

令和元年6月12日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14541

研究課題名(和文) 永久磁石を用いた革新的電磁ポンプの開発に関する研究

研究課題名(英文) Development of innovative electromagnetic pump using permanent magnet

研究代表者

吉橋 幸子 (Yoshihashi, Sachiko)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20403157

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)：本研究は、液体金属を流すための小型電磁ポンプの開発に係る研究である。液体金属流は核融合炉や高速炉、近年では小型中性子源のターゲットとしても注目されている。しかしながら液体金属流のために用いられる電磁ポンプは大型で複雑である。そこで本研究では小型の永久磁石列を2つ組み合わせたポンプを考案し、製作した。まず、数値解析による磁場分布を計算し、製作したポンプの磁場をガウスメータで計測し、計算結果と実験値の整合性を確認した。次に、異なる種類の金属基板を用いて推力を計測し、電気伝導度と推力の関係について評価した。これらの成果から、本ポンプの原理を実証することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した電磁ポンプは、従来の交流進行波電磁ポンプと比べると駆動部がモータのみで小型で簡易である。そのため、これまで核融合炉や高速炉など大型で特殊な用途で用いられていた液体金属を様々な用途、例えば小型中性子源のターゲットなどに利用することが可能になった。また、本研究で製作した電磁ポンプの構造は、非常に基礎的な電磁気学の原理(電磁誘導)を用いたものであり、中高生を対象とした模擬講義における電磁気学教育に役立てることが期待される。

研究成果の概要(英文)：This challenge is a basic study of the development of a small electromagnetic pump for flowing liquid metal. Liquid metal flow is used for fusion reactors and fast reactors, and in recent years as targets for small neutron sources. However, typical electromagnetic pumps used for liquid metal flow are large and complex. In this study, we formulated and built a pump that combines two small permanent magnet arrays. First, the magnetic field distribution was calculated by numerical analysis, the magnetic field of the pump was measured with a gauss meter, and the consistency between the calculation result and the experimental value was confirmed. Next, the thrust was measured using different types of metal plates, and the relationship between the electrical conductivity and the thrust was evaluated. As the results, we succeeded in demonstrating the principle of this pump.

研究分野：核融合

キーワード：液体金属 電磁ポンプ 永久磁石 磁束密度 進行波 推力

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

1. 研究開始当初の背景

原子力・核融合分野において液体金属は、高速増殖炉の冷却系に利用されている他、核融合ブランケットや国際核融合材料照射施設(IFMIF)の重陽子ビームのターゲットとしての利用が検討されている。IFMIFでは、30-40MeVの重陽子ビームを高速で流れる液体金属リチウムターゲットに照射して中性子場を得る。液体金属リチウムを高速で流動させることにより、陽子ビームからの熱負荷を除去することが可能になる。近年、IFMIF以外においても中性子科学研究を目的として液体リチウムをターゲットとして用いた装置開発、例えば、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)のための小型中性子源や新しい同位体生成のためのウランビームのターゲットなどが注目されている。

液体金属システムの安全性確保のため、液体金属循環装置における液体金属駆動部には軸受けなどの漏えい部がなく、配管外から流体を駆動できる交流進行型の電磁ポンプが利用されている。しかしながら、交流進行型電磁ポンプは、三相多極の電磁石から構成されており、大型の電源が必要となる。また、高温にも耐えうる構造とするため冷却プロアが必要となり、装置全体が大型で複雑になるのに加え、効率も悪いという問題点がある。近年、核融合ブランケットや高速増殖炉の基礎実験材料としてLiPbやPbBi等による小型の液体金属実験ループが作成されているが、電磁ポンプが大がかりとなり、効率も悪いことから稼働状況は芳しくない。また、BNCT用の小型中性子源の開発においては病院にも設置可能とするため装置規模に限界があるため、**電磁ポンプを小型化にすることはこれら液体金属流を用いた装置開発において必要不可欠である。**

2. 研究の目的

液体金属などの高温で化学反応性に富んだ電気伝導性流体と管内に閉じ込めたまま外部から簡便に駆動循環できるポンプとして、**本研究では、永久磁石を回転体に取り付けて磁場の進行波を生成する小型ポンプの原理実証を行うことを目的とする。**電磁石を用いた既存の電磁ポンプは電気伝導性流体の駆動部として広く利用されており、その代替となるものは開発されておらず、今回検討するポンプの原理は非常に単純ではあるが、**汎用されている装置を大きく変える斬新な装置開発に係る研究である。**

3. 研究の方法

本研究では、以下の項目について研究を行う。

永久電磁ポンプの設計と磁場評価

複数の永久磁石を取り付けた円筒2つを設計し、磁場計算解析コード(日本原子力研究開発機構ELEORBITを改良)による計算を行う。

永久電磁ポンプの製作と原理実証

永久磁石列を2つ組み合わせたポンプシステムを製作し、ガウスメータを用いた磁場計測を行い解析結果と比較する。さらに、金属板を用いて、ポンプ間に発生する推力を計測し、本システムの原理実証を行う。

4. 研究成果

(1) 永久磁石を用いた電磁ポンプの原理

永久磁石電磁ポンプは、円筒に永久磁石のS極とN極を交互に取り付けたものをモーターで回転させることで得られるローレンツ力(電磁力)を使い液体金属などを流動させる仕組みである。ローラーが回転することで磁場が回転方向に進行する。磁場の変化によって電場が誘導されるため、ローラー間の電子が移動し、力を得る。永久磁石を使う利点は、交流三相巻き線が不要で小型化と省エネルギーが可能、近年の希土類磁石の発展により非常に強力な磁場が容易に得られること、
一対の回転磁場で駆動力が不足する場合には多数この磁場を直列に並べることで駆動力を上昇できることが挙げられる。一方で、キュリー点が液体金属の作動温度と比較して裕度が少ないため、磁石強度の劣化の懸念があるなど、問題点もあるが、本研究では、原理実証を目的としているため、動作温度等は検討しない。

(2) 磁場評価モデル

解析モデルとして、図1に示すような永久磁石6個を取り付けた円筒を考える。解析は、日本原子力研究開発機構ELEORBITを改良したものを利用した。

まず、永久磁石1個が生成する磁場について考える。永久磁石による磁場は、

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m\lambda}{r^2 r}$$

と表される。ここで、 μ_0 は透磁率(N/A^2)、 m は磁荷(Wb)を示す。磁石1つにおけるX軸、Y軸、Z軸を図2のように置いた場合、 $\lambda = (X-x, Y-y, Z)$ となる。上式を各成分に分けると H_x 、 H_y 、 H_z はそれぞれ次のように表される。

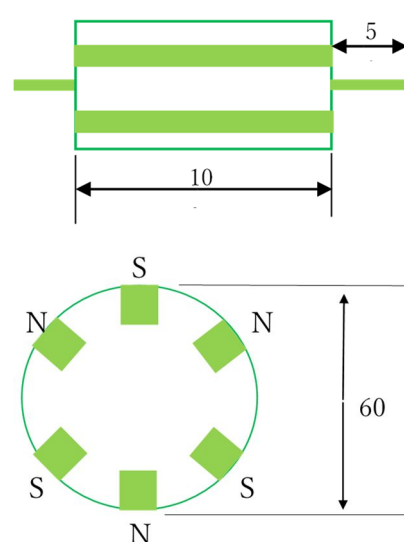


図1 解析モデル

$$H_x = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m}{4ab} \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{(X-x)dxdy}{[(X-x)^2 + (Y-y)^2 + Z^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$H_y = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m}{4ab} \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{(Y-y)dxdy}{[(X-x)^2 + (Y-y)^2 + Z^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$H_z = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m}{4ab} \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{z dxdy}{[(X-x)^2 + (Y-y)^2 + Z^2]^{\frac{3}{2}}}$$

これらは、微小面積当たりの磁場の強さを示しており、各成分で計算した微小面積当たりの磁場の強さを積分することにより 2 次元の磁場分布を得ることが出来る。解析における磁束密度は 1500 Gauss とした。

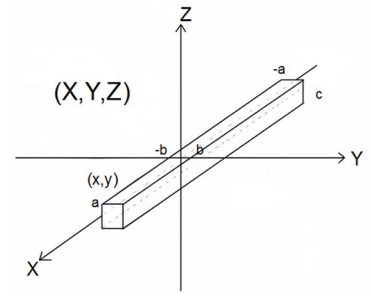


図 2 座標系

(3) 磁場計算結果

6 個の永久磁石列を 2 つ組み合わせた時の磁場分布と 2 つの円筒間の Y 軸方向の磁束密度を図 3 に示す。同図において、中心付近 (50mm) での磁束密度が急激に減少しているが、2 つの磁石の間隔が狭すぎるため計算が不安定になってしまったことが考えられる。2 つの円筒を回転させ、回転角度毎の Y 軸の磁束密度の変化を図 4 に示す。磁束密度が円筒の回転により変化している事がわかる。すなわち、磁束密度の変化に従い誘導電場が生じ、結果として進行波が生じることが解析から明らかになった。

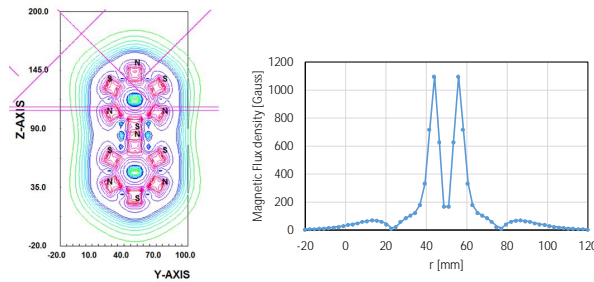


図 3 2 つの円筒間の磁場分布と磁束密度

(4) 永久磁石を用いた電磁ポンプの製作と磁場測定

図 5 は、製作した電磁ポンプシステムの完成写真を示す。本ポンプシステムは長さ (X 軸) 100 mm で直径 60 mm の ABS 樹脂製のローラーにフェライト磁石を 6 個埋め込んだものを 2 つ組み合わせている。向かい合う磁石の極性は異なっており、ギャップ間は 7 mm とした。中心シャフトはモーターに繋がっており、2 つの円筒は同じ速度で逆方向に回転する。

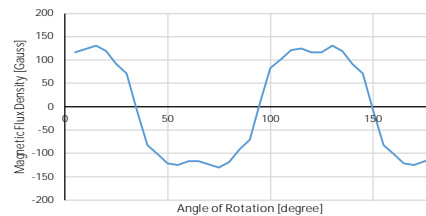


図 4 回転角度毎の磁束密度

2 つのローラー間に発生する磁場をガウスメータ (株) 電子磁気工業) を用いて測定した。検出部を Y 軸方向および X 軸方向に 2 mm ずつ移動させ、それぞれの方向における磁場の変化を計測した。

図 6 は、Y 軸方向の磁束密度の結果と図 3 で示した解析結果との比較を示す。解析結果との比較から磁石中心からプラスマイナス 10mm に見られる磁束密度の立ち上がりは非常によく再現できている。一方で解析では中心付近は不安定により生じた中心付近の磁束密度を計測することに成功した。本測定結果より、中心付近は非常に強い磁束密度となることが分かった。図 7 は X 軸方向の磁束密度の結果を示す。Y 軸とは異なり、ほぼ一定の値を示すことが示され、進行波が Y 軸方向に発生している事が計測結果および実測から明らかになった。

(5) 推力計測 (原理実証)

2 つのローラー間で発生した磁束密度の変化で、金属に影響を与えることができるかどうか原理実証するため、製作した電磁ポンプ間に金属板を設置し、円筒を回転させた時に金属に生じる推力を測定

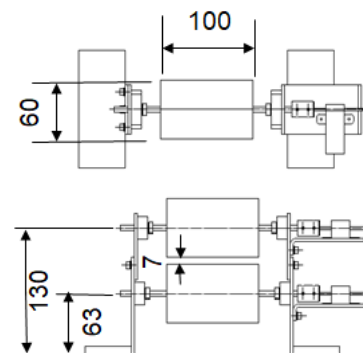
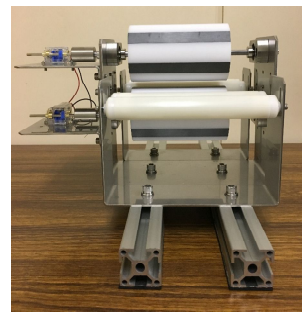


図 5 製作した電磁ポンプ

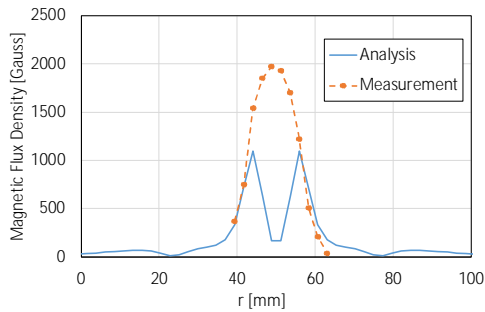


図 6 Y 軸方向の磁束密度の解析結果と計測結果の比較

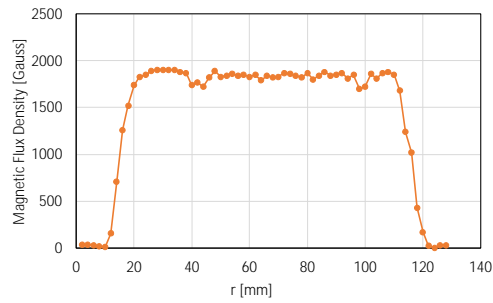


図 7 X 軸方向の計測結果

する。推力は、金属板の端に取り付けたばね係数を用いて評価する。

ローラーの回転により磁場が変化することで電場が誘導され起電力 $E = -d\phi/dt$ が生じる。この起電力により金属板の電子が移動し電流が流れ、

$F = iL \times B$ により金属板に力が働く。 F について金属板の断面積 A 、電気抵抗率 η 、金属中の電荷の移動速度 v を用いて書き換えると

$$F = A \frac{vB}{\eta} LB = A \frac{vLB^2}{\eta}$$

と表すことが出来る。さらに電気抵抗率 η は電気伝導率 σ を用いて表すことが出来る。また、断面積 A は、金属板の厚み t と長さ L の積であるから

$$F = \sigma t v B^2 L^2$$

で表すことが出来る。すなわち F は σt に比例すると考えられる。本実験では、2つの円筒間に厚さ 2mm、3mm、4mm の金属板（材質は、銅、アルミ、SUS304、真鍮）についてそれぞれの金属に働く力を測定した。それぞれの金属の電気伝導率 $\sigma [\times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}]$ は、5.95、3.55、0.139、1.59 である。図 8 は、アルミ板、銅板、真鍮板で得られた推力とそれぞれの σt の関係を示す。同図より原理に基づき推力は σt に比例して得られることが示された。SUS304 は、他と比較して電気伝導度が低く推力を得ることが出来なかった。

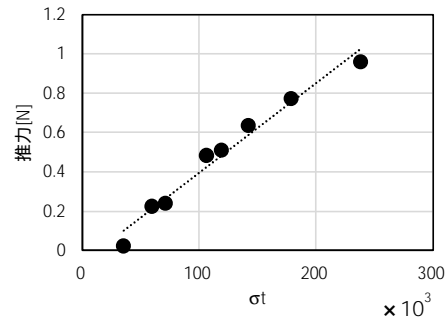


図 8 アルミの推力と σt の関係

(6) まとめ

本研究では小型で革新的な電磁ポンプとして永久磁石を用いたポンプを提案し、その原理実証を解析及び実験によって行った。回転システムを製作し、磁場計測を行った結果、ローラーの回転に伴い磁束密度が変化し、金属板に推力が働くことを原理的に実証することが出来き、装置の改良（磁場の強化による円筒間の距離の拡大、液体金属の安全性など）を行うことにより、液体金属を流動させることができる可能性を示唆することが出来た。また、本装置は、非常に基礎的な電磁気学の原理を用いたものであり、中高生を対象とした電磁気学教育や電磁ポンプの仕組みなど基礎工学教育に役立てることが期待される。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

Sachiko Yoshihashi, Measurement of Free-surface Lithium flow using laser reflection method, 29th Symposium on Fusion Technology, 2016

Sachiko Yoshihashi, Evaluation of High heat removal efficiency using cooling with rib structure, 30th Symposium on Fusion Technology, 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：堀池 寛

ローマ字氏名：HORIIKE, Hiroshi

所属研究機関名：福井工業大学

部局名：原子力技術応用工学科

職名：教授

研究者番号（8桁）：20252611

(2)研究協力者

研究協力者氏名：砂川 武義

ローマ字氏名：SUNAGAWA, Takeyoshi

所属研究機関名：福井工業大学

部局名：原子力技術応用工学科

職名：教授

研究者番号（8桁）：60329456

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。