はやぶさ試料分析の今

松本 徹1

2018年4月24日受領, 査読を経て2018年12月15日受理.

(要旨)本稿では最近のイトカワ粒子の研究についてレビューする.イトカワの母天体では熱変成が進んでいたと考えられるが,その内部では岩石の隙間をH₂O氷と有機物由来の流体が流れていた痕跡が見つかった.この母天体が破壊されて小惑星イトカワが形成したタイミングはArやU-Pbの同位体比を用いた年代測定から推定されている.イトカワの形成後,その表面では太陽風や微小隕石の衝突による宇宙風化(反射スペクトルの変化)が進んでいたが、レゴリスの流動や粒子の破砕が活発に起こり宇宙風化の進行を妨げていた証拠が示された.粒子の表面に見つかった数多くの微小な衝突クレーターは、小天体を取り巻く微小ダストの特性を知る手がかりになるのかもしれない.

1. はじめに

探査機はやぶさは2003年に打ち上げられ小惑星イ トカワを探査した、イトカワは地球軌道と火星軌道と の間を回る長径約500mの小さな天体である。イトカ ワの表面はレゴリスと呼ばれる砂の層と岩塊が覆って いた[1]. はやぶさはミューゼスの海と呼ばれるレゴ リスに覆われた領域に降り立ち、数十µmから百µm 程度の大きさの粒子(図1A)を回収した。2010年には やぶさは地球に無事帰還し、小惑星表面から直接的に 採取された試料を世界で初めて持ち帰ることに成功し た、はやぶさが帰還した直後からイトカワ粒子の初期 分析が開始され、主に次の成果が得られた。(1)隕石 の起源:イトカワ粒子の鉱物・元素組成や酸素同位体 比はLLコンドライトと呼ばれる隕石種(石質で球形 状組織のコンドリュールを含む普通コンドライト隕石 のうち、金属鉄の含有量が比較的少ないもの)に当て はまり[2-5] 隕石の故郷は小惑星であることが最終的 に証明された.(2)イトカワの形成史:イトカワは高 い空隙率(約40%)をもつことが観測から分かり、ラブ ル・パイル(がれきの集まりの意)であると推定されて

いた. ラブル・パイルとは大きな母天体が破壊され. その破片が再集積して形成したと考えられる天体であ る.一方で、イトカワ粒子の構成鉱物は高温の熱変成 を経験したことが明らかとなった。現在のイトカワで は熱変成を引き起こす放射性壊変由来の内部熱源を保 持できないため、イトカワには熱を保持できる直径 20 km 以上の大きな母天体が存在したと推定でき[2], 粒子の分析からもイトカワがラブル・パイルであるこ とを示した.(3)レゴリスの起源:小惑星表面を覆う レゴリスは天体衝突により生じた破片の集積物である と従来から予想されていた. イトカワ粒子の3次元形 状は、衝突破片と考えて矛盾しないことが分かり、予 想を裏付けることとなった[5].(4)宇宙風化の証拠: イトカワ粒子には太陽風や微小隕石衝突に曝されてい た痕跡が見つかった[6,7]. その産物のひとつとして粒 子表面に見られた鉄に富むナノ粒子は、小惑星表面の 反射スペクトルが変化する「宇宙風化」を引き起こし た証拠であった[6].

こうした粒子の初期分析に引き続いて国際公募研究 がはじまり、イトカワの形成史や小惑星表面で起こる 諸現象について具体的な描像が得られつつある.しか し、初期分析以降にイトカワ粒子の分析がいかに進展 したかについて、まとめて紹介されている機会は少な

^{1.}九州大学基幹教育院 matsumoto.toru.502@m.kyushu-u.ac.jp



図1: (A) 主にカンラン石で構成されるイカワ粒子の二次電子顕微鏡像. 宇宙科学研究所で撮影した. このイトカワ粒 子の表面には自形や同心円状の成長ステップがみられる(B). (C) 熱変成が進んだ普通コンドライトに見られる いびつな空隙(二次電子顕微鏡像). 空隙の境界を点線で示した. 空隙内部の構造(D) はイトカワ粒子の表面(B) によく似ている. (C)(D)の出典は[14]である. (E) はやぶさが撮像した小惑星イトカワ表面の丸い巨礫(提供元: JAXA).

いように思われる. はやぶさ2やOSIRIS-RExなど次 世代のリターンサンプル分析の準備が進む中で, イト カワ粒子の分析で得られた成果を今一度振り返ること は今後のサンプル分析の指針を検討する上で重要だろ う. 本稿ではイトカワ粒子の表面形態の解析を行った 筆者自身の研究も踏まえて, これまでの研究で明らか となったイトカワの進化について概括したい.

2. イトカワ母天体の進化史

ラブル・パイルである小惑星イトカワには前身となった母天体が存在した.イトカワの母天体は天体衝突によってバラバラに砕かれ、衝突破片の自己重力による再集積を経てイトカワが形成されたと考えられている.その母天体の集積した年代や母天体の熱進化史、イトカワの形成に至る衝突イベントの年代が粒子の分析から分かってきた.一方で母天体中では岩石組織の隙間を流れた流体が存在し、その流体はH₂O水や有機物質に由来することが推定されている.

2.1 イトカワ母天体の形成・熱変成モデル

母天体における熱変成によってイトカワ粒子に含ま れるリン酸塩が結晶化した年代は46.4 ± 1.8億年前で あることがU-Pb年代測定法から明らかになった[8]. また、イトカワの母天体は太陽系初期に集積し、太陽 系最古の物質であるCAI(Calcium- aluminum-rich inclusion)の形成後760万年後には²⁶Alや⁶⁰Feの放射 壊変熱を主な熱源として700℃以上の高温に達したこ とが²⁶Al-²⁶Mg年代測定と酸素同位体比測定から算出 された[3, 9]. イトカワ粒子の主要鉱物はカンラン石 や輝石、斜長石、硫化鉄(FeS)、Fe-Ni金属、クロム 鉄鉱などである. 粒子が高温の熱変成を経験したこと を示す痕跡として、熱変成が進んでいない(非平衡な) 普通コンドライトに比べてカンラン石と輝石の化学組 成の均一化が進んでいることや単斜輝石から直方輝石 への変化が進んでいることなどが挙げられる[2]. イ トカワ粒子にみられる均質な¹¹B/¹⁰B同位体比も母天 体における高温の熱変成の証拠である[10]. 隕石は熱



図2:Ar同位体比から推定される, イトカワおよび母天体で起きた天体衝突のシナリオ. (提供元: Jisun Park博士 [12]).

変成が小さいものから岩石学的タイプ3から6に分類 され、イトカワ粒子は4から6に対応することがわか った[2]. 単斜輝石と直方輝石の化学組成から平衡温 度を読み取る輝石温度計を用いると、母天体内部は約 800℃にまで到達したことが分かり、放射壊変熱を保 持できる母天体の大きさは直径20 km以上と見積も られた[2]. 母天体は最高温度に達したのち0.5 K/1000 年という緩やかな速度で冷却したことが冷却中に起こ るカンラン石とクロム鉄鉱の間で起こるFe-Mg交換 反応の進行度から求められた[2].

²⁶Alは太陽系形成以降に放射壊変によって減少し続 けるため、母天体に取り込まれた²⁶Al量は母天体集積 のタイミングに依存する、母天体内部の温度履歴は集 積段階で取り込まれた²⁶Alの量によって決まる、上記 の母天体の温度履歴を説明する熱伝導モデルを考えて 母天体集積初期の²⁶Al量を算出すると、CAI形成後約 2百万年後に母天体が集積したと見積もられている [11]. この集積年代は非平衡普通コンドライトに含ま れるコンドリュールの形成時期とおよそ一致している.

2.2 イトカワの形成年代

Park et al. (2015) [12] は⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位体比を用い たイトカワ粒子の年代測定を行った. Ar年代測定で は⁴⁰Kの放射壊変で生成した⁴⁰Arの量を見積もり鉱物 の年代を推定する。Arは揮発性元素のため天体衝突 などの加熱で失われやすく、Arが鉱物から抜けたタ イミングで年代がリセットされる. Parkらは、十分 な量のArを検出するために3つのイトカワ粒子を合 わせて年代測定を行った、結果、約13億年前に何ら かの衝突現象に伴う加熱が起こりイトカワ粒子の構成 鉱物からArが完全に失われ。Ar同位体比がリセット されたことが示された. Arのリセットを説明するた め以下の4つのシナリオが提案された(図2).(1)約13 億年前に母天体が天体衝突によって破壊されてイトカ ワが形成した。(2)約13億年前に天体が母天体に衝突 してArの同位体比はリセットされたが、母天体が破 壊される規模の衝突ではなかった. その後母天体へ別 の天体が衝突して破壊が起こり、イトカワが生まれた. (3)約13億年前にイトカワ表面で激しい天体衝突が起 きた. (4)イトカワに他天体由来のLLコンドライト物

質が飛来しており、その試料を偶然に分析した. Park らは(1)(2)がもっともらしいシナリオであり、イト カワの形成年代は約13億年か、それよりも若いと推 測している. Terada et al. (2018) [8] により算出された U-Pb年代からは14-15億年前に母天体が破壊される 衝突イベントが起きたと結論づけられている。一方で、 Iourdan et al.(2017)[13]は2つのイトカワ粒子に対し て個別にAr年代測定を行った.ひとつの粒子は約23 億年前にArの同位体比がリセットしたことを示して いた。この粒子は母岩中で15-25 GPa程度の衝撃圧力 を受けていることが結晶構造の歪みの程度から見積も られた、天体衝突が起こり衝撃圧力を受けたとき、空 隙率が高い岩石ほど衝突後の温度が高くなる傾向にあ る. 15-25 GPaの衝撃圧力を受けたとき. Arのリセ ットが起こる900 ℃程度にまで岩石が加熱されるため には少なくとも20-30%の空隙率が必要であると見 積もられた. この値はラブル・パイル天体であるイト カワの高い空隙率(約40%)に近いことから、Jourdan らは23億年前にイトカワはすでに形成していたと結 論づけている.このように、イトカワの生成時期につ いて13-15億年前と23億年前という大きく異なる年代 が提案されており、共通の認識には至っていない。

2.3 母天体中の空隙

コンドライト物質の空隙組織は、母天体の岩石の破 壊特性や衝突史などを推定する手がかりになる. イト



図3: X線トモグラフィーで撮影したイトカワ粒子(カンラン石) の断面画像.矢印で示した箇所に一列に並ぶ空隙がみられ, これらは3次元的には面上に分布している(提供元:土山明 博士).

カワ粒子の3次元像をX線トモグラフィーで撮影する と、小さな空隙(um以下のサイズ)が鉱物内部で平面 内に並んでいる様子が見られた(図3) これは母天体 における天体衝突によって岩石内部にひびが生じたの ち、母天体の熱変成作用によってひびが閉じた痕跡 (healed crack)であると考えられた[5]. ひびが閉じる 作用は熱平衡状態において表面自由エネルギーを最小 にするために働く、一方で、Matsumoto et al.(2016) [14]は走査型電子顕微鏡(SEM: scanning electron microscope)を用いてイトカワ粒子の表面形態を観察 し、一部の表面は成長ステップや自形を呈しているこ とを見つけた(図1B)。イトカワ粒子と同程度に熱変 成が進んだLLコンドライトには10 μm以上のサイズ のいびつな空隙をもつ隕石があり、それらの空隙の壁 面には同様の成長ステップや自形組織が見られる(図 1C. D). 図1Cで載せたTuxtuac隕石は比較的高い空 隙率を持ち(LLコンドライトの平均値7.5%に対して 約13%の空隙率を示す[15])、衝撃変成の程度が低く 圧密を免れている. こうした空隙は天体衝突に伴う衝 撃で形成する平面状のひびとは異なる.いびつな空隙 は、母天体が集積した時に存在した集積物間の隙間で あるか、天体衝突によって母天体で角礫化作用が起き た際に生じた空隙に起源をもつと考えられる。いびつ な空隙内部に存在する成長ステップや自形組織は、母 天体の熱変成が進んだ段階において空洞内部が熱的平 衡状態となっている環境で成長したのであろう. この ようにイトカワ粒子の母岩はTuxtuac隕石のような いびつな空隙に富み比較的空隙率に高い組織を持って いたと推測できる.

小惑星イトカワの表面の80%はレゴリスに覆われ ていない岩塊が占める地形である.はやぶさが撮像し たイトカワ表面に存在する岩塊の高分解画像には,細 かな起伏を持ちかつ角が取れている巨礫が数多く見ら れる(図1E).脆く空隙率の最大値が高い普通コンド ライト隕石(BjurboleLL4隕石:0.8 vol.% - 23 vol.% 程度)は,表面形態がこのタイプの巨礫によく似てい る[16].空隙率は岩石の機械的強度と相関しており, 空隙率の不均質性に起因して巨礫表面の起伏が生まれ ていると解釈されている[16].イトカワ粒子から推定 される母岩の特徴はイトカワ表面の巨礫の特徴と調和 的であると思われる.

2.4 母天体中に存在した流体の痕跡

Harries and Langenhorst,(2018)[17]はイトカワ粒 子のカンラン石内部に面上に分布する包有物(微小な Fe-Ni金属や硫化鉄,空隙)を透過型電子顕微鏡 (TEM: transmission electron microscope)で観察し た、これらの包有物は、元々は開いた割れ目に沿って 分布しておりイトカワ母天体の熱変成中に割れ目が閉 じたことで別々に分かれたと考えられる. 一部の包有 物には鉄ニッケル合金(テーナイトやカマサイト)と共 に鉄炭化物である haxonite (Fe_{21.9-22.7}Co_{0.2-0.3}Ni_{0.2-0.8})C₆ が共存していた(図4)、鉄炭化物は、金属鉄に対して 炭素が飽和する状態まで供給されることで形成する. Harriesらは、母天体を構成する岩石中の空隙には高 圧のC. H. Oを含む流体が充填していたと推測し. 流体が金属鉄に炭素を供給したことで鉄炭化物が形成 したことを熱力学平衡計算から示した。計算モデルと して母天体の熱変成環境(600 ℃-800 ℃, 50 bar-175 bar)においてC-H-O流体とカンラン石、直方輝石、 Fe-Ni 金属、炭化物が平衡状態で共存する場合を考え た。この熱平衡状態における流体の酸素フガシティー と炭素活量を算出できることから、それらの値に対応 するC-H-O流体の組成比(H₂O, H₂, CO₂, CO, CH₄ を想定)を見積もった.計算の結果,金属鉄と反応し た流体はH₂OやCO₂に乏しく主にメタン(CH₄)や水素 (H₂)で構成されることが示された. CH₄とH₂に富む 流体は母天体内部の熱変成が進む前に存在していた不 溶性有機物(IOM: Insoluble organic matter)の熱分解 によって生成したと推測された.流体のH/C比は4-5 と見積もられ、この値は非平衡コンドライトに典型的 に見られるIOMのH/C比(0.2-0.4)や彗星のIOMの H/C比(0.9)よりも高い. 母天体の形成時にIOMと同 様に集積していたH₂O氷の存在を仮定し、母天体の 熱変成の進行に伴ってH₂O氷が不溶性有機物を加水 分解しCH₄とH₂を生じさせたと考えると、流体の高 いH/C比を説明することが可能である. イトカワ粒 子に有機物は確認できていない[18]が、このように熱 変成前の母天体において有機物-H2O氷-無機物質が共 存していた証拠が粒子の分析から示された. LLコン ドライトでは微小な炭化鉱物が見落とされている可能 性があり、炭化鉱物がほとんど報告されていない. LLコンドライトの詳細な観察によって炭化鉱物の分



図4:イトカワ粒子のカンラン石中に含まれるHaxonite(鉄炭 化物)の透過型電子顕微鏡像(提供元: Dennis Harries博 士). OI:カンラン石, Tt:テーナイト(Fe-Ni金属), Hx: Haxonite, Void:空隙.

布や産状を記載することや、炭化鉱物を形成させる再 現実験から、有機物が関与して炭化鉱物が形成すると いうシナリオを検証できるかもしれない.

3. イトカワ表面を覆うレゴリスの進化

大気のない小天体表面で起こる物質の変化について 隕石の分析から知り得る情報は限られていた. イトカ ワ粒子の分析によって,小惑星表面を覆っているレゴ リスの形成機構やレゴリスの年代,宇宙風化作用の理 解が飛躍的に進んでいる.

3.1 レゴリスの起源

小惑星を覆うレゴリスは、天体衝突によって生じた 破片が天体表面に蓄積したものであると古くから予想 されてきた[19]. X線トモグラフィー撮影で明らかと なったイトカワ粒子の3次元形状は、衝突実験で生成 する破片の形状と一致していた[5]. また、多くの粒 子表面は弱い衝撃を受けて破砕した時に生じる破断面 であることもわかった[14]. 加えて、粒子内部に広が る結晶欠陥の特徴は小規模な衝撃によって粒子表面が 破砕したことを示唆している[20]. こうした結果は、 イトカワ表面で起きた天体衝突が原因となりレゴリス が形成したというシナリオを支持している.一方で, 小惑星表面における昼夜の寒暖差が岩石の熱疲労破壊 に至る熱膨張と収縮を引き起こし,細粒のレゴリス粒 子が形成するという新しいレゴリス形成モデルが近年 提案されている[21]. 今後の課題として,熱疲労破壊 で生じる鉱物破片の特徴をイトカワ粒子の特徴と比較 し,双方のレゴリス形成モデルを検証することが必要 だろう.

3.2 レゴリスの年代

小惑星の表層には惑星間空間から様々な高エネルギ ー粒子が飛来し蓄積されており、その痕跡からレゴリ スの年代が推定されている. 高エネルギー粒子は、太 陽系外から飛来する数MeV-数GeVのエネルギーを もつ銀河宇宙線(貫入深さ:数m)、太陽フレアにより 放出される1 MeV-100 MeVの太陽宇宙線(貫入深さ :数cm以下)、太陽から恒常的に放出される数keVの 太陽風(貫入深さ:約100 nm)に分類され、それぞれの 貫入深さ程度におよぶ領域にイトカワ粒子が滞在した 期間を算出できる. 粒子が数mの深さに滞在した年 代は、銀河宇宙線の打ち込みで形成した宇宙線起源核 種の²¹Ne量の測定によって見積もられ.8×10⁶万年以 下という値が示された[7]. 粒子が数cmの深さに滞在 した年代は最大で10³年程度[6]であることが、太陽宇 宙線の通過経路に発達した線状欠陥(太陽フレアトラ ックと呼ばれる)の密度から推定された。粒子がイト カワ最表面に滞在した年代は太陽風由来の希ガス蓄積 量から算出され、150年から550年であった[7]. 粒子 の滞在年代がイトカワの形成年代に比べて短いことは、 後に述べるレゴリスの活動と密接に関係があると考え られる.

3.3 宇宙風化

大気のない天体表面の色(可視-赤外反射スペクト ル)の時間変化や表面物質の変化は、広く"宇宙風化" と呼ばれる、小惑星イトカワは反射スペクトルの特徴 からS型に分類されている、S型小惑星の可視-赤外の 反射スペクトルは普通コンドライトに比べて暗化・赤 化しており、この違いは宇宙風化に起因すると推測さ れている[22]. Noguchi et al.(2011, 2014)[7, 23]は TEMを用いてイトカワ粒子に見られる宇宙風化の痕 跡(宇宙風化リム)を詳細に記載した、イトカワ粒子の



図5:イトカワ粒子表面の二次電子顕微鏡像. 宇宙科学研究所で 撮影した.表面を覆う小さな膨らみはブリスターである. 画像上の付着鉱物粒子にはブリスターは見られない.

表面には太陽風(H⁺やHe⁺が主成分)の貫入によって 部分的に非晶質化されたリムが見られる。この非晶質 リムは最も発達すると最大60 nm-80 nmの深さにま で広がり、その深さは太陽風Heの貫入深さで規定さ れているようである[23] 最表面には、微小隕石の衝 突による蒸発や太陽風によってスパッタリングされた のち再凝縮した2 nmから15 nmの薄い非晶質層がし ばしば覆っている. こうしたリムに豊富に存在する数 nmサイズの金属鉄粒子や(Fe, Mg) S粒子は太陽光を レイリー散乱させて小惑星全体の反射スペクトルを変 化させると考えられている。実際にBonal et al.(2015) [24]は小惑星イトカワと同様の可視-近赤外反射スペ クトルの暗化や赤化が各々のイトカワ粒子に起きてい ることを確かめた.太陽風の照射は微小鉄粒子を含む 深いリムを形成するため、イトカワの反射スペクトル の変化に最も顕著な影響を与えていると言える[23]. こうした特徴は、微小隕石衝突によって形成した蒸発 凝縮物が100 nm程度の厚いリムを形成している月面 のレゴリス粒子の特徴とは対照的である.

宇宙風化リムには、太陽風由来のHeガスやHガス が蓄積したことで発砲したと考えられる泡がしばしば 見つかった[23]. 泡はしばしば粒子表面を押し上げて おり、そのふくらみはブリスター(「水ぶくれ状」の意) と呼ばれる(図5). ブリスターは粒子表面の観察から 明確に確認できる[25]. ブリスターを含む宇宙風化リ ムは太陽風が蓄積して最も発達が進んだリムであると 考えられ、ブリスターをともなう粒子の太陽フレアト ラック年代は10³年以下であることから、宇宙風化リ ムの発達は10³年より早く完了すると予想されている [23].小惑星の観測や天体力学的な考察に基づくと太 陽風照射による反射スペクトルの変化は10⁶年程度で 完了すると予想されていたが、さらに速く進むことが イトカワ粒子の分析から分かった[23].宇宙風化リム の形成速度は正確に分かっておらず、イオン照射実験 などを通じて今後明らかにしてゆく必要があるだろう.

宇宙風化リムの観察に加えて、 リム内部に含まれる 揮発性元素の空間分布・密度を見積もる最先端の分析 手法が近年確立されつつある。ポストイオン化二次イ オン質量分析¹ではイトカワ粒子表面におけるHeの 不均一な面分布が検出されている[26]. Burgess and Stroud.(2018)[27]はアポロ計画で回収された月レゴリ ス粒子でブリスターを確認し、 泡が発達した宇宙風化 リムに含まれる太陽風Heの分布・密度をTEM分析 と併用した電子エネルギー損失分光法²を用いて初め て測定した.分析の結果、高圧のHeガスが現在もな お泡の内部を満たしていることがわかった. 宇宙風化 リムの特徴とHe密度の情報が結びつくことで、宇宙 風化リムの形成速度を正確に理解できると期待される。 また、イトカワ粒子の宇宙風化リムに対してアトム・ プローブ分析³が行われ、太陽風H⁺イオンとケイ酸塩 が反応したことで生成したと考えられるOH基とH2O がリムの内部に検出された[28]. 宇宙風化リムは小惑 星表層においてH₂Oを貯蔵する役割がある可能性が 提案されており、これからの研究が注目される.

3.4 レゴリスの活動

Matsumoto et al. (2015, 2016) [25, 14] はイトカワ粒 子表面のブリスターの観察からブリスターの表面分布 が一様でないことを示し,個々の粒子表面で宇宙風化 が不均一に進行していることを明らかにした.宇宙風 化の不均一な進行は,ブリスターが発達するタイムス ケールと同程度の頻度でレゴリスの流動や破砕が継続 して起きている結果であると考えることができ、小惑 星表面における活発なレゴリスの活動が粒子表面に記 録されていることが分かった.この結論は短い期間で 小惑星イトカワの地形変化が進んでいる観測事実[29] とも整合的である。一方で、粒子の一部は丸みを帯び 凹凸が削れているような表面組織をもつことから、粒 子は機械的摩耗を受けていると考えられる[5,14]. 摩 耗に要する期間はよくわかっていないが宇宙風化の進 行に比べるとはるかに長期間であることが予想されて いる[14]. レゴリスの流動や摩耗は、天体衝突による 振動や惑星の近くを通過した際に受ける潮汐力。イト カワの自転速度の変化、粒子の静電浮遊などが原動力 となったと考えられる、こうしたレゴリスの活動は、 宇宙風化を受けた粒子表面をはぎ取り、新鮮なレゴリ ス層の表面を露出させることで小惑星イトカワのレゴ リス層の宇宙風化の進行を妨げる働き(イトカワ表面 を若返らせる作用)をもつ可能性がある。小惑星全体 の宇宙風化の進行速度を精密にモデル化するためには、 宇宙風化リムの形成と競合するレゴリスの活動を考慮 する必要があるだろう。

3.5 微小な衝突クレーター

イトカワ粒子の表面には、数十nmから1 µmの直 径を持つ微小なクレーターが僅かながら見つかり、高 速の惑星間塵が直接的に衝突した痕であると推定され た[30]. しかし、微小クレーターは粒子表面の局所的 な領域に密集していることから、粒子の近傍で起きた 天体衝突(一次衝突)によって飛散した破片がぶつかっ た二次衝突の痕であるとも推測されていた[14, 31]. 当初は、まれだと思われていた微小クレーターだが、 Matsumoto et al. (2018) [32] は約50 個の粒子表面をく まなく調べ、約900個の微小クレーターを記載した(図 6)、微小クレーターのサイズ分布・面密度を求め、一 方で粒子がレゴリス層の最表面に滞在した期間を10² 年から104年と仮定すると、微小クレーターの形成率 は惑星間塵の衝突率に比べて最大で約10²倍も高いこ とが分かった(図7). この結果から微小クレーターの 大半は二次衝突で形成されたことが明らかになった. 惑星間塵の一次衝突が天体表面の窪みの中で起こるこ とで、多数の微小な衝突破片が窪みの周囲の壁に二次 衝突して微小クレーターは蓄積できる.数cm以上の

ポストイオン化二次イオン質量分析装置:Gaイオンによって試料表面の局所的な領域からスパッタされた原子や分子をレーザーでイオン化したのち質量分析を行う分析装置である。

^{2.} 電子エネルギー損失分光法:TEM分析において入射電子線が 試料内の電子を励起する際に失ったエネルギーを測定し、高 い空間分解能で軽元素の組成や結合状態を知る手法である。

^{3.} アトム・プローブ分析:試料の原子を電解蒸発させてイオン 化し,飛行時間型質量分析器でイオンを測定することで,試 料中の原子の3次元分布をほぼ原子レベルの分解能で把握する 手法である。



図6:イトカワ粒子に典型的に見られる微小クレーターの二次電 子顕微鏡像.宇宙科学研究所で撮影した.図のスケールバー は500 nmである.(A)硫化鉄表面の微小クレーター.クレー ター内部にはブリスターが存在する(矢印で示した).(B) (C)カンラン石表面のクレーター.微小クレーターはブリ スターが発達した表面によく見られ(AからC),しばしば クレーター内部にもブリスターが発達している(A).



図7:イトカワ粒子が宇宙空間に暴露された年代を10°年,10³ 年,10⁴年と仮定した時に、微小クレーターを形成した衝 突物質のフラックス(質量の累積分布)を示した.比較とし て月レゴリスに見られる微小クレーターを形成した衝突物 質のフラックスも載せている.また、イトカワ軌道に近い 1 AUと1.5 AUにおける惑星間塵フラックスの標準的なモ デルを実線と点線でそれぞれ示した.合わせて各観測機器 (STEREO, Pioneer, Ulysses)で測定された塵のフラック スも誤差範囲を含めて十字線で示している.出典は[32].

サイズのくぼみを想定すれば、10²年から10⁴年で十分 な数の惑星間塵が飛来すると見積もることができる. 微小クレーターの形成率は月面と小惑星イトカワ表面 で近い値を示す(図7).この理由はイトカワと月とは 1AU付近の軌道をもち惑星間塵の一次衝突のフラッ クスが同程度であり、数cmから数mの凹凸が存在す る天体表面おいて似たような割合で二次衝突が起きる ためであろう.このことは二次衝突の形成頻度は天体 のサイズや全体の形状によらないことを示唆している. 大気のない天体の周囲にはサブミクロンメートルの衝 突放出ダストの雲が取り巻いていると予想されており, 木星衛星の探査で実際に観測されている. 衝突破片に よって生成した微小クレーターの統計的情報は、観測 することが難しく謎に包まれている微小なダスト雲の 特性を知る上での手がかりになるかもしれない.

4.展望

イトカワ試料にはここでは紹介しきれない特殊な物 質も存在する.たとえば、イトカワ粒子の表面には KClやNaClがわずかに報告されているが電子線など に対して弱く観察が難しい[33].塩は水が存在する環 境で析出する物質であり、母天体の熱変成後に起きた 水質変成の証拠であるのか、オトカワへの他天体から の物質の流入物であるのか、あるいは地球上での汚染 であるのかはっきりしない.こうした興味深いが微量 であることや分析が困難であるために研究が進んでい ない試料が数多く残されており、様々な分析手法を用 いたイトカワ粒子の継続的な研究が期待される.

謝 辞

本稿で使用したイトカワ粒子画像の撮影にあたり, 宇宙科学研究所地球外物質研究グループの機器を使用 させて頂きました.感謝いたします.また本論文の執 筆を勧めてくださいました三浦均博士と瀧川晶博士に お礼申し上げます.査読者である佐々木晶博士からは 有益なコメントを頂き,感謝いたします.

参考文献

- [1] Fujiwara, A. et al., 2006, Science 312, 1330.
- [2] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
- [3] Yurimoto, H. et al., 2011, Science 333, 1116.
- [4] Ebihara, M. et al., 2011, Science 333, 1119.
- [5] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.
- [6] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [7] Nagao, K. et al., 2011, Science 333, 1128.
- [8] Terada, K. et al., 2018, Scientific report 8, 11806.
- [9] Nakashima, D. et al., 2013, EPSL 379, 127.

- [10] Fujiya, W. et al., 2016, MAPS 51, 1721.
- [11] Wakita, S. et al., 2014, MAPS 49, 228.
- [12] Park, J. et al., 2016, MAPS 50, 2087.
- [13] Jourdan, F. et al., 2017, Geology 45, 819.
- [14] Matsumoto, T. et al., 2016, GCA 187, 195.
- [15] Wilson, S. et al., 2003, MAPS 38, 1533.
- [16] Noguchi, T. et al., 2009, Icarus 206, 319.
- [17] Harries, D. and Langenhorst, F., 2018, GCA 222, 53.
- [18] Naraoka, H., 2012, GJ 46, 61.
- [19] Melosh, 1989, Impact cratering, Oxford Univ. Press
- [20] Langenhorst, F. et al., 2014, EPS 66, 118.
- [21] Delbo, M. et al., 2014, Nature 508, 203.
- [22] Hiroi, T. et al., 2006, Nature 443, 56.
- [23] Noguchi, T. et al., 2014, MAPS 49, 188.
- [24] Bonal, L. et al., 2015, MAPS 50, 1562.
- [25] Matsumoto, T. et al., 2015, Icarus 257, 230.
- [26] 馬上ほか, 2013, 遊星人 22, 2013.
- [27] Burgess, K. D. and Stroud, R., 2018, GCA 224, 64.
- [28] Daly, L. et al., 2018, 49thLPSC #1495.
- [29] Miyamoto, H. et al., 2007, Science 316, 1011.
- [30] Nakamura, E. et al., 2012, PNAS 109, E624.
- [31] Harries, D. et al., 2016, EPSL 450, 337.
- [32] Matsumoto, T. et al., 2018, Icarus 303, 22.
- [33] Noguchi, T. et al., 2014, MAPS 49, 1305.