

報道関係 各位

2026年6月10日

地球の奥深くに沈み込んだ海底の岩石を発見

— 実験・理論計算・地震観測を組み合わせ、プレートが核付近まで到達したことが
明らかに —

明治大学理工学部の新名良介准教授、米谷珠萌同大学院生(当時)、高輝度光科学研究センター(JASRI)の河口沙織主幹研究員(当時、現：京都大学 特定准教授)、東京大学大学院理学系研究科の河合研志准教授、佐藤嶺同大学院生(当時)、大鶴啓介同大学院生(当時)、物質・材料研究機構(NIMS)の佐久間博主幹研究員、末原茂主幹研究員、岡山大学(惑星物質研究所)の石井貴之准教授で構成される研究グループは、地球深部を再現する実験、原子レベルの理論計算、地震波観測を組み合わせることで、海洋プレートとともに地球内部へ沈み込んだ岩石が、深さ約 2900km の「核—マントル境界」^{注1}付近まで到達している可能性を示す新たな証拠を得ました。

地球の表面では、海洋プレートが海溝から地球内部へ沈み込んでいます。沈み込んだプレート由来の岩石は、数億年という長い時間をかけてマントルの奥深くへ運ばれると考えられてきました。しかし、それが本当に地球中心に近い核—マントル境界まで到達しているのかを直接示すことは、これまで容易ではありませんでした。今回の研究の鍵となったのは、沈み込んだ海洋地殻に多く含まれる二酸化ケイ素 (SiO_2)^{注2}です。 SiO_2 は、地球深部の非常に高い圧力と温度のもとで結晶構造を変え、最深部マントルでは「seifertite (ザイフェルタイト)」^{注3}と呼ばれる高密度の構造になります。この変化は、地震波の伝わり方に特徴的な影響を与えるため、地球深部に沈み込んだ岩石を探す“目印”になります。

本研究では、まず高温高圧力実験と大型放射光施設 SPring-8^{注4}における量子ビーム測定によって SiO_2 がどの圧力・温度で seifertite へ変化するのかを精密に決定しました。次に、原子レベルの量子理論計算によって実験結果の妥当性や、これまで問題となっていた準安定相の影響を検証しました。さらに、膨大な地震波形データを解析し、中央アメリカおよびハワイ下の地震波速度構造と照合することで、実験室で得られた鉱物の変化が、実際の地球深部で観測される地震波速度異常と対応することを示しました。

本研究は、JSPS 科研費 19H01989, 23H01277, JP23K25970, JP24K07171, JP23KJ0651, 23K19067, 24K00735, 24KJ2052 の助成を受けて実施され、成果は英国 *Nature* 系列誌の「*Scientific Reports*」に掲載されました。

研究のポイント

1. 実験：地球深部の環境を実験室で再現

本研究グループは、レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル^{注5}を用いて、最大 178GPa、6000K に達する超高压・高温条件を作り出しました。これは、地球の核—マントル境界付近に相当する極限環境です。さらに、SPring-8 の BL10XU で新しく開発されたシステムを用い、レーザー加熱の開始と同時に、高速量子ビーム測定(放射光 X 線回折^{注6}測定)を行い、 SiO_2 がどの結晶構造として現れるのかを、加熱直後の非常に短い時間で捉えました。従来の実験では、長時間の加熱や冷却の途中で、本来安定ではない「準安定相」が成長してしまい、 SiO_2 の相転移境界を正確に決めることが難しいという課題がありました。本研究では、測定時間を最短 10 ミリ秒まで短くし、レーザー加熱、X 線回折測定、温度測定を精密に同期させることで、この問題を大きく抑えました。放射光 X 線のもつ、輝度が非常に高く、平行性が良いという特性を活かした成果です。

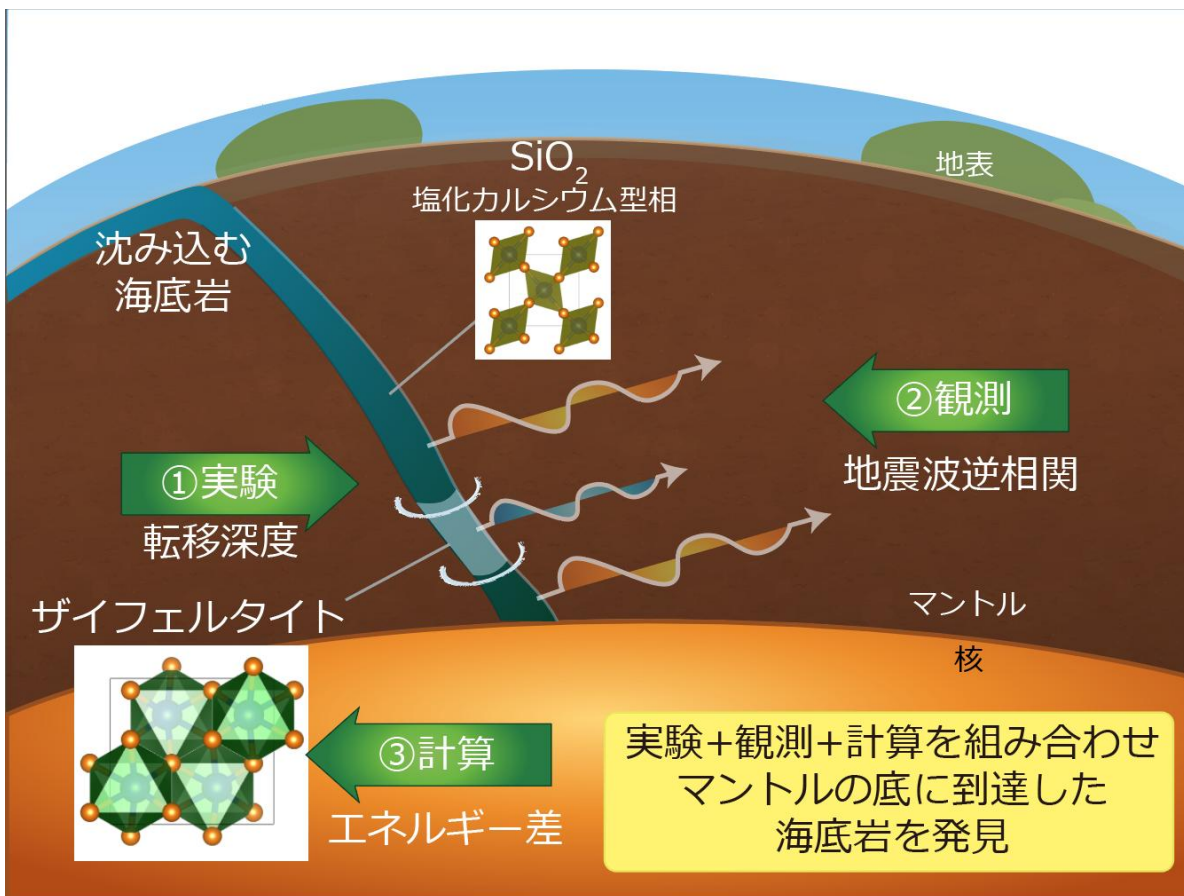
2. 理論計算：原子レベルで相転移の理由を検証

実験だけでは、観測された相がなぜ安定なのか、また過去の研究でなぜ異なる結果が出たのかを十分に説明することはできません。そこで本研究グループは、量子力学に基づく第一原理計算と分子動力学計算を用いて、低圧力で安定な相(CaCl₂型 SiO_2)と seifertite のエネルギー差を調べました。その結果、核—マントル境界に近い条件では、両者の自由エネルギー差が非常に小さいことがわかりました。これは、微小な領域では熱揺らぎによって

準安定相が一時的に生じやすいことを意味します。つまり、過去の実験で相境界が不明瞭になった理由を、理論計算によって説明できたこととなります。

3. 地震観測：実験で得た“目印”を地球深部で探す

実験と理論計算で決めた seifertite 相転移の条件を、実際の地球内部に当てはめると、沈み込んだ岩石を探ることができます。本研究グループは、独自に開発を行った波形インバージョン法を用いて、中央アメリカ下の最下部マントルを伝播する P 波と S 波の速度構造を調べました。その結果、核—マントル境界の 100~300km 上方で、S 波が遅く、P 波が速いという特徴的な異常が見つかりました。このような P 波と S 波の反対向きの変化は、SiO₂が seifertite へ変化することで説明できるため、沈み込んだ岩石の証拠となります。また、沈み込んだ低温の岩石は核—マントル境界の上方で、この相境界を二度横切ることがわかりました。これは「ダブルクロッシング」と呼ばれる現象で、この現象を応用することで地球深部において岩石の温度を決定できる可能性があります。



実験・理論・観測、三つの手法をつなぐことで見えた地球深部の姿

本研究の大きな特徴は、**実験・理論計算・地震観測**のいずれか一つだけでは到達できない結論を、三つの手法を組み合わせることで導いた点にあります。

高压高温実験は、地球深部で SiO₂がどの条件で構造を変えるのかを直接調べる手段です。一方で、実験には温度の揺らぎや準安定相の問題があり、観測結果の解釈には注意が必要です。理論計算は、その実験結果が熱力学的に妥当かどうかを検証し、準安定相がなぜ生じるのかを原子レベルで説明します。そして地震観測は、実験と計算で得られた鉱物学的な“目印”が、実際の地球内部に存在するかどうかを確かめる役割を果たします。

今回、実験で決定された seifertite 相境界は、理論計算とも整合的でした。さらに、その相境界を地球内部の温度構造に重ねると、中央アメリカ下で観測された地震波速度異常の深さとよく対応しました。これにより、実験室の数十マイクロメートル規模の試料で見つかった鉱物の変化が、地球規模の深部構造を理解する手がかりになることが示されました。

地球深部に届いたプレートの痕跡

中央アメリカ周辺では、長い地質時代にわたって海洋プレートの沈み込みが続いてきたと考えられています。本研究で見つかった地震波速度異常は、こうした沈み込んだ海洋プ

プレート^{注7}由来の岩石が、核—マントル境界付近まで運ばれている可能性を示しています。一方、ハワイ下でも S 波速度の低下が見られましたが、P 波速度構造が得られていないため、中央アメリカほど強い証拠とはいえません。ただし、ハワイ下の沈み込んだ岩石は中央アメリカ下よりも高温である可能性があり、地域ごとの温度差によって seifertite 相転移の深さや地震波速度異常の現れ方が変わることも示唆されました。

成果の意義

核—マントル境界は、地球内部の熱と物質のやり取りが集中する重要な領域です。ここに沈み込んだ海洋プレート由来の物質が存在すれば、マントル対流、地球内部の熱輸送、長期的な地球進化に影響を与える可能性があります。本研究は、SiO₂の相転移という鉱物物理学的な現象を、地震波形観測と結びつけることで、地球深部の物質循環を読み解く新しい方法を示しました。特に、実験・理論計算・地震観測を組み合わせた今回のアプローチは、今後、地球内部に残された沈み込みプレートの痕跡や、マントル底部の化学的不均質性を解明するための重要な手法になると期待されます。

用語解説

注1 核—マントル境界

地球のマントルと外核の境界。深さ約 2900 km に位置し、地球内部の熱・物質進化を考えるうえで重要な場所。

注2 SiO₂ (二酸化ケイ素)

石英などの主成分として知られる物質。海洋地殻には SiO₂が多く含まれている。地球深部では高圧力により異なる結晶構造をとる。

注3 Seifertite (ザイフェルタイト)

SiO₂が非常に高い圧力下でとる高密度の結晶構造。地球の下部マントル最深部に相当する条件で安定になる。

注4 大型放射光施設 SPring-8

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、放射光を用いてナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究が行われている。

注5 レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル

2つのダイヤモンドで試料を挟んで超高压を発生させ、レーザーで加熱する装置。地球深部の高圧・高温環境を実験室で再現できる。

注6 X線回折

結晶に X 線を当て、その回折パターンから結晶構造を調べる手法。本研究では、レーザー加熱と同期した高速測定により、加熱直後の相変化を捉えた。

注7 沈み込んだ海洋プレート

海溝などで地球内部へ入り込んだ海洋プレート。海洋プレートの上部は海洋地殻で構成されており、長い時間をかけてマントル深部へ運ばれる。

論文情報

雑誌名 : *Scientific Reports*

論文タイトル : *Cold SiO₂-rich slabs reaching the CMB revealed by the seifertite phase boundary*

著者 : **Sinmyo R.**, Kawaguchi SI., Sato R., Otsuru, K., Kawai K., Sakuma H., Suehara S., Ishii T., Maitani S.

研究機関 : 明治大学、高輝度光科学研究センター、東京大学、物質・材料研究機構、岡山大学 ほか

研究内容 : SiO₂の seifertite 相境界を SPring-8 高速 X 線回折実験と理論計算で決定し、地震波速度構造との比較から、沈み込んだ海洋プレート由来の SiO₂に富む岩石が核—マントル境界付近に到達している可能性を示した。

DOI : <https://doi.org/10.1038/s41598-026-54731-6>

公開日 : 日本時間 2026 年 5 月 30 日 (土)

本件の問い合わせ先

<研究内容・論文に関すること>

明治大学理工学部物理学科 新名 良介

京都大学 成長戦略本部 水素エネルギーマテリアル・次世代電池研究開発ユニット
(OI-HAB) 河口 沙織

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 河合 研志

岡山大学 学術研究院先鋭研究領域 (惑星物質研究所) 石井 貴之

<取材に関すること・その他>

明治大学経営企画部広報課

TEL: 03-3296-4082

公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) 利用推進部 普及情報課

TEL: 0791-58-2785 PBX: 050-3502-3763

東京大学 理学系研究科

岡山大学総務部広報課