

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244086

研究課題名(和文)イトカワ粒子から探る新しい小惑星の描像

研究課題名(英文)A new picture of an asteroid by searching from Itokawa particles.

研究代表者

土山 明 (TSUCHIYAMA, Akira)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90180017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,900,000円

研究成果の概要(和文)：「はやぶさ計画」により小惑星イトカワ表面から採取された微粒子について、初期分析結果をもとにして研究をおこない、以下の成果を得た。(1) 分析されたサンプルは微量であるが、採取されたサンプルをほぼ代表するものであり、隕石との詳細な比較によりS型に分類された小惑星(イトカワ)の構成物質が普通コンドライト隕石(LLコンドライト)であることを最終的に確認した。(2) 小惑星表面では、衝突による微粒子生成、太陽風照射による粒子表面での宇宙風化リム生成、粒子運動による粒子の摩耗が繰り返されて宇宙風化が進んでいくという、ダイナミックな小惑星進化の描像が得られた。

研究成果の概要(英文)：Fine particles collected from the surface of Asteroid Itokawa by the “Hayabusa” mission were examined based on the preliminary examination results, and the following results were achieved. (1) The analyzed samples are almost representative for the whole collected samples although they are very small in amount, and it was finally confirmed by comparing with meteorites that the materials on the S-type Asteroid correspond to meteorites, particularly ordinary chondrites (LL chondrites). (2) We successfully obtained dynamic picture about asteroid surface evolution that space-weathering proceeds by combined and repeated processes of particle formation due to impact, space-weathering rim formation on particle surfaces due to solar wind implantation, and particle abrasion due to particle motion.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：はやぶさ計画 隕石 レゴリス 宇宙風化 3次元構造 X線CT 衝突 太陽風照射

1. 研究開始当初の背景

宇宙航空研究開発機構(JAXA)によるはやぶさ計画において、無人探査機により採取されたS型小惑星イトカワの粒子が2010年6月に地球に帰還した。小惑星は太陽系形成時に惑星まで大きくなれなかった小天体であり、そのサンプルは太陽系形成時の情報を有していると考えられる。またこのサンプルは小惑星から始めて採取されたものであるだけでなく、月に次ぐ地球以外の天体のレゴリス粒子であり、小惑星表面の進化プロセスの情報をもっているはずである。

2011年1月から国内の研究機関において初期分析が開始された。研究代表者は大学合同チームの初期分析リーダーとして微小かつ微量サンプル(30-180mmの約50粒子)の分析フローを策定し、「イトカワ粒子の3次元構造」の分析に携わった。その成果はScience誌に発表され[1-6]、隕石の起源に最終的な決着を与えるとともに、隕石からでは得ることのできない重要な成果を得た。

その概要は以下のとおりである。

(1) イトカワ粒子は普通コンドライト隕石(LL5または6)に対応する物質であり[1-4]、反射スペクトルをもとに推定されていた隕石と小惑星との関係[7, 8]が実証された。

(2) LL4粒子の存在[1, 2]、鈹物の最高到達温度[1]や密度推定[2]などにより、イトカワは母天体の破壊とその一部破片の再集積で形成されたというラブルパイルモデル[9]を物質科学的に実証した[1]。

(3) 親鉄元素組成について原始太陽系初期の元素分別プロセスの痕跡が示された[4]。

(4) 太陽風希ガスの打ち込みが検出され、レゴリス粒子としての年代が見積もられた[5]。粒子表面に宇宙風化リムの存在が実証された[6]。3次元形状により粒子は衝突破片であることが示され、粒子の摩耗の痕跡から微隕石衝突の地震波誘起による粒子流動の可能性が指摘された[2]。

(5) 炭素質物質や有機物は見出されていない[10]。

これらの成果より以下のような問題が提起され、新たなサイエンスの展開が期待された。

(A) 初期分析と同様の手法による隕石との比較研究(LLとの詳細な比較、熱変成作用、大規模衝突など)。

(B) 絶対生成年代および衝撃年代の決定。

(C) 衝突、イトカワ粒子への希ガス打ち込み、宇宙風化リム生成、粒子運動による変化(摩耗など)などイトカワ表面での宇宙風化の統一的理解と、月レゴリスとの違い。

(D) 炭素質物質・有機物を含むエキゾチックな物質の発見と分析。

2. 研究の目的

(1) イトカワ表面物質の詳細の解明

はやぶさ初期分析サンプルが微量なことに起因するデータの誤差を評価することにより、サンプルがイトカワ表面物質を代表し

ているかを明らかにする。イトカワ粒子だけでなくLLコンドライト粒子についても、初期分析と同様に3次元構造をもとにした岩石鉱物学的分析を高精度でおこない、イトカワ粒子と隕石の特徴の相違点を明確にする。Ca 磷酸塩鈹物粒子を探索し[11]、Pb-Pb法により絶対生成年代および衝撃年代を求める。

(2) イトカワ表面プロセスの包括的理解

宇宙環境(微隕石衝突、太陽風などの照射)に曝されているレゴリス粒子表面のナノスケール微細構造の観察をすすめ、隕石破片や月レゴリス粒子とも比較することにより、機械的な摩耗も含めたイトカワ粒子の特徴を抽出する。粒子線照射実験により太陽風照射による宇宙風化リム生成プロセスを理解し、リム生成速度を求める。様々な条件下での室内衝突実験をおこない、レゴリス粒子生成の衝突条件を求める。これらにより、希ガス打ち込み・宇宙風化リム生成・摩耗・衝突破壊などを含めた広い意味での”宇宙風化”を包括的に理解する。月レゴリスとの比較をおこない、最終的に大気のない天体での表面現象の解明をめざす。

(3) エキゾチックな物質の探求と分析

イトカワへは有機物などの異質な太陽系物質が降り注ぎ、はやぶさサンプルに含まれている可能性がある。初期分析と同様の手法で新たにサンプルの分析をおこない、このような物質の探索と分析をおこなう。

3. 研究の方法

(1) イトカワ表面物質の詳細の解明

① サンプルの代表性の評価

はやぶさサンプルの初期分析(第1回配分)では、30-120 μm の40粒子を放射光マイクロX線CTにより分析した[2]。本研究では、新たに配分を受けた17粒子について、同様に数100nmの空間分解能で3次元構造を取得し、3次元組織、鈹物モード組成や粒子の3次元形状(3軸比)、サイズ分布を求め、従来のデータとの比較をおこなった。

また、このような少量のサンプルがイトカワ表面物質を代表しているかを調べるために、LLコンドライト隕石組織と比較した。

② イトカワ粒子と隕石との相違点

イトカワ粒子とLLコンドライトとの関係の詳細(岩石学タイプ、微小な空隙やクラックの相違など)を議論するために、イトカワ粒子と同様にLLコンドライトについてもマイクロX線CTにより3次元構造を求めた。

③ イトカワ物質の生成年代・衝撃年代

Pb-Pb法により絶対生成年代および衝撃年代を求めるために、Analytical dual-energy tomography(ADET)[11]を用いてCa磷酸塩粒子を探索し、nano-SIMSを用いて年代測定を試みた。

(2) イトカワ表面プロセスの包括的理解

① 粒子表面のナノスケール微細構造

レゴリス粒子表面に残された小惑星上での様々なプロセスの情報を得るために、X線

CTによる3次元外形(空間分解能:~1 μm)に加えて、イトカワ粒子表面の微細構造(空間分解能:~10 nm)をFE-SEMにより観察した。比較のために、鉱物や隕石破片、月レゴリス粒子についても同様に調べた。

一部の試料については、表面の断面試料をFIBにより作成し、TEM/STEM観察をおこない、SEMによる表面観察との比較をおこなった。

②イトカワ表面プロセス

様々な条件下での高速衝突実験をおこない、衝突破片の3次元形状をイトカワや月粒子と比較した。また、イトカワ粒子の主要鉱物(カンラン石)に対して、イオン照射による宇宙風化リムの再現実験をおこなった。

(3)エキゾチックな物質の探求と分析

新たに配分されたサンプルについて、初期分析と同様の手法で分析をおこない、イトカワに落下した異質な太陽系物質を探索した。

4. 研究成果

(1) イトカワ表面物質の詳細の解明

①サンプルの代表性の評価

新たなサンプルの分析データを追加しても、鉱物のモード組成や3次元粒子形状分布、サイズ分布は従来の結果とほぼ同じであり、得られたサンプルの特徴は採取されたサンプル全体をほぼ代表していると考えても問題ないことが示された。また、2カ所のサンプル採取地点による違いも認められなかった[12]。

LLコンドライト隕石の鉱物組成モードとのわずかな違い[11, 12]について、隕石の組織解析をおこなった。これにより、イトカワサンプルのカンラン石モードの方がLLコンドライトよりも有意に大きく、レゴリス粒子そのものあるいはサンプリング方法によるバイアスが存在する可能性が指摘された。

②イトカワ粒子と隕石との相違点

イトカワ粒子とLLコンドライト(LL6:2種、LL5:1種)粒子間に、鉱物モード組成、バルク密度、空隙率、鉱物粒径、空隙やクラックの存在度について大きな違いを見出すことはできなかった[12]。これにより、S型小惑星イトカワの表面物質がLLコンドライトであるという従来の結論が3次元微細構造の観点からも再確認できた。一方、イトカワ粒子が岩石学タイプ5(LL5)あるいは6(LL6)に属するのか、あるいはこれらの混合物であるかについては決めることはできなかった。

イトカワ粒子とLLコンドライトに共通してファセットをもつ微細な空隙が面状に存在し、衝撃後の加熱によるヒールドクラックであることがわかった[12]。

③イトカワ物質の生成年代・衝撃年代

一部のイトカワ粒子にCa 磷酸塩を見出した。これについてnano-SIMSを用いてPb-Pb法により求めた生成年代は45.6億年となり、隕石で求められている一般的な生成年代と一致した[13]。一方、小惑星イトカワ形成に対応すると考えられる衝撃年代は統計的な

エラーが大きく、今後測定数を増やして正確な値を求めることが必要である。

(2) イトカワ表面プロセスの包括的理解

①粒子表面のナノスケール微細構造

イトカワ粒子表面は、衝突による鉱物の破断面(Type-1:図1A)と空隙中に凝縮物が集合した面(Type-2:成長ステップが発達-図1B、Type-3:ファセットをもつ鉱物粒子(<1 μm)の集合-図1C)とに分けられる。後者は、微細で多孔質なマトリクスあるいはレゴリス角礫岩がアンニリングされてできた空隙の表面であると考えられる。

一方、表面粗さの観点から、粒子表面はType-1~3の特徴を鮮明に示すfreshな面(Type-A:図1A-C)と、これらの特徴が消えかかった面(Type-B:図1D-F)に分けられる。Type-AおよびBの面をもつ粒子は、それぞれX線CTによるシャープおよび丸みを帯びたエッジをもつ粒子[2]に対応しており、機械的な粒子の摩耗という新たな宇宙風化が提案された[15]。

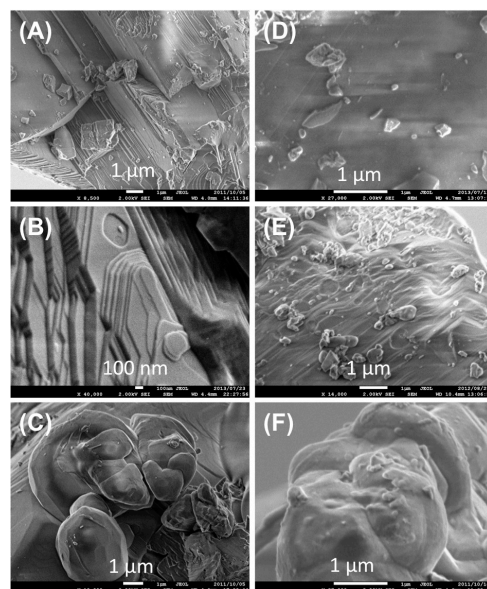


図1 イトカワ粒子表面のSEM像。(A) Type-1A, (B) Type-2A, (C) Type-3A, (D) Type-1B, (E) Type-2B, (F) Type-3B。

小惑星の反射スペクトル変化の原因となった宇宙風化リム(主として太陽風照射により深さ10-100nmの粒子表面層が非晶質化されナノ鉄粒子が生成される)がイトカワ粒子表面に存在することが、初期分析においてTEM観察により見出された[6]。本研究により、宇宙風化の進んだリムには太陽風Heが集積したと考えられる空隙(プリスタ)が生成され[16]、SEM観察によって粒子表面にプリスタが容易に観察できることが示された(図2)。プリスタはType-A, B表面にかかわらず、すなわち摩耗の有無にかかわらず観察でき、宇宙風化リム生成のタイムスケールは摩耗のタイムスケールより短いことがわかった。また、プリスタは同一粒子の反対側の表面にも存在し、レゴリス層において粒子が流動・回転していたことがわかる[17]。

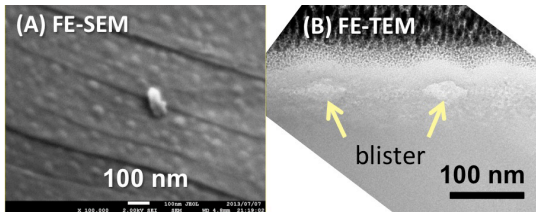


図 2 イトカワ粒子の宇宙風化リムとブリスタ。(A) 粒子表面の SEM 像。(B)(A)から FIB で切り出した切片の BF-TEM 像。

粒子表面にはまた衝撃溶融によってできたと考えられるガラス (melt splash) [18] (図 3A) が観察され、とくに宇宙風化の進んだ粒子によく見られる。一方、初期分析で報告されたナノクレータ [18] は稀で、20 粒子中 1 粒子にしか認められなかった。このような結果から、melt splash やナノクレータは、レゴリス層への微隕石の衝突によって局所的に生成された溶融物や 2 次クレータであると考えられる [15]。

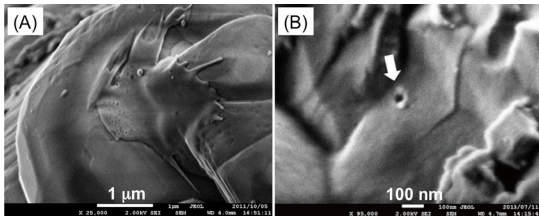


図 3 イトカワ粒子表面にみられる衝突の痕跡。(A) 衝撃メルト (melt splash)。(B) ナノクレータ (矢印)。

②イトカワ表面プロセス

隕石を模擬したカンラン岩や玄武岩ターゲットへの高速衝突実験との比較により、イトカワ粒子の 3 次元形状分布はクレータリング条件の衝突で生成された粒子のものと区別できないが (図 3A)、カタストロフィック破壊条件のものとは有意に区別できること (図 3B) がわかった。また、月のレゴリス粒子はイトカワ粒子に比べて丸いこと [2] が再確認できた。以上より、イトカワのレゴリス粒子は主としてイトカワの岩塊への微隕石衝突で生成された可能性があること、またイトカワと比べて月のように古いレゴリス粒子はガーデニングにより丸くなっていたことが示唆される。

一方、イオン照射実験により、宇宙風化リムに類似した構造が再現された (図 5A) [20]。これは、イトカワ粒子で見出された宇宙風化リムが主として太陽風照射により生成されたことを示すものである。その生成に必要な照射フラックスから、宇宙風化リムをもつ粒子の太陽風照射年代を見積もると 1000 年程度となり、太陽風希ガス濃度 [5] やソーラートラック密度 [16] から見積もられた年代ともほぼ一致する。しかしながら、実験で生成されたブリスタ (図 5B) はイトカワ粒子のもの (図 3B) とは異なる。これはイオン打ち込み速度の違いと考えられ、今後さらなる検討が必要である。

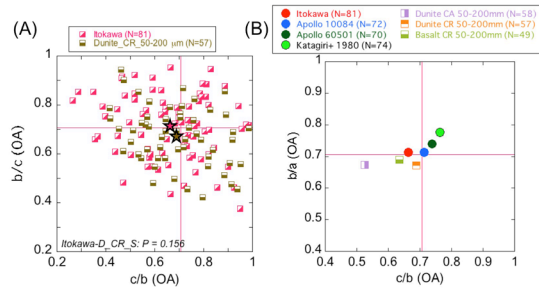


図 4 粒子の 3 軸比 (a:長軸、b:中軸、c:短軸)。(A) イトカワ粒子とクレータリング条件での衝突実験生成粒子の形状分布の比較 (星印は平均値、P: K-S 検定による P 値)。(B) イトカワ粒子、衝突実験粒子 (CA: カタストロフィック破壊条件、CR: クレータリング条件)、月粒子 (アポロ 10(10084)、16 号(60501, Katagiri)) の平均 3 軸比。

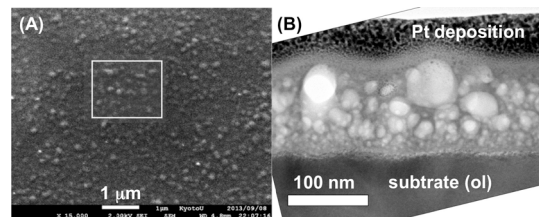


図 5 カンラン石 (Fe₂₇) 粒子への 4 keV ⁴He⁺(3×10¹⁷ ions/cm²) の照射実験生成物。(A) 表面の SEM 像。(B) (A) から FIB で切り出した断面の BF-TEM 像。

(3) エキゾチックな物質の探求と分析

イトカワ粒子の宇宙風化リムの中に KCl および NaCl の微結晶を見出した [21]。これらが地球外物質であることを完全に示すことはできなかったが、イトカワに落下した異なる太陽系物質である可能性が高い。

(4) 新しい小惑星の描像

Vernazza et al. [22] は天文観測から求められた S 型小惑星族の年代を小惑星の宇宙風化年代とみなし、その反射スペクトルから見積もった宇宙風化の程度との関係を求めた (図 6)。これによると、~10⁶ 年以下では宇宙風化は主として太陽風照射により比較的早く進行し、照射量が飽和すると微隕石衝突によりゆっくりと進行する。一方、野口ら [23] はイトカワ粒子で求められた宇宙風化リムの生成年代 [5, 16] より、太陽風照射による宇宙風化速度はかなり早い可能性を指摘した。なお、イトカワ粒子の銀河宇宙線起源希ガス濃度より、イトカワレゴリスの年代は 10⁶ 年程度と見積もられている [24]。

本研究における結果を総合すると、レゴリス層での宇宙風化は以下のようにしておこったと考えられる。レゴリス再表層に存在する粒子表面では太陽風照射により宇宙風化リムが生成されるが、この粒子はイトカワへの微隕石衝突によって誘起された地震波により流動し摩耗される。とくに、宇宙風化リムは摩耗を受けやすいと考えられる。一方、レゴリス層への微隕石衝突により、レゴリス粒子は破壊され新たに新鮮な表面が作られ

るとともに、ボルダー領域から新しいレゴリス粒子の流入も考えられる。このような、ダイナミックな小惑星表面でのプロセスを考慮すると、粒子がレゴリス表層に留まり太陽風照射を受け続けたときの宇宙風化速度 [23] に比べると、実際には比較的遅い速度で反射スペクトル変化が進行していくことと考えられる (図 6)。

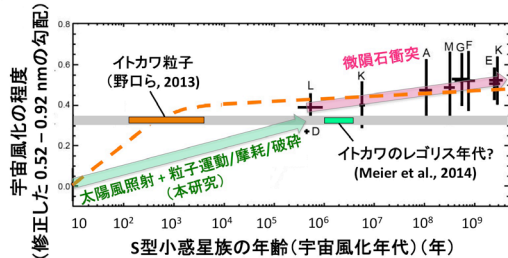


図 6 宇宙風化による小惑星反射スペクトルの進化 (原図[22]を修正)。

以上、本研究により得られた小惑星イトカワの進化の描像は、以下ようになる。(a) 微隕石衝突によるレゴリス粒子の生成、(b) 太陽風照射とそれによる宇宙風化リムの生成 (タイムスケール: $\sim 10^3$ - 10^4 年)、(c) 粒子流動によるレゴリス粒子の摩耗 ($> \sim 10^4$ 年)、(d) 微隕石衝突によるレゴリス粒子の破壊、(e) (b)-(d)の繰り返しと、衝突による宇宙空間への最終的な散逸 ($\sim 10^6$ 年?) (図 7)。

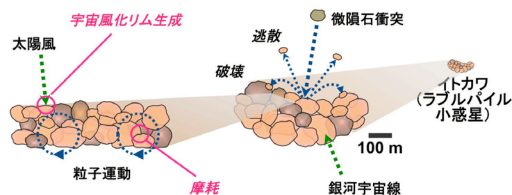


図 7 小惑星イトカワにおけるダイナミックな表面プロセス。

<引用文献>

[1] Nakamura et al. (2011) *Science*, 33: 1113.
 [2] Tsuchiyama et al. (2011) *Science*, 333: 1125.
 [3] Yurimoto et al. (2011) *Science*, 333: 1116.
 [4] Ebihara et al. (2011) *Science*, 333: 1119.
 [5] Nagao et al. (2011) *Science*, 333: 1128.
 [6] Noguchi et al. (2011) *Science*, 333: 1121.
 [7] Binzel et al. (2001) *MAPS*, 36: 1167.
 [8] Abe et al. (2006) *Science*, 312: 1334.
 [9] Fujiwara et al. (2006) *Science*, 312: 1330.
 [10] Naraoka et al. (2012) *Geochem. J.*, 46: 61.
 [11] Tsuchiyama et al. (2013) *GCA*, 116: 5.
 [12] Tsuchiyama et al. (2014) *MAPS*, 49: 172.
 [13] Terada et al. (2014) *HAYABUSA 2014: Symposium of Solar System Materials*.
 [14] Tsuchiyama et al. (2014) 同上.
 [15] Tsuchiyama et al. (2014) *Elements*, 10: 45.
 [16] Noguchi et al. (2014) *MAPS*, 49: 188.
 [17] Matsumoto et al. (2015) *Icarus*, accepted.
 [18] Nakamura et al. (2012) *PNAS*, 109: E624.
 [19] Tsuchiyama et al. (2014) *JpGU*, U06-22.
 [20] Matsumoto et al. (2013) *Goldschmidt 2013*

Conference, abstract.

[21] Noguchi et al. (2014) *MAPS*, 49: 1305.
 [22] Vernazza et al. (2009) *Nature*, 458: 993.
 [23] 野口ら (2013) *日本惑星科学会誌*, 22: 78.
 [24] Meier et al. (2014) *LPSC*, 45th: 1247.pdf.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 37 件)

1. T. Matsumoto, A. Tsuchiyama, A. Miyake, and 6 authors. Surface and internal structures of a space-weathered rim of an Itokawa regolith particle. *Icarus*, 査読有, 2015, accepted.
2. A. Tsuchiyama, and 16 authors. Three-dimensional microstructure of samples recovered from asteroid 25143 Itokawa: comparison with LL5 and LL6 chondrite particles. *Meteoritics & Planetary Science*, 査読有, Vol. 49, 2014, pp. 172-187. DOI: 10.1111/maps.12177.
3. T. Noguchi, M. Kimura, T. Hashimoto, and 21 authors (A. Tsuchiyama: 9th author). Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles. *Meteoritics & Planetary Science*, 査読有, Vol. 49, 2014, pp. 188-214. DOI: 10.1111/maps.12111.
4. Nakamura T., Nakato A., Ishida H. and 20 authors (A. Tsuchiyama: 9th author). Mineral chemistry of MUSES-C Regio inferred from analysis of dust particles collected from the first and second touchdown sites on asteroid Itokawa. *Meteoritics & Planetary Science*, 査読有, Vol. 49, 2014, pp. 214-227. DOI: 10.1111/maps.12247.
5. A. Tsuchiyama, Asteroid Itokawa: A source of ordinary chondrites and a laboratory for surface processes. *Elements*, 査読有, Vol. 10, 2014, pp. 45-50. DOI: 10.2113/gselements.10.1.45.
6. T. Noguchi, M. Kimura, T. Hashimoto and 14 authors (A. Tsuchiyama: 7th author). Sylvite and halite on particles recovered from 25143 Itokawa: Salts on Itokawa? *Meteoritics & Planetary Science*, 査読有, Vol. 49, 2014, pp. 1305-1314. DOI: 10.1111/maps.12333.
7. Katagiri, J., Matsushima, T., Yamada and 5 authors (A. Tsuchiyama: 4th author). Investigation of 3D Grain Shape Characteristics of Lunar Soil Retrieved in Apollo 16 Using Image-Based Discrete-Element Modeling. *J. Aerosp. Eng.*, 査読有, Vol. 10, 2014, pp. 1061-1073. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000421.
8. A. Tsuchiyama and 16 authors. Analytical dual-energy microtomography: A new method for obtaining three-dimensional

mineral phase images and its application to Hayabusa samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, Vol. 116, 2013, pp. 5-16.

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.036>.

9. Naraoka, H., Mita, H., Hamase, K. and 23 authors (A. Tsuchiyama: 16th author). Preliminary organic compound analysis of microparticles returned from Asteroid 25143 Itokawa by the Hayabusa mission. *Geochemical Journal*, 査読有, Vol. 46, 2012, pp. 61-72.
DOI:<http://doi.org/10.2343/geochemj.1.0134>

〔学会発表〕(計 101 件)

1. A. Tsuchiyama et al., Surface morphologies and their origins of Itokawa regolith particles. December 4-5, 2014, HAYABUSA 2014: Symposium of Solar System Materials, 神奈川県相模原市, JAXA (invited).
2. 土山 明ら, かんらん岩および玄武岩高速衝突破片の3次元形状分布: はやぶさ粒子との比較, 日本惑星科学会2014年秋季講演会, 2014年9月24日~26日, 仙台市東北大学片平さくらホール.
3. A. Tsuchiyama, Space weathering measured on Itokawa samples. International Workshop: Carbonaceous chondrites: their parent bodies and their link with primitive asteroids. June 2-4, 2014, Citadelle de Villefranche sur Mer, France.
4. 土山 明ら, イトカワレゴリス粒子の3次元構造: 月レゴリス粒子との比較, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月28日~5月2日, 横浜市パシフィコ横浜.
5. A. Tsuchiyama et al, Recent progress in HAYABUSA sample analysis on 3D microstructure and surface morphology: Comparison with LL chondrite and processes on the asteroid surface., HAYABUSA, 2013: Symposium of Solar System Materials, October 16-18, 2013, 神奈川県相模原市, JAXA, (invited).
6. A. TSUCHIYAMA et al, 3D shapes of regolith particles: comparison between Itokawa and Moon., Goldschmidt 2013 Conference, August 25-30, 2013, Firenze, Italy.
7. A. Tsuchiyama et al. "Space erosion": A new type of space weathering process on the surface of Asteroid Itokawa. *Lunar Planet. Sci.*, **XLIV**, Abstract #2169, March 18-22, 2013, Woodlands, Texas, USA.
8. A. Tsuchiyama et al., Microstructures of Itokawa particles collected by HAYABUSA. 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society, August 12-17, 2012, Cairns, Australia.

〔図書〕(計 1 件)

土山 明, 丸善出版, 2012, 「はやぶさ」によって持ち帰られた小惑星イトカワサンプルの初期分析, 理科年表, 第 86 冊, 天 99(175)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-min/index.php?content=index>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土山 明 (TSUCHIYAMA, Akira)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 90180017

(2) 研究分担者

平田 岳史 (HIRATA, Takehumi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 10251612
(平成 25 年度より連携研究者)

(3) 連携研究者

藤 昇一 (TOH, Shoichi)
福岡大学・理学部・助教
研究者番号: 20380595

寺田 健太郎 (TERADA, Kentaro)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 20263668

三宅 亮 (MIYAKE, Akira)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 10324609

松島 亘志 (MATSUSHIMA, Takashi)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
研究者番号: 60251625

矢野 創 (YANO, Hajime)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号: 00321571

(4) 研究協力者

松本 徹 (MATSUMOTO, Toru)
松野 淳也 (MATSUNO, Junya)