外部磁場による縦波振幅変化の周波数依存性と 非破壊残留応力測定への適用*

山崎 友裕^{*1}, 江畑 賢一^{*2}
元江 正史^{*3}, 福岡 秀和^{*1}

Frequency Dependence of Magnetically Induced Amplitude Change of Longitudinal Wave and Its Application to Nondestructive Residual Stress Measurement

Tomohiro YAMASAKI, Ken-ichi EBATA,
Masafumi MOTOE and Hidekazu FUKUOKA

Frequency dependence of magnetically induced amplitude change (MIAC) of longitudinal wave is experimentally investigated for JIS-SS41 low-carbon steel. The amplitude of an elastic wave that propagates in a ferromagnetic material is smaller in the demagnetized state than that in the magnetically saturated state, which is the pure elastic state. This occurs because of the existence of magnetoelastic interaction and microscopic eddy current. When an external magnetic field is applied, the amplitude increases accordingly. Since stress causes reorientation of magnetic domains, the MIAC depends on the stress. In this study, effects of stress and frequency on the MIAC are investigated. It is found that the MIAC depends on the stress and that the frequency dependence of the MIAC is affected by the sign of the stress. The results are applied to nondestructive evaluation of the residual stress in a butt-welded specimen.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Iron and Steel, Nondestructive Inspection, Residual Stress, Ultrasonic Wave Amplitude, Magnetoacoustic Interaction

1. はじめに

構造物部材中の残留応力は、時として設計強度以下の応力での破壊の原因となる。そのため、残留応力を非破壊的に評価することは安全性確保のために非常に重要である。現在まで、X線法、音弾性法などが研究され、実際の測定に適用されてきた。超音波の音速が応力によって変化することを利用する音弾性法⁽¹⁾は、X線法と比較して装置が簡便であること、材料内部の応力を測定できることなどの利点がある。ところが応力による音速変化は10MPaの応力に対して 10^{-4} 程度と小さく、集合組織の影響を応力に換算すると降伏応力に相当することもあり、適用範囲が限定される。

強磁性体の弾性的性質が磁氣的性質と密接に関連していることが磁気弾性結合として知られている⁽²⁾。強磁性体中を伝ばする弾性波の音速は、外部磁場が与えられるとわずかに変化し、その変化の様子は応力に依存する。この磁気音響結合を利用した応力測定法が最近

提案された^{(3),(4)}。この方法は、測定対象が強磁性体に限定されるが、音弾性法と同様簡便な装置で測定が可能で、さらに音弾性法で問題となる集合組織の影響を受けにくいという利点がある。

強磁性体中を伝ばする弾性波の音速は、消磁状態では純粋に弾性的な値（以下、純弾性値と呼ぶ）から低下している。これは、弾性波にともなう動的応力により磁壁移動と磁区磁化の回転振動が起こり、弾性ひずみに加えて磁歪が発生し、見かけ上の弾性定数が低下するためである。弾性波の応力による磁壁移動および磁区磁化の回転振動は、微視的かつ動的な磁化の変化とみなすことができる。この動的な磁化の変化は微小渦電流を誘導し、エネルギーの損失が起こる。そのために、弾性波の振幅も純弾性値から低下する。弾性波の応力による磁壁移動、磁区磁化の回転振動は外部磁場、応力によって拘束されるため、音速と同様、振幅も外部磁場によって増加し、外部磁場による振幅変化は応力に依存する。

本研究では、軟鋼(SS41)圧延板試料を用い、外部磁場による縦波振幅変化を測定した。得られた振幅変化の周波数依存性、応力依存性を用い、実際の残留応力の例として突き合わせ溶接板の残留応力を非破壊的に

* 原稿受付 平成5年11月8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, 大阪ガスエンジニアリング(株) (〒537 大阪市東成区中道1-4-2)。

測定した。

2. 外部磁場による振幅変化

鉄などの多結晶強磁性体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。すべての磁区は飽和状態まで磁化しており、鉄の場合、磁化方向にわずかに伸びている。

外部磁場が与えられると、磁区と磁区との境界（磁壁）が移動することによって外部磁場に平行に磁化した磁区の体積が増加し、磁化が進行する。このとき、磁歪と呼ばれるひずみが現れる。

応力が負荷された場合には、引張り応力に平行、あるいは圧縮応力に垂直な磁区の体積が磁壁移動によって増加し、弾性ひずみに加えて磁歪が生じる。磁歪は弾性ひずみと同符号であるため、見かけ上の弾性定数は低下する。

MHz帯域の弾性波の応力のように高周波で変化する応力に対しては、磁壁移動だけでなく、磁区磁化の回転振動が起こる⁽⁵⁾。磁区磁化の回転振動による磁歪も弾性ひずみと同符号であるため、見かけ上の弾性定数、すなわち音速は低下する。

弾性波の応力による磁壁移動および磁区磁化の回転振動は微視的かつ動的な磁化の変化とみなすことができる。磁区の回りには、磁化変化と反対向きの磁場を発生させる向きにマイクロ渦電流が発生する（図1）。マイクロ渦電流に弾性波のエネルギーは消費され、振幅が低下する。

外部磁場は磁区構造を変化させ、弾性波の応力による磁壁移動、磁区磁化の回転振動を拘束するため、外部磁場が与えられると弾性波の振幅は増加する。さらに、応力も磁区構造を変化させ、磁壁移動、磁区磁化の回転振動を拘束するため、外部磁場による弾性波の

図1 ミクロ渦電流

振幅変化は応力に依存する。

3. 実験方法

3・1 試料 試料として、軟鋼 S S 4 1 の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。引張り試験片は平行部長さ145mm、幅35mm、圧縮試験片は30mm×25mmであり、板厚はともに11mmである。試料の化学組成、機械的性質をそれぞれ表1、表2に示す。内部組織の影響を調べるため、長手方向を圧延方向に平行に切り出した試験片（試料R）と垂直に切り出した試験片（試料T）を用意した。さらに、熱処理の影響を調べるため、焼鈍材から長手方向を圧延方向に平行に切り出した試験片（試料HR）も用意した。

表1 化学組成(wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.012	0.22	0.99	0.015	0.004

表2 機械的性質

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

3・2 測定方法 測定装置の概略図を図2に示す。

試験片に万能試験機で単軸応力を負荷し、交流消磁を行った後、外部磁場を変化させながら振幅変化を測定した。

試験片の磁化にはC型の電磁石（巻数3960、磁極間距離35mm）を用い、磁化の方向に応じて磁極に軟鋼製の磁極片を装着した。電磁石に供給する直流電流の値を変化させて磁場の強度を調整し、試験片あるいは磁極片に巻いたサーチコイルと磁束計（横河電機3254）とを用いて磁束密度を測定した。

弾性波の振幅変化の測定には、超広帯域縦波用探触子（Karl Deutsch DS6PB4-14、直径6mm）、パルスレシーバ（日本メック 1050PRJ）、A/D変換ボード（ソニクス STR*8100）を用いた。パルスレシーバにより、送受信兼用の探触子から広帯域パルスが発生させ、試料底面からの多重エコーを観測した。本研究では、多重エコー

図2 測定装置概略図

のうち第1反射波をA/D変換し、離散フーリエ変換により振幅変化を計算した。0.1dB程度の微小な相対振幅変化を測定するため、探触子はサリチル酸フェニルにより試験片に接着した。振幅の分解能を向上させるため、同じ状態での波形を512回取り込み、平均した波形に対して離散フーリエ変換を行った。

測定は、磁場を段階的に増加させながら行い、その後減少させながら行った。試験片の温度変化、探触子の接着状態の変化、残留磁化、磁気余効の影響を除くため、それぞれの磁場での測定の後、電磁石に供給する電流を遮断した状態での振幅を測定し、これらの比として振幅変化を計算した。ヒステリシスの影響を避けるため、それぞれの磁場の回りで減衰しながら振動するバイアス磁場を与えることにより、磁化曲線を非履歴曲線⁽⁶⁾に近づけた。

4. 実験結果

4.1 振幅変化の周波数依存性 図3に、無応力状

図3 無応力時の振幅-磁束密度曲線(試料R)

態で試料Rを圧延方向に平行に磁化した場合の振幅-磁束密度曲線を示す。実験で得られたパルスの帯域が4-12MHz(-6dB)であったため、図には4MHz, 8MHz, 12MHzの結果を示している。試験片内部の磁場を正確に測定するのは困難であるため、図の横軸は磁束密度とした。磁場をかけた状態での磁束密度 B と、その直後に電磁石に供給する電流を0にしたときの磁束密度 $B_{H=0}$ との差を用いることにより、磁束計指示値のドリフトの影響を除いている。縦軸は相対振幅変化、すなわち $20\log(A/A_{H=0})$ を示している。ここで、 A は磁束密度 B における振幅、 $A_{H=0}$ は $B_{H=0}$ における振幅である。測定前の消磁状態での振幅ではなく、 $A_{H=0}$ との振幅比を用いるのは、さきに述べたように試験片の温度変化、残留磁化、磁気余効の影響を除くためである。

図3からわかるように、弾性波の振幅は磁化とともに増加している。このことは、消磁状態では磁気音響結合のため振幅が純弾性値から減少しており、外部磁場による磁化につれて純弾性値に近づくことと一致する。振幅変化が高周波数ほど大きくなっていることから、マイクロ渦電流で消費されるエネルギーは高周波数ほど大きいことがわかる。マイクロ渦電流は微視的な磁化変化によって誘導されるため、その大きさは磁化の時間変化、すなわち磁化変化の大きさと周波数との積で決定される。外部磁場による音速変化は、磁歪の大きさ、すなわち磁化変化の大きさだけに依存するが、低周波数ほど大きい⁽⁷⁾。以上のことから、磁区磁化の変化は高周波数ほど小さくなるが、周波数が2倍になっても1/2までは減少していないといえる。

相対振幅変化は0.1dB程度と非常に微小であるが、本研究では探触子を試験片に接着し、消磁状態での振幅を基準としたため、0.03dB程度の測定精度が得られた。

図4 振幅-磁束密度曲線(引張り応力100MPa)

4・2 磁気音響結合の応力依存性 図4から図7に試料Rを応力方向に磁化した場合について、各応力下での振幅-磁束密度曲線を示す。

図5 振幅-磁束密度曲線（引張り応力200MPa）

図6 振幅-磁束密度曲線（圧縮応力100MPa）

図7 振幅-磁束密度曲線（圧縮応力200MPa）

これらの図から、応力の符号、すなわち引張りか圧縮にかかわらず、応力値が増加すると振幅変化量が減少することがわかる。このことは、応力が磁気構造を変化させ、磁壁移動、磁区磁化の回転振動を拘束することを示している。

振幅変化の周波数依存性に注目すると、引張り応力の場合は圧縮応力の場合より周波数間の差が減少している。本法により応力を評価する場合、引張り応力、圧縮応力ともに振幅変化を減少させるため、ある周波数での振幅変化だけからでは引張りと圧縮との2つの候補値が求まる可能性があるが、周波数依存性を用いるとただ1つの応力評価値を採用することができる。

4・3 磁気音響結合の磁化方向依存性 前項では磁気音響結合の周波数依存性を利用して応力を評価できることを述べたが、これは応力の方向が既知の場合に限られる。ここでは、応力軸に垂直に磁化した場合の結果を前項で示した結果と比較することにより、磁化

(a) 引張り応力

(b) 圧縮応力

図8 磁気音響結合の磁化方向依存性（8 MHz）

方向依存性について検討する。

試験片Rを応力に垂直に磁化した場合の結果と平行に磁化した場合の結果との比較を図8に示す。

図8からわかるように、引張り応力下では磁化方向依存性はみられない。このことから、縦波の振幅変化からは引張り応力の方向は評価できないといえる。圧縮応力下では磁化方向依存性がみられるが、200MPaの応力に対しても0.05dB程度と小さい。磁化方向によって用いた磁極片が異なることや、外部磁場による音速変化の測定結果⁽⁸⁾を考慮すると、せん断波の利用が応力方向の評価に有効であると考えられる。

4.4 集合組織、熱処理の影響 一般の軟鋼圧延板では、集合組織のため圧延方向と圧延直角方向の弾性的性質がわずかに異なっている。磁氣的性質も集合組織の影響で異方性を示す。さらに、弾性的性質、磁氣的性質は熱処理により変化する。集合組織、熱処理の影響は、音弾性法においては無視できない。磁気音響

結合法を一般の残留応力測定に適用する場合、これらの影響がどの程度であるかをあらかじめ調べておく必要がある。

試験片Tを応力軸に平行に磁化して得られた結果を試料Rの結果と比較したものを図9に示す。

図9からわかるように、試料Rの結果と試料Tの結果はほぼ一致し、集合組織の影響はほとんど見られない。音弾性法においては集合組織の影響が降伏応力に相当することを考慮すると、磁気音響結合法は無応力時の測定ができない残留応力の測定に適しているといえる。

試験片HRを応力軸に平行に磁化して得られた結果を試料Rの結果と比較したものを図10に示す。

熱処理は、材料の微視的な残留応力、弾性的異方性を変化させ、音弾性法における誤差の原因となる。ところが図10から、熱処理の影響は小さく、最大でも50MPa程度であることがわかる。

(a) 引張り応力

(a) 引張り応力

(b) 圧縮応力

(b) 圧縮応力

図9 試料Rの結果と試料Tの結果の比較 (8 MHz)

図10 試料Rの結果と試料HRの結果の比較 (8 MHz)

5. 溶接板の非破壊残留応力測定

4章で得られた振幅-磁束密度曲線を較正曲線として用い、溶接板の残留応力を非破壊的に評価した。

5.1 試料 試料として、4章で用いた圧延板から

図11 溶接板形状

(a) 引張り応力

(b) 圧縮応力

図12 測定結果と較正曲線との比較

図11に示す形状に切り出した板2枚を突き合わせ溶接したものを用いた。電磁石設置のため、溶接ビード部はグラインダによって除去した。測定点は図11に示す12点である。

5.2 測定方法 一般に溶接による残留応力は、溶接線に平行および垂直に主軸を持つ二軸応力であり、溶接線に平行な応力成分が大きい。ここでは、残留応力は溶接線に平行な単軸応力であると仮定し、以下の手順により非破壊的に評価した。

(1) 各測定点において、交流消磁の後に溶接線に平行および垂直な磁場に対して振幅変化を測定する。

(2) 8MHzに対する測定値を較正曲線と比較し、引張りと圧縮に対する応力の候補値を求める。ここでは、応力の影響が顕著となる1.2T以上の磁束密度における振幅変化に着目した。この領域での測定結果をそれぞれ較正曲線と比較して相当する応力を求め、それらの平均値を応力の候補値とした。得られた結果の例として、溶接線からの距離が30mmである測定点において溶

(a) 引張り応力

(b) 圧縮応力

図13 12MHzと4MHzでの振幅変化の差の比較

接線に平行な磁場を与えた場合の結果を図12に示す。この場合、応力の候補値は引張りで120MPa、圧縮で210MPaである。

(3) 引張りと圧縮の応力候補値に対して、12MHzと4MHzでの振幅変化の差を較正曲線から内挿あるいは外挿により計算する。計算結果と測定結果が良い一致を示す候補値を応力評価値として採用する。図13の場合、応力評価値は120MPaの引張り応力となる。

全測定点での測定後、それぞれの測定点の表裏に二軸ひずみゲージを貼付し、溶接線、中心線および図11に示す切断線で切断し、解放されるひずみから残留応力を評価した。

5・3 測定結果 図14に残留応力の評価結果を示す。図において○印、●印はそれぞれ溶接線に平行、垂直に磁化した場合の評価結果を示し、□印はひずみゲージによる結果を示している。

図14 残留応力評価結果

図15 ひずみゲージによる主応力測定結果

図15にひずみゲージによる主応力測定結果を示す。図において、○印、●印はそれぞれ溶接線に平行、垂直な応力を示している。

図14において、磁気音響結合法による結果をひずみゲージの結果と比較すると、応力が0に近い領域で評価誤差が大きい。この原因として、溶接線に垂直な応力の存在が考えられる。本研究では残留応力は溶接線に平行な単軸応力であると仮定した。ところが、この領域では溶接線に垂直な応力 σ_2 が約50MPaであり、溶接線に平行な応力 σ_1 に対して十分小さいとは言えない。溶接線近傍での誤差の原因としては、溶接時の熱によって磁氣的性質が変化していること、溶接部の影響で電磁石の磁極と試料との接触状態が良好でないことなどが挙げられる。

ひずみゲージ法では残留応力を解放するために試験片を切断しなければならない。すなわち破壊的な応力測定法であり、実際の残留応力測定には適さない。材料内部の応力を非破壊的に測定できる方法としては音弾性法がある。この方法は、さきに述べたように集合組織の影響が無視できないため、溶接前の無応力状態での測定を必要とする。本法では溶接後の測定だけから、すなわち完全に非破壊的に残留応力を評価したことを考慮すると、比較的精度よく残留応力を非破壊評価できたといえる。本法により評価される応力は、超音波の伝ば経路、すなわち振動子直径の範囲の板厚にわたって平均した応力であり、応力分布の面内分解能は音弾性法の場合と同じである。

6. 結 論

本研究では、軟鋼圧延板について外部磁場による縦波振幅変化の周波数依存性を負荷応力下で測定し、その結果を溶接板の非破壊残留応力測定に適用した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 外部磁場を与えると振幅は増加し、増加量は高周波数ほど大きい。
- (2) 応力の符号にかかわらず、応力の絶対値が増加すると振幅変化量は減少する。ただし、振幅変化の周波数依存性は引張り応力の場合に減少する。
- (3) 外部磁場による縦波の振幅変化は引張り応力下では磁化方向依存性を示さない。
- (4) 集合組織の影響は無視できる。熱処理の影響は小さく、応力に換算して最大でも50MPa程度である。
- (5) 外部磁場による縦波音速変化を用い、溶接板の残留応力を完全に非破壊的に評価できた。

実験およびデータ処理において、当時本学学生であった増岡格君ならびに井坂淳君の協力が得られたこ

とに感謝する。

文 献

- (1) Pao, Y.-H., Sachse, W., and Fukuoka, H. (Mason, W.P. and Thurston, R.N. 編), *Physical Acoustics* XVII, (1984), 61, Academic Press.
 - (2) 近角, 強磁性体の物理 (下), (1984), 106, 裳華房.
 - (3) Kwun, H. and Teller, C.M., *J. Appl. Phys.*, **54**-9(1983), 4856.
 - (4) Namkung, M., ほか3名 (Achenbach, J.D. and Rajapakse, Y. 編), *Solid Mechanics Research for QNDE*, (1987), 301, Martinus Nijhoff.
 - (5) Mason, W.P., *Rev. Mod. Phys.*, **25**-1(1953), 136.
 - (6) Jiles, D.C. and Atherton, D.L., *J. Appl. Phys.*, **55**-6 (1984), 2115.
 - (7) 山崎・元江・福岡, 機論, **60**-571, A (1994), 792
 - (8) 山崎・平尾・福岡, 機論, **56**-532, A (1990), 2573.
-