

らせん型磁気マイクロマシンの泳動特性に対するらせん長の影響

Effect of Machine Length on Swimming Properties of Spiral Magnetic Micro-Machine

山崎彩・仙道雅彦・石山和志・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)

A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama and K. I. Arai

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

In previous studies, we examined a magnetic micro-machine composed a magnet and spiral structure. As the magnet was magnetized in the diameter direction, the micro-machine rotated in synchronism with the rotating magnetic field. This time, we fabricated two types of spiral magnetic micro-machines. One had the magnet and the wire of the spiral structure (head type). The other had the wire of the spiral structure (spiral type). We examined the influence of the micro-machine length. As a result, we found that the swimming velocity of the head type micro-machine depended on the machine length. The swimming velocity of the spiral type micro-machine does not depend on the machine length.

Key words: micro-machine, spiral blade, rotating magnetic field, swimming velocity, machine length

1. はじめに

著者らは, Fig. 1 に示すらせん形状に加工したワイヤと磁石から構成される磁気マイクロマシンを開発した^{1) 2)}. この磁気マイクロマシンは, 搭載している磁石が半径方向に着磁されているため, 外部から印加される回転磁界に同期して回転する. この磁石の回転がらせん部分で推力に変換され, 磁気マイクロマシンは推進する. 従って, 磁気マイクロマシンは, 電源を搭載せず, ワイヤレスでエネルギー供給が可能である. 磁気マイクロマシンは, 回転磁界面に垂直な姿勢を保ちながら推進を行う. 従って, 回転磁界

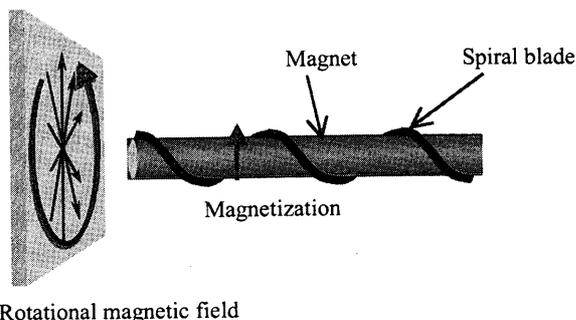


Fig. 1 Schematic view of magnetic micro-machine.

面の方向を制御することで, 磁気マイクロマシンの推進方向制御をワイヤレスで行うことが可能となる³⁾.

らせん型マイクロマシンの形状を決める要素として, マシンの直径, マシンの長さ, らせん形状がある. これらの要素が泳動特性に与える影響を検討し, 駆動に必要な磁気トルク, 効率の良い形状について検討し, マシン設計を行う必要がある. 我々は先の研究において, 有限体積法を用いた流体力学的泳動特性解析手法を確立し, マシン直径が 0.15~1.5 mm の磁気マイクロマシンについて, 実験と解析から泳動特性の検討を行った. その結果, らせん構造の磁気マイクロマシンは, レイノルズ数が 10^{-7} ~ 10^3 と幅広い条件下で駆動することができ, らせん構造が小形化に適した構造であることを示してきた^{4) 5)}. らせんの高さ, 角度の変化による泳動特性への影響について検討を行い, らせん形状に関する設計指針が得られた^{5) 6)}.

本研究では, これまでに検討を行っていないマシンの長さによる泳動特性の影響について実験と解析から検討を行った. 解析には, 先の研究で確立した有限体積法を用いた 3次元泳動特性解析手法⁷⁾を用いて行った.

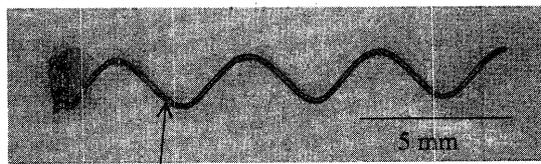
2. 磁気マイクロマシン

Fig. 2 (a), Fig. 2 (b) に検討を行った 2種類の磁気マイクロマシンの写真を示す. Fig. 2 (a)のマシンは, 半径方向に着磁された SmFeN 磁石($\phi 1.2 \times 0.55$ mm)とらせん形状に加工した直径 0.15 mm のタングステンワイヤから構成されており, 以後 Head 型マイクロマシンと呼ぶ. このマシンのらせんピッチは 4.4 mm である. Fig. 2 (b)は, 直径 20 μ m のタングステンワイヤをらせんピッチ 0.2 mm で加工したマシン(Spiral 型マイクロマシン)である. ワイヤ表面に PLD (Pulsed Laser Deposition) 法⁸⁾を用いて, NdFeB 薄膜磁石を数 μ m 積層した. 磁化方向は半径方向である.

3. 実験と解析結果

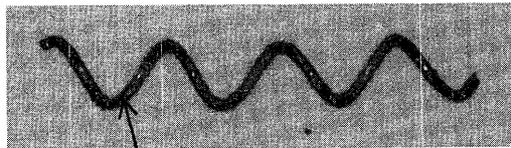
3.1 Head 型マイクロマシン

Head 型マイクロマシンの実験では, 動粘度 1×10^4 mm²/s のシリコーンオイルで満たされた試験管内にマシンを挿入した. 外部から 12 kA/m (150 Oe)の回転磁界を印



Tungsten wire ϕ 0.15 mm

(a) Head type magnetic micro-machine.



Tungsten wire ϕ 20 μ m

(b) Spiral type magnetic micro-machine.

Fig. 2 Photograph of magnetic micro-machine.

加し、Head型マイクロマシンの泳動速度の測定を行った。回転磁界周波数は1 Hzとした。Fig. 3にHead型マイクロマシンの泳動速度の実験と解析結果を示す。プロットに実験結果、実線に有限体積法を用いた3次元泳動特性解析の結果を示す。Head型マイクロマシンは、マシン長さLの減少により、泳動速度は遅くなり、Lの増加につれて泳動速度は増加し飽和する結果が得られた。実験において、マシン長さLが長い時、磁石部分が下がり傾いた状態で推進するのが確認された。この影響によりLが長くなると実験値と解析値の誤差が大きくなったと考えられる。

Fig. 4にマシンが流体から受ける抵抗力についての解析結果を示す。破線はらせん部分で受ける抵抗力、一点鎖線は磁石部分で受ける抵抗力、実線はマシン全体の抵抗力である。ここで、マシンが流体から受ける抵抗力は、らせん、磁石のそれぞれに作用するせん断力である。せん断力の式を(1)式に示す⁹⁾。

$$\begin{aligned}
 D &= S.F \\
 &= \tau \cdot A \\
 &= \mu \cdot \dot{\gamma} \cdot A
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- D: Drag [N]
- S.F: Shearing force [N]
- τ : Shearing stress [N/m²]
- A: Area [m²]
- μ : Coefficient of viscosity [N s/m²]
- $\dot{\gamma}$: Rate of shearing deformation [1/s]

らせん部分で受ける抵抗力は、Lの増加に伴い表面積が増

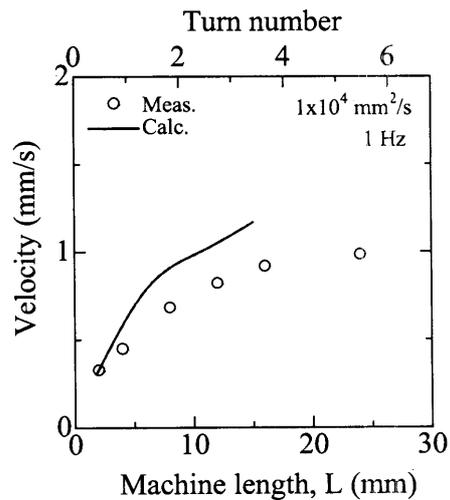


Fig. 3 Relation between swimming velocity and length of the experimental machine and analysis results (Head type).

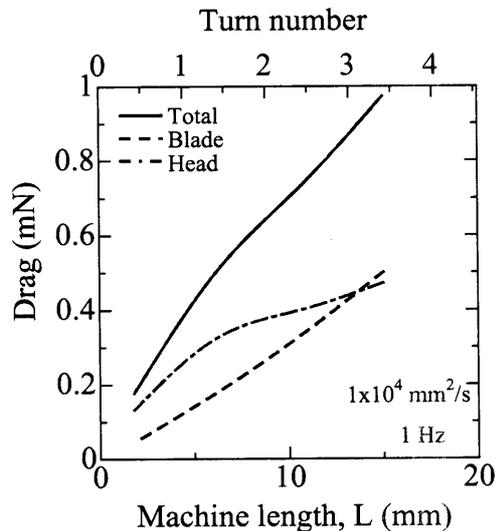


Fig. 4 Relation between drag and length of the machine of the analysis results (Head type).

加するため、増加する。磁石部分で受ける抵抗力は、Lが短い時、らせん部分で発生する推力に対して大きくなる。このため、泳動速度が減少したと考えられる。従って、泳動速度の減少により、磁石部分で受ける抵抗力が減少したと考えられる。一方、Lが長いときは、らせん部分で発生する推力に対して磁石部分で受ける抵抗力の影響は小さく、泳動速度が飽和したと考えられる。従って、磁石部分で受ける抵抗力は、一定値に飽和した。

Fig. 5にマシンが流体から受ける負荷トルクとLの関係を示す。一点鎖線と破線はそれぞれらせん部分のせん断応力と圧力に起因するものである。二点鎖線は磁石部分のせん断応力に起因する負荷トルクを示す。せん断力による負荷トルクは、せん断力と回転中心からの距離の積であらわ

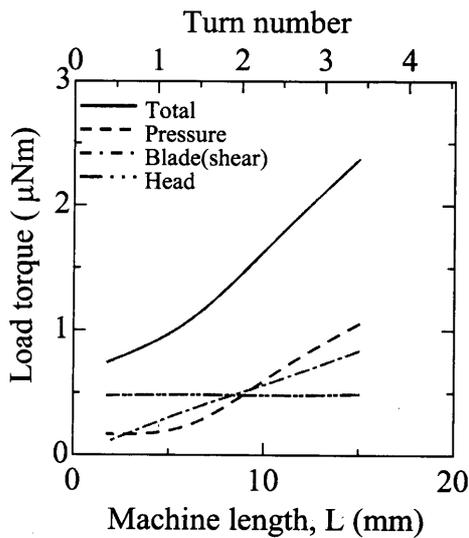


Fig. 5 Relation between load torque and length of the machine of the analysis results (Head type).

される。磁石で受ける負荷トルクは、Lの長さによらずせん断力は一定であるため、負荷トルクの値も一定値である。らせん部分の負荷トルクは、Lの増加とともに表面積が増加するため、負荷トルクも増加する。従って、全体の負荷トルクは、Lの増加に伴い増加する。

3.2 Spiral型マイクロマシン

Spiral型マイクロマシンの実験は、動粘度 $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルで満たされた幅 1.6 mm の流路内で行った。印加磁界強度 8 kA/m (100 Oe)、回転磁界周波数 10 Hz の時の泳動速度を測定した。Fig. 6にSpiral型マイクロマシンの長さに対する泳動速度の解析と実験結果を示す。プロットは実験の結果、実線は解析の結果を示す。実験と解析の結果、どちらもLの値によらず泳動速度は一定値であるが、値の大きさにずれが生じた。これは、実験において、マシンが流路の底に沈んだ状態で泳動しているのに対し、解析でのマシンと流路の位置は十分離れた状態にある。従って、解析には含まれない摩擦による影響が原因であると考えられる。

Fig. 7にSpiral型マイクロマシンの長さに対する流体から受ける抵抗力の関係を示す。Spiral型マイクロマシンはらせん部分のみで抵抗力が発生するため、抵抗力はLに比例して増加した。

Fig. 8にSpiral型マイクロマシンの長さに対する流体から受ける負荷トルクの関係を示す。一点鎖線と斜線は、それぞれらせん部分で受けるせん断応力と圧力による負荷トルクの解析結果を示す。実線にマシン全体の負荷トルクの解析結果を示す。解析の結果、Lの増加とともに、負荷トルクは増加した。

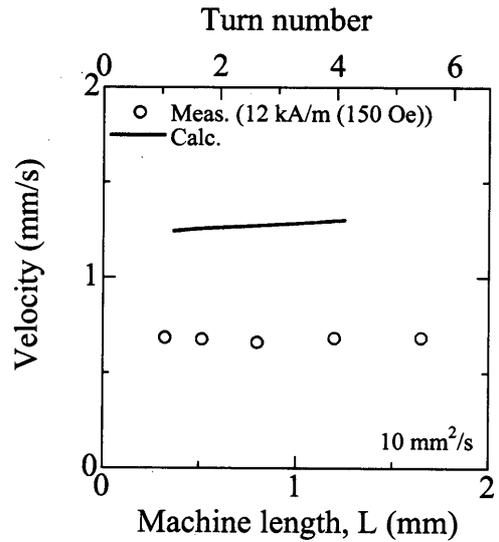


Fig. 6 Relation between swimming velocity and length of the experimental machine and analysis results (Spiral type).

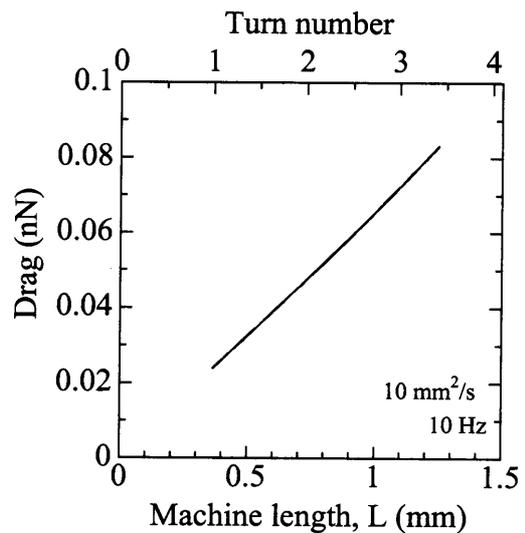


Fig. 7 Relation between drag and length of the machine of the analysis results (Spiral type).

3.3 流体力学的効率

泳動時、マシンが流体に対してなすパワーのうち、推進に使われるパワーの比を流体力学的効率 ϵ として(2)式のように定義し、特性を評価するパラメータの一つとした。

$$\epsilon = \frac{\text{推進速度} \times \text{推力}}{\text{推進速度} \times \text{推力} + \text{角速度} \times \text{負荷トルク}} \quad (2)$$

Fig. 9に、らせんのターン数に対する流体力学的効率を示す。実線に、Head型マイクロマシン、破線にSpiral型マイクロマシンの解析結果を示す。Head型マイクロマシンは、らせんのターン数が小さい時、効率は小さく、らせんのターン数が大きくなる時、効率は大きくなり、飽和する結果が得られた。3.1から、Head型マイクロマシンはらせんのターン数が小さい(マシンの長さが短い)場合は、磁石の影響を大きく受けるということに起因していると考えられる。従って、らせんのターン数は多すぎても、効率は変わらず、負荷トルクだけが大きくなるため、負荷が小さく、効率の良いマシンを得るためには、らせんのターン数は、2ターンであることがわかる。Spiral型マイクロマシンは、らせんのターン数が少ない時、効率がよく、らせんのターン数の増加とともに、効率は減少する。従って、効率の良いSpiral型マイクロマシンは、らせんのターン数を少ない方がよい。

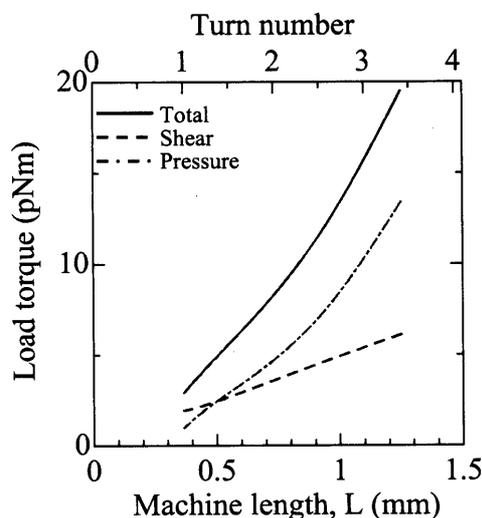


Fig. 8 Relation between load torque and length of the machine of the analysis results (Spiral type).

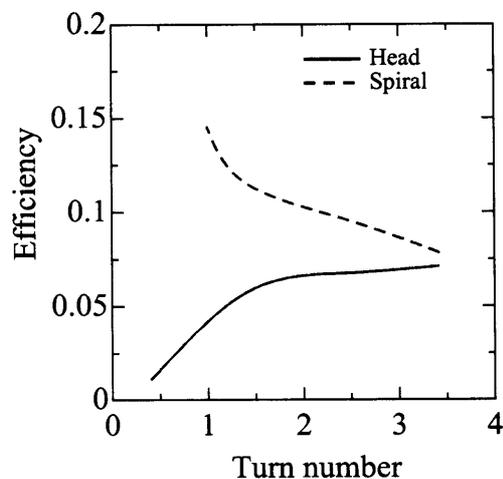


Fig. 9 Relation between efficiency and turn number of the spiral of the analysis results.

4. まとめ

2種類の磁気マイクロマシンを作製した。ひとつは、磁石とワイヤから構成されるHead型マイクロマシン、もうひとつは、ワイヤから構成されるSpiral型マイクロマシンである。2種類のマイクロマシンの長さを変えて、マシンの長さによる泳動特性の影響を実験と解析から検討を行った。その結果、Head型マイクロマシンは、Lの大きさに依存する結果が得られた。さらに、効率がよく、負荷トルクの小さくなるLの大きさは、らせんのターン数は、2ターンである結果が得られた。Spiral型マイクロマシンの泳動速度は、Lによらず一定値である結果が得られた。効率の良いマシンは、Lを短くした方がよいという結果が得られた。

謝辞

Spiral型マシン作製の際、PLD法によるNdFeB磁石の製膜をして頂いた、長崎大学の福永教授、中野助手に感謝します。

本研究の一部は「21世紀COE新世代情報エレクトロニクスシステムの構築」により行ったものです。関係者各位に感謝します。

文 献

- 1) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue and K. I. Arai, *IEEE Transactions on Magnetics*, **36**, 3688 - 3690, 1999.
- 2) K. Ishiyama, M. Sendoh, A. Yamazaki, K. I. Arai, *Sensors and Actuators A* **91**, 141-144, 2001.
- 3) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Inoue, *Transaction IEE of Japan*, **120-A**, 301-306, 2000.
- 4) K. Ishiyama, M. Sendoh, A. Yamazaki, M. Inoue, K. I. Arai, *IEEE Transactions on Magnetics*, **37**, 2868 - 2870, 2001.
- 5) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue T. Hayase and K. I. Arai, *Journal of Robotics and Mechatronics* **12**, 165-171, 2000.
- 6) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, T. Hayase, K. I. Arai, *Journal Magnetic Society of Japan* **27**, 645-648, 2002.
- 7) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Hayase, *Sensors and Actuators A* **105-1** 103-108.
- 8) M. Nakano, S. Tsutsumi, H. Fukunaga, *IEEE Transaction on Magnetics*, **38**, 2913-2915, 2002.
- 9) T. Ikui, M. Inoue, "Dynamics of viscous fluid", Rikogakusha, Tokyo, p. 4, 1978.

2003年10月27日受理, 2004年1月15日採録