

船体壁面移動ロボット用の磁気吸着ユニット

— 永久磁石の壁面吸着力をバネとカム機構で補償し小さな力で脱着—

松葉 佐 哲 仁*

正 会 員 木 村 元**

Magnetic Adsorbing Unit for Ship-hull Wall Walking Robot

by

Akihito Matsubasa

Hajime Kimura, Member

Key Words: IB Magnet, Robot,

1. 緒 言

船舶の製造や運用において、特に船体壁面の移動を伴う点検や清掃・塗装などの作業では、ロープや梯子、足場などの煩雑な段取り作業を伴う上に危険作業であるため自動化・省力化が切に求められている。本研究では、壁面を移動して作業を自動で行う歩行型壁面移動ロボットのための磁気吸着ユニットを提案する。永久磁石を用いる吸着法は、停電などのトラブルでも吸着力を失わず安全である半面、壁面との脱着に大きな力が必要となる問題があった。本研究では磁石の吸着力をカムで調整した上でバネで補償して釣り合わせ、小さな力で無理なく脱着可能なユニットを提案・試作し評価する。実験により、汎用の最も小型の空気圧シリンダーでも壁面から磁気吸着ユニットを脱着できることを示す。

2. 鋼板壁面吸着用の永久磁石について

2.1 ヨーク (継鉄) について

磁石にヨークを用いることで外部への磁場の漏れが少なくなり、吸着力を大きくすることができる。また、外部への磁場の漏れが少ないことから、意図しない物体の吸引や電子機器への影響を減らせる利点もある。

2.2 磁石の吸着力とギャップ

複雑な形状の磁性体が複数存在する状況で、磁石の磁束がどのように分布するかをモデル化し計算することは非常に難しいため、特にヨークを伴う磁石の吸着力を正確に理論計算することは事実上困難である。よって使用する磁石毎に吸着力を実際に計測する必要がある。本研究では Fig.1 のようにテコの原理を用いて様々なギャップにおける磁石の鋼板への吸着力を計測した。磁石と鋼板の間の距離を作るため、非磁性体である銅板等を用い、それを挟んだ状態で磁石を引っ張り、外れたときの力を吸着力とした。ヨークありの場合とヨークなしの場合で計測を行い、Fig.2 に実験結果を示す。吸着力の近似関数には、クーロンの法則を改良した以下の式(1)を用い、最小2乗法でフィッティングを行った。

$$F_m(d) = \frac{C_1}{(d + C_2)^{C_3}} \quad (1)$$

ただし d はギャップの大きさ、 C_1 , C_2 はパラメータである。

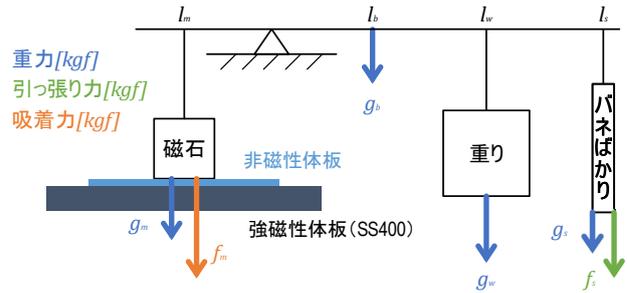


Fig.1 Schematic diagram of magnet adsorbing experiment.

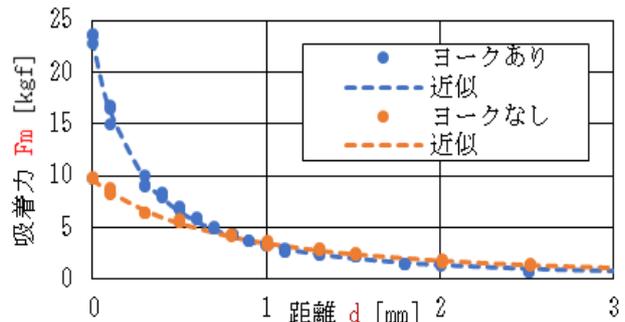


Fig.2 Relationship between magnet attraction and gap.

3. 磁石の吸着力のつり合い補償機構

3.1 Internally Balanced Magnetic Unit (IB マグネット)

IB マグネットとは永久磁石の吸着力を生じると同時に、内部力をバネユニットで打ち消す構造を持つことにより、容易に着脱を可能にする装置である^{1,2,3)}。Fig.3 においてコントロールロッドを引くとバネが吸着力を補償するため小さな力で磁石を引きはがすことが可能であるが、フレームは磁石の吸着力と同じ力でバネに引っ張られているため強力に固定されている。一般的なバネは伸びに対して力の大きさは線形なのに対して磁石の吸着力は非線形であるため、特別仕様のバネが必要になる問題がある。

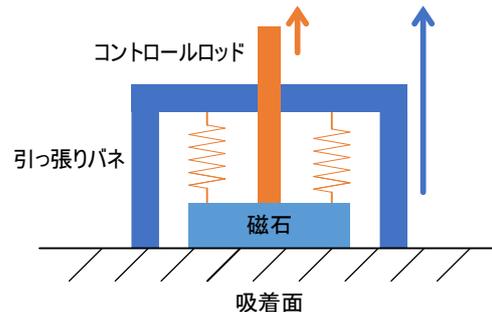


Fig.3 A simple model of the IB magnet.

* 九州大学大学院工学府

** 九州大学大学院工学研究院

原稿受付 (学会にて記入します)

公開日 (学会にて記入します)

秋季講演会において講演 (学会にて記入します)

©日本船舶海洋工学会

3.2 カムを用いたIBマグネットの提案

新たな磁気吸着力補償機構としてカムを用いたIBマグネットを提案する。Fig.4のように $f(x)$ で表されるカム形状を最適なものにすることでどのような磁石とバネの組み合わせでも最適な補償が可能であるという仕組みである。以下に設計法を示す。

1. カムフォロアの半径を0とするとつり合いの式より

以下の式(2)が導出される。 $F_m(x), F_s(x)$ は磁石の吸引力とばね弾性力を表す。

$$f'(x) = \frac{F_s(x)}{F_m(f(x))} \quad (2)$$

2. 式(2)はカムフォロアの半径を考慮していないことから、解を数値計算した後に以下の式(3)に従って解の点群を移動することでカムフォロア半径を考慮したカム形状を得ることができる。

$$\begin{cases} Q_x = P_x + r \sin \theta \\ Q_y = P_y - r \cos \theta \\ \theta = \arctan f'(x) \end{cases} \quad (3)$$

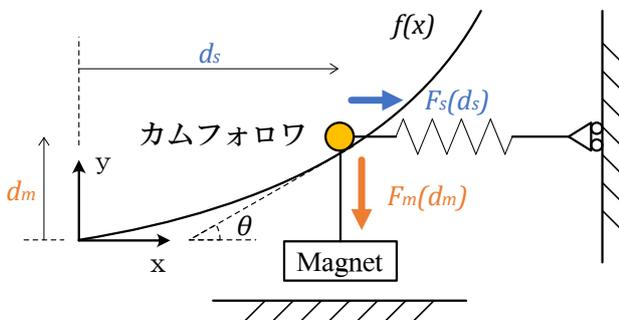


Fig.4 A proposed new IB Magnet model.

4. 実験

Fig.5に示すIBマグネットを汎用のバネとスライド機構および3Dプリンターで作成した。バネは伸びに対して力はほぼ一定の定張力バネを用い、Fig.4ではカムフォロアに対してバネを作用させていたが、左右に配置したカムを中央に引き寄せるようにバネを作用させ、カムフォロアの直径が80[mm]と大きくなったためカムと接触する部分だけを残して不要な部分を削除した扇形のカムフォロアを用いた。実際に動作させると吸着力24[kgf]に対し、その脱着に要する力は4[kgf]まで低減したものの、理論上の0[kgf]での着脱とはならなかった。

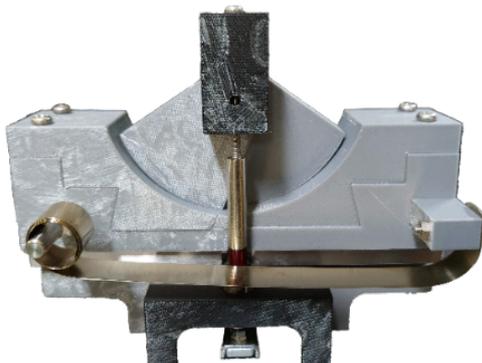


Fig.5 Magnet mechanism prototyped in the experiment.

5. 考察

磁気吸着ユニットの着脱に要する力が設計通りの0[kgf]にならなかった原因を探るため、寸法誤差等の影響を考え、カム形状・カムフォロア形状に誤差を与えたうえで式(2),(3)を逆算することで補償力のシミュレーションを行った。Fig.6は各値に5[%]ほどの誤差を与えた場合のシミュレーション結果である。補償力と磁石の吸着力の誤差が3[kgf]ほど生じるという結果になり、寸法誤差の影響を大きく受けることが分かった。また、これはカム形状の正確性が需要であることを意味しており、機構のひずみやカム機構への塵などがこのIBマグネット機構に思いのほか大きな不具合をもたらす可能性がある。今後高精度で剛性の高い部品を使って操作に必要な力が0に近づくか実験する必要があるが、現状でも最も小型な汎用空気圧シリンダーで本ユニットを着脱可能であることが分かった。

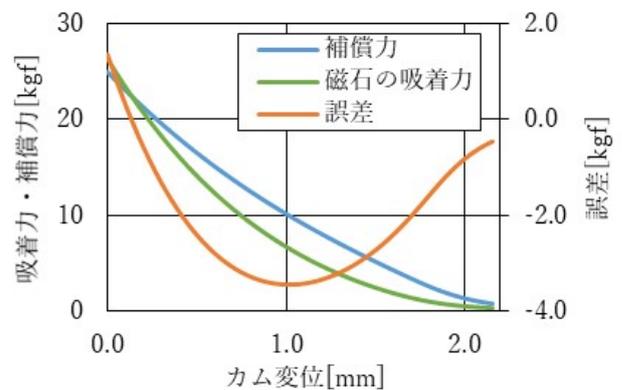


Fig.6 Balanced force error when a 5% error occurs in the cam shape.

参考文献

- 1) 広瀬茂男, 今里峰久, 工藤良昭, 梅谷陽二: 内部力補償型磁気吸着ユニット, 日本ロボット学会誌3巻1号, pp.10-19, 1985.
- 2) 鈴木真崇, 鶴清, 広瀬茂雄: 内部力補償型磁気吸着ユニットのための非線形スプリングと機構の設計, 日本ロボット学会誌 Vol.27 No.4, pp.10-19, 2009.
- 3) 清水杜織, 藤本敏彰: 磁気復元力生成により内部補償を実現するマグネット機構, 計測自動制御学東北支部第313回研究集会資料, 資料番号313-5, 2017.

付 録

本磁気吸着ユニットは、九州大学より特許出願中である(特願2021-147521)。