

Rubble-Pile 天体形成と小惑星のサイズ分布

○平田成¹

¹会津大学

小惑星探査機はやぶさの重要な成果の一つとして、小惑星 Itokawa の空隙率が非常に大きいことの発見が挙げられる (Fujiwara et al., 2006; Abe et al., 2006)。これは、Itokawa が Rubble-Pile 構造を持つ天体であるらしいことを示唆する。Rubble-Pile 天体は、一般に引張り強度 0 で、自己重力のみで天体としての形状が成立している天体と定義されている (Richardson et al., 2002)。このような天体の存在についての議論は小惑星の研究史の中でかなり早い時期に始まっている。当初は、小惑星に対して多数回の衝突が起きることによって破壊が蓄積して Rubble-Pile 構造となる、あるいは破局的な衝突破壊の結果として Rubble-Pile 天体が形成される、と考えられてきた (Davis, 1979)。その後破局的な衝突破壊が生じた後、飛散した破片同士が自己重力で再集積することによっても Rubble-Pile 天体が形成されることが示唆されるようになった。

このような Rubble-Pile 天体形成過程の理解の進展を受けて、計算機シミュレーションで衝突破壊現象と破片の再集積過程の再現が試みられているほか、シミュレーション結果と実際の小惑星族のサイズ頻度分布と比較した議論もある (Michel et al., 2003; 2004)。ただし、現在のシミュレーション手法では破片の最小サイズは 1km 程度であり、Itokawa のような小サイズ小惑星の状態を議論することはできない。また、再集積過程の全てを追跡している訳ではないため、個別の小惑星の状態についても不明である。

一方、探査機による直接観測では長らく Rubble-Pile 構造を持つ天体の実在は確認されなかった。小惑星 Ida, Gaspra, Mathilde, Eros は Mathilde を除いて空隙率がそれほど大きくないことや、全球的な構造地形の存在などから、Rubble-Pile ではない、と見なされている。このような観測事実を説明するため、例えば Cheng (2004) では小惑星の衝突破壊による寿命の見積もりを行い、過去探査された 10-50km サイズの小惑星は太陽系の年齢に対して十分長い寿命を持ち、破局的破壊を経験していないため、Rubble-Pile 構造を持たないのではないかと主張している。この主張は、小さく寿命の短い Itokawa が Rubble-Pile 構造を持つこととも整合した説明ではある。しかしながら、太陽系形成初期には現在より小惑星の数がかなり多かったことが示唆されている (Bottke et al., 2005)。そのような環境下での衝突頻度を考慮すると小惑星の衝突破壊寿命はもっと短くなる可能性があるため、10-50km サイズの小惑星に Rubble-Pile 構造が見られないことの十分な説明になっているとは言い難い。それよりは、自己重力による破片の再集積効率がサイズに依存しているためと解釈するのが自然であるように考えられるが、これは Itokawa のような小サイズ Rubble-Pile 天体の存在の理由を説明できない。

探査機による直接観測は精度が高いが、対象天体の数が少なく、観測バイアスの評価が難しい。これに対し、小惑星の位置観測結果を集積して小惑星同士の軌道擾乱の量を見積もることで小惑星質量の計測を行う手法 (アストロメトリー) は、精度は高くはないものの多くの小惑星の空隙率の推定を可能としている。図は Bear et al. (2011) による空隙率見積もりのサマリーにいくつかの文献値を追加して作成した、小惑星サイズと空隙率の関係を示したものである。Britt et al. (2002) では小惑星の巨視的空隙率を基準に、30%以上を Rubble-Pile、20%以下を Fractured または Monolithic 天体と分類している。隕石の典型的な微視的空隙率は約 10% であるので (普通コンドライトの場合)、バルク空隙率で考えると 40% 以上

が Rubble-Pile, 30%以下を Fractured または Monolithic 天体に相当する。この図からは、小惑星のバルク密度とそこから推定される内部構造がサイズごとに大きく変わっていることが示唆される。直径 500km 以上の小惑星は基本的に空隙率は低く、自己重力による圧密が効いていることが示唆される。直径 100-500km の領域では低空隙率の小惑星と高空隙率の小惑星に二極分化している。これは、初生小惑星の生き残り と破局的破壊を経験した Rubble-Pile 小惑星が共存していることを意味するのかもしれない。しかし、高空隙率のグループには C 型とその類縁の小惑星タイプが多く、構成物質の違いを見ている可能性もある。Mathilde も属する 50-100km の領域では、全ての小惑星が高空隙率を持っているが、それより小さい 5-50km の領域では一転して低い空隙率を持つようになる。アストロメトリーといえどもこのサイズでの観測例はごく少なく、プロット点のほとんどが探査機の観測に由来するデータではあるが、この傾向に反する例は今のところ見つかっていない。さらに興味深いことに、Itokawa も属する 5km 以下の領域では再び高空隙率の小惑星が主体となる。この図から読み取れる小惑星のサイズと内部構造の関係は、探査機による観測の結果が大局的には小惑星全体の状況を反映したものであることを示唆しているが、その成因を明快に説明することは依然として難しいと思われる。今後の観測、探査によってデータを増やすとともに、理論計算とシミュレーションによって、より妥当な小惑星の内部構造進化モデルの構築が行われることが望まれる。

