

磁気センサと表面形状計測による鉄基構造材料の非破壊検査

山田興治 (埼玉大工)、磯部仁博 (原子燃料工業)

Nondestructive Evaluations of Iron-based Structural Materials by Magnetic Sensors and Surface Deformation Observations

Koji Yamada (Saitama University)

Yoshihiro Isobe (Nuclear Fuel Industries)

(埼玉大学地域共同研究センター、平成 13 年度実績報告)

Abstract

Nondestructive evaluations of iron-based material are investigated using magnetic sensors for magnetic Barkhausen noises and leakage flux sensors, and surface deformation detections by a CCD-Laser device. The tensile stress of 0.1% was successfully detected for ferromagnetic materials as A533B via lattice imperfection change, and 2% for paramagnetic materials as SUS304 via martensitic transformation. The surface deformation was detected as small as 10 μm for any mm thick plates by the CCD-Laser device, which corresponds to 0.01% residual strains.

キーワード：非破壊評価、磁性体、マルテンサイト変態、バルクハウゼン雑音、ホールセンサ

(Keywords: NDE, iron-based materials, martensitic transformation, Hall sensor, Barkhausen noise)

1. まえがき

近代社会が高度文明によって支えられていることは周知の事実であるが、その安定性や持続性には大きな問題を抱えている。例えば、一度電力系統や水道、ガス等の供給停止が長時間発生すると高度の情報機器を用いた設備は機能停止し、生命の危険さえ生じる。近代社会は従って、大きな不安定性を内在させている。本研究は社会の根幹をなしている基幹産業の中でも発電設備、ガス供給パイプラインなどに用いられている鉄鋼材料の劣化を未然に検知することを主目的とした非破壊評価である。特に重要なのは高感度にかつ簡便に評価できることであり、従来の超音波探傷の欠点を補うことである。

本研究の対象鋼材は原子力発電設備の圧力容器に用いられている鋼材 (A533B)、ガスパイプライン用鋼材 (XL45) や一般鋼材 (S25C) であり、強磁性的性質を示す。また最も頻繁に用いられているステンレス鋼 (SUS304, SUS316) は非磁性 (常磁性) を

示すが、材料内部の残留応力の増大に伴いマルテンサイトが生成され磁化する。一方でこの磁性体の磁性的変化を捉えることは従来の物性実験で培われた種々の高感度計測技術があることから構造材料の磁気的手法を用いた非破壊評価は有望である。従って、本研究で紹介する手法は従来の磁気物性評価そのものであり、材料の劣化即ち、無垢材からの格子欠陥密度の増加或いは初期条件からの変化を磁気物性変化として捉える。本研究において重要な事は非破壊的であることであり、磁化過程に発生する不連続磁化 (磁気雑音と称する) の変化や残留する局所的格子歪に伴う局所的な着磁量の変化を検知することが有効である。このことから材料の着磁を行い、非一様な着磁分布を検出する。また、部分的に厚みや表面形状の変化を伴うのを検出するのも一助となる。このことからレーザー-CCD を用いた距離計やレーザースペックル干渉法を用いたリアルタイムの表面形状変化についても紹介する(1,2,3,4,5,6)。

2. 実験

非破壊評価を行う対象は鉄を主成分とする材料であれば磁気的であるが周知のように材料の化学組成によって磁性的性質は大きく変化する。本稿ではまず、局所的な着磁量変化を捉える方法を紹介するが、これが物性物理的には漏洩磁束分布測定となる。また格子欠陥密度と大きな相関がある磁壁移動の様相を観測する方法があり、これが磁気的雑音の観測である。さらに、表題に掲げる表面形状変化の計測とは、無垢材が形状変化を受けることによる内部残留歪の検出を元の形状からの差分をとることによって検出することであるが、本稿では最初が平面であるとしてその厚み変化或いは表面形状変化を計測する。以下に試料準備についても説明する。

2.1 試料作成

試料には鉄主成分鋼材で強磁性を示す A533B, S25C, XL45、また常磁性を示す SUS304, SUS316 などを用いた。本試料には最大 5 t の引張り荷重を加え 750MPa にいたる破壊直前に至るの種々の試料を作成した。巻末に A533B のみについて化学組成を示す。

2.2 磁気的計測

まず、図 1 に示すような位置制御可能な装置にホールセンサーを装着する。用いたセンサーは半導体 (GaAs) であり、その大きさは 120 μm 角、50 μm

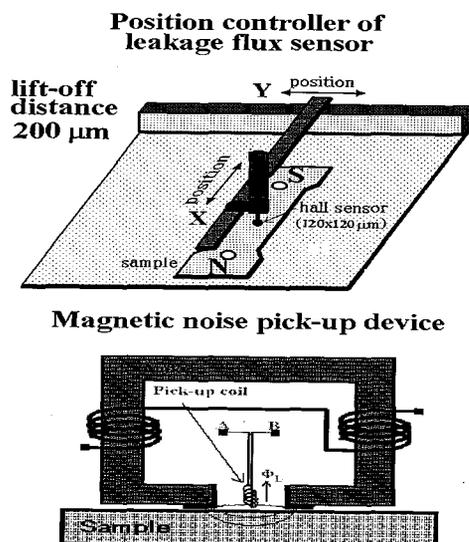


図 1 漏洩磁気〔上〕と磁気雑音(下)測定装置

厚である。本センサーを用いた漏洩磁束密度測定は空間分解能を上げるために小さいものを用いた。また素子が小さいことから相対的にオフセット電圧が大きく、これを相殺する回路の不安定性からドリフトが発生する。これらを解決するためにホール素子をロックイン回路に組み込みその動作周波数は 10 kHz、フィルタの時定数を 0.1s に設定した。これら設定値はホール素子内キャリアのローレンツ力によるホール電圧発生所用時間が数マイクロ秒であることから最適値となった。観測磁束密度 160A/m のフルスケールに対して 12bit の分解能で CPU に取り込み、多数サンプルによりさらに計測精度を上げ、0.1A/m 程度が 1LSB となった。尚、本実験では試料面からホール素子までの距離 (リフトオフ) を 200 μm 一定とした。磁気雑音測定は図 1 (下図) に示す掃引磁界の仕方に強く影響されることから最大磁界 (2000A/m) に達するまでの時間を 70ms とした。このとき得られた信号は得られた波形のフラクタル次元 ($D=1.66$) の計算から最大の情報を含むことを検証した。

2.3 表面形状変化測定

表面形状測定は CCD-Laser (C-L) が一体となった距離計を用い試料面から C-L 装置までの距離を一点ずつ計測した。また図 2 に示すような Ar-レーザスペックル干渉計を用いて荷重をかけた状態の実時間計測も試みた。

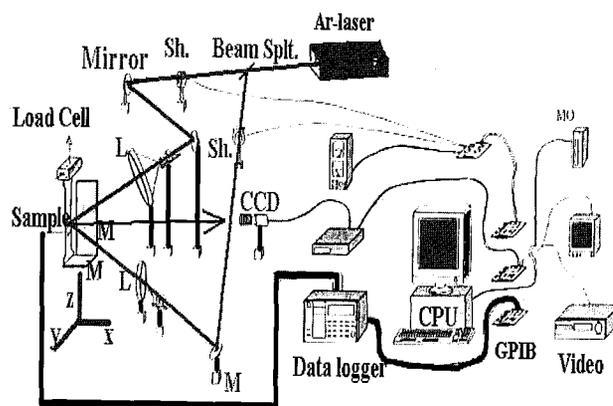


図 2 Ar レーザースペックル干渉計

図2においてレーザスペckル干渉パターンは CCD より取り込み、データロガーに記録する。本図における干渉基準鏡により、試料面の x,y,z の3方向の表面形状変化を CCD に取り組んだ。直前に配置した光子チョップにより3方向の入力切替が可能である。記録画面数総計は20000フレームにも及ぶが、変化の小さな場合には数-20コマおきの差画像を用いる。このようにして3600秒に及ぶ引張り試験試験での表面形状変化を計測することが出来た。

3. 実験結果

まず、強磁性を示す A533B 試料の漏洩磁束分布の計測結果例を図3に示す。尚、A-18は無垢材であり、

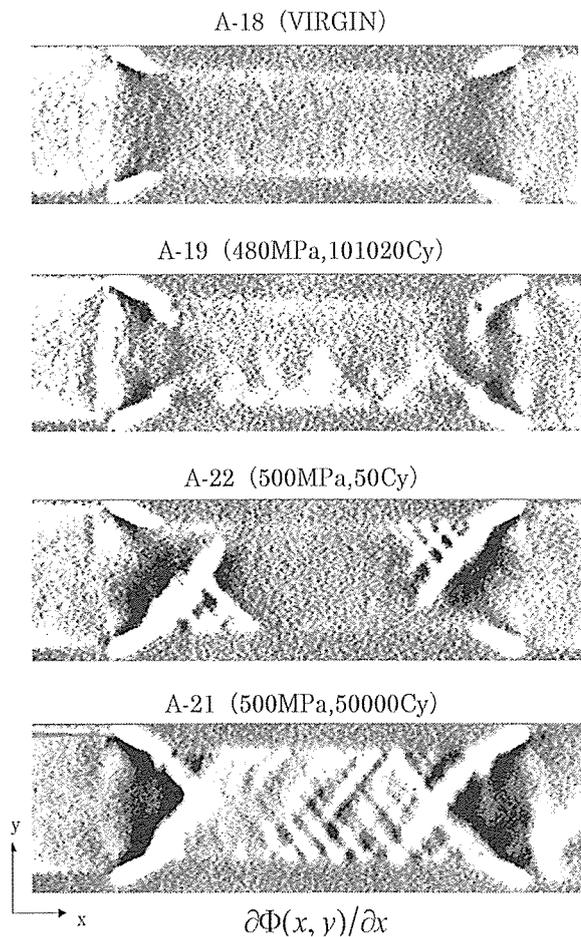


図3 繰返し引張り応力を加えた試料の漏洩磁束一次導関数分布 ($d\ddot{O}(x,y)/dx$)

注：A-18(無垢材)、A-19(480MPa,10万回)

A-22(500MPa,50回)、A-21 (500MPa,5万回)

巻末に試料準備過程を説明している。この図から判ることは無垢材は内部的には一様な状態であり、漏洩磁束の一次導関数分布も一様になっている。留意しなければならないのは着磁分布の変化を観るために80kA/mにて着磁後に測定したことと、観測磁束密度 $B(x,y)$ に対し、 $SdB/dx = d\ddot{O}(x,y)/dx$ を図示していることである。多数回の繰返し応力を加えることによりモザイク的な格子欠陥密度分布が観測される。

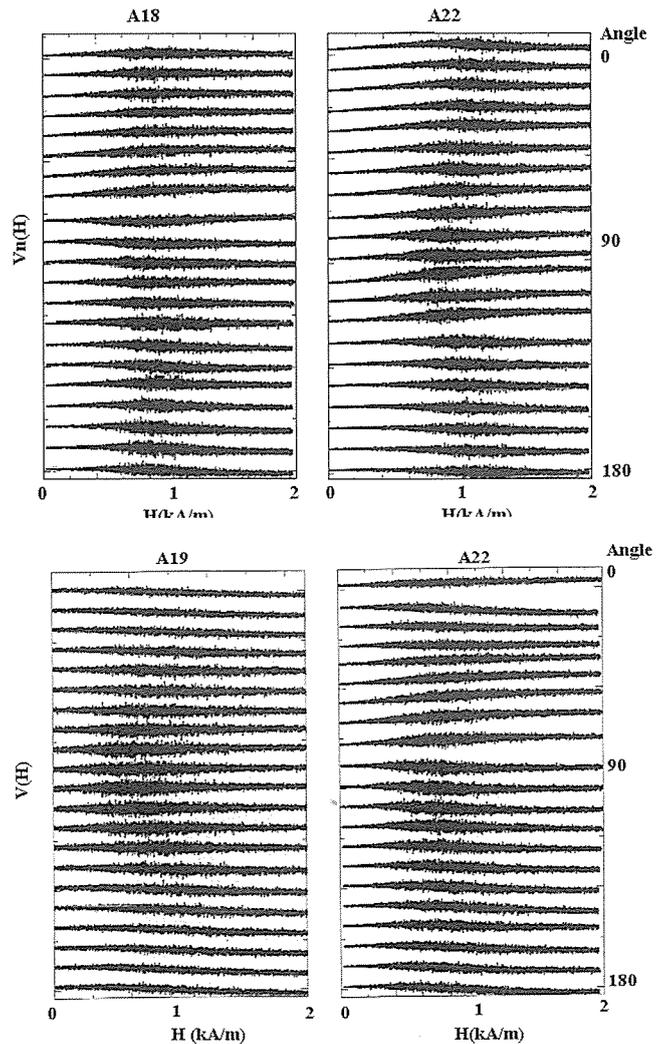


図4 繰返し応力による変形試料の磁気雑音

ついで磁氣的雑音の観測結果を図4に示す。A18、A19,A21,A22の各試料は図3の場合と同じ繰返し引張り応力を印加したものであり、一旦消磁してから測定した。各図の上から順にヨークの角度は0-180度を試料長手方向に対して0-180C変化し測定した。

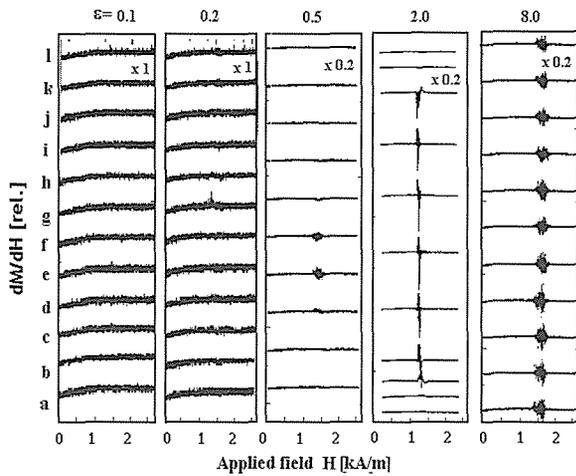


図5 SUS304 の試料にて観測される磁気雑音
(注: $\epsilon=0.1\%, 0.2\%$ 以外の振幅は縮小表示)

明らかに残留応力に対応して磁気異方性が発生し、磁気雑音は観測する方向によって頻度、振幅ともに変化していることが分かる。本試料の場合残留歪、応力に対して平行方向に磁壁移動に対する障壁が高いことが分かる。またそれに垂直方向では殆ど雑音強度、発生磁界分布は変わらない。図5には常磁性である SUS304 試料の種々の残留歪における磁気雑音振幅の各位置(a-l)の違いを示す。試料位置”g”が試料中央であり、ヨークの N-S は試料長手方向に平行

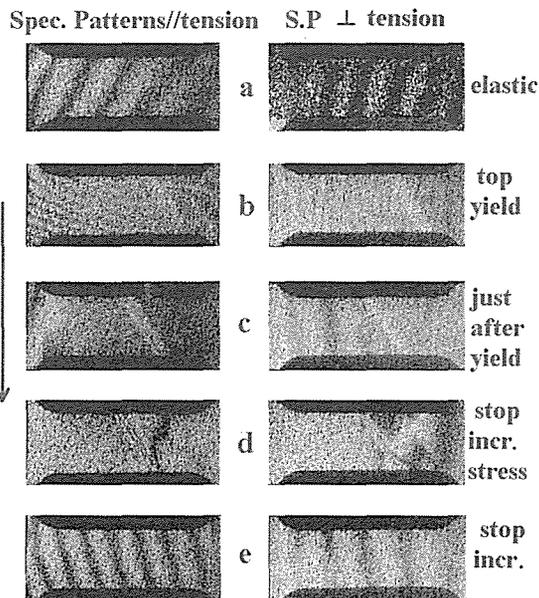


図6 レーザースペックル干渉法による変形測定

である。0.2%歪の試料は局部的残留歪が発生し、局部(”g”)にのみ磁気雑音が見られる。他の実験から、一樣歪の場合には3%以上でないとマルテンサイト変態が顕著に観られない事が磁化率の測定から検証されている。図6に示すのは Ar-レーザー干渉法(ALSI)により A533B 試料の表面形状変化の測定例である。各印加応力段階で動的な表面形状変化が観測される。ここで光学パターンのフリンジ間隔は約 900nm であり、精密な測定が可能となっている。さらに x,y 方向の L ders 帯内の変形が進行する様子も実時間的に捉えられている。詳しい説明は他書に譲る[2]。また X 線観察による結晶間隔即ち残留歪なども全試料面で計測し、他の計測値と比較を行った。

4. 検討

漏洩磁束密度の物理的起源は電磁気学的に明確であり、局部的磁気モーメントから発生する磁束密度の重ね合わせで表現できて、下式で与えられる[1,7,8]。

$$B(R) = \int \text{grad} \rho[\tau(r)] \cdot \frac{(R-r)}{4\pi|R-r|^3} dv - \int \rho[\tau(r)] \cdot \text{grad} \left[\frac{(R-r)}{4\pi|R-r|^3} \right] dv \quad (1)$$

第1項は局所磁気モーメントの変化 $\text{grad} \rho(R)$ であり、第2項は試料形状の変化により与えられる。また計測成分は磁束の表面に垂直であることに留意する必要がある。この場合センサーまでの距離 d に対して垂直成分は d^{-5} で減衰する。従って、空間分解能はもっぱらセンサーのリフトオフ距離で決定されるが本実験では $L=200 \mu\text{m}$ 一定としたがこの分解能に与える影響は小さい。ついで磁気雑音の計測については検討する。厳密には観測している磁気雑音は外部検出コイルによるものであり、内部磁束変化とは異なる。即ち、外部に漏洩した磁束であり、ピックアップコイルに発生した磁束密度の時間変化 V は内部実効磁界 H 、試料内の位置 R 、ヨークの試料長手方向からの角度 θ 、リフトオフ距離 h の関数である。今、 H は時間に比例して印加したから $H=ct$ であり、

以下の式が成立する。

$$V(H, R, \theta, h) = -nS \frac{dB_{coil}(R, \theta, h, t)}{dt}, \quad (2)$$

[H(t) = ct]

ここで n,S はコイル巻数と断面積である。また B_{coil} と表示したのは内部磁束がコイル内磁束密度と異なることを明示するためである。この漏れ外部磁束と内部磁界の関係式は近似的に漏れ係数 C_L(R, h)を用いて

$$\frac{dB_{coil}}{dt} = C_L(R, \theta, h) \frac{dB_{int}(R, \theta, h)}{dt}, \quad (3)$$

(2)式は従って近似的に内部磁束密度 B_{int} = μH と表現できて

$$V(H, R, \theta, h) = -cnC_L(R, \theta, h)S \frac{dB_{int}(H, R, \theta, h)}{dH} \quad (4)$$

このように外部漏れ磁束密度 B_{coil} を用いて試料内部実効磁界 H を推定できるパラメータを導入すると C_L は計算不可能な量であるが、パラメータ <H_D> を以下のように定義する。(4)式を用いて、

$$\begin{aligned} \langle H_D(R, \theta) \rangle &\equiv \frac{\int HVdH}{\int VdH} \\ &\approx \frac{\int_0^{t_{max}} HdB_{int}(R, \theta)}{\int_0^{t_{max}} dB_{int}(R, \theta)}, (ct_{max} H_{max}) \end{aligned} \quad (5)$$

上式は分母、分子の C_L が相殺し、これによる影響がなくなる。物理的に不連続磁化に要する実効印加磁界であり、下式の物性量に対応する。

$$\langle H_D(R, \theta) \rangle = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^{K_j} \frac{\ddot{A}x_{k,j}}{x_{Dj}} \cdot H_k, \quad (6)$$

J は試料内の磁氣的ドメインの総数である。

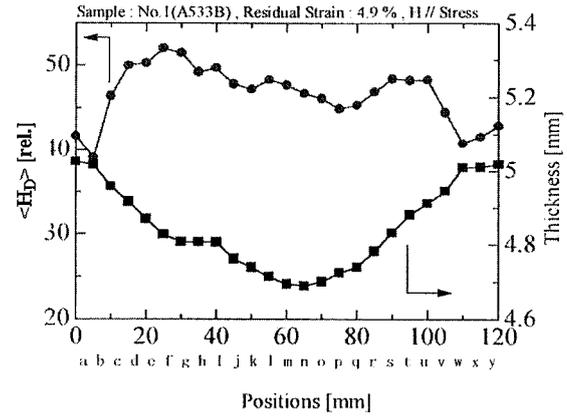


図 7 A533B にて測定した <H_D>

図 7 に前出の不連続磁化に要する印加磁界の測定例を示す。厚みの変化に対応して <H_D> が大きくなっているのが分かる。ただし試料の厚みの変化は残留歪に対応していることから物理的に理解できる。この物理量が妥当であるかを知るために試料残留歪との関係を図 8 に示す。

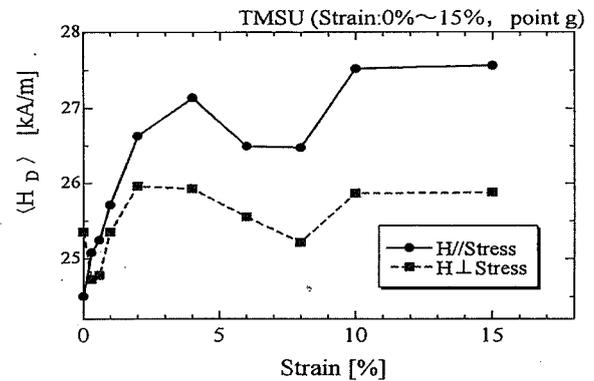


図 8 <H_D> と残留歪の測定例

上図から明らかなように歪の上昇と共に <H_D> も大きくなるが、降伏値近傍から下がり始める。これらは X 線の測定結果と一致する。さらに種々の試料の磁気雑音を計測し <H_D> を導出した。これらが物性量に対応して、格子欠陥密度が大きくなるに従って、磁壁移動に対応して障壁の高さに関係し、ほぼ比例関係にあることを示す。この意味でも <H_D> はミクロな格子欠陥の示強量となっている。

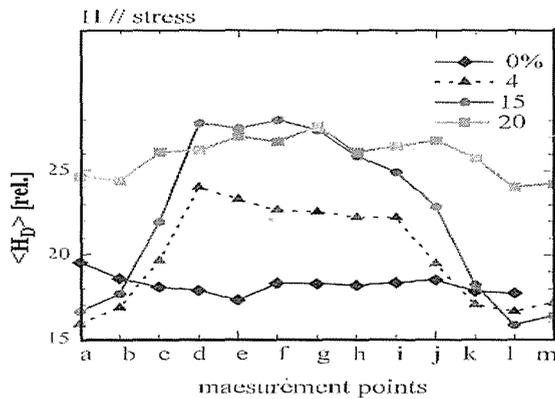
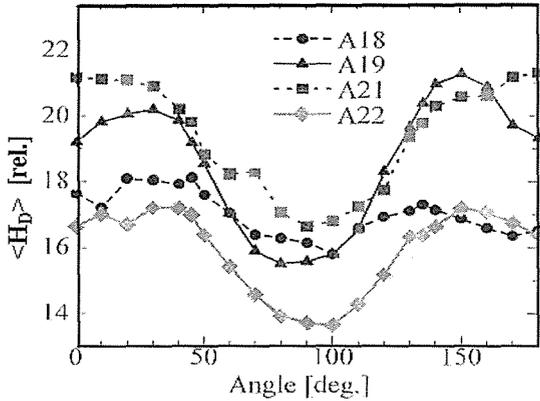


図9 繰返し応力を加えた A533B の角度依存性と
静圧を加えた同試料の位置依存性

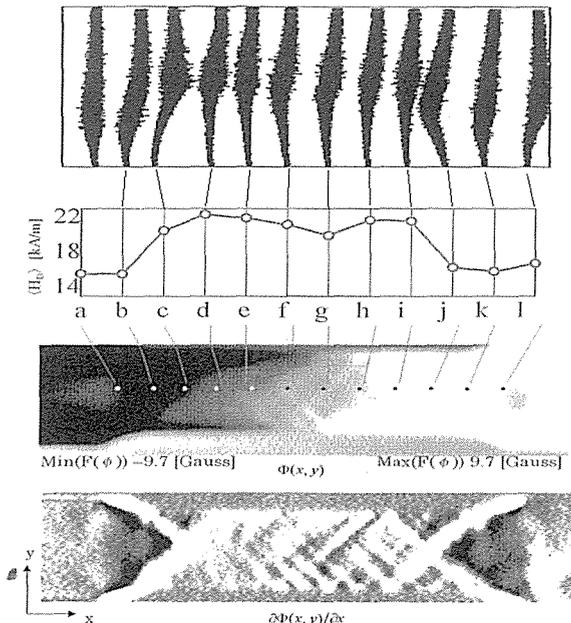


図10 磁気雑音、 $\langle H_D \rangle$ 、漏洩磁気の相互比較

図9(上)には前出 A533B 試料の $\langle H_D \rangle$ の角度依存性を示す。図9(下)に示すように試料位置によっても変化している様子が判る。明らかに歪により誘起された磁気異方性があり、磁気障壁が高いこと即ち歪方向を示す。図10には以上に示したものを一括して試料各位置に対応した磁気雑音、 $\langle H_D \rangle$ 、漏洩磁気を示すが、非一様な残留歪の分布に対応して $\langle H_D \rangle$ などのパラメータが“劣化”の一例である歪の局所性を可視化できたことになる。

5. 結論

本実験研究により磁気的な劣化診断に有効であることが分かった。しかし、試料厚み方向の診断など未だ未解決の問題がある。

付録 試料の化学組成

A533B (表示は重量比%) : 鉄は残部

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
0.18	0.14	1.53	0.004	0.002	0.66	0.56
Cu	Al	N	As	Sn	Sb	
0.03	0.01	0.0098	0.003	0.004	0.0008	

アニール条件：860-890C、2hr後水冷、その後、650-660C、2hrの後空气中除冷

6.参考文献

- 1.K. Yamada et.al. Nonlinear Electromagnetic System, ed. by Kose and J. Sievert, IOS Press, 1998, pp153-156
- 2.K. Yamada and T. Saitoh, J. Mag. Magn. Mater. 104,1991,pp341-342
- 3.S. Ishige, Master thesis, Saitama Univ., March 2000
- 4.H. Kronmuler, Candian J. Phys. Vol45(1967)
- 5.S. Shoji, Doctor Thesis, Saitama Univ., March 1999
- 6.K. Yamada et al, Proc. IWAM · 7, Nagasaki, 1997,pp114-119
- 7.K. Yamada, Y. Isobe et al., J. Magn. Soc. Jpn., 23, 1999,pp718-720
- 8.K. Yamada et al., in press, Proc. Workshop on Magnetism and Lattice Imperfections, Hanamaki, Iwate, April, 2000