引張り・曲げ応力に対する磁気異方性センサの動作比較

Performance Comparison of Magnetic Anisotropy Sensor for Tensile and Bending Stresses

脇若弘之・近藤和哉*・内山修一**・山田 一

信州大学電気電子工学科・*同大学院電気電子工学専攻, 長野市若里 500 (〒380)

** (株)小野測器第一商品技術部, 横浜市緑区白山 1-16-1 (〒226)

H. Wakiwaka, K. Kondo*, S. Uchiyama** and H. Yamada

Faculty of Engng., and *Graduate Course, Shinshu Univ., 500 Wakasato, Nagano 380

**First Products Division, Ono Sokki Co., Ltd., 1-16-1 Hakusan, Midori-ku, Yokohama 226

The magnetic anisotropy sensor (MAS) is non-contactly able to measure the mechanical stresses of ferromagnetic materials. The output voltage is caused by the inverse magnetostriuctive effect. To measure tensile or bending stress, MAS output voltage—each stress characteristic was needed. This paper deals with the relationship of MAS output voltage for tensile and bending stresses. The output voltage on bending stress is calculated using the output voltage ratio and output voltage-tensile stress characteristics. Thus, MAS can measure both the tensile and bending stresses using output voltage-tensile stress characteristics.

Key words: magnetic anisotropy sensor, bending stress, tensile stress, MAS output voltage ratio

1. ま え が き

磁気異方性センサ (Magnetic Anisotropy Sensor, 以下 MAS と略記) は, 強磁性体に応力が加わった際に, 磁歪の逆効果により形成される磁気異方性から, 応力の方向と大きさを測定する応力センサである¹⁾. MAS は強磁性体において, 磁束の浸透深さに依存する深さまでの応力を非接触で測定できるので鉄鋼建造物などの応力測定に有利である.

測定対象に曲げ応力が加わった場合, 内部応力は表面応力と比較して小さくなる. MAS は内部応力の一部も測定するので, 引張り応力と曲げ応力では, 表面応力が等しくても, MAS 出力電圧は異なった値となる. 本論文では, 以下の内容について述べる.

- 1) 引張り・曲げ応力に対する MAS の出力電圧特性
- 2) MAS 出力電圧-引張り応力特性から, MAS 出力電圧-曲げ応力特性の算出

2. MAS 出力電圧の表現式

Fig. 1 に, MAS の基本構造を示した. 励振コア (E_1 -

E_2) と検出コア (D_1 - D_2) は, 幾何学的に直交しそれらの磁極は正方形の角に配置されている.

Fig. 2 に MAS が主応力方向を検出する $\theta=45^\circ$ のときの, MAS の磁気等価回路を示した²⁾. 測定対象は正の磁歪定数をもつ等方性材料と仮定する. 磁気抵抗 R_a, R_b は測定対象内の磁気抵抗である. コアの磁気抵抗 R_D, R_E は MAS の応力に対する特性には関係しないため無視すると MAS 出力電圧 V_o は次式となる.

Fig. 1 Basic configuration of the Magnetic Anisotropy Sensor.

Fig. 2 An equivalent magnetic circuit of the MAS.

$$V_o = \beta \pi f N_d N_e I_e \frac{R_b - R_a}{R_b R_a} [V] \quad (1)$$

ここに、 β : MAS 信号処理装置の増幅率,

f : 励振周波数 [Hz],

N_d : 検出コイルの巻数 [回],

$N_e I_e$: 励振コイルの起磁力 [A]

引張り応力に対する MAS 出力電圧 V_p と曲げ応力に対する MAS 出力電圧 V_b の計算値は、各応力に対する磁気抵抗を計算して得られる。 V_p の実測値から、 V_b を算出するには、各応力に対する出力電圧を計算し、その比 $(V_b/V_p)_{cal.}$ を校正値として用い、次式により行う。

$$V_b = \left(\frac{V_b}{V_p} \right)_{cal.} \cdot V_p [V] \quad (2)$$

3. 引張り・曲げ応力に対する磁気抵抗

磁気抵抗 R_a, R_b は次式で表される。 応力により変化するのは、比透磁率と平均磁路の深さと考えられる。

$$R_a = \frac{l}{\mu_o \mu_x w d_x} [H^{-1}] \quad (3)$$

$$R_b = \frac{l}{\mu_o \mu_y w d_y} [H^{-1}] \quad (4)$$

ここに、 $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$,

μ_x : 磁化容易軸方向の比透磁率,

μ_y : 磁化困難軸方向の比透磁率,

w : 平均磁路の幅 [m],

d_x : 磁化容易軸方向の平均磁路の深さ [m],

d_y : 磁化困難軸方向の平均磁路の深さ [m],

l : 平均磁路の長さ [m]

まず、一様材質中の応力と比透磁率の関係を考える。

Fig. 3 に弾性変形範囲内での引張り・曲げ応力の分布を示した³⁾。 曲げ応力の分布は次式で表される。

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{2z}{h} \right) [MPa] \quad (5)$$

Fig. 3 Distribution of stress on tensile and bending stress.

ここに、 σ_0 : 表面応力 [MPa],

h : 測定対象の厚さ [m],

z : 深さ [m]

比透磁率 μ_x と応力 σ の関係は、次式で表される⁴⁾。

$$\mu_x = a\sigma + b \quad (6)$$

ここに、 a : 材質によって決まる定数 [MPa^{-1}],

b : 応力を加えないときの比透磁率

Fig. 4 に、引張り応力に対する方向別比透磁率分布を示した。 測定対象内における方向別比透磁率分布は、X-Y 平面において、楕円状と仮定した⁵⁾。

Fig. 5 に、曲げ応力に対する方向別比透磁率分布を示した。 磁化容易軸は測定対象表面と裏面で 90° 異なる。

曲げ応力では深さにより比透磁率が変化する。 このため、磁束の浸透深さが測定対象の厚さに比べて十分に小さい場合は、引張り・曲げ応力に対する磁化容易軸方向の等価的な比透磁率 μ_{xp}, μ_{xb} は次式で表される。

$$\mu_{xp} = a\sigma_0 + b \quad (7)$$

$$\mu_{xb} = a \left(1 - \frac{\delta}{h} \right) \sigma_0 + b \quad (8)$$

ここに、 $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_o \mu_x}} [m]$

: 磁束の浸透深さ

磁化困難軸方向については、ポアソン比 $1/m$ を用いて、表面応力を $-1/m \cdot \sigma_0$ として計算を行う。

次に、平均磁路の深さについて考察する。 磁束の浸透

Fig. 4 Distribution model of directional permeabilities μ_x, μ_y for the tensile stress.

Fig. 5 Distribution model of directional permeabilities μ_x, μ_y for the bending stress.

深さが、測定対象の厚さに対して十分に小さい場合、磁束は測定対象の表面付近を流れるものと仮定する。このとき、平均磁路の深さは次式で表される。

$$d = \delta \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{h}{\delta} \right] \right\} [\text{m}] \quad (9)$$

式(7)~(9)の計算には以下の数値を用いた。

$$a = 7.11 \quad [\text{MPa}^{-1}],$$

$$b = 275,$$

$$\rho = 13.4 \times 10^{-8} \quad [\Omega \cdot \text{m}],$$

$$1/m = 0.3$$

b は、冷間圧延鋼 (SPCC) の交流磁化特性 (60 [Hz]) より求めた。 a の値は冷間圧延鋼 (SPCC, 1.0 [mm] 厚) に対して、励振周波数 1 [kHz] で実測した MAS 出力電圧-曲げ応力特性を、計算値が近似するように定めた。

4. MAS 出力電圧-曲げ応力特性の実測値と、計算値との比較

Fig. 6 に、MAS 出力電圧-引張り応力特性測定ブロック線図を示した。引張り応力は、疲労試験機により印加し、ひずみゲージで測定した。測定は、励振電流を 10 [mA] とし、脱磁時間 8 [s]、脱磁磁界 8 [kA/m] で測定点を引張り応力方向に脱磁した後にいった。

Fig. 7 に MAS 出力電圧-引張り応力特性の実測値を示した。測定対象は冷間圧延鋼 (SPCD, 0.7 [mm] 厚) である。MAS 出力電圧の実測値は、応力に対してほぼ線形である。式(1)で、MAS 出力電圧は励振周波数に比例している。しかし平均磁路の深さも励振周波数により変化するため、出力電圧と周波数は比例しない。

Fig. 8 に、MAS 出力電圧-曲げ応力特性の測定法を示

Fig. 6 Tensile stress measuring block diagram using the MAS.

Fig. 7 Output voltage-tensile stress characteristics of the MAS for a low carbon steel. ($I_e = 10$ [mA], SPCD; thickness of specimen is $h = 0.7$ [mm].)

Fig. 8 Bending stress measuring method using cantilever.

した。曲げ応力は、片持ち梁法によって印加し、測定条件は引張りの場合と同一とした。

Fig. 9 に、MAS 出力電圧比-周波数特性の実測値と、計算値を示した。励振周波数が 2 [kHz] 以上で、計算値は実測値と、ほぼ等しくなった。

Fig. 10 に、MAS 出力電圧-曲げ応力特性の実測値と Fig. 7 と Fig. 9 により算出した計算値を示した。

計算値と実測値を比較すると、励振周波数が 2 [kHz] では、応力 0~80 [MPa] の範囲内で、計算値は誤差 13 [%] 以下であった。また、励振周波数が 3 [kHz] では、応力 0~60 [MPa] で誤差 13 [%] 以下であった。

しかし、励振周波数が 1 [kHz] では、応力が 40 [MPa] 以上の点で、誤差は 38 [%] 以上となった。これは励振周波数が低いために、測定対象の厚さに対して磁束の浸透深さが深くなり、表面付近に磁束が流れるとの仮定が成り立たないためと考えられる。

励振周波数 2 [kHz] 以上で、MAS 出力電圧-曲げ応力

Fig. 9 Output voltage ratio, V_b/V_p -stress characteristics of the MAS. ($I_e = 10$ [mA], SPCD; thickness of specimen is $h = 0.7$ [mm].)

Fig. 10 Output voltage-bending stress characteristics of the MAS for a low carbon steel. ($I_e = 10$ [mA], SPCD; thickness of specimen is $h = 0.7$ [mm].)

特性の計算値が実測値を近似できた。このことから、引張り応力と曲げ応力の測定が、MAS 出力電圧-引張り応力特性と、MAS 出力電圧比の計算によって、可能であると考えられる。

5. あとがき

本論文で、明らかにできた内容を以下にまとめる。

1) 引張り応力と曲げ応力では、MAS 出力電圧-応力特性が異なることを実測した。また、両応力の内部応力分布の違いによって MAS 出力電圧が異なることを理論の面から示した。

2) MAS 出力電圧比 V_b/V_p を用いることにより、MAS 出力電圧-引張り応力特性から、MAS 出力電圧-曲げ応力特性を算出した。誤差は励振周波数 2 [kHz]、応力 0~80 [MPa] また、励振周波数 3 [kHz]、応力 0~60 [MPa] の範囲内で 13 [%] 以内であった。

本論文の作成に当たり、卒研生の梅沢孝志君の援助に感謝する。

文 献

- 1) 脇若弘之・山田 一・内山修一・岸本 哲・伊藤昌之：電気学会論文誌，**108-D**, 323 (1988).
- 2) 脇若弘之・小林 学・山田 一：日本応用磁気学会誌，**14**, 387 (1990).
- 3) 川口雄一：「材料力学」，裳華房，東京 (1965), p. 38.
- 4) 安福精一：「磁気異方性センサ」，「磁気センサマニュアル」，トリケップス社，東京 (1981), pp. 7~22.
- 5) 岸本 哲・英 貢・脇若弘之・山田 一：日本応用磁気学会誌，**15**, 481 (1991).

1991 年 11 月 11 日受理，1992 年 1 月 30 日採録