

令和 7 年 3 月 18 日

文部科学記者会、科学記者会、
静岡県社会部記者室、浜松市政記者室、広島大学関係報道機関 御中

国立大学法人静岡大学

高圧流体が引き起こすプレート境界断層の破壊 —スロー地震発生メカニズム解明への新たな手がかり—

【研究のポイント】

- ・スロー地震が発生するプレート境界の高温高圧環境を室内で再現し、高流体圧条件下で岩石中に「fault-fracture mesh 構造」と呼ばれる多数の破壊面からなるネットワークが形成されることを発見。
- ・プレート境界断層を構成していた蛇紋岩中に、実験で確認されたものと同じ fault-fracture mesh 構造が存在すること、さらに鉱物の析出により破壊による隙間が埋められていたことを確認。
- ・蛇紋岩の破壊と鉱物析出の繰り返しがスロー地震の周期的な発生を説明することを世界で初めて地質学的に裏付け、スロー地震の発生メカニズム解明に向けた重要な手がかりを示した。

【概要】

沈み込み帯で発生する「スロー地震^(注1)」は、通常の地震と異なり、数日から数ヶ月という長い時間をかけて断層が滑る現象です。こうしたスロー地震の発生には、従来の地震とは異なるメカニズムが関与していると考えられていますが、その詳細については明らかになっていませんでした。

静岡大学理学部の平内健一准教授、同大学大学院総合科学技術研究科の永田有里奈さん（研究当時）、広島大学大学院先進理工系科学研究科の岡崎啓史准教授（研究当時：海洋研究開発機構・研究員）らの研究グループは、西南日本の沈み込み帯で頻繁に観測されているスロー地震の一種「Episodic Tremor and Slip (ETS)」に注目し、その仕組みを明らかにするため、室内実験および野外調査による研究を実施しました。

研究グループは、ETS の発生が深さ約 30 km のプレート境界断層付近に存在する蛇紋岩^(注2)と、そこに供給される高圧状態の流体と密接な関係があることに着目しました。実験では、圧力容器内にこの環境を再現し、蛇紋岩が高い流体圧を受けると、多数の破壊面がネットワーク状に広がる「fault-fracture mesh 構造^(注3)」を形成することを明らかにしました。また、四国の三波川帯に露出する蛇紋岩体の地質調査からも、実験と同じく fault-fracture mesh 構造が繰り返し形成されていたことを確認しました。さらに、流体から新たに蛇紋石が析出し、破壊によりできた隙間を埋めていました。この現象は、「断層バルブ挙動^(注4)」と呼ばれるもので、スロー地震の周期性を説明する重要な地質学的証拠となります。

本研究の成果は、ETS が蛇紋岩の断層バルブ挙動によって周期的に発生するという仮説を初めて実験的かつ地質学的に裏付けました。この成果により、スロー地震の発生メカニズム解明が進展し、将来的にスロー地震の予測向上や地震防災対策への活用が期待されます。

本研究成果は、Springer Nature 社の発行する英国科学雑誌「Communications Earth & Environment」に 2025 年 3 月 5 日に掲載されました。

【背景】

沈み込み帯のプレート境界断層では、テクトニック微動、低周波地震、スロースリップイベントなど、異なる時間スケールでゆっくり発生するスロー地震が観測されています。西南日本の沈み込み帯では、Episodic Tremor and Slip (ETS)と呼ばれる、数ヶ月から数年の周期で微動とスロースリップイベントが同時に発生する現象が知られており、通常地震が起きる領域のさらに深い場所で発生しています。この領域では、沈み込んだ海洋プレートから放出される大量の水（流体）がプレート境界断層に供給されることで、「高流体圧」という特異な環境が形成されていると考えられています（図1 上段）。

近年の地球物理観測研究では、ETS が起きるときに断層が破壊されることで、流体圧が一時的に減少するという現象が捉えられました（図1 下段）。地球物理学者は、この流体圧の変化を「断層バルブモデル」を用いて説明しています。このモデルでは、断層が破壊されて生じた隙間（亀裂）に新たな鉱物が析出することで、再び流体圧が上昇し、それが次の破壊（地震）を引き起こすという周期的なメカニズムを想定しています。

ETS が起きる領域は「蛇紋岩」と呼ばれる岩石で構成されていると考えられています。蛇紋岩はマントルを構成する「かんらん岩」が水と反応してできる岩石で、力学的に弱い性質を持っています。そのため、蛇紋岩と ETS には何らかの関連性があると考えられてきましたが、高流体圧下で実際に蛇紋岩がどのように振る舞うのか、その具体的なメカニズムは明らかではありませんでした。そこで本研究では、ETS 発生域の環境（圧力 1 GPa、温度 500 °C、深さ約 30 km に相当）を再現した実験を行い、蛇紋岩の破壊と鉱物析出を繰り返す現象が本当に ETS の発生サイクルと関連しているのかどうかを検証しました。

【成果】

本実験では、グリッグス型固体圧式装置を使用し、蛇紋岩試料に水を加えて実際のプレート境界深部の環境を再現しました。また、加える水の量を系統的に変化させることで、流体圧を制御することに成功しました。その結果、流体圧が増加するにつれて、蛇紋岩の破壊様式が変化することを明らかにしました。特に、非常に高い流体圧条件では、岩石全体にわたって網目状の亀裂（fault-fracture mesh 構造）が形成されました（図 2A）。

また、四国の三波川帯に分布する白亜紀の地質体には、深部スロー地震発生域に相当する環境下で形成された「過去のプレート境界断層」が露出しています。この地域の蛇紋岩を対象とした地質調査からも、fault-fracture mesh 構造が地質学的な時間スケールで繰り返し形成されていたこ

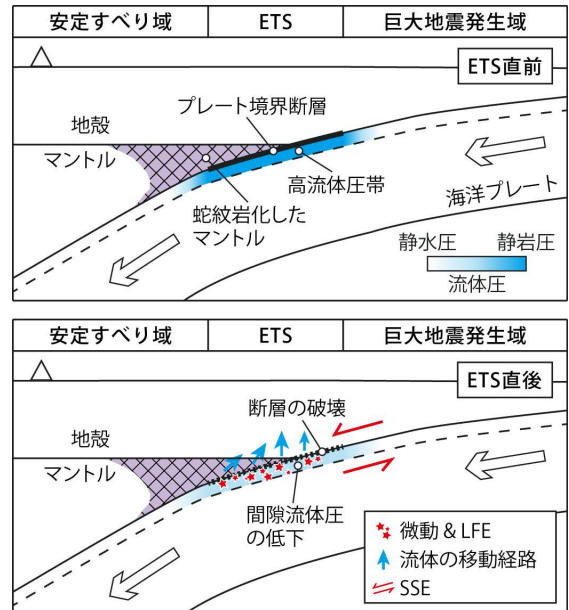


図1. 西南日本沈み込み帯の模式断面図。スロー地震の一種であるEpisodic Tremor & Slip (ETS)の発生前後でプレート境界断層付近の流体圧変化が起こる。LFE:低周波地震。SSE:スロースリップイベント。

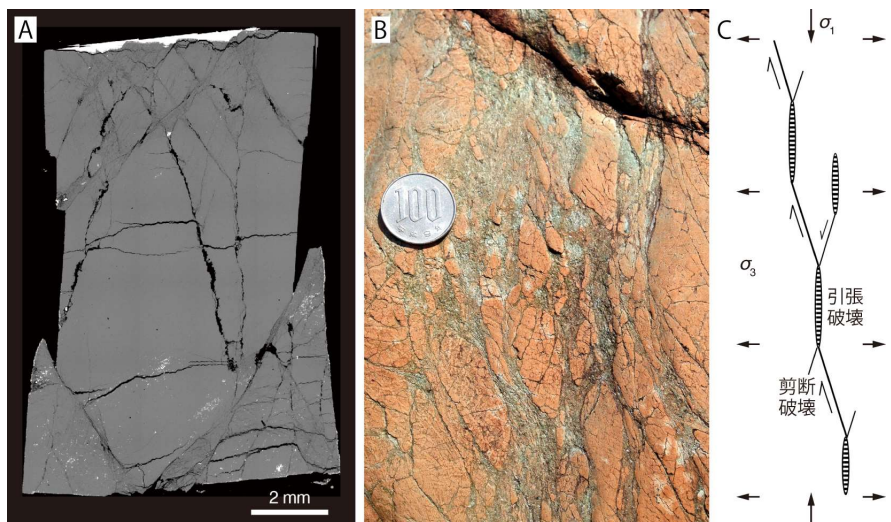


図2. 蛇紋岩中に発達するfault-fracture mesh構造。(A) 実験後の試料の電子顕微鏡写真。(B) 四国三波川帯・富郷蛇紋岩体の露頭写真。(C) fault-fracture mesh構造形成時の応力場を表した図。σ₁:最大主応力軸。σ₃:最小主応力軸。

とがわかりました（図 2B）。さらに、亀裂には新たに蛇紋石が析出して隙間を埋めていました。このことは、断層が破壊と鉱物析出を繰り返してきたという証拠であり、「断層バルブ挙動」の地質学的な痕跡であると考えられます。

これらの研究成果は、ETS の周期的発生を説明する断層モデルと非常によく一致しています。つまり、亀裂が蛇紋石の析出によって閉じるまでの時間が次の破壊（スロー地震）が起きるまでの準備期間であること、亀裂が閉じるにつれて再び流体圧が高まり、次の破壊を引き起こすことが示唆されます（図 3）。

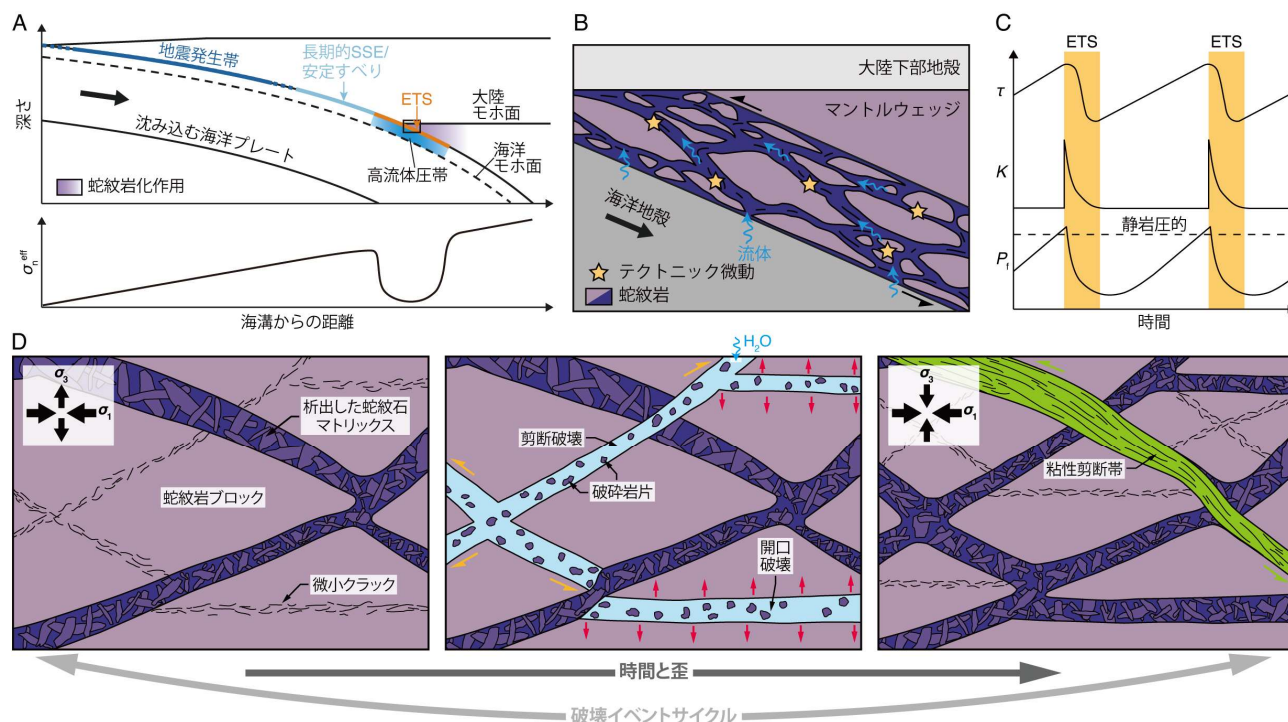


図3. Episodic Tremor & Slip (ETS)の発生機構を表した模式図. (A) 温かい沈み込み帯の断面図(上段)とプレート境界に沿った有効法線応力(σ_{eff})変化(下段). (B) 蛇紋岩からなるプレート境界断層帯に発達するfault-fracture mesh構造を表した図. 図A中の黒四角の範囲に対応する. (C) ETSの発生サイクルに対応した剪断応力(τ)、透水性(K)、流体圧(P_f)の時間変化. (D) ETSの発生サイクルを通じて起こる蛇紋岩の破壊・鉱物析出プロセスを表した図. σ_1 : 最大主応力軸. σ_3 : 最小主応力軸.

【今後の展望】

本研究は、蛇紋岩が断層バルブの役割を果たすこと、深部スロー地震が繰り返し起こることを、実験と野外調査により初めて具体的に示唆したものとと言えます。今後は、蛇紋石の析出速度についてより詳細な実験を行い、実際の ETS の周期（数ヶ月から数年）を説明できるかを明確にする必要があります。また、この破壊現象がスロー地震特有の低周波成分が卓越する地震波を発生させるのかについても、実験的に検証していきます。これらの研究が進展することで、スロー地震がなぜ、どのようにして発生するのかというメカニズムの本質的な理解が深まり、地震防災や予測の精度向上にも貢献することが期待されます。

【論文情報】

掲載誌名：Communications Earth & Environment

論文題目：Fault-fracture mesh development produces tectonic tremor in fluid-overpressured serpentinized mantle wedge

著者：Ken-ichi Hirauchi, Yurina Nagata, & Keishi Okazaki

DOI：10.1038/s43247-025-02159-7

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業である「基盤研究(B), 22H01320」、「学術変革領域研究(A) (公募研究), 22H05301」、「基盤研究(S), 22H04932」、「基盤研究(B), 18H01318」、「新学術領域

研究(研究領域提案型), 19H04630」「基盤研究(A), 21H04528」, 「挑戦的研究(開拓), 22K18283」の支援により実施されました。

【用語説明】

注1. スロー地震: 低周波微動、低周波地震、スロースリップイベントなどに代表される、通常の地震に比べてゆっくりとした断層滑りの総称。

注2. 蛇紋岩: 上部マントルを構成するかんらん岩などの超苦鉄質岩が加水作用を受けて形成される岩石。主に蛇紋石から構成される。

注3. fault-fracture mesh 構造: 引張(モードI型)破壊と引張・剪断(モードI-II型)破壊が多数発生することで形成される網目状の亀裂構造。流体圧が岩石の静岩圧を超える高流体圧環境下で形成され则认为られている。

注4. 断層バルブ挙動: 流体が断層に沿って移動していく際、鉱物の析出などにより断層面上の隙間が閉じて(断層がシールされて)局所的に流体圧が上昇し、断層の実効的な強度が低下することで発生する滑り。

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

静岡大学理学部地球科学科

准教授・平内 健一 (ひらうち けんいち)

TEL : 054-238-4735 E-mail : hirauchi.kenichi@shizuoka.ac.jp

広島大学大学院先進理工系科学研究科

海洋研究開発機構 高知コア研究所 招聘主任研究員

准教授・岡崎 啓史 (おかざき けいし)

TEL : 082-424-7462 E-mail : keishiokazaki@hiroshima-u.ac.jp

(報道に関すること)

静岡大学 広報・基金課

TEL : 054-238-5179 E-mail : koho_all@adb.shizuoka.ac.jp

広島大学 広報室

TEL : 082-424-3749 E-mail : koho@office.hiroshima-u.ac.jp