

磁気異方性センサを用いた残留応力の非接触測定

信州大学工学部電気電子工学科

教授 山田 一

(昭和63年度研究開発助成 AF-88024)

1. まえがき

磁気異方性センサ(以下MASと略す)は鉄鋼材料に応力が加わると逆磁歪効果によりその磁気異方性が変化するという現象を利用した応力センサである。MASは、プローブが小型、軽量で、かつ応力が非接触で測定できるという特長がある。

本研究は、以下の点を明かにするものである。

- 1) 現在広く利用されている鉄鋼材料として冷間圧延鋼(SPCC)を選び、その残留応力を非接触で測定することを検討する。
- 2) MASによる測定の際、重要となる交流脱磁の効果について考察を加える¹⁾。

2. MASの出力電圧

図1にMASの基本構造を示す。MASはコの字形の励振コア(E_1, E_2)と検出コア(D_1, D_2)から成る。磁極間の距離は共に10[mm]である。2つのコアは互いに幾何学的に直交し4つの磁極は正方形に配置している。本実験では検出コイル、励振コイルいずれも和動接続とした²⁾。各コアの磁極は試験片に対して非接触となっている。

MASの出力電圧 V_o は、回転角 θ に依存し次式で与えられる³⁾

$$V_o = V_m \left\{ \frac{\mu_y}{\sqrt{1 - (1 - \alpha^2) \cos^2(\theta - 45^\circ)}} - \frac{\mu_y}{\sqrt{1 - (1 - \alpha^2) \sin^2(\theta - 45^\circ)}} \right\} \quad [V] \quad (1)$$

ここに、 $\alpha = \mu_x / \mu_y$

V_m : 最大振幅値

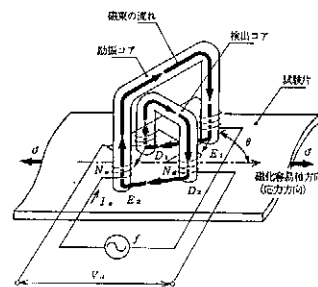


図1 磁気異方性センサ(MAS)の基本構造

μ_x : X軸方向の比透磁率

μ_y : Y軸方向の比透磁率

θ : MASの回転角[°]

式(1)において、 $\theta = 45^\circ$ を代入すれば、次式となる

$$V_o = V_m \mu_y (\alpha - 1) \quad [V] \quad (2)$$

さらに、MASに回転角 θ を与えれば、その出力電圧 V_o は経験的に次式でも与えられる。

$$V_o = \kappa V_m \sin 2\theta \quad [V] \quad (3)$$

ここに、 $\kappa = \mu_y (\alpha - 1)$

式(2)より、MASの出力電圧 V_o が μ_x 、 μ_y と θ の値に依存していることが分かる。さらに、応力方向が未知の場合、MASを 360° 回転させ、出力電圧が最大となった時の回転角を θ_1 とすると、 $\theta_1 - 45^\circ$ の方向が主応力方向となる。

3. MASによる応力測定

3.1 測定方法

実験に使用した試験片は冷間圧延鋼(SPCC)で、寸法は縦300×横300×厚さ1.2[mm]であ

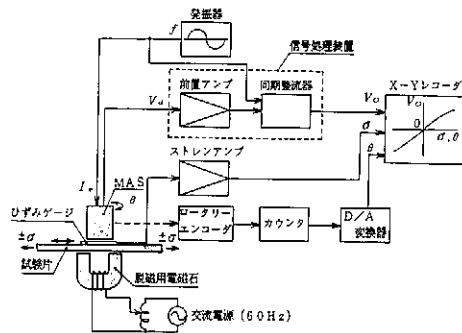


図2 MASによる応力測定のプロック線図

る。応力測定点は合計49点とした。図2に応力測定のプロック線図を示した。MASの励振電流 $I_e = 10$ [mA]、周波数 $f = 1$ [kHz]、ギャップ $g = 0.5$ [mm] の条件で試験片を励振した。そして検出コイルに誘起された検出電圧 V_o を信号処理して、出力電圧 V_o を得ることができる。この出力電圧 V_o を試験片に取り付けたひずみゲージによる応力値 σ 、あるいはロータリーエンコーダーで検出した回転角 θ と対比させて、特性測定を行った⁽⁴⁾。

3.2 MAS出力電圧-回転角特性

図3に試験片の1点A(図5参照)におけるMAS出力電圧-回転角特性を示した。まず試験片を脱磁しない状態でMASを回転させ、出力電圧が最大となる角 $\theta_1 = 26^\circ$ を測定した。そして、MASの構造より $\theta_1 - 45^\circ = -19^\circ$ の方向が主応力方向であるので、 $\theta = -19^\circ$ の方向を主応力方向とした。次に試験片を主応力方向 ($\theta_1 - 45^\circ$) に脱磁した曲線 ($H_{b\parallel}$) および主応力に直角な方向 ($\theta_1 +$

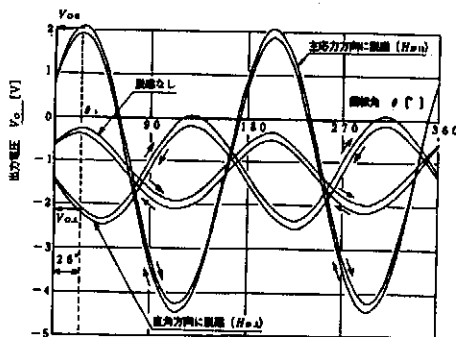


図3 測定点AにおけるMAS出力電圧-回転角特性 (SPCC, $f = 1$ [kHz], $I_e = 10$ [mA])

45°) に脱磁した曲線 ($H_{b\perp}$) から、それぞれ θ_1 における出力電圧値 $V_{o\parallel} = 2.03$ [V] と $V_{o\perp} = -2.18$ [V] を得た。試験片の脱磁には、交流脱磁法を用いて行った⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3.3 MAS出力電圧-応力特性

図4にMASの出力電圧-応力特性を示した。この試験片はSPCC材で縦300×横100×厚さ1.2 [mm] の別の試験片であり、それに曲げ応力を加えた。図4中に点線で示したヒステリシスループは試験片を脱磁しない場合の曲線である。試験片を脱磁することにより実線で示したようなヒステリシスのない特性となる。このときの脱磁方法は、応力を一定値に保った状態で試験片に脱磁作用を与えた。試験片に対して応力が印加された方向に脱磁した場合の曲線 ($H_{b\parallel}$) はヒステリシスループの上側に、また直角方向に脱磁された場合の曲線 ($H_{b\perp}$) はループの下側に記録される。両曲線とも高い再現性で得られる。図4の脱磁した場合の両曲線を校正曲線として、図3で得られた $V_{o\parallel}$ 、 $V_{o\perp}$ は、それぞれ応力値 $\sigma = 48$ [MPa]、 $\sigma = 46$ [MPa] に換算することができる。

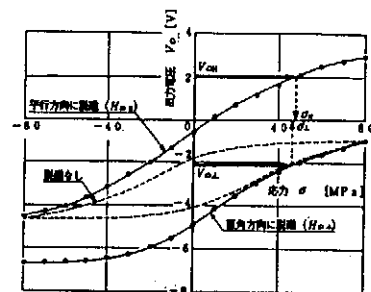


図4 SPCC試験片のMAS出力電圧-応力特性 ($f = 1$ [kHz], $I_e = 10$ [mA])

4. 残留応力の非接触測定

4.1 冷間圧延鋼板の残留応力分布

図5は、冷間圧延鋼板 (SPCC) の処女材に対してMASを用いて残留応力分布を非接触で実測したデータを示すものである。同図中において、実線は電磁石によって主応力方向に平行に交流脱磁磁界 ($H_{b\parallel}$) を印加した場合である。処女材であるながらも、残留応力は最小値20 [MPa] から最大

であるばかりでなく、鉄板加工物、鉄鋼構造物等の残留応力を知る上で将来有望な手段になり得ると思われる。図7には、本研究で行われたロボットを利用したMASによる鋼板における残留応力分布の自動測定の様相を示したものである。

なお、本研究は世界非破壊会議(WCNDT)⁽¹⁾、電気学会雑誌⁽²⁾、電気学会研究会⁽³⁾⁽⁴⁾ および非破壊検査協会⁽⁵⁾ で発表された筆者らの論文を基に要約したものである。

本研究には、当研究室の小林学工学修士、英貢、鈴木次郎両工学士および(株)アマダ技術研究所の水野勉工学修士、本学機械工学科の小林光征教授の協力があり、各位へ謝意を表する次第である。

最後に本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の補助を受けたことを付記し御礼申し上げる次第である。

参考文献

- (1) H.Yamada, M.Kobayashi, S.Kishimoto, M. Ito, and H.Wakiwaka: Theory of A Magnetic Anisotropy Sensor and Its Application, Non - Destructive Testing (Proc.12th WCNDT), Vol.1, pp.391 - 393 (1989)
- (2) 山田一・小林学・脇若弘之・岸本哲・水野勉:

磁気異方性センサによる鉄鋼材料の非接触式応力測定、日本非破壊検査協会・第3分科会資料、No. 3905、pp.22 - 29 (1988)

- (3) 岸本哲・小林学・水野勉・鈴木次郎・山田一: 磁気異方性センサによる冷間圧延鋼平板(SGCC)の残留応力分布の非接触測定、NDI平成2年度春季大会、Vol.39、No.2A、pp.183 - 184 (1990)

- (4) 柏谷賢治・坂本博・伊藤昌之・上野善旦・山田一: 交流消磁法を併用した磁気異方性センサによる応力測定、非破壊検査、Vol.34、No3、pp.201 - 207 (1985)

- (5) 山田一・小林学・佐藤右一・常 暁明・脇若弘之・岸本哲・伊藤昌之: 磁気異方性センサによる応力測定における脱磁効果、マグネティックス研究会資料、MAG - 88 - 236、pp.23 - 32 (1988)

- (6) 脇若弘之・山田一・内山修一・岸本哲・伊藤昌之: 磁気異方性センサによる機械的応力の非接触測定、電気学会論文誌、108 - D巻、3号、pp. 322 - 329 (1988)

- (7) J.L.Butler: Application Manual for the Design of Etrema Terfenol - D Magneto - strictive Transducers、Edge Technologies, Inc.,pp.1 - 67 (1988)