

分野：自然科学系

キーワード：小惑星リュウグウ、ミュオン元素分析、太陽系組成、地球外物質、サンプルリターン、SDGs

小惑星リュウグウの石の平均的元素組成を決定 —素粒子ミュオンを用いた非破壊の元素分析に成功—

【研究成果のポイント】

- ◆ 小惑星リュウグウの石にミュオン非破壊元素分析法を適用しリュウグウの平均的元素組成を解明
- ◆ リュウグウの石の元素組成はこれまで最も始源的と言われていた隕石の組成と近いものの、酸素の含有量が明確に少ないことが判明
- ◆ 本成果により、今後太陽系固体物質の元素組成の基準が書き換わる可能性

❖ 概要

大阪大学放射線科学基盤機構附属ラジオアイソトープ総合センターの二宮和彦准教授、邱奕寰特任研究員(常勤)、大学院理学研究科の寺田健太郎教授は、小惑星リュウグウの石の初期分析において、ミュオン分析チーム^{※1}と協力して素粒子ミュオン(ミュオン、ミュー粒子ともいう)を用いた元素分析を J-PARC^{※2}で行い、その元素組成を非破壊で決定することに成功しました。ミュオン元素分析法は、同研究グループが世界に先駆けて開発してきた新しい分析手法です。試料内部に存在する生命の原料物質である炭素や窒素などの軽い元素を非破壊で定量する唯一と言っていい方法です。

分析の結果、リュウグウの石は太陽系の元素組成と最も近いと言われている隕石、CI コンドライトに近い組成であったものの、酸素の含有量が明確に少ないことが分かりました。この研究成果により、太陽系固体物質の元素組成の基準が新しく書き換わる可能性があります。

本研究成果を含む「はやぶさ 2」初期分析「石の物質分析チーム」^{※3}(代表 中村智樹 東北大教授)による研究成果は、9月22日(木)(アメリカ東部時間)(日本時間9月23日(金)午前3時)にアメリカ科学振興協会(AAAS)サイエンス(Science)誌に掲載されます。

また、本件については9月23日(金)に宇宙航空研究開発機構(JAXA)においてプレス発表が行われます。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)プレスリリース URL:

<https://www.jaxa.jp/press/2022/09/20220923-1.j.html>

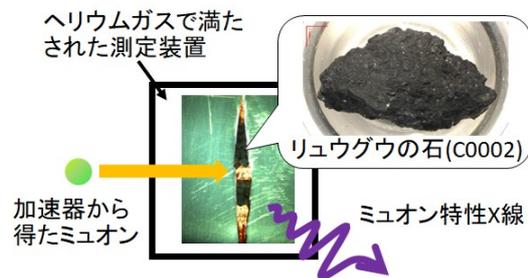


図1

ミュオン元素分析によるリュウグウの石の分析の概要。本研究では、リュウグウの石を地球の大気に触れさせることなく、非破壊で内部に含まれる元素を分析しました(リュウグウの石の画像提供:宇宙航空研究開発機構(JAXA))。

Press Release

❖ 研究の背景

2014年に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」は、炭素が多いC型小惑星のひとつ、リュウグウに向けて出発しました。2018年にはリュウグウの近傍に到達し、様々なリモート観測を行ったのち、リュウグウ上の2か所から試料(リュウグウの石)の採取を行いました。そして2020年12月、カプセルに封入された状態で想定を大きく上回る5.4gものリュウグウの石が地球で回収されました。一方、本学の研究グループは、はやぶさ2の打ち上げ以前の2012年頃から、小惑星リュウグウの軽元素の非破壊分析を目指し、ミュオンを用いた非破壊分析※4に取り組んできました。

このような背景のもと2021年から、国内外の研究者が参加する初期分析のプロジェクトが始まりました。リュウグウの石からもたらされると期待される情報は多岐にわたり、初期分析チームでは石の形状や元素分布、鉱物組成の分析など様々な研究が行われました。本学の研究グループは、リュウグウの石がどのような元素をどれだけ含んでいるのか、特にリュウグウの軽元素組成に興味を持って初期分析チームに参加しました。

太陽系誕生初期に形成され、それ以後宇宙空間を漂い続けていた小惑星は太陽系初期を知るタイムカプセルです。実際、小惑星から飛来し地球上で得られる隕石を分析することで、太陽系の平均的な元素組成を調べる研究がこれまで行われてきました。しかし隕石は、大気圏に突入した瞬間から地球大気に触れているので、酸化や物質の吸着といったことが起こります。そういう意味で、隕石の分析では我々は小惑星、すなわち初期の太陽系の本当の化学組成を知らない可能性があります。一度も地球大気に晒されていないリュウグウの石は、この目的に最適な試料です。

しかし一般に太陽系の始原物質はサブミリメートルからマイクロメートルの大きさの空間スケールで不均質です。つまり不均一性の問題を解決し平均的な化学組成を決定するためには、不均質さの空間スケールを超える大きさ(すなわち十分な体積)で分析する必要があり、これによりはじめて小惑星全体、さらには太陽系全体の元素組成を明らかにできます。しかし試料を損なわずに非破壊で、十分な量の組成分析を行うことはこれまで困難でした。

❖ 研究の内容

研究グループは、J-PARCにおいてミュオンを用いた元素分析法をリュウグウの石に適用しました。この方法は、加速器で量子ビームとして得られるミュオンを試料に打ち込み、出てくるミュオン特性X線を分析します。ミュオン特性X線は透過力が高いため、試料の内部の元素を非破壊で特定でき、貴重なリュウグウの石の分析において極めて有効な手段です。研究グループは、これまでミュオン元素分析法の開発において先端的な研究成果をあげてきており、小さなリュウグウの石に適用可能な実験システムを開発するなど、リュウグウの石への適用を見越した基礎研究を進めてきました(図2)。



図2
ミュオン分析チームと今回の研究で開発したリュウグウの石の分析のための測定システム

Press Release

2021年6月に初期分析研究の一環として、合計0.1グラムを超える10個のリウグウの石をJ-PARCに持ち込み、ミュオンによる元素分析が行われました。ミュオン特性X線を半導体検出器で検出し、図3に示すスペクトルが取得されました。特に**生命の材料物質である炭素、窒素、酸素**について、リウグウの石を損ねることなく検出することができたのは画期的な成果です。この分析に利用されたリウグウの石の重量はわずか0.1g程度です。しかし他の初期分析チームでは、これよりも少ない量のリウグウの石しか利用できていません。このような多くのリウグウの石を分析できたのは、ミュオン元素分析法が非破壊の方法で、その後の分析に悪影響を及ぼさないからです。そして多くのリウグウの石を使うことができたため、ミュオンによる分析の結果は小惑星リウグウの平均的な元素組成に最も近い値であると考えられます。

ミュオン非破壊分析によるリウグウの石の元素組成は、太陽系の固体物質の化学組成の基準となっているCIコンドライトという種類の隕石とおおむね似た組成をしていることが分かりました。これは、リウグウの石が太陽系において極めて始源的な物質であることを明確に示しています。さらに重要な結果として、**酸素のケイ素に対する存在量は、CIコンドライト隕石と比べ約25%少ないことが明らかになりました(図4)**。これはこれまで太陽系の化学組成の基準とされていたCIコンドライトが、地球物質の汚染を受けていた可能性を示唆しており、今後太陽系固体物質の元素組成の基準がこの分析結果に書き換わる可能性があります。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

この研究は、リウグウの石の初期分析の一環として行われました。研究グループはミュオン元素分析により、貴重な小惑星リウグウの石を損ねることなく、生命の材料物質である炭素や窒素などの元素分析に成功しました。非破壊で試料内部の平均的な組成の分析ができるのは、ミュオン元素分析法だけであり、研究グループが開発してきたこの方法が、今後計画されている小惑星ベンヌからのサンプルリターンや、火星の衛星フォボスから採取する試料など、希少な地球外物質の分析手法の一つとして確立していくことが期待されます。

ミュオンによる分析研究の成果としても2つの重要な知見が得られました。リウグウの石は太陽系で最も始源的と考えられてきたCIコンドライトに似ているということと、一方で酸素は明確に少ないという全く予想できていなかった結果の2つです。特に後者は、太陽系の固体物質の主成分元素組成の再考を迫る極めて大きな発見です。今回の結果はなぜ太陽系の地球という星で生命が誕生したのか、その理由に迫る重要なヒントを与えることになるでしょう。

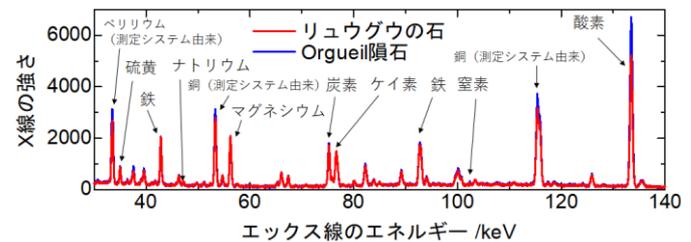


図3

リウグウの石と標準試料として測定したCIコンドライト(Orgueil)から得られたミュオン特性X線のスペクトル。リウグウの石から得られたミュオン特性X線は、はCIコンドライトと極めて近く、これらが互いに近い元素組成を持っていることを示している。

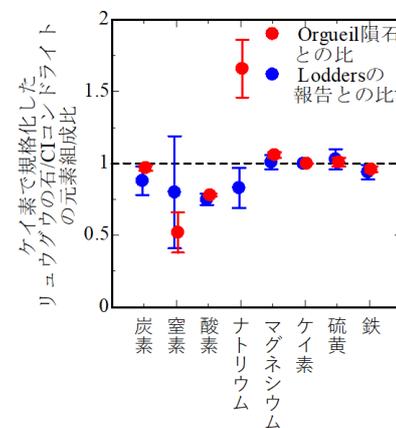


図4

リウグウの石とCIコンドライトの元素組成の比較。比較においてはケイ素のX線強度で規格化した。同じ実験装置で測定したCIコンドライトであるOrgueilとCIコンドライトの元素組成の文献値(K. Lodders, The Astrophysical Journal, 591, 1220-1247, 2003)と比較したところ、予想していなかったことに、リウグウの石は酸素のX線強度が低く、酸素の含有率はCIコンドライトより約25%低いことが明らかになった。

Press Release

❖ 特記事項

ミュオン元素分析研究を含む、初期分析全体の成果は、2022年9月23日(金)3時(日本時間)にアメリカ科学振興協会(AAAS)の「サイエンス(Science)」(オンライン)に掲載されます。

タイトル: “Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples ”

著者名: T. Nakamura, M. Matsumoto, K. Amano, Y. Enokido, M. E. Zolensky, T. Mikouchi, H. Genda, S. Tanaka, M. Y. Zolotov, K. Kurosawa, S. Wakita, R. Hyodo, H. Nagano, D. Nakashima, Y. Takahashi, Y. Fujioka, M. Kikuri, E. Kagawa, M. Matsuoka, A. J. Brearley, A. Tsuchiyama, M. Uesugi, J. Matsuno, Y. Kimura, M. Sato, R. E. Milliken, E. Tatsumi, S. Sugita, T. Hiroi, K. Kitazato, D. Brownlee, D. J. Joswiak, M. Takahashi, K. Ninomiya, T. Takahashi, T. Osawa, K. Terada, F. E. Brenker, B. J. Tkalcec, L. Vincze, R. Brunetto, A. Aléon-Toppani, Q. H. S. Chan, M. Roskosz, J.-C. Viennet, P. Beck, E. E. Alp, T. Michikami, Y. Nagaashi, T. Tsuji, Y. Ino, J. Martinez, J. Han, A. Dolocan, R. J. Bodnar, M. Tanaka, H. Yoshida, K. Sugiyama, A. J. King, K. Fukushi, H. Suga, S. Yamashita, T. Kawai, K. Inoue, A. Nakato, T. Noguchi, F. Vilas, A. R. Hendrix, C. Jaramillo-Correa, D. L. Domingue, G. Dominguez, Z. Gainsforth, C. Engrand, J. Duprat, S. S. Russell, E. Bonato, C. Ma, T. Kawamoto, T. Wada, S. Watanabe, R. Endo, S. Enju, L. Riu, S. Rubino, P. Tack, S. Takeshita, Y. Takeichi, A. Takeuchi, A. Takigawa, D. Takir, T. Tanigaki, A. Taniguchi, K. Tsukamoto, T. Yagi, S. Yamada, K. Yamamoto, Y. Yamashita, M. Yasutake, K. Uesugi, I. Umegaki, I. Chiu, T. Ishizaki, S. Okumura, E. Palomba, C. Pilorget, S. M. Potin, A. Alasli, S. Anada, Y. Araki, N. Sakatani, C. Schultz, O. Sekizawa, S. D. Sitzman, K. Sugiura, M. Sun, E. Dartois, E. De Pauw, Z. Dionnet, Z. Djouadi, G. Falkenberg, R. Fujita, T. Fukuma, I. R. Gearba, K. Hagiya, M. Y. Hu, T. Kato, T. Kawamura, M. Kimura, M. K. Kubo, F. Langenhorst, C. Lantz, B. Lavina, M. Lindner, J. Zhao, B. Vekemans, D. Baklouti, B. Bazi, F. Borondics, S. Nagasawa, G. Nishiyama, K. Nitta, J. Mathurin, T. Matsumoto, I. Mitsukawa, H. Miura, A. Miyake, Y. Miyake, H. Yurimoto, R. Okazaki, H. Yabuta, H. Naraoka, K. Sakamoto, S. Tachibana, H. C. Connolly Jr., D. S. Laurretta, M. Yoshitake, M. Yoshikawa, K. Yoshikawa, K. Yoshihara, Y. Yokota, K. Yogata, H. Yano, Y. Yamamoto, D. Yamamoto, M. Yamada, T. Yamada, T. Yada, K. Wada, T. Usui, R. Tsukizaki, F. Terui, H. Takeuchi, Y. Takei, A. Iwamae, H. Soejima, K. Shirai, Y. Shimaki, H. Senshu, H. Sawada, T. Saiki, M. Ozaki, G. Ono T. Okada, N. Ogawa, K. Ogawa, R. Noguchi, H. Noda, M. Nishimura, N. Namiki, S. Nakazawa, T. Morota, A. Miyazaki, A. Miura, Y. Mimasu, K. Matsumoto, K. Kumagai, T. Kouyama, S. Kikuchi, K. Kawahara, S. Kameda, T. Iwata, Y. Ishihara, M. Ishiguro, H. Ikeda, S. Hosoda, R. Honda, C. Honda, Y. Hitomi, N. Hirata, N. Hirata, T. Hayashi, M. Hayakawa, K. Hatakeda, S. Furuya, R. Fukai, A. Fujii, Y. Cho, M. Arakawa, M. Abe, S. Watanabe, Y. Tsuda

DOI: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn8671>

なお、本研究は文部科学省 科学研究費助成事業 新学術領域研究 (2018-2022)「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」の一環として実施されました(課題番号 18H05457, 18H05460, 18H05463, 18H05464)。また、実験は KEK 物構研ミュオン共同利用課題 2019MS01 として実施されました。

Press Release

❖ 用語説明

※1 ミュオン分析チーム

リュウグウの石にミュオン元素分析を行うために、以下のメンバーにより構成された研究チーム。本学二宮准教授は、このチームのリーダーを務めました。

(ミュオン分析チームメンバー)

- 大阪大学 二宮和彦准教授、寺田健太郎教授、邱奕寰特任研究員(常勤)
- 東北大学 中村智樹教授、和田大雅大学院生
- 高エネルギー加速器研究機構(KEK) 三宅康博名誉教授、梅垣いづみ助教、竹下聡史助教、下村浩一郎教授
- 日本原子力研究開発機構 大澤崇人研究主幹
- 東京大学 高橋忠幸教授、長澤俊作大学院生、武田伸一郎助教、桂川美穂特任研究員、南喬博大学院生
- 京都大学 谷口秋洋准教授
- 国際基督教大学 久保謙哉教授
- 航空宇宙科学開発機構 渡辺伸准教授
- 東京藝術大学 水本和美非常勤講師
- 理化学研究所 東俊行主任研究員

※2 J-PARC

茨城県東海村に設置された、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が茨城県東海村で共同運営している大型研究施設。正式名称は大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex: J-PARC)。J-PARC 内の物質・生命科学実験施設では、世界最高強度のパルスミュオンビームが利用でき、元素分析研究だけでなく物質開発研究や素粒子物理学研究など、様々な研究が行われています。

※3 「はやぶさ 2」初期分析「石の物質分析チーム」

小惑星探査機「はやぶさ 2」で回収された試料は、まず JAXA において試料情報の整理(phase-1 キュレーション)が行われたのち、一部の試料が初期分析用に配分されました(phase-2 キュレーション)。はやぶさ 2 初期分析チームは phase-2 の初期分析を担当しており、国内外の 150 名以上の研究者が参画し様々な先端的な分析を実施しています。ミュオン分析チームは、初期分析チームを構成する6つのサブチームの一つ「石の物質分析チーム」に所属しています。

※4 ミュオンを用いた非破壊分析

素粒子ミュオンを分析試料に打ち込むことで得られる、非常に高いエネルギーの X 線(ミュオン特性 X 線)を利用して元素を特定、定量する方法。本学では、これまでミュオン元素分析研究において、世界をリードする成果をあげています。関連する研究として以下のものがあります。

- 人類が手にする物質を透視する新しい“眼”

<https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2014/20140527.1>

- 素粒子ミュオンの連続ビームによる、太陽系誕生時の有機物を含む隕石の非破壊分析に成功!

<https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2017/20171113.1>

Press Release

- 緒方洪庵が遺した“開かずの薬瓶” 非破壊で解明 ミュオンビームによる医療文化財の分析に成功

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210317_1

- 素粒子ミュオンを用いた非破壊三次元元素分析に成功 量子ビーム技術と宇宙観測検出器の出会いによる新技術開発

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2022/20220426_1

【寺田教授のコメント】

「生命の根源の解明」を大目標とする小惑星リュウグウ探査では、生命の材料物質である炭素・窒素・酸素の定量分析が鍵です。大阪大学では「はやぶさ2」の打ち上げ前の2012年頃から、リュウグウ試料の分析を目指し、炭素質隕石のミュオン非破壊分析に取り組んできました。はやぶさ2が期待以上の大量のサンプルを地球に持ち帰ったおかげで、炭素のみならず微量である窒素も定量できたことは望外の喜びでした。また「始原的でありながら主成分である酸素が、従来考えられていた組成よりも25%も枯渇している」という発見には、私もふくめ世界中の研究者が驚きました。このような大きな成果を得るには本当にたくさんの方々の方々の協力が必要でした。ここに深く感謝いたします。

❖ SDGs目標



❖ 参考 URL

二宮和彦准教授 研究者総覧 URL

<https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/3701ebce92e1397c.html>

寺田健太郎教授 研究者総覧 URL

<https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/de0135e16e1c4f30.html>

JAXA プレスリリース URL https://www.jaxa.jp/press/2022/09/20220923-1_j.html

KEK プレスリリース URL <https://www.kek.jp/ja/press/202209231030muon/>

❖ 本件に関する問い合わせ先

<ミュオンを用いた非破壊元素分析について>

大阪大学 放射線科学基盤機構 ラジオアイソトープ総合センター

准教授 二宮和彦(にのみやかずひこ)

TEL: 06-6850-6103 FAX: 06-6850-6104

E-mail: ninomiya@rirc.osaka-u.ac.jp

<小惑星リュウグウの研究に関して>

大阪大学 大学院理学研究科

教授 寺田健太郎(てらだけんたろう)

TEL: 06-6850-5495 FAX: 06-6850-5480

E-mail: terada@ess.sci.osaka-u.ac.jp



国立大学法人 大阪大学

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-1

TEL: 06-6877-5111 (代)

www.osaka-u.ac.jp

Press Release

<広報・報道に関して>

大阪大学 理学研究科 庶務係

TEL: 06-6850-5280 FAX: 06-6850-5288

E-mail: ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp

大阪大学 工学研究科 総務課 評価・広報係

TEL: 06-6879-7231 FAX: 06-6879-7210

E-mail: kou-soumu-hyoukakouhou@office.osaka-u.ac.jp