

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01140

研究課題名(和文) 衝突残留磁化を用いて探る惑星磁場の初期進化史

研究課題名(英文) Reconstruction of paleo-planetary field evolution based on shock remanent magnetizations

研究代表者

佐藤 雅彦 (Sato, Masahiko)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：50723277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：惑星の磁場強度変遷に関する情報は、惑星進化の理解において必要不可欠である。クレーター上空の磁場観測データから、地殻岩石の磁化記録を読み解く事で、衝突イベント時の惑星磁場強度を復元できると期待される。本研究では衝突残留磁化に着目し、衝突実験・磁化測定・衝撃計算に基づいて衝突残留磁化の空間分布モデルを構築し、得られた分布モデルを用いてクレーター上空での磁気異常を計算することに成功した。この成果により、衝突条件と古惑星磁場強度からクレーター上空での磁気異常分布を予測する事が可能となり、クレーター上空の磁場観測データと衝突イベント時の惑星磁場強度を結びつける事が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた衝突磁化分布モデルを用いる事で、クレーター上空の磁場観測データから衝突イベント時の惑星磁場強度を復元する事が可能となった。これまでの惑星探査による既存の磁場観測データに加えて、BepiColomboなどの将来的な探査により得られる観測データから、月・火星・水星などの地球型惑星の磁場強度変遷に関する情報が得られると期待される。地球型惑星の磁場進理解が大きく進展する事に加えて、磁場進化に基づいて惑星内部・表層環境・生命居住環境の進化など惑星システムの変遷理解も大きく進展すると期待される。

研究成果の概要(英文)：Knowledge on the evolution of magnetic field is key to understanding planetary evolution. The planetary field strength at the time of an impact event could be reconstructed by interpreting the remanence record of crustal rocks from the magnetic field observation data above craters. This study focuses on shock remanent magnetization and constructs a spatial distribution model of shock remanence based on impact experiments, remanence measurements, and impact simulations. Magnetic anomalies above the crater can be estimated using the obtained distribution model. This result enables us to predict the distribution of magnetic anomalies above the crater based on the impact conditions and the strength of the paleo-planetary field, and to link the magnetic field observation above the crater with the strength of the paleo-planetary field at the time of the impact event.

研究分野：Rock-magnetism

キーワード：衝突残留磁化 惑星磁場 磁気測定 衝突実験 惑星探査

1. 研究開始当初の背景

月・火星・水星などの地球型惑星では、惑星中心の液体金属核の対流により磁場が生成される。磁場強度の進化を知る事で、金属核対流状態や金属核-岩石マントル間の熱輸送進化などの内部ダイナミクス進化を知る事ができる。惑星磁場は生命活動に有害な宇宙線から表層を保護するため、磁場強度進化データは、惑星内部・表層環境・生命居住環境の進化解明において必須の情報である。地球の古磁場強度復元は、岩石試料を採取して、その残留磁化記録を測定する事で行われている。一方、月・火星・水星では、古惑星磁場強度復元に適した岩石試料の採取が困難なため、磁場強度進化に関するデータがほとんど得られていない事が重要な課題となっている[Tikoo & Evans 2022]。

惑星磁場強度進化を知るためには、古惑星磁場強度とその記録の年代情報が必要である。衝突盆地を形成するような衝突イベント時には、地殻岩石は急激な温度・圧力変化を経験するため、その変化に伴って岩石中の磁性鉱物が残留磁化(惑星磁場の記録)を獲得すると考えられている[Nagata 1971]。衝突イベントの年代は、クレーター年代から推定可能である。地殻岩石が獲得した残留磁化により発生する磁場は探査機により観測可能であるため、磁場観測データから古惑星磁場強度の記録を読み解く事が出来れば、地球型惑星の磁場強度進化史を復元する事ができると期待される。

磁場観測データから古惑星磁場強度を読み解くためには衝突残留磁化の空間分布の情報が必要不可欠であるが、これまでの研究ではその空間分布が得られていない点が大きな課題となっている。衝突残留磁化に関する過去の研究では、主にターゲットバルクでの磁化測定が行われ[Nagata 1971]、試料全体が記録している衝突残留磁化の評価が行われており、衝突残留磁化の空間変化評価はほとんど行われていない。板状の玄武岩試料をターゲットに用いた衝突実験試料を回収後に、衝突点からの距離が異なる位置で直径1インチのコア試料を採取・磁化測定を行った研究から衝突残留磁化の状態が空間分布を持つ事が報告されている[Šrnka et al. 1979]。近年では Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) による磁気顕微鏡を用いて、磁場中でレーザーショックを与えた玄武岩試料の磁気観察実験が報告されている[Gattacceca et al. 2010]。この測定では玄武岩試料内部での残留磁化強度は同程度で、衝突残留磁化は試料内部で一様であると結論されているが、ターゲットの内部では衝突現象の際に経験した温度・圧力変化に3次元的な構造が存在する事は明らかであり、それに伴い獲得した衝突残留磁化にも3次元的な構造が存在していると予想され、適切な再評価が必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、実験・計算により衝突残留磁化強度分布モデルを構築し、そのモデルを使って、地球型惑星の衝突クレーター上空での人工衛星による磁場観測データから惑星磁場強度記録を読み解き、地球型惑星の磁場強度進化を復元する事を目的とする。そのために、以下の項目を計画した。

- (1) 衝突残留磁化着磁実験
- (2) 衝突実験試料の残留磁化分布測定
- (3) 衝突磁化強度分布モデルの作成
- (4) 衝突盆地上空での人工衛星による磁場観測データ取得・解析
- (5) 衝突イベント時の古惑星磁場強度を復元

3. 研究の方法

実験試料

衝突実験には直径10 cm・長さ10 cmおよび直径8 cm・長さ8 cmの円柱形玄武岩試料を用いた。各種の磁気測定から実験に用いた玄武岩試料は、強磁性鉱物として主として細粒な単磁区チタノマグネタイト粒子を含んでいる事が確認されている。衝突実験に先立ち、円柱形玄武岩試料の保持する自然残留磁化を消磁するために、大型の交流消磁装置を用いて3軸方向・振幅80 mTでの交流消磁処理を行った。

衝突実験

衝突残留磁化の着磁実験は、宇宙科学研究所スペースプラズマ実験施設に導入されている二段式軽ガス銃を用いて行った。衝突磁化実験の概略図を図1に示す。チャンバー内に外径30 cm程度の大型磁気シールドを入れて外部磁場を遮蔽した。チャンバー内に設置後に測定した磁気シールド内部の磁場強度は300 nT以下であった。磁気シールド内にソレノイドコイルを設置し、コイルに電流を流す事で試料周辺磁場の制御を行った。コイル中央にターゲットを置いて衝突実験を行った。弾丸は直径2 mmのAl球および直径7 mmのポリカーボネイト球を使用した。弾丸速度は約1-7 km/s、外部磁場強度は0-400 μ Tと設定した。実験では、円柱上面に垂直に弾丸を衝突させ、外部磁場は円柱上面に垂直に印可した。

磁気測定

衝突実験後の試料から、クレーターと同心円状に円柱軸方向に、直径1インチの円柱形コア試

料を切り出した。クレーター中心を含むようにコア試料から厚さ約 3 mm のスラブを切り出し、スラブから約 3 mm × 3 mm × 3 mm の立方体へと細分化した。SQUID 磁力計 (Model 755, 2G Enterprise) を用いて立方体試料の残留磁化測定を行った。微小な立方体試料の測定にはケイ酸塩単結晶の磁気測定手法を用いた [Sato et al. 2015]。交流消磁装置 (DEC-95C, 夏原技研) を用いて、2-80 mT での段階交流消磁処理・残留磁化測定を行った。

衝突計算

数値衝突計算コード iSALE [Amsden et al., 1980; Ivanov et al., 1997; Wünnemann et al., 2006] を用いて実験と同条件の数値衝突計算を実行し、試料中の温度・圧力分布を求めた。3 mm 角の立方体領域で温度・圧力の平均値を計算して立方体試料の経験温度・圧力とした。

観測データ

人工衛星による磁場観測データとして、月 (SELENE, Lunar Prospector), 火星 (Mars Global Surveyor, MAVEN), 水星 (MESSENGER) の磁場観測データをデータベースから取得して解析に用いた。

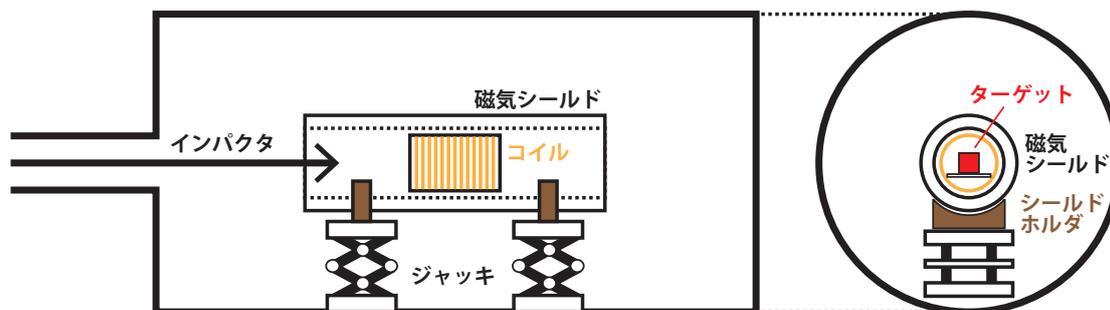


図 1. 衝突残留磁化実験の構成

4. 研究成果

① 衝突残留磁化空間分布の測定手法の開発

直径 10 cm・長さ 10 cm の円柱形玄武岩試料を用いた、衝突磁化着磁実験・回収試料の細分化・残留磁化測定の一連の実験手法開発に成功し、衝突残留磁化の残留磁化強度および残留磁化安定性を衝突点からの距離に応じて評価することが可能となった。さらに、衝突計算から求めた細分化試料の経験温度・圧力変化の値と磁気測定の結果と比較する事で、衝突残留磁化と温度・圧力変化の対応関係を調べる手法の確立に成功した。細粒なチタン磁鉄鉱を含む玄武岩に対しては、衝撃波伝搬時に経験した温度・圧力の値に応じて衝突残留磁化強度と安定性が系統的に変化する事が明らかになった (図 2) [Sato et al. 2021]。

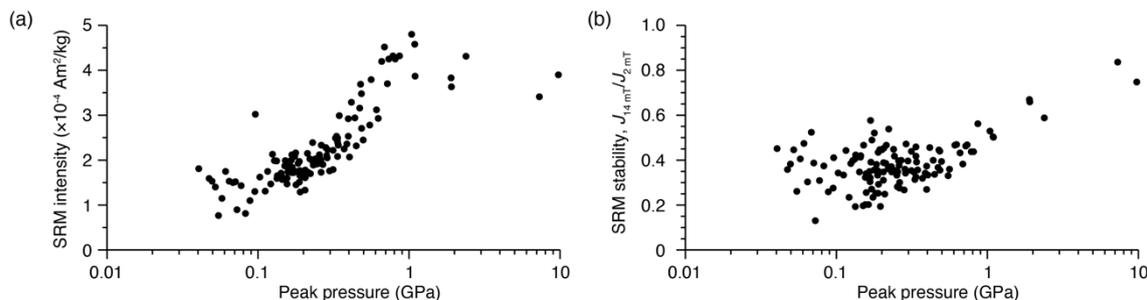


図 2. 圧力に対する衝突残留磁化の (a) 強度と (b) 安定性の変化。

② 衝突残留磁化強度の経験式の構築

直径 8 cm・長さ 8 cm の円柱形玄武岩試料を用いて、外部磁場 (100-400 μ T)・弾丸 (直径 2 mm Al 球および直径 7 mm PC 球)・速度 (1-7 km/s) の条件を変えた一連の実験を行い、それらの結果について比較・検討を行った。試料中に含まれる強磁性鉱物含有量の差異の影響を加味して、各円柱形試料の一部を用いて測定した非履歴性残留磁化の強度で衝突残留磁化の強度を規格化した。この規格化により、異なる円柱試料間での実験結果の正確な比較が可能となった。各ショットでの立方体試料を比較すると、衝突実験時に経験した最大圧力に対して衝突残留磁化の強度が系統的な変化を示している事が確認された。衝突点遠方では圧力変化に比例して衝突磁化強度が変化し、衝突点近傍では温度の影響が卓越し直線変化の傾向から外れている事が確認された。この傾向は、直径 10 cm・長さ 10 cm の円柱形玄武岩試料に対して、外部磁場 100 μ T・直径 2 mm Al 球・速度 7 km/s で衝突磁化実験を行った上述①の結果と整合的である。残留磁化強度を実験試料間で比較すると、経験した最大圧力・最高温度が同じ場合では同様な残留磁化強度を示す事が確認され、衝撃波伝搬時の圧力変化および温度変化が残留磁化獲得機構として支配的である事が明らかになった。また、弾丸種類を直径 2 mm の Al 球・弾丸速度を約 5 km/s と固定して、外部磁場を 100-400 μ T と変えた場合での比較を行った。外部磁場強度で規格化し

た残留磁化強度は同程度の値を示しており、 $400 \mu\text{T}$ 程度までの範囲では衝突残留磁化強度が外部磁場強度に比例する事が確認された。異なる温度・圧力および外部磁場強度に対する残留磁化強度の測定値を用いて、温度・圧力・外部磁場強度に対する衝突残留磁化強度の経験式を構築し、衝突磁化強度を衝撃波伝搬時の温度変化・圧力変化と外部磁場強度の関数として表現する事に成功した[Sato et al. 2024].

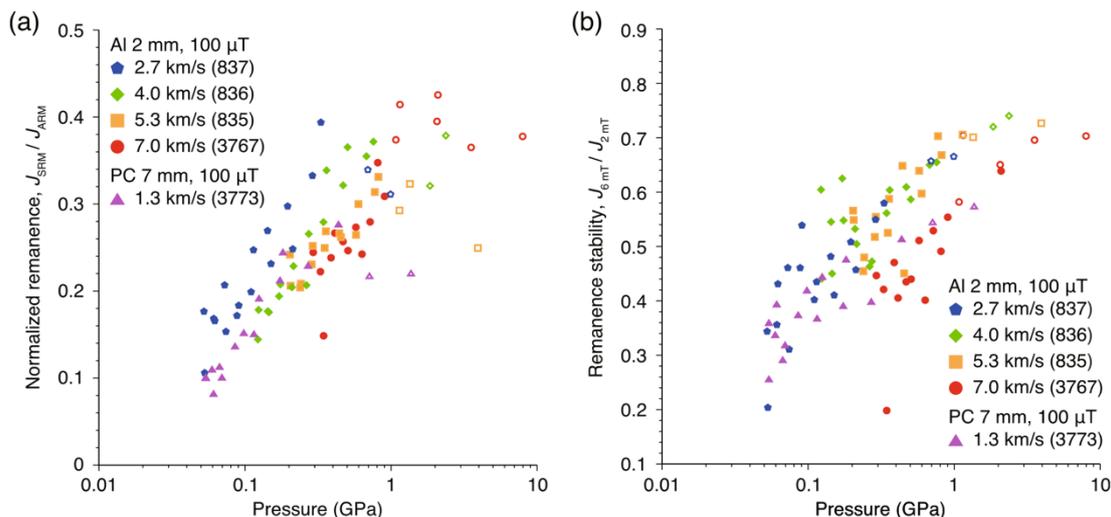


図 3. 圧力に対する衝突残留磁化の (a) 強度と (b) 安定性の変化.

③ クレーター形成に伴う衝突磁化分布と磁気異常の計算

異なる温度・圧力および外部磁場強度に対する残留磁化強度の測定値から構築した衝突残留磁化強度の経験式を用いる事で、衝突イベント時の惑星地殻岩石の圧力・温度変化および外部磁場強度から地殻残留磁化強度の分布を推定する事が可能となった。適当な条件の場合について、惑星の玄武岩質地殻に対して天体衝突時の衝撃波伝搬計算を行い、地殻岩石の温度・圧力変化を計算した (図 4a, 4b)。続いて衝突磁化強度の経験式を用いて地殻残留磁化 (図 4c) およびそれらの磁化分布が作る磁気異常 (図 4d) を計算するコードを作成した。

磁化分布について、(A) 温度変化の影響が卓越するクレーター近傍領域、(B) 温度変化が小さく衝突残留磁化の影響が卓越するクレーター遠方領域、の 2 領域に分けて、それぞれについて磁気異常の計算を行い、磁気異常全体に対する貢献を評価した。計算の結果、領域 A の熱残留磁化 (図 4d の TRM, 磁気双極子で近似すると 10 クレーター半径程度の深さに位置する) の寄与に対して、領域 B の衝突残留磁化 (図 4d の SRM, 磁気双極子で近似すると 63 クレーター半径程度の深さに位置する) がクレーター上空で観測される磁気異常に大きな貢献をする場合がある事を明らかにした[Sato et al. 2024].

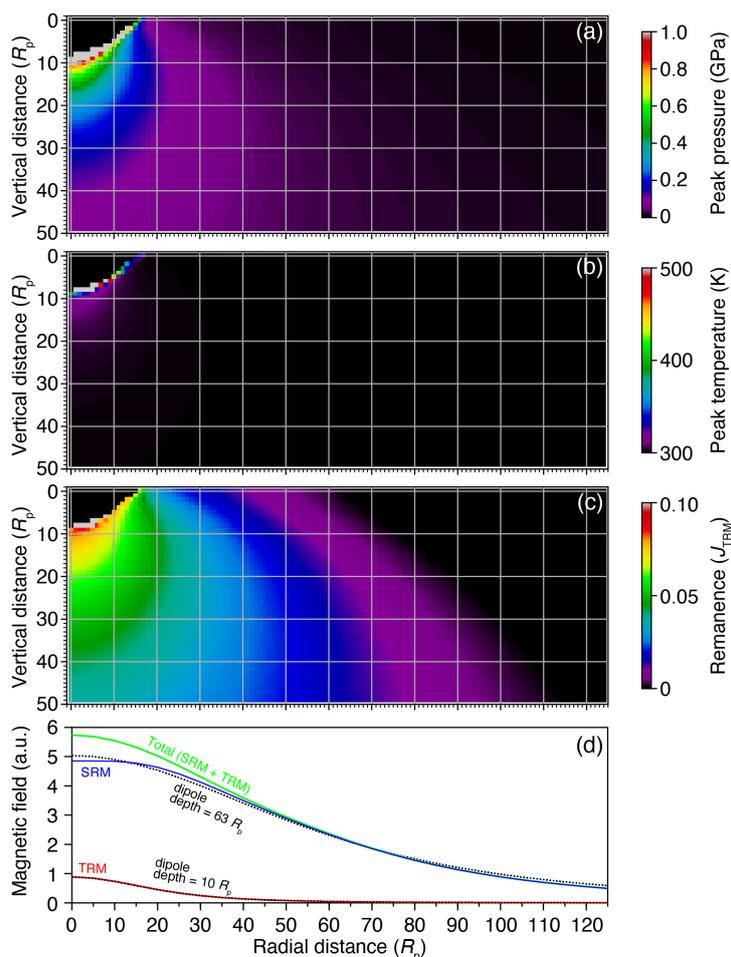


図 4. 衝突クレーター周辺での (a) 圧力変化の分布, (b) 温度変化の分布, (c) 衝突磁化の分布, および (d) クレーター上空での磁場観測値.

計算の結果、領域 A の熱残留磁化 (図 4d の TRM, 磁気双極子で近似すると 10 クレーター半径程度の深さに位置する) の寄与に対して、領域 B の衝突残留磁化 (図 4d の SRM, 磁気双極子で近似すると 63 クレーター半径程度の深さに位置する) がクレーター上空で観測される磁気異常に大きな貢献をする場合がある事を明らかにした[Sato et al. 2024].

今回作成した経験式および磁化分布・磁気異常の計算コードを用いる事で、天体衝突の条件と衝突イベント時の外部磁場条件に対して、クレーター上空で観測される磁気異常のフォワード計算を行う事が可能となった。人工衛星による磁場観測データについては、解析用データを取得して解析環境を構築済みであり、今後は、クレーター周辺での観測データを切り出してフォワード計算の結果と比較・検討する事で、衝突イベント時の古惑星磁場強度の推定を進める。

謝辞

本研究は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の共同利用制度を利用して実施されました。共同利用実験において実験補助をしていただいた寫生有理氏、木内真人氏、山本裕也氏に感謝致します。衝突実験での円柱型玄武岩試料内部の温度・圧力変化を計算するために数値衝突計算コード iSALE を用いています。iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen, Tom Davison の各氏に感謝いたします。

参考文献

- Amsden, A., Ruppel, H., & Hirt, C. (1980). SALE: A simplified ALE computer program for fluid flow at all speeds. In Los Alamos National Laboratories Report, LA - 8095 (p. 101).
- Gattacceca, J., Boustie, M., Lima, E., Weiss, B. P., de Resseguier, T., & Cuq-Lelandais, J. - P. (2010). Unraveling the simultaneous shock magnetization and demagnetization of rocks. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 182(1-2), 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2010.06.009>
- Ivanov, B. A., Deniem, D., & Neukum, G. (1997). Implementation of dynamic strength models into 2 - D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering. *International Journal of Impact Engineering*, 20(1 - 5), 411 - 430. [https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(97\)87511-2](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(97)87511-2)
- Nagata, T. (1971). Introductory notes on shock remanent magnetization and shock demagnetization of igneous rocks. *Pageoph*, 89, 159- 177. <https://doi.org/10.1007/bf00875213>
- Sato, M., Yamamoto, S., Yamamoto, Y., Okada, Y., Ohno, M., Tsunakawa, H., & Maruyama, S. (2015). Rock - magnetic properties of single zircon crystals sampled from the Tanzawa tonalitic pluton, central Japan. *Earth Planets and Space*, 67(1), 150. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0317-9>
- Sato, M., Kurosawa, K., Kato, S., Ushioda, M., & Hasegawa, S. (2021). Shock remanent magnetization intensity and stability distributions of single - domain titanomagnetite - bearing basalt sample under the pressure range of 0.1-10 GPa. *Geophysical Research Letters*, 48(8), e2021GL092716. <https://doi.org/10.1029/2021gl092716>
- Sato, M., Kurosawa, K., Hasegawa, S., & Takahashi, F. (2024). Effects of pressure and temperature changes on shock remanence acquisition for single - domain titanomagnetite - bearing basalt. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 129, e2023JE007864. <https://doi.org/10.1029/2023JE007864>
- Srnka, L., Martelli, G., Newton, G., Cisowski, S., Fuller, M., & Schaal, R. (1979). Magnetic field and shock effects and remanent magnetization in a hypervelocity impact experiment. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(1), 127-137. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(79\)90198-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(79)90198-5)
- Tikoo, S. M., & Evans, A. J. (2022). Dynamos in the inner solar system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 50(1), 99-122. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-102418>
- Wünnemann, K., Collins, G. S., & Melosh, H. J. (2006). A strain - based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets. *Icarus*, 180(2), 514 - 527. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.10.013>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Otto Katharina et al.	4. 巻 75
2. 論文標題 MASCOT 's in situ analysis of asteroid Ryugu in the context of regolith samples and remote sensing data returned by Hayabusa2	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-023-01805-8	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 Sato Masahiko et al.	4. 巻 127
2. 論文標題 Rock Magnetic Characterization of Returned Samples From Asteroid (162173) Ryugu: Implications for Paleomagnetic Interpretation and Paleointensity Estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2022JE007405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022JE007405	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 Nakamura Tomoki et al.	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 eabn8671
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.abn8671	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 Sato Tetsuro et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 Two-step movement of tsunami boulders unveiled by modified viscous remanent magnetization and radiocarbon dating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13011
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-17048-8	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 Sato Masahiko, Kurosawa Kosuke, Kato Shota, Ushioda Masashi, Hasegawa Sunao	4. 巻 48
2. 論文標題 Shock Remanent Magnetization Intensity and Stability Distributions of Single Domain Titanomagnetite Bearing Basalt Sample Under the Pressure Range of 0.1-10 GPa	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL092716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL092716	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 Hasegawa Sunao et al.	4. 巻 924
2. 論文標題 The Appearance of a "Fresh" Surface on 596 Scheila as a Consequence of the 2010 Impact Event	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac415a	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 Hasegawa Sunao et al.	4. 巻 916
2. 論文標題 Discovery of Two TNO-like Bodies in the Asteroid Belt	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac0f05	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 Kimura Yuki et al.	4. 巻 13
2. 論文標題 Visualization of nanoscale magnetic domain states in the asteroid Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-41242-x	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 Sato Masahiko, Kurosawa Kosuke, Hasegawa Sunao, Takahashi Futoshi	4. 巻 129
2. 論文標題 Effects of Pressure and Temperature Changes on Shock Remanence Acquisition for Single Domain Titanomagnetite Bearing Basalt	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2023JE007864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JE007864	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 Kato Chie, Usui Yoichi, Sato Masahiko	4. 巻 76
2. 論文標題 A brief review of single silicate crystal paleointensity: rock-magnetic characteristics, mineralogical backgrounds, methods and applications	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-024-01994-w	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 Kimura Yuki et al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Nonmagnetic framboid and associated iron nanoparticles with a space-weathered feature from asteroid Ryugu	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-024-47798-0	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 Hasegawa Sunao et al.	4. 巻 167
2. 論文標題 Candidate Main-belt Asteroids for Surface Heterogeneity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ad3045	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 Naotaka et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 A history of mild shocks experienced by the regolith particles on hydrated asteroid Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 669 ~ 677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-01947-5	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 Hamann Christopher, Kurosawa Kosuke, Ono Haruka, Tada Toshihiro, Langenhorst Falko, Pollok Kilian, Genda Hidenori, Niihara Takafumi, Okamoto Takaya, Matsui Takafumi	4. 巻 128
2. 論文標題 Experimental Evidence for Shear Induced Melting and Generation of Stishovite in Granite at Low (18GPa) Shock Pressure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2023JE007742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JE007742	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 Hasegawa Sunao et al.	4. 巻 939
2. 論文標題 Spectral Evolution of Dark Asteroid Surfaces Induced by Space Weathering over a Decade	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac92e4	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

〔学会発表〕 計46件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 田中ほか
2. 発表標題 Physical Properties of constituent material of the regolith of Ryugu
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤ほか
2. 発表標題 Paleomagnetic Dating on Tsunami Boulders from Tongatapu Island and Eua Island, the Kingdom of Tonga
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤ほか
2. 発表標題 Pressure, temperature, and magnetic field dependence of shock remanence properties of single-domain titanomagnetite
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村ほか
2. 発表標題 Magnetic domain structure of magnetite collected by the Hayabusa2 spacecraft
3. 学会等名 顕微鏡学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Nakamura et al.
2. 発表標題 ANALYSIS OF SAMPLES FROM ASTEROID RYUGU RETURNED BY HAYABUSA2
3. 学会等名 COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Tachibana et al.
2. 発表標題 Overview of initial analysis activity of Hayabusa2-returned sample from C-type near-Earth asteroid (162713) Ryugu
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kimura et al.
2. 発表標題 Magnetic Domain Structure of Magnetite Particles in the Return Sample from Asteroid Ryugu by the Hayabusa2 Mission
3. 学会等名 Microscopy and Microanalysis Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Tachibana et al.
2. 発表標題 INITIAL ANALYSIS ACTIVITY OF HAYABUSA2-RETURNED SAMPLES FROM C-TYPE NEAR-EARTH ASTEROID (162173) RYUGU
3. 学会等名 METSOC (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Nakamura et al.
2. 発表標題 ANALYSIS OF "STONE" SAMPLES FROM C-TYPE ASTEROID RYUGU
3. 学会等名 METSOC (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒澤ほか
2. 発表標題 Recovery of the shocked materials around the epicenter during hypervelocity impacts onto granular materials
3. 学会等名 地球化学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村ほか
2. 発表標題 小惑星リュウグウ試料の粗粒粒子分析結果
3. 学会等名 日本惑星科学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤ほか
2. 発表標題 Rock-magnetic and paleomagnetic studies of returned samples from asteroid (162173) Ryugu
3. 学会等名 日本惑星科学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李ほか
2. 発表標題 Unmixing magnetic mineral assemblages of a western equatorial Pacific sediment core subjected to reductive diagenesis
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤ほか
2. 発表標題 Viscous remanent magnetization and radiocarbon dating reveal the multiple movements of tsunami boulders on Ishigaki Island
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤ほか
2. 発表標題 Shock remanence distribution of single-domain titanomagnetite-bearing basalt sample
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Li et al.
2. 発表標題 Contribution of silicate-hosted magnetic inclusions to paleomagnetic signals recovered from a western equatorial Pacific sediment core subjected to reductive diagenesis
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sato et al.
2. 発表標題 Shock remanence distribution of single-domain titanomagnetite-bearing basalt sample: implications for magnetic anomaly over impact crater
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sato et al.
2. 発表標題 Rock-magnetic and paleointensity studies of returned samples from asteroid (162173) Ryugu
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤ほか
2. 発表標題 Hypervelocity Impacts on granular materials: Temperature Distribution near the Impact Point
3. 学会等名 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒澤ほか
2. 発表標題 Pressure and temperature dependence of shock remanence intensity
3. 学会等名 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kurosawa et al.
2. 発表標題 TEMPERATURE OF GRANULAR MATERIALS IMMEDIATELY BENEATH THE IMPACT POINT
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤雅彦、黒澤耕介、加藤翔太、潮田雅司、長谷川直
2. 発表標題 Shock remanent magnetization intensity and stability structures of single-domain titanomagnetite-bearing basalt sample
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 佐藤雅彦、黒澤耕介、加藤翔太、潮田雅司、長谷川直、高橋太
2. 発表標題 Basic properties of shock remanent magnetization for single-domain titanomagnetite
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤雅彦、黒澤耕介、長谷川直、加藤翔太、潮田雅司、高橋太
2. 発表標題 Pressure, temperature, and applied field dependence of shock remanence properties of single-domain titanomagnetite
3. 学会等名 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Tachibana et al. (incl. M. Sato)
2. 発表標題 REPRESENTATIVE SURFACE SAMPLES RETURNED FROM NEAR-EARTH C-TYPE ASTEROID (162173) RYUGU AND THEIR INITIAL ANALYSIS
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kimura et al. (incl. M. Sato)
2. 発表標題 MAGNETIC STRUCTURE OF FRAMBOIDAL MAGNETITE IN RETURNED SAMPLE FROM ASTEROID RYUGU
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Tanaka et al. (incl. M. Sato)
2. 発表標題 Physical properties of the returned sample of Ryugu by Hayabusa2 mission
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Nakamura et al. (incl. M. Sato)
2. 発表標題 EARLY HISTORY OF RYUGU ' S PARENT ASTEROID: EVIDENCE FROM RETURN SAMPLE
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kirschvinkほか
2. 発表標題 Searching for Primordial Dirac Magnetic Monopoles in a sample from Asteroid Ryugu returned by the Hayabusa2 mission
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Li, T. Yamazaki, M. Sato, J. Kuroda
2. 発表標題 Magnetic mineral assemblages of a marine sediment core subjected to reductive diagenesis and their contributions to paleomagnetic signals
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤哲郎, 山田昌樹, 佐藤雅彦, 浅香成哉
2. 発表標題 Viscous remanent magnetization unveils hidden tsunami record of boulders on Itogahama beach in Beppu Bay
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤哲郎ほか
2. 発表標題 Unlocking information about reworking movements of tsunami boulders from paleomagnetic dating
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒澤耕介, 佐藤雅彦, 大野遼, 富岡尚敬, 新原隆史, 長谷川直
2. 発表標題 Hypervelocity Impacts on granular materials: Temperature Distribution near the Impact Point
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤雅彦ほか
2. 発表標題 Rock-magnetic and paleomagnetic studies of returned samples from asteroid (162173) Ryugu
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤雅彦, 潮田雅司, 中田亮一, 田村裕二郎, 山本伸次, 小澤一仁, 高橋太
2. 発表標題 Intensity of the ancient Martian magnetic field estimated from the strong magnetic anomaly data: strong or weak dynamo field?
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村勇氣ほか
2. 発表標題 Magnetic Domain Structure and Formation Processes of Magnetic Minerals in the Asteroid fragments brought back by Hayabusa2
3. 学会等名 顕微鏡学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Li, T. Yamazaki, M. Sato, J. Kuroda
2. 発表標題 Different contributions to paleomagnetic signals subjected to diagenesis: Overlooked hematite vs. overstated magnetic inclusions
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤哲郎, 山田昌樹, 佐藤雅彦, 浅香成哉
2. 発表標題 Viscous remanent magnetization dating of reworked boulders from Beppu Bay
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤雅彦, 潮田雅司, 中田亮一, 田村裕二郎, 山本伸次, 小澤一仁, 高橋太, 坂田遼弥, 関華奈子
2. 発表標題 Strong magnetic anomalies record the weak dynamo field of ancient Mars
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kimura et al.
2. 発表標題 Electron holography observation of pseudo-magnetites and metallic iron nanoparticles in space weathered Ryugu sample
3. 学会等名 HAYABUSA2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Sowell et al.
2. 発表標題 Experimental Constraints on Dirac Magnetic Monopole Concentration in Primordial Material from Asteroid Ryugu
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Sato, M. Ushioda, R. Nakada, Y. Tamura, S. Yamamoto, K. Ozawa, F. Takahashi, R. Sakata, K. Seki
2. 発表標題 Estimation of the magnetic field intensity of ancient Mars using the magnetic anomaly data
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Sato et al.
2. 発表標題 Rock Magnetic Characterization of Returned Samples From Asteroid (162173) Ryugu
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木絢子, 長谷川直, 佐藤雅彦, 山本裕也
2. 発表標題 標的の強度境界付近にできる衝突クレーター
3. 学会等名 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 黒澤耕介, 佐藤雅彦, 大野遼, 富岡尚敬, 新原隆史, 長谷川直
2. 発表標題 粉体標的の衝突点近傍物質の無飛散回収
3. 学会等名 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 富岡尚敬ほか
2. 発表標題 Mild shock metamorphism experienced by surface particles of asteroid Ryugu
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023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
研究分担者	長谷川 直 (Hasegawa Sunao) (10399553)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任研究開発員 (82645)	
研究分担者	高橋 太 (Takahashi Futoshi) (20467012)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	黒澤 耕介 (Kurosawa Kosuke) (80616433)	千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員 (32503)	

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