第12回宇宙科学奨励賞 受賞記念講演 2021年4月27日

小天体近傍の強摂動環境における 軌道・姿勢力学理論の構築

菊地 翔太

JAXA 宇宙科学研究所 (現所属:千葉工業大学 惑星探査研究センター)

地球での物体の運動







小惑星や彗星などの小天体近傍では、物体が特異な動きをする

なぜ動きのズレが生じるのか?



小天体近傍の力学環境



小天体近傍の物体の運動は強く乱される = <mark>強摂動環境</mark>

本研究分野の発展



小天体探査の活発化 🛉 小天体探査機に関する力学理論の発展

ケプラーやニュートンらの研究に端を発する軌道力学の中では新しい分野





小天体からの距離に応じた摂動により、特異な運動を呈する

惑星→十分な速度があれば、円 or 楕円軌道になる
 小天体→軌道が乱れ、最悪の場合は離脱や衝突に至る

一算例

リュウグウ近傍での はやぶさ2の軌道計算例

小天体探査では、長期間の安定的な滞在が課題

従来の滞在方法

ホバリング (はやぶさシリーズ)





燃料消費量が多い



ホバリングより<mark>燃費が良く、</mark>従来の周回軌道より自由度が高い 小天体近傍での安定的な滞在方法はないだろうか?

新たな滞在方法

1周に1回<mark>少量のΔV</mark> (速度変化) を与えるだけで、安定的に 小天体近傍に留まりうる人工的な周期軌道を見出した。



(幻の) リュウグウ周回軌道

種々の制約を満たす 1周3日間の<mark>涙滴軌道</mark>

- ・燃料消費が少ない
- 安全性が高い
- ・観測しやすい
- ・通信しやすい
- 日かげに入らない
 など



はやぶさ2のエクストラ運用のオプションとして、 人工的な周期軌道によるリュウグウ周回が計画された。

本研究の副次的成果

はやぶさ2のリュウグウ周回は、 残念ながら実現しなかったが、 小天体滞在の新手法を手にした。

また、本研究の知見の一部が、 ターゲットマーカとMINERVA-II2 のリュウグウ周回に活かされた。

ターゲットマーカの周回







小天体からの距離に応じた摂動により、特異な運動を呈する

小天体近傍での軌道-姿勢運動



小天体近傍での軌道・姿勢運動は摂動を受ける ことに加えて、互いに強く<mark>連成 (カップリング)</mark> する

軌道-姿勢連成運動の重要性

従来の軌道と姿勢を扱う研究は、大多数が一方向の依存性のみ考慮。 小天体での重力と太陽光圧を介する連成運動は、ほぼ例がなかった。

軌道-姿勢連成運動の理解は、より高度な小天体探査に繋がる (推進剤の節約や、推進機のない小型ロボットの長期運用など)

軌道-姿勢連成運動のモデル化



□小天体近傍での軌道-姿勢連成運動の正確な数値計算が可能になった

□運動方程式に適切な近似を施すことで、複雑な軌道-姿勢連成運動の 振る舞いを解析的に理解できるようになった

軌道-姿勢連成運動の安定解







小天体からの距離に応じた摂動により、特異な運動を呈する

小天体着陸の課題



リュウグウの表面重力



はやぶさ2の着陸点では、リュウグウが球である 場合と比べて、約20%重力が強いことが分かった。

着陸軌道のシミュレーション



10万回の数値解析で、数メートル精度の着陸成立性を示した



まとめ

□小天体近傍の運動は、重力の偏りと太陽光圧で乱される

□研究①:人工的な周期軌道 低燃費かつ自由度の高い、新たな滞在手法を考案した

□研究②: 軌道-姿勢連成運動 連成現象をモデル化し、長期間安定な解を見出した

□研究③:高精度着陸軌道 重力の偏りを考慮した着陸軌道の設計手法を確立した はやぶさ2でメートル精度の着陸が実現できた







はやぶさ2拡張ミッション の目標天体 1998 KY26 は、 未踏の数十メートル級天体。

超強摂動環境の力学!



□ 以下の方々に、この場をお借りして厚く御礼を申し上げます。

- 修士・博士課程で様々な形で研究のサポートして頂き、また私 が深宇宙探査を志すきっかけを与えてくださった、指導教授の 川口淳一郎先生
- ・ 学生時代からポスドクに至るまで、ご多忙の中、根気強く研究 相談に乗って頂いた、はやぶさ2プロジェクトの津田雄一先生
- 本研究を新たな視点で拡張する契機となった留学で、客員研究 員として迎えてくださった、Purdue大学のKathleen Howell先生
- 本研究を磨き上げる上で欠かせないご助言を頂いた、川口研・ はやぶさ2プロジェクト・OKEANOSプロジェクトの皆様
- 宇宙科学振興会および本賞選考委員の皆様

□本研究分野は、まだ知られていないことも多く、学術的に面白い (そして時に美しい)性質が多く備わっていると感じます。 小天体探査を活発に行う上で、実用上も重要性が増してくる分野 だと思いますので、今後も研究活動に励んで参ります。

受賞対象の研究に関する論文

研究①

□ Shota Kikuchi et al., "Delta-V Assisted Periodic Orbits around Small Bodies," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 40, No. 1, pp. 150-163, 2017.

研究2

- Shota Kikuchi et al., "Orbit-Attitude Coupled Motion around Small Bodies: Sun-Synchronous Orbits with Sun-Tracking Attitude Motion," *Acta Astronautica*, Vol. 140, pp. 34-48, 2017.
- Shota Kikuchi et al., "Stability Analysis of Coupled Orbit-Attitude Dynamics around Asteroids Using Finite-Time Lyapunov Exponents," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 42, No. 6, pp. 1289-1305, 2019.

研究③

- Shota Kikuchi et al., "Design and Reconstruction of the Hayabusa2 Precision Landing on Ryugu," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 57, No. 5, pp. 1033-1060, 2020.
 ※同タイトルで、2019 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference にて発表
- □ Shota Kikuchi et al., "Hayabusa2 Landing Site Selection: Surface Topography of Ryugu and Touchdown Safety," *Space Science Reviews*, Vol. 216, No. 7, 116, 2020.