

21. 地球深部水の地震抑制効果に関する実験的研究：稍深発地震の発生予測システムの構築を目指して

愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター 准教授 大内 智博

概要

本研究は、「地球の深さ 30–100 km にて頻発する稍深発地震が、地球深部水の存在によって抑制される」といった独自の仮説を実験的に証明することを目的として行った。従来の実験でもそれを示唆する結果が得られていたものの、測定可能なアコースティック・エミッション（AE：実験室におけるミニ地震に相当）はごく一部の周波数帯域のものに限定されており、それ以外の帯域のものは測定することができなかった。そこで本研究では、稍深発地震が発生する深さ 30–100 km の高温高压環境下（400–900℃、1–3 万気圧）でも幅広い周波数帯域の AE が測定可能な広帯域型 AE センサーを開発した。続いて、その環境下にてカンラン岩の一軸圧縮試験を大型放射光施設 SPring-8 にて行った。それにより、カンラン岩に地球深部水を添加することによって、幅広い周波数帯域にて AE の発生件数が大幅に低下する（1/3 程度）という結果を得た。これは、「稍深発地震の発生は地球深部水によって抑制される」とともに、「地球深部水の乏しい領域では地震発生リスクが高い」ことを意味する。将来的に本研究の結果を防災へ応用していく上では、本研究の結果が自然地震観測の観点からも成り立つことを立証していくことが今後の課題である。

助成金は、広帯域型 AE センサーの開発及び SPring-8 での実験を行う上で活用させて頂きました。ここに感謝の意を表します。

背景および目的

日本列島をはじめとしたプレート同士の衝突する地域では、海側のプレートが地球深部のマントルへと沈み込んでいる。プレート同士が衝突する際にプレート内には歪エネルギーが蓄積されるため、それが地震発生の原動力となる。歪エネルギーが蓄積された状態で地球深部へと沈み込んでいくプレート（スラブ）内の深さ 30–100 km では稍（やや）深発地震が多発しており、その中には 1993 年 1 月 15 日の釧路沖地震（マグニチュード 7.5、震源深さ 101 km）などのように大災害に至るケースもある。岩石の摩擦強度は強い圧力依存性をもつため、理論上では深さ 30km 以深では断層すべりは起こりえないとされている。それにもかかわらずスラブ内で地震が起きる原因としては、スラブから地球深部へと放出される水（地球深部水）が岩石の破壊強度を低下させることで、地震を誘発しているものと長年考えられてきた。

しかし地下 30km 以深は高温高压の環境となっているため、水は地表付近とは異なり、超臨界状態（流動性・化学反応性が高い状態）の“地球深部水”へと変化している。そのため、そのような環境下にて水が岩石の破壊強度を低下させるかどうかは自明ではない。近年の地震学・測地学的観測結果によると、紀伊半島や四国をはじめとした特定の地域ではスラブ上面付近にて地球深部水が多量に“貯水”されていることが報告されている。そのような地域では災害をもたらす稍深発地震はあまり発生せず、代わりに非災害性のスロースリップ現象が多発している。一方、地球深部水が“貯水”されずに上側のマントルへと排水される他の地域のプレート内部では地震が多発している。これらの観測結果は地表付近のケースとは異なり、「地球深部水は稍深発地震の発生を抑制する」といった可能性を示唆している（図 1）。実際、研究代表者が過去に行った実験では、「地球深部水は稍深

発地震の発生を抑制する」ことを示唆する結果が得られている（引用文献 1、2）（図 2）。しかし、研究代表者の過去の実験結果（引用文献 1、2）を含む従来の実験的研究には「測定可能なアコースティック・エミッション（AE）周波数の帯域範囲不足」が未解決の技術的課題となっていた。本来 AE は幅広い周波数帯域を持つ（0.01–5MHz）にもかかわらず、従来では特定の帯域（2–5MHz）の AE のみを測定対象としてきた（他帯域の AE は測定できていない）。特にスロースリップ現象に相当する AE はこれまで見落とされてきた 2MHz 未満の低帯域を持つ可能性があるため、そのような実験結果より「地球深部水は稍深発地震の発生を抑制する」と結論することはできなかった。

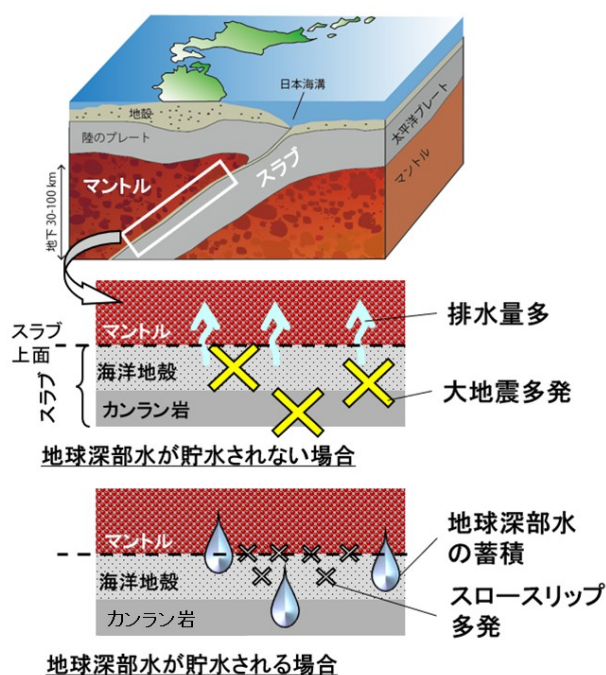


図 1. 地震学的観測結果より指摘されている、日本列島の深さ 30–100km にて発生する稍深発地震の発生と地球深部水の関連を示した模式図。海洋地殻岩で構成されるスラブ上面付近から上部のマントルへと地球深部水が排水される場合（中図）には、スラブ内にて地震が起きる。一方、地球深部水が排水されずにスラブ上面に蓄積（貯水）される場合（下図）には、地震が起きずに非災害性のスロースリップが頻発するようになる。

そこで本研究では、「測定可能な AE 周波数の帯域範囲不足」といった技術的問題をクリアした上で、稍深発地震の多発する深さ 30–100 km のスラブ内部～上面の温度圧力条件下（400–900℃、1–3 万気圧）にてスラブ岩石の一軸圧縮試験を行った。この試験を地球深部水が存在する環境下と水が全く存在しない環境下にて行う。提案者らのこれまでの予察的研究（引用文献 1、2）によると、地球深部水の存在する環境下では AE の発生を伴わずに断層すべりが進行することが予想される。

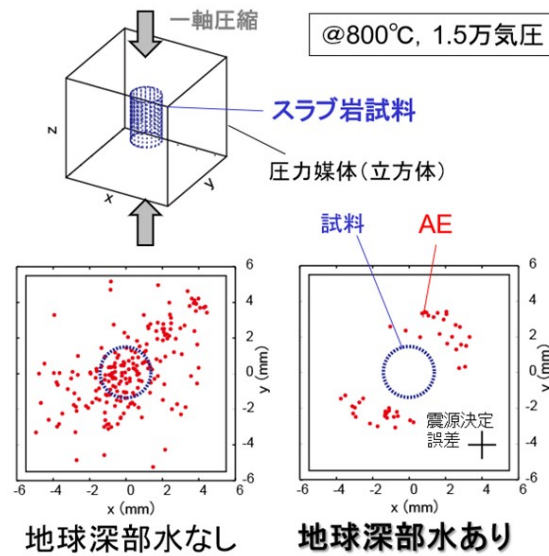


図2. 地球深部水の存在する場合と存在しない場合の環境下にてスラブ岩石試料（青円柱）が一軸圧縮変形を被る際に発生した、AE震源の位置（赤点）。

実験方法および結果

1) 高温高压環境下に対応した広帯域型 AE センサーの導入：

AE と自然地震の両者の間には、マグニチュードと周波数の間のスケールリング則が成り立つ（引用文献3）。そのため実験室における AE は地震のアナログ現象とみなすことができる。AE は一般的に 0.01–5MHz の幅広い周波数帯域をもつ。そのため、「地球深部水が AE 発生を抑制する」といった予察的結果を実験的に証明するには、0.01–5MHz の幅広い周波数帯域をカバーする広帯域型 AE センサーを用いた測定が必須となる。そこで本研究では、マルチアンビル型高温高压発生装置へ設置可能な小型広帯域型 AE センサーを開発した（図3）。

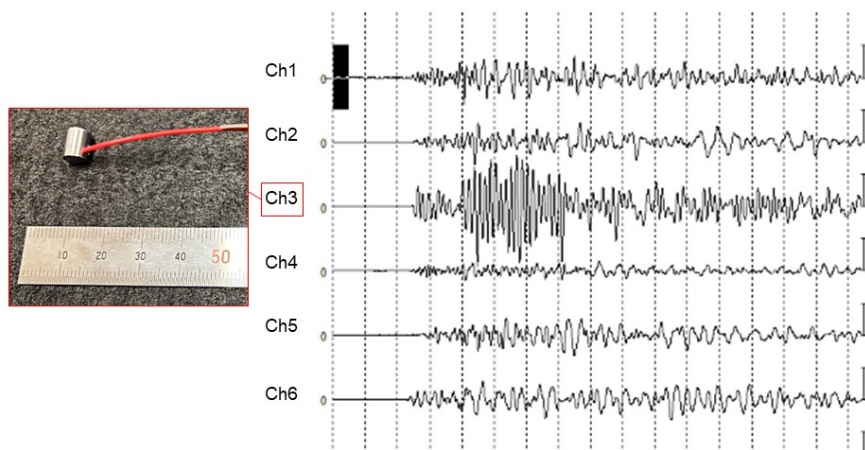


図3. 本研究で開発した小型広帯域型 AE センサー（左）と、2 万気圧・900℃の高温高压環境下にて測定した AE 波形群の一例（右）。小型広帯域型 AE センサーで測定した波形はチャンネル Ch3 に相当する。それ以外のチャンネル Ch では、汎用の共振型 AE センサーを用いて測定した AE 波形である。

2) 高温高压環境下における岩石破壊実験：

1) にて開発した小型広帯域型 AE センサーを用いて、スラブ内部の温度圧力条件下（400–900℃、1–3 万気圧）にてカンラン岩（スラブ中～下部の構成岩）の一軸圧縮試験を大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL04B1 にて行った。当ビームラインに設置のマルチアンビル型高温高压発生装置と世界最強クラスの放射光 X 線を用いて実験を行うことにより、AE のみならず、岩石試料が被る応力や歪の時間変遷を“その場”測定した。その結果、地球深部水が存在する環境下にて発生した AE の発生件数は、水が全く存在しない環境下と比較して大幅に低くなる（1/3 程度）といった結果を得た（図4）。さらには、各 AE の強度（最大振幅）が地球深部水の添加によって大幅に低下するという結果も得た。この結果は、研究代表者のこれまでの予察的研究での結果（引用文献1、2）と一致する。しかし、地球深部水が存在する環境下での断層すべりは頻度こそ少ないが大 AE を伴う場合が確認された。そのため、地球深部水が存在する条件では必ずしも断層すべりが完全な無地震状態で進行していくわけではなく、頻度は少ないものの地震も起きうるものと予想される。

以上1) 2) の結果は、学会発表（2024 年 11 月の高压討論会）にて公表した。現在、国際誌への投稿準備を進めている。

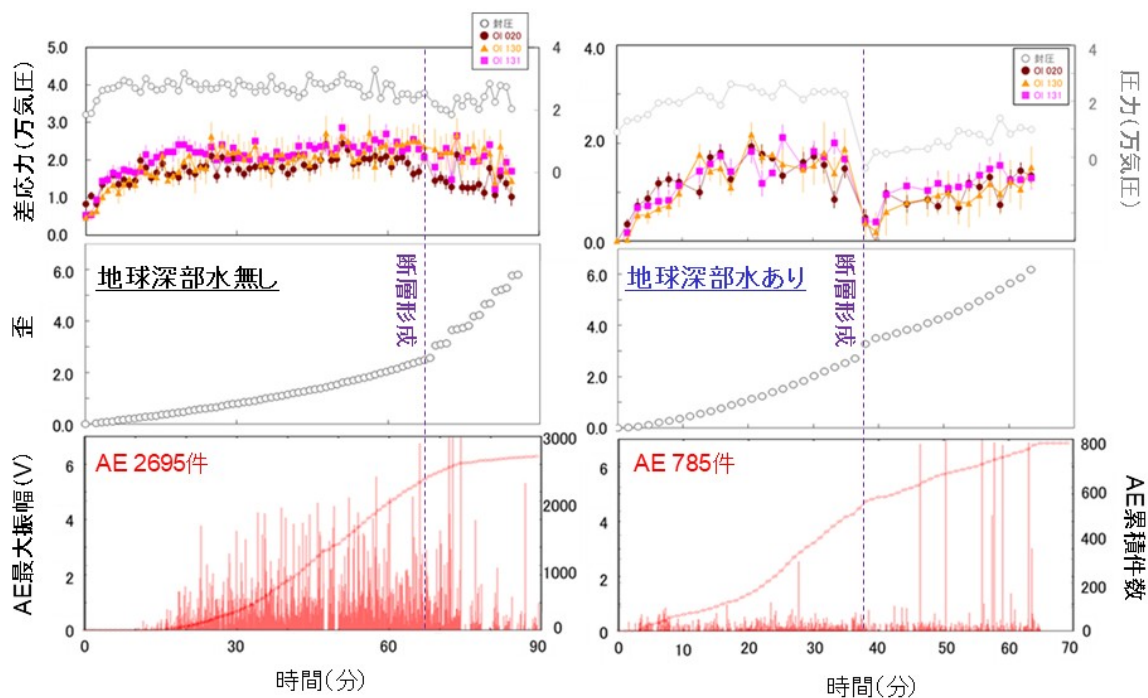


図4. 圧力2–3万気圧、温度900℃の環境下で行った、カンラン岩試料の一軸圧縮試験の結果のまとめ。グラフはそれぞれ（上）差応力（カラー）及び封圧（灰）の時間変遷、（中）歪の時間変遷、（下）AE活動の時間変遷を意味する。（左）地球深部水が無い環境下での結果。（右）地球深部水がある環境下での結果。

3) 大地震後の余効変動に関する実験：

深さ0–30kmのプレート内にて地震が発生した際にそのプレートの一部が壊れて「ずれ」が生じると、それを埋めようとしてプレート下部の軟らかいマントルが流動を開始する。この流動は長期間継続するため、地震が発生した周辺の地表では地震後も地殻変動が継続して起きることとなる（余効変動）。例えば2011年の東日本大震災の直後では、宮城県の沿岸部では1m程沈降し、その5年後には40cm程の隆起が起きた。そのような余効変動は、被災地の復興の妨げとなる。

余効変動の際に測定されるマントルの粘性（ 10^{18} Pa·s程度）は、通常のマントルの粘性（ 10^{20} Pa·s）よりも圧倒的に低く、数年から数十年間かけてマントルの粘性は上昇しつつ通常値（ 10^{20} Pa·s）に近づいていく。このような時間依存性の現象は、深さ30–100kmの最上部マントルにおける、主要構成鉱物カンラン石の遷移クリープ現象によるものであろうと推測されてきた。遷移クリープ現象とは、その物質がもつ“本来の粘性”よりも低い粘性で流動する現象であるが、実験室ではごく限られたタイムスケールでしか出現しないため、その詳細を観察するのは技術的に困難であった。

研究代表者らはマントル最上部の圧力条件下（2–4万気圧）でのカンラン石の変形実験をSPRING-8のビームラインBL05XUにて行い、SPRING-8で開発中の次世代X線を用いることで、実験室では2分間程度しか継続しないカンラン石の遷移クリープ現象を0.4秒の高い時間分解能にて観察することに成功した。これにより、カンラン石の遷移クリープ現象は理論モデル（パーガースモデル）で説明可能であり、大地震後に余効変動が数年～数十年間継続する現象を当モデルで説明できることが明らかとなった。本研究の結果より、今後は余効変動による地

表の地殻変動がより正確に予測可能となるものと期待される。以上の成果は、Geophys. Res. Lett.誌にて公表した（業績1）。

4) 深発地震の発生メカニズムに関するコラム記事：

Nature 誌の姉妹誌である Nature Geoscience 誌では、編集者の依頼により地球科学分野で顕著な業績をあげている研究者に、その分野の最近の研究に関する随筆（エッセイ）を依頼している。大内（研究代表者）は、マルチアンビル型高温高压発生装置と放射光その場観察技術を組み合わせた岩石破壊実験を通して、地球深部で起きる地震の発生メカニズムの解明を目指した研究を行ってきた。本エッセイでは、地球深部へと沈み込むプレートの主要構成鉱物であるカンラン石の構造変化が深さ 400–700 km で起きる深発地震の原因であることについて、過去及び最近の研究成果に基づいて解説した（業績2）。

今後の展望および課題

本研究の目標は、将来的に「稍深発地震の発生予測システム」を構築するための原理となる、「地球深部水は稍深発地震の発生を抑制する」ことを実験的に立証することであった。2) で示した実験結果より、それは立証されつつある。今後は、追加実験を行った上で成果を国際誌にて公表する予定である。

地震波は液体中では伝わりにくいため、地球深部水に富んだ領域では P 波と S 波の速度比 (V_p/V_s) や P 波の減衰 (Q^{-1}) に異常をきたす。本研究の計画段階より、世界各地の沈み込み帯において「地球深部水に富み V_p/V_s や Q^{-1} の異常を示す領域」= “稍深発地震が起きにくい領域” といった関係が成り立つであろうと予想してきた (図5)。本研究の結果は、その予想を支持するものである。今後は、その関係が自然地震観測の観点からも成り立つことを、これまでに公表されている観測データを再コンパイルすることによって立証していく予定である。

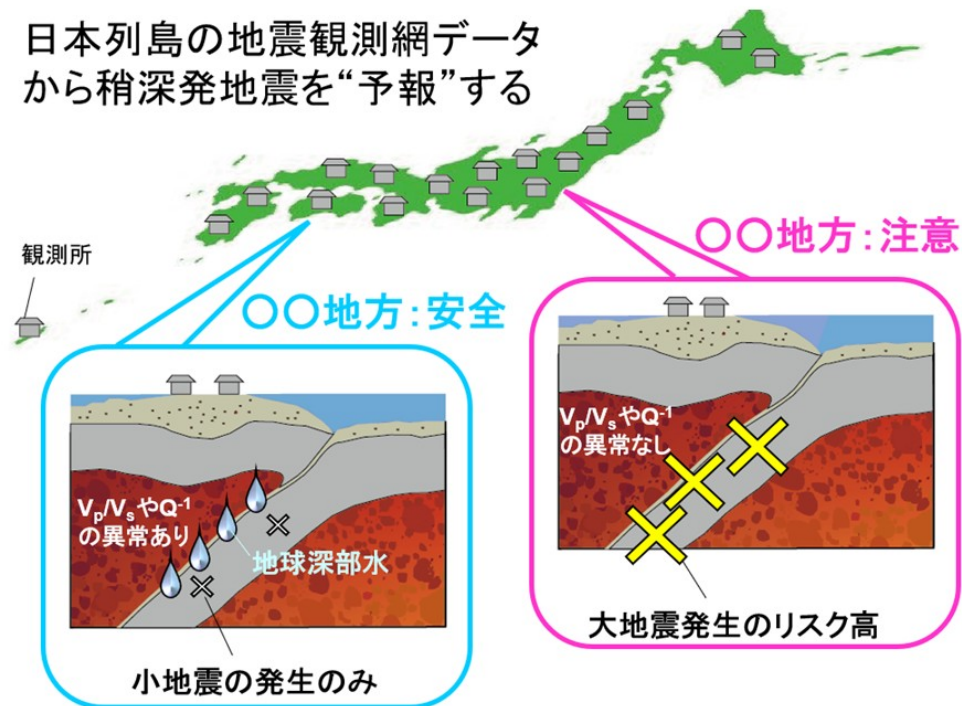


図 5. 本研究で将来的に構築を目指す、「稍深発地震の発生予測システム」の概念図。日本全国に張り巡らせられた地震観測網より、日本列島地下のスラブ上面付近における地球深部水の蓄積の程度を地震波の V_p/V_s や Q^{-1} の異常度から評価・予測し、地震“予報”を行う。地下に地球深部水に富んだ地方ほど、大地震発生リスクは低いはずであり、地球深部水に乏しい地方ではそのリスクは高いと予報される。

(完)

発表論文

- 1) Ohuchi, T., Higo Y., Tsujino N., Seto Y., Kakizawa S., Tange Y., Miyagawa, Kono Y., Yumoto H., Koyama T., Yamazaki H., Senba, Y., Ohashi, H., Inoue, I., Hayashi, Y., Yabashi M. and Irifune T. (2024) Transient creep in olivine at shallow mantle pressures: Implications for time-dependent rheology in post-seismic deformation. *Geophys. Res. Lett.* 51 e2024GL108356
- 2) Ohuchi, T. (2024) Olivine's trembling transformations. *Nat. Geosci.* 17: 958. doi 10.1038/s41561-024-01547-6
- 3) 大内智博, 鳴瀬善久, 松浦雅 (2024) 高圧下におけるザクロ石角閃岩及びエクロジャイトの一軸圧縮変形実験と微小破壊音測定. *高圧力の科学と技術*, 33, 202-210

引用文献

- 1) Ohuchi, T., Lei, X., Higo, Y., Tange, Y., Sakai, T., Fujino, K. (2018) Semi-brittle behavior of wet olivine aggregates: the role of aqueous fluid in faulting at upper mantle pressures, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 173:88. doi 10.1007/s00410-018-1515-9.

- 2) Ohuchi, T., Lei, X., Higo, Y., Tange, Y., Sakai, T. (2020) Switching from seismic faulting to silent slips in harzburgite induced by H₂O fluid at upper mantle pressures, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 175:79. doi 10.1007/s00410-020-1716-x.
- 3) Yoshimitsu, N., Kawakata, H., Takahashi, N. (2014) Magnitude -7 level earthquakes: A new lower limit of self-similarity in seismic scaling relationships. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 4495-4502.