磁歪・圧電複合型マルチフェロイクス磁気センサの設計と出力特性評価

佐渡 佑介^{1,*} 斉藤 千尋² 島田 宗勝³
松本 實⁴ 岡崎 禎子¹ 古屋 泰文¹

¹弘前大学大学院理工学研究科

²並木精密宝石株式会社 NJC 研究所

³日産自動車株式会社総合研究所

⁴東北大学金属材料研究所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 74, No. 8 (2010), pp. 543-545

© 2010 The Japan Institute of Metals

LETTERS TO THE EDITOR

Design and Characterization of Multi-Ferroic Magnetic Sensor of Magnetostriction-Piezoelectric Composite

Yusuke Sado^{1,*}, Chihiro Saito², Munekatsu Shimada³,
Minoru Matsumoto⁴, Teiko Okazaki¹ and Yasubumi Furuya¹

¹Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, Hirosaki 036-8561

²NJC Research Center, NAMIKI Precision Co, Ltd., Tokyo 123-8511

³Technical Research Institute, Nissan Motor Co, Ltd., Yokosuka 237-8523

⁴Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577

An advanced multi-ferroic composite sensor designed by using two material elements of magneto-elasto-electric effect (MEE effect) combined mutual transformation of magnetic property and electric property. This sensor was made by PZT ceramics with high piezoelectric constant and magnetostriction thin film of Fe-20 at%Ga and Fe-50 at%Co with giant magnetostriction and large elastic property in Hirosaki University 2008. From the results of magnetic properties of Fe₈₀Ga₁₅Al₅ and Fe₅₀Co₅₀, properties of magnetostriction materials affect output properties of this composite type sensor. Output voltage increased with decrease of thickness in magnetostriction materials.

(Received February 17, 2010; Accepted May 17, 2010)

Keywords: multi-ferroic effect, magnetic sensor, composite sensor, synergy effect, iron-gallium alloy, iron-cobalt alloy, piezoelectricity, magnetostriction

1. 緒 言

磁歪材料と圧電材料は磁場、電場の印加により力と変位を生じ、その磁気・電気相互変換を組み合わせた ME 効果 (Magnetoelectric Effect) のために複合材料として期待されている。これらのマルチフェロイクス系要素材料を基盤とし、Fig. 1 に示される複合化プロセスにより機能発現させたものとして磁気センサが研究されている。

2008 年、我々の研究室では、大磁歪・高剛性をもつ Fe-20 at%Ga・Fe-50 at%Co 磁歪薄膜、圧電材料として高圧電定数をもつ PZT セラミックスを選択した場合の磁気センサの試作・評価が調査され、磁歪薄膜によるセンサの開発に成功した¹⁾。

本研究で、薄膜に比べてその質量のために発生エネルギー

Synergy Effect of Ferroic-materials Composite
(Ferromagnetic, Ferroelectric, Ferroelastic Element)

Fig. 1 Synergy effect of multi-ferroic composites.

が大きいバルク磁歪材料(Fe₈₀Ga₁₅Al₅²⁾・Fe₅₀Co₅₀)を用いて圧電材料(PZT)と複合化し、マルチフェロイクス磁気センサの設計試作・検証を目的とする。そのため、磁歪材料とPZTとの複合体を作製し、磁歪材料の種類、体積(板厚)の

* 弘前大学大学院生(Graduate Student, Hirosaki University)

Fig. 2 X-ray diffraction patterns obtained from (a) $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ and (b) $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$.

Fig. 3 (a) Concept chart of sensor, and (b) Composite sensor consisting of magnetostrictive alloy and PZT.

変化による出力特性を評価する。

2. 実験方法

試料作製は、磁歪材料は目標組成となるように各元素を秤量し、プラズママーク溶解装置[TIG-400F: 東栄科学産業社製]を用い、母合金を作製した。その後、母合金から長さ 10~11 mm × 幅 5~6 mm × 厚さ 0.2, 0.5, 2.0 mm の短冊形にそれぞれ切り出した。X線回析の結果を Fig. 2(a), (b)に示す。結果、この図から、第一ピーク bcc(110)は強いが、その他の bcc(200)と bcc(211)は小さいことから磁歪材料はほぼ等方的であることがわかった。圧電材料として厚さ方向に分極した PZT セラミックス[富士セラミックス製; C-91 (Ag 電極), 長さ 10 mm × 幅 20 mm × 厚さ 0.26 mm]を選択した。複合化については磁歪材料の表面を 1000 番のサンドペーパーで研磨した後、シアノアクリレート系接着剤(ゲージセメント)[CC-3A: 共和電業製]を用いて圧電材料と接着した。Fig. 3 に磁気センサの概念図を示す。

特性評価について、磁歪材料の定量分析は電子線マイクロアナライザ(EPMA), 結晶構造解析は X 線回折法(XRD), 磁歪は歪ゲージ法, 磁気特性は振動試料型磁力計(VSM)を用いて分析・評価を行った。

これらの測定方法は、実際にセンサとして用いる長さ約 10 mm, 幅約 5 mm, 厚さ 0.2 mm の磁歪材料を選択し測定した。室温条件下, 印加磁場範囲は $-800 \text{ kA/m} \sim 800 \text{ kA/m}$ とし, 磁歪材料の長手方向に対し平行に印加した。反磁場係数は VSM のソフトウェアにより磁歪材料の寸法と質量から算出した。

センサ特性は、コイル, チャージアンプを用い, 低磁場・低周波数域での出力電圧を評価した。Fig. 4 に実験装置の概略図を示す。交流磁場; $0 \sim 13.6 \text{ kA/m}$, 発振周波数; 1, 5,

Fig. 4 View of experimental devices.

10, 20 Hz, サンプリング周期; 2 ms (500 Hz), サンプリング数; 1000 点, チャージゲイン; 1.26 mV/pC 条件下で, 印加磁場方向は磁歪材料の長手方向とし, 材料の種類・板厚による出力電圧を測定した。

3. 結果・考察

磁化・磁歪測定の結果を Fig. 5(a), (b)に示す。磁気特性について飽和磁化(M_s), 保磁力(H_c), 磁化率(χ_m)の各値は $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ においては $M_s = 184.6 (4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb} \cdot \text{m kg}^{-1})$, $H_c = 100 \text{ A/m}$, $\chi_m = 0.372$, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ においては $M_s = 241.7 (4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb} \cdot \text{m kg}^{-1})$, $H_c = 159 \text{ A/m}$, $\chi_m = 0.269$ であった。飽和磁歪(λ_s)は $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ で $\lambda_s = 84 \text{ ppm} (10^{-6})$, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ で $\lambda_s = 67 \text{ ppm}$ であった。またヤング率(E)については $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ においては $E = 138 \text{ GPa}$, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ においては $E = 205 \text{ GPa}$ であった³⁾。

測定した H_c の値より, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ と比較して低保磁力な $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ の磁化は, 印加磁場に対して出力の立ち上がりが多い。さらに, Fig. 5(b)より低磁場での磁歪の増加は, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ よりも $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ の方が早いことが確認できた。

駆動発振周波数; 1 Hz における磁歪材料 $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$, $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ の板厚変化による出力特性を Fig. 6(a)と(b)に示す。 $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5 \cdot \text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ の 2 種類の磁歪合金により作られたセンサは, 板厚の薄化により出力電圧が増大した。また発振周波数を 5, 10, 20 Hz に変化させた場合の出力特性の挙動は, どちらの合金に対しても差がほとんど見られなかった。Table 1 は最大磁場 13.6 kA/m における最大誘起電圧と各板厚における反磁場係数をまとめたものである。反磁場係数

Fig. 5 (a) Magnetization magnetic field loops and (b) Magnetostriction curve for $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ and $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ alloys. Inset figure exhibits magnification of the curves in small magnetic fields.

の算出方法については、円柱棒状の磁性体を長手方向に磁化する場合の寸法比(=長さ/直径)を角柱形状として変換し算出した⁴⁾。最大誘起電圧は板厚 2.0 mm から 0.2 mm の薄化することにより、 $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ では約 20 倍に、 $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ では約 10 倍に向上した。次に、式(1)、(2)は有効磁場と反磁場の関係を表したものである。有効磁場 H_{eff} 、外部磁場 H_{ex} 、反磁場 H_{d} である。反磁場 H_{d} は式(2)より反磁場係数 N 、磁化 I 、透磁率 μ_0 から導出できる。 N は磁歪材料の形状に依存する値であり、板厚 0.2 mm から 0.5 mm の変化で 2.4 倍、0.2 mm から 2.0 mm の変化で 7.8 倍に増大した。

$$H_{\text{eff}} = H_{\text{ex}} - H_{\text{d}} \quad (1)$$

$$H_{\text{d}} = N \frac{I}{\mu_0} \quad (2)$$

これらより、板厚の増加(体積の増加)が反磁場の増大をもたらし有効磁場を減少させたため、出力電圧が増大したと考えられる。また、 $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ において板厚 2.0 mm のものが 0.2 mm の 13.6 kA/m における出力電圧は 20 倍も大きく顕著であった。即ち、板厚の薄化によって低磁場での電圧出力が可能になると考えられる。線形性については、板厚を変化させても向上しなかった。これは磁歪材料の体積が印加磁

Fig. 6 Dependence of output voltages V for (a) $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ /PZT and (b) $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ /PZT on thickness of magnetostrictive foils.

Table 1 Maximum voltages and demagnetizing factors for each thickness.

Thickness	$\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$	$\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$	Demagnetizing factors
0.2 mm	2.398 V	1.086 V	0.00826
0.5 mm	0.344 V	0.300 V	0.01965
2.0 mm	0.117 V	0.108 V	0.06422

場に対して大きいため、低磁場での磁歪量が小さくなってしまい、立ち上がりが悪化したためだと考えられる。

4. 結 言

本研究において以下のことが確認できた。

- (1) $\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{15}\text{Al}_5$ ・ $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ の磁気特性の結果より、磁歪材料の特性が複合型センサの出力特性に影響を与える。
- (2) 磁歪材料の板厚薄化により出力電圧は増大し、低磁場における出力電圧の向上が可能になる。

本研究では、バルク磁歪材料を用いた磁歪・圧電複合型磁気センサの特性の一つとして出力電圧について評価したが、磁歪薄膜を用いたものに比べてその特性は低い。今後の課題は、複合型磁気センサにおけるバルク磁歪材料の有用性を確認したうえで磁歪材料の選択、形状・構造変更、高磁場での測定等によるプロセスの改善が必要である。

文 献

- 1) S. Satou, Y. Hayashi, T. Okazaki, Y. Furuya and C. Saito: Collected Abstracts of 2008 Autumn Meeting of the Japan Inst. Metals, (2008) p. 419.
- 2) Y. Furuya and T. Okazaki: J. Advances in Science and Technology **54** (2008) 187–194.
- 3) M. Yamamoto: Phys. Rev. **59** (1941) 768.
- 4) S. Chikazumi: *Physics of Ferromagnetism*, Vol. 1, (Syokabou, Tokyo, 2001) pp. 14–16.