

Tue. Oct 22, 2024

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

9:00 AM - 10:30 AM JST | 12:00 AM - 1:30 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S09] AM-1

chairperson: Ryota Takagi (Graduate School of Science, Tohoku University), Junichi Nakajima (Tokyo Institute of Technology)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S09-11] An earthquake nest beneath the Tokyo Bay: implications for a subducted seamount

*Junichi NAKAJIMA¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S09-12] Relationship between S-Wave Velocity Anomalies and Spatial Variations in Deep Tectonic Tremor Activity in the Nankai Subduction Zone

*Akifumi Takayama¹, Yasunori Sawaki², Yihuan Ruan¹, Yoshihiro Ito³, Takuto Maeda⁴, Takuo Shibutani³ (1. Graduate School of Faculty of Science, Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Graduate School of Science and Technology, Hiroshima University)

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

[S09-13] Migrating Earthquake Swarm Activity in the Okinawa Trough revealed by Matched Filter Method

*Yuji Abe¹, Mamoru Nakamura² (1. University of the Ryukyus, 2. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

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

[S09-14] Seismicity in shallow part of Hyuga-nada subduction zone by ocean bottom seismometer from 2015 to 2022

*Chingyu Hu^{1,2}, Masanao Shinohara¹, Yusuke Yamashita³, Takashi Tonegawa⁴, Tomoaki Yamada¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S09-15] Spatial correlation between shallow tremor distribution and S-wave velocity structure in the northern Japan Trench

*Ryota Takagi¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Kiwamu Nishida², Masanao Shinohara² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S09-16] High-precision hypocenter distribution of shallow tectonic tremors in the northern Japan Trench using relative location method

*Kosuke Minamoto¹, Ryota Hino¹, Kazuma Matsumoto¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

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

10:45 AM - 12:15 PM JST | 1:45 AM - 3:15 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S09] AM-2

chairperson: Tsukasa Mitogawa (Pacific Consultants Co., LTD.), Genki OIKAWA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S09-17] Seismicity of similar earthquakes in Ogasawara Ioto

*Genki OIKAWA¹, Hideki UEDA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S09-18] Earthquake Swarm Detection along the Middle America Trench: Implications for the Relationship between Seismicity and Slow Slip Events

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Vladimir KOSTOGLODOV², Takuya NISHIMURA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Universidad Nacional Autónoma de México)

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

[S09-19] A Hawkes Process Model for Tectonic Tremors Considering Spatial Interactions and Long-Term Periodicity

*Seiya Yano¹, Satoshi Ide¹, Shunichi Nomura² (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University)

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

[S09-20] Detection of earthquake swarms off the Boso Peninsula and investigation of the association with small slow slip events

*Ryo Yoshimura¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura² (1. Kyoto Univ., 2. DPRI)

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

[S09-21] Modeling for seismicity modulated during megathrust earthquake cycles in the Kanto region, using Coulomb stress change

*Tsukasa Mitogawa¹, Takuya Nishimura² (1. Pacific Consultants Co., LTD., 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-22] Japan M5 or over forecast for 2025 based on rate/state stress transfer projects strong influences of the 2011 M 9.0, 2024 M 7.5 and M 7.1 events

*Shinji TODA¹, Ross S Stein² (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

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

1:30 PM - 3:00 PM JST | 4:30 AM - 6:00 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S09] PM-1

chairperson: Yuta Mitsui (Faculty of Science, Shizuoka University), Takao Kumazawa (Institute of Statistical Mathematics)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S09-23] Global investigation of foreshock acceleration prior to large earthquakes

*Kai Koyama¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-24] Nonstationary ETAS model: How it works for external forcing

*Takao KUMAZAWA¹, Yoshihiko Ogata¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-25] Inverse analysis of non-uniform seismic data by ETAS model

*Yoshihiko OGATA¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-26] Seismicity before and after the February 6, 2023 *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes in Turkey

*Kazuyoshi Z. NANJO^{1,2,3,4}, Takao Kumazawa³, Jun Izutsu^{5,1}, Takane Hori^{4,1}, Toshiyasu Nagao^{6,1}, Kazuo Oike¹ (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. Chubu University, 6. Tokai University)

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

[S09-27] Expansion rate of aftershock zones and b-value for magnitude 7-class earthquakes around Japan: characteristics of interplate earthquakes

*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA², Ayaka MIYAMOTO³ (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Formerly at Graduate School of Science, Shizuoka University)

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

[S09-28] Relationship with aftershock number and source region area

*Tetsuo Hashimoto¹, Takashi Yokota² (1. NIED, 2. AIT)

Room B | Regular session : S08. Earthquake physics**3:15 PM - 5:00 PM JST | 6:15 AM - 8:00 AM UTC | Room B Medium-sized Conference room 301 (3F)****[S08] PM-2**

chairperson:Nelson Pulido(National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), Toshiko Terakawa(Nagoya University)

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

[S08-01] Broadband frequency rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake using the multi-beam back-projection and strong motion records

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

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

[S08-02] Modeling the Stress field around focal area of the 2016 Kumamoto earthquake(Mj7.3), Kyushu, Japan

*Yushi Nagayama¹, Satoshi Matsumoto², Takeshi Matsushima², Kentaro Emoto², Ryunosuke Takayama¹, Taiki Kono¹, Yuta Okuda¹ (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S08-03] Shear Strain Energy Changes in the Coseismic and Postseismic Periods of the 2016 Kumamoto Sequence: Constraints on Background Stress Field

*Angela Meneses-Gutierrez¹, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S08-04] Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on changes in elastic strain energies and stress rotation

*Toshiko TERAKAWA¹, Kimiyuki Asano², Yumi Urata³ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Kyoto University, 3. AIST)

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

[S08-05] A complex rupture sequence of the M_W 7.7 2023 southeast of the Loyalty Islands earthquake

*Asuka Murakami¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-06] Rupture Dynamics and Fault Characteristics of the Maidan Fault during the 2024 Mw 7.1 Wushi Earthquake in Xinjiang, China

*Hangyu Gao¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-07] Multi-Scale Rate- and Roughness-Dependent Friction Realizes a Variety of Seismic-Aseismic Transitions

*Reiju Norisugi¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto University)

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

📅 Tue. Oct 22, 2024 9:00 AM - 10:30 AM JST | Tue. Oct 22, 2024 12:00 AM - 1:30 AM UTC | 🏢 Room B
Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S09] AM-1

chairperson: Ryota Takagi (Graduate School of Science, Tohoku University), Junichi Nakajima (Tokyo Institute of Technology)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[S09-11] An earthquake nest beneath the Tokyo Bay: implications for a subducted seamount

*Junichi NAKAJIMA¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[S09-12] Relationship between S-Wave Velocity Anomalies and Spatial Variations in Deep Tectonic Tremor Activity in the Nankai Subduction Zone

*Akifumi Takayama¹, Yasunori Sawaki², Yihuan Ruan¹, Yoshihiro Ito³, Takuto Maeda⁴, Takuo Shibutani³ (1. Graduate School of Faculty of Science, Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

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

[S09-13] Migrating Earthquake Swarm Activity in the Okinawa Trough revealed by Matched Filter Method

*Yuji Abe¹, Mamoru Nakamura² (1. University of the Ryukyus, 2. Faculty of Science, University of the Ryukyus)

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

[S09-14] Seismicity in shallow part of Hyuga-nada subduction zone by ocean bottom seismometer from 2015 to 2022

*Chingyu Hu^{1,2}, Masanao Shinohara¹, Yusuke Yamashita³, Takashi Tonegawa⁴, Tomoaki Yamada¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S09-15] Spatial correlation between shallow tremor distribution and S-wave velocity structure in the northern Japan Trench

*Ryota Takagi¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Kiwamu Nishida², Masanao Shinohara² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S09-16] High-precision hypocenter distribution of shallow tectonic tremors in the northern Japan Trench using relative location method

*Kosuke Minamoto¹, Ryota Hino¹, Kazuma Matsumoto¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

An earthquake nest beneath the Tokyo Bay: implications for a subducted seamount

*Junichi NAKAJIMA¹

1. Tokyo Institute of Technology

首都圏の地下には、多くの地震巣（近くの活動から隔離された地震活動が非常に集中している領域）が存在する。その中で最も活発な活動は東京湾北部の深さ60–70 kmに存在する太平洋プレート上部境界面で発生する地震の巣であり、過去約20年間の最大の地震はM6である。一方で、1894年の明治東京地震(M7.0)はこの地震の巣の周辺で発生したという指摘もある。波形相関を用いた震源決定を行ったところ、地震の巣は半径約10 kmの円状の地震分布をしており、地震の並びは沈み込む太平洋プレートの平均傾斜角よりわずかに急であるという特徴が明らかになった。さらに、地震発生の特徴は空間的に異なり、第2象限ではプレート界面地震が多く、第3象限ではプレート界面地震が少なく、第4象限では $M \geq 5$ の地震が発生している。講演では地震活動の特徴を詳細に示した上で、東京湾北部の地震の巣の原因として海山の沈み込みを提案する。

Relationship between S-Wave Velocity Anomalies and Spatial Variations in Deep Tectonic Tremor Activity in the Nankai Subduction Zone

*Akifumi Takayama¹, Yasunori Sawaki², Yihuan Ruan¹, Yoshihiro Ito³, Takuto Maeda⁴, Takuo Shibutani³

1. Graduate School of Faculty of Science, Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Graduate School of Science and Technology, Hiroasaki University

本研究では、理論波形と観測波形のレシーバ関数 (RF) の計算を通じて、南海トラフ沈み込み帯における地震波速度異常域と深部テクトニック微動活動の空間変化との関係を調べることを目的とする。南海トラフ沈み込み帯では、テクトニック微動の放射エネルギー分布の空間変化が観測されている。これまでの研究から、テクトニック微動の発生要因の一つに、S 波速度異常として反映される流体の存在が示唆されている。しかし、プレート境界付近の詳細な S 波速度異常域の分布と、広範囲にわたるテクトニック微動活動の空間変化について言及した研究は少ない。また、テクトニック微動域周辺の詳細な S 波速度異常域の分布について、3次元的な S 波速度異常の分布を考慮した理論 RF と、観測 RF の両者を用いて論じた研究も少ない。したがって、このような研究は、深部スロー地震の発生メカニズムの解明に不可欠である。

南海トラフ沈み込み帯における S 波速度異常域の分布とテクトニック微動活動の空間変化を定量的に評価するため、本研究では遠地震の直達 P 波到達前後の波形にマルチバンド RF を適用した。マルチバンド RF では、プレート境界面付近の S 波速度の大局的な構造と詳細な構造の両方の情報が得られる。本研究では RF の計算に時間領域反復デコンボリューション法を適用した。この手法においては、ベイズ情報量規準の最小化をイタレーションの終了条件として用いる利点が示されており (Ruan et al., 2023), 本研究でもそれに従った。はじめに、プレート境界付近における観測 RF シグナルの振幅、到達時間、およびそれらの back azimuth 依存性などの特徴と、テクトニック微動活動の空間変化との関係について詳細に調べた。その結果、観測波形から海洋モホ面、大陸モホ面や海洋地殻の低速度帯に関連する RF シグナルを検出した。また、マルチバンド RF の形状の変化は、深部テクトニック微動活動の空間変化と対応する可能性がある。

次に、深部テクトニック微動域直上での観測 RF を説明するプレート境界面周辺の S 波速度異常域の分布を推定するために、理論波形から求めた理論マルチバンド RF と観測 RF を比較した。理論波形の計算には波線理論に基づく手法 (RAYSUM) および3次元有限差分法 (OpenSWPC) を用いた。観測 RF と理論 RF の両方から、深部テクトニック微動活動の空間変化を制約する S 波速度異常や、その分布についても議論を行う。

Migrating Earthquake Swarm Activity in the Okinawa Trough revealed by Matched Filter Method

*Yuji Abe¹, Mamoru Nakamura²

1. University of the Ryukyus, 2. Faculty of Science, University of the Ryukyus

沖縄トラフは琉球弧の北西に位置し、現在もリフト拡大が進行している活発な背弧海盆である。沖縄トラフではしばしば群発地震が発生する。群発地震は主に沖縄トラフの中軸沿いや海底火山・熱水噴出孔周辺で発生する。ほとんどの群発地震は数日以内に活動が収束するが、1週間以上、あるいは約1年間続くこともある。群発地震の活動の推移をより詳細に把握するためには、より多くの地震活動を捉える必要がある。しかし沖縄トラフで群発地震が発生した場合、一時的に検知能力が低下する。また、M4クラスの地震では、気象庁の速度マグニチュードと変位マグニチュードに大きなずれが生じる (Nakamura, 2022)。そこでMatched filter法 (Kato et al., 2014)を用いて群発地震発生時に震源が特定されていないイベントを検出した。またマグニチュードの問題を解決するため、本研究では速度マグニチュードを採用した。2002年から2022年にかけて、沖縄トラフのリフト軸周辺で発生した主要な群発地震について、気象庁のカタログにある地震データをテンプレートとして使用し、イベントを検出した。群発地震発生域の周辺にある複数の地震観測点で記録された水平動成分の連続波形に対し、テンプレート地震のS波と連続波形との相関を計算した。相関はS波読み取り時刻のプラスマイナス2.0秒間を用いた。波形にはBandpass filter 2.0 -4.0 Hz を適用した。地震活動の移動が確認された場合は、Rivalta (2010)の式を用いて移動速度と期間を推定した。これはダイク貫入によって群発地震活動域が指数関数的に拡大することを説明するモデルである。解析の結果、気象庁カタログに記載されたイベントを含め、約2~3倍の地震が検出された。また、2002年石垣島北部、2013年与那国海近海、2014年奄美大島近海、2019年宮古島北部の群発地震で地震活動の移動が確認された。南部沖縄トラフの群発地震では、地震活動域が長さ10 km以上に広がるケースが多かったが、中部沖縄トラフの群発地震では、ほとんどの活動域が約10~15km以内に留まった。2013年と2020年の与那国群発地震は、与那国リフトの南にある高まり (Futagoyama field : 24.867N, 123.308E)から活動が開始している。ここは熱水噴出孔が確認されており (InterRidge Vents Database Ver.3.4)、直下にはマグマ貫入の痕跡が確認されている (Nishizawa et al., 2019)。Futagoyama fieldの直下に熱源となるマグマだまりがあるとすると、そのマグマだまりからのダイク貫入によって、群発地震が繰り返し発生していると考えられる。中部沖縄トラフでは、群発地震活動域が10 km以内に収まっていることが多い。これよりも狭い範囲で地震活動が移動している可能性も考えられるが、震源決定の精度が不足しているため、詳細を把握することは難しい。南部沖縄トラフと比較して、中部沖縄トラフで活動範囲が狭い群発地震が多いことは、マグマ活動、特にその粘性の違いに起因している可能性がある (Shinjo and Kato, 2000)。

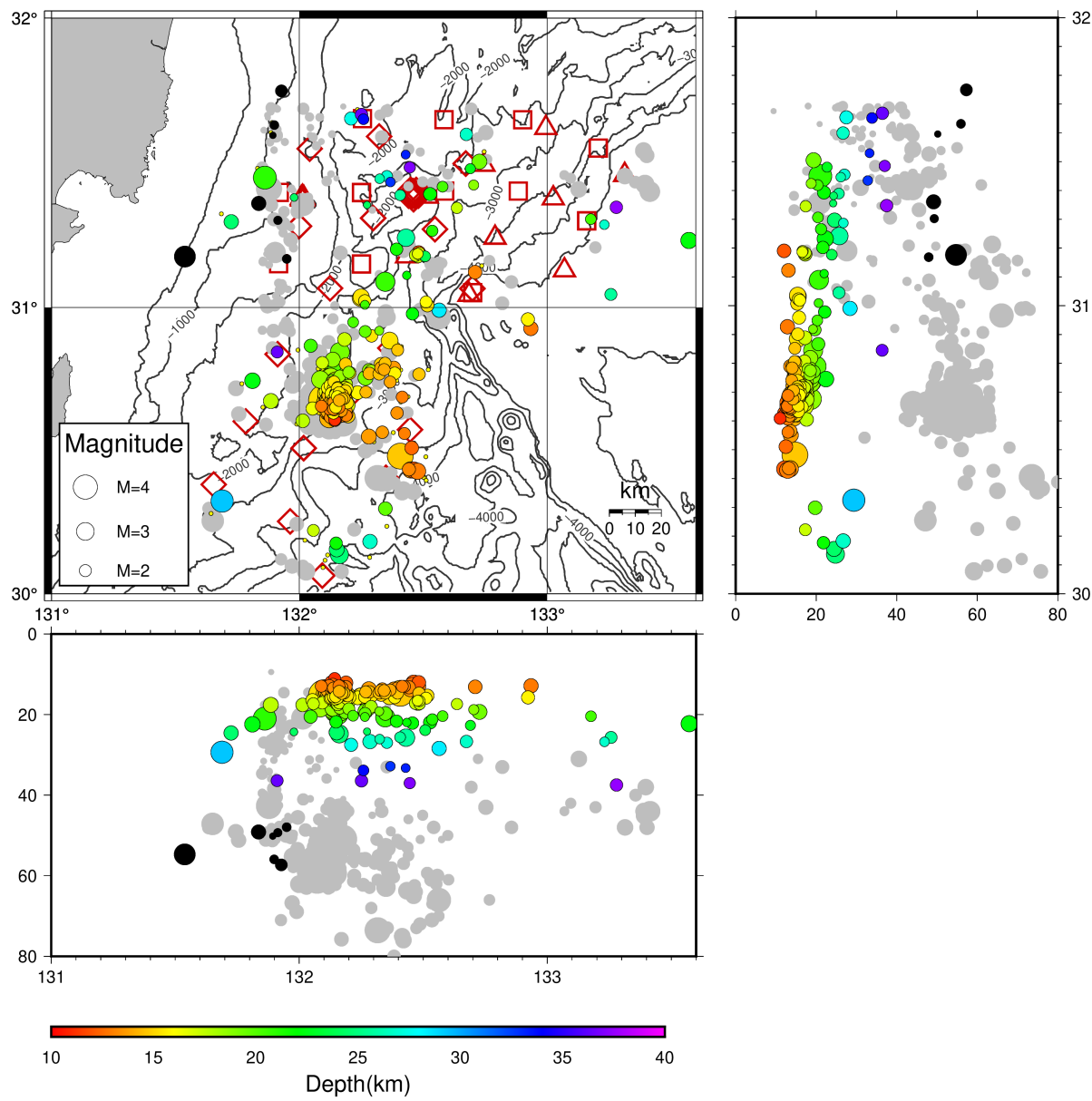
Seismicity in shallow part of Hyuga-nada subduction zone by ocean bottom seismometer from 2015 to 2022

*Chingyu Hu^{1,2}, Masanao Shinohara¹, Yusuke Yamashita³, Takashi Tonegawa⁴, Tomoaki Yamada¹, Takeshi Akuhara¹, Kimihiro Mochizuki¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The Nankai Trough extends from Suruga Bay off the coast of Shizuoka Prefecture in the north to the offshore area of Miyazaki Prefecture in Kyushu in the south. It lies at the plate boundary where the Philippine Sea Plate subducts beneath the landward plate in a northwestward direction. Due to this tectonic setting, this area is known for catastrophic earthquakes occurred repeatedly. Although Hyuga-nada is situated on the southwestern side of the Nankai Trough, there is no historical record of earthquakes with a magnitude of 8 or above. Additionally, the region frequently experiences slow earthquakes, such activities are believed to occur frequently at the plate boundary in the Nankai Trough region according to previous studies. Therefore, research on slow earthquakes in the study area is also beneficial for understanding the stress conditions of the plates. This research emphasizes the precise localization of regular seismic events and integrates it with an analysis of slow earthquake activities to provide a comprehensive discussion, aiming to deepen the understanding of seismic characteristics in the region. To monitor seismic activities consistently over approximately a year, marine seismic networks composed of pop-up-type Long-Term Ocean Bottom Seismometers (LT-OBS) were deployed in the Hyuga-nada segment. The LT-OBSs captured continuous waveform data, with event times sourced from the JMA catalog used for detecting seismic events. Waveforms were displayed based on these event times, followed by manual analysis to determine P-wave and S-wave arrival times, maximum amplitude, and first arrival polarity (Urabe and Tsukada, 1991). Additionally, P-waves converted from S-waves at velocity discontinuities between sediment layers and the igneous crust were used to adjust travel times considering structural heterogeneity. The initial event locations were determined using the Hirata and Matsuura method (1987) with one-dimensional velocity structure modified from Yamamoto et al. (2020). The difference in travel times between S-waves and converted P-waves from S-waves provided station corrections to refine event locations. Average differences between observed and calculated travel times were computed for each station and were applied to estimate station corrections. This process was repeated iteratively 10 times to achieve more accurate hypocenters. Subsequently, the events were relocated using the Double-Difference seismic tomography method (tomoDD-SE, Zhang and Thurber, 2003, 2006) with both absolute and relative arrival times. This method calculates travel times using a pseudo-bending ray tracing algorithm (Um and Thurber, 1987) and employed a three-dimensional velocity structure model based on Nakanishi et al. (2018). After relocation with tomoDD-SE, focal solutions were estimated using first-motion data of P-waves. Outputs of tomoDD-SE included calculated takeoff and azimuthal angles to each station, which were essential for determining fault plane solutions using the Hardebeck and Shearer method (2002). This program is based on a grid search method. Finally, the Frohlich method (1992, 2001) was applied to classify earthquake source mechanisms based on the dip angles of the pressure, tension and null axes. This classification divided the events into pure thrust-fault (vertical T-axis), normal-fault (vertical P-axis), and strike-slip (vertical B-axis) types based on their focal solutions. The results indicated that seismic events were uniformly distributed within the network in both spatial and temporal domains, except for earthquake swarms. The JMA catalog suggested earthquake swarms as numerous earthquakes occurring within a short time frame: from December 18th to 23rd in 2017 and January 10th to 18th in 2018. We identified many earthquakes occurred in narrow

region and most events had depths ranging between 10 and 20 km. While focal mechanism solutions revealed various source mechanisms in the study region, strike-slip fault and/or normal fault types were the most prevalent. The relocated events were notably deeper than the plate boundary, indicates that most earthquakes in the study region occurred within the subducting Philippine Sea plate.



Spatial correlation between shallow tremor distribution and S-wave velocity structure in the northern Japan Trench

*Ryota Takagi¹, Ryosuke Azuma¹, Ryota Hino¹, Kiwamu Nishida², Masanao Shinohara²

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

日本海溝北部では浅部微動が深さ約13 kmのプレート境界等深線（Koketsu et al. 2012）に沿って分布する（Tanaka et al. 2019; Nishikawa et al. 2019）。しかし、微動分布はプレート走向方向に連続的ではなく、微動の空白域が存在する。本研究では、日本海溝北部における浅部微動分布を規定する要因を明らかにするため、常時微動表面波を用いたトモグラフィー解析により同領域のS波速度構造を推定した。使用するデータは、2006年10月～2007年6月と2007年10月～2008年6月にそれぞれ青森県沖と岩手・宮城県沖で実施された自己浮上型海底地震計を用いた海底地震観測による連続記録である。観測点数は88点、観測点間隔間は約20 kmであり、S-netに比べてより高密度である。地震計水平成分の方位を推定・補正後、常時微動相互相関関数の全観測期間平均を計算し、周期10～20秒においてレイリー波基本モード・1次高次モードとラブ波基本モードを抽出した。まず青森県沖の観測データを用いて抽出した表面波の位相速度からS波速度構造を推定した結果、微動分布と推定したS波速度構造に良い相関が見られた。微動はプレート境界及び上盤内のS波速度が低い領域のみで発生しており、低S波速度領域の広がりにはプレート走向・傾斜方向に微動分布と一致する。この低S波速度領域は、海溝から100 km 程度・深さ20 km程度まで存在し、沈み込む海洋プレート堆積層からの脱水深度（Hyndman & Peacock 2003; Nishikawa et al. 2023）と対応することから、海洋プレート堆積層から脱水した流体を反映していると考えられる。また、岩手・宮城県沖の観測データも含めた解析から得られた位相速度マップからも、岩手県沖と宮城県沖で発生する微動発生域において低速度であることが示された。以上のことから、日本海溝北部では、沈み込む海洋プレート堆積層から排出された流体が浅部微動発生に寄与していると考えられ、その流体分布がプレート走向方向に不連続な浅部微動の分布を規定している可能性がある。

High-precision hypocenter distribution of shallow tectonic tremors in the northern Japan Trench using relative location method

*Kosuke Minamoto¹, Ryota Hino¹, Kazuma Matsumoto¹

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

日本海溝北部では通常地震 (Fast 地震) と浅部低周波微動 (Slow 地震) が時空間的に連動して活動しており, それらは共にプレート境界で発生すると考えられている. 本研究では, 2007-2008年に日本海溝北部に展開された海底地震計 (OBS) データを用い, 浅部微動と通常地震の震源の相対的な位置関係を精度よく決定することで, より信頼できる微動分布を得ることを目的とする.

一般的に通常地震はP, S波の到達時刻情報を用いて震源が決定されるため, 震源深さがよく拘束される. 一方, 微動波形にはP, S波の明瞭な到達が見られないことから, 微動震源は観測点間でのS波の到達時刻差から推定されるため, 震源深さの制約が原理的に難しい. これに加えて, 海底下浅部のS波速度構造が詳細に得られていないこともあり, 海域で発生する浅部微動の震源深さの信頼性は高いとは言えない. 結果としてSlow地震とFast地震の相互作用についての詳細な議論は難しいままである.

そこで本研究では, 日本海溝においては微動と通常地震が空間的に近接し, 同一の深さ範囲で発生しているといった特徴 (Nishikawa et al., 2019) を踏まえ, 精度良く決定された通常地震の震源に対する相対震源決定を行うことで, 微動の震源深さの推定精度を向上させ, 通常地震と微動との相互作用の議論の上で最も本質的な両者の空間分布の相対的關係を高い分解能で明らかにすることを目指す.

具体的に本研究では, CF (Hendriyana & Tsuji, 2021) の相互相関から計算される走時差を用いて個々に決定された震源を初期値として, Triple Difference Method (Guo & Zhang, 2016) による相対震源決定を行う. CFによって検出, 震源決定された初期震源は微動と通常地震との両者を含んでおり, 検知されたイベントの震源を個別に決定すると上盤側に広く分布していたが, 再決定によりプレート境界周辺に集まるようになったことから, 微動と地震は震源深さの上で近接していると考えられる.

さらにS-P時間から精度良く決定された通常地震をリファレンスとして相対震源決定を行うことで, 微動の震源深さの絶対値を評価できる可能性がある. そこで, PhaseNet (Zhu & Beroza, 2019) によるP, S波の読み取り値を用いて hypomh (Hirata & Matsu'ura, 1987) と hypoDD (Waldhauser & Ellsworth, 2000) により通常地震の震源を再決定したところ, それらの震源はプレート境界近傍に集中して分布しており, 上述の相対震源決定の結果を踏まえると, 通常地震と同様に微動もプレート境界付近における現象であると推測される.

今後はPhaseNetモデルによるS波の読み取り値と, 相互相関から計算されるS波走時差を連立したTriple Differenceにより, 固定した通常地震震源に対して微動震源を相対的に決定する.

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

📅 Tue. Oct 22, 2024 10:45 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 22, 2024 1:45 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 Room B
Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S09] AM-2

chairperson: Tsukasa Mitogawa (Pacific Consultants Co., LTD.), Genki OIKAWA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S09-17] Seismicity of similar earthquakes in Ogasawara Ioto

*Genki OIKAWA¹, Hideki UEDA¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S09-18] Earthquake Swarm Detection along the Middle America Trench: Implications for the Relationship between Seismicity and Slow Slip Events

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Vladimir KOSTOGLODOV², Takuya NISHIMURA¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Universidad Nacional Autónoma de México)

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

[S09-19] A Hawkes Process Model for Tectonic Tremors Considering Spatial Interactions and Long-Term Periodicity

*Seiya Yano¹, Satoshi Ide¹, Shunichi Nomura² (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Accountancy, Faculty of Commerce, Waseda University)

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

[S09-20] Detection of earthquake swarms off the Boso Peninsula and investigation of the association with small slow slip events

*Ryo Yoshimura¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura² (1. Kyoto Univ., 2. DPRI)

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

[S09-21] Modeling for seismicity modulated during megathrust earthquake cycles in the Kanto region, using Coulomb stress change

*Tsukasa Mitogawa¹, Takuya Nishimura² (1. Pacific Consultants Co., LTD., 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-22] Japan M5 or over forecast for 2025 based on rate/state stress transfer projects strong influences of the 2011 M 9.0, 2024 M 7.5 and M 7.1 events

*Shinji TODA¹, Ross S Stein² (1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor Inc.)

Seismicity of similar earthquakes in Ogasawara Ioto

*Genki OIKAWA¹, Hideki UEDA¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED)

小笠原諸島に位置する硫黄島では、高い地熱や噴火といった火山活動に伴う様々な現象が見られる。なかでも火山性地震活動は特に活発であり、防災科学技術研究所（防災科研）では日常的に多くの火山性地震を検出し、その震源カタログを作成している。防災科研が作成した火山性地震カタログの中には、互いに類似した波形を持つ相似地震がしばしば発生していることが分かった。相似地震の典型的な例として、プレート境界で観測される繰り返し地震がある。繰り返し地震は、背景にあるプレート運動と関連があることから直接推定が難しいすべり速度や固着状態の推定に用いられている（e.g., Igarashi et al. 2003）。硫黄島でもプレート境界と似たように、背景の地殻変動と地震活動に相関があることが知られており（e.g., Ueda et al. 2018）、相似地震は火山内部の情報を知る手掛かりになる可能性がある。そこで本研究では、硫黄島で発生する火山性地震についてクラスタリングおよびクラスターごとの発生位置の推定を行った。

硫黄島には防災科研の定常観測点3点と気象庁の観測点2つの合計5点の3成分速度地震計が置かれており、本解析ではこれらを用いた。2022-2023年のカタログを用いて、5つの3成分観測点の相互相関係数の和からDBSCANクラスタリング(Ester et al. 1996)を行い火山性地震の分類を行った。その結果、火山性地震は19個のクラスターに分類された。次に、クラスターごとに波形をスタックしクラスターのテンプレート波形を作成した。硫黄島では観測点の数が少ないため、テンプレート波形の読み取り走時、振動軌跡、振幅の3つの情報を用い、理論値と観測値の2乗残差が最小となる位置をグリッドサーチによって決定した。観測点のカバー率が低いため震源の特定精度は低い、地殻変動の激しい阿蘇台断層付近に多くの地震を含むクラスターが分布していることがわかった。また、マグマだまりの存在が示唆されているカルデラ再生ドームの直下ではなく、その周辺に相似地震クラスターが分布していることがわかった。この結果は、硫黄島で観測される相似地震が、地殻変動に伴うstick-slip現象によって引き起こされた可能性を示唆している。

Earthquake Swarm Detection along the Middle America Trench: Implications for the Relationship between Seismicity and Slow Slip Events

*Tomoaki NISHIKAWA¹, Vladimir KOSTOGLODOV², Takuya NISHIMURA¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Universidad Nacional Autónoma de México

スロースリップイベント（SSE）は、主にプレート境界で発生する、低速で過渡的な断層すべり現象である。SSEは、ときに大地震の発生や、小中規模の地震の群発活動を伴う（例えば、Nishikawa et al., 2023）。中米沈み込み帯では、SSEがメキシコのゲレロ州、オアハカ州、コスタリカのニコヤ半島等で観測されており、同沈み込み帯で発生する大地震（M 7以上）との関連性が、盛んに研究されてきた（例えば、Voss et al., 2018; Cruz-Atienza et al., 2021）。それに対して、中米沈み込み帯で発生する中規模地震（M4からM6程度）の活動とSSEとの関係については、未だわかっていないことが多い。この関係の解明は、中米沈み込み帯における地震活動を支配するメカニズムの解明や、同沈み込み帯の地震活動確率予測の精度向上に不可欠である。そこで、本研究は、2001年から2024年までのANSS地震カタログを使用し、中米沈み込み帯における中規模地震の群発活動を網羅的に検出した。そして、群発地震活動とSSEの時空間的關係や、群発地震発生期間に周囲のGNSS観測点で記録された過渡的変位を調べた。

群発地震の検出には、時空間ETASモデル（Zhuang et al., 2002）に基づくNishikawa & Ide (2018) の方法を用いた。まず、中米沈み込み帯を、海溝軸に沿って、（1）メキシコ・コリマ州からオアハカ州、（2）オアハカ州からグアテマラ、（3）エルサルバドルからニカラグア、（4）ニカラグアからパナマの4領域に分割し、各領域内のM 4.3以上の地震活動に対して、時空間ETASモデルの8つのパラメータ（ $K, \alpha, c, p, d, \gamma, q, \nu$ ）を推定した。ETASパラメータの推定には、Omi et al. (2015)のベイズ的アプローチを採用した。マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）によって、事後確率分布をサンプリングし、事後確率を最大化するパラメータセットを得た。パラメータの事前確率分布には、十分に広い区間で一様な確率分布を、各パラメータに対して仮定した。そして、各領域において、半径30 kmの検出円を、緯度・経度方向に15 kmの間隔で配置し、推定したETASパラメータを用いて、各検出円内における地震発生数のETASモデルによる予測値を計算した。最後に、実際に観測された地震発生数と予測値を比較することで、ETASモデルが説明できない地震活動の活発化を、群発地震として検出した。活発化の検出基準は、Nishikawa & Ide (2018)と同一の基準を用いた。

次に、検出された群発地震活動を、先行研究（Cruz-Atienza et al., 2021; Xie et al., 2020など）で報告されているSSEの活動と比較した。SSEが未報告の地域では、群発地震活動の震央付近のGNSS観測点の日座標値を確認し、未報告のSSEに起因する可能性のある過渡的な変位の有無を調べた。ゲレロ州におけるGNSS日座標値はCruz-Atienza et al. (2021) に、他の地域の日座標値はNevada Geodetic Laboratory (Blewitt et al., 2018)による。また、小さな過渡的な変位の検出には、Nishimura et al. (2013)の方法を用いた。

解析の結果、2001年から2024年の間に、中米沈み込み帯全域では、合計59の群発地震系列が検出された。ゲレロ地震空白域、メキシコ・チアパス州の沖合、コスタリカとパナマの国境のブリカ半島付近では、同一の検出円において、群発地震系列が4回または5回繰り返して検出された。59の群発地震系列のうち4系列は、2002年、2006年のゲレロSSEと、2014年のニコヤ半島SSEの発生期間と時空間的に近接して発生していた。これらの群発地震活動は、SSEによって誘発された可能性がある。加えて、未報告のSSE候補もいくつか見つかった。ニコヤ半島では、2022年に発生した群発地震系列の期間中に、付近の複数のGNSS観測点で数センチメートルの南向きの変位が観測された。同様に、ブリカ半島付近では、群発地震活動に伴い、付近の複数のGNSS観測点で約1 cmの南向き変位が観測された。また、チアパス州の沖合では、5つの群発地震系列が同じ地域で繰り返し検出され、そのうち4系列では、沿岸のGNSS観測点で数ミリメートルの南向き変位が観測された。本研究の結果は、中米沈み込み帯において、SSEが中規模地震の群発活動を誘発している可能性と、群発地震活動を伴う未報告のSSEが存在する可能性を示唆する。

A Hawkes Process Model for Tectonic Tremors Considering Spatial Interactions and Long-Term Periodicity

*Seiya Yano¹, Satoshi Ide¹, Shunichi Nomura²

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

スロー地震は、通常の地震に比べて非常にゆっくりとした滑りや変形を伴う現象であり、各地のプレート境界で観測されている。その発生パターンはプレート境界の応力変化や環境変化を反映していると考えられており、巨大地震との関連性も指摘されている (e.g., Obara & Kato, 2016; Warren-Smith et al., 2019)。したがって、スロー地震の発生パターンをモデル化することは、スロー地震と通常の地震との関係を解明し、プレート境界の状態をリアルタイムにモニタリングするための重要な基礎情報となる。特に、地震学的手法によって2-10 Hz程度の帯域で観測されるテクトニック微動や低周波地震は、他のスロー地震と比べて検出頻度が高く、震源決定精度も優れているため、スロー地震の詳細な時空間発展を明らかにし、プレート境界の不均一性を議論するための手掛かりとなる (e.g., Bartlow et al., 2011; Yabe & Ide, 2014; Frank et al., 2015)。

テクトニック微動は時空間的に密集して発生する傾向があり、さらにそのクラスターが準周期的に現れることが知られている。Ide & Nomura (2022) や Nishikawa (2024) は、地域ごとのテクトニック微動の準周期的な発生様式を、数十秒から1日程度の周期を持つ短期的な繰り返しと、数十から百日程度の周期を持つ長期的な繰り返しの双方を組み込んだ更新過程を用いてモデル化した。

一方で、テクトニック微動の空間分布は一般に不均一であり、数kmから数十km、数十分から1ヶ月程度にまで及ぶ多様な時空間スケールでの移動現象も報告されている。また、その移動方向や速度も完全にランダムではなく、地域や時間スケールに依存する (e.g., Shelly et al., 2007; Ghosh et al., 2010; Ide, 2010)。地域ごとの特徴に加えて、このような特徴的な時空間スケールでの移動現象をモデルに取り組むことで、時空間発展の予測可能性が向上することが期待される。そこで本研究では、テクトニック微動の時間的特徴と空間的特徴を同時に表現するために、周辺領域で発生したイベントの影響も考慮したホークス過程を用いることで、テクトニック微動の活動をモデル化した。

テクトニック微動のカタログはYano & Ide (2024) の手法を用いて構築した。この手法は、従来のエンベロープ相互相関法に、教師なし学習のクラスタリング手法を組み合わせることで、より客観的なテクトニック微動の検出を可能にした手法である。解析対象は2004年4月から2013年12月までの約10年間で西日本において発生したテクトニック微動とし、Hi-netのデータを用いて検出を行った。

検出したテクトニック微動を、平面で近似したフィリピン海プレートに投影し、その平面上を半径2.5 kmの円に内接する正六角形のグリッドで分割した。それぞれの正六角形領域では、1. 領域内のランダムな偶発的效果、2. 領域内で発生したイベントによる誘発効果、3. 隣接領域で発生したイベントによる誘発効果、4. 領域内の長期的なローディングによる効果、のいずれかによって微動が発生すると仮定した。これら1から4の効果をすべて組み込んだ強度関数に従うホークス過程モデルをFull Modelとする。さらに、効果1のみのモデル (Random Model)、効果1と2のモデル (Simple Hawkes Model)、効果1, 2, 3のモデル (Interactive Hawkes Model)、効果1, 2, 4のモデル (Loading Model) のように、パラメータ数の異なるモデルを用意した。各モデルに対して最尤パラメータを推定するとともに、赤池情報量基準 (AIC) に基づいて比較を行った。

周辺領域からの影響を考慮しない場合、長期的な繰り返しの効果を含むモデル (Loading Model) は、シンプルなホークス過程モデル (Simple Hawkes Model) と比較して、AICが10程度小さかった。これは、テクトニック微動の時間発展をモデリングする際に、長期的な繰り返しを考慮することの有効性を示した先行研究 (Ide & Nomura, 2022; Nishikawa, 2024) と整合的である。長期的な繰り返しの時定数は100から300日程度であった。

さらに、一部の領域では、周辺からの効果を考慮したモデル (Interactive Hawkes Model) や、すべての効果を取り込んだモデル (Full Model) のAICが、Simple ModelやLoading Modelのそれに比べて200程度と大幅に改善した。そのような領域は、10から30 km程度の比較的小規模な移動現象が頻繁に観測される領域と一致してい

た. また, 周辺領域から受ける影響の大小には, 空間不均一性や非対称性が存在し, それらはテクトニック微動の小規模なクラスター分布や移動方向と調和的な場合も見られた.

本研究のモデルを用いることで, テクトニック微動の時間的, 空間的な特徴を同時にモデル化し, 数km程度の空間スケールまで考慮した予測モデルを構築することができるかもしれない.

Detection of earthquake swarms off the Boso Peninsula and investigation of the association with small slow slip events

*Ryo Yoshimura¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura²

1. Kyoto Univ., 2. DPRI

はじめに

明確な本震を伴わない地震発生レートの増加を群発地震と呼ぶ(e.g., Mogi, 1963)。群発地震は、火山活動が活発な地域や沈み込み帯、トランスフォーム断層など、陸海域問わず様々な場所で発生する。群発地震は、地殻流体の移動やスロースリップイベント (SSE) 等の過渡的な非地震性現象によって引き起こされるとされ (e.g., Nishikawa & Nishimura, 2023)、群発地震の検出は、非地震性現象と地震活動の関係を明らかにする上で重要である。

本研究は、ETASモデル (Ogata, 1988; Okutani & Ide, 2011) と赤池情報量規準 (AIC; Akaike, 1974) に基づく、シンプルな群発地震検出手法を開発した。そして、その手法を房総半島沖の地震活動に適用した。本発表では、その結果を報告する。

手法

ETASモデルは、ある時刻 t の地震発生レート($\lambda(t)$)を、定常的な背景地震発生レート(μ)と、大森・宇津の余震則(e.g., Utsu, 1957)に従う余震発生レート

$(\sum_{t_i < t} K \exp\{\alpha(M_i - M_c)\} / (t - t_i + c)^p)$ の和で表す。ここで、 t_i と M_i は、 i 番目の地震の発生時刻とマグニチュードである。また、 α は余震発生レートのマグニチュード依存性、 c は地震発生直後の地震発生レートに関係する時定数、 K は余震発生レートの大きさを決める係数、 p は余震発生レートの減衰のべき指数、 M_c は最小マグニチュードである。モデルパラメータは、 μ, α, c, K, p の5つである。

本研究では、Okutani & Ide (2011)により群発地震活動を考慮し改良されたETASモデルを参考に、群発地震発生期間における背景地震発生レートの増分を $\mu_1(t)$ として群発地震活動を考慮した新たなモデルを作成した。 $\mu_1(t)$ は、群発地震により増加した地震の個数(N_{sw})と正規化されたガウス関数 $(1/(2\pi T_{sws}^2)^{1/2} \exp\{-(t - T_{swc})^2/(2T_{sws}^2)\})$ の積で表す。ここで、 T_{swc} は群発地震中の背景地震発生レートのピーク時刻、 T_{sws} は正規化されたガウス関数の標準偏差であり、 N_{sw} と T_{sws} は新たなパラメータである。

また、本研究では、群発地震中の背景地震発生レートのピーク時刻 T_{swc} を1日ごとにグリッドサーチを行い、新たなモデルパラメータとした。そして、群発地震を考慮したモデルと、オリジナルのETASモデルのAICの差(ΔAIC)が-2以下になる日付を抽出し、その日付を群発地震中の背景地震発生レートのピークの日付とみなした。パラメータの推定には最尤法を用いた。

データ

次に本研究は、SSEに伴う群発地震活動の発生が知られている、相模トラフ房総半島沖を中心とした深さ0-50kmの領域(北緯34.8°から35.6°、東経139.9°から140.9°)において、群発地震検出を実施した。解析期間は2000年1月1日から2010年12月31日の11年間とした。この期間は、2002年10月と2007年8月のSSEに伴う群発地震活動を含む。震源データには気象庁一元化震源カタログを用い、マグニチュード2.0以上の地震を解析に使用した。

結果

解析の結果、 ΔAIC が-2以下かつ最小となる日付が16日抽出され、そのうち ΔAIC が特に大きく減少した日付(-10以下)が5日あった。その5日のうち2日は、2002年と2007年のSSEに伴う群発地震活動に対応した。残

り3日は、東京湾と房総半島南東部における狭い領域で発生した群発地震に対応した。これらの群発地震活動は、いずれもフィリピン海プレート上面のプレート境界面付近で発生した。

本手法は、既知の群発地震活動に対応する ΔAIC の顕著な減少を検出することができた。これは、本手法の有用性を支持する。また、本手法は、先行研究では未報告の群発地震活動に対応する ΔAIC の減少も検出した。これらの中で、少なくとも3系列の地震活動はより小規模なSSE（Nishimura, 2021）と時空間的に近接して発生していた。加えて、既知のSSEに伴って発生した群発地震と似た震源分布をもつ群発地震系列も検出した。しかし、この地震系列と、時空間的に近接したSSEは報告されていない。新たに検出された群発地震の中には、未報告の小規模なSSEと関連するものが存在する可能性もあり、GNSSデータなどの測地観測データを用いた更なる調査を予定している。

Modeling for seismicity modulated during megathrust earthquake cycles in the Kanto region, using Coulomb stress change

*Tsukasa Mitogawa¹, Takuya Nishimura²

1. Pacific Consultants Co., LTD., 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

関東地方周辺では、過去の地震履歴から元禄関東地震及び大正関東地震といった相模トラフ沿いの海溝型大地震の前にM7程度の地震が複数回発生したことが知られている（中央防災会議，2013）。このように、その地域を代表する断層での大地震が長期間に渡ってその周辺の地震活動に影響を与えるような傾向は、西南日本やサンフランシスコ湾岸地域でも観測されている。多くの先行研究では、観測された地震活動の時間変化を説明するための指標としてクーロン破壊応力変化（CFS）が使用され、その有効性が実証されてきた（例えば、Hori and Oike, 1999）。本研究では、相模トラフ沿いの海溝型大地震サイクルの応力変化が関東地方周辺の地震活動の時間変化に与える影響を Δ CFSに基づいて評価した。

モール・クーロンの破壊条件では、クーロン破壊応力（CFS）が断層強度を超えた時に地震が発生する。多数の断層からなる断層群があり、それぞれの断層におけるCFSが0から断層強度まで一様に分布している場合、単位時間あたりの地震発生数はクーロン応力の増加速度に比例する（例えば、Ader et al., 2014）。そのため、単位時間あたりのCFSの過去の最大値からの増分をクーロン破壊速度（CFR）と定義すると、CFRが大きいほど地震の発生頻度が高まると言える。

応力の計算領域は、東経138.4~142度、北緯34.4~36.6度、深さ0~80kmの範囲とし、多様な地震メカニズム解を考慮するために、1997年から2023年の期間のM3.5以上のF-netのメカニズム解（福山ほか，1998）に対して1年間隔のCFRを計算した。ただし、計算負荷を低減するために計算領域内の格子点（0.2°間隔）上で応力テンソルを計算し、セントロイド位置が最も近い格子点の応力テンソルを用いて各メカニズム解に対するCFRを近似した。

媒質は半無限マクスウェル粘弾性層の上に厚さ60 kmの弾性層がある2層構造を仮定し、応力変化の計算には粘弾性応答の半解析解（Fukahata and Matsu'ura, 2006）のソースコードを使用した。粘弾性層での粘性率は 1.0×10^{19} Pa sとし、この時のマクスウェル緩和時間は約5.28年である。応力源は、相模トラフ沿いの海溝型大地震サイクル、2011年東北地方太平洋沖地震、長期的な定常応力载荷の3つを考慮した。相模トラフ沿いの固着による応力変化は、Nishimura et al. (2018) のバックスリップ速度のうち、深さ30 km以浅をバックスリップで与えた際の時間無限大の解を定常成分として累加する。相模トラフ沿いの海溝型大地震は、200年毎に1923年大正関東地震と同規模程度の大地震（以降、大正型地震とする）、1800年ごとに1707年元禄関東地震と同規模程度の大地震（以降、元禄型地震とする）が発生し、元禄型地震の発生時には大正型地震は発生しないものと仮定した。元禄型地震のすべり域はバックスリップ領域の全域、大正型地震のすべり域は東経約140度以西の領域に対して、地震間に蓄積したバックスリップを全て解放するように地震時すべりを与えた。次に、2011年東北地方太平洋沖地震による応力変化は、茨城県沖の最大余震を含む4つの矩形断層モデルを仮定し、地震時すべりを与えた。最後に、長期的な定常応力载荷は、CFS速度を1 kPa/yearとして与えた。これらの応力源を考慮して、各メカニズム解に対する地震サイクル中の1年毎のCFRの時間変化を計算した。

1923年大正関東地震から次の海溝型大地震までの地震活動を評価するために、本モデルの地震サイクルの中における元禄型地震の次の大正型地震からの200年間について着目した。空間的なCFRの時間変化の傾向を調べるために、1年毎に各メカニズム解のCFRを最近傍の格子点上で累積し、さらに同一緯度経度の格子点のCFRを合計することで、水平格子点上のCFRの時間変化を計算した。各水平格子点上の1年毎のCFRを50年間隔で累積すると、大正型地震から150年後以降（西暦2073年から2123年に相当）で伊豆半島東方沖付近や東京都及び神奈川県西部でCFRが急激に増加する傾向にあることが分かった（Fig. 1）。ただし、本モデルでは長期的な定常応力载荷としてCFS速度を一律1 kPa/yearで仮定しており、伊豆マイクロプレートの境界となっている伊豆半島東方沖付近のような地域では、地震活動の時間変化の傾向を正しく評価できていない可能性が考えられる。今後の課題として、このような応力载荷速度の地域的な違いを考慮する必要があると考えら

れる.

謝辞：本研究は，京都大学・東京工芸大学・清水建設・大崎総合研究所の共同研究「レジリエンス&サステナビリティを考慮した建物性能評価」の一部として実施しました。また，粘弾性応答の計算には深畑幸俊教授から頂いたプログラムを改変して使用しました。メカニズム解のデータは防災科学技術研究所（F-net）を使用しました。図の作成にはGMT6（Wessel et al., 2019）を使用しました。ここに記して感謝いたします。

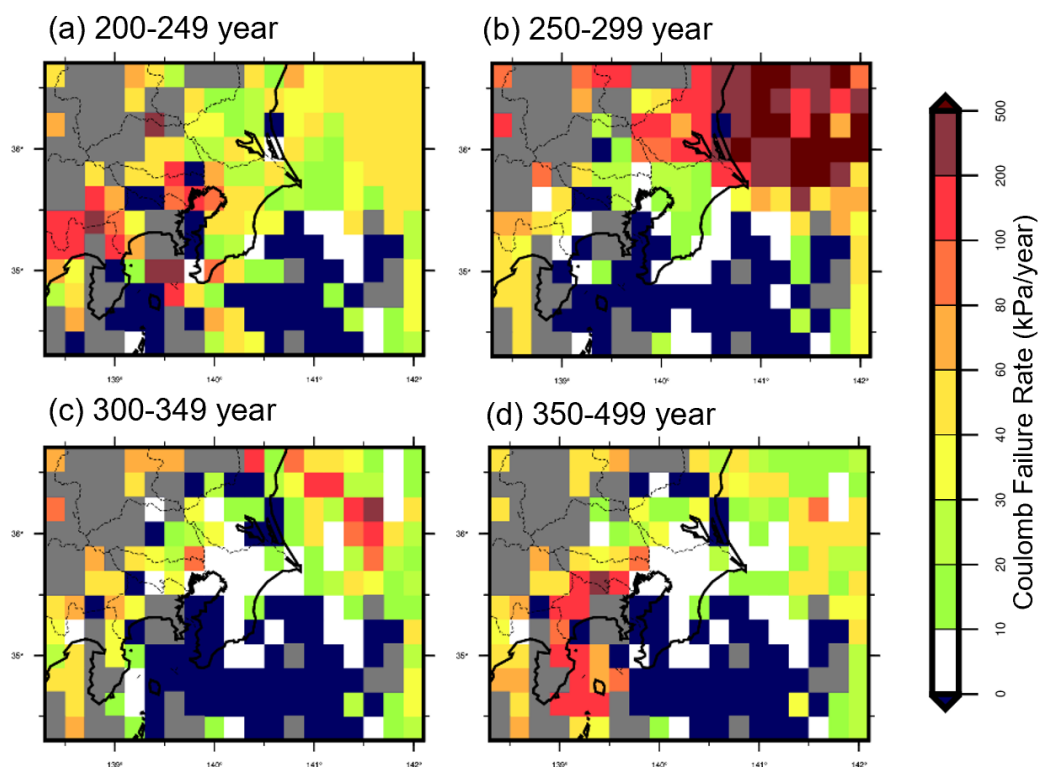


Fig. 1 Accumulation of the Coulomb failure rate every 50 years in the Kanto region. (a) to (d) show the time elapsed since the Genroku-type earthquake. The dark blue color indicates that the Coulomb failure rate has never been positive in the 50-year period.

Japan M5 or over forecast for 2025 based on rate/state stress transfer projects strong influences of the 2011 M 9.0, 2024 M 7.5 and M 7.1 events

*Shinji TODA¹, Ross S Stein²

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor Inc.

We contend that there is sufficient evidence that earthquakes promote and inhibit failure on nearby faults, a process governed principally by, whose effect decays with time. We reproduce the time decay and non-linearity of the response of seismicity to stress changes by rate/state friction (Dieterich 1994). Instead of calculating the stress on mapped faults, here we calculate the stress imparted to background focal mechanisms, because wherever there is a focal mechanism, a fault must exist and has indeed slipped. In rate/state friction, stress increases amplify the background seismicity rate, and stress decreases suppress it, and so the background seismicity model is crucial to the calculation. We have experimented with both the GEAR1 earthquake rate model (Bird et al 2015) and the observed JMA background rate for a sufficiently long period above the magnitude of completeness. We use the 200 M 6.0 earthquakes since 1995 as the sources of stress, represented by published or USGS finite fault models, or point sources if the events lack finite fault models. We calculate annual retrospective forecasts of M5 earthquakes for the years 1995-2023 in and around four main Japan's islands ranging of longitudes 128°-148° and latitudes 30° - 46°. To score the skill of these models, we devised a new metric which measures the difference between the observed and forecast cumulative number of events. In more than half of the testing years, the rate/state Coulomb model for a given year using JMA background outperforms the JMA background itself (the average behavior), and it also outperforms the GEAR1 model background, or the rate/state Coulomb model that uses GEAR1 to amplify the stress changes. This probably arises because GEAR1 includes ~100 Tohoku aftershocks, whereas the JMA background does not. We then present prospective forecast for 1 Jan -31 Dec 2025.

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

📅 Tue. Oct 22, 2024 1:30 PM - 3:00 PM JST | Tue. Oct 22, 2024 4:30 AM - 6:00 AM UTC | 🏠 Room B
Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S09] PM-1

chairperson: Yuta Mitsui (Faculty of Science, Shizuoka University), Takao Kumazawa (Institute of Statistical Mathematics)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S09-23] Global investigation of foreshock acceleration prior to large earthquakes

*Kai Koyama¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-24] Nonstationary ETAS model: How it works for external forcing

*Takao KUMAZAWA¹, Yoshihiko Ogata¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-25] Inverse analysis of non-uniform seismic data by ETAS model

*Yoshihiko OGATA¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

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

[S09-26] Seismicity before and after the February 6, 2023 *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes in Turkey

*Kazuyoshi Z. NANJO^{1,2,3,4}, Takao Kumazawa³, Jun Izutsu^{5,1}, Takane Hori^{4,1}, Toshiyasu Nagao^{6,1}, Kazuo Oike¹ (1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. Chubu University, 6. Tokai University)

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

[S09-27] Expansion rate of aftershock zones and b-value for magnitude 7-class earthquakes around Japan: characteristics of interplate earthquakes

*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA², Ayaka MIYAMOTO³ (1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Formerly at Graduate School of Science, Shizuoka University)

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

[S09-28] Relationship with aftershock number and source region area

*Tetsuo Hashimoto¹, Takashi Yokota² (1. NIED, 2. AIT)

Global investigation of foreshock acceleration prior to large earthquakes

*Kai Koyama¹, Tomoaki Nishikawa², Takuya Nishimura²

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

大地震の前駆現象に関する研究は、地震の予測可能性を議論する上で極めて重要である。特に、大地震前に発生する前震活動は、これまで活発に研究されてきた。例えば、Bouchon et al. (2013)は、環太平洋のプレート境界で発生する大地震多くで、その直前に前震発生数が加速度的に増加したと主張した。また、Nishikawa & Ide (2018)は、2008年に茨城県沖で発生したM6.9のプレート境界地震の数日前に、加速的な前震の群発活動があったと報告している。さらに、数値シミュレーションや室内岩石実験においても、大地震の直前に前震発生数が加速度的に増加することが示唆されている(McLaskey, 2019; Ito & Kaneko, 2023など)。しかし、Bouchon et al. (2013)に関しては、地震活動のクラスタリングの影響を十分に考慮できていないことなどが、その後、批判されている(Felzer et al., 2015)。また、Nishikawa & Ide (2018)も、解析対象が茨城県沖の地震活動に限られており、同様の加速現象が、他の大地震においてどの程度一般的であるのかは不明である。

そこで、本研究では、世界標準の地震活動統計モデルであるETASモデル (Ogata, 1988) を用いて、大地震前の前震活動について全世界的調査を実施した。前震活動を評価するために、数値シミュレーションや岩石実験の結果を参考に、大地震前の前震活動の加速を表す項($=L/(T_{eq} - t + d)^q$)をETASモデルに新たに加えた。この項は、逆大森則に類似しており、大地震 (本震) 発生時刻に至るまでの地震発生レートの加速を記述する。ここで、 t は時刻、 T_{eq} は本震発生時刻、 L , d , q は新たなモデルパラメータである。

さらに、本研究では、上記のモデルに基づき、前震活動の特徴を定量化する新たな指標を定義した。まず、地震発生時刻における地震発生レート (定常な背景レート、余震発生レート、前震発生レートの合計) のうちの前震項の割合を評価することで、「前震確率」 (各地震が前震項から生じた確率) を定義し、それを各地震に対して計算した。次に、計算された前震確率が50%を上回る地震を前震と定義し、その個数を「前震個数」とした。また、本震発生時刻から遡り、全前震の半数が含まれる期間を「前震50%期間」と定義し、前震活動を特徴づける時定数とみなした。以降の解析では、前震個数と前震50%期間を用いて、前震活動を定量化する。

本研究では、上記の新たなモデルと指標を、ANSS地震カタログに記載されている、2000年から2024年に発生した全世界のM6.5以上の大地震 (366個) に適用した。具体的には、大地震の震央から100km以内で、大地震前の10年以内に発生したM4.5以上の地震の活動を解析した。ここで、解析対象とは別の大地震の余震活動による影響を排除するため、Maeda (1996)の余震活動継続時間に関する式を用いて、対象の大地震が、それよりも大きな地震の余震活動期間内に発生していた場合は、解析から除外した。

その結果、366個の大地震のうち、18個 (約4.5%) の大地震の前に、前震活動の加速現象と解釈できる活動が観察された。ここでは、前震個数が5個以上、前震50%期間が10日未満となった前震活動を、顕著な加速を示すものと評価した。例えば、Nishikawa & Ide (2018)で解析された、日本海溝沈み込み帯における2008年の茨城県沖の地震や、2008年にバヌアツ沈み込み帯で発生したM7.3のプレート境界地震は、特に顕著な前震活動の加速を示した。2008年の茨城県沖の地震は前震個数15個、前震50%期間0.025日を記録し($L=0.42$, $d=0.042$ 日, $q=2.1$)、2008年のバヌアツの地震は前震個数10個、前震50%期間0.05日を記録した($L=0.73$, $d=0.061$ 日, $q=1.7$)。また、バヌアツ沈み込み帯では、前震活動の加速現象と解釈できる現象が、他にも多数見られた。

上記の解析に加えて、地震活動の加速現象が大地震前に特有の現象であるか検証するために、小地震前の地震活動に対しても同様の解析を現在実施している。また、加速現象の偶然性を評価するため、ETASモデルから合

成された地震カタログに対しても同様の解析を実施予定である。

以上のように、本研究は、前震活動の特徴を定量化し、評価するための新たな解析の枠組みを提案するとともに、全世界の前震活動の特徴を明らかにするものである。

Nonstationary ETAS model: How it works for external forcing

*Takao KUMAZAWA¹, Yoshihiko Ogata¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

The stationary ETAS (epidemic type aftershock sequence) model is based on important empirical laws in aftershock statistics with a self-similar feature, and is therefore useful for the statistical analysis of many common earthquake occurrence series. However, as earthquake catalogs become richer, the non-stationarity arising from geophysical heterogeneity becomes more pronounced. This presentation discusses the utility of a model that assumes time dependence of the first two ETAS parameters, which are sensitive to the short-term prediction. The inversion analyses of the nonstationary ETAS model show heuristic results for swarm earthquakes and complex mainshock-aftershock-type seismicity. The case studies demonstrate how these parameters change quantitatively in swarm seismicity associated with slow slips, increases in pore fluid pressure such as magma and hydrothermal fluids, stress changes associated with earthquake motion, and interseismic induced effects due to geological properties.

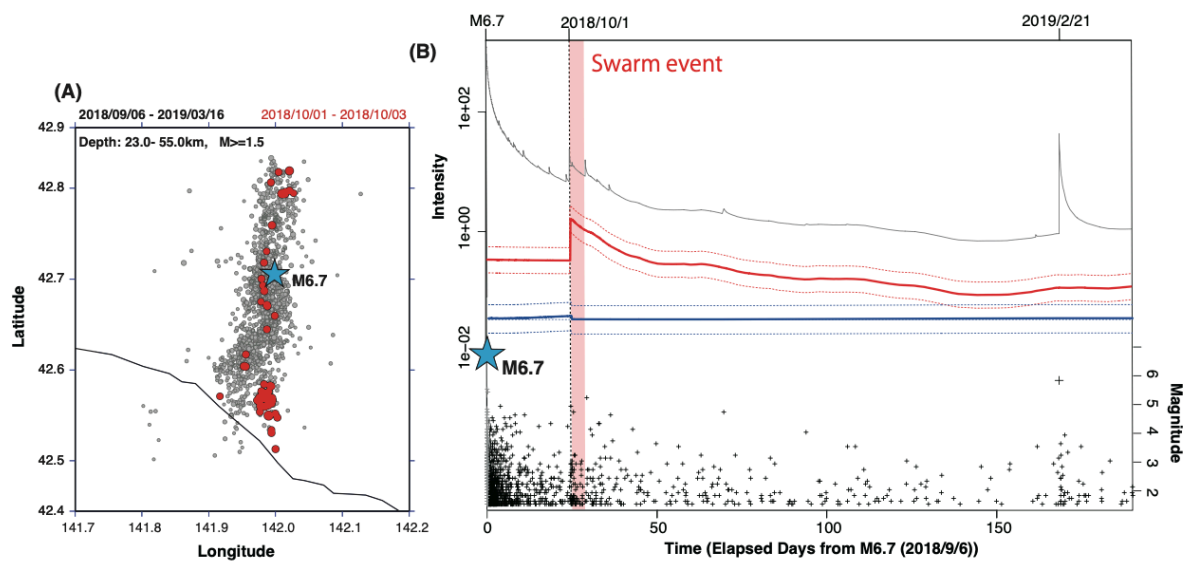


Fig.1 Hokkaido Iburi earthquake of M6.7, 2018 and aftershocks with swarms.

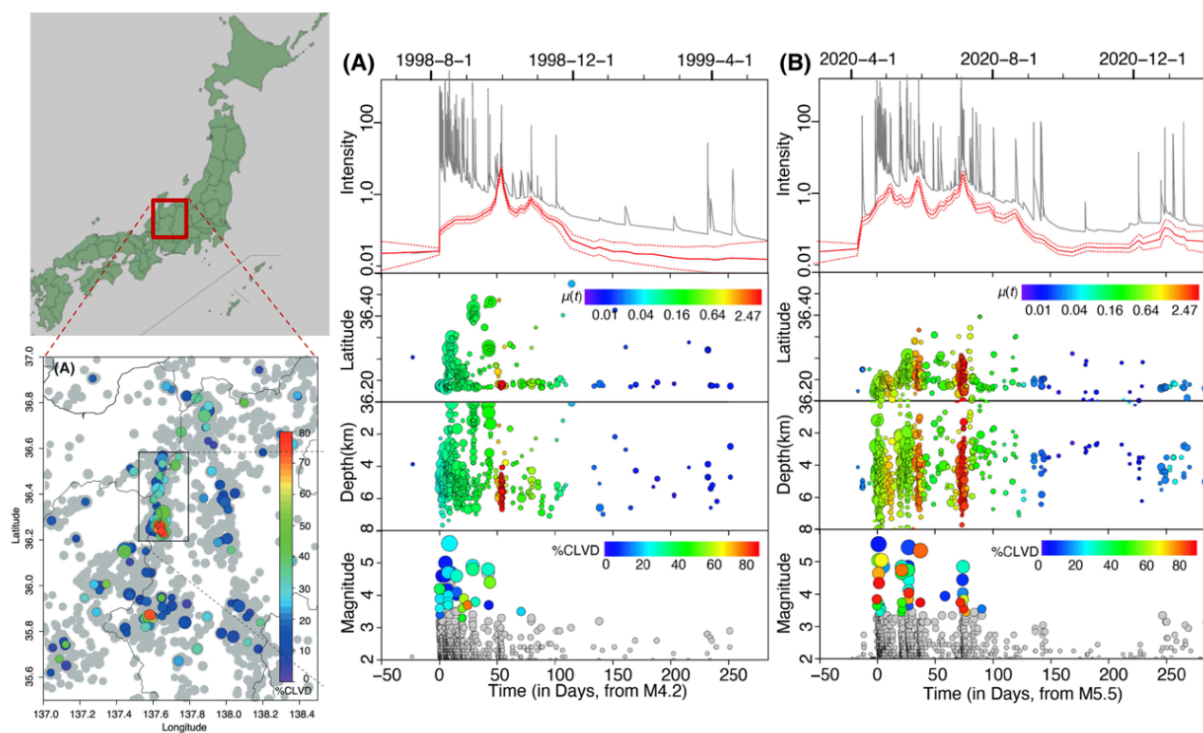


Fig.2 Nagano-Gifu earthquake swarms in 1998 and 2020.

Inverse analysis of non-uniform seismic data by ETAS model

*Yosihiko OGATA¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

地震カタログデータが豊富になるにつれて、地震発生パターンの地域性や不均質性が顕著になり、それらを検出することが難しくなっている。特に大地震発生直後や活発な群発活動の地震データは非常に不完全である。例えば大・中地震が発生すると、後続地震のうち最大のものは、直後に発生する可能性が高い。

したがって、下限マグニチュードを出来るだけ低くとして地震の直後に予想される余震の規模分布と頻度分布を正確に予測することは、地震発生の物理的要因の解明や緊急時のリスク軽減にとって重要である。したがって、地震活動モデルのパラメータを決定する際には、カタログの不完全性という問題に適切に対処する必要がある。

そのため、地震の検出率モデルや定常・非定常ETASモデルなどの高次元の多パラメータモデルの逆問題を解くベイズ手法の助けを借りなければ、地震活動探求を極めることは難しい。例えば、余震活動や群発地震活動は、静的トリガーのみならず動的トリガーによって引き起こされる例が多い。大地震の直後や群発地震には、流体の貫入によってETASモデルのバックグラウンド率が急激に上昇したり、ゆっくりしたすべりと同調したりすることがある。このような量的変化の逆問題を高い精度で捉えるためには、大地震直後や活発な群発活動中のカタログ欠損率のモデル化を検討することが有効である。

本手法のポイントは、

- (1) 地震データの検出率（欠測率）の時間変化を明らかにすること、
- (2) ETASモデルについては、欠測地震を補完する発生率を偏りなく推定すること、
- (3) 本震・余震活動中の群発型成分の有無を確認し、流体間隙水圧やスロースリップの関与の定量的な時間変化を可視化することである。

キーワード： ・ Gutenberg-Richterマグニチュード分布、 ・ 地震マグニチュードの検出率モデル、 ・ 定常および非定常ETASモデル、 ・ 平滑化制約のベイズモデル、 ・ 赤池ベイズ情報量基準（ABIC）

Seismicity before and after the February 6, 2023 *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes in Turkey

*Kazuyoshi Z. NANJO^{1,2,3,4}, Takao Kumazawa³, Jun Izutsu^{5,1}, Takane Hori^{4,1}, Toshiyasu Nagao^{6,1}, Kazuo Oike¹

1. University of Shizuoka, 2. Shizuoka University, 3. Institute of Statistical Mathematics, 4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 5. Chubu University, 6. Tokai University

On February 6, 2023 (UTC), a devastating *M*7.8 earthquake struck the East Anatolian Fault zone (EAFZ) bounding the Arabian and Anatolian tectonic plates. Nine hours later, a *M*7.5 earthquake occurred about 90 km NNW of the initial *M*7.8 earthquake. We provided a report on seismicity before and after the *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes. To create it, we used three earthquake catalogs created by the Disaster and Emergency Management Authority (AFAD), Lomax (2023), and Kwiatek et al. (2023), to demonstrate that the result does not depend on the choice of catalog.

One feature of the seismicity before the *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes is the 2020 *M*6.8 earthquake. Aftershocks since the *M*6.8 earthquake suggest that the south end of the *M*6.8 rupture was close to the north end of the *M*7.8 rupture. Another feature was the occurrence of two seismic swarms on and around the fault segment, from which the *M*7.8 rupture had initiated. On this segment, an area of a large slip (~1.3 m) overlapped with one of the swarms. The swarms began in mid-2022, and statistical analysis using the Epidemic-Type Aftershock Sequence model revealed that the occurrence rate after the start of the swarms (1.3 events of *M*1.5+ per day) was significantly larger than that before it (0.3 events of *M*1.5+ per day). We also observed a clear decrease in the Gutenberg-Richter *b*-value since the start of the swarms. This infers an increase in stress, assuming that the *b*-value is negatively correlated with differential stress.

We pointed out three features pertaining to seismicity after the *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes. The first feature is the lack of post-*M*7.5-quake seismicity at the zone of increase in Coulomb stress imparted by the *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes beyond the north end of the *M*7.8 rupture, noting that this area, which lacked seismicity, closely matched the area of the *M*6.8 rupture. The second feature is that due to stress transfer by the *M*7.8 and *M*7.5 quakes, future rupture was promoted around the south end of the *M*7.8 rupture, where the largest aftershock of *M*6.4 occurred on February 20, 2023. A map view that shows data of post-*M*7.5-quake seismicity until immediately before the *M*6.4 earthquake reveals a zone of low *b*-values around the future hypocenter. That zone coincided remarkably with the region where future rupture was promoted. The third feature is based on a comparison between the distribution of *b*-values based on seismicity after the *M*6.4 earthquake and the distribution of the faults of the *M*7.8 and *M*7.5 earthquakes. The spatial pattern in *b* generally shows high *b*-values around the causative faults (indicative of stress relieved by these earthquakes), except for two zones beyond the north end of the *M*7.8 rupture: one is the rupture area of the 2020 *M*6.8 earthquake and the other is a part of the EAFZ farther to the north, beyond the *M*6.8 rupture area. We will tackle the question of whether these two zones may show future activation.

Expansion rate of aftershock zones and b-value for magnitude 7-class earthquakes around Japan: characteristics of interplate earthquakes

*Yuta MITSUI¹, Yuya UTAGAWA², Ayaka MIYAMOTO³

1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Formerly at Faculty of Science, Shizuoka University, 3. Formerly at Graduate School of Science, Shizuoka University

本震後の余震数が経過時間のべき乗に従って減少する(e.g., Utsu, 1961)一方、余震の空間的範囲は経過時間の対数におよそ比例して拡大する(e.g., Peng and Zhao, 2009)ことが経験的に知られている。前者(大森-宇津則)については、多くの本震に関してパラメータの比較研究が行われてきたが、後者については、個別の本震に関しての研究がほとんどである。

本研究では、日本列島周辺で発生したマグニチュード7級地震を対象として、余震域の拡大速度(対数時間における)を評価し、比較する。拡大速度の定量的評価は、実は困難な問題である。我々は、余震域の時空間的上限を既存のスケーリング関係(Gardner and Knopoff, 1974)を用いて制約し、その範囲内で本震直後からの余震発生端の位置を対数時間に対して回帰する、という単純な手法を導入した。25個の本震に対して、同手法による推定を行った。

余震域拡大速度と比較するためのパラメータとして、余震のマグニチュード頻度分布におけるb値(Gutenberg and Richter, 1944)を推定した。b値の推定は、カットオフマグニチュード M_c の影響を受けやすい。 M_c が時間変化すると考えられる余震の場合、推定精度が大きな問題となる。そこで、マグニチュードの差の頻度分布に基づくb-positive法(van der Elst, 2021)を導入した。その結果、時間経過に伴う余震域内のb値変化が軽減されることを確認し、安定した推定が行えていると判断した。

余震域拡大速度とb値の推定結果を比較した。データが少なくなってしまう問題はあるが、本震をプレート境界地震に限った場合、両者の間に負相関が見られた。b値と背景差応力との間の負相関(e.g., Scholz, 2015)を仮定すると、余震域拡大速度と本震後の差応力との間に正相関があることが示唆される。この傾向は、プレート内部で発生した本震には見られなかった。なお、プレート境界地震の結果を詳細に見ると、b値が低く(差応力が高く)余震域拡大速度が速かったのは、マグニチュード8を超える大きなプレート境界地震(2003年十勝沖地震、2011年東北地震)の震源域周辺であった。これらの領域は、プレート境界上の他領域に比べ、高い差応力がかかっている可能性がある。

余震域の拡大速度は、差応力以外にも温度・圧力条件や間隙流体など様々な要因に影響され得ると考えられるが、それらをサポートする結果は本研究では得られなかった。

参考文献:

Mitsui Y. (2024) Earth Planets Space, <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02035-2>

Mitsui Y. et al. (2024) Prog. Earth Planet. Sci., <https://doi.org/10.1186/s40645-024-00638-7>

Relationship with aftershock number and source region area

*Tetsuo Hashimoto¹, Takashi Yokota²

1. NIED, 2. AIT

(1) 余震数と断層面積の関係の定式化

地震の断層の広がり余震分布から求めると、その面積が広いほど余震数が多いことに気づく。これに関しては、清野(1977)やYamanaka & Shimazaki(1990)などで研究されている。ここでは、断層面積と余震数の関係について、最近の地震を含めて、定式化を検討した。マグニチュード(M)と断層面積(S, km²)の関係については、次式で示される。

$$M = \log S + 4.01 \dots \text{【A式】}$$

Kanamori(1977)による地震モーメント(Mo)はモーメントマグニチュード(Mw)との関係は

$$\log Mo = 1.5 Mw + 9.1 \text{ 【①】}, \text{ここでは } Mw = M \text{ とする。一方, } Mo \text{ は弾性定数 } \mu, \text{ 平均すべり量 } D, \text{ 断層面積 } S \text{ とし } Mo = \mu DS \text{ であり, ストレスドロップ } \Delta \sigma, \text{ 係数 } c \text{ として } D = \Delta \sigma / (c \mu) S^{1/2} \text{ なので, } Mo = (\Delta \sigma / c) S^{3/2}$$

【②】となる。②を①に代入して $M = \log S + 2/3(\log(\Delta \sigma / c) - 9.1)$ 【③】となる。 $\Delta \sigma = 3 \text{ MPa}$, $c = 2.5$ とすると、A式を得る。次に、新たに定式化した余震数と断層面積の関係式

$$N(M_{th}) = 10^{-b(\Delta M + M_{th} - 4.01)} \cdot S^b \dots \text{【B式】}$$

を示す。マグニチュードの下限 M_{th} 以上の積算余震数 $N(M_{th})$, 余震の b 値, 及び本震マグニチュード M_x , 最大余震 M_a で $\Delta M = M_x - M_a$ とする。余震のG-R式は $N(M_{th}) = 10^{A - bM_{th}}$ 【④】であり、Shcherbakov *et al.* (2004) に倣って、最大余震に④を適用すると $1 = 10^{A - bM_a}$ 。 M_x と ΔM を用いると $1 = 10^{A - b(M_x - \Delta M)}$ と書け、対数をとって整理すると $M_x = A/b + \Delta M$ 【⑤】となる。ここで、新たな定式化として、 $M = M_x$ として⑤を③に代入・整理すると、 $A = \log S^b - b(\Delta M - 2/3(\log(\Delta \sigma / c) - 9.1))$ 【⑥】、⑥を④に代入・整理すると、 $N(M_{th}) = 10^{-b(\Delta M + M_{th} - 2/3(\log(\Delta \sigma / c) - 9.1))} \cdot S^b$ 【⑦】となる。⑦に $\Delta \sigma$ と c の値を代入して、B式が得られる。余震数は断層面積の b 乗に比例することが分かる。なお、A式とB式から、 $N(M_{th})$ と M の関係は

$$N(M_{th}) = 10^{b(M - \Delta M - M_{th})} \dots \text{【C式】}$$

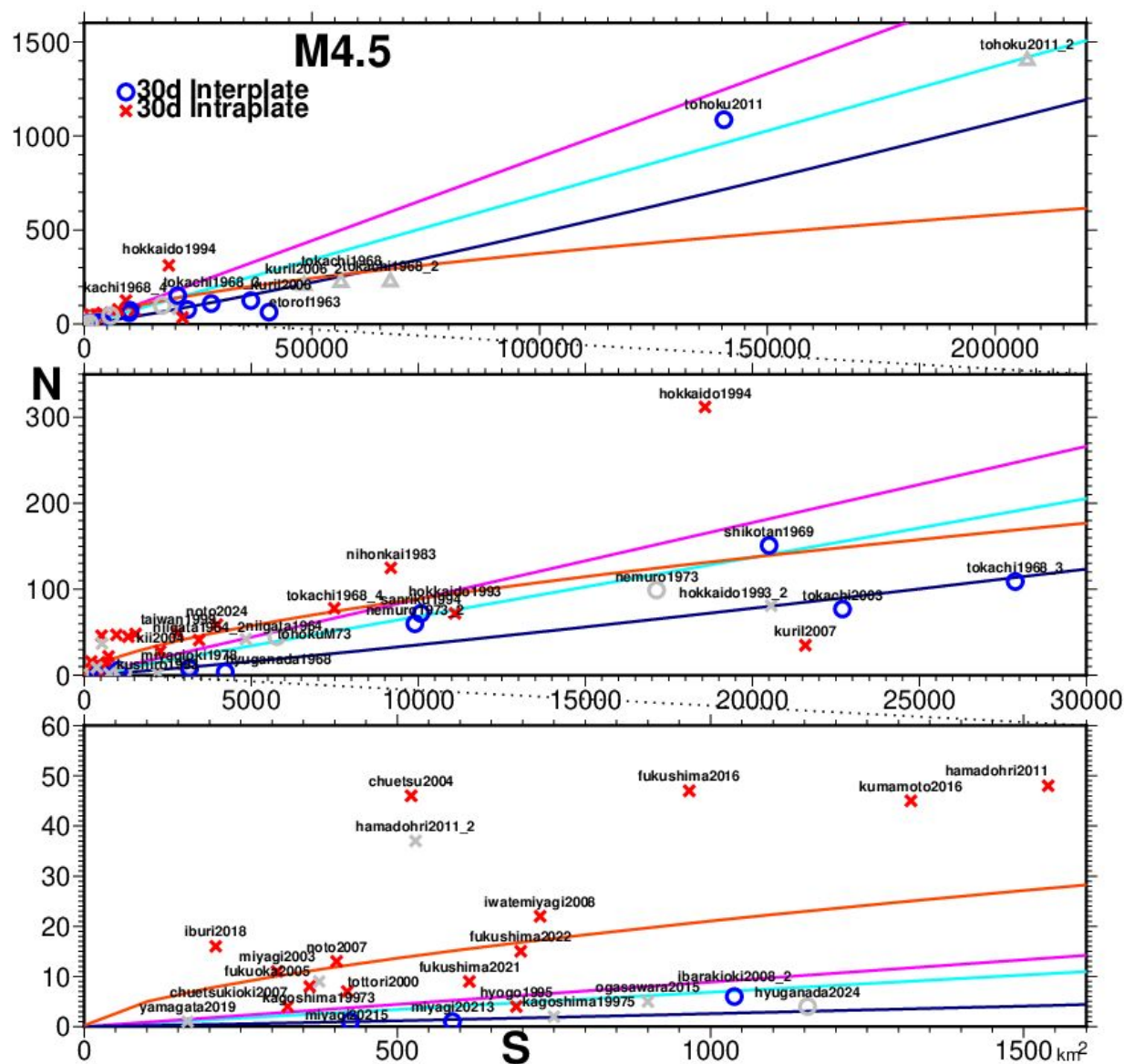
となる。

(2) 解析事例

気象庁の震源カタログを利用して、本震発生から24時間以内のM3.5以上の余震分布から、断層面積を推定した。ここでは、単純化して、横ずれ断層は、余震の走向方向の長さとし深さ分布からの矩形形状、それ以外は、上から見た余震分布を矩形として、面積を与えた。余震数は30日間としたものを表示する。平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東北地震と呼ぶ)では、 $M_{th} = M_{4.5}$ とみえ、それぞれの余震活動の比較にはこの値を用いた。ここでは、プレート間地震と内陸地震やスラブ内地震をプレート内地震として分けて解析した。プレート間地震は全体的に活動が低調で、プレート内地震は、それに比べて活発で、ばらつきも大きい。最小二乗法で求めると、プレート間とプレート内では、それぞれ $N = 10^{-3.003} S^{1.138} = 0.00099 S^{1.138}$ [127.8](紺), $N = 10^{-0.5576} S^{0.626} = 0.2787 S^{0.626}$ [172.1](橙)([]内はAIC)となった。一方、単純に比例するとすると、それぞれ $N = 0.00685 S^{119.6}$ (水色), $N = 0.00887 S^{173.7}$ (紫紅)なり、プレート間では比例の方が、AICが小さくなる。プレート内では、 b 値を入れたものの方がよくなる。

(3) 考察

定式化したモデルのプレート間とプレート内で、 b 値は1.138と0.625であり、B式の10のべき数 $(-b(\Delta M + M_{th} - 4.01))$ は、それぞれ-3.003と-0.5246で、 M_{th} が4.5なので、 ΔM は2.14と0.38となり、非現実的な値とはなっておらず、実解析においても、定式化されたモデルは概ね妥当なものと考えられる。今回の解析で、Hokkaido1994やChuetsu2004あるいはHamadohri2011やFukushima2016は回帰式から2~3倍程度ずれており、ばらつきとも言えるが、後者の2つの活動は東北地震の影響で、それぞれの断層面積で生じるべき活動以上に余震数が著しく増加していると考えられるといいかもしい。単位面積当たりの余震の生産性がよくなっているわけで、 S^b に余震活動の b 値が関わっているとも考えたが、Hamadohri2011の余震活動では b 値が0.766($M_{th} = 0.2$)で、小さい地震で数を稼いでいるのではなかった。G-R式のA値5.09であり、他の地震に比



Room B | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 22, 2024 3:15 PM - 5:00 PM JST | Tue. Oct 22, 2024 6:15 AM - 8:00 AM UTC | 🏢 Room B
Medium-sized Conference room 301 (3F)

[S08] PM-2

chairperson: Nelson Pulido (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience),
Toshiko Terakawa (Nagoya University)

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

[S08-01] Broadband frequency rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake using the multi-beam back-projection and strong motion records

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

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

[S08-02] Modeling the Stress field around focal area of the 2016 Kumamoto earthquake (Mj7.3), Kyushu, Japan

*Yushi Nagayama¹, Satoshi Matsumoto², Takeshi Matsushima², Kentaro Emoto², Ryunosuke Takayama¹, Taiki Kono¹, Yuta Okuda¹ (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

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

[S08-03] Shear Strain Energy Changes in the Coseismic and Postseismic Periods of the 2016 Kumamoto Sequence: Constraints on Background Stress Field

*Angela Meneses-Gutierrez¹, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S08-04] Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on changes in elastic strain energies and stress rotation

*Toshiko TERAKAWA¹, Kimiyuki Asano², Yumi Urata³ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Kyoto University, 3. AIST)

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

[S08-05] A complex rupture sequence of the M_W 7.7 2023 southeast of the Loyalty Islands earthquake

*Asuka Murakami¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-06] Rupture Dynamics and Fault Characteristics of the Maidan Fault during the 2024 Mw 7.1 Wushi Earthquake in Xinjiang, China

*Hangyu Gao¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-07] Multi-Scale Rate- and Roughness-Dependent Friction Realizes a Variety of Seismic-Aseismic Transitions

*Reiju Norisugi¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto University)

Broadband frequency rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake using the multi-beam back-projection and strong motion records

*Nelson PULIDO¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

本研究では、マルチビーム地震バックプロジェクション法と、震源の全方位をカバーするK-NET/KiK-net強震観測網からの震源近傍の強震記録の密集アレイを使用して、2016年4月16日の熊本地震(M7.1)の広帯域周波数(0.1 ~ 10 Hz)断層破壊プロセスを推定した。震源からの距離が100 km 以内の104の観測点を選択し、震源周辺の等間隔の角度領域に分散する複数のサブアレイにグループ化した(図1a)。バックプロジェクションのターゲット領域については、震源の周囲に南西北東方向に伸びる50 x 26 km の面積と地表から深さ20 kmまでのグリッドメッシュ(間隔500m)を構築した(図1aの黄色で表示)。九州地域のトモグラフィーで得られた3次元S波速度モデル(Matsubara et al., 2022)に基づいて、各グリッドと観測点ペアの走時を計算し、到着時刻での速度エンベロープを積み重ねることで、各グリッドとサブアレイのビームパワーを計算した。ここでは、到着時刻は震源時刻と走時の合計として推定される。そして、特定の到着時刻に対するサブアレイビームの2乗して、グリッドのビームエネルギーを推定される。断層破壊の時空間過程を調べるため、震源時刻でグリッドエネルギーを0.25秒ごとに25秒まで探索し、到着時刻の前後±1秒のウィンドウ内でエンベロープ振幅の平均として計算される。各到着時刻とグリッドでの合計グリッドエネルギーは、結合されたサブアレイビームエネルギーの積として計算する。さらに、ビームフォーミング中のS/N比を高めるために、N乗根スタッキング手順を適用した。熊本地震の広域周波数プロセスを調べるために、観測波形を4つの周波数帯域(0.1~0.5、0.5~1、1~5、5~10 Hz)にバンドパスフィルター処理し、水平成分とそのヒルベルト変換をベクトル加算して速度エンベロープを作成した。本研究の結果によると、断層の破壊は最初の3秒間の弱い放射で始まり、全破壊時間は16秒間続き、日奈久断層と布田川断層領域に沿って30 kmの距離に及んだことが分かった。高周波(HF)地震動(0.5~10 Hz)は、震源周辺の領域から発生し、地表から10 kmの深さまで広がり、3~9秒間放射された。対照的に、強い低周波(LF)地震動放射(0.1~0.5 Hz)は、HF放射帯の北東の領域から、深さ5 kmより浅いところで11~16秒の間に発生した(図1b)。さらに、低周波放射は主に布田川断層破壊の主断層痕跡とほぼ平行に帯状のように分布しており、これは現地調査で確認された熊本地震の同時性断層破壊痕跡と密接に一致している(図1b)。加えて、西原村小森(JMA)で観測された熊本地震の強震記録は、約0.2 Hz付近で顕著な速度パルスを示した。この記録は布田川主断層痕跡のすぐ近くで観測されたため、本研究で特定された浅い強い低周波放射領域を反映している可能性が高いと考えられる。本研究で提案されたBP手法が、広帯域の破壊プロセスを正確に画像化できることを示している。また、熊本地震の断層破壊の低周波成分と高周波成分が空間的にも時間的にも補完的であることも明らかにし、地震の複雑さを強調している。

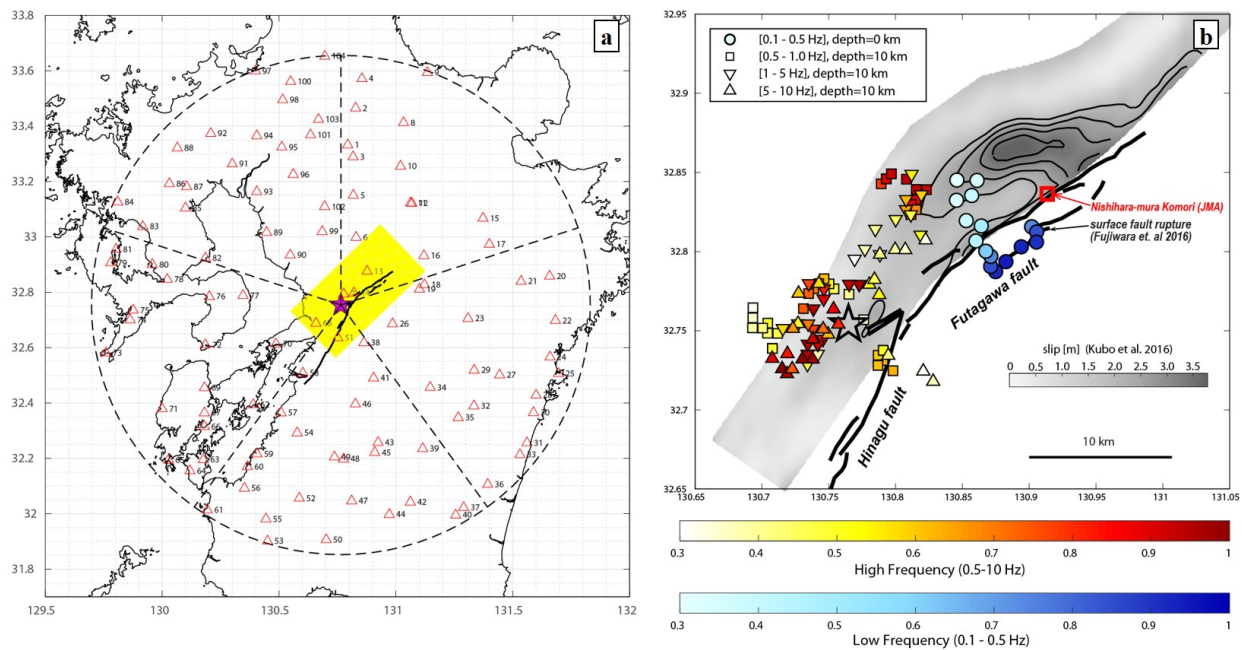


Figure 1 (a) KNET/KiK-net strong motion stations and their clustering used for multi-beam back-projection. (b) High frequency (HF) and Low frequency (LF) ground motion radiation (normalized back-projection grid energy).

Modeling the Stress field around focal area of the 2016 Kumamoto earthquake(Mj7.3), Kyushu, Japan

*Yushi Nagayama¹, Satoshi Matsumoto², Takeshi Matsushima², Kentaro Emoto², Ryunosuke Takayama¹, Taiki Kono¹, Yuta Okuda¹

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

九州中部に位置する熊本地方には、北部には別府一島原地溝帯が、南部にはせん断帯が九州を横断する形で存在し、空間的に不均質な応力場が存在することが分かっており(Matsumoto et al., 2015b), また同じく熊本地方に位置する布田川断層帯と日奈久断層帯の一部は2016年熊本地震の最大前震(Mj6.5)と本震(Mj7.3)の震源域にあたり、地震前後で応力場の時空間変化があったことが示されている(Mitsuoka et al., 2020). 一方、本震域南部の日奈久断層帯南部では未だ大きな破壊が生じていないことから将来大地震が発生する可能性を有しており、このような地震発生場である断層帯周辺の応力状態を把握することは、将来の地震活動を予測するうえで非常に重要である。特に、地震断層に応力集中が生じていたのかどうか、地震断層延長上の断層部での応力状態の把握が必要であると考えられる。そこで本研究では、断層周辺の応力変化を議論する際に重要な地震断層の形状の特定を行い、本震前における断層帯での応力集中度を考慮にいった、地震前から地震後の一連の期間における2016年熊本地震震源域の応力場のモデル化を試みた。解析には、九州大学地震火山観測研究センターが九州地方に設置している定常・臨時地震観測点に加え、日奈久断層帯周辺に設置している稠密地震観測網である0.01満点地震観測点で得られた地震データを用いた。地震データからはP波極性の読み取りをもとにHASH(Hardebeck and Shearer, 2002)を用いて各地震イベントの発震機構解を決定し、地震モーメントテンソルを計算した。本震断層面はlio et al. (2021)の手法を参考にし、発震機構解のP軸方位角の空間変化から最適な面を決定した。応力場は、Matsumoto et al. (2015a)に基づき、地震前は広域応力と断層帯での応力集中、地震後は地震前応力場と本震断層すべりによる応力変化でモデル化した。パラメータは広域応力を表す偏差応力テンソルの大きさと、断層すべりによる応力変化に対する地震前の応力集中の占める割合の2つである。これらをグリッドサーチにより、各発震機構解の単位すべりベクトルと最大せん断応力方向の単位ベクトルの残差のRMS値が最小となるものを探索し、最適モデルを決定した。広域応力を表す偏差応力テンソルはMatsumoto (2016)の手法により地震モーメントテンソルを足し合わせることで推定し、断層すべりによる応力変化はAsano and Iwata (2021)のすべり分布インバージョンの結果を用いてOkada (1992)の式により計算した。解析の結果、断層帯での応力集中が本震発生前に地震断層にある程度存在するモデルが最適であることが分かった。一方で、このモデルは仮定した広域応力場によって変わり得ることから、地震前後の両期間において空間的不均質性が報告されている熊本地方の広域応力場を適切に推定することが重要であり、今後の課題として挙げられる。

Shear Strain Energy Changes in the Coseismic and Postseismic Periods of the 2016 Kumamoto Sequence: Constraints on Background Stress Field

*Angela Meneses-Gutierrez¹, Tatsuhiko Saito¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED)

The shear strain energy density allows us to investigate whether stress is accumulated or released in the lithosphere. The energy is released during the occurrence of a large earthquake and the subsequent postseismic period, in the form of afterslip. Using the shear strain energy density, Noda et al. (2020 GRL) investigated the energy changes due to the mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake, a large intraplate earthquake sequence that considerably affected the crustal deformation in the area. Their research showed that the shear strain energy patterns strongly depended on the background stress, and the correlation of aftershocks with the areas of shear strain energy increase. However, a quantitative relation between the large earthquake and the following afterslip was not investigated at this stage.

In this research, we extend the work of Noda et al (2020) to investigate the energy release, not only in the coseismic period but also in the postseismic period by considering energy absorption due to the viscoelastic response. For the analysis, we employ GPS observations from 93 GEONET sites in the research area. We performed a time series analysis to extract the deformation associated with the coseismic period and afterslip one year after the earthquake. These results are used to estimate detailed kinematic models of the deformation. To estimate the shear strain energy change, we introduce a depth-dependent background stress field within the seismogenic zone following Noda et al. (2020). We evaluate the dependence of the coseismic and postseismic change in shear strain energy as a function of the effective frictional coefficient μ_{eff} . We consider four cases of μ_{eff} : 0.0, 0.1, 0.2, and 0.4.

The total energy estimated during the coseismic period indicates energy release for each investigated case, in agreement with shear faulting to release the stored shear strain energy from the lithosphere and the results of Noda et al (2020). On the other hand, the total energy change estimated 1 year after the earthquake indicated that the energy was released if we assume $\mu_{\text{eff}} \geq 0.2$, but the energy was increased if we assume $\mu_{\text{eff}} = 0.1$. Since the energy increase by the afterslip is not physically reasonable, we can reject the background stress model with $\mu_{\text{eff}} = 0.1$. This study highlights the importance of examining mechanical parameters by integrating different stages of the earthquake cycle to avoid nonphysical models and accurately establish the mechanics of earthquake sequences.

Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on changes in elastic strain energies and stress rotation

*Toshiko TERAKAWA¹, Kimiyuki Asano², Yumi Urata³

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Kyoto University, 3. AIST

地震は、地下に蓄えられた弾性歪エネルギーを、断層運動により一気に解放する物理過程である。弾性歪エネルギーは絶対応力の関数であり、地下の応力状態を把握できれば、地震の発生メカニズムの解明に大きく貢献する。しかし、震源域の応力を直接測定することは難しく、とりわけ、偏差応力の大きさを推定することが本質的な課題となっている。本研究では、実効摩擦係数 μ' をパラメータとした絶対応力6成分のモデリングを軸に、2016年熊本地震による弾性歪エネルギーの変化量と地震前後の応力の向き変化の両方を評価し、理論から予想される物理量の変化を観測データからの推定値と比較し、地震発生前の背景応力場の偏差応力レベルを調べることを目的とする (Terakawa et al., under review)。

地震によって解放される弾性歪エネルギー ΔE の大部分は剪断歪エネルギーであり、これは地震前の偏差応力レベルが高いほど大きくなる。 $\mu' = 0.3, 0.15, 0.1, 0.05, 0.03$ に対する ΔE は（解放を正にとると）4.03, 2.03, 1.26, 0.437, 0.093E+16 Nmとなった。エネルギーバランスを考慮すれば、 ΔE は少なくとも放射エネルギーよりも大きい必要がある。熊本地震本震の放射エネルギーは、地震波の解析や動的破壊シミュレーションにより2.09–2.7E+15 Nmと見積もられており (Kanamori et al., 2020; Kaneko & Goto, 2022)、また、地震のスケーリングに基づく理論的な研究からは3.0E+15 Nm程度となることが見積もられる (Kanamori & Rivera, 2004)。従って、エネルギーバランスによる拘束条件により、 $\mu' = 0.03$ は小さすぎる。

次に、熊本地震前後の絶対応力場から、理論的な応力の向きの時間変化を調べた。偏差応力が最も小さい場合でも、顕著な応力変化が予想されるのは震源断層のごく近傍（とくに日奈久断層付近は浅部のみ）に限られる。一方、CMTデータインバージョン法 (Terakawa & Matsu'ura, 2023) に地震データ

(1996.1–2019.4)を適用し、熊本地震前後の応力の向きの変化を観測データからも調べた。応力の向きの違いをテンソルの内積を利用して評価すると、布田川断層と日奈久断層の接合部付近と日奈久断層の東～南東側の狭い領域に有意な応力の時間変化が見られた。しかし、この結果は応力場の理論的な予想からずれており、絶対応力場のモデル化に考慮されていない要因で発生した地震の影響であると考えられる。具体的な要因として、熊本地震発生前に知られていなかった応力場の不均質、深部からの高压流体の流入等の局所的な応力変化、最大前震から本震までの間に発生した地震による影響などが考えられる。

絶対応力場のモデル化に考慮されていない要因に依る地震の影響を調べるために、本震後の絶対応力場の下で、本震後の約3年間に震源域から10km以内で発生した2628個の中小地震による弾性歪エネルギーの変化 ΔE_a を評価した。すでに述べたように、地震で解放された弾性歪エネルギーの一部は、放射エネルギー E_r として消費される。放射エネルギーを地震モーメントで規格化した規格化エネルギー E_r/M_o については、理論的な下限値 e_{min} を見積もることができる (Kanamori and Rivera, 2004)。 $\Delta E_a/M_o$ が e_{min} に満たない地震の割合を調べてみると、 $\mu' = 0.3, 0.15, 0.1, 0.05$ に対して4.9, 5.9, 7.5, 16.0%となり、実効摩擦係数が大きいほど小さくなった。各 μ' について、これらの地震を除いたデータセットを作成し、本震後の応力場（4ケース）を求めた。いずれの場合も、地震前後の応力の向きの時間変化は小さくなり、応力場の理論的な予想と解析結果とのずれも小さくなった。しかし、応力場のモデル化に考慮されていない地震を除いた場合でも、 $\mu' = 0.1$ や0.05のモデルでは本震時に大きく滑った領域の応力の向きは再現できなかったことがわかった。

これらの分析の結果、この地域の地殻の実効摩擦係数は0.15から0.3程度であり、深さ10kmでの偏差応力の大きさは、布田川断層で37–65 MPa、日奈久断層で39–70 MP程度である。これは従来の応力インバージョンによる研究で見積もられてきた値（ $\mu' < 0.1$ ）よりも有意に大きい。また、余震のデータセットの中に、応力場のモデル化に含まれていない要因で発生した地震が数パーセント含まれており、これらは応力の時間変化を過大評価し、偏差応力レベルを過小評価する原因となることもわかった。

A complex rupture sequence of the M_w 7.7 2023 southeast of the Loyalty Islands earthquake

*Asuka Murakami¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹

1. University of Tsukuba

沈み込み帯周辺の海洋プレート内部で発生する大地震では、複数の断層を破壊するような複雑な破壊伝播過程が複数報告されている。このような震源過程を解析する場合、断層形状をあらかじめ仮定する従来型の手法では断層形状をモデル化することが困難な場合があり、断層形状の不確実性に由来するモデリング誤差が解を大きく歪める可能性がある。こうした地震の一例として、2023年5月19日（UTC）にバヌアツ沈み込み帯南部のアウトターライズにおいて発生したロイヤリティ諸島南東部地震（ M_w 7.7）がある。アメリカ地質調査所（USGS）は2023年ロイヤリティ諸島南東部地震に対して走向105°、傾斜66°の矩形断層モデルを設定して有限断層インバージョンを行ったが、得られた理論波形は観測された遠地実体波P波の特徴を説明することに失敗している。これはUSGSが仮定した従来型の震源過程モデルではこの地震の複雑な震源過程を表現できなかったことを示唆する。観測波形をより良く説明する震源過程モデルを構築するためには、断層形状や破壊伝播方向に自由度を与えた高自由度な震源過程モデルを用いるのが望ましい。

ポテンシー密度テンソルインバージョン（PDTI）は、断層すべりを5つの基底ダブルカップル成分の重ね合わせで表現することで、モデル平面上に周囲の断層すべりを投影する手法である。PDTIでは断層形状の仮定をしないため、仮定した断層形状の誤差によって生じるモデリング誤差を軽減させるだけでなく、断層形状も推定することが可能である。また本研究においてはハスケルモデルのような単調な同心円上の破壊伝播だけでなく、破壊伝播方向の反転を含む自由な挙動を許容するために、仮想的な破壊フロント到達後のモデル平面上の全ての領域において自由にすべりが起きることが可能であるようにした。仮想的な破壊フロント速度は、震源近傍のS波速度を参考に3.2 km/sとした。また真の波源とモデル平面の位置のずれによる誤差を軽減するためにGlobal Centroid Moment Tensor解から得られる震源メカニズム解の節面と余震分布を参考に、走向285°、傾斜45°、長さ136 km、幅32 kmのモデル平面を設定して解析を行なった。解析には方位角に偏りのないよう選択した31観測点で得られた、遠地実体波P波の鉛直成分をダウンロードして用いた。グリーン関数は、CRUST1.0モデルの速度構造を用いて計算した。

破壊は、破壊開始から6秒まで、震源から南南東22 km地点までユニラテラルに伝播する。破壊開始時の走向は290°であるが、4秒から5秒の間、時計周りに305°まで変化し、6秒になると逆に反時計回りに回転し285°まで変化する。7秒以降、震源の東において、破壊は走向を265°まで変化させながら東南東に伝播する。その際震源から南東30 km地点にある半径5 kmの円形領域（領域B）を避けるように伝播するが、9秒以降には領域Bを破壊する。このとき、領域Bを破壊する前の走向は265°であるのに対し、領域Bを破壊した後13秒以降に走向は275°まで変化する。18秒後までに、破壊は領域Bを超えて震源から南東55 kmの地点まで到達する。このとき、走向は反時計回りに回転しながら270°まで変化する。一方で震源よりも西の領域では、破壊開始11秒後、西北西に向かって破壊が伝播し、14秒後に停止する。破壊開始時の走向は285°であるが、直後に300°まで時計回りに変化し、震源から西45 km到達時に再び285°まで変化する。得られた震源過程モデルによって再現された理論波形は観測波形をよく説明している。

一連の破壊伝播過程における急激な走向変化、および、その変化領域での破壊停滞は、破壊が形状の異なる複数の断層セグメントを次々と破壊した可能性をする。走向が遷移的に変化しかつ破壊がスムーズに伝播しているところは、断層形状が屈曲していることを示唆する。また震源西の領域における時間遅れの破壊エピソードは、断層セグメント間で破壊が停滞した結果、西側の断層セグメントを破壊するためのエネルギーが集中したことによって引き起こされた可能性がある。

Rupture Dynamics and Fault Characteristics of the Maidan Fault during the 2024 Mw 7.1 Wushi Earthquake in Xinjiang, China

*Hangyu Gao¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹

1. University of Tsukuba

On January 22, 2024, at 6:09 (UTC), a magnitude (M) 7.1 earthquake struck Wushi County in Xinjiang, China. According to the China Earthquake Network Center (CENC), this large earthquake occurred along the Maidan fault zone on the southwestern side of the Tianshan Mountains. While the southwestern Tianshan fault zone has experienced several earthquakes of magnitude 6.0 and above since 1900, this large earthquake marks the first instance of the M 7-class earthquake since the establishment of the China Earthquake Network. The Maidan fault, which trends southwest, is at the junction of the Tianshan Mountains and the Tarim Basin. Geodetic studies indicate that this fault is affected by the tectonic shortening of the southern Tianshan Mountains. Under north-south compressional stress, the southwestern section of the Maidan fault exhibits distinct left-lateral strike-slip characteristics. Active fault studies classify the Maidan fault as a fold-thrust fault zone, with numerous high-angle segments. A finite-fault inversion has been widely applied to estimate the spatio-temporal distribution of slip-rate. However, this technique requires an assumption of the fault planes, and if the assumed fault planes are inconsistent with the actual fault, the obtained solution will be distorted. In this study, we employed a recently developed Potency Density Tensor Inversion (PDTI) method to analyze the Wushi earthquake using teleseismic P-waves. The PDTI estimates the seismic source process as a spatio-temporal distribution of the potential-rate density tensor along a model plane. The PDTI defines the model plane instead of fault planes, and obtained focal mechanisms are unconstrained by the assumed model plane geometry. To mitigate the overfitting or instability associated with that modeling of high degrees of freedom, modeling errors for the Green's function were introduced into the data covariance matrix and Akaike's Bayesian Information Criterion was used to determine the strength of smoothing. We selected 44 teleseismic P-waves of the Wushi earthquake and used the CRUST1.0 model to calculate the Green's function for the one-dimensional layered velocity model in the source region.

The results show that the main slip area of this earthquake is concentrated in a triangular region radiating from the initial rupture point toward the surface. This area extends approximately 20 km along the dip direction and has a maximum length of 40 km. The maximum total rupture is located at 7.5 km east and 15 km south from the initial rupture position with a maximum slip of 3.1 m. The total seismic moment is 6.5×10^{19} N m (Mw 7.1). The initial rupture with strike of 240° and dip of 40° grows near the hypocenter and continues for about 3 s. The main rupture with strike of 232° and dip of 55° starts about 10 km south of the epicenter at 3.5 s after the origin time and propagates eastward for about 15 km. Subsequently, rupture occurs on the northeast and southwest sides of the main rupture zone, and then rupture becomes faint after 10 s. The southwestern rupture had a strike of 250° – 260° with a dip of 50° , while the northeastern rupture had a strike of 230° – 240° and a dip of 50° . We will discuss that the discontinuous rupture propagation reflects the complex fault structure of the source region and suggests that multiple faults ruptured in a series.

Multi-Scale Rate- and Roughness-Dependent Friction Realizes a Variety of Seismic-Aseismic Transitions

*Reiju Norisugi¹, Hiroyuki Noda¹

1. Kyoto University

We applied a rate- and state-dependent friction law, which accounted for multi-scale roughness evolution, to a spring-slider model and found a variety of seismic-aseismic transitions for a single set of frictional parameters. By adding the direct effect, we modernized the previously proposed law for frictional strength (Aochi & Matsu'ura, 2002). This law considers the statistically self-Affine fault topography as a "state", and each Fourier amplitude of the corresponding angular wave number evolves as a function of the slip rate (V) and itself. The modernized law realizes the rate-weakening property only in a restricted range of V . The evolution of the state for a small wavenumber requires a much longer slip than that for a single stick-slip event, resulting in a gradual change in event characteristics. As the property of the limit cycles, the maximum V changes gradually from aseismic to seismic values as a function of spring stiffness. This is not the case for standard rate-and-state friction laws with a single state variable. It also showed loading-rate dependence of bifurcation behavior at the stability transition. Faster loading produces a supercritical Hopf bifurcation, and a single stable limit cycle attracts the trajectories starting from everywhere in the phase space, as long as being simulated. On the other hand, slower loading produces a subcritical Hopf bifurcation, and a conditionally stable fixed point coexists with a large-amplitude stable limit cycle. The conditional stability leads to a timing-dependent response to perturbations of the loading rate. Specifically, for the same negative velocity steps, the fault behavior changes to either seismic or aseismic depending on the timing of the perturbation. Our result indicates potential complexity in the change in a fault's seismic/aseismic property on a perturbation of loading condition, which has significant implications for the real seismic cycles. As an ongoing study, we applied the modernized law to a continuum model and simulated a sequence of earthquakes with an adaptive time stepper (Romanet & Ozawa, 2022) to investigate the scaling of the source parameters.