磁性薄膜を用いたマイクロアクチュエータの試作

Fabricating Microactuators by Using Magnetic Thin Films

本田 崇・荒井賢一*・菅原 渉*・石山和志*・山口正洋*

(株)トーキン 材料開発部, 仙台市太白区郡山 6-7-1 (〒982)

*東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-77)

T. Honda, K. I. Arai,* W. Sugawara,* K. Ishiyama,* and M. Yamaguchi*

Materials Development Laboratory, Tokin Corporation, 6-7-1, Koriyama, Taihaku-ku, Sendai 982

*Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-77

We made magnetostrictive actuators and electromagnetic actuators by using various kinds of magnetic thin film. The magnetostrictive actuators were bimorph cantilever actuators and a traveling machine, composed of magnetostrictive amorphous Tb-Fe and Sm-Fe thin films on a polyimide substrate. The 3-mm-long cantilever actuator using a 3- μ m-thick substrate exhibited large deflection above 100 μ m in magnetic fields as low as 24 kA/m, and above 500 μ m at a resonant frequency of 29 Hz in an alternating magnetic field of 24 kA/m. The electromagnetic actuators are driven by magnetic torque, which made "flying" actuation possible. These magnetic actuators need no power supply cables, because they are driven by an external magnetic field.

Key words: magnetostriction, Tb-Fe thin film, Sm-Fe thin film, cantilever actuator, traveling machine, micro-actuator, magnetic torque, flying machine

1. はじめに

マイクロマシンの実現には高性能なマイクロアクチュエータが必要であり、これまでに様々な形状および駆動方式のマイクロアクチュエータが提案され、試作されてきた¹⁾。その中でも磁気現象を利用したマイクロアクチュエータは、励磁部と駆動部を分離した構成が可能であり、外部からの磁界によって非接触駆動ができるという特徴がある。

筆者らは、これまで正磁歪を有する非晶質 Tb-Fe 薄膜および負磁歪を有する非晶質 Sm-Fe 薄膜を用いた非接触駆動可能なマイクロアクチュエータの可能性について検討を行ってきた。その結果、ポリイミドフィルムを基板とし、その片面に Tb-Fe、反対の面に Sm-Fe を成膜したバイモルフ構造の長さ 10 mm の片持ち梁型アクチュエータにおいて、80 k~120 kA/m で約 500 μ m という比較的大きい変位を得ることに成功した²⁾。しかし、長手方向に強い磁界を印加すると磁気トルクの影響によって変位が低下することや、ポリイミドフィルム上にスパッタした Tb-Fe 薄膜が基板から強い圧縮応力を受けて磁気特性が劣化するという問題が生じ、得られた変位は理論計算から期待できる値の 1/6 程度にとどまった。一般に、片持ち梁の変位は梁の長さの 2 乗に近似的に比例するため、このままの構造でマイクロ化しても、大きな変位は見込めない。

そこで、本報告ではマイクロ化しても弱磁界である程度の大きな変位を得ることを目標として、二つの方法について検討を行った。一つは、基板を極薄化することによって、アクチュエータ自身の機械的負荷を低減し、変位を増大する方法である。この方法は、同時に Tb-Fe 薄膜が基板から受ける応力を低下させることで磁気特性を改善する効果も期待される。もう一つの方法は、機械的共振周波数に等しい交流磁界で駆動し、変位を増大させる方法である。本報告では、これらの効果について、ポリイミド基板を 3 μ m 厚まで薄くした片持ち梁型アクチュエータを試作し、磁気特性および変位特性について調べた。さらに、機械的な共振現象の応用例として、筆者らがすでに提案した磁歪型の走行機械²⁾の駆動に適用した。本報告ではこれらの方法を適用した結果について述べる。

加えて、磁気トルクを駆動力とした全長 20 mm 程度の飛行機械を試作し、その飛行を確認したので、その内容についてもあわせて報告する。

2. 磁歪薄膜アクチュエータ

2.1 アクチュエータの構成と実験方法

Fig. 1 に本実験で作製した片持ち梁型アクチュエータの構造を示す。市販の 7.5 μ m 厚のポリイミドフィルムを O₂ ガスによる反応性イオンエッチングにより 3 μ m 厚に加工した基板を用い、その片面に 45~50 at% Tb-Fe 薄膜³⁾と、その反対の面に 30~40 at% Sm-Fe 薄膜⁴⁾を rf マグネトロンスパッタ法で成膜した。磁歪膜の膜厚はそれぞれ 1 μ m とした。成膜後、Fig. 1 のように一端を固定し、長さ 3 mm、幅 0.5 mm の片持ち梁を構成した。

Fig. 2 に走行機械の構成を示す。4 mm×13 mm の磁歪膜を 7.5 μ m 厚のポリイミド基板の両面に成膜した後、基板の両端を Fig. 2 のように斜めに折り曲げ、脚の先端の進行方向と後退方向の摩擦係数に差を持たせたものである。

いずれの磁歪薄膜アクチュエータでも幅方向に磁界を印加し、磁気トルクの影響を少なくした。変位の大きさは光学顕微鏡を用いて測定した。

2.2 片持ち梁型アクチュエータの変位特性

はじめに基板の極薄化によるポリイミドフィルム上の Tb-Fe 薄膜の磁気特性の変化について示す。Fig. 3 は、ガラス基板

Fig. 1 Schematic view of cantilever actuators.

Fig. 2 Schematic view of a traveling machine.

Fig. 3 M - H loops of Tb-Fe thin films.

上 (a), 50 μm 厚のポリイミド基板上 (b) 及び, 3 μm 厚のポリイミド基板上 (c) にそれぞれ成膜した場合の Tb-Fe の磁化曲線である。50 μm 厚のポリイミド基板上では, 強い圧縮応力を受けるため, ガラス基板上と比べると面内磁化の磁界に対する変化は緩慢であった²⁾。これに対して, 3 μm 厚のポリイミド基板を用いた場合には, 弱磁界における面内の磁化の立ち上がり急峻になり, ガラス基板上の場合とほとんど同程度にまで磁気特性を改善することができた。この結果から 3 μm 厚のポリイミドフィルム上の Tb-Fe 薄膜は, 弱磁界で大きな磁歪量が得られるものと期待される。

そこで, まずポリイミド基板厚を 7.5 μm , 及び 3 μm とした長さが 13 mm の片持ち梁型アクチュエータを作製し, 変位特性の比較を行った。その結果, 基板厚を 7.5 μm から 3 μm 厚に極薄化することにより, 40 kA/m の印加磁界における変位が 6 倍以上に増大した。梁の長さ, 印加磁界, および磁歪膜の磁気特性が同一であれば, 基板の厚みを 7.5 μm から 3 μm に減少させれば, 計算上変位は 2 倍程度に増大すると見込まれる⁵⁾ ことから, 基板の極薄化に伴う Tb-Fe 薄膜の磁歪特性の向上の効果が大きいことがわかる。

この結果をもとに, 次に 3 mm まで小形化した片持ち梁型アクチュエータを試作した。Fig. 4 に長さ 3 mm の片持ち梁型アクチュエータの変位特性を示す。長さを 3 mm に小形化したにも関わらず 24 kA/m の弱磁界で 100 μm 程度の大きな変位が実現できた。また同図から変位の磁界に対するヒステリシスが比較的小さいことがわかる。このことから, この片持ち梁型アクチュエータは精密位置決め素子などへの応用が期待できる。

Fig. 4 Applied magnetic field dependence of the tip deflection for a 3-mm-long cantilever.

3.3 動的特性

次に前節で示した長さ 3 mm の片持ち梁型アクチュエータを交流磁界で駆動したときの変位特性について示す。Fig. 5 に長さ 3 mm の片持ち梁型アクチュエータにおける変位の励磁周波数依存性を示す。ただし, 本実験ではバイアス磁界を印加していないため, Fig. 4 からわかるようにアクチュエータは励磁周波数の 2 倍の周波数で振動する。Fig. 5 から静的な変位は励磁振幅 24 kA/m で 100 μm 程度であるのに対し, 励磁周波数 45 Hz 近傍では 200 μm 以上に, 90 Hz 近傍では 500 μm 以上に増大していることがわかる。90 Hz 近傍における変位の急増は, 梁の長さ方向の機械的共振によるものである。45 Hz

Fig. 5 Excitation frequency dependence of the tip deflection for the 3-mm-long cantilever.

Fig. 6 Excitation frequency dependence of the average traveling velocity.

近傍と 30 Hz 付近に認められる小さなピークは、アクチュエータの機械的振動の高調波成分の影響のため発生したと考えられる。以上の結果から大きな変位を得るためには機械的共振を利用することが効果的であることがわかる。

そこで、機械的な共振現象を筆者らが考案した走行機械の駆動に応用した。Fig. 6 に走行機械を内径 6.5 mm の管の中で 24 kA/m の交流磁界により駆動したときの走行速度と励磁周波数の関係を示す。50 Hz 以上の励磁周波数を印加すると走行し、200 Hz 付近で最高速度 5.2 mm/s に達することを確認した。この最高速度は走行機械の機械的共振によって生じたものと思われる。

3. 飛行機械

飛行機械として、ヘリコプター型およびバタフライ型の二つのモデルを試作した。

Fig. 7 にヘリコプター型飛行機械の構成を示す。羽には、3 μm 厚のポリイミド基板の両面に Tb-Fe 薄膜と Sm-Fe 薄膜を

Fig. 7 Helicopter-type flying machine.

Fig. 8 Butterfly-type flying machine.

rf マグネトロンスパッタ法により 1 μm ずつ成膜し、これを 12 mm × 5 mm の大きさに切り出したものを用いた。羽全体の保磁力は 20 kA/m 程度である。羽の先端は、回転によって揚力が働くように折り曲げた。この羽の面内方向に交流磁界を印加すると同期電動機と同じ原理で回転し、50~60 Hz, 32 kA/m の磁界で浮上し始めることを確認した。

Fig. 8 にバタフライ型飛行機械を示す。羽は 15 mm × 4 mm の大きさの磁性膜のついた上羽と 7.5 μm 厚のポリイミドフィルムの下羽からなり、内径 3 mm、長さ 3 mm のプラスチック製の管の側面に固定した。上羽は、7.5 μm 厚の PET 上に保磁力 80 kA/m 程度の Fe 基磁性粉末材料を 4 μm 厚に塗布したものを 4 枚重ねて用いた。バタフライ型の羽は、打ち下ろしの際には上羽が下羽と一体となって運動するのに対し、打ち上げの際には下羽が上羽から離れることにより、打ち下ろしに比べて抗力を減らすことができる構造になっている。このため、打ち下ろし時と打ち上げ時の抗力に差が生じる。膜面の垂直方向に 10 Hz, 80 kA/m の交流磁界を印加すると、磁気トルクにより羽ばたいて Fig. 9 のように浮上することを確認した。

なお、使用した磁性膜はいずれも長手方向に着磁して用いた。ヘリコプター型では外径 0.5 mm、バタフライ型では外径 2 mm の炭素棒をガイド(軸)として用いた。

これまで飛行機械については数多くのモデルの提案がなされている^{6,7)}が、実際に飛行したという事実は全く報告されてい

Fig. 9 Photograph of the flying scene.

なかった。上述した二つのモデルにより世界で初めて飛行するマイクロマシンの可能性が実証されたと言える。

4. ま と め

磁性薄膜を用いた非接触駆動可能なアクチュエータについて試作および検討し、以下の結果を得た。

- (1) 磁歪薄膜アクチュエータ
 - (a) ポリイミド基板を極薄化することによって Tb-Fe 薄膜の磁気特性を改善することができた。
 - (b) $3\mu\text{m}$ 厚に極薄化したポリイミド基板を用い、片持ち梁型アクチュエータの小形化について検討したところ、長さ 3mm の梁において 24 kA/m の弱磁界で $100\mu\text{m}$ 程

度の大きな変位が得られた。さらに、梁の機械的共振を利用することにより、 92 Hz , 24 kA/m の励磁条件において約 $500\mu\text{m}$ の非常に大きな変位が得られた。

- (c) 共振現象を走行機械に応用したところ、最高速度 5.2 mm/s で走行することを確認した。
- (2) 磁気トルクを駆動力としたヘリコプター型およびバタフライ型の飛行機械の試作に成功した。

謝 辞 本研究の一部は村田学術振興財団研究助成金、及びメカトロニクス技術高度化「研究助成」によった。

文 献

- 1) 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進: マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館(1992).
- 2) 本田 崇, 林 嘉隆, 山口正洋, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, **18**, 477 (1994).
- 3) Y. Hayashi, T. Honda, K. I. Arai, K. Ishiyama, and M. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3129 (1993).
- 4) T. Honda, Y. Hayashi, K. I. Arai, K. Ishiyama, and M. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3126 (1993).
- 5) T. Honda, K. I. Arai, and M. Yamaguchi: Proc. IEEE MEMS '94 Workshop, p. 51 (1994).
- 6) I. Shimoyama, Y. Kubo, T. Kaneda, and H. Miura: Proc. IEEE MEMS '94 Workshop, p. 148 (1994).
- 7) 鈴木健司, 下山 勲, 三浦宏文, 江面裕一: 日本機械学会論文集 (C編), **59**, 179 (1993).

1994年10月12日受理, 1995年1月20日採録