

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14952

研究課題名（和文）微小重力天体のブリルアン球内における重力場と軌道運動の解明

研究課題名（英文）Gravity Field and Orbital Mechanics within the Brillouin Sphere of a Small Body

研究代表者

菊地 翔太（Kikuchi, Shota）

千葉工業大学・惑星探査研究センター・特別研究員（PD）

研究者番号：90830068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：小天体表面近くのブリルアン球（外接球の一種）内では、歪な形状に起因する重力の不均一成分の影響で、物体の運動は複雑な様相を示す。本研究では、はやぶさ2で観測された小惑星リュウグウ近傍でのフライトデータを用いて、小天体のブリルアン球内における重力場と軌道運動に関する実証的な研究を行った。主な成果は以下の3点である。1）リュウグウの形状モデルや人工マーカーの軌道運動に基づくリュウグウ重力場の推定、2）画像・測距データに基づくはやぶさ2軌道の精密復元、3）重力場と太陽光圧による外乱環境下での安定周回を実現する凍結軌道の解析解の導出。

研究成果の学術的意義や社会的意義

はやぶさ2がリュウグウ近傍で取得したデータに基づく本研究の成果により、実際の小天体近傍での重力場や物体の運動に関する貴重な知見が得られた。小天体表面の極近傍における運動は、探査機着陸や小型ロボット分離の誘導精度を大きく左右する。また、小天体ダストの表層付近での運動は、小天体形成過程や探査機安全性に影響を与える。したがって、今後の小天体探査における、より高度な探査機運用や取得データに基づく科学成果の最大化という観点で、本研究は工学的にも理学的にも極めて意義深い。より広い視点では、小天体探査を通じた太陽系や生命の起源解明に貢献し得る成果である。

研究成果の概要（英文）：Within a Brillouin sphere near the surface of a small body, the motion of an object is strongly perturbed due to the non-uniform gravity field of the body. This research conducted empirical studies on the gravity field and orbital motion within the Brillouin sphere using the flight data of Hayabusa2 in the vicinity of the asteroid Ryugu. The primary results are as follows: 1) estimation of the gravity field of Ryugu based on the asteroid shape model and the orbital motion of artificial markers, 2) precise reconstruction of the Hayabusa2 trajectories based on optical and altimetric data, and 3) derivation of the analytical solution of frozen orbits that are stable even under strong perturbations caused by the gravity field of a small body and the solar radiation pressure.

研究分野：軌道力学

キーワード：小天体 探査機 重力場 太陽光圧 摂動 軌道運動

1. 研究開始当初の背景

小惑星や彗星などの太陽系小天体は、太陽系形成当時の状態を保つ始原的な天体だと考えられており、太陽系や生命の起源を解明するカギとなる。そのため、近年の観測技術の進歩による小天体の発見数増加と相まって、小天体を対象とした探査・研究が活発に行われ始めている。小天体の重力は微小であるため、その近傍では、物体の運動が強い外乱を受ける。代表的な外乱源は、歪な形状に起因する重力の不均一成分（高次重力）であり、その影響は球形に近い惑星と比べて顕著である。特に、小天体表面近くのプリリアン球（天体の外接球の一種）内では、高次重力が発達し、物体の運動は複雑な様相を示す。小天体表面の極近傍における運動は、探査機着陸や小型ロボット分離の誘導精度を大きく左右する。また、小天体ダストの表層付近での運動は、小天体形成過程や探査機安全性に影響を与える。したがって、小天体の表面付近の重力場を適切にモデル化し、その重力の影響を受ける物体の軌道運動を正確に計算することは、工学的・理学的に極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小天体のプリリアン球内における重力場と、その作用を受ける物体の軌道運動を明らかにすることである。また、重力場の偏りは内部の質量分布の偏りによってもたらされるため、重力場を明らかにすることで、副次的に小天体の内部構造についての示唆を得ることも狙う。本研究の理論を構築するにあたっては、小惑星リュウグウ近傍で観測を行った探査機はやぶさ2のフライトデータを用いることで、実証的に研究を進める。

3. 研究の方法

本研究は、以下の3つの項目に大別して進める。

(1) 第一に、小天体の形状モデルに基づき、小天体の重力場モデルを構築する。具体的には、小惑星リュウグウの多面体形状モデルを用いて、一定密度を仮定した体積分を行うことで、リュウグウの表面上および表面近傍での重力の空間分布を求める。さらに、この密度一定の重力場と、リュウグウ近傍での人工物の軌道データから推定した重力場とを比較することで、小天体内部密度の不均質性の有無を検証する。

(2) 項目(1)の重力場モデルに基づき、小天体近傍での物体の運動を推定する。具体的には、はやぶさ2がリュウグウ近傍で取得したデータに基づき、はやぶさ2本体や、はやぶさ2から投下された着陸用のターゲットマーカーの軌道運動を復元する。

(3) 項目(1)の重力モデルと項目(2)の軌道運動モデルを応用して、小天体重力場と太陽光圧の影響を受ける物体の軌道運動に関する基礎理論を構築する。特に、ラグランジュの惑星方程式に基づいて、外乱によって軌道が不安定化するメカニズムを解析的に明らかにし、軌道が長期間安定となる解の有無を検証する。

4. 研究成果

(1) 小惑星リュウグウの重力場計算

はやぶさ2の観測によって得られたリュウグウの3次元形状モデルから、一定密度の仮定のもとで重力場を計算した。この結果、リュウグウ表面での重力摂動の効果が、球形の重力と比べて最大25%以上生じることを明らかにした(図1)。さらに、後述する項目(2)-aの研究成果を応用して、ターゲットマーカーの軌道運動から局所重力を推定することで、はやぶさ2の着陸点付近の密度がリュウグウ全球の平均密度に近いことを明らかにした。この解析結果は、はやぶさ2の着陸点付近で天体内部構造の偏りが小さいことを示唆しており、内部構造に対して一定の制約を与えることができた。

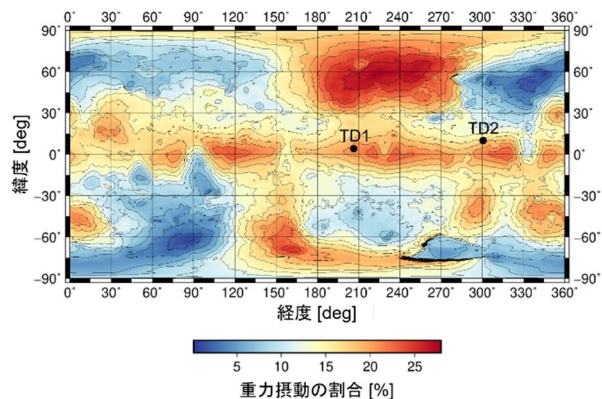


図1: リュウグウ表面における、質点重力に対する重力摂動の大きさ

(2)-a ターゲットマーカー分離軌道の推定

項目(1)で構築した重力モデルに基づき、はやぶさ2が着陸制御用に投下したターゲットマーカーの低高度軌道の推定を行った(図2)。軌道推定には、電波・画像・測距といった複数のはやぶさ2フライトデータを用いており、マーカーの精密な軌道復元に成功した。軌道推定の結果、

目標点から最小誤差 3.3 m の位置にマーカーが静止したことを明らかにした。また、この軌道復元では、重力場摂動の影響を受けるマーカーの衝突・反発軌道も推定しており、マーカーが 95%以上のエネルギー散逸率を達成したことを示した。このことは、マーカーの低反発機構が、微小重力下でも正しく機能したことの証左である。

(2)-b はやぶさ 2 着陸軌道の推定

項目(2)-aと同様に、はやぶさ2の電波・画像・測距データを用いて、はやぶさ2の2回目の着陸運用時の軌道を精密に推定した。この結果、はやぶさ2が半径 3.5 m の目標エリア内に着陸しており、その着陸精度は 58.6 ± 2.9 cm だったことが分かった(図3)。未知天体への着陸精度としては過去最高であり、本研究を通じて、狙った地点にピンポイントで着陸する技術を実証した。また、接地速度や降下時間についても、事前に計算された分散の範囲内であったことを明らかにした。

(3) 凍結軌道

項目(1)で構築した重力モデルと、項目(2)で用いた軌道運動モデルを応用して、重力場と太陽光圧の相互作用による小天体近傍での軌道運動の乱れを解析的に計算した。この結果、重力場と太陽光圧の合力により上空の周回軌道が不安定化するメカニズムを、理論的に解明した。さらに、この知見を応用して、軌道運動の乱れを抑制できる凍結軌道の条件を解析的に導出した(図4)。本研究は、より低燃費かつ安全に小天体探査ミッションを行うことに寄与する成果である。

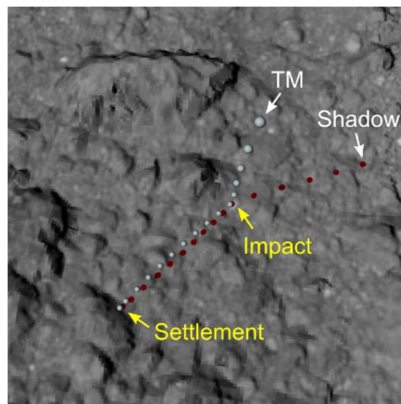


図 2: リュウグウに投下されたターゲットマーカー(TM)の推定軌道



図 3: はやぶさ 2 の推定着陸位置

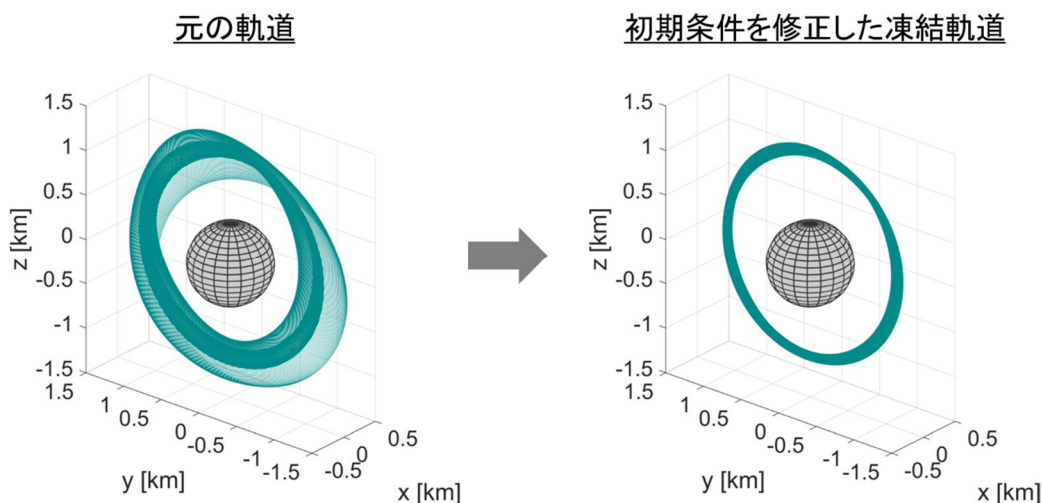


図 4: 小惑星重力場と太陽光圧による摂動下でも長期間安定な凍結軌道

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kikuchi Shota, Oki Yusuke, and Tsuda Yuichi	4. 巻 44
2. 論文標題 Frozen Orbits Under Radiation Pressure and Zonal Gravity Perturbations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 1924 ~ 1946
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.G005564	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kikuchi Shota, Saiki Takanao, Takei Yuto, Terui Fuyuto, Ogawa Naoko, et al.	4. 巻 68
2. 論文標題 Hayabusa2 pinpoint touchdown near the artificial crater on Ryugu: Trajectory design and guidance performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 3093 ~ 3140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.asr.2021.07.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ikeda Hitoshi, Takeuchi Hiroshi, Kikuchi Shota, Mimasu Yuya, Ogawa Naoko, et al.	4. 巻 1
2. 論文標題 Hayabusa2 radio science investigation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hayabusa2 Asteroid Sample Return Mission: Technological Innovation and Advances	6. 最初と最後の頁 387 ~ 399
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/B978-0-323-99731-7.00019-2	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 Terui Fuyuto, Kikuchi Shota, Takei Yuto, Mimasu Yuya, Sawada Hirotaka, Saiki Takanao, and Tsuda Yuichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Touchdown operation planning, design, and results	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hayabusa2 Asteroid Sample Return Mission: Technological Innovation and Advances	6. 最初と最後の頁 259 ~ 289
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/B978-0-323-99731-7.00014-3	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 S. Kikuchi, N. Ogawa, O. Mori, T. Saiki, Y. Takei, F. Terui, G. Ono, Y. Mimasu, K. Yoshikawa, S. Van Wal, H. Takeuchi, H. Ikeda, A. Fujii, Y. Takao, T. Kusumoto, N. Hirata, N. Hirata, K. Shirai, T. Kouyama, S. Kameda, M. Yamada, S. Nakazawa, M. Yoshikawa, S. Tanaka, S. Sugita, S. Watanabe, and Y. Tsuda	4. 巻 358
2. 論文標題 Ballistic Deployment of the Hayabusa2 Artificial Landmarks in the Microgravity Environment of Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.114220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 菊地翔太
2. 発表標題 高速自転小惑星1998 KY26の軌道変更についての実現可能性検討
3. 学会等名 第31回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shota Kikuchi, Yuya Mimasu, Takanao Saiki, Yuto Takei, Hitoshi Ikeda, Yuichi Tsuda
2. 発表標題 Preliminary Mission Analysis for the Hayabusa2 Extended Mission in the Vicinity of 1998 KY26
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shota Kikuchi, Kei Shirai, Ko Ishibashi, Koji Wada, Rie Honda, et al.
2. 発表標題 Image-based Estimation of the Attitude and Orbital Motion of Hayabusa2's Deployable Camera (DCAM3) around Ryugu
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------