



大学共同利用機関法人 自然科学研究機構  
分子科学研究所  
Institute for Molecular Science



MAKE NEW STANDARDS.  
東海国立  
大学機構



名古屋大学

プレスリリース  
2022年(令和4年)8月16日  
国立研究開発法人  
宇宙航空研究開発機構  
国立研究開発法人  
海洋研究開発機構  
公益財団法人  
高輝度光科学研究センター  
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構  
国立極地研究所  
大学共同利用機関法人自然科学研究機構  
分子科学研究所  
神奈川大学  
オーストラリア国立大学  
大阪大学  
立命館大学  
名古屋大学

## 小惑星探査機「はやぶさ2」Phase-2 キュレーション 研究成果のオンラインジャーナル「Nature Astronomy」論文掲載について

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)では小惑星リュウグウ試料分析を、国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)高知コア研究所、並びに岡山大学の2つの「Phase-2 キュレーション機関」及び、6つのサブチームからなる「はやぶさ2初期分析チーム」にて進めています。

この度「Phase-2 キュレーション機関」のうち JAMSTEC 高知コア研究所の研究成果をまとめた論文が、英国のオンラインジャーナル「Nature Astronomy」に2022年8月16日付(日本時間)で掲載されましたので、お知らせします。

タイトル: 小惑星リュウグウ: 太陽系外縁部からの来訪者

— 多機関連携分析が読み解いた小惑星の記録 —

原題: A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample

掲載誌: Nature Astronomy

DOI: 10.1038/s41550-022-01745-5

概要につきましては、別紙をご参照ください。

### 小惑星リュウグウ試料の初期分析について

小惑星探査機「はやぶさ2」により2020年12月6日に地球へ帰還したリュウグウ試料は、JAXA 宇宙科学研究所に設置された施設において、初期記載(Phase-1 キュレーション)が行われました。試料の一部が、「はやぶさ2初期分析チーム(6つのサブチーム)」と、岡山大学および JAMSTEC 高知コア研究所の2つの Phase-2 キュレーション機関へ分配されました。初期分析チームは「はやぶさ2」の科学目的達成のために専門サブチームが分担して、計画された高精度分析により、試料の多面的価値を明らかにします。

Phase-2 キュレーション機関はそれぞれの特徴である“総合分析”に基づき、個々の「はやぶさ2粒子」カタログを作成すると同時に、粒子の特性に応じた測定・分析により、「はやぶさ2粒子」がもつ潜在的価値を明らかにしていきます。

なお、初期分析の6つのチーム、Phase-2 キュレーション機関の岡山大学および JAMSTEC 高知コア研究所のチームからの報告は、論文としての成果が公表されるタイミングで、個別にお知らせしてまいります。また、全ての初期成果が公表されたのち、あらためて「はやぶさ2」サイエンス全体の総括をご説明する予定です。

以上

本件に関するお問い合わせ先:

(研究に関するお問い合わせ先)

国立研究開発法人 海洋研究開発機構(JAMSTEC) 超先鋭研究開発部門

高知コア研究所 物質科学研究グループ

主任研究員 伊藤 元雄 (いとう もとお)

主任研究員 富岡 尚敬 (とみおか なおたか)

TEL: 088-878-2272 / 050-5474-6325

E-mail: [motoo@jamstec.go.jp](mailto:motoo@jamstec.go.jp), [tomioka@jamstec.go.jp](mailto:tomioka@jamstec.go.jp)

公益財団法人 高輝度光科学研究センター

放射光利用研究基盤センター 散乱・イメージング推進室

主幹研究員 上相 真之 (うえすぎ まさゆき)

主席研究員 上杉 健太郎 (うえすぎ けんたろう)

TEL: 0791-58-0833 E-mail: [uesugi@spring8.or.jp](mailto:uesugi@spring8.or.jp), [ueken@spring8.or.jp](mailto:ueken@spring8.or.jp)

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所

准教授 山口 亮 (やまぐち あきら)

助教 今榮 直也 (いまえ なおや)

特任教授 木村 眞 (きむら まこと)

TEL: 042-512-0707 E-mail: [yamaguch@nipr.ac.jp](mailto:yamaguch@nipr.ac.jp), [imae@nipr.ac.jp](mailto:imae@nipr.ac.jp),  
[kimura.makoto@nipr.ac.jp](mailto:kimura.makoto@nipr.ac.jp)

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設

准教授 大東 琢治 (おおひがし たくじ)(クロスアポイントメント:大学共同利用機関法人

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)

技術職員 湯澤 勇人 (ゆざわ はやと)

TEL: 029-864-5592 E-mail: [ohigashi@post.kek.jp](mailto:ohigashi@post.kek.jp)

TEL: 0564-55-7203 E-mail: [ohigashi@ims.ac.jp](mailto:ohigashi@ims.ac.jp), [hayato@ims.ac.jp](mailto:hayato@ims.ac.jp)

神奈川大学 理学部 化学科

准教授 白井 直樹 (しらい なおき)

TEL: 0463-59-4111 (代) E-mail: [shirai-naoki@kanagawa-u.ac.jp](mailto:shirai-naoki@kanagawa-u.ac.jp)

カリフォルニア大学 ロサンゼルス校 宇宙地球惑星学科

学術研究員 Ming-Chang Liu (ミン チェン リウ)

TEL: +1-310-825-3299 E-mail: [mcliu@ucla.edu](mailto:mcliu@ucla.edu)

オープン大学

主任研究員 Richard Greenwood (リチャード グリーンウッド)

E-mail: [richard.c.greenwood@open.ac.uk](mailto:richard.c.greenwood@open.ac.uk)

国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

准教授 平原 佳織 (ひらはら かおり)

TEL: 06-6879-7815 E-mail: [hirahara@mech.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:hirahara@mech.eng.osaka-u.ac.jp)

立命館大学 総合科学技術研究機構

教授 土山 明 (つちやま あきら)

TEL: 077-561-2802 E-mail: [atsuchi@fc.ritsumei.ac.jp](mailto:atsuchi@fc.ritsumei.ac.jp)

国立大学法人 東海国立大学機構 名古屋大学 シンクロトン光研究センター

特任准教授 櫻井 郁也 (さくらい いくや)

アドバイザー 岡田 育夫 (おかだ いくお)

TEL: 052-747-6566 E-mail: [sakurai@nagoya-u.jp](mailto:sakurai@nagoya-u.jp), [i.okada@nusr.nagoya-u.ac.jp](mailto:i.okada@nusr.nagoya-u.ac.jp)

(報道に関するお問い合わせ先)

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 広報担当

E-mail: [isas-kouho@ml.jaxa.jp](mailto:isas-kouho@ml.jaxa.jp)

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 報道室

TEL: 045-778-5690, E-mail: [press@jamstec.go.jp](mailto:press@jamstec.go.jp)

公益財団法人 高輝度光科学研究センター 利用推進部 普及情報課 (SPring-8/SACLA に関する事)

TEL: 0791-58-2785, FAX: 0791-58-2786, E-mail: [kouhou@spring8.or.jp](mailto:kouhou@spring8.or.jp)

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所 広報室

E-mail: [kofositu@nipr.ac.jp](mailto:kofositu@nipr.ac.jp)

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 分子科学研究所 研究力強化戦略室 広報担当

TEL: 0564-55-7209, FAX: 0564-55-7374, E-mail: [press@ims.ac.jp](mailto:press@ims.ac.jp)

神奈川大学 広報部広報課

TEL: 045-481-5661(代), E-mail: [kohou-info@kanagawa-u.ac.jp](mailto:kohou-info@kanagawa-u.ac.jp)

オープン大学 Media Relations, Marketing and Communications

TEL: +44 1908 638395, E-mail: [laura.bandell@open.ac.uk](mailto:laura.bandell@open.ac.uk) (Media Relations Manager)

国立大学法人 大阪大学 工学研究科 総務課 評価・広報係

TEL: 06-6879-7231, E-mail: [kou-soumu-hyoukakouhou@office.osaka-u.ac.jp](mailto:kou-soumu-hyoukakouhou@office.osaka-u.ac.jp)

立命館大学 広報課

TEL: 075-813-8300, E-mail: [r-koho@st.ritsumei.ac.jp](mailto:r-koho@st.ritsumei.ac.jp)

国立大学法人 東海国立大学機構 名古屋大学 広報室

TEL: 052-789-3058, FAX: 052-789-2019, E-mail: [nu\\_research@adm.nagoya-u.ac.jp](mailto:nu_research@adm.nagoya-u.ac.jp)

小惑星リュウグウ:太陽系外縁部からの来訪者  
—多機関連携分析が読み解いた小惑星の記録—

A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample

## 概要

国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)(理事長 大和裕幸)超先鋭研究開発部門高知コア研究所の伊藤元雄主任研究員を代表とする Phase-2 キュレーション<sup>※1</sup>高知チームは、2021年6月20日(日)から小惑星リュウグウ粒子の分析を開始しました。約1年間にわたり日米英の研究機関・大学にまたがる多機関連携により実施したキュレーション活動の最初の研究成果が、2022年8月15日(日本時間8月16日)に英国のオンラインジャーナル「Nature Astronomy」に掲載されました。

### 本研究のポイント

1. 分析した試料の鉱物組み合わせは、リュウグウ粒子は形成後に大規模な水質変成を受けたことを示す。
2. 微細な鉱物と有機物を含む領域の水素と窒素同位体組成の関係は、リュウグウ粒子の構成物質が太陽系外縁部<sup>※2</sup>で形成されたことを示唆する。
3. 粗粒の含水ケイ酸塩鉱物中に、脂肪族炭素に富む有機物が濃集していた。この特徴は、これまでの隕石の研究からは確認されておらず、リュウグウ天体に特有のものと推察される。
4. これらの結果から、始原的天体中の粗粒含水ケイ酸塩鉱物が有機物や水のゆりかごとなり、そのままの状態地球に運ばれた可能性が考えられる。

## 1. 背景

我々が住む地球はその歴史の中で、加熱などによる様々な変成・変質を受け続けることにより、形成当時の情報を失いました。しかし、小惑星リュウグウは熱による影響が少なかったと考えられており、約46億年前に太陽系が形成された頃の有機物や含水鉱物を、今も残している可能性があります。このような有機物や鉱物から化学的情報を得ることで、太陽系の形成史だけでなく、地球の水の起源や地球生命に至るまでの有機物進化過程などの解明も期待されることから、試料の直接採取が待ち望まれていました。

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)による小惑星探査機「はやぶさ2」は、2014年12月3日に打ち上げられ、リュウグウに到着して近接分光観測を行うとともに、2度の試料採取に成功しました。試料を封入したカプセルは、2020年12月6日にオーストラリア・南オーストラリア州のウーメラ砂漠で回収されました。このカプセルからは、総量約5.4グラム程度の黒い砂状粒子が確認されています。その後、JAXA 地球外試料キュレーションセンター(ESCuC)は、1粒子毎の光学観察や重量測定を中心とした初期記載を行い、2021年11月にリュウグウ粒子の初期記載論文を報告しました。本年6月以降、Phase-2 キュレーションチームと初期分析チームそれぞれから、初期成果論文が欧米日の科学誌に順次公表されます。



## 2. 成果

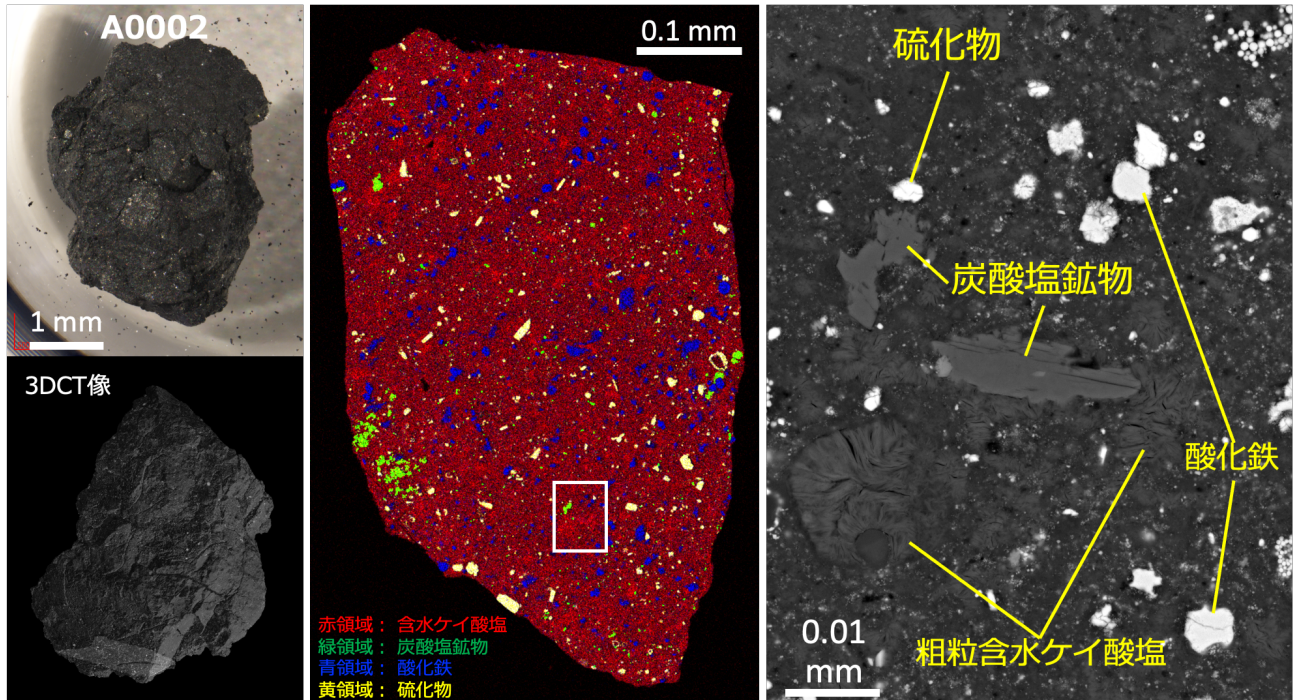
Phase-2 キュレーション JAMSTEC 高知コア研究所は、2015 年から JAXA キュレーションチームとともに、将来の惑星探査、地球惑星物質分析とキュレーション活動に資する試料の保管・輸送法や分析技術の向上を進めてきました。開発した機器や分析技術を駆使し、JAXA キュレーションと共同でリュウグウ粒子の分析を担当しています。

2021 年 6 月中旬から大型放射光施設<sup>※3</sup>SPring-8 BL20XU にて X 線 CT 撮影を行い、各粒子の形状や内部構造を取得することで、どの部分がどの分析に適しているかを決定しました。その後、国内外研究機関それぞれに、リュウグウ粒子を地球大気に触れぬよう輸送しました。貴重なリュウグウ試料の国外輸送にあたっては、駐日英国大使館、外務省、文部科学省の協力を得て、英国オープン大学と米国 UCLA に安全かつスピーディに試料を送ることができました。

Phase-2 キュレーション高知チームには、まず 8 個(1~4 ミリメートル)、合計 50mg 程度のリュウグウ粒子が配分されました。米粒程度の大きさのリュウグウ粒子から効率よく、かつ最大限に化学的情報を得て、リュウグウ試料カタログに反映することを目的としています。我々の分析に基づくリュウグウ粒子の元素組成は、先に報告された Yokoyama et al. (2022, Science), Nakamura E. et al. (2022, 日本学士院紀要)と矛盾がなく、「リュウグウは太陽系全体の元素組成を代表する始原始的な物質である」という確証が得られました。また、粒子ごとに多少の違いはありますが、水が関与して形成したと考えられる鉱物が多く見られます(図 1)。このことから、リュウグウには過去に氷が存在し、その氷が溶けてできた水と、もともと含まれていた鉱物が反応した結果、現在我々が観察している鉱物が作られたと考えられます。

約 4 ミリのリュウグウ粒子

水を含む、あるいは水が関与してできた鉱物から構成されることがわかる



©Ito et al.(2022)より改変

図 1 (左上)配布された最大のリュウグウ粒子 A0002、(左下)SPring-8 で取得した放射光 X 線 CT 像、(中)リュウグウ粒子中の水が関与してできた鉱物群: 赤: 含水ケイ酸塩鉱物、緑: 炭酸塩鉱物、青: 酸化鉄、黄: 硫化鉱物、(右)中図の白四角領域を電子顕微鏡で拡大した図。

もっと細かい物質がどうなっているのかを、超高解像度二次イオン質量分析装置(NanoSIMS)<sup>※4</sup>により分析したところ、水素と窒素は、地球と比べると重い同位体成分に富んでいることがわかりました。この結果は、宇宙塵と良い一致を示すばかりではなく、彗星の値に近い傾向も見られます(図 2)。このことは、リュウグウ粒子は熱の影響をあまり受けず、形成当時の物質科学的情報を保っていることを示唆しています。これらの粒子は太陽系の外縁部で形成後、現在の位置まで移動したと考えられます。

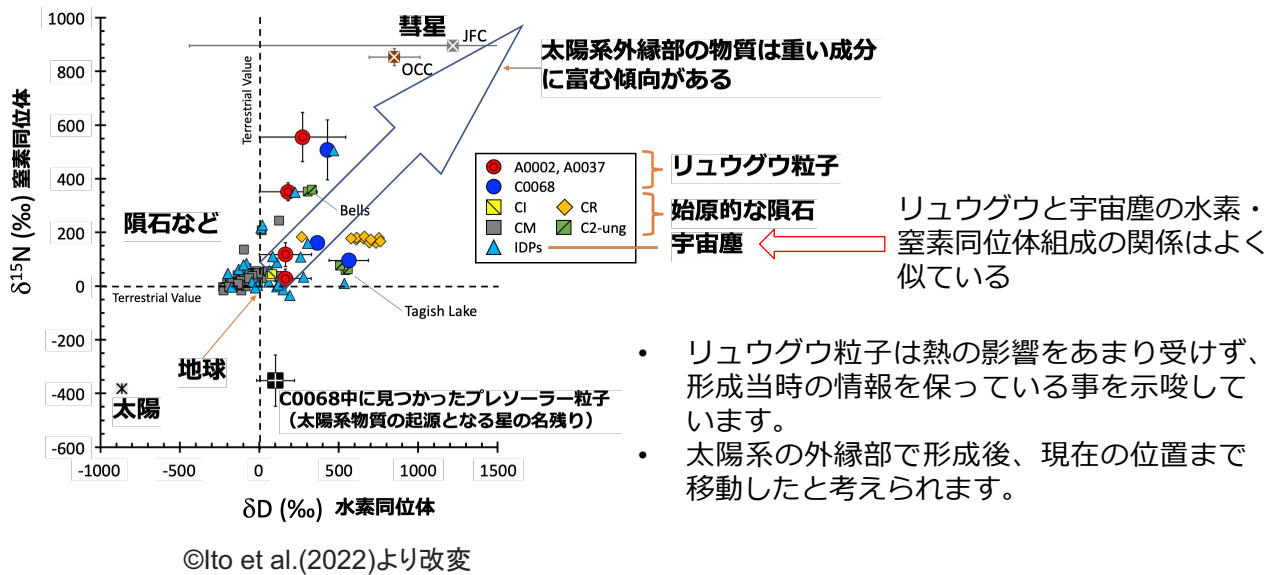


図 2 水素と窒素同位体比は太陽系外縁部での形成を示唆。グラファイトからなるプレソーラー粒子<sup>※5</sup>も確認された。

走査型透過 X 線顕微鏡(STXM)<sup>※6</sup>と超高分解能透過型電子顕微鏡(TEM)<sup>※7</sup>による分析を組み合わせることで、脂肪族炭化水素<sup>※8</sup>に富む有機物は、粗粒の含水ケイ酸塩鉱物<sup>※9</sup>と複雑に入り混じった組織を持つことが明らかになりました(図 3)。この組織は、有機物が水の存在下で鉱物と反応したことを示す、世界で初めての直接的証拠です。脂肪族炭化水素に富む有機物は、30 度以上の温度になると分解するという研究報告があります。つまり、脂肪族炭化水素に富む有機物の存在から、リュウグウは 30 度以下の温度しか経験していないと考えられます。一方、どのような種類の有機物が該当する領域に含まれるのかは、今後の研究に続きます。



©Ito et al.(2022)より改変

図3（左）リウグウ粒子に含まれる多様な有機物は、大別すると三種類の異なる特徴（色ごとに異なる官能基を持つ）を持つことがSTXMで分析によりわかった。（中）リウグウ粒子中（0.02mm四方）の三種類の異なる特徴を持つ有機物ごとの分布を可視化した。（右）左図の点線の領域の透過電子顕微鏡による観察図、粗粒の含水ケイ酸塩鉱物の中に脂肪族炭素に富む有機物が濃集していることがわかる。

### 3. 今後の展望

有機物や水が地球にどのように運ばれたか、未だに大きな議論が続いています。リウグウ粒子中の粗粒の含水ケイ酸塩鉱物は、有機物や水の供給源の一つの可能性があり。粗粒の含水ケイ酸塩鉱物に含まれる有機物は、細粒の含水ケイ酸塩鉱物に含まれる有機物よりも、分解などに対し強いと考えられるため、そのままの状態に地球に運ばれたかもしれません。一方、リウグウ粒子の水素同位体は地球と比べて重い成分に富むため、リウグウのような小惑星のみが地球への水の供給源とは言えません。一方、小惑星イトカワの粒子には、太陽風由来の軽い水素同位体組成を持つケイ酸塩鉱物が見つっています。様々な水素同位体組成を持つ成分が混じり合うことで、地球の水ができた可能性があります。

「小惑星リウグウを形づくった微粒子は、かつて太陽系の外側で形成され、水と有機物がたくさん含まれていた。このような始原的な小惑星は、その後太陽系の内側までやってきて、地球に水や有機物を供給した」という仮説を本研究で立てる事ができました。今後、小惑星リウグウ粒子の更なる分析や小惑星ベンヌ（NASA オサイリス・レックスミッション）の研究により、この仮説の検証ができると考えています。



## (用語解説)

### ※1 Phase-2 キュレーション

JAXA 宇宙科学研究所の地球外試料キュレーションセンター(ESCuC)は、「はやぶさ」をはじめとするサンプルリターンミッションによる地球外惑星からの帰還試料の受入れと管理を主な目的として設立されました。「はやぶさ2」では、ESCuC と JAXA キュレーション専門委員会が選定した連携拠点機関(JAMSTEC 高知コア研究所を中心とした連携研究機関、岡山大学惑星物質研究所)が Phase-2 キュレーションを行うための協力体制を作っています。Phase-2 キュレーションでは、ESCuC と協働でキュレーション活動に資する大気非曝露環境下での試料配分容器、輸送・搬送機器や分析技術を開発しています。また、それぞれの機関が開発した高度分析技術により「はやぶさ2」試料の詳細な物質科学的記載を進め、小惑星リュウグウから得られる科学成果を最大化することも目的としています。

当チームは、以下の研究機関から構成される。

1. 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
2. 公益財団法人 高輝度光科学研究センター 放射光利用研究基盤センター 散乱・イメージング推進室
3. 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所
4. 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設
5. 神奈川大学
6. カリフォルニア大学 ロサンゼルス校 宇宙地球惑星学科(米国)
7. オープン大学(英国)
8. 国立大学法人 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
9. 国立大学法人 東海国立大学機構 名古屋大学 シンクロトロン光研究センター

### ※2 太陽系外縁部

太陽系の中で海王星よりも外側にある領域、つまり氷や有機物が存在しうるスノーラインより外側のこと。

### ※3 大型放射光施設 SPring-8

兵庫県の播磨科学公園都市にある理化学研究所が所有する世界でもトップクラスの放射光を生み出す大型放射光施設で、利用者支援等は高輝度光科学研究センター(JASRI)が行っている。SPring-8 の名前は Super Photon ring-8 GeV の略。放射光を用いてナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究が行われている。

### ※4 超高解像度二次イオン質量分析装置(NanoSIMS)

50–100 nm に絞った一次イオンビームを用いて試料表面を走査し、試料を構成する炭素、窒素、水素、酸素などの元素、あるいはそれらの同位体の分布を可視化する質量分析装置です。なお、1 nm(ナノメートル)は1 m の10億分の1です。

### ※5 プレソーラー粒子

太陽系形成以前に、赤色巨星、超新星、新星など複数の恒星あるいは星周環境で生成された太陽系外起源の微粒子のこと。ナノメートルからミクロンサイズのケイ酸塩、酸化物、窒化物、グラファイト、ダイヤモンドが代表的なものであるが、今回はグラファイト粒子を発見した。

#### ※6 走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM)

放射光を光源とする微小 X 線ビーム (30–150 nm) の波長を変えつつ、そのビーム上に薄膜試料を走査させることで、X 線吸収スペクトルを高解像度で可視化する手法です。有機物分析では、構成する元素 (本研究では炭素) の吸収端近傍の測定を行うため、軟 X 線放射光を用います。

#### ※7 超高分解能透過型電子顕微鏡 (TEM)

高電圧で加速した電子を薄膜試料に照射し、透過・散乱した電子による像を拡大 (数千倍～数百万倍の広い倍率) して観察します。また、付属の X 線分析装置を使用することで、微小領域の元素分析ができます。

#### ※8 脂肪族炭化水素を含む有機物

直鎖、分枝または非芳香環である有機物を脂肪族炭化水素または脂肪族有機化合物と言い、メタン、エチレン、パラフィン系炭化水素やアセチレンなどがあります。脂肪族炭化水素を構成する炭素を脂肪族炭素と呼びます。

#### ※9 含水ケイ酸塩鉱物

蛇紋石やサポナイトなどに代表される層間に構造水を含むケイ酸塩鉱物です。

## 4. 論文情報

論文タイトル:

A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample

著者名:

Motoo Ito<sup>1\*</sup>, Naotaka Tomioka<sup>1</sup>, Masayuki Uesugi<sup>2</sup>, Akira Yamaguchi<sup>3,4</sup>, Naoki Shirai<sup>5,\*</sup>, Takuji Ohigashi<sup>4,6,\*</sup>, Ming-Chang Liu<sup>7</sup>, Richard C. Greenwood<sup>8</sup>, Makoto Kimura<sup>3</sup>, Naoya Imae<sup>3,4</sup>, Kentaro Uesugi<sup>2</sup>, Aiko Nakato<sup>9</sup>, Kasumi Yogata<sup>9</sup>, Hayato Yuzawa<sup>6</sup>, Yu Kodama<sup>10,\*</sup>, Akira Tsuchiyama<sup>11,12,13</sup>, Masahiro Yasutake<sup>2</sup>, Ross Findlay<sup>8</sup>, Ian A. Franchi<sup>8</sup>, James A. Malley<sup>8</sup>, Kaitlyn A. McCain<sup>7</sup>, Nozomi Matsuda<sup>7</sup>, Kevin D. McKeegan<sup>7</sup>, Kaori Hirahara<sup>14</sup>, Akihisa Takeuchi<sup>2</sup>, Shun Sekimoto<sup>15</sup>, Ikuya Sakurai<sup>16</sup>, Ikuo Okada<sup>16</sup>, Yuzuru Karouji<sup>17</sup>, Masahiko Arakawa<sup>18</sup>, Atsushi Fujii<sup>9</sup>, Masaki Fujimoto<sup>9</sup>, Masahiko Hayakawa<sup>9</sup>, Naoyuki Hirata<sup>18</sup>, Naru Hirata<sup>19</sup>, Rie Honda<sup>20,\*</sup>, Chikatoshi Honda<sup>19</sup>, Satoshi Hosoda<sup>9</sup>, Yu-ichi Iijima†, Hitoshi Ikeda<sup>9</sup>, Masateru Ishiguro<sup>21</sup>, Yoshiaki Ishihara<sup>17</sup>, Takahiro Iwata<sup>9</sup>, Kosuke Kawahara<sup>9</sup>, Shota Kikuchi<sup>22</sup>, Kohei Kitazato<sup>19</sup>, Koji Matsumoto<sup>23</sup>, Moe Matsuoka<sup>9</sup>, Tatsuhiro Michikami<sup>24</sup>, Yuya Mimasu<sup>9</sup>, Akira Miura<sup>9</sup>, Osamu Mori<sup>9</sup>, Tomokatsu Morota<sup>25</sup>, Satoru Nakazawa<sup>9</sup>, Noriyuki Namiki<sup>23</sup>, Hirotomo Noda<sup>23</sup>, Rina Noguchi<sup>26</sup>, Naoko Ogawa<sup>9</sup>, Kazunori Ogawa<sup>9</sup>, Tatsuaki Okada<sup>9</sup>, Chisato Okamoto†, Go Ono<sup>9</sup>, Masanobu Ozaki<sup>4,9</sup>, Takanao Saiki<sup>9</sup>, Naoya Sakatani<sup>27</sup>, Hirotaka Sawada<sup>9</sup>, Hiroki Senshu<sup>22</sup>, Yuri Shimaki<sup>9</sup>, Kei Shirai<sup>9</sup>, Seiji Sugita<sup>25</sup>, Yuto Takei<sup>9</sup>, Hiroshi Takeuchi<sup>9</sup>, Satoshi Tanaka<sup>9</sup>, Eri Tatsumi<sup>28</sup>, Fuyuto Terui<sup>29</sup>, Ryudo Tsukizaki<sup>9</sup>, Koji Wada<sup>22</sup>, Manabu Yamada<sup>22</sup>, Tetsuya Yamada<sup>9</sup>, Yukio Yamamoto<sup>9</sup>, Hajime Yano<sup>9</sup>, Yasuhiro Yokota<sup>9</sup>, Keisuke

Yoshihara<sup>9</sup>, Makoto Yoshikawa<sup>9</sup>, Kent Yoshikawa<sup>9</sup>, Ryota Fukai<sup>9</sup>, Shizuho Furuya<sup>9,25</sup>, Kentaro Hatakeda<sup>10</sup>, Tasuku Hayashi<sup>9</sup>, Yuya Hitomi<sup>10</sup>, Kazuya Kumagai<sup>10</sup>, Akiko Miyazaki<sup>9</sup>, Masahiro Nishimura<sup>9</sup>, Hiromichi Soejima<sup>10</sup>, Ayako Iwamae<sup>10,\$\$\$</sup>, Daiki Yamamoto<sup>9,30</sup>, Miwa Yoshitake<sup>9,\$\$\$\$</sup>, Toru Yada<sup>9</sup>, Masanao Abe<sup>9</sup>, Tomohiro Usui<sup>9</sup>, Sei-ichiro Watanabe<sup>31</sup>, and Yuichi Tsuda<sup>4,9</sup>

著者所属:

- [1] Kochi Institute for Core Sample Research, X-Star, Japan Agency for Marine-Earth Science Technology (JAMSTEC), Nankoku, Kochi 783-8502, Japan
- [2] Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8), 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan
- [3] National Institute of Polar Research (NIPR), Tachikawa 190-8518, Tokyo, Japan
- [4] The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Hayama 240-0193, Japan
- [5] Graduate School of Science, Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University, Hachioji 190-0397, Tokyo, Japan
- [6] UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science, 38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585, Japan
- [7] Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, UCLA 595 Charles Young Drive E., Los Angeles, CA 90095, USA
- [8] The Open University, Walton Hall, Milton Keynes MK7 6AA, UK
- [9] Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan
- [10] Marine Works Japan, Ltd., Yokosuka 237-0063, Japan
- [11] Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, Shiga 525-8577, Japan
- [12] CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny/Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (CAS), Guangzhou 510640, People's republic of China
- [13] CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, People's republic of China
- [14] Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan
- [15] Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494, Japan
- [16] Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

- [17] JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan
- [18] Kobe University, Kobe 657-8501, Japan
- [19] University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan
- [20] Kochi University, Kochi 780-8520, Japan
- [21] Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea
- [22] Chiba Institute of Technology, Narashino 275-0016, Japan
- [23] National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan
- [24] Kindai University, Higashi-Hiroshima 739-2116, Japan
- [25] The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan
- [26] Niigata University, Niigata 950-2181, Japan
- [27] Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan
- [28] Instituto de Astrofísica de Canarias, University of La Laguna; Tenerife, Spain
- [29] Kanagawa Institute of Technology, Atsugi 243-0292, Japan
- [30] Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo 152-8550, Japan
- [31] Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

¥ Current affiliation: Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 221-8686 Japan.

¥¥ Current affiliation: Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

\$ Current affiliation: Toyo Corporation

\$\$ Current affiliation: Center for Data Science, Ehime University, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan

\$\$\$ Current address: Toyo University, Bunkyo, Tokyo 112-8606, Japan.

\$\$\$\$ Current address: Japan Patent Office, Chiyoda, Tokyo 100-8915, Japan

†Deceased.

\*Correspondence to Motoo Ito, [motoo@jamstec.go.jp](mailto:motoo@jamstec.go.jp)

掲載誌: Nature Astronomy

D O I: 10.1038/s41550-022-01745-5