

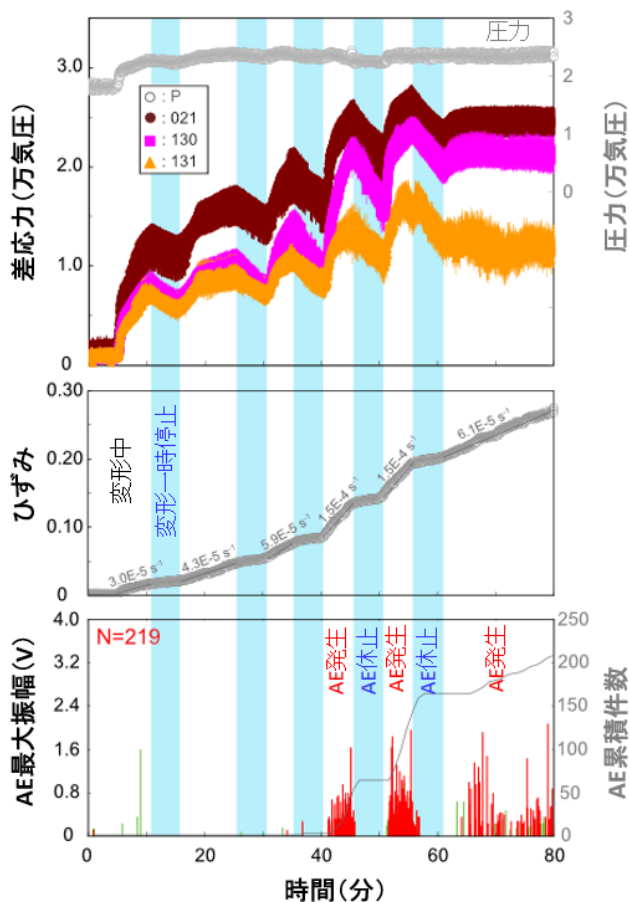
令和 7 年 5 月 26 日
愛 媛 大 学
高輝度光科学研究センター
理 化 学 研 究 所

地震の発生は岩石にかかる力の大きさを反映

～大地震発生の評価につながる基礎研究～

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センターの大内智博准教授、入船徹男教授、高輝度光科学研究センターの肥後祐司主幹研究員、理化学研究所の矢橋牧名グループディレクターなどからなる研究チームは、大型放射光施設 SPing-8 の強力な次世代 X 線と高温高压発生装置を組み合わせることで、高温高压環境にてサブ秒オーダーで進行する岩石の破壊現象の観察に成功しました。実験において、岩石の破壊（ミニ地震の発生）は、ある程度の高い応力が岩石に加わっている状態に限られることを明らかにしました。この結果より、地球内部にて地震が頻発する状況は、「地震発生場に生じている応力が高い状況」にあると解釈することができます。今後、種々の実験環境下においても検証が進めば、大地震発生の評価への応用も可能になるものと期待されます。

本研究結果は、米国の科学雑誌「Geophysical Research Letters」に 5 月 12 日に掲載されました。



温度 880℃、圧力 2.3 万気圧における実験結果の一例。ミニ地震に相当するアコースティック・エミッション (AE) の発生は、差応力が高まっている状態（白の領域）に限定されている。

【本件に関する問い合わせ先】

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター 准教授 大内 智博
電話: 089-927-8159 E-mail: ohuchi.tomohiro.mc@ehime-u.ac.jp



地震の発生頻度は岩石にかかる力の大きさを反映することを解明

大地震発生の評価につながる基礎研究

愛媛大学

高輝度光科学研究センター

理化学研究所

【研究成果のポイント】

- 実験室におけるミニ地震の発生は、岩石試料が受ける力が過去に受けた最大値を上回った場合に限られること（カイザー効果）が知られていた。
- しかし、技術的な問題により、カイザー効果は常温常圧でしか確認されておらず、数10kmの深さで発生する実際の地震の高温・高圧下では確認されていない。
- 本研究では、深さ60～90kmの地震発生場の温度圧力環境を実験室で再現し、カンラン石の変形実験とミニ地震の測定を行った。
- サブ秒オーダー（1秒以下）の高い時間分解能での観察を可能にするSPring-8の次世代X線が、実験成功の鍵となった。
- この結果、地震発生場の温度圧力環境下にてカイザー効果はおおむね成立したが、カイザー効果に反する結果も得られた。
- 地震発生場の温度圧力環境下では、岩石がある一定以上の強い力を受けている場合のみ地震が発生するものと予想される。

【概要】

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センターの大内智博准教授、入舩徹男教授、高輝度光科学研究センターの肥後祐司主幹研究員、理化学研究所の矢橋牧名グループディレクターなどからなる研究チームは、大地震発生のリスク評価につながる実験に成功しました。以前より、実験室におけるモデル実験では、ミニ地震の発生は岩石が受ける力の大きさ（差応力）が過去に受けた力の最大値を更新した場合に限られることが知られて

いました(カイザー効果)。仮にカイザー効果が実際の地震に対しても成り立つのであれば、地震が頻発する状況は「地下の岩石がかつてないほどの力を受けている」ことを意味するため、大地震発生リスクが高まっていると解釈できます。しかし技術的な問題から、実際に地震が発生する高温高压環境下にてカイザー効果が成立するかどうかを検証することは困難でした。地震発生をもたらす岩石の破壊現象は秒単位で進行しますが、そのような時間分解能にて破壊現象を観察するのは高温高压下では困難だったためです。

本研究チームは、大型放射光施設 SPring-8 の強力な次世代 X 線と高温高压発生装置を組み合わせることで、高温高压環境にてサブ秒オーダーで進行する岩石の破壊現象の観察に成功しました。高温高压環境でも差応力が上昇しつづける場合にはミニ地震が発生し、差応力が低い状態ではミニ地震の発生が休止することを示しました(カイザー効果の成立)。ただし差応力が過去最大値を下回っていても、差応力が高い状態が維持されればミニ地震は発生するという例外的な結果も確認されました(カイザー効果からの逸脱)。以上の結果は、高温高压環境にて地震が頻発する状況は「地震発生場の岩石がある一定程度の強い力を受けている状態」とであると解釈することができます。今後、種々の環境下において微弱地震の発生頻度と差応力に相関関係が見い出せれば、大地震発生の評価への応用が可能になるものと期待されます。

本研究成果は、米国の科学雑誌「Geophysical Research Letters」に5月12日に掲載されました。

【詳細】

地震発生予測技術の実用化は、地震大国である我が国にとって悲願です。これまで、大地震の前兆現象の有無について経験的・統計的な観点から検討され続けてきました。その結果、予測の指標となりうる観測値(例えばグーテンベルク・リヒター則の b 値(※1))が見い出されていますが、いずれの指標も防災に応用できる程の高い有効性はありません。そもそも、経験的・統計的な観点から得られた“指標”は、「なぜそれが指標となりうるのか?」といった問いに明確に答えることができません。

一方、物質科学的に裏付けされた地震発生予測の指標があれば、より信頼しうる指標となりえます。カイザー効果は、その代表例です。カイザー効果はもともと1950年にドイ

ツのカイザー博士によって金属の変形・破壊のプロセスにて見い出された現象で、その物質が受ける力が過去に受けた力の最大値を超えた場合に破壊が発生する、というものです。岩石でも同様にカイザー効果が成り立つことが知られており、常温常圧の実験室におけるミニ地震の発生は岩石が受ける差応力が過去最大値を更新した場合に限られます。仮にカイザー効果が実際の地震発生場でも成り立つのであれば、微弱地震が頻発する状況は「地下の岩石がかつてないほどの力を受けている」ことを意味します。これはすなわち、大地震発生の可能性が高まっていることを示唆することとなります。このような背景から、カイザー効果に関する研究は防災への応用が期待されます。これまで多くの研究がなされてきましたが、地下 10~700 km に位置する地震発生場の高温高压環境下 (200~1000℃、0.3~25 万気圧) での実験は行われてきませんでした。そのような環境下にて、サブ秒単位 (1 秒以下) で進行する破壊現象を連続的に観察するのは技術的に困難だったためです。

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター (GRC) の大内智博准教授を中心とする本研究チームは、稍 (やや) 深発地震 (図 1) が多発する深さ 60~90 km のプレート内部の温度圧力条件下 (600~900℃、2~3 万気圧) でのカンラン石の変形実験 (※2, 3) を大型放射光施設 SPring-8 (※4) のビームライン BL15XU 及び BL04B1 にて行いました (図 2)。特に BL15XU では強力な次世代 X 線と高温高压発生装置 (マルチアンビル装置) を組み合わせて用いることで、高温高压下にてサブ秒単位で進行するカンラン石の破壊現象の観察に成功しました。実験では GRC で独自に開発した高压力環境用の測定技術を用い、カンラン石試料を押しつぶした際に発生する『アコースティック・エミッション (AE)』 (※5) という音波を検出しました。これは実験室における“ミニ地震”に相当し、自然地震を実験室で模した状況を再現できたこととなります。

実験では、差応力が過去最大値を更新しながら上昇しつづける場合にはミニ地震が発生し、差応力が低い状態ではミニ地震の発生が休止するという結果が得られました (図 3)。この結果はカイザー効果の定義と一致します。しかし一方で、カイザー効果の定義から外れる結果も得られました (差応力が過去最大値を下回っている場合でも、ある程度差応力が高い状態が維持され続ける場合にはミニ地震は発生する)。以上の結果は、高温高压下にて微弱地震が頻発する状況は、どちらの場合であっても「地震発生場の岩石がある一定程度の強い力を受けている状態」であると解釈することができます。

本研究では微弱地震の発生頻度における差応力の効果を検証しましたが、微弱地震の発

生頻度は他の効果（例えば地下水の侵入など）によっても影響を受けるものと予想されます。そのため、防災への応用には本研究のような基礎実験を継続して積み重ねていく必要があります。今後、室内実験の結果と地震観測の結果を合わせることによって、大地震発生の可能性評価への展望が期待されます。

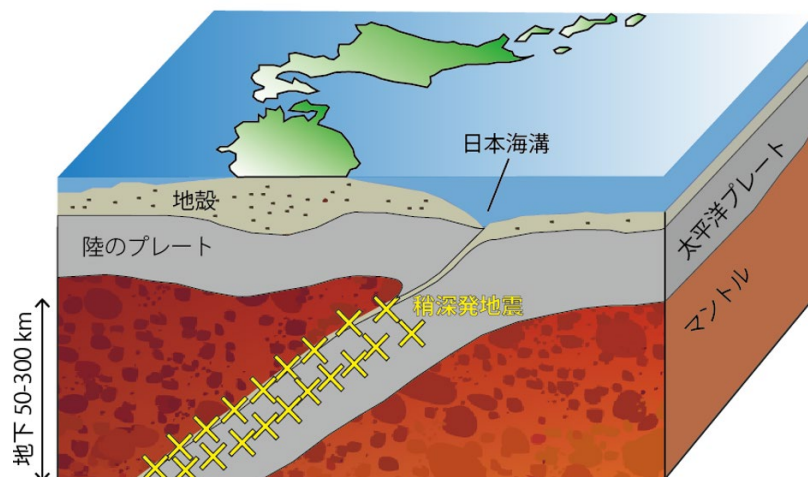


図1. 日本列島下に沈み込むプレートと稍深発地震。稍深発地震とは、深さ 50～300kmにて発生する地震のことを指す。稍深発地震のほとんどは、日本をはじめとした沈み込み帯において、地球深部へと沈み込むプレートの内部にて発生する。稍深発地震は、プレート内部にて「二重深発地震面」という地震発生場を形成する。

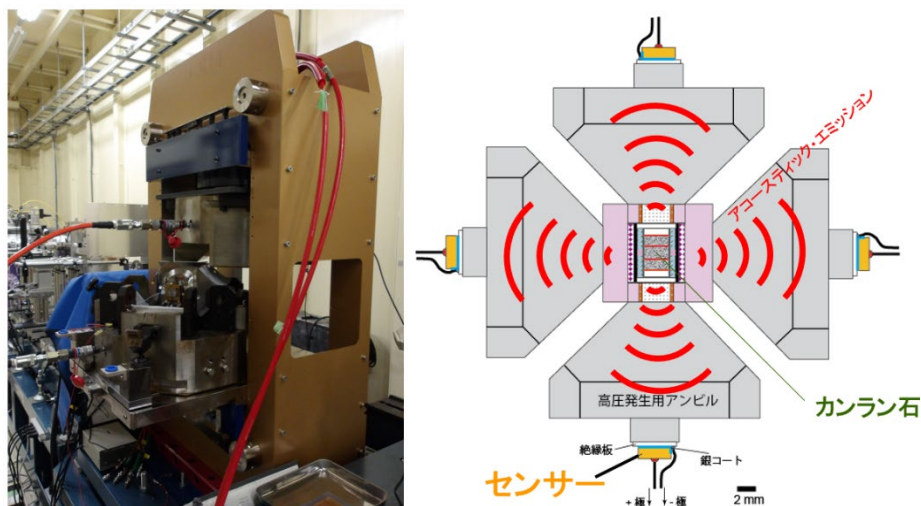


図2. マルチアンビル装置（左）と高温高圧力下でのアコースティック・エミッション検出技術の概要（右）。マルチアンビル装置では、超合金製の高圧発生用アンビルを上下左右の6方向に配置し、その中心に配置した立方体の高圧力発生容器（ピンク）内のカンラン石試料に高圧力を加える。カンラン石の破壊の際に発生する特徴的な音波である『アコースティック・エミッション』を高圧発生用アンビルの背面に張り付けた計6つのセンサーで検出する。

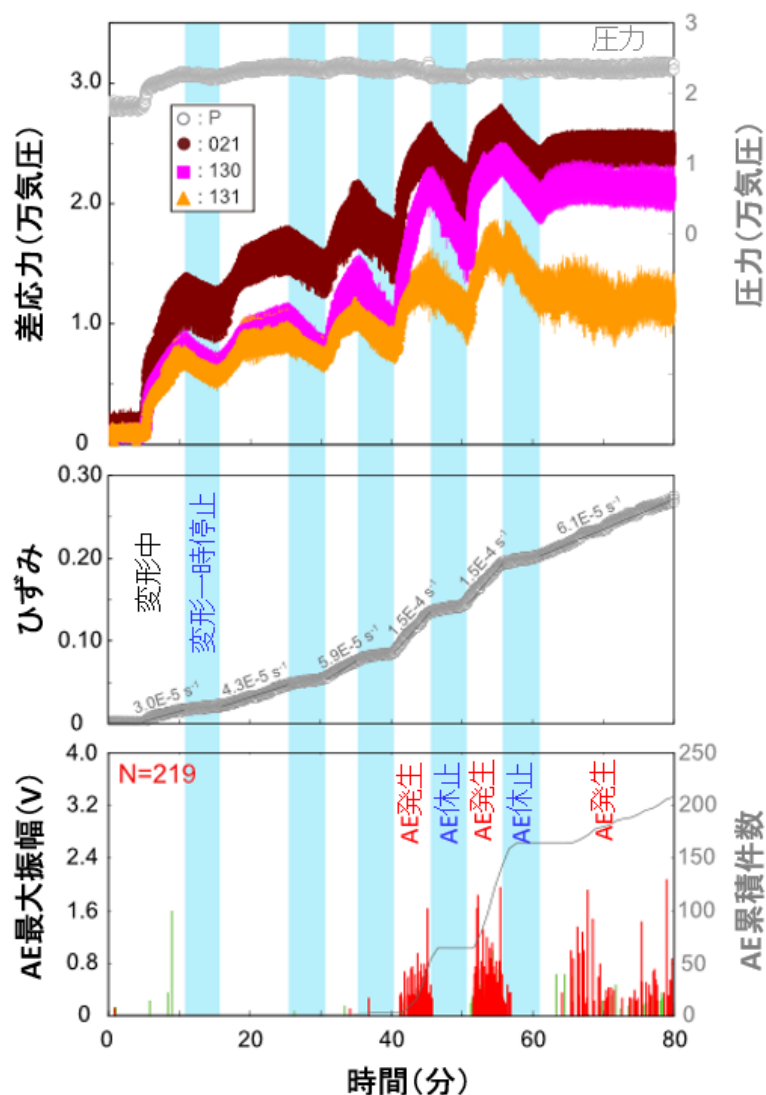


図3. 温度 880℃、圧力 2.3 万気圧におけるカンラン石試料の変形実験の結果の一例。変形中には差応力が上昇する（白）。変形を定期的に一時停止することにより、差応力は低下する（水色）。試料の変形がある程度進行すると（ひずみ 0.08 以上）、アコースティック・エミッション（AE）が発生した。ただし AE 発生は差応力が上昇する過程（白）に限定されており、差応力が低下する過程（水色）では AE は発生しなかった（カイザー効果の成立）。ただし試料が大きく変形すると（ひずみ 0.2 以上）カイザー効果に反し、差応力が過去最大値未満の状態でも AE が発生した。なお、差応力はカンラン石の複数の回折線（茶：021、ピンク：130、オレンジ：131）より決定しているため、回折線の種類によって得られる応力値は多少異なる。

【用語解説】

グーテンベルク・リヒター則の b 値 (※1)

グーテンベルク・リヒター則とは、マグニチュードが大きい地震ほど発生頻度は低いといった統計的な経験則を定式化したもの。b 値は両者の比例定数である。自然地震の b 値は一般的に 1 であることが多い。マグニチュードが大きい地震の発生頻度が相対的に増加した場合、b 値は低下する。

カンラン石(※2) :

カンラン石は上部マントル及びプレート（稍深発地震の発生場）の最主要構成鉱物であり（6～7 割を占める）、その化学組成は $\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}_{0.2}\text{SiO}_4$ で表される。

変形実験(※3) :

実験試料に数万気圧以上の超高压をかけるマルチアンビル装置の一種である、D-DIA 型変形装置を用いて行う。6 つのアンビルを大型のプレスで加圧し、中心に置かれた試料に高圧力を発生させた上で、その試料を変形させる機能をもつ。放射光を用いることにより、試料にかかる圧力、差応力、歪みを測定することができる。

大型放射光施設 SPring-8 (※4) :

理化学研究所が所有する兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す大型放射光施設で、利用者支援等は高輝度光科学研究センター（JASRI）が行っている。SPring-8（スプリングエイト）の名前は Super Photon ring-8 GeV に由来。SPring-8 では、放射光を用いて幅広い分野の研究が行われている。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、磁場によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波のこと。

アコースティック・エミッション (AE) (※5) :

微小破壊音とも呼ばれる。クラック（割れ目）が成長する際に放出される弾性波のことであり、一般的には 50 kHz～5 MHz の範囲の周波数をもつ。高温高压環境下においてクラックを直接観察するのが困難なため、AE が検出されれば、発生源にクラックが存在する

ことの強い証拠となる。自然地震との共通点も多いことから、実験室における“ミニ地震”と呼ばれることもある。

【論文情報】

掲載誌：Geophysical Research Letters

題 名：A Stress Memory Effect in Olivine at Upper Mantle Pressures and Temperatures（地球の上部マントルの温度圧力条件下における応力記憶効果）

著 者：Tomohiro Ohuchi , Yuji Higo, Noriyoshi Tsujino, Sho Kakizawa, Yusuke Seto, Yoshio Kono, Hirokatsu Yumoto, Takahisa Koyama, Hiroshi Yamazaki, Yasunori Senba, Haruhiko Ohashi, Ichiro Inoue, Hiroyuki Ohsumi, Yujiro Hayashi, Makina Yabashi , and Tetsuo Irifune

D O I : 10.1029/2025GL114960

<https://doi.org/10.1029/2025GL114960>

【研究サポート】

- 日本学術振興会科学研究費補助金
課題番号：19H00722, 23H00147
- 三菱財団
課題番号：202310008
- SPring-8 一般利用課題
課題番号：2022B1183, 2023A1213, 2023B1229
- SACLA/SPring-8 基盤開発プログラム

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

愛媛大学先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター

准教授 大内 智博

電話 : 089-927-8159 E-mail : ohuchi.tomohiro.mc@ehime-u.ac.jp

高輝度光科学研究センター 回折・散乱推進室

主幹研究員 肥後 祐司

電話 : 050-3502-3587 E-mail : higo@spring8.or.jp

(プレスリリースに関すること)

愛媛大学

・総務部広報課

電話 : 089-927-9022 E-mail: koho@stu.ehime-u.ac.jp

・先端研究院地球深部ダイナミクス研究センター (GRC)

電話 : 089-927-8165 E-mail: grc@stu.ehime-u.ac.jp

高輝度光科学研究センター (JASRI)

・利用推進部普及情報課

電話 : 0791-58-2785 E-mail : kouhou@spring8.or.jp

理化学研究所

・広報部 報道担当

電話 : 050-3495-0247 E-mail : ex-press@ml.riken.jp