



兵庫県立大学  
UNIVERSITY OF HYOGO



RIKEN  
Since 1917



岡山大学  
OKAYAMA UNIVERSITY



YAMAGUCHI UNIVERSITY  
山口大学



TOHOKU  
UNIVERSITY



平成28年9月16日

報道機関 各位

公立大学法人兵庫県立大学  
国立研究開発法人理化学研究所  
国立大学法人岡山大学  
国立大学法人山口大学  
国立大学法人東北大学  
公益財団法人高輝度光科学研究センター

## 下部マントル深部の地震波速度異常（LLSVPs）を解き明かす鍵

### 【研究のポイント】

- ・下部マントル主要鉱物であるブリッジマナイトでは、鉄とアルミニウムが入ることで、バルク音速が上昇する一方で横波音速が減少する（弾性波速度の逆相関が起きる）ことを発見した。
- ・下部マントル深部で観測されている地震波速度の逆相関が、化学的不均一で説明できる可能性を示した。

### 【概要】

公立大学法人兵庫県立大学の福井宏之助教は、国立大学法人岡山大学の米田明准教授、国立大学法人山口大学の中塚晃彦准教授、国立大学法人東北大学の鎌田誠司助教、公益財団法人高輝度光科学研究センターの筒井智嗣主幹研究員、国立研究開発法人理化学研究所のバロン アルフレッド准主任研究員らと共同で、下部マントル主要構成鉱物であるブリッジマナイトが、陽イオン置換により弾性波速度の逆相関を示すことを明らかにしました。

この研究成果は、英国のオープンアクセス科学雑誌「Scientific Reports」において公開されます。

### 【研究背景】

地球中心は我々からわずか6400kmの距離ですが、地球の内部には解明されていないことが多く存在しています。地震波速度の解析により、深さ660kmから2900kmの領域は下部マントルと呼ばれる層が存在していることが分かっています。また2000kmよりも深いところでは地域的な地震波速度異常が観測されています。地震波速度には縦波音速  $V_p$

と横波音速  $V_S$  がありますが、ここでは両者から計算されるバルク音速  $V_B$  と横波音速  $V_S$  を用いて話を進めます。太平洋とアフリカ大陸の地下では、平均的な値よりも  $V_B$  が速く、 $V_S$  が遅くなっています。この異常を示す区域は、LLSVPs (Large Low Share Velocity Provinces) と呼ばれています。  $V_B$  と  $V_S$  に正の相関があれば説明しやすいのですが、なぜ逆相関しているのかについては、地球科学者の頭を悩ませている問題となっています (図 1)。

### 【研究手法と成果】

ブリッジマナイト (化学組成:  $MgSiO_3$ ) は、下部マントルを構成する主要な鉱物です。下部マントルは地球の体積の大部分を占めますので、地球を構成する主要鉱物ともいえま  
す。ブリッジマナイトの  $V_B$  と  $V_S$  は、圧力の上昇により共に増加し、温度の上昇により共に減少します。本研究グループは、弾性波速度逆相関の原因としてブリッジマナイトの化学組成に着目しました。鉱物にはマグネシウムとケイ素の他に鉄とアルミニウムが多く含まれており、ブリッジマナイトも鉄とアルミニウムを含みうる (陽イオン置換する) ことが分かっています。この陽イオン置換が  $V_B$  と  $V_S$  に与える影響について調べました。

研究グループは、岡山大学惑星物質研究所にて鉄とアルミニウムを含むブリッジマナイトを合成し、山口大学において合成された試料の結晶性の評価を行いました。試料は 0.1mm 程度の大きさで、陽イオン置換されたものは黒色をしています (図 2)。このような試料に対しては、一般的な弾性波速度測定法の適用は困難です。

そこで、大型放射光施設 SPring-8<sup>\*1</sup> の理研専用ビームライン BL43LXU と共用ビームライン BL35XU においてブリッジマナイト単結晶に X 線を照射することで、X 線非弾性散乱 (IXS) 法<sup>\*2</sup> により弾性波速度を測定しました。鉄のイオンには 2 価と 3 価がありますが、同施設の共用ビームライン BL10XU でのメスバウア分光法<sup>\*3</sup> によりブリッジマナイト中の価数状態を測定しました。

これらの結果から、ブリッジマナイト中のマグネシウムとケイ素を 2 価の鉄とアルミニウムに置換することで、ブリッジマナイトのバルク音速  $V_B$  が増加し、横波音速  $V_S$  が減少することを実験的に明らかにしました。これまでに報告された、アルミニウムのみの置換による効果を合わせて考えると、鉄濃度の  $\pm 2.7$  パーセント以下とアルミニウム濃度の  $\pm 1.3$  パーセント以下の化学不均質と、および  $\pm 113$  度以下の温度不均質により、下部マントルで観測されている地震波速度逆相関に対応するというモデルが構築されました (図 3)。

### 【今後の展開】

本研究により、ブリッジマナイトに対して鉄やアルミニウムが 2 パーセントほど置換するだけで、観測されている地震波速度の逆相関と同程度の弾性波速度逆相関が起こることが明らかになりました。しかしながら、これは常温常圧での測定であり、下部マントルの温度圧力条件での鉄・アルミニウム置換効果や、鉄およびアルミニウム (あるいは別の陽イオン) 単独の効果については推測の域を出ません。今後は、様々な化学組成を持つブリッジマナイト単結晶を合成し、下部マントルの温度圧力条件下での測定を進めることにより、LLSVPs の温度・化学構造の詳細に迫ります。

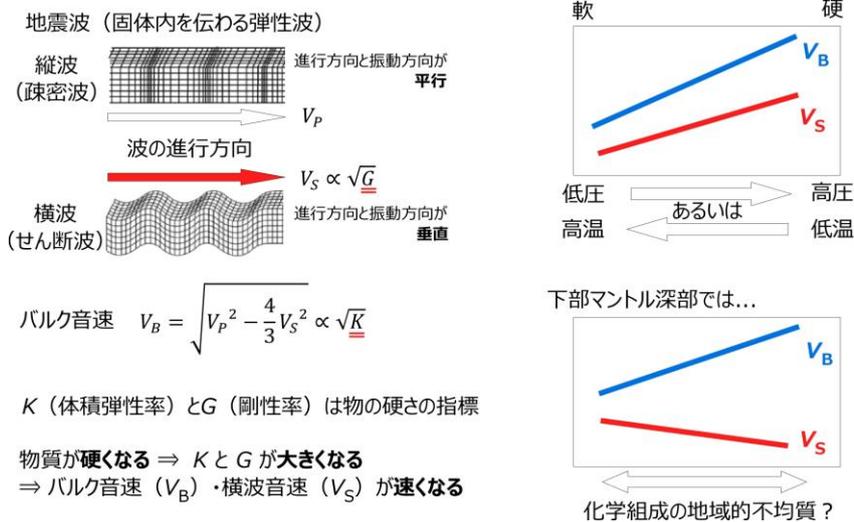


図 1. 物質の硬さ（弾性波速度）変化の模式図。（右上）バルク音速  $V_B$ と横波音速  $V_S$ が、共に増加あるいは減少（正相関）する場合、温度や圧力の変化で容易に説明可能である。（左下）下部マントル深部では地域によって両者の変化が逆になっている（逆相関）。その原因として、化学組成の不均質が提案されているが、確かめられていなかった。

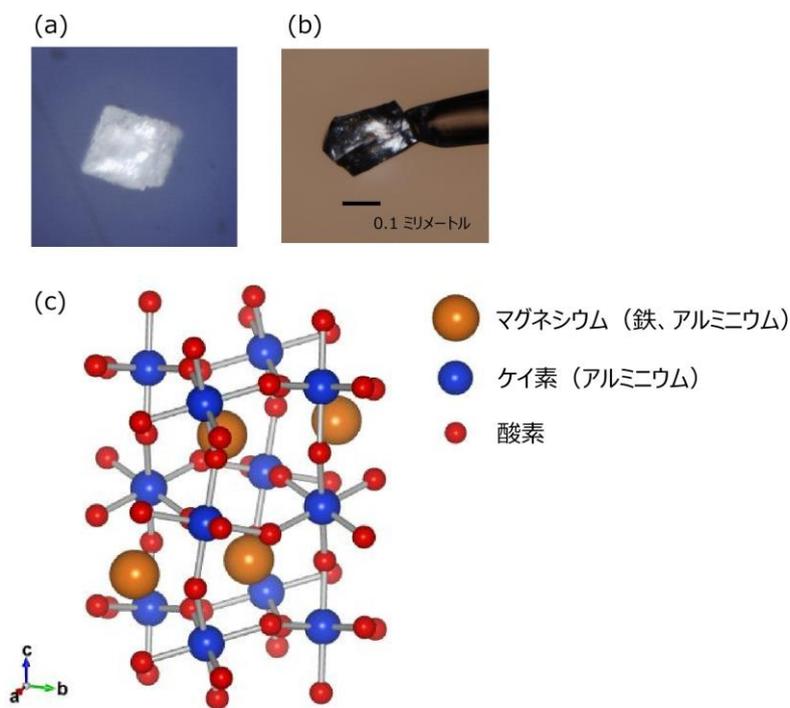


図 2. 測定に用いたブリッジマナイトの写真。(a)  $MgSiO_3$  の結晶 (b) 鉄とアルミニウムを含む結晶。試料の大きさは長い辺で 0.2 ミリメートル以下である（図中スケール参照）。(c) ブリッジマナイトの結晶構造。オレンジがマグネシウムの位置で、鉄とアルミニウムが置換する。青がケイ素の位置で、アルミニウムが置換する。赤は酸素の位置を示す。結晶構造図はソフトウェア VESTA (<http://jp-minerals.org/vesta/jp/>) により作成した。

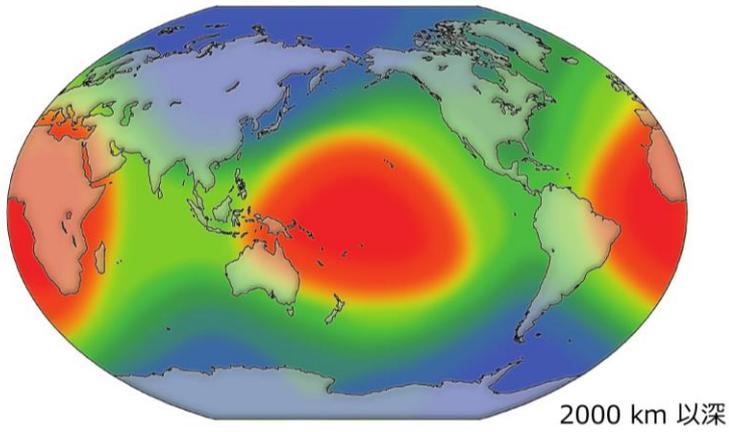


図 3. 推測される下部マントルの化学的不均一性。バルク音速  $V_B$  が速く、横波音速  $V_S$  が遅い地域（地図中赤い部分）が、鉄濃度やアルミニウム濃度が高く温度も高い部分である。数値は最大値。色は Trampert 等の研究結果 (Science 306, 853–856, 2004) に基づく。

地図データは CraftMAP (<http://www.craftmap.box-i.net/>) により作成した。

## 【論文情報】

題名 : Effect of cation substitution on bridgmanite elasticity: A key to interpret seismic anomalies in the lower mantle.

著者 : Hiroshi Fukui, Akira Yoneda, Akihiko Nakatsuka, Noriyoshi Tsujino, Seiji Kamada, Eiji Ohtani, Anton Shatskiy, Naohisa Hirao, Satoshi Tsutsui, Hiroshi Uchiyama, & Alfred Q.R. Baron

掲載誌 : Scientific Reports

DOI : 10.1038/srep33337

<http://www.nature.com/articles/srep33337>

## 【用語解説】

### ※1 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の放射光を生み出す理化学研究所の施設で、その運転管理は高輝度光科学研究センターが行っている。SPring-8の名前は Super Photon ring-8GeV に由来する。放射光とは、光とほぼ等しい速度まで加速された電子が電磁石によって進行方向を曲げられた際に発生する、細く強力な電磁波のことである。SPring-8では、この放射光を用いて、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。

### ※2 X線非弾性散乱法

X線が物質によって散乱される際に、一部のX線は物質に入射された時と異なるエネルギーで散乱される。このときのエネルギー差は物質とX線とのやりとりで生じたものである。このエネルギー差とX線が散乱される角度の関係を調べることで物質中の原子がどのように振動しているかを知ることができる。物質中の原子の振動の中には音を伝える役割の振動も含まれ、音波である弾性波に関する知見も得られる。X線非弾性散乱は、X線の持つ強い透過性と可集光性を活かして、微小な不透明物質に対して有効な弾性波速度決定法として注目されている。

### ※3 メスバウア分光法

メスバウア分光は、ルドルフ・ルートヴィヒ・メスバウアにより発見された原子核の共鳴吸収現象（メスバウア効果）を利用した分光法である。鉄では自然界に2%含まれる質量数が57の原子核がメスバウア効果を起こす。メスバウア分光では原子核を通じてそれを取り巻く電子状態（本研究の場合は主に鉄の価数）がわかる。メスバウア分光法は主に物質科学への応用がなされてきたが、地球科学分野では月から持ち帰られた岩石の分析に加え、火星探査機に分光器を搭載することにより火星の岩石の分析にも利用されている。

BL10XUでは、JASRIと東北大学によって共同でこの分光装置の導入が行われ、結晶構造と結晶中の鉄原子の電子状態を同時に測定することができる。

## 【問い合わせ先】

### <研究に関すること>

公立大学法人兵庫県立大学大学院物質理学研究科・理学部

助教 福井 宏之 (ふくい ひろし)  
(理化学研究所 バロン物質ダイナミクス研究室 客員研究員)

電話：0791-58-0158

E-mail：fukuih@sci.u-hyogo.ac.jp

国立大学法人岡山大学惑星物質研究所

准教授 米田 明 (よねだ あきら)

E-mail：yoneda@misasa.okayama-u.ac.jp

国立大学法人山口大学大学院創成科学研究科

准教授 中塚 晃彦 (なかつか あきひこ)

E-mail：tuka@yamaguchi-u.ac.jp

国立大学法人東北大学学際科学フロンティア研究所・大学院理学研究科

助教 鎌田 誠司 (かまだ せいじ)

E-mail：seijikmd@m.tohoku.ac.jp

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
主幹研究員 筒井 智嗣 (つつい さとし)

E-mail：satoshi@spring8.or.jp

国立研究開発法人理化学研究所放射光科学総合研究センターバロン物質ダイナミクス研究室

准主任研究員 Alfred Q.R. Baron (バロン アルフレッド)

E-mail：baron@spring8.or.jp

### <報道に関すること>

公立大学法人兵庫県立大学大学院物質理学研究科・理学部 総務課

神頭 由紀 (かんとう ゆき)

電話：0791-58-0101

E-mail：yuki\_kantou@ofc.u-hyogo.ac.jp

国立研究開発法人理化学研究所

広報室 報道担当

電話：048-467-9272

E-mail：ex-press@riken.jp

国立大学法人岡山大学

広報・情報戦略室

電話：086-251-7292

E-mail：www-adm@adm.okayama-u.ac.jp

国立大学法人山口大学

総務部広報課

中尾 淑乃 (なかお よしの)

電話：083-933-5964

E-mail：sh050@yamaguchi-u.ac.jp

国立大学法人東北大学学際科学フロンティア研究所 企画部

鈴木 一行 (すずき かずゆき)

電話：022-795-4353

E-mail：suzukik@fris.tohoku.ac.jp

### (Spring-8 に関すること)

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

電話：0791-58-2785

E-mail：kouhou@spring8.or.jp