外部磁界で駆動する科学教育用水中マイクロロボットの開発

非会員 榮木 天* 正員 本田 崇*
正員 山崎 二郎*

Development of Magnetically Driven Swimming Micro-robot for Science Education

Takashi Eiki*, Non-member, Takashi Honda*, Member, Jiro Yamasaki*, Member

A dolphin-type swimming micro-robot has been developed for science education. This micro-robot, approximately 60 mm in length, consists of a rigid body balanced with a float, and a propulsive mechanism including a magnet and an elastic fin. The mechanism features unique design based on biomimetics and a simple structure for easy construction. When external alternating magnetic fields are applied, the magnet oscillates angularly due to magnetic torque and then the caudal fin can produce a thrust. The micro-robot can swim at over 30 cm/sec under alternating magnetic fields of 4 kA/m at 20 Hz. Results of a handicraft class at an elementary school have demonstrated that the micro-robot developed in this study is useful for science education.

キーワード：外部磁界，磁石，科学教材，マイクロロボット

Keywords: external magnetic field, magnet, science education, micro-robot

1. はじめに

近年，青少年の科学離れが深刻な社会問題として議論されるようになった。科学離れの原因は様々考えられるが，とくに工業製品のブラックボックス化が進んだことや，テレビゲーム等による仮想現実の世界が日常化したことなどから，青少年の原理を知りたいという欲求が希薄になったことが一因として指摘されている。

青少年の科学離れに歯止めをかけるため，平成 14 年度施行の新学習指導要領で導入された総合学習の時間や週五日制で休日となった土曜日を活用し，科学のおもしろさを伝える取り組みが行われている。なかでも大学や企業の出前講義に期待が集まっており，先端技術を楽しみながら学ぶことのできる科学教材のニーズは今後高まると予想される。

ここで磁気をテーマとした科学教材を見てみると，直流モータの原理など昔から様々なものがある。しかし，基礎的な原理を教えるにはよいが，先端的な磁気工学を紹介し，科学技術に夢を持たせるような教材は少ない。

筆者らは，これまでに内蔵した永久磁石を外部磁界により駆動する磁気マイクロマシンの開発を進めてきた。それらはバッテリーレス，かつケーブルレスで駆動が可能なた

め，構造が単純で作製も容易である。このなかで配管内泳動型マイクロロボット⁽¹⁾や，体内埋込型用マイクロポンプ⁽²⁾は，水中における弾性板のたわみを利用しており，生物的な柔らかい動きを特徴とする。もし，これらマイクロマシンにアミューズメント性を付与することができれば，新しい科学教材として利用できると期待される。

そこで本研究では，外部磁界で駆動可能な磁気マイクロマシン技術をもとに，科学教材用のイルカ型水中マイクロロボットの開発を行った。本論文では，その作製方法を含めた構造と動作，さらにそれを使った工作教室の実施結果について述べる。

2. 開発指針

マイクロロボットの動作環境は水中とし，水面に対して垂直方向の磁界で駆動するとした。推進機構には，筆者らが開発を進めている配管内泳動型マイクロロボットやマイクロポンプの可動子と同様，永久磁石に働く磁気トルクで弾性板を揺動させる方式を採用した。

また，科学教材という観点から，以下の点を開発指針に加えた。

(i) 平成 14 年度施行の文部科学省学習指導要領⁽³⁾によると，磁石の性質は小学 3 年生，電流と電磁石に関しては小学 5・6 年生で学習する。そこで，教材の対象を小学校高学年とする。

(ii) 簡単な補助で作製できるように構造や作製手順を簡略化する。

* 九州工業大学大学院工学研究科機能システム創成工学専攻
〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1

Department of Applied Science for Integrated System Engineering,
Kyusyu Institute of Technology
1-1, Sensuicho, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550

- (iii) 身近な材料を使って安価に作製できるようにする。
- (iv) 視覚的に速さを感じられるように、20 cm/sec 以上の泳動速度を出せるようにするとともに、速度を競うなどのゲーム性を持たせ、楽しみながら学べるようにする。
- (v) マイクロロボットがコイルに隠れてしまわないように、コイルと水槽のレイアウトを工夫する。

3. 素子構成と動作原理

3・1 素子構成 図1に開発したマイクロロボットの試作例を示す。胴体部は、内部に浮きとなる発泡素材と推進部の取り付け用ガイドを挿入したプラスチックのペンキャップである。推進部は、高さ方向に着磁された円柱状NdFeB磁石 ($\phi 5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$)、細長い形状の弾性板、三角形の尾鰭から構成され、回転軸を介して胴体部と結合されている。胴体の上部後方の発泡素材には、マイクロロボット全体の浮力のバランスを取るだけでなく、推進部の回転が行き過ぎないようにするリミッターの働きがある。この点について次節の動作原理で詳述する。弾性板には、この例ではポリイミドフィルム (厚さ $75 \mu\text{m}$)、尾鰭にはより弾性係数が小さいポリエチレンフィルム (厚さ $100 \mu\text{m}$) を使用した。

実際の工作教室ではフィルムの材質や形状は子供たちが自由に設定できるようにする。泳動速度はフィルムの材質や形状に強く依存するため、個体による速度差が生じる。その原因を考察することも期待している。なお、本マイクロロボットの推進部における形状や材質の泳動特性に及ぼす影響については本論文の目的からはずれるため、別報で報告する予定である。

3・2 作製手順 具体的な作製方法について述べる。まず、材料として、ペンキャップ、NdFeB磁石 ($\phi 5 \times 3 \text{ mm}$)、アルミニウム線 ($\phi 1 \text{ mm}$)、アルミニウムパイプ ($\phi 2 \text{ mm}$)、発泡素材、ポリイミドフィルム (厚さ $50 \sim 100 \mu\text{m}$)、ポリエチレンフィルム (厚さ $100 \mu\text{m}$ 程度) を用意する。これらのフィルムはOHP用フィルム等でも代用が可能である。工具としてペンチ、ニッパー、カッター、ピンセットを、接着剤として瞬間接着剤とエポキシ系接着剤を用意する。

図2にマイクロロボットの作製手順を示す。はじめに胴体部について説明する (同図 (a))。ペンキャップを30 mm程度の長さで切断した後、その中にちょうど収まるよう成形した発泡素材を挿入し、接着する。このときペンキャップ内側の左右に推進部の取り付けガイドとなるアルミニウムパイプ (長さ10 mm) 2本を固定する。続いて、胴体の上部後方に発泡素材 (長さ10 mm程度) を接着するが、発泡素材が磁石の回転を妨げないようにクリアランスに注意する。

次に、推進部について説明する (同図 (b))。まずNdFeB磁石の平面側の中心に長さ5 mmのアルミニウムパイプを接着する。そのパイプの上に図のような形状に切り出したポリイミドフィルムとポリエチレンフィルムを順に接着していく。その後、アルミパイプに回転軸となるアルミニウム線を通し、両側を図のように直角に折り曲げる。

図1 素子構成

Fig. 1. Structure of micro-robot.

図2 作製工程

Fig. 2. Construction process.

最後に、胴体部のガイドに推進部のアルミニウム線を接続して完成となる (同図 (c))。

3・3 動作原理 図3に推進部の動作原理を示す。水面に対し垂直方向に磁界 H を印加すると、磁気モーメント M を有する磁石には磁気トルク $T (= M \times H)$ が働き、回転軸を中心に回転運動をする。交流磁界を印加すれば磁石の動きは回転振動となり、弾性板と尾鰭は揺動する。その結果、尾鰭は水を後方へ押し出し、その反作用で推力が発生する。

なお、この回転振動には工作を容易にすることから復元力を発生するバネを設けていないため、このままでは磁石

図3 動作原理

Fig. 3. Actuation of propulsive mechanism.

図4 泳動の様子

Fig. 4. Swimming behavior.

の磁化と磁界が平行になる姿勢（推進機構が鉛直方向を向いた姿勢）で運動が停止する。そこで、胴体上部後方に設けた発泡素材を回転角抑制のリミッターとして使用した。すなわち、尾鰭が上方に振れたときには弾性板が、尾鰭が下に振れたときには磁石が、それぞれ発泡素材に衝突し両方向のリミッターとして作用する。

図4に、磁界 4 kA/m 、周波数 20 Hz の条件で励磁したときのマイクロロボットの泳動の様子を 10 msec 毎に示す。ここではデモンストレーション用に、イルカの模型を加工したものを胴体に用いた。図3に示したように、磁石の動きと共に弾性板と尾鰭がたわみ、前進している様子が見える。また、胴体上部後方の発泡素材がリミッターとして働いている様子も確認できる。

4. 駆動用コイルと水槽の構成

2章の開発指針で述べたように、マイクロロボットがコイルの陰にならないよう、さらにゲーム性を持たせるようなコイルと水槽のレイアウトにしなければならない。そこで本研究では、図5(a)に示すような周回可能で、上方からマイクロロボットの動きを観察できる水槽を考案した。水槽の寸法は、直線部が 30 cm 、コーナーの曲率半径が 15 cm 、深さが 5 cm 、幅が 4 cm である。励磁コイルは、同図(b)の断面図のように、水槽の両側に周回方向に沿ってホルマール銅線 ($\phi 2 \text{ mm}$) を各 100 ターン巻いて構成した。内側と外側のコイルに逆向きの電流を通電すると、水槽中央部には水面に対し垂直方向の磁界が発生する。 5 A で約 4 kA/m

(a) 外観

(b) 断面図

図5 水槽コイル

Fig. 5. Oval water tank wound with coils.

の磁界を発生することが可能である。

5. 泳動特性

工作教室を行うにあたり励磁条件を予め設定しておく必要がある。そこで、図1で示したマイクロロボットを、図5の水槽で泳動させ、一周毎の周回時間をレーザセンサで計測することで平均泳動速度を算出し評価した。図6に磁界強度を変えた場合の泳動速度と励磁周波数の関係を示す。泳動速度は10～30 Hzの範囲ではほぼ単調に増加する傾向が見られ、磁界が強いほど速くなった。3.2 kA/m以上では目標の20 cm/sec以上を満足したが、4 kA/mを越えると磁界の増加率ほど速度が増加しなくなり頭打ち傾向になった。これは、磁界が大きくなると図4のように推進部の振動の振幅がリミッターにより制限されること、さらにローリング(横揺れ)が発生し泳動が不安定となるためである。ローリングの発生原因は、高速度ビデオカメラによれば尾鰭が負荷に耐えられず捻れを生じ、左右方向のバランスを崩しているためと考えられる。

また、周波数に対しては10～20 Hzではイルカのような生物的な動きであるが、25 Hz以上ではスクリューを使った泳動のように単調な動きとなった。

以上の結果から、工作教室で行う泳動実験では、励磁条件を4 kA/m、20 Hzと設定することとした。

6. 工作教室の実施

6.1 工作教室の内容 開発したマイクロロボットの科学教材としての有用性を確認するために、実際に小学生を対象とした工作教室を行った。以下に実施手順を説明する。

(i) はじめに全員を集合させ、図5のコイルと磁石を使って動作原理を説明する。

① 磁界の中の磁石はどのような動きをするか、磁界の方向を変えると磁石はどうかを演示する。

② 交流電流、交流磁界とはどのようなものか、周波数

図6 磁界を変えた場合の周波数と速度の関係
Fig. 6. Relation between frequency and velocity.

を変えて磁石の動きを演示する。

③ 交流磁界を受けるとマイクロロボットはどのように動くのか、どうして進むことができるのかを説明する。

④ 図3を使ってマイクロロボットの構造と作製手順を説明する。

(ii) 児童2～3名に対して補助者1名を配置し、グループに分かれ作製する。この際、必要に応じて図鑑等で魚の写真を見せ、尾鰭による推進のイメージを持たせる。

(iii) 作製したマイクロロボットを一人ずつ水槽で泳がせ周回時間を測定する。このとき黒板等に周回時間を記入することで競争心を高める。時間に余裕があれば改良を加え、より速くなるように工夫させる。

(iv) 最後にアンケートを取り、結果を次回に活かす。

6.2 実施結果 工作教室は、北九州市内の小学校の5、6年生に対し2回行った。一度の工作教室の定員は12名で、実施時間は2時間である。補助者は6名で、全て大学4年生と大学院生である。児童の反応はおおむね好評で、熱心に取り組んでいた。

図7に工作教室終了後に取ったアンケート結果の一部を示す。第一問の工作教室がおもしろかったかの質問には、24人中20名がとてもおもしろかったと答えており、ゲーム性を持たせた効果があったと思われる。第二問の原理は理解できたかの質問には、ほとんどの児童が理解できた

図7 アンケート結果
Fig. 7. Results of questionnaire.

ようで、対象とした小学校高学年が適正であったことがわかる。第三問の工作は簡単だったかとの質問は回答がばらつき、工作の得意不得意の差が出たようだった。この点は反省事項で、より作製しやすい構造にするなど今後工夫していきたい。

また、自由感想文の中には、「電気を使って磁石の動きを作り出し、その力でロボットを動かすことはとてもすごいと思った。電磁石の働きを使って、他のことにも役立てたいと思う」といった頼もしい感想もあり、本教材の教育効果が高いことを確信した。

しかし、いくつか問題点も指摘されており改善していく必要がある。例えば、専用のコイルと電源が必要であるため工作教室終了後は遊べなくなる。この点については、磁界強度が小さくなるが乾電池で動作できるような小さなコイルを現在作製中である。また、現在は磁石同士が強く干渉するため複数個駆動ができない。この点については素子や水槽の構造を見直すことで対処できないか検討していく予定である。

7. ま と め

外部磁界で駆動する水中マイクロロボットを使った新しい科学教材を開発し、本教材を使用した工作教室を実施した。電流による磁界の発生、磁界中の磁石の動きといった電磁気学の基礎を視覚的に理解できるだけでなく、先端技術であるマイクロロボットや新しい概念であるバイオミメティクス（生物模倣）についても学ぶことができ、教育効果が高い科学教材であると考えている。

今後は、本マイクロロボットの推進部における磁気トルクと負荷トルクの関係、形状や材質の泳動特性に及ぼす影響について学術的な側面から本マイクロロボットを考察する予定である。

謝 辞

本研究の一部は、セキスイ自然に学ぶものづくり研究助成及び中山隼雄科学技術文化財団研究助成によるものであり、関係各位に感謝いたします。

(平成 16 年 9 月 21 日受付, 平成 16 年 12 月 13 日再受付)

文 献

- (1) T. Honda, T. Sakashita, K. Narahashi, and J. Yamasaki: "Swimming Properties of a Bending-Type Magnetic Micro-machine", *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol.25, p.1175 (2001-4) (in Japanese)
本田 崇・坂下智亮・檜橋幹一郎・山崎二郎:「屈曲型マイクロマシンの泳動特性」, 応用磁気学誌, 25, p.1175 (2001-4)
- (2) K. Kondou, T. Honda, J. Yamasaki, and S. Ishii: "Considerations on Driving Magnetic Fields for an Implantable Micro-pump", *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol.26, p.612 (2003-4) (in Japanese)
近藤健太・本田 崇・山崎二郎・石井史郎:「体内埋め込み用マイクロポンプの駆動磁界に関する一考察」, 応用磁気学誌, 26, p.612 (2003-4)
- (3) 文部科学省告示第 75 号, 小学校学習指導要領, 平成 14 年施行

榮 木 天 (非会員) 2001 年鹿児島工業高等専門学校電気工学科卒業。2003 年九州工業大学工学部電気工学科卒業。九州工業大学大学院機能システム創成工学専攻在学。

本 田 崇 (正員) 1991 年東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)トーキン入社。1996 年東北大学工学研究科博士課程修了。1997 年九州工業大学講師を経て、2000 年同助教授、2003 年同大学機能システム創成工学専攻助教授、現在に至る。専門は磁気応用。工博。

山 崎 二 郎 (正員) 1971 年九州大学工学部電気工学科卒業。1976 年同大学助手、1983 年九州工業大学講師、助教授、1988 年同大学電気工学科教授、2003 年同大学機能システム創成工学専攻教授、現在に至る。専門は磁性材料。工博。