

令和元年6月14日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26420126

研究課題名(和文)機能・知能性流体を用いた次世代エネルギー輸送デバイスの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of next-generation energy transport devices using functional and intelligence fluids

研究代表者

山口 博司 (Yamaguchi, Hiroshi)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：80191237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では機能性・知能性流体の中でも特に電磁場に感応する流体に着目し、非共沸混合磁性流体を用いた磁気駆動熱輸送装置の流動特性および非磁性粒子混入系熱磁気自然対流の2つのテーマについて研究を行った。結果として、磁気駆動熱輸送装置に関する研究では、内部流体の最大駆動流量が1.5ml/minを上回ることを確認し、二重円管型構造の内部を急縮小構造に変更することによって平均ヌセルト数が増大することを確認した。熱磁気自然対流に関する研究では、磁性流体単相の自然対流と比較して、熱伝達特性が最大34%向上し、固液混合熱伝導率を求める手法として熱回路網法が妥当なものであることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MEMS磁気駆動熱輸送装置に関する研究では二重円管型熱輸送装置の有用性が明らかとなり、高温の熱源のみで駆動源を必要としない熱輸送装置の開発に大きく貢献したといえる。また、非共沸混合磁性流体の磁気駆動と円管の形状や環境条件との関係が明らかとなり、学術的にも価値が高いものだと考えられる。非磁性粒子混入系熱磁気自然対流に関する研究では非磁性粒子混入系熱磁気自然対流における熱伝達特性が通常の熱磁気自然対流より向上することを明らかにしたため学術的価値が高いといえる。また、実際に非磁性粒子混入系の熱磁気自然対流システムを構成するにあたっての設計指針を確立したので社会的意義も十分にあるといえる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focus on fluid that is sensitive to electromagnetic field among functional fluid and intelligence fluid, flow characteristics of magnetically driven heat transport device using non-azeotropic mixed magnetic fluid and thermomagnetic natural convection of nonmagnetic particle mixed system 2 l researched on two themes. As a result, in research on magnetically driven heat transport devices, it is confirmed that the maximum drive flow rate of the internal fluid exceeds 1.5 ml / min, and the average Nusselt number is obtained by changing the inside of the double circular tube structure to a sharp reduction structure. Was confirmed to increase. In the research on thermomagnetic natural convection, the heat transfer characteristics are improved by up to 34% compared with the natural convection of magnetic fluid single phase, and the thermal network method is appropriate as a method to obtain the solid-liquid mixed thermal conductivity. It was confirmed.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 機能・知能性流体 混相流 感温性磁性流体 熱伝達特性 MEMS 自然対流 VSIAM法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年エネルギー問題が注目を浴びており、さまざまなアプローチでその解決策が模索されている。本研究では感温性磁性流体と呼ばれる流体を利用することで、エネルギーの中で最も無駄になってしまっている熱エネルギーの輸送・再利用を試み、具体的に、2つのテーマについて重点的に研究することにする。

2. 研究の目的

(1) 感温性磁性流体に作用する磁気力が、地上における重力と同じ体積力であるという観点から、感温性磁性流体は宇宙空間などの微小重力環境下で対流を発生させるには最適な流体とみなされている。これまでの研究では、三次元容器内での熱磁気自然対流の熱伝達特性について実験的、解析的に調査し、磁場印加に伴い熱伝達が促進されるという知見を得た。本研究では磁性流体を用いた宇宙での熱輸送技術として磁場制御可能な高効率熱輸送システムの実現に向け、多孔質体中の熱磁気自然対流の熱伝達特性および流動挙動の実験的、解析的研究を推進する。

(2) 感温性磁性流体を作動流体とした熱輸送装置では熱と磁場の入力により流動の制御することができ、機械的な駆動力を必要としないため、エネルギー問題に大きく貢献できると考えられている。これまでの研究では、単一円管での熱輸送能力について実験的に研究を行い、印加磁場の増加に伴い熱輸送能力も向上するという知見を得た。本研究ではより工学的な応用を考え装置構造を変更し、入熱量、印加磁場および装置構造を変化させた際の熱輸送能力の変化を実験的研究していく。

3. 研究の方法

(1) 磁場および、温度場により制御が可能である感温性磁性流体について、内部に非磁性体の球体を有する三次元立方容器形状において、様々な多孔質体モデルを作成し、鉛直一様磁場印加による熱伝達特性、流動特性を実験的、解析的に調査した。

(2) 二重円管構造、二重円管急縮小構造をとった熱輸送装置を作成し、円管の中心軸方向に磁場を印加し、また円管内部の片側に入熱を行い、容器内の磁性流体に温度差をつけることで流体を駆動させ、容器内および排熱部での流体の温度を計測することで熱輸送能力を調査した。

4. 研究成果

(1) 0.5 のアルミナ粒子を一つ封入したとき (MFAI) の実験結果、0.5 のアルミナ粒子を一つ封入し底面に固着させたときの実験結果および、磁性流体単相の実験結果を図1に示す。図1中の縦軸はヌセルト数 (Nu)、横軸はレイリー数 (Ra) を表し、磁気レイリー数 (Ram) は各印加磁場条件 $H=0.00, 1.19 \times 10^4 \text{ A/m}$ ($Ram = 0.00, 17.70 \times 10^7$) に対応した値を示す。0.5 のアルミナ粒子を一つ混入させた系では流体単相と比較して、無磁場時・有磁場時ともに Nu が増加することがわかる。一方で、粒子を底面に固定した系では、磁性流体単相と比較して、 Nu が低下することがわかる。以上のことから、 Nu が増加した要因としては、粒子が容器内を流動したためであると考えられる。また、 Nu が低下した要因としては、粒子が底面に堆積し、対流を遮蔽・阻害したためであると考えられる。矩形容器に感温性磁性流体のみを封入した時の実験結果および0.5のアルミナ粒子を4個封入したときの実験結果を図2に示す。

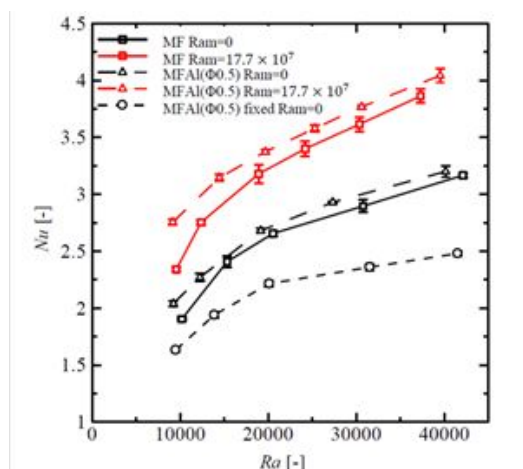


Fig. 1 Experimental result of Nu for MFAI.

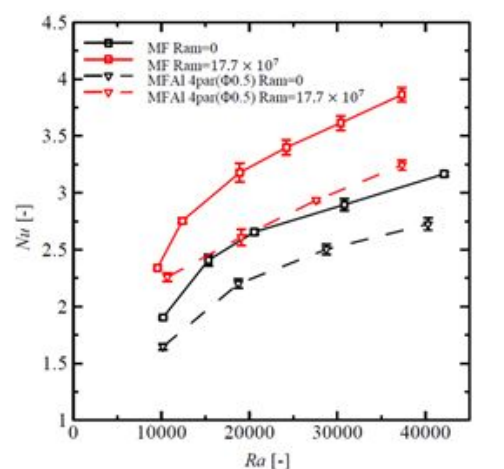
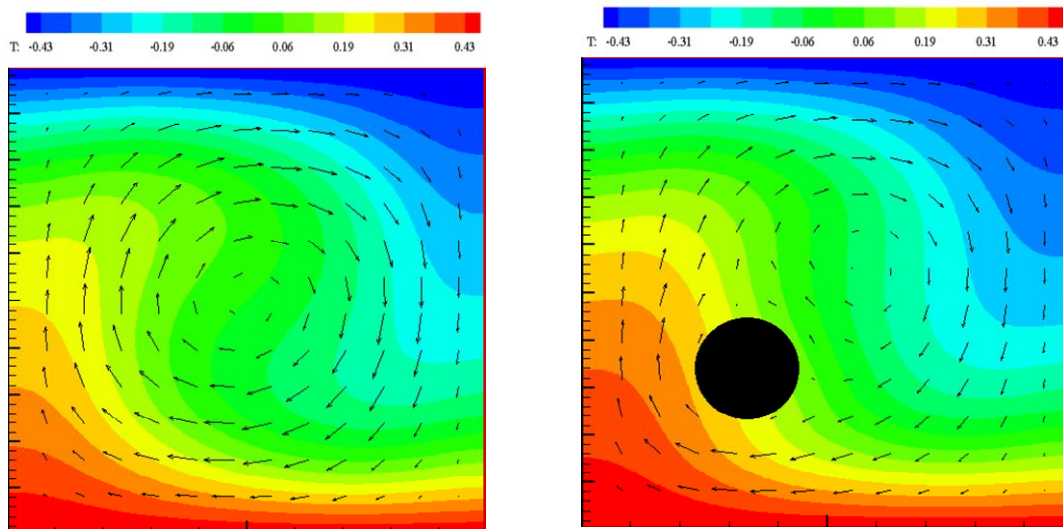


Fig. 2 Experimental result of Nu for MFAI+4particles.

0.5 のアルミナ粒子を 4 つ混入させた系では流体単相と比較して、無磁場時・有磁場時ともに Nu が低下することがわかる。4 つの粒子を入れた場合でも粒子は流動すると考えられる。しかし粒子数が増加したことにより、対流を遮蔽・阻害する効果が増加したことにより Nu が低下したと考えられる。

また数値解析として熱流動解析を行い、磁性流体中の粒子の挙動を模擬的に調査した。



(a) Natural convection of single phase.

(b) Natural convection with 1 moving particle and fluid.

Fig. 3 Numerical result of natural convection at $Ra = 1.0 \times 10^4$.

容器代表長さを L 、粒子径を $0.1 L$ および熱伝導比を 10.0 とし、数値解析によって求めた温度場・速度場を用いて考察する。単粒子が流動すると、対流の発達と共に、粒子が粘性抵抗および圧力の影響を受けて流れに追従するように流動することがわかる。また粒子の周囲では粒子の表面を沿うように速度ベクトルが変化しており、それに伴い温度場が拡散されることがわかる。

(2) Fig. 5 に熱風温度 420 におけるテストセクション入口出口温度差に時間的変化を示す。Fig.5 より、急縮小二重円管構造は単純二重円管構造の場合に比べ短時間でテストセクション入口出口温度差が定常に至ることがわかる。熱風温度 420 において、急縮小構造は単純二重円管構造に比べ 39.4% の整定時間の短縮が確認された。これはテストセクション内加熱領域の流路体積の減少により同領域における熱容量が減少し、比較的短時間で温度が上昇、温度差が得られたものと考えられる。また、Fig.5 よりテストセクション内部の構造により温度差が定常に至るまでの傾向が大きく異なることがわかる。これは流体が駆動を開始するのに必要な温度差が発生するまでの時間が長いことと、流体の駆動が停止している状態における温度制御が困難であることが原因であると考えられる。流体が長時間停滞すると、テストセクション手前の予熱部において流体が過剰に加熱される。これにより流体が駆動を開始すると一時的にテストセクション入口の流体温度が上昇するため、温度差が一時的に減少すると考えられる。また、定常となる温度差が構造ごとに異なることがわかる。全体としてのテストセクションで発生する駆動力の大きさは式(1)で表される。

$$\Delta F = \int_{cool} M \cdot \nabla H dV - \int_{hot} M \cdot \nabla H dV \quad (1)$$

式(1)より加熱領域における磁気体積力の減少は温度上昇と体積減少の2要素が原因であることがわかる。急縮小構造では加熱領域の体積が減少しているため、比較的小さな温度上昇で単純二重円管と同等の駆動力が得られたと考えられる。

Fig.6 に熱風温度 420 における印加磁場強度に対する駆動圧の変移を示す。Fig.6 より、印加磁場強度の増加に従って磁気体積力による駆動圧は増加することがわかった。この傾向は各構造・温度条件において同様であり、全ての条件においても急縮小構造における駆動圧は単純二重円管構造よりも大きいことがわかる。同熱風温度条件における全ての印加磁場条件で、磁

気体積力の増加量が概ね一定であることから、構造変更による磁気体積力の増加要因は、温度条件にも印加磁場強度条件にも左右されないものであることが推察される。このことから、急縮小構造の流路内体積減少が流動を妨げる向きの磁気体積力を減少させたことが駆動力上昇の原因と考えられる。

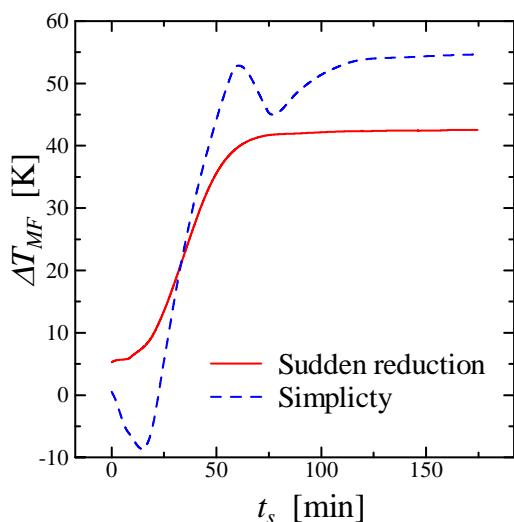


Fig.5 Transient characteristic ($\tau_{\pm}=420$)

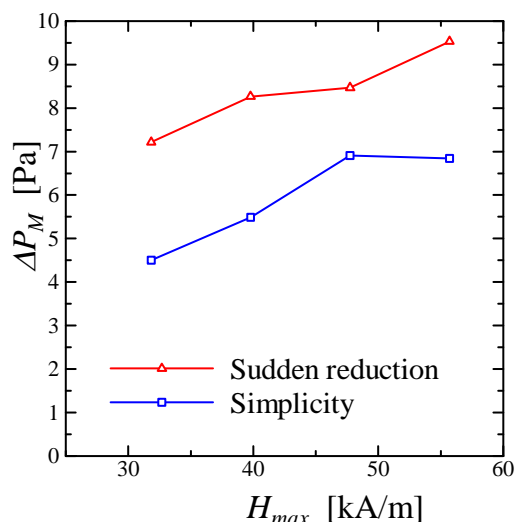


Fig.6 Drive force characteristic in steady state ($\tau_{\pm}=420$)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Mu-Feng Chen, Xiao-Dong Niu, H.Yamaguchi, Chang Shu, A lattice Boltzmann Modeling Fluid-Structure Interaction Problems and Its Applications in Natural Convections in a Square Cavity with Particles Suspended Inside, *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 査読有, 2017, pp. 303-328

H. Yamaguchi and Y. Iwamoto, Energy Transport in Cooling Device by Magnetic Fluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 査読有, Vol. 431, 2018, pp. 229-236

Yuhiro Iwamoto, Atsushi Yoshioka, Takuya Naito, Jhon Cuya, Yasushi Ido, Ryo Okawa, Balachandran Jeyadevan and Hiroshi Yamaguchi, Field Induced Anisotropic Thermal Conductivity of Silver Nanowire Dispersed-Magnetic Functional Fluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol.79, 2016, pp. 111-117

山崎晴彦, 山口博司, 磁性流体を用いた気体流量制御, *日本機械学会論文集*, Vol.82, No.833, 2016, DOI: 10.1299/transjsme. pp.1-10

M-F, Chen, X-D, Niu, Y-R, Ma, H. Yamaguchi and Y. Iwamoto, An Improved Momentum-Exchanged Immersed Boundary-Based Lattice Boltzmann Method for Incompressible Viscous Thermal Flows, *Procedia Engineering*, Vol. 126, 2015, pp.691-695

H. Yamasaki and H. Yamaguchi, Electromagnetic Measurement of Vapor Void Fraction in Binary Magnetic Fluid, *International Journal of Advances in Science and Technology*, ISSN 2348-5426, 2015, pp.153-160

H.Yamasaki, S. Umeda, Y.Iwamoto, H.Yamaguchi, Measurement of Vapor Void Fraction in Binary Magnetic Fluid using Electromagnetic Induction Method, *AIP Conference Proceedings*, Vol.1592, 2014, pp.50-56

〔学会発表〕(計 18 件)

武井公希, 山口博司, 別所毅, 感温性磁性流体を用いた二重円管型熱輸送装置の特性調査, 平成 30 年度 磁性流体連合講演会, 2018, pp.29-32

大谷寿甫, 山口博司, 感温性磁性流体を用いた非磁性粒子混入系における熱磁気自然対流に関する研究, 同志社大学エネルギー変換研究センター 2017 年度研究成果報告会, pp.51-54

H. Yamaguchi, H. Yamasaki and T. Bessho, Development of Magnetically Driven Energy Transport Device, 10th KIFEE symposium, 2018

山田智晴, 山崎晴彦, 山口博司, Mufeng Chen, Xiao-Dong Niu, 感温性磁性流体を用いた非磁性粒子混入系における熱伝達特性および粒子挙動の調査, 第 30 回電磁気力関連のダイナミクス, 2018, pp.136-139

Mufeng Chen, Xiao-Dong Niu, 大谷寿甫, 山崎晴彦, 山口博司, Heat Transfer Characteristic of Thermo-Magnetic Convection of Temperature Sensitive Magnetic Fluid with Non-Magnetic Particle, 同志社大学エネルギー変換研究センター 2016 年度研究成果報告会, 2017, pp.43-46

大谷寿甫, 山崎晴彦, 山口博司, Mufeng Chen, Xiao-Dong Niu, 非磁性粒子混入系における熱磁気自然対流の熱伝達特性調査, 「第 29 回電磁気関連のダイナミクス」シンポジウム, 2017, pp.209-210.

Hayaki Nakasumi, Yuhiro Iwamoto, Yasushi Ido and H. Yamaguchi, Long Distance Heat Transfer by Magnetically-Driven Heat Transport Device using Temperature-Sensitive Magnetic Fluid, 9th KIFEE, 2017

大谷寿甫, 山崎晴彦, 山口博司, 非磁性粒子混入系熱磁気対流の熱伝達特性調査, 日本 AEM 学会 MAGDA コンファレンス, 2016, pp.239-240

阪上晃一, 山崎晴彦, 岩本悠宏, 山口博司, 非磁性粒子を混入した磁性流体の熱磁気対流による熱伝達特性, 磁性流体研究連合講演会, 2015, pp.8-9

大川亮, 井門康司, 内藤拓也, ジョン・クヤ, パラチャンドラン・ジャヤデワン, 吉岡篤志, 岩本悠宏, 山口博司, 磁気機能性流体中微粒子挙動の可視化実験(金属ナノワイヤおよび球形微粒子の挙動), 磁性流体研究連合講演会, 2015, pp.1-2

吉岡篤志, 岩本悠宏, 内藤拓也, ジョン・クヤ, パラチャンドラン・ジャヤデワン, 大川亮, 井門康司, 山口博司, 磁場下における銀ナノワイヤ混入系磁性流体の熱伝導率, 磁性流体研究連合講演会, 2015, pp.22-23

山口貴裕, 岩本悠宏, 山崎晴彦, 牛小東, 山口博司, 非共沸混合磁性流体を用いた磁気駆動熱輸送装置の熱輸送特性, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2015, pp.170-171

山口貴裕, 岩本悠宏, 山崎晴彦, 牛小東, 山口博司, 非共沸混合磁性流体を用いた熱輸送装置の強制対流熱輸送特性, 磁性流体連合講演会 2014, 2014, pp.30-32

阪上晃一, 岩本悠宏, 山崎晴彦, 山口博司, 一様磁場下における非磁性粒子混入磁性流体の熱伝達特性, 第 92 期流体工学部門講演, 1302, 2014, pp.1-2

Y. Iwamoto, H. Yamasaki, X.D. Niu, H. Yamaguchi, Magnetically Self-Circulate Heat Transport Device Using Magnetic Fluid, 8th Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Taichung, Taiwan, 2014, pp.59-60

山崎晴彦, 梅田慎也, 岩本悠宏, 山口博司, 非一様磁場下における非共沸混合磁性流体の沸騰気泡ボイド率の電磁計測, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2014, C111, 2014, pp.1-2

H. Yamasaki, S. Umeda, Y. Iwamoto, H. Yamaguchi, Boiling Heat Transfer Characteristics of Binary Magnetic Fluid Under Non-Uniform Magnetic field, 8th Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, pp.55-56

池内章人, 佐々木雅, 岩本悠宏, 山口博司, ソレノイド磁場下における磁性流体の円管内流動特性, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014, pp.235-236

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 磁性流体を利用した流量制御装置

発明者: 山口博司, 山崎晴彦

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2015-112832

出願年: 平成 27 年

国内外の別: 国内

名称: 磁性流体駆動装置及び磁性流体駆動方法

発明者: 別所毅, 山口博司, 山崎晴彦

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2016-199212

出願年: 平成 28 年

国内外の別: 国内

取得状況(計 1 件)

名称：磁性流体駆動装置並びにそれを用いた熱輸送装置及び動力発生装置
発明者：藤井泰久，武田啓司，山口博司
権利者：同上
種類：特許
番号：特開 2014-050140
取得年：平成 26 年
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<https://www1.doshisha.ac.jp/~hyamaguc/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：須知 成光

ローマ字氏名：Shuchi Sigemitsu

所属研究機関名：秋田県立大学

部局名：システム科学技術部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00347204

研究分担者氏名：岩本 悠宏

ローマ字氏名：Iwamoto Yuhiro

所属研究機関名：名古屋工業大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：30707162

研究分担者氏名：桑原 拓也

ローマ字氏名：Kuwahara Takuya

所属研究機関名：日本工業大学

部局名：基幹工学部 機械工学科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：70602407

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。