極低レイノルズ数における磁気マイクロマシンの泳動

Swimming of a Spiral-Type Magnetic Micro-Machine under Very Low Reynolds Number Conditions

仙道雅彦・山崎彩・石山和志・井上光輝*・早瀬敏幸**・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)

*豊橋技術科学大学、愛知県豊橋市天伯町雲雀丘 1-1 (〒441-8580)

**東北大学流体科学研究所、仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, M. Inoue*, T. Hayase**, and K. I. Arai

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

*Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi 441-8580, Japan

**Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aobaku, Sendai 980-8577, Japan

(2000年10月6日受理, 2001年1月24日採録)

The swimming properties of a magnetic micro-machine with a spiral structure were examined experimentally and theoretically under very low Reynolds number conditions. It was demonstrated that the micro-machine could swim in a highly viscous fluid with a Reynolds number of 10^{-7} . This result suggests that the micro-machine has a great potential for medical applications. It was found that the optimum blade shape of the micro-machine varied with the Reynolds number condition.

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

1. はじめに

現在、マイクロマシン技術に関する研究が盛んに行われており、特に医療技術への応用が期待されている¹⁾。磁気マイクロマシンは、エネルギー供給や操作のためのケーブルを必要としないことから、生体内で診療を行う医用マイクロロボットのアクチュエータとして非常に魅力あるものといえる。医用マイクロロボットの実現において、生体の主成分が血液や体液といった液体であることから、泳動機構の検討が不可欠である。泳動機構を検討する上で重要なパラメータとして式(1)で表されるレイノルズ数 Re がある²⁾。

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

ここで、 L は物体の代表長さ、 U は代表速度、 ν は液体の動粘度である。イヌの血流をレイノルズ数で表すと $Re = 0.003 \sim 2500$ と非常に幅広い値を取る³⁾。また、バクテリアなどの微小生物の泳動をレイノルズ数で表すと小さいもので 10^{-6} 程度であることが知られている⁴⁾。我々は先に、らせん構造をもつ泳動型磁気マイクロマシンを開発し、これが $Re = 0.1 \sim 1000$ の範囲で泳動可能であることを、および、ワイヤレスで推進方向の制御が可能であることを示した^{5,6)}。さらに、このマイクロマシンの泳動特性を解析する手法を確立し、動粘度 $5 \sim 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中におけるらせん構造の

最適化を行った^{7,8)}。しかし、前述したように血流の Re が最小で 10^{-3} オーダであること、あるいは生体組織のように粘性の高い物質中を移動することなどを考えると、泳動型磁気マイクロマシンに関してさらに低い Re での泳動特性を調べる必要があるといえる。本研究では、高粘性の液体を用いて極低 Re の環境を模擬し、磁気マイクロマシンの泳動特性を調べた。さらに、極低 Re における、らせん構造が泳動特性に与える影響について解析を行った。

2. 実験および解析方法

Fig. 1 に、本研究で検討を行った、磁気マイクロマシンの概略図を示す。このマイクロマシンは、駆動用の NdFeB 磁石とセラミックパイプからなる胴体、およびらせん状に加工されたブレードから構成される。このマシンの外観的な形状は先に検討を行ったマシン⁹⁾と同一であるが、粘性の高い液体中ではより大きな駆動力が必要となるため、磁石の材質を変え、さらに体積を大きくした。磁石は直径方向に着磁されており、その残留磁束密度は 9.8 kG 、最大エネルギー積は 21.4 MGOe であった。高粘性のシリコンオイルで満たされた、内径 16 mm 、長さ 150 mm の試験管にマシンを封入し、これを 2 軸ヘルムホルツコイルの中央に配置する。その後、マシンの軸に垂直な面内回転磁界を印加すると、マシンは磁気トルクにより回転磁界に同期して回転し、液体中を推進する。このときの泳動速度と印加磁

Fig. 1 Schematic view of a magnetic micro-machine.

界の回転周波数との関係を測定した。実験には Table 1 に示される、3 種類のシリコンオイルを用いた。

これに加えて本研究では、我々の確立した本マイクロマシンの解析手法が極低 Re 環境にも適用可能かどうか検討を行った。この解析は、マシン周辺の液体の流れを有限体積法により数値計算し、マシンが流体から受ける力および泳動速度を算出するものである⁷⁾。解析モデルを Fig. 2 に示す。円柱座標系(r, θ, z)において、らせん方向に周期境界条件を考え、 z 方向にらせん 1 ピッチ分、 θ 方向に $\Delta\theta$ を解析領域とした。また、 r 方向中心から外壁までの距離 R_2 は、境界層厚さを表しており、本解析ではフィッティングパラメータとなっている。

3. 実験結果と解析結果の比較

Fig. 3 に動粘度 1×10^4 および $5 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイル中における、印加磁界の回転周波数に対する、マシン泳動速度の測定結果を示す。印加磁界強度は 100 Oe とした。このとき、マシンの発生する磁気トルクは最大で約 $66 \mu\text{Nm}$ になる。同図には、計算結果を実線で示してある。泳動速度は周波数に比例して増加した。また、図中矢印の周波数を超えると、マシン回転が外部磁界の同期からはずれるため、泳動速度は急激に低下した。以後、この周波数を脱調周波数と呼ぶことにする。計算において、マシンの回転数は励磁周波数に等しいと仮定しているため、脱調周波数以下で実験結果と計算結果はよく一致しているといえる。 $5 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中における泳動を Re で表すと、 10^{-7} オーダとなる。したがって、本マイクロマシンは $10^{-7} \sim 10^3$ という非常に幅広いレイノルズ数条件下で泳動可能

Fig. 2 Simplified model of the magnetic micro-machine used in the analysis.

Table 1 Three kinds of silicone oil used in the study.

Kinematic viscosity, $\nu \text{ (mm}^2/\text{s)}$	Density (10^3 kg/m^3)
1×10^4	0.975
1×10^5	0.976
5×10^5	0.976

であることが実験的に示された。

液体の動粘度と脱調周波数の関係を調べた結果を Fig. 4 に示す。同図において、計算によって求められる負荷トルクが $66 \mu\text{Nm}$ になるマシン回転周波数を脱調周波数の計算結果として示している。 $Re < 1$ の環境において、マシンが流体から受ける負荷トルクは、マシン回転周波数に比例して大きくなる⁷⁾。また、マシンが流体から受ける粘性抵抗は、液体の粘度に比例して大きくなる。従って、脱調周波数は、 ν の -1 乗に比例した。計算結果と実験結果はよく一致しており、我々が先に確立した解析手法が極低レイノルズ数条件下でも適用可能であることを明らかにした。

4. ブレード形状が泳動特性に与える影響

4.1 ブレード角度

前述した解析手法を用いて、高粘性液体中における、ブレード角度および高さが泳動特性に与える影響について検

(a) $\nu = 1 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$

(b) $\nu = 5 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$

Fig. 3 Relationship between the swimming velocity and frequency.

Fig. 4 Relationship between the step-out frequency and kinematic viscosity of fluids.

討を行った。本節では、ブレード角度に関する解析結果について述べる。ブレード角度は Fig. 2 の ϕ のように定義し、 $\phi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の3種類について解析を行った。ブレード角度 $\phi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のとき、らせんピッチ長さ λ は、それぞれ 6.5 mm, 4.4 mm, 2.2 mm になる。マシン直径 R_1 、ブレード高さ R_b 等、ブレード角度以外の寸法は Fig. 1 のマシンと同一とした。ただし、外壁の影響が見えなくなるように、 R_2 は十分大きい点を選んだ⁷⁾。解析を行うにあたり、流体力学的効率⁴⁾ ε を式(2)のように定義し、マシン泳動特性を評価するパラメータの一つとした。

$$\varepsilon = \frac{\text{推力} \times \text{泳動速度}}{\text{推力} \times \text{泳動速度} + \text{負荷トルク} \times \text{角速度}} \quad (2)$$

ここで、流体力学的効率は、磁気的入力に対する機械的出力の比ではなく、ある周波数で回転し泳動しているマシンが、媒体の流体に対してなすパワーのうち、実際に推進に使われるパワーの比を表したものである。

Fig. 5 に動粘度 1×10^4 および $1 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中における、ブレード角度に対する流体力学的効率および負荷トルクの計算結果を示す。同図から、ブレード角度 $30^\circ \sim 60^\circ$ の範囲では、負荷トルクの大きさはほぼ同じであることが分かる。これに対して、流体力学的効率は、動粘度 $1 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中において、ブレード角度が 45° で最大となった。この結果は、動粘度 $5 \sim 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中における計算結果と一致している。一方 $1 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中では、流体力学的効率が最大となるブレード角度が高角度側にシフトするという結果が得られた。

以上の結果を確かめるために、 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のブレード角度を持つマシンを作成し、泳動速度の測定を行った。その結果を Fig. 6 に示す。この図から、動粘度 $1 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中では、ブレード角度 45° 、 $1 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中では、 60° で泳動速度が最大となった。このことは、推進に使われるパワーが最大となるブレード角度が、 1×10^5

(a) $\nu = 1 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$

(b) $\nu = 1 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$

Fig. 5 Efficiency and load torque with the blade angle.

Fig. 6 Relationship between the velocity and blade angle.

mm^2/s の液体中では高角度側にシフトすることを意味しており、実験結果は、Fig. 5 の計算結果と定性的に一致している。この実験結果における泳動をレイノルズ数で表すと 1

$\times 10^4 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中では 10^{-3} オーダ, $1 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中では 10^{-5} オーダとなる。以上の結果から、極低レイノルズ数における最適なブレード角度は、レイノルズ数条件によって異なり、 $Re = 10^{-5}$ オーダ以下では 45° より高角度側にシフトすることが明らかとなった。この結果に関して、 ϕ の増加に伴いブレードの巻き数が増え、その影響が高粘性の液体中で現れたことが原因の一つと考えられる。しかし、詳細についてはまだ明らかになっていない。

4.2 ブレード高さ

動粘度 $1 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体中における、ブレード高さに対する流体力学的効率および負荷トルクの計算結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。ブレード角度は 60° とした。横軸は Fig. 2 に示されるブレード高さ R_b に対する胴体半径 R_l の比である。Fig. 7 から、ブレードが高くなるにつれて、効率は大きくなり、 R_b/R_l が 1 付近でピークをとることがわかる。ここで、効率の最大値は約 2% であるが、バクテリアな

Fig. 7 Relationship between the fluid dynamic efficiency and blade height.

Fig. 8 Relationship between the load torque and blade height.

どの鞭毛生物の効率が数%であることを考えると、妥当な結果といえる。対して、ブレードが高くなると、マシンの表面積が増加するために負荷トルクは大きくなる (Fig. 8)。本研究で作製したマイクロマシンに 100 Oe の外部磁界を印加した場合、マシンの発生する最大の磁気トルクは約 $66 \mu\text{Nm}$ であったので、Fig. 8 より R_b/R_l が 0.5 を超えると、マシンの駆動は困難になることがわかる。したがって、極低レイノルズ数において、流体力学的効率の大きいマシンを得るには負荷トルクがマシンの発生する磁気トルクを超えない範囲で、ブレード高さを大きくすればよい。以上の結果は、我々が先に行った、動粘度 $5 \sim 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ における計算結果と定性的に一致している。

5. まとめ

極低レイノルズ数条件における泳動型磁気マイクロマシンの泳動特性を調べ、円柱状の胴体とらせん状のブレードから構成されるマイクロマシンが $Re = 10^{-7} \sim 10^3$ という非常に幅広い条件で泳動可能であることを示した。この結果は、本マイクロマシンが医用マイクロロボットの移動機構として、非常に有用であることを示唆している。また、我々の確立した、マイクロマシンの泳動特性解析手法が極低レイノルズ数条件にも適用可能であることを実証した。さらにこの解析手法を用いて、ブレード角度および高さが泳動特性に与える影響について検討を行った。その結果、流体力学的効率最大となるブレード角度がレイノルズ数によって異なること、および、ブレード高さはマシン駆動が可能な範囲で高くすればよいことを明らかにした。

今後、マイクロマシンを注射器で体内に導入することを考え、直径を注射針の内径である 0.8 mm 以下に小型化したマイクロマシンの設計を行う予定である。

謝 辞 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」より補助を受けて行った。

文 献

- 1) 藤正巖: クリニカルエンジニアリング, **10**, 3 (1999).
- 2) 神部勉: 流体力学, p. 171 (裳華房, 東京, 1995).
- 3) Y. C. Fung: *Advances in Applied Mechanics*, **11**, 65 (1971).
- 4) 神部勉: 日本物理学会誌, **33**, 484 (1978).
- 5) 仙道雅彦, 島崎克彦, 石山和志, 井上光輝, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, **23**, 1657 (1999).
- 6) 仙道雅彦, 山崎彩, 石山和志, 荒井賢一, 井上光輝: 電気学会論文誌, **120-A**, 301 (2000).
- 7) 仙道雅彦, 網代紀行, 石山和志, 井上光輝, 荒井賢一, 早瀬敏幸: 電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-98-238** (1998).
- 8) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue, K. I. Arai, T. Hayase, and J. Akedo: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3688 (1999).