

小惑星イトカワからの試料の放射光トモグラフィーを利用した分析

土山 明

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

要旨

宇宙探査機はやぶさが小惑星イトカワ表面から採取した微粒子の初期分析が2011年におこなわれた。これにより、S型の反射スペクトルをもつ小惑星は宇宙風化を受けた普通コンドライトからなるという、これまでに推定されていた隕石と小惑星との対応関係が正しかったことが最終的に確認され、隕石の起源に終止符が打たれただけでなく、宇宙風化をはじめとする小惑星表面上での様々なプロセスが明らかにされた。我々の研究グループは、SPring-8において放射光を用いたマイクロトモグラフィーを用いて、これらの粒子の3次元構造をサブミクロンの空間分解能で明らかにした。このとき、FeのK吸収端を挟む2つの異なるX線エネルギーで同一サンプルを撮影することにより、定量的な鉱物の3次元分布を得ることができた (analytical dual-energy micro-tomography)。これによりイトカワの微粒子が普通コンドライト (LLコンドライト) に対応すること、また粒子の3次元外形からは粒子は衝突破片であり、粒子表面の一部は摩耗されていることなどを明らかにした。またこの非破壊分析をはやぶさサンプル初期分析の基本戦略として捉え、この後におこなわれた破壊分析のためにどの方向でレジンを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。

1. はじめに

小惑星は太陽系形成時に惑星にまで大きくなれなかった小天体で、太陽系形成時の情報を残していると考えられている。日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のはやぶさ探査機は2003年5月に打ち上げられ、2005年9月にイトカワと名付けられた小さなサイズ (535×294×209 m) の小惑星に到着し、同年11月まで観測をおこなうとともに^{1,2)}、小惑星表面のMUSES-C Regioと呼ばれる微細粒子で覆われた地域からサンプル採取をおこなった³⁾。2010年6月、地球に帰還した探査機は大気圏に突入して燃え尽きたが、サンプルカプセルは無事回収された。これは小惑星から初めてサンプルリターンされたものであるだけでなく、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 (惑星の表土: 月や小惑星表面では小天体が衝突してできた細かい砂を一般に意味する) のサンプルでもある。JAXAのキューレーション施設でサンプルカプセルが開封され⁴⁾、2012年9月時点でイトカワ起源と考えられる粒子は2000個程度見出されている。その多くは10 μm以下のサイズで最大でも300 μm程度の微粒子である。これらの中のいくつかの粒子が国内の様々な研究機関に配布され、2011年1月から12月にかけて初期分析がおこなわれた⁴⁻¹²⁾。また2012年6月からは、国際公募による詳細分析が開始されている。

地球への落下が観測された隕石の軌道解析や光学反射スペクトル測定により、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、隕石の近赤外～可視光反射スペクトルと比較することにより推定されるが、イトカワはS型小惑星で観測される反射スペクトルを示し、はやぶさ探査機による近接観測により普通コンドライト隕石の中でもとくにLL5あるいはLL6コンドライトと呼ばれる隕石に類似することが指摘された²⁾。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」¹³⁾と呼ばれる小惑星表面でのプロセスに起因していると考えられている。従って、はやぶさサンプル初期分析の第一の目的は、イトカワの表面物質が本当に宇宙風化を受けた普通コンドライト (LLコンドライト) であるかについて直接的な確証を与えることにあった。また、はやぶさサンプルは地球の大気や有機物に汚染されていないレゴリス粒子であり、小惑星でのレゴリスの形成や進化についての情報を与えてくれるはずである。

2. はやぶさサンプル初期分析とその概要

筆者がリーダーとなった大学コンソーシアムチームの初期分析では、あらかじめ準備していたフロー (Fig. 1) に従って、配分された比較的大きな約60粒子 (30-180 μm) を1粒子ずつ分析した。Fig. 1において右の3つのフローは、地球大気 (酸素・希ガス) や地球有機物の汚染が最小限になるように、宇宙風化の探査⁵⁾、希ガス同位体分析⁶⁾、有機物の分析^{7,8)}のために個々に分析をおこなったも

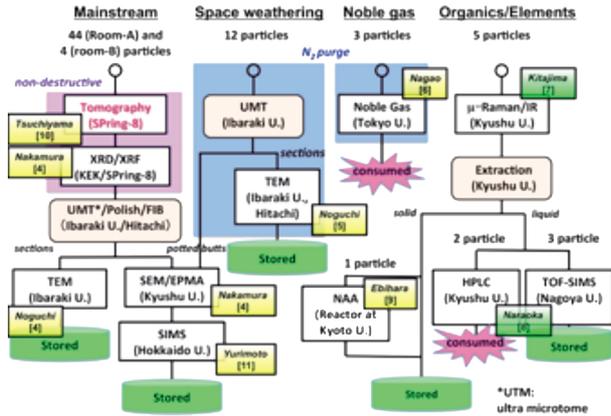


Fig. 1 (Color online) A flow chart for the preliminary examination of Hayabusa samples. Each analysis was made grain-by-grain. Three flows for “space weathering”, “noble gases” and “organic materials” were specifically made to minimize terrestrial contamination from the atmosphere (oxygen and noble gasses) and organic materials. Some particles were analyzed in multiple flows. See SOM in⁴⁾ for details of the mainstream flow analysis.

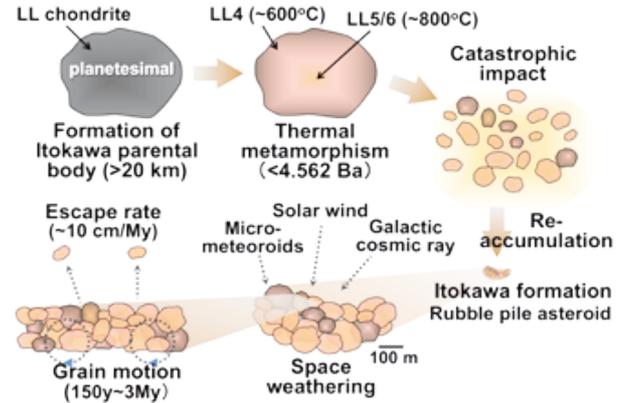


Fig. 2 (Color online) Summary of the preliminary examination results of Hayabusa samples, where interior and surface processes throughout the solar system history are shown. (Original drawing of Dr. S. Tachibana of Hokkaido University was slightly modified).

のである。有機物分析は粒子表面についておこなった後、中性子放射化分析を用いた元素分析⁹⁾をおこなった。その他の多くの粒子については、メインストリームと呼んだフローにおいて微小粒子から最大限の情報を引き出すために、非破壊分析（X線CT分析¹⁰⁾、X線回折分析⁴⁾から破壊分析（粒子断面の走査型および透過型電子顕微鏡観察および局所元素分析⁴⁾、二次イオン質量分析による同位体分析¹¹⁾）へと分析がおこなわれた。筆者の研究グループは、このメインストリームで最初におこなわれた非破壊分析として、X線CT（放射光トモグラフィー）を用いた粒子の3次元構造を求めた¹⁰⁾。一連の成果（Fig. 2）は、サイエンス誌に6つの論文^{4,6,9-11)}として発表され、サイエンス誌の2011年のブレークスルーにも選ばれた。

CTを用いた分析の詳細を述べる（4章）前に、ここでは一連の初期分析の成果について、その概要を述べる。初期分析において、鉱物の元素・同位体組成やモード組成、岩石組織により、はやぶさが回収したサンプルは小惑星イトカワ表面に存在していた粒子であり、その多くはLL5あるいはLL6に属する普通コンドライト隕石に類似する物質であることが分かった^{4,9-11)}。2種類の鉱物間の元素分配から推定したイトカワ粒子構成物質の最高到達温度は800°C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をもとにして、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⁴⁾。また、一部のサンプル粒子は熱変成度の低いLL4のものであり^{4,10)}、これらの粒子は母天体の表面にあったものと考えられる。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¹⁾を実証し、より具体的な描像を与えた（Fig. 2）。

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情報が得られた。イトカワ表面は、小天体や微隕石の衝突だけでなく、太陽風や銀河宇宙線の照射を受けている。月のレゴリス粒子では、その粒子表面に100 nm程度の厚みをもつ金属鉄ナノ粒子を含む非晶質珪酸塩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¹³⁾。このような変化は、月表面への微隕石衝突や太陽風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鉄に富むナノ粒子を含む非晶質珪酸塩層が見出され、小惑星での宇宙風化が実証された⁵⁾。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。また希ガス同位体分析により、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150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が300万年程度であることが分かった⁶⁾。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。また4章で詳しく述べるように、イトカワ粒子の3次元形状からは、粒子は衝突破片であり、粒子表面の一部は摩耗されていることなどがわかった¹⁰⁾。

3. 放射光トモグラフィーとはやぶさサンプルへの応用

X線トモグラフィー（X線CT）はX線が物体を透過する際に得られる吸収や位相シフトなどの情報をもとに、物体の内部構造を得る手法である。連続的なデジタル断層像

$$\Delta\mu \approx \rho \Delta\tau_j w_j \quad (2)$$

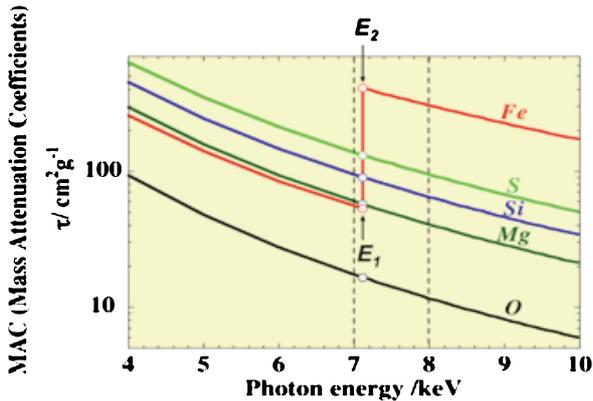


Fig. 3 (Color online) Mass attenuation coefficients (MAC) of elements plotted against x-ray photon energy. E_1 and E_2 are energies just below and above the K-absorption edge energy of Fe (7.112 keV).

(CT 像) を積み重ねることにより、サイズなど定量的な幾何学情報をもつ3次元内部構造が得られる。高いフラックス密度と干渉性をもつ放射光のX線を用いることにより、高いS/N比と空間分解能をもつCT像が得られる(例えば¹⁴⁾)。一方、フレネルゾーンプレートをもちいたX線顕微光学系によりX線ビームを拡大して、サブミクロンの空間分解能をもつCT像を得ることができる(例えば¹⁵⁾)。

X線の吸収の情報をもとにした吸収トモグラフィでは、X線の線吸収係数(LAC)の空間分布として物体のデジタル断層像(CT像)が得られる。物質のLAC値、 μ 、は、 ρ を密度、 $\tau_i(E)$ を元素*i*の質量吸収係数(X線のエネルギー、 E 、の関数である: Fig. 3)、 w_i を元素*i*の重量分率とすると

$$\mu = \rho \sum_i \tau_i(E) w_i \quad (1)$$

で表される。単色X線を用いると(放射光からは高フラックスの単色X線が得られる)、X線のエネルギーに対応した定量的なLAC値をもつCT像が得られ、これより物質の同定が可能となる¹⁶⁾。しかしながら(1)式からわかるように、密度と元素組成の組み合わせにより一般的には異なる物質がほぼ同じLAC値をもつので、単一のLAC値のみから物質を同定するには限界がある。

2つの異なるX線エネルギーを選んで同一のサンプルを撮影することにより、上記の問題を解決することができる。差分法(例えば¹⁷⁾)では、ある特定の元素*j*に着目し、その元素のX線吸収端のエネルギーの直下と直上のエネルギー(E_1 と E_2)で撮影する(Fig. 3)。この2つのエネルギーでLAC値の差分、 $\Delta\mu = \mu(E_2) - \mu(E_1)$ 、をとると、着目した元素以外では $E_1 \approx E_2$ なので $\Delta\tau_i \approx 0$ となるのに対して、 $\Delta\tau_j$ は有限の値をとる。従って(1)式より

となり、2つのエネルギーで撮影したCT像の差分像($\Delta\mu$ の空間分布)は元素*j*の空間分布を反映したものとなる。しかしながら、密度は元素組成の関数でもあり、厳密にはこの方法で定量的な元素組成像を正確に得ることは難しい。さらにたとえ定量的な元素組成像を得られたとしても、差分像の情報は1次的であり、異なる物質間のオーバーラップは避けられない。Tsuchiyama *et al.*^{10,18)}は、はやぶさサンプルの初期分析において、特定の元素のX線吸収端を挟んだ2つのエネルギーでのCT撮影により、多くの物質(はやぶさサンプルでは鉱物)の同定ができることを示した。

はやぶさサンプルのような惑星物質(地球のマントル物質も含めて)の主要元素組成は、揮発性元素を除いた太陽系における元素存在度に近く、Mg, Si, Fe, Oに富んでおり、S, Al, Ca, Na, NiおよびCrがこれにつづく¹⁹⁾。このような元素組成を反映して、はやぶさサンプルや普通コンドライトの主要構成鉱物はTable 1に挙げたようなものとなる。4つの主要元素の中でとくに重い元素はFeである。FeのK吸収端のエネルギーは7.112 keVであり、これを挟んだ7 keVと8 keVでの主要構成鉱物のLAC値がFig. 4にプロットされている。例えば、かんらん石[Ol: (Mg, Fe)₂SiO₄]はフォルステライト[Mg₂SiO₄]とフェイヤライト[Fe₂SiO₄]を端成分とする固溶体であり、Mg#(=[Mg]/{[Mg]+[Fe]})によりLAC値は変化する。Fe吸収端より高い8 keVではMg#の低下(すなわちFe量の増加)に従ってLAC値が大きく増加するのに対して、Fe吸収端より低い7 keVではMg#の低下でLAC値はあまり増加しない(Fig. 4)。同様のことはCaに乏しい輝石[LPx: (Mg, Fe)SiO₃]でもいえ、2つの固溶体のLAC値は2次的にオーバーラップする。しかしながら、はやぶさサンプルに含まれるかんらん石とCaに乏しい輝石のMg#はほぼ一定の値を持っており、Fig. 4で示されるように両者を容易に区別することができた。一方、Caに富む輝石[HPx: (Ca, Mg, Fe)SiO₃]では、Mg#だけでなくCa量が変わることによってもLAC値は変化する。例えば、Mgの端成分[(Ca, Mg)SiO₃]では、Mgより重元素であるCa量の増加により、とくにエネルギーの低い7 keVでのLAC値の増加が8 keVに比べて大きくなり、Fe量の増加とは異なるトレンドをもつ。このようにして、Fig. 4において、鉱物中のFe量が増加するとLAC値は上方やや右へ、一方Feの少ない鉱物においてS, Ca, CrなどのSi, Mgより重い元素量が増加するとLAC値は右方や上へと変化することになり、多くの鉱物を同定することが可能となる。また、固溶体をつくる鉱物の化学組成(例えばMg#)も決定でき、この手法をanalytical dual-energy tomographyと呼んだ¹⁸⁾。

以上に述べたように、この手法はサンプルの構成鉱物

Table 1 Representative minerals in ordinary chondrites and Hayabusa samples

mineral	abbreviation	formula	crystal system*	end member	abbreviation	formula
olivine	Ol	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄	Orth	forsterite	Fo	Mg ₂ SiO ₄
				fayalite	Fa	Fe ₂ SiO ₄
low-Ca pyroxene	LPx	(Mg, Fe)SiO ₃	Orth, Mono	enstatite	En	MgSiO ₃
				ferrosilite	Fs	FeSiO ₃
				diopside	Di**	CaMgSi ₂ O ₆
high-Ca pyroxene	HPx	(Ca, Mg, Fe)SiO ₃	Mono	hedenbergite	Hd**	CaFeSi ₂ O ₆
				albite	Ab	NaAlSi ₃ O ₈
plagioclase	Pl	(Na, Ca)Al(Al, Si)Si ₂ O ₈	Mono, Tri	anorthite	An	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
				apatite	CP***	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F, Cl, OH)
merrillite	CP***	Ca ₉ NaMg(PO ₄) ₇	Tri			
chromite	Chm	FeCr ₂ O ₄	Cub			
troilite	Tr	FeS	Hex			
kamacite	Kam	α-(Fe, Ni)	Cub			
taenite	Tae	γ-(Fe, Ni)	Cub			

* Cub: cubic, Hex: hexagonal, Orth: orthorhombic, Mono: monoclinic, Tri: triclinic
 ** En and Fs are also endmembers.
 *** Apatite and merrillite are abbreviated as CP (Ca phosphate).

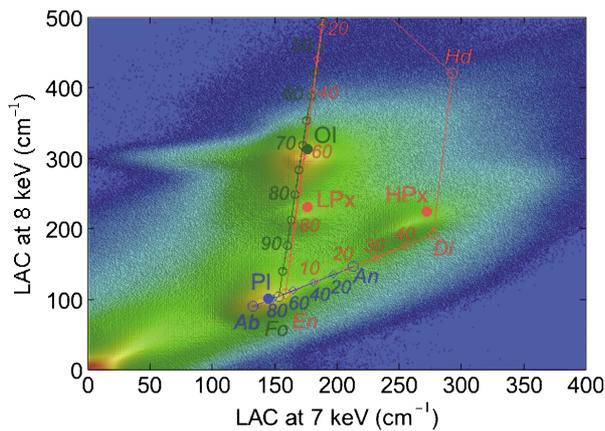


Fig. 4 (Color online) A two-dimensional histogram of linear attenuation coefficient (LAC) values at 7 and 8 keV for an Itokawa particle (RA-QD02-0013). Logarithm of the number of voxels is shown as a rainbow scale (from 0 to the maximum). Solid symbols show LAC values calculated from the mean chemical compositions of minerals of Itokawa particles⁴⁾. LAC values of olivine, pyroxene and plagioclase solid solutions are also shown as open symbols. Numbers along forsterite-fayalite, enstatite-ferrosilite, enstatite-diopside and albite-anorthite joins are the forsterite, enstatite, wollastonite and albite contents (in mol.%), respectively. Abbreviations for minerals are the same as Table 1.

(物質) があらかじめわかっている場合には CT のみから鉱物の 3 次元分布が得られるだけでなく、およそその化学組成を知ることでもできるという極めて有効なものであるが、特定の元素の吸収端を利用するためにサンプルサイズに制限がある。厚さ, x , をもつ物体の X 線の透過率, t , は LAC 値, μ と次の関係にある。

$$t = \exp(-\mu x) \quad (3)$$

従って、CT 再構成時に最も適切な S/N 比が得られるのは $\mu x \approx 1$ のときとなる。LAC 値は(1)式からわかるように X 線のエネルギーの関数であり着目する元素の吸収端のエネルギーを E^* とすると、適切なサンプルサイズは $\mu(E^*)^{-1}$ 程度となる。はやぶさサンプルの場合、その最適サイズはおおよそ 5~100 μm であり、実際のサンプルサイズと同程度であった。この手法ははやぶさサンプルだけでなく、様々な分野においても、複数の物質(鉱物)を含むサンプルに適用可能である。上の議論からわかるように、着目する元素が Fe よりも軽いと適切なサンプルサイズは小さくなりすぎてしまい現実的でなくなるが、Fe よりも重い元素ではサンプルサイズは大きくなり、有効な手法であるといえる。

4. マイクロ CT を用いたイトカワ粒子の 3 次元構造

マイクロ CT 分析の目的は、(1) 3 次元内部構造をもとに隕石との比較よりイトカワの表面物質を明らかにすること、(2) 3 次元粒子形状をもとにレゴリス形成・進化に関連する情報を得ること、そして(3)初期分析フローにおいて後におこなう破壊分析のための情報を得ることであった¹⁰⁾。実験は、SPring-8 のビームライン BL47XU において、結像型吸収 X 線 CT 法を用いておこなった。これにより、約 50 μm より小さな試料では約 200 nm、それより大きい試料では約 500 nm の実効的な空間分解能をもつ 3 次元 CT 像が得られた。3 章で述べた analytical dual-energy microtomography により、定量的な鉱物の 3 次元分布 (3

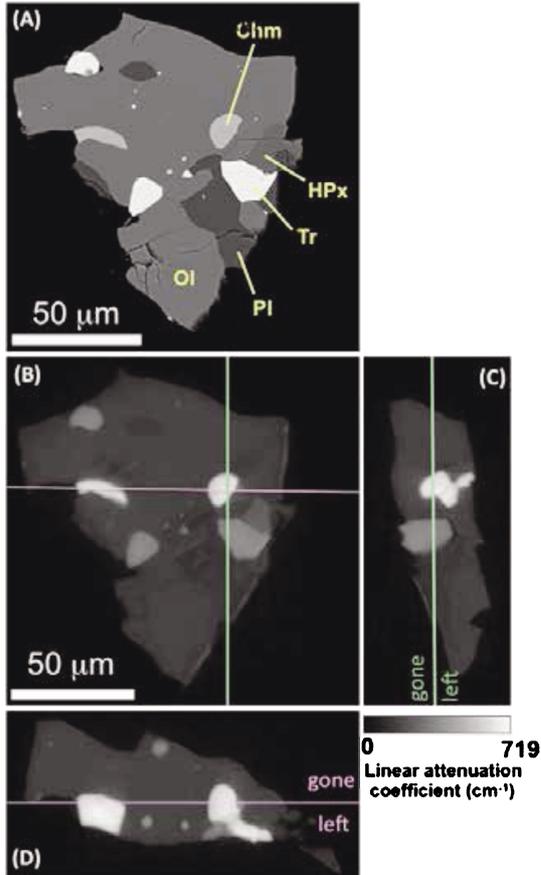


Fig. 5 (Color online) A final cross section of an Itokawa particle (RA-QD02-0031) (from SOM in¹⁰). (A) An FE-SEM back-scattered electron image. The particle is embedded in a resin. (B) A CT images corresponding to the FE-SEM section shown in (A). (C) A CT image of a vertical section of (B) after the left part was removed by polishing. (D) A CT image of a horizontal section of (B) after the upper part was removed by polishing. Abbreviations for minerals are the same as Table 1.

次元組織)を得るだけでなく、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 (Fig. 5)。このように、マイクロCTを用いた分析ははやぶさサンプル初期分析の基本戦略であった。リターンサンプルの分析としては、NASAのスターダスト計画により持ち帰られた彗星塵サンプルについて我々のグループによって始めてCTが活用され^{20,21)}、はやぶさサンプルで analytical dual-energy tomography を用いた系統的な分析がおこなわれ、成功を収めたものである。

CT撮影をおこなった48粒子の体積の総和は $4.2 \times 10^6 \mu\text{m}^3$ であり半径約 $100 \mu\text{m}$ の球に相当する(質量は $15 \mu\text{g}$)²²⁾。これらの粒子全体の鉱物モード組成は普通コンドライトの中でもLLコンドライトのもの²³⁾と最もよく一致した¹⁰⁾ (Fig. 6)。また、これにより求められたバルク密度は 3.4 g/cm^3 であり、ラブルパイルモデル¹⁾ (2章参照)

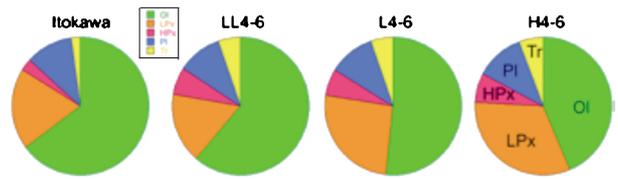


Fig. 6 (Color online) Modal compositions of minerals of Itokawa particles¹⁰⁾ and ordinary chondrites (LL4-6, L4-6 and H4-6²³⁾).

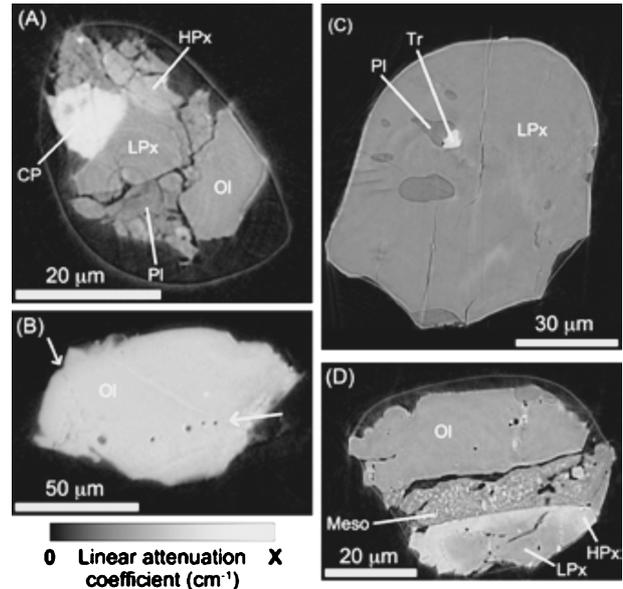


Fig. 7 Slice images of Itokawa particles obtained by microtomography (from¹⁰⁾). (A) A polymineralic particle with thermally equilibrated texture (RA-QD02-0063: 7 keV, $X=431 \text{ cm}^{-1}$). (B) A monomineralic particle with thermally equilibrated texture (RA-QD02-0014: 7 keV, $X=287 \text{ cm}^{-1}$). Some voids define a 3D plane (arrows). (C) A particle with rounded edges on the surface (RA-QD02-0042: 7 keV, $X=575 \text{ cm}^{-1}$). (D) A particle with thermally less-equilibrated texture (RA-QD02-0048: 7 keV, $X=431 \text{ cm}^{-1}$). Mes: mesostasis. Abbreviations for minerals are the same as Table 1.

とも整合的であった。粒子の9割程度は熱変成を受けた組織をもち (Figs. 7ABC), LL5あるいはLL6に対応するものであった。一方、1割程度の粒子は熱変成の程度の低いLL4に対応すると考えられる組織をもっていた (Fig. 7D)。

各粒子の3次元外形から、粒子サイズ、3次元形状や表面構造を求め、月レゴリスや衝突破壊実験結果²⁴⁾と比較した¹⁰⁾。イトカワ粒子の累積サイズ分布 (Fig. 8) は勾配約-2の対数分布をもち、月レゴリス (勾配は約-3) とは異なり mm サイズ以下の粒子が少ないことを示している。これは、天体の重力の違いを反映しているものと考えられるが、詳しい原因の特定には至っていない。3次元形状分布 (3軸比の分布) は衝突実験破片の分布と区別できず (Fig. 9), イトカワ粒子は衝突破片であると考えてよい

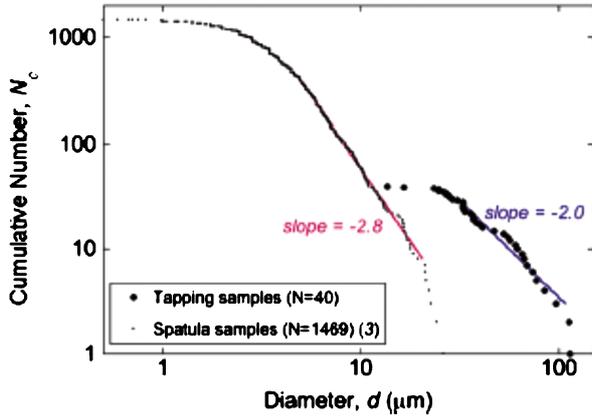


Fig. 8 (Color online) Cumulative size distribution of Itokawa particles (from¹⁰). Sphere-equivalent diameters of the tapping samples and the diameter of the spatula samples are shown. The slope of the spatula sample should become steeper during sweeping by the spatula, which would have pulverized some of the particles.

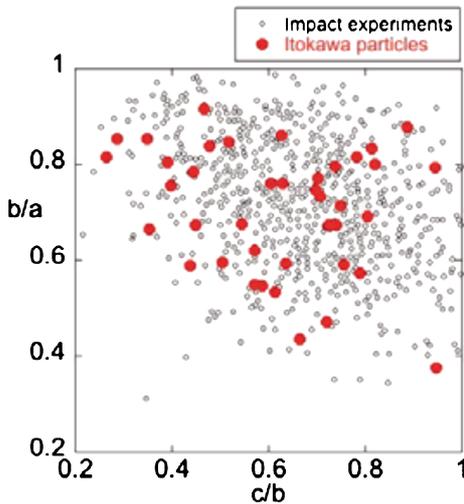


Fig. 9 (Color online) 3D shape distribution of Itokawa particles and fragments of impact experiments (from¹⁰). The longest, middle and shortest axes, a, b and c, of the Itokawa particles were obtained by ovoid approximation of the CT data.

ことを示している。実際、多くの粒子は破壊でできたと考えられるシャープなエッジをもっていたが、一部の粒子表面には丸みを帯びたエッジが観察でき、衝突破片が摩耗されたと考えられる (Figs. 7BC, 10)。これは、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起こり、粒子が機械的に摩耗されたものである可能性が高い。このような機械的摩耗が、宇宙風化⁵⁾や太陽風希ガスの打ち込み⁶⁾とどのような関係にあるのかは今後の研究課題であるが、これらを総合すると、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っていることがわかった (Fig. 2)。一方、月のレゴリスでみられるような、レゴリス粒子の融解はイト

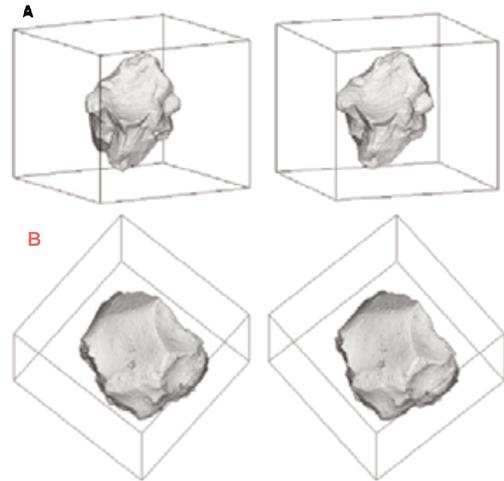


Fig. 10 (Color online) The 3D external shapes of Itokawa particles (stereograms). (A) A particle with sharp edges (RA-QD02-0023, box size: 232×232×203 μm). (B) A particle with rounded edges (RA-QD02-0042, box size: 112×112×93 μm).

カワ粒子では認められなかったが、これは衝突速度の違いによるものと考えられる。

5. はやぶさサンプル初期分析のまとめと今後の展望

一連の初期分析により、S型小惑星は宇宙風化を受けた普通コンドライトであるというこれまでに推定されていた隕石と小惑星との対応関係が正しかったことが最終的に確認され、隕石の起源に終止符が打たれただけでなく、宇宙風化をはじめとする小惑星表面上での様々なプロセスが明らかにされた (Fig. 2)。しかしながら、イトカワ粒子の絶対生成年代や大規模衝突年代 (イトカワの形成年代に対応するはずである) はわかっていない。また、太陽風・宇宙線照射や微隕石衝突と粒子表面での非晶質化・鉄ナノ粒子生成や機械的摩耗といった小惑星表面プロセスの総合的な理解はこれからの課題であり、月レゴリスとの比較研究により月も含めた大気のない天体での表面プロセスの包括的な理解が今後期待される。

炭素質物質や有機物の存在は現在のところ確認されていない^{7,8)}。10 μm以下の粒子は現在のところ安全にハンドリングできないため、未だ分析のために配分されていないが、これらの中にはイトカワに降り注いだ有機物も含めた異質物質の存在が期待される。

6. はやぶさ2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年打ち上げ、1999JU3と呼ばれる小惑星(約900 m)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。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する物質の存在が予想されている。この隕石は鉄物・水（含水鉄物として鉄物中に含まれる）・有機物からなるもので、それぞれ固体地球・海洋・生命の原材料に対応している。サンプル分析により、これらの物質の太陽系初期における進化の解明が期待される。約10年後の分析のために、高空間分解能化やX線回折を利用したトモグラフィーなど、さらなる放射光マイクロトモグラフィーの開発が重要である。

謝辞

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、また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) A. Fujiwara et al.: *Science* **312**, 1330 (2006).
- 2) M. Abe et al.: *Science* **312**, 1334 (2006).
- 3) H. Yano et al.: *Science* **312**, 1350 (2006).
- 4) T. Nakamura et al.: *Science* **333**, 1113 (2011).
- 5) T. Noguchi et al.: *Science* **333**, 1121 (2011).
- 6) K. Nagao et al.: *Science* **333**, 1128 (2011).
- 7) H. Naraoka et al.: *Geochem. J.* **46**, 61 (2012).
- 8) F. Kitajima et al.: *Lunar Planet. Sci.*, XLII 1855 (2011).
- 9) M. Ebihara et al.: *Science* **333**, 1119 (2011).
- 10) A. Tsuchiyama, et al.: *Science* **333**, 1125 (2011).
- 11) H. Yurimoto et al.: *Science* **333**, 1116 (2011).
- 12) E. Nakamura et al.: *Proc. Nat. Acad. Sci.* **109**: E624–E629 (2012).
- 13) L. A. Taylor et al.: *J. Geophys. Res. Planets* **106**, 985 (2001).
- 14) U. Bonse and F. Busch: *Progr. Biophys. Mol. Bio.* **65**, 133 (1996).
- 15) A. Takeuchi, K. Uesugi and Y. Suzuki: *J. Phys.: Conf. Ser.* **186**, 012020 (2009).
- 16) A. Tsuchiyama et al.: *Am. Min.* **90**, 132 (2005).
- 17) S. Ikeda, T. Nakano and Y. Nakashima: *Mineral. Mag.* **64**, 945 (2000).
- 18) A. Tsuchiyama et al.: submitted to *Geochim. Cosmochim. Acta*.
- 19) K. Lodders: *Astrophys. J.* **591**, 1220 (2003).
- 20) A. Tsuchiyama et al.: *Meteor. & Planet. Sci.* **44**, 1203 (2009).
- 21) T. Nakamura et al.: *Science* **321**: 1664 (2008).
- 22) A. Tsuchiyama et al.: *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XLII, 1870 (2012).
- 23) R. Hutchison: *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. 506 pp. Cambridge Univ. Press, Cambridge (2004).
- 24) F. Capaccioni et al.: *Nature* **308**, 832 (1984).

著者紹介



土山 明

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻・教授

E-mail: atsuchi@kueps.kyoto-u.ac.jp

専門：鉄物学・惑星物質科学

【略歴】

1982年東京大学理学研究科地質学専門課程博士課程修了，理学博士，NASA ジョーンソン宇宙センターおよびオレゴン大学の研究員，京都大学理学部助手，大阪大学教養部講師・助教授，同大学理学部，理学研究科助教授・教授を経て，本年度より現職。

Analysis of samples collected from the Asteroid Itokawa using synchrotron radiation based tomography

Akira TSUCHIYAMA Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawaoiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract Preliminary examination of small particles collected from asteroid Itokawa by the Hayabusa spacecraft was successfully made in 2011. The examination definitely confirmed that the surface material on an S-type asteroid is composed of ordinary chondrites suffered by space weathering and led to the end of the origin of meteorites. The examination also revealed a variety of processes on the asteroid. Our research group examined three-dimensional structures of the Itokawa particles with sub-micron resolution using synchrotron radiation-based microtomography at SPring-8. 3D distribution of minerals of each particle was obtained by comparing a set of CT images taken at dual x-ray energies below and above the K-absorption edge of Fe (analytical dual-energy microtomography). Our results show that the Itokawa particles correspond to ordinary chondrites (LL chondrites). 3D external shapes of the particles showed that the particles are impact fragments and some of them were abraded. Use of microtomography for non-destructive analysis can provide key information for the design of later destructive analyses of the same particle by providing critical information concerning where a particle should be cut to obtain the best areas of specific minerals in cross sections of these small particles. This is one of the key features of the Hayabusa preliminary examination strategy for the analytical flow sequential studies.