

磁気異方性センサを用いた残留応力の測定

山田 一*・脇若 弘之**

1. まえがき

今日、自動車、容器類、各種電気製品などの、薄い金属板で空間を囲う形態の工業製品及びそれらの部品の多くは、冷間圧延鋼板の曲げ加工とプレス絞り加工によって大量生産されている¹⁾。

冷間圧延鋼板は、熱間圧延された鋼板を酸洗後、冷間で圧延し、焼鈍、調質圧延を経て0.15~3.2 [mm]の厚さに仕上げられたもので、表面性状がきれいで寸法精度が高く、加工性に優れ、絞り加工用として広く用いられている材料である。加工性は、SPCE、SPCD、SPCCの順で、SPCCは比較的簡単な加工部品や冷蔵庫のドア、鋼製家具などの平坦な部品用として用いられている。

これら鋼板の強度は残留応力などの応力状態、疲労などによって影響を受けるので、これらを非破壊で測定することが望まれている。応力測定法としては、X線応力測定法、中性子回折法、超音波、音弾性法や、磁気ひずみを利用する方法などがある²⁾。

磁気異方性センサ (Magnetic Anisotropy Sensor, 以下MASと略記) は、測定対象である強磁性体に応力が印加された場合に、逆磁歪効果により生じる磁気異方性から、主応力方向、主応力差を非破壊、非接触で測定できるセンサである³⁾。したがって塗装などの影響を受けずに測定することができる。さらに、MASを用いた応力測定は他の応力測定と比較して、測定方法が容易できわめて短時間で測定でき、測定装置が小さく汎用的である。

本論文で述べる内容を、以下に示す。

- (1) MASプローブの磁気等価回路、比透磁率の分布、磁束の浸透を考察し、MASの出力電圧の理論式を導出する。
- (2) 打ち抜きを施した鋼板を測定サンプルとして、打ち抜き孔の周囲において実測した残留主応力差を比透磁率に換算し、打ち抜きによって変化した応力分布への影響を調べる。さらに、打ち抜きにより残留する引張り応力と圧縮応力の様子を考察する。
- (3) 同様に曲げ加工によって鋼板内の応力分布がどのように影響を受けるかを検討するため、曲げ加工前後で応力分布を測定し、残留応力分布に及ぼす影響を考察する。

2. 磁気異方性センサの応力-電気変換理論

2.1 動作原理

図1に、MASプローブの基本構造を示した。MASプローブはU字型をした励振コアと検出コア、各コアに巻かれた

励振コイル(巻数 N_e [回])と検出コイル(巻数 N_d [回])から構成されている。この2つのコアの磁極 (E_1, E_2, D_1, D_2) は、正方形の角に配置されている。正の磁歪定数を持つ強磁性体では逆磁歪効果により、引張り応力が印加されると、印加方向の比透磁率が大きくなり、この方向が磁化容易軸になる⁴⁾。

励振コイルに励振周波数 f の励振電流 I_e を流すと、励振コアに磁束が生じる。その磁束が測定対象内、検出コア内を流れ、磁束の時間変化から、検出コイルによって、検出電圧 V_d が誘起される。

磁気異方性のある測定対象では、測定対象内の磁気抵抗は、方向により大きさが異なる。MASを測定対象上で回転させることにより、主応力方向を知ることができる。あらかじめ校正用に、MASの出力電圧-主応力差特性を測定し

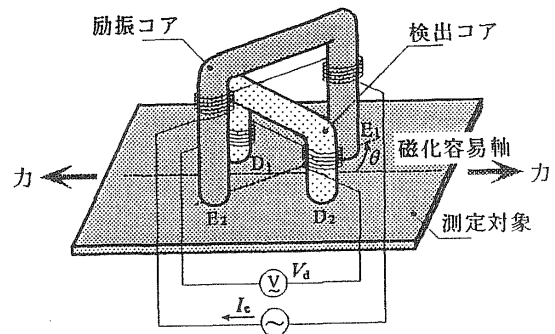


図1 磁気異方性センサ(MAS)プローブの基本構造

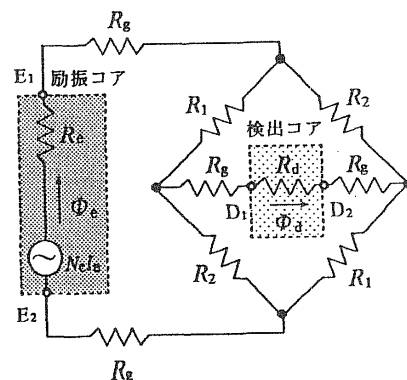


図2 MASの磁気等価回路

ておくことにより、出力電圧から主応力差に換算し、主応力差を測定することができる。

2.2 磁気等価回路

図2に、MASプローブと測定対象より作られる磁気等価回路を示した。磁気抵抗 R_e 、 R_a は励振、検出コア内の磁気抵抗である。各磁極と測定対象とのギャップの磁気抵抗はその形状、寸法が等しいため、 R_g としている。

励振コイルに流す励振電流を振幅 I_e [A]、周波数 f [Hz] の正弦波とし、磁束 Φ_a も正弦波と仮定する。本等価回路から計算した検出電圧の理論式を、次式に示した。なお、測定対象内の応力によって変化する磁気抵抗は、測定対象内の磁気抵抗 R_1 、 R_2 のみであり、 R_e 、 R_a 、 R_g はMASの出力電圧の変化には関係しないため、無視した。

$$V_a = -\beta N_a \frac{d\Phi_a}{dt}$$

$$= \frac{\beta \pi f N_a N_e I_e (R_2 - R_1)}{R_2 R_1} \sin \omega t \quad [\text{V}] \quad (1)$$

ここに、 β : 信号処理装置の増幅率、
 Φ_a : 検出コアを流れる磁束 [Wb]、
 $N_e I_e$: 励振コイルの起磁力 [A]、
 $\omega = 2\pi f$ [rad/s] : 角周波数

ここで、 $\theta = 45^\circ$ とすると、 R_1 は測定対象内の磁化容易軸方向、 R_2 は困難軸方向に一致した磁気抵抗となり、次式で表すことができる。

$$R_1 = \frac{l}{\mu_0 \mu_{r1} w d_1} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{l}{\mu_0 \mu_{r2} w d_2} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (3)$$

ここに、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] : 真空の透磁率、
 w : 磁路の幅 [m]、
 d_1 、 d_2 : 磁路の等価深さ [m]、
 l : 磁路の長さ [m]、
 μ_{r1} 、 μ_{r2} : 測定対象の磁化容易軸、困難軸方向の方向別比透磁率

2.3 方向別比透磁率分布

磁気的に等方性の材料に、応力を印加したとき生じた磁気異方性は、応力によるものと仮定する。平面において、2軸方向の垂直応力 σ_1 、 σ_2 が作用する場合、任意の点の応力は楕円状に分布し²⁾、磁気異方性が生じる。1軸応力 σ_1 が印加された場合、その直交方向に誘起される主応力 σ_2 は鉄のポアソン比 $1/m$ を用いることにより、次式で表される。

$$\sigma_2 = -\frac{1}{m} \sigma_1 \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

図3に、方向別比透磁率の分布を示した。可逆透磁率と応力の関係は、弾性範囲内では線形であり⁶⁾、測定対象

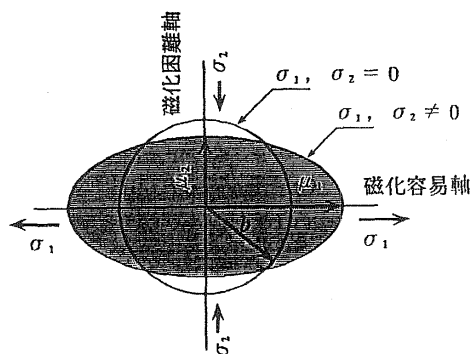


図3 方向別比透磁率分布

に主応力 σ_1 、 σ_2 が作用しているときの式(2)、(3)における比透磁率を次式に示す。

$$\mu_{r1} = a \sigma_1 + b \quad (5)$$

$$\mu_{r2} = a \sigma_2 + b \quad (6)$$

ここに、 a : 磁界、材質に依存する比透磁率の応力感度 [MPa⁻¹]、
 b : 応力を印加しない状態での比透磁率

2.4 MASの出力電圧

MASの検出電圧 V_a を位相検波することによって、出力電圧を得ている。したがって、MASの出力電圧 V_o は式(1)の振幅に相当する。

式(2)、(3)中で磁路の幅と長さはそれぞれ磁極の幅、磁極間の長さに依存する定数と置く。式(1)の磁気抵抗に式(2)、(3)を代入し、MASの出力電圧 V_o [V] を求めると、次式が得られる。

$$V_o = \frac{\beta \pi f N_a N_e I_e \mu_0 w}{l} (\mu_{r1} d_1 - \mu_{r2} d_2) \quad (7)$$

式(7)における磁路の等価深さ d_1 、 d_2 を、磁束の浸透深さ δ ($=\sqrt{\rho / \pi f \mu_0 \mu_r}$) を考慮して $d_1 = d_2 = (\pi f \mu_0 \rho / b) \{1 - \exp(-h/\delta)\}$ と置くと、引張り応力印加におけるMASの出力電圧の理論式は、次式で表わされる⁷⁾。

$$V_o = \frac{\beta N_a N_e I_e w a}{l} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \rho}{b}} \{1 - \exp(-h/\delta)\} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (8)$$

ここに、 h : 測定対象鋼板の厚さ [m]

以上より、MASの出力電圧は主応力差に比例することが分かる。

3. 打ち抜きを施した鋼板の残留主応力差

3.1 残留主応力差の測定

図4に、測定対象である打ち抜きを施した冷間圧延鋼板の寸法および測定点を示した。材質はSPCD、厚さは0.75 [mm] であり、鉄と亜鉛の合金メッキが施されている。メ

ッキ層の厚さは 3.2 [μm] である。直径 10 [mm] と 50 [mm] の孔が 2 個ずつ計 4 個打ち抜きにより開けられている。測定点は、図中の+で示した点であり、圧延方向と圧延に直交する方向に、A 面と B 面合わせて 58 点設けた。図 5 に、測定対象における打ち抜き方向と、A 面と B 面の関係を示した。A 面から B 面へと打ち抜かれている。

図 6 に、打ち抜きを施した薄鋼板における、残留主応力差分布を示した。MAS の励振周波数は 1.0 [kHz]、励振電流はプローブを空气中に保持した状態で 10 [mA] とした。A 面、B 面、全ての測定点において、主軸方向（最大主応力方向）は、圧延方向と直交していた。また、出力電圧から主応力差への換算には、SPCD の応力感度 $\alpha = 0.0654$ [V/MPa] を用いた。図 6 の結果を、主軸方向（圧延に直交）と主軸に直交方向（圧延方向）それぞれ平均を求め、図 7 に示した。孔の中心からの位置に対応して、主応力差の大きさを棒グラフに示した。直径 50 [mm]、10 [mm] の孔の両方とも、測定対象 A 面の主軸方向において、孔の中心に近付くにつれて、主応力差の値は大きくなり、B 面では逆に小さくなった。また、主軸に直交方向では、A 面、B 面とも、主軸方向と逆の大小関係となった。このことは、孔の中心に近い方が遠い方に比べ、A 面では打ち抜きにより引張り応力が多く加わり、B 面では圧縮応力が多く加わっていることを示している。

3.2 打ち抜きによる残留応力分布の考察

打ち抜きを施した鋼板の孔の周囲における主応力差の大小関係の物理的意味を考察するため、測定した主応力差の値から比透磁率に換算した。

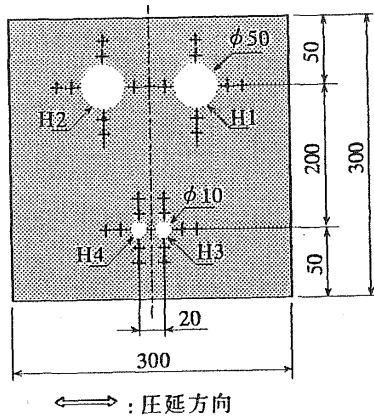


図 4 測定対象の寸法と測定点 (SPCD, 0.75 [mm] 厚, 単位: [mm])

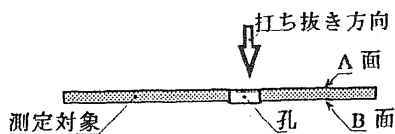


図 5 打ち抜きを施した測定対象の A 面と B 面

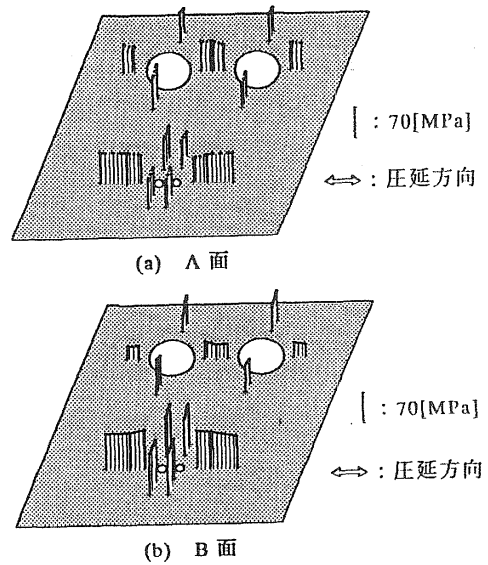
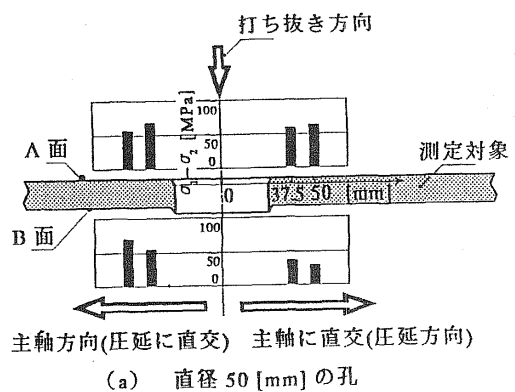
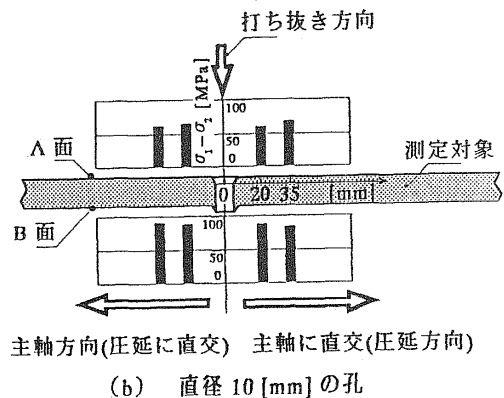


図 6 鋼板における残留主応力差分布 (SPCD, $f = 1$ [kHz], $I_e = 10$ [mA])

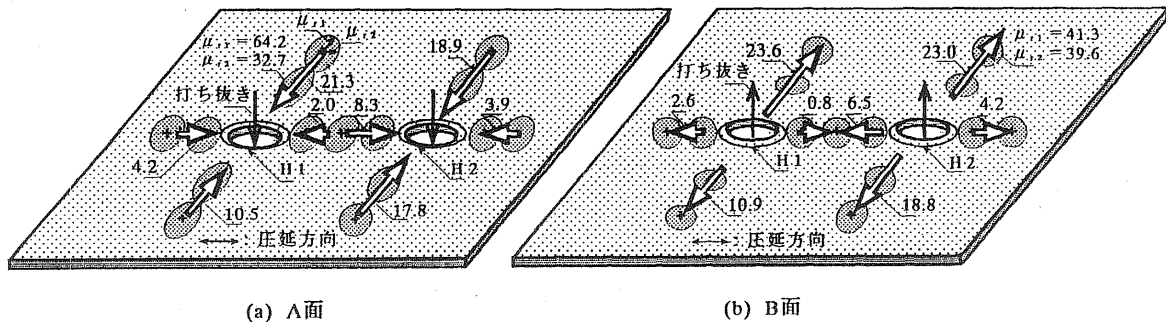


(a) 直径 50 [mm] の孔



(b) 直径 10 [mm] の孔

図 7 打ち抜きの孔の周囲における主応力差の比較 (SPCD, $f = 1$ [kHz], $I_e = 10$ [mA], 単位: [MPa])



(a) A面 (b) B面
 図8 MASにより測定した測定対象内の主応力分布
 (⇒: 主応力の方向, 楕円: 比透磁率, A面, φ50 [mm], 単位: [MPa])

(1) 主応力差から主応力に換算

式(4)を用い, MASにより測定した主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) を, 主応力に換算した。換算式を次に示した。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 1.3\sigma_2 \quad (9)$$

$$= 1.3 \times (-1/0.3) \sigma_2 \quad (10)$$

(2) 主応力を比透磁率に換算

式(5), (6)の σ_1 と σ_2 に, 式(9), (10)の σ_1 と σ_2 を代入し, それぞれの方向における比透磁率を算出する。式(5), (6)の a は0.5, b は40とした。

図8に, 測定した主応力差の値から換算した直径50 [mm]の孔の周囲における主応力の大きさと方向の分布を示した。楕円は, 比透磁率の分布(磁気異方性)である。真円に近づくほど, 主応力差は小さいことを表している。

以上の結果から, 測定対象の表面(A面)では, 打ち抜きにより孔の径方向に引張り応力が, 裏面(B面)では, 逆に圧縮応力が印加し, 残留したため, MASによる主応力差測定では, 図7のような大小関係となった。

よって, 表面処理などが施され, 打ち抜き方向の不明な鋼板において, 孔の周囲の主軸方向や主軸に直交方向に関して, MASにより残留主応力差の大小関係を測定することにより, 残留応力分布と共に打ち抜き方向が分かる。

4. 曲げ加工を施した鋼板の残留主応力差

4.1 残留主応力差の測定

図9に, プレスによる曲げ加工前後の冷間圧延鋼板(SPCC, 1 [mm]厚)の寸法及び測定点を示した。測定対象は2枚用い, 真中($x=4$ または $y=4$)のラインにおいて, 90°に曲げを施した。また, 曲げの方向は, 圧延方向と平行(No.1), 圧延方向と直交(No.2)の2種類である。

最初に, 曲げ加工前後におけるMASの出力電圧分布を測定する。測定点は曲げ加工前で81点, 曲げ加工後で72点である。

MASは, 励振電流10 [mA], 励振周波数1 [kHz]として, 測定点毎に脱磁を行った。脱磁条件は, 手動で, 最大脱磁

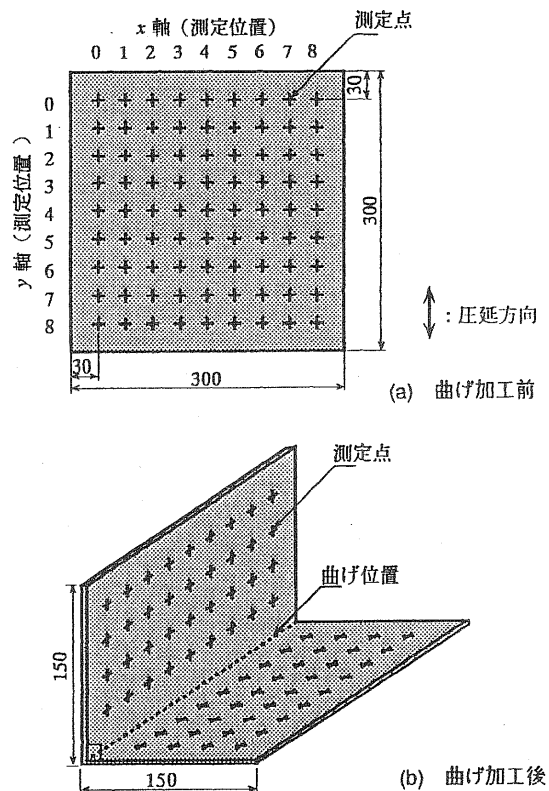


図9 曲げ加工前後の測定対象の寸法及び測定点 (SPCC, 1 [mm]厚, 単位: [mm])

境界14[kA/m], 脱磁時間6[s]とし, 主軸と平行に設定した。主軸は, ほとんどの測定点において圧延方向と直交する方向であった。

曲げ加工前後の主応力差分布を比較するため, 出力電圧分布を, 曲げ位置から距離の同じ測定点で平均をとり, 主応力差に換算する。

出力電圧から主応力差への換算には, 冷間圧延鋼板

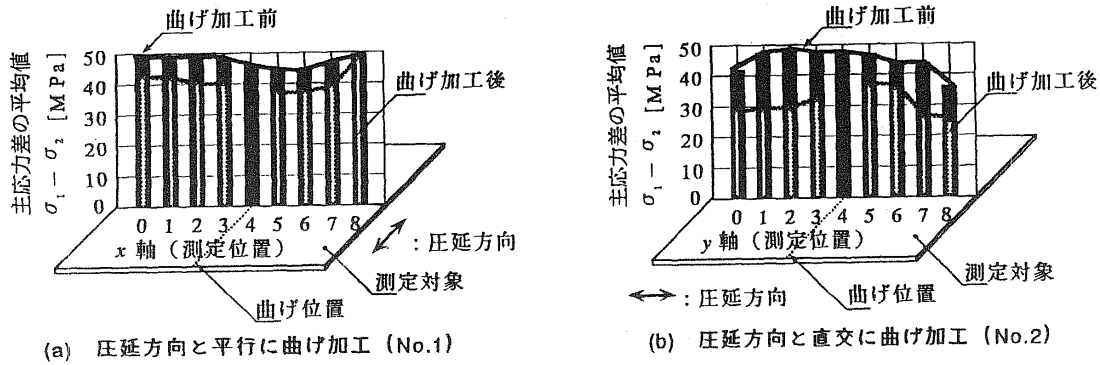


図 10 曲げ加工前後における主応力差の平均値

(SPCC) に引張り応力を印加した場合の応力感度 ($\alpha = 0.0879$ [V/MPa]) を用いた。

図10(a)に、圧延方向と平行に曲げ加工を施した場合の曲げ加工前後における主応力差の平均値を示した。ここで、平均値から大幅に外れている主応力差の値は、除いた。このように、曲げ加工後では、曲げ位置に近くなるにつれて、主応力差は小さくなる傾向となった。また、曲げ加工前との差が大きくなっている。このことは、曲げ位置に近くなるにつれて、鋼板に圧縮応力が残留しているものと考えられる。そのため、曲げ位置に近くなるにつれて、主軸方向の主応力が小さくなり、主応力差が小さくなったものと考えられる。

図10(b)に、圧延方向と直交に曲げ加工を施した場合の曲げ加工前後における主応力差の平均値を示した。平均値から大幅に外れている主応力差の値は、除いて平均化した。この場合、主応力差は曲げ位置に近くなるにつれ、大きくなっている。この傾向は、同図(a)の曲げ方向が平行のものと逆となる。

4.2 曲げ加工による残留応力分布の考察

前述のように、曲げ加工の方向が圧延方向と平行か直交

かによって、主応力差の大小関係は異なる。そこで、図10に示した主応力差の平均値の曲げ位置から近い2点 ($x=3, 5$)、($y=3, 5$) と遠い2点 ($x=0, 8$)、($y=0, 8$) を選び、主応力分布、比透磁率分布に換算し考察をおこなう。主応力差から主応力、比透磁率への換算は、3章と同様におこなう。

図11に、曲げ加工を施した鋼板の主応力分布を示した。(a)は圧延方向と平行に曲げを施したもの、(b)は圧延方向と直交に曲げを施したものである。主応力分布は、2.3項に述べたように楕円状の分布となる。同図のように、曲げ加工により圧縮応力が測定対象に加わり、(a)では曲げ位置に近づくにつれて主応力差は小さくなり、逆に(b)では大きくなった。このことから、楕円状の主応力分布は、曲げ加工の方向により異なると考えられる。また、曲げ加工の方向によって、曲げ加工精度が異なってくると考えられる。

次に、曲げ加工を施した鋼板の比透磁率分布を求めた。主応力から比透磁率への換算には、式(5)(6)を用いた。(a)では曲げ位置に近くなるにつれ、主軸方向の比透磁率は小さくなった。また、(b)では、主軸方向の比透磁率は大きくなった。

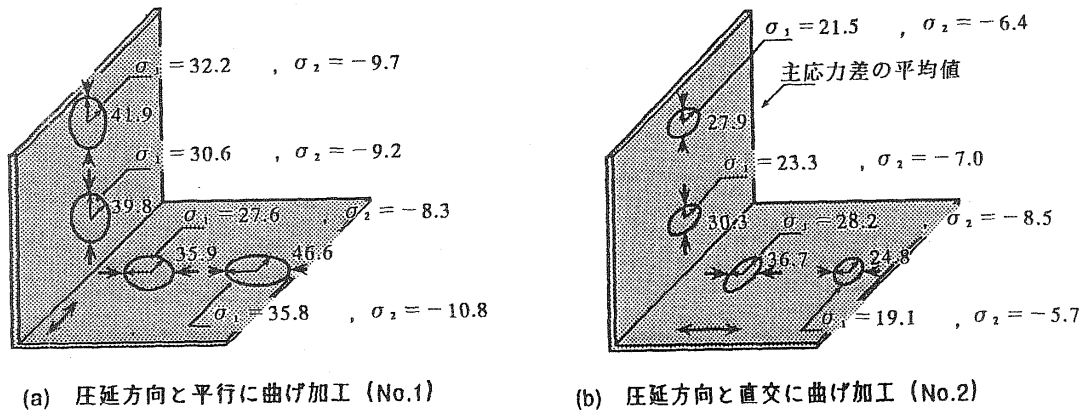


図 11 曲げ加工を施した鋼板の主応力分布 ($I_1 = 10$ [mA], $f = 1$ [kHz], 主応力差の平均値 ξ ($y = 0, 3, 5, 8$) を使用, \longleftrightarrow : 圧延方向, \rightarrow : 曲げ加工による圧縮応力, 単位 : [MPa])

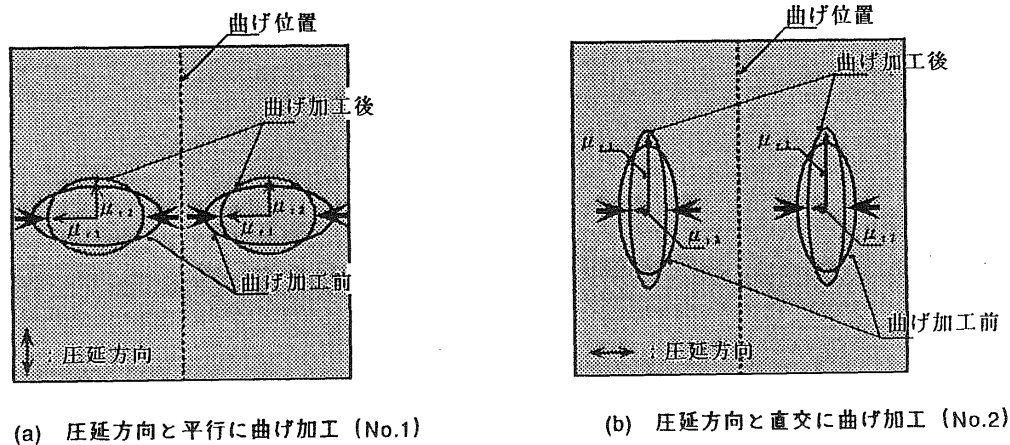


図 12 比透磁率の変化の様子 (◀: 圧縮応力)

図12に、曲げ加工前後における比透磁率の様子を示した。このように、(a)の平行に曲げ加工を施した鋼板と(b)の直交に曲げ加工を施した鋼板とでは、比透磁率の変化の様子が異なっている。曲げ加工後において、(a)では、主軸方向の比透磁率 μ_{r1} は小さくなり、(b)では、 μ_{r1} は大きくなった。

以上から、鋼板に曲げ加工を施したことにより、鋼板の内側では曲げ方向と直交に圧縮応力が加わり、残留している様子が分かる。また、曲げ位置に近い点と遠い点を比較すると、近い点の方が圧縮応力がより残留していることが分かる。

5. あとがき

本論文でMASの出力電圧理論式を示し、鋼板内部の応力が測定できることを示した。以下に、明らかとなった事柄をまとめた。

- (1) MASの出力電圧の計算式を導くことにより、出力電圧は主応力差に比例することが明らかとなった。また、鉄のポアソン比を用いることにより、主応力差から主応力に換算することができた。
- (2) 打ち抜きを施した薄板鋼板において、MASを使用して孔の周囲の残留主応力差分布を非破壊的に測定できる。孔の径方向の比透磁率の分布(磁気異方性)が測定で

き、表面(A面)では、引張り応力が、裏面(B面)では圧縮応力が残留していることが非破壊、非接触的に知ることができる。

- (3) プレスによる曲げ加工を施した鋼板において、加工前後に残留主応力差の分布を測定し、曲げ加工の影響を調べた。その結果、曲げ位置に近い点が遠い点に比べ、圧縮応力がより残留している様子をMASによって非破壊的に測定できることを示した。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会:プレス絞り加工,コロナ社,(1994),pp.1-15.
- 2) 田中啓介:「最近の残留応力測定法とその応用」,塑性と加工, Vol.33, No.381,(1992),pp.1107-1112.
- 3) 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」,電学論,Vol.108-D, No.3,(1988),pp.322-329.
- 4) 近角 聡信・橋口 隆吉:物質の磁氣的性質,朝倉書店,(1971),pp.154-179.
- 5) 渥美 光・鈴木 幸三・三ヶ田 賢次:材料力学I,森北出版,(1976),pp.161-162.
- 6) 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,(1981),pp.7-13.
- 7) 脇若 弘之・中山 達夫・平野 孝之・長沢 義明・山田 一:磁気異方性センサの変換理論と鋼板の打ち抜きにより残留した応力分布の測定,電気学会論文誌A, Vol.115A, No.10,(1995),pp.936-942.

* 信州大学工学部 電気電子工学科 教授

** 信州大学工学部 電気電子工学科 助教授