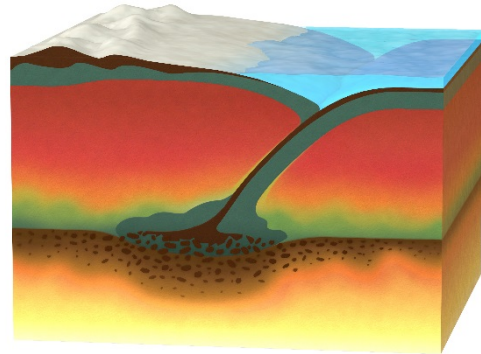


# 下部マントル最上部に玄武岩質の物質

## —沈み込むプレートの行方に関する論文が Nature に掲載—

国立大学法人 愛媛大学  
国立大学法人 東京工業大学  
公益財団法人 高輝度光科学研究センター  
公立大学法人 滋賀県立大学

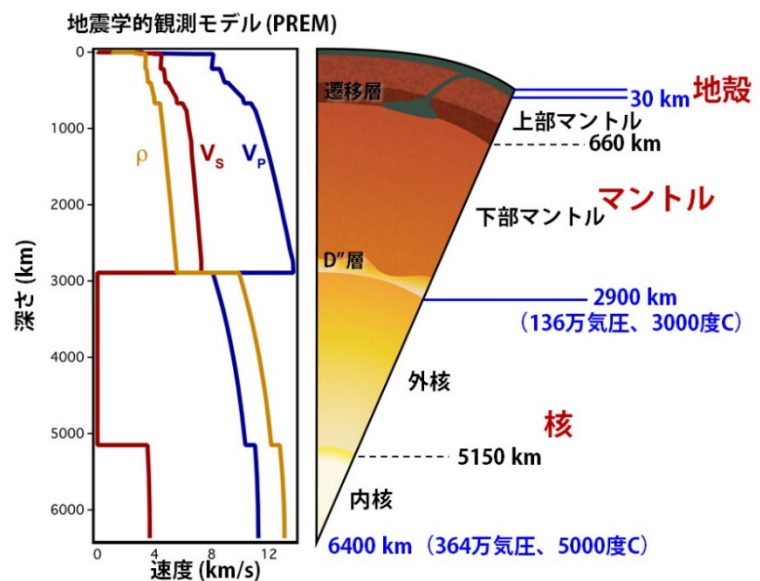


### 【今回の研究成果のポイント】

- ・ マントル物質及び沈み込む海洋地殻物質の重要な構成物である、 $\text{CaSiO}_3$  ペロブスカイト (CaPv) の弾性波 (地震波) 速度測定に世界で初めて成功した。
- ・ CaPv の弾性波速度は従来の予想に比べてはるかに低いことがわかった。このことから CaPv を多く含む玄武岩からなる海洋地殻物質の地震波速度は、従来の予想より大幅に低くなると考えられる。
- ・ 最近マントル深部の深さ 660 km 直下に発見された地震波速度の低速度領域は、海洋地殻物質の存在によると解釈される。
- ・ マントル深部に沈み込んだプレートの多くは 660 km 付近に留まり、この付近に化学的な層構造をもたらす可能性がある。

### 【研究の背景】

地球は深さ平均約 30 km の地殻、深さ 2900 km までのマントル、中心の深さ 6400 km までの核の 3 つの領域からできています。マントルは更に、深さ 660 km 付近に存在する地震学的不連続面<sup>(※1)</sup>により、上部マントル<sup>(※2)</sup>と下部マントル<sup>(※3)</sup>からできていることが、地震波の伝わり方からわかっています。



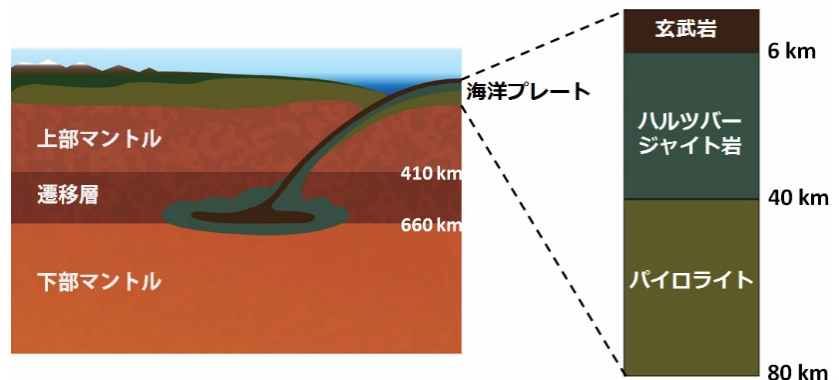
地球内部の地震波速度・密度分布と構造

上部マントルを構成する物質は、火山の噴火などによりもたらされるマントル由来の岩石（マントル捕獲岩）を調べることにより、「パイロライト」という主にかんらん石・輝石・ざくろ石の3種類の鉱物を含む岩石であることがわかっています。しかし、上部マントルの下部や下部マントルの物質<sup>(※4)</sup>は地表で手に入れることが困難であり、どのような岩石からできているかよくわかりません。

このようなマントル深部の物質を探るほぼ唯一の手がかりは、巨大地震の地震学的観測によりもたらされるマントル深部における密度と地震波速度の変化です。とりわけ、地震波速度（P波速度  $V_p$  と S波速度  $V_s$ ）は深さの関数として高い精度（ $\pm 1\sim 2\%$ 程度）で決まっており、マントル物質を特定する重要な手がかりとなります。

パイロライトを構成するかんらん石・輝石・ざくろ石などの鉱物は、マントル中の高い圧力と温度のもとで、様々な結晶構造を持つ高圧型鉱物<sup>(※5)</sup>へと変化します（構造相転移）。これらの鉱物やその高圧型鉱物の地震波速度（=弾性波速度<sup>(※6)</sup>）を実験室で測定し、得られた実験データをマントル中の地震波速度と比較することにより、マントル深部に存在する物質を推定することが可能です。

マントル中にはパイロライトの他にも、沈み込むプレートを構成する玄武岩質の海洋地殻とハルツバージャイト岩も存在すると考えられます。これらの物質も主にこれら3種類の鉱物からできていま

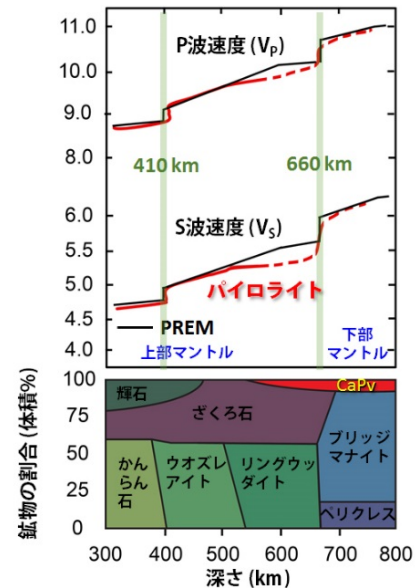


沈み込む海洋プレートの物質構成

す。ただしその割合は、それぞれパイロライト中の割合と大きく異なります。従ってこれら3つの鉱物と、それぞれの高圧型鉱物の弾性波速度を全部測定すれば、これらの比に基づいてパイロライト、玄武岩、ハルツバージャイト岩の3つのマントル深部を構成する候補物質の弾性波速度を見積もることができます。

これまでの研究により、上記3種類の鉱物及びその高圧型鉱物のほとんどに対して、弾性波速度測定が行われました。この結果に基づき560 km程度までの深さまでは、パイロライトが最も適当なマントル物質であることが明らかにされました（Irifune et al., *Nature*, 2008）。この研究では、より深いマントルではパイロライトの弾性波速度が、地震波速度の観測値と食い違うことを示していました。しかし、560 kmより深い領域での主要高圧型鉱物である、 $\text{CaSiO}_3$ 成分に富むペロブスカイト（カルシウムペロブスカイト =  $\text{CaPv}$ ）の測定は困難で、マントル候補物質の弾性波速度を精度良く見積もるには至っていませんでした。

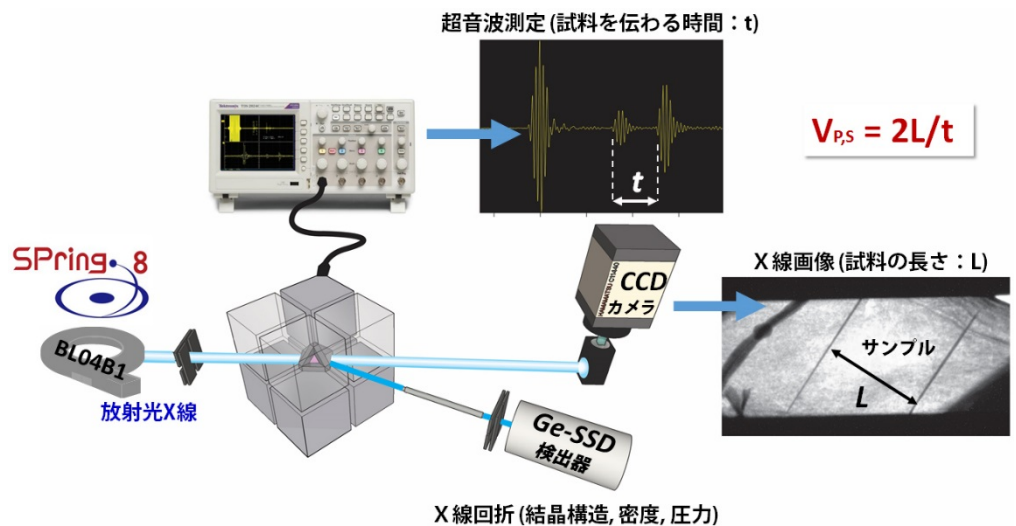
これは CaPv が常圧下ではペロブスカイト型の結晶構造を維持できず、非結晶（アモルファス）<sup>(※7)</sup>状態へと変化するため、弾性波速度測定用の適当な試料を得ることが不可能だったからです。CaPv は沈み込んだプレートを構成する玄武岩の主要高压型鉱物でもあり、その弾性波速度の測定は、マントル深部の物質を明らかにする上で重要です。



パイロライトの相変化と地震波速度

【本研究の内容】

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）と高輝度光科学研究センター（JASRI）の研究グループは、大型放射光施設 SPring-8<sup>(※8)</sup>の高温高压ビームライン BL04B1 における強い X 線と、独自の超音波技術を組み合わせることに

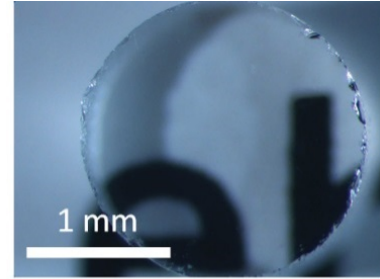


高温高压下での弾性波速度測定

より、マントル深部の高温高压下での鉱物の弾性波速度測定技術を開発してきました

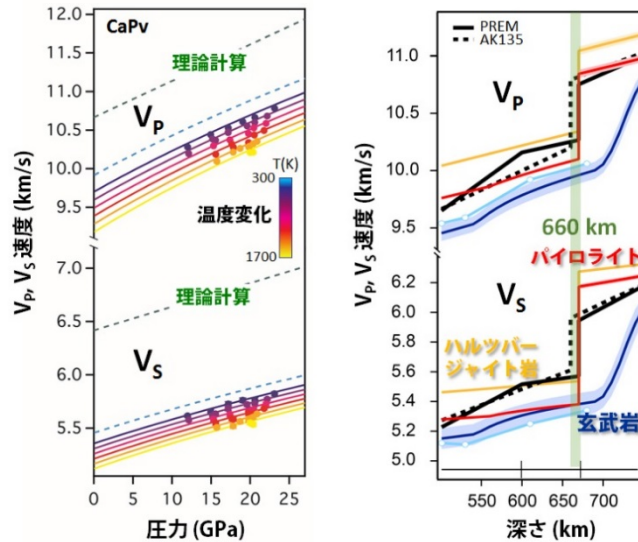
（Higo et al., *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2008 など）。この手法では、測定する鉱物の多結晶体を高温高压下で合成した後常圧下に取りだし、それを円柱形に成形したものに対し、別の実験で高温高压下での弾性波速度を測定します。弾性波（=地震波）の伝わる速度（ $v$ ）は試料の長さ（ $L$ ）と、超音波が試料を通過する時間（ $t$ ）を用いて  $v=L/t$  で決定することができるので、高温高压下での試料の X 線像（レントゲン像）から試料の長さを測定し、同時に超音波をあてて試料を通過する速度を測定することにより、様々な温度と圧力のもとでの  $v$  を測定することが可能です。

しかし、CaPv は常圧下に取り出すことができないので、本研究では新しい手法を用いました。それはまず CaSiO<sub>3</sub> 成分のガラスをつくり円柱状に加工し、これを高温高压下で CaPv に変換した後、試料を取り出すことなくそのまま弾性波速度を測定するというものです。



CaSiO<sub>3</sub>組成のガラス出発物質

実験は SPring-8 で行い、CaPv の弾性波速度の精密測定を、圧力 23 万気圧・温度 1700K という、マントル深部 660 km 不連続面に相当する条件まで行いました。測定は 5 回の独立な実験により様々な温度圧力下で行い、それぞれの実験が互いに整合的なことを確かめました。これらの結果、CaPv の弾性波速度、特に S 波速度がこれまで理論的に予測されていた値に比べてはるかに小さいことが明らかになりました。



CaPvの弾性波速度 (左) とマントル構成候補物質の弾性波速度 (右)

このことから、とりわけ CaPv を多く (20-30%程度) 含んでいる玄武岩質の海洋地殻物質は、660 km 不連続面付近まで沈み込むと、周囲のマントル物質に比べて地震波速度が大きく低下することがわかりました。

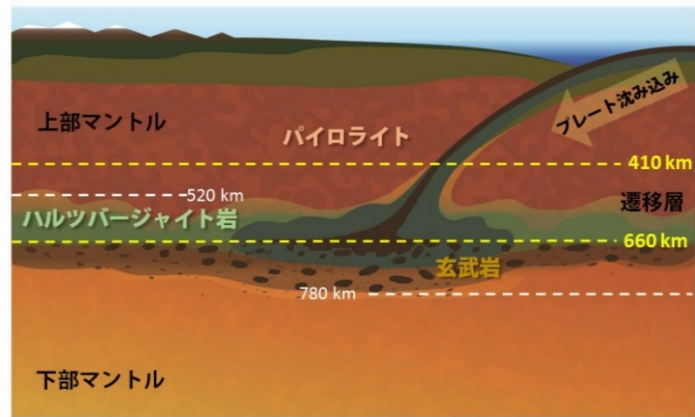
#### 【研究の意義と今後の展開】

最近マントルの深さ 660 km 不連続面直下に地震波速度が低い領域が発見され、注目を集めています (Schmandt et al., *Science*, 2014)。この地震波速度の低下は、この深さ付近で存在が予想されている少量 (数 1000 ppm 程度) の水の影響によりマントル岩石の融点が下がり、一部が融けてマグマが発生しているためと考えられていました。

本研究の結果から、このような低速度領域はマグマの発生ではなく、CaPv を多く含み地震波速度の低い玄武岩質の海洋地殻物質が、この領域に多く存在するためであるとする結論が導かれました。この結論は、GRC の西真之講師らの下部マントルでの新しい含水鉱物 (H 相) の発見や (Nishi et al., *Nature Geosci.*, 2014)、同じく GRC の井上徹教授 (広島大学教授との兼任) らの下部マントル主要鉱物であるブリッジマナイト中に多量の H<sub>2</sub>O 成分が取り込まれるという実験結果 (Inoue et al., *Goldschmidt Conference*, 2016) など、下部マントル領域では独立した物質としての「水」の存在は考えにくいとする研究成果とも調和的です。

本研究からは、沈み込んだプレート物質<sup>(※9)</sup>の多くが 660 km 不連続面付近に存在することが示唆されます。地震波速度の観測データと本研究の実験データを比較することにより、660 km 不連続面の上面にはプレートを構成するハルツバージャイト岩質の物質が、また 660 km 直下には玄武岩質の物質が多く存在することが予想されます。近年 660 km 以深の下部マントルに由来する「超深部起源ダイヤモンド」の中に、玄武岩を構成する高圧型鉱物（Walter et al., *Science*, 2011）や CaPv（Nestola et al., *Nature*, 2018）が発見され、この領域に玄武岩的な物質が存在することが指摘されており、本研究の結果とも整合的です。

今後 660 km より深い 23 万気圧を越える下部マントル深部領域で、同様の手法による弾性波速度測定を行い、観測に基づく地震波速度と対比させることにより、地球科学の大きな謎である下部マン



本研究による660 km不連続面付近の物質構成モデル

トルの化学組成の解明に重要な情報を与えることができると思われま。JASRI と GRC のグループは、最近下部マントルの深さ 800 km 近くに対応する 27 万気圧程度まで同様な測定を行う技術を開発し（Higo et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 2018）、下部マントルを構成する有力候補物質であるパイロライトや、それを構成する高圧型鉱物の弾性波速度の測定に取り組んでいます。このような手法により下部マントルの化学組成が解明されれば、地球の原材料やその進化の解明が大きく進展すると期待されます。

#### 【用語解説】

660 km 不連続面(※1)：マントルの深さ 660 km に存在する、地震波速度や密度が急激に変化する面。マントル物質中の主要な鉱物であるかんらん石の相転移が原因であると考えられている。この不連続面により、マントルは上部マントルと下部マントルにわけられる。660 km に対応する圧力は約 23 万気圧、温度 1600°C 程度と見積もられている。

上部マントル(※2)：地殻の下、深さ 30 km から 660 km に至るマントルの領域。主にパイロライトと称される、かんらん石・輝石・ざくろ石の 3 つの鉱物とその高圧型鉱物からできていると考えられる。なお、上部マントルを深さ 410 km までの領域とし、410 km~660 km の領域をマントル遷移層と呼ぶこともある。

下部マントル(※3)：マントルの深さ 660 km から、核の最上部の深さ 2900 km に至る領域。地球全体の体積の約 6 割を占めるが、その化学組成については上部マントル同様に

パイロライトであるとの考えと、よりシリカ (SiO<sub>2</sub>) 成分に富んだ組成であるとする説がある。

マントル物質(※4)：上部マントルを構成する物質は、主にパイロライトであると考えられている。パイロライト (pyrolite) はマントル捕獲岩であるかんらん岩に近い組成を持っており、主に輝石 (pyroxene) とかんらん石 (olivine) からなる、オーストラリア国立大学の A. R. Ringwood 教授により考案された仮想的岩石である。上部マントル最下部~下部マントル領域におけるマントル物質に関しては、すべてパイロライトとする考えもあるが、玄武岩、ハルツバージャイト岩、またよりシリカに富んだペロブスカイタイトなど、様々な説があり未解決である。

高圧型鉱物(※5)：鉱物はそれを構成する原子が規則正しい配列をした結晶構造をもっているが、これに圧力を加えるとある時点で全く異なる結晶構造に変化する。この現象を高圧相転移といい、その結果生じる新しい構造の鉱物を高圧型鉱物と称する。例えばダイヤモンドは石墨 (グラファイト) の高圧型鉱物である。

弾性波速度(※6)：固体 (弾性体) 物質の中を伝わる波の速度。P 波 (V<sub>p</sub>) と S 波 (V<sub>s</sub>) に対応する 2 種類がある。地震波もこの一種である。P 波速度、S 波速度は周波数に依存しないので、小さな試料に対する超音波を使った測定により、物質の弾性波速度即ち地震波速度を測定することができる。

非結晶 (アモルファス) (※7)：鉱物などの結晶に対して、原子が規則正しく配列していない固体が存在し、そのような物質を非結晶 (アモルファス) 物質と称する。ガラスはその例である。高圧型鉱物は常圧に取り出しても準安定に存在できることが多いが (ダイヤモンドもその例)、一部の高圧型鉱物は常圧下ではアモルファス化するものもある。CaPv はその例である。

大型放射光施設 SPring-8(※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施設で、利用者支援は JASRI が行っている。

SPring-8 の名前は Super Photon ring-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。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。

プレート物質(※9)：沈み込む海洋プレートの主な構成物質は、最上部の薄い堆積物・海洋地殻を構成する玄武岩、その下にあるハルツバージャイト岩、さらにその下にはマン

トル物質のパイロライトからなり、厚さ 80~100 km 程度と考えられている。これらのうち、最上部の堆積物と下部のパイロライトは沈み込む過程で周囲のマントルに取り込まれ、下部マントル付近に達するプレートの主な構成物質は玄武岩とハルツバークジャイト岩と考えられる。

#### 【掲載論文】

題名：Sound velocity of  $\text{CaSiO}_3$  perovskite suggests the presence of basaltic crust in the lower mantle

邦訳： $\text{CaSiO}_3$  ペロブスカイトの音速測定により、下部マントルに玄武岩質地殻物質が存在することを示唆

著者：スティーブ・グレオ<sup>1,2</sup>、入船徹男<sup>1,2</sup>、肥後祐司<sup>3</sup>、丹下慶範<sup>3</sup>、有本岳史<sup>1</sup>、劉兆東<sup>1</sup>、山田明寛<sup>4</sup>（1. 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）、2. 東京工業大学地球生命研究所（ELSI）、3. 高輝度光科学研究センター（JASRI）、4. 滋賀県立大学ガラス工学研究センター）

掲載誌：Nature doi: 10.1038/s41586-018-0816-5

発行日：2019年1月10日

#### 【著者の情報】

本研究はグレオと入船が立案し、主要な実験である弾性波速度測定はグレオが、肥後祐司・丹下慶範（ともに JASRI 主幹研究員）・有本岳史（GRC 博士研究員）・Zhaodong Liu（劉兆東：中国吉林大学准教授）の支援を受けて行いました。山田明寛（滋賀県立大学助教）は  $\text{CaSiO}_3$  ガラスの作製を行いました。論文の取り纏めは入船とグレオが担当しました。本研究の著者は、現在色々な研究機関に所属していますが、全員が愛媛大学大学院理工学研究科・博士課程大学院生（肥後、山田、有本、劉）、GRC 助教（丹下）として GRC に在籍した経歴を有しており、「オール GRC チーム」の成果ともいえます。尚、入船とグレオは東京工業大学の地球生命研究所において、それぞれ主任研究者と研究員を兼務しています。

#### 【問い合わせ先】

（研究に関すること）

##### 研究員 スティーブ・グレオ

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

TEL: 089-927-8137

##### 教授 入船 徹男

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

TEL: 089-927-9645

(愛媛大学に関すること)

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

(東京工業大学に関すること)

東京工業大学 広報・社会連携本部 広報・地域連携部門

E-mail: media@jim.titech.ac.jp、 Tel : 03-5734-2975、 Fax : 03-5734-3661

東京工業大学 地球生命研究所 (ELSI)

E-mail: pr@elsi.jp、 Tel: 03-5734-3163

(SPRING-8 に関すること / SACLAL 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 普及情報課

E-mail: kouhou@spring8.or.jp、 Tel: 0791-58-2785

(滋賀県立大学に関すること)

滋賀県立大学 広報担当

E-mail: tatebayashi.t@office.usp.ac.jp、 Tel: 0749-28-8351

【関連分野の研究者】 (第三者のコメントをご参考にされたい場合に下記の方々を推薦します)

東京大学名誉教授 八木 健彦

E-mail: yagitakehiko@76.alumni.u-tokyo.ac.jp, Tel: 0475-47-3845

東京大学大学院理学系研究科・附属地殻化学実験施設 教授 鍵 裕之

E-mail: kagi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp, Tel: 03-5841-7625

広島大学大学院理学研究科・地球惑星システム学専攻 教授 井上 徹

E-mail: toinoue@hiroshima-u.ac.jp, Tel: 082-424-7460

【備考】

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (課題番号: JP15H05829, JP25220712) の一環として実施したものです。



## 【参考文献】

- Higo, Y., Inoue, T., Irifune, T., Funakoshi, K., and Li, B., Elastic wave velocities of  $(\text{Mg}_{0.91}\text{Fe}_{0.09})_2\text{SiO}_4$  ringwoodite under P-T conditions of the mantle transition region, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 166, 167-174, 2008.
- Irifune, T., Higo, Y., Inoue, T., Kono, Y., Ohfuji, H., and Funakoshi, K., Sound velocities of majorite garnet and the composition of the mantle transition region, *Nature*, 451, 814-817, 2008.
- Schmandt, B., Jacobsen, S. D., Becker, T. W., Liu, Z., Dueker, K. G., Dehydration melting at the top of the lower mantle, *Science*, 344, 1265-1268, 2014.
- Nishi, M., Irifune, T., Tsuchiya, J., Tange, Y., Nishihara, Y., Fujino, K., Higo, Y., Stability of hydrous silicate at high pressures and water transport to the deep lower mantle, *Nature Geoscience*, 7, 224-227, 2014.
- Inoue, T., Kakizawa, S., Fujino, K., Kuribayashi, T., Nagase, T., Gréaux, S., Higo, Y., Sakamoto, N., Yurimoto, H., Hattori, T., Sano, A., Hydrous bridgmanite: possible water reservoir in the lower mantle, *Goldschmidt Conference* (abstract), 2016.
- Walter, M. J., Kohn, S. C., Araujo, D., Bulanova, G. P., Smith, C. B., Gaillou, E., Wang, J., Steele, A., Shirey, S. B., Deep mantle cycling of oceanic crust: evidence from diamonds and their mineral inclusions, *Science*, 334, 54-57, 2011.
- Nestola, F., Korolev, N., Kopylova, M., Rotiroti, N., Pearson, D. G., Pamato, M. G., Alvaro, M., Peruzzo, L., Gurney, J. J., Moore, A. E., Davidson, J.,  $\text{CaSiO}_3$  perovskite in diamond indicates the recycling of oceanic crust into the lower mantle, *Nature*, 555, 237-241, 2018.
- Higo, Y., Irifune, T., Funakoshi, K., Simultaneous high-pressure high-temperature elastic velocity measurement system up to 27 GPa and 1873K using ultrasonic and synchrotron X-ray techniques, *Review of Scientific Instruments*, 89, Art. No. 014501, 2018.