

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 塚 知則

これまでの流れ解析は、水や空気の単純な流れを対象に、ナビエ・ストークス方程式の数値解析により大きな成果をあげてきた。一方で、天然自然、産業、日常生活に現れる流れの多くは、例えば多相流、多成分流、化学反応流れや、界面活性剤溶液、高分子溶液、液晶、血液などの構造型流体の流れなど、さまざまな複雑さを示す流れであり、このような流れの解明と解析が、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。

さて、この複雑流れに対して、ナビエ・ストークス方程式に基づく手法は、平均場近似の成立を前提としているため、界面、化学反応、分子構造などによって流体内部が非一様で構造を示すことを特徴とする複雑流れを適切に表現することが困難で、多くの近似や経験式の導入が必要となる。このため、ナビエ・ストークス方程式に代わり、より普遍的で適用性の広い流れ解析手法として、メゾスケールの粒子挙動の粗視平均として流れ挙動を表現する格子ガスオートマトン法、格子ボルツマン法などの研究が進められてきている。

本研究は、以上を背景とし、構造型流体をメゾスケールモデルで解析する手法の確立を目指したものである。構造型流体の代表として界面活性剤溶液を取り上げ、これを格子ガスオートマトン法を発展させた実数格子ガス法でモデル化し、それに基づくさまざまな解析をとおして、解析手法の妥当性と有効性を確認している。本論文は、このような研究成果を5つの章にまとめたものである。

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。界面活性剤溶液に関するこれまでの解析モデルを評価し、それらとの比較をとおして、本研究で実数格子ガス法を採用した根拠と意義を説明している。

第2章は実数格子ガス法とその二相への拡張を述べた章である。まず、実数格子ガス法の二相への拡張を検討し、2次元および3次元での相分離挙動を解析している。二相間の界面張力を測定してラプラス則が満たされること、領域成長がメカニズムの異なるふたつの過程からなっていることを明らかにし、二相モデルの物理的な妥当性を確認している。

第3章では、実数格子ガス法に適合する界面活性剤モデルの開発とそれを用いた界面活性剤溶液の挙動解析の結果をまとめている。界面活性剤は、界面活性剤分子を模擬するよう親水基と疎水基が剛体棒で接続された形でモデル化し、水や油などとの相互作用を定義して、実数格子ガス

の枠組みに取り込んでいる。このモデルにより、水と界面活性剤の二相系で球状ミセル構造の生成を観察し、ミセルサイズの分布を求め、他の手法による解析結果との比較を行っている。

さらに油を加えた三相系の解析を行い、条件によりエマルジョン、ラメラ構造、両連続状態などのマクロ構造が形成されることを確認している。特に、両連続状態については、構造の代表長さの指標である構造因子の時間経過を調べ、特性長さの時間変化の様子から両連続状態が形成されていることを結論している。また、界面活性剤濃度と表面張力の関係を定量的に求め、界面活性剤添加により界面張力が緩和していく様子を明らかにしている。

第4章では第3章で開発したモデルをマクロな流動を伴う非平衡系に適用して、適用性を検討した章である。対象として、油井からの石油の効率的回収プロセスを念頭に置き、水の流れ場に置いた油滴の変形、壁からの離脱の問題を取り上げ、まず、壁と油滴との間の濡れ性を実数格子ガス法に取り込みモデル化している。それをを用いて、具体的な対象に適用して、界面活性剤を入れない場合と添加した場合の特性を比較している。これにより適正な量の界面活性剤添加によって、石油回収効率が飛躍的に向上する様子を2次元、3次元計算により再現し、本研究で開発した手法が、さまざまな工学問題に適用できる可能性を示している。

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。

付録として、実数型格子ガス法界面活性剤モデルの理論基礎をまとめ、実数格子ガスの計算手続きにおいて、運動量、エネルギーなどの保存量が適正に保存されることを証明している。

以上を要するに、本論文は新しい流体解析手法として実数格子ガス法を拡張して、構造型流体としての界面活性剤溶液のモデルと解析アルゴリズムを確立し、それを基にして、基礎特性、物理的妥当性を評価し、さまざまなマクロ構造の形成、時間変化の様子を再現して、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、今後の流体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。