

# 博士論文概要

## 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

2018年11月

本研究では、ロケット等の燃料として使用される液体水素を対象に、気液二相流状態における高精度なボイド率計測技術と、それを用いた実液実験により流動様式、伝熱モデルを構築することを目的とする。

液体水素は大気圧下において $-253$  °Cを沸点とする極低温流体であり、常温下では容易に気化沸騰する。ロケットや極超音速エンジンの燃料供給系において、注液時や配管予冷時には配管内で沸騰し、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。その効率的な流動制御には、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）があるが、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。

そこで本研究では、実験的にこれらの問題を解決することを試みる。まず、高精度な極低温流体用の静電容量型ボイド率計を開発する。次に、沸騰水素流動特性取得実験を実施し、種々の流動様式における流動特性、熱伝達特性を取得する。本実験結果を用いて、ボイド率とクオリティの関係、流動様式の遷移特性、伝熱特性について、水素二相流に適用可能なモデルを構築する。

本研究における成果を以下に示す。

1. 電場解析と実験計画法を用いた静電容量型ボイド率計の開発
2. 沸騰水素流動特性取得試験によるデータの取得
3. 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の構築
4. 流動様式の定量判別モデルの構築
5. 熱伝達率予測モデルの構築

以下に本論文の構成を示す。

第1章は「序論」と題し、本研究の意義と目的を説明する。航空宇宙分野および水素大量利用時代へ向けた産業分野における問題点と課題を紹介し、その中で気液水素二相流の流動特性把握の重要性について記載する。また、原子力発電の発達などにより活発化した気液二相流研究がどのように行われてきたか、その中で極低温流体がどう取り扱われているかについて記述する。さらに本研究で取り組む4つのキーワード(ボイド率・クオリティ・流動様式・熱伝達率)を説明する。

第2章は「気液二相流研究の概観」と題し、気液二相流の先行研究について纏める。まず、本論文内で扱うボイド率等の主要パラメータについて定義する。さらに本研究の目的であ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詳細に纏める。

第3章は「非対称静電容量型ボイド率計の開発」と題し、本研究で開発した静電容量型ボイド率計の詳細について示す。ボイド率の計測手法は過去に様々提案されてきたが、極低温流体に対して確立された手法は存在しない。本研究では、飛翔体等への搭載も可能なボイド率計として、安全で非接触かつ小型・軽量化が容易な静電容量型ボイド率計に着目する。申請者が過去に発明し、計測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、電場解析を用いた実験計画法による設計因子の最適化により計測精度の向上を図る。流動様式により、静電容量値とボイド率の関係が異なるため、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計測精度が中心値0.07%、標準偏差2.36%であることを示した。

第4章は「沸騰水素水平流動実験」と題し、本研究で用いた実験装置の概要を纏める。実験装置の構成、配管系統図、熱流動特性計測点、計測制御装置の諸元ならびに水素気液二相流の作成などの実験方法について詳細に記載する。さらに得られた実験データの一覧と実験値の解析手法を示す。

第5章は「沸騰水素の流動特性モデルの提案」と題し、本研究で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纏める。

第1項では、ボイド率計の精度検証結果および熱平衡クオリティ・真のクオリティ・ボイド率の相互換算モデルについて示す。ボイド率計の計測精度については、実験結果から、第3章で示したセンサー単体の計測精度の他に静電容量計測器の精度と実験の再現性などを含めたその他の精度を合わせて評価する。その結果、これらの影響を加味しても95%の信頼度で約6.5%の精度でボイド率を計測可能であることを示した。次に、クオリティからボイド率を推算するモデルを構築した。クオリティは、実際に気相の質量流量割合を示す真のクオリティと乾き度に一致する流体への入熱量から換算される熱平衡クオリティに分類される。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、計測可能なボイド率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。本研究ではまず、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クオリティ域について、14の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換算精度が高く、水素二相流で適用可能であることを示した。次に、熱平衡クオリティと真のクオリティの換算について4つの既存モデルを前述のSteinerのモデルと組み合わせることで得られたボイド率を実験結果と比較した。その結果、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だと示した。上記の組み合わせによって、熱平衡クオリティからボイド率へ換算した結果を計測したボイド率との差で評価し、95%の信頼度で約4.0%の差で換算可能であることを示した。

第 2 項には流動様式遷移モデルについての考察を示す。視覚的な気液混合の様子を示すのが流動様式であり、定量的なパラメータを用いて流動様式判定を行うことは、熱伝達特性や圧力損失特性をモデリングする上で基本となる。今回行った実験では、液単相・気泡流・間欠流・環状流が得られた。これらの流動様式を 4 つの既存モデルと比較したところ、どのモデルも沸騰水素の流動様式を判定できないことがわかった。そこで、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バランスから気泡流が存在しうる条件を導出し、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する。さらに間欠流と環状流の遷移境界については、液滴にかかる気流からの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する。この結果、本研究で提案したモデルを用いることで、今回取得した定常状態での実験点のうち約 97% で実験値と予測値が一致することを示した。

第 3 項には熱伝達率の予測モデルについての考察を示す。沸騰流の熱伝達率を推算するうえで必要となるのが液単相強制対流熱伝達率、強制対流沸騰熱伝達率、サブクール核沸騰熱伝達、飽和核沸騰熱伝達率である。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示した。また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、この影響だけを切り分けて評価することが困難であるため、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た。飽和核沸騰域については、まず実験値から上記モデルを用いて強制対流沸騰熱伝達の影響を差し引いた核沸騰熱伝達率を求める。さらに飽和核沸騰熱伝達率について 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て修正した Rohsenow のモデルが適用可能であることを示した。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た。以上の 4 つの伝熱形態に対するモデルを統合して、沸騰水素熱伝達率として実験値と解析値を比較すると、全実験点に対して中心値 -3.8%、標準偏差 23% で一致した。また、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がわかった。これは環状流領域で強制対流沸騰熱伝達の影響が顕著となり、本研究で構築したモデルの範囲を超えるためである。環状流域と液単相領域の実験値を除くと、中心値 -1.6%、標準偏差 19% で実験値と解析値が一致した。

第 6 章は「結論」と題し、本研究で得られた知見を総括する。

以上、本研究によって、これまでほとんど実験の行われてこなかった水素二相流の熱流動特性について、体系的な整理とモデル化を実現した。液体水素を燃料とするエンジンでは沸騰に伴って無効となるエネルギーを削減することが重要な課題であり、本研究結果は航空宇宙分野の発展に資するものである。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 坂本 勇樹 印

(2018年1月17日現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
査読論文 (掲載決定)	坂本勇樹, 小林弘明, 東和弘, 長尾直樹, 杉森大造, 杵淵紀世志, 佐藤哲也 “LE-5B-3 地上燃焼試験用静電容量型ボイド率計の開発”, 航空宇宙技術, (2018)
査読論文	<u>Sakamoto, Y.</u> , Peveroni, L., Kobayashi, H., Sato, T., Steelant, J., Buchlin, J. “Void Fraction Measurement in Cryogenic Flows. Part II: Void fraction measurement in cryogenic flows. Part II: Void fraction capacitive sensor performances in chilldown experiments”, Cryogenics, Vol. 96, pp.25-33, (2018)
査読論文	<u>Sakamoto, Y.</u> , Peveroni, L., Kobayashi, H., Sato, T., Steelant, J., Vetrano, R. “Void fraction measurement in cryogenic flows. Part I : Design and validation of a void fraction capacitive sensor”, Cryogenics, Vol. 94, pp.36-44, (2018)
査読論文	○ <u>Sakamoto, Y.</u> , Tetsuya, Sato and Kobayashi, H. "Development study of a capacitance void fraction sensor using asymmetrical electrode plates", Journal of Fluid Science and Technology, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.11, No.2, JFST0008, (2016)
査読論文 (筆頭でない)	小林弘明, <u>坂本勇樹</u> , 杵淵紀世志, 佐藤哲也 “微小重力環境下における極低温二相流のボイド率計測” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 66, pp.147-152, (2018)
査読論文 (筆頭でない) (掲載決定)	箕手一眞, <u>坂本勇樹</u> , 多根翔平, 中島曜, 古市敦大, 樺山昂生, 辻村光樹, 吉田光希, 小林弘明, 佐藤哲也 “均質化機構によるスリップ比モデルを用いたクオリティ計測手法の開発”, 航空宇宙技術, (2018)
査読論文 (筆頭でない)	小林弘明, 杵淵紀世志, 更江渉, 梅村悠, 藤本圭一郎, 藪崎大輔, 杉森大造, 姫野武洋, 佐藤哲也, 北古賀智史, 角悠輝, <u>坂本勇樹</u> , 野中聡, 藤田猛, "ロケット慣性飛行中の二相流挙動および熱伝達特性の観測実験～実験装置部の開発～", 日本航空宇宙学会論文集, 日本航空宇宙学会, Vol.63, No.5, pp.188-196, (2015)
査読論文 (筆頭でない)	岡田航, 佐藤哲也, 小林弘明, 前野徳秀, <u>坂本勇樹</u> , "画像解析法による極低温二相流のボイド率測定に関する研究", 航空宇宙技術, 日本航空宇宙学会, Vol.14, pp.163-170, (2015)

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (国際)	○ <u>Sakamoto, Y.</u> , Kobayashi, H., Naruo, Y., Takesaki, Y., Tane, S., Minote, K., Nakajima, Y., Furuichi, A., Tsujimura, H., Kabayama, K. and Tetsuya Sato "Thermal Fluid Characteristics of Boiling Hydrogen in a Horizontal Circular Pipe Flow", 15th International Space Conference of Pacific-basin Societies, 2018年7月
講演 (国際)	<u>Sakamoto, Y.</u> , Sato, T., Kobayashi, H., Kinefuchi, K., Sugimori, D., Higashi, K. and Nagao, N. "Development of a Capacitive Void Fraction Sensor to Mount on a Space Propulsion System for a Ground Firing Test", Space Propulsion 2018, 2018年5月
講演 (国際)	○ <u>Sakamoto, Y.</u> , Kobayashi, H., Tane, S., Minote, K., Nakajima, Y., Furuichi, A., Tsujimura, H., Kabayama, K. and Sato, T. "Investigation of Flow Boiling Phenomena for Hydrogen in a Horizontal Tube.", The 10th International Conference on Boiling & Condensation Heat Transfer, 2018年3月
講演 (国際)	<u>Sakamoto, Y.</u> "Experimental Characterization of Nitrogen Two-phase Flow during Chillover", ERASMUS MUNDUS EASED Closure Meeting, 2017年6月
講演 (国際)	<u>Sakamoto, Y.</u> "Void fraction measurement during LN2 chill-down by capacitive sensor", IFAR VIRTUAL CONFERENCE ON TURBOMACHINERY organized in collaboration with NASA-ARMD HQ, 2017年3月
講演 (国際)	<u>Sakamoto, Y.</u> "Void fraction measurement during LN2 chill-down by capacitive sensor", Symposium of VKI PhD Research 2017, 2017年3月
講演 (国際)	○ <u>Sakamoto, Y.</u> , Sato, T., Kobayashi, H., Uragaki, K., Tane, S. and Minote, K. "Development Study of a Capacitance Based Void Fraction Sensor for Cryogenic Two-phase Flow.", AJCPP2016, 2016年3月

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (国内)	坂本勇樹, Peveroni L., 小林弘明, 箕手一眞, 多根翔平, 佐藤哲也, Vetrano R. "極低温流体用静電容量型ボイド率計の開発", 2017 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2017 年 9 月
講演 (国内)	○坂本勇樹, 佐藤哲也, 小林弘明, 多根翔平, 箕手一眞 "極低温気液二相流のボイド率測定", 日本航空宇宙学会 47 期年会, 2016 年 4 月
講演 (国内)	○坂本勇樹, 佐藤哲也, 小林弘明, 浦垣昂太, 多根翔平, 箕手一眞 "極低温環境下におけるボイド率測定技術の開発", 流体工学部門講演会, 2015 年 11 月
講演 (国内)	○坂本勇樹, 佐藤哲也, 小林弘明 "極低温流体を対象とした静電容量型ボイド率計の開発", 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2015 年 10 月
講演 (国内)	○坂本勇樹, 佐藤哲也, 北古賀智史, 角悠輝, 戎野翔輝, 浦垣昂太, 小林弘明 "非対称極板を用いた静電容量型ボイド率計の開発研究", 第 55 回 航空原動機・宇宙推進講演会, 2015 年 3 月
講演 (国内)	○坂本勇樹, 佐藤哲也 "非対称極板を用いた静電容量型ボイド率計の精度向上に関する研究", 日本機械学会関東学生会第 53 回学生員卒業研究発表講演会, 2014 年 3 月