

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05901・19K21075

研究課題名（和文）小惑星近傍での強摂動環境における探査機軌道設計

研究課題名（英文）Orbital Dynamics in Strongly Perturbed Environments around Asteroids

研究代表者

菊地 翔太（Kikuchi, Shota）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：90830068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：小惑星の重力は微小で重力場が歪であるため、小惑星近傍では物体の軌道運動は強く乱される。本課題では、小惑星近傍での探査機軌道設計手法について研究した。まず、強い外乱下でも安定な小惑星周回軌道として、1周に1回少量の速度変化を与えることで、人工的に周期性を持たせる逆行涙滴軌道を考案し、その軌道力学的性質を明らかにした。さらに理論を発展させ、探査機運動を解析的に記述することで、燃料を使わずに長期間安定となる凍結軌道の条件を導出した。加えて、反復的数値計算と重力場モデルとを応用して、はやぶさ2の高精度着陸軌道を設計した。この着陸軌道を用いて、はやぶさ2は2019年に2回のリュウグウに着陸に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を応用すると、より高度かつ確実に小惑星探査を行うことが可能となる。小惑星は太陽系形成当初の姿をよく保っていると考えられており、本研究による小惑星探査技術の高度化は、太陽系や生命の起源解明につながり得る成果である。実際に、はやぶさ2では本研究で設計された着陸軌道を用いて、小惑星リュウグウへの2度のタッチダウンに成功しており、小惑星サンプル採取の成功に貢献した。また、惑星科学上の学術的意義のみならず、将来の鉱物資源の獲得や、地球への隕石衝突回避につながり得る点で、本研究の成果は社会的にも大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：The orbital motion of spacecraft in the vicinity of asteroids is strongly disturbed and exhibits complex behaviors because of weak and irregular gravitational force. The main focus of this study is the dynamics of spacecraft in the strongly perturbed environment around asteroids. This research first proposed retrograde teardrop orbits, which are made periodic by introducing a deterministic thrusting maneuver within each period to ensure long-term stability. In addition, based on the constructed dynamical model, frozen orbit solutions were identified, in which the orbital elements remain constant even under solar radiation and gravitational perturbations. Another contribution of this research is the trajectory design for the Hayabusa2 precision touchdown incorporating the effect of irregular surface gravity field. Using the designed landing trajectory, Hayabusa2 successfully conducted touchdowns on the asteroid Ryugu in 2019.

研究分野：軌道力学

キーワード：探査機 軌道設計 小惑星 摂動 太陽光圧 重力場

### 1. 研究開始当初の背景

小惑星は、形成後の変性の度合いが惑星より小さいと考えられており、太陽系や生命の起源を解明する上で重要な探査対象である。また、豊富な鉱物資源の獲得や、地球への隕石衝突回避の研究の面で、小惑星の探査は社会的にも大きな意義を持つ。そのため、近年の観測技術の進歩による小惑星発見数増加と相まって、世界的に小惑星探査が盛んに行われ始めている。実際に、研究開始当初の2018年には、JAXAの「はやぶさ2」とNASAのOSIRIS-RExが目標小惑星に到着し、小惑星近傍での観測を開始する予定であった。

このような小惑星探査ミッションには、惑星周りでは見られない、小惑星周り特有の力学的な難しさがある。1つ目は、小惑星重力が微小であるため、通常は無視できる太陽光圧(太陽光が当たることによって生じる圧力)が、相対的に大きな外乱となる点である。2つ目は、小惑星は一般にいびつな形状であるため、その近傍で重力が空間的に不均一に作用する点である。これら2つの外乱によって、小惑星近傍では、探査機の軌道運動が強く乱される環境(強摂動環境)が形成される。

### 2. 研究の目的

小惑星近傍での強摂動環境では、探査機軌道は一般的に不安定となるため、小惑星探査を行う上では、小惑星での安定的な滞在が課題となる。本研究の目的は、小惑星近傍での強摂動環境下でも、安定的に滞在できるような軌道の設計手法を確立することである。また、その応用例として、はやぶさ2ミッションを想定して、小惑星近傍軌道の有用性・成立性を検証することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、強摂動環境下でも小惑星近傍に留まるための手法として、人工的に周期性を持たせる逆行涙滴軌道(RTO: Retrograde Teardrop Orbit)という周回軌道について研究した。このRTOでは、1周に1回エンジン噴射による少量の速度変化を与えることで、小惑星での長期間の安定的な滞在が可能となる。従来の小惑星滞在手法の一つとして、高頻度のエンジン噴射によって常に外乱を相殺し続けるホバリング運用が挙げられる。RTOはホバリングに比べて燃料消費が少なく、なおかつ軌道設計の自由度が高いことが特徴である。

このRTOの力学的特性を明らかにするために、本研究ではまず小惑星近傍での探査機の軌道運動モデルを構築した。この軌道運動モデルを用いて、RTOの設計手法を確立し、また網羅的な解探索によるRTO軌道群の求解を目指した。さらに、はやぶさ2ミッションでのRTO実用化を目指して、現実には生じ得る誤差の軌道修正法や、軌道上からの小惑星観測性についても研究を行った。

また、本研究を進める過程で、RTOを設計するための力学理論が、異なるタイプの小惑星近傍軌道の設計に応用できることを見出した。具体的には、太陽光圧および重力場による外乱が相殺されることで自然に周回し続ける凍結軌道、および重力場による外乱が特に強い小惑星表面付近での高精度着陸軌道である。RTO設計のために構築した軌道運動モデルを応用して、これら2つの軌道についても力学的性質と設計手法の研究を進めた。

### 4. 研究成果

#### (1) 小惑星近傍での逆行涙滴軌道(RTO)

当初の研究計画通り、2018~2019年度に、RTOの基礎理論を構築することができた。具体的には、小惑星近傍での探査機軌道の定式化を行い、数値積分のイタレーションをすることで、RTOを設計する手法を確立した。さらに、初期条件を変えてRTO軌道群を求めることで、所要燃料や周期、安定性などの軌道力学的性質を体系的に理解することができた。実運用を見据えて、現実には生じる制御誤差や観測誤差、ダイナミクス誤差などによるずれを軌道修正するための、RTO特有の制御則を合わせて考案した。

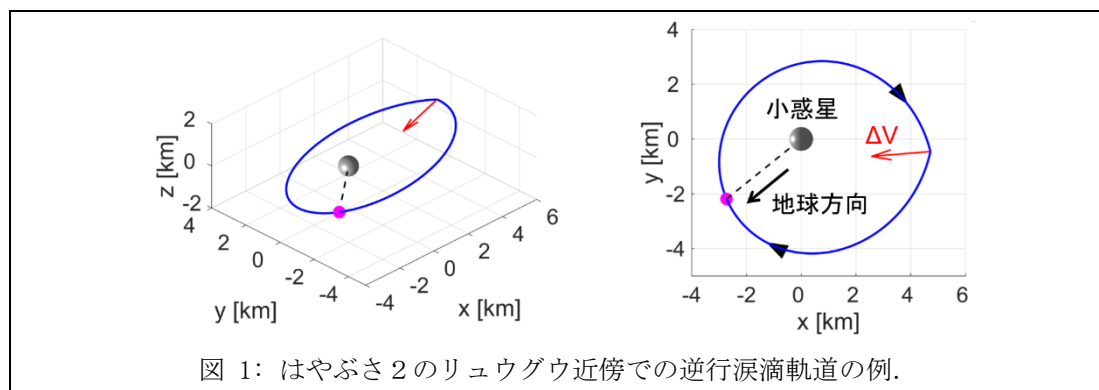


図 1: はやぶさ2のリュウグウ近傍での逆行涙滴軌道の例。

次に、本研究では、RTOの実ミッションへの応用例として、はやぶさ2の小惑星リュウグウ周回運用の成立性を検討した。具体的には、RTOの設計自由度の高さを利用して、はやぶさ2ミッションにおける、発電や通信、科学観測といった種々の要求を満たすRTOを設計した。実際に、本研究を通じて設計した周期3日のRTOが図1であり、この軌道を用いてリュウグウ近傍を多周回する計画を立案した。残念ながら、ミッション期間の制約のため、RTOの実用には至らなかったが、小惑星近傍での運用手法の新たな選択肢を得ることができた。

### (2) 小惑星近傍での凍結軌道

RTOの軌道設計を通じて構築した力学理論を応用して、小惑星近傍の強摂動環境下でも、自然に長期間周回しうる軌道について研究を行った。太陽光圧と重力場による軌道の乱れ(摂動)をラグランジュの惑星方程式を用いて解析的に表現することで、軌道の離心率や傾斜角のパラメータが常に一定となる凍結軌道の条件を解析的に導出した。また合わせて、得られた凍結軌道に生じた誤差がどのように拡大するかを定式化することで、軌道の安定性を定量的に評価する手法を考案した。

提案手法で求めた凍結軌道の例を図2に示す。この図は、太陽光圧と重力場の外乱を受ける軌道運動の数値シミュレーション結果である。解析的に導出した凍結軌道解を用いると、確かに強摂動環境でも100日オーダーで小惑星を周回し続けられることが分かった。本研究成果を応用すれば、燃料をほとんど使わずに長期間小惑星近傍に留まることが可能となる。

### (3) 小惑星表面への高精度着陸軌道

小惑星表面付近での重力場による摂動が顕著である領域においては、高精度着陸等の実現には高精度な軌道計算が不可欠である。そこで本研究では、構築した反復的数値計算とリュウグウ重力場モデルとを応用して、はやぶさ2の着陸軌道を設計した。はやぶさ2では、リュウグウの岩塊が多かったために、誤差3mの高精度着陸が要求された。

本研究では、まず天体を多面体でモデル化して重力場を計算することで、着陸点付近の局所的な重力環境を解析した。このリュウグウ重力モデルを用いて、着陸速度などの工学要求を満たす着陸軌道を設計した(図3左)。加えて、反復軌道計算から着陸分散を統計的に計算することで、高精度着陸の成立性を示した(図3右)。実際に、本研究で設計した軌道を用いて、はやぶさ2は2019年2月と7月に2度の着陸を見事成功させた。本研究ではさらに、構築した力学モデルと着陸運用時の実データとから、着陸軌道を事後復元した。軌道復元の結果、2回の着陸運用における着陸誤差がいずれも1m以下であることを明らかにし、本研究の有用性が示された。

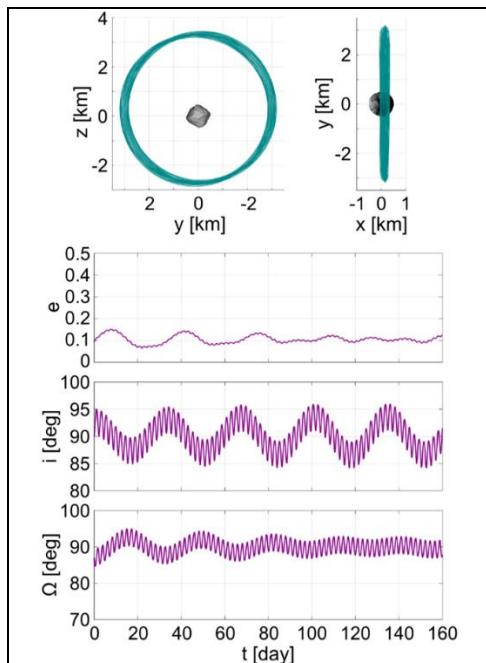


図2: 小惑星近傍での凍結軌道の例。下の3つの図は上から順に離心率・傾斜角・昇交点経度の時間履歴を表す。

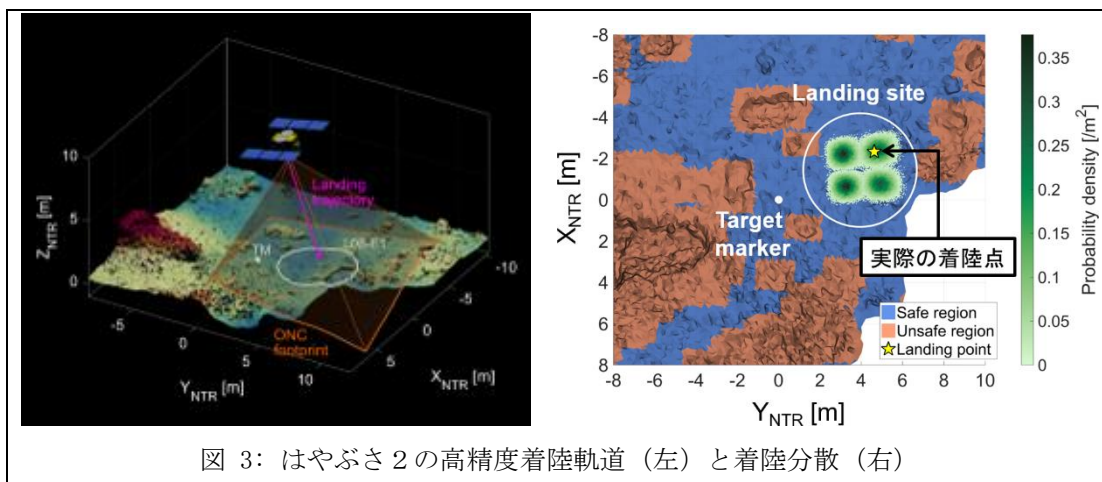


図3: はやぶさ2の高精度着陸軌道(左)と着陸分散(右)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 S. Kikuchi, F. Terui, N. Ogawa, T. Saiki, G. Ono, K. Yoshikawa, Y. Takei, Y. Mimasu, H. Ikeda, H. Sawada, S. Van Wal, S. Sugita, S. Watanabe, and Y. Tsuda	4. 巻 57
2. 論文標題 Design and Reconstruction of the Hayabusa2 Precision Landing on Ryugu	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 1033 ~ 1066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.A34683	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, Y. Tsuda, M. Yoshikawa, and J. Kawaguchi	4. 巻 42
2. 論文標題 Stability Analysis of Coupled Orbit-Attitude Dynamics around Asteroids Using Finite-Time Lyapunov Exponents	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 1289-1305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.G003879	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, S. Watanabe, T. Saiki, H. Yabuta, S. Sugita, T. Morota, N. Hirata, N. Hirata, T. Michikami, C. Honda, Y. Yokota, R. Honda, N. Sakatani, T. Okada, Y. Shimaki, K. Matsumoto, R. Noguchi, Y. Takei, F. Terui, N. Ogawa, K. Yoshikawa, G. Ono, Y. Mimasu, H. Sawada, H. Ikeda, C. Hirose, T. Takahashi, et al.	4. 巻 216
2. 論文標題 Hayabusa2 Landing Site Selection: Surface Topography of Ryugu and Touchdown Safety	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-020-00737-z	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Kikuchi, F. Terui, N. Ogawa, T. Saiki, G. Ono, K. Yoshikawa, Y. Takei, Y. Mimasu, H. Ikeda, H. Sawada, T. Morota, N. Hirata, N. Hirata, T. Kouyama, S. Kameda, and Y. Tsuda
2. 発表標題 Design and Reconstruction of the Hayabusa2 Precision Landing on Ryugu
3. 学会等名 2019 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kikuchi, Y. Oki, T. Saiki, Y. Takei, H. Takeuchi, G. Ono, H. Ikeda, and Y. Tsuda
2. 発表標題 Retrograde Teardrop Orbits about Asteroids: Application to the Hayabusa2 Mission
3. 学会等名 29th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kikuchi, Y. Oki, and Y. Tsuda
2. 発表標題 Frozen Orbits under Radiation Pressure and Zonal Gravity Perturbations
3. 学会等名 30th AIAA/AAS Space Flight Mechanics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020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