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 $0.7\ \mu\text{m}$ was used as a magnetostrictive thin film. The dimensions of the cantilever were $1\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$. We used polyimide films with thicknesses of $30\ \mu\text{m}$ and $7.5\ \mu\text{m}$ and Ni foil with a thickness of $5\ \mu\text{m}$ as substrates. As a result, the cantilevered magnetic actuator was able to function in a magnetic field of $10\ \text{kA/m}$. The maximum displacement of the cantilevered magnetic actuator was about $40\ \mu\text{m}$ 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, $80\ \text{kA/m}$ 程度の磁界印加が必要であった. また $10\ \text{kA/m}$ 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 $10\ \text{kA/m}$ 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 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 $30\ \mu\text{m}$ 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 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 $6\ \mu\text{m}$ 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 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 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 $30\text{ }\mu\text{m}$ ならびに $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 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 kA/m の磁界印加において、ポリイミドフィルムの厚さが $30\text{ }\mu\text{m}$ の場合変位量が $9\text{ }\mu\text{m}$ であったのに対し、厚さが $7.5\text{ }\mu\text{m}$ の場合では $30\text{ }\mu\text{m}$ もの変位量となった。これより薄膜厚さ $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 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 $30\text{ }\mu\text{m}$ より $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 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 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 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ のポリイミドフィルム、厚さ $5\text{ }\mu\text{m}$ 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 $-1/2$ 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 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: IEEE 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: *Kisozaairyourikigaku* (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