

リュウグウの岩石試料が始原的な隕石より黒いわけ —隕石は大気と反応し「上書き保存」されて明るく変化した—

天野 香菜^{1) 2)}・中村 智樹¹⁾・松岡 萌³⁾・橘 省吾⁴⁾

※本稿は、2023年12月7日に行ったプレス発表 (https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20231207/pr20231207.html) を修整し転載したものです。

ポイント

- 小惑星探査機「はやぶさ2」^(注1)が小惑星リュウグウ^(注2)から回収した試料は地球大気と反応することが知られており、本成果では、試料の持つ宇宙の情報が地球の情報で「上書き」されないよう、試料を大気にさらさず反射スペクトル^(注3)を測定することに成功しました。
- リュウグウの岩石試料（以下、リュウグウ試料）は、リュウグウと同種の小惑星から地球に飛来した始原的^(注4)な隕石よりも圧倒的に黒いことがわかっていました。この原因を探るため、本成果では隕石を加熱・還元する実験を行い、隕石が地球大気に含まれる水や酸素と反応したことで宇宙にあった状態から反射スペクトルが大きく変化し明るくなったことを示しました。
- 今後、隕石の地球上での変質による反射スペクトルの変化を考慮することで、観測による小惑星構成物質の特定の精度を上げることができます。

概要

小惑星回収試料や隕石の反射スペクトルは、観測で得られる小惑星の反射スペクトルから小惑星の構成物質を特定するための手がかりとなります。

東北大学大学院理学研究科地学専攻の天野香菜大学院生（現、客員研究者）、中村智樹教授、国立研究開発法人産業技術総合研究所の松岡 萌研究員、東京大学大学院理学系研究科附属宇宙惑星科学機構・地球惑星科学専攻の橘省吾教授らの研究グループは、小惑星探査機はやぶさ2が小惑星リュウグウから回収した試料を地球大気と反応させないように工夫して反射スペクトルを測定しました。リュウグウ試料、リュウグウと同種の小惑星から飛来した隕石、および隕石を実験的に加熱した試料を比較し、隕石が地球大気の水や酸素と反応したことでその反射スペクトルが宇

宙にあった状態よりも明るく変化したことを示しました。本成果を踏まえ、隕石の地上での変質によって反射スペクトルがどのように変化するかを考慮することで、観測によって小惑星の構成物質を特定する精度の向上が期待されます。

本成果は2023年12月7日に米国科学振興協会(AAAS)が発行する学術誌 Science Advances に掲載されました。

研究の背景

太陽系の天体がどのように形成したかを解明するために鍵となるのが、惑星よりも小さな「小惑星」という天体です。小惑星を構成する鉱物や有機物は、太陽系の歴史のうちの最初期の情報を含んでいます。

太陽系に百万天体以上見ついている小惑星のそれぞれがどのような物質から構成されるかを明らかにすべく、望遠鏡や人工衛星を用いた小惑星の反射スペクトル観測が行われています。小惑星の反射スペクトルと、小惑星から飛来したとされる「隕石」を実験室で分析して得られた反射スペクトルを比較することで、小惑星の構成物質の特定が試みられています。

地上で入手できる隕石に対し、2020年に探査機はやぶさ2が小惑星リュウグウから地球に持ち帰ったリュウグウ試料は地球環境での変質を経験していない状態であり、隕石の分析だけではわからなかった宇宙空間での小惑星の姿が解明されつつあります。

リュウグウ試料の主成分は含水鉱物^(注5)であり、隕石の構成鉱物にもとづく分類に照らし合わせるとCIタイプの隕石（以下、CIタイプ隕石^(注6)）とよく似ているとされています（第1図）。ところが、両者の反射スペクトルを比較すると、リュウグウ試料はCIタイプ隕石よりずっと黒く、ヒトの目に見える波長域（可視波長域）の反射率にして2倍の差があります（第2図）。

1) 東北大学大学院 理学研究科 地学専攻 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

2) フランス国立自然史博物館 57 rue Cuvier 75005 Paris France

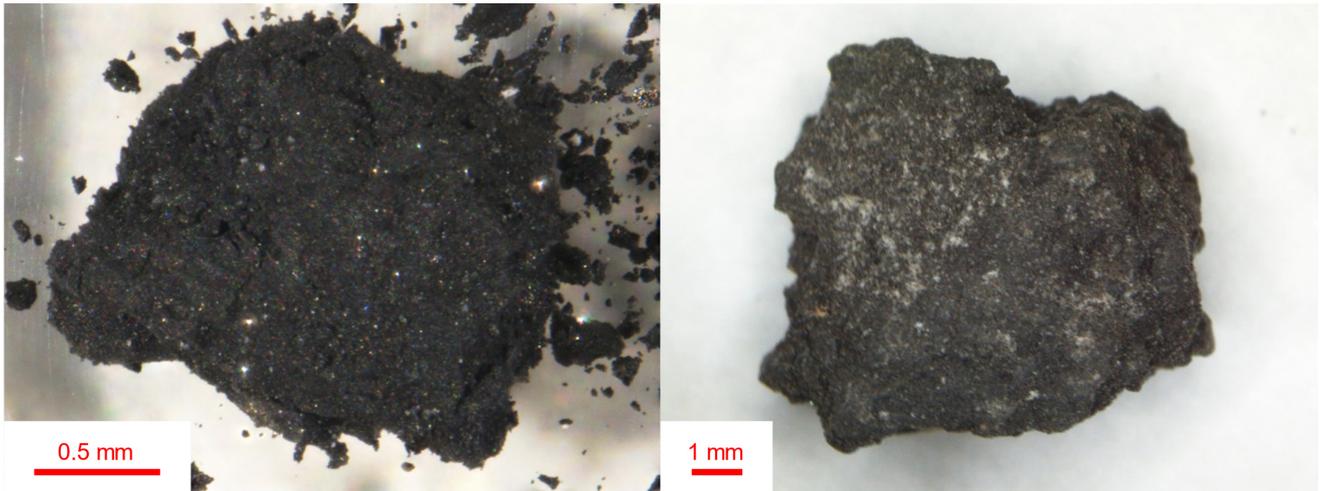
3) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

4) 東京大学大学院 理学系研究科附属宇宙惑星科学機構 〒113-0033 東京都文京区本郷7丁目3-1

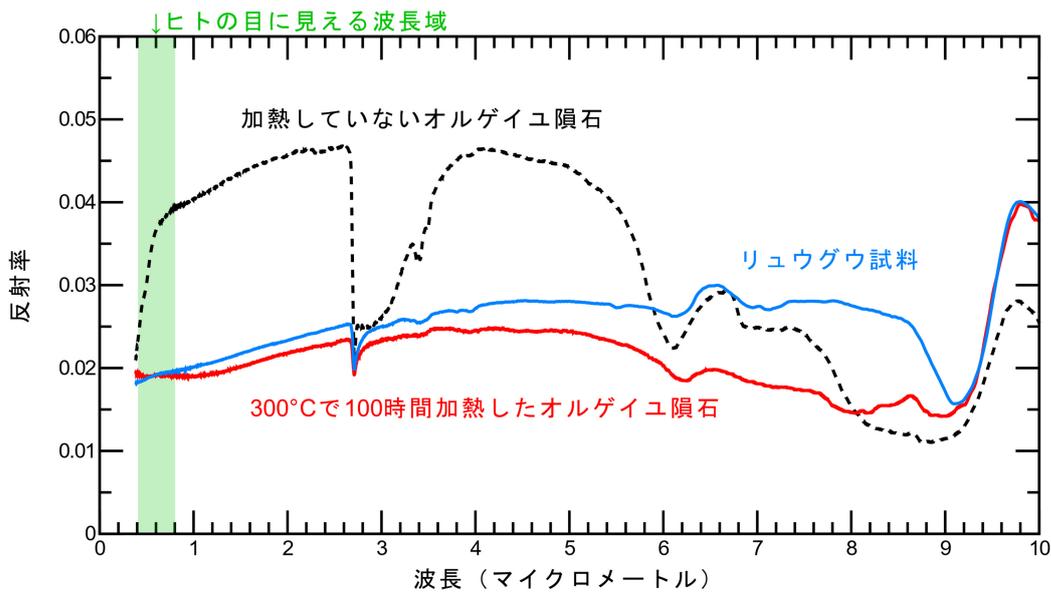
キーワード：物質科学, 分光学, 惑星科学, 小惑星, 隕石, はやぶさ2

リュウグウ試料

オルゲイユ隕石 (CIタイプ)



第1図 リュウグウ試料とオルゲイユ隕石 (CIタイプ) の写真。リュウグウ試料はオルゲイユ隕石に比べて暗い物質が大部分を占めている (左・JAXA, 右・著者撮影)。



第2図 リュウグウ試料 (グラフ中の青線), 加熱していないCIタイプ隕石 (黒の点線), 300°Cで加熱したCIタイプ隕石 (赤線) の反射スペクトル。リュウグウ試料と300°Cで加熱したCIタイプ隕石の反射スペクトルの特徴は全体的な反射率の低さ, 波長3ミクロン付近の特徴, 波長10ミクロン付近の特徴においてよく一致している。論文中の図5Aを改変。

一方で, CIタイプ隕石を実験的に500°Cで加熱してみるとリュウグウと同程度の暗い反射スペクトルを示すということが報告されています。しかし, 加熱後のCIタイプ隕石では含水鉱物が部分的に分解しており, 含水鉱物が分解していないリュウグウ試料とは異なる構成物質を持つといえます。

ここで生じた疑問は「リュウグウの構成鉱物はCIタイプ隕石に似ているにもかかわらず, なぜリュウグウの反射ス

ペクトルはCIタイプ隕石よりも圧倒的に黒いのか」という点です。その理由を突き止めるべく, 本研究ではリュウグウ試料とCIタイプの代表である1864年にフランスに落下したオルゲイユ隕石, さらにオルゲイユ隕石をさまざまな条件で実験的に加熱した試料の反射スペクトルを測定し, それら試料の構成鉱物を考慮に入れて互いに比較しました。

今回の取り組み

まず本研究チームは試料を地球大気に触れさせずに反射スペクトルを測定する方法を確立し、宇宙空間での姿に限りなく近い状態でのリュウグウ試料の反射スペクトル測定に成功しました。また、本研究チームはリュウグウ試料と比較するために、CI タイプ隕石を真空下かつ還元的な雰囲気においてさまざまな温度・時間条件で実験的に加熱しました。加熱後の試料もリュウグウ試料同様に地球大気にさらすことなく反射スペクトル測定を行いました。得られた反射スペクトルを比較した結果、300℃で加熱した試料が最もよくリュウグウの反射スペクトルの特徴を再現することがわかりました(第2図)。

加熱後の隕石試料の構成物質を調べると、300℃の実験的な加熱では含水鉱物が分解されないものの、含水鉱物に含まれる鉄の還元が起こっていることがわかりました。また、加熱によって非加熱のオルゲイユ隕石に含まれていた分子水が除去され、硫酸塩が脱水することがわかりました。このような300℃で加熱されたオルゲイユ隕石の構成鉱物の特徴は、リュウグウの構成鉱物の特徴とよりよく一致しています。先行研究の結果を踏まえると、リュウグウが過去に宇宙で300℃程度の加熱を受けたということではなく、オルゲイユ隕石などのCI タイプ隕石が地球環境に長らくさらされたことで含水鉱物中の鉄の酸化や地球の水の吸着、硫酸塩の生成などが起こり、今回の実験的な加熱によってそれらの地球での変質の影響が多少取り除かれたという説明がもっともらしいと考えられます。つまり、オルゲイユ隕石の反射スペクトルは1864年に地球に落下してから150年以上に及ぶ大気中の酸素や水分子との反応の末、地球環境の情報で「上書き保存」された状態であるといえます。隕石の分類に用いられる電子顕微鏡観察などの他の分析手法に比べて、反射スペクトル分析は始原的な隕石の地球での変質に特に敏感であるということが本研究から確認されました。

今後の展開

これまでCI タイプ隕石の母天体となる小惑星は、分光観測した場合にCI タイプ隕石のような比較的明るい反射スペクトルを示すと考えられていました。しかし、本研究によってその根拠となっていたCI タイプ隕石の反射スペクトルは地球大気との反応によって明るく変化した後のものであることが示され、CI タイプ隕石の母天体はむしろリュウグウのようにより暗い(黒い)反射スペクトルを示すこと

が示唆されました。

今回の研究結果は、地球上での隕石の変質によって隕石の反射スペクトルがいかに変化するかを実証するものであり、太陽系に数多く存在する小惑星のそれぞれがどのような物質から構成されるかを観測によって(すなわち実際に物質を実験室で分析することなく)精度よく特定するための手がかりを提供するものであるといえます。

謝辞: 本研究は日本学術振興会科研費補助金(課題番号JP21J13337, JP20H00188), および東北大学環境・地球科学国際共同大学院プログラム(GP-EES)の支援を受けて行われました。

論文情報

タイトル: Reassigning CI chondrite parent bodies based on reflectance spectroscopy of samples from carbonaceous asteroid Ryugu and meteorites

著者: Kana Amano^{*1}, Moe Matsuoka², Tomoki Nakamura¹, Eiichi Kagawa¹, Yuri Fujioka¹, Sandra M. Potin³, Takahiro Hiroi⁴, Eri Tatsumi⁵, Ralph E. Milliken⁴, Eric Quirico⁶, Pierre Beck⁶, Rosario Brunetto⁷, Masayuki Uesugi⁸, Yoshio Takahashi⁹, Takahiro Kawai⁹, Shohei Yamashita¹⁰, Yuma Enokido¹, Taiga Wada¹, Yoshihiro Furukawa¹, Michael E. Zolensky¹¹, Driss Takir¹², Deborah L. Domingue¹³, Camilo Jaramillo-Correa¹⁴, Faith Vilas¹³, Amanda R. Hendrix¹³, Mizuha Kikuri¹, Tomoyo Morita¹, Hisayoshi Yurimoto¹⁵, Takaaki Noguchi¹⁶, Ryuji Okazaki¹⁷, Hikaru Yabuta¹⁸, Hiroshi Naraoka¹⁷, Kanako Sakamoto⁵, Shogo Tachibana⁹, Toru Yada⁵, Masahiro Nishimura⁵, Aiko Nakato⁵, Akiko Miyazaki⁵, Kasumi Yogata⁵, Masanao Abe⁵, Tatsuaki Okada⁵, Tomohiro Usui⁵, Makoto Yoshikawa⁵, Takanao Saiki⁵, Satoshi Tanaka⁵, Fuyuto Terui¹⁹, Satoru Nakazawa⁵, Sei-ichiro Watanabe²⁰ and Yuichi Tsuda⁵.

*** 責任著者:** 東北大学大学院理学研究科 客員研究者 天野 香菜

- 1 東北大学
- 2 産業技術総合研究所
- 3 Delft University of Technology
- 4 Brown University
- 5 宇宙科学研究所
- 6 Université Grenoble Alpes

- 7 Université Paris-Saclay
- 8 高輝度光科学研究センター
- 9 東京大学
- 10 総合研究大学院大学・高エネルギー加速器研究機構
- 11 NASA/JSC
- 12 Jacobs, NASA/JSC
- 13 Planetary Science Institute
- 14 The Pennsylvania State University
- 15 北海道大学
- 16 京都大学
- 17 九州大学
- 18 広島大学
- 19 神奈川工科大学
- 20 名古屋大学

掲載誌：Science Advances

DOI：10.1126/sciadv.adi3789

URL: <http://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adi3789>

用語説明

注 1. 小惑星探査機「はやぶさ 2」

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) により運用されている小惑星探査機。地球の水や生命の起源の探求を目的とし、小惑星リュウグウの近傍観測と試料回収を行った。

注 2. 小惑星リュウグウ

太陽から遠い低温領域で形成された天体に由来を持ち、含水鉱物や有機物を含む小惑星。直径 900 メートルで大気を持たない。

注 3. 反射スペクトル

物質の表面に入射した光が反射される割合を波長ごとに分けて測ったデータのこと。小惑星の観測では太陽光がその光源となる。

注 4. 始原的

太陽系の形成初期から化学組成が大きく変化していない状態。母天体で強い加熱や溶融を経験していないことを指す。

注 5. 含水鉱物

構造中に水酸基 (OH 基) を含む鉱物。加熱によって脱水し、無水鉱物になる。

注 6. CI タイプ隕石

他のタイプの隕石よりも揮発性成分に富み、化学的に最も始原的な隕石とも呼ばれる。代表的なものとして 1864 年にフランスに落下したオルゲイユ隕石が挙げられる。

AMANO Kana, NAKAMURA Tomoki, MATSUOKA Moe, and TACHIBANA Shogo (2024) Ryugu samples illuminate terrestrial weathering effects on primitive meteorites?

(受付：2024 年 1 月 26 日)