

スパイラル型磁気マイクロマシンを用いたマイクロポンプ

Micropump with a Spiral-Type Magnetic Micromachine

久富伸一・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)

S. Hisatomi, 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

A micropump with a spiral-type magnetic micromachine was fabricated. The magnetic micromachine was composed of a permanent magnet and a spiral coil. When a rotating magnetic field was applied, the machine rotated and produced a thrust force in a liquid. However, the machine remained still and pumped the liquid at the point of equilibrium between the thrust force and a force created by the field gradient. We experimentally examined the basic properties of the pump, such as the flow rate and pressure. As a result, we found that the latter two properties can be controlled by adjusting the frequency of the rotating magnetic field. The pump was able to produce a maximum pressure of 116 Pa and a flow rate of several ml/min.

Key Words: spiral-type magnetic micromachine, micropump, magnetic field, magnetic field gradient, pressure, flow rate

1. はじめに

微量の流体を定量的に送液するポンプとしてマイクロポンプがある。近年、マイクロポンプの開発が盛んに行われており、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して送液を行うマイクロポンプが研究の主流となっている。このようなマイクロポンプの一般的なスペックとしては、サイズが1~2 cm³, 最大流量が1~2 ml, 最大圧力が100~200 kPa程度であり、大圧力、大流量を望めるといった利点があるが、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ことが欠点となっている。

マイクロポンプの応用例の一つとして、 μ TAS(Micro Total Analysis System)の送液システムが期待されている。 μ TASとは微小空間内で微量のサンプルの分離、反応、検出までを一括して行うもので、DNA分析や血液分析な

どに使用されている。現在実用化されている μ TASにおいて、前述のポンプには先ほど述べたような欠点があるため使われず、電気泳動を用いて幅0.1 mm, 深さ0.05 mm程度の流路における送液を行っている³⁾。しかし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、定量性に欠けるという短所があるため、定量性が必要となる免疫反応や生化学反応においては、マイクロポンプによる定量的な送液が必要となってくる。

このように μ TASにマイクロポンプを使用するには微小流路での使用を考えサイズが小型であるということ、さらに一度使用したポンプには不純物が残っている可能性があるため使い捨て可能であるということが必要な条件となる。この条件において著者らは磁気マイクロマシンを用いたマイクロポンプの使用を考えている。Fig. 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直径方向に磁化された円柱状の永久磁石とらせん構造に加工されたワイヤ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ってマシンは回転し推進する⁴⁾。この磁気マイクロマシンを用いたマイクロポンプは、外部磁界を印加することによりマシンをワイヤレスに駆動でき、駆動部と回転磁界発生部が異なることから駆動部の使い捨ても可能である。さらに構造が単純なことから小型化も可能であり、周波数によって定量的に送液することも可能である。これらのことから磁気マイクロマシンを用いたマイクロポンプは前述のマイク

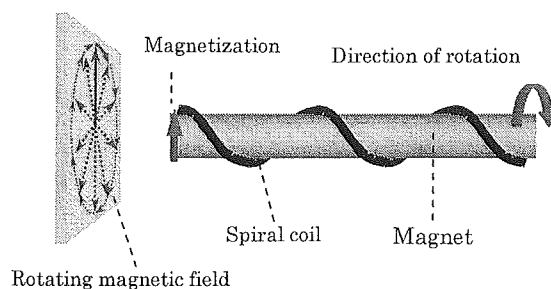


Fig. 1 Schematic view of the magnetic micromachine.

ロポンプや電気泳動による送液方法の短所を補うことができ、さらに μ TAS に使用する際の条件も満たしているといえる。

著者らはすでに、磁気マイクロマシンを用いて周波数により圧力制御可能なポンプの試作についての報告を行っている⁵⁾。本研究では磁気マイクロマシンを用いたポンプを試作し、その圧力・流量特性の評価を目的として検討を行った。

2. 動作原理

Fig. 2 にマイクロポンプの概略図を示す。マイクロポンプは磁気マイクロマシンと回転磁界発生コイルから成り立っている。マシンは図に示すように、流路内に充填されている流体の中に位置している。回転磁界発生コイルは一方のコイルでは z 軸方向に、もう一方のコイルでは y 軸方向に、それぞれ位相を制御した 2 相交流磁界を発生することにより回転磁界をつくっている。コイルによる回転磁界によりマシンが回転し推進しようとするが、コイルによる磁場勾配の力により推進を抑止され、その場で回転しポンプとして動作する。またマシンの推進力、コイルの磁場勾配の力と周波数には式(1)のような関係がある。

$$F_1 = \alpha f (\alpha > 0), F_2 = \beta (\beta > 0)$$

$$\begin{aligned} & \text{i) } F_1 \leq F_2 \text{ (等号条件 } f=f_a) \\ & \text{ii) } F_1 > F_2 \end{aligned} \quad (1)$$

F_1 : マシンの推進力

F_2 : コイルの磁場勾配の力

f : 周波数

f_a : 送液できる限界の周波数

F_1 は f に比例して単調に増加するが、 F_2 は一定である。よって i) の時は F_1 より F_2 が小さいまたは等しいためマシンはその場で回転し送液を行うが、ii) の時は周波数が f_a を超えると F_1 が F_2 を上まわり、コイル外へマシンが脱するため送液できなくなる。

Fig. 3 に今回実験で使用した磁気マイクロマシンを示す。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。回転磁界発生コイルは直径 1.0 mm の銅線を約 50 巻きにし、平均直径が約 50 mm とした。また流路には内径 1.59 mm のシリコンチューブを、流体には動粘度 10 mm²/s のシリコンオイル

を用いている。

3. 圧力-流量特性

3.1 実験方法

ポンプの基礎特性である圧力-流量特性の評価を目的として実験を行った。まず今回試作したマイクロポンプに関するパラメータについて説明する。今回の実験において、マシン形状(直径 1.0 mm、長さ 10 mm)、流路直径(1.59 mm)、磁界強度(1.6 kA/m)、流体の動粘度(10 mm²/s)は固定している。また Fig. 4 において、回転周波数 f と、流体が流路に充填されている長さ(流路長さ) L を変えることによって流量が変化し、さらに流路の出口と入口の高低差 h を変えることによって負荷圧力が変化

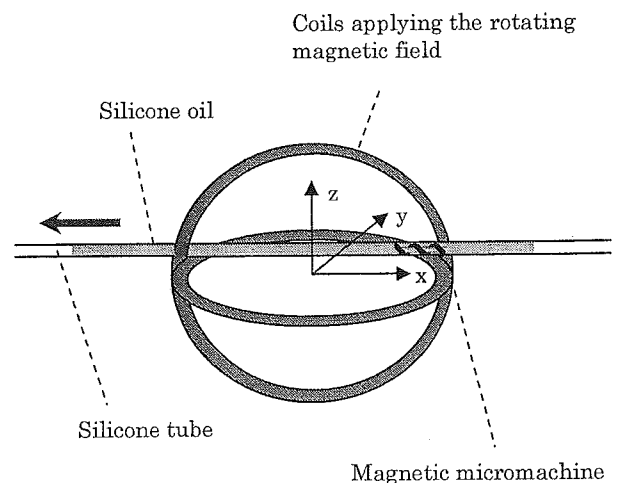


Fig. 2 Schematic view of the micropump.

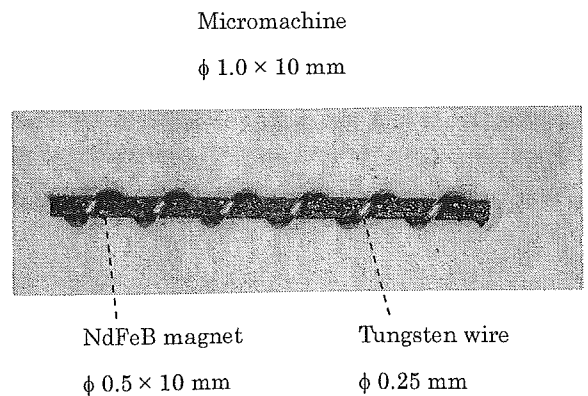


Fig. 3 Photograph of the spiral-type magnetic micromachine.

する。よって本実験では、 f , L , h を変化させることにより負荷圧力と流量の関係を求めた。流量は、単位時間当たりに移動するシリコンオイルの移動距離とシリコンチューブの断面積との積より求めている。

3.2 負荷圧力 0 Pa 時の流量実験

負荷圧力が 0 Pa における流量の検討をおこなった。Fig. 5 に L を 90 cm に固定した時における双方向の周波数と流量の特性を示す。逆方向へは順方向における回転磁界の回転方向を反転させることにより送液を行った。今回の実験条件において、周波数の上限はマシンの推力がコイルの磁場勾配による力より大きくなる 103 Hz となっている。実験の結果、順方向と逆方向の流量は等しくなり、流量は周波数に比例して増加した。これによりこのポンプは双方向性を有することが分かる。

Fig. 6 に周波数を変化させた時の L と流量の特性を示す。 L を変化させると流体と流路の接面の全摩擦量が変化し、それによって流量も変化することから、 L の変化による流量を測定した。 L は実験系の都合上 30 cm 以上で測定した。単位時間当たりの流量は L の増加に伴い減少した。これは L が長くなるほど流路と流体の接面の摩擦が大きくなるため流量が小さくなり、 L が短いほど摩擦が小さくなるため流量が大きくなるためである。また本来マイクロポンプは、 L が 30 cm のような長い距離における送液は想定していないので、今回の実験条件下で、実際のマイクロポンプで使用されている L が数 cm 程度での流量を測定したと仮定すると、Fig. 6 の最大周波数である 103 Hz の流量の推移、及び L が小さくなるほどチューブとオイルの接面での摩擦が小さくなり流量が大きくなるということから毎分数 ml 程度の流量が期待できる。

3.3 負荷圧力可変時の流量実験

負荷圧力を変化させた場合の圧力と流量の関係を検討した。Fig. 7 に L を 90 cm に固定し、周波数を変化させた時の圧力と流量の特性を示す。流量は圧力に対して直線的に変化した。また周波数を上げることにより圧力と流量は大きくなり、いずれの周波数でも直線的になった。本来、ポンプにおける圧力と流量の関係は、圧力変化に伴う流量変化が小さいものを理想としている。圧力と流量の関係はマシン形状や、流路とマシンサイズの関係により変化すると予想されるので、今後形状の最適化に関する検討が必要であるといえる。

次に Fig. 8 に周波数を 103 Hz に固定し、 L を変化させた時の圧力と流量の特性を示す。流量が 0 μl の時 L の長さに関係なく圧力は同じ値になり、116 Pa となった。この図からも分かるように L が短くなるにつれて摩擦も小

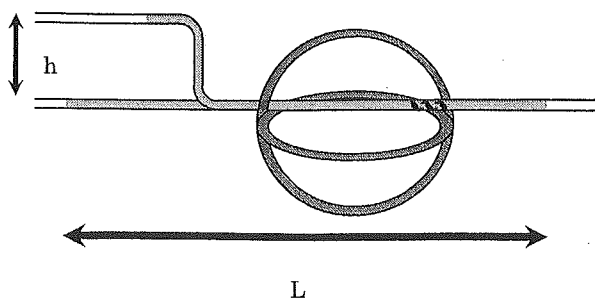


Fig. 4 Main parameters of the micropump.

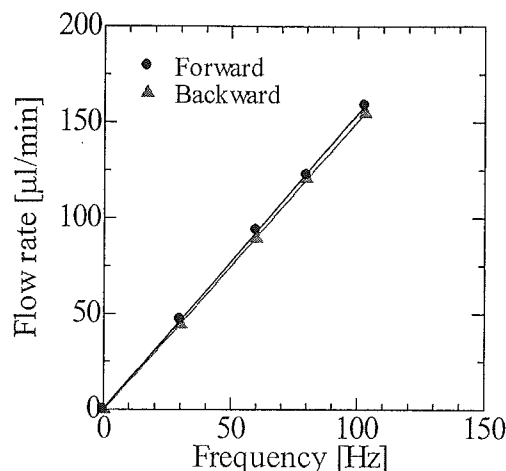


Fig. 5 Relation between frequency and flow rate in the forward and backward directions.

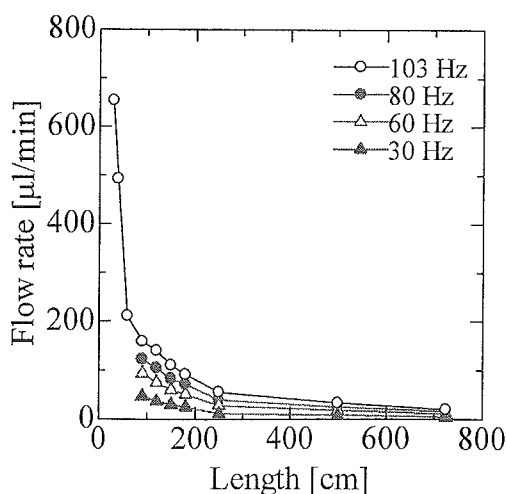


Fig. 6 Relation between L and flow rate when the frequency is changed.

さくなり傾きは急峻になった。

4. まとめ

実験より磁気マイクロマシンを用いたマイクロポンプの基礎特性を明らかにした。基礎特性としては、圧力と流量の関係、及び流路長さと流量の関係を定量的に明らかにした。またその特性の結果より、流路長さが数 cm 程度なら毎分 ml の流量が望めることが分かった。

このポンプの μ TAS への応用に関しては、圧電駆動型ポンプや SMA 駆動型ポンプと比べ、電気的な接点なしで、外部磁界によりワイヤレスに流体を送液できるという点や、電気泳動に求められる定量送液を周波数制御により可能としている点においてきわめて有利であると考えられる。

今後の課題としては、マシンのらせんに用いているワイヤの太さやらせんの角度といったらせん構造、及び流路とマシンサイズの関係についての検討を行うと共に、マシンの小型化に関する検討を行う。さらに回転磁界発生コイルの小型化の検討を行い、Fig. 9 のように回転磁界発生コイルを搭載しているステージ上に流路とマシンを搭載した基盤を乗せ、回転磁界を発生させることによりマシンを回転させ送液を行うといった、使い捨て可能なポンプのシステムに関する検討も行う予定である。

References

- 1) S. Yokota, J.-H. Park, K. Yoshida: *Fluid Power System*, 30, 502-507 (1999).
- 2) S. Yokota, K. Yoshida, T. Okayasu, T. Kawaue, Y. Otubo, K. Edamura: *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C*, 66, 3516-3522 (2000).
- 3) H. Watanabe, H. Izutu, K. Watanabe: *Hitachi Chemical Technical Report*, NO.40, 29-32 (2003)
- 4) M. Sendoh, K. Isiyama, Y. Suda, and K. I. Arai: *Journal Magnetic Society of Japan. Soc. Jpn.*, 27, 138-141 (2003).
- 5) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Hayase: *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 39, 3289-3291 (2003).

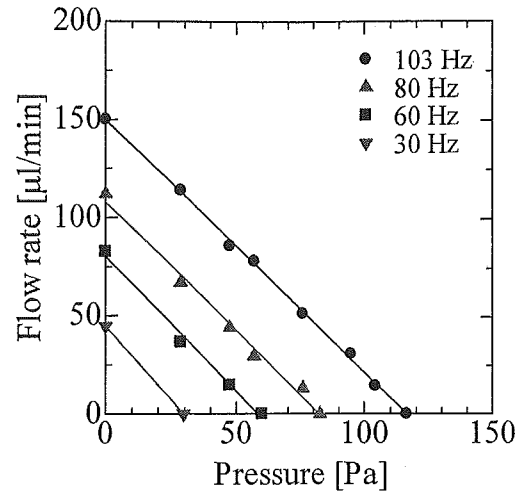


Fig. 7 Relation between pressure and flow rate when the frequency is changed.

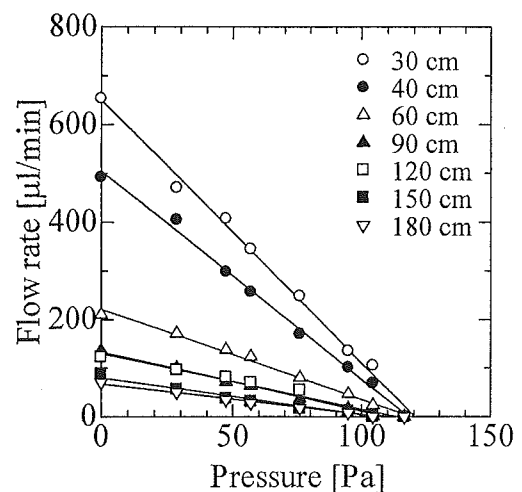


Fig. 8 Relation between pressure and flow rate when L is changed.

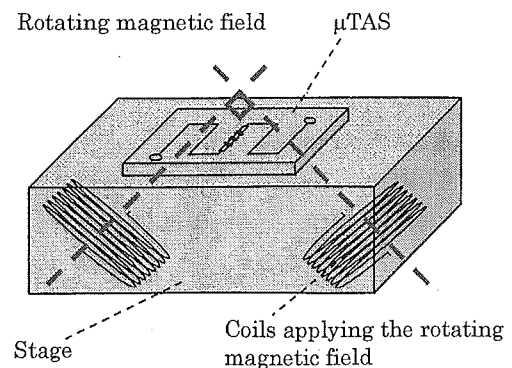


Fig. 9 Disposable micropump.

2004年10月6日受理, 2004年12月14日採録

ワイヤを牽引する磁気マイクロマシンの試作

Fabrication of a Magnetic Micromachine Trailing a Wire

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)

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

A magnetic micromachine capable of trailing a wire was fabricated. The micromachine was constructed of a permanent magnet, a copper tube, and a spiral shape made from a tungsten wire. The magnet was magnetized in the direction of its diameter. When a rotational magnetic field was applied, the machine rotated and moved in silicone oil. Experiments showed that a spiral shape produced the largest thrust force. The micromachine was able to trail a wire in a small waterway created to simulate a blood vessel. These results show that the micromachine has great potential for navigating medical catheters.

Key words: magnetic micromachine, catheter, spiral structure, rotational magnetic field

1. はじめに

カテーテルを利用した脳血管内治療は、従来の開頭手術に変わる治療法として注目されている。しかしながら、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するため、血管の形状や医師の技術などにより、医療事故が生じたり、目的の部位まで到達不可能なケースが生じたりする可能性もある。そのため、カテーテルを誘導・牽引できる機能が求められている。現在, Hagaらによって形状記憶合金を用いて先端の屈曲を制御する能動カテーテルが提案されているが¹⁾, カテーテル誘導・牽引の検討例はほとんどない。

我々は先の研究においてスパイラル型磁気マイクロマシンの研究を行ってきた²⁾。この磁気マイクロマシンは、らせん形状に加工したワイヤと永久磁石から構成されていることが特徴である(Fig. 1)。搭載している磁石が直径方向に磁化されているため、外部から印加される回転磁界に同期してマシンは回転する。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。したがって、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り、また、回転磁界面を3次的に方向制御することにより、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⁾。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、生体内で仕事を行う医療マイクロマシンとして極めて魅力あるものといえる。マイクロマシンの医療応用を考える際、血管中での駆動はきわめて重要であることから、その駆動方法として泳動機構の検討は必要不可欠である。我々は先の研究において、マシン直径が0.1~1.5 mmの磁気マイクロマシンについて、幅広い粘性の液体を用いて実験と解析から泳動特性の検討を行った^{4)~7)}。その結果、レイノルズ数が 10^{-7} ~ 10^3 と幅広い条件下において駆動可能であることを確認し、スパイラル構造が小型化に適した構造であることを示してきた。これにより、マシンの小型化が必要である血管内を泳動環境と想定した場合にも適応可能であると考えられる。

この磁気マイクロマシンをカテーテル先端部に取り付けることにより、カテーテルを誘導・牽引することが可能となり、より低侵襲な医療の実現が可能であると考えられる。そこで本研究では、ワイヤを牽引可能な磁気マイクロマシンの試作を行い、速度測定・推力測定実験ならびに牽引実験を行ったので報告する。

2. らせん形状に関する検討

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。このマシンは胴体部が筒状になっており、空洞にワイヤを通すことが可能となっている。使用した永久磁石は外径 0.38 mm, 内径 0.15 mm, 長さ 0.55 mm の筒状

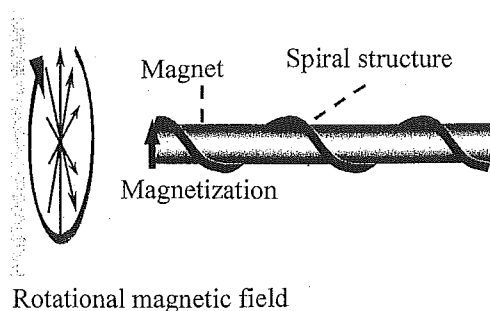


Fig. 1 Schematic view of the magnetic micromachine.

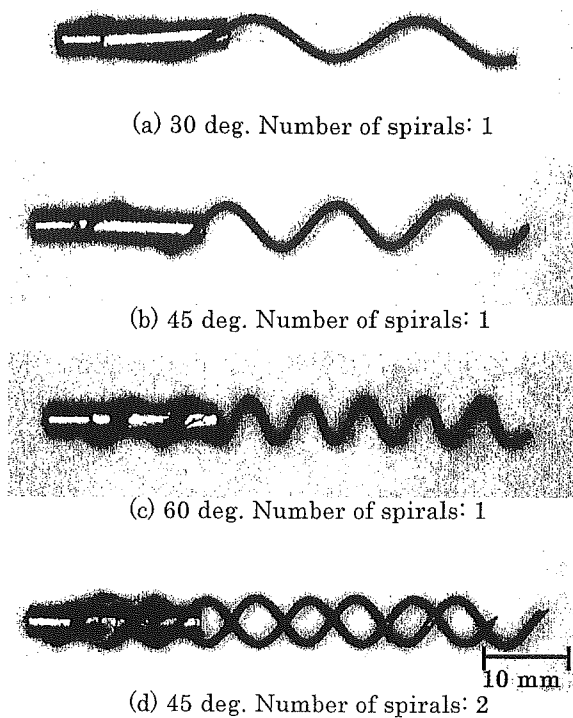


Fig. 2 Photographs of the fabricated micromachines.

の SmCo 磁石で、この SmCo 磁石に筒状の銅管 ($\phi 0.35(0.15) \text{ mm} \times 1.45 \text{ mm}$) を接着し、胴体部を 2 mm とした。この胴体部にタングステン線 ($\phi 0.1 \text{ mm}$) をらせん状に取り付け、マシン長さを 5.55 mm とした。本実験では、らせん構造の異なる 4 種類の磁気マイクロマシンを試作した。試作したらせん構造は、らせん条数 1 のらせん角度 30° 45° 60° 、らせん条数 2 のらせん角度 45° である。

2.2 泳動速度測定

直径が 16 mm、長さが 150 mm の試験管内を動粘度 $1 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルで満たし、この中に作成したマシンを入れ泳動速度の測定を行った。試験管は回転磁界発生用 2 軸ヘルムホルツコイルに入れ、回転周波数を変えることにより周波数と泳動速度の関係を測定した。ここで回転磁界の磁界強度は 16 kA/m である。

マシンのらせん角度・らせん条数に対する泳動速度の関係を Fig. 3 に示す。測定は脱調周波数(図中の矢印)までを行い、それぞれのプロットで 3 回以上測定し、平均値を図中に示している。ここで、脱調周波数とはマシンが流体から受ける負荷トルクが磁気トルクを上回り、マシンが回転の同期から外れるときの周波数である。実験の結果、泳動速度は周波数に比例して増加することが明らかとなった。その比例定数はらせん角度 45° ・らせん条数 1 のマシンが大きいにもかかわらず、最大速度は負荷

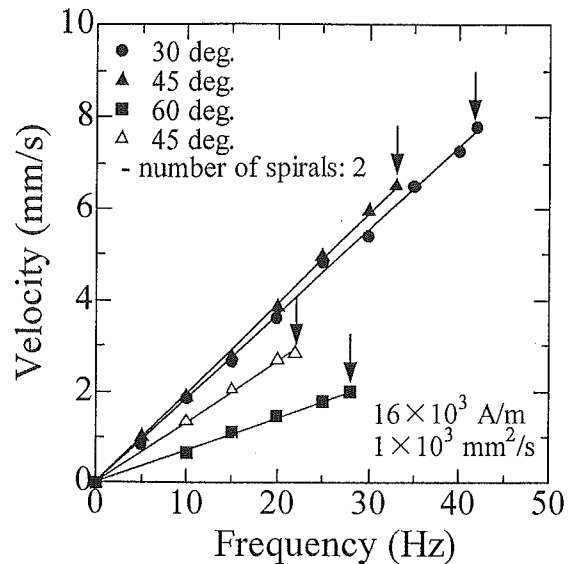


Fig. 3 Relationship between frequency and velocity.

トルクが小さく脱調周波数の高いらせん角度 30° ・らせん条数 1 のマシンの方が大きく、 7.8 mm/s であった。また、らせん角度 45° において、らせん条数 2 はらせん条数 1 と比較して比例定数・脱調周波数ともに低下することから、らせん条数を増やしても泳動速度は向上しないことが明らかとなった。

2.3 推力測定

牽引型のマシンの特性上、推力は重要なパラメータであることから、推力が最大となるマシン形状について検討を行った。推力測定方法を Fig. 4 に示す。マシンを鉛直上方に泳動させ、推力と浮力の和がマシンの自重と釣りあう周波数を測定し、推力と周波数の関係を導いた。さらに、マシンに負荷を取り付けて自重を変化させ、推力が最大となる脱調周波数まで測定を行った。試験管 ($\phi 16 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$) に製作したマシンを入れ、動粘度 $1 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルで満たし、推力の測定を行った。

マシンのらせん角度・らせん条数に対する推力の関係を Fig. 5 に示す。測定は 3 回以上行い、その平均値を図中のプロットに示した。なお図中の矢印は脱調周波数である。推力は周波数に比例して増加することが明らかとなった。泳動速度の結果と異なり、らせん角度 45° ・らせん条数 1 のマシンが比例定数、最大推力ともに最も大きく、推力は最大で $103 \text{ }\mu\text{N}$ 発生した。このことから、マシンの自重 (2.7 mg) を差し引いて約 7.9 mg の負荷まで鉛直方向に牽引可能であると考えられる。また、泳動速度の結果と同様に、らせん角度 45° においてらせん条数 2 はらせん条数 1 と比較して、比例定数・脱調周波数ともに低下することから、推力についてもらせん条数を増

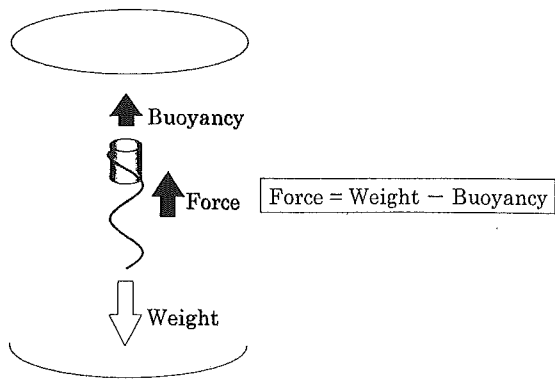


Fig. 4 Schematic view of the force measurement.

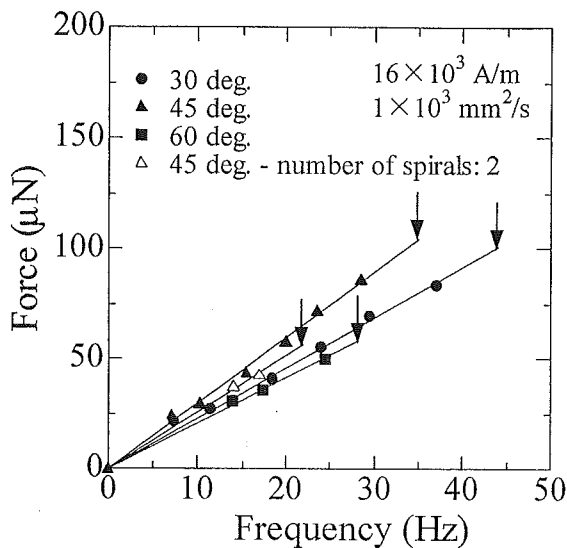


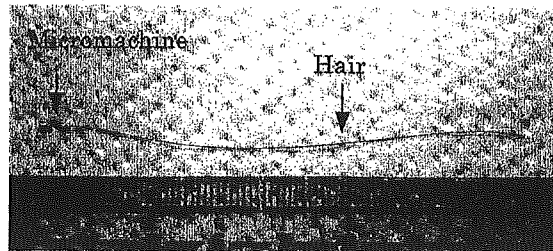
Fig. 5 Relationship between frequency and force.

やしても向上しないことが明らかとなった。

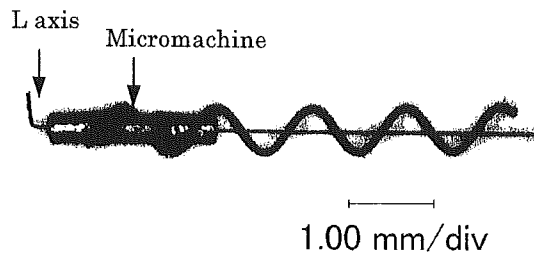
3. 牽引実験

3.1 素子構成

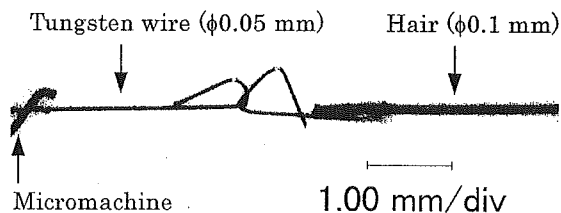
2章の結果をふまえ、実際にワイヤを牽引可能な磁気マイクロマシンの試作を行った。今回はワイヤとして $\phi 0.1$ mmの毛髪を使用した。ワイヤを牽引するマシンの外観写真をFig. 6(a)に示す。局所的に拡大したものとして、マシンとL型の受け軸をFig. 6(b)、マシンとワイヤのつなぎ目をFig. 6(c)に示す。マシンの胴体部は磁気トルクを倍にするため、SmCo磁石を2個使い、磁石の間に銅管($\phi 0.35(0.15)$ mm \times 0.9 mm)をはさんだ。この胴体部に推力が最大となるらせん角度 45° ・らせん条数1のらせんを取り付けた。胴体部にタングステン線($\phi 0.05$ mm)を通し、L型に折り曲げ受け軸を設けることにより、マシンは回転するが牽引するワイヤの回転は抑える構造となっている。さらに、マシンが自由に泳動するため、ワイヤと受け軸との接続部には2個の円をつなげたつなぎ目



(a) Photograph of whole machine



(b) Photographs of L axis and micromachine



(c) Photograph of connection

Fig. 6 Photographs of a micromachine capable of trailing a wire.

を設けた。ここで牽引するワイヤの長さは70 mmである。

3.2 実験方法

血管を模擬した流路の写真をFig. 7に示す。直径5 mmの細い血管が、角度 150° で直径10 mmの太い血管につながっている状態を模擬し、太い血管から細い血管に磁気マイクロマシンでワイヤを牽引・誘導することが本実験の目的である。この血管を模擬した流路とワイヤを牽引するマシンを動粘度 3×10^3 mm 2 /sのシリコンオイルで満たされた立方体の容器に入れ、さらにこの容器を回転磁界発生用3軸ヘルムホルツコイル内部に入れて実験を行った。印加磁界強度、印加磁界周波数はそれぞれ9.6 kA/m、10 Hzである。

3.3 実験結果

Fig. 8にワイヤを牽引しながらの磁気マイクロマシンの動作の実験結果を示す。はじめにマシンは幅の広い流

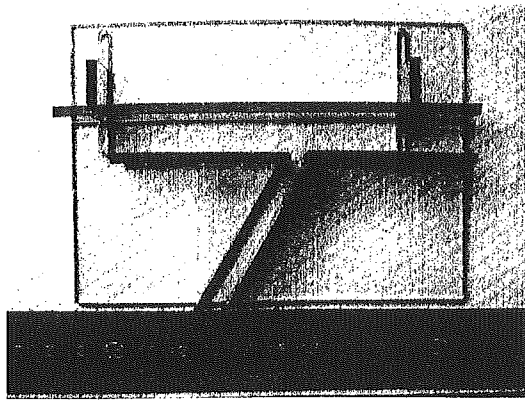


Fig. 7 Photograph of a simulated blood vessel.

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。

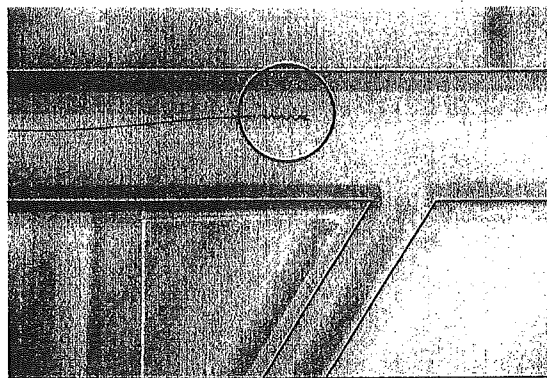
4. まとめ

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。

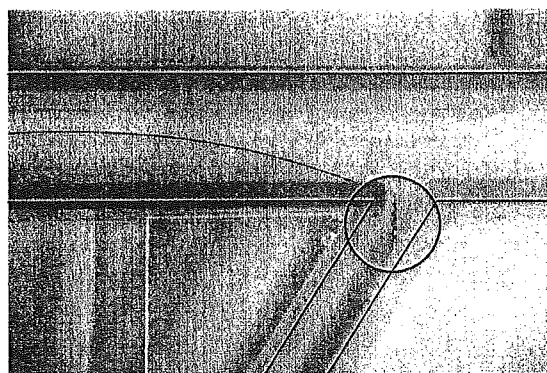
今後は更なるマシン構造の最適化を行い、カテーテルを牽引する磁気マイクロマシン実現のための検討を行う予定である。

Reference

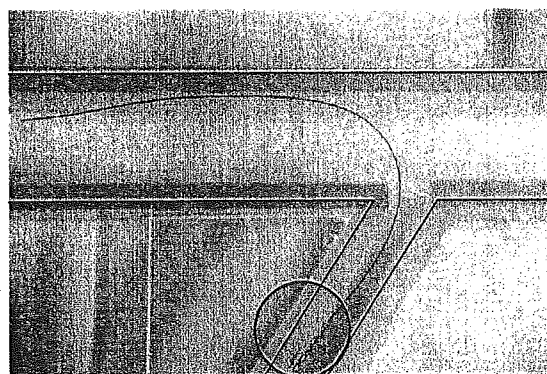
- 1) Y. Haga, M. Esashi, *Transaction IEE of Japan Application of Sensors and Micromachines Society*, 120, 515 - 520, (2000)
- 2) M. Sendoh, N. Ajiro, K. Ishiyama, M. Inoue and K. I. Arai, *IEEE Transactions on Magnetics*, 36, 3688 - 3690, (1999).
- 3) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, 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).



(a) 0 s.



(b) 80 s.



(c) 125 s.

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

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

Reprinted from

Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 30, No. 2, 2006

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.

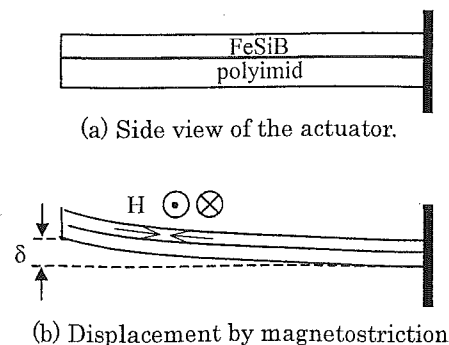


Fig. 1 Configuration and displacement of the magnetic actuator.

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 $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ 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 $0.7\ \mu\text{m}$ 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 $240\ \text{kA/m}$ とし、回転速度 $60\ \text{rpm}$ 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スコープ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める。一

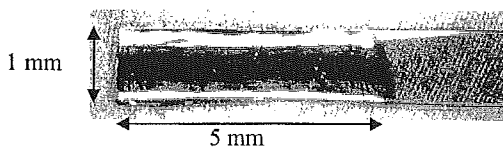


Fig. 2 Picture of the magnetic actuator.

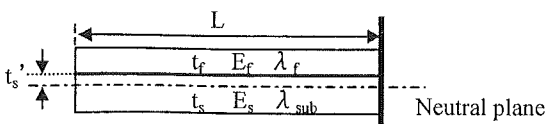


Fig. 3 Structure of the cantilevered magnetic actuator and neutral plane.

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。

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

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

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 $30\ \mu\text{m}$ 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° 度変化させ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 $10\ \text{kA/m}$ 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 $6\ \mu\text{m}$ であるのに対し、試料長手方向の場合には $9\ \mu\text{m}$ 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。

この様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

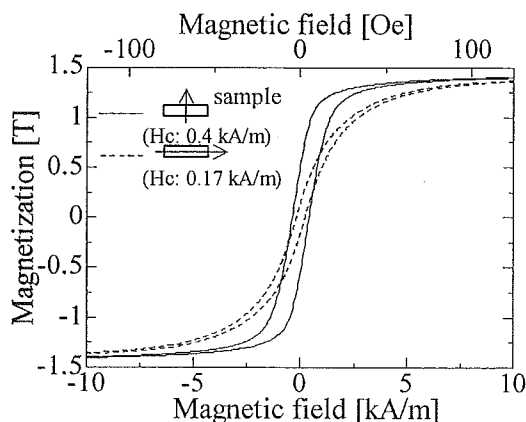


Fig. 4 Magnetic property in the width direction of the cantilevered magnetic actuators.

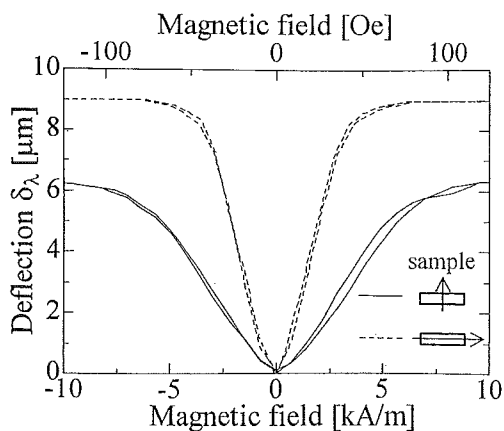


Fig. 5 Relation between the magnetic field and the displacement, δ_λ , caused by magnetostriction.

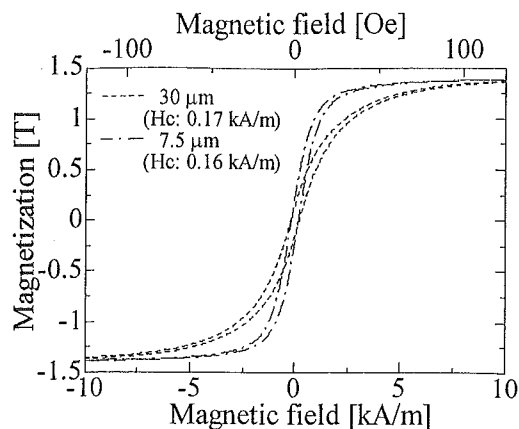


Fig. 6 Magnetic property in the width direction of the cantilevered magnetic actuators.

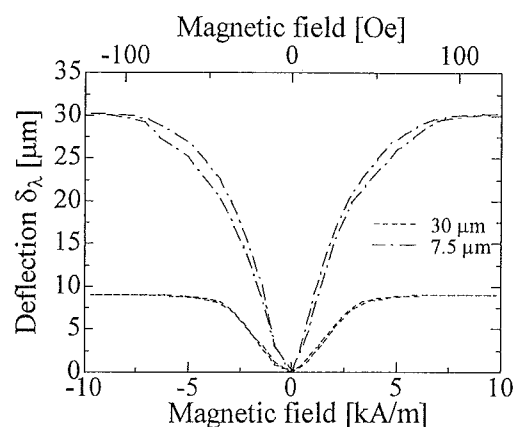


Fig. 7 Relation between the magnetic field and the displacement, δ_λ , caused by magnetostriction.

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

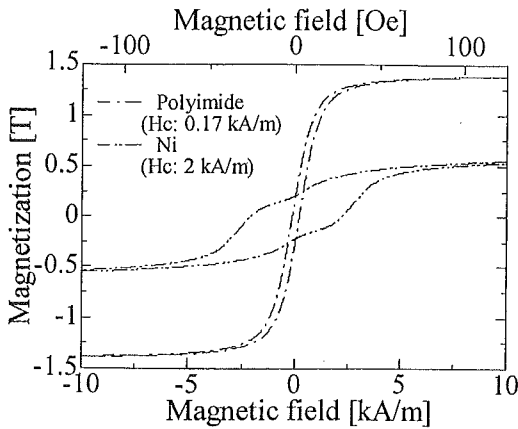


Fig. 8 Magnetic property in the width direction of the cantilevered magnetic actuators.

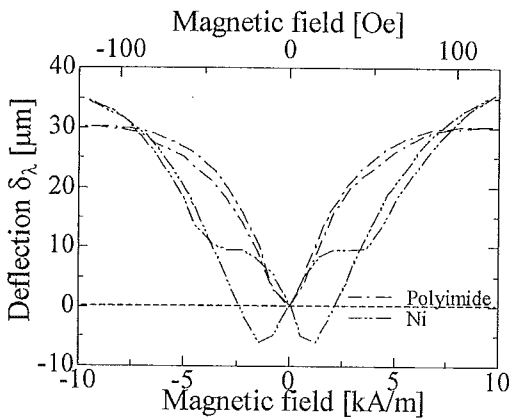


Fig. 9 Relation between the magnetic field and displacement, δ_λ , caused by magnetostriction.

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では 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⁹⁾。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 $-1/2$ 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。 $L: 5 \text{ mm}$, $w: 1 \text{ mm}$, $t_f: 0.7 \mu\text{m}$, $E_f: 210 \text{ GPa}$, $\lambda_f: -15 \times 10^{-6}$ (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 $E_s: 3.5 \text{ Gpa}$ 、基板に Ni フォイルを用いた場合には $E_s: 210 \text{ Gpa}$, $\lambda_{\text{sub}}: 14 \times 10^{-6}$ (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: IEEEJ 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

GASTROENTEROLOGY

Late complication in patients undergoing pancreatic resection with intraoperative radiation therapy: Gastrointestinal bleeding with occlusion of the portal system

YASUHIRO SHIMIZU,* KENZO YASUI,* NOBUKAZU FUWA,[†] YASUAKI ARAI[‡] AND KENJI YAMAO[§]

Departments of *Gastroenterological Surgery, [†]Radiation Oncology, [‡]Diagnostic Radiology and [§]Gastroenterology, Aichi Cancer Center Hospital, Nagoya, Japan

Abstract

Background: There are few reports of late complications in patients who have undergone pancreatic resection with intraoperative radiation therapy (IORT), because carcinoma of the pancreas (PCa) and the bile duct (BCa) have a poor prognosis. The purpose of the present paper was to review gastrointestinal (GI) bleeding occurring with occlusion of the portal system (PVs) as a complication of IORT in patients surviving long term without recurrence.

Patients: From 1990 to 1999, 45 patients underwent surgical resection of the pancreas with IORT. Eleven of these patients survived >3 years without recurrence, and occlusion of PVs was recognized in five patients at follow-up examination. Three of these five patients received repeated blood transfusions for GI bleeding.

Results: One patient had BCa and two had PCa, and pancreatoduodenectomy was carried out. The delivered radiation doses of IORT were 30 Gy (two patients) and 35 Gy (one patient). The postoperative periods to initial GI bleeding were 36, 26 and 9 months, respectively. In all cases, angiography revealed occlusion of PVs and the collateral circulation. The bleeding points were esophageal varix (case 1), remnant stomach varix (case 2) and a jejunal ulcer (case 3), and blood transfusions were carried out totaling 44, 60 and 16 units, respectively. The GI bleeding disappeared spontaneously in case 1, developed sporadically in case 2 and was stopped by metallic stent insertion in PVs in case 3.

Conclusion: During long-term follow up after pancreatectomy with IORT, it is necessary to monitor patients for GI bleeding. A clinical trial on optimum doses, long-term safety and benefit of IORT is necessary.

© 2005 Blackwell Publishing Asia Pty Ltd

Key words: bile duct cancer, complication, gastrointestinal bleeding, intraoperative radiation therapy, occlusion of the portal system, pancreatic cancer.

INTRODUCTION

Carcinoma of the pancreas (PCa) and the bile duct (BCa) have a poor prognosis.^{1,2} The only therapy providing a possibility of cure is surgical resection. However, postoperative survival rate is low, and various kinds of adjuvant therapy have been attempted to improve the treatment outcome.^{3–9} Many reports have discussed the benefit of intraoperative radiation therapy

(IORT) as adjuvant therapy in PCa^{5,10–14} and Bca,^{15,16} but its efficacy remains controversial. Although it is reported that there are no short-term complications after IORT,^{5,10–13} there are few reports on long-term safety because patient prognosis is extremely poor. In the present study we review the prevalence of gastrointestinal (GI) bleeding occurring with occlusion of the portal system as a complication of IORT in patients surviving long term without recurrence.

Correspondence: Yasuhiro Shimizu, Department of Gastroenterological Surgery, Aichi Cancer Center Hospital, Kanokoden 1-1, Chikusa-ku, Nagoya 464, Japan. Email: yshimizu@aichi-cc.jp

Accepted for publication 8 August 2004.

METHODS

Patients

From January 1990 to December 1999, 139 patients underwent surgical resection of the pancreas at the Department of Gastroenterological Surgery, Aichi Cancer Center Hospital, Nagoya, Japan. Of these 139 patients, 41 with PCa and four with BCa underwent IORT (Table 1): a single dose of radiation ranging from 25 to 35 Gy (mean, 30.5 Gy) was delivered to the tumor bed just after resection. Eleven of the 45 patients survived >3 years without recurrence, but occlusion of the portal system was recognized in five of these 11 patients at follow up. In three of the five patients, repeated blood transfusions were carried out for GI bleeding, and the postoperative courses of these three patients are reviewed in detail.

RESULTS

One patient had carcinoma of the distal common bile duct and the other two had carcinoma of the head of the pancreas (PhCa). Pancreatoduodenectomy (PD) was carried out in all three patients and the reconstruction method of Imanaga was adopted, which entails an end-to-end gastrojejunostomy, end-to-side pancreatojejun-

ostomy and choledochojejunostomy.¹⁷ In one case (case 2), wedge resection of the superior mesenteric vein (SMV) was also performed. The delivered doses of IORT were 30 Gy in two patients and 35 Gy in one patient, and the postoperative periods to initial GI bleeding were 36, 26 and 9 months, respectively (Table 2).

Case 1

A 61-year-old man underwent PD with IORT for BCa. Gastrointestinal bleeding was recognized at 36 postoperative months (POM). Computed tomography (CT) at the time of initial bleeding showed an unclear SMV but contrast of the intrahepatic portal vein (PV). Increased blood flow from the remnant stomach wall to the esophagus wall was detected. Endoscopic examination (Fig. 1a) revealed esophageal varix, which was suspected of bleeding. Portography via the superior mesenteric artery (SMA) (Fig. 1b) showed occlusion of the SMV. The collateral circulation went through the elevated jejunum, and blood flowed into the intrahepatic PV around the choledochojejunostomy. The splenic vein (SV) could not be identified on portography via the splenic artery (SA) and we diagnosed that the SV blood was flowing back through the remnant stomach and esophagus walls.

Table 1 Patients with surgical resection of the pancreas

Procedure	Cases	Survivor >3 years without recurrence	GI bleeding with occlusion of the portal system
Total pancreatic resection	139 [†]	52 [†]	3 [†]
IORT (-)	94 [†]	41 [†]	0 [†] (0) [‡]
PCa, PEn	20	7	0
PCy	40	26	0
BCa	16	2	0
VCa	18	6	0
IORT (+)	45 [†]	11 [†]	3 [†] (5) [‡]
PCa	41	9	2 [†] (4) [‡]
BCa	4	2	1 [†] (1) [‡]

Bca, carcinoma the bile duct; Pca, carcinoma of the pancreas; GI, gastrointestinal; IORT, intraoperative radiation therapy; Pcy, cystic tumor of the pancreas; Pen, endocrine tumor of the pancreas; Vca, carcinoma of ampulla of Vater.

IORT (-), surgical resection without IORT; IORT (+), surgical resection with IORT.

[†]Total number of cases for procedure; [‡]no. patients with occlusion of the portal system.

Table 2 Clinical features of three patients with GI bleeding

Patient no.	Sex	Age	Diagnosis	Surgical procedure/ reconstruction	PV resection	Radiation	
						dose of IORT (Gy)	Initial bleeding (POM)
1	M	61	BCa	PD/Imanaga	-	30	36
2	F	56	PhCa	PD/Imanaga	Wedge resection	30	26
3	M	57	Phca	PD/Imanaga	-	35	9

BCa, carcinoma of the bile duct; GI, gastrointestinal; IORT, intraoperative radiation therapy; PD, pancreatoduodenectomy; PhCa, carcinoma of the head of the pancreas; POM, postoperative months; PV, portal vein.

Case 2

A 56-year-old woman underwent PD with IORT for PhCa. Gastrointestinal bleeding was recognized at

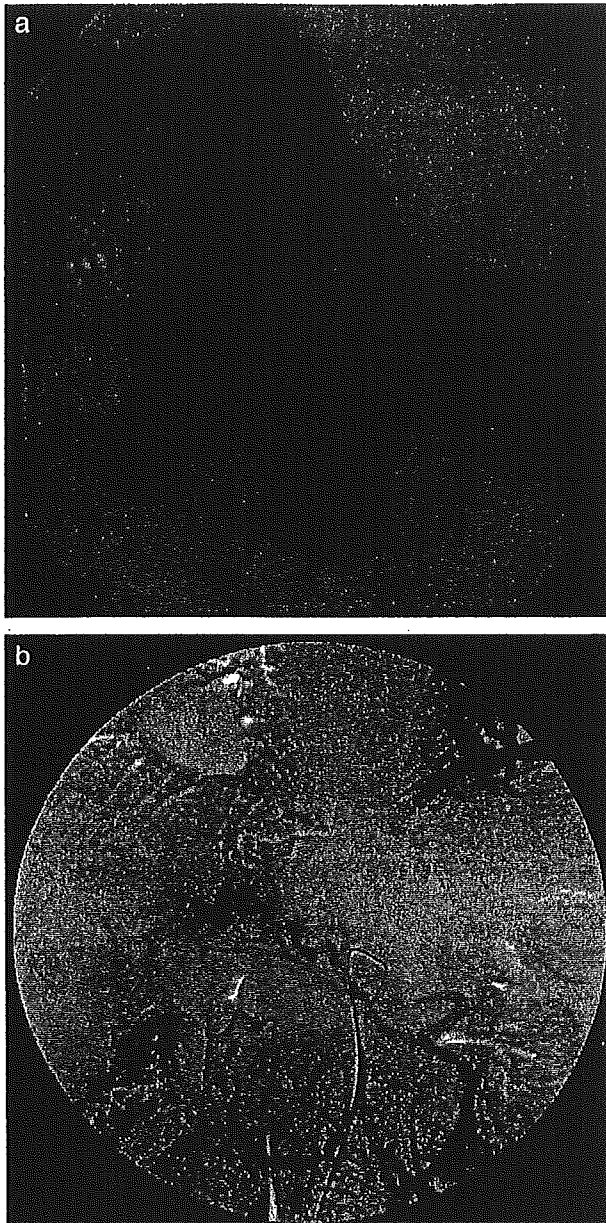


Figure 1 Case 1. Endoscopic examination revealing esophageal varix (a). Portography via the superior mesenteric artery (b) shows occlusion of superior mesenteric vein.

Table 3 Patient clinical course.

	GI bleeding (POM)	Blood transfusion (total units)	Clinical course	Recurrence	Follow-up months
1.	36-52	44	52 POM: GI bleeding (-)	+, 87 POM	98, DOD
2.	26-92	60	92 POM: close follow up	-	98, AW
3.	9-23	16	24 POM: GI bleeding (-)	-	54, AW

AW, alive and well; DOD, died of disease; GI, gastrointestinal; POM, postoperative months.

26 POM. Computed tomography at the time of initial bleeding (Fig. 2) demonstrated occlusion of the SMV and collateral circulation. These findings were not noted at the follow-up examination and GI bleeding of unknown cause was therefore repeated. Endoscopic examination at 90 POM (Fig. 3a) revealed bleeding of remnant stomach varix. Angiography (Fig. 3b,c) showed occlusion of the SMV. The collateral circulation flowed back to the PV through the elevated jejunum, remnant stomach and SV.

Case 3

A 57-year-old man underwent PD with IORT for PhCa. Gastrointestinal bleeding was recognized at 9 POM. Computed tomography at 11 POM demonstrated occlusion of the SMV and that the collateral circulation went through the elevated jejunum, anterior wall of the remnant stomach, splenic hilus and SV. Angiography (Fig. 4a) showed occlusion of the SMV, and percutaneous transhepatic portography (Fig. 4b) revealed stenosis of the SV at the portal confluence. The SV blood pressure had risen to 27 cmH₂O and PV blood pressure was 7.5 cmH₂O. Endoscopic examination at 20 POM (Fig. 4c) revealed a bleeding ulcer in the elevated jejunum.

Clinical course

Case 1 experienced repeated bleeding from 36 to 52 POM, and a total of 44 units of blood were transfused; however, there were no episodes of bleeding after 52 POM (Table 3). The patient had a relapse at 87 POM and died of cancer at 98 POM. In case 2, the first episode of GI bleeding was recognized at 26 POM and its cause was ascertained at 90 POM. During this period, a total of 60 units of blood were transfused; currently, at 98 POM, the patient is under close follow up. In case 3, the stenosis of SV at the portal confluence showed occlusion at 24 POM and a metallic stent was inserted between the PV and the SV. Gastrointestinal bleeding was not noted again until 54 POM.

DISCUSSION

In patients with PCa and BCa, the survival rate after surgical resection remains very low.^{1,2} Intraoperative radiation therapy is a common adjuvant therapy to improve the treatment outcome, but its efficacy remains

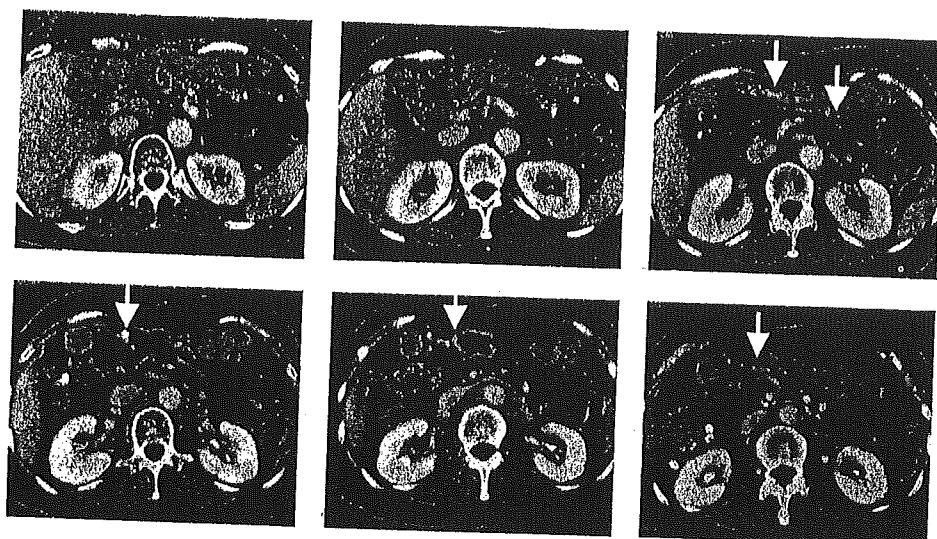


Figure 2 Case 2. Computed tomography showing occlusion of superior mesenteric vein and collateral circulation (arrows).

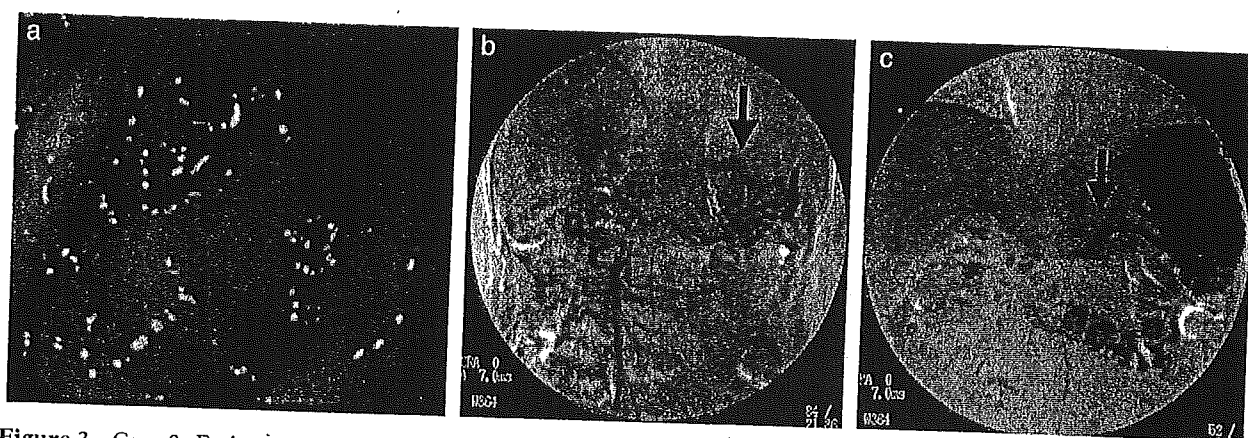


Figure 3 Case 2. Endoscopic examination demonstrating remnant stomach varix (a). Portography via superior mesenteric artery (b) and splenic artery (c) reveals occlusion of superior mesenteric vein and collateral circulation through splenic vein (arrow).

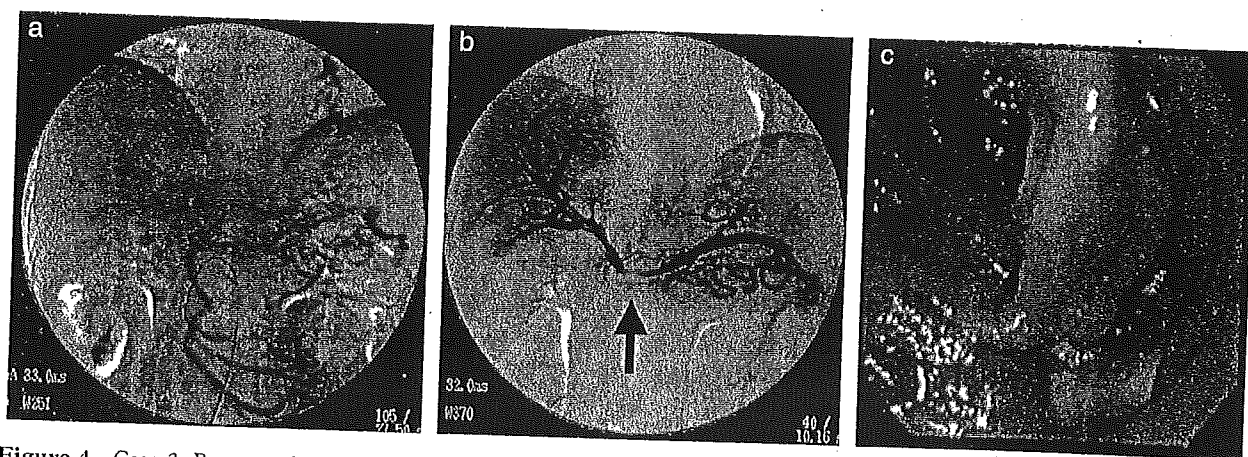


Figure 4 Case 3. Portography via superior mesenteric artery (a) and percutaneous transhepatic portography (b) at 14 post-operative months (POM) shows occlusion of superior mesenteric vein and stenosis of splenic vein (arrow). Endoscopic examination at 20 POM (c), reveals ulcer in the elevated jejunum.

controversial. While there have been reports of reduced local disease recurrence^{10,11,13} and improved disease-free survival and survival rates,¹²⁻¹⁵ it has also been reported that IORT does not extend survival time.^{5,18}

Various series of trials were conducted in order to examine the benefits of IORT for PCa.^{5,11-13} In all series, IORT was considered to have been safe in the short term following surgery.^{5,11-13} However, because

treatment outcome of PCa is extremely poor, there are no reports of long-term safety following IORT. Autopsy analyses assessing radiation damage to various tissues after IORT have demonstrated fibrosis of the retroperitoneal soft tissues and the portal vein.^{19,20} Fibrosis of tissues and occlusion of vessels in the radiation field are predicted late complications of IORT,¹⁸ and one of the common clinical problems is GI bleeding caused by portal hypertension occurring with stenosis and/or occlusion of the portal system. Thus, in the present study we reviewed the prevalence of GI bleeding as a possible complication of IORT in patients who have survived for >3 postoperative years without disease recurrence.

Of our 11 patients who survived for >3 years without recurrence following resection of the pancreas and IORT, three (27.3%) of the five patients with subsequent occlusion of the portal system required repeated blood transfusions for GI bleeding. Unfortunately we were not able to determine whether the occlusion resulted from the operation or the influence of IORT. During the period of January 1990–December 1999, 41 of our 94 patients who underwent surgical resection of the pancreas without IORT were observed to survive for >3 years without recurrence (Table 1). Because CT is not always performed in patients with benign diseases, the precise frequency of portal occlusion in these 41 patients remains unknown. However, no occlusion of the portal system was observed in the follow-up period for these 41 patients and there were also no episodes of GI bleeding. Because lymph node dissection and nerve plexus excision were not always performed in these 41 patients, the influence of surgery on the development of portal occlusion cannot be compared simply between patients with and without IORT. However, taken together, our findings suggest that occlusion of the PV and GI bleeding occurred as a late complication of IORT.

Intraoperative radiation therapy at lower doses (up to 20 Gy) with or without fractionated external beam radiotherapy (up to total 60 Gy) has been reported to be safe, and there was no GI bleeding as a short-term complication.^{5,11,12} While Reni *et al.* reported that GI bleeding was observed in five patients (6%), the doses of IORT ranged from 10 to 25 Gy (mean 17.5 Gy) in their series.¹³ In the present series patients were treated with considerably high doses of radiation ranging from 25 to 35 Gy (mean 30.5 Gy), so the risk of this complication may have been raised.

In the clinical course of case 3, a metallic stent was inserted between the PV and the SV, causing SV blood pressure to fall dramatically. Gastrointestinal bleeding was not seen again until 54 POM. There have been no reports of stent insertion for GI bleeding caused by stenosis and/or occlusion of the portal system, but this treatment is thought to be remarkably effective.

Because GI bleeding occurred with occlusion of the portal system in three of the present patients, influence of the operation itself and high-dose radiotherapy on the development of this late complication cannot be excluded. We recommend that GI bleeding is considered by physicians during the long-term follow up of patients who undergo pancreatotomy with IORT. A

clinical trial on optimum doses, long-term safety and benefit of IORT is necessary.

REFERENCES

- Gudjonsson B. Cancer of the pancreas. 50 years of surgery. *Cancer* 1987; 60: 2284–303.
- Nakeeb A, Pitt HA, Sohn TA *et al.* Cholangiocarcinoma. A spectrum of intrahepatic, perihilar, and distal tumors. *Ann. Surg.* 1996; 224: 463–73; 473–5.
- Kalser MH, Ellenberg SS. Pancreatic cancer. Adjuvant combined radiation and chemotherapy following curative resection. *Arch. Surg.* 1985; 120: 899–903.
- Gastrointestinal Tumor Study Group. Further evidence of effective adjuvant combined radiation and chemotherapy following curative resection of pancreatic cancer. *Cancer* 1987; 59: 2006–10.
- Di Carlo V, Zerbi A, Balzano G, Villa E. Intraoperative and postoperative radiotherapy in pancreatic cancer. *Int. J. Pancreatol.* 1997; 21: 53–8.
- Yeo CJ, Abrams RA, Grochow LB *et al.* Pancreaticoduodenectomy for pancreatic adenocarcinoma: postoperative adjuvant chemoradiation improves survival. A prospective, single-institution experience. *Ann. Surg.* 1997; 225: 621–33; 633–6.
- Klinkenbijn JH, Jeekel J, Sahmoud T *et al.* Adjuvant radiotherapy and 5-fluorouracil after curative resection of cancer of the pancreas and periampullary region: phase III trial of the EORTC gastrointestinal tract cancer cooperative group. *Ann. Surg.* 1999; 230: 776–82; 782–4.
- Neoptolemos JP, Dunn JA, Stocken DD *et al.* Adjuvant chemoradiotherapy and chemotherapy in resectable pancreatic cancer: a randomised controlled trial. *Lancet* 2001; 358: 1576–85.
- Neoptolemos JP, Cunningham D, Friess H *et al.* Adjuvant therapy in pancreatic cancer: historical and current perspectives. *Ann. Oncol.* 2003; 14: 675–92.
- Hiraoka T, Uchino R, Kanemitsu K *et al.* Combination of intraoperative radiation with resection of cancer of the pancreas. *Int. J. Pancreatol.* 1990; 7: 201–7.
- Zerbi A, Fossati V, Parolini D *et al.* Intraoperative radiation therapy adjuvant to resection in the treatment of pancreatic cancer. *Cancer* 1994; 73: 2930–5.
- Farrell TJ, Barbot DJ, Rosato FE. Pancreatic resection combined with intraoperative radiation therapy for pancreatic cancer. *Ann. Surg.* 1997; 226: 66–9.
- Reni M, Panucci MG, Ferreri AJ *et al.* Effect on local control and survival of electron beam intraoperative irradiation for resectable pancreatic adenocarcinoma. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2001; 50: 651–8.
- Hosotani R, Kogire M, Arii S, Nishimura Y, Hiraoka M, Imamura M. Results of pancreatotomy with radiation therapy for pancreatic cancer. *Hepatogastroenterology* 1997; 44: 1528–35.
- Todoroki T, Kawamoto T, Koike N *et al.* Radical resection of hilar bile duct carcinoma and predictors of survival. *Br. J. Surg.* 2000; 87: 306–13.
- Todoroki T, Kawamoto T, Koike N, Fukao K, Shoda J, Takahashi H. Treatment strategy for patients with middle and lower third bile duct cancer. *Br. J. Surg.* 2001; 88: 364–70.

- 17 Imanaga H. A new method of pancreaticoduodenectomy designed to preserve liver and pancreatic function. *Surgery* 1960; 47: 577-86.
- 18 Sunamura M, Kobari M, Lozonschi L, Egawa S, Matsuno S. Intraoperative radiotherapy for pancreatic adenocarcinoma. *J. Hepatobil. Pancreat. Surg.* 1998; 5: 151-6.
- 19 Sindelar WF, Hoekstra H, Restrepo C, Kinsella TJ. Pathological tissue changes following intraoperative radiotherapy. *Am. J. Clin. Oncol.* 1986; 9: 504-9.
- 20 Hoekstra HJ, Restrepo C, Kinsella TJ, Sindelar WF. Histopathological effects of intraoperative radiotherapy on pancreas and adjacent tissues: a postmortem analysis. *J. Surg. Oncol.* 1988; 37: 104-8.

CASE REPORT

Radiation Medicine: Vol. 23 No. 5, 371-375 p.p., 2005

Hepatic Hemangioma Presenting Atypical Radiologic Findings: A Case Report

Ayu Hosokawa,* Tetsuo Maeda,* Ukihide Tateishi,* Mitsuo Satake,*
Ryoko Iwata,* Hidenori Ojima,** and Yasuaki Arai*

A 69-year-old woman was referred to our hospital due to a liver tumor that was incidentally noted on ultrasound (US). US revealed a pedunculated mass of 5 cm in diameter, with a heterogeneous echo pattern. On arterial phase dynamic contrast-enhanced computed tomography (CT), a tiny enhancing dot in the upper aspect of the mass was seen; whereas, the main portion of the lesion appeared as hypoattenuating. The tumor was of low intensity on T1-weighted magnetic resonance (MR) images, and showed slightly heterogeneous high intensity on T2-weighted MR images. The most characteristic feature of the tumor was its exophytic appearance. On post-gadolinium hepatic arterial dominant-phase MR images, the tumor showed nodular enhancement centrally, with progressive spread of enhancement on later images. Angiography showed dilatation of the right posterior inferior branch of the hepatic artery and C-shaped opacification. Since we could not rule out malignancy for these nonspecific radiologic findings, a partial resection of the liver was carried out, resulting in a pathological diagnosis of hepatic hemangioma. This hemangioma had marked hyalinization and fibrosis, causing a heterogeneous appearance on MR images. The tumor presented an exophytic appearance, which caused some diagnostic confusion.

Key words: hepatic hemangioma, exophytic appearance, hyalinization

INTRODUCTION

HEMANGIOMA, THE MOST COMMON BENIGN HEPATIC tumor, is frequently incidentally detected by ultrasound (US) and computed tomography (CT) in asymptomatic patients. It is therefore important to distinguish hemangioma from other hepatic neoplasms. In cases of typical hemangioma with characteristic findings, imaging modalities are highly reliable for diagnosis. However, there are a few atypical hemangiomas that may cause difficulties for radiologic diagnosis. We report the case of an atypical hepatic hemangioma presenting an exophytic appearance mimicking hepatic malignancy.

Received September 3, 2004; revision accepted January 4, 2005.

*Division of Diagnostic Radiology, National Cancer Center Hospital

**Division of Pathology, National Cancer Center Research Institute

Reprint requests to Ayu Hosokawa, M.D., Division of Diagnostic Radiology, National Cancer Center Hospital, 5-1-1 Tsukiji, Chuo-ku, Tokyo 104-0045, JAPAN.

CASE REPORT

A 69-year-old woman was referred to our hospital due to a liver tumor that was incidentally pointed out by US. On physical examination, the abdominal mass was not palpable. Liver function studies were normal. Serum levels of carcinoembryonic antigen, α -fetoprotein, and PIVKA-II were all within normal ranges. Hepatitis B surface antigen and hepatitis C antibody were negative.

US revealed a 5 cm pedunculated mass with heterogeneous echo pattern. Nonenhanced CT scan showed the exophytic mass in the right posterior inferior portion of the liver. After intravenous administration of contrast material, the arterial-phase CT showed minimal and no enhancement except for a tiny enhancing dot in the anterior aspect of the mass. Although the delayed-phase CT indicated more than half of the mass showing slight enhancement, the mass appeared hypoattenuating relative to the normal liver parenchyma (Fig. 1).

The tumor was of low intensity on T1-weighted MR images, and was moderately hyperintense on T2-weighted MR images. Hepatic arterial-dominant phase post-gadolinium MR images showed nodular enhance-