

氏 名	よね 米 本 幸 弘
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2920 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	気液界面の数値モデル構築に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 功 刀 資 彰 教 授 福 山 淳 教 授 稲 室 隆 二

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、気泡の合一・分裂挙動を見据えた気液界面のモデル化に関する研究をまとめたものである。その際、ミクロスケールからマクロスケールまで、理論的に一貫性のあるモデル化を試みている。最終的には、構築した気液界面モデルを固気液界面まで拡張し、統一的界面モデルの構築を試みており、全8章とAppendixから構成されている。

第1章では、現在用いられている気液界面のモデルを例に、現状と課題を紹介し本研究の位置付及び目的を示している。

第2章では、格子気体モデルを基礎として、界面自由エネルギーを導出している。このとき、気泡の合一・反発は界面における電気的な効果が重要であろうとの考えに基づき、自由エネルギーの中に電気的相互作用項を考慮している。導出した自由エネルギーを、時間・空間スケールを区別しChapman-Enskog展開を援用することにより、ナビエ・ストークス方程式へ組み込む議論を行い、マルチスケール混相流体方程式を導出している。

第3章では、第2章で導出したマルチスケール混相流体方程式を基礎として、マクロスケールの指標である界面ジャンプ条件式を導出している。具体的には、本モデルに基づき新たに導出された熱力学的界面ジャンプ条件式と従来のジャンプ条件式の比較から、導出した式には温度差マランゴニや界面汚れに起因した電位の効果を表す項を含むことを明らかにしている。さらに、熱力学的界面ジャンプ条件式の無次元化から、新たな無次元数を得、その考察から界面の電位と流体運動との関係(気泡の合一との関連)を示唆されている。また、得られた熱力学的ジャンプ条件の解析的考察から、帯電した汚れ物質が付着した界面間相互作用では、汚れ物質の分布状況に応じて気泡間に挟まれた液膜内部の流動を誘起する力が表面に生じる可能性のあることを明らかにしている。その誘起された流体は、界面同士を平坦化させる作用を持つ可能性があることも明らかにしている。

第4章では、気泡の合一・反発現象に関する可視化実験により得られた結果を議論している。一般に、マイクロバブル同士の合一は困難であると思われてきたが、本章の実験により、マイクロバブル気泡流中で、多くのマイクロバブル同士の合一を見出すことに成功し、合一挙動には特定のボタンがあることを明らかにしている。さらに、得られた可視化結果を基に、潤滑理論を用いて考察・議論し、気泡同士の接触から合一までの時間が、潤滑理論だけではその挙動を説明できないことを明らかにするとともに、界面間で生じる物質移動の重要性を示唆する結果を得ている。

第5章では、第2章で導出したマルチスケール混相流体方程式を基に、気泡の合一・反発現象に関する検証計算及び定性的議論を行っている。このとき、第4章で得られた結果を基に、界面間における汚れ物質の影響を考慮し、界面間の汚れ物質が存在する場合の新たな核形成理論を構築し、二次元及び三次元での数値解析へ反映している。得られた結果は、第4章の実験結果と類似の傾向を示し、界面間の電気的反発力で生じた液膜も再現し出来ている。さらに、界面間の電気的反発力で生じた液膜の数値解析結果は、潤滑理論で前提とされてきた液膜の存在を物理的に説明するものであることを示している。

第6章では、気液界面モデルで構築した理論を基に、固気液界面の考察を行っている。具体的には、従来の界面ジャンプ条件を用いて、固体基板上に付着した液滴の接触線近傍の力学的釣り合い条件を考察し、新たに修正Youngの式を導出し

ている。さらに、従来の欠陥を補足した新たな熱力学的導出方法から、より一般性の高い修正 Young の式を導いている。最終的に、得られた修正 Young の式から導いた解析解を用いて、既往の接触角に関する実験結果との比較・検討を行い、解析解の妥当性を証明している。また、固体基板上のレンズ状液滴挙動の定式化を行い、異なる三相が交わるときの接触線近傍における力学的釣り合い式の一般的表記を導出している。

第 7 章では、マルチスケール混相流体方程式の蒸発・凝縮等の相変化への拡張についての議論を行い、液滴の曲率効果により蒸気圧が変化することを説明する Kelvin 式が、本論文で構築したマルチスケール混相流体方程式からも導出できることを示している。

第 8 章では、本論文で得られた結論の取り纏めを行い、本研究の学術的意義及び今後の展望と課題を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、工学的に重要な気泡の合一・反発現象の解明を見据え、ミクロからマクロスケールにわたるスケール横断的な考察を行い、数学的・物理的観点に基づいた気液界面モデルの構築を試みた研究成果を纏めたものであり、得られた成果は以下の通りである。

1) 格子気体モデルを基礎として、電気的相互作用項を考慮した界面自由エネルギーの導出を行い、それをナビエ・ストークス方程式へ組み込み、時空間のマルチスケール性を考慮した新たな混相流体方程式を導出した。

2) このマルチスケール混相流体方程式を基に、熱力学的な界面ジャンプ条件式を新たに導出し、界面の幾何学的考察から、新条件式がより一般的であることを証明した。

3) マイクロバブル流中の気泡の合一・反発現象の可視化実験を行い、気泡間の液膜に関する潤滑理論では本現象を説明できないことを示し、界面間の物質移動の重要性を示した。

4) 界面間に汚れ物質が存在する場合の新たな核形成理論を構築し、マルチスケール混相流体方程式に組み込むことにより、気泡の合一・反発現象を数値解析で定性的に再現可能であることを示した。

5) 流体力学および熱力学的視点から接触角を再考察し、新たな修正 Young の式を導くとともに、固気液の界面現象を統一的に表現し得るモデルを構築した。

6) 液滴の曲率効果による蒸気圧変化を説明する Kelvin 式をマルチスケール混相流体方程式からも導出できることを示した。

以上のように、本論文はスケール横断的な考察を行い、数学的・物理的観点に基づいた気液界面の数値モデル構築を試み、新たなマルチスケール混相流体方程式を導出し、メゾスケールでの気液界面モデルを構築して工学計算への道筋を示した。さらに、固気液の界面現象を統一的に表現し得るモデルを構築した点は普遍的であり、大きな学術的成果であると言える。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年1月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。