

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760162

研究課題名（和文）

磁気機能性ナノ流体による流動・伝熱同時コントロールに関する基礎研究

研究課題名（英文）

Basic Study on the Relationship between Heat Transfer and Fluid Flow of Magnetic Functional Fluid

研究代表者

本澤 政明 (MOTOZAWA MASAOKI)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：50516185

研究成果の概要（和文）：磁気機能性ナノ流体(磁性流体)とは、直径が 10nm 程度の強磁性微粒子を水などに分散させた流体で、磁場印加によって、流れの特性が大きく変化する。本研究では、磁気機能性ナノ流体として市販の磁性流体を取り上げ、層流、乱流下の流れにおいて、磁場印加による熱伝達、流動抵抗に及ぼす磁場の影響を調べた。さらに、現象解明のため、超音波流速分布測定(UVP)により流動計測も行った。成果として、層流下では磁場印加によって伝熱が促進され、一様磁場よりも非一様磁場印加の方が大きかった。その速度分布は、磁場印加により、速度勾配の増減、速度分布の異方性など非常に複雑な変化を示した。この結果を基に、磁性流体における伝熱現象を議論した。また、伝熱と流動抵抗の関係の評価を行い、非一様磁場印加において、わずかではあるが流動抵抗の増加を上回る伝熱促進が見られた。以上のように、磁気機能性ナノ流体(磁性流体)の印加磁場下の流動と伝熱に関して、定量的評価を行い、速度分布計測に基づき現象を考察した。

研究成果の概要（英文）：Relationship between heat transfer and fluid flow of a magnetic fluid under magnetic field was investigated experimentally. Experiments were performed in both laminar flow and turbulent flow. Uniform or non-uniform magnetic field were applied to magnetic fluid flow with changing magnetic field intensity, magnetic field direction and so on. Moreover, in order to better understand heat transfer phenomena of this research, the velocity distribution of the magnetic fluid flow was measured by the Ultrasonic Velocity Profile (UVP) method. The results show that in the case of laminar flow, heat transfer was locally enhanced by applying magnetic field in the region where the magnetic field exists. This enhancement of heat transfer under the uniform magnetic field is larger than that under the non-uniform magnetic field. According to the results of the velocity distribution measurements, it seems that these heat transfer enhancements were caused by different mechanism between applying uniform magnetic field and applying non-uniform magnetic field. In addition, since flow resistance increases by applying magnetic field, the relationship between heat transfer enhancement and increment of flow resistance was evaluated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：磁気機能性ナノ流体、磁性流体、強制対流熱伝達、伝熱促進、UVP

## 1. 研究開始当初の背景

近年、流体に特有の機能を有する超微粒子を分散させることで、流体に様々な機能を持たせる事が可能となった。この流体を総称して、機能性流体と呼び、温度、電磁場などの外部環境に反応して性質が変化する流体と定義される。本研究では、特に磁場に反応する磁気機能性流体を取り上げた。一言に磁気機能性流体といっても、内部粒子の粒径により、その性質は異なる。特に本研究で取り上げる内部微粒子が 10 nm 程度の流体は磁性流体として知られており、一種のナノ流体であることから磁気機能性ナノ流体と呼ぶことも出来る。この流体は、無磁場下では流動性に優れており、磁場を印加すると見掛けの粘度変化といった物性、流動特性に特徴的な変化が見られる。近年では、これらの性質を応用して、スピーカーへ実用されており、医療分野への応用も期待されている。一方、熱流動の応用に関しても多くの可能性を秘めており、磁場勾配により発生する磁気体積力を駆動力とした自己流動(H. Yamaguchi et al., *Trans. JSME B*, 70(2004), pp. 2591-2597.)なども提案されている。

このように、磁気機能性ナノ流体(磁性流体)は熱流動に関しても、非常に興味深い特性を示しており、磁場印加による「流動特性」と「伝熱特性」を併せて調べることが非常に重要である。しかしながら、磁気機能性ナノ流体は不透明であるため、光学的手法による流動計測は不可能である。また、内部に含まれた強磁性微粒子は、磁場印加によって凝集し、クラスターを形成することが知られている。このクラスター形成が、伝熱特性を変化させる一つの要因になると予想されるが、同時に流動抵抗の増加などを引き起こし、流動現象をより複雑なものにしている。

これまで、伝熱について調べた研究は多く存在するものの、層流下、乱流下において様々な磁場印加方法により伝熱特性を調べ、流動抵抗の増加と共に評価したもの、特に、伝熱特性等について流速分布の計測を実際に行い考察したものは、申請者の知る限りでは存在しないというのが研究開始当初の動機付けであった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、題目に記した磁気機能性ナノ流体の流動・伝熱同時コントロールに関する基礎研究として、市販の磁性流体を試験流体に取り上げて、磁場印加による流動特性と伝熱特性の変化を併せて計測することを目的とする。具体的事項は下記に記すとおりである。

(1) 層流下、乱流下における流動特性と伝熱特性の計測、レイノルズ数依存性の精査

(2) 一様磁場印加、非一様磁場印加において、磁場強度、磁場方向(磁場方向と伝熱方向の関係)などを変化させた計測と磁場依存性の精査

(3) 差圧計測に基づく流動抵抗の計測と伝熱との関係の評価

(4) 流速分布計測の実施。流体が不透明であるため、光学的手法が適用できないので、流動計測として、超音波ドップラー効果を応用した流速測定法(UVP)による流速分布の計測、磁場が流動に及ぼす影響の精査

(5) 研究の統括、これらの得られた実験的知見から、磁気機能性ナノ流体における伝熱現象のメカニズムを検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 磁気機能性ナノ流体

本研究では、磁気機能性ナノ流体として、市販されている磁性流体を用いた。試験磁性流体として水ベース磁性流体 W-40(タイホー工業社製)、MSGW10(フェロテック製)を用いた。両者の主な違いは、内部粒子の飽和磁化であり、実験条件によって、適宜、水により濃度を薄めるなどして使用している。本報告書には W-40 の結果を示す。

### (2) 実験装置、実験条件

実験装置における試験流路の概略を図 1 に示す。本研究では試験流路として、下面に加熱面を設置した矩形管を用いており、試験流体はポンプにより駆動、循環される。矩形管路は、長さ 950 mm、断面 18 mm × 18 mm(水力直径  $D_h = 18$  mm)である。磁場印加は管の中心部(c)において行っている。

#### ① 伝熱の計測

矩形管の出入口、図 1 に示す伝熱面内の 5 地点に熱伝対を設置しており、矩形管の出入口における流体温度、管壁の温度を測定することができる。ここから熱伝達率などを求め、伝熱特性の評価を行った。実験は、熱流束一定の条件のもと行っており、熱流束は可変である。

#### ② 流動抵抗の計測

流動抵抗の計測は、差圧計測に基づき行った。図 1 に示すとおり、矩形管路上面に静圧測定孔を設けており、この区間の差圧を計測している。

#### ③ 流動条件

本実験装置では、流速を変化させることで、層流から乱流域まで実験が可能である。本報告書では、層流( $Re \approx 950$ )、乱流( $Re \approx 2800$ )における主な結果を示す。

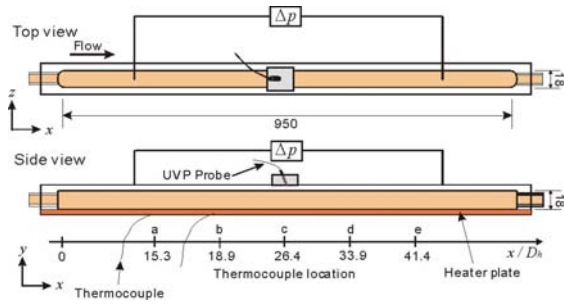


図1 試験流路概略

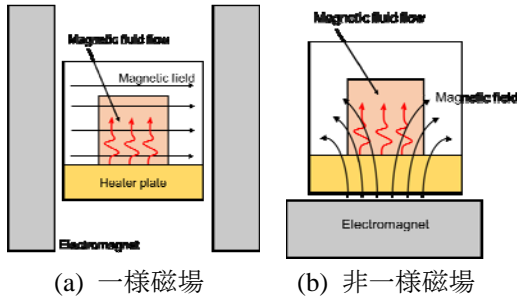


図2 磁場印加方法：  
(a) 一様磁場, (b) 非一様磁場

### (3) UVPによる速度分布計測

先にも記したとおり、磁性流体は褐色（ほぼ黒色）不透明流体であるため、PIVやLDVといった光学的手法の適用が困難である。これに対し、本研究では速度分布計測を超音波ドップラー効果を用いた流速分布測定法(UVP: Ultrasonic Velocity Profile)を用いて行った。UVPはプローブから発振した超音波周波数と流動中のトレーサー粒子からの反射波のドップラー周波数をもとに一方向一次元の速度分布を超音波の測定線上に形成する測定手法である。測定に超音波を用いるため、本研究のような不透明流体の計測に適用できる利点がある。本実験では、矩形管路上面の流路中心部にプローブを設置し、磁場印加部の管中心軸を通る $x$ (主流方向)– $y$ (伝熱面垂直方向)面の速度分布を計測した。

### (4) 磁場印加条件

磁場印加は電磁石により、一様磁場、非一様磁場を印加した。本報告に記す磁場印加方法の概略を図2に示す。一様磁場は、図2(a)に示すとおり、管路の側面から一様磁場を印加しており、伝熱方向と磁場方向の関係は垂直となっている。鉄芯の径は150 mmであり、磁場強度は700 mTまで可変である。一方、非一様磁場は図2(b)に示すとおり、管路の下面から印加している。鉄芯の径は、60 mmである。図3に鉄芯近傍で100 mTの磁場が発生された時の磁場分布を示す。図には、鉄芯から0 mm(鉄芯近傍)、30 mm、60 mmにお

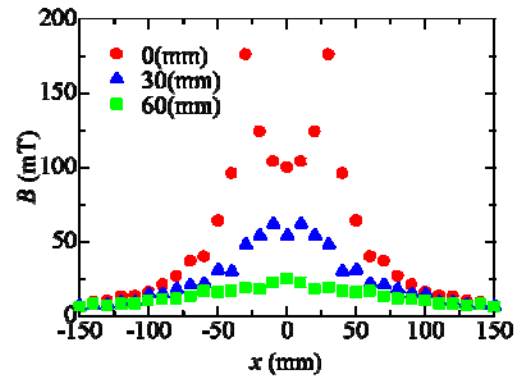
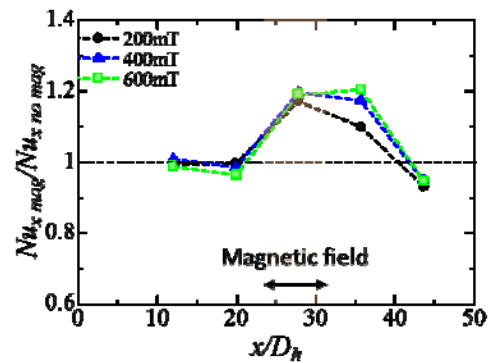
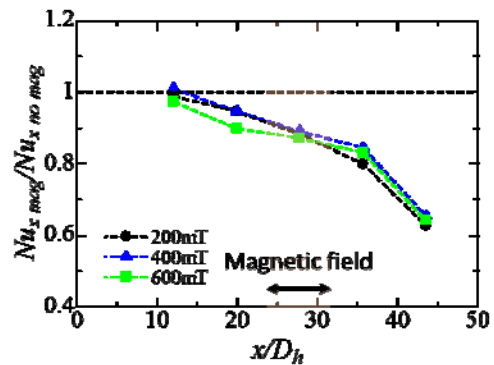


図3: 非一様磁場における磁場分布



(a) 層流



(b) 乱流

図4 一様磁場印加における伝熱特性：  
(a) 層流, (b) 乱流

る径方向の磁場分布を示している。磁場強度は可変であるが、本報告書ではこの磁場強度で印加したときの結果を記す。

## 4. 研究成果

主な研究成果を下記に記す。

- (1) 一様磁場印加下における伝熱特性  
一様磁場印加下における伝熱特性の結果を図4に示す。図4(a)には層流下における結果を示しており、図4(b)には乱流下における結果を示している。図に示される伝熱特性の

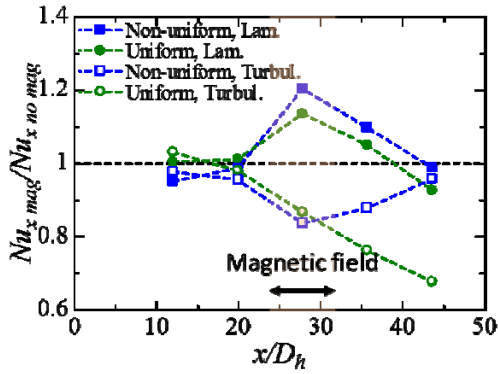


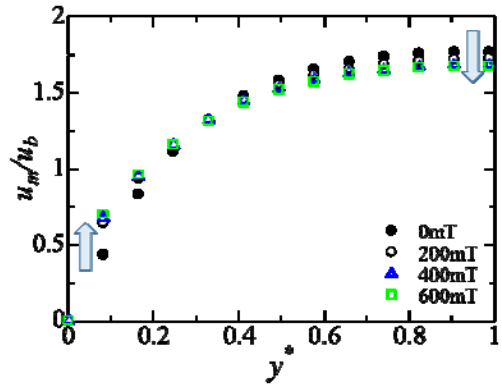
図5 1一様磁場と非一様磁場の伝熱特性の比較(100 mT)

評価(縦軸)は各地点における局所ヌセルト数( $Nu$ )を無磁場下と印加磁場下で比較し割合をとったものである。図4(a)に示されるように、層流下においては、磁性流体の流れに磁場を印加すると磁場印加領域で大きな伝熱の促進が見られた。また、この伝熱促進は、磁場強度が大きいくほど大きかった。さらに、磁場の下流域(d)地点でも促進された伝熱が保たれていた。一方で、図4(b)に示されるとおり、乱流下では磁場印加により、伝熱は低下した。さらに、磁場印加領域上流でも伝熱はやや低下しており、下流域においても伝熱は低下し続けていた。

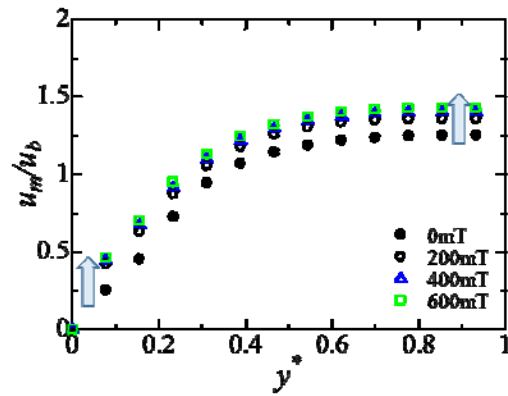
### (2) 一様磁場、非一様磁場印加による伝熱特性の比較

非一様磁場印加においても、磁場印加領域における伝熱特性は、図4に示した一様磁場とほぼ同様の傾向を示した。すなわち、磁場印加によって、層流では磁場印加領域において伝熱の促進が見られ、一方、乱流においては伝熱が抑制された。これらの伝熱特性の比較として、図5に一様磁場印加下、非一様磁場印加下の層流、乱流における伝熱特性の結果を示す。この図に示される測定では印加磁場強度は100 mTとした。なお、非一様磁場については、鉄芯近傍における磁場強度である。このため、非一様磁場では、矩形管軸付近における磁場は、100 mTよりも小さく、図3に示された30 mmにおける磁場分布に近い分布となっている。

図に示されるように、層流下において、流動域では一様磁場印加時(100 mT)よりもさらに弱い磁場であるにも関わらず、一様磁場と比較して、大きな伝熱促進が得られていた。一方、乱流下では、同様に伝熱が低下したものの、磁場印加領域下流においては、非一様磁場印加時は低下した熱伝達に大きな回復が見られた。これらの伝熱現象に関して、速度分布計測結果を併せて議論を行った。



(a) 層流



(b) 乱流

図6 一様磁場印加における速度分布：  
(a) 層流, (b)乱流

### (3) 磁場印加下の速度分布

一様磁場印加下の層流、乱流における速度分布を図6に示す。図6(a)は層流下におけるもので、図6(b)は乱流下におけるものである。図に示されるように、磁性流体の流れに磁場を印加すると、非常に特異な速度分布の変化が見られた。

層流においては、磁場印加によって管壁部分で速度勾配が増加しており、管中心部で流速の減少が見られた。一方、乱流においては管全体において速度の増加が見られた。実験は磁場印加下でも、流量一定の条件のもとで行っているため、 $x$ (主流方向)- $z$ (磁場方向)面で、異なる速度分布になるものと思われる。本実験装置では、磁場印加領域は電磁石鉄芯が存在するため、 $x$ - $z$ 面の計測が出来ないものの、磁場印加領域の入口部で計測を行うことで速度分布の異方性を捉えることに成功した。(1)項に示した伝熱現象を考えると、層流下では、速度勾配の増加が伝熱促進をもたらしており、乱流下では、乱れが抑制され、拡散が抑制されたために伝熱が低下したと考えられる。なお、乱れの抑制についても速度計測によって捉えられている。

表1 伝熱現象のまとめ

	一様磁場		非一様磁場	
	層流	乱流	層流	乱流
伝熱	促進小	低下	促進大	低下
速度分布	速度勾配増加	速度分布に異方性	速度勾配減少	変化なし
伝熱変化の要因	速度勾配増加	拡散低下	磁気対流	拡散低下

一方、非一様磁場印加では、全く異なる速度分布の変化が捉えられた。層流下では、管壁部で速度勾配の減少が見られた。乱流下では、現状では、速度分布に変化が見られなかったものの、より強い磁場を印加できれば変化が見られる可能性がある。

そこで、速度分布、磁場勾配から求めた磁気体積力、差圧による圧力勾配から、運動量による評価を行ったところ、非一様磁場では、流入、流出の運動量のつりあいがとれなかった。これは磁場印加により対流が生じたことを示唆しており、非一様磁場では対流によって、伝熱が促進されたものと考えられる。

(4) 伝熱と流動抵抗の関係

磁性流体の流れでは、磁場を印加すると流動抵抗が増加する。このため、伝熱促進と流動抵抗増加の相互評価が必要となる。そこで、本研究では、Colburn の  $J$  因子を用いて評価を行った。この結果、非一様磁場印加において、わずかではあるが流動抵抗の増加を上回る伝熱促進が見られた。しかしながら、この評価方法では、流動抵抗の増加が過大に評価されている可能性があり、今後、より厳密な評価を検討していく予定である。

(5) 伝熱促進メカニズムまとめ

先に記した層流下における伝熱促進の要因として、次の3つを挙げることが出来る。

- ①速度勾配の増加による伝熱促進
- ②磁気熱対流による伝熱促進
- ③磁場印加による流体の熱伝達率の増加

表1に本研究で得られた伝熱現象をまとめる。これまでの研究でも、磁気機能性ナノ流体中の伝熱現象に関する報告は見られたが、その伝熱現象のメカニズムの説明は不明確な部分が多く見られた。本研究では、③の熱伝達率に関する議論は難しいが、伝熱特性、流動抵抗、速度分布を併せて測定することで、この伝熱現象のメカニズムについて速度分布に基づき議論し、伝熱促進と流動抵抗に関して定量的に評価したことが大きな成果である。今後、この研究成果をもとに、より大きな伝熱促進の得られる方法などを検討し、発展させていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

(1) M. Motozawa, T. Sekine, T. Sawada and Y. Kawaguchi, Variation of forced convective heat transfer in rectangular duct flow of a magnetic fluid under magnetic field, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 412, 2013, 012025, 11pages, DOI: 10.1088/1742-6596/412/1/012025

(2) M. Motozawa, J. Chang, T. Sawada and Y. Kawaguchi, Experimental investigation on heat transfer characteristics in rectangular duct flow of a magnetic fluid under magnetic field, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 39, 2013, 583-588, DOI:10.3233/JAE-2012-1514

[学会発表] (計9件)

(1) 辰野誠哉, 非一様磁場下における磁性流体強制対流熱伝達の伝熱特性に関する研究, 第50回伝熱シンポジウム, 2013年5月31日, 仙台.

(2) M. Motozawa, Characteristic velocity distribution of rectangular duct flow of a magnetic fluid under magnetic field, 8th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD8), 2012年9月20日, Dresden, Germany.

(3) 本澤政明, 超音波による磁性流体矩形管内流れの速度分布計測と速度分布に及ぼす磁場の影響, 第40回可視化情報シンポジウム, 2012年7月17日, 東京.

(4) M. Motozawa, Variation of forced convective heat transfer of rectangular duct flow of a magnetic fluid under magnetic field, 13th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, 2012年7月4日, Ankara, Turkey.

(5) 本澤政明, 印加磁場下の磁性流体矩形管内強制対流熱伝達の伝熱特性, 第49回日本伝熱シンポジウム, 2012年6月1日, 富山.

他4件

[図書] (計1件)

(1) Y. Takeda (Editor) et al., Springer, Ultrasonic Doppler velocity profiler for fluid flow, Springer, 2012, 274pages, pp. 161-174 の部分を執筆.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本澤 政明 (MOTOZAWA MASAOKI)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号: 50516185