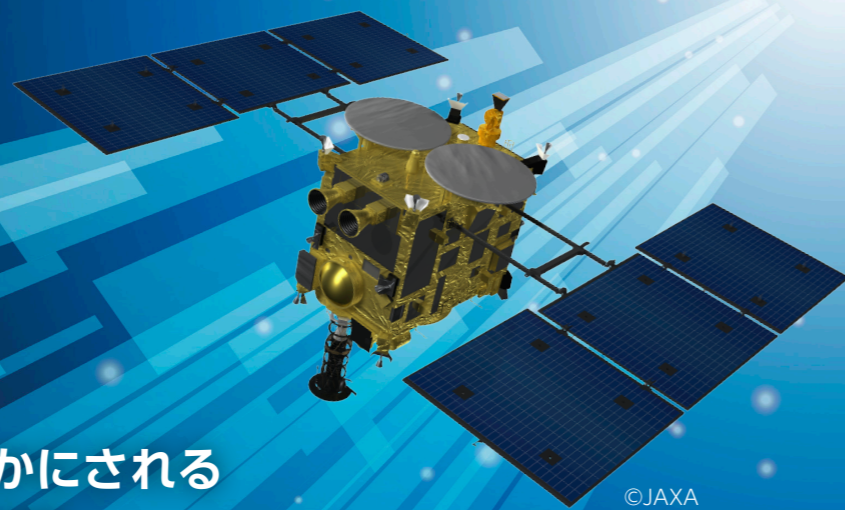


## はやぶさ2

リュウグウ試料から明らかにされる  
太陽系の進化と生命の起源

### Hayabusa2

Evolution of the Solar System and the Origin of Life Revealed from Ryugu Samples



©JAXA

#### 宇宙航空研究開発機構



宇宙科学研究所  
宇宙機応用工学研究系  
准教授

吉川 真



宇宙科学研究所  
太陽系科学研究系  
教授

臼井 寛裕

### ★はやぶさ2ミッション

「はやぶさ2」は、「はやぶさ」に続いて、世界で2番目の小惑星サンプルリターンミッションです。サンプルリターンとは、天体からその物質を持ち帰ることを指します。小惑星は、形成された約46億年前からその物質があまり変化していない天体ですので、小惑星から物質を持ち帰ると、地球などの惑星がどのような物質から生まれたのかが分かります。「はやぶさ2」の場合には、リュウグウという直径1kmほどの小惑星を探索してその物質を持ち帰ったのですが、リュウグウは水や有機物を含んだ天体と考えられていました。そのような天体から物質を持ち帰ることができれば、地球の水の起源や地球生命の元になった物質を解明することができるかもしれません。これが、「はやぶさ2」ミッションの最も重要な目的なのです。

サンプルリターンを行うには、非常に高い技術が必要になります。月からは何度もサンプル(月の石や砂)が持ち帰られていますが、月よりも遠くからサンプルを持ち帰ったミッションはこれまで4

例しかありません。2004年に太陽風(太陽から放出される粒子)を持ち帰った「ジェネシス」、2006年にヴィルト第2彗星が放出した塵を持ち帰った「スターダスト」、そして、「はやぶさ」と「はやぶさ2」です。「ジェネシス」と「スターダスト」は、太陽系空間を飛行しながらサンプルを取得して地球に戻ってきたものですが、月よりも遠い天体まで行って着陸して地球に戻ってきた探査機は、現時点では「はやぶさ」と「はやぶさ2」だけです(3番目が最後に述べます米国のOSIRIS-RExになる予定です)。「はやぶさ」は2003年に打ち上げられて2010年に地球に戻ってきましたので、もう20年前に世界初の挑戦を行っていたわけですが、ただ、「はやぶさ」は数々の深刻なトラブルに見舞われました。これはお手本がない世界初がいかに難しいかということを物語っているのですが、技術的には好ましくないことです。より確実な技術に仕上げようということで「はやぶさ2」を行いました。これも「はやぶさ2」の重要な目的でした。

### ★はやぶさ2探査機

「はやぶさ2」は、初号機である「はやぶさ」をベースにして設計されました。ただし、前述のように「はやぶさ」は多くの技術的トラブルがありましたので、それらのトラブルを検証して改良したのになっています。また、2010年に打ち上げられた金星探査機「あかつき」もそのメインエンジンにトラブルがあったのですが、そのトラブルについても「はやぶさ2」では同様なことが起こらないように設計を変更しています。

探査機の外観を図1に示します。太陽電池パドルの端から端までは約6mありますが、本体は1m×1.6m×1.25mの大きさで、燃料込みの重さは約609kgです。これは、惑星探査機としては小さいのですが、カメラをはじめとして4つの科学観測機器、人工クレーターを作るための衝突装置とその観測のための分離カメラ、小惑星表面に降ろす着陸機とローバー(探査車)を合計4機、そして表面物質を採取するための装置や地球に持ち帰るためのカプセルなど多くのミッション機器が搭載されています。これら以外にバス機器と呼ばれる太陽電池パドル、イオンエンジン、化学推進スラスタ、アンテナ、姿勢制御や着陸のための装置など非常に多くの機器が搭載されているのです。



図1 はやぶさ2探査機の外観

### ★ミッションの経緯

「はやぶさ2」が提案されたのは2006年でした。2005年の年末に、「はやぶさ」が小惑星イトカワへの着陸を試みたのですが、離陸後に燃料が漏れてしまい、一時的には通信も途絶えてしまいました。また、サンプルを採取する手順が予定通りに実行されていなかったことも分かりました。サンプルが取得されていないかもしれないし地球に戻れるかどうか分からないという状況でしたので、翌年の2006年に再挑戦として「はやぶさ2」を提案したのです。ですが、提案は認められず、毎年のように予算要求を行いましたが、プロジェクトとしてはスタートできません。諦めかけていた2010年6月、「はやぶさ」が劇的な地球帰還をします。すると、2011年に「はやぶさ2」がプロジェクトとして認められました。

惑星や小惑星などの太陽系天体に行くには、打ち上げウインドウと呼ばれる、探査機打ち上げのタイミングが決まっています。「はやぶさ2」がリュウグウに行くには、2014年末に打ち上げる必要がありました。探査機を設計・製作するのに、実質的に4年程度しかなく、これは、このクラスの探査機にとってはかなり厳しいのですが、どうにか間に合わせることができ、2014年12月3日、「はやぶさ2」は種子島宇宙センターからH-IIAロケット26号機で打ち上げられました。探査機は、通常は打ち上げられるとすぐに地球から離れて太陽系空間に向かって行くのですが、「はやぶさ2」の場合には、ロケットから探査機が分離されるときに条件がよくなかったため、地球を1周してから離れていくという特殊な軌道で打ち上げられました。

打上げからちょうど1年後の2015年12月3日、「はやぶさ2」は地球に接近して、地球の引力を利用して軌道を変更するスイングバイというテクニックを使って、リュウグウに向かいました。リュウグウ到着は、打ち上げから約3年半後の2018年6月27日。初めて見たリュウグウは、そろばんの珠のような形で、これは全くの想定外でした(図2)。さらに、その表面は大小無数の岩塊で覆われており、広くて平らな場所が無いということもわかりました。これは着陸(タッチダウン)にとっては、かなり難度が高いということを示しています。

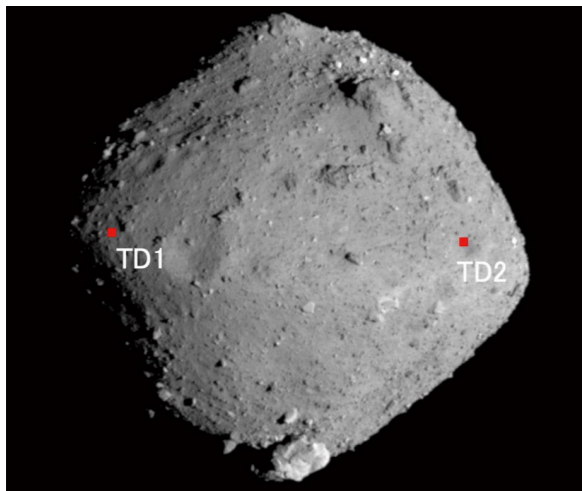


図2 小惑星リュウグウ。TD1とTD2はそれぞれ1回目と2回目のタッチダウン地点を示す。

探査機に搭載された観測機器でリュウグウを詳しく観測した後、リュウグウ表面にミネルバIIの1Aと1Bという2機のローバと、マスコットというドイツ・フランスが開発した着陸機を降ろしました。これらはすべて成功して、リュウグウ表面でデータの取得ができました。そして、2019年2月には1回目のタッチダウンを、4月には衝突装置によってリュウグウ表面に人工クレーターを作る実験を、7月にはその人工クレーターの近くに2回目のタッチダウンを行いました。2回目のタッチダウンでは、人工クレーターから放出された地下物質を採取するということが目的でした。これらの運用もすべて成功しました。タッチダウンは、リュウグウ表面がデコボコだらけなので、直径がたった6~7mの領域に降りるといったピンポイントタッチダウンというテクニックを使いましたが、2回とも誤差が1m以下の高精度で実施できました。

以上で予定されていた運用はすべて終了したのですが、タッチダウンを行うときに事前にリュウグウ表面に降ろしておくターゲットマーカという人工的な目印が3個余っており、ミネルバIIのローバ2も残っていたので、ターゲットマーカ2個とローバ2をリュウグウを周回する人工衛星とする実験を追加で行いました。リュウグウのような小さな天体のまわりに人工衛星を飛行させたことも世界初です。これらすべてのミッションが終わって、2019年11月13日に「はやぶさ2」はリュウグウを出発し、地球に向かう軌道に乗りました。

約1年後の2020年12月5日、地球に接近した「はやぶさ2」から再突入カプセルが分離されました。そして、翌日12月6日の未明に、カプセルは流

れ星となってオーストラリアの夜空を横切っていく、オーストラリアのウーメラ砂漠に無事着地したのです。カプセルはすぐに回収され、まず現地ではカプセル内の気体を抽出したあと、すぐに日本に輸送されました。そして、12月8日には、JAXA相模原キャンパスのキュレーションという施設に搬入されたのです。この後、キュレーションの作業と初期分析が行われますが、以下で詳しくご説明します。

なお、「はやぶさ2」はその後、地球から離れていき、新たなミッションを開始しました。この新しいミッションを「はやぶさ2拡張ミッション」と呼びますが、2026年に小惑星2001 CC21の近くを通過しながら観測をし(フライバイ探査)、そして2031年に小惑星1998 KY26に到着する予定です。これらの小惑星も未知の天体ですから、新たな事実が判明することでしょう。

## ★ サンプルからの科学成果

すでに述べたように、2020年12月6日、「はやぶさ2」により小惑星リュウグウの試料(サンプル)が地球に届けられました。リュウグウ試料は太陽系が生まれた時の様子を知るための貴重な情報源と考えられています。リュウグウ試料の分析により、太陽系がどのように形成され進化してきたか、そして私たち地球や生命がどのように誕生したのかという問いへと迫るような成果が次々と明らかになっています。以下では、その科学成果の一端をご紹介します。

## ★ リュウグウ試料の処理: キュレーション活動

小惑星リュウグウから持ち帰られた試料は、太陽系が生まれたばかりの時代の姿を記録しています。このような重要な試料を地球の環境に晒すと、それが太陽系の原初的な情報を失う恐れがあります。それはまるで、歴史的な文書を水や風に晒すことに等しいのです。そこで、試料が地球に到着した後、最初に行われるのが試料の保管・管理・記載を行うキュレーション作業です。

キュレーション作業は、相模原にあるJAXA宇宙科学研究所に設置されたキュレーション施設で実施されました(図3)。試料の処理は、クリーンルーム内に設置された超高真空環境と純化した窒

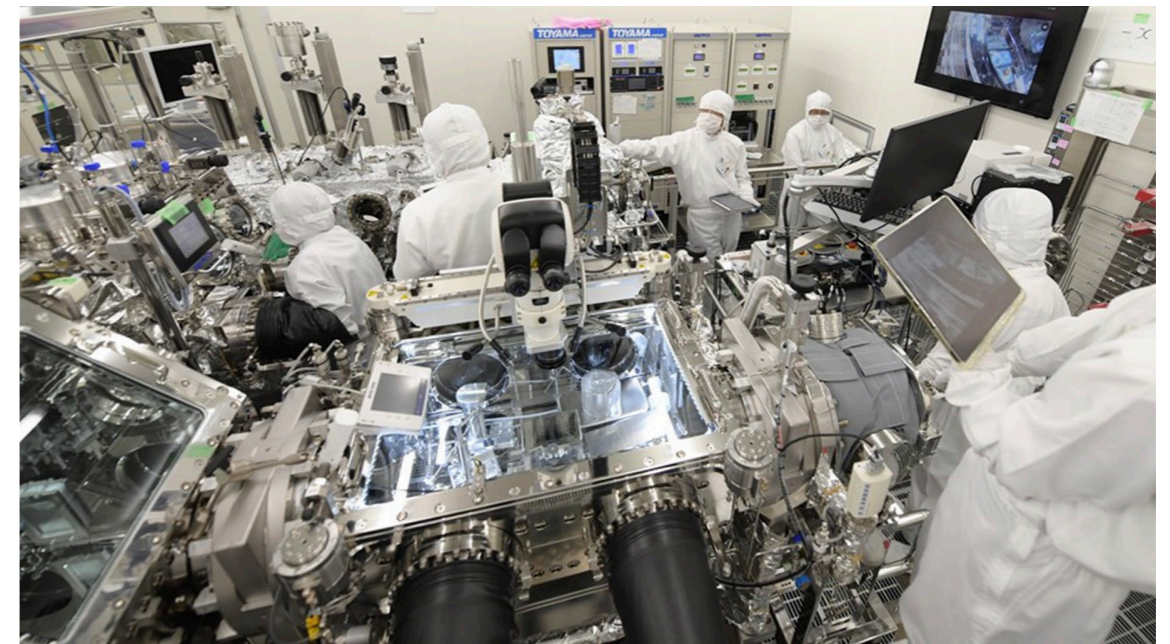


図3 ISASクリーンルームに設置された、はやぶさ2クリーンチャンバーとそこで作業するキュレーションスタッフ

素ガス環境を維持したクリーンチャンバーで実施されます。そして試料は光学顕微鏡などを用いた詳細な観察と分析がなされたあと、その情報はカタログに記載されます。この観察・分析作業もまた、試料が汚染されることなく、その初生的な状態が維持されるように行われます。キュレーション作業は、世界中の研究者が、試料の科学的な価値を最大限に引き出すために必須の工程となっており、JAXAが責任を持って実施しています。

## ★ リュウグウの化学分析結果: 隕石との関係

JAXA宇宙科学研究所のキュレーション施設から持ち出された試料は、科学者の手によってさまざまな分析活動が行われました。その一つは、化学組成・同位体組成の分析です。化学組成分析の結果、リュウグウは「イブナ型炭素質隕石」(CIコンドライト)と呼ばれる、小惑星を起源とする隕石と酷似していることが明らかになりました。CIコンドライトとは、太陽系が誕生した初期の物質で構成される、非常に古い種類の隕石です。また、化学分析からは、リュウグウの試料が、地球汚染を全く受けていないことも確認されました(図4)。この事

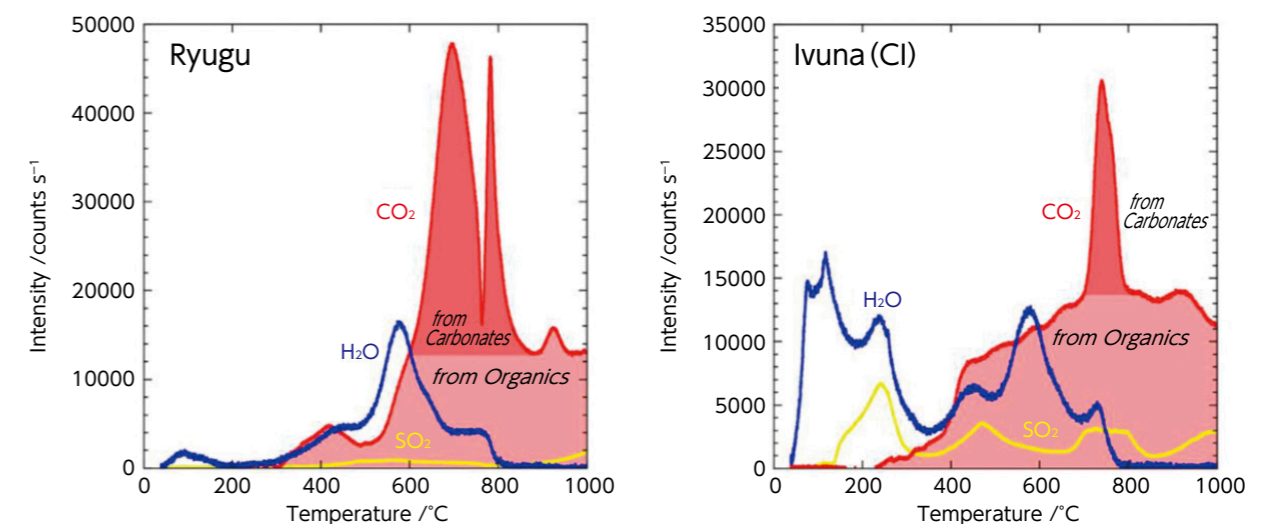


図4 TG-MSによるリュウグウ(左)、およびイブナ隕石(右)の水分量分析の結果。縦軸は質量分析計の信号強度。リュウグウでは、イブナ隕石で見られる200°C以下の低温領域で発生する地球由来の水が検出されなかった(Yokoyama et al. 2023)。

実は、リュウグウ試料が太陽系の起源を理解するための鍵となる情報を持っていることを意味しています。

## ★リュウグウの化学分析結果: ★小惑星の水分量

一方、リュウグウ試料とCIコンドライト隕石との間には微妙な違いも存在します。特にリュウグウ試料に含まれる水分量(約7%)は、CIコンドライト隕石に含まれる水分量(約13-20%)の半分以下であることが分かりました。両者の違いを生んだ要因は何なのでしょう? 実は、隕石は地球にもたらされる際に大気中の水分を吸収し、変質していることが分かっています。つまり、リュウグウ試料の分析により、世界で初めて、地球汚染の影響のない、小惑星が本来持つ水の量が正しく見積もられることができました。

小惑星の水分量の正確な見積もりは、小惑星資源探査、特に水資源探査に大きな影響を及ぼすことになりました。つまり、リュウグウ試料に含まれる水の存在形態、分布、含有量が明らかになったことで、小惑星からの水資源がどの程度利用可能かを評価する正しい情報が得られるようになったのです。リュウグウの分析は、宇宙科学のみならず、

人類の宇宙開発の新たなステージを切り開く可能性を秘めています。

## ★リュウグウの形成の歴史

リュウグウ試料の分析から、リュウグウとその母天体の歴史が明らかになりました(図5)。太陽系が誕生した際の冷たい原始的な雲(原始太陽系星雲)の中で、リュウグウの母天体が誕生したと考えられています。この冷たい環境で、リュウグウは岩石、氷、ドライアイスの粒子を取り込んで成長しました。

一方、リュウグウ試料には、太陽に近い場所で高温環境下で生成された粒子も存在しています。これは、太陽系が形成された初期には物質が広範囲に混ざり合っていたことを示し、太陽系初期のダイナミックな状況を物語っています。

その後、リュウグウ母天体の岩石が天体内部の水や二酸化炭素と反応し、水を含んだ鉱物や炭酸塩鉱物を形成しました。そうしてできた鉱物(硫化鉄)中にも水分子が閉じ込められていることが発見されました(図6)。リュウグウの多様な成分は、その形成に関与した多くの小さな岩片や、水との化学反応時の条件の違いから来るものと推測されます。

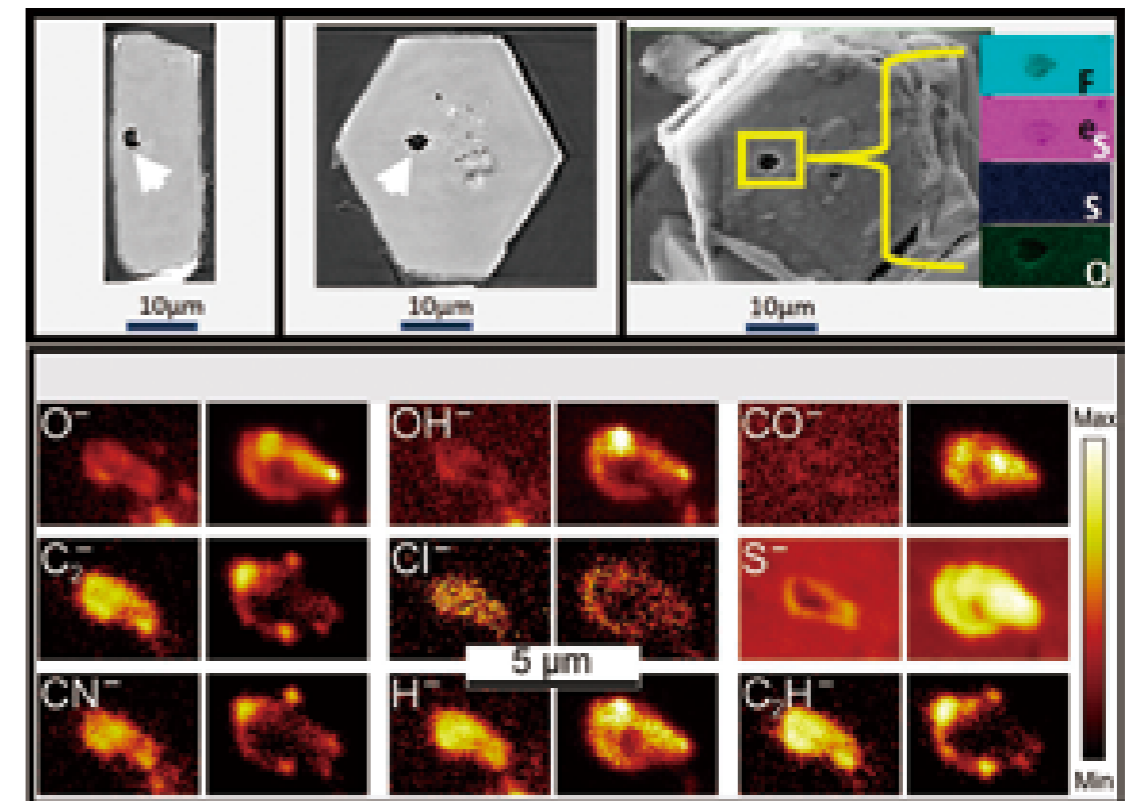


図6 リュウグウ試料に含まれる結晶(硫化鉄)の内部に発見された水とCO<sub>2</sub>を主成分とする液体(Nakamura et al. 2023)。

リュウグウの母天体がどのように形成され、また大規模な衝突でどのように破壊されたのかを理解するために、研究者たちはシミュレーションを実施しました。その結果、リュウグウの母天体は太陽系が形成されてから約200万年後に形成され、その後水と岩石の反応が始まり、約500万年後に内部が最高温度に達したと推定されました。その後の大規模な衝突により、直径100kmほどの母天体が破壊され、その破片から最大直径50kmの天体と多数の小さな岩塊が生じました。そして、これらが再び集まり、現在のリュウグウが形成されたと考えられています。

## ★リュウグウ試料に 含まれる有機物

「はやぶさ2」のリュウグウ探査は、太陽系の進化と成り立ちに対する理解だけでなく、地球上の生命の起源に関する重要な情報も提供しました。リュウグウから得られた試料には、種々様々な有機分子が含まれていました。有機分子は生命の基盤となる炭素を主成分とし、水素、窒素、酸素、硫黄など他の元素と結合することで複雑性と多様性を持ちます。

初めに取り上げるのは、黒い固体として存在す

る不溶性有機物です。この有機物は、リュウグウの母天体で水および岩石と反応し、化学進化したと考えられています(図7)。試料中の有機物の組成は、原始的なコンドライト隕石と類似していますが、リュウグウの試料はより多様性を示しました。これは、水と有機物の反応がさまざまな条件下で起き、リュウグウの成形過程が複雑で多様だったことを示唆しています。

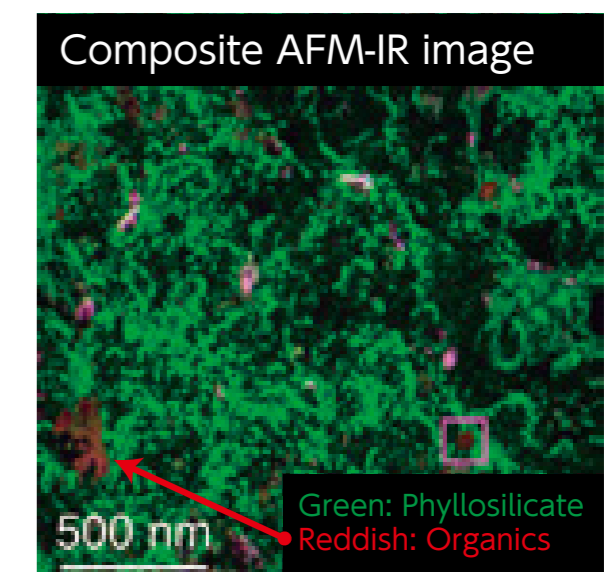


図7 リュウグウ試料の原子間力赤外顕微鏡観察で取得された、各官能基の赤外吸収に基づくマップ(Yabuta et al. 2023を一部改変)。鉱物である層状ケイ酸塩(緑色)と有機ナノ粒子(赤、紫)が共存している様子が見て取れる。

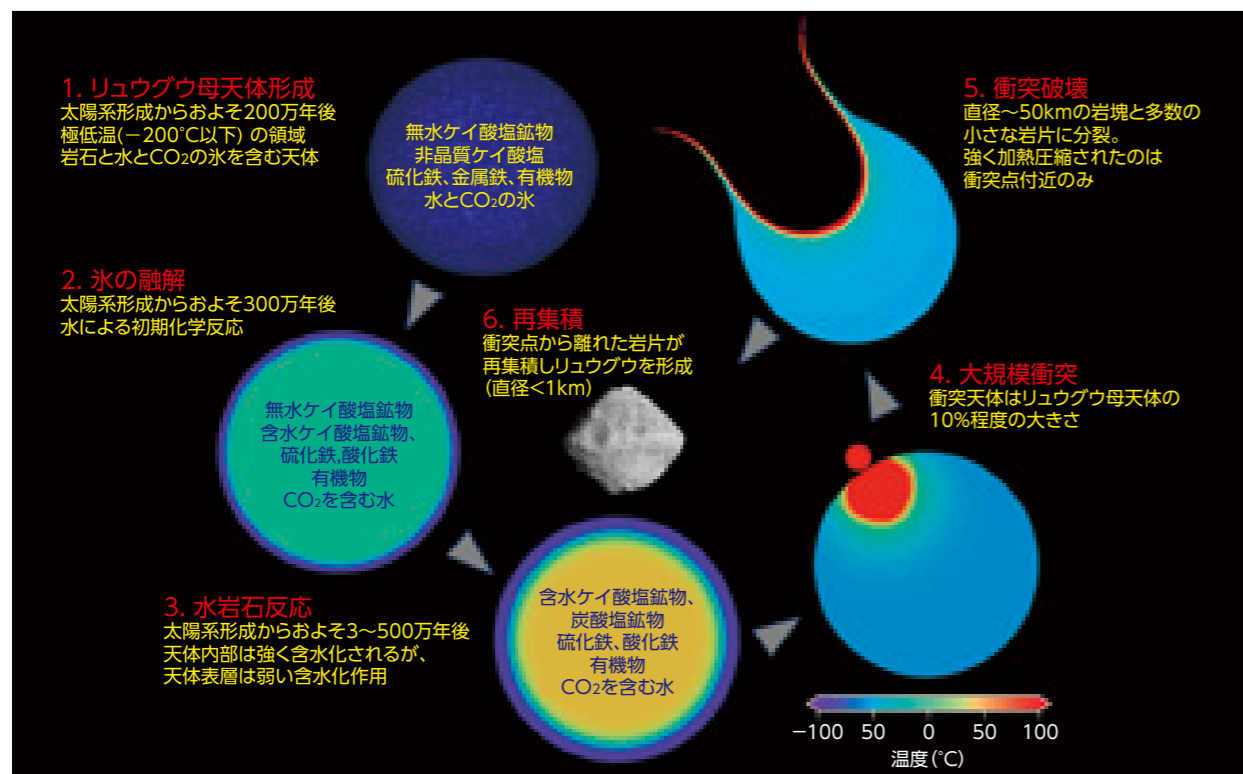


図5 リュウグウサンプルの分析結果から推定されるリュウグウの形成進化プロセス(Nakamura et al. 2023)。天体の温度分布や年代、衝突破壊のプロセスは数値シミュレーションで求めた。

## ★おわりに

「はやぶさ2」によるリュウグウ試料の分析結果は、小惑星の成分やその歴史に関する非常に重要な情報を提供しました。同じく今年（2023年9月24日）に帰還が予定されているNASAのOSIRIS-RExミッションによるベンヌ小惑星からのサンプルリターン計画も、宇宙の歴史を解明するための重要な手がかりとなるでしょう。JAXAは、NASAからベンヌ試料の一部を受け取る予定で、リュウグウ試料に対して行ったようなキュレーションの準備が急速に進行しています。リュウグウとベンヌの試料を比較することで、これらの小惑星がどのように形成され、どのように進化してきたか、現在の状態に至ったのかという、より詳細かつ具体的なプロセスを理解することが期待されます。

- 図1: ©JAXA  
 図2: ©JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研  
 図3: ©JAXA  
 図5: ©MIT, 千葉工業大学, 東京工業大学, 東北大学  
 図6: ©東北大学, NASA/JSC, SPring-8

次に、水溶性有機物について触れます。リュウグウ試料を溶媒抽出して分析した結果、驚くべきことに約2万種類の有機分子が存在することが判明しました。これらの有機分子には、アミノ酸、カルボン酸、アミンといった化合物が含まれています。特筆すべきは、アミノ酸です。これらの化合物は生命の基礎であるタンパク質を形成する材料となります。リュウグウから得られた試料には、生物に一般的に見られるアミノ酸、例えばアラニンなどのタンパク性アミノ酸や非タンパク性アミノ酸が確認されました。しかしながら、これらのアミノ酸の構造から判断すると、それらは生物によって生成されたものではなく、生物学的プロセス以外の自然現象によって形成された可能性が高いことが示唆されました（図8）。

さらに、リュウグウ試料から見つかった芳香族炭化水素は、ナフタレン、フェナントレン、ピレン、フルオランテンなどを含んでいました。これらの化合物は地球上の原油と似た特性を持ちます。それらの分布パターンは、地球上の熱水原油のパターンと一致し、これはリュウグウが母天体上で水の存在により形成された可能性を示唆しています。これらの有機分子の存在は、リュウグウが豊富な炭素資源を持つことを示し、これ自体が宇宙資源探索の観点から重要となります。

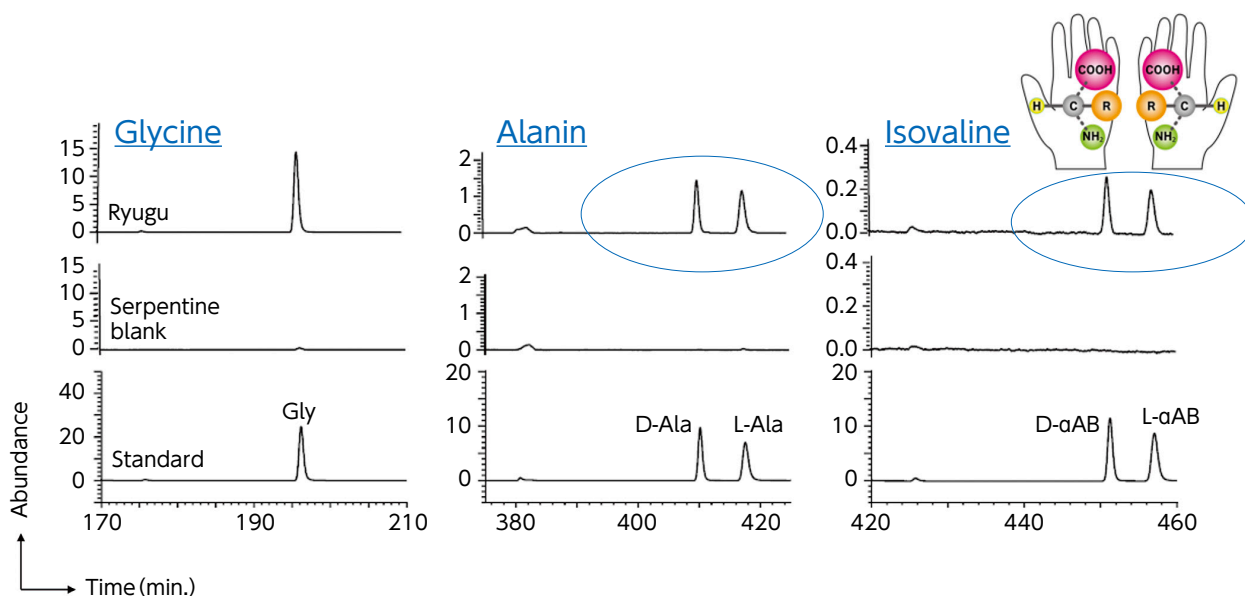


図8 リュウグウ試料の熱水抽出・加水分解物から検出されたアミノ酸の光学分離。検出された光学対掌体アミノ酸は左手構造・右手構造がほぼ1:1のラセミ体であった (Naraoka et al. 2023)。