

電磁推進機構の開発（第2報）

城門由人・沓掛暁史・池田哲
電磁力担当

Development of the electromagnetic side thruster for pleasure boats (2nd Report)

Yukihiro KIDO・Akifumi KITSUKAKE・Tetsu IKEDA
Electromagnetic Section

要 旨

本研究では、小型船舶（プレジャーボートなど）の姿勢制御などの補助推進装置として、モータ・ギヤ・スクリューがない磁気スラスタ（電磁推進機構）を技術開発する。本報では、推進力を増大する機構モデルとその評価について報告する。

1. はじめに

都心等での移動手段として渋滞や混雑緩和、災害時の緊急搬送手段や陸上交通の代替移動手段などの観点から水上タクシーなど海上輸送が注目されている。

水上タクシーなどの小型船舶（プレジャーボートなど）は、風や海流の影響を受けやすく海洋上で定位置に停まるため、また、桟橋への離着岸を安全に行うために一部の船舶において主推進機以外に補助推進装置（電動スラスタ）を備え姿勢制御を行っている。

本研究では、電動スラスタにおけるギヤの摩耗やスクリューへの藻の絡まりなどの課題を解決するため、磁気を用いたモータ・ギヤ・スクリューがない磁気スラスタ（電磁推進機構）を考案し、実用化技術の構築に取り組んでいる。本報では、推進力を増大する機構とその評価について報告する。

2. 電磁推進機構の原理

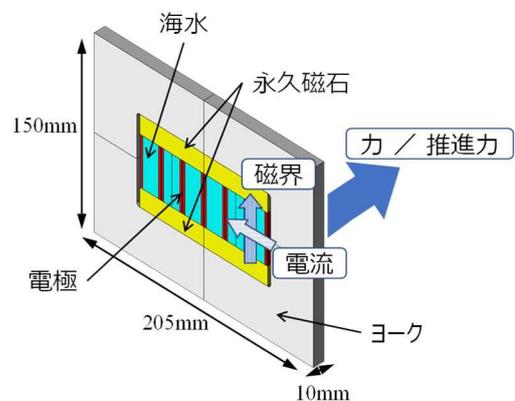
Fig. 1 に電磁推進機構の推進力の発生原理を示す。原理説明のモデルは、電磁推進機構の基本ユニット⁽¹⁾である。電極に挟まれた6個のスロットに海水を通し、スロット上下に配置した永久磁石とヨークにより海水に上下方向の磁界づくり、電極から海水に電流を流すことでローレンツ力により推進力が得られる。ローレンツ力は以下の式から求まる。

$$F = I \cdot B \cdot l \sin\theta \quad (1)$$

ただし、 F : ローレンツ力、 I : 海水に通す電流、 B : 磁束密度、 l : 電極間距離、 θ : 磁界の向きと電流の向きのなす角である。

Fig. 1 では、磁界の向きが下から上、右から左に電流を流すことで、フレミング左手の法則によりスロット奥方向の力を発生する。

Table 1 は、基本ユニットの構成である。



基本ユニットとローレンツ力（推進力）

Fig. 1 電磁推進機構の推進力の発生原理

Table 1 電磁推進機構基本ユニットの構成

	材質記号	サイズ[mm]	備考
ヨーク	構造用鋼 SS400	長さ 205 幅 10 高さ 150	表面処理： 無電解ニッケルメッキ
永久磁石	ネオジム 磁石 N45	長さ 60 幅 10 高さ 15	磁化方向：15mm 方向 ※4 個（上下各 2 個） ※上下磁石間隔 40mm
電極	銅 C1100	厚さ 1	電極面：10×36mm ※12 極（6 対） ※電極面以外絶縁被膜

3. 電磁推進機構の基本ユニットによる評価

3.1 基本ユニットの改良

電磁推進機構の推進力を増大するため、基本ユニット⁽¹⁾の磁気回路と電気回路の見直し、及び、大電流への対応（漏電対策）を図った。

磁気回路と電気回路の見直しでは、高い磁束密度の領域に電流が集中するように改良した。基本ユニットの磁束密度の分布（Fig. 2）から磁石間の中央付近では磁石近傍の半分以下の磁束密度となることから、高い磁束密度の領域（図の塗りつぶし領域）に電流が集中するように、電極の中央 15mm 程度を絶縁被膜した。

また、大電流による漏電を防ぐため、ヨーク全体を絶縁被膜し、電極の一部を収縮チューブで防水した。

Fig. 3 は、絶縁被膜を施した電極を使用した基本ユニット（改良版）の外観である。基本ユニットは、海水の通路を 6 スロット（1 スロットの開口サイズ 16×40mm、通路長：10mm）に分け、各々 1 対の電極で通電する。

3.2 基本ユニット（改良版）による推進力評価

Fig. 4 に基本ユニット 2 台を連続配置した推進力の実測値と計算（理論）値の結果を示す。なお、実験では海水の代わりに塩分濃度 3.4% の塩水とした⁽²⁾。

印加電圧 12～36V は前報⁽¹⁾の結果であり、印加電圧 48V が今回の測定結果である。改良により高電圧まで試験でき、大きな推進力を得ることができた。

また、効率（ここでは、計算（理論）値を 100 とした場合の発生推進力の割合）は、対策前 50%前後（12～36V）から改良版 74%（48V）に向上した。このことは、高い磁束密度の領域に電流を集中できたためと考えられる。

4. 電磁推進機構の連続一体モデルによる評価

4.1 連続一体モデル

前報⁽¹⁾において基本ユニットの連続配置により推進力を大きくできることを確認した。このことを応用した上で、構造の簡素化と効果的な磁力の活用のため連続一体モデルを製作した。

Fig. 5 に組み立て後のモデル写真を示す。海水を通す 6 スロット（1 スロットの開口サイズ 12×15mm、通路長 60mm）をそれぞれ永久磁石（ネオジウム磁石）と電極で囲う形状とした。Table 2 に連続一体モデルの構成を示す。

磁界解析により得られた磁束密度の 3D 分布を Fig. 6 に、モデル中央断面の分布を Fig. 7 に示す。いずれの図も対称性を考慮した部分モデルの結果を示す。また、図中のマーク球（Fig. 6）と◆（Fig. 7）は、実測値をプロットしている。

磁石間（磁石間隔 15mm）中央の平面から磁石に向かっ

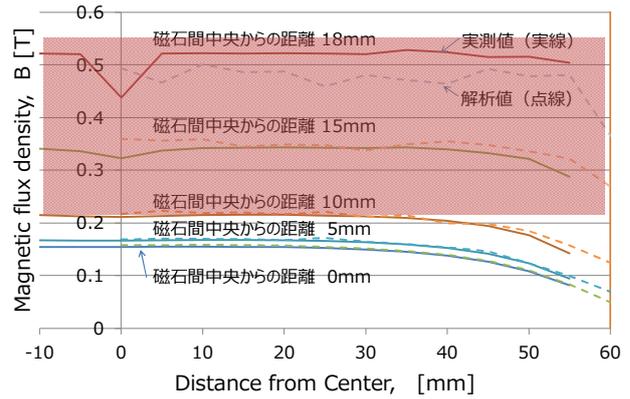


Fig. 2 基本ユニットの磁束密度の分布（測定値）

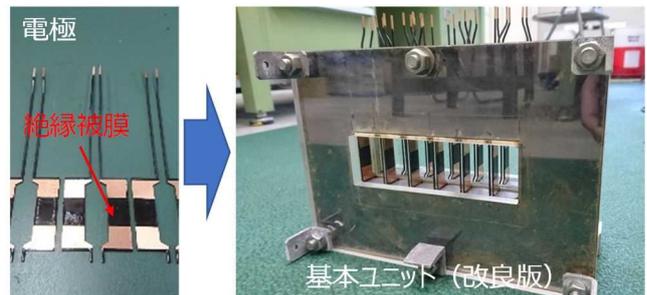


Fig. 3 基本ユニット（改良版）

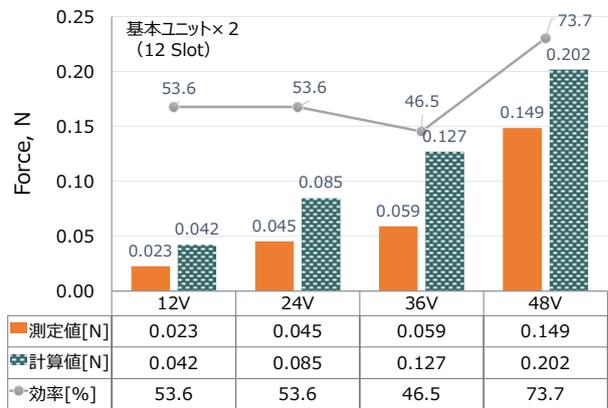


Fig. 4 基本ユニット（改良版）による推進力評価

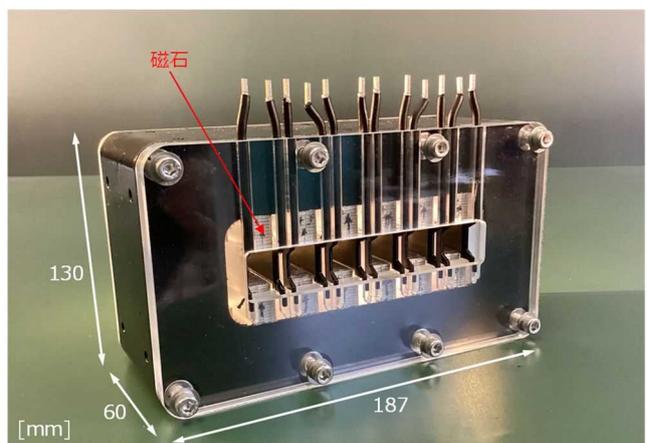
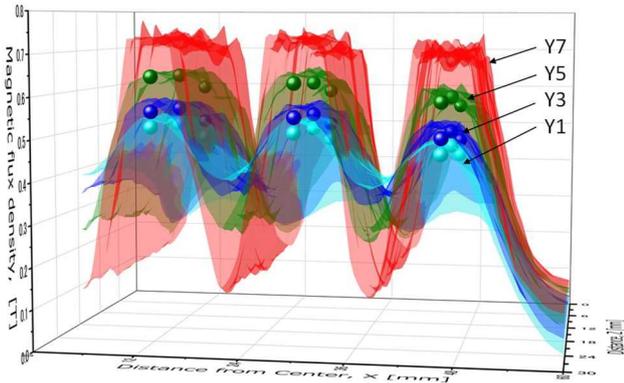


Fig. 5 連続一体モデル（電磁推進機構）



※Y [mm] : 磁石間(15mm)中央からの距離

Fig. 6 磁束密度分布 (3D)

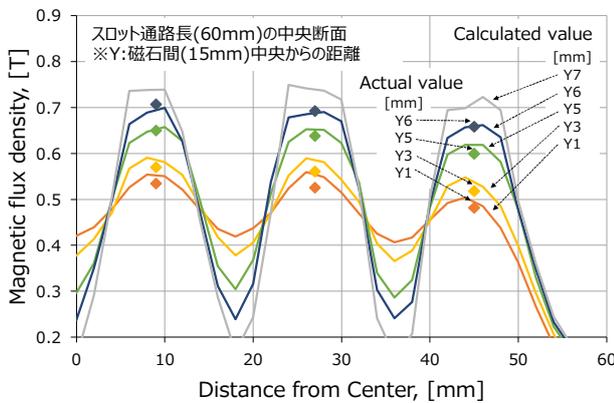


Fig. 7 磁束密度分布 (スロット通路中央断面)

て1, 3, 5, 6 (Fig. 7のみ), 7mm オフセットした平面での分布であり, 海水を通すスロット部に高い磁界を発生している。また, 3D 分布 (Fig. 6) おいてモデル端部 (図の奥方向) 側で磁束密度が小さくなるのが分かる。

解析結果と実測値については, 近似の結果が得られている。

4.2 連続一体モデルによる推進力評価

海水の代わりに塩分濃度 3.4%の塩水⁽²⁾ にモデル浸漬して推進力の試験を実施した。

Fig. 8 に連続一体モデルにおける推進力の実測値と計算 (理論) 値を示す。印加電圧 12~48V の試験を実施したが, 36~48V 試験において一部のスロットで電源リミットにより所定の電圧を印加できなかった。そのため, 図では印加電圧 40V までの結果を示している。電源仕様により 40V 以上の試験結果は無いが, 印加電圧を高めることで, モデル単体で目標の 1N 以上の推進力を達成できると推測できる。

効率 (ここでは, 計算 (理論) 値を 100 とした場合の発生推進力の割合) は, 電圧が上がるに従い向上する傾

Table 2 電磁推進機構連続一体モデルの構成

	材質記号	サイズ[mm]	備考
ヨーク	構造用鋼 SS400	長さ 187 幅 60 高さ 130	表面処理: 無電解ニッケルメッキ
永久磁石	ネオジム 磁石 N45	長さ 60 幅 10 高さ 15	磁化方向: 15mm 方向 ※12 個 (上下各 6 個) ※上下磁石間隔 15mm*
電極	アルミ A5052	厚さ 1.5	電極面: 15×60mm ※12 極 (6 対) ※電極面以外絶縁被膜

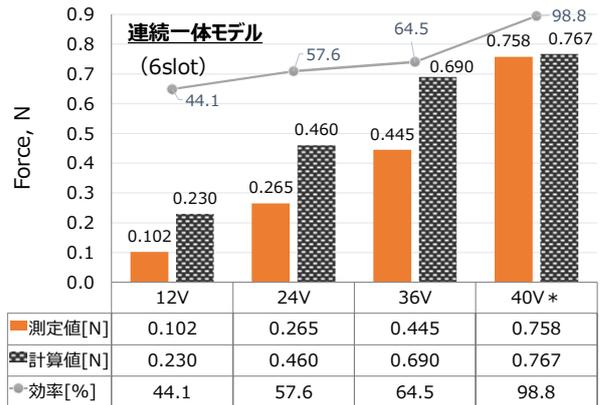


Fig. 8 連続一体モデルの推進力

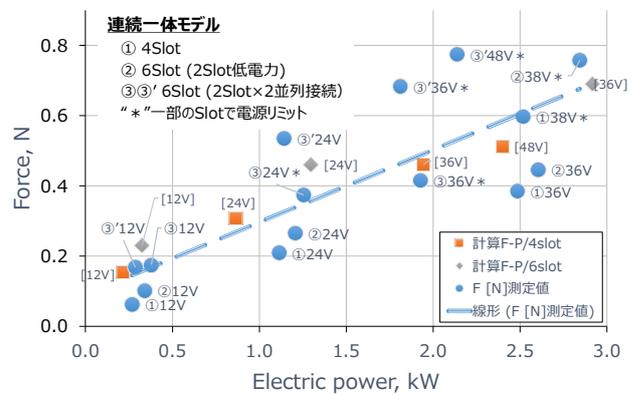


Fig. 9 電力と推進力の関係

向にあることが分かる。

いくつかの試験結果を電力と推進力の関係として Fig. 9 に示す。測定値 (図中●印) にばらつきがあるものの点線で示す線形の関係が認められる。これに, 計算 (理論) 値をプロット (図中■-4slot, ◆-6slot) すると, 点線で示す測定値の線形近傍にあり, 測定値と計算 (理論) 値がよく一致する。このことは, 本モデルにおいて理論に基づく推進力が得られていることを示している。

5. まとめ

小型船舶の姿勢制御を行う新しい機構である磁気を応用したモータ・ギヤ・スクリューがない電磁推進機構の開発において、前報⁽¹⁾の結果を反映した新しい実験モデルを製作し、推進力の評価を実施した。目標としていた機構単体で数 N の推進力の測定には及ばなかったが、約 0.76N が測定され数 N の出力の可能性を十分得ることができた。

実用レベルの推進力としては、数十～数百Nが目標であり、電磁推進機構の複数配置を考慮した場合でも実験モ

デル単体で数N以上の推進力が必要であり、さらなる磁気回路及び電気回路の見直しなど機構の改良に取り組む予定である。

参考文献

- (1) 城門由人, 沓掛暁史, 池田哲: 電磁推進機構の開発, 令和3年度大分県産業科学技術センター研究報告
- (2) 「海水」『フリー百科事典 ウィキペディア日本語版』. 2022年3月1日(火) 05:20 UTC, URL: <https://ja.wikipedia.org/wiki/海水>