

直径 0.5 mm の泳動型磁気マイクロマシンの泳動特性解析

Analysis of Swimming Properties of Magnetic Micro-machine of 0.5 mm in Diameter

山崎彩・仙道雅彦・石山和志・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)

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

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

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

*Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aobaku, Sendai 980-8577

The swimming properties of miniature magnetic micro-machines with spiral structures were analyzed theoretically employing a two-dimensional finite volume method. Based on the analysis results, a miniature machine was fabricated. The miniature machine was found to be able to swim in a fluid with Reynolds numbers of 10^{-5} to 0.2. This result shows that the machine is suitable as a micro-size swimming machine. Good agreement was obtained between experimental and theoretical results. This method made it possible to design an optimum machine structure.

Key words: micro-machine, rotating magnetic field, swimming, Reynolds number, finite volume method

1. はじめに

磁気力を駆動源とする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、生体内で仕事を行う医用マイクロロボットのアクチュエータとして極めて魅力あるものといえる。

マイクロマシンの医用応用を考えた際、マシンが生体内の体液や血液などの液体中を移動することが考えられる。従って、移動方法として泳動機構の検討は必要不可欠といえる。泳動機構を検討する上で、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¹⁾。

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

(1)式で、Lは物体の代表長さ、Uはその代表速度、 ν は液体の動粘性係数である。例えば、鞭毛推進をする微生物の泳動をレイノルズ数で表すと、 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ である²⁾。

我々は先の研究でマシン径 1.5 mm、長さ 15 mm のスパイラル構造をもつマイクロマシンを作製し、動粘度 $1.4 \sim 5 \times 10^5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の液体を用いて、レイノルズ数が $10^{-7} \sim 1000$ と広範囲な条件での泳動特性を実験と解析から明らかにした^{3) 4) 5)}。特に、レイノルズ数が 10^{-7} と極低レイノ

ルズ数条件での泳動を確認したことから、このスパイラル型構造が小型化に有用な構造であると考えられる。

マイクロマシンを体内に導入する方法として、注射器の使用が考えられる。18 G の注射針の内径が 0.9 mm であることから、マシンサイズは注射針の内径以下にする必要がある。マシンサイズが小さくなると、(1)式の代表長さが小さくなり、先の研究で用いたマシンサイズと同一粘性の値で比較すると、レイノルズ数は小さくなる。

本研究では、すでに確立した有限体積法を用いた流体力学的解析方法を用いて、マシンサイズを注射針内径以下にしたマイクロマシンの泳動特性解析を行った。そして、その解析結果をふまえて実際にマシンを作製し泳動実験を行い、マシンサイズを小さくしたマイクロマシンの泳動特性を実験と解析から検討した結果を報告する。

2. 泳動特性解析

2.1 解析方法

我々は先に、有限体積法を用いて液体中を泳動するマイクロマシンの特性解析を行った⁶⁾。泳動するマイクロマシン周辺の流れを解析するには、正確には 3 次元非定常解析が必要であるが、計算量が大きくなってしまったため、ここでは 2 次元定常解析を用いて行った。

本解析で用いた解析モデルを Fig.1 に示す。マシンは、z 軸方向に無限に長いとし、半径 $r=R_2$ のところに境界層厚さに相当する外壁を設けた。境界層厚さは実験的に求めることは困難であるため、 R_2 はフィッティングパラメータとした。本解析では、フィッティングパラメータをこの後 3 章で述べる泳動実験を参考に決定した。マシンの推進および回転を模擬するため、マシンとともに z 方向に移動し、マシンとともに θ 方向に回転する(外壁が $-W_m$ で移動し、 $-\Omega$ で回転する)円柱座標系をとった。

また、z 方向に周期境界条件を考え、計算領域をスパイラル 1 ピッチ分とした。さらに、らせん方向の一様性を仮定し、 $\Delta\theta$ の扇形の部分のみを計算領域とした。

非圧縮粘性流体の運動は運動量の保存則であるナビエーストークス方程式と、質量の保存を表わす連続方程式で記述される。この基礎方程式をすべりなし条件のもとでスタガード格子系を用いて有限体積法で離散化し、SIMPLER 法に類似の手法⁷⁾で解いた。

この手法によりマシン周辺の流れ場の計算を行う。計算された流体の速度分布から、マシン表面で発生するせん断応力による抗力及び負荷トルクを求めた。また、圧力分布から、マシンのスパイラルブレード前後の圧力差によって発生する推力および負荷トルクを計算した。解析モデルでは、マシンを無限長としているので、実際にマシンが泳動する際に先端と後端で流体から受ける抵抗を、マシン直径と等しい円板が流体から受ける抵抗として計算し、その抵抗値をマシンの端面効果とした。推力と抗力が釣りあうときの推進速度 W_m をマシン速度として計算した。

2.2 解析結果

Fig.2 に本解析で用いたマシンサイズを示す。マシン胴体が直径 0.5 mm、長さ 6 mm、ブレード高さ 0.06 mm、ピッチ 1.8 mm であり、基本的構造は先の研究で作製したマシンと同一のものである。マシン全体の直径が 0.62 mm であるので、このマシンサイズは 18 G の注射針の内径以下である。このマシンが液体中を泳動する時の泳動特性解析を行った。解析には Table 1 に示す 3 種類の液体を用いた。

Fig.3 に回転磁界周波数に対する負荷トルクの解析結果を示す。負荷トルクは周波数に比例して増加し、粘性が大きくなると、マシンが流体から受ける負荷トルクは大きくなった。図中の点線はこの後 3 章で作製するマシンに用い

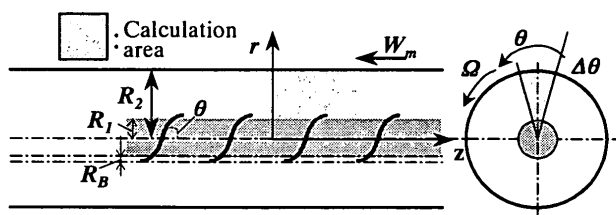


Fig. 1 Simplified model of the magnetic micro-machine used in the analysis.

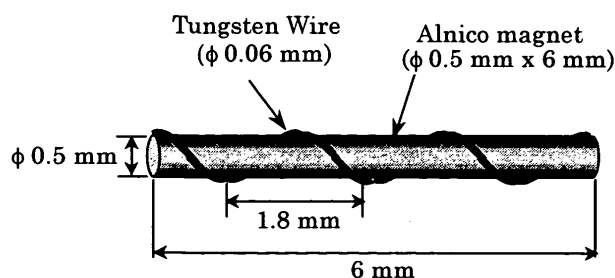
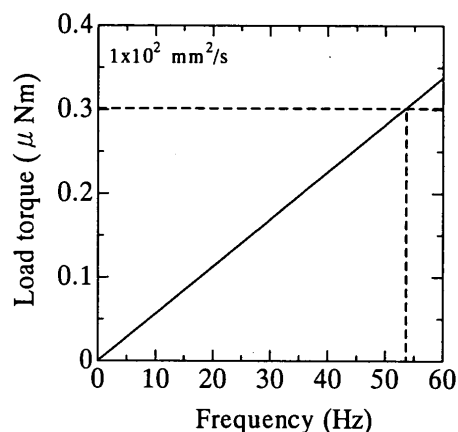


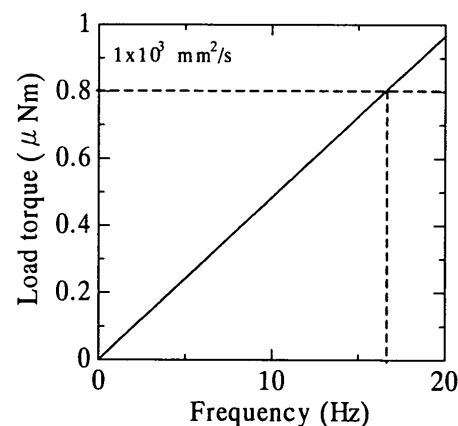
Fig.2 Schematic view of a miniature magnetic micro-machine.

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

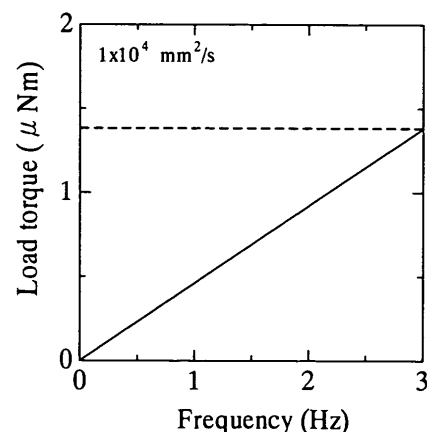
Kinematic viscosity ν (mm ² /s)	Density (10 ³ kg/m ³)
1×10^2	0.968
1×10^3	0.971
1×10^4	0.975



(a) $\nu = 1 \times 10^2$ mm²/s



(b) $\nu = 1 \times 10^3$ mm²/s



(c) $\nu = 1 \times 10^4$ mm²/s

Fig.3 Relationship between load torque and frequency.

る磁石の残留磁化と外部からの印加磁界から計算される磁気トルクで、印加磁界強度が 10, 30, 50 Oe のとき、それぞれ 0.3, 0.8, 1.4 μNm となる。この点線と負荷トルクの一致する周波数はそれぞれ 54, 17, 3 Hz となり、この周波数以上ではマシンが流体から受ける負荷トルクが発生する磁気トルクを上回るため、マシンは回転できない。従って、この周波数以下でマシンは泳動可能であるという解析結果が得られた。

本解析による回転磁界周波数に対する泳動速度の解析結果を Fig.4 の実線に示す。図中のプロットは次章で述べる泳動実験の結果である。各粘性とも泳動速度は周波数に比例して増加し泳動速度は動粘度 1×10^2 , 1×10^3 , 1×10^4 mm^2/s において、それぞれ 1 回転当たり 0.15, 0.13, 0.1 mm である。

以上の解析結果より、注射針の内径以下にサイズを小さくしたマシンの泳動に必要な磁気トルク、泳動可能な周波数範囲、泳動速度が見積もられた。

3. 泳動実験

3.1 実験方法

2 章の解析結果に基づいて、実際にマシンを作製した。Fig.2 に作成したマシンの概略図を示す。マシンサイズは解析に用いたサイズと同一であり、直径 0.5 mm、長さ 6 mm のアルニコ磁石の胴体に、ブレードピッチ 1.8 mm に加工した直径 0.06 mm のワイヤを巻き付けた構造である。使用したアルニコ磁石の残留磁束密度は、形状による反磁界の影響のために大幅に低減し、実測で 2.8 kG となった。このマシンをシリコンオイルで満たされた直径 16 mm、長さ 150 mm の試験管の中に入れ、外部から回転磁界を印加して駆動させ、泳動速度を測定した。実験には Table 1 に示す 3 種類のシリコンオイルを用いた。印加磁界強度は、動粘度 1×10^2 , 1×10^3 , 1×10^4 mm^2/s においてそれぞれ 10, 30, 50 Oe である。このとき発生する磁気トルクは磁石の残留磁化と印加磁界から計算され、10, 30, 50 Oe においてそれぞれ 0.3, 0.8, 1.4 μNm となる。

3.2 実験結果

Fig.4 に回転磁界の周波数に対する泳動速度の実験結果を示す。図中のプロットが実験結果であり、実線が解析結果である。(a)は動粘度 1×10^2 mm^2/s 、印加磁界強度 10 Oe の実験結果である。図中の矢印はマシンが回転の同期から外れる周波数であり、このときの周波数は 26 Hz であった。以後この周波数を脱調周波数と呼ぶ。マシンはこの脱調周波数以下で印加磁界に同期して回転し、泳動した。泳動速度は脱調周波数以下で周波数に比例して増加し、1 回転当たり 0.15 mm であった。マシンサイズ、泳動速度、液体の粘性から(1)式を用いてレイノルズ数を求めると、0.03~0.2 の値となった。(b)は動粘度 1×10^3 mm^2/s 、印加磁界強度を 30 Oe の実験結果である。このときの脱調周波

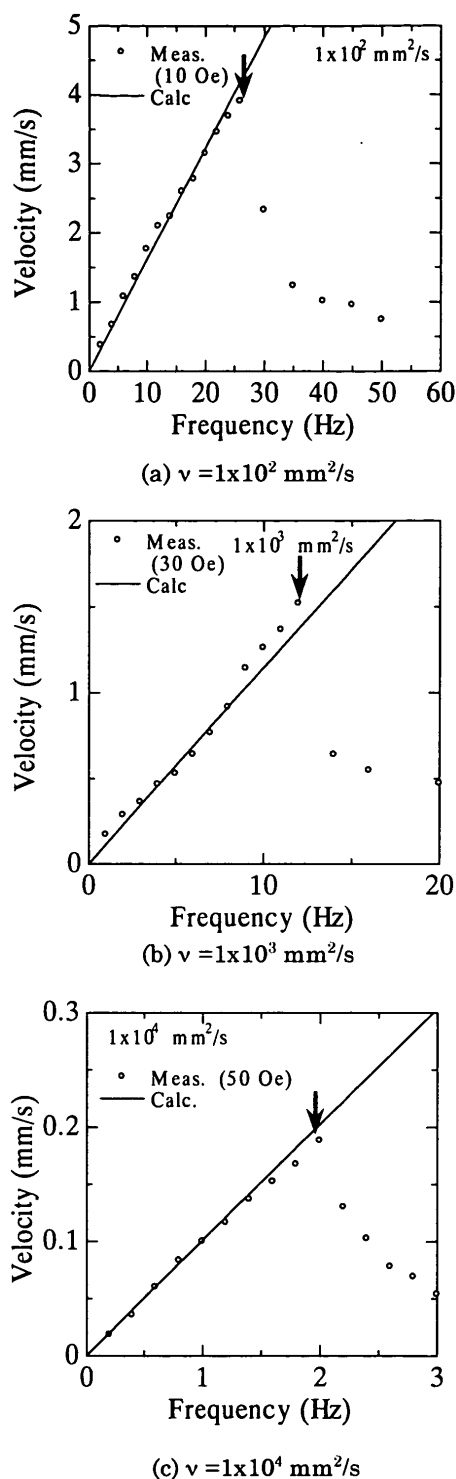


Fig.4 Relationship between velocity and frequency.

数は 12 Hz であり、この周波数以下で泳動速度は周波数に比例して増加し、1 回転当たり 0.13 mm の速度で推進した。レイノルズ数は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ となった。(c)は動粘度 1×10^3 mm^2/s の実験結果である。さらに粘性を高くしたので、印加磁界強度を 50 Oe とした。このときの脱調周波数は 2 Hz となり、この周波数以下で泳動速度は周波数に比例して増加し、泳動速度は 1 回転当たり 0.1 mm であった。レイノルズ数は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ となった。以上の結果から、泳動

速度は実験と解析の結果がほぼ一致し、レイノルズ数が $10^{-5} \sim 0.2$ での泳動が確認できた。脱調周波数は粘性が高くなるにつれ低周波側にシフトした。これは、Fig.3 の負荷トルクの解析結果より、粘性の高い液体の方が、流体から受ける負荷トルクが大きくなったことから説明できる。粘性の低い液体において、Fig.3 の解析による周波数と脱調周波数にずれが生じた。実験ではマシンは試験管の壁と接触しながら回転し推進しているため、壁との摩擦力が回転を妨げる方向に働いていると考えられる。しかし、解析ではこの摩擦力については考慮に入っていない。そのため解析と実験の周波数にずれが生じたと考えられる。粘性の高い液体では Fig.3 の解析による周波数と脱調周波数がほぼ一致した。これは、粘性が高いためマシンと壁との接触が少ないために摩擦力が小さく解析結果と実験結果がほぼ一致したと考えられる。

これらの実験によりマシンサイズを小さくしたマシンの泳動を確認したことから、本実験で用いたスパイラル構造が小型化にも有用な構造であると考えられる。また、解析結果とほぼ一致したことから、この有限体積法を用いた解析方法が小型化したマシンにも有用であることがわかる。

4. まとめ

先の研究で確立した有限体積法を用いた泳動特性解析法を用いて、マシンサイズを注射針の内径以下にしたマイクロマシンの解析を行った。この解析方法を用いて、マシンが発生する磁気トルクと負荷トルクの関係からマシンが回転し泳動できる周波数、およびマシン 1 回転当たりの泳動速度を見積もることができた。この解析結果をふまえて、同じサイズのマシンを作製して泳動実験を行った。実験の結果、マシンサイズを注射針の内径以下にしたマシン

を用いてレイノルズ数が $10^{-5} \sim 0.2$ での泳動を確認した。この結果によりスパイラル構造が小型化に有用な構造であるといえる。また、解析結果と実験結果がほぼ一致したことから、この解析方法が小型化したマシンの設計にも有用であることがわかった。

レイノルズ数が解析可能な範囲内であれば、この解析方法を用いることで、マシンの泳動速度、脱調周波数、マシンの泳動に必要な磁気トルクを見積もることができる。

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) T. Kambe : Fluid Dynamics, p.171(Shokabo, Tokyo, 1995)
- 2) T. Kambe : *J. Phys. Soc. Jap.*, 33, 484, (1978)
- 3) M. Sendoh, K. Shimazaki, K. Ishiyama, M. Inoue, K. I. Arai, and T. Hayase : *J. Magn. Soc. Jap.*, 23, pp1657-1660 (1999).
- 4) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, M. Inoue, T. Hayase, and K. I. Arai : *J. Magn. Soc. Jap.*, 25, pp1223-1226 (2001).
- 5) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, and T. Hayase : Technical Meeting on Magnetics, IEE of Japan, MAG-00-78 (2000).
- 6) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue, K. I. Arai, and T. Hayase : *Journal of Robotics and Mechatronics*, 12, pp165-171 (2000).
- 7) S.V. Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (Hemisphere, Washington DC/New York) (1980).
- 8) T. Hayase : *Journal of the Japan Hydraulics & Pneumatics Society*, 26, 407 (1995).

2001 年 10 月 9 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録