漏洩磁束測定による金属材料の弾塑性変形評価

Evaluation of Elastic-Plastic Deformation of Metal by Magnetic Flux Leakage Measurement

安部 正高^{*1}(正員), 松本 英治^{*1}(正員)

Masataka ABE (Mem.), Eiji MATSUMOTO (Mem.)

This study intends to assess elastic and plastic deformation of carbon steel (SS400) and austenitic stainless steel (SUS304) by measuring magnetic flux leakage near a specimen surface using a hall sensor with high sensitivity and high spatial resolution. We measure the tangential components of Magnetic Flux Leakage near the specimen surface under residual magnetization condition. In the results, it is confirmed the MFL signal shows characteristic trend with respect to the elastic and plastic deformation. Furthermore, it is shown that the distribution of plastic deformation and residual stress can be estimated by MFL distribution.

Keywords: magnetic flux leakage, elastic deformation, plastic deformation, SS400, SUS304, NDE.

1 緒言

強磁性体の磁化的特性と力学的特性との相互作用は磁気弾性結合効果と呼ばれ、磁歪や応力磁化効果などが知られている[1]。この磁気弾性結合効果は磁性体中の磁区構造が磁気エネルギーや磁気弾性エネルギーを小さくするように変化することに起因する。この効果によって、応力負荷で弾性変形した磁性材料の磁化特性が変化することを利用し、磁気的な測定によって応力評価を行う手法が多く研究・開発されている[2-4]。また、強磁性体の磁化特性は塑性変形にも強く依存することが知られている。これは、塑性変形によって増殖した転位による磁壁のピン止め効果の増加や、転位周辺での磁気モーメントの乱れに起因する。この性質を利用して塑性変形や疲労損傷などを磁気的に評価する手法についても盛んに研究されている[5]。

一方で、各種機械構造物の構造材料として炭素鋼とともに広く用いられているステンレス鋼のうち、SUS304 鋼や SUS316 鋼などのオーステナイト系ステンレス鋼は一般に非磁性とされているが、応力負荷や塑性変形、疲労によって磁性を持つマルテンサイト相が生成することが知られている。このことを利用して、磁気的にオーステナイト系ステンレス鋼材の探傷、ならびに塑性変形や疲労の評価を行う手法の研究が進められている[6,7]。

一般に、磁気的评价手法においては、材料の磁気特性を直接測定することが望ましいが、測定対象からのサンプリングや加工が必要であり、現場での非破壊的な評価を行う際には問題となる。また、塑性変形の局所的な分布などを評価することは難しい。他方で、弾塑性変形やマルテンサイト相の生成によって材料中の磁気特性が不連続となる場合、その周辺では磁束の変化が生じると考えられる。そこで本研究では、塑性変形や残留応力にとりなう材料中の磁気特性の非均一な分布を材料表面近傍の空間磁場（漏洩磁束）として間接的に測定することで、塑性変形や応力の分布を評価することを試みた。材料としては低炭素鋼の SS400 鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 鋼を対象とした。まず、弾性域の引張応力に対する漏洩磁束密度の変化を測定し、その傾向を調べた。続いて、塑性域まで引張応力を負荷・除荷し、残留ひずみを有する試験片について同様に漏洩磁束密度を測定し、残留ひずみとの相関を調べた。この際、大規模地震などにより大変形を生じた構造部材の評価への応用も念頭に入れて、5%程度までの残留ひずみについての相関を調べた。最後に、局所的に応力集中を生じる試験片について塑性域の引張応力を負荷・除荷し、残留ひずみ分布を有する試験片について漏洩磁束密度を測定し、その分布から残留ひずみおよび残留応力分布を推定した。

2 実験方法

2.1 試験片

今回の実験には SS400 鋼および SUS304 鋼を使用し

連絡先： 安部 正高, 〒606-8501 京都市左京区吉田本町,
京都大学大学院エネルギー科学研究科
e-mail: abe@energy.kyoto-u.ac.jp

^{*1} 京都大学大学院エネルギー科学研究科

た。Table 1 に使用した SS400 鋼と SUS304 鋼について引張試験を行って得た機械特性の一部を示す。まず、弾性域の引張応力を負荷した状態で漏洩磁束測定を行うための弾性域測定用試験片として、Fig. 1 の形状の試験片を SS400 鋼 (E 試験片) については 3 本, SUS304 鋼 (SE 試験片) については 1 本作成した。また、塑性域までの引張応力を負荷・除荷し、残留ひずみを有する塑性域測定用試験片として、Fig. 2 に示す試験片を SS400 鋼 (P 試験片) と SUS304 鋼 (SP 試験片) について作成した。塑性域測定用試験片は、塑性変形が確実に試験片中央部で発生し、かつある程度一様に変形するように緩やかな R をつけた形状とした。塑性域測定用試験片は Table 2 に示すように、SS400 鋼 (P 試験片) においては各試験片において最大ひずみが 1.25%, 2.50%, 3.75%, 5.00% となるように、SUS304 鋼 (SP 試験片) においては各試験片において最大ひずみが

Fig. 1 Specimen for elastic region measurement.

Fig. 2 Specimen for plastic region measurement.

Fig. 3 SS400 stress concentration type specimen.

Fig. 4 SUS304 stress concentration type specimen.

1.00%, 2.00%, 3.00%, 4.00% となるように引張荷重を与えた後に除荷し、異なる残留ひずみを生じさせた試験片をそれぞれ複数本用意した。最後に、弾性域および塑性域測定用試験片により得た基礎データをもとに、実際に残留ひずみや残留応力の分布を評価するための試験片として、Fig. 3 および Fig. 4 に示す応力集中型試験片を作成した。Fig. 3 は SS400 鋼 (D 試験片), Fig. 4 は SUS304 鋼 (SD 試験片) の試験片形状である。Table 3 に示すように D 試験片は、応力集中部における最大ひずみが 3.00% および 5.00% になるように引張荷重を与えた後に除荷したものと、形状の影響の有無を検証するために引張荷重を加えない試験片も 1 つ用意した。一方、SD 型試験片は、応力集中部における最大ひずみが 3.00% となるように引張荷重を与えた後に除荷したもののみ用意した。

Table 1 Mechanical properties of SS400 and SUS304.

	SS400	SUS304
Yield stress	327MPa	660MPa
/0.2% proof stress		
Young's modules	209GPa	191GPa

Table 2 Maximum and residual strain of specimen for plastic region measurement.

Specimen No	Max. strain	Residual strain
P-1	0.0125	0.0111
P-2	0.0250	0.0232
P-3	0.0375	0.0353
P-4	0.0500	0.0476
P-5	0.0125	0.0109
P-6	0.0250	0.0232
P-7	0.0375	0.0353
P-8	0.0500	0.0476
P-9	0.0125	0.0109
P-10	0.0250	0.0231
P-11	0.0375	0.0358
P-12	0.0500	0.0476
SP-1	0.0100	0.0059
SP-2	0.0200	0.0155
SP-3	0.0300	0.0252
SP-4	0.0400	0.0351

Table 3 Maximum and residual strain of stress concentration type specimen.

Specimen No.	Max. strain	Residual strain
D-1	0	0
D-2	0.0300	0.0284
D-3	0.0500	0.0477

2.2 測定方法

測定機器の概略図を Fig. 5 に示す。試験片は島津製作所製万能試験機（オートグラフ AG-50KE）に固定されており、COMS 製 3 軸ステージ（RAP-3）に固定された磁気センサプローブを走査することで試験片表面近傍の磁束密度を測定する。磁気センサプローブの反対側には消磁および着磁の際に住友通商社製電磁石（特注品、2000 巻）を設置する。試験片は測定毎に消磁および着磁を行う。試験片の磁化は直流磁化とし、残留磁化状態での漏洩磁束の測定を行った。磁化方向は試験片長手方向で、磁化電流値は 3(A) である。磁気センサには電子磁気工業社製ホールセンサ（T-550）を用い、同社製ガウスメータ（GM-5005）とアジレント社製デジタルマルチメータ（34970A）を通してパソコンに値を取り込む。本センサのエレメント部は $50\mu\text{m}$ 角と空間分解能が高く、 $\pm 4(\text{T})$ の広い測定レンジと $10^{-7}(\text{T})$ の高感度を併せ持っている。測定する磁束密度成分は試験片表面に対して接線方向成分（長手方向）とした。測定範囲は、弾性域および塑性域測定用試験片については、試験片の片面中央部 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の領域を、応力集中型試験片の測定においては、片面中央部 $10\text{mm} \times 60\text{mm}$ の領域を測定した。すべての測定において、測定間隔は 1mm 、リフトオフは 0.5mm で統一した。弾性域の引張応力を負荷した状態での測定において、SS400 鋼では公称応力 0MPa から 200MPa まで 20MPa 毎の各応力を引張試験機で負荷しながら測定を行った。また、SUS304 鋼では 0MPa から 250MPa まで 25MPa 毎の各応力を引張試験機で負荷しながら測定を行った。

3 実験結果と考察

3.1 弾性域

Fig.6 と Fig.7 に SS400 鋼と SUS304 鋼の弾性域の各引張応力下において測定された漏洩磁束密度分布の一

Fig. 5 Experimental system.

例を示す。また、Fig. 8 と Fig. 9 には各材料の測定領域内の平均値を応力に対してプロットしたものを示す。Fig. 8, Fig. 9 において(a)には測定前に行った消磁操作後の測定値を、(b)には測定値そのものを、(c)には(a)の消磁操作後の測定値を差し引いた値（消磁基準補正值）の結果を示した。これは、環境磁場やセンサのドリフトの影響を取り除くためのひとつの方法である。Fig. 8 に示すように、SS400 鋼においては引張応力の増加とともに漏洩磁束は一度減少してから再び増加する傾向があることがわかった。我々の研究室では SS400

Fig. 6 Distribution of magnetic flux density under tensile stress (SS400).

Fig. 7 Distribution of magnetic flux density under tensile stress (SUS304).

鋼は引張応力の増加とともに残留磁束密度と透磁率がともに減少傾向を示すことを別途実験により確認している[8]。透磁率の減少は漏洩磁束の増加要因ともなるため、この二つの要因が重ね合わさった効果が表れたと考えることもできる。あるいは、鉄系材料では、磁場や応力の増大とともに磁気弾性結合効果の符号が変わる（ビラリー反転）効果が知られており、この影響の可能性もある。いずれにしても、このような傾向のメカニズムを解明することは重要な課題である。

一方、Fig. 9(b)を見ると、SUS304 鋼においては測定値自体は引張応力の増加とともにやや減少する傾向があるが、Fig. 9(c)のように、消磁基準補正值では逆に引張応力の増加とともに漏洩磁束密度は増加する傾向が見て取れる。ここで、各測定値の絶対値を見ると、一

般的な SUS304 鋼の磁性から考えると、ともに非常に大きな値となっている。また、Fig. 9(a)に示した消磁操作を行った後の漏洩磁束密度値は負値で、かつ引張応力の増加と共にその絶対値はほぼ線形に増加している。まず、大きな測定値を示した理由は、試験片加工時の加工誘起マルテンサイトの生成などによると考えられる。また、消磁操作後においても大きな漏洩磁束密度を示す理由のひとつは、試験片の消磁が十分に行えなかったことが考えられる。SUS304 鋼試験片の全体的な透磁率は SS400 鋼などと比べて非常に小さいため、消磁時に試験片と電磁石とで十分な磁気回路を形成できず、試験片内で不均一な磁場分布が発生したことが考えられる。また、表面近傍の薄い磁性層がシートマグネットのように複雑な自発磁化分布を生じ、そのために通常の消磁操作では十分な消磁が行えなかった可

(a) After demagnetization

(b) Non-adjusted

(c) Adjusted (demagnetization base)

Fig. 8 Mean value of MFL density (SS400).

(a) After demagnetization

(b) Non-adjusted

(c) Adjusted (demagnetization base)

Fig. 9 Mean value of MFL density (SUS304).

能性もある。さらに、応力に対して線形に変化している点については、マルテンサイト相における磁気弾性結合効果の影響ではないかと考えられる。このような特殊な磁気的特性の影響の有無と程度を明らかにするには、熱処理などによる表面の加工誘起マルテンサイト相の除去を行った試験片を使用することが望ましい。このように、SUS304 鋼のようなオーステナイト系ステンレス鋼について、漏洩磁束測定によって応力や塑性変形を評価する場合には、SS400 鋼と異なり独自の問題、課題が存在する。

3.2 塑性域

Fig. 10 および Fig. 11 にはそれぞれ、P-1～P-4 試験片

Fig. 10 Mean value of MFL density (SS400).

Fig. 11 Mean value of MFL density (SUS304).

および SP-1～SP-4 の測定結果を例示した。また、弾性域の場合と同様、Fig. 12 と Fig. 13 に SS400 鋼と SUS304 鋼の各残留ひずみを有する試験片の漏洩磁束密度の測定領域内の平均値を示した。Fig. 12 より、SS400 鋼においては特定の試験片 (図中黒丸および黒三角で表記) を除くと、漏洩磁束密度の平均値は残留ひずみによらずほぼ一定となっていることがわかる。また、その値は弾性域に比べて非常に大きい。P-1 試験片については局所的な塑性変形による影響が大きかったと考えられる。目視によってすべり線が測定部下部 (Fig. 10(a) の縦軸-3mm～5mm) に集中しているのも確認している。

Fig. 12 Mean value of MFL density of P specimen (SS400).

(a) Non-adjusted

(b) Adjusted (demagnetization base)

Fig. 13 Mean value of MFL density of SP specimen (SUS304).

これは、最大引張ひずみ 1.25% 付近ではまだ降伏途中であり、全体が均一に塑性変形していないためである。また、P-11 試験片については、試験片作成時の引張試験データが他の試験片と異なる傾向を示していることを確認しており、引張試験の不良もしくは異なる塑性変形分布を生じている可能性が高い。

一方、Fig. 13(a)からわかるように、SUS304 鋼においては残留ひずみの増加とともに漏洩磁束密度は増加する傾向が見られたが、Fig. 13(b)に示すように消磁状態を基準とした補正を施すと、SS400 鋼と同様に漏洩磁束密度の平均値は残留ひずみによらずほぼ一定となっている。ただし、両者ともに弾性域と比較すると大き

な値を示している。これは、塑性変形によるマルテンサイト相の生成に対応していると考えられ、両者の値の違いは前述のように今回行った消磁操作で消磁しきれなかった残留磁化の増加に対応すると考えられる。

3.3 残留ひずみ・残留応力分布

Fig. 14 に、SS400 鋼の応力集中型試験片 (D 試験片) に塑性域の応力を負荷・除荷した後に測定した漏洩磁束密度分布を示した。Fig. 14(a)は無荷重状態 (D-1 試験片)、Fig. 14(b)は最大引張ひずみ 3% (D-2 試験片)、Fig. 14(c)は最大引張ひずみ 5% (D-3 試験片) の場合の測定結果である。また、Fig. 15 には各試験片の中央線に沿った漏洩磁束密度分布を、Fig. 16 には測定領域内の漏洩磁束密度の平均値を示した。Fig. 14 および Fig. 15 からわかるように、中央部に塑性変形を有する D-2、D-3 試験片ではいずれも漏洩磁束密度が中央で最大となっており、その値は最大ひずみによらずほぼ等しい。D-2 試験片では、中央部以外の周囲で無荷重の試験片 (D-1 試験片) よりも低い漏洩磁束密度となっている。これは、中央部以外では塑性変形が生じておらず、かつ弾性域の測定結果より、引張の残留応力による効果と考えられる。また、D-3 試験片では、広い範囲で漏

Fig. 14 MFL distribution of D specimen (SS400).

Fig. 15 MFL distribution on midline of D specimen.

Fig. 16 Mean value of MFL density.

Fig. 17 MFL distribution of SD specimen (SUS304).

Fig. 18 MFL distribution on midline of SD specimen.

洩磁束密度が高くなっている。試験片作成時の引張試験結果より、D-3 試験片では降伏現象が段階的に複数回起こっており、測定領域内において全体的に塑性変形していると考えられる。一方、無荷重の試験片 D-1 も中央部で漏洩磁束密度が若干増加しているが、試験片の R 部において試験片を通過する磁束が増大している効果であると考えられる。これらの結果を踏まえ Fig. 16 をみると、中央周辺部の引張残留応力による漏洩磁束密度の若干の低下にもかかわらず、中央部を中心とした塑性変形や圧縮残留応力分布による漏洩磁束密度の増大が、測定領域内での平均値の増大をもたらしていると説明できる。つまり、測定領域内での磁束密度の平均値を取ることによって、残留応力分布の影響は軽減され、測定領域内に占める塑性変形部の割合を推測できると考えられる。このことから、測定領域内での平均的な塑性変形の程度についても推測可能ではないかと考えられる。以上のように、SS400 鋼においては、漏洩磁束測定によって塑性変形や残留応力の分布、およびその程度を推定することが可能であることが示された。

他方、Fig. 17 に、SUS304 鋼の応力集中型試験片 (SD 試験片) に塑性域の応力を負荷・除荷した後に測定した漏洩磁束密度分布を示した。また、Fig. 18 は試験片中央線に沿った漏洩磁束密度分布である。これらの結果から、漏洩磁束密度は測定領域両端で最も大きな値を示しており、試験片中央に向かうにつれて減少、中央の塑性変形部で小さなピークを示していることがわかる。測定領域両端で大きな磁束密度を示しているのは、前節で述べたように、着磁時に試験片と電磁石とで十分な磁気回路を形成できないために、試験片中で不均一な磁場がかかり、磁極近傍がより強く磁化されたためであると考えられる。一方で、測定値の絶対値をみると、試験片中央部では 0.6 (T) 程度で、その周辺部では 0.56 (T) 程度の値となっている。これは、前節までの測定結果を踏まえると、中央部では塑性変形時の平均的な値であり、周辺部では弾性域の平均的な値をとっていることがわかる。このように SUS304 鋼では、試験片および測定環境の影響が大きいものの、塑性変形の有無およびその分布を確認することが可能であることが示された。

4 結言

本研究では、SS400 鋼と SUS304 鋼を対象として、材料表面近傍の漏洩磁束を測定することで、塑性変形

や応力の分布を評価することを試みた。

SS400 鋼については、

- 1) 弾性域の引張応力の増大とともに漏洩磁束密度はいったん減少した後にやや増加する。このメカニズムの詳細は明らかではないが、ビラリー反転効果の影響などが考えられる。
- 2) 残留ひずみの程度によらず漏洩磁束密度はほぼ一定の値となった。ただし、その値は弾性域のものと比較すると非常に大きい。
- 3) 測定される漏洩磁束密度分布から塑性変形部および残留応力の分布を推定することが可能であることを確認した。また、その漏洩磁束密度の平均値から、測定領域においてどの程度塑性変形が進行しているかを推測できる可能性を確認した。

続いて、SUS304 鋼については、

- 1) 弾性域の引張応力の増大とともに漏洩磁束密度は減少する傾向がある。しかし、消磁状態を基準とした補正を施すと、逆に応力の増加とともに漏洩磁束密度は増加する傾向があることがわかった。
- 2) 残留ひずみが増加すると漏洩磁束密度も増加する傾向が見られた。しかし、消磁状態を基準とした補正を施すと、残留ひずみの程度によらず漏洩磁束密度はほぼ一定となった。
- 3) 上述のように、消磁状態を基準とした補正を施した場合、元の測定値と傾向が異なるのは、試験片と電磁石とで十分な磁気回路を形成することができず、不均一な磁場下で適切な消磁および着磁が出来なかったためであると考えられる。SUS304 鋼にはこのような材料特有の問題が存在し、試験条件についての十分な検討が必要であることがわかった。
- 4) 測定される漏洩磁束密度分布から、塑性変形部の分布を推定することが可能であることを確認した。

といった知見を得た。今後は、材料に適した着磁方法や測定条件について検討するとともに基礎データを蓄積し、続いて実際に過負荷による大変形を生じた部材の残留応力や残留ひずみの分布、ならびに疲労損傷の評価など、実機での評価を通して本手法の有効性の検証をおこなっていきたい。

(2012 年 10 月 1 日受付, 2013 年 2 月 27 日再受付)

参考文献

- [1] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, Van Nostrand, 1951.
- [2] 山崎ら, 磁歪特性を利用した軟鋼の非破壊残留応力測定, 日本機械学会論文集 A, Vol. 63, pp. 1489-1494, 1997.
- [3] 関口ら, 外部磁束密度計測による強磁性鋼の応力-透磁率関係の定量評価, 日本機械学会論文集 A, Vol. 60, pp.1617-1623, 1994.
- [4] 山崎ら, 引張荷重負荷時の磁化特性に着目した構造材の劣化評価, 日本応用磁気学会誌, Vol. 23, No. 4-2, pp. 9-17, 2001.
- [5] 高橋, 磁気と塑性—非破壊検査への応用, 日本 AEM 学会誌, Vol. 9, No. 2, pp. 9-17, 2001.
- [6] 中曽根ら, マルテンサイト変態を利用した電磁的材料劣化評価, 日本 AEM 学会誌, Vol. 9, No. 2, pp. 123-130, 2001.
- [7] 槌田ら, 磁気センサによる SUS304 系鋼・SUS316 系鋼の歪および曲げ疲労評価, 非破壊検査, Vol. 57, No. 9, pp. 433-436, 2008.
- [8] 渡邊, 低炭素鋼の磁化特性を利用した応力・塑性変形・疲労の評価, 京都大学大学院エネルギー科学研究科修士学位論文, 2013.