



Title	Dynamical Evolution of Small Solar System Bodies Inferred from Interior Density Distribution and YORP-induced Spin Alteration
Author(s)	金丸, 仁明
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76407
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (金 丸 仁 明)

論文題名

Dynamical Evolution of Small Solar System Bodies Inferred from Interior Density Distribution and YORP-induced Spin Alteration
(内部密度分布とYORP効果による自転状態の進化から明らかにする太陽系小天体の力学進化)

論文内容の要旨

小惑星・彗星・宇宙塵をはじめとする太陽系小天体（以下、小天体）は、太陽系形成初期の微惑星あるいはその生き残りであると考えられている。揮発性物質が凝縮する低温領域、すなわちスノーラインの外側で形成した小天体が地球に飛来することで、原始地球に水や有機物が供給された。小天体が経験した軌道進化や衝突・破壊・再集積といった力学進化過程を理解することは、小天体の起源を制約し、太陽系内の物質輸送過程を明らかにする上で重要である。小惑星探査機が取得したデータから力学進化過程を復元する手法を確立することを目的として、（１）小惑星の自転状態の進化を再現する数値計算と、（２）小天体内部の密度分布を推定する手法の開発を行った。

（１）日本の小惑星探査機「はやぶさ２」は、2018年6月に小惑星Ryuguに到着後、１年半近くRyugu近傍に滞在し、詳細な科学観測を行った。小惑星Ryugu最大の特徴の一つが、「コマ型」と呼ばれるひし形の天体形状である。赤道域が隆起したコマ型形状は、かつてRyuguが高速に自転していた時代に、小惑星の変形あるいは表層の物質移動によって形成したと考えられている。本研究は、高速自転の状態（自転周期 ～ 3.5 h）から現在のゆるやかな自転状態（自転周期 7.6 h）に至る減速過程を明らかにして、小惑星Ryuguの力学進化史の構築を目指した。

小惑星の自転状態を変化させる現象として、「YORP効果」が知られている。太陽光に温められた小惑星の表面から熱放射が起こるとき、天体の不規則な形状に起因して異方性が生じる。熱放射の異方性によるトルクは、百万年スケールで小惑星の自転周期や自転軸の向きを変化させる。はやぶさ２が取得した小惑星Ryuguの軌道・自転・形状に関するデータをもとに、自転速度と自転軸傾斜角の変化率を計算した。本研究の結果は、Ryuguの自転が現在は減速していることを示唆している。さらに、様々な自転周期と自転軸傾斜角を初期条件として、その後の自転状態の進化を計算した。Ryuguが現在の自転状態に達するまでの時間スケールは25万年～230万年程度であり、これはクレーターの数密度から見積もられるRyuguの表層年代～900万年に比べると短いことがわかった。これらの結果は、隕石衝突や地球への接近といった自転状態を変化させるイベントが少なくとも230万年以内に起きたことを示唆している。

（２）小惑星内部の密度分布は、天体の形成過程を解明するための重要な手がかりである。しかしながら、小惑星探査においては、探査機の軌道から天体の重力場を高精度で決定して、内部構造を制約することが困難である。そこで、小惑星の３次元形状から計算した重力場と地質学的な特徴から密度分布を推定する手法を提案した(Kanamaru, Sasaki and Wieczorek, 2019)。小惑星には、低地に砂礫が堆積して形成した平坦な地形 (smooth terrain) が見られる。我々の密度分布推定法は、天体形状から抽出したsmooth terrainの分布と天体表面における等ポテンシャル面が一致するような密度分布を探索するものである。はやぶさ初号機が探査を行なった小惑星Itokawaは、二つの楕円体（「頭」と「胴体」）が合体したような形状をもつ。本手法をItokawaに適用したところ、頭と胴体に20%程度の密度差（空隙率の差）があることが示唆された。同様の形状をもつ彗星67P/Churyumov-Gerasimenkoにも本手法を適用し、Itokawaとは対照的に、全球で一様な密度分布を示唆する結果を得た。推定された密度分布は、小天体の集積過程を理解する上で重要な示唆を与える。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (金 丸 仁 明)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	佐々木 晶
	副 査	教授	近藤 忠
	副 査	教授	寺田 健太郎
	副 査	准教授	佐伯 和人
	副 査	准教授	諸田 智克
(東京大学理学系研究科)			

論文審査の結果の要旨

小惑星・彗星・宇宙塵をはじめとする太陽系小天体（以下、小天体）は、太陽系形成初期から生き残った惑星の材料物質となった天体である。揮発性物質が凝縮する低温領域、すなわちスノーラインの外側で形成した小天体が地球に飛来することで、原始地球に水や有機物が供給された。太陽系内の物質輸送と地球環境の形成過程を解明するためには、小天体の起源や進化過程の理解が欠かせない。特に、小惑星がたどった力学進化過程、すなわち軌道進化や衝突・破壊・再集積の過程を明らかにするため、申請者は（１）小惑星の自転状態の進化を復元するための数値計算、（２）小天体内部の密度分布を推定する手法の開発を行ってきた。

（１）日本の小惑星探査機「はやぶさ２」が接近観測を行なった小惑星 Ryugu は、赤道域が隆起した特徴的な「コマ型」形状をもつ。この形状は、かつて Ryugu が高速に自転していた時代に、遠心力によって形成したものと考えられている。高速自転（自転周期 3.5 時間）から現在の緩やかな自転（周期 7.6 時間）に至る減速過程を理解するため、小惑星 Ryugu に働く「YORP 効果」の数値計算を行なった。YORP 効果とは、天体表面からの熱放射の異方性によってトルクが生じて、小惑星の自転状態が変化する現象である。はやぶさ２が得た小惑星 Ryugu の軌道・自転・形状をもとに、熱トルクによる自転周期と自転軸傾斜角（自転軸の向き）の変化率を計算した。その結果、Ryugu の自転が現在は減速していることが示唆された。さらに、自転状態の時間変化を小惑星表層のクレーター年代と比較することで、Ryugu の力学進化過程に制約を与えることができ、YORP 以外の衝突や惑星遭遇などの効果が必要なことが明らかになった。

（２）重力の小さい小惑星探査においては、重力測定から天体内部の密度分布を決定することが困難であり、内部構造を理解する上で大きな障壁となっている。我々は、小惑星上に見られる平坦な地形“smooth terrain”を天体表面の重力場のアナログとして、密度分布を推定する手法を提案した。はやぶさ初号機が探査した小惑星 Itokawa にも、低地に砂礫が堆積して形成した smooth terrain が存在する。我々の密度分布推定法を Itokawa に適用して、天体表面から抽出した smooth terrain の分布と計算した等ポテンシャル面が一致するように密度分布を推定した。その結果、Itokawa の形状を構成する二つの楕円体（頭と胴体）に 20%程度の密度不均質（空隙率の差）がある可能性を見出した。これは、小天体の集積過程を理解する上で重要な示唆を与える。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。