

## 磁場計測と逆問題解析の融合による鉄鋼材料予防保全システムの開発に関する研究

研究代表者 神戸大学大学院自然科学研究科 教授 小島史男

研究分担者 岩手大学工学部附属金属材料保全工学センタ 教授 高橋正氣

研究分担者 岩手大学工学部附属金属材料保全工学センタ 助教授 菊池弘昭

研究分担者 ノースカロライナ州立大学数学科 教授 伊東一文

### 1. 緒言

原子炉，橋梁，鉄道施設，航空機等に使用される鉄鋼材料システムの材料損傷報告が最近増加しており，社会システムの安全・安心を確保するうえで，材料システムのヘルスマニタリング技術が重要な問題となってきた。BWR 原子力プラントで数年前に多発したシュラウド損傷事例においては，ステンレス系合金の“みがき”に起因して発生した表層部の残留応力が悪影響をおよぼしたとの指摘もある。このように当初は発生するはずのない(予測できない)と考えられていた材料欠陥の発生を予測することは，従来きわめて困難な問題と考えられてきた。最近，近い将来起こりうる危険を未然に防ぐ，いわゆる予防保全の考えが注目されている。システム稼働前と稼働後に時系列的に材料システムのモニタリングをおこない，鉄鋼構造物の定期健康診断データから欠陥発生の予測を実施することは，予防保全の有用な技術と考えられる。特に製品出荷時の材料の特性を記録することは，材料システムの初期状態から経年劣化評価や余寿命評価をするうえで貴重な情報となる。超音波探傷法，渦電流探傷法などの既存非破壊評価技術は音場，電磁場領域での物理特性の局所変化を鋭敏に検出できる優れた非破壊評価技術である。最近のセンサ技術の高機能化と高速計算やネットワーク環境の普及に伴い，高度な診断技術が確立されている。しかしながらこれら既存の診断技術はシステム稼働中の供用期間中検査を対象としているため，経年劣化に伴って発生する疲労き裂，システムの稼働環境により発生する応力腐食割れなど，欠陥の有無を調べることを得意としており，出荷前あるいは稼働前の初期状態をモニタリングする機能は十分とはいえない。材料システムの微視的な構造は，疲労き裂や応力腐食割れのような外面的な構造変化のように可視化することが困難である。

このような観点から，本研究においては，材料システムの外面的な変化が進む前の材料の構造変化を新たに開発する磁気センサによりモニタリングし，材料の欠陥発生を予測する新しいモニタリング技術の開発をおこなった。磁性パラメータによる材料劣化に関する非破壊評価の可能性については，本研究グループも参加した日本 AEM 学会研究委員会(平成8～13年度)「原子炉および炉内構造物の経年劣化の非破壊計測と評価に関する調査研究」における先行研究がある<sup>[1]</sup>。この知見をもとに，本研究においては，材料を一定の周期で磁化し局所的な磁性の変化の入出力を開発した磁気プローブにより記録，逆問題解析シミュレータの結果を参照しながら，劣化レベルの特性を評価するシステムを構築する新しい非破壊評価法の研究を実施した。

本研究では，まず磁気プローブによる磁性材料の磁気特性の評価をおこなった。最初に，S490 材に機械的疲労試験を実施し，もとの試験材とのマイナーループ磁気特性を比較することにより，材料劣化評価の有用性について調査・検討をおこなった。この結果にもとづき，検査システムのシミュ

レータを開発し、逆問題解析による劣化評価地図作成アルゴリズムの開発をおこなった。最後にシミュレーションによる計算実験および磁性材料への欠陥検知への応用に関する研究室実験をおこない、提案した評価手法の有用性について検証した。

## 2. 磁気特性による材料評価パラメータの調査

まず機械疲労試験を実施したマイナーループの特徴から材料の磁気特性について調べた。Fig.2.1にあるように、磁気ヨーク型プローブの両端を被測定材料と密着させた状態で配置することで閉磁路を構成し、励磁コイルに三角波電流を通电して材料を励磁した。Fig. 2.2 の回路構成で検査の入出力を測定することにより、磁気特性を求めた。

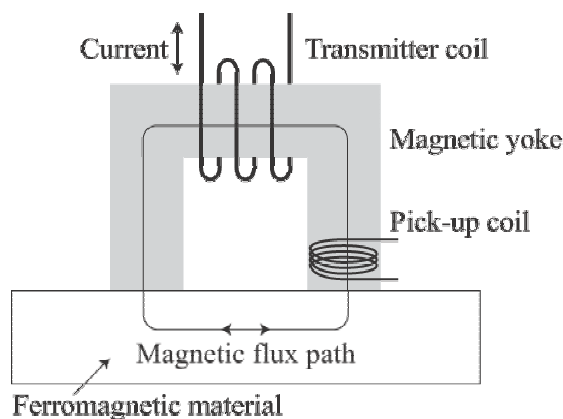


Fig. 2.1 Illustration of NDT

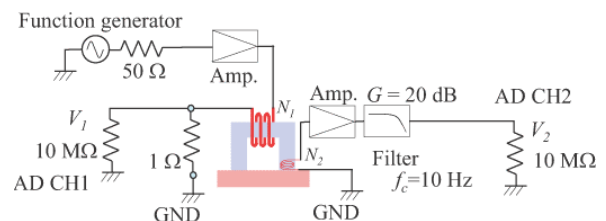


Fig.2.2 Circuit diagram of measurement apparatus

低周波三角波形電圧の振幅を徐々に増加させることで、最大磁場印加強度を増加させ、マイナーループを構成した。  $I$  を通电電流、  $N_1$  を励磁コイルの巻数、  $l$  を磁路長とすると、励磁磁場  $H$  は次式で計算できる。

$$H = \frac{IN_1}{l} \quad (2.1)$$

磁束密度  $B$  はヨーク端部に設置されたピックアップコイルに誘起された起電力  $V_2$  を積分することで、次式より算出できる。

$$B = -\frac{1}{N_2 S_2} \int V_2 dt \quad (2.2)$$

$N_{21}$  はピックアップコイルの巻数、  $S_2$  はピックアップコイルの断面積である。(2.1)および(2.2)式より、各周期ごとのマイナーループが入出力信号より計算できる。本報告では試験材料としてSM490A(610×150×6[mm])の平板試験片を採用した。Fig.2.3 は、この試験片と580[MPa]の荷重試験後の試験片に関する励磁コイルの入力電圧  $V_1$  と出力電圧  $V_2$  の検出信号を示す。Fig.2.4 は、荷重試験前の最大印加磁場を4段階にしたときのマイナーループの形状をあらわしている。マイナーループの特徴は、メジャーロープの磁気特性に関するパラメータに対応して、Fig.2.5 にまとめる<sup>[2]</sup>。Fig. 2.5 は元のSM490A 試験材および580[MPa]荷重試験後の各特徴パラメータ値を縦軸に、マイナーループの各周期を横軸にとり、その磁気特性を比較したものである。SM490A における実験

結果からマイナーループにおいても、劣化進行に伴い擬保持力  $H_c^*$  の増加, 最大印加磁場  $H_a^*$  における磁束密度  $B_a^*$  や擬残留磁束密度  $B_R^*$  の減少などの特徴が認められた。

メジャーループを得るためには、1000[Oe]以上の磁場をかけて材料を飽和磁化させる必要があり、この特性を利用して実際の非破壊評価を実施するのは困難である。マイナーループを利用すれば、材料を飽和磁化させずに計測をおこなうことができる。以上の調査結果から、最大印加磁場  $H_a^*$  を変化させることによって、多くのマイナーループを構成することにより、材料劣化に関する詳細な解析が可能となることが確認できた。

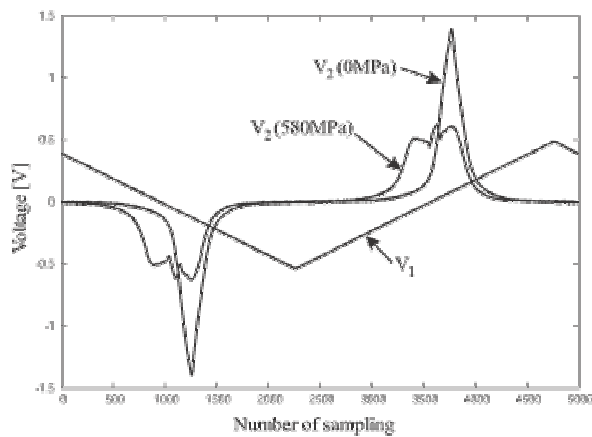


Fig. 2.3 Input and output voltage

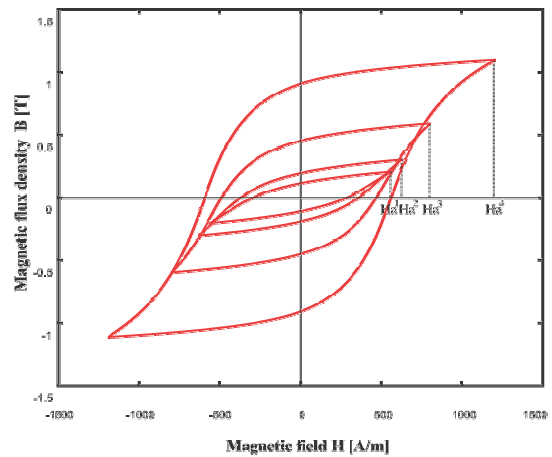


Fig. 2.4 Minor loop of SM490A

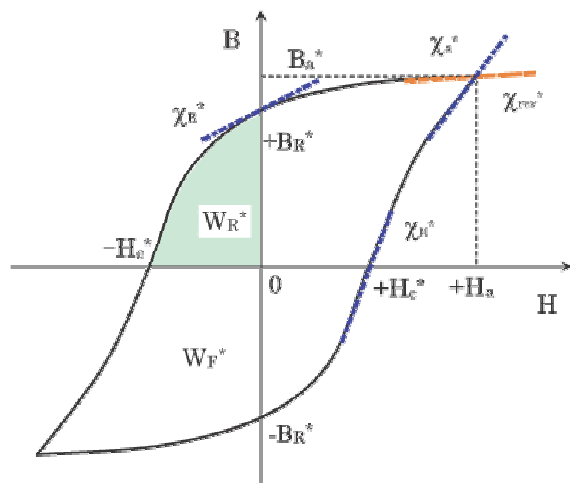
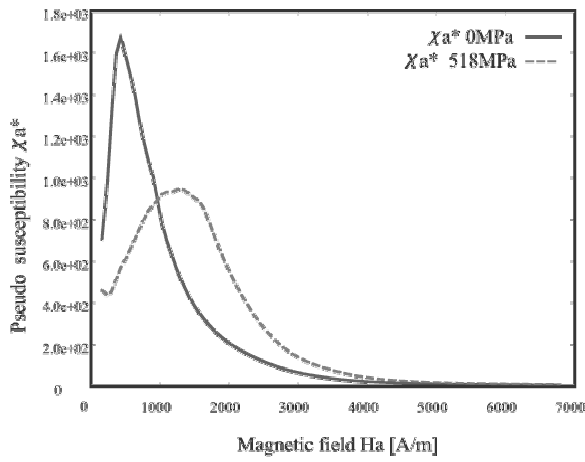
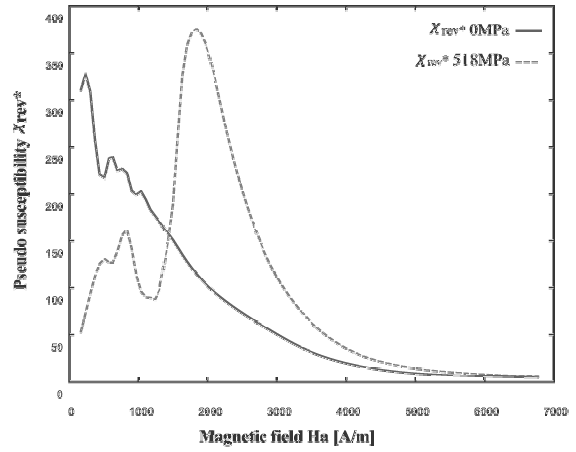


Fig. 2.5 Material sensitive parameters accompanying minor hysteresis loop

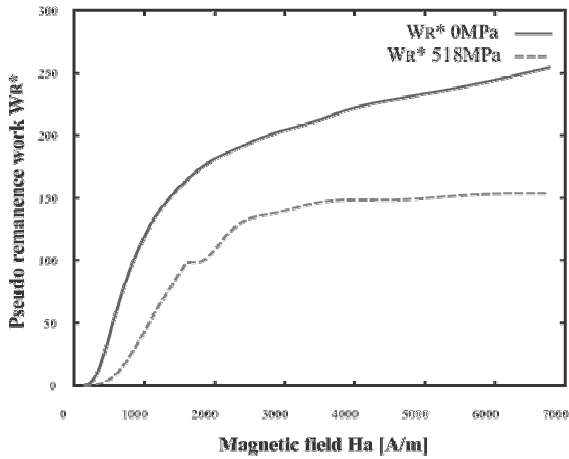
- $H_c^*$  and  $\chi_H^*$  : **pseudo coercive force** and magnetic susceptibility at  $H = H_c^*$
- $\chi_a^*$  and  $\chi_{rev}^*$ : **pseudo magnetic susceptibility** at an applied maximum field  $H = H_a^*$  for magnetization and **magnetic susceptibility** at  $B_a^*$  corresponding to the permeability at  $H = H_a^*$  for the demagnetization
- $B_R^*$  and  $\chi_R^*$  : **pseudo remanent flux density** and **magnetic susceptibility** at  $H = 0$
- $W_F^*$  and  $W_R^*$  : **pseudo-hysteresis loss** and **pseudo remanent flux loss**



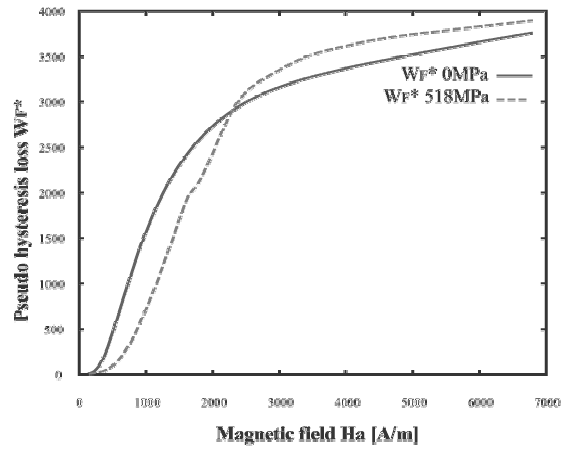
(a) Pseudo magnetic susceptibility  $\chi_a^*$  for the magnetization



(b) Pseudo magnetic susceptibility  $\chi_{rev}^*$  for the demagnetization



(c) Pseudo remanent flux loss  $W_R^*$



(d) Pseudo-hysteresis loss  $W_F^*$

Fig. 2.6 Magnetic properties of minor hysteresis loops with respect to material degradation

### 3. モニタリングシミュレータの開発と逆問題解析コードの整備

前節の調査結果にもとづき、検査環境のモデリングを含む検査シミュレータの開発をおこなった。簡単のため Fig. 3.1 に示すような空間二次元の検査環境を与えて数値解析コードの開発をおこなった。磁気マイナーループ特性と劣化の関係パラメータを

$$M_{pm}^* = \{B_a^*, H_c^*, B_R^*, \chi_R^*, \chi_H^*, \chi_a^*, \chi_{rev}^*\} \quad (3.1)$$

で与えた。磁気特性を関係づけた上記パラメータ群は最大印加磁場に依存して測定されるマイナーループの関数となる。本研究では、ピックアップコイルで検出される出力電圧を用いて、逆問題解析技法により材料劣化を特徴づける(3.1)式のパラメータ群の同定アルゴリズムの開発を実施した。

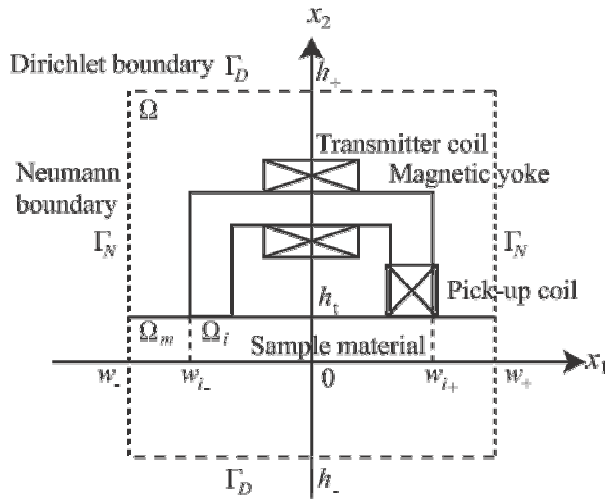


Fig. 3.1 Domain of the inspection

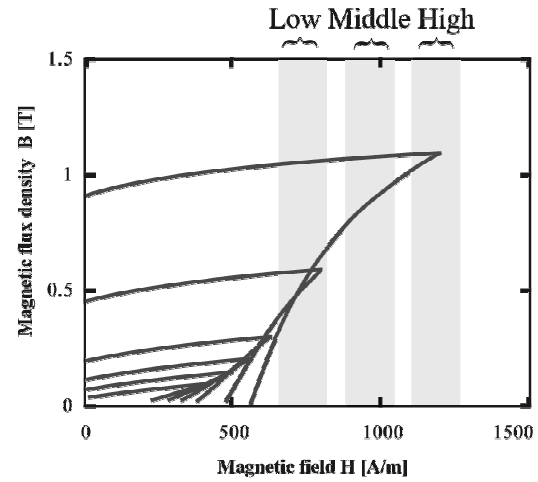


Fig. 3.2. Search area for minor loops

開発したシミュレータにおいては、仮想的な二次元領域

$$\Omega = \{x = (x_1, x_2) \mid w_- < x_1 < w_+, h_- < x_2 < h_+\} \quad (3.2)$$

に幅方向に広がりを持つ板厚  $h_1$  の強磁性材料が設置されているとして、その領域および検査の対象領域をそれぞれ

$$\Omega_m = \{x = (x_1, x_2) \mid w_- < x_1 < w_+, 0 < x_2 < h_1\} \subset \Omega \quad (3.3)$$

$$\Omega_i = \{x = (x_1, x_2) \mid w_{i-} < x_1 < w_{i+}, 0 < x_2 < h_1\} \subset \Omega_m \subset \Omega$$

のように、 $\Omega$  の部分集合で与える。入力は励磁コイルに流す電流密度  $J_s$  で与え、出力はピックアップコイルから検出する観測磁場データ  $Y$  とする。この入出力関係はマクスウェルの電磁方程式により求められる。励磁電流を低周波数領域で駆動すると仮定すると、検査の数学モデルは以下の静磁場解析における磁気ベクトルの  $z$  方向成分  $A = A_z(x_1, x_2)$  を求める問題に帰着できる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \nu \frac{\partial A}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \nu \frac{\partial A}{\partial x_2} \right) = -J_s & \text{in } \Omega \\ \frac{\partial A}{\partial n} = 0 & \text{on } \Gamma_N \\ A = 0 & \text{on } \Gamma_D \end{array} \right. \quad (3.4)$$

ただし  $\Gamma_N, \Gamma_D$  は検査対象から遠方の仮想境界を意味する。ここで  $\nu = f(B)$  は磁気抵抗をあらわし、空気領域、磁気ヨーク、検査材料ごとにその特性は

$$\nu = \begin{cases} f(B) & \text{in } \Omega_m \\ g(B) & \text{in } \Omega_{yoke} \\ 1/\mu_0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.5)$$

で与えられる。ヨーク端部に配したピックアップコイルはコイル内部を鉛直方向に鎖交する磁束密度を検出することができるので、観測モデルは

$$Y(\nu) = C \left\{ -\frac{\partial A}{\partial x} \right\} \quad (3.6)$$

で記述できる。また(3.6)式の  $C\{\bullet\}$  はピックアップコイルの有効領域での積分を意味する。なお逆解析に用いる観測データは各最大印加磁場  $H_a^*$  の励磁・消磁過程，すなわち，Fig. 3.2 に示すマイナーループの座標第1象限部分とする。材料の磁気抵抗関数  $f(B)$  は材料劣化評価パラメータによりその特性が変化するマイナーループの実験データからモデル化した。まず 3 次スプライン補間を用いて， $B-H$  曲線の近似関数を求める。印加励磁電流の周期に対応させて，各マイナーループの保磁力から最大印加磁場の区間  $[H_c^*, H_a^*]$  を

$$\hat{H}_- = \hat{H}_0^N \leq \hat{H}_1^N \leq \dots \leq \hat{H}_{N-1}^N \leq \hat{H}_N^N = \hat{H}_+ \quad (3.7)$$

のように  $N$  分割し，スプライン関数の節点集合を以下のように与える。

$$B(\hat{H}_i^N) = \left\{ \mu_0 \hat{H}_i^N + M(\hat{H}_i^N) \right\} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (3.8)$$

Fig. 3-2 は S490 材におけるマイナーループの実験曲線およびその近似曲線である。この近似曲線は(3.1)式 of 材料劣化指標パラメータ  $M_{pm}^* = \{B_a^*, H_c^*, B_R^*, \chi_R^*, \chi_H^*, \chi_a^*, \chi_{rev}^*\}$  に依存して決定できる。試験材料の磁気抵抗は最大印加磁場  $H_a^*$  に対応するマイナーループおよび下記の材料劣化指標パラメータ群に対応する近似曲線から

$$\nu(B) = f(B) = \frac{H}{B \left( H; M_{pm}^* \left\{ \hat{H}_i^N \right\}_{i=1}^N \right)} \quad (3.9)$$

で計算できる。Fig.3-3 はマイナーループ磁気抵抗曲線の構成例を示している。

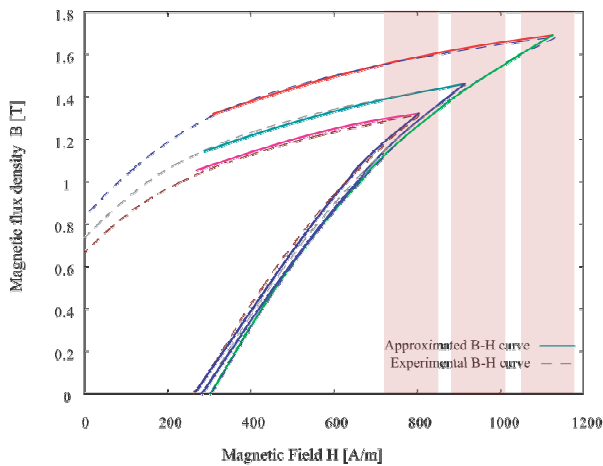


Fig. 3.3 B-H curves with respect to low, middle, and high degradation level

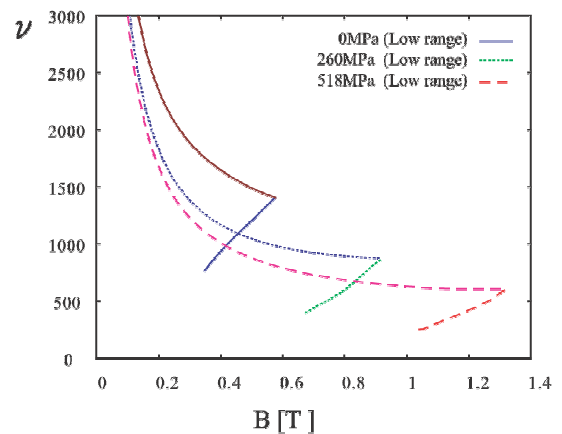


Fig. 3.4 Approximated magnetic reluctivity corresponding to low, middle and high degradation

このようにして，任意に材料劣化指標パラメータに関するモデル出力が計算できる。以下では逆に実験データから，その材料の劣化指標を逆問題解析により求める計算アルゴリズムの開発をおこなった。すなわち逆問題解析とは，与えられた実験データから材料劣化に関するマイナーループの構成パラメータ群(3.1)を推定することである。問題は，磁気プローブの走査ライン上にある各位置  $j$

において、磁化過程での電流密度  $\{J_s^i\}_{i=1}^{N_p}$  に対応する観測磁場のデータ  $\{Y_d^i\}_{i=1}^{N_p}$  が与えられたとき、出力誤差関数

$$E_j[M_{pm}^*] = \sum_{i=1}^{N_p} |Y_h^N(J_s^i(x_j), M_{pm}^*) - \tilde{Y}_j|^2 \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (3.10)$$

を最小にする最適なパラメータベクトル  $M_{pm} = M_{pm}^*$  を求めることである。最適化計算においては、(3.4)–(3.6)式に有限要素法を適用して数値解を求めた。ここでは磁気抵抗が磁束密度に依存するので、ニュートン・ラフソン法による繰り返し計算を適用した。求めた数値解に正規乱数を加えて、これを逆問題解析のデータとした。Fig.3.5 は数値解を求めるために設定した観測方法である。全体としては、Fig.3.6 のように、材料表面でラスタ状に磁気センサをスキャンすると仮定して疑似データを作成した。逆問題解析計算では、メタヒューリスティックの一種であるタブーサーチ法を用いた。Fig. 3.7 および 3.8 はこれらのパラメータから作成した特徴量

$$Deg = 0.5 \times \left( \frac{B_a^* - B_a^-}{B_a^+ - B_a^-} + \frac{\chi_a^* - \chi_a^-}{\chi_a^+ - \chi_a^-} \right) \quad (3.11)$$

の真の分布と推定分布を材料表面に投影したものである。以上の結果から材料の劣化を磁気特性の変化から検出できる可能性が確認できた。

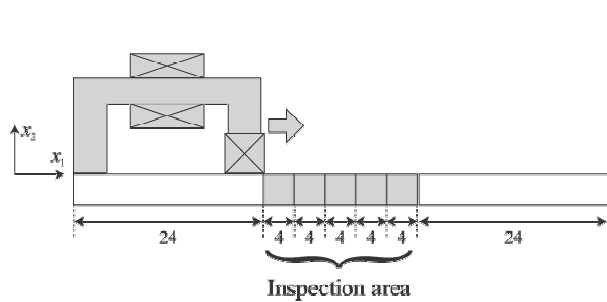


Fig. 3.5 Scanning strategies

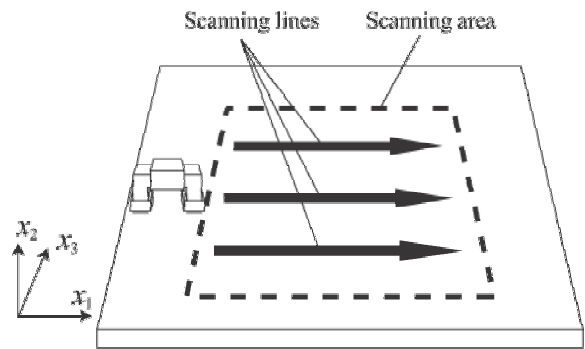


Fig. 3.6 Surface measurements

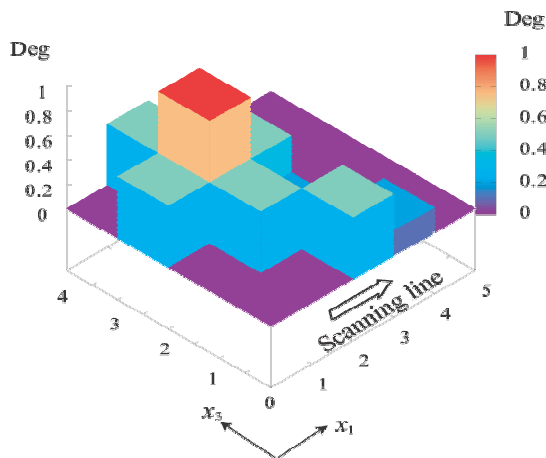


Fig. 3.7 True distribution

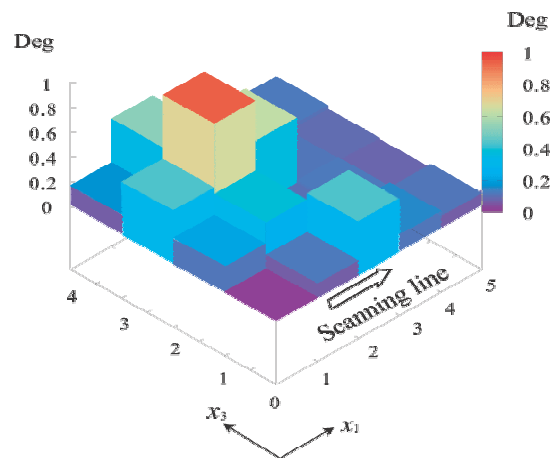


Fig. 3.8 Estimated distribution

#### 4. 材料劣化モニタリングシステムの製作と応用実験

これまでの結果にもとづき, Fig.4.1 のような材料劣化評価のための検査システムのプロトタイプを組み立て非破壊評価への適用実験をおこなった. この装置の基本的特性を評価するために, 材料の形状変化に関する鋭敏性の評価をおこなった. 具体的には, Fig.4.2 のような工作機械の天板を利用し空洞部分を推定すべきき裂形状と仮定した. 材料左端を原点として距離 30[mm]から 190[mm]までを 5[mm]間隔で計測をおこない, 33カ所の観測点においてマイナーループの磁気特性を計測した. 材料の形状変化により磁路が異なることから, マイナーループの特性が場所によって異なってくる. このデータから逆に幾何学的形状の同定が可能となる. Fig. 4.3 は磁路に関連するパラメータをマイナーループの測定から逆問題解析によって計算した結果である. この図からきずの長さ, 幅など幾何学的の形状変化が推定できる.

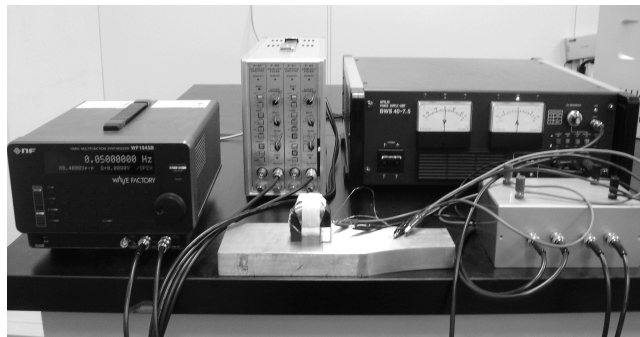


Fig. 4.1 Measurement system and magnetic probe

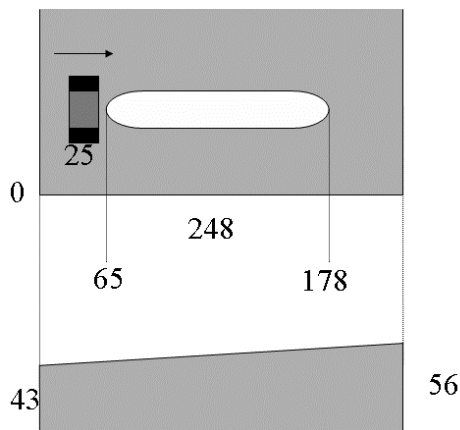


Fig. 4.2 Dimension of sample material

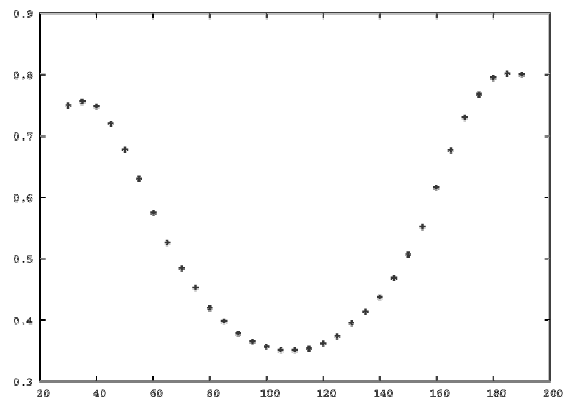
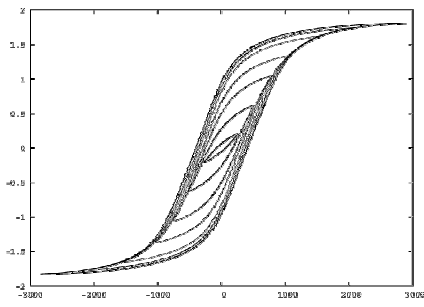


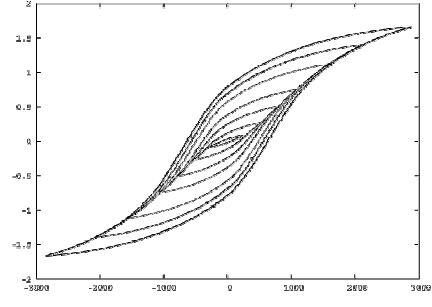
Fig. 4.3 Inverse solution

つぎに, 材料の品質評価への応用を目的として, S15C 材の冷間圧延の圧延率を 0,10,20,40(%)とした材料の磁気特性を計測し, 本研究で提案した逆問題解析の適用実験を現在すすめている. Fig. 4.4 は測定したマイナーループを表している. また Fig.4.5 に材料劣化とマイナーループ磁気特性の関係をまとめた. なおこれらの実験は研究分担者の所属する岩手大学工学部附属金属材料保全工学センターでおこなった.

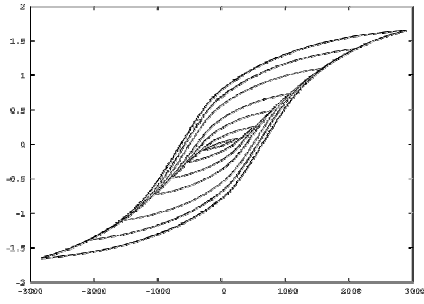




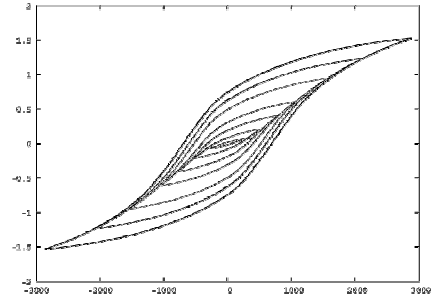
(a) Rolling reduction 0%



(b) Rolling reduction 10%

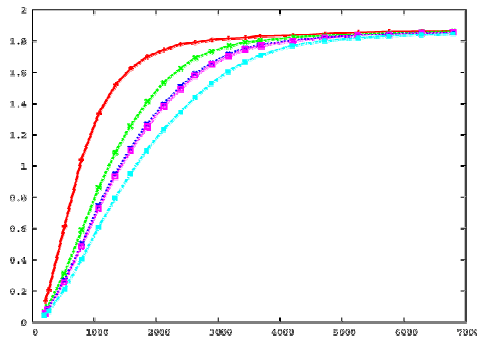


(c) Rolling reduction 20%

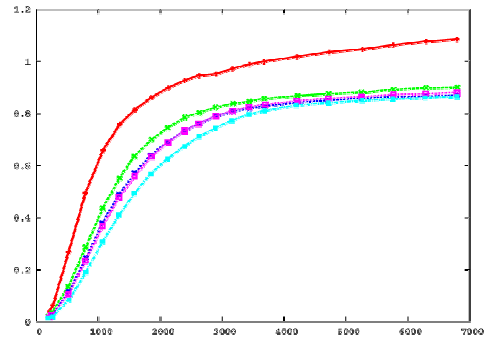


(d) Rolling reduction 40%

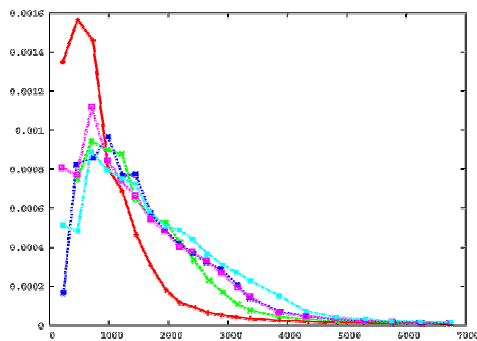
Fig. 4.4 Magnetic hysteresis loop for S15C



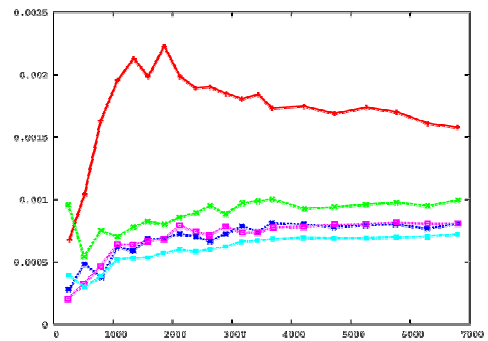
(a) Maximum flux density  $B_a^*$  at  $H_a^*$



(b) Pseudo remanent flux density  $B_R^*$



(c) Susceptibility  $\chi_a^*$  at  $H_a^*$



(d) Pseudo susceptibility  $\chi_R^*$  at  $H = 0$

Fig. 4.5 Characterization of material degradation using magnetic parameters

## 5. 今後の課題

材料劣化と磁気特性の関係性に注目して、磁気特性の変化から材料の劣化事象を定量的に評価する逆問題解析手法を提案し、その適用可能性を示すことができた。これらの評価の信頼性を高めるために、現在下記の研究を進めているところである。

- ① 材料劣化に高感度な磁気マイナーループの評価パラメータ、および検出性能向上のための最適な計測法の確立
- ② 逆問題解析アルゴリズムと測定システムとの統融合化による高精度な劣化評価機構の設計
- ③ マイナーループ測定と検査シミュレータによる磁気特性と材料劣化の関係データベースの構築

ここで開発した手法は、材料劣化の評価だけではなく、冷却・圧延工程での鉄鋼製品の品質評価に適用可能と考えられる。鉄鋼材質および加工履歴と電磁気特性の因果関係を調査し、材質に鋭敏な電磁気情報を的確に分析するための電磁応用計測と逆問題解析による信号処理技術の開発を今後指向し、鉄鋼生産工程における品証システムへの適用を考えたい。

## 参考文献

- [1] 日本 AEM 学会研究専門委員会編:「原子炉および炉内構造物の経年劣化の非破壊計測と評価に関する調査研究」調査報告書 2002.
- [2] H. Kikuchi, K. Ara, N. Ebine, Y. Sakai, Y. Kamada, and S. Takahashi: A probe using a magnetic yoke for NDE of ferromagnetic steels, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII), Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, 24 (2004) 146-152, IOS Press Amsterdam.
- [3] F. Kojima, K. Ara, and Seiki Takahashi: Identification of material degradation for nonlinear electromagnetic problem, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII), Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, 24 (2004) 85-92, IOS Press Amsterdam.
- [4] F. Kojima and R. Nishiyama: Quantitative evaluation of material degradation parameters using nonlinear magnetic inverse problems, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, (2006), IOS Press, Amsterdam (to appear).
- [5] F. Kojima and R. Nishiyama: Nondestructive evaluation for material degradation of steel sample using minor hysteresis loop observations, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XI), Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, (2007) IOS Press, Amsterdam (accepted for publication)