

## 小惑星探査機「はやぶさ」により明らかになった 小惑星イトカワの正体

北海道大学大学院理学研究院教授 塚本 尚義

小惑星から世界初の試料回収を目指した小惑星探査機「はやぶさ」は2003年5月9日に打ち上げられた。はやぶさは2005年11月に小惑星イトカワに着陸し、そのサンプル採取を行った。打ち上げ後、イオンエンジンをはじめとするいくつかの重大な故障を地球からの指令により克服しながら、7年間60億kmの飛行のすえ、2010年6月13日に地球に再突入し、オーストラリアのウーメラ砂漠にリエントリーカプセルを無事届けた。回収されたリエントリーカプセルは、6月18日に宇宙航空研究開発機構JAXAのキュレーション施設に搬入され、キュレーションチームはカプセル内の試料の回収に取りかかった。

リエントリーカプセル内にはサンプルコンテナとよぶ真空に保たれた容器があり、さらにそのコンテナ内部にサンプルキャッチャーとよぶ採取試料を保管する二つの部屋がある。サンプルコンテナを開封する前に、コンテナ内のX線CT検査が行われ、サンプル回収の有無が確かめられた(図1)。その結果、サンプルがもし回収されていたとしても、微粒子状のものが極微量しかないことが確認された。

その後、サンプルコンテナは専用のキュレーション装置内で地球の汚染をできるだけ受けないよう注意深く開封され、数十 $\mu\text{m}$ 以下(ほとんどが10 $\mu\text{m}$ 以下)の微粒子が多数存在することが確認された。微粒子の大きさとその量は想定外に小さく少なかったため、試料を確実に回収する手順の開発が急遽新たに行われた。そして、30~180 $\mu\text{m}$ の大きさの粒子約50個が回収された時

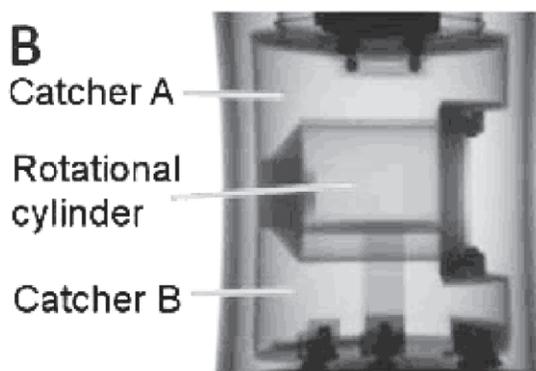


図1 サンプルコンテナのX線CTイメージ  
(文献1より引用)

点で、初期分析が開始された。それは2011年1月21日だった。

初期分析では、このわずか約50個の微粒子(総質量15 $\mu\text{g}$ )から、小惑星イトカワの正体とそれから得られる科学的意義について考察するために、最先端の分析技術が結集された。

### イトカワは地球と同じ物質でできているのか?

イトカワの微粒子を、放射光を用いて分析した結果、どの微粒子も何種類かの鉱物を含んでいることがわかった<sup>1)</sup>。主な鉱物はオリビン、輝石、斜長石、金属鉄、鉄硫化物である(図2)。このような鉱物の組み合わせは、地球のマントルを構成する岩石に似ているが、マントルの岩石は金属鉄を含まない。地球はその形成課程で溶融を経験したために金属鉄が地球の中心部に沈下し、中心核を作ったからである。

また、イトカワ微粒子のオリビンと輝石の化学

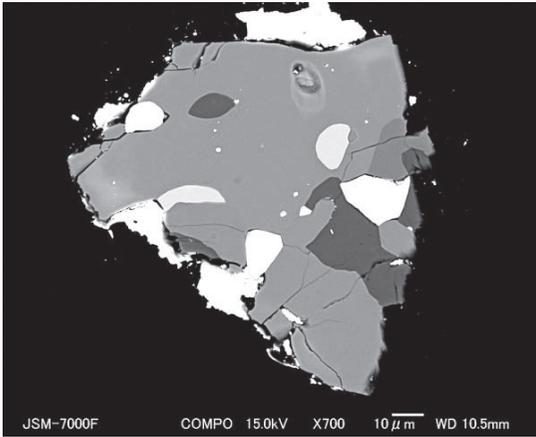


図2 イトカワ微粒子の走査電子顕微鏡写真

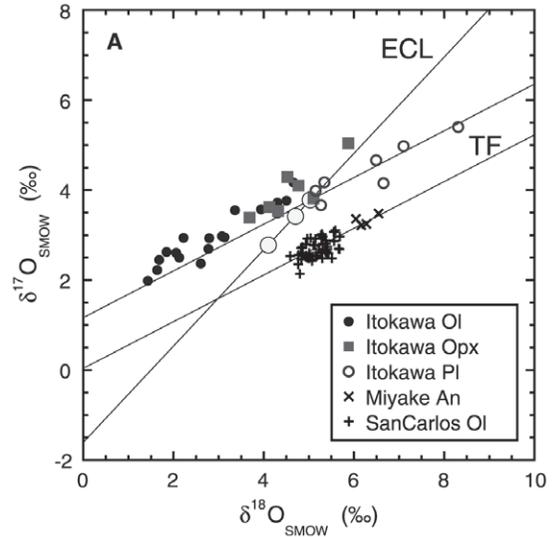


図4 イトカワと地球の酸素同位体組成の比較  
(文献4より引用)

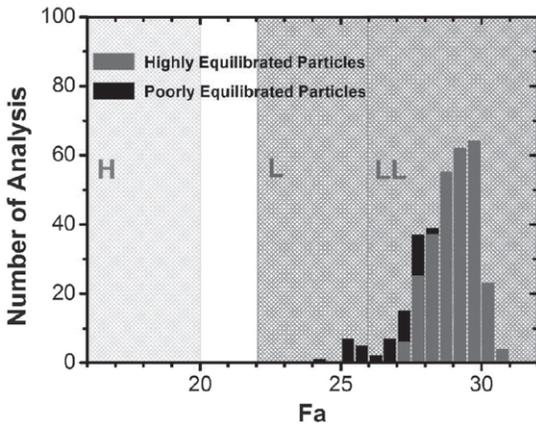


図3 イトカワ微粒子のオリビン中の  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  成分の分布  
(文献1より引用)

組成もマンタルの岩石のものとは異なることがわかった<sup>1)</sup>。イトカワ微粒子中のオリビンの  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  成分は28~30%の狭い範囲を示す(図3)。一方、マンタル岩石のオリビンのそれは10%付近が特徴的な値である。

これまでの隕石研究により、惑星や小惑星の酸素同位体組成は、それぞれ特異な値を示すと考えられている。イトカワの鉱物粒子の酸素同位体組成は地球とは異なり、地球より重い酸素同位体成分に少し富むことがわかった(図4)。つまり、酸素の原子量がイトカワでは地球よりすこし大きかったのである<sup>2)</sup>。

これらのイトカワ微粒子の特徴は、地球物質と

は明らかに異なり、普通コンドライトとよばれているものの特徴と一致していること示している。地球に落下する隕石のうち、最も多い種類がこの普通コンドライトであり、隕石全体の約8割を占めている。他に、微粒子を構成している鉱物種の量比<sup>3)</sup>や親鉄微量元素濃度<sup>4)</sup>について調べられ、いずれの結果も普通コンドライトがもつ特徴と一致した。

今回の初期分析により、普通コンドライトはイトカワのような小惑星からやってきていることが、初めて証明された。

イトカワは太陽の反射スペクトルの特徴からS型小惑星に分類されている。大部分の小惑星は小惑星帯という火星軌道と木星軌道の間領域を公転しているが、この小惑星帯の内側領域にS型小惑星が多いことが知られている。このことより普通コンドライトはS型小惑星を起源としており、小惑星帯からやってきたものが多いということも判明した。

### イトカワはかつて高温を経験した

ほとんどのイトカワ微粒子は構成する鉱物間で化学組成的にも酸素同位体的にも化学平衡に到達している。平衡にある鉱物間の元素分配や同位体

分配は温度を示すので、上記の鉱物の化学組成と酸素同位体組成からイトカワ微粒子が経験した熱史について解析することができる。

まず、酸素同位体の温度計測では 600 ~ 720°C を示した<sup>2)</sup>。鉱物組成や鉱物の結晶構造変化による温度計測では 560 ~ 840°C を示した<sup>1)</sup>。それぞれ異なる温度が算出されるのは、加熱と冷却がゆっくりであったことを意味している。元素や鉱物種により拡散速度が異なるため、平衡に達する時間に差があるからである。オリビンとスピネルを用いた冷却速度の計測により 1000 年間に約 0.5°C のゆっくりした冷却が起こったことが推定されている<sup>1)</sup>。

現在のイトカワの大きさは、約 500m × 200m で落花生のような形をしている。このように小さい天体が 800°C 以上に熱せられるためには、大きな熱源が必要であり、冷却速度計に記録されたゆっくりした冷却を実現することも難しい。なぜならば、イトカワのような小さい天体は表面積と体積の比が大きいため、宇宙空間への熱放射が速く進み、冷却速度はずっと大きくなるからである。

太陽系形成時には半減期約 70 万年の短寿命核種である <sup>26</sup>Al が少量存在していたことが知られており、イトカワ微粒子中にもその存在の痕跡が見つかっている。したがって、イトカワ微粒子が加熱されたのは太陽系が誕生して数千万年以内のことであり、そのときイトカワは現在の姿ではなく、もっと大きなおそらく数十 km の大きさの小天体の内部（イトカワ母天体）にあったのだと考えられる。イトカワ母天体は、冷却後（多分、太陽系誕生約 1 億年以降に）他の小天体と衝突し粉々に破壊され、その破片のわずかな一部が再集積しイトカワを形成したのだと考えられる。そのときの痕跡であるのかどうか、今後の研究を待たないといけないが、衝突により形成された組織が一部のイトカワ微粒子に見つかっている<sup>1)</sup>。

### イトカワ微粒子の一生

現在見られる姿のイトカワが誕生して以来、大気を持たないイトカワはずっと太陽放射を直接表

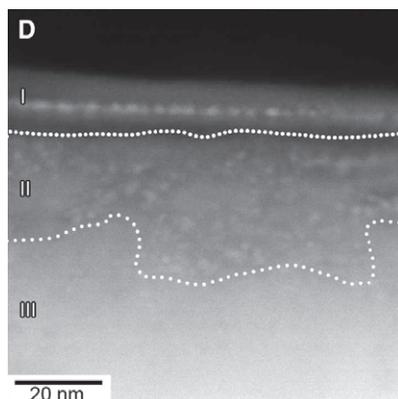


図5 イトカワ微粒子表面の宇宙風化層（文献3から引用）

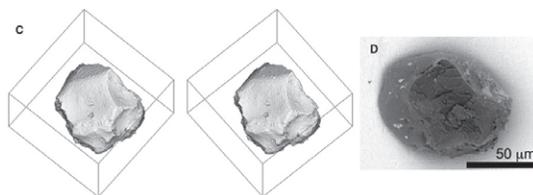


図6 イトカワ微粒子の3次元形状とその走査電子顕微鏡写真（文献2から引用）

面に受け続けている。太陽は、光のような電磁波だけでなく、太陽表面の元素が加速された高エネルギーの荷電粒子を太陽風として放出している。太陽風は水素とヘリウムを主成分とするが、他のすべての元素も宇宙存在度の割合で含んでいる。太陽風がイトカワ表面に到達すると、鉱物の表面でスパッタリングやイオン注入等のイオン-固体相互作用による表面改変がおこる。これを宇宙風化とよんでいる。

イトカワ微粒子の表面断面を透過電子顕微鏡により観察すると、鉱物表面に宇宙風化層ができていた（図5）<sup>5)</sup>。

微粒子表面に観察された宇宙風化は、イトカワが誕生してから 45 億年の間ずっと太陽風を受け続けた結果だろうか？そうではなく、イトカワ微粒子の表面形状と希ガス存在度が、変化するイトカワ表面の様子を明らかにした。

イトカワ微粒子の表面形状には、表面が丸くなった微粒子が多数観察された（図6）。これらは、

衝突でできた角張った破片が何らかの作用で流動し擦れ合い摩擦された結果であると考えられる<sup>3)</sup>。流動作用がおこった原因はイトカワへの隕石の衝突による振動（地震）であったのかもしれない。

イトカワ微粒子の希ガス測定は、この粒子流動のタイムスケールを与えた<sup>6)</sup>。イトカワ微粒子に含まれる希ガスは太陽風による宇宙風化の産物である。Ne濃度から推定した太陽風照射積算時間は約500年であった。イトカワ表面では粒子の流動により、一つひとつの粒子がイトカワ表面に露出したり埋没したりしているので、求められた500年とは微粒子の最小表面滞在時間となる。

もし微粒子がイトカワ表面にもっと長く滞在していたとすると、銀河宇宙線や太陽宇宙線の照射によりNe同位体比が変化する。しかしながら、これらの宇宙線による寄与はNe同位体比に現れていなかった。このことから、イトカワ表層の微粒子は数百万年以内にイトカワから消滅しなければならないということを示している。イトカワは小さな天体であり、脱出速度は $0.2\text{m/s}^{-1}$ と小さいので、少し大きな隕石の衝突があれば、その振動により表面物質は宇宙空間に容易に放出されるだろう。もしイトカワの軌道がずっと安定なのだとしたら、イトカワの表層物質は宇宙空間に脱出し続け、これから十億年もすればイトカワは自然に消滅していく運命なのかもしれない。

## 有機物

最後に有機物の話をしておこう。イトカワを構成する主要物質は、かつて $800^{\circ}\text{C}$ 以上の高温になっていたため、高温になる前の原材料に有機物が存在していたとしても高温時に消失しているだろう。しかしながら、イトカワが形成され現在の姿になって以降、有機物を含む隕石の衝突、あるいは、太陽風に含まれるC, H, O, Nを材料とした化学反応により、有機物がイトカワに存在するようになった可能性がある。イトカワ微粒子の有機物検出の努力はなされているが、これまでに有為な結果は得られていない<sup>7)</sup>。引き続き、有機物検出の努力が行われている。

## おわりに

すべてを合算しても総量 $15\ \mu\text{g}$ にしかならない約50個の微粒子から、小惑星イトカワの歴史が明らかになりつつある。はやぶさのサンプルコンテナ中には2000粒を超えるイトカワ微粒子がこれからの研究を待っている。これから、世界中の研究者がサンプル内の微粒子を研究することにより新しい成果が続々と出て、小惑星の正体がますます明らかになることが期待される。それと同時に私たち太陽系の起源が明らかにされていくだろう。

また、日本は、はやぶさミッションをさらに発展させた「はやぶさ2ミッション（2014年打ち上げ）」を目指している。はやぶさ2では、岩石の他に有機物と水分も主要な構成物質であると考えられているC型小惑星からのサンプルリターンを行う予定である。はやぶさ2は「宇宙と生命を結ぶ惑星探査」への人類初めての挑戦である。その帰還予定は2020年である。今の高校生たちの中から、将来はやぶさ2からの採取サンプルの分析に参加してくれる研究者が是非出て欲しいと思っている。

## 参考文献

- 1) T. Nakamura *et al.*, *Science* 333, 1113 (August 26, 2011, 2011).
- 2) H. Yurimoto *et al.*, *Science* 333, 1116 (August 26, 2011, 2011).
- 3) A. Tsuchiyama *et al.*, *Science* 333, 1125 (August 26, 2011, 2011).
- 4) M. Ebihara *et al.*, *Science* 333, 1119 (August 26, 2011, 2011).
- 5) T. Noguchi *et al.*, *Science* 333, 1121 (August 26, 2011, 2011).
- 6) K. Nagao *et al.*, *Science* 333, 1128 (August 26, 2011, 2011).
- 7) H. Naraoka *et al.*, *Geochem. J.* in press, ((2011)).