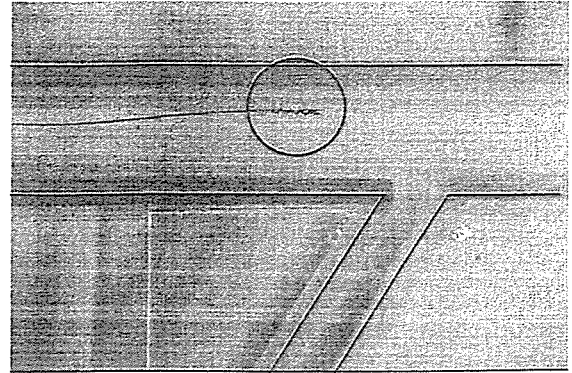
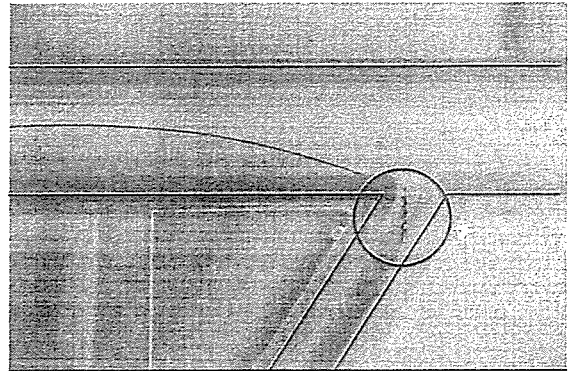


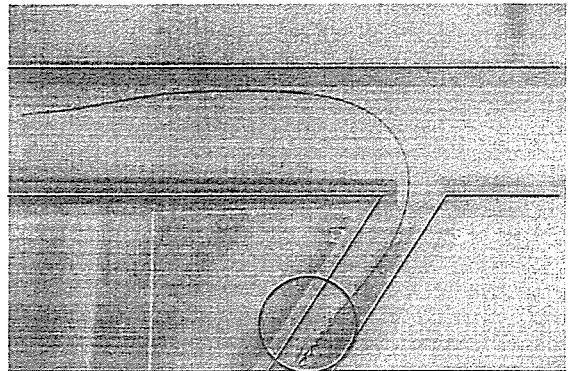
Fig. 7 Photograph of a simulated blood vessel.



(a) 0 s.



(b) 80 s.



(c) 125 s.

Fig. 8 Photographs of various stages of the trailing experiment.

路から泳動し(Fig. 8(a)), 80 秒後につなぎ目の効果でマシンのみが幅の狭い流路に進入するのを確認した(Fig. 8(b)). その後はピンセットでワイヤ後端部を押すことで、マシンとワイヤは幅の狭い流路に入り込むことを確認した(Fig. 8(c)). ワイヤ後端部を押すことは医師がカテーテルを穿刺部より押し込む作業を想定しており、本実験の特異性を示すものではない。

この結果から泳動速度は低下するものの、提案した磁気マイクロマシンはワイヤを牽引可能であり、印加磁界の回転面を変えることにより任意方向に誘導可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

らせん形状の異なる磁気マイクロマシンを作成し、推進速度および推力を測定した。推力が最大となる形状はらせん角度 45° ・らせん条数 1 であり、最大で $103 \mu\text{N}$ 発生し、マシンの自重 (2.7 mg) を差し引いて、約 7.9 mg の負荷まで牽引可能である。この形状のマシンを用いて牽引実験を行った結果、速度は低下するものの、マシンはワイヤを牽引して泳動可能であり、本研究で提案したマシンの有効性が示された。

今後は更なるマシン構造の最適化を行い、カテーテルを牽引する磁気マイクロマシン実現のための検討を行う予定である。

Reference

- 1) Y. Haga, M. Esashi, *Transaction IEE of Japan Application of Sensors and Micromachines Society*, 120, 515 - 520, (2000)
- 2) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue and K. I. Arai, *IEEE Transactions on Magnetics*, 36, 3688 - 3690, (1999).
- 3) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Inoue, *Transactions IEE of Japan*, 120-A, 301-306, (2000).
- 4) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue T. Hayase and K. I. Arai, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 12, 165-171, (2000).
- 5) K. Ishiyama, M. Sendoh, A. Yamazaki, K. I. Arai, *Sensors and Actuators A* 91, 141-144, (2001).
- 6) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, T. Hayase, K. I. Arai, *Journal Magnetic Society of Japan*, 26, 645-648, (2002).
- 7) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Hayase, *Sensors and Actuators A* 105-1 103-108, (2003).

2004年10月06日受理, 2004年12月14日採録

Study of a Cantilevered Magnetic Actuator with a Magnetic Thin Film

C. Yokota, A. Yamazaki, M. Sendoh*, S. Agatsuma, K. Morooka, K. Ishiyama, and K. I. Arai

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

*Miyagi Organization For Industry Promotion, 1-14-2 Kamisugi, Aoba-ku, Sendai 980-0011, Japan

This paper describes a cantilevered magnetic actuator driven in a low magnetic field. Magnetostriction was used as a driving principle in this study. We studied the displacement of the cantilevered magnetic actuator by the magnetostriction. FeSiB with the thickness of 0.7 μm was used as a magnetostrictive thin film. The dimensions of the cantilever were 1 mm \times 5 mm. We used polyimide films with thicknesses of 30 μm and 7.5 μm and Ni foil with a thickness of 5 μm as substrates. As a result, the cantilevered magnetic actuator was able to function in a magnetic field of 10 kA/m. The maximum displacement of the cantilevered magnetic actuator was about 40 μm with an Ni substrate.

Key words: cantilever, FeSiB, magnetostriction, magnetic thin film, soft magnetic

磁性薄膜を用いた片持ち梁型磁気アクチュエータに関する検討

横田周子・山崎彩・仙道雅彦*・我妻成人・師岡ケイ子・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)

*みやぎ産業振興機構, 仙台市青葉区上杉 1-14-2 (〒980-0011)

1. はじめに

片持ち梁型アクチュエータは長尺試料片側を固定し反対側の自由端を変位させるものであり、その駆動方式には圧電型¹⁾、熱膨張型²⁾、磁歪型³⁾等が挙げられる。それぞれの駆動方式にはそれぞれの利点があり、それぞれの特徴を利用した検討が行われている。圧電型や熱膨張型は変位量が多いものの絶縁層などが必要であり構造が複雑になるといった問題点がある。これらに対し磁歪型は非接触駆動が可能であることや、試料構造が簡単であるといった利点が挙げられる。

我々は磁歪型を用いた研究において、 10^{-4} 台の大きな磁歪を有し圧電型等と同程度の変位が見込まれる非晶質の Tb-Fe や Sm-Fe を用いた片持ち梁型アクチュエータに関する検討を行ってきた³⁾。しかしこのアクチュエータは結晶質の巨大磁歪材料を用いた場合に比べて小さな磁界で動作するものの、80 kA/m 程度の磁界印加が必要であった。また 10 kA/m 以下の磁界中ではヒステリシスが現れ、アクチュエータの変位量が磁界強度に対して一意に決まらないなど実用上の問題点もあった。

そこで本研究では磁界強度 10 kA/m 以下で駆動可能な片持ち梁型アクチュエータに関する検討を行った。ここでは磁歪材料として磁歪定数が 10^{-6} 台と小さいものの軟磁気特性の良好な FeSiB を用い、弱磁界中で変位量をより大きく得る事を目的とし異方性制御ならびに基板選択についての検討を行った。その際、変位量を求める理論式を導出し、実験結果と対比してアクチュエータとしての性能を評価した。

2. 片持ち梁型アクチュエータ

2.1 駆動原理

磁歪材料は内部の磁化方向の変化に伴って微小に寸法変化する特性を持つ。ここで使用する FeSiB は正磁歪材料であるため、印加磁界の方向に伸び、印加磁界に垂直方向に縮む。これに、印加磁界に対し FeSiB の伸縮特性とは異なる伸縮特性を持つ材料を貼付し、2層構造とすることにより磁歪駆動による片持ち梁型アクチュエータを作成した。Fig. 1(a)に外観図を示す。

この試料を駆動させる際、印加磁界方向を試料長手方向とすると変位の増大と共に磁気トルクの影響を受け、変位が妨げられる。そこで本検討では印加磁界方向を試料幅方向とし、アクチュエータの先端の変位量を検討した。Fig. 1(b)に外部磁界の印加により変位するアクチュエータの外観図を示す。

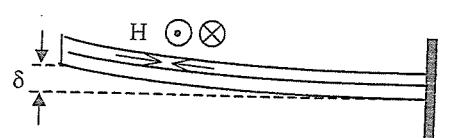
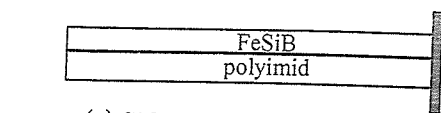


Fig. 1 Configuration and displacement of the magnetic actuator.

2.2 試料作成, 及び測定方法

2層構造から成るアクチュエータの薄膜部分の成膜にはRFスパッタ装置を用いた。ターゲット組成はFe₇₂Si₁₄B₁₄とし、Power 200 W, Arガス圧24 mTorr, スパッタ時間1時間で行った。この条件下で薄膜厚さは約0.7 μmとなった。成膜された磁性膜を幅1 mm, 長さ5 mmになるように基板ごと切り出し, 片持ち梁型構造を形成した。最後に異方性制御を目的として熱処理を行った。熱処理条件は温度350°C, 磁界強度240 kA/mとし, 回転速度60 rpmの回転磁界中熱処理を2時間, その後静磁界中熱処理を1時間とした。

作成した試料の磁気特性は, VSMを用いて測定した。アクチュエータの先端変位量の測定は, 片側を固定した試料を磁界発生用コイル内に置き, 試料幅方向に磁界を印加して変位させ試料先端の変位量をマイクロSCOPEにより実測することで行った。

本実験では試料の異方性の方向, 基板厚さ, 基板材料を変化させ, それらの条件がアクチュエータの変位特性に及ぼす影響を検討した。なお, 本研究で基板に用いたフィルム, フォイルは市販の製品である。Fig. 2に実際にポリイミドフィルムを用いて作成した試料の写真を示す。

3. 理論式

駆動源に磁歪を用いた片持ち梁型アクチュエータの変位量を求める理論計算⁴⁾⁵⁾としてこれまで様々なものが示されている。これらは試料形状等に依存した個々の近似による理論式であるため, そのまま本研究に適用することはできない。ここでは我々が今回実験をしていく上で, 検討の基準とするために導出した理論式をFig. 3のように寸法を定めて示す。

アクチュエータには試料全体が変位をしても, 元の状態と長さが変化しない面が存在し, これを中立面と呼びFig. 3に記される一点鎖線部分になる。この面は理論式を導出する上で重要なパラメータとなり, 試料内部で中立面に関して上下の力のつりあいが零という条件により求まる。一

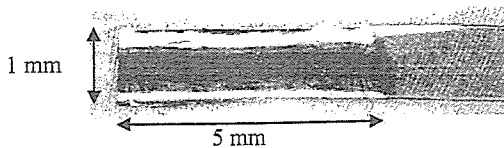


Fig. 2 Picture of the magnetic actuator.

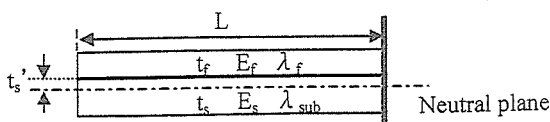


Fig. 3 Structure of the cantilevered magnetic actuator and neutral plane.

般に中立面の位置は, 二層構造の貼付面からの長さで定義され, ここでは t_s' とした。ここで求めた t_s' を元に, 組み合わせ梁において全長で曲げモーメントは一樣, 試料長さに対して変位角が微小という二つの仮定条件⁶⁾を用いて片持ち梁アクチュエータの先端変位の理論式を導出した。

$$t_s' = \frac{E_s t_s^2 - E_f t_f^2}{2(E_s t_s - E_f t_f)} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{3L^2 \{E_s \lambda_{sub} t_s (-t_s + 2t_s') + E_f \lambda_f t_f (t_f + 2t_s')\}}{4\{E_s t_s (t_s^2 - 3t_s t_s' + 3t_s'^2) + E_f t_f (t_f^2 + 3t_f t_s' + 3t_s'^2)\}} \quad (2)$$

この時計算に用いた主な記号は, δ : 自由端先端の変位量, L : 試料長さ, w : 試料幅, t_f : 磁性薄膜の厚さ, E_f : 磁性薄膜のヤング率, λ_f : 磁性薄膜の磁歪値, t_s : 基板材料の厚さ, E_s : 基板材料のヤング率, λ_{sub} : 基板材料の磁歪値, t_s' : 薄膜と基板の貼り合わせ部分から中立軸までの厚さ, とした。導出された理論式により, アクチュエータの変位量を増加させるための適正な薄膜や基板の材料特性, 厚さ等が予測可能となる。本研究では薄膜材料, ならびにその厚さは変化させず, 基板厚さと基板材料の影響についての検討を行った。

4. 実験結果

4.1 異方性制御

試料作成の際に行う異方性制御の方向についての検討を行った。磁歪により大きな変位を得るためには, 磁気モーメントの回転が必要である⁷⁾。前述のように本実験では試料幅方向に磁界を印加することから, その際に磁気モーメントの回転量を多くするためには長手方向に容易軸を誘導すべきであると考えられる。この考えを元に本検討では容易軸方向を試料長手方向, 試料幅方向それぞれにつけた試料を作成し, 異方性の方向と変位特性の関連について検討を行った。基板には厚さ30 μmのポリイミドフィルムを用い, 異方性の方向は磁界中熱処理により誘導した。Fig. 4に異方性方向を90度変化したそれぞれの試料幅方向の磁気特性を示す。またこれらの試料の磁界と変位の関係をFig. 5に示す。これらの結果から磁歪材料FeSiBを用いた片持ち梁型アクチュエータが10kA/m以下の小さな磁界で十分に駆動できること, ヒステリシスの小さい変位特性が実現できたことがわかる。また, 試料長手方向に容易軸方向を制御することにより磁界に対する応答性が良好となり, 変位量も容易軸方向が試料幅方向の場合には6 μmであるのに対し, 試料長手方向の場合には9 μmまで増加することが明らかとなった。

4.2 基板厚さ

変位量を増加させる方法の一つとして, 変位力となる磁歪材料の量を増やすことが考えられる。しかし磁歪材料を厚くすることは同時に変位を妨げる機械的負荷を増加させることにもなる。そ

のため試料作成の際には、発生力、試料強度等を考慮し基板と薄膜の厚さの関係を適切にすることが大切となる。これは先に述べた理論式からも理解される。ここでは磁歪薄膜の厚さを $0.7\ \mu\text{m}$ と一定条件とし、適切な基板厚さについての検討を行った。基板には厚さ $30\ \mu\text{m}$ ならびに $7.5\ \mu\text{m}$ のポリイミドフィルムを用いた。なお異方性制御については 4.1 節の実験結果を踏まえ共に試料長手方向が容易軸方向となるよう制御した。Fig. 6 に基板厚さを変化させたそれぞれの試料幅方向の磁気特性を示す。試料は試料長手方向に異方性を制御するよう同条件の下で作成したが、その磁気特性には差が表れた。これは基板厚さを変化させることによって、試料作成後の薄膜と基板の間に残る残留応力に違いが生じたことに起因すると考えられる。

このような磁気特性を持つ試料の磁界と変位の関係を Fig. 7 に示す。同図より $10\ \text{kA/m}$ の磁界印加において、ポリイミドフィルムの厚さが $30\ \mu\text{m}$ の場合変位量が $9\ \mu\text{m}$ であったのに対し、厚さが $7.5\ \mu\text{m}$ の場合では $30\ \mu\text{m}$ もの変位量となった。これより薄膜厚さ $0.7\ \mu\text{m}$ に対するポリイミドフィル

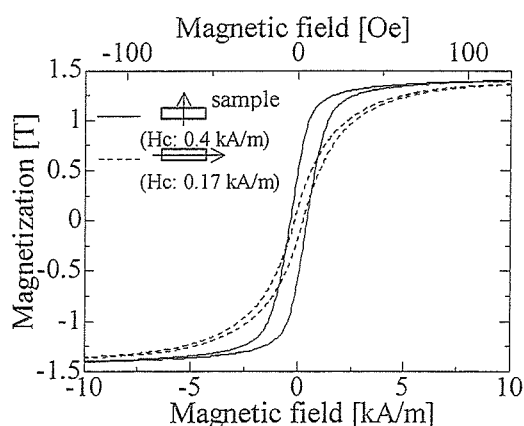


Fig. 4 Magnetic property in the width direction of the cantilevered magnetic actuators.

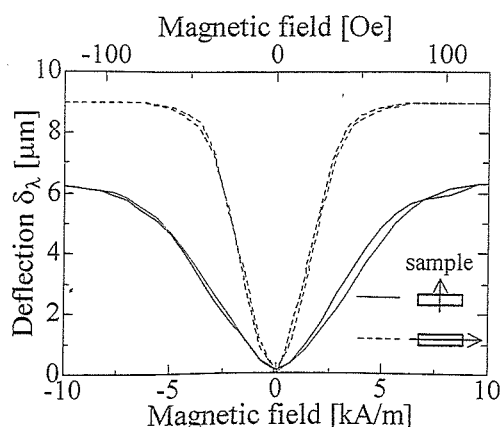


Fig. 5 Relation between the magnetic field and the displacement, δ_λ , caused by magnetostriction.

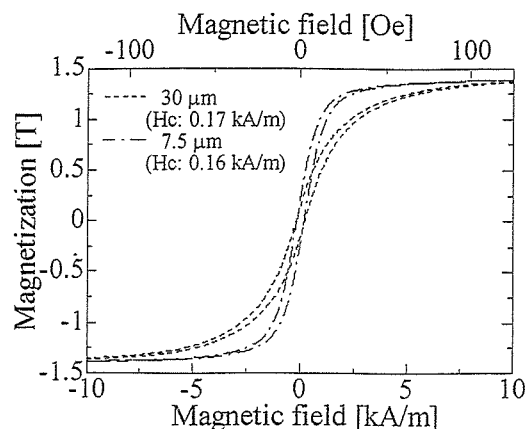


Fig. 6 Magnetic property in the width direction of the cantilevered magnetic actuators.

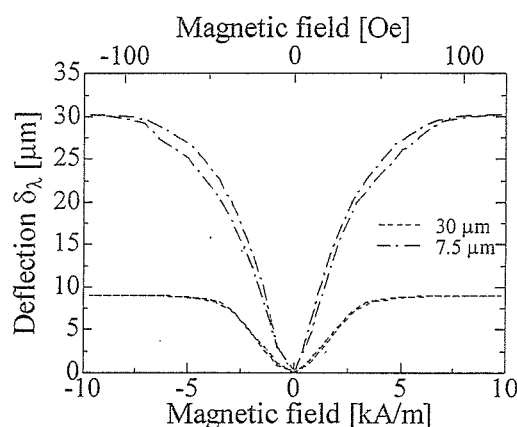


Fig. 7 Relation between the magnetic field and the displacement, δ_λ , caused by magnetostriction.

ムを用いた場合、基板厚さ $30\ \mu\text{m}$ より $7.5\ \mu\text{m}$ と薄くした方が適切であることがわかる。両者の磁気特性は Fig. 6 に示されるように差はあるが、ここでは磁界強度 $10\ \text{kA/m}$ 印加時の変位特性であることから、両者の基板厚さの影響が表れたものと考えられる。

4.3 基板材料

基板材料選択についての検討結果について示す。ここでは非磁性のポリイミドフィルムに代えて、負磁歪材料である Ni を用いて検討を行った。正磁歪材料である $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ を成膜する基板として負磁歪材料である Ni フォイルを用いることで、片持ち梁をバイモルフ構造にできる。このためポリイミド基板を用いたユニモルフ構造に比べて大きな変位が期待される。ここでは基板として厚さ $7.5\ \mu\text{m}$ のポリイミドフィルム、厚さ $5\ \mu\text{m}$ の Ni フォイルの 2 種類を用いた。なお異方性制御については 4.2 節と同様に試料長手方向が容易軸方向となるよう制御した。

Fig. 8 にポリイミドフィルム、Ni フォイルを基板としたそれぞれの試料幅方向の磁気特性を示す。Fig. 9 にこれらの試料の磁界と変位の関係をそれぞれ示す。Fig. 9 に示さ

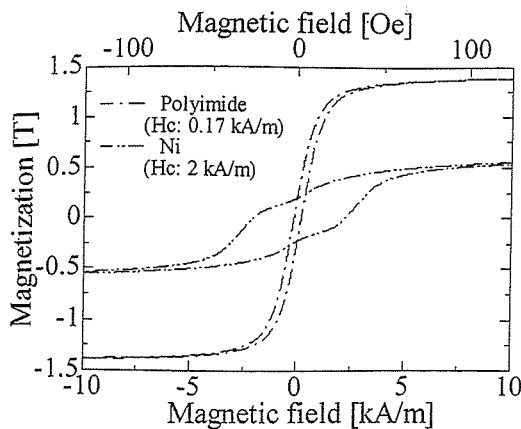


Fig. 8 Magnetic property in the width direction of the cantilevered magnetic actuators.

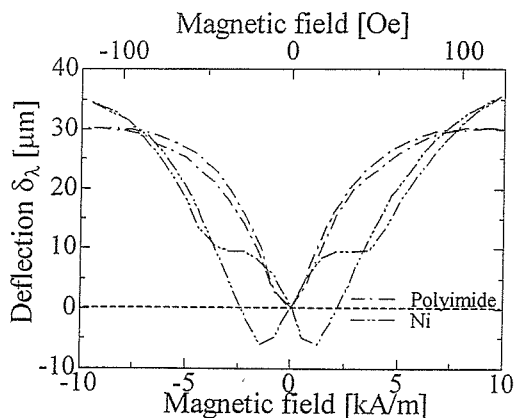


Fig. 9 Relation between the magnetic field and displacement, δ_λ , caused by magnetostriction.

れるように基板に Ni フォイルを使用した場合、変位する過程において弱磁界中でヒステリシスが生じた。このヒステリシスの原因は、Fig. 8 に示される磁気特性から明確なように Ni フォイルが 2 kA/m の保磁力を持つためであると考えられる。しかしこの影響は実験を行った磁界強度 10 kA/m に対して小さな磁界範囲内であり、最大印加磁界におけるアクチュエータの変位量には影響しないと考えられる。変位量は基板にポリイミドフィルムを使用した場合に 30 μm であったのに対し、Ni フォイルを使用した場合は 40 μm もの変位量が得られた。

4.4 実験値と理論値の比較

以上検討に用いた試料における実験値と、先述した理論式より求められる理論値を比較する。ここで理論式を用いる際には、次の二点を考慮した。第一に磁界印加方向と磁歪観測方向が直交していることから、理論値を算出する際の磁歪の値を磁歪定数 λ の $-1/2$ とした⁸⁾。第二にこの磁歪材料の磁気特性より求めた磁界強度 10kA/m での磁化量 M の飽和磁化量 M_s に対する比 M/M_s を先ほど求めた $-\lambda/2$ に乗じた値を磁歪量として計算式に代入した。その他の機

Table 1 Calculated and experimental values for the displacement of the cantilevered magnetic actuator.

| Magnetic thin film (f) | FeSiB | FeSiB | FeSiB |
|--|-----------|-----------|-------|
| Substrate (s) | Polyimide | Polyimide | Ni |
| Thickness of (f) t_f (μm) | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| Thickness of (s) t_s (μm) | 30 | 7.5 | 5 |
| Calculated value (μm) | 8 | 34 | 41 |
| Experimental value (μm) | 9 | 30 | 40 |

械定数等は次の値を用いた。L: 5 mm, w: 1 mm, t_f : 0.7 μm , E_f : 210 GPa, λ_f : -15×10^{-6} (磁歪定数: 35×10^{-6} , $M/M_s=0.86$)、基板にポリイミドフィルムを用いた場合には E_s : 3.5 Gpa, 基板に Ni フォイルを用いた場合には E_s : 210 Gpa, λ_{sub} : 14×10^{-6} (磁歪定数: -33×10^{-6} , $M/M_s=0.85$)

計算結果と実験結果をまとめたものが Table 1 である。この表よりアクチュエータの変位量は、理論式とほぼ同程度の実験結果が得られた事がわかる。この結果前述した理論式の妥当性が示され、今後変位量の増加に向けて検討をしていく際の基準として用い、基板等の最適化を行っていく。

5. まとめ

磁歪材料である $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ 薄膜を用いた片持ち梁型アクチュエータの駆動に関する検討を行った。実験の結果、磁界強度 10kA/m 以下で駆動可能な片持ち梁型磁気アクチュエータの実現と共に、弱磁界中における変位量として従来の検討結果に比べてより大きな変位量が得られた。また、異方性制御や基板選択によりアクチュエータとしての変位を増加させることができ、最大約 40 μm の変位が得られた。今後片持ち梁型アクチュエータの更なる駆動磁界の減少、変位量の増加を目的として検討を行っていく。

References

- 1) M. Okugawa, Y. Hori: Transactions of the *Japan Society of Mechanical Engineers*, 69, 858 (2003).
- 2) O. Nakabeppu, T. Kanda: IEEJ transactions on sensors and micromachines, 124, 75 (2004).
- 3) K. I. Arai, T. Honda: *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, 60, 1699 (1994).
- 4) T. Honda, K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 21, 817 (1997).
- 5) A. C. Tam and H. Schroeder: *J. Appl. Phys.*, 64, 5422 (1988).
- 6) Y. Takahashi, S. Machida: *Kisozairyourikigaku* (in Japanese), p.131 (Baihu-kan, Tokyo, 1988).
- 7) Institute of electrical engineers magnetics technical committee: *Magnetic-Fundamentals and Application* (in Japanese), p.33 (Korona-sya, Tokyo, 1999).
- 8) Institute of electrical engineers magnetics technical committee: *Magnetic-Fundamentals and Application* (in Japanese), p.34 (Korona-sya, Tokyo, 1999).

2005年10月19日受理, 2005年12月19日再受理, 2006年1月16日採録

Study of the Thrust Force of a Swimming-Type Magnetic Micromachine

K. Kikuchi, 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, Japan

*Miyagi Organization For Industry Promotion, 1-14-2 Kamisugi, Aoba-ku Sendai 980-0011, Japan

We studied the thrust force of a swimming-type magnetic micromachine. The micromachine was constructed from a permanent magnet and a spiral shape made of a tungsten wire. The magnet was magnetized in a diametrical direction. When a rotational magnetic field was applied, the machine rotated and moved in a fluid. It was experimentally found that the velocity of the micromachine trailing a wire was reduced when the kinematic viscosity was decreased. The shape of the micromachine that produced the largest thrust force was determined. To compare the analytical result with the experimental result, we made the micromachine by using a femtosecond laser. The analytical results agreed with the experimental results.

Key words: magnetic micromachine, rotational magnetic field, catheter, guide wire, femtosecond laser

泳動型磁気マイクロマシンの推力に関する検討

菊地健司・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)

*みやぎ産業振興機構, 仙台市青葉区上杉 1-14-2 (〒980-0011)

1. はじめに

現在, 脳血管疾患の死亡者数はがん, 心疾患に次いで第3位であり, 年間10万人を超えている¹⁾. この脳血管疾患の低侵襲な治療法として脳血管内治療が注目されている. この治療法は医師が血管内にガイドワイヤを用いてカテーテルを挿入し, 薬などを投与して血管内部から治療を行なうものである. 従来の頭を開いて施行する開頭手術と異なり, カテーテルを通すために大腿部を傷つけるだけで済むため, 患者への負担が軽減される利点がある. しかし, いくつもの枝分かれした血管内に医師の押し込みだけでカテーテルを挿入させるため, 医療事故や病巣まで到達不可能なケースが生じる可能性がある. そのため, カテーテルやガイドワイヤを誘導できる機能が求められている. これまでに先端の屈曲を制御するカテーテルが提案されているが²⁾⁴⁾, カテーテル誘導の検討例はほとんどない.

筆者らは先に磁気マイクロマシンの研究を行ってきた⁵⁾. このマイクロマシンは直径方向に磁化された永久磁石とらせん構造を有する. 磁気マイクロマシンの動作原理図をFig. 1に示す. 外部から回転磁界が印加されると, 磁気トルクによりマイクロマシンは回転磁界に同期して回転する. さらに, らせん構造により回転力は推進力に変換される. したがってマイクロマシンはワイヤレスでエネルギー供給, 3次元方向制御が可能である. このように, 磁気マイクロマシンはワイヤレスで駆動制御可能であることから, 生体内で仕事をこなす医療マイクロマシンとしてきわめて魅力あるものといえる.

筆者らは先の研究において, 提案した磁気マイクロマシンがワイヤを任意方向に牽引可能であることを示した⁶⁾. 本研究では, 水とほぼ同じ動粘度である血液中でワイヤを牽引させることを想定し, 泳動媒体の動粘度を変えた際のワイヤ牽引速度特性, ならびに3次元シミュレーションによる解析手法を用いた推力に関する最適形状の検討を行な

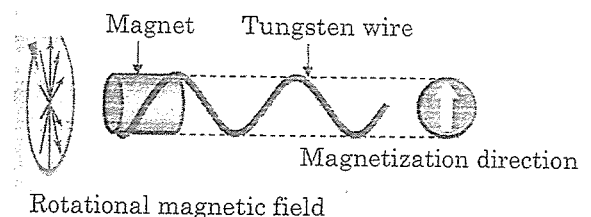


Fig. 1 Schematic view of the magnetic micromachine.

ったので報告する.

2. ワイヤ牽引実験

2.1 素子構成

Fig. 2に試作した磁気マイクロマシンの外観写真を示す. マシン径は0.55 mm, マシン長さは5.55 mmである. 胴体部は筒状のSmCo磁石(外径0.38 mm 内径0.15 mm 長さ0.55 mm)と銅管(外径0.35 mm 内径0.15 mm 長さ1.45 mm)で構成されており, この胴体にらせん構造のタングステン線(ϕ 0.1 mm)が固定されている. また, マシン内部にワイヤを通し, 折り曲げて受け軸を設けることで, マシンは回転するが牽引するワイヤの回転はおさえる構造になっている. Fig. 2に示した θ をらせん角度と定義する. 実験で用いたマイクロマシンのらせん角度は45度である.

2.2 実験方法

泳動媒体の動粘度を変えて, ワイヤを牽引した際の泳動速度を測定した. シリコンオイルで満たされた直径4 mmのガラス管内にマイクロマシンと牽引するワイヤを挿入し, 回転磁界を印加して測定を行なった. 牽引したワイヤは直径0.06 mm, 長さ50 mmのタングステン線である. 印加磁界強度は16 kA/m, 用いたシリコンオイルの動粘

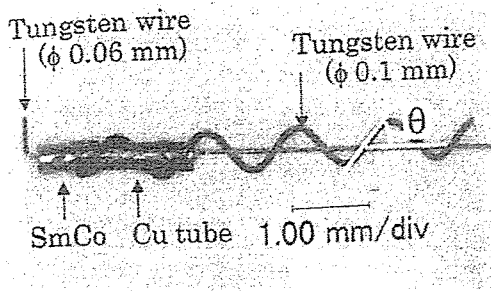


Fig. 2 Schematic view of the magnetic micromachine.

度は $1 \text{ mm}^2/\text{s}$, $10 \text{ mm}^2/\text{s}$, $100 \text{ mm}^2/\text{s}$, $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ である。

2.3 実験結果

Fig. 3 に回転周波数に対する速度特性を示す。図中の矢印で示されている脱調周波数は、動粘度が $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ の場合のみ測定された。ここで脱調周波数とは、マイクロマシンが泳動媒体から受ける回転方向の抵抗分である負荷トルクが最大磁気トルクを上回り、マイクロマシンが回転磁界の同期から外れる際の周波数を指す。動粘度が大きくなると負荷トルクが大きくなるため、今回の条件(印加磁界強度: 16 kA/m , 印加磁界周波数: 50 Hz 以下)では動粘度が $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ の場合のみ脱調周波数が測定されたと考えられる。

この実験の結果、動粘度が小さくなるとワイヤ牽引速度が低下することが明らかとなった。 $40 \text{ Hz} \cdot 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ の条件で牽引速度は 0.14 mm/s であり、 $40 \text{ Hz} \cdot 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ の牽引速度 2.53 mm/s と比較して約 $1/18$ であった。これは動粘度が小さくなることでマイクロマシンが生み出す推力が減少したためだと考えられる。ここで推力を上げる方法を考える。先の研究において推力が印加磁界周波数に比例して上昇することが明らかとなっていることから⁹⁾、周波数を上げることが考えられる。しかし、数 $k \sim$ 数十 $k \text{ Hz}$ の周波数を印加すると生体内で誘導起電力が発生し、生体に危険である恐れがある。そのため血液のような動粘度が低い環境下では、より大きな推力を発生するマシン形状の検討が必要である。次の章ではこの検討について報告する。

3. 3次元解析を用いた最適形状の検討

3.1 解析条件

筆者らは先に3次元の有限体積法を用いた泳動型磁気マイクロマシンの解析手法を確立した^{5),7),8)}。この解析手法は、流体力学の基礎法式的であるナビエ・ストークス方程式と運動量保存則をスタガード格子系を用いて有限体積法で離散化し、その離散式をSIMPLER法に類似の手法で解くものである。推力の解析値はマイクロマシンが流体から受ける推進方向成分の力を総和することで得られ、負荷トルクの解析値はマイクロマシンが流体から受ける回転方向の力を総和することで得られる。

本実験ではこの解析手法を用いて、推力に関するマシン

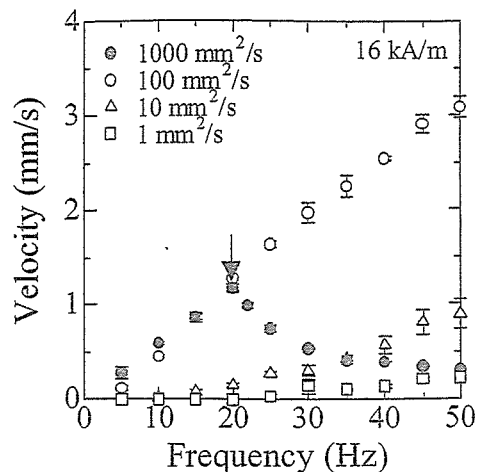


Fig. 3 Relationship between frequency and velocity.

形状の検討を行なった。管径は直径 2 mm 以内の血管内を泳動するものとして 2 mm とし、動粘度は血液の動粘度とほぼ同じである $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ とした。回転周波数は 10 Hz である。マシンサイズは医療現場で使用されている直径 0.016 インチのガイドワイヤに取り付けるものとしてマシン径を 0.4 mm とし、マシン長さを 3 mm とした。Fig. 4 に推力の検討を行なった4種類のマシン形状を示す。Type 1は胴体なし・らせん高さ 0.1 mm , Type 2は胴体なし・らせん高さ 0.18 mm , Type 3は胴体あり・らせん高さ 0.18 mm , Type 4は胴体あり・らせん高さ 0.1 mm である。また、パラメータを定義するために、Type 2のマシンを推進方向に対して平行に切断した際のらせん断面の拡大図をFig. 5に示す。図中のらせん幅とはマシン推進方向に対するらせんの幅、ピッチ長さとはマシン推進方向に対する隣り合うらせん間の中心から中心までの長さ、らせん間距離とはマシン推進方向に対する隣り合うらせん間の最短距離である。Fig. 4で設定したマシン形状について、らせん幅、らせん角度を変えて解析値を算出した。つまり、今回検討したパラメータは1. 胴体あり・なし, 2. らせん高さ, 3. らせん幅, 4. らせん角度, の4種類である。

3.2 解析結果

Type 1~Type 4の形状について、らせん幅を変えた際の推力特性の解析結果をFig. 6に示す。これより胴体がない形状はある形状に比べて推力が向上するという解析結果が得られた。これは抗力を生み出す胴体なくなったためだと考えられる。また、らせん高さが高い形状は低い形状に比べて推力が向上した。これはらせん高さが高くなることで抗力に比べて推力が大きくなったためだと考えられる。さらにすべての形状において、らせん幅が狭くなると推力が向上した。この理由についてFig. 7を用いて説明する。Fig. 7はFig. 5と同じようにマシンを推進方向に対して切断した際のらせん断面図であり、ベクトルは流体の流れを示している。ベクトルの向き、大きさはそれぞれ流体の流れる方向、流速を示している。図より、らせん幅が狭いと

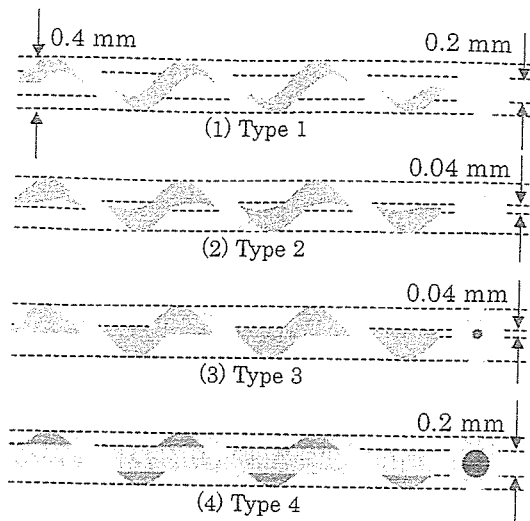


Fig. 4 Dimensions of the micromachines.

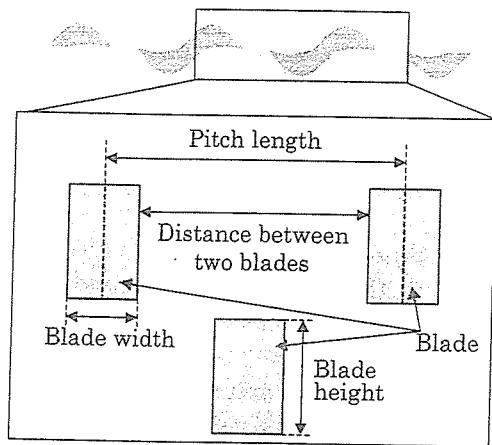


Fig. 5 Dimensions of the cut plane of two blades.

マシン推進方向に対してらせん前後で周辺の流速が速くなることが解析より計算された。このためらせん前後の圧力差が大きく生じるようになり、その結果らせん幅が狭いと推力が向上すると考えられる。以上より、最も推力を発生した形状は Type 2 であり、1. 胴体：なし、2. らせん高さ：高い、3. らせん幅：狭い、場合に大きい推力を発生することが明らかとなった。

最も推力が高かった Type 2 について、らせん幅、らせん角度を変えた際の推力特性を Fig. 8 に示す。図中の矢印は最適らせん角度を示している。これより、らせん幅が狭くなると最適らせん角度が大きくなることが明らかとなった。そこでらせん角度ではなく、らせん間距離に注目してプロットしたグラフが Fig. 9 である。これよりらせん幅に関わらず最適らせん間距離が等しくなることが明らかとなった。Type 2 の最適らせん間距離は 0.7 mm であった。最も推力を発生した形状はらせん幅 0.04 mm、らせん角度 60 度で、65 nN の推力を発生した。

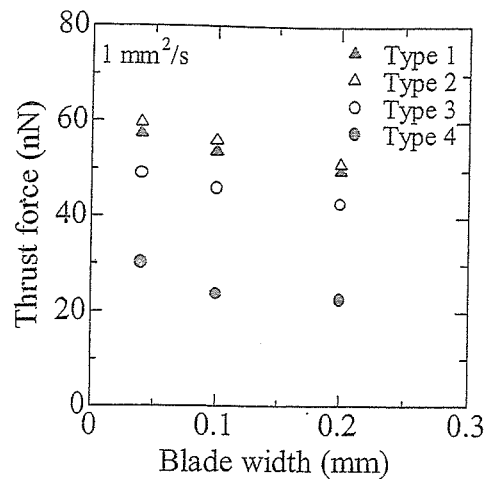


Fig. 6 Relationship between blade width and thrust force.

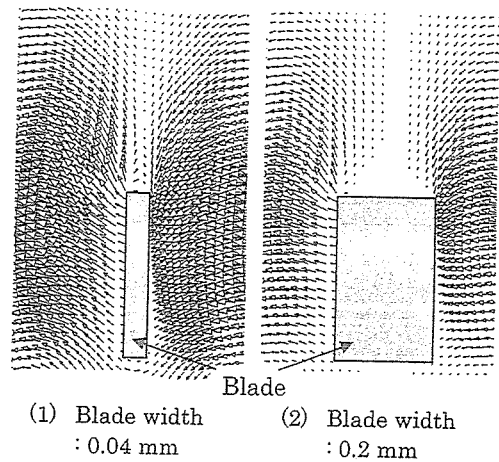


Fig. 7 Visualization of the solved flow field.

3.3 実験値との比較

解析を行なったマシン形状を作成して推力を測定し、実験値と解析値の比較を行なった。らせん幅に対してらせん高さが高いマシン形状を作成するため、フェムト秒レーザーを用いて円筒状の SmCo 磁石に直接加工を行ない、マシンを作成した。Fig. 10 に作成したマシン形状を示す。らせん幅は 0.2 mm、らせん高さは 0.22 mm、らせん角度は 55 度である。このマシンを内径 2 mm のガラス管内に挿入し、マシンを重力に逆らうように泳動させ、推力と浮力の和がマシンの自重とつりあう周波数を測定することで推力と周波数の関係を導いた。マシンの自重は 1.7 mg であり、自重に逆らって泳動するためには推力として約 16 μ N 必要であるが、動粘度 1mm²/s の液体中でマシンがその推力値を生み出すためには数 kHz の回転磁界を印加する必要がある。現行の装置では不可能であるため、動粘度が 1000mm²/s の条件で測定を行なった。印加磁界強度は 16 kA/m である。

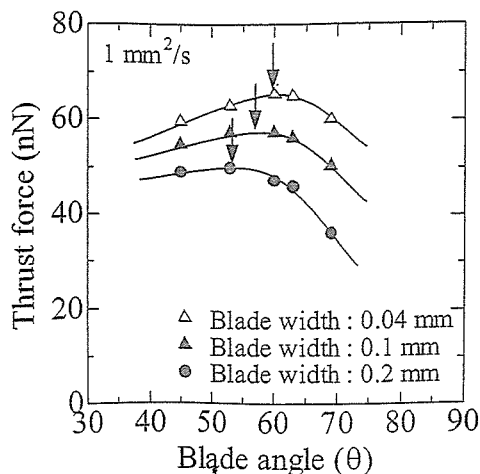


Fig. 8 Relationship of the blade angle and thrust force.

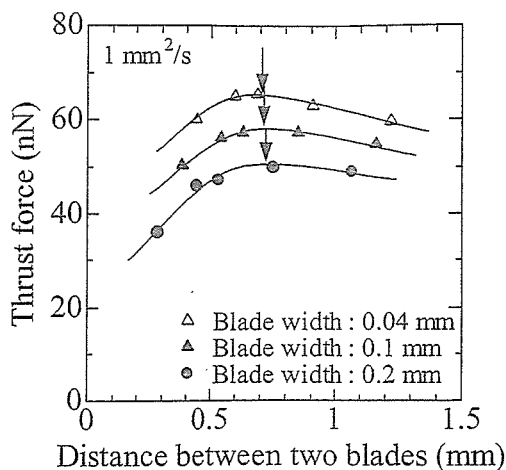


Fig. 9 Relationship of the distance between two blades and the thrust force.

Fig. 11 に実験結果を示す。実験値と解析値はほぼ一致した。これより、解析手法を利用して推力値の概算が可能であることが示された。

4. まとめ

泳動媒体の動粘度を変えた際のワイヤ牽引速度特性、および 3 次元シミュレーションによる解析手法を用いた推力に関する最適形状の検討を行なった。動粘度が小さくなるとワイヤ牽引速度は減少した。これより、血液などの動粘度が小さい環境でワイヤを牽引するためには更なる推力が必要になると考えられる。解析を用いて推力に関するマシン形状の検討を行なった結果、最大で 65 nN の推力を発生した。フェムト秒レーザーを用いてマシンを作成した結果、推力の実験値と解析値が一致することが明らかとなった。今後はマシン径や管径を変えて推力との関係を解明していく予定である。

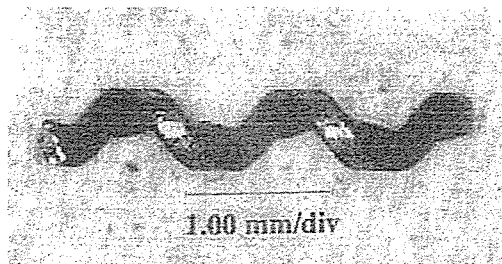


Fig. 10 Schematic view of the magnetic micromachine.

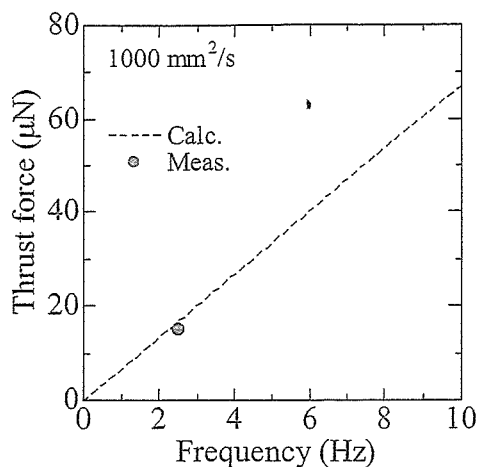


Fig. 11 Relationship of the frequency and thrust force in the experimental and analytical results.

謝辞 本研究では東北大学ベンチャービジネスラボラトリー(VBL)のフェムト秒レーザーを使用致しました。関係者各位に感謝致します。

References

- 1) Kouseishou daijin kanbou toukei jouhoubu: Trends in vital statistics of Japan for 100 years (in Japanese), p. 10 (Kousei toukei kyokai, Tokyo, 1999)
- 2) Driller, W. Casarella, T. Asch, and S. K. Hilal: *IEEE Trans. Magn.*, 6, 353 (1970)
- 3) H. Tillander: *IEEE Trans. Magn.*, 6, 355 (1970)
- 4) Y. Haga, and M. Esashi: *Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn. E*, 120, 509 (2000)
- 5) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue, and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, 36, 3688 (1999)
- 6) K. Kikuchi, A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 29, 176 (2004)
- 7) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, and T. Inoue: *Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn. A*, 120, 301 (2000)
- 8) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, and T. Hayase: *Sens. Actuators A*, 105, 103 (2003)
- 9) K. Fujita, S. Kawata, and K. Takada: *J. Inst. Electr. Inf. Commun. Eng.*, 86, 618 (2003)
- 10) J. Ikenc: *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, 68, 193 (2002)

2005年10月19日受理, 2005年12月16日採録

Disposable Pump System with a Spiral-Type Magnetic Micromachine

S. Hisatomi, A. Yamazaki, K. Ishiyama, S. Agatsuma, M. Sendoh*, and K. I. Arai

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

*Miyagi Organization For Industry Promotion, 1-14-2 Kamisugi, Aoba-ku, Sendai 980-0011, Japan

We propose a disposable pump system with a spiral-type magnetic micromachine. The machine is composed of a permanent magnet and a spiral blade. When a rotating magnetic field is applied, the machine rotates and pumps a surrounding liquid. Since the machine works wirelessly, it is possible to create a small, disposable pump. When a plate containing the machine in a fluid channel is placed on a stage containing two coils for generating a rotating magnetic field, the machine functions as a pump. In this system, the flow rate can be controlled by the rotation frequency. In addition, the system can pump the liquid selectively through several fluid channels containing similar machines on plates.

Key words: spiral-type magnetic micromachine, micropump, rotating magnetic field, disposable pump system

スパイラル型磁気マイクロマシンを用いたディスポーザブルポンプシステム

久富伸一・山崎彰・石山和志・我妻成人・仙道雅彦*・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)

*みやぎ産業振興機構, 仙台市青葉区上杉 1-14-2 (〒980-0011)

1. はじめに

微量の液体を定量的に送液するマイクロ流体デバイスとしてマイクロポンプがある。近年、 μ TAS(micro Total Analysis System)や自動投薬システムへの利用を目的とし、圧電素子¹⁾や形状記憶合金²⁾を用いたダイヤフラムを駆動源とするマイクロポンプの開発が盛んに行われている。これらのマイクロポンプの一般的なスペックはサイズが $1\sim 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 、最大圧力が $10\sim 20 \text{ kPa}$ 、最大流量が $1\sim 2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり大圧力、大流量を望むことができるが、可動部があるため構造が複雑になり小型化には不利であることや、脈動が生じてしまうといった欠点がある。また電気泳動による送液は構造が単純であるという長所がある一方で、電解液中のイオン濃度が変化してしまうと流速が変化し定量送液が困難になるといった欠点がある。さらに一度使用したポンプと流路には不純物が残ってしまう可能性があることから μ TASなどの化学分析において正確な分析を行ったり、自動投薬システムにおいて異なる薬の混入を防ぐためにはポンプと流路の使い捨てが必要となる。

これらに対し、著者らはスパイラル型磁気マイクロマシン³⁾を用いたマイクロポンプを提案している。磁気マイクロマシンは外部磁界を印加することによりワイヤレスに駆動できるため使い捨てが可能であり、構造が単純であることから小型化にも適している。また磁気マイクロマシンは幅広い動粘度の液体において駆動することが可能である。

著者らはすでに磁気マイクロマシンを用いて発生圧力と流量を回転周波数により制御可能なマイクロポンプの試作についての報告を行っている^{4),5)}。本研究では磁気マイク

ロマシンを用いたマイクロポンプの応用として、流路中に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ができるといったディスポーザブルポンプシステムを試作し、回転周波数と流量の特性といったポンプの基礎特性に関する検討を行った。さらにこのポンプシステムにおいて、基板上的マシンを搭載した複数の流路から選択的に送液を行うことができるといった選択送液に関する検討を行った。

2. スパイラル型磁気マイクロマシン

Fig. 1 にスパイラル型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直径方向に磁化された円柱状の永久磁石とらせん構造から成り立っている。マシン軸に垂直な面の回転磁界を印加することによりマシンは回転し推進する。Fig. 2 に今回実験で使用したスパイラル型磁気マイクロマシンの外観写真を示す。永久磁石には直径 0.5 mm 、長さ 10 mm の NdFeB 磁石を用いている。らせん構

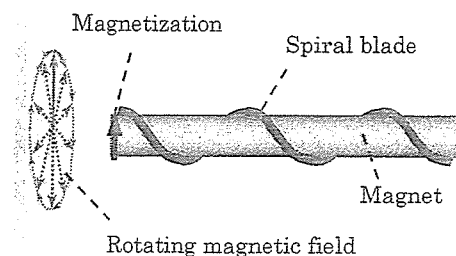


Fig. 1 Schematic view of the spiral-type magnetic micromachine.

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 ($10^7 < Re < 10^9$) において駆動可能であることがわかってい

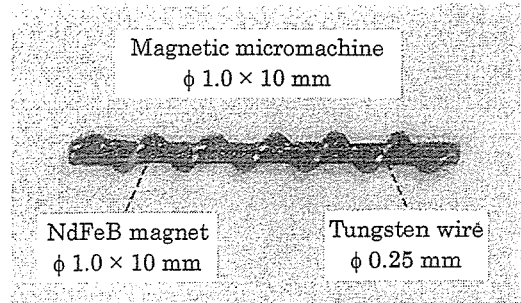


Fig. 2 Photograph of the spiral-type magnetic micromachine.

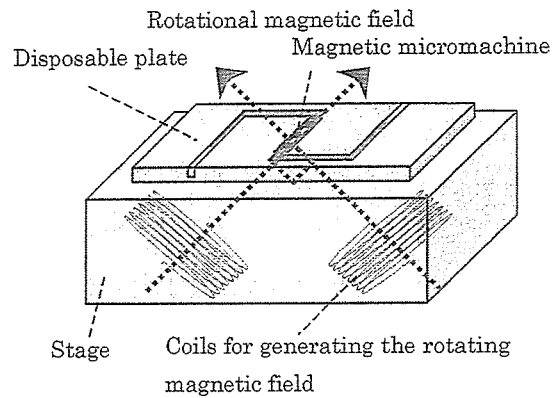


Fig. 3 Disposable pump system.

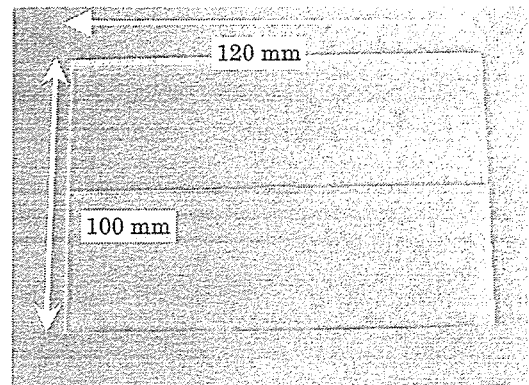


Fig. 4 Photograph of disposable plate containing the machine.

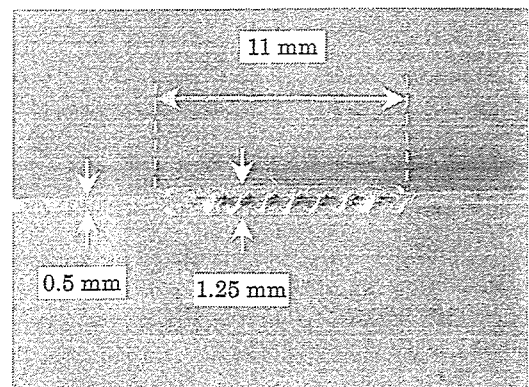


Fig. 5 Photograph of the space containing the machine in the fluid channel.

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⁹⁾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、 ΔP は圧力差、 μ 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 ΔP 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 μ 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¹⁰⁾、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

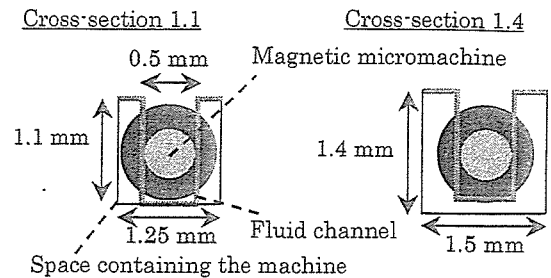


Fig. 6 Cross section of the space containing the machine in the fluid channel.

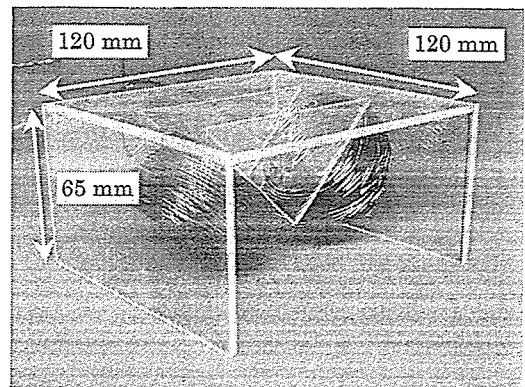


Fig. 7 Photograph of the stage for generating the rotational magnetic field.

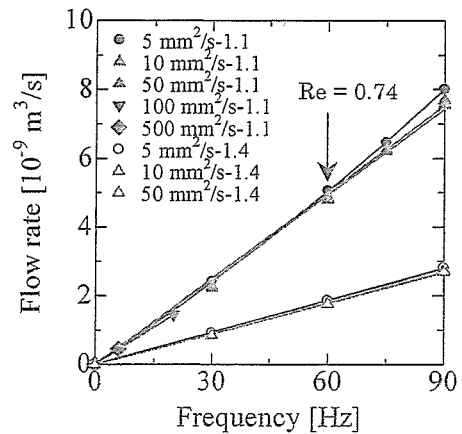


Fig. 8 Relation between the frequency and the flow rate.

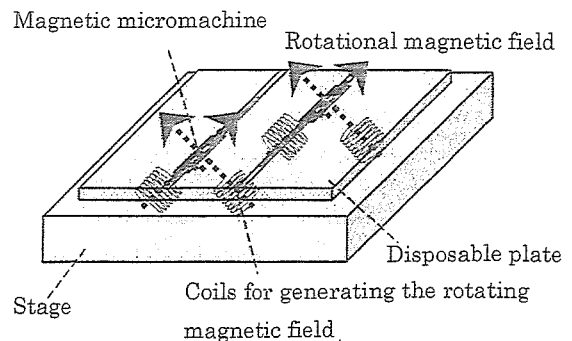


Fig. 9 Disposable pump system for pumping the liquid selectively.

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 kA/m 、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。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。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 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

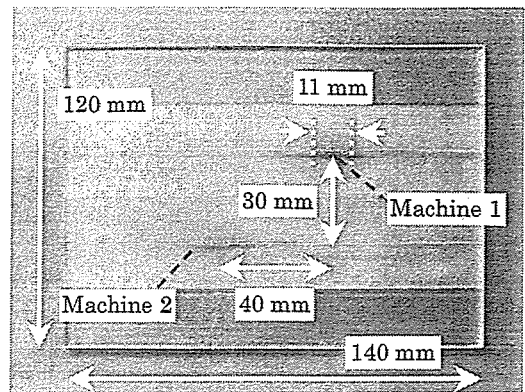


Fig. 10 Photograph of the disposable plate with the machine.

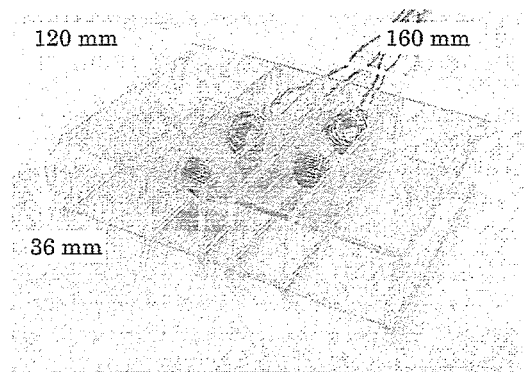


Fig. 11 Photograph of the stage for generating the rotational magnetic field.

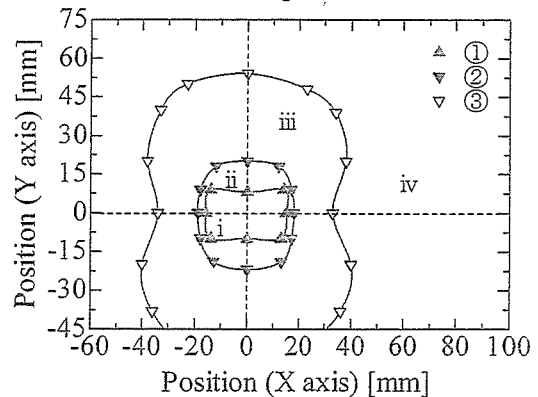


Fig. 12 Range of moving of the machine.

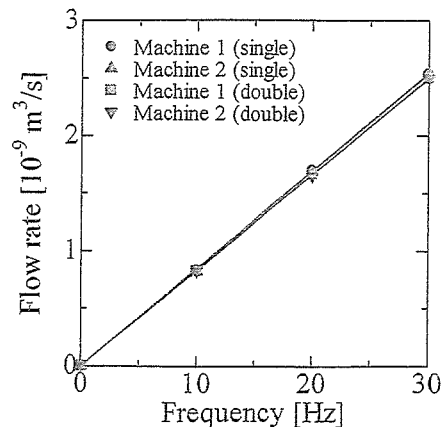


Fig. 13 Relation between the frequency and the flow rate.

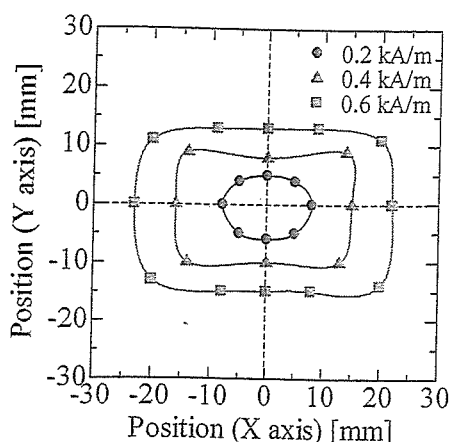


Fig. 14 Range of pumping quantitatively.

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がった。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 μ 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

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，加工技術の進歩と併に，nm～μm オーダとなっている。一般にマイクロの世界では，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⁽¹⁾）。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，マイ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⁽²⁾。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⁽³⁾⁽⁴⁾，気体⁽⁵⁾⁽⁶⁾，固体中⁽⁷⁾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り，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

⁽³⁾。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⁽⁸⁾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⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

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

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⁽¹¹⁾。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。

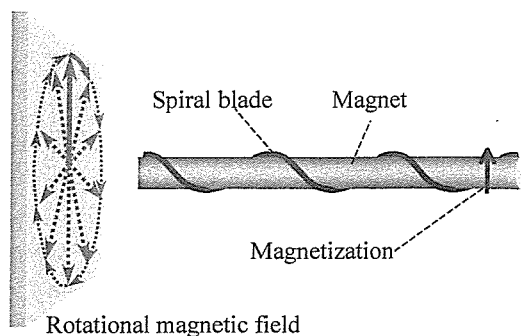


図1 磁気マイクロマシンの概略図

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], θ : 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[m³]

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、負荷トルクと寸法との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], τ : せん断応力 [N/m²], A : 表面積 [m²]

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], τ : せん断応力 [N/m²], A : 表面積 [m²], μ : 液体の粘性 [N s/m²], 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 1×10^3 , $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ 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

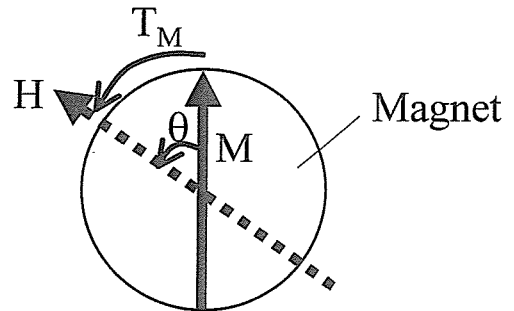


図 2 磁気トルクの概略図

Fig. 2. Schematic view of magnetic Torque.

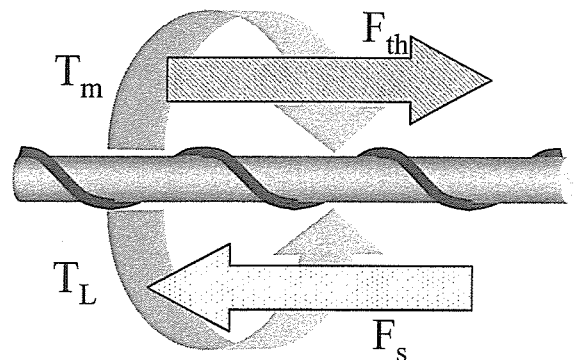


図 3 回転するマイクロマシンに働く力とトルクの関係

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

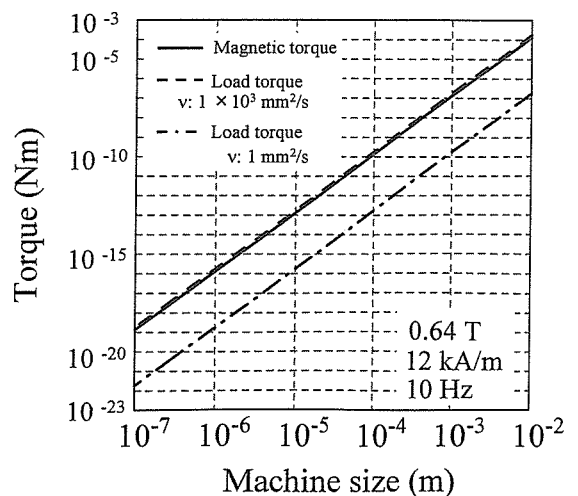


図 4 マシンサイズとトルクの関係

Fig. 4. Relation between torque and machine size.

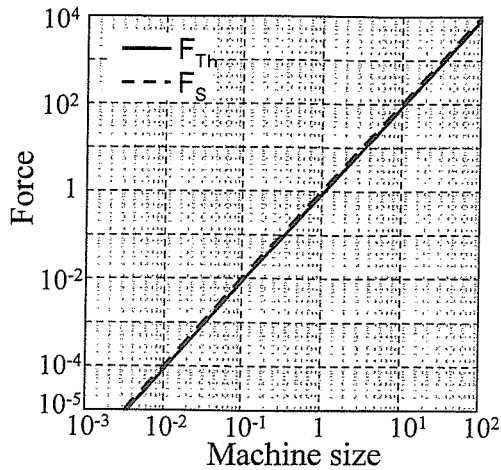


図5 マシンサイズに対する推力と抵抗力の関係
Fig. 5. Relation between force and machine size.

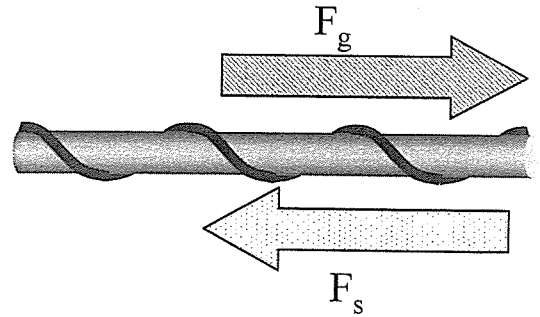


図6 マシンに働く磁場勾配の力と抵抗力の関係
Fig. 6. Relation between magnetic gradient and drag.

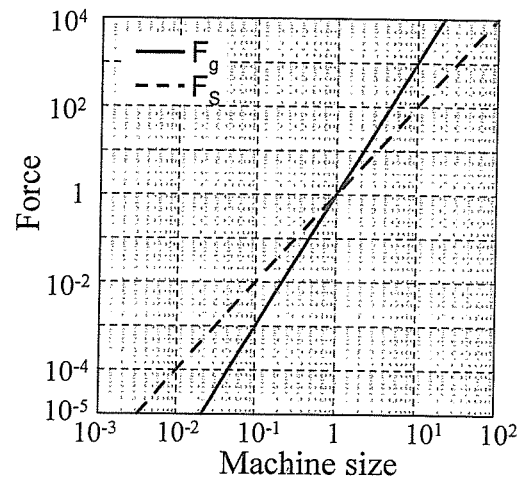


図7 マシンサイズに対するマシンに働く力の関係
Fig. 7. Relation between force and machine size.

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。

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

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

$$F_g = M \frac{dH}{dX} \quad \dots\dots\dots (7)$$

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 [A/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

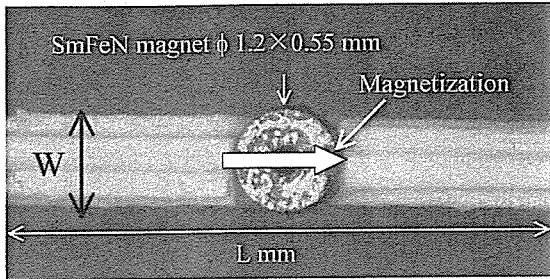
時、推力、抵抗力は 1 と仮定した。マシンサイズを小さくした場合、抵抗力は寸法の 2 乗に比例して減少するのに対し、磁場勾配の力は寸法の 3 乗に比例して減少する。従って、マシンサイズの減少により、抵抗力が磁場勾配による力を上回り動作不可能となるため、マイクロマシンの駆動力として磁気力は不利であると考えられている。

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。

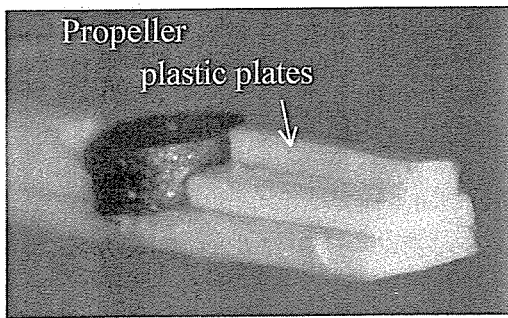
3. 実験

〈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 μm 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 μm 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⁽¹²⁾⁽¹³⁾。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 $2\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$ 成膜し、2, 3層目は Ti, Cu をそれぞれ $1\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$ 成膜した。それぞれの膜の厚さは $4\ \mu\text{m}$ としたので、マシン全体の厚さは $12\ \mu\text{m}$ となった。膜の幅は1層目から $30\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$ で



(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).

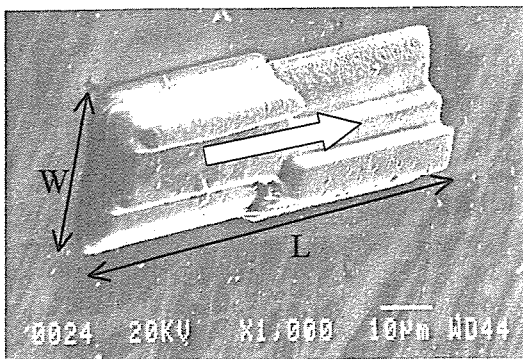


図9 平面型磁気マイクロマシンの SEM 写真 (μm -Type)

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

ある。マシンの長さは $60\ \mu\text{m}$, $80\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$, $120\ \mu\text{m}$ 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の測定をすることで、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 $16\ \text{mm}$ の試験管内にマシンを入れ、外部から $12\ \text{kA/m}$ 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

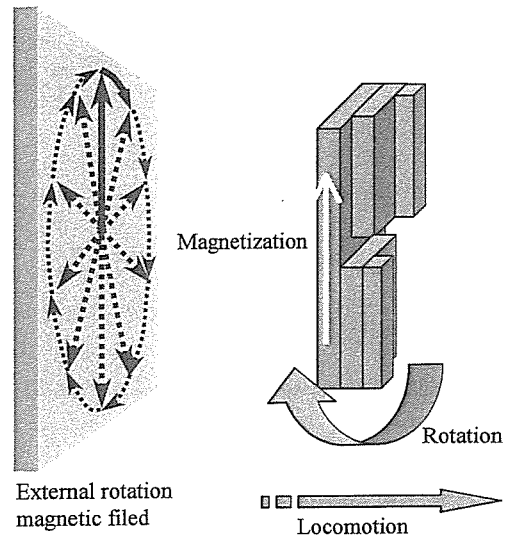


図10 平面型磁気マイクロマシンの回転方向と推進方向

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

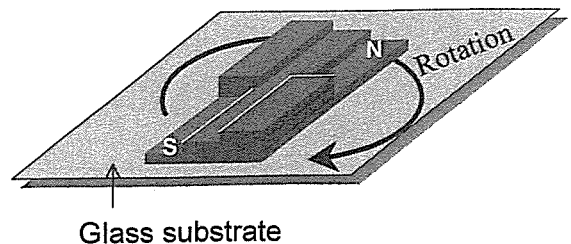


図11 負荷トルクの測定方法の概略図 (μm -Type)
Fig. 11. Schematic view of the direction of the rotation and direction of the locomotion (μm -Type).

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 μNm と計算される。 μm -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。

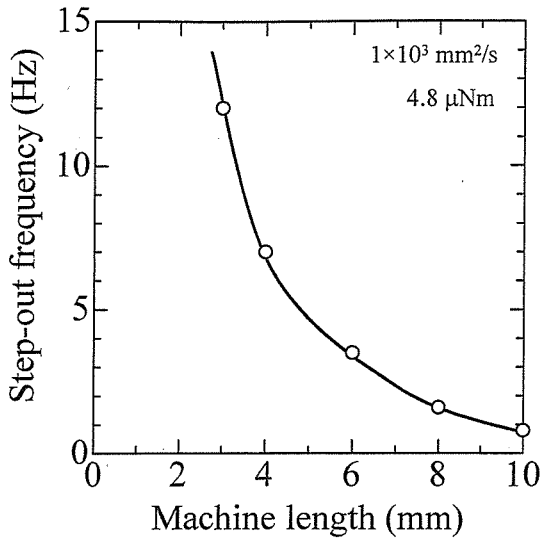


図12 マシンサイズと脱調周波数の実験結果 (mm-Type)

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

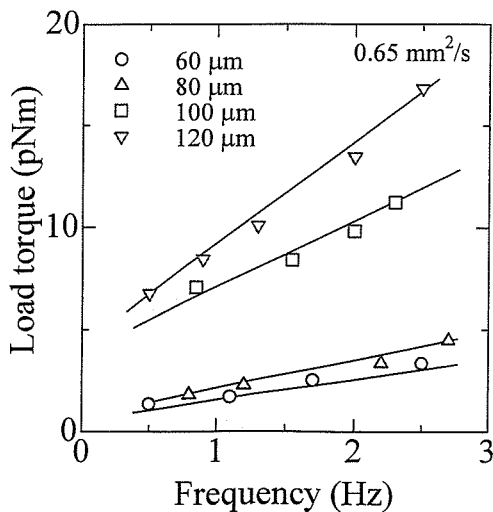


図13 周波数と負荷トルクの実験結果 (mm-Type)

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 [m^2], μ : 液体の粘性 [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、 μm -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 μNm となり、1 Hz当りの負荷トルクは0.4 μNm となった。それに対して、mm-Typeの約1/33倍となる幅30 μm 、長さ80 μm の μm -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 μm -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、 μm -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、 μm -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 μm 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 μm 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