

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：15301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05867・19K21049

研究課題名(和文) 超高温高压その場物性精密測定から導き出す最下部マンツルの地震波異常の原因

研究課題名(英文) Precise measurements of physical properties of the lower mantle minerals under high pressure and temperature

研究代表者

増野 いづみ (Mashino, Izumi)

岡山大学・惑星物質研究所・特任助教

研究者番号：50822102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、真空チャンバーおよびグラファイトをヒーターに用いるなど、外熱式ダイヤモンドアンビルセル高压発生装置のセル構成を工夫することにより、実際の地球下部マンツルに相当する高温高压を発生させ、X線回折法や各種分光法と組み合わせることで、マンツル物質の物性を詳しくすることを目的として研究を実施してきた。当該の外熱システムを用い、放射光を用いた実験にて下部マンツル温度压力を発生させ、マンツル鉱物のX線回折データを取得し、下部マンツルの地震波不連続の原因について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射光施設において当該の外熱式ダイヤモンドアンビルセルシステムを用いた高温高压X線回折実験を行った結果、先行研究で予測されている新相の压力領域よりも5 GPa以上高い压力にて、Mg(OH)<sub>2</sub>の低压相由来でもなく、Mg(OH)<sub>2</sub>の脱水分解で生じるであろうMgO由来の回折線でもない、新しい回折線が観察された。得られたX線回折データを解析し、計算で予想されている新相との関係を考察し、含水鉱物の相図を再検討した。新相が予想されているよりも高压側に存在することで、下部マンツルに存在する地震波不連続面の成因になりうるかもしれない、この相が存在することでマンツル内部の水の循環に影響を与える可能性がある。

研究成果の概要(英文)：A externally-heated diamond anvil cell system combined with vacuum chamber and carbon heater has been developed to measure the physical properties of the lower mantle minerals under high pressure and temperature precisely. I obtained in situ high-pressure and -temperature X-ray diffraction data of the lower mantle minerals in synchrotron radiation facilities using the system. These data enable us to discuss the cause of the seismic discontinuity in the lower mantle.

研究分野：地球惑星物性学

キーワード：高温高压実験 下部マンツル ダイヤモンドアンビルセル 外熱式

### 1. 研究開始当初の背景

地震波速度の観測データと照らし合わせることで、地球内部がどのようなもので構成されているかを推定することができるという点で、実験的にマントル鉱物の物性を測定することは極めて重要である。地球内部の地震波異常は、鉱物の相転移や化学組成の違い、温度の違いなどで説明される。しかしながら、下部マントルの地震波異常の原因については、鉱物の物性値に対する組成・温度・圧力の効果が正確に決まらないことから、よくわかっていない。

近年の研究では、太平洋下最下部マントルの地震波の低速度領域 (LLSVP) について、周囲のマントルより鉄の含有量の多い MORB がパイル状に存在することや (Ohta et al., 2008, EPSL) 温度によりポストペロブスカイトがブリッジマナイトへ相転移を起こすこと (e.g., Lay et al., 2006, Science) さらに最下部マントルまで安定な含水鉱物  $\delta\text{-AlOOH}$  が滞留していること (Mashino et al., 2016, GRL) で説明出来るのではないかとといった説が提唱されている。これらの説のどれがもっとも正しいのかは、弾性波速度に対する鉄濃度・温度・圧力の効果が正確に決まっていないため議論が続いている。

### 2. 研究の目的

本研究では、実験的に温度・圧力・鉄濃度を正確に決定し、マントルに存在しうると考えられている鉱物の物性測定をすることで、下部マントルの地震波異常の原因の解明を目指した。現在主流のレーザー加熱法では測定試料中の温度勾配が大きく、その温度勾配により試料中に鉄濃度の大きな不均質ができてしまい、弾性波速度の温度・組成依存性を決めることが困難であった。これが地震波速度異常の解釈を難しくしてきた。一方で外熱式では、従来のダイヤモンドアンビルセルを用いた実験でルーチン化された比較的容易な試料封入法をそのまま適用可能で、試料全体を外側から加熱するため、温度勾配を小さくする ( $\pm$ 数 10 K 程度) ことが可能で、レーザー吸収体が必要なく、あらゆる試料を加熱することができる。外熱式の欠点は発生可能温度が低いことだが、本研究では真空チャンバーとカーボンヒーターを用いることでこれを克服する。従来白金 (Pt) ヒーターが用いられてきたが、カーボンヒーターは理論的には真空中で 3000 K までの温度条件下での使用が可能で、高温でも機械的強度が低下せず、約 1 mm 程度の薄板でも複雑形状の加工が容易で、均等なパワーでの加熱が可能のため、小型で均等な加熱が必要な外熱式ダイヤモンドアンビルセルの実験に非常に適している。

以上のように、本提案では外熱式ダイヤモンドアンビル高圧装置用に真空チャンバーとカーボンヒーターを導入することで、従来報告されている以上の温度圧力条件である実際のマントル領域を網羅する温度圧力での精密な物性測定が実現できると考えた。

### 3. 研究の方法

外熱式ダイヤモンドアンビル超高压装置用の真空チャンバー (右の Fig.1) を新たに導入し、下部マントル鉱物の高温高压その場物性測定を行った。物性測定には放射光 X 線回折法を用い、高温高压発生には真空チャンバーおよび円柱状のカーボンヒーターを使用した外熱式ダイヤモンドアンビルセルシステムを用いた。

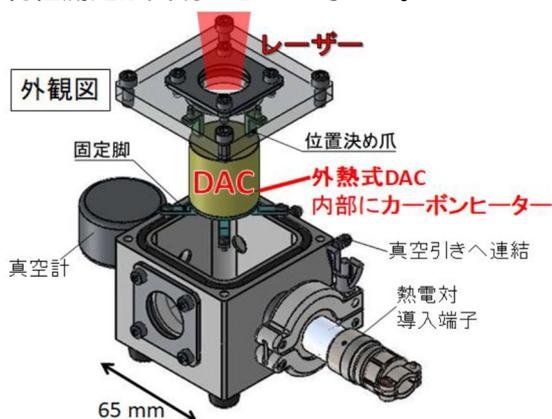


Fig.1. 外熱式ダイヤモンドアンビルセル用真空チャンバー模式図

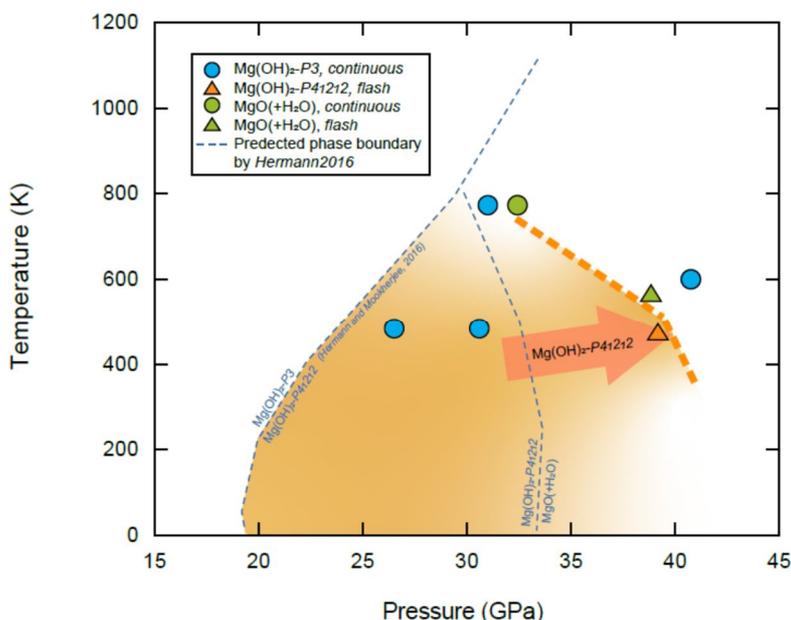
### 4. 研究成果

初年度にはまず真空チャンバーおよびカーボンヒーターの性能を確かめるため、実験室のラマン分光法に当該の外熱式ダイヤモンドアンビルセルを組み合わせ、高温高压発生実験を行った。その後、放射光施設 SPring-8 および Paul Scherrer Institut (PSI) にて当該外熱式ダイヤモンドアンビルセルシステムを導入し、下部マントルに最も多く含まれていると考えられている鉄を含むブリッジマナイト、含水鉱物である  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  および  $\text{H}_2\text{O}$  の高温高压その場 X 線回折実験を行い、65 GPa, 1500 K までの温度圧力でのデータを取得す

ることができた。途中、研究代表者の所属が国外に変更されたため、一度本基金の中断・留保を行い、帰国後に本基金を再開した。

特に  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  については、最近の密度汎関数法を用いた研究 (Hermann and Mookherjee, 2016, PNAS) において、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  が下部マントル温度圧力領域で相転移を起こすことが予測されていた。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  は常圧下でブルーサイトと呼ばれ、ヨウ化カドミウム型結晶構造という層状の結晶構造を持ち、空間群  $P\bar{3}m1$  に属する。圧力増加に伴い、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  は水素結合対称化による相転移を経て約 10 GPa 前後の圧力で  $P\bar{3}$  に変化すると考えられている。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  は下部マントル圧力下で  $\text{MgO}$  と  $\text{H}_2\text{O}$  に分解すると考えられてきたが (e.g., Fei and Mao, 1993) Hermann and Mookherjee, (2016) にて下部マントル上部圧力約 20-35 GPa で  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  が  $P4_12_12$  に変化する可能性が示唆された。この相転移によって  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  はより密な構造を取りえることから、下部マントルに存在する地震波不連続面を作り出す可能性がある。

本研究では  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - $P4_12_12$  新相の存在およびその安定領域を正確に調べるため、放射光施設において当該の外熱式ダイヤモンドアンビルセルシステムを用い、下部マントル圧力条件下の 41 GPa まで圧力範囲で高温高压 X 線回折実験を行った。その結果、先行研究で予測されている  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - $P4_12_12$  新相の圧力領域よりも 5 GPa 以上高い圧力にて、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  の低圧相  $P\bar{3}$  由来でもなく、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  の脱水分解で生じるであろう  $\text{MgO}$  や  $\text{H}_2\text{O}$  由来の回折線でもない、新しい回折線が観察された。得られた X 線回折データを解析し、計算で予想されている新相との関係を考察し、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  の圧力温度相図の再検討を行った (Fig.2)。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - $P4_12_12$  新相の安定領域が予想されているよりも高压側にシフトすることは、含水鉱物である  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  の安定領域が下部マントル圧力まで拡張されることを意味し、この相が存在することで下部マントルに存在する地震波不連続面やマントル内部の水の循環に影響を与える可能性がある。本研究の結果については、国際雑誌への投稿を予定しており、現在論文を執筆中である。



**Fig.2.**  $P$ - $T$  diagram of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  in this study. Light blue dotted lines; predicted phase boundary of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - $P4_12_12$  by Hermann and Mookherjee (2016). Bold orange lines show the expected boundary between  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - $P4_12_12$  and  $\text{MgO}+\text{H}_2\text{O}$ . Orange region shows a possible stability field of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ - $P4_12_12$  deduced from the expected upper stability limit based on our study and the lower limit from the previous study by Hermann and Mookherjee (2016).

## References

- Ohta, K., Hirose, K., Lay, T., Sata, N., & Ohishi, Y. (2008). Phase transitions in pyrolite and MORB at lowermost mantle conditions: implications for a MORB-rich pile above the core-mantle boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(1-2), 107-117.
- Lay, T., Hernlund, J., Garnero, E. J., & Thorne, M. S. (2006). A post-perovskite lens and  $D''$  heat flux beneath the central Pacific. *Science*, 314(5803), 1272-1276.

- Mashino, I., Murakami, M., & Ohtani, E. (2016). Sound velocities of  $\delta$  **AlOOH up to core mantle boundary pressures with implications for the seismic anomalies in the deep mantle.** *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**(2), 595-609.
- Fei, Y., & Mao, H. K. (1993). Static compression of Mg (OH) 2 to 78 GPa at high temperature and constraints on the equation of state of fluid H2O. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **98**(B7), 11875-11884.
- Hermann, A., & Mookherjee, M. (2016). High-pressure phase of brucite stable at Earth's mantle transition zone and lower mantle conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **113**(49), 13971-13976.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Mashino Izumi, Murakami Motohiko, Miyajima Nobuyoshi, Petitgirard Sylvain   | 4. 巻<br>117                   |
| 2. 論文標題<br>Experimental evidence for silica-enriched Earth's lower mantle with ferrous iron dominant bridgmanite              | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the National Academy of Sciences   | 6. 最初と最後の頁<br>27899 ~ 27905   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1073/pnas.1917096117   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Okuda Yoshiyuki, Kimura Seiji, Ohta Kenji, Park Yohan, Wakamatsu Tatsuya, Mashino Izumi, Hirose Kei                 | 4. 巻<br>92                    |
| 2. 論文標題<br>A cylindrical SiC heater for an externally heated diamond anvil cell to 1500 K                                     | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Review of Scientific Instruments  | 6. 最初と最後の頁<br>015119 ~ 015119 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0036551   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Mashino Izumi, Miozzi Francesca, Hirose Kei, Morard Guillaume, Sinmyo Ryosuke                                       | 4. 巻<br>515                   |
| 2. 論文標題<br>Melting experiments on the Fe-C binary system up to 255 GPa: Constraints on the carbon content in the Earth's core | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Earth and Planetary Science Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>135 ~ 144       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.epsl.2019.03.020  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>I. Mashino, M. Murakami, N. Miyajima, S. Petitgirard  | 4. 巻<br>-                     |
| 2. 論文標題<br>Experimental evidence for silica-enriched Earth's lower mantle with ferrous iron dominant bridgmanite              | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Bayerisches Forschungsinstitut für Experimentelle Geochemie und Geophysik Universität Bayreuth, ANNUAL REPORT       | 6. 最初と最後の頁<br>28-29           |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>無                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Mashino Izumi、Miozzi Francesca、Hirose Kei、Morard Guillaume、Sinmyo Ryosuke  |
| 2. 発表標題<br>Melting experiments on the Fe-C binary system up to 255 GPa: Constraints on the carbon content in the Earth's core |
| 3. 学会等名<br>AGU Fall meeting 2018（国際学会）  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>増田 滉己、増野 いづみ、廣瀬 敬                  |
| 2. 発表標題<br>高温高圧下におけるMg(OH) <sub>2</sub> の安定領域 |
| 3. 学会等名<br>日本地球惑星科学連合大会 2018                  |
| 4. 発表年<br>2018年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>I. Mashino, M. Murakami, N. Miyajima, S. Petitgirard  |
| 2. 発表標題<br>Experimental evidence for Si-enriched Earth's lower mantle with ferrous iron dominant bridgmanite |
| 3. 学会等名<br>Conference on Science at Extreme Conditions (CSEC-2021)（国際学会）                                     |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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                |  |  |  |
|---------|------------------------|--|--|--|
| スイス     | Paul Scherrer Institut |  |  |  |