

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

氏 名

杉浦 圭祐

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)

論文審査担当者

主査 名古屋大学大学院理学研究科 教授 博士(理学) 犬塚修一郎

委員 名古屋大学大学院理学研究科 教授 博士(理学) 金田英宏

委員 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授 博士(理学) 城野信一

委員 名古屋大学大学院理学研究科 准教授 博士(理学) 井上剛志

委員 名古屋大学大学院理学研究科 助教 博士(理学) 小林浩

## 論文審査の結果の要旨

## 別紙 1 - 2

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。小惑星の形状は主に小惑星同士の衝突によって形成されるため、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。そこで申請者は、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包括的に研究した。

申請者はまず、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を弾性体力学に拡張することにより、固体天体衝突現象を取り扱うことのできる数値計算コードを開発した。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った問題が存在するため、申請者は 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。これにより、岩石天体の衝突・破壊・合体過程を弾性体力学に基づいて記述する計算法を世界で初めて確立した。さらに高解像度計算を行うため、理化学研究所が開発した 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。

申請者は次に、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。惑星形成期に実現される数 100m/s の衝突速度で数値計算を行ったところ、主に破壊的ではない衝突が起きた。特に等しい質量の天体同士の衝突では短軸/長軸比が 0.4 程度の極めて平たい形状を含む様々な形状を持つ最大集積天体が形成されることを確認した。一方、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ところ、主に大規模破壊が起きた。この場合、細かい集積天体の形状まで詳細に調べても短軸/中間軸比が 0.6 以上の丸い形状か頭が 2 つあるような形状しか形成されないことがわかった。申請者は以上の計算結果から、小惑星の平たい形状は脱出速度程度の低速度で質量が近い天体同士の衝突で形成された可能性が高いことを示した。これは小惑星の光度曲線の観測と整合的である。よって申請者は、直径 100km 以上で平たい小惑星は惑星形成期に形成されたと結論づけた。

また、申請者はさらに応用として、太陽系外起源小天体 1I/'Oumuamua の極端細長形状を形成する衝突条件についても調べた。その結果、極めて若い原始惑星系円盤の環境で実現されるようなほぼ等質量かつ 30cm/s 以下の低速度衝突ならば極端細長形状が実現することを示した。したがって、この天体は始原的な環境で形成されたという示唆を与えた。

以上のように申請者は、岩石天体の衝突・破壊・合体過程を精度良く記述する数値計算法を世界に先駆けて開発し、それを用いて太陽系の小惑星の形状の起源についての理論的な解析を行い、小惑星の衝突環境についての制限を与えることができた。これらは、惑星形成論や太陽系の探査研究において重要な成果として高く評価される。以上の理由により、申請者は博士(理学)の学位を授与される十分な資格があるものと認められる。