

論文審査の結果の要旨

氏名 市川 浩樹

本論文は、多相流体の振る舞いを理解する上で重要な表面張力を取り扱う新しいモデルを開発し、これを3次元多相流の数値計算に組み込むことに成功した。さらにこの新しいモデルと数値計算手法を用いて、初期地球におけるマグマオーシャン中での金属とシリケートの分離過程のシミュレーションを行い、金属が沈降する様子を、速度、液滴のサイズ、温度・エネルギーなどの分布から詳細に検討した。その結果に基づいて、初期地球においてコアが形成される際の諸過程を議論し、その流れの様子、時間スケール、金属-シリケート間の化学平衡・熱平衡の程度に制約を与えた。

第1章では、表面張力の重要性と本論文の概要が説明されている。特に3次元数値計算における表面張力の扱いについて、本研究でのアイデアと工夫、すなわち Moving-Particle-Semi-implicit(MPS) method と Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH) を組み合わせて取り組む方針が提示されている。第2章では、表面張力を含む多相流の支配方程式が整理、提示されている。特に、2相間の幾何学とそこに働く力を詳細に解析して、従来の2次元モデルの考え・手法を3次元に拡張することは困難であることを示し、3次元相境界を扱うための新たなパラメータの導入とそれを用いた定式化がなされた。これらの定式化に基づき、第3章において表面張力を含む3次元2相流の数値計算モデルが提示される。この新しいモデルでは、境界面の法線ベクトルを注目する物質の有無を表す関数の勾配から求めるが、その勾配をSPH法を用いて‘滑らかに’求める一方、境界面の曲率はMPS法を用いてなるべくミクロな形状も考慮しながら求める。この工夫により、3次元の相境界を含む流れの計算が安定してかつ精度良く行えるようになった。本研究では、液滴の振動現象と渦輪 (vortex ring) を再現することによってその精度を確認している (第3章、第3節)。

第4章では、本研究で開発された新しい数値計算モデルが、地球初期のマグマオーシャン中での金属とシリケートの分離過程のシミュレーションに応用されている。同時に、広いパラメータスペースを探索するために、既存

のモデルを用いて2次元シミュレーションも行われた。いずれの場合にも、初期の各相の量比、粘性、金属相の大きさ・分布を主要なパラメータとし、10cm×10cm程度の水平断面をもつ領域（主に液体シリケートで占められる領域）中を金属の液滴がどのように落下するかが調べられた。その結果、2次元と3次元のいずれの場合にも、（1）落下する金属滴は合体と分裂を繰り返すこと、（2）さまざまな初期状態に関わらず速やかに（典型的には10秒程度で）定常的状态に達し、一定の速度分布、液滴サイズ分布を示すようになること、（3）定常的速度分布、液滴サイズ分布のパラメータ依存性がレイノルズ数=1前後を境として変化することが明らかとなった。これまでに、次元解析を用いた比較的単純な議論から、マグマオーシャン中での金属液滴の代表的サイズが予測されており、今回の結果も、平均的サイズ（1cm程度）はこの予測に合うことが示された。同時に、これまで予測されていないサイズ分布について、下限（数mm程度）が存在し、比較的速やかに金属液滴が落下・分離することが明らかとなった。これらの落下過程でのエネルギー輸送・散逸も計算され、金属液滴とシリケートの間の温度差は小さく（ $<1\text{K}$ ）抑えられ、ほぼ等温で分離することも示された。第5章では、結果と結論がまとめられている。

本研究では、従来取り扱いが困難であった3次元の相境界とそこでの力学に正面から取り組み、これを多相流の数値計算モデルに組み込むことに成功した。さらに地球の進化を決める重要なプロセスの一つであるコア形成過程と、そこでの素過程であるマグマオーシャン中での金属とシリケートの分離過程解明にこの新しいモデルを応用し、上記のような新たな知見を得た。本研究で開発された新しいモデルは、金属-シリケートの分離過程のみならず、地球・惑星に普遍的に見出されるさまざまな多相流の関与する現象に応用可能であるという一般性を有する。

なお、本論文第3章は、S. Labrosseとの共同研究、第4章はS. Labrosse及び栗田敬との共同研究であるが、論文提出者が主体となってモデル開発、シミュレーション、解析を行ったもので、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。