

微惑星衝突による不規則形状形成と衝突条件依存性

○杉浦圭祐, 小林浩, 犬塚修一郎
名古屋大学大学院理学研究科

惑星探査機その場観測や天文観測のライトカーブの詳細な解析により 1000 個程度の小惑星の形状モデルが得られ, 小惑星の形状を用いた統計的な議論も可能となってきた. 小惑星イトカワのラッコのような形状に見られるように多くの小惑星は不規則な形状をしており, 約 60%の小惑星が短軸-長軸比が 0.6 以下の形状を持つ. このような不規則な形状は小惑星どうしの衝突にともなう破壊や合体により形成された可能性が高く, 衝突条件と形成される形状に関係をつけることで, 形状から過去の衝突環境に制限を付けられることが期待される.

そこで本研究では, 弾性体 SPH 法による数値シミュレーションを用い, 衝突条件とその結果できる天体の形状に関係をつけることを目指す. 小惑星の衝突破壊と自己重力再集積による形状形成を再現するため, 数値計算コードに自己重力, 岩石のひび割れ破壊, 粉々に砕けた岩石間に生じる摩擦の効果を導入した. 開発したコードを用いて, まずは簡単のため半径 50km の球形状の岩石小惑星どうしの衝突に限り, 衝突速度と衝突角度を系統的に変化させて衝突計算を実行した. 詳細なパラメータスタディを行うため, 1 微惑星あたりに 50,000 SPH 粒子だけを使用した. 衝突速度を 50m/s から 400m/s まで 25m/s ごとに, 衝突角度を 5° から 45° まで 5° ごとに変化させて合計 135 通りの計算を, 衝突後 10 万秒まで実行し, 最大天体の形状を調べた. その結果図 1 に示されるように, 最大天体の形状は衝突速度 v と衝突角度 θ に応じておおまかに 5 通りに分類できることが分かった.

多くの小惑星で見られる細長い形状は, 高速で中角度の場合 ($v > 100\text{m/s}$, $\theta < 30^\circ$, $v \sin \theta > 30\text{m/s}$) で形成されることが分かった. この速度-角度領域で細長い形状が形成される理由を定性的に説明することにも成功したので, 以下で解説する.

細長い形状は, 衝突速度のうちで小惑星の中心を結んだ線に垂直な成分の方向に 1 次元的に引き伸ばされて形成される. このような引き伸ばしによって細長い形状を形成するためには,

- (i) 変形を可能にする程度に衝突速度が大きいこと,
- (ii) 衝突角度が高いと端のみ削る衝突になるので全体を変形させる程度に衝突角度が低いこと,
- (iii) 正面衝突に近いと引き伸ばしに使える速度成分が小さくなるのでその分速度が大きいこと, が必要である. これらのそれぞれの条件から (i) $v > 100\text{m/s}$, (ii) $\theta < 30^\circ$, (iii) $v \sin \theta > 30\text{m/s}$ という条件が得られる (図 1 参照).

しかしながら, 衝突速度が大きく最大天体の質量が初期の微惑星質量の 0.3 倍よりも小さいような場合には, 最大天体を構成する SPH 粒子数が少なくなってしまうという理由もあり形状の分類を行わなかった. またそもそもそのような破壊的な計算では最大天体の質量

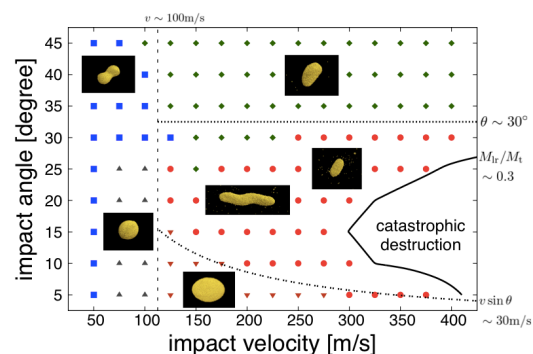


図 1: 衝突条件と形成された最大天体の形状の関係を, 典型的な形状の図とともに表したものを. 衝突角度は 0° が正面衝突である. 青い四角は頭が 2 つある形状, 灰の三角は球形状, 茶の逆三角は平たい形状, 赤い丸は細長い形状, 緑の菱形は半球形状を表す. 四本の線はそれぞれ細長い形状とその他を大まかに分ける線である. 実線の右側は破壊の度合いが大きく形状を調べなかった領域を表す.

に近い集積天体が多数できるため、最大天体の形状のみを測定するだけでは不十分である。このような破壊的な場合にできる形状を調べるためには、高解像度の計算を行い、最大天体以外の比較的小さな集積天体の形状まで測定して統計的に議論する必要がある。

そこで破壊的かつ高解像度の衝突計算を実行した。半径 50km の微惑星どうしの衝突を、衝突速度 400m/s、衝突角度 15° で行った。1 微惑星あたりには 200 万 SPH 粒子を使用し、パラメータスタディを行った時よりも 40 倍多い SPH 粒子数を用いた。この計算を同様に衝突後 10 万秒まで実行し、破片の再集積によって多数の集積天体が形成される様子を確認した。

図 2 はこの衝突計算によって形成された集積天体の累積個数分布を表す。図から、この衝突計算でできた最大天体の質量は初期の微惑星の質量の約 0.09 倍であり、非常に破壊的な衝突であることがわかる。半径方向に 10 個 SPH 粒子が置けるような解像度で球を構成すると約 4,000 SPH 粒子必要なことから、5,000 SPH 粒子で構成される集積天体ならば形状を信用していいと考えられる。図 2 の累積個数分布を見ると、5,000 SPH 粒子以上で構成される集積天体は 69 個あることがわかる。

図 3 はそのような集積天体の軸比を測定した結果を表す。図からわかる通り、中には中間軸/長軸比が 0.5 程度となる集積天体もあることがわかる。この小さい軸比は集積天体どうしが低速度で再衝突して合体することでできた、頭が 2 つあるような形状によるものである。一方で小さいものほど軸比の値が大きくなる、つまり丸い形状が多くなっていることもわかる。しかしながら実際には小さい小惑星ほどいびつな形状をしているものが多いため、この結果だけではそのような傾向は説明できない。今後は衝突条件や用いるパラメータを変えて軸比の分布がどのような影響を受けるかを調べたり、自転角速度の分布がどのようなになっているかも調べたりする予定である。

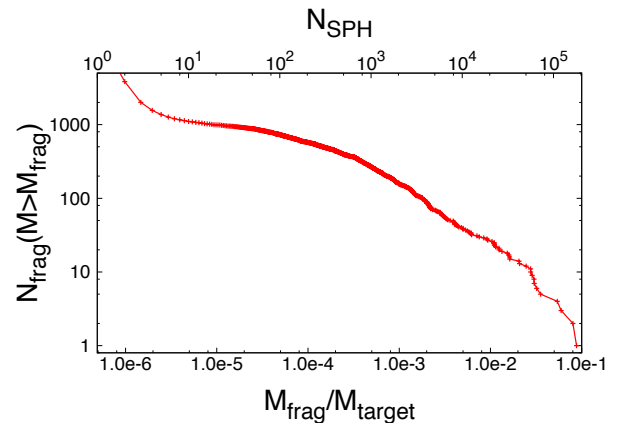


図 2: 高解像度衝突計算で生じた集積天体の累積個数分布。横軸は集積天体の質量を初期の微惑星質量で規格化したもの、もしくは集積天体を構成する SPH 粒子数を表す。また縦軸はある質量よりも重い集積天体の累積個数を表す。

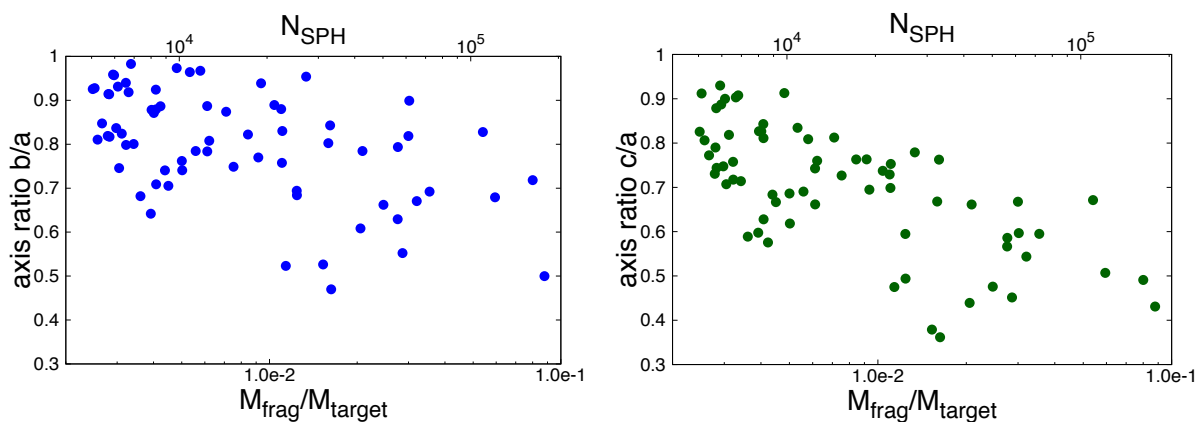


図 3: 高解像度衝突計算で生じた集積天体の軸比。軸比の値は楕円体に近似して慣性モーメントを比較することで計算した。横軸は初期の微惑星質量で企画化した集積天体質量もしくは SPH 粒子数、縦軸は軸比である。左の図は中間軸/長軸比、右の図は短軸/長軸比を表す。