磁歪を用いた軟鋼の非破壊応力測定における塑性変形の影響*

山崎 友裕^{*1}, 九鬼 洋^{*2}
金子 浩^{*3}, 平尾 雅彦^{*4}

Effect of Plastic Deformation on Magnetostriction of Steel

Tomohiro YAMASAKI^{*5}, Hiroshi KUKI,
Hiroshi KANEKO and Masahiko HIRAO^{*5} Osaka City University, Dept. of Intelligent Materials Engineering,
Sugimoto, Sumiyoshi, Osaka, Osaka, 558-8585 Japan

Magnetostriction curves were measured for plastically deformed steel specimens at various levels of applied stress. It is known that the plastic deformation changes the elastic and magnetic properties, which induces the significant error in the nondestructive stress evaluation by ultrasonics and magnetics. We have already proved that the maximum value in the magnetostriction curve can be used in the nondestructive residual stress measurement in elastically deformed steel. In this study, to reveal the applicability of the maximum magnetostriction method to plastically deformed samples, we measured the stress dependence of the maximum magnetostriction for plastically elongated specimens. It was predicted that the residual compressive stress was introduced in the deformation direction at the surface of the specimen. The evaluated stresses were compared with those by some other methods, showing that the magnetic anisotropy supports the results by the maximum magnetostriction method.

Key Words: Iron and Steel, Experimental Stress Analysis, Residual Stress, Magnetostriction, Magnetoelastic Interaction, Plastic Deformation

1. はじめに

材料の磁気的性質が応力によって変化することを利用する応力測定法⁽¹⁾は、測定対象が強磁性体に限定されるが、構造材料として広く用いられている軟鋼が強磁性体であることや測定が簡便であることから適用範囲は広く、現場での測定に適している。著者らは外部磁場による超音波の音速⁽²⁾・振幅⁽³⁾の変化、非履歴透磁率⁽⁴⁾、磁歪の最大値⁽⁵⁾を用いた応力測定法を提案し、残留応力の測定に適用できることを示してきた。

軟鋼を磁化すると磁歪⁽⁶⁾と呼ばれるひずみが生じる。磁化方向の磁歪は磁化初期に増加した後減少する。磁歪の最大値を用いる方法とは、磁歪曲線に現れる最大値(以下、最大磁歪と呼ぶ)を測定し、あらかじめ負荷試験により求めておいた較正曲線と比較して応力値を評価するものであり、高精度な測定が困難である磁場の値を必要とせず、用いる装置に依存しない測

定が行えるといった特長を有している。

溶接時の熱により発生する残留応力など、不均一な塑性変形の結果残留応力が発生する場合がある。塑性変形に伴い材料の磁気的性質は変化⁽⁷⁾し、応力測定時の誤差の原因となる。最大磁歪法を一般の残留応力測定に用いるためには、塑性変形の影響について明らかにしておく必要がある。著者らが溶接板の残留応力測定⁽⁸⁾を行った結果、最大磁歪法の結果と切断により残留応力を解放する破壊的な方法の結果とが溶接線近傍においても比較的よく一致したことから、最大磁歪法は塑性変形の影響を受けにくいものと期待される。

本研究では、単軸引張荷重により塑性変形させた軟鋼試験片について弾性限度以下の負荷応力下で磁歪曲線を測定し、応力測定に用いる較正曲線が塑性変形とともにどのように変化するか確認した。また、磁化方向の磁歪だけでなく磁化垂直方向の磁歪も応力測定に利用できることを示した。さらに、較正曲線の変化が塑性変形により生じる表面近傍の圧縮残留応力⁽⁹⁾の影響であると推定されることを示し、残留応力と塑性変形量との関係を明らかにした。X線法、磁気異方性法、試験片を切断して残留応力を解放する方法により求められる残留応力値と比較することにより、上記の推定の妥当性について検討した。

* 原稿受付 1999年3月10日。

^{*1} 正員、大阪市立大学工学部 (☎ 558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)。^{*2} (株)村田製作所 (☎ 520 2393 滋賀県野洲郡野洲町大字大篠原2288)。^{*3} 大阪大学学部生 (☎ 560-8531 豊中市待兼山町1-3)。^{*4} 正員、大阪大学大学院基礎工学研究科。

E-mail: yamasaki@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

2. 最大磁歪を用いた応力測定法

ここではまず磁歪を利用した応力測定法の原理について説明する。

2.1 磁歪曲線 軟鋼中のそれぞれの結晶粒は原子のスピンの向きがそろった磁区と呼ばれる領域に分割されている。消磁状態において磁区の磁化方向は結晶軸方向〈100〉のいずれかと一致しており、6種類の磁区がランダムに分布しているため全体としての磁化は現れない。外部磁場が与えられると磁区と磁区との境界である磁壁が移動し、外部磁場に最も近い磁化を持つ磁区の体積が増加する。それぞれの磁区では磁化方向に結晶格子がわずかに伸びていることから、磁壁移動による磁区構造変化の結果、材料全体として磁化方向に正のひずみが現れる。このひずみは磁歪と呼ばれる。このとき、磁化に垂直な方向には負のひずみが現れるが、以下簡単のため横磁歪と呼ぶ。磁壁移動がほぼ完了して結晶粒全体が一つの磁区で占められると、磁区の磁化方向が外部磁場の方向に回転し、磁歪が減少する。

2.2 磁歪の応力依存性 軟鋼に応力が負荷されると、磁壁移動により引張応力に平行あるいは圧縮応力に垂直に磁化した磁区の体積が増加する。互いに逆向きの磁区の体積が同様に増加するため、全体としての磁化は現れないが、弾性ひずみと同符号の磁歪が生じる。消磁状態での磁区構造が変化する場合、磁歪曲線は図1に示すように変化する。

2.3 応力測定の手順 非破壊応力測定は以下の手順により行うことができる。

あらかじめ測定対象と同じ材質の試験片の負荷試験

により最大磁歪と応力の関係を図2のように求めておき、応力測定における較正曲線とする。較正曲線の形状を考慮すると、測定点において最大磁歪が最大となる方向は主応力軸の一つであり、応力はその方向に平行な圧縮応力あるいは垂直な引張応力と推定できる。主応力軸方向の互いに垂直な磁化に対して得られた最大磁歪を較正曲線と比較することにより応力値を評価することができる。

著者らは、この方法は材料の製造過程で生じる集合組織などによる磁気異方性の影響を受けにくい⁽⁵⁾ことを確認しており、溶接板の残留応力測定においては溶接線近傍でも破壊的に求めた応力との差が50 MPa以下であった⁽⁸⁾。不均一な塑性変形が起こると残留応力が発生することを考慮すると、塑性変形により図2の較正曲線がどのように変化するかを調べておくことは重要である。

3. 塑性変形に伴う較正曲線の変化

3.1 試験片 ここでは試料としてSM 490 Aの軟鋼圧延板から切り出した引張試験片を用いた。化学組成を表1に示す。試験片は長さ350 mm、幅39 mmで、測定部の板厚11 mm、長さ150 mmである。つかみ部から塑性変形が進行することを避けるため、つかみ部の板厚を16 mmとした。

試験片は負荷方向が圧延方向であるもの(試験片R)、圧延直角方向であるもの(試験片T)、完全焼なまし(900℃×1 h, FC)した材料から圧延方向に切り出したもの(試験片HR)の3種類を2本ずつ用意した。

3.2 実験方法 試験片に油圧式万能試験機により段階的に引張塑性変形を与え、それぞれの塑性変形量に対して電気式試験機による負荷応力のもとで磁歪

Fig. 1 Magnetostriction curves for magnetization parallel to tension

Fig. 2 Master curves for stress evaluation

曲線を測定した。外部磁場は電磁石によって長手方向あるいは幅方向に与え、電磁石に流す電流をパーソナルコンピュータにより調整して磁場の強さを制御した。磁歪の測定は試験片中央に貼付した二軸半導体ひずみゲージを用いて行い、表裏の平均値をとった。残留磁化の影響を除くためにまず試験片を交流消磁し、磁場の強度を段階的に増加させながら各磁場に対して長手方向、幅方向の磁歪を測定した。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of specimens

Chemical compositions (mass %)					Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)
C	Si	Mn	P	S		
0.16	0.35	1.43	0.018	0.003	418	548

(a) Magnetization parallel to stress

(b) Magnetization perpendicular to stress

Fig. 3 Maximum magnetostriction of elongated specimens

3.3 実験結果および検討 試験片 R-2 について、各塑性変形量に対する最大磁歪と応力との関係を図 3 に示す。塑性変形により較正曲線が大きく変化することがわかる。塑性変形の進行とともに、応力に平行に磁化する場合には最大磁歪は増加し、垂直に磁化する場合は最大磁歪が減少しており、この傾向はいずれの試験片についても同様であった。

塑性変形により較正曲線が変化するのであれば、塑性変形した領域では応力評価ができないことになる。ところが、図 3 の結果のうち塑性ひずみ ε_p が 0.48% 以上の結果を図 4 に示すように平行移動させると塑性変形前の曲線に連続的につなげることができる。ただし平行移動の量は同じ塑性変形量に対しては図 4(a), (b) で等しくしている。このことから、塑性変形により表面近傍に圧縮の残留応力が発生した⁽⁹⁾ のものと推定した。ただし、塑性ひずみが小さい場合には変形が

(a) Magnetization parallel to stress

(b) Magnetization perpendicular to stress

Fig. 4 Shift of master curves

不均一であることが試験片表面の観察から確認されており、そのため較正曲線の形状が塑性変形前の較正曲線とは異なると考えられる。

試験片 R-2 に 0.3% の塑性ひずみを与えた時の無応力状態での磁歪曲線を図 5 に示す。長手方向に磁化した場合の磁歪曲線に注目すると、幅方向の磁歪すなわち横磁歪は磁化方向の磁歪と符号が逆で絶対値がほぼ 1/2 になっており、本研究で与えている磁場では体積磁歪が零であることを考慮すると板厚方向の磁歪は幅方向の磁歪とほぼ等しいと推定される。幅方向に磁化した場合には、磁化方向の磁歪には最大値が現れているにもかかわらず、横磁歪は単調増加している。これらのことは、後に述べるように長手方向に圧縮応力が負荷された場合の傾向と一致している。

応力方向の磁歪と応力に垂直な方向の磁歪の較正曲線が交差するときの磁歪および応力値を図 6 に示す。

(a) Magnetization parallel to elongation

(b) Magnetization normal to stress

Fig. 5 Magnetostriction curves after 0.3% elongation

較正曲線が交差するときの磁歪が塑性変形量に依存せずほぼ一定であることから、図 6(b) の応力が負荷された状態が塑性変形前の等方的な状態になっているといえる。このことから塑性変形の方に圧縮残留応力が発生していると考えられる。

試験片 R-1, T-1, HR-1 に約 10% の塑性ひずみを与えた後に応力除去焼なまし ($600^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ h}$, FC) を施し、最大磁歪の応力依存性を調べた結果を図 7 に示す。較正曲線が交差する応力値が 20 MPa 以下になっており、較正曲線の変化の原因が残留応力であるという推論を支持している。これらの試験片にさらに試験片 HR と同様の完全焼なましを施した場合の較正曲線を図 8 に示す。いずれの試験片についても試験片 HR の塑性変形前の較正曲線とほぼ一致しており、較正曲線は無応力状態で交差している。

(a) Maximum magnetostriction of isotropic state

(b) Stress shift

Fig. 6 Effect of elongation on magnetostrictive properties

以上のことから、塑性変形とともに試験片表面には圧縮残留応力が発生し、最大磁歪法では残留応力と負荷応力の和が得られていると考えられる。

4. 塑性変形による残留応力の評価

3章では塑性変形により試験片表面近傍に圧縮の残留応力が発生していることを磁歪の応力依存性から推定した。ここでは横磁歪についても詳細に検討し、さらに試験片の切断により残留応力を解放する破壊的な方法により残留応力を測定した。

4.1 試験片 試料として3章の試験片HRと同一のもの(試験片HR-3)、表2に示す化学組成および機械的性質の完全焼なましを施した軟鋼(SM 490 A)圧延板から切り出した引張試験片4本(試験片HR-4~7)および圧縮試験片を用いた。引張試験片はいずれも3.1節と同じ形状で、圧延方向に切り出した。圧縮試験片の形状は39 mm×39 mm×11 mmである。

4.2 実験方法 引張りおよび圧縮応力負荷試験において磁歪曲線を測定した。ここでは横磁歪にも着目し、磁歪曲線に現れる最小値と応力との関係も求めた。引張試験片については塑性ひずみを与え、3章と同様に較正曲線の変化から残留応力値を推定した。

試験片HR-3については塑性変形前後に以下の条件で $\sin^2 \phi$ 法によりX線応力測定を行った。

- ・装置：ストレインフレックス PSPC/MSF-2 M(理学電機工業)
- ・測定法：並傾法/ ϕ_0 一定法
- ・照射面積：1×4 mm²(測定方法×直角方向)
- ・特性X線：CrK α
- ・測定回折面： α -Fe(211)
- ・入射角(ϕ_0)：0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 deg

Fig. 7 Master curves after stress relief annealing

- ・回折角決定法：半価幅法
- ・応力定数： $-318 \text{ MPa} \cdot \text{deg}^{-1}$

試験片HR-6, 7については塑性変形前後に磁気異方性の応力依存性を測定し、較正曲線の移動量から残留応力を評価した。用いた磁気異方性センサの磁極間距離は磁化用、検出用ともに14 mmであり、測定周波数は100 Hzである。

すべての試験片について塑性変形後に試験片両面の測定点に二軸抵抗線ひずみゲージを貼付し、ゲージ近傍で試験片を切断した後さらに深さ1 mmの位置に表面と平行な幅0.2 mmのスリットを入れて残留応力を解放した。加工による残留応力の発生を避けるため、切断はワイヤカットにより行った。塑性変形による残留応力を長さ方向の主応力 σ_1 と幅方向の主応力 σ_2 をもつ平面応力状態と考え、長さ方向および幅方向に解放されたひずみ ε_1 , ε_2 から式(1)を用いて評価した。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -E(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)/(1-\nu^2) \\ \sigma_2 &= -E(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)/(1-\nu^2) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 E , ν はそれぞれヤング率(=210 GPa)、ポアソン比(=0.3)であり、負の符号は ε_1 , ε_2 が解放されるひずみであることによる。

4.3 較正曲線 塑性変形前の試験片についての較正曲線を図9に示す。応力に平行に磁化する場合には磁化に垂直な面内は等方的になるため、応力の符号

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of specimens

Chemical compositions (mass %)					Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)
C	Si	Mn	P	S		
0.16	0.35	1.41	0.015	0.002	380	529

Fig. 8 Master curves after full annealing

Table 3 Results of residual stress evaluation

Specimen	HR-3		HR-4		HR-5		HR-6		HR-7	
Elongation	1.6%		3.0%		1.5%		2.9%		1.5%	
Stress	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
Magnetostriction	-115		-150		-110		-143		-115	
X-ray	16	21								
Magnetic anisotropy							-140		-110	
Stress relief	-90	-60	-151	-109	-158	-120	-91	-85	-98	-106

(a) Maximum magnetostriction

(a) Maximum magnetostriction

(b) Minimum magnetostriction

Fig. 9 Master curves

によらず最小磁歪の絶対値は最大磁歪のほぼ 1/2 になっている。図 9(b) からわかるように圧縮応力に垂直に磁化する場合は横磁歪は最小値をとらず、図 5(b) の結果が長手方向の圧縮応力が働いていることを示しているといえる。

先に述べたように、図 9(a) の較正曲線だけをを用い

(b) Minimum magnetostriction

Fig. 10 Master curves of specimen HR-4 after 3% elongation

て応力の方向、大きさを評価することができる。ところが、パイプなど測定物表面に曲率がある場合には周方向に半導体ゲージを貼付することは困難であり、軸方向の最大磁歪の測定からだけでは 100 MPa 以上の引張応力の評価は不可能である。また、測定物によっ

ては一方方向にしか磁場をかけられない場合も考えられる。このような場合にも横磁歪の最小値も測定し、図9(b)の較正曲線と比較することにより応力評価が可能になる。

4・4 残留応力の評価 図10に3.0%の塑性ひずみを与えた試験片 HR-4 で得られた較正曲線を示す。最大磁歪、最小磁歪ともに約150 MPa で較正曲線が交差しており、残留応力は -150 MPa と推定される。

表3にそれぞれの方法で評価された残留応力を比較して示す。X線法では塑性変形前後でともに200 MPa 程度のほぼ面内等方の圧縮応力が評価されたため、塑性変形前後の応力値の差を示している。最大磁歪法による残留応力値は図6(b)の傾向と一致し、磁気異方性法は最大磁歪法の結果を支持している。ところがX線法では塑性変形後に圧縮応力がわずかに減少するという結果が得られた。切断による応力解放では、長手方向の応力は最大磁歪法とほぼ等しいが、同程度の圧縮応力が幅方向にも働いているという結果が得られた。塑性変形させていない試験片に対してワイヤカットを行った結果、長手方向に -46 MPa、幅方向に -26 MPa の応力が測定された。したがって幅方向の圧縮応力はワイヤカット時の熱の影響ではないといえる。

5. 結 論

最大磁歪を用いた非破壊応力測定法における較正曲線に対する塑性変形の影響を調べた。得られた結果を

以下に示す。

(1) 塑性変形により較正曲線は変化するが、それは残留応力の影響であり、最大磁歪法で得られるのは負荷応力と残留応力の和であると考えられる。

(2) 磁化方向の磁歪曲線に現れる最大磁歪だけでなく、磁化垂直方向に現れる磁歪の最小値も応力評価に利用できる。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金〔基盤研究(A)(1), 課題番号 08305003〕の助成を受けて行ったものである。実験においては当時本学学生であった大野達司君、名定佳記君の協力が得られた。X線応力測定は住友金属テクノロジー(株)の児玉薫氏に、磁気異方性法は住友金属工業(株)の藤澤和夫氏に行っていた。記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Jiles, D. C., *NDT Intl.*, **21**-5(1988), 311-319.
- (2) 山崎友裕・元江正史・福岡秀和, 機論, **60**-571, A(1994), 792-797.
- (3) 山崎友裕・江畑健一・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) 山崎友裕・山本真史・平尾雅彦・福岡秀和, 機論, **62**-594, A(1996), 408-413.
- (6) 近角聰信, 強磁性体の物理(下), (1984), 1, 裳華房.
- (7) Abuku, S., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **16**-7(1977), 1161-1170.
- (8) 山崎友裕・山本真史・平尾雅彦, 機論, **63**-611, A(1997), 1489-1494.
- (9) 平修二・吉岡靖夫, 材料, **12**-123(1963), 852-860.