

Mon. Oct 24, 2022

Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] AM-1

chairperson: Takashi Chiba (Rakuno Gakuen University)

9:30 AM - 10:00 AM JST | 12:30 AM - 1:00 AM UTC

[S22-01] [Invited] Recurrence and forecast of great earthquakes along Kuril Trench

*Kenji SATAKE¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S22-02] Identifying the sources of the 1611 Keicho tsunami

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

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

[S22-03] Geological evidence of coastal erosion generated with 17th-century tsunami in a beach ridge plain, eastern Hokkaido

*Yuki SAWAI¹, Toru Tamura¹, Yumi Shimada¹, Koichiro Tanigawa¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S22-04] Liquefaction history of the ground in the area around the Kuril Islands Trench, Hokkaido, Japan, based on archaeological data

*Wataru HIROSE¹, Hiroaki Takahashi² (1. Hokkaido Research Organization, 2. ISV, Hokkaido University)

Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

11:00 AM - 12:00 PM JST | 2:00 AM - 3:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] AM-2

chairperson: Yusuke Yamanaka (Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S22-05] Structure difference across the submarine canyon in the Kuril subduction zone off Hokkaido and its relation with interplate slip behaviors

*Hiroto Yamaguchi¹, Shuichi Kodaira², Gou Fujie², Tetsuo No², Yasuyuki Nakamura², Kazuya Shiraishi², Nobukazu Seama¹ (1. Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S22-06] Re-evaluation of normal fault distribution in the outer slope of the western Kuril Trench, off the southeastern coast of Hokkaido, based on recent acquired seismic reflection data and bathymetry data

*Tetsuo NO¹, Shuichi Kodaira¹, Kentaro Imai¹, Koichiro Obana¹, Gou Fujie¹, Yasuyuki Nakamura¹, Kazuya Shiraishi¹, Ryo Miura¹, Masao Nakanishi² (1. JAMSTEC, 2. Graduate School of Science, Chiba Univ.)

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

[S22-07] **Development of Real Time Tsunami Forecast Method for Outer-Rise Earthquakes occurred along the Kurile Trench**

*Miu Matano¹, Yuichiro Tanioka¹, Tatsuya Nakagaki¹, Masato Kamiya², Toshitaka Baba², Tetsuo No³, Kentarou Imai³, Yusuke Yamanaka¹, Shuichi Kodaira³ (1. Hokkaido University, 2. Tokushima University, 3. JAMSTEC)

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

[S22-08] Numerical investigation of tsunami in tsunami earthquakes for developing a real time tsunami forecasting method using S-net data

Tatsuto Oishi¹, *Yuichiro Tanioka¹, Yusuke Yamanaka¹ (1. Hokkaido University)

Award lecture | Regular session : S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

1:30 PM - 3:18 PM JST | 4:30 AM - 6:18 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S20] PM-1

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura (Kyoto University)

1:30 PM - 1:33 PM JST | 4:30 AM - 4:33 AM UTC

[S20] President speech

1:33 PM - 1:48 PM JST | 4:33 AM - 4:48 AM UTC

[S20] Award ceremony

1:48 PM - 2:08 PM JST | 4:48 AM - 5:08 AM UTC

[S20-01] [Invited] *Development of Strong Motion Prediction and its Utilization*

*Kojiro IRIKURA¹ (1. Aichi Institute of Technology, Disaster Prevention Research Center)

2:08 PM - 2:28 PM JST | 5:08 AM - 5:28 AM UTC

[S20-02] [Invited] Multi-discipline Subduction Earthquake Science

*Suguru YABE¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

2:28 PM - 2:48 PM JST | 5:28 AM - 5:48 AM UTC

[S20-03] [Invited] Elucidation of Earthquake Rupture Process and Advancement of Ground Motion Model via Data-driven Approach

*Hisahiko KUBO¹ (1. NIED)

3:08 PM - 3:13 PM JST | 6:08 AM - 6:13 AM UTC

[S20] LOC president speech

3:13 PM - 3:18 PM JST | 6:13 AM - 6:18 AM UTC

[S20] Next LOC president speech

Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

3:45 PM - 4:45 PM JST | 6:45 AM - 7:45 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] PM-2

chairperson:Mako Ohzono(Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S22-09] Seafloor Geodetic Observations along the Kuril Trench off Nemuro

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Yusaku Ohta², Ryota Hino², Takeshi Iinuma³, Chie Honsho², Mako Ohzono⁴, Hiroaki Takahashi⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University)

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

[S22-10] Crustal deformation characteristics in and around Hokkaido and Tohoku region as seen from ITRF14 reference frame

*Yuka Ishida¹, Hiroaki Takahashi², Mako Ohzono², Weiwei Wu³, Guojie Meng³ (1. The Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Institute for Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration)

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

[S22-11] Estimate an interplate coupling in the southern Kuril trench with a stress-constrained inversion method

*Shunsuke Imai¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

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

[S22-12] Strain concentration around the volcanic front in eastern Hokkaido caused by southern Kuril subduction

*Mako OHZONO¹, Hiroaki TAKAHASHI¹ (1. ISV, Faculty of Science, Hokkaido University)

Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

5:00 PM - 6:00 PM JST | 8:00 AM - 9:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] PM-3

chairperson:Takahiro Shiina(Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S22-13] Current state of seismic activity off Tokachi and Nemuro

*Hiroaki TAKAHASHI¹, Masayoshi Ichiyanagi¹, Ryosuke Azuma² (1. Hokkaido University, 2. Tohoku University)

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

[S22-14] Recent seismic activity in and around Hokkaido, Japan (2018-2021)

*Tetsuo TAKANAMI¹ (1. Hokkaido Research Center of Geology)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S22-15] Spatio-temporal seismic velocity variation near the Japan-Kuril trenches junction revealed from long-term dense-OBS network observation

*Takehiro Sato¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Takagi¹, Ryota Hino¹, Masanao Shinohara² (1. Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[S22-16] Shallow VLFE observation at the Erimo-oki, southern off Hokkaido, using a broadband OBS array and F-net

*Ryosuke AZUMA¹, Ryota Takagi¹, Satoru Baba², Ryota Hino¹, Masanao Shinohara³ (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. JAMSTEC, 3. ERI, Univ. Tokyo)

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

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

[S09] AM-1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Yosihiko OGATA¹ (1. Institute of Statistical Mathematics)

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

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

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

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

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

[S09] AM-2

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

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

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

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

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

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

*Masatoshi MIYAZAWA¹ (1. Kyoto Univ.)

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

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

*Youichi ASANO¹ (1. NIED)

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

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

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

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

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

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

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

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

[S09] PM-2

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Room C | Regular session : S06. Crustal structure

9:45 AM - 10:45 AM JST | 12:45 AM - 1:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S06] AM-1

chairperson:Takahiro Shiina(Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S06-01] Detailed seismic structure and seismic activities along the plate interface off Cape Muroto Nankai Trough*Gou FUJIE¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹, Gaku Kimura¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹ (1. JAMSTEC)

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

[S06-02] Relationship between slow earthquakes and temporal changes in seismological structure in the shallow Nankai subduction zone*Takashi TONEGAWA¹, Takeshi Akuhara², Yusuke Yamashita³, Hiroko Sugioka⁴, Masanao Shinohara², Shunsuke Takemura², Takeshi Tsuji² (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Kyoto Univ., 4. Kobe Univ.)

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

[S06-03] Upper-plate structural heterogeneities controlling shallow tremor: Results from active-source seismic surveys in the Hyuga-nada area*Ryuta ARAI¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Kazuya Shiraishi¹, Gou Fujie¹, Shuichi Kodaira¹, Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Yuka Kaiho¹, Yohei Hamada¹, Yanxue Ma², Kimihiro Mochizuki², Rie Nakata², Masataka Kinoshita², Yoshitaka Hashimoto³ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Kochi University)

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

[S06-04] Mantle Wedge Anisotropy from Tectonic Tremors beneath the Bungo Channel*Motoko ISHISE¹, Aitaro KATO¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Room C | Regular session : S06. Crustal structure

11:00 AM - 12:00 PM JST | 2:00 AM - 3:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S06] AM-2

chairperson:Ryuta Arai(JAMSTEC)

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

[S06-05] Shallow crustal structure and slip tendency of bend-faults in the outer rise of the Japan Trench*Yue SUN¹, Ayumu Miyakawa², Ehsan Jamali Hondori³, Jin-oh Park¹ (1. AORI, the University of Tokyo, 2. AIST, 3. GSE)

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

[S06-06] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling - III*Takaya IWASAKI¹, Hiroshi SATO^{2,3}, Eiji KURASHIMO³, Hirokazu ISHIGE⁴, Hidehiko SHIMIZU⁵, Tatsuya ISHIYAMA³, Takashi IIDAKA⁶, Masanao SHINOHARA³, Shinji KAWASAKI⁴, Susumu ABE⁴, Naoshi HIRATA³ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JOGMEC, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

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

[S06-07] An estimation of the crustal reflector in the north Ibaraki area using S-wave later phases*Takahiro SHIINA¹, Yuta AMEZAWA¹, Takahiko UCHIDE¹, Haruo HORIKAWA¹, Kazutoshi IMANISHI¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

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

[S06-08] A preliminary report of faults and natural gas layers observed in lowlands of the eastern Tokyo*Tetsuro TSURU¹, Naoto KUMAGAI¹, Kazuo YAMAGUCHI², Jinoh PARK³ (1. TUMSAT, 2. AIST, 3. AORI, The University of Tokyo)

Room C | Regular session : S06. Crustal structure

4:00 PM - 5:00 PM JST | 7:00 AM - 8:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S06] PM-2

chairperson: Takashi Tonegawa (JAMSTEC)

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

[S06-09] Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan

*Tomomi Okada¹, Martha Savage², Shin'ichi Sakai³, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida⁴, Ryota Takagi¹, Shuutoku Kimura¹, Satoshi Hirahara¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. The Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S06-10] Detailed structure of the uppermost part of the Philippine Sea Plate beneath the Kii Peninsula

*Katsuhiko Shiomi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S06-11] Spatial variations and causes of fracture structure in and around Hakone volcano

*Ryou HONDA¹, Yuki Abe¹, Yohei Yukutake², Shin'ichi Sakai³ (1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

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

[S06-12] Seismic velocity structure beneath Kikai-caldera, Japan, from seismic refraction survey

*Akihiro Nagaya¹, Gou Fujie², Shuichi Kodaira², Satoru Tanaka², Yojiro Yamamoto², Hiroko Sugioka^{4,1}, Hiroki Miyamachi³, Tetsuo Matsuno⁴, Hironori Otsuka⁴, Keita Suzuki^{4,5}, Nobukazu Seama^{1,4} (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Ocean Bottom Exploraiton Center, Kobe University, 5. Nippon Marine Enterprises, Ltd)

Room C | Regular session : S19. Seismology, general contribution

5:15 PM - 6:00 PM JST | 8:15 AM - 9:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S19] PM-3

chairperson: Keisuke Onodera (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S19-01] Room Seismic Intensity measurement by a ultra compact seismometer

*Naoshi HIRATA¹, Takashi FURUYA², Hiroshi TSURUOKA¹ (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. ISAD)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S19-02] Estimation of the sources of primary microseisms excited by typhoons around Japan

*Hiroki Kawakami¹, Naoki Suda¹ (1. Hiroshima University)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[S19-03] Introduction of NASA's Titan Exploration Mission: Dragonfly – For the first seismic investigation on an icy moon–

*Keisuke Onodera¹, Hiroaki Shiraishi², Satoshi Tanaka², Taichi Kawamura³, Takefumi Mitani², Hideki Murakami⁴, Ryuhei Yamada⁵, Shunichi Kamata⁶, Jun Kimura⁷, Hiroyuki Kurokawa⁸, Kiwamu Nishida¹, Yasuhito Sekine⁸, Takeshi Tsuji⁹, Ralph Lorenz¹⁰ (1. ERI/The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IPGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Johns Hopkins University)

Room D | Regular session : S14. Earthquake prediction and forecast

9:30 AM - 10:15 AM JST | 12:30 AM - 1:15 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S14] AM-1

chairperson:Masajiro Imoto(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] On the Brownian passage time distribution model of refinement for the Kanto M8 class recurrent paleoearthquakes*Masajiro IMOTO¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-02] On the probability of successive occurrence of Nankai Trough earthquakes*Yo Fukushima¹, Tomoaki Nishikawa², Yasuyuki Kano³ (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S14-03] Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the Chugoku region*Taro Hara¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

Room D | Regular session : S11. Various phenomena associated with earthquakes

10:30 AM - 11:00 AM JST | 1:30 AM - 2:00 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S11] AM-2

chairperson:Hideo Aochi(BRGM)

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

[S11-01] Ground oscillations generated by the passage of Tsunamis : Observations and numerical simulations*Hideo AOCHI^{1,2}, Masumi Yamada³, Tung-Cheng Ho³ (1. BRGM, 2. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S11-02] Magnetic field observation using highly-sensitive SQUID magnetometers near the hypocentral area in Noto Peninsula*JUN KAWAI¹, MIKI KAWABATA¹, MASAKAZU MIYAMOTO¹ (1. Kanazawa Institute of Technology, Applied Electronics Laboratory)

Room D | Regular session : S13. Crustal fluids and earthquake

11:00 AM - 11:45 AM JST | 2:00 AM - 2:45 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S13] AM-2

chairperson:Osamu MURAKAMI(Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency)

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

[S13-01] Activity and waveform characteristics of deep low-frequency earthquakes in volcanic regions*Ryo KURIHARA¹ (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

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

[S13-02] Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan (2)*Tsuyoshi WATANABE¹, Shinya Hiratsuka², Koji Shimada¹ (1. Japan Atomic Energy Agency, 2. N/A)

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

[S13-03] Shear wave polarization anisotropy around the source area of the swarm earthquakes in the Noto peninsula*Osamu MURAKAMI¹ (1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency)

Room D | Regular session : S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

3:45 PM - 5:15 PM JST | 6:45 AM - 8:15 AM UTC | ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S12] PM-2

chairperson:Hironori Kawakata, Kentaro Omura(NIED)

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

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain (5) - In-situ stress measurement using rock core samples -

*Kentaro OMURA¹, Akio Funato², Takatoshi Ito³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Earthquake and Tsunami Research Division, 2. Fukada Geological Institute, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University)

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

[S12-02] Constitutive Properties and Frictional Behavior of Simulated Fault Zone of Halite Developed in Granular Medium

*Chengrui Chang¹, Hiroyuki Noda², Gonghui Wang², Tetsuo Yamaguchi¹ (1. Univ. Tokyo, 2. Kyoto Univ.)

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

[S12-03] Investigation of stress field in the north-central Kinki district by dense seismic observation near the active faults

*Toshio TANAKA¹, Yoshihisa Iio², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Research Center for Earthquake Hazards)

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

[S12-04] Evaluation of the source-location accuracy for AE events occurring in experiments under GPa-order high pressures

*Hironori KAWAKATA¹, Tomohiro Ohuchi² (1. Ritsumeikan Univ., 2. Ehime Univ.)

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

[S12-05] Elastic wave transmission experiment to evaluate the accuracy of absolute AE locations in a cylindrical sample

*Teruki Inanishi¹, Hironori Kawakata¹, Shiro Hirano¹, Masayuki Nakayama¹ (1. Ritsumeikan University)

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

[S12-06] Frictional behavior of clayey gouge at intermediate velocity range

*Hanaya Okuda¹, Takehiro Hirose², Asuka Yamaguchi¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

Poster session (1st Day) | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

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

[S03P] AM-P

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

[S03P-01] Trial of an assessment method of crustal deformation

*Hisao Kimura¹, Akio Kobayashi¹, Takeyasu Yamamoto¹, Takahiro Tsuyuki¹ (1. Meteorological Research Institute)

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

[S03P-02] Three dimensional distribution of fault slips and density structure at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Koji MATSUO¹, Ryosuke ANDO², Takayuki NAKANO¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo)

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

[S03P-03] Crustal deformation associated with an earthquake swarm in the Noto Peninsula based on combined analysis of multiple GNSS networks

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku Ohta³ (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

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

[S03P-04] Detection by network inversion filter of long-term and short-term slow slip events, using a very dense GNSS Network in Shikoku, Japan, during 2018–2022

*Shinzaburo Ozawa¹, Hiroshi Munekane¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)

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

[S03P-05] Slow-slip events of one-hour duration (2)

*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵ (1. Univ. of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.)

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

[S03P-06] Recent GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations off Tohoku and their results

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Chie Honsho³, Ryota Hino³, Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Tokyo university of Marine Science and Technology)

Poster session (1st Day) Regular session : S01. Theory and analysis method
--

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC | ROOM P-1 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S01P] PM-P

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-01] Antipodal seismic observation and sensitivity kernel for liquid region on the top of the Earth's Inner Core

*Seiji TSUBOI¹, Rhett Butler² (1. JAMSTEC, 2. University of Hawaii at Manoa)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-02] On the resolution matrix of the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-03] Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust (2)

*Jun Kawahara¹, Kazuki Kidoguchi¹, Takahiro Shiina² (1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-04] A trial application of the real-time tsunami forecasting by means of and adjoint-equation based wavefield estimation

*Takuto MAEDA¹ (1. Hirosaki University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-05] Characteristics of strain envelopes of scattered waves propagating in the 2D random heterogeneous medium

*Kentarō Emoto¹ (1. Kyushu University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-06] Effects of a seawater and sediment layers on seaquake amplifications on and under the sea surface

*Takeshi NAKAMURA¹, Hiroshi Takenaka² (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-07] Features of Time-series of Real-time Seismic Intensity at MeSO-net Station

*Hisahiko KUBO¹, Kaoru SAWAZAKI¹, Lina YAMAYA¹, Takeshi KIMURA¹ (1. NIED)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-08] Spatiotemporal Characteristics of Autocorrelation Functions from Seafloor Ambient Noise Records at Hyuga-nada

*Yasunori SAWAKI¹, Yusuke Yamashita², Shukei Ohyanagi¹, Emmanuel Soliman Garcia², Masanao Shinohara³, Yoshihiro Ito² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-09] Large site amplification factors observed not only along the Sea of Japan but also along the Sea of Okhotsk in the northern part of Hokkaido

*Atsushi NOZU¹ (1. Port and Airport Research Institute)

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities : S24.Committee activities for society

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC | ROOM P-8

[S24] S24

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

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

Poster session (1st Day) | Regular session : S16. Subsurface structure and its effect on ground motion

9:30 AM - 12:00 PM JST | 12:30 AM - 3:00 AM UTC | ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S16P] AM-P

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

[S16P-01] An investigation of improving sound pressure level and Resolution in seismic reflection survey using underwater speaker

*Naoto Kumagai¹, Kaito Kimura¹, Tetsuro Tsuru¹ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S16P-02] Characteristics of High-frequency S-wave and S-coda at DONET ocean-bottom seismometers

*Shunsuke TAKEMURA¹, Kentaro EMOTO², Lina YAMAYA³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyusyu University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S16P-03] Amplitude anomalies observed in the S-wave seismic reflection survey data on the Shikano fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Takao KAGAWA¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada² (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Hanshin Consultants Co. Ltd.)

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

[S16P-04] Characteristics of microtremors in the vicinity of the Yoshioka fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Tatsuya NOGUCHI¹, Isamu NISHIMURA², Takao KAGAWA¹ (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University)

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

[S16P-05] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground in Wakabadai, Tottori City from Microtremor and Seismic Observations

*Isamu NISHIMURA¹, Tatsuya NOGUCHI², Takao KAGAWA² (1. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University, 2. Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University)

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

[S16P-06] Investigation of Subsurface Structure in the Kochi Plain - microtremor survey and document retrieval

*Nobuyuki YAMADA¹ (1. Kochi Univ.)

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

[S16P-07] Estimation of shallow subsurface structure in the Oharadai area, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, using H/V spectral ratios and borehole data

*Yasuyuki IWASE¹, Kojiro Kato², Yusuke Mizuno² (1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Japan Maritime Self-Defense Force)

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

[S16P-08] Estimation of V_{S30} using microtremor array records in Thimphu and surrounding towns, the Kingdom of Bhutan

*Takumi Hayashida¹, Nityam Nepal², Phuntsho Pelgay², Shiro Ohmi³, Karma Namgay², Dowchu Drukpa², Hiroshi Inoue⁴ (1. IISEE, Building Research Institute, 2. DGM, Ministry of Economic Affairs, Bhutan, 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. NIED)

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

[S16P-09] Basic study of ground amplification factor based on microtremor array observations at seismic stations.

*Shigeki SENNA¹ (1. NIED)

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

[S16P-10] Application of Bayesian Optimization to Estimate 1D Subsurface Layered Structure from Near-filed Seismic Waveforms

*Hisahiko KUBO¹ (1. NIED)

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

[S16P-11] Site investigation by surface wave measurements on subsidiary faults of 2016 Kumamoto Earthquake

*Naoto INOUE¹, Kotaro Mizutani¹, Naoko Kitada¹, Kazuki Watanabe², Noriyuki Shibuya², Masashi Omata² (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)

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

[S16P-12] Long-term monitoring of subsurface changes by a giant magnetostrictive seismic source

*Takahiro Kunitomo¹ (1. Ontake Science Lab)

Poster session (1st Day) Regular session : S08. Earthquake physics
--

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC | ROOM P-2 10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S08P] PM-P

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-01] Stress field and slip tendency analysis for the 2016 Mw7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand

*Tomomi Okada¹, Miu Matsuno¹, Ayaka Tagami¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Clifford H Thurber⁶, Richard H Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-02] Source process analysis of the 2004 off Kii peninsula earthquake from using sparse observation network and Green functions based on a three-dimensional structure

*TAKAHITO NISHIMIYA¹ (1. Second Laboratory, Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-03] Commonality and diversity of ruptures occurring at the same asperity: the 2015 Mw6.8 Miyagi-Oki earthquake and Mw6.0-6.4 quasi-repeating earthquakes

*Keisuke YOSHIDA¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-04] Relationship Between Variations in Source Duration and Occurrence Areas of Earthquakes

*Goki Irie¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-05] Do deep low frequency earthquakes have the similar rupture growth process to ordinary earthquakes?

*Genki OIKAWA¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-06] What Actually is the Vertical Shock Verbally Reported for Shallow Earthquakes?

*Koji UENISHI¹ (1. Univ. of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-07] Outline and radiation efficiency of stochastic source time functions

*Shiro HIRANO¹ (1. Ritsumeikan Univ.)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-08] On shear localization by thermo-chemical pressurization and following destabilization and migration of the shear-localized zone

*Shunya KANEKI¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto University, DPRI)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-09] The earthquake interoccurrence time distribution in sheared granular model

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-10] Numerical experiments using a friction law both for fast and slow sliding

*Takane HORI¹, Hideo Aochi² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey))

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-11] Investigation of earthquake source scaling laws using dynamic rupture simulations with a hierarchical patch structure

*Kazuki Masuda¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-12] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kearsse² (1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-13] Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation (Part 2)

*Yuko KASE¹, Yumi URATA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-14] Why do Gutenberg-Richter b-values decrease with time prior to large earthquakes? Insights from rate-and-state earthquake cycle simulations with frictional heterogeneities

*Ryo Ito¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-15] Numerically reproduced segments of short-term slow slip events in the Nankai region

*Takanori MATSUZAWA¹, Bunichiro Shibazaki² (1. National Reserach Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Building Research Institute)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-16] **Impact of Kuroshio meanders on a stationary slow slip event and local seafloor level change around the Nankai Trough**

*Keisuke ARIYOSHI¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Takeshi Iinuma¹, Masaru Nakano¹, Demian Michael Saffer⁴, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi³, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University (now at Japan Meteorological Agency), 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. University of Texas, Austin)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-17] A possible relation between Reidel shear band and rate- and state-dependent friction parameters

*Eiichi FUKUYAMA^{1,2}, Futoshi Yamashita², Sumire Maeda², Akihiro Shimoda¹, Shun Watanabe¹ (1. Kyoto University, 2. NIED)

Poster session (1st Day) | Regular session : S17. Tsunami

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

[S17P] AM-P

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

[S17P-01] Data assimilation using high-frequency radar for tsunami early warning: A case study of the 2022 Tonga volcanic tsunami

*Yuchen WANG¹, Kentaro Imai¹, Iyan E. Mulia², Keisuke Ariyoshi¹, Narumi Takahashi¹, Kenichi Sasaki³, Hitoshi Kaneko³, Hiroto Abe^{3,4}, Sato Yoshiaki³ (1. Yokohama Institute for Earth Sciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. RIKEN Cluster for Pioneering Research, 3. Mutsu Institute for Oceanography, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4. Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University)

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

[S17P-02] Diversity of tsunami propagation caused by Nankai Trough earthquakes

*Yusuke Oishi¹, Takamasa Shinde¹, Takashi Furumura² (1. Fujitsu Ltd., 2. Univ. of Tokyo)

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

[S17P-03] Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source generation

*Hiroaki TSUSHIMA¹ (1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

📅 Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 10:45 AM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] AM-1

chairperson: Takashi Chiba (Rakuno Gakuen University)

9:30 AM - 10:00 AM JST | 12:30 AM - 1:00 AM UTC

[S22-01] [Invited] Recurrence and forecast of great earthquakes along Kuril Trench

*Kenji SATAKE¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

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

[S22-02] Identifying the sources of the 1611 Keicho tsunami

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

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

[S22-03] Geological evidence of coastal erosion generated with 17th-century tsunami in a beach ridge plain, eastern Hokkaido

*Yuki SAWAI¹, Toru Tamura¹, Yumi Shimada¹, Koichiro Tanigawa¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S22-04] Liquefaction history of the ground in the area around the Kuril Islands Trench, Hokkaido, Japan, based on archaeological data

*Wataru HIROSE¹, Hiroaki Takahashi² (1. Hokkaido Research Organization, 2. ISV, Hokkaido University)

[Invited] Recurrence and forecast of great earthquakes along Kuril Trench

*Kenji SATAKE¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

19～20世紀に発生したM8クラスの巨大地震の履歴に基づき、宇津（1972）は日本海溝北部～千島海溝南部を7つの領域に区分、根室沖が（第1種）地震空白域であると指摘、1972年以降の30年間に巨大地震が発生する確率が40～57%と推定した。その翌年、1973年根室半島沖地震（M7.4）が発生した。

その後の研究によって千島海溝の地域区分は見直され、地震調査委員会は2003年に公表した「千島海溝沿いの地震活動の長期評価」において、十勝沖・根室沖・色丹島沖・択捉島沖に分け、十勝沖におけるM8クラスの地震の30年発生確率を60%程度とした。その半年後の2003年9月26日に、十勝沖地震（M8.0）が発生したが、その震源域は1952年十勝沖地震（M8.2）の津波波源域よりも小さかった。そこで、地震調査委員会（2004）では「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第二版）」において、「十勝沖」「根室沖」の領域を2003年地震に合わせて変更、両地域におけるM8クラスの地震の30年発生確率をそれぞれ0.02～0.5%、30～40%と推定した。

十勝沖と根室沖の間にある厚岸沖は、1952年には十勝沖地震で、1894年には根室沖地震で破壊したようである。地震調査委員会（2017）は、「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版）」において、過去の震源域の多様性を考慮し、根室沖の両側に境界領域を設定し、M8クラスの地震の30年確率を十勝沖で8%、根室沖で80%程度とした。また、それまで考慮されていなかった、海溝軸付近の津波地震や、海溝軸外側の正断層地震についても評価した。

千島海溝では、東北地方太平洋沖地震と同じようなM9クラスの地震が17世紀に発生していた。これは、1990年代後半から北大・道地質研や産総研のグループによって行われてきた、津波堆積物や過去の海水準変動の復元に基づく古地震調査の成果である。

霧多布湿原では、泥炭層の中に火山灰層とともに数枚の砂層が挟まっており、最上位の砂層は、17世紀に噴火した北海道南部の駒ヶ岳や樽前山からの火山灰層の直下に位置していることから、海岸から数kmまで砂を運ぶような巨大な津波が17世紀に発生したとされた（Nanayama et al., 2003）。この地震について、三陸地方で記録されている1611年慶長奥州地震と対比する見解もあるが、釧路春取湖の湖底堆積物の年縞によれば、発生年は1637年前後とされている（Nanayama, 2020）。

17世紀の砂層の下位では、過去2500年間に6枚の津波堆積物層が発見されたことから、これらの津波の発生間隔はおおよそ500年とされていたが、火山灰層に加えて、泥炭層中の炭化物の放射性炭素年代からそれぞれの砂層の堆積年代を推定したところ、再来間隔は100～800年とばらつき、その平均は約400年となった（Sawai et al., 2009）。

同様な津波堆積物は海岸段丘上や段丘崖でも発見されており、それらの標高から、17世紀の津波の沿岸での高さは、十勝から根室の海岸で15～20 mと推定されている（平川, 2012）。

17世紀の地震の断層モデルとして、Satake et al.（2008）は十勝沖・根室沖のプレート間地震の連動モデル（Mw 8.5）を提唱した。断層面のすべり量は十勝沖で10 m、根室沖で5 m、深さは15～50 km程度である。Ioki and Tanioka（2016）は、2011年東北地方太平洋沖地震を踏まえ、海溝付近に25mのすべりを加えた、プレート間地震と津波地震の同時発生モデル（Mw8.8）を提案した。

地震調査委員会（2017）は、このような超巨大地震について、過去の地震の発生時期の不確定さも考慮し、30年確率を7～40%とした。

内閣府の日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会（2022）は、東北・北海道地方の各地で発見された過去6000年間の津波堆積物に基づいて最大規模の津波の推定を行った。千島海溝（十勝・根室沖）モデルは、襟裳岬より東側の津波堆積物・歴史資料に基づき、十勝沖の海溝軸付近のプレート境界浅部に最大すべり（約80m）を持つ断層で、Mwは9.3である。日本海溝（三陸・日高沖）モデルは、岩手県・青森県・北海道襟裳岬以西のデータに基づき、三陸沖北部の海溝軸付近のプレート境界浅部及び日高・下北沖のプレート境界や

や深部（40～50km）に大きなすべり（約40m）を持つ断層モデル（Mw 9.1）を提案している。これらの地震から想定される津波高は宮古市で約30m，えりも町で約28mとなり，最悪（冬の深夜）の場合，死者数は日本海溝地震で約199,000人，千島海溝地震は約100,000人とされている。

Identifying the sources of the 1611 Keicho tsunami

*Yusuke YAMANAKA¹, Yuichiro TANIOKA¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

1611年に発生した慶長地震による津波(慶長地震および慶長津波)に対して、先行研究によって東北沖や北海道沖がその波源域の候補として提案されている。北海道沖波源説は、慶長地震と17世紀に千島海溝沿いのプレート境界で発生した地震(17世紀地震)が同一であると仮定した上で提案されているものである。したがって、慶長津波の波源域の特定は17世紀地震の解明と千島海溝沿いで発生する地震の予測において重要である。本発表ではYamanaka and Tanioka¹⁾で得られた成果に基づき、推定された慶長津波の波源域と慶長地震の特性について報告する。なお以下で述べる内容はその要旨と同一の内容である。

本研究では、三陸海岸に対して決定されている慶長津波の痕跡高の空間分布に着目した。まずそれらを精査することにより、三陸海岸に位置する小谷島では津波が局所集中することによりその高さが約30 mに達していたことがわかった。これを踏まえて数値実験を行った結果、三陸海岸に短周期の津波が影響する場合にのみ、そのような局所集中が発生した。さらに、小谷島に接する海域では周期8分程度の固有振動特性があり、津波がそれを励起することで局所集中が強化されることが明らかになった。次に、17世紀地震による津波の挙動を推定したところ、小谷島には長周期成分が卓越する津波が影響した。一方、日本海溝沿いのプレート境界浅部域を震源域に含む地震が発生した場合、小谷島には短周期成分を主要成分として含む津波が影響することがわかった。さらに、東北沖を対象に津波のグリーン関数を推定し、その位相特性を定量的に分析した。慶長地震は日本海溝沿いのプレート境界浅部域に震源域を持ち、その地震により発生した短周期の津波が固有振動を励起して小谷島に局所集中したと仮定し、これらがもたらされる断層モデルをグリーン関数の位相特性を踏まえながら構築した。構築した断層モデルのモーメントマグニチュードは8.5であり、これによる津波は、小谷島に局所集中する津波特性およびその周辺地域で観測された津波の痕跡高分布を妥当に再現することができる。東北沖を波源とする津波では三陸海岸に有意な短周期波が影響する可能性があるが、17世紀地震による津波ではその可能性が低いこと、および東北沖を波源とする津波によって慶長津波の局所集中特性を再現できることを踏まえると、慶長津波は東北沖に波源域を持つ津波であり、慶長地震と17世紀地震は同一でないと考えられる。

1) Yamanaka, Y. and Tanioka, Y. (2022) Short-wave run-ups of the 1611 Keicho tsunami along the Sanriku Coast, *Progress in Earth and Planetary Science*. <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00496-1>
(http://progearthplanetsci.org/index_j.html)

Geological evidence of coastal erosion generated with 17th-century tsunami in a beach ridge plain, eastern Hokkaido

*Yuki SAWAI¹, Toru Tamura¹, Yumi Shimada¹, Koichiro Tanigawa¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

文書の記録が多く残されている本州西南部では、過去約1300年間に発生した巨大地震・津波の履歴が古文書・歴史書から検討されている。これに対して北海道東部の歴史記録は19世紀以降に限られているため、それ以前における地震・津波の繰り返し間隔は地質学的手法によって明らかにするしかない。こうした背景から、過去に発生した海溝型地震とそれに伴った津波の履歴を調べるため、津波堆積物に関する研究が、北海道東部の湿原域で1990年代より行われてきた。その結果、過去数千年間にわたり平均して約340-380年の間隔で巨大な津波が発生していたこと（Nanayama et al., 2003; Sawai et al., 2009; Ishizawa et al., 2017）、最後の巨大津波は17世紀頃（1630年頃？）に発生したこと（Ishikawa, 2013; Nanayama, 2020）が明らかにされた。発表者らは、こうした巨大津波によって過去の海岸がどのような影響を受けたのかを明らかにするため、地形・地質の調査を行ってきた。本講演では、その成果の一部を報告する。

地形・地質の調査は、北海道浜中町の浜堤列平野である霧多布湿原において行った。まず、地形の特徴を詳細に把握するため、無人航空機を使用したフォトグラメトリ（写真測量）を行った。浜堤は海岸線と平行に分布する地形的な高まりだが、現在の海岸線から約300m内陸に位置する浜堤において、海岸線と直行方向に浜堤を切るような池沼・湿地が点在することが明らかになった。次に、地下の堆積構造を推定するために池沼を横断・縦断する方向で地中レーダー探査（GPR）ところ、浜堤の砂層を示すGPR反射面が池沼の地下において切断されていることがわかった。さらに、GPR反射面が示す堆積物を確認するため、ジオスライサーによって柱状堆積物試料を採取した。試料を肉眼と医療用CTで観察したところ、浜堤の砂層が侵食され、その上に砂層と泥炭層が堆積していることが確認できた。侵食痕の直上で認められた砂層は、中礫～大礫サイズの泥炭の塊を含むイベント層と考えられた。本研究で確認された池沼は、その地形的特徴、GPR反射面が示す堆積構造、地下で見られた堆積物を総合的に判断し、津波や暴浪によって形成された穿掘池（scour pond）と推定された。

Scour pondの形成年代は、堆積物中の火山灰層によって推定した。ジオスライサーによって採取された試料には明瞭な火山灰層が認められる。火山灰層の起源を推定するためにEDX分析を行ったところ、本研究で見られた火山灰層は、上位より樽前aテフラ（Ta-a, 1739年）、駒ヶ岳c2テフラ（Ko-c2, 1694年）、駒ヶ岳dテフラ（Ko-d, 1640年）と考えられた。Scour pondの泥炭層は駒ヶ岳dテフラの少し前から堆積が始まっていることから、scour pondは17世紀の巨大津波によって穿掘されたものと考えられることができる。なお、scour pondの湖底堆積物中に見られたイベント堆積物は、海岸が穿掘された直後に堆積した津波堆積物と解釈することができる。

仮に、本研究で検討されたscour pondが17世紀の巨大津波によるものであるとすれば、当時の海岸線は現在よりも約300m内陸に位置していたことを意味している。17世紀のイベントが発生した当時の地殻変動を復元した研究によれば、地震が発生する前に海岸は継続的に沈降し、地震が発生した後に数十年かけて隆起し離水した（Sawai et al., 2004）。現在の海岸は、その離水イベントによって300m程度広がったものと考えれば矛盾がない。

本研究の一部はJSPS科研費（20H01988）により実施した。

引用文献

Ioki, K., Tanioka, Y., *Earth Planet. Sci. Lett.* 433, 133–138 (2016).

- Ishikawa, S., Ph D thesis. Kyushu University, Fukuoka, Japan (2013).
- Ishizawa, T. et al., *Quat. Geochronol.* 41, 202–210 (2017).
- Nanayama, F. et al., *Nature* 424, 660–663 (2003). Nanayama, F. Geological Society of London, Special Publications 501, 131–157 (2020).
- Sawai, Y. et al., *Science* 306, 1918–1920 (2004). Sawai, Y. et al., *J. Geophys. Res.* 114, <https://doi.org/10.1029/2007JB005503> (2009).

Liquefaction history of the ground in the area around the Kuril Islands Trench, Hokkaido, Japan, based on archaeological data

*Wataru HIROSE¹, Hiroaki Takahashi²

1. Hokkaido Research Organization, 2. ISV, Hokkaido University

【はじめに】

千島海溝周辺では、今後30年間以内においてM8.8以上の巨大地震の発生確率が7～40%と、地震に伴う強震動および津波リスクが極めて高い状態にある（地震調査研究推進本部，2017）。この地域の津波履歴については、たとえばSawai et al.（2009）をはじめ北海道太平洋岸で行われてきた多くの津波堆積物研究の調査により、過去6000年間程度の履歴が明らかにされている。一方で強震動の履歴については、文献記録により過去1000～1500年間にわたり履歴を検証可能な本州とは異なり、文献記録の乏しい北海道では19世紀以前の履歴は不明な点が多い。

強震動履歴に関する研究手法としては、文献調査の他に考古遺跡における地割れや噴砂（地盤液状化）などの地盤変状発生履歴によるものがある。北海道においても伏島・平川（1996）・羽坂ほか（1997）、廣瀬ほか（1999）などによる先駆的な研究が石狩低地帯中～南部の先史地震についてとりまとめを行い、1834年石狩地震の他に後期縄文～擦文期にかけての噴砂や地盤亀裂が認識されている。一方、千島海溝に隣接する北海道東部～中南部にかけては地震学の見地に立った検討はこれまで行われていない。我々は現在、北海道全域を対象とした膨大な考古資料（調査報告書・写真およびスケッチ等）の再検証を進めている。ここでは千島海溝に隣接した北海道東部～中南部にかけての調査結果について概要を報告する。

【根室半島】

根室市の南西部、温根沼に隣接する縄文早期～擦文期（トビニタイ期）の遺跡（温根沼2遺跡）では、基盤岩（上部白亜系～古第三系根室層群）を覆う海成段丘に形成された遺跡において噴砂跡が認められた。段丘面から段丘崖へと移行する箇所にある標高8～16mの緩斜面において、おおむね東北東～西西南走向で延長約80mの正断層変位を有する亀裂を充填する噴砂である。段丘堆積物を構成するMIS5e期の海成砂が液状化したものと推定される。

【根釧台地】

伊茶仁カリカリウス堅穴群遺跡をはじめとする、低位段丘～沖積低地にかけての遺跡群で噴砂痕跡が多く認められた。低位段丘における噴砂はしばしば垂直変位量数cm程度の正断層変位を有する等高線に沿った亀裂に伴って認められる。噴砂脈は分岐や屈曲、側方への貫入など不規則な形態をとることが多い。これらから、強震動による地盤の液状化と段丘堆積物の斜面変動が同時に発生し、形成された開口亀裂中に噴砂が上昇、未固結な段丘堆積物中に貫入（一部は地表に噴出）したと推定される。

【十勝～日高地域】

この地域では、明瞭な噴砂脈は認められなかった。猿別C遺跡ではTa-cテフラを切る小規模な地すべりイベントが認められるが、地震（強震動）との関係は不明である。

【石狩低地～苫小牧地域】

この地域では先行研究で認識されていた噴砂イベントに相当する後期縄文～擦文期、1834年石狩地震に対応する噴砂イベントが多数認められた。札幌周辺と恵庭～千歳地域の沖積低地～低位段丘縁辺の遺跡に集中して確認される。

【噴砂形成イベントの時期】

摩周火山や樽前火山・北海道駒ヶ岳などから更新世末～完新世に噴出した広域テフラとの関係から、北海道東部～中南部における噴砂イベントの発生時期について整理した。これらはテフラ層との切り合い関係から推定したものである。十分な数の噴砂が観察できていない場合、明らかに地表噴出した噴砂を除き、噴砂が切ったテフラよりは新しい、ということを示すものであることに留意が必要である。

根室半島～根釧台地では、（約12000年前）、約5500～4500年前、約4000～3000年前、約2500年前、1000～500年前、西暦1739年以降と、多岐にわたる時期に噴砂イベントが発生した可能性が指摘でき

る。一方、隣接する十勝～日高地域では、明瞭な噴砂イベントは見いだされないことから、これらの噴砂イベントは根室半島～根釧台地にかけて強震動をもたらした強震動イベントに関連するとみなしてよいだろう。石狩低地～苫小牧地域では、1834年石狩地震に相当するイベント（Ta-aテフラを切る）がH37遺跡など札幌市北部～石狩川下流に集中、擦文文化期（11世紀以降）～アイヌ期（Ta-aテフラ以前）、続縄文～擦文文化期のイベントは札幌周辺～石狩低地南部まで広く認められる。続縄文～擦文文化期については根室～根釧台地では該当するイベントがないこと、近接する石狩低地東縁断層帯の最新活動から一つ前の活動期（約2400年前～8世紀以前）と重なることから、石狩低地断層帯の地震活動による可能性も含めた検討が必要である。

【謝辞】

本研究にあたっては、各自治体の教育委員会および学芸員の方々にご協力いただきました。感謝いたします。

Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

📅 Mon. Oct 24, 2022 11:00 AM - 12:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 2:00 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] AM-2

chairperson:Yusuke Yamanaka(Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S22-05] Structure difference across the submarine canyon in the Kuril subduction zone off Hokkaido and its relation with interplate slip behaviors

*Hiroto Yamaguchi¹, Shuichi Kodaira², Gou Fujie², Tetsuo No², Yasuyuki Nakamura², Kazuya Shiraishi², Nobukazu Seama¹ (1. Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S22-06] Re-evaluation of normal fault distribution in the outer slope of the western Kuril Trench, off the southeastern coast of Hokkaido, based on recent acquired seismic reflection data and bathymetry data

*Tetsuo NO¹, Shuichi Kodaira¹, Kentaro Imai¹, Koichiro Obana¹, Gou Fujie¹, Yasuyuki Nakamura¹, Kazuya Shiraishi¹, Ryo Miura¹, Masao Nakanishi² (1. JAMSTEC, 2. Graduate School of Science, Chiba Univ.)

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

[S22-07] Development of Real Time Tsunami Forecast Method for Outer-Rise Earthquakes occurred along the Kurile Trench

*Miu Matano¹, Yuichiro Tanioka¹, Tatsuya Nakagaki¹, Masato Kamiya², Toshitaka Baba², Tetsuo No³, Kentarou Imai³, Yusuke Yamanaka¹, Shuichi Kodaira³ (1. Hokkaido University, 2. Tokushima University, 3. JAMSTEC)

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

[S22-08] Numerical investigation of tsunami in tsunami earthquakes for developing a real time tsunami forecasting method using S-net data

Tatsuto Oishi¹, *Yuichiro Tanioka¹, Yusuke Yamanaka¹ (1. Hokkaido University)

Structure difference across the submarine canyon in the Kuril subduction zone off Hokkaido and its relation with interplate slip behaviors

*Hiroto Yamaguchi¹, Shuichi Kodaira², Gou Fujie², Tetsuo No², Yasuyuki Nakamura², Kazuya Shiraishi², Nobukazu Seama¹

1. Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

北海道沖の千島海溝沈み込み帯では十勝沖と厚岸沖の間に釧路海底谷が海岸から海溝軸までほぼ直角に延び、この海底谷を境にプレート境界で発生する地震とスロー地震の分布が分かれていると考えられている。プレート境界でこれまで発生した地震として特に規模が大きく研究がされているのは1952年十勝沖地震(M8.1)や1973年根室沖地震(M7.4)、2003年十勝沖地震(M8.0)があげられる。1952年十勝沖地震の地震時すべりは十勝沖から厚岸沖の沿岸から海溝軸近くまでの広い範囲で推定されている。1973年の根室沖地震や2003年の十勝沖地震で推定された地震時すべりやAfter slipは1952年十勝沖地震の地震時すべり領域の一部で、十勝沖から厚岸沖の海溝軸近くでは1952年以降すべりが観測されていないことが知られている(Okamura et al.2008など)。この1952年十勝沖地震以降すべりが観測されていない海溝軸近くの領域をAzuma et al.2012ではSeismic gapと定義している。スロー地震の一種であるVLFE(超低周波地震)、微動は釧路海底谷より西側(十勝沖)で観測される。VLFEはseismic gapの領域内では観測されず、微動はSeismic gapの領域でも観測されている。Seismic gapは海底谷を越えて東側まで続くのに対し、微動は海底谷を越えていない。この海底谷は谷を挟んで東西に連続した海底地形や地下構造が存在することが知られている。そこで、釧路海底谷周辺で反射法地震探査を用いて詳細な地下構造を明らかにし、海底谷を挟んだ地殻活動の違いを支配している要素を地下構造から議論する。反射法地震探査は8本の2次元測線に沿って、海溝軸の前後500 km 海溝軸平行に150kmの範囲に及ぶ大規模な多チャンネル反射法地震探査を行った。その結果、海溝軸から80kmまでのプレート境界面をイメージングすることに成功した。このイメージングによって明らかになったプレート境界の深度とOverriding Plateの構造の大きな注目点としては3点あげられる。1点目は微動がプレート境界のある深さで帯状にみられるが、その深度がSeismic gapの内外で異なる点である。Seismic gap内ではプレート境界がより浅い12-14kmの深さの領域で、gap外では18km以深の深い領域で発生していることが明らかになった。2点目は、プレート境界と平行な多数の反射体からなる「Reflective zone」が存在していることである。このReflective zoneは海底谷の東部(厚岸沖)でのみ海溝軸から30-60kmの範囲で観測される。海底谷の西側(十勝沖)ではReflective zoneは観測されない。海底谷の西側(十勝沖)では海溝軸から40-70kmの範囲で微動が観測されている。Reflective zoneの存在の有無が微動の有無を分けているようである。日本海溝の沈み込み帯では、同様の反射帯が岩手-宮城沖と房総半島沖で観測されている。先行研究で指摘されていないが、この反射帯がみられる領域では微動が発生していないことも発見した。3点目はWedgeの構造が概ね海底谷を境界にして東西で異なる点である。Qiu and Barbot 2022では大陸地殻の海溝近傍に当たるaccretionary wedgeを陸側からPaleo-prism、Inner wedge、Outer wedgeの3つの部分に分けた。本研究では海溝軸側の2つの部分Inner wedgeとOuter wedgeに注目する。海底谷より東側(厚岸沖)ではOuter wedgeは高角に陸側傾斜した反射帯から主に構成され、Inner wedgeは反射が少ない。西側(十勝沖)ではOuter wedgeは低角に陸側傾斜した反射で構成され、Inner wedgeは多数の反射がみられる。また、Outer wedgeはInner wedgeの下にもぐりこむ構造をしているが、東側より西側の方が長い距離にわたってもぐりこんでいる。東側・西側それぞれのWedgeの構造はQiu and Barbot 2022で示された色丹島沖の千島海溝・岩手沖の日本海溝それぞれで見られるWedge構造とよく似ている。Outer wedgeが千島海溝型の東側(厚岸沖)ではReflective zoneが観測され微動は観測されない。日本海溝型の西側(十勝沖)ではReflective zoneが観測されず、微動が観測される。一方でSeismic gapを見るとこれらの違いにも関わらず両方の領域にまたがって存在している。Reflective zone、Outer wedge、プレート間すべりのお互いの関係性はまだ明らかではない。しかし、今回の観測は微動の分布がSeismic gapやOuter wedge、Reflective zoneと関連している可能性を示唆している。本発表では、釧路海底谷周辺の様々な構造の違いを紹介し、緩急のすべり現象との比較を行う。

Re-evaluation of normal fault distribution in the outer slope of the western Kuril Trench, off the southeastern coast of Hokkaido, based on recent acquired seismic reflection data and bathymetry data

*Tetsuo NO¹, Shuichi Kodaira¹, Kentaro Imai¹, Koichiro Obana¹, Gou Fujie¹, Yasuyuki Nakamura¹, Kazuya Shiraishi¹, Ryo Miura¹, Masao Nakanishi²

1. JAMSTEC, 2. Graduate School of Science, Chiba Univ.

千島海溝の海溝海側は、2007年に千島列島中部のシムシル島沖で M_w 8.1 (Ammon et al., 2008)、2020年に千島列島北部のパラムシル島沖で M_w 7.5 (Ye et al., 2021) など比較的多くのプレート内地震が発生している。その一方、北海道南東沖千島海溝の海溝海側は、2012年に発生した M_j 6.9の地震など襟裳海山南東部付近での地震活動は顕著であるが、ここ100年で見ると日本海溝における昭和三陸地震津波のような大地震は観測されていない。北海道南東沖千島海溝の海溝海側は大地震の観測例がないものの、先行研究によって多くの正断層地形の分布が確認されている。例えば、Kobayashi et al. (1998)やNakanishi (2011)は海底地形データをもとに、海溝海側斜面の断層地形のマッピングを行い、断層地形は海溝から約80 kmまで存在するが北海道海膨までは達していないことや海溝海側斜面の断層地形の走向が中生代磁気異常縞模様とほぼ平行で、海洋底拡大に起因する構造的弱線のうち、アビスサルヒルが再活動してできたものであることを論じている。海溝海側斜面の断層地形は、大局的には海洋プレートの屈曲による影響で形成された構造であるが、各々の海溝の特徴や分布の詳細は、海溝軸との位置関係、海洋プレートの形成年代や様式、プレートの屈曲率等のセッティングや条件によって異なることもわかってきている（例えば、中西, 2017）。

本発表は、科研費基盤(A)「千島海溝沖アウターライズ津波即時予測に向けた震源断層マッピングと津波評価」の一環として、Nakanishi (2011)による断層地形のマッピングの結果をもとに、近年取得されたマルチチャンネル反射法地震探査(MCS)データや海底地形データを解析し、襟裳海山付近から納沙布断裂帯付近までの千島海溝西部の海溝海側斜面における正断層分布を再評価した結果について報告する。

MCSデータは2016~2020年に海洋研究開発機構(JAMSTEC)の調査船「よこすか」「かいいい」「かいめい」を用いた4航海で取得した計34測線を使用し、ノイズ抑制処理を重点的に適用した上で、深度マイグレーション処理を行った。海底地形データについては、JAMSTEC船舶で取得されたデータを再処理して、それらのデータがカバーしていない部分についてはSRTM15+データ(Tozer et al., 2019)やGEBCOデータ(GEBCO Compilation Group, 2019; 2020)や先行研究データ(海上保安庁・海洋研究開発機構, 2011)等を重ねて、データの接合部は可能な限り不整合が生じないように処理した。解析で得られたMCSデータをSchlumberger社製のPetrelに登録して、海溝海側斜面に形成された正断層の解釈作業を行い、それらの断層の空間的な接続性を海底地形データやNakanishi (2011)の結果を用いて評価し、正断層の分布に関する検討を行った。

結果として、断層の走向や分布に関してはNakanishi (2011)に沿っているが、断層の形成は海溝軸から約100 km海側から始まっていることがわかった。これは正断層の構造が海底地形よりもMCS探査で得られた結果の方が明確に判別しやすいことによる。Fault throwの大きさも海底地形より海洋地殻上面での変位から推定する方が大きくなっている一方で、先行研究でも指摘されていることだが、日本海溝の海溝海側斜面断層(e.g. Tsuru et al., 2000; Nakamura et al., 2018)と比べると、Fault throwの大きさは若干小さい傾向にある。ただし、断層の間隔は千島海溝の方が日本海溝より狭く、密に分布している。また、対象海域には海溝軸付近に襟裳海山や拓洋第一海山が位置しており、それらの海山を切るような比較的最長い断層が存在する一方で、海山が存在している領域での断層の分布数は海山がない領域と比べると少なく、Fault throwの大きさにも影響が生じているような結果になっている。MCS探査の結果から読み取ると、海山の存在の影響で地殻の厚さが対象領域で6~10 kmの間で変化しているので、海洋地殻の厚さ等の構造が海溝海側斜面の断層の分布や形成に影響を与えている可能性がある。

Development of Real Time Tsunami Forecast Method for Outer-Rise Earthquakes occurred along the Kurile Trench

*Miu Matano¹, Yuichiro Tanioka¹, Tatsuya Nakagaki¹, Masato Kamiya², Toshitaka Baba², Tetsuo No³, Kentarou Imai³, Yusuke Yamanaka¹, Shuichi Kodaira³

1. Hokkaido University, 2. Tokushima University, 3. JAMSTEC

1. 背景

日本海溝沿いのアウターライズでは1933年昭和三陸地震により大津波が発生し、三陸沿岸は津波による甚大な災害を被った。千島海溝沿いではそのような巨大地震がアウターライズで発生した過去の例は知られていない。しかし、最近のJAMSTECによる千島海溝沿いの海底構造調査によりアウターライズでの海底活断層（正断層）が多数マッピングされている。これらの断層が活動し巨大地震が発生した場合、大きな津波が北海道沿岸に押し寄せると考えられる。また、これらの活断層の周辺領域には海底地震津波観測網（S-net）が設置されており（図）、各観測点で観測された津波波形を利用することで精度の良い津波の即時予測が可能になると考えられる。そこで本研究は、科研費基盤(A)「千島海溝沖アウターライズ津波即時予測に向けた震源断層マッピングと津波評価」の一環として、それらの正断層で発生する巨大地震による大津波を早期に予測するため、S-net観測点で観測されることが期待される海底圧力波形を用いて簡便な方法で震源断層を特定する。さらに将来、北海道沿岸を襲う津波の特性を即時的に予測する手法の開発を目指す。

2. 手法

震源断層として、JAMSTECによる海底構造調査によりマッピングされた活断層の情報（野他、本日本地震学会秋季大会）から構築された23個の千島海溝アウターライズ地震断層モデルを用いる。まず、それぞれの断層モデルに基づき海底地殻変動量を求め、梶浦フィルターを用いて高周波成分を除去して初期海面変動を推定した。その伝播を線形Boussinesq方程式に基づき推定し、S-netの観測点40点（図）における津波波形を求め、海底圧力波形に変換した。これを観測された圧力波形と見なし、地震発生から500秒までの波形の特徴から震源断層を特定する手法を開発する。

3. 結果

まず500秒の観測波形から震源断層を特定するために、Inoue et al. (2019)の手法を参考に圧力波形の特徴から、次に示す基準によって観測点を4つに分類した。1）圧力波形が原点より下で推移（隆起域の観測点）、2）圧力波形が原点より上で推移（沈降域の観測点）、3）1パルスの圧力波形が入る（隆起域または沈降域の近傍の観測点）4）その他（震源域から遠方の観測点）。分析結果の代表例を図に示しており、S-netの観測点を上記基準で分類することにより震源域が特定できる事が分かった。さらに、海底構造調査結果から、アウターライズでは地塁・地溝構造が発達しているため、断層の傾斜方向が相反する2つの断層タイプがあることが分かっている。両者の断層運動による海底地殻変動は分布が異なるため、断層の傾斜方向の違いも500秒間の波形から判別できることが分かった。海底構造調査により推定された23個の断層モデルは近接しているものも多く、全てを本手法で識別することは難しいが、識別の難しい断層モデルの場合には予想される海底地殻変動もほぼ同じであることから、津波即時予測の上で問題は少ないと考えられる。今後、さらに解析を進め、津波の即時予測に有用な情報の抽出に取り組むとともに、手法を改善することで500秒間より短い間隔での震源断層推定を試みる。津波即時予測にとって時間の短縮は避難時間確保の上で最も重要な課題である。

参考文献

Inoue, M., Y. Tanioka, Y. Yamanaka, Method for Near-Real Time Estimation of Tsunami Sources Using Ocean Bottom Pressure Sensor Network (S-net), Geosciences, doi:10.3390/geosciences9070310.

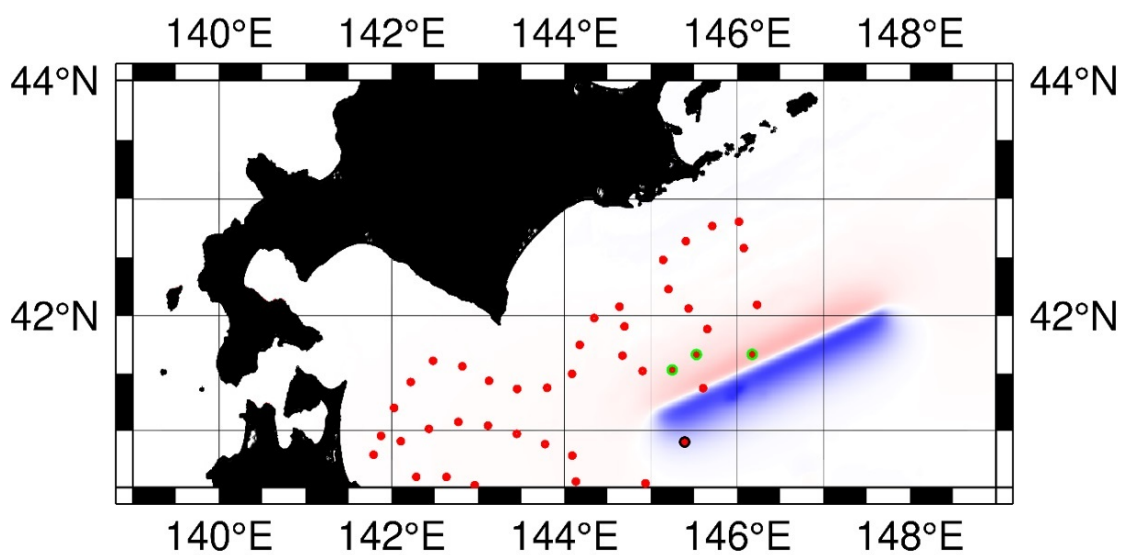


図 1つの断層モデルから計算される初期波高分布（赤：隆起、青：沈降）と S-net 観測点分布（赤丸）。
隆起域と判別された観測点（緑枠）、沈降域と判別された観測点（黒枠）

Numerical investigation of tsunami in tsunami earthquakes for developing a real time tsunami forecasting method using S-net data

*Tatsuto Oishi¹, Yuichiro Tanioka¹, Yusuke Yamanaka¹

1. Hokkaido University

1. はじめに

日本はこれまでに幾度も津波被害を受けてきた。そのため、様々な津波の即時予測手法が開発されてきたが、その中でも津波地震による津波の沿岸波高の予測は難しい。津波地震は地震による強震動から予測される津波の規模を上回る規模の津波を発生させる地震と定義され、観測される地震動に基づく津波予測では津波高を過少評価する可能性が高い。そのため、津波地震に対応可能な津波予測手法は気象庁をはじめ様々な研究機関で研究されている。現在、日本海溝・千島海溝沿い沈み込み帯では海底地震津波観測網（S-net）が設置され、150点での海底地震観測データと海底圧力観測データがリアルタイムで配信されている。また、日本海溝・千島海溝沿いでは過去に1896年明治三陸地震をはじめ1963年千島地震や1975年根室半島沖地震など津波地震が発生してきた。そこで本研究では、津波地震時にS-netで観測されることが期待される水圧データを解析することにより、津波の波源を予測する手法の開発を目指す。

2. 手法

本発表では代表的な津波地震として知られる1896年明治三陸津波地震とそれによる津波を対象とした分析結果を報告する。Tanioka and Seno (2001)を参考に、長さ210km、幅50km、すべり量6.7mの断層モデルを仮定した。上記断層モデルから地殻変動量を計算し、Tanioka and Satake (1996)の水平変動による効果を加えて津波初期水位とした（図）。津波の伝播計算は線形理論に基づき行い、S-net観測点で地震発生後500秒までに計算された津波波形を海底圧力波形に変換した。これを観測水圧波形として用いて分析した。

3. 結果

S-netの観測点での圧力波形の一部を図に示す。震源域内で、陸よりの観測点から海溝外側の観測点までの圧力波形を見ると、沈降域内に位置する観測点の圧力波形は正圧領域を推移していることがわかる。隆起域の幅は狭くなったため、隆起域に位置する観測点はない。海溝外側の観測点では、1パルス以上の波形を捉えていることがわかる。したがって、このように圧力波形の特徴を分類することにより、地震津波による津波の波源域を特定可能であることが示された。今後、この分類手法を利用した波源位置推定手法の精緻化を行い、津波地震に対応できる津波予測手法の開発につなげる。

参考文献

- ・ Tanioka Y, Seno T (2001) Sediment effect on tsunami generation of the 1896 Sanriku tsunami earthquake. *Geophys Res Lett* 28:3389–3392
- ・ Tanioka Y, Satake K (1996) Fault parameters of the 1896 Sanriku tsunami earthquake estimated from tsunami numerical modeling. *Geophys Res Lett* 23:1522–1549

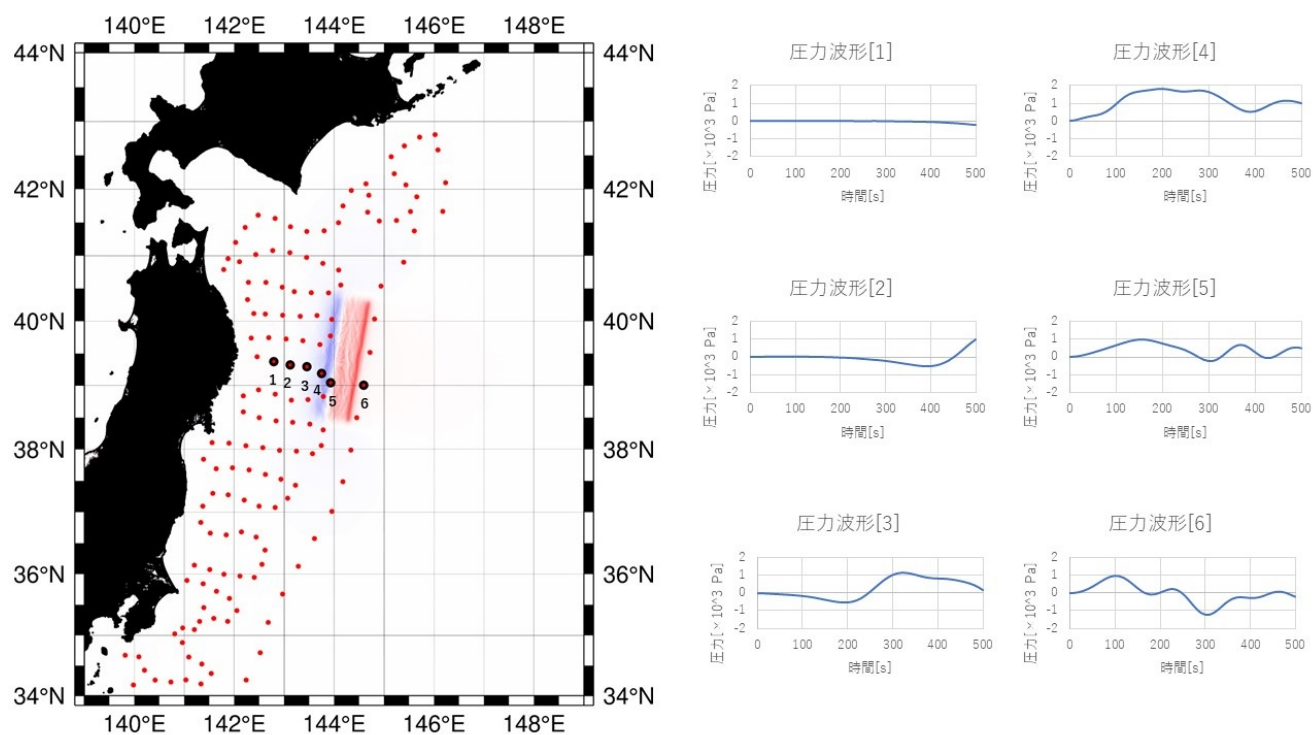


図 S-netの観測点(左図)と計算された代表的な圧力波形の例(右図)

Award lecture | Regular session : S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

📅 Mon. Oct 24, 2022 1:30 PM - 3:18 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 4:30 AM - 6:18 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S20] PM-1

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura (Kyoto University)

1:30 PM - 1:33 PM JST | 4:30 AM - 4:33 AM UTC

[S20] President speech

1:33 PM - 1:48 PM JST | 4:33 AM - 4:48 AM UTC

[S20] Award ceremony

1:48 PM - 2:08 PM JST | 4:48 AM - 5:08 AM UTC

[S20-01] [Invited] *Development of Strong Motion Prediction and its Utilization*

*Kojiro IRIKURA¹ (1. Aichi Institute of Technology, Disaster Prevention Research Center)

2:08 PM - 2:28 PM JST | 5:08 AM - 5:28 AM UTC

[S20-02] [Invited] Multi-discipline Subduction Earthquake Science

*Suguru YABE¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

2:28 PM - 2:48 PM JST | 5:28 AM - 5:48 AM UTC

[S20-03] [Invited] Elucidation of Earthquake Rupture Process and Advancement of Ground Motion Model via Data-driven Approach

*Hisahiko KUBO¹ (1. NIED)

3:08 PM - 3:13 PM JST | 6:08 AM - 6:13 AM UTC

[S20] LOC president speech

3:13 PM - 3:18 PM JST | 6:13 AM - 6:18 AM UTC

[S20] Next LOC president speech

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-1

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura (Kyoto University)

Mon. Oct 24, 2022 1:30 PM - 3:18 PM ROOM A (1st floor (Kaderu Hall))

1:30 PM - 1:33 PM

[S20] President speech

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-1

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura (Kyoto University)

Mon. Oct 24, 2022 1:30 PM - 3:18 PM ROOM A (1st floor (Kaderu Hall))

1:33 PM - 1:48 PM

[S20] Award ceremony

[Invited] *Development of Strong Motion Prediction and its Utilization*

*Kojiro IRIKURA¹

1. Aichi Institute of Technology, Disaster Prevention Research Center

強震動の予測は、大地震時の災害を軽減するために必要不可欠な研究であり、日本の地震学にとっても最重要課題の1つとして長い歴史をもっている。強震動の計器観測は、日本では1950年代に工学の研究者によるSMAC-A型強震計(高橋, 1953)の開発に始まり、観測記録の統計的な解析により経験的手法で強震動予測式(例えば、金井, 1967)が構築され、構造物の耐震性向上に役立てられてきた。一方、地震学的には強震動研究は「地震とは何か」の研究と結び付けて発展してきた。「地震は断層運動である」という考えは、1891年の濃尾地震以来、地質学者によるフィールド研究で提唱されたが、地震波観測と矛盾があるとして、日米の研究者間で大論争となっていた。断層現象と地震波生成の観測事実が一致することが物理学の理論として確立したのはDe Hoopによる断層(Dislocation)と地震波のための表現定理(1958)で、日本でも同様の考えが丸山卓男(1963)により定式化された。断層運動が地震の原因であることが地震学や地質学で広く認められるようになるのに70年の年月を要したことになる(三雲, 1992)。大地震の強震動を断層運動に結びつける定量的評価の研究は1960年代の後半から1970年代にかけてAki, Brune, Kanamoriをはじめとする多くの地震学者によりなされ、運動学的モデルによる地震動のシミュレーションによる断層パラメーターの評価や観測記録の統計的な解析による地震動のスケーリング則の構築などの重要な成果が得られた(例えば、Aki, 1967; Brune, 1970; Kanamori and Anderson, 1975)。しかしながら、断層や強震動に関して、地質学者によるフィールド研究、工学者による経験的研究、地震学者による物理学的研究は独立になされ、それらの分野横断的研究は殆どなされなかった。例えば、地震学では、数秒から数十秒の長周期地震動を対象とした地震動研究が行われたが、木造家屋や中低層のコンクリートや鉄骨のビルディングなどの建築構造物や橋梁、トンネル、土構造物などの土木構造物の耐震に重要な数秒から数分の1秒の短周期地震動に研究は殆ど行われてこなかった。その理由は、このような短周期地震動のデータは定量的な解析が可能な形で観測がなされてなかったこと、にある。強震動研究が飛躍的に前進したのは、1978年にUNESCOと国際地震工学会により強震動観測に関する国際的なワークショップが開かれ、地震災害軽減のために高密度強震動観測網の必要性が提言され、観測網が国際的に整備されてきたことにある(Iwan, 1978)。米国では1980年代からUSGSが中心となって活断層の集中するカリフォルニアを中心に高密度強震観測網が構築され、日本ではやや遅れて1995年の阪神淡路大震災を受けて強震動観測網が全国に配置され、つづいて台湾、中国、イタリアなどの地震国で強震動観測網が作られた。2000年代になると、高密度強震観測網の整備により、日本国内でも大地震の震源近傍で強震動記録が得られるようになり、地震時の断層運動のすべり分布の詳細が強震動記録を用いた逆問題の解析結果として次第に明らかになってきた。これらの断層運動の研究成果に基づいて、内陸地殻内地震の断層すべり分布の特性化の考えがまとめられた(Somerville et al., 1999; 入倉・三宅, 2001; Irikura and Miyake, 2011)。強震動記録を用いたインバージョンによるすべり分布から、一定の規範を設定して断層震源の総面積、アスぺリティ(強震動生成域)と背景領域の推定を行い、①断層面積と地震モーメントの関係、および②アスぺリティ面積と地震モーメントの関係、という2つの重要なスケーリング則が明らかにされた。これらの2つの断層震源パラメータに関するスケーリング則に基づいて、1995年兵庫県南部地震など最近の内陸地殻内地震の断層震源のモデルの構築および強震動評価がなされ、シミュレーションと観測記録の比較により、モデル化の有効性が検証された(例えば、Kamae and Irikura, 1998; Miyakoshi et al., 2000; Miyake et al., 2003)。我々は、上記の断層震源のスケーリング則や強震動評価手法に加えて、活断層に関する地質学的フィールド研究や工学的な強震動データ解析・処理の技術と結び付けて、大地震時の強震動予測手法(強震動予測レシピ)の開発を行ってきた(図1参照)。この「レシピ」は同一の情報が得られれば誰がやっても同じ答えが得られる強震動予測の標準的な方法論を目指している。現状ではいまだ開発途上であり、地震関連データの蓄積と動力学的断層破壊過程に関する理論および実験的研究の発展により、修正を加え、改訂されていくことを前提としている。今後、地形・地質学、地震学・地震工学、情報科学など分野横断的な視点で研究を発展させていくことが必要と考える。謝辞：私の日本地震学会賞の受賞は、日本における強震動観測網の構築、強震動データの収集、強震動生成の理

論および解析、強震動による災害の軽減などの研究の発展に係ってこられた方々のご協力とご支援によるものです。受賞対象となった本研究は、私が京都大学防災研究所在籍中に、私の研究室の卒業生を含めた多くの共同研究者の協力により行ったものであり、本研究に係った関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

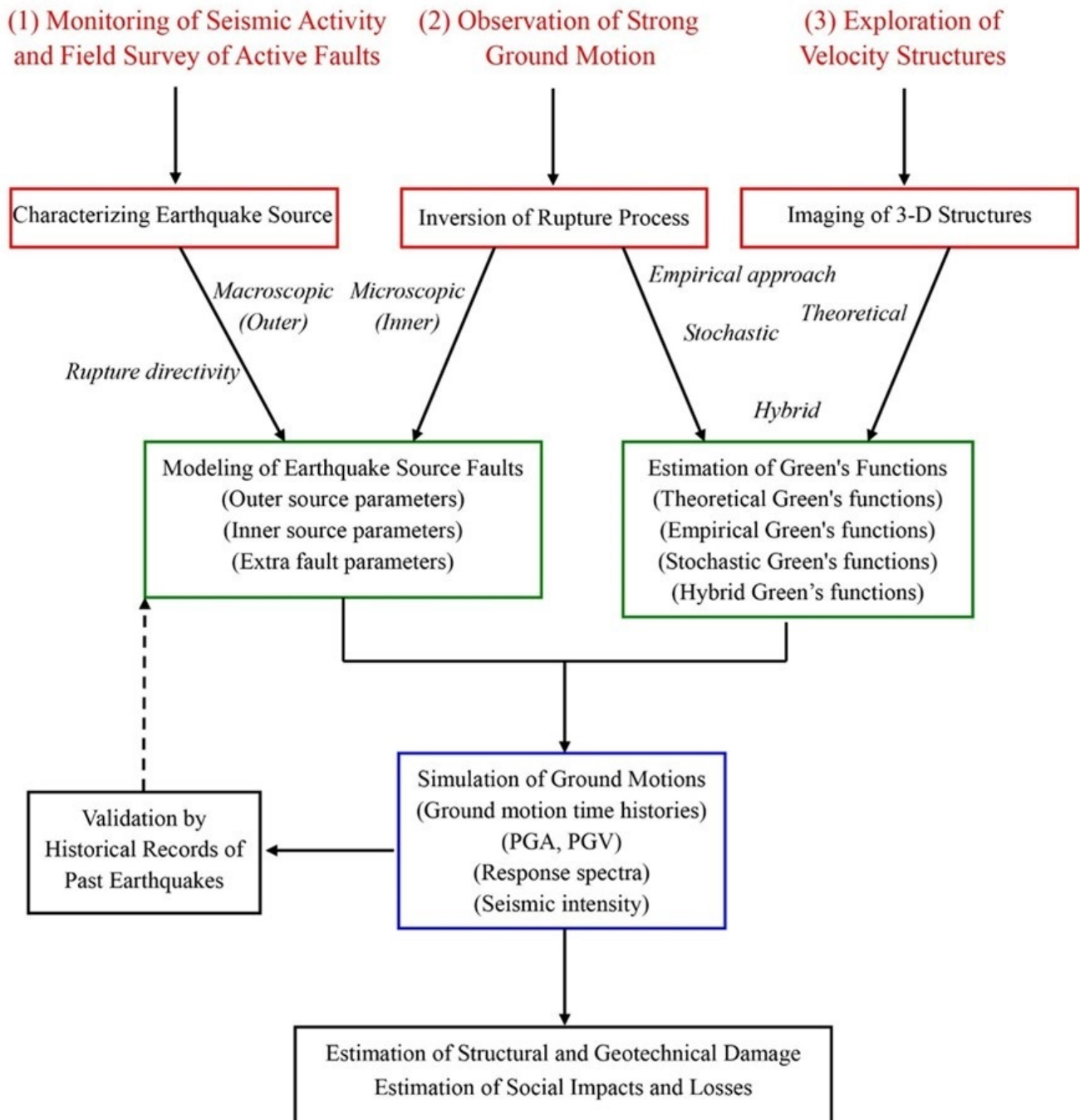


Figure 1. Framework of predicting strong ground motions for earthquake scenarios

[Invited]Multi-discipline Subduction Earthquake Science

*Suguru YABE¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

沈み込み帯では大小様々な普通の地震やスロー地震など多様な断層滑り現象が発生している。これらの現象の複雑な発生メカニズムの理解は、学術的に興味深い研究対象であると同時に、社会防災上も重要な研究対象である。地震研究における困難の一つは、震源全体の直接観察が難しい点である。そのため、地震動や地殻変動などの地球物理学的観測、数値モデルで地震発生を再現するシミュレーション研究、陸上に露出する過去の地震断層（陸上アナログ）の地質学的観察、限定的ながらも現世の地震断層を直接観察しようとする科学掘削など、様々なアプローチを組み合わせることで震源物理や地震発生環境の解明が試みられている。著者は学生時代から現職に至るまで、東京大学大学院理学系研究科、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、産業技術総合研究所地質調査総合センター(GSJ)の3機関において、それぞれの機関の特色に合わせたアプローチで研究を行ってきた。本講演では、著者のこれまで・現在の研究活動について紹介する。

・東京大学大学院理学系研究科（大学院生）

東大では、深部スロー地震、特に低周波微動を研究対象として地震学的な研究に取り組んだ。国内外の沈み込み帯の大量の地震観測データを用いて、複数の沈み込み帯における微動サイズの空間分布を系統的に明らかにし、スロー地震の多様性を明らかにした(Yabe et al., 2014, JGR)。また、震源決定や地震波エネルギー推定などの地震波解析だけでなく、沈み込み帯の温度構造計算(Yabe et al., 2014, EPS)や、潮汐応力との比較によるカタログ解析(Yabe et al., 2015, JGR)など、地震学の中でも多角的なアプローチを用いてスロー地震の震源物理や地震発生環境の解明を目指した。また、数値モデルを用いた断層破壊計算にも取り組んだ。スロー地震で提案されていた細かな空間スケールの摩擦不均質というアイデアを通常地震発生断層に取り入れることで、多様な前駆的地震現象(Yabe & Ide, 2018, PEPS)や本震縁辺部での余震生成(Yabe & Ide, 2018, GRL)などを説明できることを示した。

・JAMSTEC（ポスドク）

JAMSTECでは、DONETなどの海域地震観測データを用いたスロー地震解析に取り組んだ。様々な環境（温度・圧力など）のスロー地震を統一的な解析手法・指標を用いて比較することで、スロー地震に共通の性質と発生環境に左右される特徴を抽出することを目指した。その結果、スロー地震のScaled Energyが発生環境に依存しないスロー地震共通の性質であることを明らかにした他、南海トラフでは低周波微動サイズの空間分布が巨大地震の固着域を挟んで対称的になっていることを見出すなど、スロー地震が発生環境に系統的に左右されている様子も明らかにした(Yabe et al., 2019, JGR; Yabe et al., 2021, Tectonophysics)。また、地球深部探査船「ちきゅう」への乗船機会を契機に、それまで地球物理学の範囲で閉じていた自身の研究領域が地質学を含む広い領域に拡張された。岩石試料のCT画像解析や物性測定データ解析により、現世のスロー地震断層の変形挙動(Kimura et al., 2022, G-cubed)や付加体形成に伴う岩石圧密過程(Yabe et al., 2022, JGR)について検討を進めた。

・GSJ（現職）

GSJは西南日本において歪観測網を展開している。歪は地殻変動から地震動に至るまでの広帯域観測データとして有効である。地殻変動データとしてはGNSSよりも小さな地殻変動に感度があり、スロー地震の広帯域な振る舞いを詳細に明らかにできるのではないかと考えている。また地震動データとしては、モーメントテンソルの推定精度向上に資するのではと期待している。また、地質調査のナショナルセンターであるGSJの一員として、スロー地震の陸上アナログ研究にも取り組み始めている。四万十帯のスロー地震陸上アナログにおいて、スロー地震震源域やその周囲のプレート境界周辺における変形や流体の関与を系統的に明らかにしていきたいと考えている。他に、地質データを統計的なモデルを用いてクラスタリングすることで、定量的な地質図

作成を目指した研究も進めている(Yabe et al., 2022, EPS). 沈み込み帯地震学とは別に, GSJ在籍中に始まったコロナ禍を契機として, 地震計を用いた人間活動モニタリング研究にも着手した. コロナ禍開始当初の人間活動低下に伴ってMeSO-netで生じた地震計ノイズ低下(Yabe et al., 2020, EPS)を明らかにした他, サッカースタジアムでサポーターがジャンプすることにより励起された振動を用いて都市環境下の地下構造を推定できる可能性を示している(Yabe et al., 2022, EPS) .

[Invited]Elucidation of Earthquake Rupture Process and Advancement of Ground Motion Model via Data-driven Approach

*Hisahiko KUBO¹

1. NIED

本発表では、発表者がこれまでに取り組んできた、①大地震の震源過程の解明に関する研究、②強震動の成因と予測に関するデータ駆動型研究に関して紹介する。それぞれの研究とも観測データを出発点としており、発表においては観測データに触れることの楽しさに関しても言及したい。

① 大地震の震源過程の解明に関する研究

地震の際に取得される地震波形や地殻変動などの観測データから、現実的な地下速度構造モデルに基づくGreen関数とベイズ統計学に基づく逆解析手法によって、地震時の静的もしくは動的な断層すべり分布を推定する震源過程解析は、大地震の性質を理解する上で基礎的かつ重要な情報を提供してきた。発表者はこれまでに2011年東北地方太平洋沖地震や2011年茨城県沖地震、2016年熊本地震等など数多くの大地震に関して地震波形記録等に基づく解析を行い、それらの断層破壊過程と地震波放射の詳細を明らかにしてきた（例えばKubo & Kakehi 2013; Kubo & Nishikawa 2020; Kubo et al. 2013, 2016b, 2016c, 2017, 2020a, 2020c）。さらには震源過程解析で得られた断層破壊モデルを用いて、沈み込む海山や隣り合う他のプレートが断層破壊に与える影響を論じた研究（Kubo et al. 2013; Kubo & Nishikawa 2020）や、岩手県沖・茨城県沖のプレート境界大地震における本震時の断層破壊領域および前震・余震の発生域とスロー地震活動域との空間的な関係を調べた研究（Kubo & Nishikawa 2020）、プレート境界大地震である2011年茨城県沖地震において放射された地震波の周期特性と断層深さの依存関係の詳細を調べた研究（Kubo et al. 2020c）など、プレート境界の震源物理に関する重要な知見を得てきた。加えて情報学的な知見に基づく新たな解析手法の開発にも挑戦しており、Kubo et al. (2016a)では地震波形を用いた震源過程解析へのフルベジアンアプローチの導入を図っている。またKubo et al. (2022)では、未知パラメータとその最適な次元を同時に推定するトランスディメンショナルインバージョンが断層すべり分布推定において有用であることを示すとともに、得られる震源像およびその不確定性に関する情報が解析手法に依存して大きく異なりえることを示した。

② 強震動の成因と予測に関するデータ駆動型研究

地震による揺れ（地震動）は、地震時の断層破壊運動による影響を表す震源特性・断層から放射された地震波が地下を伝播していくことによる影響を表す地震波伝播特性・地表付近の浅い地盤構造が入射した地震動を増幅・複雑化させる影響を表すサイト特性の組み合わせによって表現できる。そのため観測された地震動を理解するにはこれら三つの特性をそれぞれ調べる必要がある。また得られた知見に基づいて三つの特性を適切に仮定することで、地震動の予測につなげることができる。①の震源過程解析は一つ目の震源特性の理解に向けた試みの一つと言える。加えて、未解明なことが多い海域地震観測網の地震動増幅特性や強震時の非線形地盤応答の詳細（Kubo et al. 2018, 2019）や、小笠原諸島周辺の深発地震による地震動分布を緻密に調べた上で、日本列島全体に適用可能な地震動予測式の提案（久保ほか2017）、リアルタイム震度時系列の簡易的な予測手法の提案（久保・功刀2022）などの研究を発表者は行ってきた。

さらには近年発展著しい機械学習を地震ピックデータと組み合わせ、地震研究および強震動研究のパラダイムシフトに向けたデータ駆動型研究も進めている。Kubo et al. (2020b)では地震動指標の予測問題に取り組み、強い揺れの記録が少ないという地震動データセットに対して機械学習を行うと、防災上重要な強震動が過小評価される予測バイアスが生じることを明らかにした。この問題への解決策として、物理モデルに基づく従来の予測式による予測と観測の残差を学習した機械学習モデルを作成し、それと従来の予測式を組み合わせたハイブリッド予測アプローチを提案して、単一の手法に比べて優れた予測性能が得られることを示した。また更なる応用としてのSite specificな地震動モデルの構築や、教師なし機械学習の適用によるモーメントテンソル解カタログのデータ構造の可視化、地震学分野のブラックボックス最適化問題へのベイズ最適化の適用など

を現在進行形で行っている。

謝辞：気象庁や国土地理院、防災科学技術研究所をはじめとする国内外の研究機関による観測データを用いました。観測網の構築・維持・管理に関わる皆様に記して感謝致します。

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-1

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura (Kyoto University)

Mon. Oct 24, 2022 1:30 PM - 3:18 PM ROOM A (1st floor (Kaderu Hall))

3:08 PM - 3:13 PM

[S20] LOC president speech

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-1

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura (Kyoto University)

Mon. Oct 24, 2022 1:30 PM - 3:18 PM ROOM A (1st floor (Kaderu Hall))

3:13 PM - 3:18 PM

[S20] Next LOC president speech

Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

🏠 Mon. Oct 24, 2022 3:45 PM - 4:45 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 6:45 AM - 7:45 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] PM-2

chairperson:Mako Ohzono(Faculty of Science, Hokkaido University)

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

[S22-09] Seafloor Geodetic Observations along the Kuril Trench off Nemuro

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Yusaku Ohta², Ryota Hino², Takeshi Iinuma³, Chie Honsho², Mako Ohzono⁴, Hiroaki Takahashi⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University)

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

[S22-10] Crustal deformation characteristics in and around Hokkaido and Tohoku region as seen from ITRF14 reference frame

*Yuka Ishida¹, Hiroaki Takahashi², Mako Ohzono², Weiwei Wu³, Guojie Meng³ (1. The Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Institute for Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration)

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

[S22-11] Estimate an interplate coupling in the southern Kuril trench with a stress-constrained inversion method

*Shunsuke Imai¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

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

[S22-12] Strain concentration around the volcanic front in eastern Hokkaido caused by southern Kuril subduction

*Mako OHZONO¹, Hiroaki TAKAHASHI¹ (1. ISV, Faculty of Science, Hokkaido University)

Seafloor Geodetic Observations along the Kuril Trench off Nemuro

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Yusaku Ohta², Ryota Hino², Takeshi Iinuma³, Chie Honsho², Mako Ohzono⁴, Hiroaki Takahashi⁴

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 4. Graduate School of Science, Hokkaido University

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）では、巨大な断層すべりがプレート境界浅部まで到達し、それに伴い巨大な津波が発生した。そのため、沈み込み帯でのプレート境界型超巨大地震の発生様式の理解および津波を含めた災害リスク評価には、こうしたプレート境界浅部での大すべりの挙動を理解することが極めて重要である。

千島海溝では、太平洋プレートの沈み込みに伴い（MOVELモデルによるオホーツクプレートに対する沈み込み速度： ~ 9.1 cm/yr・N293°）、過去にM7-8クラスの地震が十勝沖や根室沖でセグメントを分けて繰り返し発生している。一方で、近年の津波堆積物調査等から、17世紀に十勝・根室沖の両セグメントを破壊した巨大な地震が発生し、かつプレート境界浅部で大きなすべりが生じていた可能性が示された（Ioki & Tanioka, 2016）。そのため、2011年東北地方太平洋沖地震と同じくプレート境界浅部での巨大な断層すべりが今後発生する可能性が懸念されている。しかし、プレート境界浅部域での歪みの蓄積の有無は、陸上の測地観測網から検出することが困難である。そこで、東北大学・北海道大学では、千島海溝根室沖における現在のプレート間固着状態を明らかにするため、2019年にGNSS音響結合方式による海底地殻変動観測（GNSS-A観測）点を3点設置し、船舶及び海洋研究開発機構の所有するウェーブグライダーを用いたGNSS-A観測の実施を開始した。

3点のGNSS-A観測点の内、2点（G21：海溝軸から約100 km, G22：同約35 km）は陸側斜面に設置し、1点（G23：同約35 km）は沈み込む太平洋プレート上に設置した。各観測点は、三角形に配置した3つの海底局とその中心に設置した1つの海底局の計4つの海底局で構成されており、水平変位のみならず鉛直変位の検出にも有利になる（Tomita et al., 2019）ように配置した。これらの観測点において、これまでに4回のキャンペーン観測を実施した：2019年7月（新青丸：KS-19-12）、2020年10月（KS-20-16）、2021年4月（KS-21-05）、2022年5月（備船）。また、G22観測点では、2021年4月と2022年5月の観測時に、船舶とウェーブグライダーを併用して観測データを取得した。

海中音速の水平成層構造を仮定した海底局アレイ変位の推定では、どの観測点もオホーツクプレート固定で北西向きに $\sim 6-9$ cm/yrの変位速度が得られ（G21： ~ 6.4 cm/yr・N264°、G22： ~ 8.1 cm/yr・N222°、G23： ~ 9.1 cm/yr・N290°）、海溝軸に近い観測点でもプレート間固着と考えられる変動が生じていることが示された。これらの結果は、観測回数が4回と少ないことに加えて、海中音速の水平不均質性を考慮していないため、今後のさらなる観測・解析を踏まえた上で、プレート間固着状態を解釈していく必要がある。一方、上下変動についてはどの観測点でも $\sim 4-10$ cm程度の沈降傾向が得られているが、テクトニックな変動としてはあまりにも大きい。上下変動成分には、用いた船舶の差異や初期音速構造などによる系統誤差が乗りやすいため、それらの影響を今後評価していく必要がある。

本発表までに海中音速の不均質性を考慮した解析（Tomita & Kido, under review）を実施する見込みである。本発表では、その結果に基づく推定変位を紹介し、その上で千島海溝沿いプレート境界浅部でのプレート間固着状態について議論したい。

参考文献

Ioki & Tanioka (2016), *Earth and Planetary Science Letters*, 433, 133-138, doi: 10.1016/j.epsl.2015.10.009.

Tomita et al. (2019), *Earth, Planets and Space*, 71:102, doi: 10.1186/s40623-019-1082-y

Crustal deformation characteristics in and around Hokkaido and Tohoku region as seen from ITRF14 reference frame

*Yuka Ishida¹, Hiroaki Takahashi², Mako Ohzono², Weiwei Wu³, Guojie Meng³

1. The Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Faculty of Science, Hokkaido University, 3. Institute for Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration

1. はじめに

日本列島を含む北西太平洋地域は、太平洋プレート・フィリピン海プレート・オホーツクプレート・ユーラシアプレートの4つのプレートに覆われている。太平洋プレートの沈み込み境界周辺では2003年に十勝沖地震(M8.0)、2011年に東北地方太平洋沖地震(M9.0, 以降太平洋沖地震)といった巨大な地震が発生しており、これらの地震発生後にプレートの収束速度の変化などといった時間的な変動が報告されている。Yokota and Koketsu (2015)において、東北～関東地方に設置されたGEONET観測点を用いて2011年太平洋沖地震に先立って発生した長期的な地殻変動を示した。また、Heki and Mitsui(2013)では北海道から東北地方にかけて太平洋側に位置するGEONET観測点において、2003年十勝沖地震と2011年太平洋沖地震の発生によって日本海溝での太平洋プレートの沈み込みの一時的な加速が示唆される測地観測結果を示した。2011年太平洋沖地震の震源域から2000kmほど離れた南鳥島(021098)においては地震前後での有意な変化は見られず、このことから上記の変動は南千島～東北地方周辺に限られるとした。本研究では、新たな国際地球基準座標系 ITRF2014(Altamimi et al., 2016)で推定された座標値を用いて、先行研究で見られたような太平洋沖での巨大地震発生に伴うプレート運動の変化が広域な北西太平洋地域におけるGNSS観測(GEONET, IGS, CMONOC)の結果においても見られるか等の地殻変動場の時空間的特徴の確認を行った。また、これまでに推定されてきたプレート運動モデルと実際のGNSS観測の結果を巨大地震の発生前後で比較してモデル値との局所的なずれの有無を確かめ、北海道におけるregionalな変動の様子を検討した。

2. 使用データ

本研究では、GNSS観測データとして国土地理院により提供されているGEONETの日々の座標値F5解(松村他, 2021)のうち北海道から東北地方にかけて設置されている観測点のデータと、中国地震局のGNSS連続観測網CMONOCの観測データ、そしてIGS(国際GNSS事業)が提供する北西太平洋地域に設置されたGNSS観測点データをBernese GNSS software version 5.2(Dach et al., 2015)を用いて解析したものを使用した。これらのデータはすべて余効変動も考慮に入れられているITRF2014に準拠しており、それぞれ解析手法には違いがあるものの同観測点での座標値の比較を行った結果ほとんどの観測点で非常に良い一致を示しており、同一の基準系に準拠した座標値が得られていることを確認している。

3. 結果

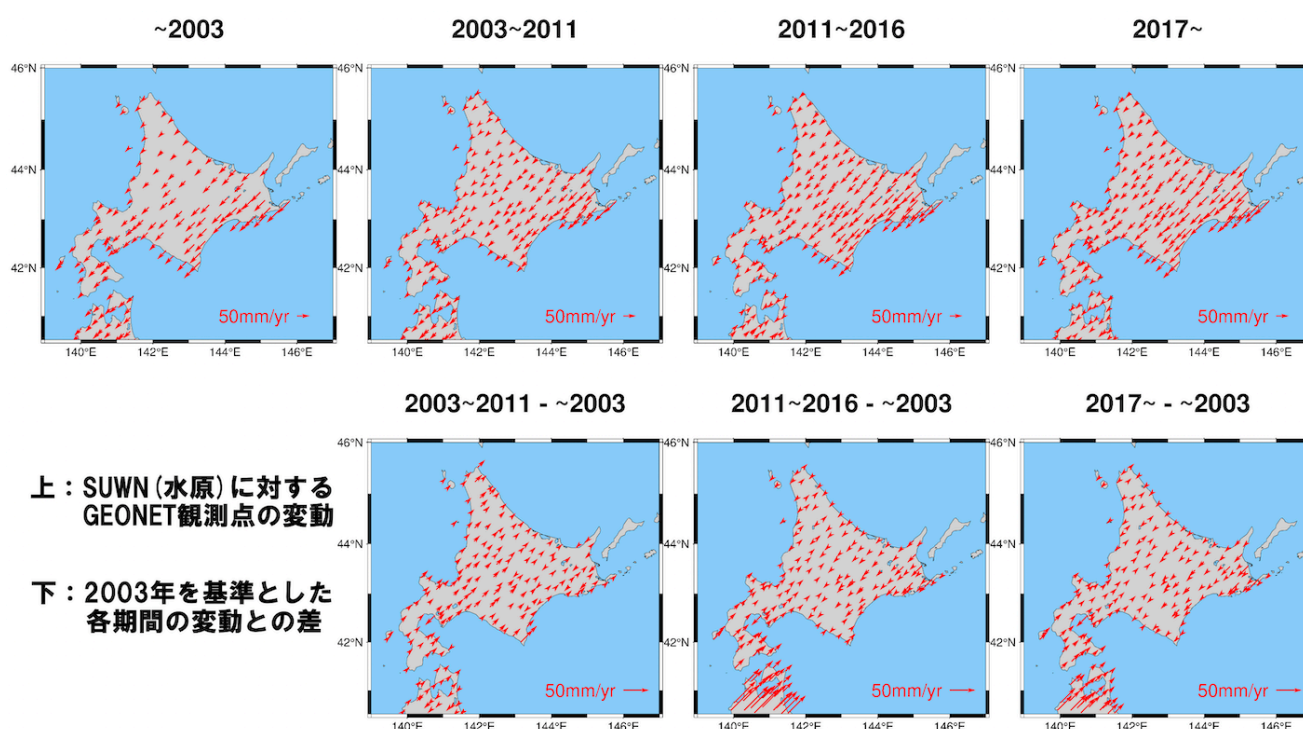
・ 2003年十勝沖地震と2011年太平洋沖地震の発生前後の変動について
上記2つの地震について、2003年以前よりGNSS観測を行なっている観測点について2003年までの変位速度と2003年十勝沖地震発生後～2011年太平洋沖地震までの変位速度、2011年太平洋沖地震～2016年末、そして2017年以降の変位速度をそれぞれ比較した。具体的には、太平洋プレート上やユーラシア大陸上に位置するIGS観測点(KOKB,BJFS,SHAO,SUWN)や北海道～東北地方の変動、日本列島周辺に位置するプレートに対する各GNSS観測点の相対運動を確かめた。その結果、Tomita et al.(2015)でも言及されたようにHeki and Mitsui(2013)で示唆されたほどの大きな加速現象は見られなかったものの、2011年太平洋沖地震の発生から10年以上発生した現在も北海道南部から東北地方にかけて地震発生前と比較して変位速度の大きさに変化が見られ、この現象はこの地域で地震による粘性緩和が未だ解消されていないことに起因するものであると考えられる。

・ 地震発生前の前兆の有無について

Yokota and Koketsu(2015)において、2011年太平洋沖地震の前駆現象として2002年から東北地方のGEONET観測点にて東西方向の変位の様子の変化が報告されている。今回は同様の変動がITRF2014に準拠したF5解でも見られるかを確認した。その結果、950158(種市)やその周辺の観測点については先行研究での指摘通り2002年ごろから水平変動がみられたが、940041(いわき),950167(山田),950179(亶理)などについては上下成分は2002年ごろから変動が見られるものの水平成分についてはそれより遅れて変動がみられ、この変動の時空間特性の検討が必要であると考えられる。

4. 謝辞

北西太平洋地域のGNSS観測データは国土地理院が提供するRINEXファイルを使用し、その解析にはIGSが提供するプロダクトやBern大学で開発されたソフトウェアBernese GNSS Software Version 5.2を用いた。日本国内のGEONET観測データは国土地理院が提供するF5解を使用した。ここに記して感謝いたします。



Estimate an interplate coupling in the southern Kuril trench with a stress-constrained inversion method

*Shunsuke Imai¹, Hiroaki Takahashi²

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

目的・背景

北海道道東の十勝沖・根室沖は、千島海溝より太平洋プレートが陸側のプレートの下に沈み込む、沈み込み帯である。沈み込み帯における地震の発生は地震間期のプレート収束によって蓄積したひずみの解放であり、すべり欠損速度は、プレート間のひずみ蓄積量を推定する指標となる。そのため、当該地域のすべり欠損速度を正しく見積もることで、次の地震で想定し得る最大のすべり量や、その災害規模をより正確に検討することができる。現状すべり欠損速度を導出する手法として、陸域の測地データを用いた測地インバージョンが一般的であるが、陸域の測地データのみ、あるいは一部海底の測地データを用いたとしても、測地点は陸域に偏在しており、主に遠い沖合の断層のすべりに対して解像度が低いものとなってしまう。また、本来摩擦固着がない地域でも、運動学的には固着しているとみなされる場合がある。本研究では応力条件を拘束したインバージョン法 (Lindsey et al. 2021) を用いることでより海溝軸に近いエリアの解像度を上げることを目指した。Lindsey et al. (2021) ではこの手法を日本海溝に適用し、2011年東北沖地震前の期間において旧来手法にくらべプレート境界浅部での滑り欠損速度が大きかった可能性を示した。本研究では、1996年以降の国土地理院電子基準点データにLindsey et al. (2021) の手法を適用し、十勝沖・根室沖のプレート間固着状態の時空間変化について検討を行う。

データセットとインバージョン手法

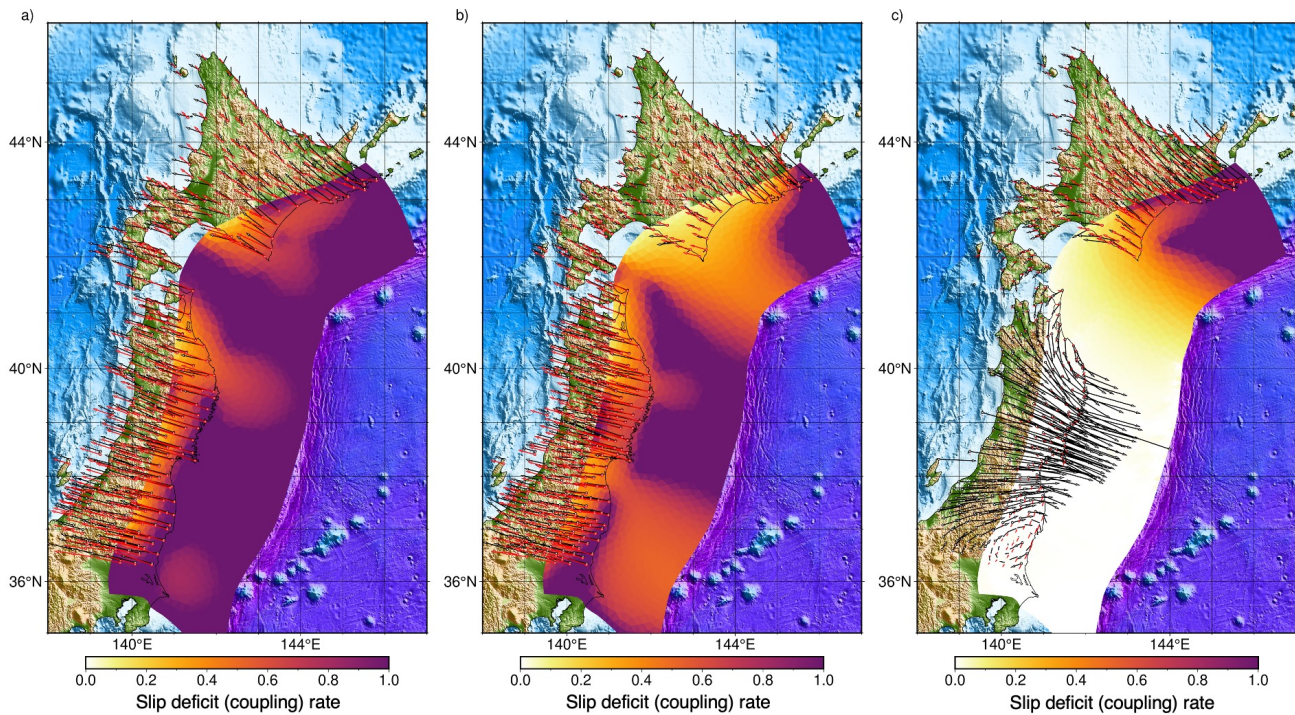
国土地理院電子基準点日々座標値F5解を時系列の東西、南北、上下変位に変換した上で期間を①2003年十勝沖地震前(1996.3.21~2003.9.25)、②2011年東北沖地震前(2006.9.26~2011.3.9)、③2011年東北沖地震後(2014.3.11~2022.6.25)の3つの期間に分け、年周・半年周運動の影響を除外した直線近似の傾きを変位速度(mm/yr)とした。F5解はITRF14に準拠しており、北米プレート準拠の基準系に変換するため、plate motion calculator (UNAVCO web site) を用いて各観測点の北米プレートによる理論変位を計算して速度ベクトルを平行移動させて入力に用いる変位速度を導出した。計算に使用する三角メッシュはSlab2スラブモデルに沿って作成されたものを用いた(Haues et al., 2018)。地震間期の余効変動やスロースリップがない状態では応力速度が常に正であるという拘束条件を基に計算を行った。計算にはLindsey et al. (2021) が公開しているMatlabプログラムを用いた。北米プレートを固定した場合の太平洋プレートの相対運動量はGSRM v2.1 (Kreemer et al., 2014) を参照した。グリーン関数はNikhoos et al., 2015の手法によって計算されたものを用いた。

結果と考察

図aと図bから、2003年十勝沖地震前は十勝根室沖の海溝軸寄りを含む広い範囲で固着度が高い状態であったが、2003年十勝沖地震後には、例えばItoh et al. (2019) が示したように、大すべり域に加えプレート境界浅部の固着度も低下したことがわかる。この領域ではVLFや微動の発生が知られているが (Nishikawa et al., 2019, Baba et al., 2020)、固着度の低下はAsano et al. (2010) で示されたVLF活動の活発化と関連している可能性がある。2003年十勝沖地震後は粘弾性緩和による地殻変動が卓越しており (例えばItoh and Nishimura, 2016, Itoh et al., 2021) その影響の評価が必要である。図bと図cが示すように、2011年東北沖地震の前後を通じて十勝沖付近の固着度は増加し、根室寄りの地域では2003年以前の結果と類似して高い固着度が維持されていることがわかる。全期間を通じて、十勝根室沖の海溝軸に近いプレート境界浅部では固着度が高く、沿岸部では低い傾向が示唆されており、先行研究 (国土地理院会報, 2012, Itoh et al., 2021) や、海底地殻変動観測の結果 (太田・他, 2021) と整合的である。継続して固着度が低いdowndip側では中規模繰り返し地震

が知られており（佐鯉・他, 2014, 気象庁気象研究所, 2021）、定常的なすべりを示唆している可能性がある。根室沖の固着度は解析期間を通じて常に高度合いを維持しているが、これは断層モデルの端であることによるアーティファクトである可能性がある。

謝辞：国土地理院電子基準点のF5解を利用しました



東北～北海道地方のGNSS変位データを使用したすべり欠損速度の導出結果。矢印黒は観測値、赤は予測値。

a) データセット①(1996年～2003年) b) データセット②(2006～2011年) c) データセット③(2014～2022年)

Strain concentration around the volcanic front in eastern Hokkaido caused by southern Kuril subduction

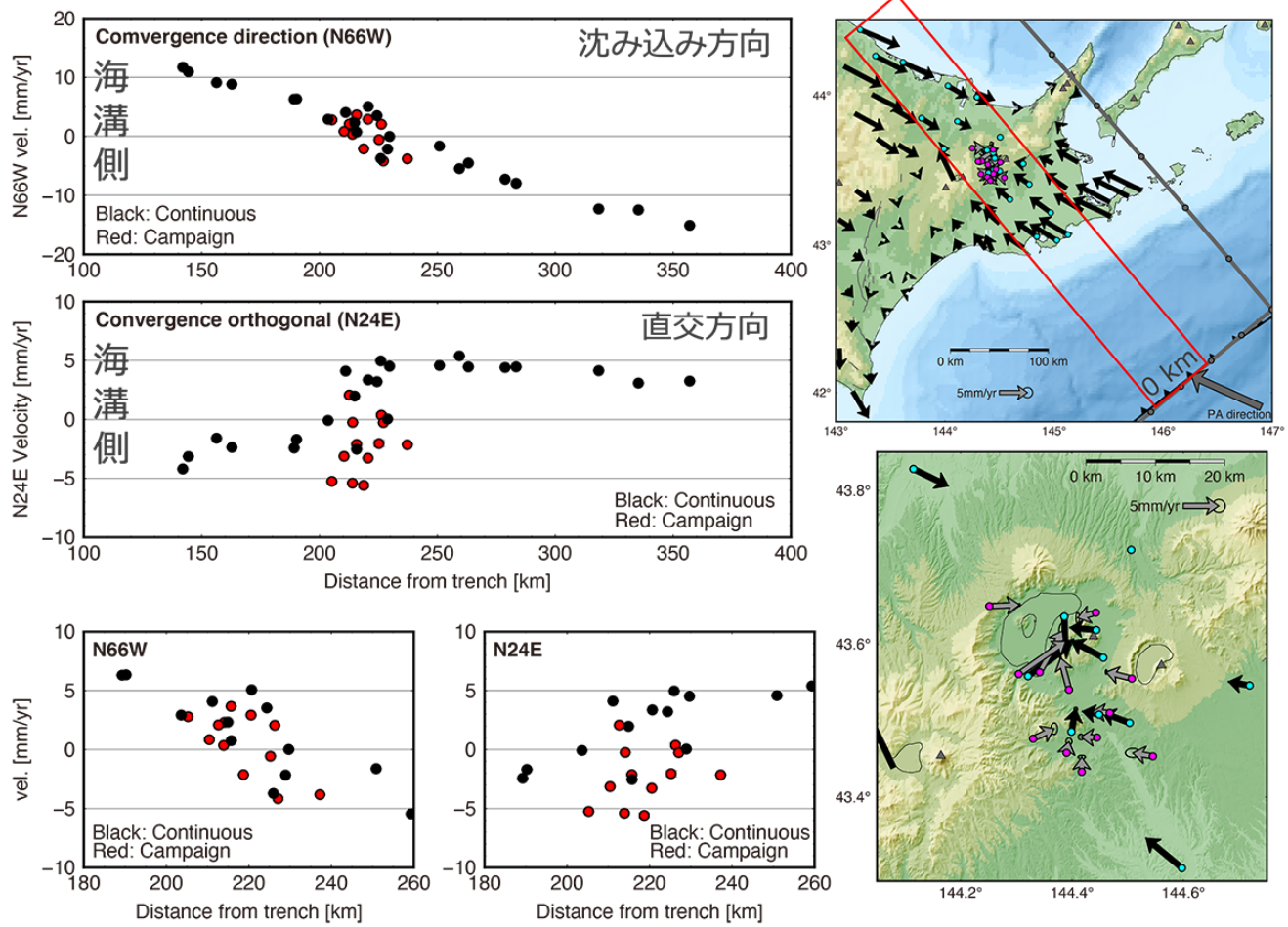
*Mako OHZONO¹, Hiroaki TAKAHASHI¹

1. ISV, Faculty of Science, Hokkaido University

北海道東部は太平洋プレートがオホーツク (北米) プレートに沈み込む島弧地域にあり、内陸部には阿寒-知床火山列などの火山フロントが分布する。屈斜路カルデラから阿寒カルデラにかけての地域は、GEONETなどの全国的なGNSS観測網から定常的に収縮ひずみが大きい場所として知られ、この変形の成因をプレート間固着による広域的なもの、火山活動による局所的なもの、といったかたちで定量的に見積もることは、千島海溝沿いにおけるプレート間固着の現実的な空間分布把握につながり、地震発生ポテンシャルを考える上でも重要となる。屈斜路カルデラ周辺では、そのひずみ集中の詳細な分布とその変形メカニズムを明らかにすることを目的として、GNSSの連続およびキャンペーン観測を実施している。本研究では、Bernese GNSS Software version 5.2の二重位相差解析により、2013年以降の北海道地域のGNSS観測点の日座標を推定し、求めた地殻変動場から各影響について考察する。北海道東部の日座標時系列が比較的一定で変化する2013年から2021年の期間に対し、線形、年周、半年周トレンドを近似して各点の速度を求めた。オホーツクプレートに対する北海道東部の広域的な水平速度場は、千島海溝に近い太平洋側で西北西～北西向きの変動を示し、海溝から離れるにつれて小さくなる。この向きは太平洋プレートの沈み込み方向と概ね一致するが北海道北部の沿岸部（オホーツク海側）でも0になることはないため、背弧側の広範囲でも沈み込みや固着の影響を受けていることを示唆する。海溝から沈み込み方向 (N66°W) に屈斜路カルデラを含むように測線をとって速度プロファイルを作成すると、沈み込み方向の速度成分は全体的に単調に変化し、 ~ 0.2 ppm/yrの短縮 (50 kmで1 cm/yrの速度差) を示す。ただしカルデラ地域周辺ではばらつきが大きい。また、沈み込み方向に直交する (千島海溝に沿う) 方向の速度成分は、前弧側と背弧側で10mm/yrの差が生じ、その間にある火山フロント (屈斜路カルデラ) 周辺で急激な速度変化がある (図)。沈み込み方向とは異なる方向に大きな速度変化があることから、カルデラ周辺ではプレート収束とそれ以外の変動が混在していることが推察できる。例として火山活動起源の地殻変動を仮定すると、屈斜路カルデラ周辺の局所変動は、カルデラ中央部に収縮源となるシルをおくことで概ね説明可能である。ただし、より広域では、火山フロントやカルデラ地域、また背弧側で異なる地下構造があることにより、プレート間固着による地殻変動場が単純なパターンとならないことも示唆されているため、現実的なプレート間固着分布はこの地下構造起因の影響、火山活動やその他要因による局所変動といった様々な時空間スケールでの地殻変動を考慮した上で、推定可能になると考えられる。

謝辞：本研究では国土地理院が提供するGNSSデータを使用しました。弟子屈町はじめ、観測点設置をさせていただいている関係機関に感謝いたします。本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の支援を受けています。

沈み込み方向（と直交方向）の速度プロファイル



Room A | Special session : S22. Earthquakes, tsunamis, and related phenomena around Hokkaido subduction zone

🏠 Mon. Oct 24, 2022 5:00 PM - 6:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 8:00 AM - 9:00 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S22] PM-3

chairperson: Takahiro Shiina (Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S22-13] Current state of seismic activity off Tokachi and Nemuro

*Hiroaki TAKAHASHI¹, Masayoshi Ichiyanagi¹, Ryosuke Azuma² (1. Hokkaido University, 2. Tohoku University)

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

[S22-14] Recent seismic activity in and around Hokkaido, Japan (2018-2021)

*Tetsuo TAKANAMI¹ (1. Hokkaido Research Center of Geology)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S22-15] Spatio-temporal seismic velocity variation near the Japan-Kuril trenches junction revealed from long-term dense-OBS network observation

*Takehiro Sato¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Takagi¹, Ryota Hino¹, Masanao Shinohara² (1. Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[S22-16] Shallow VLFE observation at the Erimo-oki, southern off Hokkaido, using a broadband OBS array and F-net

*Ryosuke AZUMA¹, Ryota Takagi¹, Satoru Baba², Ryota Hino¹, Masanao Shinohara³ (1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. JAMSTEC, 3. ERI, Univ. Tokyo)

Current state of seismic activity off Tokachi and Nemuro

*Hiroaki TAKAHASHI¹, Masayoshi Ichiyanagi¹, Ryosuke Azuma²

1. Hokkaido University, 2. Tohoku University

地震本部の今後30年間の長期評価では、千島海溝南部のM8.8程度以上で4-70%、根室沖のM7.8-8.5程度で80%程度と高い切迫度が示されている。十勝根室沖の地震活動の現況を報告する。

防災科研S-netの展開により、2020年9月から気象庁一元化震源処理で海底地震計データの利用が開始され、海域での地震検知能力と震源決定精度が大幅に向上した（植平，2019）。現在までの2年程度のデータからは、十勝根室沖の震央分布の空間的特徴はS-net導入以前と変わらないように見える。沿岸と海溝軸との中間地点よりdown-dip側の領域で地震活動が活発である一方、海溝軸寄りのup-dip側の領域ではS-net導入後も従前と同じく地震活動度が極めて低い。この空間的特徴は以前から指摘されてきたが（Takahashi and Kasahara, 2007）、検知能力の低さによる見かけ上のものではなく、実際の現象である可能性が高まった。この低地震活動域は、えりも岬沖に位置する微動やVLFE発生域の東側に位置し（Nishikawa et al., 2019, Baba et al., 2020）、さらに東方の色丹島沖や択捉島沖にも続いているように見える。色丹島沖の領域では1975年にMt7.9（阿部，2003）の津波地震が発生しており、力学的な固着がある可能性がある。根室沖で2019年より開始された海底地殻変動観測の予察的な結果からは、プレート境界でのすべり遅れがプレート間相対速度にほぼ一致することを示唆する結果が得られているが（太田・他，2021）、力学的な固着の有無を検討する必要がある。

根室沖の沿岸に近いDown-dip側では中規模繰り返し相似地震が知られており、気象庁気象研究所により発生状況がモニターされている（気象庁気象研究所，2021）。釧路町沖の平均すべり速度6.5cm/yrの相似地震は、1954年以降2016年まで11回の発生が知られ（佐鯨・他，2014）、発生間隔は現在まで大きく変化しているようには見えない。釧路から根室の沿岸近くの海域の深さ40-60kmのプレート境界付近では、北西南東向きの帯状地震活動帯に区切られた低地震活動領域が4つ程度存在し、そのうちの1つは相似地震とされる2004年M7.1及び1961年M7.1の大すべり域と一致する（気象庁気象研究所，2014, Takahashi and Kasahara, 2007）。2004年地震の余震活動は、定常的な地震活動域と同じく大すべり域の周辺部でのみ見られた。この余震域中にある平均すべり速度5.1cm/yの中規模繰り返し相似地震発生の間隔は、2004年地震の前で変化したようには見えない。2004年地震の平均すべり量は1.6mで、1961年からの経過時間から推定されるすべり遅れ速度は3.7cm/yであり、これらdown-dip側の平均すべり速度はプレート間相対運動速度である約8cm/yより有意に小さいものの、国土地理院（2012）による滑り欠損速度と概ね整合する。

S-netの展開により、震源の深さ精度の大幅な向上が期待されている。2021年5月16日十勝沖のM6.1は気象庁震源の深さは8kmで、地震調査委員会では陸のプレートの地殻内地震と評価し、上盤側プレート内地震活動の存在が明確に示された。震央付近には北東南東走向の背斜軸が存在しており（産総研，2010）、西側には活断層が存在する（泉・他，2017）。震源の深さ分布を見るため、Iwasaki et al. (1989)によるP波一次元速度構造と東・他（2019）による観測点補正值を用い、気象庁のP波読み取り値と海溝軸より陸側の海底観測点のみを用いた震源決定を行ったところ、気象庁震源より深い15kmが得られた。余震はプレート境界付近から浅部に分布しているように見える。

以前から指摘されてきた十勝根室沖海溝軸側の低地震活動域は検知能力による見かけ上のものではなく、Takahashi and Kasahara(2007)が利用した北大の微小地震カタログが存在する1976年以降継続している可能性がある。当該海域での海底地殻変動観測からは、運動学的なすべり遅れがプレート間相対運動速度相当である可能性が示唆されており、力学的固着の有無を検討する必要がある。Down-dip側の繰り返し相似地震の履歴からは、1954年以降の平均すべり速度が著しく変化した様子は見られない。震源深さ精度の向上により、上盤側プレート内でのM6クラスの地震活動の存在が明らかになった。気象庁震源・防災科研S-net地震波形・海洋研究開発機構釧路・十勝沖ケーブルシステム波形・SEIS-PC（中村・石川，2005）を利用しました。

Recent seismic activity in and around Hokkaido, Japan (2018-2021)

*Tetsuo TAKANAMI¹

1. Hokkaido Research Center of Geology

本報告では、ごく最近の2018年～2021年に確認された北海道とその周辺の地震活動をレビューする。おおよそM6以上の地震に注目すると、2018年1月24日の青森県東方沖の地震(M6.3, 深さ34km), 同年5月18日釧路沖の地震(M5.8, 深さ47km), そして同年2018年9月6日に胆振地方中東部で発生した北海道観測史上最大の内陸地震(M6.7, 深さ37km)がある。北海道では観測史上最大の内陸被害地震となり、この特別の地震を気象庁によって「平成30年北海道胆振東部地震」と命名された(以後、これを北海道胆振東部地震と称す)。この北海道胆振東部地震に続いて同年11月5日に知床半島先端付近で地震M6.3の地震が発生した。この知床半島先端近傍ではM6を超える大きな地震はこの地震が初めてである。この地震とほぼ同じ場所で10日前の10月26日にM5.5の地震が発生した。これらの地震の深さはともに20kmであり、発震機構もともに西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型の地殻内地震であった。さらに2019年2月21日に北海道胆振東部地震の最大余震(M5.8, 深さ33km)が余震域北端付近で発生し、厚真町で最大震度6弱を観測し、これによってほぼ南北方向に延びた余震域がほぼ確定されたと推定される。2019年3月2日には根室半島南東沖の千島海溝近傍では大変珍しい地震(M6.2, 深さ51 km)が発生した。この地震の震源位置やW-phaseによるWCMTから、この発生機構は千島海溝で沈み込む太平洋プレート内の正断層タイプの地震と推定された。つづいて同年4月28日の十勝地方南部の地震(M5.6, 深さ102km), 同年8月29日の青森県東方沖の地震(M6.1, 深さ21km)などが発生した。同年12月12日には宗谷地方北部で内陸浅発地震(M4.2, 深さ7km)が発生し、最大震度5弱を豊富町で観測した。北海道北部では同程度の地震が時々起こっている。その後、北海道とその周辺の地殻内ではM6を超える比較的大きな地震はほぼ皆無となり、地震活動の静穏期が約1年間継続した。一方、その静穏期の2020年には1月28日の根室半島南東沖地震(M5.5, 深さ96km), 同年5月31日の十勝沖の地震(M5.6, 深さ94km)などのやや深い地震が続発した。さらに当調査領域外であるが、同年2月13日にその東端近傍の択捉島南東沖で調査期間最大の地震(M7.2, 深さ155km)が発生した。前者の静穏期に深部では地震活動が高まったのは興味深い。しかし、11月6日と12月21日には、再び千島海溝と日本海溝の会合部で、比較的大きな地殻内地震(M6.5, 深さ43km)が発生し、前出の2018年1月24日の地震(M6.3, 深さ34km)と2019年8月29日の地震(M6.1, 深さ21km)を加えるとこの調査期間にM6以上の地震が3回起こったことになる。これらの震源域は1856年8月23日の青森県沖地震M7.5や1968年5月16日の十勝沖地震M7.9などの海溝型巨大地震の震源域とほぼ重なっている。2021年には1月27日の北海道胆振地方中東部の地震(M5.4, 深さ128km)が起こり、新冠町で最大震度4を観測した。この地震の震央は北海道胆振東部地震の震央近傍であるが、スラブ内の深さ約128kmで発生した横ずれタイプ地震であった。さらに2021年3月6日の北海道東方沖の地震(M5.9, 24km), 同年5月14日には日高地方中部の内陸地震(M4.6, 深さ20km), 同年5月16日には十勝沖の地震(M6.1, 深さ8km)など比較的浅い地震が続発した。後者の地震の震央は、1952年3月4日の十勝沖地震M8.2と2003年9月26日の十勝沖地震M8.0などの海溝型巨大地震の震源域とほぼ重なるが、今回の地震はその上盤側で発生した。その発生機構もほぼ東西方向に圧縮軸を持った横ずれタイプであり、過去の巨大地震の逆断層タイプとは異なっていた。以上の最近の地震活動調査から、北海道胆振東部地震を筆頭に、青森県東方沖、根室半島南方の千島海溝近傍、知床半島先端近傍など、比較的広範囲に地震活動が確認された。またそれらの発生機構も多様であり、北海道特有の複雑な地学的環境が示唆された。謝辞：本レビューでは気象庁地震カタログ、NIECのF-netカタログ、地震活動の可視化ツールSeis-PC(石川・中村, 1997; 中村・石川, 2005)などを用いた。2019年3月2日には根室半島南東沖のWCMT解は(私信, 金森博雄, 2022)に基づいた。

Spatio-temporal seismic velocity variation near the Japan-Kuril trenches junction revealed from long-term dense-OBS network observation

*Takehiro Sato¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Takagi¹, Ryota Hino¹, Masanao Shinohara²

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

地震波干渉法は高い時間分解能で地震波のグリーン関数を抽出できることから、大地震や火山活動に伴う地震波速度の時間変化の検出に広く用いられている。近年ではスロー地震に伴う構造変化についても地震波干渉法によって検出するという試みがなされている (e.g., Tonegawa et al., 2022)。日本海溝-千島海溝会合部では2006年から2007年にかけて42台の海底地震計からなる稠密観測網が展開された。使用した海底地震計は、固有周期1 Hzの3成分速度センサーを備えており、観測された波形はサンプリング周波数200 HzでA/D変換されレコーダーに収録された。観測期間中には3回のテクトニック微動活動 (Kawakubo, 2021) や2度の千島列島沖巨大地震 (Lay et al., 2009)、近地地震 (Mj 6.2) などが発生しており、これらの地震活動に伴う地震波速度の時間変化が期待される。本研究では、海底地震計連続記録に地震波干渉法を適用し、地震活動に伴う地震波速度変化の検出を試みた。解析では、3成分速度連続記録から単一観測点における9成分相互相関関数 (cross-correlation function, CCF) を計算した (Hobiger et al., 2014; Uemura et al., 2018)。周波数帯はスペクトル振幅が観測期間を通して安定していた1-2 Hzを用いた。CCFの計算は1日長の連続記録を60秒ずつ重複するよう切り出した120秒の時間窓ごとに行った。このとき、自然地震などによるCCFのゆらぎを軽減するため2値化処理を施した。地震波速度変化は、観測点周囲の変化は一樣であると仮定し、ラグタイム3秒から30秒内での15秒の移動時間窓における位相ずれを用いて推定した。観測期間全体のCCFの平均を基準CCFとし、それと15日平均のCCFを比較することで最終的な地震波速度の変化時系列を得た。解析の結果、観測期間において、地震波速度の過渡的な時間変化が数回検出された。また、得られた地震波速度の推定誤差は0.02%程度であった。最も顕著な変化は、Mj 6.2の地震に伴う震源近傍で見られた約0.05 - 0.2%の地震波速度低下およびその後の回復であった。この速度低下は強震による地盤の損傷が原因として考えられる。また、約0.02 - 0.05%の地震波速度変化が数回見られた。これらの地震波速度変化はテクトニック微動活動やM 5クラスの近地地震、遠地巨大地震の発生時期と一致していることから、地震活動に関連した変化である可能性がある。今後、これらの地震活動による強震分布や地震波速度変化が見られた領域を比較することにより、地震活動と地震波速度変化についてより詳細に調べていく。

Shallow VLFE observation at the Erimo-oki, southern off Hokkaido, using a broadband OBS array and F-net

*Ryosuke AZUMA¹, Ryota Takagi¹, Satoru Baba², Ryota Hino¹, Masanao Shinohara³

1. RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku Univ., 2. JAMSTEC, 3. ERI, Univ. Tokyo

北海道襟裳岬沖は、日本海溝から千島海溝にわたる沈み込み帯の中でも浅部超低周波地震 (sVLFE) の活動が極めて高い領域であることが、F-netによって明らかとなっている (例えば, Baba et al., 2020). そのごく近傍では、sVLFEの活発化と同期して、両海溝会合部に帯状に発生する微動域の活動も高くなることが、S-net (2017年以降: 例えば, Nishikawa et al., 2019) および機動海底地震観測 (2006–2007年: Kawakubo et al., JpGU, 2021) によって把握された。しかし、沖合で発生する地震に対する陸上と海域観測網とでの震源精度の違いのために、sVLFEと微動の空間的な対応関係の議論は困難であった。加えて、これらスロー地震活動は、近接する沈み込んだ海山から何らかの作用を受けている可能性も考えられるため、とりわけsVLFE活動の実態解明には、活動域直上の広帯域観測による震源精度の向上が重要である。

東北大学と東京大学地震研究所では、sVLFEの発生が予想される沈み込んだ海山周辺において、120秒速度計1台 (図a中ER0) と1秒速度計4台 (図a中ER1~4) で構成した海底地震計 (以降、OBS) アレイ観測を2019年7月6日~2020年10月10日にかけて実施した。OBSアレイに加えて観測期間内のS-netの連続記録のエンベロープ相関法解析により、2019年7月と2020年2月に大規模な微動帯活動が見つかった (図a-b, 東・他, 地震学会, 2021)。これら微動帯の活動時期には、先行研究と同様にsVLFEも活発化しており (図b, 以降は馬場カタログ, 馬場氏私信), OBSアレイにも地震波形が記録されていることが期待される。

本予稿までに、馬場カタログのsVLFE発震時刻におけるOBS波形記録をF-net記録とともに確認した。馬場カタログのsVLFE発震時刻はプレート境界上に配した仮想震源での理論VLFE波形と観測波形の相関の高い時刻を検索して作成している。そこで、Baba et al. (2019)に準じて緯度・経度方向に0.4度間隔に配した震源グリッドごとに、20–50秒帯域のイベント波形を震源時刻で揃えたペーストアップを作成してS/N比を調べたところ、アレイから60km以上離れた三陸沖以南の震源ではOBSの波形振幅が小さくS/Nが悪いものの、OBSアレイ付近にあたる十勝沖の震源グループでは明瞭に観測されていることがわかった (図c-d)。それぞれの仮想震源についてプレート境界断層すべりを仮定した理論波形を観測波形と比較すると、イベント間の観測到着時刻のばらつきがF-netに比べOBSで大きい傾向がみとれる。これより震源分布が空間的な広がりを持つことが示唆され、波形解析による震源推定によってより高い精度で震源分布を得られる可能性がある。また、十勝沖の地震グループの中には、2–8Hzの帯域で微動のような波形を描くイベントもみられ、Ide et al. (2007) などで示唆される広帯域スロー地震が発生している可能性がある。今後、モーメントテンソル解析による震源推定および周波数解析を進め、会合部でのVLFE活動の実態を明らかにしていく。本研究では、防災科学技術研究所F-net地震波形を利用しました。理論地震波形計算にZhu and Ben-Zion (2013)によるFKパッケージを利用しました。

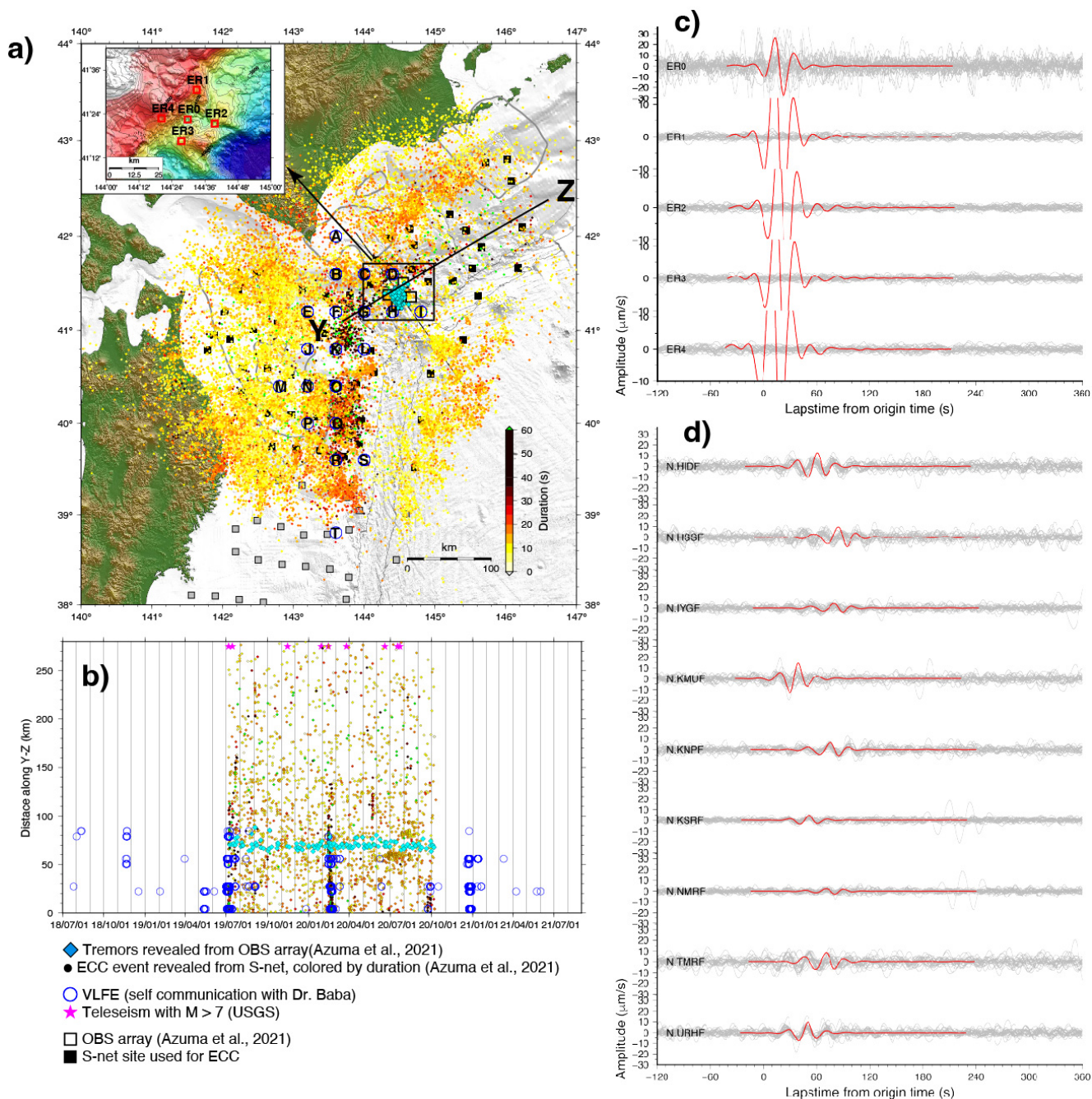


図 a) エンベロープ相関解析による地震震央分布。OBS アレイで検出した微動を水色、S-net で検出した微動・通常地震を暖色～緑色（継続時間）のプロットでそれぞれ示す。青丸は馬場カタログの VLFE 震源。b) Y-Z 測線から 60km 以内のイベントの時空間プロット。c,d) VLFE 震源 C に震源を持つイベントの観測波形（灰）と理論波形（赤）。20–50 秒の帯域通過フィルタを施してある。c は OBS 観測点。d は F-net 観測点。

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

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

[S09] AM-1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Yosihiko OGATA¹ (1. Institute of Statistical Mathematics)

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

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

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

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

*ZIYAO XIONG¹, Jiancang Zhuang¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

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

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

*Tetsuo HASHIMOTO¹, Takashi Yokota²

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

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

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

【グループ化の結果】これらのグループにおいて、1グループに3個以上の地震があるグループは2022個あった。1グループの地震数で色分けした震央分布を図1上に示す(例えば1グループ地震数150地震以上が赤で示され、6グループが抽出されている)。多数の地震で構成されるものは概ね $M_w8.55$ 以上の地震活動に対応しているように見える。フィリピンからニューギニアを経てニュージーランドに続く地震活動域では、超巨大地震がないものの、まとまった地震数のある地震のグループが見られる。北米西海岸や西アジアから地中海にかけた領域では大規模な地震が少なく、少ない地震数のグループとなっている。【最大地震と2番目の規模の地震】グループ内で、2番目の規模の地震が最大地震の前に発生した場合（マイナス）が最大の前震（590個、M差の平均0.33）、後に発生した場合（プラス）が最大余震（1432個、0.63）となる。M差が0.3以下のものは、前震的なもので357個、余震的なもので458個、M差が1.2以下のものは、それぞれ、574個と1238個となった。双子地震的なもの(M差0.3以下)を考えると、全体で見ると、812個/2022個(=0.4)が双子地震になる頻度となった。2番目の規模の地震が前震的に発生すると、357個/590個(=0.6)と、より双子地震になりやすいことになる。また、余震的なものでM差が1.2以下であるものは1238個/1432個(=0.9)で、その範囲に収まってしまうようである。【大規模地震の連動との比較】それらの最大地震と2番目の規模の地震の発生時間間隔(単位:日)をみた。発生時間間隔とその地震数をプロットしたものを図の左下に示す。最大地震の前後に2番目の規模の地震が多く発生していることが分かる。図の右下には、大規模地震の連動についての調査（橋本・横田、論文準備中）を同様にプロットしてみた。今回の手法で抽出した最大地震と2番目の規模の地震の発生時間間隔のものより、大規模地震の連動は、地震発生間隔がだらだらと長く続く傾向が見える。【おわりに】今回グループ化された地震については、まだ、広めの連動を抽出している場合も見受けられ、より精査していく必要がある。

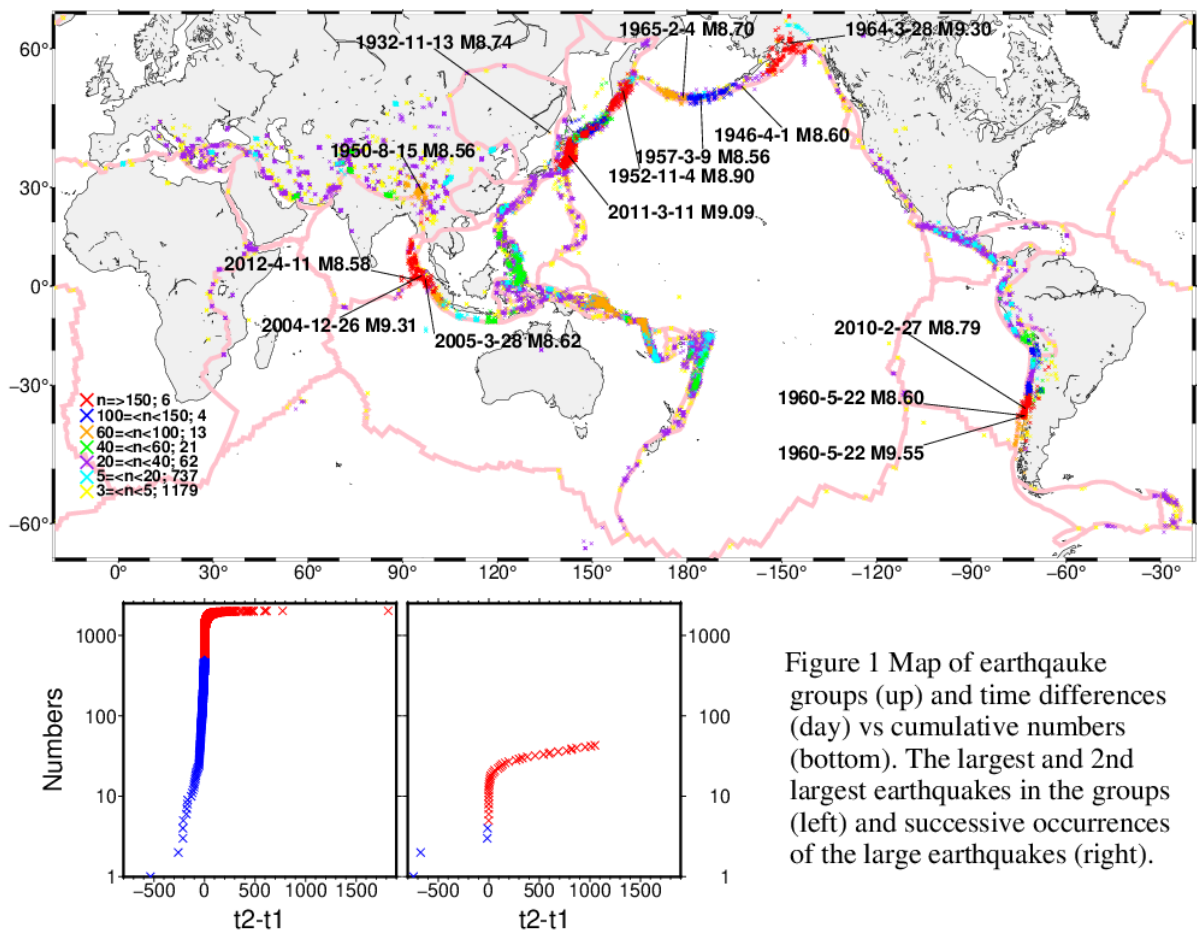


Figure 1 Map of earthquake groups (up) and time differences (day) vs cumulative numbers (bottom). The largest and 2nd largest earthquakes in the groups (left) and successive occurrences of the large earthquakes (right).

Retrospective Monitoring of the Area Surrounding the Showa Nankai Trough Earthquakes

*Yosihiko OGATA¹

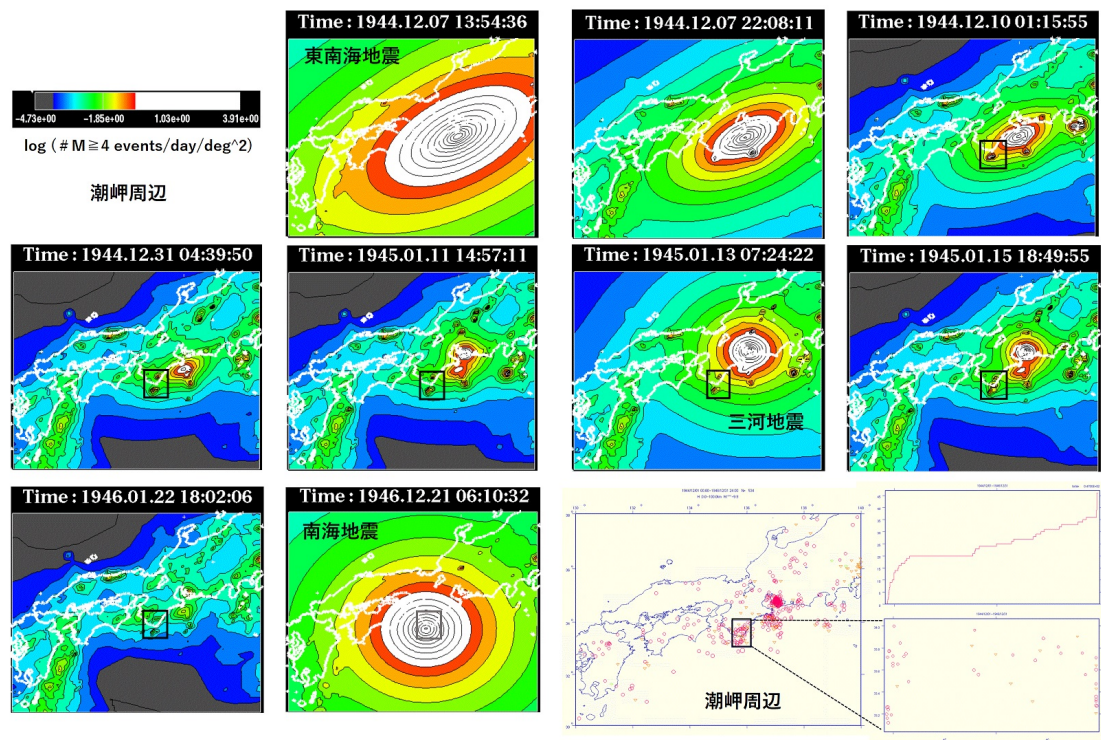
1. Institute of Statistical Mathematics

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

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

参考文献

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



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

*Kumazawa Takao¹, Ogata Yosihiko¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

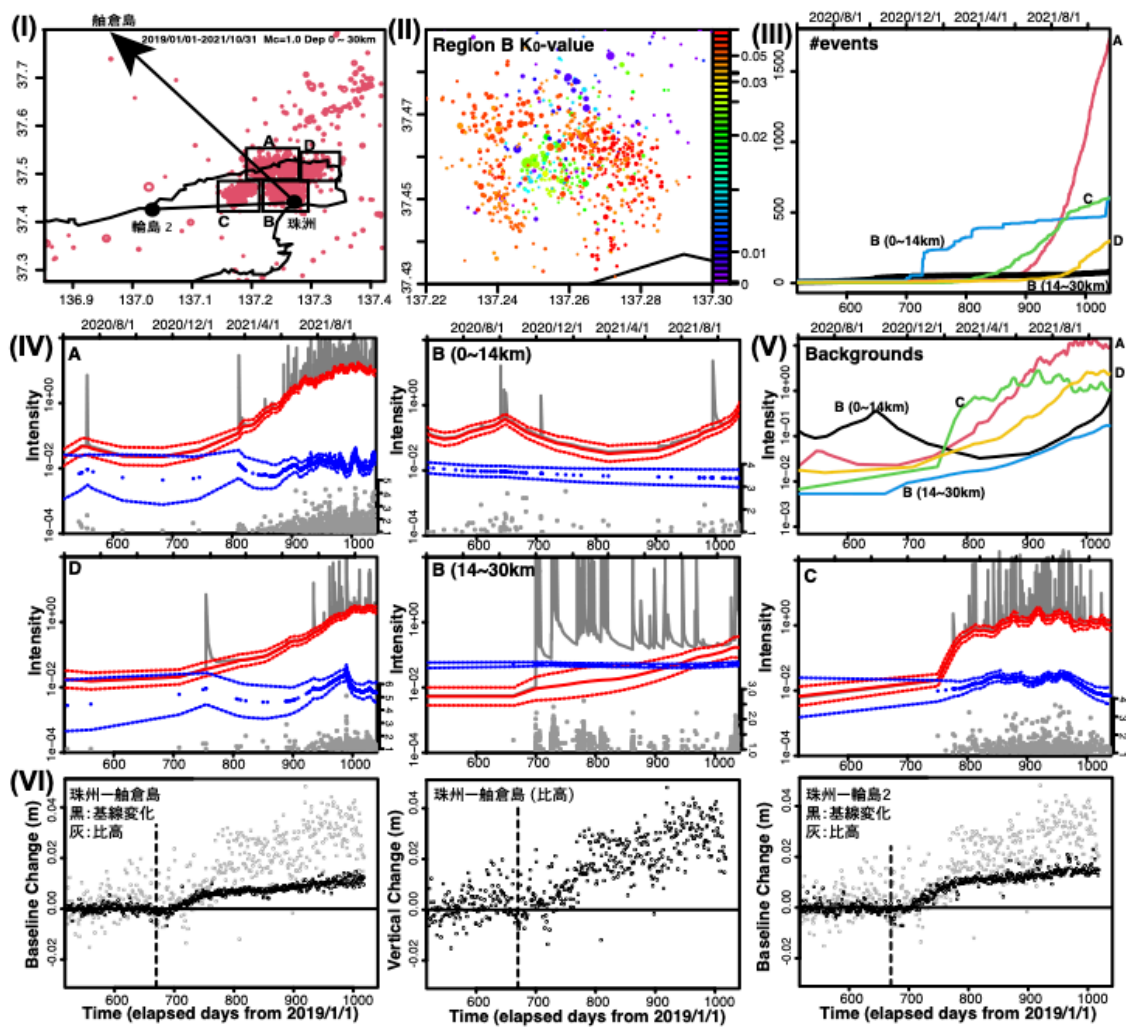
地震時系列データからは様々な統計量を抽出できるが、中でも背景地震活動強度は地震活動の予測の観点からも重要な意味を持つ。我々の研究ではETASモデルの背景地震活動度の時間変動をベイズ法で推定する点過程モデルを用い、2020年末から発生した石川県能登半島の群発地震活動に適用して、その地震活動の特徴を調べた。

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

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

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

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



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

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

[S09] AM-2

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

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

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

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

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

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

*Masatoshi MIYAZAWA¹ (1. Kyoto Univ.)

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

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

*Youichi ASANO¹ (1. NIED)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

はじめに

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

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

データ・手法

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

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

結果

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

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

議論

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

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

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

謝辞

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

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

*Masatoshi MIYAZAWA¹

1. Kyoto Univ.

・はじめに

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

・能登半島と応力場

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

・能登半島の地殻活動の源

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

・群発地震の発生メカニズム

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

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

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

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

*Youichi ASANO¹

1. NIED

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Unusual slow earthquake activity for Nankai trough earthquake emergency information

*Kazushige OBARA¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[S09] PM-2

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Ryoya IKUTA¹, Yui Kobayashi², Tatsuhiko Kawamoto¹

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

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

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

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

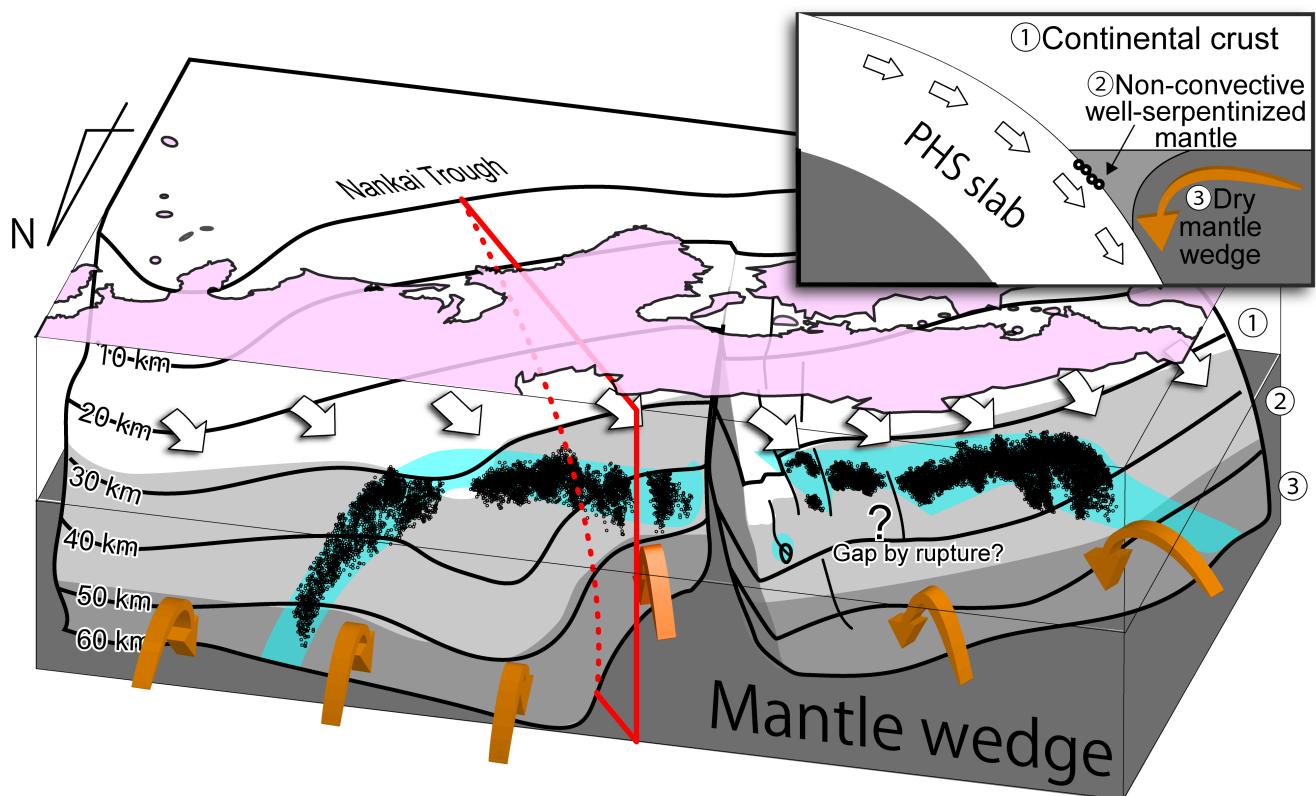


Figure. Schematic illustration showing slab motion (white arrows), torn and ruptured slab with isodepth contours, dehydrated water (blue), tremors (black circles), and deeper convective mantle (orange arrows).

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

*Kazuaki OHTA¹, Katsuhiko SHIOMI¹, Takanori MATSUZAWA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

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

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

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

Forecasting tectonic tremor activity using a renewal process model

*Satoshi IDE¹, Shunichi Nomura²

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Observation of slow earthquakes using distributed acoustic sensing off Cape Muroto

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

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

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

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

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

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

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

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

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

Room C | Regular session : S06. Crustal structure

📅 Mon. Oct 24, 2022 9:45 AM - 10:45 AM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:45 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S06] AM-1

chairperson: Takahiro Shiina (Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

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

[S06-01] Detailed seismic structure and seismic activities along the plate interface off Cape Muroto Nankai Trough

*Gou FUJIE¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹, Gaku Kimura¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹ (1. JAMSTEC)

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

[S06-02] Relationship between slow earthquakes and temporal changes in seismological structure in the shallow Nankai subduction zone

*Takashi TONEGAWA¹, Takeshi Akuhara², Yusuke Yamashita³, Hiroko Sugioka⁴, Masanao Shinohara², Shunsuke Takemura², Takeshi Tsuji² (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Kyoto Univ., 4. Kobe Univ.)

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

[S06-03] Upper-plate structural heterogeneities controlling shallow tremor: Results from active-source seismic surveys in the Hyuga-nada area

*Ryuta ARAI¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Kazuya Shiraishi¹, Gou Fujie¹, Shuichi Kodaira¹, Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Yuka Kaiho¹, Yohei Hamada¹, Yanxue Ma², Kimihiro Mochizuki², Rie Nakata², Masataka Kinoshita², Yoshitaka Hashimoto³ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Kochi University)

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

[S06-04] Mantle Wedge Anisotropy from Tectonic Tremors beneath the Bungo Channel

*Motoko ISHISE¹, Aitaro KATO¹ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

Detailed seismic structure and seismic activities along the plate interface off Cape Muroto Nankai Trough

*Gou FUJIE¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹, Gaku Kimura¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹

1. JAMSTEC

日本列島下にフィリピン海プレートが沈み込む南海トラフでは、M8を超える巨大地震のほか、微小地震や各種スロー地震(低周波微動、超低周波地震、非地震性滑りなど)まで、多様なプレート境界断層滑り現象が発生している。巨大地震とスロー地震の関係性はまだよく分かっていないところもあるが、たとえば超低周波地震は巨大地震震源域より浅い側(トラフ軸側)と深い側(陸側)に分布するなど、同じプレート境界断層の滑り現象でありながら、通常地震とスロー地震では発生場所を棲み分けていると考えられている。したがって、両者の発生場の構造的な特徴を把握できれば、プレート境界滑り現象の多様性を決定付ける要因、すなわちプレート間固着を決定付ける要因の理解に繋がると期待される。

海洋研究開発機構では南海トラフ沈み込み帯におけるプレート間固着・すべり分布の現状把握とモニタリングを目指し、海底観測ネットワークの構築を進めるとともに、2018年度から大規模な海域構造探査によりプレート境界断層の実態把握研究を進めている。この一環で、2019年末、我々は浅部超低周波地震(sVLFE)が活発な室戸岬沖で制御振源(エアガン)と稠密な海底地震計アレイ(2km間隔)を用いた構造調査観測を実施した。調査海域には、土佐簗と呼ばれる海底地形上の高まりと、その高まりを横切る土佐簗海盆と呼ばれる谷地形が顕著に発達しているのが特徴である。土佐簗海盆は海底地形の窪地であり、プレート境界断層はその下約10kmに位置するが、以下のように土佐簗海盆付近においてプレート境界断層滑り(固着・すべり)が大きく変化していることが知られている。まず、土佐簗海盆付近を境に海側(トラフ側)ではsVLFEが多数発生する一方、陸側ではsVLFEはほとんど発生していない。また、地殻変動観測研究では、土佐簗海盆付近を境に海側は固着が弱く、陸側は固着が強い傾向が示されている。したがって、土佐簗海盆直下のプレート境界部では、断層の固着・すべり状態が変化していることが期待される。

実際、土佐簗海盆直下には顕著な構造不均質性があることが最近の海洋研究開発機構の解析研究からも明らかになってきた。Nakamura et al. (2022, GRL)は潮岬から室戸岬にかけた広域で実施した稠密な地震波反射法データを解析することで、土佐簗海盆直下はプレート境界断層の形状か上盤内の地震波速度の異常帯に相当する可能性が高いことを指摘している。しかし、反射法データのみではプレート境界断層の確からしい形状やその周辺の物性を解き明かすことはできないため、断層固着・滑りを決定付けている構造要因についてはよく分かっていない。そこで、本研究では、反射法データのみからでは精度よく決定することができないプレート境界断層付近の詳細なプレート境界断層形状や断層付近の物性(地震波速度)を高い解像度でイメージングすることを目指して、海底地震計で観測される屈折波を活用して、下記の手順で高解像度地震波速度構造モデルを構築した。まず、初動走時トモグラフィによって長波長地震波速度構造モデルを構築し、その結果を初期構造として波形インバージョン(周波数領域、音響場、Full-waveform Inversion, FWI)によって短波長不均質をモデル化した。

FWIの結果から、土佐簗海盆付近を境に、プレート境界(ここでは沈み込む海洋地殻の表面とする)の上側の物性(地震波速度)が顕著に変化することが明らかになった。すなわち、スロー地震(sVLFE)が卓越する海側では、プレート境界直上の地震波速度は低い一方で、プレート固着が強い陸側ではプレート境界直上(上盤プレートの底面)の地震波速度が高い。これは、スロー地震が発生する浅部側のプレート境界面付近には沈み込むプレートが持ち込む堆積物などに由来する柔らかい物質が厚く分布している一方で、スロー地震が観測されていない深部側ではプレート境界面付近には柔らかい物質が失われていることを示唆していると考えられる。したがって、南海トラフ域におけるsVLFE発生域と固着域(通常地震が発生する領域)を隔つ要因の一つは、プ

レート境界断層付近の物性(低速度物質の分布)であると考えられる。

Relationship between slow earthquakes and temporal changes in seismological structure in the shallow Nankai subduction zone

*Takashi TONEGAWA¹, Takeshi Akuhara², Yusuke Yamashita³, Hiroko Sugioka⁴, Masanao Shinohara², Shunsuke Takemura², Takeshi Tsuji²

1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Kyoto Univ., 4. Kobe Univ.

南海トラフ域の熊野灘から紀伊半島沖にかけて、沈み込み帯の浅部において2020年末から1ヶ月ほど活発なスロー地震活動が発生した（例えば、Takemura et al. 2022; Yamamoto et al. 2022; Ogiso and Tamaribuchi 2022）。Tonegawa et al. (2022)は南海トラフ域においてDONETのノイズ記録を用い、6~10年間に渡って地震波速度構造と不均質構造の2種類の時間変化を推定した。この期間には2020年末のイベントも含まれている。その結果、2020年末のイベント中に地震波速度が低下してそれがイベント後も残る一方、不均質構造はイベント中に変化し、その後イベント前の元の状態に戻ることを指摘した。これらは地震波速度と不均質構造の変化を引き起こしている現象の時間スケールが異なっていることが原因と考えられる。そこで、本研究では、DONET1とDONET2の間に設置され、かつ、2020年末のイベントを観測した海底地震計の記録を使用することで、これらの地震波速度および不均質構造の時空間変化のマッピングを行う。また、これらの結果から、2020年末のイベントの背景にある現象を理解することを試みる。

海底地震計は短周期地震計を使用しており、連続記録の期間は2019年9月~2021年5月である。相互相関関数の計算には上下動成分を使用し、周波数領域でスペクトルホワイトニングを行った。また、相当する期間のDONET1&2の上下動成分も使用した。周波数帯域は0.5-2.0 Hzである。それらを30日間毎にスタックし、リファレンス波形は全期間スタックした波形を使用した。地震波速度構造の時間変化の抽出にはストレッチング法を用い（Wegler and Sens-Schönfelder, 2007）、不均質構造の時間変化の抽出には相互相関係数を用いた（Obermann et al. 2013）。それぞれの空間マッピングにはObermann et al. (2013)の手法を用いた。

結果では、DONET1とDONET2の間でも地震波速度が低下してイベント後も継続し、不均質構造はイベント中に変化してその後もとに戻るといった現象が確認された。空間マッピングでは、熊野灘において、速度低下は浅部超低周波地震の分布と良い一致を示したが、その一方で、不均質構造の変化は浅部超低周波地震の分布とややずれるという結果となった（図参照）。

これらを解釈すると、不均質構造の時間変化は震源域内もしくはその周辺から上昇してきた流体の移動によるもの（Tonegawa et al. 2022）で、地震波速度の時間変化は上盤側の浅部の応力場がスロー地震によって変化したものと考えられる。つまり、不均質構造が流体の移動によって変化したのであれば（図右側）、同じ場所で速度が低下するべきだが、観測ではそのようになっていない（図左側）。また、それらの時間スケールも異なる。そのため、地震波速度の低下はスロー地震活動によって引き起こされた応力場の変化に対応していると考えられる。つまり、応力場の変化によってクラックの配向やアスペクト比、もしくは、付加体浅部のimbricate thrustに起因する亀裂の変形などが起こったと考えられる。

謝辞

DONETデータを使用しました。

Data citation DONET: doi:10.17598/NIED.0008

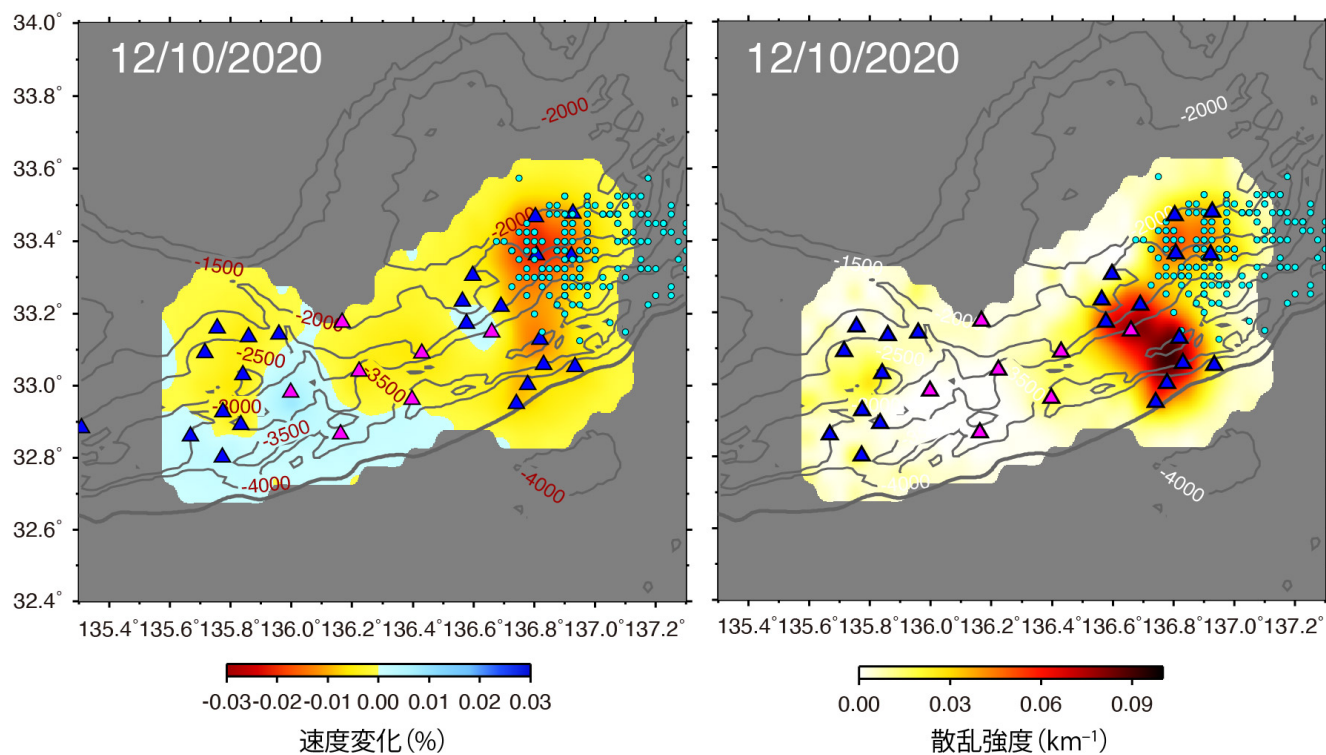


図. (左) 2020年12月10日の速度変化(ただし、時間分解能は30日). (右) 2020年12月10日の不均質構造の変化. リファレンスは2020年9–10月. 水色丸はTakemura et al. 2022による2020年12月10日±5日分の浅部超低周波地震の分布. 青三角はDONET観測点、紫三角は海底地震計を示す.

Upper-plate structural heterogeneities controlling shallow tremor: Results from active-source seismic surveys in the Hyuga-nada area

*Ryuta ARAI¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Kazuya Shiraishi¹, Gou Fujie¹, Shuichi Kodaira¹, Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Yuka Kaiho¹, Yohei Hamada¹, Yanxue Ma², Kimihiro Mochizuki², Rie Nakata², Masataka Kinoshita², Yoshitaka Hashimoto³

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Kochi University

南海トラフ西端に位置する日向灘海域では、沈み込み帯浅部において多様なスロー地震活動が発生していることが最近の海底観測で確認されている（Yamashita et al., 2015, 2021; Tonegawa et al., 2020）。これらの地震活動域は九州パラオ海嶺が沈み込む領域にあっており、沈み込む海山とスロー地震の関係を理解する上で重要な研究対象である。また、九州および種子島の東方沖では海底の陸側斜面に多数の泥火山が存在する（Ujiie, 2000）。こうしたスロー地震や泥火山の発生には地下の流体が密接に関与していると考えられるが、流体の起源や分布、移動様式などには不明な点が多く残されている。

海洋研究開発機構では、南海トラフ全体のプレート沈み込み構造を高解像度で明らかにし、プレート境界断層での多様なすべり現象の発生要因を包括的に理解することを目指した大規模稠密構造探査研究を2018年度から実施している。2020・2021年度には新学術研究領域「スロー地震学」および「日向灘掘削計画」との共同で、日向灘海域において反射法・屈折法探査データを取得した。本発表では主に、海底地震計(OBS)を用いた稠密屈折法探査から得られたP波速度構造に基づき、浅部微動発生域と泥火山近傍の構造不均質について議論する。

鹿児島県東方沖から南海トラフに平行な方向に延びる測線（HYU01）のOBS屈折法データに波形インバージョン解析を適用したところ、上盤プレート内に幅約10kmでP波速度が2.0-4.0km/sの低速度体が複数検出された。測線近傍には泥火山が多数分布することから、この低速度体は上盤プレート内に形成された大規模な破碎帯であり、その内部に透水性の高い流路が発達していると解釈した。低速度体は海底面直下から鉛直方向に深さ10-13kmのプレート境界まで続いており、プレート境界もしくはさらに深部から海底まで流体が上昇してきている可能性を示している。また、破碎帯が上盤プレート内に発達する場所ではスロー地震活動は低調であり、その東側の低速度体（破碎帯）が不明瞭でスロー地震が活発の領域とは対照的である。この特徴は、Nakajima and Hasegawa (2016)が提案している深部微動域とその直上の排水システムとの関係と整合的であり、浅部微動域においても上盤プレートの排水構造がスロー地震の活動域を規定していると考えられる。一方、微動発生域の北東側で交差する測線（HYU03・HYU04）のデータ解析からは、微動活動が低調になる場所に周囲と比べて顕著な高速度体（ $V_p=3.0-5.0\text{km/s}$ ）が存在することがわかった。この高速度体の地質学的な実体は現時点では不明であるが、これら一連の結果から、スロー地震活動と上盤プレートの構造不均質には密接な関係があり、かつスロー地震の活動域を規定する上盤プレートの要因は複数存在すると考えられる。

Mantle Wedge Anisotropy from Tectonic Tremors beneath the Bungo Channe

*Motoko ISHISE¹, Aitaro KATO¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

【はじめに】

Tectonic tremorの発見（Obara, 2002）以来、「スロー地震」と総称される多様な振動現象が世界中の沈み込み帯で確認されている。スロー地震は、プレート境界の巨大地震と同じような発震機構をもち、かつ活動場所がプレート境界型地震の推定震源域と隣接していることから、プレート境界型の巨大地震発生準備過程との関連性が示唆されてきている。そのため、スロー地震の発生メカニズム、活動様式、発生場などについて、現象解明に向けた研究が精力的に進められている。本研究では、南海トラフ沈み込み帯のスロー地震活動のうち、豊後水道における深部低周波地震のエピソードに注目し、その発生場周辺域における地震波異方性構造について検討を行った。

【解析方法】

異方性構造の推定には、Ishise & Nishida (2012)のS波スプリッティングパラメータの連続測定法を用いた。一般的なS波スプリッティングパラメータの推定（Ando et al., 1980）では、直達S波1パルス分の水平動2成分のデータからひと組のS波スプリッティングパラメータ（速いS波の振動方向、速いS波と遅いS波の到達時間差）を求める。一方、本解析では、連続波形記録全体に対して事前に設定した時間窓をずらしながらS波スプリッティング解析を連続的に実施し、異方性パラメータを連続的に測定する。今回の解析では、時間窓30秒、時間ステップ15秒としたため、15秒ごとのS波スプリッティングパラメータを得た。また、polarization解析も実施し、波線の入射角と到来方向も求めた。同様の方法によりCascadia地方の地殻異方性が推定されている（Bostock & Christensen, 2012）。

【データ】

佐多岬半島にあるN.MISHとN.IKTHのHi-net連続波形記録を使用した。Kato & Nakagawa (2020)によって検出された深部低周波地震活動が、豊後水道から始まり西へ進展したエピソードを含む4期間について、それぞれ1か月分の連続波形記録解析に用いた（2012年5月、2013年10月、2015年1月、2015年9月）。

【結果】

いずれの期間・観測点においても、深部低周波地震活動が活発な期間の解析において信頼性の高いS波スプリッティングパラメータが得られた。期間を問わずその値は観測点ごとに安定している：異方性の方向は、両観測点ともに西北西-東南東方向で、N.MISHの方がより東西系に卓越している。時間差については、N.MISHでは0.25~0.3秒付近にピークが見られ、N.IKTHでは0.05秒付近と0.25秒付近の2ヶ所にピークが見られる。

【議論・結論】

Cascadiaやメキシコではtectonic tremorのシグナルを用いた異方性推定が行われてきているが（Bostock & Christensen, 2012; Huesca-Perez et al., 2016）、当該地域では先行例がない。そこで、豊後水道下のtremorと波線経路が似ているスラブ内地震を用いて、tremorのシグナルから得られた異方性の妥当性について検討を行った。用いた地震数は、N.MISHが92地震、N.IKTHが83地震である。これらの地震の直達S波を用いたS波スプリッティング解析の結果、スラブ内地震の解析で得られたS波異方性パラメータは、低周波地震の活動時に観測された異方性とよく似た値であった。この結果はtremorシグナルから得られた異方性の妥当性を示唆している。次に、豊後水道下のtremorシグナルやスラブ内地震の解析で得られた異方性が、波線が通過した領域（上部地殻、下部地殻、マントルウェッジ）のうち、どの部分の異方性の特徴を反映しているのかについて検討を行った。上部地殻については、N.IKTH近傍の地殻地震を用いた通常のS波スプリッティング解析の

結果、北西－南東方向に速く、 <0.025 秒の時間差の異方性が得られた。これらの値は、tremorシグナルから得られた方向と大きく異なるうえ、時間差についてもtremorから得られる値の10分の1程度しかない。したがって、上部地殻の異方性の影響は考慮しなくてよいと判断される。下部地殻については、佐多岬半島の深さ25km周辺のP波方位異方性は小さい($<1\%$)ことが示されている(Ishise & Oda, 2008)。この場合、S波の異方性もP波と同様に小さいと考えられるため、下部地殻の異方性の影響も小さいと考えられる。よって、tremorシグナルから得られたS波スプリッティングパラメータは、主にマントルウェッジの異方性に起因すると考えられる。さらに、マントルウェッジ内で0.2秒以上の到達時間差が生じる場合の異方性の原因について検討を行った：マントルウェッジ内の伝播距離10km、平均S波速度4km/secとし、到達時間差としてN.IKTHの中央値(0.22秒)を使用した場合、異方性の強さ($(V_{s_{fast}} - V_{s_{slow}}) / V_{s_{average}}$)は約9%と見積もられた。この値は一般的な上部マントルの異方性の大きさ(4%程度)と比べて優位に大きく、マントルウェッジの蛇紋岩化が示唆される。当該地域のような低角沈み込み帯のマントルウェッジに蛇紋岩が形成されている場合、これによる異方性の方向はプレートの沈み込み方向と平行となる(プレート等深度線と直交)。この方向は、本研究で観測された異方性の方向と矛盾しない。

謝辞：本研究は、JST, CREST, JPMJCR1763および科研費(20K04099)の支援を受けました。

Room C | Regular session : S06. Crustal structure

📅 Mon. Oct 24, 2022 11:00 AM - 12:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 2:00 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S06] AM-2

chairperson: Ryuta Arai (JAMSTEC)

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

[S06-05] Shallow crustal structure and slip tendency of bend-faults in the outer rise of the Japan Trench

*Yue SUN¹, Ayumu Miyakawa², Ehsan Jamali Hondori³, Jin-oh Park¹ (1. AORI, the University of Tokyo, 2. AIST, 3. GSE)

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

[S06-06] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling - III

*Takaya IWASAKI¹, Hiroshi SATO^{2,3}, Eiji KURASHIMO³, Hirokazu ISHIGE⁴, Hidehiko SHIMIZU⁵, Tatsuya ISHIYAMA³, Takashi IIDAKA⁶, Masanao SHINOHARA³, Shinji KAWASAKI⁴, Susumu ABE⁴, Naoshi HIRATA³ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JOGMEC, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

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

[S06-07] An estimation of the crustal reflector in the north Ibaraki area using S-wave later phases

*Takahiro SHIINA¹, Yuta AMEZAWA¹, Takahiko UCHIDE¹, Haruo HORIKAWA¹, Kazutoshi IMANISHI¹ (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

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

[S06-08] A preliminary report of faults and natural gas layers observed in lowlands of the eastern Tokyo

*Tetsuro TSURU¹, Naoto KUMAGAI¹, Kazuo YAMAGUCHI², Jinoh PARK³ (1. TUMSAT, 2. AIST, 3. AORI, The University of Tokyo)

Shallow crustal structure and slip tendency of bend-faults in the outer rise of the Japan Trench

*Yue SUN¹, Ayumu Miyakawa², Ehsan Jamali Hondori³, Jin-oh Park¹

1. AORI, the University of Tokyo, 2. AIST, 3. GSE

沈み込んでいく海洋プレートの性質は、沈み込んだ後に海溝型巨大地震に大きく影響する。実際に、日本海溝付近では、海溝型巨大地震が発生した後に、巨大津波を引き起こすアウターライズ地震が発生した(例えば、1896年明治三陸沖地震と1933年昭和三陸沖地震)。これらの地震の発生様式を解明するために、日本海溝アウターライズの浅部地殻構造を調査することは重要な課題である。そのため、東京大学大気海洋研究所の「可搬式反射法地震探査システム」を学術研究船「新青丸」に搭載し、2019年4月にKS-19-05次航海と2020年9月にKS-20-14次航海でマルチチャンネル反射法地震(Multi-channel seismic; MCS)探査を実施した。MCSデータを処理した結果、岩手沖及び宮城沖の測線では、海底面から下方へ遠洋性堆積物・チャート・音響基盤層(玄武岩)の三つの層から成していることが確認できた。太平洋プレートが日本海溝へ沈み込む際に、プレートの折り曲げにより正断層群が発達し、明瞭なホルスト・グラベン(地塁・地溝)構造が発達している。岩手沖及び宮城沖の両方の測線ともプチスポット火山(Hirano et al., 2006)の存在が確認されている。プチスポット火山と海溝の相対位置によって、正断層の発達パターンが異なっていることが分かった。更に、Hirano et al. (2006)のプチスポット火山Site Aが存在する岩手沖の測線では、海溝軸から海側75 kmの範囲内でチャート層の反射面が消失し、音響基盤層の最上部の反射極性が反転していることが判明した。プチスポット火山の存在によってMCS測線の音響基盤がかく乱されている現象は多数の先行研究でも報告されているが、このように広範囲で均一の反射極性反転が発見されたのは初めてである。この現象をより詳しく調べるため、同海域での他の測線の観測結果を参照する必要がある。本研究では、「新青丸」のMCSデータに加え、JAMSTECが1997年から取得したMCSデータの再処理を行い、日本海溝のアウターライズにおいて広域的な地殻構造の解釈を行っている。

日本海溝アウターライズに発達する正断層群の活動性を評価するため、Morris et al. (1996)で提唱されたSlip tendency (T_s)を利用する。 T_s は各断層面に作用するせん断応力と垂直応力の比であり、 T_s 値が大きいほど断層は再活動し易く、地震発生リスクも高いことが報告されている。 T_s の計算方法としては、まずYamaji et al. (2006)で提唱された応力インバージョン法を利用し、2012年7月から2022年7月までの岩手沖及び宮城沖のアウターライズで発生した浅部地震の震源メカニズム解を用い断層周辺の応力場を推定する。その後、MCS深度断面図及び海底地形図を利用し断層の方位角及び傾斜角を測定することで、せん断応力と垂直応力を求め、 T_s を計算した。また、断層の開口性を評価するため、Ferrill et al. (1999)で提唱されたDilation tendency (T_d)を計算した。

予察的な結果として、1) 岩手沖において、他のMCS測線も「新青丸」MCS測線と同様に、広範囲に渡ってチャート層の反射面が消失する現象が確認された。2) 日本海溝アウターライズにおいて、音響基盤が不連続な部分が存在する。音響基盤が断続的にチャート層の上に偏移し、それらの反射波の周波数が低下していることが確認された。この現象は、アウターライズが隆起し始めた場所に多発している。3) 岩手沖及び宮城沖の両方とも西傾斜(海溝方向)を持つ正断層が高い T_s を持つ傾向を示す。これは、この二つの地域において推定された応力場がいずれも最大主応力軸がほぼ鉛直からわずかに東に傾斜し、最小主応力軸が水平からわずかに西に傾斜していることが原因として考えられる。4) T_d の変化パターンは T_s とほぼ同様に、西傾斜(海溝方向)を持つ正断層で高い T_d を持つ傾向を示している。5) 高い T_s と大きい断層変位と一致しないため、断層変位がそのまま T_s の大きさによるものではないと考えられる。

The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling - III

*Takaya IWASAKI¹, Hiroshi SATO^{2,3}, Eiji KURASHIMO³, Hirokazu ISHIGE⁴, Hidehiko SHIMIZU⁵, Tatsuya ISHIYAMA³, Takashi IIDAKA⁶, Masanao SHINOHARA³, Shinji KAWASAKI⁴, Susumu ABE⁴, Naoshi HIRATA³

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JOGMEC, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

We constructed the whole crustal structure model across the NE Japan from an extensive onshore-offshore seismic expedition, which was undertaken in 2019 from the Yamato bank to the Japan Trench across the central part of the NE Japan arc (Sato et al., 2020a, b). Our main data were acquired on the 150-km long onshore seismic line extending from the Shonai Plain on the coast of the Sea of Japan to the eastern margin of the Kitakami Mountains on the Pacific coast.

First, we revised the previous crustal model by Iwasaki et al. (2021a,b; 2022) from the travel-time analysis using the ray-tracing technique. In the modelling for the crooked part of the profile, “the distance correction (Iwasaki et al., 2021a)” was applied to correct the systematic travel-time shifts arising from the ray-tracing calculation under the simple 2D assumption. This was quite effective, and revealed highly complicated sedimentary structure beneath the western and middle parts of the profile. The structure of lower crust and uppermost mantle were modelled from the first arrivals and later phases at far offsets (>50-60 km). To extract reliable structural information from weak wide-angle reflections, we applied the stacking method to the original seismic records, and carried out intensive travel-time analysis both for the original and stacked seismic sections.

Next, synthetic seismograms was computed based on the asymptotic ray theory. We also included the above-mentioned distance correction, and compared with the observed records. This amplitude calculation showed inadequateness of modelling only from the travel-time data, and could refine the geometry and velocity contrast at layer boundaries within the sedimentary part, and constrain several velocity discontinuities existing in the middle/lower crust and uppermost mantle.

The obtained model at the present stage has the following features.

- (1) The uppermost part crust consists of 4 layers of V_p = 1.6-2.0, 1.8-3.5, 3.7-5.0 and 4.5-5.5 km/s, representing sedimentary and volcanoclastic rocks. Their geometry shows significant change along the profile line, well correlated with fault and caldera systems developed in the surveyed region under successive tectonic processes in the NE Japan arc.
- (2) The velocity of the crystalline upper crust is 5.8-6.1 km/s, but show higher values of 6.0-6.25 km/s in the eastern end of the profile (in the Kitakami Mts.), well consistent with the previous refraction wide-angle reflection studies (Iwasaki et al., 1994, 2001).
- (3) The thickness of the middle crust is 5-7 km with a velocity of 6.4-6.5 km/s. The lower crust is composed of three layers with velocities ranging from 6.6 to 7.1 km/s. This part is generally reflective with less seismic activity.

- (4) The Moho is situated at 30.5-32 km depth. The Pn velocity is about 7.7 km/s. At the bottom of the lowermost crust, there may exist a 2-km thick transition zone (7.1-7.4~7.5 km/s). Hence, the resultant velocity contrast at the Moho is only 0.2~0.3 km/s.
- (5) The uppermost part of the mantle is also reflective, which contains two velocity discontinuities with a contrast of 0.1~0.2 km/s at depths of 38 and 46 km.
- (6) Low frequency earthquakes are occurring at depths of 17-40 km, just within the reflectivity zones in the lower crust and uppermantle found from the present study.
- (7) Gross structural features (velocity values and crustal thickness) are well consistent with those from the tomographic analyses by Kurashimo et al. (2021, 2022).

References

- Iwasaki et al., 1994. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22187-22204.
- Iwasaki et al., 2001. *Geophys. Res. Letters*, **28**, 2329-2332.
- Iwasaki et al., 2021a. 2021 JpGU Meeting, SCG49-05.
- Iwasaki et al., 2021b. Program and Abstract of the 2021 Fall Meeting of Seismological Society of Japan, S06-03.
- Iwasaki et al., 2022. 2022 JpGU Meeting, SCG50-04.
- Kurashimo et al., 2021. 2021, JpGU Meeting, SCG49-04.
- Kurashimo et al., 2022. 2022, JpGU Meeting, SCG50-03.
- Sato et al., 2020a. 2020 JpGU-AGU Joint Meeting, MIS03-P05.
- Sato et al., 2020b. 2020 Spring Meeting of JAPT, 016.

An estimation of the crustal reflector in the north Ibaraki area using S-wave later phases

*Takahiro SHIINA¹, Yuta AMEZAWA¹, Takahiko UCHIDE¹, Haruo HORIKAWA¹, Kazutoshi IMANISHI¹

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

2011年東北地方太平洋沖地震以降、茨城県北部および福島県浜通りでは地殻内地震の活動が活発化している。これらの地域では深さ10 km以浅の活動に加えて、地殻内地震の発生深度としてはやや深い、深さ15-20 kmでも地震の発生が確認されている。また、この深さ付近ではS波反射面が存在することを指摘している[臼田・他, 2020, JpGU].

産業技術総合研究所地質調査総合センター（GSJ）では2016年6月から茨城県北部で臨時観測網を展開し、地震観測を実施している。この臨時観測網は茨城県常陸太田市・高萩市にまたがって、5 km程度の間隔で設置された7つの観測点で構成される。この臨時観測網においても、S波反射と解釈される明瞭な後続波が観測された[椎名・他, 2022, JpGU]. そこで本研究ではGSJ臨時観測網および周辺の定常地震観測網において観測される地殻内地震のS波反射波を用いて、特に茨城県北部下において、地殻内部に存在するS波反射面の詳しい分布を検討した。

本研究ではまず、茨城県北部および福島県浜通り付近で発生した地震の震源位置と同地域の1次元速度構造の推定を行った。解析には、2003年から2021年に発生したマグニチュード3.5-4.5の地震767個を用い、P波およびS波の到着時刻を手動で検出した。これらの地震の発生深度は0-30 kmである。震源位置と1次元速度構造はShiina and Kano [2022, GJI]の手法により再決定した。次に、GSJ臨時観測点および周辺のHi-net観測点（N.THGH, N.KIBH/N.KI2H, N.JUOH）でS波反射波を同定し、その到達時刻を読み取った。ここでは2016年6月以降に発生した地震50個を対象とした。観測波形からS波反射波に対応する振幅増加区間を読み取り、その中央時刻をS波反射波到達時刻として扱う。この値はS波反射波の最大振幅の到達時刻におおよそ一致する。そのうえで、事前に決定した震源位置と速度構造のもと、MCMC法（マルコフ連鎖モンテカルロ法）を用いてS波反射波の到達時刻を説明する反射面の分布を推定した。

結果として、深さ13 km程度を上端とし、ほぼ北落ちに30度程度の傾斜を持つ反射面が茨城県北部地域下に存在することが示唆された。このような反射面は同地域の地殻内地震活動と相補的な分布であるとともに、臼田・他 [2020]の結果におおむね整合する。臼田・他 [2020]は逆VSP解析に基づくイメージング結果から地殻内反射面の分布を解釈しているのに対し、本研究ではS波反射波の到達時刻から直接反射面の推定を行っている。したがって、本研究の結果はより精緻な地殻内反射面のモデルを与えるものであろう。また、推定した反射面は低速度[e.g., Tong et al., 2012, Solid Earth]かつ低比抵抗[Umeda et al., 2015, JGR]な領域の直上に位置する。以上から、茨城県北部地域の下部地殻付近には強い不均質構造が存在し、それがS波反射波の励起に大きく寄与していることが推察される。

謝辞：本研究では気象庁一元化震源カタログおよび防災科学技術研究所Hi-netの観測波形データを使用しました。また、本研究は文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）[JPJ010217]ならびにJST CREST [JPMJCR1763]の支援をいただきました。記して感謝申し上げます。

A preliminary report of faults and natural gas layers observed in lowlands of the eastern Tokyo

*Tetsuro TSURU¹, Naoto KUMAGAI¹, Kazuo YAMAGUCHI², Jinoh PARK³

1. TUMSAT, 2. AIST, 3. AORI, The University of Tokyo

1. はじめに

反射法地震探査は地下の構造形態を高精度に映像化する手法として、地殻構造探査や石油探査分野で広く使用されている。著者らは海洋生態系への環境負荷を抑制しつつ、船舶が輻輳する海域でも実施できる地震探査システムの開発に取り組んでいる。システムの特徴は、非パルス波振源である水中スピーカーを利用する小型の探査システムであり、これまで、東京湾などでの海上試験において、二次元地震探査データの取得および三次元データ取得実験を実施した。

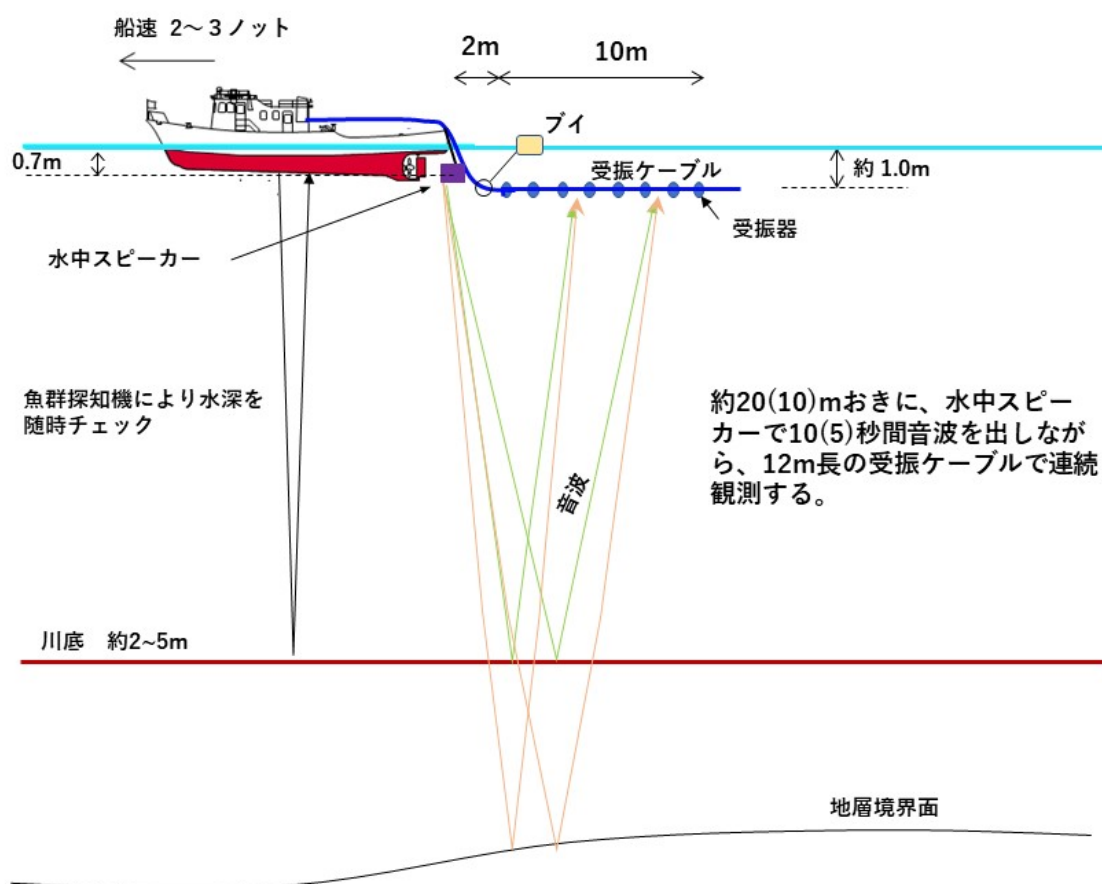
東京湾における地震探査の結果、海底下78mに分布するガス層（以下、海底ガス）や断層に封鎖されたガス層（断層トラップ）が発見された（Tsuru et al. 2019; 鶴ほか, 2021, JAPT）。海底ガスは、北は浦安沖、南は東京湾アクアライン付近まで連続して分布している。また、一部の断層は海底面を切っているように見える。

2. 河川での反射法地震探査

海底ガスの北限を調査するため、2021年11月に荒川河口から約5km遡上しつつ反射法地震探査を行った。その結果、ガス層は河口付近で一旦途切れるものの断層近傍で分布することが示唆された（Tsuru et al., 2021, JpGU）。そこで、2022年6月、更なる地震探査を隅田川、荒川、新中川および旧江戸川の下流域で実施した。その結果、全ての河川で明瞭な断層とそれらの近傍に分布するガス層の存在が確認された。発振周波数帯域などの違いにより、隅田川と荒川で取得された反射断面図では川底からの反射波の特定が困難であったものの、新中川および旧江戸川の反射断面上では、川底まで変位が達しているように見える断層もいくつか存在する。

3. 考察

比較的落差の大きな断層をマッピングすると、荒川断層と東京湾北部断層の延長部に挟まれたエリアおよびその周辺に分布しているものが多い。また、過去に建設工事中にメタンガスが湧出した場所も、同様のエリアに多く分布している。以上のことから、これら2つの断層は東京の下町低地まで延長している可能性があり、それらに挟まれたエリアおよびその周辺では、断層に沿って地下からメタンを含む流体が上昇している可能性があると考えられる。



調査期間: 2022.06.02~2022.06.03, 船舶: 第三網弁丸 3.9トン

Room C | Regular session : S06. Crustal structure

📅 Mon. Oct 24, 2022 4:00 PM - 5:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 7:00 AM - 8:00 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S06] PM-2

chairperson: Takashi Tonegawa (JAMSTEC)

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

[S06-09] Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan

*Tomomi Okada¹, Martha Savage², Shin'ichi Sakai³, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida⁴, Ryota Takagi¹, Shuutoku Kimura¹, Satoshi Hirahara¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. The Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S06-10] Detailed structure of the uppermost part of the Philippine Sea Plate beneath the Kii Peninsula

*Katsuhiko Shiomi¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S06-11] Spatial variations and causes of fracture structure in and around Hakone volcano

*Ryou HONDA¹, Yuki Abe¹, Yohei Yukutake², Shin'ichi Sakai³ (1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

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

[S06-12] Seismic velocity structure beneath Kikai-calddera, Japan, from seismic refraction survey

*Akihiro Nagaya¹, Gou Fujie², Shuichi Kodaira², Satoru Tanaka², Yojiro Yamamoto², Hiroko Sugioka^{4,1}, Hiroki Miyamachi³, Tetsuo Matsuno⁴, Hironori Otsuka⁴, Keita Suzuki^{4,5}, Nobukazu Seama^{1,4} (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Ocean Bottom Exploraiton Center, Kobe University, 5. Nippon Marine Enterprises, Ltd)

Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan

*Tomomi Okada¹, Martha Savage², Shin'ichi Sakai³, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida⁴, Ryota Takagi¹, Shuutoku Kimura¹, Satoshi Hirahara¹, Toru Matsuzawa¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. The Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. はじめに

石川県能登地方では、2020年8月ごろから地震活動が活発化し、2022年8月時点でも継続している。地震活動の活発化の原因としては、地下の変動源による応力変化と流体圧の上昇などが考えられている。本研究では震源域に設置した臨時観測点および定常観測点を用いたS波スプリッティング解析により、S波偏向異方性について検討を行った。また、地震波速度トモグラフィ解析により、震源域の地震波速度構造について検討を行った。

2. 手法・データ

S波スプリッティングについて、本研究では、Silver and Chan (1991)を基としたMFAST (Savage et al., 2010)を使用した。MFASTでは、様々な位置や長さの時間窓による解析結果のクラスター分析を行う。そのことでS波偏向異方性を安定にかつ高速に推定することができると期待される。

データは、2022年6月末から震源域に設置した臨時観測点および定常観測点による波形データを用いた。地震計は短周期地震計（固有周波数：1Hzまたは2Hz）、または広帯域地震計である。サンプリング周波数は100Hzである。

地震波速度構造について、手法は、ダブルディファレンストモグラフィ法（Zhang and Thurber, 2003, 2006）を用いた。2020年2月～2022年7月までの1648個の地震を解析に用いた。

3. 結果

S波偏向異方性の空間分布

異方性の卓越方向は概ね東西方向と南北方向に推定された。東西ないし北西-南東方向の異方性は、最大水平圧縮軸方向と概ね一致する。したがって、応力による異方性が観測された東西方向の異方性の原因として考えられる。一方、概ね東西方向と南北方向の走向を持つ断層が確認されており、構造的な異方性を見ている可能性も考えられる。

S波偏向異方性の時間変化

定常観測点の一つである、N.SUZHについて、異方性の時間変化を検討した。異方性の方向については、顕著な時間変化は見られなかった。異方性の大きさについては、2021年の6～9月ごろ以降の期間において、それ以前の期間に比べて、特に震源域の西部での活動に対し、大きな異方性が観測された可能性がある。

地震波速度構造

震源域深部、深さ18kmに高いVp/Vs領域を確認した。この領域では周囲と比べて、やや大きなP波速度が得られた。対象領域には第三紀の火成岩が分布していることから、高いVp/Vs領域は古いマグマだまりを示している可能性があり、そこから放出された（あるいはそこを経由した）流体がこの群発地震活動に関わっていることを示唆する。

議論

この地震活動は、比較的断層構造の発達した未熟な応力性の異方性が分布し、深部に流体を示唆する高いVp/Vsの領域が確認される南部より活動が開始した。その後、断層構造が発達している構造的な異方性が分布する北部での活動が活発となった。

Introduction

Seismic activity in the Noto region of Ishikawa Prefecture has increased since August 2020 and has

continued as of August 2022. Stress changes due to subsurface sources and increases in fluid pressure are discussed as the causes of the seismic activity increase. In this study, S-wave polarization anisotropy was investigated by S-wave splitting analysis using temporary and permanent stations located in the epicenter area. We also investigated the seismic wave velocity structure in the source region by analyzing seismic wave velocity tomography.

Methodology and Data

In this study, we used MFAST (Savage et al., 1990), based on Silver and Chan (1991); MFAST performs a cluster analysis of the analysis results by time windows of various locations and lengths. MFAST is expected to provide a stable and fast estimation of S-wave polarization anisotropy. The data were waveform data from permanent and temporary stations set up in the epicenter area since June 2022. The seismographs were short-period seismographs (natural frequency: 1 Hz or 2 Hz) or broadband seismographs. The sampling frequency was 100 Hz. For seismic tomography analysis, the double-difference tomography method was used (Zhang and Thurber, 2003, 2006). We used 1648 earthquakes from February 2020 to July 2022 for the analysis.

Results

Spatial distribution of S-wave polarization anisotropy

The directions of anisotropy were generally in the east-west and north-south directions. The east-west or NW-SE anisotropy generally coincides with the direction of the maximum horizontal compression axis. Therefore, stress-induced anisotropy can be the cause of the observed east-west anisotropy. On the other hand, faults with strike directions generally east-west and north-south have been identified, and structural anisotropy may be another cause.

Time variation of S-wave polarization anisotropy

We examined the time variation of anisotropy at N.SUZH, one of the permanent stations. No significant time variation was observed in the direction of anisotropy. Larger anisotropy was observed, particularly for the activity in the western part of the focal area, from about June-September 2021 compared to the period up to that period.

Seismic velocity structure

A high V_p/V_s region was identified beneath the focal area, at a depth of 18 km. This high V_p/V_s region has slightly larger P-wave velocities than the surrounding area. Since Tertiary igneous rocks are distributed in the target area, the high V_p/V_s region may represent an old magma reservoir, suggesting that fluids released from (or through) the magma reservoir are involved in this seismic swarm.

Discussion

This seismic activity started in the southern part of the area, where relatively immature fault structure development, stress anisotropy is distributed, and high V_p/V_s regions suggestive of fluid at depth are identified. Subsequently, activity became more active in the northern part, where structural anisotropy with well-developed fault structures is distributed.

Detailed structure of the uppermost part of the Philippine Sea Plate beneath the Kii Peninsula

*Katsuhiko Shiomi¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

紀伊半島は南海トラフ沿いで発生する海溝型巨大地震の震源モデルを検討する上で極めて重要な地域である。Shiomi & Park (2008, doi: 10.1029/2007JB005535) は、紀伊半島内の防災科研Hi-net/F-net各観測点で得られたレシーバ関数 (RF) のスタックから、フィリピン海プレート内海洋モホ面の位置や傾斜方向を推定し、スラブ内で発生する地震活動やテクトニック微動活動との関係を議論した。その後、様々な機関による観測データの蓄積も進み、解析に使用できる遠地地震データが格段に増加した。本研究では、紀伊半島内に設置された各機関の観測点で得られたRFにHarmonic Decomposition解析法 (HD法, e.g., Bianchi *et al.*, 2010, doi: 10.1029/2009JB007061) を適用することにより、観測点下の海洋モホ面の傾斜方向分布をより高精度かつ高密度に把握するとともに、海洋地殻相当深さ付近における異方性構造を推定し、その特徴について検討を行った。

データ・解析方法

解析には、紀伊半島及びその周辺に設置された防災科研Hi-net/F-netに加え、大学、気象庁、産業技術総合研究所の地震計並びに国土交通省による振動センサーで収録された遠地地震 (M5.8) による波形記録を用いた。自動あるいは目視によりS/Nの悪い波形を除去したのち、観測波形に1.0 Hzの低域通過フィルタを適用し、RFを推定した。各観測点で得られたRFから顕著な正の振幅を有する変換波を抽出し、Matsubara *et al.* (2019, doi: 10.5772/intechopen.86936) による地震波速度構造に基づき、この変換波が励起された速度不連続面の深さを求めた。解析対象とした地震波速度不連続面は太平洋岸から内陸部に向かって深くなる傾向が見えることから、フィリピン海プレート内海洋モホ面と判断した。変換面の深さ分布は、既存のモデル (e.g., Shiomi *et al.*, 2008, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03786.x) と矛盾しない。次に各観測点で求めた海洋モホ面深さを対象としてHD法を適用し、調和成分の抽出を行った。この際、各観測点で得られたRFに対して500回のブートストラップ抽出を行い、その結果から平均値ならびに標準偏差 σ を求めた。各抽出に対するHD法の結果において、非モデル成分のRMS振幅がモデル成分のRMS振幅よりも大きい場合、その結果は不採択とした。500回の抽出を経ても200回の採択結果が得られない観測点及び200回の採択が得られても $\pm 2\sigma$ が45度を超える観測点は「結果不安定」とした。なお、モホ面傾斜方向の推定には調和成分の1次項 ($k=1$) の $-0.2 \sim 0.2$ 秒、海洋地殻相当層の異方性の特徴推定には2次項 ($k=2$) の $-0.7 \sim -0.3$ 秒を対象とした粒子軌跡の主軸方位を用いた。

結果

海洋モホ面傾斜分布から、紀伊半島は大きく以下の4つの領域に分割可能であった：①北東傾斜を示す和歌山県南部～三重県南部地域。②北傾斜を示す和歌山県北部～奈良県南部地域。③北西傾斜を示す三重県中部～奈良県北部地域。④結果不安定な観測点が集まる三重県北部地域。領域①のうち、和歌山・三重県境付近に位置するE.KTUでは北西傾斜、E.HGUでは南東傾斜と、周辺とは異なる方位を示した。この2点を結ぶ直線の北西延長部には深部微動のギャップが位置するほか、スラブ内地震活動度が変化する場所とも対応しており、何らかの微細な構造的特徴を検出した可能性がある。一方、領域①の北端部は和歌山県内で発生する深部微動域の南端と一致するが、領域③では深部微動活動域とそれ以外で傾向の変化は見られない。領域④では近接する5観測点で結果不安定となったが、Shiomi *et al.* (2008) を見ると、この地域のスラブの等深線間隔はやや広く、スラブがほぼ平坦になっている可能性が考えられる。海洋地殻相当層の異方性構造は、深部微動域よりトラフ軸側では概ねスラブ等深線と平行に速い軸が分布する。深部微動域直下からdown-dip側を見ると、三重県北部～奈良県北部では引き続き北東－南西方向に速い軸を持つ分布が見られるが、奈良県南部～和歌山県北部

では南北方向を中心に，結果がばらつく傾向にある．プレートが湾曲している影響を受けている可能性も考えられるが，速い軸の方位がばらつく領域はスラブ内地震の活動域が海洋地殻から海洋マントル内に遷移する領域と概ね対応しており，スラブ内の鉱物の組成変化を捉えている可能性もある．

謝辞：本研究を実施するにあたって，気象庁，東大地震研，京大防災研，産総研，国土交通省による観測データを使用いたしました．記して感謝致します．

Spatial variations and causes of fracture structure in and around Hakone volcano

*Ryou HONDA¹, Yuki Abe¹, Yohei Yukutake², Shin'ichi Sakai³

1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

1.はじめに 箱根火山のカルデラ内には、古い亀裂やダイク、微小亀裂などの多くの割れ目や亀裂が存在する。そのような既存の割れ目系は、マグマや熱水が侵入する経路として利用され、地震活動の活発化や水蒸気噴火の際の地殻変動の原因となっている可能性がある。我々はこれまでも、S波スプリッティングと呼ばれる現象を利用して地下の亀裂系についての研究を行ってきたが (Honda et al., 2014)、本研究ではFuzzy C-means法と呼ばれる手法を用いて地下の亀裂系の方位についてクラスタリングを実施して、箱根火山の亀裂系の特徴を明らかにした。2. 解析手法 本研究では亀裂系の詳細な空間分布を推定するため、2016年から2017年にかけて箱根火山及びその周辺で実施した機動観測のデータを利用した。まず、S波スプリッティングの解析を行い、各観測点での速いS波の振動方向 (LSPD) のデータを集める。この振動方向が観測点直下の亀裂系の方向に相当する。ただし、機動観測点の場合はセンサーの設置方位の誤差が大きいと考えられることから、事前に遠地地震の波形を用いて方位の修正を行った。次に、観測点ごとに異方性の強度などで重みづけしたLSPDの平均を計算し、最後にFuzzy C-means法を用いて平均LSPDのクラスタリングを実施した。3. 結果 Fuzzy C-means法ではクラスター数を任意で与えるため、クラスター数を2から7まで変化させて、いくつかのクラスターに分けるのが尤もらしいか調べた。その結果、箱根カルデラの亀裂系は2つのクラスター (AおよびB) または4つのクラスター (A1、A2、B1、およびB2) に分類できることが分かった。B1はおおむね中央火口丘付近、B2はカルデラの南北、A1、A2はカルデラ西部もしくはカルデラ周辺に分布する。

広域応力場の圧縮軸の方向に対応する北西-南東方向の亀裂系が卓越するクラスター (B1) は、広域応力場によって掲載された微小な亀裂系やダイクの存在を示していると考えられ、古い火口の配列方向ともよく一致している。クラスターB2は、箱根カルデラの南北に存在する丹那断層および平山断層の走向に近い方向を持つクラスターであり、これらの断層の断層破碎帯が存在することを示唆している。クラスターA1、A2はB2の共役系 (B2と直交する走向をもつ断層) で説明できる可能性があるが、局所的な応力場による微小亀裂の配列や古い火山構造もこのようなクラスターの原因となりえる。例えば、Doke et al (2020)では、箱根の西側における歪の圧縮軸は、北西南東よりもやや東西寄りの方向を向いていることが示されており、このような局所的な応力場によって形成された亀裂系が存在している可能性もある。

Seismic velocity structure beneath Kikai-caldera, Japan, from seismic refraction survey

*Akihiro Nagaya¹, Gou Fujie², Shuichi Kodaira², Satoru Tanaka², Yojiro Yamamoto², Hiroko Sugioka^{4,1}, Hiroki Miyamachi³, Tetsuo Matsuno⁴, Hironori Otsuka⁴, Keita Suzuki^{4,5}, Nobukazu Seama^{1,4}

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Ocean Bottom Exploraiton Center, Kobe University, 5. Nippon Marine Enterprises, Ltd

鬼界カルデラは鹿児島県薩摩半島の南部約60 kmに位置する海底火山であり、過去に噴火を繰り返してきた。その中でも最も直近の噴火である鬼界-アカホヤ噴火は7300年前に発生した日本列島で最も新しい巨大なカルデラ噴火である。2016年~2017年に神戸大学「深江丸」によって行われた探査航海により、二重のカルデラ構造や、熱水活動などが明らかになり、カルデラ噴火以降に成長した溶岩ドームの下にマグマ溜まりの存在が示唆されている(Tatsumi et al., 2018)。また、火山ガスやメルト包有物の研究(Kazahaya et al., 2002)によって、地下のマグマ溜まりのモデルが提案されている。一方で、そのモデルを検証できるような地震波速度構造は、これまで推定されていなかった。

そこで、2021年7月19日~8月1日に海洋研究開発機構の海底広域研究船「かいめい」を用いたKM21-05航海では屈折法地震探査が実施された。本研究では、探査によって得られたOBSデータに初動走時トモグラフィ解析(Fujie et al., 2006, 2013)を適用し、鬼界カルデラ地下の二次元P波速度構造を推定した。初動走時トモグラフィ解析には、38台の海底地震計(OBS)の鉛直成分のデータから読み取った約12,200個の初動走時を使用した。

初動走時トモグラフィ解析の結果、鬼界カルデラを東北東-西南西方向に横切る測線直下のP波速度構造が得られた。鬼界カルデラ周辺には速度構造の特徴が異なる四つの構造が見られた。一つ目はカルデラ壁両側近傍(測線西端からの距離40 km~80 km、105 km~115 km)直下で、P波速度5.5 km/sの等値線が深さ3 km~4 kmまで盛り上がっている構造である。二つ目は測線西部(測線西端からの距離0 km~25 km)直下で、深さわずか4 kmでP波速度が6 km/sに達する大きい速度勾配である。三つ目は測線東部(測線西端からの距離115 km~175 km)直下、深さ約2 kmにおいて5 km/sであるP波速度が深さ約7 kmで5.5 km/sまで増加する、緩やかな速度勾配である。上述した三つの構造は、本研究の測線と交差するECr11測線(Nishizawa et al. 2019)の地震波速度構造にも見られた。特筆すべきは四つ目の構造である。鬼界カルデラ(測線西端からの距離80 km~100 km)直下の深さ3 kmから8 kmにおけるP波速度は、周囲より0.5 km/s~1 km/s遅く、その水平方向の広がり約25 kmに達する。この構造はECr11測線の速度構造には見られず、この火山特有の構造を反映していると考えられる。これらの特徴は複数の初期構造を与え、初動走時トモグラフィ解析を行った場合でも、同様の構造が再現された。また、チェッカーボード解像度テストによって、最終的な速度構造の空間分解能の評価を行い、深さ10 kmまでは水平方向15 km、垂直方向5 kmの空間分解能があり、深さ5 kmまでは水平方向7.5 km、垂直方向2.5 kmの空間分解能があることを確認した。以上のように、構造的特徴の再現性、空間分解能の評価から、鬼界カルデラ直下の深さ約3 km~8 kmには、周囲よりも5%~10%地震波速度が遅い領域が存在することが明らかになった。

Room C | Regular session : S19. Seismology, general contribution

📅 Mon. Oct 24, 2022 5:15 PM - 6:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 8:15 AM - 9:00 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S19] PM-3

chairperson: Keisuke Onodera (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S19-01] Room Seismic Intensity measurement by a ultra compact seismometer

*Naoshi HIRATA¹, Takashi FURUYA², Hiroshi TSURUOKA¹ (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. ISAD)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S19-02] Estimation of the sources of primary microseisms excited by typhoons around Japan

*Hiroki Kawakami¹, Naoki Suda¹ (1. Hiroshima University)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[S19-03] Introduction of NASA's Titan Exploration Mission: Dragonfly – For the first seismic investigation on an icy moon–

*Keisuke Onodera¹, Hiroaki Shiraishi², Satoshi Tanaka², Taichi Kawamura³, Takefumi Mitani², Hideki Murakami⁴, Ryuhei Yamada⁵, Shunichi Kamata⁶, Jun Kimura⁷, Hiroyuki Kurokawa⁸, Kiwamu Nishida¹, Yasuhito Sekine⁸, Takeshi Tsuji⁹, Ralph Lorenz¹⁰ (1. ERI/The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IPGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Johns Hopkins University)

Room Seismic Intensity measurement by a ultra compact seismometer

*Naoshi HIRATA¹, Takashi FURUYA², Hiroshi TSURUOKA¹

1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. ISAD

はじめに

一般家庭の壁にある電源コンセントに差し込むだけ、固定して室内の揺れ（室内震度）を計測し、インターネット経由で波形データ、計測震度などの情報を収集するシステムを開発した。この仕組みによって、一般家庭、事務所などの地震にいる揺れを「計測震度」によって知り、防災行動に結びつくかどうかの実験を神奈川県座間市、東京都新宿区、千葉県成田市などで実施した。

システム

一般消費者用のMEMS、WiFiを搭載した基盤搭載コンピュータ（Raspberry Pi）と、AC/AD変換電源を容器に詰め一体化し、家庭用の100Vコンセントに差し込めるようにした（コンセント差し込み方式小型地震計）。この地震計から、データがWiFi経由で、3成分100Hzの加速度連続記録、最大加速、計測震度値などをデータサーバーに転送される。さらに、解析サーバー経由で、Webで閲覧可能な情報として、3成分加速度波形、1 Hzにデシメーションした3成分ベクトル合成包絡波形、PGA、計測震度（室内震度）が提供される。

計測実験

2021年9月から2022年3月まで、神奈川県座間市で、一般市民20人に対して、10人には本システムを設置し、10人には設置せずに、有感地震時の揺れの体感（体感震度）や防災行動に関するアンケート調査を実施した。また、東京都新宿区の高層ビル、千葉県成田市の事業所ビルにも同様の装置を設置し、室内震度を計測した。

測定結果

室内の揺れを、計測震度を計算するのと同じアルゴリズムで測定すると、一階での測定では、基本的に最寄りの気象庁震度と同様な値が得られた。しかし、数百m程度離れた場所でも、震度階級1程度の増減があることが分かった。さらに、高層ビルの場合には、低層階と高層階で計測震度は異なり、高層階ほど大きくなることも確かめられた。

アンケート調査結果

地震計を設置した被験者と設置しない被験者とで、防災意識に差がでることを期待した実験であったが、今回の調査では顕著な差は現れなかった。対象者が少なかったことと、有感地震数、特に、大震度の揺れが少なかったことが原因と考えられる。今後、実験の規模を大きくして継続する。

まとめ

室内で勘弁に設置できる揺れの測定装置を開発して、一般市民の防災意識の向上に貢献するためのシステム作りをはじめた。現状では、データが不足しているが、比較的近隣の場所、階によって、計測震度が異なることは示せた。今後は、データ数を増して、統計的に意味のあるデータを取得する。

Estimation of the sources of primary microseisms excited by typhoons around Japan

*Hiroki Kawakami¹, Naoki Suda¹

1. Hiroshima University

地震計に記録されるバックグラウンドノイズのうち、およそ0.05-0.1Hzの周波数帯の振動はprimary microseismsと呼ばれ、沿岸域における海洋波と海底地形のカップリングにより発生すると考えられている。特に台風が接近した際には、強力な大気エネルギーにより海洋波が励起され、その結果primary microseismsが強く励起されることが知られている。台風が接近した際のprimary microseismsの震源を推定した研究はこれまでも行われているが、日本へ接近した台風によって励起されたprimary microseismsの震源を系統的に調べた研究は報告されていない。本研究では、2011年から2020年の10年間に発生した台風について、励起されたprimary microseismsの震源推定を行った。

地震波のデータにはF-netの広帯域地震計記録を使用した。観測点ごとに1時間平均のパワースペクトルを作成し、primary microseismsのピークが明瞭な観測点を選択して解析に使用した。台風のデータは気象庁で公開されている「過去の台風情報」を参照した。2011年から2020年の10年間で日本列島に接近した最大風速33 m/s以上の強い台風15個を対象とし、台風が接近した期間の記録を解析した。1時間間隔で台風の位置を特定するため、大気圧データとして京都大学のMSM再解析数値予報データを使用した。また、海洋波のデータはNOAAのWAVEWATCH IIIの解析データを用いた。

本研究では、南シナ海を通過した台風で励起された脈動の震源分布を推定したPark & Hong (2020)と同様にRayleigh波を利用して震源推定を行った。この方法では、Rayleigh波の変位波形の水平成分が上下動成分に対して位相が $\pi/2$ シフトしている性質を利用している。ある方位に回転させた水平成分と、位相を $\pi/2$ シフトさせた上下動成分との相互相関係数が最も大きいとき、その方位に震源があると考えることができる。本研究では、北緯10度～60度、東経100度～160度の範囲において0.5度間隔で仮想的な震源を地表に設定し、各仮想震源に対して相互相関係数の観測点平均を計算することでprimary microseismsの震源を推定した。

その結果、南西諸島周辺と関東地方沿岸がprimary microseismsの励起源として代表的な場所であることが分かった。通常、primary microseismsは沿岸域における海洋波と海底地形のカップリングにより発生するため、台風の移動に伴いprimary microseismsの震源も移動すると考えられる。しかし、南西諸島周辺と関東地方沿岸においては台風の通過後も励起源となっていることが複数の台風において観測された。この結果は、南西諸島周辺と関東地方沿岸が日本列島の中でも特にprimary microseismsの励起に適した地域であることを示している。

震源の停滞の原因を考察するために、南西諸島周辺と関東地方沿岸における震源の停滞と有義波高の時間変化を比較した。その結果、震源の停滞と有義波高の上昇には時間的な相関があることが分かった。南西諸島周辺と関東地方沿岸の海底地形は比較的浅く複雑な地形であることから、周囲よりも相対的に強くprimary microseismsを励起したと考えられる。また、ジャックナイフ法を用いて震源推定結果の誤差についても議論を行った。

Introduction of NASA's Titan Exploration Mission: Dragonfly –For the first seismic investigation on an icy moon–

*Keisuke Onodera¹, Hiroaki Shiraishi², Satoshi Tanaka², Taichi Kawamura³, Takefumi Mitani², Hideki Murakami⁴, Ryuhei Yamada⁵, Shunichi Kamata⁶, Jun Kimura⁷, Hiroyuki Kurokawa⁸, Kiwamu Nishida¹, Yasuhito Sekine⁸, Takeshi Tsuji⁹, Ralph Lorenz¹⁰

1. ERI/The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Johns Hopkins University

1. 概要

DragonflyはNASAのニューフロンティア計画の一つとして2019年に採択された土星衛星タイタン探査ミッションである。過去40年にわたる惑星探査(Voyager, Cassini-Huygens)および地上観測により、タイタンでは、液体が表面に安定的に存在し、大気は生命前駆物質の生成に必要な窒素やメタンなどで構成されていることが確認されている^[1]。こうした環境は、原始地球大気に似通っており、タイタンを探査することで「地球でどのように生命が誕生したのか?」「地球以外の天体に生命は存在する(した)のか?」といった疑問への解答の手がかりを得ることができる^{[2][3][4]}。Dragonflyは2027年に打ち上げ、2034年頃にタイタンに到着し、そこから約3年間の科学観測を行うといった約10年にわたる大規模な計画である^[5]。この計画の特徴として、大型のドローンを用いた離着陸可能な探査が挙げられる(図1)。Dragonflyは、その名の通りトンボのように、タイタン上を転々としながら、各地点で化学分析・気象観測および地球物理観測を実施することで、生命前駆物質の有無、あるとすればその存在量、またそれらの物質の生成に至らしめた環境を明らかにすることを目的としている。上記の観測項目のうち、我々は地球物理観測の中の地震観測を担当する。

2. タイタン地震計: DraGMet SEIS

我々のチームでは、長年JAXA宇宙科学研究所にて開発が進められてきた惑星探査用地震計をDragonflyに提供ならびに氷天体初の地震観測の実現を目指し、観測機器の開発・性能評価・科学的検討を進めている。現在は、2027年の打ち上げに向け、Engineering Model (宇宙機搭載用の前段階)の製作に取り組んでいる。搭載予定の地震計パッケージDraGMet SEIS (Dragonfly Geophysical and Meteorological Package: Seismometer)は、地震計・プリアンプ・風除けカバーからなり、1.5気圧・マイナス180度という過酷な環境において、 3×10^{-9} m/s@0.1-10Hz程度の振動まで測定することを目指している。タイタンにおける地震観測は、自然地震と人工地震の両方を想定しており、これらの観測を通じてタイタンの地震活動度と地下構造の把握を主目的としている。自然地震については、未だ不確定な部分も多く検討の余地があるが、地球・月・火星での地震観測経験から「土星-タイタン間の潮汐作用による断層活動」「氷地殻テクトニクス」「地溝からの間欠泉現象」「氷火山の噴火・溶岩流の噴出」「小天体衝突」「内部海の対流」「固気カップリング」などに起因する地震が考えられている^[6]。人工地震については、サンプル採集掘削用ドリルの稼働に伴う振動を利用し、表層付近の構造を精密に測定することを検討している。

3. 日本の地震学コミュニティの参画誘致

Dragonflyは、氷天体での初の離着陸探査であり、宇宙における生命の存在可能性を調査するといった科学的にも大きな意義を持つ。しかし、土星衛星ということもあり、打ち上げから観測終了まで10年ほどの時間を要するため、場合によっては運用中にメンバーがリタイアするケースも考えられる。こうした長期間に渡る計画では世代間での探査の引き継ぎが必須となるが、国内における惑星地震学コミュニティは未だ数名程度の規模であるのが現状である。世界的にはNASAの火星地震探査計画InSightが成功を収めたことで、地球の地震学者の惑星地震学コミュニティへの参加が進みつつあり、将来の惑星探査においても地震学者の積極的な参加が期待されている。

本発表は、日本の地震学コミュニティの惑星地震探査への参画誘致を目的に、我々の日々の活動と共に、惑星地

震学の魅力, 地球惑星科学における重要性について紹介する.

参考文献 [1] Nimmo and Pappalardo (2016), *JGRE*, 121, 1378. [2] Chyba and Hand (2005), *ARA&A*, 43, 31. [3] Lazcano and Hand (2012), *Nature*, 488, 160. [4] Mckay (2016), *Life*, 6, 8. [5] Barnes et al. (2021), *PSJ*, 2, 130. [6] Vance et al. (2018), *JGR Planet*, 123, 180–205.

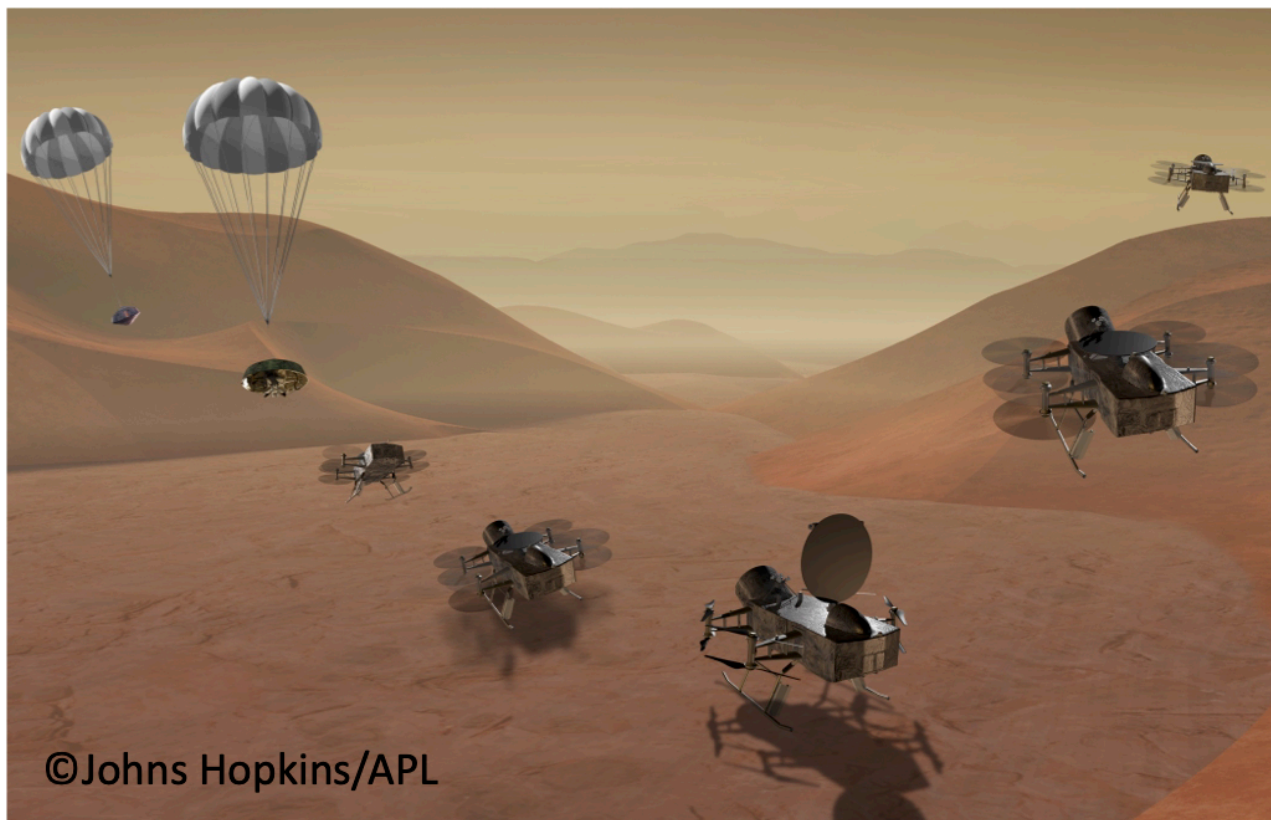


図1. ドローンを用いた離着陸探査の概念図.

Room D | Regular session : S14. Earthquake prediction and forecast

📅 Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 10:15 AM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:30 AM - 1:15 AM UTC | 🏢 ROOM D
5th floor (Training Room 520)

[S14] AM-1

chairperson: Masajiro Imoto (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-01] On the Brownian passage time distribution model of refinement for the Kanto M8 class recurrent paleoearthquakes

*Masajiro IMOTO¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S14-02] On the probability of successive occurrence of Nankai Trough earthquakes

*Yo Fukushima¹, Tomoaki Nishikawa², Yasuyuki Kano³ (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S14-03] Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the Chugoku region

*Taro Hara¹, Hiroaki Takahashi² (1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University)

On the Brownian passage time distribution model of refinement for the Kanto M8 class recurrent paleoearthquakes

*Masajiro IMOTO¹, Nobuyuki MORIKAWA¹, Hiroyuki FUJIWARA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

政府地震調査委員会(以後 地震調査委員会, 2014)は, 相模トラフ沿いに発生する関東M8級地震の地震確率をParsons (2008, JGR)に倣った方法で評価している. Parsons (2008)の方法はOgata (1999, JGR)の式と同等であり, Brownian Passage Time (BPT)分布のばらつきをあらわすパラメータ (以後ばらつき) が小さく偏る [井元他(2022a, 地震; 2022b, Jpgu)]. 井元他(2021年度地震学会)は, 古地震時系列から想定される全ての地震間隔に基づく尤度幾何平均による最尤法を提案している. これに従えば, 平均間隔362.5年ばらつき0.49となる. しかしながら, 用いた古地震時系列には不確定期間が連続する部分が含まれ, 極端に短い地震間隔を反映してばらつきがやや大きくなっている. 本報告では, 不確定期間の連続部分について尤度式を見直しデータを忠実に反映したばらつき値を求める, また, 関東M8級地震については歴史地震も存在するので, 古地震時系列と歴史地震時系列を同時に解析した結果も紹介する.

BPT分布の尤度幾何平均

井元他(2022a)によると, 古地震時系列に対する更新過程モデルの尤度幾何平均は(1)式 (表1) で与えられる. ここで, (a_i, b_i) は地震発生年の不確定期間で, 各発生年はそれぞれの不確定期間で一様に分布すると仮定している. 被積分関数の対数を対数の和に置換え, 自明な積分を実行して(2)式を得る. この式では, 地震間隔毎に対数尤度が平均され, その後全間隔の和を求めている. 地震間隔がBPT分布に従う場合, 確率密度関数は(3)式となる. モデルパラメータ μ および α をそれぞれ平均間隔およびばらつきと呼ぶ. 同一のBPT分布に従う独立な2個の地震間隔の和 d は, $\mu_2 = 2\mu$ $\alpha_2 = \alpha/\sqrt{2}$ をモデルパラメータとするBPT分布(4)式に従う. これを用いて(2)式を変形して地震発生年を特定しない場合を含む式を導くことができる. m 個の地震間隔のうち, j 番目の間隔が発生年を特定できない地震1個を含む地震間隔とする. このとき, 最尤推定値は, (5),(6)式で表される. ここで, 地震間隔および逆数の平均は(7),(8) で表される.

関東M8級地震

ここでは, 地震調査委員会(2014)に記載された古地震時系列を採用する (表2). 9個の古地震うち3番の地震が, 前後の地震(2番, 4番)から発生期間が与えられている. 表2の○印はモデルパラメータ推定に用いた地震であり, 下段に各Data set に対する尤度幾何平均による最尤推定値が与えられている. Data set Aの計算では表2にある3番地震の不確定期間をそのまま用いている. Data set Bから Data set Eでは, 3番地震の発生年を特定せず2個の地震間隔の和として2番と4番の発生間隔を用いている.

各不確定期間で発生年を無作為に選んだ時系列 (モンテカルロ時系列, 10000個) から得たばらつきの累積分布を図1に示す. Data set Aは青で Data set Bは赤で印されている. 0.1~0.9の範囲で0.1刻み (+印) で値を得ている. 0.5におけるばらつきが中央値を表す. その右隣の縦線は尤度幾何平均によるばらつき (表2) である. Data set Aではモンテカルロ時系列の中央値と表2の最尤推定値との間に一定の差が見られるが, Data set B ではその差が縮小している. 両者の0.9 (90%)点を比べるとData set A では80%点に比べ大きく右に湾曲していて, ばらつきの大きい時系列の存在が示唆される. これに対しSet Bでは, 極端に短い地震間隔が含まれないためばらつきが抑えられている. 尤度幾何平均の最尤推定値は, 想定される全ての地震間隔が再現する場合の対数尤度期待値が最も大きいモデルであり (2022b), モンテカルロ時系列の中央値とは違った意味を持つ.

図2 は地震発生後500年間における条件付き30年確率の推移を表す. Data set A, Data set B の他に, Parsons (2008)で得られた値 (ERC)を比較する. 経過年 0~250年ではばらつきの大きい方が30年確率は大きくなるが, およそ250年以後では逆転する. 今回新たに得られた値Data set Bによると, 大正関東地震が

らほぼ100年が経過し30年確率が徐々に増加する段階に差し掛かったと云える。歴史地震を含めた場合のばらつきはData set Bの0.40にほぼ等しい（表2）が、平均間隔がData set Bより短いので、100年経過時点での30年確率値はData set Bより大きくなる。

(1)	$\ln L(\theta) = \int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_n}^{b_n} \ln \{ (\prod_{i=2}^n f_{\theta}(s_i - s_{i-1})) \prod_{j=1}^n \frac{1}{b_j - a_j} \} ds_n \dots ds_1$
(2)	$\ln L(\theta) = \sum_{i=2}^n \int_{a_i}^{b_i} \int_{a_{i-1}}^{b_{i-1}} \ln f_{\theta}(s_i - s_{i-1}) \frac{1}{b_{i-1} - a_{i-1}} \frac{1}{b_i - a_i} ds_{i-1} ds_i$
(3)	$f_{\theta}(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp \left\{ -\frac{(t - \mu)^2}{2\mu\alpha^2 t} \right\}$
(4)	$f_{\theta}(d) = \sqrt{\frac{\mu_2}{2\pi\alpha_2^2 d^3}} \exp \left\{ -\frac{(d - \mu_2)^2}{2\mu_2\alpha_2^2 d} \right\} = \sqrt{\frac{4\mu}{2\pi\alpha^2 d^3}} \exp \left\{ -\frac{(d - 2\mu)^2}{2\mu\alpha^2 d} \right\}$
(5),(6)	$\hat{\mu} = \frac{1}{m+1} \sum_{i=1}^m \bar{t}_i, \quad \hat{\alpha}^2 = \hat{\mu} \frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\bar{1}}{\bar{t}_i} \right\} + 4 \frac{\bar{1}}{\bar{t}_j} \right] - \frac{(m+1)}{m}$
(7)	$\bar{t}_i = \int_{a_{i+1}}^{b_{i+1}} \int_{a_i}^{b_i} (s_{i+1} - s_i) \frac{1}{b_i - a_i} \frac{1}{b_{i+1} - a_{i+1}} ds_i ds_{i+1}$
(8)	$\frac{\bar{1}}{\bar{t}_i} = \int_{a_{i+1}}^{b_{i+1}} \int_{a_i}^{b_i} \frac{1}{s_{i+1} - s_i} \frac{1}{b_i - a_i} \frac{1}{b_{i+1} - a_{i+1}} ds_i ds_{i+1}$

表 1 式の一覧

Event		Occurrence year		Data set				
				A	B	C	D	E
震 災 目 録	cal yBP							
	1	5400	5300	○	○	○	○	○
	2	5000	4800	○	○	○	○	○
	3	4800	4250	○	*	*	*	*
	4	4250	3950	○	○	○	○	○
	5	3800	3600	○	○	○	○	○
	6	3300	3100	○	○	○	○	○
	7	3050	2850	○	○	○	○	○
	8	2750	2700	○	○	○	○	○
	9	2500	2400	○	○	○	○	○
歴 史 地 震	AD							
	1	永仁	1293				○	○
	2	明応	1495					○
	3	元禄	1703			○	○	○
		大正	1923			○	○	○
		MLE		362.5	362.5	346.7	353.0	320.9
				0.49	0.40	0.41	0.39	0.41

表 2 関東 M8 級の古地震と歴史地震

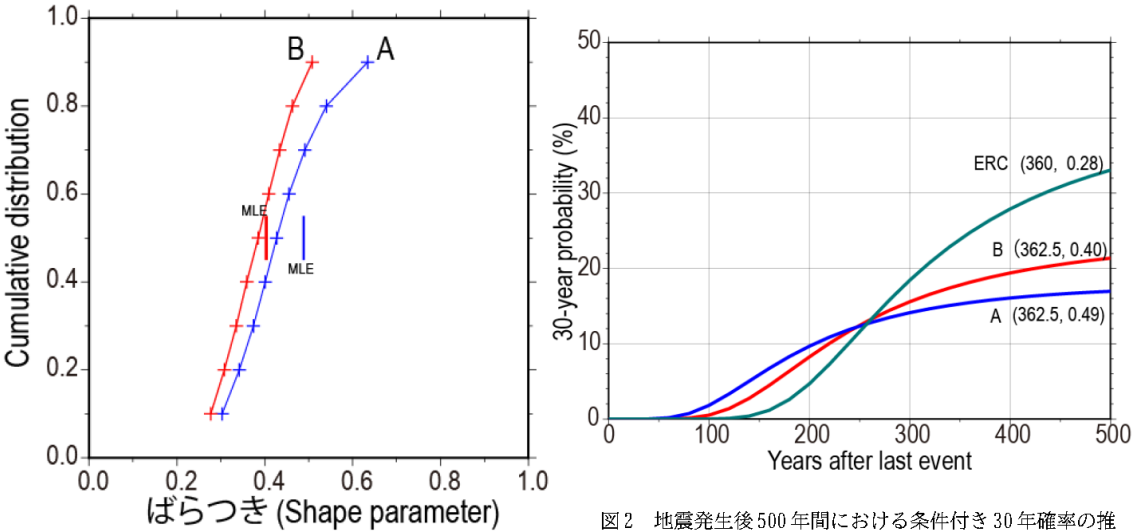


図 1 10000 個のモンテカルロ時系列に基づくばらつきの累積分布。縦線は尤度幾何平均によるばらつきを示す。A, B はそれぞれ表 2 の Data set A, Data set B に対応する。

図 2 地震発生後 500 年間における条件付き 30 年確率の推移。A, B はそれぞれ表 2 の Data set A, Data set B に対応する。ERC は Parsons (2008) で得られた値で地震調査委員会(2014)に対応する。

On the probability of successive occurrence of Nankai Trough earthquakes

*Yo Fukushima¹, Tomoaki Nishikawa², Yasuyuki Kano³

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

現在、南海トラフ地震の発生する確率が平時より高まったと評価された場合、南海トラフ地震臨時情報が気象庁より発表される仕組みになっている。特に、ひとたび南海トラフ地震が発生して後発の地震が懸念される場合（いわゆる半割れケース）には「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）」が発表されることとなっており、このケースが後発地震の発生確率が最も大きく、社会が最も厳しい状況に置かれることになる。

国の「南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン」には、ISC-GEMグローバル地震カタログを使った解析に基づき（橋本・横田, 2019, JpGU）、半割れケースの場合に後発地震は十数回に1回程度の頻度で一週間以内に発生するという目安が示されている。しかし、昭和東南海地震（1944）と昭和南海地震（1946）が約2年、安政東海地震（1854）と安政南海地震が約30時間の時間差で連発したという事実は、南海トラフでの連発確率が世界での平均的な連発確率よりも大きい可能性を示唆している。そこで本研究では、南海トラフ地震連発確率について、過去の発生履歴を考慮した算出を行った。

南海トラフ地震の発生履歴に関する既往の研究成果の調査から、1361年（康安）、1498年（明応）、1605年（慶長）、1707年（宝永）、1854年（安政）、1944–1946年（昭和）の6事例のうち、時間差を置いた連発が3年以内に発生したのは2事例（安政と昭和）～4事例（康安と明応も追加）と評価した。これらから3年以内の連発確率を推定したところ、4.3%–96%（95%信頼区間）となった。この確率をグローバル地震カタログから推定した確率（5.3%–18%；福島・西川, 2020, 地震学会秋季大会）と比べると、推定範囲が重なっていることから、南海トラフでの連発確率が世界での平均的な連発確率と同程度であるという可能性（つまり、南海トラフでも本当に「十数回に1回程度」の頻度で連発する）は否定できないものの、南海トラフでの連発確率のほうが大きい可能性が高いと言える。

また、グローバル地震カタログの解析からは、連発の時間差と後発地震の発生頻度が一般的な余震発生経験則である大森・宇津則に従うことがわかった。そこで、同法則が南海トラフにも当てはまると仮定し、南海トラフでM8以上の地震が発生したあとに同規模の後発地震が発生する確率の時間的推移を算出したところ、6時間以内、1日以内、3日以内、1週間以内の後発地震発生確率は、それぞれ1.0%–53%、1.4%–64%、1.3%–72%、2.1%–77%と算出された。この結果は、先発地震の発生直後ほど後発地震が起こりやすく、しかもその確率がかなり高い可能性があることを数字で示すもので、後発地震への対応体制をできるだけ迅速に取る必要性を示している。

Evaluation of crustal deformation and seismicity data for earthquake probability estimation in the Chugoku region

*Taro Hara¹, Hiroaki Takahashi²

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

はじめに

内陸地震発生の長期的な評価として、主要活断層の確率予測や活断層の地域評価が地震本部によって行われている。これらの長期評価では、地質学的手法による活断層調査に基づくデータが主に用いられていて、地震活動データは参考として示されているが、測地データは用いられていない。地域評価では、地表の長さが短い活断層も評価対象となっているが、伏在活断層や、そもそも活断層が存在しない地域での評価が課題となっている。Nishimura (2021)では、GNSS速度データから得られるひずみ速度の空間分布を用いて西南日本の内陸地震の発生確率の推定が行われているが、南海トラフのプレート間固着の影響をモデルに基づき除去したデータを用いている。日本列島の地殻変動場には、海溝でのプレート間固着や地震時・地震後の余効変動の影響が時間的に複雑に内包されており、定量的な評価が課題である。一方、地震活動度を用いた評価も試みられており (Ogata, 2022)、歴史地震を含む地震活動カタログの利用や、余震の減衰時間と応力速度や地震の繰り返し間隔との関係も検討されている (Toda and Stein, 2018)。本研究では、内陸地震発生確率評価に向けて、GNSS速度データから求められるひずみ速度の空間分布と、余震継続時間の特性の検討を中国地方で行う。

地殻変動データによるひずみ速度の空間分布の推定

国土地理院F5座標データから、東北地方太平洋沖地震が発生する直前の2011年3月10日までの中国地方のGNSS観測点の水平成分速度を推定した。推定された南北変位速度、東西変位速度ごとに、10kmごとのグリッドでクリギング法を用いて空間補間を行ったのち、ひずみ速度に変換した。クリギング法では、既知のデータから求められた空間相関性をバリオグラムとしてモデル化し、任意の地点での最良線形不偏推定量を求める。今回は通常クリギング法を用いた。小林(2009)によると、クリギング法は長・短波の変動が混在する地殻変動場の空間特性を保ったまま補間することが可能である。

地震カタログによる余震継続時間と定常的な地震活動

Toda and Stein (2018)の手法に従い、気象庁地震カタログを用いて中国地方における過去30年以内に発生したM6.0以上の地震の余震継続時間を推定した。1997年山口県北部地震(M6.6)では約140年、2000年鳥取県西部地震(M7.3)では約1900年、2016年鳥取県中部地震(M6.6)では約180年、2018年島根県西部地震(M6.1)では約4700年という結果になった。余震の継続時間が長かった地震の震源付近には活断層は存在せず、短かった地震の震源付近には活断層が存在した。また、定常的な地震活動比較では、本震直後の地震発生数が似ている2016年鳥取県中部地震・2000年鳥取県西部地震と1997年山口県北部地震・2018年島根県西部地震の余震継続時間を比較した。両方とも、定常的な地震が活発なほうが余震継続時間は短くなるという性質を示していた。

結果と今後の展望

クリギング補間されたひずみ分布は、Okazaki et al.(2020)による結果と同様の空間特性を示し、地震活動が活発な山陰～山口県で比較的大きな地域が見られる。岡山県付近の大きなひずみの原因は不明である。余震の減衰からは、活断層付近で大きな応力速度が示唆された。一方、GNSSから得られるひずみ速度を直接的に地震発生確率評価に用いるためには、その場所の永年の応力蓄積に寄与しない成分の客観的な評価が必要である。内陸で起こる地震の規模は最大でもM8で一般的には活断層のサイズで規定され、活断層がない場所では最大でもM7程度と考えられる。ひずみ分布から10°数10km程度の短い空間波長成分のみをフィルタリングし

て抽出しNishimura (2021)の手法を適用することで、南海トラフの固着等による影響を除去した評価が行える可能性がある。その際、地震履歴や定常地震活動度、活断層の密度と長さ等の先駆的情報を、当該地域の先天的な地震発生能力を示す指標として、中規模地震の余震減衰時間を応力速度の指標として評価することで、地震発生確率評価を行う手法を検討している。非弾性ひずみ場と永年の応力場の評価には、産総研の地殻応力場データベースと主歪の偏差を用いることも考えられる。

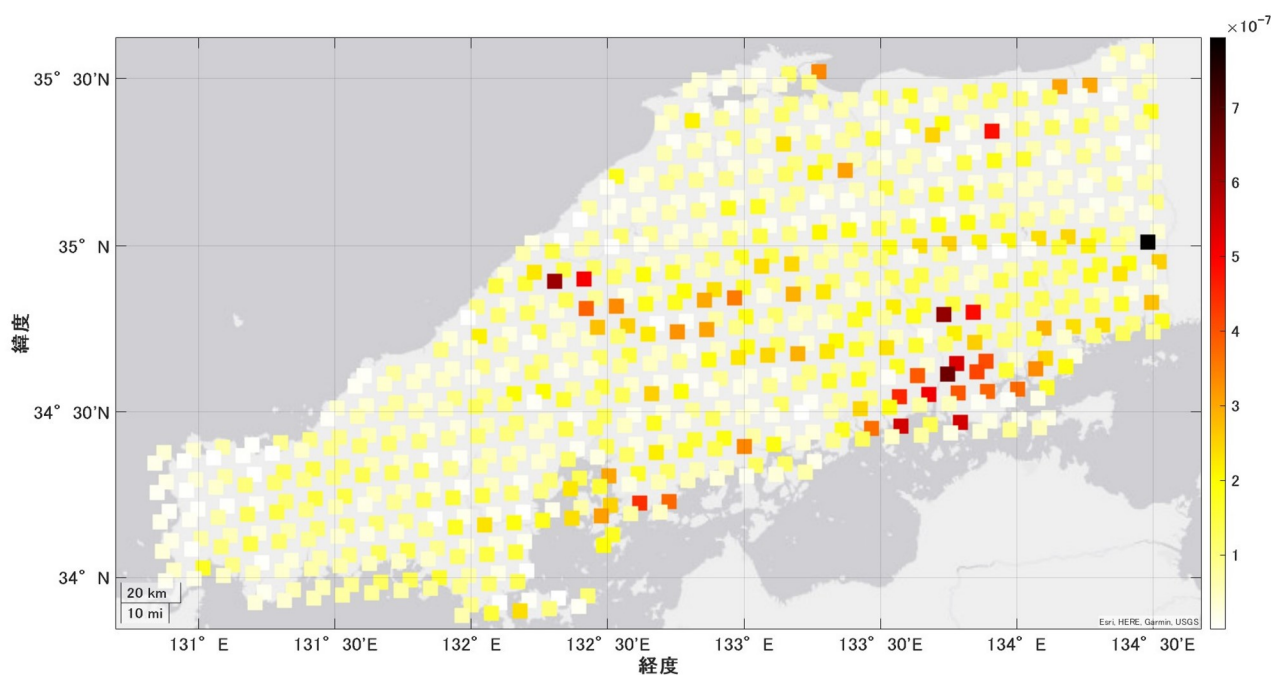


図1. クリギング法によって求められた中国地方の最大主ひずみ速度分布

Room D | Regular session : S11. Various phenomena associated with earthquakes

📅 Mon. Oct 24, 2022 10:30 AM - 11:00 AM JST | Mon. Oct 24, 2022 1:30 AM - 2:00 AM UTC | 🏢 ROOM D
5th floor (Training Room 520)

[S11] AM-2

chairperson:Hideo Aochi(BRGM)

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

[S11-01] Ground oscillations generated by the passage of Tsunamis : Observations and numerical simulations

*Hideo AOCHI^{1,2}, Masumi Yamada³, Tung-Cheng Ho³ (1. BRGM, 2. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S11-02] Magnetic field observation using highly-sensitive SQUID magnetometers near the hypocentral area in Noto Peninsula

*JUN KAWAI¹, MIKI KAWABATA¹, MASAKAZU MIYAMOTO¹ (1. Kanazawa Institute of Technology, Applied Electronics Laboratory)

Ground oscillations generated by the passage of Tsunamis : Observations and numerical simulations

*Hideo AOCHI^{1,2}, Masumi Yamada³, Tung-Cheng Ho³

1. BRGM, 2. Laboratoire de Geologie, Ecole Normale Supérieure, CNRS UMR 8538, PSL Research University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The broadband seismic stations near coastlines can record the passage of Tsunami. An example was shown during the 2017 large Greenland Landslide (Chao et al., SRL, 2018; Paris et al. Pageoph, 2019) for which Tsunami traveled along a fjord over 30 km and damaged severely a small coastal village (Nuugaatsiaq) after 10-15 minutes of the estimated origin time of landslide and tsunami generation. Due the lack of coastal measurement such tidal gauge, this seismic station (NUUG) is only the measurement available to characterize the Tsunami passage. The landslide radiated strong seismic waves, detected as an event of magnitude of about 4.8 event in GFZ catalog. We first obtained the source time function as a single force from the teleseismic inversion using five broadband stations available on Greenland. Two large pulses with a time lag of about 100 s was clearly distinguished in the solution. In parallel, the landslide into the sea and tsunami (generation and propagation) were simulated using a finite difference method (Kelfoun et al., JGR, 2010; Shi et al., Ocean Modell., 2012). The area is discretized with 100 m grid over 65 km x 45 km. The volume of landslide and the slope angles were estimated after the available InSAR data (Paris et al., 2019) and digital elevation data. We adapted the model parameters to be consistent with the guessed tsunami propagation (period and wave height). At last, we calculated the ground oscillations both from the single force at the origin of landslide and the spatio-temporal evolution of tsunami height. Both terms were added as forces on the ground surface in the framework of the elastodynamic equation using a finite difference method. The ground motions from the landslide attenuate quickly in space and time, while the ones accompanied by tsunami propagation attenuate gradually, namely peak ground velocity attenuates with $1/\sqrt{r}$, where r is the distance from the origin. According to a synthetic case study, NUUG station (a few hundred meters from the coast) is sensible to the water level change within 2 km off the coast line. Our numerical test indicates that seismic station near the coast line can be used for monitoring the on-going tsunamis propagation.

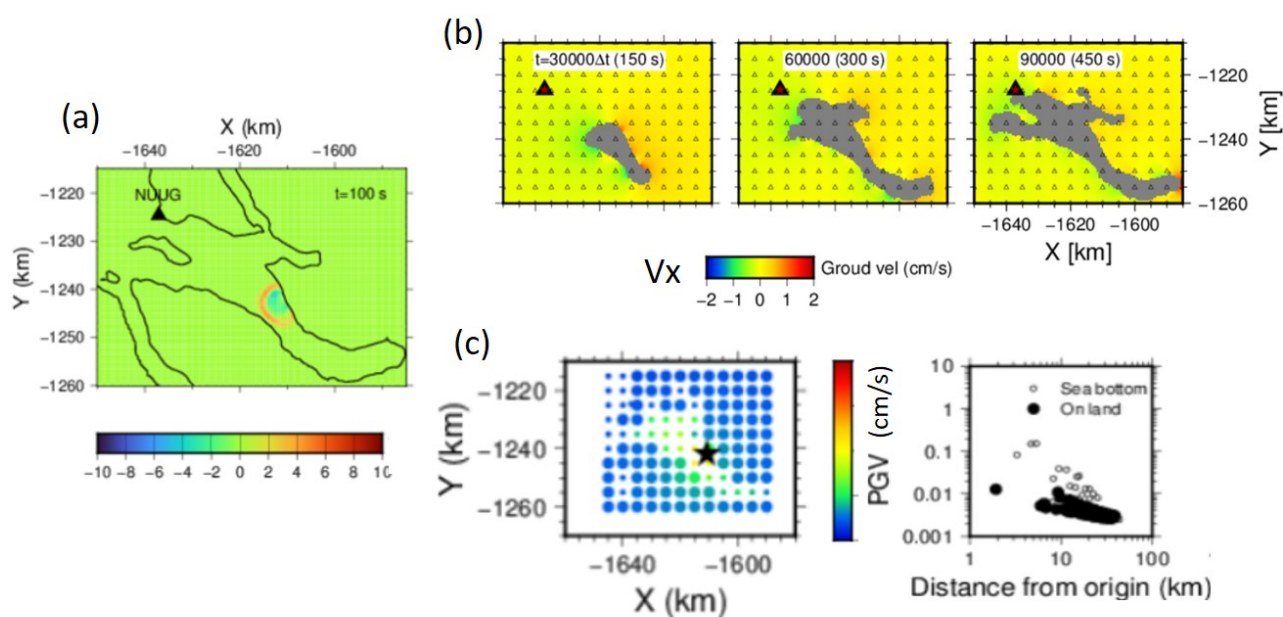


Figure: (a) A snapshot of landslide-tsunami simulation at time 100 s. NUUG station is about 30 km away from the origin of landslide and tsunami. (b) Snapshots of wave propagation on the ground surface (X component in velocity, without filter). A big triangle shows the position of NUUG, and smaller ones are the hypothetical receiver positions. The grey area indicates the implemented sources from Panel (a), showing the progress of tsunami propagation. (c) The peak ground velocity in space and in function of distance from the origin, for 2D horizontal component. The color scale and vertical axis of PGV are common. The star shows the position of tsunami generation, from which the distance is calculated. The solid big circles show the positions on land, while the others are at the sea bottom.

Magnetic field observation using highly-sensitive SQUID magnetometers near the hypocentral area in Noto Peninsula

*JUN KAWAI¹, MIKI KAWABATA¹, MASAKAZU MIYAMOTO¹

1. Kanazawa Institute of Technology, Applied Electronics Laboratory

2021年の夏頃より能登半島先端部の地域を震源とする群発地震が続いており2022年8月現在も収束する気配は見られていない。2022年の6月19日にはM5.4の地震が発生し、珠洲市を中心に被害をもたらした。専門家によれば地下に存在する流体が地震活動に関係しているとの指摘があり、引き続き調査がなされているようである。

当研究所では3軸SQUID（超伝導量子干渉素子）磁力計を用いて、超低周波帯域における自然電磁波の高感度観測を行なっている。2022年の5月から、能登半島での群発地震活動に関連する磁気信号の検出を目的として、震源領域近傍にSQUID磁力計を設置し観測を続けている。SQUID磁力計の設置場所は珠洲市唐笠町で、震源領域の少し南側になる。また参照用として、輪島市門前町にもSQUID磁力計を設置し両者の検出信号の比較も行えるようにした。SQUID磁力計の磁場分解能は $25\sim 30\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ で、データ収録のサンプリング周波数は200Hz、観測信号はテレメトリによって転送されている。

今回、観測状況の紹介をするとともに、観測期間中に起こった地震と磁気信号の関係を議論したい。当方は地震の専門家ではないため、観測手法も含め、観測信号の解析・解釈などについての助言を求められたら大いに幸いである。

Room D | Regular session : S13. Crustal fluids and earthquake

📅 Mon. Oct 24, 2022 11:00 AM - 11:45 AM JST | Mon. Oct 24, 2022 2:00 AM - 2:45 AM UTC | 🏢 ROOM D
5th floor (Training Room 520)

[S13] AM-2

chairperson: Osamu MURAKAMI (Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency)

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

[S13-01] Activity and waveform characteristics of deep low-frequency earthquakes in volcanic regions

*Ryo KURIHARA¹ (1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

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

[S13-02] Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan (2)

*Tsuyoshi WATANABE¹, Shinya Hiratsuka², Koji Shimada¹ (1. Japan Atomic Energy Agency, 2. N/A)

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

[S13-03] Shear wave polarization anisotropy around the source area of the swarm earthquakes in the Noto peninsula

*Osamu MURAKAMI¹ (1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency)

Activity and waveform characteristics of deep low-frequency earthquakes in volcanic regions

*Ryo KURIHARA¹

1. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

火山地域では深部低周波地震と呼ばれる通常の同規模の地震に比べて低い1-8 Hzに卓越する地震が発生している。これまでの研究で、この地震は多くの火山地域では深さ方向に複数の孤立したスポットに分かれて分布すること、定常的に発生する地域と群発的に発生する地域の両方があることなどがわかっている(Kurihara and Obara, 2021)。一方で、この地震の波形の特徴と活動の関係に関しては未知なことが多い。霧島山では、2011年の噴火時に深部低周波地震が活発化し、その波形が他の時期の深部低周波地震と比べてより低周波に卓越していることがわかっている(Kurihara et al., 2019)。一方で、2018年の噴火時には活発化は小規模でよくわかっていなかったため、本研究では2018年噴火時の活動の再検証を行った(Kurihara and Kato, submitted)。検出漏れを減らすため、まず1観測点でのマッチドフィルタ法(Kurihara et al., 2021)を適用し、この手法で2017-2018年、2010-2011年それぞれの深部低周波地震の検出を行った。次に、誤検出を除去するため、周辺複数の観測点を用いた波形の目視による確認で深部低周波地震を選択した。このようにしてカタログを作った結果、2017-2018年には75個、2010-2011年には1302個の深部低周波地震が検出された。このように発生数には大きな差があるものの、2017-2018年においても群発的な活動が地殻変動の開始時に対応するなど、浅部での火山活動と関連が見られる。一方で、小菅他2020を参考に波形の特徴をFrequency Index(ここでは、1-2 Hzの平均振幅と4-8Hzの平均振幅の比を用いて定義した)によって定量化すると、2017-2018年においてはFrequency Index の値は-2から0の間でばらつきが大きい一方で、2010-2011年では多くのイベントで-1以下のFrequency Indexを示す。つまり、2010-2011年では、低い帯域に大きなスペクトルを持つ深部低周波地震が多い。このような差は、深部低周波地震発生域周辺への流体供給ルートが2回の噴火で異なることによって生み出されていると推測できる。一方、箱根山では2015年噴火前後に深部低周波地震が活発化(Yukutake et al., 2019)したものの、Frequency Indexでは全期間を通じて値のばらつきも大きく、特に期間毎の顕著な違いが見られなかった。また富士山では、高周波のP波が観測される事例や、10秒程度の間隔で明らかに卓越周期の違う深部低周波地震が連発している例があった。このように、全国的にも波形の特徴は地震毎に大きく異なるケースも多い。これらの観測例から、この地震の発生には深部の流体の影響があり、深部の流体は波形の特徴にも影響を及ぼしていることが推測される。

Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan (2)

*Tsuyoshi WATANABE¹, Shinya Hiratsuka², Koji Shimada¹

1. Japan Atomic Energy Agency, 2. N/A

地震発生において流体の存在は看過できない要素の一つで、その移動経路や賦存域の解明は、防災・減災の観点のみならず、高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるサイト選定などに重要な知見をもたらす。原子力機構では、令和元年度よりS波スプリッティング解析を実施し、地殻内流体をとらえるための手法開発に取り組んでいる。例えば、渡部ほか（2021）は、平成23年東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）の発生後に地震活動が活発となった福島県浜通りから茨城県北部の地域を対象に同解析を実施し、速いS波の振動方向（ ϕ ）が東北日本弧に対して概ね平行な方向に並ぶこと、東北地震前後でそれらの方向に変化がないことなどを確認した。また、福島県浜通りの地震後に異常な湧水が確認された温泉近傍（Sato et al., 2020）の観測点で、速いS波と遅いS波の到達時間差（dt）が相対的に大きくなることを明らかにした。本研究では、渡部ほか（2021）で対象とした領域のdtの時間変化が期待されることから、2018年末までのデータを追加し再解析を行った。その結果、 ϕ の地域差やdtの時空間変化が明らかとなり、断層や構造線に沿って深部から浅部へと伝搬する地殻内流体を示唆する結果を得ることができた。

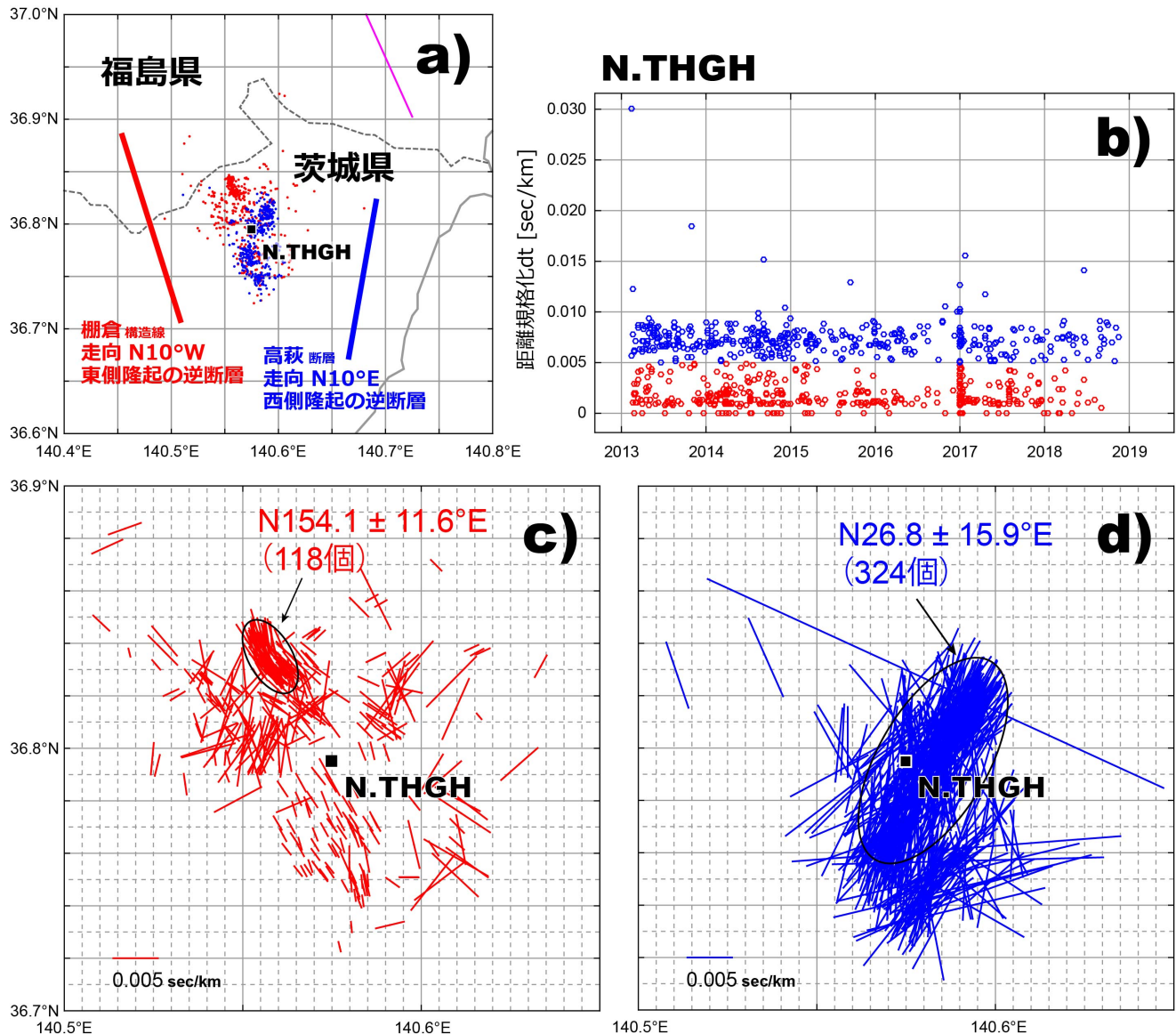
本研究では、2004年4月9日から2018年12月30日までに30 km以浅で発生したM1.0～3.4の16437イベントの地震波形を用いて解析を行った。利用した観測点は、福島・茨城・栃木県に位置する防災科学技術研究所、気象庁、東北大学が運営する21観測点である。解析には、Silver and Chan（1991）の手法を用い、SP変換波によるS波到達時の位相擾乱回避のため、入射角が35°以内の震源と観測点の組み合わせを対象とした。そして、速いS波と遅いS波の波形の相関係数が0.9以上となる4543イベントを採用した。なお、地震波速度構造は、Nakajima and Hasegawa（2007）を利用し、hypoDD法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）で震源の再決定を行った。

得られた ϕ の空間分布は、沿岸部の観測点で、東北日本弧に対して概ね平行な方向が示され、東北日本の広域応力場である東－西から西北西－東南東方向とは異なる結果となった。これは、先行研究（例えば、Iidaka et al., 2014）と調和的であった。また、dtを震源距離で除した距離規格化dt（以下、ndt）の平均値の空間分布は、福島県浜通りの地震後に異常な湧水が確認された温泉近傍の観測点（IWAKMZ）で最大、付近に断層や構造線が存在する観測点で相対的に大きな値となり、顕著な空間変化が生じていることがわかった。ndtの時間変化については、直下で多くの地震が発生した7観測点で明瞭な時間変化を確認することができた。一方、N.THGH観測点ではndtの明瞭な時間変化は確認できなかったが、それらが速いndtと遅いndtのグループに分離しているような結果が得られた（図a, b）。そこで、暫定的にndtを0.005 [sec/km] で分割したところ、 ϕ の平均について、速いndtのグループはN154.1±11.6°E、遅いndtのグループはN26.8±15.6°E方向に分布することが示された（図b-d）。この観測点は、走向N10°Wで東傾斜、東側隆起の逆断層である棚倉構造線と走向N10°Eで西傾斜、西側隆起の逆断層である高萩断層（産業技術総合研究所, 2015）に挟まれた場所に位置し、速いndtの ϕ 分布は西側の棚倉構造線の走向に近く、遅いndtの ϕ 分布は東側の高萩断層の走向に近いことがわかった（図a）。このことから、ndtの遅速は個々の断層付近の流体の多寡（賦存量）を反映しているものと予想される。一方、hypoDD法で再決定した2002年2月から2020年3月までの震源分布は、同観測点付近で経度と深さ方向の断面を南方から見ると「y」字型の分布を示した。これらの震源は、西側の棚倉構造線側で深さ3 kmから7 kmまで、東側の高萩断層側で深さ3 kmから10 kmまで直線状に分布し、約7 kmの深さで互いに交わっている。同観測点で得られたS波スプリッティング解析の結果をこれらの断面にプロットすると、南から北へ向かうにつれてそれらの震源が深部から浅部へと移動する様子が確認できた。Umeda et al.

（2015）は、この観測点付近で2013年11～12月に電磁探査を実施し、深さ20～30 kmに低比抵抗体が存在し、そこから上昇した流体が直上の地震活動を生じさせたと結論付けている。以上の結果から、低比抵抗体起源の地殻内流体が、深部まで震源が伸びる高萩断層を伝わって上昇し、深さ約7 kmの分岐点で二つの経路に分

かれ、さらに浅部まで上昇したと考えられる。高萩断層側のndtが高萩断層側のそれよりも遅い（長い）ことは、高萩断層に相対的に多くの流体が供給されていることを示していると考えられる。

本研究には、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業（JPJ007597）（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の成果の一部を利用した。また、本研究では、防災科学技術研究所によって公開されている気象庁一元化地震データ及び連続波形データを使用した。データ収集に携わった研究機関関係者に感謝致します。



図a) 解析で得られたN.THGH観測点付近の震央分布と断層・構造

図b) N.THGH観測点でとらえた地震のndtの時間変化

図c) 速いndtグループのφ分布

図d) 遅いndtグループのφ分布

図a-dを通して、赤色は速いndt、青色は遅いndtグループに属する地震の結果を示す。

Shear wave polarization anisotropy around the source area of the swarm earthquakes in the Noto peninsula

*Osamu MURAKAMI¹

1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency

2018年6月頃から、能登半島北東部において群発地震活動が始まり、この群発地震活動は現在も継続している。さらに、2020年12月から珠洲GNSS観測点において、約2cmを超える隆起が観測されており、西村(2022)は、深さ約14kmの球状圧力源でこの隆起変動が説明できるとしている。これらの群発地震活動や地殻変動は、珠洲近傍での地殻流体の存在(移動)を示唆している。このような地殻流体の存在や移動による現象の解明は、地震発生場の理解や地質環境長期安定性評価技術の開発などにとって重要である。

断層のような不均質構造や地殻流体の検出に有用なツールの1つとしては、S波スプリッティング解析がよく知られている。そこで本研究では、能登半島群発地震の震源域付近の常設地震観測点で記録された連続地震波形データを用いたS波スプリッティング解析を行うことにより、領域内のS波偏向異方性の推定を試みた。

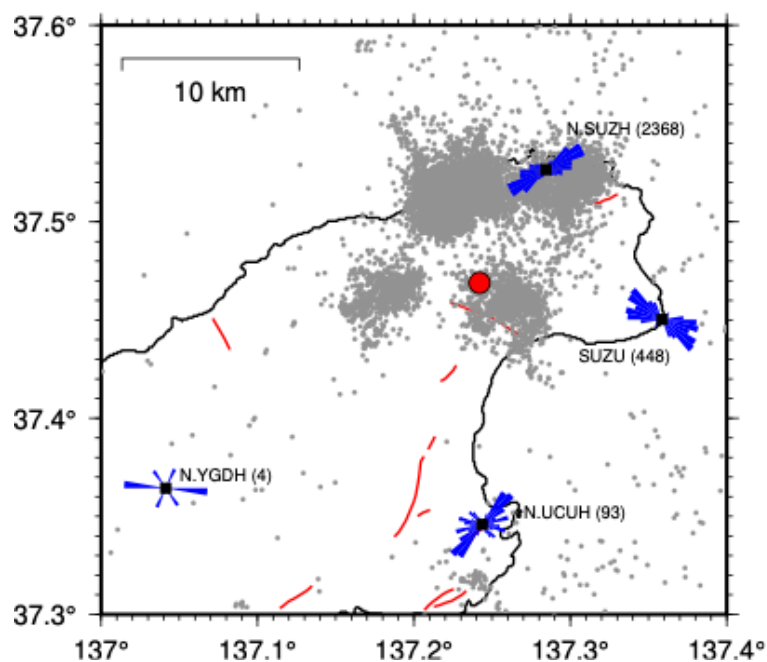
解析にあたっては、気象庁一元化震源カタログから、解析対象領域内で2004年4月1日から2022年5月31日までに発生したMj1.0以上の地震8384個(深さ20km以下)を選んだ。これらの地震について、群発地震域周辺に展開されている常設地震観測点(Hi-net, 気象庁)で観測された連続波形データを用いた。はじめに、Matsubara et al. (2019)による地震波速度構造を用いて、各観測点における1次元速度構造を仮定した。この仮定した速度構造と気象庁一元化震源から、それぞれのイベントによる各観測点に到来する地震波の入射角を推定し、入射角35度未満の震源-観測点ペアのみに解析対象を限定した。これは、入射角が高角度な場合に生じる、地表でのS-P変換波の影響(e.g., Booth and Crampin, 1985)を排除するためである。入射角35度未満の観測点-震源ペアについて、Silver and Chan (1991)の手法を適用して、速いS波の偏向方向および、速いS波と遅いS波とのarrival timeの差を推定した。

上述の解析の結果、群発地震の震源域内に位置する観測点N.SUZHでは、概ね北東-南西方向の速いS波の偏向方向が観測され、群発地震の震源域の東に位置する観測点SUZUでは、南東-北西方向の速いS波の偏向方向が観測された。観測点SUZUの偏向方向は、この領域周辺の最大水平圧縮応力の方向(e.g., Hiramatsu et al., 2015)と概ね平行であることから、stress-induced anisotropyを反映していると考えられる。一方で、観測点N.SUZHの速いS波の偏向方向は、最大水平圧縮応力の方向とは大きく異なる。能登半島北岸沖には、概ね海岸線と平行な走向の活断層が示されている(岡村ほか, 2010)。その活断層の走向方向と本研究で得られた速いS波の偏向方向が調和的であることから、この観測点N.SUZHで得られた速いS波の偏向方向は、structure-induced anisotropyを反映していると考えられる。

群発地震の震源域の直上に位置する観測点N.SUZHでは、多くのイベントについて速いS波の偏向方向が推定できた。そこで、いくつかの期間に分割してみた。例えば、2022年3月の1ヶ月間での平均方位は76であったが、2022年4月の平均方位は70であり、2022年5月の平均方位は76であった。これらの3つの期間について、t検定を行ったところ、3月と4月の平均方位が等しいという帰無仮説は有意水準5%で棄却され、4月と5月の平均方位が等しいという帰無仮説も有意水準5%で棄却された(なお、3月と5月の平均方位が等しいという帰無仮説は有意水準5%で棄却されなかった)。この平均方位の変動については、いくつかのモデルが考えられるが、間隙流体圧の変化が原因であると考えている。

謝辞: 本研究では、防災科学技術研究所 Hi-netならびに気象庁地震・津波検知網の地震波形データを使用させていただきました。また、本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業(JPJ007597)(地質環境長期安定性評価技術高度化開発)」の成果の一

部である。



能登半島の群発地震の震源域周辺におけるS波偏向異方性. rose diagram (青) で示した. 観測点名の後の数字は, 利用できたイベントの数を表す. 赤の丸は, 西村(2022)による球状圧力源の位置を示す. グレーの点は, 2004年4月1日から2022年5月31日までのMj1.0以上の震源(気象庁一元化震源)を示す. 赤線は活断層.

Room D | Regular session : S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

📅 Mon. Oct 24, 2022 3:45 PM - 5:15 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 6:45 AM - 8:15 AM UTC | 🏢 ROOM D 5th floor (Training Room 520)

[S12] PM-2

chairperson:Hironori Kawakata, Kentaro Omura(NIED)

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

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain (5) - In-situ stress measurement using rock core samples -

*Kentaro OMURA¹, Akio Funato², Takatoshi Ito³ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Earthquake and Tsunami Research Division, 2. Fukada Geological Institute, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University)

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

[S12-02] Constitutive Properties and Frictional Behavior of Simulated Fault Zone of Halite Developed in Granular Medium

*Chengrui Chang¹, Hiroyuki Noda², Gonghui Wang², Tetsuo Yamaguchi¹ (1. Univ. Tokyo, 2. Kyoto Univ.)

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

[S12-03] Investigation of stress field in the north-central Kinki district by dense seismic observation near the active faults

*Toshio TANAKA¹, Yoshihisa Iio², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka² (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Research Center for Earthquake Hazards)

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

[S12-04] Evaluation of the source-location accuracy for AE events occurring in experiments under GPa-order high pressures

*Hironori KAWAKATA¹, Tomohiro Ohuchi² (1. Ritsumeikan Univ., 2. Ehime Univ.)

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

[S12-05] Elastic wave transmission experiment to evaluate the accuracy of absolute AE locations in a cylindrical sample

*Teruki Inanishi¹, Hironori Kawakata¹, Shiro Hirano¹, Masayuki Nakayama¹ (1. Ritsumeikan University)

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

[S12-06] Frictional behavior of clayey gouge at intermediate velocity range

*Hanaya Okuda¹, Takehiro Hirose², Asuka Yamaguchi¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

In-situ stress at the basement under Osaka plain (5) - In-situ stress measurement using rock core samples -

*Kentaro OMURA¹, Akio Funato², Takatoshi Ito³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Earthquake and Tsunami Research Division,
2. Fukada Geological Institute, 3. Institute of Fluid Science, Tohoku University

日本列島の原位置の絶対応力に関するデータ、特に深さ500mを越える深部データは、陸域においても、数少ない状況にあるなか、掘削で採取された既存の岩石コアを用いた地殻応力測定法を適用し、信頼性の高い地殻応力データをはばひろく取得することを目指してきた。本発表では、防災科学技術研究所の、大阪平野にある深層地殻活動観測井における一連の原位置地殻応力測定の結果を報告する。本観測井では、ボアホールテレビュア検層による、ボアホールブレイクアウトの観察から、応力方位を推定し、Funato and Ito (2017, IJRMMS)で設計され、防災科研に整備された装置でコア形状を計測し、コア変形法(DCDA法, Diametrical Core Deformation Analysis法)を適用して応力値を推定した。コア変形法では、地下深部から採取された岩石コアが、応力解放により弾性変形(膨張)することから、その変形量を計測し、岩石の弾性定数と掛け合わせて応力値を推定する。先行研究により、1000mを超えるような深部岩石コアでは、採取後の弾性変形が大きくなり、コア変形法の適用できることが示されている。

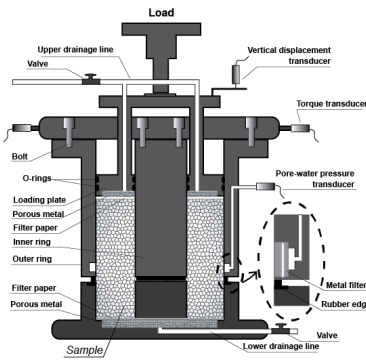
今回の例では大阪府の此花観測井(北緯34°39'45.92", 東経135°23'22.53", 掘削深度約2033m)の基盤に達する深度2035.5mコアと田尻観測井(北緯34°23'52.14", 東経135°17'01.24", 掘削深度約1532m)の同じく基盤となる深度1202.4mおよび1494.8mコアを用いた。採取後、15年以上経過したものではあるが、外周にそって直径がサインカーブ状に変化し、岩石コア断面が応力開放にともない楕円状に弾性変形していることが示され、コア変形法の適用可能と判断した。一方、外周を測った岩石コアそのもの、ないし、隣接する岩石コアを円盤状に切断し、地盤工学会基準JGS 2551-2009「圧裂による岩石の引張り強さ試験方法」に準拠して荷重し、引張破壊に至る前の弾性変形をひずみゲージで計測して、ヤング率とポアソン比を求めた。応力解放に伴う半径方向の弾性変形量と弾性定数をコア変形法の理論式にあてはめて、応力値を求めたところ、60 MPaから100MPaとなる差応力値となった。この値は、近畿周辺における、応力解放法、水圧破碎法等の孔井内原位置地殻応力測定の結果と比べて、大きな値となっているが、栃木県足尾、兵庫県猪名川といった、群発地震の活発な地点における差応力値と同等にもみえる。大きな差応力に意味があるかどうか、さらに周辺の観測井コアのコア変形法による応力値とも比較しながら、考えていく必要がある。一方、ボアホールブレイクアウトから求めた応力方位は、周辺の広域応力方位に整合的で、水平最大圧縮応力方位は、ほぼE-W方向となった。1995年兵庫県南部地震のあと、地震時に活動した野島断層周辺では、地震前後で応力方位が変化する測定例があったが、ここでは、断層からの距離が遠く、有意な方位の変化はみられなかった。本測定例では、岩石コアの採取深度が1000mを越える深部であったことから、コア変形法により有意な応力値が得られ、周辺の応力測定結果とあわせて、広域応力分布について、今後の議論に活用できるものと考えられる。さらに、過去の孔井掘削の岩石コアを活用した原位置応力測定事例の増えることが期待される。

Constitutive Properties and Frictional Behavior of Simulated Fault Zone of Halite Developed in Granular Medium

*Chengrui Chang¹, Hiroyuki Noda², Gonghui Wang², Tetsuo Yamaguchi¹

1. Univ. Tokyo, 2. Kyoto Univ.

Tectonic faults and landslides exhibit an extensive spectrum of velocities. A key motivation of this study is to better understand the physical processes that dictate the slow-to-fast transition of frictional behavior in earthquakes and landslides by combining the friction measurements and microscopic analysis of the experimental fault zone. We simplify the questions as (1) the effect of the comminution rate and segregation of granular material in determining the friction coefficient; (2) the connection between the frictional parameters and the development of shear fabric with the increasing displacement of shear. We employ a unique ring-shear configuration that has a large shear box (18.0 cm in outer diameter, 12.0 cm in inner diameter, and 10.9 cm of available sample height) to contain a larger volume of granular particles than that of conventional rotary or direct shear configurations for fault mechanics. It could produce experimental shear zones of large dimensions at significantly great shear displacements (Figs. a-c). The ring-shear apparatus is in Kyoto University and has been used in studies of landslide behavior. It should be emphasized that a shear zone is developed within the granular medium. In most of the previous friction experiments, a simulated shear zone of a millimeter scale is defined by the amount of gouge sandwiched between hard host rocks and cannot grow to be thicker. We use analog granular materials with two initial size distributions, i.e., coarse and fine halite particles, to examine the constitutive properties and frictional behavior. We vary the total normal stress from 0.2 to 1.0 MPa and the slip rate from about 0.001 cm/s to 10 cm/s for velocity-step tests. We begin with a run-in process for materials to reach a steady state of friction, and a substantial weakening ($\mu \approx 0.4$) is observed at a low slip rate (0.05 cm/s) under higher normal stress (e.g., 0.6 MPa as shown in Fig. d). We stop and hold the tests for about 1,000 seconds and the fine halite weakens rapidly once the shear is resumed. We then perform velocity-step tests and reproduce unstable stick-slip and stable sliding behaviors at relatively low and high slip rates, respectively (Fig. e). The experimental shear zone is observed after the shear test (Figs. b-c). The thickness of the shear zone is tens of millimeters. The thickness of the shear zone is from several millimeters to tens of millimeters and it is larger in coarse granular media. A spring-slider model is used to fit the stable velocity-step tests to obtain the frictional properties in a rate- and state-dependent friction law. Finally, we combine the measurements of frictional parameters, observation of shear zone development, and comminution and packing of particles to dissect the key issue that how they interact and regulate slow and fast motion.



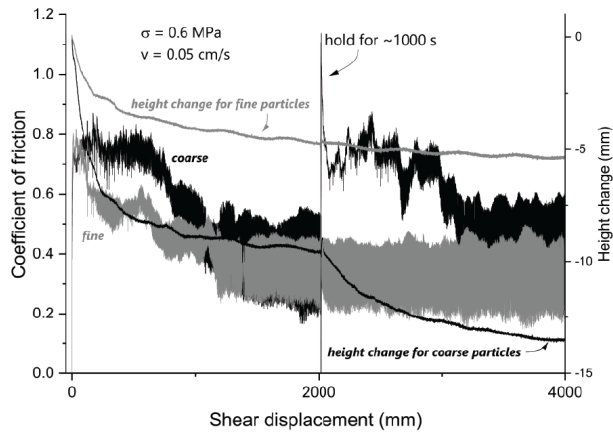
(a) The ring-shear configuration



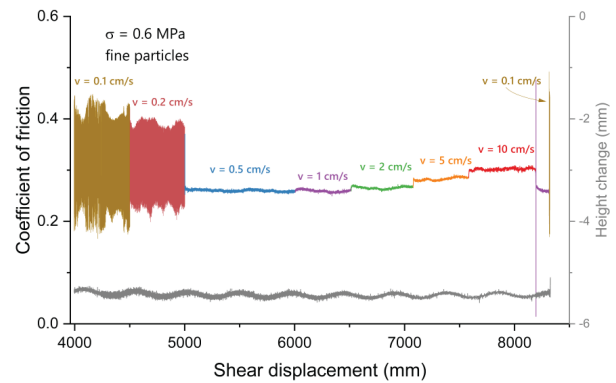
(b) A photo of an experimental shear zone in coarse halite particles (thick)



(c) A photo of an experimental shear zone in fine halite particles (thin)



(d) Run-in phases for two materials under normal stress of 0.6 MPa. We stop and hold the tests for ~1000 s and the fine material shows rapid weakening when the shear is resumed



(e) Results of velocity-step tests on fine particles under normal stress of 0.6 MPa, showing unstable stick-slip and stable sliding

Investigation of stress field in the north-central Kinki district by dense seismic observation near the active faults

*Toshio TANAKA¹, Yoshihisa Iio², Hiroshi Katao², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka²

1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Research Center for Earthquake Hazards

近畿地方の中北部には有馬-高槻断層帯、三峠・京都西山断層帯、三方・花折断層帯、琵琶湖西岸断層帯などの活断層が分布しており、日本で活断層が最も集中している地域の一つである。この地域の応力場の解析は、既に、藤野・片尾(2009)、青木ほか(2012)、飯尾(2021)などによってなされている。西南日本における最大主応力(σ_1)の向きは概ね東西方向(Huzita, 1980)である。近畿地方中北部でも σ_1 はほぼ東西方向を向いている。この地域で走向が東西に近い断層帯としては、右横ずれ断層の有馬-高槻断層帯と左横ずれ断層の三峠断層帯がある。一般走向は、有馬-高槻断層帯はN80°E(地震調査委員会, 2001)、三峠断層帯はN70°W(地震調査委員会, 2005)である。これらの断層帯では、 σ_1 の方位が東西であるならば、横ずれ運動は起こりづらいと思われる。そこで、 σ_1 の方位が地域によらず厳密に一樣であるかどうかを詳細に検討し、その後、 σ_1 の方位と断層の走向の関係を考察した。解析は、近畿地方の中北部の、東西80km、南北90kmの領域で行った。解析に際しては、満点システムと名づけられている稠密観測網(三浦ほか, 2010)および領域内の高感度定常観測点から得られた多数のデータを用いた。2008.11.17~2018.3.29に発生した地震の波形からメカニズム解を求め、応力テンソルインバージョンにより応力場を推定した。グリッドの大きさは、東西、南北各10km、深さ2.5kmとした。深さについては、藤野・片尾(2009)、青木ほか(2012)は約10km、飯尾(2021)は5kmなので、1/4、1/2であり、鉛直方向の変化を詳しく調べる設定とした。有馬-高槻断層帯付近の深さ10kmでは、 σ_1 の方位角の最適解は東方から時計回りに回転していて104°であった。この方位と一般走向とのなす角度は24°であった。また、三峠断層帯付近では σ_1 の方位角の最適解は東方から反時計回りに回転していて81°であり、この方位と一般走向とのなす角度は29°であった。また、断層帯に近いほど回転角が大きい傾向があることもわかった。これらの結果は、解析領域内の応力場は一樣ではなく、横ずれ断層に対して、横ずれ運動を起こしやすい向きに σ_1 は回転していることを示していた。 σ_1 の方位角の回転の原因を解明するために、上部地殻内の脆性断層帯の深部延長として、下部地殻内に延性断層帯が伸びていると仮定し、そこに滑り運動があるとした場合、上部地殻にはどのような影響があるかを調べた。その結果、上部地殻内の断層帯の近くで回転している応力場は、延性断層帯内の滑り運動によって説明が可能であることが分かり、上部地殻の活動は下部地殻の活動と密接に関係していることが示唆された。近畿地方の中北部で、走向が南北に近い断層帯としては、花折断層帯と琵琶湖西岸断層帯がある。この二つの断層帯は近接している。本発表では、花折断層帯付近において、メカニズム解の解析を通して分かった特徴も整理する。

Evaluation of the source-location accuracy for AE events occurring in experiments under GPa-order high pressures

*Hironori KAWAKATA¹, Tomohiro Ohuchi²

1. Ritsumeikan Univ., 2. Ehime Univ.

岩石試料の破壊にともない、微小破壊（アコースティック・エミッション、以下AE）が発生し、その地震との類似性から地震学分野において多くの研究が実施されてきた。マルチアンビル型高圧発生装置を用いたGPaオーダーの高圧力環境においてもAE計測は古くから実施されている（例えばKawakata and Shimada, 1995）。高圧試験はやや深発地震の理解の深化に貢献すると考えられることからAE解析の高度化は重要な課題であるが、一般的な液体圧、ガス圧の三軸試験に比してデータの取り扱いに注意を要する。

第一にマルチアンビル型高圧発生装置は固体媒体によって圧力をかけるため、試料に直接トランスデューサを貼り付けることはできず、圧媒体の外に配置される6個のアンビル背面に貼り付けて計測する。すなわち、AEシグナルは試料内部、圧媒体、アンビルを伝播してから記録される。第二に試料の大きさが直径5 mm弱、高さ10 mm弱と非常に小さいことも特徴である。一般的な圧電素子タイプのトランスデューサ、広帯域型のトランスデューサ（川方・大内, 2021）問わず、受感面の直径は4 mm以上であるため、試料の大きさ、すなわちAEの震源域に対して受感面の大きさが無視できない。圧電素子を用いた10 Mspsでの計測による震源位置決定がde Ronde et al. (2007; GJI)によって実現されたが、試料内外に震源が分布する結果となっている。時間分解能、トランスデューササイズ、伝播経路の複雑さなどを考慮するとその精度評価は必須であるが、これまで高圧試験において震源位置精度の評価は実施されていない。

そこで本研究では、沈み込むスラブ内浅部の温度圧力条件下（1-2 GPa, 400-900°C）での実験が可能な愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター所有のD-DIA型超高圧変形装置 Madonna I を利用し、AEの震源位置の推定精度の評価をおこなう。評価は、仮想震源をコンピュータ内で再現してその計算走時を利用して実施する数値実験と、疑似試料として石英ビーズを充填させた円柱カプセルを用いて静水圧化で発生させたAEシグナルを利用して実施する計測実験の2種類でおこなわれた。

試料は直径3 mm、高さ5.5 mmであり、圧媒体は封圧下において約9 mmの立方体形状をしている。アンビルにはトランスデューサ貼り付け用の細工を施し、試料中心から22.55 mm離れた位置にトランスデューサが配置させる。試料内の弾性波速度は8000 m/s程度であるため、信号計測のサンプリング周波数は100 Mspsとすることで、1サンプル以内の伝播距離を0.1 mm弱とした。

数値実験においては、仮想震源を試料内部に配置させ、トランスデューサは直径6 mmに設定し、受感面の中で最も早く波が届く点までの経路長をもとに走時を計算した。計算された走時に乱数的な揺らぎを与えて到達時刻データとして、受感面中心を受振点座標として震源決定を実施した。構造を単純化させ一様構造を仮定すると、トランスデューサの大きさを経路長に反映させても読み取り誤差がない場合には、震源位置のずれはほとんど認められなかった（図1a）。これはトランスデューサを試料から20 mm近く離れた位置に配置していることで受感面の大きさの影響が低減されていることに起因していると推察される。±5サンプル以内の一様乱数で読み取り誤差を加えた場合には1 mm未満の震源のずれが見られた（図1 b, c）。

計測実験においては、1台のトランスデューサが不調であったため、5つしか使用することができず、一様構造を仮定した場合、震源位置のばらつきが大きく、試料外に推定されるものも一定数見られた。そこで使用するトランスデューサを5つに減らし、標準偏差10サンプルの正規乱数で読み取り誤差を加えた場合の数値実験を実施した結果、推定誤差が1 mmを超えるものも見られ、試料中央付近に仮想震源を設定したにもかかわらず、試料外に推定される震源も見られた。試料が非常に小さいため、読み取り精度を上げることは非常に重要であり、絶対精度、相対精度ともに向上させる取り組みが必要である。本発表では構造の影響についても触れる予定である。

謝辞：本研究はJSPS科研費 JP19H00722の助成を受けたものである。

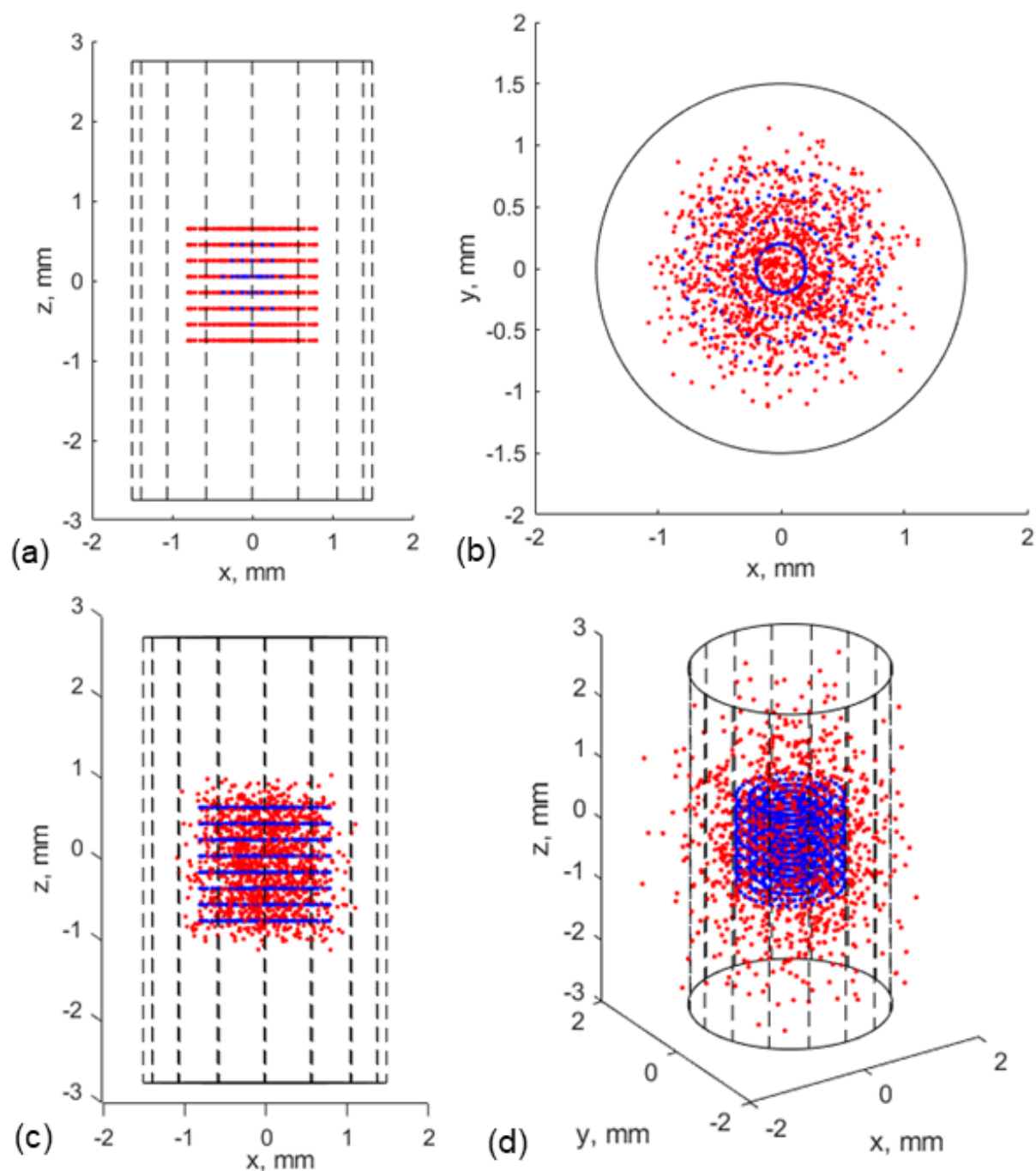


図1. 仮想震源（青点）からの計算走時から推定された震源位置（赤点）. (a)読み取り誤差を与えなかった場合の側面投影. (b) ± 5 サンプル以内の一樣乱数で読み取り誤差を加えた場合の上面投影. (c) ± 5 サンプル以内の一樣乱数で読み取り誤差を加えた場合の側面投影. (d)使用するトランスデューサを5つに減らし、標準偏差10サンプルの正規乱数で読み取り誤差を加えた場合の斜方投影.

Elastic wave transmission experiment to evaluate the accuracy of absolute AE locations in a cylindrical sample

*Teruki Inanishi¹, Hironori Kawakata¹, Shiro Hirano¹, Masayuki Nakayama¹

1. Ritsumeikan University

§はじめに

地震について理解するために岩石を用いた室内実験は古くから行われてきた（例えば、Mogi, 1962）。圧縮破壊実験では、自然地震に比べると規模ははるかに小さいが、震源近傍の媒質の弾性特性等の時間変化を観測できる点や、地震の疑似現象としてのせん断破壊の一生を一般的な自然地震の発生周期に比べてはるかに短い期間で観察できる点が特徴として挙げられる。また、破壊の進展を制御することが可能（例えば、Lockner et al., 1991; Yoshimitsu et al., 2009）であり、自然地震では観察することが困難な岩石の破壊面の観察（例えば、Moore and Lockner, 1995）や、X線CTスキャンを用いた岩石内部の状態の観察（例えば、Kawakata et al., 1999）等を容易に行うことが出来る。Yoshimitsu et al. (2014)は円筒形のWesterly花崗岩を用いた破壊実験を行い、6794個のAEの震源決定を行うとともに、地震モーメントとコーナー周波数を推定し、自然地震との類似性を示した。

断層に相当する破壊面及びその周囲でどのように微小破壊が発生するかを、震源分布の時空間発展から調べることは破壊準備や進展について理解する上で非常に重要であり、破壊進展との関係を調べるためにはAE震源の絶対位置精度についても評価する必要がある。しかし、先行研究においてAE震源の絶対位置精度については議論がなされていない。天然試料内に震源を設置し、震源決定を行う事は困難であるが、アナログ試料であれば作成が可能であり実験を行うことが出来る。そこで、本研究では円筒形のアナログ試料内に震源を埋設して弾性波透過実験を行い、AE震源の絶対位置精度を評価した。

§実験方法

アナログ試料としてモルタルを使用して成型することで、試料内部に震源を設置することが可能となる。しかし、一般的なPZT素子は直径5 mm程度以上あり試料内に埋め込むと試料に対して震源が大きすぎるため適切な評価が実施できない。そこで、本研究では、太さ1.45mmの釘を試料内に埋設し、釘の頭部にPZT素子を貼り釘の先端から弾性波を放射することで、釘の先端部が震源として推定されるか検証した。しかし、釘の全体がモルタルに埋まっていると、釘全体が震源となってしまうため、ストローの中に釘を通し、釘の先端以外はモルタルに接触していない試料を作成した。この際、ストローの先端にはパテを詰めることで、モルタルがストロー内を逆流して釘の先端以外がモルタルに埋設されてしまうことを防いでいる（写真1）。このようにして、釘の先端2 mmが試料中心付近に埋設されている円筒形試料（直径51.3 mm、高さ93.4 mm）を作成した（写真2）。図1に予備実験の際に使用した試料のCT画像を示した。ただし予備実験では、太さ2.7 mmの釘を使用した。

弾性波計測には、センサとして広帯域トランスデューサを8つ(TR1~TR8)使用し、試料の側面にエレクトロンワックスで貼り付けた。釘頭部のPZTに矩形の電気信号を繰り返し与えて弾性波を放射し、サンプリング周波数は20 Msps、スタック回数は400回で記録した。

§結果

予備実験として試料表面に配置したトランスデューサのひとつを震源とした弾性波透過試験を実施してP波速度を推定した結果、3700 m/sであった。P波速度、センサ座標、初動到達時刻から、震源決定を行った（図2）。ジャックナイフ法により、震源決定に使用するセンサを8つ、7つ、6つのすべての組み合わせとして合計で37通りの震源を求めた。TR2とTR6を除いた6つのセンサで震源決定を行った場合のみ、釘の先端から大きく外れた震源決定結果となった。これは、TR2とTR6を除いたことにより、x軸方向正かつy軸方向負の位置と、x軸方向負かつy軸方向正の位置にセンサがなくなり、センサ配置に偏りが出来たことによると考えられる（図2右）。TR2とTR6以外の6センサから求めた値を除いて推定された36通りの結果において、釘の埋設し

ている部分の中心部からx方向へのずれの平均は0.6 mm, 標準偏差は1.2 mm, y方向へのずれの平均は-0.6 mm, 標準偏差は1.2 mm, z方向へのずれの平均は-0.6 mm, 標準偏差は0.7 mmとなった。震源分布は, x方向には系統的に正に, y方向z方向には系統的に負にずれた結果となった。また, x方向y方向へのずれの標準偏差は釘の太さよりも大きい結果となり, z方向へのずれの標準偏差は釘の埋設部より小さい値となったが, センサ配置に大きな偏りがない限りは, 真の震源に対して数mm以内に震源が推定できることが分かった。

謝辞：本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の支援を受けた。

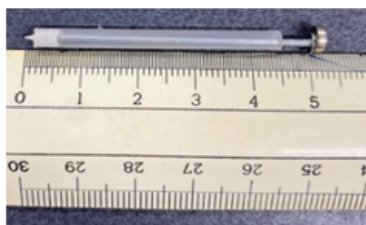


写真1 ストローに釘を通し
先端にパテを詰めたもの

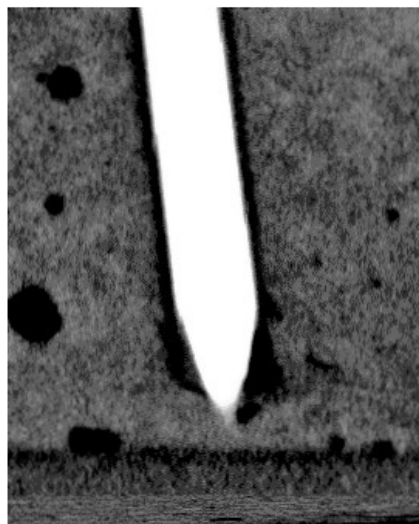


図1 予備実験で作成した試料のCT画像を拡大した図
白い部分が釘を表し、黒い部分が空洞、
灰色の部分がモルタルを示している。



写真2 モルタルで作成した円筒形試料

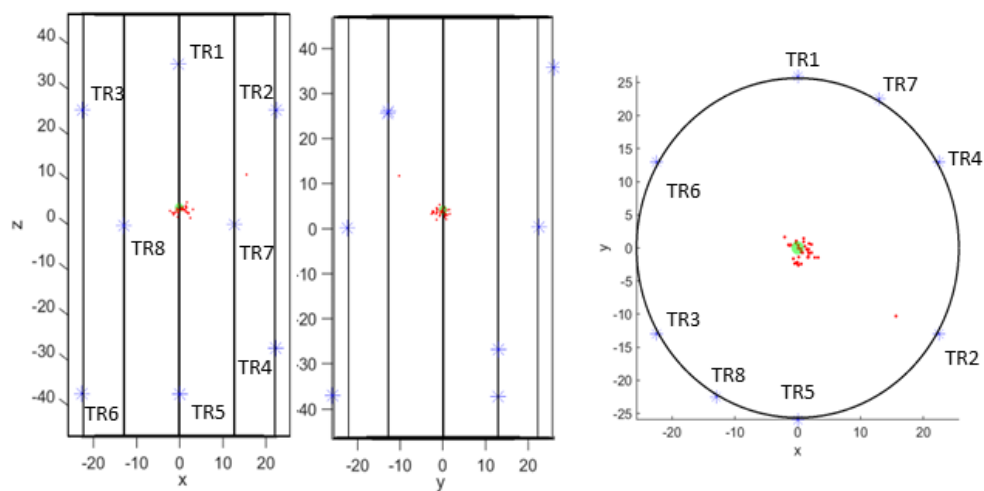


図2 トランスデューサを青米印、釘の埋設部の中央を緑丸、震源決定結果を赤点で示した。
(左) $x-z$ 平面 (中) $y-z$ 平面 (右) $x-y$ 平面に投影したもの

Frictional behavior of clayey gouge at intermediate velocity range

*Hanaya Okuda¹, Takehiro Hirose², Asuka Yamaguchi¹

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, 2. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

粘土鉱物は摩擦係数が低く、沈み込み帯にも多く存在することから、沈み込み帯における断層挙動の議論に粘土鉱物の摩擦特性の理解は不可欠である。しかし、粘土鉱物を含む断層ガウジの摩擦挙動は中速度条件では十分に理解されておらず、そのような断層におけるすべりが高速すべりに移行するか、もしくは低速すべりに留まるかはよくわかっていない。そこで本研究では、石英-スメクタイト混合物および火山ガラス-スメクタイト混合物のガウジに対して、有効垂直応力5–12.5 MPa、流体圧10 MPaまたは窒素ガス乾燥条件、すべり速度10 $\mu\text{m/s}$ –3 mm/sで摩擦実験を行い、その滑り挙動と地震との関連性を検討した。その結果、粘土を少量（～15%）含むガウジの定常摩擦強度は、流体圧存在下かつ0.1–3 mm/sの速度条件において急激に低下することがわかった。また、すべり速度を下げると摩擦強度は指数関数的に低速度条件での摩擦強度への回復を示し、これらの弱化および強化に要したすべり距離は約0.1 mであった。このような摩擦強度の急激な変化は、粘土鉱物が含まれていない場合や乾燥した系では観察されなかった。したがって、流体存在下における粘土鉱物の存在がこの挙動の鍵を握っていると考えられる。なおガウジ近傍の温度測定や、有限要素法による熱拡散・流体拡散のモデリングからは、摩擦熱による流体圧の上昇は摩擦強度に影響していないことが示されている。発表では、観測されたすべり挙動の物理的背景と、断層すべり力学への影響について議論したい。

Poster session (1st Day) Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity
--

🗓 Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 12:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:30 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-1
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S03P] AM-P

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

[S03P-01] Trial of an assessment method of crustal deformation

*Hisao Kimura¹, Akio Kobayashi¹, Takeyasu Yamamoto¹, Takahiro Tsuyuki¹ (1. Meteorological Research Institute)

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

[S03P-02] Three dimensional distribution of fault slips and density structure at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Koji MATSUO¹, Ryosuke ANDO², Takayuki NAKANO¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo)

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

[S03P-03] Crustal deformation associated with an earthquake swarm in the Noto Peninsula based on combined analysis of multiple GNSS networks

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku Ohta³ (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

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

[S03P-04] Detection by network inversion filter of long-term and short-term slow slip events, using a very dense GNSS Network in Shikoku, Japan, during 2018–2022

*Shinzaburo Ozawa¹, Hiroshi Munekane¹ (1. Geospatial Information Authority of Japan)

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

[S03P-05] Slow-slip events of one-hour duration (2)

*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵ (1. Univ. of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.)

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

[S03P-06] Recent GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations off Tohoku and their results

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Chie Honsho³, Ryota Hino³, Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁴ (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Tokyo university of Marine Science and Technology)

Trial of an assessment method of crustal deformation

*Hisao Kimura¹, Akio Kobayashi¹, Takeyasu Yamamoto¹, Takahiro Tsuyuki¹

1. Meteorological Research Institute

気象研究所では、地震活動の状況把握と推移予測を行うため、地震・地殻変動データの解析に基づいた地殻活動状態の指標化を目指している。この解析結果の地域特性・時間変化の特徴を調査し、最終的には現在の地殻活動の異常度を判定し、発生した地震の評価や今後の推移予測を目的としている。地震活動の指標化については、永田・他（2022, JpGU）により、規模別頻度分布・潮汐相関・地震活動度に基づいた指標値が提案されている。本発表では、地殻変動データを用いた指標値の検討状況について報告する。

地殻変動データを用いた地震活動予測としては、Nishimura（2022）による先行研究があるが、これは2005年4月から2009年12月までの期間のデータを定常状態と考え、今後の内陸地震の起こりやすさを評価する“time-independent”なものであった。ここでは、地殻変動の時間変化に注目し、定常状態からのずれと地震活動との関連性について調査したい。

地殻変動データは国土地理院のGEONET F5解日座標値を使用し、アンテナ交換等によるオフセット（岩下・他、2009）及び地震によるステップを除去した。さらに短期的な共通ノイズを各観測点の30日移動平均からの残差を求め、その平均値を差し引くことで除去した。速度は単純な階差で1か月毎に算出し、Shen et al.（1996, 2015）の手法を用いてひずみに換算した。解析期間は、永田・他（2022）との比較のため、2000年1月から2021年8月までとし、ひずみ算出のグリッド間隔も0.2°とした。

このように算出したひずみ場の時間変化から、定常的な地殻変動からのずれを検出できるかを検討した。また、観測点速度の算出については、Yokota et al.（2021）で議論されているように期間と精度にトレードオフ関係があるが、速度の算出法を変えてどの程度結果に影響があるかも検討した。本発表では、いくつかの特徴的な地域について調査した結果を紹介したい。

Three dimensional distribution of fault slips and density structure at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*Tomokazu KOBAYASHI¹, Koji MATSUO¹, Ryosuke ANDO², Takayuki NAKANO¹

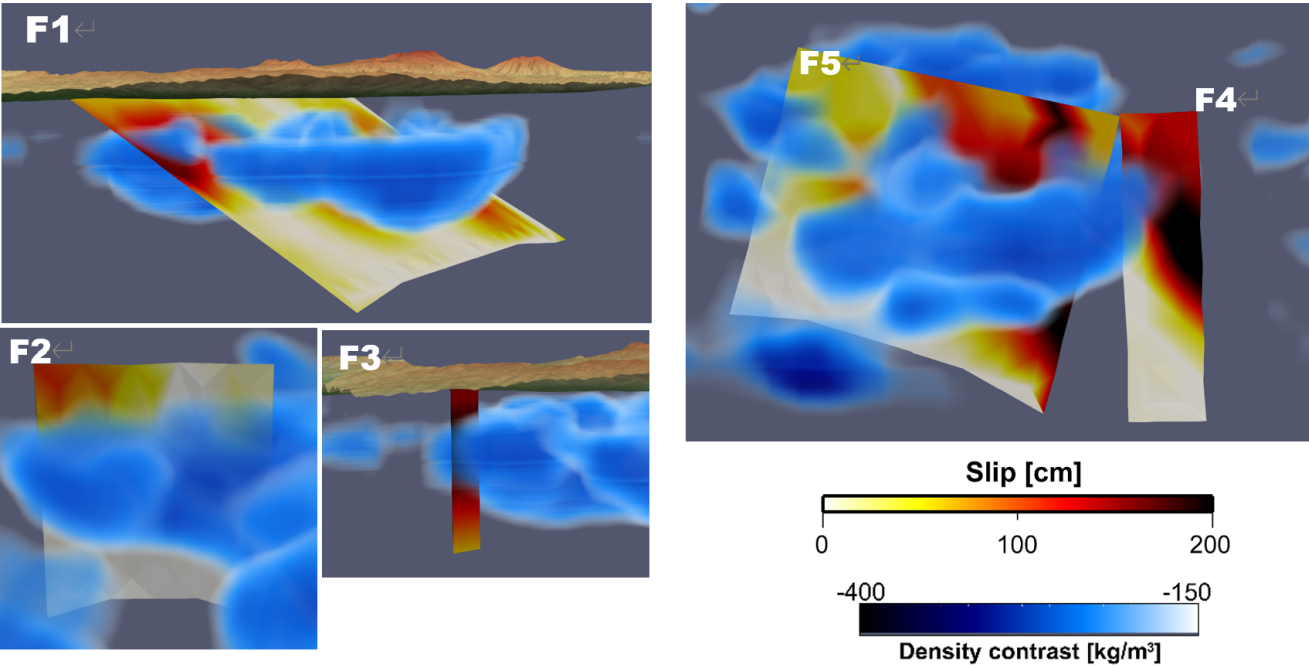
1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo

1. はじめに 本研究の目的は、断層破壊の終端部及びその周辺に特徴的な地殻構造が存在するかを調べ、断層破壊の終焉を制御する要因について議論することにある。この目的のために、本研究では、2016年熊本地震を対象に、SARによる地殻変動から推定される断層運動の詳細と重力によって推定される地殻構造との間の空間的関係を調査してきた。本発表では、これまでの計算で得られてきた断層すべりと密度構造の3次元分布を詳細に示し、両者の位置関係を明らかにする。

2. データと解析 ALOS-2衛星のSARデータを用いた解析により震源領域における変動場を獲得した。さらに、複数の軌道データから得られた変動データを用い、最小二乗法により上下、東西、南北3成分の地殻変動を得た。得られた地殻変動データを用いて断層モデルの推定を行った。日奈久断層、布田川断層沿いに加えて阿蘇カルデラ内に見られる断層運動と推察される変動に対応した断層面を設定し、計9枚の断層面の傾斜やすべり量を推定した。まず初めに、Simulated Annealing (SA) 法により断層面の形状を推定し、さらにSA法で得られた断層面を基に各断層面のすべり分布を推定した。続けて、重力データを用いた密度コントラスト構造の推定を行った。解析には、既存の重力データとキャンペーン重力観測(60点)を用いたインバージョン解析により地下の密度構造を推定した。完全ブーグ重力異常を得た後、重力インバージョン解析によって地下の密度コントラストを推定した。密度構造は、平行六面体の質量塊の引力を応答関数とし、密度コントラストを推定パラメータとする重み付き最小二乗法により3次元的に推定した。

3. 結果 地殻変動の解析から、断層運動起因と推定される変位境界が、布田川断層の東部延長上に伸展して、阿蘇カルデラ西縁部で主に2方向に分岐していることがこれまでの研究で認められている。このうち、布田川断層の延長上で右横ずれを示す断層をF1とする。一方の分岐断層は、分岐直後、約2kmの変位不連続を伴う東西走向の断層運動を示すが、その後東南東方向に走向を変化させる。ここでは、東西走向の断層をF4、その後をF5とする。このほかに、カルデラ内ではF1の走向にほぼ並行で右横ずれを示す局所的な断層であるF2、F3が認められる。図は、これら断層面上のすべり分布を推定し、密度コントラスト構造との位置関係を3次元的に示したものである。Paraviewソフトウェアを使用して3次元表示をした。F1のすべりは断層面の西端の浅部に集中している。布田川断層からすべりが進展してカルデラ内に貫入したところであるが、低密度領域に貫入したところですべりが止まり、それ以上浅部でのすべりは進展していかないことが分かる。F2についても浅部にすべりが集中しているが、ちょうど同じ深さに広がる低密度領域に貫入したのちすべりが止まりそれ以上進展していかないことが分かる。F3も同様であり、低密度領域の先端部に貫入した直後にすべりは止まっている。一方の分岐断層であるF4、F5も同様である。F4では西側から進展してきたすべりが低密度領域の中に接触したところで東西走向のすべりが止まり、F5のすべりに移るが、そのF5のすべりは低密度領域に貫入しその後止まる様子が分かる。

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



Crustal deformation associated with an earthquake swarm in the Noto Peninsula based on combined analysis of multiple GNSS networks

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku Ohta³

1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University

はじめに

能登半島の石川県珠洲市の地殻内では、2018年頃から地震回数が増加傾向にあり、2020年12月からは活発な地震活動が2022年7月現在まで継続している（地震調査委員会, 2022）。2022年6月19日にはM5.4の地震が発生し、最大震度6弱を記録した。地震活動の活発化とともに、周辺の国土地理院の電子基準点において、震源域から遠ざかる向きの地殻変動が観測されている（国土地理院, 2022）が、有意な変動を示す観測点は3点のみであり、地殻変動の全体像は十分明らかにしていない。京大防災研と金沢大学では地震活動の活発化を受けて、群発地震震源域近傍に臨時GNSS観測点を設置し、観測を行なっている。また、ソフトバンク株式会社（以下、ソフトバンク）では、全国3,300点を超える独自のGNSS観測網を設置、稼働させており、これらのGNSS観測網で得られたデータを統合解析することによって、地殻変動の全体像が把握できることが期待される。本研究では、GNSSデータの統合解析によって得られた地殻変動の特徴とその変動源モデルの推定結果について報告し、群発地震との関係について考察を行う。

データ解析手法及び観測された地殻変動

本研究では、各機関からRINEXデータの提供を受けて、GipsyX Ver 1.4（Bertiger et al., 2020）の精密単独測位法を用いてITRF2014準拠の日座標値を計算し、地殻変動の解析を行った。解析に用いた観測点数は、ソフトバンク15点、国土地理院GEONET11点、大学6点である。群発地震発生以前のデータが十分あるGEONET観測点データに対しては、群発地震前の日座標値に対して、定常変動や東北沖地震の余効変動、季節変動成分を関数フィティングによって除去し、非定常地殻変動を抽出した。また、ソフトバンクと大学の観測点に対しては、GEONET観測点での群発地震前2年間の速度をOkazaki et al.(2021)の方法で各観測点位置での速度に補間して差し引くことにより、非定常地殻変動を抽出した。非定常地殻変動は、群発地震の震源域を中心として放射状に広がっており、震源域周辺では顕著な隆起も観測され、約1.5年間での最大隆起量は6.5cmに達している。

変動源モデルの推定及び考察

2021年2月から2022年2月までの1年間の変位3成分をデータとして、開口割れ目を仮定してそのパラメータをMatsu'ura and Hasegawa(1987)の非線形インバージョンにより推定した。その結果、4つの群発地震のクラスターのほぼ中央の地震が少ない領域に、上端深さ約14kmで西南西に約30度傾斜する開口割れ目が推定された（図）。体積変化量は $2.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ となる。開口割れ目以外に球状圧力源や南東傾斜の逆断層を仮定しても、ある程度データを説明するモデルを作成することは可能であるが、開口割れ目によるクーロン応力（ ΔCFS ）の増加域が群発地震の震源分布と対応することから、対局的には何らかの流体がシル状に地殻内に貫入していると解釈した。活動開始からの1.5年間での体積変化量は $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ に達するが、2020年12月からの3ヶ月程度においては、変動源の位置が上記の推定位置よりも南西側に推定されることから、変動源が移動、拡大している可能性も示唆される。

謝辞：本研究で使用したソフトバンク独自基準点の後処理解析用RINEXデータは、ソフトバンク株式会社・ALES株式会社より東北大学大学院理学研究科が提供頂いたものを使用しました。国土地理院の電子基準点RINEXデータ、気象庁一元化震源データを使用しました。京都大学及び金沢大学のGNSS観測点の設置にあたり、珠洲市教育委員会、珠洲市企画財政課、珠洲市産業振興課、珠洲市総務課、能登町教育委員会及び奥能登国際芸術祭実行委員会にお世話になりました。ここに記してこれらの機関に感謝いたします。

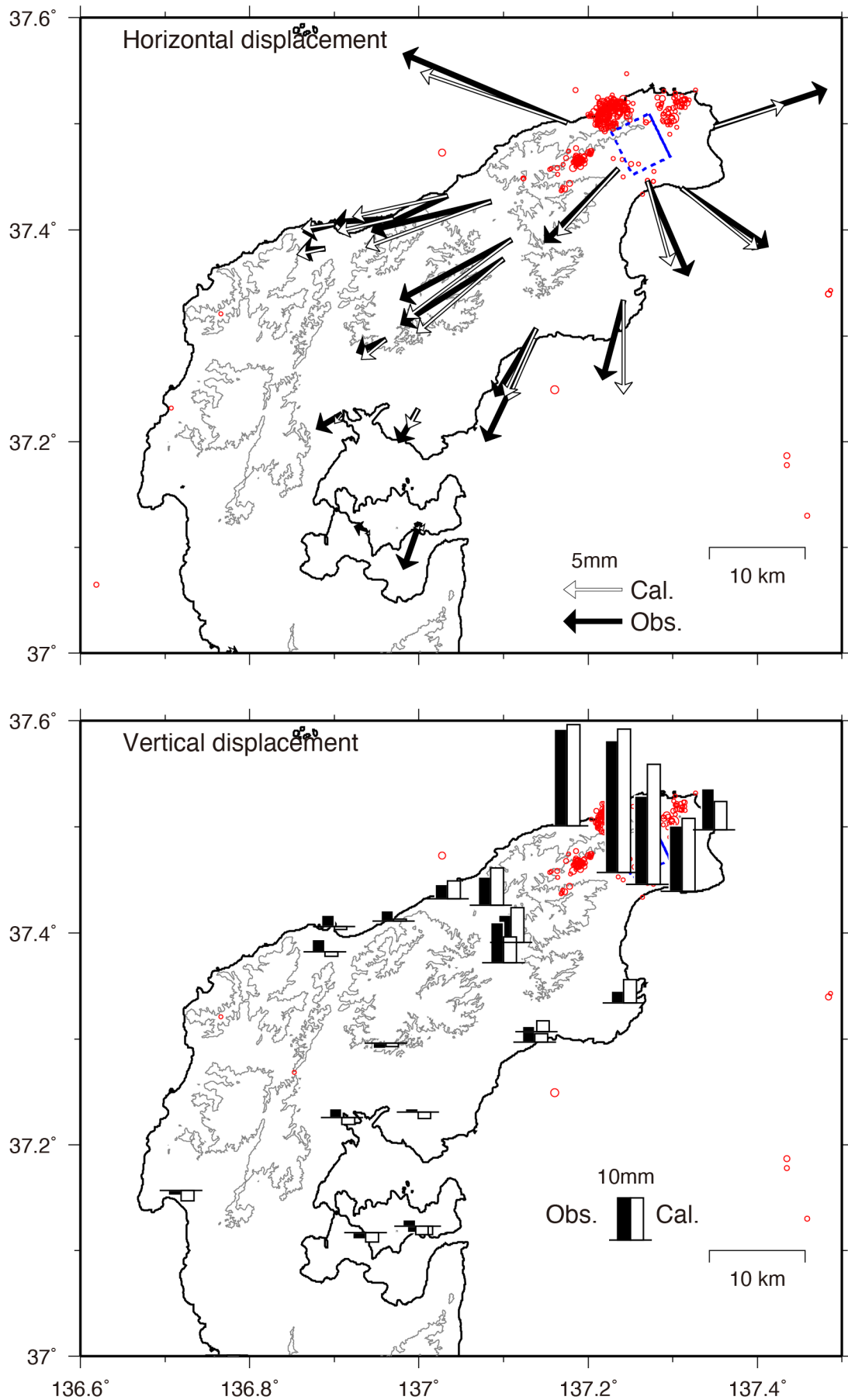


図 2021年2月から2022年2月までの非定常地殻変動と開口割れ目を仮定した変動源モデル。青の矩形領域は推定された開口割れ目の位置，赤丸は気象庁一元化震源。

Detection by network inversion filter of long-term and short-term slow slip events, using a very dense GNSS Network in Shikoku, Japan, during 2018–2022

*Shinzaburo Ozawa¹, Hiroshi Munekane¹

1. Geospatial Information Authority of Japan

要旨 2018年以降のGNSS観測データを使用し、四国域の長期的・短期的SSEを推定した。その結果、2018年10月頃から2019年8月頃にかけて、豊後水道域で長期的SSEが発生し、2019年初めころから四国中部で長期的SSEが発生し現在も継続していること、紀伊水道で、2019年4月頃から2022年1月頃まで継続し、その後鈍化していることが示された。短期的SSEは、2018年以降14回検出されている。短期的SSE領域は低周波微動域と調和的で、一部の短期的SSEでは、滑り域の移動が明瞭に見られた。はじめに豊後水道では5～6年ほどの周期で繰り返し長期的SSEが発生してきた。四国中部では1977-1980年に水準測量の結果から長期的SSEの発生が推定されている。紀伊水道の長期的SSEは、1996, 2000, 2016年に発生している。そのような中、2018年10月頃から豊後水道周辺で遷移的な地殻変動が発生し、四国中部で2019年初めころから豊後水道SSEに伴う地殻変動と異なった遷移変動が発生している。紀伊水道では、2019年4月頃から遷移的な変動が発生している。本研究では、GNSSで観測された地殻変動のデータから、四国域の長期的・短期的SSEの検出を行った。解析手法 GNSSによる、観測点の座標時系列から、年周、半年周成分を三角関数の重ね合わせで推定し、元の座標時系列からとり除いた。周期成分を取り除いた時系列から一次トレンドを除去している。一次トレンドは、2017年1月～2018年1月までで推定している。このようにして得られた東西、南北、上下の座標時系列データを用いて時間依存のインバージョン解析を四国域に関して行った。観測点は南海トラフ域の観測点約140点を使用した。弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状を三角形要素で表して解析に使用している。グリッド間隔は、20-40km程度としている。プレート境界面上のすべりの方向はプレート収束方向になるように拘束をかけた。結果と考察 2018年10月頃から2019年8月頃にかけて豊後水道でSSEが発生している。豊後水道SSEと同時期に四国中部でSSEが発生し、2022年7月まで継続している。豊後水道SSEはMw7.0、四国中部SSEはMw6.5程度と推定された。豊後水道SSEはおおよそ5～6年周期と調和的で、四国中部は、1977-1980年に発生し、2013年に発生しているが、その繰り返し間隔はあまり周期的でないように見える。紀伊水道のSSEは、2019年4月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。繰り返し間隔ははっきりしないように思われる。短期的SSEは2018年以降14回検出された。検出された短期的SSEは低周波微動と調和的であった。短期的SSEの幾つかには滑り域の移動が見られた。低周波微動と短期的SSEの時空間変化の相関を詳細に調べることで、低周波微動と短期的SSEの物理的な関係がより明瞭になることが期待される。

Slow-slip events of one-hour duration (2)

*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵

1. Univ. of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.

(1) はじめに

継続時間約1時間のスロースリップ(以後1時間SSE)現象について調査している。用いているのは、犬山観測点(名古屋大・東大地震研究所)及び天竜船明観測点(気象研究所)に設置されているレーザーひずみ計と気象庁・産業技術総合研究所が設置しているボアホール型多成分ひずみ計のデータである。1時間SSEは、短期的スロースリップ発生中の一時的なすべり速度増加現象と見られる(例えば、勝間田・他, 2021)。これまでのところ、見つかっている1時間SSEの規模はMw5前後の値となっている。これはIda et al.(2007)によって提唱されたスロー地震のスケーリング則に調和的である。

(2) 方法と結果

短期的SSEの発生期間中のデータについて、宮岡・横田(2012)によるスタッキング手法によりS/Nを向上させたデータを用いた。スタッキング法においては、断層位置・すべり方向を仮定して、ノイズレベルに基づいて重みをつけて複数観測点のデータを足し合わせた。なお、検出された信号のレベルはノイズに比べて明確に大きなものでなく、降雨のある期間ではその影響により1時間SSEは検出困難である。スタッキングしたデータとランプ関数との間で相関係数が高くなる部分について、そのステップ量からの規模推定、ソースの位置推定などを行った。ソースの位置推定は、露木・他(2017)と同様の決定係数に基づく方法を用いた。ランプ関数との相関係数が高く、ひずみにステップ状の変化が認められる場合でも、ソースの位置推定が困難な場合があり、そのような場合には実際の現象ではない可能性が高いと考えた。

2015年から2020年まで解析した結果において、もっとも明瞭に認められる1時間SSEは2019年2月3日～6日に発生した短期的スロースリップ発生した現象である(図参照)。このイベント中では短期的SSE発生中に3回の1時間SSEの発生が認められる。3回のイベントの発生位置はほぼ同じ場所に求められている。2019年2月の他にも1時間SSEと見られる現象はあるが、必ずしも2019年2月ほど明瞭ではなかった。S/Nが十分な1時間SSE現象が起きる頻度は、あまり大きくないのかもしれない。

Recent GNSS-Acoustic seafloor geodetic observations off Tohoku and their results

*Fumiaki TOMITA¹, Motoyuki Kido¹, Takeshi Iinuma², Yusaku Ohta³, Chie Honsho³, Ryota Hino³, Tetsuo No², Kazuo Nakahigashi⁴

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science, Tohoku University, 4. Tokyo university of Marine Science and Technology

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）では、宮城県沖のプレート境界浅部まで達する巨大な断層すべりが発生し、地震後には主に余効すべりと粘弾性緩和による顕著な余効変動が生じている。陸上の地殻変動観測に加え、GNSS音響結合方式による海底地殻変動観測（GNSS-A観測）により、余効変動の空間パターンが明らかになってきている（e.g., Honsho et al., 2019; Watanabe et al., 2021）。

東北大学では、2012年に20点のGNSS-A観測点を東北沖に設置し、観測を実施しており、2016年9月までは各観測点で年に1～2回程度の船舶を海上プラットフォーム（海上局）として活用したキャンペーン観測を実施しており、その観測成果はHonsho et al. (2019)にまとめられている。それ以降は、船舶の運用コストの問題で高頻度の観測は実施できない状態となっていた。しかし、2019年より波の力により無人で航行可能なウェーブグライダーを海上局として運用する試みを開始し（Iinuma et al., 2021）、2020年以降は多観測点を巡る運用を年に2回実施することに成功している。ただし、ウェーブグライダーは海流の強い海域での運用が困難であるため、黒潮続流の影響の無い宮城県沖以北の観測点でしか運用できておらず、茨城・福島県沖の観測点については、従来通り船舶を海上局とした観測を実施している。しかし、共同利用の船舶や傭船以外にも、船底に海底地殻変動観測用の音響トランスデューサーを装備したJAMSTECのかいめいや東京海洋大学汐路丸での協力観測を仰ぐ体制が整い、船舶での観測も補強されつつある。本発表では、2022年7月までに実施したウェーブグライダーおよび船舶を用いたGNSS-A観測成果について紹介する。

上記の観測データを解析し、各観測点での水平・上下変位を推定した。地震時の主破壊域に位置する宮城県沖の観測点は、概ね2016年9月までの変動の傾向に沿うもの粘弾性緩和によると考えられる西向きの変動が得られた。この変動は時間変化が小さく、時定数の長い粘弾性緩和の影響であることが示唆される。また、宮城県沖では海溝近傍まで沈降傾向が見られているが、こうした変動は既存の粘弾性緩和モデル（e.g., Sun et al., 2014）では説明できない。そのため、GNSS-A観測で得られた上下変動も踏まえた粘弾性緩和モデルの改訂が必要であると考えている。岩手県沖・青森県沖の観測点は、宮城県沖に比べ変動量が小さいが、近年では西向きの傾向が強くなっている様子が見られ、余効すべりの減衰等によりプレート間固着や粘弾性緩和の影響が現れていると考えられる。福島・茨城県沖の観測点は、2016年9月の観測までで見られていた余効すべりの影響と考えられる東向きの挙動が概ね収束している様子が見られた。これらの結果は、余効変動モデルの改訂や今後のプレート境界での歪み蓄積の把握につながるものであると考えられる。

本稿の執筆時点では、2022年5-7月に実施したウェーブグライダーによる観測成果は海中音速の水平成層構造を仮定した手法により解析した暫定的なものである。本発表では、観測データの精査と海中音速の水平不均質を考慮した解析を行い、より確度の高い推定結果を報告する。

参考文献

Honsho et al. (2019), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135

Iinuma et al. (2021), Frontiers in Earth Science, 9:600946, doi:10.3389/feart.2021.600946

Sun et al. (2014), Nature, 514, 84-87, doi:10.1038/nature13778

Watanabe et al. (2021), Earth, Planets and Space, 73:162, doi:10.1186/s40623-021-01487-0

Poster session (1st Day) Regular session : S01. Theory and analysis method
--

🗓 Mon. Oct 24, 2022 3:30 PM - 6:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 6:30 AM - 9:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-1
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S01P] PM-P

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-01] Antipodal seismic observation and sensitivity kernel for liquid region on the top of the Earth's Inner Core

*Seiji TSUBOI¹, Rhett Butler² (1. JAMSTEC, 2. University of Hawaii at Manoa)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-02] On the resolution matrix of the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-03] Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust (2)

*Jun Kawahara¹, Kazuki Kidoguchi¹, Takahiro Shiina² (1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-04] A trial application of the real-time tsunami forecasting by means of and adjoint-equation based wavefield estimation

*Takuto MAEDA¹ (1. Hirosaki University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-05] Characteristics of strain envelopes of scattered waves propagating in the 2D random heterogeneous medium

*Kentarō Emoto¹ (1. Kyushu University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-06] Effects of a seawater and sediment layers on seaquake amplifications on and under the sea surface

*Takeshi NAKAMURA¹, Hiroshi Takenaka² (1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-07] Features of Time-series of Real-time Seismic Intensity at MeSO-net Station

*Hisahiko KUBO¹, Kaoru SAWAZAKI¹, Lina YAMAYA¹, Takeshi KIMURA¹ (1. NIED)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-08] Spatiotemporal Characteristics of Autocorrelation Functions from Seafloor Ambient Noise Records at Hyuga-nada

*Yasunori SAWAKI¹, Yusuke Yamashita², Shukei Ohyanagi¹, Emmanuel Soliman Garcia², Masanao Shinohara³, Yoshihiro Ito² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S01P-09] Large site amplification factors observed not only along the Sea of Japan but also along the Sea of Okhotsk in the northern part of Hokkaido

*Atsushi NOZU¹ (1. Port and Airport Research Institute)

Antipodal seismic observation and sensitivity kernel for liquid region on the top of the Earth's Inner Core

*Seiji TSUBOI¹, Rhett Butler²

1. JAMSTEC, 2. University of Hawaii at Manoa

The Earth's inner core is thought to have been formed by the precipitation of iron from the fluid outer core. It is considered that a part of the inner core surface where iron in the fluid outer core is precipitated may be melted and formed a mushy region, but its position is not well understood seismologically. We recently analyzed seismic waveforms observed at the antipodal station of the seismic source and showed that there are clearly observed precursors to reflections beneath the inner core boundary from deeper in the inner core (Butler and Tsuboi, 2021). It has been found that this precursory wave can be successfully modeled as a reflection under the liquid / solid interface at a depth of 100 km below the inner core boundary. In this study, we use these precursor waves of the lower reflection at the inner core boundary observed at the antipodal station ($> 179^\circ$). The sensitivity kernel for the shear wave velocity structure on the inner core surface was calculated by the adjoint method corresponding to these precursor waves, using theoretical seismic waveforms. The location of the fluid region was identified using the obtained sensitivity kernel. Our results show two regions of the inner core surface where the shear wave velocity is close to zero and is considered fluid. These results may provide seismological evidence and new insights to the origin of the earth's magnetic field.

On the resolution matrix of the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

1. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

日本列島周辺が代表例であるプレートの沈み込み帯は、海水層・不規則海底地形・厚い堆積物層・沈み込む海洋プレートなどから構成されており、地球内部構造の3次元不均質性が強い。その効果は地震波動場に伝播経路の屈曲などとして強く表れる。そのため周期が10秒程度以下の短周期地震波では理論波形による観測波形の再現性が低下し、震源パラメータ推定にも影響を及ぼしうる (Okamoto et al. 2018)。地震波波形を用いた震源物理研究では、これらの強い不均質構造の効果を検討した地震波伝播シミュレーションが必要になる。

そこで我々は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域を対象として、大規模地震波シミュレーションによって初期3次元不均質構造モデルのもとで理論波形を計算し、その結果を用いた全波形トモグラフィーによって3次元不均質構造モデルを改良する研究を進めている。この研究では、改良した3次元構造モデルを用いることによって短周期の波形再現性を向上させて震源パラメータや破壊過程の解析を高精度化し、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究を短波長域に拡張することを目標としている。

本研究では波形トモグラフィーにおいて構造パラメータ摂動に対する波形の摂動量を示す感度カーネルを、高周波近似の波線理論等によらず波動論に基づいて計算する。この感度カーネルは解析対象地震の震源パラメータをもとにして計算される。しかし上述のように、沈み込み帯では短周期地震波に関する計算波形の精度を保つことが難しくなる。さらに、沈み込み帯は海域であるため震源近くの観測点数が極めて少なくなり、観測点は陸域にのみに分布するなど空間的に偏った観測点分布になる。これも海域の地震の震源パラメータ推定にバイアスをもたらす要因となり得る。そこで我々は独自の FMT (First-motion Augmented Moment Tensor) 解析 (Okamoto et al. 2017, 2018) を用いることによって、不確定さをできる限り小さくした震源パラメータ推定を行い、その結果を感度カーネルの計算に反映させるようにする。

これまでに、海域の浅いM6前後の地震15個と F-netの7観測点での広帯域3成分波形データ (全体で282成分) を用いて波形トモグラフィーの試行を進めている。この試行では対象領域 (水平方向491.4km × 352.8km、鉛直方向42.0km) を12.6km × 12.6km × 8.4kmのブロック39 × 28 × 5=5460個に分割し、ブロック内の平均的な物性パラメータ改良値を求める。パラメータはP波弾性率、S波弾性率、密度、 Q_p 、 Q_s の5つを対象にできるが、試行ではP波弾性率・S波弾性率、密度の3個を用いた。大規模波形計算はHOT-FDM (Nakamura et al. BSSA 2012) のマルチGPU対応版 (Okamoto et al. 2013) を用いて東工大TSUBAME-3.0で実行した。FDMパラメータは計算領域734km × 504km × 120km、格子間隔150m、上限周波数0.39Hzであり、GPU (Tesla P100) 126基を用いた。これらの大規模計算で生成した波動場をもとにして逆問題で用いる周波数領域の感度カーネルを生成する。試行では周期8.90~40.96秒の37周波数ポイントについて282 × 37個の感度カーネルを生成した。

逆問題は非線形であり、ここでは逐次計算1回目における分解能行列を検討した。まず本研究ではKubina et al. (2018) を参考にして感度カーネル行列に前処理 (規格化) を施している。この前処理によって分解能行列も平滑化され、極端に大きな値を取る要素がなくなるという効果がある。そしてS波弾性率 (剛性率) の分解能が他のパラメータよりも相対的に大きく、またS波弾性率の中でも最も浅い第1層ブロック (0~8.4km) での分解能が深い層のものよりも大きいことがわかった。これは浅い層の地震波速度が遅いために層内の波動場の振幅が他の層よりも相対的に大きくなることや、波動場の主要な成分が表面波であることを反映していると考えられる。第1層ブロックでのS波弾性率の分解能は海岸線付近から東北沖地震震央付近までが相対的に大き

い。海溝に近いところでは相対的に小さくなり、海溝を越えると非常に小さくなる。これは解析に用いた震源分布に依存するものと考えられる。逐次計算1回目における第1層ブロックのS波弾性率は、東北沖地震震源域の周辺で負の摂動量がやや卓越する傾向が見られた。これらの試行ではデータ量が少ないので、発表ではデータを増やした結果などについて議論する予定である。

謝辞 気象庁と防災科学技術研究所からは震源パラメータや地震波形データ、地盤構造モデルデータを提供していただきました。またGlobal CMTプロジェクトのCMT解を利用いたしました。本研究は科研費(課題番号:20K04101)および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(課題番号:jh220060)の支援によって実施しました。記して感謝いたします。

Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust (2)

*Jun Kawahara¹, Kazuki Kidoguchi¹, Takahiro Shiina²

1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

沈み込む海洋性地殻の近傍で地震が発生すると、その内部にトラップされて伝わる地震波が地表で観測されることがある(e.g., Fukao, 1983; Hori et al., 1985; Miyoshi et al., 2012)。日高山脈西部では、北海道東部の太平洋スラブ内地震によって発生し、スラブの海洋性地殻内部を海溝軸と平行に伝わるガイド波が、明瞭な後続波群として観測される (Shiina et al., 2014)。日高山脈直下のマントルウェッジに相当する深さには地震波の低速度域が存在しており (Kita et al., 2010, 2012)、この低速度域と海洋性地殻が接触することにより、ガイド波の一部が地表に向けて放出されると推測されている。椎名(2015)はこの地域の地下構造を反映した2次元構造モデルに基づく数値シミュレーションを行い、ガイド波が地表で観測されるためには、日高山脈下の低速度域が太平洋スラブ直上付近にまで分布している必要があることを示した。一方で、ガイド波の地表観測波形の詳しい特徴と地下構造との関係は未だ詳細な検討がなされていない。

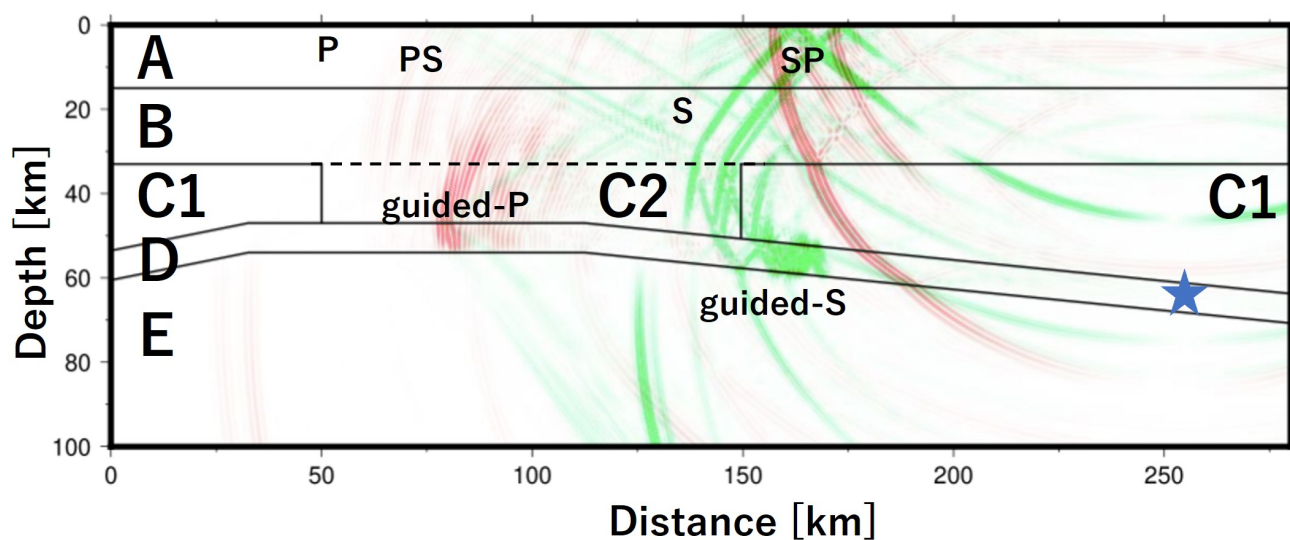
前回 (2021年度秋季大会S01P-01)、我々は椎名(2015)と同様なシミュレーションを行い、海洋性地殻内部を伝播するガイド波の地表観測波形に対して、海洋性地殻の地震波速度や内部構造の違いが与える影響を調べた。地下構造モデルとして大陸上部地殻、大陸下部地殻、マントルウェッジ、海洋性地殻、スラブマントルの5層を仮定し、マントルウェッジ層の一部を低速度域 (地震波速度が大陸下部地殻と同じ) に置き換えた。ただし椎名(2015)と異なり、各層の厚さは一定とした。各層のパラメータも椎名(2015)を参考としたが、海洋性地殻についてはP波速度6.5 km/sまたは7.0 km/sの単一層、もしくは平均P波速度がこれらに等しい2層構造の場合を検討した。海洋性地殻内にダブルカップル点震源を与え、2次元P-SV波 (卓越周波数2.0 Hz) を放射して、差分法による波形合成を行い、地表で観測されるガイドP、S波 (P、S波それぞれの後続波) の特長を調べた。その結果、海洋性地殻の地震波速度や内部構造の違いはガイド波の走時や振幅に明瞭な影響を与えること、特に2層構造ではガイド波の継続時間が顕著に伸び、波形も複雑になることが示された。

日高山脈西部でガイド波が観測される地震の震源と観測点を含む鉛直断面に沿って、実際の海洋性地殻は上向きに凸に湾曲していると推測される (Shiina et al., 2014; 椎名, 2015)。このような湾曲・屈曲も海洋性地殻内部のガイド波が地表に漏れ出る一因となり得る(e.g., Martin and Rietbrock, 2006)。そこで今回、椎名(2015)のモデルと同様に屈曲した海洋性地殻を仮定してシミュレーションを行い、屈曲がガイド波に与える効果を調べた (図)。その結果、震央により近い距離でガイド波が明瞭に観測されるとともに、特にガイドS波について振幅や継続時間を増加させる効果が認められた。

これまでのシミュレーションで得られたガイド波の振幅や波形は、仮定する点震源の放射特性にも強く依存する。そこでガイド波の観測波形に対して、最大ピーク着震時を中心とする5.12秒間の振幅スペクトルを求め、その形状とピーク周波数を震源時間関数 (卓越周波数2.0 HzのRicker wavelet) と比較した。得られたスペクトルの形状は仮定したモデル間で多様に変化し、多峰性を示す場合もあり、系統的な特徴は見いだせなかった。ただしガイドP波の最大ピーク周波数は入射波の卓越周波数より高く (3 Hz前後)、ガイドS波については入射波と大差ない傾向が見られた。

結論として、観測されるガイド波の波形や継続時間に対して、海洋性地殻の内部構造だけでなくその形状も強く影響することが示唆された。一方、ガイド波のスペクトル特性と海洋性地殻の内部構造等の間に単純な関係は見られなかった。

図：シミュレーションの一例：A：大陸上部地殻、B：大陸下部地殻、C1：マントルウェッジ、C2：マントルウェッジ内の低速度領域、D：海洋性地殻、E：スラブマントル。星印は震源。赤はP波、緑はS波を表す。



A trial application of the real-time tsunami forecasting by means of and adjoint-equation based wavefield estimation

*Takuto MAEDA¹

1. Hirosaki University

地震発生直後の観測からその地震動や津波を予測する即時予測手法は、断層運動あるいはそれに付随する量を推定もしくはカタログから探索する初期値探索型と、刻一刻と変動する波動場そのものを推定する現況把握型に大きく分類できるだろう。このうち、近年の後者に基づく研究からは、即時予測のためには地震発生時刻における震源パラメタは必ずしも必要とされず、現況さえを正しく把握できれば有効な即時予測ができることが示されつつある。ただし、現在地震波や津波に用いられている最適内挿法は静的な補間法の一つであり、現在時刻のみにおける予測値と観測値の残差を最小化するように設計されている。そのため、波動場の時間発展が間接的にしか評価されず、一定時間区間における観測波形全体を説明する逆問題と比べると、推定に用いられるデータ量が相対的に少ないという欠点があった。本研究ではこの欠点を克服すべく、波動伝播の支配方程式のアジョイント方程式に基づいた、地震発生時にはかぎらない任意時刻における波動場状態の推定法について検討した。

アジョイント方程式に基づく方法は、いわゆる逆伝播法と密接な関係がある。以下では、その導出法の概略を通じてそのことを説明する。本研究では、津波のモデルとして線形浅水波方程式を題材とし、最適制御理論に基づいてアジョイント方程式を導出した。まず、観測される津波記録とその地点における浅水波方程式からの水位の予測値の2乗残差を考える。その残差の現在時刻から一定時間前までの対象時刻までの時間積分値を目的関数と定義し、それを最小化するような対象時刻の波高と積分流速の空間分布を推定する。水位と積分流速に対応するアジョイント変数ともの浅水波方程式に対する波動場の変分との関数内積の時間積分を評価すると、目的関数の波動場に対する偏微分係数がアジョイント変数の対象時刻の値の符号を反転したものとして得られる、さらに適切な変数変換により、このアジョイント変数が従う微分方程式（アジョイント方程式）は、線形浅水波方程式に一致することが示される。アジョイント方程式は、観測記録とシミュレーションに基づく予測値の残差を等価波源項にもつ。このアジョイント方程式を時間を現在時刻から対象時刻まで逆方向にさかのぼって解くことで、目的関数を最小化させるための情報である偏微分係数が推定できる。この方法に基づく手続きは、観測値と予測値の残差を対象時刻まで逆伝播させた結果を初期水位および流速とし、再び時間の順方向に予測をして観測値と比較をする、ということを繰り返すことに相当する。Furumura and Maeda (2021)は、観測点近傍において最適内挿法を用いて地震波動場を補間しつつ逆伝播させることで震源を効率的にイメージングする方法を提案したが、この方法は、観測点周辺における最適内挿重みをつけた地震波動場の空間平均と観測記録との差の2乗和を最小化するという目的関数を採用したアジョイント法の一つであったと理解できる。

この定式化に基づき、津波波動場を逐次的に推定する数値実験を行なった。25 km間隔の津波計アレイの外側に仮想波源を置いてシミュレーションした結果を仮想観測記録とし、その記録の時間ステップ1秒毎の現在時刻に対して、300秒前の状態をしつつ時間発展させる、という問題を考えた。本来のアジョイント法に基づく推定では、逆伝播と順伝播を一定の時間区間で繰り返すことにより対象時刻における状態を推定するが、ここでは逆伝播を一回行うごとに時間区間全体を1時間ステップ進めるという手続きを行う。このことにより、時間区間のほとんどの情報を繰り返し推定に活用しつつ、地震発生の初期条件や位置を仮定したグリーン関数に頼ることなく、波動場の一定時間前の状況とそこから予測される現況を推定し、さらにはシミュレーションによる将来の状態予測もできる。数値実験からは、初期条件を推定する対象時刻が刻々と変わるにもかかわらず、仮定した波動場が観測されるにつれて、観測点近傍における津波波動場が素早く再現され、本手法の有効性が示唆された。一方、順方向と逆方向シミュレーションを繰り返すうちに、仮想観測点を起源とする高周波振動が発生し数値不安定が発生した。これについては波動場に対してグリッドサイズ5x5のガウシアン平滑化

フィルタを適用することで、効果的に不安定を抑えられることが明らかになった。本研究では試みに津波に対して定式化を行なったが、地震波の問題についてもその拡張は容易であると期待される。一方、本研究で提案したような逐次的な現況推定にこの方法を用いるためには、対象時刻を現在時刻からどれだけ前取るべきか、というチューニングが不可欠である。これは観測点配置や波動場の複雑性によると予想されるため、今後はより現実的な構造での大規模シミュレーションを通じた検証が不可欠となるであろう。

Characteristics of strain envelopes of scattered waves propagating in the 2D random heterogeneous medium

*Kentaro Emoto¹

1. Kyushu University

近年普及してきた光ファイバーケーブルを利用したDAS (Distributed Acoustic Sensing) 観測では、一本の光ファイバーケーブルで、数十kmの距離を数m間隔で計測することが可能であり、海底や火山、そして市街地などでの超高密度地震観測を行う新たな観測手法として期待が高まっている。低コストで超高密度観測ができるメリットの一方で、得られるデータには制約がある。DASでは、光ファイバーケーブルに沿った各場所での歪（もしくは歪速度）が出力される。これは従来の地震計の出力の空間微分に相当する物理量であり、従来の波形解析手法をDASのデータにそのままでは適用できない場合もある。また、3成分地震計と異なり、ケーブルに沿った一方向の歪しか得ることができない。

地震波が微細不均質媒質中を伝播すると、散乱の影響で波形が崩れ、エンベロープ幅が広がったり、長く続くコーダ波が励起されたりする。江本・他 (2022JpGU) では、多重前方散乱近似に基づき、歪波形のエンベロープは、速度波形のエンベロープに比べて、微細不均質媒質を強く受け、エンベロープ幅が広がることが示された。本研究では、2次元差分法シミュレーションを用いて、歪エンベロープのコーダの特徴を調べる。一般に、S波走時の2倍以降のコーダは、等方的な散乱波によって構成されているとみなされるが、速度と歪では、散乱波の入射方向に対する感度が異なるため、速度と歪のエンベロープ形状が同様の特徴を示すかどうかは自明ではない。

不均質媒質として、特徴的スケール1km、ゆらぎのRMS値5%の指数関数型自己相関関数で特徴づけられるランダムなゆらぎを考える。平均P波速度、S波速度をそれぞれ、6km/s、3.46km/sとし、2次元弾性体でのP-SVの運動方程式を有限差分法により解く。媒質のサイズは、一辺が約400kmの正方形とし、中心に震源時間関数 (3Hz) の等方P波震源を設置する。震源から同心円上に100kmまで10km間隔で観測点を設置する。各距離においては10度間隔で36個の観測点が存在する。各観測点で、動径方向 (R方向) とそれに直行する方向 (T方向) の速度波形に加えて、RR成分、TT成分、RT成分の歪波形を出力する。シードを変えた50個のランダム不均質媒質でシミュレーションを行い、統計的な特徴を議論する。

各伝播距離での平均二乗エンベロープは、速度のR成分はP波のピーク後単調減少となるが、T成分はPS変換散乱により、一度減少したP波コーダの振幅が徐々に大きくなり、S波到達時刻付近で2つ目のピークが現れる。歪のRR成分やTT成分では、PS変換散乱の影響は少なく、P波のピーク後は、ほぼ単調減少となる。エンベロープの比を調べると、R/TはP波のピーク後からS波走時にかけて一度減少し1以下となるが、その後徐々に増加し1に収束する。歪エンベロープの比 (RR/TT) は、P波のピーク後に単調減少し1へと収束する。速度と異なり、歪の場合は、S波の入射方向に対して4象限型の感度を持つ。これにより、PS変換された散乱波に対しても、RR成分とTT成分で差が出にくくなっていると考えられる。R/TもRR/TTも、S波走時の2倍の時刻では、ほぼ1.1以内に収まっており、この時刻以降の解析では、光ファイバーケーブルの向きを気にする必要がない。コーダ部分におけるエンベロープの減少率を示すコーダQは、速度のR成分・T成分、歪のRR成分・TT成分で、有意な差はなかった。今回のシミュレーションでは内部減衰を入れていないが、内部減衰はどの成分も同様に減衰させるとすると、この結果は、歪エンベロープから推定したコーダQも、従来の地震計で推定したコーダQと同様の解釈が可能であることを示唆する。これらの結果から、コーダ部分であれば、物理量が歪であることやケーブルの形状を考慮しない解析が可能であると言える。ただし、コーダは広い領域をサンプルする統計的な量であり、DASの超高密度観測という利点を鈍らせるため、どの場所の構造を反映しているのか、感度カーネルの考察が重要となる。また、歪のRT成分のエンベロープ形状は、速度のT成分と同様に、2つのピークを持つ。この速度のT成分と歪のRT成分のエンベロープ形状の類似性は、多重前方散乱近似から導出した数式表現と同様の特徴である。

Effects of a seawater and sediment layers on seaquake amplifications on and under the sea surface

*Takeshi NAKAMURA¹, Hiroshi Takenaka²

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University

近年の海底地震観測網の充実により、海底における地震動の特性を示した成果が多く出ている（例えば、Nakamura et al. (2015); Kubo et al. (2018)）。また、CTBTOのIMSをはじめとする海中のハイドロフォン観測点のデータを使い、T相を含む、遠方から伝播した海中の地震波（もしくは水中音響波）の特徴を示した成果も出ている（例えば、Yildiz et al. (2013)）。一方、海震を含む、海面や海中における震源近傍の地震動（もしくは水中音響波による振動）は、観測例が非常に少なく（例えば、塩谷・笹 (2013)）、理論的評価も限られている。前回の日本地震学会秋季大会において、我々はpropagator行列法（Haskell, 1953）に基づく、海面・海水・海底における海震波形の半解析解コードの開発を行い、波形計算例の紹介を行った（中村・竹中, 2021）。本大会では、開発したコードおよび3次元差分法（Nakamura et al., 2012）を用いた計算を行い、計算波形を用いて海水層の厚さおよび海底下の地盤の速度構造が波形振幅に与える影響について調べたので報告する。

計算では、海水層と、海底下に1~5層の数の固体層から成る構造を使用した。海水層は0, 200 m, 375 m, 1000 m, 2000 mの5種類の厚さを用意し、海水層厚0 mの場合は、固体層の上端を地表とした陸上における地震動のケースを想定した。震源は点震源とし、震源時間関数のパルス幅1.0秒と0.1秒の2つのケースを設定した。複数の構造モデルに対して計算を行った結果、海面での圧力がほぼ0であるために海面および海面近傍において水平動より上下動の振幅が大きい結果となり、陸上や海底の地震動と異なる特徴を示した。また、海底下の構造によっては、地表や海底の水平動とほぼ同程度の海面の上下動振幅となった。これは、地表では反射係数が入射角に依存するが、海面では入射角に関わらずP波の反射係数が常に-1であり、入射波に対して海面での上下動振幅が倍になることと、海水層が均質の低速度構造であり、層厚に対応した周波数帯における共振により海水中でP波が増幅するためである。さらに、観測点においてSH波の放射パターンが節面付近となるメカニズムを計算で使った場合、地表や海底の水平動と比べて海面の上下動振幅が大きくなることを示した。地表だけでなく海底とも異なる海面の地震動の特徴の把握は、海域における地震波動場を理解する上で重要である。

Features of Time-series of Real-time Seismic Intensity at MeSO-net Station

*Hisahiko KUBO¹, Kaoru SAWAZAKI¹, Lina YAMAYA¹, Takeshi KIMURA¹

1. NIED

本研究では、MeSO-net観測点における連続観測記録の時系列的な特徴を、地震時および非地震時を含めて考察し、その時系列の予測可能性に関する議論を行う。非地震時のMeSO-net連続観測記録を解析した研究としてはYabe et al. (2020)やNimiya et al. (2021)が挙げられる。それらの研究では2020年以降を対象として、主に数Hz以上の周波数帯域における振動レベルに着目した解析を行うことで、コロナ禍における首都圏の社会活動の変化との対応を調べている。先行研究と本研究の違いとしては、本研究では2011年東北地震も含める形で観測点設置時からの記録を扱う点がまず挙げられる。また本研究では地震波形記録そのものでなく、それから求めたリアルタイム震度（功刀ほか2008）の時系列を解析対象とする。震度およびリアルタイム震度は0.5~2 Hzの周波数帯域に高い感度を持つ地震動指標であり、先行研究とは着目する周波数帯域が異なると言える。

時系列データは次の流れで作成した。各MeSO-net観測点の1日間の連続波形記録3成分から、功刀ほか（2008）に従って1秒ごとのリアルタイム震度時系列を求めた。そして1時間ごとの最大値および中央値を算出し、それらを複数年分まとめた。以下ではE.ICEM（東京都江戸川区一之江）における観測記録での結果を示す。

1時間ごとの中央値の時系列からは、昼間の振動レベルが高く、夜間の振動レベルが低いという日変動が見て取れる。また平日は振動レベルが高く、日曜の振動レベルが低いという傾向も見られた。これらの傾向は、24時間および168時間（7日間）で自己相関係数および偏自己相関係数の絶対値が大きくなるという自己相関解析の結果と整合する。また日曜だけでなく、休日も振動レベルが低くなる傾向が見られ、特に正月を挟む年末年始・春の大型連休・お盆の期間における振動レベルの低下は顕著である。日曜および休日の日変動の幅は平日のそれよりも小さい。これらの結果はより高い周波数帯域に着目していた先行研究の結果と整合する。なお先行研究で見られたコロナ禍での振動レベルの低下は、今回の解析では明瞭には見られなかった。この違いは解析対象としている周波数帯域の違いを反映している可能性があるが、他の観測点での解析も行い、さらなる検討を行う必要がある。最大値時系列も日変動および週変動、休日の振動レベル低下の傾向を有するが、それらは中央値時系列よりも相対的に弱い。また地震による擾乱が顕著にあり、多くは瞬間的な増加として見られる。2011年東北地震およびその後しばらくは、活発な余震活動の影響を受けたことによる最大値時系列の増加およびその緩やかな減衰の傾向が見られており、その上がり幅は非地震時の日変動を大きく超えている。同様の傾向は中央値時系列でも見られたが、通常の変動に戻るまでに要する時間は中央値時系列の方が短く、最大値時系列の方がより長いタイムスケールで影響が見られた。各時系列の差分の平均はどの期間でもほぼゼロであり、差分のばらつきは最大値時系列の方が大きい。

以上の結果は、中央値時系列は日変動・休日変動を加味することでの予測が可能であることを意味する一方で、最大値時系列は日変動・休日変動を加味したとしても地震起因の地震動の影響が大きく、予測が難しいことを意味する。またLippiello et al. (2019)やSawazaki (2021)などで予測が試みられている大地震後の振動レベルの増加およびその減衰の傾向がリアルタイム震度の中央値および絶対値の時系列でも見られた。ただしMeSO-netのE.ICEMにおいては2011年東北地震の後に明瞭に見られたのみで、他の期間では確認できなかった。

謝辞：本研究は、文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）JPJ010217の助成を受けたものです。

Spatiotemporal Characteristics of Autocorrelation Functions from Seafloor Ambient Noise Records at Hyuga-nada

*Yasunori SAWAKI¹, Yusuke Yamashita², Shukei Ohyanagi¹, Emmanuel Soliman Garcia², Masanao Shinohara³, Yoshihiro Ito²

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

日向灘海域で2013年から継続的に行われている海底地震観測によって、浅部微動や超低周波地震が数多く検出されている(Tonegawa et al., 2020; Yamashita et al., 2015, 2021). 日向灘で検出されたこれら浅部スロー地震の発生には、九州パラオ海底(KPR)の沈み込みが大きく関与しており(Tonegawa et al., 2020), 上盤の構造が複雑になっていることが指摘されている(e.g., Nishizawa et al., 2009). Akuhara et al. (in revision)では、浅部微動発生領域で行われた最大半径2 kmほどの超稠密海底地震観測の記録から、遠地地震グリーン関数(Akuhara et al., 2019)と表面波分散曲線の transdimensional インバージョンを行うことで観測点直下の一次元S波構造を推定したところ、KPR直上の海底下3–4 km における顕著な低速度層(LVZ)の存在を明らかにした。LVZがKPRから上昇した地殻流体で形成されているなら、LVZの空間的広がりを制約することは、Slow-to-Fast地震の発生環境やメカニズムを推定していく上でのカギと成り得るかもしれない。そこで我々は、自己相関関数(以降、ACF)を用いた地震波干渉法に着目した。ACFは地震波干渉法で一般に用いられる相互相関関数と違い、観測点直下における大地震前後の地震波速度変化(e.g., Ohmi et al., 2008; Uemura et al., 2018)や主要な速度境界の推定(e.g., Becker & Knapmeyer-Endrun, 2018; Ito & Shiomi, 2012)などに用いられてきた。本研究では2014年から2017年の常時微動記録からACFを計算し、堆積層底面におけるLVZなどの検出を試みた。

まずは、連続波形から120秒長のACFを計算した(120-s ACF)。周波数帯域は、0.2–4.0 Hzの中で複数選択した。なお、短周期地震計の場合は機器特性の補正も行った。120-s ACFは次の2通りの方法で計算した：①1–4秒の時間窓をずらしながら相関値を計算し、それを120秒分行う(e.g., Ito et al., 2012)。なお、事前処理として、絶対振幅が3MADを超えた場合は振幅値をゼロとし、その後、1-bit化によって振幅情報を落とす(Campillo & Paul, 2003)。②1-bit化処理を行わない代わりに波形の瞬時位相を計算し、瞬時位相に対して①と同様な計算を行う(Schimmel, 1999)。120-s ACFからそれぞれ①線形スタック②phase-weighted スタック(Schimmel & Gallart, 2007)によって、1時間トレース及び1日トレースを計算した。ACFは上下動成分と水平動成分でそれぞれ計算した。

高周波帯域(2–4 Hz)でACFを計算したところ、LVZに対応する明瞭な反射波は確認できなかった。日本海溝アウターライズで行われた同様の解析では、350 mほどの厚さの海底堆積層が遅れ時間3秒付近に確認されているが(Tonegawa et al., 2013), 日向灘は全体で10倍程度の厚さを持つ複数層からなる堆積層が推定されていることから(Akuhara et al., in revision), LVZから海底面までの構造で生じる反射波が複雑なのかもしれない。低周波帯域(0.2–1 Hz)のACFからも、LVZに対応する明瞭な反射波は確認できなかったが、遅れ時間約2秒付近に出現する第一反射相が、夏から秋にかけて大幅に遅れていることを確認した。このことは、secondary microseismsの励起源がこの期間にかけて凡そ周期的に変動している可能性を示唆している。

Large site amplification factors observed not only along the Sea of Japan but also along the Sea of Okhotsk in the northern part of Hokkaido

*Atsushi NOZU¹

1. Port and Airport Research Institute

全国には約1,000の港湾があり、著者はそれらのサイト特性に興味を持って研究を進めている。その際、北海道の港湾も当然ながら視野に入っている。北海道のうち道北の日本海側は、関東平野や新潟平野と同様に、長周期地震動の卓越する地域であることが知られている。例えば中央防災会議の参考資料である「長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周期」(http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/pdf/shiryoku4.pdf)の図4.19では、道北の日本海側は赤～ピンクとなっており、長周期地震動の卓越する地域であることがわかる。ただし、中央防災会議の資料では、道北のオホーツク海側は周期1秒以下の卓越する地域とされている。一方、著者は以前にスペクトルインバージョンを道北等の強震観測記録に適用し、サイト増幅特性の評価を行った(野津・菅野, 2010, <https://www.pari.go.jp/search-pdf/no1214.pdf>)。その結果、道北の日本海側では低周波側(0.2–1Hz)で10倍を超えるような非常に大きなサイト増幅特性が得られ、中央防災会議の資料と整合する結果となったが、オホーツク海側でもサイト増幅特性は軒並み低周波側で10倍を超える結果となり、中央防災会議の資料と整合しない結果となった。著者が道北を対象に実施した解析では、地震数は多いとは言えず、個々の地震のラディエーションパターン等が結果に影響を及ぼしている可能性があり、結果に対して確信を持つに至らなかった。ところで、2013年5月24日14:44頃、カムチャッカ半島西方のオホーツク海においてMw8.3の地震が発生し、北海道から九州に至る広い範囲で揺れが観測された。遠方で発生した地震であり、北海道でも震央距離が1300kmを超えているため、北海道の各地点間では、ラディエーションパターン等の震源特性の違いや伝播経路における減衰の違いは十分に小さいことが期待できる。そこで、各地点間の揺れの違いはサイト増幅特性の違いを反映しているとみなし、この地震の記録をサイト増幅特性の検証に用いることとした。遠方の地震であり、P波とS波が完全に分かれて到来しており、P波のみが観測されている地点やS波のみが観測されている地点もあることに注意し、S波が観測されている地点のみに着目して検討を行った。過去に実施した解析(野津・菅野, 2010)では、道北に隣接した地域で比較的岩盤に近い観測点としてABSH05(滝上南)があり(サイト増幅特性は広い周波数帯にわたり2–3倍程度)、2013年5月24日の地震の記録も得られている。そこで、この地点の記録のフーリエスペクトルと道北の各地点の記録のフーリエスペクトル(すべて地表、水平2成分の自乗和平方根、バンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用)を比較した。道北のオホーツク海側に位置するHKD002(宗谷岬)におけるフーリエスペクトルをABSH05(滝上南)にけるフーリエスペクトルと比較して図1に示す。HKD002(宗谷岬)におけるフーリエスペクトルは低周波側(0.2–1Hz)ではABSH05(滝上南)に比べ10倍程度大きくなっている。図2は同じく道北のオホーツク海側に位置するSOYH02(猿払南)とHKD004(上猿払)に関する同様の比較であるが、ABSH05(滝上南)とのフーリエスペクトルの違いはさらに大きくなっている。このように、道北のオホーツク海側の観測点では軒並み、フーリエスペクトルが低周波側で大きな値を示していることから、既往の研究(野津・菅野, 2010)で道北のオホーツク海側の観測点で軒並み低周波側で大きなサイト増幅特性が得られていたことは妥当であったと考えられる。なお、低周波側の増幅が見られる範囲についても検討を行ったが、ABSH05(滝上南)に近いABSH02(興部西)やKKWH02(美深東)でのフーリエスペクトルはABSH05(滝上南)と大きくは異ならないのに対し(図3)、やや北に位置するSOYH10(歌登南)やSOYH09(歌登北)でのフーリエスペクトルはABSH05(滝上南)と既にかなり異なっている(図4)。したがって、かつての宗谷支庁に入ったあたりから、低周波側の大きな増幅が始まると言える。本研究によると、道北の日本海側だけでなくオホーツク海側も、関東平野のように、長周期地震動を増幅させる深い構造が存在するものと考えられる。中央防災会議による資料「長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周

期」は、このような点を踏まえて、今後見直しがなされることが望ましいと考えられる。謝辞：防災科学技術研究所の強震記録を利用しました。記して謝意を表します。

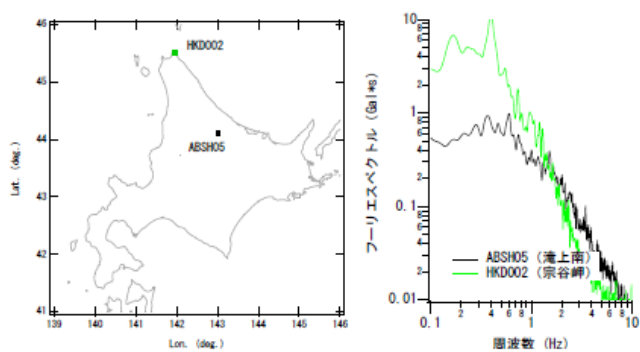


図1 HKD002 (宗谷岬)

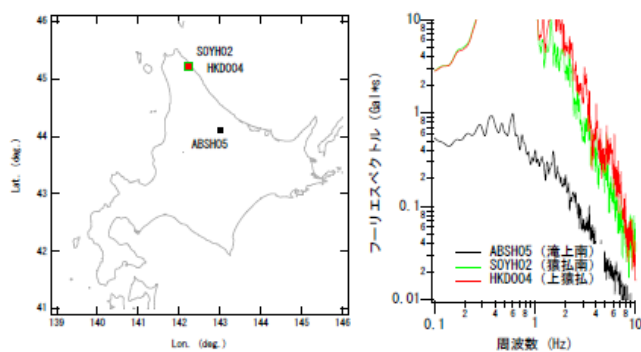


図2 SOYH02 (猿払南) と HKD004 (上猿払)

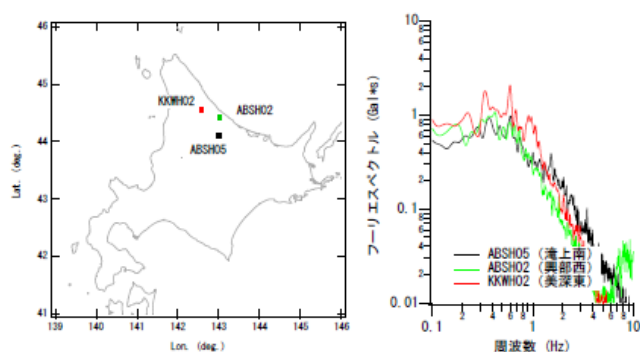


図3 ABSH02 (興部西) と KKWH02 (美深東)

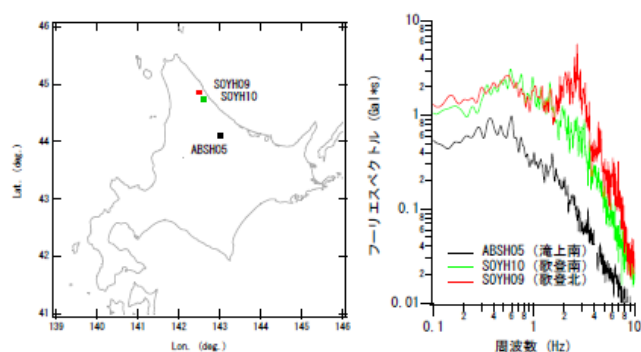


図4 SOYH10 (歌登南) と SOYH09 (歌登北)

Poster session (1st Day) Introduction of committee activities : S24.Committee activities for society
--

📅 Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:30 AM - 9:00 AM UTC | 🏠 ROOM P-8
[S24] S24

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-01] Committee for Seismology Outreach

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-02] Disaster Investigation Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-03] Newsletter Editorial Board

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-04] Geoparks Assistance Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-05] Zisin Editorial Board

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-06] Public Relations Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-07] Strong Ground Motion Committee

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-08] Committee for School Education

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-09] Committee on Summer School for Kids

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

9:30 AM - 6:00 PM JST | 12:30 AM - 9:00 AM UTC

[S24P-10] Kanamori Fund

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-01]Committee for Seismology Outreach

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-02]Disaster Investigation Committee

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-03]Newsletter Editorial Board

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-04]Geoparks Assistance Committee

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-05]Zisin Editorial Board

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-06]Public Relations Committee

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-07]Strong Ground Motion Committee

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-08]Committee for School Education

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-09]Committee on Summer School for Kids

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

Poster session (1st Day) | Introduction of committee activities | S24.Committee activities for society

[S24] S24

Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 6:00 PM ROOM P-8 (1階 (展示ホール))

9:30 AM - 6:00 PM

[S24P-10]Kanamori Fund

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

Poster session (1st Day) Regular session : S16. Subsurface structure and its effect on ground motion
--

🗓 Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 12:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:30 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-2
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S16P] AM-P

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

[S16P-01] An investigation of improving sound pressure level and Resolution in seismic reflection survey using underwater speaker

*Naoto Kumagai¹, Kaito Kimura¹, Tetsuro Tsuru¹ (1. Tokyo University of Marine Science and Technology)

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

[S16P-02] Characteristics of High-frequency S-wave and S-coda at DONET ocean-bottom seismometers

*Shunsuke TAKEMURA¹, Kentaro EMOTO², Lina YAMAYA³ (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kyusyu University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S16P-03] Amplitude anomalies observed in the S-wave seismic reflection survey data on the Shikano fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Takao KAGAWA¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada² (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Hanshin Consultants Co. Ltd.)

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

[S16P-04] Characteristics of microtremors in the vicinity of the Yoshioka fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Tatsuya NOGUCHI¹, Isamu NISHIMURA², Takao KAGAWA¹ (1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University)

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

[S16P-05] Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground in Wakabadai, Tottori City from Microtremor and Seismic Observations

*Isamu NISHIMURA¹, Tatsuya NOGUCHI², Takao KAGAWA² (1. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University, 2. Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University)

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

[S16P-06] Investigation of Subsurface Structure in the Kochi Plain - microtremor survey and document retrieval

*Nobuyuki YAMADA¹ (1. Kochi Univ.)

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

[S16P-07] Estimation of shallow subsurface structure in the Oharadai area, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, using H/V spectral ratios and borehole data

*Yasuyuki IWASE¹, Kojiro Kato², Yusuke Mizuno² (1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Japan Maritime Self-Defense Force)

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

[S16P-08] Estimation of V_{S30} using microtremor array records in Thimphu and surrounding towns, the Kingdom of Bhutan

*Takumi Hayashida¹, Nityam Nepal², Phuntsho Pelgay², Shiro Ohmi³, Karma Namgay², Dowchu Drukpa², Hiroshi Inoue⁴ (1. IISEE, Building Research Institute, 2. DGM, Ministry of Economic Affairs, Bhutan, 3. IISEE, Building Research Institute, 4. IISEE, Building Research Institute)

DPRI, Kyoto Univ., 4. NIED)

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

[S16P-09] Basic study of ground amplification factor based on microtremor array observations at seismic stations.

*Shigeki SENNA¹ (1. NIED)

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

[S16P-10] Application of Bayesian Optimization to Estimate 1D Subsurface Layered Structure from Near-field Seismic Waveforms

*Hisahiko KUBO¹ (1. NIED)

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

[S16P-11] Site investigation by surface wave measurements on subsidiary faults of 2016 Kumamoto Earthquake

*Naoto INOUE¹, Kotaro Mizutani¹, Naoko Kitada¹, Kazuki Watanabe², Noriyuki Shibuya², Masashi Omata² (1. Geo-Research Institute, 2. PASCO)

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

[S16P-12] Long-term monitoring of subsurface changes by a giant magnetostrictive seismic source

*Takahiro Kunitomo¹ (1. Ontake Science Lab)

An investigation of improving sound pressure level and Resolution in seismic reflection survey using underwater speaker

*Naoto Kumagai¹, Kaito Kimura¹, Tetsuro Tsuru¹

1. Tokyo University of Marine Science and Technology

1. はじめに

反射法地震探査は資源探査や地盤構造の推定、地震防災に至るまで幅広い活用がされている。東京海洋大学探査工学研究室では、海上での反射法地震探査において、振源に水中スピーカーを利用した探査システムの開発に取り組んでいる。水中スピーカーの採用によって、探査システムの小型化、海洋生物への負荷低減が実現でき、東京湾等の船舶輻輳海域における調査が可能となった。実際に東京湾北部を調査した結果、海底下数十m程度まで地下構造を映像化することができ、ガス層の存在も明らかとなった(Tsuru et al. 2019, EPS)。

当研究室では発振波形として非パルス波である、疑似乱数列を用いたランダム波形を使用している。ただし、データ解析の際、取り扱う波形データはパルス波である必要があるため、発振波形と観測波形で相互相関処理を行うことで非パルス波をパルス波に圧縮処理する。

相関波形で得られるパルス波を解析に用いるため、この波形はサイドローブが小さく、シグナル値（ピーク値）が大きいことが望ましい。ここで、相互相関波形は発振波形によって形状が変化するが、どのような発振波形を用いた場合、最もデータ品質の向上に繋がる相互相関波形が得られるかについては検証が不十分である。そこで、本研究では観測データの音圧レベル・分解能向上を目的として、発振波形の最適化を試みた。

2. 発振波形の最適化検討

最適化を検討するうえで、まず過去の東京湾での調査データより、減衰(Q値)を推定した。作成した発振波形にその減衰効果を適用して得られた波形を観測波形と仮定し、この2つの波形に対して相互相関処理を行い、波形を評価する。

本研究では、波形を音圧レベルと分解能の2つの観点で評価するために、相互相関波形のシグナル値と発振波形の振幅の比を「音圧レベル評価値」、シグナル値とサイドローブの比を「分解能評価値」として、2種類の評価値を導入した(Figure.1)。

発振波形は、サンプリング間隔や波形長等の条件を変更して複数作成し、それぞれの条件における評価値の傾向を調査した。

3. 河川の川底調査

2のシミュレーションで良い評価を得られた発振波形を実際に実地調査で使用した。2022/6/2~6/4の期間で東京湾北部に流入する河川の川底探査を実施し、そこで得られた観測結果を速報として報告する。

4. 結果・まとめ

発振波形の最適化検討の結果、サンプリング間隔・波形長の一方のみを変化させた場合、評価値は共に一次関数的な変化をした。波形長は1s増加するごとに、音圧レベル評価値は38.8%向上、分解能評価値は8.4%向上し、サンプリング間隔は0.1ms短縮するごとに、音圧レベル評価値は33.3%向上、分解能評価値は20.7%向上した。

川底調査では、断層やガス層と考えられる地下構造が確認された。一方で、観測データ解析の際に波形長の増加による水平分解能の低下、シミュレーション上ほど音圧レベルが向上していないといった問題が見受けられた。音圧レベルに関しては振源に用いた水中スピーカーの機械特性が原因として考えられ、今後の留意すべき課題といえる。

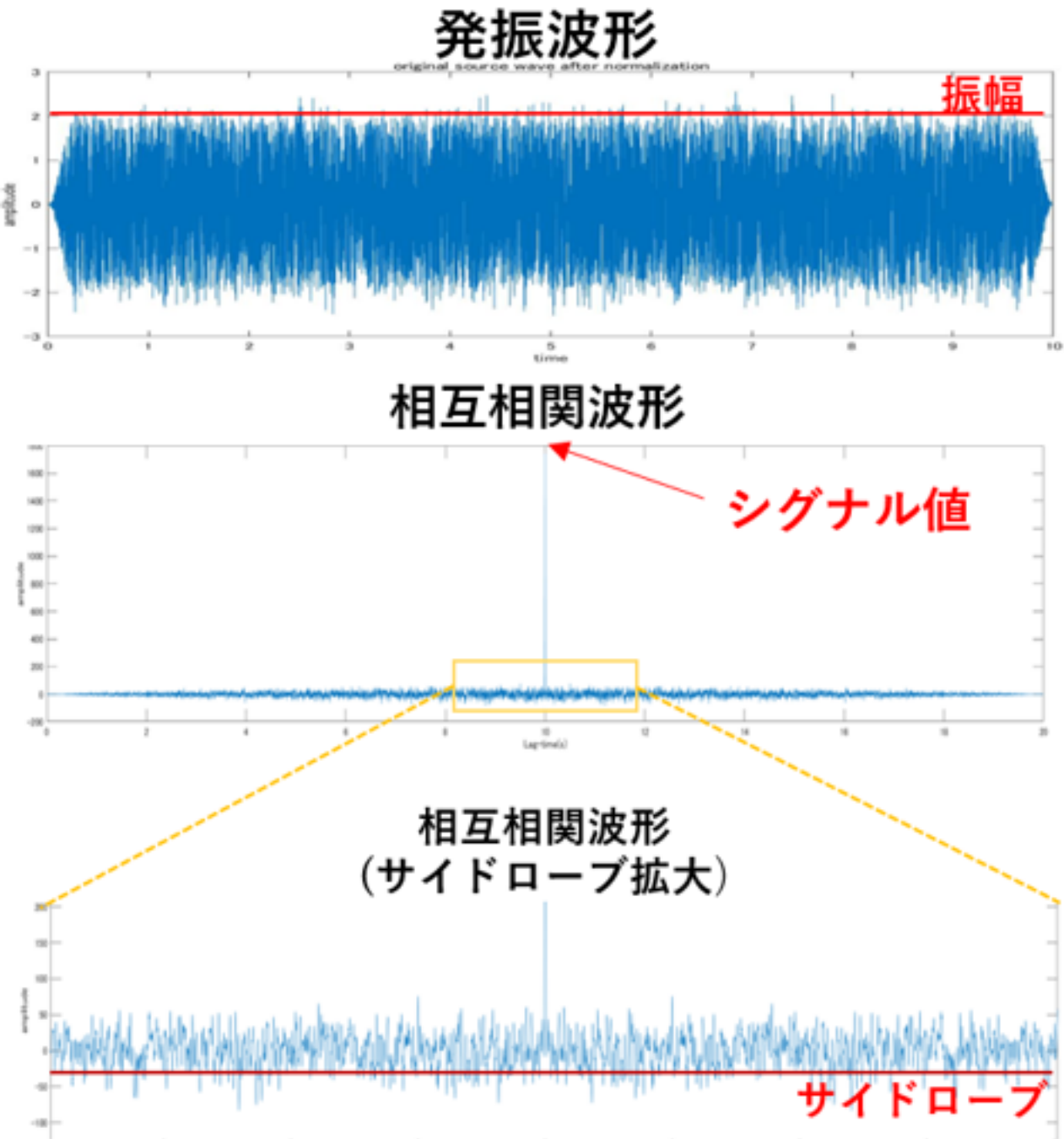


Figure 1. 評価値基準

Characteristics of High-frequency S-wave and S-coda at DONET ocean-bottom seismometers

*Shunsuke TAKEMURA¹, Kentaro EMOTO², Lina YAMAYA³

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

南海トラフや日本海溝の巨大地震発生域周辺の地震活動をモニタリングする上で、特にDONETやS-netなどの海底地震計で観測される1 Hz以上の高周波数帯の解析が重要となる（例えば、Yabe et al., 2021）。しかし、海底地震計で記録される地震波形は、沈み込む海洋プレート、厚く堆積した海洋堆積物、海水、海底地形などの影響を受け複雑化したものである。特に、厚い（> 2km）海洋堆積物内に地震波のエネルギーがトラップされ、大きなピーク遅延やエンベロープ拡大現象が引き起こされる（Takemura, Yabe & Emoto, 2020）。本研究では、南海トラフに敷設されたDONETの記録解析と大規模地震波伝播シミュレーションを基に、海底地震計で得られるS波およびS波コーダの特徴を明らかにする。

2014年10月以降にDONET1周辺で発生したM 3.5以上の地震について、DONET強震計記録とF-net広帯域地震計記録を用いてS波最大振幅とS波コーダ振幅の解析を行った。発震時刻からの経過時間が70-90秒の時間窓で速度波形エンベロープの平均を計算し、それらをS波コーダ振幅とした。すると、DONETのS波コーダ振幅は、水平動および上下動の両方についてF-netよりS波コーダ振幅より数倍から数十倍大きく、これはDONET下の地盤によるサイト増幅の影響と考えられる（例えば、Philipps & Aki 1986; Takemoto et al., 2012）。しかし、上下動のS波最大振幅はDONETとF-netで同様の減衰特性を示しており、コーダ振幅から予測される結果と矛盾する。OpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いて地震波伝播シミュレーションをすることで、この矛盾について検討した。シミュレーション結果は、S波振幅はF-netとDONETで同様の減衰曲線に乗り増幅が見られないのに対し、S波コーダ振幅のみDONETで大きくなるという観測の特徴を再現した。地下構造モデルから海水や堆積層を除いたモデルを作成しシミュレーションを実施したところ、厚い（> 2 km）堆積層がDONETのコーダ振幅に大きく寄与していることがわかった。

南海トラフ域だけでなく、堆積層の厚い陸域の平野においてもコーダ規格化法によるサイト増幅特性の評価は過大評価となる可能性がある。この可能性は、出射・堀家・岩田（1985）で指摘されていたが、本研究の観測データ解析および数値シミュレーションにより原因が明らかとなった。堆積盆地外の岩盤点の観測点と異なり、DONETなどの厚い堆積層直上の観測点のコーダ波は空間的にランダムに分布した散乱体ではなく、堆積層内にトラップされたS波エネルギーにより構成されており、コーダ規格化法の基本となる伝播経路一様の仮定が成り立たなくなる。そのため、岩盤点を基準としてコーダ規格化法により推定されたサイト増幅特性は、過大評価の傾向となる。

文献

出射・堀家・岩田, 1985, 地震 第2輯, https://doi.org/10.4294/zisin1948.38.2_217

Takemura, Yabe, & Emoto, 2020, GJI, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa404>

Takemura, Emoto, & Yamaya, 2022, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1674758/v1>

謝辞

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

Amplitude anomalies observed in the S-wave seismic reflection survey data on the Shikano fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Takao KAGAWA¹, Tatsuya Noguchi¹, Koji Yamada²

1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Hanshin Consultants Co. Ltd.

1. はじめに

1943年鳥取地震（Mj7.2）で出現した鹿野断層を横断してS波反射法地震探査を実施した（香川・他, 2020）。この探査では、S波震源として油圧による板叩き機材を用い、ショット間隔1 m、地震計間隔1 mで201チャンネル（測線長200m）の記録を得た。今回、人工震源を用いたこれらの稠密観測記録の減衰特性を解析し、地表地震断層近傍で有為に小さい振幅が観測されたので報告する。

2. 解析の概要

観測では2KHzサンプリングで4000データ（2秒間）が保存されており、それぞれ1震源毎に複数回の発震がスタックされたものとなっている。全201チャンネルの中間（101チャンネル）付近が地表断層の露頭部に相当するが、反射断面ではやや北寄りの110から115チャンネル（CMP220から230）に地下構造の変化が観察されている。まず、各波形のオフセットを取り除いた最大値を求め、断層露頭部を含む51から151チャンネルの振幅を震源からの距離（ x ）に対する累乗近似（ $b \cdot x^a$ ）で表現した。念のため200m/sの速度フィルターで表面波の影響が小さいことを確認している。図の上側に結果の例を示すが、太実線が近似式と適用範囲を示している。決定係数（ R^2 ）は概ね0.8以上で近似された。次に、観測振幅を近似式で除した比率を求め、対象区間の各チャンネルで平均値を求めた。なお、あまりにショットに近いデータは採用せず、ショット1から41（南から）とショット161から201（北から）の82データを用いた。

3. 解析結果

結果を図の下側に示す。南からショットした場合（細実線）と北からの場合（破線）、および全平均（太線）を示している。どちらから波動が到来した場合も、チャンネル90から120程度で振幅比が1を切っており、断層帯部分で大きく減衰していることが分かる。それよりも遠いチャンネルでは振幅比が1以上となっている。ここで卓越する波群が深部からの反射波であることから、地表付近の破碎帯に影響されない、より深部を通過した波群による影響と考えられる。断層帯近傍では常時微動の卓越周期が不明瞭になる傾向も見られ、このような断層破碎帯が振動特性に大きく影響しているものと考えられる。一方で断層破碎帯は地震動を効率よく伝達するため破碎帯での振幅が大きくなるとの報告もあるが（伊藤・他, 2020など）、破碎帯に直交して伝播する場合は波動を減衰する効果を示すことが改めて示唆された。

4. おわりに

過去に地表地震断層を生じた断層帯で実施した人工地震探査記録を解析したところ、破碎帯部で有為な減衰傾向が見られた。次のステップとして、波形に見られる特性などより詳細な解析を試みたい。

謝辞

S波反射法地震探査の実施は、日本学術振興会科研費 19H02406の助成を受けたものです。記して感謝致します。

参考文献

伊藤・他(2000), 日本地球惑星科学連合2000年大会.
香川・他(2020), 日本地震学会2020年度秋季大会.

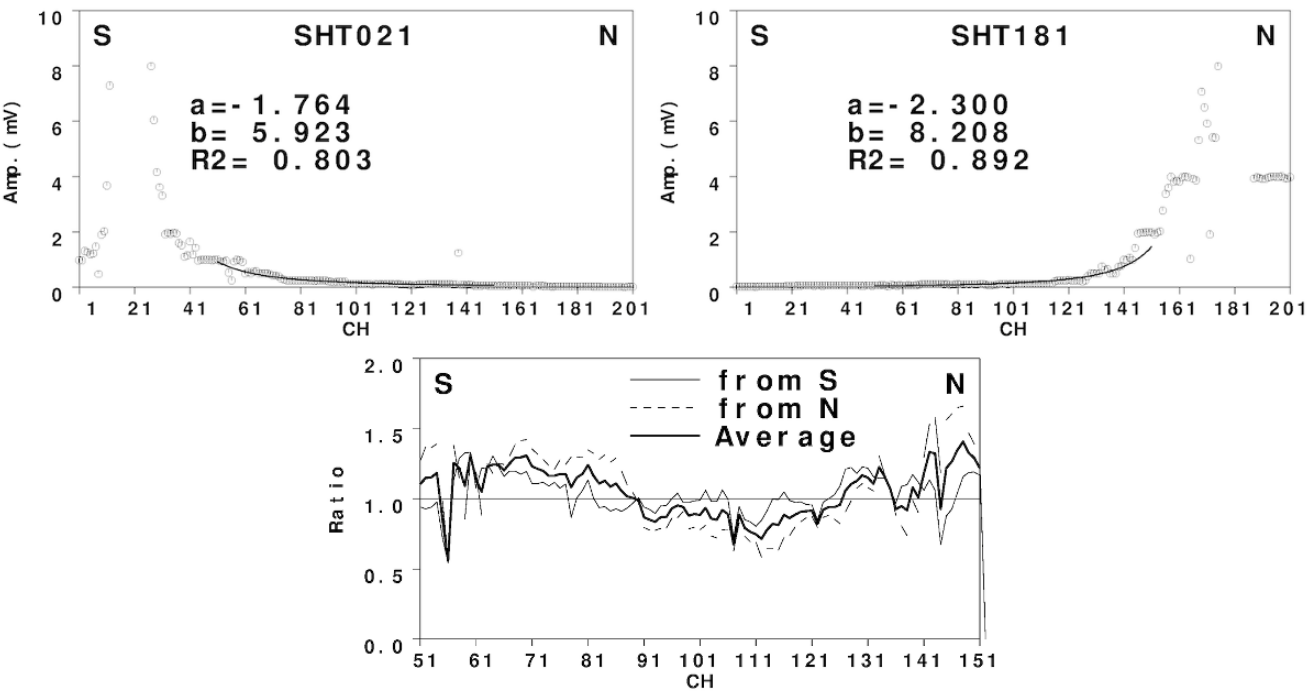


図 観測振幅の累乗近似（上）と近似モデルと観測の振幅比（下）

Characteristics of microtremors in the vicinity of the Yoshioka fault caused by the 1943 Tottori earthquake

*Tatsuya NOGUCHI¹, Isamu NISHIMURA², Takao KAGAWA¹

1. Tottori University, Faculty of Engineering, 2. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University

1. はじめに

1943年の鳥取地震で生じた吉岡断層において、地震断層ごく近傍の地盤震動特性を把握するために、微動探査や重力探査が実施されており、断層に伴う地下構造の変化が確認されている（野口・他，2022）。本研究では、その際に実施された大塚地区で稠密な微動観測データを詳細に分析し、地表地震断層の位置と微動特性の関係を調べた。

2. 観測データ

微動観測データ（野口・他，2022）は、1943年鳥取地震で生じた地表地震断層が確認された（金田・他，2002）鳥取市大塚地区で実施した単点3成分観測（167点）のデータである。複数のライン上（道路沿い）に10～20m間隔で観測点を設け、11台の地震計を用いた同時観測したデータが含まれる。地震計はJU410（白山工業）を用い、サンプリング周波数は200Hzとし、観測時間は単点3成分観測では1か所につき10分間としている。

3. 解析

各地点の3成分記録について、20.48秒間の区間を5区間以上選定し、各成分のフーリエスペクトルを求め、平均スペクトルとし、水平動2成分に対する上下動のスペクトル比（H/V）を求めた。H/Vの卓越周期、ピーク値、形状などの特徴を詳細に調べた。同一地点で水平動2成分（東西、南北方向）に対するH/Vの形状が異なる事例があったため（野口・他，2022）ズレの大きさを指標化した。これらのH/Vの特徴や指標について分布図を作成した。また、断層を横切るライン上の観測点では、微動波形から10秒間抽出し、0.1～0.5秒のバンドパスフィルターをかけ粒子軌跡を求めた。

4. 微動特性

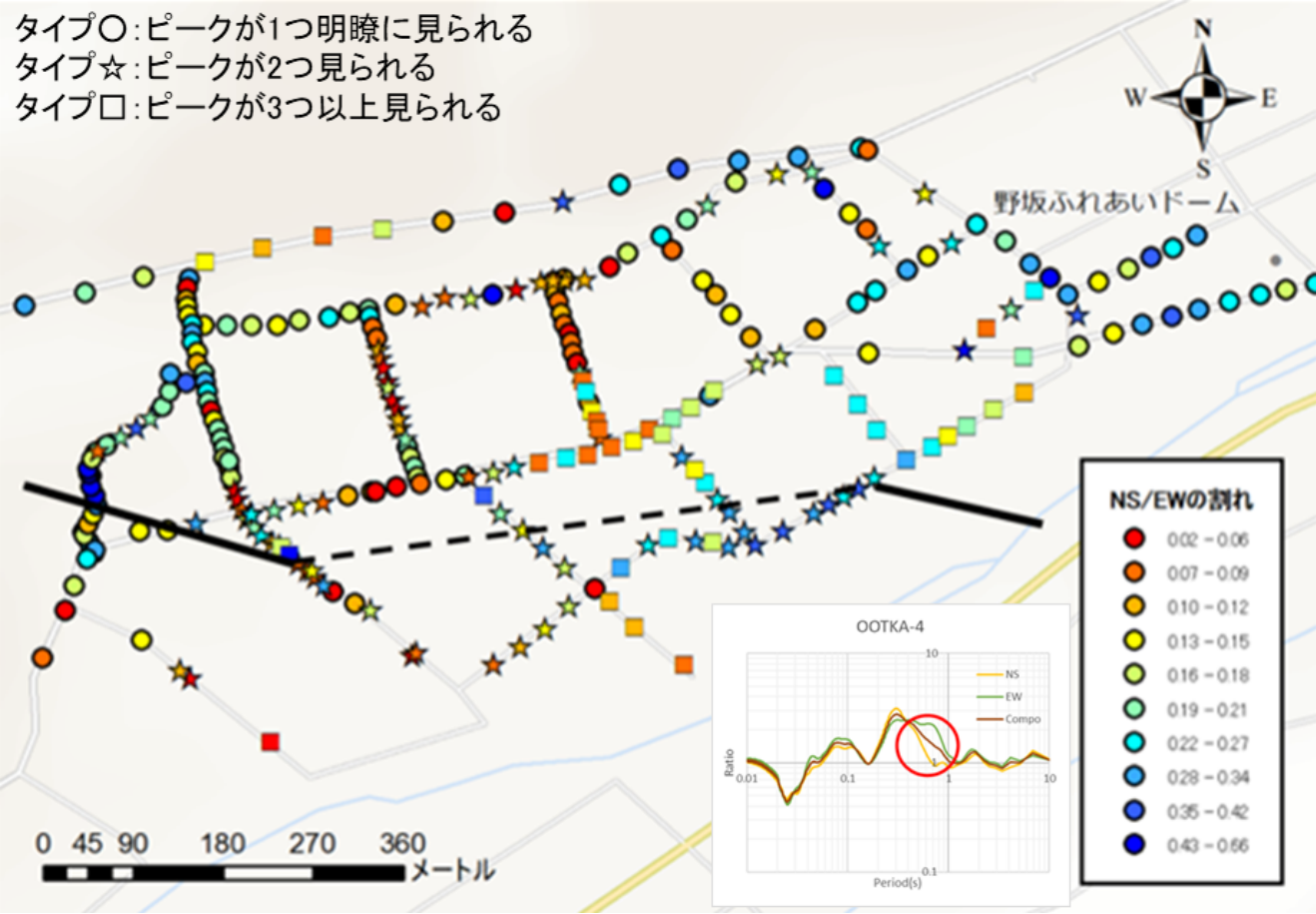
H/Vの形状の違いは局所的に特定の地域に分布している。特に東西の方向に走る1943年鳥取地震の断層線（推定断層線）を直交するラインで比較すると、断層線を境にH/Vの形状が変化するラインがあった。また、断層線の近傍では、水平動成分が断層走行方向と直交方向でH/Vの形状が異なる様子もみられた。粒子軌跡も断層線の直上で水平動の振幅が大きく、断層の走行方向に大きくなる地点があった。

5. まとめ

吉岡断層のごく近傍において実施された微動観測データの分析より、微動H/Vの形状などの特性について詳しく調べた結果、断層線の近傍やそれを境に特徴が異なることがわかった。今後は線上に配置した同時観測記録から、2点間の記録を用いて位相速度分散曲線を算出し、断層線近傍の速度変化を調べるなど、H/Vの形状が変化する原因について検討する予定である。

参考文献

野口・他（2022）：日本地球惑星科学連合2022年大会，SSS10-P12。
金田・他（2002）：活断層研究，Vol.2002，No.21。



Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground in Wakabadai, Tottori City from Microtremor and Seismic Observations

*Isamu NISHIMURA¹, Tatsuya NOGUCHI², Takao KAGAWA²

1. Graduate School of Engineering Department of Social Infrastructure Engineering, Tottori University, 2. Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University

高度経済成長期以降、丘陵地の斜面や山麓地域に盛土などの人工的な造成地が次々と開発され、そのような地域では地震被害が懸念されている。近年の一連の地震災害では軟弱な盛土地盤による被害が顕著であり、大地震において周辺の切土地盤よりも被害が大きいことが報告されている。これは谷埋め部と土切り部ではS波速度が低く、地震動を増幅しやすいなど地盤の性質が異なるためである。また都市近郊ではニュータウン建設などの大規模な宅地開発が行われ、人工的に造成された平坦な地形が広がっている。これらの地域では、切土や盛土が複雑に分布しており、地盤震動特性や地震による住宅被害の可能性が地点によって大きく異なることが想定される。

著者らは既往研究にて、大規模盛土造成地に指定されている鳥取市若葉台地区にて微動観測を実施し(図1)、切土地点と盛土地点で微動H/Vの卓越周期や表層のS波速度など、地盤震動特性が異なることを確認した。本研究では切土と盛土が複雑に分布している地点にて微動アレイ観測および地震観測を行い、既往研究を含めた観測結果を基に2次元地盤構造モデルを作成した。そのモデルを用いて2次元有限要素法を実施しモデルの妥当性を検証した。

観測について、微動アレイ観測を切土地点(AR4)と盛土地点(AR3)で各1点の計2地点で行った。地震計を円の中心に1台、円周上に3台が正三角形になるように4台配置し、アレイ半径は1-30mの範囲で、サンプリング周波数は200Hz、観測時間はアレイ半径ごとに15分程度とした。使用機器には加速度型微動計JU410を4台用いた。地震観測は2022年5月からアレイ観測点と同一地点である切土地点(AR4)と盛土地点(AR3)の各1点で実施しており、2022年8月現在も稼働中である。使用機器にはセンサに速度型地震計KVS300(近計システム)とデータレコーダーにHKS9700(計測技研)を用いて、測定方向を水平動2成分(NS, EW)成分、上下動成分の3成分とし、サンプリング周波数100Hzで常時収録、GPSクロックによる時刻校正する仕様とした。

微動アレイ探査では観測記録よりSPAC法(Aki K., 1957.)およびCCA法(Cho et. al., 2006.)により位相速度分散曲線を求めた。レイリー波基本モードに基づく理論的な曲線が位相速度分散曲線と微動H/Vスペクトルの両方を満たすよう、地盤構造モデルを試行錯誤で決定した。解析の結果、切土地点では表層に $V_s=500\text{m/sec}$ の層が推定されたが、盛土地点ではその層の上部に $V_s=200\text{m/sec}$ の層が9m確認された。

地震観測記録より、S波初動の20.48秒の区間を切り出し、テーパー処理を施した後、バンド幅0.3HzのParzenウィンドウでスペクトルを平滑化し、各成分のフーリエスペクトルを算出した。図2より切土地点を基準にした盛土地点との水平動の比(盛土/切土)を取ると、0.10秒と0.22-0.26秒の範囲にピークがみられ、盛土地点ではこれらの周期帯で切土地点よりも揺れやすいことが判明した。

推定した微動アレイ観測による地盤構造モデルと既往研究における微動H/Vの卓越周期から4分の1波長則で表層の層厚を推定した。卓越周期が読み取れなかった切土地点の層厚は一律0mとして内挿補完して層厚分布を作成した。層厚分布を基に対象地域の2つのアレイ観測地点を通るように2次元地盤構造モデルを切り出し(図3)、そのモデルを基に2次元有限要素法でシミュレーションを実施した。

モデルは盛土層と基盤層からなる2層地盤とし、表層地盤のS波速度を 200m/sec 、密度を 1.83g/cm^3 、基盤のS波速度を 500m/sec 、密度を 2.22g/cm^3 とした。また非線形解析には修正Ramberg-Osgoodモデルを用い、入力地震波には鳥取県の自治体観測点国府における2016年鳥取県中部の地震を使用した。モデルの側面および底面には粘性境界を用いて地震波の逸散を考慮している。図4より地震動解析と同様に切土地点を基準にした盛土地点の水平動スペクトル比(盛土/切土)を取ると、0.1-0.2秒の範囲と0.2-0.3秒の範囲にそれぞれ1つのピークがみられ、地震動解析の結果と概ね一致することがわかった。

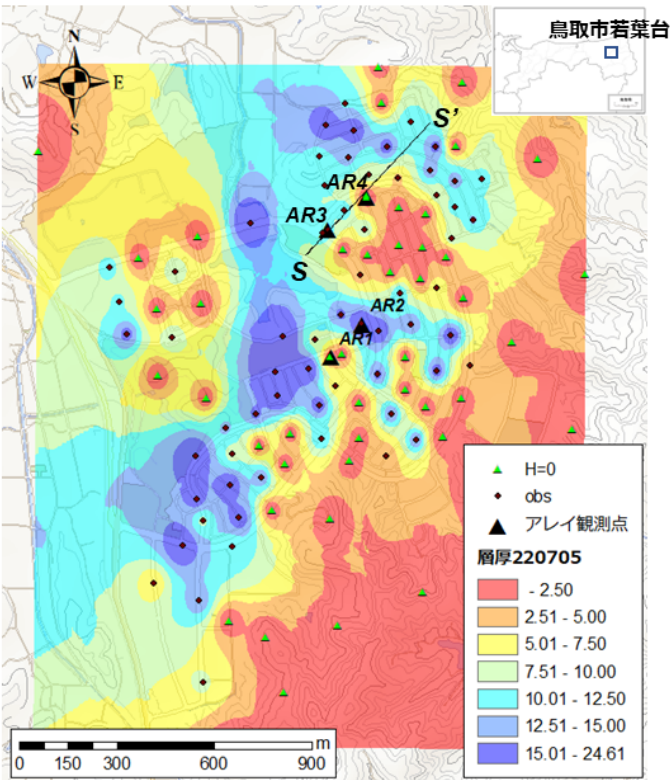


図1 鳥取市若葉台における微動H/V卓越周期から推定した表層地盤の層厚分布

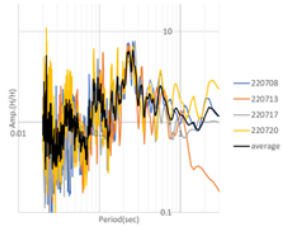


図2 地震観測記録から得られた水平動比(盛土/切土)

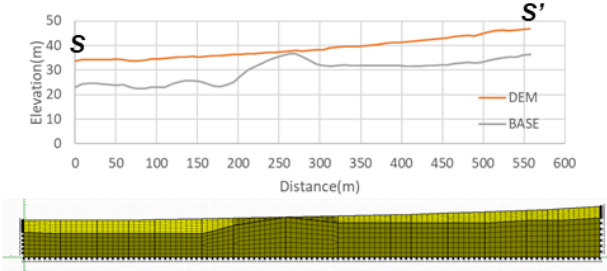


図3 FEM解析に使用した2次元地盤モデル

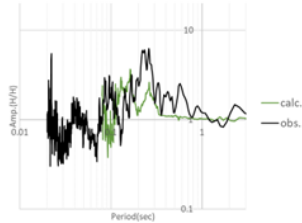


図4 図2の観測記録とFEM計算結果の比較

Investigation of Subsurface Structure in the Kochi Plain - microtremor survey and document retrieval

*Nobuyuki YAMADA¹

1. Kochi Univ.

高知平野は、南北数km東西20～30km程度の小さな平野であり、四国南部地域の地形や地質の成因[例えば、産総研(2018)]からは、変化に富んだ複雑な地質・地下構造であることが窺える。こうした小規模な平野においては、平野規模や地形の変化具合に見合った密度での面的な速度構造情報の把握やモデル化およびその修正手法の検討は必要なことであると考えられる。こうした点を踏まえ、平野端部に注目して、山田(2021)に引き続き、新たに検討した内容について報告する。

(1)高知平野西端部での地盤震動調査

平野西端部に位置するボーリング測線では、工学的基盤相当層(軟岩層に区分)の上面形状に、10m超の段差構造(東下がりの段差:西側で上面深さ10m弱、東側で同20数m)が示されていた。そこで、段差付近での単点常時微動観測(15分程度の収録を30か所、同一箇所でも日時を変えて複数回実施)を、3成分強震計を用いて行った。得られた微動データを用い、主に1～10 Hzを対象にH/Vスペクトル比(以下、H/V)や最西端の地点を基準にしたスペクトル比(増幅度)の算出を行った。H/Vでは、形状に明瞭な山谷が現れず、注目した段差周辺での顕著な差異もみられなかった。増幅度では、段差の周辺での変化は小さく、むしろ段差の西の表層厚の小さいところで増幅度が大きくなる傾向が見られた。ボーリングデータでは、段差の西側は、泥質層(層厚数m)と砂礫層(約5m)、東側は、砂礫層が大半を占める(約20 m)地質構造となっており、微動データの結果は、ごく表層の泥質層が反映されたものと考えられる。

(2)平野西部・中央部での小規模微動アレイ観測

微動アレイ観測は、(a)高知大学朝倉キャンパス(上記(1)の測線の近隣)1ヶ所と、(b)平野の南北端部から高知城付近を通る平野を縦断する測線(山田(2021)で報告してきた測線)上の10ヶ所で実施した。観測は、(a)(b)ともに円周上(正三角形の各頂点)とその重心の計4点に地震計を配置し、円の半径を1～2 mから十数mと複数設定し、それぞれ15～20分間程度、100Hzサンプリングで微動の収録を行った。それには、加速度計(アカシ製JEP6A3)と無線LAN振動計(白山工業SU101)を組み合わせた機器を用いた。得られたデータをもとにBID02.0(長(2010))を用いて周波数毎の位相速度の算出を行った。(a)では、7～15 Hzの帯域で周波数毎の連続性のある位相速度が得られ、その値は300～800 m/sであった。また、ボーリングデータと大堀ほか(2013)などによる物理定数をもとにした理論位相速度を算出し、観測位相速度と比較した。詳細な検討を要するが、320, 700, 1500, 3200 m/sの4層を主とした構造のモデルを仮定した場合、観測データから算出した位相速度との対応が最もよくなった。(b)では、3～15Hzの帯域で位相速度が得られ、その値は150～600m/sで、(a)に比べて広い帯域で得られ、位相速度は高周波で低い値となった。このことは表層地盤の層厚が大きい、又は、物性値が小さいことを反映しているといえる。今後、表層地盤構造の推定や速度構造のモデル化に繋げたい。

(3)高知平野における地盤震動に関する文献調査

既往の研究の現状実態を把握するために、地盤震動による構造調査などのワードをタイトルに含む関連学会の論文および発表要旨を検索(各学会誌の検索システムやCiNiiを利用)した。これによると、現在のところ、54件ほどが該当した。ボーリング調査結果も含むが、その大部分は、常時微動のH/V比に関するもので、H/V比のピーク周期をもとに表層地盤の層境界深さを推定するものもあった。ここまでの調査では、前述した大堀・他らの論文などが微動アレイ探査によるもので、S波速度構造にまで触れられている数少ない文献であった。更なる文献の掘り起こしと既往の研究結果を概観し、今後のモデル化等の作業に反映させたい。この報告の内容の一部は、高知大学理工工学部の2021年度卒業研究:鈴木嵩大氏、原拓也氏らの成果によるものです。また、この研究の一部は、科学研究費基盤研究(A)(課題番号:22H00234)の補助を受けています。関係者各位に記して、感謝いたします。

Estimation of shallow subsurface structure in the Oharadai area, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, using H/V spectral ratios and borehole data

*Yasuyuki IWASE¹, Kojiro Kato², Yusuke Mizuno²

1. Department of Earth and Ocean Sciences, School of Applied Sciences, National Defense Academy, 2. Japan Maritime Self-Defense Force

神奈川県横須賀市にある標高80m～90mの台地の小原台は約10万年前の海岸段丘である。地質学的な調査により地表から、主に、火山灰（ローム層）、砂礫（小原台砂礫層）、礫（走水礫層）の順の地質構造であることが明らかとなっている（例えば、江藤、1998）。小原台砂礫層の分布域である小原台の最上部は防衛大学校によるボーリング調査により、約100地点で地下浅部構造が詳細に記録されている。

ところで、常時微動H/Vスペクトル比を用いると表層地盤の厚さを推定することができる（中村・上野、1986）。この手法で必要とされる常時微動データは厚さを推定する地点の1点のみで良いことが特徴であるが、表層地盤のS波速度が既知でなければならない。また地層ごとのインピーダンス比が大きければ地層の厚さを推定することも可能である。

本研究では、小原台でボーリング調査が行われている地点のうち、比較的データの信頼できる59地点の半径5m以内で常時微動観測を行った。観測には白山工業JU-410微動計を用い、サンプリング周波数100Hzで各観測地点でそれぞれ15分間の計測を行った。得られたデータは10.24秒、20.48秒、40.96秒ごとのタイムウィンドウに分割し、各タイムウィンドウの東西・南北・上下動のフーリエスペクトルを計算し、バンド幅0.05Hz～1HzのParzenウィンドウにより平滑化後、相加平均または相乗平均を計算した。さらに東西成分と南北成分の2乗和平方根を水平方向成分とし、水平方向成分を上下方向成分で割ることでH/Vスペクトル比を求めた。また、タイムウィンドウごとにH/Vスペクトル比を算出し、相加平均をH/Vスペクトル比とする計算も行った。

H/Vスペクトル比が最大となる周期はローム層（地表の埋土などを含む）に対応していると考えられるため、最近接のボーリング調査地点のローム層の厚さと周期の関係から最小二乗法によりローム層のS波速度を求めた。その結果、H/Vスペクトル比の計算方法やパラメータによらず、ローム層のS波速度は約145～約150m/sと計算された。このときの決定係数はほとんどが約0.97であった。この値は、道路橋示方書（社団法人日本道路協会、2002）の推定式にボーリングデータの平均N値を代入して求めたS波速度である約160m/sと大きく矛盾はしない。

次にH/Vスペクトル比が最大となるピークよりも低周波で、かつ、最大ピークとなる周期は小原台砂礫層と走水礫層との境界深度に対応していると仮定し、ローム層および小原台砂礫層の厚さから小原台砂礫層のS波速度を求めた。この結果はパラメータや計算手法に依存し、約140m/s～約700m/s（決定係数は0.58～0.77）が得られたが、多くは200m/s～300m/sであった。しかし、最小二乗法の決定係数が0.73を超える場合には、約265m/s～約270m/sと安定した数値が得られた。なお、ボーリングデータの平均N値（約30）から推定したS波速度は約250m/sである。

最後にボーリングデータ調査地点から離れた地点での常時微動データに本研究で得られたS波速度を用いて小原台のローム層と小原台砂礫層のそれぞれの層厚分布を推定した。ローム層は全領域に渡ってほぼ10m程度の厚さであり、小原台砂礫層は約5m～約10mの厚さという結果となった。ローム層ではボーリングデータと常時微動データから推定される層厚に大きな違いはなかったが、小原台砂礫層は両者の差異が大きい

(～5m) 地点があった。小原台砂礫層と走水礫層に対するH/Vスペクトル比のピークを正しく検出できていないことが原因かもしれない。

本研究では、H/Vスペクトル比のピークの読み取りに主観を排除するために機械的に地表からの第一境界層を最大ピーク、第二境界層を最大ピークより低周波の最大ピーク（以下、第二ピークと呼ぶ）とした。その結果、最大ピークの検出には本研究で試みた方法やパラメータには大きな依存性はないことが分かった。一方で、第二ピークの検出には大きな誤差が見られた。この原因は、小原台砂礫層（第二層）と走水礫層（第三層）の速度コントラスト（走水礫層のN値を50とすると速度コントラストは約1.2）が、ローム層（第一層）と小原台礫層の速度コントラスト約1.8倍よりも小さいことからくるのかもしれない。複数のパラメータでS波速度の計算を試み、決定係数の高い結果を採用するのが最適であると考えられる。常時微動観測は簡単に観測密度を高くすることができ、層厚の計算も複雑ではないため最適なパラメータを探索することで、必要な精度の地下構造を得ることができる可能性がある。

Estimation of V_{s30} using microtremor array records in Thimphu and surrounding towns, the Kingdom of Bhutan

*Takumi Hayashida¹, Nityam Nepal², Phuntsho Pelgay², Shiro Ohmi³, Karma Namgay², Dowchu Drukpa², Hiroshi Inoue⁴

1. IISEE, Building Research Institute, 2. DGM, Ministry of Economic Affairs, Bhutan, 3. DPRI, Kyoto Univ., 4. NIED

Bhutan is a landlocked country located in the eastern Himalayas, one of the most seismically active regions in the world. Thimphu and surrounding towns (Isuna, Paro, and Ura) are located in the western central part of Bhutan at altitudes of >2000 m, and settlements are distributed along river valleys. The global V_{s30} map calculated from the ground slope (Heath *et al.*, 2020) indicates decreasing V_{s30} values along the valleys. Recent seismic intensity observations also show large ground shakings in the valley areas compared to mountainous sites. To evaluate the effect of subsurface soil structure on the ground motion, we conducted microtremor measurements in the areas. We used four portable broadband seismometers (CMG-40T: Guralp Systems Ltd.) with 24-bit recorders (Centaur: Nanometrics Inc.) for the measurements. Microtremor arrays with radii of 5–30 m were deployed in the valleys and uphill areas, and the measurements were taken for >15 minutes for each array. We applied the spatial autocorrelation (SPAC) method (Aki, 1957; Okada, 2003) for velocity structure estimations and derived microtremor horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios to identify dominant frequencies at each site. We found the microtremor measurement below 10 Hz was difficult due to stiff subsurface soil as well as weak microtremor power in the target areas, but the SPAC results indicate dispersive characteristics of Rayleigh wave phase velocity above 10 Hz, and the estimated structure models show S-wave velocity profiles down to several tens of meters. We estimated V_{s30} values using the estimated S-wave velocity models or by applying the directly V_{s30} estimation method with SPAC coefficients (Hayashida *et al.*, 2022; in review). Our results showed no apparent difference in deeper soil structures between the valley and uphill areas but a slight difference in the shallower part (several meters below the ground surface) due to fluvial sediments. The estimated V_{s30} values range from 300–900 m/s, which are comparative with those calculated using topographic features, and our results contribute to the development of more detailed hazard maps.

Acknowledgments:

This study was supported by Japan Science and Technology Agency (JST) and Japan International Cooperation Agency (JICA) under the "Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS): Project for Evaluation and Mitigation of Seismic Risk for Composite Masonry Buildings in Bhutan (FY2017-2022)".

Basic study of ground amplification factor based on microtremor array observations at seismic stations.

*Shigeki SENNA¹

1. NIED

防災科学技術研究所では、広帯域の強震動評価を行う事を目的として、関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデルを構築し、構築した地盤モデルによるAVS30や地盤増幅率（最大速度増幅率）を地震本部およびJ-SHISより2021年3月26日に公開されている。このモデルの作成では、関東地方全域において、約31万本のボーリングデータで初期モデルを作成し、低地・台地を基本として約1km間隔（3次メッシュ単位）で約14,000地点の解析結果に基づいて250mメッシュ間隔の地盤モデルが構築され、地盤増幅率の評価がなされている。関東地方およびその周辺地域における、K-NETおよびKiK-net等の地震観測点においては、微動アレイ観測も実施されており、地震観測記録と微動アレイのS波速度構造に基づく地震動応答計算による周期毎の増幅特性の検証もなされ（地震本部2017, 2021）、その結果、微動アレイ観測に基づいたS波速度構造の精度は非常に高いことが確認されている。現在の表層地盤モデルによる地盤増幅率の評価は、藤本・翠川（2006）で実施されているが、地盤増幅率に使用されているAVS30はK-NETやKiK-netのPS検層を基に計算されているものである。本研究では、地盤モデルによるAVS30による地盤増幅率の精度検証の一環として、微動アレイから得られるS波速度構造に基づくAVS30と地盤増幅率の関係を評価し、今後において、微動アレイ観測が実施されていれば最適な地盤増幅率が評価できる事、新しい地盤増幅率の提案すること等を目的としている。本件等では、手始めに関東地方およびその周辺地域（山梨県・長野県・福島県等）を含むK-NET、KiK-netの海域および離島を除く全観測点（587地点）および自治体震度計（千葉県・茨城県を中心として130地点）、MeSO-net（293地点）の合計1010観測地点のベリポイントにおいて、半径20m程度以下の中心点のない三角形・L字および半径60cmのそれぞれのアレイ探査を実施した。観測したほぼ全ての地点においてAVS30が評価可能な良好な結果を得ることが出来ている。AVS30の計算は長尾・紺野（2002）に基づく波長40m(C40)に基づく方法、1/3波長則に基づく方法(Ballard(1964))、および、Arai and Tokimatsu(2004, 2005)の手法を参考とした位相速度とH/Vによるインバージョン解析、Cho and Iwata(2019)のベイズ理論に基づいた手法のそれぞれのS波速度構造を求め、PS検層や、N値とS波速度構造の変換式で換算したS波速度構造（例えば太田・後藤(1978)等）と、AVS30から得られる最大速度増幅率（藤本・翠川(2006)）等を計算し比較した。また、工学的基盤相当層(V_s400)上面から伝達関数関数を計算し、地震観測記録から計算されるスペクトル増幅率（地表地震記録の速度応答スペクトル／距離減衰式における速度応答スペクトル）を用いてS波速度構造の精度の検証を行った。

（参考文献）

- 藤本一雄・翠川三郎 (2006) : 近接観測点ペアの強震観測記録に基づく地盤増幅率と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 6, 1, 11-22.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017) : 「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル説明資料.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2021) : 「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル説明資料.
- 長尾毅, 紺野克昭 (2002) : 常時微動アレイ観測に基づく表層地盤の平均S波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集, No.696, I-58, pp.225-235.
- Arai, H., and K. Tokimatsu (2004) : S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 94, no.1, pp.53-63.
- Cho, T. Iwata(2019) : A Bayesian Approach to Microtremor Array Methods for Estimating Shallow S Wave Velocity Structures: Identifying Structural Singularities, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(1), pp.527-553.

Application of Bayesian Optimization to Estimate 1D Subsurface Layered Structure from Near-filed Seismic Waveforms

*Hisahiko KUBO¹

1. NIED

三次元地下速度構造モデルに基づく地震波伝播シミュレーションは昨今では一般的となっているが、近地地震波形の理論的な計算には一次元地下成層構造モデルが近年でもよく用いられている。これは計算の手軽さという理由が大きいが、観測地点直下の速度構造を深さ方向に複数の層で構成されるモデルで近似しても近地地震波形記録がよく再現できるケースが多いという側面もある。一次元地下成層構造モデルの作成においては、既存の三次元地下速度構造モデルからの観測点直下の構造の切り出しやボーリング調査に基づくモデル構築だけでなく、アレイ探査や地震観測などに基づくモデル推定も行われており、例えば中小規模の地震における近地観測波形記録のモデリングを通じた構造推定は有力なアプローチの一つである（e.g., Ichinose et al. 2003; Kakehi 2004; Asano and Iwata 2009）。既存研究では、一次元地下成層構造の推定に、グリッドサーチや勾配法、遺伝的アルゴリズム、焼きなまし法、マルコフ連鎖モンテカルロ法などが用いられてきた。本研究では、近地地震波形に基づく一次元地下成層構造の推定問題に、ブラックボックス最適化問題における効率的な探索手法として近年注目されているベイズ最適化（Mockus 1989; Jones et al. 1998; Frazier 2018）を適用する。一次元地下成層構造モデルは各層の厚さと物性値の組み合わせで構成されるが、各パラメータの間にはトレードオフがあり、どのような組み合わせが観測波形を最もよく再現できそうかを予め予想することは困難である。そのため同推定問題は、波形残差というブラックボックス関数を最小にするモデルパラメータの組み合わせを最適化するブラックボックス最適化問題と言える。ベイズ最適化は可能な限り少ない試行回数でブラックボックス関数の性質を解明し、それを最適化することを目的とした機械学習手法である。具体的には、それまでの試行結果に基づいてガウス過程などによりブラックボックス関数を近似した代理モデルを作成した上で、その代理モデルにおける期待値や標準偏差などに基づく獲得関数を最大化するように次の試行を行う、という流れを繰り返していく。なお既存の研究では各層の厚さもしくは物性値のどちらかを固定した上で、もう片方を推定するということが行われてきた。それに対して本研究では各層の厚さと物性値を同時に解くことにも挑戦している。

本手法における一次元成層地下構造モデルは各層の厚さと5つの物性値（P波速度 V_p ・S波速度 V_s ・密度・P波減衰係数 Q_p ・S波減衰係数 Q_s ）で構成される。これらの物性値の間には緩やかな対応関係があることが分かっているため、経験式を用いることで推定すべき物性値の数を減らす。本研究では V_s を推定パラメータとし、 V_p および密度はBrocher (2005)の経験式により V_s から求める。また Q_p および Q_s はKawabe & Kamae (2008)およびKoketsu et al. (2009)を参考にして V_s から求める。層の数に関してはあらかじめ設定する。一次元成層地下構造モデルから理論波形を求める際には、離散化波数積分法（Bouchon 1981）と反射・透過係数行列法（Kennett & Kerry 1979）を用いた。ベイズ最適化のツールとしてPreferred Networksによるオープンソースのハイパーパラメータ自動最適化フレームワークOptuna（Akiba et al. 2019）を用いる。Optunaはdefine-by-runスタイルのユーザAPIを有するpythonライブラリであり、各種のベイズ最適化アルゴリズムを備えているほか、様々な可視化や枝刈り、並列化の機能も有する。ベイズ最適化のアルゴリズムにはTree-structured Parzen Estimator（Bergstra et al. 2011, 2013）を用いた。

予備的な理論テストからは、各層の V_s を一定範囲内でフリーに探索するよりも、深いほど V_s が大きくなるという制約を入れる形で解の探索範囲を絞った方が、同じ試行回数でより真値に近い解にたどり着くことが分かった。今後さらなる理論テストや実記録を用いた解析を通じて手法のアップデートを図るとともに、同手法の妥当性やその有用性を検証する。

謝辞：本研究はJSPS科研費21K14019の助成を受けたものです。

Site investigation by surface wave measurements on subsidiary faults of 2016 Kumamoto Earthquake

*Naoto INOUE¹, Kotaro Mizutani¹, Naoko Kitada¹, Kazuki Watanabe², Noriyuki Shibuya², Masashi Omata²

1. Geo-Research Institute, 2. PASCO

地震により地表地震断層が発生すると、副次的な断層が時には断層主部(主断層)から数km 離れて発生することもある。特に主断層から離れた場所に発生する副次的な断層には、既存断層構造との関係が指摘されている(Boncio et al., 2018, Nurminen et al., 2020, 高橋・他, 2020)。そこで、副次的な断層が発生した地点の地下構造を明らかにすべくトレンチ調査を行ってきた(例えば渋谷・他, 2018)が、トレンチ調査では検討できる深度に限度があるため、物理探査により浅部地下構造の検討を行った。2016年熊本地震の際にSARにより抽出された微小な地表変状が示唆された箇所(小俣・他, 2017)で表面波探査やGPR探査を行い、浅部地下構造の検討を行った。本発表では表面波探査の結果について報告する。表面波探査は浅部地質構造調査に有効な手法の一つである。地表付近を伝播する表面波はS波速度構造に敏感であり、減衰しにくいいため測定が容易である(例えば三浦, 2017や林・他, 2001など)。岩石の堅さとS波速度には相関性があり、堅い岩石ほどS波速度が大きくなる。探査機材はMcSEIS-SXWを用い、受震点・発信点はいずれも2m 間隔とした。震源には10kgの掛矢を用いた。解析はSeisImager(Geometrics, 2019)を用いた。計測したデータから表面波の位相速度を求め、これを説明する地下構造を逆解析により推定を行った。ほとんどの測線で深くなるにしたがい速度は速くなる傾向にある。得られた浅部速度構造からは、断層構造を示唆するような明瞭な速度コントラストはみられなかった。しかしながら、多くの箇所で側方に速度構造が変化している(低速度層が厚くなる)傾向がみられた。したがって、地震時に副次的な断層に相当するような変状を呈する場所は、地下に不均質構造を有する可能性が考えられる。一方、地表で微小な変状が確認されたところでも速度構造に側方変化がみとめられなかった測線もあったが、表面波探査ではとらえることができないスケールの不均質構造があるのか、それとも明瞭な不均質構造みられないものの副次的な断層が発生しているのかは今回の限られた表面波探査の結果からのみで考察することは困難であった。GPR探査やトレンチ調査等の各種浅部地下構造調査結果の蓄積が必要と考えられる。

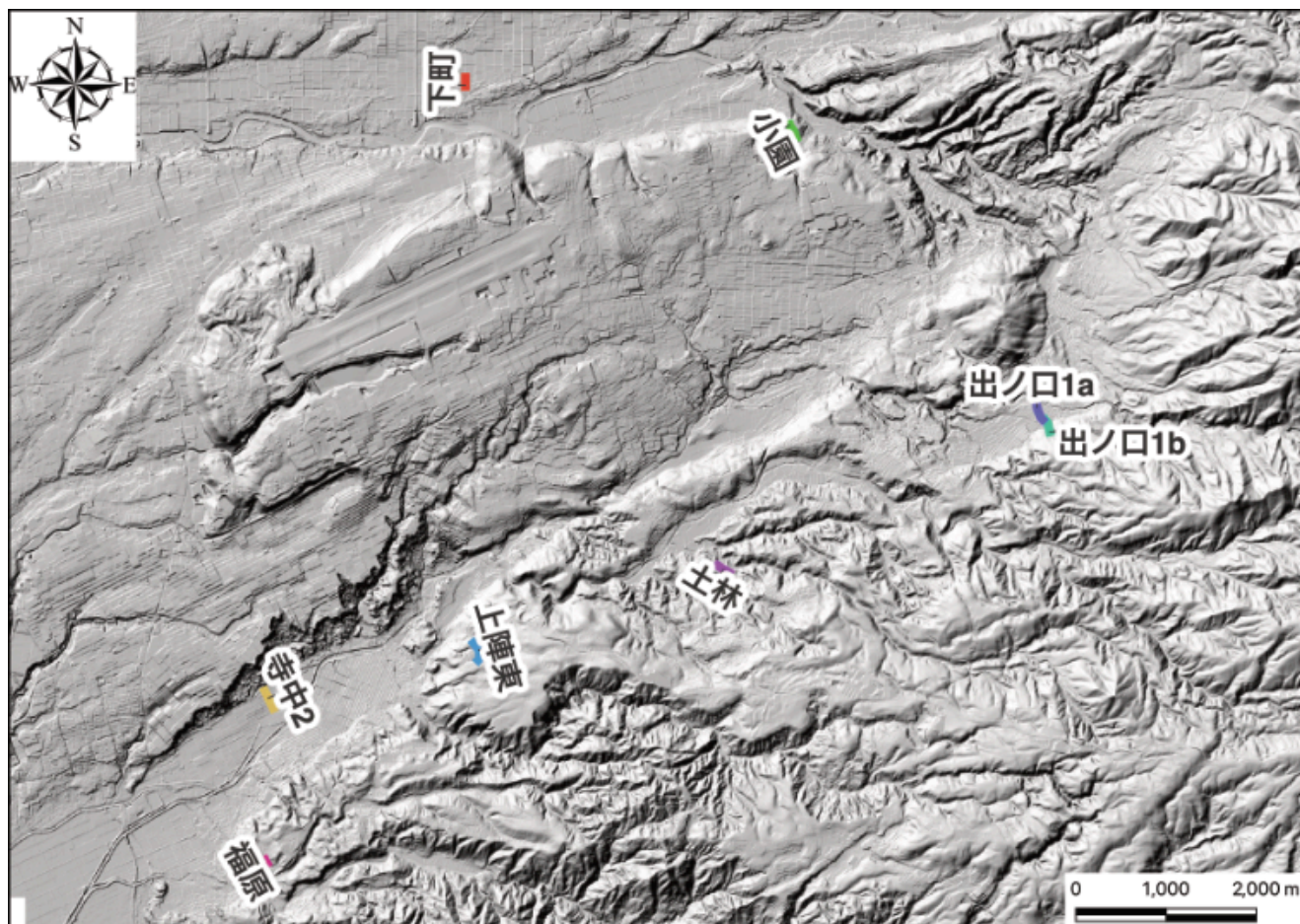
謝辞:表面波探査の際には現地の方々にご協力いただいた。なお、本検討の一部は令和3年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査)事業によるものである。

参考文献 : Boncio, P. et al. (2018): Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, 1, pp. 241–256.

Geometrics (2019): https://www.geometrics.com/wp-content/uploads/2021/05/SeisImagerSW_Documentation.zip.

Nurminen, F. et al. (2020): Frontiers in Earth Science, 8, p. 456, DOI: 10.3389/feart.2020.581605. 高橋直也・他(2020):活断層研究, 2020, 53, pp.51-65, DOI: 10.11462/afr.2020.53_51. 三浦みなみ(2017):博士論文, URL:<https://ci.nii.ac.jp/naid/500001054729>.

渋谷典幸・他(2018):日本地質学会学術大会講演要旨. 小俣雅志・他(2017):日本活断層学会2017年度秋季学術大会講演予稿集, P-4. 林宏一・他(2001):応用地質技術年報. 応用地質.



図：表面波探査測線位置図

Long-term monitoring of subsurface changes by a giant magnetostrictive seismic source

*Takahiro Kunitomo¹

1. Ontake Science Lab

東濃地震科学研究所（2022年3月31日閉所）で、2015年度にGPSに同期した任意波形を発生できるシングルフォース型の超磁歪震源を開発した。最大発生力が91kgf（890N）、上限周波数が1.25kHzで、一人でもハンドリングできる小型の震源装置である。直線距離約700mのボアホール観測点でも、1時間程度のスタッキングを行うことで、明瞭なP波の到来を確認できる。この震源装置を、瑞浪地殻変動観測壕内の地震計検定用のコンクリート基台に設置し実験を行ってきた。2016年4月8日から地下の常時モニタリング（弾性波の走時や波形変化の観測）を開始し、研究所の閉所に伴い実験場所を撤収した2021年11月2日までの期間、約5年半にわたって送信実験を継続した。その間、停電やGPS時計の受信不良の対策期間などを除けば、加振部には一度も触れることなく、メンテナンスフリーで稼働を行うことができた。本報告では、これまでの期間で得られた地下の変化について述べる。ボアホール地震計（土岐花崗岩内に設置）を用いた観測では、熊本地震（2016/04/16 M=7.3）によるP波およびSV波の走時変化が検出され、地震後の走時変化の推移が、土岐花崗岩中の間隙水圧の変化と良く一致していることが判明した（P波については2016年地震学会で報告済み）。送信は地震計のサンプリング周波数（400Hz）を考慮して100-200Hzの帯域で行い、観測データを1日間スタッキングし、クロススペクトル法による走時変化の検出を行った。TRS（深度505m、水平距離490m）では、P波走時に熊本地震に伴う60 μ sの遅延が観測された。また、TGR350（深度350m、水平距離50m）では、P波の走時変化は25 μ s以下であったが、後続のSV波の走時には155 μ sの遅延が観測された。走時遅延の原因は、地震による間隙水圧の上昇に伴うクラックの開口に起因する速度低下であると推定され、また、観測点の方向や波により遅延量が異なるのは、本地域の土岐花崗岩のクラックの卓越方向と弾性波の波線および振動方向により説明できる。地震後の走時変化は、P波SV波ともに、土岐花崗岩中に設置された間隙水圧計（瑞浪超深地層研究所の立坑内、深度200m）による間隙水圧の変化と相関しており、間隙水圧が上昇すると走時は遅れ、下降すると早まった。同様の変化は、瑞浪超深地層研究所の立坑埋め戻しに伴って土岐花崗岩内の間隙水圧が変化する場合も検出されると期待されたが、埋め戻し開始直後に周囲のボアホール観測点が撤収されたため観測を行うことはできなかった。なお、2017年8月から送信を停止する2021年11月2日まで、瑞浪観測壕内に設置した小規模な地震計アレイによる瑞浪層群内の地下構造変化のモニタリングを行っており、1時間毎の差分波形を並べるだけでイベントに伴う波形変化が観測された。一つは、壕壁付近の岩盤破壊現象に伴う波形変化であり、後続波の変化から散乱構造の変化を捉えていると見られる。もう一つは、降雨後の波形変化である。降雨後に特定のフェーズが変化し、時間をかけて徐々に変化が解消されていく。また、より深い場所からの反射波もしくは屈折波であると考えられるフェーズでは、降雨から遅れて波形変化が見られる。こうした変化は、降雨後の地下水流動に対応しているのではないかと考えられる。（謝辞）実験期間中にアドバイスを頂いた元東濃地震科学研究所の石井紘博士と浅井康広博士に感謝致します。

Poster session (1st Day) | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Mon. Oct 24, 2022 3:30 PM - 6:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 6:30 AM - 9:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-2
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S08P] PM-P

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-01] Stress field and slip tendency analysis for the 2016 Mw7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand

*Tomomi Okada¹, Miu Matsuno¹, Ayaka Tagami¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Clifford H Thurber⁶, Richard H Sibson⁷ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-02] Source process analysis of the 2004 off Kii peninsula earthquake from using sparse observation network and Green functions based on a three-dimensional structure

*TAKAHITO NISHIMIYA¹ (1. Second Laboratory, Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-03] Commonality and diversity of ruptures occurring at the same asperity: the 2015 Mw6.8 Miyagi-Oki earthquake and Mw6.0-6.4 quasi-repeating earthquakes

*Keisuke YOSHIDA¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-04] Relationship Between Variations in Source Duration and Occurrence Areas of Earthquakes

*Goki Irie¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-05] Do deep low frequency earthquakes have the similar rupture growth process to ordinary earthquakes?

*Genki OIKAWA¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-06] What Actually is the Vertical Shock Verbally Reported for Shallow Earthquakes?

*Koji UENISHI¹ (1. Univ. of Tokyo)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-07] Outline and radiation efficiency of stochastic source time functions

*Shiro HIRANO¹ (1. Ritsumeikan Univ.)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-08] On shear localization by thermo-chemical pressurization and following destabilization and migration of the shear-localized zone

*Shunya KANEKI¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto University, DPRI)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-09] The earthquake interoccurrence time distribution in sheared granular model

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-10] Numerical experiments using a friction law both for fast and slow sliding

*Takane HORI¹, Hideo Aochi² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey))

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-11] Investigation of earthquake source scaling laws using dynamic rupture simulations with a hierarchical patch structure

*Kazuki Masuda¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-12] Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kears² (1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-13] Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation (Part 2)

*Yuko KASE¹, Yumi URATA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-14] Why do Gutenberg-Richter b-values decrease with time prior to large earthquakes? Insights from rate-and-state earthquake cycle simulations with frictional heterogeneities

*Ryo Ito¹, Yoshihiro Kaneko¹ (1. Kyoto University)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-15] Numerically reproduced segments of short-term slow slip events in the Nankai region

*Takanori MATSUZAWA¹, Bunichiro Shibasaki² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Building Research Institute)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-16] **Impact of Kuroshio meanders on a stationary slow slip event and local seafloor level change around the Nankai Trough**

*Keisuke ARIYOSHI¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Takeshi Iinuma¹, Masaru Nakano¹, Demian Michael Saffer⁴, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi³, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University (now at Japan Meteorological Agency), 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. University of Texas, Austin)

3:30 PM - 6:00 PM JST | 6:30 AM - 9:00 AM UTC

[S08P-17] A possible relation between Reidel shear band and rate- and state-dependent friction parameters

*Eiichi FUKUYAMA^{1,2}, Futoshi Yamashita², Sumire Maeda², Akihiro Shimoda¹, Shun Watanabe¹ (1. Kyoto University, 2. NIED)

Stress field and slip tendency analysis for the 2016 Mw7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand

*Tomomi Okada¹, Miu Matsuno¹, Ayaka Tagami¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha K Savage⁵, Clifford H Thurber⁶, Richard H Sibson⁷

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. GNS Science, New Zealand, 5. Victoria University of Wellington, New Zealand, 6. University of Wisconsin - Madison, United States of America, 7. University of Otago, New Zealand

2016年11月13日にニュージーランドで発生したMw7.8 Kaikōura地震は約20枚の複数断層による連動破壊により生じた。本研究 (Matsuno et al., 2022) では、Kaikōura地震の発生に対する応力の影響を理解することを目的とする。そのためには震源域の応力場を精度良く推定することが必要である。そこで、2013年4月から2018年12月、すなわちKaikōura地震前後における地殻応力場を推定した。臨時地震観測網により得られたP波初動による震源メカニズム解とGeoNetのモーメントテンソル解の両方を用いた。その際、本震の断層面以外で発生した地震を選択した。そして、選択した震源メカニズムの解に対して、応力テンソルインバージョンを行った。Kaikōura地震前の応力状態は震源域全体で概ね横ずれ型であり、応力テンソルの最大圧縮軸方向(σ_1)はWNW-ESEの方向であった。地震後、応力場の向きは大きく変化していなかった。このことは、Kaikōura地震の際の応力変化が応力方位を変えるには小さすぎたことを示唆しており、Kaikōura地震地震の前に大きな差応力が存在していた可能性を示唆している。しかし、地震後、それぞれの領域の応力比は増加あるいは減少の2つの異なるパターンで変化しており、差応力の大きさの領域による違い、あるいは間隙水圧が領域によって異なる変化をした可能性を示唆している。応力テンソルインバージョンの結果を用いて、Slip tendency (ST) の計算を行った。破壊開始点の断層では、高いSTが求められた。震源域中央に位置する断層 (Jordan thrustに相当する断層) は低いSTであったが、大きなすべりを起こした周辺の断層では高いST値が推定されており、破壊過程が周辺の断層に伝播していることと調和的である。震源域北端の断層はSTが最も低く、そのために破壊過程が停止したことを示唆される。また、各断層のすべり方向は推定した応力場により概ね再現することができた。以上の結果からは、地震前の応力がKaikōura地震の連動破壊過程を説明できることを示唆している。

Reference:

Matsuno, M., Tagami, A., Okada, T., Matsumoto, S., Kawamura, Y., Iio, Y., Sato, T., Nakayama, T., Hirahara, S., Bannister, S., Ristau, J., Savage, M.K., Thurber, C.H., Sibson, R.H., 2022. Spatial and temporal stress field changes in the focal area of the 2016 Kaikōura earthquake, New Zealand: A multi-fault process interpretation. *Tectonophysics* 835, 229390. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229390>

Source process analysis of the 2004 off Kii peninsula earthquake from using sparse observation network and Green functions based on a three-dimensional structure

*TAKAHITO NISHIMIYA¹

1. Second Laboratory, Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

気象庁は、南海トラフで異常な現象が観測され調査を開始すると南海トラフ臨時情報を発表する。特に南海トラフのプレート境界で M_w 7.0以上の地震が発生したと認識すれば速やかに巨大地震への注意・警戒を速やかに呼びかけることとしている。このため南海トラフで地震が発生した場合、プレート境界のどこからどこまで破壊に至ったのか速やかに把握したい。

破壊領域を知る手段の1つに震源過程解析がある。気象庁の地震観測網はリアルタイムで地震波形が伝送され、それを用いて24時間体制で地震活動を監視している。それら波形データを用いることで速やかに震源過程解析に着手することができるが震源過程にはやや疎な観測網であるかもしれない。

やや疎な観測網のデータであっても、地震波についての3次元構造を反映したより正確と思われるGreen関数を解析に用いることで妥当な震源過程が得られる可能性がある(西宮, JpGU Meeting 2022)。

そこで 2004/09/05 19:07(JST)に紀伊半島沖で発生した地震(M_j 7.1)について、当時の気象庁の地震観測網の波形データと3次元構造を反映したGreen関数を用いて震源過程解析を行った。

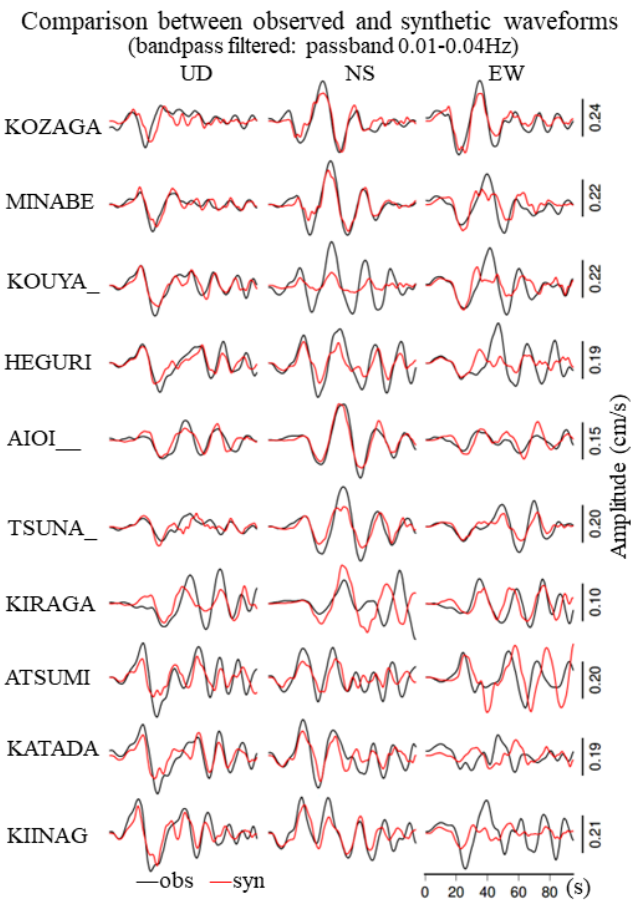
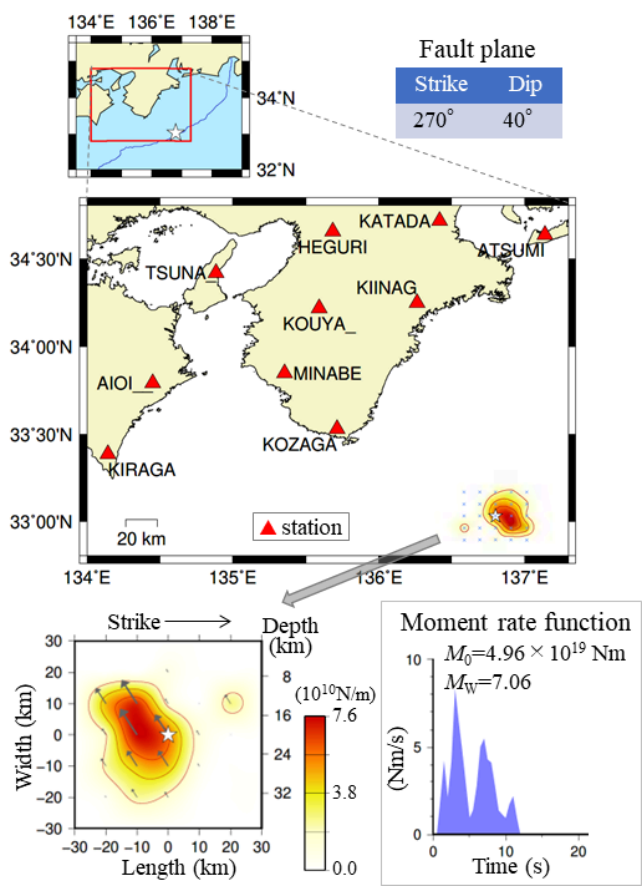
破壊開始点や断層パラメータについては、この地震について遠地P波を用いて震源過程解析を行っているPark and Mori(2005)の値を用いた。Park and Mori(2005)は南落ち・北落ちなど様々な走向・傾斜を持つモデルで解析を行い、その上で適切な断層パラメータを設定している。

設定した断層面上にグリッドを配置し、3次元構造として全国1次地下構造モデル(JIVSM)(Koketsu et al., 2012)を用いて、OpenSWPC(Maeda et al., 2017)の相反定理モードにより各グリッドと各観測点間のGreen関数を計算した。

そしてグリッドごとにGreen関数とすべりの基底関数から理論的な地震波を計算し断層面全体にわたって重ねて得た合成波形と、観測波形とを用いたマルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン(たとえばIde et al., 1996)により震源過程を得た。インバージョンでは、各グリッドでのすべり方向を断層すべりから ± 45 度の範囲内に拘束し、またすべり量が滑らかになるような制約を課した。すべりの基底関数には継続時間2秒の三角形関数を用いた。滑らかさのパラメータはABIC最小となるよう選んだ(Fukahata et al., 2003)。

結果、震源から東方向へ破壊が進行する、まとまった破壊領域が得られた(図参照)。これをPark and Mori(2005)の結果と比べると、破壊領域の広さなど傾向はよく似ているが、Park and Mori(2005)の結果に比べて東方向へ破壊が伝播する傾向が顕著に現れた。なお、この地震の東側で約5時間後に M_j 7.4の地震が発生している。

3次元構造でのGreen関数は計算に時間を要することから短時間で震源過程解析の結果を得る場合にはGreen関数をあらかじめ用意しておく必要がある。このため、断層パラメータを変えるなどの臨機応変な解析や得られた結果の誤差評価等について課題がある。



Commonality and diversity of ruptures occurring at the same asperity: the 2015 Mw6.8 Miyagi-Oki earthquake and Mw6.0-6.4 quasi-repeating earthquakes

*Keisuke YOSHIDA¹

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

2011年M9東北沖地震後、宮城沖北部地域では2015年Mw6.8の地震を含む複数のMw>~6のプレート境界地震が、その規模を少しずつ変えて、繰り返し発生している。本研究では、同一のアスペリティを共有して発生する異なる地震の発生過程の共通点と相違点、そしてその原因について知見を得る目的で、Mw6-6.8地震の震源過程および周辺域で発生する繰り返し地震の発生頻度の時間発展とについて調べた。

最初に、対象域周辺地震の相対位置を、地震の波形相関とカタログ値を用いた Double-difference法により求めた。その結果、この地域においては、東北沖地震直後から繰り返し地震が非常に短い繰り返し間隔で発生していることが分かった。東北沖地震の余効すべりに伴う loading rateの増加により、周辺域の地震活動が活発化していると考えられる。2002年の Mw6.4地震、2011年3月の Mw6.0地震、2011年7月の Mw6.3地震、2012年の Mw6.3地震、2020年4月の Mw6.3、2015年 Mw6.8地震、2020年の Mw6.3地震が、非常に近い位置で破壊を開始したプレート境界型地震であることが分かった。

次に、観測波形の deconvolutionにより 2015年 Mw6.8の地震および近接する5つの Mw6.0-6.4地震のみかけの震源時間関数を求め、source inversionにより、震源過程を推定した。その結果、これら6つの Mw6.0-6.8地震が、震源から西側にある同一のパッチを繰り返し破壊していたことが分かった。6つの地震のいずれの場合でも、破壊は、最初、西側パッチで開始して、主として西側に伝播した。2002年 Mw6.4と2012年 Mw6.3の地震、2015年 Mw6.8地震の場合には、西側パッチの破壊後に、更に東側のパッチも破壊したのに対して、それ以外の地震は、西側パッチのみしか破壊しなかった。

西側パッチにおけるモーメント解放量は、東北沖地震前後、破壊の連動の有無にかかわらず、同様の 2.5×10^{18} Nm (Mw6.3)程度が多かった。ただし、2011年3月の Mw6.0の地震の場合では、 9.1×10^{17} 程度で、滑り量・応力降下量がそれ以外の時期の半分程度に小さかった。この地震は、東北沖地震時に一回滑った直後に発生したため、強度の回復量が平時にの地震時に比べて小さいままだったことにより説明できるかもしれない。

2015年 Mw6.8の地震の場合にも、西側パッチのモーメント解放量は約 7.3×10^{18} Nm程度となり、同じパッチの滑り量・応力降下量が平時よりも数倍大きくなった。西側パッチ破壊の直後に生じた東側パッチの滑り量も大きく、両パッチで同程度のモーメント解放が行われた。この地震の際に、小繰り返し地震から示唆される loading rateが、他の地震の際と大きく変わっていたようには見えなかった。一方で、この地震と前回の地震の間の繰り返し時間は3年程度と比較的長く、同じ系列の繰り返し地震の発生個数は、前の繰り返し時間のそれの2~3倍程度になっていた。

2015年の地震の際にだけ滑り量が大きくなった理由は明らかではないが、一つの可能性として、西側パッチと東側パッチの連動でトータルの断層サイズが大きくなったことに伴い、滑り量も大きくなったことが考えられる。2015年の地震の前には、西側パッチ・東側パッチが間の領域と共に滑り遅れることにより、同じ loading rateでもせん断応力の増加量は小さくなり、地震の再来にも時間が掛かったのかもしれない。ただし、2002年や2020年の地震の際にも、二つのパッチの連動破壊が生じたが、その際には西側パッチの滑り量は平時と大きく変わらなかった。また、2015年の地震時にも西側パッチと東側パッチの間の領域ではパッチ内に比べて小さな滑りしか生じさせなかった。異なる可能性として、2015年 Mw6.8地震発生前には、それ以

外のMw6-6.4地震よりも、パッチ内のせん断応力・断層強度が高いレベルになっていたのかもしれない。2012年の地震の際には、破壊が西側パッチだけでなく、東側の浅部側にも伝播した。流体が破壊域を通過して浅部側に移動し、間隙水圧が減少するようなことが起こったのかもしれない。2015年 Mw6.8地震前の断層サイズが平時よりも大きくなっていたために、繰り返し期間および繰り返し地震の個数がそれ以外の時よりも大きくなり、地震前のパッチ内せん断応力も大きくなり、大すべりを生じさせた可能性が考えられる。

Relationship Between Variations in Source Duration and Occurrence Areas of Earthquakes

*Goki Irie¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

地震の震源過程は、地震モーメント放出の時間変化を表す震源時間関数を推定することで議論されることが多い。一般にM6以上の規模の大きな地震については詳細に震源過程が調べられることが多いが、中小規模の震源時間関数を系統的に調べた研究は多くない。また地震ごとの破壊継続時間の違いについて、マグニチュードとの関係性は頻繁に議論されているが、例えば内陸地殻とプレート境界、スラブ内などの発生場所によるの違いはあまり理解されていない。

本研究では、地殻内地震として2008年岩手・宮城内陸地震の余震、プレート境界地震として茨城県南西部のフィリピン海プレート上部境界の地震と千葉県北西部の太平洋プレート上部境界の地震、スラブ内地震として宮城県沖のスラブ内地震（2003年宮城沖地震の余震）について、それぞれの領域で発生した $3.7 \leq M \leq 3.9$ について、Yoshida(2019)の手法に従い時間領域繰り返しデコンボリューション法を用いて震源時間関数を求め、そこから破壊継続時間を推定した。本講演では、各領域の相対的な継続時間の違いについてなど議論する。

Do deep low frequency earthquakes have the similar rupture growth process to ordinary earthquakes?

*Genki OIKAWA¹, Naofumi Aso¹

1. Tokyo Institute of Technology

地震のスケーリング則は地震の破壊プロセスを特徴づける基本的な経験則である。通常地震については、地震モーメント(M_0)が継続時間(T)の3乗に比例するスケーリング則 ($M_0 \propto T^3$) が成り立つことが知られている一方で、プレート境界で発生するスロー地震については、Ide et al. (2007)により、低周波地震(LFE)からスロースリップイベント(SSE)に至るまで広帯域なスケーリング則として、継続時間が地震モーメントに比例する関係 ($M_0 \propto T$) が提唱されている。しかしながら、通常地震は微小地震から巨大地震まで連続的に存在していることから、一連の自己相似的な破壊の成長で説明できる一方で、スロー地震については、全く異なるスケールのスロー地震（例えばLFEとSSE）がそれぞれ別の成長過程を持つ可能性がある。そこで本研究では、プレート境界および火山深部の両方で発生するLFEに関して、地震モーメントと継続時間を精度良く推定し、その関係から成長過程について考察する。

以下の3つのステップで地震モーメントと継続時間を推定した。まず、地震波形のエンベロープに階段状関数をフィッティングさせることで、継続時間と振幅を推定した。コーダ波形を模擬するため、階段状関数には指数関数的減衰も考慮した。エンベロープは1-20 Hzのフィルターをかけたtransverse成分の波形から作成した。次に、理論波形を用いて同じ解析をすることで、震源での継続時間と地震モーメントと、ここで推定されるパラメータとの関係を経験式として推定した。最後に、この経験式を用いて、LFEについて推定された継続時間と振幅から、継続時間と地震モーメントを求めた。このように本研究では、実波形の解析にはロバストな推定のために単純化された関数を用いる一方で、理論波形を用いたキャリブレーションを行うことで、グリーン関数の畳み込みの影響やフィルターのバンド幅の影響を除去していることが特徴である。

この解析を蔵王火山の深部で発生しているLFEと愛媛県西部のプレート境界で発生しているLFEに適用した。得られた関係は、火山型・プレート境界型ともに、通常地震 ($M_0 \propto T^3$) に近かった。この結果から、LFEが通常地震と同じような成長過程をもつ破壊プロセスであることが示唆される。また、得られた地震モーメントは同程度の継続時間を持つ通常地震と比較して2桁程度小さく、破壊伝播速度が同程度であるとする、応力降下量も2桁程度小さくkPaオーダーであることを意味している。

What Actually is the Vertical Shock Verbally Reported for Shallow Earthquakes?

*Koji UENISHI¹

1. Univ. of Tokyo

Currently we are investigating the mechanical backgrounds behind two different types of distinct seismic shaking that we may directly experience, even at the same place. One has rather long duration arising from interlocking earthquakes, seismic clusters or earthquake swarms. For example, the recent off the Coast of Fukushima Prefecture earthquake at 23:36 JST on 16 March 2022 itself (moment magnitude 7.3) has records of long duration of shaking of about two minutes, and in addition, it had a foreshock just two minutes before, at 23:34 JST. Hence, the total duration of shaking for this earthquake might be considered to be as long as four minutes. For a deeper understanding of the generation mechanism of this and other seemingly complex rupture processes, we are performing global observations of large-scale material behavior and more local, smaller-scale tracing of development of ruptures and waves in two-dimensional linear elastic brittle solids. The solid materials have sets of digitally fabricated small-scale multiple cracks modeling large-scale geological fault planes that are under quasi-static external loading and dynamic impact (see e.g. Uenishi and Nagasawa, *SSJ Fall Meeting, 2020, Procedia Struct. Integr.*, 2022, *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 2022).

The other shaking we are paying attention to is the sudden vertical shock that can be felt near the epicenters of shallow earthquakes, even with smaller magnitudes. The strong shock, including that experienced onboard a ship at sea (seaquakes), has been verbally reported quite often for recent earthquakes. However, as reported in Uenishi (*Physics Today*, 2021), while the shaking of long duration caused by (interlocking) earthquakes occurring usually in the far field seems to be relatively correctly (i.e. similar to what we feel) recorded, the abrupt shock coming directly from "bottom" does not seem to have become rightly "visible" in seismograms so far. Rather, the presence of strong shock has been only indirectly supported by several elastodynamic analyses (Uenishi and Sakurai, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 2000, *Int. J. Prot. Struct.*, 2014; Uenishi, *ASME J. Appl. Mech.*, 2012) of the unique failures of surface and underground structures generated by the seismic waves in the near field. Here, we shall try to describe some advancement in "unveiling" the mechanical characteristics of the shock by treating recent earthquake swarms attracting considerable attention and other small earthquakes probably drawing much less attention.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 20K04680. The author is grateful to the generous support provided by the Construction Engineering Research Institute Foundation in Kobe, Japan.

Outline and radiation efficiency of stochastic source time functions

*Shiro HIRANO¹

1. Ritsumeikan Univ.

地震時の断層滑り速度を断層面に渡って積分した震源時間関数 (STF) は、個々の地震の特徴を表わし、かつ地震波形インバージョンによる可観測量であるため、多くの研究において着目されてきた。また、個々の STF は高周波の擾乱に富み複雑かつ個性的であるが、統計的には多数の経験則が知られ、それらの特徴を再現するための物理モデルや近似式も古くから多数提案されてきた。Hirano (2022: Web リンク参照) は、ある種の確率微分方程式の解2つの畳み込みを STF と見做すことで、確率的に揺らぐ高周波成分を持った STF (以下、このモデルを S-STF と呼ぶ) を理論的に生成することを提案した。従来の決定論的あるいは確率論的モデルの多くは、STF についての経験則をごく部分的にしか満たさないものであったが、S-STF モデルでは、STF が ω^{-2} モデルに従うこと、モーメント (すなわち STF の時間積分) の時間発展が時間の3乗に比例すること、およびモーメントの規模別頻度が GR 則に従うことが確認された。

S-STF モデルは純粋に数理的なモデルであり、その物理的実体が何であるかは議論の余地がある。Hirano (2022) が提案したひとつの可能性は、2つの確率過程が、断層面上で空間積分された応力降下速度と、同じく断層面上で空間積分された Green 関数ではないかというものであった。そこで本研究では、その可能性の下で成立する震源の力学的性質を明らかにする。

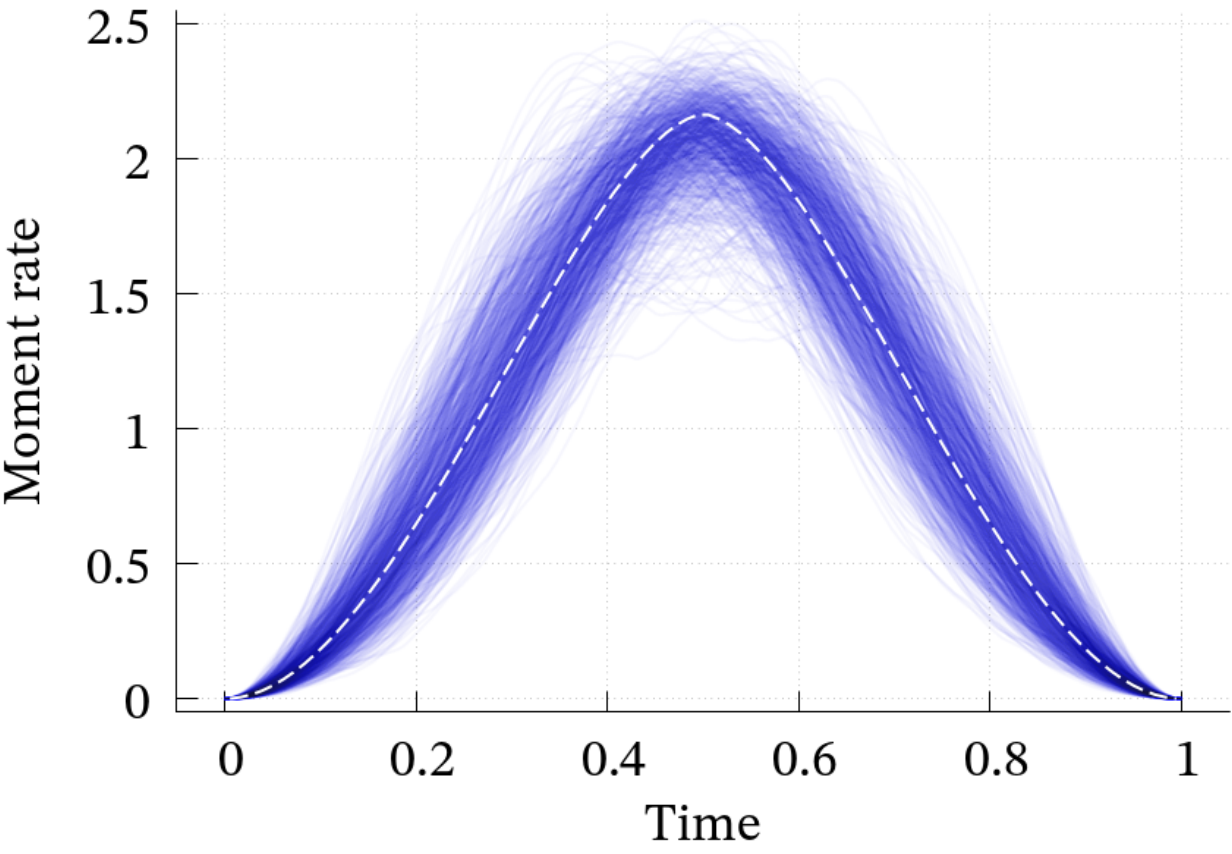
断層面上で空間積分された応力降下速度が S-STF モデルで仮定される確率過程ならば、断層面全体に渡る巨視的な滑り弱体化曲線までもが再現されることが、既に判明している。そこで今回は、巨視的な破壊エネルギーを計算する。これは積分量なので、確率過程に特有の高周波数ノイズにはさほど依拠しないであろう。そこで数学的・数値的な考察により、S-STF の低周波数成分だけを近似するモデルを考案した。これを用いると、S-STF は2つの楕円型分布 $(a^2 - t^2)^{1/2}$ の畳み込みで近似され、それが先述の、多数の数値解の平均とよく一致することも確認できる (図)。ただしここで定数 a は確率過程の持続時間であり、2つの異なる値を取りうる。そこで応力降下速度の持続時間を a_1 、Green 関数の持続時間を a_2 として、比 $A := a_1/a_2$ が様々な値を取る状況を考える。 A が小さいほど、応力の弱体化が滑りの初期に終わってしまうことを意味する。言い換えれば A は、地震の最終滑りを $D_{\max}$ とするとき、臨界滑り量の割合 $D_c/D_{\max}$ と正の相関を持つ。これに加えて、震源物理学において頻繁に用いられる指標である応力比 $S = (\text{strength excess})/(\text{stress drop})$ を与えると、震源からの放射効率 η が定まる。そこで関数 $\eta(A, S)$ の特徴に基づいて、震源の物理的特徴を議論することが可能になる。

まず、関数 $\eta(A, S)$ の特徴が示す事実を列挙する:

- 1) 応力降下に要する時間の比 ($=A$) が長いほど、放射効率 η は下がる。
- 2) η が非負という制約から、応力比 S が大きいほど A の取りうる値は小さくなる。

以下、これらについて物理的解釈を考える。 A は $D_c/D_{\max}$ と正の相関を持つことから、上記2つにおいて A を $D_c/D_{\max}$ と読み替えれば、これらは定性的に既知の事実と一致する。よって物理的に大きな瑕疵は無いであろう。その上で、 $D_c/D_{\max}$ ではなく A について上記が言えるということは、 A , η , S の3者間に関係があり、2つを決めれば残り1つが自動的に決まりうることを意味する。既存研究において、 A がどのように決定されるかは未知であったが、ここではそれを理解するための有益な制約条件が得られたことになる。また A はインバージョン解析によって得られる STF の低周波数成分から推定可能な量であるため、個々の地震についてもパラメータ間の関係を議論する筋道が示された。

謝辞: 本研究はJSPS科研費18K13637, 22K03782の助成を受けたものである。



On shear localization by thermo-chemical pressurization and following destabilization and migration of the shear-localized zone

*Shunya KANEKI¹, Hiroyuki Noda¹

1. Kyoto University, DPRI

地震時の断層帯では、高速滑りに伴う摩擦熱によって鉱物の化学反応が進行する場合がある。Platt et al. (2015)は、左右対称な断層帯の高速滑り時の一次元モデルを考えて、既存の間隙流体および鉱物の熱分解反応によって生じる流体の圧力上昇（thermo-chemical pressurization）によって、断層中心にピークを持つ剪断集中帯の厚みが数十マイクロメートルとなることを報告した。Platt et al. (2014)およびRice et al. (2015)は、同じ力学モデルを用いた数値計算をより長い時間スケールで行い、剪断集中帯のピーク位置が断層中心から移動することを報告した。この挙動は流体の拡散と未反応の鉱物の枯渇によって引き起こされたとされているが、その詳細な原理については不明な点が多い。

Platt et al. (2015)のモデルで考慮されている主な機構は、慣性と体積力を無視した連続体の運動方程式（力学平衡）、速度依存摩擦構成則、流体の質量保存則、エネルギー保存則、反応速度論に従う鉱物の熱分解反応である。本研究ではPlatt et al. (2015)に倣い、代表的な化学反応として方解石の熱分解反応に着目した。時間について一次の前進差分、空間について二次の中心差分をとった数値積分を、上述の機構を表現した偏微分方程式について実行することで、Platt et al. (2015)の計算結果を再現するコードを自作した。再開発したコードを用いた数値実験の結果、Platt et al. (2014)およびRice et al. (2015)によって報告された剪断集中帯の移動が再確認された。また、剪断集中帯が移動する方向は常に一定ではなく、採用するグリッドサイズやステップ数によって左右どちらにもなりうることがわかった。この事は、左右対称な解がある時点で不安定化し、数値計算の丸め誤差の増大が数値解を選択している事を示唆する。すなわち、剪断集中帯の移動が観測されたこれらの数値解は、今回のモデルの解析解に対する適切な近似解として扱うことができないと言える。「初期反応率が一樣」といった単純な条件の問題設定では、滑り速度履歴や応力履歴を与えても、地震性滑り後の反応率の空間分布は一意には定まらない。

この問題を解決する手段の一つは、予め初期条件の対称性を崩してやることである。そこで、初期反応率を空間不均質とした場合の解について調べた。初期反応率が空間座標の線形関数であるとした場合、時間ステップの増加に伴って剪断集中帯のピークが初期反応率が低い側へと移動する挙動が確認された。これは、断層中心の両隣のグリッドで初期反応率が異なる場合、より反応率が低いグリッドにおいて反応が進行しやすいため、断層強度がより弱化することで剪断集中のピークがそちらに移動するためであると解釈できる。移動が発生した解の収束性テストを実施した結果、空間グリッドのサイズについて二次のオーダーで数値誤差が小さくなることが確認された。これは、二次の中心差分を取ったことによって生じる数値誤差の理論値と調和的である。これらの結果から、初期設定で対称性を崩してやることにより、解の一意性が担保された問題設定となり、本モデルの数値解を解析解の近似として扱う事ができる様になると言える。

本講演では上述の内容に加えて、初期反応率の空間不均質性を導入したモデルを用いて予想的に実施した数値実験の結果についても発表する予定である。

The earthquake interoccurrence time distribution in sheared granular model

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹

1. Osaka University

地震の発生間隔の分布を明らかにすることは、長期的な地震発生確率の予測精度を高める上で重要である。このため、地震の発生間隔の分布関数を決定する研究がこれまで多数行われてきた。ここで、地震の発生間隔は大きく2つに分類することが出来る。1つはinteroccurrence timeであり、1つの断層で発生する最大級の地震(固有地震)の発生間隔のことである。もう1つはrecurrence timeであり、1つの断層で発生する全ての地震の発生間隔である。近年の観測は、interoccurrence timeがワイブル分布に従うことを示唆している(Abaimov et al., 2008; Hasumi et al., 2009)。一方、そうした分布が、地震のダイナミクスに重要な役割を果たす可能性がある、断層ガウジのstick-slipにおいても観測されるかは未だ明らかにされていない。そこで、我々は個別要素法により剪断粉体をモデル化し、interoccurrence time分布が観測と同様、ワイブル分布に従うかを調べた。更に、interoccurrence time分布は外部からの応力摂動によってどのように変化するかを調べた。本発表ではこれらの結果を報告する。

Numerical experiments using a friction law both for fast and slow sliding

*Takane HORI¹, Hideo Aochi²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. BRGM (French Geological Survey)

To realize various fault slip behavior as regular and slow earthquakes, I assume a simple friction law. In the friction law, the frictional strength decreases due to fault slip and recovers with time. These two processes along the fault, slip-weakening and healing are the intrinsic ones to model regular and slow earthquake sequences. Here, an evolution equation of the frictional strength proposed by Nielsen et al. (2000) is used. In this equation, there are two frictional parameters, d_c and t_c , which represent a characteristic displacement for slip-weakening and a characteristic time for healing, respectively. The balance of these two parameters controls how frictional strength evolves depending on the fault slip history. To examine fault slip behavior with the evolution equation, a single degree of freedom elastic system, composed of a block and a spring with constant loading is introduced. The block starts to slip following the strength evolution equation when the shear stress acting on the contact surface of the block reaches the strength. On the other hand, the block is in stationary contact if the shear stress is less than the strength. Note that this is a classical constitutive law without direct effect in a rate- and state-dependent friction law (Nakatani, 2001). To examine the slip behavior depending on the above system, I modified a simulation code used in Aochi and Matsu'ura (2002), which introduces more complex evolution equation of fault strength. Some preliminary results show that both fast and slow fault slip sequences can be demonstrated depending on the two frictional parameters. These slip behaviors are similar with regular and slow earthquakes. One interesting behavior in slow fault slip sequences here is that both the stress drop and the recurrence time interval are much smaller than those of the fast fault slip sequences but the peak strength is identical. Furthermore, the slow slip behavior is similar with that found at Izu-Bonin Trench (Fukao et al., 2021).

Investigation of earthquake source scaling laws using dynamic rupture simulations with a hierarchical patch structure

*Kazuki Masuda¹, Yoshihiro Kaneko¹

1. Kyoto University

地震破壊の成長過程とそれに伴う地震波の放射を理解することは、地震の物理や地震災害のために重要である。地震の震源パラメータのスケーリング則は、地震破壊の成長やその抑制に対する物理的過程を示唆しているが、スケーリング則の成り立ちが断層帯の物性の不均質性によるものかスケールに依存する摩擦構成則の特性によるものかどうかは明らかでない。そこで、本研究では、すべり弱化摩擦構成則に基づき、破壊エネルギー G_c の階層構造を取り入れた断層上の自発的な動的破壊モデルが、震源パラメータに関するいくつかのスケーリング則を説明できるという仮説を検証する。このシミュレーションはスペクトル要素法で行われており、Aochi and Ide (2003)によって提案された効率的な計算手法を取り入れることで、数オーダーのスケールの地震破壊を扱うことができる。まず、破壊エネルギー G_c の階層的なパッチで特徴づけられた断層上で、幅広いマグニチュード（M2からM6）の地震のシミュレーションを行った。次に、計算した地震の震源パラメータに関する様々なスケーリング則（地震モーメントと震源継続時間、マグニチュードと発生頻度の関係、モーメントの成長と時間、破壊エネルギーと地震性すべりなど）を定量化した。そして、モデルパラメータの値を変化させたときにこれらのスケーリング則がどのように変化するかを分析した。予備的な結果として、今回調べたモデルパラメータのうち、 S 値がスケーリング則のトレンドに大きな影響を与えており、スケーリング則がモデルパラメータの取りうる値の範囲を限定することが示唆された。今回得られたスケーリング則に影響を与える重要なモデルパラメータを特定し、このモデルを2次元断層で実装したときの取り組みを報告する。

Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kears²

1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington

地震の強震動分布を決定する要因の1つである地震の破壊伝播方向を、古地震に対して決めることは重要な課題である。近年、過去の地震の際に観測された条線と単純な平面断層の動的破壊モデルから、地震時に断層面上で記録される条線の湾曲の向きと断層の破壊伝播方向との間に関係性があり（Kears et al., 2019; Kears and Kaneko, 2020）、古地震学的な観測から地震の破壊伝播方向を推定できる可能性が提示された。一方で複雑な形状を持つ断層で観測された条線には、平面断層モデルから得られた関係性とは湾曲の凹凸が逆向きになっているものも報告されている。本研究ではこのような逆向きの湾曲をabnormal convexityと呼ぶ。このような逆向きな湾曲の条線を説明するため本研究では地表付近に形状を与えた断層や断層全体に複雑な形状を持つ断層モデル（rough fault model）を用いて地震破壊のシミュレーションを行った。その結果、abnormal convexityを持つ条線が再現された。断層が平面でない場所では断層面上の初期応力が変化し、特に横ずれ断層については断層の傾斜が急激に変化する場所でせん断応力の鉛直成分が変化することによって、平面の場合とは逆向きの湾曲が起きていた。また、初期応力が深さとともに増加するモデルでは地表近くでabnormal convexityが得られるようなパラメータ範囲が狭く、地表付近で湾曲の凹凸を逆にするのは難しいこともわかった。本研究の結果から、急激な断層形状の変化がある地点では条線の湾曲が逆向きになることもあるため、条線の湾曲から断層の破壊伝播方向を推定する際には断層の形状が比較的単純な場所での観測を用いるべきであると考えられる。

Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation (Part 2)

*Yuko KASE¹, Yumi URATA¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

中央構造線断層帯は、日本で最も活動的な断層帯のひとつである。この断層帯のうち、讃岐山脈南縁東部区間、同西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間を対象として、連動可能性とその条件を検討するため、断層帯の置かれた条件を反映した動力学的震源モデルを構築し、動的破壊シミュレーションをおこなう。前回報告（加瀬・浦田，2021）では、既存情報を基にプロトタイプの震源モデルを構築し、試計算をおこなった。今回は、断層モデルと媒質モデルを見直すとともに、より現実的な応力場モデルを考慮した震源モデルを用いた結果を報告する。

断層モデル各区間の走向と長さは、都市圏活断層図（後藤・他，1998；中田・他，1998；岡田・他，1998；堤・他，1998；後藤・他，1999；中田・他，1999；岡田・他，1999；堤・他，1999；中田・他，2009；岡田・他，2009；岡田・他，2014）を基に、讃岐山脈南縁西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間が並行する部分について修正を加えた。傾斜角と地震発生層の深さについては、地震調査研究推進本部（2017）では中角度と高角度を併記しているが、有限要素法による静的解析により、中角度を設定した場合には、断層運動により相当の上下変位が生じ、地表での変位分布に関する既往の調査結果、および、変位様式や地形と整合しないことが示されている（文部科学省・産総研，2022）ことから、高角度（鉛直）のみを扱い、断層幅は20 kmとした。媒質モデルは水平3層構造とし、伊藤・他（1996）、Nakajima and Hasegawa（2007）の紀伊半島・中国四国地方のモデル、文部科学省・東京大学地震研究所（2020）、日本列島基盤岩類物性データベース（大熊・金谷，2007）を参考に決定した。

主応力軸の向きは、佐々連における応力解放法による応力測定データ（Tanaka, 1986；斎藤・他，1988）より、最大主圧縮応力（ σ_1 ）は東西方向、最小主圧縮応力（ σ_3 ）は南北方向とした。 σ_1 と σ_3 の大きさは応力測定データを参照、また、中間主応力（ σ_2 ）は鉛直でかぶり圧に等しいとし、それぞれ深さに比例するとした。更に、応力降下量と強度の初期値の深さプロファイルを、深さ10 kmまで応力降下量、強度ともに深さに比例し、10 km以深では強度は一定値、応力降下量は深さとともに減少し、深さ15 kmでゼロ、15 km以深では負の応力降下量となるように設定した。その上で、予察的な数値計算で断層長とすべり量のスケージング則（松田・他，1980）を満たす応力降下量のプロファイルを求め、動摩擦係数を得た。また、静摩擦係数は、強度と応力降下量の比（Andrews, 1976；Das and Aki, 1977）を1.3と仮定して求めた。摩擦係数は破壊の始まる領域の走向によって異なるが、動摩擦係数は概ね0.1～0.5程度となった。臨界すべり量は、地表で2.5 m、深さ1 kmまで深さとともに減少して、1～10 kmでは0.50 m、10 km以深では深さとともに増加するとした。

断層面の境界条件には、Coulombの破壊基準とすべり弱化的摩擦構成則（Ida, 1972；Andrews, 1976）を仮定し、弾性体の運動方程式を差分法（Kase and Day, 2006）で解くことによって、断層面上の破壊伝播過程を求めた。

σ_1 の向きと破壊の始まる領域の走向によって各区間の応力状態が異なるため、それに対応した様々な連動パターンが得られた。例えば、讃岐山脈南縁東部区間東端から破壊が始まる場合には、4区間のほぼ全域にわたって破壊が広がり、石鎚山脈北縁区間から破壊が始まる場合には、石鎚山脈北縁西部区間が連動する。それに対し、石鎚山脈北縁西部区間から破壊が始まる場合には、破壊はこの区間に留まる。連動性は、初期応力状態に強く支配されるが、初期応力状態が同じでも、破壊開始点が異なると連動のパターンが異なる場合もある。また、複数区間の連動が生じるのは、連動する区間の強度が小さく、応力降下量が大きい場合であること

が多いため、すべり量がスケーリング則で得られる値よりも大きくなりがちであるが、観測値とは整合的である場合もあり、詳細に検討する必要がある。

今後、応力場推定の結果を参照して、断層走向に沿った主応力軸の向きの変化を反映させた応力場モデルや、上記と異なる応力降下量と強度の深さプロファイルを用いたシミュレーションもおこない、1回の活動によるすべり量を説明しうる地震シナリオを求めるとともに、震源モデルの違いによる地震シナリオのばらつきについても検討する。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究」として実施されました。

Why do Gutenberg-Richter b-values decrease with time prior to large earthquakes? Insights from rate-and-state earthquake cycle simulations with frictional heterogeneities

*Ryo Ito¹, Yoshihiro Kaneko¹

1. Kyoto University

前震活動のメカニズムを理解することは、震源物理学の根本的な理解のみならず地震の予測にもつながりうる重要な問題である。大地震前の地震活動の観測により、Gutenberg-Richterの累積地震数とマグニチュードの関係における傾き、すなわちb値が、大地震の発生前に減少することが多数観測されている。例えば2011年Mw9.0東北地方太平洋沖地震では、震源域におけるb値が本震前に減少したことが報告された(Nanjo et al., 2012)。しかし、観測されたb値の時間変化を物理的に解釈することは依然として困難である。そこで本研究では、摩擦不均質性を伴う地震サイクルシミュレーションを用いてb値の時間変化の再現を試みるとともに、b値の時間変化の要因について検証する。まず、本震開始前に活発化する前震がみられるような摩擦パラメータの範囲を特定し、モデル内の前震の時空間分布に注目すると、観測と定性的に類似した複雑に遷移する前震分布が現れた。また、得られた前震を統計的に解析しb値を求めたところ、モデル内においても本震前にb値が減少することを確認できた。さらに、活発化する前震活動がみられる際の断層面のせん断応力は、安定すべり領域においては時間とともに増加していた一方、断層全体の平均せん断応力はほぼ一定であった。これらの結果から、大地震の前にb値が減少する要因は、多くの前震によって安定すべり領域内のせん断応力が増加し、安定すべり領域内においても地震性すべりが起こりやすくなったことで、より大きな地震が時間とともに起こりやすくなったためであると考えられる。

Numerically reproduced segments of short-term slow slip events in the Nankai region

*Takanori MATSUZAWA¹, Bunichiro Shibazaki²

1. National Reserach Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Building Research Institute

1. はじめに

南海トラフにおける深部微動の発見(Obara, 2002)以降, 世界各地のプレート境界においてスロー地震に関する研究が精力的に進められてきた。活発な微動に同期して短期的スロースリップイベント(以下, 短期的SSE)が観測されるため、これらは合わせてEpisodic Tremor and Slip(以下, ETS)とも呼ばれる。また、微動は短期的SSEを含めた、地下のすべりや応力の状況を知るうえでの指標となっているとも考えられている(Obara and Kato, 2016)。南海トラフにおいては、様々なスロー地震に関する知見が得られるとともに、微動の発見から20年以上経過したこともあり、長期のスロー地震活動のカatalogが利用可能となっている。本研究では、南海トラフで発生するSSEの数値シミュレーションにおいて、長期間(複数地震サイクルのスケール)にわたって計算した結果をもとに、再現された短期的SSEのセグメント形成について、実際のスロー地震活動とも比較しつつ、議論する。

2. 計算手法・モデル

使用した数値モデルにおいては、Matsuzawa et al. (2010, 2013)と同様にカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を仮定して、各要素上でのすべり速度および摩擦の時間発展を計算した。計算領域は東海地域から日向灘の範囲とし、沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートの境界面の形状を約17万個の三角形要素で表現した。短期的SSEの再現においては、短期的SSEの発生している深さ(28km以深)において低い有効法線応力を仮定するとともに、観測された微動活動の分布に基づいて、摩擦則における(a-b)値が負となる領域を短期的SSE領域として設定した。東海地域、豊後水道および日向灘の長期的SSE領域については、Matsuzawa et al. (2013)と同様に、有効法線応力が周囲よりやや低い領域の沈み込み方向の幅を広く設定した。

3. 結果・議論

数値計算結果から短期的SSEを抽出するため、各断層要素上で基準すべり速度(以下の場合、载荷レートの10倍)以上の速度を示した時間帯を短期的SSEとして定義した。さらに同時帯に周辺5km以内の断層要素において同様の基準を満たすすべりがある場合に、同一イベントとした。これを、新たな同一イベントの判定がなくなるまで繰り返した。こうして得られた短期的SSEのうちMw4.5以上のイベントについて、すべり領域のstrike方向の両端の位置を取り出し、地震サイクル2回分(約217年)の計算結果から空間の頻度分布をとったところ、局所的なピークをもつ分布が得られた。このピークは短期的SSEのセグメント境界に対応するものとなる。このセグメント境界は微動分布が不連続となる箇所および、dip方向の微動分布(短期的SSE領域)の幅Wが大きく変化する箇所と対応しており、Wの分布のstrike方向の変化が数値モデリングによる短期的SSEのセグメント境界を特徴づけていることを示唆する。この結果を防災科研によって推定されている微動活動カatalog(Maeda and Obara, 2009; Obara et al., 2010)と比較したところ、大局的な特徴については類似性がみられたものの、例えば、紀伊半島中北部などにおいて、実際の微動活動はより細かくセグメント化されている傾向がみられた。これは、実際の活動にさらなる不均質性が関与している可能性を示唆する。また、地震サイクルスケールにおける活動セグメントの変化は顕著でなかった。ETSのセグメントの形成においては、地震サイクルを通じた応力状況の違いは大きな影響を与えず、Wによって強く特徴づけられている可能性が示唆される。

Impact of Kuroshio meanders on a stationary slow slip event and local seafloor level change around the Nankai Trough

*Keisuke ARIYOSHI¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Takeshi Iinuma¹, Masaru Nakano¹, Demian Michael Saffer⁴, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi³, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC, 2. Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University (now at Japan Meteorological Agency), 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 4. University of Texas, Austin

南海トラフ近傍に設置されたDONETや長期孔内観測システムによって、海溝型巨大地震固着域の浅部延長上のプレート境界面上において、スロースリップイベント (SSE) が繰り返し起きていることが明らかとなっている (Araki et al., 2017; Ariyoshi et al., 2021a)。昨年の秋季大会の講演では、2020年3月に発生したSSEについて、黒潮蛇行によってトラフ軸付近の海底圧力が減少したことで浅部側まですべりが延伸し、SSEが終息するタイミングで海底圧力がすべり域全体で増加したことを指摘した (Ariyoshi et al., 2021b)。本講演は、この特徴が過去の事例についても当てはまるのか検証することを目的としている。

その中で今回は、2012年2月のSSEと、2013年3～7月のイベントに着目した。2012年のSSEは、規模が同程度の他のSSEに比べて継続時間が有意に長い特徴がある。2013年のイベントは、DONETのBノード付近で海底圧力計に局所的な変化が生じたことが指摘されているが (Suzuki et al., 2017)、プレート境界面上でのすべりであるとすると、Mw 6程度のSSEであったことが期待される一方で、スロー地震活動に顕著な活発化はみられていないという矛盾を抱えている。

そこで、海洋モデル (JCOPE) を適用し、海底圧力の海洋変動成分を算出した。その結果、両期間中に黒潮蛇行が通過し、中規模渦と呼ばれる時空間スケール (数十～数百km、数日～数十日程度) で海洋擾乱が生じていることを確認した。2012年2月のSSEでは、海面高度の低下と共に海底圧力が減少し続けており、これが長い継続時間をもたらした要因の一つと考えられる。2013年のイベントでは、急激な海底圧力の変動がみられており、これによりBノード直下にある海山周辺の地殻流体が移動し、局所的な膨張が生じたと考ええると、局所的な海底隆起が説明できると考えられる。

これらの解析を検証する際に、スロースリップイベントや余効すべりは、海洋擾乱の中規模渦と同程度の時空間スケールとなっていることが分かった。このことは、海底地殻変動の多様性を理解するために、気象海象の擾乱などの影響も考慮する必要があることを示している。そこで我々は、スロースリップイベントの誤検知リスクの軽減や終息時期の予測向上を図るため、統合的な解析環境の構築を進めている。

A possible relation between Reidel shear band and rate- and state-dependent friction parameters

*Eiichi FUKUYAMA^{1,2}, Futoshi Yamashita², Sumire Maeda², Akihiro Shimoda¹, Shun Watanabe¹

1. Kyoto University, 2. NIED

ガウジ層を挟んだ岩石摩擦実験を行うと、すべり方向に並行な剪断面(Y面やB面)だけでなく、すべり方向と斜交するRiedel shear band (R1面)と呼ばれる剪断面が形成される。R1面は、すべりの初期に生成され、定常になるとY面やB面でのすべりに移行することが、これまでの実験的な研究で知られている(e.g., Logan et al., 1992)。しかしながら、すべり距離が長くなると振る舞いが異なってくることも報告されている(Beeler et al., 1996)。本研究においては、大型2軸岩石摩擦試験機を用いたガウジ層を含む試料のvelocity step change testから得られたデータ(下田・他, 2020, 地震学会)と、実験後にサンプリングされたガウジ層の薄片観察結果(渡辺・他, 2021, 地震学会)との関係を議論する。大型岩石摩擦試験のメリットは、試料長が長いこと、回転剪断摩擦試験のように同じところを何度もすべらせることなくすべり量を長くできることであり、また、試料が大きいこと、すべり面の不均質状態を観察できるという特徴がある。実験は、長さ1.5m幅0.1m 初期厚さ3mm(実験中厚さ1-2mm)に敷設した変斑れい岩ガウジをおなじ変斑れい岩試料により上下から挟み防災科学技術研究所の大型2軸摩擦試験機を用いて行われた。3.3MPaあるいは6.5MPaの法線応力をかけたのち0.01mm/s, 0.1mm/s, 1mm/s の速度を行き来するvelocity step change testが行われた(下田・他, 2020, 地震学会)。実験中はAEセンサーによりstick slip eventから発せられる波動の測定も行われた。実験後、上側試料を垂直に持ち上げ、ガウジ層を露出させたのち、ガウジ層の採取が行われた。採取したガウジ層試料はエポキシ樹脂溶液につけられ、すべり方向断面の薄片が作成された。薄片には明瞭な境界すべり面(B面)とR1面が認められた(渡辺・他, 2021, 地震学会)。実験後にガウジ層上部から撮影した写真より、すべり面はR1面があまり発達していないと考えられる部分と、R1面が非常に発達している部分(およそ4箇所)に分けられ、いずれの実験においてもその位置に大きな違いはなかった。また、velocity step change testの際にAE eventの発生が認められ、その震源位置を推定すると、いずれもR1面が発達している部分と符合した。また、単位すべり量当たりのAE event発生数は、1mm/sへと速度を変化させた直後が最も多く~1.0個/mmであり、0.1mm/sでは~0.3個/mm、0.01mm/sでは~0.1個/mmと载荷速度依存性が見られた(渡辺・他, 2021, 地震学会)。上記の測定結果より、R1面の生成に関して以下のシナリオが考えられる。velocity step changeの直後からR1面の形成が始まりAE eventが発生する。R1面の形成が終わりB面によるすべりが卓越し定常状態となる。速度変化直後の摩擦係数の変動から摩擦パラメータの推定が行われることから、R1面の生成はa, b, Dcなどの摩擦パラメータに何らかの関連があると考えられる。

Poster session (1st Day) | Regular session : S17. Tsunami

📅 Mon. Oct 24, 2022 9:30 AM - 12:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:30 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM P-3
10th floor (Conference Room 1010-1070)

[S17P] AM-P

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

[S17P-01] Data assimilation using high-frequency radar for tsunami early warning: A case study of the 2022 Tonga volcanic tsunami

*Yuchen WANG¹, Kentaro Imai¹, Iyan E. Mulia², Keisuke Ariyoshi¹, Narumi Takahashi¹, Kenichi Sasaki³, Hitoshi Kaneko³, Hiroto Abe^{3,4}, Sato Yoshiaki³ (1. Yokohama Institute for Earth Sciences, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 2. RIKEN Cluster for Pioneering Research, 3. Mutsu Institute for Oceanography, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 4. Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University)

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

[S17P-02] Diversity of tsunami propagation caused by Nankai Trough earthquakes

*Yusuke Oishi¹, Takamasa Shinde¹, Takashi Furumura² (1. Fujitsu Ltd., 2. Univ. of Tokyo)

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

[S17P-03] Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source generation

*Hiroaki TSUSHIMA¹ (1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

Data assimilation using high-frequency radar for tsunami early warning: A case study of the 2022 Tonga volcanic tsunami

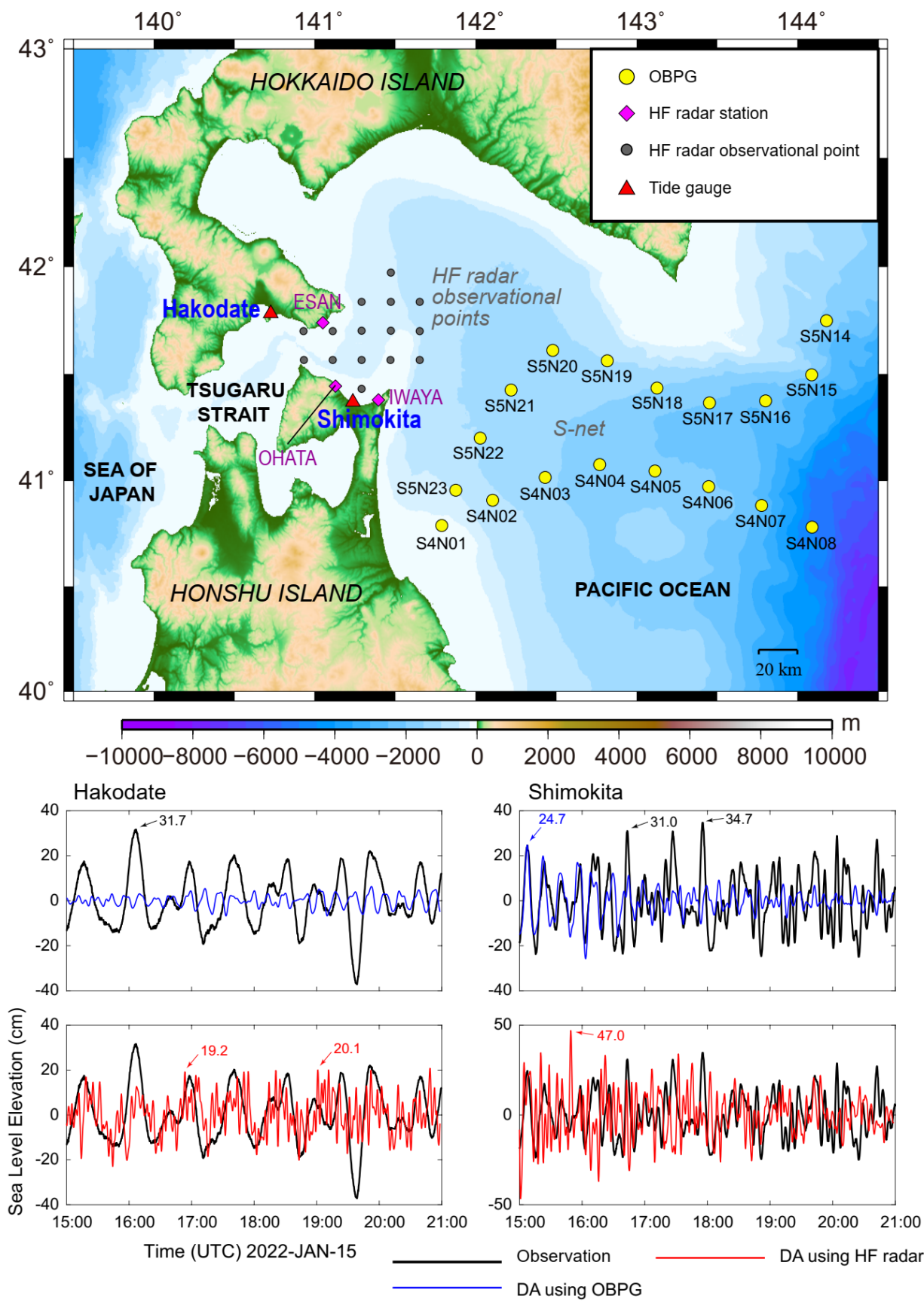
*Yuchen WANG¹, Kentaro Imai¹, Iyan E. Mulia², Keisuke Ariyoshi¹, Narumi Takahashi¹, Kenichi Sasaki³, Hitoshi Kaneko³, Hiroto Abe^{3,4}, Sato Yoshiaki³

1. Yokohama Institute for Earth Sciences, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 2. RIKEN Cluster for Pioneering Research, 3. Mutsu Institute for Oceanography, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 4. Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

High-frequency (HF) radar monitors the sea surface current velocity and provides information for tsunami early warning. SeaSondeR, an HF ocean radar system in the eastern Tsugaru Strait, Japan, measured the tsunami-induced current velocity during the 2022 Tonga volcanic tsunami. This event was triggered by the eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano on January 15, 2022. As an air-coupled tsunami, the generating mechanism was complex, making it difficult to predict coastal tsunamis using traditional early warning methods.

We adopted the tsunami data assimilation approach, which reconstructs the tsunami wavefield using offshore data and does not require source information, to forecast the coastal tsunami waveforms. Observations from the HF radar and offshore bottom pressure gauges (OBPGs) were used as the input for tsunami data assimilation. The assimilation process started at 09:00 (UTC, hereafter) and forecasts were made at 14:00 and 15:00. The surface current velocity recorded by the HF radar reached the maximum (~ 0.25 m/s) at 13:00, which corresponded to a negative phase of ~ 2 cm sea level variation observed by OBPGs.

The forecasted waveforms were compared with the observed waveforms at Hakodate and Shimokita tide gauges. The assimilation results using OBPG accurately forecasted the tsunami waveforms at Shimokita, especially for the next 2 h after the forecast. However, the forecast underestimated the waveforms at Hakodate. The assimilation results using HF radar matched well with the observations at both Shimokita and Hakodate. Furthermore, for quantitative analysis, we adopted an accuracy index that considers the maximum amplitude in the next 2 h and 6 h after the forecast. At 14:00, the accuracy indices were 91% and 67% for the next 2 h and 6 h, respectively. At 15:00, it was 63% and 70% for the next 2 h and 6 h, respectively. The accuracy indices of the forecast using HF radar were higher than those using OBPG. Thus, we demonstrated the applicability of HF ocean radar system in tsunami data assimilation. This study is the first to apply tsunami data assimilation to early warning using real HF radar observations. The HF ocean radar system could be a good supplement to OBPG for monitoring tsunamis and providing information for data assimilation.



Diversity of tsunami propagation caused by Nankai Trough earthquakes

*Yusuke Oishi¹, Takamasa Shinde¹, Takashi Furumura²

1. Fujitsu Ltd., 2. Univ. of Tokyo

近い将来に高確率で発生が予測されている南海トラフ巨大地震に関して、中央防災会議により最大クラス（Mw9.1）の地震モデルが11ケース提案されており、被害想定や防災計画の基準となっている。一方で、14万平方kmに及ぶ想定震源域における実際の地震発生シナリオはより多様であることが想定され、これにより生じる津波の波高分布や到達時間にも高い多様性が想定される。そのため、より適切な津波対策に向けては、限られた最大クラスケースのみならず、南海トラフ域で発生する可能性のある様々なケースの津波の性質を統計的に理解しておくことが重要である。そこで本研究では、中央防災会議モデルを拡張することで多様な津波波源モデルを生成して津波シミュレーションを実施し、結果の統計的な性質を整理し、南海トラフ域で発生しうる津波に関する包括的な理解を目指す。始めに、中央防災会議モデルによる南海トラフ沿いの約5 km四方の大きさを持つ約5,700の小断層を組み合わせる様々な波源モデルを生成した。波源域の面積は1.6~14万平方kmの範囲で変更し、中央防災会議モデル同様に、南海トラフ沿いの各地の断層滑り量は、プレートの沈み込み速度に比例する設定とした。断層面上の滑り量分布についても、中央防災会議モデルの設定方針に倣い、波源域の背景領域の2倍の滑り量を持つ大滑り域を波源域の12~32%の面積で設定し、さらに背景領域の4倍の滑り量を持つ超大滑り域を波源域の2~9%の面積で海溝軸付近に設定した。なお、超大滑り域についてはある／ない場合の双方について検討した。大滑り域の位置については、波源域内を南北（深さ）方向、東西方向に移動したケースを想定した。以上により、Mw8.19~9.16の744ケースの津波波源モデルを生成した。次にこれらの波源モデルに基づく津波シミュレーションを実施した。ライズタイムは60秒として、断層全体が同時に破壊する設定とした。シミュレーションは解像度810 mで行い、地震により生成される津波の性質を理解するため、土佐湾、大阪湾、伊勢湾、東京湾に向かう湾外の地点における津波の波形について詳細な解析を行なった。各地点における最大波高は、Mwの増加とともにほぼ線形に増大する傾向が得られ、地震規模ごとの最大の津波波高の目安が得られた。また、超大滑り域がないMw9以上の地震による津波の各湾周辺の最大波高は、土佐湾、大阪湾、伊勢湾、東京湾でそれぞれ、2.79~5.13 m, 1.40~3.32 m, 0.39~0.67 m, 1.30~2.73 mであった。同じMw9以上の地震であっても、発生状況の違いによって、津波波高が41.2~57.9%小さくなるケースもあり、津波の多様性が高いことが確認された。さらに、超大滑り域を設定した場合の各湾周辺の最大波高はそれぞれ、5.84 m, 4.80 m, 1.11 m, 3.69 mであり、超大滑り域がない場合に比べ13.9~64.4%の津波波高の増大が確認され、特に伊勢湾での増大が大きかった。津波の波高には、Mwに加え、震源域からの距離の影響が大きいことが考えられる。大滑り域の中心を震央として、各湾周辺の地点と震央との東西距離と津波波高の関係性に着目すると、震央が各湾から遠いほど津波が小さくなる傾向は確認できたものの、距離に対して単調減少ではなかった。特に東京湾周辺の波高は和歌山県沖よりも高知県沖の震央に対してより大きくなる傾向もみられ、陸との反射を繰り返しながら津波が伝播する過程で、津波が効率的に増幅されるケースがあることが影響していた。また、超大滑り域による津波の増強の度合いは局所性が強く、超大滑り域がある場合の震央距離の減少に対する津波波高の増加は、超大滑り域がない場合に比べて大きい結果となった。最大波高の到達時間については、土佐湾沖や大阪湾沖では30分以内にそれぞれ744ケースのうちの51.6%と68.6%が集中し、東京湾沖では2時間から3時間の間に80.2%のケースが集中した。一方で、伊勢湾沖では特定の時間への到達時間の集中は見られず、地震発生から4時間後までに広く分布し、津波到来時間の事前予測の難しさが確認された。

Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source generation

*Hiroaki TSUSHIMA¹

1. Department of Seismology and Tsunami Research, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

背景と目的

津波を早期に直接観測できる沖合の津波観測は、津波の即時予測に有効である。東日本大震災後、日本近海に海底観測網が急速に拡充され、その観測データを用いた津波予測の研究も格段に進んだ。本研究では、その1つであるリアルタイム津波波形逆解析に基づく予測手法に注目する。この手法では、地震発生時に瞬時に波源分布(初期水位分布)が形成されると仮定することが多い。一方、巨大地震では、断層破壊が長時間に及ぶなど、波源生成の時空間発展が複雑なことがあり、瞬時の波源形成の近似が不十分な場合がありうる。Tomita and Takagawa (2014)は、波源生成の時空間発展を考慮した波形逆解析に基づく津波予測を提案し、数値実験を通して巨大地震への有効性を示した。一方、波源の時間発展を表現するためのモデル・パラメータが増えると、時空間的なトレードオフが生じやすくなるため、瞬時破壊とみなせるような中小規模の地震津波に対して、かえって波源推定や津波予測の品質が低下するおそれがある。津波即時予測の場面では、破壊継続時間などがまだ明らかではないことも想定されるため、時空間発展を考慮した逆解析に基づく津波予測をより効果的に行うには、そもそも稠密な沖合津波観測データから波源の時間発展をどのくらい拘束しうるのかを把握しておくことが重要と考えられる。本研究では、数値実験でこの感度を調べるとともに、その実験結果に基づいて津波予測に適した津波波形逆解析について議論する。

実験方法

稠密な沖合観測網S-netがある日本海溝沿いを対象領域に、数値実験を実施した。まず、2011年東北沖地震の断層モデル(Fujii et al., 2011)から初期水位分布(実験での正解波源)を計算し、それを基にした津波伝播数値計算で得られた波形を観測波形だとみなした。そして、沖合津波観測点約170点の波形を用いて、波源の時間発展を考慮した津波波形逆解析で初期水位分布を推定し、正解波源をどのくらい復元できるかを評価した。とくに、逆解析で仮定した時間発展の長さが、正解波源のそれと異なる場合に、波源の時間発展をどのくらい拘束できるかに着目した。正解波源の時間発展としては、問題を単純にするため、破壊伝播速度は無限大とし、ライズタイムのみ様々な値を仮定した(最長5分)。波源推定には、Tsushima et al. (2009)の津波即時予測向けの波形逆解析を、波源の時間発展を考慮できるように改良したものをを用いた。具体的には、初期水位の発生を表現する基底関数を時間方向に1分間隔で複数配置した。実験では、基底関数の個数を増減させて、逆解析における波源生成の総時間長をさまざまに変化させた(最長10分)。破壊伝播速度は無限大を仮定した。拘束条件としては、Tsushima et al. (2009)と同様、初期水位の空間分布に関する拘束を課し、時間方向の拘束は課していない。観測波形だけで波源を時間方向にどのくらい拘束できるかを調べるためである。また、十分な時間長の波形から時間発展をどのくらい抑えられるかを知ることがまずは重要だと考え、地震発生から30分間のデータを逆解析に用いた。

実験結果と考察

実験結果のうちの大半のケースでは、正解波源よりも長時間にわたって基底関数を展開しても、前後の時間帯に偽波源が若干求まることはあるものの、概ね正解の波源生成時間帯の範囲で初期水位が求まった。一方、時間的に隣り合う初期水位分布が逆符号の顕著な変位を持つなどして、時間方向に初期水位のトレードオフが起きてしまい、正解波源よりも長時間にわたって初期水位が求まるケースもみられた。これらのことは、稠密観測データを用いることで、波源生成の時間帯を一定程度は拘束できる可能性はあるものの、解析条件によっては過度なモデル・パラメータ設定になって波源解の推定精度が低下しうることを示唆する。こうした時間発展への拘束力の違いが生じる要因・条件についてはさらなる検討が必要である。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費JP21K04621の助成を受けている。