屈曲型磁気マイクロマシンの泳動特性 Swimming Properties of a Bending-Type Magnetic Micro-machine

本田崇・坂下智亮・檜橋幹一郎・山崎二郎

九州工業大学工学部、北九州市戸畑区仙水町 1-1 (〒804-8550)

T. Honda, T. Sakashita, K. Narahashi, and J. Yamasaki

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensuicho, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550

(2000 年 9 月 27 日受理、2000 年 12 月 6 日採録)

Basic swimming properties of a bending-type in-pipe micro-machine were investigated. The micro-machine consists of a permanent magnet attached to an elastic plate, and can be remotely driven by an external alternating magnetic field. The swimming velocity depends on the excitation conditions and the shape of the elastic plate. First, we examined the frequency dependence of the swimming velocity and found that two peaks occurred due to the mechanical resonance and a lack of the power required for swimming. Next, we examined the effect of the shape of the elastic plate, and found that the shape suitable for higher velocity changed markedly according to the intensity of the magnetic field.

Key words: elastic plate, in-pipe micro-robot, magnet, power, wireless operation,

1. はじめに

微小な配管内を自走し不良箇所の検査や修理を行うマイクロロボットの実現には、環境に適した移動機構とケーブルレスによるエネルギー供給技術の開発が不可欠である。しかしながら、従来までの技術ではこれら両課題に対して十分な対応ができなかった。例えば、現状の管内自走マイクロロボットの多くは内壁との摩擦力を推力発生や姿勢保持に利用しており¹⁾、管の内径の大きな変化や内壁に付着した汚れに対応が困難である。また、エネルギー供給についても、動作の妨げになる電源ケーブルに頼っているものがほとんどである。

この2つの課題を解決するために筆者らは、配管が細長い形状であること、及びその内部が液体で満たされている場合が多いことに着目し、磁石と弾性板からなる屈曲型磁気マイクロマシンの適用を提案している。本素子は配管周囲に緩く巻いたコイルの発生する磁界によってケーブルレスで駆動することが可能であり、すでに、高速かつ長距離移動が可能だけでなく管の曲がりにも対応できることを報告している²⁾。

本論文では、泳動速度をより増加するための指針を得るために、これまで十分な検討がなされていなかった泳動速度の周波数特性と弾性板の形状依存性を調べ考察を行ったので報告する。

2. 素子構成と動作原理

Fig. 1 に泳動機構の構成を示す。円柱状の NdFeB 磁石の側面に「ひれ」として長方形の弾性板をエポキシ系接着剤で固定したものである。磁石の磁化 M の向きは円柱の高さ方向で、進行方向と直角である。弾性板にはヤング率約 3GPa、厚さ 125 μm のポリイミドフィルムを使用した。

Fig. 2 に簡単な動作原理を示す。図のように素子の長さ方向と平行な交流磁界 H が印加されると永久磁石は磁気トルク $T (= M \times H)$ を受け回転振動を行う。それに伴い弾性板も回転振動するが、たわみを伴った揺動となって液体を後方へ送り出す。このときの反作用が推力となり、磁石を先頭に推進する。

本素子の基本構造は 1970 年代に Lavie によって提案された医療用素子³⁾と同一であるが、磁石の磁化の向きと印加磁界の向きが異なる。Lavie のものは磁化の向きが進行方向と平行であり、素子の幅方向の磁界で駆動されている。

Fig. 1 Schematic view of the micro-machine.

Fig. 2 Actuation principle.

Fig. 3 Relation between the swimming velocity and the frequency. ($L = 10$ mm, $W = 6$ mm)

Fig. 4 Relation between the swimming velocity and the frequency. ($L = 20$ mm, $W = 6$ mm)

3. 実験方法

本実験では、全長 1.7m、内径 10mm のシリコンチューブを細管として用いた。チューブは直線状かつ水平に配置し、内部をエタノールで満たした。励磁用のコイルはチューブ中央の長さ 1.2m の範囲に、直径 1.2mm の銅線を直径約 20mm、間隔約 2.4mm で巻いて構成した。コイルは緩く巻いてあるため内部の様子を外部から観察することができる。

4. 実験結果及び考察

4-1 励磁周波数と泳動速度の関係

はじめに代表的な泳動特性を示し、泳動速度と周波数の関係について考察する。Fig. 3 と Fig. 4 に、幅が 6mm で長さがそれぞれ 10mm と 20mm の弾性板を用いた場合の泳動速度と励磁周波数の関係を示す。長さ 10mm の場合、周波数の増加とともに泳動速度ははじめ単調に増加するが、30Hz~70Hz の範囲で一度減少に転じ、さらに周波数を増加していくと再び 240Hz 付近を中心に速度が大きく増大した。この 2つのピークの特徴に着目すると、低周波側のピークは磁界が強いほど高周波ヘシフトするのに対し、高

周波側のピークは磁界強度にほとんど依存しないことがわかる。このことから、2つのピークが生じた原因はそれぞれ異なるものと推測される。

一方、長さ 20mm の場合には、周波数の増加とともにはじめほぼ一定の傾きで速度は増加するが、10Hz~35Hz にかけて磁界の弱い順にグラフの傾きが減少し、緩やかな増加となった。さらに周波数を増加すると、70Hz 付近で最大値を示した後、減少した。ここで、傾きが減少する周波数付近を細かく見ると 20、30、50Oe では小さなピークが確認される。このことから、長さ 20mm における傾きの変化は長さ 10mm で観測された低周波側のピークに相当するものと考えられる。これに対して最大値を示した周波数は磁界強度に依存しておらず、長さ 10mm の場合の高周波側のピークに相当するものと考えられる。

この結果を基に、2つのピークが生じた原因を考察する。まず磁界の大きさに依存しないピークに関しては、素子構造に起因すると推察される。Fig. 5 に、弾性板の長さとの関係を生じる周波数 f_2 との関係を両対数表示で示す。ピークを示す周波数が弾性板の長さの 2 乗に反比例することがわかる。一般に梁の共振周波数は長さの 2 乗に反比例することから、後者のピークは弾性板の共振によって振動の振幅が増大し速度が増大したものと考えられる。確認のため、Fig. 6 に長さ 20mm の場合の 60Hz における振動の様子を示す。弾性板の長さに対して自由端からおよそ 1/4 のところに節が認められ、1 次の共振が生じていることが確認される。

Fig. 5 Relation between the frequency f_2 and the length of the elastic plate.

Fig. 6 Wave form of the micro-machine with a 20-mm-long plate at 60 Hz.

一方、磁界強度に依存するピークは、磁界から供給されるパワ（供給パワ）が泳動に必要なパワ（必要パワ）に対して不足したことによる振幅の低下が原因であると説明される。Lavie の理論解析によれば、供給パワは周波数に比例し、必要パワは周波数の 3 乗に比例する⁹⁾。そのため低周波では泳動に必要なパワが磁界から十分に供給されるが高周波では供給パワが不足し、その結果、ある周波数以上になると泳動速度が低下する。また、磁界強度に対しては、低周波では振幅が大きく内壁によって振幅が制限されると仮定すると、供給パワは磁界強度に比例し、必要パワは磁界強度に依存しない。したがって、磁界が大きいほどパワ不足が起こる周波数が高周波になり、速度の低下（あるいは傾きの減少）が起こる周波数が高周波側にシフトしたと説明できる。

4-2 弾性板の形状と泳動速度の関係

続いて、弾性板の形状（長さ×幅）を変化させながら泳動速度を調べ、速度が増大する条件について検討した。

Fig. 7, 8, 9 は、それぞれ 20、40、60Oe 印加時における泳動速度の最大値を弾性板の長さ×幅に対して示したものである。磁界が 20Oe と小さい場合には、幅が細いほど速度が増加する傾向が見られ、最も細い 1mm の場合に大きな速度が得られた。幅が細いほど流体から受ける抵抗が小さく必要パワが少なく済むため、高い周波数まで大きな振幅を維持できたことが速度の増大につながったと思われる。40Oe になると、20Oe と同様に幅が 1mm と細い場合に速度が増加する傾向が見られるが、とくに速くなる長さは、20Oe 時の 20mm から 30～40mm へと長くなった。また、短く幅広い形状の速度も 45cm/s 以上となり、20Oe に比べ大幅に増加した。さらに磁界が 60Oe になると、短く幅広い形状の速度が更に増加して、広い条件で 60cm/s 以上の高速泳動が可能となった。以上の結果より、速度を増加させる形状は常に一定ではなく、磁界強度によって適切な形状があることがわかった。

ここで速度がとくに増加する形状についてその原因を詳しく調べるために、60Oe の場合で速度が 75cm/s 以上となった形状に着目する。Fig. 9 から高速泳動が得られる形状には大きく 2つの傾向が見られる。一つは、長さ 10mm、幅 2mm～5mm から長さ 20mm、幅 5mm かけての短く比較的幅広い形状、もう一つは長さ 30mm、幅 1mm から長さ 40mm、幅 2～3mm かけての細長い形状である。

まず、前者の短く幅広い形状で速度が増加する原因を考察する。Fig. 10 は、長さ 20mm で幅が異なる場合の泳動速度と励磁周波数の関係である。図中にはパワ不足が生じたと考えられる周波数に矢印（↓）を記入し、共振周波数付近(60～70Hz)を灰色で表示している。但し、幅が 5mm の場合にはパワ不足が起こる周波数と共振周波数がほぼ重なっているため矢印は省略した。低周波では幅が広いほど押し出す水量が多く推力が大きいため速度が速い。しかし、低い周波数でパワ不足を生じるため、例えば幅 6mm では

35Hz を境に傾きが大幅に低下し共振周波数では大きな速度が得られなかった。一方、幅が細い場合には、低周波では推力が小さく速度は遅いが、パワ不足を生じる周波数が高いため、より高い周波数まで速度は増加傾向となる。しかし、幅が細すぎるとパワ不足を生じる周波数が共振周波数を大きく越え振幅が逆に減少してしまうため共振後の速度の伸びがあまり得られない結果となった。結局、パワ不足を起こす周波数と共振周波数がほぼ一致した幅 5mm において最大値が得られた。

同様に Fig. 11 に長さ 10mm の場合の結果を示すが、幅が細くなりパワ不足が生じる周波数と共振周波数（240Hz 付近）が接近するとともに最大速度が増大していることがわかる。このとき幅 2mm では最高速度は 84cm/s に達した。なお、幅を更に細くすると泳動が不安定になって速度が大幅に低下したため、共振周波数とパワ不足が生じる周波数を一致させることはできなかった。

Fig. 7 Relation between the maximum velocity and the shape of the elastic plate. (H = 20 Oe)

Fig. 8 Relation between the maximum velocity and the shape of the elastic plate. (H = 40 Oe)

Fig. 9 Relation between the maximum velocity and the shape of the elastic plate. (H = 60 Oe)

Fig. 10 Relation between the swimming velocity and the frequency. ($L = 20$ mm)

Fig. 11 Relation between the swimming velocity and the frequency. ($L = 10$ mm)

Fig. 12 Relation between the swimming velocity and the frequency. ($L = 40$ mm, $W = 3$ mm)

次に、長さ 30~40mm で幅が細い場合に速度が増加している理由を考察する。Fig. 12 に長さ 40mm、幅 3mm の場合の泳動速度と周波数の関係を示す。長さ 40mm の場合、1 次の共振周波数は 15~20Hz 付近であるが振動の振幅が内壁で制限されているため速度の増加としては現れていない。しかし、30Oe 以下では 60Hz 付近に磁界強度に依存しないピークがわずかに認められる。このピークは理論計算と観察から 2 次の共振によるものである。一方、パワー不足

を生じる周波数は、20Oe では 25Hz、30Oe では 35Hz、40Oe では 45Hz と考えられ、60Oe では 60Hz 付近と予想される。すなわち、60Oe ではパワー不足を生じる周波数と 2 次の共振周波数が重なることで速度が増大したものと考えられる。

このようなパワー不足を起こす周波数と共振周波数が接近して速度が増加する傾向は、20Oe における長さ 20mm、幅 1mm (1 次共振)、40Oe における長さ 20mm、幅 3mm (1 次共振)、及び長さ 40mm、幅 2mm (2 次共振)、と他の磁界強度でも確認された。以上の結果から、泳動速度をより増大させるためには、駆動する磁界強度に対して、パワー不足を起こす周波数と共振周波数が接近するような弾性板の形状を与えればよいという設計上有用な知見が得られた。

ところで、長さが 30mm 以上で幅が 1mm の場合には上述の傾向が当てはまらないにも関わらず、泳動速度は非常に高速となる傾向が見られた。観察の結果、弾性板の波動が定在波から進行波に近づいており、泳動挙動が他の形状とは異なることがわかった。この点については別報で報告する予定であるが、幅を極端に細くし長さを長めに設定することも速度増加の一つの方策として有用と思われる。また、本報では弾性板の厚さと材質を一定としたが、他の条件の結果についても今後報告していく予定である。

5. まとめ

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 泳動速度は励磁周波数に対して 2 つのピークを示した。このうち、磁界強度の増加とともに周波数が高くなるピークの成因は、磁界からの供給パワーが泳動に必要なパワーに対して不足したものと考えられる。これに対し、磁界強度に依存しないピークは弾性板の共振によるものであることがわかった。
- (2) 弱い磁界では細長い形状の弾性板、強い磁界ではこれに加え、長さが短く幅の広い形状の弾性板で泳動速度が増大する傾向が見られた。このとき泳動速度がとくに増加する形状では、泳動に必要なパワーが不足する周波数と共振周波数が接近していることが確認された。

本研究の一部は、平成 11 年度笹川研究助成及び平成 12 年度文部省科学研究補助金 (奨励(A)) によるものである。

参考文献

- 1) 服部 正: 電学論 E, **116-E**, 43(1996).
- 2) 坂下智亮、本田 崇、山崎二郎: 平成 10 年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 1121, (1998).
- 3) A. M. Lavie: IEEE Trans. Magn., **6**, 365(1970).
- 4) A. M. Lavie: J. Fluid Mech., **53**, 701(1972).