

2022年9月23日

報道関係者各位

高エネルギー加速器研究機構
J-PARC センター
日本原子力研究開発機構

宇宙航空研究開発機構ほか記者発表

[「小惑星探査機『はやぶさ2』初期分析 石の物質分析チーム
研究成果の科学誌『Science』論文掲載について」](#)
に記載のミュオン分析についてご紹介します。

素粒子ミュオンにより非破壊で 小惑星リュウグウの石の元素分析に成功 — 太陽系を代表する新たな標準試料となる可能性 —

本研究成果のポイント

- 小惑星リュウグウの石の初期分析に大強度陽子加速器施設（J-PARC）^{※1}のミュオン^{※2}元素分析法を適用した
- およそ 0.1 g の試料の非破壊分析を行い、リュウグウの石の平均的組成が明らかに
- これまで最も始原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

ミュオン分析を待つ リュウグウの石

リュウグウの石は白丸で囲んだ部分にあり、銅箔に包まれている。分析時は銀色のホルダーから外されて試料以外は銅のみの空間に。



【概要】

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所の三宅康博名誉教授、梅垣いづみ助教、竹下聡史助教と日本原子力研究開発機構 (JAEA) の大澤崇人研究主幹は、大阪大学の二宮和彦准教授、寺田健太郎教授、邱奕寰特任研究員、東京大学の高橋忠幸教授、長澤俊作大学院生、京都大学の谷口秋洋准教授、国際基督教大学の久保謙哉教授、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所の渡辺伸准教授、東北大学の中村智樹教授 (「はやぶさ2」初期分析「石の物質分析チーム」^{*3}代表)、和田大雅大学院生らと、ミュオン分析チーム^{*4}としてミュオンを用いた元素分析法を小惑星リュウグウの石に適用し、非破壊でその元素組成を明らかにすることに成功しました。リュウグウの石の組成は、これまで最も始原的な物質であると言われていた隕石と近い組成を示す一方で、これらの隕石と比べて酸素の含有量が明らかに少ないことが分かりました。

ミュオンを用いた元素分析法は、研究グループが大強度陽子加速器施設 (J-PARC) において世界に先駆けて開発してきた新しい分析手法で、分析することが難しい生命の材料である炭素や窒素などの軽い元素を非破壊で定量することができます。

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」(代表 中村智樹 東北大学教授) による全体の研究成果は、9月22日(木) (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) 誌に掲載されました。 https://www.jaxa.jp/press/2022/09/20220923-1_j.html

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、J-PARC 物質生命科学実験施設 MLF において高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所ミュオン共同利用実験課題 2019MS01 として実施されました。

【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5.4 gの貴重な試料が地球で回収されました。

2021年6月から、国内外の研究者が参加する初期分析のプロジェクト「はやぶさ2」初期分析チーム (研究統括: 東京大学 橋省吾教授) が試料の分析を開始しました。リュウグウの石 (およそ1 mm以上の粒子) 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。ミュオン分析チームは、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、その元素組成に興味を持って初期分析チームの「石の物質分析チーム」に参加しました。

太陽系の形成の初期に小惑星も形成されたとすると、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の平均的な元素組成の情報を保持していると考えられます。これまで、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、太陽系の元素組成を調べる研究が行われてきました。しかし隕石は、大気圏に突入したときから地球大気による汚染が始まります。そういう意味で、人類は小惑星の本当の化学組成を知らない可能性があります。

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。一度も地球大気に晒されていない、より大きな試料の平均的な化学組成を分析することができれば、不均一性の問題を解決することができ小惑星全体、さらには太陽系全体の元素組成を明らかにできる可能性があります。しかしこのような分析を、試料を損なわずに非破壊で行うことは困難でした。

【研究内容と成果】

研究グループは、世界最大強度のミュオンビームを利用できるJ-PARC MLF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（図1）に適用しました。この方法は、加速器で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^{※2}を分析するものです。非破壊で元素を特定することができるため、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、2008年にJ-PARCで初めてミュオンのビームが得られて（Miyake et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Volume 600, 22-24, 2009）以降、この分析法を隕石などの地球外物質に適用するための基礎研究を進めてきました（Terada et al. *Scientific Reports*, 4, 5072, 2014）。



図1：今回分析した中で最も大きいリュウグウの石（C0002）の写真
（写真提供：JAXA）

質量は 93.5 mg。左上の赤線はスケールで縦 1 mm 横 1 mm を表す。

しかしリュウグウの石の分析には、これまでの研究にはなかった困難な問題がありました。まずミュオン元素分析は考古学的試料など比較的大きな試料に利用されてきたため、1 g以下の試料に対する分析の実績がありませんでした。また、リュウグウの石は地球大気に一切触れていない、地球物質の汚染が全くない試料であり、地球に落ちてきた隕石とは全く異なる取り扱いが必要だったのです。リュウグウの石は非常に繊細な物質であり、わずかでも酸素や水蒸気に接してしまうと組成が変化してしまう可能性がありました。そこで分析をヘリウムガス雰囲気の中で行うことができる、専用の測定システムを開発しました（図2）。これにより、リュウグウの石を全く地球大気に接触させずに分析を行うことが可能になりました。また分析装置の内部を全て、試料に含まれていない純銅で覆う特殊な構造にすることで、試料のみに由来するシグナルを得ることのできる、少ない試料でも分析可能な極めてバックグラウンドの低い測定条件を達成しました。



図 2： リュウグウの石を分析するために開発したミュオン元素分析装置
装置をヘリウムガスで満たすことで地球大気を完全に遮断できる。また内部を試料に
含まれていない銅で覆うことで、試料由来の微弱なシグナルを検出できる。

2021年6月に10個のリュウグウの石がJ-PARCに持ち込まれ、ミュオンによる元素分析が行われました。これにより図3に示すミュオン特性X線の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、リュ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。ミュオンの分析に利用されたリュウグウの石の重量はわずか0.1gあまりです。しかし初期分析における他の分析では、数mgもしくは μg オーダーの試料量で実験が行われており、このように大きなリュウグウの石を分析することができたのは、ミュオン元素分析法が非破壊の方法だからです。多くのリュウグウの石を使うことができたため、ミュオンによる

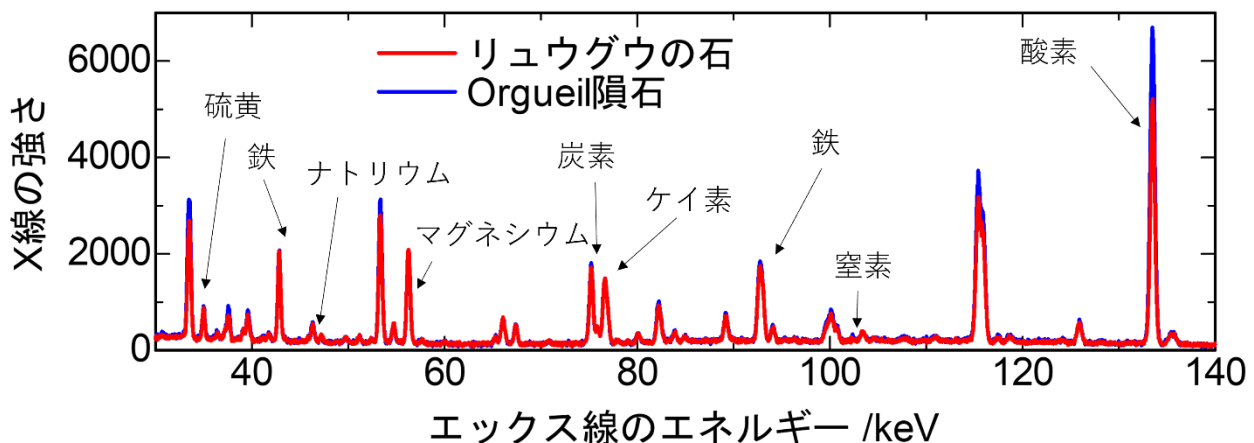


図 3： リュウグウの石と標準試料として測定した CI コンドライト (Orgueil: オルゲイユ) から得られたミュオン特性 X 線のスペクトル
リュウグウの石から得られたミュオン特性 X 線のスペクトルは CI コンドライトと極めて近く、これらが近い元素組成を持っていることを示している。リュウグウの石は酸素の X 線強度が低いことが分かる。

分析の結果は小惑星リュウグウの平均的な元素組成に最も近い値を示していると考えられています。非破壊のミュオン分析を行ったリュウグウの石は、その後の他の様々な分析に提供されました。

ミュオン非破壊分析によるリュ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、リュウグウの石が太陽系において極めて始原的な物質であることを明確に示しています。さらに、酸素の含有量は、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。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、CIコンドライトよりもリュウグウの石の方が、太陽系を代表する物質として相応しい可能性があります。

< 論文情報 >

「石の物質分析チーム」の成果発表論文（ミュオン分析チーム以外の成果も含まれます）

Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu:

Direct evidence from returned samples

（炭素質小惑星リュウグウの形成と進化：リターンサンプルから得た証拠）

T. Nakamura et.al

雑誌名 *Science*（オンライン版 2022年9月22日 日本時間9月23日午前3時）

DOI : 10.1126/science.abn8671

【本研究の意義、今後への期待】

この研究は「はやぶさ2」初期分析チーム「石の物質分析チーム」による研究の一環として実施されました。そのうちミュオンによる元素分析研究では、貴重な小惑星リュ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ビームだけであり、ミュオンビームの有用性を改めて示したと言えます。この方法は今後の小惑星、衛星探査で得られた試料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。

今回の成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になるでしょう。

【お問い合わせ先】

高エネルギー加速器研究機構 広報室

Tel: 029-879-6047

Fax: 029-879-6049

e-mail: press@kek.jp

【用語解説】

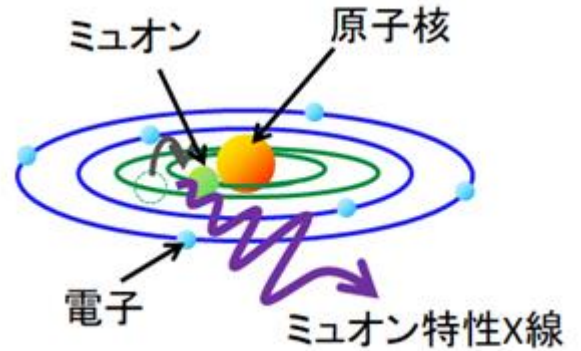
※1 大強度陽子加速器施設（J-PARC）

高エネルギー加速器研究機構（KEK）と日本原子力研究開発機構（JAEA）が茨城県東海村で共同運営している大型研究施設で、素粒子物理学・原子核物理学・物性物理学・化学・材料科学・生物学などの学術的な研究から産業分野への応用研究まで、広範囲の分野での世界最先端の研究が行われている。J-PARC 内の物質・生命科学実験施設 MLF では、世界最高強度のミュオン及び中性子ビームを用いた研究が行われており、世界中から研究者が集まる。

※2 ミュオン・ミュオン特性 X 線

ミュオンは電子に似た素粒子で、正の電荷をもつ正ミュオンと負の電荷をもつ負ミュオンがある。負ミュオンは、原子中に飛び込むとあたかも 200 倍の質量を持つ電子のようにふるまい、電子よりも原子核に近づくことができる。その際に失った位置エネルギーに相当する X 線（ミュオン特性 X 線）を放出するので、その波長を測定することによって元素を特定する元素分析に用いられる。非破壊で分析ができるので、歴史的試料などの分析例も多い。

ミュオン特性 X 線は、ミュオンの質量が大きいため電子が放出する特性 X 線の約 200 倍のエネルギーを持っている。このためミュオン特性 X 線は透過力が非常に高く、電子による特性 X 線では分析することができない軽い元素に対しても高い感度で検出が可能である。



負ミュオンは電子よりも重いため、電子よりも原子核のより近くに軌道（緑線）を作る

※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た（Phase-2 キュレーション）。

初期分析は、日本を中心に 14 カ国、109 の大学と研究機関、269 名が参加する国際チームで進められた。初期分析を担当する「はやぶさ 2」初期分析チームは 6 つのサブチーム「化学分析チーム」「石の物質分析チーム」「砂の物質分析チーム」「揮発性成分分析チーム」「固体有機物分析チーム」「可溶性有機物分析チーム」に分かれている。

「石の物質分析チーム」は、中村智樹 東北大学教授が代表を務め、リュウグウの石の物質分析を行う国際研究チームである。水を含む鉱物である「含水鉱物」に着目し、粒子の光の反射スペクトルを取得し、小惑星リュウグウ表面の物質分布を推定、放射光高エネルギービームを使った非破壊の物質分析を行い、回収試料の 3 次元の内部構造や元素分布を求める。高分解能電子顕微鏡を用いた微細組織観察や熱伝導率などの物性測定も行う。すべてのデータを統合し、リュウグウの形成過程をモデル化することを目標に多岐にわたる分析を行った。

※4 ミュオン分析チーム

リュウグウの石のミュオン元素分析を行うための研究チーム。ミュオン分析チームは、「石の物質分析チーム」に所属している。

ミュオン分析チームメンバー

- ・ 高エネルギー加速器研究機構（KEK）・J-PARC 物質・生命科学ディビジョン
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（JAEA） 大澤崇人研究主幹
- ・ 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
- ・ 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
- ・ 宇宙航空研究開発機構（JAXA） 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
- ・ 東北大学 中村智樹教授、和田大雅大学院生



実験当日 J-PARC MLF ミュオン実験エリアに集まったミュオン分析チームメンバー

関連記事・ページ：

J-PARC MLF ミュオン科学実験施設でのリュウグウ試料の分析が始まりました：

https://www2.kek.jp/imss/news/hayabusa2/news/20210701_muonD2/

ミュオン分析チームの写真・動画：

https://www2.kek.jp/imss/news/hayabusa2/gallery/mlf01.html#MUSE_D2

「地球に生命をもたらしたもの」が 小惑星の探査で分かるわけ ～小惑星探査機はやぶさ2が持ち帰った小惑星リュウグウ試料の分析～：

<https://www2.kek.jp/imss/news/2021/highlight/0602AsteroidRyugu/>

KEK 物質構造科学研究所の特設サイト「はやぶさ2 微粒子分析」：

<https://www2.kek.jp/imss/news/hayabusa2/>