

小惑星探査機はやぶさにより回収された イトカワ微粒子サンプルの放射光 X 線回折および 電子顕微鏡分析

中村智樹

東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

田中雅彦

物質・材料研究機構高輝度放射光ステーション 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1 SPring-8 内

要旨

小惑星探査機はやぶさは S 型小惑星イトカワから多くの微粒子を回収することに成功した。放射光および電子顕微鏡を用いた解析から、イトカワは太陽系誕生時に形成された化学的に未分化なコンドライト天体であることがわかった。イトカワは直径 20 km 以上の天体として形成され、放射性同位元素の崩壊熱により天体内部の温度が約 800°C 程度になっていたことがわかった。天体内部の温度が下がった後に、イトカワは大きな衝突を受け粉碎され、そのかけらが現在のイトカワであることが判明した。

小惑星探査機「はやぶさ」は、約 7 年におよぶ惑星間飛行を終えて、2010 年 6 月 13 日に地球に帰還した。当初の計画から約 3 年遅れであった。そのため探査機に使用されていた電子部品などはすべて「期限切れ」で、宇宙から大気圏突入、カプセル分離、高温状態での減速、カプセル分割、パラシュートで落下という一連のシーケンスがうまくいくかどうか分からない、と工学系の人々から聞かされていた。しかし、オーストラリア・ウーメラ砂漠の満天の星空の中で燃え尽きるはやぶさ本体の横を、一筋の明るい軌跡が静かに音もなく行き過ぎていったとき、これはカプセル開封までうまく行くかもしれないと感じ、鳥肌が立った。この帰還の日まで約 2 年間、筆者は当時所属していた九州大学から毎週のように神奈川県・相模原の宇宙研に通い、はやぶさカプセルの解体、サンプルキャッチャー分離、キャッチャー開封、微粒子選別分離のための機器開発やリハーサルを宇宙研のスタッフと続けていた。筆者がサンプルキャッチャー開封等の主要なオペレーションを自分の手で行う（もちろん窒素置換したチャンバー内でバイトングローブした状態であるが）ことが決まっていた。傷一つなく、変形もなく、製作された当時とほぼ変わらない状態で、はやぶさカプセルがウーメラ砂漠に鎮座しているのを確認し、日本行きの飛行機にのりながら「ついに自分の出番がやってきた」と心身ともに戦闘状態になった。

小惑星探査機はやぶさは 2003 年 5 月に鹿児島県内之浦から打ち上げられ、2005 年 9 月に小惑星 25143 イトカワに到着した。到着してみるとイトカワは予想に反し、表面が

ごつごつし大きな岩が集まったような、これまで観測した小惑星には見られない不思議な姿をしていた。イトカワ自身は約 12 時間で自転する。そのため、はやぶさはイトカワから 10 km 程度離れた場所に静止し、回転するイトカワを観測した。はやぶさはイトカワ近傍に約二か月間滞在しイトカワの地形や密度、表面の化学組成や反射スペクトルなどを調べた。表面がでこぼこであったため、着陸地点選定の際はさまざまな議論があった。小惑星表面に 2 回タッチダウンする予定であったため、1 回目と 2 回目は別々の場所にするというのが通常の見方であったが、安全に下りられる場所はほとんどなかった。結局、唯一の砂地であるミュージズの海とウーメラ砂漠（イトカワ上の地名）の 2 地点が最終候補になった。2005 年 11 月にはやぶさがイトカワ表面に接近した際に、表面の高解像度画像を取得した。その画像をみると、ウーメラ砂漠地点は 1 m を超す岩石が散乱しており、はやぶさのサンプリングホーンの長さ（1 m）では探査機本体を傷つけずに着陸することは困難と判断され候補から外された。11 月 20 日と 26 日に探査機はミュージズの海に着陸しサンプル採集を試みた。一回目の着陸では、探査機の危険物回避システムが過剰に作動し、探査機は降下中にフリーズしイトカワ表面に自由落下した。ミュージズの海を数回バウンドしながら北上し、目標地点より約 100 メートル北に着陸した。約 30 分の間探査機は、小惑星の表面に横たわっていた。サンプリングホーンが小惑星表面に何度か打ち付けられたことになる。二回目の着陸では、一回目の不具合を全て克服しミュージズの海の目標地点に理想的なタッチアンドゴーで着陸し、

タンタルの弾丸も発射され全てが上手くいったように思われた。しかしながら翌日、弾丸が発射されなかった可能性が高いことが分かった。したがって、二回の着陸いずれにおいても弾丸は発射されずサンプルが回収されたかどうかは不明であった。その後探査機は、燃料漏れを含む様々なトラブルに遭遇し、結局地球への帰還が当初から3年延期され、2010年の6月になった。

2010年6月13日に地球に帰還したはやぶさカプセルは6月18日に相模原市の宇宙研に到着し、6月22日に真空中で開封された。カプセル内部のサンプルが回収されているはずのキャッチャーの中には、肉眼ではサンプルは確認できなかった。その後、キャッチャー内部を高分解能の光学顕微鏡で観察したところキャッチャーの金属表面にうっすらと埃のような物質が確認された。その微粒子をひとつひとつ静電型マニピュレーターを用いて、慎重にピックアップした。これらの作業は、高純度の窒素で満たされたクリーンチャンバーの中で行った。2011年6月～12月にかけてサンプルキャッチャーから多くの微粒子を選別し、小惑星イトカワ起源と特定した¹⁾。初期分析チームのためのサンプル準備を経て、2012年2月からイトカワ微粒子約50個を用いた初期分析が始まった¹⁻⁶⁾。筆者の研究グループは、筆者と茨城大学の野口教授、物質構造科学研究所の田中博士、NASA ジョンソン宇宙センターのゾレンスキー博士および、筆者の研究室の大学院生で構成され、初期分析における役割はイトカワ微粒子の鉱物学的特性を調べることであった。初期分析チームは、探査機「はやぶさ」が打ちあがる前から複数回にわたって、模擬試料を用いた分析オーデションがあり、それを勝ち抜いた研究グループから主に構成されていた。筆者の研究グループでは、放射光 X 線を利用した多段階分析法をあらかじめ構築し、1999年から10数年の間に成層圏で捕獲した惑星間塵、南極氷床から回収された宇宙塵や始原隕石、スターダスト探査機が短周期彗星ビルド2から回収した彗星塵⁷⁾などにその分析シーケンスを適用し成果を上げてきた。基本的な分析の流れは、放射光 X 線回折分析により、分析する微粒子の鉱物組成を確定させ、その後の電子顕微鏡や同位体分析の分析戦略を微粒子ごとに決定するというものである¹⁾。イトカワ微粒子の初期分析では、我々のグループでは放射光分析と電子顕微鏡分析を担当し、同位体分析は北海道大学の塚本尚義教授のグループが担当した²⁾。

はやぶさが回収したサンプルは地球大気に接触していない世界初の小惑星サンプルである。サンプルキャッチャーから取り出されたイトカワ微粒子は、表面を大気にさらす時間を最小限にするために、ただちに直径5 μm 長さ2mmの炭素繊維に接着され、エポキシ樹脂で表面をコーティングされる。この処理法はあらかじめ想定し、コーティングに適した樹脂の軟化温度、固化速度などを求め、綿密に手順を設定してあった¹⁾。樹脂は微粒子の表面約数 μm の厚みでコーティングされる。炭素繊維の先端に樹脂で固

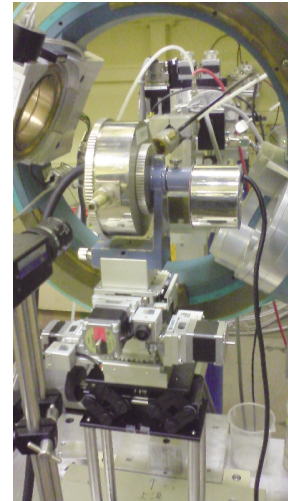


Fig. 1 (Color online) Experimental set up for X-ray diffraction analysis at photon Factory at KEK. Itokawa particle is inside of the Gandolfi camera.

定されコーティングされた微粒子は兵庫県の放射光施設 SPring-8 に持ち込まれ、大阪大学(当時)土山明教授の研究グループにより、X線CT分析が行われた³⁾(この分析成果は本小特集号に紹介されているのでそちらを参照されたい)。続いて、試料は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構に持ち込まれ、我々の研究グループが放射光 X 線を用いた X 線回折分析を行った(Fig. 1)。ガンドルフィー X 線カメラに炭素繊維についての試料を装着し、試料ひとつひとつの X 線回折パターンを取得した。0.1 Pa 程度に真空引きされたガンドルフィー X 線カメラ内部で、30~100 μm のサイズのイトカワ微粒子は歳差運動を行い、あらゆる方角から X 線が照射される。その結果、1個の微粒子から粉末 X 線回折パターンを得ることができ、回折パターンはイメージングプレートに記録される。光源はビームライン 3A のアンジュレーター放射光を約 2 \AA に単色化した X 線である。高エネ研の放射光の最強度はもっと高エネルギー側にあるが、我々は波長 2 \AA を選択している。ガンドルフィーカメラは構造上、回折角 0~5度の X 線を検出できず、そのため短波長の X 線を用いると面間隔 10~15 \AA に最強の底面反射を示す層状ケイ酸塩鉱物を特定できない。波長 2 \AA を用いると、約 20 \AA の面間隔まで検出することができるので、我々は10年以上同一の波長を用いてこれまでに1000以上の小惑星や彗星の微粒子の X 線回折分析を行い、データベース化している。

高エネ研での X 線回折結果を解析し、次の分析手法を決定する。分析した約40個のイトカワ微粒子のうち構成鉱物に斜長石と輝石を含む微粒子を特定し、これらの微粒子のみ SPring-8 での高角度分解能の X 線回折分析を行った(Fig. 2)。この分析はガンドルフィーカメラを改造することで、従来のガンドルフィーカメラの16倍強のカメラ

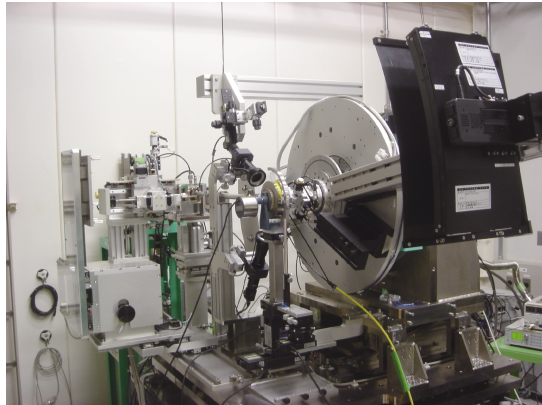


Fig. 2 (Color online) Experimental set up for X-ray diffraction analysis at SPring-8. The Gandolfi camera is modified to have a long camera length for high resolution in diffraction angle.

半径により高い角度分解能を実現している。半径955 mmの円筒状イメージングプレートを検出器としている。イメージングプレートの読み出しピクセルサイズ $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ で、 2θ の最小角度刻みは0.003度である。光源はSPring-8, BL15XUのリポルバー型アンジュレーターであり、その高輝度高平行度X線は $200 \mu\text{m}\phi$ 以下の微小試料から高い角度分解能のX線回折データを効率よく測定することを可能にした。一連の放射光分析（CT分析、2種類のX線回折分析）において、イトカワ微粒子は炭素繊維の先端に樹脂で固定されコーティングされた状態で行った。一連の放射光分析が終了したのちに試料のX線CTとX線回折の結果をとりまとめ微粒子内部の鉱物の三次元配置を決定した。微粒子を構成する鉱物の中には、存在度の低い鉱物がある。たとえば、カルシウムリン酸塩やクロム鉄鉱などである。それらの、まれな鉱物を分析するためにはそれらの鉱物を研磨断面に露出させる必要がある。微粒子を研磨する際に微粒子内部の鉱物の三次元配置を参考にし、あと何ミクロン研磨すれば目標の鉱物に到達するか計算しながら研磨作業を慎重に行った。その結果、微粒子を構成する主な鉱物だけでなくまれな鉱物を含めすべての鉱物を研磨断面に露出することに成功した。一部の微粒子は、研磨の前にダイヤモンド刃を用いてマイクロトーム法により超薄切片を作成し、我々のグループの野口高明教授（茨城大学）により高分解能透過型電子顕微鏡により観察された⁴⁾。一方、研磨断面の方は、電界放出走査型電子顕微鏡を用いて鉱物組織の詳細観察を行い、エネルギー分散型X線分析計で元素分析を行った。電子顕微鏡分析の後、二次イオン質量分析計を用いた同位体分析³⁾のため北海道大学に輸送された。

以上の一連の分析を一つの微粒子（RA-QD02-0013）の分析結果¹⁾を中心に解説する。RA-QD02-0013のサンプル名の意味するところは、はやぶさカプセルのサンプルキャッチャーのA室（RA）から2枚目の石英ガラス

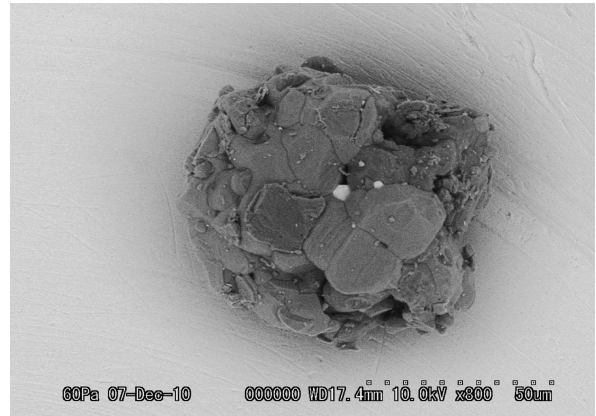


Fig. 3 Electron-microscope image of a Itokawa particle RA-QD02-0013.

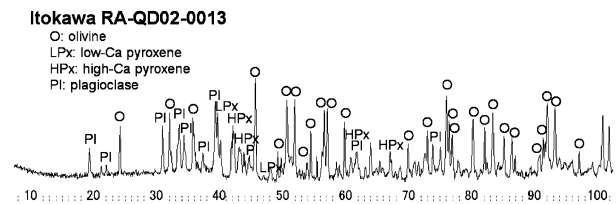


Fig. 4 X-ray diffraction pattern of a Itokawa particle RA-QD02-0013 taken at photon factory of KEK.

（QD02）に自由落下方式で回収された多数の微粒子のうちイトカワ起源と特定された13番目（0013）の微粒子ということである。この0013微粒子は直径約80ミクロン程度で、一見サッカーボールのような形状を示す（Fig. 3）。表面の色の違いから、複数の鉱物から構成されていることがわかる。また、粒子表面は比較的スムーズであり、これは小惑星表層で太陽風が鉱物表面に打ち込まれ、表面がスパッタリングされることで角が取れスムーズになったと推定している。高エネ研でのX線回折分析の結果、この微粒子の主な構成鉱物はカンラン石、斜長石、Caに富む輝石とCaに乏しい輝石であることがわかった（Fig. 4）。約40粒子のX線回折の結果、イトカワの構成鉱物はカンラン石、斜長石、Caに富む輝石とCaに乏しい輝石、硫化鉄トロイライト、金属鉄テナイトおよびカマサイト、クロム鉄鉱、リン酸塩鉱物アパタイトおよびメリライトなどであることがわかった。この鉱物組み合わせは、小惑星起源の普通コンドライト隕石と同じである。SPring-8における高角度分解能のX線回折分析の結果、高解像度のX線回折パターン（Fig. 5）を得ることに成功した。斜長石は形成温度が結晶構造に反映され、高温形と低温形が存在し両者は連続的に変化する。したがって、斜長石の結晶構造（三斜度）を特定すると形成温度を推定することができる。三斜度は斜長石の1-31反射と131反射の角度差 $\Delta 131$ から求めることができる。斜長石が主体のイトカワ微粒子では、直接 $\Delta 131$ を求めることができるが、0013粒子のよ

天体のサイズが大きくなると、天体内部の温度は上昇する。我々の解析により、多くのイトカワ微粒子が800°C以上の長時間加熱を受けていたことがわかった¹⁾。天体内部が800°C以上になるには、少なくとも直径20 kmの天体の大きさが必要である。したがって、小惑星イトカワは、太陽系誕生時に直径20 km以上の天体として形成され、放射性元素の崩壊熱により内部温度が上昇し最高温度が800°C程度になり、その後ゆっくりと冷えていったことになる。ところが、現在のイトカワの大きさは0.5×0.3×0.2 kmであり、誕生時のサイズよりも格段に小さい。このことは熱変成後のイトカワに他の天体が衝突し、大きな衝突破壊現象が起こりイトカワは粉碎され、そのかけらが現在のイトカワであるということを示唆する。はやぶさが撮影したイトカワは、イトカワが岩の集合体であることを示していた。これは、ひとつひとつの岩が集まって現在のイトカワが形成されたことを意味しており、我々の物質分析からの結論と調和的である。イトカワが隙間だらけの岩の集合体であることはイトカワの外観や低い密度(約1.9 g/cm³)からも明らかである。また、はやぶさが回収したのはイトカワの極表層の微粒子であり、天体表層に天体内部で長時間加熱を受けた微粒子が多数存在していること自体、現在のイトカワが形成後そのままの構造を保持しているのではなく、天体内部の物質が表層にきてしまうほど強く破壊されたことを示唆している。イトカワ微粒子の多くは強い衝撃の証拠を残している。今後の微粒子の解析により、このカタストロフィックな衝突現象が太陽系の歴史のいつごろ起こったのか、衝撃溶融した微粒子の年代決定で明らかになることが期待される。イトカワ微粒子の希ガス同位体測定の結果⁵⁾、イトカワ表面にはエネルギーの高い銀河宇宙線が照射されていたのは1000万年以下であることが示されている。この事実はイトカワが現在の大きさになったのは、長い太陽系の歴史の中では比較的最近(1000万年以内)である可能性が高いことを示している。これまでに明らかになったイトカワ微粒子の解析結果に基づく小惑星イトカワの形成モデル図を Fig. 8 に示す。

太陽系には60万を超える小惑星が存在しており、小惑星は反射スペクトルから分類されている。小惑星帯に存在する最も多い小惑星のタイプはCタイプでその次がSタイプである。どちらの小惑星も岩石質であるが、Sタイプは岩石の割合が高く、一方Cタイプの小惑星は水や有機物が含まれている。イトカワは反射スペクトルからS型に分類されている。S型小惑星とは、火星と木星の軌道の間分布する小惑星帯の中心と、中心より内側に多く分布する小惑星である。反射スペクトルの類似性から普通コンドライト隕石からS型小惑星が構成されている、と予想されていたが、小惑星と隕石の反射スペクトルが細部で一致せずその関係性が不明のままであった。今回S型小惑星から、持ち帰った微粒子を直接分析しその微粒子が普通コンドライト隕石とまったく同一のものであると示すこと

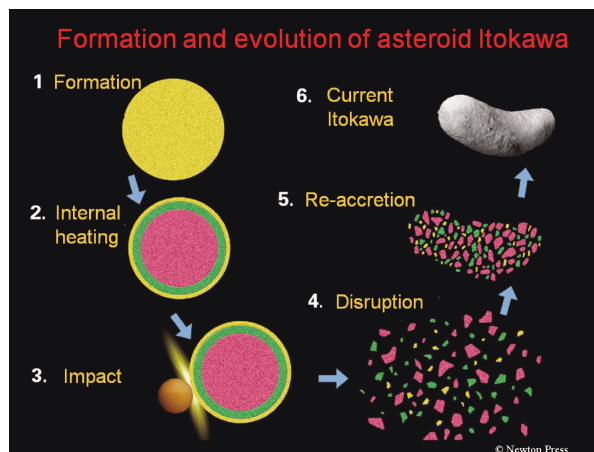


Fig. 8 (Color online) Formation model of asteroid Itokawa.

ができた¹⁻²⁾。このことは、長年不明であったS型小惑星と普通コンドライト隕石の親子関係を確定させた、という点で大きな意味がある。一方、小惑星と隕石の反射スペクトルの細部の違いは宇宙風化作用により小惑星の表面微粒子が変成し、反射率が下がることが原因である。この宇宙風化作用のナノスケールでのメカニズムは野口教授の電子顕微鏡による観察で明らかになった⁴⁾。小惑星イトカワは直径20 km以上の元の天体が破壊されて現在のサイズになった後に、太陽風照射などにより天体表面が暗化し、現在の少し灰色がかかった色になったと考えられる。

2012年9月現在、約2000個の微粒子がはやぶさカプセルから同定されている。この数は今後も増え続けることは間違いない。なぜなら現在特定されている微粒子は、サンプルキャッチャーを傾けて外側から軽く叩いて落下させて回収した粒子と、キャッチャー内部の約5%の表面をテフロンヘラで掻いて集めた粒子だからである¹⁾。しかしながら、サンプルのサイズは小さく、一つ一つキャッチャーから分離し特定することは容易でない作業であり、はやぶさが回収したイトカワ微粒子の全容が明らかになるのに後数年を必要とする。2011年2月から約1年行われた初期分析は無事に終了し、最初の成果がサイエンスに特集号の形で出版された¹⁻⁶⁾。本稿はその時に出版された論文の内容を、我々の研究グループの成果を中心に解説した。初期分析の成果は、今後も出版されていく予定である。現在、国際公募分析がちょうど始まったところである。欧米をはじめとする多くの科学者が名乗りを上げ活発な研究活動が行われようとしている。世界中の研究者がイトカワ微粒子を分析することにより、より詳細で精密な太陽系の初期進化史が明らかになると期待される。我々の研究グループも初期分析と同様に放射光を駆使し、研究を推し進めていく予定である。放射光はイトカワ微粒子のように大変貴重で少量しかない試料の特徴を解析するには最適の分析手法である。イトカワ微粒子分析には高エネルギー研究機構とSPring-8に分析時間を配分していただき、また、多くの

スタッフに技術的な支援をいただき深く感謝している。

参考文献

- 1) T. Nakamura et al.: Science **333**, 1113–1116 (2011).
 2) H. Yurimoto et al.: Science **333**, 1116–1119 (2011).
 3) A. Tsuchiyama et al.: Science **333**, 1125–1128 (2011).
 4) T. Noguchi et al.: Science **333**, 1121–1125 (2011).
 5) K. Nagao et al.: Science **333**, 1128–1131 (2011).
 6) M. Ebihara et al.: Science **333**, 1119–1121 (2011).
 7) T. Nakamura et al.: Science **321**, 1664–1667 (2008).

著者紹介



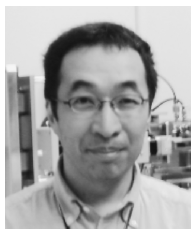
中村智樹

東北大学大学院・理学研究科 教授
tomoki@m.tohoku.ac.jp

専門・惑星科学・初期太陽系進化学

【略歴】

1991年東京大学大学院理学系研究科鉱物学専攻修士課程修了，1994年博士(理学)。1993年九州大学理学部地球惑星科学科助手，2001年同助教授，2010年東北大学大学院理学研究科准教授を経て，2012年1月より現職。



田中雅彦

独立行政法人物質・材料研究機構・主席エンジニア
masahiko@spring8.or.jp

専門・X線回折法・結晶構造解析

【略歴】

1992年東京大学大学院理学系研究科鉱物学専攻博士課程修了，博士(理学)。高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助手を経て，2004年4月より現職。

Synchrotron X-ray diffraction analysis and electron microscopy of Itokawa dust particles recovered by the spacecraft Hayabusa

Tomoki NAKAMURA Department of Earth and Planetary Material Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University
Aramaki, Aoba, Sendai, Miyagi 980–8578, Japan

Masahiko TANAKA WEBRAM, National Institute for Materials Science Synchrotron X-ray Station at SPring-8
1–1–1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679–5148, Japan

Abstract Hayabusa spacecraft has successfully recovered many dust particles from S-type asteroid Itokawa. We performed analyses of these dust particles using synchrotron-radiation X-rays and electron microscopes and found that the asteroid is a very primitive, chemically-unfractionated body that formed in the early solar system. After formation as a 20-km size body, the internal temperature increased up to approximately 800°C and slowly cooled down. The present Itokawa is an asteroid made of broken pieces of an inner part of the pre-existing larger asteroid.