

特集 2

はやぶさサンプルを分析する



おかえり、
はやぶさ！

土 山 明*

Hayabusa sample analysis

Key Words : Hayabusa mission, Asteroid, Itokawa,
Preliminary examination, Meteorite

はやぶさサンプル

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のはやぶさ探査機は、イトカワと名付けられた小惑星の探査をおこない、表面より採取されたサンプル粒子を2010年6月に地球に持ち帰った。小惑星は惑星にまで大きくなれなかった小天体であり、太陽系形成時の情報を残していると考えられている。これまでにNASAなどの宇宙探査機が近接撮影した比較的大きなサイズの小惑星の表面は、月と同じようにレゴリス（他の小天体が落下することによって表面物質が破碎されて形成された砂礫）に覆われ、さらにレゴリスへの衝突でできたクレーターが多数存在していることがわかってきた（図1）。一方、イトカワのサイズは小さく（535×294×209 m）、重力も小さいので（脱出速度は20 cm/s程度）、レゴリスのような細かい粒子は宇宙空間に放出されて表面には存在しないのではないとも考えられていた。はやぶさ探査機が撮影したイトカワの姿はこれまでに知られていた小惑星表面とは異なり、その大部分は最大50mにもおよぶ岩塊（ボールダー）に覆われ、またレゴリスが集まった地域も観察された（図2）。多数のボールダーの存在やイトカワの平均密度（1.9g/cm³）から推定されたイトカワの空隙率（約40%）から、イトカワは瓦礫が集まって重力で緩く結合したラブルパイル天体であることが指摘された。

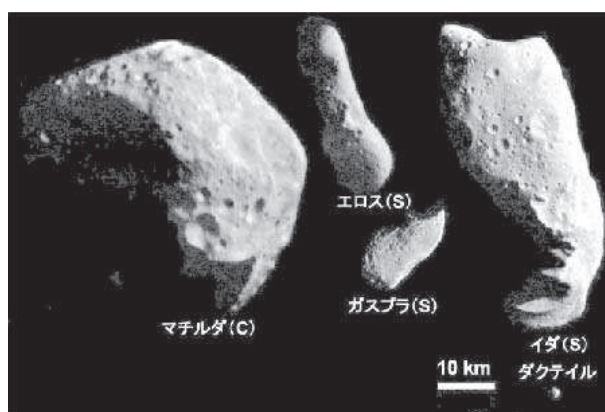


図1 はやぶさ以前に宇宙探査機により撮影された小惑星。括弧内は反射スペクトルタイプ。ダクテイルはイダの衛星。

はやぶさサンプルは人類がはじめて小惑星から採取したサンプルであり、これを分析することにより小惑星はどのような物質から成るのか、また小惑星起源であると考えられてきた隕石との関係が直接明らかにされるはずである。一方サンプルは、月（アポロ計画・ルナ計画）に次いで地球外天体から採取された2番目のレゴリスのサンプルでもあり、小惑星表面でどのようなことがおきているのかについての情報も期待される。

探査機が持ち帰ったサンプルカプセルは、JAXAのキュレーション施設で開封された。キュレーションとは博物館用語でサンプルを収集・分類・管理する作業のことである。イトカワ起源と考えられる微粒子の一部が初期分析チームに配分され、2011年の約1年間国内の様々な大学や研究機関において分析がおこなわれた。筆者は大学コンソーシアムチームのリーダーとして初期分析に参加し、この小惑星のサンプルを世界に先駆けて分析する機会を得、永年の夢を叶えることができた。幸いにして、我々のチームの結果はサイエンス紙に6編の論文 [1-6] として掲載され、2011年のブレークスルーにも選ば



*Akira TSUCHIYAMA

1954年1月生
東京大学大学院理学系研究科地質学専門
課程 (1982年)
現在、京都大学大学院理学研究科 地球
惑星科学専攻 教授 理学博士 鉱物学
・実験惑星物質科学
TEL : 075-753-4161
FAX : 075-753-4189
E-mail : atsuchi@kueps.kyoto-u.ac.jp

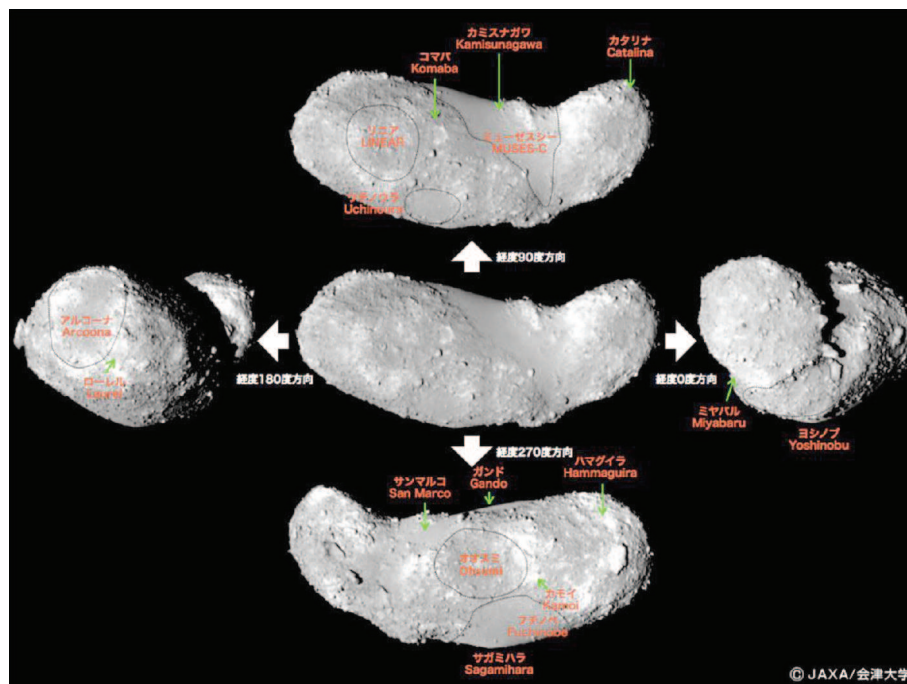


図2 はやぶさ探査機が撮影した小惑星イトカワと地形。ミュゼスシーと名付けられたレゴリス領域からサンプルが採取された。

れた。ここでは、その成果について述べ、今後の夢についても語りたいと思う。なお、初期分析に引き続いて、2012年1月には国際公募による詳細分析の公募が開始されており、近い将来サンプルが国内だけでなく世界に向けて配分される予定である。

どのように分析したのか

キュレーション施設でサンプルカプセルを開封したとき、光学顕微鏡下で最初サンプル粒子は確認できなかった。その後、テフロン製のヘラでカプセル容器内の壁をかき出すことにより、ヘラの先端に付着した微粒子が走査型電子顕微鏡 (SEM) により確認された (図3A)。さらに、容器を叩くことで落下した粒子を石英板上で捕集する手法により、比較的大きな粒子が回収できるようになった (図3B)。これらにより、現在少なくとも2000個以上のイトカワ由来と考えられる粒子が見出されている。そのサイズは最大300 μm で、多くは10 μm 以下の微粒子である。

はやぶさ計画は1995年に正式に承認されたが、サンプル分析は1990年から検討が始まり、1999年に本格的な議論が開始された。計画では、探査機が小惑星表面にタッチダウンして弾丸発射により舞い上がる粒子を回収するという手法を採用したため、

A イトカワ粒子 アルミ粒子(人工物)

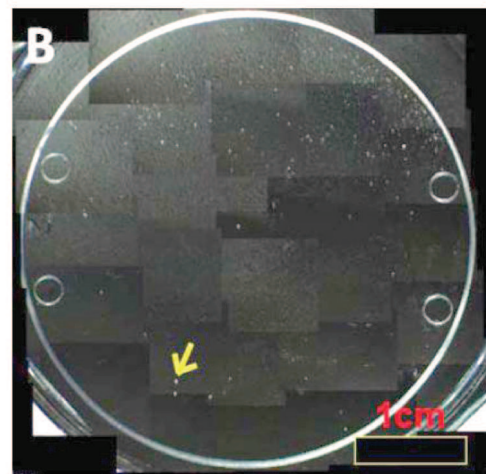
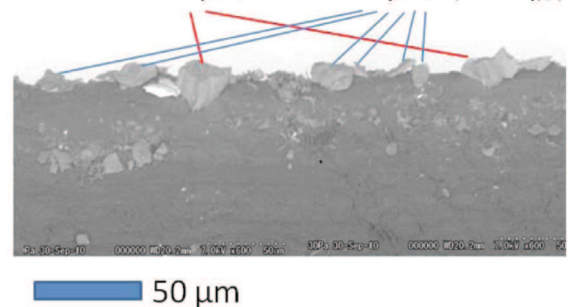


図3 回収されたイトカワ粒子 ([1] より)。(A) テフロン製のヘラの先に見出された粒子 (走査型電子像)。赤い線で示された左はカンラン石、右は輝石の粒子である。この他に、サンプル容器の壁をつくる多数のアルミ粒子が観察される。

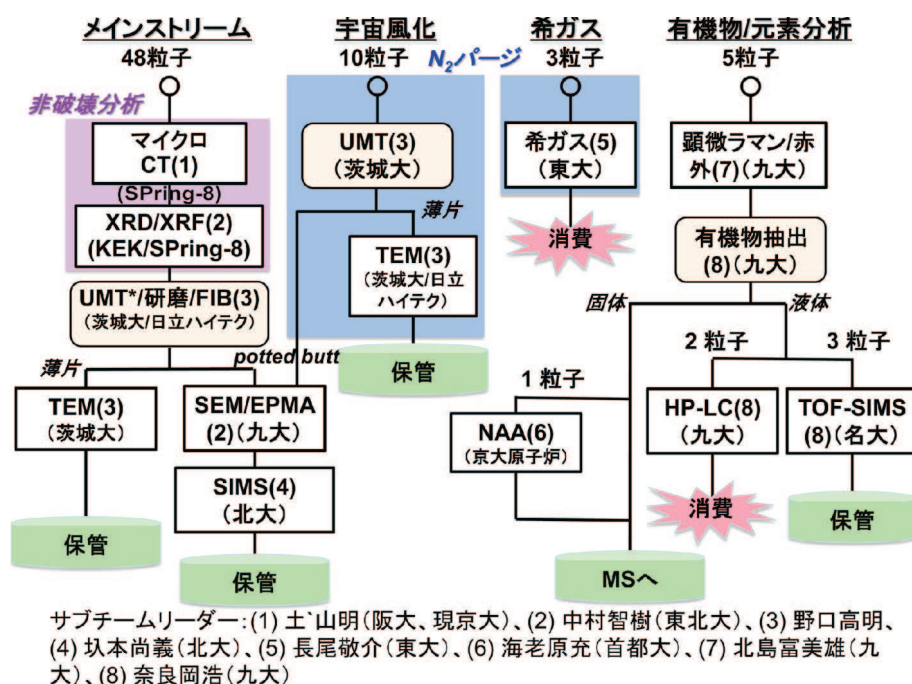


図4 はやぶさサンプルの初期分析フロー。

XRD: X線回折、XRF: X線蛍光分析、UMT: ウルトラマイクロトーム、FIB: 収束イオンビーム、TEM: 透過型電子顕微鏡、SEM: 走査型電子顕微鏡、EPMA: 電子プローブ局所分析、SIMS: 二次イオン質量分析、NAA: 中性子放射化分析、HP-LC: 高速液体クロマトグラフィー、TOF-SIMS: 時間飛行型二次イオン質量分析、potted putt: 粒子の切断面が樹脂に埋め込まれているもの。

1 mm 以下の粒子が1 g 程度採取されることが予想された。2003年に探査機が打ち上げられ、2005年にイトカワに到着、様々な観測をおこなった後、サンプリングが試みられた。タッチダウンには成功したものの弾丸が発射されなかったことが判明し、サンプルが採取されたとしても微小粒子が微量しか採取されていないことが予想された。これにより、微量の微粒子からいかにして最大限の情報を効率良く得るかが最大の検討事項となった。この頃、初期分析グループの何人かのメンバーは、NASAのスターダスト計画の彗星塵サンプル(2006年地球に帰還)初期分析にも携わっていた。この数10 μm 以下の微粒子の分析の経験が今回のはやぶさサンプルの分析に大いに役立つことになった。

初期分析には、比較的大きな約60粒子が配分された。大きいといってもそのサイズは30-180 μm 程度であり、肉眼でようやく見分けられる程度である。これらは、一粒子ずつ図4に示したフローにより分析された。この中で「宇宙風化」「希ガス」「有機物/元素分析」の3つのフローは、サンプルが地球上の大気(とくに酸素および希ガス)や有機物による汚染を最小にして、目的に特化した分析をおこ

なうためのものである。一方、「メインストリーム」と呼んだフローでは、非破壊から破壊分析へという順序で、効率良く最大限の情報を得ようとした。このとき非破壊分析では、SPRING-8とKEKという大型放射光施設を最大限利用し、とくにマイクロCTを用いた分析を初期分析の基本戦略とした(図5)。これにより、サブミクロンの空間分解能での構成鉱物の3次元分布(3次元構造)(図6)を得ることができただけでなく、後におこなわれた破壊分析のためにどのようにサンプルを埋めて切断するかというデータを提供し、微細な粒子から最大限の情報を効率よく得ることができた。この手法は筆者の研究グループがSPRING-8や産総研の研究者らとともに開発してきたものである。スターダストサンプルにおいて世界に先駆けて適用され、はやぶさサンプル分析で系統的におこなわれた。

分析でなにがわかったのか

キュレーション施設においてSEM観察された粒子は、特性X線による半定量分析により、カンラン石[(Mg,Fe)₂SiO₄]、Caに乏しい輝石[(Mg,Fe)SiO₃]、Caに富む輝石[Ca(Mg,Fe)Si₂O₆]、斜長石

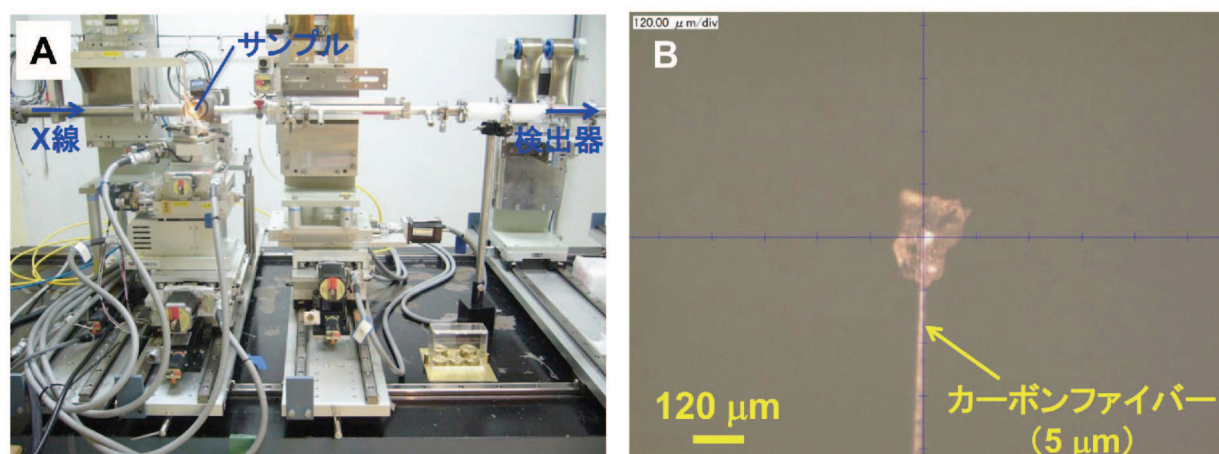


図5 (A) SPring-8のビームラインBL47XUに設置されたマイクロCT装置。X線ビームは回転ステージに設置されたサンプルに照射される。サンプルは180°回転しながら、各角度での透過像が検出器で撮影される。フレネルゾーンプレートを用いた拡大X線光学系を用いることにより、200 nm程度の空間分解能が得られる。(B) CT撮影したサンプル。直径5 μm のカーボンファイバーに樹脂で接着されてある。

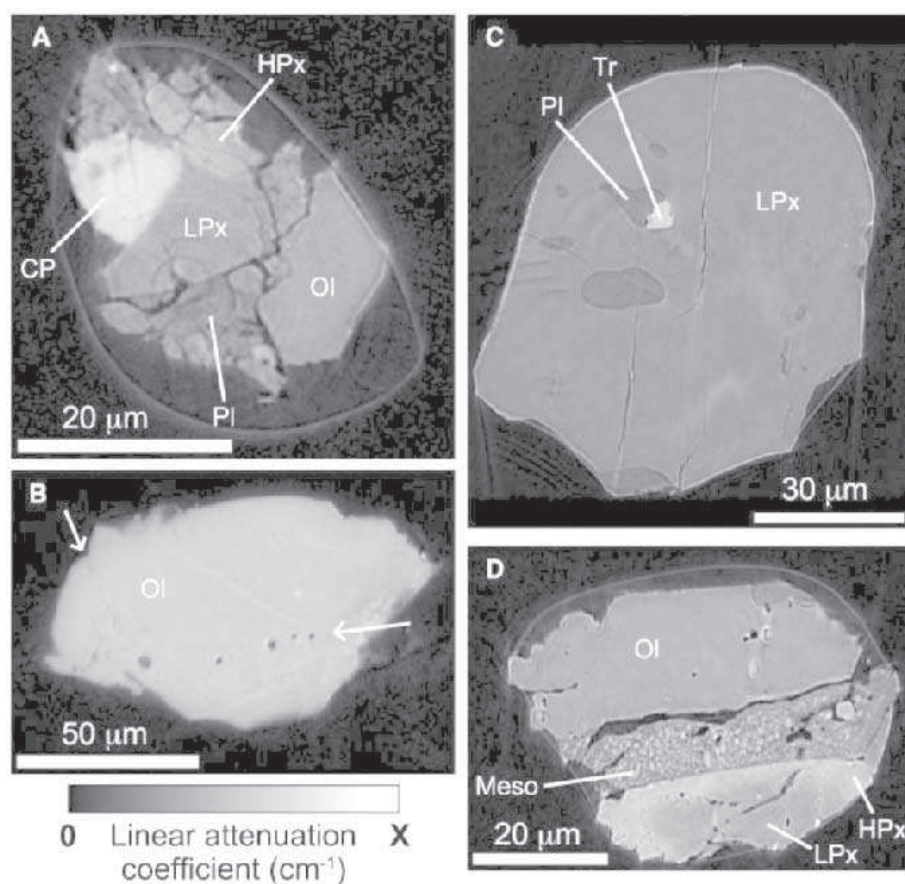


図6 代表的なイトカワ粒子のCT像 ([5] より)。(A) 複数の鉱物を含む平衡組織を示す粒子。(B) ほぼ単一の鉱物から成る粒子 (矢印: 空隙が平面上に並んでいる)。(C) 表面に丸いエッジをもつ粒子。(D) 非平衡組織を示す粒子。OI: カンラン石、LPx: Caに乏しい輝石、HPx: Caに富む輝石、PI: 斜長石、CP: Ca 磷酸塩鉱物、Tr: トロイライト、Meso: メソスタシス。

[(Na,Ca)(Al,Si)AlSi₂O₈]、トロイライト [FeS] などの鉱物が存在することがわかった。サンプル容器は開いた状態で探査機が打ち上げられたため（容器を閉めて打ち上げると、宇宙で容器を開けるという余分の操作とそのために必要な装置を搭載することが必要となってしまう）、打ち上げ時に舞い上がった地上の塵が多数混入していることが危惧された。これらの塵としては、人工物や射場である鹿児島県大隅半島の内之浦付近に分布する岩石（花崗岩や桜島の火山灰など）の粒子が想定された。カンラン石は隕石だけでなく地球とくにその内部（マントル）に普遍的に存在する鉱物であるが、内之浦周辺には基本的に見当たらず、カンラン石粒子が見出されれば当たりだと、少なくとも筆者は考えていた。カンラン石だけでなくトロイライトが見出されたこと、また上に述べた鉱物の組み合わせから、採取されたサンプルは地球上のものではなく、イトカワ由来の粒子でほぼ間違いないことが確認され、これらの粒子が初期分析に配分された。

図4のフロー（とくにメインストリーム）にもとづいた分析により、鉱物の元素・同位体組成や鉱物モード組成（鉱物の構成比）、岩石組織が明らかにされた。これらにより、イトカワ表面から採取したサンプルはLL5あるいはLL6という熱変成を受けたLLコンドライト隕石（地球にもっとも多く落下する普通コンドライト隕石のなかで、全鉄量および金属鉄が少ないもの）に対応する物質であることが分かった（図7）。2種類の鉱物間の元素分配から

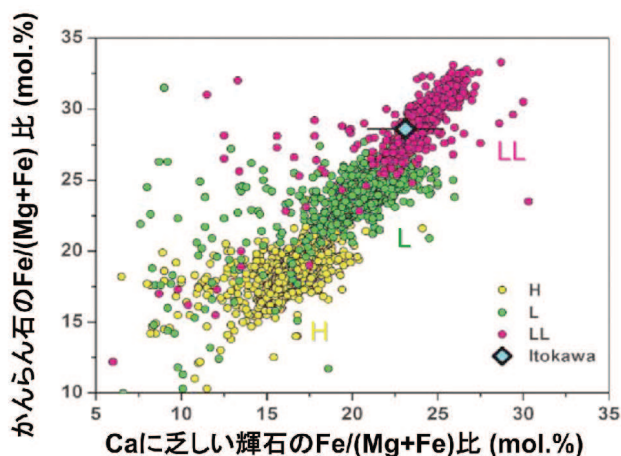


図7 カンラン石のFe-Mg比とCaに乏しい輝石のFe-Mgのプラット ([1]より)。イトカワ粒子の分析値の平均は、普通コンドライト隕石 (LL, L, H) の中でもLLコンドライトのデータと一致する。

推定した最高到達温度は800℃程度であり、消滅放射線核種である²⁶Alによる小惑星の加熱モデルより、20 km以上の直径をもつイトカワ母天体内部で熱変成を受けたものであることがわかった。また、一部のサンプル粒子は熱変成度のやや低いLL4のものであり、これらの粒子は母天体の表面に近い部分にあったものと考えられる。このような母天体が別の天体の衝突により破壊され、破片の一部が再集積して現在のイトカワとなったというラブルパイル天体モデルを確証し、より具体的な描像が与えられた（図8）。

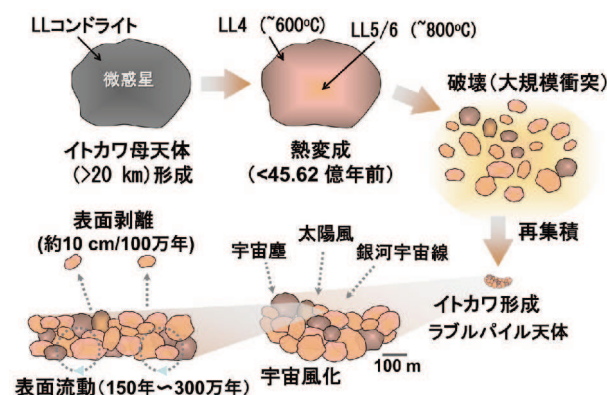


図8 はやぶさサンプルの初期分析から明らかとなった太陽系史にわたる小惑星イトカワの内部・表層活動史（橘省吾博士（東京大学理学研究科）による原図を一部修正）。

一方、レゴリスとしてのイトカワ粒子の分析により、隕石からでは得られない成果が挙げられた。サンプリング時に弾丸が発射されなかったことはサンプル量の低下を招いたが、レゴリス粒子は破壊されず、また宇宙環境に直接曝されたイトカワ表面粒子が採取されたことは不幸中の幸いであった。イトカワ粒子外形の3次元形状から、粒子は衝突破片であり、さらに粒子表面の一部は摩耗されていることがわかった。イトカワへの微小天体衝突に起因した地震波振動により誘起された粒子運動がおり、粒子が機械的に摩耗された可能性が指摘された。一方、月のレゴリスでみられるようなレゴリス粒子の大規模な融解はイトカワ粒子では認められなかったが、これはイトカワのような小惑星と月への衝突速度の違いによるものと考えられる。

イトカワ表面は、小天体や宇宙塵の衝突だけでなく、太陽風や銀河宇宙線の照射を受けている（図8）。月のレゴリス粒子の表面には100 nm程度の厚みを

もつ金属鉄ナノ粒子を含む非晶質層が見出されており、これが月の反射スペクトルの変化（赤化および暗化）をもたらした原因であることが知られている。このような変化は、物体衝突や太陽風・銀河宇宙線照射に起因すると考えられ、宇宙風化と呼ばれている。今回の透過型電子顕微鏡（TEM）を用いた分析により、イトカワ粒子表面にも金属鉄などのナノ粒子が見出され、小惑星での宇宙風化が実証された（図9）。これにより、大気のない天体の反射スペクトルを変化させる原因を一般的に説明できることが示された。また、粒子に打ち込まれた太陽風希ガス成分が検出され、粒子がイトカワの最も表面に滞在した時間スケールは100-1000年程度であること、また銀河宇宙線起源の希ガスは検出できなかったことから、粒子がレゴリス層内部に滞在した時間スケールの上限は300万年程度であることが分かった。これらの年代は、月レゴリスの滞在時間スケール（10億年程度）と比べて圧倒的に短く、小さな小惑星の特徴であると考えられる。

地球への落下が観測された隕石の軌道解析などにより、ほとんどの隕石（約99.9%）は小惑星を起源としていると考えられてきた。小惑星の表面物質は、隕石の可視～近赤外反射スペクトルと比較することにより推定されていたが、イトカワはS型の反射スペクトルをもち、地上からの天文観測だけでなくはやぶさ探査機による近接観測からも、普通コンドライト隕石の中でもとくにLL5あるいはLL6コンドライトに類似することが指摘された。しかしながら、S型小惑星と普通コンドライト隕石の反射スペクトルは完全には一致せず、その違いは「宇宙風化」と

呼ばれる小惑星表面プロセスに起因していると考えられていた（図9A）。初期分析は、このような隕石とその小惑星との対応関係が正しかったことを直接的に確証したものであり、科学史上のマイルストーンを築いたともいえる。また、宇宙風化、太陽風希ガスの打ち込みや機械的摩耗の可能性が示され、質量の小さな天体表面においても活動的なプロセスが比較的短いタイムスケールでおこなっていることがはじめて明らかにされた（図8）。

初期分析のみからはまだ解明されていないことも多い。例えば、イトカワ粒子の生成年代の絶対値はまだ測定されていない。イトカワを作った巨大衝突がどのようなものであったのか詳細は不明であり、その年代（すなわちイトカワの形成年代）も不明である。一方、イトカワ表面プロセスがお互いにどのような関係にあるのか、その総合的な理解も今後の研究課題である。また、今後月レゴリスとの比較研究により、小惑星だけでなく月も含めた天体での表面活動のさらなる理解が期待される。

イトカワをはじめとする小惑星表面には他の小天体由来する異質物質が降り注いでいるはずである。炭素質物質や有機物もその候補であり、有機物の分析が試みられたが（図4）、残念ながら現在のところ見出されていない。10 μm 以下の粒子は光学顕微鏡下でのハンドリングが難しく、詳細分析のための配分はすぐにはおこなわれない。このような粒子の中には、有機物だけでなく無機鉱物を含めてLLコンドライトには本来含まれない物質が存在している可能性がある。極微小粒子のハンドリング技術は開発中であり、近い将来この宝の山が明らかにされ

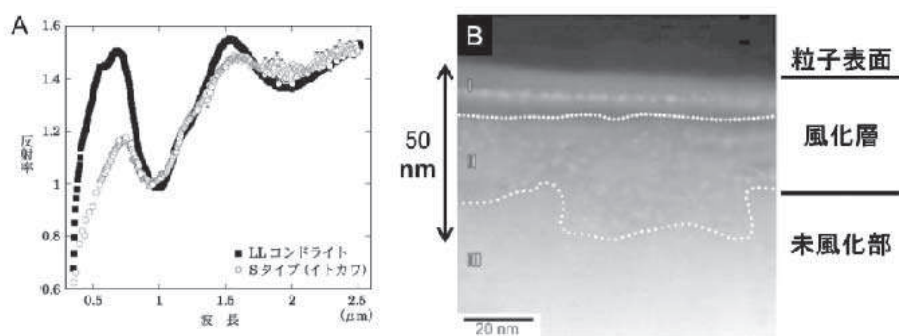


図9 イトカワとその粒子の宇宙風化。(A) 小惑星イトカワ（S型）とLLコンドライトの反射スペクトル。(B) イトカワ粒子の表面に見出された宇宙風化の証拠（[4]より）。表面にある非晶質珪酸塩層中に鉄に富むナノ粒子（明るい小さな斑点）が見える。これらのナノ粒子が、(A)に示された反射スペクトルの違いをもたらしている。

ることが夢である。

バラ色の夢：これからの小天体探査・サンプルリターン計画

はやぶさ2は、はやぶさのヘリテージを受け継いだ次期小惑星探査・サンプルリターン計画である。2014年に打ち上げられ、1999JU3と呼ばれイトカワの倍ほどの大きさの小惑星（径：約900m）を観測し、サンプルを採取して、2020年12月に地球帰還が予定されている。この小惑星はその反射スペクトル（C型）より、炭素質コンドライト隕石に対応していると考えられている。この隕石は鉱物・水（含水鉱物として鉱物中に含まれる）・有機物からなるが、様々な種類が存在している。サンプル分析により、実際に採取されたサンプルが具体的にどのような隕石に対応しているのか（あるいは対応のない未知の種類のものなのか）から始まり、太陽系初期の鉱物・水・有機物はどのようなものであり、これらが物理的・化学的にどのような相互作用をしていたのか、さらにこれらの物質がそれぞれ固体地球・海洋・生命の原材料とどのような関係にあるのかが解明されることが期待される。

一方、NASAもOSIRIS-RExと呼ばれるアメリカがはじめておこなう小惑星からのサンプルリターン計画を決めた。打ち上げ予定は2016年であり、2019年に1999RQ36という小惑星に到達し、観測およびサンプリングをおこなった後、2023年9月にサンプルが地球帰還予定である。この小惑星も炭素に富む物質から成ると考えられており、はやぶさ2と同様に宇宙での有機物の生成や生命発生の手がかりなどの成果が期待される。はやぶさ2計画から2-3年

の遅れとなるが、はやぶさ2でははやぶさと同様のサンプリング方式を採用するのでサンプル量は1g程度が予想されるのに対して、この計画ではロボットアームを使ってタッチダウンしたときに窒素ガスを噴射して50g以上のサンプルを採取する計画である。日本のはやぶさ計画の成功やはやぶさ2の早期実現の可能性も考慮してこの計画の実行が決められた可能性もあり、もしこれが本当であるとするアメリカが日本の成果に触発されて科学をおこなうという極めて稀なこととなる。いずれにせよ、日米がライバルとして人類が未知のサンプル採取・分析をおこない、太陽系形成や生命を含む地球の起源の理解が進むことは、まさにバラ色の夢である。サンプル帰還予定はわずかに8-10年後であり、若い研究者や学生諸君とともにこの夢が見られればと思う。

謝辞

JAXA キュレーションチームをはじめとするはやぶさサイエンスプロジェクトチームの皆さん、CTサブチームをはじめとするはやぶさサンプル初期分析チームの皆さん、に感謝します。また、はやぶさサンプル粒子のマイクロCT撮影をおこなうことができたSPRING-8に謝意を表します。

参考文献

- [1] Nakamura T. et al., 2011. *Science*, 333, 1113.
- [2] Yurimoto H. et al., 2011. *Science*, 333, 1116.
- [3] Ebihara M. et al., 2011. *Science*, 333, 1119.
- [4] Noguchi T. et al., 2011. *Science*, 333, 1121.
- [5] Tsuchiyama A. et al., 2011. *Science*, 333, 1125.
- [6] Nagao K. et al., 2011. *Science*, 333, 1128.

