

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03988

研究課題名(和文) 熱磁気力による対流制御に最適な磁場分布の探求とその検証

研究課題名(英文) Effective magnetic field for the convection control by the magneto-thermal force

研究代表者

金田 昌之 (Kaneda, Masayuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50346855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：外部磁場印加による対流伝熱の促進や制御についての知見を得るために、常磁性流体への磁気力の効果について研究を進めた。その結果複数個並べた磁石の間で強い磁気力を生じることがわかった。これを自然対流への対流制御ならびに温度成層状態の流体の対流誘起に応用するために数値解析ならびに実験を実施した。その結果、2個の磁石を交互に並べた場合で最も局所的な効果が大きくなることがわかった。磁石を増やすことで効果の増大を期待したが、磁場印加の領域は広がるものの局所的なピーク値はむしろ低下することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然対流は身の回りの熱交換デバイスなどに利用されているが、その交換熱量には限界がありそれほど大きくないことが知られている。本研究で得られた成果は、この自然対流や熱でよどんだ流体を磁気力で駆動するために用いられるもので、永久磁石を利用することで安価かつ簡便に応用することができる技術である。したがって、現状廃棄している熱を有効に熱交換に利用できれば、熱エネルギーの効果的な回収に大きく役に立つものである。

研究成果の概要(英文)：The effect of the applied magnetic field from permanent magnets is investigated numerically and experimentally for the paramagnetic fluid in terms of the effective convection control and induction. It is found that the junction of multiple magnet can induce the strong magnetic force, especially two alternating magnetic pole. By the increment of the magnet was expected to enhance the effect, however, the effect becomes less due to the locally-weak magnetic force.

研究分野：自然対流

キーワード：磁気力 常磁性流体 熱流動 対流制御 対流誘起

### 1. 研究開始当初の背景

磁場利用について超電導電磁石の広まりと共に、「磁気科学」という学問領域が徐々に広がりを見せていた。これは従来の電磁気学とは異なり、電気伝導率が低く、従来磁石の影響をほとんど受けないとみなされていた物質を対象とする。磁性はすべての物質に存在するため、強磁場を印加することで何らかの効果が期待できる。「磁気科学」とは、この磁場のみがもたらす効果について研究する学問で、2000年あたりから登場してきた。その内容は幅広く、磁気浮遊や、材料科学・応用化学分野において物質の結晶構造や配向に及ぼす変化などが報告されてきた。

これらに必須となる永久磁石をはじめ、さらに強力な定常強磁場施設は米、仏、蘭、日に存在する。日本にはNIMSと東北大に施設があり、トップランナーとしての役割を担っており、強磁場利用の研究は将来性と発展性を含み、新しい学問領域といえる。

申請者は、この磁場印加効果に対流制御手法の一つとしてとらえ、無重力場での空気対流駆動や重力場での自然対流・強制対流の制御に利用できることを明らかにしてきた。

これらはいずれもテスラオーダーの強磁場を用いたものである。他にも磁場印加による常磁性流体の対流制御については様々な系での報告があるが、強力な磁場(数テスラオーダー)のような高コストのものや、特定の系、たとえば密閉容器内の閉じた系を対象とした研究が多く、磁場印加と対流という意味では汎用性に欠けた側面が強い。

機械工学の分野で、とりわけ産業への応用を見据えて考えると、超電導電磁石を利用した対流制御は現象としては面白いものの、高コストとなるため、批判的にとらえられがちであった。近年は0.5テスラ程度の永久磁石も入手が容易になってきたため、永久磁石を用いた対流制御が実現できれば、安価で効果的なデバイスの開発につながる。

そこで課題となったのが磁場分布である。磁場分布を正確に解析し、その効果を熱流動(=伝熱学、流体力学)と関連付けて学術的に考察することが必要であった。

また、当然であるが磁力は磁極の存在する場所の効果が最も顕著である。外力発生メカニズムはある程度明らかにされているが、熱流動場と錬成させた場合、どの温度場に磁極を設置すれば最大の効果が得られるかについては、解析系にも依存するため未解明な部分が多かった。

以上より低コストな磁場による対流制御の高効率化を模索する必要があった。

### 2. 研究の目的

以上の問題点を解決するためには、これまでのコイルからの磁場分布ではなく、より実利用に近い永久磁石からの磁場とそこから誘起される外力を考察し、熱流動場における効果を整理することが必要となる。そこで本研究では、永久磁石からの磁場を解析し、それを自然対流場もしくは温度成層状態の常磁性流体に印加した際の実験ならびに数値解析により検証することで、効果的な磁気力分布と伝熱促進への効果を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究は自然対流および温度成層状態の常磁性流体に及ぼす磁場印加効果を検証するために、それぞれにおいて磁場分布解析とそれを使った熱流動数値解析を実施し、さら

に一部相応する実験により対流への影響を検証した。

自然対流においては、鉛直の場合と、下加熱上冷却のいわゆるレイリーベナール対流を対象とし、加熱面下部に磁石を配置した系を考案した。

対流誘起に関しては、下面冷却上面加熱とすることで温度成層状態とし、これに磁場印加をすることで生じる対流を解析した。

各実施項目についての詳細は以下の通りである。

磁場解析：二次元有限要素法を素地としたソフトを利用した。磁石形状や表面磁束密度をパラメータとして解析領域のマクスウェル方程式を解くことで静磁場分布を解析した。そのままでは三角形のメッシュ状のデータなので、格子ボルツマン法で用いる矩形メッシュ状に再分配した。

熱流動場解析：D2Q9 格子ボルツマン法を用いて、密度分布関数ならびにエネルギー分布関数を二次元で解析した。ここで外力項として磁場勾配と流体の局所温度より求められる熱磁気力ならびに浮力を考慮した。解析の高速化を目指してGPUによる解析プログラムを構築した。

実験：実験に関しては鉛直の場合と対流誘起の場合についてのみ実験装置を構築した。作動流体として硝酸ガドリニウム水溶液を用い、加熱面冷却面に設置した薄型熱電対で温度を計測した。熱損失を考慮した局所熱輸送量を計算し、これを解析結果と比較することで現象の理解を深めた。

#### 4. 研究成果

Effect of magnetic field on natural convection inside a partially-heated vertical duct: Experimental study, International Journal of Heat and Mass Transfer (2019)

鉛直加熱壁に沿った自然対流に及ぼす磁場印加効果に関する実験を実施し、局所的な対流促進及び対流抑制効果があることを発見した。

Natural convection of paramagnetic fluid along a vertical heated wall under a magnetic field from a single permanent magnet, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2020)

単一永久磁石からの磁場が鉛直平板自然対流に及ぼす効果について数値解析を実施し、その詳細を検討した。その結果、磁石の位置に応じて磁気力が変化し対流促進ならびに抑制効果が発現することがわかった。

Magnetothermal force effect on natural convection through a partially-heated vertical channel, Journal of Thermal Science and Technology (2020)

鉛直加熱平板上の自然対流に及ぼす磁場印加効果を検証した。その結果、温度境界層が発達し始める箇所に磁石を設置することが最も効果的であることがわかった。また、単一磁石よりも複数の磁石を配置した方が効果的であることも分かった。さらに、限定的な条件においては脈動流を誘起できることが示唆された。

Rayleigh-Benard Convection of Paramagnetic Liquid under a Magnetic Field from Permanent Magnets, Symmetry (2020)

レイリーベナール対流のロールセルパターンに及ぼす磁場印加効果を数値解析により検証した。その結果、ロールセルの位置を任意に操作することができ、さらにその場所の対流伝熱を操作できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kaneda Masayuki、Fujiwara Hiroaki、Wada Kengo、Suga Kazuhiko	4. 巻 502
2. 論文標題 Natural convection of paramagnetic fluid along a vertical heated wall under a magnetic field from a single permanent magnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 166574 ~ 166574
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2020.166574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wada Kengo、Kaneda Masayuki、Suga Kazuhiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Rayleigh-Benard Convection of Paramagnetic Liquid under a Magnetic Field from Permanent Magnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 341 ~ 341
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/sym12030341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kaneda Masayuki、Nazato Kensuke、Fujiwara Hiroaki、Wada Kengo、Suga Kazuhiko	4. 巻 132
2. 論文標題 Effect of magnetic field on natural convection inside a partially-heated vertical duct: Experimental study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1231 ~ 1238
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kengo WADA, Hiroaki FUJIWARA, Masayuki KANEDA, Kazuhiko SUGA	4. 巻 15
2. 論文標題 Magnetothermal force effect on natural convection through a partially-heated vertical channel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jtst.2020jtst0019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 名里健佑, 和田賢伍, 金田昌之, 須賀一彦
2. 発表標題 温度成層状態にある常磁性流体の永久磁石による対流誘起
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 名里 健佑, 和田 賢伍, 藤原 宏彰, 金田 昌之, 須賀 一彦
2. 発表標題 複数磁石を用いた鉛直ダクト内自然対流の伝熱促進/抑制効果実験
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田 賢伍, 藤原 宏彰, 金田 昌之, 須賀 一彦
2. 発表標題 片側加熱鉛直チャンネル内自然対流に及ぼす磁場印加効果 -数値解析による検討-
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo WADA, Hiroaki FUJIWARA, Masayuki KANEDA, Kazuhiko SUGA
2. 発表標題 MAGNETOTHERMAL FORCE EFFECT ON NATURAL CONVECTION THROUGH A PARTIALLY-HEATED VERTICAL CHANNEL
3. 学会等名 ASCHT2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田 賢伍, 金田 昌之, 須賀 一彦
2. 発表標題 磁場印加下における常磁性流体レイリー・ベナール対流の数値解析 - 永久磁石からの磁場の場合 -
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Wada, Masayuki Kaneda and Kazuhiko Suga
2. 発表標題 Rayleigh-Benard convection of paramagnetic liquid under a magnetic field from block magnets
3. 学会等名 APCM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Kaneda, Kazuhiko Suga
2. 発表標題 Magnetothermal convection of paramagnetic fluid inside open-cell porous media under gravity field
3. 学会等名 16th International Heat Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 名里健佑, 金田昌之, 藤原宏彰, 和田賢伍, 須賀一彦
2. 発表標題 永久磁石を用いた鉛直平板自然対流の伝熱促進に関する実験的研究
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------