

# SS400 鋼の磁化特性を利用した応力と塑性変形の評価

## Estimation of Stress and Plastic Deformation of SS400 Steel Using Magnetic Properties

京都大学大学院エネルギー科学研究科	渡邊 誠	Makoto WATANABE	Student
京都大学大学院エネルギー科学研究科	安部 正高	Masataka ABE	Member
京都大学大学院エネルギー科学研究科	松本 英治	Eiji MATSUMOTO	Member

Ferromagnetic materials have the interaction between mechanical and magnetic fields which is called magnetoelastic coupling. Also it is known that magnetic properties of ferromagnetic materials depend on plastic deformation. There are various kinds of Non-Destructive Testing (NDT) based on these phenomena for estimation of stress and plastic deformation. We propose a new analytical method of magnetic hysteresis curve, in which the saturation magnetic hysteresis curve is decomposed to neutral magnetization curve and hysteresis gap curve. Each of the curves is expanded into power series, and its coefficients are extracted as parameters for the estimation. To verify this method, saturation magnetic hysteresis curves of SS400 steel, a typical structural material, are measured under tensile stress and after plastic deformation. The method is found to be effective to estimate the existence of plastic deformation.

**Keywords:** magnetoelastic coupling, nondestructive inspection, magnetization curve, stress, plastic deformation

### 1. 緒言

強磁性体の磁化特性は負荷応力に依存し、逆に力学的特性は磁場や磁化などの磁気的な量に依存することが知られており、このような磁気的な量と力学的な量の間の相互作用を、磁気弾性結合効果と呼ぶ[1]。磁気弾性結合効果の例として、磁場を印加すると材料がわずかに変形する Joule 効果[2]や、磁場を印加した状態で応力を変動させると磁化が変化する Villari 効果[3]などがある。

各種建造物の構造材料として広く用いられている鉄鋼材料は、一般に強磁性体であり、磁気弾性結合効果を利用して残留応力・劣化・損傷などを磁気的な測定から非破壊的に評価する方法が盛んに研究されている。例えば、磁歪を利用した応力測定[4]、外部磁束密度計測による応力測定[5]、保磁力や透磁率計測による応力評価[6]などがある。

一方、強磁性材料の保磁力や透磁率といった磁化特性は、塑性変形にも強く依存することが知られており[7]、この性質を利用して塑性変形や疲労損傷・材料劣化などを非破壊的に評価する方法が研究されている。例えば、磁気マイナーループを用いた炭素鋼の劣化評価[8]、磁気音弾性法を利用した残留塑性ひずみの評価[9]、磁気アコースティックエミッションを利用した疲労損傷度の評価[10]などがある。また、非磁性であるオーステナイト系ス

テンレス鋼に対しては、漏洩磁束の測定による損傷・疲労の評価法の研究が行われている[11-12]。

このように、鉄鋼材料の応力や塑性変形の磁気的な非破壊評価に関しては、様々な手法が研究されている。しかし、飽和磁気ヒステリシス曲線の定式化による応力や塑性変形の非破壊評価に関する研究はこれまでほとんど行われていない。そこで本研究では、一般的な構造用鋼である SS400 鋼について、飽和磁気ヒステリシス曲線の定式化に基づいて、応力や塑性変形を非破壊評価する手法について検討した。具体的には、飽和磁気ヒステリシス曲線を中立磁化曲線とヒステリシスギャップ曲線に分離し、それぞれのべき級数展開の係数をパラメータとして取り出し、応力や残留ひずみとの関連を調査した。

### 2. 中立磁化曲線とヒステリシスギャップ曲線

強磁性体に Fig.1(a)のような周期的な磁場を印加した場合、Fig.1(b)のように磁化曲線がヒステリシスループを表すことが知られている。特に、Fig.1(b)のように正負の飽和磁化まで磁場を印加したループをメジャーループと呼ぶ。また、磁場の減少過程を表す曲線 ABCD を下降曲線、磁場の増大を表す曲線 DEFA を上昇曲線と呼ぶ。

ここで、Fig.2 に示すような、メジャーループ  $M^{\pm}$  を考える。ここで、添字の+と-は、ヒステリシスの上昇過程と下降過程をそれぞれ表す。メジャーループにおいて、増加磁場あるいは減少磁場における磁化  $M^{\pm}$  は、次のよ

連絡先: 渡邊 誠、〒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: makoto.watanabe.37x@st.kyoto-u.ac.jp

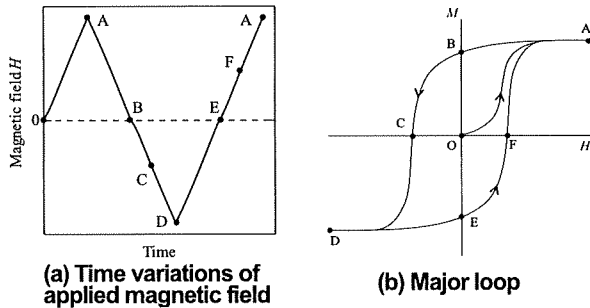


Fig.1 Magnetization curve for ferromagnetic

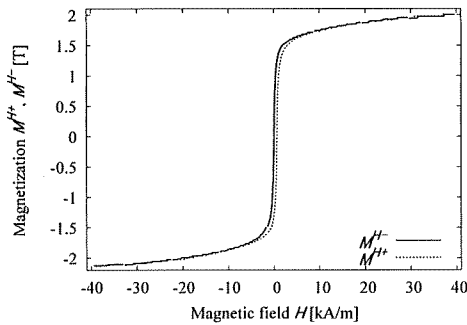


Fig.2 Magnetic curve

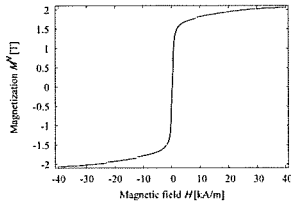


Fig.3 Neutral magnetic curve

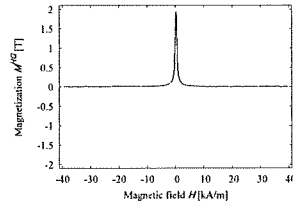


Fig.4 Hysteresis gap of magnetization

うに与えられる。

$$M^{H\pm} = \frac{M^{H+} + M^{H-}}{2} + \delta \frac{M^{H+} - M^{H-}}{2} = M^N + \delta M^{HG} \quad (1)$$

ただし、 $M^N$ は、 $M^{H+}$ と $M^{H-}$ の平均値、すなわち、中立磁化であり、 $M^{HG}$ はそれらの差、すなわちヒステリシスギャップである。また、 $\delta$ は、磁場 $H$ が座標軸方向に増加するとき+1、減少するとき-1の値をとるヒステリシスを表すパラメータである。

Fig.3に示す中立磁化 $M^N$ は、 $M=0$ 、 $H=0$ の原点に関して対称であるため、磁場の奇関数で表すことができる。一方で、Fig.4に示すヒステリシスギャップ $M^{HG}$ は、磁場に関して対称であるため、磁場の偶関数で表すことができる。すなわち、 $M^N$ と $M^{HG}$ は以下のようなべき級数で表されることがわかる。

$$M^N = \sum_{i=1} g_i M^{2i-1}, M^{HG} = \sum_{i=0} h_i M^{2i} \quad (2)$$

### 3. 実験方法

#### 3.1 試験片

本研究では、弾性域測定用・塑性域測定用の2種類のSS400鋼試験片を使用した。

まず、弾性域測定用試験片はFig.5に示すようにJISZ2201規格に準拠した形状のもの(E8-20型)を3本作成した。

次に、塑性域測定用試験片として、Fig.6に示す形状の試験片(P8-20型)を作成した。この形状は、塑性変形が確実に試験片中央部で発生し、かつ後述の磁化曲線の測定範囲においてなるべく一様に変形するよう意図したものである。P8-20型試験片では、最大ひずみが1.25%、2.50%、3.75%、5.00%となるように引張荷重を与えたあとに除荷し、異なる残留ひずみを生じさせたものを各3本作成した。各試験片の最大ひずみと残留ひずみをTable1に示す。

#### 3.2 磁化曲線の測定

磁化曲線の測定方法について説明する。測定方法の模式図をFig.7に示す。電磁石を用いて試験片長手方向に磁場を印加しながら、試験片長手方向の磁場 $H$ 、磁化 $M$ の測定を行った。また、弾性域測定の際は、引張試験機を用いて試験片長手方向に応力を負荷した。なお、引張応力は0MPa~200MPaまで20MPa刻みとした。

磁場 $H$ の測定においては、磁場 $H$ の面方向成分が試験片の表面の境界において連続であることから、Fig.7のようにホールセンサの先端を試験片中央部表面に設置し、得られた磁束密度から試験片内部の磁場を求めた。

また、磁化 $M$ の測定には試験片中央部にエナメル線(直径0.1mm)を100巻きしたB-コイルを用いた。B-コイルから発生した誘導起電力をフラックスメータで積分して得られる試験片内部の磁束を、試験片の断面積で割ることによって磁束密度の値を算出した。そして以下の式、

$$B = \mu_0 H + M \quad (3)$$

を用いて磁化 $M$ を計算した。ここで $\mu_0$ は真空の透磁率( $=4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])である。

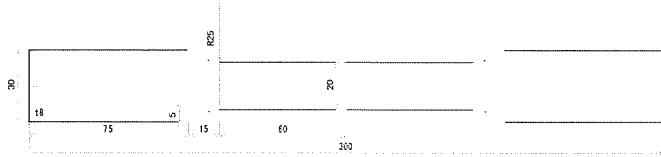


Fig.5 Specimen for elastic range measurement (E8-20)

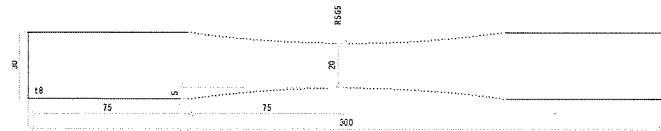


Fig.6 Specimen for plastic range measurement (P8-20)

Table 1 Maximum strain and residual strain (P8-20)

試験片名称	最大ひずみ	残留ひずみ (歪ゲージから読取)
P8-20-5	0	0
P8-20-6	0	0
P8-20-7	0	0
P8-20-8	0.0125	0.0111
P8-20-9	0.0250	0.0232
P8-20-10	0.0375	0.0353
P8-20-11	0.0500	0.0476
P8-20-12	0.0125	0.0109
P8-20-13	0.0250	0.0232
P8-20-14	0.0375	0.0353
P8-20-15	0.0500	0.0476
P8-20-16	0.0125	0.0109
P8-20-17	0.0250	0.0231
P8-20-18	0.0375	0.0358
P8-20-19	0.0500	0.0476

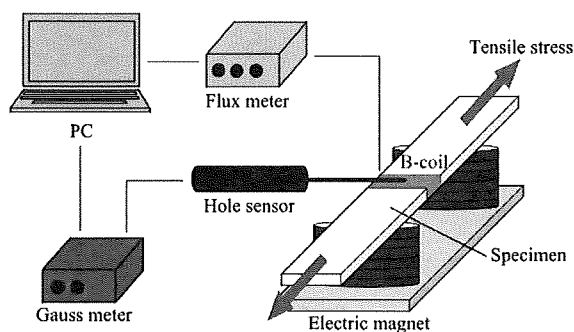


Fig.7 Experimental set-up for magnetic measurement

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 磁化曲線

まず、弾性引張応力下での磁化曲線の測定結果の一部を Fig.8 に示す。磁化の最大値が応力の増加とともにわずかに減少していることがわかる。また、0kA/m~5kA/m 領域の磁化曲線の傾き、すなわち磁化率も応力により若干変化している。これらは、磁気弾性結合効果によるものと考えられる。

次に、塑性変形を有する試験片の磁化曲線の測定結果の一部を Fig.9 に示す。凡例の括弧内の数字は、それぞれの試験片の残留ひずみである。残留ひずみの増加とともに磁化率が減少していることがわかる。これは、塑性変形に伴い、転位などの磁壁移動を妨げる因子が増加したためと考えられる。

### 4.2 応力と塑性変形の評価

実験により得られた磁化曲線を、中立磁化曲線とヒステリシスギャップ曲線に分離し、(2)式による最小二乗近似を行い、それぞれの試験片について各パラメータ  $g_i, h_i$  を求めた。このとき、磁場の 30 次まで、すなわち  $i=30$  までの近似を行った。また、Fig.4, 5 のように狭い磁場範囲で急激な磁化の変化が起こるので、近似精度の向上のために、-2kA/m~2kA/m の磁場範囲のデータを用いた。

Fig.10 に弾性応力を負荷した試験片の解析結果を示す。紙面の都合上、 $g_1, g_3, h_0, h_2$  のみ示す。各パラメータとも、100MPa 付近で極値を持っており、応力に対して 2 価関数的な変化をしていることがわかる。したがって、これらのパラメータを用いると 0MPa~100Mpa の範囲での応力評価は可能であるが、それ以上の応力範囲では応力を一意に求めることができないと考えられる。

Fig.11 に塑性域試験片の解析結果を示す。弾性域試験片と同様、 $g_1, g_3, h_0, h_2$  のみ示す。各パラメータとも、残留ひずみ 0~0.01 の間で急激に値が変化し、その後は緩やかに変化あるいはほとんど変化していないことがわかる。このことから、塑性変形の有無の評価については非常に有効である一方、大きな塑性変形が生じた場合にその程度を評価することは難しいと考えられる。

## 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、飽和磁化曲線を中立磁化曲線とヒステリシスギャップ

ブ曲線に分離し、それぞれのべき級数展開の係数をパラメータとして取り出すことで、応力と塑性変形を評価する手法について検討した。その結果、以下のことがわかった。

- ① 弾性域の引張応力下では各パラメータが、100MPa付近で極値を取るような変化をする。したがって、これらのパラメータを用いると0MPa~100Mpaの範囲での応力評価は可能であるが、それ以上の応力範囲では応力を一意に求めることができないと考えられる。
- ② 塑性変形を有する試験片については、残留ひずみ0~0.01の間で急激なパラメータの変化が見られ、0.01以降は大きく変化しない。このことから、塑性変形の有無の評価については非常に有効である一方、大きな塑性変形が生じた場合にその程度を評価することは難しいと考えられる。

今後、磁化曲線の低磁場領域における測定点数を増やすなどして、べき級数展開の近似精度を向上させるとともに、他関数での近似も検討し、応力や残留ひずみの定量評価に取り組んでいきたい。

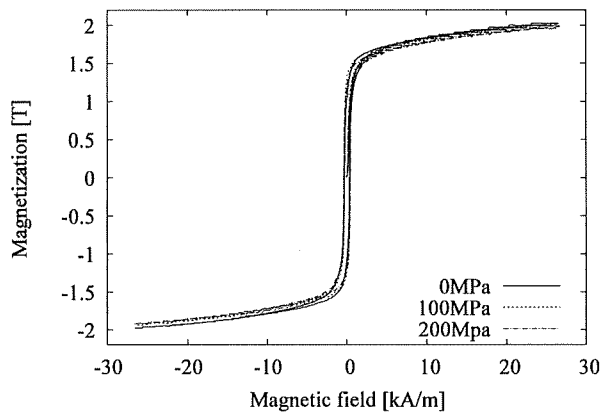


Fig.8 Magnetization curves of E8-20-1 under stress

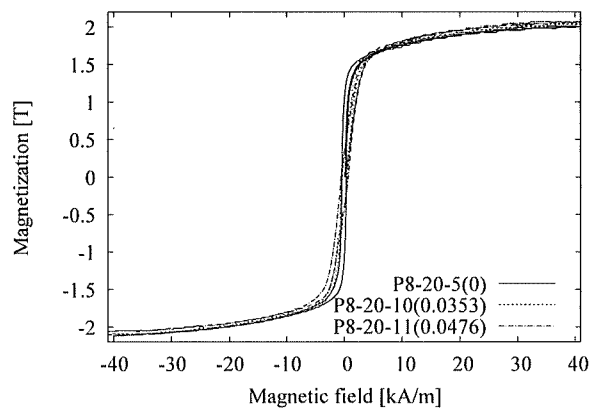


Fig.9 Magnetization curves of plastic deformed SS400

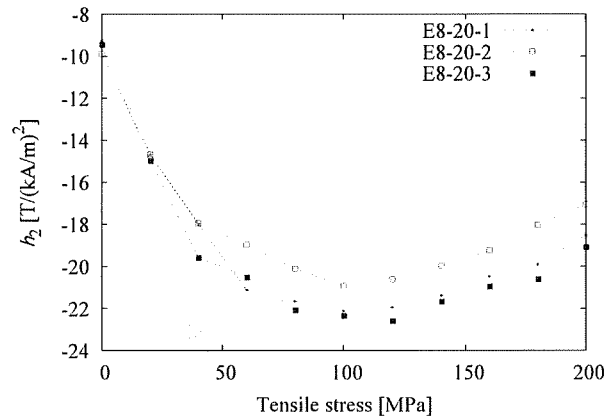
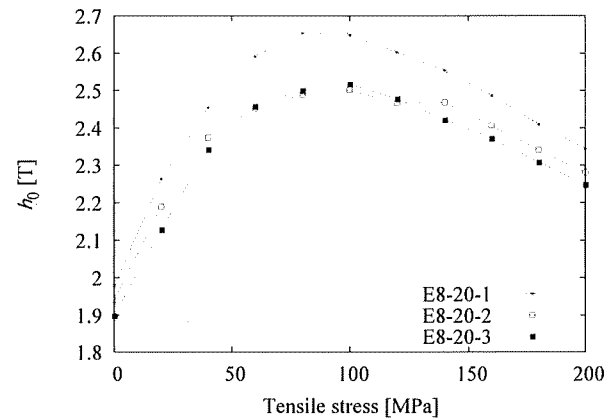
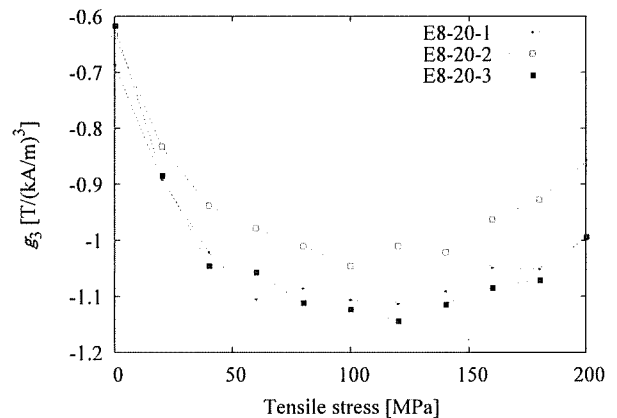
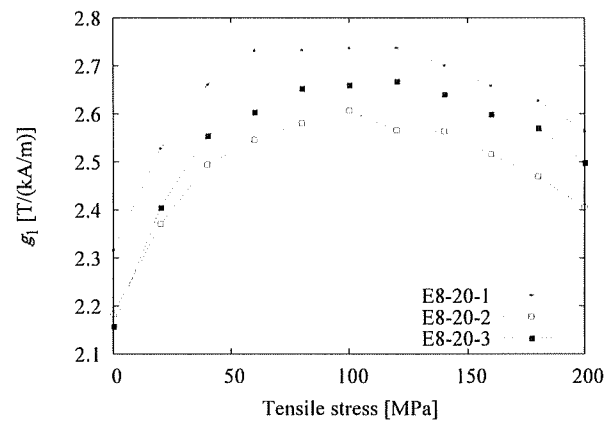


Fig.10 Relations between Parameters and tensile stress

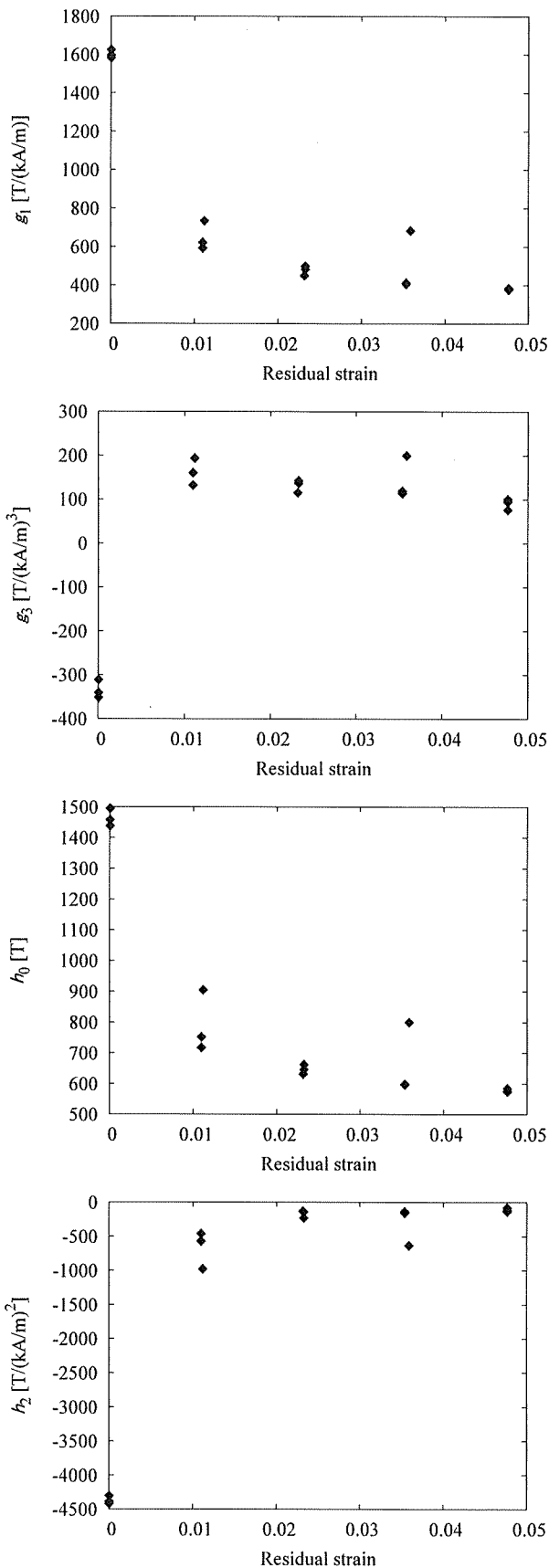


Fig.7 Relations between Parameters and residual strain

### 参考文献

- [1] R. M. Bozorth, "Ferromagnetism", Van Nostrand, 1951.
- [2] J. P. Joule, "On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars", Philos. Mag., Vol.30, 1847, pp.76-87.
- [3] E. Villari, "Change of magnetization by tension and by electric current", Ann. Phys., Vol.126, 1865, pp.87-122.
- [4] 山崎友裕, 山本真史, 平尾雅彦, "磁歪特性を利用した軟鋼の非破壊残留応力測定", 日本機械学会論文集 A, Vol.63, 1997, pp.1489-1494.
- [5] 関口謙一郎, 坂真澄, 阿部博之, "外部磁束密度計測による強磁性鋼の応力-透磁率関係の定量評価", 日本機械学会論文集 A, Vol.60, 1994, pp.1617-1623.
- [6] 山崎慶太, 小川孝寿, 櫛部享道, 石原大輔, 中野正典, 藤原耕二, 高橋則雄, 千葉晶彦, "引張荷重負荷時の磁化特性に着目した構造材の劣化評価", 日本応用磁気学会誌, Vol.23, No.4-2, 1999, pp.1541-1544.
- [7] 高橋正氣, "磁気と塑性-非破壊検査への応用", 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.2, 2001, pp.9-17.
- [8] 菊池弘昭, 荒克之, 高橋正氣, "材料劣化の非破壊評価のための磁気ヨークプローブ", 日本 AEM 学会誌, Vol.13, No.2, 2005, pp.113-118.
- [5] 木村圭一, "磁気弾性結合を用いた低炭素鋼の塑性変形と残留応力の評価", 京都大学修士論文, 2012.
- [6] 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(低サイクル疲労へのニューラルネットワークの適用)", 日本機械学会論文集, Vol.64, No.627, 1998.11, pp.2862-2868.
- [7] 槌田雄二, 岡茂八郎, 薬師寺輝敏, 榎園正人, "磁気センサによるオーステナイト系ステンレス鋼の引張試験ひずみ評価および面外曲げ疲労評価", 日本 AEM 学会誌, Vol.13, No.2, 2005, pp.99-106.
- [8] 中曾根祐司, 岩崎祥史, 清水徹, "マルテンサイト変態を応用した劣化・損傷の非破壊的検出に関する研究", 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 2001, pp.579-580.