^{特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」} イトカワの宇宙風化における太陽風照射の 重要性について

野口 高明¹, 木村 眞¹, 岡崎 隆司², 日高 洋³

2013年4月3日受領, 2013年4月22日受理.

(要旨) 宇宙風化とは惑星間空間にさらされた大気の無い天体表面で起こる光学特性を変化させる過程や産物を包括的に示す語である.近地球型のS型小惑星であるイトカワは宇宙風化を受けている.宇宙風化を起こす主要因として,太陽風の照射や微小隕石の衝突が考えられてきた.イトカワ試料初期分析は,イトカワ粒子のごく表面を変化させている主要因は太陽風照射であることを支持している.また,太陽風照射による宇宙風化過程は,小惑星の観測および天体力学的な考察から考えられているよりもさらに速い可能性を示している.本稿ではイトカワ粒子の極表面に観察された宇宙風化について紹介し,さらに,イトカワ粒子に観察された宇宙風化組織にもとづいて,S型小惑星の宇宙風化の時間変化について検討する.

1. はじめに

イトカワ試料の初期分析によって、イトカワの構成 物の多くはLL5-6とほぼ同じ物質であることが明らか になった[1].ところが、LLコンドライト隕石の反射 スペクトルはイトカワの反射スペクトルとは合致しな い.これは、惑星間空間にさらされた大気の無い天体 表面の光学特性を、微小隕石の衝突や太陽風の照射な どによって変化させる宇宙風化に起因すると考えられ た[2].光学特性を変化させる物質は粒子のごく表面 に存在するナノメートルサイズの金属鉄(ナノフェー ズ鉄)であることが月レゴリス物質の研究[3]や微小隕 石の衝突を模擬したレーザ照射実験[4]によって示さ れた.S型小惑星であるイトカワの反射スペクトルが、 LLコンドライト隕石にナノフェーズ鉄を分散させた 場合のスペクトルと合うことから、イトカワを構成す る物質も宇宙風化を受けていると考えられた[5].

しかし、ナノフェーズ鉄を形成する主要な機構がイ トカワと月レゴリス物質で必ずしも同じである必要は ない.なぜなら、微小隕石の衝突の影響が顕著になる ためには、衝突地点の物質が容易に散逸しない必要が ある。それには、比較的大きな脱出速度を持つこと、 未固結の細粒レゴリス(ソイル)層を持つことが重要と なる.しかし.イトカワの脱出速度は~15 cm/sであり. 月の脱出速度の~6×10⁻⁵しかない.また.イトカワ には厚い細粒レゴリス層はない[6]. こうしたことから, イトカワの宇宙風化の研究では、月の宇宙風化では脇 役とされている太陽風照射の効果を考慮する必要があ る。月ソイルの構成粒子は長期にわたって月表面にと どまるため、ナノフェーズ鉄が存在する再凝縮リム以 外に、照射損傷による非晶質リム、これら2種類の複 合リム、発泡リムが観察されている[3]、イトカワの ようにごく小さな小惑星表面に存在していた物質のご く表面はどのような変化をしていたか、次章で述べて いきたい、なお、本稿ではイトカワ粒子の極表面に観 察された組織・組成・微細構造変化は、反射スペクト ルの変化を起こすか否か(ナノフェーズ鉄が含まれる か否か)によらず、宇宙風化リムと呼ぶことにする、

^{1.} 茨城大学理学部 2. 九州大学大学院理学府 3. 広島大学大学院理学研究科 tngc@mx. ibaraki. ac. jp

イトカワ粒子に観察された宇宙風化 リム

2.1 手法

筆者らが宇宙風化の研究に用いたイトカワ試料は 12粒子である. これら12粒子のうち11粒子からは超 薄切片法によって厚さ100 nmの透過電子顕微鏡観察 用の超薄切片試料を作成した.2粒子からは集束イオ ンビーム(FIB: focused ion beam)加工装置を用いた リフトアウト法で厚さ100 nmのFIB切片試料を作成 した.1粒子については、超薄切片法とFIBリフトア ウト法の2通りで試料作製を行った.超薄切片法を主 要な試料作製法に選んだのは、FIB加工において問題 となる。切片の両面に形成されるGaイオンビームに よる非晶質層が高分解能観察に影響すること、珪酸塩 鉱物中のナノ鉄がFIB加工で酸化する可能性を危惧し たためである.通常,超薄切片切削時には蒸留水上に 超薄切片を浮かせて回収するが、本研究では水分との 接触を避けるために脱水エチレングリコールを用いた. さらに、包埋、切片作成、走査透過電子顕微鏡(STEM) 観察、試料保管に至る工程で、できる限り大気との接 触時間を短くするように努めた[7]. 高分解能の高角 度散乱暗視野-走查透過電子顕微鏡(HAADF-STEM) 像および明視野像(BF-STEM) 像を得るため に、冷陰極電界放出型電子銃と球面収差補正機能を搭 載したHitachi HD-2700 STEMを使用した.実際、こ のSTEMを使用することで、HAADF-STEM像中に ナノフェーズ鉄が微小な輝点として観察できた. なお. STEM 試料観察とFIB加工は、日立ハイテクノロジ ーズ社の全面的な支援をいただいた.

2.2 イトカワ粒子の宇宙風化リム

イトカワ粒子本来の表面付近の断面組織を詳細に調 べるには、粒子本来の表面が入射電子線とほぼ平行に なるように試料を傾斜する必要がある.実際に観察さ れた宇宙風化リムの厚さは数nmから80 nm程度しか ないため、粒子表面と入射電子線がほぼ平行でない限 り、リムの正確な内部構造を知ることができないため である.粒子本来の表面と入射電子線がほぼ平行にな るようにして観察することを、ここではエッジオンで 観察するということにする.我々は、イトカワ粒子の

主成分鉱物であるカンラン石、低Ca輝石、Naに富む 斜長石についてエッジオンで観察することができた. 初期分析当初に見出した宇宙風化リムは1種類だった が[7]. 初期分析終了時までに3種類の異なる内部構造 を持つ宇宙風化リムを見出すことができた[8]. それ らは、Redeposition rim, Composite rim, Composite vesicular rimである[8]. これらの典型的なHAADF-STEM 像と、対応するリムの内部構造の模式図を示 したのが図1である.これら3種類のリムの内部構造 は一見異なっているが、以下に述べる3種類のZone の組み合わせとして理解することができる. Zone Iは、 イトカワ粒子の最表面に存在する. それよりも下位の 鉱物に含まれない元素を含むことを特徴とする領域で ある. Zone II は部分的に結晶構造が非晶質化されて いる領域である. そして、Zone III は結晶構造が保持 されている領域である. Zone IIの化学組成はその直 下にあるZone IIIの化学組成とほぼ同じである.

Redeposition rimは、厚さわずか2-3 nmのZone I だけからなり、その直下には結晶構造が変化していな いZone IIIが存在している(図1(a), (b)). 一例として、 カンラン石(Mg,Fe)₂SiO₄の表面に観察されたごく薄 いZone Iの場合、Siに非常に富みMgに欠乏している とともに、少量のNa, Al, S, Cl, K, Caを含んでいる. すなわち、Zone Iの形成には、周囲に存在する鉱物起 源の元素の寄与(再凝縮)があったことは明らかである. 再凝縮物であるZone Iのみからなるリムであるため、 Redeposition rim(再凝縮リム)と名付けた.

Composite rimには、5-15 nmの再凝縮層である Zone Iと、結晶構造が部分的に非晶質化した領域であ るZone IIの2種類の領域が存在する. このため、 Composite rim(複合リム)と名付けた. Zone Iの厚さ が10-15 nmある場合、Fe, S, Mgに富むナノ粒子(ナ ノフェーズ(Fe,Mg)S)が密に並んだ層が含まれている 場合が多い. 部分的に非晶質化した領域であるZone IIの構造は、斜長石のようにFe²⁺をほとんど含まない 鉱物と、カンラン石や低Ca輝石のようにFe²⁺を多く 含む鉱物では大きく異なる. 図1(c),(d)は、Fe²⁺を 多く含む鉱物の場合を示している. カンラン石や低 Ca輝石の場合、部分的に非晶質化した部分は、ナノ フェーズ鉄とそれと密接に伴って産する非晶質のFe²⁺ に乏しい部分からなる. Composite rimは総厚30-60 nmである.



図1:イトカワ粒子表面に見られた3種類の宇宙風化リム (HAADF-STEM像とその模式図). (a) (b) Redeposition rim. (c) (d) Composite rim. (e) (f) Composite vesicular rim.

Composite vesicular rim は Composite rim の一種で ある (図1(e),(f)). Composite rim の Zone II の最上 部にバブルが存在し,バブルは粒子表面を押し上げ, 長さ約50 nm,高さ約20 nm の多数の膨らみとなって いる. この膨らみがあるため,Composite vesicular rim の厚みは 60-80 nm である.膨らみの厚さを除くと, Composite rim と同程度の厚さである.発泡している ことより Composite vesicular rim(複合発泡リム)と 名付けた.

Zone Iの非晶質珪酸塩中に存在するにもかかわら ず、ナノフェーズ(Fe,Mg) Sの格子像を観察すること は難しく、結晶度は低いことを意味している.まれに 格子縞が観察される場合は、0.21-0.23 nmであった. この値は、ナイニンジャーライトMgSやカイライト (Fe,Mg) Sの(200)面の面間隔0.26 nmよりも明らかに 狭く、トロイライトFeSの(114)やピロータイト Fe1-xSの最強線の結晶面(面指数は構造による)の0.21 nmと誤差(約5%)の範囲で一致する.すなわち、 STEM元素マッピングでは、Fe,S、Mgは密接に存 在しているようにみえるが[7]、少なくとも格子像が 観察される部分は、ナノフェーズFeSである可能性が 高い.

鉄マグネシウム珪酸塩のZone IIに観察されるナノフェーズFeの格子像は、0.20-0.22 nmである. a -Feの(110)の面間隔0.203 nm前後の面間隔を持つものが多いが、上記のように誤差の範囲を超えて幅広い面間隔を示すものや格子像が見られないものも存在する. これらのことから、Zone IIのナノフェーズFeは ナノフェーズ金属鉄である場合が多いが,結晶度の悪いものやナノフェーズ鉄酸化物(Fe_{1-x}O)も存在する可能性がある.

月レゴリス(ソイル)試料でも最表層が非晶質化して いる粒子は以前よりよく知られている[3]. そのよう な試料では、非晶質層の下位には多数のソーラーフレ アトラック(ソーラーフレア粒子のインプラントによ って形成された線状欠陥)が観察される. 図2にイト カワ試料RA-QD02-0033と月レゴリス試料15009,129 に観察されたソーラーフレアトラックの暗視野像を示 す. イトカワ粒子のソーラーフレアトラック密度が月 よりもずっと低いことが分かる. ソーラーフレアトラ ック数密度はそれぞれ、~2×10⁹ cm⁻²と~3×10¹⁰ cm⁻²である. 初期分析では2試料について暗視野像観 察し、ソーラーフレアトラックを探した. 数密度を計 測できたのはRA-QD02-0033のみであり、他のイトカ ワ粒子のトラック密度はそれよりもかなり低いと考え られる.

2.3 イトカワ粒子の宇宙風化リムの形成機構

Zone Iの形成には周囲に存在していた鉱物由来の 元素の寄与があったことから、Zone Iは再凝縮物であ ることは明らかである。月レゴリス(ソイル)試料の場 合、ナノフェーズ鉄を含むおよそ100 nmの非晶質珪 酸塩層全体(宇宙風化層)が微小隕石の衝突による蒸発 物が再凝縮したものであるのに対して、イトカワ粒子 では再凝縮物の厚さは2から15 nm しかない[8]. 先に 述べたように、イトカワの脱出速度は月の脱出速度の ~6×10⁻⁵しかないため、Zone Iの形成には太陽風に よってスパッタリングされた物質の再凝縮の方が微小 隕石の衝突による蒸発物の再凝縮よりも寄与している ように思われるが、両者の相対的な寄与率については 今後の理論的な研究が必要である.

複合リムおよび複合発泡リムのZone Iにはナノフ エーズ(Fe,Mg) Sが存在する場合が多い.一方,再凝 縮リムを形成しているごく薄いZone Iの場合はナノ フェーズ(Fe,Mg) Sが存在しない. Zone Iがある程度 厚くないとナノフェーズ(Fe,Mg) Sが存在しないこと を考慮すると,より長く惑星間空間に曝露されること がナノフェーズ(Fe,Mg) Sの形成に重要であることが 示唆される.スパッタリングの際にナノフェーズ (Fe.Mg) Sが形成されて鉱物表面に凝縮したならば.

ナノフェーズ(Fe,Mg) SはZone I中に分散して存在す ると予想される、しかし、ナノフェーズ(Fe.Mg) Sは ごく薄い層としてZone I中に産する。このような産 状のナノフェーズ(Fe,Mg) Sの形成には、Zone Iに撃 ち込まれた太陽風イオン(後述の侵入深さを考慮する と、おそらくH+)によるナノフェーズ(Fe,Mg) Sの照 射誘起偏析(放射線照射によって誘起される固体中の 元素の偏析のこと)、微小隕石衝突による加熱による Zone I中でのナノフェーズ(Fe.Mg) Sの析出の促進. あるいは、それら両方が関与した可能性があるだろう. ナノフェーズ(Fe,Mg) Sがイトカワ粒子に存在し、月 ソイル粒子には存在しないのは、両者でトロイライト FeSの含有量が2 vol.% [9]と <0.2 vol.% [10]と大きく 異なるため、再凝縮物に含まれるS含有量が異なるた めであろう、実際に、普通コンドライト的物質へのレ ーザ照射実験では、ごく容易にナノフェーズFeSが形 成される[11]. 初期分析の元素分布マッピングにおけ る空間分解能ではFe. S. Mgが密接にかかわって存在 するためナノフェーズ(Fe,Mg) Sと記載したが[8], す でに述べたように、それらの格子像はFeSであること を示唆している。イトカワ試料で観察されたナノフェ ーズ(Fe,Mg) Sと、実験産物のナノフェーズFeSとは 実際は同じ可能性がある、興味深いことに、実験産物 中のナノフェーズFeSは反射スペクトルを赤化させる 効果を持つ[11]. このことは、S型小惑星のスペクト ル変化を考える際に、ナノフェーズFeと共にナノフ ェーズFeSも無視できない可能性を示している.

Zone IIは、結晶質のホスト中にパッチ状の非晶質



図2:イトカワ粒子RA-QD02-0033と月レゴリス試料15004,129の 下地結晶に見られるソーラーフレアトラック(ともに暗視 野像).(a)ではトラックを矢頭で示した.(b)ではトラッ クが多数みられるため、トラックを矢頭で示していない. 明るいバックグラウンド中に多数みられる黒い細線がト ラックである.

領域が存在するという組織を持つ、このような組織は、 放射線損傷を中程度受けた鉱物に特徴的である[17]. イトカワ試料に照射損傷を起こした主な放射線は、太 陽から放出される低エネルギーの荷電粒子の流れであ る太陽風と考えられる. Fe²⁺イオンを多く含むかんら ん石や低Ca輝石では、非晶質領域内のFe²⁺イオンが Fe⁰へ還元されナノフェーズFeが形成されている。太 陽風の主要な陽イオンは低エネルギー(~1 keV/ amu)のH⁺(~95.4 %)とHe⁺(~4.6 %)である。低エネ ルギーH⁺やHe⁺をFe²⁺を含むカンラン石へ照射する と、照射部に金属鉄が形成されること[12]を考慮する と, 照射による部分的な非晶質化, および, 非晶質部 内での照射誘起偏析とFe²⁺のFe⁰への還元が太陽風照 射によって引き起こされたと考えられる.一方、月ソ イル試料の場合、ナノフェーズFe⁰は厚さ~100 nm の再凝縮物中に存在しており[3]. イトカワ粒子の場

合とナノフェーズFe⁰の形成機構が異なるのは明らか である.

複合発泡リム表面に見られるたくさんの膨らみは. インプラントされた太陽風陽イオン(H⁺, He⁺)の拡散 による移動と偏析によって形成されたものと考えられ る. 単純にHeが偏析することでバブルが形成された 場合、バブルは球状で圧力がかかった状態になる、し かしながら、複合発泡リムでは、膨らみはZone IIの 上部に形成され、Zone Iを塑性変形させており、バブ ルに圧力はかかっていない。こうした表面に膨れを生 じさせるバブルのことをブリスタリングという. ブリ スタリングは、H⁺やHe⁺イオンなどの照射によって 金属やセラミックスの表面に形成されることが知られ ている[13]. 金属では加熱されている状態で照射され ないとブリスタリングを生じないが. 珪酸塩鉱物への 低エネルギー He⁺イオンの照射では100 ℃よりも十分 低い温度でブリスタリングが生じる.後者の結果は、 現在の軌道におけるイトカワ表面の最高温度が100 ℃ より十分低い(310 ± 10K [6])という事と矛盾しない.

月ソイル試料では明らかなブリスタリングを示すも のは少ないが,見出されてはいる[14].一方,イトカ ワ粒子の場合,12試料中3試料からブリスタリングが 見出された.ブリスタリングの大きさと数密度の関係 は月試料の範囲に入ることから[15],両者でブリスタ リング形成機構は大きくは異ならないことが示唆され る.一方,月レゴリスやレゴリスブレッチャーに見ら れる発泡リムでは、ときに数百nmに達するバブルが 粒子表面を膨らませており、その形成には、隣接した 場所への衝突に伴う加熱の影響があるとされる[16]. しかし、こうした大きなバブルと、イトカワ粒子や月

ソイル試料一部に観察された50 nm 程度のブリスタ リングの形成機構は必ずしも同じとは限らないだろう.

今まで述べてきたように、イトカワ粒子の極表面に 見られるリムの形成は、太陽風照射によって引き起こ された各種過程(スパッタリングと再凝縮、照射損傷、 照射誘起偏析とFe²⁺の還元、イオン注入とガスの偏 析)が主要因と考えられる。もし、そうならば、リム の厚さは太陽風中の主要陽イオンの侵入深さによって 規定されていると予想される。フォルステライトモル %が70のかんらん石(イトカワ粒子のかんらん石の範 囲内[1])に、太陽風とほぼ同じ~1 keVのH⁺および~ 4 keVのHe⁺を照射した際の侵入深さをSRIM (stopping and range of ions in matter) コードで計算 した. 侵入深さは, 飛程(projected range)と縦方向 のゆらぎ(longitudinal straggle)の和とすると, それ ぞれ, ~27 nmおよび~51 nmであった[8]. 最も厚い リムの厚さ~60 nmと整合的なのはHe⁺イオンの侵入 深さであり, 宇宙風化リムの厚さを規定しているのは He⁺イオンであると推定される. H⁺イオンよりもHe⁺ イオンの方がFe²⁺の還元能力が高いことを考慮する と[12], かんらん石や低Ca輝石のZone II下部までナ ノフェーズFeが存在するということは, Zone II下部 までHe+イオンが侵入していたことを支持する.

S型小惑星における宇宙風化過程 速度について

3.1 イトカワの宇宙風化リム形成速度

イトカワ粒子の3種類のリムと太陽風照射との関係 は、定性的には以下のようにまとめられる.太陽風照 射期間がごく短い場合は、Zone Iのみからなる再凝縮 リムが形成された.より照射期間が長くなると、最表 面に再凝縮層(Zone I)があり、その下位に照射損傷に よって部分的に非晶質化した層(Zone II)が存在する 複合リムが形成された.さらに、照射期間が長くなる とHeやHがZone II内で偏析しブリスタリングが起 こって複合発泡リムが形成された.

これらリム形成の速さを定量的に考察するのは現況 では難しい. しかし, RA-QD02-0033の複合発泡リム に観察されたソーラーフレアトラック数密度~2×109 cm⁻²から、大まかな照射期間の推定が可能である。1 AU付近では、惑星間塵(IDP)や月試料の研究から、 トラック数密度10¹⁰⁻¹¹ cm⁻²を達成するまでの1 AUで の太陽風照射期間は10⁴年と見積もられている[17]. イトカワの平均軌道半径が1.3 AUであることを考慮 しても、RA-QD02-0033の太陽風照射期間は10³年程 度と考えられる、トラック数密度のより低かった他の リムの形成期間はさらに短いと考えられる.注意する 必要があるのは、宇宙風化リムのZone IIにおける非 晶質化の程度は月レゴリス試料の非晶質リムよりもず っと低いことである[3,8]. このため、月の非晶質リム を持つ試料の非晶質リム直下の下地結晶に観察される ソーラーフレアトラック密度がイトカワ試料よりも1 から2桁高いのはむしろ当然であろう.



図3: イトカワ粒子から推測される宇宙風化の進行過程(Vernazza et al., 2009; Marchi et al., 2012のデータを使用). 横軸が照射期間(単位:年),縦軸は、反射スペクトルの波長0.52と0.92µmにおける値を結んだ線分の傾き(カ ンラン石の組成の効果を補正したもの). Path 1はVernazzaらによって推定された宇宙風化の変化経路. Path 2は本研究で推定された宇宙風化の変化経路.

3.2 S型小惑星の宇宙風化の二つのタイムスケ ールについて

S型小惑星の宇宙風化には、1 Myr(あるいは、より 短い)と数百 Myr の二つのタイムスケールが存在する ことが知られている[例えば18](図3).速い赤化速度 は、形成後1 Myr 程度しか経過していないDaturaと Lucascavinという二つの小惑星族が十分に赤化して いるということと、普通コンドライト隕石への(重)イ オン照射実験にもとづいており、太陽風照射による赤 化と考えられている[18].一方、後者は微小隕石衝突 の効果と考えられている[18].

しかし、速い効果が初めの数Myrだけ顕著でそれ 以降は顕著な赤化を起こさず、別の過程が有効になる という考え方には必然性はないと言われている[19]. 宇宙風化を起こす過程と宇宙風化の影響を取り去る過 程が競合することで、全ての過程の総和として、宇宙 風化が初期に速く進行しその後ゆっくりと進行すると いう考え方も可能だろう.ここでは、このような考え 方にもとづいて、図3の赤化トレンドをごく定性的に 考えてみる.Path1は[18]で考えられた赤化トレンド である.この論文では、Path1の左下に普通コンドラ イトの反射スペクトルがプロットされていた.これは、 [18]で議論された小惑星族の年代が10⁵から10⁹ yrで あるため、10⁵ yr以下のスペクトル変化を無視したこ とによる.イトカワは10³ yrの照射期間でスペクトル が赤化しており、イトカワをアンカーとして書き直し たのがPath 2である. 近地球型小惑星の補正済傾き の平均値は0.43であるため[19], 0.43に漸近的に近づ くようにトレンドを引いた.

図3に示した修正した赤化トレンドにおいても、初 期に速く変化し、その後、漸近的に赤化が進むという 傾向は同じである、 宇宙風化を特徴付ける反射スペク トル形状の変化として、暗化(全体的なアルベドの低 下),赤化(長波長域で相対的に高いアルベドを持つ), ~1 μm と~2 μm の6 配位の Fe²⁺ に起因する吸収バン ドの減衰の3つがある[4]. 図3はこのうち赤化と吸収 バンドの減衰の効果を見ている. イトカワは十分赤化 が進んでいるが(図3),アルベドはS型小惑星の中で は0.29と大きい[30]. これはイトカワ粒子に存在する ナノフェーズFeやナノフェーズ(Fe.Mg)Sのサイズが <2 nmと小さいため、ナノフェーズFeがスペクトル の赤化を顕著におこすが暗化は顕著にはおこさないた めであると考えられる[11]. 一方,多くのS型小惑星 のアルベドは0.10から0.22であり、図3において漸近 的に赤化が進んでいく領域では赤化よりも暗化が顕著 に進行すると予想される. 暗化をより顕著におこすに は、より大きなナノフェーズが形成される、あるいは、 月レゴリス試料に含まれるようなスペクトルの暗化を 引き起こすガラスの形成、及び、これら両方が関わる 必要があるだろう.

初期の速い赤化過程の進行が頭打ちになるように見 えるのはなぜだろうか.原子炉材料科学の分野では, 材料極表面の剥離現象として、ブリスタリングとフレ ーキングが知られている[13]. フレーキングとはイオ ン注入されたガスが偏析してごく表面が剥がれ落ちる 現象のことである. 曝露時間が10⁴⁻⁵ yrのオーダーに 達すると、ブリスタリングがより進行しフレーキング が起きると仮定する(この仮定が正しいかどうかは照 射実験によって証明できるはずである). フレーキン グによる極表面層の剥落によって、Zone Iのナノフェ ーズ(Fe.Mg)Sの多くと、Zone II最上部のナノフェー ズFeが失われ、スペクトルの赤化(と吸収帯の減衰) が減少すると考えられる、そして、フレーキングによ って曝露した面に新たなZone I(再凝縮層)の形成と Zone IIの再形成が開始されると考えられる. この拮 抗する両過程によって宇宙風化は定常状態になり、速 い赤化の進行がほとんど進まなくなる可能性があるだ ろう、そうした定常状態に到達したところに、より遅 い過程である微小隕石衝突が作用し始めると、すでに 存在していたナノフェーズFeが加熱により合体し, より大きなナノフェーズFeが形成され、スペクトル の暗化を引き起こすようになる. 並行して, 太陽風照 射により新たな細粒ナノフェーズFeの形成も起き. 総合的には、暗化が進み、かつ、徐々に赤化も進むと いうシナリオが考えられる。今後、イトカワ及び月レ ゴリス試料を使って、このシナリオの当否を検討した いと考えている.

従来,赤化過程のゆっくりとした進行については, レゴリスガーデニング、地球や金星などへの大接近に よる小惑星表面の更新、インパクトエジェクタの部分 的な被覆、他天体の衝突による小惑星の振とうなどの 影響が主張されてきた[19]. こうしたマクロな過程も もちろん宇宙風化の進行速度に根本的な役目を果たし ているはずであるが、天体のサイズや軌道(メインベ ルト小惑星か近地球小惑星か)によらず、似たような スペクトル変化経路をたどるということは、ごく表面 において共通の過程の影響があることを示唆している のではないか.こう考えると、図3においてメインベ ルトのS型小惑星族のそれぞれにおいて、最も赤化の 程度が低いものがイトカワ程度であるというのは偶然 ではないように思えてくる. すなわち, 上記のいずれ かの過程によって小惑星表面が更新されても、すぐに 非常に速いイトカワ型の宇宙風化(主に太陽風照射よ る宇宙風化)を受け、赤化したという解釈が可能であ る(むしろ, Daturaの赤化の程度が低い理由を再度検 討する意義があるのではないか). これからの宇宙風 化についての議論では,宇宙風化のミクロな過程を十 分に組み込んだ上でマクロな過程の影響を考えていく 必要があるだろう.

4. 今後の計画

著者らが現在進めている基盤研究(A)では、一粒の イトカワ粒子から走査透過電子顕微鏡(STEM)観察試 料の作製と希ガス同位体試料の作成を行い、本稿で示 したような宇宙風化層の微細組織と、希ガス質量分析 データを得ることを目指している.イトカワ粒子の希 ガス同位体分析は、個々のイトカワ粒子が複雑な履歴 を経ていることを示唆している[20].現在までに、月 レゴリス試料を使った試料作製と、同一試料に対する 透過電子顕微鏡観察・希ガス質量分析は確立すること ができた.今後、希ガス同位体質量分析とSTEM観 察と組み合わせることで宇宙風化組織のより精密な理 解,各種宇宙風化リムの形成期間の推定、さらには月 型宇宙風化も含め宇宙風化の物質科学的な理解を目指 したいと考えている.

謝 辞

本稿は、はやぶさ初期分析の一環として行われた研 究成果を出発点として、JSPS科研費242440088の助 成を受けて行っている研究を加えたものです. はやぶ さプロジェクト関係者、JAXAキュレーションチーム、 初期分析メンバー、雰囲気遮断システムの作成や STEMおよびFE-TEM分析等をサポートして下さっ た日立ハイテクをはじめとする多くの関係者の方々に 感謝します. また、低エネルギーイオンの照射損傷に ついて検討する際には、日本原子力機構のセミナーに おける議論やJ. P.ブラッドリー博士との議論が役に 立ちました. また、査読者の松本徹さんのコメントは 文章の改善に役立ちました. これらの方々にも感謝い たします.

参考文献

[1] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.

- [2] Chapman, C. R., 2004, Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 32, 539.
- [3] Keller, L. P. and McKay, D. S., 1997, GCA 61, 2331.
- [4] Sasaki, S. et al., 2001, Nature 410, 555.
- [5] Binzel, R. P. et al., 2002, MAPS 36, 1167.
- [6] Yano, H. et al., 2006, Science 312, 1350.
- [7] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [8] Noguchi, T. et al., 2013, MAPS (in press).
- [9] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.
- [10] Taylor, L. A. and Patchen, A., 1995, 26th LPSC, 227.
- [11] Keller, L. P. et al., 2013, 44th LPSC abstract #2404.
- [12] Loeffler, M. J. et al., 2009, JGR: Planet 114, E03003.
- [13] 井形直弘 編, 1986, 核融合炉材料(培風館: 東京).
- [14] Assonov, S. S. et al., 1998, 29th LPSC abstract #1635.
- [15] Matsumoto, T. et al., 2013, 44th LPSC abstract #1441.
- [16] Noble, S. K. et al., 2005, MAPS 40, 397.
- [17] Fraundorf, P. et al., 1980, Proc. 11th LPSC, 1235.
- [18] Vernazza, P. et al., 2009, Nature 458, 993.
- [19] Marchi, S. et al., 2012, Month. Not. R. Astron. Soc. 421, 2.
- [20] Nagao, K. et al., 2011, Science 333, 1128.