

審査の結果の要旨

氏名 賀群武 (He Qunwu)

本論文は，“Fluid Flow and Convective Heat Transfer of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Micro Tube” (マイクロ管内気液二相流と対流熱伝達に関する研究)と題し、7章より成っている。

電子機器をはじめ様々な次世代技術において、常温に近い許容温度で極めて高密度の熱流束を制御することが要求されつつあり、そのような設計条件を満たすための伝熱技術の開発が期待されている。伝熱学の基本則として、装置の小型化によって熱伝達率と、単位体積当たりの伝熱面積の増大が見込まれるので、多くの機器設計に置いて、小型化が進んでいる。さらに、伝熱作動流体としては気体よりも液体が、また従来の単相流から沸騰流の採用へ移行することもしばしば検討されている。しかし、多数のマイクロサイズの並列の流路において沸騰流が生じる場合には、強い非定常性と流量配分の不均一が生じやすいことが知られており、それらの回避のために単相流を採用せざるを得ない状況もある。本論文では、そのような問題点を回避するために、気液2相流を採用して、安定して単相液流を上回る優れた伝熱性能を実現する可能性を、主として数値シミュレーションとモデル化によって明らかにすることを試みたものである。

第一章は序論であり、まず内径がミクロンオーダーの、いわゆるマイクロチャネル流の流動と伝熱について、過去の研究を概観している。即ち、管径に依存して、ナノチャネル、マイクロチャネル、ミニチャネル、マクロチャネルに大別され、それぞれの管径において異なる熱流動様式や特異な特性が現れることを述べている。これらを支配する無次元パラメータを列挙して、実際の応用技術における条件を議論すると共に、特に近年の実験的知見として、入口条件によって気液2相流が異なる流動様式を採り得ることを述べている。そして、このことから、気液2相流によって、単相液流を上回る伝熱特性の得られる可能性を数値シミュレーションとモデル化を通じて解明することを本論文の目的とすることが述べられている。

第二章では、一連の数値シミュレーションを行うための、数学的な定式化と、数値解法について詳説している。低レイノルズ数のマイクロチャネルの2相流を対象とすることから、軸対象2次元層流を仮定して、運動方程式を忠実に解くための数値技法が採用されている。特に、気液界面の精度の良い捕獲計算法として、**phase field**法を採用し、格子依存性の確認に加えて、上昇気泡、壁面衝突液滴などの標準的な流れに対するベンチマークテストを行うと共に、気泡を含むスラグ流流動様式が再現できることから、使用した支配方程式、境界条件、離散化法、そして界面捕獲法が本研究の目的に十分応えられることを確認している。

第三章では、気液2相流のシミュレーションで問題となる非物理的な寄生流れと、固体面にドライアウトが生じる場合のコンタクトラインの計算法について吟味している。特に、前者はキャピラリー数が小さな条件で問題とされるが、界面の表面張力の計算法として、**continuum surface force**法と**chemical potential**法を採用して両者の計算結果を比較し、本論文で対象とする数百ミクロンの径を有するマイクロ管内の流動には、後者が優れていることを確認している。

第四章では、気泡が壁面に接しない、スラグ流に対するシミュレーション結果を示して、従来の実験結果との比較検討を行っている。当該条件では、気泡は液相よりも早く流れ、液相内には顕著な循環流が形成されること、圧力損失は**Lockhart-Martineli**パラメータの関数として整理できるがその係数が流動様式によって異なることを見出し、実験的知見との整合性を確認している。気液各相の速度比は従来のマクロな管の相関式とほぼ一致すること、その結果、気泡と壁面に挟まれる液膜の厚さは、管内半径の8.7%の一定値と近似できることを明らかにしている。熱伝達機構に関しては、熱輸送のほぼ全てが液相に担われること、また循環流の存在によって顕著な伝熱増進が計られることを明らかにしている。

第五章では、ドライアウト流のシミュレーション結果から、熱流動特性を論じている。圧直損失はスラグ流に比べて小さいこと、乾き域の存在によって壁面温度が上昇し、熱伝達率の劣化が生じることなど、前章の結果とは対照的な熱流動特性が示されている。

第六章は、以上のシミュレーションの結果から熱流動機構を説明し、さらにより広い条件下で熱流動特性を予測するためのモデル化と評価が示されている。

圧力損失に関しては、液相、気泡端部、気泡腹部として領域分割を行い、それぞれの領域における圧力損失についてモデル化を進め、2相流圧力損失の予測モデルの構築に成功している。伝熱機構についてもほぼ同様に領域毎に熱伝導や対流伝熱が支配的と仮定してモデル化し、実験結果と良い一致を得ている。最後に、圧力損失と熱伝達の両者を統一的に評価し、スラグ長さやレイノルズ数に依存して最適な熱流動特性の得られる条件を考察している。

第七章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている

以上、本論文では、高精度の数値シミュレーションを通じて、マイクロ管内の気液2相流の熱流動機構や圧力損失・伝熱特性を明らかにし、それらのモデリングによって実際の技術への応用の可能性を示すなど、マイクロスケール伝熱学や関連技術への応用の可能性について新たな知見を加えたもので、熱流体工学をはじめ機械工学の学術の上で寄与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。