HFSD is available after the above mentioned procedure is carried out, if this estimate is used to set the width of the window for smoothing of each time series, HFSD measurement accuracy may be improved. In this study, we set one twelfth of the HFSD estimate to the width, and calculated smoothed time series again, and measured HFSDs from them. We analyzed shallow earthquakes whose moment magnitudes are greater than or equal to 7.2 that occurred in between 1994 and 2017. We used broadband waveform data recorded at the GSN stations in the epicentral distance range between 30 and 85 degrees, which were retrieved from the IRIS DMC. The differences between the newly measured HFSDs and those obtained by the procedure of Hara (2007) are about 5 per cent on average. The median absolute deviations of the newly measured HFSDs are smaller by about 21 per cent on average than those obtained by the procedure of Hara (2007), which suggests that the procedure in this study is helpful to reduce the scatters of the measurements.

Another view of the JMA unified catalog

*Shutaro Sekine¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction

1. はじめに

気象庁の一元化処理震源カタログデータは1997年10月以来約350万個の震源が決定されてきており、非常に重要なデータとして使用されている。そしてそのデータは震源情報を得るためだけでなく、読み取られた走時データや振幅データを用いる事で地球内部の構造の推定に用いられている。一元化カタログ内の読み取りでは、観測点の個数制限や距離制限はあったとしても方位による恣意性はない。従って、もし地下に大規模な低減衰域があるならば、その方角は読み取るのが困難な為、読み取れずに震源が決定されるために長期間蓄積されたデータには傾向が現れてくるはずである。さらに、観測点は地表やボアホール内など様々な環境化にあるので、そのデータがどのような範囲で読み取られているかを確認しておく事は、リアルタイム地震等を使用するには非常に重要である。上手くグルーピングすることで観測点のデータの着・未着の実効的な判定条件として加えることができるかもしれない。そこで、本研究では、普段用いられる震源側からではなく、読み取りが行われた観測点の方から情報を精査し、他の既知の情報と併せてみる事により、観測点の状態や内部構造に対して傾向を見出す事ができないかという事について考えてみた。

2. 解析手法

気象庁一元化震源カタログのデータ1997年10月1日から2019年6月30日までの読み取りデータに対して、観測点から見た方位角や震源距離等を計算し、それを観測点毎にまとめた。

3. 結果および考察

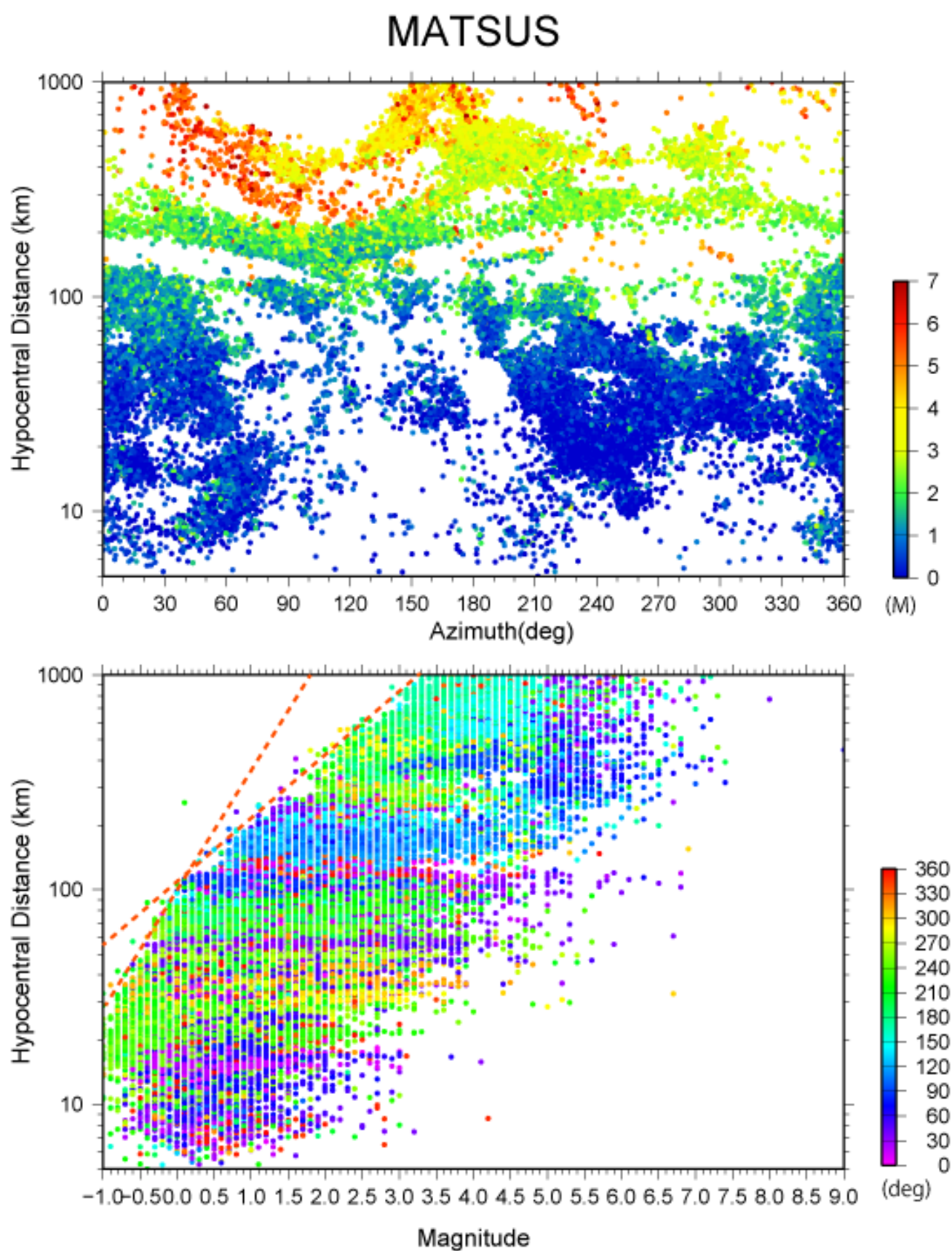
図に気象庁の松代観測点の読み取りが行われた震源方位と震源距離およびマグニチュードと震源距離のグラフを示す。この観測点の場合、震源から200kmの距離において全方位の地震を観測している事がわかる。なお、松代観測点においては、90度から180度の方向の100km以内の地震に対する読み取りが少ない事が見て取れるが、その方角には火山フロントの低速度・高減衰領域があり、その影響が出ていると推測できる。また、震源距離とマグニチュードのグラフでは、読み取り下限を赤い点線で示しているが、この線の傾きが観測点から約100kmで変化している。各観測点によって線の傾きの大きさは違うが、100kmほどで傾きが変わる傾向は他の観測点でも現れており、地震の読み取りに対して上限が設定されている事が関係している可能性があると思われる。なお、距離で方向の色が揃うように見えるのは、本震の後に余震の読み取りがあると、同じ方向からマグニチュードが違う地震を読み取るからであると考えられる。

このようにカタログを図示すると近い地震から遠い地震や深い地震もきちんと読まれているが連続的にすべての地震が読まれているわけではない事がわかる。観測点を読まれている分布を確認する事でトモグラフィ解析等を行う際には、実際には波は来ているが読まれていない可能性もあることにも注意すべきである。

謝辞

本研究で用いた気象庁一元化震源は、気象庁・文部科学省が協力してデータを処理した結果であり、処理に用いられた読み取りデータおよび波形データは、気象庁、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、国立研究開発法人海洋研究開発機構、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所および

び公益財団法人地震予知総合研究振興会から提供されたものです. 記して関係機関に感謝します.



図：気象庁松代観測点を読み取りに使用した震源分布図.
(上図) 方位角と震源距離 (下図) マグニチュードと震源距離

Development of automatic data acquisition Web application of distributed accelerometer

*Makoto Furuzono¹

1. Tokyo Denki University

1. 背景

新津研究室では加速度計の開発を行っている。だが、専用ソフトをインストールしない場合、データの閲覧が行えない。加えて、容量の問題で半年ごとに現地に行ってデータを回収しなければならないため、現状運用には負担がかかる状態である。そこで、前年に開発した震源地可視化アプリケーションを応用し、加速度計データを使用した拡張機能不要なWebブラウザとビッグデータのような膨大なデータ処理時に高速描画を可能とするWebGL、取得したデータを送信・保存・ダウンロードすることが出来るサーバー技術を用いたWebアプリケーションを考案した。

2. 開発内容

2.1 加速度計

加速度計とは、物体の振動または物体の運動の加速度を測定する装置である。振動より引き起こされる力、または運動の変化(加速度)より引き起こされる力により、質量が圧電体を「押しつぶされ」、その圧電体に印加された力に比例した電荷が生じる。この電荷は力に比例するが、質量は一定であるので加速度に比例すると言える。

新津研では地震動の加速度を計測できるMEMS(Micro Electro Mechanical System)加速度計を開発してきた。主な特徴を挙げると、スマホなどに搭載されている加速度センサに比べ、数10～数100倍の高い感度を有し加速度計単体で数か月から半年程度の3軸加速度データ収集し保存できる。また、複数の加速度計を同期して動作させることも可能で、電池による低消費電力駆動を利点としている。

現在、研究室が管理している加速度計は千葉にある五重塔、福島にある写真美術館、埼玉にある旧田中邸の3ヶ所である。なお国外のネパールの五重塔、ギリシャのパルテノン神殿にも設置しており、現在も複数箇所で加速度のモニタリングを行っている。

加速度計の加速度の取得方法はそれぞれの方向に取り付けた重りが、外部からの衝撃により移動することで、その位置変化をセンサー内部で測定し、バネ係数などを考慮した力学の方程式($a=k \times x/m$)に得られた数値を入力することで、加速度を導き出すことができる。

2.2 アプリケーションの仕組み

このアプリケーションは加速度計とラズベリーパイを接続し、加速度計から得られたデータをラズベリーパイが受け取り、それを一定時間毎にSCPファイル転送で研究室に設置されたサーバーにデータを送る。それらのデータはインターネットブラウザを通してクライアント側から場所と日付を指定し、ブラウザのダウンロード機能を使用してデータをダウンロード、このデータをアプリケーション上で読み込んで波形を描画する。

3. 結論

現在までの開発で加速度計から得られたデータをCSVファイル化し、サーバーに転送。それらのデータをWebアプリケーション上からダウンロード及びデータ表示を可能とした。画面の右側に表示されているgoogle mapについては、将来加速度計を設置した場所を登録することで、よりアプリケーションを利用しやすくすることを想定している。

