

2021年
6月号NEWS
LETTERIEVG ニュースレター
Vol.8 No.2

[新人研究紹介]

数値シミュレーションによる大地震発生の力学条件の解明

浦田優美（地震テクトニクス研究グループ）

はじめに

地震とは、地下で断層がずれ、断層周囲に蓄積されていたひずみが解消される現象です。断層の一部で断層のずれ（断層すべり）が始まり、そのずれが広がっていきます。ずれが大きいくほど、またずれが広範囲に広がるほど地震の規模が大きくなります。どんな地震が起こるかは、断層に働く応力と摩擦によって決まります。そのため、地震発生時の応力と摩擦挙動の解明は、地震現象とその発生メカニズムの理解、ひいては将来の地震予測へと繋がります。応力場について、地震波の解析により主応力軸の向きを推定することができます（e.g., Hardebeck & Michael, 2006）が、主応力の大きさを得ることは難しく、その事例は少ないです（Hasegawa et al., 2011）。断層の摩擦挙動を表現する摩擦構成則の研究は、岩石摩擦実験（e.g., Dieterich, 1978）や理論的研究（e.g., Ida, 1972）によって進められてきまし

た。摩擦構成則のパラメータにはスケール依存性があり、岩石実験と実際の地震での値は異なると考えられています（Ohnaka, 2003）。実際の地震における摩擦パラメータは、地震波形記録から（Fukuyama & Suzuki, 2016）、また断層すべり伝播の数値シミュレーションを用いて（e.g., Olsen et al., 1997）推定できる可能性が示されてきました。

私は地震時の摩擦挙動に着目した数値シミュレーション研究に取り組んできました。本稿では、2016年熊本地震について、前震-本震系列の再現に必要な主応力の大きさと摩擦パラメータを同時に明らかにした研究を紹介します。

2016年熊本地震の再現シミュレーション：主応力の大きさと摩擦パラメータの解明

2016年熊本地震では、マグニチュード（以下 M）7.1の本震が発生する前の28時間以内に、M6級の

Contents

- 01 新人研究紹介 数値シミュレーションによる大地震発生の力学条件の解明 …… 浦田優美
- 04 お知らせ 地質標本館の展示リニューアルのご紹介：南海トラフ巨大地震の短期予測
- 05 地質標本館特別展のご紹介：日本列島ストレスマップー地震観測とAIで読み解く全国の地殻応力場ー
- 06 リサーチアシスタントの紹介
- 07 外部委員会活動報告 2021年4月～5月

前震が3回起こりました。それらの前震によって、断層周囲に蓄積されていたひずみの一部は解消され、本震が起こりにくくなったと考えられます。そのような状況で、なぜM7級の本震が起こったのでしょうか？その疑問に答えるため、3回の前震の後に本震が発生するのに必要な応力と摩擦の条件について調べることにしました。

まず、前震および本震の断層面を推定するため、余震分布を精密に求め、その時間発展を詳細に調べました。3回の前震および本震の発生に伴い、面状の余震分布の構造が順に現れました。得られた余震分布の構造が、3回の前震と本震それぞれの断層面に対応すると考えられます。

次に、3回の前震に対し、推定したそれぞれの断層面上に断層すべり分布を仮定し、その断層すべりによる本震断層面上での静的応力変化を推定しました。広域応力が小さい場合には、初めの予想通り、前震による応力変化が、本震の震源より浅い広い領域で本震の断層すべりの伝播を妨げた可能性が示唆されました。一方、震源付近では、前震の応力変化が本震の断層すべりを開始させる駆動力となり得たことがわかりました。

そして、前震による応力変化と広域応力の和を本震発生直前の応力分布として、本震の断層すべり伝播の数値シミュレーションを行いました。広域応

力場の主応力軸の向きは、Yoshida et al. (2016) による微小地震解析の結果を元に設定しました。未知数は、主応力の大きさ2つと摩擦構成則のパラメータ2つです。それら4つのパラメータについては、考えられる範囲で多数の値を検討しました。シミュレーションを行う前に、シミュレーションの実施数を減らすため、理論的考察を行いました。前震による応力変化と本震による応力解放に必要な力のバランスを考えることで、本震の断層すべりが実現しないパラメータの範囲を得ました(図1の灰色の部分)。それらの範囲を除き、約150ケースのシミュレーションを行いました。大部分のパラメータで、断層すべりは断層の途中で停止し、本震の断層すべりを再現できませんでした(図1の+と△)。わずかに数ケースのシミュレーション結果だけが、観測された本震の断層すべりの時空間発展や最終すべり分布などの特徴と整合的だった(図1の赤丸; 図2)ことから、広域応力の大きさと摩擦構成パラメータを絞り込むことができました。

今後の展望

この研究は、大地震発生の力学条件を明らかにしたというだけでなく、大地震の発生前に現実的な地震シナリオ(どのような地震が起こりうるか)を想定する観点からも重要です。大地震が発生する前に、さまざまな観測・調査研究から得られた断層面や応力場などの情報をもとに、あり得るパラメータ範囲で多数のシミュレーションを行うことで、多様な地震シナリオを構築でき、それらの中に実際の地震に似たシナリオが含まれることを示しています。今後は、地球物理学・地質学などの幅広い知見を取り入れ、地震発生メカニズムの解明、地震シナリオの構築に向けた研究に取り組みたいと考えています。

引用文献

Dieterich, J. H. (1978). Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 790–806. <https://doi.org/10.1007/BF00876539>

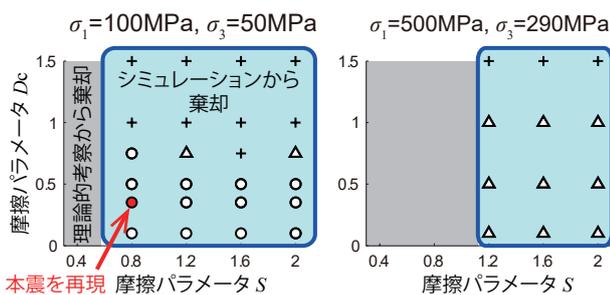


図1 断層すべり伝播シミュレーションの実施例。未知数である、主応力の大きさ (σ_1, σ_3) と摩擦構成則のパラメータ (S, D_c) を変えて多数のシミュレーションを実施した。理論的考察から、灰色で示したパラメータ範囲では本震の断層すべりが実現しないと考えられる。シミュレーションの結果、断層すべりが開始しなかった (+)、断層すべりが途中で停止した (Δ)、断層すべりが断層全体に広がった (\circ)。○のうち、赤丸のパラメータのみで本震の断層すべりの特徴を再現できた。Urata et al. (2017) を編集。

- Fukuyama, E., & Suzuki, W. (2016). Near-fault deformation and Dc'' during the 2016 Mw7.1 Kumamoto earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 194. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0570-6>
- Hardebeck, J. L., & Michael, A. J. (2006). Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(11), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2005JB004144>
- Hasegawa, A., Yoshida, K., & Okada, T. (2011). Nearly complete stress drop in the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 63(7), 703–707. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.007>
- Ida, Y. (1972). Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy. *Journal of Geophysical Research*, 77, 3796–3805. <https://doi.org/10.1029/JB077i020p03796>
- Kubo, H., Suzuki, W., Aoi, S., & Sekiguchi, H. (2016). Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 161. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0536-8>
- Ohnaka, M. (2003). A constitutive scaling law and a unified comprehension for frictional slip failure, shear fracture of intact rock, and earthquake rupture. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2), 1–21. <https://doi.org/10.1029/2000JB000123>
- Olsen, K. B., Madariaga, R., & Archuleta, R. J. (1997). Three-Dimensional Dynamic Simulation of the 1992 Landers Earthquake. *Science*, 278(5339), 834–838. <https://doi.org/10.1126/science.278.5339.834>
- Urata, Y., Yoshida, K., Fukuyama, E., & Kubo, H. (2017). 3-D dynamic rupture simulations of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 150. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0733-0>
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Saito, Y. Asano, S. Tanaka, K. Sawazaki, Y. Urata, and E. Fukuyama (2016), Stress rotations due to the M6.5 foreshock and M7.3 main shock in the 2016 Kumamoto, SW Japan, earthquake sequence, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10,097–10,104, <https://doi.org/10.1002/2016GL070581>

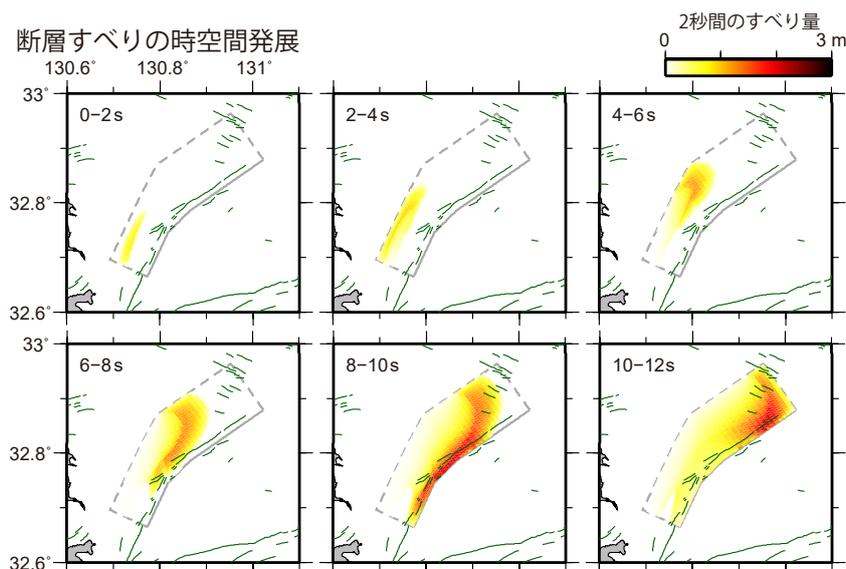


図2 断層すべり伝播シミュレーションの結果。2秒間毎のすべり量を地図上に投影。灰色の線が本震の断層面を示す。図1の赤丸のパラメータを仮定した。このシミュレーション結果は、地震波形記録の解析結果 (Kubo et al., 2016) と整合的である。Urata et al. (2017) を編集。

お知らせ 地質標本館の展示リニューアルのご紹介： 南海トラフ巨大地震の短期予測

地質標本館 2 階の第 3 展示室にある、南海トラフ巨大地震の予測に関する展示をリニューアルしました（図 1）。産総研では、南海トラフで発生する巨大地震の短期予測（数週間から数日前に発生を予測する）を目標に、東海地方から四国にかけての地域（16 地点）で地殻の「ひずみ観測」を行っています。南海トラフの巨大地震は 100～200 年に 1 回発生しており、最近では 1944 年と 1946 年に発生しました。巨大地震の発生を事前に知ることができれば被害を抑えることができます。

各観測地点では、外界からのノイズを避けるために、深いボーリング孔を掘って、その中に観測機器を設置し、海洋プレートが日本列島の下に沈み込むことで生じる地殻のわずかな「ひずみ」を観測しています。その精度は日本とアメリカ大陸の距離（1 万 km）が 1 cm 変わったことを検知できるほどです。この観測は、巨大地震の発生に関係すると考えられているプレート間で発生する「ゆっくりすべり」を捉えることを目的としています。「ゆっくりすべり」が起きても地表付近ではゆれが発生せず、ごく

わずかな地殻変動や水位の変化が現れます。「ゆっくりすべり」は普段でも起きていますが、巨大地震の前にはそれが起きる場所や頻度が変わると考えられています。24 時間連続観測されたデータは、産総研と気象庁にリアルタイムで送られています。気象庁ではこれを「南海トラフ地震臨時情報」などの発表に利用します。

新しい展示では観測の仕組みや、観測データが社会にどのように利用されるのかを紹介しています。ボーリング孔に設置しているものと同じ仕組みの超高感度ひずみ計のデモ機も展示しています（図 2）。1 辺約 20 cm 花崗岩の立方体にボーリング孔をあけ、その中にひずみ計が固定してあります。説明員がいるときには、実際にデモ機に触ることができます。花崗岩を手で押すと、わずかなひずみが生じて、それがモニターに表示されます。花崗岩が「ひずむ」とは不思議な気もしますが、そんな極小の変化を観測する技術が地震の予測に使われています。みなさんも巨大地震予測の研究に使われている技術を体験しに来ませんか？



図 1（左） リニューアルされた南海トラフ巨大地震に関する研究の展示。

図 2（右） 超高感度ひずみ計のデモ機。孔の中に設置されたひずみ計が見えるように、デモ機の上に鏡がついています。

お知らせ 地質標本館特別展のご紹介：日本列島ストレスマップ —地震観測とAIで読み解く全国の地殻応力場—

2021年4月27日から8月1日まで表題の特別展を行っています。ここで言うストレスとは、日本列島の地殻にかかっている力のことです。日本列島とその周辺は世界でも地震が多いところで、人が揺れを感じる地震だけでなく、人が感じない小さな地震が毎日500個も起きています。地震は岩盤が押したり引いたりする力を受けて壊れることで起こります。地震の起こり方を調べると、どういう向きに力が働いたかが分かります。2005年から2019年の間に日本中で起きた約6万7千の地震の起こり方を調べて、日本列島にどういう力が働いているのかを地図に示しました。大きく見ると、海洋プレートが日本列島の下に沈み込むことで生じるストレスが広く見られますが、それだけではない地域性もあります。標本館の床には日本中の地震の起こり方を示した約4m×3.5mの地図が貼ってありますので、この上を実際に歩いて日本列島のどこにどんなストレスがかかっているかを確認してみましょう（図3、4）。また、特別展では地震の起こるメカニズム

や地殻にかかっているストレスと活断層の関係などについても分かりやすく解説しています。パンフレットは下記からダウンロードできます。

https://www.gsj.jp/Muse/exhibition/archives/2021/2021_spring.html

標本館は新型コロナ対策のため予約制となっています。<https://www.gsj.jp/Muse/>

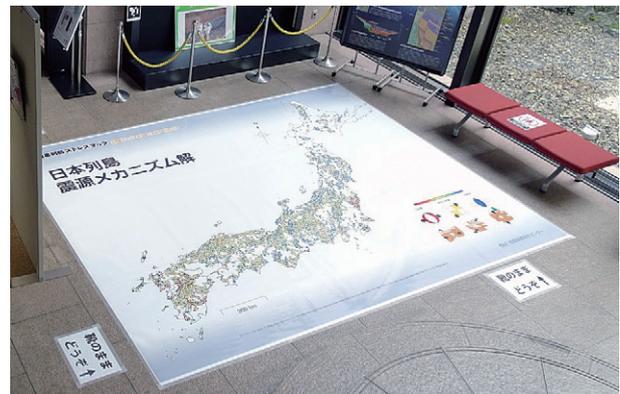


図4 日本列島のどこでどんな地震が起きているのか、地図の上を歩いて確かめてみましょう。

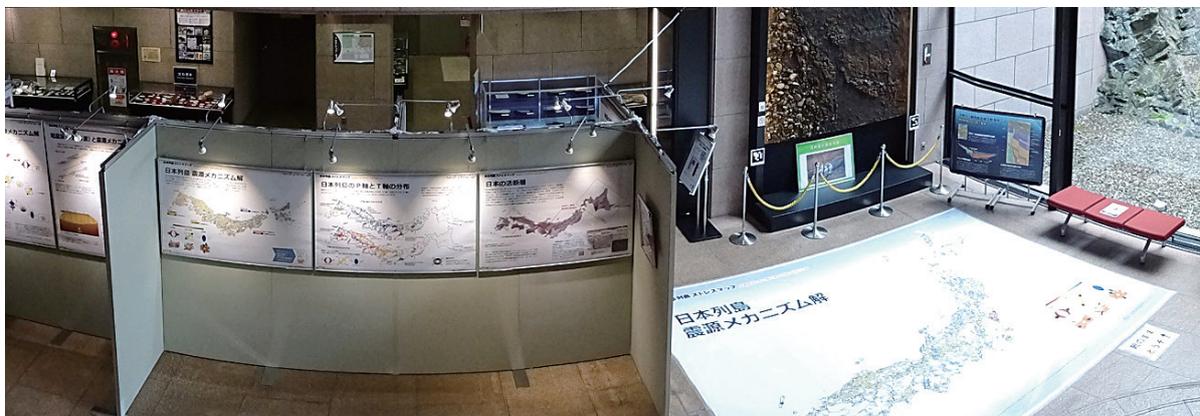


図3 特別展の様子。パーティションの裏にも解説パネルがあります。

リサーチアシスタントの紹介

地質変動研究グループで2021年4月よりリサーチアシスタント（RA）として勤務している細野日向子です。2020年度は同グループで技術研修生として岩石実験のノウハウを学んでいました。本年度はフィールドワーク・数値解析・実験を並行して研究を行う予定です。現在は日本大学大学院総合基礎科学研究科博士前期課程に在籍しています。

私は地震の発生メカニズムについて非常に興味があります。断層面の流体圧が高くなるほど、断層は滑りやすくなるため、地震発生前後の断層周辺の流体挙動の理解が地震発生メカニズムの解明につながると考えます。断層が動くことについて、地面に置いた段ボールを横から押して動かす様子を想像してください。段ボールの中身が重い（垂直応力:大）と、押すためには大きな力（剪断応力:大）が必要になります。段ボールの中身を軽くする（垂直応力:小）と、押す力が小さくても（剪断応力:小）楽に滑り動かせます。これは地震を発生させる断層でも同様で、ここでの段ボールを軽くするのは流体の影響となります。

卒業研究は、過去の地震発生時の断層周辺の流体挙動を推定することを目的に、宮崎県延岡市の海岸で観察可能な延岡衝上断層を対象としました。延岡衝上断層は巨大分岐断層の陸上アナログとして研究が進んでいます。母岩の透水係数が小さい場合、流体は亀裂を水みちとして移動します。亀裂内部を流体が移動する過程で流体から鉱物が晶出したものが、現在の露頭で観察できる鉱物脈です。そこで、この鉱物脈（石英脈）の幾何情報を現地で計測して

得たデータをもとに数値計算により固有透水係数を推定し、過去の延岡衝上断層周辺の流体の移動を推定しました。

RAを務める2年間では今まで求めた固有透水係数の値に加えて、岩石実験を行い、現地露頭から求める値と室内実験の値を繋げていきたいと考えています。さらに研究航海などで得られる地震波トモグラフィとの結びつけも検討していきたいと思っています。また在籍している日本大学では、紀伊半島の泥岩を対象にイライト結晶度と反発硬度の関係、それらの分布と熱変成過程についての研究に携わっています。産総研は幅広い分野の研究者が多くいらっしゃいますので、分野問わず多くの方と議論をしたいと思っています。どうぞよろしくお願ひします。（産総研への出勤日：月曜と木曜）



宮崎県の高千穂峡で柱状節理の見学をしている細野。

外部委員会等 活動報告 (2021年4月～5月)

2021年4月7日

南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会、地震防災対策強化地域判定会（松本（則）出席 /Web会議）

2021年4月9日

第357回地震調査委員会（宮下出席 /Web会議）

2021年4月23日

東京都環境影響評価審議会（宮越出席 / 都庁（出席はweb会議））

2021年4月26日

地震調査委員会長期評価部会（岡村・穴倉出席 / Web会議）

2021年4月28日

第32回（令和3年度第1回）地震・火山噴火予知研究協議会（田中出席 /Web会議）

2021年4月28日

東京都環境影響評価審議会（宮越出席 / 都庁（web出席））

2021年5月12日

東京都環境影響評価審議会第二部会（宮越出席 / webによるオンライン会議）

2021年5月12日

南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会、地震防災対策強化地域判定会（松本出席 /Web会議）

2021年5月14日

第358回地震調査委員会（岡村・宮下出席 /Web会議）

2021年5月18日

第40回 地震火山観測研究計画部会（田中出席 / Web会議）

2021年5月18日

東京都環境影響評価審議会総会（宮越出席 /webによるオンライン会議）

2021年5月20日

茨城県原子力安全対策委員会(令和3年度 第1回)（宮下出席 /Web会議）

2021年5月28日

第231回地震予知連絡会（今西・松本出席 / オンライン会議）

IEVG ニュースレター Vol.8 No.2 (通巻44号)

2021年6月発行

発行・編集 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
活断層・火山研究部門
編集担当 黒坂朗子

問い合わせ 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

Tel: 029-861-3691 Fax: 029-861-3803

URL <https://unit.aist.go.jp/ievg/index.html>