

審査の結果の要旨

氏 名 大西 順也

高分子溶液、液晶、コロイド分散系などの複雑流体は、食品、医薬品、潤滑材や生体内流れなど日常生活と産業のさまざまなところに見られる。このような系の流動特性は、各種の高機能製品の開発や生体機能の解明といった実用上の観点と、また、多数の要素を含む非一様流体系の示す非平衡ダイナミクスといった学術上の観点から重要で、今後の流れ解析に課せられた主要な課題のひとつとなっている。

このような複雑流体の系は、マイクロレベルの流体構成要素の構造がマクロレベルの挙動に反映し、さまざまな流れ構造や粘弾性などのレオロジー特性を示す。一般に流体解析に用いられる平均場近似の方程式に基づく手法では、このようなマイクロレベルの効果を機構的に取り入れることができない。また、分子機構から現象に即して組み立てるモデルでは、マクロレベルの解析が実用上不可能である。このため、マイクロレベルの効果をうまく取り込み、それがマクロレベルにおいて発現的に生じる特性を正しく模擬できる新たな流体解析手法が必要となってきた。

本研究は、以上を背景とし、複雑流体流れの解析に適する流体解析手法を開発し確立することを目標に、格子ボルツマン法による新しいモデル化と、さまざまな解析によるその検証、拡張を行ったものである。本論文は、このような研究の成果を5つの章にまとめている。

第1章は序論であり、研究の背景と位置付けをまとめたものである。複雑流体のモデルに関する考え方をまとめ、研究目的を述べている。

第2章は格子ボルツマン法について述べた章である。まず、格子ガスオートマトン法からの流れとして格子ボルツマン法を捉えるとともに、ボルツマン方程式の気体運動論からの導出を行い、それがチャップマン・エンスコグ展開を通して流体方程式に帰着することを示している。また、格子ボルツマン法の基礎としての離散化の数学的背景を詳細に検討している。

第3章は本研究で開発した粘弾性流体モデルについて述べた章である。粘弾性流体の特徴を整理したのち、本研究で開発した格子ボルツマン粘弾性流体モデルについて述べている。粘弾性流体の運動論から、ダンベル状のプリミティブによる運動量交換を定式化することを提唱し、速度分布関数のほかに配位分布関数を導入している。配位分布関数のダイナミクスはフォッカー・プランク型の方程式で表現されるものとし、これより、平衡分布が正しく表されること、このマクロ極限での現象的な関係がオールドロイドBモデルと一致することを示している。次に、配位分布

関数についてのフォッカープランク型の方程式を離散化することで配位分布関数についての格子ボルツマン方程式を導き、速度分布関数と配位分布関数の間の流体力学相互作用を考えることにより、粘弾性流体についての格子ボルツマン法を確立している。これを一様せん断流れ、クエット流れ、振動平板流れに対して適用し、応力特性、シアシニング特性、振動時の位相特性、流速分布の時間発展などを解析解と比較し、良好な一致を得て、開発したモデルが粘弾性流体の基本特性を正しく表わすことを確認している。

第4章では、多相格子ボルツマンモデルに第3章で開発したモデルを適用し、粘弾性流体の多相流れへと拡張を行っている。まず、多相モデルにより二相の相分離が正しく解析できることを示し、次に、粘弾性流体中に分散した液滴が一様せん断場で受ける変形を解析している。液滴の変形や変形形状の配向などについて、ニュートン流体中と粘弾性流体中での挙動をそれぞれ実験および解析と定量的に比較し、良好な結果を得ている。これに続き、粘弾性流体中を上昇する気泡の解析を行い、形状変化と上昇速度を求めている。粘弾性流体中の上昇気泡は、特徴的なカスプと呼ばれる形状を示すことが実験的に知られているが、本研究では解析でこのカスプ形状が得られることを示し、この機構として粘弾性流体を構成するプリミティブの位置と配向について議論している。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめた章である。

以上を要するに、本論文は、複雑流体の流れ解析に適用可能な新しい流体解析手法として格子ボルツマン法の拡張を提案し、その開発した手法の理論基礎を明らかにして解析アルゴリズムを明らかにしたもので、粘弾性流体を対象に、基礎特性を検証して解析および実験との比較から手法の物理的妥当性を実証し、粘弾性流体およびその多相系でのレオロジー特性や流動機構を再現して、手法としての妥当性を確認し、合わせて工学問題への適用性を示したものであり、今後の複雑流体の解析の進展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。