

電磁推進機構の開発

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

Yukihito KIDO・Akifumi KITSUKAKE・Tetsu IKEDA
Electromagnetic Section

要 旨

小型船舶（プレジャーボートなど）は、海流に流されず海洋上の定位置に停まる、漁港やマリーナ内で安全に航行するために、主推進機とは別に姿勢制御のための補助推進装置（電動スラスタ）を備えることが増えている。本研究では、モータ・ギヤ・スクリューがなく、ギヤの摩耗や振動、海藻のスクリューへの絡まりなど電動スラスタでの課題を解決する新たな電磁推進機構を考案し、その基本特性を評価したので報告する。

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。しかし、水上タクシーなどの小型船舶（プレジャーボートなど）は、桟橋への離着岸が困難であることから船舶操作の経験が必要であり人材確保が困難な状況となっている。また、小型船舶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ことができないなどの問題がある。

一部の小型船舶では、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うことで、上記問題に対応している。電動スラスタは、モータ直結小型スクリューでモータの動力をギヤを介して小型スクリューに伝達して推進力を得る機構であり、正反転を頻繁に繰り返すことからギヤの摩耗による定期的なメンテナンスが必要となっている。また、スクリューへの藻の絡まりや貝類の付着により推進力が得られないなどの課題もある。

これらの課題を解決するため、電動スラスタの代替技術として、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を考案した。本稿では、電磁推進機構の評価モデルの構築とその基本特性を評価したので報告する。

2. 電磁推進機構の評価モデル

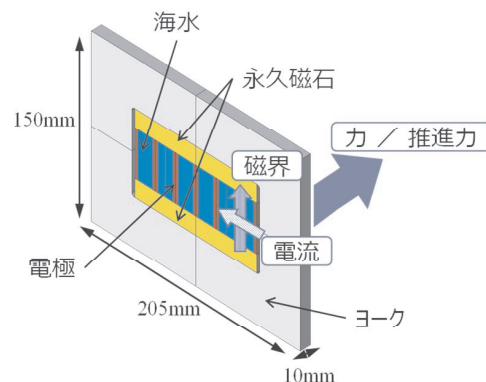
2.1 評価モデルと推進力発生原理

Fig.1 に電磁推進機構のイメージモデルを示す。中央 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により上下方向の磁界を発生し、スロット左右に配置した電極で海水に電流を流すことでローレンツ力に



(基本ユニットを連続配置したもの)
(1) 電磁推進機構のイメージモデル



(2) 基本ユニットとローレンツ力（推進力）

Fig.1 電磁推進機構

Table 1 電磁推進機構の構成材料

	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	表面处理: 無電解ニッケルメッキ
永久磁石	ネオジウム 磁石 N45	長さ 60 幅 10 高さ 15	磁化方向:15mm 方向 ※4 個(ノ基本ユニット)
電極	銅 C1100	厚さ 1	電極面:10×36mm ※12 極(ノ基本ユニット) ※電極面以外絶縁被膜

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。

例えば、Fig.1(2)で磁界の向きが下から上で、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。

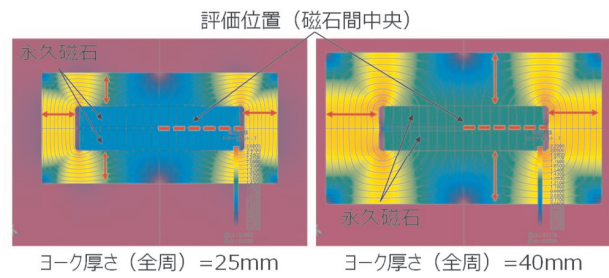
電磁推進機構の主な構成は、磁界を発生する永久磁石、磁気回路を構成するヨーク、海水に電気を流す電極から成る。表1に電磁推進機構を構成する材料を示す。

2.2 磁気回路

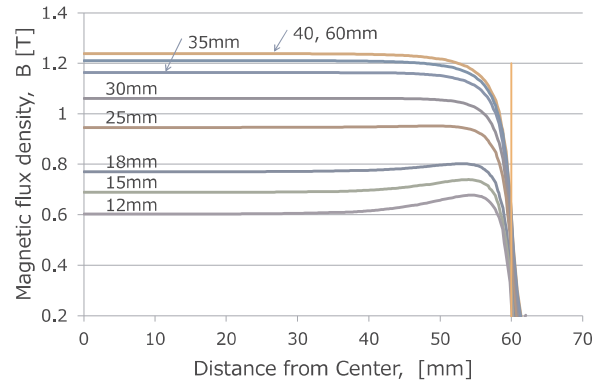
磁気回路を設計するため、磁界解析ソフト JMAG (株式会社 JSOL) を使用してヨーク部の幅、及び、磁石間距離を検討した。

ヨーク部の幅を検討した結果をFig.2に示す。磁石間距離を固定し、ヨーク部の幅を変更した場合の磁石間中央の磁束密度をシミュレーションした。グラフは、磁束線図の点線で示す評価位置の磁束密度分布であり、ヨーク部の幅 35mm を超えると磁束密度への影響は小さくなることから、磁気推進機構は小型であることが望ましく、かつ、磁石間の磁束密度は高くなるほうがよいことから、磁束密度が 1.2T を超えるヨーク部の幅 40mm を採用した。

次に、磁石間距離を検討した結果をFig.3に示す。ヨーク部の幅を 40mm 固定とし、磁石間距離を変更した場合の磁石間中央の磁束密度をシミュレーションした。グラフは、磁束線図の点線で示す評価位置の磁束密度分布である。磁石間の磁束密度が高いほど推進力は大きくなることからできるだけ磁石間距離を小さくする方がよいが、電極面積が小さくなるため海水に大きな電流が流せなくなり、結果として推進力を得にくくなる。このことは、

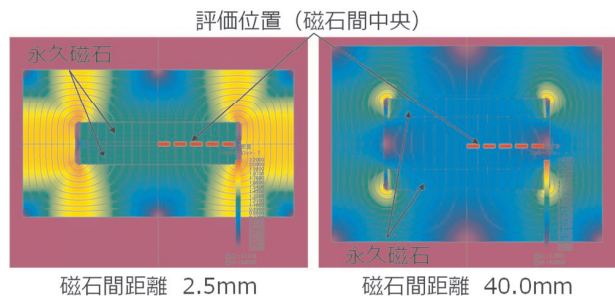


(1) 磁束線図と評価位置

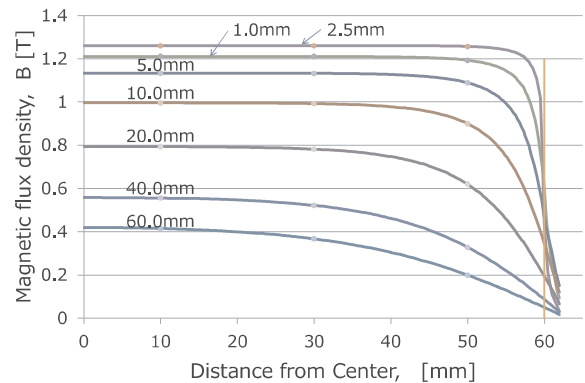


(2) 評価位置の磁束密度分布

Fig.2 ヨーク幅の検討



(1) 磁束線図と評価位置



(2) 評価位置の磁束密度分布

Fig.3 磁石間距離の検討

以下の関係式から分かる.

海水を流れる電流 (I_w) は, 式(2)から電極面積 (S) に比例する. また, 海水の電気抵抗 (R_w) は式(3)となる.

$$I_w = E/R_w = \frac{E}{\rho l} \cdot S \quad (2)$$

$$R_w = \rho l/S \quad (3)$$

1 スロットあたりのローレンツ力 (F_s) は, 式(1)に式(2), (3)を代入して式(4)となる.

$$F_s = \frac{1}{\rho} \cdot E \cdot S \cdot B \sin\theta \quad (4)$$

ただし, E : 電圧, ρ : 電気抵抗率 (海水), l : 電極間距離, B : 磁束密度, θ : 磁界の向きと電流の向きのなす角である.

ここで, 磁石間距離と推進力の関係を Fig.4 に示す. 磁束密度は, 磁石間距離との関係を示した Fig.3 の各磁石間距離の磁束密度分布における中心からの距離 (X 軸) が, 10mm, 30mm, 50mm の平均値をプロットしており, 磁石間距離が大きくなるにつれ小さくなる.

評価モデルの磁気推進機構の基本ユニットは 6 スロットで構成 (Fig.1 参照) するので, 基本ユニットあたりの推進力 (F_{unit}) は式(5)から算出でき, その結果を Fig.4 に示す.

$$\begin{aligned} F_{unit} &= 6 \cdot F_s \\ &= 6 \cdot \frac{S}{\rho} \cdot E \cdot B \end{aligned} \quad (5)$$

$$S = \{ \text{電極幅} \} \times \{ \text{磁石間距離} \}$$

ただし, F_s : 1 スロットあたりのローレンツ力, S : 電極面積, E : 電圧, B : 磁束密度, ρ : 電気抵抗率 (海水の場合 $0.2[\Omega\text{m}]$) である. ここでは, 電圧 (E) を 36V, 磁界の向きと電流の向きのなす角 (θ) は 90° , 電極幅は 10mm として算出した.

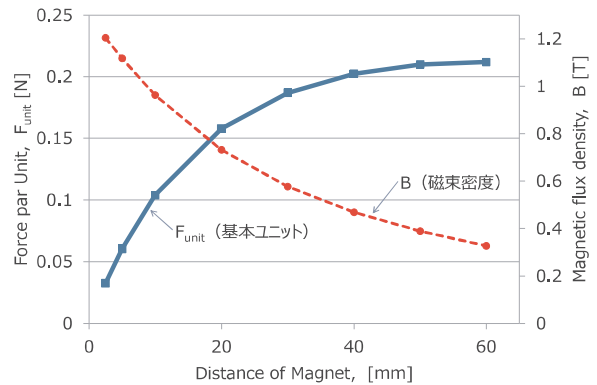
Fig.4 より推進力の増加率が低下しはじめる磁石間距離 40mm を設計値とした.

3. 試作モデルによる評価

上記の磁界解析の結果に基づき, 試作モデルを製作した. 製作した基本ユニットを Fig.5 に示す.

3.1 磁気回路 (磁石間の磁束密度)

製作した基本ユニットの磁石間の磁束密度を測定した結果を Fig.6 に示す. 磁束密度の測定は, ガウスメータ (Lake Shore Cryotronics 製 475 型) を使用した.



磁石間距離, [mm]	2.5	10	20	40
推進力, F_{unit} [N]	0.033	0.10	0.16	0.20
磁束密度, B [T]	1.20	0.96	0.73	0.47

Fig.4 磁石間距離と推進力の関係

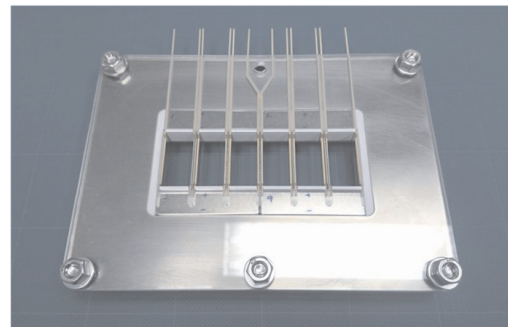


Fig.5 試作モデル (基本ユニット)

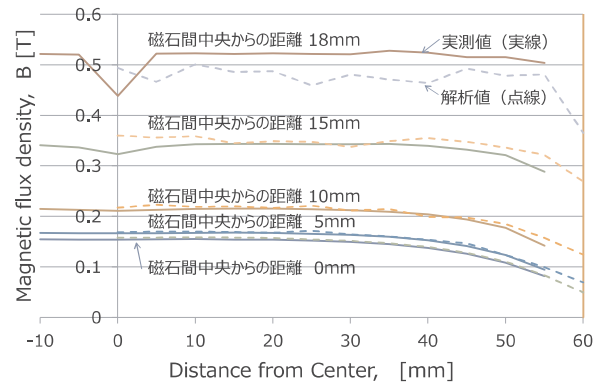
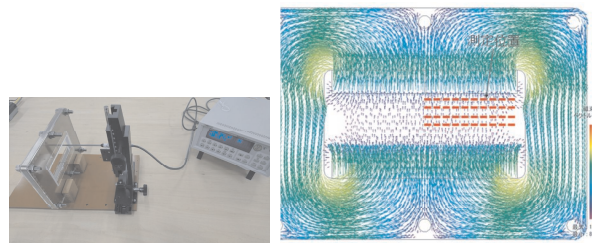


Fig.6 磁石間の磁束密度分布

実測値と解析値はほぼ同じ結果となっていることが分かる。磁石に近い磁石間中央からの距離 18mm における実測値と解析値のずれは、XZ ステージのメモリによる位置合わせのため測定位置の僅かなずれによるものと推測される。また、中心(X軸 0mm)付近で実測値が下がるのは、並べた磁石の僅かな間隙のためである。

3.2 推進力評価

電磁推進機構の基本的特性を評価するため、基本ユニット 2 個を用いた推進力評価ユニット(Fig. 7)による推進力評価を実施した。推進力評価では、基本ユニット 1 個での特性評価も

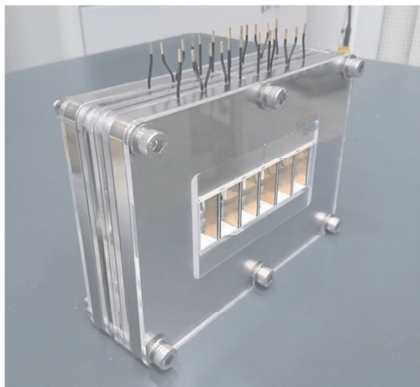
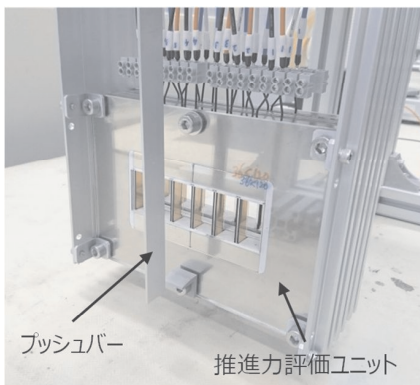
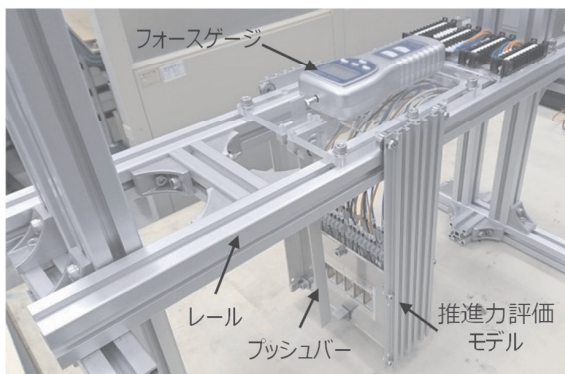


Fig. 7 推進力評価ユニット



(1) 推進力評価モデル



(2) 推進力評価装置

Fig. 8 推進力評価モデルと推進力評価装置

実施するため、2 個の基本ユニットが互いに磁気的な影響を及ぼさないように一定の間隔で配置した。また、電極は、海水への通電部分以外は絶縁被膜した。

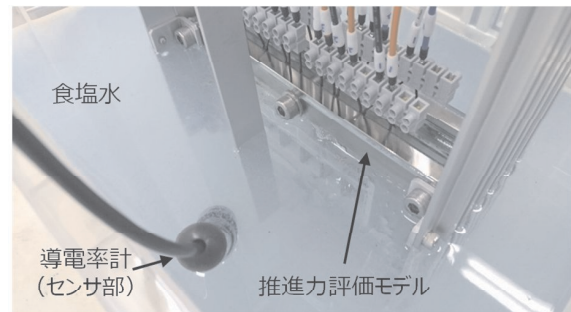
推進力評価モデルの重さは、5.44kg、基本ユニット 1 個の重さは、2.48kg であった。

推進力評価モデルを推進力評価装置にセットした様子を Fig. 8 に示す。推進力評価モデルは、レール上を自由に移動することができ、プッシュバーを押すことでフォースゲージ(サトテック FG-5005)により推進力を計測することができる。基本ユニットの各スロットは、独立に電気回路が組まれており、スロット毎に海水への通電を制御できる。

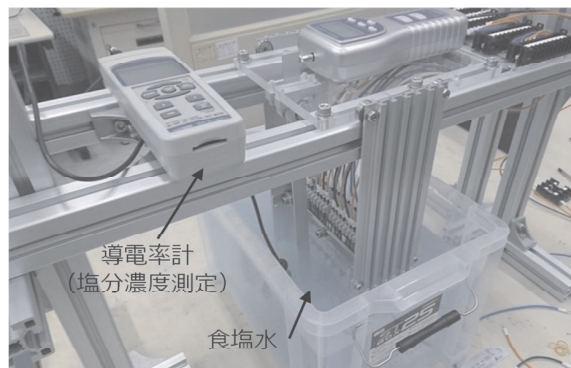
海水を模した食塩水に推進力評価モデルを浸した試験の様子を Fig. 9 に示す。海水は、96.6%の水と 3.4%の塩分で構成される⁽¹⁾ことから、本試験で使用する食塩水の塩分濃度は、約 3.4%とした。塩分濃度は、導電率計(サトテック WA-2017SDJ-CD)を用いて計測した。

推進力評価では以下の内容を確認した。

- ①基本ユニット単体での推進力(スロット並列配置)
- ②基本ユニットを連続配置した場合の推進力(スロット連続配置)



(1) 水槽内の様子



(2) 試験の様子

Fig. 9 推進力評価装置による試験の様子

評価では、Fig.6 より磁束密度の低下がみられる両サイドのロットは使わずに試験した。

Fig.10 に評価対象のロット位置を示す。①の評価では基本ユニットの中央4個のロットを、②の評価では2個の基本ユニットの各2個の同じ位置のロットを用いて、いずれの試験も4個のロットで配置の違いによる差異について評価した。

4個のロットの電極間電圧を12V, 24V, 36Vとした場合の①と②での推進力の実測値と、式(6)で算出した4スロットでの推進力 (F_{4slot}) の計算値をFig.11 に示す。

$$F_{4slot} = 4 \cdot \frac{S}{\rho} \cdot E \cdot B \quad (6)$$

$$S = 36 [mm] \times 10 [mm] = 0.00036 [m^2]$$

$$\rho = 0.2 [\Omega m]$$

$$B = 0.1634 [T]$$

ただし、 S : 電極面積, E : 電圧, B : 磁束密度 (ここでは、磁石間中央付近の実測平均値), ρ : 電気抵抗率 (海水の場合 $0.2 [\Omega m]$) である。

スロットを並列配置 (①) した場合と、連続配置 (②) した場合とでその差はなく、ほぼ同じ推進力が得られることが分かった。このことから、以下のことが確認できた。

1. スロットの配置位置に関係なく各スロットからの推進力が全体の推進力に作用すること
2. 基本ユニットを複数連続配置することで、その数に乗じて推進力を大きくすることができること

実測値と計算値とを比較すると、実測値は計算値より小さくなっている。これは、スロット中の食塩水に流れる電流の大きさによるものと推測される。食塩水への通電は、水に食塩を溶かすことで電離したイオンの移動によるものでその制御は困難である。実際、電流計でモニタしていたが変動が激しく、再現性も得られないため今回の試験での計測は断念した。このように、電流が安定して流れないために計算値ほどの推進力が得られない結果になったと考えられる。

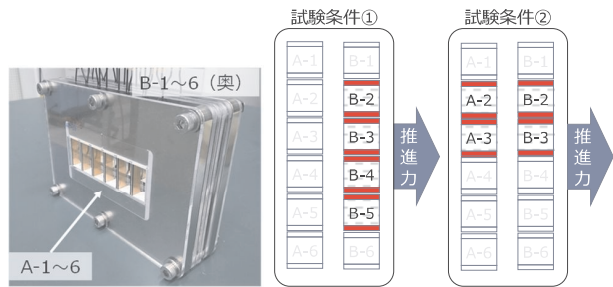


Fig.10 試験条件

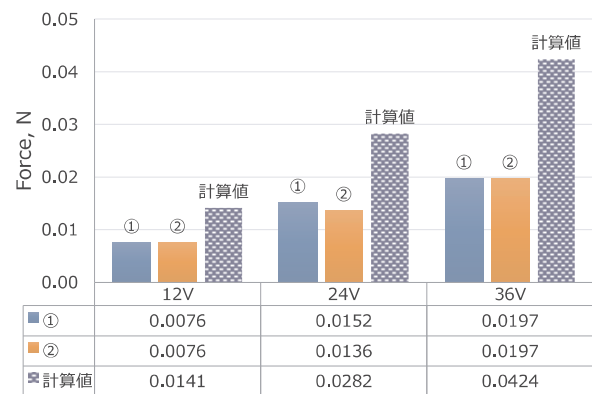


Fig.11 推進力測定結果

4. まとめ

本稿では、小型船舶の姿勢制御を行う新しい機構の開発を目指して、永久磁石を用いた電磁推進機構の考案と、その基本的特性の評価結果について報告した。

理論計算で得られるほどの推進力は見込めないが、基本ユニットを連続配置することで推進力を増大できることを本研究により確認した。今後、基本ユニットの連続配置により実用レベルを目指した研究に取り組んでいく予定である。

参考文献

- (1) 「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>