

有限体積法による磁気マイクロマシン特性の2次元解析

Two-Dimensional Analysis of the Properties of Magnetic Micro-Machines
by the Finite Volume Method

仙道雅彦・網代紀行・石山和志・井上光輝・荒井賢一・早瀬敏幸*

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)

M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue, K. I. Arai, and T. Hayase*

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

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

(1998年10月15日受理, 1999年1月21日採録)

The swimming properties of magnetic micro-machines with spiral structures were analyzed theoretically by employing the two-dimensional finite volume method. Good agreement between the experimental and theoretical results was obtained. It was demonstrated that the swimming properties of machines depend strongly on the operational environment, including the state of the flow field and machine structure. Thus, there exists an optimum machine structure corresponding to the operation environment, which can be determined from the present analytical results.

Key words: micro-machine, finite volume method, flow field, Reynolds number

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。

生体での利用を目的としたマイクロロボットは, 泳動による移動が不可欠といえる。これは, これらマイクロロボットの移動環境が, 生体の主成分である体液や血液などの液体中であることによる。この観点から我々は, 液体中での泳動が可能なスパイラル形状を基本とした磁気マイクロマシンを作製し, その基礎的な泳動特性について詳しく調べてきた¹⁾。その結果, これらのマイクロマシンが静水中や流水中で良好な駆動性能を示し, 医用マイクロロボットへの応用上極めて有望なマイクロマシンであることを示した。また, 幅広い粘性を持つ生体内において優れた駆動特性を有するマイクロマシンを実現するには, レイノルズ数(Re)を考慮した, 最適なマシン形状の決定が不可欠であることを示した。

本研究では, 磁気マイクロマシン構造の最適設計を行う第一歩として, マシン近傍の流れ場を有限体積法により解析し, 液体中を移動するマイクロマシン特性の理論解析を行った結果と実験結果との比較検討を行った。

2. 磁気マイクロマシンの解析モデル

2.1 磁気マイクロマシン

Fig. 1 に泳動型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セラミックパイプの胴体, タングステンワイヤをスパイラル形状に加工したブレードおよび駆動用の永久磁石からなる。液体中でこのマイクロマシンに軸に対して垂直な面内で回転磁界を印加すると, 同期モータの原理で磁石が回転し推進する。このとき, Fig. 2 に示すように境界層が発生する。ここでは, マシンの泳動速度を W_m , 回転角速度を Ω とする。

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うため, 今回は2次元定常解析を行った。その解析モデルを Fig. 3 に示す。マイクロマシン中心軸を軸とした円柱座標系を定義した。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。境界層厚さを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。

マシンの推進および回転を模擬するため, マシンと

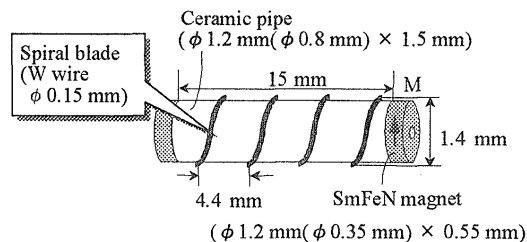


Fig. 1 Schematic view of a magnetic micro-machine.

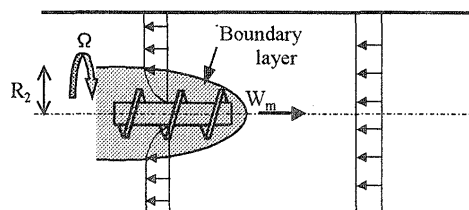


Fig. 2 Flow field around a swimming micro-machine.

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。

2.2 基礎方程式

非圧縮性粘性流体の運動は運動量の保存則であるナビエ-ストークス方程式と、質量の保存を表わす連続方程式によって記述される。

前節より円柱座標系 (r, θ, z) に対し、 z 方向に W_m で移動し、 θ 方向に Ω で回転する座標系 (r, θ', z') を用いる。対応する速度成分を (u, v', w') とおくと、

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta' + \Omega t \\ z &= z' + W_m t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} v &= v' + \Omega r \\ w &= w' + W_m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。(1), (2)式より、定常問題でのナビエ-ストークス方程式は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v'}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta'} + w' \frac{\partial u}{\partial z'} - \frac{v'^2}{r} - 2\Omega v' - r\Omega^2 \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right. \\ \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta'^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v'}{\partial \theta'} + \frac{\partial^2 u}{\partial z'^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial v'}{\partial r} + \frac{v'}{r} \frac{\partial v'}{\partial \theta'} + w' \frac{\partial v'}{\partial z'} - \frac{uv'}{r} + 2\Omega u \\ = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta'} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v'}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v'}{\partial r} - \frac{v'}{r^2} \right. \\ \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v'}{\partial \theta'^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta'} + \frac{\partial^2 v'}{\partial z'^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial w'}{\partial r} + \frac{v'}{r} \frac{\partial w'}{\partial \theta'} + w' \frac{\partial w'}{\partial z'} \\ = -\frac{\partial p}{\partial z'} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w'}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w'}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w'}{\partial \theta'^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z'^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

連続方程式は(6)式ようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v'}{\partial \theta'} + \frac{\partial w'}{\partial z'} = 0 \quad (6)$$

(3) - (5)式中の Re はレイノルズ数であり、

$$Re = \frac{(\Omega R_1^2)}{\nu} \quad (7)$$

と表される。ここで ν は動粘度、 R_1 は胴体の半径である。

以上の基礎方程式は無次元量で表されており、速度、長さ、圧力の代表量はそれぞれ、 ΩR_1 、 R_1 、 $\rho(\Omega R_1)^2$ である。

次に境界条件であるが、外壁でのすべりなし条件から、

$$\left\{ \begin{aligned} u(R_2, \theta, z) &= 0 \\ v'(R_2, \theta, z) &= -\Omega R_2 \\ w'(R_2, \theta, z) &= -W_m \end{aligned} \right. \quad (8)$$

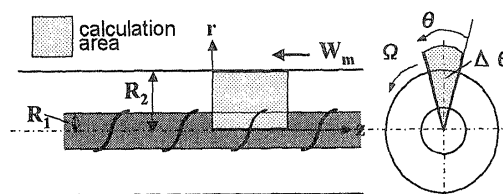


Fig. 3 Simplified model used in the analysis.

またマシン表面でのすべりなし条件から、

$$\left\{ \begin{aligned} u &= 0 \\ v' &= 0 \\ w' &= 0 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$z=0$ と $z=L$ での周期条件と、らせん方向の一様性から(10), (11)式を得る。

$$\left\{ \begin{aligned} u(r, \theta, 0) &= u(r, \theta, L) \\ v'(r, \theta, 0) &= v'(r, \theta, L) \\ w'(r, \theta, 0) &= w'(r, \theta, L) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u(r, 0, z) &= u(r, \theta_0, z + z_0) \\ v'(r, 0, z) &= v'(r, \theta_0, z + z_0) \\ w'(r, 0, z) &= w'(r, \theta_0, z + z_0) \end{aligned} \right. \quad (11)$$

2.3 数値計算法

前述の基礎式を、スタガード格子系²⁾を用いて有限体積法で離散化し、SIMPLER法²⁾に類似の手法で解いた。この手法については参考文献^{2)~4)}を参照されたい。

求め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および負荷トルクを求めた。また、圧力分布から、マシンスパイラル部分のブレード前後の圧力差による推力および負荷トルクを計算した。マシンの先端と後端で流体から抵抗を受けるので、この効果を組み込むためマシン直径と等しい円盤が流体から受ける抵抗を計算しその抵抗値をマシンの端面効果としてモデル化した。また、推力と抗力が釣りあうときの推進速度 W_m をマシン推進速度として計算した。

幅広い Re 条件での特性を調べ、ミリサイズ以下にダウンサイジングした場合の特性を模した実験を行うため、液体の動粘度が5および100 mm²/sのシリコンオイル中での泳動特性を解析し、実験結果との比較検討を行った。

3. 解析結果

3.1 流れおよび圧力分布

Fig. 4 はそれぞれの条件における流れのベクトル場と圧力分布を図示したものである。図中色の濃淡が圧力分布、矢印が速度ベクトルを示している。斜線で示しているのがマイクロマシンである。

Re が小さい場合、圧力の高い部分はブレード後方面にあるが、 Re が大きい場合、高圧力の部分はブレード先端

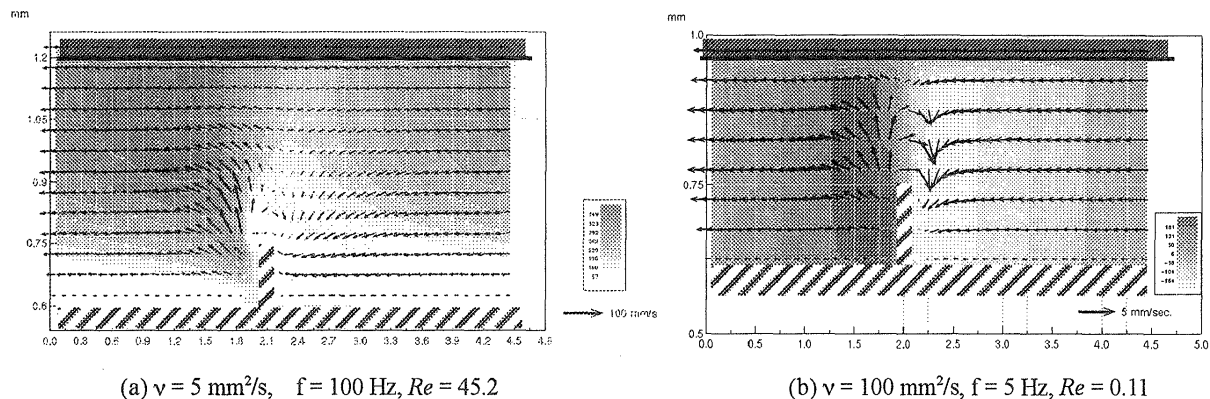


Fig. 4 Visualization of the flow field.

へと移っていく様子がよく分かる．このことは、 Re によって圧力の勾配方向が変化することを示している．

速度ベクトル場を見ると、 Re が小さい場合、流体はブレード後方から前方に回り込んでおり、 Re が大きくなると、流体は後方に押し出されていることが分かる．

この流れのベクトル場と圧力分布からマイクロマシン特性を算出した．

3.2 泳動速度

Fig. 5 に液体の動粘度が $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ および $100 \text{ mm}^2/\text{s}$ における、泳動速度の回転周波数に対する関係の計算結果を示す．同図には実験結果を○で示してある．実験による泳動速度がある周波数で急激に低下しているのは、脱調のためマシンが回転磁界に追従できなくなるためである．この周波数を脱調周波数と呼び、液体の粘性が高くなると、脱調周波数は低下する．

計算結果と実験結果は定量的に一致しており、計算結果において、液体の粘性が低い場合、泳動速度は回転周波数に対して 2 次曲線的に増加し、粘性が高い場合は直線的に増加する傾向が得られた．

3.3 マシンの受ける抵抗

Fig. 6 はマシンが流体から受ける抵抗力と回転周波数の関係を求めたものである．Fig. 6(a)の粘性の低い液体中において、マシンの受ける抵抗は周波数に対して 2 次曲線的に増加した．これに対して、Fig. 6(b)の粘性の高い液体中では直線的に増加した．このことは、流体の粘性によってマシンの泳動特性が変化することを良く説明している．

また、マシンの受ける抵抗力をマシン胴体表面で受ける力(Cylinder)、ブレード表面で受ける力(Blade)、マシン端面の効果(Disk)に分けて比較してみるとマシン端面の効果は非常に小さいといえる．このことは、今回解析した条件において、マシン端面の形状がマイクロマシン特性に与える影響は小さいことを示唆している．

3.4 負荷トルク

Fig. 7 に負荷トルクと回転周波数の関係を示す．高粘性

の液体中では、負荷トルクも大きくなっている．このことは粘性の高い液体中で脱調周波数が低くなることを良く説明している．

また、負荷トルクをマシン表面で受けるせん断応力に起因するもの(Shear)とブレード前後の圧力差に起因するもの(Pressure)に分けて比較すると、せん断力による負荷トルクがいずれの粘性においても大きくなっている．しかし、液体の粘性が低く、マシンの回転数が大きくなると、圧力による負荷トルクが大きくなっていく．これは、 Re が大きくなるにつれ慣性力が支配的になることを示している．

3.5 形状の異なるマイクロマシンの特性

前述のものとは異なる形状のマイクロマシンを作製し実験および計算を行った．作製したマイクロマシンの概略図を Fig. 8 に示す．このマイクロマシンを B タイプ、前述のマシンを A タイプとする．B タイプのマイクロマシンはブレードの高さを胴体半径と 1:1 の大きさとし、ブレード表面積が大きいことが特徴である．

Fig. 9 は動粘度 $100 \text{ mm}^2/\text{s}$ における A, B タイプの実験および計算結果である．泳動速度を見ると、B タイプのマイクロマシンの方が、周波数当たりの推進速度が大きく、推進力は大きいことが分かる．一方、負荷トルクの計算結果を見ると、B タイプの負荷トルクは A タイプに比べて大きく、その結果、実験において B タイプの脱調周波数は低くなっている．このことから、B タイプのマイクロマシンは負荷トルクの小さい環境、すなわち低粘度の液体中において、Fig. 9(a)の $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ の実験結果に示すように高い最高速度を示すことが分かる．

以上の結果は、計算によって様々な形状のマイクロマシン特性の比較が可能であることを示している．

4. まとめ

磁気マイクロマシンの単純化モデルを用いて、有限体積法による数値解析を行い、計算結果と実験結果はよく一致することを示した．このことは本解析手法がマイクロマシン最適設計条件の解明に有用であることを示唆している．

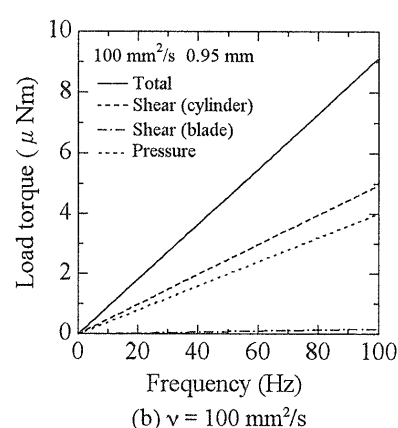
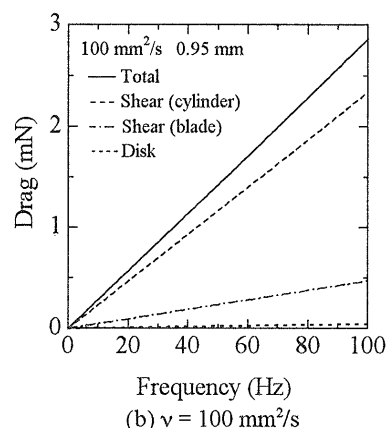
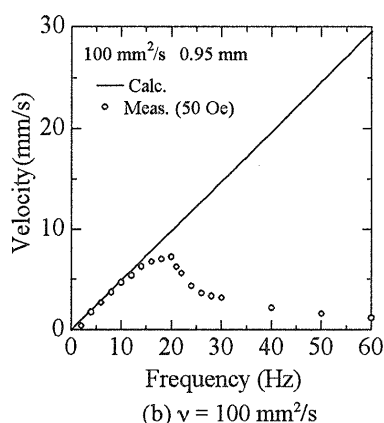
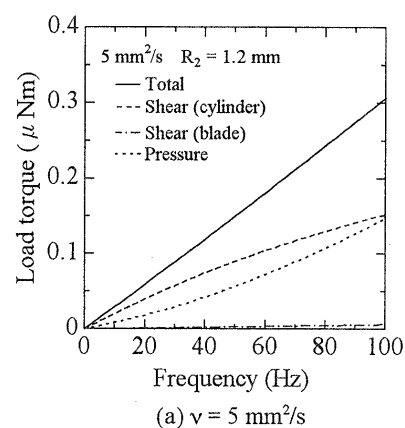
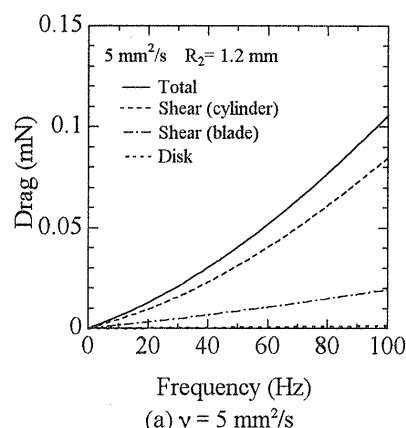
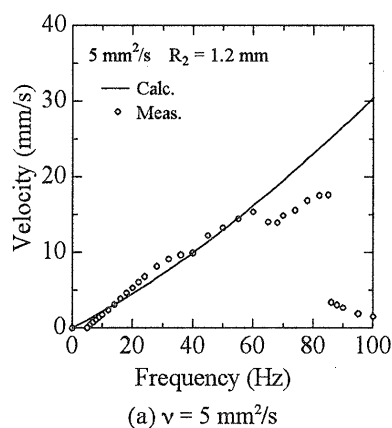


Fig. 5 Velocity with rotation frequency.

Fig. 6 Drag with rotation frequency.

Fig. 7 Load torque with rotation frequency.

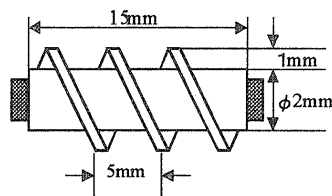


Fig. 8 Schematic view of a B-type micro-machine.

現在我々は生体導入を目的としてミリからサブミリサイズの磁気マイクロマシンを光造形技術により試作を行っている。今後解析で得られた最適設計条件によるマシンを作製し実験を行う予定である。

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「保険医用分野における基礎研究推進事業」により行ったものである。

文 献

- 1) 島崎克彦, 仙道雅彦, 井上光輝, 荒井賢一, 早瀬敏幸, 高木敏行: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-98-25 (1998).
- 2) S.V.Patankar: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, (Hemisphere, Washington DC/New York, 1980).
- 3) 早瀬敏幸: 油圧と空気圧, 26, 407 (1995).
- 4) T.Hayase, J.A.C.Humphrey, and R.Greif: J. Comput. Phys. 98, 108 (1992).

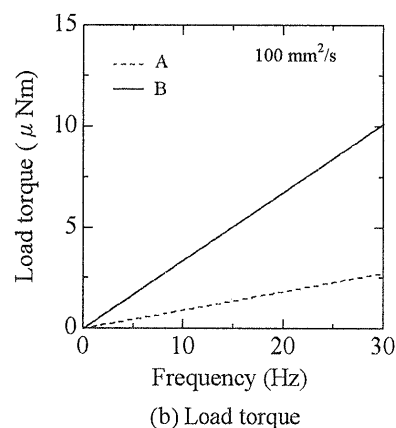
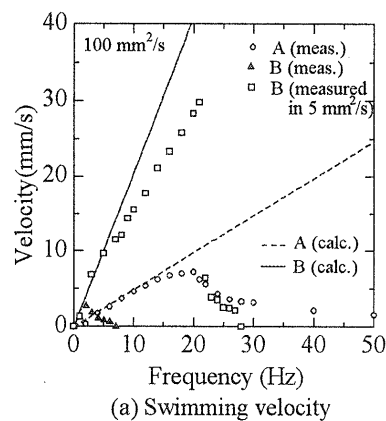


Fig. 9 Swimming properties of A- and B-type micro-machines.