

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20684019

研究課題名(和文) 微小重力下における地質現象の解明：振動は熱・衝突に次ぐ第三の地質プロセスか？

研究課題名(英文) Geological processes under an extremely small gravity: Effects of seismic-shaking

研究代表者 宮本英昭(MIYAMOTO Hideaki)
東京大学・総合研究博物館・准教授

研究者番号：00312992

研究成果の概要(和文)：小惑星イトカワの岩塊上にある高輝度の点に着目し、岩塊が10~100万年という極めて若い年代を示すことを示した。これは岩塊が幾度となく小惑星表面において流動化したとする研究代表者らの説と調和的である。さらに、3次元の複雑形状の粒子の分布を計算する数値シミュレーションコードを開発し、イトカワの高解像度画像における岩屑は幾何学的に飽和していることを示した。また、岩塊粒子の移動に関する理論的な研究を進め、特に静電気力による微粒子の浮遊効果が重要な意味を持つ事をあきらかにした。そして土星の衛星アトラスでは、その表面更新に主要な役割をはたしていることを示し、この現象が、実は微小重力下においては極めて重要な地質プロセスの一つであることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Detailed geological study of close-up images obtained by Hayabusa spacecraft reveal that some of the gravels hold bright spot, which indicate the age of surface blocks is 1-10Ma. This supports our view that the surface gravel is migrating occasionally on the surface of the asteroid Itokawa. We developed a numerical simulation code of three-dimensional rock particles with irregular shapes and find that the gravels in the close-up images obtained by Hayabusa spacecraft are geometrically saturated and thus their size-frequency distributions should be carefully used to discuss the internal structure of Itokawa. Also, we newly develop a theoretical model of migrations of gravels including electro-statically levitated fine particles. Our theoretical model indicates that the smoothness of Saturnian satellite, Atlas, can be explained by dust levitations, which might be the dominant resurfacing process on the surface of this satellite. This indicates that dust levitation can be another important global-scale resurfacing under an extremely small gravity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	12,200,000	3,660,000	15,860,000

研究分野：惑星地質学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：小惑星、レゴリス、惑星探査、粉体、数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

| 小惑星探査機「はやぶさ」の成功により、

小惑星表面におけるレゴリスに関する情報が著しく増加した。特にこれまで唯一、小惑星エロスにおいてしか、高い解像度で表面を観察した例が無かったが、イトカワの高解像度画像の取得は、レゴリス形成メカニズムを理解する上で、重要な情報源となった。

イトカワにおいて特に奇妙であった点は、地球の約1万分の1という微小な重力しか持たないにも関わらず、その表面において岩塊が多数存在していたことである。さらにその岩塊がかって流動化したことを示す証拠がいくつも見つかった。

さて岩石の集合体は、振動を受けると流動化することがある。地表面重力が小さい天体では、こうした流動化が特に容易に生じることを、研究代表者らは理論的に示し、これを小惑星イトカワにおける岩石流動化の証拠と共に、雑誌サイエンスで報告した。この中で、マンテル対流のように岩石が粒子対流をする可能性があること指摘したが、これは特に革新的であると同誌の *Perspective* (Asphaug, 2007) でも紹介されていた。

上の研究が注目を集めたのは、一般に惑星や衛星上の地質現象は、天体が熱を失う過程における受動的な結果に限られると考えられてきたからである。そのため完全に冷え切った小さな天体の表層が、上述の機構で活発に更新されたということは、まだ知られていない新たな地質プロセスの存在を予感させた。

2. 研究の目的

本研究では、上で議論した微小重力下における岩石の流動化というアイデアを発展させ、微小重力下における地質現象について知見を広げることが目的とした。特にイトカワやエロスだけでなく、さまざまな小さな小惑星・衛星の画像解析によって、こうした微小重力下における現象の系統的な理解を進めることと、数値モデルによってどのような現象が生じるか、またはどのようにしてリモートセンシングによって得られたデータを解釈すべきであるかを検討するとともに、理論モデルの構築を進めて微小重力下における地質プロセスを理解することを目的とした。

3. 研究の方法

小惑星イトカワの全ての近接画像を精査した。具体的には、表面に見られる全ての岩屑粒子をコンピュータソフト上で丁寧にマッピングすると共に、その表面状態について整理した。この際、岩石粒子の大きさ等の統計的な処理に留まらず、その形態や表面における様態についても注意深く観察を行った。

これと同様の研究を、小惑星エロスに代表されるさまざまな小惑星の探査データにつ

いても行った。さらに土星や木星の多数の小惑星の探査データも精査し、これらの表層に見られる粒子群としての特徴を抽出した。

粒子群を3次元的に扱う数値モデルを構築した。ここでいわゆるセルラーオートマトン的な手法を用いることで、複雑形状の多数の粒子を取り扱うことを可能とした。これを用いて統計的な解析を行った。この検証には、粉碎した土砂や川砂などを利用した室内実験を利用した。

こうして得られた知見を用いて、微小重力上における粒子の挙動に関する理論的モデルを構築した。

4. 研究成果

現時点では、高解像度の画像が取得されている小惑星は、イトカワとエロスに限られる。そこでこうした天体における岩屑の分布を、探査機によって取得された全ての画像を丁寧に検討することで調べた。その結果、合計2万個以上の岩塊の輪郭を抽出すると共に、その分布特性に対して次のような新たな知見を得た。①岩塊の表面に見られる形態的な特徴とその統計的分布から、岩塊の集合体の年代を推定できることを示した。②画像解像度による影響が少ない相対サイズ頻度分布を詳しく調べると、小惑星表層において岩塊の分布にある程度の地域性が見られることがわかった。③岩塊の分布は完全にフラクタル性を持つのではなく、ある程度の大きさより小さな岩塊の分布は、全体の傾向とずれていることが見いだされた。こうした特徴は、小惑星におけるクレーターの形成に伴ってレゴリスが作られるという従来の考え方は説明が難しく、現段階では岩塊の物質強度が大きく影響しているのではないかと考えられる。

さらに、ブライトスポットと名付けた著しく輝度の高い点を数多く認識した。さらに、形態のおよび統計的な検討から、これらがマイクロクレーターであることを明らかにし、このためブライトスポットの数密度を利用すれば、イトカワ表面に存在している岩塊の宇宙空間への暴露年代の尺度を得られることがわかった。従来、小惑星の年代に関する情報は非常に限られているため、この発見はとても重要であるだけでなく、私たちが提唱している岩塊の流動モデルを数値モデルによって検証する上で具体的な制約条件となるために、重要な発展であったと考えている。

複雑な粒子形状を取り扱うことのできるセルラーオートマトン法を用いた岩屑流動の数値コードを開発した。このモデルを用いて大規模な数値計算を行うために、並列化計算機を導入し、現在までにおいてもある程度の高速度に成功した。このコードで粒子流の挙動を正確に求めるにはまだ至っていない

が、たとえば近接画像にあらわれる粒子の分布を予想することはできるため、ハヤブサ探査機が取得した画像と比較した。その結果、こうした画像における岩屑は幾何学的に飽和しており、この画像にみられる岩塊粒子の大きさの頻度分布から内部構造を推定するには困難を伴うことが明らかになった。

本研究はさらに、岩塊粒子の移動に関する理論的な研究を進めたが、特に静電気力による微粒子の浮遊に関する研究を行ったところ、イトカワのような低重力下において、振動によって流動した微小粒子が、電気的な浮遊によって受ける影響が重要となることを明らかにした。この効果が最も強く表れる場所として、衛星アトラスをはじめとした土星系の小さな衛星が挙げられる。理論的な検討から、これらの衛星において、粒子の電気的な浮遊・移動の効果が表層のリサーフェシングプロセスとして支配的であることを明らかにした（現在国際誌に投稿中）。これはイトカワで提唱した粒子対流よりも現象としてははるかに大規模であり、微小重力下における粒子の挙動という意味で革新的な発見であった。そのため本研究が最大の目的として掲げていた、微小重力下における地質現象という新しい分野の開拓という意味において、重要な貢献を行うことができたと考えている。こうした新しい現象が見つかったため、将来的には次期小惑星探査計画などを通じて実地検証を行う必要がある。そこで電磁波を用いた地下構造探査の手法を検討した。特に実験室において基礎実験を行い、適切な周波数帯を選択することができたことが重要な成果であった。また、粒子流動の研究を進展させることで、火星における砂の流動に関する新しいモデルを提唱し、国際誌に掲載された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 8 件）

①Haruyama, J., Ohtake, M., Matsunaga, T., Morota, T., Honda, C., Yokota, Y., Pieters, C. M., Hara, S., Hiroki, K., Saiki, K., Miyamoto, H., Iwasaki, A., et al., Lack of exposed ice inside lunar south pole Shackleton Crater, *Science*, 322, 938-939, 2008

②Hirata, N., Barnouin-jha, O. S., Honda, C., Nakamura, R., Miyamoto, H., Sasaki, S., Demura, H., Nakamura, A. M., Michikami, T., Gaskell, R. W., and Saito, J., A survey of possible impact structures on 25143

Itokawa, *Icarus*, 200, 486-502, 2009

③Haruyama, J., Ohtake, M., Matsunaga, T., Morota, T., Honda, C., Yokota, Y., Abe, M., Ogawa, Y., Miyamoto, H., Iwasaki, A., et al., Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE terrain camera, *Science*, 323, 905-908, 2009

④Noguchi T, Tsuchiyama A, Hirata N, Demura H, Nakamura R, Miyamoto H, Yano H, Nakamura T, Saito J, Sasaki S, Hashimoto T, Kubota T, Ishiguro M, Zolensky ME, Surface morphological features of boulders on Asteroid 25143 Itokawa, *Icarus*, 206, 319-326, 2010

⑤竹内洋人, 宮本英昭, 丸山智志 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？, 日本惑星科学学会誌, 19, 23-27, 2010

⑥野口高明, 平田 成, 土'山 明, 出村裕英, 中村良介, 宮本英昭, 矢野創, 中村智樹, 齋藤潤, 佐々木晶, 橋本樹明, 久保田孝, 石黒正晃, マイケル・E・ゾレンスキー, 小惑星イトカワ表面に存在する岩塊の表面組織の解読 -小惑星のフィールド岩石学の試み-, 日本惑星科学学会誌 19, 12-22, 2010

⑦Rodriguez, JAP, Tanaka, K. L., Berman, D. C., Zimbelman, J. R., Kargel, J. S., Sasaki, S., Yan, J. G., Miyamoto, H., The sedimentology and dynamics of crater-affiliated wind streaks in western Arabia Terra, Mars and Patagonia, Argentina, *Geomorphology*, 121, 30-54, 2010

⑧Dohm, J.M. Miyamoto, H., et al, An Inventory of Potentially Habitable Environments on Mars: Geological and Biological Perspectives, Special Edition of Geological Society of America, 印刷中

〔学会発表〕（計 17 件）

①宮本英昭、小天体の表層プロセスと内部探査の重要性、シンポジウム「はやぶさ後継機にむけた太陽系小天体の科学」、2008年8月27日、JAXA相模原キャンパス

②春山純一、西堀俊幸、宮本英昭、小惑星探査で何を知らたいかーレーダー探査への期待ー、シンポジウム「はやぶさ後継機にむけた太陽系小天体の科学」、2008年8月28日、JAXA相模原キャンパス

③Hirata, N., S. Abe, M. Ishiguro, K. Kitazato, R. Nakamura, H. Miyamoto, H. Demura, M. Abe, S. Sasaki, S., Geologic processes on the surface of a small asteroid Itokawa, 71st Annual meeting of Meteoritical Society, 2008年7月30日, 松江

④竹内洋人、宮本英昭, 高解像画像に見られるイトカワ上の bright dot の分布, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 29 日, 幕張

⑤竹内洋人、宮本英昭, イトカワの岩塊にみられる高輝度スポット: 形態の分類と岩塊のサイズ分布, 日本惑星科学会秋期講演会, 2008 年 11 月 1 日, 博多

⑥Takeuchi, H., H. Miyamoto, and M. Oku, Distributions and Morphological Characteristics of Bright Spots on Boulders Covering the Surface of Asteroid Itokawa, Lunar and Planetary Science Conference, 2009 年 3 月 15 日, 米国・テキサス州

⑦竹内洋人, 宮本英昭, 奥元良, 丸山智志, イトカワの岩塊表面に見られる高輝度スポット: 形成過程と岩塊の年代, 日本惑星科学会秋期講演会, 2009 年 9 月, 東京

⑧丸山智志, 宮本英昭, 竹内洋人, イトカワにみられる岩塊の統計的解析: 表層物質の逆分級, 日本地球惑星科学連合大会, 2009 年 5 月 26 日, 千葉県

⑨竹内洋人, 宮本英昭, 丸山智志, 小惑星イトカワの岩塊表面に見られる高輝度スポットの分布と形態的特徴, 日本地球惑星科学連合大会, 2009 年 5 月 26 日, 千葉県

⑩Takeuchi, H., Miyamoto, H., Maruyama, S, Origins of Bright Spots on the Surface of Boulders Covering Asteroid Itokawa, Lunar and Planetary Science Conference, 2010 年 3 月, 米国

⑪Maruyama, S., Miyamoto, H., Takeuchi, H., Oku, M., Evidence for Global-Scale Inverse Grading of Regolith Materials on Asteroid Itokawa, Lunar and Planetary Science Conference, 2010 年 3 月, 米国

⑫Noguchi, T., Tsuchiyama, A., Hirata, N., Demura, H., Nakamura, R., Miyamoto, H., Yano, H., Nakamura, T., Saito, J., Sasaki, S., Surface morphological features of

boulders on Asteroid 25143 Itokawa, Lunar and Planetary Science Conference, 2010 年 3 月, 米国

⑬丸山智志 宮本英昭 竹内洋人, イトカワにみられる岩塊の統計的解析: 表層物質の逆分級, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 26 日, 幕張

⑭平田直之、宮本英昭, 土星系の小型衛星アトラスの地形と進化, 月惑星科学シンポジウム, 2010 年 8 月 5 日, 相模原市

⑮渡邊宏弥、宮本英昭, 西堀俊幸, 固体天体用地中レーダー(GPR)システムの検討と開発, 月惑星科学シンポジウム, 2010 年 8 月 5 日, 相模原市

⑯平田直之、宮本英昭, 光化学反応によるイオの硫黄濃集機構, 日本惑星科学会 2010 年秋季講演会 2010 年 10 月 6 日, 名古屋市

⑰Hirata, N. and Miyamoto, H., Unusual smoothness of the surface of a saturnian icy satellite, Atlas, Lunar and Planetary Science Conference, 2011 年 3 月 15 日, 米国・テキサス州

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本英昭 (MIYAMOTO, Hideaki)
東京大学・総合研究博物館・准教授
研究者番号：00312992

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし