

氏 名	石 本 淳
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	磁性流体の気液二相流動特性に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 神山 新一
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 神山 新一 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 中塚 勝人 東北大学教授 橋本 弘之

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

本研究では、磁性流体気液二相流の活用により流体駆動力を一段と向上させる新型のエネルギー変換システム開発の可能性を検討するための基礎研究として、他では知見しない磁性流体気液二相流の流動特性におよぼす磁場の影響に関する詳細な解明を目的とし、理論と実験の両面からなる総合的研究を行った。本研究の要旨を各章ごとに大別して列挙すると以下ようになる。

第 2 章 磁性流体気液二相流の圧力上昇効果に関する研究

本章では、非一様軸方向磁場下での磁性流体二相流に作用する、駆動力上昇に寄与する圧力上昇効果におよぼす諸因子の影響に関して、気液二相流の熱平衡一次元二流体モデルを適用し理論解析を行った。さらに、圧力上昇効果におよぼす諸因子の解析が可能な磁性流体二相流エネルギー変換システム実験装置を新たに試作し、管内圧力分布の詳細な計測と解析を行うとともに計算値との比較検討を行った。

図 1 は、二相流全体の圧力分布 ΔP_{IT} におよぼす諸因子の寄与に関する数値計算結果である。図より、磁性流体二相流における圧力上昇効果は磁気体積力による圧力成分 $\Delta P_{IT(M1)}$ が支配的であるといえる。ほかの圧力成分についてみると、二相流領域においては磁性流体に対し気泡ポンプ効果がはたらくため $\Delta P_{IT(BV)}$ が上昇し、また磁場強さの減少にともない見掛け粘度や粒子の凝集等に対する磁場の影響も小さくなるため $\Delta P_{IT(M2)}$ は 0 に近づいてゆく。そして、 $\Delta P_{IT(BV)}$ ならびに $\Delta P_{IT(C)}$ の上昇量は $\Delta P_{IT(M1)}$ の上昇量に比較して小さく、気泡ポンプ効果ならびに対流慣性力の

全体の圧力上昇効果に対する寄与は、磁気体積力のそれよりもかなり小さいことがわかる。

図2は二相流の管内圧力分布に関する成分分離解析の実験結果である。数値解析結果(図1)とおおむね同様の傾向を示しており、 ΔP_{IT} に占める $\Delta P_{IT(MI)}$ の割合が高いことがわかる。

以上の結果から、二相流による流体駆動法においては、作動流体に磁化特性を与え、それにはたらく磁気体積力を利用することにより相当大きい駆動力上昇効果が見込めるといえる。

第3章 磁性流体気液二相流における単一気泡の挙動に関する研究

本章では磁場作用下における静止磁性流体中の気泡の上昇運動について、数値解析による検討を行うとともに、透明近接平行平板を用いた可視化画像計測を行い、気泡の上昇速度および変形挙動に関する実験的検討を行った。

図3は無磁場下、軸方向磁場下および横方向磁場下における気泡の上昇運動を連続的にとらえた画像計測結果である。無磁場下の場合、気泡はほぼ球形を保ったまま上昇しており、磁場を印加した場合、気泡は磁場の方向に伸張しながら上昇していることがわかる。

図4は横方向磁場を印加した場合の気泡の上昇速度と位置の関係を示す。磁場を印加した場合、正磁場こう配部で気泡の上昇運動が抑制され、負磁場こう配部で促進されており数値計算結果と定性的な一致がみられる。

以上の結果から、磁気体積力の活用により気泡の上昇運動および変形挙動の制御が可能であることを明らかにした。

第4章 感温磁性流体沸騰二相流エネルギー変換システムに関する研究

本章では、非一様軸方向磁場下における感温磁性流体沸騰二相流動特性の詳細な解明を目的とし、熱非平衡二流体モデルに基づく数値解析を行った。さらに超音波エコー装置を用いた可視化画像計測による二相流動特性に関する実験的検討を行うとともに、数値解析結果との比較検討を行った。

図5に、軸方向磁場下における沸騰二相流の管内圧力分布 ΔP_{IT} に関する実験結果、ならびに計算結果を示す。実験結果は、概略、数値解析結果と同様の傾向を示している。特に $z \geq 0$ の二相流領域における圧力分布は数値計算結果と良好な一致を示しており、熱非平衡モデルの適用の有効性を示している。二相流領域においては、負磁場こう配に基づく磁気力により ΔP_{IT} は減少する傾向にあるが、気相の出現による見かけ上の磁化の減少効果ならびに加熱による感温磁化特性に基づく磁化の減少効果が磁性流体に対して働くため磁場作用域出口付近で ΔP_{IT} は正の値となっている。すなわち沸騰二相流の活用による駆動力の上昇効果が顕著にみられる。

図6は可視化画像計測により求められた、レーザ照射部近傍の軸方向磁場下における局所断面平均ボイド率 α の分布である。沸騰開始位置付近における α は数値計算結果と同様に、磁場を作用させると無磁場下の場合の α に比較して減少することがわかる。

以上の結果から、磁性流体沸騰二相流におけるボイド率、スリップ、温度等の分布は強い磁場依存性を示すことを理論的および実験的に明らかにし、作動流体の磁気体積力を効果的に利用することにより磁場による沸騰の制御が可能であることを明らかにした。続いて、作動流体の感温磁化特

性ならびに見掛けの磁化の減少効果を利用することにより流路出口部において高い圧力上昇効果が得られることを理論的および実験的に明らかにするとともに、このエネルギー変換システムの有効性を示した。

第5章 磁性流体沸騰二相流の安定性に関する研究

本章では、磁性流体沸騰二相流の安定性におよぼす磁場の影響に関する詳細な解明を行うことを目的とし、非定常熱非平衡二流体モデルに基づいた基礎方程式を提示し、線形安定性解析の手法により理論的検討を行った。さらに、磁性流体沸騰二相流エネルギー変換システムの小型試験ループを用いて二相流の安定性に関する基礎実験を行い、理論解析結果との比較検討を行った。

図7は、画像計測により得られた実験値と理論解析により得られた中立安定曲線を示している。磁化特性に基づく二相流の安定領域は斜線で示した領域となり、斜線より外側の領域は不安定領域または準安定領域となる。この図より、磁化特性の影響 $(\mu_0 M_i^{(0)2} / \rho_i \bar{u}_g^{(m)2})^{1/2}$ が増大するにしたい、または、 z_i^* ($= z/D$) に対する非一様磁場の影響が強い場合 ($z_i^* \rightarrow 0$) ほど安定領域が増大していることがわかる。また、最大磁場強さが増大するにしたい、実験点が安定領域へ遷移していることがわかる。すなわち、磁場の作用により二相流動の安定性が向上しており、実験結果と理論解析結果の傾向が一致していることがわかる。

図8は、最大磁場強さがほぼ同等の場合の軸方向磁場および横方向磁場下、さらに無磁場下における圧力の時間的変動 ΔP_{TrG0}^* を示している。横方向磁場下の場合、無磁場下の場合に比較して圧力変動を抑制する効果はあるものの、 ΔP_{TrG0}^* の絶対値は軸方向磁場の場合のそれに比較して大きな値を示していることがわかる。この結果より、軸方向磁場の方が横方向磁場よりも沸騰二相流の安定性の向上を図る上で効果的であることが明らかとなり、理論解析との傾向の一致が見られる。

以上の結果から、作動流体の磁化特性を効果的に利用し、適切な見掛け気相流速を与えることにより沸騰二相流の安定性を向上させることが可能であることが明らかとなった。また、磁気体積力の活用により沸騰二相流の安定化ならびに均質微細化が可能であることを画像計測により実験的に明らかにするとともに、実験結果と理論解析結果の傾向の一致を確認し、本理論解析の妥当性を実証した。さらに、沸騰二相流の安定を向上させるには、管軸に対し横方向の磁場よりも軸方向の磁場を作用させる方が効果的であることを理論的、実験的に明らかにした。

第6章 導電性磁性流体二相流 MHD 発電システムに関する研究

本章では、鉄-ニッケル合金を分散微粒子とする水銀ベース感温導電性磁性流体を液体金属 MHD 発電システムの作動流体として想定し、垂直磁場内でのダクト内沸騰二相 MHD 特性とその発電特性について気液二相流の熱平衡二流体モデルを用いて理論解析を行った。

図9は、感温導電性磁性流体、導電性磁性流体および水銀の流れの管軸方向液相圧力分布を示している。 $0 \leq z \leq 0.05$ の二相流領域においては、磁気力とローレンツ力の両方とも z 軸負方向に働き抵抗となるため ΔP_l は減少している。しかし、ボイド率が増加し液相温度が上昇するにしたい、見かけ上の磁化 $(1 - \alpha)M_l$ と導電率 σ_T の減少効果が生じ、Fe-Ni 導電性磁性流体の場合にはさ

らに感温磁化特性に基づく磁化の減少効果が生じるために、二相流部での圧力の減少量は感温導電性磁性流体の場合が最も少なく、 ΔP は電極出口において電極入口よりも大きな値を示し、高い駆動効果が得られている。

図10はスリップ S の分布を示している。感温導電性磁性流体の場合、磁場の作用により液相流体が増大しているにもかかわらず、電極出口付近における S は水銀よりも同程度か低い値に抑えられており、液体金属MHD発電システムの高効率化の一つの条件である「スリップを低く抑える」という条件を満足していると言える。

以上の結果より、沸騰気液二相流を利用した液体金属MHD発電システムの作動流体として感温導電性磁性流体を使用し、非一様磁場下で作動流体に働く感温磁化特性に基づく磁気駆動力を利用することにより大きな駆動力上昇効果、および高い出力密度が得られることを明らかにした。さらに、感温導電性磁性流体の活用により、液相流速の増大と同時にスリップを低く抑えることが可能であることを明らかにし、この方式による二相流MHD発電システムの有効性を示した。

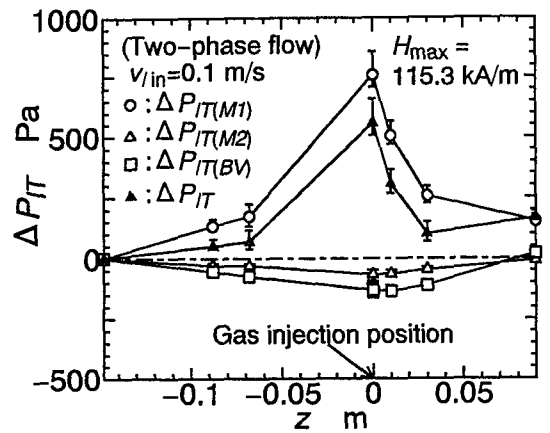
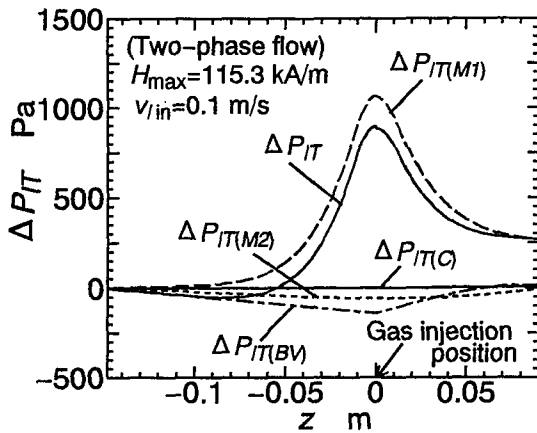


図1 管内圧力分布の成分分離の結果 (計算値)

図2 管内圧力分布の成分分離の結果 (実験値)

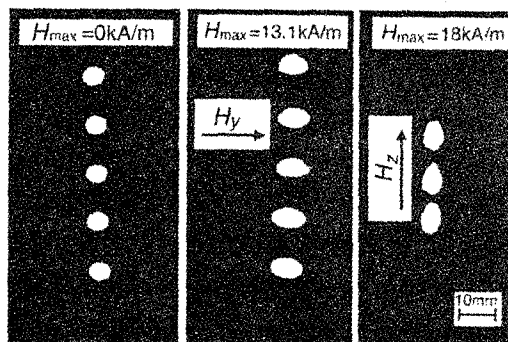


図3 気泡上昇運動の可視化画像計測結果

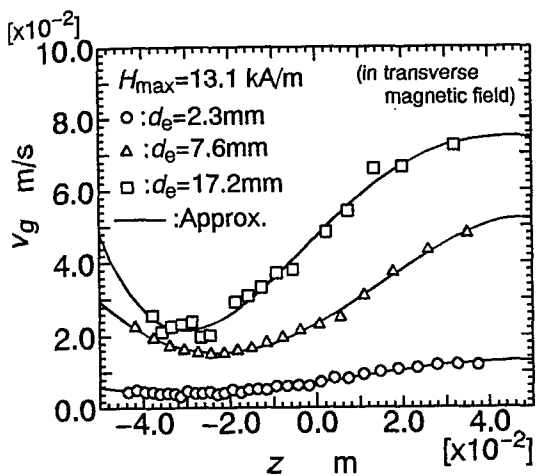


図4 気泡の上昇速度と位置の関係
(横方向磁場下)

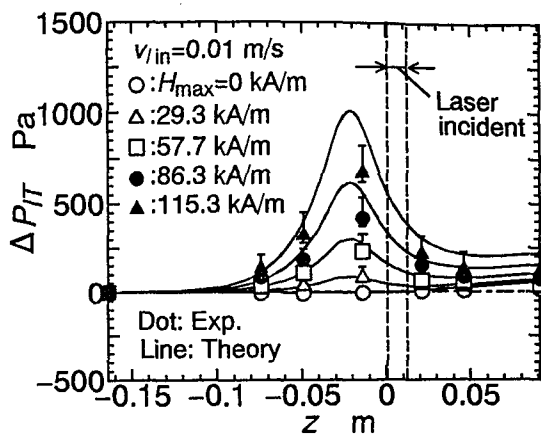


図5 管内液相圧力分布
(実験値及び計算値・軸方向磁場下)

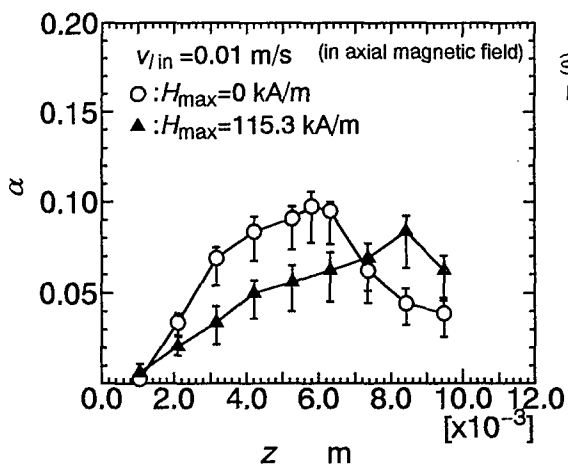


図6 断面平均ボイド率の分布
(実験値・軸方向磁場下)

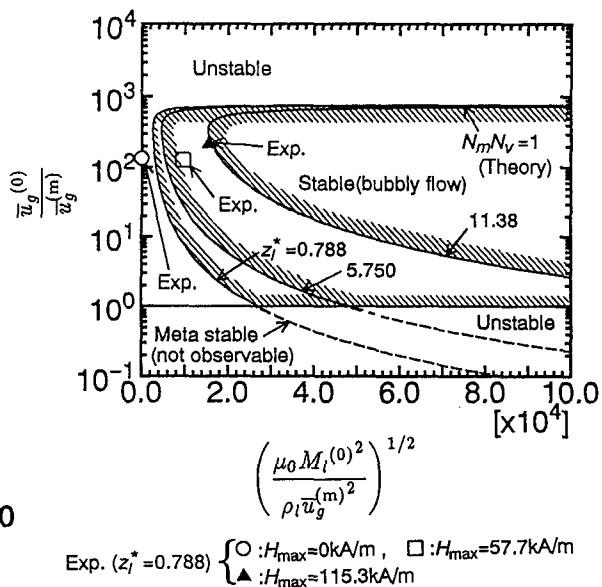


図7 中立安定曲線
(理論解析結果及び実験結果)

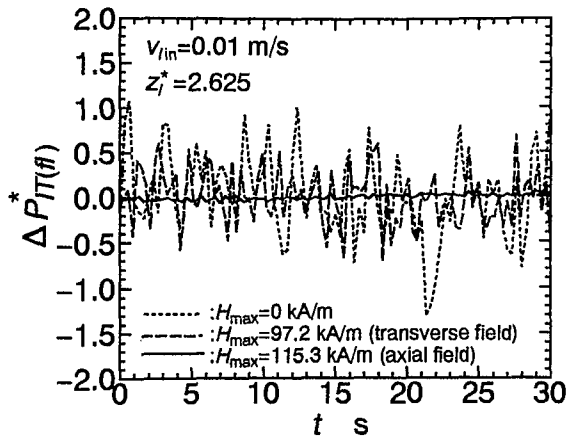


図8 圧力の時間的変動に及ぼす磁場方向の影響

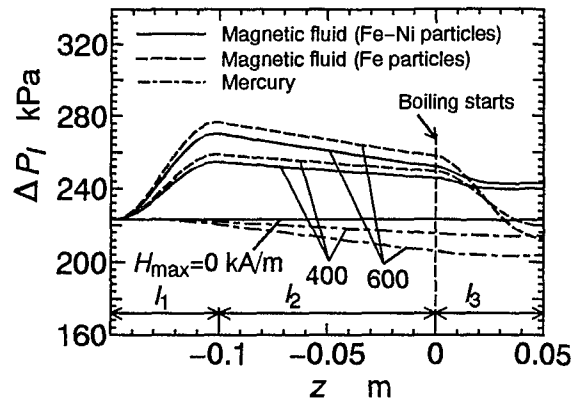


図9 管内液相圧力分布

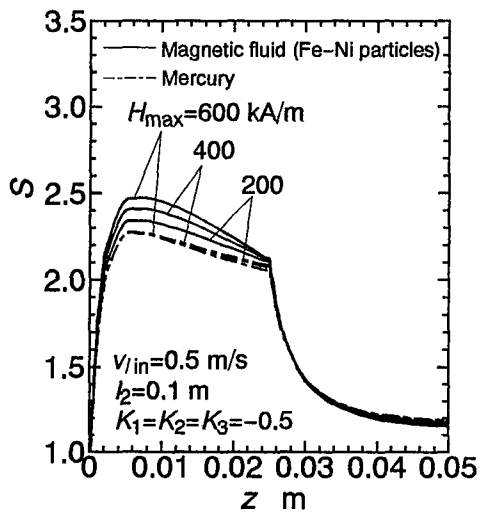


図10 スリップの分布

審査結果の要旨

磁場の作用下で、各種の機能を発揮する磁性流体の特性を利用した応用技術開発が進められている。とりわけ、磁性流体アクチュエータやダンパ、さらには、エネルギー変換システムなど管内流の磁場制御を利用する方式の応用開発並びに性能向上には、その基本となる非一様磁場下での管内流動特性に関するより詳細な現象の解明並びに特性の向上を図ることが必要である。

本研究は、磁性流体の磁化の温度依存性の利用に加えて、蒸気泡の発生による沸騰二相流の活用により、磁性流体を用いたエネルギー変換システムの性能向上を目的に、磁性流体沸騰二相流動特性に及ぼす非一様磁場の影響を総合的に解明したもので全編7章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、非一様磁場中での沸騰二相流の流動特性を理論的並びに実験的に検討し、特に、二相流の圧力分布に及ぼす諸因子の影響を詳細に分析し、流路の圧力上昇効果は、磁性流体に作用する磁気力が支配的であること、さらに、二相流の活用により流体駆動力を单相流の場合に比べて、大幅に上昇しえることを明らかにしている。これは有用な知見である。

第3章では、磁性流体気液二相流の気泡のミクロな挙動を明らかにするために、磁性流体中の単一気泡の並進運動に及ぼす非一様磁場の影響について数値解析を行い、さらに、狭いスリット内の磁性流体中の気泡の並進運動及び変形挙動に関しての画像計測手法を用いた可視化実験を行い、気泡は磁場の方向に伸張すること、及び磁気体積力により気泡の並進運動の加速並びに減速を制御することが可能なことを示している。

第4章では、感温磁性流体の沸騰二相流の詳細な挙動を超音波エコー装置により可視化する方法で検討し、磁性流体二相流のボイド率分布は、磁場の強さ及び方向により大きく変化し、二相流動特性の磁場制御が可能であることを示している。これは有用な成果である。

第5章では、磁性流体沸騰二相流の安定性に関する理論的及び実験的検討を行い、磁気体積力の活用により沸騰二相流の安定化並びに気泡の微細均質化が可能であることを明らかにしている。さらに、安定性向上のためには、管軸方向に磁場を印加することが効果的であることを明らかにしている。これは重要な成果である。

第6章では、導電性磁性流体の活用を想定して、二相流MHD発電システムとしての作動流体の駆動力、さらに発電特性の解析を行っている。液体金属单相流の場合と対比して、より大きな駆動力上昇効果及び高い出力密度が得られることを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、非一様磁場下での磁性流体沸騰二相流を利用したエネルギー変換システム開発の基礎研究として、沸騰二相流の流動特性に及ぼす非一様磁場の影響を明らかにし、さらに、エネルギー変換システムの性能向上を図る上での最適な作動条件を明らかにしたもので、流体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。