

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18647

研究課題名(和文)回転式DAC × レーザー加熱 = 地球深部に沈み込んだ海洋地殻の変形特性の解明

研究課題名(英文) Rheological properties of the oceanic crust subducted to the Earth's deep interior

研究代表者

東 真太郎 (Azuma, Shintaro)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：60771293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温高压変形試験機として回転式ダイヤモンドアンビルセルと近赤外線集光加熱を組み合わせた新たな実験装置(IRrDAC)を開発し、地球深部条件下での変形実験に対して有用であることを実証した。この装置を用いて地球深部へと沈み込んでいることが予想される含水スティショバイト( $\text{SiO}_2$ ,  $1750 \pm 150$  ppm  $\text{H}_2\text{O}$ )に対し変形実験を行ったところ、流動強度は下部マントルを構成する鉱物の一つフェロペリクレスとほぼ同等である可能性が示された。IRrDACを用いた含水スティショバイトの高温高压変形実験(16–54 GPa, 常温–650度)から、その流動強度の温度依存性と圧力依存性を確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで下部マントルに相当する圧力下(23–135 GPa)で定量的な高温変形実験を行うことは非常に困難であった。これに対し、本研究では我々研究グループが開発してきた回転式ダイヤモンドアンビルセルと新たな加熱手法の近赤外線集光加熱を組み合わせ、大型放射光施設SPring-8のビームライン上に最適化することで可能にした。これによって、今まで得ることが困難であった地球深部へと沈み込んでいる海洋地殻物質の高温高压大ひずみ変形が可能となり、流動強度における温度依存性や圧力依存性を観察するに至った。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a new experimental apparatus (IRrDAC) in which combines the rotational diamond anvil cell and near-infrared focused heating, and demonstrated its capability for high-temperature deformation experiments under the lower mantle pressures. Deformation experiments using this apparatus on hydrous stishovite ( $\text{SiO}_2$ ,  $1750 \pm 150$  ppm  $\text{H}_2\text{O}$ ) suggest that the flow strength may be similar to that of ferropericline. On the other hand, high-temperature and high-pressure deformation experiments (16–54 GPa, room temperature–650 ) of hydrous stishovite using IRrDAC confirmed the temperature and pressure dependence on its flow strength.

研究分野：高温高压変形実験、岩石レオロジー

キーワード：回転式ダイヤモンドアンビルセル レオロジー 高温高压 変形実験 海洋地殻 スティショバイト 近赤外線

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

超高压条件下における海洋地殻物質の変形特性(レオロジー)を解明することは、プレートテクトニクスによって地球深部へと沈み込んだ海洋地殻がどこまで沈み込み、どこで滞留し、そしてどこへ行くのかを明らかにするために必要不可欠な研究項目である。沈み込んだ海洋地殻の描像については、マンツルの不均質性や対流様式、マンツル内部で観測される異方性、反射面などの観点から多くの議論がされてきたにも関わらず、その変形特性については技術的困難さから実験的研究報告がほとんどない。例えば、海洋地殻の高压鉱物(ブリッジマナイト、スティショバイト、デイブマオアイト、アルミナス相)の内、スティショバイトに関して、従来のダイヤモンドアンビル装置を用いた結晶選択配向に関する実験(Kaercher et al., 2014. *Phys. Chem. Minerals*)や、デイブマオアイトにおける変形実験(Miyagi et al., 2010. *PEPI*)などが報告されているが、どれも非常に小さいひずみの一軸圧縮実験、そして常温の変形実験がほとんどである。以上の背景から、これまでの先行研究の弱点を克服し、大ひずみ、かつ、実際の温度圧力下での変形実験による海洋地殻物質の変形特性の解明が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、応募者グループが開発してきた回転式ダイヤモンドアンビル装置(回転式 DAC)に対し、適した加熱手法を開発することで、新たな高温高压変形実験技術を切り開くとともに、特に下部マンツル領域(>23GPa)において海洋地殻部分を構成する高压鉱物(例えばスティショバイト)に対して、実際の地球内部の温度圧力下での大ひずみ変形実験に挑戦し、変形挙動の解明に貢献することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、新たに開発した回転式ダイヤモンドアンビル装置を用い、海洋地殻を構成する鉱物の高压相に対して超高压高温大ひずみ変形実験を行う。それを実現するため、新たな加熱手法として、回転式ダイヤモンドアンビル装置に近赤外線集光加熱装置(IRrDAC)を導入した(図 1)。さらに SPring-8(BL47XU)のビームライン上で、この回転式ダイヤモンドアンビル装置と加熱装置を組み合わせた変形実験が可能ないように最適化を行った。IRrDAC による加熱の有用性については、SPring-8(BL47XU)において銀の融解実験と、蛇紋石(アンチゴライト)の脱水実験を行うことによって確かめた。これによって、超高压高温変形実験と XRD(試料の同定・応力測定)、X 線ラミノグラフィー技術(試料の 3 次元撮像)を組み合わせ可能にし、海洋地殻物質の高压相に対して大ひずみ変形、高温加熱、応力・ひずみ測定を行った(図 1)。

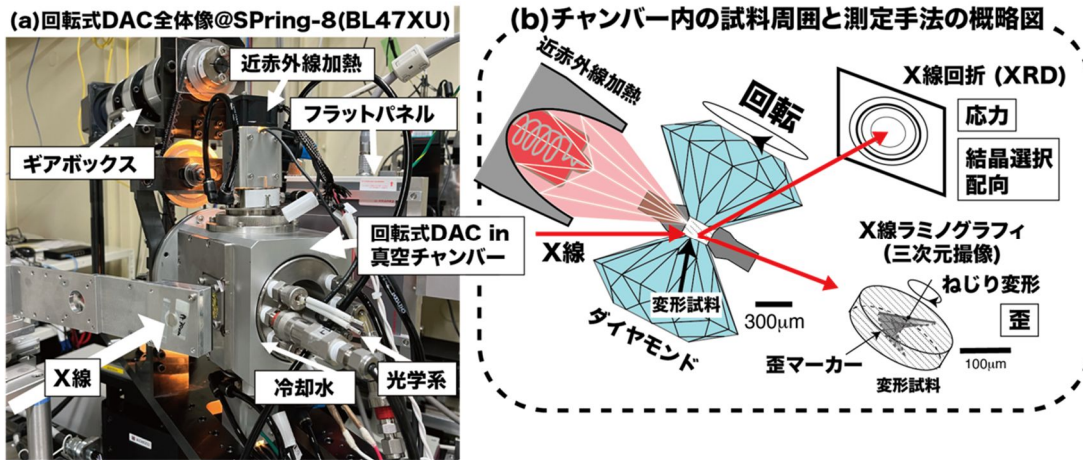


図 1: (a)新たに導入した近赤外線加熱装置と回転式 DAC(IRrDAC)を X 線入射方向から見た全体像。(b)実験で用いられる測定手法の概要。

#### 4. 研究成果

##### ・近赤外線集光加熱 + 回転式 DAC(IRrDAC)の有用性

新たに導入した IRrDAC を用いた銀の加熱実験において、熱電対の温度が $\sim 970^{\circ}\text{C}$ に到達すると、観察されていた銀の回折ピークが消失もしくは極端に低くなったことを確認できた。試料部全体をカバーするように XRD 測定を行なったが、銀の回折ピークをほとんど検出することはできなかつたため、試料に用いた銀は均質に加熱され、融点を超えたことを示している。ラジオグラフィーによる撮像からは、加熱前には確認できていた銀の形状が融点以上の温度で確認できなくなったことに加え、銀の溶融によって試料室の形状が変形していることが確認された。他にも蛇紋石(アンチゴライト)を用いた高圧加熱実験でも、安定領域の境界温度付近で回折ピークが消失し、脱水分解していることが確認された。以上の結果から、今回導入した近赤外線加熱装置は回転式 DAC を用いた高圧変形実験においても、必要条件(X 線経路の確保、安定かつ均質な昇温)を満たせる有効な加熱法であると考えられる。

##### ・スティショバイトの変形実験

本研究では、上記の新たに導入した IRrDAC を用いて、含水スティショバイト ( $1750 \pm 140 \text{ ppm H}_2\text{O}$ ) に対する変形実験を行った。本報告では、常温高圧条件と高温高圧条件での結果を紹介する。図 2 はスティショバイトに対して行った常温高圧 (室温、41 GPa) での変形実験の結果と、比較のために記載したブリッジマナイト ( $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ ) とフェロペリクレス ( $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ ) の力学データ (室温、45 GPa) である。いずれの結果も回転式 DAC によって行われた実験である。含水スティショバイトは上記のように多量の水を含んでおり、非常に柔らかいことが予想されたが、実際に実験を行ってみると流動強度はフェロペリクレスとほぼ同等であった (図 2)。一方、ブリッジマナイトと比較すると、その流動強度は非常に低く、海洋地殻の変形挙動は含水スティショバイトに支配される可能性が示唆された (図 2)。高圧条件での海洋地殻には、ブリッジマナイトとスティショバイトの他に、デイブマオアイトやアルミナス相などが含まれており、今後それらの流動強度も明らかにすることが課題となる。図 3 は含水スティショバイトの高温高圧条件 ( $650^{\circ}\text{C}$ 、 $18 \pm 2 \text{ GPa}$ ) と室温高圧条件 (室温、 $18 \pm 2 \text{ GPa}$ ) の変形実験の結果である。この結果から、IRrDAC による加熱によって、スティショバイトの流動強度の温度依存性が観察可能であることが確認できた。今後は様々な温度条件で変形実験を行うこ

とで、海洋地殻物質の高圧相の流動強度における温度依存性だけでなく、発達する結晶選択配向なども明らかにしていく予定である。上記結果からも、本研究によって開発された回転式 DAC の新たな加熱手法(IRrDAC)は、下部マントルに相当する圧力条件での高温変形実験に対し非常に有用であると考えられる。

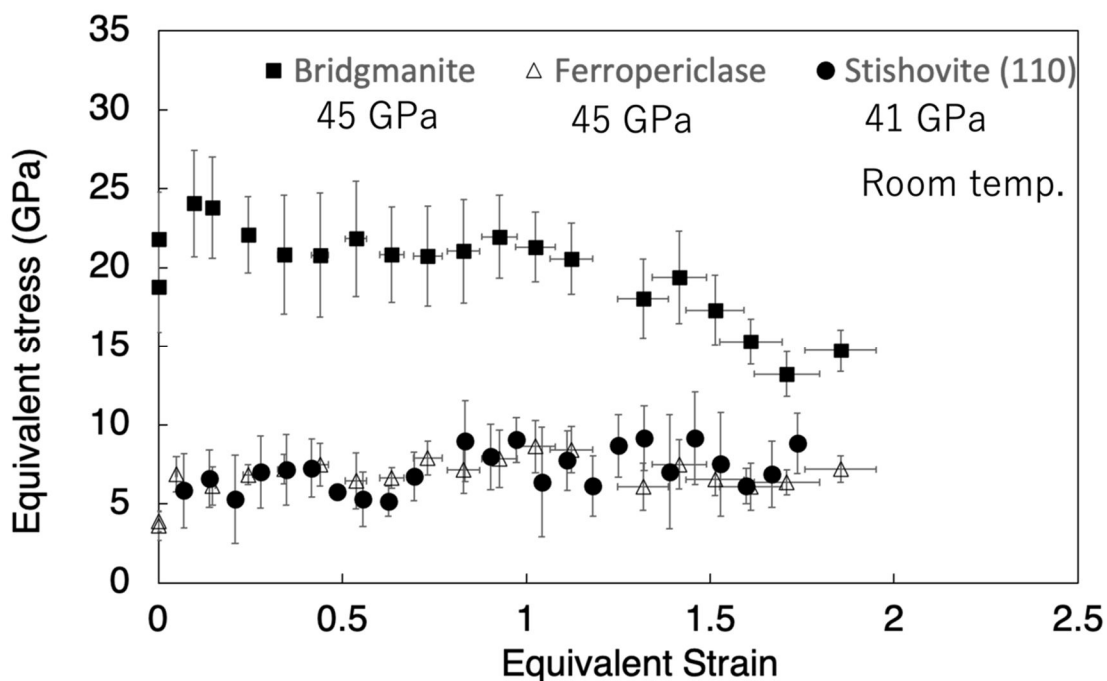


図 2: 回転式 DAC によって行われた含水スティショバイト、ブリッジマナイト、フェロペリクレスの変形実験の応力—歪曲線。実験条件は図中に記載。

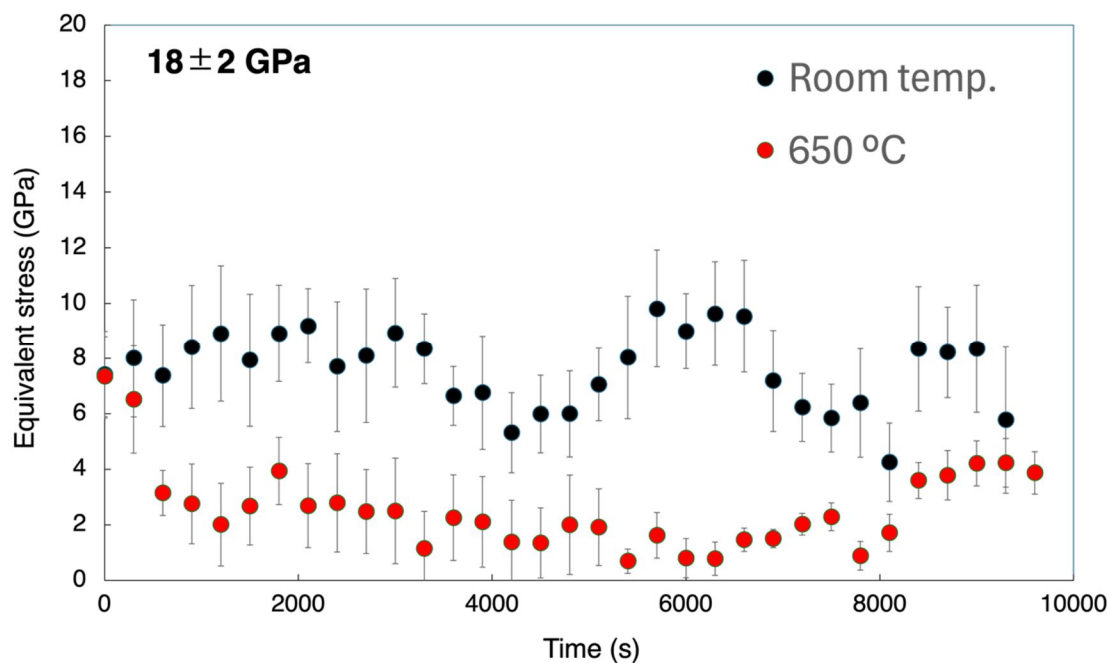


図 3: IRrDAC によって行われた含水スティショバイトの高温高圧変形実験の力学データ。実験条件は図中に記載。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Park Yohan, Azuma Shintaro, Okazaki Keishi, Uesugi Kentaro, Yasutake Masahiro, Nishihara Yu, Nomura Ryuichi	4. 巻 49
2. 論文標題 Development of Lattice Preferred Orientations of MgO Periclase From Strain Rate Controlled Shear Deformation Experiments Under Pressure up to 120?GPa	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022GL100178	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 Park Yohan, Yonemitsu Kyoko, Hirose Kei, Kuwayama Yasuhiro, Azuma Shintaro, Ohta Kenji	4. 巻 108
2. 論文標題 Viscosity of Earth's inner core constrained by Fe-Ni interdiffusion in Fe-Si alloy in an internal-resistive-heated diamond anvil cell	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1064 ~ 1071
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2022-8541	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Okazaki Yusuke, Azuma Shintaro, Fukuhara Daijiro, Katayama Ikuo, Sekine Yasuhito, Saruya Tomotaka	4. 巻 411
2. 論文標題 Low-temperature friction experiments on ice-salt mixtures: Implications for the strength of ice plate boundaries on Europa	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115961 ~ 115961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2024.115961	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 Ohta Kenji, Suehiro Sho, Kawaguchi Saori I., Okuda Yoshiyuki, Wakamatsu Tatsuya, Hirose Kei, Ohishi Yasuo, Kodama Manabu, Hirai Shuichiro, Azuma Shintaro	4. 巻 130
2. 論文標題 Measuring the Electrical Resistivity of Liquid Iron to 1.4Mbar	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 266301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.266301	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Park Yohan, 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 西原遊, 野村龍一
2. 発表標題 MgO多結晶体の超高压高歪変形実験から推察する D'' 層の結晶選択配向の発達
3. 学会等名 第63回高压討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Natsui, B., Azuma, S., Okazaki, K., Uesugi, K., Yasutake, M., Nomura, R.
2. 発表標題 Large strain deformation experiments of FeO polycrystals under the lower mantle pressures.
3. 学会等名 International Symposium, Frontier of Understanding Earth's Interior and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 夏井文凜, 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 野村龍一
2. 発表標題 下部マントル圧力条件での FeO 多結晶体の大歪変形実験
3. 学会等名 第63回高压討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福原大二郎, 東真太郎, 片山郁夫, 猿谷友孝
2. 発表標題 低温環境における氷摩擦実験と火星内部レオロジー構造への応用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Park Yohan, 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 野村龍一
2. 発表標題 High pressure shear deformation experiments on MgO periclase under pressure up to 120 GPa: Toward understanding anisotropy in the lowermost mantle
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Park Yohan, 東 真太郎, 岡崎 啓史, 上杉 健太郎, 安武 正展, 野村 龍一
2. 発表標題 High pressure shear deformation experiments on MgO periclase under pressure up to 120 GPa: Toward understanding anisotropy in the lowermost mantle
3. 学会等名 Japan Geoscience Union meeting 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鎌戸 隆行, 東 真太郎, 岡崎 啓史, 藤崎 俊平, 黒澤 耕介, 玄田 英典
2. 発表標題 炭酸塩岩の高歪速度変形実験と衝突現象における降伏強度と昇温の推定
3. 学会等名 Japan Geoscience Union meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福原 大二郎, 東 真太郎, 片山 郁夫, 猿谷 友孝
2. 発表標題 低温環境における氷摩擦実験と火星内部レオロジー構造への応用
3. 学会等名 Japan Geoscience Union meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 夏井文凜, Eranga JAYAWICKRAMA, 野村龍一
2. 発表標題 近赤外線集光による回転式ダイヤモンドアンビルセルの高温技術開発
3. 学会等名 第64回高圧討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 夏井文凜, Jayawickrama Eranga, 野村龍一
2. 発表標題 近赤外線加熱法による回転式ダイヤモンドアンビルセルの高温条件の実現
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡崎雄祐, 東真太郎, 片山郁夫, 関根康人, 猿谷友孝
2. 発表標題 氷塩混合物を用いた低温摩擦実験から考察するエウロパのプレート境界強度
3. 学会等名 第64回高圧討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 夏井文凜, 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 河口沙織, 野村龍一, 太田健二
2. 発表標題 下部マントル圧力下大歪変形実験での(Mg,Fe)O多結晶体の結晶選択配向特性
3. 学会等名 第64回高圧討論会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 手塚海羽, 太田健二, 東真太郎, 荒井慧悟, 木村詠吉, 小場瑛介
2. 発表標題 地球科学への応用に向けたDACとNV センターによる高圧下の磁性・応力測定
3. 学会等名 第64回高圧討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 夏井文凜, 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 河口沙織, 野村龍一, 太田健二
2. 発表標題 回転式DACを用いた下部マントル圧力下大歪変形実験より検討するWustite多結晶体の変形特性
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡崎雄祐, 東真太郎, 片山郁夫, 関根康人, 猿谷友孝
2. 発表標題 氷塩混合物を用いた低温摩擦実験から考察するエウロパのプレート境界強度
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 夏井文凜, 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 野村龍一
2. 発表標題 下部マントル圧力下大歪変形実験でFeO多結晶体の結晶選択配向特性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石森慧也, 東真太郎, 上杉健太郎, 安武正展, 岡崎啓史, 夏井文凜, Jayawickrama Eranga
2. 発表標題 rDACを用いた高温高压大歪変形実験から推察する下部マントルにおけるMgOの結晶選択配向
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 東真太郎, 太田健二
2. 発表標題 固体地球科学と材料科学の融合における回転式ダイヤモンドアンビルセルが担える役割
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岡崎啓史, 東真太郎, 安武正展, 夏井文凜, 上杉健太郎, 富岡尚敬
2. 発表標題 rDACによるカンラン石多結晶体の大歪変形実験の予察的結果
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 夏井文凜, 東真太郎, 岡崎啓史, 上杉健太郎, 安武正展, 河口沙織, 野村龍一, 太田健二
2. 発表標題 下部マントル圧力下大歪変形実験より検討する (Mg, Fe) O多結晶体の結晶選択配向特性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会
4. 発表年 2024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
研究協力者	岡崎 啓史  (Okazaki Keishi)  (90784257)	広島大学・先進理工系科学研究科・准教授   (15401)	
研究協力者	野村 龍一  (Nomura Ryuichi)		

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
---------	---------