磁気音響結合を用いた非破壊残留応力測定*

山崎 友裕^{*1}, 平尾 雅彦^{*1}, 福岡 秀和^{*1}Nondestructive Residual Stress Measurement in Steel
Using Magnetoacoustic Interactions

Tomohiro YAMASAKI, Masahiko HIRAO and Hidekazu FUKUOKA

In ferromagnetic materials, ultrasonic velocity varies with both stress and external magnetic field. This phenomenon occurs due to the magnetoelastic interactions, and it is called magnetically induced velocity change (MIVC). The behavior of MIVC depends on the stress, magnetic field, ultrasonic mode (longitudinal or shear), and their relative orientation including the polarization direction of the shear wave. Its magnitude is of the order of 10^{-5} , being comparable with the acoustoelastic effects. In the present study, the MIVC for longitudinal and polarized shear waves were first measured with mild steel specimens for the changing magnetic fields applied parallel or perpendicular to uniaxial stresses. The MIVC curves thus obtained showed salient dependence on the stress. They were then used to nondestructively evaluate the thermomechanical residual stress introduced by gas cutting. The results agreed with the strain gage measurements and the conventional acoustoelastic methods, both destructive, showing the usefulness of the MIVC method to measure residual stresses nondestructively. The MIVC was found to be insensitive to the microstructures.

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

1. はじめに

残留応力の非破壊評価, 特に材料内部の応力評価において音弾性法⁽¹⁾は非常に有効である。この方法は材料中を伝ばする弾性波の音速が応力により変化する現象を利用して応力を評価する。ところが弾性波の音速変化は非常に小さく、100 MPa の応力による相対変化量は 10^{-4} のオーダーであり、音弾性法では 10^{-5} 程度の高い音速測定精度が要求される。音弾性法のうち、複屈折音弾性法は板厚方向に伝ばし、主応力方向に偏向した二つのせん断波の相対音速差(音響異方性)が主応力差に比例することを利用して主応力差を評価するものである。測定装置の発達により、現在では音響異方性は 10^{-5} 程度の精度で測定することができる。ところがこのような高精度音速測定のもとでは材料中の微視的構造(主として集合組織)によるわずかな異方性(組織効果)が無視できず、測定される音響異方性は主応力差の効果(応力効果)と組織効果の和に相当する。単位応力差に対する音響異方性の変化である複屈折音弾性定数は軟鋼では約 $-7 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ であり、組織効果を正しく評価できない場合、例えばわずか 0.2 %

の組織効果を無視することによって、材料の降伏応力と同程度の 280 MPa もの誤差が生じる。残留応力測定の場合、この組織効果と音弾性効果の分離の問題のため、音弾性法の適用範囲は応力分布の対称性が利用できる場合など特別な場合に限定されるのが現状である⁽²⁾。

鉄のような強磁性体の弾性的性質は磁気弾性結合を通して磁区構造と密接に関連することが知られている。強磁性体に外部磁場を与えると磁わい⁽³⁾⁽⁴⁾あるいは磁気弾性ひずみと呼ばれるひずみを生じる。磁わいの逆効果として、応力を負荷すると磁壁移動によって磁区構造が変化し、それに伴って弾性ひずみに加えて磁気弾性ひずみが生じるため、見かけ上の弾性定数が低下する ΔE 効果が起こる⁽³⁾⁽⁴⁾。

最近、Kwun ら⁽⁵⁾と Namkung ら⁽⁶⁾はこの磁気弾性結合に着目し、外部磁場による弾性波の音速変化(磁気音響結合)が応力依存性を有することを利用した応力評価法を提案した。この方法は磁わいの逆効果⁽⁵⁾のため生じる二つの現象、すなわち強磁性体中を伝ばする弾性波の音速が外部磁場による磁区構造の変化に伴い変化すること、および磁区構造が応力によって変化することを利用する。磁気音響結合を用いると組織効果の影響を受けない応力評価を行えることが実験で確

* 原稿受付 平成元年 12 月 13 日。

^{*1} 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待基山町 1-1)。

認されており⁽⁵⁾、残留応力測定に有望である。また、元木⁽⁷⁾は、等方体中の主応力を消磁状態と磁化状態の音響異方性を用いることにより評価できることを理論的に示している。

本研究では、軟鋼圧延板試料(JIS-SS41)を用い、外部磁場による音速変化の応力依存性を調べ、この磁気音響結合をもとに軟鋼試料中に溶断によって生じた残留応力の非破壊評価を行った結果について報告する。

2. 磁気音響結合

2・1 応力による磁区構造の変化 強磁性体は外部磁場によって磁化されると磁化の方向に長さが変化することが知られている。この現象は磁わい⁽³⁾⁽⁴⁾あるいは磁気弾性ひずみと呼ばれ、外部磁場の増加とともにひずみが増加し、飽和磁化の状態に一定値に収束する。

多結晶構造を持つ強磁性体内部では、それぞれの結晶粒は多数の磁区に分かれている。消磁状態においてもそれぞれの磁区内は飽和磁化まで磁化しているが、磁化方向がランダムであるため全体としての磁化は零である。強磁性体に外部磁場が与えられると、磁化方向が外部磁場と平行な磁区で磁気エネルギーが最小となるため、磁化方向が磁場の方向に近い磁区の体積が増加するように磁壁移動が起こる。それぞれの磁区は磁化方向に自発的なひずみを生じており、この磁壁移動によってひずみの方向が変化し、磁わいが生じる。磁化方向に伸びを生じる場合を正の磁わいと呼び、鉄は正の磁わいを有している。

磁わいの逆効果により、強磁性体に応力が負荷されると弾性ひずみと同符号の磁気弾性ひずみを生じ、見かけ上の弾性定数が低下する ΔE 効果⁽³⁾⁽⁴⁾が生じる。鉄のように正の磁わいを有する材料に引張応力が負荷された場合、磁気弾性エネルギーは応力軸に平行な磁

化を持つ磁区で最小となり、垂直な磁化を持つ磁区で最大となる。そのため 90° 磁壁の移動によって応力軸に近い磁化を持つ磁区の体積が増加し [図 1(a)], 応力軸方向に正の磁気弾性ひずみが生じる。この磁壁移動によっては全体としての磁化は生じない。磁気弾性ひずみ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。磁気弾性結合の影響のない純粋に弾性的な値 (以下、純弾性値 (Pure elastic value) と呼ぶ) は飽和磁化の状態で得られる。他方、圧縮応力が負荷された場合、応力軸に垂直な面内に磁化を持つ磁区の体積が増加するように磁壁が移動し [図 1(b)], 応力軸方向には負の磁気弾性ひずみを生じる。応力軸に垂直な面内に磁気弾性エネルギーが最小となる磁区が分布しているという点が引張応力の場合と異なる。この場合にも見かけ上の弾性定数は低下する。

2・2 外部磁場による音速変化 強磁性体中を弾性波が伝ばする場合、弾性波による動的応力は MHz オーダの周波数で変化する。応力の変化速度が高くなると磁壁移動が追従しにくくなり、磁区磁化の回転振動が起こる⁽⁸⁾。この回転振動に伴う磁気弾性ひずみも弾性波の応力による弾性ひずみと同符号となるため、見かけ上の弾性定数が低下し、音速は純弾性値より小さくなる。この回転振動の大きさはそれぞれの磁区の磁化方向に依存し、外部磁場および応力によって拘束される。無応力時に外部磁場による磁化が進行すると磁区構造の変化および回転振動の拘束が起こり、音速は増加し、純弾性値に近づく。

2・3 磁気音響結合を用いた応力測定 2・1, 2・2 節において、応力が磁区構造に及ぼす影響、外部磁場が音速に与える影響について述べた。応力が与えられると磁区構造が変化し、さらに磁区磁化の回転振動が拘束される。したがって、外部磁場による弾性波の音速変化を示す曲線 (以下、音速-磁束密度曲線と呼ぶ) の形状は応力に依存して変化することになる。ここでは、外部磁場に対する音速変化の応力依存性を利用して応力を評価することを試みる。

外部磁場による音速変化は、応力、外部磁場、偏向方向の相対的な関係および応力値に依存する。これらの方向が平行あるいは垂直なすべての組合せについて較正曲線を求めておけば、実際の測定で得られる曲線をこの較正曲線と比較することによって応力評価を行うことが可能である。本研究ではまず単軸負荷試験によって較正曲線を求め、これらの曲線を用いて試料に溶断によって生じた残留応力の非破壊評価を行う。

図 1 静的応力による磁壁移動

3. 負荷応力実験

3.1 試料および測定方法 試料として軟鋼 SS 41 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。引張試験片は平行部長さ 145 mm、幅 35 mm、圧縮試験片は 30 mm×25 mm であり、板厚はいずれも 11 mm である。試験片は長手方向を圧延方向に平行に切り出している。この試料の弾性定数および降伏応力を表 1 に、磁化曲線を図 2 に示す。

これらの試験片に万能試験機で単軸応力を負荷し、交流磁場による消磁を行った後、C 形電磁石 (3 960 巻、磁極寸法 80 mm×15 mm、磁極間距離 35 mm) によって外部磁場を与え、弾性波が試料中を一往復する伝ば時間を測定した。電磁石の磁極には磁化方向に応じて軟鋼の磁極片を装着した。外部磁場が応力軸に平行な場合について実験装置の概略を図 3 に示す。

伝ば時間の測定には、送受信兼用の振動子として 10 mm 角 3 MHz の縦波用 PZT 形圧電素子と偏向方向が互いに垂直である 8 mm 角 3 MHz のせん断波用 PZT 形圧電素子 2 枚を貼り合わせた三層素子⁽⁹⁾を用い、シングア라운드法により第一反射波と第二反射波の到達時間の差を求めた。振動子はサリチル酸フェニルを用い、試料面に接着した。この方法による伝ば時間の相対変化の測定精度は 10^{-5} 程度である。

試料中の磁束密度はサーチコイルおよび磁束計を用いて測定した。サーチコイルは外部磁場が応力軸に平行な場合には試験片に、垂直な場合には磁極片に巻いた。この方法により得られた磁束密度を、音速測定部にサーチコイルを巻いた同等の試料を用いて較正し

た。磁束密度の測定精度は約 0.05 T である。

試験片の温度変化、振動子と試験片の接着状態の変化および残留磁化、磁気余効の影響を除くため、磁場をかけた状態での伝ば時間と、その後に電磁石に供給する電流を遮断した状態での伝ば時間との差を求めた。また、ヒステリシスの影響を除くため、設定した磁場の付近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って磁化曲線を Anhyseretic curve⁽¹⁰⁾ に近づけた。測定はまず磁場を増加させながら行い、その後磁場を減少させながら測定を行った。

3.2 実験結果 本実験において、ヒステリシスの影響はあまり見られなかったが、磁場を減少させながら測定を行った結果のほうがわずかに再現性が良好であった。ここではその場合について得られた磁束密度 $B-B_0$ に対する相対音速変化 $\Delta v/v_{B=0}$ を示す。ただし、 $\Delta v = v_B - v_0$ 、 v_B は磁束密度 B における音速、 B_0 と v_0 はそれぞれ v_B の測定後に電磁石に供給する電流を零にして得られた磁束密度と音速、 $v_{B=0}$ は測定開始時の消磁状態における音速である。ここで、 $v_B - v_{B=0}$ ではなく $v_B - v_0$ を Δv とするのは試験片の温度変化、振動子と試験片の接着状態の変化および残留磁化、磁気余効の影響を除くためであり、 $B-B_0$ を用いるのは磁束計指示値のドリフトの影響を除くためである。磁場を増加中の測定結果の再現性が良くない原因として、消磁状態が測定ごとにわずかに異なっていることが考えられる。

縦波および応力軸に平行あるいは垂直に偏向したせん断波に対して得られた結果を外部磁場が応力軸に平行な場合についてそれぞれ図 4、5、6 に、外部磁場が応力軸に垂直な場合についてそれぞれ図 7、8、9 に示す。

3.3 検討 図 4～9 からわかるように、外部磁場による音速の変化量は 10^{-4} のオーダーであり、応力の効果はさらに微小量である。よって応力を精度よく

表 1 弾性定数および降伏応力

ヤング率 GPa	ポアソン比	降伏応力 MPa
214	0.271	280

図 2 磁化曲線

図 3 実験装置概略図

評価するためには非常に高精度な音速変化の測定が要求される。本法では、振動子を試料に圧着させた状態のまま外部磁場のみを変化させて音速変化の測定を行うため、高精度に音速変化を測定することが容易である。

外部磁場による弾性波の音速変化が応力、外部磁場、偏向方向によってそれぞれ特徴的な変化をすることから、応力測定部での音速-磁束密度曲線をあらかじめ同じ材質の試験片で求めておいた校正曲線と比較することによって単軸応力の応力値および応力方向を評価することが可能である。測定精度、再現性の点から、本法による応力評価精度は約 30 MPa であると考えられる。

荒居ら⁽¹¹⁾は引張応力に平行な外部磁場に対するせん断波の音速変化を測定し、外部磁場と垂直に偏向したせん断波が応力評価に有効であることを示してい

る。このことは、図 5 (b)より図 6 (b)のほうが応力の効果が大きいことに対応する。しかし、本研究では応力と外部磁場が平行あるいは垂直な組合せすべてについて音速測定を行い、その結果、引張応力に対しては外部磁場、偏向方向がともに応力軸に垂直なせん断波[図 9 (b)]で、圧縮応力に対してはこれらが応力軸に平行なせん断波[図 5 (a)]で最も応力の効果が顕著であることが確認できた。したがって、応力評価の際には、外部磁場に平行に偏向したせん断波が有効であることが明らかになった。

4. 残留応力の非破壊評価

ここでは 3 章で得られた校正曲線を用い、試料中に溶断により生じた残留応力の非破壊評価を行う。

4.1 試料 試料として、3 章で用いた試験片と同じ軟鋼圧延板から溶断により切り出した後に図 10

(a) 圧縮応力

(b) 引張応力

図 4 縦波の音速変化 (外部磁場が応力軸に平行)

(a) 圧縮応力

(b) 引張応力

図 5 応力軸に平行に偏向したせん断波の音速変化 (外部磁場が応力軸に平行)

の形状に加工したものを用いた。溶断線は図の aa の数十 mm 外側である。他の 3 辺は溶断線から十分離れており、溶断の影響は無視できる。また、圧延方向は溶

断線に平行であり、測定点は図 10 に示した 12 点である。

4.2 磁気音響結合による応力評価 各測定点に

(a) 圧縮応力

(b) 引張応力

図 6 応力軸に垂直に偏向したせん断波の音速変化 (外部磁場が応力軸に平行)

(a) 圧縮応力

(b) 引張応力

図 7 縦波の音速変化 (外部磁場が応力軸に垂直)

(a) 圧縮応力

(b) 引張応力

図 8 応力軸に平行に偏向したせん断波の音速変化 (外部磁場が応力軸に垂直)

おいて縦波および溶断線に平行あるいは垂直に偏向したせん断波の外部磁場による音速変化を、溶断線に平行あるいは垂直な外部磁場を加えて測定した。音速変化の測定方法は3章で示した方法と同じであり、磁束密度測定のためのサーチコイルは磁極片に巻いた。試験片と同じ母材から同一形状の板を切り出し、測定点にサーチコイルを巻き、磁束密度の較正を行った。各測定点で六つの音速-磁束密度曲線が得られることになるが、測定点1から3については電磁石設置の都合上、溶断線に平行な外部磁場についてのみ測定した。これらの結果を単軸荷重試験で得られた較正曲線と比較することにより応力評価を行う。以下にその手順を示す。

(1) まず、応力を溶断線に平行な引張応力であると仮定する。この場合、外部磁場、偏向方向ともに溶断線に平行なせん断波の音速-磁束密度曲線を同じ条件に相当する図5(b)の較正曲線と比較し、最も近い曲

線からの内挿あるいは外挿によって応力値を推定する。他の五つの曲線についてもそれぞれに対応する較正曲線との比較により応力を推定する(図11)。較正曲線から応力を推定できない場合、すなわちいかなる応力値に対しても測定された曲線が得られないと考えられる場合には応力評価は不可能とする。この場合、応力方向、符号の仮定に誤りがある。

(2) 応力を順に溶断線に平行な圧縮応力、溶断線に垂直な引張応力、溶断線に垂直な圧縮応力と仮定し、それぞれの場合で(1)と同様に応力の推定を繰り返す。

(3) (1)と(2)で仮定した応力方向、符号の組合せのうち、六つの曲線から推定される応力値のばらつきが最も小さく、応力評価が不可能である曲線のない組合せを求めるべき応力方向、符号と評価する。応力値はすべての曲線から推定された値から総合的に判断して評価するが、応力の効果が最も顕著である外部磁場に平行に偏向したせん断波の曲線から推定された値を優先させる(表2)。

4.3 音弾性法による応力評価 本研究では、比較のため従来からの音弾性法によっても応力を評価し

図9 応力軸に垂直に偏向したせん断波の音速変化 (外部磁場が応力軸に垂直)

図10 試料寸法

図11 測定結果と図9(b)との比較(測定点12) (○, ●はそれぞれ1回目, 2回目の測定)

た。

応力評価は、主応力方向に偏向した二つのせん断波の相対音速差である音響異方性 ϕ を用いる複屈折音弾性法および縦波音速と二つのせん断波の平均音速の比で与えられる音速比 R を用いる音速比音弾性法によって行った。

$$\phi = \frac{v_{T1} - v_{T2}}{v_T} = \alpha + C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$R = \frac{v_L}{v_T} = R_0 + C_R(\sigma_1 + \sigma_2) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで

v_{Ti} : 板厚方向に伝ばし、主応力 σ_i 方向に偏向したせん断波の音速

$\overline{v_T}$: 二つのせん断波の平均音速 $= (v_{T1} + v_{T2})/2$

v_L : 板厚方向に伝ばする縦波の音速

式(1)、(2)において、 α は集合組織による異方性(組織効果)、 R_0 は無応力時の音速比である。 C_A と C_R はそれぞれ単位応力に対する音響異方性と音速比の変化であり、複屈折音弾性定数、音速比音弾性定数と呼ばれる量である。

音弾性法においては、無応力時の音響異方性 α と音速比 R_0 の値が必要となる。よって本研究のように応力発生前の測定が不可能な場合には非破壊応力評価は行えない。ここでは応力を開放するために試験片を図

10に破線で示した切断線で切断した後に α と R_0 を測定する破壊的音弾性法を採用した。音弾性定数は、3章で用いた試験片の単軸負荷試験を消磁状態で行い、圧縮と引張りで得られた値の平均値 $C_A = -8.06 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, $C_R = 9.94 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ を用いた。軟鋼の音弾性定数、特に音速比音弾性定数 C_R は磁気音響結合のために消磁状態では圧縮と引張りで異なった値を取り、磁化することによってその差は小さくなる⁽⁹⁾。本研究で用いた試料の音弾性定数も消磁状態では圧縮と引張りで異なっており、それらの平均値を用いた場合、評価される応力には7%程度の誤差が含まれる。また、応力は溶断線に平行な成分のみ存在する単軸応力場と仮定した。

4.4 ひずみゲージによる応力評価 本研究ではひずみゲージによる破壊的応力測定との比較も行った。

各測定点の表裏両面に二軸ゲージを貼付した後、試験片を図10の切断線で切断し、開放されるひずみから残留応力を計算した。

4.5 測定結果 図12に各手法による応力評価結果を示す。図中、□は磁気音響結合法、△と▲はそれぞれ複屈折音弾性法と音速比音弾性法、○はひずみゲージ法による結果を示す。ひずみゲージ法による結果は表裏両面の応力の平均値である。表裏での差は溶断線付近で最も大きく、最大50 MPaであったが、測定点8～12では10 MPa以下であった。ひずみゲージ法により溶断線に垂直な方向の応力成分 σ_2 は10 MPa以下であることが明らかになり、磁気音響結合法と音弾性法で単軸応力場を仮定したことの正当性が確認された。

4.6 検討 図12において、ひずみゲージ法で得られた応力を基準にすると、磁気音響結合法によって十分な精度で残留応力が非破壊評価できることがわかる。他の測定点に比べ、溶断線に近い測定点での誤差が大きい。この原因として、これらの測定点では溶断

図 12 残留応力評価結果

表 2 応力評価の一例(測定点12)

	Shear wave				Longitudinal wave	
	PD // CL MF // CL	PD ⊥ CL MF // CL	PD // CL MF ⊥ CL	PD ⊥ CL MF ⊥ CL	MF // CL	MF ⊥ CL
$\sigma // \text{CL (Tens)}$	0 ~ 50	50	150 ~ 200	25	0	0 ~ 50
(Comp)	0	0 ~ 200	50 ~ 100	×	0	0 ~ 50
$\sigma \perp \text{CL (Tens)}$	0	150 ~ 200	0 ~ 30	100	0 ~ 50	0
(Comp)	×	100 ~ 200	0 ~ 200	0	0 ~ 50	0

CL: Gas cutting line

PD: Polarization direction

MF: External magnetic field

Estimated stress

$\sigma // \text{CL (Tens.)}$

25 MPa

の熱の影響で磁氣的性質が変化していること、電磁石の磁極が試験片端部からはみ出すこと、応力方向に垂直な磁場に対する測定が行えないことが挙げられる。特に、これらの測定点での残留応力は溶断線に平行な引張応力であり、この応力の効果はせん断波の偏向方向、外部磁場の方向がともに溶断線に垂直な場合に最も顕著である。

磁気音響結合法と音弾性法を比較すると、音弾性法のほうがより高い精度で応力が得られている。これは試験片切断後に α と R_0 を測定したことによるものである。本研究のように α と R_0 の測定が行えない場合は音弾性法による残留応力の非破壊評価は困難である。特に溶断などによって金属組織が変化し、 α や R_0 が応力発生部で変化している場合、無応力状態あるいは応力発生前の測定が可能であっても応力評価値には大きな誤差を生じることになる。例えば、本研究で用いた試料では組織効果 α が溶断の影響で最大 0.04 % 変化している。溶断部から十分遠方の測定点を無応力状態とみなし、その音響異方性を組織効果 α として溶断線付近の応力を評価すると、このようなわずかな α の変化に対しても応力には約 50 MPa の誤差を生じる。一方、磁気音響結合を用いれば、応力評価はこのような金属組織変化の影響を受けず、残留応力の非破壊評価が可能である。

本研究では溶断による残留応力を同じ母材から切り出した試験片で得られた較正曲線を用いて評価し、約 50 MPa の精度が得られた。評価精度を向上させるためには、より多くの応力値に対する較正曲線を求めておくこと、磁束密度をより高精度に測定することが要求される。さらに、試料端部付近で溶断線に垂直な磁場を加えられるように磁極片形状を変更することも必要であるが、この場合、磁極と測定点が接近するため、測定点付近での磁化が板厚にわたって一様であることを確認しなければならない。

磁気音響結合法を残留応力の非破壊評価法として確立するためには、公称が同じ材料の較正曲線が一致するかどうか、熱処理により磁氣的性質が変化した材料に同じ較正曲線が適用可能かどうかを調べる必要がある。また、板厚が大きい場合の磁化分布の検討や二軸応力下における磁気音響結合の研究も今後の研究課題

である。

5. 結 論

軟鋼圧延板試料 (SS 41) について、外部磁場による音速変化の応力依存性 (磁気音響結合) を測定し、さらにこれらを用いて溶断による残留応力の非破壊評価を行い、次の結果を得た。

(1) 外部磁場による弾性波の音速変化は応力、外部磁場、偏向方向の相対関係によって特徴的な変化を示す。特に、外部磁場と平行に偏向したせん断波に対して著しい応力効果が観測された。

(2) 残留応力を評価しようとする材料について、外部磁場による弾性波の音速変化を測定し、同じ材料の試験片を用いた負荷試験により求めた較正曲線と比較することによって単軸応力の応力値および応力方向を評価することが可能である。

(3) 溶断による残留応力を磁気音響結合を用いて非破壊評価することができた。さらに、本法は無応力時の測定が不可能で、場所によって金属組織が変化しているような、音弾性法による応力評価が困難である場合にも有効であることが確認された。

本研究で用いた電磁石の設計は住友特殊金属(株)の遠藤政治氏に、磁化曲線の測定は同じく住友特殊金属(株)の結城正廣氏に行っていただいた。記して感謝の意を表す。また実験において本学学生の東條公資君、元江正史君の協力が得られたことに感謝する。

文 献

- (1) 徳岡・岩清水, 機械の研究, 27-7(1975), 860.
- (2) 福岡・井田, 材料, 35-396(1986), 961.
- (3) 近角, 強磁性体の物理(下), (1984), 106, 裳華房.
- (4) 元木・松本, 機論, 55-515, A (1989), 1623.
- (5) Kwun, H. and Teller, C. M., *J. Appl. Phys.*, 54-9(1983), 4856.
- (6) Namkung, M., ほか 3 名 (Achenbach, J. D. and Rajapakse, Y. 編), *Solid Mechanics Research for QNDE*, (1987), 301, Martinus Nijhoff.
- (7) 元木・松本, 材料, 37-418(1988), 844.
- (8) Mason, W. P., *Rev. Mod. Phys.*, 25-1(1953), 136.
- (9) 山崎・平尾・福岡, 機論, 56-531, A (1990), 2262.
- (10) Jiles, D. C. and Atherton, D. L., *J. Appl. Phys.*, 55-6(1984), 2115.
- (11) 荒居・小林・住永, 機論, 55-511, A (1989), 622.