

博士学位論文審査要旨

2008年2月12日

論文題目: Characterization of gas-liquid two-phase flow regimes using magnetic fluid: setup, measurements, signal processing and data analysis

学位申請者: 桑原 拓也

審査委員:

主査: 同志社大学大学院工学研究科 教授 山口 博司

副査: Ecole Centrale Paris 教授 Florian DE VUYST

副査: 大阪府立大学大学院工学研究科 教授 大久保 雅章

要 旨:

気液二相流の応用は原子力工学, 機械工学, 化学工学, 環境工学など多岐に渡る. さらに新しいエネルギー変換装置として磁性流体の気液二相流を用いた装置が研究されている. 気液二相流の流動解析を行う上で重要となるボイド率, 気泡速度, 流動様式判別方法などが不十分であるのが現状である. これら気液二相流の主要パラメータに関する新しい計測方法が必要不可欠である.

本論文は上記のような現状を踏まえ, ボイド率および気泡速度, 流動様式に関する磁性流体を用いた電磁誘導による新しい計測方法を提案するものであり,

第1章では, 気液二相流の研究背景および磁性流体を用いた熱輸送装置やエネルギー変換装置について概観し, ボイド率, 気泡速度計測方法ならびに流動様式判別の重要性・必要性について述べている. また, 本論文の全体の構成についてまとめている.

第2章では, ボイド率, 気泡速度計測方法ならびに流動様式判別に共通の計測原理について述べている. また, 計測原理を確立する上で必要な, 空気-磁性流の気液二相状態での磁化に関するモデルを理論的に与えている.

第3章では, 磁性流体と希釈濃度に関して, 気液二相流の流動挙動に影響を及ぼす動粘度, 表面張力, また磁氣的物性である磁化について述べている. 計測により得られた物性をもとに実験式を与えている.

第4章では, ボイド率計測について述べ, 本計測の基礎となるボイド率と誘導起電力の関係を実験的に調査し, 実際の流動において本研究で提案したボイド率計測の有用性を証明している. さらに, ドリフト・フラックスモデルより算出されるボイド率とも比較検討を行い, 良い精度でボイド率計測を行えることが確認している.

第5章では, 気泡速度計測について述べている. 気泡速度計測では得られる誘導起電力の信号をウェーブレット変換により信号処理し, 相関関数を用いることにより気泡速度を求めるアルゴリズムを提案している. 比較的良く理論研究が行われている静止水中のテイラー気泡の気泡速度の計測を行い, 本計測方法の妥当性を確認し, さらに気相および液相が流動している状態でも同様の調査を行い, 良い一致が得ている.

第6章では, 流動様式判別について述べている. 気泡速度計測での信号処理を発展させ, ウェーブレット密度推定により信号の振幅に対する確率密度関数を得た. 得られた確率密度関数をニューラルネットワーク用の入力ベクトルに変換し, 動径基底関数 (RBF) ニューラルネットワークが有用であることを見出した.

第7章では, 本論文で得られた結果を総括している.

以上より本論文は磁性流体を利用した、新しい非接触法によりボイド率ならびに気泡速度計測、流動様式判別方法を提案するとともに、理論および実験的な妥当性・実用性を結論付けたものであり、工学的に極めて価値があるものである。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2008年2月12日

論文題目： Characterization of gas-liquid two-phase flow regimes using magnetic fluid: setup, measurements, signal processing and data analysis

学位申請者： 桑原 拓也

審査委員：

主査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 山口 博司

副査： Ecole Centrale Paris 教授 Florian DE VUYST

副査： 大阪府立大学大学院工学研究科 教授 大久保 雅章

要 旨：

本論文の提出者は本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に2004年4月に入学し、現在在学中である。

本論文の主たる内容は *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 混相流研究の進展, *AIAA J. of Thermophysics and Heat Transfer*, 混相流研究の進展 Vol.2 に掲載されすでに十分な評価をえている。また, *J. of Physics: Condensed Matter* に投稿し,すでに受理されている。

本年1月19日15時より約2時間にわたり提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ,種々質疑討論が行なわれたが,提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後,審査委員により,論文に関連する諸問題につき口答試験を実施した結果,本人の十分な学力を確認することができた。なお,英語に関しては本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）在学中に合格しており,さらに海外国際学会で8件の英語により講演も行なっており,十分な学力を有すると認める。また,フランス語に関しては本学工学部在学中に単位認定されており,十分な語学力を有しているものと認められている。以上より,本論文提出者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： Characterization of gas-liquid two-phase flow regimes using magnetic fluid: setup, measurements, signal processing and data analysis

氏名： 桑原 拓也

要旨：

気液二相流の応用は原子炉，ボイラー，化学プラント，水質浄化などに代表されるように原子力工学，機械工学，化学工学，環境工学など多岐に渡る．一方，流体工学的観点では，熱輸送および熱伝達特性を解析する上で基礎方程式が必要になるものの，現象の複雑さゆえに，統一的な見解および理論がなく，実験に基づくモデルあるいは経験によるところが大きいという問題がある．また，数値解析に必要な基礎的実験データが不十分なのが現状である．さらに，実質的な流体工学の応用を考える場合，現状では巨視的な流動解析を行うことができるドリフト・フラックスモデルや二流体モデルに代表される平均化モデルが有用であるものの，平均化モデルを用いた解析では，ボイド率および流動様式が主要なパラメータとなる．同様に，ボイド率についても様々な理論が存在し，正確な予測が困難である．また，ボイド率計測方法についても，その重要性から多くの方法が提案されているものの，利用範囲に制限ある場合や流体との接触法が多く，十分であるとは言い難い．流動様式についても定義の曖昧さや主観的要素が多く，比較的容易な計測で客観的に流動様式を判別する方法は確立されていない．

磁性流体は磁場に感応する性質をもつ液体であり，外部磁場による制御が可能であるために様々な応用が提案され研究が進められている．特に磁場勾配のある磁場を加えることにより磁気体積力を利用した応用としては，熱輸送装置やエネルギー変換装置などが挙げられる．これらの応用では理論上，ポンプなどの機械的要素を必要としないシステムの構築が可能であるため，新しいエネルギー変換システムとして研究が進められている．磁性流体を用いた熱輸送装置やエネルギー変換装置では磁気体積力を駆動力に効率良く変換，さらに熱伝達特性を高めるために気液二相流を用いる方法が主流である．そのため，流動挙動や熱伝達特性を解析・解明するためにはボイド率および流動様式が必要になるものの，磁性流体が黒色不透明な液体であるため，光学的可視化による計測が不可能であり，主要なパラメータの計測はさらに困難になる．

以上より，磁性流体の気液二相流も含めた広範囲の応用における気液二相流の研究では，ボイド率および流動様式の計測が必要不可欠である．また，気泡速度は気液二相流の個々の基本的な現象が複雑に絡み合った現象であり，気液二相流の研究では重要なパラメータである．特に磁性流体を用いた熱輸送装置やエネルギー変換装置では，気泡速度は熱輸送特性や熱伝達特性に影響を及ぼす気泡ポンプ効果と密接な関係があり，気泡速度を知ることが重要である．そこで，本研究では，磁性流体の気液二相流も含めた広範囲の気液二相流において，ボイド率および気泡速度を電磁誘導を用いて非接触で計測する方法，さらに流動様式を自動的に判別する方法を提案した．なお，これらの計測は同じ計測装置で同時に行えるものである．

磁性流体の気液二相流も含めた広範囲の気液二相流を対象とすることから，空気-磁性流体の気液二相流および一般的な気液二相流の代表として空気-水（蒸留水）の気液二相流を取り扱い研究を行った．空気-磁性流体の気液二相流では，磁性流体そのものの磁化を利用した．空気-水の気液二相流では，液相である水に，水そのものの物性に影響を与えない微量の磁性流体を添加し，液相に磁化を持たせる手法を提案した．この場合，磁性流体から見れば希釈されたことになり，磁化を与える材料とみなすことができる．磁性流体のこのような利用方法は前例がなく，特に磁性流体を希釈した場合の物性に関する研究報告は見あたらない．これらの研究背景を踏ま

え、本研究では磁性流体と希釈濃度に関する調査、ボイド率計測方法、気泡速度計測方法ならびにデータマイニング技術を用いた流動様式判別の方法を提案し確立した。

本論文は7章で構成されており、

第1章では、気液二相流の研究背景および磁性流体を用いた熱輸送装置やエネルギー変換装置について概観し、ボイド率、気泡速度計測方法ならびに流動様式判別の重要性・必要性について述べた。また、本論文の全体の構成についてまとめた。

第2章では、ボイド率、気泡速度計測方法ならびに流動様式判別に共通の計測原理について述べた。また、計測原理を確立する上で必要な、空気-磁性流の気液二相状態での磁化に関するモデルを理論的に与えた。提案されたモデルよりボイド率と磁性流体の磁化には線形関係が成り立つことが分かった。また、磁性流体の緩和時間に基づく考察から、計測に用いる交流磁場の周波数に関して議論した。

第3章では、磁性流体と希釈濃度に関する物性について述べた。具体的には、気液二相流の流動挙動に影響を及ぼす動粘度、表面張力、また磁気的物性である磁化について物性計測実験を行った。さらに、磁性流体を磁化を与える材料として用いる応用を考慮して、計測により得られた物性をもとに実験式を与えた。

第4章では、ボイド率計測について述べ、ボイド率計測に関する計測原理、実験装置を詳細に説明した。本計測は誘導起電力を用いたものであるため、まず、較正検定実験よりボイド率と誘導起電力について調査し、実験からも両者の間には線形が成り立つことを確認した。また、ボイド率と誘導起電力を関連づける検定線を得た。一方、計測では検定線よりボイド率が計測できるものの、その実用性を確かめるために、実際の気液二相流においてボイド率計測を行い、また既存のボイド率計測方法である締切法により求めたボイド率と比較検討を行った。さらに、ドリフト・フラックスモデルより算出されるボイド率とも比較検討を行った。空気-水の気液二相流の計測では0.1 [vol%] になるように液相に磁性流体を添加すれば良いという知見を得た。これら一連の結果より、空気-磁性流体の気液二相流および空気-水の気液二相流の両方において、良い精度でボイド率計測を行えることが確認された。

第5章では、気泡速度計測について述べた。気泡速度計測では得られる誘導起電力の信号を複素数ウェーブレットを用いた連続ウェーブレット変換および離散ウェーブレット変換に基づく多重度解析により信号処理し、相関関数を用いることにより気泡速度を求めるアルゴリズムを提案した。比較的良く理論研究が行われている静止水中のテイラー気泡の気泡速度を磁性流体ならびに水（希釈磁性流体）中で計測を行い、本計測方法の妥当性を確認した。さらに気相および液相が流動している状態でも同様の調査を行い、良い一致が得られた。なお、気相および液相が流動している気液二相流に関する理論と比較にはドリフト・フラックスモデルを用いた。

第6章では、流動様式判別について述べた。気泡速度計測と同様な連続ウェーブレット変換および離多重度解析による信号処理後、信号をヒストグラムに変換し、離散ウェーブレット変換に基づくウェーブレット密度推定により信号の振幅に対する確率密度関数を得た。ウェーブレット密度推定の際に適当な周波数成分のみを再構成することで、確率密度関数は流動様式に応じて特徴的な関数となることが分かった。自動的に流動様式判別を行うために、得られた確率密度関数をニューラルネットワーク用の入力ベクトルに変換し、ニューラルネットワークにより流動様式判別を行った。ニューラルネットワークには数多くの種類が存在する。様々なタイプのニューラルネットワークで数値実験を行った結果、比較的新しいニューラルネットワークである動径基底関数（RBF）ニューラルネットワークが有用であることを見出した。

第7章では、本研究の総括し、これまでにない非接触法によりボイド率ならびに気泡速度計測、流動様式判別の妥当性・実用性を結論付けた。