

学術論文

超磁歪材料を用いた力センサの基礎特性

Basic characteristics of force sensor using giant magnetostrictive material

脇若 弘之	(信州大学)	山科 宜秋	(信州大学大学院)
中山 圭	(信州大学)	森 輝夫	(TDK)

Hiroyuki WAKIWAKA Member

Yoshiaki YAMASHINA

Kei NAKAYAMA

Teruo MORI Member

The giant magnetostrictive material (GMM) is electromechanical transformation one with large magnetostriction and electromechanical coupling factor. GMM can make a small and high sensitivity sensor by utilizing the Villari effect. This paper deals with the characteristics and the possibility for force sensor with GMM. This paper describes the following findings; (1) the principle operation of the force sensor using GMM is shown, (2) the hysteresis has decreased by utilizing the dither method, (3) the sensitivity and the resolution are better than those of the load cell.

Key Words: giant magnetostrictive material, force sensor, Villari effect, impedance characteristic, dither method.

1 まえがき

超磁歪材料は他の磁性材料と比べ、ひずみ量、発生応力が非常に大きく、応答時間も μs オーダと非常に速い特徴を持っている [1]. 超磁歪材料はその特徴を生かし、様々なアクチュエータとして用いられている。例えば、海洋音響トモグラフィシステムの音源である超磁歪振動子や自動車や電車用のブレーキシステムである超磁歪ブレーキなどの大出力のアクチュエータに应用されている [2][3]. ところで、超磁歪材料は電気機械結合係数が大きい電気機械変換素子である。そのため、アクチュエータと相反的な関係であるセンサにも应用できる可能性がある。そこで我々は、逆磁歪効果を利用し、超磁歪材料を用いた小型で高感度な力センサを構成した。そこで本論文では、超磁歪材料を用いた力センサの基礎特性を測定し、超磁歪材料を用いた力センサの有用性を明らかにした。

本論文では、以下の内容について述べる。

- (1) 超磁歪材料を用いた力センサの動作原理
- (2) ディザ法によるヒステリシス低減
- (3) ロードセルとの特性比較

2 超磁歪材料を用いた力センサの動作原理

2.1 動作原理

超磁歪材料を用いてアクチュエータを構成するには、磁歪効果 (Joule 効果) を利用する。逆に、超磁歪材料をセンサとして構成するには、逆磁歪効果 (Villari 効果) を利用することが考えられる [4]. Fig.1 に、超磁歪材料を用いた力センサの動作原理を示した。超磁歪材料を圧縮すると、逆磁歪効果により磁化の変化が起こり、透磁率が低下する。透磁率の変化は、励振コイルのインダクタンスに影響を及ぼすので (式 (1)), コイルインピーダンスが変化する [5]. この原理を用いることで、簡易な回路による力センサを構成するこ

連絡先: 脇若弘之, 〒 380-8553, 長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部, email: wakiwak@gipwc.shinshu-u.ac.jp

とができる。

$$L = \Phi/I = \mu SN^2/l \quad [\text{H}] \quad (1)$$

ここに、 N ：励振コイル巻数、 I ：電流値 [A]、 l ：励振コイルの長さ [m]、 Φ ：鎖交磁束 [wb]、 μ ：透磁率 [H/m]、 S ：励振コイル断面積 [m²]、 L ：インダクタンス [H] である。

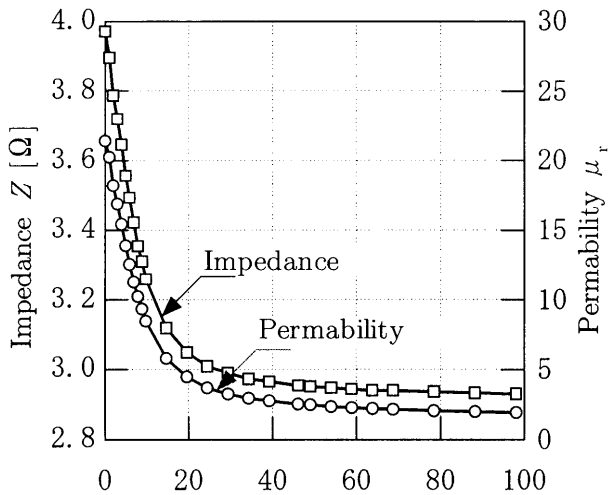


Fig. 1 Principle operation of force sensor with GMM ($H = 10 \text{ kA/m}$, $f = 1 \text{ kHz}$).

2.2 測定方法と力センサの仕様

Fig.2 に測定ブロック図を示した。励振コイルの中心に超磁歪材料を設置し、圧縮試験機を用いて力を加えた。応力はロードセルで、温度は熱電対を励振コイル外側に貼付けて測定した。また、励振コイルに正弦波 (定電流条件) を入力し、インピーダンスを測定した。

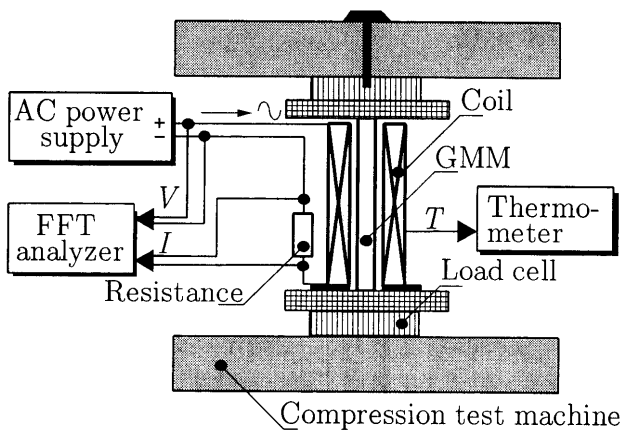


Fig. 2 Block diagram of measurement.

また、Table 1 に測定に使用した超磁歪材料と励振コイルの仕様を示した。励振コイルは超磁歪試料を圧縮する都合上、超磁歪材料より短いものを使用した。

Table 1 Specifications of GMM and coil.

Item	Value
GMM	
Size	$1 \times 1 \times 10 \text{ mm}^3$
Material	Powder metallurgy method
Coil	
Turns	320
Length	8 mm

2.3 特性評価方法

特性の評価方法は、ヒステリシス ϵ_h 、非直線性 ϵ_1 、出力の温度影響 ϵ_T 、ゲージ率 K とした。

$$\epsilon_h = \frac{\Delta Z_h}{Z_{RO}} \times 100 \quad \% \quad (2)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta Z_1}{Z_{RO}} \times 100 \quad \% \quad (3)$$

$$\epsilon_T = \frac{\Delta Z_T}{Z_{RO}} \times 100 \quad [\%/^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

$$K = \frac{\Delta Z/Z_0}{\epsilon} \quad (5)$$

ここに、 ΔZ_h ：インピーダンス差 [Ω]、 Z_{RO} ：定格出力 [Ω]、 ΔZ_1 ：非直線性のインピーダンス差 [Ω]、 ΔZ_T ：温度に対するインピーダンス変化 [$\Omega/^{\circ}\text{C}$]、 K ：ゲージ率、 ΔZ ：ひずみを受けたときのインピーダンス変化量 [Ω]、 Z_0 ：無負荷時のインピーダンス [Ω]、 ϵ ：ひずみである。

3 超磁歪材料を用いた力センサの基礎特性

3.1 圧縮応力におけるインピーダンス特性

超磁歪材料を用いた力センサは、逆磁歪効果によるインピーダンスの変化が大きいほど高感度なセンサである。渦電流の影響が小さく、電気機械結合係数が大きい条件である $f = 10 \text{ kHz}$ 、 $H = 10 \text{ kA/m}$ に

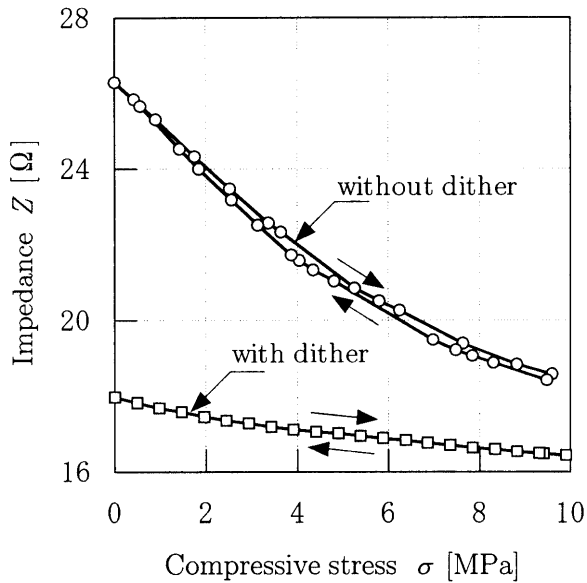


Fig. 3 Impedance characteristic - compressive stress (without dither : $H = 10$ kA/m, $f = 10$ kHz, with dither : $H_d = 20$ kA/m, $f_d = 0.5$ kHz, $H = 4$ kA/m, $f = 10$ kHz).

における圧縮応力-インピーダンス特性を Fig.3 に示した [6]. その結果, インピーダンス変化率 $\Delta Z/Z_0 = 31.1\%$ と大きなインピーダンス変化率を示した. しかし, ヒステリシスにおいても $\epsilon_h = 5.07\%$ と大きくなることが明らかになった.

3.2 デイザ法を用いたヒステリシス低減

センサにとってヒステリシスの低減は重要である. ヒステリシスの主要因は, 磁壁のピンニングによるものと考えられ, このピンニング効果を低減すれば, ヒステリシスの低減が期待できる. 磁壁のピンニングを実効的に低減する方法として, 交流磁界を重畳 (デイザ) する方法がある [7]. これは, デイザのエネルギーを用いて磁壁を振動状態とし, 磁壁ピンニング力を低減していると考えられる [8]. 一般的に, 脱磁磁界は保磁力の 2 ~ 10 倍とされており [9], 本超磁歪材料の保磁力は 10 kA/m であるので, 約 20 kA/m のデイザ磁界でヒステリシスを低減できると考えられる. Fig.3 にデイザ法によりヒステリシスが低減された圧縮応力-インピーダンス特性を示した. デイザ磁界を 20 kA/m とした時, ヒステリシスは 0.02% となり, ヒステリシスは 1/250 に減少できた. しかし, デイザ磁界が増加すると, インピーダンス変化率は減少する特性を示した. これは, デイザ磁界が増加すること

で, 超磁歪材料の磁化特性における飽和領域まで磁界が印加され, 透磁率が減少したためである.

3.3 インピーダンスの温度特性

デイザ法を適用した状態でのインピーダンスの温度特性を測定し, そのリアクタンスと抵抗成分を Fig.4 に示した. 矢印は, 温度を 40 °C から 70 °C まで上昇させた時の変化の方向を示す. 応力によらず抵抗は, 温度上昇に伴い増加した. それに対しリアクタンスは, 圧縮応力 0 Pa では, 温度上昇に伴いリアクタンス (透磁率) が減少したため, インピーダンスの温度係数は $\epsilon_T = 0.0002\%/^{\circ}\text{C}$ と非常に小さくなった. しかし, 圧縮応力 10 MPa では, 透磁率が変化し難く, インピーダンスの温度係数が $0.107\%/^{\circ}\text{C}$ と大きくなった.

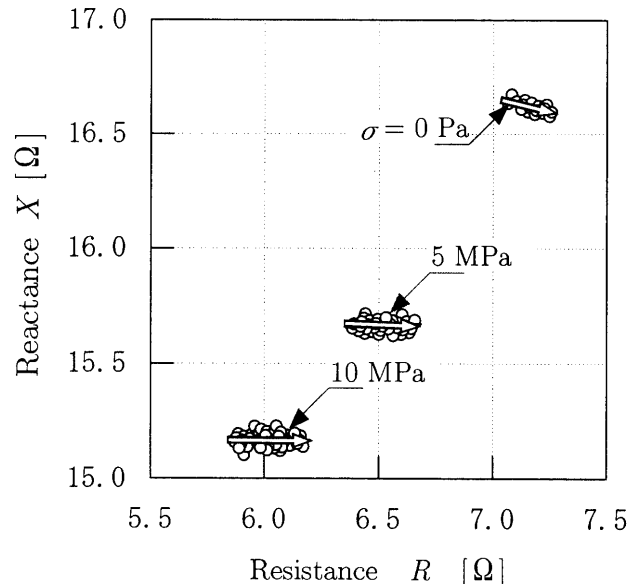


Fig. 4 Coil impedance - temperature ($H_d = 20$ kA/m, $f_d = 0.5$ kHz, $H = 4$ kA/m, $f = 10$ kHz, $T = 40 \sim 75$ °C).

4 超磁歪材料を用いた力センサとロードセルとの比較

超磁歪材料を用いた力センサとロードセルの特性を比較した. 比較するロードセルの定格は, 超磁歪材料と同様 10 N とした. Table 2 に超磁歪材料を用いた力センサとロードセルの特性比較を示した.

デイザ法を用いることでインピーダンス変化率は約 1/4 に減少したが, ロードセルと比較すると 20 倍大きいことが明らかとなった. そのため, 材料のひず

Table 2 Characteristics comparison of force sensor with GMM and load cell.

Item	Symbol [unit]	without dither	with dither	Load cell
Rated force	[N]	10	10	9.81
Magnetostriction	ϵ ppm	400	400	(2000)
Impedance coefficient (Resistance coefficient)	$\frac{\Delta Z}{Z}$ % $\frac{\Delta R}{R}$ %	31.1 -	8.46 -	- 0.4
Gauge factor	K	777	212	2
Non-linearity	ϵ_l %	15.71	17.05	0.50
Hysteresis	ϵ_h %	5.07	0.02	0.50
Temperature coefficient at span	ϵ_T [%/°C]	-	0.10	0.05

※ The load cell is calculated according to the output voltage.

※※ The load cell is a catalog value.

み感度を表すゲージ率 K においても 超磁歪材料を用いた力センサの方が 106 倍大きい。ヒステリシスにおいては、ディザ法を用いることで 1/250 に低減でき、ロードセルと比較しても 1/25 に小さくできた。非直線性においては、超磁歪材料を用いた力センサの方が大きくなっているが、回路処理により改善できると考えられる。また、出力はインピーダンスに比例する信号処理回路を使用した。その時、出力の温度係数は、応力が 10 N の時、ロードセルの 2 倍になった。

5 あとがき

本論文において明らかになったことを以下に示す。

1. 超磁歪材料を用いることで力センサを構成できることを明らかにした。
2. ディザ法により重畳磁界を加えることで透磁率が減少し、インピーダンス変化率が約 1/4 に減少したが、ヒステリシスは 0.02 % となり、約 1/250 に減少できた。
3. 超磁歪材料を用いた力センサは、ロードセルよりヒステリシスが小さく、106 倍高感度（ゲージ率）なセンサとなることが明らかとなった。
4. 出力の温度係数は、応力が 10 N の時、ロードセルの約 2 倍となった。

(1999 年 12 月 15 日受付)

参考文献

- [1] 近藤 孝之, 超磁歪材料内の波動伝播, 日本機械学会第 74 期通常総会講演会講演論文集, No.97-1 (1997), pp.138-139.
- [2] H. Wakiwaka, K. Aoki, T. Yoshikawa, H. Kamata, M. Igarashi and H. Yamada, Maximum output of a low frequency sound source using giant magnetostrictive material, *Journal of Alloys and Compounds*, 258, (1997), pp.87-92.
- [3] 村田 幸雄, 川瀬 和夫, 小川 豊, 脇若 弘之, 山田 一, 超磁歪材料の大出力アクチュエータへの適応検討, 第 9 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, (1997), pp.3-6.
- [4] A.E. クラーク, 江田 弘, 超磁歪材料, (1995), 日刊工業新聞社.
- [5] 山田 一, ~ R & D のための ~ 磁気回路の計算法, (1987), トリケップス.
- [6] 脇若 弘之, 山科 宜秋, 山田 洋次, センサ, アクチュエータに用いた超磁歪材料の電気機械結合係数, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-99-190, (1999), pp.31-36.
- [7] 笹田 一郎, 原田 耕介, トルクセンサ, 平成 3 年電気学会全国大会シンポジウム, (1991), S.19-4.
- [8] I. Sasada, S. Kubo, R.C.O' Handley and K. Harada, *J. Appl. phys.*, Vol.67, No.9 (1990).
- [9] 山田 一, 宮澤 永次郎, 別所 一夫, 基礎磁気工学, (1975), 学献社.