特集「始原天体研究のこれまでとこれから:探査を仲介とした異分野交流」 イトカワの岩塊表面に分布する高輝度スポット: 年代決定に利用できるか?

竹内 洋人¹, 宮本 英昭¹, 丸山 智志¹

2010年1月19日受領, 2010年2月7日受理.

(要旨)小惑星は、一般には衝突と再集積を繰り返すなど様々な進化過程を経ていると考えられるが、こう した過程に関する時間スケールを知ることは容易ではない、小惑星に関連した年代の測定法としては、クレ ーター数密度に基づく表面年代、同位体分析に基づく放射年代、そして衝突確率と天体サイズで推定される 衝突寿命、といったいろいろな年代推定法が存在する、しかしながら、こうして与えられる年代が小惑星の 形成年代であるかというと、必ずしもそうではない、そこで、小惑星イトカワの高解像度画像で岩塊表面に 発見された高輝度スポットに着目した、高輝度スポットはマイクロクレーターと解釈できる、その数密度か ら岩塊の暴露年代を求められる可能性があり、小惑星進化を考察する新しい年代の尺度として利用できると 考えられる、

1. はじめに

小惑星とは、太陽系に存在する惑星や衛星以外の比 較的小さいが塵や隕石よりも大きな天体の中で、揮発 性成分が主な構成物ではなく、かつ塵やガスの放出を 伴わないものと定義されている [1]. 小惑星は太陽系 初期から続く小天体同士の衝突進化によって形成され たものが多いと考えられるため [2]、太陽系の形成時 において微惑星になりそびれたものや破砕された微惑 星が起源であったとしても、様々な進化過程を経てい ると考えられる [3]. これには衝突破壊や再集積、熱 変成だけでなく、太陽風や微小天体の衝突が原因とさ れる宇宙風化作用なども含まれる [4].

小惑星は多様な組成を持つことが古くから地上観測 で知られており、S型、C型など大きく分けると10種 類程度に分類される. 隕石の反射スペクトルを実験室 で測定することで、こうした地上から得られた小惑星 の反射スペクトルと隕石とを対応づけようとする試み が行われてきた. その結果、S型小惑星は普通コンド ライトに、C型小惑星は炭素質コンドライトに、V型 小惑星はエコンドライトに、などと対応付けることが できるとされている [5]. しかしこれには問題点も多 く指摘されている。例えば地上に落下する可能性が高 いと考えられる近地球型小惑星は、多くの場合LLコ ンドライトと類似した分光特性を持つにもかかわらず. LLコンドライトは全隕石中のたったの8%でしかない [6]. こうした矛盾点に対し、天体表面からの不均一な 熱放射によって軌道が変化するというヤルコフスキー 効果のような小惑星の大きさに依存した作用が、メイ ンベルトからの隕石と近地球型小惑星の輸送過程に影 響を与えたことが、小惑星の分布を決定するのに大き な役割を果たしたとする説もあれば [6]. 例えば宇宙 風化による小惑星表面の反射スペクトルの変化やレゴ リスの粒径の違いによる見かけ上の変化が原因である とする説もある [7,8]. こうした議論は、小惑星の表面 における進化過程を理解することが、小惑星の分布や 起源を考えるうえで重要であることを強く示している.

2. 小惑星表面年代の解釈

小惑星の内部や表層において,具体的にどのような 変化が生じているのか明らかにするためには,近距離 で表面を観測することが求められる.したがって地上 観測や隕石の測定だけではなく,探査機によって小

^{1.} 東京大学総合研究博物館

take-uchi0515@ninus.ocn.ne.jp



図1: 探査機によって観測された小惑星の最高解像度画像の一覧. 横軸は解像度を表しており、右に進むほど高解像度である. ガスプ ラ、イダ、マチルドの画像は比較的低解像度であるがクレーターがはっきりと確認できる. 特にイダやマチルドにおいてはクレー ターが飽和状態になっていると考えられている [8]. フォボスとダイモスの画像は比較的解像度が高く、特にフォボスにおいて はクレーターの周辺に岩塊が分布しているのを確認することができる. エロス、イトカワの画像は他と比較して非常に解像度が 高い. エロスでは岩塊があまり見られないが、イトカワでは岩塊が積み重なっており、岩塊の表面形状まではっきりと確認する ことができる.

惑星を直接観測することが重要となる.これまでに探 査機による観測が行われた小惑星は、ガスプラ、イダ、 ダクティル、マチルド、ブレイユ、アンネフランク、 エロス、イトカワ、シュタインが挙げられる.これに 彗星(ボレリー、ビルト2、テンペル1)や捕獲衛星と考 えられるもの(フォボス、ダイモス、ハイペリオン等) を加えると、一見数多くの天体が観測されたように見 受けられるが、実際はこうした天体の観測は、ほとん ど全てがフライバイ時に行われたものであって、ラン デブーして詳しく調べられた小惑星はS型の近地球小 惑星であるエロスとイトカワに限られている(図1).

フライバイで得られた画像の解像度は典型的には 数10 m/pixel (最高でも4 m/pixel)であったが [9, 10], それでも地上観測よりは桁外れに高い解像度であり, 小惑星の表面にクレーターを確認することができた ことは重要な進展であった.例えばガスプラは,表 面を覆うクレーターの数密度から,その表面はおよ そ2千万年から3億年が経過していると求められた [11]. イダやマチルドに至っては、クレーターの形成が飽和 状態であることから表面は相当古く、およそ10億年以 上が経過しているであろうと考えられている [12]. ラ ンデブーに成功したためにより高い解像度で撮像する ことができたイトカワは、メートルサイズ以上のクレ ーターの分布が明らかにされており、これからおよそ 7500万年から数億年という年代が得られている [13].

ここで興味深いのは、こうして求められた年代が何 を意味するのかが不明瞭である、という点である.確 かに月や火星など固体の地表面を持つ天体に対し、そ の年代計測手法としてクレーターの数密度と生成率か ら時間情報を得るクレーター年代学は発達している. しかし上の議論はこれをそのまま小惑星へとあてはめ たものであるため、その解釈は慎重に行うべきである. 少なくともエロスやイトカワにおいては、表面を覆っ ているレゴリスが流動しクレーターは消失していると



図2: (A)数cm程度の大きさの小石や岩塊を多数確認することができる.岩が互いに積み重なり,小さな石が大きな岩塊同士のあいだ を埋めるように配置されている.白い点は高輝度スポットの位置を示している.また,白い線で縁取られた岩塊は高輝度スポッ トをその表面に持つ岩塊であり,高輝度スポットを持たない岩塊は灰色の線で縁取っている.(B)はやぶさのタッチダウンが行 われたスムーズテレーン(滑らかな領域)であり,岩塊が少なく,解像度は非常に高いが高輝度スポットはそれほど確認できなかっ た.(C),(D)マッピングした高輝度スポットを拡大したもの.(C)は比較的円に近い形状であるが,一方で(D)は比較的細長い 形状を示している.

考えられているし [14],同様のプロセスは他の小惑星 においても一般的である可能性がある(単に画像解像 度の制約から知られていなかっただけかもしれない). するとその場合,クレーターを利用して求めた年代が どのような意味を持つのかがわかりにくくなってしま う.

小惑星の大きさや軌道などを考慮して小惑星の衝突 確率を導くことができるため、これをもとに年代を求 めることができる。例えばガスプラの大きさと軌道か ら、衝突寿命は2億年から10億年であると見積もら れているが[9]、これはクレーターによって予想され た年代と奇妙に調和的である点は注目に値する、イト カワにおいても、その近日点が1 AU 以下で地球軌 道を横切るような軌道を持つことを考慮した衝突寿命 は数百万年から数千万年と考えられており [15]、クレ ーターの年代と類似した推定値が得られている。ただ し小惑星はヤルコフスキー効果の影響などもあってそ の軌道が多分に不確定要素を持っているため [16]、こ れが本当に意味のある年代の推定値であるかどうか、 注意する必要がある.

隕石の多くは小惑星が起源と考えられているが、こ れらは同位体分析からかなり正確に年代を測定するこ とが可能となる場合がある。例えば小惑星ベスタにつ いては、ベスタ起源といわれている隕石の同位体分析 を行うことで、ベスタ表面を覆っていると信じられて いる溶岩流は太陽系形成後300万年以内に形成された と考えられている [17]. しかし当然のことながら、母 天体が明らかとなっている隕石試料は非常に限られて いるため、隕石から特定の小惑星の進化過程における 年代を明らかにすることは容易ではない.

3. 高解像度画像の意義

こうした状況を一変しつつあるのが,小惑星探査機 による高い解像度の画像の存在である.エロスで最高 11mm/pixel,イトカワで最高 6mm/pixel (図1)の画 像が得られたことによって,小惑星の地表面を構成し ている物質に関する研究が可能になったからである.

エロスやイトカワの高解像度画像を観察すると、その 表面は均一の表土で覆われているわけではなく、多数 の岩塊が存在していることがわかる [18,19]. この表面 構造は、これまでマチルドやイダなどから想定されて いたものと大きく異なるが、この違いが単に解像度の 差異に由来するものか、もしくはエロスやイトカワの 表面においてのみ確認できる特異な現象であるのかは よくわかっていない.しかし、センチメートルサイズ の大きさの岩片がはっきりと確認できるほど高解像度 な画像が得られたことは、以前の探査では行えなかっ た、全く新しい方向性の研究を可能としたと言える.

さて上に述べた理由から,小惑星について正確な時間 情報を取得するのは困難であるが,小惑星表層は常に 宇宙空間に晒されているため,高解像度画像で観察で きる表面に進化の形跡が残されている可能性がある.

よって小惑星表層の進化過程の年代を正確に理解する ことは、その進化過程を知るうえで重要であると考え られる.この年代推定に手掛かりを与えそうな形態的 特徴として、イトカワ上の岩塊表面に点在するセンチ メートルサイズの高輝度な箇所が挙げられる.

イトカワの岩塊には、比較的丸みを帯びたものから 角張った細長いものまで、さまざまな形態が見られる. また岩塊の表面形状も、波打ったように見えるものも あれば、逆に平らに見えるものも存在するなど、多様 である.私たちは、そのような岩塊の表面に、周囲と 比較して輝度が高く、一見小さな衝突痕のように見え る点や傷のような箇所が点在していることに注目して いる.これを本研究では高輝度スポットと呼ぶことに する (図2).

高輝度スポットはハヤブサの取得した22mm/pixel 以上の高解像度画像において岩塊表面に確認すること ができる.高輝度スポットは多数点在しており、中に は画像の輝度やコントラストを調整しなくても確認す ることができるものも存在する.これまでに高輝度ス ポットについて詳しい研究が行われたことは無く、こ の成因については謎とされてきた.私たちは現在、こ の高輝度スポットの形成起源について統計的な解析を 現在試みているが [20]、本稿ではその形態学的な特徴 について報告する.なお、高輝度スポットはエロス表 面の高解像度画像では今のところ確認できていないが、 これはおそらく単にその画像に写る領域に岩塊があま り存在していないことが原因であると筆者らは考えて いる.

イトカワの表面は起伏に富み [21], 岩塊自身の表面 が持つ傾斜も異なるため, 輝度値は条件によって変化 する. さらに高輝度スポットは比較的円に近い形状の ものもあれば, 細長い形状のものもある. そのため輝 度値や形状などに基づいて, 自動的に高輝度スポット を判別して抽出することは難しい. そこで私たちは岩 塊や周囲の輝度値との相対的な差異に基づいて, 手動 で丁寧に高輝度スポットを抽出した (図2C, D). 岩塊 の輪郭についても, 同様に抽出した. その結果, 高解 像度画像からおよそ400個の高輝度スポットを抽出す ることができたが, そこから明らかになった重要な発 見は, (1)高輝度スポットの大半は比較的円に近い形 状を持ち, (2)そのサイズは大きなもので 20 cm を超 えるが, 多くは数 cm から 10 cm 程度である, とい うことである.

ところでイトカワはハヤブサに搭載された近赤外線 分光器NIRSによって分光観測が行われており,その 吸収帯の特徴からイトカワの表面はカンラン石に富み, 普通コンドライト(特にLLコンドライト)に類似して いることが分かっている [22]. LLコンドライトに含 まれるコンドリュールの粒径は1 mm 程度であり,多 種のコンドライトに含まれるコンドリュールのうち 大きなものでも1 cm に満たないことが知られている [23]. 高輝度スポットとコンドリュールの大きさの違 いから,岩塊表面に露出したコンドリュールが高輝度 スポットとして見えている可能性は低いと考えられる.

私たちの計測によると、解像度が高い画像ほど多く

の高輝度スポットが確認できた [20]. これは解像度以 下の大きさで高輝度スポットが存在していることを意 味しており,その大きさが小さくなるにつれて対応す る高輝度スポットの個数は冪関数的に増加すると考え られる.月の岩石試料表面に見られるマイクロクレー ターも同様のサイズ分布を示すことから [24],上記の 理由も考慮して,高輝度スポットは微小天体や宇宙塵 の衝突によって形成されたマイクロクレーターである と考えられる [20].

これは非常に重要な発見であると私たちは考えてい る、というのは、イトカワの脱出速度は非常に小さく およそ10~20 cm/sであると推定されており [25],高 輝度スポットが1次クレーター形成時の放出物の落下 によって形成された2次クレーターの可能性は低いた め、火星や月などの大きな惑星と異なり小さなクレー ターであっても年代導出に用いることができる可能性 が高いからである. 高輝度スポットから得られる年代 は、クレーター年代学や衝突寿命、そして隕石の同位 体分析に基づく年代とは異なった推定値であり、おそ らく小惑星の表層における岩石の宇宙空間へ暴露され た年代を反映していると考えられる. すると高輝度ス ポットからの年代導出はこれまでに知られている年代 の導出方法を補完するものであり、惑星の形成過程を 正確に理解するためのよい手がかりになるものと考え られる.小惑星の表層において高い解像度の画像を取 得することは、こうした新しい方向の研究を行う事を 可能とするため、今後の探査においても、ここで報告 したような数 cm スケール程度のマイクロクレーター を認識できるほど、解像度が高い画像を取得すること が重要であると考えられる.

参考文献

- [1] Dermott. S. F. et al., 2002, AsteroidIII, 423
- [2] Cheng. A. F., 2004, Icarus, 169, 357
- [3] Bottke Jr. W. F. et al., 2002, AsteroidIII, 3
- [4] Hiroi. T. et al., 2006, Nature 443, 56
- [5] Roig. F. and Gil-Hutton. R., 2006, Icarus 183, 411
- [6] Vernazza. P. et al., 2008, Nature 454, 858
- [7] Clark. B. E. et al., 2002, Asteroids III, 585
- [8] Kitazato. K. et al., 2008, Icarus, 137
- [9] Sullivan. R. J. et al., 1996, Icarus 120, 119

- [10] Willner. K. et al., 2009, Earth and Planetary Science Letters, 10.1016/j.epsl.2009.07.033
- [11] Veverka. J. et al., 1994, Icarus 107, 2
- [12] Chapman. C. R. et al., 1999, Icarus 140, 28
- [13] Michel. P. et al., 2008, Icarus 200, 503
- [14] Richardson. J. E. et al., 2004, Science 306, 1526
- [15] Michel. P and Yoshikawa. M., 2005, Icarus 179, 291
- [16] Bottoke Jr. W. F. et al., 2002 Asteroids III, 395
- [17] Lugmair. G. W and Shukolyukov. A., 1998, Geochimica et Cosmochimica Acta 62, 2863
- [18] Chapman. C. R. et al., 2002, Icarus 155, 104
- [19] Yano. H. et al., 2006, Science 312, 1350
- [20] Takeuchi. H. et al., to be submitted
- [21] Abe. S. et al., 2006, Science 312, 134
- [22] Okada. T. et al., 2006, Science 312, 1338
- [23] Karla. E. K. et al., 1999, Icarus 141, 96
- [24] Schneider. E and Hörz. F., 1974, Icarus 22, 459
- [25] Fujiwara. A. et al., 2006, Science 312, 1330