



学位論文題目 Title	一成分系気液二相流に及ぼす重力および表面張力の影響に関する研究
氏名 Author	五明, 泰作
専攻分野 Degree	博士 (工学)
学位授与の日付 Date of Degree	2016-03-25
資源タイプ Resource Type	Thesis or Dissertation / 学位論文
報告番号 Report Number	甲第6640号
権利 Rights	
JaLCDOI	
URL	http://www.lib.kobe-u.ac.jp/handle_kernel/D1006640

※当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

論文内容の要旨

氏 名 五明 泰作

専 攻 機械工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

一成分系気液二相流に及ぼす重力および表面張力の影響
に関する研究

指導教員 浅野 等

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

近年、電子機器の小型化・高性能化は著しく、その発熱密度は年々上昇している。また、高性能な電子機器を搭載した機器が適用される環境も広まっており、例えば宇宙構造物内の電子・電力機器や、電気自動車やハイブリット自動車のインバータなど、重力加速度が通常とは異なる環境での排熱要求や冷却システムの小型軽量化の要求が高まっている。これらの問題に対応するため、新たな冷却方式として、作動流体の潜熱を利用した強制流動沸騰式の冷却システムの開発が進められている。本システムでは、発熱体の冷却は相変化、すなわち沸騰現象を伴うため、コールドプレートやラジエータでの熱伝達、およびその間の熱輸送はすべて気液二相流で行われる。一般に、気液二相流には慣性力、重力、表面張力の 3 つの力が作用するが、気液界面構造はこれらの力のバランスで決定される。そのため、通常とは異なる重力環境下で安全かつ効率的に運用できるようにこの冷却システムを設計するためには、気液二相流の熱流動特性に及ぼす力の支配領域を明らかにする必要がある。

本研究では、気液二相流に及ぼす力として重力および表面張力を取り上げ、支配領域を明らかにすることを目的とした。表面張力の影響に関しては、① 流路径が異なる数種の円管を、重力の影響に関しては② 重力加速度が異なる環境、を対象とし、一成分系気液二相流も流動様式および断面平均ボイド率への重力および表面張力を評価する。

まず、第 2 章では、気液界面構造の観察とボイド率計測が同位置、同時に実施可能な、平行平板型電極の静電容量式ボイド率センサーを開発した。締切法による計測との比較から計測精度を評価し、本研究で開発したボイド率センサーの計測結果は $\pm 5\%$ で締切法の値と一致することを確認した。

第 3 章では、研究対象①として、管内径 4.0 mm とそれ以下 2.0, 1.1, 0.5 mm の 4 種類の細管に対する、Perfluorohexane を主成分とする FC-72 を作動流体とした実験を行った。高速度カメラによる気液界面構造の観察と管断面平均ボイド率に計測結果から以下の知見を得た。

- ・観察画像から判定された流動様式に対し、2 種類の流動様式線図と比較した結果、高質量流束および高气相容積流束条件において Mishima-Ishii モデルとよく一致することが確認された。一方、管内径が小さくなるにつれ表面張力の影響が大きくなり、スラグ流から環状流への遷移はモデルよりも高い気相容積流束で生じることが確認された。

- ・環状流における管断面平均ボイド率を、均質流モデルおよび Cioncolini らのモデルと比較したところ、均質流モデルではいずれの管内径においても平均ボイド率を過大評価すること、また、Cioncolini らのモデルにおいても、管内径 1.1 mm の高質量流束条件を除けば、ボイド率を過大評価することが確認された。

- ・クオリティとボイド率の相関では管内径 4.0, 2.0, 1.1 mm の低質量流束条件において、質量流束の低下に伴いスリップ比が増大する、重力支配であると考えられる領域が存在した。

・チャーン流、セミアニュラー流および環状流に対し、ドリフトフラックスモデルにより平均ボイド率を整理した。チャーン流、セミアニュラー流に対しては Ishii のモデルを、環状流に対しては Zuber のモデルを適用し、いずれの流動様式においても分布定数はモデルと一致することを確認した。一方、ドリフト速度に関しては、管内径 4.0 mm を除くすべての径において、これらのモデルでは過大評価する傾向が確認された。

・環状流の液膜構造を詳細に評価するため、Hazuku らの方法に基づき擾乱波通過頻度を計測した結果、管内径 4.0・1.1 mm までは、管内径が小さくなるにつれ擾乱波通過頻度は増大するが、管内径 0.5 mm では減少することが確認された。これは、管内径 0.5 mm では表面張力の影響が顕著となることで、擾乱波の発生が抑えられたためであると考えられる。

これらの結果から、気液二相流に及ぼす力の支配領域遷移境界を無次元数により整理した。重力－表面張力の遷移境界は、重力と表面張力の比である Bond 数 (Bo) により定義され、その遷移境界が $0.5 < Bo < 30.0$ であることを確認した。また、重力－慣性力の遷移境界は、慣性力と重力の比である Froude 数 (Fr^*) により整理され、その遷移境界が $1.4 < Fr^* < 2.8$ であることを確認した。

次に、研究課題②として、気液二相流に及ぼす重力の影響を評価すること目的として、国際宇宙ステーション ISS (International Space Station) での微小重力環境下での一成分系気液二相流実験 (JAXA プロジェクト TPF 実験として 2016 年度に実施予定) に参加し、加熱試験部直下に設置される流動観察部の構造設計と観察画像に基づく気液界面構造計測の精度評価を行った。

第 4 章では、ISS で実施される沸騰・二相流実験 (TPF 実験) について、その実験計画および計測項目をまとめ、その中での本研究の位置づけを明確にした。

第 5 章では、PF 実験での流動観察部における具体的な計測および項目を明記し、流動観察部を構成する各機器に性能およびその仕様についてまとめた。得られた知見を以下に示す。

・流動観察部では観察画像による気液界面の 3 次元同定およびボイド率計測がなされるが、ボイド率計測の基礎となる環状流での液膜厚さ、気泡流での気泡径の計測精度を検証した。その結果、TPF 実験フライトモデルの流動観察部で得られた撮影画像の空間分解能は画素寸法で $27 \mu\text{m}/\text{pixel}$ であり、環状流の液膜厚さ計測は、屈折率差に基づく像のひずみを考慮せず画素寸法程度の空間分解能で計測可能であることが確認された。

・気泡径の計測では、流れ方向での屈折の影響は認められなかったものの、観察の奥行き方向の位置に依存した屈折によるひずみが確認された。そのひずみは気泡位置に対する補正式によって大きさが補正可能であることを確認した。

・環状流に対しては、安定した液膜が形成される垂直下降流を対象として縮切法と画像撮

影の同時計測を行い、縮切法を用いた平均ボイド率に対して、撮影画像の液膜厚さから計測した平均ボイド率は、縮切法による計測結果と $\pm 5\%$ 以内で一致する結果を得た。すなわち、実際の気液二相流での液膜厚さも画素数から計測可能であることを確認した。

TPF 実験のフライトモデルでは流動観察部が伝熱管下流直下に位置していることから、流動観察部での流動が、沸騰伝熱部での流動の影響を受けている恐れがある。微小重力環境下での実験結果と地上リファレンスデータ (同じ仕様の実験装置を用いて、垂直上昇流として実施) との適切な比較評価を行うため、事前評価として垂直上昇流での加熱試験部下流の流動発達過程を流動挙動の観察および流れ方向ボイド率分布の計測結果をもとに評価する。第 6 章では、加熱試験部下流の流動発達過程を評価するため、加熱試験部出口から 4 箇所 ($L/D=7.5, 22.5, 37.5, 52.5$) で、流動観察及びボイド率計測を実施し、発達挙動を評価した。なお、TPF 実験の流動観察部は、伝熱管出口から $L/D=21.5$ の位置に配置されている。得られた結果は以下の通りである。

・環状流では $L/D=22.5$ の位置で、チャーン流およびセミアニュラー流では $L/D=37.5$ の位置で発達した流動となることが確認されたが、スラグ流については、本実験の最下流である $L/D=52.5$ の位置においても発達した流動である確証は得られなかった。

・スラグ流において、質量流束の高い条件では、下流に向かいボイド率が上昇する傾向が、質量流束の低い領域では下流に向かいボイド率が低下する傾向が確認された。これは、流動が前者では慣性力支配、後者では重力支配であると考えられ、スラグ流での流動の発達過程は支配力により変化することが確認された。

本研究により、気液二相流の気液界面構造、特にボイド率に及ぼす表面張力の影響が明らかとなり、また、重力－表面張力支配領域を Bond 数で、重力－慣性力支配領域の遷移境界を Froude 数により定められた。一方、表面張力－慣性力支配領域の遷移境界の解明は、微小重力環境下での TPF 実験の実施を待つこととなるが、TPF 実験の流動観察部における気液界面構造の計測手法やその精度が十分に検証され、また、微小重力と通常重力で得られたデータを比較する際に重要となる気液二相流動の発達過程も十分に評価されており、TPF 実験で得られたデータを速やかに整理する準備は完了したと言える。

氏名	五明 泰作		
論文 題目	一成分系気液二相流に及ぼす重力および表面張力の影響に関する研究		
審査 委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	浅野 等
	副査	教授	竹中 信幸
	副査	教授	山根 隆志
	副査	教授	宋 明良

要 旨

近年の宇宙開発の発展は目覚ましく、科学技術の進展のみならず産業・医療など幅広い分野の躍進に大きな役割を果たすものであり、今後は実験設備を含む宇宙構造物の大型化が進み、さらにその中で使用されるエネルギー量の増大が予想されている。これらの問題に対応するためには冷却システムの大容量・高性能化が必須であり、新たな冷却システムとして、冷媒の潜熱を利用した二相流体ループ式熱輸送システムが必要とされている。このシステムは、従来の単相流体ループ式熱輸送システムと比べ、冷媒の単位質量当たりの熱輸送量の増大とそれに伴う循環流量の低減により、冷媒を駆動させるポンプ電力を低減することが可能であり、また、コールドプレートでの沸騰冷却による熱伝達率の向上により熱交換温度差を小さくできるなどの利点が挙げられる。しかし、その一方で、沸騰熱伝達におけるドライアウトや膜沸騰への遷移などの徐熱限界が存在し、また、コールドプレートからラジエータへの熱輸送、凝縮、気液分離などの各過程において冷媒流動が気液二相流状態となるため、システムの最適かつ安全な運用のためには、一成分系気液二相流の熱流動特性への重力の影響を明らかにすることが必要不可欠である。また、微小重力場では重力の消失によって表面張力の影響が顕著になると考えられる。

一方、自動車でのインバータや電気モータの冷却においても、排熱源が限定されていることから、効果的な熱輸送システムとして二相流体ループ式熱輸送システムが検討されている。この場合、利用環境の姿勢や加減速による重力変化が問題となる。

気液二相流の熱流動特性、例えば圧力損失や熱伝達率は、気液界面構造に強く依存する。一般に、界面構造の形態は、流動様式として表され、流動様式に応じて流れがモデル化され、気相の体積割合であるボイド率に代表される変数の構成式が構築される。気液二相流には慣性力・重力・表面張力の3つの力が作用するが、気液界面構造はこれらの力のバランスで決定される。本論文では、気液二相流に及ぼす力として重力および表面張力を取り上げ、支配力の遷移境界を明確にすることを目指している。特に、ボイド率特性に注目し、計測センサーも新たに開発している。

まず、導電率が低い流体にも適用できる静電容量式ボイド率センサーを開発し、その計測精度の検証が行われている。静電容量センサーの詳細は第4章でまとめられ、以下の成果が得られている。

(A-1) 電極形状に平行平板型電極を採用し、ボイド率計測と高速度カメラによる流動観察が同位置・同時刻で実施可能である静電容量式ボイド率計測センサーが開発された。

(A-2) 縮切法によるボイド率計測と静電容量法によるボイド率計測を同時に実施することで、開発した静電容量式ボイド率計測センサーの計測精度が、縮切法を基準にして±5%の精度であることが確認された。

次に、重力の影響が小さくなる環境として、表面張力の影響が相対的に大きくなる細管内流れにおける管内径の影響を評価している。例えば、地上場で表面張力支配の流れであれば、その流動は微小重力環境でも同じになると考えられる。従来、マイクロチャンネルのように明らかに表面張力支配である流れは、多々報告されているが、重力の影響が消失する境界を探る研究は数少ない。そこで、内径4.0, 2.0, 1.1, 0.5 mmの4種の単一細管を対象とした一成分気液二相流実験を行い、静電容量式センサーによるボイド率計測、高速度カメラによる流動挙動観察によって、流動特性に及ぼす管内径の影響が評価されている。この内容は第3章でまとめられ、以下の成果が示されている。

氏名	五明 泰作		
(B-1)	チャーン流は、管内径 2.0 mm 以上でのみ観察された。		
(B-2)	流動様式線図を Mishima-Ishii による流動様式遷移境界モデルと比較した結果、管内径 4.0 mm ではチャーン流・環状流およびスラグ流・環状流への遷移境界がモデルと概ね一致することが確認された。また、スラグ流・環状流の遷移境界は、高液相容積流束域において管内径に関わらずモデルとよく一致すること、低液相容積流束域では管内径の縮小によりモデルよりも高い気相容積流束域において遷移が生じることが確認された。		
(B-3)	ドリフトフラックスモデルでの平均ボイド率の整理では、チャーン流およびセミアンユラー流は Ishii のチャーン流モデルと、環状流は Zuber らの環状流モデルと比較された。チャーン流、セミアンユラー流、環状流ともに分布定数は計算結果とよく一致するが、ドリフト速度は管内径 4.0 mm ではモデルとよく一致するものの、その他の管内径において計算結果は過大評価した。また、管内径 1.1 mm までは管内径が小さくなるほどドリフト速度が低下するが、管内径 0.5 mm では増大することが確認された。		
(B-4)	空間平均ボイド率の時間変動から計測された擾乱波通過頻度では、管内径が 4.0~1.1 mm では管内径が小さくなるにつれ擾乱波通過頻度が増大するが、管内径 0.5 mm では表面張力の影響が相対的に大きくなることで、擾乱波通過頻度が低下する傾向が確認された。		
	一方、重力の影響については、今後の宇宙開発で必要とされる次世代熱制御システムである二相流体ループシステムの実現を目的とした研究が進められている。		
	微小重力環境下での一成分系二相流の熱流動特性を明らかにするには、安定した微小重力環境での実験が有効であり、現在、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) プロジェクトとして国際宇宙ステーション (以下、ISS とする) での沸騰・気液二相流実験が計画されている。沸騰伝熱試験部の直下流には気液界面構造の詳細計測のため流動観察部が設置され、論文提出者の研究グループはこの観察部での気液界面構造の観察と計測を担当している。		
	第4章および第5章では、沸騰伝熱試験部直下流の流動観察部について、試験部の設計、気液界面構造の3次元計測システムの構築と精度評価が行われ、以下の成果が得られている。		
(C-1)	環状流液膜厚さの計測精度について屈折率の影響を理論的に評価した。管内挿物による模擬液膜の計測によって、屈折率による補正を加えた画素寸法を用いれば屈折の影響の補正なしで液膜厚さを画素寸法精度の空間分解能で計測できることが確認された。		
(C-2)	安定した液膜構造である気液二相環状下降流に対し、縮切法によるボイド率計測との比較から平均ボイド率を±5%以内で計測可能であることが確認された。		
	ISS での二相流実験では、沸騰伝熱試験部の直下流に流動観察部が設けられるため、地上実験との比較では、まず、沸騰伝熱試験部出口からの流れの発達を明らかにしておく必要がある。そこで、伝熱管出口から、流れ方向に4か所の計測点が設定され、静電容量式センサーによるボイド率計測、高速度カメラによる流動挙動観察から流れの発達が評価されている。この内容は第6章でまとめられ、以下の成果が示されている。		
(D-1)	環状流域では、質量流束に関わらず $L/D=22.5$ の位置で発達していることが確認された。 (L: 沸騰伝熱試験部出口端からの軸方向距離, D: 管内径 4 mm)		
(D-2)	チャーン流、セミアンユラー流では、伝熱管直下部では環状流の様相を示し、流動方向に従い液膜流は重力の影響を受けるようになり、 $L/D=35$ で発達した流動となることが確認された。		
(D-3)	スラグ流域では、下流に行くに従いボイド率の軸方向の粗密が顕著なスラグ流に遷移した。 $L/D=47.5$ においても完全な発達は得られていない。		
	以上のように、本研究は細管内一成分系気液二相流の流動特性について、重力および表面張力の影響を研究したものであり、流動様式およびボイド率特性について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の五明 泰作は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。		