



Title	Three-dimensional structure and surface micromorphology of regolith particles from Asteroid Itokawa : Implication for space weathering of regolith
Author(s)	松本, 徹
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/34041
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (松本 徹)	
論文題名	Three-dimensional structure and surface micromorphology of regolith particles from Asteroid Itokawa: Implication for space weathering of regolith (小惑星イトカワのレゴリス粒子の3次元構造及び表面微細構造から探るレゴリスの宇宙風化)
論文内容の要旨	
惑星間空間にさらされた大気のない天体表面では、主に微小隕石の衝突と太陽風の照射により、表面の光学物性が変わり反射スペクトルが変化する。これらの現象は宇宙風化と呼ばれ、シリケイト天体ではナノ鉄微粒子の生成が原因と考えられ、観測から天体表面の物質的情報を得ることを難しくさせている。小惑星表面においても、太陽風照射・微小隕石衝突による宇宙風化が考えられているが(Clark, 2002)、具体的な宇宙風化の進行過程を理解するためには小惑星表面物質のサンプル分析が不可欠である。2010年、S型小惑星イトカワ表層からのレゴリス粒子(小惑星表層の微細粒子)を回収した探査機はやぶさが地球に帰還した。イトカワ粒子の初期分析により、太陽風の打ち込みの証拠や、粒子表面に主に太陽風照射に起因するナノ鉄微粒子を含む宇宙風化リムが観察された(Nagao et al., 2011; Noguchi et al., 2013)。 本研究では、これまで系統的に観察されていないイトカワ粒子の表面モルフォロジーに注目した。イトカワレゴリス粒子表面は固体と宇宙空間との界面であり、宇宙風化の履歴を記録していると同時にレゴリス粒子の形成・進化に関わる情報も保持していると考えられるが、これらの関連は明らかでない。そこで、本研究は、イトカワ粒子の表面構造の系統的な分類・解釈を行うとともに、宇宙風化リムの表面モルフォロジーと内部構造を対応させた。り、小惑星表層のレゴリス粒子の形成・進化過程を探り、小惑星の宇宙風化過程との関連性を明らかにした。 まず、X線マイクロトモグラフィ(CT)によって、イトカワ粒子60個の3次元外形を評価した。結果、粒子は鋭いエッジをもつ粒子(Angular particles)とエッジが丸みを帯びた粒子(Rounded particles)の2種類に分類された。丸みを帯びた粒子は、元々鋭いエッジをもつ粒子が摩耗作用により、形成した粒子であると推測した。 続いて、CT観察を行ったイトカワ粒子のうち19個について走査型電子顕微鏡(FE-SEM)により表面微細構造を観察した。その結果、レゴリス粒子表面は、レゴリス粒子生成時もしくは生成後に破断した面、レゴリス粒子形成前のmatrix/regolith breccia内部の空隙内部の蒸発・凝縮により生成物した面に分類できることが明らかとなった。一方で、3次元CT分析で確認されたエッジが丸みを帯びた粒子の表面微細構造は、ぼんやりとしたステップをもつことが分かり、表面微細構造観察においても摩耗作用の存在を確認した。 また、1つのイトカワ粒子に対して透過型電子顕微鏡(TEM/STEM)を用いた宇宙風化リムの断面構造観察を行い、FE-SEMにて観察した表面構造との比較を行った。TEM/STEMで観察したナノ鉄微粒子を含む宇宙風化リム内部には空隙が存在し、空隙の一部は表面を押し上げて、大きさ数十nmのプリスター(水ぶくれ状)の構造を形成していた。プリスターを伴うリムはイトカワ粒子の宇宙風化リムのうち、最も長時間太陽風に暴露され形成したリムと考えられており(Noguchi et al., 2013)、本研究結果から、粒子の表面観察のみで粒子表面の宇宙風化の程度を判断できることを示した。 プリスターをもつ宇宙風化リムは、主に太陽風Heの貫入により形成されたと提案されたが(Noguchi et al., 2013)、直接的な証拠は示されていない。本研究では、イトカワ粒子に見られる宇宙風化リムの形成プロセスを明らかにするため、太陽風照射を模擬したオリビン粒子へのイオン照射実験を行った。その結果、H, Heイオンの打ち込みによりイトカワ粒子の宇宙風化リムと類似するプリスター構造が形成された。特にプリスター構造の形成に必要なHe照射量を太陽風照射期間に換算すると数百～数千年の照射期間に対応することが分かった。この年代は、先行研究の希ガス分析(~150-550年; Nagao et al., 2011)、太陽フレアトラック密度からの見積もり(10^3-10^4年; Noguchi et al., 2013)に近い値であった。 本研究では、粒子表面構造・プリスター分布から小惑星表層のプロセスと関連したS型小惑星の宇宙風化プロセスについて考察した。従来S型小惑星の宇宙風化プロセス(スペクトル変化)は太陽風照射(~10^6年)とそれに続く微隕石衝突(10^9年)の2つの異なるタイムスケールで進行すると提案されていた(Vernazza et al., 2009)。宇宙風化を受けたイトカワ表面のレゴリス層の年代も10^6年程度である(Busemann et al., 2013)。一方で、イトカワ粒子の宇宙風化リムの発達は、観察、実験から10^2-10^4年程度で進行すると考えられる。このタイムスケールの不一致を本研究の観察結果から考察した。まずプリスター分布と粒子の丸みに相関性がないことから、摩耗過程は、太陽風照射ではなく、地震震動による粒	

子同士の機械的摩耗の可能性が高く、宇宙風化リムの形成よりも長いタイムスケールで起こる現象であると考察した。機械的摩耗は宇宙風化リムの剥離を引き起こすと考えられる。一方でレゴリス粒子の破碎による宇宙風化表面の更新、レゴリス粒子のかき混ぜ・移動を示唆するブリストア分布の不均一性が観察された。イトカワ表面の宇宙風化のタイムスケールを考えると、個々のレゴリス粒子の局所的な表面に太陽風照射によって宇宙風化リムが 10^2 - 10^4 年程度で発達しても、イトカワ表層でのプロセス(レゴリス粒子の破碎、摩耗、かき混ぜなど)により、イトカワ全体を考えたときのスペクトルの変化は徐々に進行し、遅くとも 10^6 年程度で起こるという描像が正しいと考えられる。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (松 本 徹)			
論文審査担当者		(職)	氏 名
	主 査	教授	佐々木 晶
	副 査	教授	中嶋 悟
	副 査	教授	寺田健太郎
	副 査	准教授	佐伯 和人
	副 査	教授	土山 明 (京都大学)

論文審査の結果の要旨

大気の無い太陽系天体表面では、主に微小隕石の衝突と太陽風等の高エネルギー粒子の照射により、表面の光学物性が変わり反射スペクトルが時間とともに変化する。この宇宙風化と呼ばれる現象は、シリケート天体ではナノ鉄微粒子の生成が主要因と考えられている。小惑星においても、太陽風照射・微小隕石衝突による宇宙風化により、普通コンドライトの反射スペクトルが暗化・赤化し S 型小惑星の反射スペクトルに変化したと考えられるが、具体的な宇宙風化の進行過程を理解するためには小惑星表面物質のサンプル分析が不可欠である。

S 型小惑星イトカワ表層から「はやぶさ」が持ち帰ったレゴリス粒子(小惑星表層の微細粒子)の初期分析により、太陽風の打ち込みの証拠やナノ鉄微粒子を含む宇宙風化リムが観察された(Nagao et al., 2011; Noguchi et al., 2013)。レゴリス粒子表面は、宇宙風化の履歴を記録していると同時に粒子の形成・進化に関わる情報も保持していると考えられるが、これらの関連は明らかでない。本研究は、イトカワのレゴリス粒子の表面構造の系統的な分類・解釈を行うとともに、宇宙風化リムの表面モルフォロジーと内部構造を対応させた。

まず、X 線マイクロトモグラフィ(CT)により、イトカワのレゴリス粒子 60 個の 3 次元外形を評価した。粒子は鋭いエッジをもつ粒子と(摩擦により)エッジが丸みを帯びた粒子に分類された。19 個の粒子について走査型電子顕微鏡(FE-SEM)により表面微細構造を観察した結果、レゴリス粒子表面は、粒子生成時もしくは生成後に破断した面と、粒子形成前の蒸発・凝縮生成物の面とに分類された。

また、1 つの粒子に対して透過型電子顕微鏡(TEM/STEM)を用いた宇宙風化リムの断面構造観察を行い、表面構造との比較を行った。TEM/STEM で観察したナノ鉄微粒子を含む宇宙風化リム内部には空隙が存在し、空隙の一部は表面を押し上げて、大きさ数十 nm のプリスター(水ぶくれ状)の構造を形成していた。本研究は、レゴリス粒子の表面形態観察から、宇宙風化の程度を判断できることを示した。

さらに、宇宙風化リムの形成過程を明らかにするため、太陽風照射を模擬したオリビン粒子へのイオン照射実験を行った。その結果、宇宙風化リムと類似するプリスター構造が、太陽風照射期間に換算すると数百～数千年に相当する量のヘリウムイオン照射で形成された。この値は、イトカワ粒子の希ガス分析(150-550 年; Nagao et al., 2011)、太陽フレアトラック密度からの見積もり(10^2 - 10^4 年; Noguchi et al., 2013)に近い。しかし、軌道進化年代が得られている小惑星族の風化度から求めた、S 型小惑星の太陽風照射による宇宙風化タイムスケール(10^6 年; Vernazza et al., 2009)や、イトカワ粒子の宇宙線照射年代(10^6 年程度; Busemann et al., 2013)とは合わない。

本研究のイトカワ粒子の観察結果では、プリスター分布と粒子の丸みに相関性がないことから、摩擦過程は、太陽風照射ではなく震動による粒子同士の機械的摩擦が主要因と考えられる。さらにプリスター分布の不均一性は、レゴリス粒子の破碎、かき混ぜ、移動を示唆する。個々のレゴリス粒子の局所的な表面に太陽風照射によって宇宙風化リムが 10^2 - 10^4 年程度で発達しても、イトカワ表層でのプロセス(レゴリス粒子の破碎、摩擦、かき混ぜなど)により、観測されるスペクトルの変化は徐々に進行し、タイムスケールが 10^6 年程度になると考えられる。

本研究は、小惑星表面のレゴリス粒子の系統的な詳細観察・分析を世界で初めて行い、粒子の生成、摩擦、破壊と宇宙風化リム生成の過程の関係を明らかにし、風化年代のパラドックスに答えを示した、高い価値を有すると考えられる。したがって博士(理学)の学位を授与するにふさわしいと判断した。