

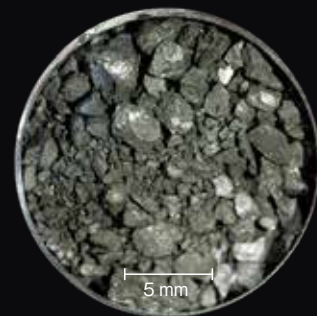


帰還する「はやぶさ」

2010年6月13日、小惑星探査機「はやぶさ」が帰還した。

右下の光点は本体から切り離れたカプセル。

画像提供：NASA Ames Research center



リュウグウで採取されたサンプル
炭素の含有量の多い炭素質コンドライトと
同様な組成を持つリュウグウのサンプル。
画像提供：宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

小惑星サンプルに刻まれた 太陽系の歴史を紐解く

「はやぶさ」「はやぶさ2」は、小惑星から直接、サンプルを採取し、地球に持ち帰るという画期的な成果をあげた。小惑星イトカワとリュウグウからもたらされたサンプルはどのような事実を明らかにしたのだろうか。小惑星や太陽系形成の謎を解くサンプルリターン計画の成果の一端を紹介する。

小惑星からのサンプルリターンの意義

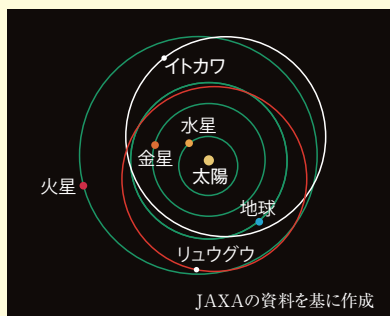
小惑星から試料を採取し、持ち帰る「サンプルリターン」の意義は、試料の由来が明確な点と、隕石では失われてしまう試料表面の情報を観察できる点であるとされる。

たとえば月由来とされる隕石は、その反射スペクトルが月の岩石の反射スペクトルと類似している点や、アポロが持ち帰った試料による組成比較などが根拠とされている。また、火星由来とされる隕石は、火星の大気に含まれる希ガス同位体と窒素や二酸化炭素の量比の一致が根拠とされている。しかし、いずれも直接的な証拠ではない。これに

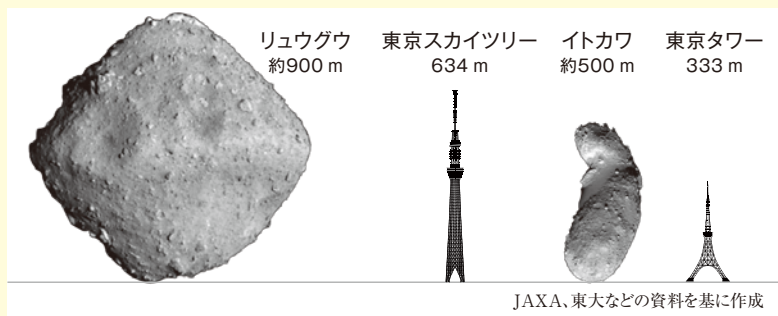
対してサンプルリターンでは「イトカワ」「リュウグウ」(図1、2)のどの場所から採取されたのかまでが明確であり、そこから得られる情報はそれまでの仮説を裏付ける「ground truth」となる。

イトカワが示す小惑星の「進化」の歴史

イトカワから回収されたサンプルは詳細に分析され、これまで推測されてきた小惑星の進化の歴史——塵やガスなどが集積して小惑星を形成していき、小惑星同士の衝突により破壊され、破片の一部が再集積する——を裏付ける結果が



JAXAの資料を基に作成



JAXA、東大などの資料を基に作成

小惑星「イトカワ」と「リュウグウ」は、近日点が地球軌道の内側に入る、アポロ群と呼ばれる小惑星群に属する地球近傍小惑星である。イトカワは石質物質を主成分とするS(Stony/Siliceous)型小惑星、リュウグウは石質物質に水(氷)や有機(化合物)物が加わったC(Carbonaceous)型小惑星に分類されている。

図1 イトカワとリュウグウの軌道

図2 イトカワとリュウグウの大きさの比較

示されている。

電子顕微鏡とX線回折によりイトカワの微粒子は、カンラン石、輝石、斜長石、トロイライト（硫化鉄）、テーナイト（鉄ニッケル金属）、クロマイトなどの鉱物から構成されていることが明らかになった。

また、イトカワ微粒子の表面模様は4つに大別され、イトカワの母天体時代にできたもの、天体衝突によるレゴリス（粉碎された岩石などの細粒物）形成時にできたもの、イトカワ表面でのレゴリスの流動時にできたもの、イトカワ表面で太陽風によりつくられたものと推測された。

イトカワの母天体時代にできたと推測される模様は熱変成によるもので、800℃程度の高温での蒸発・凝縮実験で形成した鉱物とよく似た構造を示している（図3a）。このような環境が存在するのは母天体での熱変成か天体衝突による加熱が推測される。

また、破断された断面を持つ微粒子があることから、イトカワ表面では天体の衝突による破砕が起きていたことが示唆されている（図3b）。

さらに、イトカワ表面に存在する微粒子は、太陽風の影響も受けることになる。太陽風に含まれる水素イオンやヘリウムイオンが微粒子表面に入り込むことで形成されるブリストー（水ぶくれ状）構造が確認されている（図3c）。

そのほか、摩耗痕のある微粒子が見つかった（図3d）。これは表面のレゴリスが流動したために生じたと推測される。イトカワには大気がないが、太陽風による荷電や昼夜の温度差、天体の衝突、自転速度の変化、惑星の近くを通

過した際に受ける潮汐力などがレゴリス流動の原因と推測されている。

これらの結果から、45億年前にガスや塵が集積してイトカワ母天体が形成され、天体内部が800℃に達するには直径約20 kmの大きさであったと推定された。そして天体の衝突により母天体が破壊、破片が再集積してイトカワが形成され、その表面では天体の衝突や太陽風による「宇宙風化」が進行しているという、これまでに推定されてきた小惑星の進化の歴史が裏付けられたのである。

リュウグウに残された原始太陽系の姿

はやぶさ2によってリュウグウのサンプルは2020年12月6日に地球に帰還した。イトカワよりも豊富に採取されたサンプルからは、イトカワと同様に小惑星の進化の歴史を示す痕跡が発見された。加えて、太陽系の形成に関わる情報も得られている。

従来の惑星形成モデルでは、太陽が生まれた後にガスや塵で構成された原始惑星系円盤が形成され、太陽に近い軌道では岩石ダストから岩石惑星が生まれ地球などに進化し、太陽から遠い軌道では岩石ダストと氷ダストから氷惑星が生まれ、木星型惑星や天王星型惑星にほぼ同時期に進化していったと推測されていた。

しかし、近年の系外惑星の観測などにより、このモデルの見直しが迫られている。新しい惑星形成モデルでは、原始惑星系円盤でまず木星型の巨大ガス惑星が形成されたと考え

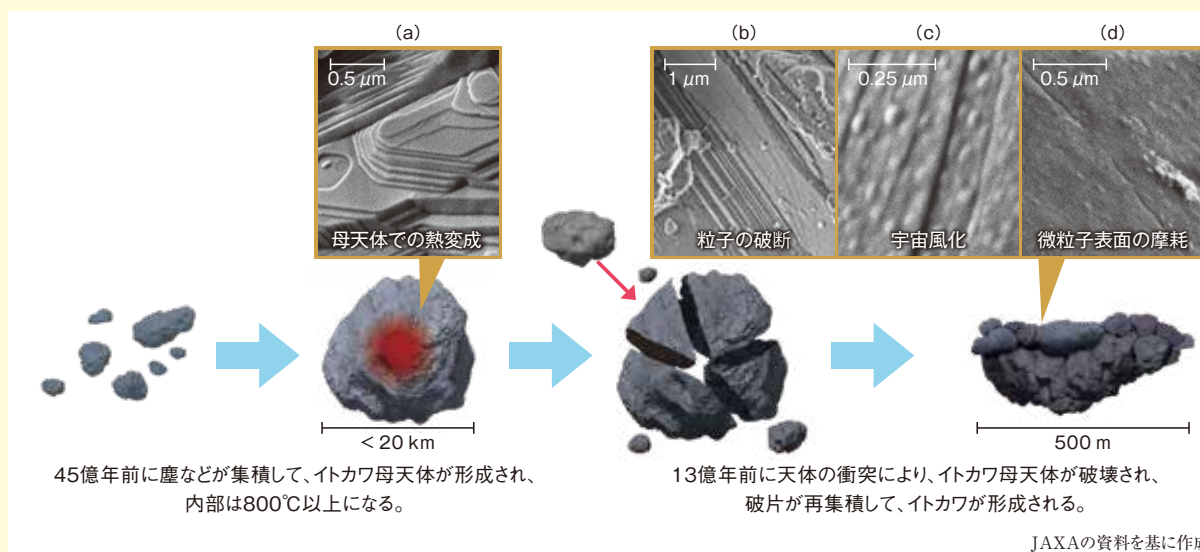


図3 イトカワ40億年の歴史

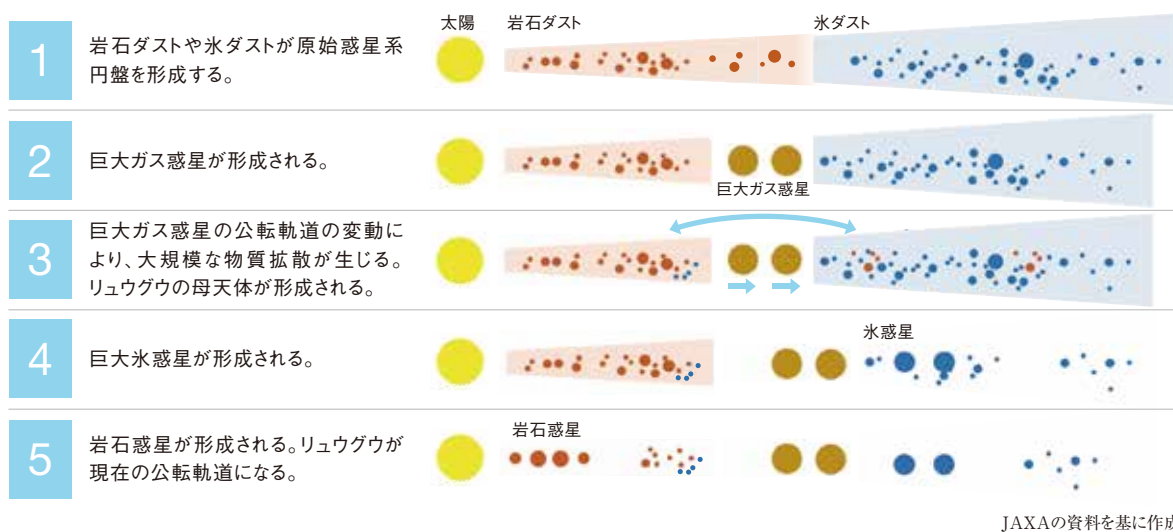


図4 推定される太陽系形成プロセスの例

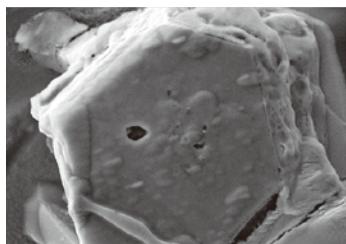
られている。加えて、公転軌道が変化したと推測されている(図4)。

その推測を裏付ける証拠がリュウグウのサンプルから発見されている。サンプルからは結晶に閉じ込められた液体の水が発見されており、これはドライアイス(CO₂氷)が存在する空間でリュウグウが形成されたことを示している(図5)。その一方で、約1350℃以上の高温環境でできたカルシウムとアルミニウムに富む含有物を含む粒子が発見されており、これは太陽の近くで形成されたと推測されている(図6)。

これらの離れた場所で形成された粒子がリュウグウとして集積するためには、大規模な物質の攪拌が必要であり、巨大ガス惑星の公転軌道の変化が起こっていたことが示唆される。

また、リュウグウの形成進化プロセスも推定されている。リュウグウの母天体は、水と二酸化炭素が氷で存在する-200℃以下の低温領域で形成された。その後、母天体内部の放射性核種²⁶Alにより氷が溶ける温度(0~50℃)まで上昇し、炭酸塩と磁鉄鉱、含水状珪酸塩などが形成されたと考えられている。リュウグウのサンプルからは水の存在下で形成する磁鉄鉱などが発見されている。磁鉄鉱は結晶が形成された当時の磁場を反映しており、リュウグウ母天体の形成時には太陽系は磁場を持つ星雲ガスに覆われていた可能性が示されている。

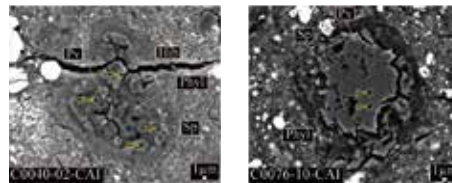
温度上昇からリュウグウ母天体の大きさは直径100 km程度と推測され、その後、母天体の1/10程度のほかの天体が衝突して母天体が破壊されたと考えられる。衝突時の熱



内部からは水とCO₂を主成分とする液体が発見された。

画像提供: 東北大学 中村智樹教授

図5 リュウグウサンプル中の六角板状の結晶(硫化鉄)



CaとAlに富む含有物には、スピネル(Sp)、ヒポナイト(Hib)、ペロブスカイト(Pv)、Alに富む層状珪酸塩(Phyl)が観察された。黄色の三角形で指す穴は同位体比分析孔。 画像提供: 東北大学 中嶋大輔博士

図6 リュウグウサンプル中に発見された高温環境(約1350℃以上)で形成された粒子

星のカケラで太陽系の謎を解く

はやぶさ／はやぶさ2のサンプル分析に携わった
京都大学理学部 野口高明教授に
小惑星や隕石の分析について話を聞いた。

2ヶ月かかって表面を見つける

▶ はやぶさのサンプル分析ではどのような苦労があったのでしょうか。

リュウグウのサンプル分析では、表面観察を行う計画だったのですが、人工クレーターを作った際にレゴリスが破砕され、観測できる表面を見つけるまでに時間がかかりました。ほかの分析チームが次々に成果を発表する中で、大きなプレッシャーを感じたことを覚えてます。

▶ 隕石や宇宙塵の分析とはどのような違いがあるのでしょうか。

小惑星のサンプルは大気中の水分などを吸着・吸収してしまうため、はやぶさのサンプルは大気を遮断した環境で分析する必要があります。そのために作業はすべてグローブボックスの中で行う必要があります。また、微小なサンプルを取り扱うためのツールやノウハウの開発も必要になります。

「ひげ状結晶」で分かること

▶ イトカワで発見されたひげ状結晶にはどのような特徴があるのでしょうか。

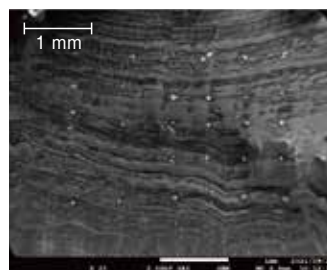
太陽風によって硫化鉄から硫黄が吹き飛ばされ、残った鉄が結晶化したと考えています。土台となる硫化鉄は宇宙風化でスカスカになっていますが、やや鉄が多いものの鉄と硫黄は1:1です。このことから、硫黄が飛ばされた後に残された鉄が表面移動してひげ状結晶を生成しているものと推測しています。また、ひげ状結晶が霜柱のように根本から成長していることも鉄が表面移動している証左と考えられます。

▶ 月のサンプルからもひげ状結晶が発見されました。

大気のない環境に硫化鉄が存在していれば、月でも小惑星でもひげ状結晶が成長すると考えています。長年、宇宙の照射環境にさらされることで成長するひげ状結晶は人間には再現することができません。今後、ほかの天体からもひげ状結晶が見つかることで、宇宙風化の時間的スケールとして利用できるようになるかもしれません。



リュウグウのサンプルのレプリカを持つ京都大学理学部 野口高明教授

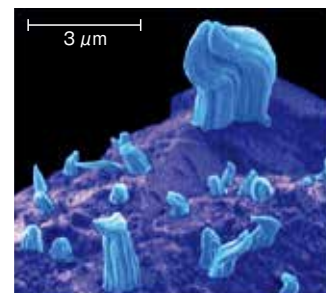


走査型電子顕微鏡用の試料金の板にごく薄くエポキシ樹脂を塗って、何度もカミソリで拭いた後にリュウグウの粒子を一粒ずつ並べた後の様子。波状に見える線が何度もカミソリでエポキシ樹脂を拭いた跡で、基盤の目状に粒子が並んでいるのが分かる。



グローブボックスでサンプルをハンドリングしている様子

グローブボックス内の実体顕微鏡の画像を見ながらマイクロピピュレータを操作して粒子を拾い上げている。



イトカワ微粒子で発見したひげ状結晶
走査型電子顕微鏡写真を着色した。硫化鉄(紫色)表面に金属鉄のひげ状結晶(青色)が成長している。

画像提供：京都大学 野口高明教授、松本徹特定助教

影響を受けた粒子が発見されていないことから、リュウグウは衝突点から離れた岩石が再集結したものと推測されている。そして、木星などの引力の影響を受け、現在の軌道になったものと考えられる。

現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)では次のサンプルリターン計画として、火星の衛星フォボスからサンプル採取を行い地球に帰還する火星衛星探査計画が進行中だ。また、米航空宇宙局(NASA)の探査機「オシリス・レックス」が小惑星Bennuで採取したサンプルを地球に持ち帰るために飛行を続けている。そのほかにも、木星のトロヤ群小惑星を

探査する探査機「ルーシー」も飛行中である。

サンプルリターンの進展により、太陽系の起源や初期進化に関する物質情報が得られるようになり、地球に飛来した隕石試料を太陽系天体に関連付けて理解できるようになった。今後のサンプルリターンの成果に期待したい。

●取材協力：宇宙航空研究開発機構(JAXA) 安部正真准教授、
京都大学 野口高明教授

●文 石田亮一