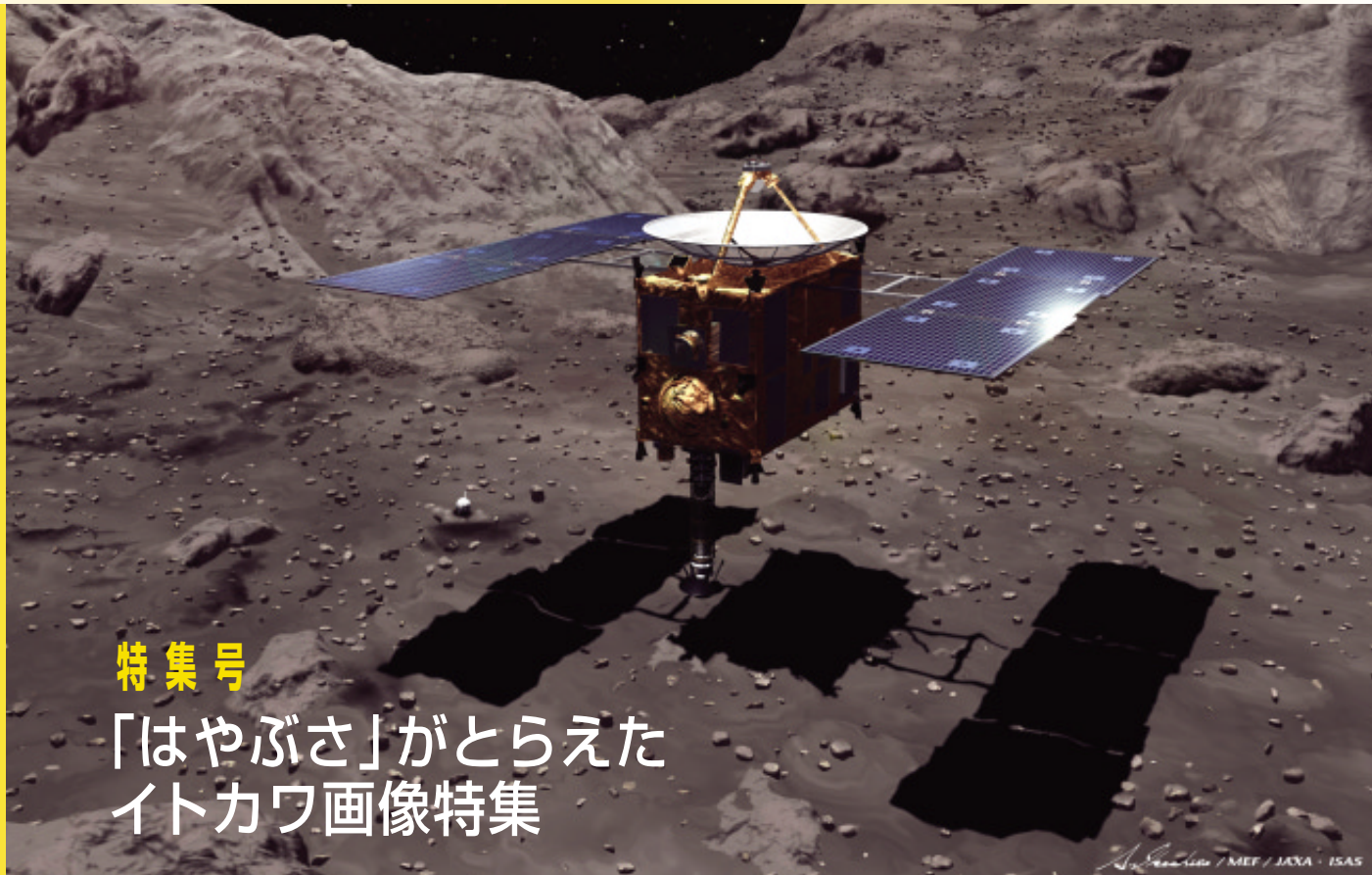




特集号

「はやぶさ」がとらえた
イトカワ画像特集

探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワにタッチダウンしたときのイメージ図 © 池下章裕

はじめに

齋藤 潤 東海大学工学部 研究員・AMICAチームリーダー

「はやぶさ」には、望遠光学航法カメラ(ONC-T: Optical Navigation Camera)1台と広角光学航法カメラ(ONC-W1, W2)2台、合計3台の高分解能カメラが搭載されています。これらのカメラは探査機の眼として、「はやぶさ」を小惑星イトカワに導くための航法用に使われます。ONC-Tは航法誘導だけでなく、理学観測のためにも使われました。そのため、マルチバンド分光カメラ(AMICA: Asteroid Multi-band Imaging Camera)という別の名前が付いています。

今回、「はやぶさ」の画像とそこから得られた成果に関して特集させていただくことになり、「はやぶさ」AMICAチームで科学論文を執筆された方々を中心に解説をお願いしました。このような形で皆さまにカメラ観測の成果をご報告できることは、AMICAチームリーダーとして大変喜ばしいことだと思っております。

AMICAには7バンドの色フィルタと偏光子が搭載され、わずかな色の違いを判別することができます。「はや

ぶさ」ミッションでは、AMICAを用いて小惑星イトカワをまんべんなく観測しました。その結果、その特異な形状や地形のバリエーション、そして色と明るさのバリエーションなど、小惑星の科学において多くの新しい知見を得ることができました。これは世界の惑星科学の歴史においても大きなエポックメイキングな出来事だと考えております。

今回の特集で紹介されるこれら一つ一つの知見が、「はやぶさ」の搭載カメラがもたらした大きな発見なのです。特集の最後には、チームメンバーの佐々木 晶さんから、今後の小惑星科学の展開についてご寄稿いただきました。今回の特集で、AMICAの成し遂げた“仕事”やその意義について、読者の皆さまに少しでもご理解いただき、興味を抱いていただければ大変光栄なことだと考えております。

それではAMICAの成果をお楽しみください。

(さいとう・じゅん)

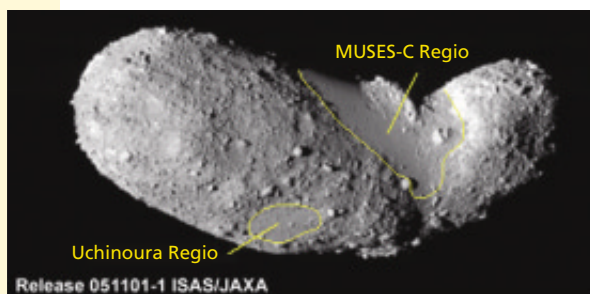
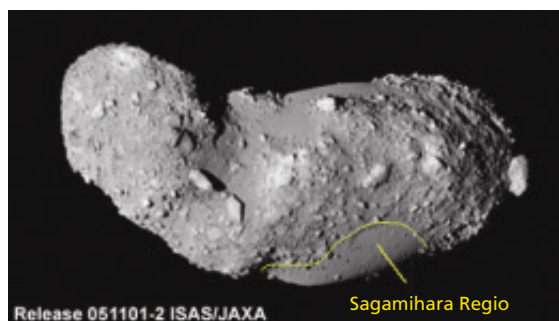


図1 国際天文学連合 (IAU) 承認の三地名 (米国地質調査所地名索引より)

小惑星イトカワの名前が糸川英夫博士にちなんで付けられたことはご存知のことと思いますが、そのイトカワの上にそれなりの由来の地名が付けられつつあることは、どれくらい知られているのでしょうか？

太陽系内の天体の地名は、2006年夏、冥王星が惑星から“降格”されたことで話題となった国際天文学連合 (IAU) の承認を得ることで一元管理されています。天体の地形に名前を付けるにはいろいろなルールがあり、小惑星それ自体の命名規則よりも厳しくて大変です。最初に訪れて写真を撮ったときに地名を付けるのは、先着の権利ということもありますが、まだ天体の座標系が固まり切らない時期に関係者同士で誤りなく場所を指し示す共有の鍵という実利的な理由も大きいのです。しかし、IAU承認地名となると世界中で認知・使用されるため、米ソの月探査競争当時から両陣営の宣伝材料として使われないよう、発見者が付けた地名がそのまま流通することのないようになっています。

一度確定した名称は、生物学の種・属名と同じく変更できません。また、地形種別ないし天体別のテーマに沿った一連の名前を付けることが慣行となっています。例えば、C型小惑星253 Mathildeは真っ黒な炭に見えることから世界各国の炭田名が採られていて、日本からは石狩炭田にちなんでIshikari Craterが命名されました。小

惑星イトカワの地名のテーマは、「はやぶさ」プロジェクトないし日本の宇宙開発にかかわった場所か、それに隣接する地名となっています。さらに最近加わった新ルールに“天体をまたがって重複する文字列を含んだ固有地名は(これ以上)付けない”があります。私たち「はやぶさ」プロジェクトが最初に付けようとした地名のいくつかは、すでに火星などで使われていることを理由に拒絶され、泣く泣く断念しました。例を挙げると、ウーメラ (大気圏再突入カプセル回収地点にちなむ) という地名も公には使えないことになってしまい、アルコーナという別名で再申請することになりました。

米国地質調査所の地名索引ウェブページ “Gazetteer of Planetary Nomenclature” (<http://planetarynames.wr.usgs.gov/>) では、太陽系内各天体のIAU承認地名が検索できます。なお、地名は前半の固有名詞部分と後半の地形種をペアにして付けることになっていますが、日本語で呼称するとき後半は省略されてしまうことが多いようです。例えば、宇宙科学研究本部の所在地にちなんで相模原と名付けられた小石の平原は、正しくはSagamihara Regioといいます。IAU承認地名として登録されているのは英語アルファベット表記です。なお、Regioを訳すと“地域”でしょうか。

さて、2007年5月現在、IAUで承認され“世界中で公に語ってよいとされている”地名を三つ紹介します (図1)。Sagamihara Regioは、すでに紹介しました。MUSES-C Regioは、「はやぶさ」の打上げ前のコードネームから採ったもので、日本語での愛称では発音をもじって“ミューゼスの海”と呼んでいます。そしてUchinoura Regioは、「はやぶさ」を打ち上げた場所、内之浦町から採ったものです。打上げ後、市町村合併により内之浦町の名前が消えてしまいましたが、このUchinouraは空の彼方で永遠に残ることになりました。現在、さらに角田や能代といった施設名や、小惑星イトカワを発見したチーム名のLINEAR、大気圏再突入カプセルを試験したNASAエームズ研究所の所在地から採ったMountainviewなどの地名が承認を受けるべく準備中です。まだしばらく息の長い作業が続きます。 (でむら・ひろひで)

イトカワにおける レゴリスの流動と分別

宮本英昭 東京大学総合研究博物館 准教授

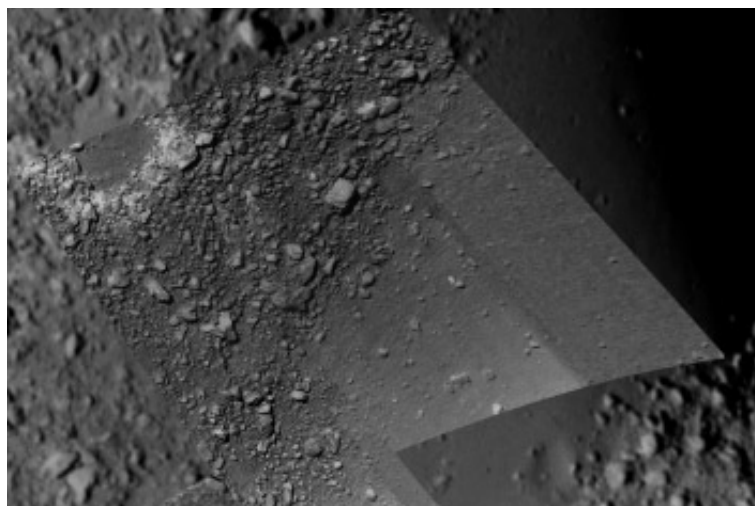


図2 イトカワの地滑り跡。左上の白い円形のクレーター（コマバ・クレーター）から右側の滑らかな場所（ミューゼスの海）へと土砂が流動したと考えられている。なお、この図は低解像度画像の上に高解像度画像を張り付けている。

惑星や衛星、小惑星など、固体でできている天体の表面は一般に表土で覆われていて、これを“レゴリス”と呼びます。例えば、月や火星など比較的大きな天体では、大小さまざまな大きさの岩塊が表面に降り注ぐことで地面が掘られ、次第に表土が粉碎され、レゴリスが形成されたと考えられています。こうした天体では表面の重力も大きく、巻き上げられた岩は衝突現場の付近に集まるため、レゴリスの粒度分布は場所によって異なっているようです。一方、小惑星の場合はどうかというと、重力がはるかに小さいために、岩塊の衝突で巻き上げられた岩は天体全土に均一に簡単にばらまかれると考えられます。確かに、これまで観察された小惑星（エロスやイダなど）は、比較的均一な見掛けを持っていました。しかし驚いたことに、「はやぶさ」が明らかにしたイトカワの表面は、岩の多い地域と滑らかな見掛けの地域とが混在していて、明らかにレゴリスに地域性があったのです。これは、なぜでしょうか？

私たちは、イトカワ全体が振動することでレゴリスが流動化したことが原因であろう、と考えています。私たちは、「はやぶさ」が取得した画像を徹底的に調べ、二つの重要な発見をしました。まず、イトカワは何度も振動していた、ということです。例えば、小さい砂利が大きな岩石の上にポツンと存在していてもよさそうなのですが、こうしたものは一切見つかりません。また、イトカワの小さい重力を考えると、岩石同士が引っ掛かって、すき間だらけで不安定に存在していても不思議はないのですが、すべての岩石は重力に対して安定な姿勢を保っていました。さらに、普通はきれいな円形を描くはずの衝突クレーターが、イトカワ上ではすべて不明瞭な形状をしています。こうした事実は、イトカワを覆っている岩石が、全体的に何

回も、おそらく長時間にわたって振動を経験していたことを示しています。

さらに重要なことに、私たちはイトカワ表面において、地球の地滑り地形とそっくりな地形をいくつも発見しました（図2）。イトカワの表面における重力を理論的に推定したところ、こうした地形が示す土砂の流動方向は常にその場の重力が働く向き（つまり傾斜）と一致していました。つまり重力に沿って土砂が流動するという地質学的現象が、イトカワの表面で生じていたのです。また、重力的に低い部分（すなわち、もし液体の水を置いたとしたら流れていったまる部分）に、必ず表面が滑らかな部分（ミューゼスの海など）が存在し、こうした部分の粒子サイズはイトカワ表層で最も小さい1cm程度の砂利であることが分かりました。なぜ、このようなことが起こったのでしょうか？

岩石などの粒子が集まって振動を受けると、流動化することが知られています。これを“粉体（的な挙動）”と呼びます。この物理は大変に複雑で、まだ完全に理解されているわけではありませんが、粒子が大きさなどに応じて分別されることはよく知られています。この現象によって、イトカワを構成している土砂は振動を受けるたびに、まるで“紙相撲”のようにじわじわと動き、次第に細かい部分がふるいにかけられたかのように分別されていき、低い部分に堆積したと考えられます。すなわち、イトカワ全土において土砂が流動化と移動を繰り返し、その結果として粒子の大きさによる分別が生じたわけのです。

今回発見された“天体全球のスケールで、土砂が粉体として運動していた証拠”は、長い太陽系探査の歴史においても初めての発見です。地球では全地球規模でその歴史を考えると、マントル対流によって地表面が次々と変えられてきました。しかし熱源を持たないイトカワでは、熱源の代わりに振動が生じることで、マントル対流のように粒子が流動し地表面が更新されていたのです。

さて、イトカワ以外の天体では、なぜこうした現象が発見されなかったのでしょうか？ 私たちは、イトカワがこれまで高精度で探査された天体の中で最も小さな天体であることに原因があると考えています。私たちの物理モデルによる計算では、イトカワほど小さな天体は、宇宙空間に無数にある小さな粒子が衝突することで、比較的簡単に全体的に振動することが分かりました。つまり何度も振動することができたので、イトカワでは土砂が流動化できたのだらうと考えています。（みやもと・ひであき）

ボルダーの衝突形成

中村昭子 神戸大学大学院理学研究科 准教授

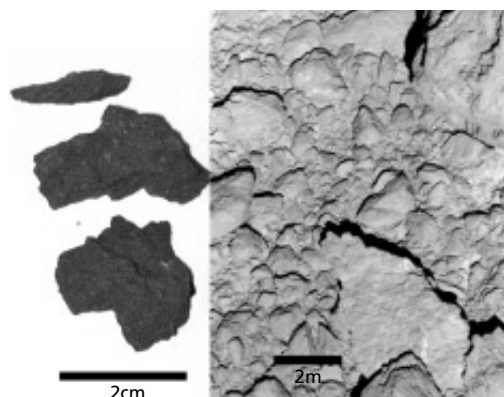


図3 玄武岩衝突破片(左)とイトカワ上のボルダー(右)

図4 ボルダー・ペアの例。一つのボルダーが割れてできたかのように見える。

小惑星は、火星と木星の間の小惑星帯において、お互い秒速数kmの速さで衝突して壊れていきます。衝突で生じた破片の一部は、互いの重力を振り切れずに再集積して、新たな小惑星を構成していると考えられています。このような天体は、研究者の間では30年も前から“ラブルパイル”と呼ばれていましたが、“これぞラブルパイル”という天体が見つかったのはイトカワが初めてです。イトカワの表面は大きさ・形ともさまざまな岩の塊で覆われています。ここでは過去の小惑星探査の例に倣い、大きな岩塊を“ボルダー”と呼ぶことにします。少なくとも最大級のボルダーは、イトカワ表面のクレーターから飛び出したものとは考えられません(本誌5ページ参照)。イトカワそのものをつくった母天体の衝突破壊時に新たにできた破片、あるいは、母天体にもともとあったボルダー(母天体上のクレーターからつくられたものかもしれません)と考えるのが自然です。このことは、イトカワのバルク密度が小さい、すなわち、内部を占める空隙の体積割合が大きいことと相まって、イトカワをラブルパイルとする根拠となっています。

小惑星が衝突でどのように壊れるか、破片がどのような速度で散らばるのかを調べるために、秒速数kmに加速した弾丸で岩石を破壊する模擬実験が行われてきました。模擬実験で壊すことのできる岩石試料の大きさは、ただ数cmです。小惑星のサイズは何桁も大きいので、実験室の結果をそのまま小惑星に適用するには限界があると考えられ、1990年

代の半ばごろからは室内実験の結果を参照した衝突破壊の数値シミュレーションが行われています。実際、実験室スケールでは自己重力で破片が集積する様子を再現することはできません。コンピュータの中でのみ、ラブルパイルをつくることができます。

実験室の結果と小惑星の衝突破壊過程の結果を直接比較することは可能でしょうか。実験室の衝突クレーター模擬実験、破壊実験でできた衝突破片は、小さな破片ほど数が急激に増していて、大きさと数の関係が簡単な“べき乗則”で表されています。イトカワの前に探査機が訪れた小惑星エロスについても、同様のべき乗則が見られました。今回、イトカワについてもボルダーをはじめとする岩塊のサイズごとの頻度分布が調べられ、従来とよく似たべき乗則で表されることが確認されています。

イトカワの画像では、単なるサイズ分布の比較だけではなく、ボルダーの形状を実験室での衝突破片のそれと詳しく見比べることができます。イトカワ上に見つかったさまざまな形のボルダーは、室内実験でできるいろいろな形の破片と、実によく似ています。図3はその一例で、クローズアップ画像で見た不規則形状のボルダーと実験室衝突破片を並べたものです。実験室での岩石破片は、ミクロなびびが音速の数分の1の速さで成長・合体してできると考えられています。イトカワ上のボルダーと実験室衝突破片の形の類似は、実験室で起こるのと同じような破壊の過程が、何桁も大きな規模で起きていることを示しています。

ところで、イトカワの表面には“ボルダー・ペア”、“ボルダー・ファミリー”と呼ばれる、大きな1個のボルダーが2〜3個に割れてできたかのように見える岩塊があります。図4に示す、イトカワをラッコに見立てた場合にラッコの手元の二枚貝に相当するボルダーは、ボルダー・ペアの例です。これらは、埋もれている大きな岩塊のどっぴりの一部が、そう見えるだけなのかもしれません。しかし、イトカワ上のボルダーが衝突破壊された痕跡の可能性もあります。すなわち、イトカワの表面で惑星間空間にさらされていたボルダーが小天体の衝突によって破壊され飛び散ったときに、イトカワ上に一部とどまったものである、などです。小惑星を構成するボルダーもまた、衝突で形成され、衝突で壊れていっているというわけです。(なかむら・あきこ)

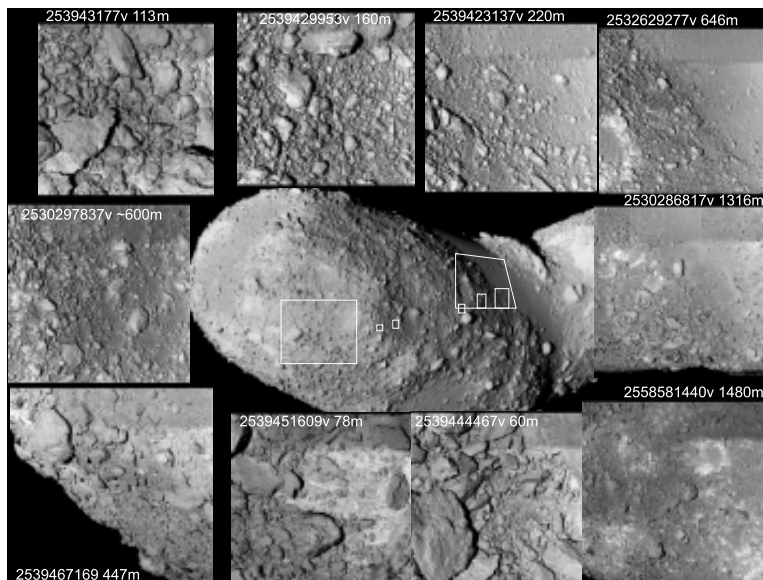


図5 イトカワの東側とその表面の一部のクローズアップ画像
(見やすくするため画像の偏光子の部分加工してある)
©東京大学総合研究博物館/JAXA

「はやぶさ」が小惑星イトカワを訪れた際、研究者の一番の驚きは、表面が非常に多くのボルダー(岩塊)や石で覆われていたことでした。図5はイトカワの東側を撮像したもので、その表面のクローズアップ画像をまわりに示してあります。まずはボルダーの地域別の特徴について見てみましょう。

小惑星の表面は、メートルサイズのボルダーが多く存在する“ラフ地域”と、センチメートル、ミリメートルの大きさの石、小石がそろって構成される“スムーズ地域”に分かれます。数m以上のボルダーの9割以上がラフ地域に存在しています。イトカワは、頭と胴体からなる特徴的な形状をした小惑星です。頭と胴体でボルダーの分布を調べたところ、単位面積当たりの数は頭の方が胴体よりも多いように見えますが、これは胴体にスムーズ地域が集まっているためで、頭と胴体のラフ領域だけ比べるとそれほど大きな違いはないと考えられます。また、20m以上のボルダーはイトカワの西側に偏っていますが、数m以上のボルダーの数で見ると東側と西側でほとんど差はありません。これらのことは、以前探査された小惑星と比べて、イトカワのボルダーがラフ地域に偏りなく散らばっていることを意味しています。しかしながら、ボルダーの分布についてはよく分かっていないことも多く、現在研究が進められています。

これら多くのボルダーは、どこから来て、どうやってできたのでしょうか。天体表面には隕石などの天体が絶え

ず衝突し、クレーターと呼ばれる穴がいくつも形成されます。ボルダーは、クレーター形成などの衝突を受けて飛び出した表面の破片が、天体の重力によって捕獲され、再び天体表面に降り積もることによってつくられます。この際、破片の捕獲には天体の重力が大きな影響を及ぼします。つまり、重力が小さいと、ほとんどの破片が天体から逃げていくことになるからです。イトカワはこれまで探査機が直接訪れた天体としては最も小さく(大きさが535×294×209m)、それより前に米国の探査機が訪れた小惑星エロス(大きさが34.4×11.2×11.2km)の約50分の1という大きさです。探査機が到着する前は、イトカワは重力が小さいため、飛び出した破片を捕獲することができないと、考えられてきました。つまり、のっぺらぼうの表面でもおかしくないと多くの研究者は考えていたわけです。ところが、イトカワの表面はこれまで見たことがないくらい多くのボルダーで覆われていたのですから、研究者は驚いたわけです。

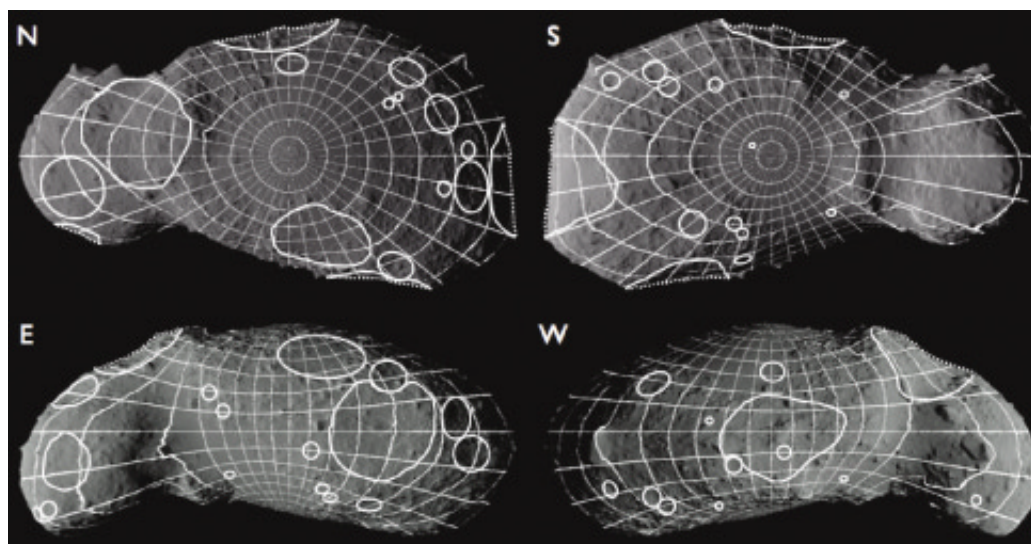
ボルダーの単位面積当たりの数は、小惑星エロスよりも多いことが分かっています。イトカワ以前に探査された小惑星のボルダーは、いずれもクレーター起源であると考えられてきました。イトカワの場合、それらの多くのボルダーをクレーター起源だけで説明できるのでしょうか。例えば、クレーター起源の場合、そこから生じたボルダーの大きさとクレーターの大きさには、ある関係性が成り立つことが知られています。小惑星エロスの場合は、最大のボルダーが約130mで、これは直径が約7.6kmのクレーターから生じたと、今までの関係式で説明することができます。ところが、小惑星イトカワの場合は最大のボルダー(愛称:由野台)が約50mと、全体の大きさに比べて大きく、イトカワ表面にある最大のクレーターを用いても、今までの関係式で説明することができません。つまり、クレーターの大きさに対してボルダーが大き過ぎるのです。またイトカワは、ほかの小惑星に比べてクレーターの数が少ないように見えます。そのため、クレーターの総体積に比べて、これまでの小惑星よりもボルダーの割合が大きいことが分かっています。

以上のことから、イトカワのボルダーがクレーター以外で多くつくられたこと、つまりイトカワよりもはるかに大きな母天体がほかの天体の大きな衝突を受けて大きく壊れ、その破片の一部が互いに集積し合って現在のイトカワを形成したのではないかと考えられています。(みちかみ・たつひろ)

イトカワの3次元形状

平田 成 会津大学コンピュータ理工学部 准教授

図6 イトカワの3次元形状モデルからつくった4面図。10度ごとの経緯線とクレーター候補の位置（本誌7ページ参照）を書き込んである。



“イトカワといえばラッコ”と、今ではすっかり有名になったイトカワの奇妙な形は、「はやぶさ」のランデブー探査で初めて明らかになったものです。しかし、実は地球からでも、遠く離れた小さな天体の形を推定することができるのです。イトカワのように細長くとがった形をした天体が自転している様子を地球から見ると、あるときには細長い辺が横向きに、また別のときにははとがった部分が地球の方を真っすぐ向いている、という状態になります。つまり、地球から見たときの大きさが、時期によって変わってくるのです。小惑星は非常に小さいので、普通の望遠鏡では光の点としか見えませんが、それでも大きさの違いを光の強さの違いとして観測することができます。この光の強弱のパターンから、小惑星の形、特にどれくらい細長いのか、という情報を引き出すことができます。この方法を“ライトカーブ法”といいます。また、電波を小惑星に当てて、跳ね返ってくる信号をとらえるレーダー観測によっても、小惑星の形を調べることができます。「はやぶさ」が到着する前は、レーダー観測が、イトカワの形を知る最も詳しい方法でした。しかし、ライトカーブ法やレーダー観測はイトカワのようにくびれた形を調べるのはなかなか難しく、あのラッコの形は、やはり「はやぶさ」のように探査機が近くまで行ってみないことには分からなかった、ということになります。

では、探査機が小惑星の写真を撮れば、すぐに形が分かるのかというと、これもそう簡単ではありません。人間の目と頭脳は優秀なので、写真を見れば何となく物体の形を脳裏に描くことができま

すが、コンピュータ上に正確な3次元形状を構築するためには、たくさんのデータ処理が必要です。「はやぶさ」ミッションの中では、三つのグループが独立にこの課題に取り組んでいました。それぞれのグループの手法は、処理にかかる時間や結果の詳しさに差があるので、ミッションの進行度に応じて一番適したグループの解析結果が使われていたのです。最初のグループは、イトカワのシルエット、つまり輪郭から全体の形を再現しようとしていました。これは最も簡単で早く結果を出すことができました。しかし、この方法もくびれの形状を求めるのには、あまり向いていませんでした。2番目のグループは、ステレオ視の手法を用いました。ステレオ視は、人間が左右の目で物体の形状を認識するのと同じ原理に基づくものです。

現在一番詳しいイトカワの3次元形状は、3番目のShape-from-Shading(影からの形状測定)という方法を使っています。白い布にしわが寄っていると、しわの凹凸に応じたさまざまな濃淡の影が生じます。この濃淡のパターンから凹凸の様子、つまり物体の形状を推定するのが、Shape-from-Shadingの原理です。画像で観測できる濃淡のパターンの細かさは、画像自体の解像度と同程度になるので、非常に細かい凹凸までとらえることができます。このようにしてつくられた3次元形状モデルからは、「はやぶさ」が実際には観測することのできなかった向きから見たイトカワの画像を、本物の画像そっくりにつくり出すことができます(図6)。

(ひらた・なる)

イトカワの 衝突クレーターを求めて

平田 成 会津大学コンピュータ理工学部 准教授



図7 イトカワの西半球のクローズアップ画像。矢印はクレーター候補地形。

望遠鏡で月を見ると、おわんのような丸い穴がたくさんあることが分かります。これは、隕石が秒速数kmから十数kmという高速で月の表面に衝突してきたもので、クレーターと呼ばれています。大気を持たない天体であれば、ほぼ必ずその表面にはクレーターが存在します。地球にクレーターがあまりないのは、厚い大気を通る際に小さい隕石は燃え尽きてしまうためと、一度できたクレーターも後の地質活動や浸食で次第に消えていってしまうためです。

イトカワには大気はありませんし、地質活動もほとんどないと思われていましたから、私たちはイトカワでもたくさんのクレーターを見ることになると予測していました。ところが意外にも、今までほかの天体で見慣れたおわん形のクレーターはほとんど見つかりませんでした。その後の詳しいデータ解析で、どうやらクレーターらしい、と解釈できる地形が存在していることが分かりましたが、そのような地形はイトカワ表面全体でたった38個しか見つかりません。しかも、これらが100%確実に隕石の衝突でできたクレーターなのかどうかは、研究者の間でもいまだに意見が分かれています。

なぜイトカワにはクレーターが少ない(ように見える)のでしょうか？ まず単純に、クレーターは見たままの数しかない、と考えることもできます。単純ではあるものの、この考え方に基づくと、イトカワを含む太陽系の中での衝突現象の生じる頻度について重要な考察を導くことができます。これについては別の記事を参照してください(本誌8ページ参照)。一方で、見たままの数以上にクレーターは存在するが見つけにくい、あるいは過去にはたくさんあったが現在は消えてしまっている、と考えることもできます。

イトカワで見つかったクレーター候補は、非常に特異な形状をしていることが分かっています。例えば、ラッコの“お尻”に当たるアルコーナ(旧称ウーメラ)地域はクレーターである可能性が高いと考えられています。イトカワの4面図(本誌6ページ参照)で明らかな通り、アルコーナは南北方向から見るとまわり比べてわずかにくぼんでいる一方、東西方向から見ると逆に膨らんでいます。つまり、この地域は馬の鞍のように、見る向きによってくぼんで見えたり、膨らんで見えたりしているのです。平らな地面の上のできるクレーターは、どの向きから見てもおわん形にくぼんでいます。ところが、イトカワのお尻のようにもともと丸みを帯びた形になっているところにクレーターができる場合、その形は元の地面の形に影響を受けてしまうのです。

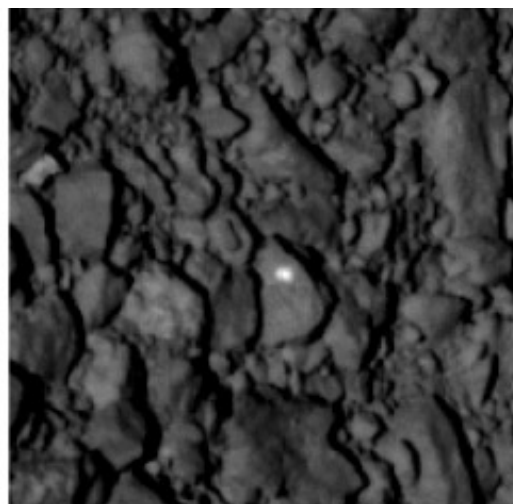
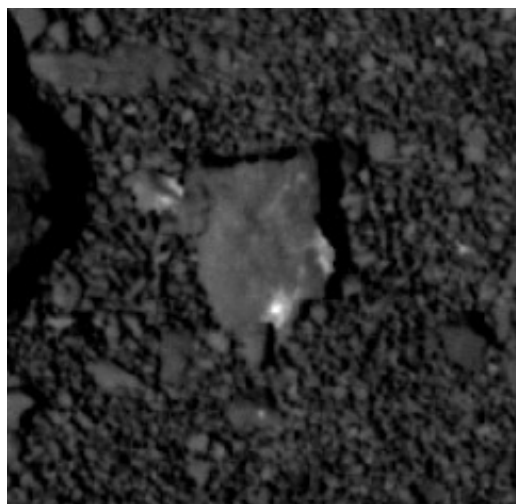
図7は、ラッコの背中に当たる地域の画像です。この地域にも、よく見るとクレーターらしき小さなくぼみが見つかります。小さいクレーターの場合には、相対的にはイトカワの地面も平らだと見なしても差し支えありません。それでも、ここに見つかるくぼみは非常に浅く、ほかの天体のクレーターに比べて半分ぐらいの深さしかありません。“ボルダー”と呼ばれる岩が散乱している中で、このような浅いくぼみを見つけるのは大変です。ただし、きちんと解析すればこのような特異な地形も発見できるので、単に“見つけにくいから”だけではクレーターの少なさは説明できそうにありません。

そもそもなぜ、イトカワで見つかるくぼみは浅いのでしょうか？ 初めは深かったとしても、後から土砂で埋まれば浅くなります。くぼみが土砂で埋まる現象は、イトカワ上で実際に観察されています。別の記事(3ページ参照)で説明されている通り、粒の小さい土砂はイトカワの表面でよく移動することが分かっています。土砂の移動による埋没が進行すれば、クレーターが完全に消えてしまうこともあり得るわけです。しかし、イトカワ上にたまっている土砂の層はあまり厚くなく、すべてのクレーターがこの働きで浅く埋められているというわけでもなさそうです。ですから、初めから浅いくレーターができる、すなわちクレーターはあまり消えていないという説も捨て切れません。この説を採用した場合、最初に述べたクレーターは見たままの数しかない、という結論につながります。いずれにせよ、イトカワのクレーターの実体を明らかにするためには、今後も詳細な研究が必要でしょう。(ひらた・なる)

イトカワはいつ、 どこからやって来たか？

中村良介 産業技術総合研究所 研究員

図8 最接近画像の一部。左は1.2m、右は3.2m四方をカバーしている。中心付近に写っている白い点は、微小天体の衝突によって形成されたクレーターだと考えられる。



月の表面には、宇宙空間から降ってくる物体の衝突によって、クレーターと呼ばれる円形のくぼみが形成されています。月を望遠鏡で見ると、ウサギの模様になっている暗い部分（海）と周囲の明るい部分（高地）では、クレーターの数がまったく異なることが分かります。高地には無数のクレーターが存在するのに、海にはあまりクレーターはありません。アポロ計画によって月から持ち帰られた岩石の分析から、「海は高地よりもずっと新しい」ということが明らかになりました。海は高地よりも後になってきたとすれば、衝突する天体の合計数が少なくなり、その分クレーターの数も減るのが当然です。このように月では、ある地域のクレーター数とその地域の形成年代を対応付けることができます。

月ほどは目立たないものの、イトカワにもクレーターはきちんと存在しています（本誌7ページ参照）。では、月と同様に、イトカワ上のクレーターの数とイトカワが形成された年代を対応付けることができるのでしょうか？ 実はほとんどの小惑星は、火星と木星の間に存在する“小惑星帯”と呼ばれる領域に存在しており、イトカワのように地球の近くにやって来るもの（地球接近小惑星）は少数派です。イトカワも、もともとは小惑星帯にいたと考えるのが自然でしょう。小惑星帯では、地球や火星近辺に比べて衝突する物体の数がはるかに多いため、同じクレーター数に対応する形成年代は、月よりもずっと若くなります。イトカワは、“母天体”と呼ばれるより大きな小惑星が破壊された後に、その破片が合体してできたと考えられています。イトカワ上のクレーターの数から、この母天体の破壊年代（＝イトカワの

形成年代）を見積もると、数千万～数億年となります。

イトカワ上の100mの大きさのクレーターは、数mの大きさの物体の衝突によってできたと考えられます。イトカワに衝突しなかった数mの物体の中には、最終的に地球に落下し、隕石となったものもあるかもしれません。イトカワの上のクレーターは、ある意味では、“隕石”の衝突によってできたということもできるわけです。また、「はやぶさ」の最接近画像には、数cm程度の小さな白い点がたくさん写っています。宇宙風化（本誌10ページ参照）によって暗くなった岩石の表面に、小さな物体が高速で衝突すると、クレーターの底には風化していない内部の明るい物質が露出するはずですが、図8に見える小さな明るい点は、こうした微小クレーターだろうと考えられています。

小惑星帯での衝突を免れた微小物体の一部も、隕石と同様に共鳴を通じて地球にやって来るはずですが、地表に到達する前に大気との摩擦で流星となって燃え尽きてしまうでしょう。またイトカワ自身も、数百万年すると地球やほかの惑星などに衝突してしまうと予測されています。実際、月の海に存在するクレーターのほとんどが、イトカワのような地球接近小惑星の衝突によって形成されたと考えられています。

このように、「はやぶさ」の取得した高解像度画像は、イトカワ本体はもちろんのこと、隕石や流星、月のクレーターの起源についても重要な情報を提供してくれているのです。

（なかむら・りょうすけ）

イトカワ表面のボルダーと隕石の組織・形態を比較する

野口高明 茨城大学理学部 准教授

平田 成 会津大学コンピュータ理工学部 准教授

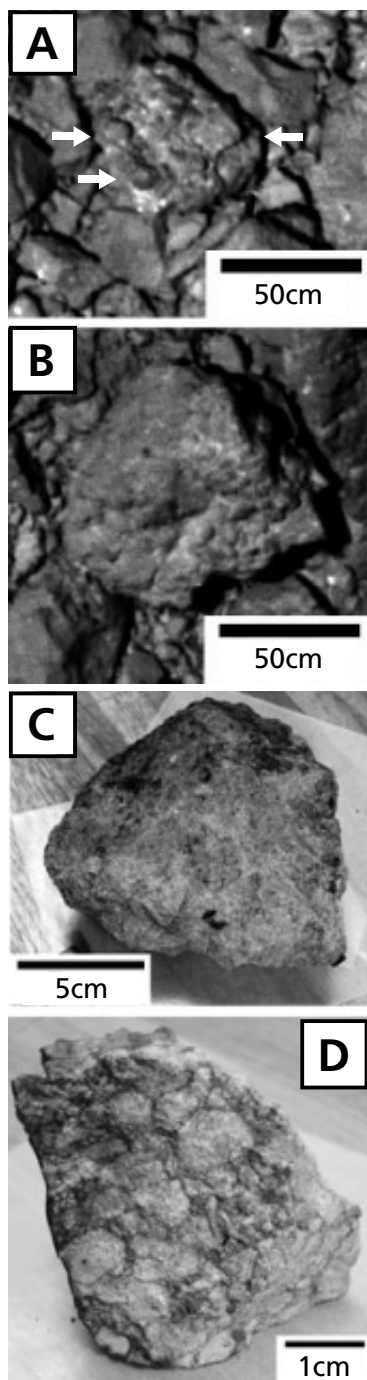


図9 イトカワ表面に見られるボルダー(AとB)と隕石(CとD)の組織

イトカワの表面には、さまざまな大きさや形態を持つ岩があります。その大きさは、最接近したときに撮影した画像の分解能より少し大きな数cm程度のもので、数十mにもなるようなものまであります。イトカワは、大きさ約40cmから数mの岩(“ボルダー”と呼ばれる)を詳しく観察するのに大変適した天体です。天体に近づいて写真撮影すれば表面の岩石の組織を観察できるのは当たり前だと思う方もいるかもしれませんが、ところが、大きさが数十kmある小惑星エロスでは、“レゴリス”と呼ばれる未固結の細かい物質で表面が覆われています。この物質は、隕石が高速衝突したときに小惑星表面が粉碎されてできます。ところが、イトカワのように小さな天体の場合では衝突によって岩石粉がつくられても、天体の重力が小さ過ぎて、天体から脱出してしまいます。だからこそ、我々はイトカワで初めて、ボルダーの組織を詳しく観察することができたのです。

イトカワの表面にはいろいろな組織を持ったボルダーが存在しますが、ここでは、数多く面白い組織を持っているものを紹介します。図9の写真Aでは、数cmから10cm程度の特徴的な凹凸がボルダー表面にいくつも見られます(右向きの矢印)。また、このボルダーの右端(左向きの矢印)から角の取れた丸い物体が外れかかっているように見えます。このボルダーは、こうした突き出している物体が集まってできているように見えます。一方、写真Bでは、写真Aで示したものよりボルダー表面に見られる凹凸の突き出し方は少ないですが、写真Aと同様に、数cmから10cm程度の物体が集まってボルダーをつくっているように見えます。

隕石のほとんどすべてが、小惑星からやって来たものと考えられています。隕石の中には写真Cや写真Dのように、周囲と明るさの違う部分がパッチ状になっているものがあります。パッチ状の領域は写真Cでは周囲より暗く、写真Dでは周囲より明るくなっています。周

囲の方が暗いかどうかは、隕石ができたときに加えられた衝撃の程度によります。こうした隕石は、すでに存在していた角ばった岩石の破片が集まってつくられたもので、“角礫岩(ブレッチャー)”といえます。写真Aや写真Bに見られる凹凸は、ブレッチャー隕石の岩石片に対応するのではないかと考えられます。

隕石との比較という観点からは、イトカワの経緯度の基準になっているブラックボルダー(以下BB)も興味深い存在です。BBはイトカワ上で見つかっているボルダーの中で特に黒い色をしています。宇宙風化作用も岩を黒く変化させますが、これは特定の岩ではなく表面全体をまんべんなく黒くするので、BBの黒さの原因はそれとは違いそうです。先に、ブレッチャー隕石の岩石片を埋めている物質の黒さが衝撃の程度で変わると書きましたが、強い衝撃を受けて全体が黒くなった隕石もあります。BBもその仲間とすると、黒さをうまく説明できます。

イトカワ表面の物質は、赤外反射スペクトルの解析からはLLコンドライト隕石に似た物質であるとされています。一方、X線蛍光分析からは、始原的エコンドライト隕石の可能性も捨て切れていません。隕石の組織からいうと、LLコンドライトはその50%以上がブレッチャーであるのに対して、今まで見つかっている始原的エコンドライトにはブレッチャーはないようです。写真Aや写真Bのボルダーがもしブレッチャーであるとなると、半分のボルダーはブレッチャーである可能性が高く、岩石の組織の比率の点からは、イトカワ表面の物質はLLコンドライトである可能性がより高いと考えられます。

最後に、このようなブレッチャーと考えられるボルダーがどこでできたか考えてみましょう。ボルダーはすでに存在していた岩石の破片が集まってつくられたものですが、現在のイトカワ表面でブレッチャーはつくれません。なぜなら、ブレッチャーを一つの固化した岩石にするためには、衝撃によって岩石片がわずかに溶けて岩石片同士を固着させなければなりません、イトカワは小さ過ぎてこの作用がほとんど起きないためです。すなわち、ボルダーはイトカワがつくられる前に、イトカワの母天体でつくられたことになります。これは、イトカワが巨礫の集まりであるというラブルパイルモデルとも整合的であるだけでなく、ボルダーの組織の解析からその形成史に具体的なデータを与えられると考えられます。

(のぐち・たかあき、ひらた・なる)

イトカワ表面の色と 反射率の多様性

石黒正晃 ソウル大学 助教

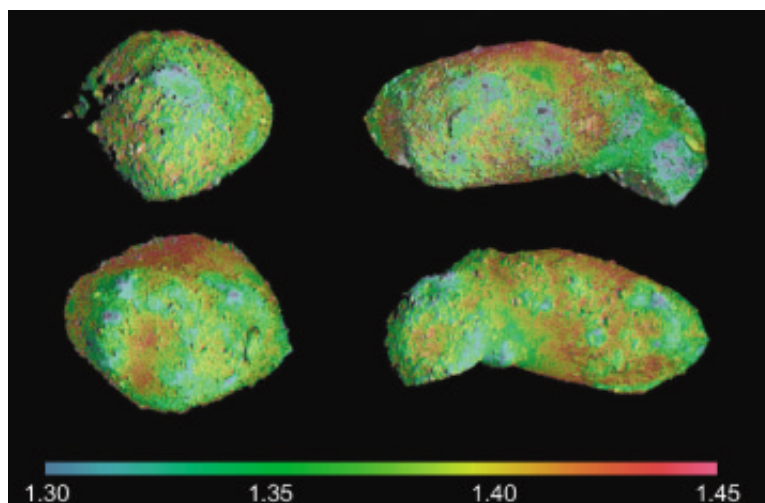


図10 波長 $0.76\mu\text{m}$ (赤)の画像を $0.41\mu\text{m}$ (紫)の画像で割り算した比演算画像(疑似カラー)

“イトカワ表面は、多彩でかつ明暗がはっきりしている”。これはほかの探査小惑星と異なる、イトカワの大きな特徴の一つです。実際に我々の肉眼でイトカワを直視すると、その色は月に似ていて、注意深く眺めない限りその多色性に気が付かないことでしょう。図10は波長 $0.76\mu\text{m}$ (赤)の反射率を $0.41\mu\text{m}$ (紫)の反射率で割り算した画像です。イトカワのこの波長間での反射率比が1.30から1.45の間にあることから、イトカワは全域にわたって赤っぽいことが分かります(反射率比1は白)。ここでは便宜上、長波長側の反射率が高い部分が赤く、長波長側の反射率が弱い部分が青色になるように疑似カラーを割り振り、本文中の色の記述も図10の疑似カラーに対応させています。

探査機が小惑星を訪れて多色観測した例は、「はやぶさ」以前に3件あります。ガリレオ探査機が観測したイダとガスプラは反射率が同様でしたが、わずかに色の変化が検出されました。探査機NEARシューメーカーによって観測された小惑星エロスでは反射率の異なる場所が見つかりましたが、色の変化はほとんど検出されませんでした。これらの小惑星の大きさは直径が10km以上であるのに対して、イトカワは1km以下と小さいので、場所による色や反射率の変化が見つからないであろうというのが大方の見通しでした。

ところが実際には、イトカワ表面の色と反射率には相関があることが分かりました。“青い部分は反射率が高く、赤い部分は反射率が低い”のです。色や反射率の多様性は、鉱物の組成の違いによって説明できます。しかしながら、「はやぶさ」搭載近赤外分光器の観測から、場所による鉱物組成には大きな違いがないことが分かっています。こうした色や反射率の関係は、最近に

なって注目を浴びている“宇宙風化作用”と呼ばれる現象で説明することができます。もともと、アポロ探査で得られた月面のレゴリスの反射スペクトルが月の反射スペクトルと異なることを説明するために、宇宙風化作用は提案されました。大気のない月やイトカワのような天体では、太陽からのイオン粒子(太陽風)や惑星間のマイクロメートルサイズの塵が高速で表面に衝突します。この衝突によって微小領域の加熱・蒸発といった現象が起こり、表面に10nm程度の微小鉄粒子が形成されます。この宇宙風化作用によって赤く暗くなることが、実験的にも理論的にも証明されています。

さて、宇宙風化という観点に立ってイトカワ表面の色や反射率の多様性を考えると、素直に観測結果を解釈することができます。イトカワはその形成以降、表面の薄い層が宇宙風化作用を受けて反射率が低下し、色も赤っぽく変化していきます。イトカワ全体が赤っぽく見えるのは、鉱物由来の色だけでなく、宇宙風化によるものだ解釈できるでしょう。後に小天体が衝突することによって、傾斜のきつい斜面やクレーター内壁で、宇宙風化を受けていない内部のフレッシュな物質が暴露されます。この部分こそが、図10の青く反射率の高い部分に対応しています。

ではいったい、どうしてイトカワの表面に宇宙風化度の大きな違いが見られるのに対して、小惑星エロスのような大きな小惑星には宇宙風化度の違いがあまり見られないのでしょうか。その一つの解釈として、レゴリスの有無が考えられます。通常、宇宙風化はレゴリス表面で起こると考えられてきました。大きな小惑星では、宇宙風化を受けたレゴリスがその全表面を覆って一様に風化しているように見えるのに対して、イトカワ表面にはレゴリスがほとんどないので、フレッシュな部分があらわに見えているのだと推測されています。イトカワの近接画像では、レゴリスによって覆われていないボルダー表面でも宇宙風化が起こっているように観測されています(本誌8ページ図8参照)。このような岩の表面で宇宙風化がどのように進行するのかはまだよく分かっていません。今後、室内実験が進むにつれて、イトカワの形成から今までの歴史が、宇宙風化という目を通して調べられることが期待されます。

最後に一言。“明るいところほどフレッシュだ”。そう考えながら本特集号に掲載されているイトカワの画像を見ると、形成以降、変化してきたイトカワの新しい一面が見えてきませんか？ (いしぐろ・まさてる)

イトカワの衝効果

横田康弘 セレーネプロジェクト 研究員

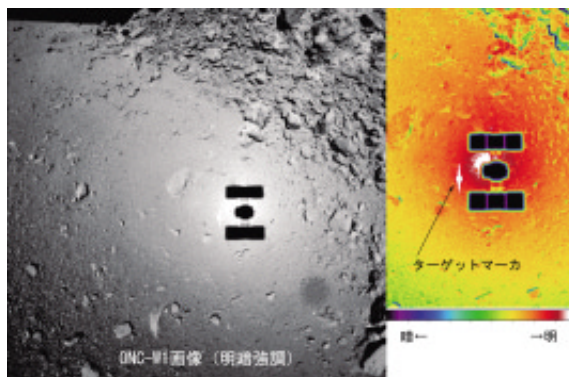


図11 ミューゼスの海の衝効果

皆さんは満月の夜、月の明るさに驚いたことはありませんか？ 満月は半月に比べて見掛けの面積が2倍ですが、明るさでは4倍以上です。太陽-天体-観測者がなす角度“位相角”がゼロ度に近づくときと急激に明るくなるこの現象は“衝効果”と呼ばれます。その原因の一つは、月面の砂粒がふわりと積もってできるミクロな凹凸です。観測者がこのくぼみをのぞき込むとき、影が視野に映る割合は位相角に応じて変わるため、マクロな月の明るさも変わります。多くの小惑星でも、

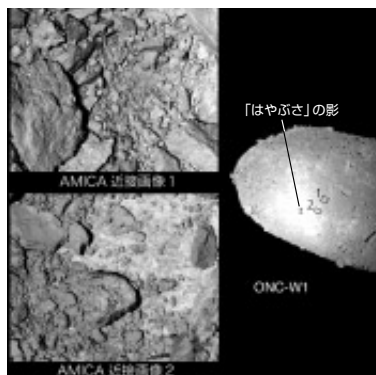


図12 岩石の多い地域での衝効果

これまで地上観測で衝効果が確認されてきました。

イトカワでも、「はやぶさ」により衝効果が確認されました。探査機による小惑星の衝効果観測は世界で初めてです。図11は、

広角光学航法カメラ(ONC-W1)

で得られたミューゼスの海の画像です。「はやぶさ」の影の本体左上隅にあるカメラ搭載位置(位相角ゼロ度)に向かって、イトカワ地表が明るくなっていることが一目瞭然です。通常、衝効果はレゴリスで覆われている天体の表面で起こると考えられてきました。しかし驚くべきことに、イトカワでは明らかにレゴリスで覆われていない場所(本誌3ページ参照)でも衝効果が観測されたのです(図12)。岩石表面で衝効果を起こすメカニズムの研究が今後の課題です。

(よこた・やすひろ)

イトカワの衛星サーベイ

布施哲治 国立天文台ハワイ観測所 研究員

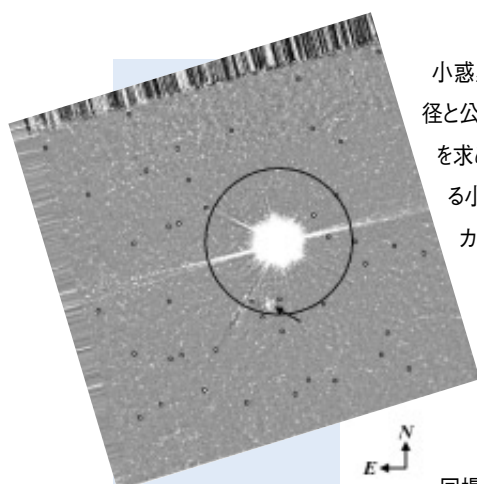


図13 大きな円はイトカワのヒル半径、小さな円は背景の恒星を示す。イトカワは明る過ぎるため、スパイク状のブルーミングが見られる。矢印はイトカワのゴーストを示す。(Fuse et al.)

小惑星のまわりに衛星が見つければ、その軌道半径と公転周期より、重要な物理量の一つである質量を求めることができます。これまでに衛星を伴っている小惑星が数十個も見つかっていることから、イトカワにも衛星の存在が期待されていました。

「はやぶさ」がイトカワに接近中の世界時2005年9月1日、マルチバンド分光カメラ(AMICA)を用いてイトカワの衛星探査を実施しました。観測はイトカワから約1700km離れた地点で2時間の時間間隔を空けて4回撮像しました。その距離におけるAMICAの視野は、イトカワ周辺でおよそ170km四方に相当します。一方で、太陽のまわりを公転する天体のまわりに、衛星が力学的に安定して存在し得る距離を“ヒル半径”と呼びます。太陽からの距離などによるヒル半径は観測時に33km程度であることから、AMICAの視野はヒル半径を十分にカバーしていました。

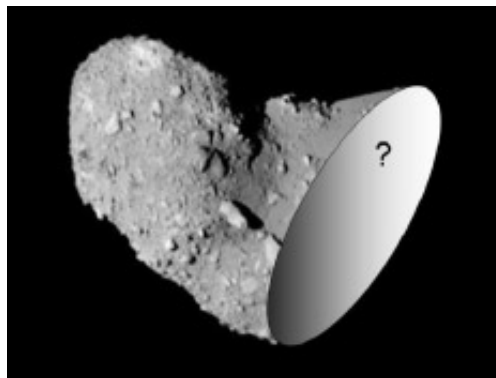
しかし、観測時に巨大な太陽フレアが発生したため、取得したデータには太陽から飛来した高速粒子による多数

のノイズがランダムに写りました。さらに探査機の姿勢を制御するリアクションホイールのトラブルにより、4回の撮像の間に探査機が少し回転しました。画像処理によりノイズを軽減した後、各画像の背景に写る恒星をカタログと比較同定し、恒星の位置に合わせて4枚のデータを重ね合わせたものが図13になります。その後、ランダムなノイズと区別しつつ、4枚の画像上のほぼ同位置に連続的に写るべき衛星を探しましたが、該当するものは発見できませんでした。

本観測の限界等級は、66.7秒の積分時間から約9.5等級と見積もっています。衛星がイトカワと同程度の反射率を持っていると仮定すると、イトカワ周辺にある1mクラスの天体が検出できる条件でした。イトカワの光に隠れて見えない領域も存在しますが、大きさ1m以上の衛星はイトカワに存在していない可能性が高いことになります。以上の結果は、「はやぶさ」によるほかの観測や、これまで行われてきた光学観測・レーダー観測から衛星が見つからない事実と矛盾のない結論を示しています。

(ふせ・てつはる)

図14 小惑星の内部をもっと知りたい



「はやぶさ」が探査した小惑星イトカワは、本特集で紹介されているように非常に面白い天体で、新しいさまざまな科学的事実をもたらしました。世界の小惑星研究者で、「はやぶさ」「イトカワ」の名前を知らない者はもはやいないでしょう。

これまで探査機が訪れた小惑星は、いずれも「レゴリス」と呼ばれる微細粒子に覆われていました。イダやエロスでは、表面に散在する岩塊が確認されましたが、小惑星上の衝突で内部から放出された破片と考えられており、天体の内部構造を直接は反映していません。大きさが1kmに満たないイトカワは、重力が小さく微細粒子のレゴリスは散逸したため、荒々しい岩塊に覆われた小惑星の裸の姿が、初めて明らかになったのです。イトカワの姿は、小惑星そのものが、大きな天体の衝突破片が集積した岩塊の集合体(ラブルパイル)であるという、これまで提唱されていたモデルを強く支持します。

リモートセンシング観測は大きな成果を挙げましたが、小惑星のサンプル分析という課題は残っています。赤外分光、X線分光の結果から、イトカワはLL型隕石の組成である可能性は高くなりました。これ

をサンプル分析によって確認したいのです。また、細かい粒子のレゴリスがないにもかかわらず、弱い宇宙風化は示しています。もし、「はやぶさ」が小岩片を持ち帰れば、その表面が宇宙風化を受けているかどうか、確認できるでしょう。

我々は、小惑星の数あるタイプのうち、S型という1種類の天体を探査した段階です。もう一つの小惑星の代表的タイプ、C型天体を調べるという大きな課題は残っています。C型小惑星もイトカワのような岩塊の積み重なり(ラブルパイル)なのか、それとも異なった姿なのか？ また、C型小惑星の物質は本当に炭素質隕石と対応しているのか？ さまざまな疑問があります。次のステップとして、C型天体のサンプルリターンを目指す意義は大きいでしょう。

サンプルリターン以外にも、小惑星の構造にはまだまだ調べるべき課題があります。イトカワは岩塊の積み重なりで、密度からは40%という高い空隙率が推定されています。次のステップとして、小惑星の内部がどのようなになっているのかを地震波や電波で調べてみたい。イトカワ表面の宇宙風化度の変化は、天体全体が揺さぶられた可能性を示しています。天体内部では岩塊の間に何らかの結合力が生まれているようです。また、イトカワと同じくらいのサイズの天体で、非常に自転速度が速く遠心力が自己重力を上回っている天体が発見されています。この高速自転小惑星は、巨大な(いわば一枚岩の)岩体であると考えられています。これが本当なのか、このような天体をフライバイで観測することも、興味深いと思います。

イトカワは小惑星科学の目的地ではありません。私たちは、広がる将来へ向けての一步を踏み出したにすぎないのです。(ささき・しょう)

JAXA宇宙科学研究本部 一般公開開催

7月21日(土) 10:00~16:30

詳しくは <http://www.isas.jaxa.jp/> をご覧ください。

ISASニュース No.315 2007.6 ISSN 0285-2861

発行/独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット(<http://www.isas.jaxa.jp/>)でもご覧になれます。

本特集号編集委員

石黒正晃・平田 成・吉川 真・橋本樹明・久保田 孝

デザイン/株式会社デザインコンピビア 制作協力/有限会社フォトンクリエイト

編集後記

「はやぶさ」が打ち上げられて4年が過ぎ、さまざまなドラマを体験した探査機「はやぶさ」は地球に向かって航行中です。ミッション期間中に得られた科学データは全世界に公開されています。本特集号では、画像データを中心に、詳細な解説付きでイトカワの素顔に迫りました。宇宙の不思議に興味を持ていただければ幸いです。(久保田 孝)

*本誌は再生紙(古紙100%)、大豆インキを使用しています。

R100

古紙配合率100%再生紙を使用しています

PRINTED WITH
SOYINK