

# 博士学位論文審査要旨

2010年2月12日

論文題目： 磁気粘弾性体を用いた流量制御に関する研究

学位申請者： 松村 和彦

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： 同志社大学大学院工学研究科 教授 水島 二郎

副査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 稲岡 恭二

要 旨：

近年、盛んに研究が行われるようになった機能性流体工学に関する分野において、磁性流体を用いた流量制御への応用に関する研究が行われてきた。しかしレイノルズ数が高くなると磁性流体の飛散により、流量制御ができないといった問題点がある。一方、産業界において広く用いられているニードル式流量制御弁は、流体騒音が発生する等の様々な問題点を抱えており、最終的にはコスト高によって製品の価格競争力を失っている。よって現行のニードル式流量制御弁に変わる画期的な新しい流量制御方式は提案されていないのが実状である。

本論文は上記のような現状をふまえて、構造が簡単で、かつ生産工程が容易であり、絞り機構部を通過する際の冷媒流体音が小さい画期的な流量制御弁を開発するための基礎研究に関する研究成果をとりまとめたものである。

第1章では過去から行われている磁性流体を用いた流量制御に関する研究と流量制御弁に関する産業界の現状について説明し、それらの問題点を取り上げ、本論文での研究課題を明らかにしその研究成果を述べると共に、本論文における研究の概要をまとめている。

第2章では本研究の対象となる、磁気粘弾性体を用いた流量制御機構の基本原理について述べ、流量制御が可能であることを理論的に示している。

第3章では磁気粘弾性体の引張評価試験を実施し、その結果を基にプロクラステス効果による理論検証を行い、それが実験における事象と一致することを確認している。

第4章では磁気粘弾性体を用いた流量制御弁による流量制御特性の評価について述べている。その結果、層流領域において印加磁場の変化に伴い、流量制御することが可能であることを確認している。

第5章では中性子ラジオグラフィを用いた絞り機構部内部の可視化評価について述べている。この評価方法により、半径方向からの絞り機構部形状の確認が可能であることを示している。

第6章ではコンピュータ利用可視化法を用いて、流れの可視化及び流れの状態について考察し、更に磁気粘弾性体の全長の違いが流れに及ぼす影響について評価している。その結果、数値流体解析を用いることにより絞り機構部内部の作動流体の流れの状態が可視化可能であることを確認している。また絞り機構部の長さの差により、その流量制御特性が大きく変わることを確認している。

第7章では閉弁可能な新たな流量制御機構を提案し、印加磁場の変化に伴う流量制御特性評価を行っている。その結果、第2章で述べた流量制御機構に対して、磁気粘弾性体の耐圧性、流量制御特性、電磁石の磁気効率、軽量化、最大消費電力いずれにおいても大幅に向上したことを確認している。また特許も出願しており その有用性を示している。

第8章では本論文で得られた結果を総括している。

以上、本論文は磁気粘弾性体を用いた流量制御に関する研究において、既存の研究の問題点を解決する新しいシステムを提案するとともに、磁気粘弾性体を用いた新たな流量制御機構を提案したものであり、工学的に極めて価値のあるものと評価できる。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

2010年2月12日

論文題目： 磁気粘弾性体を用いた流量制御に関する研究

学位申請者： 松村 和彦

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： 同志社大学大学院工学研究科 教授 水島 二郎

副査： 同志社大学大学院工学研究科 教授 稲岡 恭二

要 旨：

本論文提出者は現在、本学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期）に在籍中で、また、太平洋工業㈱の技術本部開発部に勤務している。この間、流量制御弁の挙動・特性の研究、磁気エラストマーの磁気制御に関する研究を行ってきた。

本論文の主たる内容は、日本実験力学学会論文集、日本機械学会論文集（B 編）、日本レオロジー学会論文集、同志社大学理工学研究報告、Proc. of 4th ISEM（The 4<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics）、Polymer Engineering & Scienceに掲載され、既に十分な評価を受けている。

本年1月23日午前10時00分よりおよそ2時間にわたり、提出論文に関する学術講演会が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。

さらに、講演会終了後、審査委員により、論文に関係した諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することが出来た。また、ドイツ語については既に単位を取得し、英語についても本学在学中に語学試験に合格し、国際学会で英語による講演も行っており、十分な語学能力を有するものと認める。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士学位論文要旨

論文題目： 磁気粘弾性体を用いた流量制御に関する研究

氏名： 松村 和彦

## 要旨：

近年、流体にある物理量を付与することによって、流体の微視的構成要素の物理化学的性質を変化させ、諸機能を発揮する流体である機能性流体力学あるいは知能流体力学に関する研究が盛んに行われている。その中で磁場に感応する機能性流体として磁性流体が一般に知られている。磁性流体は宇宙開発に関連した技術開発の一環として登場してきており、1965年 NASA において Papell が特許を取得し、その後 Rosensweig によって発展させられてきたものである。

この磁性流体は開発当初から産業界への応用が試みられている。その中でも液体ブリッジ現象が良く知られており磁気バルブなどへの応用が試みられている。更に外部磁場制御に電磁石を用い、流路の初期開口断面積を自由に可変することができる磁性流体膜を用いることにより流量制御への応用が可能であることが知られている。しかし磁性流体は磁化が小さいためこれを用いて流量制御を行うには非常に高い磁場を印加しなければならず、またレイノルズ数が高くなると磁場保持されていた磁性流体膜の一部が飛散し、流量制御ができないといった問題点が挙げられる。

一方、産業界において、現在多くの熱または流体システムで使用されているニードル式流量制御弁は、一般的に部品点数が非常に多く、流量制御機構が複雑で、それに伴い作動流体による流体騒音が発生する問題点を抱えており、最終的にはコスト高により製品の価格競争力を失っている。特に作動流体による騒音に関しては代表例として空気調和装置を取り上げると、近年、冷凍サイクル内での冷媒流体音あるいは振動音が注目されており、その中で発生源が空気調和システムに関わる問題と、膨張弁そのものの問題とがある。これらについては、それぞれ対策がなされているが、いずれも充分ではない。よって現行のニードル式流量制御弁に変わる画期的な新しい流量制御方式は提案されていないのが実状である。

そこで本研究の目的は、前述の問題点を解決することができる流量制御弁を開発するための基礎研究を行い、そのための新たな流量制御機構を提案することである。膨張弁等に代表されるニードル式流量制御弁の最大の問題点は、ニードルを稼働させることにより弁口部の開口断面積を可変させ、それにより絞り機構部を通過する流体の流量制御を行うため、絞り機構部通過時の流れの状態が非常に複雑になっていることである。その対策案としては開口断面積を可変するためのニードルを使用せず、絞り機構部そのものを直接開閉制御することであると考える。その具体案として、この流量制御弁の一番のポイントとなる絞り機構部に着目し、それを構成する材料として、溶媒自身の分子間力が大きく、かつ磁性流体よりも磁化の大きい強磁性微粒子を用い、そしてそれが混合可能であるゲルに着目した結果、強磁性微粒子と分散媒であるシリコーンゲルを混合して作製した磁場に反応するエラストマー（以下、磁気粘弾性体と呼称）を用いることを提案する。

絞り機構部に磁気粘弾性体を用いる利点として、第一に外部磁場制御によって絞り機構部の開口断面積を任意の形状に変化させることができることである。第二にこれまでの流量制御弁ではニードルをはじめとして様々な部品により絞り機構部が構成されていたが、それが磁気粘弾性体のみで全て置き換わることである。それにより部品点数が少なく、構造が簡単で組み付け易く、絞り機構部を通過する際の冷媒流体音が小さい画期的な流量制御弁が可能であると考えられる。

本論文は8章から構成されている。第1章では過去から行われている磁性流体を用いた流量制御に関する研究と流量制御弁に関する産業界の現状について説明し、それらの問題点を上げ、

本論文での研究課題を明らかにしその研究成果を述べると共に、全体の構成について示した。

第2章では本研究の対象となる、磁気粘弾性体を用いた流量制御機構の基本原則について述べた。具体的にはパイプ、磁気粘弾性体、電磁石の3つの部品から構成されるテストセクションにおいて、支配力として電磁石により磁場を印加することで強磁性微粒子に対して半径方向の強い磁場の勾配を与えることにより磁気体積力が作用し、強磁性微粒子とその周りに存在する分散媒であるシリコーンゲルが電磁石側に引き寄せられ、絞り機構部の形状が変化する現象を利用した。ここで、磁気粘弾性体内部に作用する局所的磁気体積力ベクトルは、磁化ベクトルと磁場勾配との内積により表される。またテストセクションでの磁気粘弾性体に作用する力は、開弁時では印加電流を上げることで平均磁化ベクトルの強さが増加し、磁気体積力が増すことにより発生する。すなわち、磁気粘弾性体には半径方向の平均磁場勾配が作用し、磁気粘弾性体に働く半径方向の平均磁気体積力により開口断面積が増加する。逆に閉弁時は印加磁場を減少させることで、シリコーンゲルの弾性復元力により絞り機構部の開口断面積は減少する。その結果、流れ場に置かれたテストセクションでは磁気粘弾性体の前後に差圧が生じ、流量制御が可能となる。この基本原則により磁気粘弾性体を用いた流量制御が可能であることを理論的に示した。

第3章では、磁気粘弾性体の機械的特性を評価するために引張評価試験を実施し、その結果について考察し、それを基に、プロクラステス効果による理論検証結果について述べた。本研究では磁気粘弾性体を用いた流量制御弁の製品形状を想定し、引張評価試験サンプルである磁気粘弾性体を円柱形状に作製し、その両側をクランプした後、引張試験の際に外部からソレノイドコイルにより印加磁場のON-OFF制御を可能とした。これにより磁気粘弾性体を含む磁場に反応する機能性流体の新たな引張評価試験方法を確立することができた。また各種条件における試験評価を実施し、弾性率の評価とその差異に関する考察を行い、流量制御弁の絞り機構部へ応用するための基礎的な知見を得た。またこの様な実験に対し、これまでは、磁気粘弾性体が磁氣的に誘導された場合の応力とひずみとの関係について十分に説明することができる理論がなく、今回、新たにプロクラステス効果の理論を用いて説明した。また引張評価試験から得た実験結果を基に理論検証を行い、それが実験における事象と一致することを確認した。

第4章では磁気粘弾性体を用いて流量制御弁を構築し、更に作動流体に水を用いた閉ループ配管ASSYの中に組み込み、外部磁場制御機構に電磁石を用いることにより、印加磁場の変化に対する流量制御特性評価について述べた。その結果、層流領域において印加磁場の変化に伴い、絞り機構部の開口断面積を連続的に、かつ可逆的に制御することが可能であることを確認した。

第5章では絞り機構部前後及び通過中の流れの可視化と絞り機構部形状の可視化を行うために非破壊検査でラジオグラフィの一種である中性子ラジオグラフィを用いた可視化評価について述べた。無負荷時において、従来は軸方向からの目視による確認は可能であったが、この評価方法を用いた結果、半径方向からの絞り機構部形状の確認が可能であることを示した。

第6章ではコンピュータ利用可視化法を用いて、レイノルズ数と流量係数との関係について実験値と、簡易解析モデルを用いた数値流体解析から求めた解析値との比較評価を行い、流れの可視化及び流れの状態について考察し、更に磁気粘弾性体の全長の違いが流れに及ぼす影響について評価した。その結果、第5章においては絞り機構部通過中の流れの可視化をすることが出来なかったが、数値流体解析を用いることによりそれらが可視化可能であることを確認した。また絞り機構部の長さの差により、その流量制御特性が大きく変わることを確認した。

第7章では今回新たに考案した、閉弁可能な流量制御機構を提案し、この流量制御部を配管に取り付け、作動流体に工場エアを用いた場合の印加磁場の変化に伴う流量制御特性評価を行った。その結果、第2章で述べた流量制御機構に対して、磁気粘弾性体の耐圧性、流量制御特性、電磁石の磁気効率、軽量化、最大消費電力いずれにおいても大幅に向上したことを確認した。

第8章では第2章から第7章で得られた結果をまとめ結論とし、最後に本研究で確立した流量制御技術に関する問題点とその課題を明らかにし、今後の展開について述べた。