

Thu. Oct 29, 2020

ROOM B

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

[S12]PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

1:00 PM - 1:45 PM ROOM B

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

○Kentaro Omura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 1:15 PM

[S12-02] Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

○Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2.Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3.Japan Meteorological Agency)

1:15 PM - 1:30 PM

[S12-03] Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

○Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

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

[S09]PM-1

chairperson:Satoshi Matsumoto(Kyushu University)

1:45 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-01] Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule -

○Satoshi Matsumoto¹ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-02] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

○Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho

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

2:00 PM - 2:15 PM

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

[S09]PM-2

chairperson:Shiro Ohmi(DPRI, Kyoto University),

chairperson:Akemi Noda(MRI)

2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-03] Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

○Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at

Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5.Institute of Statistical Mathematics)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-04] Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

○Ichiro Kawasaki¹ (1.Tono Research Institute of Earthquake Science)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-05] Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

○Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-06] Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

○Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹ (1.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

Fri. Oct 30, 2020

ROOM B

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

[S09]AM-1

chairperson:Kazuaki Ohta(NIED), chairperson:Akiko Takeo(ERI, University of Tokyo)

9:00 AM - 10:15 AM ROOM B

[S09-07] Long-term temporal variation of deep low frequency tremor seismicity

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

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-08] Full automation for the CMT analysis of deep very low frequency earthquakes

○Akiko Takeo¹, Kazushige Obara¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-09] Detection and evaluation of tremor migration beneath Kii Peninsula

○Takuya Maeda¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Takanori Matsuzawa² (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-10] Tectonic tremor activity along the Japan trench before the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Hidenobu Takahashi¹, Hino Ryota¹, Naoki Uchida¹, Ryosuke Azuma¹, Susumu Kawakubo¹, Kazuaki Ohta², Masanao Shinohara³ (1.Tohoku University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-11] Detailed tremor activity beneath the eastern Shikoku and Kii Channel, Japan, revealed by dense seismic observation

○Kazuaki Ohta¹, Katsuhiko Shiomi¹, Takanori Matsuzawa¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM

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

[S09]AM-2

chairperson:Keisuke Yoshida(Tohoku University),

chairperson:Tomoaki Nishikawa(DPRI, Kyoto University)

10:30 AM - 12:00 PM ROOM B

[S09-12] Earthquake swarm detection along the Hikurangi Trench, New Zealand: insights into the relationship between seismicity and slow slip events

○Tomoaki Nishikawa¹, Takuya Nishimura¹, Yutaro Okada² (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University)

10:30 AM - 10:45 AM

[S09-13] Detection of shallow very low frequency earthquakes and estimation of energy rate of low frequency tremors in the Costa Rica subduction zone

○Satoru Baba¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Akiko Takeo¹, Geoffrey A. Abers² (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Cornell University)

10:45 AM - 11:00 AM

[S09-14] Events enduring and scaling in cellular automaton models due to competing timescales of stress accumulation and rupture propagation

○Kota Fukuda¹, Takahiro Hatano², Kimihiro Mochizuki¹ (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Department of Earth and Space Science Osaka University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S09-15] Detection of Temporal Change in Seismic Attenuation near Earthquake Source during Intense Fluid-Driven Seismicity following 2011 Tohoku-Oki earthquake

○Keisuke Yoshida¹ (1.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

11:15 AM - 11:30 AM

[S09-16] Relationship between migration diffusivity and the duration of earthquake swarms

○Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹ (1.Graduate school of Science and Technology, Hiroshima University)

11:30 AM - 11:45 AM

[S09-17] Simulation of inland earthquake activity using Coulomb stress change during the megathrust earthquake cycle in southwest Japan

○Tsukasa Mitogawa¹, Takuya Nishimura²

(1.Graduate School of Science, Kyoto University,
2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto
University)
11:45 AM - 12:00 PM

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

[S09]PM-1

chairperson:Koichiro Obana(JAMSTEC), chairperson:Masashi Ogiso(MRI)

1:00 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-18] Master event location estimation method using seismic amplitude: application to volcanic tremors occurred at Meakandake volcano
○Masashi Ogiso¹, Kiyoshi Yomogida²
(1.Meteorological Research Institute, Japan
Meteorological Agency, 2.Hokkaido Univ.)
1:00 PM - 1:15 PM

[S09-19] Estimating Earthquake Rupture Process Using Second Degree Moments
~Application to a swarm-like seismicity in the northern Ibaraki and Iwaki areas~
○Naoto Yokotani¹, Aitaro Kato¹, Kazushige Obara¹, Shin'ichi Sakai¹, Takashi Iidaka¹, Tetsuya Takeda²
(1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo., 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
1:15 PM - 1:30 PM

[S09-20] Relationship between the subducting plate boundary and fault geometry of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand, based on high precision aftershock distribution
○Yuta Kawamura¹, Satoshi Matsumoto¹, Tomomi Okada², Miu Matsuno², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato², Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard H Sibson⁷ (1.Kyushu University, 2.Tohoku University, 3.Kyoto University, 4.GNS Science, 5.Victoria University of Wellington, 6.University of Wisconsin - Madison, 7.University of Otago)
1:30 PM - 1:45 PM

[S09-21] Faults geometry of outer-rise normal-faulting earthquakes in the central Japan trench based on the ocean bottom seismograph observations
○Koichiro Obana¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1.JAMSTEC)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-22] Relative hypocenter determination using wave correlation around P-wave first motion with sampling frequency of 10 kHz
○Yuki Noda¹, Yoshihisa Iio² (1.Kyoto University Graduate School of Science, 2.Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)
2:00 PM - 2:15 PM

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

[S09]PM-2

chairperson:Hideo Aochi(BRGM), chairperson:Makoto Matsubara(NIED)
2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-23] Characterization of deep lower limit of seismogenic zone (D90) in the region of low heat flow region beneath Japanese Islands
○Makoto Matsubara¹, Tomoko Elizabeth Yano¹, Hiroshi Sato² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)
2:30 PM - 2:45 PM

[S09-24] The diversity of source parameters in deep earthquakes with waveform similarity
○Ayako Tsuchiyama¹, Junichi Nakajima¹ (1.Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology)
2:45 PM - 3:00 PM

[S09-25] Method to Evaluate the Probability of Earthquake Occurrence Using Information of Small Events
○Hiroki Tanaka¹, Ken Umeno¹ (1.Kyoto University)
3:00 PM - 3:15 PM

[S09-26] Detection of rate change of induced seismicity using ETAS model
○Hideo Aochi¹, Julie Maury¹, Thomas Le Guenan¹ (1.BRGM)
3:15 PM - 3:30 PM

Sat. Oct 31, 2020

ROOM B

Room B | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

[S02]AM-1

chairperson:Ryoichi Iwase(JAMSTEC)
9:00 AM - 9:45 AM ROOM B

[S02-01] Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-

Wave Arrival Polarization

○Yusuke Mukuhira¹, Oleg V. Poliannikov², Michael C. Fehler², Hirokazu Moriya³ (1.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2.Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3.School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan)

9:00 AM - 9:15 AM

[S02-02] Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

○Ryoichi Iwase¹ (1.JAMSTEC)

9:15 AM - 9:30 AM

[S02-03] Channel ID number expansion in WIN format

○Kenji Uehira¹, Shigeki Nakagawa², Hiroshi Tsuruoka², Taku Urabe³ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Telemetra)

9:30 AM - 9:45 AM

Room B | Regular session | S19. Seismology, general contribution

[S19]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

9:45 AM - 10:00 AM ROOM B

[S19-01] A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

○Satoko Murotani¹, Kenji Satake², Hiroshi Tsuruoka², Hiroe Miyake², Toshiaki Sato³, Tetsuo Hashimoto⁴, Hiroo Kanamori⁵ (1.National Museum of Nature and Science, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.Ohsaki Research Institute, Inc., 4.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5.Seismological Laboratory, California Institute of Technology)

9:45 AM - 10:00 AM

Room B | Regular session | S18. Education and history of seismology

[S18]AM-1

chairperson:Satoko Murotani(National Museum of Nature and Science)

10:00 AM - 10:15 AM ROOM B

[S18-01] Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation

simulations for junior high school students.

○Shota Takeichi¹, Toshitaka Baba¹, Naoyuki

Nakayama² (1.Tokushima University, 2.Tsuda Junior High School)

10:00 AM - 10:15 AM

Room B | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

[S03]AM-2

chairperson:Kosuke Heki(Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University), chairperson:Yuta Mitsui(Faculty of Science, Shizuoka University)

10:30 AM - 12:00 PM ROOM B

[S03-01] Interseismic plate coupling on the Main

Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

○Takao Tabei¹, Mako Ohzono², Bishow R. Silwal³, Rajendra Bhandari³, Janak B. Chand³, Soma N. Sapkota³, Hiroe Miyake⁴, Kazuki Koketsu⁴ (1.Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2.Graduate School of Science, Hokkaido University, 3.Department of Mines and Geology, Nepal, 4.Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM

[S03-02] Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

○Yusuke Tanaka¹, Yusaku Ohta¹, Shin'ichi Miyazaki² (1.Tohoku University, 2.Kyoto University)

10:45 AM - 11:00 AM

[S03-03] Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

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

11:00 AM - 11:15 AM

[S03-04] Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

○Yuta Mitsui¹, Hinako Muramatsu², Yusaku Tanaka³ (1.Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

[S03-05] Crustal deformation by a heavy rain episode

○Kosuke Heki¹, Syachrul Arief¹, Wei Zhan² (1.Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2.The First

Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration)

11:30 AM - 11:45 AM

[S03-06] Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

○Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Paul Segall³, Takeshi Sagiya^{2,4} (1.Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3.Stanford University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

11:45 AM - 12:00 PM

Room B | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

[S03]PM-1

chairperson:Takeshi Iinuma(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)), chairperson:Ryoya Ikuta(Shizuoka Univ.)

1:00 PM - 2:15 PM ROOM B

[S03-07] Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

○Hiroki Aota¹, Mako Ohzono^{1,2}, Hiroaki Takahashi¹, Yusaku Ohta³ (1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

1:00 PM - 1:15 PM

[S03-08] A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

○Ryoya Ikuta¹, Horng-Yue Chen², Kiyomichi Takemoto³, Takeru Kohmi¹, Masataka Ando¹ (1.Shizuoka Univ., 2.Academia Sinica, 3.Nagoya Univ.)

1:15 PM - 1:30 PM

[S03-09] GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

○Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido^{2,3}, Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta^{3,2}, Fumiaki Tomita¹, Ryota Hino^{3,2} (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S03-10] Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

○Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura² (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

1:45 PM - 2:00 PM

[S03-11] A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

○Yuya Machida¹, Shuhei Nishida¹, Toshinori Kimura¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

2:00 PM - 2:15 PM

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

[S12]PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 1:45 PM ROOM B

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

○Kentaro Omura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 1:15 PM

[S12-02] Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

○Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2.Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3.Japan Meteorological Agency)

1:15 PM - 1:30 PM

[S12-03] Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

○Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

*Kentaro Omura¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震発生過程やテクトニック変動を理解する上で、重要な物理量である地殻の原位置絶対応力を求めるには、陸域にしる海域にしる、水圧破碎法、応力解放法のように、掘削と複雑な孔内計測が必要であった。しかし、最近では、岩石コアを採取して室内計測する応力測定法(ASR法、DRA法、DCDA法など)や、孔内物理検層で得られる孔壁画像から、応力方位と値を推定する手法(ボアホールブレイクアウト、DITF)が適用されてきている。本発表では、一例として、防災科学技術研究所のHi-net観測網で、大阪平野にある深層地殻活動観測井でのボアホールテレビュア検層から、ボアホールブレイクアウトが観察され、原位置地殻応力方位を推定した結果を報告する。

大阪府の此花観測井(北緯34°39' 45.92" , 東経135°23' 22.53" , 掘削深度約2033m)と田尻観測井(北緯34°23' 52.14" , 東経135°17' 01.24" , 掘削深度約1532m)において、ボアホールテレビュア検層(BHTV)が実施された。BHTVは、検層ツールのトランスデューサーを回転させ、超音波を孔壁に照射しながら孔内を上昇して、孔壁からの反射波の振幅と往復時間を濃淡表示することによって、孔壁面の画像を描く。亀裂などは、反射波の振幅が小さく、画像が黒くなる。検層ツールには磁力計が組み込まれていて、孔壁画像に写る亀裂などの方位がわかる。ボアホールブレイクアウトは、孔壁にかかる応力集中により、孔壁の一部が剪断破壊し、その部分が、崩れ、孔径が拡大する現象であり、孔壁画像で、深度方向に縦に筋が写ることで、認識される。崩壊した部分の幅から応力値が、崩壊部分の方位から応力方位が求められる。応力値には孔壁の破壊強度が直接関与し、推定が難しいため、今回は、応力方位のみ着目する。応力集中領域から90°回転した方位が原位置地殻応力の水平最大圧縮応力方位になる。

両観測井ともに、浅部の軟岩堆積層の大阪層群から、基盤は花崗閃緑岩となり、基盤のBHTV画像にボアホールブレイクアウトが認識された。図1に此花観測井のボアホールブレイクアウトのBHTV画像の例を示す。田尻でも広い範囲でボアホールブレイクアウトのBHTV画像がえられた。その方位から、原位置地殻応力の水平最大圧縮方位は、此花でN80°E-N260°E、田尻でN65°E-N245°Eとなり、+-15°程度の誤差が見込まれる。この応力方位は、周辺の北近畿地域における、東西方向の圧縮応力方位に整合的な結果になっている。BHTV検層は、標準的な検層種目となっており、観測井など孔井掘削する機会に、あわせて実施することにより、条件が適合して、ボアホールブレイクアウトが形成されれば、原位置地殻応力を求めることができる。

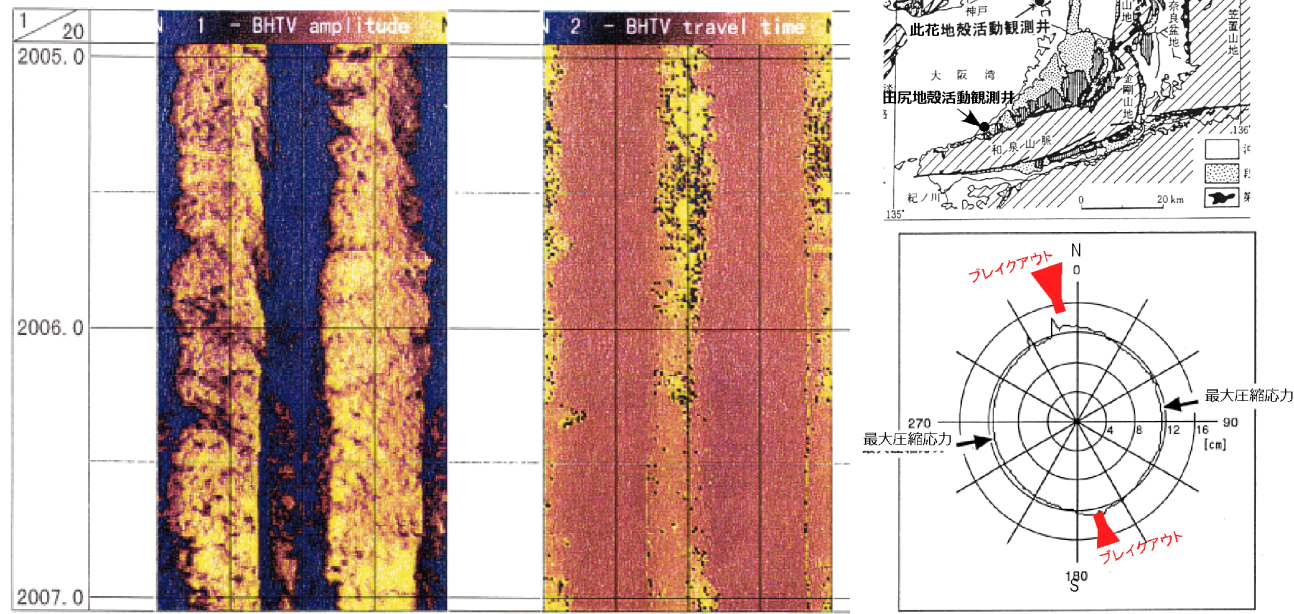


図1. 此花観測井の深度2006m付近のBHTV画像. 左が, 反射振幅, 右が往復時間を示す. 縦方向の黒い筋がボアホールブレイクアウト. 右図は, 往復時間から再現した孔壁断面で, 拡張したボアホールブレイクアウト部分から90°が最大圧縮応力方位になる

Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

*Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3. Japan Meteorological Agency

これまで秒速ナノメートルからメートルオーダーの範囲において摩擦実験が行われ (Di Toro et al., 2011), 様々な岩種の摩擦挙動が調べられてきた。また、摩擦実験後のせん断帯に発達する微小構造の観察も行われてきた (例えば, Marone & Scholz, 1989; Moore & Lockner, 2011 など)。しかし、それらは限られた速度範囲での実施が多く、同一岩種に対して広い速度範囲での摩擦実験を行った例は少ない。そこで、本研究では統一的に摩擦挙動を理解することを目的とし、房総半島江見層群の火山砕屑性堆積物を用いて速度範囲 0.0002–1.0 m/s にて摩擦実験を行った。その他の実験条件は、封圧 1.5–3.0 MPa, すべり量 10 m で統一し、乾燥および水飽和条件下で行った。実験の結果、乾燥条件では 0.1 m/s 以上で、水飽和条件では 0.01 m/s 以上ですべり弱化を示した。実験後試料の薄片を用いた微小構造観察の結果、乾燥および水飽和両条件において、すべり弱化を示した速度域のせん断帯にはせん断方向と平行な Y 面が、すべり弱化を示さなかった速度域ではせん断方向と斜交する R_1 面の発達が確認された。

続いて、摩擦実験中の粒子の挙動や粒子にかかる応力状態を粒子単位、時間ステップ単位で詳細に解析することを目的として、個別要素法 (DEM) による摩擦実験を再現した粒子シミュレーションを行った。その結果、すべり弱化を示した速度域では、隣接粒子間相対変位が大きい部分がせん断方向に平行に存在し、加えて摩擦係数上昇時にはせん断方向に対して傾斜した方向に、摩擦係数下降時には塊状に存在した。粒子にかかる応力の局所的な集中は見られなかった。一方、すべり弱化を示さなかった速度域では、隣接粒子間相対変位と粒子にかかる応力が大きな部分の局在化が見られたが、摩擦係数低下時と上昇時でその粒子数は大きく異なり粒子の固着と解放が繰り返し行われていた。

以上の摩擦実験と実験後試料の薄片観察、および個別要素法による数値計算の結果から、せん断帯に発達する微小構造にはすべり速度依存性があることが分かった。

しかし、江見層群の火山砕屑性堆積物の試料には火山性ガラスが含まれており、これが複合面構造の発達に影響を与えているか不明である。そこで、複合面構造の発達とすべり速度との関係性をより精査するために、試料として3種類の石英砂を用いた摩擦実験を行った。実験は全て乾燥条件下で、封圧 2 MPa, すべり速度 1.0 m/s および 0.01 m/s, すべり量 10 m で実施した。すべり速度 1.0 m/s においてはすべり弱化を示し、摩擦係数が定常状態を示すまでの弱化距離は 8–10 m であった。0.01 m/s では、すべり量 1 m 程度までのすべり強化に続いて定常状態に達する挙動を示した。石英砂におけるすべり速度と複合面構造の発達との対応性について、今後、微小構造観察などを通して精査していく予定である。

Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

*Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University

防災科学技術研究所では、岩石摩擦特性のスケール依存性を調べる目的で大型振動台を利用したメートル規模の摩擦実験をおこなっている。過去に実施したメートル規模の変はんれい岩試料同士を直接接触させておこなった摩擦実験では、摩擦係数が急減する仕事率の値がセンチメートル規模に比べ1桁小さくなるというスケール依存性を確認している。さらに様々な観察に基づき、その原因が摩耗に伴って自発的に発生・成長する断層面上の応力不均質にあると結論づけられた (Yamashita et al., 2015, Nature)。しかしながら自然の断層には一般にガウジと呼ばれる微細な岩石粒子が含まれている。ガウジ層を含む断層でも摩擦特性にスケール依存性が存在するか否かは重要な問題であることから、我々はメートル規模でのガウジ摩擦実験をおこなった。本研究でも変はんれい岩のブロックを母岩として用い、長さ1.5 m、幅0.1 mの接触面上に模擬ガウジを散布して摩擦実験をおこなった。模擬ガウジとしてジェットミルによって平均粒径10 μm 、最大粒径200 μm となるよう粉碎した変はんれい岩の粉末粒子を用いた。模擬ガウジを散布する面は凹凸が一面に渡って10 μm 以下となるよう成形した後、模擬ガウジをとらえられるようサンドブラストによって粗くした。模擬ガウジを接触面上にふるいを使って可能な限り均質に散布し、厚さが3 mmになるよう余分な模擬ガウジを取り除いた後、金属板を使って手で圧密した。大型振動台によるせん断載荷をおこなう前に油圧ジャッキにより最大6.7 MPaの垂直応力を与え、実験中は一定に保った。実験後、せん断を受けたガウジ層を観察するため、1実験あたり最低3箇所ではガウジ層を採取した。残りの模擬ガウジも可能な限り収集し、接触面に残った粒子は掃除機により除去した。本研究では目的に応じて2種類のせん断載荷による実験をおこなった。1つ目は速度-状態依存摩擦 (RSF) 則のパラメタを調べるための速度ステップ変化の載荷である。載荷速度を0.01 mm/sから1 mm/sの間で繰り返し変化させ、速度増加時と減少時の応答を収録した。得られたデータは、変はんれい岩の模擬ガウジが速度弱化の特性を示すことを示唆している。RSF則のパラメタ推定に関しては別の講演で報告をおこなう予定である (下田他, 2020, 本大会)。2つ目の載荷方法は定常すべり時の摩擦特性の調査を目的としたものであり、0.01 mm/sから30 mm/sの一定速度で載荷し最大で400 mmのすべり距離を与えた。定常状態での摩擦係数と仕事率とを比較したところ、岩石試料同士を直接接触させた状態の摩擦実験で見られていた高い仕事率での摩擦係数の急減が見られなかった。局所的な応力状態を調べるため模擬断層沿いに設置した歪ゲージアレイのデータを解析したところ、すべりに伴い模擬断層面上の垂直応力分布が不均質化ではなく均質化している過程が見られた。ガウジ層を含む状態では岩石同士が直接接触した状態で見られたような応力不均質が発達しづらく、それにより摩擦係数の急減が発生しなかったと考えられる。一方、載荷速度が高い条件での実験においては、実験の最終段階において巨視的な摩擦係数が低下し始める様子が観察されている。そのような実験では、実験後のガウジ層内に黒く固結した薄いガウジ片がしばしば見つかっており、せん断変形が集中し高い仕事率が発生して局所的に摩擦係数が低下したと考えられる。歪のデータでも、一旦均質化した垂直応力分布が巨視的な摩擦係数の低下と同期して再び不均質化していく様子を確認できる。したがって、ガウジ層を含む状態では応力不均質が発達するまでにより多くのすべり距離が必要となるものの、岩石同士が直接接触した状態と同様に応力不均質に起因する巨視的な摩擦係数の大幅な低下が引き起こされ、小さな規模では観察されないような低い仕事率での巨視的な摩擦係数の急減が発生する可能性がある。

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

[S09]PM-1

chairperson:Satoshi Matsumoto(Kyushu University)

Thu. Oct 29, 2020 1:45 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-01] Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule –

○Satoshi Matsumoto¹ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-02] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

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

2:00 PM - 2:15 PM

Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule -

*Satoshi Matsumoto¹

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

はじめに

中小地震の発震機構解やモーメントテンソルを用いた応力場推定がAngelier(1974)の先駆的な研究を皮切りに多くの手法開発や領域での推定がなされてきた（レビューとして、たとえば岩田・他，2020）。その中でMatsumoto(2016)は地震が媒質中の非弾性現象であることに着目し、マクロに見るとPrandtl-Reuss則に従うと考えて、モーメントテンソル密度が載荷される偏差応力に比例するとして応力テンソルを推定した。しかしながらその仮定が成立しているかどうかは定かではない。また、いわゆる応力インバージョンによって推定される偏差応力の比（応力比 $\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ここで $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はそれぞれ最大、中間、最小主圧縮応力）は推定精度が悪く、その意味するものについても不明な点がある。そこで本研究では非常に単純な計算からこれらの点について考察する。

流れ則の有効性と応力インバージョン

ここでは静岩圧平衡状態から3軸応力がかかる状態を考える。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ をそれぞれ各タイムステップで増加させ、最大せん断応力が破壊基準を超えた時に一定の応力降下が起こるとする（図1a参照）。具体的には基準はTresca状態を考えることになる。たとえばCoulombの破壊基準（摩擦係数で最適面で滑りが起こる）であっても $\mu = 0.6$ の時 σ_1 から ± 30 度の面で滑りが起こる。どちらも同様に起こるはずであるのでこれらを足し合わせれば単純に45度のすべりのモーメント解放と同じになる（図1b）。さて、ここでは簡単のために媒質中で強度は一定とし、基準を満たした瞬間に媒質で一斉に地震が起こり、応力降下に対応したモーメントが解放されることとする。応力場は最大せん断応力になる組み合わせの大きい応力と小さい応力でそれぞれ応力降下量の半分現象、増加することになる。最大せん断応力を基準とした場合、地震後も主応力は x, y, z 軸と一致し、回転は起こらない。

載荷する応力の比 $\phi = 0.2, 0.5, 0.8$, ($\sigma_1 = \sigma_x, \sigma_2 = \sigma_z, \sigma_3 = \sigma_y$) の3つのケースの場合の結果を図2に示す。載荷する応力 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) は各時間ステップで $0.1, -0.1, -0.06$ ($\phi = 0.2$), $0.1, -0.1, 0$ ($\phi = 0.5$), $0.1, -0.1, 0.06$ ($\phi = 0.8$) MPa/time stepである。ここで強度は10MPa, 応力降下は2MPaの場合を示す。この結果では以下の特徴が得られる。1) 媒質が破壊強度に達するまでは媒質内の応力は載荷された応力と等しい(stage 1)。 $\sigma_1 - \sigma_3$ の組み合わせが強度に達すると地震が起き始め、差応力は強度と強度一応力降下量の間を保つ(stage 2)。 σ_2 が増加（減少）しつつ、 $\sigma_2 - \sigma_3$ ($\sigma_1 - \sigma_2$) の組み合わせが強度に達し、これらを解放する方向でも地震が起き始める(stage 3)。この結果、媒質内の応力は $\sigma_2 \approx \sigma_3$ ($\sigma_1 \approx \sigma_2$) の状態になる。一方解放されるモーメントは載荷される応力に比例する。すなわち、地震を用いた応力推定においては載荷される応力（応力レート）のみが反映され、その場応力を推定することはできない。2) Stage 2においては σ_2 の影響は観測されず、応力比はいつも0.5になる。3) 載荷される応力（強度を超えて）と解放される応力（非弾性ひずみ）は比例関係になり、いわゆる流れ則を満足する。

さらに、外部から瞬時に加わる応力変化から強度を見積もる方法について検討を行った。Hardebeck and Hauksson(2001)で提唱された応力比によらない主応力の回転から強度を推定する方法では応力比 < 0.5 の場合、 > 0.5 の場合では $\sigma_2 - \sigma_3$, $\sigma_1 - \sigma_2$ の面内の回転は直接応力変化を示し、強度の情報は含まない。そのほかの面内の変化では強度が求められることが明らかになった。

以上のように、簡単な計算から応力場推定についての検討を行い、今後の応力場推定や強度推定、モデリング

について重要な知見が得られた。

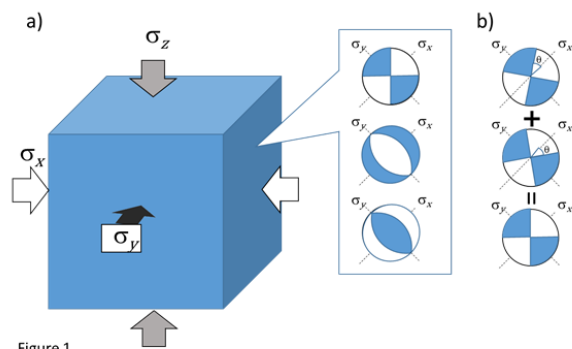


Figure 1.
a) Coordinate of the simulation in the text. Three types of seismic moment tensor indicated in right side occur inside of medium. b) Schematic illustration showing summation of two seismic moment tensor with compression angle perturbations are averaged.

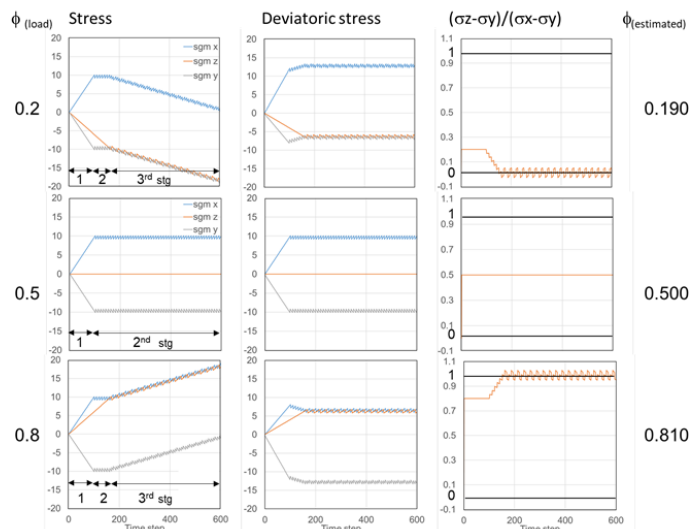


Figure 2
Column figures show temporal variations of stresses, deviatoric stress, and in-situ stress ratio, respectively. Coordinate system is shown in Fig. 1b. Colors in the figures are shown in legend. Stress ratios of given loaded from outside and estimated are indicated in the left and right of the column figures. Row corresponds to case for different loaded stress ratio. Arrows show stages of stress condition.

Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

*Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

地震の震源特性を理解するためには、地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c 、応力降下量 $\Delta\sigma$ などの震源パラメータを推定することが基本となる。地震モーメントとコーナー周波数のスケーリング則(相似則) $M_0 \propto f_c^{-3}$ が成り立つとすれば、応力降下量は地震の規模に依らず一定の値を取ることが知られている。このような震源スケーリングや応力降下量のばらつきを調べることは、震源物理の理解だけでなく、将来起こり得る地震の強震動予測の向上のためにも重要であると言える。

本研究では、2016年熊本地震系列における余震の震源分布に焦点を当て、そのうちの318イベントを対象としたS波コーダスペクトル比法による震源パラメータの推定を行い、応力降下量のばらつきやその要因について調べた。解析は、基本的にSomei et al. [2014]の手順に倣って、観測記録から震源スペクトル比を求めた。観測記録は防災科学技術研究所(以下、防災科研)高感度地震観測網Hi-netの観測点から7点、熊本地震合同地震観測グループによる観測点から9点の計16点における速度波形データを用いた。1–30Hzの周波数帯におけるSN比(Signal-Noise Ratio; SNR)が2以上という条件を満たす地震波形データを用いて、地震モーメント比・親地震と子地震のコーナー周波数の計3つの未知パラメータを非線形最小二乗法によるインバージョンで推定した。親地震の地震モーメントは防災科研広帯域地震観測網F-netのメカニズム解による値で固定し、地震モーメント比から子地震の地震モーメントを推定した。

解析の結果、地震モーメントはコーナー周波数に対して $M_0 \propto f_c^{-4.35}$ の関係に従う様子が見られた。一般的に知られるスケーリング則である $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係は破綻しており、規模依存性を示唆する結果となった。また、推定されたコーナー周波数と地震モーメントを用いて、地震断層を円形クラックと仮定して応力降下量を推定した[Eshelby, 1957; Brune, 1970, 1971]。対象とした318イベントの応力降下量は0.21–17MPaの間でばらついており、幾何平均は2.6MPa($-1\sigma/+1\sigma$ はそれぞれ1.2, 5.5MPa)であった。過去に日本国内で発生した内陸地震の応力降下量[Somei et al., 2014]と比較すると、本研究の推定値は空間的なばらつきの範囲内であった。一方、本研究では詳細に推定精度を検討したところ、熊本地震震源域内においても地震の規模や震源深さに対する有意な依存性が認められ、いずれも正の相関を示した(相関係数はそれぞれ0.47, 0.43)。これらは当震源域における地震の発生メカニズムを考えるうえで重要な結果である。

謝辞：解析において、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net、広帯域地震観測網F-net、気象庁のデータも用いました。記して感謝申し上げます。

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

[S09]PM-2

chairperson:Shiro Ohmi(DPRI, Kyoto University), chairperson:Akemi Noda(MRI)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-03] Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

○Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5.Institute of Statistical Mathematics)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-04] Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

○Ichiro Kawasaki¹ (1.Tono Research Institute of Earthquake Science)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-05] Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

○Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-06] Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

○Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹ (1.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

*Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at Meteorological Research Institute, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5. Institute of Statistical Mathematics

地殻内の歪みエネルギーを用いて断層破壊が進展することを考慮すると、地震発生層内に蓄積した歪みエネルギーの分布を明らかにすることは、地震の発生メカニズムを理解する上で重要である。本研究では、歪みエネルギーのうち地震発生との関係が深いと考えられるせん断歪みエネルギーに注目し、2016年熊本地震によるせん断歪みエネルギー変化を、地殻内の3次元空間分布として定量評価した。

地震時のせん断歪みエネルギー密度変化の空間分布を求めるには、地震による応力変化と背景応力場を知る必要がある。地震時の応力変化については、GNSS観測による地震時の地表変位データから断層すべりモデルを推定し、半無限弾性体を仮定してこのすべりモデルによる周辺地殻内の応力変化分布を計算した。一方、背景応力の向き（主応力軸の方向・応力比）は対象地域で発生する地震のメカニズム解から推定可能だが、その絶対値を知ることは難しい。そこで本研究では、背景応力の向きについてはTerakawa and Matsu'ura (2010) による応力インバージョンの結果を用い、背景応力の大きさは地殻内の摩擦強度に従うと仮定した。この際、地殻の有効摩擦係数として $\mu_{\text{eff}}=0.0, 0.1, 0.2, 0.4$ を候補に設定し、それぞれの場合のせん断歪みエネルギー密度の変化量を算出したところ、その空間分布のパターンは背景応力のレベルに強く依存することが分かった。背景応力の大きさがゼロであることを意味する $\mu_{\text{eff}}=0.0$ の場合、せん断歪みエネルギー密度は全ての場所で増加した。一方、摩擦係数が大きい場合（ $\mu_{\text{eff}}=0.4$ ）は、背景応力と地震による応力変化が同じ向きの地点でせん断歪みエネルギー密度が増加、逆向きの地点で減少した。

次に、以上のように得られたせん断歪みエネルギー密度変化を積分して、地震によるせん断歪みエネルギー変化の総量を計算した。 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ のケースでは、地殻内のせん断歪みエネルギーの総量は増加した。地震が地殻内に蓄積したエネルギーを解放する物理プロセスであることを考慮すると、これは不合理な結果である。その他のケースではせん断歪みエネルギーの総量は減少し、背景応力レベルが大きいほど減少量が大きいことが分かった。 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ のケースで見られたエネルギー増加の不合理を避けるには、有効摩擦係数は0.05以上でなければならない。これは深さ10 kmで最大せん断応力14 MPaに対応する。このように、せん断歪みエネルギー変化の総量の議論から背景応力レベルの下限値を拘束することができた。

最後に、 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ 以外のケースについて、せん断歪みエネルギー密度変化の空間分布と、熊本地震本震後1週間のうちに発生した余震の震源分布を比較した。その結果、せん断歪みエネルギー密度増加域と余震発生域には相関が見られ、余震の総数のうち凡そ75%がエネルギー密度増加域で発生していたことが分かった。余震が完全にランダムに発生したと仮定して100,000通りの余震データセットを合成し、テスト解析を行ったところ、せん断歪みエネルギー密度増加域で75%以上の余震が発生する確率は、0.001%より小さかった。従って、熊本地震の場合、せん断歪みエネルギーの増加と余震活発化の関連性は統計的に有意だと考えられる。本震の震源断層近傍ではエネルギーの増加で説明できない余震が発生したが、これらの余震発生を理解するには間隙水圧の増加による強度低下などの別の物理プロセスを考慮する必要がある。

Reference:

Noda, A., Saito, T., Fukuyama, E., Terakawa, T., Tanaka, S., and Matsu'ura, M. (2020). The 3-D spatial distribution of shear strain energy changes associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence,

southwest Japan, Geophysical Research Letters, 47, e2019GL086369.

<https://doi.org/10.1029/2019GL086369>

Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

*Ichiro Kawasaki¹

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

●2020年4月22日、驚いたことに飛騨上高地群発地震が再来した。たった20年程で激しい群発地震活動が再来したことは熱水が原因であることを示している。本発表は、気象庁HPの「震度データ検索」によって検索・作図した分布図を手掛かりに、そのメカニズムを探る試みである。

●1998年と2020年で、南北0.2分(0.37km)、東西2分(0.30km)以内で発生したM4以上の地震の組み合わせを探すと、表1のように、XA1, XA2, XB, XCの4地点が見出された。これらの地点は群発活動域が特定の時空間に移動したときの最初のM3以上の地震、あるいはそれに近いことに気が付いたので、時間区切りを「日」では無く、必要に応じて「時」、「10分」に下げると、群発地震活動は、図1のように時空間的に分離することが明瞭になった。2020の群発地震は、この予稿を準備している段階でM2以上の地震では槍ヶ岳周辺で停止してしまっているが1998年の時には富山・長野・岐阜県境まで拡大したので図には1998年の分布を示したが、時空間的に分離したことは2020年でも明瞭である。2回とも同じ区間区切りで時空間的に分離が生じたので、それは偶然ではない。

●1998年8月7日に始まった飛騨上高地群発地震と今回の群発地震のM2以上の群発活動域は、図1のような共通の区間区切りで「時空間的に分離」して移動した。図の区間を、南から北に向かって(A)(北緯36度15.5分以南。上高地周辺。地震の深度6kmから4km)、(B)(同15.5分から16.7分。西穂高岳東南側。深度6kmから4km)、(C)(同16.6分から18.8分。西穂高北側。深度5kmから4km)、(D)(同18.8分から22.3分。槍ヶ岳西山腹。深度4kmから1km)、(E)(同22.3分以上、槍ヶ岳から野口五郎岳。深度2kmから0km)と名付ける。なお、発生深度は6kmから4kmと述べた場合は深度6.5kmから3.5kmを意味する。

●特異な例を挙げておこう。

期間[2]には(C)が活動域になった。8月14日11時34分に3.1、14時6分にM4.2の地震(深度3km)が発生し、活動域は西穂高岳尾根部に向かって「南」に延びて行った。この時空間の群発活動は「半日程」で沈静化した。

期間[3]には活動域は(B)に移動した。同日23時52分、長野県側の南端近くでM4.0(深度5km)の地震が発生し、活動域は西穂高岳尾根部に向かって「北」に延びて行き、この時空間の群発活動は「1日程」で沈静化した。

●(A)から(D)の様に「空間的に分離」していることは、区間境界(例えば西穂高岳尾根部直下)に、熱水の移動を妨げる境界面があることを意味しているとしか考えられない。

「時間的に分離」していることは、地震発生域に熱水が充満して群発地震活動を引き起こしているのでは無いことを意味している。直接的な証拠は無いが、それは、「群発地震活動域の下に熱水混合層が上記区間におおよそ対応するように分離して分布しながらも、熱水脈で細々と連結して水圧は共有している。ある区間で水混合層から突破的に熱水が溢れ出して地震活動が生じると熱水混合層全体で水圧が下がり、今まで地震活動が生じていた場所では地震活動が終息する。そのようなサイクルを区間を変えて繰り返したこと」を意味しているように思われる。このようなモデルで無ければ「活動域の時空間分離」を説明することは困難であろう。

●立山・黒部地域では黒部峡谷の直下に熱水混合層が分布することは、川崎(2019, 測地学会)が1996年集中観測による地殻構造(Matsubara, et al, 2000)や重力異常データによる超低密度域(源内・他, 2002)などに基づいて議論した通りである。

槍・穂高・上高地地域にはその様な研究成果はないが、Mikumo et al. (1995)による上宝観測所や高山観測所の観測データのトモグラフィー、水谷・他(1983)による奥飛騨温泉郷の深さ700mの地熱調査井の変質鉱物組成、温泉水の化学組成、酸素・炭素同位体比の研究、焼岳の山頂の160℃程の火山ガスのヘリウム3/4比などから、地下数kmに熱水混合層が分布することは疑えない。むしろ、群発地震の活動域の「時空間的分離」こそが熱水混合層存在の強力な状況証拠であろう。

●以上はM2以上の地震による飛騨上高地群発地震像である。M2以下の微小地震で見ればもっと多彩な活動をしている（大見，私信）。両方を合わせれば群発地震の全体像になるのであろう。

	発生日	時刻	北緯	東経	深度	M
XA1	1998/08/09	12:45	36° 14.5′	137° 38.3′	4km	M4.6
	2020/04/27	11:32	36° 14.7′	137° 38.3′	5km	M4.8
XA2	1998/08/12	09:40	36° 14.2′	137° 39.0′	4km	M4.6
	2020/04/23	13:57	36° 14.1′	137° 39.0′	5km	M5.0
XB	1998/08/14	23:52	36° 15.8′	137° 38.0′	5km	M4.0
	2020/05/13	10:28	36° 15.7′	137° 38.1′	3km	M4.8
XC	1998/08/14	14:06	36° 17.8′	137° 37.6′	3km	M4.2
	2020/05/19	14:23	36° 17.6′	137° 37.7′	3km	M4.7

表 1 緯度0.2分
(0.37km)，経度
0.2分 (0.30km)
以内で，1998年と
2020年に発生した
M4以上の地震の
組み合わせ。

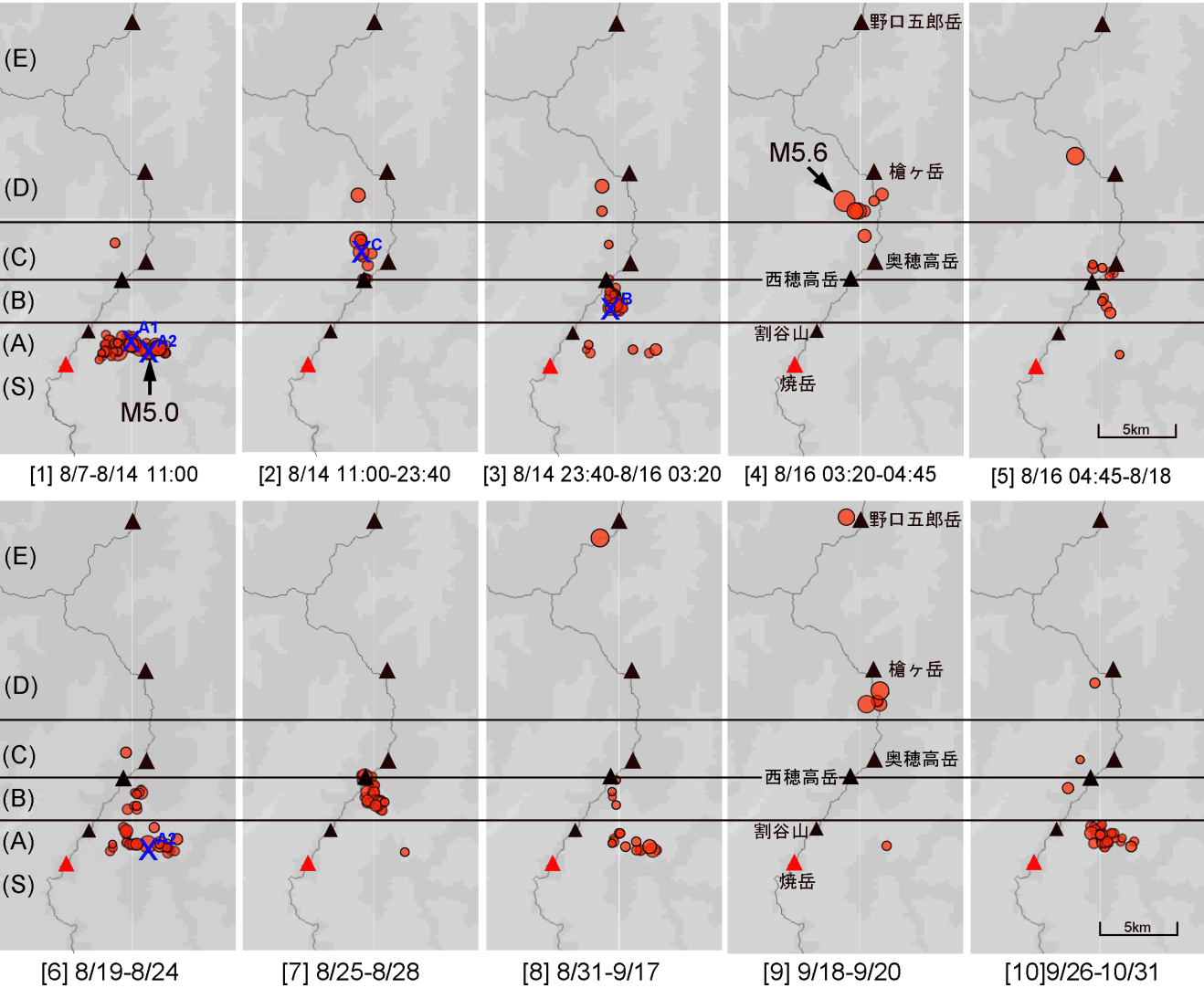


図 1 1998年飛騨上高地群発地震の期間 [1] から [10] のM2以上の地震の震央分布。
気象庁HPの「震度データベース検索」によって作図した震央分布を加筆編集した。

Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

*Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

§はじめに：飛騨山脈南部の上高地およびその周辺において、2020年4月23日のM=5.5（以下、Mは気象庁マグニチュード）の地震を最大地震として（2020年8月下旬現在）、活発な地震活動が続いている。今回の地震活動は、4月6日の上高地徳本峠付近での小規模な群発地震で始まったと考えられる。その後若干の震源移動と消長を繰り返した後、4月22日未明にM=3.8を含む地震が徳本峠付近の4月6日の活動域とほぼ同じ位置で発生し、翌日4月23日13時44分にM=5.5の地震が発生した。その後、上高地の谷底から岳沢にかけての地域に震源域が拡大し、5月13日早朝からの活動で飛騨山脈主稜線（岐阜・長野県境）の近くまで震源域が拡大した。5月19日13時12分の地震（M=5.4）において震源域が主稜線の岐阜県側に拡大し、その後は、長野県側と岐阜県側の双方で散発的な活動が継続している。

§過去の群発地震との比較：飛騨山脈の南部の、主に鷲羽岳から焼岳付近は断続的な群発地震が頻発する地域で、京大防災研が1970年代後半に地震観測を開始して以来、既往研究によれば、主な群発地震活動が1990～1991年（焼岳および烏帽子岳付近）、1993年6月～1994年1月（槍ヶ岳）、1998年8月～2000年2月（飛騨山脈群発地震）、2011年3月～4月（東北地方太平洋沖地震直後の群発地震）、2014年5月（西穂高・千石尾根付近）、2018年11月～2019年1月（焼岳西麓および上高地）などに発生している。また、小規模ながら、上述以外にもたとえば2003年12月の焼岳北東域や2013年10月の涸沢付近などにもクラス的な地震活動が見られた。これらのうち、1998年の活動は、1970年代後半以降では最大の活動であった。同地域で発生する群発地震の震央分布をみると、2018年の活動までは大まかにみるとそれぞれの震源域が重なっておらず、震源域が「棲み分け」をする現象が観察される。また、過去の大部分の活動では一連の活動の震源域が飛騨山脈の主稜線を越えることはなく、岐阜・長野のいずれかの側に限定されることが特徴であり、これまでの唯一の例外が1998年の活動であったが、今回の2020年の活動は5月19日の段階で長野側から岐阜側へ震源域が拡大し、1990年代以降2度目の例となった。

§地殻変動データの解析：京大防災研は、焼岳中尾峠、焼岳山頂などで焼岳火山の研究観測の一環としてGNSS連続観測を実施している。また、焼岳西側山麓の奥飛騨温泉郷中尾、同・栃尾でも別プロジェクトでGNSS連続観測を継続中である（京大・名大・北大の共同運用）。これらのデータに、気象庁の焼岳南峰南東および大正池南の観測点のデータを加えて、栃尾を基準点として解析したところ、4月下旬から一部の観測点で有意な地殻変動が検出され、5月中旬にはほぼ全ての観測点で変動が加速した。今回の地震活動は、M=5.0以上の地震を複数個含む活発なものであるが、GNSSで観測された地殻変動は、地震の断層運動による地殻変動の寄与だけでは観測された変動量を説明できないことがわかった。そこで、開口断層を仮定して変動源のパラメタを推定したところ、上高地の谷底から西穂高岳の稜線にかけての位置、および西穂高岳と奥穂高岳の中間付近の稜線を跨ぐ位置に、それぞれ北西～南東方向のほぼ鉛直な開口断層（総体積変化量 $2.4\sim 2.5\times 10^6\text{m}^3$ ）を置くことにより、変動量を説明できることがわかった。なお、InSARによる解析によれば、焼岳北東斜面には長期的な膨張が認められているが（たとえば、気象庁、第143回噴火予知連絡会資料）、今回の地震活動の開始前後の比較では有意な変動は認められない。

§考察：上で求められた開口断層の位置と、防災科研のF-netにより求められた、活動期間中の主だった地震の発震機構解を比較すると、求められた開口断層の周辺に発生した地震の発震機構解にはNon Double Couple成分が大きな地震が多く見られており、今回の解析の妥当性を示すものと考えられる。今回の活動は、(1) 過去

の活動の震源域と「棲み分け」をせず1998年の震源域に重なるように発生した、(2) 飛騨山脈の主稜線を跨ぐように震源域が拡大した、の2点で特異である。また、直近の2018年の群発地震活動では、すでに現在と同様のGNSS観測網が稼働していたが有意な地殻変動は検出されなかった。このようなことから類推すると、当地域で発生する群発地震のうち、主稜線を跨ぐような規模の大きな地震活動ではダイク貫入イベント等を伴う可能性があり、今回の活動だけではなく、1998年の活動もその一つであった可能性がある。2018年の活動のような地殻変動を伴わない群発地震の発生メカニズムの考察は今後の課題である。

§謝辞：気象庁からGNSS観測データを提供していただいた。記して感謝する。

Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

*Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹

1. Nihon University

1.はじめに

火山地域では深部低周波地震と呼ばれる通常の構造性地震に比べて卓越周波数が低い地震が深さ10～50kmで発生する。深部低周波地震は火山深部のマグマの活動と関連して発生すると考えられているが、詳細なメカニズムは明らかになっていない。

飛騨山脈の長野県と岐阜県の境界に位置する焼岳でも深部低周波地震活動が見られる。この地域では2020年5月2日から3日にかけて、20時間以上にわたり、規模の小さい深部低周波地震が連続的に発生した。本研究では、この連続的な深部低周波地震活動のスペクトルの時間変化について述べる。

2.焼岳の深部低周波地震活動の概要

気象庁の一元化震源カタログによると、焼岳近傍では通常の構造性地震が深さ0～10 kmで、また深部低周波地震が深さ10～40 kmで発生している。深部低周波地震は焼岳の北から北西にかけて、東西に10km、南北に5kmの範囲を中心に発生している。この活動は2つの群に分かれて活動し、東側の群は主として深さ20～35 kmで発生、西側の群は主に深さ10～20 kmで発生し、西ほど浅くなる傾向がある。西側の群は東側の群に比べて活動度は低い。

焼岳周辺の深部低周波地震は大見他(2003)で指摘しているように群発的に発生する傾向が強い。2004年以降は、2004年に群発的な深部低周波地震活動が起こって以降、この活動ほど顕著ではないものの、数年に一度続発的な活動が見られ、2019年以降、活動度は高くなっていた。

3.2020年5月の活動

2020年5月2日～3日にかけて非常に規模の小さい深部低周波地震が連続的に発生した。気象庁の一元化震源カタログによると、これらの連続的な深部低周波地震のマグニチュードは-0.9～0の範囲で、西側の浅い群に属し、深さは10～20 kmに決められている。国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net（以後、Hi-netと略す）の観測点の連続地震記録を見ると、この連続的な活動は2020年5月2日の正午ごろに始まっており、2020年5月3日の15時ごろに収束している。

4.2020年5月2日～3日の連続的発生のスペクトル

5月2日～3日の深部低周波地震活動について、鵜川(2020)と同様のウェーブレット解析を適用して、スペクトルの時間変化を調べた。ウェーブレット解析は低周波振動の中に高周波が重畳する場合に有効である。アナライジング・ウェーブレットとして下記の式で与えられるMorletのウェーブレットを採用した。

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$$

ここに η は無次元のパラメーター、 ω_0 は無次元の周波数パラメーターである。計算方法はTorrence and Compo(1998)に従った。本研究では、ウェーブレット解析結果から2秒間のスペクトル強度が最大となる周波数を、時間をずらしながら読み取ることで卓越周波数の時間変化の検出を試みた。地震波形データはHi-netの

100Hzサンプリング波形データを使用している。

その結果、図に示すようにHi-net観測点N.KOKH（神岡）では2020年5月2日18時頃から1Hz～2Hz程度の振動が連続的に卓越するようになり、2020年5月3日3時頃に2Hz程度の顕著な振動は見られなくなったが、1Hz程度の振動は2020年5月3日14時頃まで顕著に続いているということがわかった。同様の傾向がHi-net観測点N.KTRH（上宝）でも観測されている。

5.考察とまとめ

深部低周波地震が噴火や火山浅部の群発地震活動と同期して活発化する事例（例えば1991年ピナツボ火山噴火や1998年岩手山）があり、深部低周波地震が火山深部のマグマ活動と関連して発生していることを示していると考えられている。

焼岳近傍では2020年4月22日から地殻浅部の東北東側を中心に群発地震活動が活発化していた。5月2日～3日に発生した深部低周波地震の連続的活動は、この群発地震活動の活発な期間に発生している。浅部の群発地震と深部低周波地震の震央は一致していないが、深部からのマグマなど、火山性流体の移動を示している可能性がある。

本研究では、5月2日～3日に焼岳近傍で深部低周波地震が連続的に発生し、その卓越周波数が1～2Hzから1Hz程度に時間変化したことを明らかにした。今後、震源の精査と卓越周波数が変化するメカニズムを明らかにすることが課題である。

6.謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netの地震波形データを使用した。また、図の作成にはGMT6を使用した。記してここに感謝いたします。

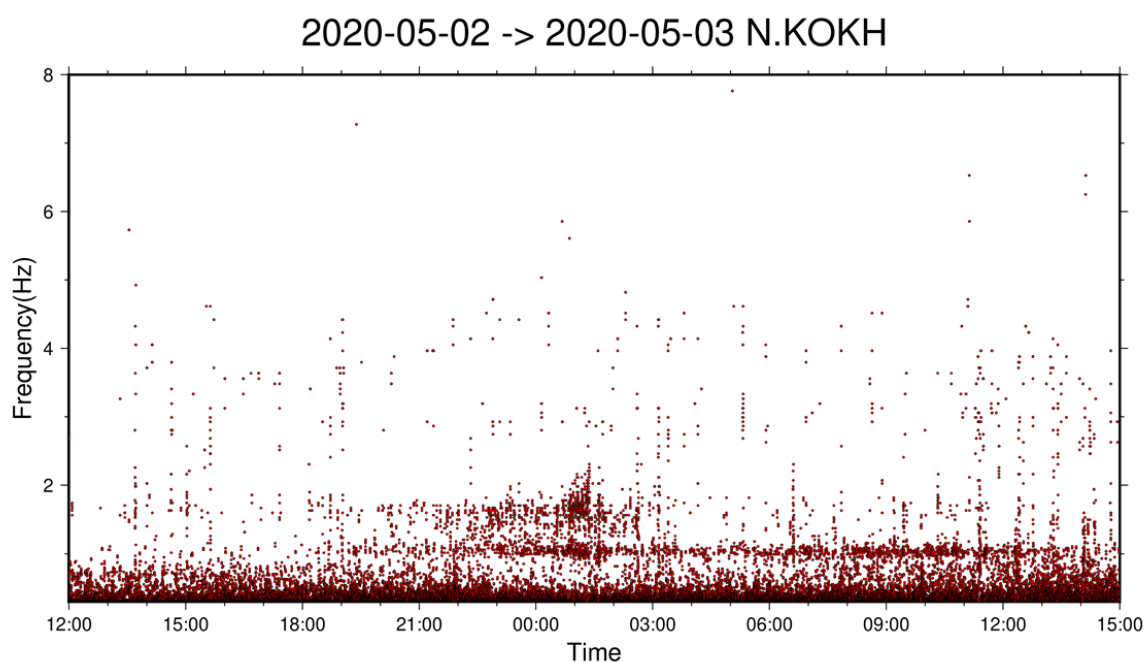


図.Hi-net観測点（N.KOKH）における5月2日12:00～5月3日15:00の卓越周波数の変化

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

[S09]AM-1

chairperson:Kazuaki Ohta(NIED), chairperson:Akiko Takeo(ERI, University of Tokyo)

Fri. Oct 30, 2020 9:00 AM - 10:15 AM ROOM B

[S09-07] Long-term temporal variation of deep low frequency tremor seismicity

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

9:00 AM - 9:15 AM

[S09-08] Full automation for the CMT analysis of deep very low frequency earthquakes

○Akiko Takeo¹, Kazushige Obara¹ (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM

[S09-09] Detection and evaluation of tremor migration beneath Kii Peninsula

○Takuya Maeda¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Takanori Matsuzawa² (1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:30 AM - 9:45 AM

[S09-10] Tectonic tremor activity along the Japan trench before the 2011 Tohoku-oki earthquake

○Hidenobu Takahashi¹, Hino Ryota¹, Naoki Uchida¹, Ryosuke Azuma¹, Susumu Kawakubo¹, Kazuaki Ohta², Masanao Shinohara³ (1.Tohoku University, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

9:45 AM - 10:00 AM

[S09-11] Detailed tremor activity beneath the eastern Shikoku and Kii Channel, Japan, revealed by dense seismic observation

○Kazuaki Ohta¹, Katsuhiko Shiomi¹, Takanori Matsuzawa¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM

Long-term temporal variation of deep low frequency tremor seismicity

*Kazushige Obara¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

深部低周波微動は、沈み込みプレート境界面におけるすべり現象としてのスロー地震の一部を構成するとともに、地球潮汐応答や遠地地震による誘発現象など、外的要因に対して敏感に反応する特徴を有することから、隣接する固着域における応力蓄積など周囲の状態変化を反映するモニタリング指標と考えられる（Obara and Kato, 2016）。西南日本では、微動の発見（Obara, 2002）から約20年に渡ってほぼ均質なカタログが構築されており（Obara et al., 2010）、その間における微動活動の経年的な変化とその要因について検討を行った。

解析には、防災科学技術研究所の微動クラスタリングカタログ（Obara et al., 2010）を使用した。微動は深さとともに活動頻度が高くなるという深さ依存の特徴を有する（Obara et al., 2011）ことから、微動活動の経年変化を議論するためには、発生深度を考慮する必要がある。そのため、西南日本における微動分布をプレート傾斜方向の幅のほぼ中心を境に、浅部側と深部側に分割した。境界線を設定する際には、微動のバイモーダルな分布（Obara et al., 2010）なども考慮している。

いずれの領域にも、エピソードではなく常時微動が発生する、いわゆるスリートスポットが点在しているが、それらを除くと、一般的な特徴として、浅部側では大規模なエピソードがやや長めの間隔でエピソードに発生するのに対して、深部側では小規模なエピソードが頻繁に発生する。ただし、浅部側の活動は、さらにその浅部側で発生する長期的スロースリップイベント（SSE）に影響を受け、その期間は発生頻度が高まる。例えば、豊後水道では2003, 2010, 2014, 2019年に長期的SSEが発生し、その周辺の浅部側微動が活発化した。これらの誘発微動活動を詳細に観察すると、その時空間発展はそれぞれ異なる。2003年は四国西部陸域から豊後水道海域の約50 kmの範囲で微動活動がほぼ同時に起き始めたのに対し、2010年では豊後水道海域西部から四国西部陸域に向かって1日約2 kmもの遅い速度で伝播していた。また、2014年の誘発微動活動は長期的SSEの規模の違いを反映し2010年に比べ小規模であるが、活動域は2010年のときより東方にも広がっており、SSEのすべり面が東西方向にも異なっていたことを示唆する。このような長期的SSEによる影響は、豊後水道ほど顕著ではないが、東海SSE（2003~2005年、2013年）、志摩半島（2016年以降）でも見られる。

更に長期間の変化に注目すると、四国西部の広い範囲で2015年以降から微動活動度が低下しており、それは超低周波地震の網羅的検出結果とも調和的である（Baba et al., 2018）。この領域では、2004-2005年及び2012-14年ごろにわずかな微動活動の活性化が見られ、豊後水道長期的SSEからさらに東側に長期的SSEがゆっくり広がることによる影響と解釈されている（Takagi et al., 2016）が、それ以降しばらく長期的SSEが起きていなかったためかもしれない。一方、豊後水道長期的SSEによる顕著な地殻変動が始まる約1年前から同海域でわずかに微動活動が増加しており、先行的な滑りが生じていたことを反映している可能性がある。

Full automation for the CMT analysis of deep very low frequency earthquakes

*Akiko Takeo¹, Kazushige Obara¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

スロー地震の一種である超低周波地震は広帯域地震計の周期20–50秒前後で観測される。西南日本の豊後水道から東海地域にかけてのプレート境界においては深さ約35kmで深部超低周波地震が発生しており、低周波微動活動と同期していることが知られている。そのモーメントマグニチュードは3前半と小さいため既存のCMT解析 (Ito et al. 2009) における検出数は年間約50個である。この数は超低周波地震活動の地域性や微動活動との関連性を統計的に議論し、プレート境界非定常滑りの物理を明らかにするためには十分とは言えない。

そこで、本研究では新学術領域研究「スロー地震学」によって展開・維持されている広帯域臨時観測 BC-DENSE (Broadband Campaign for Deep Extent of Nankai Slow Earthquake) 20点の3成分記録及び防災科学技術研究所の広帯域観測網F-netの3成分記録を用いてCMT解析を行った。解析地域は豊後水道を含む四国西部 (2018/1–2020/7) と紀伊半島北東部 (2020/1–2020/7)、東海地域 (2020/4–2020/7)の3地域である。基本的な手法はGRiD MT (Tsuruoka et al. 2009; Takeo et al. 2010) と同じである。より多くのシグナルを自動的に検出し、かつ誤検出を少なくするよう従来の手法を改良し適用し、後述するように誤検出率約1%で年間500イベント以上の検出に成功した。

まず、CMT解析時の波形の重み付けについて再考した。臨時観測点は公園や学校の隅に設置していることが多く人間活動に伴うノイズが不定期に入る。また、超低周波地震は通常の地震と異なり連続的に発生しながら移動する特徴がある。そこで、周辺観測点上下動のRMS振幅分布から距離による重み付き平均を計算し推定RMS振幅とした。この推定RMS振幅とその観測点のRMS振幅の比を重みとして用いることで、イベントが連続してもノイズレベルに近い小さなシグナルを検出できるようになった。

次に、計算の高速化を行なった。OpenMPによる並列化やI/Oの統合を進めた結果、1地域1日のデータ解析時間が約80分、25並列では約4分程度となった。ただし、この時間はシグナル候補に対する100回のブートストラップを含むが、1秒へのダウンサンプルなどのデータの下処理は含まない。使用メモリは約1GBである。

最後に、超低周波地震を自動的に検出するためのアルゴリズムを検討し、条件A-Fを定義した。すなわち、A: $VR > 10\%$ 、B: $VR > \text{平面}VR - 3\%$ 、C: P軸とT軸のブートストラップ推定誤差の和 < 50 度、D: 通常の地震ではない、E: MT解独立5成分と地域平均MT解との相関係数の絶対値 > 0.5 、F: F1又はF2、F1: 3イベント/日以上、F2: 距離とHi-net 2-8 HzのRMS振幅の相関係数 < -0.5 、である。ここで条件Eは超低周波地震のメカニズムがプレート沈み込みと対応し各地域でほぼ一定であること、条件F1は超低周波地震がスロースリップイベント発生時に群発すること、条件F2は超低周波地震が低周波微動活動と同期することを利用している。

ブートストラップ計算が高速化されたこと、及び、条件B-Fの取捨選択を自動で行えることから条件Aの閾値を低く設定して小さなシグナルも可能な限り検出することができた。実際、条件Aを満たすもののうち、条件A-Cを満たすものの割合はわずかに約1%である。また、誤検出率も推定できるようになった。条件A-Eを満たすもののうち条件Fを満たさないものは約0.1個/日/地域である。条件F1を満たす日数は年間約30日であることから、条件A-Fを満たすもののうち誤検出数は年間約3個/地域と推定された。これはA-Fを満たす全検出数の約1%であり、カタログの約99%は信頼できることを示す。

以上の改良を行った結果、四国西部では約2年半で1029個、紀伊半島北東部では約半年で98個のイベントを検出した。東海地域では観測開始が遅かったことと一部の観測点の地震計が故障したことなどから条件A-Dを満

たイベントが13個と少なかった。その結果、条件E-Fがうまく適用できず検出数が0個になった。ただし、13イベントのうち4イベントは目視で低周波微動と同期した超低周波地震であると確認できた。今後は各超低周波地震イベントの震源時間関数を求めるほか、同時に発生する低周波微動の位置を詳細に決定し震源の広がりについて考察したいと考えている。

Detection and evaluation of tremor migration beneath Kii Peninsula

*Takuya Maeda¹, Kazushige Obara¹, Akiko Takeo¹, Takanori Matsuzawa²

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

西南日本やCascadiaなどで発生する深部低周波微動は、短期的スロースリップイベント(SSE)とともに Episodic Tremor and Slip (ETS ; Rogers and Dragert, 2003) を構成し、1日約10 kmの速度で、プレート形状の走向 (strike) 方向に移動することが知られている。このような移動する微動のメインフロントが通過した後に、比較的小規模で高速度の移動現象がしばしば確認されている。例えば、メインフロント移動の10~20倍の速度で反対方向に移動するRapid Tremor Reversal (RTR ; Houston et al., 2011) やメインフロント移動のおよそ100倍の速度でプレートの傾斜 (dip) 方向に移動するstreak (Ghosh et al., 2010) などが挙げられる。ここではこれらの様々な微動の移動現象をマイグレーションと呼ぶ。マイグレーションの特徴として、その移動方向や移動速度がマイグレーションの継続時間に依存することが知られている。例えば、西南日本では、継続時間が短いマイグレーションはdip方向、長い継続時間の場合はstrike方向に卓越する (Ide, 2012; Obara et al., 2012)。Cascadiaでも、時間窓が長くなるに従い、strike方向に移動するマイグレーションの割合が大きくなることが報告されている (Bletery et al., 2017)。

本研究では、微動マイグレーションの特徴をより詳細に明らかにするため、従来とは異なる手法により、複数の時間窓におけるマイグレーションの抽出と、マイグレーションの移動方向、移動速度、アスペクト比の推定を行った。ここでアスペクト比とは、1つのマイグレーションを構成する微動分布における、移動方向の長さとしてとそれと直交する方向の長さの比を指す。解析にはエンベロープ相関・振幅ハイブリッド法による微動カタログを用いた (Maeda and Obara, 2009)。解析対象地域は紀伊半島中部から北東部にかけての領域、解析期間は2001年1月~2020年5月とし、ETSだけでなく期間中に発生した小規模な活動も含めて解析を行った。解析に用いた時間窓は1h, 2h, 4h, 8hの4通りで、その半分の時間長で時間窓をずらしながら全期間について解析することにより、その時間窓の長さを継続時間とするマイグレーションの探索を行った。設定された時間窓の中に含まれる全ての微動が、ある一つの方向に移動すると仮定して、その移動方向を10度刻みで変化させ、移動方向に投影した距離と微動の発生時刻との相関係数が最大となる方向を推定した。この時、回帰直線からの残差が 2σ を超える微動源については外れ値として除去し、移動方向を再計算した。この回帰直線の傾きから、マイグレーションの速度を推定した。また、それぞれの時間窓において、外れ値を除いたデータからマイグレーションの重心を求めた。この重心を通る移動方向の直線と微動源との距離の標準偏差 σ' を計算し、移動方向の長さを時間窓内での移動距離、それに直交する横方向の長さを $\pm 3\sigma'$ としてアスペクト比を求めた。なおこの時、マイグレーションを構成する微動群から空間的に離れた点を外れ値として除去し、マイグレーションの方向と速度を再計算した。また、1つの時間窓における微動数が20個未満の場合及び、時間窓を4等分したいずれかにおいて微動源が3点未満の場合、マイグレーションとしては採用しないこととした。

約20年間の微動活動をまとめて解析した結果、マイグレーションの移動方向は、時間窓の長さによらずdip方向に卓越する。一方、移動速度は時間窓が1, 2, 4, 8 hのときにそれぞれ5, 3, 2, 1 km/h付近にピークを持ち、時間窓が長くなるに従って低下した。また、アスペクト比は、大部分のマイグレーションで1より大きく、時間窓の長さとともに増加傾向にあることから、マイグレーションの多くは移動方向に対して直交方向の広がりを持って進行していることが明らかになった。以上の結果を既往研究 (Obara et al., 2012) と比較するといくつか相違点が見られる。この違いは、既往研究では一次元的な移動を前提として、ETSなどの大規模活動中のマイグレーションを抽出したのに対し、本研究で小規模な活動も含めて解析し明らかにされたように、マイグレーションのほとんどが面的に進行する現象であることに起因する可能性がある。

Tectonic tremor activity along the Japan trench before the 2011 Tohoku-oki earthquake

*Hidenobu Takahashi¹, Hino Ryota¹, Naoki Uchida¹, Ryosuke Azuma¹, Susumu Kawakubo¹, Kazuaki Ohta², Masanao Shinohara³

1. Tohoku University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

近年、世界各地の沈み込み帯を中心に、通常地震と比べゆっくりとした断層のすべり現象が観測されるようになった(たとえば, Obara & Kato, 2016). 低周波微動(微動)はスロー地震の一形態と考えられており、南海トラフやカスケディアでは、想定される巨大地震震源域の深部もしくは浅部側で観測されている。微動は、卓越周波数や時定数の異なる超低周波地震(VLFE)やスロースリップイベントと、しばしば時空間的に近接して発生しており、広帯域のスロー地震現象の一側面を表していると考えられている(たとえば, Ide, 2008). 微動は海溝型巨大地震同様、プレート境界面上の断層のすべり現象である可能性が高く、その活動の時空間的な分布の把握は巨大地震震源近傍でのプレート境界面のすべりの時空間変化を捉えるという観点から重要である。

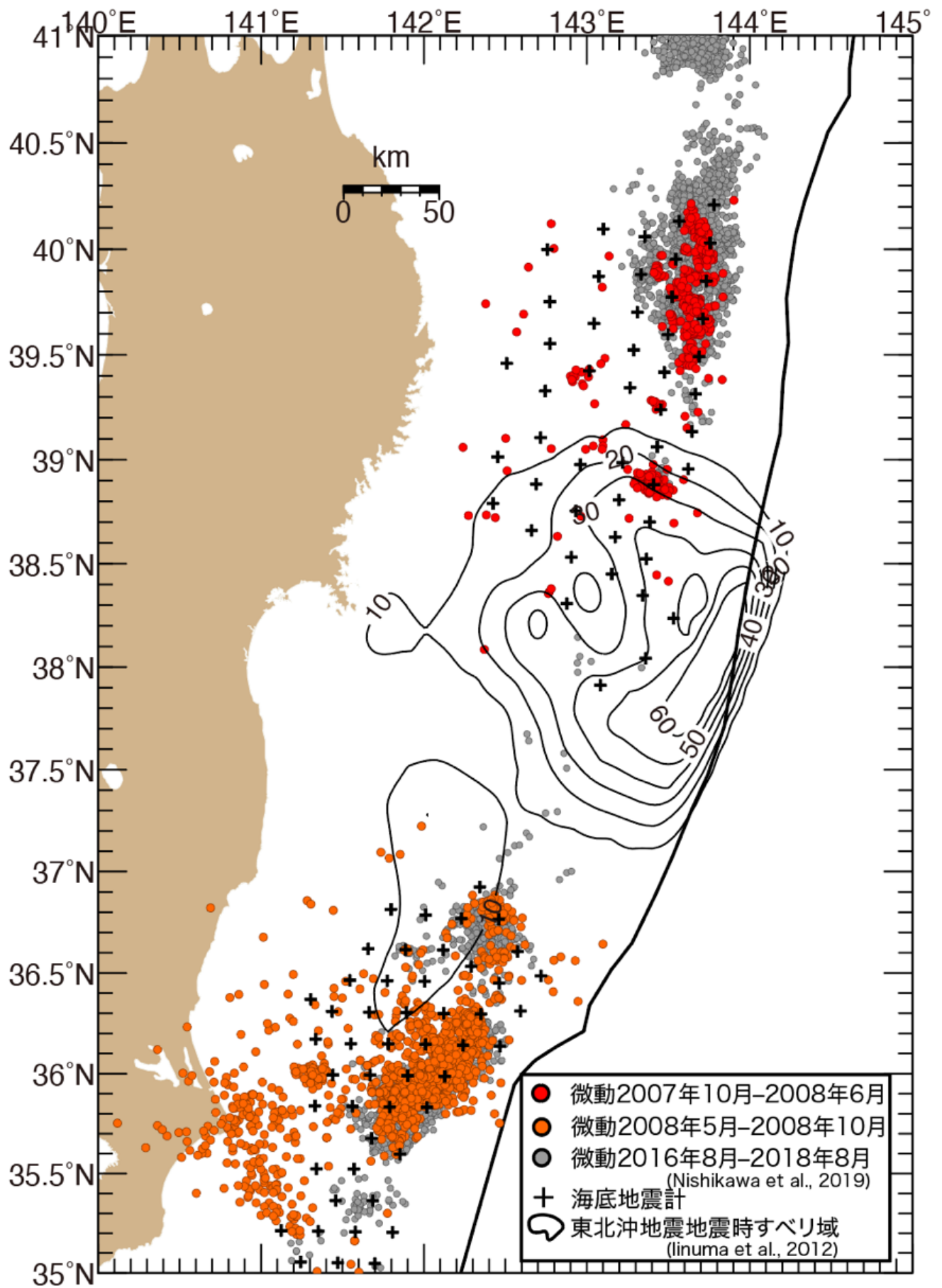
さらに、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)により、日本海溝沿いでも広く低周波微動が発生していることが明らかになったが(Tanaka et al., 2019; Nishikawa et al., 2019)、南海トラフなどと異なり、その発生深さの範囲は必ずしも大地震震源域の深さ範囲と棲み分けているわけではなく、複雑な空間分布をしており興味深い。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震以後の微動の活動は、この地震の余効変動の影響を何らかの形で受けている可能性もあり、東北沖地震発生以前の微動活動の理解は、微動と巨大地震との関連を考えるうえで極めて重要である。VLFEは東北沖地震前にも発生していたことが明らかになっている(Matsuzawa et al., 2015; Baba et al., 2020)ことから、東北沖地震前にも微動は発生していた可能性が高い。そこで、本研究では、東北沖地震前に日本海溝沿いで実施した海底地震観測のデータを用いて微動を検知し、その分布を明らかにする。

東北沖地震前の2007-2008年に設置されていた海底地震計記録に対して、エンベロープ相関法(e.g., Obara, 2002)を適用して微動検出を試みた。観測期間は2つに分けられ、前半(2007年10月16日-2008年6月22日)は38-40.5°Nの48観測点、後半(2008年5月20日-10月27日)は35-37°Nの45観測点が展開されていた。エンベロープ相関法は原理的に通常地震も同様に検出してしまうが、先行研究を参考に継続時間が20秒以上で検出されたイベントを微動と同定した。震源決定の際には、海底地震計直下の堆積層による走時遅延を観測点ごとに補正した。

その結果、岩手県沖(39.5-40.25°N)、宮城県沖(39°N)、そして福島・茨城県沖(35.5-37.0°N)で微動を検出した(図)。それら震央分布はNishikawa et al. (2019)と概ね一致し、海溝軸から50 km程度陸側に分布している。また、岩手県沖と宮城県沖においては一週間以内で続発する微動クラスターを6つ観測し、それぞれの活動期の中で~20 km/dayで震源が移動していることも確認できた。なお、福島・茨城県沖での微動活動に関しては、通常地震との弁別が不完全であり、詳細な特徴を明らかにするために、微動の判別条件を検討しているところで、図の震央分布も暫定的なものとなっている。

S-net(2016-18年)および本研究(2007-08年)による微動活動を比較するうえで、微動との同期が期待できるVLFEの2003-2018年の連続した活動の記録(Baba et al., 2020)が参考になる。東北沖地震の地震時すべり域内である宮城県沖では、VLFEは地震前は9ヶ月に一度程度の間隔で発生していたが、東北沖地震後は静穏化している。一方で、地震時すべり域の外側となる岩手沖や福島・茨城沖では、2011年の地震後にVLFEの活動度が上昇している。これらを念頭に微動活動に着目すると、宮城県沖での微動活動はVLFEと同様に、東北沖地震後に低くなっていると期待されるが、実際2016-2018年の期間では宮城県沖の微動発生数は岩手県沖の0.5 %

であるのに対し，2007-08年では37.7%であった．これは巨大地震の地震地時すべり域が地震後に再固着している可能性を示唆する．東北沖地震前の福島・茨城県沖では，2008年7月19日に福島県沖で発生した M6.9のプレート境界型地震の直後から顕著なVLFEの活発化が観られるが，我々の海底地震観測の期間はこの時期に対応しており，これに伴う微動活動が捉えられていると考えられる．



Detailed tremor activity beneath the eastern Shikoku and Kii Channel, Japan, revealed by dense seismic observation

*Kazuaki Ohta¹, Katsuhiko Shiomi¹, Takanori Matsuzawa¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフ沈み込み帯に発生する深部微動はスロースリップと同期して頻繁に観測され、巨大地震の想定震源域の下限設定の根拠にもなっている。活動が盛んでよく研究されている四国西部の微動と比べて東部の微動は活動が低調であり、その震源分布には不明瞭な部分が多い。また四国と紀伊半島の間にある紀伊水道は微動の観測されないギャップとなっている一方、地殻変動データからは長期的スロースリップの存在が報告されている。本研究では、四国東部に展開した稠密地震観測データを用いて四国東部ならびに紀伊水道下の微動活動の詳細を調べた。

四国東部における稠密観測は、文部科学省による「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の一環として、2015年10月から2019年9月までの4年にかけて展開され、Hi-netの観測網の空白域を補うように15-24点の臨時観測点に固有周期1Hzの3成分短周期地震計が設置された。本研究ではこの臨時観測データおよび同期間の周辺16点のHi-net速度波形データにエンベロープ相関法(Obara, 2002)を適用し、微動の検出と震源決定を行なった。解析にはIde (2010)の震源決定コードを用いた。

得られた四国東部の微動の震源分布の特徴は明瞭な線状構造である。微動は北西-南東に線状の列をなすおよそ15の小クラスタから構成されており、大部分はN50°-70°Wの方角を示した。また、活動を見ると四国東部内で完結する小規模な活動がおよそ1ヶ月毎、東部から中部にかかる大規模な活動がおよそ3ヶ月毎に起こっていた。想定震源域の下限の議論ともなる香川県下の最北端の微動クラスタは孤立的、或いは小規模な活動の一部として発生することはあっても大規模な活動と陽に連動する様子は見られなかった。

紀伊水道においては、四国東部から紀伊半島の微動分布をそのまま繋ぐような震源を持つ微動活動が確認された。報告されている長期的スロースリップイベントの主すべりの北端付近にあたる(Kobayashi, 2014)。活動は低調であるが、比較的明瞭な活動として、4年間の観測期間中に3-7日程度の継続期間を持つ小規模な活動が3回観測された。これらはいずれも紀伊水道下から開始し、東西の両方向に震源が伝播する様子が見られた。また、これらの活動は四国・紀伊半島の微動のいずれとも連動せず、独立した活動であった。

微動分布の線状配列はプレート運動に起因すると考えられており、四国西部では過去と現在のフィリピン海プレートの沈み込み方向を反映する二種類の配列が報告されている(Ide, 2010)。四国東部の微動分布はほとんどが東西寄りの現在のプレート運動の向きに近く、西部と比べても比較的”若い”微動であると考えられる。また、北端の微動クラスタはプレート境界すべりの一部としての連動性は低いと考えられるが、その南側(up-dip側)の微動の空白域の挙動は不明であり、さらなる調査が必要であろう。紀伊水道下のプレート構造の詳細はまだよくわかっておらず、Ide et al.(2010)ではプレートが断裂している可能性に言及している。紀伊水道の独立した微動活動はこのような複雑なプレート構造を反映しているのかもしれない。

Room B | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes**[S09]AM-2**

chairperson: Keisuke Yoshida (Tohoku University), chairperson: Tomoaki Nishikawa (DPRI, Kyoto University)

Fri. Oct 30, 2020 10:30 AM - 12:00 PM ROOM B

- [S09-12] Earthquake swarm detection along the Hikurangi Trench, New Zealand: insights into the relationship between seismicity and slow slip events**
○Tomoaki Nishikawa¹, Takuya Nishimura¹, Yutaro Okada² (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University)
10:30 AM - 10:45 AM
- [S09-13] Detection of shallow very low frequency earthquakes and estimation of energy rate of low frequency tremors in the Costa Rica subduction zone**
○Satoru Baba¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Akiko Takeo¹, Geoffrey A. Abers²
(1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Cornell University)
10:45 AM - 11:00 AM
- [S09-14] Events enduring and scaling in cellular automaton models due to competing timescales of stress accumulation and rupture propagation**
○Kota Fukuda¹, Takahiro Hatano², Kimihiro Mochizuki¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Space Science Osaka University)
11:00 AM - 11:15 AM
- [S09-15] Detection of Temporal Change in Seismic Attenuation near Earthquake Source during Intense Fluid-Driven Seismicity following 2011 Tohoku-Oki earthquake**
○Keisuke Yoshida¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)
11:15 AM - 11:30 AM
- [S09-16] Relationship between migration diffusivity and the duration of earthquake swarms**
○Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹ (1. Graduate school of Science and Technology, Hirosaki University)
11:30 AM - 11:45 AM
- [S09-17] Simulation of inland earthquake activity using Coulomb stress change during the megathrust earthquake cycle in southwest Japan**
○Tsukasa Mitogawa¹, Takuya Nishimura² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)
11:45 AM - 12:00 PM

Earthquake swarm detection along the Hikurangi Trench, New Zealand: insights into the relationship between seismicity and slow slip events

*Tomoaki Nishikawa¹, Takuya Nishimura¹, Yutaro Okada²

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

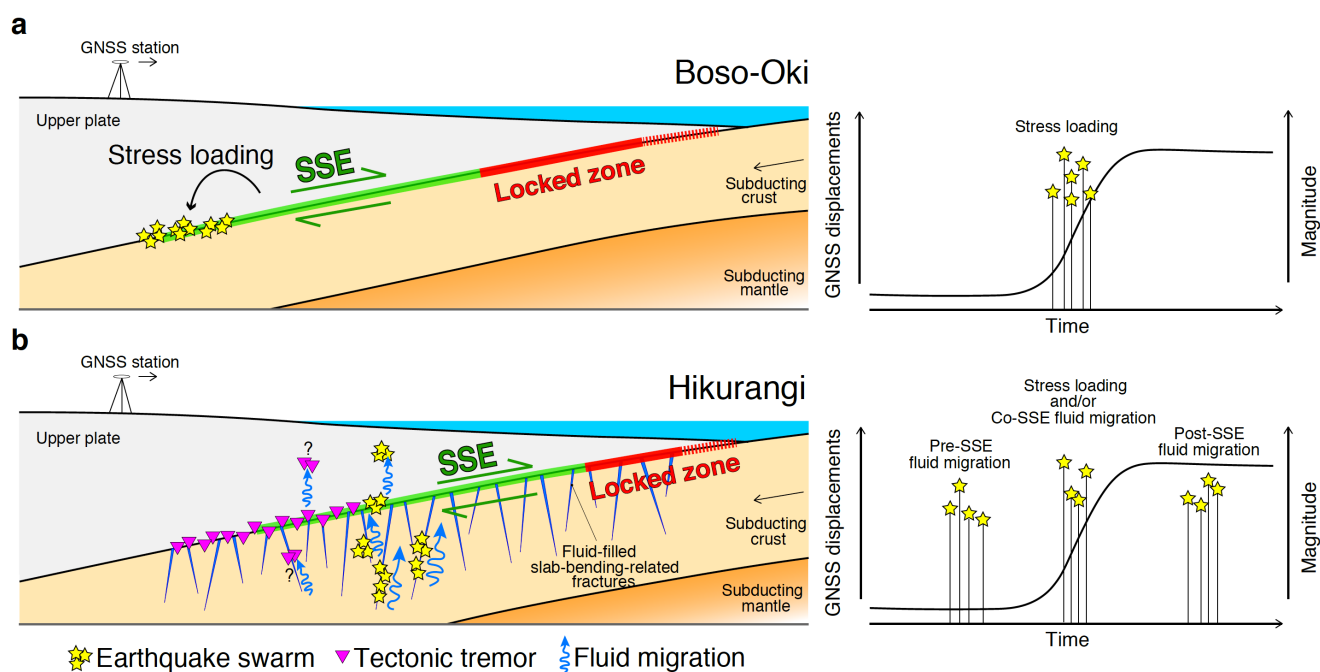
Earthquake swarms, which are anomalous increases in the seismicity rate without a distinguishable mainshock, often accompany aseismic transients, such as fluid migration and episodic aseismic slip along faults. Investigations of earthquake swarm activity can provide insights into the causal relationship between aseismic processes and seismicity. Furthermore, earthquake swarms can be used as potential indicators of aseismic transients that have previously escaped detection. For example, attempts have been made to detect offshore SSEs by examining the earthquake swarm activity in subduction zones, such as the Aleutian and Japan trenches (e.g., Reverso et al., 2015; Nishikawa et al., 2019).

Slow slip events (SSEs) along the plate interface in the Hikurangi Trench, New Zealand, are often accompanied by intensive earthquake swarms. However, the detailed spatiotemporal distribution of these earthquake swarms is still unclear. Here we apply the earthquake swarm detection method published in Nishikawa and Ide (2018) to seismicity along the northern and central Hikurangi Trench and create a new earthquake swarm catalog. We then compare our new earthquake swarm catalog with Global Navigation Satellite System (GNSS) time series data, and existing SSE and tectonic tremor catalogs, to both elucidate the causal relationship between aseismic transients and seismicity and detect new aseismic transients.

We extracted M3.0 or larger earthquakes from the GeoNet earthquake catalog for the 1997–2015 analysis period. We selected the location of our study region to encompass the source regions of shallow SSEs along the northern and central Hikurangi Trench. We then applied the earthquake swarm detection method published in Nishikawa and Ide (2018) to the seismicity. This method objectively distinguishes earthquake swarms from ordinary mainshock–aftershock sequences using the epidemic-type aftershock sequence model (Ogata, 1988; Zhuang et al., 2002). As a result, we detected 119 earthquake swarm sequences along the Hikurangi Trench. Most of the detected earthquake swarm sequences were intraplate events, and their epicenters were mainly distributed along the east coast of the North Island, with a sparse inland distribution.

We then compared the new earthquake swarm catalog with GNSS time series data, and existing SSE (Wallace & Beavan, 2010; Wallace et al., 2012; Wallace & Eberhart-Phillips, 2013; Wallace et al., 2016) and tectonic tremor (Todd & Schwartz, 2016; Todd et al., 2018; Romanet & Ide, 2019) catalogs. We detected eastward GNSS displacements caused by SSEs following the method published in Nishimura et al. (2013) and Nishimura (2014). We found that 14 of the detected earthquake swarm sequences occurred within 14 days of the SSE occurrence periods and were located either within or on the periphery of the SSE source regions. Furthermore, the detected earthquake swarms often occurred close in time to transient eastward GNSS displacements potentially due to SSEs that have previously escaped detection. The earthquake swarms sometimes preceded or succeeded the GNSS displacements by more than a week, suggesting the earthquake swarm seismicity rate in the Hikurangi Trench is not correlated with SSE slip or stress loading rates. Similar to earthquake swarms, tectonic tremor bursts were sometimes delayed by more than a week with respect to the transient GNSS displacements.

SSE-induced stress loading is not a plausible triggering mechanism for these pre-SSE and post-SSE earthquake swarms. We instead propose that high fluid pressure within the slab, which accumulated before the SSEs, may have caused intraplate fluid migration, which in turn triggered the pre-SSE earthquake swarms (see Figure). Using an earthquake focal mechanism analysis, Warren-Smith et al. (2019) inferred that there was a build-up of fluid pressure within the subducting slab before SSEs in the Hikurangi Trench. Such an accumulation of pressurized fluids may break a low-permeability seal, allowing fluid migration along preexisting intraplate faults prior to an SSE, which reduces the shear strength of the faults (e.g., Raleigh et al., 1976; Yamashita, 1998) and potentially triggers pre-SSE earthquake swarms. Furthermore, the occurrence of an SSE along the plate boundary enhances the permeability of the surrounding rocks via strain-induced fracture opening (Rivet et al., 2011). This may induce fluid movement/drainage from intraslab faults to the plate boundary and overriding plate after an SSE has occurred (Warren-Smith et al., 2019). Such post-SSE fluid migration may trigger post-SSE earthquake swarms and delayed tremor bursts.



Detection of shallow very low frequency earthquakes and estimation of energy rate of low frequency tremors in the Costa Rica subduction zone

*Satoru Baba¹, Kazushige Obara¹, Shunsuke Takemura¹, Akiko Takeo¹, Geoffrey A. Abers²

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Cornell University

Slow earthquakes, such as low frequency tremors (LFTs), very low frequency earthquakes (VLFs), and slow slip events (SSEs), are fault slip events with slower slip speed than regular earthquakes and occur mainly in subduction zones. In the Costa Rica subduction zone, thrust type large earthquakes with Mw of 7–8 occur repeatedly. Jiang et al. (2012; 2017) pointed out that large slip areas of SSEs were distributed in both downdip and updip areas of the coseismic slip of large earthquakes. Outerbridge et al. (2010) located LFTs in downdip of the coseismic slip area of large earthquakes, whereas Walter et al. (2011; 2013) found LFTs and VLFs that occur in the updip.

To clarify the relationship between the distributions of slow earthquakes and large regular earthquakes, we detected VLFs in the Costa Rica subduction zone by the matched-filter technique. We used waveforms of a temporary seismic network, Tomography Under Costa Rica and Nicaragua (TUCAN; Abers and Fischer, 2003), recorded from August 2004 to January 2006. We computed synthetic waveforms at stations from each virtual source grid using OpenSWPC (Maeda et al., 2017) and a 3D velocity model. The grids were widely distributed on the plate boundary beneath both onshore and offshore areas. The focal mechanisms were assumed to be consistent with the geometry of the plate boundary and with plate motion. After applying a band-pass filter of 0.02–0.05 Hz, we calculated cross-correlation coefficients between the synthetic and observed seismograms every 1 s, and selected events whose cross-correlation coefficients exceeded the threshold defined as 9.5 times the median absolute deviation of the distributions. After removing false detections, we also estimated seismic moments and durations of detected VLFs based on the synthetic waveforms.

As a result, we detected 76 VLFs mostly in September 2004 and August 2005. Most of VLFs are located near the trench axis, in the depth range of 5–10 km, updip of the coseismic slip areas of large earthquakes. Furthermore, we found LFT signals in a frequency range of 2–8 Hz within the same time windows of VLFs. We estimated energy rate functions of such LFTs assuming that an LFT occurs in the same location as the accompanying VLF. Energy rate functions of LFTs were evaluated based on envelope waveforms in a frequency range of 2–8 Hz. The range of energy rates of LFTs is $10^{3.5}$ – $10^{5.5}$ J/s. We estimated the scaled energy from the ratio between the seismic energy rate of an LFT and the seismic moment rate of the corresponding VLF. The range of scaled energy of slow earthquakes in the Costa Rica subduction zone is 10^{-9} – 10^{-8} , which is similar to that of shallow slow earthquakes in the Nankai subduction zone (Yabe et al., 2019).

Events enduring and scaling in cellular automaton models due to competing timescales of stress accumulation and rupture propagation

*Kota Fukuda¹, Takahiro Hatano², Kimihiro Mochizuki¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Space Science Osaka University

普通の地震の破壊伝播スケールはプレート運動による応力蓄積の時間スケールに比べるととても小さい為、従来のシミュレーションにおいては、破壊伝播中のローディング効果は殆ど無視されてきた。しかし、継続時間が長く、ストレスドロップの小さいイベントである微動においてはこの効果が無視できない可能性がある。我々はこの効果を定量的に評価する為の物理パラメータとして"応力解放レートと応力蓄積レートの比"に注目した。このパラメータは"応力蓄積の時間スケールと破壊の時間スケールの比"と考えることもでき、破壊伝播中のローディング効果を表す。観測データを用いてこのパラメータのオーダー評価を行うと、普通の地震に比べて、SSE発生時の微動ではこのパラメータは5~6桁大きくなった。したがって、我々は従来より地震の統計性質(GR則や大森則)をよく再現するとして知られているセルオートマトンモデルである

Olami-Fraser-Christensen(OFC) モデルにこのパラメータを導入して新しいモデルを作成した。この新しいモデルでは、先のパラメータの増加に伴って、永続的な継続時間と共に、モーメント M_0 と継続時間 T に関するスケーリング関係として $M_0 \propto T$ という結果が得られた。このような結果は、破壊伝播と応力蓄積の時間スケールの競合が、普通の地震とは異なる微動のスケーリング特徴を引き起こしている可能性を示唆している。また、本発表ではこのパラメータの統計分布への影響についても紹介する。

Detection of Temporal Change in Seismic Attenuation near Earthquake Source during Intense Fluid-Driven Seismicity following 2011 Tohoku-Oki earthquake

*Keisuke Yoshida¹

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

The occurrence of earthquakes may be heavily influenced by increases in pore pressure as it decreases fault strength (Hasegawa et al., 2005; Hubbert & Rubey, 1959; Nur & Booker, 1972; Sibson, 1992). It is possible that the seismogenic zone has a larger amount of fluids than the surrounding crust (Mindaleva et al., 2020); as such, it is crucial to develop a means of monitoring the behaviour of fluid at depth to understand the mechanisms influencing earthquake occurrence.

This study uses a novel, simple approach to examine near-source attenuation in the focal region of intense swarm activity in the Yamagata-Fukushima border region, Japan, which is considered to be triggered by fluid movement following the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Terakawa et al., 2013; Yoshida et al., 2016). Whilst the obtained Q^{-1} values vary over a wide range, their median values exhibit characteristic temporal variation; Q^{-1} was large for the initial ~50 days, and significantly decreased, becoming almost constant after 50 days. These temporal patterns are similar to those independently obtained for background seismicity rates, b-values, stress drops, and fault strength (Yoshida et al., 2016, 2017, 2019; Yoshida & Hasegawa, 2018). The synchronous change supports the hypothesis that swarm was triggered by fluid movement following the 2011 Tohoku-Oki earthquake, and suggest that source and seismicity characteristics and seismic attenuation were altogether affected by pore pressure.

The results from this study suggest that seismic attenuation intensity is higher near the earthquake source than in the surrounding crust in some situations. Localised higher attenuation near the source produces a systematic estimation error of earthquake source effects; the attenuation is erroneously estimated as a part of the earthquake source signal. It is therefore important to examine the intensity and the frequency dependence of near-source attenuation to accurately estimate earthquake source properties.

The method used in this study successfully detected a high attenuation anomaly in the initial period of the swarm, predicted by the fluid-diffusion model proposed in previous studies (Yoshida et al., 2016, 2017, 2019; Yoshida & Hasegawa, 2018). The present method would be helpful to monitor Q^{-1} at seismogenic depths in various regions and understand the states of potential seismogenic zones and the occurrence mechanism for earthquakes.

Relationship between migration diffusivity and the duration of earthquake swarms

*Yuta Amezawa¹, Takuto Maeda¹, Masahiro Kosuga¹

1. Graduate school of Science and Technology, Hiroshima University

はじめに

群発地震は、本震のような明瞭な最大規模の地震を欠き、地震活動が一定期間継続する現象である。その継続期間は数時間から数年と様々であるが、非大森則的な地震活動の時間継続特性を評価することが難しいため、群発地震の継続期間とそれ以外の活動様式とを関係付ける明確な指標は存在していない。ゆえに、群発地震の継続期間を規定する要因を調べることは、群発地震の発生と継続についての物理的メカニズムを解明し、活動の時空間発展を予測するために重要である。

一方で、群発地震に伴い震源マイグレーション（地震活動域の時空間的移動）が観測される場合がある。震源マイグレーションは、拡散モデル（Shapiro et al., 1997）で説明され、その拡散係数により活動の時空間発展の特徴を定量化できる。継続期間と拡散係数を対比させた議論を行った研究例もあるが、個別の群発地震に対する検討に留まっている。

そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震により東北日本内陸で誘発された複数の群発地震について、その継続期間と震源マイグレーションの拡散係数を統一的基準のもとで推定し、両者の関係を調べた。

方法

解析には気象庁一元化震源カタログを用い、東北日本内陸の群発地震のうち震源マイグレーションが観測された森吉・角館・月山・仙台・米沢－喜多方周辺での活動について、2011/3/11から2019/12/31に発生したマグニチュード1以上、20 km 以浅の地震を扱った。

震源マイグレーションに対する拡散モデルの適用は、空間原点と時間原点からの距離と経過時間をデータとして行う。本研究では、時間原点は群発地震の最初の地震の発生時刻とし、空間原点は以下のように探索した。まず、間隔 0.2 km で分割したグリッドを仮の空間原点とする。次に、時間順の10地震毎に、仮の空間原点からの距離の最外縁（震源マイグレーションの前線）位置を、距離分布の四分位範囲内での95パーセンタイル値として決定する。その最外縁データに拡散モデルを当てはめてRMS残差を計算し、残差が最小となる空間原点位置とその時の拡散係数を、対象とする群発地震活動を説明する拡散モデルの最適値とした。

群発地震の継続期間は、マグニチュード1以上の地震の積算数が最終的な積算数の90%に達した時点までとし、これをEVT90 [day] と定義した。なお、現在も活動が継続しているものは現時点での積算数を最終的な積算数とした。

結果

群発地震の継続期間と震源マイグレーションの拡散係数のそれぞれ対数には、負の相関があることが明らかになった（Fig.1）。両者の関係の冪指数は-0.5から-1.0であり、拡散係数が小さい（大きい）ほど、群発地震の継続期間は長期（短期）であった。推定された拡散係数の値の範囲は $0.01 - 5 \text{ m}^2/\text{s}$ で、先行研究の推定値からの大きな逸脱はない。

さらに、世界各地の群発地震について、先行研究で求められた拡散係数と継続期間の関係を調べた。継続期間は先行研究に記述があればそれを用い、なければ活動時系列などから概算した。本研究と同領域のものには我々が求めたEVT90を用いた。その結果、本研究と同様の負の相関が成立することを確認した（Fig.2）。

議論

Fig.2のプロットには火山・非火山・地熱地域が含まれることから、群発地震発生域のテクトニックな条件に関わらず、負の相関は一般的に成り立つ可能性がある。ただし、Fig.1の分布は1本の直線で近似可能であるのに

対し、Fig. 2の分布には折れ曲り点があるようにも見える。

群発地震の継続期間と震源マイグレーションの拡散係数の関係は、特定の場合についてはいくつかの解釈が行われている。例えば、活動が短期終了するものについて、水などの低粘性流体によって比較的高速な震源マイグレーションを伴う群発地震が駆動されたという解釈 (Shelly et al., 2016) や、活動が長期継続するのは、硬質な深成岩による低透水性な環境のためであるという解釈 (Hauksson et al., 2019) がなされている。

先行研究での解釈の前提となっているように、十分高い間隙圧が維持される時間を群発地震の継続期間と考えると、継続期間は流体の粘性が比較的小さい (大きい) 場合は短期化 (長期化)、地殻の透水性が小さい (大きい) と長期化 (短期化) すると解釈できる。すなわち、拡散係数は流体の粘性や地殻の透水性を反映すると考えられ、これらは群発地震の継続期間を規定する要因の一部だと考えられる。

謝辞

本研究では気象庁一元化震源カタログの震源データを使用しました。記して謝意を表します。

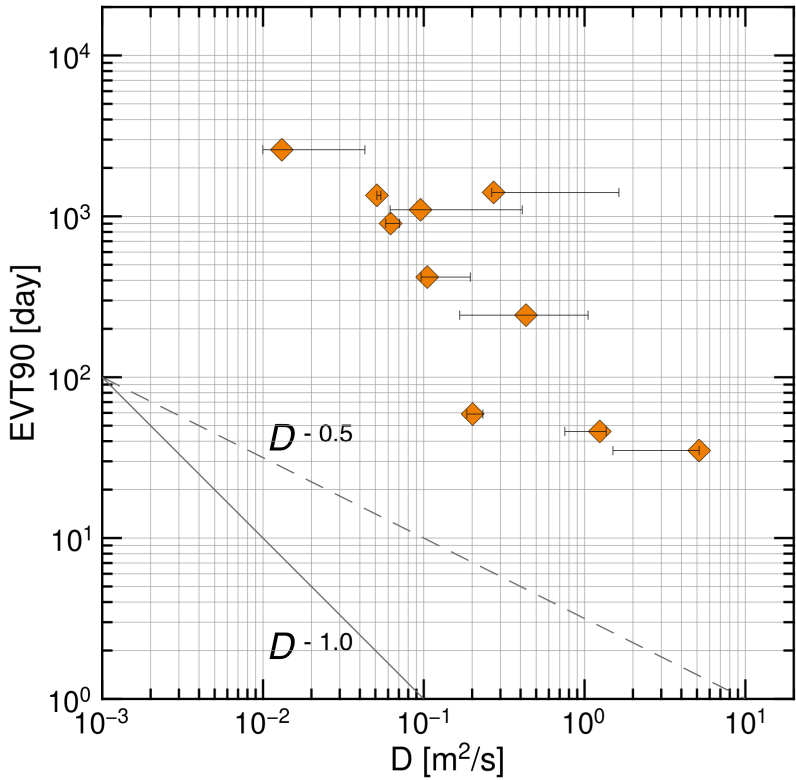


Fig.1 Scatter plot between EVT90 and D value. Orange diamonds denote the points of D value and EVT90 of each region estimated in this study. Black bars indicate the range of D values in the top 25% of the smallest order of fitting RMS.

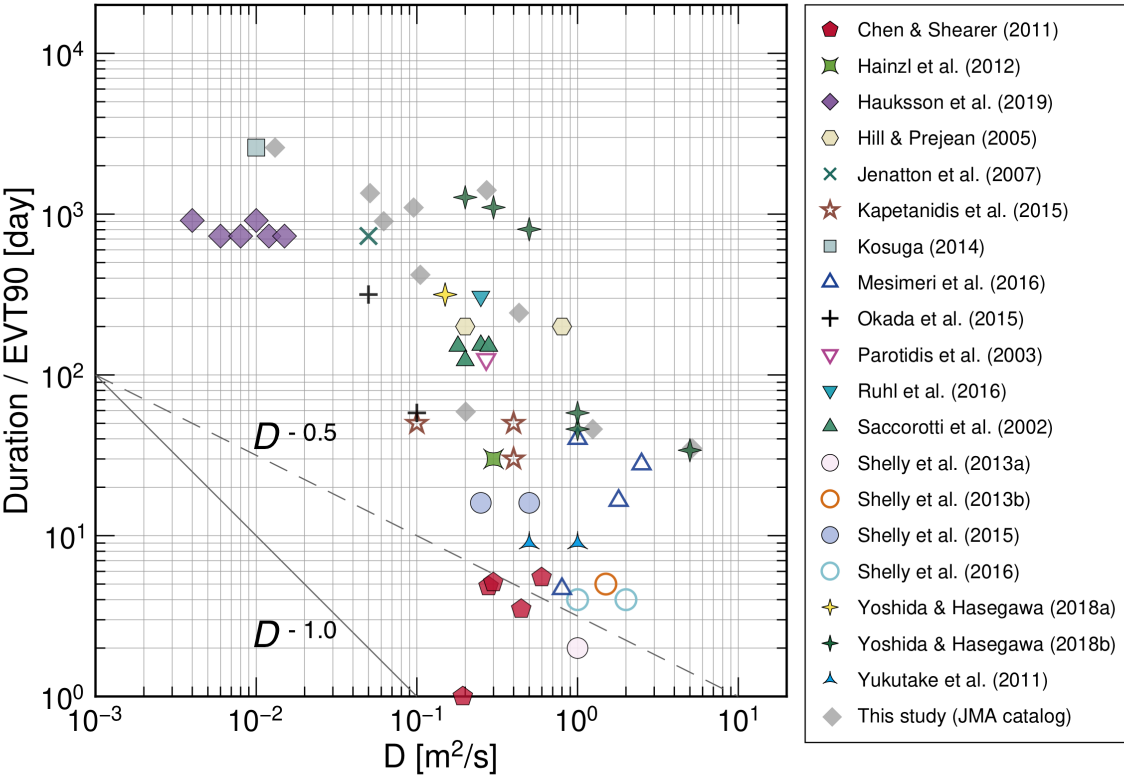


Fig.2 Scatter plot between the duration and D value previously reported in various environment worldwide. Each symbol denotes the point of D value and duration (or EVT90). The symbols indicate the previous studies in the legend. Light gray diamonds are the same as the plotting points in Fig.1.

Simulation of inland earthquake activity using Coulomb stress change during the megathrust earthquake cycle in southwest Japan

*Tsukasa Mitogawa¹, Takuya Nishimura²

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

西南日本では世界的に類のない詳細な地震履歴によって、南海トラフ沿いのメガスラスト巨大地震が約100-200年周期で発生し、この地震の約50年前から10年後にかけて内陸大地震が活発化する傾向が明らかとなっている。このような傾向はメガスラスト地震が内陸部に応力変化をもたらすことで内陸地震の発生時期を調整しているという仮説のもと、CFS (Coulomb Failure Stress) によって説明する数値モデルが提案されてきた。しかし、先行研究のモデルは近年GNSS (Global Navigation Satellite System) 観測によって明らかとなった現在の地殻変動は考慮されていない。本研究では観測された地殻変動を再現するためにGNSSデータから推定されたブロック間断層の形状とすべり速度 (Nishimura et al., 2018) を組み込んだ。そして、内陸断層間での応力変化も考慮したCFSを用いてメガスラスト地震サイクル中の内陸地震活動のシミュレーションを行った。媒質は、弾性層厚さを40 kmの弾性一半無限マクスウェル粘弾性水平二層構造を仮定し、計算にはFukahata and Matsu'ura (2006)のコードを使用した。内陸断層の応力源はメガスラスト断層と内陸断層のそれぞれでの固着と滑り(地震)に分けられる。地震間の固着は、メガスラスト断層にはNishimura et al. (2018)のバックスリップ速度を与え、内陸断層にはブロック間相対運動に0.1を乗じたものを与える。地震時の滑りは、メガスラスト断層では100年周期で蓄えられたバックスリップを全て解放するように滑りを発生させ、内陸断層では内陸断層面に一様滑り $D (=2 \times 10^{-5} \times \text{断層長さ})$ を与えたときのCFSの絶対値を断層強度とし、断層強度を超えた時にCFSが0に戻るよう滑りを発生させる。ただし、内陸断層での地震が完全に周期的になることを避けるために断層強度は標準偏差で5%の摂動を与える。このような条件のもと、数千回のメガスラスト地震サイクル中の内陸断層での地震活動のシミュレーションを行うことでメガスラスト地震サイクル中の内陸地震の発生時期に関する一般的な傾向を調べた。なお、西南日本の見かけの摩擦係数はかなり小さい可能性が指摘されているため(例えば、Shikakura et al. 2014; Mitogawa and Nishimura, 2020)、見かけの摩擦係数は0とした。シミュレーションの結果、四国や近畿南部、山陰地域の内陸断層で歴史地震に見られるような地震前後に活発化する傾向が得られた。一方で、九州や近畿北部ではメガスラスト地震サイクルが内陸地震の活動時期へ与える影響が小さく、地震間はほぼ一定の割合で内陸地震が発生する。次に、四国と山陰、近畿の内陸断層に対して地域毎に内陸地震の発生時期を調べた。四国の内陸断層ではメガスラスト地震後12年から内陸地震が発生し始めるが、地震後50年までに発生する地震はこの地域の全地震の約3%に過ぎない。地震後約50年から約70年後にかけて1年毎の発生割合は急激に増加し、その後次の地震まで徐々に発生割合が増加する。また、山陰地域の内陸断層ではメガスラスト地震後20年は全く地震が発生せず、その後徐々に内陸地震が発生し、50年後以降で発生割合がほぼ一定となるパターンが得られた。一方、近畿の内陸断層では全内陸地震のうち約20%がメガスラスト地震と同時に内陸地震が発生するが、歴史地震で見られるような地震後約10年の間での活発化の傾向は見られない。ただし、本モデルで仮定した摩擦係数0や弾性層厚さ40 kmなどのパラメータは確定的なものではないため、これらのパラメータの影響についても検討する必要がある。

Room B | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes**[S09]PM-1**

chairperson:Koichiro Obana(JAMSTEC), chairperson:Masashi Ogiso(MRI)

Fri. Oct 30, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-18] Master event location estimation method using seismic amplitude: application to volcanic tremors occurred at Meakandake volcano○Masashi Ogiso¹, Kiyoshi Yomogida² (1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2.Hokkaido Univ.)

1:00 PM - 1:15 PM

[S09-19] Estimating Earthquake Rupture Process Using Second Degree Moments ~Application to a swarm-like seismicity in the northern Ibaraki and Iwaki areas~○Naoto Yokotani¹, Aitaro Kato¹, Kazushige Obara¹, Shin'ichi Sakai¹, Takashi Iidaka¹, Tetsuya Takeda² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo., 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:15 PM - 1:30 PM

[S09-20] Relationship between the subducting plate boundary and fault geometry of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand, based on high precision aftershock distribution○Yuta Kawamura¹, Satoshi Matsumoto¹, Tomomi Okada², Miu Matsuno², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato², Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard H Sibson⁷
(1.Kyushu University, 2.Tohoku University, 3.Kyoto University, 4.GNS Science, 5.Victoria University of Wellington, 6.University of Wisconsin - Madison, 7.University of Otago)

1:30 PM - 1:45 PM

[S09-21] Faults geometry of outer-rise normal-faulting earthquakes in the central Japan trench based on the ocean bottom seismograph observations○Koichiro Obana¹, Tsutomu Takahashi¹, Yojiro Yamamoto¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1.JAMSTEC)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-22] Relative hypocenter determination using wave correlation around P-wave first motion with sampling frequency of 10 kHz○Yuki Noda¹, Yoshihisa Iio² (1.Kyoto University Graduate School of Science, 2.Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

2:00 PM - 2:15 PM

Master event location estimation method using seismic amplitude: application to volcanic tremors occurred at Meakandake volcano

*Masashi Ogiso¹, Kiyoshi Yomogida²

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Hokkaido Univ.

地動振幅のみを利用した震源決定法(Amplitude source location: ASL)は、火山性微動をはじめとした相の着信時を利用した震源決定が困難なイベントの震源推定に広く用いられている。ASL法ではサイト補正を行った観測振幅の空間分布から震源位置を推定するため、サイト特性の推定精度が震源位置の精度に多大な影響を与える。そこで、本研究では、振幅比を用いてサイト特性を除去し、基準イベントの震源に対する相対的な位置を推定するという新たな手法を提案する。

定式化の概要は次の通りである。同一観測点において、震源位置の基準となるマスターイベントの観測振幅とサブイベントの観測振幅の比は、マスターイベントとサブイベントの震源振幅項の比と距離減衰及び内部減衰項の比の積で表現できる。その際、マスターイベント及びサブイベントの震源距離の差がそれぞれの震源距離に比べてごく小さいという近似を行い、また、両辺の対数を取ることによって、震源振幅の比及び相対震源の位置(3成分)の4成分を未知数とする線形の方程式が得られる。したがって、4点以上の観測データがあれば標準的な最小二乗法を用いて相対震源の位置を推定できる。本研究の定式化は走時を用いたマスターイベント法(例えばAoki, 1974, JPE)と同様の考え方に基づいており、振幅を用いたマスターイベント法と呼ぶことができる。

この振幅を用いたマスターイベント法を用いて、2008年11月16日に北海道東部の雌阿寒岳で発生した火山性微動の震源推定を行った。図(a)に観測波形を示す。この火山性微動はOgiso and Yomogida (2012, JVGR)によってASL法で震源が推定され、phase1~3における震源域が異なっていることがわかっている。Ogiso and Yomogida (2012) と異なる1次元の速度・減衰構造を導入してASL法を適用したところ、Ogiso and Yomogida (2012)と同様の結果が得られた(図b)。本研究で提案する相対震源決定を行ったところ、各phaseの震源域のまとまりがASL法の結果よりも向上し、また、震源域のすみ分けの様子がASLの結果とは異なることがわかった(図c)。この微動はTakahashi et al. (2018, JVGR)による低比抵抗領域で発生し、また、クラックの開口を示唆する地殻変動が重畳していたことがわかっている(Aoyama and Oshima, 2015, EPS)。Ogiso and Yomogida (2012)ではphase1からphase2にかけて微動震源が深部に移動し、その後phase3にかけて北東方向に移動したと解釈されるが、本研究の結果に基づくとphase1の微動が低比抵抗域の南東端で発生し、その後、phase2と3の間に深部から浅部へ移動したと解釈される。Phase2は低比抵抗域の深部で活性化した火山性流体が地殻変動を引き起こしつつ上昇する際の微動を、phase3は上昇した流体が浅部で発生させた微動をそれぞれ観測したというモデルが想定できる。

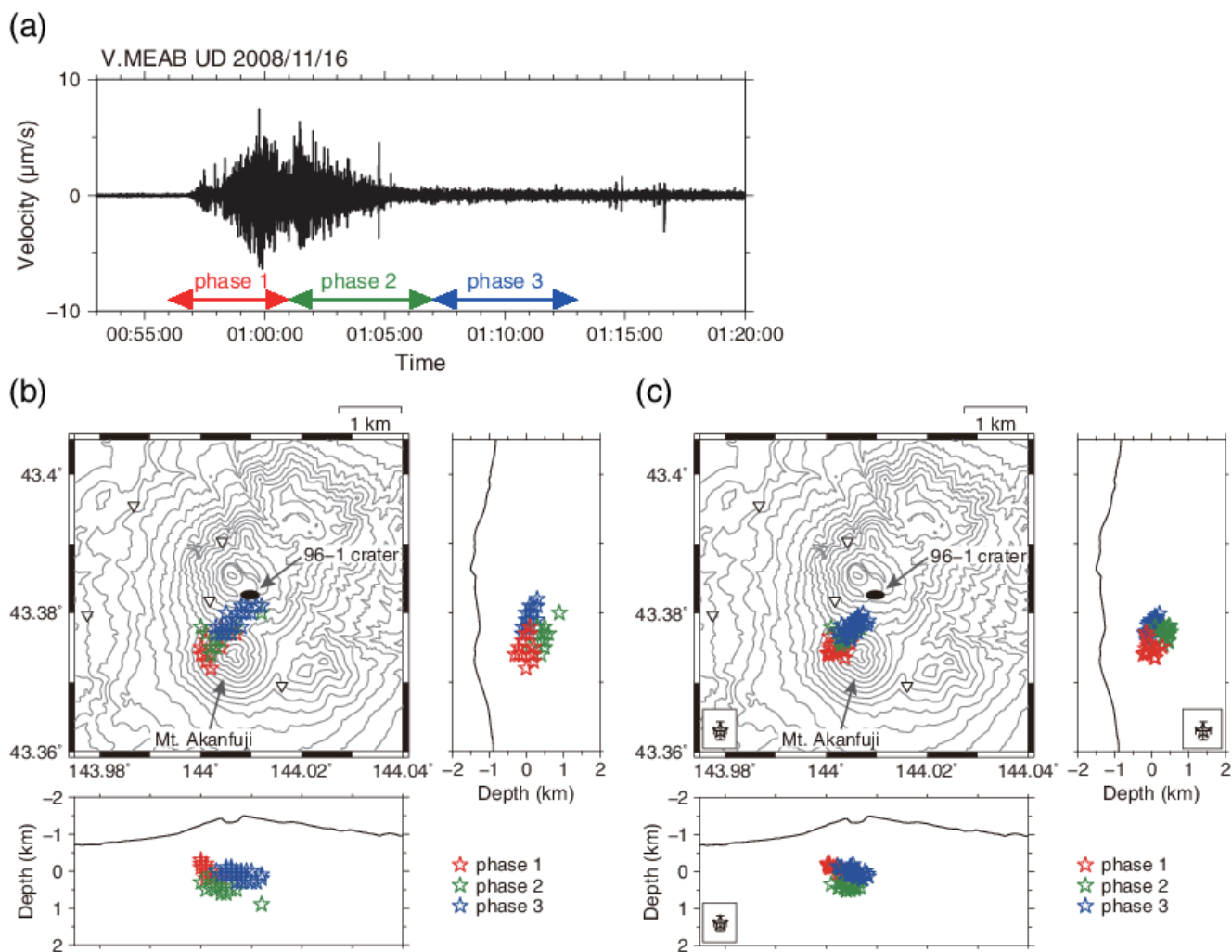


図 (a)2008年11月16日に発生した火山性微動の観測波形
 (b)ASL法によって推定された火山性微動の震源
 (c)本研究によって推定された火山性微動の相対震源

Estimating Earthquake Rupture Process Using Second Degree Moments

~Application to a swarm-like seismicity in the northern Ibaraki and Iwaki areas~

*Naoto Yokotani¹, Aitaro Kato¹, Kazushige Obara¹, Shin'ichi Sakai¹, Takashi Iidaka¹, Tetsuya Takeda²

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

2011年東北沖地震の発生直後から、茨城県-福島県県境周辺の地域で地震活動が活発化した。その地震の多くが正断層のメカニズムを有しており、東北沖地震ののちの伸長場を反映している(Kato et al. 2013)。

本研究では、この地震活動の背景やこの地域の地震テクトニクスを明らかにするために、この地震活動を構成する地震の破壊過程を、second degree moment推定法 (e.g., McGuire 2004) を用いて解析した。震源時間関数の一次モーメントがセントロイド時刻であり、その空間分布の一次モーメントがセントロイドの位置である。それに対して、それぞれの分散と共分散がsecond degree momentである。それらの偏差を特徴的継続時間、破壊域の特徴的長さ・幅、そして破壊中のセントロイドの移動速度として利用することで、破壊の伝播方向や破壊の伝播様式等を推定することができる(McGuire 2004; McGuire and Kaneko 2018; Meng et al. 2020)。

解析対象とした地震はFnetカタログ(NIED, 2019)に掲載されている2011年8月-2017年5月のMw3.5-4.9の176個のイベントである。また、震源時間関数を求めるために経験的グリーン関数(EGF)法を用いた。気象庁カタログに掲載されている同地域・同期間のイベントをEGFとして利用した。またEGFとするイベントは解析対象となるイベントより気象庁マグニチュードで1~2低く、震源間距離が2 km以内であるものを選び、deconvolutionが多くの観測点で安定して求められたものを最終的にEGFとしている。Deconvolutionには、Projected Landweber Method(PLD法)を用いた(e.g. Betero et al., 1997; Lanza et al., 1997; Vallée 2004)。

Hi-net(NIED, 2019)・気象庁・大学の基盤的地震観測網に加えて、この地域に設置されている稠密地震観測網(Kato et al., 2013)で記録された地震波形にバンドパスフィルターをかけ、各観測点での見かけの震源時間関数(ASTF)を求めた。フィルターの周波数帯域は、 $0.5-0.6 \times$ (EGFのコーナー周波数)であり、EGFの震源時間関数がデルタ関数として近似が成り立つ帯域を選択した(Yoshida 2019)。

各観測点で得られたASTFの分散を観測値として、震源時間関数の分散・震源時間関数の空間分布の分散・それらの共分散であるsecond degree momentの各量をinversionで推定する。推定されたsecond degree momentの各量から、特徴的継続時間 τ_c 、破壊の特徴的長さ L_c ・特徴的幅 W_c 、破壊中のセントロイド移動速度 v_0 、応力降下量 $\Delta\sigma$ 、破壊様式を表す比 R を求めた。

176個の地震のうち安定した結果が得られたものについて、それぞれの R , $|v_0|$, $\Delta\sigma$ の空間分布に加えて、directivityの方向の頻度分布について注目すると、地震活動域の外縁部でunilateralな破壊を示した地震が多く、一方、活動域内部では、bilateralな破壊を示した地震が多いという傾向が見られた。また、unilateralに近い破壊様式を示した地震の多くは、directivityが地震活動の内側へ向くように見える。

本地域の地震活動の発生に対して、地殻流体の関与が指摘されており(Kato et al., 2013; Umeda et al. 2014)、今回の結果から、外縁部では地殻流体が存在する内側に向かって破壊が伝播し、一方内側では地殻流体がある程度均質に分布していることで等方に近い破壊伝播を示したと解釈される。

Relationship between the subducting plate boundary and fault geometry of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake, New Zealand, based on high precision aftershock distribution

*Yuta Kawamura¹, Satoshi Matsumoto¹, Tomomi Okada², Miu Matsuno², Yoshihisa Iio³, Tadashi Sato², Stephen Bannister⁴, John Ristau⁴, Martha Savage⁵, Clifford Thurber⁶, Richard H Sibson⁷

1. Kyushu University, 2. Tohoku University, 3. Kyoto University, 4. GNS Science, 5. Victoria University of Wellington, 6. University of Wisconsin - Madison, 7. University of Otago

On November 14, 2016, the Kaikoura earthquake (Mw. 7.8) occurred in northeastern South Island, New Zealand. The main characteristic of this earthquake is that the co-seismic rupture process of the main shock was composed of slip on many faults. Clark et al. (2017) pointed out that the aftershocks of both strike-slip and reverse fault types frequently occurred and more than 20 faults were ruptured during the main shock. Moreover, Cesca et al. (2017) proposed a simple model that the complex rupture proceeded on three major faults in the northern, central and southern areas based on the aftershock distribution, focal mechanisms, geodetic and seismic waveform inversion. Two previous studies have relocated aftershocks using double-difference techniques (Mouslopoulou et al., 2019; Lanza et al., 2019). However, in these studies, it was difficult to determine the fault geometry in detail because of the sparse seismic station density within about 50 km. In this research, we added phase data from seismic stations that we deployed before the main shock in order to improve the accuracy of hypocenter location. Furthermore, we apply the double-difference earthquake relocation algorithm (Waldhauser and Ellsworth, 2000) and time-domain waveform cross-correlation (Poupinet et al., 1984), which further enhance the precision of the hypocenter locations.

As a result, the variance of the hypocenter distribution is reduced and the depth is also concentrated to 15 km or less. There are 10-kilometer long clusters that mainly show a north-south-southwest orientation. Nine fault planes were found from the relocated aftershock distribution through a principal component analysis and bootstrap resampling method. The bottom of the aftershock distribution reveals a curved surface deepening in the southwest direction, which is parallel to the slab determined by Williams et al. (2013).

Faults geometry of outer-rise normal-faulting earthquakes in the central Japan trench based on the ocean bottom seismograph observations

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

1. JAMSTEC

2011年3月に発生した東北沖地震以降、日本海溝の海溝軸から海側のアウターライズ域においては、東北沖地震の本震の約40分後に発生したM7.6の地震をはじめとする太平洋プレート内部の正断層地震の活動が活発化しており、大規模な地震の発生と、それに伴う津波の被害が危惧されている(e.g. Lay et al., 2011)。アウターライズ域におけるプレート内正断層地震では、複数の断層が連動して破壊した可能性が指摘されている。例えばUchida et al. (2016)は、1933年昭和三陸地震の余震分布の再解析や津波記録から、2枚の傾斜方向の異なる正断層の複合破壊を指摘している。その他のアウターライズ域の地震においても、2枚の共役な正断層や横ずれ断層にそって余震が分布している様子(Hino et al., 2009, Obana et al., 2013)や、複数の平行な余震列を形成している様子(Obana et al., 2014)が捉えられている。一方で、アウターライズ域の大規模な地震の本震や、直後の余震活動を震源近傍の観測で捉えた例はほとんどない。JAMSTECでは、2017年9月から2018年7月にかけて、日本海溝中部の海溝軸周辺ならびに海溝海側において、超深海型を含む計45台の海底地震計(OBS)を用いた地震観測を実施した。この観測期間中、M6クラスの正断層型地震が複数(2017年9月21日M6.3、10月6日M6.3、11月13日M6.0)発生した。OBS観測記録の解析から、これらの地震の本震の破壊開始点や、余震分布、震源メカニズムを決定した。3つのM6クラスの地震のうち、OBS設置点のごく近傍で発生した2017年10月の地震(M6.3)では、破壊開始点を境に南北で傾斜方向の異なる余震分布が見られた。破壊開始点はその交点付近に位置しており、本震直後から両方の面上で余震が発生している。また、震央付近の海底地形では、海溝軸にほぼ平行なホルスト・グラーベン構造が不連続になるとともに、グラーベンに斜交する構造も見えている。OBS観測で得られた震源メカニズムは、正断層に加え、グラーベンに斜交する構造に沿った横ずれ型のメカニズムも得られている。他の2つの地震でも、走向や傾斜の異なる面や、隣接したグラーベンに沿った地震活動が、本震直後または数時間以内に発生している様子が捉えられた。これらの観測結果は、M6クラスのアウターライズ域のプレート内正断層地震であっても、複数の断層が連動して活動することを示している。より大規模なアウターライズ地震によって生じる津波の推定において、複数の断層の複合的な破壊による複雑な断層面形状を考慮することが必要である。

Relative hypocenter determination using wave correlation around P-wave first motion with sampling frequency of 10 kHz

*Yuki Noda¹, Yoshihisa Iio²

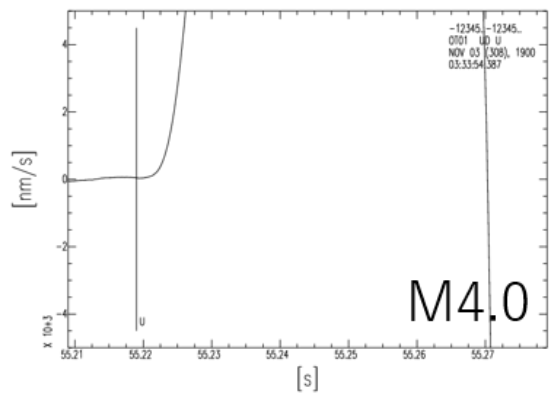
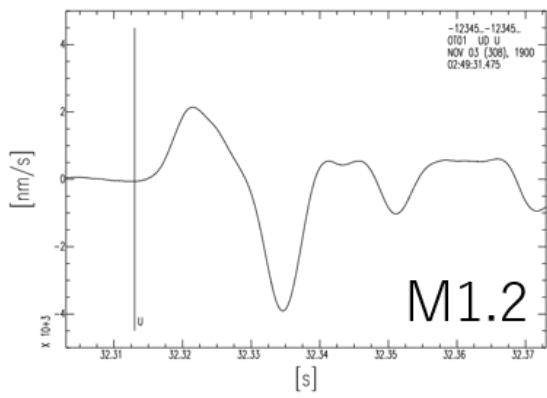
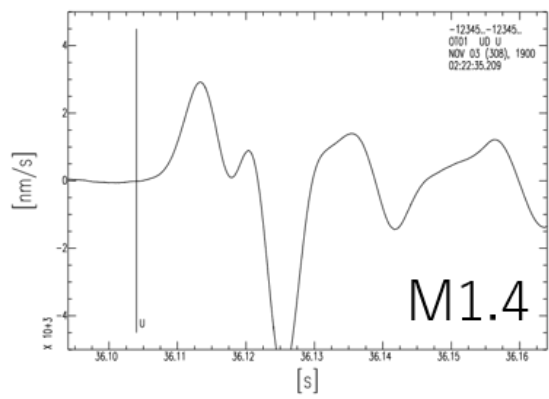
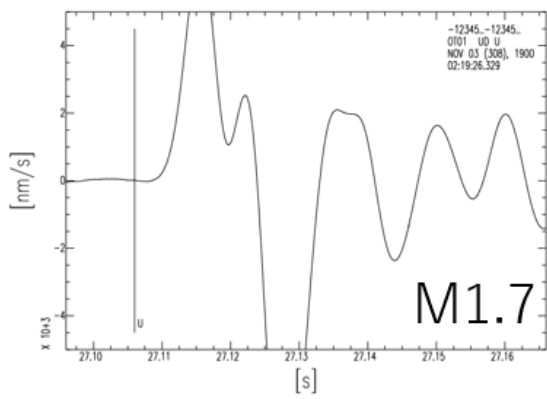
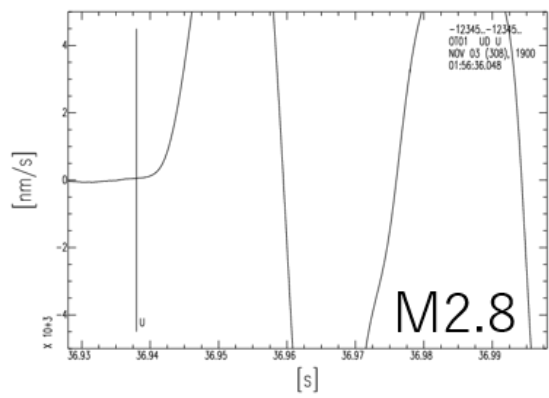
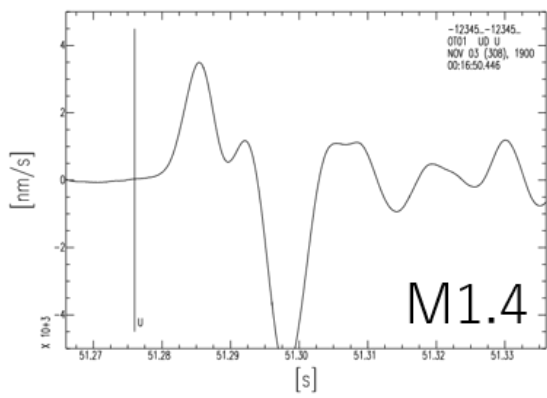
1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute

長野県西部地域では1995年6月から10kHzサンプリングによる地震観測が行われている。観測点は1984年長野県西部地震の余震域の東部を中心に設置されており、この地域では1976年8月以来地震活動が活発である。またこの地域では、震源が浅く信号が大きい地震が多い、岩盤が均質で固く非弾性減衰が小さい、観測点の周囲が静かでノイズレベルが小さいといった特徴があり、非常に地震観測に適した環境が整っている。そのため多数の微小地震データが得られ、シンプルな波形が観測できる。また、2008年8月からは満点システムによる250Hzサンプリングの観測も行われている。

この研究では本震およびその前震をマグニチュード、発震時の前後関係、震央距離および鉛直距離から時空間的に定義し、前震それぞれについて本震に対する相対震源を決定した。

この研究で用いている波形データは10kHz速度波形の鉛直成分である。時空間的に定義した本震および前震活動の波形は、同じ観測点において、極性の違いはあってもP波初動の立ち上がりの数ミリ秒間の形状がよく似ていた。そこで本震とその前震から成るペアについて、ある観測点におけるP波初動付近の10ミリ秒程度の短いウィンドウを用いて相互相関係数が最大になる時間差を求め、それをある観測点における2つの地震のP波到達時刻の差として扱った。このような値を用いて本震に対するその前震それぞれの相対震源決定をした。

今後、相対震源決定の精度を数メートルまで高めたうえで震源周囲の応力変化を詳細に推定し、preslipモデルやcascadeモデルで説明されるような一連の前震活動の発生過程を解明していきたい。



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

[S09]PM-2

chairperson:Hideo Aochi(BRGM), chairperson:Makoto Matsubara(NIED)

Fri. Oct 30, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-23] Characterization of deep lower limit of seismogenic zone (D90) in the region of low heat flow region beneath Japanese Islands

○Makoto Matsubara¹, Tomoko Elizabeth Yano¹, Hiroshi Sato² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-24] The diversity of source parameters in deep earthquakes with waveform similarity

○Ayako Tsuchiyama¹, Junichi Nakajima¹ (1.Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-25] Method to Evaluate the Probability of Earthquake Occurrence Using Information of Small Events

○Hiroki Tanaka¹, Ken Umeno¹ (1.Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-26] Detection of rate change of induced seismicity using ETAS model

○Hideo Aochi¹, Julie Maury¹, Thomas Le Guenan¹ (1.BRGM)

3:15 PM - 3:30 PM

Characterization of deep lower limit of seismogenic zone (D90) in the region of low heat flow region beneath Japanese Islands

*Makoto Matsubara¹, Tomoko Elizabeth Yano¹, Hiroshi Sato²

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

日本列島は地殻の変形と太平洋プレートやフィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震活動や地殻の変形に特徴づけられる。プレート境界の巨大地震に加えて、上盤プレート中の地震は被害と伴う地震の主な原因である。上盤プレート内で起こる地震の最大規模を推定する重要な要素である地震発生層の下限(D90)は、地表からD90までの間においてその領域下での地震の90%が発生していることを示す。本研究では三次元構造により再決定された震源カタログを用いてD90を推定した。

2000年10月から2017年12月までに東経129.2~146.3°、北緯30~46°、深さ0~100kmで発生した561,611個の地震を三次元地震波速度構造(Matsubara et al., 2019)を用いて再決定した。これらの地震のうち、活断層に起因する地震として、深さ25km以浅の地震を選び、ある点から $\pm 0.1^\circ$ (約10km)の1辺が約20kmの矩形内における地震の数が11以上ある場合についてD90を算出した。領域の平均的なD90を推定する場合には、やや広い $\pm 0.25^\circ$ (約25km)の1辺が約50kmの矩形内における地震の数から算出した。

我々の結果は既往の研究(Omuralieva et al., 2012)とほぼ一致した。浅いD90の地域は地殻熱流量が高い。D90のパターンは地殻熱流量(Matsumoto, 2007)や地温が300°Cの深さであるD300degのパターン(Yano et al., 2020)と調和的である。

日本列島のD90はいくつかの特徴的な構造のところを除いて深さ約15kmである。活火山の下は共通して8km以浅という浅いD90で特徴づけられる。D90は前弧より背弧側が浅い。一方で冷たく厚い太平洋プレートの沈み込みにより、千島列島や東北日本、伊豆・小笠原弧等の前弧ではD90が深い。これらの領域での太平洋プレート上面境界の深さは25km以深であることからプレート境界の地震を含んでいないことから、上盤側プレート内の地震活動が深いところまで活発なことを示している。日高山脈や伊豆などの衝突帯ではD90が深く、モホ面の深さも深い(Matsubara et al., 2017)。関東地方南部や東海地方の太平洋岸ではD90が深い、この領域においてはフィリピン海プレート上面境界が25km以浅のためプレート境界の地震を含んでいる。同時に、神縄・国府津-松田断層や富士川河口断層帯のようにプレート境界から連続的に地震活動が続いている領域でもある。

中新世における日本海拡大に伴い、本州北部の背弧側ではリフトが形成されたが、その後太平洋プレートの沈み込みに伴う圧縮場となり、リフトの形成は停止した(佐藤, 2014)。この中絶リフトの下ではD90は通常よりも深く20km以深まで達している。中絶リフトの中部・下部地殻の岩石は苦鉄質に富むため、この組成の違いによりD90が深くなっている。一方で、この領域のモホ面は浅い。中絶リフトの領域では伸長場時に地殻が薄くモホが浅くなり、さらに苦鉄質に富むマントル物質が大陸地殻に嵌入することにより下部地殻が高速化し

たため硬い物質が存在することになり、圧縮場において深部の硬い領域における地震活動が観測されと考えられる(佐藤, 2014)。西南日本においては中央構造線の南側のD90が9-10kmである。瀬戸内海に沿った地域ではD90は非常に深く、地殻熱流量が小さい地域と一致する。

本研究により得られた上盤プレートのD90は地殻熱流量やD300degと調和的な結果が得られた。内陸でのD90は、主として最近20Ma(2000万年)に発生したテクトニックな事象により形成された熱レジームやレオロジーに支配されていることを示唆する。

The diversity of source parameters in deep earthquakes with waveform similarity

*Ayako Tsuchiyama¹, Junichi Nakajima¹

1. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

海溝から地球深部に向かって沈み込むスラブの深部で発生する深発地震は、その発生機構の解明が望まれている。そこで本研究では、太平洋スラブ内の200 km以深における相似地震の波形解析を行った。各地震に対して、P波、S波を含む40秒以上の時間窓で波形相関を計算し、5観測点以上でコヒーレンス値が0.9を超えるペアを相似地震群として定義した。その結果、中部日本領域の3252個の地震のうち、11個の地震が合計5つの相似地震グループを構成していた。次に、hypoDD (Waldhauser and Ellsworth, 2000)を用いて震源の再決定を行った結果、各グループはそれぞれ共通の断層面を形成するが、グループ内の個々の地震は同一断層面上の異なる場所で発生していることがわかった。さらに、個々の相似地震に対してスペクトル比法および減衰補正を用いて応力降下量、地震波放射エネルギー、地震波放射効率を推定した。その結果、推定された応力降下量は各グループ内ではほぼ同じ値であったが、グループ全体では10-100 MPaの多様性が存在していた。一方、単位モーメント辺りの地震波放射エネルギーと地震波放射効率の値は同一グループ内でも多様であった。本研究によって示された共通のスラブにおける相似地震の震源パラメータの多様性は、スラブ全体の特性よりも局所的な個々の断層の違いによって説明できると考えられる。従って、脱水反応に伴う流体の間隙水圧の上昇で破壊が始まり、塑性変形に伴う熱的な不安定性によって破壊が拡大するという複数の発生機構を用いることで説明できる可能性がある。

Method to Evaluate the Probability of Earthquake Occurrence Using Information of Small Events

*Hiroki Tanaka¹, Ken Umeno¹

1. Kyoto University

長期的な地震発生リスクを確率的に評価する上で、地震の発生時刻の間隔についての統計性質は重要である。地震の時間間隔分布は、M-T図にマグニチュード閾値(Mとする)を一つ設定して得られる点過程において、隣接する点どうしの間隔(確率変数 τ_M で表す)の従う統計として得られる。この時間間隔分布の性質がカタログ解析により調べられてきた。なかでもマグニチュードの閾値を変えた際の時間間隔分布の性質を調べた研究は、スケールの異なるイベントの時間間隔の従う統計性質の間に普遍的な関係があることを示唆している[1,2]。それらの研究は、地震の時間間隔の統計性質をその階層構造に注目して調べたものであるが、それらの階層間を繋ぐ方法・性質についてはあまり議論されてこなかった。

そうした階層間を橋渡しするには、異なるマグニチュード閾値における時間間隔の間の条件付き確率を用いる方法が有効である[3]。この条件付き確率は、異なる二つのマグニチュード閾値(mおよびM(>m)とする)における時間間隔の関係を、大きい閾値(M)における時間間隔(τ_M)の中に含まれるという条件のもとで、小さい閾値(m)での時間間隔(τ_m)の従う分布関数という仕方で与える。この条件付き確率には特徴的なスケール則がカタログ解析から見出されており、その性質より時間間隔分布の分布形を導くことができる。

一方で、異なるマグニチュード閾値の時間間隔を結びつける方法としては、小さい閾値(m)においてある長さの間隔が見出されたという条件のもとで、それを含む大きい閾値(M)での間隔の長さがいくらになるか、という確率を用いることも考えられる。この確率は、上で述べた条件付き確率とベイズの定理により結びつけられるもので、閾値Mおよびmでの時間間隔における一対一の関係を与えるものである。さらにこのベイズの定理に基づいて、閾値mにおいて次々に現れる時間間隔($\tau_m^{(1)}, \tau_m^{(2)}, \dots$)に対してベイズ更新を行うことができる。こうして更新を行って得られる尤度は、閾値Mにおける時間間隔分布に、それより小さい閾値(m)において出現する時間間隔の情報を取り込んだものである。

発表では、マグニチュードの時系列におけるベイズの定理、およびベイズ更新の適用方法を示した上で、ETASモデル[4]で生成した時系列に対してこのベイズ更新を行った結果について述べる。図はそのような更新の例である。図の横軸は前回のM以上の規模のイベントからの経過時間、縦軸はn回更新したときの尤度($p_{Mm}(\tau_M | \tau_m^{(1)}, \dots, \tau_m^{(n)})$)の対数、カラーバーは更新回数(n)を表している。黒線は更新回数n=0回で、時間間隔分布を表す。尤度は更新回数10回ごとに示されている。太線の左端はその更新回数までの経過時間、右端は実際に次のM以上のイベントが発生した時の経過時間(図中に縦線で表示されている)を表している。この例では、短い経過時間でM以上のイベントが発生した場合(図中左側の群)と長時間経過後イベントが発生した場合(図中右側の群)について、更新が進むにつれて尤度の形が変化していき、実際にMを超えるイベントが発生した時刻の付近でピークを示す様子が見て取れる。ただし、ベイズ更新の回数はあらかじめ決まっているわけではなく、図に示したような良い予測がいつでも行えるわけではない。発表では、M以上のイベントの発生時刻が尤度のピーク付近に現れる条件について議論する。

[1] A. Corral, Phys. Rev. Lett. 92, 108501 (2004).

[2] Y. Aizawa, T. Hasumi, and S. Tsugawa, Nonlinear Phenom. Complex Syst. 16, 116 (2013).

[3] H. Tanaka and Y. Aizawa, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 024004 (2017).

[4] Y. Ogata, J. Am. Stat. Assoc. 83, 9 (1988).

Detection of rate change of induced seismicity using ETAS model

*Hideo Aochi¹, Julie Maury¹, Thomas Le Guenan¹

1. BRGM

ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence) model (e.g. Ogata, 1983, 1988) is widely used for natural seismicity, mostly supporting the stationarity of the background seismicity rate caused by tectonics. On the other hand, induced seismicity rate evolves with on-going operation (fluid injection, etc.) and the assessment of non-stationary seismicity is important. In this study, we apply the ETAS model to detect the seismicity change and aim to characterize the obtained ETAS parameters with the operation information such as injected fluid volume.

A standard, stationary ETAS model consists of five parameters (μ , K , α , c , p). The first parameter μ (number of earthquakes per day) is usually considered stationary. The other four concern the cumulative effect of the triggered events. The ratio between μ and K tells that the importance of the “induced” events with respect to “triggered” ones in a sequence. However no explicit formulation of variable μ is known for non-stationary seismicity. Therefore, we are going to decluster the observed seismicity into μ (hereafter called “declustered seismicity rate”) and the triggered part.

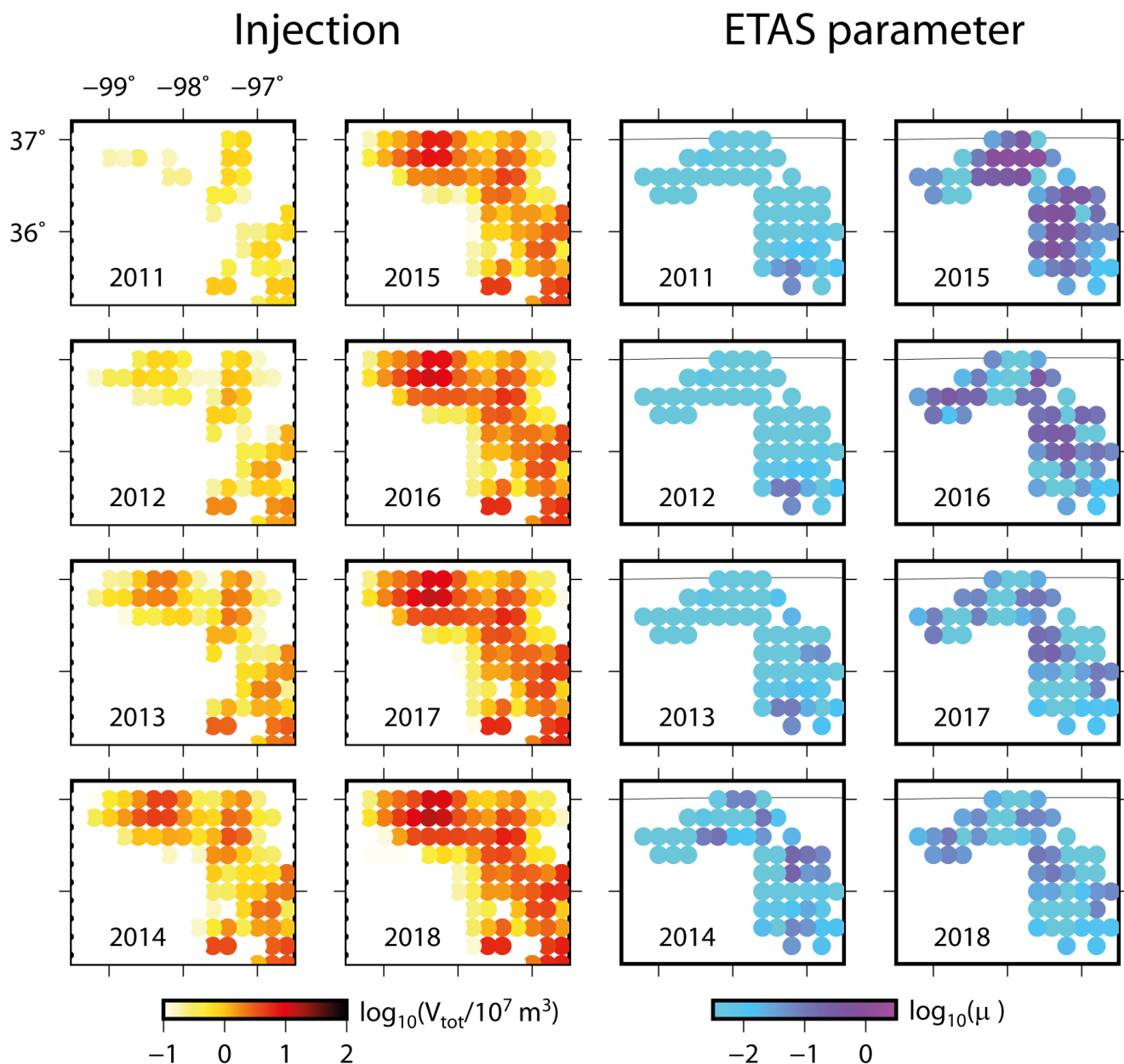
We have applied ETAS model on different data sets: 2000 Soultz-sous-Forêt, France (stimulation test at deep geothermal site), 2010-2013 Rousse, France (CO₂ storage experiment in depleted gas reservoir) and 2010-2018 Oklahoma, USA (waste water injection, principally). In particular, the seismicity in Oklahoma expands in space and time due to massive injection from multiple wells. We carry out a systematic regression on Oklahoma data (Oklahoma Geological Survey). Spatially, we select each area with a radius of 20 km to have a sufficient number of earthquakes. Temporally, we fix a time window of 200 events, shifting by 50 events, such that the regression is stable enough. After some trials, we determine two variables of interest (μ , K) by fixing the three other parameters. Figure 1 shows the regression result on the declustered seismicity rate μ and the total injected volume on the same area based on the data reported by Oklahoma Corporation Commission, Oil and Gas Division. The variable K does not change significantly. In Figure 1, total volume injected in Arbuckle layers is calculated for each area, and μ is calculated at the 53 areas where there are more than 250 earthquakes recorded of magnitude larger than and equal to 2.3 between 2010 and 2018. The peaks of μ appears from the end of 2014 to 2015. We find that the appearance of high μ does not always corresponds to the high injected volume area

We then analyze among the parameters. The acceleration of μ can be fitted through an exponential function of normalized total injected volume with a ceiling ($\mu_{\max}$). After the peak, the attenuation phase can be fitted with an exponential decay of time passed. The values of $\mu_{\max}$ (about 3-4 eq/day at maximum among them) are not related to the injection itself so that this should be an intrinsic seismic potential at each area. The acceleration and attenuation rates show certain tendency with the other parameters. For example, μ may not increase rapidly for a high $\mu_{\max}$. At average, a coefficient of 0.83 (yr⁻¹) is found for an exponential equation of decay. This is much slower (by a factor of 10 and more) than the one we found in the Rousse case. This is because the injection continues anyway in the Oklahoma case.

In conclusion, our statistical analysis allows to follow (forecast) the seismicity evolution with the injection once it begins. However, it is hard to precise the turning points (beginning of the seismicity increase and its peak). The parameters (seismic potential) should be information to learn from the field and

understanding the turning points needs mechanical insights within a fracture system.

Acknowledgement: This work benefits the fundings through GEODENERGIES Miss-CO2 (° 10-IEED-0810-03) and the European Union' s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement number ENER/H2020/764531/SECURe.



Room B | Regular session | S02. Seismometry and monitoring system

[S02]AM-1

chairperson:Ryoichi Iwase(JAMSTEC)

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 9:45 AM ROOM B

[S02-01] Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

○Yusuke Mukuhira¹, Oleg V. Poliannikov², Michael C. Fehler², Hirokazu Moriya³ (1.Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2.Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3.School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan)

9:00 AM - 9:15 AM

[S02-02] Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

○Ryoichi Iwase¹ (1.JAMSTEC)

9:15 AM - 9:30 AM

[S02-03] Channel ID number expansion in WIN format

○Kenji Uehira¹, Shigeki Nakagawa², Hiroshi Tsuruoka², Taku Urabe³ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Telemetry)

9:30 AM - 9:45 AM

Low-SNR Microseismic Detection Using Direct P-Wave Arrival Polarization

*Yusuke Mukuhira¹, Oleg V. Poliannikov², Michael C. Fehler², Hirokazu Moriya³

1. Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2. Earth Resources Laboratory, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 3. School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan

Detection and analysis of small magnitude events are valuable for better characterization and understanding of reservoirs in addition to developing strategies for mitigating induced seismicity. Three-component (3C) receivers, which are now widely used, are commonly deployed in boreholes to provide continuous seismic data amenable to novel and powerful analysis. Using multicomponent continuous records of ground motion, we utilize two principal features of the direct P-wave arrival: (1) linearity and (2) polarization in the direction along the ray path to the source region to detect small magnitude events undetectable by conventional methods. We evaluate the linearity of polarization and direction of arrival in the time and frequency domains by introducing the spectral matrix analysis method and combine them into a scalar characteristic function that is thresholded for event detection purposes. We boost the signal-to-noise ratio by stacking characteristic functions obtained at different 3C receivers along an empirical moveout of a master event known to have occurred in an area of interest. This allows us to detect smaller events and spatially tie them to a relatively small area around the large event. We apply our method to field data recorded at the Groningen gas field in the Netherlands. Our method detects all catalog events as well as several previously undetected events.

Replay and digitization of analog hydrophone data of the old cabled observatory on deep seafloor off Hatsushima Island in Sagami Bay

*Ryoichi Iwase¹

1. JAMSTEC

海洋研究開発機構(JAMSTEC)が1993年に相模湾初島南東沖水深1175mの海底に設置した海底ケーブル型観測システム「深海底総合観測ステーション」(初島沖ステーション)は、深海環境の多面的な観測を目的としており、地震計のほか、ハイドロフォン、ビデオカメラ、CTD(海水の電気伝導度・水温・深度)センサや電磁流向流速計等の多種類のセンサを搭載していた。初島沖ステーションは、1999年7月に海底ケーブルの地絡障害により一度観測を停止し、その後2000年に更新されている。

海底に設置されたハイドロフォンの信号は、海底ケーブルを通じ初島陸上局においてアナログ信号として出力され、設置当初から1999年7月の停止までの期間は、ペンレコーダに記録されるとともにアナログデータレコーダに連続記録されていた。しかしながら、これまで当該データは本格的に再生・解析されていなかった。ハイドロフォンは、地震に伴うT波をはじめ、水中を伝搬する音響信号を検出することが可能である。岩瀬(2017)では、ビデオカメラによる海底観察の際、ビデオテープの音声トラックに録音されたハイドロフォン信号から、伊豆半島東方沖地震時の泥流に伴う礫の衝突音と推定される信号やホワイトノイズ的な信号を検出している。ビデオカメラによる観察は間欠的に実施されているため、ビデオカメラによる泥流の観測は、複数回発生したうちの一部に限られている。このため、未再生のハイドロフォンデータの解析は泥流や混濁流の解明等にも資する可能性がある。

ハイドロフォン信号の収録には、TEAC製カセットデータレコーダXR-5000WBが使用された。当該レコーダは、14チャンネルのアナログ信号入力インタフェースを有し、VHSビデオテープを記録媒体として周波数変調方式で記録する。通常無人の初島陸上局にて1週間毎にテープを回収するため、全チャンネルに同一信号を入力し、テープ(VHS 160分テープ)の走行速度を0.6 cm/sとし、テープの順方向走行時は奇数チャンネルに、逆方向走行時は偶数チャンネルの信号を順次記録する設定により、1週間の連続記録を可能としていた。収録テープは約300本に及ぶ。時刻はJJYで校正されており、ボタンの手動押下によりBCD(Binary-coded decimal)表現の日付・時刻情報が重畳されることに加え、毎正時と毎時30分にはそれぞれ2個と1個の短時間パルスが観測信号に自動的に重畳されていた。再生手段は当該レコーダに限られるが、はるか以前に生産終了となっており、今回は収録に使用していたレコーダを用いてテープを再生し、出力信号をリニアPCMレコーダ(OLYMPUS LS-100)に収録した。再生時、テープ走行速度を収録時と同じ0.6 cm/sとすると、テープ走行の揺らぎが原因と推定されるノイズが大きい。再生効率も考慮して、テープ走行速度を収録時の8倍の4.76 cm/sとしたところ、同ノイズの低減が見られた。なお、当該レコーダの仕様では、テープ走行速度0.6 cm/s時の収録可能周波数帯域は0.977 kHz以下となっている。図1は、1997年3月3日23:09に発生した伊豆半島東方沖地震(M5.5)を観測した波形例である。

今後、順次再生を進めていく予定であるが、当該レコーダの劣化が著しく、走行が不安定であることに加え、電解コンデンサやその周辺の基板の焼損等の故障も発生し、困難に直面している。使用可能なTEAC製データレコーダXR-5000WBについての情報があればお知らせ頂けると幸いである。

参考文献

岩瀬, 2017年地震学会秋季大会講演予稿集, S11-01, 2017.

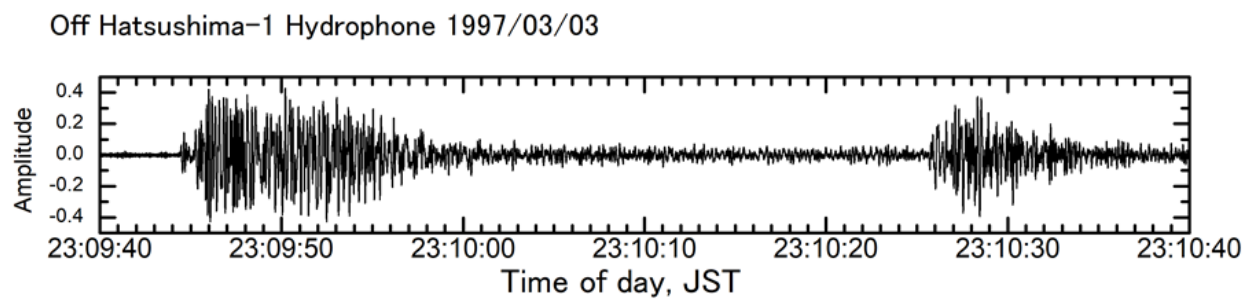


図1 ハイドロフォンで観測した伊豆半島東方沖地震の波形例

Channel ID number expansion in WIN format

*Kenji Uehira¹, Shigeki Nakagawa², Hiroshi Tsuruoka², Taku Urabe³

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Telemetry

WINシステム（ト部・東田，1992など）は地震のフェーズの検測や震源決定等の解析，大学・気象庁・防災科学技術研究所などの機関間のデータ流通に広く使われている多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムで，UNIX上で動作するプログラム群である．WINシステムではWINフォーマットと呼ばれるデータフォーマットを定義している．WINフォーマットにおいてデータの区別を16ビット長のチャンネル番号（channel ID）によって行っており，最大65536チャンネルまで扱うことが出来る．

ト部（データ流通ワークショップ，2013）で言及があった通り，JDXnetで流通しているのは10000チャンネル弱であり，85%程度は空いているが，多くが虫食い状態であり大きなブロックは残っていない．一方で，陸上や海底でのオフライン観測で得られた観測データをJDXnetの流通データと統合して解析を行ったり，複数機関でのデータ共有，高感度地震計以外の地殻変動・火山・強震等の多項目観測データを同一システムで取り扱う機会が増えており，チャンネル空間の枯渇が課題となっていた．そこで，チャンネル番号の桁数を現行の16ビット長から32ビット長へ増加することにした．

WINフォーマットは観測点での収録から，伝送流通網，収録系にまで幅広く使用されている．チャンネル空間の拡張にあたっては新しいフォーマットが必要となる．運用中の機器との互換性や，これまで収録されてきた既存データとの相互運用性を考えると，ネットワーク上やファイルシステム上で新旧両フォーマットが混在可能であることが望ましい．またソフトウェアについても両フォーマットを混在した状態を扱えることが望ましい．そこで，現行のWINフォーマットを拡張することとした．

WINフォーマットは1秒のブロックが基本単位になっている（図上段）．先頭に6バイト長の時刻情報があり，その後に複数のチャンネルブロックが連なっている．各チャンネルブロックの先頭には4バイト長のチャンネルヘッダがついており（図中段の黄色ハッチ部），その後ろにデータの本体が続く．チャンネルヘッダには2バイト長のチャンネル番号（channel ID）が含まれる（図中段赤枠）．現行フォーマットでは，チャンネル番号（channel ID）として0x0000から0xFFFFまでの値を取ることが出来る．0xFFXXのチャンネル番号は32ビット拡張用として予約されていたが，それを利用することとした．即ち，先頭バイトが0xFFであったら拡張フォーマットであることを表し，更に続く2バイト目が0x00の時（図下段青枠）は，引き続き32ビット（図下段赤枠）が新たなチャンネル番号（channel ID）を示すと定義した．なお，チャンネルヘッダの先頭2バイトが0xFF01～0xFFFFの場合は現在未定義であり，将来の拡張用とすることにした．

以上，今回拡張したチャンネル番号の割り振り方をまとめると，

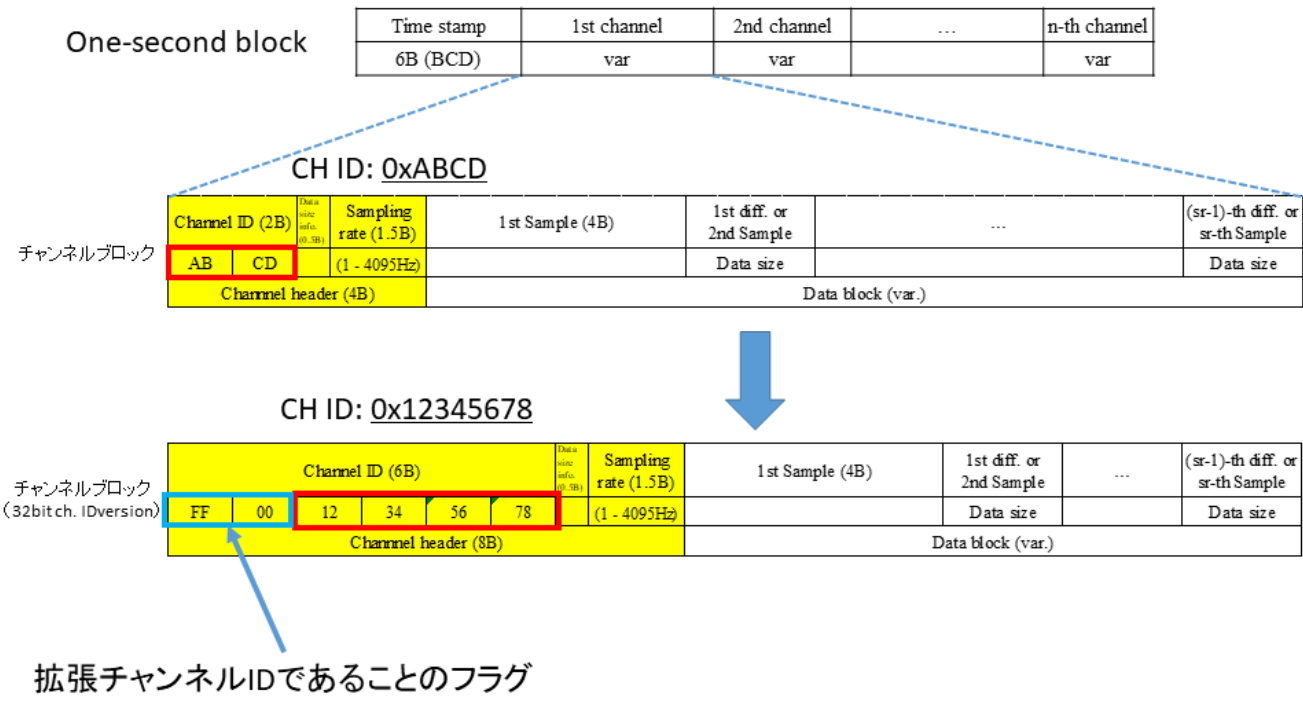
1. 0x0000～0xFEFF (0x0000 0000～0x0000 FEFF)は新旧どちらのフォーマットでも表現出来るチャンネル．ただし，基本は16ビット長で作成．
2. 0xFF00以降 (0x0000 FF00～0xFFFF FFFF)は拡張フォーマットでのみ表現できるチャンネル．

となる．なお，チャンネルヘッダには，4096Hz以上のデータを扱える高サンプリングレート等のバージョンもあるが，チャンネル番号の拡張については上で述べた方法で対応可能である．

現在，チャンネル番号32ビット拡張化については，WINシステムの基本ライブラリの対応が完了し，順

次，個々のソフトウェアの対応を進めている．今後，伝送流通網や収録系のテスト環境の下で検証を行う．

拡張チャンネルIDのWINフォーマット（raw形式）



Room B | Regular session | S19. Seismology, general contribution

[S19]AM-1

chairperson: Satoko Murotani (National Museum of Nature and Science)

Sat. Oct 31, 2020 9:45 AM - 10:00 AM ROOM B

[S19-01] A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

○Satoko Murotani¹, Kenji Satake², Hiroshi Tsuruoka², Hiroe Miyake², Toshiaki Sato³, Tetsuo Hashimoto⁴, Hiroo Kanamori⁵ (1. National Museum of Nature and Science, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Ohsaki Research Institute, Inc., 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Seismological Laboratory, California Institute of Technology)

9:45 AM - 10:00 AM

A database of digitized seismic records and seismogram image copies for major historical earthquakes in Japan

*Satoko Murotani¹, Kenji Satake², Hiroshi Tsuruoka², Hiroe Miyake², Toshiaki Sato³, Tetsuo Hashimoto⁴, Hiroo Kanamori⁵

1. National Museum of Nature and Science, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Ohsaki Research Institute, Inc., 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 5. Seismological Laboratory, California Institute of Technology

我が国には明治以来130年以上に渡る地震計・検潮儀による地震・津波観測の歴史があり、膨大な記録が残されている。気象庁や大学機関などの甚大なる努力によって蓄積されてきた地震・津波波形に関するアナログ記録は、所蔵リストや画像のデータベースとして公開され、誰もが利用しやすいよう整備されてきている

(Furumura et al., 2020, SRL; Matsu'ura et al., 2020, SRL; Satake et al., 2020, SRL)。しかしその一方で、観測機器で得られたアナログ記録を数値化し、科学的な解析に耐えうるデジタルデータとするためにはかなりの精査時間と労力が必要であるため、波形記録が数値化されたデータベースは極めて少ない(例えば、消防庁消防大学校消防研究センターによる「気象庁1倍強震計記録の数値化データ公開システム」がある)。近年、地震の解析手法の高度化や計算機の高性能化が進み、速度構造等の新しい知見も得られており、貴重な歴史観測データを用いて過去の被害地震について再解析することにより、地震や津波の発生メカニズムや防災に対する新たな研究成果が生み出されることが期待される。そこで、1920年代～1940年代の歴史的に重要な被害地震・津波(例えば、1923年関東地震や1944年東南海、1946年南海地震)に関する記録の画像化・数値化を行い、将来発生が懸念される大地震に対する防災・減災対策への一助となるよう学術データベースの構築を進めているところである。

このデータベースは地震名や観測点名などで検索できるようにしており、可能な限り大振幅の波形の円弧補正を施し、地震計の特性も併せて提供する。大地震の場合、中央気象台や各地測候所の記録紙には地震計の特性が一緒に書かれていることが多い。しかし、東京大学地震研究所に残る帝国大学時代からの記録紙には特性は書かれておらず、別途観測帳などを参照する必要がある。時期によっては値にばらつきも見られる。いつの情報なのかということも、できるだけ付記する必要がある。公開は数年後を目指しており、国立科学博物館と東京大学地震研究所で公開することを計画している。科博での公開は広く一般の方々に、東大地震研での公開は研究者にとって有用であろう。地震学分野においては、過去の地震の震源パラメータ等の解明や、各地での震度や長周期地震動の検証等への利用、地震工学、社会防災学などの分野では、公開された地震波形や津波波形の数値が、建物構造物等に関連する耐震設計や沿岸域での津波防災対策等に利用されることが期待される。学校教育や博物館分野においては、数値化されたデータを提供することにより、専門的な知識や計算機等を必要とせず容易に波形データを利用することができ、地震に関する展示や教育の普及への利用価値はかなり高いと思われる。さらには、歴史分野や防災教育の分野でも利用できるであろう。

日本は歴史的な観測記録が充実している数少ない地震大国であり、国際的にも重要な研究対象である。歴史観測データ保存と活用の重要性は国際的にも認識されており、本データベースは貴重な歴史観測データを数値的に提供するとともに、元画像を保存公開することで研究の再現性担保やデータのバックアップとなる意義もある。海外の研究者から東大地震研に問い合わせが多いのは、海外で発生した大地震を本郷の地震計で記録した波形の利用についてである。英語でのページも作成予定であるので、日本で観測した海外の大地震などの記録も数値化できれば、より多くの海外の研究者にとっての利便性も高まるだろう。当面は1920年代～1940年代に日本周辺で発生した主要な歴史地震記録の数値化を行うが、将来的には、1950年以降の記録や海外で記録された波形記録についても蓄積できればと考えている。本データベースに関しては、Murotani et al., (2020), *Seismol. Res. Lett.*, doi: 10.1785/0220190287においても紹介している。

謝辞：本データベースの作成は，国立科学博物館における2017年度館長支援経費，JSPS科研費JP18HP8037，JP18H01289，東京大学地震研究所共同利用（2020-G-16）によって実施されています．記して感謝いたします．

Room B | Regular session | S18. Education and history of seismology

[S18]AM-1

chairperson: Satoko Murotani (National Museum of Nature and Science)

Sat. Oct 31, 2020 10:00 AM - 10:15 AM ROOM B

[S18-01] Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

○Shota Takeichi¹, Toshitaka Baba¹, Naoyuki Nakayama² (1. Tokushima University, 2. Tsuda Junior High School)

10:00 AM - 10:15 AM

Effectiveness in raising awareness of disaster prevention through numerical evacuation simulations for junior high school students.

*Shota Takeichi¹, Toshitaka Baba¹, Naoyuki Nakayama²

1. Tokushima University, 2. Tsuda Junior High School

初等中等教育における防災教育は将来の災害軽減に必要不可欠であり、いくつかの学校では地域住民と連携も含めて意欲的に行われている。例えば、徳島県徳島市津田中学校では防災クラブを結成し、中学校周辺地域の事前復興計画の作成をしている。一方、AIに代表される情報通信技術の進展は著しく、今後、防災分野においても主要な役割は果たすであろうと考えられる。本研究では、このような観点からコンピュータ上で津波避難シミュレーションを中学生に実施してもらい、それによる彼らの考察をもって、有効な防災意識向上効果について調査したので報告する。

はじめに、津波避難シミュレーションの概要を説明する。津波避難シミュレーションにマルチエージェントモデルのCrowdWalkを用いた。CrowdWalkは一次元空間モデルを用いた大規模群衆流動にも対応したマルチエージェント歩行者シミュレータであり、実際の花火大会や劇場での避難訓練で群衆移動の検証が行われている。防災クラブの生徒らは、学校周辺地区内の住民に対して、津波避難先として利用する避難場所とそこまでの経路の調査を実施した。（ちなみに、住民は必ずしも最短経路を使って最寄りの避難場所に避難するとは限らない。）調査をもとに、学生らが自ら作成した避難シミュレーションモデルで、エージェントの避難経路を設定し、シミュレーションを行った。その結果、主要な道路で避難やの混雑（渋滞）が発生する可能性が示唆された。避難完了時間は2112秒であった。また、単に最寄りの避難場所に最短経路で避難する場合のシミュレーションも実施し、この場合は、避難完了時間は852秒であった。避難シミュレーションモデルの作成開始から、シミュレーション実施完了まで、およそ2か月かかった。その期間においては、メール等で利用法を説明するだけでなく、防災クラブの活動に数回訪問して、作業を手助けた。

生徒らに、今回の活動についてヒアリング調査を行った。シミュレーションを用いたことで、避難時に混雑が起る場所がわかったことや避難のイメージをつかめやすくなったなどの回答があった。これらから、生徒たちにとって、避難シミュレーションの実施は防災活動や事前復興計画を考える上で有効なツールとなる可能性があることが分かった。一方、今回利用したCrowdWalkは専門的なツールで、説明書も中学生向けに書かれているわけではないため、シミュレーションの実施には相当のサポートが必要だった。しかし、要点をつかむと入力作業の速度は一気に上がった。これは、情報ツールを使うことに幼いころから慣れ、興味関心が高いからだと考える。

Room B | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

[S03]AM-2

chairperson: Kosuke Heki (Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University), chairperson: Yuta Mitsui (Faculty of Science, Shizuoka University)

Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 12:00 PM ROOM B

[S03-01] Interseismic plate coupling on the Main Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

○Takao Tabei¹, Mako Ohzono², Bishow R. Silwal³, Rajendra Bhandari³, Janak B. Chand³, Soma N. Sapkota³, Hiroe Miyake⁴, Kazuki Koketsu⁴ (1. Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2. Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Department of Mines and Geology, Nepal, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

10:30 AM - 10:45 AM

[S03-02] Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

○Yusuke Tanaka¹, Yusaku Ohta¹, Shin'ichi Miyazaki² (1. Tohoku University, 2. Kyoto University)

10:45 AM - 11:00 AM

[S03-03] Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

○Fumiaki Tomita¹, Takeshi Inuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

11:00 AM - 11:15 AM

[S03-04] Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

○Yuta Mitsui¹, Hinako Muramatsu², Yusaku Tanaka³ (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM

[S03-05] Crustal deformation by a heavy rain episode

○Kosuke Heki¹, Syachrul Arief¹, Wei Zhan² (1. Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration)

11:30 AM - 11:45 AM

[S03-06] Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

○Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Paul Segall³, Takeshi Sagiya^{2,4} (1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Stanford University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

11:45 AM - 12:00 PM

Interseismic plate coupling on the Main Himalayan Thrust in Nepal estimated from GNSS displacement rate field

*Takao Tabei¹, Mako Ohzono², Bishow R. Silwal³, Rajendra Bhandari³, Janak B. Chand³, Soma N. Sapkota³, Hiroe Miyake⁴, Kazuki Koketsu⁴

1. Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2. Graduate School of Science, Hokkaido University, 3. Department of Mines and Geology, Nepal, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

ネパールの国土の大部分はインドプレートとユーラシアプレートの収束境界域の上盤側に位置し、直下で発生する逆断層型地震は直接的な脅威である。最近では2015年Gorkha地震 (Mw 7.8) が記憶に新しいが、この地震の震源域の西方には、過去数百年間にわたって顕著な地震が発生していない広大な地震空白域が広がっている。2016年に開始された地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム「ネパールヒマラヤ巨大地震とその災害軽減の総合研究」(通称NERDiM)の一環として、我々はネパール中部・中西部に計10点のGNSS連続観測点を設営した。我々の観測網は、ネパール国内に既設のGNSS観測網を補間しながら、地震空白域における観測強化を目指している。最終的には、既設観測網のデータも含めてネパール全土の詳細な変位速度場とひずみ速度場を算出し、測地学的側面からヒマラヤ主要断層帯の地震ポテンシャル評価を行うことを目標としている。

UNAVCO経由でデータ入手可能なネパール国内のGNSS観測点の総数は50に近いが、安定して観測が継続されているものは半数に満たない。今回は、GIPSY/OASIS II ver.6.4のPPP-AR法を用い、NERDiM観測点を加えた2004-2019年の期間のすべてのデータより日々の座標解を算出し、観測期間の長短に関わらず観測点の平均変位速度を求めた。さらに、変位速度場を空間補間し、ひずみ速度場を導いた。結果を要約すると、ユーラシアに対するインドプレートの北進を反映して、ネパール国内では南北方向の10-15 mm/yrの短縮変形が卓越する。ひずみ速度に換算して約0.1 ppm/yrとなる。すなわち、インド-ユーラシアの相対運動速度 (36-37 mm/yr, DeMets et al., 2010) の約30-40%がヒマラヤ前縁域の短縮変形に費やされている。NERDiM観測網は、とくにインド国境に近いプレート境界周辺の空間分解能の向上に大きく貢献している。

GNSS平均変位速度場を用い、インド・ユーラシアプレート境界面における地震間の固着分布を推定した。従来の推定では、ほぼ平坦な断層面が北へ向かって10°程度の緩やかな角度で傾き下がるモデルが用いられてきた (例えばStevens and Avouac, 2015)。それによると、地表から深さ20 km程度までほぼ一様な強い固着が求められている。一方、2015年Gorkha地震発生の構造地質学的考察から、深さごとに急傾斜の断層セグメントと緩傾斜のセグメントが交互につながってプレート境界面を構成するモデルが提唱されている (Hubbard et al., 2016)。今回は、この後者のモデルを採用した。固着するプレート境界面の下限を深さ35 kmと仮定し、深さ5 kmごとの等深線に沿って30-40 km間隔にノードを設定した。TDEFNODE (McCaffrey, 2009) を用い、各ノードにおけるすべり欠損速度を推定した。プレート相対運動速度で規格化した固着率は、プレート境界面の形状と強い相関を持つ。すなわち、緩傾斜のセグメント上では非常に強い固着を、急傾斜のセグメント上ではほぼゼロに近い弱い固着を示す。今回の結果は予備的な解析によるものであるが、単純なプレート境界面形状を用いた従来の結果とは大きく異なる。プレート間固着が境界面形状のみに規定されるものかどうか、今回採用したモデルが実際の広域の構造を正しく反映したものかどうか、さらなる検証が必要である。

Continuous estimation of coseismic and early postseismic slip of the 2011 Tohoku-Oki sequence using PTS analysis

*Yusuke Tanaka¹, Yusaku Ohta¹, Shin'ichi Miyazaki²

1. Tohoku University, 2. Kyoto University

地震発生サイクルの一連の過程に伴う断層すべり現象は幅広い時間スケールで発生するため、その統一的な理解のためには広帯域な観測手段が必要不可欠である。しかしながら現在のGNSS測位解析は、1時間から半日程度の時間帯域で精度が大きく低下する。これは主に地表変位と、大気遅延等の他の未知パラメータとの分離の困難性による。そこで我々は新たな手段として、GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する手法(以降PTS (Phase To Slip))を用いた広帯域断層すべりモニタリング技術の開発に取り組んでいる。PTSでは座標推定を行わず、搬送波位相変化をグリーン関数と視線方向への幾何学的変換を介して直接断層すべりに結びつける。そして、断層すべりと大気遅延等の各種パラメータの、初期時刻からの相対変化を一括で推定する。このため、未知パラメータの分離精度の評価と改善に有利であると考えられる。

本研究では広帯域な断層すべり推定手段としてのPTSの性能評価を目的として、同手法による2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり・初期余効すべりの連続的な推定を試みた。推定では東日本の69のGEONET点の搬送波1秒データを使用し、3月11日の14時から16時(JST、本震発生は14時46分)の2時間について解析した。その結果、本震と茨城沖で発生した最大余震について、通常の測位解析を用いた推定とよく一致するすべり分布やマグニチュードが推定された。得られたすべり分布から計算される地表変位場についても、測位による推定と良好に一致する値となった。さらに岩手沖で発生した余震のすべりも検出された。これらの結果から、短時間に連続して発生する地震時すべりをPTSで安定して推定できることが示された。

一方で本震後の時間帯に注目すると、推定された断層すべり時系列には上記の3つの地震時すべりとは別に、ゆっくりした逆断層すべりの増加が見られた。増加を示すのは主に本震で大きくすべった領域に隣接する陸寄りの深い側の小断層であり、岩手から茨城までの沿岸付近に複数のすべり域が推定された。これらのすべり域はそれぞれ異なる時間発展を示し、本震後の39分間で最大0.8mのすべりが推定された。また全領域の合計では M_w 7.60相当となった。これらはMitsui and Heki (2013)等の先行研究と比べて明らかに大きな値であるが、初期の余効すべりを捉えたものであると考えられる。

以上の結果から、PTSを用いた地震時から地震後のすべりの連続的な推定の可能性が示された。発表ではPTSの原理や推定結果の詳細を解説し、それらの妥当性についても議論する。

Estimation of coupling slip distributions in a subduction zone by a trans-dimensional inversion approach

*Fumiaki Tomita¹, Takeshi Iinuma¹, Ryoichiro Agata¹, Takane Hori¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

地殻変動観測データを用いた断層すべり分布の推定には、一般的にすべりの平滑化条件を課した最小二乗法が行われ、その度合いを調整するハイパーパラメータをABICやLカーブ等の基準により決定する。しかし、解の直接的な拘束条件（非負拘束等）を課した最小二乗法を行う場合、ABICが解析的に正しく計算できないことや、解の事後確率分布の非ガウス性に対応できないなどの問題点に対応するため、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法の活用が望まれる [Fukuda & Johnson, 2008]。更に、従来の手法ではすべりの平滑化条件として、解析空間で一様な拘束条件を課す場合がほとんどであり、断層すべりの広がりや非一様性に対応できていない。また、観測点分布の空間的な粗密の違い等により、断層すべりのモデル誤差が空間的に大きく異なり、インバージョン結果の確からしさ・解釈が難しい [Kimura et al., 2019] といった問題点が挙げられる。

上記の問題の解決のため、我々は、Reversible-jump MCMC法 [Green, 1995] によるTrans-dimensional inversion（TDI）手法の開発に取り組んでいる [e.g., Tomita et al., 2020, JpGU-AGU]。本手法では、Bodin & Sambridge [2009]と同様にVoronoi cell 空間分割により断層面を区切り、cell毎の未知パラメータ（すべり量）とcell自体の数（未知パラメータ数）を同時に探索する。これにより、観測データから求め得る空間解像度とすべり分布自体の空間スケールに合わせた空間分割がなされ、最小限の未知パラメータ数で断層すべり分布が求められるとともに、非一様な断層すべりの広がりの表現も可能となる。また、本手法はMCMC法の一種であるため、解の直接的な拘束条件を課すことや解の事後確率分布の非ガウス性を表現することも可能である。Tomita et al. [2020, JpGU-AGU] では、このTDI法を測地データを用いた沈み込み帯での巨大地震時すべりの推定に適用し、非一様な断層すべりの広がりや解の事後確率分布の非ガウス性の表現が可能であることを確かめた。

本研究では、上記のTDI法を沈み込み帯での固着分布の推定に適用した。固着分布の推定では巨大地震時すべりと比較して観測データのSN比が小さくなりがちであるため、そうした悪条件下でのTDI法の挙動を確認するとともに、従来のABICによりすべりの平滑化拘束を最適化した最小二乗法（ABIC-LSM）に基づく推定結果との比較から、固着分布の推定にTDI法が適しているかどうかを検証した。このような手法の有用性を確認するため、Syntheticデータを用いて仮定した固着分布の再現度合いの検証を行った。Syntheticデータは、均質半無限弾性媒質 [Okada, 1992] を仮定したバックスリップに対する応答として求めた。沈み込み帯プレート境界断層を模した傾斜角15度・幅300 km・長さ500 kmの矩形断層を仮定し、20 km × 20 kmの小断層を配置した。なお、TDI法では、この小断層をVoronoi cellにより空間的にグループ分けすることで未知パラメータ数を調整することになる。観測点配置は、海溝から200 kmの距離を海岸線として、①150陸上観測点+25海底観測点。②150陸上観測点のみ、の2パターンを用意し、固着分布の推定をそれぞれ行った。Syntheticデータは、円形の滑らかな固着パッチを海溝に沿って3つ並べた複雑な固着分布から計算された地表面変位に対して、実観測成果に沿った観測誤差を与えることで作成した。TDI法の実行にあたっては、初期状態として20個のVoronoi cellを配置し、すべり量の初期値は従来の最小二乗法による推定結果を元に設定することで、初期収束を早める方策をとった。また、初期値の影響を軽減し計算時間を短縮するため、複数鎖の並列計算を行い（今回は2000並列鎖で実施）、合計で 1×10^6 サンプルのアンサンブルにより推定を行った。

ABIC-LSMによる固着分布の推定結果は、どちらの観測点分布でも仮定した固着分布よりも滑らかな分布を示した。これは、観測点分布の粗さや観測データのSN比の低さから、十分な空間解像度が得られず、強い平滑化拘束が課された結果であると考えられる。一方で、TDI法による推定結果は、ABIC-LSMの結果に比べて、全体的により仮定した固着分布に近い滑らかさの分布が得られた。特に、観測点分布が密でモデル解像度が高いと

考えられる領域の滑らかさがよく再現され、逆にモデル解像度が低いと考えられる領域でやや仮定した固着分布よりも滑らかな分布が推定された。これは観測点分布の粗密による空間解像度に合わせて、Voronoi cellの広がり（平滑化度合い）が調整されたためと考えられる。こうした特徴は、空間的に一様な平滑化条件を置かないTDI法による利点であると考えられる。また、観測点分布が疎な領域では、解の事後確率分布が非ガウス性になる傾向が得られるなど、MCMC法による推定の利点も確認することができた。こういった特徴により、TDI法では観測データの持つモデルパラメータへの感度をより生かした解析が可能であると考えられる。

発表では、より詳細なSyntheticデータの解析結果の報告を行う。また、今後南海トラフでの実データを用いた解析を実施し、その結果も踏まえて報告する見込みである。

Slow event between large intraslab earthquakes at the Tonga Trench

*Yuta Mitsui¹, Hinako Muramatsu², Yusaku Tanaka³

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

本研究では、世界で最も深発地震が活動的なトンガ海溝沈み込み帯における、地殻変動と地震活動に注目する。データとしては、GNSS変位時系列(Blewitt et al., 2018)とANSS地震カタログを用いる。トンガのGNSSデータには、2006年5月3日に海溝近傍で発生したM8.0のスラブ内地震による地震時変位と余効変動が明確に記録されている。そのため、それ以前のデータを定常変動と仮定してデトレンドを行い、非定常変動の推定を行った。これと比較するため、地震カタログから沈み込み帯の浅部～深部にかけての背景地震活動率(ETAS model; Ogata, 1988)を1年ごとに推定し、その時間変化を追った。

我々は、トンガのトンガタブ島・ヴァヴァウ島のGNSS観測点において、2009年9月29日に数百km北方のサモア諸島沖で発生したM8.1のスラブ内地震直後から非定常変動(～数cm)が発生していることを発見した。この非定常変動は海溝方向を向いており、2009年サモア地震の余効変動(Han et al., 2019)そのものというよりは、別種の独立したスローイベントが2009年サモア地震によって誘発されたと考えられる。このイベントは、プレート境界の逆断層すべり(スロースリッピイベント)としても解釈できるが、2006年スラブ内地震の余効変動が再加速したという見方も可能である。この非定常変動は数年継続し、2013年5月23日のスラブ内地震(M7.4)の発生時期には収束していた。一方、地震活動の解析からは、2009年サモア地震から2013年のスラブ内地震の時期にかけて、前後の時期よりも深さ400km以深の背景地震活動率が数十%低下していたことがわかった。

以上のことから我々は、2009年サモア地震(M8.1)から2013年スラブ内地震(M7.4)にかけて、トンガ海溝沈み込み帯の少なくとも一部で、浅部から深部にまで影響を与える"スローイベント"が発生していたと考える。その実態は、プレート境界でのスロースリッピイベントやプレート沈み込みの一時的加速など、他の場所で報告されてきた現象と同種のものであるかもしれないが、沈み込み帯における浅い地震と深い地震の関連性についても新たな知見を与えるものである。

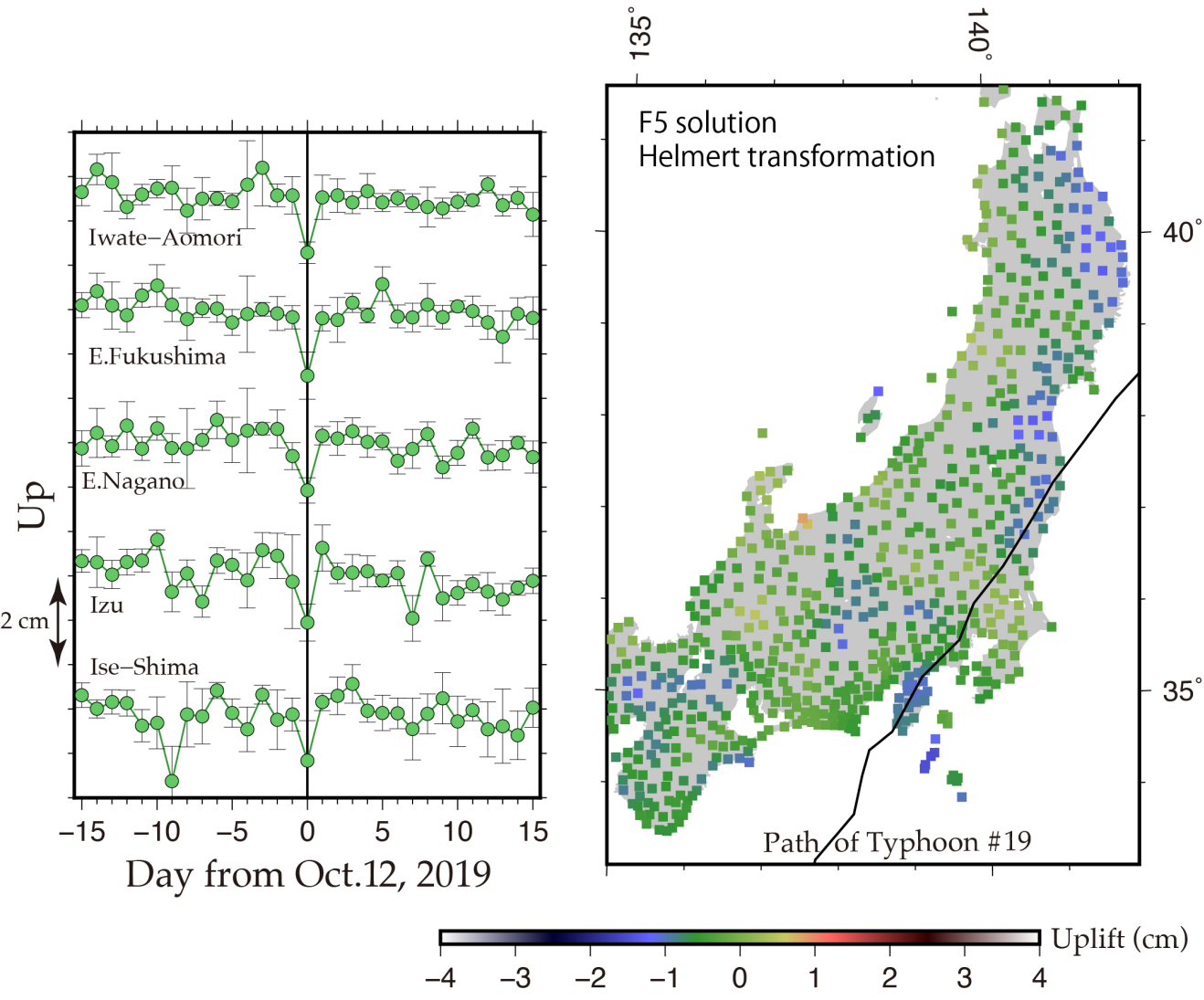
Crustal deformation by a heavy rain episode

*Kosuke Heki¹, Syachrul Arief¹, Wei Zhan²

1. Dept. Earth Planet. Sci., Hokkaido University, 2. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration

地表に置かれた荷重は固体地球の弾性変形をもたらす。古くから知られる海洋潮汐荷重変形に加え、大気荷重、積雪荷重、非潮汐性海洋荷重、ダムの湛水等が、全球衛星航法システム(GNSS)でしばしばみられる季節的地殻変動の要因として考慮され、GRACE衛星による重力季節変化とも定量的に対応づけられている。本研究では2019年10/12に日本列島を襲った令和元年台風19号(Hagibis, Category 5)を主に取り上げ、台風がもたらした多大な降水荷重による固体地球の変形を議論する。雨量はアメダス降雨計に加え、レーダーを用いた高空間分解能の解析雨量を併用した。GEONET測位データは国土地理院のF5解を用いた。全国から選んだ約百点の座標を用いて台風前後±15日間の中央値からの偏差を最小にするようなHelmert変換パラメータ（平行移動、回転、膨張）を日々推定した。それらの変換をGEONET全体に施し、測位解全体に共通な系統誤差を取り除いた。その結果台風の進路に沿った伊豆、福島浜通り、岩手沿岸部などで1-2 cmの沈降が台風上陸日に確認された。また沈降は翌日にはほぼ回復し、雨水が海洋に流出する時定数が1-2日であることがわかる。次にFarrell (1972)の荷重グリーン関数（剛性率は30 GPaとした）を用いてGNSS局の沈降を入力データとして、降水荷重分布を最小二乗法で推定した。台風の低気圧に起因する負の荷重は地殻の隆起をもたらすが、それらはアメダス気圧計のデータから計算した日平均気圧を用いて補正した。台風Hagibisがもたらした本州東部の総降雨量は、解析雨量を時空間的に積分すると約33 Gtとなる。一方、地殻上下変動から推定された荷重はそれをはるかに超える40 Gt程度となる。実際の荷重は、降雨量から一日の流出分を差し引いたものになるはずであり、雨量を超える荷重が実在することは考えられない。この矛盾の原因には、(1) GNSS局が立地する地域の地殻岩石の剛性率が局地的に低い、(2) GNSS局が凹地に選択的に配置されているため雨水が局地的に集中し、地域的な平均より大きな沈降がもたらされた、の二つが考えられる。GNSS局の標高を、GNSS局を中心とする一辺20 kmの正方形の中の平均地形高度(ETOPO1モデルから計算)と比べると、GNSS局の方が平均して数百m低いことがわかった。従って本研究では(2)が主要原因と考えている。発表ではさらに台風15号(Faxai, Category 4)や、梅雨前線が例年のようにもたらす西日本の豪雨についても、同様な地殻上下変動と解析雨量を比較する。

Figure: (left) Average time series of 7 GNSS stations around 2019 Oct. 12 from each of the 5 regions, Ise-Shima, Izu, Eastern Nagano, Eastern Fukushima, and Iwate-Aomori, along the path of the typhoon Hagibis (#19 in 2019). We can see significant subsidence on the day of the landfall and recovery on the next day. (right) Subsidence of GNSS stations on 2019 Oct. 12 relative to their median position of the period shown in the left figure. Spatially smoothed with the averaging radius of 20 km. We used the GSI F5 solutions and removed common mode errors by performing daily Helmert transformation to adjust the daily positions to the median positions.



Duration of Transient Deformation in Northeast Japan as Observed by Geodetic Data from 1890 to 2010

*Angela Meneses-Gutierrez^{1,2}, Paul Segall³, Takeshi Sagiya^{2,4}

1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Stanford University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Crustal deformation has been transformed in the past decades by the availability of continuous GPS data. Time series analysis of GPS data often assumes strain accumulation at a steady rate. In the case of NE Japan, analysis of horizontal GPS data from 1996-2010 revealed a decrease in trench perpendicular strain-rate in the decade prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mavrommatis et al., 2014). However, the limited duration of the observations makes it difficult to assess how these transients relate to the full interseismic period. Importantly, we do not know whether the strain-rate at the beginning of the GPS era (1996-1998) is typical of the preceding decades or not. It could be that strain-rate during this period was anomalously high.

Conventional geodetic data (triangulation and trilateration) are available in Japan since the end of the 19th century. The data consist of two first-order triangulation surveys (1883-1901; 1946-1972) and two trilateration campaigns in the latter half of the 20th century (1973-1985; 1977-1994), including second-order surveys. Examination of historical data in combination with GPS data can provide a way to evaluate the velocity and strain distributions in the last 100 years and elucidate whether the acceleration observed prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake represents a short-term transient deformation or not. Thus, we analyze horizontal deformation in NE Japan utilizing all the geodetic sets available.

We estimate horizontal displacement fields in NE Japan for the conventional geodetic data using the method developed by Yu and Segall (1996). In this, a denuisancing procedure is performed so that the dependency of the data on station coordinates is projected out of the system of equations and the horizontal displacement fields can be estimated directly. We solve for the inner coordinate or minimum norm estimate, representing the essential displacement after removing rigid motion and scale factor (in the case of triangulation) which fall in the null space of the observations. These results are transformed into average velocities by assuming steady deformation over the survey period and average shear strain rates are calculated for the region. The null space inherent in trilateration and triangulation data is constrained by GPS velocities in either the early GPS period or the period prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake.

We found that the maximum shear strain rate in South-Central Tohoku from 1884-1984 was not higher than those observed during the GPS era. Thus, suggesting that the transient deformation described by Mavrommatis et al. (2014) did not begin prior to 1996. Furthermore, the maximum shear strain rates from conventional geodetic data are consistent with those prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake, while the shear strain rate in the early stage of the GPS data may represent an anomalously high strain rate from the average interseismic situation, having geophysical implications related to precursory phenomena of the giant earthquake.

Room B | Regular session | S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

[S03]PM-1

chairperson:Takeshi Iinuma(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)),

chairperson:Ryoya Ikuta(Shizuoka Univ.)

Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM B

[S03-07] Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

○Hiroki Aota¹, Mako Ohzono^{1,2}, Hiroaki Takahashi¹, Yusaku Ohta³ (1.Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

1:00 PM - 1:15 PM

[S03-08] A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

○Ryoya Ikuta¹, Horng-Yue Chen², Kiyomichi Takemoto³, Takeru Kohmi¹, Masataka Ando¹ (1.Shizuoka Univ., 2.Academia Sinica, 3.Nagoya Univ.)

1:15 PM - 1:30 PM

[S03-09] GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

○Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido^{2,3}, Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta^{3,2}, Fumiaki Tomita¹, Ryota Hino^{3,2} (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3.Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S03-10] Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

○Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura² (1.Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2.Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

1:45 PM - 2:00 PM

[S03-11] A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

○Yuya Machida¹, Shuhei Nishida¹, Toshinori Kimura¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹ (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

2:00 PM - 2:15 PM

Limitation of the interplate coupling estimation at Kuril Trench around Nemuro-oki, eastern Hokkaido, Japan deduced from GEONET, and the possible contribution of newly constructed GNSS-A sites

*Hiroki Aota¹, Mako Ohzono^{1,2}, Hiroaki Takahashi¹, Yusaku Ohta³

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

千島海溝沿いにある北海道根室沖は、陸域のGNSSデータ解析から大きなすべり欠損速度分布が推定されており(例えば, Hashimoto et al., 2009), 次のプレート境界型大地震が発生する可能性が高い場所として注目されている地域である。また、この地域の津波の痕跡からは、17世紀に十勝沖から根室沖にわたる広範囲で超巨大地震が発生し、2011年東北地方太平洋沖地震のようにプレート境界浅部の断層がすべった可能性が示唆されている(Ioki and Tanioka, 2016)。そのため、このような海溝近くのプレート境界浅部の固着状態を推定することは、起こりうる地震の規模を予測するためにも重要であるが、距離が離れた陸域の観測のみからの推定には限界がある。このため、2019年7月に北海道大学・東北大学・東大地震研の共同研究により、根室沖の海底に3点のGNSS-A観測点が設置され、1回目の観測点の座標値推定が実施された(太田・他, 2019地震学会)。2020年10月に2回目の航海が予定されており、順調に行けば今年中に最初の地殻変動速度が得られると期待される。

これに先立ち本研究では、陸域のGNSS観測点による固着分布の検出限界を調べるとともに、新設されたGNSS-A観測点が、陸域のGNSS観測点では検出できない地域の固着分布推定にどのように貢献しうのかなかを定量的に検討する。まずは陸域のGNSS観測点が、固着分布の違いによってどの程度変化するかを調べる。本研究では、より現実的なプレート形状を仮定するため、ブロック断層モデルの1つである

TDEFNODE(McCaffrey, 2009)を用いて各点のノードにIwasaki et al. (2015)のプレート形状を与えて、試行錯誤的なフォワード計算から推定を行った。ブロックの相対的な剛体回転はプレート運動モデル

GSRMv2(Kreemer et al., 2014)で定義し、ブロック境界となる断層に様々な滑り欠損分布を与え、半無限均質弾性体を仮定したOkada (1992)によって各点での変位場、速度場を求めた。

先行研究等から固着の下限を60 kmと仮定してそれ以浅の固着率を1としたが、陸域の観測点から遠い深さ0-10 km, 0-20 kmのプレート境界面の固着率を0.5や0.0のように変化させた場合と、深さ0-60 kmにおいてフルカップリングさせた場合の計算値を比較すると、深さ0-10kmの固着率を変化させても陸域のGNSS観測点の速度場に大きな変化は生じないことがわかった。深さ0-20kmについては、固着率を0.5に変化させても深さ0-10kmの場合と同様に大きな変化はなかったが、固着率を0.0とした場合は陸域のGNSS観測点で最大1.5cm/yほどの変化が生じた。海溝近くのプレート境界浅部の固着状態を変化させても陸域の観測網のみからはそのシグナルの検出能力が低下することが報告されているように(Yokota et al., 2016), 本研究においても特に深さ10kmよりも浅いところについては陸域のみの観測網では固着状況を推定することが難しいことを確認した。一方で、同様の変化を与えてプレート境界浅部に近いGNSS-A観測点の予測値を見ると、深さ0-10 kmの領域で、0.5程度の固着率の変化させた場合、それに対応して水平成分では3cm/y以上、上下成分では最大0.8cm/y程度の違いが生じる。海底地殻変動の観測精度は、他の地域の先行研究などから水平成分で2-3cm/y程度と考えられているため、この誤差を考慮しても観測点周辺の固着率を検出可能と考えられる。上下成分については、水平成分よりも誤差が大きくなるため、固着率の細かい違いについては議論が難しいかもしれないが、今後の繰り返し観測による精度向上により、水平成分の結果をサポートする情報が得られる可能性がある。現在、プレート境界に沿って一様な固着分布を与えて簡易的な計算を行っているが、今後、17世紀型の超巨大地震(Ioki and Tanioka, 2016)におけるプレート境界浅部の固着分布を設定して計算するなど、走行方向にも変化する固着分布に対してGNSS-A観測点がどのような感度を持つか検討し、プレート境界浅部の固着の可能性やその状態について検討を行う。

A decade of GNSS/Acoustic measurements on the back-arc spreading in the southwestern end of the Okinawa Trough

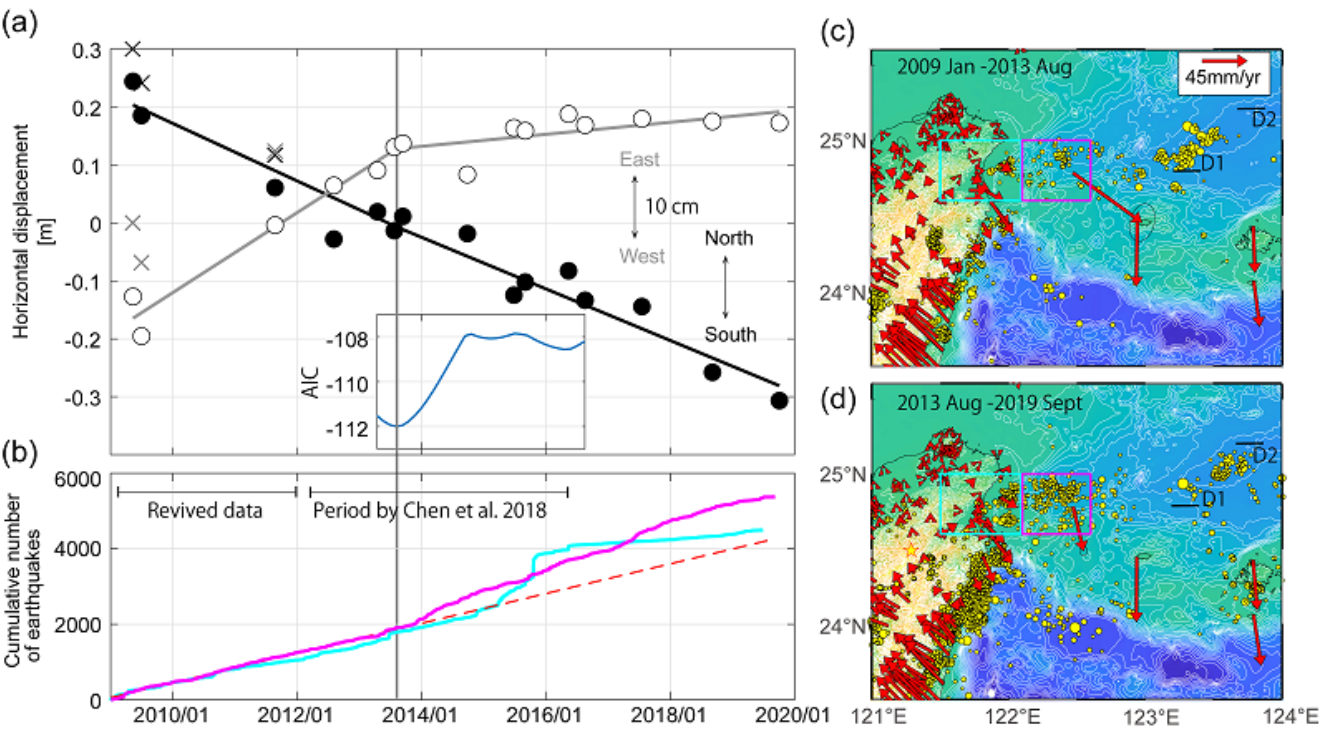
*Ryoya Ikuta¹, Horng-Yue Chen², Kiyomichi Takemoto³, Takeru Kohmi¹, Masataka Ando¹

1. Shizuoka Univ., 2. Academia Sinica, 3. Nagoya Univ.

The sustained seafloor geodetic measurement is crucial, even yet sparse in time and space, to constrain the undersea crustal deformation near the plate boundaries versus time. We present an integrated analysis of a decade of GNSS/Acoustic data collected at the site 60 km to the east of the northeast coast of Taiwan near the opening axis of the Okinawa trough back-arc basin. As a result, we obtained the horizontal and vertical positioning time series of the benchmark by the eighteen measurements from 2009 to 2019. The positioning time series of the benchmark shows a southeastward movement at a rate of 44 ± 3 mm/yr, with respect to the Yangtze plate, following the potential offset in 2012. The horizontal motion can be explained by the clockwise block rotation of the Yonaguni block united with the northern part of the Central Range. In addition, the vertical displacement of the transponder array shows the rapid subsidence of 20 ± 7 mm/yr from 2012 to 2019. The fast subsidence rate and the negative free-air gravity anomaly in this region indicate that the crustal thinning is compensated mainly by the surface deformation instead of the upward migration of the Moho. Considering the offset in 2012 due to the change of transponder array, the horizontal positioning time series of our site is best explained by two linear lines with a slope change in August 2013. The timing of the velocity change roughly coincides with the change of the periphery seismicity rate and the dike intrusion 150 km away from the site. The results show the potential of our seafloor geodesy site in accessing the temporal variation in the deformation rate near the spreading center of the Okinawa Trough, which is not accessible by on-land GNSS stations.

=====Figure caption=====

Time series of the OILN benchmark position relative to the stable part of Yangtze plate. (a) Same with Figures 3a and 3b. North-south (solid circles) and east-west (open circles) components. The coordinates for the revived data before 2012 are shifted assuming an offset at 2012. The original north-south and east-west coordinates are shown by black and gray crosses. Each time series is fitted by linear lines with a break at August 7, 2013 (vertical line) which is determined by AIC which is shown by the imposed diagram. The data for the middle eight campaigns are common with Chen et al. 2018 but solved by our new procedure. (b) Cumulative seismicity larger than M2.0 detected within the corresponding colored rectangular shown in Figures 6c and 6d. The red dashed line fits the seismicity during the period from January 2009 to July 2013. (c) Horizontal velocity vectors and seismicity larger than M3.0 during the period from Jan 1, 2009 to August 7, 2013. D1 and D2 show the location of dike intrusion modeled by Nakamura & Kinjo (2018) which occurred in the end of 2002 and April 2013, respectively. (d) Horizontal velocity vectors and seismicity during the period from August 8, 2013 to September 30, 2019.



GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation (2)

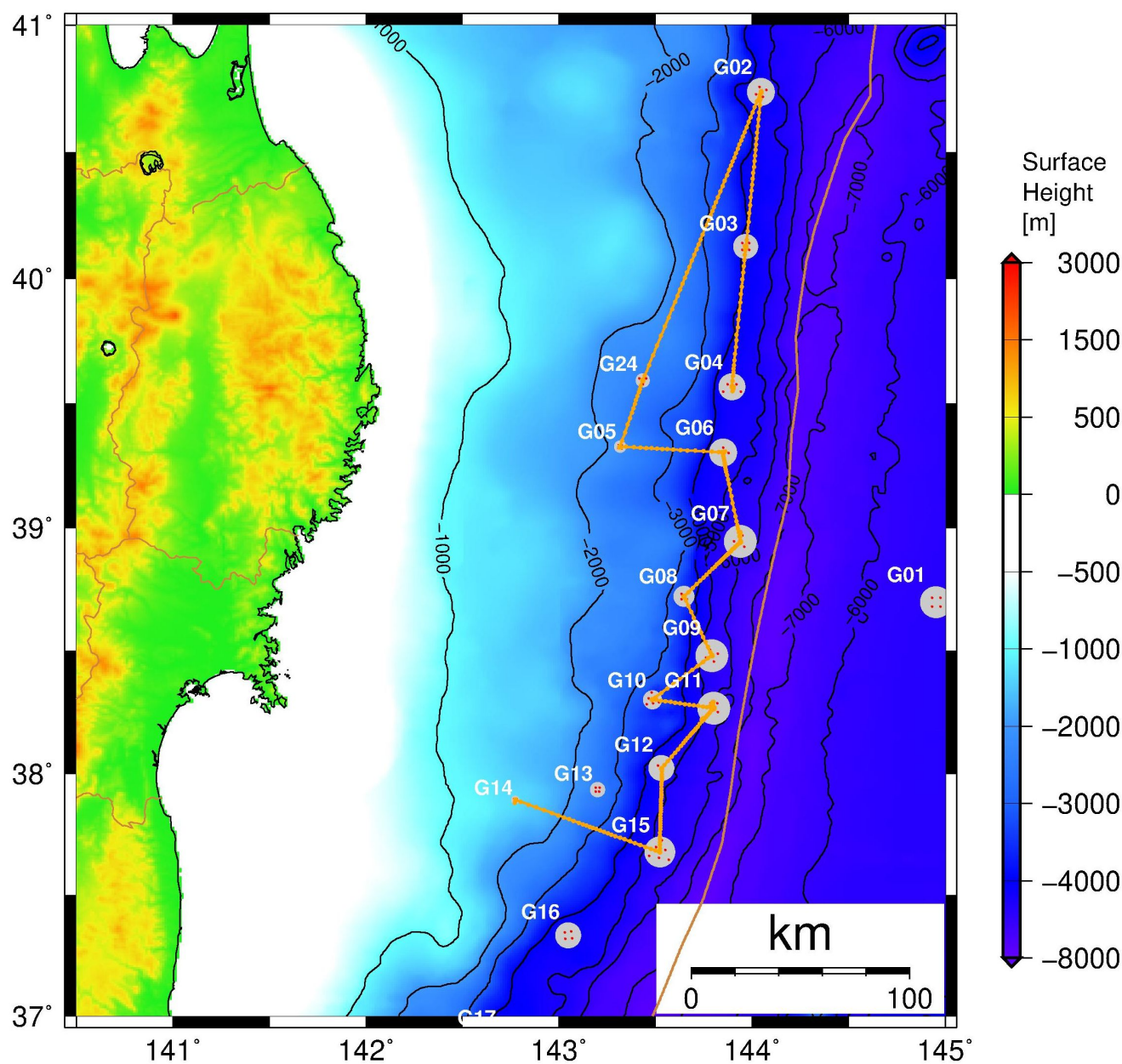
*Takeshi Iinuma¹, Motoyuki Kido^{2,3}, Tatsuya Fukuda¹, Yusaku Ohta^{3,2}, Fumiaki Tomita¹, Ryota Hino^{3,2}

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Tohoku University

GNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測（以下、GNSS-A観測）によって、プレート間の固着や地震時すべりによる地殻変動を海底で捉えることができ、多くの重要な知見が得られてきた。しかしながら、GNSS-A観測の実施には海上プラットフォームが不可欠であることがコスト面の問題を生んでいる。海上プラットフォームとしての有人船舶や係留ブイは、その運用に多額の費用がかかるため、経時的な地殻変動を検出するための高頻度観測や、多くの観測点を巡回しての観測を実施するのに限界がある。この点を克服して、多数の観測点における高頻度GNSS-A観測を行うため、海洋研究開発機構と東北大学では、無人機を用いた長期自律的GNSS-A観測を実施するための技術開発に共同で取り組んでいる。2019年7月に実施されたKS-19-12航海において、ウェーブグライダーを用いたGNSS-A観測を試験的に行った結果については、昨年の地震学会秋季大会で報告した通り、海底地殻変動観測点G02において、データの収録及び海底局の起動に無事成功した。また、大会後の解析によって、船舶を用いた場合と同程度のばらつきで海底局アレイ位置の推定が可能であることも示された[富田・他, 2019, 日本測地学会第132回講演会; Iinuma et al., 2019, AGU 2019 Fall Meeting].

昨年の試験の結果を踏まえ、今年度上半期においては、1か月程度ウェーブグライダーを実海域で運用して、日本海溝沿いに設置されている海底地殻変動観測点を巡回し、各観測点でのGNSS-A観測を実施する、長期運用試験を行った。昨年度のシステムを一部改良して、スラヤ衛星を利用した通信機能を付加し、ウェーブグライダーに搭載した制御装置に陸上から接続できるようにした。これによって、一部のデータの取得状況を確認したり、音響船上局へ手動でコマンドを送信したりできるようになった。当初は、2020年5月に、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の共同利用航海（KS-20-7）において、ウェーブグライダーを投入し、1か月余り後に傭船航海によって回収する予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大による機構船舶の運航停止によって、KS-20-7航海はキャンセルとなってしまった。このため、6月20日から23日にかけて東北大学が実施した「第三開洋丸」を用いた傭船航海での投入に切り替えて準備作業を行い、6月21日にG04観測点でウェーブグライダーを投入した。38日間の運用を経て、7月28日に「第八開洋丸」を傭船しての航海を実施して同機を回収した。

図にウェーブグライダーの航跡を示す。東北大学が2012年に設置した、G01～G20までの観測点のうちの13点、及び2019年に設置したG24の計14観測点を巡回し、GNSS-A観測を実施した。途中天候に恵まれない時期があり、太陽光パネルによる発電が不足したため、G13観測点での観測を断念した。取得したデータの解析は現在実施中ではあるが、各観測点における海底局アレイの位置を求めるのに十分な質・量のデータは得られており、大会当日は解析結果の詳細についての紹介する見込みである。



Evaluation of sound speed structure for each GNSS-A seafloor geodetic observation epoch using GARPOS

*Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura²

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

GNSS-A 観測では、海中音速度場が精度に重大な影響を与える。しかし、その影響について、場所・時期による違いの検証や定量的な評価は十分になされてこなかった。渡邊・内田 [2016, 研究報告] では、それぞれの海底局における実際に観測された鉛直音速度プロファイルの比較を行い、局ごとのばらつきの大小を評価した。しかし、GNSS-A 観測では音速度構造の水平傾斜や時空間変化が観測精度に強く影響する。その影響を考慮して、観測値に対して、観測機会、観測点ごとに異なる環境依存の誤差量が与えられるべきである。このことは、GNSS-A 時系列の精度評価のみならず、時系列解析を実施する上でも必要であり、課題となっている。本稿では、観測中に得られる海洋場の状態を新しく定義し、その値を明示的かつ定量的に抽出できる新しいソフトウェア GARPOS を用いて、数値シミュレーション結果等との比較を行う。

海面を海上局が移動する手法を採用した GNSS-A 観測では、海上局の位置の違いから抽出される海中音速度変化 g_1 と海底局の位置の違いによって抽出される音速度変化 g_2 がそれぞれ取り出される [Yokota et al., 2019, MGR; Yokota & Ishikawa, 2019, SNAS]. これら 2 つのパラメータを複素平面上に配置した $g_1 + ig_2$ (G と定義する) を考慮することで観測時の海中音速度傾斜構造の定性的な状態が把握できる。傾斜層が多くて 2 層までと仮定すると、たとえば、 G の偏角 $\arg G \sim 0$ となる場合、傾斜構造は単純かつ浅部側に寄っていると推定できる。 $\arg G \sim \pi/2$ の場合、2 層かつお互いが逆向きの傾斜を持っていると推定される。 $\arg G \sim \pi, 3\pi/2$ の場合は $\arg G \sim 0, \pi/2$ の場合と同様であるが向きが反転している。 G の絶対値 $|G|$ は傾斜場の強度を表している。 G は水平 2 方向に取り出され、立体的な場を反映する。 G は、観測時のあらゆるタイミングで推定されるが、海上局が移動する測線の形状などに拘束され、現状では 1500 m 深度の観測局で 1 時間程度の分解能しか持たないと考えられる [Yokota et al., 2020, Frontiers in ES].

観測値 G の例をいくつか紹介する。紀伊水道の沖合に位置する MRT2 では、2017 年以降の黒潮大蛇行時とそれ以前では明らかに観測時間中の $\arg G$ の平均値が変化している。また、南海トラフ側では $\arg G$ の平均値が観測機会ごとにばらつかず安定しているのに対して、日本海溝側ではばらつきが大きく、観測機会ごとの海洋場の大きな変動が観測されている。

海底局の場所や観測時期による G の変化は、局ごとの観測時の海洋場の状態を表現しており、各観測時の観測精度を議論する上で重要である。新たに開発された GARPOS [Watanabe et al., submitted] を用いることで、この値が明示的に取り出せるようになり、数値シミュレーション等を利用した比較を簡便かつ高速に行うことができるようになった。本稿では、アイコナル方程式に基づいた海中音響伝播の数値シミュレーション結果との比較を通して、上記の音速場の状態について定量的に議論する。

A development of submarine geodetic monitoring system by calibration of the DONET pressure gauge network

*Yuya Machida¹, Shuhei Nishida¹, Toshinori Kimura¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Eiichiro Araki¹

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

南海トラフ地震発生帯では、海洋プレートの沈み込みより年間1cm程度の海底上下地殻変動が予想される。巨大地震発生帯における海底地殻変動を捉えることは、プレート間の固着強度分布、巨大地震の発生過程、およびその推移を理解する上で非常に重要な情報である。このような現象を高精度で捉えるために南海トラフに展開されている地震・津波観測監視システム（DONET: Dence Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis, Kaneda et al., 2015; Kawaguchi et al., 2015）に接続された水圧計により、長期的な変動を捉えることが期待されるが、それぞれの水圧計は年間最大10hPa（=10cm）の固有のドリフトを持っており、地殻変動成分とドリフト成分を切り分けるためには水圧計の校正が必要である。そこで私たちは海底に設置している水圧計を校正し、水圧計に固有なドリフト成分を把握するための移動式水圧校正装置を開発してきた

（Machida et al., 2019）。移動式水圧校正装置は内部の水圧計の計測の不確かさの主要因である圧力ヒステリシス、温度特性、姿勢の影響を最小にするように設計されており、実験室においても海底においても1hPa（1cm相当）以下の精度で圧力を計測することができる。現場における校正時にはDONET水圧計との水準差を計測することができ、その水頭差を把握することでDONET水圧計に対して絶対圧力を値付けすることができる。海洋研究開発機構では移動式水圧校正装置の精度評価を行うため、DONET1, DONET2においてそれぞれ1観測点ずつ（KMB08, MRC10）の校正を繰り返し行ってきた。MRC10観測点においては2018年10月、2019年2月、2019年5月、2020年2月に校正を行った。その結果MRC10観測点の水圧計の機器的なドリフト成分は7.3hPa/yearとなり、2015年以降からの長期的な連続水圧データについて線形的に補正した結果、MRC10観測点では0.48hPa/year（速報値）の沈降を示した。また、2020年以降、観測域の拡大、および稠密化を目的としてDONET水圧計の校正観測点を順次拡大している。本講演ではこれまでのDONET水圧計の校正結果、および今後の展望について紹介を行う。

※DONETは構築終了後の2016年4月1日より海洋研究開発機構から防災科学技術研究所に移管され、陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS: Monitoring of Waves on Land and Seafloor）の一環として両者が連携して運用・保守を行っている。