

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01965

研究課題名（和文）オリビンは一瞬で高密度化する：惑星物質の衝撃変成解明の新展開

研究課題名（英文）Olivine densifies instantly: new developments in understanding of shock metamorphism of planetary materials

研究代表者

富岡 尚敬 (TOMIOKA, Naotaka)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員

研究者番号：30335418

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：隕石はその母天体である小惑星同士の高速度衝突による衝撃圧縮により、構成鉱物一部が高密度化する。本研究では、オリビンの新高密度相であるイプシロン相を3つの隕石から発見した。透過電子顕微鏡観察とX線回折により、イプシロン相の産状が詳細に明らかになった。さらに、第一原理計算による熱力学的安定性の検証と高圧相転移実験により、同相の形成条件が制約された。これらの結果から、イプシロン相は隕石の新しい衝撃変成指標になる可能性が提示され、また、新鉱物ポワリエイトとして国際鉱物学連合により承認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、世界各国で「はやぶさ」、「はやぶさ2」を始めとする太陽系天体サンプルリターンが計画され、小惑星、彗星核、月などの表層から物質を地球に持ち帰り、詳細分析する研究が活発化している。オリビンはこれらの物質を構成する最も代表的な鉱物の一つであり、本研究で得られた同鉱物の衝撃（高圧）応答の知見は、天体相互衝突プロセスを細かく上で重要な基礎となる。従来、観測が主体だった惑星探査において、物質科学的視点から太陽系天体の衝突履歴に迫ることができる点に、本研究の学術的意義がある。また、高額予算を要するサンプルリターンの成果を最大化するための基盤的成果である点が社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：Meteoritic minerals are partially densified by shock compression caused by high-velocity collisions between their parent asteroids. In this study, the epsilon phase, a new high-density polymorph of olivine, was discovered in three meteorites. Transmission electron microscopy and X-ray diffraction revealed the detailed occurrence of the epsilon phase. In addition, first-principles calculations and high-pressure phase transition experiments have constrained the formation conditions of the epsilon phase. These results suggest that the epsilon phase may be a new shock indicator for meteorites. It has also been approved by the International Mineralogical Association as a new mineral, poirierite.

研究分野：鉱物学、惑星物質科学

キーワード：隕石 衝撃変成 高圧相転移 高圧実験 透過電子顕微鏡

## 1. 研究開始当初の背景

衝突現象は、惑星や小天体の形成と破壊、それらの表層構造をもたらす最も基礎的なプロセスの一つであり、多様な惑星の進化を理解するための鍵である。地球外物質である隕石には、46億年間の太陽系の歴史でおきた衝突の履歴が、構成鉱物の変形・溶融・相転移という組織として記録されている。石質隕石の最も主要な鉱物はオリビン（主成分  $Mg_2SiO_4$ ）である。オリビンは圧力の上昇に伴い高密度となり、10GPa(万気圧)以上でワズレアイト（準スピネル構造）、さらに高圧でリングウッダイト（スピネル構造）に相転移する。これらは衝撃変成を受けた始原的隕石と火星隕石から数多く報告されている（Miyahara et al. 2021 ほか）。オリビンの高圧相は地球深部の主要鉱物成分でもあることから、静的な高圧実験により状態図が確立され、それに基づいて衝撃変成の環境が推定されてきた。しかしその推定には下記の問題がある。

「実験室で衝突をつくる」研究は、火薬銃による衝撃実験が中心であった。この回収試料と隕石の組織との比較から、Stöffler ら(1991)は6段階の衝撃変成度を提案した。最も高い変成度の基準はオリビン高圧相で、その形成圧力は約45~75 GPaと推定された。しかし、この値は静的な高圧実験における安定条件（約12~26 GPa）に比べると著しく高い。この大きな矛盾の原因は、衝撃実験の試料サイズが太陽系小天体と比較して5桁以上も小さいためだと考えられる。衝撃圧縮では、最高到達圧力の保持時間は衝突体のサイズに比例する。そのため、室内実験での衝撃圧力時間（マイクロ秒）は、太陽系小天体衝突（ミリ~数秒）に対して極端に短く、高圧相の形成量が時間に強く依存する（Tomioka et al., 2010）。そして、衝撃実験で合成したオリビン高圧相を回収し、結晶学的な解析に至った例はこれまでない。

## 2. 研究の目的

最近、オリビン単結晶をレーザー衝撃圧縮し、X線自由電子レーザーを用いて圧縮中の結晶構造変化をその場観察する実験が行われた（Okuchi et al., 2021）。この測定では、オリビンは原子拡散を伴わないプロセスにより、わずか数ナノ秒で高密度構造への転移が進行することが回折パターンの時間変化から示された。この結果は、無拡散相転移が生じる物理化学条件を制約すれば、圧力保持時間に依存しない新しい衝撃変成度の指標が得られることを示唆している。

無拡散メカニズムを理解する際の鍵となるのが、オリビンの新高圧相「イプシロン相」である。同相は40年以上前に理論予測されたが（Madon and Poirier, 1982）、天然・合成試料いずれからも報告がなく、その存在が疑われていた。しかし最近、研究代表者は隕石中に同相を発見した（Tomioka and Okuchi, 2017）。イプシロン相は、ワズレアイトとリングウッダイトと同じスピネル族に属するが、基本構造単位の周期性に違いがある。一方、オリビンとイプシロン相の構造は、「酸素イオン充填層の積み重なり方は異なるが、層間の陽イオンの並び方は同じ」という共通点を持つ。この様に、イプシロン相の結晶構造はオリビンやその高圧相の全てと大きく類似し、各相の間の構造変化を中継する役割を果たし得る。したがって、イプシロン相の形成はオリビンの衝撃誘起相転移を理解する上で重要な基礎プロセスである。

本研究では、強い衝撃変成を受けたコンドライト隕石の鉱物学的記載、第一原理計算による計算機実験、圧力保持時間を十分にとることのできる静的な高圧実験をもとに、イプシロン相の形成条件（温度・圧力・差応力）を決定することを目的とした。

## 3. 研究の方法

隕石記載：Tenham(L6), Miami(H5), Suizhou(L6)コンドライト隕石を微細組織観察に用いた。Tenham, Miamiについては、集束イオンビーム（FIB）により、研磨薄片中でオリビンが高圧相転移した部位から超薄切片を作成し、透過電子顕微鏡（TEM）による微細組織観察を行った。Suizhou(L6)については、同様の部位を掘り出し、単結晶X線回折装置で測定し、SHELXL-97ソフトウェアを用いて結晶構造の精密化を行った。

第一原理計算：密度汎関数理論（DFT）に基づく第一原理計算により、 $Mg_2SiO_4$ 多形の相対エンタルピーを決定した。DFT計算は、Perdew-Burke-Ernzerhof汎関数とノルム保存型擬ポテンシャルを用いて、Quantum Espressoソフトウェアにより行った。

高圧実験：アリゾナ・サンカルロス産の $(Mg_{0.91}, Fe_{0.09})_2SiO_4$ オリビン単結晶を粉砕し、100  $\mu m$ 以下の不均一な粒径を持つ粉末とした。この粉末をMgOカプセルに封入し、川井型マルチアンビル装置により12-16 GPa、900  $^{\circ}C$ の圧力温度条件で120分間保持した。急冷減圧して回収した試料について、走査電子顕微鏡で全体組織の観察を行った後、オリビンの相転移境界部分をFIBで超薄切片に加工し、TEMによる微細組織観察を行った。

## 4. 研究成果

下記の成果に基づき、隕石中に初めて発見されたイプシロン相は、新鉱物ポワリエライトとして国際鉱物学連合によって承認された（Tomioka et al., 2021）。以下、イプシロン相をポワリエライトとして記述する。

Tenham と Miami コンドライトの衝撃溶融脈中では、母相のオリビンが取り込まれ、固相のまま粒径が  $1\ \mu\text{m}$  前後のリングウッドイト、ワズレイト粒子の集合体に高压相転移している。リングウッドイト粒内には、 $\{110\}$  面上に幅数 nm のポワリエライトのラメラが形成され、両鉱物は、 $\langle 110 \rangle_{\text{Rwd}} // a_{\text{Poi}} // b_{\text{Poi}}$ ,  $c_{\text{Rwd}} // c_{\text{Poi}}$  というトポタキシーを示した (Rwd: リングウッドイト、Poi: ポワリエライト)。一方、ワズレイト粒子は (010) 面上にポワリエライトラメラを示し、トポタキシーは  $a_{\text{Wds}} // a_{\text{Poi}}$ ,  $b_{\text{Wds}} // b_{\text{Poi}}$ ,  $c_{\text{Wds}} // c_{\text{Poi}}$  であった (Wds: ワズレイト) (図 1)。これらの結晶方位関係は、オリビン多形構造のトロポジー解析を元に指摘されたものと一致し、リングウッドイト、ワズレイト格子の剪断変形によるメカニズム (shear mechanism) により、ポワリエライトが形成されたことを示唆している。

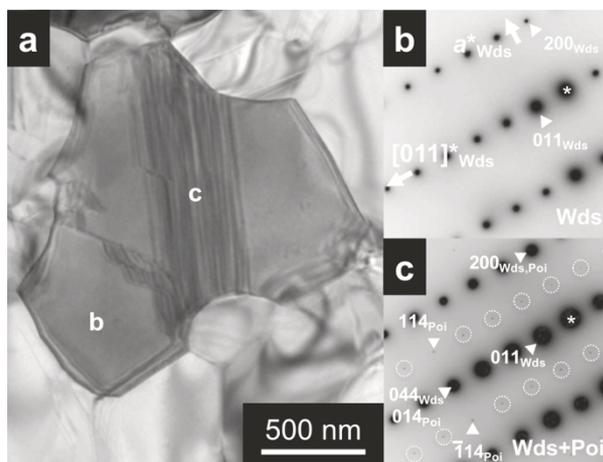


図 1 Miami コンドライト隕石のポワリエライトラメラを含むワズレイト (a) TEM 像。 (b, c) 図 1 a 中の b, c 領域からの電子線回折パターン。

Suizhou コンドライトにおいても、ポワリエライトはサブミクロンスケールと微細であり、単独での X 線回折は行えなかった。そこで、母相のリングウッドイト単結晶とトポタキシャルに共存するポワリエライトの 2 相に対して、同時に X 線結晶構造を行った。イプシロン相モデル (空間群  $Pmma$ ) を元に構造を精密化し得られたポワリエライトの格子定数は  $a = 5.802(11)\ \text{\AA}$ ,  $b = 2.905(9)\ \text{\AA}$ ,  $c = 8.411(16)\ \text{\AA}$  であり、準スピネル構造群では最小の単位格子を持つことが確認された。また、M サイトにおける Mg, Fe の席占有率から求めた化学式は  $(\text{Mg}_{1.96}\text{Fe}_{0.04})_2\text{SiO}_4$ 、密度は  $3.33\ \text{g/cm}^3$  であった。

DFT による計算では、0 K、0-20 GPa の圧力範囲において、ポワリエライトは  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  の多形の中で最も高いエンタルピーを持つことが明らかになった (図 2)。高温条件での相対エンタルピーは不明であるが、ポワリエライトは準安定相である可能性が高い。

相転移実験において、オリビン粒子は粒界にて部分的に高压相転移していた。12、14、16 GPa における生成相はそれぞれ、ワズレイト、ワズレイト+リングウッドイト、リングウッドイトであった。ワズレイト、リングウッドイトの粒径は  $0.5\text{-}1.5\ \mu\text{m}$  である。大半のリングウッドイト結晶粒子は、 $\{110\}$  上に積層欠陥を持つ。それらの電子回折パターンは、リングウッドイトの回折スポットに加えて、ポワリエライトに対応する微弱な回折スポットを示し、両相の結晶方位関係は、隕石で観察されたものと同じであった。いくつかのワズレイト粒子は (010) 面に積層欠陥を持つが、これまでの観察では、ポワリエライトの電子線回折スポットは見つかっていない。未反応のオリビン粒子内に高压相は一切みられず、塑性変形を示す転位のみが観察される。転位密度は  $1.4\text{-}2.1 \times 10^9/\text{cm}^2$  で、オリビン差応力計 (Kohlstedt et al., 1976) によると、 $0.5\text{-}0.6\ \text{GPa}$  の差応力に相当する。

以上の隕石試料と実験試料の微細構造および結晶学的観察結果から、14 GPa 以上の圧力にて、1000 °C 以下の温度条件にて、オリビンに高い差応力が加えられると、ナノスケールのポワリエライトを含むリングウッドイトに相転移することが明らかになった。ワズレイト中のポワリエライト形成条件については、引き続き実験的検討を行っている。

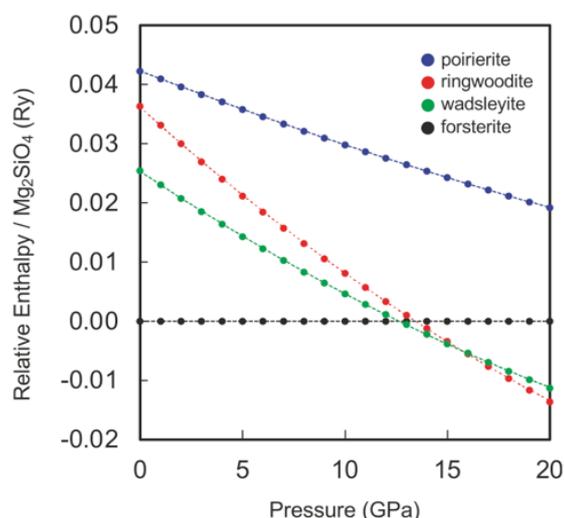


図 2 0 K における  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  多形の相対エンタルピー

## 参考文献

Kohlstedt, D. L., Goetze, C., and Durham, W. B. (1976) Experimental deformation of single crystal olivine with application to flow in the Mantle, in *Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*, 35–49.

Madon, M., and Poirier, J. P. (1983) Transmission electron microscope observation of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$   $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  in shocked meteorites: planar defects and polymorphic transitions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 33, 31–44.

Miyahara, M., Tomioka, N., and Bindi, L. (2021) Natural and experimental high-pressure, shock-produced terrestrial and extraterrestrial materials. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 59.

Okuchi, T., Seto, Y., Tomioka, N., Matsuoka, T., Albertazzi, B., Hartley, N. J., Inubushi, Y., Katagiri, K., Kodama, R., Pikuz, T. A., Purevjav, N., Miyanishi, K., Sato, T., Sekine, T., Sueda, K., Tanaka, K. A., Tange, Y., Umeda, Y., Togashi, T., Yabuuchi, T., Yabashi, M., and Ozaki, N. (2021). Ultrafast olivine-ringwoodite transformation during shock compression. *Nature Communications*, 12, 4305.

Stöffler, D., Keil, K., and E. R. D. Scott (1991) Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845–3867.

Tomioka, N., Kondo, H., Kunikata, A., and Nagai, T. (2010) Pressure-induced amorphization of albitic plagioclase in an externally heated diamond anvil cell. *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2010GL044221.

Tomioka, N. and Okuchi, T. (2017) A new high-pressure form of  $Mg_2SiO_4$  highlighting diffusionless phase transitions of olivine. *Scientific Reports*, 7, 17351.

Tomioka, N., Bindi, L., Okuchi, T., Miyahara, M., Iitaka, T., Li, Z., Kawatsu, T., Xie, X., Purevjav, N., Tani, R., and Kodama, Y. (2021) Poirierite, a dense metastable polymorph of magnesium iron silicate in shocked meteorites. *Communications Earth & Environment*, 2, 16.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Kurosawa, K., Ono, H., Niihara, T., Sakaiya, T., Kondo, T., Tomioka, N., Mikouchi, T., Genda, H., Matsuzaki, T., Kayama, M., Koike, M., Sano, Y., Murayama, M., Satake, W., Matsui, T.	4. 巻 127
2. 論文標題 Shock recovery with decaying compressive pulses: Shock effects in calcite (CaCO <sub>3</sub> ) around the Hugoniot elastic limit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	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) 10.1029/2021JE007133	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 Ito, M., Tomioka, N., and 100 co-authors	4. 巻 6
2. 論文標題 A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 1163 ~ 1171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01745-5	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 該当する

1. 著者名 Noguchi, T., Matsumoto T., Miyake, A., Igami, Y., Haruta, M., Saito, H., Hata, S., Seto, Y., Miyahara, M., Tomioka, N., and 100 co-authors	4. 巻 7
2. 論文標題 A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 170-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01841-6	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 該当する

1. 著者名 Ono, H., Kurosawa, K., Niihara, T., Mikouchi, T., Tomioka, N., Isa, J., Kagi, H., Matsuzaki, T., Sakuma, H., Genda, H., Sakaiya, T., Kondo, T., Kayama, M., Koike, M., Sano, Y., Murayama, M., Satake, W., Matsui, T.	4. 巻 50
2. 論文標題 Experimentally shock induced melt veins in basalt: Improving the shock classification of eucrites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2022GL101009	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 該当する

1. 著者名 Yamaguchi, A., Tomioka, N., and 32 co-authors	4. 巻 7
2. 論文標題 Insight into multi-step geological evolution of C-type asteroids from Ryugu particles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 398 ~ 405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-01925-x	査読の有無 無
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 Miyahara, M., Tomioka, N., Bindi, L.	4. 巻 8
2. 論文標題 Natural and experimental high-pressure, shock-produced terrestrial and extraterrestrial materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-021-00451-6	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 該当する

1. 著者名 Wittmann, A., Cavosie, A. J., Timms, N. E., Ferriere, L., Rae, A., Rasmussen, C., Ross, C., Stockli, D., Schmieler, M., Kring, D. A., Zhao, J., Xiao, L., Morgan, J. V., Gulick, S. P. S., the IODP-ICDP Expedition 364 Scientists (including Tomioka, N.)	4. 巻 575
2. 論文標題 Shock impedance amplified impact deformation of zircon in granitic rocks from the Chicxulub impact crater	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117201 ~ 117201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2021.117201	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 該当する

1. 著者名 Yoshida, M., Miyahara, M., Suga, H., Yamaguchi, A., Tomioka, N., Sakai, T., Ohfuji, H., Maeda, F., Ohira, I., Ohtani, E., Kamada, S., Ohigashi, T., Inagaki, Y., Kodama, Y., Hirao, N.	4. 巻 56
2. 論文標題 Elucidation of impact event recorded in the Iherzolitic shergottite NWA 7397	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meteoritics and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1729 ~ 1743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13735	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 Miyahara, M., Yamaguchi, A., Ohtani, E., Tomioka, N., Kodama, Y.	4. 巻 56
2. 論文標題 Complicated pressure-temperature path recorded in the eucrite Padvarninkai	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meteoritics and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1443 ~ 1458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13724	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 Okuchi, T., Seto, Y., Tomioka N., and 19 co-authors	4. 巻 12
2. 論文標題 Ultrafast olivine-ringwoodite transformation during shock compression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24633-4	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 該当する

1. 著者名 Zhang, A., Jiang, Q., Tomioka, N., Guo Y., Chen, J., Li, Y., Sakamoto, N., Yurimoto, H.	4. 巻 48
2. 論文標題 Widespread Tissintite in Strongly Shock Lithified Lunar Regolith Breccias	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL091554	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 該当する

1. 著者名 Tomioka, N., Bindi, L., Okuchi, T., Miyahara, M., Itaka, T., Li, Z., Kawatsu, T., Xie, X., Purevjav, N., Tani, R., Kodama, Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Poirierite, a dense metastable polymorph of magnesium iron silicate in shocked meteorites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-020-00090-7	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 該当する

1. 著者名 Miyahara, M., Yamaguchi, A., Saitoh, M., Fukimoto, K., Sakai, T., Ohfuji, H., Tomioka, N., Kodama, Y., Ohtani, E.	4. 巻 55
2. 論文標題 Systematic investigations of high-pressure polymorphs in shocked ordinary chondrites	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 2619-2651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13608	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 Kodama, Y., Tomioka, N., Ito, M., Imae, N.	4. 巻 115
2. 論文標題 Developments in microfabrication of mineral samples for simultaneous EBSD-EDS analysis utilizing an FIB-SEM instrument: study on an S-type cosmic spherule from Antarctica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 407-415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.181227	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 Fukimoto, K., Miyahara, M., Sakai, T., Ohfuji, H., Tomioka, N., Kodama, Y., Ohtani, E., Yamaguchi, A.	4. 巻 55
2. 論文標題 Back-transformation mechanisms of ringwoodite and majorite in the reheated ordinary chondrite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1749-1763
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13543	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 Cox, M. A., Erickson, T. M., Schmieder, M., Christoffersen, R., Ross, D. K., Cavosie, A. J., Bland, P. A., Kring, D. A., and the IODP-ICDP Expedition 364 Scientists (including Tomioka, N.)	4. 巻 55
2. 論文標題 High-resolution microstructural analysis of shock deformation in apatite from the peak ring of the Chicxulub impact crater	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1715-1733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13541	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 該当する

1. 著者名 Ito, M., Tomioka, N., Kodama, Y., Uesugi, K., Uesugi, M., Sakurai, I., Okada, I., Ohigashi, T., Yuzawa, H., Yamaguchi, A., Imae, N., Karouji, Y., Shirai, N., Yada, T., Abe, M.	4. 巻 72
2. 論文標題 The universal sample holders of microanalytical instruments of FIB, TEM, NanoSIMS, and STXM-NEXAFS for the coordinated analysis of extraterrestrial materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01267-2	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19件(うち招待講演 3件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 黒澤耕介、大野遼、Christopher Hamann、多田賢弘、新原隆史、三河内岳、富岡尚敬、境家達弘、近藤忠、Felix Kaufmann、鍵 裕之、玄田 英典、松崎 琢也、鹿山 雅裕、小池みずほ、佐野有司、村山雅史、佐竹渉、岡本尚也、松井孝典
2. 発表標題 減衰衝撃波を用いた衝撃回収実験: 大理石、花崗岩、玄武岩の衝撃変成
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 Tomioka Naotaka, Miyahara Masaaki, Bindi Luca, Okuchi Takuo
2. 発表標題 High-pressure minerals in planetary materials: Witnesses of asteroid impact events
3. 学会等名 23rd International Mineralogical Association General Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富岡尚敬、山口亮、伊藤元雄、上相真之、今栄直也、白井直樹、大東琢治、木村眞、Liu Ming-Chang、Greenwood Richard 他20名
2. 発表標題 小惑星リュウグウ表層粒子の衝撃変成
3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Okuchi Takuo, Tomioka Naotaka
2. 発表標題 Laser-driven shock experiments of planetary silicate minerals for finding evolution history of the solar system
3. 学会等名 2022 IUCr High-Pressure Workshop "Advanced High-Pressure Crystallography" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miyahara Masaaki, Noguchi Takaaki, Matsumoto Toru, Tomioka Naotaka, and 12 co-authors
2. 発表標題 Slickenside as a record of shock metamorphism on asteroid Ryugu
3. 学会等名 Hayabusa Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kurosawa Kosuke, Sato Masahiko, Ono Haruka, Tomioka Naotaka, Niihara Takafumi, Hasegawa Sunao
2. 発表標題 Temperature of granular materials immediately beneath the impact point
3. 学会等名 54th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大野遼、黒澤耕介、新原隆史、三河内岳、玄田英典、富岡尚敬、鹿山雅裕、小池みずほ、佐野有司、佐竹涉、松井孝典
2. 発表標題 玄武岩質岩石の衝撃溶融脈発生条件
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒澤耕介、玄田英典、東真太郎、岡崎啓史、大野遼、新原隆史、三河内岳、富岡尚敬、境家達弘、近藤忠、鹿山雅裕、小池みずほ、佐野有司、松崎琢也、村山雅史、佐竹渉、松井孝典
2. 発表標題 炭酸塩岩の高歪速度変形時の挙動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富岡尚敬
2. 発表標題 隕石中の高密度ケイ酸塩の形成過程解明にむけてのレーザー衝撃圧縮時間分解X線回折
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥地拓生、尾崎典雅、富岡尚敬、瀬戸雄介、兒玉了祐、宮西宏併、関根利守、梅田悠平、藪内俊毅
2. 発表標題 パワーレーザー/XFEL利用によるフォルステライトの高速相転移と高速融解
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富岡尚敬
2. 発表標題 高差応力下におけるカンラン石の無拡散高圧相転移メカニズム
3. 学会等名 第8回HiPeRシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kurosawa, H. Ono, T. Niihara, T. Mikouchi, T. Sakaiya, T. Kondo, N. Tomioka, H. Genda, T. Tada, R. Tada, M. Kayama, M. Koike, Y. Sano, T. Matsuzaki, M. Murayama, W. Satake, T. Okamoto, T. Matsui
2. 発表標題 Shock recovery of macro blocks of rocky materials with decaying shock waves
3. 学会等名 84th Annual Meeting of The Meteoritical Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naotaka Tomioka, Motoo Ito, Masayuki Uesugi, et al.
2. 発表標題 Transmission electron microscopy of Hayabusa2 particles: How shocked is asteroid Ryugu?
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Ono, K. Kurosawa, T. Niihara, T. Mikouchi, N. Tomioka, T. Okamoto, and T. Matsui
2. 発表標題 Shock effects in pre-heated basalt: Search for the criteria for producing mosaicism
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naotaka Tomioka, Takuo Okuchi, Luca Bindi, Masaaki Miyahara, Toshiaki Iitaka, Zhi Li, Xiande Xie, Narangoo Purevjav, Kiyoshi Fujino, Tetsuo Irifune, Riho Tani, Yu Kodama
2. 発表標題 A new olivine polymorph "poirierite" in shocked meteorites and its possible high-pressure synthesis conditions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤野清志、富岡尚敬、大藤弘明
2. 発表標題 分析電顕での定量分析における吸収補正の問題点
3. 学会等名 日本鉱物科学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富岡尚敬、Bindi Luca、奥地拓生、宮原正明、飯高敏晃、Li Zhi、河津勲、Xie Xiande、Purevjav Narangoo、谷理帆、兒玉優
2. 発表標題 Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> 第4の多形：コンドライト中の新鉱物ポワリエライト
3. 学会等名 日本鉱物科学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ono, K. Kurosawa, T. Niihara, T. Mikouchi, H. Genda, N. Tomioka, M. Kayama, M. Koike, Y. Sano, W. Satake, T. Matsui
2. 発表標題 Shock metamorphism in a quasi-open system II: Melt veins in basalt at shock stage 2
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kurosawa, H. Ono, T. Niihara, T. Mikouchi, N. Tomioka, H. Genda, T. Sakaiya, T. Kondo, M. Kayama, M. Koike, Y. Sano, W. Satake, T. Matsu
2. 発表標題 Shock metamorphism in a quasi-open system I: Undulatory extinction in calcite (CaCO <sub>3</sub> )
3. 学会等名 52nd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

High-Pressure Mineral Database  
<https://sites.google.com/site/highpmineral/>

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
研究分担者	河津 励  (Kawatsu Tsutomu)  (00447913)	横浜市立大学・生命ナノシステム科学研究科(八景キャンパス)・客員研究員   (22701)	
研究分担者	奥地 拓生  (Okuchi Takuo)  (40303599)	京都大学・複合原子力科学研究所・教授   (14301)	
研究分担者	宮原 正明  (Miyahara Masaaki)  (90400241)	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・准教授   (15401)	

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		
ドイツ	バイロイト大学		
中国	南京理工大学	広州地球化学研究所	