

学術論文

SS400 鋼の弾性域および塑性域における磁気 AE 特性

Magneto-Acoustic Emission Characteristics of SS400 Steel in Elastic and Plastic Region

安部 正高* (正員), 松本 英治* (正員)

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

Acoustic Emission (AE) is stress pulses generated by the release of localized stress energy during dynamical process in solids. AE is reflected by structural change of the material such as dislocation and crack growth, so that it is utilized as Non-Destructive Testing (NDT) for fracture or fatigue of the material. On the other hand, AE is also observed during dynamic magnetization process of ferromagnetic material. The phenomenon is called Magneto-Acoustic Emission (MAE), which is caused by abrupt and discontinuous motion of magnetic domain wall pinned by inclusions, voids, dislocations, grain boundaries etc. The characteristics of MAE change with the applied stress and plastic deformation since the stress, dislocations and residual stress influences the structure of the magnetic domains and the pinning effects. In this paper, experimental result on SS400 steel in the elastic and plastic region is presented and discussed.

Keywords: MAE, NDT, SS400, stress evaluation, residual strain, ferromagnetic material.

1 緒言

材料の磁気的変化から弾性波が発生する現象を磁気 AE (Magneto-Acoustic Emission) と呼ぶ。従来の AE と異なり、進展するき裂や転位によるものではなく、変動磁場を加えた際に生じる材料内部の磁区構造の変化によって弾性波が発生する現象である[1]。磁気 AE は材料の構造が磁気的に変化しやすい強磁性体で発生し、その特性は、材料の形状、印加磁場の強さや周波数、応力などの外的要因や[2-5]、欠陥、結晶粒度、不純物、熱処理などの内的要因に依存する[6-8]。磁気 AE では変動磁場を加えるだけで弾性波が放出されるため、変形や破壊が進行中でない供用材に対する新しい非破壊検査法への適用が考えられている[9-11]。また、測定時間が比較的短く、試験対象の表面状態の影響を受けにくいこと、再現性が高いといった特徴がある。

本研究では、強磁性体の応力評価や残留ひずみ評価への磁気 AE の適用を目的として、一般構造用鋼である SS400 鋼を実験対象に選び、弾性域の応力を負荷した状態と、塑性域まで応力を負荷した後に除荷した残留ひずみ状態において磁気 AE の測定を行い、その特性について考察した。

2 磁気 AE の発生要因

鉄、ニッケル、コバルト等の強磁性体は、磁壁で区切られた多数の磁区で構成されている。1 つの磁区内では磁気モーメントは同一方向に揃っており、自発磁化を生じている。磁壁は厚みをもっており、磁気モーメントの向きが徐々に変わっていく領域である。消磁状態では各磁区の磁気モーメントの向きは無秩序で、巨視的には磁化は現れない。しかし、外部磁場を印加すると、低磁場域では主に磁壁の移動によって、高磁場域では磁区の磁気モーメントの回転によって磁化が進行していく。また、周期磁場を印加すると、磁場と磁化が一对一に対応しないヒステリシスループを描く。これは磁化方向、不純物、応力などの影響を受ける。

一般に多結晶強磁性体の磁化過程では、結晶中の格子欠陥、不純物、結晶粒界等の影響で磁壁移動が不連続になり、磁化も不連続に進行する (バルクハウゼン効果)。この不連続磁壁移動のうち、主に 90° 磁壁の移動によって、磁区の自発ひずみのエネルギー変化がパルス状の弾性波として放出される現象が磁気 AE であるとされている。このように、磁気 AE は不連続な磁壁移動によって発生する弾性波であり、より直接的に観測される磁気的な雑音 (バルクハウゼンノイズ) とは異なる。磁気 AE は、個々の信号ごとに発生時刻 (位置)、振幅、周波数などの情報を含んでおり、高精度な非破壊評価技術への応用が期待されている。

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

*京都大学大学院エネルギー科学研究科

一方、磁性と応力などの力学量とが関連した現象を磁気弾性効果という。この効果により負荷が働くと、磁区構造に変化が現れ、磁気 AE は影響を受ける。また、塑性変形においても、転位やすべり線の増殖、残留応力などによる磁壁移動の抵抗の増大や磁区構造の変化等により、磁気 AE に影響が出ると考えられる。

3 磁気 AE および磁化曲線の測定

3.1 試験片

実験に使用した試験片は SS400 鋼で、Fig. 1 のような断面の幅 10 mm、厚さ 9 mm、平行部の長さ 72 mm の板状引張試験片である。本試験片について引張試験より得られた機械特性を Table 1 に示す。

3.2 測定方法

電磁石のコイルに周期が 10 s で、最大電流値が 3 A である三角波形状の電流を流すことで周期的な磁場を印加する。磁場の印加方向は試験片長手方向とし、電磁石の磁極間隔は 114 mm とした。その際、AE 探触子によって、試験片が磁化されることにより発生する弾性波の発生時刻、発生件数と振幅をイベント計数法により検出する (Fig. 2)。イベント計数法では、微小な時間帯にしきい値を超えた一連の信号を 1 イベントとし、この一連の信号のうちで最も大きな振幅をイベントの振幅とする。なお、三角波電流は 3 周期繰り返し、第 2 周期目の最小電流値から 1 周期間の磁気 AE を計測した。計測は試験片の両面についてそれぞれ 10 回行い、その平均値を実験値として採用した。

測定装置の概略を Fig. 3 に示す。AE 測定装置一式には NF 回路設計ブロック製のものをを用いた。AE 探触子 AE-901S (中心周波数 150 kHz) からの信号はプリアンプ AE-912 (利得 40 dB) によって増幅され、AE 計測器 U-PLOT9502 によってイベント数がカウントされる。プリアンプと AE 計測器はそれぞれ、50 kHz のハイパスフィルターと、100 kHz~500 kHz のバンドパスフィルターを持つ。AE 計測器による発生時刻の計測は 0.1 s 間隔でおこなわれる。分解時間は 0.8 ms、デッドタイムは 1 ms である。しきい値は 50 dB に設定した。また、試験片の磁気的変化を測定するために、試験片に探りコイル (40 巻) を巻き、電流値に対応する磁束密度を測定した。さらに、試験片表面に設置した電子磁気工業製ホールセンサ T-550 (空間分解能 50 μm 、測定レンジ $\pm 4(\text{T})$ 、測定感度 $10^{-7}(\text{T})$) により印加磁場方向 (試

験片長手方向) の磁界強さを測定し、以下の式から試験片の磁化を算出した。

$$M = B_{\text{coil}} - \mu_0 H_{\text{hole}} \quad (1)$$

ここで、 M は試験片の磁化、 B_{coil} は探りコイルにより測定された磁束密度、 H_{hole} はホールセンサで測定された磁界強さである。

弾性域の測定にあたっては、試験片を島津製作所製オートグラフ AG-5000E (定格 50 kN) に固定し、引張応力を負荷した状態で測定を行った。一方、塑性域の試験片の測定においては、一度塑性域まで引張応力を負荷した後に除荷し、実験卓上に設置した電磁石の磁極上に試験片を設置して測定を行った。

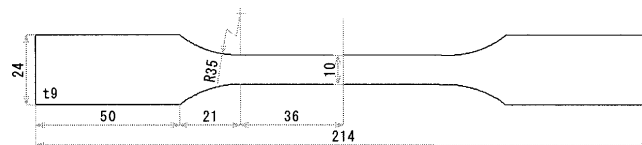


Fig. 1 Dimension of specimen.

Table 1 Mechanical properties of SS400 steel.

Yield stress	327 MPa
Tensile strength	464 MPa
Elastic limit	270 MPa
Young's modules	209 GPa

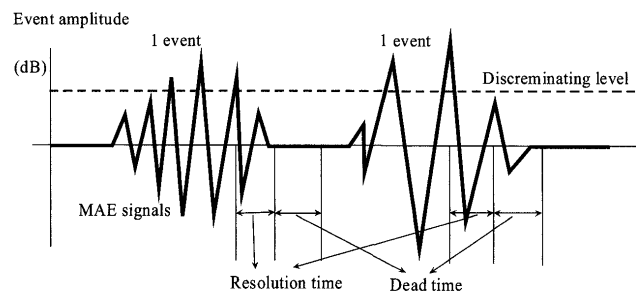


Fig. 2 MAE measurement method.

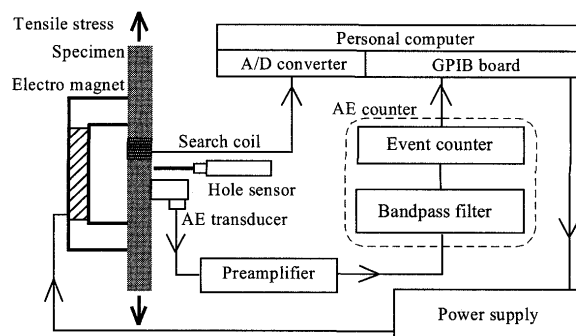


Fig. 3 Experimental system.

4 測定結果と考察

はじめに、SS400 鋼の磁化曲線と磁気 AE の関連について述べる。Fig. 4(a)は無負荷状態での磁化曲線を示したもので、横軸は電流値 I (A)，縦軸は磁化 M (T) である。Fig. 4(b)は Fig. 4(a)の磁化過程における磁化の時間変化を表す。Fig. 4(c)は印加磁場 1 周期 10 秒間に発生した磁気 AE の 0.1 s 間隔毎のイベント分布である。これらの図より、磁化の時間変化率が大きい時間帯(図中の 2~3 s および 7~8 s の時間帯)、つまり単位時間あたりの磁壁移動量が多い時間帯で磁気 AE が多く観測されていることがわかる。このように、磁気 AE と磁壁移動、磁化曲線には密接な関係があることがわかる。

4.1 弾性域における磁化曲線と磁気 AE

Fig. 5(a)には引張応力が 0 MPa, 100 MPa, 200 MPa の場合の磁化曲線を示した。Fig. 5(b)は低磁界領域における拡大図である。磁気弾性結合効果によって、引張応力が異なると磁化曲線も変化している。図より、応力の増加とともに磁化曲線はなだらかになり、飽和磁化は低下する傾向がみられる。Fig. 6 には各引張応力状態における飽和磁化を示した。

Fig. 7 から Fig. 9 にはそれぞれ、0 MPa, 100 MPa, 200 MPa の引張応力状態における磁気 AE の測定結果を示した。横軸は時間(s)，縦軸は測定された磁気 AE のイベントカウント数である。また、Fig. 10 には、それぞれの応力における磁気 AE のピークカウント(最大イベントカウント数)を、Fig. 11 には、トータルカウント(10 秒間のイベントカウントの総計)を示した。これらの結果から、引張応力の増加に伴い磁気 AE のピークカウントおよびトータルカウントは若干ながら減少する傾向が見られた。これは、Fig. 5 に示された磁化曲線の応力依存性(磁気弾性結合効果)に起因するものと考えられる。Fig. 5 より、引張応力を負荷すると、低 H 領域での磁化の変化速度と飽和磁化は共に低下する。磁気 AE の発生頻度は磁化の変化速度に依存するため、ピークカウントは応力の増加と共に減少する。また、磁気 AE の発生総量は飽和磁化に比例するため、トータルカウントも応力の増加と共に減少する。

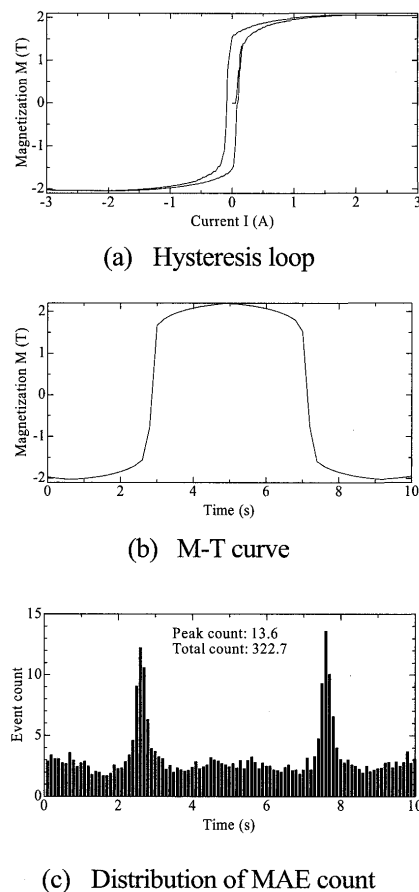


Fig. 4 MAE distribution and hysteresis loop of SS400.

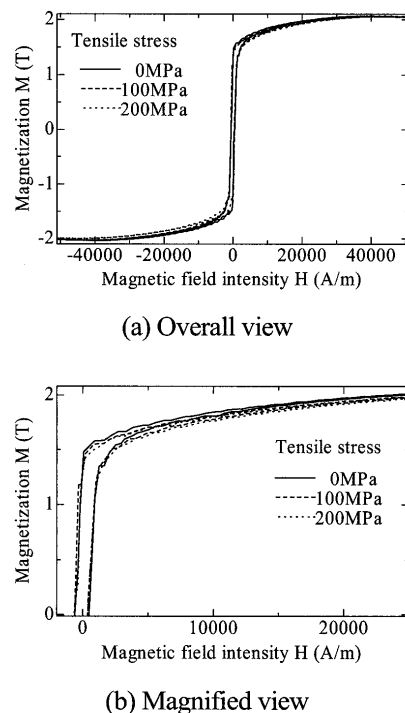


Fig. 5 Hysteresis loop of SS400 under stress.

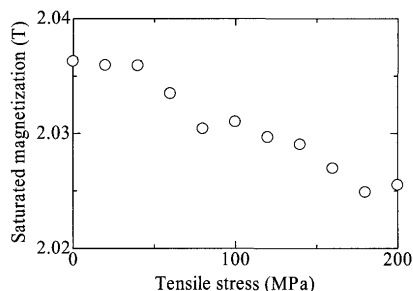


Fig. 6 Variation of saturated magnetization of SS400 due to tensile stress.

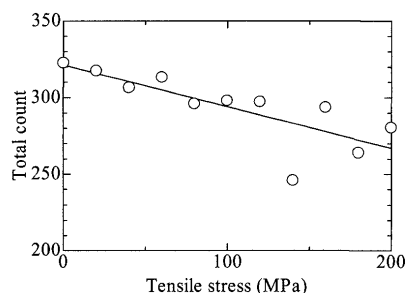


Fig. 11 MAE total count versus tensile stress.

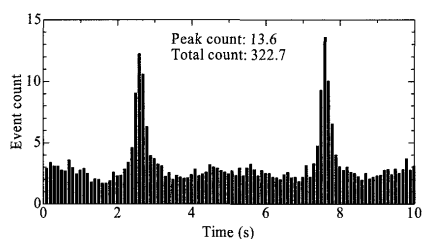


Fig. 7 Distribution of MAE count (0MPa).

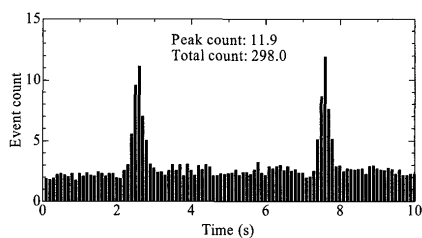


Fig. 8 Distribution of MAE count (100MPa).

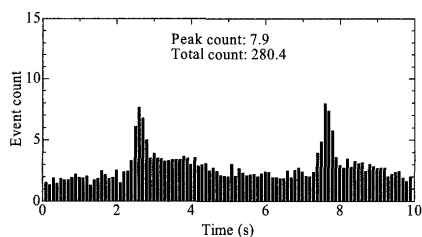


Fig. 9 Distribution of MAE count (200MPa).

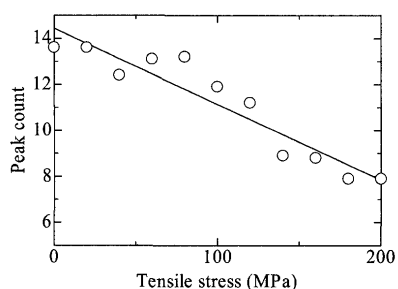


Fig. 10 MAE peak count versus tensile stress.

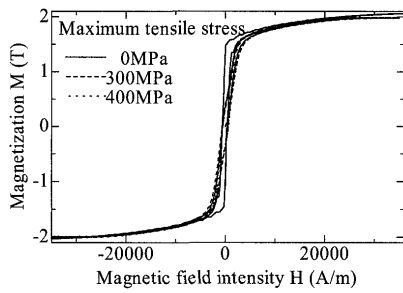
4.2 塑性域における磁化曲線と磁気 AE

Fig. 12(a)には最大引張応力が 0 MPa, 300 MPa, 400 MPa の場合の各磁化曲線を示した。Fig. 12(b)は低磁界領域における拡大図である。図より、最大引張応力が大きいほど磁化曲線はなだらかになっていることがわかる。Fig. 13 には各最大引張応力状態における飽和磁化を弾性域のものとあわせて示した。飽和磁化は、弾性域のものと比較すると減少しているが、塑性域においては、最大引張応力との明確な相関は見られなかった。また、試験片表面に貼付した大ひずみゲージ（共和電業, KFEL-2-120-C1L1M2R）を用いて引張応力除荷後に測定した残留ひずみと、負荷応力との対応を Fig. 14 に示した。残留ひずみは負荷応力に対して単調に増加していることがわかる。

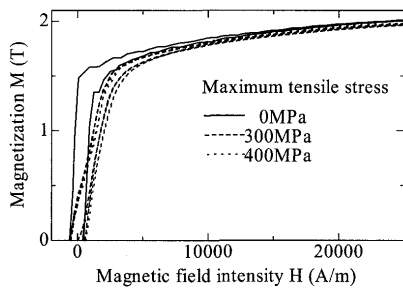
Fig. 15 から Fig. 17 には最大引張応力がそれぞれ、300 MPa, 360 MPa, 400 MPa の試験片の磁気 AE の測定結果を示した。また、Fig. 18 には、それぞれの応力における磁気 AE のピークカウントを、Fig. 19 には、トータルカウントを示した。測定環境の違いから、ノイズ分布を含め、弾性域の測定結果とは異なった分布となっている。

これらの結果から、最大引張応力（残留ひずみ）の増加に伴い磁気 AE のピークカウントは若干ながら減少する傾向が見られた。これは、Fig. 12 に示したように、最大引張応力が増加すると、磁化曲線がなだらかになり、低 H 領域での磁化変化速度が低下したためであると考えられる。一方、トータルカウントは最大引張応力にかかわらずほぼ一定となった。これは、Fig. 13 に示したように、飽和磁化の最大引張応力に対する変化がほとんどみられなかったことに対応している。

これらの変化は、塑性変形の進行にともなう転位密度の増加、磁区構造の変化などの微視的構造変化に起因すると考えられる。



(a) Overall view



(b) Magnified view

Fig. 12 Hysteresis loop of SS400 with plastic strain.

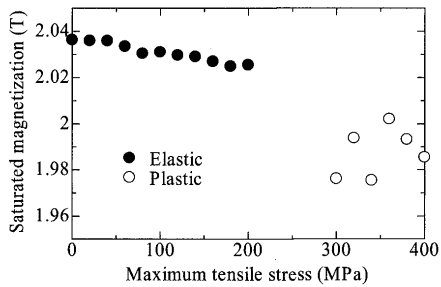


Fig. 13 Variation of saturated magnetization of SS400 due to tensile stress.

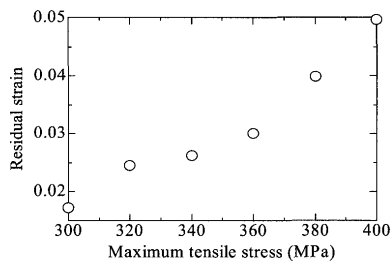


Fig. 14 Residual strain versus maximum tensile stress.

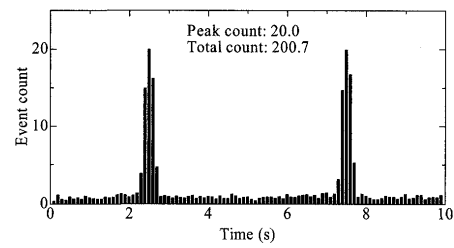


Fig. 15 Distribution of MAE count (300 MPa).

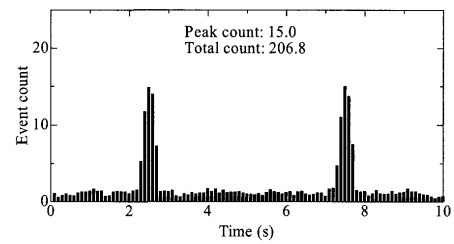


Fig. 16 Distribution of MAE count (360 MPa).

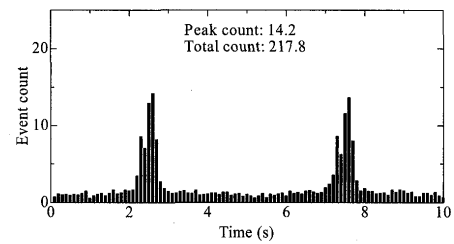


Fig. 17 Distribution of MAE count (400 MPa).

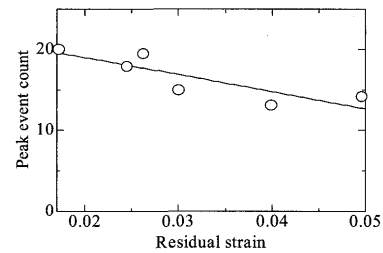


Fig. 18 MAE peak count versus residual strain.

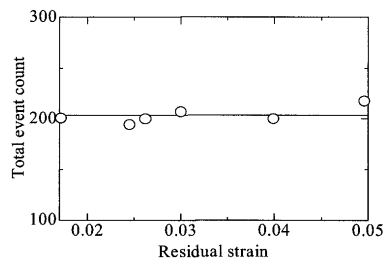


Fig. 19 MAE total count versus residual strain.

5 結言

本研究では、一般構造用鋼である SS400 鋼を実験対象に選び、弾性域および塑性域において、印加磁場と応力の負荷方向が平行な場合の磁気 AE の測定および考察を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 弾性域の引張応力に対して、応力の増加にともない、磁気 AE のピークカウントおよびトータルカウントは減少する。これらは、磁化曲線の応力依存性（磁気弾性効果）とよく対応する。
- (2) 塑性域まで引張応力を負荷後、除荷した試験片においては、残留ひずみが増加すると磁気 AE のピークカウントは減少する。一方、トータルカウントはほぼ一定となる。これらは、磁化曲線の変化とよく対応する。

これにより、磁気 AE による応力評価、残留ひずみ評価の可能性が示された。しかし、塑性域においては巨視的な残留ひずみが同様であっても、微視的には転位やすべり線、残留応力（ひずみ）が不均一に分布していると考えられ、多数の測定データを収集した上でその影響について検討する必要がある。また、磁化曲線（係数）と測定される磁気 AE 特性との相関関係を明らかにしていくことで、従来は困難であった磁気 AE 測定による応力や残留ひずみの統一的な評価法などについて提案していきたい。

(2010 年 10 月 15 日受付, 2011 年 2 月 22 日再受付)

参考文献

- [1] 新家昇, 宅間正則, 小野桓司, 松井望, 小橋正俊, 磁気 AE の発生機構に関する研究(ウェーブレット変換による発生挙動の観察), 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 68, No. 669, pp. 835-839, 2002.
- [2] 草薙秀雄, 強磁性材料の磁化過程における AE 特性と応力依存性, 電力中央研究所報告, 278001, pp. 1-21, 1978.
- [3] 新家昇, 前田春興, 原隆一, SS41 の磁化過程における AE の応力依存性, 非破壊検査, Vol. 34, No. 8, pp. 8-13, 1985.
- [4] D. H. L. Ng, J. P. Jakubovics, C. B. Scruby and G. A. D. Briggs, Effect of biaxial stress on magnetoacoustic emission from nickel, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 28, pp. 2214-2216, 1992.
- [5] 羽根法亮, 松本英治, 柴田俊忍, ニッケルにおける磁気 AE の応力依存性, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 65, No. 534, pp. 1629-1634, 1999.
- [6] 柴田守, 佐々木弘明, 磁気 AE 信号とバルクハウゼン信号の関連, 非破壊検査, Vol. 36, No. 10, pp. 772-777, 1987.
- [7] R. Ranjan, D. C. Jiles and P. K. Rastogi, Magnetoacoustic emission, Magnetization and barkhausen effect in decarburized steel, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 22, No. 5, pp. 511-513, 1986.
- [8] A. Dhar and D. L. Atherton, Magnetizing frequency dependence of magneto-acoustic emission in pipeline steel, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 28, No. 2, pp. 1003-1007, 1992.
- [9] 新家昇, 前田春興, 薄木嘉雄, 磁化過程における AE の自動解析装置の試作と応用, 非破壊検査, Vol. 34, No. 8, pp. 506-512, 1985.
- [10] 宅間正則, 新家昇, 磁気特性と磁気 AE による疲労損傷度と疲労条件の評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 64, No. 627, pp. 2862-2868, 1998.
- [11] 新家昇, 宅間正則, 小野桓司, 松井望, 小橋正俊, 磁気 AE の発生機構に関する研究(第 2 報, 集合組織の影響), 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 71, No. 705, pp. 831-837, 2005.