

## 剛体物理シミュレーションで探るラブルパイル小惑星の集積過程と 全体形状、内部構造

平田成、角田竜規、小林拓斗、佐藤優多（会津大学）

小惑星 Itokawa、Ryugu や Bennu など、rubble-pile 構造を持つ小惑星の存在は広く知られている。これらの rubble-pile 小惑星は、母天体の衝突破片の集積によって形成された、という共通する形成過程を持っているはずでありながら、外見には大きな多様性がある。算盤の球、またはコマに喩えられる Ryugu の三軸比は  $b/a=0.96$ ,  $c/a=0.87$  とされているが、ラッコに喩えられる Itokawa 全体の三軸比は  $b/a=0.55$ ,  $c/a=0.39$  であり、頭部と胴部に分けたとしても胴部の三軸比は  $b/a=0.63$ ,  $c/a=0.53$  と依然として細長い部類に入る。小惑星形状の多様性は地上または宇宙望遠鏡によるライトカーブ観測からも示唆されている。メインベルト小惑星のライトカーブ観測の統計的解析からは、直径 10 km 以下の小惑星（衝突破壊の寿命から考えて rubble-pile 構造を持つ可能性が高い）の軸比は  $b/a$  換算で 1.0 から 0.4 近辺まで広く分布し、そのピークは約 0.6 である（Cibulková+2016）また、当初は Itokawa のように大きなマクロ空隙率（約 40%）を保つことが rubble-pile 小惑星の特徴であるとみなされていたが、Ryugu（バルク空隙率約 50%）や Bennu の大きなバルク空隙率はむしろミクロな空隙に由来する可能性が指摘されている。Grott+2020 では Ryugu のマクロ空隙率を約 16% と推定した。つまり、Rubble-pile 小惑星はバルク空隙率にも多様性があるということになる。

本研究では、Rubble-pile 小惑星の集積過程を剛体物理シミュレーションで再現することで、その全体形状、内部構造の多様性がどのような要因で生じるのかを調べることを目指している。オープンソースの物理シミュレーションエンジンである Chrono を用いて rubble-pile を構成する母天体の衝突破片の集積、合体の過程を再現し、形成された rubble-pile 小惑星の三軸比や空隙率を計測した。個別の破片形状は、衝突破壊実験で形成される破片や小惑星表面に存在する岩塊の典型的な軸比である  $2:\sqrt{2}:1$  として、冪乗則（冪指数-2.5）に従った衝突破片のサイズ頻度分布モデルを同サイズの最大破片が四個存在する寡占ケースと、ただ一つの最大破片が存在する独占ケースの二種類を準備した。このモデルに沿った破片をランダムな順番で集積させるシミュレーションを各 300 回繰り返し、形成された Rubble-pile 小惑星の三軸比と空隙率を求めてその統計的な性質を明らかにすることで、観測されている Rubble-pile 小惑星の三軸比や空隙率の分布、範囲が再現され得るか、また Itokawa のような極端な形状を持つ小惑星が形成され得るかの検証を行なった。

シミュレーションの結果、いずれのケースでも形成された Rubble-pile 小惑星の三軸比は 1.0 から 0.7 程度に分布し、その平均値と標準偏差は  $b/a=0.89\pm 0.05$ ,  $c/a=0.82\pm 0.05$  となった。従って、Ryugu や Bennu のような三軸比が 1 に近い形状を

持つ rubble-pile 小惑星は寡占ケース、独占ケースのいずれの場合もごく自然に形成されることがわかった。 $b/a$ の分布はライトカーブ観測から推定される直径 10 km 以下のメインベルト小惑星の軸比の分布範囲とは全く異なり、より球形に近い方に偏っている。Itokawa のような極端に細長い形状を持つ小惑星が形成される結果も発生しなかった。この傾向は、集積過程の中で小さい破片が小惑星上の低地に移動することで、より三軸比が 1 に近い形状になろうとする物理が働いていることによると解釈している。一方、マクロ空隙率は常に Itokawa のように大きい値を取ることがわかった。マクロ空隙率は独占ケースで平均  $29.0 \pm 0.7\%$ 、寡占ケースで  $34.2 \pm 0.8\%$  となり、等サイズ球の最密充填の空隙率よりやや小さい結果となった。また、軸比と空隙率には相関はないことも判明している。空隙率の結果を観測と比較すると、Itokawa のマクロ空隙率（約 40%）は説明可能かもしれないが、Ryugu（約 16%, Grott+2020）は説明が難しい。このことは Grott+2020 の見積もりに疑問を投げかけることとなる。

今回使用した衝突破片のサイズ頻度分布モデルでは、冪関数の傾きは比較的緩やかで、最小破片サイズの打ち切りも行なっている。冪関数の傾きをより急に変えたり、破片サイズの打ち切り位置を小さい方に変えたサイズ頻度モデルを用いた場合は、マクロ空隙率が減少することが予想されるが、Ryugu や Bennu の推定マクロ空隙率が実現される条件を見出すためには、今後さらなる検討が必要である。