

Wed. Oct 26, 2022

Room A Regular session : S08. Earthquake physics
--

9:30 AM - 10:45 AM JST | 12:30 AM - 1:45 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-1

chairperson: Osamu Sandanbata(NIED), Futoshi YAMASHITA(NIED)

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

[S08-18] Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S08-19] Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-20] Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University)

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

[S08-21] Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD))

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

[S08-22] Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

11:00 AM - 12:15 PM JST | 2:00 AM - 3:15 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Hiroyuki NODA (Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute), Sumire MAEDA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-23] Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co., Ltd.)

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

[S08-24] Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University)

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

[S08-25] Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

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

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

[S08-26] Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

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

[S08-27] Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹ (1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

1:45 PM - 3:00 PM JST | 4:45 AM - 6:00 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson:Kurama OKUBO(NIED), Makiko OHTANI(ERI)

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

[S08-28] Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

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

[S08-29] Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of technology)

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

[S08-30] Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University)

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

[S08-31] Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-32] Recurrence interval of M>7 Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of M~9 earthquake*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

3:15 PM - 4:30 PM JST | 6:15 AM - 7:30 AM UTC | ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

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

[S08-33] Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto Univ.)

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

[S08-34] Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S08-35] Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3} (1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN)

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

[S08-36] 4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO² (1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.)

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

[S08-37] Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

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

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:30 AM - 10:45 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:30 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-1

chairperson: Osamu Sandanbata(NIED), Futoshi YAMASHITA(NIED)

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

[S08-18] Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda² (1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute)

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

[S08-19] Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO² (1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-20] Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino² (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University)

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

[S08-21] Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ioto Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD))

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

[S08-22] Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹² (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: A case of Nankai Trough

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda²

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の予測には、プレート境界の固着状態を監視することが重要である。通常は地殻変動データが用いられるが、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。今西・野田（2021,地震学会）は、地殻変動データから平均的なプレート間固着を推定し（基準固着）、プレート境界周辺の地震（プレート内地震）が基準固着による応力変化に調和的に発生しているか否かを判定することで、固着状態の変化を推定する手法を提案した。この手法を東北沖プレート境界に適用したところ、先行研究で報告されている本震前の固着の剥がれを始めとした様々な変動と調和的な結果が得られた。また、プレート内地震を使うため、固着が強くて日常的にプレート境界地震が少ない領域の固着状態も推定できる利点があることもわかった。本研究では、日常的にプレート境界地震の活動が極めて少ない南海トラフ沿いに本手法を適用し、年スケールの固着変化を調べた結果を報告する。

2. 手法

今西・野田（2021）の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変化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。
- ・ プレート間固着が継続する場合、固着に起因する応力変化に調和的なクラックが優先的に破壊する。
- ・ ミスフィット角（各地震の断層面のすべり角と固着に起因する応力変化から計算されるすべり角との角度差）に着目すると、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SSE等により固着状態からのずれが生じる場合は、その周囲で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。

以上の考えを元に、実際の解析手順は以下の通りである。

- （1）地殻変動データから基準固着を推定し、基準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）それぞれの地震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、メカニズム解の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0.2°間隔、時間方向には目的に応じた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以内の地震を抽出し、ミスフィット角の平均値を計算することで、プレート間固着状態の変動を可視化する。

3. データ

メカニズム解は、防災科学技術研究所のF-net解（1997年1月～2022年6月）を使用した。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、プレート内地震のカタログを作成した。基準固着に関しては、2005年3月～2011年2月のGNSSデータを用いて推定したNoda et al.(2018) のモデルを使用した。2009～2010年に発生した豊後水道SSEによる影響はデータから除去されている。また、この期間はその他に顕著な長期的SSEが発生しておらず、また東北沖地震の影響も受けていないことから、南海トラフ沿いの平均的な固着状態を表していると考えられる。

4. 結果と解釈

全期間のミスフィット角の空間分布をみると、1944年東南海地震及び1946年南海地震で大きくすべった領域で小さい値を示している。これは、過去の大すべり域の固着が少なくとも25年間にわたり継続していると解釈できる。次に、時間方向のグリッド間隔を10か月に設定し、年スケールの変動を調べた。時間的にも空間的にも変動する様子が伺えるが、最近の数年間に着目すると、日向灘周辺のミスフィット角も小さい値を示すようになっている。現在は、南海トラフ沿いの広い範囲で固着が継続していることが示唆される。

ミスフィット角が大きくなる要因の一つとして、SSEの寄与が考えられる。長期的SSEが報告されている東海、紀伊水道、豊後水道に着目すると、長期的SSEの発生に同期してミスフィット角が大きくなる傾向が確認できた。東海地域を例に挙げると、2000年頃のミスフィット角の平均値は30度程度であったのが、5年後には120度程まで上昇し、その後再び30度程度まで低下した。これは2000年秋～2005年夏頃の東海SSEの発生時期と重なっており、本手法がうまく機能していることを示している。時間変動の特徴をさらに詳しく見ると、1年から数年の周期的な変動が含まれることが確認できる。この変動は短期的SSEの発生時期に対応している可能性があり、より小さな地震のメカニズム解を用いた精密解析による検証が必要である。

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。

Mechanically coupled areas estimated from GNSS velocity data: The variety of great interplate earthquakes along the Sagami trough

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO²

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

相模トラフ沿いプレート境界では、過去に1703年元禄関東地震（M8.1）、1923年大正関東地震（M7.9）が発生して関東地域に甚大な被害をもたらした。地震時の鉛直変位や津波浸水域の観測記録から、これら2地震の震源域は同一ではないことが分かっている（Matsuda et al., 1978）。測地データ解析による大正地震の震源モデル（Matsu'ura et al., 2007）、旧汀線データ解析による元禄地震の震源モデル（Sato et al., 2016）、そしてGNSS変位速度データ解析による地震間のすべり遅れ速度分布（Noda et al., 2013）の比較から、相模トラフ沿いプレート境界には3つの破壊領域があり、元禄地震と大正地震は異なる2つの領域の組合せで破壊が生じたものと推測される。このような複雑な環境下で発生する地震は、元禄地震型・大正地震型の2種類だけだろうか？これまで経験のない大規模／小規模なプレート境界地震が発生する可能性はあるだろうか？これらの問いに答えるためには、地震発生の根本的原因であるプレート境界への応力蓄積を明らかにし、地震発生サイクルの力学モデルを構築する必要がある。そのため本研究では、Saito and Noda (2022) による力学的カップリング推定手法を関東地域に適用し、相模トラフ沿いプレート境界の地震間の応力蓄積速度の推定を試みた。

力学的カップリング推定手法では、地震間の地表の変位速度とプレート間すべり遅れ速度の線形関係、プレート間すべり遅れ速度と応力蓄積速度の線形関係を結合することにより、地表の変位速度の観測データからせん断応力蓄積速度（以降「応力蓄積速度」と呼ぶ）を直接インバージョン推定する。本研究では応力蓄積速度をガウス分布型の基底関数の重ね合わせで表現し、重ね合わせの係数を未知パラメータとして推定した。この際、非負の条件を課したダンピング最小二乗法を用いたが、これは（1）岩石の強度は有限であることから極端な応力集中を避ける、（2）地震間は基本的に応力蓄積する、という2つの拘束条件を課したインバージョンを意味する。従来のすべり遅れ速度のインバージョン解析では（1）の物理学的要請に基づいてすべりの滑らかさの拘束条件を課することが一般的である。本手法では、応力蓄積速度を直接的に拘束することができるため、より合理的で柔軟な条件設定が可能となる。

関東地域の2005年3月～2011年2月のGEONET時系列データから求めたGNSS変位速度ベクトルデータを解析した。データ期間内の2007年に房総半島沖で発生したスロースリップの影響を予め除去したため、推定された応力蓄積速度はスロースリップが発生していない状態を表している。プレート境界の深さ10kmの等深度線に沿って大きく3つの応力蓄積領域（アスペリティ）が存在し、そのうちの西側2つは大正地震、東側2つは元禄地震の震源域に対応していることが分かった。これらはプレート境界の高摩擦領域に対応しており、いずれ蓄積した応力を解放する大地震が発生すると考えられる。この結果は、当該領域で過去2種類の異なる地震イベント（元禄地震、大正地震）が発生した原因が、3つのアスペリティの連動の多様性にあることを示唆する。一方、変位速度データの分布範囲外は推定精度が落ちる傾向にあり、推定されたアスペリティの妥当性について、感度解析により慎重に評価する必要がある。今後、本研究の推定結果に基づいてプレート境界の応力蓄積モデルを構築し、断層破壊の力学と組み合わせることで、相模トラフ沿いで発生する多様なプレート境界地震のシナリオ作成に活用することが期待できる。

参考文献

Matsuda et al. (1978). GSA Bulletin, doi:10.1130/0016-7606(1978)89<1610:FMARTO>2.0.CO;2
Matsu'ura et al. (2007). GJI, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03578.x
Noda et al. (2013). GJI, doi:10.1093/gji/ggs129

Saito and Noda (2022). JGR: Solid Earth, doi:10.1029/2022JB023992

Sato et al. (2016). EPS, doi: 10.1186/s40623-016-0395-3

Near-trench large slip of the 2011 Tohoku earthquake revealed by in-situ tsunami and geodetic observations: effects of heterogeneous velocity structure on stress drop estimation

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹, Ryota Hino²

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

2011年東北地方太平洋沖地震（東北地震）では、宮城沖のプレート境界浅部において50 mを超える大すべりが生じた (Kodaira et al. 2012; Sun et al. 2017). 従来、プレート境界浅部は安定すべり領域のために地震すべりを起こさないと考えられていた (Scholtz 1998; Lay et al. 2012) にもかかわらずこのような大きなすべりが生じたため、その原因がこれまで広く考察されてきた。たとえば、地震時のすべり速度の増加に伴ってプレート境界浅部が動的に不安定すべり領域に遷移したり摩擦強度が著しく低下した説 (e.g., Noda & Lapusta 2013; Hirono et al. 2016) が提唱された。一方で、地震時の浅部の急激な摩擦弱화를積極的に支持しない報告事例もある。たとえば、地震後の掘削調査からは浅部断層を構成する鉱物の摩擦強度はそもそも低いことが明らかとなり (Ujiie et al., 2013), その鉱物試料を用いた摩擦実験では摩擦強度のすべり速度依存性が見られなかった (Remitti et al. 2015). このように、東北地震で浅部大すべりのメカニズムの決定的な答えは得られていない。この浅部の大すべり原因を明らかにすることは、巨大地震の津波発生メカニズムの理解には不可欠である。久保田・齊藤 (2021SSJ) では、震源直上の水圧計による津波波形を用いて東北地震の断層モデルを推定した。本研究では、さらに海陸の地殻変動観測データを加えて断層モデルをアップデートし、その結果をもとに東北地震の浅部すべりの原因を議論する。

津波と測地データを用いたインバージョン解析により得られた断層モデルからは、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、最大すべり量は海溝軸ごく近傍において約53 mとなった (Fig. 1a). 一方で、すべり分布に基づいて断層面上でのせん断応力変化 (応力降下) を計算したところ、海溝軸の付近では応力降下は小さく ($\ll 3$ MPa), 深部側の震源近傍に大きな応力降下 (> 5 MPa) が得られた (Fig. 1b). この応力降下の分布は、浅部大すべりを伴った東北地震の原動力となった歪みエネルギーの蓄積は、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が担っていたことを示唆する。

本解析結果は、浅部のプレート境界で応力を解放せずとも浅部大すべりを引き起こすことができることを意味する。これは一見すると矛盾しているようにも見えるが、深部での強いプレート間固着および地表の影響を考えれば合理的に解釈される。東北地震が起こる前の地震間プロセスでは、プレート境界深部の力学的固着が浅部側の沈み込みを押し留め、浅部にすべり遅れを生じさせる (Fig. 1, e.g., Lindsey et al. 2021). この深部固着による浅部すべり遅れが、東北地震において浅部が大きくすべったそもそもの要因であると解釈できる。この考えは、東北地震前から考えられてきた、浅部は安定すべり域で応力を蓄積しないとする考え (Scholtz, 1998) と調和的である。

本解析における応力降下の計算では、半無限均質媒質における理論解 (Meade, 2007) を使用した。しかし、本来、地殻構造、とくに海溝軸の周辺は構造の不均質性が大きく、これが応力降下の推定に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、2次元の鉛直断面における有限要素法に基づく計算により、構造の不均質性が応力変化にどれほど影響しうるか評価した。宮城沖での構造探査測線 (Miura et al. 2005) に沿った鉛直断面を仮定し、有限要素計算にはPylithソフトウェア 3.0.1 (Aagaard et al. 2022) を使用した。本解析で得られたすべり分布のうち、同じ測線に沿ったすべりを入力とした。計算の結果、海溝軸近傍の領域 ($z < 10$ km) においては、構造探査をもとにした速度構造を用いて計算した応力変化は、均質構造を用いて計算された応力変化の3-4割程度となった。これは海溝周辺に存在する付加体ウェッジの剛性率が低いことが主な原因である。地殻構造の不均質性を考慮すると、プレート浅部での応力降下はさらに小さくなると見積もられる。

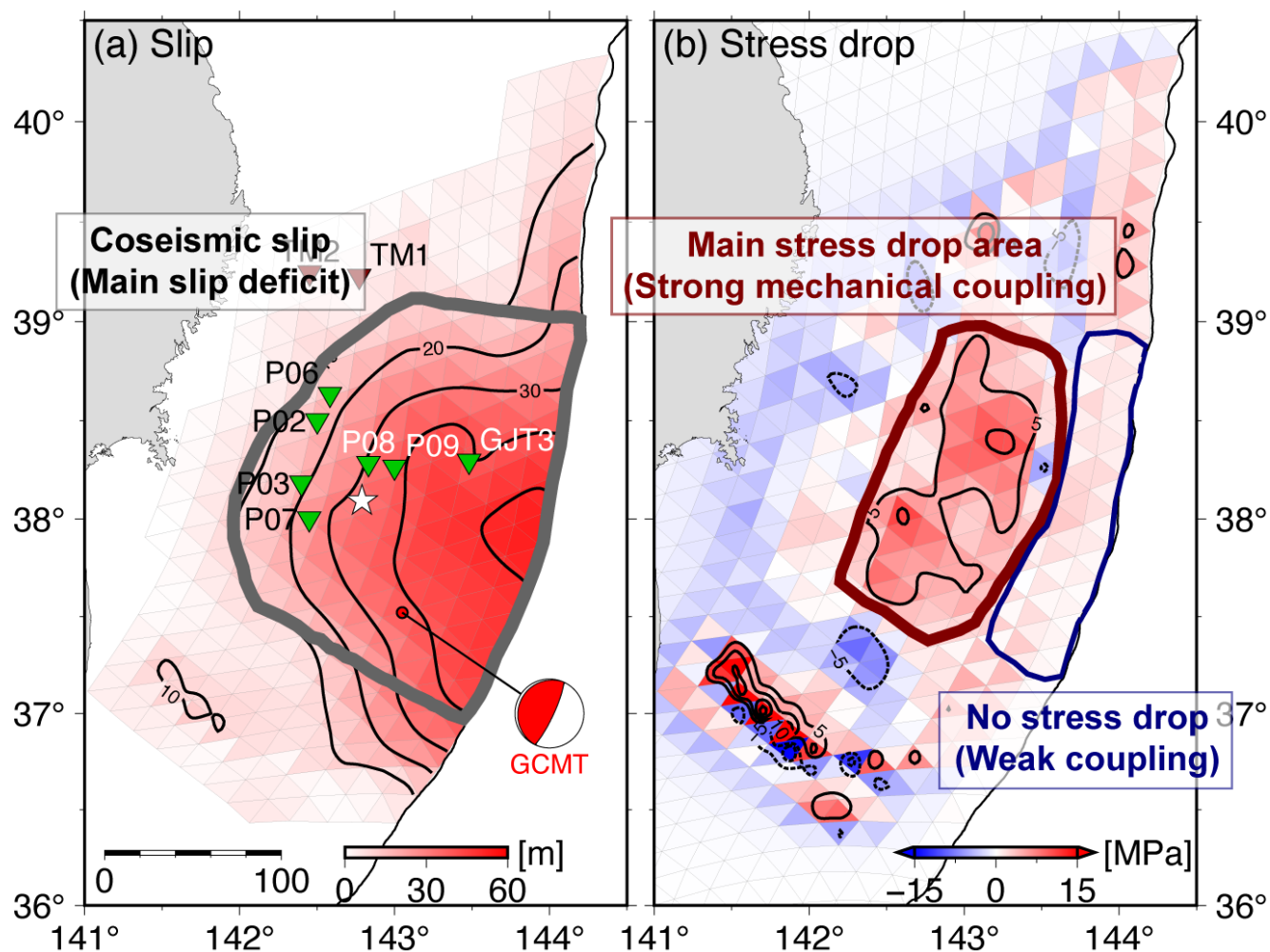


Figure 1. (a) 本研究により推定されたすべり分布 (赤色) および対応する地震間プロセスにおける主なすべり欠損域 (灰色太線). (b) すべり分布より得られた応力降下分布および地震間プロセスにおけるプレート間力学的固着領域 (濃赤色太線).

Mechanical model of trapdoor faulting at volcanic calderas: Application to Kita-Ito Caldera, south of Japan

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Tatsuhiko Saito¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD)

近年、複数の海底カルデラ火山において「トラップドア断層破壊」と呼ばれる火山現象が、M5規模の火山性地震とともに津波を繰り返し引き起こすことが明らかになってきた (Sandanbata et al., 2022など)。この種の現象は、カルデラ地下に蓄積して高圧化したマグマが作る地殻内応力場によって、カルデラ内部の環状断層が地震性すべりを起こすことによって発生すると考えられる。

本研究では、トラップドア断層破壊の静的力学モデルの計算手法を提案する。ここではトラップドア断層破壊を、高圧マグマが作り出す地殻内応力場を駆動力として、「環状断層での傾斜すべり」、「マグマに満たされた水平クラックの開口/閉塞」、「水平クラックの体積変化に伴うマグマ圧力変化」の三つのプロセスが同時に発生する現象としてモデル化を行う。これらのプロセスによる環状断層における剪断応力降下と、水平クラック壁における法線応力・マグマ圧力間の力学的つりあいを境界条件として境界要素法を解き、トラップドア断層破壊の静的力学モデルを計算する。この静的力学モデルを用いることで、地震前後でのマグマ圧力・地殻内応力場の変化や、地震前のマグマ圧力と地震規模の定量関係を調べることが可能となる。

上記の静的力学モデルを、2008年6月12日に伊豆小笠原諸島・北硫黄島近海の海底カルデラ（以降、「北硫黄島カルデラ」と呼ぶ）で発生した、トラップドア断層破壊と見られるMw 5.3の火山性地震・津波イベントに適用する。このイベントに伴う津波・地震波の波形記録と、上記の静的力学モデルを用いて計算した津波・地震波の波形を突き合わせることで、北硫黄島カルデラにおけるトラップドア断層破壊の静的力学モデルを構築した。その結果、約10–20 MPaのマグマ圧力の増加によって環状断層に応力が蓄積され、その剪断応力を解消するように発生する約5–8 mの傾斜すべりを伴うトラップドア断層破壊モデルがイベント記録をよく説明した。またこのモデルから推定されるマグマ減圧量は< 5 MPa程度で、断層破壊発生後もマグマの圧力状態は依然としてある程度高い状態に保たれることが示された。

本研究のアプローチのように、トラップドア断層破壊の力学を調べることは、構造的な地震と異なる発生機構を持つカルデラ火山特有の地震現象の発生機構の理解に繋がる。さらに、定量的観測が困難な火山地下の応力場環境やマグマだまり内に蓄積したマグマ圧力状態を推定することができ、新たな火山モニタリング手法としての可能性を有している。

Several kinds of analyses on rocks from aftershock cloud of the 2014 Orkney earthquake, South Africa (ICDP DSeis project).

*Takeshi MIYAMOTO¹, Tetsuro HIRONO², Yuki YOKOYAMA³, Shunya KANEKI⁴, Yuhji YAMAMOTO⁵, Tsuyoshi ISHIKAWA⁶, Akira TSUCHIYAMA⁷, Ikuo KATAYAMA⁸, Yasuo YABE⁹, Martin ZIEGLER¹⁰, Raymond J. DURRHEIM¹¹, Hiroshi OGASAWARA¹²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Osaka Metropolitan University, 3. Osaka University, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, 6. Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, 7. Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, 8. Hiroshima University, 9. Tohoku University, 10. Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 11. University of the Witwatersrand, 12. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

2014年に南アフリカ Orkney 近郊の Moab Khotsonk 金鉱山の深部にて M5.5 の地震が発生した（以下、Orkney 地震）。この地震の震源は深度 4.7 ± 1.2 km に位置し (Midzi et al., 2015), 余震発生域は主に 3.5–7 km に分布していた (Ogasawara et al., 2019)。国際科学陸上掘削計画 (ICDP) の “Drilling into Seismogenic zones of M2.0 to M5.5 earthquakes in deep South African Gold Mines (DSeis)” プロジェクトにより、Moab Khotsonk 金鉱山の地表深度 2.9 km の坑道から掘削調査が実施され、3つの掘削孔からコア試料が回収された。中でも、長さ約 700 m に渡って掘削された Hole B の地表深度約 3.3 km では、2014年の余震発生域と交差し、現地オンサイトチームによって、断層角礫岩を主としたコア試料の回収に成功した (Ogasawara et al., 2019)。

本研究では、Hole B コアの 50 試料において、粉末 X 線回折 (XRD) 分析による構成鉱物の同定、密度・空隙率および帯磁率の測定を実施した。また、各岩相から計13試料を選定し、蛍光X線分析による主要元素の濃度分析と室内摩擦実験装置による摩擦係数の計測および滑り安定性 (a-b) の評価を実施した。

鉱物学的・化学的分析の結果、断層帯とその周囲の貫入岩では、周囲の岩相と比較して、角閃石、黒雲母、方解石、および滑石の含有率が高い。また、鉄 (Fe_2O_3)、マグネシウム (MgO)、およびカルシウム (CaO) の濃度が高く、ケイ素 (SiO_2)、アルミニウム (Al_2O_3)、およびナトリウム (Na_2O) の濃度は相対的に低い。室内摩擦実験の結果、それらの摩擦係数は相対的に低く、a-b 値は正であった。また、一部の試料では高い帯磁率を示した。断層帯を内包する貫入岩の鉱物・元素組成より、貫入岩はランプロファイアと推測される。また、その鉱物学的・化学的特徴より、著しい変質を受けていると考えられる。また、断層試料の低い摩擦係数は、30 wt.%に達する高い滑石の含有量に起因するかもしれない。しかし、a-b 値は正であり、安定滑りの特徴に相当する。これは観測事実である余震発生と矛盾する。但し、断層の他の主要構成鉱物である角閃石のa-b 値は正負両方の値を示し (Fagereng and Ikari, 2020)、黒雲母は負 (Scruggs and Tullis, 1998)、方解石は正を示す (Carpenter et al., 2016)。すなわち、これら4種の各鉱物が有する摩擦滑り安定性が複雑に作用した結果、断層全体として複雑な摩擦挙動の傾向を示しているかもしれない。同時に、断層帯とその周囲の貫入岩における鉱物の量比のばらつきは大きいため、断層強度や滑り安定性における空間的な不均一性が存在するかもしれない。以上のような複雑な断層帯の物質科学的特徴が、Orkney 地震やそれに引き続く余震の発生およびそれらの震源分布に強く影響を与えているだろう (Miyamoto et al., 2022, GRL)。

【引用文献】

Carpenter et al., 2016, *Geophys. J. Int.*

Fagereng and Ikari, 2020, *J. Geophys. Res., Solid Earth*.

Midzi et al., 2015, *J. Seismol.*

Miyamoto et al., 2022, *Geophys. Res. Lett.*, 49, doi: 10.1029/2022GL098745.

Ogasawara et al., 2019, Proc. of the ninth international conference on deep and high stress mining.

Scruggs and Tullis, 1998, *Tectonophysics*.

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:00 AM - 12:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:00 AM - 3:15 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] AM-2

chairperson: Hiroyuki NODA (Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute), Sumire MAEDA (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

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

[S08-23] Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³ (1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co., Ltd.)

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

[S08-24] Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1} (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Kyoto University)

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

[S08-25] Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

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

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

[S08-26] Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹ (1. Kyoto University)

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

[S08-27] Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹ (1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute)

Measurements of strain along the simulated fault in 4m biaxial rock friction experiments using Fiber Bragg Grating sensors

*Kurama OKUBO¹, Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Masahito Wakahara³

1. NIED, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 3. CMIWS Co.,Ltd.

大型岩石試料を用いた摩擦実験を行うことで、模擬断層面での震源核の広がりやその後の高速な破壊伝播を再現することが可能となるが、それらを詳細に観察するためには断層面近傍でのひずみの多点計測が必要である。しかし、ひずみゲージ毎に配線が必要であるため、その取り回しが計測点数の制約となる。本研究ではそのような状況を改善するために、光ファイバーを用いたひずみ計測手法であるFiber Bragg Grating (FBG)センサーに着目し、断層面近傍のひずみ変化を空間的に密に計測することを目的とした岩石試料のひずみ計測実験を行った。

FBGセンサーは、光ファイバーケーブルのコアの一部に長さ4-8mmに渡って回折格子(FBGゲージ)をあらかじめ加工し、その伸縮に伴う反射光スペクトルの波長変化を測定することでFBGゲージを貼り付けた部分の軸ひずみを計測する。FBGセンサーを用いたひずみ計測では、1本の光ファイバーに格子間隔の異なるFBGゲージを複数点加工し、それぞれの反射スペクトルをモニタリングすることで多点のひずみを同時計測することが可能である。さらに、インテロゲーターとよばれる波長変化を測定する装置の中には、複数本の光ファイバーを同時に使用できるものもある。近年地震波観測に応用されつつあるDistributed Acoustic Sensing(DAS)との違いは、FBGセンサーは光ファイバーにあらかじめFBGゲージを加工する必要がある一方で、DASよりも高い空間分解能(DAS: >1m, FBG > 10mm)を有している点が挙げられ、室内実験スケールではFBGセンサーの方が用途に適しているといえる。

本実験では、防災科学技術研究所が所有する4m大型二軸岩石摩擦試験機を用いてスティックスリップ実験(垂直応力6MPa)を行い、断層近傍の準静的なひずみ蓄積や動的なひずみ変化を計測した。FBGセンサーは一本の光ファイバーに合計20点、1点の長さ4mmのFBGゲージ(DTG-LBL-1550, ベルギーFBGSインターナショナル社製)を120mm間隔で加工し、下側岩石試料側面の模擬断層面直下2mmに一般的なシアノアクリレート系瞬間接着剤を用いて貼り付けた。FBGゲージは模擬断層に対して平行に貼り付け、断層面に平行な軸ひずみ(ε_{xx})を測定した。インテロゲーターは、計測分解能 $<1\mu\varepsilon$ 、サンプリング周波数1kHzの性能を有し、20点のFBGセンサーを同時に計測できる波長帯域(1460nm-1620nm)を持つsi255(米国Luna社製)を用いた。また、FBGセンサーによるひずみ計測値の比較対象として、断層面を挟んで断層面直上10mmの上側岩石試料側面に取り付けられた半導体ひずみゲージを用いた。光ファイバーの径が非常に小さい($\sim 0.2\text{mm}$)ことを活かしてFBGセンサーを断層面の極近傍に貼り付けたことにより、スティックスリップ時に半導体ひずみゲージの計測値($\sim 5\mu\varepsilon$)よりも大きなひずみ変化($\sim 15\mu\varepsilon$)を計測することができた。また、20点のうちひずみ変化を明瞭に計測できた数点については、半導体ひずみゲージとFBGセンサーの間で断層破壊の圧縮側・引張側に対応する対称性を確認できた。また、スティックスリップ実験で特徴的である準静的なひずみ蓄積に関してもFBGセンサーを用いて計測することができた。

一方で、断層面からの距離の違いと対称性を考慮に入れても、断層破壊時のFBGセンサーと半導体ひずみゲージによるひずみ変化の違いを定量的に説明することはできなかった。これは本実験における動的すべりが単純なモデルで説明できるものではなかったことによると考えられる。また、震源核の成長過程や破壊伝播速度を計測するためには、より高いサンプリング周波数が必要であることも明らかとなった。20点のFBGゲージのうち3点は接着不良により反射スペクトルの波長変化が計測できなかったことから、岩石試料への接着方法も改善する必要があることが分かった。本発表では、FBGセンサーを用いたひずみ計測結果の解析に加え、インテロゲーター内のガスセルを用いた波長校正に起因するランダムノイズの除去方法についても議論する。

今後、一本の光ファイバーで複数点のひずみを同時に計測可能であるという利点を活かし、半導体ひずみゲージよりも多点かつ断層により近いひずみ計測を実現することで、震源核の成長過程や破壊伝播様式の解明に貢献できると期待される。

Transition of frictional properties from velocity-weakening to velocity-strengthening for siliceous sandstone revealed by rotary-shear friction experiment

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}

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

断層の摩擦特性を明らかにすることは地震の発生機構を理解する上で重要であるため、岩石摩擦特性に関する室内実験研究が盛んに行われてきた。特に、様々な岩石が断層の不安定すべりを引き起こす速度弱化（摩擦係数がすべり速度の増加とともに低下する傾向）の性質を持つことがこれまでに示されている（e.g., Di Toro et al., 2011）。一方、近年の観測学的研究により通常の地震よりもはるかに遅いすべり速度で準安定的に断層がすべるスロー地震が様々な地域で発生していることが確認されており、またすべり速度の異なる現象が近接した、もしくは同一の断層構造で発生していることが先行研究により指摘されている（e.g., Ito et al., 2013; Yokota & Ishikawa, 2020; Fukao et al., 2021）。このような速度・時間スケールの異なるすべり現象を生じさせる断層の摩擦特性を明らかにすることは、多様な地震発生形態を理解するうえで重要である。さらに、摩耗物の生成や剪断に伴う断層面の状態も摩擦特性と密接な関係がある（e.g., Hirose et al., 2012; Verberne et al., 2014）。したがって、本研究では、広範囲なすべり速度帯における摩擦特性、摩耗特性および断層面の状態について明らかにすることを目的とし、地殻の主要構成鉱物である石英を多く含む石英系砂岩を対象とした剪断摩擦実験を行い、得られたデータを解析した。

実験には防災科学技術研究所に設置された回転剪断摩擦試験機を用いた。岩石試料は既存弱面の影響が少なくと考えられるインド産の石英系砂岩を使用した。実験条件はすべり速度 10^{-3} – 10^{-1} m/s、垂直応力は0.5, 1.0, 1.5 MPaの3通り、すべり距離は約200–300 mの条件で合計45回の実験を行った。また、赤外放射温度計（KEYENCE IT2-02, IT2-50）を用いて実験中の断層面近傍の温度を連続的に計測した。摩耗率を推定するために、実験後に生成された摩耗物を全て収集し、その質量を計測した。本研究では、様々な垂直応力およびすべり速度での実験結果を比較するために、垂直応力とすべり速度の積で表される入力仕事率[W/m²]を導入し、摩擦特性、摩耗特性および断層面の状態を調査した。剪断応力とすべり速度の積で求まる摩擦力の仕事率は摩擦特性と密接に結びついている（Di Toro et al., 2011）一方で、すべり量に応じて非定常的に変化するため異なる実験条件間の比較指標として扱いづらいことから（前田・他, 2022, JpGU）、本研究では実験条件ごとに定常的な入力仕事率を基準とした。

実験の結果、入力仕事率が0.06 MW/m²を境に摩擦特性、摩耗特性、断層面の状態が大きく変わることが明らかとなった。平均剪断応力と垂直応力の比によって求まる摩擦係数は0.06 MW/m²以下では速度弱化特性を示したのに対し、0.06 MW/m²以上では速度強化特性に転じることがわかった。摩耗率（一実験中の摩擦力による総仕事量に対する収集された摩耗物の質量）は0.06 MW/m²以下では摩耗物がほとんど生成されないため入力仕事率によらずゼロに近い値であったのに対し、0.06 MW/m²以上では入力仕事率に対して正の相関を示した。断層面の状態は0.06 MW/m²以下では光を反射する面（鏡面）が形成されるのに対し、0.06 MW/m²以上では鏡面の破壊が始まり、入力仕事率が0.1 MW/m²以上になると再び鏡面の形成が始まることが確認された。剪断面近傍の温度を調べた結果、0.06 MW/m²以上では最高温度が100℃を超えていたことが判明した。上記の結果から、石英系砂岩内の断層にすべりが生じた場合、そのすべり速度と垂直応力の増加に伴い摩擦特性、摩耗特性、断層面の状態がある閾値を境に大きく変わることが予想される。特に摩擦特性の調査結果は、石英系砂岩内の断層が安定すべりから不安定すべりに遷移する過程ですべり速度の増加に伴う速度強化特性が生じた場合に、そのすべりの成長を抑制し、スロー地震の一因となる可能性を示唆している。

Frictional properties of metagabbro gouge in meter scale

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

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

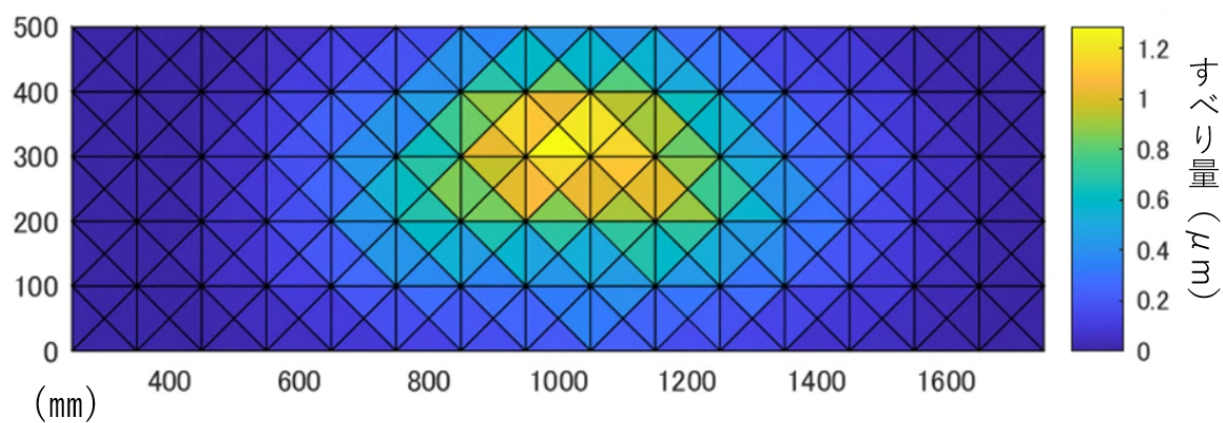
岩石の摩擦特性が断層スケールに依存するか否かは極めて重要な研究テーマである一方、確認する手段が限られていることから、未だその真偽は明らかとはならない。そのため、山下他（2021, 地震学会；2022, JpGU）は変はんれい岩の粉末粒子を模擬ガウジ（平均粒径12 μm , 最大粒径75 μm ）として用い、メートルとセンチメートルの二つの断層スケールにおいて可能な限り近い条件下での摩擦実験を実施して、スケール間で摩擦特性に違いがないかを調べてきた。メートルスケール実験（下田他, 2020, 地震学会）に使用した試験機は防災科学技術研究所が所有する大型二軸摩擦試験機（断層面積: 1.5 m $\times$ 0.1 m）、センチメートルスケール実験で使用した試験機は電力中央研究所が所有する二軸摩擦試験機（断層面積: 10 cm $\times$ 5 cm）である（Mizoguchi et al., 2021, EPS）。調査の結果の一つとして、速度ステップ変化に対する応答から見積もられた速度-状態依存摩擦則（rate- and state-dependent friction law, 以下RSF則）の摩擦パラメタのうち、 a および b に関しては二つのスケール間で有意な差は見られなかったが、 D_c に関してはセンチメートルスケール実験で得られた 9.9 ± 4.9 μm に対し、メートルスケール実験では 23.9 ± 10.2 μm と倍以上の大きさが見積もられた。ガウジの D_c はガウジ層の厚さに依存することが知られているが（e.g. Marone and Kilgore, 1993, Nature）、どちらの実験でも初期の層厚は3 mmと共通であるため、それが差の原因ではない。また、ガウジの D_c はせん断変形の集中により実験中の総変位量の増加に伴って減少する性質が示されている（e.g. Marone and Kilgore, 1993, Nature; Scuderi et al., 2017, Geology）が、メートルスケール実験で D_c が推定された際の変位量はセンチメートルスケール実験に比べ大きかったことから、この変位量依存性でもスケール間の D_c の違いを説明できない。一方、メートルスケール実験では、速度ステップ変化実験に加え、一定速度での摩擦実験も実施されており、特定の条件では、既往研究（e.g. Leeman et al., 2016, Nature Communications; Scuderi et al., 2017, Geology）で見られたような安定すべりから最大すべり速度の小さいスティックスリップ（以下、スロースティックスリップと呼ぶ）に遷移する現象が確認されている（山下他, 2020, 地震学会）。そこで、このスロースティックスリップを数値実験によって再現し、摩擦パラメタを制約できるかの調査をおこなった。再現においては、Urata et al. (2017, PAGEOPH) を参考に、1自由度のバネ-スライダ系において、断層面の摩擦すべりがRSF則のSlip law (Ruina, 1983, JGR) に従うものとして計算をおこなった。メートルスケール実験でスロースティックスリップの発生が確認されたのは、垂直応力が1.3 MPaもしくは2.7 MPaで載荷速度が10, 15, 30 mm/sの条件下である。一方、垂直応力2.7 MPa, 載荷速度5 mm/sでは明瞭なスロースティックスリップは発生しなかった。摩擦パラメタとしてメートルスケールの速度ステップ変化実験で推定された $a=0.004156$, $b=0.004983$ を仮定し、上記の7つの実験条件での摩擦すべり応答を計算した。7つの実験中に観察されたせん断荷重変化の最大振幅と、同条件で計算されたせん断荷重変化の最大振幅とが最も近くなる D_c を探索したところ、6 μm という値が得られた。この値は速度ステップ変化実験から推定された D_c に比べ有意に小さく、最大振幅を再現するには最適な一方、すべり初めの安定すべりを再現することはできない。安定すべりを再現するにはより大きな D_c が必要であるため、 D_c がすべりに伴って23.9 μm から6 μm に徐々に変化すると仮定して計算したところ、安定すべりからスロースティックスリップへの遷移についても再現できた。ただし、初期の D_c が23.9 μm である必要はなく、値を確定することはできなかった。また、ここでは摩擦パラメタ a 及び b の変位量に伴う変化も考慮していない。以上の通り、速度ステップ変化実験で推定された摩擦パラメタの a 及び b に基づき、実験で観察されたスロースティックスリップの基礎的な挙動を再現することはできたが、各パラメタを制約するには至らなかった。今後、メートルスケール実験後に採取されたガウジ層の微細構造観察や断層沿いに設置されたひずみゲージデータの解析をおこなひ、摩擦パラメタのスケール依存性に関し総合的に調査を進めていく予定である。

Estimation of friction parameters and slip distribution from shear strain array data beneath the fault plane

*Kyosuke Noda¹, Eiichi Fukuyama¹

1. Kyoto University

近年、シェールオイルガス採掘や高温岩体地熱発電などに伴う地下注水などにより、誘発地震の発生が問題となっており、その破壊伝播メカニズムを解明により、誘発地震発生リスクの軽減に資する必要がある。断層面上のすべりの時空間分布や岩石の摩擦構成則を推定し、誘発地震の発生過程を推定することは重要である。室内実験においてさえ、断層面付近の歪み分布を計測する事は可能であるが2次元断層面上のすべり分布を直接測定する事は困難である。本研究では、大型岩石摩擦実験によりFukuyama et al. (2018, Tectonophysics)によって得られた断層面近傍のせん断歪みのアレーデータを用いて、断層面上の摩擦パラメータとすべりの時空間分布の推定を行った。野田・福山(2022, JpGU)は、境界積分方程式法を用いた平面断層の動的破壊伝播の計算手法(Hok and Fukuyama, 2011, GJI)により数値実験をおこなった。この計算手法では断層面を三角形要素に分割しその要素上ですべり速度が一定と仮定し断層面全体のすべり速度、せん断応力を計算する。摩擦構成則は線形すべり弱化摩擦構成則(Ida, 1972, JGR; Andrews, 1976, JGR)を用い、静摩擦力、動摩擦力、すべり弱化距離をパラメータとした。一定速度で伝播する正規化Yoffe関数(Tinti et al., 2005, BSSA)を用いて真のすべり分布を作成し、Hok and Fukuyama (2011)のプログラムを用いて剪断応力の時空間分布データを作成し疑似測定データとした。Hok and Fukuyama(2011)のプログラムを用い摩擦パラメータを変化させながら疑似入力データを再現する摩擦パラメータを求め、その際計算されたすべり分布と真のすべり分布を比較した。実験の結果、すべり開始位置から近い位置ですべり量、せん断応力分布を精度良く求めることが出来たものの、破壊開始点から遠ざかるにつれて誤差が大きくなり、摩擦パラメータの空間的不均質性の導入が必要なことがわかった。Fukuyama et al. (2018)によって得られた、大型岩石摩擦実験の際の断層面直下で測定されたせん断歪アレーデータに対して、野田・福山(2022)の手法を適用し、摩擦パラメータとすべり分布の推定を試みた。実際の測定点は数値実験とは異なりまばらであるので、せん断歪のデータをcubic splineで内挿し、ひずみアレーの外側のデータはひずみアレー端の値と同じと仮定して外挿した。垂直応力は断層面上で一定の1.3MPaとした。また、初期破壊域は、数値実験結果を参考に直径20 cmの領域とした。本研究において対象としたイベントは、Fukuyama et al. (2018)においてType 2と区分された、断層内部から破壊が始まるイベントである。イベント発生直前の応力が静止摩擦力とほぼ等しく、イベント発生後の応力が動摩擦力に近い値になっていると考え、摩擦構成則を設定した。すべり弱化距離は試行錯誤的に与えた。最適なパラメータの評価は、測定点におけるせん断歪の時間変化の測定値と推定値の2乗残差を誤差関数として設定し、誤差関数が最小となる摩擦パラメータとその時の滑り分布を最終解とした。本発表において最終的に求められた摩擦パラメータ及びすべり分布を紹介する予定である。



図：すべり弱化距離10 μm の時の破壊開始0.04秒後のすべり分布

Evolution of normal stress heterogeneity by frictional heating and thermoelasticity: Implication for size effect in friction experiments

*Hiroyuki NODA¹

1. Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute

Yamashita et al (2015) は長さ 1.5 m の岩石試料の摩擦実験と直径 4 cm の試料の回転剪断試験の比較を行い、後者では 0.1 m/s 程度で発生する所謂「高速摩擦」の急激な速度弱화가、前者では 1 cm/s 程度で発生する事を報告した。彼らはこの原因として、断層面の形状の不均質に起因する垂直応力の不均質と、それに伴う摩擦仕事（発熱）の集中を挙げている。本研究では摩擦発熱による温度上昇と熱弾性効果に注目し、垂直応力の不均質が摩擦滑り中にどのように時間発展するかを考察した。

無限媒質における非連成熱弾性（熱伝導率： β 、変位固定時の圧力上昇／温度上昇： α ）を考え、簡単の為に 2 次元の面内問題を考える。断層面を模した平面状の発熱体を考えると、断層面での垂直応力の変化を過去の摩擦発熱の時空間分布とグリーン関数の畳み込みで表現することができる。グリーン関数には Xiao et al. (2021) による時空間的に集中した熱源に対する解析解を使用した。これに断層方向のフーリエ変換を施し空間一様の滑り速度 V と一定の摩擦係数 f を仮定すると、ある角波数 k の垂直応力擾乱 $\Delta\sigma$ を自身の過去の履歴と積分核との時間畳み込みで表現することができる。この積分方程式には低速 $V < V_{cr}$ において初期値 σ_0 と同符号の定常解が存在し、 $V_{cr} = \gamma \beta |k| / \alpha f$ 、 $\Delta\sigma = \sigma_0 V / (V_{cr} - V)$ と表すことができる。ここで γ は Poisson 比 ν の関数で $\gamma = 4(1-\nu)/(1-2\nu)$ である。高速 $V \geq V_{cr}$ では定常解は初期値と符号が異なるため、「高垂直応力部で発熱と熱膨張が顕著になる」なる直観に反する。

上述の系について、時刻 $t=0$ に摩擦滑りを開始する場合の挙動を、境界積分法方程式法およびメモリー変数法 (Noda, 2022) を用いて数値的に解析した。低速 $V < V_{cr}$ では、 $\Delta\sigma$ は定常解に漸近するのに対し、 $V = V_{cr}$ では時間に対して線形に、 $V \geq V_{cr}$ では時間に対して指数関数的に際限なく増大する結果が得られた。定常状態の $\Delta\sigma$ は初期値 σ_0 に比例するため、摩擦実験試料の平面加工の精度を上げることによって垂直応力不均質の影響を少なくすることが可能である。しかし定常解に漸近しない $V/V_{cr} = \alpha f V / \gamma \beta |k| \geq 1$ の場合は、理想的な平面を作成するのは不可能であるので、垂直応力不均質の振幅はどこまでも大きくなり、最終的には摩擦発熱の面内での局所化やそれに伴う巨視的な弱化に至る事となる。

斑レイ岩の物性値 (Schön, 1996) を用いた場合、 $k = 2\pi/(1 \text{ cm})$ では $V_{cr} = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 、 $k = 2\pi/(1 \text{ m})$ では $V_{cr} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ となる。これらの滑り速度は室内実験に用いる速度レンジ内にあり、これまでの摩擦実験中で熱弾性の影響が重要である可能性を示唆している。摩擦実験試料のサイズを超える波長の擾乱は試料中に発生し得ないため、例えば $V = 1 \text{ mm/s}$ 程度の実験の際には、cm スケールの試料の場合は熱弾性の影響は限定的であるが、m スケールの試料の場合は大きな影響が存在しうる。大型摩擦実験の際には、温度分布の測定と、歪ゲージで測定する応力に対する温度の影響の補正が重要である可能性がある。天然断層の挙動を考える上では、広い波数の擾乱が存在すること、滑り速度が時空間的に変化する影響、動弾性との連成の必要性などの検討が課題である。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:45 PM - 3:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:45 AM - 6:00 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-1

chairperson:Kurama OKUBO(NIED), Makiko OHTANI(ERI)

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

[S08-28] Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault

*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹ (1. Osaka University)

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

[S08-29] Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law

*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹ (1. Tokyo Institute of technology)

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

[S08-30] Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹ (1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University)

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

[S08-31] Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation

*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST)

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

[S08-32] Recurrence interval of M>7 Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of M~9 earthquake

*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO² (1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC))

Molecular dynamics study on clay particles in clay-rich crustal fault

*Zhuyuan Lin¹, Takahiro Hatano¹

1. Osaka University

The frictional resistance on a fault controls the earthquake dynamics via solid contact surfaces. Recent studies have revealed that the abundance of clay (smectite) can result in low apparent friction coefficients and facilitate fault slip. A close example is the March 2011 Tohoku-Oki earthquake that produced huge displacement and a disastrous tsunami, while the shallow regions of the plate-boundary thrust were thought to slip aseismically. The drilling survey revealed the fault zone is characterized by 60 to 80 wt% of smectite and a solid fraction of about 0.6. While clay can be simply thought of as a weaker material compared to rocks and minerals, it is distinguished from other fault-zone inclusions in terms of the smaller size and activeness to water. In addition, these properties may largely depend on the clay type. Rheological experiments reveal that the clay-water mixture at low solid fractions behaves as a viscous fluid with thixotropy and can reproduce stick-slip behavior. However, it is still unclear how clay would behave under high pressure and high solid fraction. The underlying mechanism of low shear resistance is also unknown. In this study, we examine the feasibility of nanometer scale simulation of clay particles using molecular dynamics. Individual clay particles are modeled as disc-like ellipsoids with large aspect ratios. Long-range interactions between particles are simplified as Gay-Berne potentials with mid-range attraction and short-range repulsion. The system is compressed and sheared to reach a target configuration of a given pressure or a given solid fraction. Our results show that molecular dynamics can be a promising approach for further study into the rheology and slip behavior of clay-rich faults.

Self-consistent setting of heterogeneity with slip-weakening friction law

*Yoshinori Nishiyama¹, Naofumi Aso¹

1. Tokyo Institute of technology

断層破壊シミュレーションでは、先見的な情報として断層形状に加え断層面における初期応力および摩擦則が必要になる。その摩擦則には滑り弱化則と速度状態依存摩擦則が主に用いられる。本研究では動的破壊を再現するのに優れた滑り弱化則を用い、その空間不均質性について調べた。滑り弱化則に対する空間不均質性として、Ide and Aochi(2005)では、降伏強度は均質のまま臨界滑り弱化距離 D_c に不均質性を与えている。摩擦則の不均質性は、断層上でのミクロな凹凸に起因するものであるから、降伏強度にも不均質性を考慮する必要がある、本研究では降伏強度と臨界滑り弱化距離の不均質性を同時に検討した。

一般に摩擦はマクロな状態量であり、摩擦法則は任意のスケールで相似な関数系であるべきである。本研究では、この自己相似性に着目し、合理的な滑り弱化則の不均質性について精査した。そのために、1次元断層で境界積分法による滑りの時間発展を解いた。摩擦則の不均質性については、i)降伏強度一定で D_c のみに不均質、ii) D_c と強度降下量が比例しながら不均質、iii) D_c と強度降下量が反比例しながら不均質の3つのパターンを考慮した。初期条件の影響を排除するために、定常的な応力ローディングにより複数回の地震を発生させ、5回目以降の地震の滑りと応力に着目した。ある空間スケールで滑りと応力を平均化したものが、そのスケールでの滑り弱化を経験的に表したものであると考えられる。このように様々なスケールについて得られた滑り弱化の経験則が自己相似であることを検証した。特に、a)単一の関数として精度良く求めるか、b)スケール間で共通の関数系で表現できるかの2点において合理性を検証した。

計算の離散化スケールに近いときは、仮定したような直線的な関数を確認できた一方で、大きなスケールで平均化すると、多様な形状の履歴が得られた。不均質性パターン i) と ii) では条件a)を満たさない一方で、不均質性パターン iii) では条件a)とb)を満たし、マルチスケールで共通の関数系で表現される滑り弱化則を確認することができた。このように単一の関数系に収束した理由としては、不均質性パターン iii) では破壊エネルギーが均質に設定されている事に起因していると考えられる。この結果は、滑り弱化則を使用する際には、少なくとも局所的には破壊エネルギーが均質であるような設定が望ましいことを示唆する。また、与えた直線的な滑り弱化則に対し、得られた共通の関数系はハーフガウシアンのような曲線状であり、そのような摩擦則を仮定することの妥当性を示唆する。

Quasi-dynamic sequence simulation considering 3D subduction zone geometry with viscos boundary condition

*Ryoya Matsushima¹, So Ozawa², Ryosuke Ando¹

1. EPS, Univ. of Tokyo, 2. Department of Geophysics, Stanford University

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震やその余効変動より、日本列島の地殻の広い範囲で変形が観測された。特徴的なのは、例えば新潟神戸歪集中帯において、GNSSで求めた歪速度の長波長成分が地震前の収縮から地震後には伸長に変化した一方、短波長成分は収縮を続けた(Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016)ことである。この長波長の変形にはアセノスフェアの粘弾性緩和も寄与していると考えられ、Fukahata et al.

2020は地震後の新潟神戸歪集中帯における体積歪速度の長波長成分を74 nanostrain/yearと推定している。このように、巨大地震後の地殻の変形を再現するには、粘弾性の効果を含めたシミュレーションを行う必要がある。しかしながら、既存の粘弾性グリーン関数を用いる手法（Hashima et al. 2008）では水平成層構造しか考慮できず、海洋スラブやウェッジマントルなどの沈み込み帯の3次元構造を十分に再現できない。そこで本研究では、弾性媒質中に力学境界として震源断層を表す面とリソスフェア-アセノスフェア境界（LAB）を表す面を用意し、それぞれ速度と状態変数に依存する摩擦（RSF）則と粘性抵抗を境界条件として与え、境界積分方程式法で準動的に解く手法を提案する。本手法は、バルク粘弾性を弾性体内部境界面上での粘性緩和として扱ういくつかの手法（例えばDuan and Oglesby, 2005や、Miyake and Noda, 2019）に類似したものである。

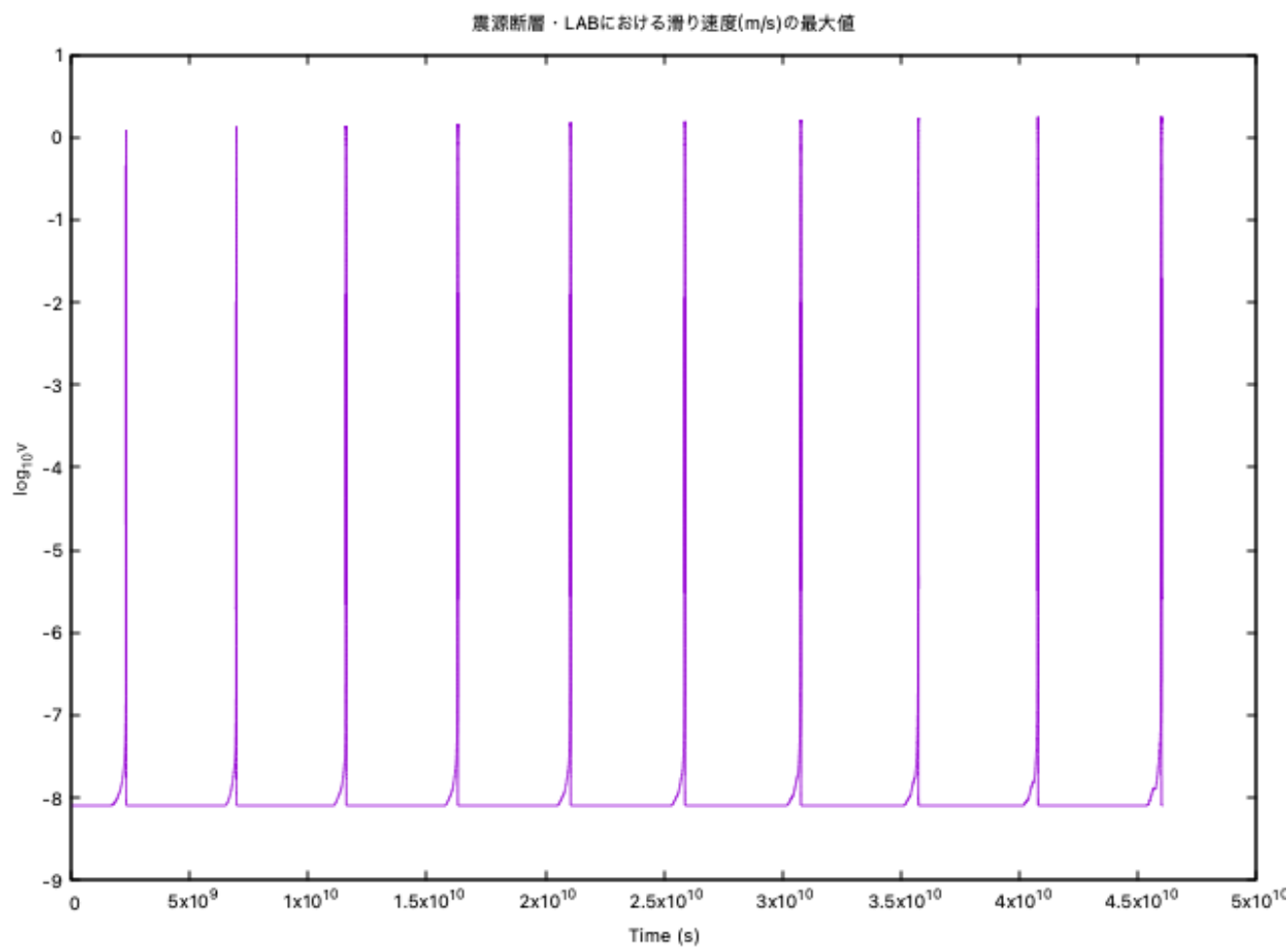
手法・モデル

本研究では、まず最も単純な場合として傾斜角が30°であり一片の長さが100kmである平行な2つの面を用意し、上面には正規化されたRSF則（Rice et al. 2001）を、下面には粘性抵抗 $\tau = \eta v/w$ （e.g. Ando et al. 2012）を境界条件として与えた。後者の境界条件は、アセノスフェアの粘性が生じる応力をリソスフェア側の境界面が受ける抵抗力として考慮したものとみなせる。上面はプレート境界の震源断層を、下面は海洋プレートとアセノスフェアの境界を表したものである。また、沈み込み運動による応力载荷を与えるため、下面にのみプレート相対運動に対応するバックスリップを考慮した。これを慣性効果が放射減衰項による近似として加味された平衡方程式（Rice, 1993）と連立し、Ozawa et al. (2022, 投稿中)のコード（hbi）を改良し粘性抵抗を扱えるようにしたコードを用いて解いた。また、行列ベクトル積の計算には格子H行列法（Ida, 2018）を用い、計算時間や使用メモリの削減を図った。

結果

粘性抵抗を与えた下面にのみバックスリップ25cm/年を与えたところ、上面ではM8の地震が150年周期で発生し、また地震滑り後にはLABでの粘弾性応力緩和に伴う余効変動が発生し、粘性係数が大きいほど緩和時間が長くなることが確認された。

沈み込み帯の3次元構造を再現するには、プレート境界の震源断層・海洋リソスフェア（スラブ）-アセノスフェア境界だけでなく、マントルウェッジ構造を含めた大陸LAB、および断層面上での速度弱化・速度強化領域の分布も考慮すべきである。当日はそのような沈み込み帯構造を再現したモデルの計算結果を報告する予定である。



Estimating the dip angle of the Median Tectonic Line Active Fault System (MTLAFS) by quasi-dynamic earthquake sequence simulation

*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa², Takahiko Uchide³, Ryosuke Ando¹

1. The University of Tokyo, 2. Stanford University, 3. Geological Survey of Japan, AIST

はじめに

中央構造線断層帯(MTLFZ)は右横ずれ運動の卓越する日本最長の活断層帯である(Ikeda et al., 2009). 中央構造線における断層運動は、地表付近における変動地形の調査 (Tsutsumi and Okada, 1996など) や横ずれ運動から示唆される鉛直または高角傾斜面 (中央構造線活断層系(MTLAFS), Ikeda et al., 2009) 上において起こるか、反射法地震探査 (Ito et al., 1996, Sato et al., 2015など) によって観測されている北傾斜面 (物質境界, MBMTL) 上で起こっているかは定かでない. Uchide et al., (2022)はJ-SHISデータベース記載の活断層位置, 走向, 傾斜と, 小地震 ($M_j > 0.5$ の 約22 万イベント) の震源メカニズム解を用いた応力インバージョン結果から, 日本全体のslip tendency $Ts' = |\tau|/(\mu|\sigma|)$ (Yukutake et al. (2015))の分布を計算した. 中央構造線断層帯の特に四国周辺については, 傾斜 90° と仮定した場合には $Ts' > 0.95$, 傾斜 40° と仮定した場合には $0.6 \leq Ts' \leq 0.7$ を得た. 本研究では, MTLAFSの断層面傾斜角を, 物理モデルと観測に基づいて得られた応力場の情報から推定することを目的とする.

手法および予察

本研究では, まず中央構造線の鉛直断層面および北傾斜断層面の可能性をそれぞれ考慮した3次元非平面断層形状モデルを新たに構築した. そして, 鉛直断層面モデルおよび北傾斜断層面モデルにおいて準動的シークエンスシミュレーションを行い, 地形学・地質学的調査 (岡田, 1970, 後藤ほか, 2003など) から得られる平均活動間隔及び平均変位速度と比較し, それぞれの形状モデルの妥当性を評価する. シミュレーションに際し, 各断層面におけるRake角は地震発震機構を用いた応力インバージョンの結果 (Uchide et al., 2022) から, そして断層面法線方向及び接線方向の応力載荷速度は, GNSSデータから求められるひずみ速度分布からプレート間固着による弾性変形の寄与が除去されたもの (Nishimura, 2022) から与える. 数値計算には, Ozawa et al. (2022, 投稿中)で実装された格子H行列を用いて高効率化された準動的境界要素法コード (HBI) を用い, 20万要素と30万タイムステップ数の規模の計算を, Wisteria/BDEC-01の100ノードを約10時間使用して実施した. その結果, 垂直モデル・北傾斜モデルそれぞれの3次元断層形状と応力場の空間変化に応じて, 平均変位速度および平均活動間隔が変化する様子が見られた. これらのより詳細な解析結果を発表する予定である.

Recurrence interval of $M > 7$ Miyagi-ken-Oki earthquakes through a cycle of $M \sim 9$ earthquake

*Ryoko NAKATA¹, Naoki UCHIDA^{2,3}, Takane HORI⁴, Ryota HINO²

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 4. Research Institute for Marine Geodynamics (IMG), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

【はじめに】

宮城県沖では、1978年宮城県沖地震のように、過去に $M > 7$ 海溝型大地震が約40年間隔で繰り返し発生し、沿岸地域に被害をもたらしてきた。この履歴に基づく長期評価に加え、2011年東北地方太平洋沖地震 ($M9.0$)の影響を定性的に踏まえた結果、2021年1月時点では、宮城県沖で $M7.4$ 前後の地震発生確率は30年以内に60~70 %程度となっている [地震調査研究推進本部, 2021]。ここで想定されている地震の震源域付近で2021年3月20日と5月1日に $M6.9$ と 6.8 の地震が発生した。これらの地震は、2011年東北沖地震以降ではこの地域では最大のプレート間地震であるが、規模は想定されている地震よりもやや小さく、震源域は1978年の震源域の西側部分 [吉田他, 2021; 地震調査研究推進本部, 2021]だけであった。

Nakata et al. [2016]では、地震発生サイクルシミュレーションで得られた結果について、 $M9$ 地震のすぐ後には、 $M9$ 地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、 $M > 7$ 宮城県沖地震が発生するケースが多く見られたと報告している。これは、 $M9$ 地震の余効すべりが宮城県沖地震単独の場合よりも大きいために、宮城県沖の陸寄り地域での応力蓄積レートが高くなったためであると考えられる。本研究では、先行研究と同様の地震発生原因であるプレート境界での応力蓄積と解放過程に基づく数値シミュレーションを行い、その結果の妥当性や、東北沖地震のような $M9$ 地震サイクルにおける、宮城県沖地震の準備過程について、先行研究よりも詳しく検討を行った。

【手法】

地震発生サイクルシミュレーションは、先行研究 [Nakata et al., 2016]と同様の物理法則とプレート境界面形状で実施した。入力する摩擦パラメタの値や空間分布は、Nakata et al. [2016; 2021]で示した摩擦パラメタを基に微修正した。

【結果】

シミュレーション結果では、宮城県沖での $M > 7$ 地震の繰り返し間隔は、複数の $M9$ 地震サイクルを通して共通の時間的特徴を示していた。Nakata et al. [2016]で述べたように、 $M9$ 地震直後は $M9$ 地震以前に比べて間隔が短い。その後、繰り返し間隔は一旦長くなるが、次の $M9$ 地震が近づくにつれて、繰り返し間隔は一定に近づいていった。また、宮城県沖地震による余効すべり分布は、 $M9$ 地震直後は震源域のupdip側への伝播がほとんど見られないのに対し、 $M9$ 地震前はupdip側への伝播が顕著であった。 $M9$ 地震後数10年間の累積すべり量は、宮城県沖地震震源域のdowndip側では $M9$ 地震による余効すべりの影響で大きくなるが、updip側では小さいか、固着していた。

【議論】

このシミュレーション結果の妥当性を検証したところ、観測に見られるいくつかの特徴と整合していることが確認できた。例えば、 $M9$ 地震前の宮城県沖地震の余効すべり分布は、2005年の宮城県沖地震の観測から示唆されるもの [Hino et al., 2007; Miura et al., 2007; Uchida et al., 2007]と、累積すべり量の時空間分布は、2011年以降の繰り返し地震の観測から見積もられるもの [Uchida & Matsuzawa, 2013]と調和的であった。また、 $M9$ 地震前に発生した複数回の宮城県沖地震の繰り返し間隔に大きなばらつきがないことも、過去の地震発生履歴と矛盾していないと言える。

上述したような $M9$ 地震サイクルを通じた繰り返し間隔の変化は、宮城県沖地震震源域のupdip側、つまり

M9地震震源域下限での固着域と非地震性すべり域の分布に起因していると考えられる。今後の宮城県沖地震の発生時期を議論するには、M9地震以前の繰り返し間隔を基に推定するだけではなく、測地・地震学的観測から見積もられる東北沖地震震源域内における固着の回復の程度を明らかにしたうえで、シミュレーション結果と照らし合わせて検討する必要があるだろう。

【謝辞】

本研究の一部は、JSPS科研費Grant Number JP21K04604、JP19H05596およびJP21H05206の助成を受けて実施されたものです。本研究のシミュレーション結果は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムおよびJAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して得られたものです。

Room A | Regular session : S08. Earthquake physics

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:15 PM - 4:30 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:15 AM - 7:30 AM UTC | 🏢 ROOM A 1st floor (Kaderu Hall)

[S08] PM-2

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Ryoko NAKATA (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

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

[S08-33] Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹ (1. Kyoto Univ.)

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

[S08-34] Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

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

[S08-35] Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3} (1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN)

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

[S08-36] 4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO² (1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.)

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

[S08-37] Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

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

Homoclinic bifurcation of a rate-weakening patch in a viscoelastic medium and effect of strength contrast in seismic-aseismic transition

*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹

1. Kyoto Univ.

速度状態依存摩擦則（RSF則）が発見されて以来、これを適用した地震サイクルシミュレーションが盛んに行われている [e.g., Lapusta et al., 2000]。低速での摩擦係数について、速度弱化（ $a-b<0$ ）を示す鉱物は Byerlee 則に従う値（0.6-0.85）を示すのに対し、速度強化（ $a-b>0$ ）を示す鉱物には粘土鉱物などの小さな値を示すものも存在することが確認されている。全体としては、低速での摩擦係数は摩擦パラメータ $a-b$ と負の相関が見られる [Ikari et al., 2011]。しかし基準滑り速度 V_0 における定常摩擦係数 f_0 の不均質性は、媒質が線形弾性体の場合、滑りの基準（滑りをゼロと定義する状態）の選択に吸収されてしまい、初期条件の影響のなくなったアトラクタにおける滑り速度 V の時空間的分布には影響を及ぼさない。その一方で、媒質に粘弾性体を採用する場合、非弾性変形の速度が媒質中の偏差応力の絶対値に依存するため、 f_0 の分布が断層の長期的挙動に影響する。地中では、地殻浅部から深部にかけて媒質の弾性・粘弾性の遷移が見られる。Miyake and Noda (2019) は、粘弾性媒質中での2次元の動的地震サイクルシミュレーション手法を開発し、空間的に一様な f_0 を採用し Maxwell 粘弾性体に対して（緩和時間）／（パッチサイズ）の減少によって地震性（EQ）挙動から永久固着（Stuck, ST）への遷移が起こることを報告している。永久固着とは、応力の緩和が速いことで地震が起こらなくなることである。地中深くの領域では、粘性が支配的になると考えられるため永久固着が起きやすくなる。本研究では、Miyake and Noda (2019) と同じシミュレーション手法を用い、EQ-ST遷移についてさらに詳しく調べた。粘弾性のパラメータに加え、速度弱化パッチとその外部の断層強度差（ $=f_0$ の差 Δf_0 ）による影響も調査の対象とした。パラメータスタディを行ったところ、Miyake and Noda (2019) で報告されていた粘弾性の変化だけでなく、 Δf_0 の変化によってもEQ-ST遷移があることが分かった。 Δf_0 が大きくなると永久固着が起こりやすくなり、本研究で最大の強度差である $\Delta f_0=0.3$ のときは $\Delta f_0=0$ の時と比べて一桁大きな緩和時間で永久固着が起こる。次に、この遷移の解釈を得ることを試みた。本シミュレーションは連続体モデルであるため自由度が大きく、物理的な理解が難しい。そこで、自由度を大きく削減したバネ-ブロックモデルを用いた。速度弱化域と速度強化域をそれぞれ代表させたブロックをバネとダッシュポットでつないだ単純なモデルである。連続体とバネ-ブロック両モデルのパラメータスタディと解軌道について比較を行った。すると、バネ-ブロックモデルについても同様にEQ-ST遷移が確認され、2つのモデルの結果がよく似ていた。このことから、EQ-ST遷移をバネ-ブロックモデルによって解釈することは一定程度有効であると考えられる。バネ-ブロックモデルにおける解軌道、ベクトル場から、EQ-ST遷移は Homoclinic 分岐である事を見出した。弾性体中の断層についてはこれまで、摩擦パラメータ $a-b$ が正のとき非地震性、負のとき地震が起こりうるということが知られており、これは Hopf 分岐として理解されている。本研究で見出した Homoclinic 分岐による遷移は全く新しいタイプの地震性・非地震性遷移である。パラメータスタディの結果は、温度が上昇して粘弾性緩和がより有効となると、大きなサイズの速度弱化パッチから地震発生頻度の減少と非地震性への遷移を起こすことを示している。Spada et al. (2013) は、世界の様々な大陸の b 値と深さの関係を示した。いくつかの大陸では、比較的浅い領域では深くなるにつれ b 値が減少するが、ある深さからは増加に転じた後に地震発生層の下限となる傾向が確認されている。この b 値増加の傾向は、地震発生層最下部では深いほど大きな地震が起こりにくくなることを示しており、本研究におけるパラメータスタディの結果と整合的である。

Numerical simulation of SSE triggering based on rate- and state-dependent friction law

*Shingo YOSHIDA¹

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

円形アスペリティを仮定し、Nagata et al. (2012)により修正された速度・状態依存摩擦則に基づいてスロースリップイベント(SSE)のトリガーに関する数値シミュレーションを行なった。同じ半径のアスペリティでも、摩擦パラメータの値により、周期的地震、アスペリティの一部だけでの動的すべり、周期的SSE、安定すべりなどが発生する(Fig.1)。周期的に発生している状態で応力擾乱を受けると、すべりモードが移行する場合がある。Yoshida et. al (2015)は釜石沖地震について、以前はアスペリティ一部の破壊だったが東方沖地震の余効すべりの擾乱により全領域が破壊してマグニチュードの大きな地震が発生した可能性を指摘した。今回、周期的SSEが起きているときに、様々なタイミング、振幅で地震波による応力擾乱を与えSSEのトリガーについて調べた。擾乱の振幅が大きくなるにつれ、SSEの発生が早められ、SSE時のすべり速度が速くなり、継続時間が短くなっていく。さらに大きくすると、高速な地震すべりに移行することがわかった。また、安定すべりが起きている条件下で、擾乱を与えたときについてシミュレーションを行い、擾乱の振幅により、地震波通過時に、SSEあるいは高速な地震すべりがトリガーされるという結果が得られた。普段は地震やSSEが発生していない領域であっても、地震波によりSSEなどがトリガーされる可能性を示唆する。(b-a)*有効法線応力が大きいほど不安定性が増すが、Yoshida(2018)が示したように有効法線応力が小さいほどトリガー効果が大きくなる。アスペリティ内で浅くなるにつれ有効法線応力が小さくなるモデルを仮定して、そのトレードオフについても調べた。

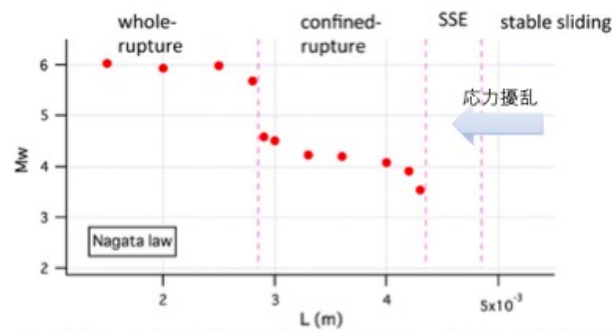


図1. 摩擦パラメータの特徴的すべり量Lを小さくすると、すべりモードは周期的地震、アスベリティの一部だけの動的すべり、周期的SSE、安定すべりに移行する。東北地震後に釜石沖地震のマグニチュードが大きくなったのは、余効すべりによる応力擾乱のためモードが変化したためと考えられる。安定すべり域においても、地震波による応力擾乱によりSSEがトリガーされることがある。Yoshida et. al (2015)に加筆。

Simulation of long-term slow slip events in a long thrust fault with uniform frictional properties : Spontaneous break-up of events

*Takanari Ohata¹, Shin'ichi Miyazaki¹, Kazuro Hirahara^{2,3}

1. Kyoto University, 2. Kagawa University, 3. RIKEN

南海トラフ巨大地震の発生予測に向けて、巨大地震発生サイクルにおけるスロー地震の挙動を理解することは重要である (Obara & Kato, 2016)。

南海トラフ西部では、巨大地震震源域（固着域）の深部隣接領域でスロー地震の一つである長期的スローリップイベント（L-SSE）が発生している。そして、その再来間隔や伝播方向等の特徴（以下発生様式と呼ぶ）が、走向方向に多様性を示すことが指摘されている (Takagi et al., 2019)。

我々は、この四国中部～豊後水道～日向灘にかけての走向方向のL-SSEの発生様式の違いを説明するため、速度状態依存摩擦法則を使った数値シミュレーション研究を行っている。

現実的な3次元形状の断層モデルで実験を行う前に、L-SSEの相互作用について理解を深めるため、摩擦パラメータなどを走向方向に変化させた平面断層モデルを用いてシミュレーションを行った。具体的には、断層を走行方向にいくつかの領域に分割し、それぞれの領域ではパラメータは一樣となるようにパラメータ分布を与えた。

その結果、一つのパラメータを走向方向に変化させるだけでも、走向方向の各領域の長さなどを変えることで、再来間隔が変化する場合もあればしない場合もあるという結果が得られた。再来間隔が変化する場合は、SSEが走向方向に分裂して発生していたが、再来間隔が変化しない場合は、SSEが分裂せずに一つのイベントとして発生していた。

このことから、SSEの走向方向の発生様式の多様性について理解を深めるためには、SSEが走向方向に分裂する条件を調べることが重要であると考えた。

SSEが走向方向に分裂する条件を調べるため、領域幅 W に比べて走向方向の長さ L_{str} がかなり長い平面モデルでシミュレーションを行った。

その結果、領域幅や摩擦パラメータを一樣にしても、走向方向の長さに応じて、SSEが2個以上に分裂する様子が観察された。また、摩擦パラメータを変え、分裂の様子が変化することも分かった。

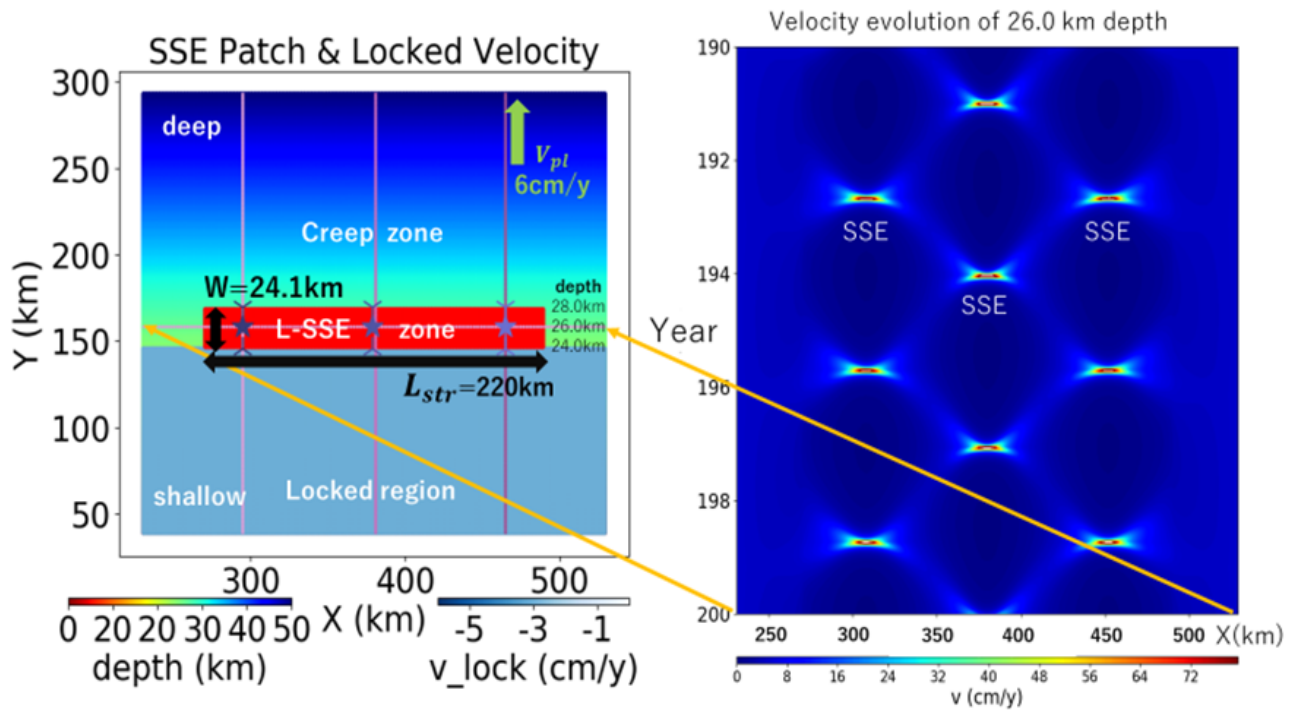
一例として、図にSSEが3つに分裂する様子を示す。左図はモデル領域を示す。モデルは固着域（深さ5-24km、滑り欠損速度 $v_{lock} = 3.0\text{cm/y}$ ）・L-SSE域（深さ24-28km、幅 $W=24.1\text{km}$ 、走向長さ $L_{str}=220\text{km}$ 、震源核形成サイズ $h^*=31.83\text{km}$ ）・安定すべり(creep)域（深さ28-50km）の3領域から成り、傾斜角 10° 、プレート収束速度 $V_{pl}=6.0\text{cm/y}$ で走向方向に垂直に沈み込んでいる。右図にL-SSE域の中心深さ26.0km（ $Y=158.2\text{km}$ ）におけるすべり速度の時間発展を示す。一樣な領域幅や摩擦特性を与えたにもかかわらず3つのセグメントに分裂してL-SSEが発生している様子が見て取れる。ただし、再来間隔や、滑り速度が速い領域の幅などはセグメントごとに変化せず、ほとんど同じとなっている。

これまでの研究では、プレート収束速度やプレート形状の変化に伴う深さ方向の領域幅(Perez-Silva A. et al., 2022)、有効法線応力などの摩擦パラメータ (Li, H. et al., 2018) を変化させることで、走向方向にみられるセグメント化されたSSEの再来間隔や伝播といった発生様式の相違や相互作用が説明されてきた。これに対して本研究では、このような物理パラメータの変化を仮定せず、走向方向に一樣な領域幅・摩擦パラメータをもつ領域で計算をしても、走向方向にSSEが分裂することが明らかになった。また、分裂の個数や形態は、領域幅 W や震源核形成サイズ h^* と走行方向の長さ L_{str} の関係によって変化することを確認した。これまでの数値シミュレーションでは、深さ方向の領域幅 W と震源核形成サイズ h^* の関係に注目したものは多いが、走向方向の領域長さ L_{str} に注目した研究は無いように思われる。

もちろん、これまでの研究に見られるように、セグメントごとに再来間隔等の多様性が生まれる主要因は、各種物理パラメータの相違であると考えられるが、本研究では、走向方向のL-SSE発生様式の多様性について、走向方向の長さ L_{str} の影響という新たな知見を付け加えている。特に、 L_{str} 、 W 、 h^* とSSE分裂の関係の理解を深めると、プレート形状と観測されたSSEの分裂の様子から h^* を推定できるかもしれないという点が重

要である。

本発表では、SSEが分裂する条件と、走向方向の領域の長さ L_{str} と領域幅 W 、震源核臨界サイズ h^* の関係について議論する。



4DVAR numerical experiments on estimation of the frictional properties and slip evolution on the Bungo SSE fault

*Makiko OHTANI¹, Nobuki KAME¹, Masayuki KANO²

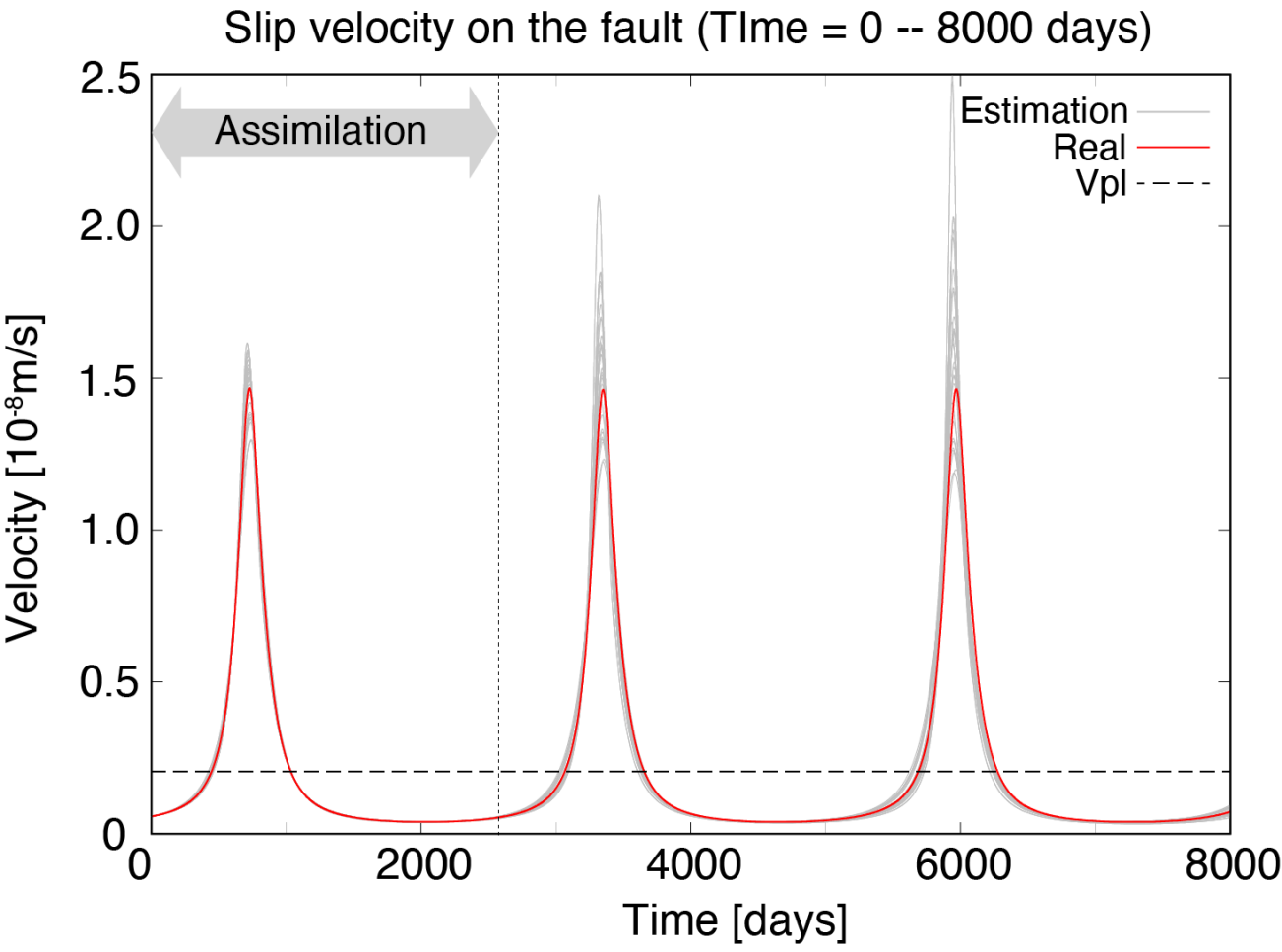
1. ERI, the Univ. of Tokyo, 2. Tohoku Univ.

沈み込み帯プレート境界において、巨大地震発生領域の深部延長では長期的SSE(slow slip event)が発生し、巨大地震発生の誘発可能性に注目が集まる。SSE断層面上のすべりは地殻変動データから運動学的な逆解析によって推定されるが、その後の時空間発展を予測するには断層面の摩擦特性も推定する必要がある。この要請に対して、近年、地殻変動データから断層のすべり速度などのモデル変数と、モデルパラメタである摩擦特性の同時推定を目指したデータ同化研究が行われている。データ同化とは、物理モデルによる数値シミュレーションに実際の観測データを取り入れ、シミュレーションをより尤もらしいものにする方法である。Hirahara & Nishikiori (2019)は西南日本南海トラフ沿いの豊後水道で繰り返し発生する豊後SSEを想定し、データ同化のうち逐次同化手法の一つであるEnKF法を用いたデータ同化数値実験を行い、真値に近い変数・パラメタ値の同時推定に成功した。

H&N(2019)では一様な摩擦特性のSSEパッチモデルを用いた実験によってEnKFの有効性が示されたが、今後実データへの適用を考える際には断層面の摩擦不均質を考慮する必要がある可能性がある。この対処に際してEnKFでは、物理モデルに従って時間発展する複数の変数・パラメタの組(アンサンブル)によって予報のばらつきを表現するため、計算量が大きくなってしまいう問題点がある。これに対して、データ同化のうち4次元変分法(4DVAR)は、得られた時系列データを尤も良く説明する物理モデルの初期値を求める手法で、一般にEnKFよりも計算量が少ない。不均質な断層摩擦を考慮できるモデルに対しては、EnKFよりも4DVARの方が適しているかもしれない。

加納・他(2018)は、H&N(2019)と同様のパッチモデルに対して豊後SSEの4DVARデータ同化数値実験を実施し、模擬地殻変動データをよく再現することに成功した。しかしながら加納・他(2018)ではモデル変数(すべり速度・断層強度)の初期値分布は既知であるとしてパラメタ推定のみを行っており、このままでは実データに適用できない。データ同化において、断層面のすべり速度は地殻変動データの運動学的逆解析の値を初期値として直接利用できるが、断層強度の分布は現在の観測研究からは推定できない未知量だからである。そこで本研究では、すべり速度の初期値は既知とし、SSEの周期性を条件として陽に課すことで、断層強度の推定を行いつつ同時に摩擦パラメタの推定を行う数値実験を行う。本講演ではその推定方法及び推定結果を示す。

H&N(2019)に倣い、豊後SSEを想定してdip角15度の平坦な断層上に半径35 kmの円形SSEパッチを設定する。SSEパッチは一様な摩擦パラメタ($A, A-B, L$) = (100 kPa, -50 kPa, 0.04 m)をもつとしてこれを真値($A_{\text{true}}, A-B_{\text{true}}, L_{\text{true}}$)とする。このパラメタ値において、断層は物理モデルに従い一定周期でSSEが繰り返す。このとき、豊後SSE断層周囲の実際のGNSS観測点の位置に93点観測点を設定し、SSE一周分に対応する地表変位速度を切り出し、3 mm/年のガウスノイズを加えたものを模擬観測データ(time = 0–2620日)とした。モデルパラメタ $A, A-B, L$ の初期推定値を $A/A_{\text{true}} = 0.75, 1.0, 1.25, (A-B)/(A-B)_{\text{true}} = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, L/L_{\text{true}} = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ のいずれかにとり、断層強度の初期推定値をすべり速度に対する定常状態の値にとって、データ同化を実施した。初期推定値によっては、SSEの周期性を満たすような結果に到達できない場合もあったが、到達したものは総じて実際の断層のすべり速度・観測値をよく説明でき、推定された摩擦パラメタの真値からのずれは15%以内であった。図に断層の中心位置でのすべり速度を示す。赤線は真値、灰色線は各初期推定値から同化を行った結果得られたすべり速度の推定値である。Time = 0–2620日のデータ同化期間を超えると、推定値は真値からのずれが大きくなり、図中3回目のSSEピークは真値よりも最大で33日早く現れる結果となった。



Understanding of variety of the transition from slow to fast earthquakes via the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity

*Takehito SUZUKI¹, Hiroshi MATSUKAWA¹

1. Aoyama Gakuin University

天然断層においては、ゆっくり地震を何度か繰り返した後に高速地震が発生する、という振る舞いが見られることがある。このゆっくり・高速遷移がいつ起こるのか、その決定機構を明らかにすることは現在でも重要な問題である。加えて、一度高速地震が起こった後に再びゆっくり地震が起こるのか否か、という点も理解が進んでいない。

ここではゆっくり・高速両地震を統一的に取り扱うため、BKモデルと熱・流体・空隙相互作用を考える。断層岩は多孔質媒質であるので、それを模すために多孔質媒質のブロックと基板からなるBKモデルを考える。滑りは接触している領域の近傍で担われる変形と解釈し、それが起こる領域を滑り帯と呼ぶ。滑り帯は有限の幅を持つとし、その内部で熱・流体・空隙相互作用を考える。動的滑り時において、滑り帯内での空隙生成[摩擦発熱]の効果はそこでの流体圧を減少[増加]させ、摩擦応力を増加[減少]させて滑り速度を減少[増加]させる。従って、ゆっくり地震と高速地震を支配する物理的素過程はそれぞれ空隙生成と摩擦発熱であると解釈できる。なお、動的地震間の期間には空隙の回復も考え、空隙率が減少するとした。

滑り前後のエネルギーバランスを考えることによって、系の振る舞いを支配する関数 $F(u_f)$ を見出せた。ここで u_f は一回の地震の滑り量である。 $F(u_f)=0$ という方程式は複数の正の実数解を持つが、実際の地震に対して実現されるのはその中の最小のものである。本研究ではそれを地震開始時の流体圧 p_0 と空隙率 ϕ_0 の関数として求めることができた。特に大きい p_0 及び小さい ϕ_0 の下でゆっくり地震が発生し易いことが示された。 p_0 と ϕ_0 の値はいくつかの物理的素過程に影響されて決まるが、ここではその中でも空隙回復に着目する。この効果はあるパラメータ α_1 によって支配され、 α_1 が大きいほど空隙が早く回復すると考えて良い。まず無視できるほど小さい α_1 を仮定すると、ゆっくり地震を繰り返した後に高速地震が繰り返し発生した。最初に高速地震が発生した後は、ゆっくり地震は発生しなかった。これはゆっくりー高速遷移と解釈できる。そして α_1 を増加させていくと、ゆっくり地震の繰り返しの後、高速地震が一度発生してから再度ゆっくり地震が繰り返す、という振る舞いが見られた。これはゆっくりー高速ーゆっくり遷移と理解される。2つの遷移を分ける臨界的な α_1 の値が存在することが示唆される。他の物理的素過程、例えば流体拡散の効果も含めた統一的な遷移の多様性の理解は将来の課題であろう。