軟鋼における磁歪特性の応力依存性*

山崎 友裕^{*1}, 山本 真史^{*2}
平尾 雅彦^{*1}, 福岡 秀和^{*3}

Stress Effect on Magnetostriction of Low Carbon Steel

Tomohiro YAMASAKI, Shinji YAMAMOTO,
Masahiko HIRAO and Hidekazu FUKUOKA

Magnetostriction curves of low-carbon steel were measured while applying a magnetic field, either parallel or perpendicular to the uniaxial applied stress. When ferromagnetic steels are magnetized, dimensional change occurs, which is called magnetostriction. As the magnetic field strength increases, domain wall movement first occurs, causing an increase in magnetostriction, and followed by rotation of domain magnetization, which reduces magnetostriction. The magnetostriction then shows the maximum with the applied field for which the rotation of domain magnetization starts to occur. The maximum value indicates the amount of domain wall movement, which depends on the domain structure in the demagnetized state. The stress application also affects the domain structure through the magnetoelastic interaction. Considering the internal energy, it is predicted that the maximum magnetostriction parallel to the magnetic field increases when the field is either parallel to the compressive stress or perpendicular to the tensile stress. This is potentially useful for nondestructive stress measurement. In this study, the maximum magnetostriction was measured as a function of the applied stress for low-carbon steel, the result of which confirmed the above prediction.

Key Words: Iron and Steel, Experimental Stress Analysis, Nondestructive Inspection, Magnetostriction, Magnetoelastic Interaction

1. はじめに

構造物部材に広く用いられている軟鋼の非破壊応力測定法の一つとして、磁気を用いる方法⁽¹⁾が研究されている。著者らは、磁場と超音波の相互作用を用いる方法⁽²⁾⁽³⁾、非履歴透磁率の異方性を用いる方法⁽⁴⁾について検討し、無応力状態での測定を行うことなく応力評価が可能であり、残留応力の非破壊評価に有効であることを確認してきた。これらの方法は、強磁性体である軟鋼に応力が負荷されると磁歪の逆効果⁽⁵⁾により内部の磁区構造が変化することを、磁氣的性質、超音波の音速・振幅の変化として間接的に測定するものである。

強磁性体を磁化すると、磁化方向に磁歪と呼ばれるひずみが発生する。軟鋼の磁化は、低磁場領域ではおもに磁壁移動により進行し、高磁場領域では磁区磁化の回転が支配的になる。磁壁移動では伸びの磁歪が発生するが、磁区磁化の回転が始まると磁歪は減少するため、磁歪曲線は極大値を示す。極大値は磁区磁化の

回転が起こるまでの磁壁移動の量に依存するため、応力によって消磁状態での磁区構造が変化すると、それに伴って極大値および極大値が現れる磁場の強度は変化する。この磁気弾性効果を利用すると非破壊的に応力を評価できる。

本研究では、より高精度な応力測定法の確立を目的とし、従来の方法の基礎となる磁歪そのものに着目した。単軸負荷応力下で軟鋼試験片に応力方向あるいは応力に垂直な方向の磁場を与え、磁歪曲線を磁化方向および磁化垂直方向について測定した。極大磁歪を与える磁場強度を正確に測定することは困難であるが、極大値は容易に高精度測定が行える。よって、ここでは磁歪の極大値と応力、磁化方向との関係を明らかにし、非破壊応力測定の可能性について検討した。

2. 磁歪の応力依存性

磁歪の応力依存性は、強磁性体の内部エネルギー⁽⁶⁾を考えることにより定性的に説明することができる。ここでは外部磁場、応力による磁区構造の変化について簡単に説明する。

2.1 外部磁場による磁区構造の変化 多結晶構造をもつ軟鋼のそれぞれの結晶粒は、多数の磁区と呼ばれる領域に分割されている。鉄(α -Fe)の原子は電子

* 原稿受付 1995年6月21日。

^{*1} 正員, 大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-3)。^{*2} 学生員, 大阪大学大学院。^{*3} 正員, 奈良工業高等専門学校 (〒639-11 奈良県大和郡山田市矢田町22)。

のスピンのため原子磁石とみなすことができ、磁区の内部ではすべての原子のスピンの向きがそろっている。消磁状態あるいは弱い磁場のもとでは、磁気異方性エネルギーを最小にするため磁区の磁化方向は結晶軸と平行な6方向(<100>方向)のいずれかと一致している。このとき、それぞれの磁区で結晶格子は磁化方向にわずかな自発的な伸びを生じている。消磁状態では磁区の磁化方向はこれらの6方向にランダムに分布しており、試料全体として磁化も伸びも生じない。

外部磁場が与えられると、磁気エネルギーは外部磁場と平行な磁区で最小、反平行な磁区で最大となる。その結果、図1に示すように磁区と磁区との境界である磁壁が移動し、磁化が進行する。磁場に平行な磁区と垂直な磁区とを隔てる90°磁壁が通過した部分に着目すると、自発的なひずみの方向が磁場に垂直な方向から平行な方向へと変化するため、巨視的に磁歪と呼ばれるひずみが発生する。

外部磁場と結晶軸とが平行ではない場合、図2に示すようにまず磁壁移動により外部磁場の方向に最も近い磁区の体積が増加し、その後磁区磁化の方向が外部磁場の方向に回転する。磁壁移動が磁区磁化の回転よりさきに起こるのは、磁壁移動では磁気異方性エネルギーは変化しないのに対し、磁区磁化の回転は磁気異方性エネルギーを増加させるためである。磁区磁化の回転が起こり、磁区の磁化方向が<100>方向からずれると自発的なひずみが減少するため磁歪は減少し、磁歪は極大値を示す。極大値の大きさは、外部磁場の方向に最も近い磁区とそれらと垂直な磁区とを隔てている90°磁壁が消磁状態から磁区磁化の回転が起こるまでの間に移動する量に依存する。

Fig. 1 Domain reorientation by external magnetic field

Fig. 2 Domain reorientation and rotation of domain magnetization

一般の多結晶体では、それぞれの結晶粒で結晶方位に依存して図1あるいは図2で示した過程で磁化が進行し、各結晶粒の磁歪の平均が巨視的な磁歪となる。磁歪は磁化初期にはすべての結晶粒で磁壁移動が起こるために増加するが、磁区磁化の回転が起こる結晶粒が増加すると減少しはじめる。磁歪の極大値を与える磁場は、磁化がおもに磁壁移動により進行する領域と磁区の回転が支配的である領域との境界とみなせる。

2・2 応力による磁区構造の変化 軌鋼に応力を負荷すると、磁気弾性エネルギーは引張応力に平行あるいは圧縮応力に垂直な磁区で最小になる。これらの磁区の体積が増加するように磁壁が移動する結果(図3)、弾性ひずみに加えて磁歪が発生し、見掛け上の弾性定数が低下する ΔE 効果⁽⁵⁾が現れる。ただし、引張応力に平行である互いに反対向きの磁区、あるいは圧縮応力に垂直な面内方向のすべての磁区の体積が増加するため、外部に磁化は現れない。

2・3 応力による磁歪極大値の変化 応力により磁区構造が変化している状態に外部磁場が与えられると、無応力状態と比較して90°磁壁の移動量が異なるために磁歪の極大値が変化する。

まず、引張応力が負荷されている状態で応力に平行に外部磁場を与える場合を考える。外部磁場による磁化とともに磁場方向の磁区の体積が増加するが、応力により外部磁場と平行、反平行な磁区の体積がすでに増加している。これらの磁区では自発的なひずみの方向が等しいため、これらの磁区を隔てる180°磁壁の移動は磁歪を発生させない。磁場と垂直な磁区の体積が減少しているため、磁歪を発生させる90°の磁壁の移動量は無応力状態より少なく、磁歪の極大値は減少する。

圧縮応力に平行に磁化する場合、消磁状態では磁場に垂直な磁区の体積は増加し、平行な磁区の体積は減少している。そのため90°磁壁の移動量は無応力状態よりも多く、磁歪の極大値は増加する。

Fig. 3 Stress-induced domain reorientation

応力に垂直に磁化する場合も同様に考察すると、磁歪の極大値は、引張応力に平行あるいは圧縮応力に垂直に磁化する場合は減少し、圧縮応力に平行あるいは引張応力に垂直に磁化する場合は増加することが予想される。

3. 実験方法

試料として、軟鋼(SS 400)圧延板から切り出した引張りおよび圧縮試験片を用いた。引張試験片は平行部長さ 145 mm、幅 35 mm、圧縮試験片は高さ 30 mm、幅 25 mm であり、板厚はともに 11 mm である。圧延により生じた磁気的な異方性の影響を調べるため、受領材から圧延方向および圧延直角方向に切り出した試験片を用意した。これらを試験片 R、試験片 T と呼ぶ。熱処理による微視的組織変化の影響をみるため、焼なまし材(880°C, 1 h)から圧延方向に切り出した試験片も用意した。これを試験片 HR と呼ぶ。試験片の化学組成、機械的性質を表 1 と表 2 に示す。

測定装置の概略を図 4 に示す。万能試験機により試験片に単軸応力を負荷し、各負荷状態で交流消磁を行った後に磁場の強度を増加させながら磁歪曲線を測定した。交流消磁を行うのはヒステリシスの影響を除く

ためである。残留応力測定時など応力発生前の状態での消磁が行えない場合への本法の適用を想定し、応力負荷後に消磁した。

外部磁場は電磁石(巻数 3 960, 磁極寸法 80 mm×15 mm, 磁極間距離 35 mm)によって与え、磁場の強度は電磁石に与える直流電流を制御することにより変化させた。磁化条件によっては磁極片を用い、試験片あるいは磁極片に巻いたサーチコイルと磁束計により磁束密度を測定した。電磁石あるいは磁極片を試験片に直接接触させると、表面粗さなどに起因する磁極と試験片との接触状態のわずかな変化が磁束密度の測定値に影響を及ぼすことが考えられる。さらに電磁石と試験片とで閉じた磁気回路が形成されるため外部に磁極が現れず、残留磁化が大きくなり消磁が困難になることが考えられる。そのため、磁極と試験片との間に厚さ約 0.1 mm の非磁性材料をはさんだ。

10^{-5} オーダの微小な磁歪を精度よく測定するため、半導体ひずみゲージ(ゲージ率約-100)を用いた。二軸ゲージを用い、磁化方向および垂直方向の磁歪を測定した。曲げの影響を避けるため、ゲージは試験片中央部の表裏両面に貼り付けた。

変位制御型の試験機を用いているため、磁歪が発生すると応力が変化することが考えられるが、磁歪と同じ大きさの弾性ひずみに相当する応力が数 MPa であること、試験片の中央部付近だけで磁歪を発生させていることから、磁歪による応力変化は十分小さく無視することができる。

4. 実験結果および検討

4.1 磁歪曲線の再現性 図 5 に無応力状態で引張試験片 R を幅方向に磁化し、磁化方向の磁歪曲線を

Table 1 Chemical compositions (mass %) of specimens

C	Si	Mn	P	S
0.012	0.22	0.99	0.015	0.004

Table 2 Mechanical properties of specimen

	Young's Modulus E GPa	Poisson's ratio ν	Yield stress MPa
Specimen R	208	0.290	310
Specimen HR	209	0.284	260

Fig. 4 Block diagram of experimental setup

Fig. 5 Reproducibility of magnetostriction measurement

3回測定した結果を示す。図5から、磁歪測定の再現性は極大値にして約 0.4×10^{-6} である。

4・2 磁歪曲線の応力による変化 図6に試験片Rを引張応力に平行に磁化した場合の磁歪曲線を示す。図6(a)、(b)はそれぞれ磁化方向、磁化に垂直な方向の磁歪を示している。図6(a)からわかるように、引張応力の増加とともに磁化方向の磁歪の極大値は減少し、さらに応力の値が大きくなると磁歪曲線は単調に減少して極大値を示さなくなる。これは、応力による磁壁移動のために正の磁歪の原因となる 90° 磁壁が減少し、磁歪を生じない 180° 磁壁の移動や負の磁歪を生じる磁区磁化の回転が支配的になるためである。極大値の現れる磁束密度も応力とともにわずかに変化しているが、用いるサーチコイルが磁化条件により異なるため、ここでは磁歪の極大値だけに着目する。

本研究で与えたような飽和磁化に至るまでの磁場に対しては、体積変化を伴わないジュール磁歪だけが発

生し、体積磁歪は無視することができる⁽⁶⁾。すなわち等方性の材料であれば磁化垂直方向の磁歪は磁化方向の磁歪の $-1/2$ となる。図6(b)における磁歪の値および応力による磁歪の変化量は図6(a)の $-1/2$ 程度である。したがって、ここでは磁化方向の磁歪について検討する。

図7から図9にそれぞれ引張応力に垂直、圧縮応力に平行、圧縮応力に垂直に磁化した場合の磁化方向の磁歪曲線を示す。図6から図9において、2章での推測どおり、応力に平行に磁化する場合には極大値は引張応力の増加とともに減少し、圧縮応力の増加とともに増加している。応力と垂直に磁化する場合には逆の傾向が得られている。

4・3 磁気異方性および熱処理の影響 図10、11にそれぞれ応力と平行、垂直に磁化した場合について3種類の試験片で得られた極大値の変化を示す。それぞれ3回ずつの測定結果の平均値を示している。無応力状態からの変化量が引張りと圧縮応力とで異なっ

(a) Magnetostriction in magnetization direction

(b) Magnetostriction normal to magnetization

Fig. 6 Magnetostriction curves of specimen R under tensile stress

Fig. 7 Magnetostriction of specimen R magnetized perpendicular to tensile stress

Fig. 8 Magnetostriction of specimen R magnetized parallel to compressive stress

いるが、これは応力による磁区構造の変化が異なる、すなわち引張応力負荷時には応力方向の磁区だけが増加するが、圧縮応力に対しては応力に垂直な面内のすべての磁区の体積が増加するためである。また、図 10, 11 で圧縮試験の結果と引張試験の結果との間に不連続がみられるが、磁化方向によっては試験片が磁極片から応力を受け、わずかに弾性変形を生じるためと考えられる。

図 10 と図 11 より、試験片 R と試験片 T の結果の差は圧縮応力に垂直に磁化する場合を除くと小さく、応力に換算してたかだか 30 MPa 程度である。したがって磁歪の極大値を用いて応力を評価する場合、圧延など製造工程で生じた巨視的な磁気異方性の効果は無視できるといえる。

試験片 R と試験片 HR の結果を比較すると、応力の効果は試験片 HR のほうが大きい。これは焼なましにより磁壁移動の妨げとなる転位の密度が低下し、応

力による磁壁移動が起こりやすいためである。焼なましによる内部組織変化の影響は 50 MPa 以上の応力に相当する場合もあるため、応力測定においては測定対象と材質および熱処理が同じ試験片を用いて図 10, 11 のような較正曲線を測定する必要がある。

4・4 磁歪の極大値を用いた応力測定法 4・3 節で示したように、磁歪の極大値の応力依存性は巨視的な磁気異方性の影響が小さい。そのため、残留応力の測定など応力発生前の測定が行えないような場合にも、応力を受けた状態での磁歪曲線の測定だけから完全に非破壊的に応力を測定できる可能性がある。ここでは、本研究の結果を利用して単軸応力を評価する方法について検討する。

2 章での考察から、応力と平行な方向で磁歪の極大値は最大あるいは最小となることが考えられる。したがって応力の方向が未知である場合は、磁化方向を回転させることによってあらゆる方向の磁歪曲線を測定すれば、極大値が最大となる方向に圧縮応力あるいは最小となる方向に引張応力が働いていると推定することができる。

まず最大の極大値に相当する応力を図 10 より圧縮応力、図 11 から引張応力について推定する。次に圧縮応力については図 11, 引張応力については図 10 において、推定された応力値に相当する極大値と測定された最小の極大値とを比較し、それらの差が小さいほうを応力の評価値とする。

材質および熱処理が試験片 HR と同じ測定対象について、仮にある方向で極大値の最大値 12×10^{-6} 、垂直な方向で最小値 0.5×10^{-6} が得られたとする。最大値に相当する応力を求めると、図 12(a) に実線で示すように最大値が得られた方向に 100 MPa の圧縮応力、

Fig. 9 Magnetostriction of specimen R magnetized normal to compressive stress

Fig. 10 Maximum magnetostriction for magnetization parallel to stress

Fig. 11 Maximum magnetostriction for magnetization normal to stress

Fig. 12 Maximum magnetostriction of specimen HR

あるいは図 12(b)に破線で示すように最小値の方向に 20 MPa の引張応力が働いていると推定できる。それぞれの応力に相当する最小の極大値を求めて測定値と比較すると、100 MPa の圧縮応力については図 12(b)に実線で示すように測定された最小値とよい一致を示すが、20 MPa の引張応力については図 12(a)に破線で示すように差が大きいことがわかる。したがってこの場合は 100 MPa の圧縮応力が最大値の極大値を示す方向に働いていると評価できる。

測定の再現性を考慮すると、応力の評価精度は引張り、圧縮の場合ともに 30 MPa 程度であると考えられる。

5. 結 論

軟鋼(SS 400)試験片の磁歪曲線を単軸負荷応力下で測定し、以下の結果を得た。

(1) 磁歪の絶対値および応力による磁歪の変化量は、磁化方向の磁歪のほうが磁化垂直方向の磁歪より大きい。このことは、本研究で与えた磁場では体積変化を伴わないジュール磁歪だけが発生し、ほぼ等方性とみなせる材料では磁化垂直方向の磁歪が磁化方向の磁歪の $-1/2$ になることと一致する。

(2) 応力に平行に磁化する場合、磁化方向の磁歪の極大値は引張応力とともに減少し、圧縮応力とともに

に増加する。応力に垂直に磁化する場合は逆の傾向が得られる。

(3) 圧延により生じる巨視的な磁気異方性が磁歪の極大値の応力依存性に与える影響は無視できる。そのため、磁歪の極大値を測定することにより未知の方向の残留応力を完全に非破壊的に評価できる可能性がある。

(4) 磁歪の極大値を用いて応力を測定する場合、熱処理による内部組織の変化は考慮する必要がある。すなわち、被測定物と同じ材質、同じ熱処理の試験片で得られた較正曲線を用いる必要がある。

実験において、当時本学学生の大石孝一郎君の協力が得られたことに感謝する。

文 献

- (1) Jiles, D. C., *NDT Intl.*, 21-5(1988), 311-319.
- (2) 山崎友裕・平尾雅彦・福岡秀和, 機論, 56-532, A(1990), 2573-2580.
- (3) 山崎友裕・江畑賢一・元江正史・福岡秀和, 機論, 60-573, A(1994), 1280-1287.
- (4) 山崎友裕・池田正一・福岡秀和, 機論, 60-571, A(1994), 777-783.
- (5) 近角聰信, 強磁性体の物理(下), (1984), 1, 裳華房.
- (6) Cullity, B. D., *Introduction to Magnetic Materials*, (1972), 248, Addison-Wesley.