

Wed. Oct 23, 2024

Room A | Special session : S22. The 2024 Noto Peninsula Earthquake

9:00 AM - 10:30 AM JST | 12:00 AM - 1:30 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S22] AM-1

chairperson: Kentaro Imai(JAMSTEC), Hisashi Suito

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

[S22-19] Earthquake-Induced Fire in Kawai-machi, Wajima City During the Noto Peninsula Earthquake

*Yuji ENOMOTO¹, Taku KOMATSUBARA², Shoko KIYASU³ (1. Shinshyu University, 2. AIST, 3. ME-SAI INC.)

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

[S22-20] A source model to reproduce tsunamis along the Niigata and Sado coasts during the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Kentaro IMAI¹, Tomoya KURIHARA^{1,2}, Tetsuo NO¹, Taro ARIKAWA² (1. JAMSTEC, 2. Chuo Univ.)

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

[S22-21] Advanced Seismic Depth Imaging of the Tsunamigenic Fault in the 2024 Noto (M7.6) Earthquake Rupture Area

*Hamzeh Mohammadigheymasi¹, Yige Yang¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), Tokyo)

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

[S22-22] Postseismic deformation caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Hisashi SUITO¹ (1. GSI of Japan)

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

[S22-23] Viscoelastic relaxation and afterslip contribution to the postseismic crustal deformation after the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Miku Ohtate¹, Yusaku Ohta¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University, 2. Shizuoka University)

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

[S22-24] Crustal deformation after the 2024 M7.6 Noto Peninsula earthquake based on the combined GNSS analysis

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku OHTA³ (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

10:45 AM - 12:15 PM JST | 1:45 AM - 3:15 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S08] AM-2

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Keisuke Ariyoshi (JAMSTEC)

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

[S08-14] Spatial and temporal characteristics of repeating earthquake distribution in the Noto peninsula seismic swarm*Maki Komatsu¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Tech)

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

[S08-15] Spatial pattern in frictional properties on the subducting Philippine Sea Plate off the east of Kyushu Island*Takuji YAMADA¹ (1. Faculty of Basic Natural Science, Ibaraki University)

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

[S08-16] A physical explanation for an unusually long-duration slow slip event in the Nankai Trough*Keisuke Ariyoshi¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Iinuma Takeshi¹, Masaru Nakano¹, Demian Saffer³, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi⁴, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Japan Meteorological Agency, 3. University of Texas, Austin, 4. NIED)

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

[S08-17] Evaluating Ground Motion Scenarios for the Nankai Trough Megathrust Earthquake based on the Dynamic Rupture Simulation*Kenichi TSUDA¹, Bunichiro Shibasaki², Akemi Noda³, Jean-Paul Ampuero⁴ (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. International Institute of seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 3. Meteorological Research Institute, 4. Institut de Recherche pour le Développement, Université Côte d'Azur)

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

[S08-18] Estimating effective normal stress during SSE in Bungo channel from slip velocities and shear stress variations: Part.2*Yojiro Sasagawa¹, Toshinori Sato¹ (1. Chiba University)

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

[S08-19] Effect of two M6.6 in-slab earthquakes on occurrence of the next long-term slow slip event beneath Bungo channel*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Youichi Asano³, Aitaro Kato⁴, Suguru Yabe⁵ (1. Building Research Institute, 2. University of Southern California, 3. NIED, 4. ERI, University of Tokyo, 5. AIST)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics**1:30 PM - 3:00 PM JST | 4:30 AM - 6:00 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)****[S08] PM-1**

chairperson: Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo), Shiro Hirano (Hirosaki University)

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

[S08-21] Feature of cascading rupture frequently observed in Northern California*Weifan Lu^{1,2}, Satoshi Ide¹, Han Yue² (1. The University of Tokyo, 2. Peking University)

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

[S08-22] Prediction for a stochastic rupture propagation model along a 2-D fault plane*Shiro HIRANO¹ (1. Hirosaki University)

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

[S08-23] Models of fluid-driven seismic swarms with permeability enhancement and rate-and-state frictionNatalia Berrios-Rivera², *So Ozawa¹, Eric M. Dunham² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Stanford University)

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

[S08-24] Emergence of Self-Organized Criticality and Phase Transition in the Olami-Feder-Christensen Model with a Single Defect*Tetsuto Otani¹, Nobuki Kame¹ (1. The University of Tokyo)

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

[S08-25] Recurrence of large earthquake using multiscale circular patch model in quasi-dynamic simulation of earthquake generation cycle*Ryoko Nakata¹, Takane Hori², Hideo Aochi^{3,4}, Satoshi Ide¹ (1. UTokyo, 2. JAMSTEC, 3. BRGM, France, 4. ENS-CNRS PSL, France)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

3:15 PM - 4:45 PM JST | 6:15 AM - 7:45 AM UTC | Room A International Conference Hall (4F)

[S08] PM-2

chairperson: Makoto Naoi(DPRI, Kyoto Univ.), Tatsuya Kubota(NIED)

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

[S08-26] Estimating fault mechanical parameters by strategic incorporation of tsunami, geodetic and teleseismic data: the 2011 Tohoku earthquake*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Hisahiko Kubo¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-27] Source process of the 2016 off-Fukushima earthquake deduced from ocean-bottom and onshore seismograms together with tsunami source data*Ritsuya Shibata¹, Hisahiko Kubo¹, Suzuki Wataru¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-28] Correlation between strain change and tectonic tremor activities during a short-term slow slip event*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵ (1. University of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.)

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

[S08-29] Molecular Dynamics Investigation on the Lifetime of an α -Quartz Gouge Particle Under Shearing a Pair of Asperity Walls*SHENG LI¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto, Japan)

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

[S08-30] Reexamination of Rate- and State- Friction Parameters at Subseismic Loading Rate*Kotaro Kusada¹, Eiichi Fukuyama^{1,2} (1. Univ. of Kyoto, 2. NIED)

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

[S08-31] High-Resolution AE Analysis During Hydraulically-Induced Fracturing Using Deep Learning Techniques and Matched Filter Analysis*Makoto NAOI¹, Shiro Hirano², Youqing Chen³ (1. Hokkaido Univ., 2. Hirosaki Univ., 3. Kyoto Univ.)

Room A | Special session : S22. The 2024 Noto Peninsula Earthquake

📅 Wed. Oct 23, 2024 9:00 AM - 10:30 AM JST | Wed. Oct 23, 2024 12:00 AM - 1:30 AM UTC | 🏢 Room A International Conference Hall (4F)

[S22] AM-1

chairperson: Kentaro Imai (JAMSTEC), Hisashi Suito

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

[S22-19] Earthquake-Induced Fire in Kawai-machi, Wajima City During the Noto Peninsula Earthquake

*Yuji ENOMOTO¹, Taku KOMATSUBARA², Shoko KIYASU³ (1. Shinshyu University, 2. AIST, 3. ME-SAI INC.)

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

[S22-20] A source model to reproduce tsunamis along the Niigata and Sado coasts during the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Kentaro IMAI¹, Tomoya KURIHARA^{1,2}, Tetsuo NO¹, Taro ARIKAWA² (1. JAMSTEC, 2. Chuo Univ.)

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

[S22-21] Advanced Seismic Depth Imaging of the Tsunamigenic Fault in the 2024 Noto (M7.6) Earthquake Rupture Area

*Hamzeh Mohammadigheymasi¹, Yige Yang¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹ (1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), Tokyo)

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

[S22-22] Postseismic deformation caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Hisashi SUITO¹ (1. GSI of Japan)

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

[S22-23] Viscoelastic relaxation and afterslip contribution to the postseismic crustal deformation after the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Miku Ohtate¹, Yusaku Ohta¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University, 2. Shizuoka University)

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

[S22-24] Crustal deformation after the 2024 M7.6 Noto Peninsula earthquake based on the combined GNSS analysis

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku OHTA³ (1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University)

Earthquake-Induced Fire in Kawai-machi, Wajima City During the Noto Peninsula Earthquake

*Yuji ENOMOTO¹, Taku KOMATSUBARA², Shoko KIYASU³

1. Shinshyu University, 2. AIST, 3. ME-SAI INC.

2024年1月1日16時10分に発生したM7.6能登半島地震から約50分後、輪島市河井町朝市通り付近で起きた地震火災は、焼失面積約49,000m²、焼失家屋約240棟におよぶ大規模災害に至った（消防庁,2024）。消防庁の発表(2024)によれば、火元と思われる建物の屋内電気配線に溶けた痕跡が認められたことから、火災発生から約50分のち電力会社で試送電されたさいに電気起因する火災が発生した可能性が考えられるものの、具体的な発火源、出火に至る経過及び着火物の特定には至っていないとしている。歴史地震史料を辿れば水溶性ガス田を胚胎する地域（石油技術協会,1983）を震源とする大地震が発生したとき、しばしば地中からメタンの火災が噴出して火災に至ったという目撃証言がある。すなわち1828年三条地震、1847年善光寺地震、1855年安政江戸地震がその事例である（榎本ほか、2023）。水溶性ガスを胚胎する地域は輪島市を含む能登半島北岸一帯も該当する（石油技術協会,1983）。そこで上述の歴史地震と同様に2024年能登半島地震に伴った輪島市河井町の地震火災も地中のメタンが火源となった可能性があるとの仮説をたて、まずニュース映像などにもとづいて地震に伴うメタン湧出と自然発火の可能性を検討した。日テレNEWS映像(2924)には火元とされた激しく燃える建物の画面左側の火の気のない駐車場付近に地上から噴き出す火柱とその右近くに小さな火炎列が見える(図1a)。激しく燃える建物から煙は画面のやや右に流れていて火の粉が飛ぶ様子は確認できない。それゆえこれらの火柱と火炎列は独立して発生した火災と判断される。となれば火元は一か所ではなく、燃え盛る建物を含め周辺に複数あったことになる。輪島付近は約1万年前の完新生のはじめに海面が急激に上昇し、“溺れ谷”が現在よりかなり山側にまで及び入り江状態となった。この入り江に河原田川および鳳至川が運んだ堆積物が溜まっていった。この堆積層は粘土を主とする軟弱な地層であり、貝の化石や腐植物などの有機物を多く含んでいて、洪水時には砂質土が薄く重なっていった（佐藤,1994）。その後の6000年前以降、今回の能登半島地震を含め4回の大きな隆起が起きた（穴倉ほか,2024）。その結果、輪島市市街地の地下には最大厚30mの軟弱な粘性土層が分布した（輪島市,1993）。この地震のあと、(株)メーサイが実施した輪島市河井町での鑿井と地質調査では、地下数メートルの浅い地層に腐有機物を豊富に含む地層が確認された（図1b）。この嫌気性環境でメタンが生成されていることを確認できた。以上の考察から、輪島市河井町で発生した大規模火災は地下に胚胎するメタンの湧出と自然着火によって大規模火災にいたった可能性が高いと判断した。



A source model to reproduce tsunamis along the Niigata and Sado coasts during the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Kentaro IMAI¹, Tomoya KURIHARA^{1,2}, Tetsuo NO¹, Taro ARIKAWA²

1. JAMSTEC, 2. Chuo Univ.

2024年1月1日に発生した能登半島地震による津波は日本海沿岸に大きな影響を与えた。この津波のうち、新潟沿岸ではおおむね2 m以下であったが、上越周辺で5 m以上 (Yuhi et al., 2024)、佐渡島南西岸で2.3 m (行谷・他, 2024) であった。このような津波の局所的な増幅は、津波観測や地殻変動から推定された波源断層モデル (例えば, Fujii & Satake, 2024) では説明は難しい。この局所的な津波増幅の原因のひとつとして、海底地すべりなどによる副次的な津波波源の可能性が考えられる。本研究では、新潟県上越や佐渡南西沿岸における津波高増幅の素因を明らかにするため、波源断層モデルと海底地すべりの影響を考慮した津波数値解析を行い、海底地すべりの発生位置やその規模について検討を行う。

津波数値解析は、柳澤・他 (2014) の海底地すべりモデルをJAGURS (Baba et al., 2019) に組み込み実施した。海底地形モデルは野・他 (2016) を用い、空間格子は6秒角とした。断層モデルは『日本海における大規模地震に関する調査検討会』(国土交通省, 2016) のF43を基礎として、余震分布 (産総研, 2024; 地震研, 2024) を参考に修正した。海底地すべり条件としては10 km²の正方土塊を想定し、その層厚は10 mとした。海底地すべりの発生位置は能登半島珠洲沖の富山盆地西斜面上の水深500 m等深線に沿っておおよそ5 kmごとに18カ所に設定し数値解析を実施した。

修正したF43の波源断層モデルによる津波計算波形は、直江津の観測波形を再現することはできないことや、新潟沿岸や佐渡沿岸における最大浸水高分布が過小評価となることがわかった。本研究で用いた波源断層モデルに加えて、副次的な波源として海底地すべりを発生させた数値解析を実施した。37.7°N, 137.5°Eの位置で海底地すべりが発生した場合、直江津の観測波形をおおむね再現することができ、新潟沿岸や佐渡沿岸における最大浸水高分布についても良好に再現性できることがわかった。これまでの当該地震に関する海域調査において、珠洲～佐渡沖における明確な海底地すべり痕は未だ見出されていない。しかし、本研究結果は副次的な津波波源の可能性として37.7°N, 137.5°Eの位置での海底地すべりの可能性を示唆する。

Advanced Seismic Depth Imaging of the Tsunamigenic Fault in the 2024 Noto (M7.6) Earthquake Rupture Area

*Hamzeh Mohammadigheymasi¹, Yige Yang¹, Ehsan Jamali Hondori², Jin-Oh Park¹

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Geoscience Enterprise Inc. (GSE), Tokyo

On January 1st, 2024, at 7:10:22.5 UTC, a M7.6 earthquake struck the Noto Peninsula, Japan, causing a series of severe effects, including strong ground shaking, landslides, liquefaction, and tsunami across the eastern coast of the Japan Sea. The initial assessments by the Japan Meteorological Agency (JMA) identified the activation of a reverse fault with the hypocentral parameters of (37°29.7' N, 137°16.2' E, 16 km) and a compressional axis oriented NW-SE. The extension of the causative fault, were later estimated from the aftershock distribution (Japan Meteorological Agency, 2024), evidently posing a total length of approximately 150 km, originating from the west coast of the Noto Peninsula to the northeast offshore area of the peninsula. It is inferred that part of the 150-km-long fault, as an active submarine fault, could serve as the source of the tsunami in the northeast offshore Noto Peninsula. However, the detailed structure and physical properties of tsunamigenic faults remained unexplored. To shed more light into the mechanisms of the tsunamigenic faults, we conducted a multi-channel seismic (MCS) reflection survey in March 4-16, 2024, comprising 14 2D lines offshore of the northeast coast of the Noto Peninsula, using the R/V Hakuho-maru cruise. The MCS data was recorded with a recording length of 5 or 6 seconds and a sampling interval of 2 milliseconds, using a 1200 m long streamer cable with 48 channels at 25 m group spacings.

The data was processed at the Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, for advanced depth imaging. Initially, a workflow was applied that included the UKOOA P1/90 navigation application, followed by a series of conventional processing steps such as trace editing, de-ghosting, surface-related multiple attenuation (SRMA), predictive deconvolution for multiple suppression, stacking velocity analysis, normal moveout correction, common midpoint (CMP) stacking, and Kirchhoff post-stack time migration. The region's complex geological structure, characterized by intense lateral and vertical velocity variations and rapidly changing seafloor depths (ranging from just a few tens of meters to nearly 2 km in some areas), posed significant challenges in processing the recorded dataset, hindering conventional imaging workflows from producing clear depth images. Accordingly, an optimized processing workflow was devised at some steps to tackle these issues. Specifically, after applying SRMA, an optimal predictive deconvolution method was applied in the CMP domain to suppress the remaining multiple reflections. The operator window for this process was designed by incorporating the seafloor reflection time on the stack sections. Additionally, to update the interval velocity section for pre-stack depth migration (PSDM), the absence of a sharp continuous reflector limited the effectiveness of layer-stripping method. To overcome this challenge, a grid-based tomography method was applied, enhancing the continuity of reflections identified by automated continuity attributes while effectively distinguishing between primaries and multiples in the migrated gathers by analyzing their dips. In this talk, we will present the implemented imaging workflow and provide PSDM depth sections of the MCS study, focusing on the active faults.

Postseismic deformation caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Hisashi SUTO¹

1. GSI of Japan

1. はじめに

令和6年1月1日に発生した令和6年能登半島地震によって中日本全域に渡って大きな地殻変動が観測された。引き続いて余効変動も観測されている。余効変動のメカニズムには余効すべり、粘性緩和、間隙弾性緩和等があるが、本稿では主に粘性緩和による変動の詳細について報告する。

2. 余効変動の特徴

余効変動は、地震後1か月間が最も大きく、その後は徐々に減衰している。地震後6か月間の変動に対し、初めの1か月間の変動は4、5割程度の大きさとなっている。水平変動は、ほぼ全域で北西方向の変動が卓越している（図1左上）。ただし、能登半島の北西岸の一部地域で、ほぼ0もしくは東向きの変動が観測されている。また、震源域より北西側に唯一位置する舩倉島観測点では南東向きの変動が観測されている。上下変動は、能登半島全域で沈降が観測され、その周辺域に当たる富山県、新潟県では隆起が観測されている（図1右上）。こうした余効変動の空間パターンは、地震時の変動パターンと比べると、能登半島北岸で大きく異なっている。地震時には能登半島の変動が周辺域（富山県、新潟県）に対して圧倒的に大きく、変位の大きさの比は10倍程度あったが、地震後の変動では数倍程度である。変動の方向も能登半島では、地震時には西北西から西南西の方向であったのに対して、地震後は北西方向の変動が卓越している。さらに上下変動は、地震時には能登半島北西岸の大きな隆起が特徴的であったが、地震後は地震時に大きく隆起した場所を含めて能登半島全域で沈降が卓越している。それに対して、震源域周辺（富山県、新潟県）では、地震時、地震後ともに隆起が観測されている。

3. 粘性緩和による変動の特徴

粘性緩和による変動は、粘弾性構造および粘性率に大きく依存する。本稿では、水平二層モデルを仮定し、最適な弾性層の厚さと粘性率の値を算出した。粘弾性モデルはマクスウェルとバーガーモデルの2つを検討した。バーガーモデルの場合には、剛性率と粘性率がそれぞれ2つ（ケルビンとマクスウェル）があるが、粘性率の比（ケルビン／マクスウェル）は0.1に、剛性率の比は1.0とし、特に明示しない限りマクスウェルの粘性率の値のみを示す。

地震後6か月間の水平、上下変動のデータ、震央から200km以内の観測点を使用し、水平成分および上下成分の残差が最も小さいパラメータを検討した結果、バーガーモデルの場合には、最適な弾性体の厚さは35 km、粘性率は $4 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ であった。マクスウェルモデルの場合の最適値は、弾性体の厚さは35 km、粘性率は $1 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ であった。マクスウェルモデル場合には、6か月間のパターンは再現できるものの、変動量や時間変化はほとんど再現できていない。特にはじめの大きな沈降を再現することは難しい。そのため、以後はバーガーモデルの場合の結果について報告する。

粘性緩和による変動の特徴は、震源域に向かう方向の水平変動、すなわち、能登半島南岸および富山県、新潟県では北西方向、能登半島北西側の海域で南東方向である（図1下）。上下変動は、震源域を中心に沈降し、その周辺領域で隆起、すなわち、能登半島北岸を中心に沈降し、富山県から新潟県での隆起が特徴である。空間パターンだけ見ると、いずれの特徴も観測されている余効変動と調和的である。パラメータの一つである弾性層の厚さによって、上下変動の空間パターンはかなり異なる。弾性層の厚さが薄い場合には、変動が震源域に集中し、沈降域が能登半島に限定される。逆に厚い場合には、変動が広域に広がり、沈降域は能登半島から周辺の海域に広がり、隆起のピークは富山県から新潟県の沿岸にかかるようになる。

粘性緩和によって地震後6か月間の観測された変動の空間パターンおよび時間変化はほぼ再現できている。しかしながら、残差を見ると、特に能登半島北岸と佐渡島で観測値を説明しきれておらず、粘性緩和のみで観測値をすべて説明することは難しい。おそらく余効すべりの影響だと考えられる。今後、余効すべりの推定に取り組んでいく予定である。

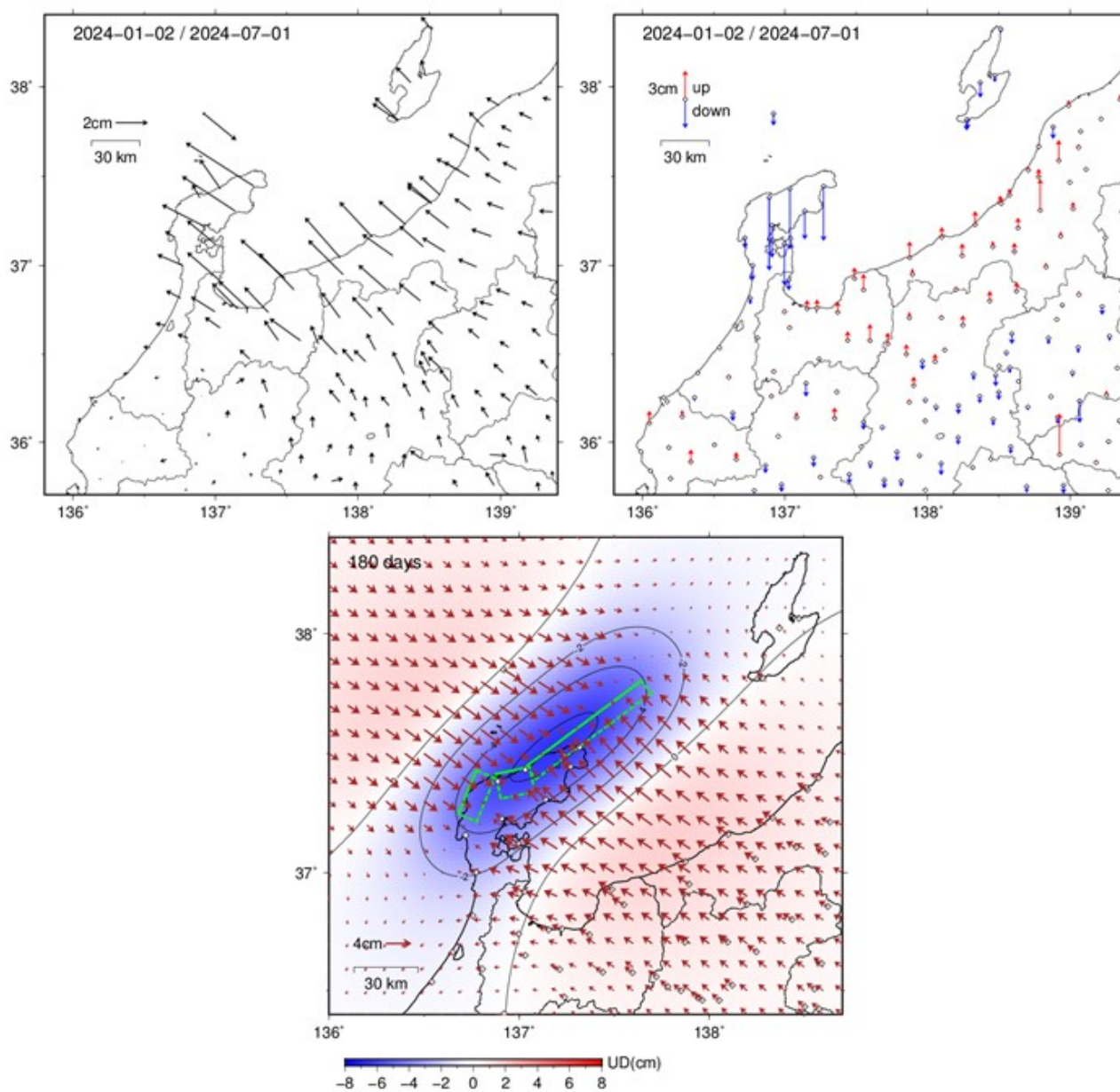


図1. 地震後6か月間の地殻変動。(左上)水平変動の観測値。(右上)上下変動の観測値。(下)最適モデルによる粘性緩和による変動の計算値。

Viscoelastic relaxation and afterslip contribution to the postseismic crustal deformation after the 2024 Noto Peninsula earthquake

*Miku Ohtate¹, Yusaku Ohta¹, Yuta Mitsui²

1. Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University, 2. Shizuoka University

大規模な地震の後には、余効変動と呼ばれる地殻変動がしばしば観測される(e.g., Ohzono et al., 2012; Moore et al., 2017)。余効変動は断層上で発生するアフタースリップ、下部地殻やマントルの粘弾性媒質の粘性的な応答である粘弾性緩和など、時間・空間スケールの異なる要因がその原因である。つまり、大地震後の余効変動の原因を理解することは、断層の摩擦特性や震源域下の粘弾性構造を解明するために極めて重要である。本研究では、2024年1月1日に能登半島で発生したMj 7.6の地震後の余効変動に着目した。国土地理院GEONET観測点のデータおよびSoftBank株式会社(以下SoftBank)が運用する民間の独自のGNSSデータから地震・人為的オフセットの除去および定常的変動の除去を行い、2024年6月1日までの余効変動変位を推定した。推定された余効変動変位は、震源域の北東に延びる佐渡島において主に北西方向へ約1 cmの変位を示した。

得られた佐渡島における北西向き変位の成因を調べるために、半解析的境界要素法(Barbot & Fialko, 2010)を用いて、地震時の断層すべりによる応力擾乱から期待されるマクスウェル粘弾性緩和のシミュレーションを行った。断層モデルとしては国土地理院がWebで公開しているものを用いた。粘性構造については、上部地殻、下部地殻、マントルからなる一次元の成層モデルを仮定した。その結果、佐渡島における粘弾性緩和変位は主に北東方向の変位を示し、観測で得られている北西方向への変位とはその方向自体が異なる。粘性構造のうち、下部地殻の粘性率をより低く設定した場合の検証も行ったが、一次元の成層モデルにおける粘弾性緩和では観測データが示す北西方向への変位を再現できなかった。

この乖離を説明するために、佐渡島西岸沖におけるアフタースリップを考慮したモデルを検討した。断層幾何としてFujii & Satake (2024)によるNT2を仮定し、その上でのアフタースリップを推定した結果、佐渡島中央域で主に北西方向への変位が得られ、本震の粘弾性緩和を想定した場合よりも観測データをより良く説明する。さらにアフタースリップの断層パラメータを拘束するために、断層パラメータのうちすべり角・走向・断層幅を試行錯誤的に変えて検証した。その結果、従来のすべり角=78°よりも小さい60°の場合に佐渡島全体にわたる地殻変動をより説明できる。しかし、すべり角と走向の間にはトレードオフがあるため、正確な断層パラメータを決めるためには海域における余震のメカニズム解など、他の観測データと比較する必要がある。佐渡島西沖でのアフタースリップの発生は、地震時電離圏擾乱の測定結果(Heki, 2024)や直江津観測された津波の大きい波高(Fujii & Satake, 2024)との関連性を想起させる。特にHeki (2024)で示された地震後約8分後に発生したとされる最大余震の震源は、本研究でアフタースリップの発生が示唆された場所と重なる。GNSSデータから得られた佐渡島の余効変動変位の時間発展を見ると、地震後3か月間で大きく減衰する。以上を踏まえると、Heki (2024)で示された地震後約8分後に発生したとされる最大余震の震源周辺において、地震後3か月程度でアフタースリップが進展したと考えられる。発表では、より広域の地殻変動場を含めて、詳細な議論を行う。

謝辞：本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式会社およびALES株式会社より提供を受けたものを使用しました。

Crustal deformation after the 2024 M7.6 Noto Peninsula earthquake based on the combined GNSS analysis

*Takuya NISHIMURA¹, Yoshihiro HIRAMATSU², Yusaku OHTA³

1. Kyoto University, 2. Kanazawa University, 3. Tohoku University

はじめに

能登半島において、2020年11月末に始まった群発地震活動は、顕著な地殻変動を伴うものであった (Nishimura et al., 2023)。能登半島には、2024年8月現在、国土地理院のGEONETに加え、ソフトバンク株式会社による独自基準点、京都大学と金沢大学による臨時観測点を含めると45観測点以上のGNSS観測点が設置されており、充実した地殻変動の観測体制が整っている。2024年1月1日に発生した能登半島地震 (M7.6)では、これらの観測点で水平方向に最大2.2m、上下方向には最大1.9mの隆起が観測された。地震後も余効変動と考えられる地殻変動が、地震後徐々に減速しながらも継続している。本発表では、能登半島のGNSS観測点で観測された能登半島地震後の地殻変動について報告する。

データ解析手法及び観測された地殻変動

本研究では、各機関から提供されたRINEXデータを用いて、GipsyX Ver 1.4 (Bertiger et al., 2020) の精密単独測位法によりITRF2014準拠の日座標値を計算し、2020年11月以前の長期トレンド成分を除去して、非定常地殻変動を抽出した。GEONET観測点については、2020年11月以前から長期にわたる観測が行われているため、一次トレンド、年周、半年周成分や対数関数と指数関数を組み合わせた東北地方太平洋沖地震の余効変動成分を外挿して長期トレンド補正を行ったが、それ以外の観測点では2020年12月以前の観測データがほとんどないため、GEONET点での2017年12月から2020年11月までの平均速度を空間的に内挿して各観測点での速度を推定し、この速度をトレンド成分として除去した。地震後6ヶ月間の非定常地殻変動は、能登半島や震源域の南東側にあたる富山県や新潟県では北西向きで最大4cmに程度に達する。また、上下変動では能登半島では全域が沈降し、最大沈降量は7cmに達する。また、水平変位の距離減衰が小さく、能登半島と富山県や新潟県の日本海側の観測点の水平変位量は概ね等しい。非定常地殻変動は現在も継続しており、地震6ヶ月後の42日間でも最大数mmの変動が確認できる (Fig. 1a)、その変動速度は時間とともに低下している。また、能登半島北東部の2020年以降に非定常地殻変動が観測されていた地域において、周辺と異なるような特筆すべき地殻変動は観測されていない。なお、2024年6月3日に発生したM6.0の地震に伴う地震時変動も地震の震央に近い観測点で観測されており、最大2cmの隆起と水平変動が観測された。

地震後の非定常地殻変動モデル

M7.6地震後の非定常地殻変動を、粘弾性緩和を仮定してモデル化を行なった。地震後3ヶ月間の非定常地殻変動時系列を、対数関数でフィティング (例えば、Hashimoto et al., 2008) して3ヶ月間の変位量を算出し、半無限Burgers粘弾性体の上に弾性層があるような単純な一次元構造を仮定 (Pollitz, 1997) して、弾性層の厚さと粘弾性層の粘性率をグリッドサーチで推定した。その結果、弾性層厚さは30km、Kelvin要素の粘性率は $5.5 \times 10^{17} \text{ Pa s}$ と推定された。なお、この計算ではMaxwell要素の粘性率はKelvin要素の粘性率の20倍 (すなわち $1.1 \times 10^{19} \text{ Pa s}$) と仮定している。このモデルは地震後6ヶ月後の地殻変動場も概ね説明する (Fig. 1) が、計算値の方がやや小さく、余効すべりの影響もあると考えられる。一方、間隙弾性反発による余効変動は、地震時すべりが大きかった能登半島北西部で大きくなることが予想されるが、半無限弾性体でポアソン比を変えて計算した (例えば、Jonsson et al. 2003) 変位の水平変動パターンは、観測変位と異なっており、M7.6地震後の非定常地殻変動への影響は小さいと考えられる。

謝辞：本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じてソフトバンク株式会社とALES株式会社より提供を受けたものを使用しました。国土地理院の電子基準点RINEXデータ、気象庁一元化震源データを使用

しました。京都大学及び金沢大学のGNSS観測点の設置にあたり、珠洲市教育委員会、珠洲市企画財政課、珠洲市産業振興課、珠洲市総務課、能登町教育委員会及び奥能登国際芸術祭実行委員会にお世話になりました。本研究はJSPS科研費 JP22K19949, JP23K17482, 京都大学防災研究所共同研究2023GC-7の助成、及び、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第三次）」の支援を受けました。ここに記して感謝いたします。

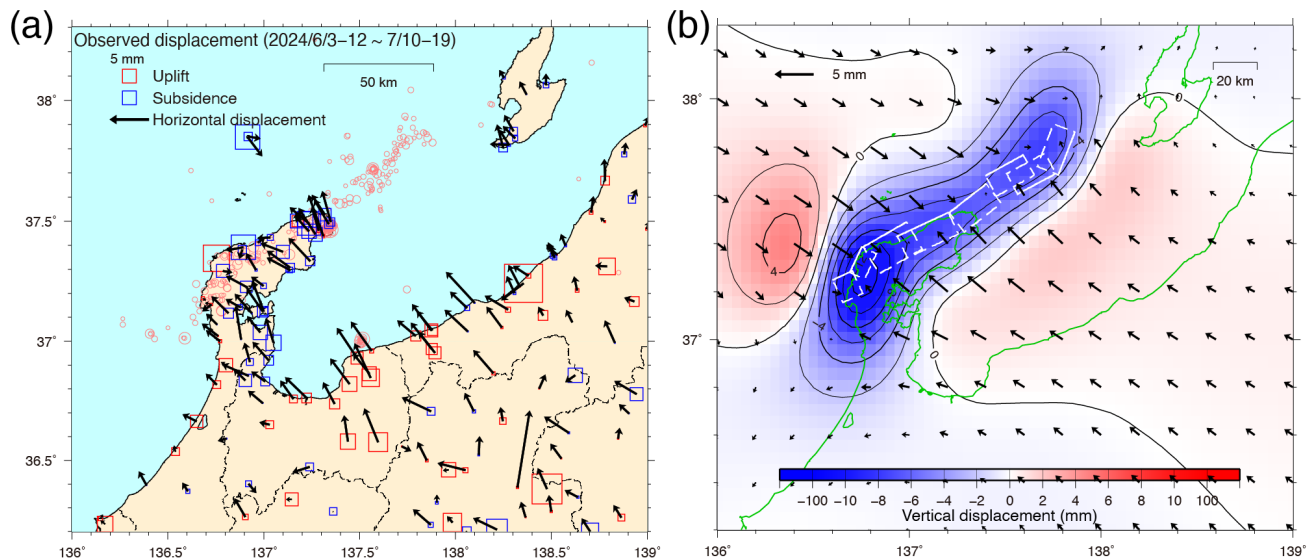


Fig.1 Observed (a) and calculated (b) postseismic displacement of the 2024 M7.6 Noto Peninsula earthquake from early June to mid July, 2024. Calculated displacement is predicted by the model of a 30-km-thick elastic plate overlying a Burgers viscoelastic half-space.

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 23, 2024 10:45 AM - 12:15 PM JST | Wed. Oct 23, 2024 1:45 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 Room A
International Conference Hall (4F)

[S08] AM-2

chairperson: Kenichi Tsuda (Institute of Technology, Shimizu corporation), Keisuke Ariyoshi (JAMSTEC)

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

[S08-14] Spatial and temporal characteristics of repeating earthquake distribution in the Noto peninsula seismic swarm

*Maki Komatsu¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Tech)

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

[S08-15] Spatial pattern in frictional properties on the subducting Philippine Sea Plate off the east of Kyushu Island

*Takuji YAMADA¹ (1. Faculty of Basic Natural Science, Ibaraki University)

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

[S08-16] A physical explanation for an unusually long-duration slow slip event in the Nankai Trough

*Keisuke Ariyoshi¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Iinuma Takeshi¹, Masaru Nakano¹, Demian Saffer³, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi⁴, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹ (1. JAMSTEC, 2. Japan Meteorological Agency, 3. University of Texas, Austin, 4. NIED)

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

[S08-17] Evaluating Ground Motion Scenarios for the Nankai Trough Megathrust Earthquake based on the Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA¹, Bunichiro Shibasaki², Akemi Noda³, Jean-Paul Ampuero⁴ (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. International Institute of seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 3. Meteorological Research Institute, 4. Institut de Recherche pour le Développement, Université Côte d'Azur)

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

[S08-18] Estimating effective normal stress during SSE in Bungo channel from slip velocities and shear stress variations: Part.2

*Yojiro Sasagawa¹, Toshinori Sato¹ (1. Chiba University)

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

[S08-19] Effect of two M6.6 in-slab earthquakes on occurrence of the next long-term slow slip event beneath Bungo channel

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Youichi Asano³, Aitaro Kato⁴, Suguru Yabe⁵ (1. Building Research Institute, 2. University of Southern California, 3. NIED, 4. ERI, University of Tokyo, 5. AIST)

Spatial and temporal characteristics of repeating earthquake distribution in the Noto peninsula seismic swarm

*Maki Komatsu¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Tech

繰り返し地震（リピーター）とは、断層面上の同じ位置において同じ破壊過程で繰り返し発生し、類似した波形が観測される地震のことである。プレート境界の繰り返し地震については発生メカニズムがよく研究されており、孤立したアスペリティが周囲の非地震性すべりによって繰り返し破壊されたものと解釈されている。しかし、繰り返し地震は地殻内地震や注水誘発地震でも見つかっており、プレート境界以外で発生する繰り返し地震のメカニズムを理解するためには、さらに検証が必要である。本研究では、2020年末から活発化している能登半島群発地震において繰り返し地震の検出を行った。この群発地震活動は流体との関連が示唆されており、流体移動によって非地震性すべりが促進され、繰り返し地震が誘発されていることが予想される。繰り返し地震を検出し、その時空間分布を調べることで、地殻内における繰り返し地震の発生メカニズムについて考察するとともに、能登半島の群発地震活動に関する理解を深めることを目的とした。

2020年1月から2024年1月1日のM7.6までの間に能登半島北東部で発生したM2-4の地震を対象とし、Double-Difference法を用いて震源再決定を行った上で、波形相似性と震源域の重複度の評価により繰り返し地震を同定した。その結果、解析した地震の12.8%にあたる236個の地震を含む、102系列の繰り返し地震が見つかった。

繰り返し地震は2021年5月以降に発生しており、群発地震の4つのクラスターの内、北部のNクラスターに最も多かった。2022年6月のM5.4までの期間には繰り返し地震が集中して発生しており、これは非地震性すべり発生のタイミングと対応している可能性がある。解析した地震数に占める繰り返し地震の割合は、日本列島直下の地殻内地震における平均と比較して高く、期間やクラスターごとに大きく差があった。この割合の違いは流体が関係している可能性がある。気象庁マグニチュード差が1以上の繰り返し地震ペアが存在していたが、スペクトル振幅から計算されたモーメントマグニチュード差は最大でも0.9であった。一定の断層サイズを仮定した場合、この差は応力降下量が20倍程度異なることに対応する。

繰り返し地震が集中するNクラスター内の断層面上に位置する地震を抽出し、繰り返し地震の空間的な特性を評価した。その結果、繰り返し地震の震源域は他の繰り返し地震を含む周囲の地震と重なっていることが多く、繰り返し地震パッチは従来解釈されてきたように孤立してはいないことがわかった。孤立していないアスペリティで発生する繰り返し地震についても検討する必要がある。

Spatial pattern in frictional properties on the subducting Philippine Sea Plate off the east of Kyushu Island

*Takuji YAMADA¹

1. Faculty of Basic Natural Science, Ibaraki University

1. はじめに

豊後水道から日向灘にかけての九州東方沖では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震が繰り返し発生している。2024年8月8日にも日向灘でMj7.1の地震が発生した（Mj：気象庁マグニチュード、本地震を以後、2024年日向灘地震と表記する）。本研究では、2003年6月から2022年12月に九州東方沖で発生した小地震のうち、2.で説明するとおり、フィリピン海プレート上面のプレート境界面における摩擦特性を反映していると考えられる142地震（ $4.0 \leq Mj \leq 5.0$ ）を選び出し、応力降下量の解析を行った。

2. 解析地震の選択基準

本研究では深さ方向の震源決定精度を考慮して、Baba *et al.* (2002), Hirose *et al.* (2008), Nakajima and Hasegawa (2007) の推定したフィリピン海プレート上面から ± 15 km の深さで発生した小地震（ $4.0 \leq Mj \leq 5.0$ ）を選択した。結果として、142地震について解析することができた。

解析対象地震の規模の下限と上限は、以下の理由から設定した。マグニチュードが3.5を下回る地震では、特に低周波数帯の信号-ノイズ比が悪かった。そこで、経験的グリーン関数（EGF）として用いる地震をMj3.5とし、コーナー周波数の決定精度を確保するため、解析対象地震はEGFと0.5以上のマグニチュードの開きをもつ地震（ $Mj \geq 4.0$ ）とした。また、応力降下量は各地震の断層面の大きさに応じた平均値として求められるため、解析対象地震の断層面が大きすぎると、空間不均質性の議論に不適である。よって、解析対象地震の規模の上限はMj5.0（断層面の長さは約数km）とした。

本研究では、MjがモーメントマグニチュードMwに等しいと仮定しているが、この仮定の妥当性についても検討済みである。また、解析対象地震のうち、防災科学技術研究所によってメカニズム解が求められている地震については、フィリピン海プレートの沈み込みと調和的な節面を持つことを確認済みである。

3. 応力降下量解析

Yamada *et al.* (2021) の手法を用いて、応力降下量の解析を行った。まず、2003年から2022年に発生したMj3.5の地震のうち、解析対象の小地震（ $4.0 \leq Mj \leq 5.0$ ）の震源から最短距離にある地震の観測波形をEGFとした。次に、解析対象の地震の観測波形スペクトルをEGFのスペクトルで割り（デコンボリューション）、震源スペクトルがオメガ2乗モデルに従うとの仮定のもと、解析対象地震のコーナー周波数を求めた。最後に、断層面が円形であり、かつ破壊伝播速度がS波速度の90%であると仮定して、Madariaga (1976) のモデルを用いてコーナー周波数から応力降下量を計算した。

4. 結果および考察

小地震の応力降下量の解析結果から、プレート境界の摩擦特性、特に剪断強度の空間不均質分布を推定することができる（Yamada *et al.*, 2021）。各地震の応力降下量の解析結果をもとに、緯度・経度それぞれ0.1度ごとに平滑化した応力降下量分布を図1.に示す。

領域Aは豊後水道下のスロースリップ発生域に相当する。特筆すべき特徴は見られないが、北側に応力降下量が多い領域が存在することから、この北側隣接領域の剪断強度が高いことが示唆される。また、1996年日向灘地震（Mj6.9とMj6.7が1.5ヶ月隔てて発生）の震源域（図1の領域B：Yagi *et al.*, 1999）の南隣に、応力降下量が多い領域が見られる。すなわち、この領域では剪断強度が高く、1996年日向灘地震の際にバリアとして働いたのかもしれない。2024年日向灘地震の震源はこの領域Bの南端部に相当する。宮崎県北部よりも鹿児島県の方が大きめの震度を記録したことを考慮すると、2024年日向灘地震は星印で始まった破壊が南側へ進展し、図1の領域B南側の応力降下量が多い（剪断強度が高い）領域を破壊し、Mj7.1の地震となった

可能性も考えられるが、今後の精査が必要である。なお、この応力降下量が大きい領域の東隣領域（図1の領域C）では、浅部スロー地震・スロースリップが発生していることが報告されている（Yamashita *et al.*, 2015; 2021）。

北海道南東沖（Yamada *et al.*, 2017）や東北地方東方沖（Yamada *et al.*, 2021）の太平洋プレートの沈み込みに伴う小地震の解析結果と比べると、本研究で解析した豊後水道～日向灘の領域では、全体的に応力降下量が小さい。これは、九州東方沖のフィリピン海プレート上面の剪断強度が相対的に低いことを示唆していると考えられる。

謝辞：

本研究では、Hi-net（防災科学技術研究所）、気象庁、鹿児島大学、九州大学、高知大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献：

- Baba *et al.* (2002), PEPI, [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00044-4](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00044-4)
- Hirose *et al.* (2008), JGR, <https://doi.org/10.1029/2007JB005274>- Madariaga (1976), BSSA, 66 (3): 639-666
- Nakajima and Hasegawa (2007), JGR, <https://doi.org/10.1029/2006JB004770>
- Yagi *et al.* (1999), GRL, <https://doi.org/10.1029/1999GL005340>
- Yamada *et al.* (2017), PEPS, <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0152-7>
- Yamada *et al.* (2021), EPS, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01326-8>
- Yamashita *et al.* (2015), Science, <https://doi.org/10.1126/science.aaa4242>
- Yamashita *et al.* (2021), EPS, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01533-x>

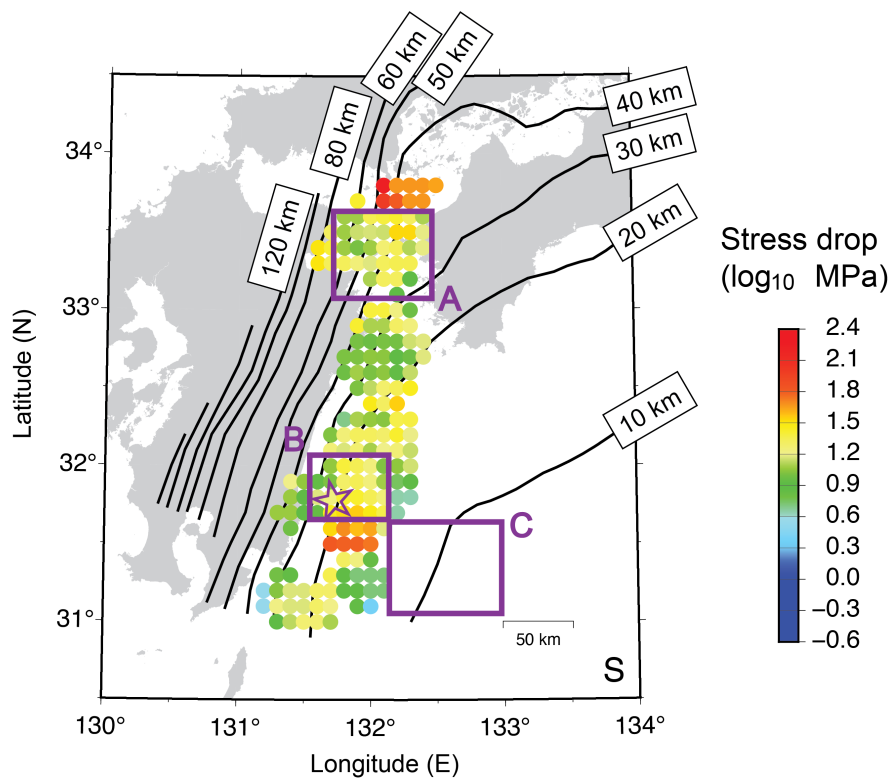


Fig. 1. Spatial pattern of stress drop estimated from S waves of earthquakes with $4.0 \leq M_j \leq 5.0$. Black contours indicate the surface depth of the subducting Philippine Sea Plate. Areas A and B correspond to source regions of slow slips in Bungo Channel and the two Hyuganada earthquakes in 1996 ($M_j 6.9$ and $M_j 6.7$; Yagi *et al.*, 1999), respectively. The hypocenter of the earthquake on Aug. 8, 2024 ($M_j 7.1$), which is shown as a star, is located at the southern tip of Area B. Shallow slow earthquakes have been taking place in Area C (Yamashita *et al.*, 2015; 2021).

A physical explanation for an unusually long-duration slow slip event in the Nankai Trough

*Keisuke Ariyoshi¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa², Iinuma Takeshi¹, Masaru Nakano¹, Demian Saffer³, Hiroyuki Matsumoto¹, Shuichiro Yada¹, Eiichiro Araki¹, Narumi Takahashi⁴, Takane Hori¹, Shuichi Kodaira¹

1. JAMSTEC, 2. Japan Meteorological Agency, 3. University of Texas, Austin, 4. NIED

1944年東南海地震の震源域直上に設置された地震・津波観測監視システム（DONET）と長期孔内観測（LTBMS）により、海溝型巨大地震の浅部延長線上でスロースリップイベント（SSE）が繰り返し発生していることが明らかになった。しかし、(A)2012年2月のSSEの継続時間は、同程度のマグニチュードのSSEの予想よりも長かったこと、(B)掘削作業期間に伴う外部擾乱により2012年2月と12月のSSE間の断層すべり空間分布の関係が不明瞭、という2つの未解決問題が残されていた。これらの疑問を明らかにするために、SSEに関連する間隙水圧・海底水圧データを再分析した。その結果、2月のSSEは他のSSEに比べて伝播速度が遅く、継続時間が長かったが、12月のSSEは他のSSEと同程度であった。この期間と伝播速度の違いは、それぞれ外部応力擾乱と内部応力擾乱に関係していると解釈される。海洋モデルJCOPE(Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)を用いると、黒潮蛇行の通過による海底圧力の低下と上昇が、2月のSSEの長周期化の後半と終息にそれぞれ一致することが確認された。このことは、黒潮蛇行がSSEの継続期間に影響を与えている可能性を示唆している。また、我々の改良した断層モデルは、2月のSSE発生前にはせん断応力の蓄積量が小さく、これが速度・状態依存の摩擦則に基づくゆっくりとした地震すべり伝播の引き金となったことを示している。これらの結果は、SSEの多様性について、断層セグメント間の相互作用だけでなく、海洋現象に起因する外力による応力擾乱の観点からも考慮する必要があることを示唆している。

参考文献

Ariyoshi et al. (2024) Physical understanding of a slow slip event longer than expected around the Nankai Trough, *Tectonophysics*, vol. 887, 230439. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230439>

Evaluating Ground Motion Scenarios for the Nankai Trough Megathrust Earthquake based on the Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA¹, Bunichiro Shibazaki², Akemi Noda³, Jean-Paul Ampuero⁴

1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. International Institute of seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 3. Meteorological Research Institute, 4. Institut de Recherche pour le Développement. Université Côte d'Azur

The Nankai Trough, where repeated large historical earthquakes have occurred, is supposed to generate the next megathrust earthquake in the future, and it might bring a tremendous amount of damage to Japanese society. Furthermore, this earthquake is supposed to generate dangerous long-period ground motions that might have a big impact on high-rise buildings. Thus, building an earthquake scenario for this Nankai Trough Earthquake is very critical for hazard mitigation. However, historical records reveal that the ruptured segment of the Nankai Trough is different for each event, suggesting that modeling the whole area of the Nankai Trough without any segmentation is necessary to construct a physically plausible scenario. We constructed a physically plausible earthquake scenario for the Nankai Trough megathrust earthquake by considering a realistic plate boundary structure around Nankai Trough (Iwasaki, 2015), as well as the experimental results using fault material (Tsuda and Hirono, 2024, in revision). Furthermore, we have incorporated the stress rate based on the analysis of GNSS data (Noda et al., 2021) into initial stress conditions for the simulation with the assumption of the hypocenter location close to the latest Nankai Trough historical earthquake (1946 Nankai Earthquake). Even the resultant simulated results were compatible with-slip distributions from geodetic inversion, such as that by Sagiya et al. (1999), we have investigated further scenario of Nankai Trough megathrust earthquake for the different hypocenter location, such as the area close to 1944 Tonanakai Earthquake, historical Tokai Earthquake or Hyuga-nada earthquake, and for different assumption for stress drop (inter-seismic period). We also have simulated long-period ground motions and considering the results of ground motion prediction based on such scenario can provide more realistic scenarios of long-period ground motion for future Nankai Trough megathrust earthquake, especially to the urban area.

Estimating effective normal stress during SSE in Bungo channel from slip velocities and shear stress variations: Part.2

*Yojiro Sasagawa¹, Toshinori Sato¹

1. Chiba University

1. はじめに

スロースリップ(SSE)は、地震波を出さずにプレート境界等を10日～数年かけて数十cmゆっくりすべる現象である。SSEはGNSS観測以降発見され、プレート境界でのエネルギー蓄積・解放の新たな1つの過程として位置づけられる。これを調べることはプレート境界のテクトニクス等を知る上で重要である。速度と状態に依存した摩擦則を用いた理論解析により、速度弱化に伴う準静的なすべり挙動が示されている。Kobayashi and Sato(GRL, 2021,<https://doi.org/10.1029/2021GL095690>)はGNSSのデータから房総半島沖で発生した6回のSSEの時空間すべり分布を推定し、剪断応力変化とすべり速度の関係をグラフに示した。すると、その軌跡のほとんどは理論的に安定な軌跡と類似していた。これは、房総沖のSSEは準静的な現象であり、すべり加速時の軌跡の傾きはSSEを引き起こしたプレートの摩擦係数 (a, b) と有効法線応力 (σ_n) の積 ($(a-b)\sigma_n$) で表されることが示唆された。笹川、佐藤(地震学会秋季大会、2023)では、この方法を2018年の豊後水道で発生したSSEに適用し、房総沖SSEと同様の結果を得た。笹川、佐藤(JpGU, 2024)とSasagawa and Sato(AOGS, 2024)では、2010年の豊後水道SSEに対してこの方法を適用して有効法線応力の絶対量を推定した。本研究では、2003年に発生した豊後水道SSEに対してもこの方法を適用して有効法線応力の絶対量を推定し、複数のイベント間での比較を行う。

2. 解析方法

用いたデータは国土地理院による日々の座標値(F5解)である。SSEによる変動を抽出するために、SSEとは無関係な線形トレンドや季節変動等を推定し、除去する。線形トレンドや季節変動等を除去したデータをフィッティングによってなめらかな曲線で繋ぎ、1ヶ月毎の変動に分割する。次に、1ヶ月毎の変動データからABICを用いたインバージョン解析によって1ヶ月毎のすべり分布を推定する。そしてUSGS(United States Geological Survey)のソフトウェアCoulomb3.3を用いて、プレート境界面を長方形の微小パッチに分割してすべり分布に伴う剪断応力変化をそれぞれのパッチで計算する。求めた剪断応力変化とすべり速度の関係をグラフに表し、加速時の傾きから有効法線応力の絶対量を推定する。

3. 結果

剪断応力変化とすべり速度の関係を示したグラフから有効法線応力はそれぞれ2003年SSEでは10-20MPa、2010年SSEでは30-40MPa、2018年SSEでは20-30MPaであることがわかった。どの年のイベントもその深さにおける静岩圧よりも非常に小さい値であり、SSE発生領域のプレート境界面に非常に高い圧力の間隙水の存在が示唆される。

謝辞

解析にあたり、国土地理院の日々の座標値(F5解)を使いました。応力の計算では、米国地質調査所のCoulomb3.3を使いました。ここに記して感謝します。本研究は科研費(23K03541)の補助を受けました。

Effect of two M6.6 in-slab earthquakes on occurrence of the next long-term slow slip event beneath Bungo channel

*Saeko KITA¹, Heidi Houston², Youichi Asano³, Aitaro Kato⁴, Suguru Yabe⁵

1. Building Research Institute, 2. University of Southern California, 3. NIED, 4. ERI, University of Tokyo, 5. AIST

It is important to consider the relationship of large in-slab earthquakes to the preparation of occurrence of slow slips and/or megathrust earthquakes on the plate boundary. Within the recent 25 years, there have been two in-slab earthquakes of magnitude over 6.5 in the Bungo channel (the 2024 M6.6 Bungo channel and the 2022 M6.6 Hyuga-nada earthquakes). We report temporary effects by the two in-slab earthquakes on the entire fault plane of the long-term slow slip events beneath Bungo channel. For both M6.6 events the plunges of Sigma 1 increase by 5-10 degrees after the events and rotate back to the state before the occurrence of these events beneath the fault plane of the long-term slow slip events. For both events plunges of Sigma 3 tend to decrease several degrees after the events, and the plunge for the 2024 event rotates back to the state before them. This may suggest that a temporary decrease of normal stress on the plate boundary and a following decrease of locking on the plate boundary just after the M6.6 events. The stress ratio R and plunge of the Sigma 1 in the period 1 month after the 2024 event are clearly changed. The plunge and azimuth of the Sigma 1 from 1 to 2.5 months after the 2024 event became close to the stress state during the long-term slow slips. The stress ratio R also continues to be ~0.7 before and after the large in-slab event. Based on the reoccurrence time (~7 years) and previous timing of the slow slip events, it is expected that the next long-term slow slip in Bungo channel will occur in ~2025. Our study methodology monitoring in-slab events may detect a signal of preparation of the next slow slip event.

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 23, 2024 1:30 PM - 3:00 PM JST | Wed. Oct 23, 2024 4:30 AM - 6:00 AM UTC | 🏢 Room A International Conference Hall (4F)

[S08] PM-1

chairperson: Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo), Shiro Hirano (Hirosaki University)

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

[S08-21] Feature of cascading rupture frequently observed in Northern California

*Weifan Lu^{1,2}, Satoshi Ide¹, Han Yue² (1. The University of Tokyo, 2. Peking University)

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

[S08-22] Prediction for a stochastic rupture propagation model along a 2-D fault plane

*Shiro HIRANO¹ (1. Hirosaki University)

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

[S08-23] Models of fluid-driven seismic swarms with permeability enhancement and rate-and-state friction

Natalia Berrios-Rivera², *So Ozawa¹, Eric M. Dunham² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Stanford University)

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

[S08-24] Emergence of Self-Organized Criticality and Phase Transition in the Olami-Feder-Christensen Model with a Single Defect

*Tetsuto Otani¹, Nobuki Kame¹ (1. The University of Tokyo)

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

[S08-25] Recurrence of large earthquake using multiscale circular patch model in quasi-dynamic simulation of earthquake generation cycle

*Ryoko Nakata¹, Takane Hori², Hideo Aochi^{3,4}, Satoshi Ide¹ (1. UTokyo, 2. JAMSTEC, 3. BRGM, France, 4. ENS-CNRS PSL, France)

Feature of cascading rupture frequently observed in Northern California

*Weifan Lu^{1,2}, Satoshi Ide¹, Han Yue²

1. The University of Tokyo, 2. Peking University

Understanding if earthquakes of different sizes start in the same way and whether the growth process of the rupture of large earthquakes is predictable are fundamental questions in earthquake source physics, with practical implications for Earthquake Early Warning systems and probabilistic forecasting. Recent studies in Japan have shed light that the onsets of seismic waves from small and large earthquakes exhibit similar characteristics, and proposed a hierarchical patch model. This model indicates the onset of an earthquake does not determine its final size. However, the applicability of the hierarchical path model and the controlling factors remain unclear. A systematic comparison of 24 years of high-sensitivity seismograph records for approximately 75,000 events reveals 125 extremely similar and 1,939 very similar pairs of large ($M \geq 4.0$) and small ($M \leq 3.0$) earthquakes, co-located within about 100 meters. An extremely high similarity is observed for pairs of earthquakes occurring on simple faults (50 of 65 large events) separated by a long period of up to 24 years, whereas pairs of large earthquakes occurring on complex faults have a low probability of cascading rupture. Estimating the probability of cascading rupture based on fault geometry can improve the predictability of future earthquakes with a more quantitative size estimation.

Prediction for a stochastic rupture propagation model along a 2-D fault plane

*Shiro HIRANO¹

1. Hirosaki University

断層の破壊過程の複雑さと多様さを記述するには、確率的モデルが有用と考えられる。しかし、これまでの震源過程や地震活動の解析から、少なくとも以下の経験則が知られる：

- (1). k^{-2} -モデル: 最終滑り分布の空間方向 Fourier 振幅スペクトルの高波数成分が、空間波数 k の -2 乗で減衰する。
- (2). ω^{-2} -モデル: 震源時間関数の時間方向 Fourier 振幅スペクトルの高周波成分が、角周波数 ω の -2 乗で減衰する。
- (3). 自己相似則: 地震モーメントの成長が、破壊開始からの時間の3乗に比例する。
- (4). GR 則: モーメント・マグニチュードが M であるイベントの発生頻度が、 10^{-bM} に比例し、特に $b \sim 1$ である。

震源物理学の理解に重要なことは、着目する経験則ごとの個別モデルではなく、これら複数の経験則を同時に満たすモデルを考えることであろう。

点震源モデル、すなわち波数を $k \rightarrow 0$ とした場合については、Bessel 過程という確率微分方程式に基づくモデルが、上記経験則(2)(3)(4)を満たすことが示された(Hirano 2022 *Sci.Rep.*). これを空間的に拡張することで動的破壊の仔細をモデル化し、また経験則(1)を満たすべく、まずは1次元直線断層の場合に、平野 (2024 *JpGU*) は

$$\begin{aligned}\partial_t D &= V, \\ \partial_t V &= \Delta D + d + \sqrt{V} W + \delta\end{aligned}$$

という確率波動方程式の解の挙動を数値的に検証した。ここで、 D, V は各々滑りと滑り速度の時空間分布、 d は Bessel 過程に現れる定数、 W は時空間白色雑音、 δ は時空間における Dirac の δ 関数である。結果、この解は自発的に停止し、経験則(1)を満たすが、(2)を満たさず、むしろ高周波成分が ω^{-1} のエンベロップを持つことが分かった。また、(3)および(4)については未検証であった。

上記モデルの改良を目指すにあたり。まず ω^{-2} 的なエンベロップは空間2次元モデルであれば実現される可能性がある。断層面上の1直線に沿って積分した結果が ω^{-1} 的であれば、そのようなランダムなソースを2次元的に積分すれば、時間方向にも滑らかさが高じると期待されるためである。従って2次元平面断層上での分布を考える必要が生じるが、これにGR則(4)の検証を加えるには、膨大な数の数値シミュレーションが必要で、計算コストが高いと見込まれる。そこで予察として、GR則を満たすような確率波動方程式の構造を考える。

GR則を満たす確率的表現として、「拡大する亀裂の面積が A に達しているとき、その直後に拡大が停止する確率は、 A に反比例する」というものがある (Scholz 1968 *BSSA*)。本発表ではこの表現を、新しいアプローチによっても求めるとともに、確率微分方程式に取り込むにあたっての考え方を紹介する。

Models of fluid-driven seismic swarms with permeability enhancement and rate-and-state friction

Natalia Berrios-Rivera², *So Ozawa¹, Eric M. Dunham²

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Stanford University

Anthropogenic fluid injections and natural fluid flow in Earth's crust lead to an increase in pore pressure, which can trigger earthquake swarms characterized by a migrating seismicity front. Observations of seismicity expanding with the same diffusive space-time behavior as analytical solutions for aseismic slip have been interpreted as evidence for seismic slip triggered by stress changes from aseismic slip. In some cases, aseismic slip is confirmed from crustal deformation measurements and sheared wellbore casing. Our work offers another interpretation of migrating seismicity that may be relevant when there is no independent evidence for aseismic slip. We show that pressure diffusion and elastic stress transfer can independently drive the diffusive expansion of seismicity fronts, and that analytical solutions for aseismic slip can explain this seismicity pattern, even when all slip is seismic. Here we present a 2D earthquake sequence model that simulates constant-pressure injection into the end of a velocity-weakening rate-and-state fault, permeability enhancement with slip, and fluid transport. Our simulations produce microseismicity concentrated along the slip front and large events that usually rupture back to the injector. While the overall aseismic slip potency is much smaller than the seismic potency, aseismic slip at the leading edge of the slip front appears to be important to increase permeability, allowing fluid influx and pressurization that weakens the fault and prepares it for seismic slip. Although we find that simulations for understressed faults have some distributed seismicity behind the slip edge, most events are concentrated at the slip front, likely due to the planar fault geometry and the uniform friction and stress distributions. Additional simulations with a nonplanar fault introduce heterogeneity in the fault normal stress, resulting in a broader distribution of event sizes, events that rupture both toward and away from the injector, more distributed seismicity behind the leading slip edge, and swarm-like clusters of microseismicity. Even with this complexity, the nonplanar fault sequences produce a diffusively expanding slip front (with fluctuations about this diffusive expansion correlated to the local fault geometry) and mostly seismic slip. Our results suggest that aseismic slip solutions can be used to quantitatively interpret the space-time behavior of migrating swarms, even in cases with negligible aseismic slip.

Emergence of Self-Organized Criticality and Phase Transition in the Olami-Feder-Christensen Model with a Single Defect

*Tetsuto Otani¹, Nobuki Kame¹

1. The University of Tokyo

自己組織化臨界現象(SOC)は物理学, 地球惑星科学, 生物学, さらには社会科学において, 複雑系における挙動を理解するために提唱されている重要な概念である. Bak, Tang, Wiesenfeldが”SOC”という概念を提唱し(Bak et al. 1987), 地震がこの代表的な例であることを示した(Bak et al. 1989). SOCの概念は制御パラメータを外部から調整することなく, システムが臨界状態に向かって自発的に進化するというものである. さらに, この状態にある系の空間や時間の物理量はべき乗則に従うことが知られている. 実際に地震はいくつかのべき乗則を示す. 最も代表的なものはGutenberg-Richter則であり, 地震のサイズ頻度分布は放出されるエネルギーに対してべき乗則に従うことを主張する.

このGR則を再現するモデルとして提案されたモデルがOlami-Feder-Christensen(OFC)モデルである(Olami et al. 1992). OFCモデルはBurridge-Knopoffのバネブロックモデルを単純化したもので, 隣接するサイト間を破壊が伝播するセル・オートマトンモデルとして実装されている. OFCモデルでは境界条件がSOCの発現に重要な役割を果たす. これまでの研究により, openもしくはfreeの境界条件の場合にのみSOCが発現し, 周期的境界条件を課した場合にはSOCは発現しないことが明らかにされている(Socolar 1993, Grassberger 1994). これはopenもしくはfreeの境界条件によってシステムに不均質性が導入されているためであるとされている(Grassberger 1994). その後, SOC発現の根源的な起源を理解するために, 境界条件や不均質性を変更した様々なモデルが提案されてきたが, その統一的な理解は未だ得られていない.

OFCモデルは2次元正方格子のそれぞれのサイトにエネルギーが割り当てられている系であり, 瞬間的な緩和(toppling)と相対的に遅く均一なエネルギーの増加/loading)によって駆動される. それぞれのサイトではtopplingの度に分配ルールに従いエネルギーの散逸が発生する. 分配ルールには陽に示されていないが, 系の境界ではopen BCsもしくはfree BCsの効果により内部より強い散逸が起こっている. そして, この境界からクラスタが生成され(Middleton and Tang 1995), 系全体が自発的にSOCの状態へと移行する(Hergarten and Krenn 2011). 我々はSOC発現のより根源的な条件を明らかにするために, 最も単純な不均質性”Defect”を, 周期的境界条件のOFCモデルに導入する. すなわち, Defectが無ければ完全に均質な系となり, SOCを示さない. Defectは系のただ1つのサイトにのみ導入され, Defectからその再隣接サイトへの分配をバルクのそれと比べ小さくできるサイトである. すなわち, Defectではバルクよりも強いエネルギー散逸が発生し, その強さも調整できるということである.

Defectモデルを解析した結果, 散逸が強ければSOCになり, 散逸が弱いとSOCにならないことが明らかになった. そして, SOCの状態からほんのわずかに散逸が大きくなると, いくつかの状態が繰り返される, リミットサイクルを特徴とする新しい”秩序相”に移移することが新たに見出された. また, Defectの数を増やすとSOCの状態は徐々に壊れていくことが確かめられた. Defectモデルを用いることにより, SOC発現の条件が明らかになり, SOCからの新たな相転移が見出された. わずかなエネルギー散逸の違いがSOCと秩序相発現をコントロールするという本研究の発見は, 今後SOC発現の根源的な理解に重要な手掛かりを与えるであろう.

Recurrence of large earthquake using multiscale circular patch model in quasi-dynamic simulation of earthquake generation cycle

*Ryoko Nakata¹, Takane Hori², Hideo Aochi^{3,4}, Satoshi Ide¹

1. UTokyo, 2. JAMSTEC, 3. BRGM, France, 4. ENS-CNRS PSL, France

【はじめに】本研究では、地震サイクルを通した大地震発生過程を理解するために、日本海溝沿いの三陸沖で発生する幅広いマグニチュードの地震に、マルチスケール円形パッチモデル [Ide and Aochi, 2005; Aochi and Ide, 2009; Ide and Aochi, 2013] を適用して、準動的な地震発生サイクルシミュレーションを行った。

【手法】マルチスケール円形パッチモデルは、Ide and Aochi [2013] では、2011年東北地方太平洋沖地震の複雑な動的破壊過程を説明するために用いられたものを参考にした。彼らは、気象庁カタログを基に、過去に発生した $M > 6.5$ の地震を規模別にグループ分けし、各グループの地震の震源域を同じ半径の円で近似した。各地震の震源位置に配置した円形パッチでは、すべり弱体化距離 D_c を円の半径に比例して変化させることで、空間的に不均質な階層構造を与えていた。本研究では、Ide and Aochi [2013] でモデル化した地震のうち、三陸沖にのみ着目する。従って、最大規模の地震は、1896年明治三陸地震 ($M = 8$) である。2番目に大きな規模のグループは、 $M_j = 7.1 \sim 7.6$ の6地震、3番目は $M_j = 6.6 \sim 7.2$ の9地震である。さらに、気象庁カタログから、1923年1月～2023年3月に発生した、震源深さ60 km以浅・ $M_j = 5.6 \sim 6.5$ の362地震を、4番目のグループとして追加した。これらの地震の震央には、グループ1・2・3・4でそれぞれ半径80・40・20・10 kmの円形パッチを配置するが、本研究では、ほぼ同じ場所で同規模の地震が繰り返し発生しているという仮定の下、グループ2の地震を3つに減らした。またグループ4の地震は、近くで発生しているものをまとめて28パッチを配置した。地震発生サイクルシミュレーションの数値計算は、先行研究 [Nakata et al., 2016; 2021; 2023] と同様の物理法則・初期値・境界条件・プレート境界面形状等で実施した。ただし、M5クラスの地震まで再現するために、プレート境界面を先行研究よりも細かく分割した。そこで、計算規模を小さくするために、モデル領域は先行研究よりも狭い三陸沖のみとした。本手法では、 D_c は特徴的すべり量 L に相当する。A-Bはモデル領域全体で一様に、すべり速度弱体化とした。

【結果・議論】2600年分を計算したところ、 $M_{8.15} \sim 8.29$ の地震が43回発生した。平均繰り返し間隔は約61年であった。 $M > 8$ 地震のセントロイドは43地震でほぼ同じ位置であったが、破壊開始点はそれぞれ異なっており、グループ1のパッチ内ではなく、グループ2, 3, 4のパッチのいずれかであった。これは、 $M > 8$ 地震が、小さいパッチから始まるcascade-up過程であることを意味している。また、多くのケースで、破壊開始点付近で発生した $M < 8$ 地震の余効すべりがトリガーとなっていた。余震は、 $M > 8$ 地震のすべり域周辺に位置するグループ4のパッチで多く発生していた。本研究の結果は、動的破壊過程だけではなく、地震サイクルにおいても、階層構造モデルが本質的に重要であることを示唆している。

【謝辞】本研究のシミュレーション結果は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムおよびJAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して得られたものです。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 23, 2024 3:15 PM - 4:45 PM JST | Wed. Oct 23, 2024 6:15 AM - 7:45 AM UTC | 🏢 Room A
International Conference Hall (4F)

[S08] PM-2

chairperson: Makoto Naoi (DPRI, Kyoto Univ.), Tatsuya Kubota (NIED)

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

[S08-26] Estimating fault mechanical parameters by strategic incorporation of tsunami, geodetic and teleseismic data: the 2011 Tohoku earthquake

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Hisahiko Kubo¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-27] Source process of the 2016 off-Fukushima earthquake deduced from ocean-bottom and onshore seismograms together with tsunami source data

*Ritsuya Shibata¹, Hisahiko Kubo¹, Suzuki Wataru¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-28] Correlation between strain change and tectonic tremor activities during a short-term slow slip event

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

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

[S08-29] Molecular Dynamics Investigation on the Lifetime of an α -Quartz Gouge Particle Under Shearing a Pair of Asperity Walls

*SHENG LI¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto, Japan)

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

[S08-30] Reexamination of Rate- and State- Friction Parameters at Subseismic Loading Rate

*Kotaro Kusada¹, Eiichi Fukuyama^{1,2} (1. Univ. of Kyoto, 2. NIED)

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

[S08-31] High-Resolution AE Analysis During Hydraulically-Induced Fracturing Using Deep Learning Techniques and Matched Filter Analysis

*Makoto NAOI¹, Shiro Hirano², Youqing Chen³ (1. Hokkaido Univ., 2. Hirosaki Univ., 3. Kyoto Univ.)

Estimating fault mechanical parameters by strategic incorporation of tsunami, geodetic and teleseismic data: the 2011 Tohoku earthquake

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Hisahiko Kubo¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震の応力降下 (Stress drop) や放射エネルギー (Radiated energy), 地震放射効率 (Radiation efficiency) といった地震の断層破壊を特徴づける力学パラメータは、地震におけるエネルギー収支を理解する上で重要なものであり (e.g. Kanamori & Rivera 2006 AGU Geophysical Monograph), しばしば遠地実体波記録を使用したインバージョン解析で得られた震源断層モデルから見積もられる (e.g. Ye et al. 2016 JGR). しかし、遠地実体波インバージョンでは、解析上で仮定する破壊フロントの進展速度と、最終的なすべり分布およびそこから見積もられる応力降下の間にはトレードオフの関係があり、その見積もりに不確実性があることが指摘されている (Ye et al. 2016). そのため、上記の力学的パラメータを遠地実体波インバージョンのみから高い信頼度で推定することは、しばしば容易ではない。他方、津波データは時間解像度が低いという欠点があるものの、その非常に遅い伝播速度 ($\sim 10^{-1}$ km/s) から断層面上の破壊伝播の影響を受けにくく、最終すべりや応力降下の空間分布の推定に高い制約を与えることができる。最近、Kubota et al. (2022 PEPS) は、震源域直上で得られた津波データと海陸の測地データから、2011年東北地震の最終すべりと応力降下の分布を高い信頼度で推定した。本研究では、津波と測地データから推定した最終すべり分布の情報を統合した遠地実体波インバージョンの解析手法を提案し、信頼度のより高い東北地震の力学的パラメータの推定を試みる。本解析では、これまで行われてきた遠地実体波インバージョンと同様に、遠地P波記録を用いて断層すべりの時空間発展を推定する。本手法の特徴的な点は、実際のプレート境界構造に基づいて点震源要素を配置する点、および、最終すべり分布が津波・測地データに基づく解析で推定したもの (Kubota et al. 2022) と同じになるという拘束条件を課す点の2つである。解析で得られた東北地震の震源モデルから地表変位および津波を計算したところ、測地観測点の永久変位のみならず、震源域近傍の津波観測点の初動やピークの振幅と到達タイミングをよく再現した。すべりの時空間発展および震源時間関数は、遠地地震波のみの解析で得られたものとおおむね調和的であったが、最終すべり・最終応力降下分布には異なる部分が見られた。本解析からは、海溝近傍に ~ 50 mの最大すべり、および、震源周辺に ~ 5 MPaの主な応力降下領域が推定された。一方で、Ye et al. (2016) が遠地実体波のみから推定した結果では、海溝近傍に最大すべりが推定された点は類似していたものの、そのすべり量は ~ 90 mと非常に大きく、かつ海溝付近に ~ 70 MPaと極めて大きな応力降下が推定された。本解析で得られた震源モデルに基づいて、断層の力学的パラメータを計算すると、以下の通りとなった: Radiated energy $E_R = 5.4 \times 10^{17}$ J, モーメント規格化エネルギー Moment-scaled energy $E_R/M_0 = 1.2 \times 10^{-5}$, 見かけ応力 Apparent stress $\sigma_a = 0.49$ MPa. これらの値は、Ye et al. (2016) が遠地実体波のみの解析から推定した値と同様であった。なお、これらの値は過去に発生した津波地震 (Kanamori 1972 PEPI) における値ほどは小さくない。また、本モデルを用いてEnergy-based stress drop (エネルギー収支の観点から定義される実効的な平均応力降下, Noda et al. 2013 GJI) を計算すると、 $\Delta \sigma_E = 3.2$ MPaとなった。この値はYe et al. (2016) の推定値 (12.5 MPa) よりも小さい。また、この応力降下の推定値の違いに起因して、放射効率 Radiation efficiency $\eta_R = E_R / \Delta W_0 = 2\mu E_R / (\Delta \sigma_E M_0)$ は、本モデルのほうが約4倍大きい値となった。これらの値に違いが出た理由は、両者のモデルにおいて、海溝付近での最大すべり量、および、主な応力降下域の位置に違いがあったことにあると解釈される。しかし、Ye et al. (2016) モデルにもとづいて震源域近傍で得られた津波波形を計算すると観測よりも過大となったことから、Ye et al. (2016) の最大すべり量は過大推定であったこと、さらにはEnergy-based stress dropが過大推定であったことが示唆される。この結果は、津波・測地データに基づいて得られた信頼度の高い最終すべり分布を遠地実体波インバージョンに組み込むことが、地震の断層の力学パラメータをより高い信頼度で推定するために効果的であることを示している。

Source process of the 2016 off-Fukushima earthquake deduced from ocean-bottom and onshore seismograms together with tsunami source data

*Ritsuya Shibata¹, Hisahiko Kubo¹, Suzuki Wataru¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2016年11月22日、福島県沖において気象庁マグニチュード7.4の地震が発生した。防災科学技術研究所（防災科研）によるF-net モーメントテンソル（MT）解と気象庁による一元化震源カタログの余震分布から、この地震は北東-南西に走向を持つ正断層型の地震と考えられる。この地震の断層滑り分布は強震波形や海底水圧記録などを用いて推定されている。強震波形を用いた解析（防災科研, 2016）では断層破壊の時空間発展（震源過程）を推定することができる一方、海域の地震に対して陸上観測点のみを利用すると観測点カバレッジが悪いという問題がある。他方、津波波形を用いた解析は、グリーン関数が地震波のものよりも安定して求められるという利点や、総滑り分布の拘束が良いという利点がある一方で、M7級の地震で破壊伝播過程まで推定することは難しい。本研究では前者の制約を軽減するため、Shibata and Aso（2024 submitted to BSSA）において開発した、放射パターンの補正を加えた経験的グリーン関数（EGF）を利用した波形インバージョン手法を海底のS-netと陸域のKiK-net（地中）の強震波形に適用することで、陸海の地震波形を同時に説明可能な震源過程の推定を試みた。また、Kubota et al.（2021）によりS-net水圧波形を用いて推定された、津波を励起した海底の上下変位（津波波源）をあわせてインバージョンすることにより、滑り量の空間分布のより安定的な拘束を図った。

強震波形解析においては、0.04–0.4 Hzのバンドパスフィルタを用い、S波走時の0.5秒前から50秒間の波形を用いた。EGFとして用いる地震としては2016年12月20日に発生した気象庁マグニチュード5.5の地震を採用した。気象庁によるEGFの震源深さは32.5 kmである一方、F-net MT解のセントロイド深さは5 kmと推定されている。海域の地震に対する震源決定の不確実性を考慮し、低周波数帯の地震波により推定されたF-net MT解の5 kmをEGFの震源深さとした。また、本震の破壊開始点の深さも気象庁震源（24.5 km）とF-net MT解（11 km）の間で乖離がある。Kubota et al.（2021）とKubo et al.（2023）の結果はこの地震の主な滑り領域の深さは、気象庁震源よりもF-net MT 解の深さに近いかそれよりも浅いことを示唆している。本解析では震源断層の震央位置は気象庁震央とし、震源深さに関してはF-net MT解の11 kmと設定した。震源断層として32 km × 60 kmの断層面を仮定し、8 km × 8 kmの小断層をハーフオーバーラップさせて配置した。時間方向には小断層ごとに1.8秒幅の三角形関数をハーフオーバーラップさせて6個並べ、6.3秒間滑りを許した。各小断層の破壊開始時刻は震源から同心円上に1.6 km/sで伝播するように設定した。グリーン関数における放射パターンの補正に必要なレイパラメタは、全国1次地下構造モデルJIVSM（Koketsu et al., 2012）を仮定し、TauPパッケージ（Crotwell et al., 1999）により計算した。津波波源については、Kubota et al.（2021）で推定された津波波源のうち、特に海底変位が大きかった領域において緯度、経度ともに0.02度ごとの上下変位を用いた。ここではOkada（1985）に従い計算された、断層滑りによる理論静的変位をグリーン関数として適用した。地震波形と津波波源の重みづけはトライアンドエラーにより決定した。強震波形と津波波源のジョイントインバージョンの結果、震源域南西部において最大7 m程度の滑り分布が推定された。大滑り領域は走向方向に16 km程伸びており、滑り方向はほぼ -90°から変化しなかった。すなわち破壊はほぼユニラテラルに伝播していた。観測された地震波形に関して、S-netでは解析周波数帯の高周波側において振幅が大きかった一方、KiK-netでは低周波側の波が卓越していた。本解析では、そのどちらの波形も概ねフェーズの特徴を中心に再現された。これはEGFを用いることにより適切に地下構造の影響を考慮できているためと考えられる。津波波源データに関しては、その分布はほぼ再現された一方、振幅は元データと比較すると若干小さかった。防災科研（2016）と比較すると、本研究の滑り分布はより浅い領域に集中している様子が見られた。これは津波波源データを用いることで、総滑り量に対する拘束が良くなったためと考えられる。

Correlation between strain change and tectonic tremor activities during a short-term slow slip event

*Akio Katsumata¹, Kazuki Miyaoka², Takahiro Tsuyuki³, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka³, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori⁵, Akito Araya⁵

1. University of Toyama, 2. JMA, 3. MRI, JMA, 4. AIST, 5. ERI, Univ. of Tokyo, 6. Nagoya Univ.

ボアホールひずみ計およびレーザーひずみ計のデータをスタッキング処理した時系列とテクトニック微動の震源(Imanishi et al., 2011)の積算数は類似性の高い変化を示す(Katsumata et al., 2024)。ひずみ変化と積算微動震源がどの程度の時間幅まで相関を示すか調査した。ひずみと積算微動回数のそれぞれのトレンドを除去して移動相関係数を計算した。相関係数を計算する時間幅を15分, 30分, 1時間, 2時間などに变化させた。なお, Imanishi et al.(2011)の微動震源は最短1分間隔で決定されている。15分の時間幅で相関係数を計算しても相関係数が1.0に近い値となる時間帯が多く出現した(図(a))。これは、微動とひずみ変化が同一の現象の異なった観測結果であることを示唆するものである。

そこで、微動の変位振幅の積分がひずみ計から推定されるプレート間すべり量に相当するか調査した。微動の変位 $d(t)$ を以下のように近似できるとした。

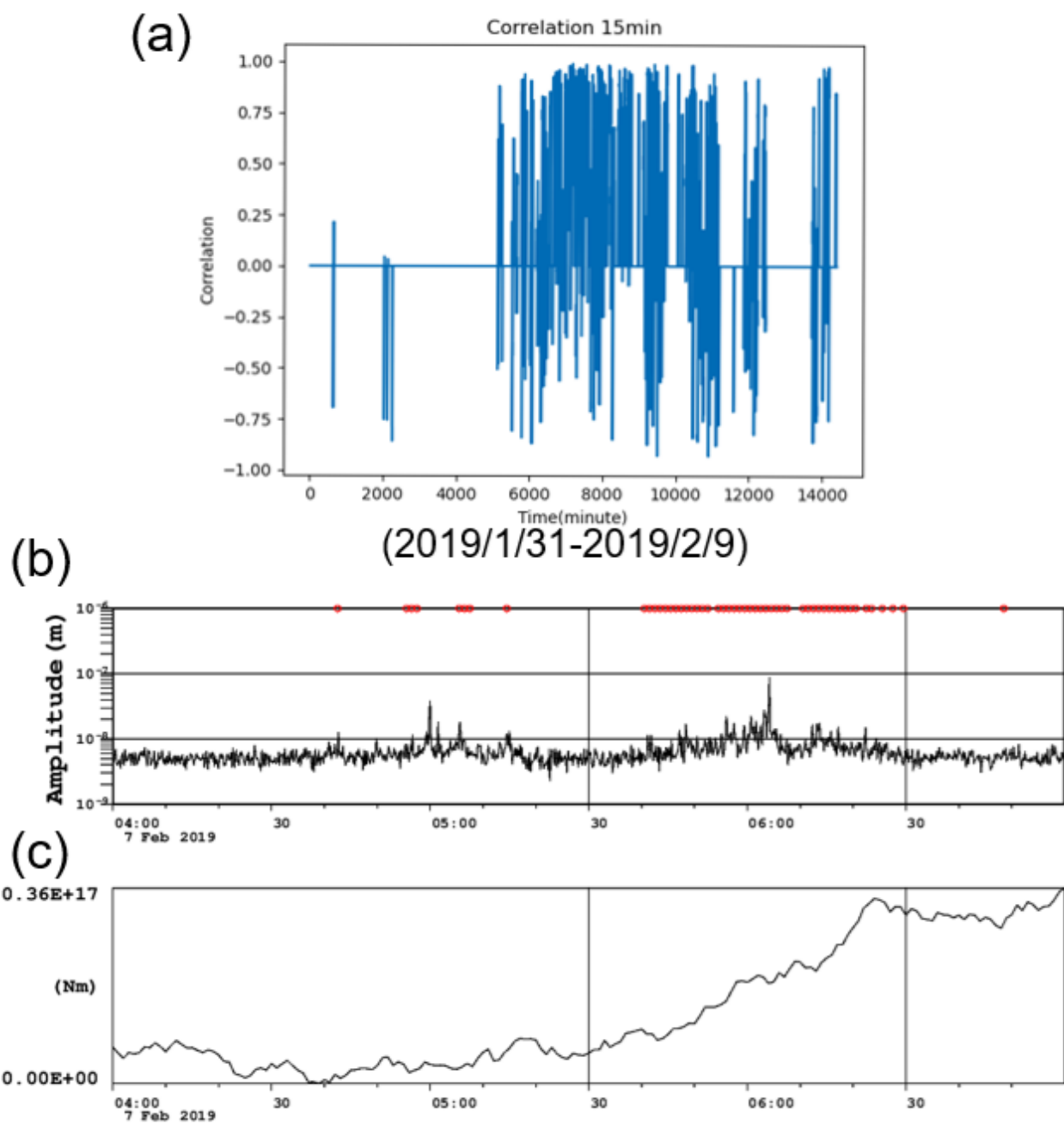
$$d(t)=(dM_0/dt)(R/4\pi r\rho_s\beta_s^3)g_l(\rho\beta/\rho_s\beta_s)^{0.5}\exp(-\pi ft/Q)$$

ここで R は放射特性, r は震源と観測点間の距離, ρ_s は震源における密度, β_s は震源におけるS波速度, ρ は表層における密度, β は表層におけるS波速度, g_l は地表面における増幅係数, $\exp$ の部分は Q 値による減衰を表す。2019年2月7日5時30分~6時30分(JST)までの1時間のF-net旭観測点のNS成分の変位振幅(図(b))の積分を計算し、仮に $R=0.7$, $g_l=2.0$, $Q=200$ として、上式に基づき地震モーメントに変換すると、 2×10^{15} Nm(Mw4.1相当)となった。なお、F-net旭の元データは、積分して変位相当の波形とし、1Hzの高域通過フィルターを施した上で、ヒルベルト変換を用いてinstantaneous amplitudeに変換している。図(b)の枠上の赤丸は微動の検出時刻を表している。この期間のひずみデータ(図(c))に基づくプレート間すべりの地震モーメントは 2.5×10^{16} Nm(Mw4.9相当)であった。

地震波形からの地震モーメント推定値とひずみデータに基づく地震モーメント推定値の間には約10倍の差があり、直接、" $\int(\text{テクトニック微動})dt=\text{プレート間すべり}$ "と結論するには差が大きいが、否定できるほどには差が大きくはない。5:00ころには、微動活動は認められる(図(b))が、ひずみ(図(c))には変化が認められない。この点は" $\int(\text{テクトニック微動})dt\neq\text{プレート間すべり}$ "を示唆している。

謝辞

本研究には防災科学技術研究所のF-net観測点のデータを利用させて頂いた。



Molecular Dynamics Investigation on the Lifetime of an α -Quartz Gouge Particle Under Shearing a Pair of Asperity Walls

*SHENG LI¹, Eiichi Fukuyama¹

1. Kyoto University, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto, Japan

The mechanical behavior of gouge particle could closely relate to the friction properties of rocks, which may influence the nucleation, rupture propagation and termination of earthquakes. In this study, by using molecular dynamics, we explicitly simulated a series of 3D dynamic friction processes of a single spherical α -quartz particle with rough surfaces composed of semi-spherical asperities. We investigated the effects of the normal force, particle size, asperity interval and contact configurations on the dynamic failure of a particle during shearing. Our model initially involves asperities that are aligned with the same asperity interval along the sliding direction and meanwhile all replicated in the direction perpendicular to the sliding with the same asperity interval. Afterwards, two initial contact conditions are considered: the particle center is aligned with the geometric centers either formed by two upper and two lower asperities in the x directions (Case I) or formed by four upper and four lower asperities in two rows (Case II). Finally, we changed the normal load (allowing the fracture to occur), particle size (either $5R$ or $6R$, where $R = 3.4$ nm) and asperity interval (either $0.5 R$ or R in sliding direction) for the two contact cases to investigate the particle failure. The loading velocity was set at 30 m/s and asperity radius at $4R$. Our results show that under all simulations, the normal load significantly affects the particle lifetime. Under the high normal load, the particle breaks within a short sliding distance during the stick stage with asperities. In contrast, under the low normal load, the particle undergoes a long-distance adhesive wear (plastic flow) and shrinkage of the particle volume. It breaks when the volume reduces to a critical size. This process, from adhesive wear to fracture, persists with the increased particle size, where the larger particle experiences a longer adhesive wear distance. Furthermore, the asperity interval generally increases the particle lifetime in our model setup. Contact configurations also have effects, where the particle in Case I cracks more easily over short distances, while in Case II it endures longer plastic wear before breaking under the same normal load. Finally, an interesting finding is that the lifetime of particle could be related to the wear-induced shape.

Reexamination of Rate- and State- Friction Parameters at Subseismic Loading Rate

*Kotaro Kusada¹, Eiichi Fukuyama^{1,2}

1. Univ. of Kyoto, 2. NIED

自然地震の解析においては、断層面における比較的長い($\sim$ m)摩擦のすべり弱化解距離()が報告されている(e.g. Ide & Takeo 1997, JGR)。しかし室内実験においては、遅いすべり速度(μ m/s)と短いすべり距離($\sim$ cm)による Velocity Step Change Testの実験結果から、は極めて短い($\sim$ mm)と報告されている(e.g. Marone 1998, ANEPS)。摩擦パラメータは多くの地震シミュレーション研究で用いられているため、この相違を調査することは重要である。本研究では、地震のすべり速度に近い中速度域($\sim$ mm/s)、および長すべり距離($\sim$ m)条件下での摩擦パラメータの特性を明らかにすることを目的として岩石摩擦試験を行った。実験には福建省花崗岩を使用し、長すべり距離条件を実現するために回転せん断摩擦試験機を用いた。室温室内湿潤状態で3MPaの法線応力を加え、すべり速度ステップが 5.0×10^{-3} m/sと 1.5×10^{-2} m/sの間を行き来する Velocity Step Change Testを複数回($\sim$ 10回)繰り返してデータを取得した。実験の結果、定常状態に到達したと確認できたデータと、定常状態とならなかったデータが得られた。前者は速度ステップの際に見られる典型的な摩擦係数波形の形となり、それから摩擦パラメータの値を推定することができた。後者は摩擦係数の値が不規則に擾乱し、摩擦パラメータの値を推定することはできなかった。これは、run-in直後の不安定さによるものと、実験終盤においてすべり面のダメージが急拡大したことによると考えられる。そこで、解析は前者のデータに対して行った。パラメータ推定は、まず初めにの値を速度急変時の摩擦係数のジャンプより推定したのち、とについてのグリッドサーチを行い、最小二乗法によって最適解を選択することで行った。パラメータ推定の結果、の値は既往研究と同様であったが、負の値は一桁小さくなり、もメートルオーダーの値が推定された。この結果は、同じスケールの速度と距離条件での一定すべり速度実験(Mizoguchi & Fukuyama, 2010, IJRMMS)の実験開始直後の挙動と類似している。の値が大きくなった理由の一つは、長いすべり距離の挙動のデータを取得したためと考えられる。このことは Abercrombie and Rice(2005, GJI) でも示唆されているように、状態に依存する過程が低速・短距離すべり実験とは異なっているためと考えられる。また、の値が大きくなることや摩擦係数が擾乱する原因として、ガウジやガウジ層の影響があると予測している。発表では、この可能性も踏まえて議論を行う。我々の実験結果は、低速すべり($\sim \mu$ m/s)と中速度すべり($\sim$ mm/s)では摩擦パラメータの挙動が異なる可能性を示し、より現実的な条件下で摩擦パラメータを推定することの重要性を示唆するものである。

High-Resolution AE Analysis During Hydraulically-Induced Fracturing Using Deep Learning Techniques and Matched Filter Analysis

*Makoto NAOI¹, Shiro Hirano², Youqing Chen³

1. Hokkaido Univ., 2. Hirosaki Univ., 3. Kyoto Univ.

破壊を伴う室内実験において、AEセンサによる微小破壊モニタリングは破壊成長過程の観察に有効であるため、連続波形データからより多くのイベントを検出し、震源決定することは重要である。本研究では、室内水圧破碎実験におけるAE連続測定データに、深層学習による自動走時検測とMatched Filter Analysis（以下MFA）を適用し、高品質のAEカタログを作成することを試みた。解析には、Naoi et al. (2020; GJI)が実施したEagle Ford頁岩を用いた3実験と、Tanaka et al. (2021; GJI)が実施した黒髪島花崗岩を用いた10実験のデータを用いた。これらの実験では、65 x 65 x 130 mmの供試体を用い、供試体中央部に穿孔した直径6 mmの破碎孔に流体を圧入することで水圧破碎を実施し、発生する微小破壊によって放射される波を24個のAEセンサで10 MHz sampling連続収録した。Naoi et al. (2020)とTanaka et al. (2021)はこれらの連続測定データに対し、STA/LTA法によるイベント検出と、AR-AIC法を用いた自動走時検測を行い、最小二乗法でその震源を決定しているが、残差が大きい走時値を動的に省くことで、誤検測の影響を低減する仕組みを導入している。本研究では、これらの先行研究で最終的に震源決定に使われた検測値及び対応する波形データを用い、1ch波形データ用に微修正したPhaseNet (Zhu and Beroza 2019) 走時検測モデルを訓練した。得られた検測値に対して、差分進化法で処理を高速化したREALアルゴリズム (Zhang et al. 2019) を用いてPhase Associationと震源決定を実施し、それらのイベント波形をテンプレートとしてMFAを行うことで、さらに検出イベント数を向上させた。MFA解析においては平野・直井 (2024; JpGU) が開発した大規模データを高速に処理可能なDiallelX (<https://github.com/ShiroHirano/DiallelX>) アルゴリズムを用いた。検出イベントに対して波形相関による相対走時差の読み取りをおこない、Double Difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) で震源を決定して最終的なカタログを作成した。深層学習モデルの訓練は教師あり学習で行っているものの、その教師データは自動処理で作成したものであり、プロセス全体としては事前のラベル付けが不要である。すなわち、提案手法による自動処理は、連続波形記録が得られさえすれば適用可能である。上記の手法によって、Naoi et al. (2020), Tanaka et al. (2021)が作成したものに比べ、約10倍の数のイベントをリストしたカタログを作成することに成功した。一連の実験では、水圧破碎の主破壊前後でイベントが続発したために解析が困難な時間帯が存在したが、そのような時間帯にも本手法により多数の震源が決定された。他にも主破壊後の流体圧入時に、Tremorのような波形が観測され、そこから5 mm程度の領域で短時間のみ活動するクラスターの存在を明らかにするなど、これまでとは質的に異なる知見が得られた。本解析手法は、室内実験で得られるAEデータから、より多くの情報を引き出すことに寄与すると期待される。