

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03792

研究課題名(和文)地震波速度構造のX-不連続面から予言されるマントル中の化学不均質

研究課題名(英文) Relationship between seismic X-discontinuity and chemical heterogeneity of mantle

研究代表者

小野 重明(Ono, Shigeaki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(火山・地球内部研究センター)・センター長

研究者番号：20313116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：上部マントル中の深さ300km付近にX不連続面の存在が報告されていて、その成因は明らかにすることが本研究課題のテーマである。そのために、我々が提案している「シリカ鉱物構造相転移」仮説を検証が目的であり、相転移圧力境界の精密決定を進めた。ターゲットとなるシリカの高圧相のコーサイトとステショバイトの熱力学的安定領域を確認し、そのデータから相境界を見積もった。その結果は、深さ300kmでマントル中での断熱温度勾配を仮定した温度に相当する条件で、シリカ鉱物の相転移が起こることが確認された。このことは、「シリカ鉱物構造相転移」を支持するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マントル中の地震波速度構造において、複数の速度不連続面が存在することが知られている。この速度不連続面は、マントルの物質科学情報を得るための重要な情報源である。上部マントル中の深さ300km付近にX不連続面の存在が報告されていて、その成因は明らかにすることにより、上部マントル中の化学組成不均一が存在が明らかになる。本研究では、海溝から沈み込んだスラブ物質のマントル内での分布を明らかにし、地球史におけるマントルの化学組成進化の理解が進んだ。

研究成果の概要(英文)：The existence of an X-discontinuity has been reported in the upper mantle at a depth of about 300 km. An aim of our research is to understand the origin of this discontinuity. To assess the relationship between this discontinuity and the silica mineral phase transition, we perform the precise determination of the phase transition boundary. It was confirmed that the phase transition of the silica mineral occurs at around 10 GPa corresponding to a depth of 300 km. This indicates that the silica mineral structural phase transition might forms the discontinuity at 300 km depth.

研究分野：高圧鉱物物理学

キーワード：X地震波不連続面 相転移 シリカ

## 1. 研究開始当初の背景

地球内部の状態を知るために、いろいろな観測データが用いられてきた。その中で、地震波観測データが担ってきた役割は極めて大きく、核・マントル境界の発見や、410 km や 660 km の地震波速度不連続面の成因を解明する研究は、地球内部の構造や進化の理解に不可欠な情報を与えてきた。地球内部の主要な地震波速度不連続面の理解は進んだが、成因が解明されていない不連続面が存在する。その中で、ある地域のみで観測される深さ300 kmのX-不連続面は、その成因を理解することにより、上部マントルの物質科学的進化を明らかにするための鍵と考えられている。過去の研究において、数多くのX-不連続面の成因に関する仮説が提案されてきた。その中で有力だと考えられているのは三つある。まずは、含水鉱物の分解がトリガーであるとするモデルである(e.g., Revenaugh & Jordan 1991; Mookhejee et al. 2013)。次に、パイロキシン相転移モデルである(e.g., Woodland 1998)。三つ目は、我々が支持しているシリカ相転移モデルである(e.g., Williams & Revenaugh 2005; Ono et al. 2017)。仮説が乱立して、決着がつかない理由は、それぞれの仮説を検証するために必要な物理化学データが不正確なためである。

## 2. 研究の目的

提唱している仮説は、地震学的データから確認されているX-不連続面の特徴的な性質を説明する必要がある。1)ある地域に限って観測される、2)深さ300 km、3)不連続面の厚みが薄い、4)インピーダンスなどの物性の大きな変化、などの特徴を仮説が満足するかどうかを検証する。我々が発表した研究論文(Ono et al. 2017)のデータに基づいて、純粋なSiO<sub>2</sub> 鉱物が深さ約300 km(圧力~10ギガパスカル)で、コーサイト構造からスティショバイト構造へ相転移することが確認でき、X-不連続面の観測条件と一致した。我々の最新データが、「シリカ鉱物構造相転移」仮説が最も有力であると考えられる根拠である。しかしながら、シリカ鉱物は標準的なマントル化学組成で出現しない鉱物である。これまでの高圧実験研究において、沈み込むスラブを構成する海洋プレートの玄武岩組成や堆積物組成であれば、シリカ鉱物が出現することが確認されている(e.g., Ono 1998; Ono et al. 2001 & 2005)。したがって、玄武岩や堆積岩に相当する天然の岩石化学組成において、シリカ鉱物構造相転移が、X-不連続面の特徴を説明しうるかどうかの問題の本質である。天然化学組成岩石中では、鉱物相転移のメカニズムや性質が、我々の純粋なSiO<sub>2</sub> 組成の研究結果とは異なる可能性がある。そこで、我々は玄武岩と堆積岩をターゲットにして、シリカ(SiO<sub>2</sub>)の相転移現象が、X-不連続面の性質に合致しているかどうかを検証する

## 3. 研究の方法

本研究では、シリカ鉱物の構造相転移境界の精密決定には高温高圧実験を利用し、構造相転移にともなう弾性物性変化の予測は第一原理分子動力学計算を利用する。この2つの手法を組み合わせることにより、地球内部に相当する極限環境下での物性予測を、高い信頼性で行うことを目標とする。本研究の最も特筆すべき点は、第一原理に基づいた理論計算の手法を、従来の実験手法と結びつけて、問題解決を試みる点である。近年の、物理、化学、材料科学の分野では、第一原理に基づいた理論計算による物質合成、及びその物性見積もりは盛んに行われていて、それぞれ分野で大きな地位を確立している。ところが、日本の地球科学分野では、研究者の層も薄いことなどの理由から、大きく立ち遅れている。本研究では、この手法を積極的に取り入れ、日本がリードしている超高圧実験技術と組み合わせ、それぞれの手法の長所を最大限に生かすことにより、卓越した成果を目指す。

## 4. 研究成果

量子ビームを利用した高温高圧実験は高エネルギー加速器研究機構のPF-AR NE7A ビームラインで行った。ここには700トン級のマルチアンビル型高圧発生装置が設置されている。試料に入射するビームは白色X線を用いた。高圧装置に内部に位置する実験試料から十分な強度のシグナルを得るために強力なX線が必要であったためである。試料は粉末状態の物を用い、試料からの粉末X線回折データを使い、データ解析を進めた。相転移境界の精密な決定のためには、実験圧力を正確に知る必要がある。量子ビームを利用したその場測定手法は、実験中の試料カプセル内の正確な圧力を見積もることが可能である。本研究では、試料粉末中に金粉末を混ぜ込んだ。試料からの粉末X線回折データのみならず、金粉末からの粉末X線回折データを取得することにより、金の体積を精密に測定した。測定した金の体積と、熱電対でモニタしている温度を、金の状態方程式へ組み込み、圧力の決定を行った。相転移境界を決定するために、数多くの温度圧力条件で実験を行い、実験試料の粉末X線回折データから、それぞれの条件で出現したシリカ相を同定した。出現するシリカ相はクエンチ可能であるため、X線その場測定での安定相の同定だけでなく、回収試料のラマン分光測定も行い、相同定の確認を行った。例えば、粉末X線回折データでは2相共存する場合がある、回収試料のラマン分光測定で試料カプセル内の分布を調べ、温度を測定している熱電対近傍で出現している安定相を見極めることにより、一見、2相共存と

思われる条件でも、より精密な同定が可能であった。図1に、実験データから見積もられた相転移境界を示す。過去の研究データからは、シリカ相の相転移境界が X-不連続面に一致するかどうかは不確かであった。本研究で得られた精密データから、相転移境界が不連続面に一致することが明らかになった。上部マントルの平均的な温度分布（地温勾配）を仮定すると、シリカ鉱物の相転移は深さ 300km で起こる。この深さは、X-不連続面が観測されている深さと非常によく一致することが分かる。マントル中の温度の揺らぎ（不均質）を考慮すると、X-不連続面が出現する深さのバリエーションを説明可能である。これまでの研究から、上部マントルを構成するカンラン岩の平均的な化学組成を仮定すると、深さ 300km 付近では、シリカ鉱物は出現しない。一方、カンラン岩に比べて  $\text{SiO}_2$  量が多い玄武岩や堆積岩では、この深さでシリカ鉱物が出現することが知られている。したがって、X-不連続面が観測される領域では、マントル物質の化学組成は、カンラン岩ではなく、玄武岩や堆積岩を主体とする化学組成であることが予想される。このことが意味することは、X-不連続面を手掛かりに、マントル中の化学組成不均質構造が予想できることである。玄武岩や堆積岩は、沈み込むスラブを構成する岩石であり、本研究の成果は過去に沈み込んだ海洋プレートの存在分布を解明する鍵となりうる。

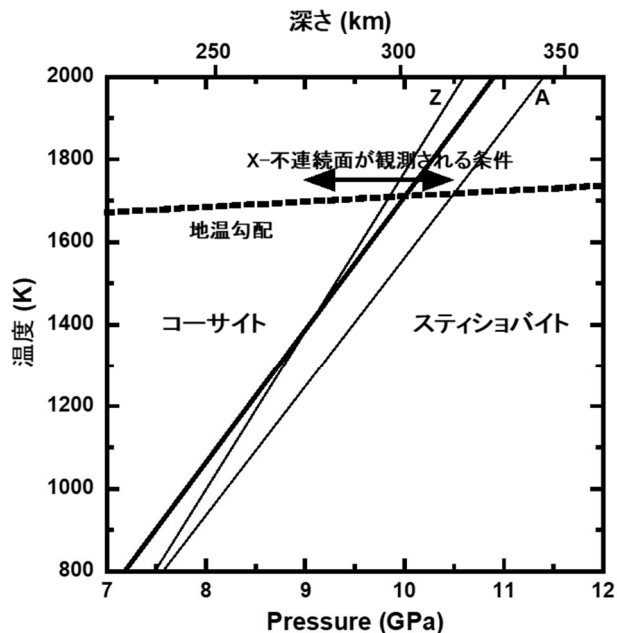


図1 シリカ相転移境界とX-不連続面の関係  
 太線：本研究で決定された相転移境界、細線：過去の研究で報告されている相転移境界 (A: Agaogi et al. 2011、Z: Zhang et al. 1996)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shigeaki Ono	4. 巻 10
2. 論文標題 Fate of subducted argon in the deep mantle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-58252-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ono Shigeaki	4. 巻 38
2. 論文標題 High-pressure phase transition of bismuth	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 414 ~ 421
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/08957959.2018.1541456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 2. 小野重明
2. 発表標題 アルゴンの地球内部循環
3. 学会等名 日本鉱物科学会年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------