

Tue. Oct 31, 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:Futoshi YAMASHITA(NIED), Ryosuke Ando(University of Tokyo)

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

[S08-01] IODP JTRACK: Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench toward understanding fault strengthening and stress build-up processes

*Shuichi Kodaira¹, Kohtaro Ujiie², Takehiro Hirose¹, Weiren Lin³, Ryota Hino⁴, Yasuyuki Nakamura¹, Tatsuya Kubota⁵
(1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. University of Tsukuba, 3. Kyoto University, 4. Tohoku University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-02] Development of a giant rock friction apparatus for understanding faulting phenomena over broad spatiotemporal scales

*Futoshi YAMASHITA¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Kurama Okubo¹, Sumire Maeda¹ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University)

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

[S08-03] Molecular Study of Rock Friction and Wear Mechanism Using a Pair of α -quartz Asperities

*Sheng Li¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

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

[S08-04] Influence of particle number on fluidization of sheared granular by vibration

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

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

[S08-05] Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaraş and Ekinozu, Türkiye, Earthquake Sequence

*Ryosuke ANDO¹, Dogan Kalafat², Haluk Ozener², Esref Yalcinkaya³, Yojiro Yamamoto⁴ (1. University of Tokyo, 2. KOERI, Bogazici University, 3. Istanbul University, 4. JAMSTEC)

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: Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo), Daisuke Sato (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S08-06] The Investigation of Stress Condition of the 2014 Northern Nagano Earthquake with Surface Rupture Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA¹, Junichi Miyakoshi¹, Naoki Iwata², Yuji Sasai², Akihiro Matsui², Keita Higashi² (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. Chuden Engineering Consultants)

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

[S08-07] Numerical simulation of earthquake generation cycle using multiscale circular patch model

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

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

[S08-08] Episodic Aseismic Slip Events as Incomplete Nucleation of Seismic Slip due to Heterogeneous Stress Distribution

*Naoyuki KATO¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S08-09] 3D viscoelastic earthquake sequence simulation with plate-boundary fault and inland faults

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Stanford University)

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

[S08-10] Separating interlocking asperities from high slip deficit zones along the Nankai Trough, Japan

*Daisuke Sato¹, Takane Hori¹, Yukitoshi Fukahata² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | Room A F205+206

[S08] PM-1

chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University), Hitoshi HIROSE(Kobe University)

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

[S08-11] Analytical treatment of transition condition between slow and fast earthquakes and its validity*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹ (1. Dept. Phys. Sci., Aoyama Gakuin University)

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

[S08-12] Slow and fast earthquakes and earthquake modeling*Satoshi IDE¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-13] Mega-earthquake potential along the Peruvian subduction zone based on shear stress build-up and the earthquake energy balance*Nelson PULIDO¹, Juan Carlos Villegas-Lanza² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Instituto Geofísico del Perú)

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

[S08-14] Inter-plate sluggish slip: its initiation and growth*Yoshio FUKAO¹, Hiroko Sugioka², Ryo Furue³, Tatsuya Kubota⁴ (1. JAMSTEC, Yokohama Institute, Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Kobe Univ., 3. JAMSTEC, 4. NIED)

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

[S08-15] A stacking analysis of the tilt record prior to the 2011 great Tohoku earthquake*Hitoshi HIROSE^{1,2}, Aitaro Kato³, Takeshi Kimura² (1. Kobe University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. ERI, Univ. of Tokyo)

Room A | Regular session : S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

3:00 PM - 4:38 PM JST | 6:00 AM - 7:38 AM UTC | Room A F205+206

[S20] PM-2

chairperson:Takuto Maeda, Takuya Nishimura

3:00 PM - 3:03 PM JST | 6:00 AM - 6:03 AM UTC

[1A16-19-1add] President speech

3:03 PM - 3:18 PM JST | 6:03 AM - 6:18 AM UTC

[1A16-19-2add] Award ceremony

3:18 PM - 3:38 PM JST | 6:18 AM - 6:38 AM UTC

[S20-01] [Invited] Seismic tomography: New insights into seismotectonics, volcanism and geodynamics*Dapeng ZHAO¹ (1. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University)

3:38 PM - 3:58 PM JST | 6:38 AM - 6:58 AM UTC

[S20-02] [Invited] Flexible source-process imaging to illuminate a relationship between rupture growth complexity and fault geometry*Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

3:58 PM - 4:18 PM JST | 6:58 AM - 7:18 AM UTC

[S20-03] [Invited] Study on earthquake, tsunami, and volcanic phenomena using ocean-bottom pressure data considering solid-fluid coupled earth*Tatsuya Kubota¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:18 PM - 4:38 PM JST | 7:18 AM - 7:38 AM UTC

[S20-04] [Invited] Improvement of earthquake early warning and detection of characteristic seismicity based on identification of simultaneous earthquakes*Koji TAMARIBUCHI¹ (1. Meteorological Research Institute)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 31, 2023 9:30 AM - 10:45 AM JST | Tue. Oct 31, 2023 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏠 Room A F205+206

[S08] AM-1

chairperson:Futoshi YAMASHITA(NIED), Ryosuke Ando(University of Tokyo)

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

[S08-01] IODP JTRACK: Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench toward understanding fault strengthening and stress build-up processes

*Shuichi Kodaira¹, Kohtaro Ujiie², Takehiro Hirose¹, Weiren Lin³, Ryota Hino⁴, Yasuyuki Nakamura¹, Tatsuya Kubota⁵ (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. University of Tsukuba, 3. Kyoto University, 4. Tohoku University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-02] Development of a giant rock friction apparatus for understanding faulting phenomena over broad spatiotemporal scales

*Futoshi YAMASHITA¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Kurama Okubo¹, Sumire Maeda¹ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University)

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

[S08-03] Molecular Study of Rock Friction and Wear Mechanism Using a Pair of α -quartz Asperities

*Sheng Li¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

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

[S08-04] Influence of particle number on fluidization of sheared granular by vibration

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

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

[S08-05] Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaraş and Ekinozu, Türkiye, Earthquake Sequence

*Ryosuke ANDO¹, Dogan Kalafat², Haluk Ozener², Esref Yalcinkaya³, Yojiro Yamamoto⁴ (1. University of Tokyo, 2. KOERI, Bogazici University, 3. Istanbul University, 4. JAMSTEC)

IODP JTRACK: Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench toward understanding fault strengthening and stress build-up processes

*Shuichi Kodaira¹, Kohtaro Ujiie², Takehiro Hirose¹, Weiren Lin³, Ryota Hino⁴, Yasuyuki Nakamura¹, Tatsuya Kubota⁵

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. University of Tsukuba, 3. Kyoto University, 4. Tohoku University, 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2011年東北沖地震発生から13年となる2024年9月－12月に国際深海科学掘削計画(IODP) 東北地方太平洋沖地震震源断層掘削：JTRACK(Tracking Tsunamigenic Slips Across the Japan Trench)が実施される。JTRACKの主要目的は、「プレート境界断層浅部とその周辺の構成岩石や流体の物理的・化学的特性と、その時空間変化を理解することにより、巨大断層すべりや巨大津波を引き起こす要因を把握する」ことである。地震発生から13年後に再び震源断層を掘削するJTRACKは地震発生後のプレート境界断層の固着強度、断層周辺の応力蓄積過程を明らかにする貴重な機会となり、これまで取り組むことができなかった巨大津波を生成する海溝型地震準備過程に関する本質的な問い、即ち「巨大津波を生成するプレート境界浅部すべりの駆動源は何か、どのように応力を蓄積するか」に迫ることができる。この目的達成のため、JTRACKでは地震発生直後に行われた震源断層掘削JFAST(Japan Trench Fast Drilling Project)と同一地点、およびその海溝海側の海洋プレート上において海底から海洋プレート上面に至る連続コアの採取、孔内検層、孔内温度計測を実施する。2011年東北地震発生直後には海底地形調査、海底地震・地殻変動観測、地下構造探査、JFASTによる震源断層掘削などが行われ、50mを超える断層すべりがプレート沈み込み口で海底に突き抜けたこと、巨大地震の震源断層は厚さ数mの遠洋性堆積物から構成されていたこと、地震時の断層の摩擦係数は約0.1と非常に小さかったこと、などマグニチュード9の海溝型巨大地震の実態が初めて明らかにされた。しかしながら、それらの調査は「地震発生時」の実態を明らかにしたのみで、マグニチュード9の巨大地震を発生させた震源断層がどのようにして次の巨大地震の準備を行うか、巨大地震震源断層の固着強度、断層周辺の応力蓄積過程を明らかにすることはできなかった。JTRACKはその問題に取り組むための貴重な機会となる。本講演では、2011年東北沖地震発生直後から行われた深海調査・掘削の成果を総括するとともに、JTRACK、及び関連した広域的な深海調査の目的、計画、期待される成果について報告する。

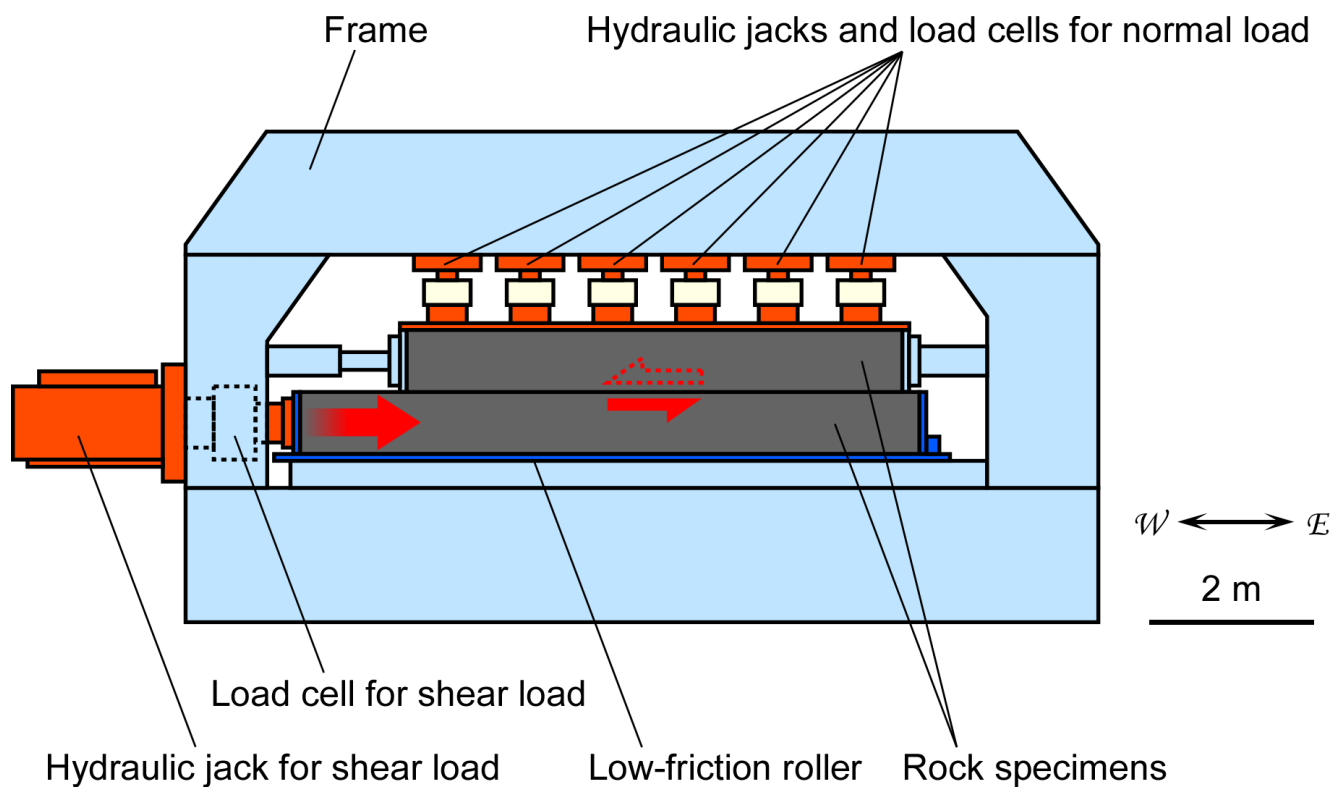
Development of a giant rock friction apparatus for understanding faulting phenomena over broad spatiotemporal scales

*Futoshi YAMASHITA¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Kurama Okubo¹, Sumire Maeda¹

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

地震の原因である断層摩擦すべりは、時間的にも空間的にも幅広いスケールに渡る現象であり、その統一的な理解のためには、観測・理論・実験等による多角的なアプローチが必要である。空間スケールに関する特徴に注目すると、観測と実験それぞれで推定された規模の異なる地震の応力降下量が広いスケールで調和的である (McLaskey et al., 2014; Yoshimitsu et al., 2014) 一方で、岩石の摩擦特性が断層面の大きさに依存して変化する、すなわち岩石摩擦のスケール依存性が実験的・理論的に指摘されており (Yamashita et al., 2015; Noda, 2023)、より広範なスケールでの検証が必要とされている。時間スケールに関しても、数秒～数分で断層すべりが停止する通常地震から数ヶ月間に渡り断層がすべり続けるスロースリップまでの広範に渡るスケールの現象が、隣接した、また一部は重複した地域で発生する複雑性が議論されている (例えばNishikawa et al., 2023)。また、ゆっくりとした震源核形成から高速な動的断層破壊への遷移過程を観察するには、現在のところ実験的アプローチ以外に手段がないが、その詳細な観察のためには震源の臨界核サイズを内包する模擬断層が必要とされる。さらに、大型岩石摩擦実験により、すべり量の累積に伴う断層面形状の発達や震源核形成及び断層破壊過程に影響を与えることも明らかとなっており (例えばYamashita et al., 2018; Xu et al., 2023)、断層面の空間不均質性を考慮に入れた検討が求められている。以上の理由から、我々はさらに大規模な模擬断層を長距離ですべらせる摩擦実験が必要と考え、それを可能とする新たな巨大岩石摩擦試験機を開発した。

実験ではインド産の変はんれい岩からなる一対の岩石試料を使用しており、一方の長さは6.0 m、もう一方の長さは7.5 mである。幅及び高さは共通で、それぞれ0.5 m、0.75 mである。図に示す通り、長い試料の上に短い試料を積み重ね、試験機のフレーム内に収めて実験をおこなう。したがって接触面 (模擬断層面) のサイズは長さ6.0 m × 幅0.5 mである。模擬断層面は初期表面の凹凸が面全体に渡って50 μm 以内に収まるよう研磨されている。上側試料と試験機フレームの間に設置した6本の油圧ジャッキによって垂直荷重が加えられ、それぞれのジャッキに個別に荷重計が接続されている。垂直載荷ジャッキ1本あたりの最大載荷量は2 MNであるため、模擬断層面へ与えられる最大垂直応力は $12 \text{ MN} / 3 \text{ m}^2 = 4 \text{ MPa}$ である。断層にせん断荷重を与えるためのジャッキが下側試料西側のフレームに固定されている。下側試料は低摩擦ローラーの上に設置されているため、せん断載荷ジャッキが与えるせん断荷重は模擬断層面のみが支えることとなる。このせん断載荷ジャッキの最大載荷量は12 MNである。載荷速度は0.01 mm/sから1 mm/sの間で自由に設定可能であり、最大変位距離は1 mである。垂直応力1 MPa、載荷速度0.01 mm/sの条件で予備実験をおこなったところ、多数のスティックスリップイベントを観測した。イベント発生にともなうせん断荷重降下量及びロードポイントにおける変位量から実験系の剛性を概算したところ、 $3.5 \pm 0.5 \text{ GN/m}$ と推定された。断層すべりに伴い発生する局所的な現象を詳細にモニターするため、断層面近傍に二軸半導体ひずみゲージ (共和電業 KSN-2-120-F3-11) を44枚、三軸半導体ひずみゲージ (共和電業 SKS-30282) を44枚設置、さらにAE計測用の圧電素子センサー (オリンパス V103-RM) を64個設置した。これらのセンサーを用いた測定により、断層すべりに伴う幅広い時空間スケールの現象を把握するとともに、すべり量の累積に伴う変遷を調査していく予定である。



Molecular Study of Rock Friction and Wear Mechanism Using a Pair of α -quartz Asperities

*Sheng Li¹, Eiichi Fukuyama¹

1. Kyoto University

Frictional instabilities of faults, a significant factor in triggering shallow earthquakes, have widely been recognized as a phenomenon governed by the wear of asperities on fault surfaces. However, there is still a lack of clarity regarding the wear mechanisms of asperities and their dynamical connections to friction. Here, at molecular level, we conducted a series of kinetic simulations with realistic atomic force field to explicitly reproduce multiple 3-D nanoscale wear processes under different normal forces. We extensively explored the friction and wear mechanisms by examining worn surfaces, total wear volume, wear volume rate with distance, and the links of total wear volume to friction work (i.e. integrating friction force over slip).

Our simulation was a sliding friction experiment and focused on the “running-in” period of smoothening asperities (Wang and Scholz, 1984). The surface area of two solid blocks was 23.77 nm×13.73 nm and each block contained an identical semi-sphere α -quartz asperity with radius being 3.40 nm. Initially, the two asperities were not contacted and the distance between semi-spherical centers was a radius. Then we pressed asperities together by applying normal force. The bottom of the lower block was fixed and a constant normal force and velocity were applied to the upper block where it was allowed to move in the fault normal (z-) direction. Additionally, periodic conditions were applied to the x- and y-directions while in the z-direction shrink-wrapping condition was applied. Furthermore, the sliding velocity was set at 10 m/s and the constant normal force was applied ranging from 1 nN to 4 nN.

Our results showed that the time-averaged friction force had a positive correlation to the normal force at nanoscale and scuffing wear was dominated in the normal force range we applied. This wear type could be due to the high hardness of α -quartz. Moreover, we observed that the total wear volume generally increased with the normal force but it did not show a clear positive correlation. In certain segments of the normal force range, a slight decrease could be observed. A similar phenomenon also occurred at macroscopic rotary shear experiment (Hirose et al., 2012), which could be related to the sliding velocity. On the other hand, we found that the wear volume rate increased nonlinearly with slip distance and it showed a positive dependence on the normal force. Finally, we confirmed that the friction work was proportional to total wear volume, which could be served as a potent indicator for predicting the volume of worn debris. These discoveries will offer a profound understanding of fault friction and wear mechanisms, laying the groundwork for modeling multi-scale friction constitutive laws.

Influence of particle number on fluidization of sheared granular by vibration

*Ryunosuke Sakamoto¹, Takahiro Hatano¹

1. Osaka University

ある震源から放射された地震波は他の地震を誘発しうる。これは、地震波による動的歪が断層に作用するためである。地震の動的誘発はnear-field(震源から10km以内)だけでなく、far-field(震源から1000km以上遠方)でも観測される。とりわけ、far-fieldの観測は、 $O(10^{-6-9})$ の動的歪が地震を誘発することを示した(e.g., Hill and Prejean 2015)。このような小さな動的歪によって地震が誘発される理由の一つは、振動によってガウジが流動化するためと考えられている。例えば、Ferdowski et al. (2015)は、粒子シミュレーションにより、振動によってせん断粉体が流動化することや、流動化に必要な動的歪の閾値(critical strain)が $O(10^{-6})$ となることを示した。しかし、critical strainが $O(10^{-6})$ より小さくなることを示した研究結果はこれまで報告されていない。このため、 $O(10^{-6})$ より小さい動的歪によって発生する動的誘発地震においても、振動によるせん断粉体の流動化が重要な役割を果たしうるかは明らかとなっていない。

Lerner and Procaccia (2009)は、粒子シミュレーションにより、粒子数が増えるほど粉体の降伏応力が低下することを示した。つまり、粒子数が増えるほど、より小さなせん断応力で粉体が流動化することを示した。critical strainにもこうした粒子数依存性はあるだろうか。つまり、粒子数が増えるほど、より小さな動的歪で粉体が流動化することや粒子数が増えることでcritical strainが $O(10^{-6})$ より小さくなることがあるだろうか。

本研究では、粒子シミュレーションにより、critical strainの粒子数依存性を調べた。具体的には、断層ガウジを2枚の基板で閉じ込め、片方の基板をバネ定数 k のバネを介して一定速度 V で引っ張るというモデルに、一過性の振動を印加することによって、critical strainの粒子数依存性を調べた。

数値計算の結果から、印加する振動周波数によらず、粒子数が増えるにつれcritical strainが小さくなることが分かった。とりわけ、第一共鳴周波数の振動を印加した場合、粒子数が1376ではcritical strainは $O(10^{-6})$ であったが、粒子数が22002ではcritical strainは $O(10^{-8})$ となった。これは、粒子数の増加によってforce chainが長くなることで、より小さな動的歪でforce chainを破壊できるようになるためと考えられる。

我々の結果は、 $O(10^{-6})$ より小さい動的歪によって発生する動的誘発地震においても、振動によるせん断粉体の流動化が重要な役割を果たすことを示唆している。

Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkiye, Earthquake Sequence

*Ryosuke ANDO¹, Dogan Kalafat², Haluk Ozener², Esref Yalcinkaya³, Yojiro Yamamoto⁴

1. University of Tokyo, 2. KOERI, Bogazici University, 3. Istanbul University, 4. JAMSTEC

The 2023, M 7.8, Kahramanmaras earthquake (mainshock) occurred on February 6th, mainly along the plate interfaces called the East Anatolia fault ruptured toward NE (accommodating the motion between Anatolia and Arabia) and the Dead Sea Fault Zone ruptured toward SW (between Arabia and Africa). Followed in 9 hours, the M 7.6, Ekinozu earthquake (largest aftershock) was hosted by the subsidiary fault system called the Cardak –Surgu faults. This earthquake sequence presents significant complexity in fault geometry and rupture patterns. The observed hypocenter indicated that the mainshock rupture nucleated away from the East Anatolia fault (EAF) and was probably located on a subsidiary fault called the N-S striking Narli fault. The Narli fault is close to the area called Maras Tripple Junction (MTJ) where Anatolian, Arabian and African plates meet. We performed a set of stress tensor inversions and dynamic rupture simulations. We used the FDP-BIEM developed by Ando, 2016, for the fully-dynamic rupture simulation. The 3-D fault geometry is built based on the previously compiled surface fault traces with constant dip angles. Based on the stress inversion using the aftershock focal mechanisms (M>4), we find that the maximum horizontal principal stress axis around the Cardak –Surgu faults is slightly rotated clockwise from that around EAF. The Narli fault and EAF are favorably oriented. The simulation can reproduce a number of coseismic features determined by seismic and geodetic observations. Such features include 1) the rupture propagated from the Narli fault to EAF; 2) initially propagated towards the northeast on EAF, and eventually to the southwest; 3) the rupture to the south is posed at a bend (MTJ) before entering into the Dead Sea Fault zone (the Amanos Fault), further delaying the southwest rupture; 4) the possible super-shear on the Amanos Fault; 5) the locations of large slip areas determined by the SAR data. Moreover, the positive dynamic Coulomb stress change (~ 2 MPa) is simulated in the middle of the Cardak Fault, while the Surgu Fault experienced a smaller amplitude. These characteristics are understandable as the primary effect of the fault geometry. Acknowledgment: This work used computational resources of Earth Simulator provided by JAMSTEC through the HPCI System Research Project (Project ID: hp220105).

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 31, 2023 11:00 AM - 12:15 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏠 Room A F205+206

[S08] AM-2

chairperson: Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo), Daisuke Sato (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

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

[S08-06] The Investigation of Stress Condition of the 2014 Northern Nagano Earthquake with Surface Rupture Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA¹, Junichi Miyakoshi¹, Naoki Iwata², Yuji Sasai², Akihiro Matsui², Keita Higashi² (1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. Chuden Engineering Consultants)

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

[S08-07] Numerical simulation of earthquake generation cycle using multiscale circular patch model

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

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

[S08-08] Episodic Aseismic Slip Events as Incomplete Nucleation of Seismic Slip due to Heterogeneous Stress Distribution

*Naoyuki KATO¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

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

[S08-09] 3D viscoelastic earthquake sequence simulation with plate-boundary fault and inland faults

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Stanford University)

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

[S08-10] Separating interlocking asperities from high slip deficit zones along the Nankai Trough, Japan

*Daisuke Sato¹, Takane Hori¹, Yukitoshi Fukahata² (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

The Investigation of Stress Condition of the 2014 Northern Nagano Earthquake with Surface Rupture Dynamic Rupture Simulation

*Kenichi TSUDA¹, Junichi Miyakoshi¹, Naoki Iwata², Yuji Sasai², Akihiro Matsui², Keita Higashi²

1. Institute of Technology, Shimizu Corporation, 2. Chuden Engineering Consultants

動力学的断層破壊シミュレーションを行う上で重要な初期応力条件を設定する方法として、Aochi and Tsuda(2023)では深さ依存性を考慮した方法を提案し、地表地震断層を伴った2014年長野県北部地震への適用を試みた(Tsuda・他, 2022)。得られたシミュレーション結果は既往の震源インバージョン結果(引間・他, 2015)と比較して、最大すべりが2倍以上、断層面積が60%程度であった。これらの原因として、アスペリティ領域内では応力降下量を深さに依存して変化させているため、その領域内で応力降下量が負になってしまい、アスペリティの周辺で断層破壊が急激に減速してしまった等、動力学的断層破壊シミュレーションの初期応力パラメータの条件設定に関する課題が考えられた。そこで本研究では、地表地震断層を伴った2014年長野県北部地震を対象に、地表面の変位に着目した動力学的断層破壊シミュレーションの初期応力条件の設定について検討した。直応力とせん断応力はAochi and Tsuda(2023)を踏まえて設定し、2つのアスペリティと背景領域からなる特性化震源モデル(Tsuda・他, 2022)の応力降下量は、アスペリティ領域で負にならないように浅部のアスペリティ1で2.0 MPa、深部のアスペリティ2で7.4MPa、背景領域で0MPaの一定値とした。Dcに関しては、断層破壊が伝播するように、試行錯誤してアスペリティ領域は0.4m、背景領域は0.9mと設定した。図1に設定した応力降下量分布を示す。媒質に関しては、地震発生層より浅い部分が深さ0.4kmとあまり大きくなく、単純な条件での検討を主眼としていることから、均質媒質($V_s 3.4\text{km/s}$, $V_p 6.0\text{km/s}$, $\rho 2.75\text{t/m}^3$)とした。なお、地震発生層より浅い部分の媒質の違いが結果に与える影響については今後の課題である。また、初期破壊領域は引間・他(2015)を参考に、アスペリティ2の上端部分に設定した(図1の黒い口の領域)。図2にはシミュレーションで得られたすべり分布を示す。最大すべりは1.4mで、引間・他(2015)による値(1.1m)と同程度であった。また、推定された地震モーメント($3.81\text{E}+18\text{Nm}$)とSomerville・他(1999)の規範に基づいて算定した断層面積(262.2km^2)は、引間・他(2015)の地震モーメント($3.08\text{E}+18\text{Nm}$)、断層面積(292.5km^2)と同程度であった。図3aには、断層近傍の地点(NGN005)における計算と観測の変位波形の比較を示す。両者の変位波形には、同じ0.5Hz以下のローパスフィルターを掛けている。シミュレーションでは純粋な逆断層を仮定しているため、計算波形のFP成分は振幅がほぼゼロであり観測波形を説明できていないが、FX成分とUD成分(鉛直成分)では計算波形と観測波形の最終変位は概ね対応している。図3bにシミュレーションによる地表の鉛直変位分布を、図3cにはInSARによる鉛直変位分布を示す。図より、アスペリティ1の直上の鉛直変位は計算では約50cm、InSARでは約30cm程度で概ね対応している。また、大きな鉛直変位が生じている範囲(図3bの白い口の領域)も観測記録(図3cの白い口の領域)と概ね対応している。以上より、本検討で設定した初期応力条件は、2014年長野県北部地震の地表面の変位を概ね再現できたものと考えられる。

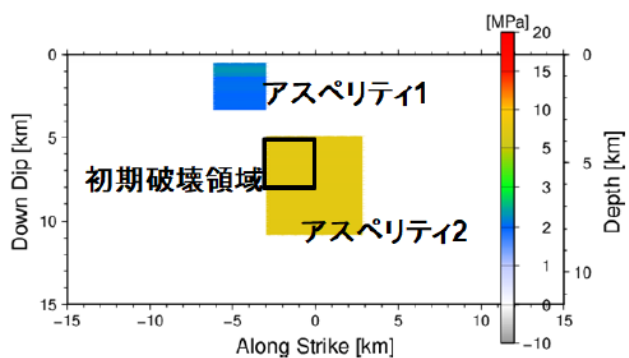


図1 シミュレーションで設定した応力降下量
分布(図中の□は初期破壊領域)

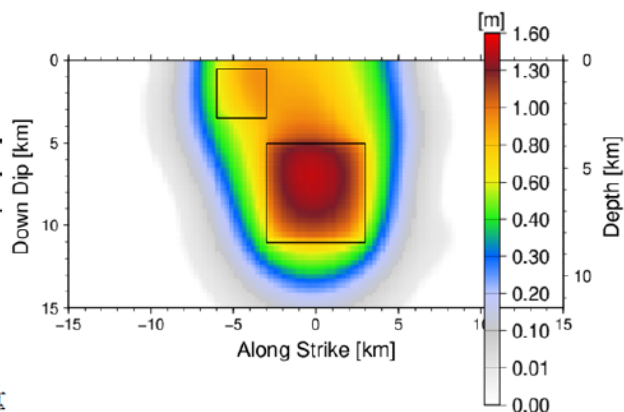


図2 シミュレーションによるすべり分布

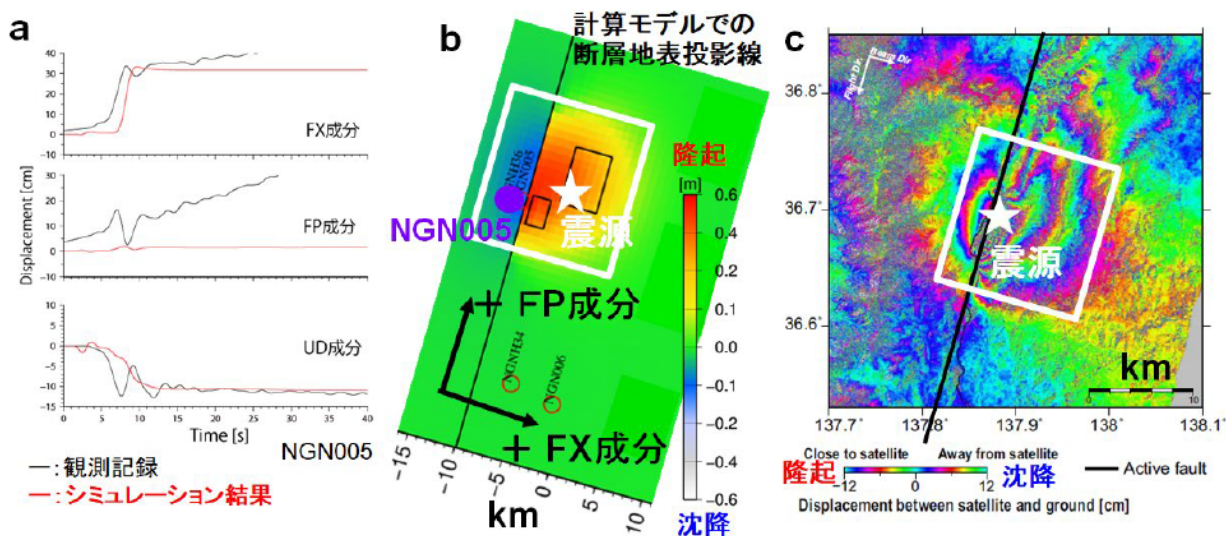


図3 鉛直変位の観測記録との比較 a: 断層近傍の地点(NGN005)での変位波形の比較, b: シミュレーション結果の鉛直変位分布(図中の黒い□はアスペリティ)c: InSAR の地震後の変位分布(黒線は計算モデルでの断層地表投影線, 白い□は図 3b での同じ白い□の領域に対応)

Numerical simulation of earthquake generation cycle using multiscale circular patch model

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

1. Univ. of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. BRGM, France, 4. ENS-CNRS PSL, France

【はじめに】地震活動が活発な地域では、様々な規模の地震が発生しているが、マグニチュードの分布は、一般的にべき乗則に従い、小さい地震ほどたくさん発生している。日本海溝を対象とした我々の先行研究では、過去に発生したM9地震とM7クラスの地震の震源域を矩形や円でモデル化した地震発生サイクルの数値シミュレーションを行ってきた [Nakata et al., 2016; 2023]。これらの先行研究で再現した地震活動は、過去に発生した地震の一部に過ぎない。そこで、本研究では、地震サイクルを通した長期にわたる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Dc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、三陸沖領域にのみ着目する。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、Mj = 7.1~7.6の6地震、3番目はMj = 6.6~7.2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・Mj = 5.6~6.5の362地震を、4番目のグループとして追加した。

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、Dc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】Ide and Aochi [2013]に倣って、全ての地震をそのままLの不均質に反映させると、グループ4の多数のパッチが合わさって見かけ上大きなパッチとなり、モデル領域のほとんどをカバーしてしまうため、階層構造が不明瞭になる。その結果、過去の地震のすべり分布の多くを、シミュレーションで説明することはできなかった。そこで、距離の近い地震をまとめてグループ4のパッチ数を1/10以下に減らしたところ、複数のパッチが適度に重なり合った4階層の構造によって、中~大規模地震が、複雑なすべり分布や繰り返し間隔を示すようになった。講演では、いくつかのモデルの結果を比較することで、階層構造を取り入れた効果について議論する。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。

Episodic Aseismic Slip Events as Incomplete Nucleation of Seismic Slip due to Heterogeneous Stress Distribution

*Naoyuki KATO¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

速度・状態依存則を用いた数値シミュレーションにより、様々な非地震性すべりの発生や複雑な地震サイクルの説明が可能になっている。Wu and Chen (2014)は、断層面上の速度弱化域 ($a-b < 0$) において摩擦特性が一様であっても、速度弱化域の一部が破壊されるような小地震が発生することを示した。これは、速度弱化域全体を破壊するような大地震発生後には速度弱化域のせん断応力がほぼ動摩擦応力まで一様に低下し、その後、深部の速度強化域 ($a-b > 0$) での安定すべりにより速度弱化域の最深部でせん断応力が増加するために応力の不均一性が形成され、速度弱化域の最深部のみが破壊される小地震が発生するためである。このような小地震は、摩擦パラメータから決まる破壊核臨界長 h^* が速度弱化域の幅 W よりも十分に短い場合に実現する。さらに、Cattania (2019)は、 W/h^* が十分に大きい場合には、速度弱化域を部分破壊する様々な規模の地震が発生し、地震の規模別頻度分布がべき乗則に従うことを説明した。浅部の地震発生域と深部の安定すべり域での摩擦特性の違いによる不均一な応力分布はごく普通に生じると考えられ、非地震性すべりの発生過程にも影響する可能性がある。非地震性エピソードすべりの発生に着目して数値シミュレーションを行った。

均質半無限弾性体中の断層を考え、摩擦は速度・状態依存摩擦則に従うとする。浅部では速度弱化を深部では速度強化の摩擦特性を仮定した。有効法線応力と摩擦パラメータである特徴的すべり量 L は断層面上で一様であるとする。 L ($\propto h^*$) を変化させることにより、幅広い W/h^* について地震サイクルの数値シミュレーションを行った。また、摩擦パラメータ a と b の比 a/b の効果についても調べた。その結果シミュレーションで得られた地震サイクルのパターンを図に示す (Kato, 2023)。 W/h^* が100程度よりも大きいと、先行研究で示されたように、速度弱化域全体を破壊する大地震と速度弱化域の一部を破壊する小地震が発生し、複雑な地震サイクルが現れる。 W/h^* がやや小さい場合、速度弱化域全域を破壊する大地震に先行して、速度弱化域の一部での非地震性エピソードすべりが発生する。これは、速度弱化域の最深部での応力集中により非地震性すべりが発生し破壊核が形成されかかるが、破壊先端が浅部の低応力域に入ることにより、破壊伝播が停止してしまうためである。その後、ほぼ同じ場所で再びエピソードすべりが発生するが、速度弱化域内部のせん断応力は時間の経過により上昇しているために破壊は停止されず、破壊伝播は加速されて地震性すべりにまで発展する。 W/h^* がさらに小さくなると、速度弱化域の一部でのエピソードすべりは発生せず、速度弱化域全域を破壊する大地震が繰り返し発生する。

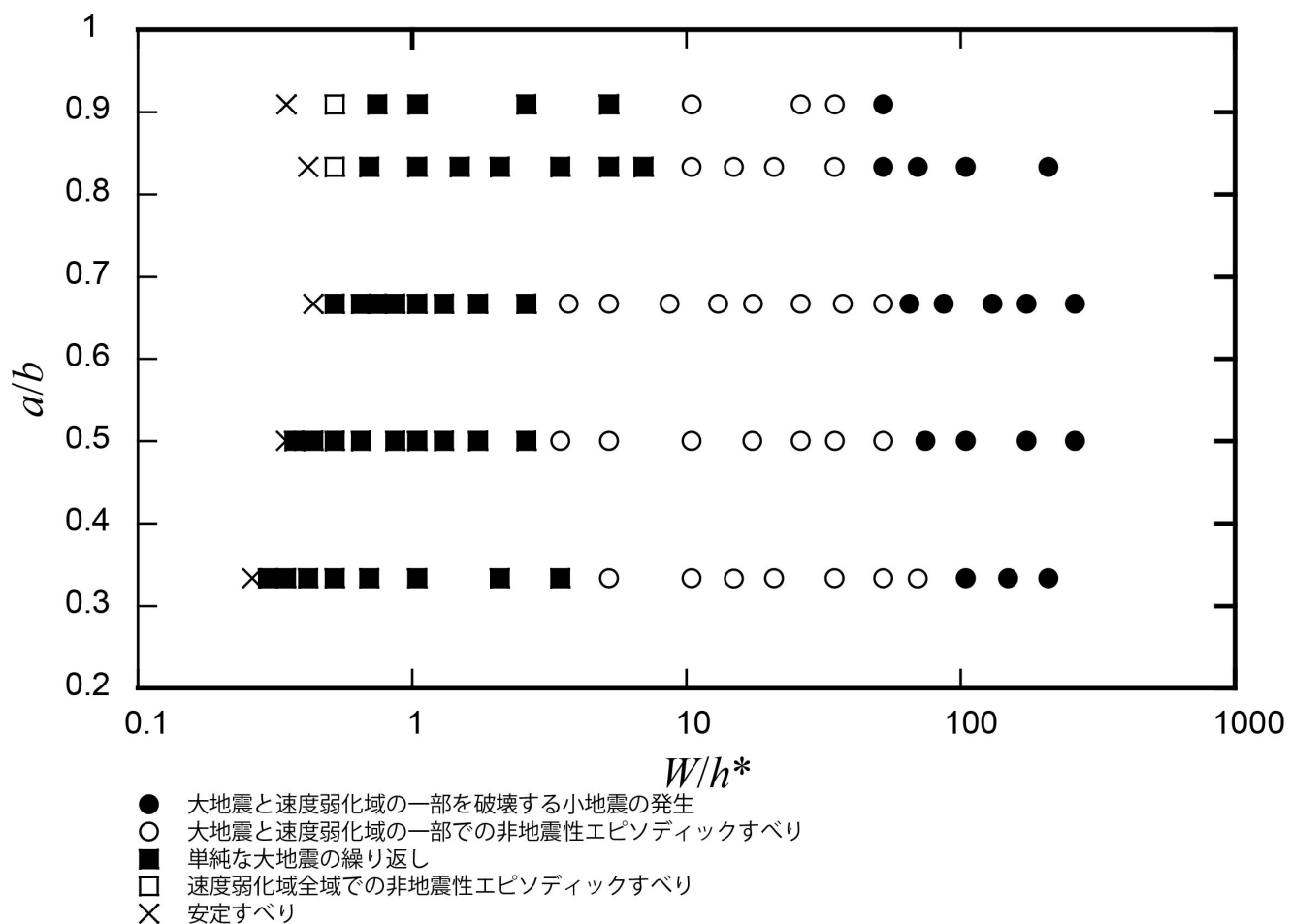
スロースリップイベントは、大地震が発生する速度弱化域とその浅部または深部の速度強化域のとの境界域で多く発生するが、地震発生域内でのイベントも大地震発生との関連で重要である。本研究で示したように、速度弱化域内の摩擦特性が一様であっても、深部の安定すべりによるせん断応力の不均一分布により非地震性エピソードすべりが発生する。これは途中で止められた（成功しなかった）破壊核形成過程であり、時間が経過して速度弱化域のせん断応力が増大すると再び破壊核形成過程が生じて大地震が発生する。

文献

Cattania, C. (2019). *Geophys. Res. Lett.*, 46, doi: 10.1029/2019GL083628.

Kato, N. (2023). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, doi: 10.1785/0120230048.

Wu, Y., and X. Chen (2014). *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, doi:10.1002/2013JB010779.



3D viscoelastic earthquake sequence simulation with plate-boundary fault and inland faults

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹

1. Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Stanford University

沈み込み帯周辺の応力場は、内陸地震やプレート境界地震、アセノスフェアの粘弾性緩和や海洋プレートの定常的な沈み込みなど多くの要素の影響を受けており、その結果沈み込み帯周辺の応力場は時空間的に複雑なものになっている。例えば、2011年の東北地方太平洋沖地震後には東北日本の歪速度の長波長成分が収縮から伸長に転じた一方、新潟神戸歪集中帯における歪速度の短波長成分は地震後も収縮を続けた

(Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016)。また、東北日本ではプレート境界地震による応力降下にも関わらず内陸では応力が長期的に蓄積し、逆断層型の地震を引き起こしている。

しかし、内陸の断層に応力が蓄積するメカニズムは明らかになっていない。また、内陸活断層における地震、プレート境界地震、アセノスフェアの粘弾性緩和の相互作用を地震シークエンスシミュレーションの枠組みでモデル化した研究はまだなされていない。そこで本研究では、弾性媒質中に断層を表す面とリソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)を表す面をおき、それぞれに適切な境界条件を与えて準動的に解く手法を提案する。

手法

まず、内陸に応力が蓄積するメカニズムについて考察するため、海洋プレート上面と下面、大陸プレート下面を表す面を用意し、海洋プレートを表す面の端に速度境界条件を与えて駆動するモデルを作成した。そして非地震性滑りを再現できるようにhbi (Ozawa et al. 2023)を書き換えたコードを用いて、定常状態になるまで時間発展させ、プレートが定常的に沈み込む時のそれぞれの面の変位速度分布を求めた。このようにして得られた変位速度分布から、Nikkhoo and Walter, 2015のグリーン関数を用いて沈み込み帯周辺の応力場を計算した。本研究では、プレートの形状や速度境界条件の値を変えつつ応力場を計算し、応力蓄積メカニズムを調べた。

次に、内陸地震、プレート境界地震、粘弾性緩和の相互作用を再現するために、このモデルに内陸断層を追加し、海洋プレート上面の一部をプレート境界断層にした。そして境界条件として断層には速度・状態に依存する摩擦則(RSF則)を、その他の面(LAB)には粘性抵抗を与えた。そして前述のコードを用いて準動的な地震シークエンスシミュレーションを実行した。なお、LABに与えた境界条件の妥当性は、解析解(Savage and Prescott, 1978)の存在するモデルで粘弾性緩和による地表面変位を計算し、解析解と本手法の結果を比較することで検証した。

予備的結果と今後の展望

定常的なプレートの沈み込みによる応力場を計算したところ、大陸プレート内に引張応力場が形成された。また、海洋プレートの曲げにより、海洋プレート浅部には引張応力場が、海洋プレート深部には圧縮応力場が形成された。

また、断層を追加して準動的シミュレーションを行ったところ、プレート境界断層では数百年周期で地震が発生した。プレート境界地震により、LABでは粘弾性緩和が発生し、内陸断層では応力が過渡的に変化した。また内陸の断層では、プレート境界地震による応力降下にも関わらず、長期的に応力が蓄積し正断層地震が発生した。内陸の断層で発生した地震の周期はプレート境界における地震の周期より1桁大きかった。

今後は、内陸に圧縮応力場が形成されるメカニズムを明らかにするとともに、2011年東北地方太平洋沖地震前後の内陸断層の地震や粘弾性緩和をプレート境界地震と同一の枠組みでシミュレートし、地表面変位の観測結果や地震活動などを再現することを目指す。

Separating interlocking asperities from high slip deficit zones along the Nankai Trough, Japan

*Daisuke Sato¹, Takane Hori¹, Yukitoshi Fukahata²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

地震時・地震間の断層滑りの推定法は、表現定理に基づく滑りインバージョンとして確立されている(Ide, 2007)。一方で、対応する断層摩擦特性の推定は、特定の物理モデルを採用することに由来するモデルエラーがあり、種々の結果は容易には比較できない。本研究では、特定の摩擦則を仮定せずに得られる断層摩擦の情報とは何かを追求する。結果として、物理モデリングでいうアスペリティにあたる、摩擦則本来の意味での固着域を地震間の測地データから直接に推定できることがわかった。この手法を実データに適用し、南海沈み込み帯の固着域と高滑り欠損域を分離する。

解析は、相補性(Smai & Aochi, 2017)として知られる、摩擦運動の普遍的性質を原理にする。ここで相補性とは、摩擦境界では滑り量か剪断応力のどちらかがほぼ時間一定であることを指す。ゼロ滑り速度と定応力の二相は、いわゆるスティック・スリップにあたり、応力を蓄積する固着時のアスペリティと定常的にクリープする領域の物理的相である。こうして、固着したアスペリティの推定は、特定の摩擦則に依拠することなく、従来研究されてきたスティックスリップモデル (e.g., Bürgmann et al., 2005) のインバージョン解析に帰着する。スティックスリップインバージョンの観測方程式は、所与のスティックスリップのバイナリ変数に対する混合境界値問題(クラック問題)を設定し、これを滑り分布について解き、その滑り分布を表現定理で地表変位に変換するという一連の手続きで計算される(Johnson & Fukuda, 2010; Herman et al., 2020)。同推定は素朴には非線形でかつ不安定であるため、我々はアスペリティ形状を円形パッチの重ね合わせで表し、円の中心・半径・また個数を最適化することでこの逆問題を解いた。そのように解くことで、従来のスティックスリップインバージョンで見られた、粗い離散格子を用いた場合の推定値のグリッド依存性や稠密離散化で生じる解の不安定性(Herman et al., 2020)や、非線形問題における事前情報使用時の客観的超パラメータ決定の課題(Johnson & Fukuda, 2010)を回避している。

実データ適用では、GEONETの陸上GNSSデータとYokota et al. (2016)が取得した海域GNSS-Acousticデータを解析した。まず、三次元弾性構造を考慮したHori et al. (2021)のグリーン関数と、グリーン関数の不確定性を確率変数として顕に考慮するYagi & Fukahata (2011)の方法を併用し、従来のな滑り欠損推定を行った。結果、3つの100-200kmの広がりを持つ高滑り欠損域が推定された。これらは、1944年東南海・1946年南海地震の震源域(Baba & Cummins, 2005)、および2018-2019年豊後水道長期スロースリップ域(Seshimo & Yoshioka, 2022)に概ね対応している。次に、上述のスティックスリップインバージョンを実施すると、それら3つの高滑り欠損域に対応する、50-100km幅の3つのアスペリティが検出された。これは、高滑り欠損域は必ずしも固着していないという最近の報告(Herman et al., 2020; Lindsey et al., 2021)と合致するのみならず、低速・高速破壊を生じるアスペリティは地震間においては区別なく固着域であることを示唆している。3つのアスペリティは空間的に明確に分離していることが確認されたが、一方で推定すべり欠損域については1946年南海地震と2018-2019年豊後水道長期スロースリップに対応する2つは重なっていた。南海沈み込み帯の巨大低速・高速地震の摩擦的アスペリティは、定常的クリープ領域によって隔てられてこそのものの、周囲の滑り遅れを介する互いの弾性作用圏にある。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Tue. Oct 31, 2023 1:30 PM - 2:45 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 4:30 AM - 5:45 AM UTC | 🏠 Room A F205+206

[S08] PM-1

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Hitoshi HIROSE (Kobe University)

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

[S08-11] Analytical treatment of transition condition between slow and fast earthquakes and its validity

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

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

[S08-12] Slow and fast earthquakes and earthquake modeling

*Satoshi IDE¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

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

[S08-13] Mega-earthquake potential along the Peruvian subduction zone based on shear stress build-up and the earthquake energy balance

*Nelson PULIDO¹, Juan Carlos Villegas-Lanza² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Instituto Geofísico del Perú)

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

[S08-14] Inter-plate sluggish slip: its initiation and growth

*Yoshio FUKAO¹, Hiroko Sugioka², Ryo Furue³, Tatsuya Kubota⁴ (1. JAMSTEC, Yokohama Institute, Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Kobe Univ., 3. JAMSTEC, 4. NIED)

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

[S08-15] A stacking analysis of the tilt record prior to the 2011 great Tohoku earthquake

*Hitoshi HIROSE^{1,2}, Aitaro Kato³, Takeshi Kimura² (1. Kobe University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. ERI, Univ. of Tokyo)

Analytical treatment of transition condition between slow and fast earthquakes and its validity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹

1. Dept. Phys. Sci., Aoyama Gakuin University

バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用によって生じるゆっくり・高速地震の遷移条件を解析的に取り扱う。ゆっくり地震と高速地震の違いは、それぞれブロックのエネルギーバランスを表す方程式の解が3つまたは1つの正の実数解を持つ場合に対応することを既に報告している。ここではある近似の下で解の個数の条件を解析的に求め、また数値計算も同時に行いその近似の有効性や妥当性を議論する。

ブロックの滑り前後のエネルギー変化を表す関数を $F(u_f)$ とする。ここで u_f は一回の地震の滑り量である。 F は滑り前後のバネに蓄えられたエネルギーの差から動摩擦力がした仕事を引いたものであり、 $F(u_f)=0$ がエネルギー保存を示すため、この解が実際の地震の滑り量として実現されることになる。 $F=0$ が複数の正の実数解を持つ場合は、最小の解が実現される。ここでは $F=0$ が3つの正の実数解を持つ場合を考える。 $F(0)=0$ （滑らなければエネルギー変化もない）であり、かつ $dF(u_f)/du_f|_{u_f=0}<0$ という条件も存在することに注意する。するとこの時は $dF(u_f)/du_f=0$ が3つの正の実数解を持っており、その解を $u_1<u_2<u_3$ とすれば $F(u_1)<0$, $F(u_2)>0$ かつ $F(u_3)<0$ である。

続いて $F=0$ の正の実数解が縮退する場合を考える。境界条件から $F(u_1)<0$ は常に成り立つ。これに加えて $F(u_3)<0$ のままであるとすると、 $F=0$ の正の実数解は $F(u_2)=0$ になった時に2つになり、 $F(u_2)<0$ になった時に1つになる。またこの時実現される解もそれまでの最小のもの（ゆっくり地震に対応）から最大のもの（高速地震に対応）へと不連続に大きくジャンプする。すなわち $F(u_2)=0$ となる条件を解析的に書ければ、両地震への遷移条件が理解できるということになる。

ここで、 $dF/du_f=0$ の式と $F(u_2)=0$ の式に $u_2>>1$ とすると、 u_2 の二次方程式が得られる。これが正の実数解を持つ条件、すなわち判別式 >0 が、相転移の解析的表現である。 F には滑り開始時の流体圧や空隙率がパラメータとして含まれるが、それらが作る相空間中で両地震の振る舞いの境界を示せるとも言える。そして数値計算の結果、実際に多くのケースで先の近似は有効であることが確かめられた。地震滑りの振る舞いの予測に重要な役割を果たす解析的表現が得られたと言える。

Slow and fast earthquakes and earthquake modeling

*Satoshi IDE¹

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

地震は断層運動といえるが、断層運動なら地震というわけではない。Leid (1911)の弾性反発説や、Brace and Byerlee (1966)の地震はstick-slipだという考え方によって、断層には固着とすべりという2つの状態があり、「地震＝断層すべり」という常識が形成された。そして断層のすべりのモデルならば、地震のモデルだと考えられてきた。ところが21世紀になって、スロー地震が発見され、この常識は修正を迫られている。スロー地震も、ほぼ弾性反発や、stick-slipとみなすことができるからである。

スロー地震とは何か？Ide and Beroza (2023)は、16年前にIde et al. (2007)によって提案されたスロー地震のスケール法則の再検討を行った。16年間の観測的証拠の蓄積によって、現在では1秒以下から数か月以上までの様々な時定数で、スロー地震を観測することができ、その地震モーメント M_0 は継続時間 T に比例することが確認できる。但し、すべての現象はノイズなどの影響から、検出限界ぎりぎりの信号しか出さない。観測できない様々な現象の存在を仮定すれば、 M_0 と T の比例関係は、スロー地震の地震モーメントレートの上限を規定する関係と理解すべきである。地球内部の様々な変形現象は、この法則に規定されており、様々な断層のすべり運動が、スロー地震としてこの法則に従って発生する。これまでに様々な物理素過程を含むメカニズムが提唱されているように、スロー地震を生み出すメカニズムは多様な可能性があるが、すべてこの法則に従うようだ。見方を変えれば、この法則に従わないユニークな変形現象こそが、普通の地震である。普通の地震とは、実は普通でない変形現象ともいえる。

地震の何が特別かといえば、地震波を放出する点である。地震時には、断層のすべりが地震波の伝播速度に近い速度で進展することで、断層面における非弾性エネルギー損失を抑え、弾性エネルギーを効率的に地震波エネルギーに変換する。スロー地震の進展には、地震波のサポートがないので、この効率的な変換ができない。当たり前であるが、この高速の破壊伝播と地震波の放出なしに、地震をモデル化することはできない。しかし、多くの「地震のモデル」は、この必要条件を満たさない。1次元のバネとブロックのモデルは、非常によく検討されるが、もちろん地震波を出さない。これを連結したBurridge and Knopoff (1967)のモデルと、その派生形の様々な臨界現象モデルは、Gutenberg-Richter則を再現するので人気だが、地震波は出さない。Rate-and-State摩擦則を用いた地震サイクル計算も数多くなされている。多くの地震サイクル計算では、計算コストを下げるために、放射ダンピングの近似が用いられている。この準動的サイクルモデルにおいては、破壊の伝播速度は、非現実的に遅い。

現象の一面をとらえるために単純化したのがモデルであり、その一面の議論には役立つが、時に単純化の制約を超えた議論が誤った認識を生み出すことがある。例えば1次元のバネのブロックの安定性解析は、自発的なすべりの発生を議論するには良いが、自発的＝地震波を出すわけではない。スロー地震も自発的なすべり進展現象である。Gutenberg-Richter則は、地震について知られていたが、スロー地震の頻度統計も似たようなべき法則になるという指摘がある。べき法則を生み出すモデルが、スロー地震のモデルであっても問題は無い。実際に臨界現象モデルを用いて、テクトニック微動が再現できるという指摘がある。準動的サイクルモデルの伝播速度を決めているのは、静的なエネルギーバランスである。すべりの進展と停止も、静的なエネルギーバランスが決める。つまり進展の条件は、スロー地震と同じである。このような計算で不均質な媒質中の破壊伝播の可能性を計算すれば、当然過小評価になる。

以上まとめれば、これまで地震のモデルと考えられていたものには、スロー地震のモデルとして見直すべきものがたくさんある。スロー地震が存在することが地震学の常識になった今、その認識に立ってモデル体系を再構築する必要があるだろう。

Mega-earthquake potential along the Peruvian subduction zone based on shear stress build-up and the earthquake energy balance

*Nelson PULIDO¹, Juan Carlos Villegas-Lanza²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Instituto Geofísico del Perú

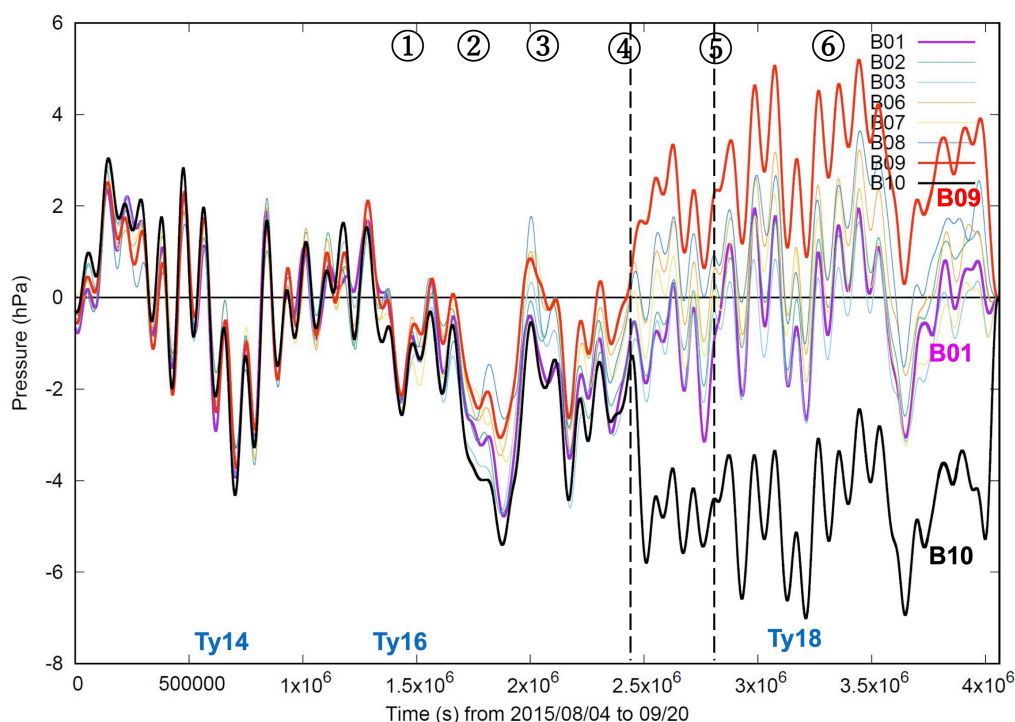
海溝帯における巨大地震発生の評価は通常、地域の地震履歴に基づいて行われる。しかしながら、地震カタログに含まれる情報は巨大地震間において不完全である。さらに、応力とひずみの蓄積や、破壊に対する断層強度等は、プレート境界で発生する大地震の破壊物理的プロセスの科学知見を、組み込む必要がある。日本の南海・東南海沈み込み帯における最近の研究では、すべり欠損領域が、プレート境界での断層すべりを支配する局所的な摩擦強度特性等を、直接反映していないことが示されている。したがって、地震発生の物理的条件を解明するために、プレート境界の力学カップリングモデルと地震エネルギー収支が提案されている (Noda et al. 2021)。このモデルでは、ひずみエネルギーが断層破壊エネルギーを超えない限り、地震破壊は起こらない。一方、巨大地震の断層破壊中には極めて強い動的弱化が発生することが、様々な摩擦実験データや動的破壊数値モデル等から明らかになりつつある。本研究では、強力な動的断層弱化効果を考慮した地震エネルギー収支に組み込み、それをペルーの海溝型巨大地震発生ポテンシャル評価のために適用する。破壊エネルギー (G) を計算するには、海溝型地震の震源断層破壊過程モデルのグローバルデータベースと、2D 有限幅滑り動的破壊モデル (Pulido 2023、準備中) から得られた平均断層滑りと G のスケーリング法則を使用する。本研究では、地震滑り欠損モデル (ISC) (Villegas-Lanza et al. 2016) と、個々のセグメントごとの過去最大規模の地震からの発生期間を用いて、ペルーの沈み込み沿岸帯に沿った、せん断応力蓄積レートと、総蓄積せん断応力分布を計算した。この情報を用いて、複数の破壊シナリオを設定し、各地震シナリオの破壊エネルギーとエネルギー収支の推定に基づいて、巨大地震発生の可能性について検討した。その結果、ペルー中部（リマ地域）とペルー最南部（チリ近郊）の沈み込み帯が、数十年以内に、それぞれ Mw~8.9 と Mw~8.5 の巨大地震を発生させるための、必要物理条件を満たすことを示している。近年、世界中の ISC モデルのデータが大量に利用可能になったことと、プレート境界の断層破壊エネルギーのスケーリング法則との統合において、本研究の手法を用いて、世界中の沈み込み帯の大地震発生ポテンシャルの一次評価は可能であると考えられる。

Inter-plate sluggish slip: its initiation and growth

*Yoshio FUKAO¹, Hiroko Sugioka², Ryo Furue³, Tatsuya Kubota⁴

1. JAMSTEC, Yokohama Institute, Research Institute for Marine Geodynamics, 2. Kobe Univ., 3. JAMSTEC,, 4. NIED

1. 序 伊豆・小笠原海溝のプレート沈み込みは非地震性滑りの代表例である。この海溝内側水深約5000mの海底で、2015年5月末から1年間、高感度水晶式水圧計によるアレー観測が実施された。我々はこの記録を解析し、M6.0の地震がアレー直下に発生したこと、その直後と3.5日後に、通常地震よりは遅く Slow Slip Eventよりは早い滑り現象 (Rapid Aseismic Slip) を見出した(Fukao et al., 2021, JGR)。今回は、(1) これらはほぼ1か月にわたってズルズルと続く滑りの中の数イベントであり、他にもいくつか主要なイベントがあるべきこと、(2) この期間、海底の上下変形は時間とともに増大し、最終的に水平距離10kmで高低差5cmを生む海底変動が生じたこと(3) sluggish滑りは、台風16号がアレーに最接近し海底水圧が低下したときと同期しているように見えること、を示す。2. 記録 図は8月4日から47日間の8観測点の海底水圧記録である。NaotideとLowpass-filterを用いて海洋潮汐を除去しようとしたが適切なfilteringが未だできていない。以下、観測点B01,B09,B10の水圧変化(紫、赤、黒色の太線)の時間変化を追いかける。①台風16号が接近するまで海底に有意な高低差運動なし。②台風接近に伴う海底水圧の低下をきっかけに海底の高低差運動始まる。③B10の相対的隆起とB09の相対的沈降進行。④M6地震と直後のRapid Aseismic Slip (2)によりB10の相対的隆起とB09の相対的沈降が劇的に進行(2)、⑤地震から3.5日後のRapid Aseismic Slip (2)によりB10に対するB01の相対的沈降が急激に進行、⑥B10に対するB09の相対的沈降が続くがその勢いは次第に弱まり活動は終息に向かう。3. 考察 このズルズル滑りの中から、これまでに前震・本震・余震型の地震1イベント、Rapid Aseismic slip 2イベントが検出されているが、記録は他にもイベント的な滑りがあることを示唆する。それらの一部がRapid aseismic よりも遅く、通常のslow slip eventsの範疇に仕分けされる可能性もある。伊豆・小笠原小笠原海溝では、こうした多様なモードの滑りの連鎖的発生がプレート間滑りの主流かもしれない。



A stacking analysis of the tilt record prior to the 2011 great Tohoku earthquake

*Hitoshi HIROSE^{1,2}, Aitaro Kato³, Takeshi Kimura²

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

Bletery and Nocquet (2023, Science; 以下 BN23) は、GEONET変位時系列データのスタッキング処理に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震発生直前の約2時間に、前兆的なスロースリップ (プレスリップ) が震源付近のプレート境界で起きていたと主張した。これに対して、Bradley and Hubbard [1] は、この変動は GNSS データに含まれる共通誤差 (Common Mode Error: CME) による見かけ変動であり、CMEを補正すると見えなくなることを指摘した。さらに、震源域から200 km以上離れたGNSS観測点のノイズしか含まないはずのデータのみを用いて、BN23 が示した「プレスリップ」のような見かけの変動を再現できることを報告しており、CME がこの見かけの変動の要因であることを主張している。そこで我々は GNSSデータとは独立なデータである防災科研 Hi-net 高感度加速度計 (傾斜計) のデータに対して BN23 と同様な手法を適用し、彼らの主張する本震発生直前の約2時間におけるプレスリップの有無を検証した。

岩手県、宮城県、福島県に位置する防災科研Hi-net 55 観測点の傾斜記録水平2成分によって記録された2011年1月はじめから3月11日の本震直前までの1分サンプリングデータを用いた。そのデータに BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を適用して潮汐応答成分を除去した。これらのデータに対して BN23 に準じた処理を適用した。まず本震発生時刻 (2011年3月11日14:46) の 48 時間前から本震までのデータを切り出した。その最初の24時間分、すなわち、本震の48時間前から24時間前までの中央値を各観測点・各成分で算出し、時系列全体から差し引いた。この2成分の時系列を $u(t)$ とする。また同期間のデータでノイズレベル σ を算出した。次に Okada (1992) によって各観測点における理論傾斜変化ベクトルを算出した。このとき、震源位置・震源メカニズムは BN23 で用いられている SCARDEC database (Vallée and Douet, 2016) の値を用いた。このデータベースにある震源メカニズムの2つの節面のうち、ほぼ西落ちの低角の面 (走向197度, 傾斜14度, すべり角84度) を震源断層とした。断層面積を $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ とし、 1 m のすべりを与えた際の各観測点での理論値を計算し g とした。これらの値を用い、各観測点で $u(t) \cdot g / \sigma^2$ を計算し、全観測点の和を取った (スタック: $S(t)$)。また $S(t)$ を、地震モーメントに対応する量に変換した ($M_0(t)$)。

この結果、算出された $S(t)$, $M_0(t)$ には、BN23 で示されたような地震発生2時間前からの加速的な上昇は見られなかった。一方で、今回解析した 48 時間の $M_0(t)$ の長周期成分は数時間程度でゆらいであり、その標準偏差は約 10^{19} Nm (Mw 6.6) であった。これは Hi-net 傾斜記録を BN23 のスタッキング手法で処理した際の、本震震源近傍でのすべりの検知レベルを示すと解釈できる。BN23 がプレスリップと解釈した加速的变化の大きさは $2.9 \times 10^{19} \text{ Nm}$ (Mw 6.9) であり、今回の解析における検知レベルを超えている。すなわち、もしそのようなプレスリップがあったのであれば、我々の結果にも見られるはずであるが、その規模の同様な変動は見られなかった。したがって、Bradley and Hubbard [1] が指摘するように、BN23 がプレスリップと解釈した変動は見かけのものである可能性が高いと結論付けることができる。

[1] <https://earthquakeinsights.substack.com/p/update-on-apparent-gps-detection>

Room A | Regular session : S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

📅 Tue. Oct 31, 2023 3:00 PM - 4:38 PM JST | Tue. Oct 31, 2023 6:00 AM - 7:38 AM UTC | 🏢 Room A F205+206

[S20] PM-2

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura

3:00 PM - 3:03 PM JST | 6:00 AM - 6:03 AM UTC

[1A16-19-1add] President speech

3:03 PM - 3:18 PM JST | 6:03 AM - 6:18 AM UTC

[1A16-19-2add] Award ceremony

3:18 PM - 3:38 PM JST | 6:18 AM - 6:38 AM UTC

[S20-01] [Invited] Seismic tomography: New insights into seismotectonics, volcanism and geodynamics

*Dapeng ZHAO¹ (1. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University)

3:38 PM - 3:58 PM JST | 6:38 AM - 6:58 AM UTC

[S20-02] [Invited] Flexible source-process imaging to illuminate a relationship between rupture growth complexity and fault geometry

*Ryo Okuwaki¹ (1. University of Tsukuba)

3:58 PM - 4:18 PM JST | 6:58 AM - 7:18 AM UTC

[S20-03] [Invited] Study on earthquake, tsunami, and volcanic phenomena using ocean-bottom pressure data considering solid-fluid coupled earth

*Tatsuya Kubota¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:18 PM - 4:38 PM JST | 7:18 AM - 7:38 AM UTC

[S20-04] [Invited] Improvement of earthquake early warning and detection of characteristic seismicity based on identification of simultaneous earthquakes

*Koji TAMARIBUCHI¹ (1. Meteorological Research Institute)

Room A | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-2

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura

Tue. Oct 31, 2023 3:00 PM - 4:38 PM Room A (F205+206)

3:00 PM - 3:03 PM

[1A16-19-1add] President speech

Room A | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20] PM-2

chairperson: Takuto Maeda, Takuya Nishimura

Tue. Oct 31, 2023 3:00 PM - 4:38 PM Room A (F205+206)

3:03 PM - 3:18 PM

[1A16-19-2add] Award ceremony

[Invited] Seismic tomography: New insights into seismotectonics, volcanism and geodynamics

*Dapeng ZHAO¹

1. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University

In the past 30 years I have made seismic tomography studies, which shed new light on seismotectonics, volcanism, and the Earth interior structure and dynamics. In this lecture I introduce the main findings of our tomographic studies made so far.

(1) Subduction zone structure and arc magmatism. We have investigated the 3-D structure of many subduction zones by conducting joint inversion of local and teleseismic data (e.g., *Zhao et al.*, 1992, 1994, 1995, 1997). The subducting slab is imaged clearly as a high-velocity (high-V) zone whose thickness depends on the slab age. Significant low-velocity (low-V) anomalies are revealed in the mantle wedge, which reflect arc magma and fluids associated with corner flow and slab dehydration, leading to the formation of arc volcanoes.

(2) Fluids and earthquakes. A low-V and high Poisson's ratio anomaly was revealed in the source zone of the 1995 Kobe earthquake (M7.2), reflecting a fluid-filled, fractured rock matrix that triggered the rupture of the Nojima fault (*Zhao et al.*, 1996). The fluids in the source zone came from dehydration of the subducting Philippine Sea (PHS) slab under SW Japan (*Zhao et al.*, 2000, 2002). Similar features have been revealed in source zones of various large earthquakes worldwide, suggesting that fluids are probably involved in all types of earthquakes (*Zhao*, 2021).

(3) Big mantle wedge and intraplate volcanism. East Asian mantle tomography shows that the Pacific slab becomes flat in the mantle transition zone (410-660 km depths) beneath the Korean Peninsula and East China, and a big mantle wedge (BMW) has formed above the slab under East Asia. The intraplate volcanism in NE Asia is caused by hot and wet upwelling flows in the BMW (*Zhao et al.*, 2004, 2009).

(4) Seismic anisotropy and mantle dynamics. The subducting Pacific and PHS slabs exhibit mainly trench-parallel azimuthal anisotropy, which may reflect frozen-in lattice-preferred orientation of aligned anisotropic minerals and/or shape-preferred orientation, such as normal faults produced at the outer-rise near the trench axis (*Zhao et al.*, 2023). Trench-normal anisotropy is generally revealed in the mantle wedge under the volcanic front and back-arc, which may reflect corner flows in the mantle wedge due to the plate subduction and dehydration (*Wang & Zhao*, 2021; *Zhao et al.*, 2023). Trench-normal anisotropy also occurs in the subslab mantle, reflecting asthenospheric shear deformation associated with the overlying slab subduction (*Fan & Zhao*, 2021).

(5) Mantle plumes and deep slabs. Global tomography has revealed deeply subducted slabs reaching the core-mantle boundary (CMB). Plume-like, continuous low-V anomalies appear beneath 13 hotspots, suggesting that they are 13 whole-mantle plumes originating from the CMB. These plumes exhibit tilted images, suggesting that plumes are not fixed in the mantle but can be deflected by the mantle flow (*Zhao*, 2004, 2015).

(6) Lunar tomography and moonquakes. Moonquake arrival-time data recorded by the Apollo seismic network operated during 1969 to 1977 were used to determine the first Vp and Vs tomography beneath the lunar near-side (*Zhao et al.*, 2008, 2012). A correlation between the Vs tomography and the thorium abundance distribution is revealed. The area with high thorium abundance exhibits a distinct low Vs that extends down to ~300 km depth, which may reflect a thermal and compositional anomaly. The distribution of deep moonquakes (700-1300 km depths) shows a correlation with the tomography in the deep lunar mantle. The presence of deep moonquakes and seismic-velocity heterogeneity implies that the interior of the present Moon may still be thermally and dynamically active.

References

- Fan, J., D. Zhao (2021). *Nature Geoscience* 14, 349-353.
- Wang, Z., D. Zhao (2021). *Science Advances* 7, eabc9620.
- Zhao, D. et al. (1992). *J. Geophys. Res.* 97, 19909-19928.
- Zhao, D. et al. (1994). *J. Geophys. Res.* 99, 22313-22329.
- Zhao, D. et al. (1995). *J. Geophys. Res.* 100, 6487-6504.
- Zhao, D. et al. (1996). *Science* 274, 1891-1894.
- Zhao, D. et al. (1997). *Science* 278, 254-257.
- Zhao, D. et al. (2000). *J. Geophys. Res.* 105, 13579-13594.
- Zhao, D. et al. (2002). *Phys. Earth Planet. Inter.* 132, 249-267.
- Zhao, D. (2004). *Phys. Earth Planet. Inter.* 146, 3-34.
- Zhao, D., J. Lei, Y. Tang (2004). *Chinese Sci. Bull.* 49, 1401-1408.
- Zhao, D., J. Lei, L. Liu (2008). *Chinese Sci. Bull.* 53, 3897-3907.
- Zhao, D. et al. (2009). *Phys. Earth Planet. Inter.* 173, 197-206.
- Zhao, D. et al. (2012). *Global Planet. Change* 90, 29-36.
- Zhao, D. (2015). *Multiscale Seismic Tomography*. Springer, 304 pp.
- Zhao, D. (2021). *Earth-Science Reviews* 214, 103507.
- Zhao, D. et al. (2023). *Surveys in Geophysics* 44, 947-982.

[Invited]Flexible source-process imaging to illuminate a relationship between rupture growth complexity and fault geometry

*Ryo Okuwaki¹

1. University of Tsukuba

断層形状が破壊や滑りの時空間分布に与える影響は、これまで理論・シミュレーション研究によって検討されてきた。一方、実地震においては、そもそも非平面断層上の震源過程のイメージング自体が困難であった。発表者は、断層形状の複雑性が地震破壊伝播に及ぼす影響を解明するため、破壊伝播や滑りの急な加減速により放射される1 Hz前後の高周波地震波の強度を推定するBack-projection法および、より低周波帯域における有限断層インバージョンの改良に取り組み、断層の滑り方向と断層形状を同時推定可能にする高自由度な震源過程イメージング手法の開発とその適用を行ってきた。断層形状や破壊進行方向など、解析者が予め規定したシナリオに縛られることなく、地震波形データ自身がその情報を素直に描き出す震源過程イメージを構築することで、破壊成長過程の隠された複雑性を明らかにし、また断層形状との因果関係を実地震データ解析により検証可能になった。

例えば2008年四川地震 (Mw 7.9) においては、高周波地震波強度の時空間分布から、断層面が不連続な箇所において破壊進展が妨げられた後、強い応力集中により破壊伝播速度が急加速したことがわかった。断層形状が複雑な内陸巨大地震において、幾何バリアが破壊進展の不規則性をコントロールする主要原因となりうることを突き止めた。さらに、2018年インドネシア地震 (Mw 7.6) においては、S波速度を越えて進展する破壊前線が、断層の屈曲に従いまるで尺取り虫が進むように停滞と進展を伴いながら伝播したことが分かった。破壊前線は、断層の屈曲が背景応力にとって最適な方向に向く場合に進展し、そうでない場合に停滞することが数値シミュレーションにより予測されているが、これを実地震の解析により立証し、断層形状の複雑性が破壊成長を決定する重要な因子であることがわかった。

高自由度な震源過程解析は、地震破壊を規定するプレート境界面形状やスラブ内部の応力状態についても新たな拘束を与える。例えば2021年ハイチ地震 (Mw 7.2) において、一つの地震において逆断層破壊と横ずれ破壊を擁する極めて複雑な地震発生機構をもつことを見出した。2つの破壊エピソードはいずれも既知の横ずれ断層帯から予想される断層の向きや断層の動きとは相容れない機構であり、衝突とすれ違いを伴う複雑なプレート運動が複雑な断層セグメントを形成し得ることがわかってきた。また、2021年ニュージーランド地震 (Mw 7.3) において、スラブ内深部から浅部に至る領域で逆断層・横ずれ断層・正断層破壊が混在すること、特に逆断層破壊で特徴づけられるスラブ深部は海溝軸に並行する圧縮応力軸をもつことが分かった。スラブの浮力や海山の沈み込みに起因するスラブ内応力場の複雑な変化はスラブ形状の特異な折れ曲がりを示唆しており、柔軟な震源過程解析がニュージーランド北端をはじめとする複雑なテクトニクス場の理解に貢献する可能性を見出した。

本講演では、これらを含む解析事例に基づいて、破壊と滑りの加減速が断層形状と相関することを示し、先行するシミュレーション結果を踏まえた解釈が可能になったことを紹介する。断層面の屈曲や不連続が破壊を停滞させるだけでなく、時としてその進展を促し、階層的に地震を巨大化させ得る場合について議論する。さらにこれらの実地震データ解析が、テクトニクス分野の研究に対してどのような貢献をし得るかについても議論する。

[Invited]Study on earthquake, tsunami, and volcanic phenomena using ocean-bottom pressure data considering solid-fluid coupled earth

*Tatsuya Kubota¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2011年の東北地方太平洋沖地震(東北地震)では、宮城沖のプレート浅部が大きくすべり、津波が発生し、沿岸に甚大な被害をもたらした。この東北地震でなぜ浅部大すべりが生じたのかを知ることは、海溝型巨大地震の発生の理解には重要である。著者は、海溝型巨大地震と巨大津波の発生を本質的に理解するためには巨大津波を励起しうる沈み込み帯プレート浅部のすべり量は何によって規定されるのか、そしてプレート境界すべりの駆動源となる応力はどのように蓄積するのか、を明らかにすることが重要であると考え、【(1) 固体-流体の波動論を応用した海底の震源直上の観測データの解析手法の開発】を進め、【(2) 直上観測データを用いた東北沖で発生した地震の高精度・高信頼度な震源断層モデリングと東北沖の地震テクトニクスの研究】を進めてきた。加えて、これらの研究で得られた知見を発展させ、【(3) 地震以外の気象・火山噴火現象を要因として生じる津波現象の研究】(e.g. Kubota et al. 2021a GRL; Kubota et al. 2022 Science) も進めてきた。発表では、主に(1)と(2)の研究で得られた知見や、それらの研究を進めるに至った背景や経緯を紹介したい。

近年、日本周辺の沖合には広域・稠密な海底観測網が展開されるようになり、沈み込み帯の地震テクトニクスの研究が進んでいる。一方で、いくら新しい観測網ができて、2011年東北地震当時の観測記録は増えることはない。著者は、東北地震の当時に展開されていた海底観測データから、いまだ見出されていない情報を引き出すことが重要であると考え、「振り切れない地震計」としての潜在性を持つ海底圧力計に着目した。従来、海底圧力計は、津波(海洋長波)のような長周期の波や余効変動・スロースリップ等の地殻変動を主な観測対象としていたが、実際は、海底圧力計は短周期な地震波(水中音響波)も観測している。著者は、固体-流体の波動論(e.g. Saito, 2019)に基づいた海底圧力記録の解析手法の開発に取り組んで、この短周期圧力変動を地震解析への活用可能性を示してきた。一例として、巨大地震の断層直上の地震動と津波が重畳する海底圧力記録から両者を分離する手法(Kubota et al. 2021b GRL)や、長周期の津波や地殻変動(永久変位)から、短周期の津波や地震動成分まで再現できる海底圧力モデリング手法を考案(Kubota et al. 2017 GRL; 2021c GRL)した。震源直上の海底圧力計の広帯域変動成分をフル活用することにより、津波の利点(伝播速度が遅く、水平位置の信頼度が高い)と地震波の利点(時間解像度が高い)をあわせもつ震源過程解析ができるようになる。

開発した手法は、特に、震源直上で得られていたデータの解析への適用性が高いため、より高精度・高信頼度な震源断層モデルの推定が実現可能となり、地震発生の力学の定量的理解へとつながることが出来る。一例として、2012年に宮城沖のアウトャーライズ域で2つのM7級プレート内地震が立て続けに発生した地震では、震源域直上に多数設置された海底圧力計データ解析から、2つの地震の震源過程を詳細に分離、それぞれの地震の応力降下量の推定を可能にした。さらに、これらを東北地震による静的な応力変化量と比較することにより、海洋プレート内部の応力と強度状態を明らかにした(Kubota et al. 2019 PEPS)。最近では、東北地震時に震源直上に展開された海底圧力計のデータと測地データの統合解析によって断層面上の応力変化分布を高い信頼度で推定し、プレート浅部は応力を解放することなく大すべりを起こしたことを指摘した。これは、浅部大すべりを駆動した歪みエネルギーは、大すべりを起こした浅部ではなく、深部のプレート間の力学的固着領域によって蓄積されていたことを示唆する(Kubota et al. 2022 PEPS)。現在は、これら一連の研究をさらに発展させ、より高精度な東北地震の時間・空間発展を求め、浅部大すべりのメカニズムのさらなる理解に向けた研究を進めている。

著者は、上記の一連の研究を通して、海底観測データ(とくに海底圧力データ)の可能性を押し広げることにより、海底地震学の進展に貢献できたと考えている。一方で、観測データの解析研究から高い信頼度で拘束できるのは、地震の運動学的な描像(「何が起こったか」)であり、地震が「なぜ起こったか」、すなわち地震の駆

動源となるエネルギーやその蓄積と解放を支配するレオロジーや摩擦の構成則といった力学的描像を明らかにすることも重要である。これら力学的性質が巨大地震発生にどのように影響するかを理解するべく、一層の研究を進めたい。

[Invited]Improvement of earthquake early warning and detection of characteristic seismicity based on identification of simultaneous earthquakes

*Koji TAMARIBUCHI¹

1. Meteorological Research Institute

地震波形から迅速かつ適切に震源を識別・推定することは、緊急地震速報をはじめとする地震動即時予測や地震カタログの作成といった地震動・地震活動監視の根幹となる重要な要素である。また、通常地震活動に加えて、スロー地震や繰り返し相似地震の監視も、プレート間の固着状況の監視に貢献する要素の一つである。発表者は地震動・地震活動の監視に貢献することを目的として、これまで地震識別手法および地震活動の統計解析に主に取り組んできた。本発表では、これらの研究開発について紹介する。

一つめは、地震識別手法の高度化である。一般に、大地震や群発地震が発生すると、多数の震源からの地震波が同時に観測されるため、地震識別が困難となる。特に、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震以降、地震活動が非常に活発になり、緊急地震速報の過大な予測や手作業でのカタログ作成に遅れが生じ、早期に地震活動を把握することが困難になった。発表者らは、この課題を解決する二つの震源推定手法

(IPF法: Integrated Particle Filter 法^[1], PF法: Phase combination Forward search法^{[2][3]})を開発し、改良を重ねてきた。IPF法は、ベイズ推定に基づく粒子フィルタを活用した震源推定手法で、各種観測データの統合解析と震源の不確定性を考慮した地震識別の高度化を実現した。この手法は、2016年12月から気象庁の緊急地震速報で活用されている。一方、PF法は、同様の考え方を微小地震カタログに応用した手法で、従来から用いられるP相、S相の検測時刻に加えて最大振幅を特徴量として用い、地震多発時でも高精度に震源を自動推定することを実現した。PF法は2016年4月から一元化震源に活用され、その直後に発生した平成28年(2016年)熊本地震ではその震源が気象庁の報道発表資料の第1報から利用される等、地震活動の早期把握に大きく貢献した^[3]。

二つめは、地震活動の統計解析である。溜淵・他(2010)^[4]は、宮古島近海のプレート境界で、M4-5の繰り返し相似地震系列が複数の存在することを地震カタログと記象紙等の地震波形から見出した。その後、解析対象を全国の強震波形に広げ、震度3程度以上の繰り返し相似地震を検出した。Tamaribuchi et al. (2018)^[5]では、熊本地震を契機として前震活動の統計解析を行い、前震の b 値はいずれの本震規模であっても余震のものよりもわずかに小さいことを明らかにした。また、海底地震観測網を活用した自動震源カタログに対して機械学習を用いたノイズ誤検知低減手法を適用し、日本海溝沿いでスロー地震と同じ深さ10-20 kmで発生する前震活動が発生しやすい特異な微小地震活動領域を同定した^[6]。さらに、南海トラフ沿いでは海底地震観測網を用いて浅部微動を検出し、浅部微動が地震動や潮汐に敏感に反応する様子^[7]や、浅部微動のエネルギーレートの空間分布はプレート境界浅部の応力不均質によく対応していること^[8]を明らかにした。

これらの研究に加えて、社会実装を進めていくことが、地震防災および調査研究の進展にとって重要である。今後も大地震から微小地震・スロー地震の即時解析を通じて地震動や地震活動の実況把握、評価、予測を目指し、包括的地震モニタリングの構築を進めていく。

謝辞: これらの成果は、一元化関係機関の皆様が培ってこられた高品質かつ大量の観測データや気象庁の運用システムに関する知見・技術に基づくものであり、観測網の維持・発展やシステム開発・運用にご尽力いただいている関係者の皆様に改めて感謝申し上げます。

[1] 溜淵功史, 山田真澄, Stephen WU, 2014, *地震*2, 67, 41-55. doi:10.4294/zisin.67.41

[2] 溜淵功史, 森脇健, 上野寛, 束田進也, 2016, *験震時報*, 79, 1-13.

[3] Tamaribuchi, K., 2018, *Earth Planets Space*, 70, 141. doi:10.1186/s40623-018-0915-4

[4] 溜淵功史, 山田安之, 石垣祐三, 高木康伸, 中村雅基, 前田憲二, 岡田正実, 2010, *地震*2, 62, 193-207.

doi:10.4294/zisin.62.193

[5] Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, *Earth Planets Space*, 70, 90.

doi:10.1186/s40623-018-0866-9

[6] Tamaribuchi, K., F. Hirose, A. Noda, Y. Iwasaki, K. Iwakiri, H. Ueno, 2021, *Earth Planets Space*, 73, 91.

doi:10.1186/s40623-021-01411-6

[7] Tamaribuchi, K., A. Kobayashi, T. Nishimiya, F. Hirose, and S. Annoura, 2019, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 13737–13745. doi:10.1029/2019GL085158

[8] Tamaribuchi, K., M. Ogiso, and A. Noda, 2022, *J. Geophys. Res.*, 127. doi:10.1029/2022JB024403