

小惑星 Ryugu に働く YORP 効果の数値計算 ～自転状態の進化史解明に向けて～

金丸 仁明¹、佐々木 晶¹、諸田 智克²、長 勇一郎²、平田 成³、平田 直之⁴、
千秋 博紀⁵、寫生 有理⁶、田中 智⁶、杉田 精司²、渡邊 誠一郎⁷

¹大阪大学、²東京大学、³会津大学、⁴神戸大学、⁵千葉工業大学、⁶JAXA、⁷名古屋大学

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 は、「コマ型」と呼ばれる特徴的な形状をもち、自転周期 $P = 7.6$ 時間で逆行自転（自転軸傾斜角 $\varepsilon = 172^\circ$ ）している。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ものと考えられている (Watanabe+2019, Hirabayashi+2019, Sugiura+2019@衝突研究会)。本研究では、小惑星 Ryugu の進化過程を理解するために本質的に重要と思われる、自転の減速過程とその時間スケールについて調べた。

小惑星の自転状態を系統的に変化させる現象として、「YORP 効果」が知られている (e.g. Rubincam 2000)。太陽光に温められた天体表面からの熱放射に起因するトルクは、小惑星の自転周期や自転軸の向きを 100 万年の時間スケールで変化させる。我々は、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、YORP 効果による自転速度 ω と自転軸傾斜角 ε の変化率を計算した。Stereo-photoclinometry (SPC) と呼ばれる手法を用いて作成された 49,152 メッシュの形状モデル (ver. 2019-08-02) を用いた場合、現在の Ryugu の ω と ε の変化率は、それぞれ -5.6×10^{-3} [deg/sec/Myr]、23 [deg/Myr] となった。この結果は、Ryugu の自転が現在は減速しており、自転軸が直立していく ($\varepsilon \rightarrow 180^\circ$) 過程にあることを示唆している。

自転状態の長期進化を再現するため、YORP 効果の自転軸傾斜角 ε に対する依存性を調べた。図1からは、Ryugu がある自転軸傾斜角 ε をもつときの、 ε (実線) と ω (破線) の変化率が読み取れる。この ε 依存性に基づくと、Ryugu の自転軸傾斜角は、初期状態 (ε_0) によって $\varepsilon = 0, 90, 180^\circ$ のいずれかに漸近していき、そのとき自転速度は減速に転じることが予想される。

図2は、適当な初期状態（自転周期 $P_0 = 7$ 時間、自転軸傾斜角 $\varepsilon_0 = 135 \sim 175^\circ$ ）から始めた時の Ryugu の自転進化を示している。YORP 効果が働くと、Ryugu のクレーター年代（ ~ 800 万年@NEA, Sugita+2019, Morota+ in revision）に比べて短時間で自転軸傾斜角 ε が 180° まで達してしまう。現在の Ryugu の自転状態 ($P = 7.6$ 時間、 $\varepsilon = 172^\circ$) を実現するためには、クレーター形成による天体形状の変化や惑星との接近による自転状態の変化などが最近（ ~ 230 万年以内？）起きていた必要がある。

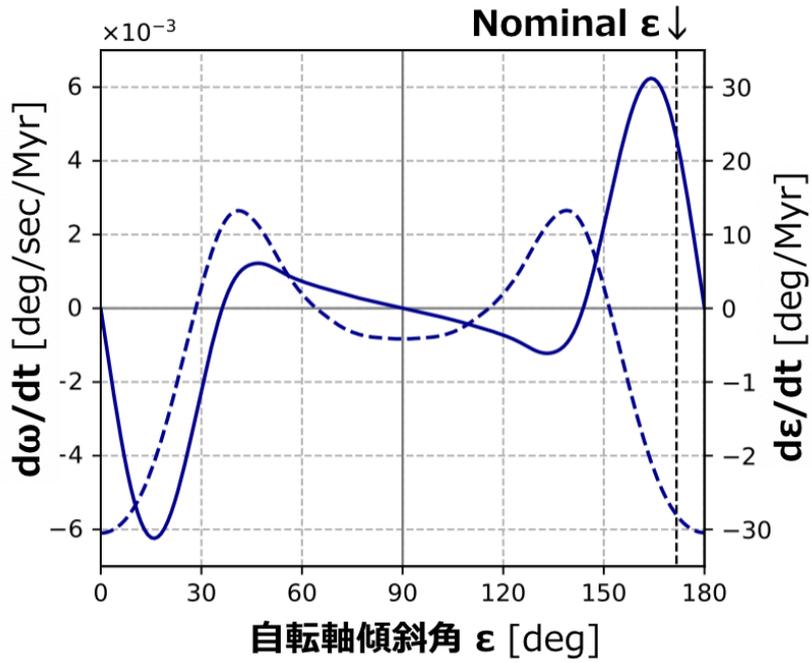


図1：自転速度 ω と自転軸傾斜角 ε の変化率/100万年。

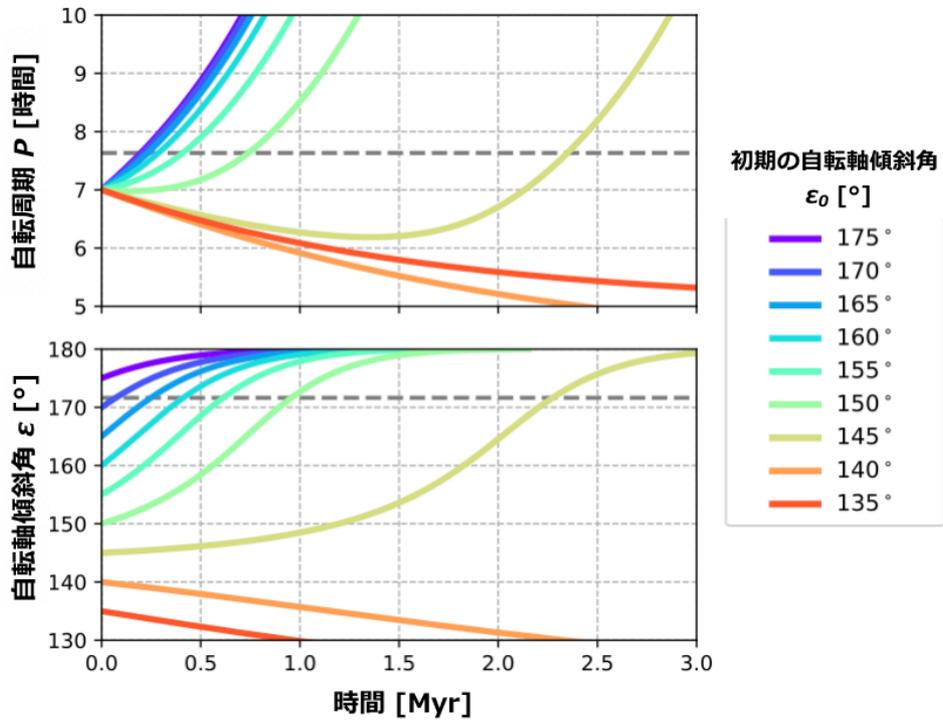


図2：初期自転周期7時間から始めた Ryugu の自転状態の進化。初期の自転軸傾斜角を変えて計算を行った。