スパイラル形状を基本とした泳動型磁気マイクロマシンの泳動特性

Swimming Properties of Spiral-Type Magnetic Micro-machines

仙道雅彦・島崎克彦・石山和志・井上光輝・荒井賢一

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

M. Sendoh, K. Shimasaki, K. Ishiyama, M. Inoue, and K. I. Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aobaku, Sendai 980-8577

(1998年10月15日受理, 1998年12月4日採録)

The fundamental swimming properties of spiral-type magnetic micro-machines were investigated in detail by constructing four micro-machines with different structures. These micro-machines are able to swim in various liquids with kinematic viscosities ranging from 1.37 to 1000 mm²/s. This result suggests that the micro-machines have potential medical uses. In particular, they can swim against the stream in a liquid whose the velocity is comparable to the that of venous blood.

Key words: micro-machine, swimming, rotational magnetic field, Reynolds number

1. はじめに

最近, 従来の機械では困難であった微小空間や極限領域で動作可能な, マイクロマシンと呼ばれる微小機械の研究が盛んに行われている. マイクロマシンの応用が最も期待されている分野に医療技術への応用がある¹⁾. マイクロマシンを用いた診断・治療は, 自らが血管等を移動し患部だけの手術を正確に行なうことができるので, 次世代の低侵襲医療技術としてその開発が大いに期待されている.

医用マイクロロボットにおいて, その移動手段として, 泳動機構の検討が不可欠である. それは, 生体の主成分が体液や血液といった液体であることによる.

泳動機構の推進方法は, 反動力推進と抵抗力推進に大別することができる. 反動力推進は流体の慣性力を利用した推進方法で, 後方に正味の運動量を与え, その反作用で推進する. 抵抗力推進は機構の表面で流体から受ける粘性力を利用した推進方法である²⁾. このような推進方法の違いを把握する際, 慣性力と粘性力の比を表わすレイノルズ数 (Re) が重要なパラメータとなる.

$$Re = LU/\nu \quad (1)$$

(1)式で, L は物体の代表長さ, U はその代表速度, ν は流体の動粘性係数である. 例えば, 魚類や水性哺乳類において Re は $10^4 \sim 10^8$ であり, 体長が 1mm 以下の鞭毛生物など

は $Re < 1$ である³⁾.

我々はこれまで, 磁気力を駆動源とするさまざまな移動形態のマイクロマシンを提案し, その基礎的な特性を詳しく調べてきた^{4)~8)}. この中で, スパイラル形状の泳動型マイクロマシンは生体内での駆動に最も都合が良いといえる. これは, このマイクロマシンが液体中ばかりでなく生体組織に近い硬さを持つゼリー状の媒質中でも泳動可能であることによる. 我々は鞭毛生物の運動を模倣して, スパイラルと微小磁石で構成したシンプルな構造を持つ磁気マイクロマシンを作製し, $Re < 1$ の条件下で優れた泳動特性を持つことを示した⁶⁾. しかし実際の医用マイクロマシンへの応用を考えた際, かならずしも $Re < 1$ の条件が満たされているわけではなく, また医薬品やセンサ素子などの積載物を運ぶことが要求される. そこで本研究では, より複雑な構造を持つ磁気マイクロマシンを作製し, 広範な Re 条件の下での泳動特性や積載能力を詳細に調べた.

2. 素子構成

Fig. 1 に, 本研究で作製した 4 種類のマイクロマシンの概略図を示す. それぞれのマイクロマシンの基本形状となるタイプ A のマイクロマシン (Fig. 1(a)) は, 直径 0.15 mm のタングステン線をスパイラル形状に加工したブレードに, 円筒状のセラミック胴体を挿入した構造を持つ. 胴体の両端の穴を塞ぐように円盤状の SmFeN 磁石を配置し, エボキシ系接着剤で固定した. 胴体内は空洞になっているため, 積載物の搭載が可能である. このマイクロマシン作成後, 両端の SmFeN 磁石の磁化が面内同方向を向くように着磁した. スパイラルの形状は, 直径を 1.4 mm とし, 波長はピッチ角がもっとも推進効率の良い 45 度⁶⁾ となるように 4.4 mm とした. 磁石の最大エネルギー積は 6.3 MGOe, 残留磁束密度は 0.64 T である.

タイプ B (Fig. 1(b)) とタイプ C (Fig. 1(c)) のマイクロマシンは, 積載能力について検討を行ったものである. タイプ B は, タイプ A のセラミック胴体内に, 銅線あるいは白金線を詰め込んで積載重量が泳動速度特性に与える影響を検討したものである. マシン総重量は, タイプ A の 46.2 mg

に対して、銅線を封入したものが 70.6 mg、白金線を封入したものが 106.7 mg となっている。銅線と白金線は、いずれも直径 0.5 mm、長さ 15 mm で、セラミック胴体の内部空間と同程度の体積であるため、泳動中に内部負荷が移動することはない。

タイプ C は、タイプ A のセラミック胴体長を 10 mm、5 mm と短くして、積載容量が泳動速度特性に与える影響を検討したものである。

タイプ D (Fig. 1(d)) のマイクロマシンは、推進能力の高いスパイラル構造について検討を行ったものである。このマイクロマシンはスパイラルの表面積を広くとるために、外径 4 mm、内径 0.5 mm、長さ 15 mm のアルミのパイプをスパイラル高さが 1 mm となるように削り出したモノコック構造を持つ。胴体の全長とその両端に配置した磁石は、上述の 4 種類のマイクロマシンと同じであり、スパイラルの波長は、加工上の制約からピッチ角が 63 度となる 5 mm とした。

3. 実験方法

(1) 式から、液体の動粘性係数を変化させることにより、同一形状のマシンを用いた場合でも Re 条件の異なる環境を実現することができる。そこで動粘性係数が $1.37 \text{ mm}^2/\text{s}$ のエタノールおよび、 $10 \sim 1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ の種々のシリコンオイルを用いてマシンの泳動速度特性を調べた。

これらの液体で満たされた長さ 150 mm、内径 16 mm の試験管内でマイクロマシンを駆動した。マイクロマシンは、スパイラルの軸に対して垂直な面内回転磁界の印加により、同期モータの原理で磁石が回転し、マシンは推進する。このときの推進速度を、前進後退の平均速度から算出した。

4. 実験結果と考察

4.1 タイプ A のマイクロマシン

Fig. 2 に、タイプ A の泳動速度と励磁周波数との関係を示す。印加磁界強度は 10, 30, 50 Oe とした。粘度の低い液体中、すなわち Re が大きい環境でマシンの泳動速度は励磁周波数の 2 乗に比例して増加し、印加磁界に依存したある周波数 (図中の矢印。以後、脱調周波数と呼ぶ) 以上で回転磁界との同期から外れ泳動は停止した。一方、粘度の高い液体中、すなわち低 Re 環境での泳動速度は、励磁周波数の 1 乗に比例して増加し、粘度が低い液体の場合と比べて脱調周波数が低下した。この場合、同期から外れた後は急激に泳動速度は減少した。

泳動媒体の粘性で泳動特性が変化した原因は、マシンが流体から受ける抵抗が Re によって変化したためと考えられる。また、粘性の高い液体で脱調周波数が低下する原因は、マシンの受ける負荷トルクが増大するためである。いずれにしてもタイプ A の磁気マイクロマシンは、幅広い Re 条件 (およそ $0.1 < Re < 1000$) の下で十分な推進能力を持つと

Fig. 1 Schematic view of magnetic micro-machines.

いえる。

4.2 タイプ B、タイプ C の泳動特性

4.1 の結果を踏まえ、タイプ B とタイプ C のマイクロマシンを用いて、積載能力の検討を行った。印加磁界強度は 50 Oe に固定した。Fig. 3 にマシン質量をパラメータとした、泳動速度と励磁周波数の関係を示す。積載物による重量の増加により、脱調周波数が若干低周波側にシフトするが、泳動特性に大きな変化は見られない。特に、液体の粘性が高いほど、脱調周波数は積載負荷にあまり依存しない傾向を持つ。

Fig. 4 に胴体長さをパラメータとしたタイプ C の泳動特性を示す。胴体長が短くなることにより、グラフの傾きに対応する 1 回転あたりの推進距離が長くなり、脱調周波数は高周波側にシフトした。これはマシン表面積が小さくなると流体から受ける粘性力による抵抗が減るためである。

一般にマシンの寸法が小さくなると、スケール則により、体積に比例する重力よりも、その面積に比例する粘性力の効果が大きくなるとされる。実験結果からも分かる

Fig. 2 Swimming velocity of typeA vs. the driving frequency.

Fig. 3 Swimming velocity of typeB vs. the driving frequency.

Fig. 4 Swimming velocity of typeC vs. the driving frequency.

ように、積載能力を持つマイクロマシンを設計するには、マシンの重量よりも表面積に配慮した設計が必要といえる。

4.3 タイプDのマイクロマシン

タイプDのマイクロマシンを用いて、推進能力の高いブレード形状について検討した。4.2と同様に印加磁界強度は50 Oeとした。Fig. 5にタイプDの泳動特性をタイプAとともに示す。タイプDのマイクロマシンは、タイプAと比べて、一回転あたりの泳動距離は長くなったが、脱調周波数は4分の1以下と低いため、粘性の高い液体中ではほとんど泳動できない。

マイクロマシンのスパイラル表面積を大きくすることで、低周波数で大きな泳動速度を得ることができた。反面、表面積の増加により、流体から受ける負荷トルクが大きくなり、脱調周波数が低下した。このことは、移動環境に応じたブレード構造の設計が必要であることを示唆している。また、粘性が高い場合 (Re が小さい場合)、ブレード表面積は小さい方がよい。

4.4 泳動速度の Re 依存性

マイクロマシン(タイプA)の脱調周波数と回転運動の Re の関係をFig. 6に、最高速度と Re の関係をFig. 7に示す。最高速度は、各液体中での脱調周波数における泳動速度で

ある。Fig. 6より、脱調周波数は $Re < 10$ の領域では Re に比例して増加し、それ以上の範囲では飽和の傾向を示した。このことは、高い Re 条件では比較的高い周波数の回転境界にマシン回転が追従できないことを意味している。またFig. 7から最高速度は脱調周波数の場合と同様の傾向を示した。このことから、マイクロマシンは高い励磁周波数に追従できれば泳動速度が速くなることが分かる。

これらの結果から、今回作製した磁気マイクロマシンが幅広い Re 条件(0.1~1000)の下で泳動可能であることが明らかとなった。

4.5 流水中でのマイクロマシンの泳動

これまでの結果を踏まえて、実際に水が流れているガラス管の中でマイクロマシンを駆動させた。デジタル制御のマイクロポンプを用いて内径8 mmのガラス管に水を流し、マイクロマシンの推進速度が流速とつりあって静止するときの水の流速を調べた。印加磁界強度は50 Oeとした。Fig. 8に水の流速とマイクロマシンの駆動周波数の関係を示す。同図には、主な静脈の流速を破線で示した。この図から磁気マイクロマシンは、積載物を搭載した状態で、静脈中を移動することができることが分かる。

Fig.5 Swimming velocity of the type-D with driving frequency.

5. まとめ

種々の形状の磁気マイクロマシンを作製し、その泳動速度特性を詳しく調べた。その結果、スパイラル形状を基本とした磁気マイクロマシンが、幅広い Re 条件 ($0.1 < Re < 1000$) で良好な推進能力を示した。また、医用マイクロロボットは、移動だけではなく、医薬品や医療用器材の搭載が必須となるが、今回作製した磁気マイクロマシンは、積載物を搭載しても十分駆動可能であり、さらに静脈程度の流速に逆らって泳動可能であるなど、医用応用の観点から極めて有望といえる。

マイクロマシンの形状は、生体内での利用環境に応じて形状を工夫する必要がある。我々は、今回の実験結果をもとにマシン最適設計を目的として、有限体積法を用いた流体解析により、マイクロマシン泳動特性のシミュレーションを行っている。

謝辞 微小磁石を提供していただいた、TDK (株) に感謝します。

本研究の一部は医薬品副作用障害救済・研究振興調査機構「保険医療分野における基礎研究振興事業」により行ったものです。関係者各位に感謝します。

Fig. 6 Out-of-step frequency vs. the Reynolds number (rotation motion).

Fig. 7 Maximum velocity vs. the Reynolds number (propulsive motion).

Fig. 8 Stream velocity of water vs. the excitation frequency for driving machines.

文献

- 1) 常味孝幸：機械の研究，**46**，65 (1994)。
- 2) 福田敏男，川本敦史，新井史人，松浦英雄：日本機械学会論文集 (C 編)，**60**，204 (1994)。
- 3) 神部 勉：日本物理学会誌，**33**，484 (1978)。
- 4) K. I. Arai, W. Sugawara, K. Ishiyama, T. Honda, and M. Yamaguchi : *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3758 (1995)。
- 5) 本田崇，島崎克彦，荒井賢一：日本応用磁気学会誌，**20**，541. (1996)。
- 6) 本田崇：東北大学博士学位論文(1997)。
- 7) K. Shimasaki, M. Inoue, K. I. Arai and T. Honda : *IEEE Trans. Magn.*, **34**，2096(1998)。
- 8) 島崎克彦，井上光輝，荒井賢一，本田崇：日本応用磁気学会誌，**22**，953 (1998)。