

博士論文審査報告書

論文題目

静電容量型ボイド率計を用いた水素二相流の
流動様式と伝熱特性に関する実験的研究
Experimental Study on Flow Regime and
Heat Transfer Characteristics of Hydrogen
Two-phase Flow Applying the Capacitive
Void Fraction Sensor

申請者

坂本	勇樹
Yuki	SAKAMOTO

機械科学専攻 航空宇宙輸送システム研究

2019年2月

液体水素は、単位質量あたりの発熱量の高さ、極低温冷媒（沸点-253℃）としての冷却能力の高さおよび燃焼後の排気ガスがクリーンであることより、現行ロケットや将来の極超音速エンジンの燃料として使用される。液体水素はタンクへの注液時や配管予冷時に配管内において沸騰し、気体と液体が複雑に混ざり合った気液二相流と呼ばれる流動形態となる。液体水素の効率的な流動制御には、気液二相流の高精度な計測技術の構築と熱流動特性の把握が課題となっている。気液二相流状態を決定づける重要パラメータとして、クオリティ（気相の質量割合）やボイド率（気相の体積割合）があり、古くより様々な手法が提案、開発されてきたが、極低温流体に適用可能な計測手法は確立されていない。また、熱流動特性を把握するためには、これらのパラメータを用いた流動様式の遷移点や熱伝達率の予測が必要であるが、液体水素を扱う実験が難しく、公開されているデータもほとんどないため、詳細な沸騰水素流動特性の解明に至っていない。

本研究では、電場解析を用いた設計により最適化されたボイド率計を開発し、液体水素の流動実験に適用することで、上述の課題を解決することを試みている。本研究における成果を以下に示す。第一に、高精度かつ安全性、搭載性に優れた極低温流体用静電容量型ボイド率計を開発した。申請者が考案した非対称型ボイド率計は、従来のもものと比べて著しく精度が向上している。第二に、沸騰水素流動特性取得実験を実施し、気泡流や間欠流など種々の流動様式における流動特性、熱伝達特性を取得した。本データは、希少な沸騰水素流のデータとして価値が高い。第三に、実験データを用いて熱平衡クオリティ・真のクオリティ・ボイド率の相互換算モデルを新規に構築した。これにより、実験においてボイド率を計測すれば、計測の困難なクオリティを求めることが可能となる。第四に、流動様式の定量判別モデルを構築し、そのモデルの物理的意味を考察した。第五に熱伝達率予測モデルを構築した。これらのモデルを構築する際に、既存研究モデルのレビューを行い、水素に適用可能なモデルを選定している。

本論文は、全6章から構成される。

第1章「序論」では、本研究の意義と目的を説明するため、航空宇宙分野および水素大量利用時代へ向けた他の産業分野における研究、開発動向を紹介し、その中で水素気液二相流の流動特性把握の重要性について記載し、本研究の動機付けを明確にしている。

第2章「気液二相流研究の概観」では、気液二相流の先行研究についてまとめている。また、本研究で用いるボイド率等の主要パラメータや本研究の骨子となるボイド率とクオリティの関係、流動様式の遷移条件、熱伝達率の推算手法について、既存研究を整理し、その適用方法を調査した結果をまとめている。

第3章「非対称静電容量型ボイド率計の開発」では、本研究で開発した静電容量型ボイド率計の設計手法とその精度について詳細に示している。申請者が過去に発明し、測定誤差の低減効果が示されている非対称型ボイド率計について、電場解析と実験計画法を用いた設計因子の最適化により測定精度の向上を図っている。流動様式の違いにより静電容量値とボイド率の関係が異なるため、ここでは360通りの気液分布条件を模擬してシミュレーションを行い、ボイド率計単体と

しての測定精度が中心値 0.07%，標準偏差 2.36%であることが示されている。これまで，極低温流体に対して確立された計測手法はほとんどなく，飛翔体等への搭載も可能な，安全で高信頼性かつ小型・軽量の静電容量型ボイド率計は波及効果が高い。

第 4 章「沸騰水素水平流動実験」では，本研究で実施した水素流動実験の装置および計測方法，水素気液二相流の作成方法について詳細に記載し，最後に得られた結果について示されている。

第 5 章「沸騰水素の流動特性モデルの提案」では，第 4 章の実験結果をもとに構築した，沸騰水素に適用可能なボイド率とクオリティの相互変換モデル，流動様式の遷移モデル，熱伝達率の推算モデルについて下記の様にまとめている。

第 1 項「ボイド率とクオリティの関係」では，熱平衡クオリティ・真のクオリティ・ボイド率の相互換算モデルについて示している。まず，ボイド率計の精度が従来と比較して高いこと（95%の信頼度で約 6.5%の精度）が示されている。次に，ボイド率からクオリティ（真のクオリティおよび熱平衡クオリティ）を推算するモデルについて示されている。沸騰流において真のクオリティを計測することは現状不可能であり，熱平衡クオリティは限られた実験装置を用いないと計測できないため，ボイド率計測とクオリティを相互換算することは，沸騰流動状態を把握するうえで極めて重要である。熱平衡クオリティと真のクオリティが一致するとみなせる中・高クオリティ域については，先行研究の 14 モデルを比較検討し，Steiner のドリフトフラックスモデルが最もボイド率・真のクオリティ換算精度が高く，水素二相流で適用可能であることが示されている。熱平衡クオリティと真のクオリティの換算に関しては，4 つの既存モデルを比較し，低クオリティ域を含めて，世古口が提案した簡易換算法が換算精度と計算コストの観点から沸騰水素にも適用可能であることを示している。以上の組み合わせによって換算精度をボイド率の換算誤差で評価すると今回の実験の範囲で 95%の信頼度で約 4.0%であることを示している。

第 2 項「流動様式判定モデルの構築」では，視覚的な気液混合の様子を示す流動様式を定量的なパラメータを用いて判別している。液単相・気泡流・間欠流・環状流は，既存モデルでは流動様式を判定できないため，新たな物理モデルを構築している。気泡流と間欠流の遷移境界については，気泡にかかる剪断力と浮力の力のバランスから気泡流が存在できうる条件を導出し，二力のバランスについては実験値への回帰分析から境界を決定している。間欠流と環状流の遷移境界については，液滴にかかる抗力と重力のバランスから環状流が存在しうる条件を導出し，実験値への回帰分析から境界を決定している。本研究で提案したモデルを用いることで，本実験点の 97%で実験値と予測値が一致することが示されている。

第 3 項「熱伝達特性予測モデルの構築」では，熱伝達率の予測モデルについて考察している。液単相強制対流熱伝達率については先行研究でも液体水素に適用可能とされる Dittus-Boelter の式が使用可能であることを確認している。強制対流沸騰熱伝達率については，今回の実験装置の構成上，独立してこの影響を評価することが困難であったため，代表的な 2 つの既存モデルを比較し，それらの差

が核沸騰熱伝達率の影響に比較して小さいことから、Kind-Saitoの強制対流沸騰熱伝達率予測モデルが沸騰水素にも使用可能であるとしている。飽和核沸騰域について、実験値から強制対流沸騰熱伝達の影響を差し引いて、7つの既存モデルとの比較を行い、流体物性と配管材質を考慮した補正係数を用いたRohsenowのモデルが適用可能であることが示されている。サブクール核沸騰領域については、熱平衡クオリティを用いて液単相状態から発達した飽和核沸騰熱伝達領域までの熱伝達率を滑らかに結ぶ関数を提案している。以上の4つのモデルを統合して、沸騰水素熱伝達率として実験値と解析値を比較し、中心値3.8%、標準偏差23.0%で一致することが示されている。流動様式に着目すると、環状流域では熱伝達率がクオリティや熱流束の増加に対して急激に増加することとその理由が示されている。

第6章「結論」では、本研究で得られた知見を総括するとともに、今後の展望や課題について示している。

以上を要約すると、本論文は、極低温水素二相流の流動データを新規に開発したボイド率計を用いた詳細な実験によって取得し、その結果を元にこれまで不明であった水素二相流の熱流動特性を体系的に整理し、数学的モデルを構築することで明らかにしたものである。本研究結果は、航空宇宙分野のみならず将来の水素大量利用時代におけるエネルギー技術の向上に資するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。

2019年1月

審査員（主査） 早稲田大学教授 博士（工学） 東京大学 佐藤 哲也

早稲田大学教授 博士（工学） 大阪大学 宮川 和芳

早稲田大学教授 博士（工学） 早稲田大学 吉村 浩明

早稲田大学教授 博士（工学） 早稲田大学 齋藤 潔

宇宙航空研究開発機構特任准教授 博士（工学） 東京大学 小林 弘明
早稲田大学客員准教授
