

特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」

探査機「はやぶさ」が持ち帰った小惑星イトカワ粒子の初期記載について

矢田 達¹, 安部 正真^{1,2}, 岡田 達明^{1,2}, 中村 智樹³, 野口 高明⁴,
 岡崎 隆司⁵, 石橋 之宏¹, 白井 慶², 上相 真之¹, 唐牛 譲¹,
 八亀 彰吾⁶, 上野 宗孝¹, 向井 利典¹, 吉川 真^{1,2}, 川口 淳一郎²,
 藤村 彰夫¹

2013年4月5日受領, 2013年4月30日受理.

(要旨) 地球外物質の採取・記載・保管および配布の目的で発足したJAXAキュレーションセンターでは、現在は小惑星イトカワにタッチダウンした探査機「はやぶさ」の試料を取り扱っている。「はやぶさ」から分離して地球帰還した再突入カプセルを受け入れ、その内部の試料コンテナを取り出してクリーンチェンバー内に導入し、開封を行った。試料コンテナ内の残留ガスから地球外起源の希ガスは検出できなかったが、キャッチャー内部からは主にケイ酸塩鉱物から成る微粒子を回収した。初期記載の結果、それらの鉱物比・鉱物組成がLL4-6コンドライト隕石に近いことが分かり、イトカワ試料と確認された。現在までに400個以上の粒子の回収・初期記載を行い、そのうち8割がイトカワ粒子だった。キュレーションセンターではこの試料を初期分析チーム、NASA、国際公募研究に対して配布し、多様な科学成果が挙がっている。

1. はじめに - 小惑星探査機「はやぶさ」による小惑星探査と地球帰還

小惑星探査機「はやぶさ」は2003年5月に鹿児島宇宙空間観測所(現内之浦宇宙空間観測所)より打ち上げられ、2005年9月に目標天体である近地球型小惑星25143イトカワ(スペクトルタイプS(IV)^{*})に到達し、およそ2ヶ月にわたる遠隔探査を行った[1]。一連の遠隔探査の後、同年11月に2回のタッチダウンによるイトカワ表層の試料回収を試みた[2]。2回のタッチダウンとも弾丸が射出されなかったが、微量であっても試料が回収されている可能性を秘めて、「はやぶさ」は2006年3月に地球への復路飛行に入った。

宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration

Agency; JAXA)では、「はやぶさ」が小惑星イトカワでの探査を行っていた2005年より本格的に帰還試料受入を行う設備の仕様検討・設計を始めた[3]。世界でもNASA以外では初めての本格的な帰還惑星物質試料キュレーション設備は2008年3月にJAXA相模原キャンパス内に完成した[3-5]。「はやぶさ」の試料地球帰還までの2年間をかけて、設備の機能・性能確認、総合試験、受入りハーサルを行ってきた。2010年6月、「はやぶさ」は試料を収めた可能性のある再突入カプセル(以下カプセルと省略)をオーストラリアのウーメラ砂漠に帰還させ、カプセルは速やかに回収された[4]。JAXA惑星物質試料受入れ設備(以下キュレーションセンターと呼称)では、帰還直後よりカプセルの受け入れ、試料コンテナの取り出し・洗浄・開封を行

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
 2. 宇宙航空研究開発機構月・惑星探査プログラムグループ
 3. 東北大学大学院理学研究科
 4. 茨城大学理学部
 5. 九州大学大学院理学研究院
 6. 東京大学大学院理学系研究科
 yada@planeta.sci.isas.jaxa.jp

*小惑星は、地上からの反射スペクトル観測に基づき、主にC型、S型、X型、D型などクラスに分類されている。それぞれ反射スペクトルのクラスは、地球上で見つかる隕石との対応が示唆されている。S型は岩石質の隕石、特に普通コンドライト隕石との類似性が示唆されている。S(IV)はS型のサブクラスの一つである。



図1：小惑星探査機「はやぶさ」が帰還させ、豪ウーメラ砂漠で発見された再突入カプセルの火工品の取り外し作業の様子。

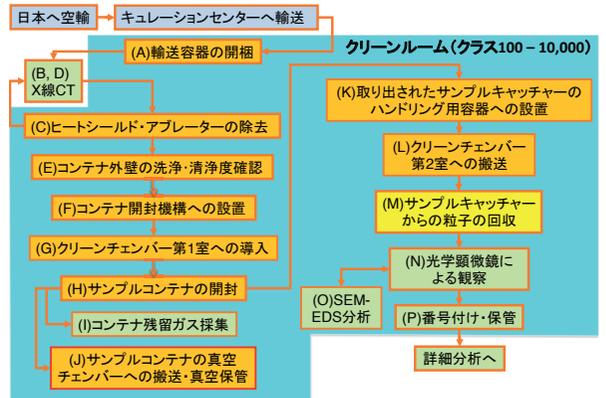


図2：帰還した試料コンテナの受入・開封・試料回収作業フロー図。グレーのハッチはクリーンルーム内での作業を示す。帰還前に同じ手順で繰り返しリハーサルを行った。

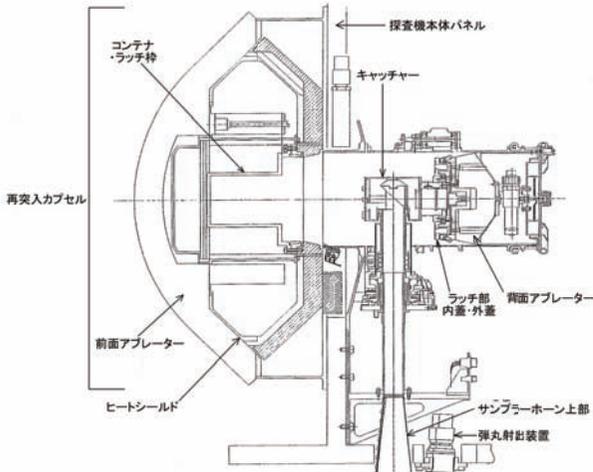


図3：探査機はやぶさ本体における再突入カプセルとサンプルキャッチャーの配置図([24]のFig.1を一部改訂)。キャッチャー等はサンプラーホーンの根元に設置されており、タッチダウン終了後、カプセルに設置されているコンテナに搬送・密閉される機構になっている。カプセルの直径はおよそ40cm。

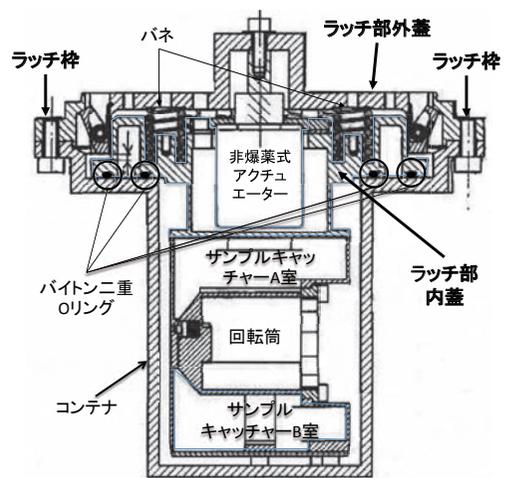


図4：「はやぶさ」試料コンテナの断面図。試料コンテナは図3に示す向きから左回りに90°起きた状態になっているので、注意されたい。主にラッチ部外蓋、ラッチ部内蓋、ラッチ枠、コンテナ、キャッチャーから成る。サイズは外径12cm、高さ13cm。

い、試料コンテナに収められた粒子の回収・初期記載を進めてきた。本稿では、キュレーションセンターで行われた上記一連の処理と成果を紹介したい。

2. 試料コンテナの取り出し・洗浄・開封

2012年6月13日深夜に帰還した探査機「はやぶさ」のカプセルは、翌14日ウーメラ砂漠上で回収された(図1)。回収されたカプセルは梱包された上で空輸さ

れ、回収の4日後の18日未明にキュレーションセンターに搬入された。以下、図2に示す手順でカプセル内部の試料コンテナは処理され、最終的に試料の取り出しに到った[4, 5]。

まず始めに、探査機「はやぶさ」における試料採集方法の概要を説明する。「はやぶさ」の目標天体が長径1 kmにも満たず、微少な重力しか持たないことが分かっていた[6]。よって、採集方式として、天体表層の砂礫層の有無に関わらず試料の採集が見込まれる、

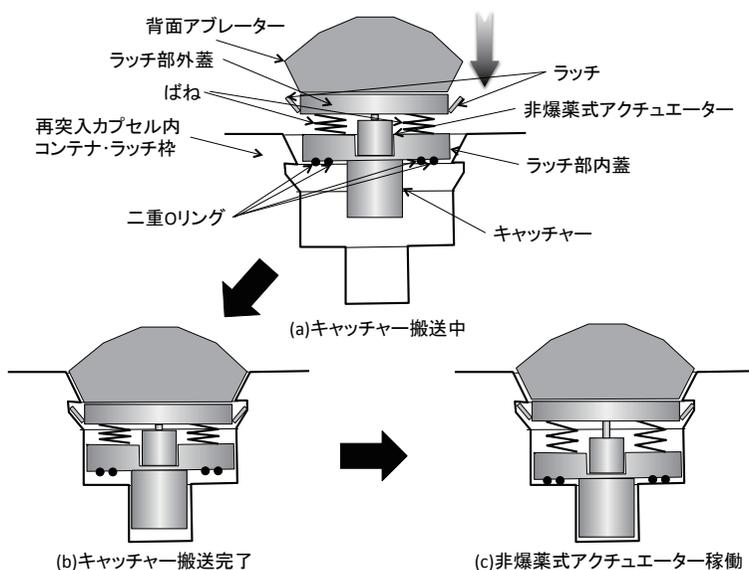


図5：「はやぶさ」キャッチャー搬送の概念図。試料コンテナは図3に示す向きから左回りに90°起きた状態になっているので、注意されたい。(a)キャッチャー搬送機構によりキャッチャーが再突入カプセル内のコンテナまで搬送され、(b)停止位置までの搬送が完了しラッチがかかった後、(c)非爆薬式アクチュエーターが動作することでバネ力が解放され、ラッチ部内蓋の二重Oリングがコンテナ上面に押しつけられることで、キャッチャーはコンテナ内に密封される。

打ち込み式サンプラーが採用された[7]。具体的には、サンプラーは伸展時に長さ1 mとなる円錐状のカバー(サンプラーホーン、以下ホーンと省略)を備えており、ホーンの根元近くには弾丸射出装置が、ホーンの根元にはサンプルキャッチャー(以下キャッチャーと省略)が備えられている(図3参照)。探査機が小惑星表面にホーン先端からタッチダウンしたタイミングで、弾丸射出装置から重さ5 gのタンタル製弾丸が天体表面へ300 m/sの高速で発射され、弾丸の衝突により舞い上げられた砂礫・破片がホーン内を跳ね返りながらホーン根元に設置してあるキャッチャーに回収される仕組みになっていた。ここで試料コンテナの概要を図解により説明しておく。図4は、キャッチャーがコンテナに搬送された後の「はやぶさ」試料コンテナの断面図である。試料コンテナは主要な構造体として、コンテナ、キャッチャー、ラッチ部内蓋(以下内蓋と省略)、ラッチ部外蓋(以下外蓋と省略)、ラッチ枠から構成されている。図3の通り、試料コンテナを大気圏突入時の加熱から守る為に、外蓋の上面には炭素繊維強化樹脂から構成された背面アブレーター(以下アブレーターと省略)が取り付けられている。また、内蓋には縮んでいるバネを解放する動作を行う非爆薬式アクチュエー

ター(以下アクチュエーターと省略)が取り付けられている。打ち上げ時のコンフィギュレーションでは、コンテナとラッチ枠のみがカプセル内に固定されており、一方キャッチャー、内蓋、外蓋、アブレーターの部分は探査機本体のホーンの根元部分に設置されている(図3参照)。試料回収作業後、キャッチャー、内蓋、外蓋、アブレーターは、カプセル内のコンテナに搬送され(図5(a))、外蓋に付いているラッチがラッチ枠に引っかかることでロックがかかる(図5(b))。その後、アクチュエーターの稼働により解放されたバネの力で内蓋下面の二重Oリングがコンテナ上面に押しつけられ、キャッチャーを含むコンテナ内部が外部環境から密閉される構造になっていた(図5(c))。

試料が回収されるキャッチャーはA室、B室と回転筒から構成されている。図6に示すとおり、1回目のタッチダウンの際はB室への開口部が開いており、1回目が終わった後に回転筒を1/3回転させることで、B室の開口部が閉じてA室への開口部が開く構造になっている。これにより1回目と2回目のタッチダウンにより回収される試料をそれぞれB室とA室に分けることができる。なお、2回目のタッチダウンが終わった直後、回転筒は更に1/3回転され、タッチダウン時

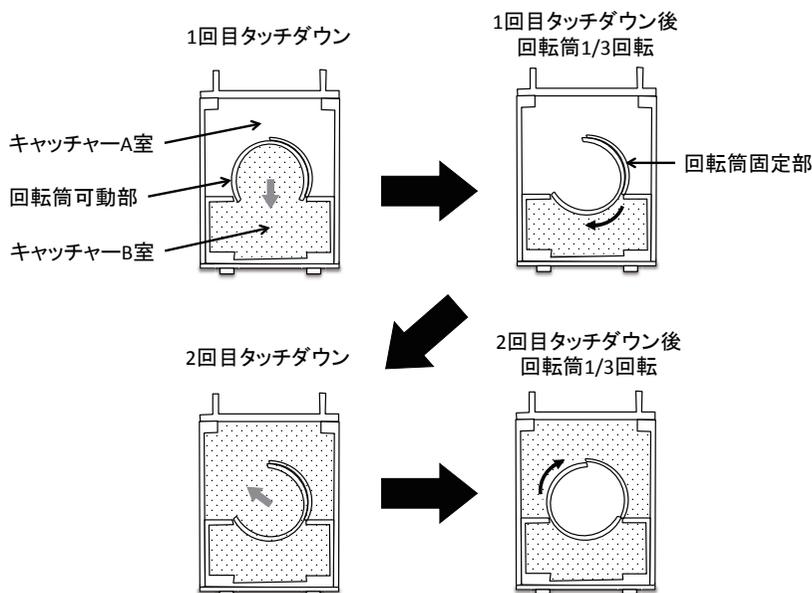


図6：「はやぶさ」サンプルキャッチャーの動作概念図。1回目と2回目のタッチダウン後、それぞれ回転筒可動部が1/3ずつ回転することで、1回目と2回目の採集試料をそれぞれキャッチャーB室とA室に分けて回収し、回転筒のキャッチャーへの開口部を閉じて試料を閉じ込める機構になっている。

に開いていたキャッチャー各室に対する開口部は閉じられる。

上記の構造・機構を持つ試料コンテナが収められたカプセルを収納した輸送箱は、クラス10,000のクリーンルームに持ち込まれて開梱され、ポリエチレン製の袋に窒素封入されたカプセルが取り出された(図2(A))。カプセルの内、試料を収めるコンテナからケーブル・温度シールなどの部品の除去を行った上で、JAXA調布キャンパス飛行場分室の大型X線CT装置にて1回目の解析を行った(図2(B))。これにより、試料を密閉しているコンテナに異常が無く、且つ探査機における回転筒の回転、キャッチャー部の搬送などが正常に行われていたことが確認された。その後、再びクラス10,000のクリーンルームに持ち込まれ、試料コンテナに取り付けられていたヒートシールド・アブレーターの取り外しが行われた。アブレーターを取り外すために、その上面8カ所をフライス盤で削り、取り付けネジの頭を露出させた(図2(C))。

ヒートシールド・アブレーターの取り外しが終わった後、もう一度JAXA調布キャンパス飛行場分室で小型X線CT装置による解析を行った(図2(D))。この作業で、試料コンテナ中に1 mm以上のサイズの試

料は存在しないことが分かった。再びクリーンルームに持ち帰ったコンテナから温度センサーを取り外し、コンテナ外壁の乾式・湿式ワイブ洗浄及び乾式機器洗浄を行った(図2(E))。洗浄後のコンテナ表面の洗浄度評価を光学顕微鏡、接触角計、フーリエ変換型赤外分光分析装置で行い、著しい汚染が見受けられないのを確認した。この後、コンテナ開封のために不要な部品(ラッチ枠、外蓋、バネ、アクチュエーター)を除去した。図5で説明した通り、試料を収めるキャッチャーは、ラッチとバネ力により二重Oリングでコンテナ内に密封されているので、常に二重Oリングの付いている内蓋を何らかの手段で押さえながら進めた。まず図4の外蓋の上側から治具を押しつけて力を加えた状態にして、コンテナと締結しているネジを外してラッチ枠を取り外した。次に外蓋とコンテナの隙間から内蓋を治具で押さえ、外蓋を取り外し、更に外蓋と内蓋の間に設置されているバネ、アクチュエーターを取り除いた。この状態から、内蓋を直接押さええて密封保持が可能なコンテナ開封機構へ設置し、内蓋に必要な荷重をかけた状態にした上で、内蓋を押さええている治具を取り外した(図2(F))。ここで、内蓋とコンテナの隙間に残っていた汚染粒子の除去・清掃を行った。こ

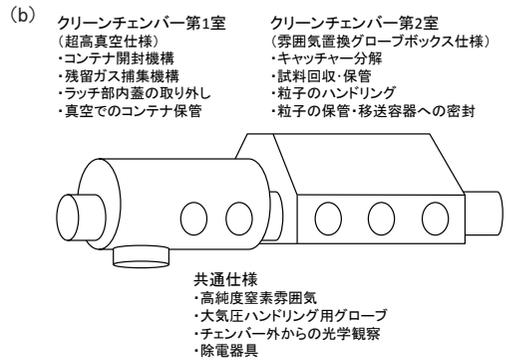
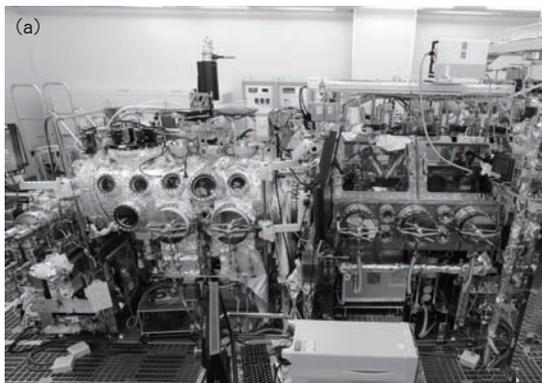


図7：クリーンチェンバーの外観の(a)写真及び(b)概念図。(b)概念図は[3]の図2を一部改訂して引用。コンテナの開封などを行うチェンバー第1室(左側)と、試料の拾い出しなどを行うチェンバー第2室(右側)から成る。



図8：キャッチャー A室内部を搔いたテフロンヘラの光学顕微鏡写真のモザイク画像。多数の粒子が主にヘラの縁辺部・稜部に捕獲されているのが確認できる(矢印)。ヘラの縦の長さが5mm。

の隙間はコンテナの二重Oリングで密閉されている空間の外側にあたる為外部環境に通じており、カプセルが着陸したオーストラリアの砂漠の土壌やアプレーターを切削加工した際の削りかすなどが入り込む可能性がある。

清掃の後、試料コンテナを設置した開封機構を、コンテナの開封・コンテナ内残留ガスの捕集の目的で開発されたクリーンチェンバー第1室(図7)に導入した(図2(G))。コンテナ開封機構は、独立及び全軸同時

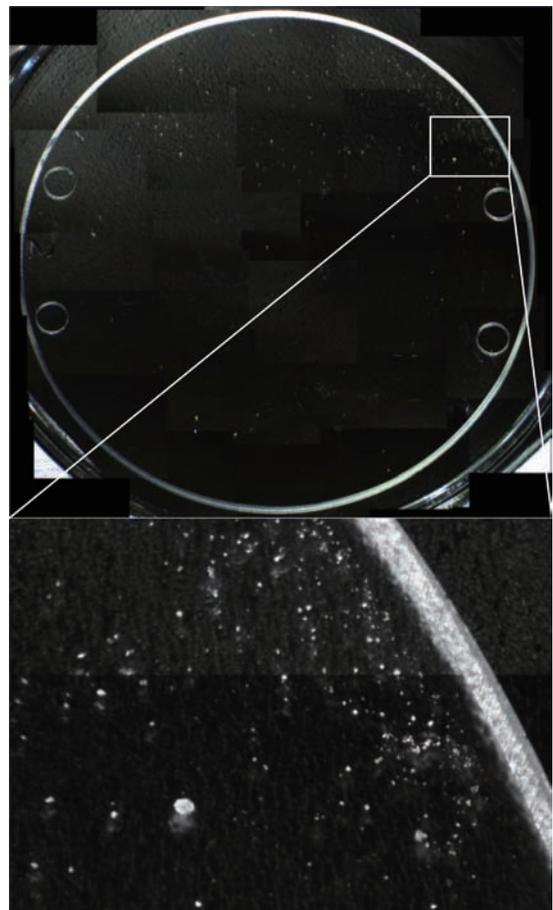


図9：上はキャッチャー A室に取り付けて粒子を落下回収した合成石英ガラス製円盤のマップ写真。粒径 $10 \mu\text{m}$ 以上の粒子が1000個以上有るのが確認された。円盤の直径は48mm。下は上の枠内の拡大写真。様々なサイズ・形状の粒子が多数確認できる。写真の横幅が約7mm。

に上下動可能な4本の軸を介して内蓋の中央を押さえる仕組みになっており、4軸それぞれが接触型及びブレーザー変位計、荷重計でモニター可能である。これにより、変位・荷重をモニターしつつ、クリーンチェンバー第1室に導入されたコンテナの内蓋の上下動、つまり密封・開封を行うことが出来る。Oリングを介したコンテナ内部への拡散による地球大気の混入を最小限に抑えるために、カプセルの受入から第1室導入作業までは昼夜連続で行い、地表帰還後7日後の6月20日までで一連の処理を完了した。

コンテナ開封機構に設置された試料コンテナをクリーンチェンバー第1室に導入してから、一晩高純度窒素ガス循環環境で保持してチェンバー内の清浄度を高めた。翌日、チェンバーの圧力を徐々に下げつつ、コンテナ蓋を抑えているロッドに変位を加え、ロッドにかかる応力の変化を計測した。この結果からコンテナのOリングによるシールは機能しており、コンテナ内圧は大気圧より減圧環境にあることが分かった。チェンバーを超高真空(10^{-7} Pa)で12時間排気を続けた後、真空排気ラインのバルブを閉じて真空密閉状態にし、コンテナの開封とコンテナ内残留ガスの捕集を行った(図2(H, I))。開封時のチェンバー第1室の圧力変化から、コンテナ内には5000 Pa相当の気体が入っていたことが分かった。開封時に捕集したガスの希ガス同位体分析を行った結果、捕獲されたコンテナ内残留ガスの大部分は地球大気由来であることがわかった[5, 8]。

3. サンプルキャッチャーからの試料の回収

試料コンテナ開封後、クリーンチェンバー第1室で開封された試料コンテナのうち、キャッチャーを収納していたコンテナは、まず第1室に付属している搬送室に真空環境で移動された(図2(J))。搬送室は単独での真空排気が可能で、コンテナは現在に至るまで $10^{-3} \sim 10^{-6}$ Paの高真空環境で保管されており、コンテナ内は帰還後一貫して真空でのみ取り扱われている。チェンバー第1室内でコンテナから取り出されたキャッチャーは容器状の治具に設置された(図2(K))。設置の過程でキャッチャーA室は開封され、キャッチャーA室蓋と一体化している内蓋は取り外され別途容器に収納された。キャッチャーA室蓋を含む内蓋

がこの段階で取り外された理由としては、探査機内でのキャッチャー部分のカプセルへの搬送の際の滑らかな摺動を実現するために内蓋の側面に少量使用されている二硫化モリブテンによる汚染を避ける為である。

チェンバー第1室でキャッチャーA室が開封された時点で、キャッチャーA室内が観察できる状態になる。キャッチャーA室内部を肉眼で観察した結果、視認できるサイズの粒子は存在しないことが確認された。キャッチャーは収容された容器状治具ごと、粒子ハンドリングに特化したクリーンチェンバー第2室に搬送された(図2(L), 図7を参照)。キャッチャーが搬送された第2室には粒径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ の粒子試料のハンドリングの為に独自製作された、静電制御マイクロマニピュレーターが準備されている。

静電制御マイクロマニピュレーター(詳細は参考文献[9]に記載されている)、電圧をかけて帯電させた石英ガラスプローブで粒子をハンドリングする機構で、主に $10 \mu\text{m}$ 以下の微動が可能な手動式の4軸(X, Y, Z, θ)試料ステージと、同様の精度の手動5軸(X, Y, Z, θ , 傾き)プローブステージ(左右一対)と、直上及び斜めから試料ステージ上を観察可能な2種類の光学顕微鏡からなるシステムである。プローブステージには前述の石英ガラスプローブが取り付けられており、プローブには白金線が埋め込まれている。この白金線がチェンバー外の直流電源と接続されており、 $\pm 110\text{V}$ の電圧の印可が可能である。このプローブ内の白金線に印可する電圧と極性を調整し、静電気力で粒子をプローブ先端に付着させ、目的の場所に試料ステージを移動し、印可電圧などを変更(多くの場合0Vに)して粒子を設置する、という方法で粒子をハンドリングしている。

チェンバー第2室に搬送されたキャッチャーの内、蓋が開封されたA室からマニピュレーターにより、顕微鏡で見える細かい粒子の拾い出しを試みた(図2(M))。数十個の粒子の拾い出しに成功したが、キャッチャー内部の構造の複雑さや、キャッチャー内面のアルミ金属表面の加工痕の光学散乱による視認性の悪さなどの難点から、効率が悪かったので、別の粒子回収方法を試みる必要があった。

試料に与える影響が少ない手法として最初に試したが、テフロンヘラだった。電子顕微鏡に導入可能なサイズのテフロン製のヘラを開発し、キャッチャー

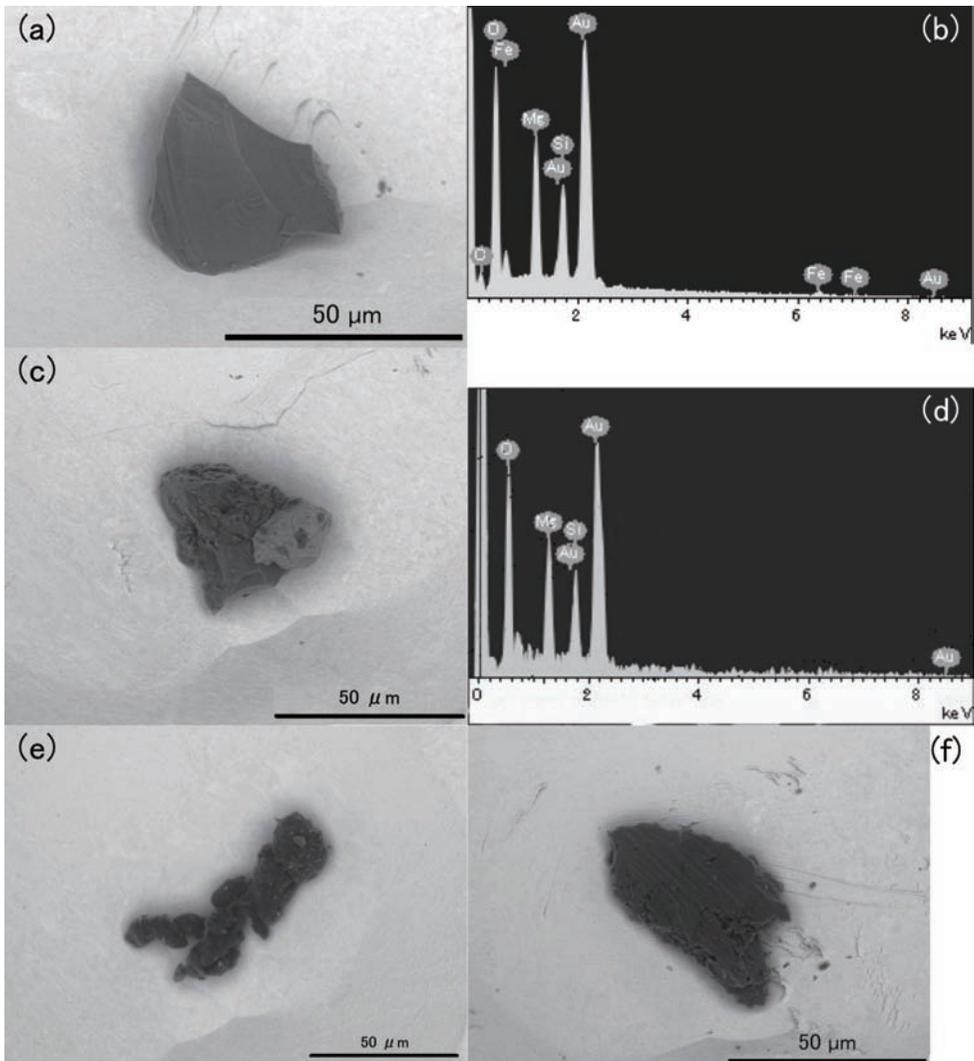


図10:「はやぶさ」サンプルキャッチャーから回収された粒子の後方散乱電子像及びEDSスペクトル。(a)カテゴリー1粒子. 主にケイ酸塩鉱物から成る. この粒子は(b)に示すとおり,かんらん石の組成を示した.(c)カテゴリー2粒子.(a)と同じだが,硫化鉄・鉄ニッケル金属などを含む.(d)に示すとおり,この粒子の主要鉱物もかんらん石だった.(e)カテゴリー3粒子. 主に炭素, 酸素, 窒素から成る.(f)カテゴリー4粒子. アルミニウムや石英ガラスの破片など人工物起源.

A室内部をそのヘラで掻いて, 光学顕微鏡及び電界放射形電子顕微鏡(FE-SEM)で観察した(図2(N, O), 図8). なお, 粒子を大気で汚染しないように, クリーンチェンバー第2室から電子顕微鏡内までの搬送が窒素封入状態で行えるような密閉型SEMホルダーを用いた. また, 試料への無用な汚染を避けるためにテフロンヘラ及び捕獲粒子に対して導電膜蒸着を行わず, 帯電を防止するために, 低真空環境(60 Pa)で環境2次電子像及び反射電子像により観察を行った. その結

果, 主に10 μm 以下の微粒子が多数捕獲されていることが確認された. これらの微粒子の定性元素組成分析を電子顕微鏡に付属するエネルギー分散型X線分光分析装置(EDS)で行った(図2(O)).

その結果, 付着している粒子3000個余りのおよそ半数がケイ酸塩鉱物(かんらん石, 輝石, 斜長石), 硫化鉄, 鉄ニッケル金属, クロム鉄鉱, リン酸塩鉱物などの化学組成を示しており(残りの半数はアルミ粒子などのキャッチャー材質由来の人工物), それらの主

要鉱物比率は、かんらん石54%：輝石17%：斜長石13%と、LL4-6コンドライト隕石とほぼ一致した。また、それらの粒子中のかんらん石とCaに乏しい輝石の鉄マグネシウム比の平均値もそれぞれFa28, Fs23とLLコンドライト隕石の値の範囲内であった。一種類の地球の岩石で、このような造岩鉱物から構成されるものではなく、地上からの可視近赤外分光観測及び小惑星イトカワの遠隔探査の結果から小惑星イトカワがLLコンドライトに近い物質であることが示唆されていたことから[6, 10]、これらの粒子が小惑星イトカワ起源であることが分かった[11, 12]。

イトカワ粒子の存在が確認されたという意味で、テフロンヘラによる粒子回収は成功だった。しかし、この方法で回収された粒子は主に10 µm以下と小さく、かつテフロンヘラ表面に埋め込まれていたり、強力で静電気捕獲されているため、クリーンチェンバー内のマニピュレーターでは、ヘラから粒子を回収して詳細分析の為に配分することは難しかった。詳細分析に配布するための粒子を確保するために、サンプルキャッチャーの蓋と同じサイズの合成石英ガラス製の円盤を製作し、蓋を外した開口部に設置して、キャッチャーを上下反転させてから振動を与えて粒子をガラス円盤表面に落下させ、そのガラス円盤を回収して光学顕微鏡で観察してみた。その結果、最大で300 µm超という比較的大きな粒子が多数(粒径10 µm以上で1000個以上)確認された(図9)。この方式の回収は、現時点でキャッチャーA, B室両方で1回ずつ行われ、粒子の回収が進められている。

4. 粒子の初期記載・分類・保管・配布

粒子は前述のガラス円盤及びキャッチャーB室蓋から1個ずつ静電制御マイクロマニピュレーターでピックアップされ、前述の密閉型SEMホルダーに設置して、クリーンチェンバーから電子顕微鏡に移動し、観察及びEDS分析を行った。EDSによる定性元素組成分析の結果から、粒子を4つのカテゴリーに分類した(図10)。カテゴリー1は、主にかんらん石・輝石・斜長石からなる粒子である(図10(a, b))。カテゴリー2は、主要構成鉱物はカテゴリー1と同じだが、硫化鉄や鉄ニッケル金属を含むものに該当する(図10(c, d))。初期分析の結果、このカテゴリー1, 2が小惑星

イトカワ起源であることが判明している[12-18]。カテゴリー3は主に炭素・酸素・窒素からなる粒子である(図10(e))。現在の所、その起源は調査中である。カテゴリー4はキャッチャー材質であるアルミ片、ガラス円盤などに用いられている石英ガラス片など明らかな人工物起源の粒子である(図10(f))。

粒子は電子顕微鏡分析後、クリーンチェンバーに戻して、上記の分類に基づいてグリッドをきった合成石英ガラス製スライドガラスの上に設置され、高純度窒素循環環境で保管されている(図2(P))。最新の集計(2013年3月15日時点)では400個を超える粒子が回収されており、その内8割の330個ほどがカテゴリー1, 2粒子、つまりイトカワ起源粒子だった。なお、上記の粒子の電子顕微鏡写真・EDSスペクトルは、後述の国際公募研究のために公表されている(http://hayabusaa.isas.jaxa.jp/docs/sample_top.html)。興味があれば是非ご参照頂きたい。

FE-SEM-EDSによる初期記載が完了し、保管されている粒子については、個別に試料番号が付けられる(図2(P))。ここで試料番号の付け方について言及しておく。キャッチャーA室から回収された粒子には「RA」、B室から回収された粒子には「RB」の番号がまず付けられる。その次には拾い出された場所、例えばキャッチャーA室の粒子を回収した石英ガラス製円盤(quartz disk)だと「QD02」(数字は石英ガラス製円盤の通し番号)、キャッチャーB室の蓋であれば「CV」(cover)等が来る。その後は各区割りにおける通し番号が4桁の数字で付けられる。例えば、キャッチャーB室のガラス円盤「QD04」から拾い出された107番目の粒子だと、「RB-QD04-0107」となる。更に分析やハンドリングの過程でこれらの粒子が分割した場合は、個別に前述の番号の末尾に二桁の数字による通し番号が付けられる。

初期記載の済んだ粒子の内、一部は3つのルートによりJAXA以外の研究機関に配布されている。一つ目は初期分析で、2000年及び2004年に行われたテスト試料分析結果の評価に基づき選抜された国内の研究チームに対して、イトカワ粒子の配布を行い、帰還後1年を目処に粒子の詳細分析が行われた[11]。なお、この初期分析チーム選抜の過程については[19]に詳しいので、ご参照頂きたい。初期分析の結果、イトカワの粒子が熱変成度の進んだLLコンドライトとよく似

た特徴を持つこと、その表面には小惑星イトカワ表面で受けた宇宙風化の痕跡があることなどが分かった[12-18]。なお、本特集号の[20]はその初期分析における有機分析についてまとめている。

二つ目が米国NASAに対する試料配付で、探査機「はやぶさ」の打ち上げ前の取り決めで、NASAとの協力関係の中で回収された試料の一定量について配布することになっている。これに基づき、既に2回の配布が実施済みである。

三つ目が国際公募研究で、これは一定数の粒子について、上記の初期記載情報を開示し、国内外の研究者に広く研究テーマの募集を行う。応募された研究テーマから専門委員会による審査の結果、採択されたテーマについて決められた数の粒子を配布するものである。この1回目の国際公募研究では17件の研究テーマについて既に試料配布が行われ、科学成果が上がりつつある。なお、採択された研究テーマの詳細については、以下のURL(http://www.jaxa.jp/press/2012/06/20120613_sac_hayabusa.pdf)をご覧ください。本特集号の[21]は初期分析も含めたそれらの希ガス分析についての成果、[22]は初期分析も含めたそれらの透過電子顕微鏡観察・分析による成果がまとめられている。国際公募研究の2回目の公募は今年の1月に開始し、同3月に締め切られて、現在審査中である。同6月までには審査結果が公表され、配布が始まる予定である。なお、NASAへの配布は提供であるが、初期分析と国際公募研究に対する配布は貸与であって、可能な限り分析後の試料はJAXAに返却することになっている。

因みに、現在、国際公募研究及びNASAへの粒子配布には、主に合成石英ガラスとステンレス製容器からなる密閉型移送容器が用いられている[23]。クリーンチェンバー第2室中で配布対象粒子を拾い出して、ステンレス製容器中の合成石英スライドグラス上のくぼみの中に収め、スライドグラスのカバーを取り付けて、容器を密閉することにより、高純度窒素雰囲気下にて試料を研究者やNASAの元に届けることが可能である。これらは参考文献[23]及び以下のURL(<http://hayabusaao.isas.jaxa.jp/docs/accepted.html>)の“Information of sample container”に詳しい。

5. 今後の展望

今後は、粒子のピックアップ・初期記載を進め、出来る限り早くキャッチャー内の粒子の全容を把握する予定である。こうして得られた試料の初期記載情報及び配付による詳細分析からイトカワ粒子全体の特徴をとらえ、他の惑星物質試料と比較して、小惑星イトカワ及びその前駆天体の形成・物質進化過程、ひいては初期太陽系の物質進化過程の解明を目指す。また、同時に粒子回収後の地球物質による汚染レベルの詳細評価や物理的な変化などから探査機「はやぶさ」での試料回収の問題点を明らかにし、今後のサンプルリターンミッションに対して課題と対応案を提起していきたい。

謝辞

世界初の小惑星往復飛行を成し遂げた「はやぶさ」(MUSES-C)プロジェクトチーム設計・製作・試験・運用・回収各担当及び各関連メーカーの皆様には厚く御礼申し上げます。キュレーションセンター仕様検討に多くの有益なコメントを頂きました。惑星物質試料受入設備仕様検討委員会の皆様には謝意を表します。また、多数の建設的なコメントを頂きました。橘省吾准教授に感謝致します。

参考文献

- [1] Fujiwara, A. et al., 2006, *Science* 312, 1330.
- [2] Yano, H. et al., 2006, *Science* 312, 1350.
- [3] 矢田達ほか, 2007, *日本惑星科学会誌* 16, 170.
- [4] 藤村彰夫, 安部正真, 2010, *日本惑星科学会誌* 19, 211.
- [5] Yada, T. et al., 2013, *Meteoritics Planet. Sci.*, in press.
- [6] Binzel, R. P. et al., 2001, *Meteoritics Planet. Sci.* 36, 1167.
- [7] Yano, H. et al., 2002, *Proc. Asteroids Comets Meteors ESA-SP-500*, 103.
- [8] Okazaki, R. et al., 2011, *Lunar Planet. Sci. XLII*, #1653.
- [9] 藤村彰夫, 2011, *静電気学会誌* 35, 255.

- [10] Abe, M. et al., 2006, *Science* 312, 1334.
- [11] 安部正真, 藤村彰夫, 2011, *日本惑星科学会誌* 20, 185.
- [12] Nakamura, T. et al., 2011, *Science* 333, 1113.
- [13] Yurimoto, Y. et al., 2011, *Science* 333, 1116.
- [14] Ebihara, M. et al., 2011, *Science* 333, 1119.
- [15] Noguchi, T. et al., 2011, *Science* 333, 1121.
- [16] Tsuchiyama, A. et al., 2011, *Science* 333, 1125.
- [17] Nagao, K. et al., 2011, *Science* 333, 1128.
- [18] Nakamura, E. et al., 2012, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 109, E624.
- [19] 山本哲生, 2007, *日本惑星科学会誌* 16, 165.
- [20] 奈良岡浩, 2013, *日本惑星科学会誌* 22, 94.
- [21] 馬上謙一ほか, 2013, *日本惑星科学会誌* 22, 86.
- [22] 野口高明ほか, 2013, *日本惑星科学会誌* 22, 78.
- [23] Ishibashi, Y. et al., 2012, *Lunar Planet. Sci.* XLIII, #2887.
- [24] Fujiwara, A. et al., 2004, *Adv. Space Res.* 34, 2325.