



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 2 年 6 月 18 日

岡 山 大 学

小惑星「リュウグウ」が大量の有機物からなる可能性を示唆 「はやぶさ2」タッチダウン時に巻き上がった破片の色から推定

◆発表のポイント

- ・小惑星「リュウグウ」に含まれる有機物は、これまで数%程度だと考えられていました。
- ・小惑星探査機「はやぶさ2」のタッチダウン時に巻き上がった破片の色に着目し、解析を行ったところ、リュウグウが含む有機物は約 60%であるという推定が導かれました。
- ・この推定が正しければ、リュウグウはかつて氷からなる彗星の核（氷母天体）であり、氷が昇華し失われるにつれて有機物と周回中に捕獲された岩塊が濃集し、ソロバン玉形状の瓦礫集合体へと進化したと考えられます。
- ・11～12月に探査機「はやぶさ2」が持ち帰る試料を詳細に解析することによって、今回の推定を検証します。太陽系有機無機物質の新たな進化モデルを提示できる可能性があります。

岡山大学惑星物質研究所の中村栄三教授らの研究グループ PML (The Pheasant Memorial Laboratory) は、小惑星探査機「はやぶさ2」が小惑星「リュウグウ」にタッチダウンした直後に小惑星表面から巻き上がった破片の色（アルベド）が表裏で異なることに着目し、解析を行ったところ、リュウグウが含む有機物は約 60%であることが導かれました。望遠鏡と探査機による分光観測からは、リュウグウは数%の有機物を含む炭素質コンドライトに似た小惑星だと想定されていましたが、有機物量がこの想定をはるかに超えるという今回の結果は、リュウグウが彗星だったことを示唆します。つまり、彗星だったリュウグウは、太陽近傍を周回する間に氷を失い、有機物の濃縮と岩石の濃集が促進された結果、瓦礫状かつソロバン玉状の構造になったと推定できます。

今回導かれたリュウグウの新たな姿「三朝モデル」は、「はやぶさ2」が今年11～12月に持ち帰る試料を解析することによって検証が可能です。「はやぶさ2」プロジェクトにおいて JAXA・宇宙科学研究所と連携協定を締結した岡山大学惑星物質研究所は、フェーズ2 キュレーション施設として初期総合解析を担当します。従来 of 想定を超えた発見により、太陽系科学にパラダイムシフトが起きることが期待できます。

本研究成果は6月15日、科学誌「Astrobiology」のオンライン版に掲載されました。

◆研究者からのひとこと

この研究の発端は、YouTubeで「はやぶさ2」のタッチダウンの動画を何度も見ている最中の思いつきです。従って、論文掲載料以外、研究費は使っていません。実際に回収試料を分析することによって、自分が立てた仮説を自分たちの手で検証できることが科学者としての最高の喜びです。



中村教授



PRESS RELEASE

■発表内容

<背景>

太陽系が誕生してから約 46 億年が経過しました。小惑星には、この間に蓄積された初生的な情報から現在までの物質進化の過程が記録されていると考えられます。「はやぶさ」ミッションにおいて世界に先駆けて小惑星からのサンプルリターンを実現した日本は、後継探査機「はやぶさ 2」によってリュウグウでの探査と試料採取を実行しました。現在、リュウグウでの任務を終えた探査機「はやぶさ 2」は地球への帰還の途についています（帰還予定日は 2020 年 11～12 月）。

理論やリモートセンシングに基づく科学的推論に評価・判定を下すには、人類が到達できない場所から試料を採取して地球に持ち帰り、地上の実験室における詳細な解析を可能にするサンプルリターンが欠かせません。サンプルリターンから大きな成果を引き出すには、「はやぶさ 2」によって得られた観測データを基に、これから届く試料について物質科学的な推論を事前に行う必要があります。試料の特性に見合った解析方法を準備し、科学的な成果をあらかじめ予測しておくことが極めて重要となります。

<研究手法>

2019 年 2 月 22 日、「はやぶさ 2」はサンプリングを目的とするタッチダウンに成功しました。搭載カメラが撮影したそのときの映像は極めて興味深いものです（<https://youtu.be/-3hO58HFa1M>）。

タッチダウン後、「はやぶさ 2」はサンプリング・ホーン内部で弾丸を発射してリュウグウ表面を破壊し、その際に舞い上がった試料を採取し、スラスターを噴射して上昇に転じました。搭載カメラは、板状に破壊されたリュウグウ表面が巻き上がり、回転しながら四散する物体破片の表裏が白色と黒色の明暗をなす様子を捉えていました（図 1）。映像からは、リュウグウの表面は白色（明）、内部は黒色（暗）と考えられます。そこで、表面と内部の明暗（反射率）変化を説明するために、有機物を用いた既存の宇宙風化再現実験の結果を基に、物質の構成を評価しました。

PRESS RELEASE

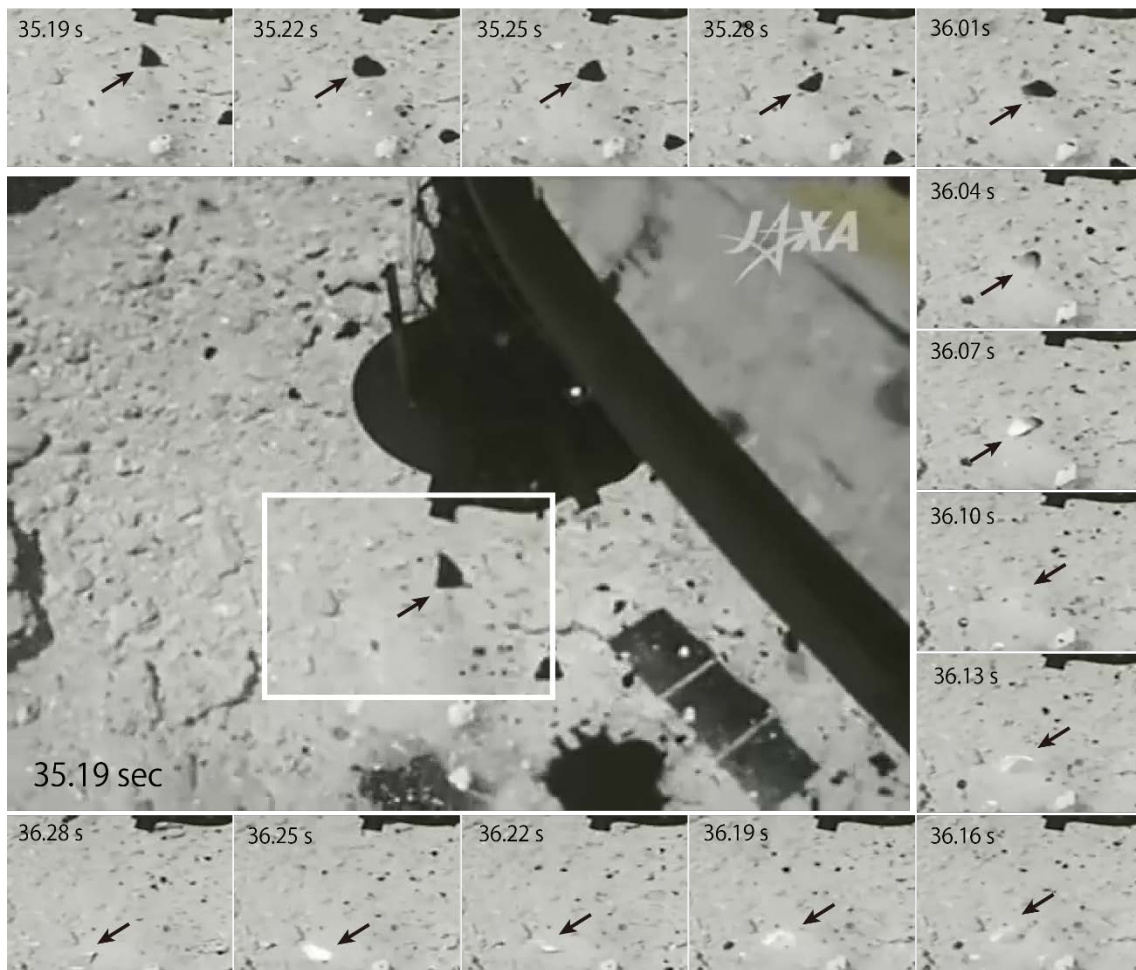


図 1：2019 年 2 月 22 日（日本時間）。「はやぶさ 2」が小惑星リュウグウにおいて第一回目のタッチダウン時に破片が四散する様子。矢印で示した破片は、回転することによって黒色から白色へと変化する。図中に示した時間は、実時間ではなく映像をキャプチャしたタイムフレーム。
映像クレジット：JAXA 宇宙航空研究開発機構

<研究成果>

小惑星の表面は太陽風などの高エネルギー粒子にさらされています。つまり、宇宙風化の影響を受けていると考えられます。従来の研究者が想定したように、リュウグウが始原的な炭素質コンドライト隕石（CM2 コンドライト：炭素含有量 3%未満）様であるのなら、リュウグウの表面は宇宙風化によって暗色化すると考えられます。このような隕石は 90%以上がケイ酸塩鉱物で構成されているため、この鉱物に含まれる鉄分子が宇宙風化によって還元され、ナノメートルサイズの鉄微粒子が形成されて黒色化（暗）するためです。

ところが、「はやぶさ 2」のタッチダウンの際の動画からは、巻き上げられた岩片が回転する際に色が変わり、表面は白色（明）、内部は黒色（暗）であることが分かりました。これまでに行われた宇宙風化を模した室内実験からは、太陽系初期に氷と紫外線の反応によって形成されたと考えられるアスファルトやソリンなどの漆黒の有機物に太陽風の成分である水素やヘリウムの高速粒

PRESS RELEASE

子を照射すると、有機物を構成する分子がグラファイト化して白色化することが分かっています。これらの宇宙風化による有機物と無機物の反射率の変化を考慮して評価すると、有機物（炭素）の含有量が増加するにしたがって、小惑星表面の物質は宇宙風化によって白色（明）化することが分かります（図 2）。リュウグウのアルベド特性を説明するとすれば、有機物の含有量は約 60%ということになります。この結果は、隕石を基準とする想定物質とは有意に異なります。人類がリュウグウのサンプルを手に入れば、有機物の含有量と違いの原因を断定することが可能になります。

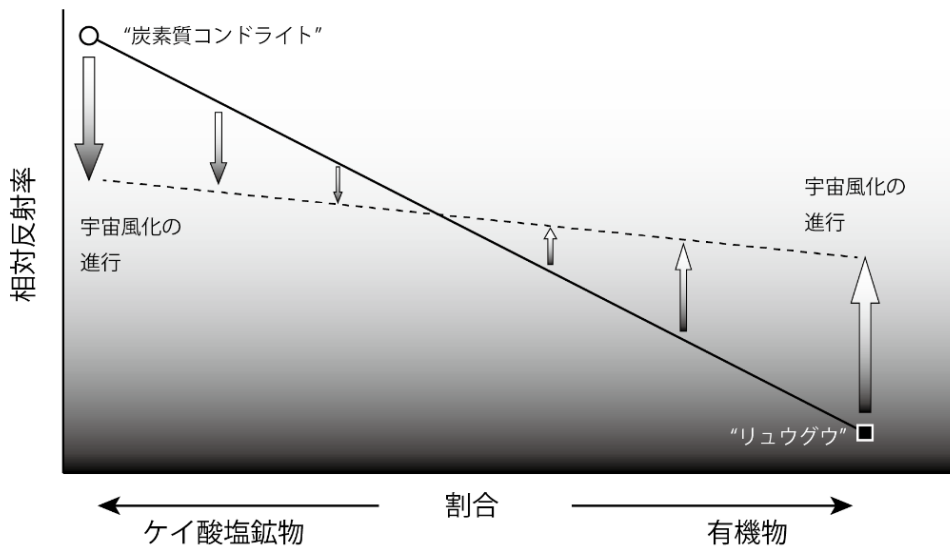


図 2：有機物/ケイ酸塩鉱物の量比を変化させた場合の、宇宙風化の進行に伴う相対的な反射率変化の概念図。宇宙風化の進行に伴い、物質は無機物質の割合が高まると反射率が低下して暗色化するが、有機物質の割合が高まると明色化する。リュウグウの場合、表面が内部に比べて相対的に明るくなっていることから、リュウグウは有機物質に富む小惑星だと推測できる。

このように小惑星リュウグウの有機物割合が極めて高いという推測は、チェリャビンスク隕石母天体形成モデル (Nakamura et al., 2019) によって説明できるかもしれません。このモデルは、氷を主成分とする彗星の核が小天体の高速衝突から生じた破片を取り込み、取り込んだ破片が氷の昇華によって集積して瓦礫状の構造を持つようになるというメカニズムです。このモデルによれば、有機物を含む氷からなる彗星の核が、太陽周回の軌道上で周期的に接近する太陽の加熱により、その表層付近に形成される流体相が有機物の移動、濃集、重合・分解反応を促進したのではないかと推定できます。また、氷の核が周回を重ねるうちに氷は全て昇華して失われたのではないかと推定できます。また、氷の核が周回軌道上のケイ酸塩鉱物を主体とする岩塊を取り込んだ可能性も考えられます（図 3）。

さらに、衝突や他天体との重力的な相互作用によって生じる振動により、密度の高い岩塊は中心へと落ち込みます。この過程では、岩塊の自転（スピン）による角運動量は保存された状態で中心に集まり、氷の昇華に伴い彗星のサイズが次第に減少するため、彗星全体の自転速度は次第に増加します。観測されたリュウグウの形状がソロバン玉と似ているのは、自転速度の増加に伴う遠心力

PRESS RELEASE

が作用した結果なのかもしれません。(図3)。

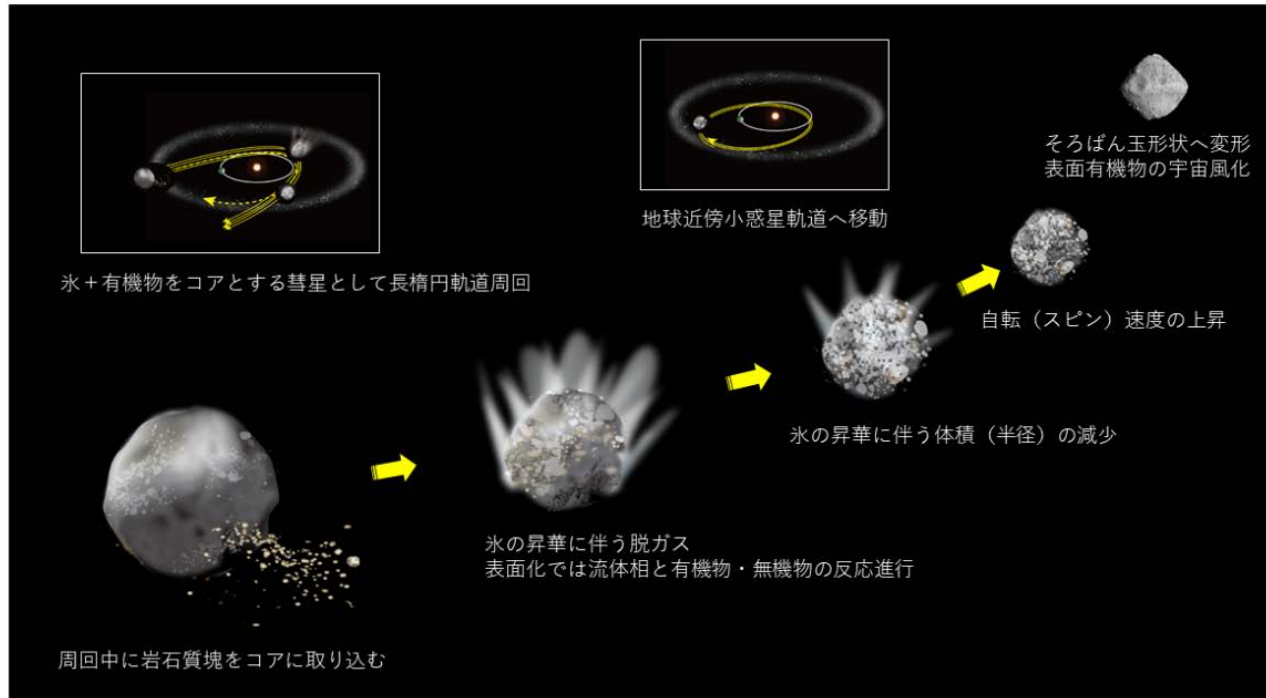


図3：彗星（氷母天体）が小惑星リュウグウになるまでの様子。衝突によって破壊された岩石塊は、彗星が太陽を周回する彗星との衝突の際に、彗星の核に取り込まれる。また、彗星が太陽に接近する際に、彗星の核の氷は加熱され、徐々に昇華して消失する。この過程において、有機物は濃集する。そして彗星の核のサイズの減少に伴い、回転速度が上昇し、ソラバン玉の形状を持つ、有機物に富む瓦礫状小惑星が形成される。

（リュウグウ画像クレジット：JAXA・東京大学・高知大学・立教大学・名古屋大学・千葉工大・明治大・会津大・産総研）

<今後の展望>

本研究に基づく小惑星リュウグウに関する科学的推論は、「はやぶさ2」が持ち帰る採取試料を地球上の実験室で直接詳細に解析することによって検証が可能です。

「はやぶさ」が小惑星イトカワから回収した5粒の微粒子の初期総合分析を行った岡山大学惑星物質研究所のPMLグループ（Nakamura et al., 2003）は、小惑星を取り巻く宇宙環境を初めて物質科学的に明らかにしました（Nakamura et al., 2012）。

私たちはこれらの経験を踏まえ、有機物分析を合体させて世界に類のない「有機・無機物質総合解析システム（CASTEM plus）」を構築しました。

「はやぶさ2」帰還試料に関して、私たちは高次キュレーション分析を担当し、先述の「CASTEM plus」を活用して初期総合解析を実施します。理論とリモートセンシングを基に築き上げられた科学的推論に評価・判定を下すには、「はやぶさ2」が持ち帰る出所の明らかな天体の試料に直接接触



PRESS RELEASE

れ、詳細に分析にすることが必要不可欠です。

帰還試料を解析するにあたっては、隕石に関する従来の研究手法や概念にとらわれず、より普遍的な物質科学を実践する。想像を絶する発見に至り、パラダイムシフトが起きることも十分に期待できます。

人類が初めて手にする地球外物質を用い、これまでにない太陽系物質科学に挑む。これこそがサンプルリターン・ミッションの醍醐味といえるでしょう。

<参考文献>

Nakamura E. et al. (2019) Hypervelocity collision and water-rock interaction in space preserved in the Chelyabinsk ordinary chondrite. Proc Japan Acad Ser B 95: 165–177.

Nakamura E. et al. (2003) Comprehensive geochemical analyses of small amounts (< 100mg) of extraterrestrial samples for the analytical competition related to the sample return mission MUSES-C. Inst Sp Astronaut Sci Rep SP 16: 49–101.

Nakamura E. et al. (2012) Space environment of an asteroid preserved on micrograins returned by the Hayabusa spacecraft. Proc Natl Acad Sci 109: E624–E629.

■論文情報

論文名：The Albedo of Ryugu: Evidence for a High Organic Abundance, as Inferred from the Hayabusa2 Touchdown Maneuver. (小惑星リュウグウのアルベド：「はやぶさ2」のタッチダウン時に巻き上がった破片から推定される有機物量)

掲載紙：Astrobiology

著者：Christian Potiszil¹、田中亮吏¹、小林桂¹、国広卓也¹、中村栄三¹

¹The Pheasant Memorial Laboratory (PML)、岡山大学惑星物質研究所

DOI：https://doi.org/10.1089/ast.2019.2198

URL：https://pml.misasa.okayama-u.ac.jp/home.php

<お問い合わせ>

鳥取県東伯郡三朝町山田827

岡山大学惑星物質研究所

教授 中村 栄三

Tel: 0858-43-3745

