

稍深発地震の発生メカニズムを高温高压下での 地震発生モデル実験により解明

国立大学法人 愛媛大学
公益財団法人 高輝度光科学研究センター

【研究の背景】

私達が住む地表のプレート（厚さ約 60 キロメートル）はゆっくりと流れるマントルに浮いているため、マントルの流れと一緒にプレートも移動します。プレート同士が衝突したり、プレートが地下深くへ沈み込む過程で地震が発生します。地震は、その震源位置の深さや場所によって分類されます。地表付近（地下 10~40 km）で起きる『浅い地震』はプレートの境目や陸の直下で度々起きるため、津波を伴う地震や直下型地震を引き起こし、時にはマグニチュード 8 に達することもあるため大きな被害をもたらします。一方、稍深発地震は深さ 50~300 km のプレート内部で頻発する地震であり（『浅い地震』に次ぐ頻度で発生）、時にはマグニチュード 7 クラスの大きな稍深発地震も発生します。地表付近で起きる浅い地震の発生原因は既存の断層がずべることですが、深さ 50km 以深では圧力が高いために断層すべりは阻害されてしまいます。そのため、稍深発地震の発生原因は単なる断層すべりでは説明が付きません。地球深部水が深部での断層すべりを誘発しているのではないか、とする仮説が稍深発地震を説明する上で支持されてきました。しかしこの仮説には、地球深部水が存在しない場所でも稍深発地震が起きている事実を説明できない問題点があることも知られていました。

近年、大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL04B1 設置の D-DIA 型変形装置^(※7)に代表される、放射光を用いた高温高压下での変形実験の技術が進歩してきました。稍深発地震が発生する深度の温度圧力条件を再現し、プレートの岩石^(※8)（主にカンラン石及び斜方輝石から構成されるカンラン岩）を押しつぶすことで変形やミニ人工地震発生の特性を評価することも可能となってきました。実験中に岩石試料の破壊や断層形成が起きたことを証明するには、ミニ人工地震に特有の『アコースティック・エミッション』という音波を高温高压の環境下にて検出する技術（図 1）が必要不可欠です。しかし『アコースティック・エミッション』測定技術と放射光実験を組み合わせるには非常に高度な技術が要求されます。これまで、その技術の実用化に成功しているのは世界中でも 1 グループ（フランス・米国の国際共同研究グループ）に限られていました。

【研究の成果】

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）の大内智博講師、入船徹男教授（東京工業大学地球生命研究所兼務）と、高輝度光科学研究センターの肥後祐司研究員らの研究グループは、稍深発地震が特に多発する深さ 50~100 キロメートルのプレート内部に相当する温度圧力条件下（600~900℃、1.5~3 万気圧）でカンラン岩^(※8)の変形実験を大型放射光施設 SPring-8 にて行いました。この実験では、愛媛大 GRC と産業技術総合研究所の共同研究グループが独自に開発した『アコースティック・エミッション』測定技術を用いたほか、その結果、カンラン岩が比較的速い変形をする

際に限り、変形のエネルギーが岩石の脆弱層（微細鉱物粒子からなる）に局所集中し、瞬間的にその部分が 1840°C もの非常に高い温度に達することで岩石が溶融し（図 2）、それに伴う岩石強度低下の結果として断層形成に至る（図 3）ことが明らかとなりました。

実際、理論的にはこのような現象が予測されていたほか、天然の岩石にはシュードタキライトという、地震の際に岩石が溶融した痕跡も多く見つかっています。これらの先行研究との一致は、変形エネルギーが一部に集中して岩石が溶融することで稍深発地震が発生するとする本研究の正当性を裏付けており、本研究の発見がプレート内における稍深発地震の発生を統一的に説明できる新たなモデルとなることを意味します。

【今後の展望】

本研究の結果は、稍深発地震はプレート岩石が変形する際に起きる岩石の溶融が原因となっている現象であり、既存の断層がすべる過程で起きるわけではないことを示しています。また、地球深部水の存在は稍深発地震にとって必須の要件ではないことも示しています。今後は多くの実験を積み重ねていくことによって、稍深発地震発生過程のより詳細を明らかにしていくとともに、どのような条件で地震が誘発されるのかを解明することを目指していきます。また、地震の中には 300 km よりも更に深い、700 km 程度までの深さでおきる地震（深発地震^(**9)）もあり、その発生原因は稍深発地震以上に多くの謎に包まれています。本研究グループは深さ 300 km よりも深い地球深部の温度圧力条件の再現を得意としており、その技術力は世界最高水準に達しています。今回用いた実験技術（アコースティック・エミッション測定技術や放射光実験技術）は今後も更なる技術の進歩が見込まれますので、本研究グループの手法を拡張することで深発地震の発生メカニズムの謎も将来的には解明することができるかもしれません。

【成果のポイント】

- ・ 変形エネルギーがプレートの岩石の一部に局所集中することによって起きる岩石溶融が稍深発地震の原因であることを実験的に解明。
- ・ 独自の『高圧力環境下のアコースティック・エミッション』測定技術を活用。
- ・ 稍深発地震の発生過程の解明を目指した基礎科学（高圧地球科学）のモデルケース。

【用語解説】

（※1）地球生命研究所

東京工業大学の廣瀬敬教授をリーダーとして採択された、地球・生命科学分野の WPI（世界トップレベル研究拠点）プログラムに基づき 2012 年に設立された同大学の新しい研究所。愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）は、当研究所のサテライト拠点となっている。

（※2）稍深発地震（ややしんぱつじしん）

深さ 50 から 300 km 程度にて発生する地震のこと。日本列島直下の沈み込むプレートの内部にて多く発生し、その震源は二重深発地震面といういわば『地震の巣』を形成している。

(※3)プレート

上部マントルの上に位置する、固体地球の最表層。温度が低いために、プレートは硬い剛体として振る舞う。一方、上部マントル以深では温度が高いために、水飴のようにゆっくりと流れる粘性流体として振る舞う。

(※4)マントル

マントルは最主要構成鉱物の違いに従って、上部マントル（深さ約 60-410 キロメートル）、マントル遷移層（410-660 キロメートル）、下部マントル（660-2900 キロメートル）の3つの領域に区分される。上部マントルは我々が住むプレートの下に位置するため、上部マントルの流れがプレート移動の原因となる。

(※5)地球深部水

地球のマントルやプレート深部に存在する水性流体。マントルに沈み込むプレート中に存在する含水鉱物（例えば蛇紋石）がマントルの熱によって分解する際に直上のマントルへと放出される。日本列島直下にて玄武岩質マグマを生成させ火山をつくる原因。

(※6)大型放射光施設 SPring-8

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国立研究開発法人理化学研究所の施設で、その運転と利用者支援は公益財団法人高輝度光科学研究センターが行っている。SPring-8の名前は **S**uper **P**hoton **r**ing-**8**GeV に由来。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石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。

(※7)D-DIA 型変形装置

マルチアンビル型高圧発生装置の一種。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うえに、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、歪を測定することができる。

(※8)プレートの岩石、カンラン岩

カンラン岩は主にカンラン石及び斜方輝石から構成される岩石であり、地球の上部マントル及びプレートの主要構成岩石である（本資料では、カンラン岩のことを「プレートの岩石」と呼んでいる）。カンラン岩はカンラン石と輝石の割合で呼び方が細分される。特にプレートはカンラン岩の一種であるハルツバーナイトで構成されている。

(※9)深発地震

深さ 400-700 km で発生する地震のこと。沈み込むプレートの内部にて多く発生する。ただし、その発生頻度は稍深発地震と比べると少ない。その発生メカニズムは謎に包まれている。

【掲載論文】

題名： Intermediate-depth earthquakes linked to localized heating in dunite and harzburgite

邦訳： ダナイト及びハルツバータイト中の局所加熱によっておきる稍深発地震

著者： 大内智博（愛媛大学 GRC）、雷興林（産業技術総合研究所）、肥後祐司、丹下慶範（高輝度光科学研究センター利用研究促進部門）、境毅、藤野清志、入船徹男（愛媛大学 GRC）

掲載誌： Nature Geoscience（Nature Publishing Group 発行），doi: 10.1038/ngeo3011

電子版発行日： 2017 年 8 月 29 日予定（報道解禁：日本時間 8 月 29 日（火）午前 0 時）

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

講師 大内 智博

E-mail: ohuchi@sci.ehime-u.ac.jp

TEL: 089-927-8159、 080-8631-1368

教授 入船 徹男

E-mail: irifune@dpc.ehime-u.ac.jp

TEL: 089-927-9645、 080-3925-8848

公益財団法人高輝度光科学研究センター

研究員 肥後 祐司

E-mail: higo@spring8.or.jp

TEL: 0791-58-2702

愛媛大学総務部広報課

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

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）

E-mail: grc@stu.ehime-u.ac.jp TEL: 089-927-8165 FAX: 089-927-8167

（SPring-8 / SACLA に関すること）

公益財団法人高輝度光科学研究センター 利用推進部 普及情報課

E-mail: kouhou@spring8.or.jp TEL: 0791-58-2785 FAX: 0791-58-2786

【関連分野の研究者】

国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋科学技術イノベーション推進本部

研究推進担当役（上席研究員） 鳥海 光弘

E-mail: tori@k.u-tokyo.ac.jp TEL: 046-867-9742

【備考】

なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号：25707040、16H04077、25220712）、SPring-8 パートナーユーザー課題（課題番号：2015A0075）の一環として実施したものです。

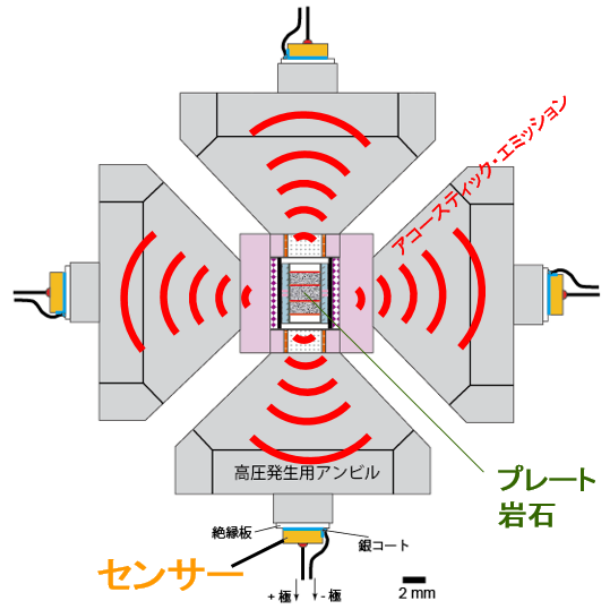
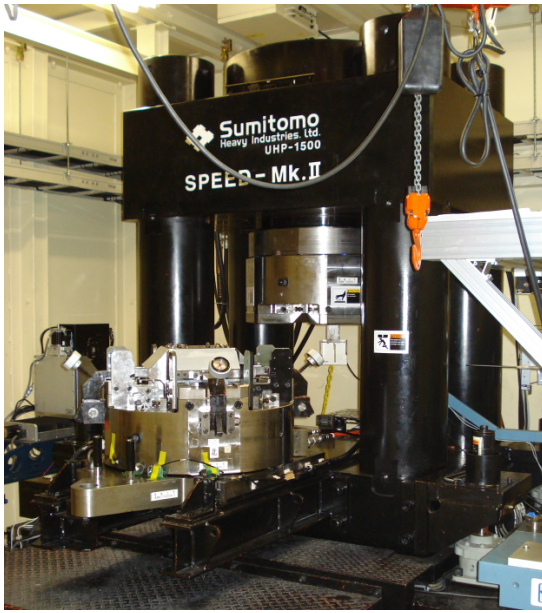


図 1. D-DIA 型変形装置 (左) と高圧力下でのアコースティック・エミッション検出技術の概要 (右)。D-DIA 型変形装置では、超合金製の高圧発生用アンビルを上下左右の 6 方向に配置し、その中心に配置した立方体の高圧力発生容器 (ピンク) 内のプレート岩石試料に高圧力を加える。プレート岩石の破壊及び断層形成の際に発生する特徴的な音波である『アコースティック・エミッション』を高圧発生用アンビルの背面に張り付けた計 6 個のセンサーで検出する。

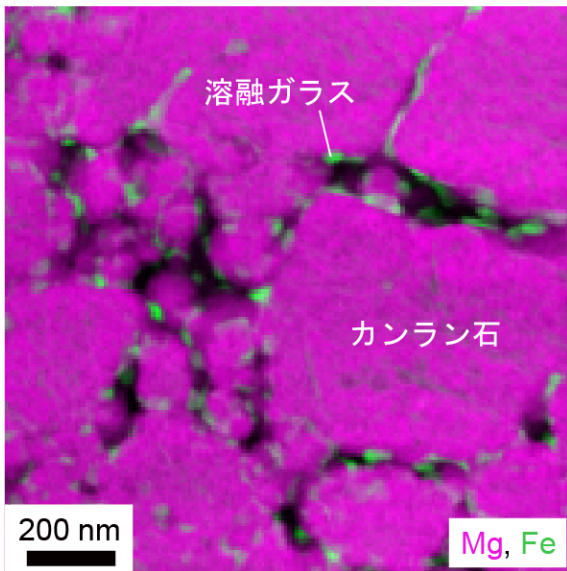


図 2. プレート岩石変形実験の際に、変形のエネルギーが岩石の脆弱層に局所集中することで 1840°C もの非常に高い温度に達して岩石が溶融したことを示す証拠。カンラン石 (ピンク色 : マグネシウム成分に富む) が溶融した際に生じる溶融ガラス (緑色 : 鉄成分に富む) が見られる。

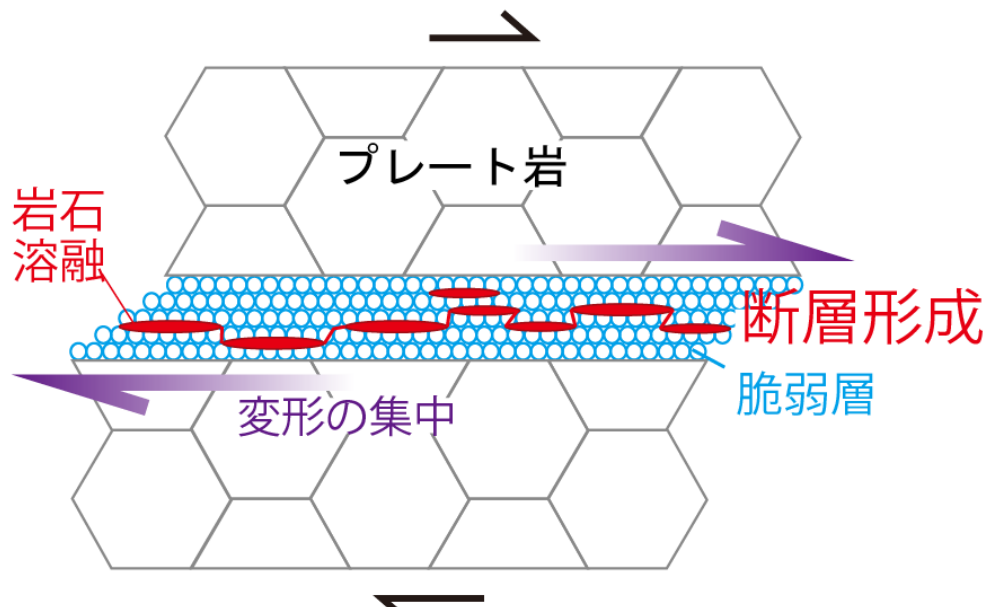


図3. 今回解明された、稍深発地震を引き起こす断層の形成メカニズム。
 プレート岩石に脆弱層（微細鉱物粒子からなる）が存在すると、脆弱層に変形エネルギーが集中することがある。その場合には局所的かつ瞬間的に 1840℃に達する高温が発生し、岩石の溶融を引き起こす。その結果プレート岩石の強度は大幅に低下し、断層形成及び稍深発地震発生に至る。