

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Development of the Numerical Simulation Method for Rocky Body Impacts and Theoretical Analysis of Asteroidal Shapes
(固体天体衝突現象を扱う数値計算法の開発と小惑星形状の成因の理論的解析)

氏 名 杉浦 圭祐

論 文 内 容 の 要 旨

太陽系の火星と木星の軌道の間には多数の小惑星が存在している。小惑星は惑星形成期に存在した小天体の残滓であり、その小ささ故に熔融などの大きな変性を受けることなく生き残ってきた化石でもある。そのため小惑星の詳細な研究は太陽系の歴史を明らかにすることに繋がる。

探査機「はやぶさ」によって明らかとなった小惑星イトカワの細長い形状から分かるように、小惑星は球形状に限らず様々な形状をしている。今や小惑星の光度曲線の詳細な観測により約 1600 個の小惑星の形状が明らかとなっている。小惑星の形状は主に小惑星同士の衝突によって形成するため、衝突速度などの衝突条件と形成される小惑星形状の関係性を明らかにすることで、小惑星の衝突史を統計的に議論することが可能である。先行研究ではいくつかの小惑星の形状を作る衝突条件については調べられていたが、衝突条件と形成される小惑星形状の関係性に関する包括的な研究は十分になされていなかった。そこで我々は、数値シミュレーションを用いて岩石小惑星の衝突を様々な衝突条件で再現し、形成される形状について調べた。

我々はまず、固体天体衝突現象を取り扱うことのできる数値計算手法を開発した。衝突のような大変形を伴う問題には粒子法が適しているため、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を弾性体力学に拡張することで計算法開発を行った。しかしながら弾性体 SPH 法には張力優勢領域で数値不安定性が起きるという問題が存在する。我々は Inutsuka (2002) のゴドノフ SPH 法の知見を基にしてこの数値不安定性を解決する新しい手法を確立した。また岩石の衝突破壊及び重力による再集積を再現するため、自己重力、岩石の破壊モデル (Benz and Asphaug 1995)、粉々になった岩石間の摩擦モデル (Jutzi 2015) を導入した。さらに高解像度計算を行うため、理化学研究所粒子系シミュレータ研究チームが開発した Framework for Developing Particle

Simulator (Iwasawa et al. 2015, 2016) を利用して計算コードの並列化を行い、スーパーコンピュータを用いた大規模並列計算及び広範囲のパラメータサーベイを可能とした。

直径 100km 以上の実際の小惑星の形状と比較するため、開発した計算コードを用いて直径 100km の岩石ターゲット天体への衝突シミュレーションを実行した。まず惑星形成期に実現される数 100 m/s の衝突速度で数値計算を行った。その結果、衝突する 2 天体の質量差が 2 倍よりも小さい場合には短軸/長軸比が 0.5 以下の極めて平たい形状を含む様々な形状を持つ最大天体ができ、それよりも質量差が大きい場合には短軸/長軸比が 0.5 以上の丸い最大天体しかできないことがわかった。次に現在の太陽系で実現される数 km/s の衝突速度で数値計算を行った。衝突する 2 天体の質量差が 64 倍の計算では破壊的ではない衝突が起きるが、最大天体の形状は短軸/長軸比が 0.7 以上の丸い形状しかできなかった。一方質量差が 8 倍よりも小さい場合には大規模破壊が起きるが、細かい集積天体の形状まで調べても丸い形状か中間軸/長軸比が 0.5 程度の頭が 2 つあるような形状しか形成されないことがわかった。以上から、平たい小惑星形状は始原的な環境での低速度で等質量に近い衝突でしか形成されないことが予想される。この予測を検証するため、Database of Asteroid Models from Inversion Technique の小惑星形状モデルを解析し、最近の破壊的な衝突の影響を受けた族に含まれる小惑星とそうでない小惑星に分けて形状を調べた。その結果、直径 100km 以上で族に含まれない小惑星には平たい形状があるのに対し、含まれるものには平たい形状はないことがわかった。また直径 10km 以上の小惑星でも族に含まれず平たい形状をもつものの割合は、族に含まれ平たい形状をもつものの割合よりも倍以上大きいことがわかった。従って平たい形状は始原的な環境で形成されやすく、特に直径 100km 以上で平たい小惑星は惑星形成期での衝突で形成された形状を現在まで保持していると言える。

次に具体的応用として、2017 年 10 月に発見された太陽系外起源小天体の 1I/Oumuamua の極端細長形状を形成する衝突条件について調べた。1I/Oumuamua は平均半径 100m 程度の大きさを持ち、光度曲線の大きな振幅から中間軸/長軸比が 0.3 よりも小さいような細長い形状をしていると考えられている。1I/Oumuamua の形成を再現するため、半径 50m のラブルパイル天体への衝突計算を、衝突速度、衝突角度、衝突天体質量比、粉体の摩擦角を様々に変えて計算を行った。その結果大雑把には、衝突速度 40cm/s 以下、衝突角度 30 度以下、質量比 0.5 以上、摩擦角 40 度以上ならば中間軸/長軸比が 0.3 以下の極端細長形状が形成可能であることがわかった。この衝突速度は、小天体の半径が 7km まで成長していないような極めて始原的な惑星系ならば実現可能である。従って 1I/Oumuamua は、そのような極めて始原的な惑星系で形成され、恒星遭遇などで惑星系から脱出し、太陽系までたどり着いた小天体である可能性があることがわかった。