

造は直径 0.25 mm のタングステンワイヤを 45 度の傾きで磁石に巻きつけることにより形成している。これよりマイクロマシンのサイズは直径 1.0 mm、長さ 10 mm となっている。

### 3. ディスポーザブルポンプシステム

#### 3.1 動作原理

Fig. 3 にディスポーザブルポンプシステムの概略図を示す。このシステムは流路内にスパイラル型磁気マイクロマシンを搭載した使い捨て可能な基板を回転磁界発生ステージの上に載せるだけで送液を行うことを可能にするものである。

このシステムを得るために、使い捨て可能な基板と回転磁界発生ステージを試作した。Fig. 4 に試作した基板の外観写真を示す。基板にはアクリルを用いており、サイズは 120×100×5 mm である。Fig. 5 にマシン挿入部の外観写真を示す。流路幅をマシン径より狭くすることで、マシンは推進を抑止されその場で回転し送液を行う。ここでマシンと流路の隙間の距離の比較を行うために、マシン挿入部のサイズが 11×1.1×1.25 mm の基板と 11×1.4×1.5 mm の基板を作製した。Fig. 6 にこの 2 種類の挿入部断面の概略図を示す。流路はどちらも幅 0.5 mm、深さ 1.1 mm である。今後前者の基板を断面 1.1 の基板、後者の基板を断面 1.4 の基板とする。基板にはマシンを搭載し、流路にはシリコンオイルを充填した。

Fig. 7 に試作した回転磁界発生ステージの外観写真を示す。ステージはサイズが 120×120×65 mm でマシン周辺に回転磁界を発生させるための一対のコイルを設置している。コイルは直径 1.0 mm の銅線を約 150 巻きし、平均直径を約 50 mm とした。ここで実際にステージ上に基板を載せ、回転磁界を印加するだけでマシンは回転し送液を行った。

#### 3.2 実験

ディスポーザブルポンプシステムの基礎特性評価を目的として回転周波数と流量の特性を求める実験を行った。ここで流体力学において重要なパラメータであるレイノルズ数  $Re$  を式(1)に示す。レイノルズ数は慣性力と粘性力の比で表すことができる。

$$Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} = \frac{\text{代表長さ} \times \text{代表速度}}{\text{液体の動粘度}} \quad (1)$$

本研究においては、流路内の流体の流れについての検討を行っているため、代表長さを流路径、代表速度を流速としている。磁気マイクロマシンは幅広いレイノルズ数領域 ( $10^{-7} < Re < 10^3$ ) において駆動可能であることがわかってい

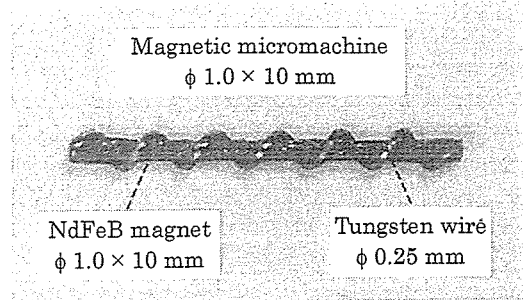


Fig. 2 Photograph of the spiral-type magnetic micromachine.

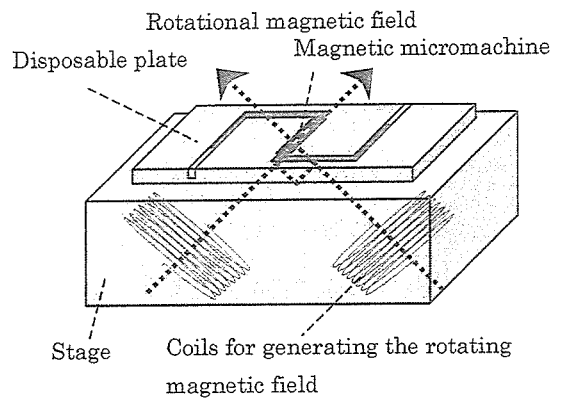


Fig. 3 Disposable pump system.

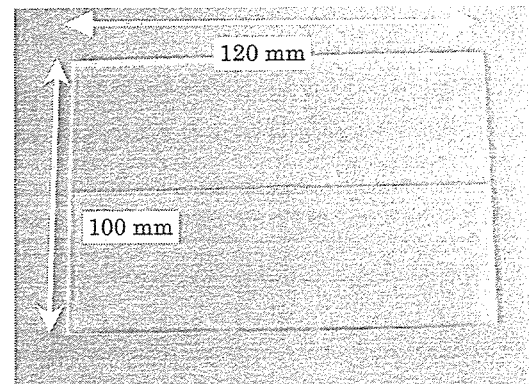


Fig. 4 Photograph of disposable plate containing the machine.

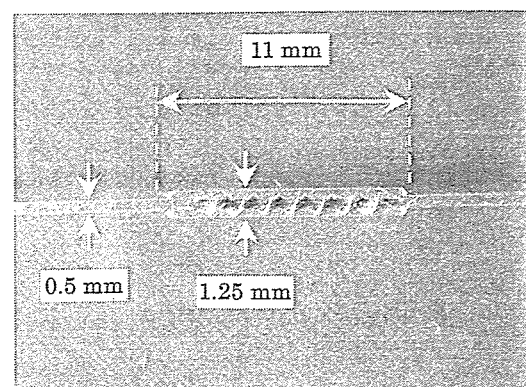


Fig. 5 Photograph of the space containing the machine in the fluid channel.

る 6)8)。

この実験において、断面 1.1 の基板と断面 1.4 の基板を用いマシンと流路の隙間の距離と液体の動粘度をパラメータとした場合の回転周波数と流量の関係を求めた。この時磁界強度は 1.6 kA/m、流路内に液体を充填した長さは 50 mm とした。Fig. 8 に実験結果を示す。ここで塗りつぶしてあるプロットが断面 1.1 の基板、白抜きのプロットが断面 1.4 の基板の回転周波数と流量の特性を表している。この時のレイノルズ数  $Re$  の範囲は  $6.7 \times 10^{-4} \sim 1.19$  であった。

同図より、流量は回転周波数に比例して増加し、同一周波数において動粘度にかかわらず等しくなることが理解される。この実験結果は式(2)に示されるハーゲン・ポアズユの流れにおける流量の式<sup>9)</sup>より説明することができる。

$$Q = \frac{\Delta P}{8\mu L} \pi r_0^4 \quad (2)$$

ここで、 $Q$  は流量、 $\Delta P$  は圧力差、 $\mu$  は液体の動粘度、 $L$  は流路内に液体を充填した長さ、 $r_0$  は流路の内径を表している。この実験において、流路内に液体を充填した長さ  $L$  と流路内径  $r_0$  は一定であり、圧力差  $\Delta P$  はマシンによる発生圧力を表している。流体力学の理論において  $Re$  が 1 より十分小さい場合には流体の慣性力を無視でき、発生圧力は動粘度に比例する。それゆえに流量  $Q$  は液体の動粘度  $\mu$  に依存しないことになる。

また流量はマシンと流路の隙間の距離が小さいほど増加した。これはマシンの動作時にこの隙間の部分において送液方向と逆方向の流れが発生し送液総量を減少させているためだと考えられる。

以上の結果から本マイクロポンプの流量は動粘度に依存せず、さらにマシンと流路の隙間の距離が小さいほど高効率な送液を行うことができることが示された。またマシン挿入部の角付近において逆方向の流れによる渦流が生じることが予想されるので<sup>10)</sup>、今後は流体力学的解析を用いて渦流の送液総量への影響などに関する検討、及びマシン挿入部の最適形状に関する検討を行う予定である。

#### 4. 選択送液に関する検討

##### 4.1 動作原理

Fig. 9 に選択送液を行うためのディスプレイザブルポンプシステムの概略図を示す。このシステムにおいて、各マシン近傍に小型の回転磁界発生コイルが設置されている。コイルによりマシン周辺に局所的な回転磁界を印加することで、他のマシンに影響を及ぼすことなく回転磁界を印加したマシンのみ送液を行うことができると考えられる。

Fig. 10 に試作した使い捨て可能な基板の外観写真を示

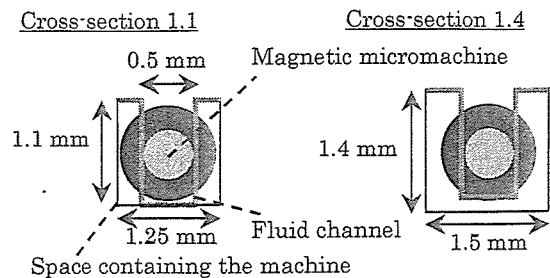


Fig. 6 Cross section of the space containing the machine in the fluid channel.

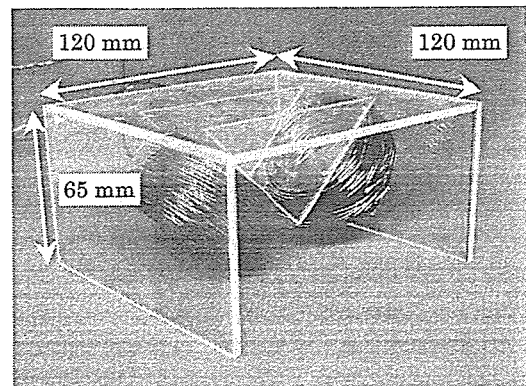


Fig. 7 Photograph of the stage for generating the rotational magnetic field.

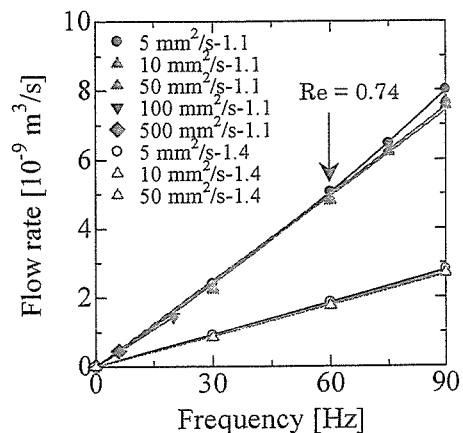


Fig. 8 Relation between the frequency and the flow rate.

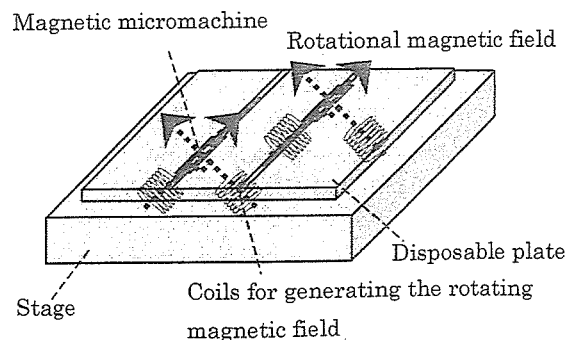


Fig. 9 Disposable pump system for pumping the liquid selectively.

す。基板にはアクリルを用いており、サイズは  $140 \times 120 \times 5$  mm である。基板表面には二本の流路と二箇所のマシン挿入部を作製した。流路、及びマシン挿入部は共に断面 1.1 の基板と同形状としている。今後画面上部の挿入部に搭載したマシンをマシン 1、下部の挿入部に搭載したマシンをマシン 2 とする。Fig. 11 に試作した回転磁界発生ステージの外観写真を示す。ステージはサイズが  $160 \times 120 \times 36$  mm で回転磁界を発生させるための二対のコイルを設置している。コイルは直径 1.0 mm の銅線を約 50 巻きし、平均直径を約 20 mm とした。実験では流路内に動粘度  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$  のシリコンオイルを充填し、オイルを充填した長さは 50 mm とした。

#### 4.2 実験

ポンプをどれだけ近接させてもよいかを調べるために、回転磁界発生コイルにより磁界を印加した際に、基板に搭載されたマシンがステージ上で磁界の影響を受けず静止している範囲と磁界の影響を受け動く範囲についての検討を行った。ここで磁界の影響を受け動くとは、(i)マシンが回転磁界に同期して回転し定量送液を行う状態、(ii)マシンは脱調するが送液は行う状態、(iii)マシンが脱調し送液は行わないが磁界の影響を受け微振動する状態のことである。またマシンが磁界の影響を受けず静止している状態を(iv)とする。Fig. 12 にマシンが磁界の影響を受け動く範囲を示す。ここで図中の①は上記(i)の範囲、②は(i)かつ(ii)の範囲、③は(i)かつ(ii)かつ(iii)の範囲を表している。この時、原点(0, 0)は回転磁界の磁界強度が最大となる点であり、ステージ上で回転磁界面と垂直となる方向を X 軸、平行となる方向を Y 軸とした。実験では(0, 0)での磁界強度は  $0.4 \text{ kA/m}$ 、回転周波数は  $10 \text{ Hz}$  とし、ステージ上でのマシンはマシン長さ方向と X 軸が平行になるように位置している。図より(iv)の範囲においては、コイルによる磁界の干渉を受けないため別のポンプを配置することができるといえる。この結果をうけて、(iv)の範囲に別のポンプを配置した Fig. 10 に示す基板と Fig. 11 に示すステージを試作し、この基板とステージを用いて流量特性に関する検討を行った。実験では、マシン 1 あるいは 2 のいずれかのみに回転磁界を印加した場合(single)、及びマシン 1 とマシン 2 共に回転磁界を印加した場合(double)の回転周波数と流量の特性を求めた。Fig. 13 に回転周波数と流量の特性を示す。マシンに印加した回転磁界の磁界強度は  $0.4 \text{ kA/m}$  とした。この時、流量は互いのコイルによる回転磁界の影響を受けることなく等しくなった。このことからマシンがコイルによる磁界の干渉を受けない範囲に別のポンプを配置している場合、選択送液可能であることが実験により示された。

次にポンプの位置をずらして設置した場合における回転周波数と流量の関係を求めることにより、定量送液可能な

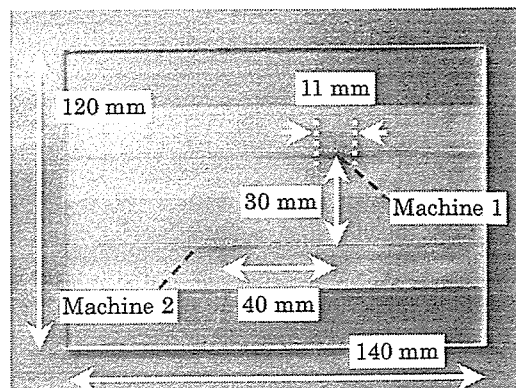


Fig. 10 Photograph of the disposable plate with the machine.

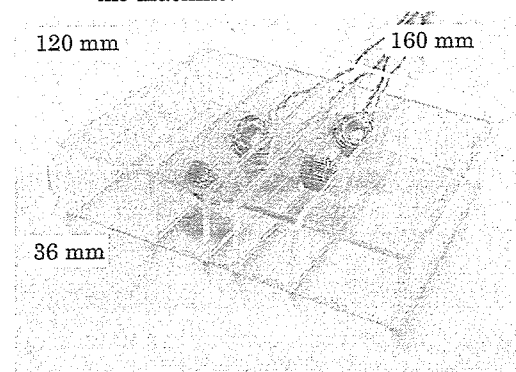


Fig. 11 Photograph of the stage for generating the rotational magnetic field.

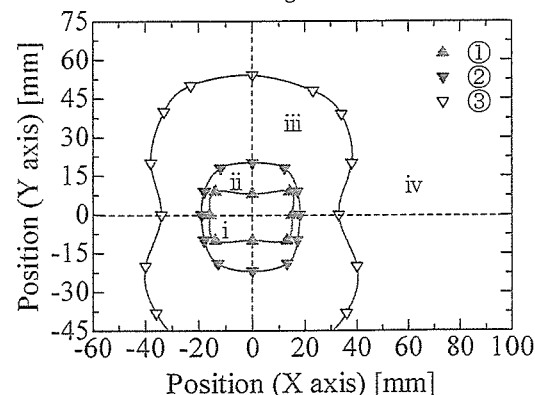


Fig. 12 Range of moving of the machine.

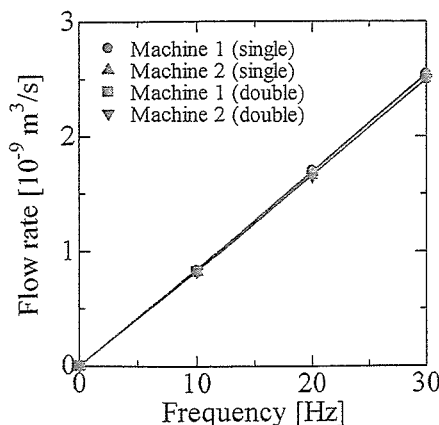


Fig. 13 Relation between the frequency and the flow rate.

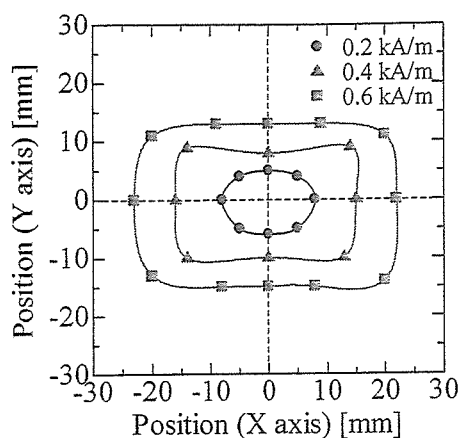


Fig. 14 Range of pumping quantitatively.

範囲についての検討を行った。Fig. 14 に磁界強度を変化した場合の定量送液可能な範囲を示す。図中の磁界強度は点(0, 0)での磁界強度を表しており、回転周波数は 10 Hz とし、ステージ上でのマシンはマシン長さ方向と X 軸が平行になるように位置している。この時、各磁界強度において定量送液可能な回転磁界の最小磁界強度は 0.18 kA/m となった。これは(0, 0)から離れるほど回転磁界の磁界強度が小さくなり、磁界強度が 0.18 kA/m を下回るとマシンの磁気トルクがオイルや流路から受ける負荷トルクを下回り脱調するためである。また(0, 0)での回転磁界の磁界強度が大きいほど定量送液可能な範囲は広くなった。これは磁界強度が大きいほどマシンの磁気トルクが大きくなり、0.18 kA/m 以上の磁界強度の範囲が広がるためである。このことから回転周波数 10 Hz のもとで回転磁界の磁界強度が 0.18 kA/m 以上の範囲においては、多少ポンプが位置ずれしたとしても定量送液可能であるといえる。

以上より、各ポンプが互いの回転磁界発生コイルによる磁界の干渉を受けない範囲において選択送液は可能であることが示された。また回転周波数が 10 Hz のもとで、回転磁界の磁界強度が 0.18 kA/m 以上の範囲では多少ポンプが位置ずれしたとしても定量送液可能であることがわかった。今後は装置の小型化を目的として、ポンプ間をより近づけるためのコイルの最適形状、及びコイルの小型化に関する検討を行う予定である。

## 5. まとめ

スパイラル型磁気マイクロマシンを用いたディスプレイポンプシステムを得るために、回転磁界発生ステージと流路を搭載した使い捨て可能な基板を試作した。このシ

ステムにおいて、ステージ上に基板を載せるだけでマシンは回転し送液を行った。またこのポンプシステムの基礎特性として回転周波数と流量の特性を定量的に明らかにした。さらにこのポンプシステムにおいて選択送液が可能であることが示された。

本マイクロポンプは電気的な接点なしにワイヤレスに送液可能であり、幅広い動粘度の液体を周波数制御により定量送液可能であることから圧電駆動型ポンプや SMA 駆動型ポンプ、電気泳動による送液の短所を補うことができる。さらに基板の使い捨てが可能であり、選択送液を行うことができることから  $\mu$ TAS などのマイクロ流体工学や生体工学への応用に適しているといえる。

## References

- 1) S. Böhm, W. Olthuis, P. Bergveld: *Sensors and Actuators A* 77, 223 (1999).
- 2) W. L. Benard, H. Kahm, A. H. Heuer, M. A. Huff: *Journal of Microelectromechanical Systems*, 7-2, 245 (1998).
- 3) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Inoue: *Trans. IEE Jpn.*, 120-A, 301 (2000).
- 4) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Hayase: *IEEE Trans. Magn.*, 39, 3289 (2003).
- 5) S. Hisatomi, A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 29, 161 (2004).
- 6) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, M. Inoue, T. Hayase, K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 25, 1223 (2001).
- 7) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, T. Hayase, K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 26, 645 (2002).
- 8) K. Ishiyama, M. Sendoh, A. Yamazaki, M. Inoue, K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, 37, 2868 (2001).
- 9) T. Kanbe: *Ryuutairikigaku* (in Japanese), p. 178 (Shoukado, Tokyo, 1997).
- 10) T. Takori, C. Arakawa: *Ryuutaikougaku* (in Japanese), p. 94 (Sanshusha, Tokyo, 1989).

2005年10月19日受理, 2005年12月16日採録

# 磁気トルクを利用したマイクロマシンの小型化に関する検討

学生員 山 崎 彩  
正 員 仙 道 雅 彦  
正 員 石 山 和 志  
正 員 荒 井 賢 一

電 気 学 会 論 文 誌 E  
(センサ・マイクロマシン準部門誌)

平成 18 年 11 月号 抜 刷

IEEJ Trans. SM, Vol. 126, No. 11, 2006

# 磁気トルクを利用したマイクロマシンの小型化に関する検討

学正員 山崎 彩\*      正員 仙道 雅彦\*\*  
 正員 石山 和志\*      正員 荒井 賢一\*

## Examination Concerning Miniaturization of the Micro-Machine using the Magnetic Torque

Aya Yamazaki\*, Student Member, Masahiko Sendoh\*\*, Member, Kazushi Ishiyama\*, Member, Ken Ichi Arai\*, Member

In this paper, the limit size of a magnetic micro - machine using the magnetic torque was examined. This machine rotates according to a magnetic torque and is promoted. The limit of the miniaturization of the machine was examined by requesting the relation between a magnetic torque and the load torque. In the case of the rotating and driving magnetic micro-machine, the driving force and the drag decrease at the same rate. Therefore, the magnetic micro-machine can swim even if the machine becomes miniaturization.

キーワード：磁気トルク，負荷トルク，回転磁界，スケーリング則  
 Keywords：Magnetic torque, load torque, rotational magnetic field, scaling law

### 1. はじめに

近年，マイクロマシンのサイズは，加工技術の進歩と供に，nm～μm オーダとなっている。一般にミクロの世界では，寸法の3乗に比例する体積力が相対的に弱くなり，寸法の2乗に比例する面積力が支配的になる（スケーリング則<sup>(1)</sup>）。抵抗力で考えると，寸法の3乗に比例する重力や慣性力より，寸法の2乗に比例する摩擦力，表面張力，粘性力が支配的になる。駆動力に関しては，一般的に，寸法の3乗に比例する磁気力より，寸法の2乗に比例する静電力がマイクロマシンの小型化に対して有効な駆動方法であると考えられている。また，ミクロの世界では寸法の2乗に比例する抵抗力が大きな問題となるため，マイクロマシンを駆動する際のエネルギー供給や制御用のケーブルは大きな障害となる<sup>(2)</sup>。つまり，エネルギー供給やマシンの移動制御をワイヤレスに行えることは，マイクロマシンの小型化においては必要であると考えられる。このようなワイヤレス駆動可能な駆動方法のひとつに磁気力が挙げられる。これまでに磁気力を用いて液体<sup>(3)(4)</sup>，気体<sup>(5)(6)</sup>，固体中<sup>(7)</sup>を自立移動するマイクロマシンの研究が報告されている。本論文では，液体中を駆動するマイクロマシンに焦点を絞る，図1に示すスパイラル型磁気マイクロマシンについて検討を行った

<sup>(3)</sup>。このマイクロマシンは，磁石とスパイラル形状に加工されたワイヤから構成されている。このマイクロマシンは搭載した磁石に外部から磁界を印加して発生する磁気トルクを利用して駆動するため，ワイヤレスに駆動可能である。これまでの研究において，マシン直径0.1～1.5mmのマシンを用いて，(1)式で表されるレイノルズ数<sup>(8)</sup>が $10^{-7} \sim 10^3$ と幅広い条件下において実験と解析により検討が行われている<sup>(9)(10)</sup>。

$$Re = L \cdot S / \nu \dots\dots\dots(1)$$

ここに，Re：レイノルズ数，L：代表長さ，S：代表速度，ν：液体の動粘度

さらに，印加磁界面の制御によりマシンをワイヤレスで方向制御可能であることが示されている<sup>(11)</sup>。従って，スパイラル型構造のマイクロマシンは，構造の面から小型化が期待される。

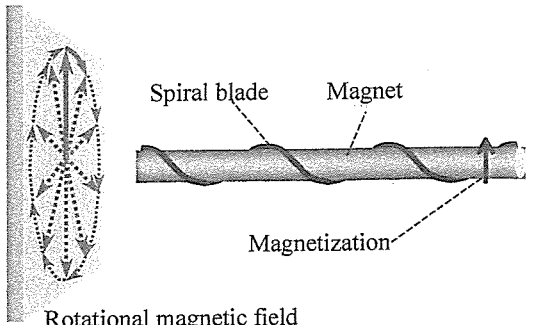


図1 磁気マイクロマシンの概略図  
 Fig. 1. Schematic view of magnetic micro-machine.

\* 東北大学電気通信研究所  
 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1  
 RIEC, Tohoku Univ.  
 2-1-1 Katahira Aoba-ku, Sendai Miyagi 980-8577  
 \*\* みやぎ産業振興機構  
 〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉 1-14-2  
 Miyagi Organization For Industry Promotion  
 1-14-2 Kamisugi Aoba-ku Sendai, Miyagi 980-0011

本論文では、磁気力を用いた磁気マイクロマシンがどこまで小さくできるかについて検討を行った。このとき、小型化の条件として、以下の項目を設定した。

1. マシンに搭載する磁石の残留磁束密度は一定
2. マシンは均一磁場中を駆動
3. 印加磁界強度は一定
4. マシンの寸法比を一定で小型化

以上の条件のもと、マシンサイズと抵抗力、駆動力との関係を明らかにし、磁気トルクを用いたマイクロマシンの小型化の限界について検討を行った。

## 2. マシンに働くトルクと力

(2.1) 回転方向 本論文で検討を行う磁気マイクロマシンは、図 2 に示す磁気トルクを利用している。磁気トルクは(2)式で表されるように、磁石の磁気モーメント  $M$  と磁界  $H$  によって表される。

$$T_M = M \cdot H \cdot \sin \theta \quad (2)$$

ここに、 $T_M$ : 磁気トルク [Nm],  $M$ : 磁気モーメント [Wb·m],  $H$ : 外部印加磁界強度 [A/m],  $\theta$ :  $M$  と  $H$  の位相差

また、磁気モーメント  $M$  は(3)式で表される。

$$M = B_r \cdot V \quad (3)$$

ここに、 $M$ : 磁気モーメント [Wb·m],  $B_r$ : 残留磁束密度 [T],  $V$ : 磁石の体積[m<sup>3</sup>]

ここで(3)式より、磁気モーメントは体積に比例することから、寸法の 3 乗に比例する。従って、(2)式より、印加磁界強度を一定としたとき磁気トルクは磁気モーメント  $M$  に比例することから、寸法の 3 乗に比例する。

一方、回転した磁気マイクロマシンは、流体から負荷トルクを受ける。磁気トルク  $T_m$  と負荷トルク  $T_L$  の関係を図 3 に示す。磁気マイクロマシンが回転するためには、負荷トルクを上回る磁気トルクが必要である。従って、負荷トルクと寸法の間関係を明らかにすることで、マイクロマシンの小型化の限界を見積もることが可能となる。負荷トルクの主な要因は、(4)式で表されるマシンの表面に働くせん断力である。

$$F_s = \tau \cdot A \quad (4)$$

ここに、 $F_s$ : せん断力 [N],  $\tau$ : せん断応力 [N/m<sup>2</sup>],  $A$ : 表面積 [m<sup>2</sup>]

回転方向の抵抗力であることから、せん断力と回転半径の積で表される負荷トルクが磁気トルクに対する抵抗力となる((5)式)。

$$\begin{aligned} T_L &= F_s \cdot D \\ &= \tau \cdot A \cdot D \\ &= \mu \cdot u \cdot A \cdot D \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、 $T_L$ : 負荷トルク [Nm],  $F_s$ : せん断力 [N],  $D$ : 回転半径 [m],  $\tau$ : せん断応力 [N/m<sup>2</sup>],  $A$ : 表面積 [m<sup>2</sup>],  $\mu$ : 液体の粘性 [N s/m<sup>2</sup>],  $u$ : 変位速度 [1/s]

従って、負荷トルクは寸法の 2 乗に比例するせん断力と寸

法の 1 乗に比例する回転半径の積で表されるため、寸法の 3 乗に比例し、液体の粘性の 1 乗に比例する。図 4 に周波数 10 Hz における液体の粘性に対するマシンサイズとトルクの計算結果を示す。破線と一点鎖線がそれぞれ動粘度  $1 \times 10^3$ ,  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$  における負荷トルクである。実線は、(2)式を用いて求めた磁気トルクであり、磁石の残留磁束密度、印

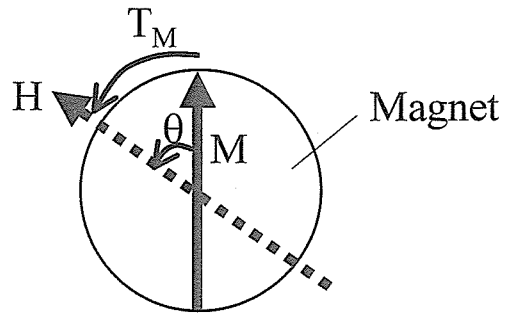


図 2 磁気トルクの概略図

Fig. 2. Schematic view of magnetic Torque.

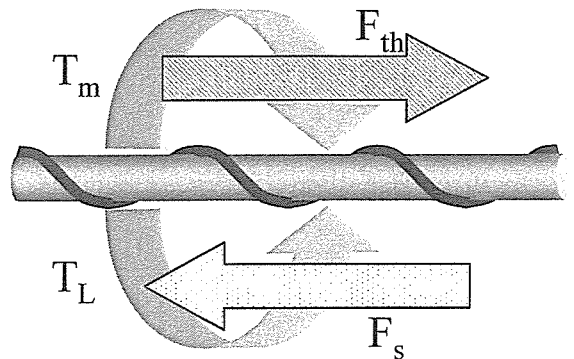


図 3 回転するマイクロマシンに働く力とトルクの関係

Fig. 3. Relation between force and torque of machine.

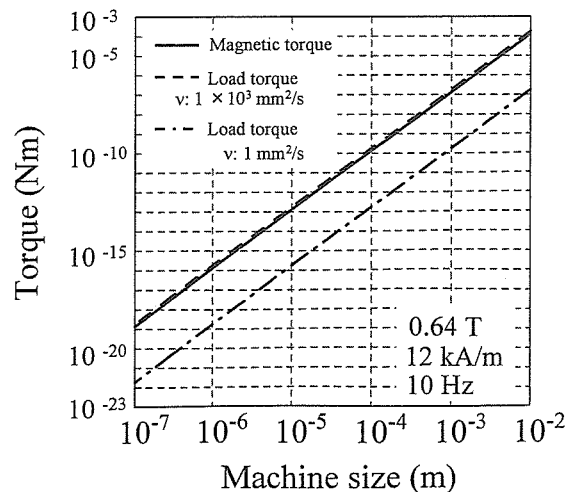


図 4 マシンサイズとトルクの関係

Fig. 4. Relation between torque and machine size.

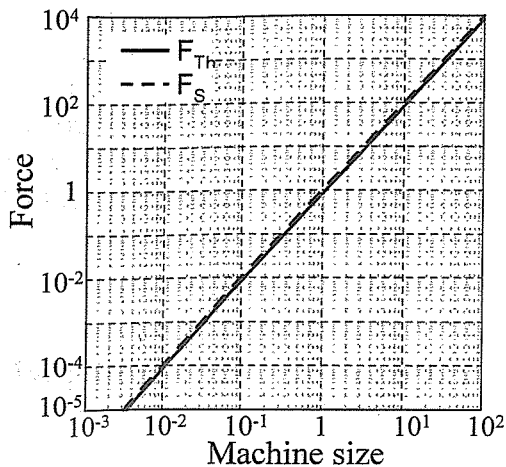


図5 マシンサイズに対する推力と抵抗力の関係  
Fig. 5. Relation between force and machine size.

加磁界強度をそれぞれ 0.64 T, 12 kA/m とした。ここで、動粘度  $1 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{s}$  における負荷トルクと磁気トルクが等しいと仮定する。この結果より、負荷トルク、磁気トルクとも寸法の 3 乗に比例して減少するため、マシンサイズを小さくしても駆動可能である。また、負荷トルクは粘性の 1 乗に比例するため、液体の粘性を  $10^{-3}$  倍にすると負荷トルクは  $10^3$  倍小さくなる。従って、マシンサイズを小さくしても駆動可能であり、液体の粘性を小さくすることで、さらに小さい磁気トルクで駆動可能であることが明らかとなった。

〈2・2〉 推進方向 磁気トルクにより回転したマイクロマシンはブレード部分で生じた圧力差が推力となり、マシンは推進する。推力の式を(6)式に示す。

$$F_{Th} = P \cdot A \quad (6)$$

ここに、 $F_{Th}$ : 推力 [N],  $P$ : 圧力差 [ $\text{Pa}/\text{m}^2$ ],  
 $A$ : 表面積 [ $\text{m}^2$ ]

推力に対する抵抗力は、(4)式で表されるマシン表面に働くせん断力である。従って(4), (6)式より、推力、抵抗力は寸法の 2 乗に比例する。図 5 に、マシンサイズに対する、推力と抵抗力の関係を示す。マシンサイズ 1 の時、推力、抵抗力は 1 と仮定した。推力と抵抗力は同じ割合で減少するため、マシンを小型化しても推進可能であることが明らかとなった。ここで、推進方向に磁気力を加えてマシンを推進させる場合について検討を行う。これは例えば図 6 に示す磁場勾配の力でマシンを引っ張って動かす場合に相当する。磁場勾配による力  $F_g$  は(7)式で表されるように、寸法の 3 乗に比例する。

$$F_g = M \, dH / dX \quad (7)$$

ここに、 $F_g$ : 磁場勾配による力 [N],  $M$ : 磁気モーメント [ $\text{Wb} \cdot \text{m}$ ],  $dH / dX$ : 磁場勾配 [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]

対する抵抗力は、(4)式で表されるマシン表面に働くせん断力である。図 7 にマシンサイズに対する磁場勾配による力と抵抗力の関係を示す。図 5 と同様に、マシンサイズ 1 の

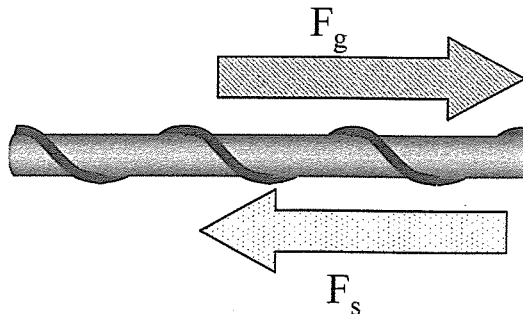


図6 マシンに働く磁場勾配の力と抵抗力の関係  
Fig. 6. Relation between magnetic gradient and drag.

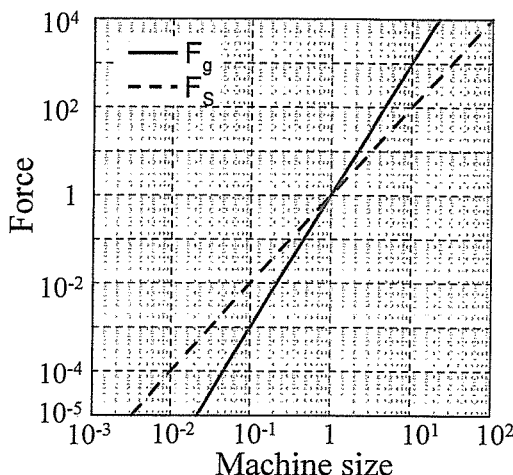


図7 マシンサイズに対するマシンに働く力の関係  
Fig. 7. Relation between force and machine size.

時、推力、抵抗力は 1 と仮定した。マシンサイズを小さくした場合、抵抗力は寸法の 2 乗に比例して減少するのに対し、磁場勾配の力は寸法の 3 乗に比例して減少する。従って、マシンサイズの減少により、抵抗力が磁場勾配による力を上回り動作不可能となるため、マイクロマシンの駆動力として磁気力は不利であると考えられている。

以上の結果より、磁気トルクが駆動力であり、負荷トルクが抵抗力となる、回転し推進する磁気マイクロマシンはマシンを小型化しても推進可能であることが示された。

### 3. 実験

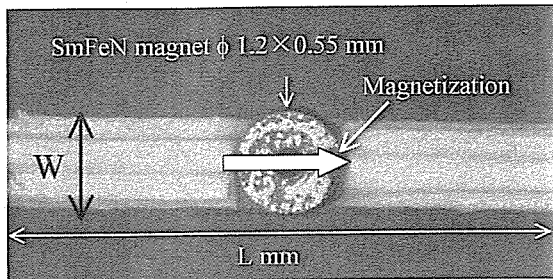
〈3・1〉 素子構成 第 2 章で検討した負荷トルクとマシンサイズの関係を検討するために、ミリサイズのマシンと数十  $\mu\text{m}$  サイズのマシンを作製した。図 8 に作製したミリサイズの平面型磁気マイクロマシンの写真を示す。数十  $\mu\text{m}$  サイズのマシンを薄膜を用いて作製することを考慮してブレードの一部分を平面的に取り出した構造とした<sup>(12)(13)</sup>。このマイクロマシンは、SmFeN 磁石 ( $\phi 1.2 \times 0.55 \text{ mm}$ ) とプラスチック板 (厚さ; 0.2 mm, 幅; 0.2, 0.8, 1 mm) から構成されている。3 種類の幅のプラスチック板は磁石の周りに階段状に並べられ、傾斜が磁石を挟んで逆方向となるように配置されている。マイクロマシンの厚さは 0.6 mm であ



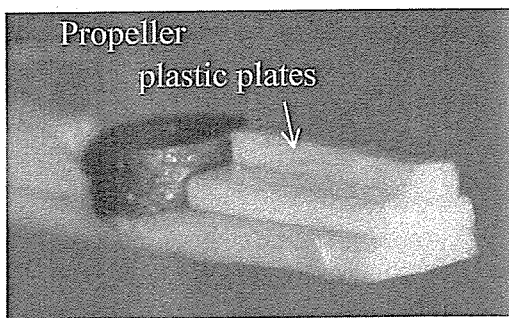
り、マシン全体の長さは3~10 mmとした。これをmm-Typeとする。図9に製作した数十μmサイズのマイクロマシンのSEM写真を示す。このマイクロマシンはCuとTi薄膜、駆動用の磁石としてSmCo薄膜磁石をスパッタリング法を用いて成膜し作製した。マシンの形状は、ミリサイズのマシンと同様に幅の異なる3種類の薄膜を積層し、傾斜を作製した。これをμm-Typeとする。各層の構成は、1層目に、Cu, Ti, SmCo薄膜をそれぞれ2μm, 1μm, 1μm成膜し、2, 3層目はTi, Cuをそれぞれ1μm, 3μm成膜した。それぞれの膜の厚さは4μmとしたので、マシン全体の厚さは12μmとなった。膜の幅は1層目から30μm, 20μm, 10μmで

ある。マシンの長さは60μm, 80μm, 100μm, 120μmの4種類作製した。両タイプとも、磁石の磁化方向は、図8, 図9の矢印に示すマシンの長手方向とした。外部から回転磁界を印加するとマシンが回転し、マシンは図10に示すマシンの厚さ方向に推進する。また、作製の都合上、マシンの幅Wは一定とし、マシンの長さLのみを変化させて作製した。

〈3・2〉 実験方法 マシンは回転により流体から負荷トルクを受ける。マシンの回転周波数の増加と共に負荷トルクは増加し、ある周波数を越えるとマシンの回転は回転磁界の同期から外れる。この周波数を脱調周波数と定義する。この脱調周波数において、負荷トルクと磁気トルクは等しいため、脱調周波数と磁気トルクの関係測定することで、負荷トルクの測定を行った。実験には、mm-Type, μm-Typeそれぞれ、動粘度 $1 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $0.65 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルを使用した。mm-Typeのマシンは、シリコンオイルで満たされた直径16 mmの試験管内にマシンを入れ、外部から12 kA/mの回転磁界を印加し、脱調周波数を測定した。このとき印加磁界強度と磁石の磁気モーメント



(a) Top view



(b) Side view

図8 平面型磁気マイクロマシン (mm-Type)

Fig. 8. Magnetic micro-machine of plane structure (mm-Type).

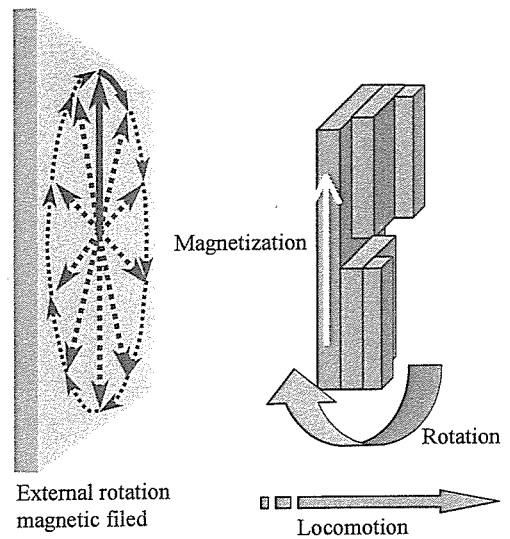


図10 平面型磁気マイクロマシンの回転方向と推進方向

Fig. 10. Schematic view of the direction of the rotation and direction of the locomotion.

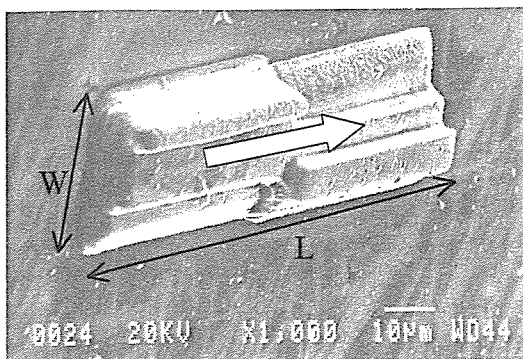


図9 平面型磁気マイクロマシンのSEM写真 (μm-Type)

Fig. 9. SEM photograph of the magnetic micro-machine of planar structure (μm-Type).

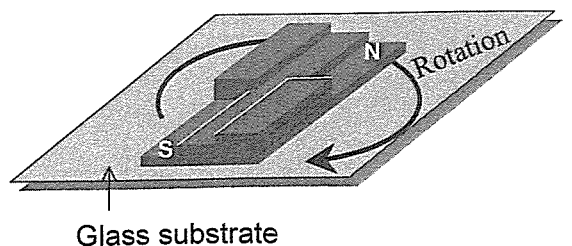


図11 負荷トルクの測定方法の概略図 (μm-Type)  
Fig. 11. Schematic view of the direction of the rotation and direction of the locomotion (μm-Type).

から計算される磁気トルクは(2)式より与えられる。実験に使用した磁石の残留磁束密度は 0.32 T であり、外部印加磁界強度は 12 kA/m であるので、磁気トルクは 4.8  $\mu\text{Nm}$  と計算される。 $\mu\text{m}$ -Type のマシンを用いた実験系を図 11 に示す。マシンを載せた基板をシリコンオイルで満たされた容器に入れ、基板に平行な回転磁界を印加しマシンを回転させる。回転磁界の強度を変化させて脱調周波数の測定を行った。磁気トルクは、成膜した磁石の残留磁束密度の実測値 0.9 T と回転磁界強度から(2)式を用いて求めた。回転周波数が 3 Hz 以上になると、回転の様子を観察することが困難となるため、周波数は 3 Hz 以下で測定を行った。

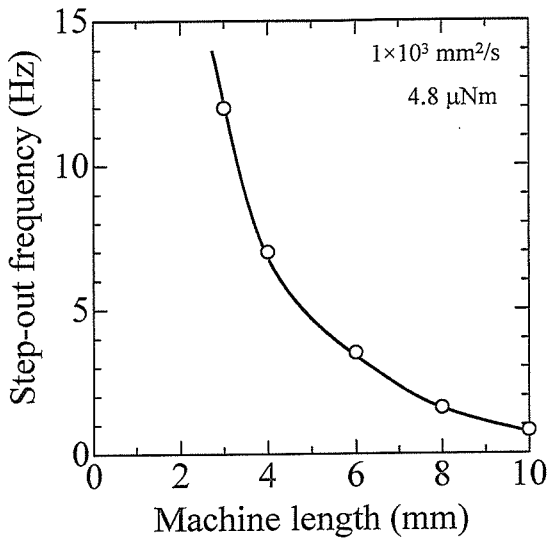


図 12 マシンサイズと脱調周波数の実験結果 (mm-Type)

Fig. 12. Relation between step-out frequency and machine size L (mm-Type).

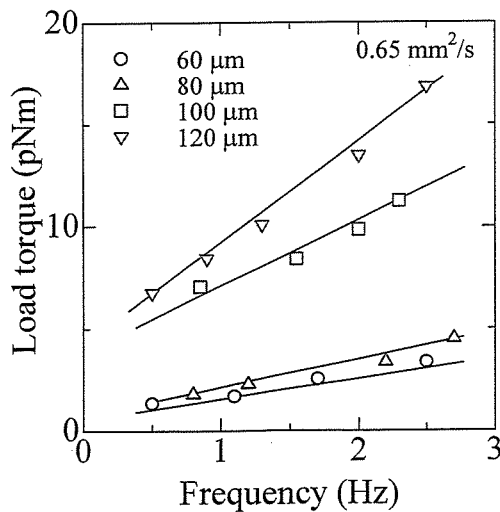


図 13 周波数と負荷トルクの実験結果 (mm-Type)  
Fig. 13. Relation between load torque and frequency (mm-Type).

〈3・3〉 実験結果 図 12 に mm-Type のマシンを用いたマシン長さに対する脱調周波数の実験結果を示す。実験の結果、マシン長さの増加に伴い、脱調周波数は減少した。従って、同一周波数における負荷トルクはマシン長さの増加に伴い増加した。(5)式より、負荷トルクは表面積と回転半径に比例する。本実験では、マシンの幅を  $W$  と一定とし、マシンの長さ  $L$  を変化させている。従って、(5)式より、負荷トルクは、(8)式で表される。

$$T_L = \mu \cdot u \cdot A \cdot D$$

$$= \mu \cdot u \cdot (2 \cdot W \cdot L) \cdot L/2 \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $T_L$ : 負荷トルク [Nm],  $D$ : 回転半径 [m],  $A$ : 表面積 [ $\text{m}^2$ ],  $\mu$ : 液体の粘性 [ $\text{N s/m}^2$ ],  $u$ : 変位速度 [1/s],  $W$ : マシン幅 [m],  $L$ : マシン長さ [m]

従って、マシンの長さ  $L$  の 2 乗に比例して増加したと考えられる。一方、図 13 に、 $\mu\text{m}$ -type のマシンを用いた周波数に対する負荷トルクの実験結果を示す。各マシン長さにおいて、周波数に比例して負荷トルクは増加し、マシン長さの増加に伴い負荷トルクが増加した。これは、mm-Type のマシンと同様の結果が得られた。

〈3・4〉 考察 実験結果から、マシンサイズと負荷トルクの関係について検討を行うために、幅と長さの比が約 1 対 3 の形状を用いて比較を行った。mm-Type のマシンより、幅 1 mm、長さ 3 mm のマシンは 12 Hz のとき負荷トルクが 4.8  $\mu\text{Nm}$  となり、1 Hz 当りの負荷トルクは 0.4  $\mu\text{Nm}$  となった。それに対して、mm-Type の約 1/33 倍となる幅 30  $\mu\text{m}$ 、長さ 80  $\mu\text{m}$  の  $\mu\text{m}$ -Type のマシンは、約 3 Hz のとき負荷トルクは 5 pNm となり、1 Hz 当りの負荷トルクは約 1.6 pNm となった。(3)式より負荷トルクは液体の粘性に比例することから、mm-Type と  $\mu\text{m}$ -Type の実験に用いた液体の粘性が約  $10^3$  倍であることを考慮して、 $\mu\text{m}$ -Type の負荷トルクは mm-Type の約 1/250 倍の負荷トルクと予想より大きな値となった。これは、mm-Type のマシンは、壁から十分離れた位置で回転しているため、回転による流体からの負荷トルクのみである。それに対し、 $\mu\text{m}$ -Type のマシンは、基板上で回転しているため、回転による流体からの負荷トルクの他に、基板との摩擦による負荷トルクの影響を受け、全体の負荷トルクが大きくなったと考えられる。従って、マシンの小型化による負荷トルクの減少率はマシンサイズの 3 乗より大きなものとなったが、数十  $\mu\text{m}$  まで小型化したマイクロマシンは数 pNm の磁気トルクで駆動可能であり、膜厚 1  $\mu\text{m}$  の薄膜磁石で実現可能であることが示された。

#### 4. まとめ

本論文では、マシンの小型化には不利であると考えられている磁気力を用いた磁気マイクロマシンの小型化について検討を行った。検討の結果、磁気マイクロマシンの駆動力である磁気トルクと抵抗力である負荷トルクはそれぞれ寸法の 3 乗に比例することを明らかにした。従って、回転し推進する磁気マイクロマシンは、駆動力、抵抗力共に寸

法の 3 乗に比例するため、マシンの小型化にはスケールリング則の制限を受けないことを明らかにした。

(平成 17 年 11 月 25 日受付, 平成 18 年 6 月 6 日再受付)

## 文 献

- (1) M. Esashi : "Physics of the Micro World and Micromachines", *J. Rob. Soc. Jpn.*, Vol.14, No.8, pp.1086-1089 (1996) (in Japanese)  
江刺正喜:「微小世界の物理学とマイクロマシン」, 日本ロボット学誌, 14, 8, pp.1086-1089 (1996)
- (2) I. Shimoyama : "Scale Effects in Microrobots", *J. Rob. Soc. Jpn.*, Vol.14, No.8, pp.1106-1108 (1996) (in Japanese)  
下山 勲:「マイクロロボットのスケール効果」, 日本ロボット学誌, 14, 8 pp.1106-1108 (1996)
- (3) M. Sendoh, K. Shimazaki, K. Ishiyama, M. Inoue, and K. I. Arai : "Swimming Properties of Spiral-Type Magnetic Micro-machines", *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol.23, No.4-2, pp.1657-1660 (1999) (in Japanese)  
仙道雅彦・島崎克彦・石山和志・井上光輝・荒井賢一:「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」, 応用磁気学誌, 23, 4-2, pp.1657-1660 (1999)
- (4) M. Tomie, A. Takiguchi, T. Honda, and J. Yamasaki : "Turning Performance of Fish-Type Microrobot Driven by External Magnetic Field", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.41, No.10, pp.4015-4017 (2005)
- (5) K. I. Arai, W. Sugawara, K. Ishiyama, T. Honda, and M. Yamaguchi : "Fabrication of small flying machines using magnetic thin films", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.31, No.6, pp.3758-3760 (1995)
- (6) N. Miki and I. Shimoyama : "Soft-Magnetic Rotational Microwings in an Alternating Magnetic Field Applicable to Microflight Mechanisms", *IEEE J Microelectromec. Syst.*, Vol.12, No.2, pp.221-227 (2003)
- (7) K. Ishiyama, M. Sendoh, A. Yamazaki, and K. I. Arai : "Swimming micro-machine driven by magnetic torque", *Sens. Actuators. A*, Vol.91, No.1-2, pp.141-144 (2001)
- (8) T. Kambe : "Fluid Dynamics", Shokabo (1995) (in Japanese)  
神部 勉:「流体力学」, 裳華房 (1995)
- (9) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, T. Hayase, and K. I. Arai : "Three-Dimensional Analysis of Swimming Properties of the Spiral-Type Magnetic Micro-Machine", *Sens. Actuators. A*, Vol.105, No.1, pp.103-108 (2003)
- (10) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, R. Kato, M. Nakano, and H. Fukunaga : "Wireless Micro Swimming Machine With Magnetic Thin Film", *JMMM*, Vol.272-276, No.4, pp.e1741-e1742 (2004)
- (11) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, and M. Inoue : "Wireless Controlling of the Swimming Direction of the Spiral-Type Magnetic Micro-Machines", *Trans. IEE Japan*, Vol.120-A, No.3, pp.301-306 (2000-3) (in Japanese)  
仙道雅彦・山崎 彩・石山和志・荒井賢一・井上光輝:「スパイラル型磁気マイクロマシンのワイヤレス泳動方向制御」, 電学論 A, 120, 3, pp.301-306 (2000-3)

- (12) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. Morooka, and K. I. Arai : "Fabrication of Magnetic Micro-Machine of Planar Structure", *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol.29, No.2, pp.157-160 (2005) (in Japanese)  
山崎 彩・仙道雅彦・石山和志・師岡ケイ子・荒井賢一:「平面型構造の磁気マイクロマシンの試作」, 応用磁気学誌, 29, 2, pp.157-160 (2005)
- (13) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, and K. I. Arai : "Wireless Magnetic Micro-Machine of Planar Structure with Magnetic Thin Film", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.41, No.10, pp.4021-4023 (2005)

山崎 彩 (学生員)



(学生員) 2000年3月東北大学工学部電気工学科卒業。2005年9月東北大学大学院工学研究科電気通信工学専攻後期課程修了。同年10月東北大学電気通信研究所研究生。現在に至る。

仙道雅彦 (正員)



(正員) 1999年3月東北大学工学部電気工学科卒業。2002年4月日本学術振興会特別研究員(DC)。2003年3月東北大学大学院工学研究科電気通信工学専攻後期課程修了。2004年4月東北大学電気通信研究所助手。2005年4月(財)みやぎ産業振興機構研究員。現在に至る。

石山和志 (正員)



(正員) 1986年東北大学工学部電気工学科卒業。1988年3月東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士前期課程修了。同年4月東北大学電気通信研究所助手。2003年1月東北大学電気通信研究所助教授。現在に至る。

荒井賢一 (正員)



(正員) 1966年東北大学工学部電子工学科卒業。1971年東北大学大学院博士課程修了。同年東北大学助手, 電気通信研究所。1975年東北大学助教授, 電気通信研究所・1986年東北大学教授, 電気通信研究所。現在に至る。

日本機械学会論文集  
Transactions of the Japan Society of  
Mechanical Engineers

別 刷

72 卷 723 号 C 編

(平成18年11月)

社団法人 日本機械学会

3次元泳動特性解析法を用いたらせん型磁気  
マイクロマシンの形状設計\*山崎 彩<sup>\*1</sup>, 仙道 雅彦<sup>\*2</sup>, 石山 和志<sup>\*3</sup>  
早瀬 敏幸<sup>\*4</sup>, 荒井 賢一<sup>\*1</sup>Design of Spiral-Type Magnetic Micro-machine with  
Three-Dimensional Analysis of Swimming PropertiesAya YAMAZAKI, Masahiko SENDOH, Kazushi ISHIYAMA<sup>\*5</sup>,  
Toshiyuki HAYASE and Ken Ichi ARAI<sup>\*5</sup> Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University,  
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8577 Japan

Magnetic micro-machines are driven by a magnetic field. They require no power supply cables, no batteries, and no controlling systems on the machine body. In previous studies, we examined the swimming properties of a spiral-type magnetic micro-machine (outer diameter of 0.1 or 1.5 mm) by the experiment and the analysis. This micro-machine is composed of the body of cylinder and the spiral structure. Pulling the thing and the transportation of the thing are given to the application of the micro-machine. At this time, a big load works in the machine. It is necessary to improve thrust to swim against the drag. In this paper, we examined about the influence that machine shape and a spiral shape give to the swimming properties of micro-machine using the analysis. As machine shapes, the having body (Ref-Type) and no (Head-Type) were examined. As a spiral shape, the blade pitch was examined. It was found that the micro-machine of Head-Type suitable for the micro-machine that pulled the thing because the thrust was large. In the case of Ref-Type with the loading on the machine body, the spiral pitch of the maximum thrust was about 1 mm.

**Key Words:** Micro-machine, Mechatronics and Robotics, Numerical Analysis, Spiral, Rotational Magnetic Field

## 1.はじめに

著者らは先の研究において、らせん型磁気マイクロマシンの泳動特性について検討を行ってきた<sup>①</sup>。図1に磁気マイクロマシンの概略図を示す。磁気マイクロマシンは、磁石とらせん形状に加工されたワイヤから構成されている。磁石は直径方向に磁化されているため外部からの回転磁界に同期してマシンは回転する。マシンの回転がらせん部分で推力に変換され、マシンは推進する。磁気マイクロマシンの推進方向は、回転面に対して垂直であるため、回転磁界面の方向を変えることによりマシンの推進方向制御も可能となる<sup>②</sup>。

これまでの研究において、直径0.1～1.5 mmのマイクロマシンと幅広い粘度の液体を用いて、らせん型磁気マイクロマシンが幅広いレイノルズ数条件下( $10^{-7} < Re < 10^3$ )で駆動可能であることを実験と解析により明らかにした<sup>③-⑤</sup>。このような磁気力を駆動源とする磁気マイクロマシンは、ワイヤレスに駆動、制御できることから、生体内を移動する医療用マイクロマシン<sup>⑥-⑧</sup>や化学分析システム( $\mu$ TAS, Micro Total Analysis System)等に用いるマイクロポンプ<sup>⑨</sup>としての応用が考えられる。マイクロマシンの行う仕事として考えられることは、物をけん引したり、マシンに物を搭載して運搬す

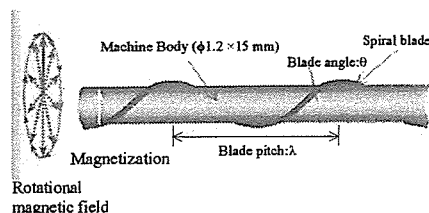


Fig. 1 Schematic view of spiral-type micro-machine (Ref-Type).

\* 原稿受付 2005年12月16日。

<sup>\*1</sup> 東北大学電気通信研究所(☎980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)。<sup>\*2</sup> (財)みやぎ産業振興機構(☎980-0011 仙台市青葉区上杉1-14-2)。<sup>\*3</sup> 正員, 東北大学電気通信研究所。<sup>\*4</sup> 正員, 東北大学流体科学研究所。

E-mail: ishiyama@riec.tohoku.or.jp

ることが挙げられる。このようなマシンが推進する際、マシンには推進方向に推力、推進を妨げる方向には流体からの力と外壁との摩擦力、マシンに取り付けた負荷に対する流体からの力などの抵抗力を受ける。この推力と抵抗力が等しいとき、マシンは等速運動を行う。従って、抵抗力に打ち勝ってマシンが推進するためには、推力の大きいマシン形状が求められる。本研究では、先の研究で確立された有限体積法<sup>(4)</sup>を用いた3次元泳動特性解析法<sup>(6)</sup>を用いてらせん型マイクロマシンのらせん形状、マシン形状の違いによる泳動特性への影響について検討を行い、マシン設計の指針を得ることを目的とした。

## 2. 素子構成

マシン形状の違いによる泳動特性への影響を検討するために、図1, 2に示すマイクロマシンについて検討を行った。図1は直径12 mm、長さ15 mmの円柱形の胴体に高さ0.15 mm幅0.2 mmのらせんを巻きつけた構造である。これをRef-Typeとする。それに対して、図2はRef-Typeの胴体の代わりに、直径12 mm、厚さ0.5 mmの円盤をらせんの先端に取り付けた構造である。これをHead-Typeとする。この2種類のマシン形状を用いて、胴体の有無がマシンの泳動に与える影響について検討を行う。らせん形状が泳動特性に与える影響について検討を行うために、図1に示す $\theta$ をらせん角度、隣り合うらせん間距離 $\lambda$ をらせんピッチと定義し、らせん角度 $\theta$ を21, 30, 38, 46, 58, 72°に変化させて検討を行った。このとき、マシン胴体径12 mm、マシン長さ15 mm一定とする。さらに図3に示すように同じらせん角度のらせんを多条巻きし、同一らせん角度において隣り合うらせん間距離を変化させてらせんピッチの影響について検討を行った。検討を行ったらせん角度 $\theta$ 、らせんピッチ $\lambda$ 、らせんに沿った全体の長さを表1に示す。また、解析結果の妥当性について検討を行うために、図4(a), (b)に示すようにRef-TypeとHead-Typeのマイクロマシンを作製し、実験を行った。Ref-Type, Head-Typeにはそれぞれ $\phi 1.2 \times 15$  mmのNdFeB磁石(残留磁束密度: 1 T)、 $\phi 1.2(0.35) \times 0.55$  mmのSmFeN磁石(残留磁束密度: 0.64 T)を使用した。らせんには、直径0.15 mmのタングステンワイヤを用いた。

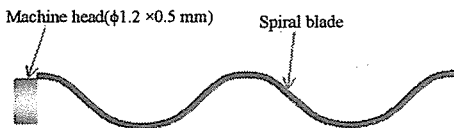


Fig.2 Schematic view of spiral-type micro-machine (Head-Type).

## 3. マシン形状

**3.1 泳動速度特性** 図1, 2に示すRef-TypeとHead-Typeのマシン形状について解析と実験を行った。らせん角度とらせん条数は46°, 1条とした。実験の都合上、Ref-Typeは動粘度0.1 m<sup>2</sup>/s, Head-Typeは動粘度0.01 m<sup>2</sup>/sのシリコンオイルを使用し、印加磁界強度はどちらも12 kA/mである。この2種類の形状を用いて、らせん部分の胴体の有無が泳動特性へ与える影響

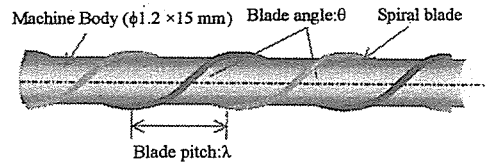
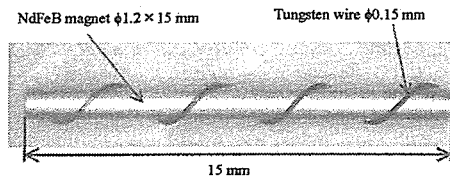


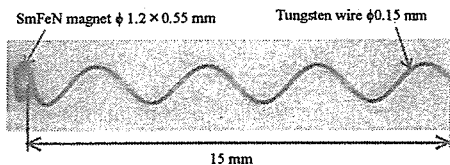
Fig.3 Schematic view of spiral-type micro-machine (Ref-Type, Blade number 2).

Table 1 Size of blade of micro-machine.

Blade angle $\theta$ \ Blade number	1	2	3	4	6	8
21°	9.6					
	16.1					
30°	6.4	3.2		1.6		0.8
	17.4	34.8		69.6		139.2
38°	4.8	2.4	1.6	1.2	0.8	0.6
	19.0	38.0	57.0	76.0	114.0	152.0
46°	3.6	1.8	1.2	0.9	0.6	
	21.6	43.2	64.8	86.4	129.6	
58°	2.4	1.2	0.8	0.6		
	28.3	56.6	84.9	113.2		
72°	1.2	Upper: Blade pitch $\lambda$ (mm)				
	48.5	Lower: Total length of blade (mm)				



(a) Ref-Type



(b) Head-Type

Fig.4 Photograph of spiral-type micro-machine.

について検討を行う。図5にRef-Type, Head-Typeの周波数に対する泳動速度の実験と解析結果を示す。プロットが実験結果、線が3次元泳動特性解析法による解析結果を示す。図中に示す矢印はマシンが回転磁界の同期から外れる周波数であり、以後この周波数を脱調周波数と呼ぶ。Ref-Type, Head-Typeともに脱調周波数以下において周波数に比例して速度は増加した。Ref-Type, Head-Typeそれぞれの1回転当りの推進距離は、0.086, 12 mmであった。従って、液体の動粘度は異なるが、Head-TypeはRef-Typeより泳動が速いことが明らかとなった。動粘度の影響については次節で述べる。

**3.2 推力と抵抗力** Head-Typeの泳動が速い理由について検討を行うために、マシンの速度とマシンに働く推力、抵抗力の関係について解析を行った。解析では、マシンが流体から受ける抵抗力のみを計算した。図6にマシンの泳動速度に対するマシンに働く推力と抵抗力の解析結果を示す。周波数は1 Hzと固定した。実線と破線がRef-Typeの推力と抵抗力、一点鎖線と二点鎖線がHead-Typeの推力と抵抗力である。各マシンの推力と抵抗力が等しい泳動速度が周波数1 Hzにおけるマシンの泳動速度となる。本章では、2種類の異なる動粘度の液体を用いていることから、液体の動粘度と推力、抵抗力の関係について検討を行う。推力は、推進方向のらせん前後の圧力差によるものである。流体力学における運動量保存則である定常運動でのナビエ・ストークス方程式<sup>(2)</sup>を式(1)に示す。

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla \left( \frac{p}{\rho_0} \right) + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{V}$ は速度、 $p$ は圧力、 $\rho_0$ は密度、 $\nu$ は動粘度である。本研究では、低レイノルズ数条件下において検討を行っているため、左辺の慣性項は無視できることから、右辺第一項の圧力項は粘度に比例する。従って、らせん前後の圧力差で求められる推力は液体の粘度に比例する。一方、抵抗力はマシン表面のせん断力によるものであり、せん断力<sup>(3)</sup>は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} F_s &= \tau \cdot A \\ &= \mu \cdot u \cdot A \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $F_s$ はせん断力、 $\tau$ はせん断応力、 $A$ は表面積、 $\mu$ は液体の粘度、 $u$ は変形速度である。式(2)より、せん断力は液体の粘度に比例するため、抵抗力も粘度に比例する。従って、推力、抵抗力ともに粘度に比例する。これらの結果を踏まえて、マシン形状と泳動特性の関係について検討を行う。Head-Typeの速度が速い

要因として、マシン速度0における推力と抵抗力の差が大きいことが考えられる。マシン速度0とは、その場でマシンが回転し、推進していない状態である。Head-Typeは胴体が無いので、らせんの周囲で自由に流れが存在するのに対して、Ref-Typeは胴体により流れが妨げられ、推力が低下したと考えられる。マシン速度0におけるRef-Typeの推力はHead-Typeの約4倍であった。液体の粘度が10倍であることを考慮すると、Head-Typeの推力は大きい。一方、抵抗力は表面積に比例するため、胴体無く、マシンの表面積が少ないHead-Typeの抵抗力が小さくなった。従って、Head-Typeは推力と抵抗力の差が大きくなったと考えられる。

以上のことから、Head-Typeは抵抗力が少なく、推力が大きいので、推力と抵抗力の等しくなる泳動速度が高速側にシフトしたと考えられる。

**3.3 負荷トルク** 磁気マイクロマシンは、式(3)で表される磁気トルクにより回転し推進する。

$$T_M = M \cdot H \cdot \sin \delta \quad (3)$$

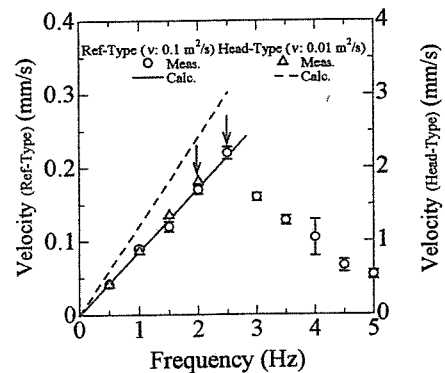


Fig 5 Relation between frequency and velocity.

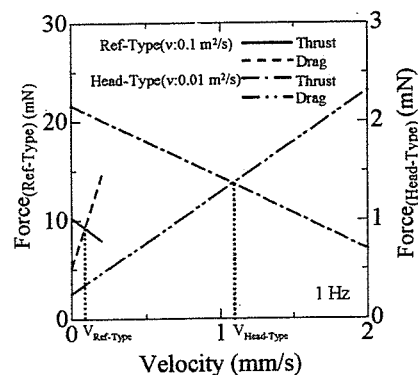


Fig 6 Relation between velocity of machine and force.

ここで、 $T_m$ は磁気トルク(N m)、 $M$ は磁化(Wb・m)、 $H$ は磁界強度(A/m)、 $\delta$ は $M$ と $H$ の位相差である。回転するマイクロマシンは流体から負荷トルクを受けるため、負荷トルクが磁気トルクを上回ったとき、マイクロマシンは回転磁界の同期から外れる。磁気トルクと負荷トルクが等しい周波数が脱調周波数である。従って、脱調周波数を測定することで、負荷トルクを見積もることが可能となる。表2に、1 Hzにおける負荷トルクの実験と解析結果を示す。実験では、磁界強度を4~12 kA/mに変化させて脱調周波数を測定し、式(3)を用いて磁気トルクを求め、脱調周波数における負荷トルクとした。求めた負荷トルクから1 Hz当りの負荷トルクの平均値を求め実験値とした。実験と解析の結果、負荷トルクはほぼ一致した結果が得られた。負荷トルク Ref-Typeと Head-Typeの1 Hzあたりの負荷トルクはそれぞれ、574、27  $\mu$ Nm/Hzであり、Ref-TypeはHead-Typeの約21倍となった。負荷トルクはせん断力と圧力によるため、推力と同様に、液体の粘度に比例する。従って、液体の粘度が10倍であることを考慮しても、Ref-Typeの方が負荷トルクは大きい結果が得られた。解析結果より、負荷トルクを胴体(Cylinder)とらせん(Blade)表面で発生するせん断力、端面で受ける抵抗力(Disk)、らせん前後の圧力差(Pressure)に分けた場合、Ref-Typeの負荷トルクの約72%は胴体部のせん断力(Shear(Cylinder))である。従って、Head-Typeは胴体が無いため、表面積が減少し、負荷トルクが小さくなったと考えられる。

以上の結果より、Head-Typeは推力が大きく、負荷トルクが小さい形状であることが示された。

Table 2 Results of load torque.

		Ref-Type	Head-Type
Meas.		55.3	2.6
Analysis	Total	57.4	2.7
	Shear (Cylinder)	40.9	
	Shear (Blade)	10.4	1.3
	Pressure	18	48
	Disk	5.1	0.9
		9	33
	1.0	0.5	
	1	19	

(Upper: Load torque ( $\mu$ Nm))  
(Lower: Percent (%))

#### 4. らせん形状

##### 4.1 Ref-Type

4.1.1 推進方向成分 図7に動粘度0.1 mPa・s、周波数1 Hzにおけるらせんピッチに対するマシンの推力の解析結果を示す。解析の結果、全てのらせん角度においてらせん条数の増加とともに推力は増加し、らせんピッチが約1 mm付近で最大値が得られた。推力はらせんのみで発生するので、らせん単位長さ当りに発生する推力を図8に示す。らせんピッチが広い場合、隣のらせんの影響が少なく、単位長さ当りの推力値が大きい。らせんに沿った全体の長さが短いため、全体の推力値が小さい。従って、図7においてらせんピッチの減少とともに、らせん全長が長くなるため、全体の推力値が増加したと考えられる。それに対して、らせんピッチが狭い場合、隣のらせんの影響を受け、単位長さ当りの推力値が小さい。従って、全体のらせんの長さは長い。単位長さあたりの推力が小さいため、図7においてらせんピッチの減少とともに、推力値は減少した。以上の結果から、らせんピッチが約1

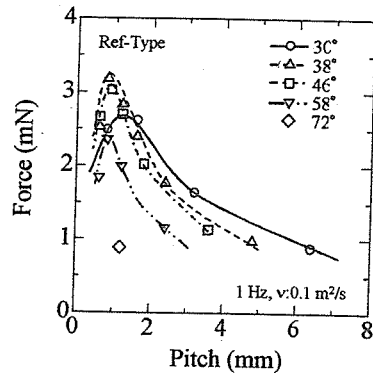


Fig. 7 Relation between blade pitch and force (Ref-Type).

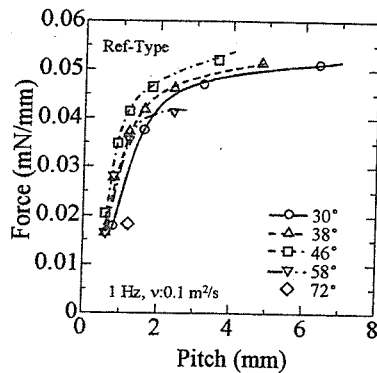


Fig. 8 Relation between blade pitch and force per unit (Ref-Type).



mm 付近において、推力の最大値が得られた。図 9 に動粘度  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ 、周波数  $1 \text{ Hz}$  におけるらせんピッチに対するマシンの泳動速度の解析結果を示す。解析の結果、推力の結果と同様にらせん条数の増加とともに泳動速度は速くなり、各らせん角度においてらせんピッチが約  $1 \text{ mm}$  付近において最大値が得られた。従って、推力の大きいらせん形状は泳動速度も速いことが示された。

**4.1.2 回転方向成分** 図 10 に動粘度  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ 、周波数  $1 \text{ Hz}$  におけるらせんピッチに対する負荷トルクの解析結果を示す。らせん条数の増加に関係なく、らせんピッチが約  $1 \text{ mm}$  以上では、らせん角度によらずほぼ一定の値となり、 $1 \text{ mm}$  以下ではらせんピッチの減少と共に負荷トルクは増加した。負荷トルクの主な要因はマシン表面に働くせん断力によるものであるため、液体の粘度と表面積に比例する。図 11 にらせんピッチに対するマシン全体の表面積の計算結果を示す。負荷トルクの結果と同様にマシン全体の表面積はらせ

ん角度には依存せず、らせんピッチの減少と共に表面積は増加した。

以上の結果、Ref-Type はらせん角度によらずらせんピッチが  $1 \text{ mm}$  付近において推力が大きく、負荷トルクが小さい結果が得られた。

**4.2 Head-Type**

**4.2.2 推進方向成分** 図 12 にらせん角度に対する泳動速度の実験と解析結果を示す。○プロットは実験結果、△プロットが解析結果を示す。実験において、磁石部分が下がり傾いた状態で泳動しているため、解析より速度が低下したと考えられる。実験と解析の結果、Ref-Type と比較して、泳動速度の最大値は  $30^\circ$  付近と低角度側にシフトした結果が得られた。図 13 に推力の解析結果を示す。解析結果より、推力は泳動速度と同様に、 $30^\circ$  から  $45^\circ$  付近において最大値が得られた。図 14 に単位長さ当りの推力値と、らせん全長のグラフを示す。Ref-Type は  $45^\circ$  付近から減少しているのに対して、Head-Type は  $30^\circ$  付近より単位長さ当

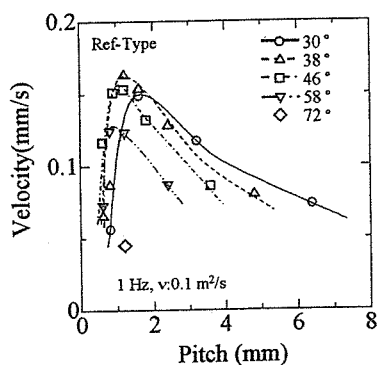


Fig. 9 Relation between blade pitch and velocity (Ref-Type).

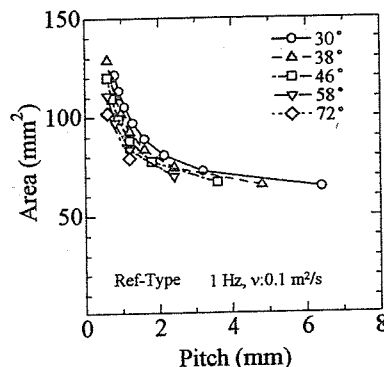


Fig. 11 Relation between blade pitch and surface area of machine (Ref-Type).

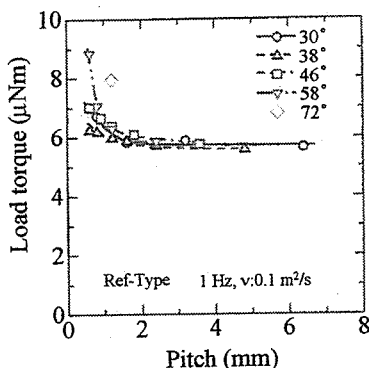


Fig. 10 Relation between blade pitch and load torque (Ref-Type).

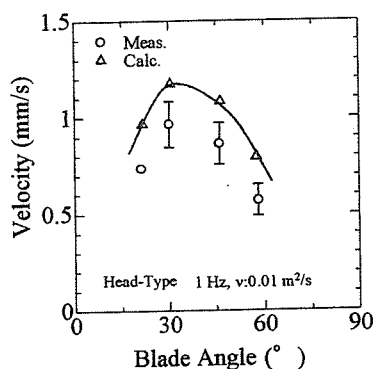


Fig. 12 Relation between blade angle and velocity (Head-Type).

りの推力値は減少している。Head-Type は胴体がないため、らせんの周辺を自由に流れることができるため、らせん下部においても、流れが存在する。従って、隣のらせんの影響を受けるらせんピッチが狭まり、 $30^\circ$  付近より影響が出始めている。 $30^\circ$  付近までは、らせ

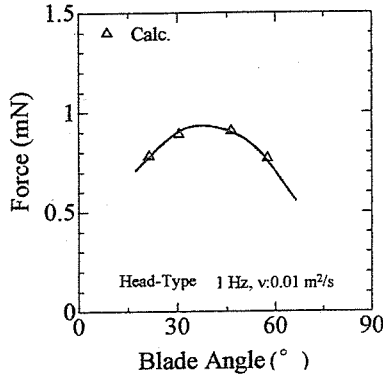


Fig. 13 Relation between blade angle and force (Head-Type).

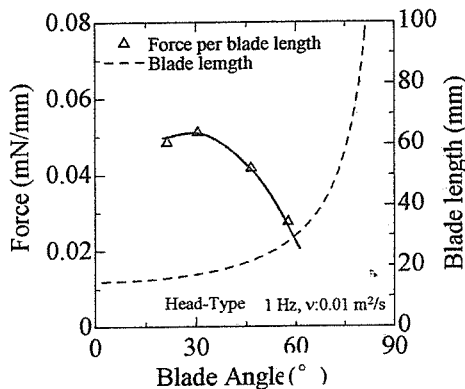


Fig. 14 Relation between blade angle and force per unit (Head-Type).

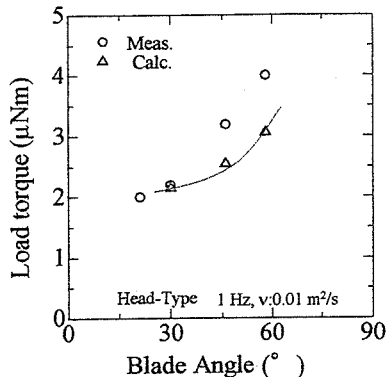


Fig. 15 Relation between blade angle and load torque (Head-Type).

ん全長の増加により推力値は増加し、 $30^\circ$  以上では、らせん全長は増加するが、単位長さ当りの推力値が減少するため推力値が減少したと考えられる。

以上の結果より、Ref-Type と比較して、Head-Type は低角度側に推力の最大値がシフトしたため、泳動速度についても  $30^\circ$  付近において最大値が得られたと考えられる。

**4.2.2 回転方向成分** 図 15 に負荷トルクの実験と解析結果を示す。実験と解析の結果、負荷トルクはらせん角度の増加に伴い、増加することが示された。Head-Type の負荷トルクの主な要因はらせん表面のせん断力によるものである。従って、らせん表面積の増加に伴い、負荷トルクは増加している。

## 5. まとめ

3次元泳動特性解析法を用いて磁気マイクロマシンの最適形状について検討を行った。Head-Type のマイクロマシンは、推力が大きい形状であることから、物をけん引するマイクロマシンに適していることが明らかとなった。このときのらせん角度は  $30^\circ$  付近が推力最大となる。物を搭載できる Ref-Type の場合、らせんピッチはらせん角度によらず、1 mm 付近において推力が最大となった。従って、用途に応じたマシン形状、らせん形状の設計を行う必要がある。

## 文 献

- (1) Sendoh M. et al., Effect of Machine Shape on Swimming Properties of the Spiral-Type Magnetic Micro-Machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 5 (1999) pp. 3688 - 3690.
- (2) Sendoh M. et al. Wireless Controlling of the Swimming Direction of the Spiral-Type Magnetic Micro-Machines, *Transaction IEE of Japan*, Vol. 120-A, No. 3 (2000) pp. 301-306.
- (3) Ishiyama K. et al., Swimming of Magnetic Micro-Machines under A Very Wide-Range of Reynolds Number Conditions, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4 (2001) pp. 2868 - 2870.
- (4) Yamazaki A. et al., Three-Dimensional Analysis of Swimming Properties of the Spiral-Type Magnetic Micro-Machine, *Sensors and Actuators A 105* No. 1 (2003) pp. 103-108.
- (5) Yamazaki A. et al., Wireless Micro Swimming Machine with Magnetic Thin Film, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* Vol. 272-276 (2004) pp. e1741-e1742.
- (6) Chiba. A. et al. *Journal of Magnetics Society of Japan* 29 343-346, 2005.
- (7) Chiba. A. et al. *Journal of Magnetics Society of Japan* 28 1067-1073, 2004.
- (8) Soma. M. et al. *Journal of Magnetics Society of Japan* 29 594-597, 2004.
- (9) Kikuchi K. et al. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, 4012 - 4014, 2005.
- (10) Hisatomi. S. et al. Micropump with a Spiral-Type Magnetic Micromachine, *Journal of Magnetics Society of Japan* Vol. 29, No. 2 (2005) pp. 76-179.
- (11) T. Hayase, et al., Numerical Calculation of Convective Heat Transfer Between Rotating Coaxial Cylinders With Periodically Embedded Cavities, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 114 (1992) pp. 589-597.
- (12) T. Kambe: "Fluid Dynamics", Shokabo (1995) pp. 38, 52 (in Japanese).
- (13) T. Ikui : "Nenseiryutainonkigaku", Rikougakusya (1990) pp. 4 (in Japanese).

---

## **A Phase II Study of the Global Dose and Schedule of Capecitabine in Japanese Patients with Metastatic Colorectal Cancer**

**Ichinosuke Hyodo<sup>1</sup>, Kuniaki Shirao<sup>2</sup>, Toshihiko Doi<sup>3</sup>, Kiyohiko Hatake<sup>4</sup>, Yasuaki Arai<sup>2</sup>, Kensei Yamaguchi<sup>5</sup>, Takao Tamura<sup>6</sup>, Shoji Takemiya<sup>7</sup>, Hiroya Takiuchi<sup>8</sup>, Kazuhiko Nakagawa<sup>9</sup> and Hideyuki Mishima<sup>10</sup>**

<sup>1</sup>University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, <sup>2</sup>National Cancer Center Hospital, Tokyo, <sup>3</sup>National Cancer Center Hospital East, Kashiwa, Chiba, <sup>4</sup>Cancer Institute Hospital, Tokyo, <sup>5</sup>Saitama Cancer Center, Saitama, <sup>6</sup>Kobe University Graduate School of Medicine, Kobe, <sup>7</sup>Kanagawa Cancer Center, Yokohama, <sup>8</sup>Osaka Medical College, Takatsuki, Osaka, <sup>9</sup>Kinki University, Osakasayama, Osaka and <sup>10</sup>National Hospital Organization Osaka National Hospital, Osaka, Japan

## A Phase II Study of the Global Dose and Schedule of Capecitabine in Japanese Patients with Metastatic Colorectal Cancer

Ichinosuke Hyodo<sup>1</sup>, Kuniaki Shirao<sup>2</sup>, Toshihiko Doi<sup>3</sup>, Kiyohiko Hatake<sup>4</sup>, Yasuaki Arai<sup>2</sup>, Kensei Yamaguchi<sup>5</sup>, Takao Tamura<sup>6</sup>, Shoji Takemiya<sup>7</sup>, Hiroya Takiuchi<sup>8</sup>, Kazuhiko Nakagawa<sup>9</sup> and Hideyuki Mishima<sup>10</sup>

<sup>1</sup>University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, <sup>2</sup>National Cancer Center Hospital, Tokyo, <sup>3</sup>National Cancer Center Hospital East, Kashiwa, Chiba, <sup>4</sup>Cancer Institute Hospital, Tokyo, <sup>5</sup>Saitama Cancer Center, Saitama, <sup>6</sup>Kobe University Graduate School of Medicine, Kobe, <sup>7</sup>Kanagawa Cancer Center, Yokohama, <sup>8</sup>Osaka Medical College, Takatsuki, Osaka, <sup>9</sup>Kinki University, Osakasayama, Osaka and <sup>10</sup>National Hospital Organization Osaka National Hospital, Osaka, Japan

Received March 1, 2006; accepted April 6, 2006; published online July 6, 2006

**Background:** Although the standard 3-week capecitabine regimen (1250 mg/m<sup>2</sup> twice daily for 2 weeks followed by a 1-week rest) has shown superior activity and improved safety over bolus 5-fluorouracil/leucovorin in two large randomized phase III trials in Europe and in the United States, only a 4-week regimen of capecitabine (828 mg/m<sup>2</sup> twice daily for 3 weeks) has been studied in Japan. Therefore, we performed a phase II study to investigate the 3-week regimen of capecitabine in Japanese patients with metastatic colorectal cancer (MCRC).

**Methods:** Previously untreated patients with MCRC received oral capecitabine 1250 mg/m<sup>2</sup> twice daily for 2 weeks. Treatment was repeated every 3 weeks. Blood and urine samples were collected for pharmacokinetic analysis.

**Results:** Sixty patients were enrolled. The overall response rate was 35% [95% confidence interval (CI), 23–48%], and 52% of patients had stable disease. The median time to progression was 5.5 months (95% CI, 4.2–6.7 months). The median overall survival was 20.2 months (95% CI, 16.6–27.8 months). The most frequently occurring adverse drug reaction was hand-foot syndrome (all-grade 73%; grade 3 13%). Diarrhea, anorexia, nausea and stomatitis were each seen in 37% of patients. The pharmacokinetic profiles of capecitabine and its metabolites were similar to those reported in Caucasian patients.

**Conclusions:** The 3-week regimen of capecitabine was effective and well tolerated in Japanese patients with MCRC as well, and could be used as the basic regimen for future combination therapies.

*Key words:* capecitabine – colorectal cancer – phase II study

### INTRODUCTION

For more than 40 years, 5-fluorouracil (5-FU) has been the mainstay of treatment for patients with metastatic colorectal cancer (MCRC). Many incremental improvements to 5-FU regimens, such as biomodulation with leucovorin (LV) and schedule modification, have been made. For example, infusional 5-FU offers not only improved response rates, but also a small survival benefit, compared with those of bolus 5-FU according to data from randomized trials and

meta-analyses (1,2). However, continuous infusions require venous access lines and pumps with significant associated costs. Consequently, patients prefer to receive oral rather than intravenous chemotherapy (3,4).

Several new fluoropyrimidines, including uracil plus tegafur (UFT), capecitabine and S-1, have been developed and evaluated in the treatment of colorectal cancer. Capecitabine (Xeloda<sup>®</sup>) is an oral fluoropyrimidine carbamate designed in Japan to deliver 5-FU predominantly to tumor cells. After oral administration, capecitabine is rapidly and extensively absorbed through the intestine as an intact molecule, and then metabolized to 5-FU in three steps. In the first step, capecitabine is hydrolyzed to 5'-deoxy-5-fluorocytidine (5'-DFCR) by carboxylesterase primarily in the liver. 5'-DFCR is then converted to 5'-deoxy-5-fluorouridine (5'-DFUR) by cytidine deaminase, which is highly active in

For reprints and all correspondence: Ichinosuke Hyodo, Division of Gastroenterology, Institute of Clinical Medicine, Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8575, Japan. E-mail: ihyodo@md.tsukuba.ac.jp