

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14538

研究課題名（和文）はやぶさ2画像データをつかった、現在・過去の自転状態の解析と表層進化の解明

研究課題名（英文）Analysis of present and past rotation states and surface evolution of asteroid Ryugu using Hayabusa2 image data

研究代表者

平田 直之（Hirata, Naoyuki）

神戸大学・理学研究科・助教

研究者番号：00791550

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：小惑星探査機はやぶさ2が訪れた小惑星リュウグウは自転がかつて早かったと考えられている。この早い自転によって天体の形がそろばんの珠状になったと考えられている。このような高速自転小惑星は太陽系では珍しくない。リュウグウは人類にとってこの種の小惑星をつぶさに観察できる初めての例である。本研究の結果、高速自転小惑星の表面で生じた衝突によって弾き飛ばされたエジェクタ（放出物）は自転の効果を強く受けること、リュウグウの赤道付近でのエジェクタの集積をはじめとする様々な現象が起きることが明らかになった。また、実態の明らかでない他の高速自転小惑星についても、その表層進化について様々な知見が波及効果としてあった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小惑星は太陽系初期の微惑星の集合・合体等による惑星形成段階において、集積せずに生き残った天体グループだと考えられている。日本の探査機はやぶさ2が訪れた小惑星リュウグウの進化を包括的に解き明かすことは太陽系初期進化の理解へ資するものである。特にリュウグウの重要な特徴の一つがかつて高速自転小惑星であったという点である。リュウグウのような高速自転小惑星は太陽系ではありふれたものだが、探査機が訪れたことはこれまでなく、高速自転小惑星を観察する格好の機会である。研究の結果、リュウグウで天体衝突が起きると非対称な形態のクレーターができた、エジェクタが赤道付近に集積したりすることがわかった。

研究成果の概要（英文）：It is thought that Asteroid Ryugu, visited by the Hayabusa2 spacecraft, used to be a fast rotator. Such fast-spinning asteroids are not uncommon in the solar system. Ryugu is the first example of this type of asteroid that we are able to observe in detail. The results of this study revealed that impact ejecta on the surface are strongly affected by the rotation of Ryugu, and that various phenomena, including the accumulation of ejecta near the equator of Ryugu, take place.

研究分野：惑星科学

キーワード：惑星 小惑星 リュウグウ

## 1. 研究開始当初の背景

日本の小惑星探査機はやぶさ2は小惑星リュウグウに接近・着陸し、多くの貴重なデータを提供した。小惑星は太陽系の形成初期の、惑星形成段階で惑星に取り込まれずに生き残った始原的な天体であると考えられ、地球の初期進化や生命の起源という観点においても重要な研究対象だと考えられる。そのうえで、リュウグウに固有の特徴として、ソロバンの珠のような形状をしている点が挙げられる。この形状はリュウグウが高速自転小惑星であったことを示唆している (Watanabe et al. 2019)。

比較的小さな小惑星はYORP効果として知られる赤外線放射のアンバランスによって自転が暴走加速することが知られている。そのような高速自転小惑星は太陽系において一般的な存在であることが知られている。この高速自転小惑星は物理的・軌道的な進化という点において関心が高かった。小惑星探査機はやぶさ2が訪れた小惑星リュウグウもそのグループに所属する小惑星である。はやぶさ2がリュウグウを訪れたことによって、この種の高速自転小惑星を人類ははじめてつづさに観察する機会を得た。

## 2. 研究の目的

はやぶさ2の貴重なデータを生かし、高速自転小惑星の諸性質を解明することを目指す。これらの取り組みによって小惑星の軌道進化やそれによる太陽系初期の微惑星の集合や合体による惑星形成、地球への衝突過程などへの知見へと発展させることができると考えられる。自転が暴走加速した小惑星でどのような現象がおきるのか、現在や過去の自転状態はどうだったのかといった一連の謎をリモートセンシング画像データ解析および数値計算モデリングで解明することを目指す。

## 3. 研究の方法

はやぶさ2が撮影したリュウグウや種類の近い小惑星の画像データを用いて、地形データを作成した。クレーター等の形態について定量的な評価を行った。特に、東西不対称性に着目した。リュウグウの赤道にある衝突クレーターのリムは、西側の方が東側よりも必ず盛り上がっていることがわかった。また、自転周期を関数とし、リュウグウ上のクレーター放出物の軌道計算を行った(図1)。また、リュウグウ以外の天体について広範に検証を行った。

## 4. 研究成果

令和2年度

リュウグウの自転周期をさまざまなパラメータとして動かし、リュウグウ表面上のクレーター放出物の軌道を計算した。自転周期を関数として、どこにどのくらいのクレーター放出物が堆積するかを求めた(図2)。自転が早いと、コリオリ力が働くことによって、クレーター放出物の分布に強い東西不対称性が生じることを発見した。また、東西不対称性が認められるクレーターの地形プロファイルを解析し、そういったクレーターの地形プロファイルはリュウグウの自転周期が3.5時間よりも短いときと整合的であることを発見した。この成果は査読付き国際学会誌 *Icarus* にて出版された (Hirata et al. 2021)。

リュウグウの赤道上に青い色を帯びた領域があることが知られていた。青い色はどのように生じたものか明らかではなかったが、内部の新鮮な風化していない部分が露出したものだと考えられていた。本研究の結果、これも自転の効果を加味したした場合のクレーター放出物の分布で説明できることがわかった。自転が早い場合、クレーター放出物の軌道はコリオリ力によって大きく西側に寄ってしまう。この結果として、放出物が赤道付近に降り積もることで、青い色を呈する赤道について説明できることがわかった。この成果は査読付き国際学会誌 *Icarus* にて出版された (Hirata and Ikeya, 2021)。

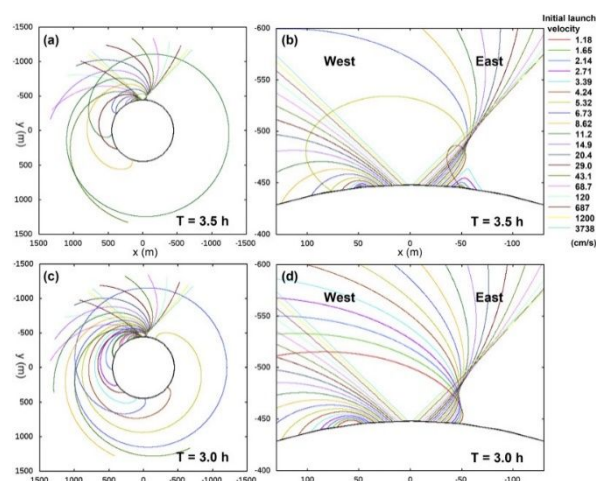


図1 小惑星まわりのクレーター放出物粒子の軌道の計算例 (Hirata et al. 2021)

### 令和3年度

前年度の解析手法を応用し、リュウグウのソロバン型の形状を説明することに取り組んだ。前年度に行われた解析によって、リュウグウの自転周期が3.5時間以下の速さで自転している場合、クレーター放出物が赤道に沿って降り積もることを明らかにした。そこで、その結果を応用すれば、より長い時間においては、リュウグウのクレーター放出物の蓄積によって赤道リッジ(コマ型をなしているリュウグウの横方向のふくらみ部分)の形成そのものを説明できるのではないかと考えた。結果として、100万-1億年ほどのオーダーの時間スケールで赤道リッジを作ることができることがわかった。これはリュウグウに限らず多くの小惑星の赤道リッジ形成にもつなげることができる重要な知見である。この成果をまとめたものが査読付き国際学会誌 *Icarus* にて出版された (Ikeya and Hirata, 2021)。

### 令和4年度

リュウグウ以外的高速自転小惑星について調査した。その結果、小惑星ヴェスタの赤道に沿うように分布する Equatorial Trough の起源が、リュウグウなどと同様に自転の効果を基礎とするメカニズムで説明できることがわかった。南極にある Rheasilvia クレーターの形成時の放出物が2次的に衝突することで、Equatorial trough の起源が説明できた。今後、似たような高速自転小惑星を調査することで、モデルの検証とさらなる発展が期待できる。この成果をまとめたものが査読付き国際学会誌 *Journal of Geophysical Research: Planets* にて出版された (Hirata, 2023)。また、一連の研究成果として、合計6報の論文を国際学会誌にて公開した。

### <引用文献>

Watanabe, S. et al. 2019, Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu-A spinning top-shaped rubble pile, *Science* 364, 268-272.

Hirata, N. et al. 2021, Rotational effect as the possible cause of the east-west asymmetric crater rims on Ryugu observed by LIDAR data, *Icarus* 354, 114073.

Hirata, N. and R. Ikeya, 2021, Ejecta distribution from impact craters on Ryugu: Possible origin of the bluer units, *Icarus* 364, 114474.

Ikeya, R. and N. Hirata, 2021, Ejecta emplacement as the possible origin of Ryugu's equatorial ridge, *Icarus* 367, 114590.

Hirata, N. 2023, Secondary Cratering From Rheasilvia as the Possible Origin of Vesta's Equatorial Troughs, *Journal of Geophysical Research: Planets* 128, JE007473.

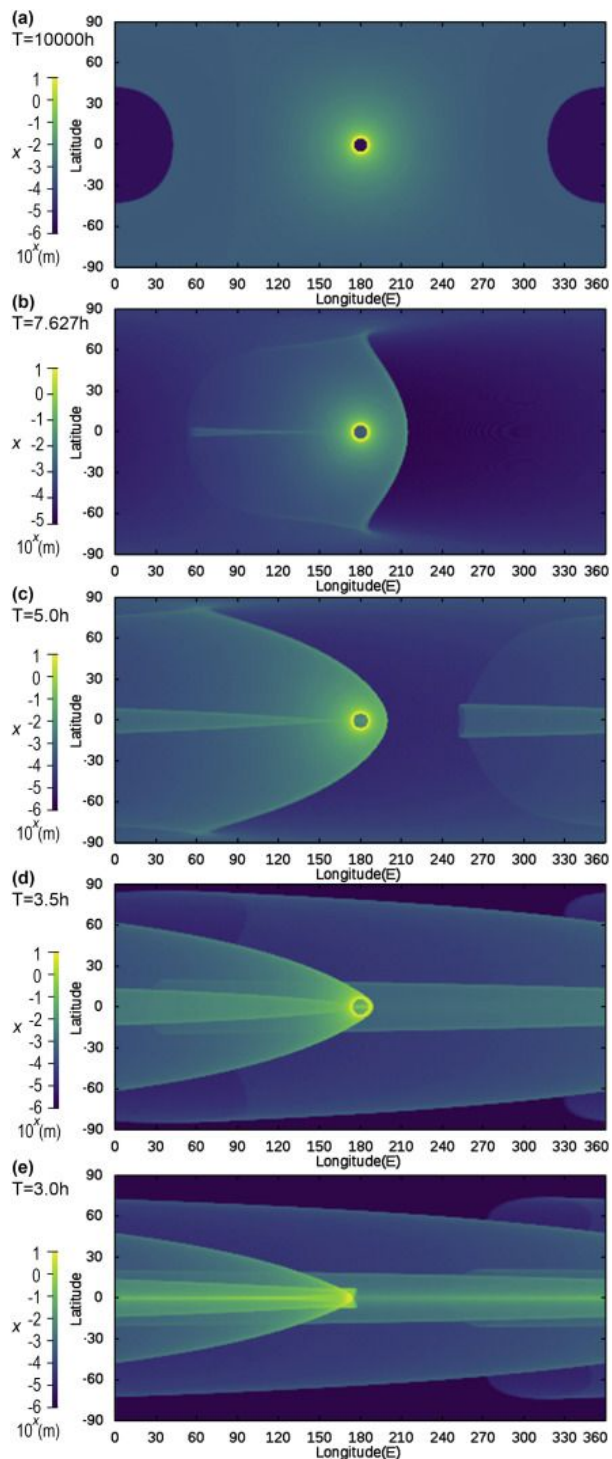


図2 リュウグウの自転周期 10000 時間・7.6 時間・5 時間・3.5 時間・3 時間の場合の、クレーター放出物の堆積量の global 分布の例 (Hirata et al. 2021)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ikeya Ren, Hirata Naoyuki  | 4. 巻<br>367                   |
| 2. 論文標題<br>Ejecta emplacement as the possible origin of Ryugu's equatorial ridge | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Icarus   | 6. 最初と最後の頁<br>114590 ~ 114590 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.icarus.2021.114590                         | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Hirata Naoyuki, Namiki Noriyuki, Yoshida Fumi, Matsumoto Koji, Noda Hiroto, Senshu Hiroki, Mizuno Takahide, Terui Fuyuto, Ishihara Yoshiaki, Yamada Ryuhei, Yamamoto Keiko, Abe Shinsuke, Noguchi Rina, Hirata Naru, Tsuda Yuichi, Watanabe Sei-ichiro | 4. 巻<br>354                   |
| 2. 論文標題<br>Rotational effect as the possible cause of the east-west asymmetric crater rims on Ryugu observed by LIDAR data   | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Icarus   | 6. 最初と最後の頁<br>114073 ~ 114073 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.icarus.2020.114073   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Hirata Naoyuki, Ikeya Ren   | 4. 巻<br>364                   |
| 2. 論文標題<br>Ejecta distribution from impact craters on Ryugu: Possible origin of the bluer units | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Icarus  | 6. 最初と最後の頁<br>114474 ~ 114474 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.icarus.2021.114474  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>Hirata Naoyuki  | 4. 巻<br>128            |
| 2. 論文標題<br>Secondary Cratering From Rheasilvia as the Possible Origin of Vesta's Equatorial Troughs | 5. 発行年<br>2023年        |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Geophysical Research: Planets  | 6. 最初と最後の頁<br>JE007473 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1029/2022JE007473  | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>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<br>-              |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平田 直之                 |
| 2. 発表標題<br>小惑星ヴェスタの赤道トラフ形成に関する考察 |
| 3. 学会等名<br>日本惑星科学会秋季講演会          |
| 4. 発表年<br>2022年                  |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平田 直之                     |
| 2. 発表標題<br>小惑星リュウグウの自転によるエジェクタ堆積への影響 |
| 3. 学会等名<br>日本惑星科学会秋季講演会              |
| 4. 発表年<br>2021年                      |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>池谷蓮、平田直之                 |
| 2. 発表標題<br>小惑星の赤道リッジ形成へのエジェクタ堆積物の寄与 |
| 3. 学会等名<br>日本惑星科学会秋季講演会             |
| 4. 発表年<br>2020年                     |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| 6. 研究組織 | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|