

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287114

研究課題名(和文)高精度形状モデルを基盤とした小惑星地質活動の解析

研究課題名(英文)Analysis of geological activities of asteroids using high definition shape models

研究代表者

平田 成(Hirata, Naru)

会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授

研究者番号：80372655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小惑星高精度形状モデル構築手法の確立、小惑星3次元地理情報システムの構築などの技術的目標を達成させる事で、小惑星イトカワのデータ解析の基盤を構築し、イトカワを代表とする rubble-pile 小惑星の実態を明らかにすることを目指した。

その結果、SPC法とSfM法を組み合わせた迅速かつ高精度の形状モデル構築手法を確立した他、小惑星向け3D-GISの開発に成功した。これらの基盤を活かしてイトカワ探査データの解析を進め、表面の衝突地形の分布から、数Myr前にイトカワの全球を更新するイベントが起きていた可能性が示唆された。これは、イトカワの回収試料の分析結果とも矛盾しない。

研究成果の概要(英文)：We developed a method for high resolution 3D shape reconstruction of asteroids with a combination of SPC and SfM methods and a 3D geographical information system for asteroid data analysis. By utilizing these research environment, we analyzed image data of the asteroid Itokawa taken by the Hayabusa spacecraft to reveal new views on a small rubble-pile asteroid. We describe a resurfacing history of Itokawa by impact events. It is suggested that Itokawa was suffered by a global resurfacing event on several Myr ago, which is consistent with evidence from samples recovered from Itokawa.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 形状モデル 3次元地理情報システム Stereo photogrammetry Structure-from-Motion 衝突現象

1. 研究開始当初の背景

小惑星イトカワに対する探査機はやぶさによる接近観測により、1) イトカワが特異な全体形状と 40%以上の空隙率を持つ、rubble-pile 構造の小惑星であること (Abe et al., 2006)、2) 隕石衝突などで励起された振動 (seismic-shaking) により、表層物質の移動と分級が起き、rough terrain と smooth terrain からなる地形上の二分性が生じている (Miyamoto et al., 2007) ことなどがわかった。さらに、はやぶさが地球に持ち帰ったサンプルの分析から、現有の隕石コレクションとその母天体である小惑星との関係が明確化されたのみならず、イトカワのような小サイズの rubble-pile 小惑星の母天体のサイズや、現在のイトカワ上での宇宙風化や物質移動のタイムスケールに対する制約が得られている。

このような研究の進展とともに、新たな課題も明らかになった。イトカワは rubble-pile 構造を持つことに加えて、頭部と胴部の二大ブロックから成る contact binary であるとも言われている (Fujiwara et al., 2006; Demura et al., 2006)。しかし、各ブロックを構成する rubble (母天体の衝突破壊破片) のサイズ頻度分布や、rubble の配置状態など、詳細な内部構造はわかっていない。rubble-pile 天体は、母天体の衝突破壊後に相対速度の近い破片が再集積することによって形成されると考えられている。つまり、現在イトカワを構成する rubble のサイズ頻度分布がわかれば、小惑星帯における衝突破壊現象で生じる破片のサイズと速度の頻度分布に制約を与えることになる (科学的目標 1)。

また、イトカワには宇宙風化の進行度の差による反射スペクトルとアルベドの地域差がある (Ishiguro et al., 2007)。イトカワで最も顕著な低宇宙風化度の領域は、頭部と胴部の接合部に位置する、斜度が大きく土砂が対流しにくい地域に存在しているため、seismic-shaking による物質移動が宇宙風化進行度の地域差を生む原動力の一つであると考えられている。一方で、斜度の大小とは必ずしも関係なく、宇宙風化度が低い領域が存在している。地形的に盛り上がった ridge 地域はその一例である (Sasaki, personal comm.)。表層物質の地域差は、基本的には宇宙風化の進行と、物質移動を含む種々の小惑星表層における地質活動の進行との兼ね合いによって生じる。さらに、小惑星のサイズを考慮すれば表層の地質活動は前節で述べた小惑星の内部構造とも密接に関連しているはずである。従って、宇宙風化度の地域差の分布を正確に把握して、その原因について考察することで、天体全体の地質構造・地質活動に関する理解を深めることができる (科学的目標 2)。

2. 研究の目的

本研究計画の科学的目標は、小惑星探査機

はやぶさで得られたリモートセンシングデータを用いて、小惑星イトカワの形状、表層環境と内部構造に関するモデルを構築し、小惑星全体の地質活動について理解することである。さらに、目標達成のための3つの技術的課題である、小惑星高精度形状モデルの構築手法の確立、小惑星表面アルベドマップの作成、観測データとモデルを統合して解析可能な小惑星用三次元地理情報システムの開発にも取り組む。最終的には、イトカワサイズの小惑星の表層から内部に到る全体像を理解し、太陽系小天体の起源と進化に新たな制約を与える知見を得る。また、本研究の成果は2014年打ち上げのはやぶさ2計画に備えた観測データ解析手法の確立と、データの科学的解釈のための基盤を与えることにも繋がる。

3. 研究の方法

本研究では、小惑星イトカワのデータを解析することで、以下の二つの科学的目標を達成し、イトカワを代表とする rubble-pile 小惑星の実態と、その生成環境についての理解を深めて太陽系における小天体の進化に関する新たな知見を得ることを目指す。

科学的目標(1) イトカワを構成する rubble のサイズ頻度分布の解明：全体形状、ローカル地形、密度モデルと整合性のあるイトカワの rubble 配置モデルを構築し、rubble のサイズ頻度分布を明らかにする。

科学的目標(2) 宇宙風化度の地域差の分布の把握と天体全体の地質構造・地質活動に関する理解：反射スペクトルとアルベド地域差分布を解析し、地形特徴などとの関係を把握することで、イトカワの宇宙風化と小惑星地質活動環境を解明する。

さらに、この科学的目標を達成するための技術開発課題として、まず小惑星探査データの特徴を考慮した解析環境の構築を行う。小惑星のように複雑な形状を持ち、表面地形・地質のバリエーションがある天体の観測データのための解析環境は、地球や月のリモートセンシングデータや天文観測データ解析の環境とは大きく異なる。そこで、データ解析技術開発に関わる以下の3つの課題に取り組み、その成果を活用して最終的な科学的目標の解決を目指す。

技術開発課題(1) 小惑星高精度形状モデル構築手法の確立：現在広く用いられている小惑星イトカワの標準形状モデルは Gaskell et al. (2006) で作成された Gaskell モデルである。本モデルは海外研究者の手になるもので、作成手法がブラックボックス化されていることから精度評価に難があるため、改めて作成手法の明確な高精度形状モデルの構築手法を確立させる。

技術開発課題(2) 小惑星表面形状と表面ア

ルベドマップの同時推定手法の確立：画像から物体の表面形状を推定する Shape from Shading 法を用いて、課題(1)による手法では対応できない小スケールの小惑星表面形状と表面のアルベドマップを同時推定する手法を確立させる。

技術開発課題(3) 高精度形状モデルを基盤とした小惑星 3 次元地理情報システムの構築：小惑星を 3D-CG で表現し、その表面に地図情報を表示する 3 次元地理情報システムを開発し、高精度形状モデル、アルベドマップや過去の研究で得られた種々の地図情報を統合して、小惑星表層と内部構造の直感的な解析を行うことが可能な環境を整備する。

4. 研究成果

平成 25 年度：

3 つの技術的課題を解決するソフトウェア開発と、その検証作業を行った。

技術開発課題(1)では、はやぶさ初号機の画像データセットなどを用いて、オープンソースソフトによる小惑星形状推定を試み、その精度検証を行うとともに、はやぶさ 2 における観測計画へのフィードバックを行った。その結果、bundler と PMVS2 による形状推定手法は、探査ミッション初期のモデル構築に充分使用可能である事が分かった。

技術開発課題(2)では、データ取得時の日照条件が現実的なレベルにまで緩和された新しい Photometric stereo 法による表面形状と光散乱モデルの同時推定手法を開発し、試験実装を行った。また、各手法の精度検証を行うための設備として、物体の三次元形状を直接取得可能な 3D スキャナを導入した。

技術開発課題(3)では、既存の小惑星 3 次元地理情報システム (AiGIS) を改良し、小惑星表面地質の分布が解析可能とするようにする事ができた。

さらに、当初は平成 26 年度に着手する予定であった化学的目標の解決に向けたデータ解析を開始している。その結果、小惑星表面の重力ポテンシャル分布と表面地質の関係が明らかになりつつある。また、主成分分析法を用いて、宇宙風化度の地域差の分布の把握を行う事も始めている。

平成 26 年度：

技術開発課題(2)に関わる小惑星高精度形状モデルの構築方法に関して、主に Photometric stereo 法、ボクセルベース形状復元法について検討を進めた。各手法の精度検証の方法として、小惑星模型を撮像したテスト画像を用いる事とした。模型の撮像は、今年度導入した平行光源装置での照射下で行われ、宇宙空間での撮像条件を模擬している。模型の形状は、昨年度導入した 3D スキャナを利用して高精度で測定されているため、この 3D スキャナデータをリファレンスとして、画像から復元した形状モデルの精度

評価を行える環境を構築できた。また、昨年度検討した bundler と PMVS2 で用いられている Structure-from-Motion (SfM) 法についてより洗練された実装が行われた商用ソフト (Agi PhotoScan) を導入し、精度検証を開始した。

技術開発課題(3)で掲げた小惑星 3 次元地理情報システム (AiGIS) の更なる改良を進め、実用性のあるツールとする事ができた。また、これまで、スタンドアロン動作するツールを Java で開発していたが、今年度ではこれに加えて JavaScript と WebGL 技術を用いたウェブアプリケーション版を開発した。これにより、より柔軟にデータの閲覧と解析が行えるようになった。

科学的解析では、昨年度から着手している小惑星表面の重力ポテンシャル分布と表面地質の関連に関する解析と、マルチバンド画像データを用いた主成分分析による宇宙風化度の解析を引き続き実施した。また、イトカワの rubble 配置モデルを構築するための解析を開始した。

平成 27 年度：

技術開発課題(1)と技術開発課題(2)について、これまでブラックボックス状態であったいわゆる Gaskell モデルの作成手法である Stereo Photoclinometry (SPC) のソースコードが、はやぶさ 2 プロジェクトと米国の小惑星探査計画 OSIRIS-Rex プロジェクトとの間で締結された協力関係のもとで提供されることになった。これは本科研費プロジェクトの直接的成果ではないが、目標の変更を強いつつも、大きな前進となる変化である。また、これまで検討していた SfM 法も、SPC 法による処理の前段階の処理として用いる事で、SPC 法の処理時間を大きく短縮する可能性がある事が確認された。Photometric stereo 法、ボクセルベース形状復元法は、本科研費の研究期間中では SfM+SPC 法を置き換えるレベルの完成度まで開発を進める事ができていないが、今後も研究分担者のレベルでは研究を継続する事とした。

技術開発課題(3)については AiGIS の改良をさらに進め、小惑星の地理情報、地形情報に基づく解析結果を形状モデル上に直接記録できる機能の追加を行った。

科学的解析については、小惑星イトカワ表面の衝突地形の分布から、イトカワ表面の年代を推定し、イトカワの形成史を記述する事ができた。イトカワ表面は多数の粗粒物質に覆われているため、通常天体表面での衝突地形形成についての知見を直接適用することは難しいが、イトカワ表層環境を模擬した衝突実験からイトカワ表面における衝突クレータ形成のスケーリング則を構築し、表面年代の推定に用いた。その結果、数 Myr 前にイトカワの全球を更新するイベントが起きていた可能性が示唆された。これは、イトカワの回収試料の分析結果とも矛盾しない。一

方,イトカワを構成する rubble 配置モデルを構築するための解析のため,前年度よりイトカワ表面地形の詳細なサーベイを行って,rubble の露頭をトレースする作業を行っていたが,研究期間内に完了できていない.予備的な結果からは,イトカワは比較的大サイズかつ少数の rubble から構成されていることが示唆されているが,露頭サーベイを引き続き行う事でこの予察が正しいかどうかの検討を進めたい.

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 4 件)

Tomohiro Ishii, Yoshihiko Mochizuki, Hidemoto Nakada, Ryosuke Nakamura, and Hiroshi Ishikawa, 2015, Surface Object Recognition with CNN and SVM in Landsat 8 Images, The 14th IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2015), 341-344, DOI: 10.1109/MVA.2015.7153200.

Naoki Kobayashi, Yuji Oyamada, Yoshihiko Mochizuki, and Hiroshi Ishikawa, 2015, Three-DoF Pose Estimation of Asteroids by Appearance-based Linear Regression with Divided Parameter Space, The 14th IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA 2015), 551-554, DOI: 10.1109/MVA.2015.7153252.

Terazono, J., Hirata, N., Ogawa, Y., 2014, WISE-CAPS: Overcoming Information Gathering Challenges in Lunar Surface Exploration, in Madaan, A., Kikuchi, S., Bhalla, S., eds., Lecture Notes in Computer Science 8381, p. 266-273.

Yuki Ohtaka, Shigeo Takahashi, Hsiang-Yun Wu, Naoya Ohta, 2015, Using Mutual Information for Exploring Optimal Light Source Placements, Proceedings of International Symposium on Smart Graphics 2015, Chengdu, China, August, 2015.

[学会発表](計 15 件)

Aoki, T., Nakamura, A., Hirata, N., 2014, Estimating the angle of friction of blocks on rubble-pile asteroid Itokawa, Asteroids, Comets, Meteors 2014 15.

Doan, D., Tatsumi, E., Sugita, S., 2016, An experimental investigation on the yield of Hayabusa2 sampler system using different grain-size distribution, Lunar and Planetary Science Conference 47.

Hirata, N., Matsumoto, K., Kimura, J., Kitazato, K., 2014, Constraining the distribution of regolith deposits from the gravitational potential field on

small asteroids, Asteroids, Comets, Meteors 2014 215.

Kitazato, K., Iwata, T., Abe, M., Ohtake, M., Matsuura, S., Arai, T., Nakauchi, Y., Tsumura, K., Hirata, N., Senshu, H., Others, 2015, In-Flight Performance of the Hayabusa-2 Near-Infrared Spectrometer (NIRS3), Lunar and Planetary Science Conference 46, 1856.

Kitazato, K., Matsuura, S., Tsumura, K., Iwata, T., Abe, M., Ohtake, M., Arai, T., Nakauchi, Y., Hirata, N., Watanabe, S., 2014, On-ground characterization of the Hayabusa2 near-infrared spectrometer (NIRS3), Asteroids, Comets, Meteors 2014 271.

Kitazato, K., Iwata, T., Abe, M., Ohtake, M., Tsumura, K., Ishikawa, T., Takato, N., Nakauchi, Y., Arai, T., Senshu, H., Hirata, N., Takagi, Y., Hayabusa2 NIRS3 Science Team, 2016, Near-Infrared Spectroscopy of the Earth and Moon During the Hayabusa2 Earth Swing-By, Lunar and Planetary Science Conference 47, 2158.

Koga, S., Sugita, S., Kamata, S., Ishiguro, M.A., Hiroi, T., Sasaki, S., 2014, Spectral Evolution Tracks of S-Type Asteroids Suggested by Principal Component Analysis of Multi-Band Images of Itokawa Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Science Conference 45, 1721.

Mori Y., Nakajima H., Hirata N., Demura H., Naruse K., Yaguchi Y., 2013, 3D Reconstruction of Asteroid Using Open-source Software Bundler which Implements Structure from Motion and Bundle Adjustment, 29th International Symposium on Space Technology and Science 2013-k.

Mori, Y., Hirata, N., Group, Hayabusa-2 Shape Reconstruction Study Group, 2014, Asteroid Shape Reconstruction by Open-Source Structure from Motion Tools, Lunar and Planetary Science Conference 45, 1760.

Namiki, N., Mizuno, T., Senshu, H., Yamada, R., Noda, H., Hirata, N., Ikeda, H., Abe, S., Matsumoto, K., Oshigami, S., Others, 2015, Performance of Hayabusa-2 LIDAR in Acceptance and Verification Tests, Lunar and Planetary Science Conference 46, 1798.

Namiki, N., Mizuno, T., Hirata, N., Noda, H., Senshu, H., Yamada, R., Ikeda, H., Matsumoto, M., Oshigami, S., Miyamoto, H., Abe, S., Sasaki, S., Araki, H., Tazawa, S., Shizugami, M., Ishihara, Y., Kobayashi, M., Wada, K., Demura, H., Kimura, J., 2013, Scientific use of LIDAR

Data of Hayabusa-2 Mission, Lunar and Planetary Science Conference LPI Contributions 1719, 1945.

Noda, H., Mizuno, T., Namiki, N., Senshu, H., Yamada, R., Hirata, N., Others, 2015, Scientific Measurements of Hayabusa-2 Laser Altimeter (LIDAR), LPSC 46, 6017.

Tatsumi, E., Sugita, S., 2014, Crater efficiency on an asteroid surface covered with a block layer, Hayabusa Symposium 2014, Kanagawa

Tatsumi, E., Sugita, S., 2015, Dynamical evolution of Itokawa inferred from impact experiments on rubble-pile targets, Lunar and Planetary Science Conference 46.

Tatsumi, E., Sugita, S., 2015, Cratering Efficiency Reduction due to Armoring on the Coarse-Grained Targets, Bridging the Gap III, Freiberg, Germany.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 成 (HIRATA, Naru)

会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授

研究者番号：80372655

(2) 研究分担者

出村 裕英 (DEMURA, Hirohide)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：10360009

杉田 精司 (SUGITA, Seiji)

東京大学・理学研究科・教授

研究者番号：80313203

成瀬 継太郎 (NARUSE, Keitarou)

会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授

研究者番号：10301938

太田 直哉 (OHTA, Naoya)

群馬大学・理工学研究院・教授

研究者番号：10270860

高橋 成雄 (TAKAHASHI, Shigeo)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：40292619

矢口 勇一 (YAGUCHI, Yuichi)

会津大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号：00609109

石川 博 (ISHIKAWA, Hiroshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60381901

(3) 連携研究者

尾川 順子 (OGAWA, Naoko)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙

探査イノベーションハブ・研究員

研究者番号：10523813