

博士論文（要約）

加減速する非定常スラグ流の
液膜厚さに関する研究

村松 憲志郎

電子機器の出力密度は年々増加する傾向にあり、それに伴い電子素子の発熱密度も増加している。そのため、素子冷却を目的として、高性能な熱輸送デバイスが求められている。このような高性能熱輸送デバイスとして、自励振動型ヒートパイプが注目されている。自励振動型ヒートパイプは、従来のヒートパイプのようなウィック限界や飛散限界がないことや、マイクロ管内スラグ流が支配的な流れであるために、表面張力が支配的であり重力の効果を無視することができる、という利点を有する。しかしながら、自励振動型ヒートパイプの動作原理は完全に解明されているとは言えず、未だに製品設計できる状況には至っていない。原理解明のためには、特にマイクロ管内スラグ流の伝熱現象を把握することが重要である。

マイクロ管内スラグ流の伝熱においては、壁面と気泡の間に形成される液膜の厚さが、蒸発および凝縮熱伝達特性を決める重要なパラメータであり、液膜厚さを正確に予測することが求められる。自励振動型ヒートパイプの実使用条件における流動は複雑であり、一定速度から加速もしくは減速する流れ、脈動する流れなどが発生するため、このような非定常スラグ流における液膜厚さを正しく予測することが重要である。しかしながら、これまでは定常スラグ流および静止状態からの加速スラグ流における液膜厚さの予測にとどまっており、上述の複雑な非定常スラグ流液膜厚さを予測する方法はない。

そこで本研究では、数値解析によって初速をもつ加減速スラグ流の流動現象および液膜厚さについて明らかにするとともに、得られた知見から、より一般的な、速度および加速度が変化する非定常スラグ流の液膜厚さモデル式を提案することを目的とした。

第一章では研究背景について述べている。第二章では、計算モデルおよび数値計算法について説明している。本研究においては、気液二相流の数値解析法として **Phase Field** 法を採用した。

第三章は、スラグ流液膜厚さの数値解析結果について述べている。まず、定常スラグ流の数値解析によって、レイノルズ数が液膜厚さに与える影響を評価した。作動流体として、気相は空気、液相は水、エタノール、FC-40 の 3 種類の物性を用いて計算を行った。各流体の液膜厚さは、同キャピラリー数においても異なっており、レイノルズ数の高い水で最も液膜が厚く、FC-40 で最も薄い。過去の研究者らによっても、レイノルズ数が高くなると粘性力だけではなく、慣性力の液膜厚さへの影響も無視できなくなることが報告されており、本研究ではより定量的に流動現象の評価を行った。まず流れ場について気泡先端から見ると、液スラグ内には二次流れが存在しており、気泡先端付近の液相内で上流からの流れが折り返し、再び上流側へ流れていく様子が観察された。また、液スラグ内では気泡先端から管直径程度離れると放物型の速度分布に近づき、単相流解析解とほぼ等しくなることが観察された。次に、気泡先端付近における、液相内の軸方向運動量変化のバジェットについて、摩擦速度によって無次元化して観察した。その結果、液相内では二次流れに

よる慣性力と壁面摩擦力が気泡先端から後端方向への力を与え、それとバランスするように圧力勾配が発生していることがわかった。エタノールと FC-40 について比較すると、レイノルズ数の大きいエタノールの方が二次流れの慣性力が大きく、液相内の圧力勾配が大きくなっていることが明らかになった。続いて、気液界面上における速度および液相側の圧力について観察した。二次流れの強いエタノールにおいては、気液界面上のよどみ点から気泡先端にかけての速度増分が、FC-40 に比べて大きくなっており、これによって液相側の気液界面上の差圧がより大きくなっていることがわかった。以上の結果より、同じキャピラリー数においてもレイノルズ数が大きいほど二次流れの慣性力の影響が強くなり、液相側の気液界面上の差圧が大きくなる。そのため、気泡先端の曲率は大きくなり、結果として液膜が厚くなるということが示された。

続いて、定常スラグ流の計算結果を初期条件として、初速のある加速スラグ流の数値解析を行い、初速および加速度が、流れ場や液膜厚さに与える影響を評価した。液膜厚さについては、定常条件に比べて加速条件では全体として液膜が薄くなった。定常流れから加速によって速度すなわちキャピラリー数が増加すると、加速初期には液膜厚さはほとんど変化せず定常スラグ流の液膜厚さとの乖離が大きくなった。同じキャピラリー数でみた場合、初期速度が小さいほど定常との乖離は大きい。また、加速度が小さくなるほど、液膜厚さの定常との乖離は小さくなった。次に、液スラグ中の速度分布について見ると、加速条件においては、加速によって壁面付近にストークス層が誘起され、定常条件と比較して壁面境界層が薄くなっており、同キャピラリー数における二次流れの循環量が定常条件に比べて減少していることが明らかとなった。次に、定常の場合と同様に、液相内の軸方向運動量変化について観察した。その結果、加速条件においては、二次流れによる慣性力が定常条件に比べて減少している一方、液加速のための慣性力が発生していることがわかった。続いて、気液界面上における速度および液相側の圧力について観察すると、加速条件においては二次流れが弱く、よどみ点から気泡先端にかけての速度増分が定常に比べて小さいため、液相側の差圧が小さくなっていることが明らかになった。以上の結果より、加速スラグ流では同キャピラリー数において定常よりも壁面境界層が薄く、二次流れによる慣性力が小さくなるために、液相側の気液界面上の差圧が小さくなる。そのため、気泡先端の曲率は小さくなり、結果として液膜が薄くなるということが示された。また、初速が小さく、加速時間が長いほど、二次流れの慣性力は小さくなり、定常との乖離は大きくなる、すなわち液膜が薄くなるということが示された。

続いて、初速のある減速スラグ流の数値解析を行った。減速条件においては、加速条件とは逆に、同キャピラリー数において、液膜は厚くなることがわかった。減速スラグ流では同キャピラリー数において定常よりも壁面境界層が厚く、二次流れによる慣性力が大きくなるために、液相側の気液界面上の差圧が大きくなる。そのため、気泡先端の曲率は大きくなり、結果として液膜が厚くなるということが示された。

加速および減速スラグ流の数値解析結果より、初速および加減速の影響によって速度分

布が変化し、同じキャピラリー数においても液スラグにおける二次流れの強さが変化するため、気泡先端の曲率および液膜厚さが変わることがわかった。つまり、非定常スラグ流における液膜厚さを予測するためには、この二次流れの強さの変化を予測することが重要となると考え、非定常スラグ流の液スラグにおける速度分布の予測を行った。定常スラグ流では、液スラグ中心での速度分布は单相流の解析解とほぼ一致するため、非定常スラグ流においても单相流解析解による予測を試みた。非定常单相流解析解と非定常スラグ流数値解析の液スラグ中心における速度分布は、よく一致しており、解析的に速度分布が予測可能であることを示した。続いて、この单相流解析解を用いて、二次流れの強さを表す指標として、軸中心速度で定義した排除厚さを導入した。同キャピラリー数における排除厚さの大小は、すなわち二次流れの大小を表しており、非定常スラグ流液膜厚さを予測する上で重要なパラメータとなる。

第四章は、非定常スラグ流の液膜厚さのモデリングについて述べている。まず、非定常スラグ流の液相内の運動量のオーダー評価を行った。その際、移流による慣性力の項は定常からの修正量によって表現した。第三章の結果から、この修正係数は、非定常の定常に対する排除厚さの比の指数関数とし、指数部はレイノルズ数の関数であるとした。最終的に得られた液膜厚さのモデル式について、数値解析結果とのフィッティングを行い、係数を決定した。立案された液膜厚さのモデル式は、第三章の各初速度および加減速度の数値解析結果に対して、誤差 15%以内で一致した。続いて、モデル式の汎用性を確認するために、より複雑な流れである、定常から加速し定常に戻る流れ、脈動流れについて数値解析結果と比較した。その結果、立案したモデル式は誤差 10%以内で数値解析結果と一致し、モデル式の汎用性が確かめられた。

第五章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

以上を要するに、本論文は、非定常スラグ流の液膜厚さへのレイノルズ数および二次流れの影響を明らかにし、それらを組み込んだ汎用性の高い非定常スラグ流液膜厚さのモデル式を提案したものである。本モデル式は、数値解析を行うことなく非定常スラグ流の液膜厚さを予測することが可能であり、自励振動型ヒートパイプの内部挙動把握に大きな役割を果たすものである。また、マイクロ管内気液二相スラグ流を用いたその他の工業製品の伝熱設計などに使用することができ、製品設計の時間を大きく短縮することが可能であると考えられ、工学的有用性が高いものである。