

Fri. Oct 15, 2021

## ROOM B

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## AM-1

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo), Tatsuya Kubota (NIED)

9:00 AM - 10:30 AM ROOM B (ROOM B)

- [S08-01] Slip and stress drop distribution models of the Tohoku-Oki earthquake: A mechanical implication on the near-trench large slip  
 ○Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup> (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)  
 9:00 AM - 9:15 AM
- [S08-02] Spatiotemporal change in the inelastic strain and displacement fields due to aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan  
 ○Ayaho MITSUOKA<sup>1</sup>, Satoshi MATSUMOTO<sup>2</sup>, Yuhei YUASA<sup>3</sup> (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Japan Meteorological Agency)  
 9:15 AM - 9:30 AM
- [S08-03] Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake  
 ○Yoshihisa IIO<sup>1</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>2</sup>, Kyoto Kyushu Tokyo (1.DPRI, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Kyoto University)  
 9:30 AM - 9:45 AM
- [S08-04] Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?  
 ○Ryosuke ANDO<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>2</sup>, Howell Andy<sup>4,3</sup>, Andy Nicol<sup>4</sup>, Robert Langridge<sup>3</sup>, Ian Hamling<sup>3</sup>  
 (1.School of Science, University of Tokyo, 2.School of Science, Kyoto University, 3.GNS Science, 4.Canterbury University)  
 9:45 AM - 10:00 AM
- [S08-05] Quasi-dynamic earthquake sequence simulation of the Median Tectonic line Fault Zone  
 ○Kazunori Muramatsu<sup>1</sup>, So Ozawa<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup>  
 (1.Department of Earth and Planetary Science, The university of Tokyo)  
 10:00 AM - 10:15 AM

- [S08-06] Investigation of scaling laws for earthquake source parameters using simulations of dynamic rupture with a hierarchical patch structure  
 ○Kazuki Masuda<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>1</sup> (1.Graduate School of Science, Kyoto University)  
 10:15 AM - 10:30 AM

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## AM-2

chairperson: Akemi Noda (MRI), Kazutoshi Imanishi (AIST)

11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

- [S08-07] Plate locking along the Nankai Trough: A scenario for coseismic and post seismic ruptures  
 ○Tatsuhiko SAITO<sup>1</sup>, Akemi Noda<sup>2</sup> (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Meteorological Research Institute)  
 11:00 AM - 11:15 AM
- [S08-08] Spatial and temporal variations in interplate coupling along the Tohoku-Oki plate boundary deduced from a new method using off-fault earthquakes and geodetic data  
 ○Kazutoshi IMANISHI<sup>1</sup>, Akemi Noda<sup>2</sup> (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Meteorological Research Institute)  
 11:15 AM - 11:30 AM
- [S08-09] Deep volcanic low frequency earthquakes induced by spatio-temporal stress distribution in northeast Japan  
 ○Genki OIKAWA<sup>1</sup>, Naofumi Aso<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup>  
 (1.Tokyo Institute of Technology)  
 11:30 AM - 11:45 AM
- [S08-10] Estimate of the stress field in the region of the 2017 southern earthquake  
 ○Hikari Nogi<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Masayo Sawada<sup>2</sup>, Kazuhide Tomisaka<sup>2</sup> (1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)  
 11:45 AM - 12:00 PM
- [S08-11] Estimation of inelastic deformation using geodetic and seismic data: Application to Niigata-Kobe Tectonic Zone  
 ○Akemi NODA<sup>1</sup>, Tatsuhiko SAITO<sup>2</sup> (1.Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)  
 12:00 PM - 12:15 PM

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

PM-1

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Junichi Nakajima (Tokyo Institute of Technology)  
1:30 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

○Takehito SUZUKI<sup>1</sup> (1. Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University)

2:45 PM - 3:00 PM

[S08-12] **Repeating earthquakes and aseismic slip:**

**Toward unified understanding of seismogenesis**

○Junichi NAKAJIMA<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>2</sup> (1. EPS Department, Tokyo Tech, 2. Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-13] Detection of slip events amid the transitional regime between the unstable seismic and stable sliding regimes

○Yoshio FUKAO<sup>1</sup>, Tatsuya Kubota<sup>2</sup>, Hiroko Sugioka<sup>3</sup>, Aki Ito<sup>1</sup>, Takashi Tonegawa<sup>1</sup>, Hajime Shiobara<sup>4</sup>, Mikiya Yamashita<sup>5</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>2</sup> (1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Kobe Univ, 4. Univ Tokyo, 5. AIST)

1:45 PM - 2:00 PM

[S08-14] Longer than One-year Afterslip due to the 2016 Moderate Earthquakes along Chaman Fault: Noncomplementary Co- and Post-seismic Slip Distribution

○Masato FURUYA<sup>1</sup>, Fumiko Matsumoto<sup>2</sup> (1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. PASCO)

2:00 PM - 2:15 PM

[S08-15] Propagation velocity of detachment front along a seismogenic plate interface in a rate– state friction model

○Naoyuki KATO<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

2:15 PM - 2:30 PM

[S08-16] Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories

○Keisuke ARIYOSHI<sup>1</sup>, Toshinori Kimura<sup>1</sup>, Yasumasa Miyazawa<sup>1</sup>, Sergey Varlamov<sup>1</sup>, Takeshi Inuma<sup>1</sup>, Akira Nagano<sup>1</sup>, Joan Gomberg<sup>2,3</sup>, Eiichiro Araki<sup>1</sup>, Toru Miyama<sup>1</sup>, Kentaro Sueki<sup>1</sup>, Shuichiro Yada<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>4</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>

(1. JAMSTEC, 2. USGS, 3. University of Washington, 4. NIED)

2:30 PM - 2:45 PM

[S08-17] Conditions for the existence of the propagation velocities for two forms of the slip fronts and their physical interpretations

---

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## AM-1

chairperson:Ryosuke Ando(University of Tokyo), Tatsuya Kubota(NIED)

Fri. Oct 15, 2021 9:00 AM - 10:30 AM ROOM B (ROOM B)

---

- [S08-01] Slip and stress drop distribution models of the Tohoku-Oki earthquake: A mechanical implication on the near-trench large slip  
○Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup> (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)  
9:00 AM - 9:15 AM
- [S08-02] Spatiotemporal change in the inelastic strain and displacement fields due to aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan  
○Ayaho MITSUOKA<sup>1</sup>, Satoshi MATSUMOTO<sup>2</sup>, Yuhei YUASA<sup>3</sup> (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3.Japan Meteorological Agency)  
9:15 AM - 9:30 AM
- [S08-03] Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake  
○Yoshihisa IIO<sup>1</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>2</sup>, Kyoto Kyushu Tokyo (1.DPRI, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University)  
9:30 AM - 9:45 AM
- [S08-04] Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?  
○Ryosuke ANDO<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>2</sup>, Howell Andy<sup>4,3</sup>, Andy Nicol<sup>4</sup>, Robert Langridge<sup>3</sup>, Ian Hamling<sup>3</sup> (1.School of Science, University of Tokyo, 2.School of Science, Kyoto University, 3.GNS Science, 4.Canterbury University)  
9:45 AM - 10:00 AM
- [S08-05] Quasi-dynamic earthquake sequence simulation of the Median Tectonic line Fault Zone  
○Kazunori Muramatsu<sup>1</sup>, So Ozawa<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup> (1.Department of Earth and Planetary Science, The university of Tokyo)  
10:00 AM - 10:15 AM
- [S08-06] Investigation of scaling laws for earthquake source parameters using simulations of dynamic rupture with a hierarchical patch structure  
○Kazuki Masuda<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>1</sup> (1.Graduate School of Science, Kyoto University)  
10:15 AM - 10:30 AM

# Slip and stress drop distribution models of the Tohoku-Oki earthquake: A mechanical implication on the near-trench large slip

\*Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

## はじめに

これまで2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）の震源過程の研究が広く行われ、さまざまな断層モデルが提案されてきた。なかでも、プレート浅部のすべりやすべり域の広がりへの拘束には津波記録が大きく貢献した (e.g., Satake et al. 2013; Yamazaki et al. 2018 JGR)。津波データに基づく断層モデルによると、宮城沖から岩手沖にかけて大すべりがあり、海溝まで進展するすべりが推定されている。この特徴は多くの地震波・測地データに基づく断層モデルでも共通する (e.g., Wang et al. 2018 Geosphere)。このような高い精度で拘束されたすべり分布にもとづいて東北地震の発生に至った過程を定量的に考察することが、巨大地震の発生メカニズムの理解に重要である。

巨大地震の発生メカニズムの理解には、断層面上のすべり分布にもとづく運動学的な議論だけでなく、地震時に解消された歪みエネルギー量や応力解放（降下）量などに基づく力学的な考察 (e.g. Kostrov 1974; Noda et al. 2021 JGR), および摩擦則による破壊シミュレーション (e.g. Hok et al. 2011) も重要である。断層面上の応力降下量は、すべり分布から得られる基本的な力学的物理量である。しかし、これまで報告されてきた断層モデルに基づいて計算された東北地震の応力降下分布には、さまざまなパターンがみられる (e.g., Brown et al. 2015 GRL)。なかには、運動学的（すべり分布）視点では不都合が無くても、力学的（応力）視点では不自然となる断層モデルもあり得る。地震発生を力学的に議論するには、力学的にも正確なすべり分布が不可欠である。本研究では、以上の点を踏まえて東北沖地震の断層モデルの推定を試みる。そして、断層モデルから期待される応力降下量の分布が断層モデルが力学的にもっともらしいか議論し、東北沖地震時に海溝で大すべりが発生した力学的原因を考察する。

## 手法・データ

解析には沖合の津波データを用いた (e.g., Maeda et al. 2011)。なかでも震源域直上で得られた水圧計データ (Kubota et al. 2021 GRL) は、過去の断層モデル推定の研究では使用されていない。

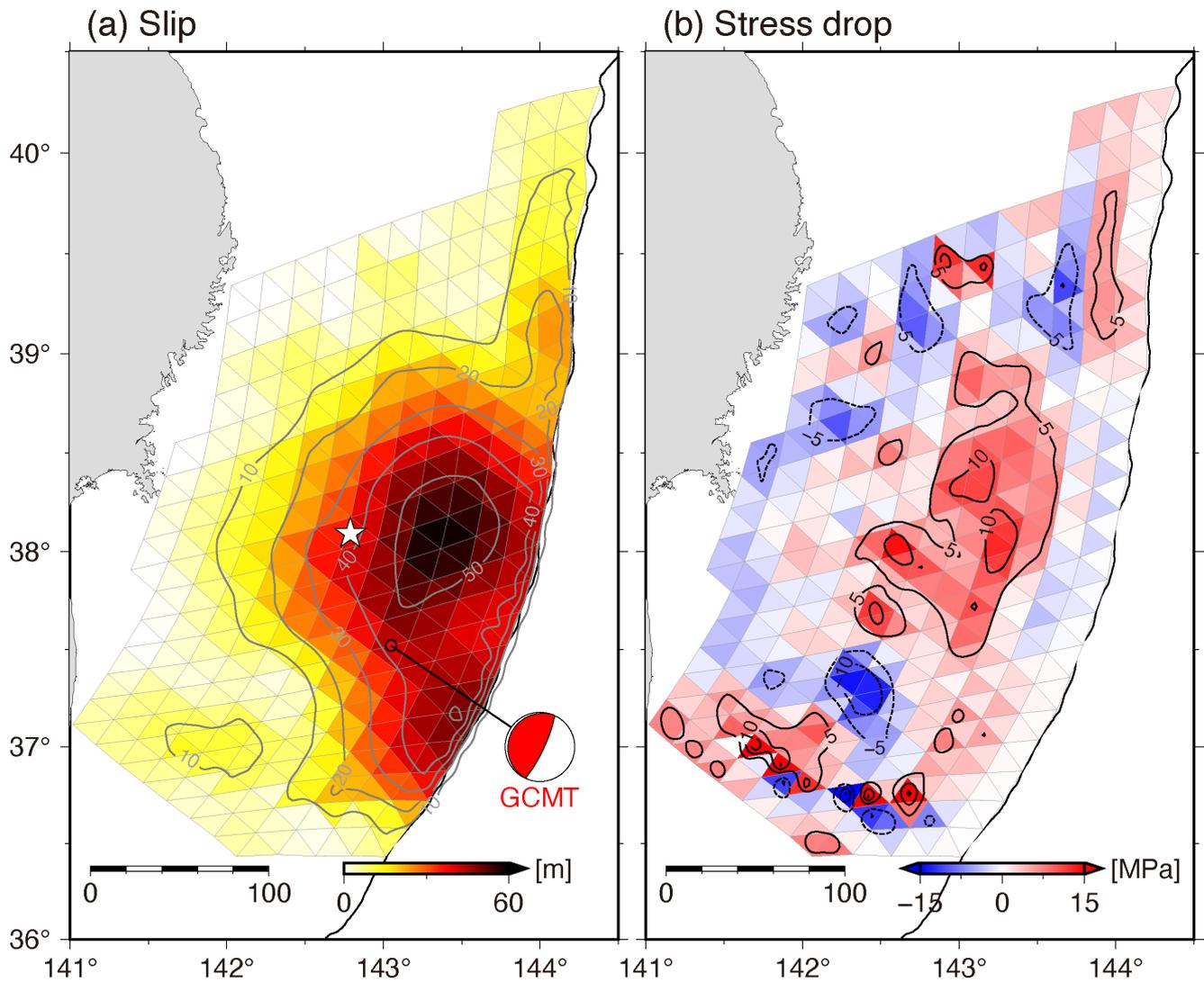
本解析では、3次元のプレート形状を正しく表現するため、Iinuma et al. (2016) を参考に、既存のプレートモデルを三角形の小断層要素に分割した。地殻変動の計算においては、水深を考慮して、プレートモデルから設定した三角要素の深さを一律 8 km 浅くした。さらに、東北沖地震の地表にまで進展した破壊を正しく表現するため、三角要素断層のうち、海溝と一致するもっとも浅い列の要素の上端深さを計算上の自由表面 ( $z = 0$  km) に接するように補正した。

## 結果・議論

津波データのインバージョン解析の結果、これまで報告されてきたすべり分布と同様、宮城沖の領域に海溝軸まで進展する大すべりが推定された (図1a)。一方で、すべり分布から期待される応力変化（応力降下）では、海溝軸そば付近では応力降下はほとんどゼロで、深部側の震源近傍に大きな応力降下域が得られた (図1b)。

本解析で得られた応力降下分布から、力学的な固着はプレート境界深部側でのみ起こり、浅部では起こっていないことが示唆される。一方で、これまで報告されてきた断層モデルに基づく応力降下分布には、海溝軸近傍の大すべりに対応して浅部に大きな応力降下をもち、一方で深部側での応力降下が小さくなるものも見られた (Brown et al. 2015, fig. S2)。この応力降下分布は固着が海溝軸の浅い場所でのみ生じていると解釈できるが、深さとともに増加する温度・圧力の条件を考慮すると、浅部でのみ固着が生じるとは考えづらい (e.g., Scholtz 1998; Lay et al. 2012)。深部側でのみ力学的な固着が生じる本研究のモデルが力学的にもっともらしいと言える。プレート境界浅部において大きなすべりが生じた原因は、浅部が力学的に固着していたのではな

く、プレート境界深部の力学的な固着が浅部側の沈み込みが押し留め、すべり遅れを生じさせた (Herman & Govers, 2020 G3; Lindsey et al. 2021 Nature Geo) ためと解釈される。



**Figure.** (a) 解析により推定された東北沖地震のすべり分布. 各要素断層上でのすべり量を色とコンター線で表す (コンター線間隔: 10m). 白星は震央 (Suzuki et al. 2012 EPS) を示す. (b) すべり分布から計算した断層面上での応力降下の分布 (正: 応力降下, 負: 応力増加). コンター線の間隔は5MPa.

# Spatiotemporal change in the inelastic strain and displacement fields due to aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

\*Ayaho MITSUOKA<sup>1</sup>, Satoshi MATSUMOTO<sup>2</sup>, Yuhei YUASA<sup>3</sup>

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Japan Meteorological Agency

地震は地殻内に蓄積された弾性歪み(応力)を解放する現象であることを考えると、大地震発生後の余震活動は、大地震の断層運動によって蓄積された弾性歪みを、地震(非弾性変形)によって解消する活動と解釈することができる。地震発生後の地殻内での応力再配分、緩和過程を理解するために、余震活動による非弾性歪み場をとらえることは重要である。

大地震後の余震活動による非弾性歪み速度は、時間のべき乗則( $d\varepsilon/dt \propto t^{-P}$ )に従うことが知られており、これらの時間変化は、地震時に生じた弾性歪みへの応答として解釈することができる(たとえばNanjo et al., 2019; 楠城, 2007)。このべき乗則のべき指数 $-P$ を本研究では $P$ 値と呼ぶ(余震数の減少を示す大森係数 $p$ 値とは異なる意味を持つ)。

対象期間を、熊本地震本震(Mj 7.3、2016年4月16日)後から2020年9月までと設定し、モーメント密度テンソルと非弾性歪みテンソルの関係(Noda and Matsu'ura, 2010)を用いて、非弾性歪み速度の時空間変化を調べ、 $P$ 値を最小二乗法で推定した。 $P > 1$ となる領域は、歪みが時間経過に伴い、減少する領域であるが、地震時断層(たとえばAsano and Iwata, 2016; Mitsuoka et al., 2020)の周辺に位置していた。一方で、 $P$ 値が1より小さくなる(非弾性歪みが時間経過とともに増加する)領域が、地震時断層の南西側に確認された。このような領域は、最大前震・本震が発生したことによる弾性変形によって生じた応力ステップへの応答だけでは、この活動を説明できないことがわかる。

また、GNSS観測網の拡充により、詳細な地表面での変位場を得ることができる。対象期間の九州全域の変位場を求めると、およそ10–30 cmの変位があることがわかった。さらにプレート運動などによる定常運動による変動を除くと、日奈久・布田川断層周辺、つまり2016年の熊本地震の震源域では、定常運動とは異なる数cmから10 cmほどの変位が推定された。

このような地殻内の非弾性歪みや地表変位の増加は、大地震発生後に、アフタースリップなどの余効変動の影響を受けていると考えることができる。そこで本研究では、地震後に見られた非弾性歪みと地表変位は、アフタースリップによって生じたと仮定し、このすべりを起こす断層モデルの推定を試みる。

アフタースリップを仮定すると、ある断層が非地震的にすべることによって周囲に弾性歪みが蓄積されると考えられる。

余震活動によって生じた非弾性歪みは、個々の地震の発震機構データから推定されるわけだが、その場に負荷された弾性歪みが非弾性歪み(余震活動)として即座に解消されるのか、時定数がどうなっているのか、また、空間的に応力の緩和過程が異なるのかどうか、という問題が重要になってくる。つまり、その場に負荷された弾性歪みをどのくらいの時間かけて解消するのか、また、観測された非弾性歪みはその何%に相当するのか、場所によってそれらは異なるのか、未知なままである。

一方で、地表面では与えられた弾性歪みがそのまま変位として現れると考えると、地殻内のアフタースリップ断層のすべりに対する地表変位を計算することで、データと比較することが可能であると考えられる。そこで、地表での変位をデータとし、Okada (1992)の矩形断層による弾性歪み変化、変位を用いて観測方程式を立

て、最小二乗法でアフタースリップ断層面上のすべり分布を推定した。アフタースリップ断層は、日奈久・布田川断層それぞれで地震時断層(たとえばAsano and Iwata, 2016; Mitsuoka et al., 2020)を延長して設定した。その結果、最大で50 cm程度、地震時にすべった領域に加え、日奈久断層の深部延長部で大きいすべりを示す分布が得られた。

これは、地表変位が説明できるすべり分布であるわけだが、このアフタースリップ断層がすべることによって生じる歪み変化を、低P値が示された領域で計算し、地震によって解放された非弾性歪みと比較を行った。歪みテンソルの軸方向は有意に一致しないものの、正断層型、横ずれ型の歪み変化を生じることがわかり、これは観測された非弾性歪みの傾向と同じであった。また、非弾性歪みの大きさは、弾性歪み変化のおおよそ10%程度である結果が得られた。さらに詳細な断層すべりやそれが周囲に及ぼす歪み変化、P値との比較について議論する。

# Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake

\*Yoshihisa IIO<sup>1</sup>, Satoshi Matsumoto<sup>2</sup>, Kyoto Kyushu Tokyo

1. DPRI, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University

## 1. はじめに

大きな地震が起こると余震が引き起こされる。断層端での大きな静的応力集中により、大きな地震が起こることが予想されるが、実際に大きな地震が発生することはむしろ稀である。2016年鳥取県中部地震の約10,000個の高精度のメカニズム解を解析して、余震震源に対する本震断層の水平端の位置を約200mの精度で推定することが出来た(Iio et al., 2021)。その結果、余震は、断層の水平方向の端と延長部ではほとんど発生しないことが分かった。この観測結果は、本震の前に断層の両端部で応力緩和が起こっていたことにより解釈可能である。断層端の応力緩和は、本震の破壊を止めるとともに、大きな地震の続発を起こりにくくすると考えられる。

## 2. 結果と考察

2016年10月21日鳥取県中部地震(Mj6.6)の余震域に、本震発生の翌日早朝から設置を開始した69点の高感度地震計および周辺の高感度定常観測点のデータを用いて、約2か月間に発生した余震の震源とメカニズム解を正確に決定した。それにより、断層の両端付近において、P・T軸とも、推定断層を境に方位が急変していることが分かった。また、断層南端の東側においては正断層型の余震が卓越しており、本震すべりによる正断層型の地震に対する $\Delta CFS$ が正の領域と良く対応していることも分かった。推定断層を境としたT軸の方位の急変から「真の」断層面の位置を推定した。断層に直交する方向におけるT軸の方位分布を階段関数で近似し、その段差の位置に断層があると見なし、それらの位置を平滑化して断層面を推定した。この断層面を用いて、余震域の両端部付近において、正断層型の余震に対する $\Delta CFS$ が最も大きくなる断層端の位置を求めた。本震のすべり分布は、InSARやGNSSデータから推定された断層モデル(Meneses-Gutierrez et al., 2019)を参考にし、矩形すべりの端からtaperをかける単純なものとした。その結果、断層南端の位置を200m程度の精度で推定することが出来た。

断層南端付近におけるP軸の傾斜角の分布と、正断層および本震と同じ横ずれ断層に対する $\Delta CFS$ の分布を比較により、正断層型の余震の分布が、正断層に対する $\Delta CFS$ の大きな領域とよく一致している一方、横ずれ断層に対する $\Delta CFS$ の大きな領域では、横ずれ型の余震は非常に少ないことが分かった。この $\Delta CFS$ は本震すべりによる応力変化によるものであり、地震前の応力場も考慮すると、本来は、断層端では本震と同様の横ずれ型の余震が圧倒的に起こりやすいはずである。

このことを説明する4つの可能性が考えられる。i) 断層端付近において、その規模に寄らず断層の強度が非常に大きい、ii) 地震前に、本震すべりの起こった領域のみに応力集中が発生していた、iii) 断層端において地震後に非弾性変形が起こった、iv) 地震前に断層端において応力緩和が起こっていた。i)の場合は、一般的には、断層端付近で余震活動が活発になる(例えば、Aki, 1979)。ii)として想定されるのは、地震前に本震断層の周辺で非地震性すべりが発生していた場合である。しかし、非地震性すべりが発生していた場合、同じところで地震後に予効すべりが起こることが期待されるが、地殻変動の解析結果からはそのような変動は検知されていないし、予効すべりに伴うことが期待される余震の震源移動も見られていない(Iio et al., 2020)。また、山陰の地震帯は歪集中帯となっており、地震帯直下の下部地殻において数mm/年の非地震性すべりが検知されているが(Nishimura and Takada, 2017)、それによる応力集中は幅広いものとなり、震源断層だけに応力集中を起こすことは出来ない。iii)についても、地殻変動の解析結果では検知されていない。残されるのはiv)であり、断層端において、本震前に非常に長い時間スケールを持った非弾性変形が発生して応力緩和が生じていた可能性が考えられる。山陰の地震帯においては、満点観測網のデータを用いた地震波トモグラフィにより、大きめの地震の余震域の両端に、系統的に低速度異常域が推定されている。この知見は、山陰の地震帯において、大きな地震の断層両端において、地震前に応力緩和が起こっていた可能性を示唆している。

文献 Iio et al., 2021, Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori

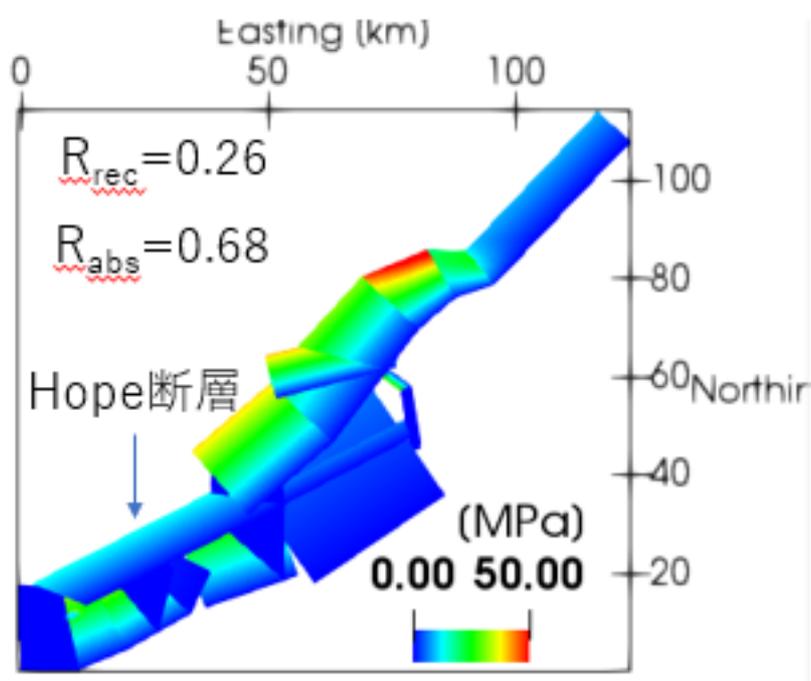
earthquake, Communications Earth & Environment DOI : 10.1038/s43247-021-00231-6.

## Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?

\*Ryosuke ANDO<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>2</sup>, Howell Andy<sup>4,3</sup>, Andy Nicol<sup>4</sup>, Robert Langridge<sup>3</sup>, Ian Hamling<sup>3</sup>

1. School of Science, University of Tokyo, 2. School of Science, Kyoto University, 3. GNS Science, 4. Canterbury University

The complex multi-fault rupture is observed in the 2016 Kaikoura (New Zealand) earthquake. Although the overall slip pattern was well explained by dynamic rupture simulations (Ando and Kaneko, 2018, GRL), a big question remains on the reason why the Hope fault was bypassed during the 2016 event. The Hope fault is one of the most active upper plate faults in the focal area, accommodating the relative motion between the Pacific Plate and the Australian Plate. In this study, we first test a hypothesis: The stress level of the Hope fault (see fig.) is lower than the surrounding faults due to the effect of the last event before 2016. A set of parameter studies shows that 70-80% lower stress level on the Hope fault leads to the passive partial slip resembling the observation of the 2016 event. So far, we do not exclude the possibility that the Hope fault is bypassed through a more complicated rupture path than that obtained in A&R (2018). To explore this hypothesis, we adopt the 3D fault geometry developed by Nicol et al. (in prep July 2021) to revise the geometry of the Point Kean and Papatea faults based on the aftershock distribution (Chamberlain et al., 2021).



# Quasi-dynamic earthquake sequence simulation of the Median Tectonic line Fault Zone

\*Kazunori Muramatsu<sup>1</sup>, So Ozawa<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup>

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

中央構造線断層帯 (MTLFZ) 上で生じた地震の記録は乏しく、MTLFZの構造およびMTLFZ上における地震の連動破壊過程は不明である。古文書の記録およびトレンチ調査 (HERP,2017) などの地質学的な証拠から、MTLFZ上で起こった最新の地震は慶長地震 (1596) であると推定されている。慶長地震では、少なくとも300kmの規模で、慶長伊予地震、慶長豊後地震、慶長伏見地震の3つの地震が連動して発生したことが示唆されているが、この一連の地震における破壊開始点とその伝播過程は断定されていない。Ikeda et al. 2018は慶長地震について、MTLFZの西端を破壊開始点として慶長豊後地震および慶長伊予地震が発生し、東方に伝播して慶長伏見地震を起こすケースと、四国北部の川上断層を開始点として西方に伝播したのちに慶長伏見地震が生じるケースを想定した。そして主応力軸の方向、傾斜角をパラメータセットとしてCoulomb応力変化を計算し、その正負から東西の双方向に伝播するケースを支持した。本研究では、MTLFZを10数個の深さ10kmの鉛直な矩形断層に分けて3次元モデル化し、準動的な地震シークエンスシミュレーションを行った。0.25kmのセルサイズで各断層を離散化し、それぞれの要素は速度状態依存摩擦則に従い、諸摩擦パラメータは深さ依存せず一様とした。全断層面に一様なせん断応力速度を付加した場合、全セルの平均変位速度との比例関係が見られた。GNSSを用いて求められたMTLFZ周辺の区間における平均相対変位速度は9~10m/1000年、平均歪速度は $10^{-7}$ /年 (Nishimura et al. 2018) であるが、本シミュレーションでは、少なくともセル平均変位速度が1~15m/1000年となる範囲で、MTLFZの中央から西方に地震が伝播したのち、MTLFZの東側で中央から東に地震が連動することが再現された。代表的な例では、平均歪速度 $1.3 \times 10^{-7}$ /年に対応する平均変位速度は5m/1000年、再来間隔は約3000年であった。今後は、現状の矩形断層が接続された滑らかでない断層モデルの改善や、摩擦パラメータの深さ依存性の設定、また四国周辺の応力分布の観測結果に則した非一様な広域応力場の考慮が必要である。

# Investigation of scaling laws for earthquake source parameters using simulations of dynamic rupture with a hierarchical patch structure

\*Kazuki Masuda<sup>1</sup>, Yoshihiro Kaneko<sup>1</sup>

1. Graduate School of Science, Kyoto University

地震破壊の成長過程とそれに伴う地震波の放射を理解することは、地震災害や減災のために重要である。Ide (2019) は、異なるマグニチュードの地震で、P波の発生から0.2秒以内の初期波形の類似性が観測されたことを、フラクタルに分布する断層パッチの階層構造で説明できるのではないかと提案した。本研究では、すべり弱化摩擦則に基づき、破壊エネルギー $G_c$ の階層構造を取り入れた断層上の自発的な動的破壊モデルが、地震の震源パラメータに関するいくつかのスケール法則を説明できるという仮説を検証する。このシミュレーションはスペクトル要素法で行われており、Aochi and Ide (2003)によって提案された効率的な計算手法を取り入れている。まず、破壊エネルギー $G_c$ の階層的なパッチで特徴づけられた一次元断層上で、幅広いマグニチュード (M1からM6) の地震のシミュレーションを行った。次に、計算した地震の震源パラメータに関する様々なスケール法則 (地震モーメントと震源継続時間、マグニチュードと発生頻度の関係、モーメントレートの成長と時間、破壊エネルギーと地震性すべりなど) を定量化した。そして、モデルパラメータの値を変化させたときにこれらのスケール法則がどのように変化するかを分析した。予備的な結果として、階層的なパッチの大きさや個数の関係を変えると、スケール法則の一部に影響を与えることが示唆された。今回得られたスケール法則に影響を与える重要なモデルパラメータを特定し、このモデルを2次元断層に拡張するための取り組みを報告する。

---

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## AM-2

chairperson: Akemi Noda(MRI), Kazutoshi Imanishi(AIST)

Fri. Oct 15, 2021 11:00 AM - 12:15 PM ROOM B (ROOM B)

---

- [S08-07] Plate locking along the Nankai Trough: A scenario for coseismic and post seismic ruptures  
○Tatsuhiko SAITO<sup>1</sup>, Akemi Noda<sup>2</sup> (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Meteorological Research Institute)  
11:00 AM - 11:15 AM
- [S08-08] Spatial and temporal variations in interplate coupling along the Tohoku-Oki plate boundary deduced from a new method using off-fault earthquakes and geodetic data  
○Kazutoshi IMANISHI<sup>1</sup>, Akemi Noda<sup>2</sup> (1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Meteorological Research Institute)  
11:15 AM - 11:30 AM
- [S08-09] Deep volcanic low frequency earthquakes induced by spatio-temporal stress distribution in northeast Japan  
○Genki OIKAWA<sup>1</sup>, Naofumi Aso<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup> (1.Tokyo Institute of Technology)  
11:30 AM - 11:45 AM
- [S08-10] Estimate of the stress field in the region of the 2017 southern earthquake  
○Hikari Nogi<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Masayo Sawada<sup>2</sup>, Kazuhide Tomisaka<sup>2</sup> (1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)  
11:45 AM - 12:00 PM
- [S08-11] Estimation of inelastic deformation using geodetic and seismic data: Application to Niigata-Kobe Tectonic Zone  
○Akemi NODA<sup>1</sup>, Tatsuhiko SAITO<sup>2</sup> (1.Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)  
12:00 PM - 12:15 PM

# Plate locking along the Nankai Trough: A scenario for coseismic and post seismic ruptures

\*Tatsuhiko SAITO<sup>1</sup>, Akemi Noda<sup>2</sup>

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Meteorological Research Institute

(はじめに) 運動を予測するためには、運動を引き起こす原動力やエネルギーを定量化することが重要である。プレート間巨大地震を引き起こす原因は、プレート間の固着によって蓄積する歪みエネルギーである (e.g., Savage 1969; Noda et al. 2021 JGR). 衛星測位データ解析によってすべり遅れ分布を推定し、それをもとに将来起こりうる巨大地震の規模や場所が予測されている (e.g., Watanabe et al. 2018; Baranes et al. 2018). しかし、すべり遅れ域と力学的な固着域は同一ではない (e.g. Wang and Dixson 2004; Noda et al. 2018 JGR). 力学的に固着している箇所では、大きな摩擦力によって地震間に応力が増大し、歪みエネルギー蓄積の根本原因となる。一方、力学的固着が無い箇所でも、隣接した固着域によってすべり遅れが生じる (e.g., Herman et al. 2018). このような領域では地震間の応力増加が無くても、地震時には隣接する固着の破壊のためにすべりを引き起こす。例えば、東北地震では宮城沖海溝付近は、応力降下がほとんど無いにもかかわらず、隣接深部に位置する力学的固着の破壊によって大すべりが起こっている (久保田・齊藤 本大会)。巨大地震の連動や半割れ破壊後の推移予測を行うために、地震を引き起こす原因となる力学的固着分布が重要である。本研究では、力学的固着の推定法を提案し、南海トラフの固着分布を推定する。さらに、結果をもとに想定しうる連鎖的な巨大地震発生と余効すべりのシナリオ例を示す。

(解析手法) プレート間の剪断応力の蓄積速度が大きい箇所が、力学的に固着している箇所と考えられる。剪断応力として、プレート沈み込みによるslip方向の向きのtractionの成分を考え、以下の手順によって、プレート間剪断応力速度分布をGNSSデータ逆解析で推定する。プレート間剪断応力分布を水平拡がり60km程度の大きさの基底関数を約250個使って表現する。各基底関数による地表変形速度応答を次のように計算する。半無限均質媒質を仮定し、南海トラフプレート境界を大きさ一辺10km程度の三角要素5400個程度を使って表し、それぞれの三角要素のすべり速度に対するそれぞれの三角要素における剪断応力速度応答を計算する。このデータセットを使うことで、剪断応力速度基底関数に対応するすべり速度分布を逆問題によって得ることができる。そして、地表変位速度をすべり速度分布から計算する。この手順で剪断応力速度の基底関数による地表変形速度応答を得る。地表変形速度応答を使い、GNSSデータの逆解析から、プレート間剪断応力速度分布を推定した。

(力学的固着と連動破壊シナリオ) プレート境界深さ~25kmより浅い箇所に4箇所 (室戸沖, 紀伊半島沖, 熊野灘沖, 東海沖) に顕著な力学的固着域を推定した。それぞれ、年間10kPa程度で剪断応力が蓄積されていく。特に、室戸沖の固着領域は広く、剪断応力蓄積速度が大きい。仮に、応力蓄積期間が100年ならば、これら固着域に1MPa程度の応力が蓄積する。固着域が破壊すれば、1MPa程度の応力降下をもつ巨大地震を引き起こす。一方、プレート境界深部や力学的固着が弱い箇所では、余効すべりが発生する可能性がある。得られた固着分布から想定しうる破壊シナリオのうち、複数のプレート境界地震が連鎖的に発生する可能性を紹介する。まず、紀伊半島沖の固着が破壊することで、Mw 8程度の前震が発生する。この地震によって周囲の応力が増加する。前震すべり域周辺の応力をゆるやかに解消するようにして余効すべりが発生する。余効すべりはMw 8程度と前震と同程度の規模となるが、応力降下量が前震に比べて小さいために解消する歪みエネルギー (available energy) は、前震の3分の1程度となる。さらに、余効すべりにトリガーされ室戸沖の固着が破壊することで、Mw 8.3の本震となる。本震は前震に比べて3倍程度の歪みエネルギーを解消する。ただし、モーメント、解消する歪みエネルギーは、応力解消領域やすべり域の設定で変化する。

(さいごに) 本研究やNoda et al. (2021 JGR) は力学的な固着分布から、今後起こりうる巨大地震や連鎖する地震の破壊シナリオを想定した。しかし、摩擦則および背景応力に関して大きな不確定性があり、大地震や

余効すべりが起きたときに、そのデータを使って、現在の考えやモデルの検証と修正をすることが重要である。あり得る複数の破壊シナリオを提示し、シナリオ作成時の仮定・条件を明確するなど、検証の準備をすすめていく。

# Spatial and temporal variations in interplate coupling along the Tohoku-Oki plate boundary deduced from a new method using off-fault earthquakes and geodetic data

\*Kazutoshi IMANISHI<sup>1</sup>, Akemi Noda<sup>2</sup>

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute

## 1. はじめに

プレート境界における巨大地震の発生時期や規模を予測するためには、プレート境界の固着状態をモニタリングすることが重要である。通常は地殻変動データをもとに推定されるが、地震データも組み合わせた解析を行うことで、高い時空間分解能を持つ固着状態の推定が期待できる。本研究では、プレート境界の周辺で発生している地震（オフフォルト地震）がプレート間固着による応力変化に調和的に発生しているか否かを評価し、直近のプレート境界の固着状態を推定する方法を提案する。そして、この手法を東北沖プレート境界に適用した結果について報告する。

## 2. 手法

本手法の背景にある基本的な考え方は以下の通りである。

- ・ 応力場は、背景応力にプレート間固着による応力蓄積が加わったものと記述される。
- ・ 地殻内には様々な姿勢の既存クラックがあり、それらの多くが応力の臨界状態にある。
- ・ 背景応力に調和的なクラックでも破壊は生じるが、プレート間固着に起因する応力場（応力変化）に調和的なクラックが優先的に破壊する。

プレート間固着に起因する応力場から計算されるすべり角と断層面のすべり角との角度差（ミスフィット角）に着目すると、プレート間固着が継続する場合はミスフィット角の小さい地震が多く発生することが期待され、逆にゆっくりすべり等により固着が剥がれる場合は、ミスフィット角の大きい地震が多く発生することが期待される。従って、ミスフィット角の時空間平均を推定することで、直近のプレート間固着状態の変動を可視化することができる。

実際の解析手順は以下の通りである。

- (1) プレート間固着により周辺域に作り出される応力テンソルを水平方向に0.1°間隔、深さ方向に5km間隔で計算する。
- (2) それぞれのメカニズム解の震源位置に最も近い位置の応力テンソルを用いて、ミスフィット角を計算する。この際、2つの節面のうち、小さい方のミスフィット角を採用する。
- (3) 空間方向に0.1°間隔のグリッドを設定する。グリッドを中心とした半径75km以内、1年以内に含まれる地震を抽出し、ミスフィット角の平均値を計算する。

## 3. データ

データとなるメカニズム解は、防災科学技術研究所のF-net解（1997年1月～2021年7月）を使用した。デクラスタリング（Reasenber, 1985）処理後、代表的なプレート境界地震のメカニズム解に対するKagan角を元にプレート境界型の地震を除去し、オフフォルト地震のカタログを作成した。また、プレート間固着に関しては、1998年3月から2008年2月のGNSSデータを用いて推定した。

## 4. 結果と解釈

本研究では2011年東北沖地震を挟む約24年間にわたる解析結果が得られた。ミスフィット角は時間的にも空間的にも複雑な挙動を示すが、特定の場所に着目すると、ある程度の周期性を持ちながら変動している。Uchida et al.(2016)は小繰り返し地震と地殻変動データから、およそ1～6年の周期を持つゆっくりすべりの存在を報告しているが、本研究の結果はそれと概ね調和的である。また、プレート境界型の地震はミス

フィット角が小さい時（固着継続時）に発生する傾向があり、本手法の妥当性が伺える。

東北沖地震発生前に着目すると、東北沖地震の大すべり域（アスペリティ）内のミスフィット角は小さく、基本的に固着し続けていたと推定される。また、その周囲ではミスフィット角の大きい時期が間欠的に発生しており、周囲のゆっくりすべりにより応力が繰り返しアスペリティ内に载荷されていたことも予想される。アスペリティ内をさらに詳細にみると、2001年7月から10月、2005年8月から10月、2008年8月から2009年3月、2010年8月、そして東北沖地震発生前に、ミスフィット角の大きい時期が確認できる。このうち、一部は先行研究（e.g., Ito et al., 2013）により報告されているゆっくりすべりの発生時期と重なっている。今後慎重な検討が必要であるが、徐々に発生間隔が短くなっている傾向があり、アスペリティ内での固着の剥がれが加速的に進行していた可能性がある。

東北沖地震発生後は広い範囲でミスフィット角が $90^\circ$ を超えるようになる。これは本震による応力変化に調和的なクラックで破壊が生じているためと考えられ、正断層型の余震が多く起きている観測事実（Asano et al., 2011）からも理解できる。一方、三陸沖と茨城県沖では本震後も小さいミスフィット角を維持しており、固着が継続していると解釈できる。それに加えて、本震すべりによる応力载荷の寄与もあると考えられ、地震発生ポテンシャルの高い地域として注意が必要であろう。

謝辞：防災科学技術研究所のF-netカタログ、国土地理院のGEONET F3解を使用しました。記して感謝します。

# Deep volcanic low frequency earthquakes induced by spatio-temporal stress distribution in northeast Japan

\*Genki OIKAWA<sup>1</sup>, Naofumi Aso<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup>

## 1. Tokyo Institute of Technology

近年の高感度な地震観測網の発達により、通常の地震よりも深部の下部地殻及び上部マントルで発生する微小地震が観測されてきた。この地震は規模が小さいにも関わらず2-8Hzの低周波成分が卓越することから低周波地震と呼ばれ、主に火山周辺やプレート境界で観測されている。東北日本では活火山周辺で活発な地震活動が見られており、2011年に発生した東北沖地震以降、いくつかの地域では顕著な活動変化が見られている(小菅・他2017)。東北日本の応力場は基本的に東西圧縮(Terakawa and Matsu'ura, 2010)であるが、東北沖地震によって応力変化が起きたことが活動変化に繋がったと考えられる。本研究では火山深部低周波地震のメカニズム解を決定し、応力の時間及び空間変化との関係を調べた。

メカニズムの決定にはS波とP波の振幅比を用い、グリッドサーチによって理論振幅比との残差が最小となるモーメントテンソルを推定した。結果として東北日本の26個の火山領域で発生した264イベントについてメカニズム解を決定した。得られたメカニズム解の多くは、double-couple成分を多く含んでおり、低周波地震の初期破壊プロセスが断層すべりによって駆動されている可能性を示している。一方で、メカニズムには有意なCLVD成分も少なからず含んでいることを考えると、完全な平面ではなく凸凹な面、もしくは湾曲した面上での断層すべりである可能性がある。さらに興味深い特徴として、メカニズム解のNull軸の傾斜角は震源深さ15~25kmでは20~30°と小さいが、深くなるにつれてばらつきが大きくなり、多様であることがわかった。この結果は、下部地殻では局所的な応力場がおおむね東西圧縮であるのに対し、モホ不連続面付近では熱応力やマグマ貫入プロセスによる応力の擾乱によって変化していることを示唆している。

次に、Coulomb 3.3 (Toda et al., 2005; Lin et al., 2004) を用いて2008年岩手宮城地震、2011年東北沖地震による静的応力変化と得られた低周波地震との関係性を調べた。この解析の結果、応力テンソルの変化と低周波地震のメカニズム解のモーメントテンソル間の類似度と活動変化の度合いには弱い正の相関があることが分かった。この結果は低周波地震活動が時間的な応力変化にある程度敏感であることを示唆している。

## Estimate of the stress field in the region of the 2017 southern earthquake

\*Hikari Nogi<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Masayo Sawada<sup>2</sup>, Kazuhide Tomisaka<sup>2</sup>

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

内陸地震の発生には応力場が密接に関係しており、地震発生過程を理解するためには、地殻の応力状態を知ることが重要である。例えばKawanishi et al.(2009)では、2000年鳥取県西部地震 (Mw=6.6) の稠密余震観測で得られた余震データを使用して応力インバージョン法により詳細な応力場を推定し、中国地方の地震帯において、それ以外の領域に比べて最大圧縮応力の向きが回転していることを示唆した。この空間変化は、地震帯直下の下部地殻の不均質構造を仮定した有限要素法による応力場のパターンと整合的であり、断層上の延性的なすべりによる影響で説明できることが報告された。

本研究では、長野県西部地域における稠密地震観測で得られた地震データを用いて、2017年6月25日に発生した長野県南部の地震(Mj=5.6)の断層近傍の詳細な応力場を推定し、空間的な不均質性を調べた。

本研究の対象領域である長野県西部地域は、1984年の長野県西部地震(Mj=6.8)の発生以降30年以上にわたり地震活動が継続している。地震は本震断層面に沿って分布するだけでなく、御嶽山東麓域では断層から離れたところでも多数起きている。本研究で扱う長野県南部の地震は、村瀬・木股(2020)において左横ずれ断層によると考えられ、長野県西部地震の断層の東端付近で発生した。

メカニズム解の推定には、稠密地震観測データのうちIio et al.(2017)が使用した1995年6月から2010年6月までの地震データに未解析のデータを加えて、2017年長野県南部の地震発生前までのデータを使用した。この地域は震源が浅く、その直上に多数の観測点が設置されているため、精度の良いメカニズム解を求めることができる。

応力インバージョンの計算には、Iio et al.(2017)による、断層面上で生じるすべりの方向が断層面に働く剪断応力の方向と平行であるとするWallace-Bott仮説と、解析領域内の応力場は時空間的に一様であるという仮定を用いて、解析に用いる地震に関して、観測されたすべりの方向と理論的なそれとの差(ミスフィット角)の二乗和を最小とする方法を用いて、グリッドサーチにより求めた。

応力インバージョンの結果、断層近傍において応力場の不均質性が見られた。本解析領域全体における最大圧縮応力 $\sigma_1$ のazimuthの平均は西南西-東南東方向であり、これはTerakawa et al.(2013)における、本研究で解析に用いた領域を含む広域での $\sigma_1$ のazimuthと比較すると、やや東-西に近い向きであった。また長野県南部の地震の西側の一部(深さ2-3km)では、 $\sigma_1$ のazimuthが北西-南東から北北西-南南東方向であり、応力比は周囲と比べて低い傾向が見られた。これはYukutake et al.(2010)にて報告された特徴と同様の応力場のパターンを示している。さらに、長野県西部地震の断層の南東側(深さ2.5-3km)と長野県南部の地震断層より北部(深さ3-3.5km)では一部、 $\sigma_1$ のazimuthが東-西方向へと回転している領域が見られた。

これより、本解析領域全体における $\sigma_1$ のazimuthの平均が西北西-東南東であるのに対して、一部北西-南東から北北西-南南東を示す領域や東-西方向など、平均的な応力パターンとは異なる不均質構造の存在が考えられる。しかしながら、不均質性を示す一部の領域では、ミスフィット角が明確な最小値を示していないため、解の精度評価についても検討する。また、地震発生前の不均質な応力場が地震発生にどのような影響を与えるのかについては、局所的な剪断応力の増加に寄与するのか、断層強度の低下に寄与するのか、などの観点から考察していきたい。

# Estimation of inelastic deformation using geodetic and seismic data: Application to Niigata-Kobe Tectonic Zone

\*Akemi NODA<sup>1</sup>, Tatsuhiko SAITO<sup>2</sup>

1. Meteorological Research Institute, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震は地殻内の弾性歪みエネルギーを解消する現象であることから、地殻内の歪みエネルギーの蓄積状況を知ることが、地震の発生メカニズムを理解する上で重要である。そのため、我々はこれまで地震データと測地データに基づいて地殻内の歪みエネルギー変化をモニタリングする手法の開発を行ってきた。

歪みエネルギー変化は、背景応力場と応力変化から定量的に評価することができる。地震発生に至る歪みエネルギー蓄積（時間変化）をモニタリングするためには、周辺の地殻活動による応力変化の正確なモデル化が必要となる。プレート境界地震を発生させる歪みエネルギー蓄積の原因は、プレート境界での安定すべりや固着といったすべりの不均質による応力変化にあると理解できるのに対して、内陸の地殻浅部で発生する地震（内陸地震）はプレート境界ほど明瞭な構造境界のない場所で発生するため、プレート境界地震と同じ枠組みをそのまま適用することはできない。そこで本研究では、応力変化の原因である地殻内非弾性変形をプレート境界のような平面に限定させるのではなく、3次元モーメントテンソル密度分布としてモデル化することで、地殻内の応力変化の汎用的な推定手法を確立することを目指している。

Noda & Matsu'ura (2010) で提案した3次元モーメントテンソル密度分布の推定手法では、モーメントテンソルの方向も含めて推定したが、地表の限られたGNSS観測データから地下のモーメントテンソル6成分を一意に決定できるか、その信頼性が残された課題となっていた。地殻変動の力源たるモーメントテンソルの物理的実体が、地殻内の微小なクラックで生じる脆性破壊や塑性流動といった非弾性変形であることを考慮すると、その方向は基本的にテクトニック応力場（背景応力場）に従うはずである。そこで、モーメントテンソルの方向を応力場の方向に固定した上でモーメントテンソル密度分布を推定することとした。応力場の情報は、対象地域で発生した地震のメカニズム解から推定できる。つまり、モーメントテンソルを応力場の方向に固定する新たな手法では、測地データでは足りない情報を地震データの情報で補い、モデルの信頼性を高めることができる。

本講演では、新潟神戸変形集中帯への適用例を紹介する。新潟神戸変形集中帯のうち東経136°以東をモデル領域とし、F-netメカニズム解からモデル領域内の平均的な応力場を推定した。次に、GEONETのF3解を時系列解析して2004年中越地震等の地震イベントによる変動を取り除き、地震間のGNSS変位速度データを得た。モーメントテンソルの方向を平均的な応力場に固定し、変位速度データから3次元モーメントテンソル密度分布を推定した結果、新潟神戸変形集中帯に沿って不均質な分布が推定された。

Noda & Matsu'ura (2010) の結果と比較すると、Noda & Matsu'ura (2010) のモーメントテンソル密度のピークのうち、モーメントテンソルの方向が背景応力場と調和的な領域に関しては、本研究の解析でも同様のピークが現れた。一方、Noda & Matsu'ura (2010) でモーメントテンソルの方向が背景応力場と食い違う領域に関しては、本研究の結果ではモーメントの集中は見られなかった。したがって、モーメントテンソルの方向を固定することにより、その場のテクトニクスと調和的なモーメント、つまり非弾性変形を抽出することができたと考えられる。

---

Room B | Regular session | S08. Earthquake physics

## PM-1

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Junichi Nakajima (Tokyo Institute of Technology)  
Fri. Oct 15, 2021 1:30 PM - 3:00 PM ROOM B (ROOM B)

---

### [S08-12] Repeating earthquakes and aseismic slip: Toward unified understanding of seismogenesis

○Junichi NAKAJIMA<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>2</sup> (1.EPS Department, Tokyo Tech, 2.Graduate School of Science, Tohoku University)

1:30 PM - 1:45 PM

### [S08-13] Detection of slip events amid the transitional regime between the unstable seismic and stable sliding regimes

○Yoshio FUKAO<sup>1</sup>, Tatsuya Kubota<sup>2</sup>, Hiroko Sugioka<sup>3</sup>, Aki Ito<sup>1</sup>, Takashi Tonegawa<sup>1</sup>, Hajime Shiobara<sup>4</sup>, Mikiya Yamashita<sup>5</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>2</sup> (1.JAMSTEC, 2.NIED, 3.Kobe Univ, 4.Univ Tokyo, 5.AIST)

1:45 PM - 2:00 PM

### [S08-14] Longer than One-year Afterslip due to the 2016 Moderate Earthquakes along Chaman Fault: Noncomplementary Co- and Post-seismic Slip Distribution

○Masato FURUYA<sup>1</sup>, Fumiko Matsumoto<sup>2</sup> (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2.PASCO)

2:00 PM - 2:15 PM

### [S08-15] Propagation velocity of detachment front along a seismogenic plate interface in a rate– state friction model

○Naoyuki KATO<sup>1</sup> (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

2:15 PM - 2:30 PM

### [S08-16] Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories

○Keisuke ARIYOSHI<sup>1</sup>, Toshinori Kimura<sup>1</sup>, Yasumasa Miyazawa<sup>1</sup>, Sergey Varlamov<sup>1</sup>, Takeshi Iinuma<sup>1</sup>, Akira Nagano<sup>1</sup>, Joan Gomberg<sup>2,3</sup>, Eiichiro Araki<sup>1</sup>, Toru Miyama<sup>1</sup>, Kentaro Sueki<sup>1</sup>, Shuichiro Yada<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>4</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup> (1.JAMSTEC, 2.USGS, 3.University of Washington, 4.NIED)

2:30 PM - 2:45 PM

### [S08-17] Conditions for the existence of the propagation velocities for two forms of the slip fronts and their physical interpretations

○Takehito SUZUKI<sup>1</sup> (1.Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University)

2:45 PM - 3:00 PM

## Repeating earthquakes and aseismic slip: Toward unified understanding of seismogenesis

\*Junichi NAKAJIMA<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>2</sup>

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

内陸地殻やスラブ内における地震の発生には高間隙圧流体の存在とそれによる有効法線応力の低下が深く関与しているとの指摘がある一方で、プレート境界における繰り返し地震の発生には孤立したアスペリティパッチの周囲の準静的すべり（非地震性すべり）が不可欠であると考えられている。内陸地殻においても大地震の前震の中の繰り返し地震活動や前震のマイグレーションなどから非地震性すべりの存在が示唆されているが、非地震性すべりが普遍的に存在するかどうかはよくわかっていない。そこで本研究では、Igarashi (2020)の相似地震・繰り返し地震カタログに含まれる地震を用いて、日本列島下における繰り返し地震の分布およびその時間的特徴を系統的に調査した。まず、相似地震カタログに含まれる2003年～2017年に発生した地震を内陸地殻、太平洋プレートの上部境界面、および太平洋プレート・フィリピン海プレート内部（スラブ内部）の3つの領域に分け、地殻内とスラブ内の地震については波形相関を用いた震源決定(hypoDD)を行い、震源の重なりから繰り返し地震かどうかを判定した。断層半径の計算には応力降下量は3MPa（内陸地殻）、10MPa（スラブ内）を仮定し、断層が平面および深さ方向とも70%以上重なっている場合を繰り返し地震と判定した。このようにして選ばれた繰り返し地震は地殻内が1333グループ、スラブ内が79グループであった。これらの繰り返し地震は発生間隔が短い（数分から数ヶ月）ものがほとんどであり、いわゆるバースト型の繰り返し地震（Igarashi et al. 2003）である。なお、プレート境界の繰り返し地震についてはこれまでも多くの研究がなされているため、Igarashi (2020)の繰り返し地震カタログをそのまま利用した。本研究の結果、繰り返し地震は従来その発生が確認されていたプレート境界だけではなく、内陸地殻やスラブ内でも広く発生していることが明らかになった。特に、M6.5以上の大地震余震域や群発地震が活発な地域で繰り返し地震が多く発生しているという特徴がある。また、発生の時間的特徴から、平均発生間隔と発生レートがべき乗則の関係にあることも示された。この特徴は繰り返し地震の発生場所（内陸地殻、プレート境界、スラブ内）、またはその発生時期（定常的な活動か大地震の余効すべりに伴って発生かなど）によらず、すべての繰り返し地震グループで共通であり、改良大森公式のp値は概ね0.7-1.0の範囲になる。これらの結果は、繰り返し地震はどこでも起こりうることを、またその発生メカニズムは場所によらず同じであることを強く示唆している。つまり、周囲の準静的すべりにより孤立したパッチが破壊することで繰り返し地震が発生するというプレート境界で考えられてきたモデルは、すべての繰り返し地震に適用できると考えられる。繰り返し地震の発生メカニズムをより詳細に調べるため、2011年東北沖地震に誘発され、その地震活動の詳細な解析から間隙流体圧の時間変化が明らかにされた福島・山形県境の群発地震（Yoshida and Hasegawa, 2018）の震源域内で起こっている繰り返し地震の時空間変化を分析した。その結果、1) 繰り返し地震は背景地震と同じ断層面上で発生していること、2) 間隙圧が高い活動初期に繰り返し地震の発生割合が高いこと、3) 繰り返し地震の発生間隔は間隙圧が高い活動初期に短いことが明らかになった。結果1)は繰り返し地震の発生は通常地震（背景地震）と同じメカニズム（既存断層面上でのすべり）であることを示している。さらに、プレート境界での繰り返し地震の解釈を援用し、結果2), 3)も考慮すると、断層面上での間隙流体圧が大きいつきに非地震性すべりのすべりレートが大きいつき、そのすべりに伴って繰り返し地震が発生することが強く示唆される。なお、繰り返し地震として認識されるためには、周囲のパッチと相互作用のない孤立したパッチが観測期間内に複数回すべることが必要であり、この条件が満たされない場合には、繰り返し地震ではないいわゆる普通の地震として観測されることになる。今回の観測事実とこれまでにわかっている知見を総合的に解釈すると、すべての地震は、A) 間隙圧の上昇によって既存断層面の強度が低下し、B)そこで非地震性すべりが発生し、C) その中のアスペリティパッチがすべることによって発生すると結論づけられるのではないだろうか。これまでは地震発生にはA)のメカニズムが本質であると考えられてきたが、全ての地震の背後には非地震性すべりがあると考えると、プレート境界地震も含めすべての地震を統一的に理解できる。

## Detection of slip events amid the transitional regime between the unstable seismic and stable sliding regimes

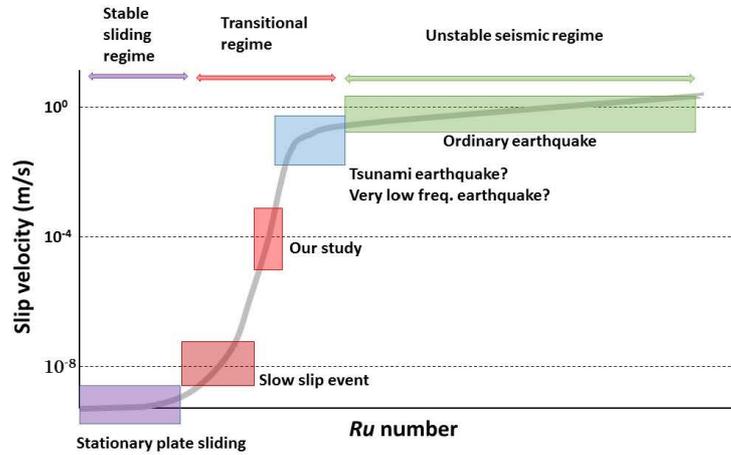
\*Yoshio FUKAO<sup>1</sup>, Tatsuya Kubota<sup>2</sup>, Hiroko Sugioka<sup>3</sup>, Aki Ito<sup>1</sup>, Takashi Tonegawa<sup>1</sup>, Hajime Shiobara<sup>4</sup>, Mikiya Yamashita<sup>5</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>2</sup>

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Kobe Univ, 4. Univ Tokyo, 5. AIST

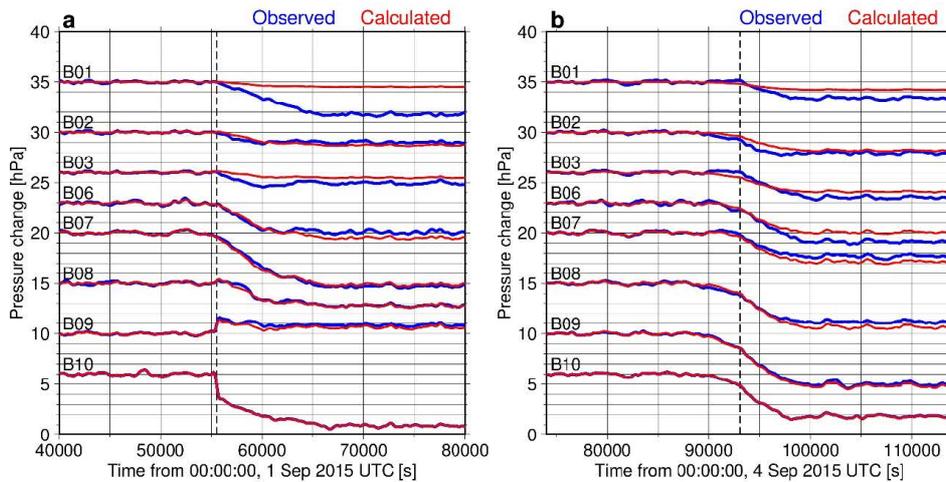
1. 序：プレート間滑りには、応力解放を伴わない定常安定滑りから蓄積応力を爆発的に解放する不安定滑りまで多様なモードが存在する。どのモードが出現するかは断層とそれを取り巻く条件に依存する。数値実験によればコントロールされた条件下では、滑りモードは安定滑り領域、遷移領域、不安定滑り領域に分離される (Barbot, 2019)。スロースリップイベント (SSE) は安定滑り領域と遷移領域との境界付近で発生し、津波地震や超低周波地震 (VLFE) は遷移領域と不安定滑り領域との境界付近で起こる現象と考えられる (図 1)。しかし、これまで遷移領域本来の滑りイベントの観測例がないため、SSEと津波地震との間には物理的に本質的なギャップがあるとする考えもある (Ide, 2014)。本講演では遷移領域の真ただ中に位置付けられる滑りイベントの観測例を2件報告する。

2. 観測と記録解析：2015年5月から翌年5月までの1年間、北部小笠原海溝急斜面の西側緩斜面 (水深約5000m) において10台 (故障のため実質的には8台) の絶対海底水圧計PARO-8B7000-I-005による最小サイト間距離10kmのアレー観測を行った。サンプリング速度は4Hz, カットオフ周波数は0.7Hzとした。2015年9月1日にアレーのごく近傍でM6.0の低角逆断層地震が発生し、アレーはその長周期地震波海底加速度成分・津波・上下動海底永久変位を記録した。これらを一連のダイナミックなプロセスとして解析し地震断層モデル ( $D=15$  cm,  $S=210$  km<sup>2</sup>,  $M_0=0.95 \times 10^{18}$  Nm,  $\Delta \sigma=0.77$  MPa) を得た。このモデルに基づいて計算した水圧波形と観測波形との一致は驚くほど良い。アレーは、地震の直後と3.5日後にそれぞれ時定数1-2時間程度の海底変動を記録した (図2：青線)。これら2イベントは、それぞれ本震と同じメカニズムの非地震性逆断層滑りであると考えて、その大まかな滑りの分布と時間発展を求めた。断層面はIwasaki et al. (2015)の推定したプレート境界面上にあるとし、深さ方向に3枚の断層セグメント (各面積は20x20 km<sup>2</sup>) を設定し、滑りは1つのセグメント上で一定であるとした。時刻tの観測水圧変化は3つのセグメントの時刻tにおける滑りの効果の和であると考え、各セグメントの滑りの時間発展を求めた。得られたモデルに基づく水圧変化の時間発展を赤線で示す (図2)。観測とモデルとの一致は一般に大変良い。

3. 結果と議論：本震直後のイベントも3.5日後のイベントも、また何れのセグメントにおいても、滑りの時間発展は、 $f(t)=1-\exp(-t/T)$  タイプの時間関数で非常に良く近似できる。3セグメントの平均的なTの値は最初のイベントが3800 s, 2番目のイベントが2100 sであった。即ちイベントの特性時間2Tは1時間から2時間の程度であった。 $M_0$ は最初のイベントが $8.1 \times 10^{18}$  Nm, 2番目のイベントが $8.4 \times 10^{18}$  Nmで、何れも本震より1桁近く大きい。震源関数 $f(t)$ の形と $M_0$ の大きさからして、これらが本震の余効変動ではなく、テクtonicな応力の解放イベントであることは明らかと思われる。応力降下量 $\Delta \sigma$ は最初が1.2 MPa, 次が0.96 MPaの程度で本震の $\Delta \sigma$ と余り変わらない。観測されたイベントの特性時間2Tは同じ $M_0$ の通常の地震の継続時間と比べて4桁大きく、同じ $M_0$ のSSEの継続時間と比べて3桁小さい (Gao et al., 2012)。応力降下量は、通常の地震と比べると (Denolle & Shearer, 2016) 低めで、SSEと比べると (Gao et al., 2012) 1桁以上大きい。破壊速度を断層の長さで定義すると、通常の地震よりも4桁遅く、SSEよりも3桁速い (Gao et al., 2012)。今回検出したイベントは津波地震や超低周波地震よりも遅く、スロースリップイベントよりも早い現象である。プレート間滑りを不安定滑り (地震) 領域と安定滑り領域とに分けたとき、両者の間を繋ぐ遷移領域の実態が見えてきたと考える。



**Figure 1.** Schematic illustration for how slip mode changes when the  $R_u$  number is varied while the frictional parameter ratio,  $(b-a)/b$ , is kept constant (Barbot, 2019).



**Figure 2.** Observed (blue) and calculated (red), 600-s lowpass filtered, tide-removed records. They show the quasi-static responses of seawater to seafloor vertical displacements. **a.** Records for the first aseismic event. The vertical dashed line indicates the origin time of the mainshock. **b.** Records for the second aseismic event. The vertical dashed line indicates the origin time of the M3.2 aftershock. In **a**, the records were inverted for the first aseismic event after subtraction of the impact of the mainshock.

## Longer than One-year Afterslip due to the 2016 Moderate Earthquakes along Chaman Fault: Noncomplementary Co- and Post-seismic Slip Distribution

\*Masato FURUYA<sup>1</sup>, Fumiko Matsumoto<sup>2</sup>

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. PASCO

チャマン断層は、インドプレート西部とユーラシアプレートの境界にあたる長さ900km以上の左横ずれ断層であり、地質学的に予想されるプレート間相対運動は $\sim 2\text{cm}/\text{年}$ 程度である。この断層は歴史的に見ても地震活動が低いことが知られており、固着しているかあるいはクリープしているのではないかと考えられてきた (Ambraseys and Bilham 2003)。陸上観測点は依然として少なく、InSARを用いてクリープ域と固着域のマッピングが報告されている (Fattahi and Amelung 2016; Barnhalt 2016)。一方、Furuya and Satyabala (2008)は、2005年に発生したM5の地震が非常に長く広い範囲でのAfterslipを起こしていたことを報告した。この2005年のM5地震以来、大きな地震は発生していなかったが、2016年5月と7月にM5クラスの地震が南西方向に100km以上離れた断層沿いで発生した。

2016年地震の地震前および地震時、地震後の地殻変動をESAのSentinel-1衛星のInSARデータを用いて調べたところ、震源近傍での地震前の地表付近のクリープ運動は存在していなかった。地震時地震後の地殻変動は明瞭で、特に2016年7月のmb4.7に伴う地殻変動は、Furuya and Satyabala (2008)で報告した変動とよく似ている。

得られた地震時地震後のInSARデータを元に、カルマンフィルタ<sup>~</sup>に基づいたいわゆる「時間依存滑りインバージョン」 (Segall and Matthews 1997)を行って、滑り分布と滑り速度分布を推定した。空間方向と時間方向の二つのハイパーパラメータは、Miyazaki et al (2006)に倣ってトレードオフから決定した。

推定された滑り分布(滑り速度分布)で最も特徴的なことは、一年以上続いた地震後滑りが地震時滑りの空間分布と「相補的ではない」ことである。従来から報告されているM>6地震に伴うAfterslipは、ほぼ例外なく地震後滑りは地震時滑りの外側で起こっている(e.g., Miyazaki et al., 2004; Hsu et al., 2006; Barbot et al., 2009)。我々の推定でも浅部での地震後滑りはゼロではないが、最も顕著に滑るパッチは明らかに地震時滑りが最大のパッチである。

この結果をRate-and-state friction (RSF) lawの枠組みで解釈するためには、(a-b)の「滑り速度依存性」 (e.g., Shimamoto 1986)が必要である。この滑り速度依存性はSlow slip event (SSE)のモデリングでもしばしば要請されている(e.g., Shibasaki and Iio 2003, Im et al 2020)。SSEは” 静かに”滑り始めるように見えるため地震時滑りは無視されることが多いが、Ide et al (2007)が示したようにゼロではない。チャマン断層の中規模地震(とその地震後滑り)はNon-silent SSEと言えるかもしれない。

有効法線応力の動的な変化など(e.g., Suzuki and Yamashita 2009, Segall et al 2010)のRSF則の摩擦パラメータの調整以外の解釈もあり得る。

## Propagation velocity of detachment front along a seismogenic plate interface in a rate–state friction model

\*Naoyuki KATO<sup>1</sup>

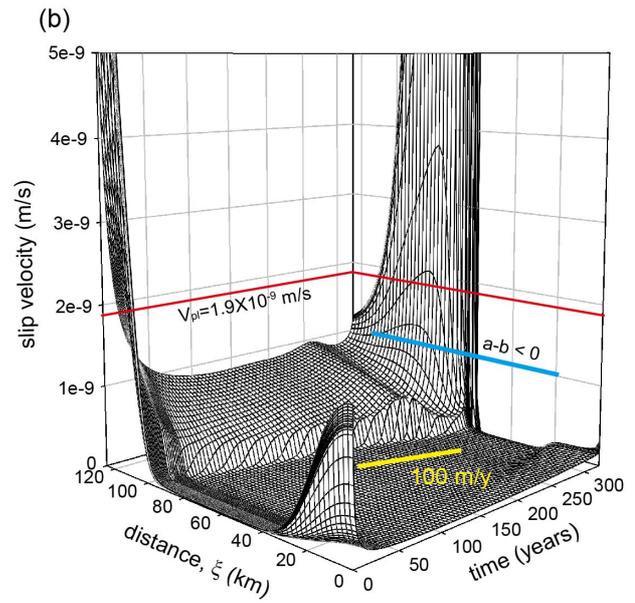
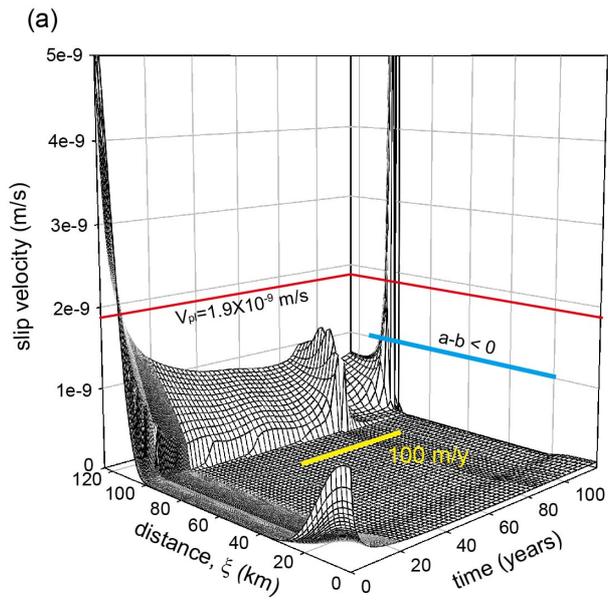
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

速度・状態依存則を用いて地震発生サイクルの数値シミュレーションを行い、地震間（前の地震の直後から次の地震の直前まで）の非地震性すべりの時空間発展を調べた。モデルでは、沈み込み域のプレート境界を仮定し、十分深部のプレート境界に一定の安定すべり速度 $V_{pl}$ を与えた。シミュレーションでは、浅部の速度弱化域 ( $a-b < 0$ ) で地震が周期的に発生し、深部の速度強化域 ( $a-b > 0$ ) で常に非地震性すべりが発生する状況が再現される。地震間での速度弱化域は完全に固着しているわけではなく、非地震性すべりが深部から浅部に伝播していく。深部の非地震性すべりにより固着域の最深部で応力集中が生じ、固着が徐々に破壊されていくためである。図1は、地震間のすべり速度の時空間分布のシミュレーション結果の例であり、(a)は速度・状態依存則の特徴的すべり量 $L = 20\text{mm}$ の場合、(b)は $L = 100\text{mm}$ の場合である。 $\xi$ はプレート境界に沿って地表から測った距離であり、速度弱化域と速度強化域の境界は $\xi = 113\text{ km}$ である。深部の速度強化域では常に非地震性すべりが発生しており、これは速度弱化域に徐々に伝播していく様子が見られる。速度弱化域での非地震性すべりのすべり速度は $0.1V_{pl}$ 程度であり、伝播速度はほぼ一定で、 $V_{pl}$ に比例し、 $(b-a)\sigma$ に反比例することがわかった ( $\sigma$ は有効法線応力)。特徴的すべり量 $L$ には依存しない。非地震性すべりの伝播に伴い、プレート境界のせん断応力は、前の地震による応力降下の状態から、すべり速度約 $0.1V_{pl}$ に対応する定常応力まで増大する（負の応力降下）。非地震性すべり域の先端では、深部の非地震性すべりによる応力集中と、非地震性すべりの伝播による負の応力降下による負の応力集中とが釣り合っている状況であると考えられる。この2つの状況の応力拡大係数が等しいと仮定し、均質無限弾性体中の半無限長クラックの解を利用すると、非地震性すべりの伝播速度を導くことができ、 $V_{pl}$ に比例し $(b-a)\sigma$ に反比例するというシミュレーション結果を説明することができる。図1の2つの例の場合の理論的な伝播速度は約 $80\text{ m/y}$ で、シミュレーションで得られる約 $100\text{ m/y}$ と非常に近い値が得られる。非地震性すべりの伝播は測地データなどから検出できる可能性がある。Bruhat & Segall (2017)はCascadia沈み込み帯においてプレート境界の固着域で伝播する非地震性すべりの伝播速度を $30\text{--}120\text{ m/y}$ と推定した。この結果から、前述の関係を使うと、 $(b-a)\sigma$ は $0.1\text{--}0.3\text{ MPa}$ と推定することができる。

図1では、サイクルの後半ですべり速度の顕著な増大がみられる。このエピソードすべりは、 $L$ が小さいほど、また $\sigma$ が小さいほど顕著となる傾向がある（図1 a）。プレート境界の浅部行くほど、前の地震による応力降下から回復しておらず低応力状態にあるので、このすべりは浅部にはあまり伝播せず停止する。一方、深部方向には高速で逆伝播し、その伝播速度は図1 (a)の場合は $4\text{ km/y}$ である。図1 (b)の場合は、すべり域の先端が明瞭でなく、伝播速度は決められない。このエピソードすべりに伴い、せん断応力は、ほぼ $\tau_{ss}(V)$ に沿って低下する。

文献

Bruhat, L. & Segall, P., 2017, *Geophys J Int.*, 211, 427-449.



## Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories

\*Keisuke ARIYOSHI<sup>1</sup>, Toshinori Kimura<sup>1</sup>, Yasumasa Miyazawa<sup>1</sup>, Sergey Varlamov<sup>1</sup>, Takeshi Inuma<sup>1</sup>, Akira Nagano<sup>1</sup>, Joan Gomberg<sup>2,3</sup>, Eiichiro Araki<sup>1</sup>, Toru Miyama<sup>1</sup>, Kentaro Sueki<sup>1</sup>, Shuichiro Yada<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>4</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>

1. JAMSTEC, 2. USGS, 3. University of Washington, 4. NIED

In our recent study, we detected the pore pressure change due to the slow slip event (SSE) in March 2020 at the two borehole stations (C0002 and C0010), where the other borehole (C0006) close to the Nankai Trough seems not because of instrumental drift for the reference pressure on the seafloor to remove non-crustal deformation such as tidal and oceanic fluctuations. To overcome this problem, we use the seafloor pressure gauges of cabled network (DONET) stations nearby boreholes instead of the reference by introducing time lag between them. We confirm that the time lag is explained from superposition of theoretical tide modes. By applying this method to the pore pressure during the SSE, we find pore pressure change at C0006 about 0.6 hPa. We also investigate the impact of seafloor pressure due to ocean fluctuation on the basis of ocean modeling, which suggests that the decrease of effective normal stress from the onset to the termination of the SSE is explained by Kuroshio meander and may promote updip slip migration, and that the increase of effective normal stress for the short-term ocean fluctuation may terminate the SSE as observed in the Hikurangi subduction zone.

## Conditions for the existence of the propagation velocities for two forms of the slip fronts and their physical interpretations

\*Takehito SUZUKI<sup>1</sup>

1. Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University

2つの媒質間の滑りの伝播は理学的・工学的に重要な問題であり、特にその伝播端の伝播速度の決定機構は長く興味を集めてきた。これにはもちろん断層面上の滑りの伝播速度の理解も含まれる。本発表では滑り速度に二次で依存する摩擦則を仮定した以前の我々の結果（Suzuki and Matsukawa, 2019）を拡張し、滑りにも依存する摩擦力を導入して、それらの伝播速度が物理的に存在できる条件を摩擦則中に現れるパラメータの観点から明らかにする。

解析には線形臨界安定性解析（Linear Marginal Stability Hypothesis, LMSH）を用いる。ここで伝播端には intruding front と extruding front の二通りがあることに注意する（Suzuki and Matsukawa, 2019）。その理解のため、1次元系を考え、ある物理量  $s$  の伝播を考える。 $s$  がゼロと正の定常状態があるとし、一方が安定、もう一方が不安定であるとする。この時、 $s=0$  が不安定で  $s>0$  の領域が侵入していく場合を intruding front,  $s > 0$  が不安定で  $s=0$  の領域が侵入していく場合を extruding front と呼ぶ。特に extruding front について着目したい。定義から明らかのように、通常 extruding front は「一定速度で相対的に滑っている媒質の運動を止めた時の滑りの伝播端」の形状である。

LMSHの仮定の下、intruding front速度として2つ、extruding front速度として3つが存在することが明らかになり、またそれらの解析解も得られた。これらのうち、intruding front速度のうちの一つ、extruding front速度のうち2つは光学モードであり非物理的な伝播速度であった。すなわち両frontsに対して一つずつが物理的な音響モードであったと言える。加えて、支配方程式中において摩擦則を  $C_1 \dot{u} - C_2 u$  と書いた時（ $u$  は変位、 $\dot{u}$  はその時間微分） $C_1 - C_2$  相空間でそれらの物理的伝播速度が存在し得る領域の境界を表す曲線の解析的表現も得た。これは伝播速度の存在の有無、すなわち定常伝播の存在の有無が  $C_1$  と  $C_2$  の値から予測可能であることを示す。

加えて、extruding front速度において、滑り速度の二次の依存性を仮定した摩擦則に基づいた以前の数値計算結果（Suzuki and Matsukawa, 2019）と調和的な結果が得られたことは重要である。LMSHで行われるような、変位  $u$  やその微分が小さいという仮定では通常 intruding front しか現れない。しかしここでは（一般的に小さくない）ある基準となる滑り・滑り速度の点の伝播が extruding front として記述できるということが明らかになった。加えて強調すべきは、extruding速度の方が intruding速度よりも小さいということである。前者が高速地震、後者がゆっくり地震に対応することも示唆される。通常地震とゆっくり地震の存在する条件を示せたとも言える。