

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)

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)

Tue. Oct 25, 2022

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

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

[S09] AM-1

chairperson:Mamoru Nakamura(Ryukyu University), Kazuyoshi Nanjo(University of Shizuoka)

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

[S09-17] Is the low b -value in the rift-axis of the southern Okinawa Trough accurate?

*Mamoru NAKAMURA¹ (1. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

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

[S09-18] b -value dependency on crustal strength inferred from precise focal mechanism data

*Satoshi MATSUMOTO¹, Yoshihisa Iio², Shinichi Sakai³, Aitaro Kato⁴ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S09-19] Seismic radiated energy and source spectra of the regular and deep low-frequency earthquakes in and around the source area of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Taka'aki Taira², Kentaro Emoto³, Akira Hasegawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, Berkeley, California, U.S.A., 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-20] Estimation of earthquake distribution and fault structure of normal fault earthquakes off Fukushima-Ibaraki using sP depth-phase

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Genti Toyokuni¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Tohoku University)

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

[S09-21] Static Coulomb stress transfer and seismicity rate change associated with the 2016 Kumamoto, Kyushu, Japan, earthquake

*Shinji TODA¹, Ross S. Stein² (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

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

11:00 AM - 11:45 AM JST | 2:00 AM - 2:45 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S09] AM-2

chairperson:Nana Yoshimitsu(Kyoto University)

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

[S09-22] What factors contribute to cut-off depth of crustal seismicity?

*Akiko TANAKA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S09-23] Evaluation of seismic activity characteristics at different depths through laboratory rock fracture experiments

*Nana YOSHIMITSU¹, Hironori KAWAKATA² (1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ.)

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

[S09-24] Verification of Seismic Gap by means of physical and statistical models

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹, Eugenio Lippiello² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Università della Campania "Luigi Vanvitelli")

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

11:45 AM - 12:30 PM JST | 2:45 AM - 3:30 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Akiko TOH (Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-01] Seismicity and its implications for fluid movement in the northern and central Hikurangi subduction zone, New Zealand*Kazuya TATEIWA¹, Calum Chamberlain², Martha Savage², Tomomi Okada¹ (1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-02] Fault valve action using ancient magma system caused the intense earthquake swarm in Northeast Noto peninsula, Japan*Keisuke YOSHIDA¹, Masaaki Uno², Toru Matsuzawa¹, Yohei Yukutake³, Yusuke Mukuhira⁴, Hiroshi Sato³, Takeyoshi Yoshida¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Environmental studies, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Institute for Fluid Science, Tohoku University)

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S08-03] Source process of moderate earthquakes off the east of Izu Peninsula in 2006 and 2009 : Relationship to previous swarm activities*Yukako Tanaka¹, Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

2:00 PM - 3:00 PM JST | 5:00 AM - 6:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson: Kazuya TATEIWA (Tohoku University), Keisuke Yoshida (Tohoku University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S08-04] Quantification of expansion rate of aftershock zone for M7-class earthquakes in Japan: Potential as differential stress meter*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA² (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S08-05] Stress Drop of Small Earthquakes in the Southeastern Kanto RegionKaho Hashimoto¹, *Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S08-06] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate*Tsukasa Masuda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S08-07] Shear strength and fluid over-pressure in world subduction zones estimated from the earthquake energy budget*Nelson PULIDO¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

3:15 PM - 4:30 PM JST | 6:15 AM - 7:30 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson:Naofumi Aso(Tokyo Institute of Technology), Saeko Kita(Building research institute)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S08-08] Nankai Trough Earthquakes Estimated from GIS-based Historical Documents in Mie Prefecture*Yoshiko YAMANAKA¹ (1. Nagoya Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S08-09] Effects of long-term slow slip events on in-slab stresses in Bungo Channel, southwestern, Japan*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Roland Burgmann³, Suguru Yabe⁴, Youichi Asano⁵, Takeshi Kimura⁵ (1. Building Research Institute, 2. USC, 3. UC Berkeley, 4. AIST, 5. NIED)

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

[S08-10] Single-station detection of seismic slow earthquakes using their broadband characteristics*Koki MASUDA¹, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-11] Strongly scattering medium along slow earthquake fault zones, inferred by the new observations of short-duration tremors*Akiko TOH¹, Wu-Cheng Chi², Yann Capdeville³, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, 3. Nantes Université, CNRS, France)

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

[S08-12] Direct Evidence of Strike-Slip Motion for Low-Frequency Earthquake near Parkfield*Naofumi Aso¹, Miki ASO², David R SHELLY³, Satoshi IDE⁴ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. OYO RMS, 3. USGS, 4. University of Tokyo)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

4:45 PM - 6:00 PM JST | 7:45 AM - 9:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-3

chairperson:Tatsuya Kubota(NIED), Suguru Yabe(AIST)

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

[S08-13] Synthetic tests of joint CMT analysis using translation and strain data*Suguru YABE¹, Kazutoshi Imanishi¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-14] Feasibility of detecting pre-P gravity elastic strain signals from earthquakes*Kantaro KAWAI¹, Nobuki KAME¹, Shingo WATADA¹, Akito ARAYA¹ (1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO)

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

[S08-15] Validating the Method Estimating Fault Slip Angles by Using Regional 3D Stress Field with the Wallace-Bott Hypothesis –Application to the focal mechanism solutions of microearthquakes –*Takeo Ishibe^{1,2}, Toshiko Terakawa³, Akinori Hashima⁴, Masashi Mochizuki⁵, Ritsuko S. Matsu'ura¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP) , 2. ISM, 3. Nagoya University, 4. JAMSTEC, 5. NIED)

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

[S08-16] Stress field in the northwestern part of the South Island, New Zealand, and its relationship with faults of recent earthquakes (3)*Ayaka TAGAMI¹, Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Satoshi Hirahara¹, Shuutoku Kimura¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard 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)

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

[S08-17] Distribution of azimuths of aftershock faults in the Western Tottori region deduced by the dense seismic observations*Yoshihisa IIO¹, Manten seismic observation group², Manten seismic observation group in the Western Tottori region² (1. Kyoto University, 2. N/A)

Wed. Oct 26, 2022

Room A Regular session : S08. Earthquake physics
--

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

[S08] AM-1

chairperson: Osamu Sandanbata(NIED), Futoshi YAMASHITA(NIED)

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

[S08-18] Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S08-19] Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-20] Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University)

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

[S08-21] Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD))

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

[S08-22] Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Hiroyuki NODA (Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute), Sumire MAEDA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-23] Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co., Ltd.)

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

[S08-24] Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University)

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

[S08-25] Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

*Futoshi YAMASHITA¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)

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

[S08-26] Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-27] Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹ (1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

1:45 PM - 3:00 PM JST | 4:45 AM - 6:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson:Kurama OKUBO(NIED), Makiko OHTANI(ERI)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S08-28] Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S08-29] Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of technology)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S08-30] Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S08-31] Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S08-32] Recurrence interval of M>7 Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of M~9 earthquake*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

3:15 PM - 4:30 PM JST | 6:15 AM - 7:30 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S08-33] Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S08-34] Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S08-35] Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3} (1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN)

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

[S08-36] 4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO² (1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.)

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

[S08-37] Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹ (1. Aoyama Gakuin University)

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.

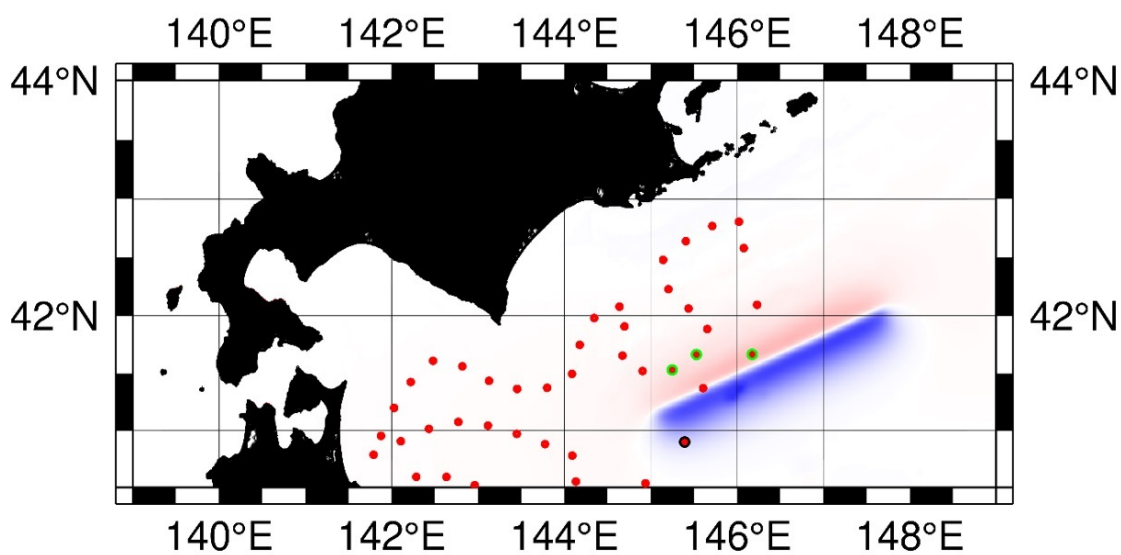


図 1つの断層モデルから計算される初期波高分布（赤：隆起、青：沈降）と S-net 観測点分布（赤丸）。
隆起域と判別された観測点（緑枠）、沈降域と判別された観測点（黒枠）

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

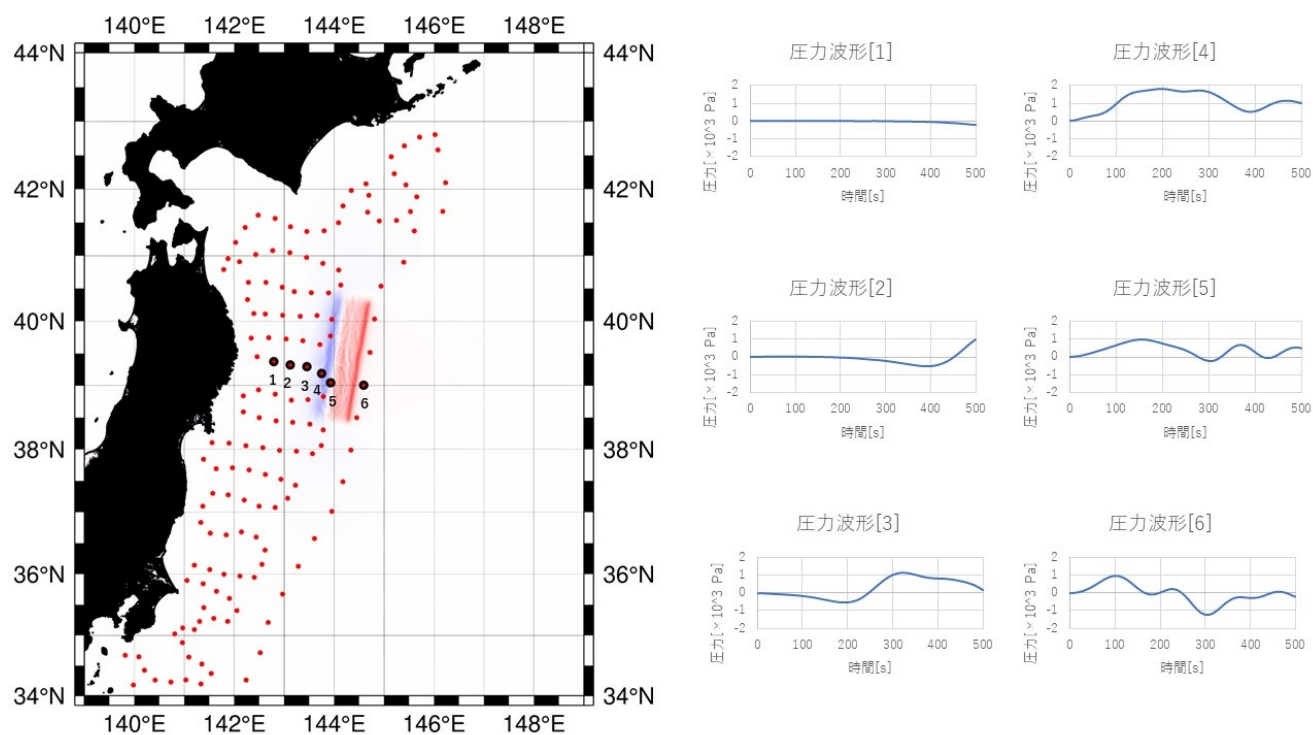


図 S-netの観測点(左図)と計算された代表的な圧力波形の例(右図)

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

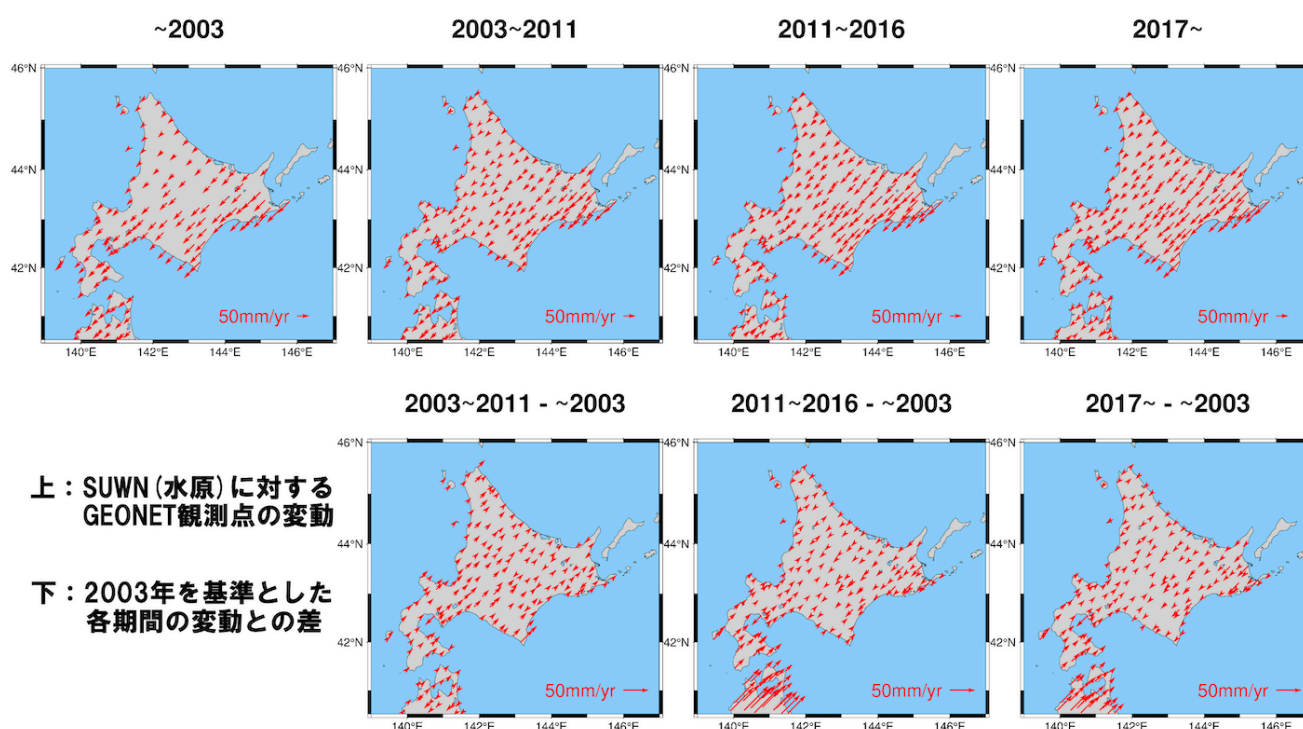
・2003年十勝沖地震と2011年太平洋沖地震の発生前後の変動について
上記2つの地震について、2003年以前よりGNSS観測を行なっている観測点について2003年までの変位速度と2003年十勝沖地震発生後～2011年太平洋沖地震までの変位速度、2011年太平洋沖地震～2016年末、そして2017年以降の変位速度をそれぞれ比較した。具体的には、太平洋プレート上やユーラシア大陸上に位置するIGS観測点(KOKB,BJFS,SHAO,SUWN)や北海道～東北地方の変動、日本列島周辺に位置するプレートに対する各GNSS観測点の相対運動を確かめた。その結果、Tomita et al.(2015)でも言及されたように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

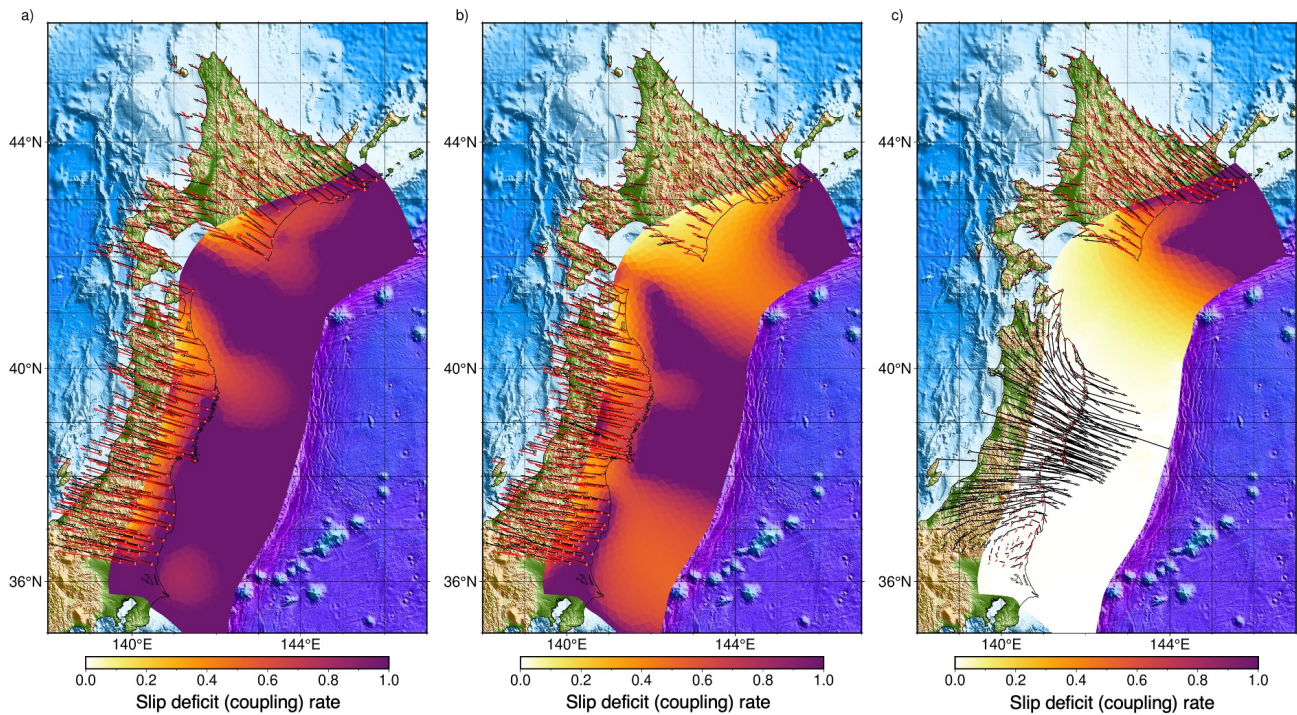
国土地理院電子基準点日々座標値F5解を時系列の東西、南北、上下変位に変換した上で期間を①2003年十勝沖地震前(1996.3.21~2003.9.25)、②2011年東北沖地震前(2006.9.26~2011.3.9)、③2011年東北沖地震後(2014.3.11~2022.6.25)の3つの期間に分け、年周・半年周運動の影響を除外した直線近似の傾きを変位速度(mm/yr)とした。F5解はITRF14に準拠しており、北米プレート準拠の基準系に変換するため、plate motion calculator (UNAVCO web site) を用いて各観測点の北米プレートによる理論変位を計算して速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

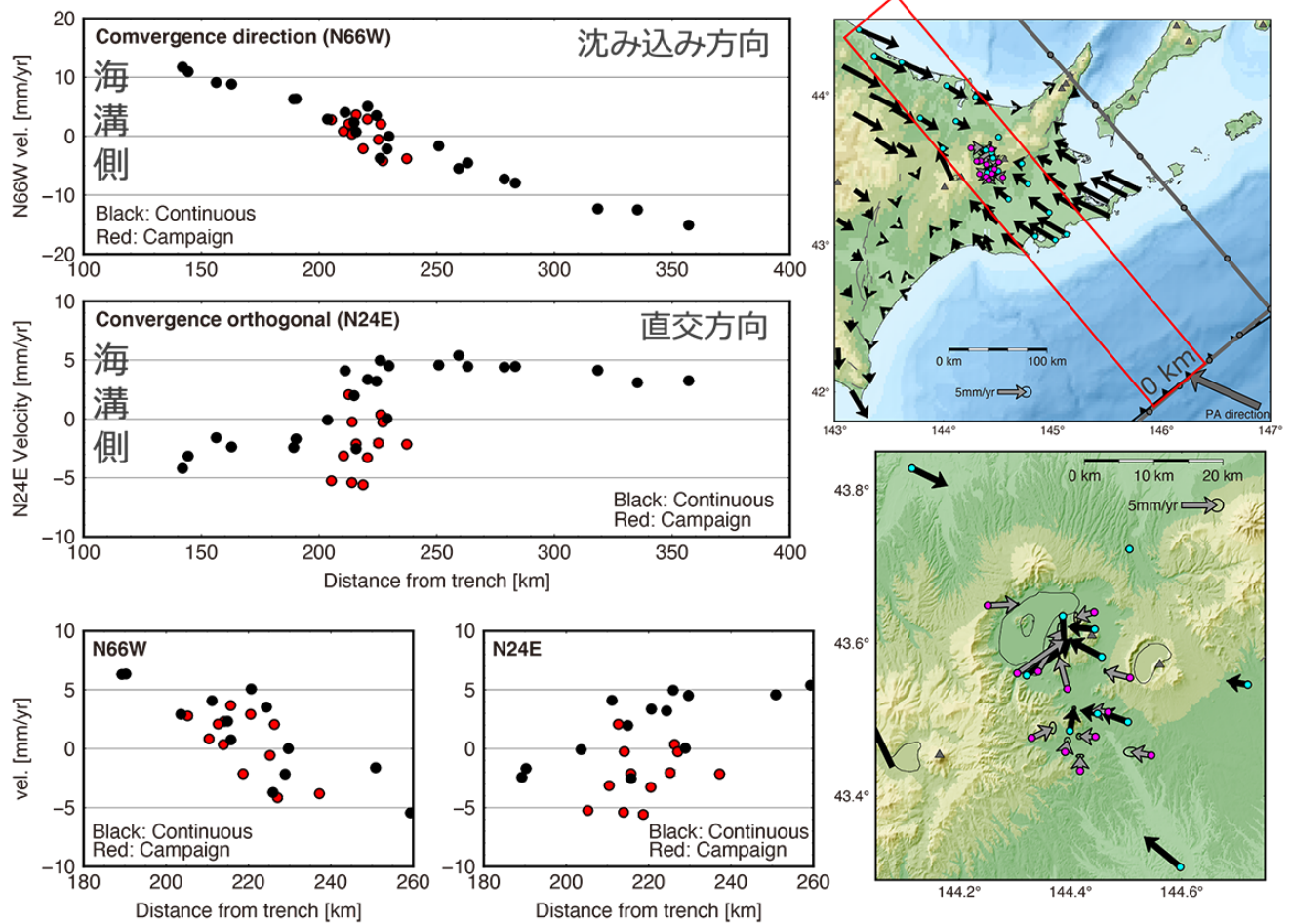
*Mako OHZONO¹, Hiroaki TAKAHASHI¹

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きている。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。

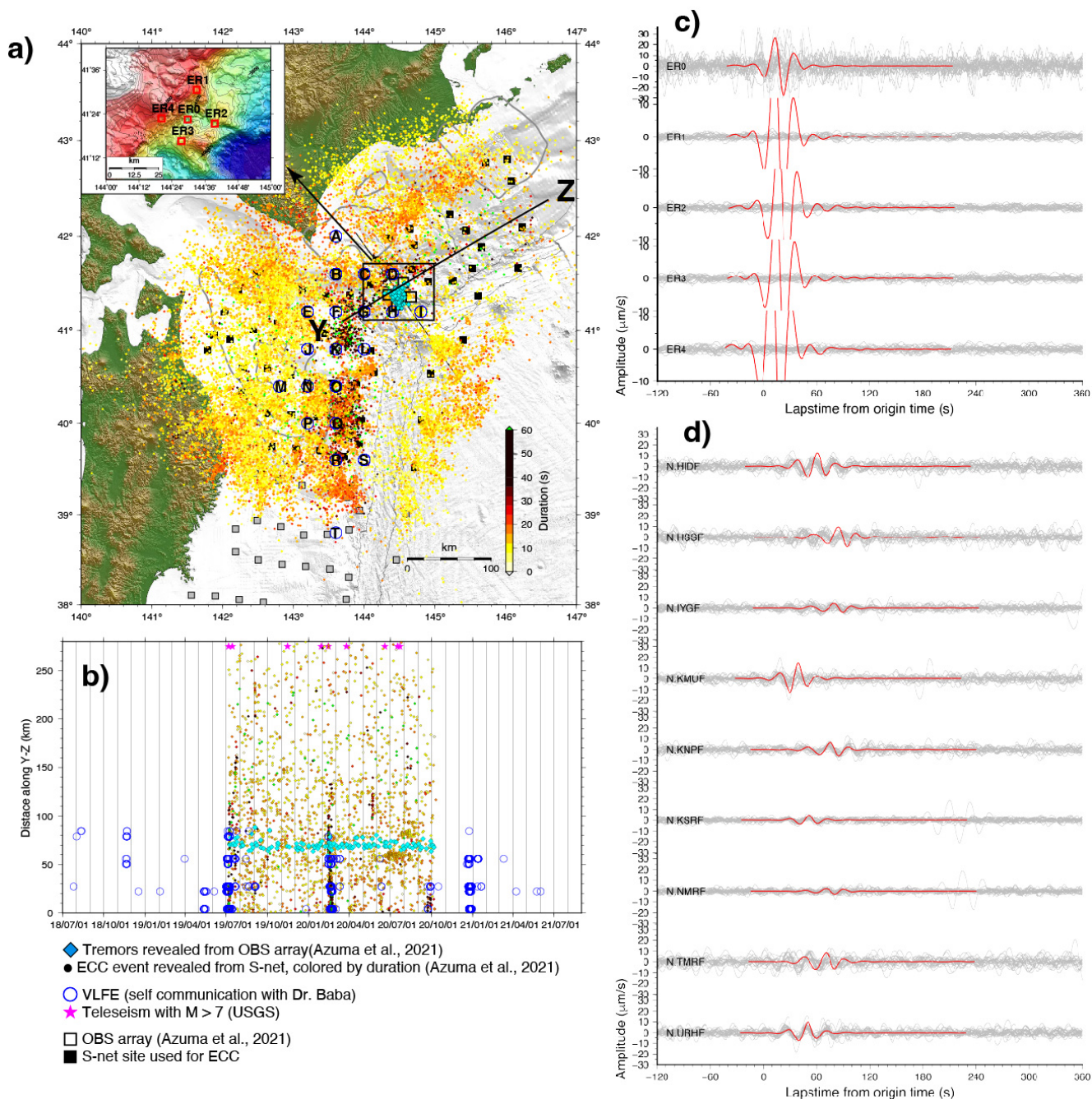


図 a) エンベロープ相関解析による地震震央分布。OBS アレイで検出した微動を水色、S-net で検出した微動・通常地震を暖色～緑色（継続時間）のプロットでそれぞれ示す。青丸は馬場カタログの VLFE 震源。b) Y-Z 測線から 60km 以内のイベントの時空間プロット。c,d) VLFE 震源 C に震源を持つイベントの観測波形（灰）と理論波形（赤）。20–50 秒の帯域通過フィルタを施してある。c は OBS 観測点。d は F-net 観測点。

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:30 AM - 10:45 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S09] AM-1

chairperson: Mamoru Nakamura (Ryukyu University), Kazuyoshi Nanjo (University of Shizuoka)

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

[S09-17] Is the low b -value in the rift-axis of the southern Okinawa Trough accurate?

*Mamoru NAKAMURA¹ (1. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

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

[S09-18] b -value dependency on crustal strength inferred from precise focal mechanism data

*Satoshi MATSUMOTO¹, Yoshihisa Iio², Shinichi Sakai³, Aitaro Kato⁴ (1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S09-19] Seismic radiated energy and source spectra of the regular and deep low-frequency earthquakes in and around the source area of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Taka'aki Taira², Kentaro Emoto³, Akira Hasegawa¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, Berkeley, California, U.S.A., 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S09-20] Estimation of earthquake distribution and fault structure of normal fault earthquakes off Fukushima-Ibaraki using sP depth-phase

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Genti Toyokuni¹, Toru Matsuzawa¹ (1. Tohoku University)

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

[S09-21] Static Coulomb stress transfer and seismicity rate change associated with the 2016 Kumamoto, Kyushu, Japan, earthquake

*Shinji TODA¹, Ross S. Stein² (1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

Is the low b -value in the rift-axis of the southern Okinawa Trough accurate?

*Mamoru NAKAMURA¹

1. Faculty of Science, University of the Ryukyus

南部沖縄トラフの中軸では、0.7以下の低い b 値が報告されている (Arai et al., 2021EPS)。このような低い b 値は、ダイク貫入による応力増加が影響していると解釈されている。しかし先行研究では、沖縄トラフ内におけるmagnitude completeness (M_c) の空間変動が考慮されていなかった。また南部沖縄トラフ付近では、気象庁の変位マグニチュード (M_D) より速度マグニチュード (M_V) の値が小さく決まる傾向がある。M4.0~5.0の地震で M_D 、 M_V 、および防災科学技術研究所F-Netのモーメントマグニチュード (M_w) を比較すると、 M_D は M_w より0.17大きく、 M_V は M_w より0.63小さい。つまり M_w を基準にすると、M4.0~5.0の地震に対して気象庁マグニチュード (M_J) として M_D が採用されればマグニチュードが0.17大きくなり、 M_V が採用されれば0.63小さくなる。結果としてM4.0~5.0の範囲の地震個数が見かけ上減少し、本来直線的であるはずのFrequency-Magnitude分布がこの範囲で下側に湾曲する。もし M_c が4.0付近であった場合、湾曲の影響で b 値を過小評価する可能性がある。しかし先行研究ではこの影響が補正されていない。そこでこれらを補正した上で、中南部沖縄トラフと琉球弧における b 値の空間変化を調べた。解析には2001年から2019年までの気象庁地震カタログを使用した。 M_c と b 値はZMAP7 (Wiemer, 2001SRL) を使用して計算した。計算は M_J を使用した場合と M_V を使用した場合の2種類で行った。

計算に M_V と M_J のどちらを使用した場合でも、中南部沖縄トラフ中軸付近の M_c は琉球弧での値 (1.0~2.0) と比べて高い値 (1.6~3.6) を示した。与那国リフトの東部では M_c が小さい (約1.4~2.2)。八重山リフトでは M_c が3.6に達する領域があった。宮古リフト (25.3°N, 125.3°E) では M_c が2.4~3.4であった。奄美大島西方では M_c は約2.0であった。各地の M_c は期間を通してほぼ一定であった。しかし、群発地震発生時に、その領域で M_c が増加した。宮古リフトでは2001年から2019年までの M_c が2.2~2.8であった。しかし2007年群発地震のときに M_c が3.3まで増加した。

b 値は M_V と M_J どちらを使用した場合でも八重山リフト西部を除いてほぼ同じ値を示した。 M_V による b 値は、南部沖縄トラフ中軸で0.7~1.2の範囲であった。与那国リフトの東部と八重山リフトの西部では b 値が0.7-0.9の範囲であった。しかし宮古リフトと八重山リフトの西側 (24.8°N, 122.5°E) は、 b 値がやや高い傾向があった (0.8~1.2)。奄美大島西方では b 値が0.8~1.2であった。

八重山リフト西部 (25.2°N, 124.0°E) での b 値は、使用するマグニチュードによって異なった。八重山リフトの西部では、 M_V と M_J どちらの場合でも M_c の値はほぼ同じ (3.3) であった。しかし、 M_J を用いた場合は b 値が0.4であるのに対し、 M_V を用いた場合の b 値は0.7であった。ここは2002年10月に発生した群発地震の領域である。 M_c が3.3と大きかったために、M4.0~5.0で生じるFrequency-Magnitude分布の湾曲の影響を受け、 b 値を過小評価した可能性がある。

全体的に、中南部沖縄トラフ中軸付近の平均的な b 値 (0.90~0.92) は、琉球弧の平均的な b 値 (0.83~0.84) とほぼ同じ値であった。このことは南部沖縄トラフ中軸の低い b 値分布は小さな M_c を用いたために生じた見かけ上のことであると考えられる。南部沖縄トラフ中軸の群発地震発生域では、それ以外の地域と比べて M_c が3.0以上である場所が多かった。南部沖縄トラフ中軸の群発地震発生域では定常状態のとき M_c が2.0であった。しかし群発地震活動時期 (数日間) の間だけ M_c が3.5以上に増加した。これは群発地震が活発化した際に地震の検知能力が短期的に低下していたことが原因である。中南部沖縄トラフ中軸部で b 値が低いことは、ダイク貫入による応力増加で生じる b 値低下だけでなく、それ以外の要因、例えば熱水活動による b 値増加の影響も含まれているかもしれないことを示している。

b-value dependency on crustal strength inferred from precise focal mechanism data

*Satoshi MATSUMOTO¹, Yoshihisa Iio², Shinichi Sakai³, Aitaro Kato⁴

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震発生数 n とマグニチュード M の関係はグーテンベルグ・リヒター則に従うことが知られている。 M 以上の地震の個数 N との関係は $\log_{10}(N) = a - bM$ として表されている。この b 値が時空間的に変化することが多く報告されている。特に、近年の地震観測網高度化に伴い、詳細な変化が求められてきた。特に、大地震前に b 値が減少することが報告されている（例えば、Nanjo et al, 2012）。岩石実験などにより b 値が差応力の上昇に伴い減少することや、テクトニック応力の違う領域での b 値の系統的な違いも報告されている。一方では b 値の違いを生み出すメカニズムについては詳しくはわかっていない。また、3次元的な広がりを持つ震源分布での b 値変化のメカニズムの検討はあまりされていない。そこで、本研究では詳細に決定された地震のメカニズム解を用いてこれらの考察を試みる。

2000年鳥取県西部地震震源域では本震発生直後の稠密観測や2017年の1000点観測（0.1満点地震観測）により、精度の高い発震機構解が得られている。本研究ではこれを用いた。 b 値の差応力や強度との関係を見るために、本研究では応力場と地震の断層面との関係を求めた。具体的には応力場に対応した単位モーメントを描き、その中での規格化せん断、法線応力を求め、これらの大きさごとにイベントを区分して b 値を推定した。応力場は震源域を空間ブロック（水平3x3x深さ2.5km）に分割して、それぞれ推定してもとめた。

b 値の推定は最尤法を用い、マグニチュードレンジは2000年が1.5–3、2017年が−0.3–2と設定した。規格化した差応力に対する b 値の変化は実験等で得られた逆相関（差応力が大きくなると b が小さくなる）のようを得られた。一方、規格化法線応力で見ると、 b 値は2000年が0付近で2017年が−0.6程度で最小となる。これらの結果から、 b 値はクーロン則に対して最適である断層面で大きい地震が起こりやすいことを示している。規格化応力でこのような傾向が見られたという意味は差応力の絶対値というよりむしろ断層強度に近いほど b 値が小さくなることを意味している。また、このような解釈が可能と考えた場合、2000年と2017年の規格化法線応力に対する最小 b 値の違いは摩擦係数の違いを反映していて、17年の時間経過で摩擦係数が回復したことを示唆している。

Seismic radiated energy and source spectra of the regular and deep low-frequency earthquakes in and around the source area of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Toru Matsuzawa¹, Taka'aki Taira², Kentaro Emoto³, Akira Hasegawa¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, Berkeley, California, U.S.A., 3. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

深部低周波地震は、通常地震とは異なる特徴を持つ地震である。同程度の規模の通常地震に比べて、地震波の卓越周波数が低く、特徴的な後続部を持つことが多い。深部低周波地震の地震波放射過程の詳細は、断層破壊が原因であると解明されている通常地震と比べるとよく分かっていない。従って、深部低周波地震と通常地震の地震波のエネルギーを定量化し、比較することが、深部低周波地震の地震波放射過程を解明するために重要である。本研究では、2008年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周辺で発生した通常地震と深部低周波地震の震源スペクトルを推定し、規格化エネルギーを系統的に調べた。2008年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周辺では、地震発生域でも低周波地震（浅部低周波地震）が発生していることが報告されている（Nakajima and Hasegawa, 2021）。本研究では、これらも解析対象に加えた。地震波の観測スペクトルを用いて震源スペクトルの推定を行う。観測波形は、震源から観測点まで伝播する間に、地震波減衰 Q^{-1} や観測点直下のサイト特性の影響を受けてしまう。震源スペクトルをより正確に推定するためには、これらの影響を取り除く必要がある。本研究では、地震波の後続波を利用したコーダ規格化法（Aki, 1982; Aki and Chouet, 1975）を利用して、地震波減衰 Q^{-1} およびサイト特性を推定した（Takahashi et al., 2005; Yoshida et al., 2017）。この結果、通常地震 1464 個、深部低周波地震 169 個、浅部低周波地震 52 個の震源スペクトルを推定することができた。Snoke (1987) の方法を利用して、規格化エネルギー e_R を推定した。通常地震の $\log_{10}e_R$ の平均値および標準偏差は、それぞれ -4.3、0.39 であり、先行研究（e.g., Kanamori and Brodsky, 2004）と調和的であった。深部低周波地震と浅部低周波地震の $\log_{10}e_R$ の平均値はそれぞれ、-6.9、と -5.5、であった（標準偏差は、それぞれ 0.43 と 0.50）。低周波地震の規格化エネルギーは、通常地震のそれと比較して、一桁から二桁程度小さかった。通常地震と低周波地震の地震波放射過程の違いを反映していると考えられる。通常地震の規格化エネルギーの空間分布には、特徴が見られた。規格化エネルギーが比較的小さい通常地震が、2008年岩手・宮城内陸地震震源域近傍の火山近傍で多く発生しており、浅部低周波地震とも近接した場所で発生する傾向が見られた。2008年岩手・宮城内陸地震震源域近傍の火山周辺は、間隙水圧比が比較的大きい地域である。高間隙水圧が、地震波放射に影響を与えていることを表しているのかもしれない。本研究では、解析対象域の地震波減衰 Q^{-1} が空間的に均質であると仮定した。しかし、深部低周波地震は通常地震よりも深部で発生するため、実際には、深部低周波地震の代表する Q^{-1} が通常地震と異なる可能性がある。深部低周波地震発生帯と上部地殻の地震波減衰 Q^{-1} の違いが解析に与える影響を評価するため、深さ 15 km を境界とした地震波減衰 Q^{-1} の二層構造を仮定した。その場合に得られた規格化エネルギーを、空間的に均質な Q^{-1} を仮定した場合の結果と比較したところ、 $\log_{10}e_R$ の平均値が、0.1 程度変化しただけで、顕著な違いは見られなかった。地震波減衰 Q^{-1} の空間的均質性の仮定が、通常地震と深部低周波地震の違いに与えた影響は限定的であると考えられる。

Estimation of earthquake distribution and fault structure of normal fault earthquakes off Fukushima-Ibaraki using sP depth-phase

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Genti Toyokuni¹, Toru Matsuzawa¹

1. Tohoku University

2011年東北地方太平洋沖地震（以降、東北沖地震）の発生後、東北日本沖合陸側プレート内では、それ以前までほとんど観測されていなかった正断層型の地震が活発に発生している。東北沖地震は、東北日本沖合陸側プレートを東西に伸長させた。Hasegawa et al. (2012) は、Moment tensor インバージョンにより得られた震源位置とメカニズム解に基づき、東北沖地震が上盤側プレート内の応力場を東西圧縮状態から東西引張状態に逆転させた可能性を指摘している。

小地震の震源分布や断層方向の情報は、断層構造や応力状態を把握するための重要な情報源である。しかしながら、海域部で発生する地震については、地震観測網が基本的に陸側のみにしか分布しないことから、地震発生位置・断層構造についての高解像度の情報を得ることが難しい。たとえば、東北沖地震後に福島-茨城沖合で発生するようになった正断層型地震を気象庁一元化震源でみると、プレート境界に共役な断層に沿って発生しているようにも見える (Imanishi et al., 2012)。しかし、この震源分布の並びが、実際の断層構造を反映しているのか、それとも震源の深さ精度による見かけのものなのかの判断は難しい。2016年以降、東日本太平洋沖では、S-netデータを用いた震源深さの推定が可能になってきているが、それ以前の地震の深さの決定精度は低いままである。本研究では、東北日本沖合、特に東北沖地震後から正断層型地震が多発している福島-茨城沖で発生した地震を対象に、depth-phase として知られている sP 波 (e.g. Umino et al., 1995) を使用することで、震源の深さを高精度に推定し、上盤側プレート内で発生している正断層地震の断層構造を明らかにすることを目的とする。

最初に、福島-茨城沖合浅部で発生している地震の観測波形を目視により調べた。その結果、多くの地震に、直達P波と直達S波の間に到着する明瞭な波が存在することが分かった。その振幅は上下動成分に卓越し、震央距離の異なる観測点でみてもP波からの遅れ時間が同程度となっており、震源からの放射後に地表で反射して観測点に到達したsP波を表すと考えられる。F-netによるCMT解の情報に基づき、Zhu & Rivera (2002) のcodeを用いて各観測点の合成波形を計算してみると、観測波形と近い時間で合成波形にも反射波が表れていることが確かめられた。本研究では、これらのsP波を用いて、地震の震源の深さを拘束する。

福島-茨城沖で発生したF-netによるCMT解が求まっている3.2 Mw 5の1297イベントを対象に解析を行った。波形データとしては、S-net設置以前から使用可能な陸上データのみを使用した。各地震に対し、観測波形のsP波の到着時刻を最も良く説明する深さを求めた。具体的には、合成波形を計算する深さを変えながら、P波到達1s前からS波到達0.5s前までの時間窓におけるエンベロープ同士の相関値が最大となる深さを探索した。

得られた震源の深さは、気象庁一元化震源よりも10km程度浅くなる傾向を示した。F-netで決定されている地震のセントロイドの深さは、気象庁一元化震源よりも系統的に浅い傾向があったが、本研究で推定した震源深さは、F-netによる震源深さよりも系統的に深くなった。本研究で得られた震源深さの場合でも、気象庁一元化震源と同様に、正断層型地震が東側に傾斜して分布しており、この構造が、震源決定精度に由来するみかけのものでないことを示唆する。

Static Coulomb stress transfer and seismicity rate change associated with the 2016 Kumamoto, Kyushu, Japan, earthquake

*Shinji TODA¹, Ross S. Stein²

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. Temblor Inc.

日奈久断層北端～布田川断層の活動による2016年熊本地震（M7.3）から6年が経過した。同地震では、地震直後から約30-40km長の震源断層沿いだけではなく、北東には阿蘇、九重地域、南西には熊本市、有明海南部、八代市、八代海など、オフフォルト（off-fault）域での余震活動が顕著に認められた。これらの一部は、本震直後の由布でのM5.7など動的応力変化で誘発（Yoshida, EPS, 2016）された中規模地震とそれらの余震活動もあるが、多くが熊本地震の本震による静的クーロン応力変化（ ΔCFF ）と対応することが当初から指摘されていた（Toda & Stein, Temblor, 2016）。本発表では、このような広義の余震活動について、本震後6年間という長期的視点から検討を加えるものである。特に、本震後短期では検出し難い地震活動度の低下と負の ΔCFF との対応や、余震活動の時間減衰などについて言及する。まず、熊本地震からの6年間を3年区切りで前半（2016/4/16-2019/4/15）と後半（2019/4/16-2022/4/15）に分け、余震活動の継続性の観点から後半の活動に注目した。その際に、最初の熊本地震（2016/4/14 M6.5）前の（2000/1/1-2016/4/14）を常時地震活動期間とみなし、熊本地震後の後半3年の活動度と比較した。その結果を図1bに示す。おおむね熊本地震の震源から北東の阿蘇周辺、南西の熊本市～八代市～八代海、宮崎県北西部（図1e）などでは、余震活動の長期化が明確である。これらは、東西走向の正断層と北東走向の右横ずれ断層の正の ΔCFF 解と調和的である。なお、地域的な大森-宇津則の余震減衰パラメータと常時地震活動を考慮して余震継続時間をマッピングした結果、これらのオフフォルト余震活動は20年以上にもおよぶことがわかった。数年以内に常時地震活動レベルに戻るオンフォルト余震と対照的である。一方で、熊本地震震源断層の北側と南側では広域で静穏化が認められる。ただし、本震に先行する期間に、局所的な本震一余震、群発地震活動があった場合、見かけの静穏化が検出されることもある。ここでは、静穏化地域の時系列（M0.5）を確認し、活動の低下が熊本地震に対応するかどうかを慎重に検討した。2つの例を図1c, dに示す。朝倉市-日田市周辺（図1c）では、2009年にM4.7とその余震活動があり、結果的に熊本地震後に極端な低下として強調されているが（図1b）、その活動を除いても熊本地震後に静穏化しているのは明確である。一方で、図1dは一見活動の低下が認められるが、静穏化開始には約半年の遅れがある。これは、従来から説明されているように、1) 本震の動的応力変化による中規模地震の誘発と関連の活動が数ヶ月以内に発生したこと、もしくは、2) レシーバ断層の多様性（Toda et al., Nature Geosci., 2013）による遅れ静穏化（delayed stress shadow）の可能性が考えられ興味深い。いずれにしても、熊本地震によるクーロン応力の正負と地震活動の活発化・静穏化はよく対応し、変化した地震活動は長期化している。

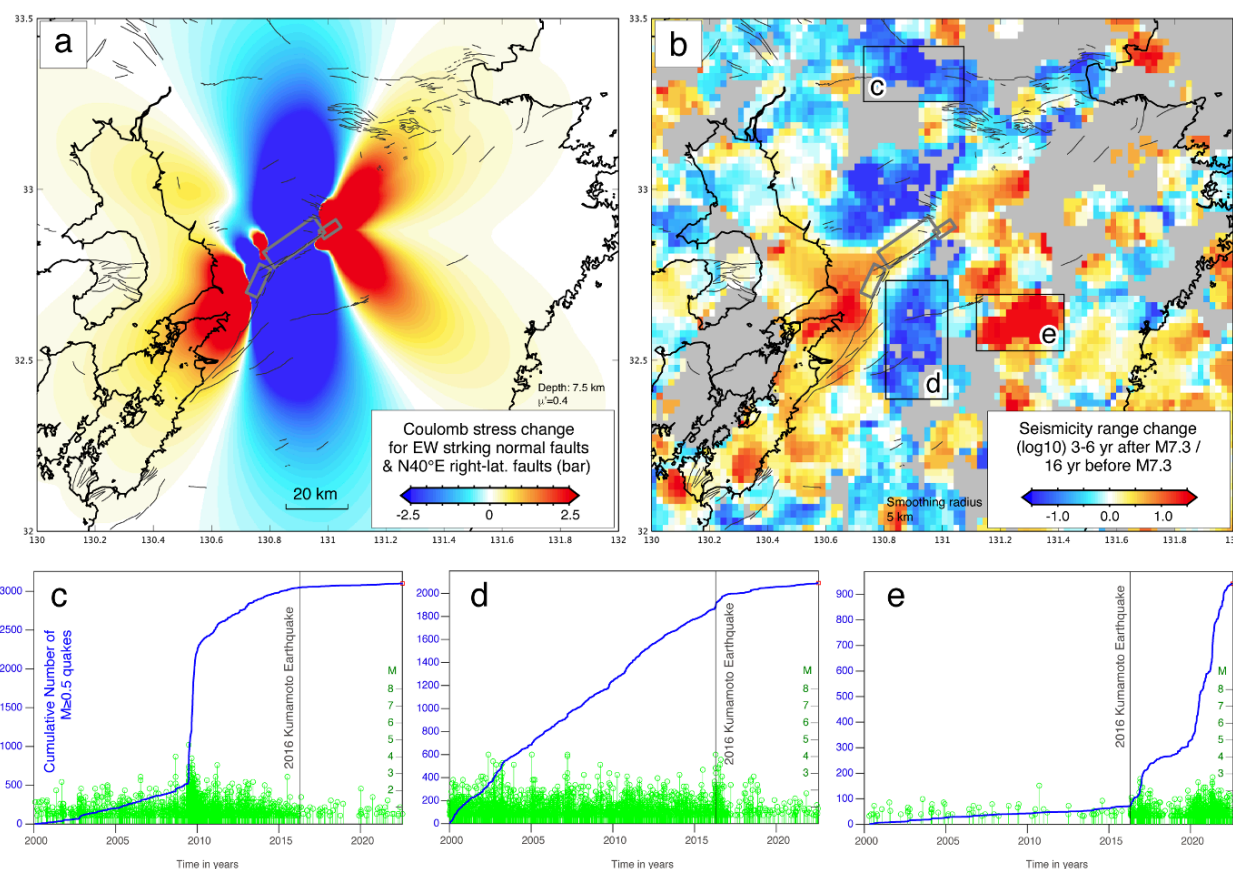


図1. 熊本地震による静的クーロン応力変化 (a) とその前後の地震活動度変化 (b) . 個々の小地域での地震活動応答時系列 (c-e) . 震源断層モデルには国土地理院 (2016) を用いた.

謝辞：地震活動の解析にあたっては気象庁一元化震源カタログ（暫定も含む）を使用した.

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

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:00 AM - 11:45 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:00 AM - 2:45 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S09] AM-2

chairperson:Nana Yoshimitsu(Kyoto University)

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

[S09-22] What factors contribute to cut-off depth of crustal seismicity?

*Akiko TANAKA¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S09-23] Evaluation of seismic activity characteristics at different depths through laboratory rock fracture experiments

*Nana YOSHIMITSU¹, Hironori KAWAKATA² (1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ.)

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

[S09-24] Verification of Seismic Gap by means of physical and statistical models

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹, Eugenio Lippiello² (1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Università della Campania "Luigi Vanvitelli")

What factors contribute to cut-off depth of crustal seismicity?

*Akiko TANAKA¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

Heat flow data contribute to the imaging of the lithospheric thermal structure, which greatly influences tectonic and geological processes and constrains the strength of the lithosphere, the modes of deformation, and the depth distribution of earthquakes. To provide a more reliable estimation of the lithospheric thermal structure, some complementary approaches are possible.

One approach is to update and incorporate the existing thermal data. The compilation of global heat-flow data is currently under major revision by the International Heat Flow Commission (IHFC [<http://www.ihfc-iugg.org/>]) of the IASPEI/IUGG. The significant improvement over the former heat-flow database structure is the implementation of a parent-child system for heat-flow data determined at each location and an extended set of meta data fields, relevant to enable quality control, and supporting interoperability following FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) and open data principles. We updated and incorporated the existing thermal data in and around Japan. A new version of the database “Thermal Data Collection in and around Japan”, which contains continuously updated heat flow and geothermal gradient data and adds thermal conductivity data in and around Japan, has been released in 2019 [https://www.gsj.jp/data/G01M/GSJ_MAP_TDCJ_2019.zip]. This provides an opportunity to revisit the thermal state of the lithosphere along with other geophysical/geochemical constraints.

Another approach is based on the complementary interpretation of different geophysical data sets. One of the promising indicators is the cut-off depth of shallow seismicity. Several studies have been conducted to assess the inverse correlation between the cut-off depth and heat flow since it has been attributed primarily to the temperature. Some abrupt fluctuations in seismogenic depth may be caused by changes in lithology affecting rheology [e.g., Magistrale 2002]. Relative contributions of heat flow and lithology to controlling the cut-off depth will be discussed.



Evaluation of seismic activity characteristics at different depths through laboratory rock fracture experiments

*Nana YOSHIMITSU¹, Hironori KAWAKATA²

1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ.

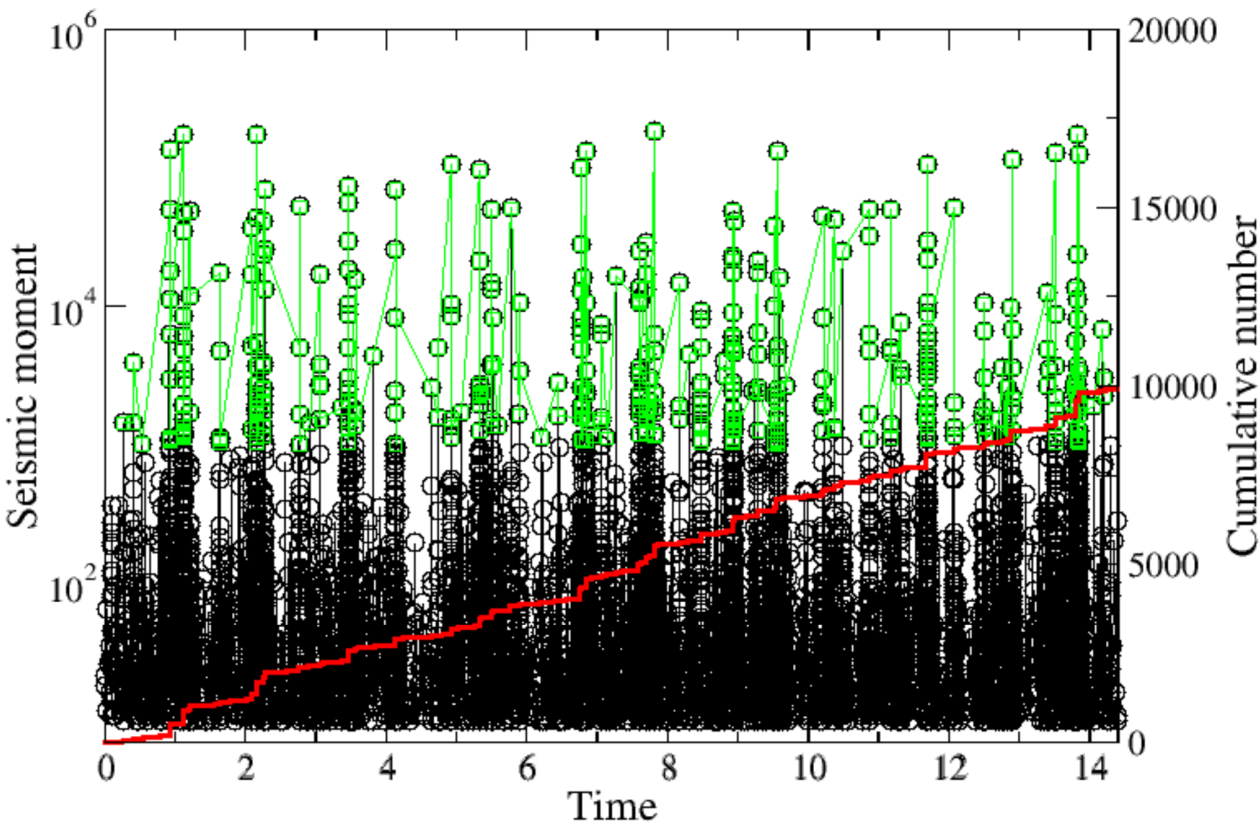
異なる深さ、つまり異なる応力環境において発生した地震が、どのような共通点や相違点を持つかは興味深い。近年は地震10 km以浅でも人間の工業活動の影響による地殻浅部における誘発地震の発生も増加しており、その活動特性の評価が重要となっている。本研究では、異なる封圧下における岩石の三軸圧縮破壊試験中に発生した微小破壊活動を比較することで、異なる深さにおける地震活動を観察する。岩石の圧縮試験中に発生する微小破壊はAcoustic Emission(AE)と呼ばれ、主破壊が発生する前の試料内で発生することから、その活動や波形情報は地殻の応力や不均質の状態を反映していると考えられる。我々は、10 MPaの封圧下におけるWesterly花崗岩の三軸圧縮試験を実施し、広帯域連続AE収録を実現するとともに(Yoshimitsu et al., 2014)、その後封圧50 MPa下における三軸圧縮試験にも成功した(Yoneda et al., 2017)。本発表ではこれらに加えて新たに封圧100 MPa下における実験を実施した。3つの実験には直径50 mm、高さ100 mmのWesterly花崗岩を利用した。室温条件下において目的封圧達成後に軸応力制御で強度の6割程度まで載荷した後、周変位制御による圧縮を数時間かけて実施し、破壊強度を迎えたのちにわずかに軸応力が低下したところで除荷した。実験中、試料側面に貼った8点(100 MPaの場合のみ7点)の広帯域センサ(富士セラミックス社製、100-2000 kHz)でAE波形を20 Mspsで連続収録した。得られた連続記録からAICにより次数選択したARモデルを用いて初動の立ち上がりと同定し、AE波形を切り出した。最小二乗法による震源決定を実施したところ、決定されたイベントは、10 MPaにおいて 6794、50 MPaにおいて約65000、100 MPaにおいて約70000であった。すべてのケースにおいて、イベント活動は圧縮開始直後には低調であり、AEはほとんど発生しなかった。その後、強度の80%程度まで圧縮が進むと地震活動は徐々に活発になり、最大強度を超えた後に急激にイベントの数が増える。AE活動の規模別頻度分布から推定したGutenberg-Richter則におけるb値は2程度の値を示した。これは一般的な自然地震活動から得られる1程度のb値に比べると大きく、群発地震や火山性地震においてみられる値に近い。10 MPa、50 MPaの両ケースにおいて、b値は最大強度に近づくとも0.3程度減少した。これらより、3つの異なる封圧下においてAEの発生数に違いはあるものの、その活動パターンは非常によく似ていることがわかった。実験試料内のAEは自然環境における前震に相当するものであり、最大強度に近づくまでほとんど活動が見られないという結果は、自然地震において本震のはるか前には活発な前震活動があまり見られないことが多いことと調和的である。いくつかの自然地震においては本研究で見られたのと同様の前震の活発化も見られているが(e.g., Jones and Molnar, 1979)、載荷レートが実験とは異なる可能性があり、直接的な比較には注意が必要である。本研究で取り扱った封圧10-100 MPaという圧力環境は、深さ1-3 km程度の地殻に相当する。したがって、本研究の結果は、浅部地殻において周辺岩盤の圧力は地震活動パターンに大きな影響を与えない可能性を示した。

Verification of Seismic Gap by means of physical and statistical models

*Giuseppe Petrillo¹, Jiancang Zhuang¹, Eugenio Lippiello²

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Università della Campania "Luigi Vanvitelli"

Spring-block models are a striking example of how implementing the right physical laws in a model, even with few parameters, it is possible to reproduce the statistical features of earthquakes. In fact, in recent years, the introduction of an additional parameter that regulates the elastic rebound after a large earthquake has also allowed the optimal description of the statistical laws of aftershocks. In the seismological community, the estimate of the occurrence probability of the next big shock on the basis of the time delay from the last earthquake still represents a big challenge. In fact, the real catalogs still contain few seismic events, therefore appears difficult to test the so called “Seismic Gap Hypothesis” in a statistically relevant way with current historical data. Instead, extensive numerical simulations can be obtained with up-to-date realistic spring-block model and allow us to test the Gap Hypothesis. Our numerical results support recent findings which have shown that important insights can be obtained from the spatial organization of aftershocks and its relationship to the mainshock slip profile. In particular, we show that large earthquakes do not regularly repeat in time, but it is possible to achieve insights on the time until the next big shock from the percentage of aftershocks occurring inside the mainshock slip contour. Finally, it is possible to describe the physical model numerical catalogs with other statistical-based models by means of Likelihood Maximization procedure. The results of the optimization for the Stress Release, Triggering and Self Exciting Long Term Correcting models confirm that in addition to the triggering process, the charge and discharge of stress due to the succession of events also plays an important role in seismic prediction.



Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:45 AM - 12:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:45 AM - 3:30 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Akiko TOH (Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-01] Seismicity and its implications for fluid movement in the northern and central Hikurangi subduction zone, New Zealand

*Kazuya TATEIWA¹, Calum Chamberlain², Martha Savage², Tomomi Okada¹ (1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-02] Fault valve action using ancient magma system caused the intense earthquake swarm in Northeast Noto peninsula, Japan

*Keisuke YOSHIDA¹, Masaaki Uno², Toru Matsuzawa¹, Yohei Yukutake³, Yusuke Mukuhira⁴, Hiroshi Sato³, Takeyoshi Yoshida¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Environmental studies, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Institute for Fluid Science, Tohoku University)

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S08-03] Source process of moderate earthquakes off the east of Izu Peninsula in 2006 and 2009 : Relationship to previous swarm activities

*Yukako Tanaka¹, Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

Seismicity and its implications for fluid movement in the northern and central Hikurangi subduction zone, New Zealand

*Kazuya TATEIWA¹, Calum Chamberlain², Martha Savage², Tomomi Okada¹

1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington

Introduction

Beneath the North Island of New Zealand, the Pacific plate is subducting under the Australian plate along the Hikurangi Trough, forming the Hikurangi subduction zone. In the Hikurangi subduction zone, some recent studies suggest that fluid movement from the oceanic crust to the plate boundary or into the Australian plate impacts various seismic activities such as SSEs (slow slip events), tremors, and earthquake swarms. Tateiwa et al. (2022, JpGU) relocated earthquakes in the northern Hikurangi (37S–39.5S) and classified them into those occurring within the Australian plate (AUS), within the Pacific plate (PAC), or at the interplate (INT). They found that PAC, INT, and AUS earthquakes were active during the pre- and co-SSE period, co-SSE period, and post-SSE period, respectively, which indicates fluid movements before and after the SSE. In this study, we extend the study area to the central Hikurangi (39.5S–41S), classify earthquakes into AUS, INT, or PAC, and investigate the relationship between earthquakes and SSEs.

Data and Method

We selected all earthquakes in the GeoNet catalog of $M > 3$ occurring between 2003 and 2020 in the northern and central Hikurangi and shallower than 150 km for analysis. The number of earthquakes used was 7,616. Data from GeoNet broadband (HH) and short-period (EH) seismometers were used for the study. The classification into AUS, INT, and PAC mainly consists of the three steps: (1) classification based on the re-determined hypocenters by this study, (2) classification based on the focal mechanisms from the P-wave polarity, and (3) classification based on the cross-correlation of the waveforms. The number of earthquakes classified in each step was 3,269 in the first step, 260 in the second step, and 244 in the third step. To find the occurrence of SSEs, we used all GNSS stations by the GeoNet within the same region as used in the relocation analysis. We defined the occurrence timing of SSEs as the timing that the GNSS transient eastward displacement occurs based on linear function fitting. We also defined the 20-day period, from 30 to 10 days before the transient displacement appeared, as the pre-SSE period, from 10 days before to 10 days after the transient displacement as the co-SSE period, and from 10 to 30 days after the transient displacement as the post-SSE period.

Result and Discussion

PAC earthquakes were distributed widely, while AUS and INT were distributed locally. Many AUS earthquakes in the northern Hikurangi were where the extensional areal strain was observed (Dimitrova et al., 2016), indicating that the extension increases the permeability of the crust and makes it easy for fluid-related earthquakes to occur. INT earthquakes were at the periphery of the SSE source regions. In and around the shallow SSE source region, AUS earthquakes were active during the post-SSE period, INT earthquakes were active during the co-SSE period, and PAC earthquakes were slightly active during the pre- and co-SSE period. This is the same as in the Northern Hikurangi (Tateiwa et al., 2022, JpGU). This characteristic temporal relation with SSE dependent on earthquake location can be explained by fluid movement. That is, fluid movement from the oceanic crust to the plate boundary or upper plate, as proposed by Nishikawa et al. (2021), may have triggered SSEs, tremors, and AUS or INT earthquakes.

Fault valve action using ancient magma system caused the intense earthquake swarm in Northeast Noto peninsula, Japan

*Keisuke YOSHIDA¹, Masaaki Uno², Toru Matsuzawa¹, Yohei Yukutake³, Yusuke Mukuhira⁴, Hiroshi Sato³, Takeyoshi Yoshida¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Environmental studies, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 4. Institute for Fluid Science, Tohoku University

日本列島能登半島北東部において、現在、非常に活発な群発地震活動が発生している。地殻内における群発地震の発生には、しばしば火山活動に関係する流体移動が関わっていることが示唆されているが、この地域は現在是非火山地域である。本研究では、この群発地震活動の発生原因を調べる目的で、震源の時空間変化と地震波反射面を調べた。

震源の再決定の結果、震源域にみられる4つの地震クラスターの各々において、地震の震源が多数の面構造を用いて深部から浅部へ移動していく特徴が見られた。この特徴は、注水時の誘発地震活動や流体に関係する自然の群発地震活動 (e.g., Yoshida & Hasegawa, 2018) と酷似している。S波反射面は、この地震活動開始地点付近、震源域の中で局所的に深い場所に検出された。Nakajima & Hasegawa (2007) による地震波速度トモグラフィ結果によると、この反射面の直下にマントルに続くS波の低速度域が存在する。このS波低速度域が一連の活動を生じさせた流体の供給源になっていることを示唆する。

この地震活動開始地点付近の震源分布は、特徴的な環状構造を呈し、陥没カルデラを伴うマグマだまり直上に生じる環状岩脈に類似してみえる。現在、この地域には火山活動は見られない。しかしながら、中期中新世の日本海拡大期においては、この地域には活発な火山活動が生じている。また、この周辺では、現在も周辺に温泉が分布しており、高いヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) も観測されている (Umeda et al., 2009)。過去のカルデラ火山活動の際に形成され現在も高い含水量を維持し続けている固化したマグマだまりが震源域深部に存在している可能性が考えられる。もしくは、同じマグマ供給系を使用して、現在の沈み込みに関係したマグマ活動が地下で進行している可能性もあるかもしれない。中期中新世あるいはあるいは現在のマグマ活動により深部からもたらされた流体が、中期中新世以降の海成層に埋もれた陥没カルデラ深部の環状岩脈に関係した裂隙を用いて上昇することにより、一連の地震が発生しだしたことを表している可能性がある。

この地震活動中には、地震活動だけでは説明できない顕著な地殻変動が観測されており (Nishimura et al., 2022)、これが地震の発生原因となっている流体の供給とも関係している可能性が考えられる。例えば、地震活動域中心部には地震の空白域がみられるが、そこで流体圧増加に起因する非地震性すべりや断層開口が生じたことを表すのかもしれない。実際に、そのような地殻変動が、最近、箱根の群発地震活動についても報告されている (Yukutake et al., 2022)。本研究の結果は、現在では非火山地域となっている能登半島北東部においても、中新世のリフト活動に伴うカルデラ火山活動や、現在の沈み込みに伴うマグマ活動に関係する流体が、地震活動および地殻変動を生じさせていることを示唆する。

Source process of moderate earthquakes off the east of Izu Peninsula in 2006 and 2009 : Relationship to previous swarm activities

*Yukako Tanaka¹, Takuji YAMADA¹

1. Ibaraki University

1. 序論

伊豆半島の東方沖では、1970年代後半以降、地殻変動を伴う群発地震活動が繰り返し発生している(e.g. Hayashi and Morita, 2002; Ueno et al., 2012)。1989年には群発地震活動の活発化と共に海底噴火が発生し、地震活動と地下の火山性流体との関係が議論されている(e.g., Okada and Yamamoto, 1991; Tada and Hashimoto, 1991; Ukawa and Tsukahara, 1996)。本研究では、伊豆半島東方沖で発生した群発地震活動のうち、2006年に発生した4地震($3.9 \leq M_w \leq 5.6$)および2009年に発生した2地震($4.8 \leq M_w \leq 4.9$)について、経験的グリーン関数(EGF)を用いた複数時間窓の波形インバージョンを行い、震源時間関数に見られる特徴を解析するとともに、過去の地震活動域との位置関係を比較し、特徴の背景を考察した。

2. データと解析手法

同じ年の群発地震活動中に発生した複数の小地震($3.4 \leq M_w \leq 3.9$)の観測波形をEGFとして用い、震源時間関数の解析を行った。各年とも、解析対象地震とほぼ同じメカニズム解を持つ2地震の他に、解析対象地震と異なるメカニズム解を持つ地震をEGF地震として用いることで、結果の信頼性を確かめている。解析対象の6地震、およびEGFとして用いた7地震は、いずれも横ずれ断層型であった。解析には、防災科学技術研究所(NIED)のK-net強震計記録を用いた。加速度波形記録を積分して速度波形とした後、0.1-1.0 Hzのバンドパスフィルタをかけ、さらにS波を含む10秒間を切り出して解析に使用した。

解析には、0.05 秒ずつずらした40個の時間窓を用いた。EGF地震の震源時間関数は破壊継続時間0.2 秒の二等辺三角形で表せると仮定し、解析対象地震のモーメントがNIEDのCMT解の M_w 値に一致するとの条件下、解析対象地震の震源時間関数を求めた。

3. 結果と考察

解析から得た6地震の震源時間関数を図1に示す。以降、解析対象地震は、発生年の下2桁と規模の大きい順に振った番号を、その地震の名称とする。2006年に発生した地震について、EQ06-1($M_w 5.6$)は、破壊開始後0.2秒程度でモーメントレートが最大になった後、1秒程度尾を引くような破壊を起こしている。EQ06-2($M_w 4.5$)とEQ06-3($M_w 4.3$)は共に2回の破壊が見られ、EQ06-2は2回の破壊が同規模である一方で、EQ06-3は2回目の破壊が明らかに小さいという特徴がある。EQ06-4($M_w 3.9$)は破壊継続時間0.2秒程度の単一の破壊であった。また、2009年に発生した地震については、EQ09-1($M_w 4.9$)は大きな破壊を起こした後、小規模な破壊が連続して発生している。一方でEQ09-2($M_w 4.8$)では、主破壊後、0.2 秒程度の間隔を空けて、小規模な破壊が発生している。

結果から得られた震源過程の特徴の違いは、震源の空間分布に関連すると考えられる。EQ06-1, EQ06-2は少なくとも20年程度群発地震が発生していない領域で起こった地震である。一方、EQ06-3は1998年に発生した群発地震活動の震源域に近接している。このことから、以下のような推論が可能である。過去に破壊が起こった領域では、既に存在する強度の低い部分を、破壊が比較的スムーズに進展するのに対し、過去に破壊の起こっていない領域では、フレッシュな強度の高い部分を破壊が進展するため、複雑な破壊過程を示したのではなかろうか。すなわち、たとえばUmeda(1990)が本震と余震の破壊過程の相違について言及しているように、過去の地震活動による破碎の有無が、解析した地震の破壊過程の相違として見られたと考えられる。

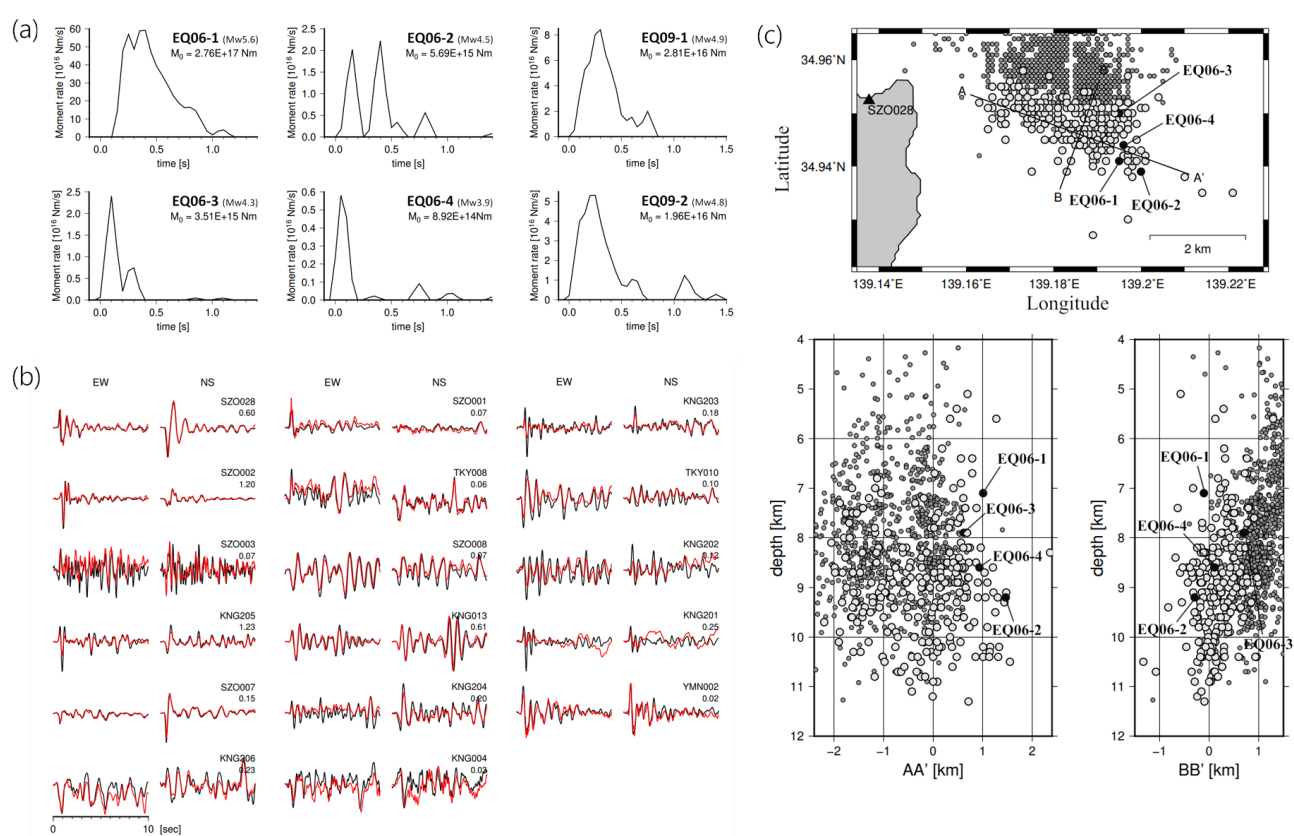


図1. (a) 解析対象の6地震の震源時間関数。縦軸はモーメントレート（単位： 10^{16} Nm/s）、横軸は時間（単位：秒）を表し、時刻ゼロは破壊開始時刻を表す。
(b) EQ06-3の観測波形（黒）と理論波形（赤）。(c) 2006年4月に発生した地震活動の震源分布。灰色小丸は1998年の群発地震の震源分布。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 3:00 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 6:00 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson: Kazuya TATEIWA (Tohoku University), Keisuke Yoshida (Tohoku University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S08-04] Quantification of expansion rate of aftershock zone for M7-class earthquakes in Japan: Potential as differential stress meter

*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA² (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S08-05] Stress Drop of Small Earthquakes in the Southeastern Kanto Region

Kaho Hashimoto¹, *Takuji YAMADA¹ (1. Ibaraki University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S08-06] Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

*Tsukasa Masuda¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S08-07] **Shear strength and fluid over-pressure in world subduction zones estimated from the earthquake energy budget**

*Nelson PULIDO¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

Quantification of expansion rate of aftershock zone for M7-class earthquakes in Japan: Potential as differential stress meter

*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA²

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University

2004年パークフィールド地震(M6)や2010年バハ・カリフォルニア(エルマヨール・クカパ)地震(M7.2)では、本震からの経過時間の対数に比例する形で余震域拡大が生じた(Peng and Zhao, 2009; Ross et al., 2017)。背景にある物理メカニズムの候補として、本震の余効すべりによる余震誘発が考えられている。余効すべりの伝播について多くの理論的研究が行われている(e.g., Ariyoshi et al., 2019)一方で、余震域の拡大速度についての定量的理解は必ずしも進んでいない。そこで本研究では、日本国内で発生した複数の大地震を例として、余震域の拡大速度を比較・検討する。

気象庁の地震カタログデータに基づき、2000年以降のマグニチュード6.9-7.4の地震を本震とした上で、本震から100日以内に震源近傍で発生したマグニチュード3以上の地震を余震と定義した。ただし、震源決定精度が低いため余震数が(見かけ上)少なくなっているアウターライズ地震と、大々的な動的誘発現象が生じた2016年熊本地震(e.g., Uchide et al., 2016)、さらにマグニチュード8以上の巨大地震直後の地震は、研究対象の本震から除外した。余震域の拡大を評価するために、本震震源からの3次元的な距離を用いた。この3次元距離を縦軸、本震からの経過時間(対数)を横軸としたグラフ上で、余震域が広がる様子を確認できる。拡大速度についてデータからの自動推定を行うため、経過時間を時間窓に分割した上で、外れ値を除去し、各時間窓の中で本震震源から最も遠い点を回帰する、というアルゴリズムを開発した。

解析の結果、余震域の拡大速度(対数時間に対する)と、余震から推定したGutenberg-Richter則のb値との間に、-0.7を超える強い負の相関があることがわかった。一方、拡大速度と本震の深さや大きさとの間に相関はないこともわかった。既存の経験的關係(Scholz, 2015)と合わせ、余震域の拡大速度から差応力を推測する關係式(差応力計)を得た。この式は、差応力が高いほど余震域の拡大速度が大きいという点で、力学的に合理的と考えられる。さらに、拡大速度は、本震がプレート境界地震の場合に大きく、プレート内地震の場合には小さい、という傾向が見られた。このことは、プレート境界地震の余震域がプレート内地震の余震域よりも高い差応力環境下(本震後)にあることを示唆するが、プレート境界地震とプレート内地震との断層成熟度の違いなど他の要因の影響も考えられる。また、以上の結果は、拡大速度の自動推定結果に依存している。この自動推定アルゴリズムは簡易的なものであり、改善の余地が残っているため、この点についての議論も行う。

Stress Drop of Small Earthquakes in the Southeastern Kanto Region

*Kaho Hashimoto¹, Takuji YAMADA¹

1. Ibaraki University

1. 目的と解析対象地震

関東地方南東部では、南からフィリピン海プレートが沈み込み、さらにその下には東から太平洋プレートが沈み込んでいる。これに関連して複雑な地震活動が見られ、千葉市や旭市、古河市などに地震活動が密集した地域（以後、クラスターと称す）が存在する（図1a）。本研究では、2003年から2020年の間に関東地方南東部で発生した $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ の311個の地震を対象に応力降下量解析を行い、クラスターごとの特徴や地震の深さとの関係を考察した。解析した地震の最大深度は112.5 kmである。

2. 解析手法

防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）の速度波形を利用し、Yamada *et al.* (2021) の手法を用いて解析を行った。手法の詳細は、以下の通りである。解析対象の $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ の地震に最も近接する $M_w 3.5$ の地震波形をEGF波形とし、まず、解析対象地震の波形およびEGF波形それぞれのスペクトルを算出した。次に、解析地震波形のスペクトルをEGF波形のスペクトルで割ることにより（デコンボリューション）、地震波の経路の影響、観測点近傍の地盤の影響、地震計特性を除去して、解析地震とEGF地震の周波数領域における震源特性の比を求めた。さらに、Boatwright (1978) のオメガ2乗のスペクトル式を用いてコーナー周波数を推定した。最後に、破壊伝播速度をS波の90%と仮定して、Madariaga (1976) のモデルから、応力降下量の値を得た。

3. 結果と考察

図1(b)は、本研究で得られた応力降下量の解析結果である。まず、クラスター間の違いについて考察する。解析地震の密集域を、図1(b)中の四角い枠に対応する6区域に分け、区域間の応力降下量の差についてWelchのt検定（危険率5%）を行った。その結果、茨城県西部クラスター（赤）は、ほぼ同一深度で発生した旭市付近のクラスター（青）に比べて応力降下量が大きく、この差は統計的に有意であった。前者はToda *et al.* (2008) で存在が示唆された「関東フラグメント」もしくはフィリピン海プレート上面、後者は太平洋プレート上面で発生した地震と考えられる。応力降下量は主として剪断強度の大きさの指標となるため（Yamada *et al.*, 2021）、上記2地域における相違は、フィリピン海プレート上面の剪断強度が、太平洋プレート上面のそれに比べて大きいことを示唆していると考えられる。

次に、各クラスター内の応力降下量空間分布について検討した。茨城県西部のクラスター（図1bの赤枠内）では北端と南端部に近い地震、また千葉市付近のクラスター（橙）では、より深い地震ほど応力降下量が多い傾向が見られた。この傾向を定量的に調べるため、クラスター中央からの距離あるいは震源の深さの関数として、応力降下量を図示した（図2）。

茨城県西部のクラスターでは、クラスター中央からの距離が異なるドーナツ型領域内で発生した地震の応力降下量と個数から平均応力降下量を算出した。ドーナツ型領域の幅を1 kmに固定したまま、半径を0.5 kmずつ拡大して平均応力降下量の推移を調べた。千葉市周辺のクラスターでは、気象庁の震源の深さ決定精度を考慮して深さの幅4 kmの領域を設定し、下方に1 kmずつずらしながら平均応力降下量の推移を調べた。図2aに示した茨城県西部のクラスター（図2a）では、図1で見られる傾向どおり、クラスター辺縁部の地震ほど応力降下量が多いことがわかる。千葉市周辺（図2b）では、応力降下量は深さとともに増加していることがわかる。ただし、地震ごとの応力降下量値のばらつきが大きいことにも注意が必要である。クラスターの縁辺部では剪断強度が大きいためその外側で地震が発生しづらいと考えられ、これは本研究で得られた応力降下量の空間分布と矛盾しない。また、断層の垂直応力が深さの関数となることを考えると、応力降下量に深さ依存性があることは自然であるが、依存性の有無については様々な報告があり、議論の余地がある（たとえば、Abercrombie *et al.*, 2021）。今後は、応力降下量を深さで規格化した上で、深さ依存性やクラスター内

の応力降下量分布について詳細な検討を行う予定である。

参考文献

- ・ Abercrombie *et al.* (2021), <https://doi.org/10.1029/2021JB022314>
- ・ Boatwright (1978), <https://doi.org/10.1785/BSSA0680041117>
- ・ Madariaga (1976), <https://doi.org/10.1785/BSSA0660030639>
- ・ Toda *et al.* (2008), <https://doi.org/10.1038/ngo318>
- ・ Yamada *et al.* (2021), <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01326-8>

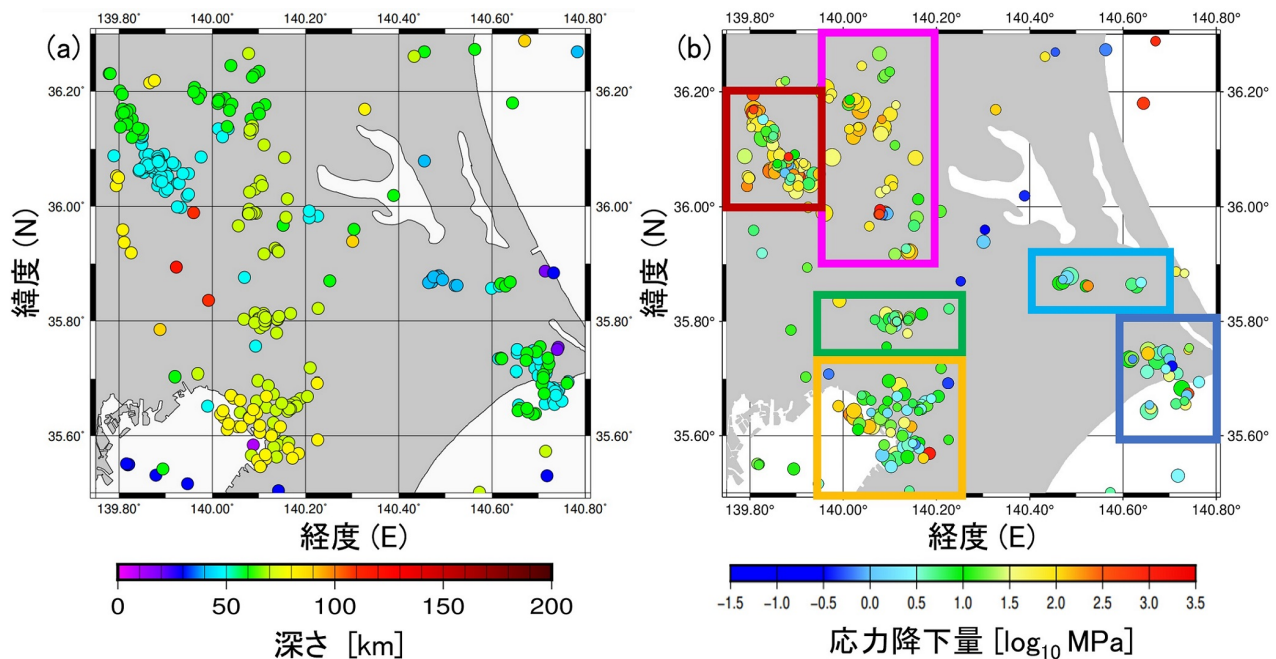


図 1. (a) 解析した地震の震央分布図。(b) 本研究で得られた応力降下量。図中の長方形はWelchのt検定や深さ依存性の議論に用いたクラスターに対応している。

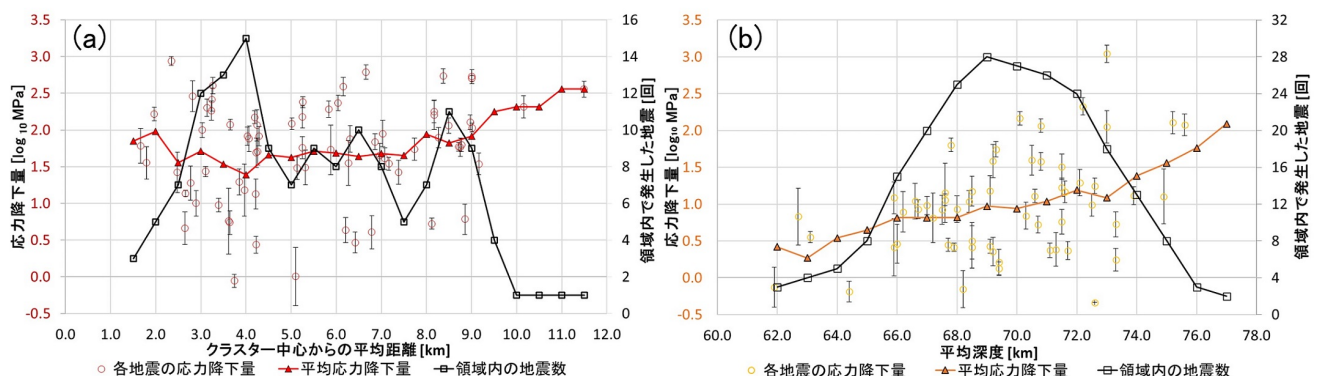


図2. (a) クラスタ中心からの距離の関数として表した、茨城県西部クラスターの応力降下量。赤丸、赤実線、黒実線はそれぞれ、解析に用いた各地震の応力降下量、平均応力降下量、領域内で発生した地震の数を示す。(b) 震源の深さの関数として表した、千葉県周辺の地震の応力降下量。黄色丸、橙実線、黒実線は(a)の場合と類似して、解析に用いた各地震の応力降下量、平均応力降下量、領域内で発生した地震の数を示す。

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

*Tsukasa Masuda¹, Takuji Yamada¹

1. Ibaraki University

1. はじめに

茨城県・千葉県東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う地震が定常的に多数発生しており、1677年にはマグニチュード (M) 8.0 以上であったと推定される延宝地震も発生している。本研究では、2003年1月から2019年12月に茨城県沖・千葉県東方沖で発生した小地震 ($4.0 \leq M_w \leq 5.0$) のうち、2. で説明するとおり、太平洋プレートの摩擦特性を反映していると考えられる地震について、応力降下量を解析した。

2. 解析対象地震と解析手法

2003年1月から2019年12月に茨城県沖・千葉県沖で発生した $4.0 \leq M_w \leq 5.0$ の地震のうち、太平洋プレート上面から ± 15 kmの深さの地震を対象とし、Hi-net (防災科学技術研究所)の速度波形記録を用いて、応力降下量を解析した。解析手法は、Yamada *et al.* (2021) と類似の手法を用いた。まず周波数領域において、各解析対象地震の速度波形を、それに最も震源の近い M_w 3.5の地震の観測波形 (以後、経験的グリーン関数と表記する) で除し、観測点ごとにスペクトル比を求めることにより、両地震の震源特性の比を取得した。次に、地震の震源スペクトルはオメガ2乗モデル (Boatwright, 1978) に従うと仮定し、スペクトル比から解析対象地震および経験的グリーン関数のコーナー周波数を求めた。そして、Madariaga (1976) の円形断層モデルに従って、コーナー周波数から解析対象地震の応力降下量を推定した。この操作を解析対象地震すべてについて実行した。

3. 結果および考察

緯度経度0.1度ごとに平滑化した応力降下量の解析結果を図1に示す。P波、S波ともに、千葉県沖に比べて、茨城県沖で応力降下量が多い傾向がみられた。また、結果を注意深く観察すると、その空間不均一性があることが分かる。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震の大すべり域 (Iinuma *et al.* 2012) で発生した小地震は、大きな応力降下量を持つことも明らかとなった。これは、先行研究と調和的であり、小断層の応力降下量はその場の摩擦特性を反映し、応力降下量の大小関係が剪断強度のそれに対応しているという主張を支持する。図1中の領域Aはアスペリティとされる領域で、応力降下量が比較的大きい小地震が発生しており、一方、図1中の領域Bの海山がある領域では、応力降下量が小さい地震が発生している。これは、アスペリティの存在と応力降下量の値が対応していると考えられ、また、海山自身がアスペリティになるわけではないという Mochizuki *et al.* (2008)の考えと調和的である。さらに、図1中の領域Cは1667年延宝房総沖地震の震源域 (羽鳥, 1975) に相当し、領域C内での小地震の発生数が少ないこと、領域Cの西端では応力降下量が比較的小さい地震が発生していることが分かった。これは、領域Cおよびその周辺の剪断強度が小さいことを示唆していると考えられ、1667年延宝房総沖地震が津波地震であったと推定されていることと調和的である。

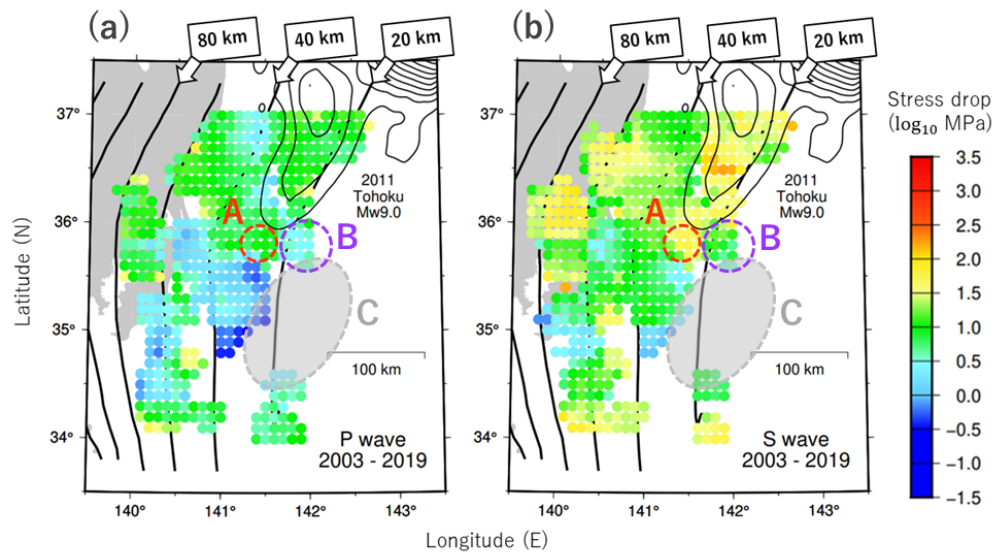


図 1. (a)P波, (b)S波から得られた応力降下量の空間分布. グリッドポイント間隔は緯度経度0.1度ごとである. 各グリッドポイントの値は, グリッドポイントから半径20 km以内の地震の応力降下量の平均値を示す. 黒のコンターは, 2011年東北地方太平洋沖地震のすべり分布を示し, その間隔は2 mごとである (Iinuma *et al.*, 2012). 太い黒線は, 沈み込む太平洋プレート上面の深度を表しており, 線間隔は20 kmである (Kita *et al.* 2010; Nakajima and Hasegawa 2006; Nakajima *et al.* 2009).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

Shear strength and fluid over-pressure in world subduction zones estimated from the earthquake energy budget

*Nelson PULIDO¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

I estimated fault shear strength of global subduction zones based on calculations of the seismic energy budget during large earthquakes. Estimates of shear strength are based on the calculation of the total energy released during earthquake rupture, which is partitioned into radiated energy, fracture energy (G) and frictional (heat) energy. Radiated energy can be readily obtained from radiated seismic waveforms or using information of the source time function of earthquakes. Accurate estimates of fracture energy are more difficult to obtain, and for this purpose I use the Finite Width Slip Pulse dynamic rupture model, combined with information of the heterogeneous fault rupture process of large earthquakes (208 fault rupture models of the NEIC finite fault slip database, from 1990 to 2022, and $M_w > 7$). Estimates of G are largely influenced by the heterogeneous distribution of fault rupture velocity, rise time and slip of earthquakes across the fault plane. In a previous study (AGU, 2021) I showed that fracture energy is underestimated by a factor of 5 when estimations do not account for the heterogeneity in fault rupture process of large earthquakes, as typically assumed by the calculations based on the difference between average stress drop and the apparent stress of earthquakes (known as G'). Furthermore, recent studies also suggest that megathrust earthquakes experience an almost complete strength drop during fault rupture (i.e. 2011 Tohoku). If a strong dynamic weakening typically takes place during fault rupture of large earthquakes (substantial stress undershoot) then frictional energy can be neglected, and therefore average shear stress and shear strength can be obtained. Based on this assumption I calculated lower bound estimates of shear strength across subduction regions and oceanic lithosphere worldwide. My results indicate a severe fault strength weakening during all megathrust earthquake ruptures (with a global average around 4 MPa), notably tsunami earthquakes belonging to the weakest faults (around 1 MPa), implying that fluids are extremely over-pressured across the majority of subduction regions worldwide. By using my shear strength results, I obtained a global average of λ (the fluid pore pressure to lithostatic pressure ratio) of 0.98, for subduction megathrusts. In contrast, I showed that oceanic lithosphere at ridges, transform faults and fracture zones is 5 to 10 times stronger. This considerable difference indicates that fluid pressure plays a major role in controlling strength of earth's lithosphere. Furthermore, my estimations of average shear stress during fault rupture also enable the calculation of seismic efficiency. I obtained that average seismic efficiency for megathrust subduction earthquakes, is smaller than the average value for earthquakes in oceanic lithosphere.

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

🗓 Tue. Oct 25, 2022 3:15 PM - 4:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:15 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology), Saeko Kita (Building research institute)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S08-08] Nankai Trough Earthquakes Estimated from GIS-based Historical Documents in Mie Prefecture

*Yoshiko YAMANAKA¹ (1. Nagoya Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S08-09] Effects of long-term slow slip events on in-slab stresses in Bungo Channel, southwestern, Japan

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Roland Burgmann³, Suguru Yabe⁴, Youichi Asano⁵, Takeshi Kimura⁵ (1. Building Research Institute, 2. USC, 3. UC Berkeley, 4. AIST, 5. NIED)

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

[S08-10] Single-station detection of seismic slow earthquakes using their broadband characteristics

*Koki MASUDA¹, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-11] Strongly scattering medium along slow earthquake fault zones, inferred by the new observations of short-duration tremors

*Akiko TOH¹, Wu-Cheng Chi², Yann Capdeville³, Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, 3. Nantes Université, CNRS, France)

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

[S08-12] Direct Evidence of Strike-Slip Motion for Low-Frequency Earthquake near Parkfield

*Naofumi Aso¹, Miki ASO², David R SHELLY³, Satoshi IDE⁴ (1. Tokyo Institute of Technology, 2. OYO RMS, 3. USGS, 4. University of Tokyo)

Nankai Trough Earthquakes Estimated from GIS-based Historical Documents in Mie Prefecture

*Yoshiko YAMANAKA¹

1. Nagoya Univ.

▼ はじめに

地震調査委員会長期評価報告書に掲載されている宝永地震の震度分布（H13度版は宇佐美他(1994); H25度版は松浦(2012)）をみると、たとえば高知の震度が震度6以上から震度5になっており、今後の地域防災を考える上で検証が必要と思われるが、どの史料から震度を判断したのかわからないためすぐには検証ができない。これまで刊行されている史料集の検索システムを構築してきた（山中, 2015, 2021）。これによって膨大な史料集からターゲットの地震の史料を取り出すことが可能になった。しかし現状ではそれらの史料がどこ被害を記述したものかわからないため、上記検証もかなりの時間を要する。

そこで、フリーのWEB-GISであるe-コミマップを用いて地方史や郷土資料、論文等の史料を整理することを試みた。

▼ e-コミマップの活用

史料に関する地名を調べるには、現在名称が残っていないことも多くかなりの時間を要する。現状では史料を使う研究者それぞれが同様の作業を行っており、非効率的である。そこでフリーのWEB-GISであるe-コミマップを用いて、場所を特定した史料を地図上に整理していく仕組みを考えた。e-コミマップはメンバー参加型で地図を作成でき、グループ内や外との情報共有が行えるWEBマッピングシステムである。

GISゆえ様々な地理空間情報を外部から呼び出し重ね合わせて統合して見ることができるため、史料を理解する上でも有益である。本研究では旧版地形図（明治期）をデジタル化したり、標高陰影図を作成し重ねて表示可能にした。そのほか国土数値情報や防災科技研によるJ-shisデータや産総研データなども併せて表示できる。昔の行政区分や旧版地形図で明治期に人が住んでいた場所などの情報は被害の大まかな場所の特定に大いに役立つ。

本システムでは、整理する項目を揺れ、津波、地殻変動・液状化、その他にわけてシンボルを変え、それぞれ史料名や史料内容、出典などを入力した。また地震毎に色を変えることで比較ができるようにした。

▼ 三重県への適用から震源域推定

手始めに三重県における明応地震、宝永地震、安政地震、昭和東南海地震について史料整理をしてみた。まだ入力途中で丁寧な考察はできていないが、いくつかの特徴が見えてきた。

安政東海地震では全般的に大きな津波被害を被っているが、これまでも指摘があるように（たとえば行谷・都司, 2005）南伊勢市東部では比較的被害が少ないことがわかる。また志摩半島の東側では最初に潮が大きく引いているのに対し、紀北以南では大きく引くことはなかったと言っている。さらに紀北以南での津波到来時刻を宝永と比較すると、宝永地震では揺れがおさまってから津波が来るまでに飯を炊くくらいの時間があつたが、安政地震ではすぐにやってくる。時間差はあるものの被害そのものは宝永、安政とも大きな被害がでており、これまでに推定された浸水高をみてもさほどの違いはない。このことから宝永の方が規模は大きかったことが想像される。昭和東南海地震でもこの地域には5~20分程度で津波がきている。これらことから、安政や昭和では少なくとも紀北以南に近いところに震源域があるが、宝永ではそこは滑っていないということができよう。

もし現在求められているアスペリティが繰り返し滑っているという考え方(Yamanaka&Kikuchi,2004)に基づいてYokota et al. (2016)で求められたアスペリティ分布で考えてみる。昭和東南海地震の波形解析から（山中, 2006）滑ったアスペリティは彼らの求めた遠州灘と熊野灘の大きなアスペリティにあたる。安政東海でも紀北に津波を早くもたらせたアスペリティは図中の熊野灘のアスペリティの可能性があるが、本当に安政と昭和で同じところが滑ったかどうかはもう少し情報の整理が必要である。

今後は和歌山県、愛知県、静岡県、高知県等の整理を進め、南海トラフ地震の震源過程について検討していく予定である。

Effects of long-term slow slip events on in-slab stresses in Bungo Channel, southwestern, Japan

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Roland Burgmann³, Suguru Yabe⁴, Youichi Asano⁵, Takeshi Kimura⁵

1. Building Research Institute, 2. USC, 3. UC Berkeley, 4. AIST, 5. NIED

In Kii peninsula, Kita et al. [2021] has reported that short-term slow slip events on the plate interface can change the stress field and seismicity within the subducting Philippine Sea plate, examining ~40 times slow slips events over 17 years. These results suggested that it is possible to indirectly monitor the reduction of locking on the plate boundary using time-space variations of in-slab seismicity. In the present study, we also examined relationships between in-slab events and shallow slow slip events (SSEs) in the Bungo channel, where there are in-slab earthquakes and long-term SSEs (L-SSEs) with recurrence time of ~7 years and ~1 year duration. We applied a stress-tensor inversion method to focal mechanisms of in-slab events for 19 years and examined time change of stress axis relative to the duration time of the three L-SSEs. In general, the Sigma 3 axes of inversion results strike in the east-west direction, whereas the Sigma 1 axes are close to vertical and parallel to the direction of plate motion of the subducting plate. During the period of one year just before the L-SSEs, the strike of the Sigma 1 of in-slab events rotated ~30 degrees clockwise direction and plunge of it rotate ~10 degrees becoming less vertical. Then, the plunge of the Sigma 1 rotated several degrees again becoming much less vertical and the strikes of it rotate back to the direction of the plate motion of the subducting plate after the initiation of the two L-SSEs. During the period of one year after the end of the L-SSEs, the plunge of the Sigma 1 rotated back to the initial position. Stress ratio R is generally ~0.5, but it become ~0.3 during the period of one year just after the end of the L-SSEs and become back to ~0.5 during the period of 1.5 years after it. The stress axis change in the southern portion of fault plane of the L-SSEs is generally larger than that in the northern portion of the fault plane of it. The stress ratio R before and after the L-SSEs is respectively ~0.8 and ~0.15 in the southern portion, whereas the ratio in the northern portion is almost constant (~0.5) before and after them. It suggests that the more stable sliding in the northern portion of the fault plane of the L-SSEs. These results suggest the potential of using in-slab events to anticipate the timing of the L-SSEs and to monitor ongoing reduction in locking of the plate boundary by aseismic slip.

Single-station detection of seismic slow earthquakes using their broadband characteristics

*Koki MASUDA¹, Satoshi Ide¹

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

地震性のスロー地震はそのシグナルの小ささからノイズレベルの小さい帯域での解析がよくなされており、1-10 Hzの帯域で観測されるものは低周波地震や微動と呼ばれ、0.01-0.05 Hzの帯域で観測されるものは超低周波地震と呼ばれてきた。これらの活動は時空間的に相関しており、超低周波地震から計算される地震モーメントレートと微動の帯域で計算される地震波エネルギーレートはほぼ常に比例している (Ide et al., 2008)。このような関係を満たすモデルとしてブラウン運動型のプロセスが考えられ、そのようなプロセスは0.01 Hzから10 Hzにおよぶ広帯域なシグナルを生み出す。実際、脈動が卓越する帯域である0.05-1 Hzをも含んだ広帯域な検出がなされており (e.g., Kaneko et al., 2018; Masuda et al., 2020)、このようなプロセスの存在を支持している。本研究ではスロー地震のこの性質を利用することで、スロー地震活動のモニタリングを一つの広帯域観測点で可能とするような手法の設計を行う。

ある観測点の広帯域地震計記録から、地震波エネルギーレートとして高周波成分 (2-8 Hz) の速度波形の二乗振幅を、地震モーメントレートとして低周波成分 (0.02-0.05 Hz) の変位波形を用いる。両者の相関係数を100秒の時間窓で10秒ごとに計算し、10000秒の移動平均をとる。この移動平均後の相関係数の時系列がある一定の閾値を超えた時間帯には広帯域なスロー地震のシグナルがあると見なす。

まず日本の広帯域地震観測網であるF-netの75観測点の18年分のデータに対して適用した。南海沈み込み帯の既に多くのスロー地震の検出がなされている場所に沿って、多数の検出があった観測点が並んだ。この空間的な相関はこの手法の有効性を示している。検出が期待されるものの検出できない観測点や、スロー地震活動があるとは考えられない場所で閾値を超える観測点もあるが、これらは放射パターンや気象の影響で説明できる。従って一定の注意のもとで、この手法は密な定常観測網が無いような場所にも適用できると考えられる。

Strongly scattering medium along slow earthquake fault zones, inferred by the new observations of short-duration tremors

*Akiko TOH¹, Wu-Cheng Chi², Yann Capdeville³, Satoshi Ide¹

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, 3. Nantes Université, CNRS, France

プレート沈み込み帯の浅部では、普通地震とTremorの二種類の地震が発生することが知られており、それらは波形の特徴により分類される。Tremorは普通地震と比べて、シグナル継続時間が長く、10Hz以上の地震波エネルギーに枯渇し、シグナルの立ち上がりが不明瞭である(Obana & Kodaira, 2009)。これまで、Tremorと普通地震の違いは震源過程の違いにあると考えられてきた。それ故、Tremorの長いシグナル継続時間は、長い震源時間過程を反映すると考えられてきた(e.g. Shelly et al., 2007)。

本研究では、DONET1海底観測網により震源の直近で得られた地震計記録の中から、遠方では典型的な長いシグナル(> 10 s)を呈する一方で、直上では継続時間の短いシグナル(< 3 s)を呈するTremorを発見したことを報告する。これらを”short-duration tremor”と呼ぶ。これらの特徴は、従来考えられてきた長い震源時間過程では説明できず、短いシグナルが示唆する短い震源時間過程から、継続時間の長いシグナルが作り出されるメカニズムを新たに考える必要がある。

ここでは、震源周辺に水平方向に広がり、地震波散乱によりシグナル継続時間を伸ばすような異常構造を考える。このような構造があれば、震源直上と遠方で継続時間の短いシグナルと長いシグナルがそれぞれ見られるはずである。候補となりうる構造は無数にあるが、ここでは、その内側で超低速S波速度を持つ多数の小さな介在物が震源周辺に局在する構造を考えた。構造内に震源をおき弾性波シミュレーションを実施した結果、観測されるshort-durationの特徴を捉えた結果を得ることができた。

他方、近年海底掘削により、Tremor震源域には幅数100メートルの高間隙水圧帯がパッチ状に点在することが示された(Hirose et al., 2021)。本研究で示した地震波構造モデル中の介在物は、地質学的に観察された高間隙水圧帯に相当する可能性がある。更に、Tremorはスロー地震の一種であり、広帯域で観測される他のスロー地震(VLFEやSSE)と断層を共有すると考えられている(Sugioka et al., 2012; Araki et al., 2017)。そうであれば、本研究で示したTremor震源周辺の構造は、スロー地震断層の構造そのものである筈で、この構造はスロー地震の支配要因である可能性がある。

謝辞 解析には防災科学研究所のDONETデータを使用させていただきました。

Direct Evidence of Strike-Slip Motion for Low-Frequency Earthquake near Parkfield

*Naofumi Aso¹, Miki ASO², David R SHELLEY³, Satoshi IDE⁴

1. Tokyo Institute of Technology, 2. OYO RMS, 3. USGS, 4. University of Tokyo

サンアンドレアス断層に位置するパークフィールドは、地震研究が世界で最も盛んに行われてきた地域の一つである。将来の地震評価のためには、大きさは小さいものの頻繁に発生するスロー地震の知見を活かし、応力状態や断層形状を把握することが重要である。パークフィールドの深部低周波地震については、様々な活動の詳細が調べられてきたものの、微弱なシグナルであるが故に、断層運動の直接的証拠となる発震機構解は、未だに分かっていない。そこで我々は、Shelly(2017)により検出されている、100万以上の深部低周波地震に対して、新たな振幅評価手法を開発・適用することで、発震機構解の推定に取り組んだ。

発震機構解の推定には、地震計記録に含まれる地震波の振幅を正確に評価する必要がある。そこで、はじめに、同じファミリーのすべての地震の波形をスタックした。そして、スタック波形と観測波形を比較することにより、地震波振幅を評価した。最後に、地震の規模に依る影響を取り除き、成分（観測点三成分）およびフェーズ（P波とS波）ごとの相対振幅を得た。この相対的な振幅値は、ファミリーごとの発震機構解に依存する放射パターンとファミリーに依らない成分ごとの観測点補正值から構成されていると考えられる。我々は、一次元速度構造（Eberhart-Phillips, 2016）に対して波数積分法（Zhu and Rivera, 2002）で計算した理論波形と比較する形で、観測振幅を一番良く説明するような発震機構解をグリッドサーチにより求めた。

解析した88ファミリーのほとんどはサンアンドレアス断層での横ずれ運動と整合的である一方で、いくつかの相違も確認された（走向/傾斜/すべり角= $N35^{\circ}W \pm 35^{\circ}/50-90^{\circ}/\pm 40^{\circ}$ ）。ブートストラップテストを行ったところ、いくつかのファミリーについては推定が良くないことが分かった一方で、ほとんどのファミリーについてはロバストな解であることが分かった。この信頼できる発震機構解について、震源の位置や地震の規模のほか、潮汐応答性など他の特徴量と比較を行った。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 25, 2022 4:45 PM - 6:00 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 7:45 AM - 9:00 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-3

chairperson: Tatsuya Kubota(NIED), Suguru Yabe(AIST)

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

[S08-13] Synthetic tests of joint CMT analysis using translation and strain data

*Suguru YABE¹, Kazutoshi Imanishi¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-14] Feasibility of detecting pre-P gravity elastic strain signals from earthquakes

*Kantaro KAWAI¹, Nobuki KAME¹, Shingo WATADA¹, Akito ARAYA¹ (1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO)

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

[S08-15] Validating the Method Estimating Fault Slip Angles by Using Regional 3D Stress Field with the Wallace-Bott Hypothesis –Application to the focal mechanism solutions of microearthquakes –

*Takeo Ishibe^{1,2}, Toshiko Terakawa³, Akinori Hashima⁴, Masashi Mochizuki⁵, Ritsuko S. Matsu'ura¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. ISM, 3. Nagoya University, 4. JAMSTEC, 5. NIED)

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

[S08-16] Stress field in the northwestern part of the South Island, New Zealand, and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

*Ayaka TAGAMI¹, Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Satoshi Hirahara¹, Shuutoku Kimura¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard 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)

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

[S08-17] Distribution of azimuths of aftershock faults in the Western Tottori region deduced by the dense seismic observations

*Yoshihisa IIO¹, Manten seismic observation group², Manten seismic observation group in the Western Tottori region² (1. Kyoto University, 2. N/A)

Synthetic tests of joint CMT analysis using translation and strain data

*Suguru YABE¹, Kazutoshi Imanishi¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

近年盛んに研究されているスロー地震や誘発地震の分野では、地震の発生に流体が大きく関与していることが指摘されている。そのような場における地震発生では、純粋な断層運動だけでなく体積変化を伴うような変形が起こることが予想される。そのような震源域における変形は、地震のモーメントテンソルの非Double-Couple (DC)成分として表現することができる。しかし、モーメントテンソルの非DC成分には大きな推定誤差が含まれることが指摘されており、地震発生における流体の影響について理解を深めるためには、モーメントテンソルの推定精度向上が重要な課題である。本研究では、通常使われるF-netの並進成分に加えて、産業技術総合研究所が西南日本において展開する歪観測網で取得される地震動記録（歪地震動）をCentroid Moment Tensor (CMT) 解析に取り入れることで、どの程度モーメントテンソルの推定精度が向上するかを理論テストにより検討した。理論テストでは、観測ノイズと地下構造の不確実性がモーメントテンソル推定にどの程度影響するかを主に調べた。観測ノイズは実際の地震動記録のノイズスペクトルから作成した。地下構造の不確実性は、グリーン関数の作成に使用したF-netの構造をベースに1次元地下構造の層厚や地震波速度をランダムに変化させて作成した構造を用いてターゲット波形を作成し、それを元のF-netの構造で作成したグリーン関数を用いて解析することで調べた。その結果、2種類の地震動記録をジョイントすることで、非DC成分を含むモーメントテンソル推定精度の向上が確認された。さらに、2021年12月3日に発生した紀伊水道での M_w 5.1の地震の実データに対して、ジョイントCMT解析を実施し、F-netなどで推定されているモーメントテンソル解と比較しながら非DC成分の有無を検討した。

Feasibility of detecting pre-P gravity elastic strain signals from earthquakes

*Kantaro KAWAI¹, Nobuki KAME¹, Shingo WATADA¹, Akito ARAYA¹

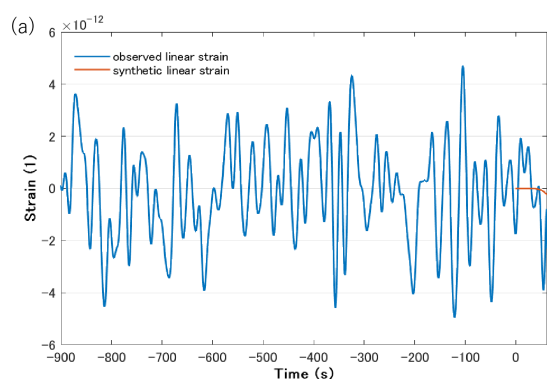
1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO

地震によって生じる重力場変動はP波より早くほぼ即時に観測点に伝わる。この重力変動の信号は広帯域地震計の加速度記録の中に検出されてきた (Vallée et al., 2017; Kimura et al., 2019; Vallée and Juhel, 2019)。P波到達前の重力場変動は加速度変化と同時に弾性歪み変形も引き起こす。本研究の目的は、このP波到着前に変化する弾性歪みの検出可能性について論じることである。

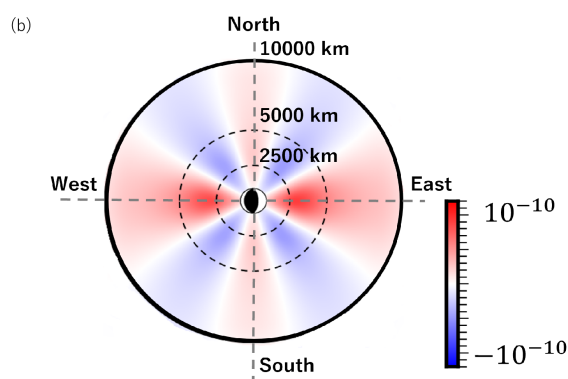
本研究では、観測データ解析と理論波形合成の2つのアプローチを行い、両者を比較する。データ解析には、地震研究所が神岡に設置した100 m 基線長レーザー歪計により記録された2011年M9東北沖地震のデータを用いて、パワースペクトル解析を行い観測地点の背景ノイズレベルの大きさを調べる。理論波形合成には Zhang et al. (2020)で提案された計算コードQSSP_PEGSを用いる。これはWang et al. (2017)の重力-弾性完全結合方程式に従う現実的な球対称地球モデルにおいて弾性・重力応答を計算するコードQSSPをP波前の重力・弾性応答を計算できるように拡張したものである。

解析の結果、従来のP波前重力信号解析で用いられた周波数バンド(帯域0.002-0.05 Hz)において歪みの背景ノイズ振幅は 10^{-12} 程度であった。一方、2011年東北沖地震に対して神岡観測点で理論的に予想される歪み振幅の大きさは 10^{-12} 程度であり、時間領域で実際の波形と比較すると全く信号は見えなかった(Fig. (a))。次に、東北地震クラスの巨大地震に対して様々な震源距離での理論波形を合成し、P波前に予想される歪レベルのコンターマップを作成した。すると、意外なことに震源距離が2000 km を超える範囲に 10^{-10} 程度のピークが現れることが分かった(Fig. (b))。この値は背景ノイズレベルと比較して50倍大きく、一点観測で十分に検出可能である。

P波到達前の重力場変動の計測可能性に関する既往研究は、地震計加速度センサーおよび重力勾配センサー (Torsion Bar Antennas) によるものがある。それぞれの理論信号のピークは、震源距離800km付近、および震央近傍であることが報告されている。一方、本研究の理論歪信号が震源距離2000 km を超える遠地でピークを持つ理由については、今後の検討課題である。なぜなら、歪み信号の距離減衰は単純な物理モデルからは重力勾配と同じになることが予想されるからである。現在、地震研究所はプロトタイプを遙かに超える1500 m 基線長のレーザー干渉計を稼働させている。今後、M9クラスの巨大地震が、本研究の理論的予測に従う震源距離で発生した場合には、歪計によるP波前重力変動の信号検出が期待できる。



(a) Comparison of the recorded strain and synthetic one calculated by the simulation method of Zhang et al. (2020).



(b) Synthesized pre-P elastic strain amplitude from a point source ($M=9$, dip=30 deg., strike=180 deg., rake=90 deg., $d=20$ km) located at the center of map.

Validating the Method Estimating Fault Slip Angles by Using Regional 3D Stress Field with the Wallace-Bott Hypothesis –Application to the focal mechanism solutions of microearthquakes –

*Takeo Ishibe^{1,2}, Toshiko Terakawa³, Akinori Hashima⁴, Masashi Mochizuki⁵, Ritsuko S. Matsu'ura¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP), 2. ISM, 3. Nagoya University, 4. JAMSTEC, 5. NIED

活断層調査に基づき将来発生する地震の現実的な強震動・津波予測には、入力データとなる断層形状や断層すべり角（ずれの向き）、断層すべり量などが実際に発生する地震のそれらと乖離しない事が求められる。近年、すべり方向が断層面に働くトラクションの剪断成分の方向に一致するとの考え方（Wallace-Bott仮説）に基づき、活断層調査から得られた断層形状と地震データから推定された広域応力場の情報から断層すべり角が推定され、強震動・津波予測に活用されている（例えば、日本海における大規模地震に関する調査検討会, 2014；武田・他, 2014；Satake *et al.*, 2022）。しかしながら、上記手法の妥当性の検証ならびに精度（誤差）について、十分な検討が行われていなかった。また一般に、活断層で発生する固有地震規模の地震の平均再来間隔は数千年から数万年のオーダーと推定されており、10年程度の地震学データから推定された広域応力場を、長期間のテクトニックな応力場のプロキシとして用いる事ができるのか、検討する必要があった。

上記の背景から、Ishibe *et al.* (2020) ではその手始めとして、防災科学技術研究所によるF-netメカニズム解等を対象に、広域的三次元応力場を用いWallace-Bott仮説から断層すべり角を推定する手法の有効性の検証ならびにその精度に関する検討を行った。その結果、東北日本内陸において2011年東北地方太平洋沖地震後に活発化した群発的活動などでWallace-Bott仮説から推定されるすべり角と実際に発生した地震のすべり角の間に乖離がみられる地震もあったが、これら一部の地震を除き、推定されたすべり角とF-netメカニズム解におけるすべり角のミスフィット角は概ね30°以内に収まり整合的であった。また、地震調査研究推進本部によって評価されている活断層（帯）を対象に、変動地形学的に推定された断層のずれの向きと種類（型）と、広域的三次元応力場ならびにWallace-Bott仮説から推定される断層型が概ね整合的であることを確認した（石辺・他, 2020）。

近年、深層学習を用いた初動読み取りに基づく微小地震の発震機構解カタログが構築・公開された（Uchide, 2020）。そこで本研究では、より小規模の地震に対する検証ならびにその規模依存性の検討を目的として、Uchide (2020) によって推定された微小地震に対する発震機構解を対象に上記手法を適用した。カタログ期間は2005～2019年であり、F-netメカニズム解と同様に2011年東北地方太平洋沖地震の発生を跨ぐため、その前後の期間に分けて解析を行い、推定精度の高いランクAまたはBの発震機構解を用いた。

推定された発震機構解における断層すべり角と広域応力場からWallace-Bott仮説に基づき算出された断層すべり角とのミスフィット角を算出した結果、先行研究と同様に概ね30°以内に収まり整合的であった。ただし、紀伊半島南部から四国南部、宮崎県東部に沿った領域において比較的ミスフィット角が大きな領域が見られた。また2007年能登半島地震や2008年岩手・宮城内陸地震の余震活動に対しても広域応力場から算出される断層すべり角には乖離が見られた。前者は推定された三次元広域応力場が沈み込むプレートに伴う地震活動による影響を含む可能性が、後者は大地震発生に伴う応力変化の影響を含む可能性が考えられる。一方で、東北沖地震後の期間においてはF-netメカニズム解を用いた解析と同様に、その震源域ならびに近傍領域において顕著に大きなミスフィット角が見られたが、震源域から離れた西南日本などでは2016年熊本地震の震源域などを除き概ね調和的であった。微小地震に対する発震機構解を用いたミスフィット角は、F-netメカニズム解を用いたそれらと比べやや大きい傾向が見られ、また小規模地震に対する発震機構解ほどミスフィット角が大きい規模依存性を示す結果となった。一般に微小地震に対する発震機構解の精度は中～大規模地震に対するそれらと比べ低い傾向にあること、あるいは初動発震機構解とモーメントテンソル解の相違を反映している可能性を否定できないが、小規模地震はTerakawa and Matsu'ura (2010)で推定された三次元広域応力場の空間的

解像度よりも小スケールの応力不均質を反映して発生している可能性がある。本研究で得られた結果は、それぞれの規模（震源域のスケール長）の地震がどういった空間スケールの応力不均質を反映して発生しているのかについて、重要な示唆を与える可能性がある。

謝辞：本研究は、文部科学省による「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一環として実施された。また、Uchide (2020) による発震機構解を使用させていただいた。ここに記して感謝いたします。

Stress field in the northwestern part of the South Island, New Zealand, and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

*Ayaka TAGAMI¹, Miu Matsuno¹, Tomomi Okada¹, Satoshi Matsumoto², Yuta Kawamura², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato¹, Satoshi Hirahara¹, Shuutoku Kimura¹, Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard 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

目的

ニュージーランドでは北島から南島北部にかけてオーストラリアプレートに太平洋プレートが沈み、現在の南島北部ではおよそESE-WNW方向の圧縮応力場が分布する (Townend et al., 2012)。南島北西部では、タスマン海の形成とエメラルド海盆の形成に伴う引張応力場により発達した古い正断層が存在し、古い正断層 (高傾斜角面) が逆断層として活動する反転テクトニクスが、現在の東北日本と同様に確認されている (例えば Ghisetti et al., 2014)。

我々はこれまでにニュージーランド南島北西部で生じた二つの大規模地震 (1929年 Buller地震 Mw 7.3、1962年 Westport地震 Mw 5.6) を対象に応力場に対する断層のすべりやすさの検討を行った (田上・他, JpGU Meeting, 2022)。その結果、対象地域ではESE-WNW方向の圧縮応力場を確認した。また、60°未満の傾斜角を持つ東傾斜の面がすべりやすい傾向を示した。本研究では引き続き、2つの大規模地震 (1968年 Inangahua地震、1991年 Hawks Crag 地震) を対象に応力場に対するすべりやすさの検討を行なった。

データと手法

まず、対象領域における臨時観測点と定常観測点のデータを用いて応力場を推定した。次に、Anderson et al. (1993) で推定された大規模地震のメカニズム解の節面に対して、Slip Tendency法 (Morris et al., 1996) を用いて応力場に対する断層面のすべりやすさを評価した。

結果

1968年 Inangahua地震 (Mw 7.1)

2つの節面のうち、西傾斜の面が高いST値 (>0.7) を示し、応力場に対してすべりやすい傾向であった。Inangahua地震は西傾斜の断層面で活動したことが考えられている (Anderson et al., 1994) ことから、本研究で得られた傾向は実際の地震の断層面と整合的である。

1991年 Hawks Crag地震

前震 (Mw 5.8) と本震 (Mw 6.0) を対象にST値を算出した。結果、前震は低傾斜角の面が高いST値 (>0.7) を示したが、本震ではST値に大きな差はなかった。Ghisetti et al. (2014) では、本研究地域において低傾斜角の新しい断層が高傾斜角の断層の深部に発達していると示唆されている。このことから、応力場に対してすべりやすい低角傾斜面で前震のすべりが生じ、その後、本震は高角な面で活動したことが示唆される。

Introduction

In New Zealand, the Pacific plate is currently subducting below the Australian plate in the northern part of the South Island. Stress fields of ESE-WNW oriented compression are widely distributed in the northern part of South Island (Townend et al., 2012). Many old normal faults are widely distributed on the northwestern South Island. These old faults were developed due to the extensional stress fields associated with the formation of the Tasman Sea and the Emerald Basin (Ghisetti et al., 2014). As in northeastern Japan, a tectonic inversion in which old normal faults become reverse fault has been confirmed in this region (Sibson and Ghisetti, 2018).

Our previous studies focused on the two large to moderated-sized earthquakes (1929 Buller earthquake Mw 7.3 and 1962 Westport earthquake Mw 5.6) that occurred in South Island (Tagami et al., JpGU Meeting 2022). We confirmed that the eastward-dipping planes with a dip angle of less than are likely to slip. This study focused on two other large to moderate-sized earthquakes (the 1968 Inangahua earthquake and the 1991 Hawks Crag earthquake). We investigated the relationship between the fault planes of these earthquakes and the stress field.

Data and methods

First, we estimated the stress field using the focal mechanisms obtained by temporary and permanent stations (Okada et al., 2019; Matsuno et al., 2022) and the GeoNet moment tensor solutions. Then, using the Slip Tendency analysis method (Morris et al., 1996) we evaluated the likelihood of slip for both nodal planes of the focal mechanisms estimated by Anderson et al. (1993).

Results

1968 Inangahua earthquake (Mw 7.1)

The westward-dipping plane has a high ST value (>0.7) and is more likely to slip under the current stress field. Inangahua earthquake is considered to have occurred on the westward-dipping plane (Anderson et al., 1994). Our result is consistent with the previous study.

1991 Hawks Crag earthquake

We focused on foreshock (HC1, Mw 5.8) and an aftershock (HC2, Mw 6.0). In the case of HC1, the low dip angle plane has a high ST value (>0.7). In the case of HC2, both nodal planes have a similar ST value. In Ghisetti et al. (2014), new lower dip angle fault planes are developed in the deep part of the higher dip angle fault plane. Therefore, it is suggested that slip first occurred on the lower dip angle fault plane as the foreshock, and then slip with the high dip angle fault plane occurred as the aftershock.

References

- Anderson, H., Beanland, S., Buck, G., Darby, D., Downes, G., Haines, J., Jackson, J., Robinson, R., and Webb, T., 1994., *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 37, 59-86.
- Anderson, H., Webb, T., and Jackson, J., 1993, *Geophys. J. Int*, 115, 1032-1054.
- Ghisetti, F. C., and Sibson, R. H., 2006, *Journal of Structural Geology*, 28, 1994-2010.
- Ghisetti, F.C., Barnes, P. M., and Sibson, R. H., 2014, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 57(3), 271-294.
- Okada, T., Y. Iio, S. Matsumoto, et al., 2019, *Tectonophysics* 765, 172-186.
- Matsuno, M., Tagami, A., T. Okada, et al., 2022, *Tectonophysics* 835, 229390.
- Morris, A., Ferril, D. A., and Henderson, D. B., 1996, *Geology*, 24(3), 275-278.
- Sibson, R.H., Ghisetti, F.C., 2018, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 108, 1819-1836.
- Townend, J., Sherburn, S., Arnold, B. C., and Woods, L., 2012, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 353-354, 47-59.

Distribution of azimuths of aftershock faults in the Western Tottori region deduced by the dense seismic observations

*Yoshihisa IIO¹, Manten seismic observation group², Manten seismic observation group in the Western Tottori region²

1. Kyoto University, 2. N/A

1. はじめに

断層の走向・傾斜とすべり方向は、地震に関する基本的なパラメータであるが、小さな地震の断層については、メカニズム解の2つの節面から断層面を特定することが難しいため、断層の方位の分布についてはあまり調べられてこなかった。稠密地震観測により精度の良い応力場が得られた場合には、2つの節面におけるmisfit角(メカニズム解のすべり方向と面上の最大せん断応力の方向の差)から、断層面を特定することが可能である。鳥取県西部地震の余震域におけるデータから、断層面の方位分布の特徴を調べてみた。

2. 結果

2009年から島根・鳥取地域で行われている満点地震観測データ(50点、Iio et al., 2018)、2015年から鳥取県西部地域で行われている満点地震観測データ(81点、飯尾・他, 2017)、2000年鳥取県西部合同地震観測データ(Shibutani et al., 2005)と周辺の定常観測点のデータの中で手動読み取りされているものを用いて、応力場と断層の方位分布を推定した。応力逆解析の方法はIio et al.(2017)と同じくmisfitの二乗和を最小とするもので、各解析領域の大きさは水平・深さ方向とも基本は2kmであり、地震数が50個以下になるように、断層直交方向ではグリッドサイズを調整している。各解析領域内のメカニズム解の2つの節面について、推定された応力場によるmisfitを計算し、その差が小さい方の節面を断層面とした。ただし、2つの節面において同程度のmisfitを持つものは結構多く、misfitの差が、メカニズム解の誤差(複数解の分布範囲をKagan角から推定)を超えて大きいもののみを採用した。その結果、メカニズム解が精度よく決まった地震に関して、およそ半分の断層面を決定することができた。鳥取県西部地域では、余震の断層は基本的に鉛直の横ずれ型であるので、断層の走向の方位分布に着目した。余震分布の大局的な方向はN145°E程度であるが、この方向の断層は非常に少ないことが分かった。地震すべりが起こった領域(岩田・関口, 2002)における方位分布のピークはN120°Eくらいであり、余震分布とは20°ほど異なっている。このことは、Yukutake & Iio(2018)の結果と調和的である。一方、 σ_1 の方位分布のピークはN120°Eくらいであり、こちらとは一致している。最大主圧縮応力 σ_1 の方位に近い走向を持つ断層が多いということである。個々の断層とその点で推定された σ_1 とのなす角を調べると、特に大すべり域においては、その角度が25~55度であるものが非常に少ないことも分かった。本震すべりが及んでいないと推定される余震域北部においては、 σ_1 の方位から ± 40 度程度のところにピークを持つ方位分布となっており、この違いは顕著である。2000年の鳥取県西部地震の前に、震源付近でM5クラスの地震を含む群発地震が多数発生したが、そのメカニズム解はほぼ東西のP軸を持っていた(Shibutani et al., 2002)。つまり、群発地震の断層面の走向はN135°E程度であり、余震の断層の走向の方位分布はこの方向とも少し異なっている。一方、鳥取県西部地域においては、小断層の地質調査により、約千条の断層が記載されているが(Uchida et al., 2021)、これらの小断層の方位分布は、余震の断層の方位分布と良く一致していた。これらの観測結果の意味するところはよくわかっていないが、鳥取県西部地震の大すべり域で付近では、余震の発生域と地表において、小断層の方位分布がよく似ている。このことは、地表から地震発生域まで、断層の方位分布が同じであることを示唆している。地表から地震発生域まで一続きであるとする、通常は決して手に取ることができない、地震発生域の断層を地表で観察できることを示している。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏠 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-1

chairperson: Osamu Sandanbata(NIED), Futoshi YAMASHITA(NIED)

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

[S08-18] Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S08-19] Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-20] Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University)

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

[S08-21] Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD))

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

[S08-22] Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda²

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute

1. はじめに

プレート境界における巨大地震の発生時期や規模の予測には、プレート境界の固着状態を監視することが重要である。通常は地殻変動データが用いられるが、地震データも組み合わせた解析を行うことで、高い時空間分解能を持つ固着状態の推定が期待できる。今西・野田（2021,地震学会）は、地殻変動データから平均的なプレート間固着を推定し（基準固着）、プレート境界周辺の地震（プレート内地震）が基準固着による応力変化に調和的に発生しているか否かを判定することで、固着状態の変化を推定する手法を提案した。この手法を東北沖プレート境界に適用したところ、先行研究で報告されている本震前の固着の剥がれを始めとした様々な変動と調和的な結果が得られた。また、プレート内地震を使うため、固着が強くて日常的にプレート境界地震が少ない領域の固着状態も推定できる利点があることもわかった。本研究では、日常的にプレート境界地震の活動が極めて少ない南海トラフ沿いに本手法を適用し、年スケールの固着変化を調べた結果を報告する。

2. 手法

今西・野田（2021）の基本的な考え方は以下の通りである。

- ・ 応力場は、背景応力にプレート間固着による応力変化が加わったものと記述される。
- ・ 地殻内には様々な姿勢の既存クラックがあり、それらの多くが応力の臨界状態にある。
- ・ プレート間固着が継続する場合、固着に起因する応力変化に調和的なクラックが優先的に破壊する。
- ・ ミスフィット角（各地震の断層面のすべり角と固着に起因する応力変化から計算されるすべり角との角度差）に着目すると、固着が継続する場合はミスフィット角の小さい地震が多く発生することが期待され、逆にSSE等により固着状態からのずれが生じる場合は、その周囲でミスフィット角の大きい地震が多く発生することが期待される。

以上の考えを元に、実際の解析手順は以下の通りである。

- （1）地殻変動データから基準固着を推定し、基準固着により周辺域に作り出される応力テンソルを水平方向に0.1°間隔、深さ方向に5km間隔で計算する。
- （2）それぞれの地震の震源位置に最も近い位置の応力テンソルを用いて、ミスフィット角を計算する。この際、メカニズム解の2つの節面のうち、小さい方のミスフィット角を採用する。
- （3）空間方向に0.2°間隔、時間方向には目的に応じた間隔のグリッドを設定する。グリッドを中心とした半径75km以内の地震を抽出し、ミスフィット角の平均値を計算することで、プレート間固着状態の変動を可視化する。

3. データ

メカニズム解は、防災科学技術研究所のF-net解（1997年1月～2022年6月）を使用した。代表的なプレート境界地震のメカニズム解に対するKagan角を元にプレート境界型の地震を除去し、プレート内地震のカタログを作成した。基準固着に関しては、2005年3月～2011年2月のGNSSデータを用いて推定したNoda et al.(2018) のモデルを使用した。2009～2010年に発生した豊後水道SSEによる影響はデータから除去されている。また、この期間はその他に顕著な長期的SSEが発生しておらず、また東北沖地震の影響も受けていないことから、南海トラフ沿いの平均的な固着状態を表していると考えられる。

4. 結果と解釈

全期間のミスフィット角の空間分布をみると、1944年東南海地震及び1946年南海地震で大きくすべった領域で小さい値を示している。これは、過去の大すべり域の固着が少なくとも25年間にわたり継続していると解釈できる。次に、時間方向のグリッド間隔を10か月に設定し、年スケールの変動を調べた。時間的にも空間的にも変動する様子が伺えるが、最近の数年間に着目すると、日向灘周辺のミスフィット角も小さい値を示すようになっている。現在は、南海トラフ沿いの広い範囲で固着が継続していることが示唆される。

ミスフィット角が大きくなる要因の一つとして、SSEの寄与が考えられる。長期的SSEが報告されている東海、紀伊水道、豊後水道に着目すると、長期的SSEの発生に同期してミスフィット角が大きくなる傾向が確認できた。東海地域を例に挙げると、2000年頃のミスフィット角の平均値は30度程度であったのが、5年後には120度程まで上昇し、その後再び30度程度まで低下した。これは2000年秋～2005年夏頃の東海SSEの発生時期と重なっており、本手法がうまく機能していることを示している。時間変動の特徴をさらに詳しく見ると、1年から数年の周期的な変動が含まれることが確認できる。この変動は短期的SSEの発生時期に対応している可能性があり、より小さな地震のメカニズム解を用いた精密解析による検証が必要である。

謝辞：防災科学技術研究所のF-netカタログ、国土地理院のGEONET F3解を使用しました。

Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO²

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

相模トラフ沿いプレート境界では、過去に1703年元禄関東地震（M8.1）、1923年大正関東地震（M7.9）が発生して関東地域に甚大な被害をもたらした。地震時の鉛直変位や津波浸水域の観測記録から、これら2地震の震源域は同一ではないことが分かっている（Matsuda et al., 1978）。測地データ解析による大正地震の震源モデル（Matsu'ura et al., 2007）、旧汀線データ解析による元禄地震の震源モデル（Sato et al., 2016）、そしてGNSS変位速度データ解析による地震間のすべり遅れ速度分布（Noda et al., 2013）の比較から、相模トラフ沿いプレート境界には3つの破壊領域があり、元禄地震と大正地震は異なる2つの領域の組合せで破壊が生じたものと推測される。このような複雑な環境下で発生する地震は、元禄地震型・大正地震型の2種類だけだろうか？これまで経験のない大規模／小規模なプレート境界地震が発生する可能性はあるだろうか？これらの問いに答えるためには、地震発生の根本的原因であるプレート境界への応力蓄積を明らかにし、地震発生サイクルの力学モデルを構築する必要がある。そのため本研究では、Saito and Noda (2022) による力学的カップリング推定手法を関東地域に適用し、相模トラフ沿いプレート境界の地震間の応力蓄積速度の推定を試みた。

力学的カップリング推定手法では、地震間の地表の変位速度とプレート間すべり遅れ速度の線形関係、プレート間すべり遅れ速度と応力蓄積速度の線形関係を結合することにより、地表の変位速度の観測データからせん断応力蓄積速度（以降「応力蓄積速度」と呼ぶ）を直接インバージョン推定する。本研究では応力蓄積速度をガウス分布型の基底関数の重ね合わせで表現し、重ね合わせの係数を未知パラメータとして推定した。この際、非負の条件を課したダンピング最小二乗法を用いたが、これは（1）岩石の強度は有限であることから極端な応力集中を避ける、（2）地震間は基本的に応力蓄積する、という2つの拘束条件を課したインバージョンを意味する。従来のすべり遅れ速度のインバージョン解析では（1）の物理学的要請に基づいてすべりの滑らかさの拘束条件を課することが一般的である。本手法では、応力蓄積速度を直接的に拘束することができるため、より合理的で柔軟な条件設定が可能となる。

関東地域の2005年3月～2011年2月のGEONET時系列データから求めたGNSS変位速度ベクトルデータを解析した。データ期間内の2007年に房総半島沖で発生したスロースリップの影響を予め除去したため、推定された応力蓄積速度はスロースリップが発生していない状態を表している。プレート境界の深さ10kmの等深度線に沿って大きく3つの応力蓄積領域（アスペリティ）が存在し、そのうちの西側2つは大正地震、東側2つは元禄地震の震源域に対応していることが分かった。これらはプレート境界の高摩擦領域に対応しており、いずれ蓄積した応力を解放する大地震が発生すると考えられる。この結果は、当該領域で過去2種類の異なる地震イベント（元禄地震、大正地震）が発生した原因が、3つのアスペリティの連動の多様性にあることを示唆する。一方、変位速度データの分布範囲外は推定精度が落ちる傾向にあり、推定されたアスペリティの妥当性について、感度解析により慎重に評価する必要がある。今後、本研究の推定結果に基づいてプレート境界の応力蓄積モデルを構築し、断層破壊の力学と組み合わせることで、相模トラフ沿いで発生する多様なプレート境界地震のシナリオ作成に活用することが期待できる。

参考文献

Matsuda et al. (1978). GSA Bulletin, doi:10.1130/0016-7606(1978)89<1610:FMARTO>2.0.CO;2
Matsu'ura et al. (2007). GJI, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03578.x
Noda et al. (2013). GJI, doi:10.1093/gji/ggs129

Saito and Noda (2022). JGR: Solid Earth, doi:10.1029/2022JB023992

Sato et al. (2016). EPS, doi: 10.1186/s40623-016-0395-3

Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino²

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

2011年東北地方太平洋沖地震（東北地震）では、宮城沖のプレート境界浅部において50 mを超える大すべりが生じた (Kodaira et al. 2012; Sun et al. 2017). 従来、プレート境界浅部は安定すべり領域のために地震すべりを起こさないと考えられていた (Scholtz 1998; Lay et al. 2012) にもかかわらずこのような大きなすべりが生じたため、その原因がこれまで広く考察されてきた。たとえば、地震時のすべり速度の増加に伴ってプレート境界浅部が動的に不安定すべり領域に遷移したり摩擦強度が著しく低下した説 (e.g., Noda & Lapusta 2013; Hirono et al. 2016) が提唱された。一方で、地震時の浅部の急激な摩擦弱화를積極的に支持しない報告事例もある。たとえば、地震後の掘削調査からは浅部断層を構成する鉱物の摩擦強度はそもそも低いことが明らかとなり (Ujiie et al., 2013), その鉱物試料を用いた摩擦実験では摩擦強度のすべり速度依存性が見られなかった (Remitti et al. 2015). このように、東北地震で浅部大すべりのメカニズムの決定的な答えは得られていない。この浅部の大すべり原因を明らかにすることは、巨大地震の津波発生メカニズムの理解には不可欠である。久保田・齊藤 (2021SSJ) では、震源直上の水圧計による津波波形を用いて東北地震の断層モデルを推定した。本研究では、さらに海陸の地殻変動観測データを加えて断層モデルをアップデートし、その結果をもとに東北地震の浅部すべりの原因を議論する。

津波と測地データを用いたインバージョン解析により得られた断層モデルからは、宮城沖の領域に海溝軸まで進展する大すべりが推定され、最大すべり量は海溝軸ごく近傍において約53 mとなった (Fig. 1a). 一方で、すべり分布に基づいて断層面上でのせん断応力変化 (応力降下) を計算したところ、海溝軸の付近では応力降下は小さく ($\ll 3$ MPa), 深部側の震源近傍に大きな応力降下 (> 5 MPa) が得られた (Fig. 1b). この応力降下の分布は、浅部大すべりを伴った東北地震の原動力となった歪みエネルギーの蓄積は、大すべりを起こした浅部ではなく、深部のプレート間の力学的固着が担っていたことを示唆する。

本解析結果は、浅部のプレート境界で応力を解放せずとも浅部大すべりを引き起こすことができることを意味する。これは一見すると矛盾しているようにも見えるが、深部での強いプレート間固着および地表の影響を考えれば合理的に解釈される。東北地震が起こる前の地震間プロセスでは、プレート境界深部の力学的固着が浅部側の沈み込みを押し留め、浅部にすべり遅れを生じさせる (Fig. 1, e.g., Lindsey et al. 2021). この深部固着による浅部すべり遅れが、東北地震において浅部が大きくすべったそもそもの要因であると解釈できる。この考えは、東北地震前から考えられてきた、浅部は安定すべり域で応力を蓄積しないとする考え (Scholtz, 1998) と調和的である。

本解析における応力降下の計算では、半無限均質媒質における理論解 (Meade, 2007) を使用した。しかし、本来、地殻構造、とくに海溝軸の周辺は構造の不均質性が大きく、これが応力降下の推定に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、2次元の鉛直断面における有限要素法に基づく計算により、構造の不均質性が応力変化にどれほど影響しうるか評価した。宮城沖での構造探査測線 (Miura et al. 2005) に沿った鉛直断面を仮定し、有限要素計算にはPylithソフトウェア 3.0.1 (Aagaard et al. 2022) を使用した。本解析で得られたすべり分布のうち、同じ測線に沿ったすべりを入力とした。計算の結果、海溝軸近傍の領域 ($z < 10$ km) においては、構造探査をもとにした速度構造を用いて計算した応力変化は、均質構造を用いて計算された応力変化の3-4割程度となった。これは海溝周辺に存在する付加体ウェッジの剛性率が低いことが主な原因である。地殻構造の不均質性を考慮すると、プレート浅部での応力降下はさらに小さくなると見積もられる。

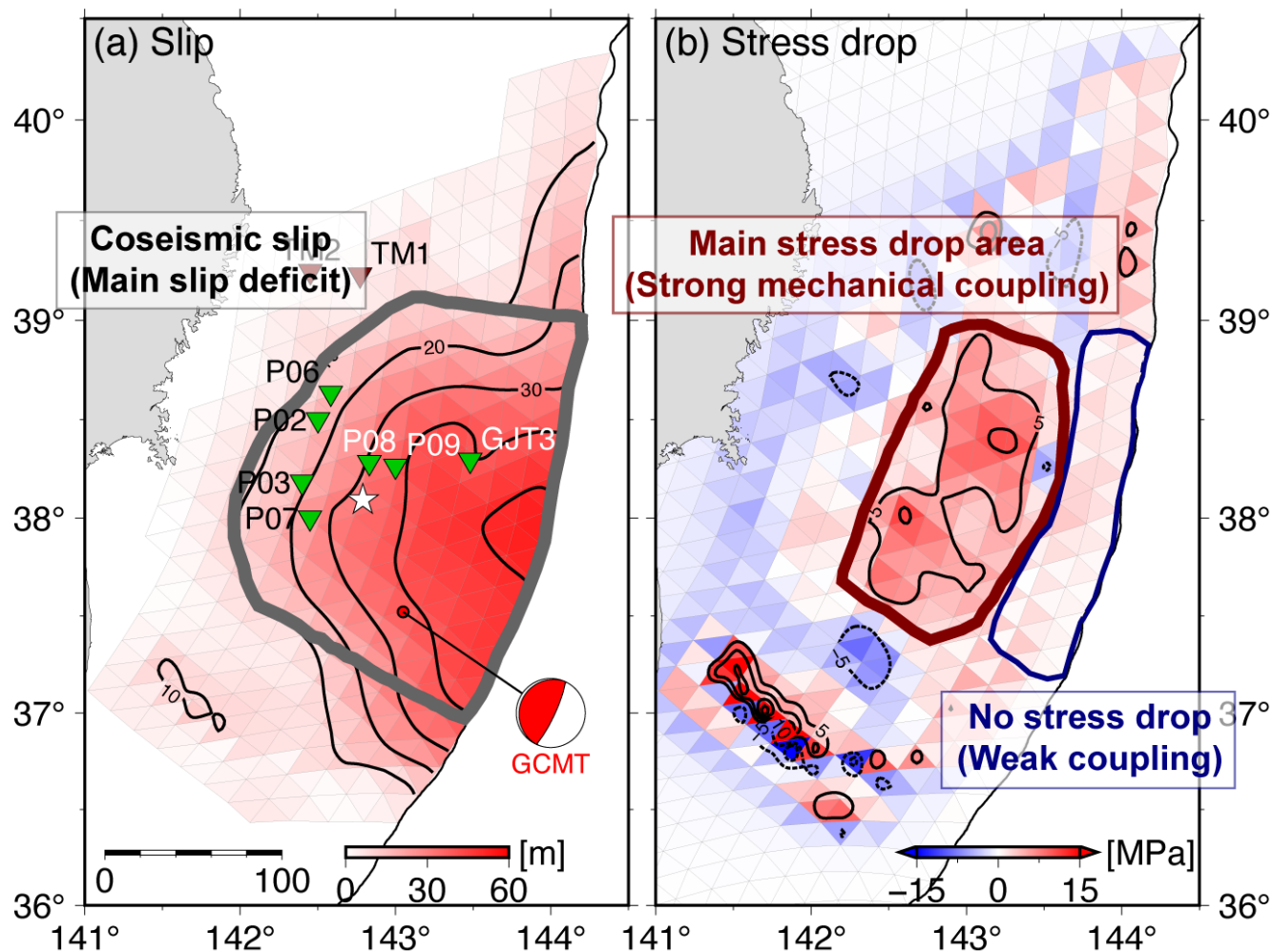


Figure 1. (a) 本研究により推定されたすべり分布 (赤色) および対応する地震間プロセスにおける主なすべり欠損域 (灰色太線). (b) すべり分布より得られた応力降下分布および地震間プロセスにおけるプレート間力学的固着領域 (濃赤色太線).

Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD)

近年、複数の海底カルデラ火山において「トラップドア断層破壊」と呼ばれる火山現象が、M5規模の火山性地震とともに津波を繰り返し引き起こすことが明らかになってきた (Sandanbata et al., 2022など)。この種の現象は、カルデラ地下に蓄積して高圧化したマグマが作る地殻内応力場によって、カルデラ内部の環状断層が地震性すべりを起こすことによって発生すると考えられる。

本研究では、トラップドア断層破壊の静的力学モデルの計算手法を提案する。ここではトラップドア断層破壊を、高圧マグマが作り出す地殻内応力場を駆動力として、「環状断層での傾斜すべり」、「マグマに満たされた水平クラックの開口/閉塞」、「水平クラックの体積変化に伴うマグマ圧力変化」の三つのプロセスが同時に発生する現象としてモデル化を行う。これらのプロセスによる環状断層における剪断応力降下と、水平クラック壁における法線応力・マグマ圧力間の力学的つりあいを境界条件として境界要素法を解き、トラップドア断層破壊の静的力学モデルを計算する。この静的力学モデルを用いることで、地震前後でのマグマ圧力・地殻内応力場の変化や、地震前のマグマ圧力と地震規模の定量関係を調べることが可能となる。

上記の静的力学モデルを、2008年6月12日に伊豆小笠原諸島・北硫黄島近海の海底カルデラ（以降、「北硫黄島カルデラ」と呼ぶ）で発生した、トラップドア断層破壊と見られるMw 5.3の火山性地震・津波イベントに適用する。このイベントに伴う津波・地震波の波形記録と、上記の静的力学モデルを用いて計算した津波・地震波の波形を突き合わせることで、北硫黄島カルデラにおけるトラップドア断層破壊の静的力学モデルを構築した。その結果、約10–20 MPaのマグマ圧力の増加によって環状断層に応力が蓄積され、その剪断応力を解消するように発生する約5–8 mの傾斜すべりを伴うトラップドア断層破壊モデルがイベント記録をよく説明した。またこのモデルから推定されるマグマ減圧量は< 5 MPa程度で、断層破壊発生後もマグマの圧力状態は依然としてある程度高い状態に保たれることが示された。

本研究のアプローチのように、トラップドア断層破壊の力学を調べることは、構造的な地震と異なる発生機構を持つカルデラ火山特有の地震現象の発生機構の理解に繋がる。さらに、定量的観測が困難な火山地下の応力場環境やマグマだまり内に蓄積したマグマ圧力状態を推定することができ、新たな火山モニタリング手法としての可能性を有している。

Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

2014年に南アフリカ Orkney 近郊の Moab Khotsonk 金鉱山の深部にて M5.5 の地震が発生した（以下、Orkney 地震）。この地震の震源は深度 4.7 ± 1.2 km に位置し (Midzi et al., 2015), 余震発生域は主に 3.5–7 km に分布していた (Ogasawara et al., 2019)。国際科学陸上掘削計画 (ICDP) の “Drilling into Seismogenic zones of M2.0 to M5.5 earthquakes in deep South African Gold Mines (DSeis)” プロジェクトにより、Moab Khotsonk 金鉱山の地表深度 2.9 km の坑道から掘削調査が実施され、3つの掘削孔からコア試料が回収された。中でも、長さ約 700 m に渡って掘削された Hole B の地表深度約 3.3 km では、2014年の余震発生域と交差し、現地オンサイトチームによって、断層角礫岩を主としたコア試料の回収に成功した (Ogasawara et al., 2019)。

本研究では、Hole B コアの 50 試料において、粉末 X 線回折 (XRD) 分析による構成鉱物の同定、密度・空隙率および帯磁率の測定を実施した。また、各岩相から計13試料を選定し、蛍光X線分析による主要元素の濃度分析と室内摩擦実験装置による摩擦係数の計測および滑り安定性 (a–b) の評価を実施した。

鉱物学的・化学的分析の結果、断層帯とその周囲の貫入岩では、周囲の岩相と比較して、角閃石、黒雲母、方解石、および滑石の含有率が高い。また、鉄 (Fe_2O_3)、マグネシウム (MgO)、およびカルシウム (CaO) の濃度が高く、ケイ素 (SiO_2)、アルミニウム (Al_2O_3)、およびナトリウム (Na_2O) の濃度は相対的に低い。室内摩擦実験の結果、それらの摩擦係数は相対的に低く、a–b 値は正であった。また、一部の試料では高い帯磁率を示した。断層帯を内包する貫入岩の鉱物・元素組成より、貫入岩はランプロファイアと推測される。また、その鉱物学的・化学的特徴より、著しい変質を受けていると考えられる。また、断層試料の低い摩擦係数は、30 wt.%に達する高い滑石の含有量に起因するかもしれない。しかし、a–b 値は正であり、安定滑りの特徴に相当する。これは観測事実である余震発生と矛盾する。但し、断層の他の主要構成鉱物である角閃石のa–b 値は正負両方の値を示し (Fagereng and Ikari, 2020)、黒雲母は負 (Scruggs and Tullis, 1998)、方解石は正を示す (Carpenter et al., 2016)。すなわち、これら4種の各鉱物が有する摩擦滑り安定性が複雑に作用した結果、断層全体として複雑な摩擦挙動の傾向を示しているかもしれない。同時に、断層帯とその周囲の貫入岩における鉱物の量比のばらつきは大きいため、断層強度や滑り安定性における空間的な不均一性が存在するかもしれない。以上のような複雑な断層帯の物質科学的特徴が、Orkney 地震やそれに引き続く余震の発生およびそれらの震源分布に強く影響を与えているだろう (Miyamoto et al., 2022, GRL)。

【引用文献】

Carpenter et al., 2016, *Geophys. J. Int.*

Fagereng and Ikari, 2020, *J. Geophys. Res., Solid Earth*.

Midzi et al., 2015, *J. Seismol.*

Miyamoto et al., 2022, *Geophys. Res. Lett.*, 49, doi: 10.1029/2022GL098745.

Ogasawara et al., 2019, Proc. of the ninth international conference on deep and high stress mining.

Scruggs and Tullis, 1998, *Tectonophysics*.

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Hiroyuki NODA (Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute), Sumire MAEDA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-23] Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co., Ltd.)

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

[S08-24] Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University)

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

[S08-25] Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

*Futoshi YAMASHITA¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)

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

[S08-26] Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S08-27] Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹ (1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³

1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co.,Ltd.

大型岩石試料を用いた摩擦実験を行うことで、模擬断層面での震源核の広がりやその後の高速な破壊伝播を再現することが可能となるが、それらを詳細に観察するためには断層面近傍でのひずみの多点計測が必要である。しかし、ひずみゲージ毎に配線が必要であるため、その取り回しが計測点数の制約となる。本研究ではそのような状況を改善するために、光ファイバーを用いたひずみ計測手法であるFiber Bragg Grating (FBG)センサーに着目し、断層面近傍のひずみ変化を空間的に密に計測することを目的とした岩石試料のひずみ計測実験を行った。

FBGセンサーは、光ファイバーケーブルのコアの一部に長さ4-8mmに渡って回折格子(FBGゲージ)をあらかじめ加工し、その伸縮に伴う反射光スペクトルの波長変化を測定することでFBGゲージを貼り付けた部分の軸ひずみを計測する。FBGセンサーを用いたひずみ計測では、1本の光ファイバーに格子間隔の異なるFBGゲージを複数点加工し、それぞれの反射スペクトルをモニタリングすることで多点のひずみを同時計測することが可能である。さらに、インテロゲーターとよばれる波長変化を測定する装置の中には、複数本の光ファイバーを同時に使用できるものもある。近年地震波観測に応用されつつあるDistributed Acoustic Sensing(DAS)との違いは、FBGセンサーは光ファイバーにあらかじめFBGゲージを加工する必要がある一方で、DASよりも高い空間分解能(DAS: >1m, FBG > 10mm)を有している点が挙げられ、室内実験スケールではFBGセンサーの方が用途に適しているといえる。

本実験では、防災科学技術研究所が所有する4m大型二軸岩石摩擦試験機を用いてスティックスリップ実験(垂直応力6MPa)を行い、断層近傍の準静的なひずみ蓄積や動的なひずみ変化を計測した。FBGセンサーは一本の光ファイバーに合計20点、1点の長さ4mmのFBGゲージ(DTG-LBL-1550, ベルギーFBGSインターナショナル社製)を120mm間隔で加工し、下側岩石試料側面の模擬断層面直下2mmに一般的なシアノアクリレート系瞬間接着剤を用いて貼り付けた。FBGゲージは模擬断層に対して平行に貼り付け、断層面に平行な軸ひずみ(ε_{xx})を測定した。インテロゲーターは、計測分解能 $<1\mu\varepsilon$ 、サンプリング周波数1kHzの性能を有し、20点のFBGセンサーを同時に計測できる波長帯域(1460nm-1620nm)を持つsi255(米国Luna社製)を用いた。また、FBGセンサーによるひずみ計測値の比較対象として、断層面を挟んで断層面直上10mmの上側岩石試料側面に取り付けられた半導体ひずみゲージを用いた。光ファイバーの径が非常に小さい($\sim 0.2\text{mm}$)ことを活かしてFBGセンサーを断層面の極近傍に貼り付けたことにより、スティックスリップ時に半導体ひずみゲージの計測値($\sim 5\mu\varepsilon$)よりも大きなひずみ変化($\sim 15\mu\varepsilon$)を計測することができた。また、20点のうちひずみ変化を明瞭に計測できた数点については、半導体ひずみゲージとFBGセンサーの間で断層破壊の圧縮側・引張側に対応する対称性を確認できた。また、スティックスリップ実験で特徴的である準静的なひずみ蓄積に関してもFBGセンサーを用いて計測することができた。

一方で、断層面からの距離の違いと対称性を考慮に入れても、断層破壊時のFBGセンサーと半導体ひずみゲージによるひずみ変化の違いを定量的に説明することはできなかった。これは本実験における動的すべりが単純なモデルで説明できるものではなかったことによると考えられる。また、震源核の成長過程や破壊伝播速度を計測するためには、より高いサンプリング周波数が必要であることも明らかとなった。20点のFBGゲージのうち3点は接着不良により反射スペクトルの波長変化が計測できなかったことから、岩石試料への接着方法も改善する必要があることが分かった。本発表では、FBGセンサーを用いたひずみ計測結果の解析に加え、インテロゲーター内のガスセルを用いた波長校正に起因するランダムノイズの除去方法についても議論する。

今後、一本の光ファイバーで複数点のひずみを同時に計測可能であるという利点を活かし、半導体ひずみゲージよりも多点かつ断層により近いひずみ計測を実現することで、震源核の成長過程や破壊伝播様式の解明に貢献できると期待される。

Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}

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

断層の摩擦特性を明らかにすることは地震の発生機構を理解する上で重要であるため、岩石摩擦特性に関する室内実験研究が盛んに行われてきた。特に、様々な岩石が断層の不安定すべりを引き起こす速度弱化（摩擦係数がすべり速度の増加とともに低下する傾向）の性質を持つことがこれまでに示されている（e.g., Di Toro et al., 2011）。一方、近年の観測学的研究により通常の地震よりもはるかに遅いすべり速度で準安定的に断層がすべるスロー地震が様々な地域で発生していることが確認されており、またすべり速度の異なる現象が近接した、もしくは同一の断層構造で発生していることが先行研究により指摘されている（e.g., Ito et al., 2013; Yokota & Ishikawa, 2020; Fukao et al., 2021）。このような速度・時間スケールの異なるすべり現象を生じさせる断層の摩擦特性を明らかにすることは、多様な地震発生形態を理解するうえで重要である。さらに、摩耗物の生成や剪断に伴う断層面の状態も摩擦特性と密接な関係がある（e.g., Hirose et al., 2012; Verberne et al., 2014）。したがって、本研究では、広範囲なすべり速度帯における摩擦特性、摩耗特性および断層面の状態について明らかにすることを目的とし、地殻の主要構成鉱物である石英を多く含む石英系砂岩を対象とした剪断摩擦実験を行い、得られたデータを解析した。

実験には防災科学技術研究所に設置された回転剪断摩擦試験機を用いた。岩石試料は既存弱面の影響が少なくと考えられるインド産の石英系砂岩を使用した。実験条件はすべり速度 10^{-3} – 10^{-1} m/s、垂直応力は0.5, 1.0, 1.5 MPaの3通り、すべり距離は約200–300 mの条件で合計45回の実験を行った。また、赤外放射温度計（KEYENCE IT2-02, IT2-50）を用いて実験中の断層面近傍の温度を連続的に計測した。摩耗率を推定するために、実験後に生成された摩耗物を全て収集し、その質量を計測した。本研究では、様々な垂直応力およびすべり速度での実験結果を比較するために、垂直応力とすべり速度の積で表される入力仕事率[W/m²]を導入し、摩擦特性、摩耗特性および断層面の状態を調査した。剪断応力とすべり速度の積で求まる摩擦力の仕事率は摩擦特性と密接に結びついている（Di Toro et al., 2011）一方で、すべり量に応じて非定常的に変化するため異なる実験条件間の比較指標として扱いづらいことから（前田・他, 2022, JpGU）、本研究では実験条件ごとに定常的な入力仕事率を基準とした。

実験の結果、入力仕事率が0.06 MW/m²を境に摩擦特性、摩耗特性、断層面の状態が大きく変わることが明らかとなった。平均剪断応力と垂直応力の比によって求まる摩擦係数は0.06 MW/m²以下では速度弱化特性を示したのに対し、0.06 MW/m²以上では速度強化特性に転じることがわかった。摩耗率（一実験中の摩擦力による総仕事量に対する収集された摩耗物の質量）は0.06 MW/m²以下では摩耗物がほとんど生成されないため入力仕事率によらずゼロに近い値であったのに対し、0.06 MW/m²以上では入力仕事率に対して正の相関を示した。断層面の状態は0.06 MW/m²以下では光を反射する面（鏡面）が形成されるのに対し、0.06 MW/m²以上では鏡面の破壊が始まり、入力仕事率が0.1 MW/m²以上になると再び鏡面の形成が始まることが確認された。剪断面近傍の温度を調べた結果、0.06 MW/m²以上では最高温度が100℃を超えていたことが判明した。上記の結果から、石英系砂岩内の断層にすべりが生じた場合、そのすべり速度と垂直応力の増加に伴い摩擦特性、摩耗特性、断層面の状態がある閾値を境に大きく変わることが予想される。特に摩擦特性の調査結果は、石英系砂岩内の断層が安定すべりから不安定すべりに遷移する過程ですべり速度の増加に伴う速度強化特性が生じた場合に、そのすべりの成長を抑制し、スロー地震の一因となる可能性を示唆している。

Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

*Futoshi YAMASHITA¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}

1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.

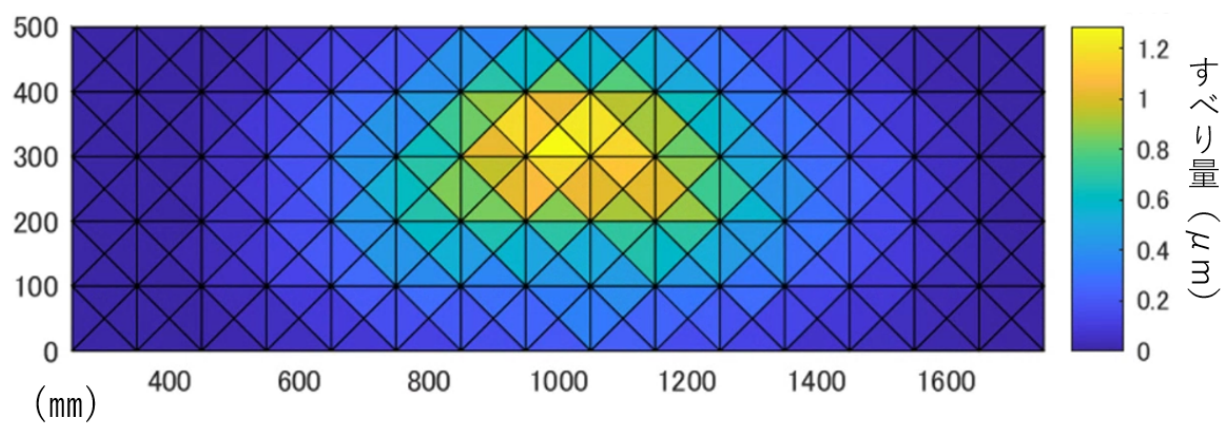
岩石の摩擦特性が断層スケールに依存するか否かは極めて重要な研究テーマである一方、確認する手段が限られていることから、未だその真偽は明らかとはならない。そのため、山下他（2021, 地震学会；2022, JpGU）は変はんれい岩の粉末粒子を模擬ガウジ（平均粒径12 μm , 最大粒径75 μm ）として用い、メートルとセンチメートルの二つの断層スケールにおいて可能な限り近い条件下での摩擦実験を実施して、スケール間で摩擦特性に違いがないかを調べてきた。メートルスケール実験（下田他, 2020, 地震学会）に使用した試験機は防災科学技術研究所が所有する大型二軸摩擦試験機（断層面積: 1.5 m $\times$ 0.1 m）、センチメートルスケール実験で使用した試験機は電力中央研究所が所有する二軸摩擦試験機（断層面積: 10 cm $\times$ 5 cm）である（Mizoguchi et al., 2021, EPS）。調査の結果の一つとして、速度ステップ変化に対する応答から見積もられた速度-状態依存摩擦則（rate- and state-dependent friction law, 以下RSF則）の摩擦パラメタのうち、 a および b に関しては二つのスケール間で有意な差は見られなかったが、 D_c に関してはセンチメートルスケール実験で得られた 9.9 ± 4.9 μm に対し、メートルスケール実験では 23.9 ± 10.2 μm と倍以上の大きさが見積もられた。ガウジの D_c はガウジ層の厚さに依存することが知られているが（e.g. Marone and Kilgore, 1993, Nature）、どちらの実験でも初期の層厚は3 mmと共通であるため、それが差の原因ではない。また、ガウジの D_c はせん断変形の集中により実験中の総変位量の増加に伴って減少する性質が示されている（e.g. Marone and Kilgore, 1993, Nature; Scuderi et al., 2017, Geology）が、メートルスケール実験で D_c が推定された際の変位量はセンチメートルスケール実験に比べ大きかったことから、この変位量依存性でもスケール間の D_c の違いを説明できない。一方、メートルスケール実験では、速度ステップ変化実験に加え、一定速度での摩擦実験も実施されており、特定の条件では、既往研究（e.g. Leeman et al., 2016, Nature Communications; Scuderi et al., 2017, Geology）で見られたような安定すべりから最大すべり速度の小さいスティックスリップ（以下、スロースティックスリップと呼ぶ）に遷移する現象が確認されている（山下他, 2020, 地震学会）。そこで、このスロースティックスリップを数値実験によって再現し、摩擦パラメタを制約できるかの調査をおこなった。再現においては、Urata et al. (2017, PAGEOPH) を参考に、1自由度のバネ-スライダ系において、断層面の摩擦すべりがRSF則のSlip law (Ruina, 1983, JGR) に従うものとして計算をおこなった。メートルスケール実験でスロースティックスリップの発生が確認されたのは、垂直応力が1.3 MPaもしくは2.7 MPaで載荷速度が10, 15, 30 mm/sの条件下である。一方、垂直応力2.7 MPa, 載荷速度5 mm/sでは明瞭なスロースティックスリップは発生しなかった。摩擦パラメタとしてメートルスケールの速度ステップ変化実験で推定された $a=0.004156$, $b=0.004983$ を仮定し、上記の7つの実験条件での摩擦すべり応答を計算した。7つの実験中に観察されたせん断荷重変化の最大振幅と、同条件で計算されたせん断荷重変化の最大振幅とが最も近くなる D_c を探索したところ、6 μm という値が得られた。この値は速度ステップ変化実験から推定された D_c に比べ有意に小さく、最大振幅を再現するには最適な一方、すべり初めの安定すべりを再現することはできない。安定すべりを再現するにはより大きな D_c が必要であるため、 D_c がすべりに伴って23.9 μm から6 μm に徐々に変化すると仮定して計算したところ、安定すべりからスロースティックスリップへの遷移についても再現できた。ただし、初期の D_c が23.9 μm である必要はなく、値を確定することはできなかった。また、ここでは摩擦パラメタ a 及び b の変位量に伴う変化も考慮していない。以上の通り、速度ステップ変化実験で推定された摩擦パラメタの a 及び b に基づき、実験で観察されたスロースティックスリップの基礎的な挙動を再現することはできたが、各パラメタを制約するには至らなかった。今後、メートルスケール実験後に採取されたガウジ層の微細構造観察や断層沿いに設置されたひずみゲージデータの解析をおこなひ、摩擦パラメタのスケール依存性に関し総合的に調査を進めていく予定である。

Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹

1. Kyoto University

近年、シェールオイルガス採掘や高温岩体地熱発電などに伴う地下注水などにより、誘発地震の発生が問題となっており、その破壊伝播メカニズムを解明により、誘発地震発生リスクの軽減に資する必要がある。断層面上のすべりの時空間分布や岩石の摩擦構成則を推定し、誘発地震の発生過程を推定することは重要である。室内実験においてさえ、断層面付近の歪み分布を計測する事は可能であるが2次元断層面上のすべり分布を直接測定する事は困難である。本研究では、大型岩石摩擦実験によりFukuyama et al. (2018, Tectonophysics)によって得られた断層面近傍のせん断歪みのアレーデータを用いて、断層面上の摩擦パラメータとすべりの時空間分布の推定を行った。野田・福山(2022, JpGU)は、境界積分方程式法を用いた平面断層の動的破壊伝播の計算手法(Hok and Fukuyama, 2011, GJI)により数値実験をおこなった。この計算手法では断層面を三角形要素に分割しその要素上ですべり速度が一定と仮定し断層面全体のすべり速度、せん断応力を計算する。摩擦構成則は線形すべり弱化摩擦構成則(Ida, 1972, JGR; Andrews, 1976, JGR)を用い、静摩擦力、動摩擦力、すべり弱化距離をパラメータとした。一定速度で伝播する正規化Yoffe関数(Tinti et al., 2005, BSSA)を用いて真のすべり分布を作成し、Hok and Fukuyama (2011)のプログラムを用いて剪断応力の時空間分布データを作成し疑似測定データとした。Hok and Fukuyama(2011)のプログラムを用い摩擦パラメータを変化させながら疑似入力データを再現する摩擦パラメータを求め、その際計算されたすべり分布と真のすべり分布を比較した。実験の結果、すべり開始位置から近い位置ですべり量、せん断応力分布を精度良く求めることが出来たものの、破壊開始点から遠ざかるにつれて誤差が大きくなり、摩擦パラメータの空間的不均質性の導入が必要なことがわかった。Fukuyama et al. (2018)によって得られた、大型岩石摩擦実験の際の断層面直下で測定されたせん断歪アレーデータに対して、野田・福山(2022)の手法を適用し、摩擦パラメータとすべり分布の推定を試みた。実際の測定点は数値実験とは異なりまばらであるので、せん断歪のデータをcubic splineで内挿し、ひずみアレーの外側のデータはひずみアレー端の値と同じと仮定して外挿した。垂直応力は断層面上で一定の1.3MPaとした。また、初期破壊域は、数値実験結果を参考に直径20 cmの領域とした。本研究において対象としたイベントは、Fukuyama et al. (2018)においてType 2と区分された、断層内部から破壊が始まるイベントである。イベント発生直前の応力が静止摩擦力とほぼ等しく、イベント発生後の応力が動摩擦力に近い値になっていると考え、摩擦構成則を設定した。すべり弱化距離は試行錯誤的に与えた。最適なパラメータの評価は、測定点におけるせん断歪の時間変化の測定値と推定値の2乗残差を誤差関数として設定し、誤差関数が最小となる摩擦パラメータとその時の滑り分布を最終解とした。本発表において最終的に求められた摩擦パラメータ及びすべり分布を紹介する予定である。



図：すべり弱化距離 $10\mu\text{m}$ の時の破壊開始0.04秒後のすべり分布

Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹

1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute

Yamashita et al (2015) は長さ 1.5 m の岩石試料の摩擦実験と直径 4 cm の試料の回転剪断試験の比較を行い、後者では 0.1 m/s 程度で発生する所謂「高速摩擦」の急激な速度弱화가、前者では 1 cm/s 程度で発生する事を報告した。彼らはこの原因として、断層面の形状の不均質に起因する垂直応力の不均質と、それに伴う摩擦仕事（発熱）の集中を挙げている。本研究では摩擦発熱による温度上昇と熱弾性効果に注目し、垂直応力の不均質が摩擦滑り中にどのように時間発展するかを考察した。

無限媒質における非連成熱弾性（熱伝導率： β 、変位固定時の圧力上昇／温度上昇： α ）を考え、簡単の為に 2 次元の面内問題を考える。断層面を模した平面状の発熱体を考えると、断層面での垂直応力の変化を過去の摩擦発熱の時空間分布とグリーン関数の畳み込みで表現することができる。グリーン関数には Xiao et al. (2021) による時空間的に集中した熱源に対する解析解を使用した。これに断層方向のフーリエ変換を施し空間一様の滑り速度 V と一定の摩擦係数 f を仮定すると、ある角波数 k の垂直応力擾乱 $\Delta\sigma$ を自身の過去の履歴と積分核との時間畳み込みで表現することができる。この積分方程式には低速 $V < V_{cr}$ において初期値 σ_0 と同符号の定常解が存在し、 $V_{cr} = \gamma \beta |k| / \alpha f$ 、 $\Delta\sigma = \sigma_0 V / (V_{cr} - V)$ と表すことができる。ここで γ は Poisson 比 ν の関数で $\gamma = 4(1-\nu)/(1-2\nu)$ である。高速 $V \geq V_{cr}$ では定常解は初期値と符号が異なるため、「高垂直応力部で発熱と熱膨張が顕著になる」なる直観に反する。

上述の系について、時刻 $t=0$ に摩擦滑りを開始する場合の挙動を、境界積分法方程式法およびメモリー変数法 (Noda, 2022) を用いて数値的に解析した。低速 $V < V_{cr}$ では、 $\Delta\sigma$ は定常解に漸近するのに対し、 $V = V_{cr}$ では時間に対して線形に、 $V \geq V_{cr}$ では時間に対して指数関数的に際限なく増大する結果が得られた。定常状態の $\Delta\sigma$ は初期値 σ_0 に比例するため、摩擦実験試料の平面加工の精度を上げることによって垂直応力不均質の影響を少なくすることが可能である。しかし定常解に漸近しない $V/V_{cr} = \alpha f V / \gamma \beta |k| \geq 1$ の場合は、理想的な平面を作成するのは不可能であるので、垂直応力不均質の振幅はどこまでも大きくなり、最終的には摩擦発熱の面内での局所化やそれに伴う巨視的な弱化に至る事となる。

斑レイ岩の物性値 (Schön, 1996) を用いた場合、 $k = 2\pi/(1 \text{ cm})$ では $V_{cr} = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、 $k = 2\pi/(1 \text{ m})$ では $V_{cr} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ となる。これらの滑り速度は室内実験に用いる速度レンジ内にあり、これまでの摩擦実験中で熱弾性の影響が重要である可能性を示唆している。摩擦実験試料のサイズを超える波長の擾乱は試料中に発生し得ないため、例えば $V = 1 \text{ mm/s}$ 程度の実験の際には、cm スケールの試料の場合は熱弾性の影響は限定的であるが、m スケールの試料の場合は大きな影響が存在しうる。大型摩擦実験の際には、温度分布の測定と、歪ゲージで測定する応力に対する温度の影響の補正が重要である可能性がある。天然断層の挙動を考える上では、広い波数の擾乱が存在すること、滑り速度が時空間的に変化する影響、動弾性との連成の必要性などの検討が課題である。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:45 PM - 3:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:45 AM - 6:00 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson:Kurama OKUBO(NIED), Makiko OHTANI(ERI)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S08-28] Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault

*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S08-29] Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law

*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of technology)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S08-30] Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S08-31] Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation

*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S08-32] Recurrence interval of M>7 Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of M~9 earthquake

*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault

*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹

1. Osaka University

The frictional resistance on a fault controls the earthquake dynamics via solid contact surfaces. Recent studies have revealed that the abundance of clay (smectite) can result in low apparent friction coefficients and facilitate fault slip. A close example is the March 2011 Tohoku-Oki earthquake that produced huge displacement and a disastrous tsunami, while the shallow regions of the plate-boundary thrust were thought to slip aseismically. The drilling survey revealed the fault zone is characterized by 60 to 80 wt% of smectite and a solid fraction of about 0.6. While clay can be simply thought of as a weaker material compared to rocks and minerals, it is distinguished from other fault-zone inclusions in terms of the smaller size and activeness to water. In addition, these properties may largely depend on the clay type.

Rheological experiments reveal that the clay-water mixture at low solid fractions behaves as a viscous fluid with thixotropy and can reproduce stick-slip behavior. However, it is still unclear how clay would behave under high pressure and high solid fraction. The underlying mechanism of low shear resistance is also unknown. In this study, we examine the feasibility of nanometer scale simulation of clay particles using molecular dynamics. Individual clay particles are modeled as disc-like ellipsoids with large aspect ratios. Long-range interactions between particles are simplified as Gay-Berne potentials with mid-range attraction and short-range repulsion. The system is compressed and sheared to reach a target configuration of a given pressure or a given solid fraction. Our results show that molecular dynamics can be a promising approach for further study into the rheology and slip behavior of clay-rich faults.

Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law

*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹

1. Tokyo Institute of technology

断層破壊シミュレーションでは、先見的な情報として断層形状に加え断層面における初期応力および摩擦則が必要になる。その摩擦則には滑り弱化則と速度状態依存摩擦則が主に用いられる。本研究では動的破壊を再現するのに優れた滑り弱化則を用い、その空間不均質性について調べた。滑り弱化則に対する空間不均質性として、Ide and Aochi(2005)では、降伏強度は均質のまま臨界滑り弱化距離 D_c に不均質性を与えている。摩擦則の不均質性は、断層上でのミクロな凹凸に起因するものであるから、降伏強度にも不均質性を考慮する必要がある、本研究では降伏強度と臨界滑り弱化距離の不均質性を同時に検討した。

一般に摩擦はマクロな状態量であり、摩擦法則は任意のスケールで相似な関数系であるべきである。本研究では、この自己相似性に着目し、合理的な滑り弱化則の不均質性について精査した。そのために、1次元断層で境界積分法による滑りの時間発展を解いた。摩擦則の不均質性については、i)降伏強度一定で D_c のみに不均質、ii) D_c と強度降下量が比例しながら不均質、iii) D_c と強度降下量が反比例しながら不均質の3つのパターンを考慮した。初期条件の影響を排除するために、定常的な応力ローディングにより複数回の地震を発生させ、5回目以降の地震の滑りと応力に着目した。ある空間スケールで滑りと応力を平均化したものが、そのスケールでの滑り弱化を経験的に表したものであると考えられる。このように様々なスケールについて得られた滑り弱化の経験則が自己相似であることを検証した。特に、a)単一の関数として精度良く求めるか、b)スケール間で共通の関数系で表現できるかの2点において合理性を検証した。

計算の離散化スケールに近いときは、仮定したような直線的な関数を確認できた一方で、大きなスケールで平均化すると、多様な形状の履歴が得られた。不均質性パターン i) と ii) では条件a)を満たさない一方で、不均質性パターン iii) では条件a)とb)を満たし、マルチスケールで共通の関数系で表現される滑り弱化則を確認することができた。このように単一の関数系に収束した理由としては、不均質性パターン iii) では破壊エネルギーが均質に設定されている事に起因していると考えられる。この結果は、滑り弱化則を使用する際には、少なくとも局所的には破壊エネルギーが均質であるような設定が望ましいことを示唆する。また、与えた直線的な滑り弱化則に対し、得られた共通の関数系はハーフガウシアンのような曲線状であり、そのような摩擦則を仮定することの妥当性を示唆する。

Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹

1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震やその余効変動より、日本列島の地殻の広い範囲で変形が観測された。特徴的なのは、例えば新潟神戸歪集中帯において、GNSSで求めた歪速度の長波長成分が地震前の収縮から地震後には伸長に変化した一方、短波長成分は収縮を続けた(Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016)ことである。この長波長の変形にはアセノスフェアの粘弾性緩和も寄与していると考えられ、Fukahata et al.

2020は地震後の新潟神戸歪集中帯における体積歪速度の長波長成分を74 nanostrain/yearと推定している。このように、巨大地震後の地殻の変形を再現するには、粘弾性の効果を含めたシミュレーションを行う必要がある。しかしながら、既存の粘弾性グリーン関数を用いる手法（Hashima et al. 2008）では水平成層構造しか考慮できず、海洋スラブやウェッジマントルなどの沈み込み帯の3次元構造を十分に再現できない。そこで本研究では、弾性媒質中に力学境界として震源断層を表す面とリソスフェア-アセノスフェア境界（LAB）を表す面を用意し、それぞれ速度と状態変数に依存する摩擦（RSF）則と粘性抵抗を境界条件として与え、境界積分方程式法で準動的に解く手法を提案する。本手法は、バルク粘弾性を弾性体内部境界面上での粘性緩和として扱ういくつかの手法（例えばDuan and Oglesby, 2005や、Miyake and Noda, 2019）に類似したものである。

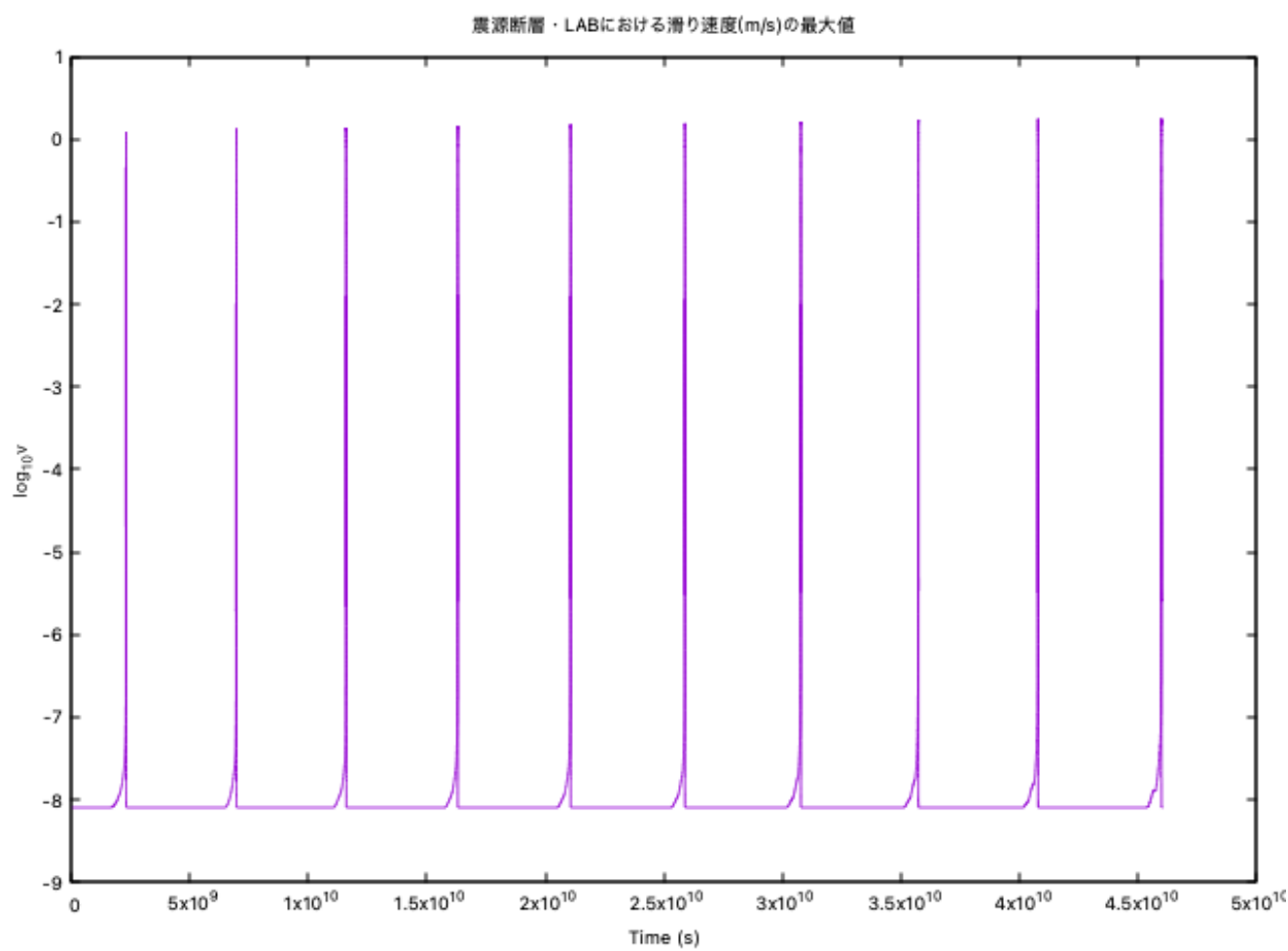
手法・モデル

本研究では、まず最も単純な場合として傾斜角が30°であり一片の長さが100kmである平行な2つの面を用意し、上面には正規化されたRSF則（Rice et al. 2001）を、下面には粘性抵抗 $\tau = \eta v/w$ （e.g. Ando et al. 2012）を境界条件として与えた。後者の境界条件は、アセノスフェアの粘性が生じる応力をリソスフェア側の境界面が受ける抵抗力として考慮したものとみなせる。上面はプレート境界の震源断層を、下面は海洋プレートとアセノスフェアの境界を表したものである。また、沈み込み運動による応力载荷を与えるため、下面にのみプレート相対運動に対応するバックスリップを考慮した。これを慣性効果が放射減衰項による近似として加味された平衡方程式（Rice, 1993）と連立し、Ozawa et al. (2022, 投稿中)のコード（hbi）を改良し粘性抵抗を扱えるようにしたコードを用いて解いた。また、行列ベクトル積の計算には格子H行列法（Ida, 2018）を用い、計算時間や使用メモリの削減を図った。

結果

粘性抵抗を与えた下面にのみバックスリップ25cm/年を与えたところ、上面ではM8の地震が150年周期で発生し、また地震滑り後にはLABでの粘弾性応力緩和に伴う余効変動が発生し、粘性係数が大きいほど緩和時間が長くなることが確認された。

沈み込み帯の3次元構造を再現するには、プレート境界の震源断層・海洋リソスフェア（スラブ）-アセノスフェア境界だけでなく、マントルウェッジ構造を含めた大陸LAB、および断層面上での速度弱化・速度強化領域の分布も考慮すべきである。当日はそのような沈み込み帯構造を再現したモデルの計算結果を報告する予定である。



Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation

*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹

1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST

はじめに

中央構造線断層帯(MTLFZ)は右横ずれ運動の卓越する日本最長の活断層帯である(Ikeda et al., 2009). 中央構造線における断層運動は、地表付近における変動地形の調査 (Tsutsumi and Okada, 1996など) や横ずれ運動から示唆される鉛直または高角傾斜面 (中央構造線活断層系(MTLAFS), Ikeda et al., 2009) 上において起こるか、反射法地震探査 (Ito et al., 1996, Sato et al., 2015など) によって観測されている北傾斜面 (物質境界, MBMTL) 上で起こっているかは定かでない. Uchide et al., (2022)はJ-SHISデータベース記載の活断層位置, 走向, 傾斜と, 小地震 ($M_j > 0.5$ の 約22 万イベント) の震源メカニズム解を用いた応力インバージョン結果から, 日本全体のslip tendency $Ts' = |\tau|/(\mu|\sigma|)$ (Yukutake et al. (2015))の分布を計算した. 中央構造線断層帯の特に四国周辺については, 傾斜 90° と仮定した場合には $Ts' > 0.95$, 傾斜 40° と仮定した場合には $0.6 \leq Ts' \leq 0.7$ を得た. 本研究では, MTLAFSの断層面傾斜角を, 物理モデルと観測に基づいて得られた応力場の情報から推定することを目的とする.

手法および予察

本研究では, まず中央構造線の鉛直断層面および北傾斜断層面の可能性をそれぞれ考慮した3次元非平面断層形状モデルを新たに構築した. そして, 鉛直断層面モデルおよび北傾斜断層面モデルにおいて準動的シークエンスシミュレーションを行い, 地形学・地質学的調査 (岡田, 1970, 後藤ほか, 2003など) から得られる平均活動間隔及び平均変位速度と比較し, それぞれの形状モデルの妥当性を評価する. シミュレーションに際し, 各断層面におけるRake角は地震発震機構を用いた応力インバージョンの結果 (Uchide et al., 2022) から, そして断層面法線方向及び接線方向の応力載荷速度は, GNSSデータから求められるひずみ速度分布からプレート間固着による弾性変形の寄与が除去されたもの (Nishimura, 2022) から与える. 数値計算には, Ozawa et al. (2022, 投稿中)で実装された格子H行列を用いて高効率化された準動的境界要素法コード (HBI) を用い, 20万要素と30万タイムステップ数の規模の計算を, Wisteria/BDEC-01の100ノードを約10時間使用して実施した. その結果, 垂直モデル・北傾斜モデルそれぞれの3次元断層形状と応力場の空間変化に応じて, 平均変位速度および平均活動間隔が変化する様子が見られた. これらのより詳細な解析結果を発表する予定である.

Recurrence interval of $M > 7$ Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of $M \sim 9$ earthquake

*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO²

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

【はじめに】

宮城県沖では、1978年宮城県沖地震のように、過去に $M > 7$ 海溝型大地震が約40年間隔で繰り返し発生し、沿岸地域に被害をもたらしてきた。この履歴に基づく長期評価に加え、2011年東北地方太平洋沖地震 ($M9.0$)の影響を定性的に踏まえた結果、2021年1月時点では、宮城県沖で $M7.4$ 前後の地震発生確率は30年以内に60~70 %程度となっている [地震調査研究推進本部, 2021]。ここで想定されている地震の震源域付近で2021年3月20日と5月1日に $M6.9$ と 6.8 の地震が発生した。これらの地震は、2011年東北沖地震以降ではこの地域では最大のプレート間地震であるが、規模は想定されている地震よりもやや小さく、震源域は1978年の震源域の西側部分 [吉田他, 2021; 地震調査研究推進本部, 2021]だけであった。

Nakata et al. [2016]では、地震発生サイクルシミュレーションで得られた結果について、 $M9$ 地震のすぐ後には、 $M9$ 地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、 $M > 7$ 宮城県沖地震が発生するケースが多く見られたと報告している。これは、 $M9$ 地震の余効すべりが宮城県沖地震単独の場合よりも大きいために、宮城県沖の陸寄り地域での応力蓄積レートが高くなったためであると考えられる。本研究では、先行研究と同様の地震発生原因であるプレート境界での応力蓄積と解放過程に基づく数値シミュレーションを行い、その結果の妥当性や、東北沖地震のような $M9$ 地震サイクルにおける、宮城県沖地震の準備過程について、先行研究よりも詳しく検討を行った。

【手法】

地震発生サイクルシミュレーションは、先行研究 [Nakata et al., 2016]と同様の物理法則とプレート境界面形状で実施した。入力する摩擦パラメタの値や空間分布は、Nakata et al. [2016; 2021]で示した摩擦パラメタを基に微修正した。

【結果】

シミュレーション結果では、宮城県沖での $M > 7$ 地震の繰り返し間隔は、複数の $M9$ 地震サイクルを通して共通の時間的特徴を示していた。Nakata et al. [2016]で述べたように、 $M9$ 地震直後は $M9$ 地震以前に比べて間隔が短い。その後、繰り返し間隔は一旦長くなるが、次の $M9$ 地震が近づくにつれて、繰り返し間隔は一定に近づいていった。また、宮城県沖地震による余効すべり分布は、 $M9$ 地震直後は震源域のupdip側への伝播がほとんど見られないのに対し、 $M9$ 地震前はupdip側への伝播が顕著であった。 $M9$ 地震後数10年間の累積すべり量は、宮城県沖地震震源域のdowndip側では $M9$ 地震による余効すべりの影響で大きくなるが、updip側では小さいか、固着していた。

【議論】

このシミュレーション結果の妥当性を検証したところ、観測に見られるいくつかの特徴と整合していることが確認できた。例えば、 $M9$ 地震前の宮城県沖地震の余効すべり分布は、2005年の宮城県沖地震の観測から示唆されるもの [Hino et al., 2007; Miura et al., 2007; Uchida et al., 2007]と、累積すべり量の時空間分布は、2011年以降の繰り返し地震の観測から見積もられるもの [Uchida & Matsuzawa, 2013]と調和的であった。また、 $M9$ 地震前に発生した複数回の宮城県沖地震の繰り返し間隔に大きなばらつきがないことも、過去の地震発生履歴と矛盾していないと言える。

上述したような $M9$ 地震サイクルを通じた繰り返し間隔の変化は、宮城県沖地震震源域のupdip側、つまり

M9地震震源域下限での固着域と非地震性すべり域の分布に起因していると考えられる。今後の宮城県沖地震の発生時期を議論するには、M9地震以前の繰り返し間隔を基に推定するだけではなく、測地・地震学的観測から見積もられる東北沖地震震源域内における固着の回復の程度を明らかにしたうえで、シミュレーション結果と照らし合わせて検討する必要があるだろう。

【謝辞】

本研究の一部は、JSPS科研費Grant Number JP21K04604、JP19H05596およびJP21H05206の助成を受けて実施されたものです。本研究のシミュレーション結果は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムおよびJAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して得られたものです。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:15 PM - 4:30 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:15 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S08-33] Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[S08-34] Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S08-35] Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3} (1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN)

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

[S08-36] 4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO² (1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.)

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

[S08-37] Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹ (1. Aoyama Gakuin University)

Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹

1. Kyoto Univ.

速度状態依存摩擦則（RSF則）が発見されて以来、これを適用した地震サイクルシミュレーションが盛んに行われている [e.g., Lapusta et al., 2000]。低速での摩擦係数について、速度弱化（ $a-b<0$ ）を示す鉱物は Byerlee 則に従う値（0.6-0.85）を示すのに対し、速度強化（ $a-b>0$ ）を示す鉱物には粘土鉱物などの小さな値を示すものも存在することが確認されている。全体としては、低速での摩擦係数は摩擦パラメータ $a-b$ と負の相関が見られる [Ikari et al., 2011]。しかし基準滑り速度 V_0 における定常摩擦係数 f_0 の不均質性は、媒質が線形弾性体の場合、滑りの基準（滑りをゼロと定義する状態）の選択に吸収されてしまい、初期条件の影響のなくなったアトラクタにおける滑り速度 V の時空間的分布には影響を及ぼさない。その一方で、媒質に粘弾性体を採用する場合、非弾性変形の速度が媒質中の偏差応力の絶対値に依存するため、 f_0 の分布が断層の長期的挙動に影響する。地中では、地殻浅部から深部にかけて媒質の弾性・粘弾性の遷移が見られる。Miyake and Noda (2019) は、粘弾性媒質中での2次元の動的地震サイクルシミュレーション手法を開発し、空間的に一様な f_0 を採用し Maxwell 粘弾性体に対して（緩和時間）／（パッチサイズ）の減少によって地震性（EQ）挙動から永久固着（Stuck, ST）への遷移が起こることを報告している。永久固着とは、応力の緩和が速いことで地震が起こらなくなることである。地中深くの領域では、粘性が支配的になると考えられるため永久固着が起きやすくなる。本研究では、Miyake and Noda (2019) と同じシミュレーション手法を用い、EQ-ST遷移についてさらに詳しく調べた。粘弾性のパラメータに加え、速度弱化パッチとその外部の断層強度差（ $=f_0$ の差 Δf_0 ）による影響も調査の対象とした。パラメータスタディを行ったところ、Miyake and Noda (2019) で報告されていた粘弾性の変化だけでなく、 Δf_0 の変化によってもEQ-ST遷移があることが分かった。 Δf_0 が大きくなると永久固着が起こりやすくなり、本研究で最大の強度差である $\Delta f_0=0.3$ のときは $\Delta f_0=0$ の時と比べて一桁大きな緩和時間で永久固着が起こる。次に、この遷移の解釈を得ることを試みた。本シミュレーションは連続体モデルであるため自由度が大きく、物理的な理解が難しい。そこで、自由度を大きく削減したバネ-ブロックモデルを用いた。速度弱化域と速度強化域をそれぞれ代表させたブロックをバネとダッシュポットでつないだ単純なモデルである。連続体とバネ-ブロック両モデルのパラメータスタディと解軌道について比較を行った。すると、バネ-ブロックモデルについても同様にEQ-ST遷移が確認され、2つのモデルの結果がよく似ていた。このことから、EQ-ST遷移をバネ-ブロックモデルによって解釈することは一定程度有効であると考えられる。バネ-ブロックモデルにおける解軌道、ベクトル場から、EQ-ST遷移は Homoclinic 分岐である事を見出した。弾性体中の断層についてはこれまで、摩擦パラメータ $a-b$ が正のとき非地震性、負のとき地震が起こりうるということが知られており、これは Hopf 分岐として理解されている。本研究で見出した Homoclinic 分岐による遷移は全く新しいタイプの地震性・非地震性遷移である。パラメータスタディの結果は、温度が上昇して粘弾性緩和がより有効となると、大きなサイズの速度弱化パッチから地震発生頻度の減少と非地震性への遷移を起こすことを示している。Spada et al. (2013) は、世界の様々な大陸の b 値と深さの関係を示した。いくつかの大陸では、比較的浅い領域では深くなるにつれ b 値が減少するが、ある深さからは増加に転じた後に地震発生層の下限となる傾向が確認されている。この b 値増加の傾向は、地震発生層最下部では深いほど大きな地震が起こりにくくなることを示しており、本研究におけるパラメータスタディの結果と整合的である。

Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

円形アスペリティを仮定し、Nagata et al. (2012)により修正された速度・状態依存摩擦則に基づいてスロースリップイベント(SSE)のトリガーに関する数値シミュレーションを行なった。同じ半径のアスペリティでも、摩擦パラメータの値により、周期的地震、アスペリティの一部だけでの動的すべり、周期的SSE、安定すべりなどが発生する(Fig.1)。周期的に発生している状態で応力擾乱を受けると、すべりモードが移行する場合がある。Yoshida et. al (2015)は釜石沖地震について、以前はアスペリティ一部の破壊だったが東方沖地震の余効すべりの擾乱により全領域が破壊してマグニチュードの大きな地震が発生した可能性を指摘した。今回、周期的SSEが起きているときに、様々なタイミング、振幅で地震波による応力擾乱を与えSSEのトリガーについて調べた。擾乱の振幅が大きくなるにつれ、SSEの発生が早められ、SSE時のすべり速度が速くなり、継続時間が短くなっていく。さらに大きくすると、高速な地震すべりに移行することがわかった。また、安定すべりが起きている条件下で、擾乱を与えたときについてシミュレーションを行い、擾乱の振幅により、地震波通過時に、SSEあるいは高速な地震すべりがトリガーされるという結果が得られた。普段は地震やSSEが発生していない領域であっても、地震波によりSSEなどがトリガーされる可能性を示唆する。(b-a)*有効法線応力が大きいほど不安定性が増すが、Yoshida(2018)が示したように有効法線応力が小さいほどトリガー効果が大きくなる。アスペリティ内で浅くなるにつれ有効法線応力が小さくなるモデルを仮定して、そのトレードオフについても調べた。

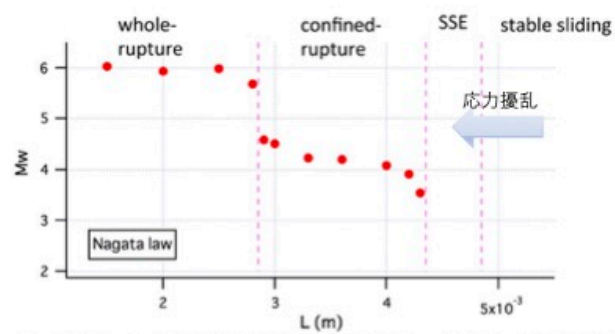


図1. 摩擦パラメータの特徴的すべり量 L を小さくすると、すべりモードは周期的地震、アスベリティの一部だけの動的すべり、周期的SSE、安定すべりに移行する。東北地震後に釜石沖地震のマグニチュードが大きくなったのは、余効すべりによる応力擾乱のためモードが変化したためと考えられる。安定すべり域においても、地震波による応力擾乱によりSSEがトリガーされることがある。Yoshida et. al (2015)に加筆。

Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3}

1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN

南海トラフ巨大地震の発生予測に向けて、巨大地震発生サイクルにおけるスロー地震の挙動を理解することは重要である (Obara & Kato, 2016)。

南海トラフ西部では、巨大地震震源域（固着域）の深部隣接領域でスロー地震の一つである長期的スローリップイベント（L-SSE）が発生している。そして、その再来間隔や伝播方向等の特徴（以下発生様式と呼ぶ）が、走向方向に多様性を示すことが指摘されている (Takagi et al., 2019)。

我々は、この四国中部～豊後水道～日向灘にかけての走向方向のL-SSEの発生様式の違いを説明するため、速度状態依存摩擦法則を使った数値シミュレーション研究を行っている。

現実的な3次元形状の断層モデルで実験を行う前に、L-SSEの相互作用について理解を深めるため、摩擦パラメータなどを走向方向に変化させた平面断層モデルを用いてシミュレーションを行った。具体的には、断層を走行方向にいくつかの領域に分割し、それぞれの領域ではパラメータは一樣となるようにパラメータ分布を与えた。

その結果、一つのパラメータを走向方向に変化させるだけでも、走向方向の各領域の長さなどを変えることで、再来間隔が変化する場合もあればしない場合もあるという結果が得られた。再来間隔が変化する場合は、SSEが走向方向に分裂して発生していたが、再来間隔が変化しない場合は、SSEが分裂せずに一つのイベントとして発生していた。

このことから、SSEの走向方向の発生様式の多様性について理解を深めるためには、SSEが走向方向に分裂する条件を調べることが重要であると考えた。

SSEが走向方向に分裂する条件を調べるため、領域幅 W に比べて走向方向の長さ L_{str} がかなり長い平面モデルでシミュレーションを行った。

その結果、領域幅や摩擦パラメータを一樣にしても、走向方向の長さに応じて、SSEが2個以上に分裂する様子が観察された。また、摩擦パラメータを変え、分裂の様子が変化することも分かった。

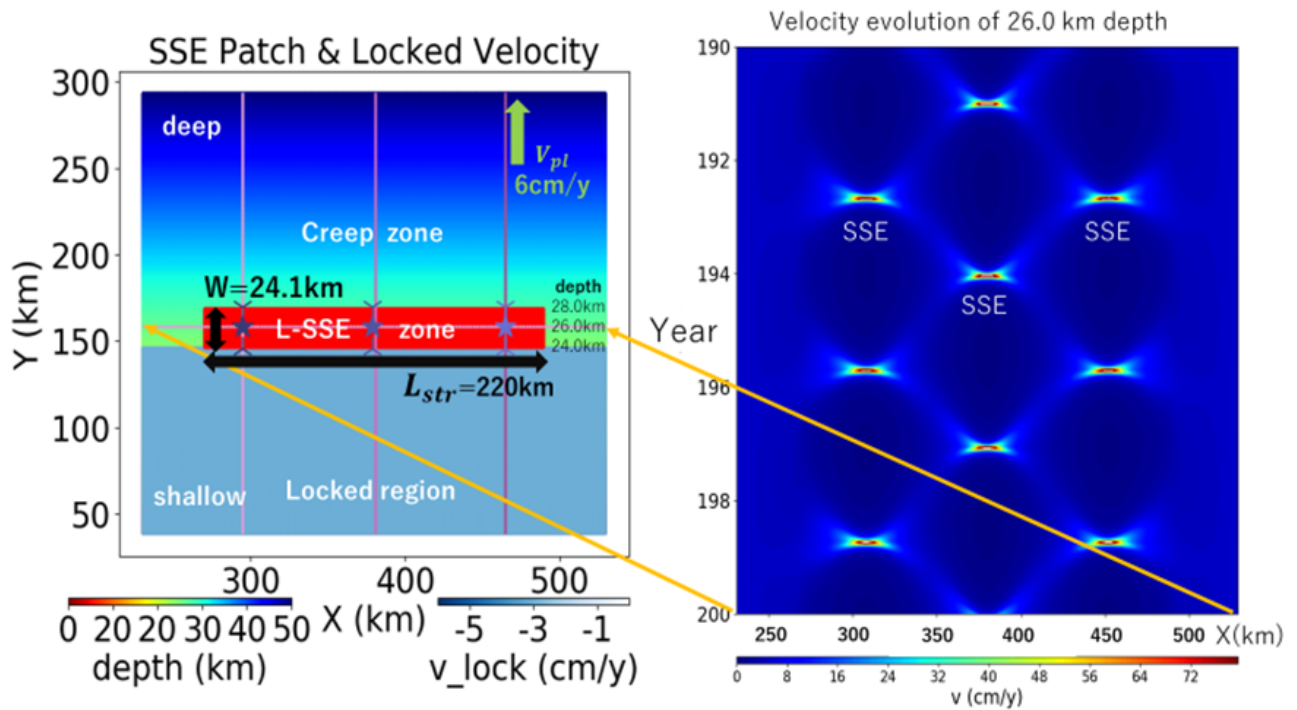
一例として、図にSSEが3つに分裂する様子を示す。左図はモデル領域を示す。モデルは固着域（深さ5-24km、滑り欠損速度 $v_{lock} = 3.0\text{cm/y}$ ）・L-SSE域（深さ24-28km、幅 $W=24.1\text{km}$ 、走向長さ $L_{str}=220\text{km}$ 、震源核形成サイズ $h^*=31.83\text{km}$ ）・安定すべり(creep)域（深さ28-50km）の3領域から成り、傾斜角 10° 、プレート収束速度 $V_{pl}=6.0\text{cm/y}$ で走向方向に垂直に沈み込んでいる。右図にL-SSE域の中心深さ26.0km（ $Y=158.2\text{km}$ ）におけるすべり速度の時間発展を示す。一樣な領域幅や摩擦特性を与えたにもかかわらず3つのセグメントに分裂してL-SSEが発生している様子が見て取れる。ただし、再来間隔や、滑り速度が速い領域の幅などはセグメントごとに変化せず、ほとんど同じとなっている。

これまでの研究では、プレート収束速度やプレート形状の変化に伴う深さ方向の領域幅(Perez-Silva A. et al., 2022)、有効法線応力などの摩擦パラメータ (Li, H. et al., 2018) を変化させることで、走向方向にみられるセグメント化されたSSEの再来間隔や伝播といった発生様式の相違や相互作用が説明されてきた。これに対して本研究では、このような物理パラメータの変化を仮定せず、走向方向に一樣な領域幅・摩擦パラメータをもつ領域で計算をしても、走向方向にSSEが分裂することが明らかになった。また、分裂の個数や形態は、領域幅 W や震源核形成サイズ h^* と走行方向の長さ L_{str} の関係によって変化することを確認した。これまでの数値シミュレーションでは、深さ方向の領域幅 W と震源核形成サイズ h^* の関係に注目したものは多いが、走向方向の領域長さ L_{str} に注目した研究は無いように思われる。

もちろん、これまでの研究に見られるように、セグメントごとに再来間隔等の多様性が生まれる主要因は、各種物理パラメータの相違であると考えられるが、本研究では、走向方向のL-SSE発生様式の多様性について、走向方向の長さ L_{str} の影響という新たな知見を付け加えている。特に、 L_{str} 、 W 、 h^* とSSE分裂の関係の理解を深めると、プレート形状と観測されたSSEの分裂の様子から h^* を推定できるかもしれないという点が重

要である。

本発表では、SSEが分裂する条件と、走向方向の領域の長さ L_{str} と領域幅 W 、震源核臨界サイズ h^* の関係について議論する。



4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO²

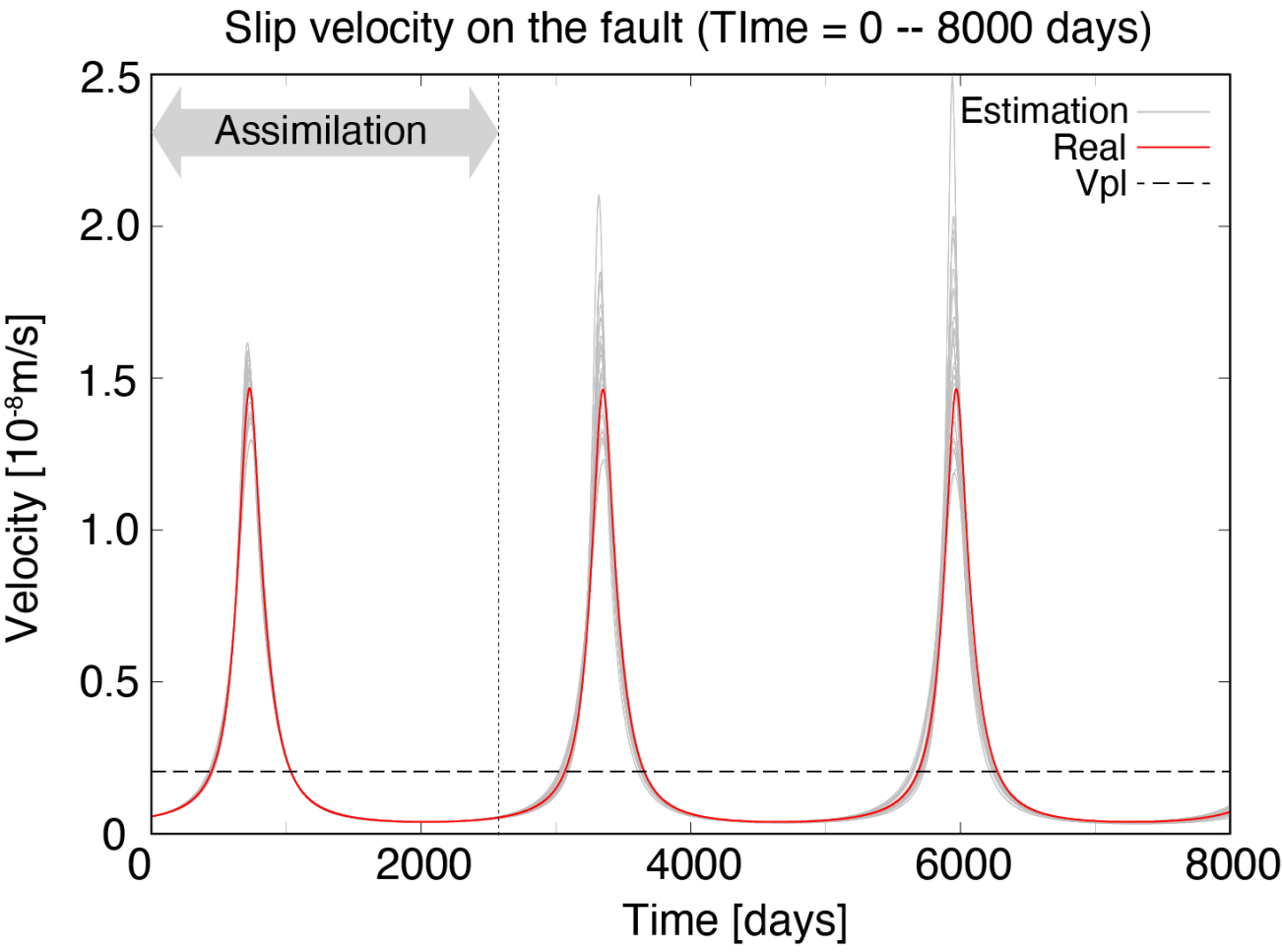
1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.

沈み込み帯プレート境界において、巨大地震発生領域の深部延長では長期的SSE(slow slip event)が発生し、巨大地震発生の誘発可能性に注目が集まる。SSE断層面上のすべりは地殻変動データから運動学的な逆解析によって推定されるが、その後の時空間発展を予測するには断層面の摩擦特性も推定する必要がある。この要請に対して、近年、地殻変動データから断層のすべり速度などのモデル変数と、モデルパラメタである摩擦特性の同時推定を目指したデータ同化研究が行われている。データ同化とは、物理モデルによる数値シミュレーションに実際の観測データを取り入れ、シミュレーションをより尤もらしいものにする方法である。Hirahara & Nishikiori (2019)は西南日本南海トラフ沿いの豊後水道で繰り返し発生する豊後SSEを想定し、データ同化のうち逐次同化手法の一つであるEnKF法を用いたデータ同化数値実験を行い、真値に近い変数・パラメタ値の同時推定に成功した。

H&N(2019)では一様な摩擦特性のSSEパッチモデルを用いた実験によってEnKFの有効性が示されたが、今後実データへの適用を考える際には断層面の摩擦不均質を考慮する必要がある可能性がある。この対処に際してEnKFでは、物理モデルに従って時間発展する複数の変数・パラメタの組(アンサンブル)によって予報のばらつきを表現するため、計算量が大きくなってしまいう問題点がある。これに対して、データ同化のうち4次元変分法(4DVAR)は、得られた時系列データを尤も良く説明する物理モデルの初期値を求める手法で、一般にEnKFよりも計算量が少ない。不均質な断層摩擦を考慮できるモデルに対しては、EnKFよりも4DVARの方が適しているかもしれない。

加納・他(2018)は、H&N(2019)と同様のパッチモデルに対して豊後SSEの4DVARデータ同化数値実験を実施し、模擬地殻変動データをよく再現することに成功した。しかしながら加納・他(2018)ではモデル変数(すべり速度・断層強度)の初期値分布は既知であるとしてパラメタ推定のみを行っており、このままでは実データに適用できない。データ同化において、断層面のすべり速度は地殻変動データの運動学的逆解析の値を初期値として直接利用できるが、断層強度の分布は現在の観測研究からは推定できない未知量だからである。そこで本研究では、すべり速度の初期値は既知とし、SSEの周期性を条件として陽に課すことで、断層強度の推定を行いつつ同時に摩擦パラメタの推定を行う数値実験を行う。本講演ではその推定方法及び推定結果を示す。

H&N(2019)に倣い、豊後SSEを想定してdip角15度の平坦な断層上に半径35 kmの円形SSEパッチを設定する。SSEパッチは一様な摩擦パラメタ($A, A-B, L$) = (100 kPa, -50 kPa, 0.04 m)をもつとしてこれを真値($A_{\text{true}}, A-B_{\text{true}}, L_{\text{true}}$)とする。このパラメタ値において、断層は物理モデルに従い一定周期でSSEが繰り返す。このとき、豊後SSE断層周囲の実際のGNSS観測点の位置に93点観測点を設定し、SSE一周分に対応する地表変位速度を切り出し、3 mm/年のガウスノイズを加えたものを模擬観測データ(time = 0–2620日)とした。モデルパラメタ $A, A-B, L$ の初期推定値を $A/A_{\text{true}} = 0.75, 1.0, 1.25, (A-B)/(A-B)_{\text{true}} = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, L/L_{\text{true}} = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ のいずれかにとり、断層強度の初期推定値をすべり速度に対する定常状態の値にとって、データ同化を実施した。初期推定値によっては、SSEの周期性を満たすような結果に到達できない場合もあったが、到達したものは総じて実際の断層のすべり速度・観測値をよく説明でき、推定された摩擦パラメタの真値からのずれは15%以内であった。図に断層の中心位置でのすべり速度を示す。赤線は真値、灰色線は各初期推定値から同化を行った結果得られたすべり速度の推定値である。Time = 0–2620日のデータ同化期間を超えると、推定値は真値からのずれが大きくなり、図中3回目のSSEピークは真値よりも最大で33日早く現れる結果となった。



Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹

1. Aoyama Gakuin University

天然断層においては、ゆっくり地震を何度か繰り返した後に高速地震が発生する、という振る舞いが見られることがある。このゆっくり・高速遷移がいつ起こるのか、その決定機構を明らかにすることは現在でも重要な問題である。加えて、一度高速地震が起こった後に再びゆっくり地震が起こるのか否か、という点も理解が進んでいない。

ここではゆっくり・高速両地震を統一的に取り扱うため、BKモデルと熱・流体・空隙相互作用を考える。断層岩は多孔質媒質であるので、それを模すために多孔質媒質のブロックと基板からなるBKモデルを考える。滑りは接触している領域の近傍で担われる変形と解釈し、それが起こる領域を滑り帯と呼ぶ。滑り帯は有限の幅を持つとし、その内部で熱・流体・空隙相互作用を考える。動的滑り時において、滑り帯内での空隙生成[摩擦発熱]の効果はそこでの流体圧を減少[増加]させ、摩擦応力を増加[減少]させて滑り速度を減少[増加]させる。従って、ゆっくり地震と高速地震を支配する物理的素過程はそれぞれ空隙生成と摩擦発熱であると解釈できる。なお、動的地震間の期間には空隙の回復も考え、空隙率が減少するとした。

滑り前後のエネルギーバランスを考えることによって、系の振る舞いを支配する関数 $F(u_f)$ を見出せた。ここで u_f は一回の地震の滑り量である。 $F(u_f)=0$ という方程式は複数の正の実数解を持つが、実際の地震に対して実現されるのはその中の最小のものである。本研究ではそれを地震開始時の流体圧 p_0 と空隙率 ϕ_0 の関数として求めることができた。特に大きい p_0 及び小さい ϕ_0 の下でゆっくり地震が発生し易いことが示された。 p_0 と ϕ_0 の値はいくつかの物理的素過程に影響されて決まるが、ここではその中でも空隙回復に着目する。この効果はあるパラメータ α_1 によって支配され、 α_1 が大きいほど空隙が早く回復すると考えて良い。まず無視できるほど小さい α_1 を仮定すると、ゆっくり地震を繰り返した後に高速地震が繰り返し発生した。最初に高速地震が発生した後には、ゆっくり地震は発生しなかった。これはゆっくりー高速遷移と解釈できる。そして α_1 を増加させていくと、ゆっくり地震の繰り返しの後、高速地震が一度発生してから再度ゆっくり地震が繰り返す、という振る舞いが見られた。これはゆっくりー高速ーゆっくり遷移と理解される。2つの遷移を分ける臨界的な α_1 の値が存在することが示唆される。他の物理的素過程、例えば流体拡散の効果も含めた統一的な遷移の多様性の理解は将来の課題であろう。