

論文審査の結果の要旨

氏名 柴田 雄

本論文は、岩石と氷からなる未分化微惑星同士の衝突合体過程と、そこで得られた微惑星の合体条件を用いて、微惑星の合体により原始惑星が形成する過程を数値シミュレーションで調べたものである。

本論文は4章からなる。第1章は序章であり、本論文の背景や研究動機などがまとめられている。微惑星同士の衝突合体による原始惑星形成過程は、太陽系形成の標準シナリオとして広く受け入れられている。その中で、一部の微惑星の質量が暴走的に成長する進化段階は暴走的成長と呼ばれる。この過程の数値シミュレーションを行う時に、適切な合体条件を設定することは、原始惑星形成のタイムスケールの決定において非常に重要な課題である。これまでの研究では、N体計算の手法から、扱える粒子数には限界があり、多くの場合、完全合体の仮定がなされていた。また、衝突時の跳ね返りを考慮した計算でも、より大きな微惑星かつ岩石微惑星についてのみしか研究されていなかった。一方で本研究では、新しいアルゴリズムを採用したシミュレーションコードを用いることで、これまでの研究より小さな微惑星からの原始惑星形成シミュレーションを実行した。そのために、これまで行われていなかった、氷と岩石が未分化の微惑星同士の衝突合体シミュレーションを行い、本研究で扱う微惑星に適した衝突合体条件を、系統的な微惑星衝突シミュレーションから初めて明らかにした。

第2章は、氷岩石未分化微惑星の衝突数値シミュレーションについて、手法と結果がまとめられている。ここで用いられている計算手法は、SPH法と呼ばれる流体計算の手法であり、鉄コアと岩石マントルからなる原始惑星同士の衝突シミュレーションに用いられた手法と同じものである。本研究では、状態方程式を変更することで、純粋氷微惑星、純粋岩石微惑星、岩石コアを持つ氷微惑星（分化微惑星）の3種類について、衝突角度、衝突速度、質量比を系統的に変えて衝突シミュレーションを行っている。本研究の微惑星衝突シミュレーションによって、合体非合体の境界となる臨界速度は、脱出速度で規格化された衝突速度で表すことができ、臨界速度は衝突角度が大きくなるほど小さくなることが示された。これは、先行研究である鉄コアと岩石マントルの分化した原始惑星の場合の結果と同様の傾向ではあるが、この臨界速度と衝突角度の関係は物質によって異なり、純粋氷、純粋岩石、分化微惑星の順で合体しやすいことが明らかとなった。これは、状態方程式が物質によって異なるためである。本研究は、世界で初めて純粋氷、純粋岩石、岩石コアを持つ氷微惑星についての衝突合体条件を示したものであり、これらは先行研究の分化した原始惑星の合体条件とも異なることを示した。この結果は、微惑星の集積シミュレーションにおいて原始惑星の合体条件を用いることの問題点を指摘するものである。

第3章では、前章で得られた結果を用いて行った微惑星集積過程の数値シミュレーションについて、方法と結果がまとめられている。これは、本論文のもう一つの主要な結果である。微惑星集積シミュレーションは、最近開発された Particle-Particle Particle-Tree 法

という N 体シミュレーションの手法を用いている。この手法により、これまでの典型的な粒子数より一桁多い 20 万體を用いたシミュレーションが可能となり、それによって初めて 100km サイズの微惑星からの集積シミュレーションが実行できるようになった。本研究では、微惑星サイズからの微惑星集積シミュレーションを、世界で初めて微惑星衝突シミュレーションから得られた未分化岩石の合体条件を用いて行った。手法では、初期条件についての他、膨らまし半径を用いた合体判定、合体しなかった場合の跳ね返りの仮定、合体時の微惑星の自転角速度の変化、N 体シミュレーションの手法について述べられている。シミュレーションの結果として、衝突時の跳ね返りの効果によって、微惑星がある程度の質量に成長するまでは完全合体の仮定の場合より時間がかかる一方で、微惑星が原始惑星サイズまで成長してからは今回の跳ね返りの条件の影響を受けずに合体成長するため、跳ね返りありの場合、完全合体を仮定した場合と比べて軽い微惑星が残りやすくなることが示されている。これは、これまで完全合体の仮定のもとに考えられてきた微惑星の暴走的成長、寡占的成長という基本的な成長過程について、一石を投じる結果となっている。さらに、本研究では微惑星の衝突合体によって形成する原始惑星の自転についても解析を行っている。ここでも、完全合体を仮定した場合との違いが見られ、跳ね返りがある場合、完全合体の場合と比べて合体できるインパクトパラメータが減少するため、原始惑星の自転角速度が、微惑星で 70%、原始惑星で 30%減少することがわかった。これは、非常に低い自転角速度を持つことと矛盾しない結果となっている。このことから、微惑星集積シミュレーションにおいて、微惑星の跳ね返りを正しく考慮することの重要性が示されている。また、今回用いたふくらまし半径の仮定の結果への影響の有無が議論されている。

第 4 章は論文のまとめである。

本論文で議論されている衝突時の跳ね返りを考慮した微惑星の衝突合体による原始惑星形成過程の研究は、微惑星の集積過程を理解する上で非常に重要である。今回、世界で初めて未分化微惑星の衝突合体条件を明らかにし、その結果を用いて世界でも最大規模の粒子数を用いた微惑星集積過程の N 体シミュレーションを行い、微惑星の跳ね返りを考慮した場合、これまでの完全合体の仮定の場合と比べて暴走的・寡占的成長時の原始惑星と微惑星の質量比が大きくなる起こることを示したという学術的価値は高い。また、火星の自転角速度といった現在の太陽系の成り立ちについて示唆を与えた点も評価できる。

なお、本研究は小久保英一郎・細野七月との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。