

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05639

研究課題名(和文)高精度形状モデルに基づく小惑星イトカワの分光データ解析

研究課題名(英文) Spectral data analysis of the asteroid Itokawa based on high resolution 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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：小惑星 Itokawa と Ryugu の高精度形状モデルと分光観測データを組み合わせることで、小惑星表面の分光学的な地域差の分布と小惑星及びその母天体で過去に起きた地質活動を明らかにした。小惑星 Itokawa は Neck 領域に宇宙風化度が低い新鮮な領域が分布している。この領域は Itokawa の特異な形状から地表温度の日変化が激しいことに加え、傾斜も非常に大きいことから、常に表層の更新が進んで風化度が上がらない環境にある可能性がある。小惑星 Ryugu の表層物質は既知の C 型コンドライト隕石と比較して宇宙風化が進むとともに強い脱水反応を被っていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小惑星探査機はやぶさとははやぶさ2によって取得されたデータを駆使して、小惑星 Itokawa と Ryugu の構成物質を明らかにした上、小惑星表面の地質活動や両者の母天体の描像にも迫る情報を得ることができた。特に、近年小惑星上で起きる現象として着目されている熱疲労が、Itokawa でも重要な表面更新機構である可能性を見出した点は重要な知見である。また、終了したミッションのアーカイブデータから新たな知見を引き出したこと、また進行中のミッションで取得されたデータから迅速な成果を得ることができたこと、いずれもビッグサイエンスである月惑星探査の成果を最大化するという観点からも大きな意義があったと考えられる。

研究成果の概要(英文)：By combining a high-precision shape models with spectroscopic observation data of of asteroids Itokawa and Ryugu, the distribution and regional differences on the surface of the asteroid and geological activity on the asteroid and its parent body are revealed. The asteroid Itokawa has a fresh region with less space-weathered in the Neck region. This area is characterized with severe diurnal variations in surface temperature and very steep slopes. This suggests that the environment may be one in which the weathering rate does not increase due to the constant renewal of the surface layer. The surface material of the asteroid Ryugu is strongly weathered and suffered by a heavy dehydration process.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 イトカワ はやぶさ 地理情報システム リュウグウ はやぶさ2 分光 形状モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

小惑星探査機はやぶさでは、ターゲットとなった S 型小惑星 Itokawa について、可視光カメラ (AMICA) による高解像度画像と分光画像、近赤外分光器 (NIRS) による分光データ、レーザ高度計 (LIDAR) の測距データなどのリモートセンシングデータが得られている。これらのデータの解析により、Itokawa 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、Itokawa 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 Itokawa 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。

提案者はこれまで小惑星探査データを解析するための技術的基盤の整備として高解像度画像を用いた小惑星の高精度形状モデルの構築手法の検討と、形状モデルとそれに関連づけられた小惑星表面データの可視化を行うツールの開発に取り組んできた。その結果、小惑星探査機の分光データを解析するために必要な各種ソフトウェアが利用できるようになりつつある。また、これらの研究基盤ははやぶさの後継機である小惑星探査機はやぶさ 2 の取得データの解析にも生かすことが可能な状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では、小惑星探査機によって取得された可視光分光画像データと近赤外線反射スペクトルデータに高精度形状モデルを組み合わせ、測光学的に補正が施された全球分光データを得ること、また前記の全球分光データを解析することで、小惑星表面の分光学的な地域差の分布を明らかにした上で、小惑星及びその母天体で過去に起きた地質活動を理解すること、の二点を目的としている。研究開始当初に想定された対象天体は小惑星探査機はやぶさによって探査が行われた S 型小惑星 Itokawa のみであったが、研究期間中の 2018 年夏に後継機である小惑星探査機はやぶさ 2 が到着した C 型小惑星 Ryugu も新たな対象として追加された。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するためには、対象天体の高精度形状モデル、良好に輝度較正が行われた分光観測データ、観測データを形状モデル上にマッピングするための探査機位置・姿勢情報が必要となる。アーカイブデータが十分な精度を持っている場合はそれをそのまま使用したが、精度が不十分なものは再解析を実施する必要がある。また、新規に取得された観測データの場合は、形状モデルの構築や分光データの較正、探査機位置・姿勢情報の推定を 1 から実施した。また、すでに開発済みのデータ解析・可視化ツールを改良することにより、新規データも含めて効率的な解析とその結果の可視化を行えるようにした。

4. 研究成果

平成 29 年度

小惑星探査機はやぶさに搭載された分光カメラ AMICA 画像の全ピクセルについての日照条件をはじめとする観測条件のデータベース化を実施した。これは、米国 Planetary Data System (PDS) にアーカイブされた AMICA 画像から画素毎の較正済み輝度値を抽出し、観測波長や当該画素が観測している小惑星表面上の位置情報とともにデータベース化して、串刺し検索により、特定の地点の異なる日照条件での較正済み輝度値や、同じ観測条件での異なる地点での較正済み輝度値を抽出できるように整理するためのものである。なお、当初 AMICA データの輝度較正は本研究

グループで独自に実施する計画としていたが、東京大学の研究グループが AMICA の輝度較正に成功したため、そのデータの提供を受けることとなった。これに加えて、本研究グループで開発している小惑星向け三次元地理情報システム(AiGIS)の改良を行い、画像や地図画像の形状モデルへの貼り付け機能や、複数画面での情報の比較機能の追加など、本課題の実現に必要な機能強化を行った。これにより、AMICA の全ピクセルアーカイブから抽出された情報の可視化も AiGIS を用いて可能となっている。上記の過程で、研究代表者は米国 Johns Hopkins University の Applied Physics Laboratory(APL)を約一週間訪問し、PDS アーカイブデータの取り扱い方法や、三次元地理情報システムの機能についての議論を深めた。

また、同じくはやぶさ2に搭載されていた近赤外分光器 NIRS のデータ解析も進めると共に、Itokawa の形状モデルを利用した日照履歴、地表温度の日変化の計算も実施した。その結果、Itokawa で最も宇宙風化度が低い Neck 領域は、地表温度の急変を繰り返していることがわかった。従来より、この領域は急傾斜であることが指摘されていたことと合わせると、温度の急変による熱衝撃により、表層の更新が常に起きていることが示唆される。

平成 30 年度

6 月に後継機であるはやぶさ2がC型小惑星 Ryugu に到着し、観測を開始した。本研究で昨年度から構築していた解析手法およびシステムは、はやぶさ2のデータ解析にも有用である。研究計画策定の当初から、本研究の成果のはやぶさ2への波及は構想されており、Itokawa のデータ解析と並行して、Ryugu の解析も進めることにした。その結果、Ryugu については完全に新規に高精度形状モデルの構築に成功し、これを基盤として分光データ解析を進めることができるようになった。Ryugu は spinning-top 型(いわゆるコマ型)の形状を持つ小惑星であり、過去には短い自転周期の状態にあった結果、この形状となった可能性がある。また、はやぶさ2搭載の近赤外分光器 NIRS3 の観測によって Ryugu 表面に含水鉱物が持つ 2 μm 帯の弱い吸収が認められた。これは C 型小惑星母天体での水質変成作用などの地質活動がいかに進行したかを考える上で非常に重要な情報となる。これらのはやぶさ2データの解析の成果は、Science 誌に論文として掲載された。また、Itokawa および Ryugu の解析のためのツール開発も継続して行われ、3次元地理情報システム AiGIS の画像データ取扱機能の強化が行われた。本ツールは昨年度から引き続いてコミュニティに無料で提供されているほか、はやぶさ2プロジェクト内でも広く利用されている。

令和元年度

研究の最終年度は、1) 当初目標に掲げた小惑星探査機はやぶさによる小惑星 Itokawa の分光データ解析、2) 研究基盤としての3次元地理情報システム AiGIS の改良、3) 小惑星探査機はやぶさ2による小惑星 Ryugu の形状モデル高精度化と、近赤外分光器 NIRS3 による分光データ解析を並行して進めた。第1項では、分光カメラ AMICA 画像の全ピクセル DB の改良を進め、多波長での小惑星表面の光散乱特性の解析を行った。第2項では他の外部資金研究プロジェクトとの協業により、画像データ取扱機能の再強化、地理情報データの取扱機能の強化、小惑星三次元形状モデルの可視化機能の強化を進めた上で、コミュニティでの利用促進も図った。第3項では複数手法で構築された Ryugu の形状モデルを組み合わせ、地形再現度が高く、小惑星固定座標系に合わせこみの済んだ高解像度・高精度の全球形状モデルと局所領域地形モデルを構築することに成功した。これらのモデルを用いて小惑星の重力場計算を行い、表層での物質移動過程と地形・分光学的な特徴の議論を行えるようになった。また、副産物として源泉となった画像デー

夕取得時の探査機位置・姿勢の高精度な推定を行うことにも成功している．さらに第1項，第2項で得られている知見やツールを Ryugu 観測データにも適用することを試みて，良好な結果を得た．成果の外部発表は，速報性が重要となる第3項に関する内容を重点的に進めている．NIRS3のほか，可視分光カメラ ONC，熱赤外カメラ TIR のデータと形状モデルのデータを組み合わせた複数の査読付き論文を共著で出版したほか，本研究の組織メンバが主著者の論文も投稿中または準備中である．また，平成 29 年度の項で述べた Itokawa の Neck 領域に関する研究成果については学会発表済みであるが，学術論文誌への投稿を準備しているところである．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件/うち国際共著 10件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watanabe S., Hirabayashi M., Hirata N. et al.	4. 巻 364
2. 論文標題 Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu?A spinning top?shaped rubble pile	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 268-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aav8032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugita S., Honda R., Morota T., Kameda S., Sawada H., Tatsumi E., Yamada M., Honda C., Yokota Y., Kouyama T., Sakatani N., Ogawa K., Suzuki H., Okada T., Namiki N., Tanaka S., Iijima Y., Yoshioka K., Hayakawa M., Cho Y., Matsuoka M., Hirata N. et al.	4. 巻 364
2. 論文標題 The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 252-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw0422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kitazato K. et al.	4. 巻 364
2. 論文標題 The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 272-275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aav7432	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Barnouin O. S., The OSIRIS-REx Team et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 Shape of (101955) Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 247-252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41561-019-0330-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirabayashi M., Tatsumi E., Miyamoto H., Komatsu G., Sugita S., Watanabe S., Scheeres D. J., Barnouin O. S., Michel P., Honda C., Michikami T., Cho Y., Morota T., Hirata N. et al.	4. 巻 874
2. 論文標題 The Western Bulge of 162173 Ryugu Formed as a Result of a Rotationally Driven Deformation Process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L10 ~ L10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0e8b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wataru UENO, Hirohide DEMURA, Naru HIRATA	4. 巻 60
2. 論文標題 HARMONICS: A Visualization Tool for Hayabusa and Hayabusa 2 Missions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 132-136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2322/tjsass.60.132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsumi Eri, Domingue Deborah, Hirata Naru, Kitazato Kohei, Vilas Faith, Lederer Susan, Weissman Paul R., Lowry Stephen C., Sugita Seiji	4. 巻 311
2. 論文標題 Vis-NIR disk-integrated photometry of asteroid 25143 Itokawa around opposition by AMICA/Hayabusa	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 175 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.04.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Barucci M. A. et al.	4. 巻 629
2. 論文標題 Multivariable statistical analysis of spectrophotometry and spectra of (162173) Ryugu as observed by JAXA Hayabusa2 mission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A13 ~ A13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201935851	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Soldini Stefania, Takanao Saiki, Ikeda Hitoshi, Wada Koji, Yuichi Tsuda, Hirata Naru, Hirata Naoyuki	4. 巻 180
2. 論文標題 A generalised methodology for analytic construction of 1:1 resonances around irregular bodies: Application to the asteroid Ryugu 's ejecta dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 104740 ~ 104740
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2019.104740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Okada, T., Fukuhara, T., Tanaka, S., Taguchi, M., Arai, T., Senshu, H., Sakatani, N., Shimaki, Y., Demura, H. et al.	4. 巻 579
2. 論文標題 Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 518 ~ 522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2102-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morota, T., Sugita, S., Cho, Y., Kanamaru, M., Tatsumi, E., Sakatani, N., Honda, R., Hirata, N. et al.	4. 巻 368
2. 論文標題 Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 654 ~ 659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz6306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Hirata, N., Demura, H., Tsuchiya, T., Yamaguchi, Y., Endo, T., Sato, H., Otake, H.
2. 発表標題 New Features of AiGIS: A 3D-GIS for Visualization of Map and Shape of Irregular-Shaped Small Bodies
3. 学会等名 50th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hirata, Naru Matsumoto, K Michikami, T Kimura, J
2 . 発表標題 Constraints on global distribution of regolith deposits on the asteroid 162173 Ryugu
3 . 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Tatsumi, E. Domingue, D. Hirata, N. Kitazato, K. and Vilas, F. Lederer, S. M. Weissman, P. R. Lowrys, S.C. and Sugita, S.
2 . 発表標題 Regolith Properties on the S-Type Asteroid Itokawa Estimated from Photometrical Measurements
3 . 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hirata, N. Demura, H. Ichikawa, M. Endo, T. and Ishihara, Y. Sato, H. Otake, H.
2 . 発表標題 AiGIS: A 3D-GIS for Visualization of Map and Shape of Irregular-Shaped Small Bodies
3 . 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Aoki, Y. Demura, H. Hirata, N. Ichikawa, M. and Endo, T.
2 . 発表標題 GUI Retrieval of FOVs in HARMONICS for 2018 Rendezvous of Hayabusa2
3 . 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 北里宏平, 平田成, 出村裕英, 稲澤朋生, 安部正真, 山本幸生, 三浦昭, 川口淳一郎
2. 発表標題 小惑星イトカワの表面に見られる白色地域の成因
3. 学会等名 日本惑星科学会2017年秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kitazato, K., Hirata, N., Demura, H., Inasawa, T., Abe, M., Yamamoto, Y., Miura A., Kawaguchi, J.
2. 発表標題 Thermally induced rock breakdown on asteroid Itokawa
3. 学会等名 American Astronomical Society, DPS meeting #49 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Inasawa, T., Kitazato, K., Hirata, N., Demura, H.
2. 発表標題 Cluster analysis of near-infrared reflectance spectra of asteroid Itokawa
3. 学会等名 American Astronomical Society, DPS meeting #49 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ARC-Space
<https://arcspace.jp/>
 研究グループのウェブサイトにおいて、開発したソフトウェアを公開中。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	出村 裕英 (Demura Hirohide) (10360009)	会津大学・コンピュータ理工学部・教授 (21602)	
研究 分 担 者	北里 宏平 (Kitazato Kohei) (50550597)	会津大学・コンピュータ理工学部・准教授 (21602)	