

氏 名	木 野 千 晶
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2799 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 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	垂 直 流 下 液 膜 流 の 界 面 波 構 造 と 伝 熱 特 性 に 関 す る 数 値 解 析 的 研 究

論文調査委員 (主 査) 教 授 福 山 淳 教 授 中 部 主 敬 教 授 功 刀 資 彰

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、様々な工業機器に見られる流下液膜流の界面波構造と伝熱特性の関係について界面追跡法に基づく混相流数値解析手法を用い、界面波構造・内部流動構造に関する新たな知見・相関式を見出し、伝熱特性の定量評価手法の確立に向けた方策を検討した結果をまとめたものであって、7章からなっている。

第1章は緒言であり、これまでの垂直流下液膜流研究に関するレビューが述べられている。これまで垂直流下液膜流の特性について、多くの研究者によって様々な角度から定量的・定性的に議論されてきたが、垂直流下液膜流の内部流動構造の理解に基づく総合的な検討・整理が行われていない。本論文では混相流数値解析を用いて、界面波の内部流動構造を詳細に把握することで、その定性的・定量的特性を流体力学的理解に基づいて議論することを狙いとしている。

第2章では本研究で用いた界面追跡法に基づく混相流数値解析手法(MARS)の概要および計算条件について述べられている。

第3章では、界面波構造を流動条件・物性値に関して整理し、垂直流下液膜流で見られる界面波の特性や現象に関する検討を行っている。2次元界面波が定常的に存在しうる人工擾乱の条件について、擾乱のパラメータとして微小擾乱の振幅および周波数に関して検討を行った。擾乱の振幅が大きい場合、定常2次元界面波へと発達するのに必要な助走区間は短くなるものの、その界面波特性は初期の微小擾乱の振幅によらないことを明らかにした。しかしながら、擾乱の周波数が一定以上高くなった場合、界面波が互いに相互作用しあい、合体・結合して低周波へと遷移していく現象が見出された。このため、定常な2次元界面波を生成するためには振動数を一定以下に設定する必要があることを示した。

界面波様式に関して従来から「solitary wave および capillary wave で界面波から構成されている」タイプの界面波様式と「capillary wave が solitary wave との重ね合わせで構成されている」タイプの界面波様式の2種類の存在が指摘されていたが、本解析ではそれに加えて新たに「solitary wave 的な界面波のみが存在する」タイプの界面波様式を見出した。さらに、界面波様式が新しい無次元数 We/Ka で整理できることを示した。 We/Ka は重力エネルギー、流体の運動エネルギー、平均せん断応力の積と表面張力の比であり、界面波様式の決定には重力およびせん断応力を考慮する必要性のあることを示した。さらに、solitary wave の波高・波長に関する新たな相関式を提案した。また、界面波をその液膜厚さおよび形状によって、substrate film, wave back 領域, wave front 領域, capillary wave 領域に分類した上で、それらの領域長さが流動条件および物性値によって影響されることを示した。結果として、界面波を系統的に整理できることを示した。

また、表面張力の界面波様式に与える影響を検討した。表面張力が大きくなることで、液膜厚さが維持され、結果として液膜が薄くなる領域すなわち substrate film 領域の長さが短くなることを明らかにした。さらに、wave back および wave front 領域の長さは慣性力依存であり、表面張力の影響はほとんどみられないことを示した。また、capillary wave 領域においては表面張力が減少することで capillary wave が不安定となり、その結果、高周波へと遷移することを示した。

第4章では、垂直流下液膜流における内部流動構造の界面波構造との関係について議論している。液膜厚さが平衡液膜厚

さより薄い領域の速度分布は Nusselt の理論解よりも大きい値、平衡液膜厚さの領域では Nusselt の理論解と一致すること、そして平衡液膜厚さより厚い領域における速度は Nusselt の理論解よりも小さい傾向を持つことを示し、本解析結果が従来の実験的・数値解析研究で指摘されてきた液膜流の性質を再現し得ることを示した。また、液膜が非常に薄くなる領域においては逆流渦が生じることを示し、逆流構造は流量保存の概念で理解できることを明らかにした。また、第3章で定義した各領域について、内部流動構造を定量的・定性的に議論した。すなわち、substrate film 領域においては低下した壁面せん断応力が急速に回復し、それに伴って速度分布が放物線形へと戻ることを見出した（速度分布回復領域）。Wave back 領域においては速度分布が、境界層厚さを液膜厚さ、主流速度を界面速度と定義して得られた境界層速度分布（Pohlhausen の速度分布式）と良く一致することを示した（発達領域）。Wave front 領域では速度分布が従来の放物線形を維持できずに崩壊することを示した（速度分布崩壊領域）。さらに、solitary wave のピーク地点における最大液膜速度は最大液膜厚さの $1/2$ 乗に比例することを見出し、流れ方向の圧力差と重力のバランスに基づく理論的考察を行った。また、solitary wave が運ぶ流量が変化して液膜厚さが変化し、その結果として表面張力が変化することを示した。よって、液膜が非常に薄くなる領域においてみられる逆流渦は Weber 数で整理できることを示した。

第5章では、垂直流下液膜流における熱伝達特性の界面波構造の関係について議論している。本解析では最初に気液界面における以下の2種類の加熱条件についての検討を行った。

- (1) 気液界面で温度一定、壁面で熱流束一定の加熱壁条件
- (2) 壁面で熱流束一定、界面での熱流束を考慮

その結果、従来の数値解析研究で用いられている(1)の気液界面で温度一定の条件では、気液界面での熱伝達率（すなわち、熱流束）を無限大と評価していることに相当することを示した。実際の物理現象では気液界面での熱流束は有限値であると考えられることから、本研究では(2)の気液界面での熱流束を考慮した条件を用いることとした。

平衡液膜厚さで定義された無次元熱伝達率（Nusselt 数）は、界面波の各領域においてその伝熱機構が異なることを示した。すなわち、substrate film 領域においてはほぼ熱伝導支配であり、Prandtl 数の影響はほとんど受けないこと、solitary wave 領域では内部循環流の対流効果を大きく受け、その結果、Prandtl 数が低い場合、Nusselt 数はほぼ一定となるが、Prandtl 数が高くなるにつれて Prandtl 数の影響を大きく受けることを示した。さらに、capillary wave 領域においては平均液膜厚さが薄くなることから熱伝導支配となるが、渦構造による温度混合の影響も受けっていると考えられ、その結果わずかに Prandtl 数の影響を受けることを示した。また、作動流体に水を用いた場合について、無次元流量である Reynolds 数を 75、無次元周波数を 20 Hz とした場合の伝熱相関式を提示した。

第6章では3次元垂直流下液膜流について数値解析し、その2次元界面波が3次元界面波へと遷移していく過程を数値解析によって再現できることを示した。

第7章では本研究で得られた知見を総括し、工学的応用に向けた今後の課題を示している。

論文審査の結果の要旨

垂直流下液膜流の気液界面は本質的に不安定であり、界面波の発生を伴うことがその特徴である。この界面波は液膜流内部の流動構造に強く関連するため、その伝熱特性は自由界面での波動現象により大きく促進されることが過去の実験で明らかにされている。しかしながら、その定量的予測は液膜内部の熱流動機構が不明なため、実験相関式の範囲を出ていない。本研究は、垂直流下液膜流の界面波形態、液膜厚さ、界面波速度などの界面波構造や、液膜内部の速度分布、壁面せん断応力、2次流れ、渦発生などの内部流動特性を界面追跡法に基づく混相流数値解析により詳細に検討し、垂直流下液膜熱流動特性の定量的予測・評価手法の確立に資することを目的としている。

本研究で得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 界面波様式を3種類のグループに分類し、それらを慣性力と表面張力の比である無次元数 We/Ka で整理できることを示した。これにより、界面波の性質を系統的に整理・検討することを可能とした。
- (2) 界面波を液膜厚さおよび形状から substrate film, wave back 領域, wave front 領域, capillary wave 領域に分類し、それらの領域長さが流動条件および物性の影響を受けて変化することを示し、特に solitary wave の波高および波長に

関する新たな相関式を提案した。

- (3) 界面波内部の流動特性について議論し、substrate film の速度分布回復領域、wave back 領域（発達領域）、wave front 領域（速度分布崩壊領域）、capillary wave 領域の4種類に分類できることを示した。
- (4) 界面速度について、重力と壁面せん断応力の釣り合いから求める従来の理論とは異なり、重力と流れ方向の圧力差との釣り合いから求める新たな理論を提案した。その結果、界面速度は液膜厚さの -1 乗に比例することを示した。
- (5) 液膜厚さが薄くなる地点における逆流の発生は、solitary wave 領域が運ぶ流量が平均流量を超える流動条件における液膜厚さの減少と、これに伴う表面張力の増加（Weber 数の低下）がその要因であることを明らかにした。
- (6) 界面波の各領域における伝熱特性は、substrate film の速度分布回復領域においては熱伝導支配であり、Nusselt 数はおおよそ一定値を示すこと、さらに solitary wave 領域（wave back 領域および wave front 領域）では内部循環流による対流伝熱効果により Nusselt 数が Prandtl 数の関数となることを示した。また、capillary wave 領域では、逆流発生による温度混合効果と液膜厚さが薄くなることによる熱伝導促進効果が相乗し、大きな熱伝達が行われることを明らかにした。

以上のように、本論文は、界面追跡法に基づく混相流数値解析を援用して垂直流下液膜流の界面波特性、内部流動構造および伝熱特性の詳細を明らかにするとともに、界面波様式に基づく伝熱特性の定量評価手法の確立に向けた方策を示しており、得られた成果は学術上、工学応用上で寄与するところが少なくない。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19年1月25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。