

Wed. Nov 1, 2023

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | Room A F205+206

[S08] AM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), Toshiko Terakawa(Nagoya University)

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

[S08-16] Effects of long-term slow slip events on intraplate stresses in Bungo Channel and Tokai region*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Suguru Yabe³, Sachiko Tanaka⁴, Youichi Asano⁴, Takeshi Kimura⁴ (1. BRI, 2. USC, 3. AIST, 4. NIED)

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

[S08-17] Stress Change Driven Afterslip Following the 2016 Central Tottori Earthquake*Angela Meneses-Gutierrez¹, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED))

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

[S08-18] Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy and stress rotation*Toshiko TERAOKAWA¹, Kimiyuki Asano², Yumi Urata³ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Disaster Prevention research Institute, Kyoto University, 3. AIST)

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

[S08-19] Estimation of the spatial distribution of the "internal friction coefficient" in the crust beneath the Japanese Islands*Yuta MITSUI¹ (1. Department of Geosciences, Shizuoka University)

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

[S08-20] Stress drop variations of repeating earthquakes*Junichi NAKAJIMA¹, Akira Hasegawa² (1. EPS Department, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | Room A F205+206

[S08] AM-2

chairperson:Yuji YAGI(University of Tsukuba), Yasuhira AOYAGI(Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S08-21] Spatial pattern on stress drop of small earthquakes in the eastern margin of the Sea of Japan west off the Tohoku region, Japan

*Misa Tanaka¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-22] Frictional properties on the upper surface of the subducting Pacific plate off the south-east of Hokkaido, Japan

*Nanako Nemoto¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-23] Hierarchical Rupture Growth Revealed by High-Degree-of-Freedom Seismic Source Models

*Yuji YAGI¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-24] A complex source process during the 2021 South Sandwich Islands earthquake

*Ryo Yamaguchi¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-25] Rupture Termination at the Northeastern End of the Source Fault of the 2016 Kumamoto Earthquake inferred from Seismic Velocity Structure

*Yasuhira AOYAGI¹, Haruo Kimura¹ (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

1:30 PM - 2:30 PM JST | 4:30 AM - 5:30 AM UTC | Room A F205+206

[S08] PM-1

chairperson:Keisuke Yoshida(Tohoku University)

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

[S08-26] Change in scaling relations of source parameters around M_w 5.1 for crustal earthquakes*Shota Shimmoto¹, Hiroe Miyake¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S08-27] Precise hypocenter determination around the 2016 Mw 7 normal fault earthquake off Fukushima and Ibaraki prefectures: S-net data analysis

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida^{1,2}, Tatsuya Kubota³, Toru Matsuzawa¹ (1. Tohoku University, 2. ERI, University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-28] Microearthquakes in the lower crust and their generation mechanism: The case of deep cluster activity beneath western Hiroshima prefecture

*Kazutoshi IMANISHI¹, Takahiko Uchide¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-29] The 2023 M6.5 Suzu, Japan, Earthquake that occurred during a Fluid-Induced Swarm Activity

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

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

2:30 PM - 3:00 PM JST | 5:30 AM - 6:00 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-1

chairperson:Keita Chiba

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

[S09-01] Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan (2)

*Shiro OHMI¹, Hiroshi INOUE², Nityam NEPAL³, Karma NAMGAY³, Dowchu DRUKPA³ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Department of Geology and Mines, Ministry of Energy and Natural Resources, Bhutan)

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

[S09-02] Visualization of the transition of the Japan Meteorological Agency's seismic stations from the Meiji to Showa eras.

*Tetsuo Hashimoto¹, Satoko Murotani² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. National Museum of Nature and Science)

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

3:15 PM - 4:45 PM JST | 6:15 AM - 7:45 AM UTC | Room A F205+206

[S09] PM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Satoru Baba

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

[S09-03] Realtime seismological observation around the Tsugaru Strait by distributed acoustic sensing, northeastern Japan

*Satoru BABA¹, Eiichiro ARAKI¹, Takashi YOKOBIKI¹, Kei KAWAMATA², Keisuke UCHIYAMA², Takuji YOSHIZUKA² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Electric Power Development Co.,Ltd.)

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

[S09-04] Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation

*Chingyu Hu^{1,2}, Masanao Shinohara², Yusuke Yamashita³, Tomoaki Yamada², Takeshi Akuhara², Kimihiro Mochizuki² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-05] Seismicity in trench-outer rise region of the southern Kuril Trench off Hokkaido, Japan, obtained from OBS observations

*Koichiro OBANA¹, Tetsuo No¹, Ryo Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Kentaro Imai¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC)

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

[S09-06] Detection of immediate aftershocks following the 2011 Tohoku Earthquake using MeSO-net data

*Takuro Imadera¹, Aitaro Kato¹, Shin'ichi Sakai² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

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

[S09-07] Focal mechanisms based on the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko SHIOMI¹, Makoto MATSUBARA¹, Shoji SEKIGUCHI¹ (1. NIED)

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

[S09-08] Spatiotemporal characteristics of foreshock sequences of magnitude M3-4 earthquakes in the western Nagano Prefecture region

*Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO² (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Nov 1, 2023 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Nov 1, 2023 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 Room A F205+206

[S08] AM-1

chairperson: Saeko Kita (Building research institute), Toshiko Terakawa (Nagoya University)

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

[S08-16] Effects of long-term slow slip events on intraplate stresses in Bungo Channel and Tokai region

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Suguru Yabe³, Sachiko Tanaka⁴, Youichi Asano⁴, Takeshi Kimura⁴ (1. BRI, 2. USC, 3. AIST, 4. NIED)

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

[S08-17] Stress Change Driven Afterslip Following the 2016 Central Tottori Earthquake

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

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

[S08-18] Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy and stress rotation

*Toshiko TERAOKAWA¹, Kimiyuki Asano², Yumi Urata³ (1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Disaster Prevention research Institute, Kyoto University, 3. AIST)

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

[S08-19] Estimation of the spatial distribution of the "internal friction coefficient" in the crust beneath the Japanese Islands

*Yuta MITSUI¹ (1. Department of Geosciences, Shizuoka University)

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

[S08-20] Stress drop variations of repeating earthquakes

*Junichi NAKAJIMA¹, Akira Hasegawa² (1. EPS Department, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

Effects of long-term slow slip events on intraplate stresses in Bungo Channel and Tokai region

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Suguru Yabe³, Sachiko Tanaka⁴, Youichi Asano⁴, Takeshi Kimura⁴

1. BRI, 2. USC, 3. AIST, 4. NIED

Relationships between in-slab events and two slow slip events (SSEs) were examined in the Tokai region, where there are in-slab earthquakes and long-term SSEs (L-SSEs) of several years' duration. Such relationships were compared for the Bungo channel by Kita et al. [2022, SSJ meeting]. A stress-tensor inversion method of focal mechanisms of 20 years of in-slab events was applied and temporal changes of stress axis relative to the duration times of the two L-SSEs were found. Basically, the Sigma 3 axes of inversion results strike in the east-west direction beneath fault planes of L-SSEs, whereas the strikes of the Sigma 1 axes beneath the fault planes can be divided into two portions by the Median Tectonic Line which corresponds to the boundary between Aichi and Shizuoka prefectures. The Sigma 3 axes are close to vertical in western portion, whereas they are horizontal in the eastern portion. The stress ratio R of the inversion became maximum (0.53 to 0.55) during the period between the two L-SSEs in both of the regions. This suggests that the fault plane became more locked in the period, compared to periods of L-SSEs slip. During the periods of the two L-SSEs slips, the plunges of Sigma 1 axes decreased, becoming less vertical in the western portion and close to the plunge of the plate interface in the eastern portion. The stress ratio R decreased during the periods of slip in the both of the regions, which was also observed in three L-SSEs in the Bungo channel. These results suggest to detect in-slab events to monitor ongoing reduction in locking of the plate boundary by aseismic slip.

Stress Change Driven Afterslip Following the 2016 Central Tottori Earthquake

*Angela Meneses-Gutierrez¹, Tatsuhiko Saito¹

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

The analysis of GNSS observations in the coseismic and postseismic period of the 2016 Central Tottori earthquake (M_w 6.2) revealed a complementary spatial pattern between the coseismic and postseismic slip distributions on the fault plane (Meneses-Gutierrez et al., 2019 JGR). These results suggested afterslip driven by coseismic stress change, in agreement with velocity-strengthening friction laws, often invoke to explain postseismic deformation (Marone et al., 1991). However, a quantitative relation between the coseismic deformation and the mechanism driving postseismic deformation of the 2016 Central Tottori earthquake has not been established.

We perform a geodetic inversion of a dense GNSS network to estimate the coseismic slip distribution on the fault plane of the 2016 Central Tottori earthquake in an elastic half-space using the method of Yabuki and Matsu'ura (1992). Using the stress change calculated from the aforementioned coseismic slip distribution, we construct the expected afterslip stress drop in the postseismic period (Saito and Noda, 2022 JGR). For this purpose, we assume that the observed positive coseismic stress change at shallow depths (~ 1 MPa) works as the stress drop in the afterslip. Next, we obtain the afterslip distribution by inverting the stress drop distribution. In doing this, we assume that the slip direction in the postseismic period is consistent with that of the subfaults in the coseismic period.

Large afterslip is restricted to shallow depths (< 3 km) in agreement with previous studies. The maximum postseismic slip is 20 cm and the moment magnitude is M_w 5.3 (1.47×10^{17} N·m) when we assume a rigidity of 30 GPa. The moment magnitude of our slip distribution constructed from the coseismic stress change is smaller than the resulting from the conventional geodetic data inversion (M_w 5.55, 2.17×10^{17} N·m), however, we found that our model can well reproduce the horizontal postseismic displacement near the source region, quantitatively demonstrating the afterslip driven by coseismic stress change.

Background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy and stress rotation

*Toshiko TERAKAWA¹, Kimiyuki Asano², Yumi Urata³

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2. Disaster Prevention research Institute, 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。偏差応力を拘束する情報としては、応力インバージョンによる大地震前後の応力の向き変化、動的破壊の再現、剪断歪エネルギーの変化の総量等が提案されている。2016年熊本地震の震源域では、これらの3種類の情報に基づき、偏差応力の大きさが見積もられているが、統一的な見解は得られていない (Yoshida et al., 2016; Mitsuoka et al. 2020; Urata et al., 2017; Noda et al., 2020)。

本研究では、熊本地震震源周辺域の絶対応力6成分のモデリングを通じて、剪断歪エネルギーの変化と地震前後の応力の向きの変化の両方を分析し、地震前の偏差応力の大きさを調べることを目的とする。具体的には、まず、熊本地震発生直前（一連の地震活動のスタートとなった最大前震発生直前）の震源域周辺域の背景応力場を、実効摩擦係数を支配する無次元間隙流体圧パラメータ ($C = 0.0, 0.5, 0.8$) を変化させて3ケース計算した (Terakawa & Hauksson, 2018)。 $C = 0.0, 0.5, 0.8$ に対応する実効摩擦係数は、 $m' = 0.38, 0.18, 0.08$ である。次に、熊本地震の本震と最大前震のすべり分布 (Asano & Iwata, 2016) からすべりによる応力応答関数 (Fukahata & Matsu'ura, 2005) を用いて地震時応力変化を計算した。地震前の背景応力場と地震時応力変化を合わせれば、仮定した3つの実効摩擦係数に対応して、地震後の絶対応力場を計算することができる。地震前後の全応力成分が得られることで、地震前後の弾性歪エネルギーや地震前後の理論的な応力の向きの変化を直接計算することができる。

エネルギーバランスを考慮すれば、地震で解放される剪断歪エネルギーは少なくとも放射エネルギーよりも大きい必要がある。剪断歪エネルギーの解放量は地震前の偏差応力レベルが高いほど大きくなるが (Noda et al., 2020; Terakawa et al., 2020)、熊本地震の場合、最も偏差応力の小さい場合でも放射エネルギーの推定値 (Kanamori et al., 2020; Kaneko & Goto, 2022) を超えており、エネルギーの解放量だけでは偏差応力レベルを推定することは難しい。また、すべりに伴う断層面上の剪断応力の変化のパターンは偏差応力レベルには依らない。しかし、剪断応力の代わりに偏差応力の大きさをとると、数kmより浅い部分での振る舞いにモデル間で違いがみられた。偏差応力が大きく、地殻に剪断歪エネルギーが十分蓄えられている場合は ($C = 0.0, 0.5$)、偏差応力を小さくするようにすべりが進行する ($C = 0.5$ の震源域南部の浅部の一部を除く)。一方、偏差応力が最も小さいケース ($C = 0.8$) では、偏差応力がすべりと共に増加するか、または一旦減少した後に再び増加する。これは、すべりの途中で応力の向きが変化し、すべることで剪断歪エネルギーを増加させてしまうためである。地震はすべりにより剪断歪エネルギーを解放する物理過程であるため、大きくすべった領域では偏差応力が減少するモデルの方が合理的である。

また、熊本地震前後の絶対応力場から、理論的な応力の向きの変化を調べた。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に限られる。本震後の絶対応力場3ケースに対して、本震後約3年間に震源断層から10km以内で発生した地震のメカニズム解のミスフィット角を計算したところ、 $C = 0.0, 0.5, 0.8$ に対してその平均値は23.9度、23.6度、30.5度となった。つまり、剪断歪エネルギーと応力場の時間変化に基づく分析の結果は、どちらも偏差応力の大きい2つのケースの方が偏差応力の最も小さいケースより合理的であることを示した。この結果、熊本地震震源周辺域の実効摩擦係数は、少なくとも0.2程度以上である。これは、従来、応力インバージョンによる推定結果よりも有意に大きい。本震後の地震のデータセットの約3割はどの応力場の下でも説明できず、応力以外の要因で発生した地震の可能性がある。これらを応力インバージョンのデータに含めしまうと、本震前後の応力の向きの変化を過大評価し、偏差応力レベルを過小評価することになるのかもしれない。

Estimation of the spatial distribution of the "internal friction coefficient" in the crust beneath the Japanese Islands

*Yuta MITSUI¹

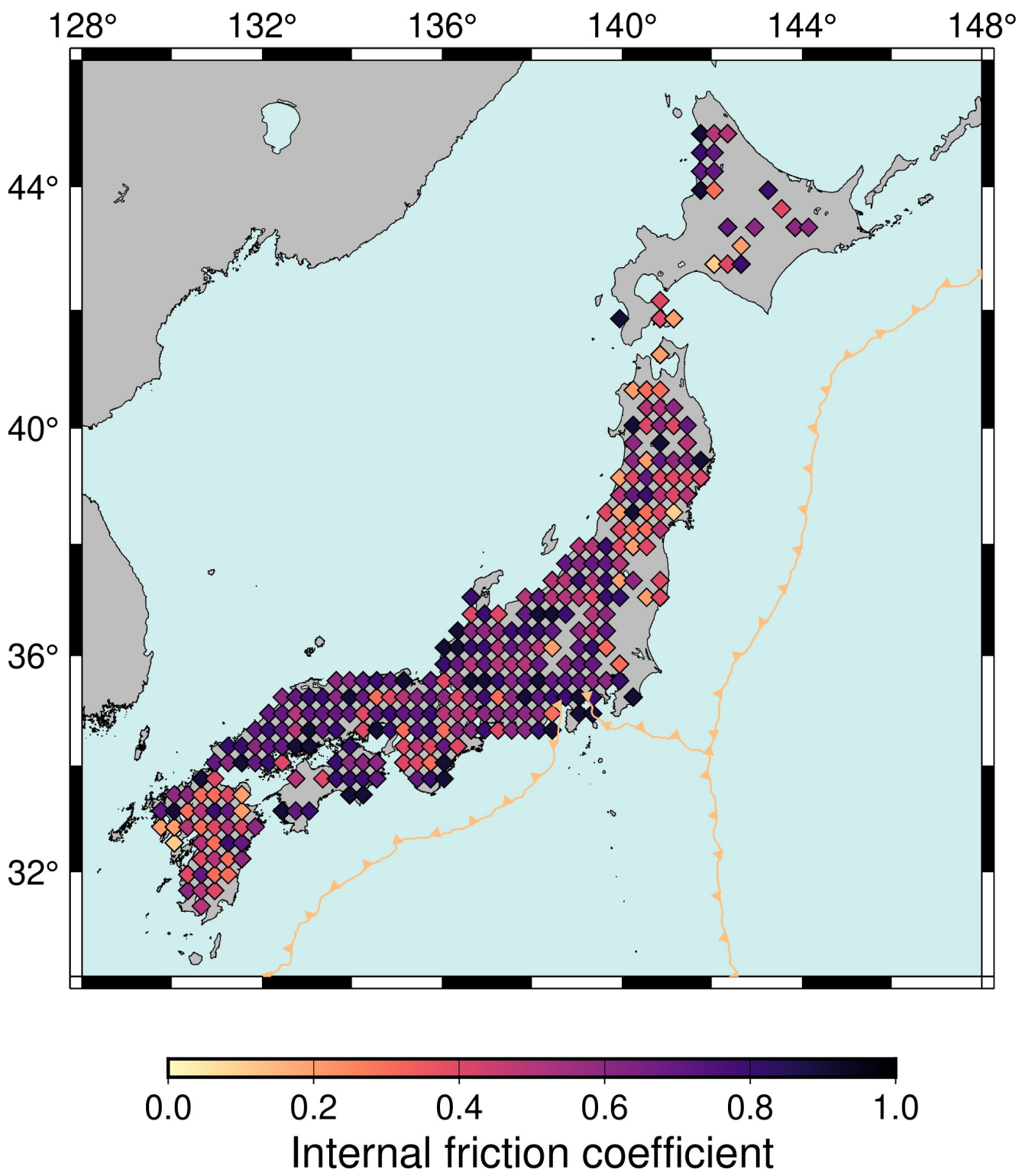
1. Department of Geosciences, Shizuoka University

メカニズム解などの地震学的データから地下の主応力の向きや応力比を推定するための応力インバージョン手法は数多く開発され(岩田・他, 2019)、日本列島下の応力状態も3次的に推定されるようになった(e.g., Terakawa and Matsu'ura, 2010; Yukutake et al., 2015; Uchide et al., 2022)。これらと少し異なった試みとして、Iio [1997]は、メカニズム解データからモール・クーロン破壊基準の内部摩擦係数を推定する先駆的な研究をしている。そして、Vavrycuk [2014]では、メカニズム解の2つの節面のどちらが真のすべり面か、モール・クーロン破壊基準からの「近さ」を基準に決める応力インバージョン手法を提案しており、この際に内部摩擦係数についてもグリッドサーチすることで最適値を推定している。この、モール・クーロン破壊基準からの「近さ」を基準に真のすべり面を決めるという概念は、Terakawa and Matsu'ura (2010)などのCMT解自体に基づくインバージョン手法の原理とも矛盾しない。本研究では、このVavrycuk [2014]の手法に基づいて、日本列島下の地殻内地震のメカニズム解から内部摩擦係数を推定する。

メカニズム解のデータとして、Uchide et al. [2022]による、日本列島下の深さ20km以浅のP波初動発震機構解を用いる。空間グリッドを0.3度ずつ取り、スムージングをかけず、各グリッド内の全メカニズム解に対して素朴に応力インバージョン解析を行った。内部摩擦係数のグリッドサーチを0.1から0.9の範囲で行い、3次元のモール円上でモール・クーロン破壊基準と各メカニズム解との距離の平均が最小となるものを最適値とした。Vavrycuk [2014]の手法は、2つの節面のどちらが真のすべり面かを決める部分以外は、古典的なMichael [1984]の手法を踏襲している。本研究でも、応力インバージョン自体の結果(主応力の向き・応力比)に特筆すべきところはなく、Uchide et al. [2022]が行った応力インバージョンと概ね同様の結果が得られたことを確認した。

その上で、同時に推定された内部摩擦係数の分布を図に示す。この結果は、2002年元旦から2011年東北地方太平洋沖地震の発生前までのメカニズム解データに基づいている。各グリッドの値の推定誤差は小さくないと考えられるため、空間的傾向のみを議論する。全体として、南海トラフ沿いの中国・四国地方から中部地方にかけて高い値が推定された一方、九州地方の一部と東北地方から北海道南部にかけての一部で、0.2以下の低い値が推定された。九州地方の中で特に内部摩擦係数の低い場所は別府湾周辺地域および雲仙天草地域であり、正断層系の発達した場所である。このことには何らかの意味があるかもしれない。しかし、同じく内部摩擦係数の低い東北地方から北海道南部にかけての一部には、このような地域的特徴はない。

先行研究(e.g., Yukutake et al., 2015)で示唆された、地表活断層に沿っての高いslip tendencyに類する結果は、本研究の内部摩擦係数の推定では得られていない。また、低い内部摩擦係数の原因が岩石物性の違いなのか、あるいは間隙流体圧(e.g., Sibson and Xie, 1998)の影響なのかについて、現時点で判断する材料もない。これらについては、より空間的に範囲を絞った、詳細な解析が必要と考えられる。



Stress drop variations of repeating earthquakes

*Junichi NAKAJIMA¹, Akira Hasegawa²

1. EPS Department, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

注水実験で検出された繰り返し地震（リピータ）では、マグニチュードが1以上異なるイベントが同一のグループ内で発生するという報告がある（Bourouis & Bernard, GJI, 2007; Lengline+, JGR, 2014; Cauchie+, GJI, 2020）。これらの研究では、波形相関と震源域の重なりの2つの基準でリピーター判定がなされており、実際に同一のグループでマグニチュードの異なるイベントが発生していると考えられる。このことは、同一の孤立したアスペリティパッチで応力降下量の異なるイベントが発生することを示している。一方、自然地震については、同様な報告がいくつかある（Harrington & Brodsky, BSSA, 2009; Bouchon+, Science, 2011; Lin+, GJI, 2016）が、これらの研究では波形相関と震源域の重なりの2つの基準でリピータ判定をしておらず、近接して発生した地震が含まれている可能性がある。最近、Nakajima & Hasegawa (JGR, 2023) は喜多方群発地震及び2003年宮城県沖地震の余震の中のリピータについて調査し、同じグループ内で応力降下量が1桁以上変化するリピータが確かにあることを明らかにした。

本研究ではNakajima & Hasegawa (2023)の対象を広範囲に広げ、日本列島全域を対象としてプレート境界地震、スラブ内地震、内陸地震の全てのリピータを系統的に調査した。その結果、いずれの領域においても同一のリピータグループでマグニチュードの異なるイベントが発生している事例が多数あることが明らかになった。応力降下量の異なるイベントが同一のアスペリティパッチで発生する原因は、間隙流体圧の時間変化に伴う有効法線応力の違いにあると推定される。また、同一グループのマグニチュードの差は大きくて2程度であり、これは応力降下量で3桁の差に対応する。このことは、通常の地震で見積もられている3桁程度の応力降下量のばらつきの主な原因の一つが間隙流体圧の違いであることを示唆している。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Nov 1, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 Room A F205+206

[S08] AM-2

chairperson:Yuji YAGI(University of Tsukuba), Yasuhira AOYAGI(Central Research Institute of Electric Power Industry)

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

[S08-21] Spatial pattern on stress drop of small earthquakes in the eastern margin of the Sea of Japan west off the Tohoku region, Japan

*Misa Tanaka¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-22] Frictional properties on the upper surface of the subducting Pacific plate off the south-east of Hokkaido, Japan

*Nanako Nemoto¹, Takuji Yamada¹ (1. Ibaraki University)

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

[S08-23] Hierarchical Rupture Growth Revealed by High-Degree-of-Freedom Seismic Source Models

*Yuji YAGI¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-24] A complex source process during the 2021 South Sandwich Islands earthquake

*Ryo Yamaguchi¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

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

[S08-25] Rupture Termination at the Northeastern End of the Source Fault of the 2016 Kumamoto Earthquake inferred from Seismic Velocity Structure

*Yasuhira AOYAGI¹, Haruo Kimura¹ (1. Central Research Institute of Electric Power Industry)

Spatial pattern on stress drop of small earthquakes in the eastern margin of the Sea of Japan west off the Tohoku region, Japan

*Misa Tanaka¹, Takuji Yamada¹

1. Ibaraki University

1. 研究背景・目的

地震計による地震観測が始まって以降、太平洋側だけでなく、日本海側でも複数の巨大地震が観測されている。一方で、オホーツクプレートとアムールプレート間の相対運動速度が遅いため地震数が少ないこと、両プレート境界の形状が不明瞭であること等を理由として、太平洋側と比べて日本海側の地震には不明点が多い。しかし、日本海側は太平洋側よりもプレート境界が沿岸に近いと考えられるため、防災対策のためにも、地震研究が重要である。本研究では北日本の日本海東縁域における摩擦特性の空間的特徴を把握することを目的として、2003年から2021年に同地域で発生した $4.0 \leq M \leq 5.0$ の97地震について応力降下量を解析した。

2. 研究手法

Yamada *et al.* (2021)と同様の手法を用いて、以下の手順により解析を行った。まず、防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)で観測された時間領域の地震波形をフーリエ変換し、周波数領域に変換した。その後、解析対象地震に近接するM3.5の地震の観測波形を経験的グリーン関数(EGF)として用いることにより、解析対象地震のスペクトルをEGFのスペクトルで割り、解析対象地震の震源特性の比を抽出した。最後にBoatwright (1978)のオメガ2乗モデルを用いてコーナー周波数を推定し、円形断層モデル(Madariaga, 1976)を仮定して応力降下量を算出した。

3. 結果・考察

本研究で得られた応力降下量の空間分布を図1に示す。応力降下量には空間不均質性が見られ、1983年日本海中部地震(Mw7.7)の震源域における応力降下量の値が大きい一方、1993年北海道南西沖地震(Mw7.9)の震源域は小さな応力降下量の値を示していることがわかる。また、2つの地震の震源域に挟まれた領域(図1中のA領域)では応力降下量が大きく、高い剪断強度がさらなる破壊の進展を妨げたと考えられる。本研究の結果は1993年北海道南西沖地震の震源域における剪断強度が低いことを示唆しているが、過去の研究により推定されている両地震の断層面積とすべり量の関係から、本震時の応力降下量は1993年北海道南西沖地震のほうが大きかったと考えられ(地震予知連絡会 1994)、調和的に対応しない。現段階では解釈が難しいが、1993年の震源断層は東傾斜と西傾斜の両方を含む可能性が指摘されている(Murotani *et al.* 2022)ことから1993年北海道南西沖地震の破壊の複雑性が、震源域における小地震の応力降下量が小さい原因かもしれない。

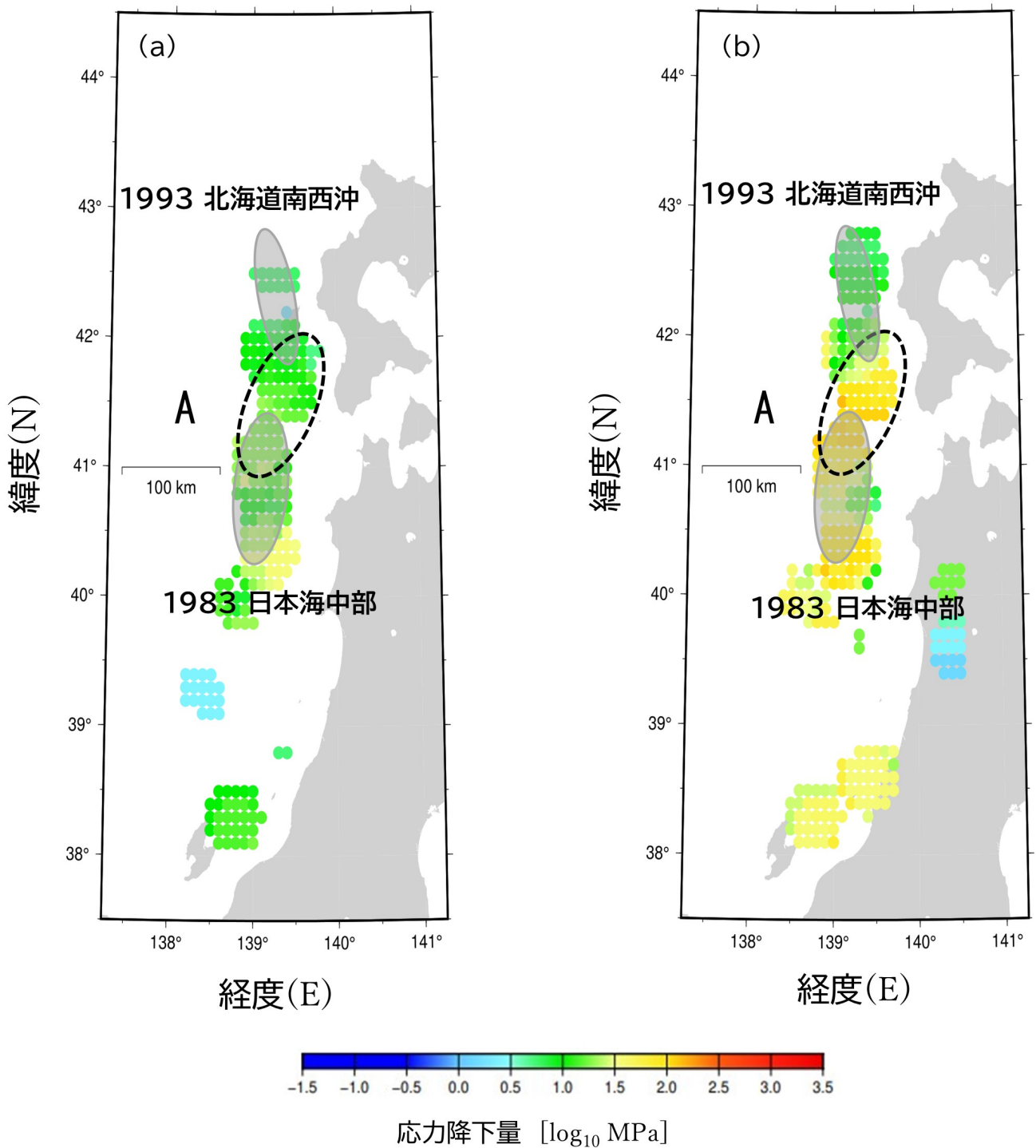


図1:本研究で得られた応力降下量の値を、緯度経度0.1度ごとに平滑化した結果。
 (a)P波および (b) S波から求めた応力降下量の空間分布と、1983年日本海中部地震
 の震源域、1993年北海道南西沖地震の震源域を比較して示す。領域Aは、両地震の
 震源域に挟まれた高応力降下量領域を示す(本文参照)。

Frictional properties on the upper surface of the subducting Pacific plate off the south-east of Hokkaido, Japan

*Nanako Nemoto¹, Takuji Yamada¹

1. Ibaraki University

1. 研究背景・目的

北海道南東沖は太平洋プレートがオホーツクプレートの下に沈み込んでいる地域であり、プレート境界における地震活動が活発である。Yamada et al. (2017)では、同地域の2002年6月～2015年12月に発生した小地震の応力降下量解析を行い、その空間分布が過去の大地震のすべり分布と調和的であり、時間変化が見られないことを報告している。一方、東北地方太平洋沖の小地震の応力降下量を解析したYamada et al. (2021)は、2011年東北地方太平洋沖地震前後において、一部の地域で応力降下量に時間変化が見られることを報告している。本研究では、2016～2021年に北海道南東沖で発生した小地震の応力降下量を解析し、Yamada et al. (2017)の結果と比較することにより、その時空間的特徴を議論する。

2. 研究手法

本研究では、防災科学技術研究所のHi-netで観測された157地震の波形データを解析した。解析対象地震の条件として、Yamada et al. (2017)と同地域の、震源がプレート境界から±15kmかつマグニチュードが4.0以上5.0以下の地震と定めた。解析手法はYamada et al. (2017; 2021)と同様に、以下のとおりとした。まず、震源が解析対象地震の近傍であるM3.5の地震波形を経験的グリーン関数（EGF波形）として用い、解析対象地震の波形及びEGF波形のスペクトルをそれぞれ算出した。続いて、解析対象地震のスペクトルをEGF波形のスペクトルで割る（デコンボリューション）ことにより、震源特性を抽出した。その後、Boatwright (1978)のオメガ二乗モデルを用いて、各観測点のスペクトル比からコーナー周波数を推定し、これらのlog平均を解析対象地震のコーナー周波数とした。最後に、Madariaga (1976)の円形断層を仮定し、コーナー周波数から応力降下量を推定した。さらにその結果を緯度経度0.1度ごとに平滑化することで、解析対象地域における応力降下量の空間分布を求めた。

3. 結果・考察

応力降下量の解析結果を図1に示す。Yamada et al. (2017)と同様に、北海道南東沖における太平洋プレート上面の摩擦特性に不均質性が見られた。また、1968年十勝沖地震すべり域で発生した地震の応力降下量は、その周辺の領域で発生した地震よりも高い値を示した。このことも、Yamada et al. (2017)の結果と調和的である。応力降下量の時間変化については、解析地域の中西部では大きな変化は見られなかったが、根室沖に関しては、2020年ころから低下が見られる（図2）。岩石実験では、将来の震源付近で剪断強度が下がることが報告されている(Ohnaka and Shen, 1999)ことを考慮すると、根室沖において次の大地震の発生が迫っていることを示しているのかもしれない。なお、同地域では2023年2月にM6.0の地震が発生しているが、現段階ではこの地震と2020年以降の応力降下量低下の関連は不明である。

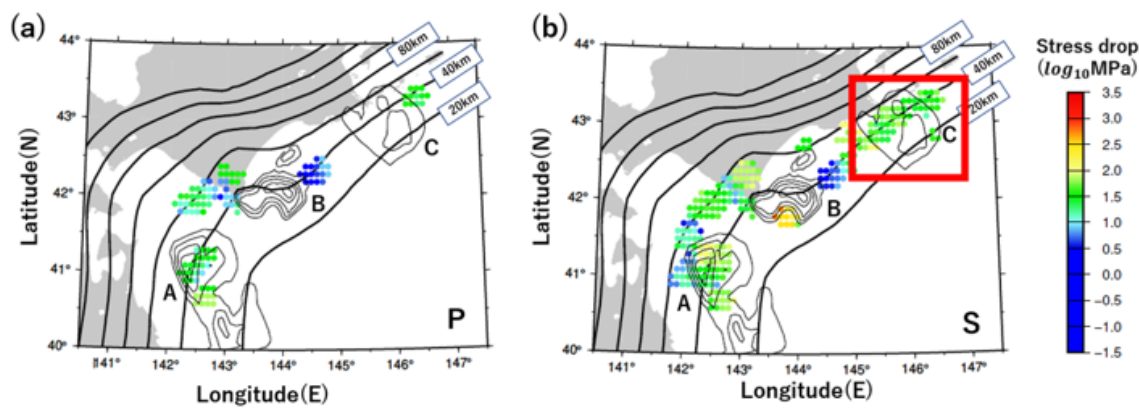


図 1. P波、S波からそれぞれ求めた応力降下量の空間分布。太い実線は沈み込む太平洋プレート上面の深さを表す。細実線で表されたコンターはそれぞれ、(A)1968年十勝沖地震(永井ほか, 2011)、(B)2003年十勝沖地震(Yamanaka and Kikuchi, 2003)、(C)1973年根室沖地震(山中, 2006)の地震時すべりを1mごとに示したもの。図中の赤枠は、図2に示した地震の空間範囲を表す。

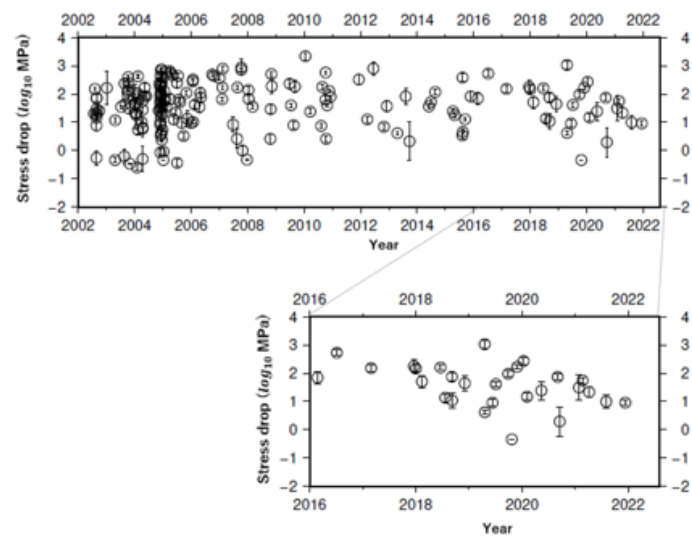


図 2. 1973年根室沖地震すべり域周辺(図1の赤枠内)における、応力降下量の時間分布。縦軸は応力降下量を、横軸は時間を表す。

Hierarchical Rupture Growth Revealed by High-Degree-of-Freedom Seismic Source Models

*Yuji YAGI¹, Ryo Okuwaki¹

1. University of Tsukuba

地震は断層上で破壊が伝播する現象であり、有限断層インバージョン等の方法により、その震源過程を推定することができる。1980年代に登場した有限断層インバージョンでは、基本的に、破壊フロントは揺らぎながらも震源から遠ざかるように伝播すると仮定し、また断層形状は平面もしくは曲面で定義でき、断層滑りベクトルは断層面の法線ベクトルと直交する方向に制限している。ちなみに断層滑りベクトルは、この制限に加えてリファレンスとするベクトル周辺に分布すると制限されることが多い。観測データの質と量が不十分な場合は、従来型の有限断層インバージョンは観測データを説明できるため、この枠組みに疑問を持つことは少なかったと思われる。しかし、観測データの質と量が向上することによって、従来の有限断層インバージョンで観測データが説明できないケースが多いことが明らかになりつつあり、地震像を正しく理解するためには高自由度な震源過程モデルが必要不可欠になってきている。

私たちのグループが提案しているポテンシー密度テンソルインバージョン (PDTI) は、観測データの質と量の向上に対応できるように、モデルの自由度を高める方向に開発されたものである。PDTIでは、断層面ではなくモデル平面を設定し、断層滑りを5成分の基底ダブルカップルで表現している。このことによって、“断層滑りベクトルは断層面の法線ベクトルと直交する方向に制限される”という、当たり前のように用いられていた強い拘束条件を用いることなく解析することができる。このような自由度の高いモデルを用いても安定に解析できるのは、グリーン関数の不確定性をデータの共分散成分に取り入れることによって、タチの良いデータに改善しているからに他ならない。PDTIでは、モデルの自由度を向上させるために、破壊フロントが反転する現象も許容する震源過程モデルが用いられることが多い。断層構造や強度分布に階層性が存在する場合は、破壊フロントの進行方向が反転する現象も起こりうるため、破壊伝播方向に自由度を持たせることは重要である。PDTIは多くの地震に適用されてきたが、その中でも、2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake、2014 Mw 6.2 Thailand earthquake、2016 Mw 7.1 Romanche transform fault earthquake、2016 Mw 8.0 Kaikoura earthquake、2018 Mw 8.1 Gulf of Alaska earthquake、2019 Mw 8.0 Peru intraslab earthquake、2022 Mw 7.1 Taitung, Taiwan, earthquake、2023 Mw 7.9 South-Eastern Türkiye and Syria earthquake の8つの地震で、破壊フロントの進行方向が反転する現象が観測されている。これらの破壊フロント進行方向の反転は、初期破壊から主破壊への移行時に発生しており、階層的な破壊成長が発生していることを示している。また、断層形状が複雑な領域では非ダブルカップル成分が卓越し、複数の断層が同時破壊している様相が捉えられている。本発表では、PDTIの解析結果をレビューし、階層的な破壊成長について議論する。

A complex source process during the 2021 South Sandwich Islands earthquake

*Ryo Yamaguchi¹, Yuji Yagi¹, Ryo Okuwaki¹

1. University of Tsukuba

2021年8月12日、英国領サウスサンドウィッチ諸島沖合、サウスサンドウィッチ沈み込み帯の浅い領域で、2021年サウスサンドウィッチ諸島 (SSI) 地震 (M_w 8.5) が発生した。サウスサンドウィッチ沈み込み帯では、南米プレートがサンドウィッチプレートへ東南東方向に70–78 mm/yr の速度で沈み込んでいる。この沈み込み帯は構造侵食型に分類されるが、一部には付加体も存在し、海溝軸は東に凸に湾曲している。米国地質調査所 (USGS) によると2021年SSI地震発生後4分間に M_w 7.5, M_w 8.1, mb 6.7の3つの低角逆断層型の地震が同定されているが、Global CMTプロジェクトの2021年SSI地震の解析結果では300秒の継続時間を持つ M_w 8.3の一つの低角逆断層型地震のみが同定されている。これらの事実は、2021年SSI地震は複数のサブイベントから構成されており、その破壊継続時間はスケーリング則から予測される値より有意に長いことを示唆する。なお、この地震では東に約7000 km離れたモーリシャス島の観測点で約0.4 m の潮位変化が観測されるなど広い範囲で津波に伴う潮位変化が観測されている。

一般に、継続時間が長い地震を解析する場合、グリーン関数の不確実性が時間と共に増加するため、安定的に震源過程像を得ることは難しい。また、沈み込み帯で発生する複雑な震源過程を理解するためには、スプレー断層や破碎帯などのプレート境界以外の場所で断層すべりが起きている可能性を考慮して解析を行うことが重要である。近年になって、グリーン関数の不確実性の影響をデータに取り入れることで継続時間が長い地震を安定に解析することを実現し、かつ、断層面の形状に関する事前の仮定を排することで、湾曲した断層面や複数の異なった断層面における破壊の推定を可能にするPotency Density Tensor Inversion (PDTI) が提案された。そこで本研究はPDTIを用いて2021年SSI地震の複雑な震源過程を明らかにする。

解析には、IRIS Data Management Centerよりダウンロードした47観測点における遠地実体波P波の上下動成分を使用した。これらの波形は、地震計特性を取り除いた後に1.5秒間隔でリサンプルした。震源域の速度構造はCRUST 1.0のデータを用いて設定し、グリーン関数を計算した。余震分布を参考にして非矩形のモデル面を設定し、各要素震源の深さはSlab2.0によるスラブ表面の深度データを用いた。

ポテンシー密度テンソル分布を時空間で積分することによって得られたモーメントテンソル解は25.2 %の非ダブルカップル成分を含む低角逆断層型を示し、地震モーメントは 6.5×10^{21} Nm (M_w 8.5) である。各要素震源のすべり速度を時間方向に積分して得られたポテンシー密度分布は主に震源付近から南に約300 kmの範囲に分布しており、震源から南南東に約140 km地点の、海溝が最も東に張り出している領域周辺にピークを持つ。各要素震源のメカニズム解について、スラブ表面の形状に近い節面のスリップベクトルを求めると、震源から南に向かうにつれて時計回りに回転する傾向が見られる。破壊継続時間は約280秒であり、モーメント速度関数は10個以上のスパイクを有している。震源過程モデルから合成した理論波形は、解析に使用していないデータポイントを含めた観測波形の特徴を再現している。震源付近で開始した破壊は、震源の南に約35 kmの付近で約15秒間、震源の南南東に約150 kmの付近で約75秒間の停滞を伴いながら、南方向へ伝播している。東側の浅い領域において、低角逆断層に対応する節面のスリップベクトルは、海溝軸の湾曲に対応して、海溝軸に直交する方向に時間変化する傾向が見られる。また、傾斜角は海溝軸付近の浅い領域ほど高くなる傾向が見られ、スラブ形状から推定される傾斜角と乖離している。

本発表では、PDTIによって得られた震源過程モデルに基づき、2021年SSI地震における不規則な破壊伝播と海底地形の関係や、スプレー断層の破壊の可能性について議論する。

Rupture Termination at the Northeastern End of the Source Fault of the 2016 Kumamoto Earthquake inferred from Seismic Velocity Structure

*Yasuhira AOYAGI¹, Haruo Kimura¹

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

1. はじめに

長大な活断層系における起震断層の端部を評価する上では、実地震で破壊が停止した断層端部の特徴が参考になる。2016年熊本地震では、布田川－日奈久断層帯の北部で破壊が生じたが、日奈久断層帯の中部～南部区間へは破壊が伝播しなかった。Aoyagi et al. (2020EPS) は、震源断層南端には日奈久断層を横断する地震波速度の急変部が存在し、そこで地震発生層が上下に食い違っていることが断層の破壊停止要因になったと指摘している。一方、震源断層北東端については、重力異常や比抵抗構造に基づいて、阿蘇カルデラ内の上部地殻に存在するマグマだまりが破壊の停止要因になったという見方が多い（例えば、Miyakawa et al., 2016EPS）。ただし、阿蘇カルデラ内の地下構造と断層活動との関係については未解明な点が多く残されている。

本研究では、震源断層北東端付近の地下構造と断層活動の解明を目的として、稠密臨時地震観測に基づく地震波トモグラフィ解析を実施した。本報告は、P波速度構造に関する暫定結果（青柳, 2022, 活断層学会2022年度秋季大会）に対して、使用データを増やしてS波速度構造まで含めた検討を行った結果である。なお、2016年熊本地震の地表地震断層は、従来図示されていた布田川断層の北東端部より東北東に4～5 km延伸してカルデラ内まで達した（Shirahama et al., 2016EPS）。また、Kobayashi et al.(2018)が地殻変動から推定した断層モデルでも、断層北東端の位置は地表地震断層とほぼ一致している。本論では、この位置を震源断層の北東端として地下構造との関係を議論する。

2. 臨時地震観測とトモグラフィ解析

稠密臨時地震観測は、2018年3～9月の約半年間、2016年熊本地震の震源域北部～阿蘇カルデラ周辺に約5 km間隔で計30点の臨時観測点（近計システムEDR-X7000+KVS-300）を設置して行った。得られた地震観測記録からP波、S波到達時刻を験測し、周辺にあるHi-netなどの定常観測点の験測値とも併合処理して、tomoDD（Zhang and Thurber, 2003BSSA）により地震波トモグラフィ解析を行った。この際、分解能の向上を図るため、Aoyagi et al.(2020)による震源域南部の臨時観測で得られた験測値の一部や、2001～2021年における臨時観測期間外の気象庁一元化震源カタログの験測値も併合処理した。解析に用いた地震総数は5098個である。解析空間は、震源断層の北東端部付近を中心とし、布田川断層の方向に長軸をもつ48 km×24 km、深さ20 kmまでの範囲とした。グリッド間隔は、水平方向4 km、深さ方向2.5 kmである。

3. 断層北東端部の速度構造と破壊停止要因

チェッカーボードレゾリューションテストの結果、深さ2.5 km～12.5 kmの範囲で4 kmの空間分解能が確認された。この深度における、震源断層北東端部付近の地震波速度構造の特徴、およびそこから考察される断層破壊停止要因は次の通りである。

- (1) 阿蘇カルデラの外側（西側）では、布田川断層を挟んで南側に高速度領域（ $V_p \sim 6.5$ km/s）、北側に低速度領域（ $V_p < 6$ km/s）が認められ、両者の境界は約60度で北傾斜している。余震は両者の境界に沿って分布している。
- (2) 一方、阿蘇カルデラ内の南西部には、 $V_p < 5.0$ km/sの顕著な低速度領域が地表付近から深さ10 km以上まで円柱状に認められる。この低速度領域は水平方向に8 km程度の広がりを持ち、中央火口丘西側の海抜-1000mで推定されている150℃の高温領域（NEDO, 1995）とよく対応する。この低速度領域は、その分

布，形態的特徴から，比較的最近の火山活動に伴う火道，あるいはピストンシリンダー型のカルデラを示すと考えられる。

(3) 熊本地震の破壊域北東端では，断層下盤側の構造が(1)から(2)に置き換わっている。この円柱状の低速度領域は，低 V_p/V_s 領域であるため，マグマだまりではなく，熱水領域である可能性が高い。地温勾配からは深さ2 kmで300℃になると予想され，石英あるいは長石のレオロジーから想定されている地震の下限深度の温度300～450℃（たとえば，Sibson, 1984）に比較的浅部で達すると考えられる。このため，この脆性破壊を生じにくい高温の低速度領域が，地震時の断層破壊を停止させたと解釈できる。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Nov 1, 2023 1:30 PM - 2:30 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 4:30 AM - 5:30 AM UTC | 🏠 Room A F205+206

[S08] PM-1

chairperson: Keisuke Yoshida (Tohoku University)

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

[S08-26] Change in scaling relations of source parameters around M_w 5.1 for crustal earthquakes

*Shota Shimmoto¹, Hiroe Miyake¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S08-27] Precise hypocenter determination around the 2016 Mw 7 normal fault earthquake off Fukushima and Ibaraki prefectures: S-net data analysis

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida^{1,2}, Tatsuya Kubota³, Toru Matsuzawa¹ (1. Tohoku University, 2. ERI, University of Tokyo, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-28] Microearthquakes in the lower crust and their generation mechanism: The case of deep cluster activity beneath western Hiroshima prefecture

*Kazutoshi IMANISHI¹, Takahiko Uchide¹ (1. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-29] The 2023 M6.5 Suzu, Japan, Earthquake that occurred during a Fluid-Induced Swarm Activity

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

Change in scaling relations of source parameters around M_w 5.1 for crustal earthquakes

*Shota Shimmoto¹, Hiroe Miyake¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

本研究では、応力降下量、見かけの応力、放射効率および破壊エネルギーのスケーリング則を検討した。まず、日本の中小規模(M_w 3.2–6.0)の地殻内地震の地震波の放射エネルギーと応力降下量をスペクトル比解析から求めた。解析にはHi-netの速度波形データを使用した。地震波の放射エネルギーは、地震モーメントと観測スペクトル比のコーナー周波数から ω^{-2} モデルを仮定して推定した。一方、応力降下量は、Shimmoto (2022)が開発したスペクトル比法を適用して推定した。この手法では、各観測点で得られたスペクトル比から均質な長方形震源の面積や破壊伝播速度等の有限震源特性を推定する。この手法で推定される有限震源特性は、地震すべり量が大きい局所領域（最大アスぺリティ領域）に対応する。この結果を踏まえ、従来の中小規模の地震の解析で広く使われている均質な円形震源に対して、高い応力降下量が集中する局所領域を一つ有する不均質震源モデルを導入し、応力降下量を計算した。この際、Somerville et al. (1999)による最大アスぺリティの面積が平均的に破壊領域全体の17.5%であるという結果を利用した。推定した応力降下量と放射エネルギーを用いて放射効率と破壊エネルギーを算出した。

次に、本研究の結果と既往研究による小規模地震($M_w < 3.0$)と大規模地震($M_w > 6.0$)の震源パラメータの推定結果を合わせて震源パラメータのスケーリング則を検討した。既往の小規模地震の研究では、応力降下量は震源スペクトルのコーナー周波数の方法で推定されている。コーナー周波数の方法では、震源モデルを仮定してコーナー周波数と応力降下量を結びつける定数(以下、k値)を決める必要がある。しかしながら、仮定する震源モデル(k値)によって、コーナー周波数から推定される応力降下量は著しく異なる。例えば、広く使われている円形震源モデルにBrune (1970)とMadariaga (1976)があるが、これらの震源モデルは同じコーナー周波数に対して5.6倍異なる応力降下量の推定値を与える。コーナー周波数の方法におけるk値の選択の任意性は、応力降下量のスケーリング則を調べる際に問題となる。本研究では、観測スペクトル比のコーナー周波数から推定した応力降下量と、Shimmoto (2022)の手法から推定した応力降下量の中央値を比較してk値を求め、既往研究の小規模地震の応力降下量を再計算した。

既往研究と本研究に基づく震源パラメータの推定結果と合わせて、応力降下量、見かけの応力、放射効率のマグニチュード依存性を検討し、次の結果を得た：(1)応力降下量と見かけの応力は M_w 5.1付近まではマグニチュードとともに増加し、 M_w 5.1より大きくなるとマグニチュードに依存しなくなる。(2)放射効率はマグニチュードにおおむね依存しない。観測された応力降下量、見かけの応力、放射効率、破壊エネルギーの地震すべり量依存性は、Rice (2006)による地震時の摩擦発熱による間隙圧上昇(Thermal pressurization)の影響を考慮したすべり弱化モデルによって概ね再現できることが分かった。今後、地震時の摩擦発熱による間隙圧上昇を含め、他のメカニズムの震源パラメータのスケーリング則に対する影響についてのさらなる研究が望まれる。

Precise hypocenter determination around the 2016 Mw 7 normal fault earthquake off Fukushima and Ibaraki prefectures: S-net data analysis

*Yoshiaki Matsumoto¹, Keisuke Yoshida¹, Naoki Uchida^{1,2}, Tatsuya Kubota³, Toru Matsuzawa¹

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

地震発生の理解のために地球内部の断層構造や応力状態の把握が必要である。小地震の震源分布は、断層構造や応力状態を把握するための情報源として利用できるが、海域で発生する地震に関しては、震源直上に観測点がほとんどないことから、詳細な震源分布が得られないでいた。2016年以降、東北日本沖合において、海底ケーブル式観測網 (S-net) のデータが使用できるようになった。S-netデータを活用することにより、東北日本海域部で発生する地震の高精度な震源決定が可能になり、海底下のより詳細な断層構造や応力状態の情報抽出が可能であると考えられる。

2016年11月22日に福島-茨城沖の地殻浅部においてMw7.0の正断層型地震が発生し、津波を生じさせた。Mw 9.0東北地方太平洋沖地震の発生以降、東北日本沖合の上盤プレート内では正断層型地震が多発しており、その要因としてMw 9.0地震の発生による上盤プレート内の応力状態の変化が考えられている(e.g. Hasegawa et al., 2012)。本研究では、Mw7.0の正断層型地震の発生機構を理解するために、S-netデータを使用した波形相関による高精度な震源決定を行うことで、本震震源周辺の詳細な震源分布を調べる。併せて、本震の震源パラメータの推定を行い、本震破壊の特徴の抽出を試みる。

まず、2016年8月15日から2020年8月31日までに福島-茨城沖で発生した9,090個の $M_{JMA} \geq 2$ のイベントを対象に、波形相関を用いて地震波の到達時刻差を求めた。対象領域内に位置するS-net観測点6点に加えて、陸上観測点17点で得られた波形データを使用した。震央間距離が3km以内の地震ペアについて、2 - 5Hzのbandpass filterを適用した速度波形の相互相関を計算し、相関係数が0.75以上であった場合、到達時刻差を求めた。波形相関から得られた到達時刻差データに加えて、読み取りによる到達時刻差データに対

し、Double-Difference法(Waldhauser & Ellsworth, 2001)を用いた震源再決定を行った。ただし、本震震源については読み取りによる到達時刻差データのみを使用した。初期震源には、鈴木 (2022) が陸上観測点に加えS-net観測点における到達時刻も使用して推定した震源カタログを使用した。

震源再決定の結果、初期震源ではばらつきをもって分布していた本震周辺の震源が、明瞭な面上に集中した。その主要な面は、北東-南西走向の南東傾斜を示し、本震のメカニズム解の節面の一つと整合的であった。この面は本震の断層面を表していると考えられる。得られた震源分布を、Kubota et al (2022) が津波データ解析に基づき推定したすべり分布と比較すると、本震震源はすべり量が大きい領域の北東端に位置し、余震震源は本震のすべり量が大きい領域を取り囲むように分布した。このことは、本震と余震による主要な応力解放領域が空間的に異なることを示唆する。

次に、本震の地震波放射過程の情報を抽出する目的で、本震近傍で発生した余震15個 ($4.5 \leq M_w \leq 5.8$)の波形を用いたデコンボリューション (Liggoria & Ammon, 1983)によりApparent moment rate function (AMRF)の推定を行った。データにはF-netの12観測点における速度型強震計データを使用した。得られたAMRFは2つのピークを持ち、北側の観測点ほどピークの間の時間差が大きくなる傾向が確認できた。本震破壊が北東から南西方向に伝播したことが示唆され、本震震源が断層の北東部に位置することと整合的である。

得られたAMRFを用いて、Mw7.0地震の規格化エネルギーを推定した。推定された規格化エネルギーの中央値は 4.5×10^{-5} であり、この値は、先行研究により推定された同規模地震についての値と同程度である (Venkataraman & Kanamori, 2004; Yoshida & Kanamori, 2023)。本研究で得られた規格化エネルギーに加えて、Kubota et al (2022)が津波データ解析から推定した応力降下量の平均値4.2 MPaを用いて、Mw7.0地震の破壊による放射効率を推定すると、放射効率の値として0.64が得られた。Venkataraman & Kanamori (2004)による $M_w > 6.7$ 地震の典型的な値の範囲内に含まれるものの、やや大きい。本震周辺の余震震源が明瞭な面上に集中して発生したと併せて考えると、Mw7.0福島-茨城沖地震が成熟した断層で発生したことを示唆しているのかもしれない。このことは、福島-茨城沖合浅部における正断層地震活動が、これまでも繰り返し発生してきた可能性を示唆する。

Microearthquakes in the lower crust and their generation mechanism: The case of deep cluster activity beneath western Hiroshima prefecture

*Kazutoshi IMANISHI¹, Takahiko Uchide¹

1. Geological Survey of Japan, AIST

陸域においては通常、地震は深さ約15kmよりも浅い上部地殻で発生するが、それよりも深い下部地殻でも起こることがある。例えば、南カリフォルニアの断層帯直下では、超稠密な地震計アレイにより、下部地殻から上部マントルまで連続する地震活動が明らかにされている (Inbal et al., 2016)。日本においても広島県西部直下の深さ約30kmにおいて、直径10kmほどの地震クラスターが存在することが報告されている (高橋・山田, 2010; 志藤, 2021)。下部地殻で発生するこの種の地震は、内陸地震の発生にも関係していると考えられるが、その発生メカニズムは依然として良くわかっていない。我々は今年のJpGUにおいて、広島県西部の地震クラスターを対象に、M1.5以上の地震のモーメントテンソル解を推定した。その結果、クラックの開口成分が卓越する時期と閉口成分が卓越する時期が約10年弱の周期で交互に現れることを報告した。そして、クラックが開口するには流体の関与が考えられることから、クラスター内に高間隙水圧の流体が周期的に注入され、これが深部クラスターを引き起こす要因になっている可能性を指摘した。地震の活動度も開口成分が卓越する時期にやや多い傾向があり、流体と地震活動の関連が示唆される。

本研究では、さらに小さな地震にまでモーメントテンソル解析を適用するとともに、応力降下量の推定も行い、この活動の発生メカニズムをさらに詳しく調査することとした。解析対象は、2004年以降に発生したM1.0以上の地震 (約240イベント) である。マグニチュードの下限を1.5から1.0まで引き下げたことで、推定対象が3倍以上に増加した。モーメントテンソル解析は、Dahm (1996)の相対モーメントテンソル法を改良した逐次相対モーメントテンソル法 (Imanishi and Uchide, in preparation) によって行った。予備的な結果からは、マグニチュードが小さいと推定精度は悪くなるものの、クラックの開口・閉口成分が周期的な変動を示す傾向は確認できた。次に、地震波の減衰補正を慎重に行いながら、地震波スペクトルに ω^2 モデルを当てはめてコーナー周波数を推定し、応力降下量を見積もった。推定値は概ね1~100MPaの範囲に分布し、上部地殻内の地震と同程度か、やや大きな値を持つことがわかった。応力降下量の時間変化を見ると、応力降下量の大きい地震は開口成分が卓越するタイミングに、一方で応力降下量の小さい地震は閉口成分が卓越するタイミングに、それぞれ概ね調和して発生する傾向があることが明らかになった。一般的には流体が注入されて間隙水圧が上昇すると強度低下が生じるため、応力降下量は小さくなると期待されるが (e.g., Goertz-Allmann et al., 2011)、それとは逆センスである。下部地殻を構成する岩石の性質や温度圧力条件も含めた検討が必要である。

謝辞：解析には防災科研Hi-net、気象庁、東大地震研究所、産総研の地震波形データ、気象庁一元化カタログを使用しました。本研究はJSPS科研費20K04141の助成を受けたものです。記して感謝いたします。

The 2023 M6.5 Suzu, Japan, Earthquake that occurred during a Fluid-Induced Swarm Activity

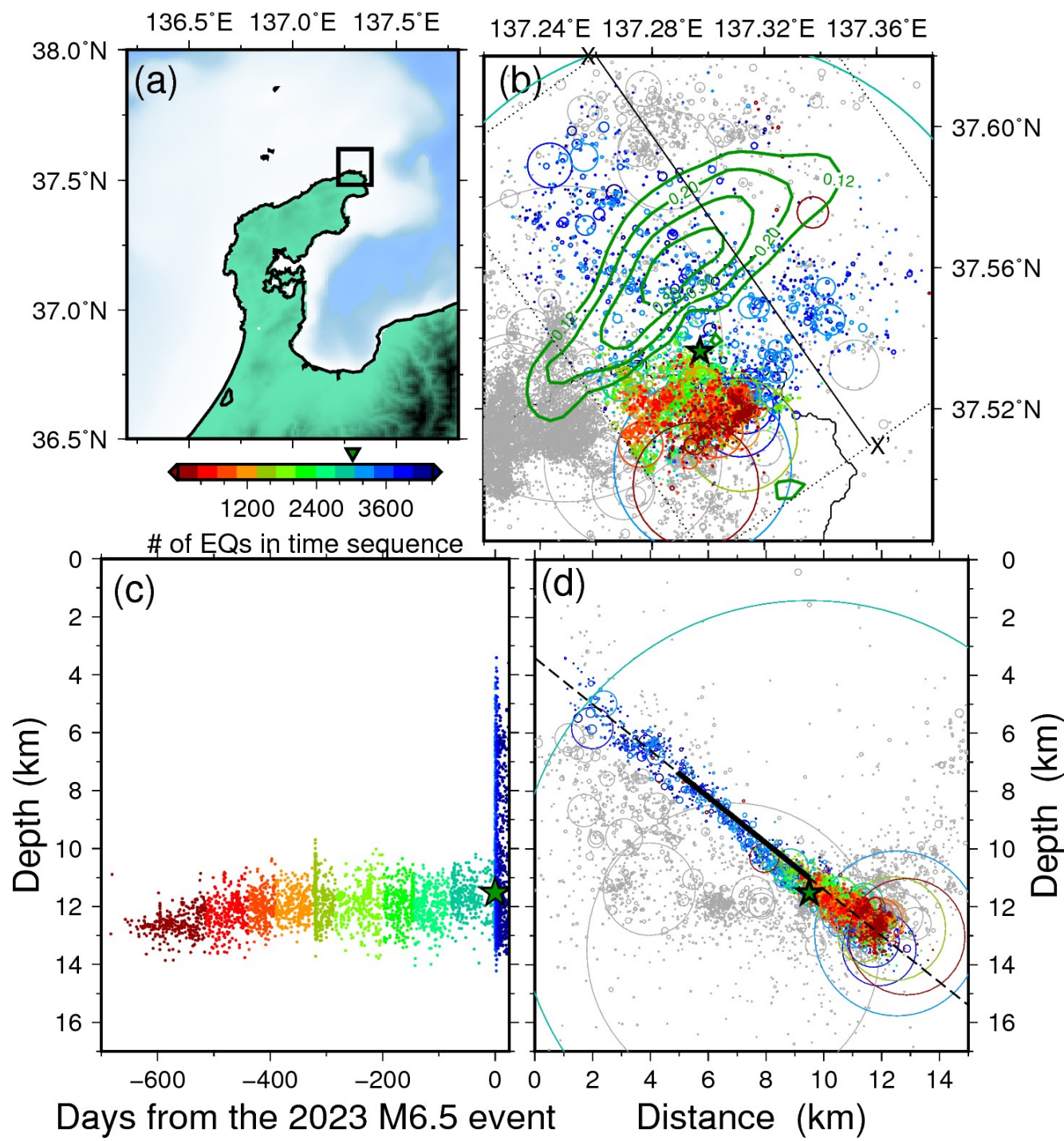
*Keisuke YOSHIDA¹

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

2023年5月5日、石川県能登半島の北東端部において、 M_{JMA} 6.5の地震が発生した。この地域では、2020年末頃から地震活動度が急激に増加しており、2022年6月19日にも M_{JMA} 5.4の地震が発生したことから、その動向に注目が集まっていた。特筆すべきことに、この群発地震活動時には、複数のクラスターの複雑な断層ネットワークを経由した震源域の浅部側への移動がみられていた (Yoshida et al., 2023, JGR)。

本講演では、本震の震源過程の推定と微小地震 (2003-2023/7)の震源再決定を行った結果について紹介する。本震の震源過程は防災科学技術研究所 F-net強震地震波形記録を用いて推定し、微小地震の震源は気象庁および NIED Hi-netの観測波形の相互相関により求めた到達時刻差データを用いて再決定した。得られた結果は、 M_{JMA} 6.5本震の破壊が、それ以前から継続していた群発地震の面構造のうちの一つの北部・浅部端付近で開始し、更に浅部側で主すべりを起こしたことを示した。余震の多くは本震断層に対応すると考えられる南東傾斜の面構造に集中しており、本震以前に地震が発生していた深さよりも ($z > 10$ km)も更に浅部側で発生した (z 5-10 km)。

得られた結果は、2023年5月5日の M_{JMA} 6.5の地震が、地殻深部から断層帯を通して上昇してきた流体と、それに誘発された非地震性すべりや微小地震による応力変化により引き起こされた可能性を想起させる。流体起因で発生する地震は群発地震活動になりやすく、大地震には至りにくいという考えもあるものの、今回の観測は、流体起因の群発地震活動の中で $M > 6$ の被害地震を発生させ得ることを示している。本震震源は、2022年6月に M_{JMA} 5.4地震を発生させた断層帯中の地震活動の浅部端付近に位置するように見える。その断層帯では、本震以前から震源の migrationが見られていたが (Yoshida et al., 2023)、直前には migrationに明瞭な異常は見られなかった (ただし、本震一日以内に震源 1 km以内の距離で $M1-2.3$ の小地震が 6つ発生した)。この周辺域では、1993年にも M_{JMA} 6.6の地震が発生している。しかしながら、その震源域は陸上の観測点から離れているため、震源深さの推定精度が悪く、現在の地震活動との3次元的な位置関係ははっきりしていない。本震後の地震活動の多くは、同じ面構造の浅部延長 (北部側)で発生している。本震破壊により、断層の更なる浅部に流体が供給されるようになった可能性も考えられる。



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

📅 Wed. Nov 1, 2023 2:30 PM - 3:00 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 5:30 AM - 6:00 AM UTC | 🏢 Room A F205+206

[S09] PM-1

chairperson: Keita Chiba

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

[S09-01] Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan (2)

*Shiro OHMI¹, Hiroshi INOUE², Nityam NEPAL³, Karma NAMGAY³, Dowchu DRUKPA³ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Department of Geology and Mines, Ministry of Energy and Natural Resources, Bhutan)

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

[S09-02] Visualization of the transition of the Japan Meteorological Agency's seismic stations from the Meiji to Showa eras.

*Tetsuo Hashimoto¹, Satoko Murotani² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. National Museum of Nature and Science)

Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan (2)

*Shiro OHMI¹, Hiroshi INOUE², Nityam NEPAL³, Karma NAMGAY³, Dowchu DRUKPA³

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Department of Geology and Mines, Ministry of Energy and Natural Resources, Bhutan

1. はじめに : ブータン・ヒマラヤ地域は、インドプレートとユーラシアプレートの衝突帯に位置しており、世界で最も地震活動が活発な地域のひとつであると考えられている。我々は、2013年以来、複数のプロジェクトの支援を受けながら、ブータンにおける恒久的な地震活動監視観測網の構築を行ってきた。本稿では、ブータンの地震観測網構築の経緯と現在の稼働状況、ならびに観測結果の速報的な報告をおこなう。

2. 観測網の概要 : 本計画の当初の段階では、地質鉱山局(DGM)の観測網は6点のオンライン観測点と3点のオフライン観測点(以後、DGM-NETとよぶ)から成り、短周期高感度地震計、強震計、広帯域地震計等を設置して運用することが計画された。これらのうち、オンライン観測点は、自動車により近傍までアクセスが可能な点を選点し、2015年から2017年にかけて稼働を開始した。オフライン観測点は短周期高感度地震計のみで構成され、通信環境が劣悪で自動車アクセスが困難な北部国境地域を中心に、2017年から2019年にかけて最初期の観測を実施し、2023年3月末までに一旦撤収した。データは、首都ThimphuのDGMのデータセンターにて、GFZ/Gempaによる地震データ解析処理プログラムSeisCompにて解析を行うこととした。また、DGM-NETの構築と並行して、Bangkokに本拠があるRIMES (Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System)による独立プロジェクトとして、2017年から8点の広帯域地震計と強震計からなる観測網も構築が進められた(以下、RIMES-NETとよぶ)。そのため、2023年3月末現在では、ブータン国内では合計14点のオンライン地震観測点が稼働していることになる。2021年から2023年にかけては、RIMES側の了解を経て、これらの14点のオンライン観測点データをSeisCompにより統合処理するシステムの構築を目指した。

3. 運用上の問題点 : DGM-NETの構築・運用は多くの困難に直面した。その大部分は、通信回線の脆弱さに起因するもので、オンライン観測点と銘打っていながら、リアルタイムでのデータ収集が充分に行えていない状況が続いている。当初の設計では、これら6点のオンライン点は、地上回線でのデータ伝送が可能という事前調査結果に基づき地点選定を行ったが、その後の情勢の変化により、Cellular 回線に転換せざるを得ない状況になり、地上回線とCellular回線では視通やサービス地域等の選点の条件が異なるため、稼働状況が悪化している。そのため、データ伝送状況の悪い観測点については、定期的に現地でのデータ回収を試みていたが、2020年以降はCOVID-19の影響により、それもままならない状況が続いた。2023年現在は、地上伝送回線を同国のICT部門直轄の回線に転換する計画が進んでおり、その結果に期待しているところである。また、RIMES-NETは当初からCellular回線による伝送を行なっているが、必ずしも伝送状況は良好ではなく、今後はこちらも伝送状況の改良を試みる必要がある。

4. 得られたデータの解析 : 構築した観測網の稼働率が必ずしも高くないため、稼働中の少数の観測点のデータのみでも震源決定等の作業が効率的に行えるように 2021年から2023年にかけてSeisCompのlocal earthquake monitoring用のモジュールとして、scanlocとscevalの有償モジュールを導入してシステムの改良を行った。2016年2月から2020年5月までの、利用可能な全てのデータに、IRIS DCから入手可能な近隣国のデータとして、Nepal/KathmanduとIndia/Shironのデータを加え、local monitoring 用にパラメタを調整したSeisCompで自動処理したところ、この期間に約1600個の地震を検出・震源決定することができた。この期間の地震活動の最も顕著な特徴は、インドのアッサム/西ベンガル州からブータンの南西部を通り、同じくインドのシッキム州にかけての帯状に分布する地震帯で、ISCのカタログや他の過去の研究でも既に確認されている。このほか、ブータン中部から西部、東部でも活動が見られる。なお、データ通信環境が貧弱なため、データ品質が時間的に均質ではなく、現段階では検出率や精度が時間的にも空間的にも一様でないことに

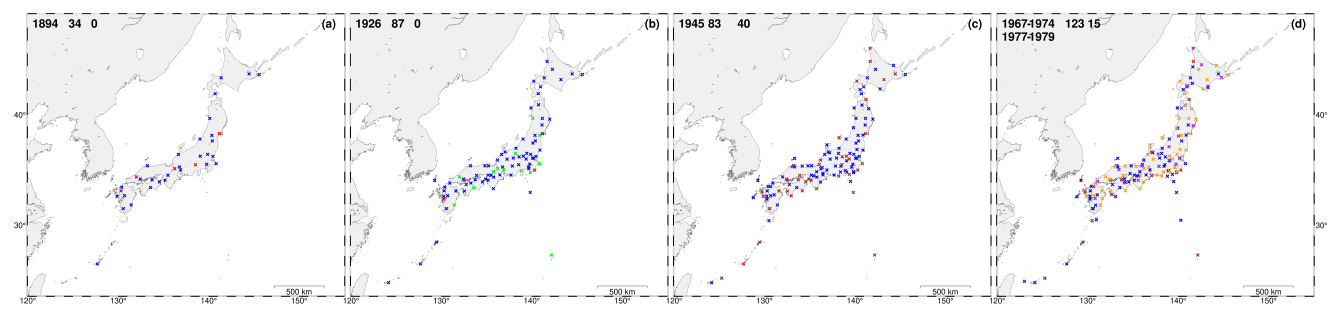
留意する必要がある。観測網の稼働率が不十分な現状でも、ISC等のグローバルなカタログと比較して同等以上の地震を検出・震源決定できていることから、懸案であるデータ通信インフラの品質改善を図ることにより、比較的短期間に、同国の地震活動監視が可能になることが期待される。

Visualization of the transition of the Japan Meteorological Agency' s seismic stations from the Meiji to Showa eras.

*Tetsuo Hashimoto¹, Satoko Murotani²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. National Museum of Nature and Science

地震計で観測された明治以降の古い地震を調べるにあたって、当時、どのような観測点があったかを目視できるようにしてみたいと考えた。東京気象台に明治8年1875年にパルミエリ地震計が設置されたのをはじめとして、その後、地震計は測候所等に徐々に展開されていった。なお、初期には、内務省地理局に設置されて、測候所に引き継がれたようなものもある。ここでは、地震観測業務履歴（地震火山部、2002、以下、業務履歴と呼ぶ）に基づき、測候所等の開所と廃止の年月日、住所、緯度経度、諸地震計による観測の開始と終了、および、地震計による観測（ここでは地震観測とする）が全くできなかった休止期間などの情報について整理した。明治の地震の調査（橋本、JpGU2023）に関連して、その当時や昭和の半ばぐらいまでの観測点分布をみるため、データ入力を始めていたが、今年関東大震災から100年を迎えたのを機に、100年間の地震観測点分布の変遷を見ることにもつなげるため、まずは機械式の残存する1990年代半ばまでの期間を入力することにした。図の(a)に1894年の東京地震の頃の1894年の1年間、(b)にウィーヘルト地震計が展開されていた頃の1926年、(c)に終戦の1945年、および(d)に67型磁気テープ記録式電磁地震計と76型磁気テープ記録式地震計（以下、67型と76型）が展開されていた概ねの期間として1967-74年と1977-79年の地震観測点を示す。青色は地震計が稼働している観測点、赤色は地震計がその年に導入された観測点、茶色は数か月以上休止した観測点、緑色はウィーヘルト地震計がその年に導入された観測点、黄色は67型、紫は76型である。薄ピンクは測候所等の開所した年にプロットされている。図のそれぞれ左上の数値は年、稼働観測点数、休止した観測点数を示す。図(d)には赤、薄ピンクは表示せず、観測点の稼働休止は、1967-74年の期間のものを示す。図(a)の1894年では、全国で34カ所とまばらに分布しており、関東地方においては、東京、銚子、水戸、前橋の4カ所で地震観測が行われており、また、中部の名古屋・岐阜・金沢でも既に行われているが、業務履歴によると、この3カ所は1891年濃尾地震の前の1887年から地震計が設置されていた。1926年にはウィーヘルト地震計が導入された観測点は図(b)に示すように14カ所（内2カ所1926年以前）ある。岡田武松の「測候瑳談」のウィーヘルト地震計の項に「関東大震災後に地震の観測を確かりやる・・・地方は測候所は十三個所で乃ち根室、札幌、秋田、仙台、銚子、沼津、長野、濱田、長崎、宮崎、高知、洲本、名古屋である。附属測候所では、七個所で柿岡、富江、八丈島、父島、潮岬、名瀬、石垣島・・・」とある（濱田、駿震時報、2002）。業務履歴によると、これらの観測点では1924年柿岡から始まり、1931年名瀬に導入されて目標は達成されている。一方、上記の地点を除いて、東京に1912年に初めて購入され、神戸で1923年5月と早く、盛岡、前橋、熊谷にも1924年に導入され、1930年までで16カ所展開されており、測候所の独自性も感じられる。その後、1950年代から気象庁一倍強震計(50型、51型、52型)や1960年代にはウィーヘルト地震計の後継機の100倍の59型直視式地震計と500-1000倍程度の59型光学式地震計が展開されている。図(d)に示すように1960年代後半から、1000倍の高感度地震計である67型が気象台等の50カ所に展開されたが、地震の検知能力には、あまり効果がなかったようである。太田他（駿震時報、2002）によると76型で検知能力が向上したとされている。また、様々な事情で地震観測が中断することがあるが、業務履歴の記載に、空襲、戦災、あるいは紙不足という記述があったりして、比較的長く中断していた観測点が多かったのが、1945年であり（図(c)）、翌年も同程度の箇所が長期の休止となっていた。謝辞：水戸地方気象台の南海トラフ地震防災官の菊池康友氏には、気象台に保管されている記象紙を調査していただき、感謝いたします。



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

📅 Wed. Nov 1, 2023 3:15 PM - 4:45 PM JST | Wed. Nov 1, 2023 6:15 AM - 7:45 AM UTC | 🏠 Room A F205+206

[S09] PM-2

chairperson:Katsuhiko Shiomi, Satoru Baba

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

[S09-03] Realtime seismological observation around the Tsugaru Strait by distributed acoustic sensing, northeastern Japan

*Satoru BABA¹, Eiichiro ARAKI¹, Takashi YOKOBIKI¹, Kei KAWAMATA², Keisuke UCHIYAMA², Takuji YOSHIZUKA² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Electric Power Development Co.,Ltd.)

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

[S09-04] Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation

*Chingyu Hu^{1,2}, Masanao Shinohara², Yusuke Yamashita³, Tomoaki Yamada², Takeshi Akuhara², Kimihiro Mochizuki² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

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

[S09-05] Seismicity in trench-outer rise region of the southern Kuril Trench off Hokkaido, Japan, obtained from OBS observations

*Koichiro OBANA¹, Tetsuo No¹, Ryo Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Kentaro Imai¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC)

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

[S09-06] Detection of immediate aftershocks following the 2011 Tohoku Earthquake using MeSO-net data

*Takuro Imadera¹, Aitaro Kato¹, Shin'ichi Sakai² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

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

[S09-07] Focal mechanisms based on the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko SHIOMI¹, Makoto MATSUBARA¹, Shoji SEKIGUCHI¹ (1. NIED)

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

[S09-08] Spatiotemporal characteristics of foreshock sequences of magnitude M3-4 earthquakes in the western Nagano Prefecture region

*Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO² (1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute)

Realtime seismological observation around the Tsugaru Strait by distributed acoustic sensing, northeastern Japan

*Satoru BABA¹, Eiichiro ARAKI¹, Takashi YOKOBIKI¹, Kei KAWAMATA², Keisuke UCHIYAMA², Takuji YOSHIKAWA²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Electric Power Development Co., Ltd.

巨大地震の震源域は海域に存在することが多いため、海域で地震観測を行い、その活動をモニタリングすることは重要である。しかし、海域は陸域と比較すると定常的な観測点が少ないため、地震の検出能力や震源決定の解像度は低いと考えられる。近年、光ファイバーケーブルに沿って歪または歪速度の時間変化を計測する分布型音響センシング（DAS）という技術が、空間的に密な観測が可能であるという利点を活かし、地震学において広く使われるようになってきている。既存の海底光ファイバーケーブルを使ったDAS観測を行うことによって、ケーブル近傍の海域の地震活動を詳細に観測し、リアルタイムでモニタリングできる。本研究では、DASによる地震検知能力の評価、DASデータに基づく震源決定、DASの観測する歪速度とマグニチュードの経験的な関係式の導出を目的として、2022年度および2023年度に津軽海峡において、AP Sensing社のモデルを使ったDAS観測を行った。

2022年度は、2022年10月から2023年2月までの約4ヶ月間で連続観測を実施し、1101個のイベントが観測された。そのなかにはケーブル近傍で発生したマグニチュード1未満の地震（最小でマグニチュード0.3）を含むほか、気象庁地震カタログに掲載されていない小さい地震のシグナルも捉えることができ、DASの高い地震検知能力が確認できた。ケーブル近傍の地震について、P波・S波の到達を150 mおきに手動で読み取り、震源決定プログラムhypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）による震源決定を行ったところ、気象庁地震カタログによる震源と数 kmの違いで求められ、DASのデータのみで震源を決定できるポテンシャルがあることが示された。観測された地震について、DASで計測されたS波の最大歪速度振幅・震源・マグニチュードの経験的な関係式を求めたところ、震源距離が1桁大きくなると、S波の最大歪速度振幅は1.8桁小さくなった。この関係式を使うことで、DASで観測されたS波の歪速度から、マグニチュードを推定することができる。また、DASで観測されたS波の最大歪速度振幅と、陸域の観測点で計測された最大加速度振幅を比較したところ、これらの振幅の関係は、平面波を仮定した場合に約710 m/sのS波見かけ速度によって説明できると考えられる。

2023年度は、2023年6月より連続観測を行っている。地震のシグナルの検知能力は2022年度より上がっている傾向があり、理由としては、夏の方が冬よりも波や風によるノイズが小さいことが考えられる。2023年度の観測では、リアルタイムでの地震活動のモニタリングを目指し、地震の自動走時読み取りおよび震源決定を行っている。自動走時読み取りには、深層学習モデルPhaseNet（Zhu and Beroza, 2018）を用い、2022年度に観測された津軽海峡の地震のDASの歪速度波形を学習させている。震源決定には、2022年度と同様に、hypomhを用いている。今後は、震源決定をより高い解像度で行えるよう、自動で読み取られたP波・S波のピックの精度の検証を行っていく。

Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation

*Chingyu Hu^{1,2}, Masanao Shinohara², Yusuke Yamashita³, Tomoaki Yamada², Takeshi Akuhara², Kimihiro Mochizuki²

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The Nankai trough region has numerous historically devastating earthquakes. However, a earthquake greater than magnitude 8 has not been recorded in the Hyuga-nada region covering the westernmost area of the Nankai trough. A lack of a large earthquake may be attributed to a coupling between the subducting Philippine Sea plate and a landward plate. It is widely known that low-frequency tremors and very low frequency earthquakes frequently occur in the region. Accurate distribution of normal earthquakes is one of important information for understanding the plate subduction in the study region. To gain insights into it, several Long Term Ocean Bottom Seismometer (LTOBS) networks were deployed to observe seismic activities. This study focuses on the analyses of three datasets among these observations in 2015-2016, 2017-2018 and 2022, respectively.

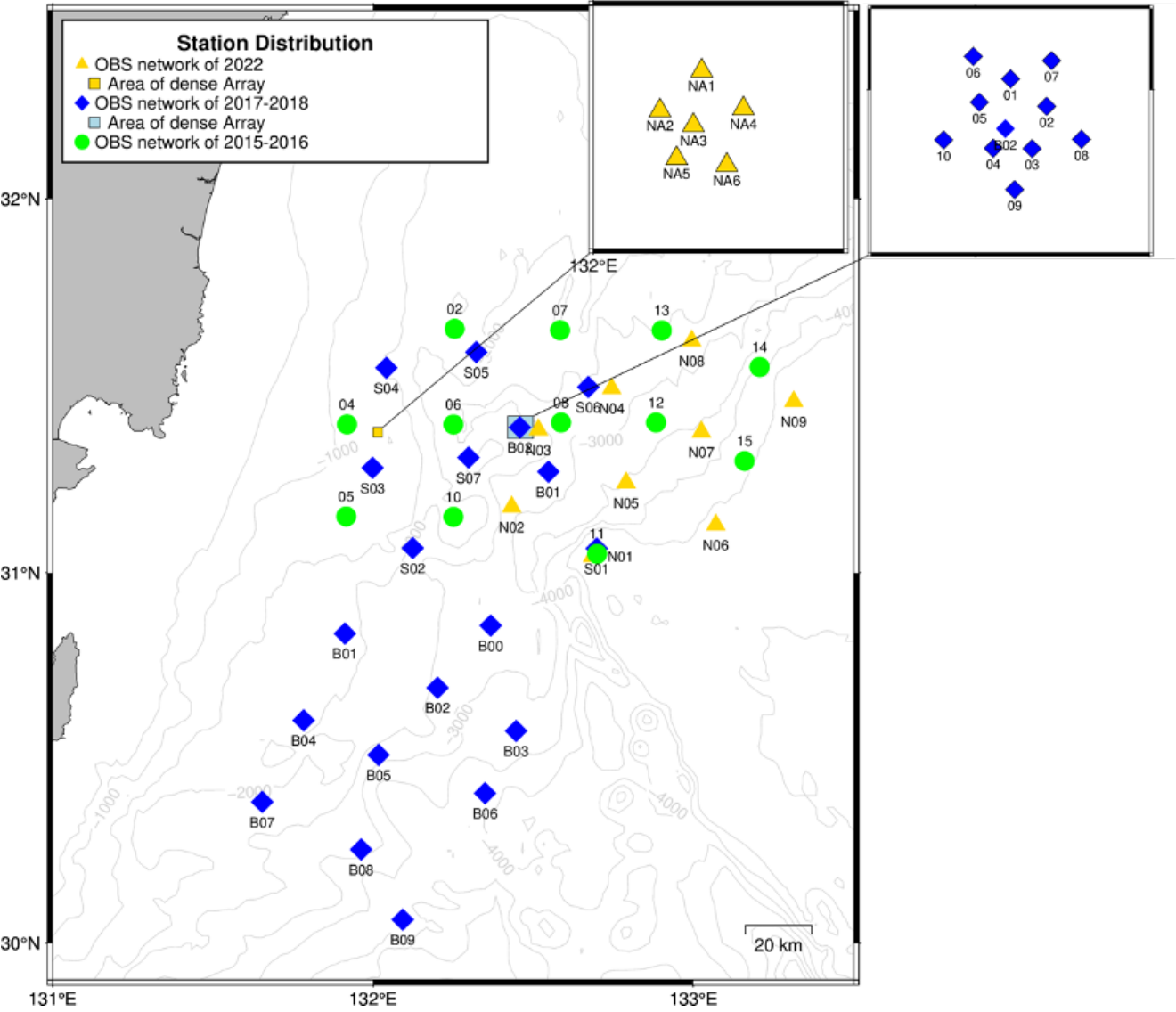
The very first step for data processing is to extract three minutes of the waveform to include the event from collected raw data. Since that raw data were continuous time series waveforms, establishing a reference for event detection was essential. The Japan Meteorological Agency (JMA) provided an earthquake catalog based on terrestrial observations, which included date and time information. Utilizing this catalog, we identified origin times from the JMA catalog, setting a reference three seconds prior to origin time for extracting the seismic waveforms. After cutting out the waveform, we manually picked up P-wave and S-wave arrivals, S-wave converted S-P wave arrivals, first arrival polarity, and maximum amplitude. P- and S-wave arrivals and maximum amplitude were employed in a location program that integrated absolute travel times and a 1-D velocity structure. During this process, station corrections were applied to compensate for structural heterogeneity beneath the LTOBSs, and station corrections were the calculation result of difference between S-wave arrival and S-P arrival, P-wave velocity from initial velocity model and assumed S-wave velocity in sediment layer, etc. Subsequently, we relocated the events by a program which determines hypocenters and 3-D velocity structure simultaneously using a double-difference technique, to enhance the location accuracy. Furthermore, data on first arrival polarity were inputted into the computer program to infer focal mechanisms.

The first dataset was collected by LTOBSs deployed from January 9, 2015, to January 6, 2016, in the westernmost part of the Nankai trough. The relocated result revealed that the earthquakes occurred within the Philippine Sea Plate. Although some earthquakes had thrust-fault type focal mechanisms, the dominant focal mechanisms were normal-fault and/or strike-slip types.

The second dataset was obtained by LTOBSs in the northernmost part of the Ryukyu trench adjacent to the first analysis, and we processed data from July 25, 2017, to September 30, 2018. According to the result of this dataset, we found that most events concentrated in small regions and occurred during limited time periods. These hypocenters were also positioned within the subducting plate. The focal mechanisms of the events were predominantly strike-slip and/or normal faulting.

The third dataset was collected by LTOBSs in the same area to the first analysis, which deployed in 2021 and 2022. We then selected the 13 events occurred within the network between January 9, 2022, to August 13, 2022. Since that only 13 events could be selected to be processed, the double-difference technique has limitations due to event pair scarcity. We obtained hypocenter distribution by applying to a location program utilizing absolute travel times. As the result, it shows similar to the results from

observation from 2015 to 2016.



Seismicity in trench-outer rise region of the southern Kuril Trench off Hokkaido, Japan, obtained from OBS observations

*Koichiro OBANA¹, Tetsuo No¹, Ryo Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Kentaro Imai¹, Seiichi Miura¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC

海溝軸周辺から海溝海側アウターライズ域では、海溝からの沈み込みに伴う海洋プレートの屈曲により海洋性地殻を断ち切る正断層によってホルスト・グラベン構造が発達するとともに、一般に「アウターライズ地震」と呼ばれる沈み込む海洋プレート内を震源とする正断層地震が発生することが知られている。アウターライズ地震の発生頻度は海溝型巨大地震に比べると低いものの、日本海溝北部で発生した1933年昭和三陸地震のように、地震にともなって発生した津波により大きな被害をもたらす場合がある。

千島海溝沿いでは2017年に地震調査研究推進本部により公表された「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版）」において、北海道東部に巨大な津波をもたらす超巨大地震(17世紀型)が今後30年以内に発生する確率が7~40%とされるなど、海溝型巨大地震の発生が懸念されている。アウターライズ地震はしばしば海溝型巨大地震に伴って発生しており（e.g. Lay et al., 2011）、千島海溝中部でも2006年11月のMw8.4の海溝型地震の2ヶ月後の2007年1月にMw8.1のアウターライズ地震が発生した例がある(Lay et al., 2009)。一方、海岸線から遠く離れたアウターライズ域の詳細な震源分布を得ることは、陸上の地震観測網のデータからは困難である。近年、防災科学技術研究所による日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の観測が開始されているが、海溝軸海側の観測点は限られている。そこで、海底地形や構造探査データと組み合わせたアウターライズ地震の潜在断層マッピングや津波想定への活用を念頭に、OBSによる海底地震観測を北海道沖の千島海溝南部の海溝軸周辺から海溝海側において、2022年4月から6月にかけて実施した。

解析では地震観測のために設置した24台の海底地震計に加え、千島海溝を横切る構造探査側線上に設置された78台のOBSのうち、10台を使用した。これらのうち7台は水深6000m以上の海域に設置可能な超深海型のOBSを使用している。また、防災科学技術研究所が運用するS-net(<https://doi.org/10.17598/NIED.0007>)のうち13観測点のデータも、Takagi et al. (2019)に従って上下動と水平動（南北、東西）の3成分に補正した上で使用した。統合したデータセットから検出したイベントに加え、気象庁一元化震源に含まれるイベントについて、winを用いた手動検測を行い震源決定するとともに、P波初動極性を用いて震源メカニズムを推定した。解析の結果からは、千島海溝の海溝軸海側（南側）約100km程度の範囲で地震活動が見られる。千島海溝にほぼ平行なホルスト・グラベン構造に沿う線状分布や、T軸が千島海溝にほぼ直交する正断層型の震源メカニズムが得られており、千島海溝からの沈み込みに伴う海洋プレートの変形を反映していると考えられる。一方2012年3月にMw6.9の地震が発生した襟裳海山周辺では、日本海溝にほぼ平行な線状分布や、T軸が日本海溝に直交する正断層型の震源メカニズムも推定されている。千島海溝と日本海溝の接合部において、海洋プレート内で複雑な変形が生じていることが示唆される。謝辞：本研究はJSPS科学研究費JP20H00294の助成を受けたものです。

Detection of immediate aftershocks following the 2011 Tohoku Earthquake using MeSO-net data

*Takuro Imadera¹, Aitaro Kato¹, Shin'ichi Sakai²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

2011年東北地方太平洋沖地震では非常に活発な余震活動が観測された。その余震活動では大規模な地震も数多く発生し、それらによって生じた波動場によって中小規模の地震の検出が阻害され、既存の地震カタログから数多く漏れている可能性があると考えられている。実際に、気象庁の地震カタログに記録されている中小規模の地震はグーテンベルグ・リヒター則から推定される数よりも少なくなっている。こうした検出から漏れた地震を改めて検出しようという試みも行われており、Lengliné et al. (2012)は東北地方と関東地方のHi-net観測点の波形記録を用いたMatched-Filter Methodを実行し、本震発生後12時間について解析を行なっている。

本研究では、関東地方に設置されている地震観測網であるMeSO-netの観測点のうち茨城県、埼玉県、千葉県
の3県にある85観測点で得られた波形記録を用いてMatched-Filter Methodを実行し、余震の検出を試みる。Hi-net等の観測網では津波による被害や停電などにより観測を停止する観測点があった一方、MeSO-netではそうした観測点が少なかったことから時間的に安定した地震検出能力が期待される。テンプレートには気象庁カタログに記録されている本震発生後から2012年3月までの地震の波形記録を使用した。研究対象期間の連続波形記録とテンプレートに1-8Hzのバンドパスフィルタを適用し、計算の高速化のために200Hzから25Hzにデサンプリングして相関の計算を行った。そして得られた相関の各日1日分の時系列データの中央絶対偏差を計算し、その10倍の値を検出閾値として地震イベントの検出を行った。

こうした解析の結果、本震から100時間以内、M4.5以上において気象庁カタログの約3倍の地震イベントを検出した。また、検出イベントカタログで見られた余震活動の時空間発展では、活動域の南端のマイグレーションが既往研究（Lengliné et al., 2012）や気象庁カタログに比べてよりスムーズであった。観察された活動域の南端の移動速度は約5km/hであり、太平洋プレートとフィリピン海プレートの接触域付近で停止している。この活動域の南端のマイグレーションは本震および同日15時15分頃の茨城県沖の地震(Mj7.6)のアフタースリップによって駆動されたと考えられる（Lengliné et al., 2012）。

Focal mechanisms based on the 3D velocity model for the Nankai Trough area

*Katsuhiko SHIOMI¹, Makoto MATSUBARA¹, Shoji SEKIGUCHI¹

1. NIED

プレートの沈み込み帯において、地震が発生した場所を評価するための重要な情報のひとつとして発震機構解がある。初動発震機構解（初動解）は、初動極性を読み取った観測点の分布に強い影響を受けるものの、MT解／CMT解に比べて規模が小さい地震も評価できること、計算量が少ないこと等の利点がある。一方、南海トラフ周辺のプレート境界付近で発生する逆断層型の地震に対し、一次元地震波速度構造（1D構造）を用いて求めた初動解は正断層型を示すことがある（Takemura et al., 2016; doi: 10.1186/s40623-016-0527-9）。これは、観測点への射出角評価の際、低角で沈み込むフィリピン海プレートの影響を正しく考慮していないことに起因する。

防災科研では、文部科学省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（防災南海PJ）において、三次元地震波速度構造モデル（3D構造モデル）を用いた自動震源決定システムの構築を担っている。構築済のプロトタイプシステムで採用している震源計算方法のひとつに、昨年度、各観測点への射出角を3D構造モデルに基づいて計算し、初動解を推定する機能を追加した。この機能を用いて、南海トラフ周辺海域で発生する地震で得られる初動解を調査したので、その結果を報告する。

評価対象には、Takemura et al. (2016) が検討した5地震のほか、2019年5月10日の日向灘の地震等、南海トラフ周辺の海域で発生した地震Mw4.5以上の6地震を抽出した。3D構造モデルとしては、海陸の観測データに基づくトモグラフィ解析結果（Matsubara et al., 2019, doi: 10.5772/intechopen.86936）及び地震本部ウェブサイトで公開されている全国1次地下構造モデル（暫定版）をグリッド形式に再構築したモデルを用意した。比較対象としては、1D構造モデルに基づく防災科研Hi-netの初動解、防災科研F-netによるMT解、AQUA-CMT解、気象庁CMT解、3D構造モデルに基づくCMT解（3D CMT解）を用いた。

2011年8月12日の遠州灘の地震は、CMT解析により北西－南東圧縮の低角逆断層型の解が得られているが、1D構造モデルによる初動解は北西－南東伸張の正断層型であった。全国1次地下構造モデルを用いて初動解計算を行ったところ、プレートが沈み込む方向（御前崎－浜名湖－愛知県東部）の観測点への射出角が適切に評価されたことにより、CMT解と類似の初動解が得られた。一方、2009年7月の四国地方南方沖の地震や2016年4月の紀伊半島南東沖の地震では、若干の改善は見られたものの、3D構造モデルを用いても正断層型のままであった。ただし、震源球上に配置した各観測点の極性分布は各MT解/CMT解と大きな矛盾は無かったことから、防災南海PJにおいて現在構築中の新たな3D構造モデル（Nakanishi et al., 2022）ならびに整備中を含む海域地震観測網のデータを活用することで、海域で発生する地震の初動解推定精度向上が期待出来る。日向灘等、プレートの傾斜角がやや急角な地域のプレート境界付近で発生する地震の場合、1D構造モデルでも逆断層型の初動解が得られた。この地域の地震に対して3D構造モデルを用いた解析を実施すると、走向や傾斜がよりCMT解と一致する傾向が見られた。

今後、3D CMT解のカタログと相補的に活用することで、より信頼性の高い地震発生場所の評価につなげることが出来るよう、新たな3D構造モデルが構築され次第、初動解カタログの整備を進めていく予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。3D構造モデルを用いた震源位置及び発震機構解推定には、気象庁、大学、産業技術総合研究所及び防災科研の観測データを使用した。解析結果の比較検討に気象庁CMT解カタログを使用した。3D CMT解計算にあたっては、武村俊介より提供頂いたプログラム及びグリーン関数を用いた。

Spatiotemporal characteristics of foreshock sequences of magnitude M3-4 earthquakes in the western Nagano Prefecture region

*Yuki NODA¹, Hiroshi KATAO², Yoshihisa IIO²

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

大きな地震（本震）が発生する前に、その震源の近傍で複数の小さな地震（前震）が発生することがあり、前震が本震と時空間的に近接して発生することは、その背後にある破壊核形成過程の存在を示唆している。しかし現在の科学では地震が発生したときに、それがより大きな地震の前震かどうか識別することはできない。また、前震の発生がどのような物理過程を表しているのかという解釈については、地震同士の応力伝達により前震が次々と発生しているという見方と、断層面上のゆっくりとしたすべりや流体の移動などといった、非地震性の過程によって前震が引き起こされているという見方とがある。ただし、これまでに行われてきた多くの地震観測では使用可能な観測点数の制約やデータの精度などの問題もあり、どのような説明が実際の過程を正確に表しているかについては議論の余地がある。

長野県西部地域では1995年6月から稠密地震観測網が展開されていて、観測点は1984年に発生した長野県西部地震の余震域の東部を中心に設置されている。その中で10kHzのサンプリング周波数でデータを記録しているものが最大で57ヶ所に設置された。これほどまでの高サンプリングレートで長期間において自然地震を稠密観測している地域というのは他に例を見ない。さらに、この地域で発生する地震は震源が浅いものが多く、さらに観測点の周囲が静かでノイズレベルが小さいため、多数の高品質な微小地震データが得られている。

この稠密地震観測で得られた10kHz波形データを使用し、1995年の観測開始から2008年7月までに発生したM3.7～M4.1の6つの地震（本震）について、それぞれの周囲で発生した地震の破壊開始点の相対震源をmaster event法（Ito, 1985）およびDouble Difference法（Waldhauser & Ellsworth, 2000）のそれぞれで高精度に再決定した。いずれの方法で再決定した場合でも、震源分布が鮮明な平面状になっていて、先の前震ですべったところで後の前震の破壊が始まっている可能性のある活動や、震源分布に空間的なギャップがあり、先の前震によりほとんど応力が増加していないと考えられるところでも後の前震の破壊が始まっている可能性のある活動が見られた。これらの地震活動は地震間の応力伝達だけでは説明できない可能性が高い。