

[別紙 2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 姫野 武洋

修士(工学) 姫野武洋提出の論文は、「低重力環境における気液二相熱流動の研究」と題し、本文6章および付録から成っている。

宇宙環境では重力が減少し、これに代わって流体の挙動には界面張力と濡れ性の影響が卓越する。そのため、自由表面を有する気液二相流の挙動は地上の場合と大きく異なるが、その熱流動特性は十分に究明されておらず、例えば宇宙輸送系の構築に必要な液体管理手法の設計にも、的確な指針が未だ得られていない。具体例としては液体燃料タンクから燃料を吸引する際、低重力場では地上で経験されない気液界面の大きな落ち込みが発生し、ターボポンプが気相を早期に吸い込んでしまう現象が生じるため、相当量の燃料を未使用のままタンク内に残さざるを得ない、という問題があるが、この現象を的確に予測することは従来不可能で、落下塔などを用いた地上試験による知見から界面挙動を類推せざるを得ない状況にあった。

本論文で著者は、このような通常重力場で経験されない気液二相流体の挙動を解明し、宇宙環境における液体管理技術および熱管理技術の基礎を確立することを目指して、大変形する気液界面の動的な挙動を高精度に追跡することが可能な、新しい数値解析手法を提案した。また、この解析手法による結果と、落下塔実験の結果とを統合することにより、低重力環境における気液界面の動的挙動に関する相似則を見出し、更に固体表面の濡れ性の適切なモデル化を実現することで、様々な重力環境での自由表面流の挙動を適切に評価するための知見を獲得することに成功した。

論文の第1章では、本研究の背景を述べ、研究の目的と独自性を明確にしている。

第2章では、気液両相が共存する流れ場の運動を一般的に論じ、数値解析のための支配方程式を導いている。ここでは気相と液相および界面の運動を統一的に記述し、低重力環境で大変形する気液界面を固定格子上でオイラー的に追跡する方針が採られている。汎用性のある数値的手法の構築を指向して、気液両相で粘性と圧縮性が考慮されており、内部状態についても状態方程式の形を特定しない。重力は運動量式に直接加えられ、また、界面張力の温度依存性も考慮されており、広範な流体挙動を解析対象にできる方程式系が導かれている。

第 3 章では、前章で導かれた自由表面流の統一的支配方程式を数値的に解く独自の手法として、CIP-LSM と呼ぶ解法を提案している。この手法は、支配方程式の解法に CCUP 法を、気液両相の識別に Level Set 法を採用したものであるが、従来の CCUP 法で用いられてきた独立変数の中の密度を、伝熱解析に適するよう温度へと変更してアルゴリズムを再構築し、また、Level Set 関数の移流だけでなく再初期化操作にも CIP 法を適用するなど、独自の改良が加えられている。開発した手法を用いて、定常および非定常衝撃波、密閉容器内の自然対流、浮力の効果で上昇する気泡、マランゴニ対流等を模擬し、いずれも比較対象と良好に一致する解を得て、この手法の妥当性を確認している。

続く第 4 章では、固体壁の濡れ性が自由表面流に与える影響を、実験と数値計算により詳しく調べている。まず落下塔を用い、円筒容器に封入した液体表面の動的変形を可視化した実験について述べられている。その結果から、界面張力に駆動される自由表面流に関し、接触点の変位までを含めて時間と空間に関する相似則が成立することが認められ、特に円筒容器内径が十分大きな場合について、接触点変位が時間の $2/3$ 乗に比例するという半理論式が見出された。次に実験による知見を基に、自由表面流の数値解析における壁面境界条件の検討がなされ、動的接触角を変数とする濡れ性モデルが考案されている。このモデルを組み込んで落下塔実験を数値的に模擬した結果、両者には良好な一致が認められた。更に平板上を移動する接触点を対象とする数値実験から、上述の半理論式の比例係数が液体物性と前進接触角の関数として具体的に定められ、これを基に接触点変位の時間履歴から前進接触角を求める原理が提案されている。

第 5 章では数 m 程度のスケールを持つ液体貯蔵タンクで発生する排出問題を実際例に採り上げ、その流れ場を CIP-LSM により数値的に調べた。具体的には、液体ロケット上段推進系でエンジンが再始動する際の推進剤タンク内流動を解析し、結果から落下塔実験データでは明確に把握できなかった液面形状の変化を明らかにしている。更に落下塔実験では模擬の難しい加速度が時間的に変化する条件を課して数値的模擬を実施し、その予測に基づいて実際の再始動シーケンスの安全性を評価することを可能にしている。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

以上要するに、本研究は低重力環境における自由表面流を考察の対象とし、その熱流動特性を数値的に解析できる手法を提案したうえで、重力と界面張力の影響を受ける自由表面流れ場の非定常変化を実験的手法と数値的手法の両方を用いて詳細に調べたものである。これにより、固体面の濡れ性までを適切に考慮した自由表面流の予測が可能となり、その成果は宇宙環境における流体管理技術を構築するための一つの基盤を確立したものと評価され、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

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。