

称号及び氏名 博士（工学） 杉本 真

学位授与の日付 2022 年 3 月 31 日

論 文 名

「気液混相流の格子ボルツマンモデリングおよび複雑構造周りの流体挙動解析」

論文審査委員 主査 須賀 一彦 教授

副査 高比良 裕之 教授

副査 大久保 雅章 教授

副査 金田 昌之 准教授

論文要旨

気相・液相・固相の複数の相が混在する混相流現象は自然環境および各種産業において広く見受けられる。とりわけ多孔体のような複雑構造の表面および内部における気液混相流は燃料電池のガス拡散層やインクジェット印刷機、ヒートパイプのウィック、オイルミストフィルター、油水分離機といった様々な工業製品の性能を左右する重要な現象である。これらの現象は発生状況や空間および時間スケール等の制約から、理論解析や実験計測が困難である場合が多い。また、気液の物性や流れ場の状況、固相表面の濡れ性などの影響を考慮した、現象の包括的なメカニズムを解明するためには数値解析によるアプローチが有効であり、これまでに様々な気液混相流解析手法が開発されてきた。本研究ではその一つである **phase-field (PF)** モデルを組み合わせた格子ボルツマン法 (**LBM**) に注目した。PF モデルは非平衡熱力学に基づく手法であり、気液界面は系の自由エネルギーが最小となるように自律的に変形する。気液を区別するために秩序変数を用い、その移流拡散を解析する必要がある。移流拡散方程式として、保存形 **Allen-Cahn (CAC)** 方程式が近年注目されている。CAC 方程式を用いることで密度比 1000 程度の気液混相流解析を安定的に解析できることが先行研究によって示されている。また、**LBM** は格子ボルツマン方程式に基づく解析手法であり、流体を格子上の仮想粒子の集合体とみなし、それらの衝突と並進を繰り返し計算することで巨視的な流れ場を解析する。**LBM** は計算の局所性に優れ、壁面上で仮想粒子を跳ね返すのみで境界条件を記述できるため、大規模並列解析および複雑構造周りの解析に適している。本研究では **CAC** 方程式に基づく **PFLBM** を用いて三次元複雑構造における濡れを高精度に再現できる手法の開発を行い、これを用いて多孔体上における微小液滴浸潤解析ならびに水平角柱群への液の流下解析を行った。また、気液界面における蒸発モデルを定式化した **PFLBM** の開発も行い、その有効性を検証した。本論文は全 7 章と二つの付録で構成されている。以下に概要を示す。

第1章は序論であり、研究背景および気液混相流解析手法について概説している。また、PFLBMの従来の研究動向および本研究の目的について記述している。

第2章では本研究で用いた数値解析手法について記述している。ここではCAC方程式の定式化からPFLBMの概要、境界条件の適用方法について記述している。

第3章では三次元複雑構造周りに適用可能な濡れ性境界条件の実装方法ならびに精度検証結果について述べている。本研究では壁面自由エネルギーの三次の項まで考慮するcubic境界条件と固相表面からの符号付き距離関数を用いた濡れ性境界条件の開発を行い、CAC方程式に基づくPFLBMに実装した。その際、cubic境界条件では固相内部に濡れの影響を考慮した仮想的な秩序変数を外挿することで表面張力項を介して濡れの影響が考慮される。この外挿計算には流体相の秩序変数を内挿補間する必要がある。本章では計算の局所性を損なわずに解析精度を保つことが可能な内挿補間手法を開発し、その実装方法について記述している。また、この手法を計算格子線に沿わない平板上液滴と球上液滴の解析に適用し、精度検証を行った。従来手法において曲面は階段状に近似されるため、非物理的な液滴挙動を示すが、新手法では非物理的な液滴挙動が抑制され、高精度に濡れを再現できることを確認した。また液相体積保存性についても検証し、壁面非接触液滴と同等の保存性を有していることを確認した。これにより濡れ性境界条件に起因する誤差を排除できていることを示した。以降の章では本章の濡れ性境界条件を用いて解析している。

第4章ではCAC方程式および連続の式に適切な生成項を付与することで気液界面の蒸発速度分布を高精度に解析できるPFLBMの開発について記述している。生成項の計算に必要な比湿分布の時間発展を解くために、気相領域のみにおいて比湿の移流拡散方程式をLBMにより解析した。従来手法ではLBMの時間発展方程式と支配方程式の間に矛盾点が存在したため、定常一次元Stefan流において蒸発質量流束を過剰に見積もる問題が報告されていた。本研究では支配方程式との間に一貫性のある時間発展方程式の定式化を行うことで、従来手法における問題の解決を図った。開発した手法を定常一次元Stefan流および平板上三次元蒸発液滴の解析により検証した。その結果、定常一次元Stefan流において界面比湿が0.8以下の範囲において高精度に蒸発質量流束の解析解を再現できることを確認した。また、平板上三次元蒸発液滴においてHu-Larsonによって提案された無次元蒸発質量流束分布のモデル式を広い接触角の範囲にわたって高精度に再現できることを確認した。同時に、液滴頭頂部の蒸発質量流束の絶対値をモデル式よりも20%以上高く見積もってしまうことがわかったが、これはHu-Larsonがモデル式の導出に用いた数値解析が蒸気の質量濃度の拡散方程式のみに基づいているのに対し、本研究の手法では気相中の蒸気の移流拡散を考慮したためだと結論付けた。

第5章では多孔体上に静置した液滴の挙動解析を行い、液滴サイズと多孔体空孔径が同程度の場合における液滴浸潤条件とそのメカニズムについて調査している。その結果、多孔体への液滴の浸潤率は接触角がある閾値を超えると急激に変化することを明らかにした。また多孔体の空孔に対して液滴が大きい場合には、多孔体表面が撥液に推移するにつれてWenzelからCassie-Baxterへの濡れ状態の遷移に似た現象が確認された。さらに液滴サイズが多孔体の空孔サイズと同等になるにつれて多孔体の表面構造の影響を強く受けることを明らかにした。

第6章では電気自動車のステータコイル構造を単層および複層の水平角柱群でモデル化し、上部から流下した液体の挙動解析を議論している。角柱同士の間隔や液相粘度、接触角が濡れ広がり及び影響について調査した。その結果、濡れ面積を角柱間隔とReynolds数の平方根の積で整理した際に相関が見られた。この相関においては角柱間隔やReynolds数が大きくなるにつれて濡れ面積は単調減少し、ある閾値を超えると単一角柱の濡れに収束し、濡れ面積は一定値に収束した。また、角柱の濡れ性の変化に応じて濡れの形状は変化するが、濡れ面積には大きく影響しないことを明らかにした。単層モデルと複層モデルの結果を比較すると、角柱間隔が狭い場合には複層モデルの表層の濡れ面積は単層の濡れ面積より大きくなるが、角柱間隔が広がるにつれてこれらが同程度になることがわかった。さらに、複層モデルの内部の層は表層と比べて濡れ面積が大きくなるが、角柱間隔が広い場合にはこの現象は顕著でなくなった。これは構造の透過

率に関連すると予想している。

第 7 章は結論であり、これまでに得られた結果の総括ならびに今後の展望について記述している。

付録 A では Chapman-Enskog 展開を用いて第 4 章で開発した PFLBM の時間発展方程式が蒸発を考慮した CAC 方程式、連続の式および非保存形の比湿の移流拡散方程式に帰着することの証明を行っている。

付録 B では PFLBM における表面張力モデルについて記述している。表面張力モデルを平坦な液膜と壁面非接触液滴に適用し、評価を行った結果、計算精度を損なうことなく計算コストを削減できる手法を示している。

審査結果の要旨

本論文は格子ボルツマン法による気相・液相・固相の複数の相が混在する混相流現象の高精度計算手法の開発・改良と電動モーターの油冷現象への応用を目的とした研究成果をまとめたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 壁面自由エネルギーの三次の項まで考慮する境界条件と固相表面からの符号付き距離関数を用いた濡れ性境界条件を開発した。これにより計算の局所性を損なわずに解析精度を保つことができ、高精度に濡れを再現できることを示し、濡れ性境界条件に起因する誤差を排除できることを示した。
- (2) 蒸発を考慮可能なフェーズ・フィールド格子ボルツマン法を開発し、従来手法において蒸発質量流束を過剰に見積もる問題の解決を図った。平板上三次元蒸発液滴の解析により検証した結果、定常一次元 Stefan 流において界面比湿が 0.8 以下の範囲において従来手法よりも高精度に蒸発質量流束を解析できることを示した。
- (3) 本研究で開発した濡れ性境界条件を多孔体への液滴浸潤解析に適用し、液滴サイズと多孔体空孔径が同程度の場合における液滴浸潤条件とそのメカニズムについて調査した結果、多孔体への液滴の浸潤率は接触角がある閾値を超えると急激に変化することを示した。また多孔体の空孔に対して液滴が大きい場合には、多孔体表面が撥液に推移するにつれて Wenzel から Cassie-Baxter への濡れ状態の遷移に似た現象を確認した。
- (4) 電気自動車のステータコイル構造を単層および四層の水平角柱群で単純化し、角柱同士の間隔や液相粘度、接触角が濡れ広がり及び影響について調査した結果、濡れ面積は角柱間隔と Reynolds 数の平方根の積に相関するという見出しをした。

以上の成果は、混相流現象の数値解析精度を向上させたばかりではなく、コイルや多孔体に浸潤する液体流動の工学的設計指針に寄与できるものであり、その機械工学に対する貢献度を高く評価できる。さらに、これら成果は有機的に関連しており、申請者が自立して研究計画を立て、研究を遂行するに十分な能力と学識を有することを証している。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、以上のことを確認したので博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。