外部磁束密度計測による磁気ひずみ応力測定法における センサの好配置位置*

武 尾 文 雄^{*1}, 坂 真 澄^{*2}

Suitable Position of Sensor for Measurement of Magnetic Flux Density for Determining Stress

Fumio TAKEO^{*3} and Masumi SAKA

^{*3} Hachinohe National College of Technology, 16-1 Uwanotai, Tamonoki, Hachiohe, Aomori, 039-1192 Japan

The position of sensor is required to be effective for measuring magnetic flux density near a specimen in order to determine stress based on the magnetoelastic interaction effect in ferromagnetic materials. The purpose of the present study is to find a suitable area for the measurement. The distribution of two components of magnetic flux density in both directions of stress and thickness of the specimen is measured for various values of stress under low magnetic field. From the results, the suitable area is determined in connection with higher sensitivity to the change in stress and lower influence of error in sensor positioning.

Key Words: Nondestructive Inspection, Iron and Steel, Material Testing, Stress, Magnetoelastic Interaction, Low Magnetic Field, Magnetic Flux Density, Position of Sensor

1. 緒 言

機械・構造物の保全や製造時の信頼性確保において応力評価は不可欠である。各種応力評価法の中で、非破壊評価法であること、残留応力計測に適用できること、および現場への適用性を兼ね備えたものとして磁気ひずみ応力測定法が有望視されている⁽¹⁾。強磁性体では、ひずみが生じることにより磁気特性が大きく変化する⁽¹⁾。この現象は磁気弾性効果⁽¹⁾と呼ばれ、磁気ひずみ応力測定法は同効果を利用したものである。磁気ひずみ応力測定法としてはこれまで、磁気弾性効果による電磁石の磁気抵抗変化を利用したストレステスト⁽²⁾、応力による磁氣的異方性を検出する磁気異方性センサ⁽³⁾⁽⁴⁾や高バイアス磁界下で動作する磁気プローブを用いる方法⁽⁵⁾など、種々の方法が提案されている。

最近、微弱な磁場下での磁気弾性効果による透磁率変化を、空気中の磁束密度変化としてガウスメータを

用いて計測する外部磁束密度計測法が提案され⁽⁶⁾、応力-透磁率関係の定量評価⁽⁷⁾やその周波数依存性⁽⁸⁾が報告されている。外部磁束密度計測法では現象変化の検出に、特性が巻き方などによって影響を受けやすいコイルを用いないため、検出システムに依存しない応力評価が可能となる⁽⁶⁾。

ところで磁気弾性効果により被検査体の透磁率が変化した場合、周辺空間における磁束密度の応力方向・板厚方向各成分の変化を考えると、応力の増加に対して増加傾向を示す領域や逆に減少傾向を示す領域が存在するものと推測される。また変化の大きさも、位置により異なっているものと考えられる。外部磁束密度計測法により応力評価を行う場合、応力の変化が磁束密度変化に強く反映する場所で計測すれば、感度を向上させることができる。一方、励磁電磁石の磁極近傍では磁束密度が急激に大きくなっているものと考えられ、センサ位置の微少なずれによっても計測される磁束密度の値が大きく異なり、応力計測に悪影響を及ぼすことが考えられる。

このように外部磁束密度計測法におけるセンサ位置の最適設定はいまだ検討されるに至っていないが、感度や計測誤差の点から高度化を図る上で不可欠な課題である。また文献(6)～(8)では、励磁電磁石に対し

* 原稿受付 1998 年 12 月 4 日。

^{*1} 正員、八戸工業高等専門学校(☎ 039-1192 八戸市田面本字上野平 16-1)。

^{*2} 正員、東北大学大学院工学研究科(☎ 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01)。

E mail: takeo m@hachinohe-ct.ac.jp

て被検査体の裏面側における応力方向成分および表面側における板厚方向成分の磁束密度が計測されているが、実用上は表面側からのみの計測が望ましく、その可能性についての検討も重要である。

以上にかんがみ、本報では、平板試験片に対し種々の応力下で表・裏両側の空気中における磁束密度分布を計測することにより、応力感度(応力の一定量変化による磁束密度の変化率)の分布を明らかにした。またセンサ位置のずれが磁束密度の計測値に及ぼす影響を考察し、応力感度との関係から片側からのみの計測の可能性も含め、最適センサ位置について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片 本実験では、計測値に及ぼす試験機等の環境の影響を極力除くことを考慮し、荷重試験機との接続部と計測部(試験片長手方向中央部)が離れるよう、図1に示す長い平板試験片を用いた。また試験片材料には、強磁性体であるニッケルクロムモリブデン鋼(JIS G 4103 SNCM 439)材を用い、焼なましにより加工ひずみを除去した後、実験に供した。

2.2 実験装置および方法 励磁周波数と励磁用電磁石への供給電流の実効値を設定した状態で、平板試験片の長手方向に一様応力 σ をかけた。次に、試験片板幅方向に一方交流消磁を行った後、消磁用電磁

Fig. 1 Specimen geometry

Fig. 2 Measuring system

石を取り除き、応力下における試験片近傍の空気中の磁束密度分布を計測した。本計測を σ の種々の値について行った。

図2に実験装置の構成を示す。板幅方向の中心線上に原点を有する直交座標系 x, y, z を図2のように導入する。計測はすべて $x=0$ の面内で行った。励磁用電磁石には、コの字形のフェライトコアに直径0.2 mmのホルマル線を500回巻いたものを用い、アクリル樹脂製のスペーサを挟むことにより試験片表面からのリフトオフ δ を設定した。発振器より周波数200 Hz、電流の実効値10 mAの交流を励磁電磁石に供給することにより試験片応力方向に磁場を発生させた。空気中の磁束密度の計測にはフルスケール 1.0×10^{-4} Tのレンジを有するガウスメータを用いた。図3にセンサであるガウスメータのプロープ先端の形状・寸法を示す。センサの向きを変えることにより磁束密度の応力方向成分 B_y および板厚方向成分 B_z を計測した。センサの位置決めには最小0.01 mmの目盛り付二軸ステージを用いた。図2に示すように磁束密度を計測する空間を四つに区分し、それぞれ領域0, 1, 2, 3と呼ぶことにする。本実験では、これまでの報告^{(6)~(8)}と条件を同一にするためリフトオフ δ を1 mmとした。しかし磁極直下の領域0については、プローブの厚さが1 mmであることから磁束密度の分布を計測することは不可能である。したがって領域0については δ を2 mmとし、 B_z のみを計測した。

材料の磁氣的性質は、応力履歴および磁化履歴によることが知られている⁽¹⁾。そこで実験では上記のごとく弱い励磁磁場を利用した。これにより試験片内部での磁束密度は初透磁率範囲にあると考えられ、試験片の磁氣的性質に対する磁化履歴の影響は無視できる。さらに試験片に応力を負荷した後、試験片板幅方向に一方交流消磁を行うことにより、試験片の磁氣的性質に対する応力履歴の影響をも除去した。交流消磁は積層けい素鋼板に直径1.6 mmのホルマル線を100回巻いた電磁石を用い、周波数50 Hzで、電流を15 Aから徐々に減少することにより行った。図4に交流消磁用電磁石の形状を示す。

Fig. 3 The size of the sensor

図5に引張試験の概略を示す。試験片板厚方向に一樣応力が作用するよう、試験片ピン穴部に図1に示すような段差を設け、ピンと試験片ピン穴の接触面積を小さくした。さらに試験片両面に貼ったひずみゲージにより、両面のひずみが等しいことを確認した。与えた負荷応力は0~200 MPaの範囲(弾性限内)である。

3. 実験結果および考察

3.1 磁束密度の分布 図6~8に $\sigma=0$ MPaにおける磁束密度の分布を示す。図6および図7は $\delta=1$ mmの場合の B_y , B_z の分布である。格子の交点が計測点である。表面側の領域1および2においては, B_y , B_z ともに磁極の角部付近で急激に大きくなっている。これにより、磁極の角部付近で磁束密度を計測する場合、センサの位置がわずかにずれても計測値に

Fig. 4 Demagnetizing system

Fig. 5 Tensile test

Fig. 6 Distribution of B_y ($\sigma=0$ MPa, $\delta=1$ mm)

大きな変化をもたらされることになる。また領域2の B_y は全体的に大きい値をとっており、電磁石内の空間において磁極から磁極へ直接流れる磁束が多いことが現れている。これに対し裏面側の領域3では、試験片を通過した磁束のみが検出されるため、磁束密度の大きさは表面側の約10分の1程度になっている。 B_y と B_z を比較すると B_y のほうが値が大きい。 B_z では磁極の裏側部分に磁束密度のピークが見られる。 B_y , B_z のいずれにおいても、表面側の磁極角部付近のように急激に変化する部分は見られない。図8は $\delta=2$ mmとして計測した領域0を含む B_z の分布を表している。磁極と試験片にはさまれた空間である領域0では、磁極の厚さの中央部付近で B_z がピークを示している。同ピーク付近では、磁極の角部に近い空間の中では例外的に、センサ位置のずれが計測値に及ぼす影響が小さくなっているものと推測される。

3.2 応力変化に対する磁束密度変化 図9~12に領域0~3における応力と磁束密度の関係の一例を示す。 $\sigma=0$ MPaおよび200 MPaにおいては3~4回、その他の応力においては2回の計測結果を示している。領域1および2において、センサの位置や角度の誤差によるものと思われるデータのばらつきがやや見られるが、全体的には文献(6)~(8)で述べられているように、 $\sigma=40$ MPa付近を境に2本の直線で近似される関係になっていることが確認できる。また領域2の B_y および領域3の B_y , B_z は、応力の増加に対

Fig. 7 Distribution of B_z ($\sigma=0$ MPa, $\delta=1$ mm)

Fig. 8 Distribution of B_z ($\sigma=0$ MPa, $\delta=2$ mm)

して減少する傾向を示している。

3・3 応力感度 応力を感度よく計測するということは、応力がある一定量変化したときに検出される信号の変化が大きいということである。外部磁束密度計測法において、ガウスメータにより空気中の磁束密度を計測する場合、計測する磁束密度の大きさに応じた適切なレンジを選択することが必要である。本実験で使用したようなガウスメータでは、計測値を指示計に表示するほかに、選択したレンジのフルスケールをある一定電圧値とするアナログ出力端子を有するものが多く、磁束密度の値は同端子からの出力電圧を換算することにより求められる。したがって応力が一定量

変化した場合、ある計測点における磁束密度変化に対応して同端子から得られる電圧変化量は、使用するレンジによって異なることになるが、いかなるレンジを有するかは機器固有の問題である。よってここでは、レンジ選択の基準となる磁束密度そのものの大きさに対する、磁束密度変化量の割合によって感度を評価することにする。すなわち、感度を $S_{st} = (B_{200} - B_0)/B_0$ と定義する。ここに B_0 , B_{200} はそれぞれ $\sigma = 0$ MPa および 200 MPa における磁束密度を表す。 S_{st} はその計測位置における $\sigma = 0$ MPa から 200 MPa までの平均磁束密度変化率を表す量であり、途中の変化は考慮していない。図 13, 14 に領域 1, 2, 3 における B_y ,

Fig. 9 Relations between B_z and σ ($\delta = 2$ mm, Area 0)

Fig. 12 Relations of B_y and B_z with σ ($\delta = 1$ mm, Area 3)

Fig. 10 Relations of B_y and B_z with σ ($\delta = 1$ mm, Area 1)

Fig. 11 Relations of B_y and B_z with σ ($\delta = 1$ mm, Area 2)

Fig. 13 Distribution of S_{st} (B_y , $\delta = 1$ mm)

Fig. 14 Distribution of S_{st} (B_z , $\delta = 1$ mm)

B_z それぞれの S_{st} の分布を、図15に領域0における B_z の S_{st} の分布を示す。 S_{st} の値が負になっているのは、応力が大きくなるにつれて磁束密度が減少することを表しており、感度は S_{st} の絶対値で評価できる。表面側と裏面側を比べると裏面側では B_y 、 B_z ともに減少傾向を示しており、感度が大きく、特に B_y について④、 B_z について⑤、⑥付近が大きい、これに対し表面側では全体的に感度が小さいが、その中では B_z について①付近で増加傾向、 B_y について②、③付近で減少傾向がみられ、ともに感度が比較的大きい。領域0では、磁束密度の値自体がかなり大きいこともあり感度は小さい。

3.4 センサの位置決め誤差の影響と最適位置

センサを設置しようとしている目的位置と、実際に設置された位置との微小なずれをセンサの位置決め誤差と呼ぶことにする。応力測定にあたり、センサの位置決め誤差によって計測される磁束密度の値が大きく影響されると、応力の評価値に直接大きな誤差が含まれることになる。したがって適切なセンサ位置としては、感度が高いばかりではなくセンサの位置決め誤差の影響が小さいことが条件となる。本報では、センサの位置決め誤差の影響について検討するにあたり、 $E_p = \Delta B_p / B_0$ で定義する位置決め誤差率 E_p を用いることにする。ここに ΔB_p は、 $\sigma = 0$ MPaにおいて、ある計測位置で計測した磁束密度とそこから y, z 各方向に ± 1 mm ずれた位置で計測した磁束密度の差(絶対値)の最大値である。実際には、隣接する計測点における磁束密度との差を、その計測点までの距離で除し、1 mm 当りに換算して求めた。したがって E_p は、センサが設置しようとしている正しい位置から1 mm ずれたときに生じ得る磁束密度の変動率を簡便に表した量である。なおセンサの位置決め誤差としては、 E_p のほかにセンサの方向を設定する際に生じる角度誤差がある。同誤差の影響は、センサの感受面と磁束線のなす角が小さい場合に大きくなるが、ここで

Fig. 15 Distribution of S_{st} in Area 0 (B_z , $\delta = 2$ mm)

は E_p のみを考慮する。

図16に、計測した各点の E_p と S_{st} の関係を示す。計測に適するセンサ位置は、感度が大きく、位置決め誤差率が小さい点であるから、図の左上または左下に位置することになる。また図16の丸付数字は図13~15のものと対応する。図16より、裏面側の領域3では感度が大きいばかりでなく位置決め誤差率も小さく、センサ位置に適していることがわかる。これに対し表面側の領域では、領域0の⑦において位置決め誤差率が小さいものの感度も小さいなど、二つの条件を同時に満たす計測位置は見出せない。したがって裏面側での計測が困難な場合に表面側からのみの計測を行うとすれば、表面側の中では感度が大きく、位置決め誤差率も比較的小さい①付近が適切であると判断される。また②、③付近は減少傾向を示しており、感度が大きく、位置決め誤差率も比較的小さいため、これらの点との比をとることにより、さらに若干の感度の向上が期待できる。いずれにせよ表面側で計測を行う場合には、センサの位置決めには十分注意を払う必要があることがわかる。

4. 結 言

平板試験片について種々の応力下で試験片周辺空間の磁束密度分布を計測し、外部磁束密度計測による磁気ひずみ応力測定法における最適センサ位置について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 裏面側の領域3では、 B_y 、 B_z ともに感度が大きく、さらにセンサの位置決め誤差率も小さいので、センサ位置として適切である。
- (2) 表面側の領域では、裏面側に比べて全体的に感度が小さくセンサの位置決め誤差の影響も大きい。

Fig. 16 Relation between S_{st} and E_p

よって表面側の領域で計測を行う場合には、センサの位置決めに十分注意する必要がある。

(3) 裏面側での計測が不可能で、表面側のみでの計測を行う場合には、領域1の電磁石および試験片から離れた部分の B_z が感度および位置決め誤差率の点から有利である。

(4) 応力の増加に対し、領域3の B_y , B_z , および領域1, 2の B_y の一部では、磁束密度が減少する。

最後に、ご指導をいただいた東北大学阿部博之総長に感謝の意を表する。また本研究の一部は、文部省科学研究費補助金〔基盤研究(A)(2):08555021, 基盤研究(A)(1):08305003〕によったことを記す。

文 献

- (1) 河田孝三・ほか35名, 最新応力・ひずみ測定・評価技術, (1992), 171-195, 総合技術センター.
- (2) 吉永昭男・ほか4名, 非破壊検査, **37**-9(1988), 730-736.
- (3) 磯野敏雄・安福精一, 非破壊検査, **38**-3(1989), 253-256.
- (4) 柏谷賢治・坂本博, 非破壊検査, **38**-8(1989), 677-681.
- (5) Utsunomiya, T., ほか2名, *NDT & E Int.*, **24**-2(1991), 91-94.
- (6) 関口謙一郎・ほか3名, 機論, **59**-567, A(1993), 2659-2665.
- (7) 関口謙一郎・ほか2名, 機論, **60**-575, A(1994), 1617-1623.
- (8) 坂真澄・ほか2名, 機論, **63**-606, A(1997), 358-363.