

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 平林 美樹

流れのような非平衡現象では、複雑さの発現として、さまざまな形態やパターンの形成が見られる。これらの形は、近年フラクタルとして特徴づけられ、複雑系一般の示す共通の特徴と認識され、その起源や特性を理解、解明することが重要な課題となっている。

本研究は、このようなフラクタルに関連する複雑流れを解析する手法を確立し、その有効性を確認することを目的に行われたものである。手法としては格子ボルツマン法を取り上げている。これは、従来の連続体近似の流体表現に代わり、格子ボルツマン法が運動論に基づいているため実際に生じている物理により忠実であること、また、分子や粒子の代わりに分布関数を用いるので計算効率が高いことに着目したものである。複雑流れとしては、まずランダムメディアにおける成長現象として多孔質媒体での流れを対象とし、その記述である非線形偏微分方程式を格子ボルツマン法を用いて解くことによりユニバーサリティクラスとスケーリングの評価を行っている。次に、流体中の微細構造の相互作用によりマクロなフラクタルが発現する系として磁性流体を取り上げ、磁場との相互作用を詳細に検討して、格子ボルツマン法に適合しマクロな物理を正しく再現できる平衡分布関数を求め、数値解析により検証を行っている。

本論文は以上の研究成果を取りまとめたものであり、全体で7つの章よりなっている。

第1章は序論であり、研究の背景として格子流体解析の流れをまとめ、格子ボルツマン法の特徴を検討し、本研究との関連を議論している。

第2章は格子ボルツマン法の理論基礎を整理、検討した章である。具体的な空間次元と速度離散方式に対して、格子ボルツマン方程式とそのBGK近似が導く連続表現を検討し、解析の実施にあたって重要となる境界条件、数値安定性について議論をしている。

第3章は、ランダムメディアの流れを表すQKPZ方程式に対する格子ボルツマン解法を述べた章である。QKPZ方程式の拡散項に着目し、これを格子ボルツマン法によるポアソン方程式ソルバーで解くことを考えると、表面張力に相当する非線形項とノイズ項をポアソン方程式のソース項として扱えることを見出し、これに基づいてQKPZ方程式の解法アルゴリズムを確立したものである。例題に対する具体的な解析から、粒子衝突を扱う座標位置について新しい提案を行い、数値上の振動を抑制できることを確認している。

第4章では、第3章で開発したQKPZ方程式の格子ボルツマン解法をさまざまなパラメータと

体系に対して適用し、多孔質媒体への流体浸入現象のユニバーサリティクラスとスケーリング特性を検討している。表面張力項の大きさにより、自己アフィンフラクタルであるクラス1と自己相似フラクタルであるクラス2が再現できることを確認し、ランダム場イジングモデルなどの離散モデルと比較して、結果が妥当であることを示し、加えてスケーリング指数が0に相当する第3のクラスを見出したことを報告している。さらにスケーリングの界面粗さ指数、成長指数を評価し、他の理論値、実験値との比較において妥当な結果を得ている。また、体系の大きさと相関長さの大小関係によって熱ゆらぎが支配的な領域とノイズが支配的な領域があり、それらが異なる界面粗さ指数で特徴づけられることを確認している。

第5章は磁性流体の格子ボルツマン定式化の検討を行った章である。磁性流体についての従来の格子ボルツマン解析が、磁気モーメントを磁性粒子に固定していたのに対して、より厳密に物理に即して、各磁性粒子のもつ磁気モーメントは回転可能で、全体を磁化を帯びた流体と扱って定式化している。これよりマクロ運動方程式を再現できるよう平衡分布関数を定めている。

第6章では、第5章で開発したモデルを用いて、磁性流体に関する解析を行っている。平行平板間流れに対して、印加磁場の方向を変えて解析を行い、流れの渦度ベクトルと垂直に磁場を加えたときに見かけの粘性が増大すること、そしてその変化は理論値と一致することを確認し、開発した手法が妥当であること実証している。次に交流磁場下で磁性粒子がクラスターを構成し、その形状がフラクタルであること、また、回転磁場下の磁性流体流れにおいて渦度の励起により流体駆動効果が起こることを確認し、手法の検証を行っている。

第7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、本論文は運動論に基づく格子ボルツマン法の複雑流れへの適用性に関して、偏微分方程式ソルバーとして、および、局所平衡状態への運動論的緩和アルゴリズムとしてという異なる視点からのアプローチを検討し、ともにフラクタルで特徴づけられる複雑流れの解析に対して、現象の理解、解明から、さらに進んだ工学的応用までの範囲で広い適用性と有効性をもつことを示したものであり、工学における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。