

Mon. Sep 16, 2019

ROOM B

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

[S09]AM-1

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), Koichiro Obana(JAMSTEC)
9:30 AM - 10:30 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-01] **Derivation of probability density function for interval maximum amplitude of continuous seismogram**

*Kaoru SAWAZAKI¹ (1. National Research institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-02] **Focal mechanisms of aftershocks and stress field in the focal area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake**

*Yuki Susukida¹, Kei Katsumata¹, Masayoshi Ichianagi¹, Mako Ohzono¹, Hiroshi Aoyama¹, Ryo Tanaka¹, Masamitsu Takada¹, Teruhiro Yamaguchi¹, Kazumi Okada¹, Hiroaki Takahashi¹, Shin'ichi Sakai², Satoshi Matsumoto³, Tomomi Okada⁴, Toru Matsuzawa⁴, Shuichiro Hirano⁵, Toshiko Terakawa⁶, Shin'ichiro Horikawa⁶, Masahiro Kosuga⁷, Hiroshi Katao⁸, Yoshihisa Iio⁸, Airi Nagaoka⁸, Noriko Tsumura⁹, Tomotake Ueno¹⁰, the Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 4. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, Sendai, Japan, 5. Nansei-Toku Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Kagoshima, Japan, 6. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan, 7. Earthquake and Volcano Observatory, Hirosaki University, Hirosaki, Japan, 8. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan, 9. Department of Earth Science, Faculty of Science, Chiba University, Chiba, Japan, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience,

Tsukuba, Japan)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-03] **Seismicity in the Japan Trench outer-rise region off Miyagi based on OBS observations**

*Koichiro Obana¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Gou Fujie¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-04] **Improvements of seismic activity model for probabilistic seismic hazard assessment**

*Nobuyuki Morikawa¹, Jun'ichi Miyakoshi², Hiroyuki Fujiwara¹ (1. NIED, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

10:15 AM - 10:30 AM

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

[S09]AM-2

chairperson:Kazuyoshi Nanjo(University of Shizuoka), Kohei Nagata(MRI)
10:45 AM - 12:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-05] **Seismicity prior to the July 2019 southern California *M*7.1 earthquake**

*Kazuyoshi Z. Nanjo¹ (1. University of Shizuoka)

10:45 AM - 11:00 AM

[S09-06] **Successively occurring large earthquakes in the world (2) -Successive occurrence and simultaneous occurrence of same class earthquakes-**

*Tetsuo Hahsimoto¹, Takashi Yokota² (1. Meteorological Research Institute, 2. Aichi Institute of Technology)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] **Temporal change in size distribution of the earthquakes around large earthquakes in the continental crust of Japan**

*Kohei NAGATA¹ (1. Meteorological Research Institute)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-09] **Variation of activity of felt aftershocks: An application of the modified Omori formula to aftershocks of the 2019 off Yamagata earthquake**

*Kentaro Hattori, Ichiro Nakanishi¹ (1. Kyoto Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM

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

[S09]PM-2

chairperson: Makoto Matsubara(NIED), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

2:45 PM - 3:45 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-10] Small repeating earthquake beneath the Tokai region

*Makoto Matsubara¹, Hiroshi Sato² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-11] Spatio-temporal distributions and activities of deep low-frequency earthquakes in volcanic regions all over Japan

*Ryo Kurihara¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Yusaku Tanaka¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-12] Low-frequency aftershocks of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake revisited

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

3:15 PM - 3:30 PM

[S09-13] Migration of microseismicity and subsequent aseismic adiabatic expansion after the termination of injection in Okuaizu Geothermal Field

*Kyosuke Okamoto¹, Li Yi², Hiroshi Asanuma¹, Takashi Okabe³, Yasuyuki Abe⁴, Masatoshi Tsuzuki⁵ (1. AIST, 2. Osaka University, 3. GERD, 4. OAG, 5. JOGMEC)

3:30 PM - 3:45 PM

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

[S09]PM-3

chairperson: Takane Hori(JAMSTEC), Hisahiko Kubo(NIED)

4:00 PM - 5:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-14] A mechanical model of regular and slow earthquakes

*Takane Hori¹ (1. JAMSTEC)

4:00 PM - 4:15 PM

[S09-15] Patch distributions of tremors and growth process of ETS.

*Keita Nakamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takahiko

Uchide², Kazutoshi Imanishi² (1. Univ. of Kanazawa, 2. AIST)

4:15 PM - 4:30 PM

[S09-16] Spatial properties of slow earthquake activity and its geophysical and geological environment

*Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

4:30 PM - 4:45 PM

[S09-17] Spatial relationship between rupture area of two large inter-plate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake and slow-earthquake activity

*Hisahiko Kubo¹, Tomoaki Nishikawa² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

4:45 PM - 5:00 PM

[S09-18] Spatial distribution of b-values related to slow earthquakes in the area encompassing the Kii-Peninsula and Hyuga-nada regions, Japan

*Keita Chiba¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

5:00 PM - 5:15 PM

Tue. Sep 17, 2019

ROOM B

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

[S09]AM-1

chairperson: ryosuke Azuma(Tohoku University), Ryuta

Arai(JAMSTEC)

9:15 AM - 9:45 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-19] **Distribution of strain energy density change due to an earthquake faulting in elastic-viscoelastic media***Tatsuhiko Saito¹, Akemi Noda¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-20] Mechanism of normal-fault type earthquakes under the Boso Peninsula, Japan

*Akinori Hashima¹, Hiroshi Sato¹, Toshinori Sato² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Chiba University)

9:30 AM - 9:45 AM

Room B | General session | S06. Crustal Structure

[S06]AM-1

chairperson: ryosuke Azuma(Tohoku University), Ryuta

Arai(JAMSTEC)

9:45 AM - 10:30 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S06-01] Anisotropic P wave velocity structure around the shallow plate boundary in the northern Hikurangi margin

*Ryuta Arai¹, Shuichi Kodaira¹, Stuart Henrys², Nathan Bangs³, Koichiro Obana¹, Gou Fujie¹, Seiichi Miura¹, Dan Bassett², Dan Barker², Rebecca Bell⁴, Kimihiro Mochizuki⁵, Team NZ3D (1. JAMSTEC, 2. GNS Science, 3. Univ. of Texas, 4. Imperial College London, 5. ERI, Univ. of Tokyo)

9:45 AM - 10:00 AM

[S06-02] Seismic wave velocity structures in the Iburi region of Hokkaido, Japan

*Takahiro Shiina¹, Kei Katsumata², Masayoshi Ichiyanagi², Hiroaki Takahashi², Ryoichi Nakamura¹, Aitaro Kato¹, Mako Ohzono², Hiroshi Aoyama², Ryo Tanaka², Masamitsu Takada², Teruhiro Yamaguchi², Kazumi Okada², Shin'ichi Sakai¹, Satoshi Matsumoto³, Tomomi Okada⁴, Toru Matsuzawa⁴, Shuichiro Hirano⁵, Toshiko Terakawa⁶, ShinichiroHorikawa⁶, Masahiro Kosuga⁷, Hiroshi Katao⁸, Yoshihisa Iio⁸, Airi Ngaoka⁸, Noriko Tsumura⁹, Tomotake Ueno¹⁰, the Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake (1. ERI, UTokyo, 2. ISV, Grad. Sch. of Sci., Hokkaido Univ., 3. SEVO, Grad. Sch. of Sci., Kyoshu Univ., 4. RCPEV, Grad. Sch. of Sci. Tohoku Univ., 5. Nansei-Toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 6. Earthquake and Volcano Reserach Center, Grad. Sco. of Environ., Nagoya Univ., 7. Earthquake and Volcano Observatory, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Hirosaki Univ., 8. DPRI, Kyoto Univ., 9. Department of Earth Sci., Faculty of Sci. Chiba Univ., 10. NIED)
10:00 AM - 10:15 AM[S06-03] **Tomography and anisotropy in the 2018 East Iburi earthquake area***Dapeng Zhao¹, Tao Gou², Zhouchuan Huang², Liangshu Wang² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University)

10:15 AM - 10:30 AM

Room B | General session | S06. Crustal Structure

[S06]AM-2

chairperson: Ryuta Arai(JAMSTEC), ryosuke Azuma(Tohoku University)

10:45 AM - 12:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S06-04] Particle motion of Rayleigh waves in the ocean bottom : Effects of water and sediment

*SHUN FUKUSHIMA¹, KIYOSHI YOMOGIDA¹ (1. Hokkaido University, Graduate School of Science, Department of Natural History Sciences)

10:45 AM - 11:00 AM

[S06-05] Phase velocity estimation based on spatial gradient of surface wave arrival time of teleseismic earthquakes observed by S-net

*Akira Ishigami¹, Ryota Takagi¹ (1. Univ. of Tohoku)

11:00 AM - 11:15 AM

[S06-06] **Investigating Japan Trench Outer Rise Structure off Sanriku and Miyagi Using Multichannel Seismic Reflection Survey***Ehsan Jamali Hondori¹, Yue Sun¹, Hyun-Woo Youn¹, Katsura Kameo¹, Masanari Ashida¹, Juichiro Ashi¹, Jin-Oh Park¹, Tomoko Hanyu², Ayanori Misawa³, Gou Fujie⁴, Seishiro Furuyama⁵, Mayu Ogawa⁵, Keita

Suzuki⁶, Akie Suzuki⁶, Waka Komatsu⁶ (1. Univ. of Tokyo, 2. Kobe Univ., 3. Geological Survey of Japan, 4. JAMSTEC, 5. Tokyo Univ. of Marine Science and Tech., 6. Nippon Marine Enterprises)

11:15 AM - 11:30 AM

[S06-07] Faults mapping of outer rise earthquakes off the Japan Trench

*Shuichi Kodaira¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹ (1. Research Institute of Marine Geodynamics, JAMSTEC)

11:30 AM - 11:45 AM

[S06-08] Seafloor sediment thickness below S-net observatories revealed from PS conversion wave at the sedimentary base

*Ryosuke Azuma¹, Ryota Takagi¹, Genti Toyokuni¹, Takashi Nakayama¹, Syuichi Suzuki¹, Makiko Sato¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

11:45 AM - 12:00 PM

[S06-09] **P and S wave tomography of the NE Japan forearc region using S-net data**

*Genti Toyokuni¹, Dapeng Zhao¹, Naoki Uchida¹, Takashi Nakayama¹ (1. RCPEVE, Tohoku University)

12:00 PM - 12:15 PM

Room B | General session | S06. Crustal Structure

[S06]PM-1

chairperson:Tatsuya Ishiyama(Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Takashi Tonegawa(JAMSTEC), Masanao Komatsu(Okayama University)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S06-10] Receiver function imaging of the subducting Pacific plate beneath NE Japan using offshore and on land seismic arrays

*HyeJeong Kim¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Takeshi Akuhara¹, Masanao Shinohara¹, Ryota Takagi² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-11] Crustal reflector and seismicity in Iwaki area

*Takashi Iidaka¹, Shinichi Sakai¹, Toshihiro Igarashi¹, Kazushige Obara¹, Aitaro Kato¹, Tetsuya Takeda², Shigeki Nakagawa¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:45 PM - 2:00 PM

[S06-12] Heterogeneous crustal structure offshore of the Ibaraki prefecture along the Japan Trench

*Kimihiro Mochizuki¹, Tomoaki Yamada¹, Masanao Shinohara¹, Ryota Hino², Ryosuke Azuma², Yoshihiro Ito³, Yoshio Murai⁴, Kenji Uehira⁵, Toshinori Sato⁶ (1. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 4. Faculty of Science, Hokkaido Univ., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 6. Graduate School of Science, Chiba Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM

[S06-13] Seismic Source Fault Model for Kinki Region Based on Geologic and Geophysical Data, Southwest Japan

*Tatsuya Ishiyama¹, Hiroshi Sato¹, Naoko Kato¹, Makoto Matsubara², Tomoko Elizabeth Yano², Susumu Abe³, Masanori Higashinaka³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. JGI, Inc.)

2:15 PM - 2:30 PM

[S06-14] The seismological structure about fault zone extending to the lower crust in the northern Kinki district, southwestern Japan

*Shinya Katoh¹, Yoshihisa Iio², Takuo Shibutani², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (1. Graduate School of Science, Kyoto University., 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.)

2:30 PM - 2:45 PM

[S06-15] Detailed seismic velocity structure in focal area of the 2016 Central Tottori Earthquake estimated using dense aftershock observation data

*Hiroo Tsuda¹, Yoshihisa Iio², Satoshi Matsumoto³, Shinichi Sakai⁴ (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM

Room B | General session | S06. Crustal Structure

[S06]PM-2

chairperson:Tatsuya Ishiyama(Earthquake Research Institute, the

University of Tokyo), Takashi Tonegawa(JAMSTEC), Masanao Komatsu(Okayama University)
 3:15 PM - 5:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

- [S06-16] Feasibility study on the waveform inversion to the OBS wide-angle seismic data
 *Gou Fujie¹, Takeshi Sato², Kazuya Shiraishi¹, Shuichi Kodaira¹, Eiichi Asakawa³, Nibe Takao⁴ (1. JAMSTEC, 2. Sapporo Regional Volcanic Observation and Warning Center, JMA, 3. JGI, inc., 4. JAPEX)
 3:15 PM - 3:30 PM
- [S06-17] Seismic velocity structure monitoring of the Nankai accretionary prism from ambient noise correlations during Chikyu drilling
 *Takashi Tonegawa¹, Toshinori Kimura¹, Kazuya Shiraishi¹, Eiichi Araki¹, Masataka Kinoshita², Yoshinori Sanada¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo)
 3:30 PM - 3:45 PM
- [S06-18] Underthrust turbidite facies affecting variation in interplate coupling along the Nankai subduction zone
 *Jin-Oh Park¹, Tetsuro Tsuru² (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology)
 3:45 PM - 4:00 PM
- [S06-19] Relationship between three-dimensional detailed crustal structures and very low frequency earthquakes in the Nankai trough off Kumano
 *Kazuya Shiraishi¹, Yasuhiro Yamada¹, Masaru Nakano¹, Masataka Kinoshita², Gaku Kimura³ (1. JAMSTEC, 2. ERI, University of Tokyo, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology)
 4:00 PM - 4:15 PM
- [S06-20] **Lithium isotope detects slab-derived fluids in spring water from the Median Tectonic Line fault zone in Shikoku, Japan**
 *Yoshiro Nishio¹, Satoshi Tonai¹, Yu Inokuchi¹, Emika Nakamura¹ (1. Kochi Univ.)
 4:15 PM - 4:30 PM
- [S06-21] **The velocity structure beneath the Aira caldera, deduced from the seismic exploration (4)**
 *Hiroki Miyamachi¹, Reji Kobayashi¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuuichiro Hirano¹, Takeshi Kubo¹, Naohiro Unno¹,

- Takeshi Matsushima², Kazuya Uchida², Rintaro Miyamachi², Hiroshi Katai³, Takuo Shibutani³, Tsutomu Miura³, Jun Nakagawa³, Itaru Yanada³, Takeshi Tameguri³, Kosei Takishita³, Kazuho Nakai³, Yusuke Yamashita³, Yuta Maeda⁴, Shinichirou Horikawa⁴, Kenjiro Mitsuhiro⁴, Takashi Okuda⁴, Shuhei Tsuji⁴, Naoki Sogawa⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Eiji Kurashima⁶, Tomoaki Yamada⁶, Miwako Ando⁶, Shinichi Tanaka⁶, Satoshi Ikezawa⁶, Toshinori Sato⁷, Mare Yamamoto⁸, Satoshi Hirahara⁸, Takashi Nakayama⁸, Ryusuke Azuma⁸, Shuichi Suzuki⁸, Tomoki Tsutsui⁹, Ryuichi Takei⁹, Yuya Tada⁹, Hiroaki Takahashi¹⁰, Hiroshi Aoyama¹⁰, Mako Ohzono¹⁰, Takahiro Shiina¹⁰, Masamitsu Takada¹⁰, Masayoshi Ichianagi¹⁰, Teruhiro Yamaguchi¹⁰, Chihiro Ito¹⁰, Yuki Susukida¹⁰, Yoshio Murai¹⁰, Tatsuya Nakagaki¹⁰ (1. Kagoshima University, 2. Kyushu University, 3. Kyoto University, 4. Nagoya University, 5. TUMSAT, 6. University of Tokyo, 7. Chiba University, 8. Tohoku University, 9. Akita University, 10. Hokkaido University)
 4:30 PM - 4:45 PM
- [S06-22] P- and S-wave attenuation structures in the Ryukyu Arc, Japan
 *Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹ (1. Okayama University)
 4:45 PM - 5:00 PM

Wed. Sep 18, 2019

ROOM B

Room B | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]AM-1

chairperson:Takuji Yamada(Ibaraki University), Nana Yoshimitsu(University of Tokyo)

9:15 AM - 10:30 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S08-18] Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata¹, Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹, Satoshi Ide² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

[S08-19] Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana¹, Masatoshi Miyazawa², James Jiro Mori² (1. Graduate School Science Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

9:30 AM - 9:45 AM

[S08-20] Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method

*Nana Yoshimitsu¹, Takuto Maeda², Tomonari Sei³ (1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo)

9:45 AM - 10:00 AM

[S08-21] Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada¹, Meitong Duan¹, Jun Kawahara¹ (1. Ibaraki University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S08-22] Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan)

10:15 AM - 10:30 AM

Room B | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]AM-2

chairperson:Toshiko Terakawa(Nagoya University), Keisuke Yoshida(Tohoku University)

10:45 AM - 12:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S08-23] Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake

*Keisuke Yoshida¹, Tatsuhiko Saito², Taka'aki Taira³, Kentaro Emoto¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley)

10:45 AM - 11:00 AM

[S08-24] CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari¹, Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹, Taro Okamoto², Takeshi Nakamura³ (1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-25] Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake

*Yoshihisa Iio¹, Hiroshi Katao¹, Kazuhide Tomisaka¹, Masayo Sawada¹, Takuo Shibutani¹, Airi Nagaoka¹, Jun Nakagawa¹, Shukei Ohyanagi¹, Shota Hara¹, Mitsu Sakaguchi¹, Abuyama Supporters¹, Satoshi Matsumoto², Takeshi Matsushima², Megumi Kamizono², Shin-ichi Sakai³, Masataka Masuda³, Shin-ichi Tanaka³, Yoshinari Hayashi⁴ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University)

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-26] A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa¹, Mitsuhiro Matsu'ura², Akemi Noda³ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED)

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-27] Metrics for Aftershock Generation Based on the

Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura¹, Toshiko Terakawa², Akemi Noda³ (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:45 AM - 12:00 PM

Room B | General session | S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

[S12]PM-1

chairperson: Muneyoshi Furumoto (Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura (NIED)

2:30 PM - 3:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S12-01] Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells - Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura¹, Weiren Lin², Takatoshi Ito³, Akio Funato⁴ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute)

2:30 PM - 2:45 PM

[S12-02] Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke¹, Tetsuro Hirono¹, Shunya Kaneki² (1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University)

2:45 PM - 3:00 PM

[S12-03] Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura¹, Tetsuro Hirono¹ (1. Osaka University)

3:00 PM - 3:15 PM

Room B | General session | S11. Various Phenomena Associated with Earthquakes

[S11]PM-1

chairperson: Muneyoshi Furumoto (Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura (NIED)

3:15 PM - 4:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S11-01] What are Possibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara¹ (1. Geosystem Research Institute)

3:15 PM - 3:30 PM

[S11-02] Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki¹, Ihsan Naufal Muafiry² (1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University, 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University)

3:30 PM - 3:45 PM

[S11-03] Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto¹, Osamu Murakami¹, Yasuhiro Asai¹ (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

3:45 PM - 4:00 PM

[S11-04] Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto¹, Tsuneaki Yamabe¹, Shigeki Sugiura², Hitoshi Kondo² (1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.)

4:00 PM - 4:15 PM

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

[S09]AM-1

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), Koichiro Obana(JAMSTEC)

Mon. Sep 16, 2019 9:30 AM - 10:30 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-01] Derivation of probability density function for interval maximum amplitude of continuous seismogram

*Kaoru SAWAZAKI¹ (1. National Research institute for Earth Science and Disaster Resilience)
9:30 AM - 9:45 AM

[S09-02] Focal mechanisms of aftershocks and stress field in the focal area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

*Yuki Susukida¹, Kei Katsumata¹, Masayoshi Ichiyanagi¹, Mako Ohzono¹, Hiroshi Aoyama¹, Ryo Tanaka¹, Masamitsu Takada¹, Teruhiro Yamaguchi¹, Kazumi Okada¹, Hiroaki Takahashi¹, Shin'ichi Sakai², Satoshi Matsumoto³, Tomomi Okada⁴, Toru Matsuzawa⁴, Shuichiro Hirano⁵, Toshiko Terakawa⁶, Shin'ichiro Horikawa⁶, Masahiro Kosuga⁷, Hiroshi Katao⁸, Yoshihisa Iio⁸, Airi Nagaoka⁸, Noriko Tsumura⁹, Tomotake Ueno¹⁰, the Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 4. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, Sendai, Japan, 5. Nansei-Toku Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Kagoshima, Japan, 6. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan, 7. Earthquake and Volcano Observatory, Hirosaki University, Hirosaki, Japan, 8. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan, 9. Department of Earth Science, Faculty of Science, Chiba University, Chiba, Japan, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Tsukuba, Japan)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-03] Seismicity in the Japan Trench outer-rise region off Miyagi based on OBS observations

*Koichiro Obana¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Gou Fujie¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC)

10:00 AM - 10:15 AM

[S09-04] Improvements of seismic activity model for probabilistic seismic hazard assessment

*Nobuyuki Morikawa¹, Jun'ichi Miyakoshi², Hiroyuki Fujiwara¹ (1. NIED, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.)

10:15 AM - 10:30 AM

Derivation of probability density function for interval maximum amplitude of continuous seismogram

*Kaoru SAWAZAKI¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

本研究の目的

大地震の直後には余震が多発するため、地震計記録上で波形が互いに重なり合い、P波やS波を読み取り震源決定を行うことが困難となる。このような複雑な地震計記録から地震活動の統計的特徴を抽出する方法として、最近、地震計記録上で一定時間Tごとの区間最大振幅（Interval Maximum Amplitude, IMA）を読み取り、その頻度分布と推移を調べる方法が提案された（Sawazaki, 2019, SSA）。IMAは（非定常）Frechet分布（Non-stationary Frechet Distribution, NFD）と呼ばれる極値分布の一種にしたがうことが経験的に知られており、NFDを用いてIMAの将来予測を行う試みもなされている。しかし、IMAがなぜNFDにしたがうかの理論的背景と、NFDを規定するパラメータが地震学的にどのような意味を持つかについては、綿密な考察がなされていない。今回、Gutenberg-Richter（G-R）則、大森・宇津則、マグニチュードとエネルギー輻射量との関係、エネルギー輻射量と最大振幅との関係などを組み合わせて、IMAがNFDにしたがうことを理論的に導き、NFDを規定するパラメータの地震学的な意味を明らかにしたので、報告する。

理論的導出

G-R則と大森・宇津則から、本震からの経過時間 $t \sim t+dt$, マグニチュード $M \sim M+dM$ の範囲で発生する地震の数 n は

$$n(t,M)=Kt^{-p}10^{-bM}dtdM \quad (1)$$

と表される。ただし大森・宇津式の c 値をここでは0とみなす。また、地震波エネルギー W と M との間に

$$\log W = \alpha + \beta M \quad (2)$$

エネルギー放出時間（震源継続時間） τ と M との間に

$$\log \tau = \delta + \gamma M \quad (3)$$

の線形関係を仮定する。さらに、震源距離 r における地震動の最大振幅 x が

$$x = CR(S/W/\tau)^{1/2}r^{-d}\exp(-Q^{-1}\omega r/V) \quad (4)$$

と記述されると仮定する。ここで R 、 S 、 d 、 Q^{-1} 、 ω 、 V はそれぞれ震源輻射特性、サイト増幅率、幾何減衰の指数、内部減衰パラメータ、角周波数、およびS波速度である。 C は比例定数である。以上の式を組み合わせると、 $t \sim t+dt$ 、 $x \sim x+dx$ の範囲で発生する最大振幅の数 n は

$$n(t,x)=At^{-p}x^{-m-1}dtdx \quad (5)$$

と表される。ここで

$$A=mb^{-1}KC^mR^mS^m10^{m(\alpha-\delta)/2}r^{-md}\exp(-mQ^{-1}\omega r/V)/\ln 10 \quad (6)$$

$$m=2b/(\beta-\gamma) \quad (7)$$

である。最大振幅の規模別頻度分布を支配するパラメータ m は、 b 、 β 、 γ の組み合わせで記述される。最大振幅の発生数を支配するパラメータ A は、地震活動（ K 、 b ）、地震波のエネルギー輻射（ α 、 β 、 δ 、 γ ）、エネルギー伝播（ r 、 R 、 d 、 Q^{-1} ）、サイト特性（ S ）に関わる各パラメータの組み合わせで記述される。時間減衰を表すパラメータ（ p ）は、大森・宇津式のパラメータと同じである。

極値統計理論によれば、べき乗則にしたがい減衰する確率分布（5式）の極値分布はFrechet分布となる。（5式）から、経過時間 $t \sim t+T$ の間に発生する区間最大振幅 z の累積確率分布 G が

$$G(z,t)=\exp(-ATm^{-1}z^{-m}t^{-p}) \quad (8)$$

と導かれる。（8）式は（非定常）Frechet分布と同じ関数形であり、 A 、 m 、 p の3個の独立なパラメータで記述される。確率密度関数 g は

$$g(z,t)=\partial G(z,t)/\partial z=ATt^{-p}\exp(-ATm^{-1}z^{-m}t^{-p})z^{-m-1} \quad (9)$$

と導かれる。

以上の導出は、地震発生領域の広がりか震源距離と比べて十分狭く（したがって r を固定値とみなせる）、かつ2次余震の影響を考慮しない場合に成り立つ。ただし、地震発生領域の広がりか無視できない場合でも、全ての場所か本震-余震系列が同じ時間経過をたどり、かつ m を場所によらないパラメータとみなせる場合、(8)式と同様の関数形を導くことができる。

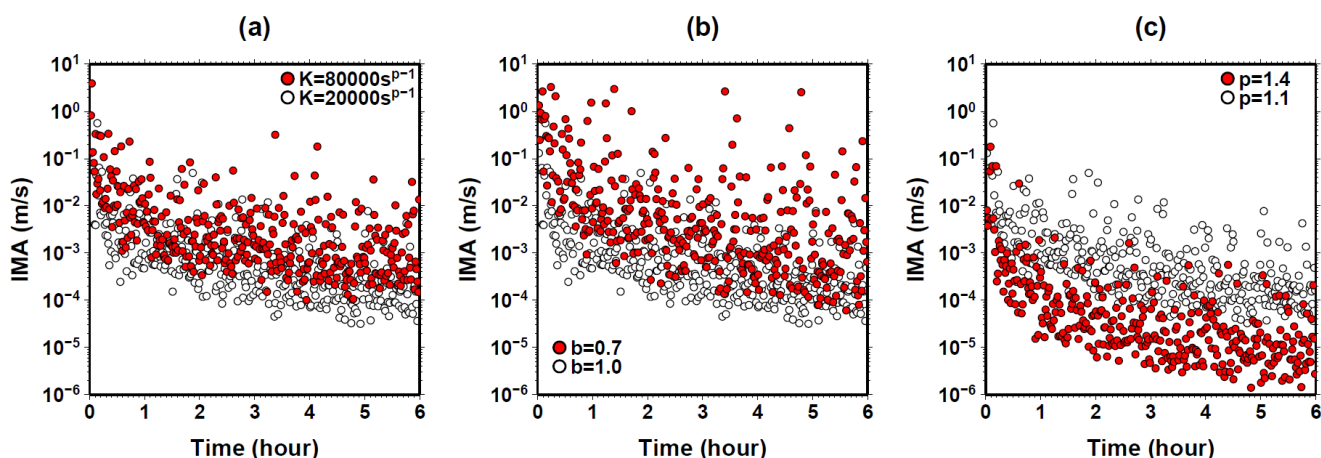
数値実験

乱数を用いて、マグニチュードと発生時刻が(1)式に示す確率分布にしたがう余震を多数生成し、(2)~(4)式を用いて M を x に変換し、 $T=60s$ の場合のIMAを計算した結果を図に示す。各図中では、 K （ A のみに影響。図a）、 b （ A と m に影響。図b）、 p （図c）の各パラメータを変化させた場合の比較を白丸と赤丸で示している。 K を大きくする（ A のみを大きくする）場合、IMAはどの経過時間においても統計的に同じ割合で増加する。 b を小さく（ m を小さくし、 A も変化）する場合、IMAが全体的に増加するだけではなく、IMAがとる値の範囲が広がる。 p を大きくするとIMAの時間減衰が早くなる。

まとめと展望

以上のように、マグニチュード、エネルギー輻射量、エネルギー放出時間、および最大振幅の間の関係式から、いくつかの仮定の下でNFDを導出し、NFDを記述する3個のパラメータ A 、 p 、 m を、地震学で用いられる物理量の組み合わせとして表現することができた。これら3個のパラメータは、観測されたIMAに(9)式をあてはめることで、大地震発生後数時間以内に観測点ごとに推定可能である。本研究で示した理論的根拠に基づき、連続地震動記録の解析を通じて、カタログを使わずに余震活動の特徴を早期に把握・予測できるようになることが期待される。

謝辞：本研究は科研費・若手研究B「連続地震波形記録を用いた準リアルタイム余震活動予測手法の開発」（課題番号17K14385）からの支援を受けています。



図：数値実験により生成したIMAの推移。使用したパラメータのデフォルト値は、 $\alpha=4.8$ 、 $\beta=2.5$ 、 $\delta=-2.3$ 、 $\gamma=0.5$ 、 $d=1.0$ 、 $C=10^{-4}(\text{J/s})^{-1/2}\text{m}^{1+d}/\text{s}$ 、 $Q^{-1}=0.002$ 、 $S=1.0$ 、 $R=1.0$ 、 $V=3.5\text{km/s}$ 、 $\omega=2\pi \times 5\text{ Hz}$ 、 $r=20\text{km}$ 、 $K=20000\text{s}^{p-1}$ 、 $b=1.0$ 、 $p=1.1$ 。 K 、 b 、 p を変化させた場合の値は図a、b、cにそれぞれ記載のとおり。

Focal mechanisms of aftershocks and stress field in the focal area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

*Yuki Susukida¹, Kei Katsumata¹, Masayoshi Ichiyanagi¹, Mako Ohzono¹, Hiroshi Aoyama¹, Ryo Tanaka¹, Masamitsu Takada¹, Teruhiro Yamaguchi¹, Kazumi Okada¹, Hiroaki Takahashi¹, Shin'ichi Sakai², Satoshi Matsumoto³, Tomomi Okada⁴, Toru Matsuzawa⁴, Shuichiro Hirano⁵, Toshiko Terakawa⁶, Shin'ichiro Horikawa⁶, Masahiro Kosuga⁷, Hiroshi Katao⁸, Yoshihisa Iio⁸, Airi Nagaoka⁸, Noriko Tsumura⁹, Tomotake Ueno¹⁰, the Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 4. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, Sendai, Japan, 5. Nansei-Toku Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Kagoshima, Japan, 6. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan, 7. Earthquake and Volcano Observatory, Hirosaki University, Hirosaki, Japan, 8. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan, 9. Department of Earth Science, Faculty of Science, Chiba University, Chiba, Japan, 10. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Tsukuba, Japan

(1) はじめに

2018年9月6日、北海道胆振東部地震 (M_{JMA} 6.7) (以下、胆振地震と呼ぶ) が発生した。Katsumata et al. (Earth, Planets and Space, 2019) によると、本震の特徴として以下の2つが挙げられる。第一に、本震の震源の深さは30 km以深であり、日本の他地域の内陸地震が20 km以浅であるのに比べて深い。第二に、P波初動の押し引きから決定した震源メカニズム解は横ずれ断層型を示し、逆断層型を示すCMT解と一致しない。Katsumata et al. (2019) は本震直後数時間の余震が、北部・中部・南部と3つに大別される点に着目し、本震の破壊は中部の小さい横ずれ断層で始まり、その後、北部と南部の大きな逆断層が滑りを起こしたというモデルを提唱した。

本研究では、胆振地震の余震の震源メカニズム解を多数決定し、応力インバージョン法により震源域の応力場を推定した。胆振地震の震源域付近は、定常的な地震活動が非常に低いため、震源メカニズム解を用いた応力場の推定は困難であった場所である。また、得られた応力場の空間分布とKatsumata et al. (2019) が提唱した断層モデルとの比較を行った。

(2) データと解析

胆振地震発生直後から10月31日まで、北海道大学・東京大学地震研究所・九州大学・東北大学・鹿児島大学・名古屋大学・弘前大学・京都大学防災研究所・千葉大学・防災科学技術研究所が合同で臨時余震観測を実施した。本研究では、この臨時観測点と定常観測点(北海道大学・気象庁・Hi-net)のP波初動の押し引きを使用して震源メカニズム解を決定した。振幅値は使用していない。震源メカニズム解の推定には、HASH (Hardebeck and Shearer, 2004) を用いた。その際、Katsumata et al. (2019) の一次元地震波速度構造を仮定した。HASHで決定した震源メカニズム解の内、精度の良い、Quality A, B, C の解を選び、Hardebeck and Michael (2006) が開発した応力インバージョン法を適用した。

(3) 結果

余震の震源メカニズム解は全部で802個決定され、それらのMは M_w 1.0から M_w 5.7であった。その内、Quality Aが241個、Quality Bが266個、Quality Cが155個だった。応力インバージョンによると、震源域での最大主応力軸の向きは東北東-西西南西であり、本震のCMT解のP軸の向きと調和的である。最大主応力軸の向きは、震源域内において空間的にほとんど変化していないが、応力比には空間的な変化が見られた。震源域の中部では、応力比が0.5に近く、横ずれ断層型の応力場を示唆する。また、震源域の南部では、応力比が0.7に近

く、やや逆断層型の応力場を示唆する。

謝辞

本研究は、2018年胆振東部地震余震観測、防災科研の常時観測点および気象庁の常時観測点から得られたデータを用いて解析を行っております。2018年胆振東部地震余震観測グループの皆様、防災科研、気象庁などの基盤的地震観測に携わっている方々に心より感謝申し上げます。

Seismicity in the Japan Trench outer-rise region off Miyagi based on OBS observations

*Koichiro Obana¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Gou Fujie¹, Yasuyuki Nakamura¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC

2011年3月に発生した東北沖地震以降、日本海溝の海溝軸海側アウターライズ域では、太平洋プレート内部で地震が活発に発生している。宮城県沖のアウターライズ域においては、2011年4月から2014年4月にかけて、海底地震計（OBS）を用いた地震観測が繰り返し実施されてきており、深さ40km付近まで正断層型の地震が発生していることが示されている(Obana et al., 2012)。これらの観測では、従来からの多くの調査と同様にガラス製耐圧容器を用いたOBSが使用されており、観測点のほとんどが水深6000mより浅い場所に限られていた。水深6000mを超える海溝軸に設置可能な超深海型OBSの実用化は当時から進められていたが、海溝軸における観測は極めて限定的に行われただけであった。一方、2015年以降に行われた日本海溝北部（三陸沖）および南部（福島・茨城沖）の海溝軸からアウターライズ域における観測では、実用化された超深海型OBSを用いた観測が実施され、アウターライズ域における地震活動が明らかになってきている。例えば、日本海溝北部三陸沖では、1933年昭和三陸地震に関連していると思われる地震活動が水深7000mに達する海溝軸近傍で発生していることが捉えられており(Obana et al., 2018)、超深海型OBSを用いた観測の重要性が示されている。そこで、2017年9月から2018年7月にかけて、宮城県沖日本海溝の海溝軸周辺ならびに海溝海側において、超深海型OBSを含む計45台のOBSを用いた地震観測を再び実施した。この観測では、海溝軸を挟んだ35点において、2017年9月から2018年2月（一部は3月）まで観測を行なっている。また2018年3月から7月にかけては海溝軸の東約60kmから100kmの範囲に10点のOBSを設置して観測を実施した。

解析では、OBSによる連続記録からイベントを検出したのち、手動で検測を行ない、1次元構造で震源決定を行なった。震源決定に使用した速度構造は、過去に観測領域周辺で行われた研究を参考にしている。堆積層による走時の遅れに関しては、観測点ごとに基盤上面で生じたPS変換波と直達P波の到着時間差から観測点補正値を推定して補正した。また、P波初動極性を用いて震源メカニズムを推定した。

得られた震源分布からは、2011年3月11日の東北沖地震の40分後に海溝海側で発生したMw7.6の正断層地震の震源域周辺の余震活動をはじめ、2011年東北地方太平洋沖地震後に活発化した太平洋プレート内部の地震活動が継続していることが示されている。震源メカニズムも、2014年までの観測の結果と同様に、アウターライズ域において深さ40km付近まで正断層型のメカニズムが卓越しており、時間的に大きな変化は見られない。一方、今回の観測期間中には、宮城県沖を中心としたアウターライズ域において、M6クラスの地震が複数発生している（2017年9月21日M6.3、10月6日M6.3、11月13日M6.0）。特に10月6日の地震は震源のごく近傍にOBSが設置されており、本震とそれに伴う余震活動が詳細に捉えられている。この地震は、正断層で形成されたホルスト・グラベン構造が不連続になっている部分で発生しており、余震は複数の傾斜方向の異なる断層面にそって分布している。ホルスト・グラベン構造は日本海溝のアウターライズ域に広く分布しているが、必ずしも連続性はよくなく、細かくセグメント化されている。一方、1933年昭和三陸地震のような大規模なアウターライズ地震の際には、複数の断層が連動して破壊する可能性が指摘されている(Uchida et al., 2016, Obana et al., 2018)。今回の観測結果は、複数の正断層が連動して活動する様子を捉えたものと考えられる。

Improvements of seismic activity model for probabilistic seismic hazard assessment

*Nobuyuki Morikawa¹, Jun'ichi Miyakoshi², Hiroyuki Fujiwara¹

1. NIED, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

1. はじめに

地震調査研究推進本部による全国地震動予測地図のうち、確率論的地震動予測地図では、日本周辺で発生する被害を及ぼしうる全ての地震を考慮するため、震源断層をあらかじめ特定しにくい地震がモデル化されている。震源断層をあらかじめ特定しにくい地震は、過去に発生した地震のデータ（カタログ）に基づく、地震の発生場所、規模、頻度をモデル化しており、東北地方太平洋沖地震を受けて、陸側プレートの浅い地震への大領域の導入や、最大規模の見直しなどのモデル改良が行われた。しかしながら、東北地方太平洋沖地震の活発な余震活動をどのように考慮するかについて課題として残されていた。また、平成30年北海道胆振東部地震など最近発生した地震により、モデル化が不十分な部分も明らかとなった。このような状況を踏まえて、震源断層をあらかじめ特定しにくい地震のモデル改良に向けた検討を行った。

2. 東北地方太平洋沖地震後の地震カタログの取り込み

東北地方太平洋沖地震の余震活動は年々減衰してきているものの、2019年3月時点では本震発生前の1.5倍程度の地震が発生している（地震調査委員会、2019）。そこで、当該震源域において本震後に発生した地震活動の減衰を改良大森公式にあてはめ、地震発生前の地震活動レベルまで減衰した時点からは定常な活動となるモデルを仮定する。

3. 領域区分の追加と見直し

震源断層をあらかじめ特定しにくい地震では、海溝型地震の長期評価や地震地体構造、震央分布等に基づいて区分された領域を単位として評価する方法と、機械的に区分した東西南北0.1度のメッシュを単位として評価する方法を併用している。このうち、前者の方法における領域区分について、最近の地震による知見と「もれ」のない地震活動モデルの構築という観点から行う。

○海域における陸側プレートの浅い地震（地殻内地震）

2016年11月22日に発生した福島県沖の地震（M7.4）は、陸側プレートの地殻内地震と評価されている（地震調査委員会、2016）が、その震央位置は、現行の領域区分の外側ですべて海溝型地震とみなしていた。そこで、太平洋側の海域に新たな地殻内地震の領域区分を追加する。このとき、海域の断層および規模の大きな地震（M7程度）の地震を包含できるように沈み込む海洋プレート上面深さ10km等深線まで領域として含むようにし、東北地方だけでなく、北海道、伊豆～小笠原諸島、南海トラフ、日向灘～南西諸島にかけての領域すべてを対象として設定する。一方、日本海側については海域の領域がすでに設定されているものの、文部科学省による「海域における断層情報総合評価プロジェクト」で示されている五島列島西方沖の断層は現行の領域区分外に位置している。そこで、九州～南西諸島の西側（東シナ海）の領域について、現行領域の西側に拡張する。

○南海トラフ以西の海溝（トラフ）軸外側

千島海溝から伊豆～小笠原海溝沿いについては、海溝軸外側の地震をすでにモデル化している一方で、南海トラフおよび南西諸島海溝の海溝（トラフ）軸外側については、踏まえて、これらについても新たな領域区分を設定する。

○平成30年北海道胆振東部地震を受けて

平成30年北海道胆振東部地震は深さ約40kmで発生した。当該地域においては、深さ25kmまでは地殻内地震としてモデル化されており、それよりも深い地震はすべて深さ100km程度のスラブ内地震としてモデル化されていた。一方で、隣接する浦河沖については、1982年浦河沖地震とその余震活動を踏まえて、深さ25km～45kmの地震活動を別途にモデル化していた。北海道胆振東部地震の震源域についても浦河沖地震と同

様のモデル化を行う。

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

[S09]AM-2

chairperson:Kazuyoshi Nanjo(University of Shizuoka), Kohei Nagata(MRI)

Mon. Sep 16, 2019 10:45 AM - 12:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-05] Seismicity prior to the July 2019 southern California *M*7.1 earthquake

*Kazuyoshi Z. Nanjo¹ (1. University of Shizuoka)

10:45 AM - 11:00 AM

[S09-06] Successively occurring large earthquakes in the world (2) -Successive occurrence and simultaneous occurrence of same class earthquakes-

*Tetsuo Hahsimoto¹, Takashi Yokota² (1. Meteorological Research Institute, 2. Aichi Institute of Technology)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-08] Temporal change in size distribution of the earthquakes around large earthquakes in the continental crust of Japan

*Kohei NAGATA¹ (1. Meteorological Research Institute)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-09] Variation of activity of felt aftershocks: An application of the modified Omori formula to aftershocks of the 2019 off Yamagata earthquake

*Kentaro Hattori, Ichiro Nakanishi¹ (1. Kyoto Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM

Seismicity prior to the July 2019 southern California *M*7.1 earthquake

*Kazuyoshi Z. Nanjo¹

1. University of Shizuoka

米国カリフォルニア州南部で、2019年7月4日にマグニチュード *M*6.4の地震が発生し、その翌日(5日)に、震央間距離にして約15 km離れた場所で、*M*7.1の地震が発生した。詳細に見ると、*M*6.4の地震発生後、北東-南西方向に走行を持つ地震活動と、その活動の北東端を含み、北西-南東方向に走行を持った地震活動が活発化している。そして、その北西端から*M*7.1の地震の破壊が開始した。

大地震が続発した例として、2016年熊本地震がある。2016年4月14日に日奈久断層の北部で*M*6.5の地震が起き、2日後(16日)に、隣接する布田川断層で*M*7.3の地震が発生した。*M*6.5の地震から*M*7.3の地震までに起きた地震活動を解析すると、布田川断層で*M*7.3の地震の前にプレスリップがあった可能性が示唆された(Nanjo & Yoshida, 2017)。この様に、大地震と大地震の間の活動の推移を把握することで、大地震が続発する特徴を捉えられる可能性があり、この知見は今後の地震発生予測の研究の基礎となる。

そこで本研究では、*M*6.4の地震発生以降、*M*7.1の地震までに発生した地震活動を解析した。用いる手法は、グーテンベルグ・リヒター則(GR則)の*b*値と、地震の集中度の時間変化を捉える ϕ 値(Lippiello et al., 2012)に基づく。地震の規模別頻度分布はGR則で近似でき、*b*値は一般に1に近い値をとる。*b*値が小さい場合、小さい地震に対して大きい地震が比較的多めであることを示す(*b*値が大きい時は、その逆)。岩石破壊実験から、*b*値と差応力に負の相関があることが知られており(Scholz, 1968)、また、いくつかの大地震の前にその破壊開始点付近で*b*値が低かった報告がある(e.g., Schorlemmer & Wiemer, 2005; Nanjo et al., 2012, 2016)。このことは、地震発生前に震源付近で応力が高かったことを示唆する。一方、 ϕ 値は、時間と共に地震が集中して発生する様になったか($\phi > 1$)、または、地震が空間的にばらつく様になったか($\phi < 1$)を評価する指標である。1980年代以降の南カリフォルニアのデータを ϕ 値で解析した結果、大地震(*M*6以上)の発生時刻に近づくとつれて、その震源付近で地震の集中が見られたという報告がある(Lippiello et al., 2012)。

*b*値の時空間分布から、地震活動の北西側で*M*7.1の地震発生前に低めの値(約*b*=0.7)だったことが分かった。また、同北西側の ϕ 値から、時間と共に、比較的大きめの地震(*M*3以上)が集中して発生する様になっていたことも分かった(最大値は ϕ =1.5)。このような結果は、他の地域の活動では見られなかった。以上から、北西側で、大きめの地震(*M*3以上)が集中する様になったことで、低い*b*値が観測されたと考える。従って、応力が高かった地域から、*M*7.1の地震の破壊が開始した可能性がある。

クーロン応力の計算によると、*M*6.4の地震の発生により、*M*7.1の震源付近では断層運動を促進する応力が高くなっており(Stein et al., 2019)、本研究の結果と矛盾しない。大地震が続発する特徴を捉えるためには、先発する大地震後の応力状態を推定することが重要であることを示している。

Successively occurring large earthquakes in the world (2) -Successive occurrence and simultaneous occurrence of same class earthquakes-

*Tetsuo Hahsimoto¹, Takashi Yokota²

1. Meteorological Research Institute, 2. Aichi Institute of Technology

南海トラフ地震の沿いの防災対応のための委員会が開催され、その際の資料となるべく、世界における大規模地震の続発性について、報告を行ってきた(橋本他, 2017など)。今回は、この委員会とはやや離れて、南海トラフの地震の特徴の一つである安政や昭和の地震のような同規模の地震の続発と宝永の地震のように東海と南海の連動のような現象が、世界の大規模地震の発生について、新たに改訂されたISC-GEM version5.1のデータ(1904-2014年)を用いて抽出することが出来るか検討を行った。

安政の東海と南海の地震等はdoubletといえるが、doubletの地震の研究は、Lay and Kanamori(1980)によるSolomon諸島の地震、Kagan and Jackson(1999)による世界の地震の解析など多数あるものの、その定義として、2つの地震のM差や時空間距離について固定的ではない。そこで、ここでは、doubletとして可能性のありそうな地震の組み合わせを比較的多く抽出するため、やや幅広にとるようにして、 $M \pm 0.3$ 、空間距離 $d \times 2$ ； $\log d = (0.5M - 1.8)$ (宇津の余震長径(1962)の2倍)、時間差11年として検索を行った。また、震源の深さは、カタログ初期の誤差も考慮し、150km以浅とし、M7.2以上の地震を対象とし、Mの小数第2位を四捨五入して、検索を行った。

先行地震に対する後続地震の関係が上記の条件に合ったものは、重複を許すようにして、252個が抽出された。その内、先行地震(図1の青×)と後続地震の両方が $M7.8 \leq M < 8.6$ の事例が39個あり、後続地震が3年以内に発生した事例(黄緑×)は13個、3日以内は5個(桃×)となり、ここでは、1707年宝永地震がM8.6とされているので、それより小さいが、やや規模の大きめの地震の続発性を図1に示した。M8.6以上の地震(赤×)の近傍で続発性を示す地震は、1957Aleutian地震、2005Sumatra地震、2011Tohoku地震の3事例にみられ

た。Aleutian地震の周りでは、1986年M7.95と1996年M7.88が抽出されているが、やや小ぶりな地震である。また、その隣接で1965RatsIsland地震が発生しており、その近傍では、1906年8月17日M8.3(なお、同日のチリのM8クラスの地震がISC-GEMには登録されていないようなので注意が必要)の地震や2014年M7.92の地震が発生しており、これらの地域では活動が活発である。Sumatra地震の近傍では、2012年の横ずれ断層の地震が抽出されているが、別物といってもいいと考える。Tohoku地震の近傍も1938年M7.95や1968年M8.2の地震が抽出されているが、それらが連動してTohoku地震になったわけではないので、別物と考える。結局、100年程度の計測器による地震観測からは、南海トラフの連動と同規模の地震の続発の関係を見出すことは、やはり無理があるようである。

そこで、MをM7.2から抽出して、doublet地震がよくみられるソロモン諸島周辺に着目したものを図2(発震機構はUSGS及びLay and Kanamori, 1980)に示す。よく知られている1971年、1974年、1975年(Lay and Kanamori, 1980)の地震が抽出されている。地震の規模から断層長を推定し、おおよその位置に震源断層を長方形(幅は意味がない)で図が重ならないように示した。1971年の地震と発生時間間隔、Mや破壊の順番が異なるが、1916年M7.96(+1920年M7.81)→1919年M8.15(赤枠)が同じようともいえるかもしれないし、やや無理があるが、1983+1992年→2000年(緑枠)がある。空間の位置精度の問題もあるが、同じようなアスペリティーが破壊されているように思える。また、1974年(橙枠)と1975年(茶枠)の一方で、1939年M7.82の地震の領域が破壊されているようにも見え、連動と同規模の続発性を示している事例かもしれない。その後に同様なものの繰り返し期待されるが、しかしながら、そのような現象は発生していない。

ISC-GEMを用いて、南海トラフの連動・同規模地震の続発性を探してみたが、同様なものは、なかなか見出すことが難しいように思われる。

謝辞：ISCのISC-GEM ver5.1を使わせていただいた。

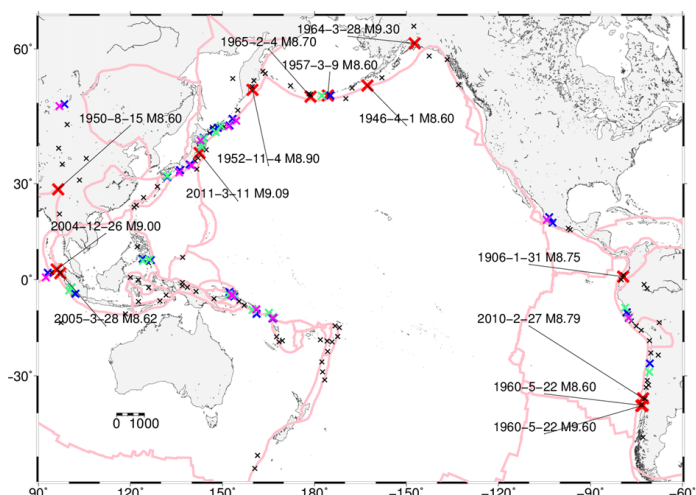


Fig.1 Greater than M8.6 earthquake and plots of candidates of Doublets

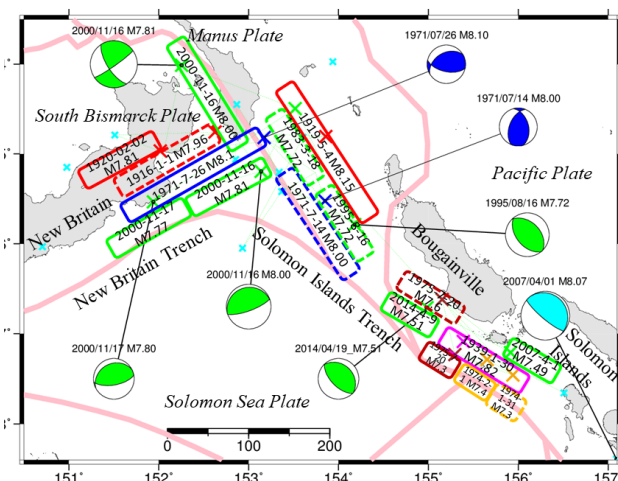


Fig.2 Solomon Islands Doublets

Temporal change in size distribution of the earthquakes around large earthquakes in the continental crust of Japan

*Kohei NAGATA¹

1. Meteorological Research Institute

平成28年（2016年）熊本地震以降、被害を伴うような規模の大きな地震が発生した後の、同程度もしくは更に大きな規模の地震に対する備えの重要性について、改めて認識が高まっている。このような大規模な地震発生後には、断層面近傍でGR則の b 値が有意に増加する傾向があることが指摘されており、その後の地震活動には、地震の発生頻度の時間変化だけではなく、規模別頻度分布の時間変化が影響する可能性が指摘されている[例えば Gulia et al., 2018, GRL]。そこで、このような局所的な規模別頻度分布の変化が生じることを前提に、大規模な地震発生後の震源周辺のやや広い空間スケールでの規模別頻度分布の変化の傾向を把握し、局所的な規模別頻度分布の変化との関係性を調べるための解析を試みる。

これまでに行った解析では、1997年10月以降、2017年までの気象庁一元化震源を用いて、2004年以降に日本の内陸地殻内で発生したM6.5以上の地震（最大M7.3）を対象に、震源周辺における深さ40km以浅の地震活動の規模別頻度分布の変化を調べた。規模別頻度分布の解析には様々な手法が提案されているが、今回は、規模別頻度分布の特徴の変化を調べるという観点から、ノンパラメトリックな手法 [Amorèse, 2007, BSSA]を用いて震源カタログが網羅できている地震のマグニチュードの下限 (M_c) を推定し、 M_c 以上の規模でGR則が成り立っていると仮定した場合の b 値を最尤法により推定するとともに、 b 値から推定される規模別頻度分布と観測された分布が異なるかどうかをKS検定により確認、また、GR則からの分布の逸脱の指標として提案されている η 値[宇津、1978, 地震2]を同時に推定した。これらの解析を、対象領域内のすべての規模の震源から抽出した一定数の連続する震源データに順次適用した。

対象地震が周囲の地震活動に影響を及ぼし得る空間スケールとして、地震規模 M との平均的な関係式[宇津、1961, 気象庁欧文彙報]を用いて推定した余震域の長径 L を基準とし、対象地震と震央距離が基準以下の震源を抽出し上記手法を適用した結果、対象地震の発生前に比べ、概して発生後の b 値が高くなっていることを確認した。変化の様相は対象地震により異なるが、概ね、対象地震発生直後から b 値が増加し始め、数か月から1年程度かけて一定の値に落ち着く傾向が見られる。このため b 値の比較には、対象地震発生前の中央値と、対象地震発生後ある程度変化が落ち着いた6ヶ月以降の中央値を用いた。 b 値の増加の程度は、大きいもので0.1程度であった。 M_c は規模の大きな地震の発生後に著しく増加し、一定の値に落ち着くまでにある程度の時間を要するが、この時間は上述の b 値の増加の時定数に比べると短い。 η 値は、対象地震発生前後で若干値が変化することがあるものの、概ね1.7~1.9程度の値で顕著な変化は見られていない。このことは、 M_c 以上の規模別頻度分布が概して上に凸の形状となっていることを示しており、上述の b 値の増加が M_c の低下に起因する変化ではないことを裏付けている。KS検定の結果、GR則とは有意に異なる規模別頻度分布が、特に対象地震発生直後に多く確認されるが、これらのデータを除いても、上記の結果は変わらない。

上記の結果は、GR則の b 値が広域的な応力場の差応力に対応した地域差を持ち、差応力が高いほど b 値が低い傾向を持つという先行研究の指摘 [Scholz, 2015, GRL]と調和的に見える。すなわち、地震に伴う震源域周辺での応力降下に対応して b 値が増加したとの解釈が可能であり、この場合、 b 値のやや長期的な遷移過程は、対象地震により解放された応力がその後の余震による応力の再配分により空間的に平滑化されながら新たな定常状態に落ち着いていく過程を観察したものという解釈が可能ではないかと考えている。 b 値の変化と応力変化の関係を確認するため、震源抽出の基準とする距離を $0.71L$, $0.5L$ として同様の解析を行ったところ、解析対象範囲を狭めるほど b 値の増加量が大きくなる場合もみられたが、対象地震前の規模別頻度分布を推定するための十分な震源データが得られる事例が少なく、明瞭な結果は得られていない。特に、2014年11月の長野県北部の地震（M6.7）に関しては、震央距離 $0.5L$ 以内の地震について解析すると、本震前後で b 値が低下するという

他とは逆の結果が得られる。これは、本震の震源付近の群発的な活動の影響で本震前のb値が大きく推定されるのに対し、本震後はそれ以外の活動が規模別頻度分布の大部分を占めることにより相対的に群発地震の影響が低下するためと考えられる。b値の時間変化の調査には、このような空間的な活動の分布の変化の影響等があるため困難を伴うことは既に指摘されている〔例えばWiemer et al., 2002, Adv. Geophys〕ところではあるが、上記の結果は、このような影響を含むとしても、規模の大きな地震に伴う地域的なb値の増加は考慮に値することを示唆している。

今後、解析対象地震を増やすとともに、対象領域を小領域に分割し、局所的な地震活動の変化が上述の結果とどのように関係しているかという点も含めて報告を行う予定である。

Variation of activity of felt aftershocks: An application of the modified Omori formula to aftershocks of the 2019 off Yamagata earthquake

*Kentaro Hattori, Ichiro Nakanishi¹

1. Kyoto Univ.

Dependence of activity of felt aftershocks (K value) with epicentral distance has been studied by fitting the modified Omori formula (Utsu, 1961) to the aftershock sequences of the off Southern Yamagata Prefecture earthquake of June 18, 2019 observed at eight seismological stations in Yamagata and Niigata prefectures. The aftershocks used in the analysis are limited to those whose epicenters are located off the coast of Yamagata prefecture or Kaetsu area of Niigata prefecture. The fitting of the modified Omori formula is made to the time sequences of aftershocks with seismic intensities greater than one at each of the eight stations. The aftershocks with seismic intensities greater than one are called felt aftershocks in the present study. Because the data set of aftershocks located by JMA is used, the fitting of the formula is also made to all the located felt aftershocks. The interval of two hours is adopted after several trial fitting of the formula to the data. Three intervals are obtained from the origin time of the main shock 22:22 of June 18 to 4:22 of the next day. The values of $p=1.3$ and $K=20$ are derived from fitting the formula to the data set of all the located felt aftershocks. The value of $c=0.1$ is assumed. The values of $p=1.3$ and $c=0.1$ are fixed and K value is determined from the aftershocks felt at each of eight stations. The results are summarized in Figures 1 and 2. Figure 1 shows the numbers of felt aftershocks at three time intervals for each of eight stations, the best fitting formula and the K value for each station. Result from the all the located felt aftershocks are also shown in Figure1. In Figure 2, the values of K obtained for eight stations are plotted as a function of epicentral distance. The K value plotted at epicenter (0 km) is obtained from the data set of all the located felt aftershocks. Figure 2 may show the decrease of the value of K with increasing epicentral distance.

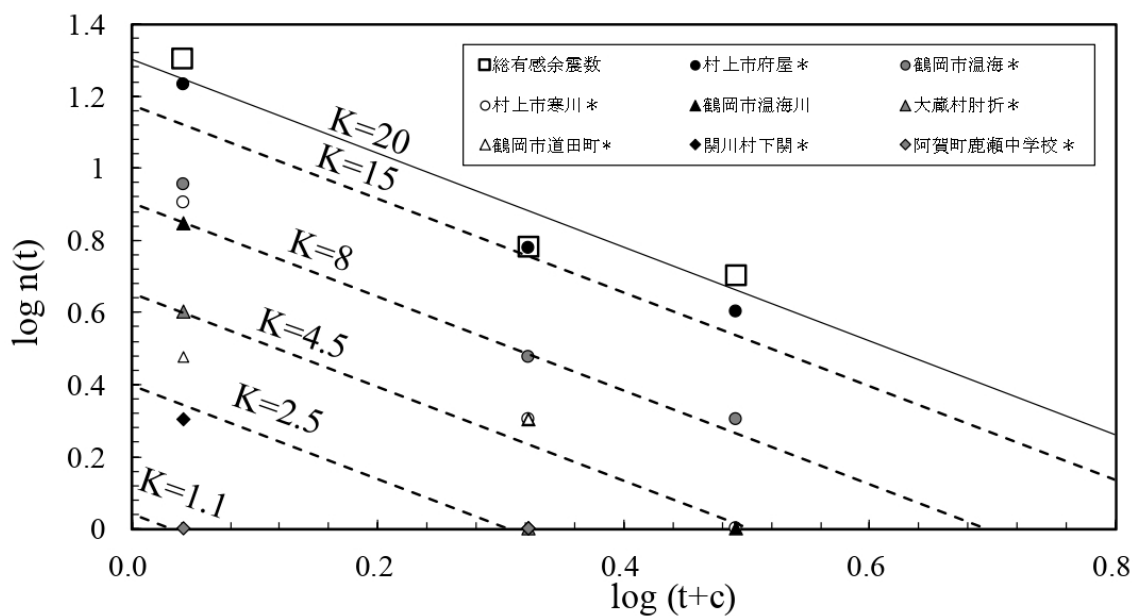


Fig.1 Frequency of the felt aftershocks for interval of 2 hours of the 2019 off Southern Yamagata Prefecture earthquake and lines with $p=1.3$, $c=0.1$, and the best values of K estimated for modified Omori formula (Utsu, 1961).

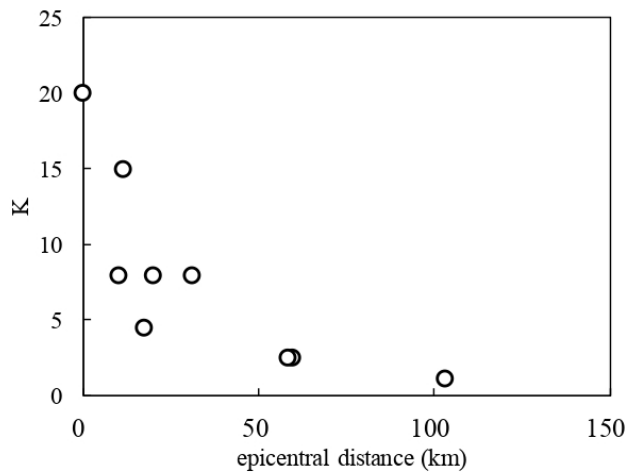


Fig.2 Relation between the value of K of the modified Omori formula and epicentral distances. The K value at 0 km is determined from all the located felt aftershocks.

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

[S09]PM-2

chairperson: Makoto Matsubara¹(NIED), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

Mon. Sep 16, 2019 2:45 PM - 3:45 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-10] Small repeating earthquake beneath the Tokai region

*Makoto Matsubara¹, Hiroshi Sato² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-11] Spatio-temporal distributions and activities of deep low-frequency earthquakes in volcanic regions all over Japan

*Ryo Kurihara¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Yusaku Tanaka¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-12] Low-frequency aftershocks of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake revisited

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

3:15 PM - 3:30 PM

[S09-13] Migration of microseismicity and subsequent aseismic adiabatic expansion after the termination of injection in Okuaizu Geothermal Field

*Kyosuke Okamoto¹, Li Yi², Hiroshi Asanuma¹, Takashi Okabe³, Yasuyuki Abe⁴, Masatoshi Tsuzuki⁵ (1. AIST, 2. Osaka University, 3. GERD, 4. OAG, 5. JOGMEC)

3:30 PM - 3:45 PM

Small repeating earthquake beneath the Tokai region

*Makoto Matsubara¹, Hiroshi Sato²

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

1. はじめに

西南日本では、フィリピン海プレートは南海トラフからユーラシアプレートの下に沈み込んでいる。このプレート境界では、巨大地震がこれまでも繰り返し発生しており、今後の発生も予測されている。東海地域と駿河トラフは、この巨大地震発生域の東端に位置する。これまでも、小固着域（アスペリティ）での小繰り返し地震からプレート境界でのすべり量が推定されてきた（例えばNadeau and Johnson, 1998; Igarashi et al., 2003, Uchida et al., 2003; Matsubara et al., 2005）。防災科学技術研究所（防災科研）は太平洋プレートやフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込むこの地域において1979～2003年に関東東海観測網（KT-net）を2000年以降は高感度地震観測網（Hi-net）を運用してきた。駿河トラフからのプレート境界におけるすべり量を推定するため、富士川河口断層帯周辺の東海地域において、小繰り返し地震を解析した。

2. データ・手法

東経137～139°、北緯34～36°の地域において防災科研のKT-netやHi-netにより1979年8月～2017年12月までマグニチュード（M）1.5以上の地震が152,333個の地震が検出された。ある地震に対して周囲0.1°（約10km）以内の地震の波形を相互相関係数の計算対象とした。防災科研Hi-netの観測点における上下動成分の1～8 Hzのバンドパスフィルターを適用した波形について、P波の到達の1秒前からS波の到達の5秒後までもしくは、S波の読み取りが無い場合はP波の到達の1秒前から40秒間の波形について相関係数を計算した。陸域に囲まれた領域も含めて、震央距離100 km以内の3観測点以上で0.95以上の相関係数を持つ波形が観測された地震の組み合わせを相似地震として抽出した（Matsubara et al. 2005）。

3. 結果

3,525個の地震からなる1,072グループの小繰り返し地震の組み合わせが得られた。その中から2年以上継続している小繰り返し地震は3,489個の地震からなる1,059グループであった。深さ15～25 kmのフィリピン海プレート上面境界で発生していると考えられる低角逆断層型の小繰り返し地震は藤枝市付近や森町付近および山梨県南部で発生していた。このうち、森町付近の発震機構解はトラフから離れているが深さ17 km付近でありプレート境界とした場合の沈み込む方向が西南西の低角逆断層であることから、この小繰り返し地震はプレート境界ではなく内陸の微小地震と考えられる。

4. 議論

プレート境界付近で発生している小繰り返し地震について、Nadeau and Johnson（1997）の関係式を用いてマグニチュードからすべり速度を推定した。それぞれ藤枝市付近では0.2 cm/年、山梨県南部では1.4 cm/年で

あった。Seno (1993) によればこの領域のすべり速度は4.0 cm/年であるが、小繰り返し地震から推定されるすべり速度は大幅に下回っていることが分かった。

Igarashi, T., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2249, doi:10.1029/2002JB001920.

Matsubara, M., Y. Yagi and K. Obara, 2005, Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data, *Geophysical Research Letters*, 32, L08316, doi:10.1029/2004GL022310.

Nadeau, R. M., and L. R. Johnson, 1998, Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 790-814.

Seno, T., 1993, A Model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, 98, 17,941-17,948.

Uchida, N., T. Matsuzawa, T. Igarashi, and A. Hasegawa, 2003, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 30(15), 1801, doi:10.1029/2003GL017452.

Spatio-temporal distributions and activities of deep low-frequency earthquakes in volcanic regions all over Japan

*Ryo Kurihara¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Yusaku Tanaka¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

火山性の深部低周波地震は、同規模の通常の地震に比べて卓越周波数が低いという特徴を有し、気象庁のカタログによると主に火山地域の深さ10–50 kmで発生する。その多くは震源深さ分布の中央値が約20–30 kmになる（小菅・他, 2017）ため、モホ面との関係が指摘されている。しかし、岩手山では深さ10 km付近と35 km付近での2つの深さで集中して発生している（Nakamichi et al., 2003）など、深さ分布には火山毎に違いがある。地下の地震波速度との比較研究では、低速度域の内部またはその周辺に深部低周波地震の震源が分布することから、火山性流体の移動が深部低周波地震の発生に関与していると考えられている（e.g. Hasegawa et al., 2005）。本研究では、深部低周波地震の深さ分布をより正確に求め、その発生メカニズムに関わる構造を把握するためにNetwork Correlation Coefficient法（Ohta and Ide, 2011）による震源の再決定を行った。また、気象庁のカタログ中の深部低周波地震をテンプレートとして、マッチドフィルタ法（Gibbons and Ringdal, 2006）を用いて連続データから2004年4月から2018年12月の期間で深部低周波地震の検出を行い、全国52地域を対象に防災科研Hi-netの観測点を使用してカタログを作成した。カタログの完成後には、波形相関や各テンプレートにマッチした深部低周波地震の時間集中度を用いて、カタログ中の深部低周波地震の分類を行った。

震源再決定の結果、深部低周波地震の震源は今まで広範囲に分布していた地域でも狭く限られた範囲に集中し、また、ほとんどの地域において複数の点状の小さな震源域に分かれることがわかった。山形県肘折では鉛直方向に約5 km間隔で4つの点状の震源に分かれる。また、この震源の違いは深部低周波地震の波形相関等による分類の結果とほぼ対応する。そのため、深部低周波地震の震源は孤立的に複数存在し、一箇所の震源では同じようなメカニズムの深部低周波地震が繰り返し発生していると考えられる。

次に、波形相関によって分類されたグループ毎に深部低周波地震の活動の時間変化を作成したカタログを用いて解析した。その結果、深部低周波地震の活動は同一地域内でもグループ毎に大きく異なることがわかった。肘折では深部低周波地震が解析期間中に概ね定常的なレートで発生するグループと、群発的な活動が数年単位で発生するグループが存在する。雌阿寒岳や霧島山、桜島では定常的に発生する深部低周波地震の他に、地殻変動（国土地理院, 2019）や噴火活動と対応の良いグループの深部低周波地震も発見された。この結果は、地表火山へのマグマ供給に伴う地下深部の流体が深部低周波地震の震源域の一部のみを通過するような流路で上昇してきていることを示唆する。

Low-frequency aftershocks of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake revisited

*Masahiro Kosuga¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

はじめに

東北日本の地殻深部及びマントル最上部では低周波地震が発生しているが、最近の高密度地震観測により、地殻浅部においても低周波地震が発生していることが明らかになってきた〔野口・他(2018), 小菅・他(2019)〕。地殻浅部低周波地震の発生メカニズムの解明は、同じ深さ範囲で発生する通常の地震の発生メカニズムの解明と不可分であることから、地殻浅部低周波地震の発生状況を知ることは重要である。一方、内陸地殻内で発生した2008年岩手・宮城内陸地震の余震中に低周波地震が含まれていることが報告されている〔防災科学技術研究所(2009), 気象庁・気象研(2009)〕。小菅・他(2010)はその系統的な調査を実施したが、今回はFrequency Index (以下、FI値と称する)を用いて低周波地震の検出と震源の時空間分布についての再検討を行なったので、その結果を報告する。

方法とデータ

FI値は、高周波帯域と低周波帯域のスペクトル振幅比の常用対数として定義され、低周波が卓越すると絶対値の大きい負の値を取る。今回の解析にはS波を用い、高周波帯域は10–20 Hz、低周波帯域は2–4 Hzとした。観測波形と検測値は、2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループによるものを用いた。なお、特定の周波数が卓越したり高周波のノイズが多い観測点は除き、S波とノイズのスペクトル振幅比がしきい値を下回る場合にはFI値を求めている。

FI値の分布とその要因

FI値のヒストグラムは、モードが–0.2程度の正規分布に近い形を示すが、マイナス側のテールが長く、これが低周波の余震を表している。FI値は低周波の度合いを連続量で表現できることが利点である。FI値とマグニチュードの間には弱い負の相関があるが、余震の大部分を占めるマグニチュード2.5未満の地震では依存性が弱い。

マグニチュード2.5未満の地震についてFI値の空間分布を見ると、低周波の余震は空間的にまとまった分布を示すことがわかる。それらは、(1) 本震の震源とその北西部、(2) 余震域の北東端、(3) 北側余震域から西側に離れた小クラスター、(4) 栗駒山の南5–10 kmの領域、および(5) 余震域南端部（鳴子火山の北北東）である。これらは、実体波とコーダ波の卓越周波数を用いて低周波地震を検出した小菅・他(2010)の結果と概ね調和的であるが、(1)(4)についてはより明瞭な分布を得た。

低周波地震発生域の中で、(4)(5)はカルデラ領域とよく対応する。これらの領域では相対的高温領域で低応力降下量の地震が発生していると解釈できる。一方、低周波地震は余震域北側にも広く分布する。これらの領域では高周波の余震と隣接しながら棲み分けて分布する。この棲み分けは温度・圧力の空間分布からでは説明することはできない。(1)と(2)の領域は本震の震源域と余効すべり域に対応することから、流体の寄与による低応力降下の断層すべりを反映したものかもしれない。今後は、他の観測結果との比較検討を進め、低周波余震の発生メカニズムの解明を進めたい。

謝辞：本研究では，2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測および防災科学技術研究所Hi-netの観測波形を使用しました．

Migration of microseismicity and subsequent aseismic adiabatic expansion after the termination of injection in Okuaizu Geothermal Field

*Kyosuke Okamoto¹, Li Yi², Hiroshi Asanuma¹, Takashi Okabe³, Yasuyuki Abe⁴, Masatoshi Tsuzuki⁵

1. AIST, 2. Osaka University, 3. GERD, 4. OAG, 5. JOGMEC

奥会津地熱地域では蒸気生産量の安定化を図るために、2015年度に涵養注水試験が行われた（1回目：2015年6月-8月、2回目：11月-12月）。本涵養注水の際に、当該地域に設置した9点（地表5点、坑内4点）の微小地震計で観測された微小地震記録を利用して、「涵養注水前」、「第一回涵養注水中」、「第一回涵養注水後」、「第二回涵養注水前」、「第二回涵養注水後」の期間に分けて、流体挙動把握を試みたので報告する。

微小地震のイベント決定に際して、1,000Hzサンプリングで収録されたデータに対して、P波、S波の目視読み取りを行った。更に、決定された微小地震群に対して、波形相関を利用した震源クラスタ解析を適用することで、より高分解能な微小地震分布を求めた。更に、蒸気が卓越している地熱貯留層岩石孔隙内が、涵養注水に伴い液相で置換され弾性波速度が急変し得ることに着目し、散乱波解析によりその推定を試みた。本解析により、涵養水の到達・未到達を時空間で判断することを目指す。以上の解析を通して、以下のことを明らかとした。

- ・涵養注水中に一定して表れる微小地震群（Mqs1, Mqs2）を特定した。これらが涵養水の流動方向を示している可能性を明らかとした。
- ・第一回涵養注水後に新たに生じる微小地震群(Mqs3)を特定した。この微小地震群は間隙圧力の伝播によって生じている可能性を明らかとした。
- ・第二回涵養注水後には、新たな微小地震群は発生しないことを特定した。同時に、涵養井周辺とMqs3により生成された領域間で、断熱膨張と水の凝縮の繰り返しが生じている可能性を見出した。

以上のことより、高分解能な微小地震観測を行うことで、涵養注水に伴う地下流動を予測できることが分かった。

本研究はJOGMECの地熱発電技術に関する委託研究「地熱貯留層評価・管理技術」の一環として行われた。ここに記して感謝の意を表します。

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

[S09]PM-3

chairperson: Takane Hori(JAMSTEC), Hisahiko Kubo(NIED)

Mon. Sep 16, 2019 4:00 PM - 5:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-14] A mechanical model of regular and slow earthquakes

*Takane Hori¹ (1. JAMSTEC)

4:00 PM - 4:15 PM

[S09-15] Patch distributions of tremors and growth process of ETS.

*Keita Nakamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi² (1. Univ. of Kanazawa, 2. AIST)

4:15 PM - 4:30 PM

[S09-16] Spatial properties of slow earthquake activity and its geophysical and geological environment

*Kazushige Obara¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

4:30 PM - 4:45 PM

[S09-17] Spatial relationship between rupture area of two large inter-plate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake and slow-earthquake activity

*Hisahiko Kubo¹, Tomoaki Nishikawa² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

4:45 PM - 5:00 PM

[S09-18] Spatial distribution of b-values related to slow earthquakes in the area encompassing the Kii-Peninsula and Hyuga-nada regions, Japan

*Keita Chiba¹ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

5:00 PM - 5:15 PM

A mechanical model of regular and slow earthquakes

*Takane Hori¹

1. JAMSTEC

地震は、規模の小さいものから大きなものまで、また発生する場所によらず（震源となる断層を構成する物質が異なっていたり、すべりが不安定になる物理過程が異なっていたりしても）、弾性波で見れば相似な振る舞いをする。その振る舞いは、弾性体中にすべり弱化（すべりに依存して強度が低下する）の性質を持ったすべり面を仮定し、スケールに応じた破壊エネルギーとすべり弱化距離、スケールに依存しない応力降下量を仮定することで表現できる（大中・松浦, 2002）。そして、様々なスケールが混在した状態での地震の発生過程（1つの地震時のすべりの広がり方だけでなく、様々な規模の地震の発生）は、例えば、すべり面上に様々な大きさの円形のパッチを、その半径の分布がフラクタル的な性質を持ちつつ空間的にランダムに分布させ、その半径にすべり弱化距離を比例させるように断層を設定することで表現できる（Ide and Aochi, 2005）。ここでポイントになるのは、空間的なランダム不均質性が、自然の中で不可避免的に存在するものであり、それとスケール依存のすべり弱化過程が組み合わせることで、小さいスケールで始まった破壊が必然的に止まりやすい仕組みになっているということである。

一方、ゆっくり地震は、スケールに依存してすべりの伝播速度等が大きく異なるため、発見された当初は時間スケールや空間スケールに応じて異なる名称が与えられ、異なる現象として扱われてきた。しかし、それらが地震とは別の相似性とスケール依存性を持った断層すべり現象であることがわかってきている（Ide et al., 2007, 2008; Kaneko et al., 2018等）。ゆっくり地震も、地震と同様にせん断すべり現象であり、弾性体中にすべり面を仮定し、すべり面に何らかの力学特性（断層構成則）を与えることで、その振る舞いを表現できると思われる。実際様々な力学モデルが提案されているが、地震と異なる相似性・スケール依存性を適切に扱えるモデルは、そのような力学モデルではなく、時間的なランダムさを持つstochasticなモデルである（Ide 2008, 2010; Ide and Yabe, 2018）。Stochasticなモデルのうち、空間的な広がりを導入したIde and Yabe(2018)のモデルを含めて、様々なゆっくり地震のモデルで共通していることは、すべりの伝播を止める性質やすべりにブレーキをかける性質が何らかの形で入っていることである。すべり面を離散化した小パッチが単独ですべりを起こせるように設定されている（Ide and Yabe, 2018; Ben-Zion, 2012; Collella et al, 2012など）ものもあれば、不安定なすべりそのものが加速できない性質を持つ（Shibazaki and Iio, 2003; Matsuzawa et al., 2010）もの、不安定なすべりを起こす部分の周辺に粘性やすべり速度強化などでブレーキをかける（Ando et al., 2010; Ariyoshi et al., 2012）ものもある。もう一つのブレーキのかけ方は、すべり弱化距離を大きくするものである（Hashimoto and Matsu'ura, 2000; Liu and Rice, 2005; Nakata et al., 2014）。ここで、地震の力学モデルのポイントが、断層の持つ空間不均質性が小規模なすべりの伝播を止める性質を持っていたこと、ゆっくり地震を起こしている断層は、普通の地震を起こしている断層の深部延長や浅部延長であることが多いこと、さらに、断層の深部では温度が高いために、浅部では断層ガウジが厚いこと等のためにすべり弱化距離が大きいこと（Kato et al, 2003; Marone, 1998）などを考慮すれば、空間的なランダム不均質を仮定した地震のモデルに対して、よりすべり弱化距離を大きくしただけで、様々なゆっくり地震を表すモデルになることが期待される。すべり弱化距離が大きいというのは、すべりに対する強度の低下率が小さく、すべりにブレーキかけるので、結果的にすべり速度強化の振る舞いをするることになり、余効すべりも表現される（Hori and Miyazaki 2010等）。つまり、地震のモデルと同じ力学モデルで1つのパラメータを変更するだけで、様々なスケールのゆっくり地震や余効すべりも表現できるモデルになると期待される。この普通・ゆっくり地震の力学モデルの有効性を確認するためには、空間的なランダム不均質を仮定した断層にloadingをかけて自発的にすべりを起こしていった場合に、stochasticなモデルで仮定されていた時間的なランダムさがもたらす結果と同様な性質を満たすかどうかを調べる必要があり、講演ではその検討結果について報告する。

Patch distributions of tremors and growth process of ETS.

*Keita Nakamoto¹, Yoshihiro Hiramatsu¹, Takahiko Uchide², Kazutoshi Imanishi²

1. Univ. of Kanazawa, 2. AIST

はじめに

深部低周波微動の震源決定手法としてエンベロープ相互相関法やハイブリッド法が一般的に用いられている [Obara, 2002; Maeda and Obara, 2009]. Imanishi et al. [2011]やGhosh et al. [2009]は、アレイ観測を用いることで通常の震源決定手法より高い検出率で微動の震源を決定することができることを示した. 本研究では産業総合技術研究所が紀伊半島に設置したアレイ観測データを用いて微動の震源決定とエネルギー計算を行い、ETSイベントの成長過程についての調査を行った. 本発表では微動の高エネルギーを放出するパッチ分布及びETSの開始位置と停止位置, さらには類似した開始点を持つETSについて, 開始点の浅部に位置する高エネルギーパッチを破壊した時と破壊できなかった時の累積エネルギーの時間変化の違いに焦点を当てて報告する.

データ・解析手法

解析期間は2011年4月から2015年1月までとした. 使用したアレイの波形データは産業総合技術研究所により観測されたものである. ハイブリッドクラスタリング法 [Obara et al., 2011]により決定された震源データに対してクラスタリング処理を行い, 微動が時空間的に集中して発生している時間を特定した. 特定したクラスタは16個であった. 本研究ではこのクラスタの時間をETSイベントの発生時間として解析を行った.

本研究で用いたアレイによる震源決定手法はセンブランス法である. 震源決定を行う際に仮定したプレート境界モデルと速度構造モデルはShiomi et al. [2006]のプレート境界モデルと気象庁JMA2001速度構造モデル [上野ほか, 2002]である. 紀伊半島の微動発生域に水平方向に2km間隔でグリッドを配置し各グリッドからプレート境界の深さを計算した後, 速度構造に従って波線追跡を行うことにより各グリッドの位置情報と予想されるスローネス情報を紐づけた. それにより各グリッドの位置情報とセンブランス解析結果を直接対応させることが可能である. センブランス解析に使用した周波数帯は2-4Hzであり, 時間窓は1分である. 最大センブランス値が0.3以上のグリッドの位置を微動の震源として決定した. また配置したグリッド領域の端付近に決定されたイベントは解析領域外のノイズの可能性があるため排除した. エネルギー計算手法はMaeda and Obara [2009]の計算式を使用し, 非弾性減衰のパラメーターであるQuality factorは一定値184を仮定した.

結果・考察

本研究でまず注目すべき点は微動の高いエネルギーを発する領域の空間的な形状(図1)はETSイベントの特徴に関わらずおおよそ不変であったことである. このことは, 高いエネルギーの微動を発生させる領域はETSイベントの拡大過程の特徴に左右されず, 地域固有の特徴によって決まることを意味する.

ETSの拡大過程を調べるため, Obara et al. [2011]を参考にし, 一分間に1つ決められる震源に対して1時間の時間窓でクラスタリング解析を行い, 5個以上の震源を持つクラスタに対して重心位置を決める解析を行った. その震源群の重心位置の時間変化から, 基本的にはETSの開始点は微動発生域の深部であり(浅部から開始するものも一部存在), そこから浅部の高エネルギー領域を破壊した後, 走行方向に広がるというETSの特徴的な拡大過程を見ることができた (図2). また微動活動の走向方向の移動は, ある高エネルギーパッチ領域に侵入後, 高エネルギーパッチを破壊させることが出来ない場合に停止する(図3). これはETSの成長過程は各高エネルギーパッチが連動して破壊するか否かが支配している可能性を示唆する.

アレイの北側の類似点を微動活動の開始点とするETSの累積地震波エネルギーの時間変化を図4に示す. 赤線はアレイ南部に存在する高エネルギーパッチの破壊が生じたETS, 青線はアレイの南部に位置する高エネルギーパッチの破壊が生じなかったETSのものである. この解析結果からは, 浅部の高エネルギーパッチを破壊する場合としない場合では, 累積エネルギーの時間変化の初期部分において明瞭な差は確認できなかった. このことから, ETSの成長過程について微動活動から推定されるETSの初期部分の活動状態からは明らかな予測はできず, ETSの破壊領域浅部にある高エネルギーパッチの応力蓄積状態及びその破壊の有無が決定していると考えられる.

謝辞

防災科学技術研究所の松澤博士にはハイブリッドクラスタリング法による深部低周波微動の震源データを提供して頂きました。記して感謝いたします。

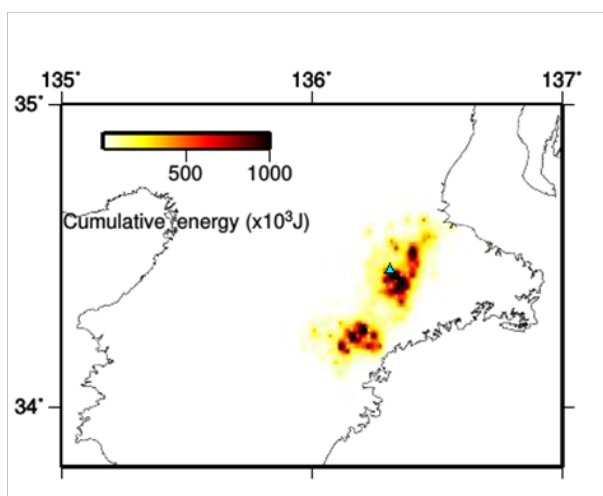


図1: 累積エネルギーの空間分布. 水色の三角形はアレイの位置を示す。

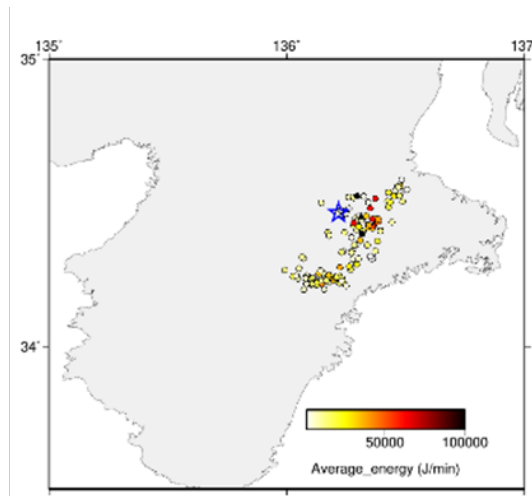


図3: 震源群の重心を平均地震波エネルギーで色付けした図. 青色の星印はETSの開始点を示す

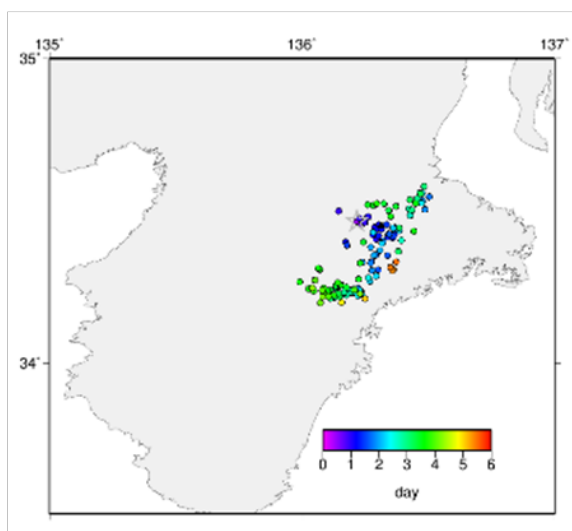


図2: 震源群の重心の移動例. 灰色の星印はETSの開始点を示す。

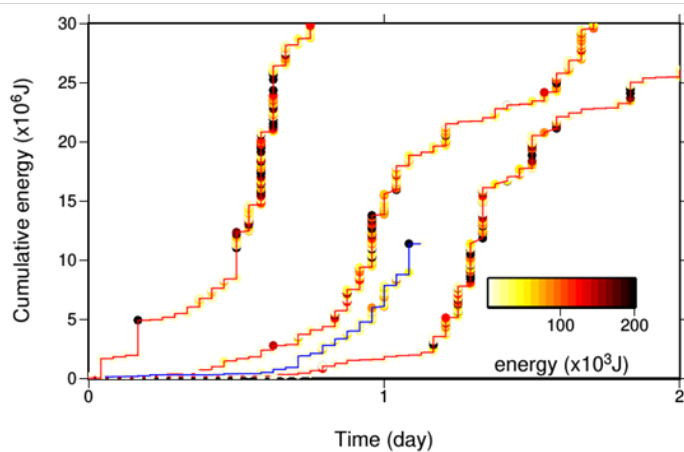


図4: 類似した開始点を持つETSの累積エネルギーの時間変化

Spatial properties of slow earthquake activity and its geophysical and geological environment

*Kazushige Obara¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

1. はじめに

スロー地震は異なる滑り速度を持つ様々な現象から構成され、それぞれ特徴的な活動特性を有する。その空間分布は遷移的または不連続に変化する場合があり、いずれも地球物理学的・地質学的発生環境を反映すると考えられる。近年、スロー地震の発生環境について数多くの研究成果が創出され、具体的なイメージができつつある。本講演では、改めてスロー地震活動特性における空間分布の特徴を検討し、支配要因としての発生環境について考察する。

2. Along-strikeセグメンテーション

スロー地震を構成する各現象は、沈み込みプレート境界面のほぼ同じ深さでalong-strikeに細長く分布し、複数のセグメントに分かれてそれぞれ独立にあるいは相互作用しながら活動を繰り返す。その典型例はETS (Episodic Tremor and Slip) であり、西南日本では約3~6か月、Cascadiaでは約10~20か月の発生間隔を持つセグメントに分かれる。長期的SSEも日向灘から紀伊水道にかけてETSと固着域とのギャップを埋めるように分布し、基本的な活動様式はやはりセグメント化されている。ETSのセグメンテーションの支配要因としては、Cascadiaでは大規模地形標高やスラブから供給されるシリカ量、西南日本ではプレート境界上盤のVp/Vsや減衰異常の岩体（キャップロック）の存在による不均質性が議論されている。最近Ujiie et al. (2018)はETSの周期的発生に関する地質学的証拠を見出し、過去のETS域が地表に露出したと考えられるメランジュ内の多数のshear-veinに残されたquartzの解析から、イベント発生間隔がETSと調和的な数年以内であることを明らかにした。この結果を踏まえると、ETSを構成する短期的SSEは断層帯内部の粘性変形のマクロな描像であり、微動は断層帯内部の多数のveinにおける摩擦破壊と考えることができる。

3. Along-dipの遷移的变化（ETS内）

ETSは、along-dipの狭い幅でも活動特性が徐々に変化し、浅部から深部に向かって発生間隔が短く、また規模が小さくなる。この傾向は西南日本とCascadiaで共通であり、ETSの普遍的な特徴と考えられる。支配要因としては、温度変化に対応した摩擦強度やシリカ量変化が挙げられる。このような活動特性の深さ依存性に関してはまだ地質学的な証拠は見出されていないが、室内実験では封圧の増加とともにゆっくり破壊の継続時間が短くなるという結果が得られており（Hirauchi & Muto, 2015）、定性的には観測事実と調和的かもしれない。

4. Along-dip不連続的变化（長期的SSEとETS）

豊後水道では、長期的SSEがETSの上端部の活動を活発化することが知られているが、長期的SSEのすべり分布は深部側のETSとは重なっていないこと(Nakata et al., 2017)から、地質学的環境の不連続のためにすべり速度が急変することが示唆される。東海や四国西部に展開された機動的地震観測アレイを用いたレシーバ関数解析から、ETS及び長期的SSEがそれぞれ、マントルウェッジ及び陸側下部地殻と沈み込むプレートとの境界で発生するイメージが得られている。CascadiaではETSと固着域との間に長期的SSEは検出されず、ギャップのみが存在し、プレート間カップリングは固着域とETS域では高くギャップ域では低いことから、ギャップ域では西南日本と同様に流動則で支配される大陸下部地殻がプレート境界に接すると考えられる。なお、西南日本で長期的SSEが生じる理由としては、陸側下部地殻内のキャップロックや沈み込む海洋プレート内での脱水によって間隙流体圧が増加して断層強度が低下し、準摩擦的挙動を示すのかもしれない。

5. Along-dip不連続的变化（房総SSEと群発地震）

房総SSEは、発生間隔は数年と長期的SSEと同様であるが、継続時間は数日から数週間と短期的SSEに近く、同じフィリピン海プレート境界で発生する他のスロー地震とは異なる活動特性を示す。また、房総SSEは常にすべり域の下端側に群発地震を伴い、同時に小繰返し地震（RE）も検出されることから、不均質な断層面の一部に準静的すべり域に囲まれた地震性の小パッチが存在すると考えられる。これらのREは、沈み込む海洋地殻の最上部層が剥ぎ取られる底付け作用の進行を表していると解釈され（Kimura et al., 2010）、それに基づくと、房総SSEはその浅部で物質境界に一致していた力学境界からRE発生面に遷移するステップダウンに対応すると考えられる。つまり、プレート最上部層の内部変形が房総SSEの実態であるともいえる。

Spatial relationship between rupture area of two large inter-plate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake and slow-earthquake activity

*Hisahiko Kubo¹, Tomoaki Nishikawa²

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

1. はじめに

Nishikawa et al. (2019) では、S-netや陸域観測網の観測記録および地震活動記録を利用することで、日本海溝沿いで発生している微動・超低周波地震・スロースリップイベント・繰り返し地震・群発地震といったスロー地震の活動域を推定し、それらが空間的にすみ分ける形で発生していることを明らかにした。本研究では2011年東北地震の後に発生したプレート境界型の余震のうち、2011年茨城県沖地震（2011年3月11日15時15分、Mjma 7.6）と2011年岩手沖地震（同日15時8分、Mjma 7.4）に着目し、それらの断層破壊領域とNishikawa et al. (2019) によるスロー地震活動の空間的な関係に関して調べる。後者に関しては本研究で新たに震源過程解析を行った。

2. 2011年茨城県沖地震と周辺のスロー地震活動

2011年茨城県沖地震のup-dip側のプレート境界上には沈み込む海山がMochizuki et al. (2008)によって推定されており、Nishikawa et al. (2019) によると、この海山が位置する領域において微動活動が存在している。2011年茨城県沖地震の断層破壊過程に関しては、Kubo et al. (2013)が強震波形記録と地殻変動記録を用いたジョイント震源インバージョンによって推定している。その結果によると、この地震は主としてup-dip方向に破壊が進展していき、海山の手前で終了したことが分かっている。

プレート境界上に存在する海山がどのように振る舞うのかはこれまで様々な議論がなされてきている。例えばScholz and Small (1997)では沈み込む海山がハードバリアとして振る舞うことを提案している。しかしながら茨城県沖の海山では微動が発生していることを鑑みると、Mochizuki et al. (2008)が提案したように、海山がソフトバリアとして振る舞っていると考えるのが妥当である。Mochizuki et al. (2008)では水分に富んだ堆積物が海山と一緒に沈み込み、それがプレート間カップリングを弱めている可能性を述べている。このソフトバリアの領域が地震破壊の進展先に存在していたことによって、2011年茨城県沖地震の破壊が止まったと考えられる。

3. 2011年岩手県沖地震と周辺のスロー地震活動

まず2011年岩手県沖地震の震源過程解析に関して説明する。2011年茨城県沖地震を解析したKubo et al. (2013)と同様な解析を行うが、震源インバージョン手法はKubo et al. (2015)によるFully Bayesian multiple-time-window source inversionを用いた。断層モデルとして全国1次地下構造モデル（Koketsu et al. 2012）の太平洋プレートの上面形状に沿うものを作成した。破壊開始点の水平位置は気象庁の震央情報を使用した。データには、防災科研K-NET・KiK-netによる地震動波形記録（S波部分、周期5-50秒）と、国土地理院GEONETによる30秒サンプリングの電子基準点記録から算出した地震前後の静的地殻変動記録を用いた。強震波形のGreen関数として、藤原・他（2009）による三次元地下構造モデルから観測点毎に観測点直下の一次元速度構造を抜き出し、それに基づき離散化波数積分法（Bouchon 1981）と反射・透過係数行列法（Kennett and Kerry 1979）により点震源の波形を計算した。地殻変動のGreen関数として、半無限均質媒質を仮定し、Okada (1992)のプログラムを用いて計算した。

2011年岩手県沖地震のup-dip側には、微動・超低周波地震・繰り返し地震・群発地震が分布している（Nishikawa et al. 2019）。予備的な震源過程解析の結果、震源を中心とした領域に大きなすべりの領域が見られており、2011年岩手県沖地震の破壊はスロー地震の活動域には及ばなかったと考えられる。また2011年

岩手県沖地震の周辺では過去にもM7クラスのプレート境界型地震が発生しており、1960年三陸沖の地震（Mjma 7.2）や1989年三陸はるか沖の地震（Mjma 7.1）がそれにあたる。それぞれの余震活動域は2011年岩手県沖地震の大すべり領域よりもup-dip側に位置しており、上記のスロー地震の活動域、とくに繰り返し地震・群発地震の活動域と重なる。なお1989年三陸はるか沖の地震の余震活動に関しては、地震後の非地震性滑りによって誘発された可能性が指摘されている(Kawasaki et al. 2001; Uchida et al. 2004)。

Spatial distribution of b-values related to slow earthquakes in the area encompassing the Kii-Peninsula and Hyuga-nada regions, Japan

*Keita Chiba¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

南海トラフでは、多くのスロー地震が発生することが報告されている(e.g., Obara and kato, 2016). これらのスロー地震は、応力状態に鋭敏な性質を持つことが知られており、プレート境界における応力状態の指標になると考えられている(e.g., Obara and Kato, 2016). こうしたスロー地震の性質に注目し、南海トラフにおける、紀伊半島から日向灘にかけてのプレート境界近傍で発生する通常地震のb値分布を求め、長期的スロースリップ(SSEs)、低周波地震(LFEs)との関係を調べた。b値は、グーテンベルグ・リヒター測に従う、大きい規模の地震と小さい規模の地震の相対的な発生数のパラメタであり、差応力や強度と逆相関することが知られている(e.g., Scholz, 1968, 2015; Wyss, 1973; Urbancic et al., 1992). ゆえに、b値の空間分布からプレート境界近傍における応力状態を把握できると期待される。Chiba (2019)では、豊後水道から日向灘にかけての限定的な領域でb値解析を行い、得られたb値分布がSSEsやLFEsに強く依存することを指摘している。本発表では、紀伊半島から日向灘にかけての、より広い領域でb値解析を行い、b値の空間的な不均質性についての考察を試みる。

b値の解析には、Yano et al., (2017)によるJUICEカタログを使用した。このカタログデータは、Hi-netによる震源カタログを基に、地震波形データの波形相関を用いたDouble-Difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000)により再決定されたものである。解析期間は2000/10/1-2012/12/31、解析範囲はE131°-136°, N31.0°-34.2°, 深さ25-40kmに発生する地震を用いた。下限マグニチュード M_c の空間分布を考慮し、解析には $M \geq 1.4$ のイベント12090個を使用した。b値の計算にはZMAP (Wiemer, 2001)を使用した。計算には0.1°間隔のグリッド点を作成し、各グリッド点に対し50-100個の地震を取り出し最尤法(Aki, 1965)によりb値を計算した。解析の結果、b値はプレート沈み込み方向に沿って大きく変化する様子がみられた。基本的にLFEs発生領域(豊後水道、四国西部、紀伊半島)でのb値は大きい。これはChiba (2019)で指摘されているようにLFEsの発生域では、プレート境界上盤側のpermeabilityが小さく、沈み込むスラブから脱水される水が境界付近にとどまり、間隙水圧が上昇したために、高b値が生じたものと解釈される。また、SSEsの発生域(紀伊水道、豊後水道、日向灘域)では、b値は中間程度から、やや低い値をとることがわかった。この点についても、Chiba (2019)で指摘されるように、SSEs発生に伴う部分的な応力の解放、及びSSEsが発生しないことによる応力の蓄積を表すと考えられる。一方、四国中央部では、顕著な低b値を示すことが分かった。この領域ではLFEs、SSEsが発生するものの、SSEsによる、すべりは小さい(e.g., Takagi et al., 2016)。この領域では、前述のLFEs発生モデルによるb値の上昇よりも、SSEsのすべりが小さいことによる応力の蓄積が大きく影響しているものと考えられる。以上の考察から、b値分布はLFEsやSSEsの発生に強く影響されることが示唆される。

今回の解析領域は、大局的には南海地震発生域のdown-dip側に対応する。スロー地震発生に伴う応力擾乱を通して、スロー地震とプレート間巨大地震には密接な影響があると考えられていることから(e.g., Obara and Kato, 2016)、今後の南海地震の発生予測に際し、南海地震のアスペリティ域だけでなく、隣接するスロー地震発生域でのb値解析が重要になるかもしれない。

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

[S09]AM-1

chairperson:ryosuke Azuma(Tohoku University), Ryuta Arai(JAMSTEC)

Tue. Sep 17, 2019 9:15 AM - 9:45 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S09-19] Distribution of strain energy density change due to an earthquake faulting in elastic-viscoelastic media

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

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-20] Mechanism of normal-fault type earthquakes under the Boso Peninsula, Japan

*Akinori Hashima¹, Hiroshi Sato¹, Toshinori Sato² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Chiba University)

9:30 AM - 9:45 AM

Distribution of strain energy density change due to an earthquake faulting in elastic-viscoelastic media

*Tatsuhiko Saito¹, Akemi Noda¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

地震は歪みエネルギーを使って発生するため、地殻に蓄えられる歪みエネルギーの可視化と定量化が重要である。例えば、南海トラフ沿いのプレート間の固着が内陸の地震発生層に引き起こすせん断歪みエネルギーの増減分布と内陸地震活動との関連(Saito et al. 2018 JGR), 熊本地震前震・本震によるせん断歪みエネルギーの増加域での余震活動の活発化など、歪みエネルギーと地震活動の関連性(Noda et al. 2018 ACES; Tanaka et al. 2018 JpGU)が報告されてきた。

地殻内の歪みエネルギーの可視化、定量化を行う際には、弾性リソスフェア粘弾性アセノスフェアの影響を考慮することが重要である。Hashima et al. (2014 Pageoph)は、ラプラス変換と波数積分法によって、歪み・応力の時空間変化を計算し、粘弾性アセノスフェアが、応力蓄積過程ではせん断応力を保持せず流体のように、地震による瞬間的な応力変化時には弾性体として、地震後の応力緩和過程では粘弾性として振る舞う様子をシミュレートした。

本研究では、周波数領域での波数積分法によって、弾性リソスフェア粘弾性アセノスフェア中の歪みエネルギーの時空間変化を可視化、定量化する。

計算手法

フーリエ変換した線形粘弾性構成則と平衡方程式をもとに、ダブルカップル点震源に対する周波数応答を計算し、周波数領域から時間領域へと変換することで、歪み場・応力場の時空間変化を計算する（対応原理 correspondence principle）。水平成層構造を仮定し、波数積分法を利用し計算する。周波数領域で表しているために、弾性波動場（運動方程式）の波数積分法(Zhu et al. 2002 GJI)との結合・拡張が容易に行える利点がある。初期値定理 initial value theorem として、高周波数極限の周波数応答が弾性応答を表し、最終値定理 final value theorem として、低周波数極限の周波数応答が変位・応力場の完全緩和を表す。

計算結果

一例として、半無限粘弾性媒質のアセノスフェアの上に弾性層のリソスフェアが載った構造を想定し、ダブルカップル点震源による応力変化と歪みエネルギー密度分布を計算した。初期値定理に基づき、緩和時間(500 yr)に比して十分高周波数 (40 yr^{-1}) の周波数応答は、弾性媒質を仮定した場合と良く一致することを確認した。また、最終値定理に基づき、十分低周波数 ($2\pi/5000 \text{ yr}^{-1}$) の周波数応答は、アセノスフェアの剛性率がゼロの場合の応力変化と良く一致することを確認した。

ある背景応力場を仮定して、断層面にかかるトラクションと断層すべり方向が同じ向きの場合を考え、ダブルカップル点震源による歪みエネルギー密度の増減分布を可視化・定量化した。通常、背景応力場に従って断層運動が起こると、断層面で応力が降下し、地殻内の総歪みエネルギーは減少する(e.g., Savage 1969 BSSA)。一方、点震源のシミュレーションでは、断層運動によって地殻内の総歪みエネルギーが増加する。地震発生によって媒質の歪みエネルギー総量が増加することは、非現実的な結果である。この結果は、平均的なすべり方向が背景応力場のトラクションと同じ向きでも、短波長のすべり成分が極端に多ければ歪みエネルギーは増加し得ること(例 Saito & Noda 2019 JpGU)に対応している。点震源の場合、短波長のすべり成分が極端に多く、実効的な応力降下量が初期応力に比べ大きくなるので、Savage (1969)の前提条件が崩れ、歪みエネルギーが増加することになる。

Mechanism of normal-fault type earthquakes under the Boso Peninsula, Japan

*Akinori Hashima¹, Hiroshi Sato¹, Toshinori Sato²

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

1. はじめに

2019年5月25日、房総半島下でMw 4.9の地震が発生し、関東地方の広域にわたり揺れが感じられ、最大震度は千葉県で震度5弱であった。この地震は防災科学技術研究所のHi-netメカニズム解カタログによれば、深さ26 kmで発生した正断層型の地震であった。したがって、この地震はプレート境界地震ではなく、上盤プレートと太平洋プレートにはさまれたフィリピン海スラブで起きたプレート内地震であると考えられる。付近では6月1日にも同様のメカニズムを示すMw4.6の地震が発生した。

プレート内部の地震は、数千年以上の長期にわたるプレート境界のすべり運動により、その周囲に蓄積された応力を解放するように起こると考えられる。したがって、これらの地震の発生メカニズムを定量的に明らかにするためには、プレート内部の応力蓄積過程をモデル化する必要がある。

著者らは、これまでの研究において、関東盆地周囲の地質学・変動地形学データに基づき、太平洋プレートとフィリピン海プレートの定常沈み込み運動と伊豆半島の衝突の効果による長時間スケールの変動をモデル化した[1]。本発表では、この関東盆地の長時間変動モデルについて述べ、このモデルを用いて房総半島下に形成される内部蓄積応力場を計算し、地震活動との関連を議論する。

2. 関東盆地の長時間変動モデル

本研究で用いるモデルでは、Matsu'ura & Sato (1989)の定常的プレート沈み込みモデル[2]にもとづき、プレート境界面における定常すべり運動によってフィリピン海と太平洋プレートの沈み込み運動を表現した。また、伊豆小笠原弧の衝突はすべり速度欠損を与える（定常的固着）ことによりモデル化した。一方、地質学・変動地形学的手法によって見積もられた過去100万年の上下変動データによると、はじめ関東盆地のほぼ全域で沈降運動が起こっていたが、沈降域は徐々に狭まり、最終間氷期（12.5万年前）以降は全域での隆起運動へと転じている。同時期には、フィリピン海プレートの運動方向が北北西から北西方向へ変化したことが指摘されている[3, 4]。そこで、本モデルを用い、フィリピン海プレートの運動方向変化による伊豆小笠原弧衝突の効果の時間変化を計算し、関東盆地の上下変動パターンの時間変化を満たす衝突領域の範囲を定めた。得られた衝突範囲は伊豆半島の周囲のプレート境界が押し込まれた領域であるが、現在の北西方向のプレート運動下では伊豆半島よりも西側の部分の効果が大半を占める。

3. 関東盆地、房総半島下の応力状態

得られたプレート沈み込みと伊豆半島の衝突モデルを用いて、プレート内部の応力蓄積レートを計算した。関東地方上盤側の地殻内応力は伊豆半島における北西-南東圧縮応力、フィリピン海プレート内部の横ずれ的な応力場とともに、関東盆地の東部では、ドーナツ状のメカニズム解で表される、東西・南北ともに伸張的な応力場を示す。房総半島下のフィリピン海プレート内部の応力場も上盤側と同様に、水平伸張的な応力場を示す。5月25日、6月1日の地震は東西伸張の正断層型であるが、計算で示した水平伸張の応力蓄積パターンと調和的であり、フィリピン海スラブ内部の弱面において断層すべりとして解放されたものと考えられる。

引用文献

- [1] Hashima et al., Tectonophysics, 679, 1-14, 2016.
- [2] Matsu'ura and Sato, Geophys. J. Int., 96, 23-32, 1989.
- [3] Nakamura et al., Bull. Soc. Geol. Fr., 26, 221-243, 1984.
- [4] 貝塚, 地学雑誌, 96, 223-240, 1987.

Room B | General session | S06. Crustal Structure

[S06]AM-1

chairperson: ryosuke Azuma(Tohoku University), Ryuta Arai(JAMSTEC)

Tue. Sep 17, 2019 9:45 AM - 10:30 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S06-01] Anisotropic P wave velocity structure around the shallow plate boundary in the northern Hikurangi margin

*Ryuta Arai¹, Shuichi Kodaira¹, Stuart Henrys², Nathan Bangs³, Koichiro Obana¹, Gou Fujie¹, Seiichi Miura¹, Dan Bassett², Dan Barker², Rebecca Bell⁴, Kimihiro Mochizuki⁵, Team NZ3D (1. JAMSTEC, 2. GNS Science, 3. Univ. of Texas, 4. Imperial College London, 5. ERI, Univ. of Tokyo)
9:45 AM - 10:00 AM

[S06-02] Seismic wave velocity structures in the Iburi region of Hokkaido, Japan

*Takahiro Shiina¹, Kei Katsumata², Masayoshi Ichianagi², Hiroaki Takahashi², Ryoichi Nakamura¹, Aitaro Kato¹, Mako Ohzono², Hiroshi Aoyama², Ryo Tanaka², Masamitsu Takada², Teruhiro Yamaguchi², Kazumi Okada², Shin'ichi Sakai¹, Satoshi Matsumoto³, Tomomi Okada⁴, Toru Matsuzawa⁴, Shuichiro Hirano⁵, Toshiko Terakawa⁶, Shinichiro Horikawa⁶, Masahiro Kosuga⁷, Hiroshi Katao⁸, Yoshihisa Iio⁸, Airi Ngaoka⁸, Noriko Tsumura⁹, Tomotake Ueno¹⁰, the Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake (1. ERI, UTokyo, 2. ISV, Grad. Sch. of Sci., Hokkaido Univ., 3. SEVO, Grad. Sch. of Sci., Kyoshu Univ., 4. RCPEV, Grad. Sch. of Sci. Tohoku Univ., 5. Nansei-Toku Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 6. Earthquake and Volcano Reserach Center, Grad. Sco. of Environ., Nagoya Univ., 7. Earthquake and Volcano Observatory, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Hirosaki Univ., 8. DPRI, Kyoto Univ., 9. Department of Earth Sci., Faculty of Sci. Chiba Univ., 10. NIED)
10:00 AM - 10:15 AM

[S06-03] Tomography and anisotropy in the 2018 East Iburi earthquake area

*Dapeng Zhao¹, Tao Gou², Zhouchuan Huang², Liangshu Wang² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University)
10:15 AM - 10:30 AM

Anisotropic P wave velocity structure around the shallow plate boundary in the northern Hikurangi margin

*Ryuta Arai¹, Shuichi Kodaira¹, Stuart Henrys², Nathan Bangs³, Koichiro Obana¹, Gou Fujie¹, Seiichi Miura¹, Dan Bassett², Dan Barker², Rebecca Bell⁴, Kimihiro Mochizuki⁵, Team NZ3D

1. JAMSTEC, 2. GNS Science, 3. Univ. of Texas, 4. Imperial College London, 5. ERI, Univ. of Tokyo

地震波異方性は媒質の層構造や応力状態に依存するため、これらを推定する指標として広く用いられている。プレート沈み込み帯の海溝軸周辺では、海域観測データを用いたS波スプリッティング解析等から、海底下浅部のS波方位異方性が複数の沈み込み帯で明らかになってきた（例えば、Tonegawa et al. 2017）。一方、P波の異方性推定には制御震源データを用いた解析が最適であるが、南海トラフ等の一部地域を除くと multi azimuth を密にカバーするデータの取得はほとんどなされておらず、地域性や沈み込み環境との関係など未知な点が多い。

海洋研究開発機構は2017年度に日米英ニュージーランドの各研究機関と共同で、ニュージーランド北島東方沖のヒクランギ沈み込み帯にて大規模な3次元地震探査データを取得した。調査地域は海溝海側から前弧海盆までの領域で、海溝直交方向に60km、海溝平行方向に14kmである。この領域内に4列に2km間隔で展開した97台の海底地震計（OBS）で140,000以上のエアガン発振の記録が収録された。エアガン発振は3次元反射法探査用に非常に稠密に実施されたため、異方性研究に適したmulti-azimuthのデータの取得に成功した。このデータセットにまず初動走時トモグラフィ解析を適用し、等方性を仮定した3次元P波速度構造を推定した。得られた3次元P波速度モデルから、沈み込む太平洋プレート上の堆積層や上盤プレート内の付加体に対応する低速度域が明らかとなった。既存の反射断面（Barker et al., 2018）と比較すると、この付加体内にはプレート境界からの分岐断層が複数存在すると考えられる。次に、上記の3次元P波速度モデルから計算される初動の走時残差を各OBSと地震波の伝播方向の方位角ごとに分類したところ、走時残差は顕著な方位依存性を示すことがわかった。特に、前弧海盆上に設置したOBSでこの方位依存性が明瞭であり、最大で約4%のP波速度の方位異方性が存在することがわかった。一方、海溝より海側ではこの異方性の特徴は不明瞭になる。また、海溝より陸側ではP波がより速く伝播する軸がほぼ東西（海溝に直交する方向）に向くことも確認した。調査海域のヒクランギ沈み込み帯では、構造探査と同じ時期に掘削調査も行われており、borehole breakoutのデータから最大水平圧縮応力がおおよそ海溝と直交する方向に向くことが明らかになっている。これらの結果から、P波速度の異方性も大局的にはプレート沈み込みに起因する広域応力場を反映していると考えられる。

Seismic wave velocity structures in the Iburi region of Hokkaido, Japan

*Takahiro Shiina¹, Kei Katsumata², Masayoshi Ichiyanagi², Hiroaki Takahashi², Ryoichi Nakamura¹, Aitaro Kato¹, Mako Ohzono², Hiroshi Aoyama², Ryo Tanaka², Masamitsu Takada², Teruhiro Yamaguchi², Kazumi Okada², Shin'ichi Sakai¹, Satoshi Matsumoto³, Tomomi Okada⁴, Toru Matsuzawa⁴, Shuichiro Hirano⁵, Toshiko Terakawa⁶, Shinichiro Horikawa⁶, Masahiro Kosuga⁷, Hiroshi Katao⁸, Yoshihisa Iio⁸, Airi Ngaoka⁸, Noriko Tsumura⁹, Tomotake Ueno¹⁰, the Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

1. ERI, UTokyo, 2. ISV, Grad. Sch. of Sci., Hokkaido Univ., 3. SEVO, Grad. Sch. of Sci., Kyoshu Univ., 4. RCPEV, Grad. Sch. of Sci. Tohoku Univ., 5. Nansei-Toku Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Kagoshima Univ., 6. Earthquake and Volcano Reserach Center, Grad. Sco. of Environ., Nagoya Univ., 7. Earthquake and Volcano Observatory, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Hirosaki Univ., 8. DPRI, Kyoto Univ., 9. Department of Earth Sci., Faculty of Sci. Chiba Univ., 10. NIED

2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震（M=6.7）やその余震は、これまで考えられてきた内陸地震の発生深度下限（約15 km）よりも深い20-40 kmに分布する [Katsumata et al., 2019]. 胆振地方の東側に位置する日高山脈を中心とする地域では千島弧と東北日本弧が衝突しており、島弧—島弧の衝突帯として知られている。このため、北海道胆振東部地震はそのような北海道中軸部における複雑なテクトニクスに関連した地震であると考えられる。本研究では、北海道胆振地方を中心とした領域の地震波速度構造の詳細な推定を試みた。そして、得られた地震波速度構造をベースに北海道胆振東部地震の発生メカニズムや余震を含む一連の活動と同地域におけるテクトニクスとの関係を検討した。

地震波速度構造の推定にはDouble-difference (DD) tomography法 [Zhang and Thurber, 2006]を用いた。解析期間は2008年11月9日から2018年11月8日までの10年間である。このうち、2018年9月7日から同年11月8日の期間中は2018年北海道胆振東部地震合同観測グループによって行われた臨時観測で取得されたデータを含む。使用した観測点の数は定常的な観測点が73、臨時観測点が20の計93点である。地震数は胆振東部地震本震前の期間が3,089個、本震後の期間が805個となる。マグニチュードの下限はM=2とした。P波とS波の読み取り値は全期間でそれぞれ209,009、176,052である。また、DDデータはP波で114,083、S波で104,348となった。グリッド間隔は東西方向に7.5-15.0 km、南北方向に12.5-15.0 km、深さ方向は4.0-20 kmとした。初期1次元速度構造は北海道大学地震火山研究観測センターで使用されているルーチン構造 [笠原・他, 1994]をベースに深さ10 km以浅を吉田・他 [2009]の推定値で置き換えたものを使用した。解析結果の妥当性はCheckerboard resolution testを行うことで確かめた。

胆振地方から日高山脈にかけて、地震波の低速度域が明瞭にイメージされた。このうち、地表面付近の低速度域は石狩低地帯に発達する厚い堆積層に対応する。また、低速度域は深さ40-70 km程度まで分布し、その下限は東（日高山脈）側で深くなる。この特徴は千島弧との衝突による東北日本弧の沈み込み [e.g., Iwasaki et al., 2004; Kita et al., 2012]を表していると考えられる。さらに、北海道胆振東部地震はそのような明瞭な地震波低速度域の西端に位置する。言い換えると、胆振東部地震の震源域周辺を挟んで地震波速度が急激に変化しているように見える。この地震波速度境界（あるいは急激な変化域）はほぼ南北に分布し、余震の広がる方向と一致する。地表の地質構造でも見られるように、南北に伸びる不均質性は北海道中軸部の特徴的な構造である。したがって、本解析の結果は、千島弧と東北日本弧の衝突を起因とする複雑な構造が胆振地方においても発達していることを示すとともに、北海道胆振東部地震がそのような不均質構造と密接に関係した地震であることを示唆する。なお、3次元速度構造での震源再決定を行った結果、胆振東部地震の本震深さはおよそ35 kmとなった。また、震源域周辺ではP波で5.5-7.2 km/s程度、S波で3.0-4.0 km/s程度と見積もられた。このことから、胆振東部地震の一連の地震活動は主として島弧地殻内部で発生したものであると考えられる。

Tomography and anisotropy in the 2018 East Iburi earthquake area

*Dapeng Zhao¹, Tao Gou², Zhouchuan Huang², Liangshu Wang²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University

We used a seismic tomography method (Zhao *et al.*, 1992, 2015) to investigate 3-D P and S wave velocity (Vp, Vs) structures and Poisson's ratio images in the source area of the 2018 East Iburi earthquake (M 6.7) in Hokkaido, Japan. We collected a large number of P and S wave arrival-time data from two groups of earthquakes released by the Japan Meteorological Agency (JMA) Unified Earthquake Catalog, which were recorded at 74 seismic stations belonging to the Kiban seismic network installed in southern Hokkaido. One group contains 53,784 P-wave arrivals and 38,840 S-wave arrivals from 3073 local shallow and intermediate-depth earthquakes during June 2002 to August 2018 before the East Iburi earthquake. The intermediate-depth earthquakes mostly occurred in the subducting Pacific plate, providing very good ray coverage in the mantle wedge beneath the source zone. The other group contains 8540 P-wave arrivals and 6528 S-wave arrivals from 460 earthquakes that occurred in the crust and uppermost mantle (mostly < 40 km depth) during 6–14 September 2018, including the mainshock and aftershocks of the East Iburi earthquake. The picking accuracy of the arrival times is estimated to be ~0.05–0.15 s for P-wave data and ~0.1–0.2 s for S-wave data. The 2018 Iburi mainshock occurred at the edge of a high-Vp (2–4%) seismogenic zone. Significant low-Vs (-1 to -3%) and high Poisson's ratio (2–7%) anomalies are imaged in and below the source zone and extend to the upper surface of the subducting Pacific slab, most likely reflecting ascending fluids released by the slab dehydration. A high consistency between the fault plane and the low-Vs and high Poisson's ratio anomalies indicates that the fluids may have entered the fault and affected the rupture nucleation. A high-V (1–3%) anomaly is revealed in the fore-arc mantle wedge and connects with the high-V seismogenic zone, probably reflecting a lithospheric fragment and contributing to cool down the mantle wedge. We also apply the method of Wang and Zhao (2013) to investigate the 3-D Vp azimuthal anisotropy structure in the 2018 Iburi earthquake area. The results reveal complex seismic anisotropy in the crust in and around the source zone, which may reflect complicated stress regime and strong structural heterogeneities there.

References

- Wang, J., D. Zhao (2013). P-wave tomography for 3-D radial and azimuthal anisotropy of Tohoku and Kyushu subduction zones. *Geophys. J. Int.* **193**, 1166–1181.
- Zhao, D., A. Hasegawa, S. Horiuchi (1992). Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.* **97**, 19909–19928.
- Zhao, D., H. Kitagawa, G. Toyokuni (2015). A water wall in the Tohoku forearc causing large crustal earthquakes. *Geophys. J. Int.* **200**, 149–172.

Room B | General session | S06. Crustal Structure

[S06]AM-2

chairperson: Ryuta Arai(JAMSTEC), ryosuke Azuma(Tohoku University)

Tue. Sep 17, 2019 10:45 AM - 12:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S06-04] Particle motion of Rayleigh waves in the ocean bottom : Effects of water and sediment

*SHUN FUKUSHIMA¹, KIYOSHI YOMOGIDA¹ (1. Hokkaido University, Graduate School of Science, Department of Natural History Sciences)

10:45 AM - 11:00 AM

[S06-05] Phase velocity estimation based on spatial gradient of surface wave arrival time of teleseismic earthquakes observed by S-net

*Akira Ishigami¹, Ryota Takagi¹ (1. Univ. of Tohoku)

11:00 AM - 11:15 AM

[S06-06] Investigating Japan Trench Outer Rise Structure off Sanriku and Miyagi Using Multichannel Seismic Reflection Survey

*Ehsan Jamali Hondori¹, Yue Sun¹, Hyun-Woo Youn¹, Katsura Kameo¹, Masanari Ashida¹, Juichiro Ashi¹, Jin-Oh Park¹, Tomoko Hanyu², Ayanori Misawa³, Gou Fujie⁴, Seishiro Furuyama⁵, Mayu Ogawa⁵, Keita Suzuki⁶, Akie Suzuki⁶, Waka Komatsu⁶ (1. Univ. of Tokyo, 2. Kobe Univ., 3. Geological Survey of Japan, 4. JAMSTEC, 5. Tokyo Univ. of Marine Science and Tech., 6. Nippon Marine Enterprises)

11:15 AM - 11:30 AM

[S06-07] Faults mapping of outer rise earthquakes off the Japan Trench

*Shuichi Kodaira¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹ (1. Research Institute of Marine Geodynamics, JAMSTEC)

11:30 AM - 11:45 AM

[S06-08] Seafloor sediment thickness below S-net observatories revealed from PS conversion wave at the sedimentary base

*Ryosuke Azuma¹, Ryota Takagi¹, Genti Toyokuni¹, Takashi Nakayama¹, Syuichi Suzuki¹, Makiko Sato¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

11:45 AM - 12:00 PM

[S06-09] P and S wave tomography of the NE Japan forearc region using S-net data

*Genti Toyokuni¹, Dapeng Zhao¹, Naoki Uchida¹, Takashi Nakayama¹ (1. RCPEVE, Tohoku University)

12:00 PM - 12:15 PM

Particle motion of Rayleigh waves in the ocean bottom : Effects of water and sediment

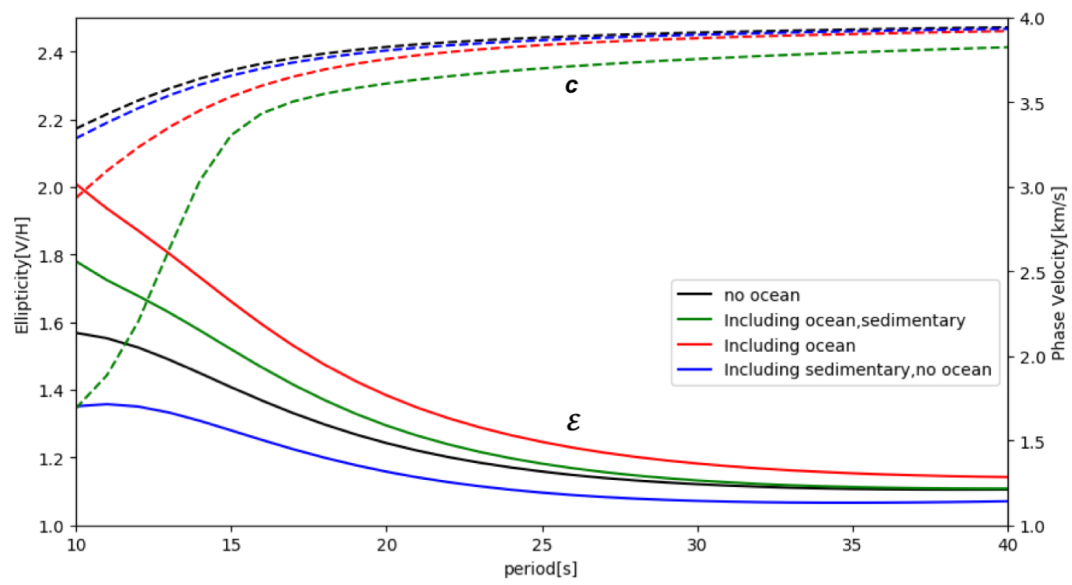
*SHUN FUKUSHIMA¹, KIYOSHI YOMOGIDA¹

1. Hokkaido University, Graduate School of Science, Department of Natural History Sciences

表面波の波形記録から地球表層の地球内部構造を推定する際、表面波が伝搬する2点間の位相速度や群速度の分散曲線がこれまで用いられてきた。これとは別にレイリー波の楕円率からも観測点の近くでの地震波速度構造を推定できることが知られている(e.g., Tsuboi & Saito, 1983)。レイリー波の楕円率は固有関数の地表面での振幅比で定義されるため、位相速度よりも浅い部分の地球内部構造に感度が高い。強震動の研究分野でのサイト特性を簡便に評価するために、常時微動の水平と上下成分の振幅比、H/V値が用いられるが、基本的には同じ原理である。近年DONETなどの海底地震計技術の発達により海底面での地震波が数多く観測されるようになり、レイリー波の楕円率も詳しい観測が可能となりつつある。しかし、陸上地震計と海底地震計では、境界条件が異なるため楕円率が異なることが予想される。さらに堆積層では急激にP波速度やS波速度が減少するが、海底堆積層の楕円率への影響は十分に研究されていない。

本研究では楕円率を V/H 値として周期10秒から40秒の海底面でのレイリー波の楕円率を計算した。PREM (e.g., Dziewonski & Anderson, 1981)には3kmまで海が含まれているが、海を含むPREMと海を取り除いたPREMについて楕円率を計算し、陸上地震計と海上地震計での楕円率の違いを検証した。さらに海を含むPREMと海を含まないPREMそれぞれに海底と地表から500mまで堆積層（PREMからP波速度を10%、S波速度を50%減少とした）を含め、楕円率への影響を検証した。これらの4つのモデルの楕円率（実線）と位相速度（点線）を図に示す。陸上での観測（no ocean）では位相速度の研究で明らかにされているように、堆積層があると位相速度は周期20秒以上でもほぼ一様に減少し、楕円率は小さくなる、すなわち表面に低速度層が加わるため水平動が卓越する。一方、海が加わると、位相速度は（深さに応じて）周期15秒前後から短周期では大きく減少するが長周期ではあまり変化はない。これは位相速度の感度が長周期帯において表面近くでは小さいためである。一方、海底面での楕円率は海が存在すると（赤線）、全周期わたり、大きくなっており、周期が短くなるとこの特徴が強くなり、水平動に比べて上下動が大きくなっている。堆積層の場合と異なり、観測点の上側にP波だけが存在する層があると上下動成分だけが選択的に大きくなるためと考えられる。これに対して、堆積層を含む場合には（緑線）、陸上と同じように、楕円率は小さくなり、上下動が大きくなる効果は抑えられる。

このように、海底面ではP波速度もS波速度も遅い堆積層があっても、P波速度だけが存在する海水の効果のために、上下動が大きくなる可能性がある。



Phase velocity estimation based on spatial gradient of surface wave arrival time of teleseismic earthquakes observed by S-net

*Akira Ishigami¹, Ryota Takagi¹

1. Univ. of Tohoku

地震発生環境やプレート境界面におけるすべり特性の理解のためには、地震波速度構造が重要な情報の一つになる。また、近年の稠密観測網の整備により、観測波形を波動場として捉えることが可能になってきた。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震後に防災科学技術研究所が整備した日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の観測データを用いて、東北日本前弧海域下における表面波位相速度分布を、位相到達時間の空間勾配を取ることで推定した。

解析には加速度計で記録された遠地地震による長周期表面波を使用する。観測記録をXYZ成分からUNE成分への座標変換後、上下動成分を用いて、Rayleigh波について解析を行った。解析手法はLin et al. (2009) に従い、解析手順は以下の通りである。まず、狭帯域フィルタを使用した周波数時間解析（FTAN）を行い、観測点毎に位相速度分散曲線を得た。次に、ある周期に着目してその周期における各観測点での到達時刻を空間的に補間して、到達時刻マップを得た。この到達時刻の勾配を計算することでRayleigh波のスローネスを求めることができ、スローネスの逆数を取ることで位相速度分布を得た。これを様々な周期で同様の解析を行い、20-50sの周期について5sごとに位相速度分布を得た。

上で述べた手順のうち、周波数時間解析における位相速度推定には、位相の 2π の任意性の問題が存在する。一般に、標準的な位相速度分散曲線を基準としてサイクル数を推定することが行われるが、基準の位相速度分散曲線と実際の位相速度の差が大きい場合や、初期位相による影響が大きい場合には、サイクル数を誤って推定する可能性がある。本研究では、基準とする位相速度分散曲線を繰り返し修正することでこの問題を解決した。まず、初期モデルを陸域におけるPREM 1 Dモデルで与え、周波数時間解析を行い、各観測点で位相速度の分散曲線を得る。次に、得られた位相速度分散曲線の平均を取り、それを次のイタレーションの際の基準分散曲線として用いて周波数時間解析を行う。この処理を繰り返し行うことで、観測網において一定のサイクル数を得ることができた。

以上の解析で得られた位相速度は3.6-3.9km/sであり、Rayleigh波の位相速度として妥当な値が得られた。位相速度の周波数分散も確認することができ、周期45sにおいては高速度領域であるスラブを示すような速度異常が確認できた。また、宮城・福島沖の領域がそれより北および南の領域に比べて高速度を示すパターンも確認できた。

今後は、今回推定された位相速度の空間パターンが地下構造を反映したものであるのか、それとも解析上生じたものなのかを、解析する地震を増やすことで確かめたいと考えている。また、位相到達走時マップを得る際の補間方法も位相速度の空間パターンに影響を与えている可能性があり、これについても検討を行いたい。さらに、陸上の地震計のデータも用いて上記の解析を行うことで、海域だけでなく陸上を含めたより広い範囲における位相速度マップを得、先行研究と比較を行いたいと考えている。

Investigating Japan Trench Outer Rise Structure off Sanriku and Miyagi Using Multichannel Seismic Reflection Survey

*Ehsan Jamali Hondori¹, Yue Sun¹, Hyun-Woo Youn¹, Katsura Kameo¹, Masanari Ashida¹, Juichiro Ashi¹, Jin-Oh Park¹, Tomoko Hanyu², Ayanori Misawa³, Gou Fujie⁴, Seishiro Furuyama⁵, Mayu Ogawa⁵, Keita Suzuki⁶, Akie Suzuki⁶, Waka Komatsu⁶

1. Univ. of Tokyo, 2. Kobe Univ., 3. Geological Survey of Japan, 4. JAMSTEC, 5. Tokyo Univ. of Marine Science and Tech., 6. Nippon Marine Enterprises

Introduction

A number of historically large earthquakes with magnitude higher than 8 occurred in the Japan Trench subduction zone, with the March 2011 Tohoku earthquake (M 9.1) being the latest one. Obana et al. (2012) used ocean bottom seismograph observations after Tohoku earthquake and realized that the mechanism of intraplate earthquakes beneath the outer rise of Japan Trench has changed at depths below 20 km from a reverse faulting to a normal faulting pattern. Their observation suggested that the stress regime of the Pacific plate has changed to a tensional stress down to a depth of 40 km after the Tohoku earthquake. This could have a direct impact on the occurrence of the large normal faulting earthquakes which could trigger a Tsunami. In order to investigate the detailed geological setting of the outer rise of Japan Trench off Sanriku and Miyagi of northeast Japan, we have conducted a high resolution multichannel seismic reflection survey in April, 2019.

Data Acquisition and Processing

We used research vessel *Shinsei-Maru* for survey KS-19-05 to acquire seismic reflection data along two seismic lines. Line number 5 off Miyagi passes closely to the epicenter of Tohoku earthquake, and line number 1 off Sanriku is in the northern part of the study area. A streamer was towed at a nominal depth of 6 m with 288 channels at intervals of 6.25 m to record the data with a maximum offset of 1800 m. Two GI airguns (2 x 355 cubic inches) at a depth of 5 m were fired simultaneously at shot intervals of 50 m and 37.5 m for line 5 and line 1, respectively. The total length of seismic line was 100 km and 150 km for line 5 and line 1, respectively. Due to a problem with acquisition tools, the depth of streamer could not be fixed in line 5 and a significantly strong swell noise contaminated the reflection data. Moreover, a large amount of spike noise occurred due to the recording system issues, which demanded advanced noise suppression methods. We used a time-variant band-limited envelope thresholding technique to suppress the strong swell noise. The spiky traces were manually edited to be excluded from data processing, and FX deconvolution filter was applied to further reduce the noise effect. Stacked sections and post-stack time-migrated sections illustrated the high resolution subsurface structure of the Japan Trench outer rise.

Results and Future Work

We could recognize a horst and graben pattern which starts from the seaside and continues toward the Japan Trench axis with clear associated normal faults. There are three major vertical displacements along

line 5, the line close to the Tohoku earthquake epicenter, which are of significant importance for further investigation. We also observed a series of horst and graben structures that are characterized by normal faults with displacements of several hundreds of meters along line 1. We found slumping-like structure containing turbidites in the major grabens, which we believe were produced by the normal faulting earthquakes. Our future work is to apply advanced velocity model building and depth imaging techniques including reverse time migration (RTM) for a detailed and more accurate imaging of the subsurface structure.

Acknowledgments

We are grateful to the crew of the R/V *Shinsei-Maru* for their support in acquiring the seismic reflection data. This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 18H03732. We thank Paradigm/Emerson (<http://www.pdgm.com>) for providing seismic data processing software.

References:

Obana K., G. Fujie, T. Takahashi, Y. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Kaneda, and M. Shinohara, 2012, Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implications for the stress regime in the incoming Pacific plate, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. **39**, L00G24.

Faults mapping of outer rise earthquakes off the Japan Trench

*Shuichi Kodaira¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹

1. Research Institute of Marine Geodynamics, JAMSTEC

日本海溝海側アウターライズでは2011年東北沖地震発生直後から地震活動が活発化し、本震発生から8年以上が経過した現在でも、依然として東北沖地震発生前より有意に高い地震活動が続いている。また、1896年明治三陸地震と1933年昭和三陸地震のようにプレート境界での巨大地震に続いて沈み込む前の海洋プレート内で正断層型巨大地震が発生することも指摘されており、これらの観測事実から東北沖地震発生後のアウターライズ域では巨大な正断層地震発生の可能性も危惧されている。

東北地震発生後、日本海溝域ではS-netの運用が開始されるとともに、津波浸水即時予測システムの構築も進められている。しかしながら、アウターライズ地震に対しては津波予測等に必要な震源断層に関する情報が極めて少ないのが現状である。そこで、海洋研究開発機構では徳島大学、防災科学技術研究所などと共同で日本海溝アウターライズ域での震源断層マッピングとそれらを用いた津波予測の研究を進めている。本講演では震源断層マッピングに向けた地下構造探査の最新結果を報告する。

海洋研究開発機構では千島海溝南部から日本海溝域アウターライズ域において大局的地下構造を把握するための調査を2009年より進めてきた。その結果、アウターライズ域では最上部マントルP波速度が海溝海側約150km付近から8~12%減少していることが確認され、これはプレート折れ曲がりによる断層発達に伴うマントルの蛇紋岩化作用の結果であると解釈された。そこで、2017年度からは大局的調査によって推定された断層発達域において、海底広域調査船「かいめい」による集中的な反射法地震探査を開始した。2017年度は「かいめい」慣熟航海の一環として北緯38~39°付近で6測線の反射法探査データを取得し、2018年度は調査航海として38~36°付近の10本の測線で反射法探査データを取得した。

2018年度航海で得られたデータは船上処理の後、ノイズ抑制処理、多重反射波抑制処理、速度解析、重合前時間マイグレーション等を実施した。その結果、プレート折れ曲がりに伴う海洋地殻上面の正断層構造や海洋地殻上面から往復時間約2秒下に明瞭な海洋モホ面がイメージングされた。海洋地殻上面は折れ曲がり断層の落差は海溝付近では往復時間0.5秒（約500m）に達するものもある。また、海洋モホ面も明瞭にイメージングされているが、ところどころに不連続な特徴を示している。一方で、地殻内、及びマントル内には正断層を示すような明瞭な反射面は見えていない。

アウターライズ域で実施された地震観測の結果からは深さ40km程度まで正断層地震が観測されており、震源分布から断層の傾斜は55~75°と推定されている。この急傾斜のために反射法地震探査データからは地殻内・マントル内の断層イメージが得られなかった可能性がある。一方で、地震観測から示された傾斜角を仮定して基盤で確認された正断層構造をモホ面まで延長すると、モホ面の不連続な領域とよい対応を示している。

現在、反射法地震探査データから推定されるマントルまで伸びる正断層の分布、及び海底地形によるその断層の横方向の連続性、地震活動情報に基づく断層の深さ分布などの観測データを用いてアウターライズ震源断層マッピングをすすめている。今後、これらの情報を基にM7.5相当以上の震源断層を用いてアウターライズ巨大正断層地震による津波計算を実施する予定である。

Seafloor sediment thickness below S-net observatories revealed from PS conversion wave at the sedimentary base

*Ryosuke Azuma¹, Ryota Takagi¹, Genti Toyokuni¹, Takashi Nakayama¹, Syuichi Suzuki¹, Makiko Sato¹, Naoki Uchida¹, Ryota Hino¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

日本・千島海溝域に展開されたケーブル式リアルタイム海底地震観測網「日本海溝海底地震津波観測網（S-net, 防災科学技術研究所）」の運用が2016年に開始され、海域で発生する巨大地震・津波の早期検知による防災面や地震活動の実態把握など科学面での発展が期待される。一方で、海底下の表層には低地震波速度の未固結堆積層が不均質な厚さで存在するため、海底地震計記録を用いた解析にはこの表層堆積層による走時遅れを適切に補正する必要がある。そこで本研究では、堆積層基盤でP波からS波に変換する波（PS変換波）とP波初動との走時差をS-net観測点において読み取ることで、日本・千島海溝域の表層堆積層厚さの空間分布を推定した。

地震波形の読み取りにあたり、傾斜面に設置されたS-net観測点のセンサーの姿勢と方位を決め地震波形記録を上下・水平動成分に分離する必要がある。ここではTakagi et al. (under review) において加速度波形の重力加速度と遠地地震表面波の振動軌跡から求めたセンサーの姿勢と方位を用い、速度波形を上下・東西・南北成分に変換した。次に、2017年1月から2018年9月までに東日本で発生した太平洋スラブ内の地震30個（Mjma = 3.9–6.2, 深さ4–98 km）についてP波初動を験測し、それらの到達時刻で時間軸を揃え震央距離で並べたギャザーを観測点ごとに作成した。地震波速度が非常に遅いため堆積層中では波線は鉛直に近く、観測点直下の堆積層基盤でのPS変換波はP波と同じ見かけ速度で水平動記録にあらわれるため、観測点ギャザー上で震央距離によらず一定の走時差で振幅の増大が顕著な相を堆積層基盤変換波とみなし、それよりも早い時刻にも振幅の増大する相がある場合には候補として験測した。

S-net全150点の観測点ごとにPS-P走時差の平均値を求めた結果、太平洋プレート上では~1.1–1.7秒程度であったが、陸側斜面では~1.5–3.3秒程度と分布の幅が広く、海溝軸の内外で大局的に異なることがわかった。さらに太平洋プレート上であっても日本海溝沿いの観測点で1.3–1.5秒、千島海溝側で1.6–1.7秒、海溝会合部で約1.1秒と走時差が領域ごとに変化した。一方、陸側斜面上に注目すると、斜面下部と海岸近く（~2秒以下）に対して斜面中部（~2秒以上）では相対的に走時差が大きい。加えて、斜面中部の水深1,000~3,000mの範囲では、海底面の斜度の緩やかな日高トラフ（~2.5–3.3秒）から斜度の増加する三陸沖から房総沖に向かって1.8秒程度まで減少し、島弧沿いに大きく変化した。PS-P走時差に対して堆積層内のP波速度を2 km/s, S波速度を陸側斜面で0.6 km/s (Yamamoto et al., 2006)・海側斜面で0.25 km/s (Fujie et al., 2016)と仮定し推定した堆積層厚さ分布は人工地震探査（例えば, Tsuru et al., 2002; Fujie et al., 2016; Azuma et al., 2018）の結果と整合的である上、基盤の深くなっている場所は、日高トラフや十勝沖での発達した海盆の存在を示す低重力異常 (Basset et al., 2016)ともよく対応する。したがって、本研究により堆積層の基盤の深さが太平洋プレート上と陸側斜面の上部・下部で浅く、陸側斜面中部では日高トラフと三陸沖以南とで異なる様子を捉えられたとえる。

本研究のPS-P走時差分布は上野・他 (2019) の推定値とも概ね一致するが、日高トラフや房総沖の観測点にはPS-P験測値のばらつき（±0.06–0.17秒程度）を上回って異なる傾向があり、同定した相が上野・他と異なる可能性がある。そこで、各地震の水平動2成分の波形から4つの周波数帯（1–2, 2–4, 4–8, 8–16 Hz）でエンベロープ波形を求め重合したものを観測点ごとに作成し、本研究および上野・他による験測値と比較した。その結果、走時差の一致がよい福島沖～三陸沖の観測点ではPS変換波の験測時刻において2–8 Hz帯域のエンベロープ振幅が顕著に増大するのに対し、不一致の大きい房総沖～茨城沖の観測点では複数の時刻で段階

的に振幅が増加，日高トラフでは全帯域で特徴的な振幅増加を持たない傾向があった．一般的に，P波からS波への変換効率は上下層間の地震波速度コントラストの大きさに依存する．すなわち，PS変換波の振幅の明瞭さが，堆積層－基盤岩間の速度コントラストや堆積層内構造の情報になりうる．したがって，変換波の明瞭さの異なる日高トラフ，三陸沖～福島沖，房総沖とでは異なる過程で未固結堆積層が形成されたと考えられる．

P and S wave tomography of the NE Japan forearc region using S-net data

*Genti Toyokuni¹, Dapeng Zhao¹, Naoki Uchida¹, Takashi Nakayama¹

1. RCPEVE, Tohoku University

The great 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) occurred off the Pacific coast of Northeast Japan, where the Pacific plate is subducting beneath the Okhotsk plate. The S-net (the Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench) that initiated in 2016 is a large-scale, permanent, ocean-floor seismograph network with cabled 150 stations, which covers a wide oceanic region off Northeast Japan (Kanazawa, 2013). In this work, we study the 3-D seismic velocity structure beneath the NE Japan forearc region covered by the S-net.

We have newly collected two sets of arrival-time data. The first set contains arrivals picked by our technical staff, which include 36,002 P and 13,326 S arrivals of 241 local earthquakes recorded at the S-net and other inland Hi-net stations. The second data set contains arrivals picked by the first author (G.T.), which include 3,754 P-wave arrivals of 63 local earthquakes recorded by the S-net. Then the newly picked data are integrated with the existing arrival-time data from 747 teleseismic events for P-wave and 643 teleseismic events for S-wave, as well as 2,528 local earthquakes recorded at 1,852 Hi-net stations on the Japanese land areas (Liu & Zhao, 2016). These combined data are inverted to obtain new 3-D P- and S-wave velocity models (V_p , V_s) beneath the entire NE Japan arc by using the tomographic method of Zhao et al. (2012).

In this work we focus on the obtained 3-D images at depths < 80 km below the region covered by the S-net. The major results are summarized as follows.

- (1) The spatial resolution of the V_p and V_s images at depths of 5~60 km beneath the S-net is greatly improved.
- (2) Prominent low- V_p and low- V_s anomalies are revealed in the off-Iwate and off-Fukushima areas. These features are consistent with those revealed by previous works (e.g., Zhao et al., 2011; Huang & Zhao, 2013; Liu and Zhao, 2018), suggesting that our hand-picked arrival-time data are quite accurate and robust.
- (3) A significant high- V_p anomaly is revealed along the Japan Trench especially beneath the off-Miyagi region where the rupture of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) initiated, which may reflect that the sedimentary layer is very thin there above the subducting Pacific plate.

References

- Huang, Z., D. Zhao (2013) JAES, 70–71, 160–168.
 Kanazawa, T. (2013) Underwater Technology Symposium (UT), 2013 IEEE International.
 Liu, X., D. Zhao (2018) Science Advances 4, eaat4396.
 Zhao, D. et al. (2011) GRL 38, L17308.
 Zhao, D. et al. (2012) GJI 190, 816–828.

Keywords: Seismic tomography, Offshore Northeast Japan, S-net, 3-D velocity structure

[S06]PM-1

chairperson: Tatsuya Ishiyama (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Takashi Tonegawa (JAMSTEC), Masanao Komatsu (Okayama University)

Tue. Sep 17, 2019 1:30 PM - 3:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S06-10] Receiver function imaging of the subducting Pacific plate beneath NE Japan using offshore and on land seismic arrays

*HyeJeong Kim¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Takeshi Akuhara¹, Masanao Shinohara¹, Ryota Takagi² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S06-11] Crustal reflector and seismicity in Iwaki area

*Takashi Iidaka¹, Shinichi Sakai¹, Toshihiro Igarashi¹, Kazushige Obara¹, Aitaro Kato¹, Tetsuya Takeda², Shigeki Nakagawa¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:45 PM - 2:00 PM

[S06-12] Heterogeneous crustal structure offshore of the Ibaraki prefecture along the Japan Trench

*Kimihiro Mochizuki¹, Tomoaki Yamada¹, Masanao Shinohara¹, Ryota Hino², Ryosuke Azuma², Yoshihiro Ito³, Yoshio Murai⁴, Kenji Uehira⁵, Toshinori Sato⁶ (1. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 4. Faculty of Science, Hokkaido Univ., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 6. Graduate School of Science, Chiba Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM

[S06-13] Seismic Source Fault Model for Kinki Region Based on Geologic and Geophysical Data, Southwest Japan

*Tatsuya Ishiyama¹, Hiroshi Sato¹, Naoko Kato¹, Makoto Matsubara², Tomoko Elizabeth Yano², Susumu Abe³, Masanori Higashinaka³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. JGI, Inc.)

2:15 PM - 2:30 PM

[S06-14] The seismological structure about fault zone extending to the lower crust in the northern Kinki district, southwestern Japan

*Shinya Katoh¹, Yoshihisa Iio², Takuo Shibutani², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.)

2:30 PM - 2:45 PM

[S06-15] Detailed seismic velocity structure in focal area of the 2016 Central Tottori Earthquake estimated using dense aftershock observation data

*Hiroo Tsuda¹, Yoshihisa Iio², Satoshi Matsumoto³, Shinichi Sakai⁴ (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM

Receiver function imaging of the subducting Pacific plate beneath NE Japan using offshore and on land seismic arrays

*HyeJeong Kim¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Takeshi Akuhara¹, Masanao Shinohara¹, Ryota Takagi²

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

The seismogenic zone of NE Japan subduction zone locates at offshore, where in situ observation is only possible with ocean bottom sensors. The seismogenesis of subduction zones has a close relationship with the hydrous state of the subduction zone system, and water has been observed as a low velocity zone of the subducting plate. Continuous imaging of the subsurface structure from the trench, crossing the whole forearc, is important to understand the relationship between seismicity and seismic structure, as well as to delineate the water transportation in subduction. On land, arrays from different institutes cover Japanese islands densely enough to get good quality receiver function images. On the seafloor, several temporary arrays of pop-up type ocean bottom seismometers were deployed over the years (e.g., Shinohara et al., 2012, EPS). Furthermore, the ocean bottom cable network off the coast of NE Japan (S-net; Kanazawa et al., 2016, SubOptic) has allowed a real-time and permanent observation on the seafloor from late 2016. In this work, we conduct the receiver function analysis of those amphibious array data to produce continuous receiver function images from ocean to land. To use the ocean bottom seismic data for imaging, special care has to be taken for the effect of the low velocity sediment on top of the seafloor; an extremely slow S-wave velocity (< 0.5 km/s) of the thin sediment causes a large delay in arrival times (e.g., ~ 2 seconds) to the converted waves that may result in misplacement of an image if the effect is not corrected. The common conversion point stacked images show a continuously dipping oceanic Moho along profiles crossing ocean and land. Besides, the forearc part of the subducting plate shows a signature of a low velocity layer above the oceanic Moho as land stations do. The result of this work presents the first receiver function image in NE Japan using both ocean and land stations that shows coherent structural signatures of the subducting oceanic plate.

Crustal reflector and seismicity in Iwaki area

*Takashi Iidaka¹, Shinichi Sakai¹, Toshihiro Igarashi¹, Kazushige Obara¹, Aitaro Kato¹, Tetsuya Takeda², Shigeki Nakagawa¹

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

1) はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震以降、日本列島の地震活動は大きく変化した。これらの地震活動の変化は、東北地方太平洋沖地震に伴い島弧の応力場が変化したことに関係していると考えられる。いわき地域の地震活動においては、東北地方太平洋沖地震以降大きく変化し、地震が増加した。しかし、その理由はいまだに明らかになっていない。東京大学地震研究所では関係機関と連携し、この地域で60点規模の臨時地震観測をおこなった。いわき地域で発生した地殻内地震について、この臨時観測点で観測された波形記録を見ると、ひとつの特徴として2種類の後続波が観測された。その原因を調べてみると、2つの後続波は、地殻内に存在する境界面とモホ面からの反射波であることがわかった(臼田, 修士論文2018)。臼田(2018)では、いわき地域に発生した地震と臨時観測の観測点を用いて、逆VSP法解析による調査から反射面の位置の推定をおこなった。

この地域の地震活動の特徴として、上部地殻での活動に加えて、地殻中部でも顕著な活動域が見られることが挙げられる。この地殻中部の活動域は、地殻内反射面とほぼ一致し、地殻中部の地震活動と反射面との関係が深いことが示唆された。また、反射波の振幅が大きいことから、地殻内の反射波は流体を含んでいる層からの反射波である可能性が指摘され、地殻中部の地震活動が地殻内流体によって引き起こされた可能性が示された(臼田, 2018)。さらに、この領域の地殻上部の地震活動と反射面との関係を調べた。この領域の地震活動は、東北地方太平洋沖地震に伴い3月11日に活発化が始まっている。一連の活動は、検出された反射面の南部の直上で始まり、地殻内反射面を中心にして取り囲むように地震活動が活発となっていることがわかった(飯高・他, 2019)。このように地震活動と反射面の位置は密接な関係があり、一連の地震活動が地殻内流体と関係している可能性が指摘された(飯高・他, 2019)。臼田(2018)によって求められた反射面は北緯37度まで求められているが、その北側でも地震活動は活発であり、地震と反射面との関係を明らかにするために、北緯37度以北における反射面の存在の有無を明らかにすることが重要であると考えられる。そのため北側について、観測域の北側で発生した地震を中心に北緯37度以北の観測点を調べた。反射面を検出するため、逆VSP法解析による解析を用い解析をおこなった。

2) データおよび解析

いわき地域で、2012年に北緯37度以北に発生したマグニチュード3以上の地震について解析をおこなった。用いた観測点は、この地域に展開した臨時観測点とHi-net, F-net等の観測点を用いた。この地域の地震活動は、上部地殻で発生する深さ15km以浅の地震と、15kmから30kmに発生する地殻中部の地震の活動が見られる。この解析では、地殻上部で発生した15km以浅の地震を用いた。

解析手順は以下のようにした。(1) 波形から後続波を検出する。(2) その後続波のパーティクルモーションを調べ、P波であるかS波であるかを明らかにする。(3) 後続波の起源を調べる(反射された波であることを確認する)。(4) 後続波を用い逆VSP法解析により地殻内反射面を求める。

3) 結果

後続波を調べることによって、パーティクルモーションや見かけ速度から、観測された後続波は地殻内に存在する境界面からのS波の反射波であることがわかった。この地域では、これまでに逆VSP法解析による調査から反射面の検出が行われており、北緯37度まで反射面の存在が示されている(臼田, 修士論文2018)。一方、この地域の地震活動は、一辺が30km~50kmの三角形の領域で活発に発生しており、その地震活動は北緯37度以北にも見られる。また、この地域の地震活動と反射面との関係が示唆されており、その観点に立って考

えると、北緯37度以北の地殻内部においても反射面の存在が推測される。

今回の解析で、このいわき地域で反射波を用いて逆VSP 法解析をおこなったところ、これまで求められていた地域の北側の北緯37度以北にも、反射面が存在することが確認された。このことは、この地域においては、地震活動が活発な領域において広く地殻内反射面が存在することを示している。この反射面は、反射波の振幅が大きいことから、地殻内流体起源である可能性が示唆されている。この地域の活発な地震活動と地殻内流体との関係を明らかにしていくことは、地殻内地震の発生原因を考えるうえでひじょうに重要な課題である。また、地殻内流体の物理的性質やその供給源を明らかにしていくことは、内陸地震の発生メカニズムの現象解明に向けた重要な研究課題であると考えられる。

Heterogeneous crustal structure offshore of the Ibaraki prefecture along the Japan Trench

*Kimihiro Mochizuki¹, Tomoaki Yamada¹, Masanao Shinohara¹, Ryota Hino², Ryosuke Azuma², Yoshihiro Ito³, Yoshio Murai⁴, Kenji Uehira⁵, Toshinori Sato⁶

1. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 4. Faculty of Science, Hokkaido Univ., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 6. Graduate School of Science, Chiba Univ.

茨城県沖100 kmの日本海溝沿いでは、M7級地震が約20年間隔で繰り返し発生してきた。この震源域周辺で行われた構造調査では富士山級規模の沈み込んだ海山が確認されたが、その位置はM7級地震の震源域から外れていた（Mochizuki et al., 2008）。また、海域地震観測で観測された微小地震も、この沈み込んだ海山周辺には分布していないことが明らかとなった。これらの結果から、Mochizuki et al. (2008) は、沈み込んだ海山はM7級繰り返し地震のアスペリティとなっていない可能性を示した。Wang and Bilek (2011) は、海山が沈み込むことによって、上盤側構造内にフラクチャー網が形成され、したがってプレート境界面周辺ではひずみエネルギーが蓄積されないために、規模の大きな地震が発生しないである可能性を議論した。最近の研究によって、本領域でスロー地震が発生していることが明らかとなった（例えばMatsuzawa et al., 2015 ; Nishikawa and Ide, 2018）。通常の地震からスロー地震まで、多様な地震活動とプレート境界周辺構造との比較検討は、地震発生メカニズムの理解のために重要な課題である。

ニュージーランド北島沖合のヒ克蘭ギ沈み込み帯では、多様な地震活動とプレート境界の形状的特徴との比較検討が進められている。例えばWallace et al. (2016) は海域での地震・地殻変動観測網によって、その直下で発生した大規模なスロースリップの観測に成功し、スロースリップにおけるすべり量の詳細な分布を明らかにした。その結果を見ると、スロースリップによる断層すべりは、地震波構造調査や電磁気観測から明らかにされた沈み込んだ海山を避けるように分布していることがわかった。またTodd et al. (2018) は、ヒ克蘭ギ沈み込み帯では初めてとなる、海域における微動活動を確認し、しかもその活動が沈み込んだ海山周辺域に限って分布することを明らかにした。これらのことから、ヒ克蘭ギ沈み込み帯北東部における多様な地震活動は、そのすべりの性質の違いとともに、プレート境界面上の異なった場所に分布していると考えられる。地震波構造調査によるプレート境界面の形状や物性の特徴を詳細に明らかにすることで、多様な地震の発生メカニズムの理解が深まることが期待される。

周期的に発生する大規模な地震からスロー地震まで、多様な地震活動が見られる茨城県沖日本海溝沿いでは、海底地震計とエアガン人工震源を用いた海域構造調査が複数の測線に沿って行われてきた。これらの構造調査の結果をまとめることによって、プレート境界周辺の構造的および物性的特徴の空間分布を明らかにすることができると考えられる。本研究では2011年2月に白鳳丸を用いて行った構造調査のデータ解析を進め、既存の構造調査の結果と合わせ、プレート境界周辺の構造的特徴を議論する。

Seismic Source Fault Model for Kinki Region Based on Geologic and Geophysical Data, Southwest Japan

*Tatsuya Ishiyama¹, Hiroshi Sato¹, Naoko Kato¹, Makoto Matsubara², Tomoko Elizabeth Yano², Susumu Abe³, Masanori Higashinaka³

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. JGI, Inc.

はじめに 近畿地域の西南日本内帯では第四紀に活動的な南北～北北東走向の逆断層と東西～東北東走向の横ずれ断層が密に分布し、これらは鮮新-更新統および中後期更新世・完新世に形成された新旧の地形を累積的に変位させる（活断層研究会，1991）。当地域では1995年兵庫県南部地震以降に数多くの反射法地震探査が実施されており、得られた反射法地震探査断面の解釈に基づく震源断層モデルの推定が可能である。また、近畿地域には鮮新・更新統の堆積盆が広く分布し（例えば市原編，1993）、その層序は反射断面の解釈や断層のすべり速度を推定する上で有用である。そこで、当地域で過去に取得された反射法地震探査断面および変動地形・地質構造・鮮新-更新統の層序に基づき構造解釈を行い、近畿地域に分布する活断層の震源断層モデルの構築を試みた。本発表では主要な活構造について例を示すとともに、課題を整理する。

反射法断面と断層モデルの概要 震源断層モデルの構築に際し、1980年代以降に近畿地域で実施された主要な反射法地震探査断面を収集し、測線位置と断面のコンパイルを行った。反射断面の解釈にあたっては、産業技術総合研究所・地質調査総合センター発行の5万分の1・20万分の1地質図に加えて市原編（1993）や吉川・三田村（1999）、Satoguchi and Nagahashi (2012)等の鮮新・更新統の層序・構造を参照するとともに、都市圏活断層図、池田ほか（2002）等の活断層・変動地形の位置・性状に関するデータを参照した。また、重力異常データ（地質調査総合センター編(2013)など）も使用した。

逆断層である琵琶湖西岸断層帯と右横ずれ断層である花折断層帯は近接して並走しており、何れが主要な構造かについてはよく分かっていない。そこで両断層帯の構造的な関係について詳細に検討することを目的として、両者を横断する2測線で実施した高分解能反射法地震探査の結果（石山ほか, 2018）から、琵琶湖西岸断層帯は地表位置から西に中角度で傾斜する逆断層であること、また花折断層帯は高角ないしはほぼ垂直な断層面をなすと考えられる。一方、地震波速度構造モデル（Matsubara et al., 2017）に基づく測線沿いの東西断面・微小地震活動および震源メカニズム解（松原・ヤノ, 2018）によると、右横ずれ断層である花折断層帯と整合的なメカニズム解を持つ地震活動は深さ10 km以浅に限定されるのに対して、逆断層型のメカニズム解を持つ地震は堅田断層の断層面の下方延長部に分布しており、高角の右横ずれ断層である花折断層帯が、中角度で西に傾斜する逆断層である琵琶湖西岸断層帯の上盤側に発達するとする構造モデル（佐藤ほか, 2007）と整合的である。このように、花折断層帯・琵琶湖西岸断層帯については、反射法地震探査および再決定震源による地震活動・震源メカニズム解から、低角～中角度で西に傾斜する逆断層である琵琶湖西岸断層帯が主断層であり、花折断層帯がその上盤側に発達する高角の横ずれ断層と推定される。

大阪平野周辺には、上町断層帯、生駒断層帯に代表される南北走向・東傾斜の逆断層と、有馬-高槻断層帯、六甲-淡路断層帯に代表される東西～東北東走向の横ずれ断層が近接して分布しており、その構造的な関係は複雑である。上町断層・生駒断層を横断する大大特測線（Sato et al., 2009）の再解析結果や重力異常データから、上町断層・仏念寺山断層が生駒断層とは独立したリトリックな断層面を有する逆断層であること（石山ほか, 2018）、枚方断層や有馬-高槻断層帯が従来の推定よりも北および東に延び、その東端部がとほぼ収束することなどが明らかとなった。2018年6月18日の大阪府北部の地震（M6.1）の本震・余震は、これらの複数の断層帯が近接する上町断層の北部延長である仏念寺山断層の深部延長周辺にあたるが、震源断層面の推定や大阪府北部の地震との関係を詳細に義論するためには、深部構造探査により仏念寺山断層などの構造的特徴を更に詳細に把握することが必要である。

引用文献 地質調査総合センター編, 日本重力データベースDVD版, 2013;市原編, 『大阪層群』, 創元

社, 1993; 石山, 活断層・古地震研究調査報告, 3, 145-155, 2003; 石山ほか, 活断層・古地震研究調査報告, 4, 155-162, 2004; 石山ほか, 日本地震学会秋季大会予稿集, S24-04, 2018; 活断層研究会, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 1991; Sato, H. et al., Tectonophysics, 472, 86-94, 2009; Sato, H. et al., Tectonophysics, 644-645, 58-67, 2015, 2015; Satoguchi, Y. and Nagahashi, Y., Island Arc, 21, 149-169, 2012; 吉川・三田村, 地質学雑誌, 105, 332-340, 1999; 吉川ほか, 物理探査学会第77回春季大会講演論文集, 114-117, 1987.

The seismological structure about fault zone extending to the lower crust in the northern Kinki district, southwestern Japan

*Shinya Katoh¹, Yoshihisa Iio², Takuo Shibutani², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka²

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

GNSS観測により新潟-神戸ひずみ集中帯(NKTZ)の存在が確認されている(Sagiya et al. 2000 Pure appl. geophys). NKTZではM7以上の内陸地震が多く発生しており、NKTZは日本列島の内陸域への歪・応力の蓄積や集中に重要な働きをしていると考えられている。そのため、NKTZの成因を明らかにすることは、内陸域への歪・応力の蓄積や集中のメカニズムを理解するために重要である。現在、Iio et al. (2002 Earth Planet Sci Lett)により、断層帯深部の流体による不均質構造の変形により直上の上部地殻でひずみ速度が大きくなるというNKTZの成因モデルが提唱されており、このモデルでは流体による不均質構造が下部地殻の断層帯深部に局所的に存在していることが必要と考えられている。

現在までの研究(Katoh et al. 2019 JpGU)で、自然地震を用いたS波反射法解析の結果から、近畿地方中北部の下部地殻には有馬高槻断層帯(ATFZ)と同じ走行をもち、ATFZの傾斜方向にのみ存在する不均質構造(reflector)が明らかになり、さらにレーザ関数イメージングでこのreflectorが地震波低速度の薄い層である可能性があることが推定された。これより、このreflectorはATFZの下部地殻への深部延長であると結論づけ、reflectorはIio et al. (2002)によって提唱された断層帯深部の不均質構造であると考えた。しかし、レーザ関数イメージングにおいて、reflectorの上面での地震波速度の不連続面はS波反射法解析と整合的な結果が得られたが、reflectorの下面での不連続面はやや不明瞭であった。そのため、本研究ではreflectorよりも深部の構造をより詳細に求めることを目的として解析を行なった。

解析手法はS波反射法解析とレーザ関数イメージングである。S波反射法解析では、観測された地震波のコーダ波部分をコーダ波の減衰率(codaQ)を用いて振幅の補正を行ない、3Dスタッキングをすることでreflectorの位置を求めている。S波反射法解析においてcodaQが重要なパラメーターとなるが、先行研究では推定されたcodaQの値が精度よく求められているかの確認を行なっていなかった。そこで、本研究では推定されたcodaQの精度を相関係数から統計的に評価し、推定されたcodaQの精度が良い波形だけをS波反射法解析に用いた。次に、先行研究でのレーザ関数イメージングでは、1Hzまでの遠地地震の波形を用いてレーザ関数を求めていたが、本研究では1Hz以上の高周波の波形も用いることでレーザ関数の地震波速度不連続面への感度を上げreflectorの下面を詳細に求めようとした。

上記の手法を用いて推定された下部地殻における断層帯深部の地震学的構造について発表し、近畿地方中北部の下部地殻に存在するreflectorはIio et al. (2002)によるモデルで必要とされる断層帯深部の不均質構造であるかどうかを議論する。

Detailed seismic velocity structure in focal area of the 2016 Central Tottori Earthquake estimated using dense aftershock observation data

*Hiroo Tsuda¹, Yoshihisa Iio², Satoshi Matsumoto³, Shinichi Sakai⁴

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2016年10月21日に鳥取県中部においてM6.6の地震（鳥取県中部地震）が発生した。震源の深さは約10km、震源断層は北北西－南南東方向に延びる左横ずれ断層であった。本研究では、下記の稠密余震観測で得られたデータを用いて、地震波走時トモグラフィーにより本震の震源域における詳細な地震波速度構造を推定した。本研究で得られた速度構造と先行研究により推定されたすべり分布や応力場を比較することで、本震の発生過程を考察した。

鳥取県中部地震の余震域において、京都大学・九州大学・東京大学地震研究所合同観測班により稠密地震観測が行われた。地震計の設置は本震発生の翌日10月22日から11月8日にかけて行われ、3成分地震計（京大・九大担当、満点地震計）10点、3成分地震計（地震研担当、GSX）10台、1成分地震計（0.1満点地震計）49点の計69点が設置された。1成分地震計は2016年12月12日まで、3成分地震計（GSX）は2017年3月まで、3成分地震計（満点地震計）は現在まで観測が行われている。図には、それら臨時観測点と2016年10月22日から12月15日に深さ15 km以浅で発生した14,166個の地震の震源をプロットした。ただし、図にプロットした震源は、臨時観測点で得られたデータを用い、震源決定プログラムhypomh（Hirata & Matsuura, 1987）によって決定したものである。

地震波走時トモグラフィー解析には、臨時観測点のデータに加え、2点の定常観測点のデータも使用した。トモグラフィー解析のプログラムとして、ダブルディファレンストモグラフィーのプログラムであるtomoDD（Zhang & Thurber, 2003）を使用した。トモグラフィー解析のようなインバージョン解析では、初期値にもっともらしい値を与えることが重要である。そこで、1次元速度構造と震源位置を同時に推定するインバージョン手法であるVELEST（Kissling et al., 1994）を使用し、もっともらしい1次元速度構造、震源位置をあらかじめ推定し、それらをトモグラフィー解析の初期速度構造、初期震源位置として使用した。

強震波形のインバージョンにより、震源周辺と震源北部の2ヶ所に大きなすべりが推定されている（Kubo et al., 2017）。本研究で得られた断層面上の速度構造では、その2ヶ所の大すべり域が高速度域に、その周囲のすべりの大きくなかった領域が低速度域におおむね対応している。高速度域で地震時すべりが進展し、低速度域ですべりの進展が阻害されたことが示唆される。

謝辞：気象庁、防災科学技術研究所による定常地震観測点のデータを使用させていただきました。

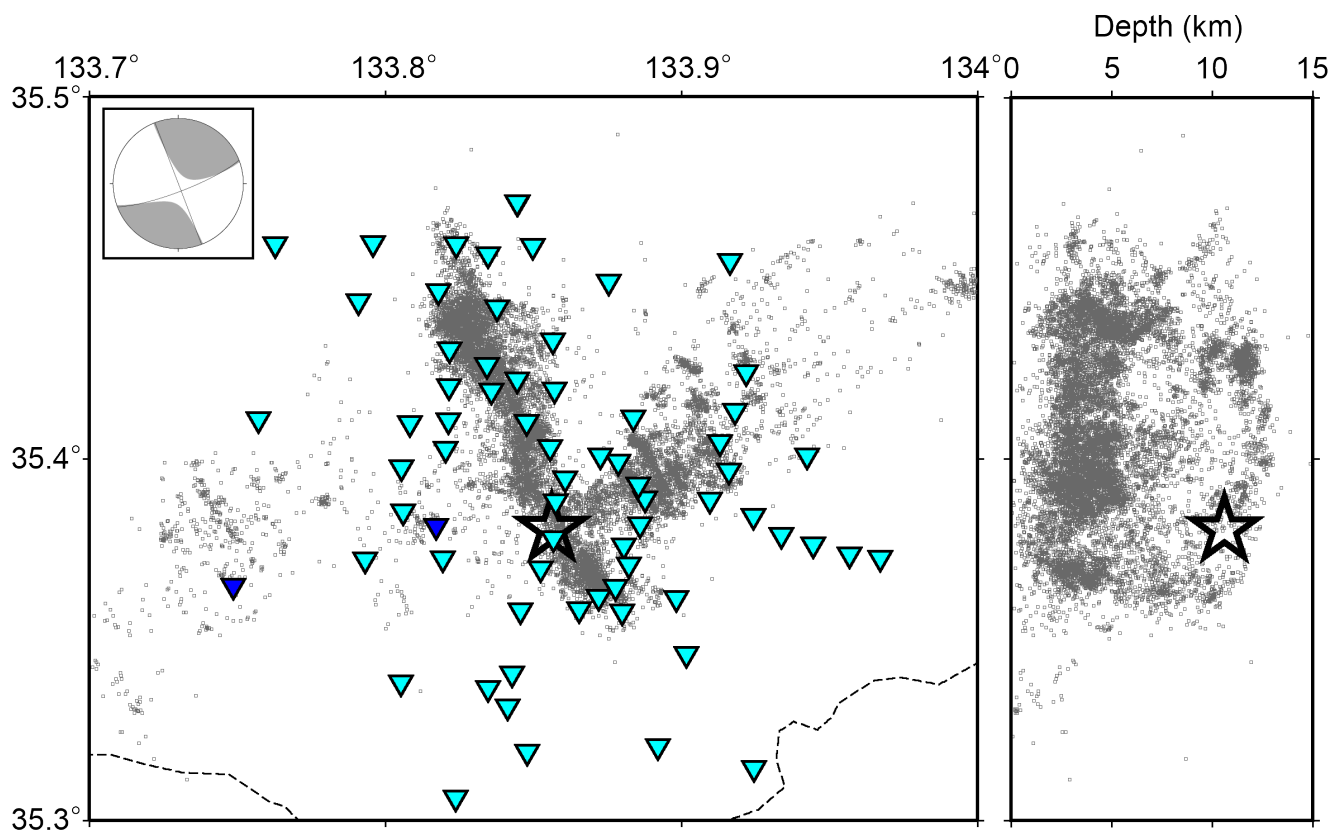


Figure. グレーの点は、2016/10/22~12/15に深さ15 km以浅で発生した地震の震源を表す。星は、鳥取県中部地震の震源を表す。図中の発震機構解は、鳥取県中部地震の気象庁によるCMT解析の結果を表す。水色の三角は臨時観測点を、青の三角は定常観測点を表す。

[S06]PM-2

chairperson: Tatsuya Ishiyama (Earthquake Research Institute, the University of Tokyo), Takashi Tonegawa (JAMSTEC), Masanao Komatsu (Okayama University)

Tue. Sep 17, 2019 3:15 PM - 5:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S06-16] Feasibility study on the waveform inversion to the OBS wide-angle seismic data

*Gou Fujie¹, Takeshi Sato², Kazuya Shiraishi¹, Shuichi Kodaira¹, Eiichi Asakawa³, Nibe Takao⁴ (1. JAMSTEC, 2. Sapporo Regional Volcanic Observation and Warning Center, JMA, 3. JGI, inc., 4. JAPEX)

3:15 PM - 3:30 PM

[S06-17] Seismic velocity structure monitoring of the Nankai accretionary prism from ambient noise correlations during Chikyu drilling

*Takashi Tonegawa¹, Toshinori Kimura¹, Kazuya Shiraishi¹, Eiichiro Araki¹, Masataka Kinoshita², Yoshinori Sanada¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo)

3:30 PM - 3:45 PM

[S06-18] Underthrust turbidite facies affecting variation in interplate coupling along the Nankai subduction zone

*Jin-Oh Park¹, Tetsuro Tsuru² (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology)

3:45 PM - 4:00 PM

[S06-19] Relationship between three-dimensional detailed crustal structures and very low frequency earthquakes in the Nankai trough off Kumano

*Kazuya Shiraishi¹, Yasuhiro Yamada¹, Masaru Nakano¹, Masataka Kinoshita², Gaku Kimura³ (1. JAMSTEC, 2. ERI, University of Tokyo, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology)

4:00 PM - 4:15 PM

[S06-20] Lithium isotope detects slab-derived fluids in spring water from the Median Tectonic Line fault zone in Shikoku, Japan

*Yoshiro Nishio¹, Satoshi Tonai¹, Yu Inokuchi¹, Emika Nakamura¹ (1. Kochi Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM

[S06-21] The velocity structure beneath the Aira caldera, deduced from the seismic exploration (4)

*Hiroki Miyamachi¹, Reji Kobayashi¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuuichiro Hirano¹, Takeshi Kubo¹, Naohiro Unno¹, Takeshi Matsushima², Kazuya Uchida², Rintaro Miyamachi², Hiroshi Katai³, Takuo Shibutani³, Tsutomu Miura³, Jun Nakagawa³, Itaru Yanada³, Takeshi Tameguri³, Kosei Takishita³, Kazuho Nakai³, Yusuke Yamashita³, Yuta Maeda⁴, Shinichirou Horikawa⁴, Kenjiro Mitsui⁴, Takashi Okuda⁴, Shuhei Tsuji⁴, Naoki Sogawa⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Eiji Kurashima⁶, Tomoaki Yamada⁶, Miwako Ando⁶, Shinichi Tanaka⁶, Satoshi Ikezawa⁶, Toshinori Sato⁷, Mare Yamamoto⁸, Satoshi Hirahara⁸, Takashi Nakayama⁸, Ryusuke Azuma⁸, Shuichi Suzuki⁸, Tomoki Tsutsui⁹, Ryuichi Takei⁹, Yuya Tada⁹, Hiroaki Takahashi¹⁰, Hiroshi Aoyama¹⁰, Mako Ohzono¹⁰, Takahiro Shiina¹⁰, Masamitsu Takada¹⁰, Masayoshi Ichiyanagi¹⁰, Teruhiro Yamaguchi¹⁰, Chihiro Ito¹⁰, Yuki Susukida¹⁰, Yoshio Murai¹⁰, Tatsuya Nakagaki¹⁰ (1. Kagoshima University, 2. Kyushu University, 3. Kyoto University, 4. Nagoya University, 5. TUMSAT, 6. University of Tokyo, 7. Chiba University,

8. Tohoku University, 9. Akita University, 10. Hokkaido University)

4:30 PM - 4:45 PM

[S06-22] P- and S-wave attenuation structures in the Ryukyu Arc, Japan

*Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹ (1. Okayama University)

4:45 PM - 5:00 PM

Feasibility study on the waveform inversion to the OBS wide-angle seismic data

*Gou Fujie¹, Takeshi Sato², Kazuya Shiraishi¹, Shuichi Kodaira¹, Eiichi Asakawa³, Nibe Takao⁴

1. JAMSTEC, 2. Sapporo Regional Volcanic Observation and Warning Center, JMA, 3. JGI, inc., 4. JAPEx

人工振源を用いた海域地震波構造探査は海底下の地殻構造をイメージングするもっとも効果的な手段である。海域地震探査は、直下からの反射波を稠密な地震計(ハイドロフォン)で観測し海底下の地震波反射面分布をイメージングする反射法地震探査(MCS)と、遠方に設置した海底地震計(OBS)などの観測データを用いて地震波速度構造をモデリングする屈折法地震探査に大別される。

反射法は高解像度で地下構造(反射構造)をイメージングできるが、直下からの反射エネルギーは弱いため10km以深といった深部のイメージングは容易ではない。一方、屈折法は遠距離で観測される深部を伝播した地震波も活用できるため、反射法に比べ深部までイメージングできる。しかし、一般に、屈折法データは地震波の走時(振源から観測点までの伝播時間)のみを用いて解析される事が多く、水平方向の解像度が数km以上など空間分解能が反射法に比し大きく劣る。

この状況を大きく改善し得るのが、屈折法で観測される波動場を活用して地下構造をイメージングする波形インバージョン解析手法である。波形インバージョン解析は一般に稠密な波動場観測が必要となるため、OBSを用いた海域屈折法探査では活用例は未だ多くはないが、Kamei et al. (2013, EPSL) や Gorszyczek et al. (2017, JGR) など海洋研究開発機構が南海トラフ域で実施した稠密OBS探査データ(OBS間隔が1km)によって、走時解析に比して遥かに高解像度で地震波速度構造がモデリングできることが示され始めている。

そこで、我々は海洋研究開発機構が実施した二つの海域、南海トラフ域(Kamei et al., 2013と同じ調査)、伊豆小笠原前弧域、で取得した稠密OBS屈折法探査データに波形インバージョン解析手法を適用し、その可用性について検討した。その結果、波形インバージョン解析の結果は走時解析結果に比して圧倒的に高解像度であるばかりでなく、イメージングされた速度境界は反射法によって把えられる浅部堆積層の地震波反射面分布とも非常によい一致を示すこと、さらにはそれらの速度境界が反射法ではイメージングができない深度まで続いていることなどが確認できた。これらの結果はOBS屈折法データに波形インバージョンを適用することで、地殻構造研究が大きく進展することを改めて認識させるものである。

本講演では、南海トラフ域、伊豆小笠原前弧域における波形インバージョン解析結果を示すとともに、その結果を反射法イメージング結果と比較し、OBSデータ解析における波形インバージョン解析手法の実用性について議論する。また、間引きテストの結果などにもとづき、今後の海域地殻構造探査の進むべき方向などについても議論する。

Seismic velocity structure monitoring of the Nankai accretionary prism from ambient noise correlations during Chikyu drilling

*Takashi Tonegawa¹, Toshinori Kimura¹, Kazuya Shiraishi¹, Eiichiro Araki¹, Masataka Kinoshita², Yoshinori Sanada¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo

2018年10月から2019年3月にかけて、地球深部探査船「ちきゅう」によって南海トラフC0002孔の掘削が行われた（国際深海科学掘削計画（IODP）第358次研究航海）。この掘削中の海底地震計記録を用いて付加体の構造モニタリングを行うため、2018年11月から2019年5月にかけてC0002孔から半径800 m以内に6点、半径4-10 km付近に4点の海底地震計を設置し、(1)掘削中の海底常時振動の記録、(2)「ちきゅう」からのエアガン発震、(3)海底広域研究船「かいめい」からのエアガン発震の記録を取得した（Kimura et al. JpGU2019）。本研究では、これらの海底地震計の波形記録に相互相関解析を適用して反射波の抽出を試み、船舶によるエアガン記録と比較してそれらの同定を行い、さらに、同定された反射波の位相・振幅の時間変化の有無を検証する。

海底地震計と孔内（海底下約900 m）に設置された地震計の波形（ノイズ）記録に相互相関解析を適用したところ、4-20 Hzの帯域で二種類の信号を取得できていることがわかった。一つはロータリー掘削中のドリルビットと地層のトルクによって生じる上向きに伝播するS波（ビットシグナル：ドリルビットで地層を掘削する際の連続的な振動）で、もう一つは「ちきゅう」のアジマススラスタ（船舶の推進装置）や掘削機器の動作による船体振動を震源とする音波が海中を伝わりさらに海底下を下向きに伝播するP波である。これらが卓越する時間帯は、ドリルビットの回転率の情報により区別することが可能なこともわかった。本研究では、海底下から戻ってくる反射波を対象にしているため、船体振動による地震波のみを使用する。

C0002孔を通る20 kmの測線（N30°W）上で、「かいめい」によるエアガン発震が行われた。それらの海底地震計記録の水平動成分を見ると、P波から遅れて6秒付近に分岐断層から、8秒付近に海洋性地殻上面からのPS反射波が確認できた。「ちきゅう」の船体振動記録から得た相互相関関数と、「ちきゅう」によるエアガン発震から得た相互相関関数を比較すると、完全に一致とは言えないまでも、非常によく似たフェイズを観測することができた。

さらに付加体の地震波速度構造の潮汐応答を調べるため、C0002孔から約3.7 km離れたDONET(Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)観測点（KMD16）の水圧計記録を用い、その水圧の大きさに分けてスタックを行った。その結果、水圧の値（荷重）が大きいときのほうが小さいときのものに比べて、反射波の振幅が大きくなることがわかった。その一方で、走時の系統的な変化は見られなかった。このことは、海底での水圧が大きいときに海底下に存在する地震波速度不連続面の速度コントラストが上昇していることを示唆している可能性がある。

謝辞：DONETの水圧計記録を使わせていただきました。また、「ちきゅう」・「かいめい」・「よこすか」の関係者の皆様に感謝申し上げます。

Underthrust turbidite facies affecting variation in interplate coupling along the Nankai subduction zone

*Jin-Oh Park¹, Tetsuro Tsuru²

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology

Trench sediments get involved in subduction-zone processes such as interplate coupling and megathrust earthquake generation. Although recent seafloor geodetic observations have revealed variation in interplate coupling along the Nankai subduction zone, what constrains the variation is not fully understood. Based on seismic reflection characteristics and drilling results, we mapped three Miocene turbidite facies within the Shikoku Basin sedimentary section incoming to the Nankai subduction zone: western turbidite (WT), central turbidite (CT), and eastern turbidite (ET). These turbidite facies are apparently discrete, and also underthrust along the megathrust fault (i.e., décollement) immediately beneath the overlying accretionary wedge. An inferred landward extension of the three turbidite facies correlates well with the recent slip-deficit rates (SDRs) (Yokota et al., 2016) indicative of interplate coupling. The ~200-km-wide, sheet-like WT overlaps partially with a high-SDR region ($\text{SDR} > 5 \text{ cm/yr}$). The underthrust WT with possibly enhanced drainage could cause low fluid pressures and high effective stresses in the footwall of the décollement, eventually affecting the high-SDR region. The ~115-km-wide, channel-filling CT is almost consistent with a moderate-SDR region ($\text{SDR} > 4 \text{ cm/yr}$) between the high-SDR region and patch. The underthrust CT deposited within erosional channels or isolated basement lows may generate local compartments of excess pore pressure in the footwall of the décollement and thus the moderate-SDR region, leading to segmentation of the neighboring high-SDR region and patch. The ~100-km-wide, sheet-like ET interbedded with thick hemipelagic mudstone facies coincides roughly with another moderate-SDR region between adjacent high-SDR patches. The underthrust ET with the less-permeable mudstone layer may cause relatively high pore pressures and low effective stresses in the footwall of the décollement, and help low-coupling condition at the moderate-SDR region and thus segment the two high-SDR patches. The shallow décollement with the high SDR in the WT region may be associated with the tsunami earthquake generation.

Relationship between three-dimensional detailed crustal structures and very low frequency earthquakes in the Nankai trough off Kumano

*Kazuya Shiraishi¹, Yasuhiro Yamada¹, Masaru Nakano¹, Masataka Kinoshita², Gaku Kimura³

1. JAMSTEC, 2. ERI, University of Tokyo, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology

南海トラフ熊野灘では、歴史的に繰り返される巨大地震のほか、スロースリップイベントや浅部超低周波地震（shallow very low frequency earthquake, 以後はsVLFE）などが観測されており、それらの発生要因やメカニズムについて理解するための調査・研究が盛んに行われている。その中で、三次元反射法データをもとに、海洋プレート形状や付加体内部の変形構造とsVLFEの関係についての詳細な議論は十分に行われていない。本研究では、反射法データ再解析により品質の改善された三次元地殻構造イメージをもとに、前縁スラスト帯の詳細地質構造とsVLFE発生の関係を明らかにする。

三次元地殻構造の解析に用いたデータは、南海トラフ熊野灘において2006年の三次元反射法地震探査で取得されたものである。地震発生帯の詳細な三次元地質構造をより良く理解するため、データに再処理と重合前深度マイグレーションを実施し、イメージ品質の改善を行った（Shiraishi et al., 2019）。ここでは、前縁スラスト帯の地質構造を見直すこととし、約30km×12kmの範囲の三次元反射波イメージについて、コヒーレンス解析を用いた不連続構造の抽出と断層の解釈、海洋地殻上面とデコルマ面のホライゾン追跡などを行った。次に、Nakano et al. (2018)によるsVLFEのCMT解推定結果について、水平方向と深度方向のBootstrap法による推定誤差に基づき、震源決定精度の比較的良好な震源のみを選別し、三次元地質構造との対比を行った。

データ再解析の結果、シーケンススラストの発達する浅部の互層ユニットより下位の、アンダースラスト堆積物の内部には複数の反射面がより明瞭になっており、これらのいくつかはスラスト群のデタッチメントと認定できる。ホライゾン追跡を行ったデコルマ面は、全体として比較的なめらかな表面形状を持って北西から南東へ深度約7kmから4.3kmまで浅くなる。そして、東側では緩やかな傾斜で海底面まで達する一方、西側では南端部で急傾斜を伴って一度浅くなってから緩やかに海底面に達する。海洋地殻上面は、同様に全体的に北西から南東へ深度約8kmから6.5kmまで浅くなる中で、地殻内の逆断層（e.g., Tsuji et al., 2009, 2013）に伴う変位や起伏が顕著である。特に、対象領域の中央部、デコルマ面の急傾斜部からは北へ約4kmの位置に、高低差約1kmのリッジが認定された。また、推定誤差の平均値以下で選別されたsVLFEのほとんどは、深度誤差が1.62km以下の精度で、海洋地殻上面近傍と厚さ約2kmのアンダースラスト堆積物の内部に位置しており、その多くが海洋地殻のリッジの北側に分布している。

海洋地殻上面の起伏とsVLFE震源分布が高い相関があるのは、海洋地殻上面の形状がsVLFEの発生をコントロールする要因の一つであることを示唆している。震源メカニズムが低角逆断層型と推定されたsVLFE（Nakano et al., 2018）の多くは、海洋地殻上面のリッジの陸側を中心として、半遠洋性泥質堆積物からなるアンダースラスト堆積物層の内部で、デコルマ面または堆積物中のデタッチメントを利用して発生している可能性が考えられる。今後、sVLFEを含む地震活動と構造との関係をさらに深く理解するために、デコルマ面や付加体内部の断層の三次元形状は欠かせない要素となる。

謝辞：本研究は、JSPS科研費基盤S（JP15H05717）によりサポートされています。

Lithium isotope detects slab-derived fluids in spring water from the Median Tectonic Line fault zone in Shikoku, Japan

*Yoshiro Nishio¹, Satoshi Tonai¹, Yu Inokuchi¹, Emika Nakamura¹

1. Kochi Univ.

日本のような沈み込み帯においては、海溝を通じて地下深部に注入された海洋プレートから、地下深部の高温高圧によって水が放出される（＝「脱水」が進行する）。一方、沈み込んだプレートの年代が大きく異なる太平洋プレートとフィリピン海プレートでは、脱水の様式が大きく異なる（例えば、片山他, 2010）。東北日本下に沈み込む太平洋プレートは、1.3億年前と古くに海嶺で作られたため低温である。そのため、東北日本の火山前線に達するまでの前弧域で、太平洋プレートからの「脱水」はさほど進行せず、火山前線まで沈み込んで、ようやくプレートから顕著な脱水が起こるようになる。一方、西南日本下に沈み込むフィリピン海プレートは、2千年前に比較的最近に作られたためまだ熱い。そのため、西南日本の火山前線に達するまでの前弧域で、フィリピン海プレートから「脱水」が激しく起こっていることが予測される。前弧域のマントルは、溶融が起こるほど温度が高くないため、西南日本前弧域では、地下深部の高温高圧によってプレートから放出された水が上昇する「水みち」が多数存在することが予測される。そして、その水は地殻内の断層を辿って地表に湧出していると考えられる。この観点から、西南日本前弧域は、プレートから放出された水の調査研究に非常に適した場所といえる。

地下の流体分布の調査研究においては、電気比抵抗構造探査や地震波トモグラフィーといった地球物理学的手法が強力なツールであるが、流体の起源部を特定することは地球物理学的手法では難しい。そこで、地表で採取する湧水の地球化学など物質科学的知見を併用することで、より高度な深部起源流体像を得ることが期待される。しかし、深部由来の流体が地表まで上昇する過程で地表水の混入は避けることができない。これまでも温泉の地球化学的調査研究は行われてきたが、従来から利用されていた伝統的な地球化学指標の多くが地表水混入の影響を大きく受けて、深部由来流体の情報を得ることは困難であった。伝統的地球化学ツールの中でも、ヘリウム同位体指標は地表水混入の影響が少ないが、マントル成分の検出に優れたツールであって、スラブ起源成分を直接検出することはできない。この理由で、これまで湧水試料の中からスラブ起源成分を特定できた地球化学研究はない。

最も軽いアルカリ金属元素であるリチウム（Li）は、水に分配されやすい元素の1つである。岩石を含む水溶液は温度が上昇すると共に、水溶液中のLi濃度が急速に上昇する。実際に河川水のような低温しか経験していない地表水に比べると、温泉水など高温を経験した水のLi濃度は有意に高い。地表水と高温を経験した深部流体のLi濃度の差が極めて大きいため、地表水混入の影響はLiの場合は他の元素に比べるとはるかに小さい。流体相に分配されやすい特徴は、Li以外のアルカリ金属元素の共通した特徴であるが、Liは他のアルカリ金属元素と異なって軽元素の安定同位体比（ $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ ）を利用することができる。水と岩石が共存する系において、岩石との反応温度が高くなるほど水溶液の $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ 比は反応した岩石の値に近づき、流体の起源温度の推定を可能とする。特に周囲に火山が存在しない前弧域においては、得られた起源温度から流体の起源深度を推定することができる。このように深部流体の強力なツールとなるLi同位体指標であるが、最近まで分析が困難であったため、他の地球化学指標に比べると得られた知見は限られていた。

中央構造線は日本島弧における最も活動的な断層帯の1つである。断層帯は地下深部の流体の上昇経路として期待され、より深部由来の流体を検出できる。本研究では、西南日本前弧域で上昇するスラブ起源流体を特に四国中央構造線付近の湧水中から検出することを試みた。その結果、四国の中央構造線付近の湧水中のLiはスラブ起源であることが見えてきたため本研究発表で説明する。

参考文献：片山他(2010) 地学雑誌112, 205-223

The velocity structure beneath the Aira caldera, deduced from the seismic exploration (4)

*Hiroki Miyamachi¹, Reji Kobayashi¹, Hiroshi Yakiwara¹, Shuuichiro Hirano¹, Takeshi Kubo¹, Naohiro Unno¹, Takeshi Matsushima², Kazuya Uchida², Rintaro Miyamachi², Hiroshi Katai³, Takuo Shibutani³, Tsutomu Miura³, Jun Nakagawa³, Itaru Yanada³, Takeshi Tameguri³, Kosei Takishita³, Kazuho Nakai³, Yusuke Yamashita³, Yuta Maeda⁴, Shinichirou Horikawa⁴, Kenjiro Mitsuhiro⁴, Takashi Okuda⁴, Shuhei Tsuji⁴, Naoki Sogawa⁴, Kazuo Nakahigashi⁵, Eiji Kurashima⁶, Tomoaki Yamada⁶, Miwako Ando⁶, Shinichi Tanaka⁶, Satoshi Ikezawa⁶, Toshinori Sato⁷, Mare Yamamoto⁸, Satoshi Hirahara⁸, Takashi Nakayama⁸, Ryusuke Azuma⁸, Shuichi Suzuki⁸, Tomoki Tsutsui⁹, Ryuichi Takei⁹, Yuya Tada⁹, Hiroaki Takahashi¹⁰, Hiroshi Aoyama¹⁰, Mako Ohzono¹⁰, Takahiro Shiina¹⁰, Masamitsu Takada¹⁰, Masayoshi Ichiyanagi¹⁰, Teruhiro Yamaguchi¹⁰, Chihiro Ito¹⁰, Yuki Susukida¹⁰, Yoshio Murai¹⁰, Tatsuya Nakagaki¹⁰

1. Kagoshima University, 2. Kyushu University, 3. Kyoto University, 4. Nagoya University, 5. TUMSAT, 6. University of Tokyo, 7. Chiba University, 8. Tohoku University, 9. Akita University, 10. Hokkaido University

〔1〕 人工地震探査概要

南九州の大隅半島～始良カルデラ～薩摩半島～甑海域を東西に横断する約165 km長の人工地震探査測線を設定し、2017年と2018年に観測を実施した。陸域の測線上に約100m間隔で830点、海域の測線上には1 kmまたは2 km間隔で42点の観測点を展開した。人工震源には、2017年は陸域で9カ所の爆薬震源（各薬量200kg）を、2018年はエアガン（容量6000 cubic inch）を海域測線上で100m（一部の区間では50m）間隔で発震すると共に、陸域では大型パイプレータ4台による多重発震を使用した（JpGU, 2019）。

〔2〕 走時データと解析手法

2018年のエアガン震源による走時データは膨大な量であるため、今後、データ整理が終わり次第、データ解析に用いる。今回は、2017年度のP波初動走時データに2018年の観測で得られた新たなP波初動走時データの一部を加え、解析を実施した。解析手法は、これまでと同様に、二次元トモグラフィー法（LTI法（Asakawa and Kawanaka, 1993）、SIRT法）である。高密度な観測点配置と高密度な爆薬震源及びエアガン発震を考慮し、トモグラフィー法における各セルサイズを200m×200mとし、測線下の詳細な速度構造（暫定版）の推定を試みた。また、エアガン発震時に曳航したストリーマーケーブルのデータの解析も行った。

〔3〕 解析結果

ストリーマーケーブルデータの解析により、測線B（桜島の北方海域）では、水平成層を示唆する複数の明瞭な反射面が深さ2km以浅で確認できた。一方、測線H（桜島の南方海域）測線D（甑海域）では、多くの断裂構造が検出された。

主測線下の速度構造については、データ量が増えたことにより、従来の解析結果よりも、より安定した解が得られる傾向である。発表時に詳細を報告する。

P- and S-wave attenuation structures in the Ryukyu Arc, Japan

*Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹

1. Okayama University

九州南端から台湾北東にかけて位置する南西諸島を対象として、Komatsu and Takenaka (2017, IASPEI)はP波およびS波の減衰トモグラフィを行った。その際、震源スペクトルのコーナ周波数 f_c は気象庁マグニチュードから算出し、 Q が周波数に独立であるとして減衰量 t^* を決定した。本研究では、南西諸島で発生した地震について、Sコード波のスペクトル比から推定した f_c （小松・竹中，2018，地震学会）を採用し、 Q の周波数依存性を考慮して t^* を決定した。決定した t^* を用いて減衰トモグラフィを行い、 Q^{-1} の3次元空間分布を推定した。対象とした地震は、南西諸島で2002年6月～2017年5月の期間に発生した2874イベント（Fig. 1）である。観測波形記録のP波およびS波初動を3秒間切り取り、振幅スペクトルを計算した。 Q が周波数 f に依存して変化すると仮定すると、1 Hzの Q_0 を用いて $Q = Q_0 f^\alpha$ と表現される。本研究では、P波とS波のスペクトルから、 Q の周波数依存性を考慮した t^* の決定を行い、 α の最適値を見積もった。その値は、P波とS波でそれぞれ0.55と0.8である。次に、 t^* をデータとして地震波減衰トモグラフィを行った。波線追跡に必要なモホ面は公開されている最新の反射法探査の結果をコンパイルしてモデル化し、沈み込むフィリピン海(PHS)プレート上面は最新のモデルを採用した。推定された Q^{-1} の空間分布より、以下のことが分かった。沖縄トラフ内や火山活動が活発な地域において、高減衰領域が広がっている。これは地下から供給される高温物質や流体が原因と考えられる。沈み込むPHSプレートに沿った Q^{-1} の分布と南西諸島で発生した短期的スロースリップ・イベント(SSE)の断層モデルを重ねると（Fig. 2），PHSプレート直上の高減衰域と一致した。沈み込むPHSスラブから供給された流体（例えば、脱水した水）がSSEに大きく関わっていると考えられる。

謝辞：防災科研，気象庁，鹿児島大の波形記録，気象庁一元化処理震源データを使用しました。波線追跡にはZhao et al. (1992, 1994)によるコードを使用しました。

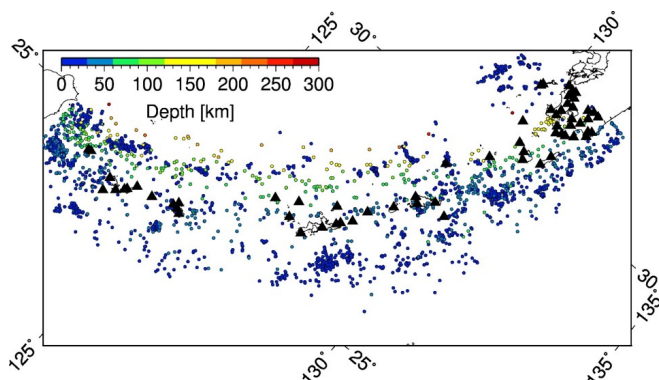


Fig. 1: Events and stations in this study. Colored circle and triangle indicate the epicenter and the station, respectively. Color of each circle denotes the depth of the event.

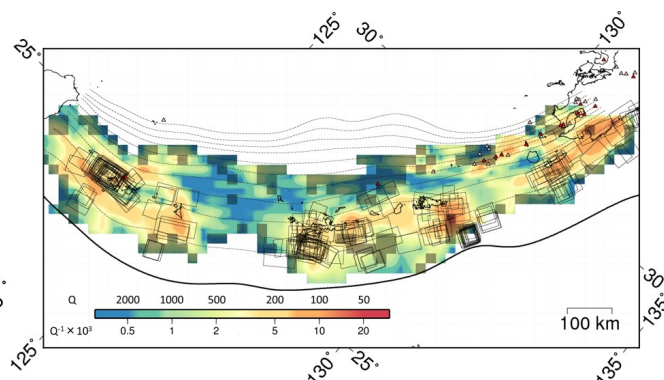


Fig. 2: Q^{-1}_p structure along a curved surface located 5 km above the PHS plate. Black rectangles show SSEs estimated by Nishimura (2014). Dashed lines are contours of top of the PHS plate with intervals of 20 km.

Room B | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]AM-1

chairperson:Takuji Yamada(Ibaraki University), Nana Yoshimitsu(University of Tokyo)

Wed. Sep 18, 2019 9:15 AM - 10:30 AM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S08-18] Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

*Ritsuya Shibata¹, Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹, Satoshi Ide² (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

[S08-19] Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana¹, Masatoshi Miyazawa², James Jiro Mori² (1. Graduate School Science Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University)

9:30 AM - 9:45 AM

[S08-20] Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method

*Nana Yoshimitsu¹, Takuto Maeda², Tomonari Sei³ (1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo)

9:45 AM - 10:00 AM

[S08-21] Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada¹, Meitong Duan¹, Jun Kawahara¹ (1. Ibaraki University)

10:00 AM - 10:15 AM

[S08-22] Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹ (1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan)

10:15 AM - 10:30 AM

Slip inversion using empirical Green's function considering radiation patterns

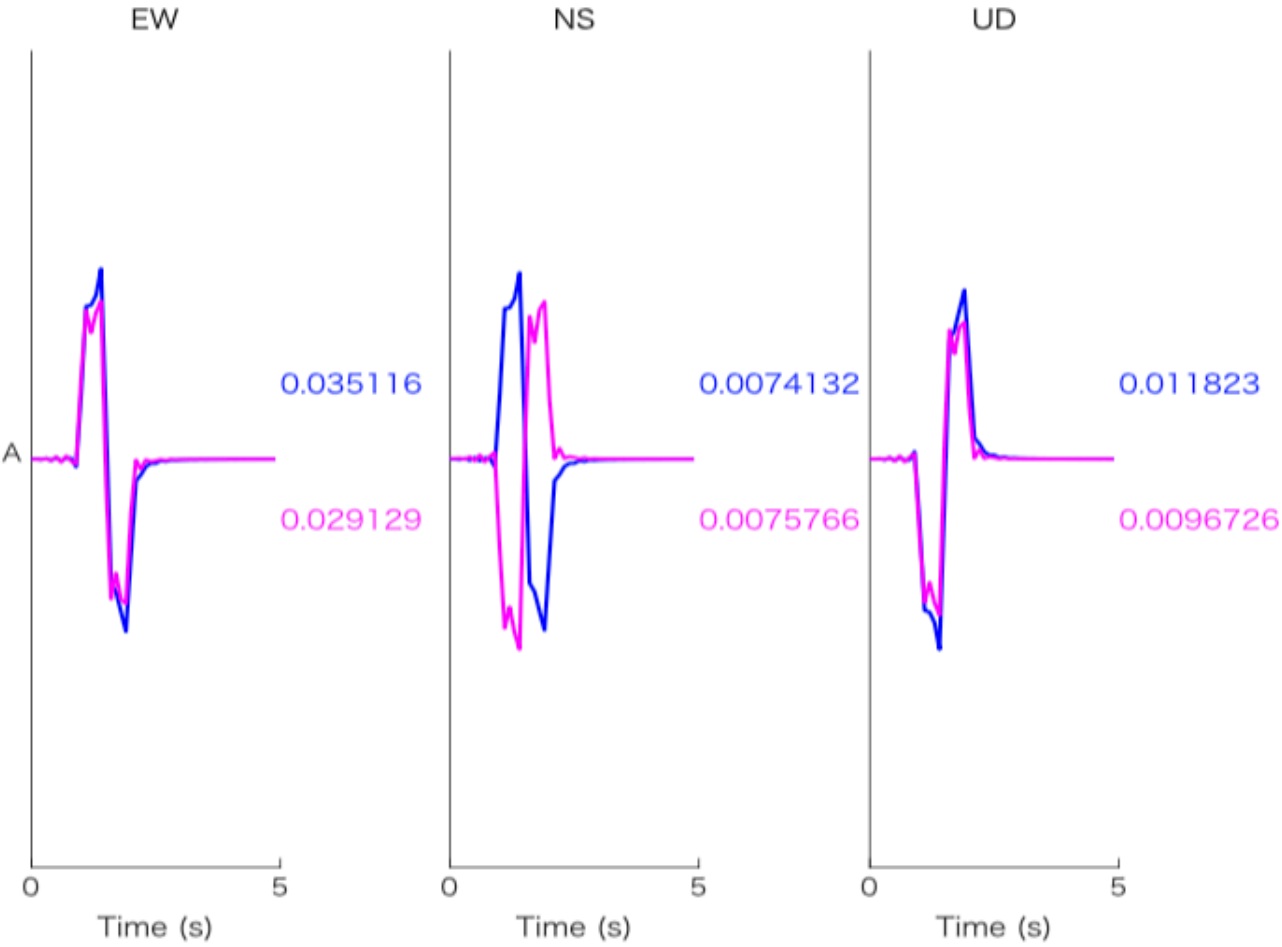
*Ritsuya Shibata¹, Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹, Satoshi Ide²

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

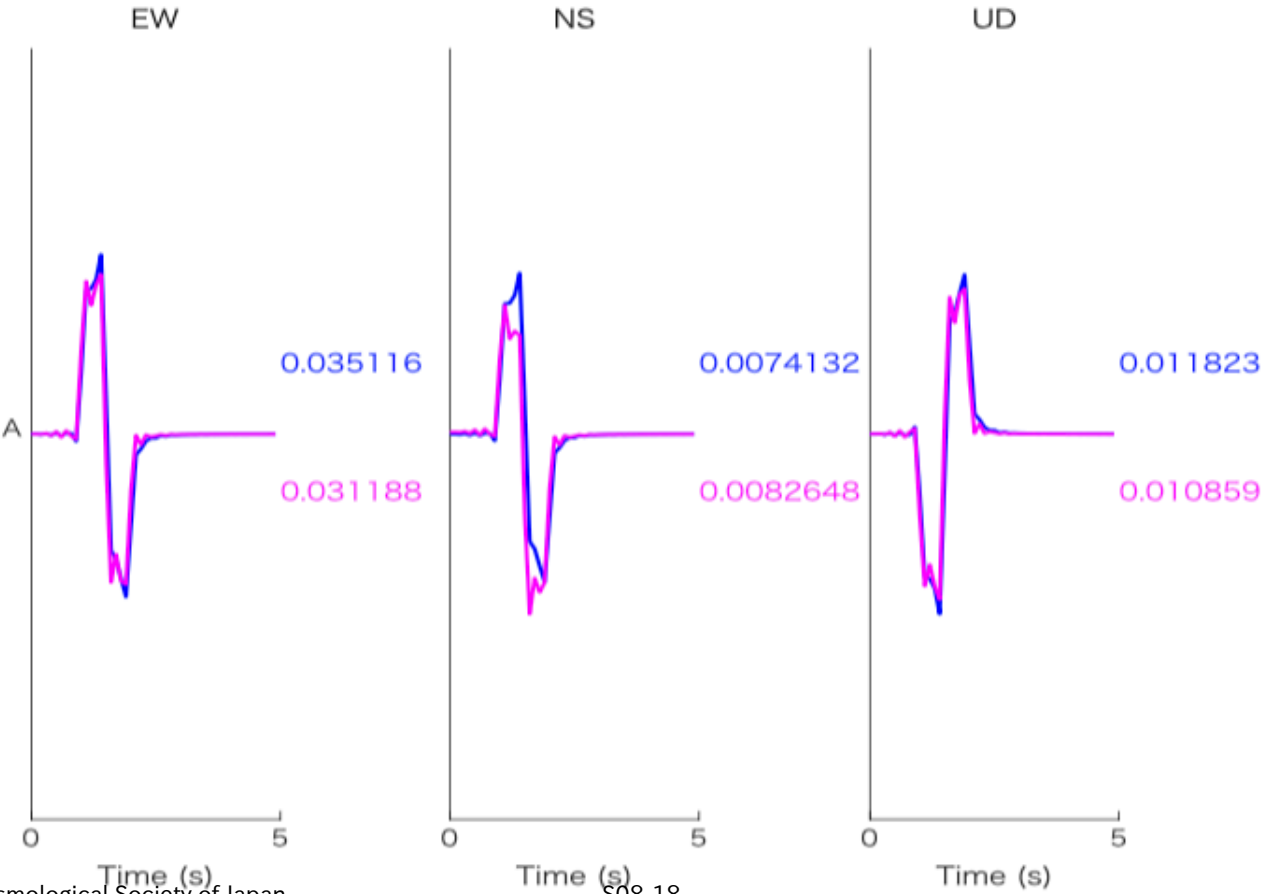
震源過程を解析する手法として波形インバージョンが広く用いられている。この波形インバージョンは、グリーン関数と滑り量を時空間でコンボリューションして生成される理論波形で観測波形を再現するアプローチであり、その波形残差を最小にするような各小断層の時間ステップごとの滑り量を最小二乗的に求めるのが一般的である。このとき、グリーン関数として、仮定した速度構造から理論的に求められるグリーン関数 (例えばBouchon, 1981; 武尾, 1985) を用いる場合と、近傍で発生した同様のメカニズムの地震波形を経験的グリーン関数 (例えばHartzell, 1978) として用いる場合がある。経験的グリーン関数は、実際の複雑な速度構造の影響を説明できる一方で、両者の震源が十分に近いことやメカニズムの類似性が要求されるため、解析対象とする地震の震源近傍に本震と似たメカニズムの地震が存在しなければ適用できないという欠点がある。

しかしながら、地震波形の複雑性に大きく寄与する観測点近傍の経路がほぼ共通であれば、震源位置やメカニズムが多少異なる地震の波形でも、放射パターンの影響を補正した上でグリーン関数として用いることができる可能性がある。そのような補正が実用的であれば、経験的グリーン関数の適用範囲を広げることが期待される。そこで本研究では、放射パターンを考慮した経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン手法を開発し、理論波形を用いてテストを行った。

具体的には、波線理論を仮定して、射出角とモーメントテンソルの情報から、対象とする地震の小断層での滑りと経験的グリーン関数に用いる地震について理論的な放射パターン (Aki and Richards, 2002) を計算し、その比を用いてP波・SH波・SV波のそれぞれについて観測点毎に補正をおこなった。放射パターンには、メカニズムが異なることによる直接的な影響と、震源位置が異なることによるみかけ上の影響があるので、一番単純なケースとして、震源位置が同じでメカニズムが異なる点震源同士、メカニズムが同一で震源位置が異なる点震源同士について、本手法による補正の効果を確認した。後者の例として、北緯40度・東経141度で深さ50kmと200kmで発生し、北緯41度・東経141.5度の地表で観測される理論地震波形を、それぞれ赤色・青色で図に示す。なお、メカニズムは走向0度・傾斜90度の左横ずれ断層を仮定している。本研究で提案した補正により、振幅が正しく評価できていることが確認できる。今後、矩形断層でのテストを行ったうえで、実データへの適用を目指す。



放射パターンによる補正をかけなかった場合の波形



Source mechanism and triggering process for the April 12th and 13th 2014 earthquake doublet in Solomon Islands

*Calvin Luiramo Qwana¹, Masatoshi Miyazawa², James Jiro Mori²

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

This abstract is the result of the study carried out on two earthquakes that occurred on 12th and 13th April 2014 in the Solomon Islands. The pair of earthquakes with magnitudes Mw 7.6 and Mw 7.4, respectively, occurred near Makira Island (San Cristobal). The depth of the main event (Mw 7.6) was 27 km and depth of the second event (Mw 7.4) was 37 km (Global Centroid Moment Tensor (GCMT)). The second event occurred 16 hours later after the Mw 7.6, approximately 20km southwest of the location of the hypocenter of the first event. Our study aims to analyze and evaluate the source mechanism for the doublet earthquakes and evaluate the interrelation between the two events, especially to investigate

“Why the Solomon Islands has a high rate of doublet earthquakes” (Lay and Kanamori, 1979; Schwartz et al., 1989; Felzer et al., 2004, Yamamoto et al., 2002 and Xu and Schwartz, 1993). The study aims to establish a framework in which to understand the mechanisms of the triggering process for these large doublet events. The study uses static Coulomb stress function to evaluate if the Mw 7.4 earthquake was triggered by static stress changes. Initially, the slip distributions of ruptured faults for the two events was determined to evaluate their source process. This was done by the inversion method of Kikuchi and Kanamori (1991). The teleseismic P waveform data from more than 20 stations Global Seismographic Network in a distance range of 30° to 90°, were used in the inversions for both events. The P-waveform data were band-passed filtered between 0.04 and 0.10 Hz to obtain the best-fits between the observed waveform and the synthetic waveform. The Green's functions were calculated and used to determine the slip distribution on the fault planes. Based on an assumed fault plane with fixed strike and dip angles placed in the region of the earthquake hypocenter and divided into subfaults, a constant rupture velocity of 2.5 km/s is assumed and the teleseismic data inverted for the slip of each subfaults

The results show that the mechanism for the Mw 7.6 first event is left-lateral strike-slip faulting for a fault plane of strike 116, dip 74, and rake 24 degrees. The results for the mechanism of the Mw 7.4 event indicates thrust faulting on a fault plane-oriented WNW –ESE with two dip angles, i.e. a south dipping fault plane with strike 104 degree, dip 46, rake 86 (Fig 1.7) and a north dipping fault with strike 279, dip 44 and rake 94.

We calculated the values for the Coulomb Failure Stress function at the hypocenter for the second event and obtained a value of +48.59 kPa for the north dipping fault and a value of +18.20.64 kPa for the south dipping plane.

The spatial distribution of aftershocks for 16 hours seems to be more consistent with the northern dipping fault for the triggered event. Both cases, however, show increase of stress changes which encourages the likelihood that the second event was triggered by static Coulomb stress. We proposed a model that might support the complexity of the region to produce these doublet events.

Evaluation of source parameters in the Bayesian framework by Markov Chain Monte Carlo method

*Nana Yoshimitsu¹, Takuto Maeda², Tomonari Sei³

1. ERI, UTokyo, 2. Hirosaki Univ., 3. IST, UTokyo

Stress drop is an important factor to express earthquake source characteristics, and it is utilized for the hazard assessment. To estimate the stress drop, we usually compare the theoretical source spectrum representation with the spectrum of the observed waveforms. In this process, we estimate seismic parameters (corner frequency and seismic moment) that are necessary to calculate the stress drop. Previously, the estimation error of these parameters decreased the reliability of the stress drop estimates. For evaluating the estimation accuracy and trade-off among parameters, we used Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method in the Bayesian framework for stress drop analysis (Yoshimitsu et al., SSJ, 2018) instead of grid search.

In this study, we introduce F-distribution into MCMC as a probability density function instead of normal distribution. To estimate the stress drop, we use the spectral ratio of co-located two earthquakes to cancel the path effect. The ratio of power spectrum between observed and theoretical spectrum is represented by chi-square, and the ratio of two chi-squares is represented by F-distribution. Thus, the ratio of the observed power spectrum of two earthquakes divided by the ratio of the theoretical power spectrum of two earthquakes is represented by F-distribution.

We focused on a cluster consisted of 36 earthquakes that occurred from 2015 May to 2016 November in Oklahoma. The spectral ratios between the large event ($M_L = 4.1$) and co-located small events ($2.2 < M_L < 3.7$; < 2 km from the large event) were formed to remove path effects. We analyzed 5.12 seconds after twice the S-arrival time with the band-pass filter of 0.5 to 30 Hz. To examine the probability of corner frequencies and moment ratio of each event pair, we applied the Metropolis-Hastings algorithm of the Markov Chain Monte Carlo method that is a random walk adaptation. Each event observed a different number of stations, and we used as many stations as possible. To calculate the likelihood, we use all spectral ratios simultaneously. We update the value of moment ratio and two corner frequencies with 200,000 iterations.

Sampling distribution showed strong trade-off among all three parameters. Moment ratio has a negative correlation with f_{c1} and f_{c2} . f_{c1} has a positive correlation with f_{c2} . The histogram of the sampling showed a single peak in most cases, but some events showed multimodal histogram.

We compared the results obtained from MCMC with F-distribution and normal distribution. Both calculations showed almost similar estimates, but the sampling distribution was different. In this analysis, F-distribution is suitable for probability density function than normal distribution because sampling distribution is reasonable.

Acknowledgements : NY, TM and TS are supported by JST CREST Grant Number JPMJCR1763. NY is supported by JSPS KAKENHI, Grant Number 19K14812.

Spatiotemporal characteristic of frictional properties on the subducting Pacific Plate off the Tohoku region, Japan

*Takuji Yamada¹, Meitong Duan¹, Jun Kawahara¹

1. Ibaraki University

1. はじめに

東北地方東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う大地震が繰り返し発生している。本研究では、2003年1月から2018年12月に東北地方東方沖で発生した中規模地震（4.4 Mw 5.0）のうち、2.で説明するとおり、プレート境界面の摩擦特性を反映していると考えられる1735地震を選び出し、応力降下量の解析を行った。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0；以下では2011年東北地震と略す）を含む過去の Mw 7.0 の地震時すべり分布との関連を議論することにより、応力降下量の空間分布が示唆するプレート境界面の摩擦特性の時空間分布およびその物理的背景について考察を行った。

2. 解析地震の選択基準

本研究では深さ方向の震源決定精度を考慮して、Nakajima and Hasegawa (2006)の推定した太平洋プレート境界面から±15 km の深さで起きた中規模地震（4.4 Mw 5.0）を選び、解析対象とした。なお本研究では、気象庁によって決定されたマグニチュードMjmaがモーメントマグニチュードMwに等しいと仮定しているが、この仮定の妥当性についても検討済みである。また、解析対象地震のうち、防災科学技術研究所によってメカニズム解が求められている地震については、太平洋プレートの沈み込み角度と調和的な節面を持つことを確認済みである。

3. 応力降下量解析

Yamada *et al.* (2010, 2015, 2017) の手法を用いて、応力降下量の解析を行った。まず、2012年から2018年に発生したMw3.5の地震のうち、解析対象の中規模地震（4.4 Mw 5.0）の震源から最短距離にある地震の観測波形を経験的グリーン関数とした。次に、解析対象の地震の観測波形スペクトルを経験的グリーン関数のスペクトルでデコンボリューションし、震源スペクトルがオメガ2乗モデルに従うとの仮定のもと、解析対象地震のコーナー周波数を求めた。最後に、断層面が円形であり、かつ破壊伝播速度がS波速度の90%であると仮定して、Madariaga (1976) のモデルを用いてコーナー周波数から応力降下量を計算した。

4. 結果および考察

各地震の応力降下量の解析結果をもとに、緯度・経度それぞれ0.1度ごとに平滑化した応力降下量分布をFig. 1に示す。Fig.1aより、応力降下量の解析結果には空間的な不均質性がみられ、Iinuma *et al.* (2012)による2011年東北地震の地震時すべり分布と比較すると、地震時すべり域周辺に大きな応力降下量が分布していることがわかる。この結果は、摩擦強度の大きい領域が2011年東北地震時にバリアとして働いたことを示唆している。2011年東北地震前後での時間変化を調べると（Fig.1bc）、宮城県沖および福島県沖におい

て、2011年東北地震後に応力降下量が低下した領域が見られる。現時点でこれらの原因は不明だが、より詳細な時間変化の調査から原因究明を図りたい。なお、本研究の解析対象領域については、Uchide *et al.* (2014)が2011年東北地震前の応力降下量の空間分布を求めている。本研究とは解析手法が異なるが、本研究はUchide *et al.* (2014)の結果と調和的である (Fig. 1b)。このことは、本研究の解析結果の信頼性の高さを示唆している。

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

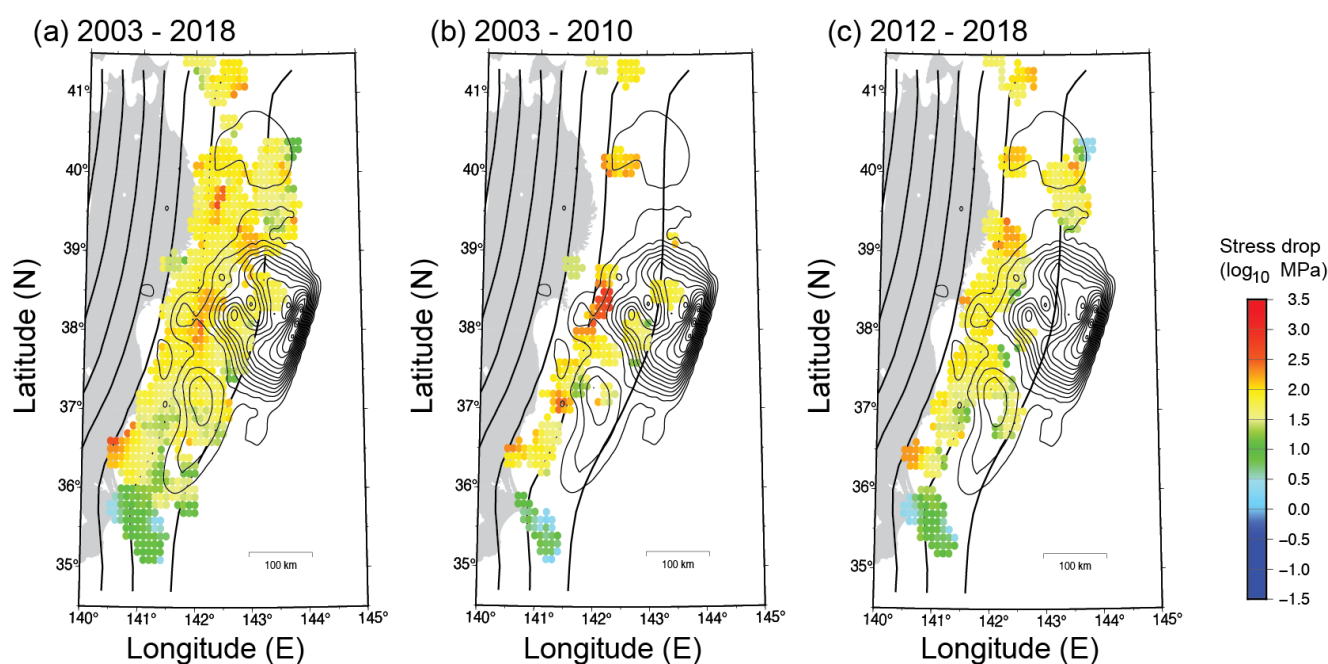


Figure 1. Spatial pattern of stress drops estimated from moderate-sized earthquakes with $4.4 \leq M_w \leq 5.0$ that occurred (a) in 2003 through 2018, (b) from 2003 to 2010, and (c) from 2012 to 2018. Contours indicate the coseismic slip distribution of the 2011 Tohoku earthquake with M_w 9.0 (Inuma *et al.*, 2012) at intervals of 2 m. Bold lines in NS direction express the depth of the upper surface of the subducting Pacific Plate (Nakajima and Hasegawa, 2006) at intervals of 20 km.

Possible aseismic phenomena causing the precursory activity and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake, Kyusyu, SW Japan

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Japan

地震の発生要因としては、断層上のせん断応力の増加の他に、摩擦強度の低下が考えられる。このことは、地震の発生に間隙水圧の変化が深く関わっていることを示唆する (例えば, Hasegawa, 2017; Hubbert and Rubey, 1959; Nur and Booker, 1972; Sibson, 1992)。従って、地下の流体の挙動を調べることは地震の発生メカニズムを考える上でとても重要である。震源 migration は、地下に存在する流体の移動や面に沿った非地震性の滑りのような非地震的な現象に起因するとよく説明される。このように、詳細な震源の時空間分布は、地殻や上部マントルで生じている非地震的な現象を調べるための重要な手がかりとなる。

2017 年 7 月 11 日 11:56 (JST) に、鹿児島湾の深さ約 10 km を震源とする M 5.3 の地震が発生した。本震震源の周辺では、前年の 2016 年 12 月頃を境に地震活動が活発化していたことがわかっている。本研究では、M 5.3 の地震の前後で発生した地震について、波形相関を用いた精密な震源再決定により求めた詳細な震源分布を用いて、振幅比によって決定されたメカニズム解との比較や本震の断層サイズとの比較等を行うことで、一連の地震活動活発化の原因について調べた。

まず、気象庁一元化震源カタログに記載されている 2010 年 1 月から 2018 年 4 月の期間において鹿児島湾南部の本震震源周辺で発生した地震を対象にして、波形相関を用いることで精密な到達時刻差を求めた。この波形相関を用いて得られた到達時刻差データとカタログ記載の検測値の到達時刻差データに対し、Double-Difference 震源決定法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002) を適用した。初期震源としては、気象庁一元化震源カタログデータを用いた。

震源再決定により、気象庁一元化カタログデータでは雲状にばらついていた震源が、複数枚の面上に集中した。それらのうちの主要な面の方向は、気象庁による本震や余震の初動発震機構解や波形の振幅比を用いた手法 (Dahm, 1996) によって推定された多くの余震のメカニズム解の節面の一つと整合的であることから、これらの地震は震源のならば面上を破壊したと考えられる。

特に、前駆的活動の震源の多くは 1 枚の面上に集中し、震源が時間と共に面上を広がるような明瞭な震源 migration の特徴を示した。震源 migration の原因として、非地震性すべり (e.g. Lohman & McGuire, 2007) や流体の移動 (e.g. Parotidis, 2003)、地震発生準備過程 (e.g. Kato et al. 2016) 等が考えられているが、この震源 migration は、水頭拡散率が $0.05 \text{ (m}^2/\text{s)}$ の流体拡散モデルによる流体の移動で説明できる。余震の震源は複数枚の面状構造を示し、その活動が時間とともに浅部から深部へと移動する傾向がみられる。このような深部から浅部へと向かう震源移動の特徴は、流体の関与が指摘されている、東北沖地震後に stress shadow である東北地方中部で発生した群発地震活動の特徴 (Yoshida & Hasegawa, 2018) と良く似ている。

次に、Lin & Shearer (2007) の手法により、波形相関を計算して求めたイベント間の到達時刻差を使用して震源域における P 波と S 波の地震波速度比 V_p/V_s の推定を行った。その結果、前駆的活動について推定した V_p/V_s の値は、早期の余震よりも高い値を示す傾向がみられた。また、本震発生から 20 日以降の余震についての V_p/V_s も前駆的活動と同じような高い値を示した。これらの結果と震源分布や地震活動の時間変化との比較から、 V_p/V_s の時間変化は本震発生による流体圧の変化を反映していることが示唆される。以上の結果から、鹿児島湾の地震活動の発生には、流体による関与が考えられる。

さらに、前駆的活動の震源が形成する「面」の中には震源の空白域がみられ、本震震源は空白域の端に位置する。余震の震源もまた空白域を避けるように分布することから、本震の主要なすべり域がこの空白域に対応する可能性がある。スペクトル比法を用いて推定した本震震源スペクトルのコーナー周波数から求めた本震の断層サイズはこの空白域の大きさと整合的であった。このことは、本震のすべり域が空白域に位置することを支持し、断層上の摩擦強度の不均質を示しているのかもしれない。

以上の前駆的活動と余震活動にみられた震源の空白域および震源の migration などの特徴は、次のように考えると説明できるかもしれない。(1) 本震の発生に先立ち既存の亀裂等の弱面に流体が浸入し、弱面の摩擦強度が減少することで、活発な前駆的活動が生じた。そして、流体が弱面に沿って移動することに伴い、前駆的活動の発生場所も徐々に移動した。この際、トリガーされた非地震性すべりや本震の前駆的すべりも生じて地震発生・震源移動に貢献したかもしれない。(2) 前駆的活動がさらに進行し、前駆的活動では地震すべりが生じなかった空白域においてもついに本震すべりに至った。(3) 本震に伴う応力変化により広範囲で余震が生じた。また前駆的活動や本震に関与した流体が複数枚の弱面を伝わりながら浅部へ移動していった結果、震源も深部から浅部へと移動した。

Room B | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]AM-2

chairperson:Toshiko Terakawa(Nagoya University), Keisuke Yoshida(Tohoku University)

Wed. Sep 18, 2019 10:45 AM - 12:00 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S08-23] **Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake**

*Keisuke Yoshida¹, Tatsuhiko Saito², Taka'aki Taira³, Kentaro Emoto¹, Toru Matsuzawa¹
(1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley)

10:45 AM - 11:00 AM

[S08-24] **CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions**

*Hirofumi Kowari¹, Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹, Taro Okamoto², Takeshi Nakamura³
(1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-25] **Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake**

*Yoshihisa Iio¹, Hiroshi Katao¹, Kazuhide Tomisaka¹, Masayo Sawada¹, Takuo Shibutani¹, Airi Nagaoka¹, Jun Nakagawa¹, Shukei Ohyanagi¹, Shota Hara¹, Mitsu Sakaguchi¹, Abuyama Supporters¹, Satoshi Matsumoto², Takeshi Matsushima², Megumi Kamizono², Shin-ichi Sakai³, Masataka Masuda³, Shin-ichi Tanaka³, Yoshinari Hayashi⁴ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University)

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-26] **A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks**

*Toshiko Terakawa¹, Mitsuhiro Matsu'ura², Akemi Noda³ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED)

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-27] **Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting**

*Mitsuhiro Matsu'ura¹, Toshiko Terakawa², Akemi Noda³ (1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

11:45 AM - 12:00 PM

Stress release process along a crustal fault during the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake

*Keisuke Yoshida¹, Tatsuhiko Saito², Taka'aki Taira³, Kentaro Emoto¹, Toru Matsuzawa¹

1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. UC Berkeley

Stress release process ongoing along a crustal fault examined through the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen, NE Japan, earthquake

Keisuke Yoshida, Tatsuhiko Saito, Taka'aki Taira, Kentaro Emoto, Toru Matsuzawa

Stress accumulation and release processes in the crust are less understood compared to those in the plate boundary. One difficulty in examining the temporal evolution of stress along a crustal fault comes from weakness of geodetic signal due to aseismic slip possibly proceeding along a crustal fault. Spatiotemporal variations in foreshock and aftershock activities can provide key constraints on time-dependent stress and deformation processes in the crust.

The 2017 M 5.2 Akita-Daisen intraplate earthquake in NE Japan was preceded by an intense foreshock activity and triggered a remarkable sequence of aftershocks. In this study, we examine the spatiotemporal distributions of foreshocks and aftershocks and determine the coseismic slip distribution of this earthquake. In this study, we examine the spatiotemporal distribution of precisely relocated hypocenters of foreshocks and aftershocks and the coseismic slip distribution of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake in NE Japan, to shed light on processes that release stress in the crust.

Our result indicates that the seismicity concentrates forming a planar distribution with N-S strike dipping slightly eastward consistent with their focal mechanisms. We find a migration of foreshocks towards the mainshock rupture area, suggesting that they were triggered by aseismic phenomena such as fluid migrations and episodic aseismic slip events. Alternatively, the foreshock migration might be related to the quasi-static expansion of the slow slip associated with the nucleation phase of the mainshock.

The mainshock rupture was propagated primary toward north with lower coseismic slip in foreshock regions. Aftershocks were intensely triggered near the edge of large coseismic slip regions where shear stress increased after the mainshock. The aftershock region expanded along the fault strike with the logarithm of time, which would be attributed to the post-seismic slip of the mainshock.

The postseismic slip possibly triggered repeating earthquakes with $M \sim 3$. We applied the relationship between fault slip and earthquake magnitude proposed by Nadeau & Johnson (1996, BSSA) to the observed repeating earthquakes in this study for exploring post-seismic slip. The resultant post-seismic slip amount is comparable or slightly larger than the maximum coseismic slip amount of 28 cm. Our observation is consistent with previous work for California micro-earthquakes (Hawthorne et al., 2016, JGR).

As a whole, foreshocks, the mainshock, aftershocks and post-seismic slip released stress at different segments on the fault, which might reflect the difference in frictional properties. Furthermore, there are probably aseismic slip behind the occurrences of aftershocks and foreshocks, which also contributed to the redistribution of stress. Such observations are similar to those observed for interplate earthquakes, which is consistent with the model that the deformation processes along plate boundaries and the crustal fault are not essentially different.

The static stress drop of the mainshock is estimated to be 4.7 MPa, the apparent stress is 1.3 MPa, and the radiation efficiency is 0.55. The radiation efficiency might be relatively high compared to recent observations of crustal earthquake. It might suggest that the present earthquake occurred on a rather mature fault. The similarity to interplate earthquake might be relevant to the maturity of the fault.

CMT inversion of aftershocks of the Yufu, Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake using 3D FDM Green functions

*Hirofumi Kowari¹, Masanao Komatsu¹, Hiroshi Takenaka¹, Taro Okamoto², Takeshi Nakamura³

1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2016年4月16日1時25分に熊本県を震源とする M_{JMA} 7.3の熊本地震が発生し、約32秒後に大分県の由布を震源とする M_{JMA} 5.7の地震を誘発した。誘発地震発生後1ヶ月以内に、大分県由布から別府湾にかけて、誘発地震の余震と考えられる M_{JMA} 3.6から M_{JMA} 5.4のイベントが4回発生した（図1）。我々はこれらの余震のうち規模の大きい2つのイベント：2016年4月16日7時11分（event1, M_{JMA} 5.4）、4月29日15時9分（event2, M_{JMA} 4.5）の強震波形記録に3次元構造モデルを用いたCMTインバージョンを適用した（小割・他, 2018, JpGU）。本研究では、先の2つのイベントの再解析の他に、残り2つのイベント：2016年4月16日8時27分（event3, M_{JMA} 3.7）、同日23時26分（event4, M_{JMA} 3.6）の解析を行い、地震の位置、規模、震源メカニズムを推定する。インバージョンにはOkamoto *et al.* (2017) のコード、グリーン関数の計算には陸上・海底地形を考慮できるNakamura *et al.* (2012) の3次元差分法コードを用いる（計算領域は、図2 a）。このとき3次元構造モデルには、地震基盤より上は地形とともに3次元地盤構造モデル（吉見・他, 2017）、地震基盤より下は地震調査研究推進本部の全国1次地下構造モデル（暫定版）を使用する（図2 b）。本研究で使用した波形データは、気象庁の震度観測計と防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの観測点で記録された加速度波形を積分した速度波形のうち、3点以上の観測点（×3成分）の波形を使用した。小割・他（2018, JpGU）では帯域を一律周期10秒から30秒としたが、本研究で対象としたイベントは規模が小さいことを考慮して、周期数秒のより短周期の成分までインバージョンに含めた。

ここで、結果の例として、event3（4月16日8時27分の M_{JMA} 3.7のイベント）の結果を記す。帯域は周期4秒から30秒を用い、観測記録は別府市鶴見（気象庁）、別府市天間（同）、湯布院（OIT009, K-NET）の3観測点を用いた。セントロイドの位置は、気象庁一元化震源の震央位置より南西方向約2 kmで、海水準からの深さ2 km（地表面からの深さ2.5 km）と求まった。セントロイドの深さは、気象庁一元化震源（7.0 km）、F-net CMT（5 km）と比較して浅い。この地域は火山の影響で地震発生層の下限が非常に浅いと考えられている（例えば Matsumoto *et al.*, 2016, EPS）ことと整合的である。この地震の規模は M_w 3.8と推定された。発表ではこの他のイベントの結果も示し、これらの地震の発生位置、震源メカニズムや周辺の断層分布の関係から、応力場及び誘発地震のメカニズムについて議論する。

謝辞：本研究では気象庁、防災科学技術研究所の強震記録を使用しました。

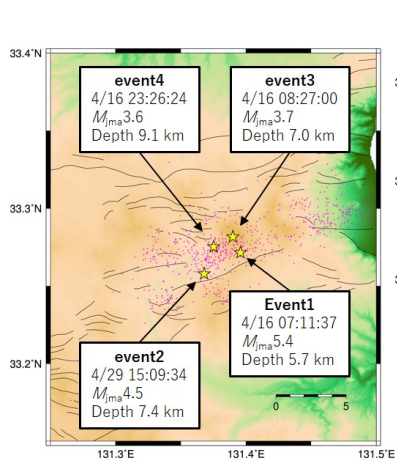


図1. 解析イベントの震央分布（星印）。紫点は2016年熊本地震の発震後24時間以内に発生した地震の震央，黒線は活断層の地表トレースを表す。

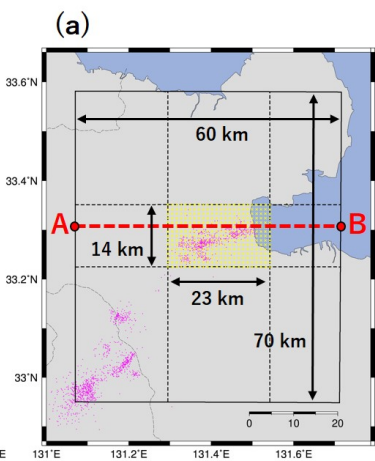
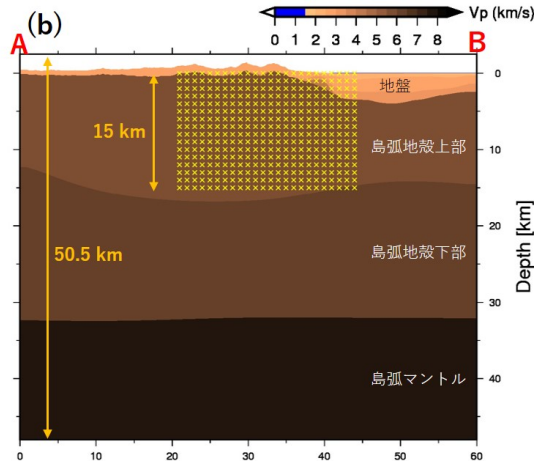


図2. (a) 計算領域（黒実線）。紫点は2016年熊本地震の発震後24時間以内に発生した地震の震央，黄色×印はセントロイド位置の候補点を表す。
(b)(a)におけるA-B直下の構造モデルの断面。



Stress field in and around the aftershock area of the 2018 Northern Osaka Prefecture earthquake

*Yoshihisa Iio¹, Hiroshi Katao¹, Kazuhide Tomisaka¹, Masayo Sawada¹, Takuo Shibutani¹, Airi Nagaoka¹, Jun Nakagawa¹, Shukei Ohyanagi¹, Shota Hara¹, Mitsu Sakaguchi¹, Abuyama Supporters¹, Satoshi Matsumoto², Takeshi Matsushima², Megumi Kamizono², Shin-ichi Sakai³, Masataka Masuda³, Shin-ichi Tanaka³, Yoshinari Hayashi⁴

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

1. はじめに

大阪府北部の地震 (Mj 6.1) は、有馬高槻断層帯(ATL)の東端部付近、京都西山断層帯(KNF)、生駒断層帯、宇治川断層など活断層が集中する地域で2018年6月18日に発生した。余震域とその周辺の104か所において臨時地震観測を行い、周辺の「満点計画」の観測点および定常観測点のデータと統合して、詳細な余震の震源分布、地震メカニズム解の空間分布、および応力場を推定した。さらに、地震発生の約10年前から継続している満点計画による地震データを用いて、震源域周辺の広域の応力場を推定した。これらの推定結果と、浅野(2018)による震源モデルから推定される今回の地震による応力変化を組み合わせ、震源断層の両端部等における応力状態の推定を試みた。

2. 結果

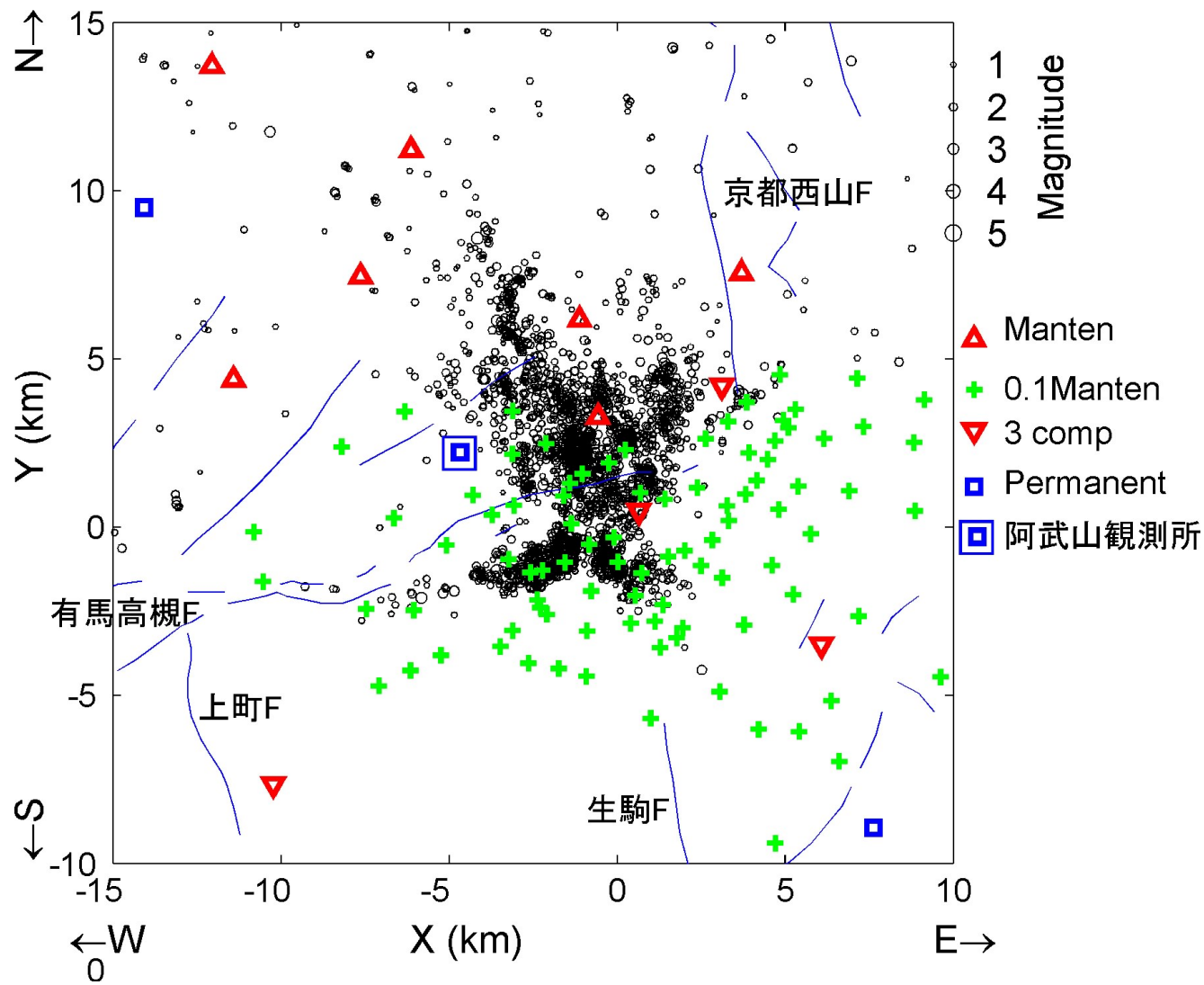
余震の震央分布(2018年6月18日～9月1日)と観測点の分布を図に示す。余震は、阿武山観測所の直下、ATLとKNF付近に広く分布している。ATLの南側には微小地震のリニアメント(線状分布)が知られていたが(京都大学, 1995)、分布の南西端付近では、余震はそれに沿って延びているように見える。ATLの北方にも広く延びている。これらは、水平成層構造を用いて観測点補正値を考慮して決定されたものであるが、ATLとKNFを境にして浅部の速度構造が大きく異なっているため、震源の絶対位置については、3次元の速度構造を考慮して検討する必要がある。地震のメカニズム解は、基本的には南部で横ずれ型、北部で逆断層であり、2枚の断層が関係している震源モデル(例えば、浅野,2018)と調和的である。

余震のメカニズム解を用いた応力逆解析によると、余震域の応力場は、最大圧縮応力の向きが西北西-東南東の横ずれ型であり、近畿地方で一般的な東西方向より時計回りに回転している。余震域の北部では逆断層型となっている。満点計画データによる広域の応力場もこれと調和的であり、ATLの深部延長のすべりによる応力集中の可能性が示唆される。余震域の南部と北部における典型的なメカニズム解を示す地震(南部は横ずれ型、北部は逆断層型)に着目すると、その下限は、余震活動が延びている南西方向および北方に向かって浅くなるお椀型を示しており、これらの端部において応力集中が発生していない可能性が示唆される。

謝辞：地元の皆さまには臨時観測に際して大変お世話になっております。記して感謝申し上げます。

図 余震の震央分布と観測点の分布 余震分布は2018年6月18日から9月1日まで。

+と▽が104カ所の臨時点、+は0.1満点の1成分観測点(松本・他, 2018)、▽はオンラインの3成分観測点。△は満点計画の3成分観測点、□は高感度の定常観測点。



A new energetics-based failure criterion for understanding the spatial pattern of aftershocks

*Toshiko Terakawa Terakawa¹, Mitsuhiro Matsu'ura², Akemi Noda³

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. ISM, 3. NIED

最近、社会のあらゆる分野において、機械学習や深層学習（Deep Learning, DL）を取り入れた人工知能技術が活躍の幅を広げている。地震学の分野では、DLにより世界中で発生した多数の本震－余震活動のペアをトレーニングデータとした余震分布の推定が行われ、その推定能力は古典的なクーロン破壊応力変化（ ΔCFS ）よりも高精度であるという衝撃的な結果が報告された（DeVries et al., 2018）。さらに、余震の発生は、 ΔCFS よりも地震時の偏差応力変化の最大剪断応力（ $\Delta \tau_{\max}$ ）や2次不変量（ ΔJ_2 ）に支配されているという物理的な解釈が示された。これらの物理量を理論的に分析すると、 $\Delta \tau_{\max}$ と ΔJ_2 は共に地震時偏差応力テンソルから計算される剪断歪エネルギーと結びつき、これは剪断歪エネルギーがゼロである等方応力状態から地震によって引き起こされた剪断歪エネルギー変化（増加）に相当する。したがって、DLによる余震分布の推定結果は本震の発生によって剪断歪エネルギーが至る所で増加することを意味し、地震の発生原理に矛盾する。その背景には、地震は絶対応力を反映して発生するにも拘らず、トレーニングデータが地震による応力変化に関する量に限られていたという根本的な問題がある。

本研究では、絶対応力場を考慮して余震の発生を理解するために、弾性歪エネルギー $E = E_s$ （剪断歪エネルギー）+ E_v （体積ひずみエネルギー）に基づく新しい地震破壊規準（Energetics-based Failure Stress, *EFS*）を提案する（Terakawa, Matsu'ura & Noda, in prep.）：

$$EFS = \sqrt{2GE_s} - \mu \{ \sqrt{2\kappa E_v} - P_f \} \quad (1)$$

ここで G , κ , μ , P_f は剛性率、体積弾性率、岩石の摩擦係数、間隙流体圧を表す。本式の第一項は偏差応力の2次不変量 J_2 の平方根と一致し、剪断応力のスカラー計量である。第二項の $\sqrt{2\kappa E_v}$ は応力の1次不変量 I_1 の1/3（平均垂直応力）であり、第二項全体は断層強度に相当する。つまり、本震による E_s 及び E_v の増減は、それぞれ剪断応力及び断層強度の増減を意味し、絶対偏差応力場及び絶対等方応力場を反映する

（Matsu'ura, Noda & Terakawa, under review）。従って、式(1)で定義される *EFS* の本震前後の変化（ ΔEFS ）が正ならば余震を促し、負ならば余震を抑制すると考えることは合理的である。*EFS* の特長は、剪断応力と断層強度を不変量であるエネルギーを用いて記述した点にある。このため、従来の ΔCFS のように特定の面を対象とすることなく、3次元応力空間内の任意の点で地震破壊を評価することが可能となる。

ΔEFS の余震発生推定能力を調べるために、1992年ランダース地震に続く1年間の余震データ12673個に対して、震源周辺域の現実的な絶対応力場（Terakawa & Hauksson, 2018）を設定して ΔEFS を計算し、ROC（Receiver Operating Characteristic）解析を実施した。まず、理論から予想される通り、 ΔE_s 及び ΔE_v は余震の発生に正及び負の相関があること、双方の影響を取り入れた ΔEFS は ΔE_s の推定能力を上回ることが確認された。次に、地震前の偏差応力レベルを現実的な値よりも低くすると、AUC値と真陽性率（正しく余震発生を推定した割合）が上昇するが、同時に偽陽性率（余震発生と推定したが実際にはない割合）も上昇することがわかった。これは、地震前の偏差応力が低いと、地震後に E_s の増加する領域が本震断層近傍で顕著に増え、その結果 ΔEFS を過大評価してしまうことに原因がある。一方、本震前後の間隙流体圧場の変化を評価し（Terakawa et al., 2010）、 ΔEFS の計算に取り入れてROC解析を実施すると、AUC値と真陽性率は上昇し、偽陽性率は低下した。これらの結果は、本震断層近傍の応力変化では説明できない多数の余震の発生には、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ことを示している。

また、 $\Delta \tau_{\max}$ と ΔEFS のROC解析の結果を比較したところ、真陽性率も偽陽性率も $\Delta \tau_{\max}$ の方が ΔEFS より高

かった。 $\Delta \tau_{\max}$ は、地震前の絶対応力場を等方的（偏差応力ゼロ）、地震による応力変化を純粋剪断であるとした場合の ΔEFS の特殊ケースである。つまり、DLによる余震分布の推定では、暗に、地震前の偏差応力の絶対レベルを非現実的に低く（ゼロ）仮定していたことになり、これが見かけの余震推定的中率を上げるものの、同時に余震の発生を過大評価する結果を招いたことがわかった。

Metrics for Aftershock Generation Based on the Energetics of Shear Faulting

*Mitsuhiro Matsu'ura¹, Toshiko Terakawa², Akemi Noda³

1. Institute of Statistical Mathematics, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震の発生は地殻に蓄えられた弾性歪みエネルギーを断層運動によって解放する過程である。弾性歪みエネルギーは、一般に、体積歪みエネルギー $=(\text{応力テンソルの第1次不変量})^2/18\kappa$ と剪断歪みエネルギー $=(\text{偏差応力テンソルの第2次不変量})/2\mu$ の和として表せる。但し、 κ は体積弾性率、 μ は剛性率である。Terakawa, Matsu'ura & Noda (in preparation) は、応力テンソルの第1次不変量は平均垂直応力の3倍であり、偏差応力テンソルの第2次不変量の平方根は剪断応力のスカラー計量（例えば、法線応力が平均垂直応力に等しい面に働く剪断応力の $(3/2)^{1/2}$ 倍）であることに着目して、既存断層の剪断破壊に関するモール・クーロンの規準 (Mohr-Coulomb fracture criterion) に擬えたエネルギー論的考察に基づく断層破壊応力 (Energetics-based Failure Stress), $EFS = (2\mu \times \text{剪断歪みエネルギー})^{1/2} - \mu_f \times [(2\kappa \times \text{体積歪みエネルギー})^{1/2} - P_f]$, を導入した。ここで、 μ_f 及び P_f はそれぞれ岩石の摩擦係数及び間隙流体圧である。従って、EFS の右辺第2項は断層の実効的な摩擦強度に相当する。

大地震の発生は震源断層周辺域の応力場及び間隙流体圧場の変化を引き起こす。Matsu'ur, Noda & Terakawa (under review) は、地震発生前の地殻応力場（背景応力場）と地震時の応力変化から剪断歪みエネルギーと体積歪みエネルギーの変化を分離して個別に評価する一般公式を導いた。この公式により、地震発生に伴う断層破壊応力 EFS の変化分 ΔEFS は、間隙流体圧の変化を ΔP_f として、 $\Delta EFS = [(2\mu \times \text{地震後の剪断歪みエネルギー})^{1/2} - (2\mu \times \text{地震前の剪断歪みエネルギー})^{1/2}] - \mu_f \times [(2\kappa \times \text{地震後の体積歪みエネルギー})^{1/2} - (2\kappa \times \text{地震前の体積歪みエネルギー})^{1/2} - \Delta P_f]$ と書き表すことができる。本講演では、この ΔEFS を剪断破壊のエネルギー論的考察に基づく新しい余震発生評価規準量として、それがこれまで提案されてきた様々な余震発生評価規準量（良く知られているクーロン破壊応力変化量から最近の深層学習解析の結果が推奨する最大剪断応力変化量或いは偏差応力変化テンソルの第2次不変量の平方根まで）を特殊ケースとして包含する合理的一般化であることを数学的に解説する。

例えば、あまりに非現実的ではあるが、背景応力場の等方成分も偏差成分もゼロの場合、つまり解放すべき弾性歪みエネルギーが全く無いにも拘らず地震が起きてしまった場合、地震による等方応力成分の変化も間隙流体圧の変化も無視すれば、 ΔEFS の表現式は偏差応力変化テンソルの第2次不変量の平方根に帰着する。ちなみに、偏差応力変化テンソルの第2次不変量は常に至るところで正となるので、それを余震発生評価規準量として採用すると (e.g., Devries et al., 2018), 本震発生後の地震活動の活性化は説明できても、静穏化は説明できない。更に、地震時の偏差応力変化テンソルが純粋剪断的であると仮定すれば、 ΔEFS の表現式は最大剪断応力変化量に帰着する。一方、地殻の背景応力レベルはある程度以上深いところでは地震による応力変化に比べて十分に高いと考えられる。そのような場合、地震時の偏差応力変化テンソルが純粋剪断的で、間隙流体圧変化が断層法線応力変化に比例すると仮定すれば、 ΔEFS は近似的に古典的なクーロン破壊応力変化量 ΔCFS に帰着する。但し、その場合のターゲット断層としては背景応力場の最大剪断面を選ばなければならない。

Room B | General session | S12. Rock Mechanics, Crustal Stress

[S12]PM-1

chairperson: Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

Wed. Sep 18, 2019 2:30 PM - 3:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S12-01] Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells -Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentaro Omura¹, Weiren Lin², Takatoshi Ito³, Akio Funato⁴ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute)

2:30 PM - 2:45 PM

[S12-02] Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke¹, Tetsuro Hirono¹, Shunya Kaneki² (1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University)

2:45 PM - 3:00 PM

[S12-03] Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura¹, Tetsuro Hirono¹ (1. Osaka University)

3:00 PM - 3:15 PM

Applications of DCDA method to rock core samples from NIED seismic observation wells -Attempt for in-situ crustal stress measurement-

*kentarō Omura¹, Weiren Lin², Takatoshi Ito³, Akio Funato⁴

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 4. Fukada Geological Institute

地震発生過程やテクトニック変動を理解する上で、重要な物理量である地殻の原位置の絶対応力に関するデータは、陸域においても、地震観測や地殻変動観測データに比べて乏しい状況にある。主要な原位置地殻応力測定手法では、掘削と特殊な孔内計測が必要で、広域にわたる系統的な測定が難しいという要因がある。本研究では、掘削で採取された岩石コアの計測から原位置地殻応力値を推定する方法である「コア変形法(DCDA法, Diametrical Core Deformation Analysis法)」を既存の岩石コアに適用して、原位置地殻応力を推定することを試みた。コア変形法は、掘削孔内で特殊な計測をする必要がなく、既存の岩石コアに適用できることから、例として足尾で採取された深部岩石コアに適用することで、原位置地殻応力データの得られることが示された(小村他, 2018年地震学会秋季大会S11-03)。コア変形法では、コア周にそった形状を計測するとともに、応力値の推定には岩石の弾性定数が、応力方位の推定には岩石コアの方位づけが必要である。今回、防災科研の7地点のHi-net観測井で深度が100m~200m(1地点だけ2000m)から採取した硬岩の岩石コアを利用した。無定方位の岩石コアのため、応力方位の推定はできなかった。Funato and Ito (2017, IJRMMS)で設計された装置でコア外周にそった直径を測定した。測定された岩石コアは、採取後、10年以上経過したものではあるが、外周にそって直径がサインカーブ状に変化した。これは、岩石コア断面が応力開放にともない楕円状に弾性変形していることが推測され、コア変形法の適用可能性がみられた。一方で、堆積岩コアのように、明確に層理面がある場合には、層理面に相対した楕円状の断面形状が計測され、岩石コアの性状を考慮する必要があることがわかった。地殻応力値を推定するため、コア岩石の弾性定数は、直接岩石試験によるデータがないため、同じ掘削井で実施されたPS検層による地盤のP波速度、S波速度から、密度を仮定して計算される弾性定数を適用することを試みた。定性的には既存観測井岩石コアにコア変形法を適用して、広域的に原位置地殻応力を推定できる見込みがあることが示された。

Correlation of frictional property on volcanoclastic sediment with changes in its mineral assemblage and microstructure

*Akari Fuke¹, Tetsuro Hirono¹, Shunya Kaneki²

1. Science, Osaka University, 2. DPRI, Kyoto University

先行研究において、主要岩石及び鉱物の摩擦係数は、1 nm/sの低すべり速度から1 m/sの高すべり速度まで、広いすべり速度範囲で系統的に調べられてきた (Di Toro et al., 2011). 多くの岩石の最大摩擦係数は、Byerlee則にならい0.6-0.85の間に収まるが、0.1 m/s以上の高速域での定常摩擦係数は0.1-0.4程度にまで低下する。このような高速域での断層の動的弱化は、地震時における応力降下量を増加させ、地震時のモーメントマグニチュードの増大に繋がることから、非常に重要な現象である。

断層の動的弱化機構については、サーマルプレシャライゼーションやシリカゲル潤滑などの様々なメカニズムが先行研究により提案されている (例えばSibson, 1973; Goldsby and Tullis, 2002)。しかし、これらの弱化メカニズムも含め、断層岩の摩擦係数及び動的弱化機構が作用した場合の寄与の程度は、厳密な意味では断層岩を構成する鉱物種に依存すると考えられる。例えば、タルクやスメクタイトなどの層状ケイ酸塩鉱物は、動的弱化を伴わない低速域においても、Byerlee則から外れた低い摩擦係数を示すことが室内摩擦実験から報告されている (Moore and Lockner, 2004)。同様に、日本海溝のように層状ケイ酸塩鉱物を含む天然の断層から採取した試料においても、顕著に低い摩擦係数を示すことが確認されている (Remitti et al., 2015)。

さらに、前述のような弱い鉱物だけでなく、断層滑りによって生成された非晶質物質が水和したのも、摩擦強度の低下をもたらすと考えられている (Nakamura et al., 2012)。また、回転摩擦実験においても、非晶質ナノシリカの形成に起因した動的弱化が確認されている (Rowe et al., 2019)。このような非晶質物質は、火山ガラスとして火山灰に多く含まれており、一部の地層群において火山砕屑性堆積物を形成しているが、火山砕屑性堆積物の摩擦特性は未だ不明となっている。

そこで本研究では、非晶質物質 (火山ガラス) の影響を考慮することによって、火山砕屑性堆積物の摩擦特性及びその微小構造の変化との依存性を調べた。過去の房総沖プレート境界断層の天然試料について0.0002-1.0 m/sの速度領域で摩擦実験を行った。その結果、乾燥条件では、0.1 m/s以下の速度領域において定常摩擦係数が0.48-0.65という値を示していたが、1.0 m/sにおいて0.16-0.21にまで弱化した。一方、湿潤条件では、0.001 m/s以下の速度領域において定常摩擦係数が0.44-0.65という値を示していたが、0.1 m/s以上の速度領域において0.14-0.30にまで弱化した。乾燥状態の結果は、従来までの他の主要鉱物を用いた実験結果の傾向に準拠しているが、湿潤状態において0.01 m/sで弱化するという結果は、極めて特異である。

これらの剪断摩擦実験前後試料についてX線粉末回折を行った結果、スペクトルから非晶質物質の存在を示す $2\theta=20-30^\circ$ のハローピークの存在が確認された。また、XRDプロファイルからRockJockソフトを用いて鉱物組成定量解析を行った結果、母岩には、どの鉱物にも分類されない鉱物 (Unfitted component) が 50.0 ± 2.0 wt.%含まれていることが明らかになった。これは火山ガラスに由来するものと考えられる。摩擦実験後の試料では、Unfitted componentが5.0-18.0 wt.%増加しており、低速滑りであるほどその増加量は大きかった。また、湿潤状態よりも乾燥状態における増加量の方が大きかった。次に、剪断摩擦実験前後の試料について薄片を作成し、微小構造観察を行ったところ、摩擦係数の低下に伴いY面の形成が確認され、高速すべりはせん断応力の局所集中を引き起こしうることが明らかになった。このすべり速度と応力集中の関係は、水和した火山ガラスの存在により、他の鉱物と比較してより低速域にシフトしている可能性がある。

以上、火山性砕屑物では火山ガラスの水和や摩耗による強度低下が起こっている可能性を示唆し、これは、火山性弧に位置するプレート沈み込み断層での地震時の破壊伝播及びそのすべり挙動に影響を与えているかもしれない。

Experimental investigation of cumulative effect on thermal maturation of carbonaceous material as a proxy for earthquake slip

*Yutaro Shimamura¹, Tetsuro Hirono¹

1. Osaka University

地震発生時に断層で開放されるエネルギーの大部分が熱であり(Chester et al.2005)、この摩擦熱が断層弱化メカニズムや地震のエネルギー収支に直接関係している。そのため、断層に記録されている摩擦熱の検出は、これらの理解において極めて重要である。摩擦熱の検出手法の1つとして、炭質物の熱熟成に伴う有機化学的特性の変化が注目を集めている。これまでに、赤外分光法・ラマン分光法(Hirono et al.2015; Kaneki et al.2016,2018)や質量分析法(Savage et al.,2014)元素組成分析(Kaneki et al.2016)、ビトリナイト反射率測定(Sakaguchi et al.2011)などを使用することによる様々なアプローチが行われてきた。しかし、摩擦熱のより定量的に推定するためには、剪断により促進されるメカノケミカル効果だけのみならず、繰り返し加熱を考慮した化学反応速度論を検討する必要がある。地震イベントは、地質学的タイムスケールでは何度も繰り返すため、断層における多数の加熱イベントが断層に含まれる炭質物の熱熟成反応に与える影響はいまだ未解決である。そこで、本研究では炭質物の熱熟成反応における繰り返し加熱の影響の解明を目的とし、複数の地震イベントを模擬した室内実験および実験前後試料の分光分析を実施した。

研究手法として、まず瀝青炭と無煙炭の炭質物2種類をそれぞれガラス管に真空封入、そのガラス管を管状電気炉の中に挿入し、100, 300, 500, 600, 700, 900,1100, 1300℃の温度で40秒間、繰り返し地震イベントを模擬して、10, 100回の加熱を行なった。また、瀝青炭のみ上記の実験に加え、500℃における8,16時間加熱を、600℃における8時間加熱を行なった。その後、実験前後試料において、赤外分光分析およびラマン分光分析を行なった。

結果、各温度において赤外・ラマン両分光分析ともに加熱回数による熱熟成度の有意な差は認められなかった。但し、500℃における長時間加熱では脂肪族CH鎖の吸収帯が8時間では消失せず、16時間でようやく消失することが確認できた。地震時の短いタイムスケールの滑り事象では何度繰り返しても化学反応速度的制約より熱熟成が促進されることはない結論づけることが出来る。すなわち、断層に保存されている炭質物の最高到達温度は、かつてその断層が履歴した最大規模の地震イベントを示していると言える。

Room B | General session | S11. Various Phenomena Associated with Earthquakes

[S11]PM-1

chairperson: Muneyoshi Furumoto(Tono Research Institute of Earthquake Science), Kentaro Omura(NIED)

Wed. Sep 18, 2019 3:15 PM - 4:15 PM ROOM B (Symposium Hall, International Science Innovation Building)

[S11-01] What are Possibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hiroshi Mehara¹ (1. Geosystem Research Institute)

3:15 PM - 3:30 PM

[S11-02] Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki¹, Ihsan Naufal Muafiry² (1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University, 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University)

3:30 PM - 3:45 PM

[S11-03] Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto¹, Osamu Murakami¹, Yasuhiro Asai¹ (1. Tono Research Institute of Earthquake Science)

3:45 PM - 4:00 PM

[S11-04] Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto¹, Tsuneaki Yamabe¹, Shigeki Sugiura², Hitoshi Kondo² (1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.)

4:00 PM - 4:15 PM

What are Possibilities of Influencing of the Strong Vertical Impulsive Seismic Motions on the Occurrence of Grate Landslides ?

*Hroshi Mehara¹

1. Geosystem Research Institute

強力な鉛直地震動が構造物を損壊させる事は、120年程も前に海震の震度階表（ルドルフの表[1898]、シーベルグの表[1923]）が作られていたことから知られていた筈だが、ここ60年程陸の地震関係者はそのことを忘れていたようで、船舶工学者から「地震で船舶が損壊する時の地震波は疎密波であることは常識である。」と、兵庫県南部地震の被害事例を見直している時にこの指摘を受けた。

それまで、構造物の破壊経過と体験証言を基に、構造物を破壊する強力な鉛直地震動が存在することを証明しようと活動していたが、問題の地震波形がまだ正確には観測できていない事から、なかなか理解が浸透しにくかった。ところが海震度階級表と船舶工学者の指摘を紹介すると雰囲気は大きく変わり始めた。しかしながら、構造物を破壊する威力を持つ鉛直地震動による被災事例を調べるにつれ、その現象の複雑さと捉えにくさも明らかになってきた。最近感じている視点から、問題の波の特徴を掻い摘んで表すと次のようになる。

1. 従来の地震計では捉えられない高周波だが破壊力も持つ疎密波の地震動である。
2. 地震の主體的な面と随伴的な面の両面性を持つ現象である。
3. 被害形態が線状で百m程の場合もあるが、多くは局在波の突き上げ力による被害形態を示す。
4. 波形頭部の外形が平坦な場合とか、釣鐘型の場合もある。
5. 衝撃的な鉛直波動と構造物の状態により被害形態は多様性を示す。
6. 強力な鉛直波動が主震動より3分程後に生じる場合等（後発鉛直キラーパルス）がある。
7. 発震原因は岩盤の割れでなく、物質の相変化によると予想される。

以上のような特徴を踏まえて、大規模な地滑りの被害が生じた事例を見直してみる。岩手・宮城内陸地震では荒砥沢ダム上流で大規模な地滑りが生じた(図1(a))。この地震では、1.一の関西の地震計の鉛直震動は3866galの過去最大の記録値が得られた。しかしこの記録の解釈には、ある地層幅を持って地盤が持ち上がるトランポリン効果が想定されている。2.それは鉛直波動による突き上げ作用が地表近くで増幅されたことを連想させる。3.震源断層は鉛直に近い形状で逆断層の動きを示す。4.県境に近い栗駒衣川線沿い河川のブロック護岸に、かなり長い水平亀裂が複数箇所ある。以上の事象から軽石層の存在だけが被害の規模を大きくしたのではなく、巨大な威力の鉛直地震動の影響が加わった事が予想される。

次に北海道胆振東部地震では広範囲に亘り、一定の方向性が見られない、山の斜面の滑り崩壊が生じた(図1(b))。ここでは火山灰層の存在が斜面崩壊の特徴をなすものと考えられている。しかし震源断層は深さ16km以深と深いものの、鉛直面に近い状況で、逆断層の動きが顕著である。明確な鉛直地震動によるとみられる災害事例は未確認であるが、斜面崩壊の形態と震源断層の特性から、強力な鉛直地震動が散在的に作用した可能性は高いと思われる。

このような大規模な地滑りを起こすことに関与する、鉛直地震動の威力は大きいことが予想され、安全対策上、観測体制を工夫することはもちろん、詳しい調査と解析が望まれる。



(a) 荒戸沢ダム上流の大地滑り¹⁾



(b) 胆振東部山地 広域地滑り²⁾

(a) 岩手・宮城内陸地震 (2008. M7.2)

1) なみふる No.114,p4,井上先生の報文写真1を加工

(b) 北海道胆振東部地震 (2018. M6.7)

2) 国際航業(株)提供写真資料を加工

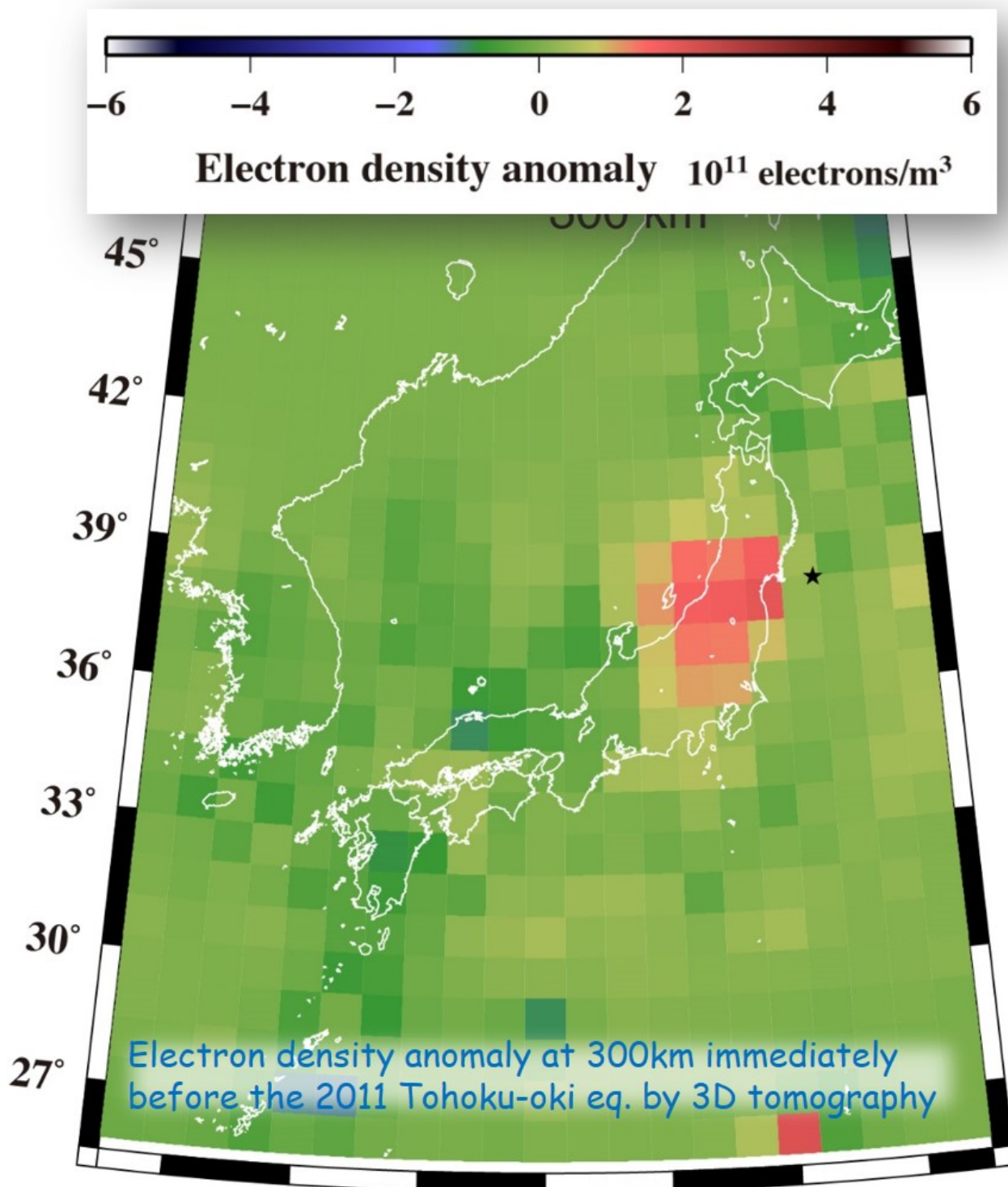
Tomographic study of 3D distribution of the ionospheric electron density anomalies before and after the 2011 Tohoku-oki eq.

*Kosuke Heki¹, Ihsan Naufal Muafiry²

1. Dept. Earth Planetary Sci., Hokkaido University, 2. Dept. Natural Hist. Sci., Hokkaido University

Based on the ionospheric total electron content (TEC) observations using Global Navigation Satellite System (GNSS) satellites, we reported that TEC showed anomalies immediately before large earthquakes (Heki, 2011GRL; Heki & Enomoto, 2013JGR; 2015JGR). The leading times and the intensities of the anomalies in the 18 earthquakes of Mw7.3-9.2 (He & Heki, 2017JGR) showed clear scaling laws, i.e. they scale with the fault lengths and fault areas, respectively, suggesting that large earthquakes know their final sizes when the fault ruptures start. He & Heki (2018JGR) studied the three-dimensional (3D) distribution of the electron density anomalies before the 2015 Illapel earthquake (Mw8.3), Central Chile, and showed that the positive/negative electron density anomalies emerged in lower/upper ionosphere along the geomagnetic field. This let us hypothesize that the ionospheric electrons were redistributed in response to electric fields made by positive electric charges that appeared on the subaerial surface above the epicenter. These charges would have been mobilized by micro-scale cracks and dislocations as positive holes.

Here we apply the 3D tomography technique using the slant-TEC residual data in Japan and South Korea for the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0). We found that the positive electron density anomaly appeared ~300 km above NE Japan (the anomaly does not extend to the sea, see attached figure). At the same time, a diffuse negative electron density anomaly appeared in the higher ionosphere. The electric current that flowed upward along the geomagnetic field makes an eastward geomagnetic field change of a few nT to the south of the epicenter, which is consistent with the change started ~40 minutes before the earthquake in Kakioka, NE Japan (Heki & Enomoto, 2013JGR). We also try to identify the 3D structure of the tsunamigenic ionospheric hole made by the 2011 Tohoku-oki earthquake.



Geomagnetic variations coincident with the passage of longer period surface waves

*Muneyoshi Furumoto¹, Osamu Murakami¹, Yasuhiro Asai¹

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

地震波通過に伴い電磁気変動が発生することについて、これまでに多くの報告がなされている。それらの発生機構として、地殻内を起源とするものについては、岩体の圧電現象や圧磁現象、導電性を持つ物質としての岩体の運動による電磁誘導、そして空隙弾性体内の界面動電現象など、様々な性質や現象が提案されてきている。

これまでに報告されている地殻内を起源とする電磁場の変動現象は、主に周波数1Hz程度やそれ以上の短周期帯域のものである。一方周期数十秒程度の帯域の変動としては、大気音波を経由した電離層の擾乱に伴うものなどについては報告されているが、地殻内を起源とするものはほとんどない。地殻内を起源とする電磁気変動の機構や関連する地下構造を知る上で、より広い帯域での検出は重要であると考えられる。本研究では2011年東北地方太平洋沖地震およびその余震などを利用して、大振幅のやや長周期表面波に同期した磁気変動が見られることを報告する。

地震動と地磁気の観測計器は、東濃地震科学研究所により岐阜県瑞浪市に設置された、水圧計（瑞浪超深地層研究所立穴、深度200m）と3成分磁力計（ボアホール、深度500m）である。両計器の水平方向の距離は約200mであり、ほぼ同一の観測点と見なすことができる。データのサンプリング間隔は両者とも1/20秒である。なお、地震動の計測に地震計を利用していないのは、コイル等を内蔵する地震計自体が磁気変動を混入させる可能性を持つためである。

解析に利用した地震波は、東北地方太平洋沖地震の本震（ $M_w=9.0$ ）と直後に発生した最大余震（ $M_w=7.8$ ）、および $M=7$ クラスの前震1個と余震5個である。各地震からの直達Rayleigh波（以下R波）の振幅は大きい。対象とした周波数帯域では通常の地磁気変動そのものが大きい。そのため本震においても波形同士の直接比較では、地震動と地磁気変動には明確な対応は見られない。特に本震時には磁気嵐が発生しており地磁気変動が大きい。そこで、各地震の地震動と磁気変動の相互相関関数により、同期した信号が含まれているかを検討した。使用したデータは、直達R波以降のコーダ部分20分間を利用した。コーダ部分を用いることで、安定した相互相関関数を求めるのに適した、ある程度定常的な波動場になっていると期待される。また直達R波部分を除いたのは、振幅が突出して大きいため、定常性が保てなくなると考えたからである。使用したコーダ部分には、周期20秒程度のR波を主として、より長周期成分が含まれていると考えられる。なお、地震波データとして水圧を利用しているので、地震波データ中にSH波やLove波成分は含まれていないことになる。

地震波と磁気変動データについて周波数15 mHz程度より高周波側でいくつかのバンドパスフィルターをかけ、各帯域の出力時系列間で相互相関関数を計算した。図1に示したのは本震後のコーダ部分の水圧と地磁気の鉛直成分の25 - 30 mHz帯域の相互相関関数である。横軸のlagが正の値は、地震波に対して磁気変動が遅れることを表している。図から明らかなように、相互相関関数はlag=0においてピークを持っている。このことは地震波と磁気変動には同期した成分があることを示している。同様のピークは15 ~ 40 mHzの帯域で見られる。しかし、40 mHzより高周波帯域ではlag=0で明瞭なピークは現れない。一方15 mHzより低周波側でもピークはlag=0にはない。

最大余震（ $M_w=7.8$ ）についても、相互相関関数は同様の帯域でlag=0にピークを持っており、大きな振幅の場合での再現性はあるように見える。一方、それより小さい振幅になる前震（ $M_w=7.2$ ）や $M_w<7.5$ クラスの余震では、lag=0における明瞭なピークは見られない。

本震と最大余震においては、鉛直以外の地磁気水平2成分においても水圧と同期した変動が見られる。地磁気の3方向成分との相互相関関数から地震動と同期した磁気変動の偏光の様子を知ることができる。偏光は直線的で、南東下向き―北西上向きとなる。そして地下水圧が最大(=岩盤の最大圧縮時)の時、地磁気は南東下向きで最大になる。

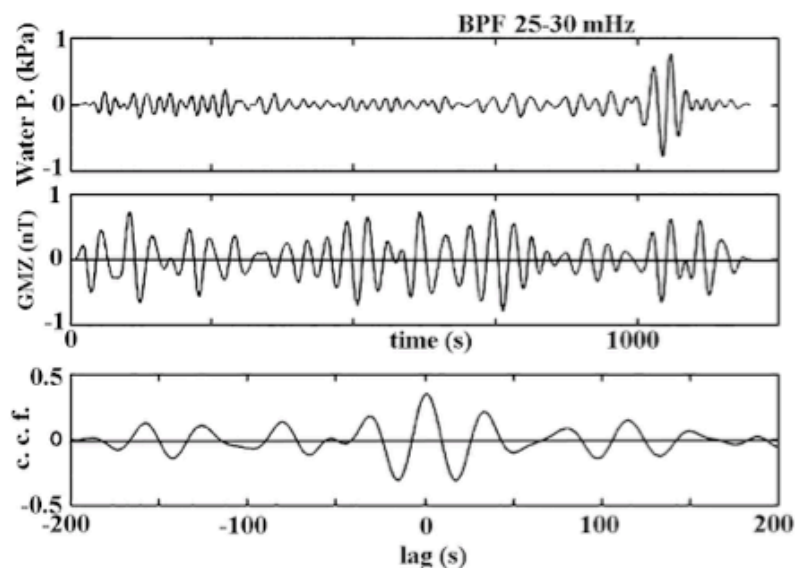


図1 本震コーダ波の相互相関関数

水圧(上段), 地磁気(中段)にバンドパスフィルターをかけたもの。サンプリングは14h55m-15h15mの20分間。下段はそれらの相互相関関数。

Reality of "swirling clouds" associated with earthquakes

*Yuji Enomoto¹, Tsuneaki Yamabe¹, Shigeki Sugiura², Hitoshi Kondo²

1. Shinshu University, 2. Genesis Research Institute, INC.

歴史地震史料で辿ると”渦巻く雲”, ”白気立つ”など竜巻状の雲に関連すると推測される記述が多い。例えば887年五畿七道の地震では「有気, 如煙非煙, 如虹非虹, 飛上蜀天」『三大実録』や1847年善光寺地震では, 「真の闇空, 飯綱山の方に火の如き雲出候間, 不思議に存見つめて居り候処, 其雲くるくると廻り消える否山鳴致し..」『時雨の袖』などである。史料に見られるこれらの記述に加え, 最近では写真や衛星画像でも捉えられ, さまざまな観測とも関連づけられる可能性がでてきて, その実体を明らかにできる情報が揃ってきた。これらの史料の記述と最近の情報を集約して見えてきた”渦巻く雲”の実体は」次のようである。1)渦巻きながら突然空に屹立する, 2)地震前後に観察されることが多い, 3)雲のできる高度(約1km)から渦巻く, 4)夜であれば光って見える, 5)陸上に限らず海上でも発生する。以上の事実と既知の物理現象とを比較参照し, ”渦巻く雲”の生成原因は, 地殻の亀裂や断層に沿って浸入してきた深層流体に含まれるRn222誘起のプラズマが大気電場で加速されて上昇, ”ウイルソンの霧箱”効果で雲を形成し, Kink Instability効果で渦を巻いたものと考察した。2011年東北沖地震の約10分後に生じた震源上空の電離層電子の急な濃集は、この帯電した”渦巻く雲”による静電気誘導効果の可能性がある。