

鉄鋼材料におけるき裂発生以前の疲労損傷検出技術の研究

—平成12年度先行基礎工学分野に関する研究協力研究報告書—

(研究報告)



2001年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

鉄鋼材料におけるき裂発生以前の疲労損傷検出技術の研究
—平成12年度先行基礎工学分野に関する研究協力研究報告書—
(研究報告)

出町和之*, 宮健三*

概要

機器の安全性を維持しその寿命を正しく推定するためには、構造物中に存在する欠陥を定量的に評価する必要がある。現在、き裂を対象として様々な非破壊検査手法が適用されているが、機器の安全性をより一層高めるためには、き裂発生前における材料劣化の診断技術の確立がぜひとも必要である。我々は、劣化程度のパラメータとして材料の磁気的物理量に注目した。なぜならば、き裂の発生は局所的な応力集中によって起こると考えられ、塑性変形に対してもっとも敏感な物理量のひとつが磁気的物理量であるからである。昨年度、陳らによって、応力の負荷による漏洩磁場変化に関する研究が行われた。対象はSUS304ステンレス鋼である。これらの実験などにより、塑性変形と漏洩磁場変化の間に関係が存在することが示された。

漏洩磁場測定結果から試験片内部磁化分布を逆解析するために、新しくニューラルネットワークを用いた手法を開発した。測定結果から試験片内部の磁化分布を逆解析した結果、き裂先端付近で大きく磁化している。また、この逆解析結果から求めた磁束密度分布と測定結果は良く一致しており、逆解析結果が妥当であることがわかった。

最後に、漏洩磁場から試験片内部の磁化率分布を逆解析する手法を開発した。先に述べた磁化分布逆解析手法により劣化部分の相対的評価は可能であるが、磁化は外部磁場の影響を受けるため、劣化量の絶対的評価は難しい。そこで初透磁率の逆解析を試みた。本文中に、シミュレーションデータについて行われた逆解析結果を示す。

以上の研究により、漏洩磁場測定によるき裂発生以前における非破壊劣化診断の可能性が示された。

* 大洗工学センター、要素技術開発部、機器・構造安全工学グループ
客員研究員（東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設）

March, 2001

Diagnosis of degradation of SUS 304 steel material by the magnetic method

K.Demachi and K.Miya

Abstract

The quantitative evaluation of cracks in structural components is necessary to maintain its safety and to estimate its life. Moreover, the establishment of diagnosis technique of the material degradation before the appearance of crack is necessary for the higher safety. In this research, the magnetic value is chosen as the parameter for the material degradation. The crack is considered to occur by the local stress concentration, and the magnetic value is one of the most sensitive parameter for the elastic deformation of the material.

The research about leak field change of SUS stainless steel due to the stress was performed by Chen et al.. The measured leak magnetic flux density is large around a crack. From such a measurement result, it is found that the leak is related with the elastic deformation of the material.

The numerical method based on the Neural Network was developed for the inverse analysis of the magnetization in the specimen from the measured leak field. It is found the magnetization is large near the edges of the crack. The magnetic flux density obtained from this simulation result of the magnetization corresponds to the leak field.

Then the inverse analysis method was developed to estimate the distribution of susceptibility in the specimen from the measured leak field. Its results are denoted in the full report.

The new nondestructive evaluation method was supposed for the diagnosis of the degradation of the material before the appearance of cracks

Visiting Researcher (Nuclear Engineering Research Laboratory, School of Engineering,
The University of Tokyo)

目次

1. はじめに	1
2. 漏洩磁束密度測定	2
3. 磁化分布逆解析	3
3. 1 磁化の作る磁場	3
3. 2 ニューラルネットワーク	3
3. 3 ニューラルネットワークの学習	4
3. 4 磁化分布逆解析結果	4
4. 磁化率分布再構成	6
5. 結論および今後の予定	7
参考文献	8

図リスト

Fig.1 Size of the specimen	9
Fig.2 In-situ measuring result during tensile testing (0~3%) (Z.Chen et al. 10))	9
Fig.3 Distribution of magnetic flux density (Z.Chen et al. 10))	
(a) y component of magnetic flux density, (b) z component of magnetic flux density	10
Fig.4 Neural network architecture	11
Fig.5 The error distribution about verification sets	11
Fig.6 The magnetization distribution analyzed inversely	
(a) The absolute value of magnetization, (b) vector expression of x , y components of magnetization	12
Fig.7 The distribution of calculated magnetic flux density due to the reconstructed magnetization	
(a) y component of magnetic flux density , (b) z component of magnetic flux density	13
Fig.8 Comparison between the measurement results of magnetic flux density and calculated one due to reconstructed magnetization	14
Fig.9 The error distribution about verification sets	14
Fig.10 Comparison between true distributions of susceptibility and simulated results	
(a) 1st layer, (b) 2nd layer, (b) 3rd layer	15

1 はじめに

機器の安全性を維持しその寿命をき裂発生に絡めて正しく推定するためには、構造物中に存在する欠陥を定量的に評価する必要がある。そのため現在、き裂を対象として渦電流、超音波、X線などによる非破壊検査が適用されている。しかし、発生したき裂が進展すると構造物の破壊につながる。機器の安全性をより一層高めるためには、き裂発生前における材料劣化の診断技術の確立がぜひとも必要である。

そこで劣化程度のパラメータとして、材料の磁気的物理量に注目する。き裂の発生は局所的な応力集中によって起こると考えられ、塑性変形に対してもっとも敏感な物理量のひとつが磁気的物理量であるからである。磁気的物理量を非破壊検査手法に用いる研究はまだ少ないが、強磁性金属、規則合金、ステンレス鋼などでは磁気的物理量が塑性変形により変化することが詳しく調べられている¹⁻⁷⁾。本研究で対象としているSUS304ステンレス鋼の場合、通常非磁性体であるが、負荷を与えると応力集中部においてマルテンサイト変態を起こし強磁性を示すようになる。したがって、漏洩磁束密度分布測定結果からマルテンサイト相である磁化領域を再構成することができれば、き裂発生前における非破壊劣化診断が可能になる。

本報告書ではまず、昨年度、陳らによって行われた応力の負荷による漏洩磁場変化に関する研究について述べる⁸⁾。対象はSUS304ステンレス鋼である。これにより、塑性変形と漏洩磁場変化の関係が示される。次に、新しく開発した漏洩磁場測定結果から試験片内部磁化分布を逆解析する手法を紹介し、その逆解析結果を示す。この問題はいわゆる逆問題であり、従来の計算手法では取り扱いが難しい。ここでは、ニューラルネットワークを用いた研究を紹介する。ニューラルネットワークとは、脳における神経細胞の信号伝達系をモデルとした情報処理法である。一般的な特徴として、曖昧さを含むデータや、原因と結果の因果関係が明確な形で定義できない場合に有効であることが知られている。このことからニューラルネットワークは、測定誤差を含む磁束密度測定結果から材料内部の磁化分布を再構成する本問題を取り扱うのに適していると考えられる。最後に、漏洩磁場から試験片内部の磁化率分布を逆解析する手法を紹介する。先に述べた磁化分布逆解析手法により劣化部分の相対的評価は可能であるが、磁化は外部磁場の影響を受けるため、劣化量の絶対的評価は難しい。そこで、初透磁率の逆解析を試みた。シミュレーションデータについて行われた逆解析結果を示す。

2 漏洩磁束密度測定

昨年度、陳らによって行われた塑性変形と漏洩磁束密度分布変化の関係を示す研究⁸⁾を紹介する。SUS304試験片について引張試験および疲労試験を行い、漏洩磁束密度の測定が行われた。試験片形状を図1に示す。ノッチ入り試験片に関しては、試験片平行部に0.3×3mmのEDMノッチが入れられている。漏洩磁束密度の計測には島津製作所によって開発された薄膜ラックスゲート磁気センサが用いられた。超高感度磁気センサとしてはSQUIDがよく知られているが、SQUIDを利用する場合、冷媒を入れるデュワーが必要であるために試験片とセンサの距離が離れてしまうという問題がある。薄膜ラックスゲート磁気センサの場合、常温で利用でき、また小型かつホールセンサと比べ高感度（最小磁場分解能：50nT）であるという長所を持つ。取りつけ器具はセンサを3次元的に精度良く調整することができ、磁束密度 x, y, z 成分の測定が可能である。

図2に、単純引張試験（ひずみ速度 0.01%/sec、最大ひずみ 3%）の磁束密度その場計測結果を示す。試験片平行部中心の6ヶ所で測定が行われた。これらはノッチが入ってない平滑試験片についての測定結果である。測定結果から明らかのように負荷応力が増大すると共に磁束密度が上昇していることがわかる。試験片は引っ張り試験を行う前に消磁されており、試験中に何ら外部磁場は加えられていないので、この測定された磁場は、変形および応力によって生じたものである。またここで、弾性変形領域においてもわずかに磁束密度の上昇は見られるものの、塑性変形領域においてその増加率が弾性変形領域に比べはるかに大きいこと、塑性変形が大きくなり過ぎると磁束密度が飽和していることがわかる。それに加え、除荷後も磁束密度が保存されていたことから、この磁束密度変化は塑性変形に関係するものであると考えられる。

次に、疲労試験に関する漏洩磁束密度測定結果を示す。試験片はノッチ付のもので、2.8%の残留ひずみがある。試験条件は、ひずみ範囲： $\pm 0.25\%$ 、ひずみ速度：0.1%/sec、繰り返し数：940回で、室温にて行われた。疲労試験およそ900サイクル後にノッチの両端に長さ3mm程度のき裂が発生した。除荷後の磁束密度分布（ y, z 成分）の測定結果を図3に示す。図から明らかのように、き裂周辺で磁束密度が大きくなっている。

以上のようなこれまでに行われた研究結果から、SUS304について漏洩磁束密度の計測により非破壊的にき裂の有無およびその位置を特定することが示された。

3 磁化分布逆解析

次に、ニューラルネットワークに基づいた漏洩磁束密度から内部磁化分布の逆解析を行う手法の開発と、その手法を用いた疲労試験片の内部磁化分布再構成結果について説明する。

上で紹介してきたように、非磁性体であるSUS304に塑性変形を与えると、応力集中部に強磁性体であるマルテンサイト相が発生し、漏洩磁束密度が観察される。き裂の発生以前にマルテンサイト変態は起こるため、漏洩磁束密度より磁化分布が逆解析できれば、き裂発生前における非破壊劣化診断が可能になる。

3. 1 磁化の作る磁場

磁化 M の分布から各測定点における漏洩磁束密度 B はBiot-Savartの法則より、次式を用いて求められる。

$$B_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^{n_s} \int_{\Omega_j} \frac{(\nabla \times M_j) \times R}{R^3} dv_j, \quad (1)$$

ここで、 B_i は測定点 i における磁束密度、 M_j 、 dv_j は n_s 個に分割した試験片の j 番目要素における磁化と要素体積、 R は各磁化と測定点間の位置ベクトルである。

3. 2 ニューラルネットワーク

漏洩磁束密度から磁化分布を逆解析するために、入力層、中間層、出力層からなる階層構造ニューラルネットワークを用いた（図4）。このニューラルネットワークの大きな特徴は次の二点である。

一点目は、入力層が中間層だけではなく、出力層にも直接つながっていること。これにより入力と出力の関係を線形的な関係で扱う。二点目は、中間層内のノード数が学習開始時には一つだけで、一セットの学習が終わる度に一つづつ増えていくことである。新しく作られたノードと入力層間の結合強度 W_{ih} はランダムに与えられる。中間層の増加により、測定誤差や考察領域外の磁化の影響を受けにくいニューラルネットワークとなる。入力層-出力層間、中間層-出力層間の結合強度 W_{io} 、 W_{ho} は、入力データ： X^i 、出力データ： Y^i の間に成り立つ次式において両辺の自乗誤差がもっとも小さくなるように決定される。

$$\left[X^i, f_1(X^i \cdot W_{ih}) \right] \cdot \begin{bmatrix} W_{io} \\ W_{ho} \end{bmatrix} = f_2^{-1}(Y^i), \quad (2)$$

ここで、 f_1 、 f_2 は中間層、出力層においてデータ変換のために用いる非線形関数である。最終的に結合強度は、直接学習には用いられていない確認用データについて（2）式両辺の自乗誤差がもっとも小さくなるものを採用する。これはネットワークが過学習により一般性

を失うのを防ぐためである。

またニューラルネットワークは、入力層および出力層のノード数があまりに多いとその構造が複雑になるために、局所解にとどまるなどして学習が進まず、学習にも多くの時間を要する。そこで、本研究ではShifting Aperture法および主成分分析を用い、ニューラルネットワークの構造の簡素化を行った。Shifting Aperture法とは、小さな領域についてその場所を移動させながら磁化分布逆解析を行い、得られた結果に重みをかけ、重ね合わせることにより、全領域の逆解析結果を求めることで、単純に考察領域を小さくしただけでは考慮できない考察領域外の磁化の影響も取り入れることができる⁹⁾。また主成分分析とは、情報量をなるべく失うことなく多次元データの次元縮小を行う手法であり、これにより効率の良い入力が可能になり、入力データを減少させることが可能になる。

3. 3 ニューラルネットワークの学習

ニューラルネットワークの学習に用いるトレーニングデータセットは、学習用に200組、確認用に50組作成した。ここで磁化分布は、半径 R (=2.3 or 4mm) の円柱状に分布しているとした。円柱の中心で最大値をとり、同心円状に値を変化させる。また、厚さ方向には変化しないと仮定した。

学習終了後、学習に用いられていない検証データについてニューラルネットワークの誤差分布を求め、その一般性を検証する。100組の検証データセットに関する誤差分布を図5に示す。横軸は格子点あたりの平均絶対誤差(MAE)、縦軸はその割合である。ここで、

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|M_{t,i} - M_{r,i}|}{N}, \quad (3)$$

MAE は次式で求められる。

ただし、 $M_{t,i}$ 、 $M_{r,i}$ はそれぞれ格子点*i*における期待される磁化および再構成により得られた磁化、また*N*は総格子点数である。

誤差分布より、得られたニューラルネットワークが十分な学習が行われ、かつ一般性を有することが確認できた。

3. 4 磁化分布逆解析結果

学習を終えたニューラルネットワークを用いて、疲労試験によりき裂が生じたSUS304試験片の磁化分布の逆解析を行った。図3が入力として用いた漏洩磁束密度測定結果である。図6に逆解析結果を示す。(a)は磁化の絶対値の分布である。き裂周辺およびその先端で高い値を示していることがわかる。(b)は磁化のx、y成分のベクトル表示である。ここでも、き裂およびき裂先端部において高い値を示しており、また $x = 0$ mm および $y = 0$ mm に対する対称性が見られる。

得られた磁化分布逆解析結果の妥当性を確かめるために、漏洩磁束密度分布を求め、測定データとの比較を行った。図7に逆解析結果から得られた磁束密度分布を示す。(a)が磁束密度y成分、(b)がz成分である。き裂近傍で大きな値を示しており、定性的には正しいと思われる。図8に $y = 2.0$ mmにおける磁化分布逆解析結果から求めた磁束密度分布と測定

データとの比較を示す。この図でも両者は良く一致しており、磁化分布逆解析結果が正しいことが示された。

4 磁化率分布再構成

前章では、漏洩磁束密度分布から磁化分布の逆解析を行った。磁化分布の逆解析結果は劣化領域の特定、および劣化量の定性的評価のために非常に重要である。しかし、磁化の大きさが履歴により変化するために劣化量の定量的評価に用いることができない。そこで、いったん消磁した後、励磁した試験片の漏洩磁束密度から初透磁率分布の逆解析を行うことを考える。初透磁率と劣化量の間に相関関係があることは中曾根らの研究などにより明らかにされている¹⁰⁾。

ここでは、シミュレーションデータについて行われた初透磁率の逆解析について述べる。まず初透磁率の分布を仮定し、A法に基づいた有限要素法・境界要素法により、その場合の漏洩磁束密度を求めた。ここで、A法とは磁気ベクトルポテンシャル(A)を利用した電磁界解析手法のことである^{11,12)}。試験片の大きさは10mm×10mm×3mmで、10×10×3の要素に分割された。各層で試験片中心から同心円状に等しい磁化率を持つと仮定している。リフトオフは0.5mmである。その後、この漏洩磁束密度を用いて初透磁率の逆解析を行った。逆解析には先と同様、ニューラルネットワークを用い、主成分分析、Shifting Aperture 法によりニューラルネットワークの構造の簡素化を行っている。ニューラルネットワークの学習には、学習用に300組、確認用に100組のデータセットが用意された。学習終了後に行われた検証用データセット100組に関する誤差分布を図9に示す。この図から十分に学習が行われていることがわかる。逆解析結果の一例を図10に示す。図は、試験片の中心を通る断面における正解値と逆解析結果との比較である。

以上のように簡単化された問題に関してではあるが、ニューラルネットワークを用いて漏洩磁束密度から初透磁率分布の逆解析が可能であることが示された。劣化量と初透磁率の定量的関係が明らかになれば、この初透磁率逆解析結果から劣化領域の特定だけでなく劣化量の定量的評価を行うことが可能になる。

5 結論および今後の予定

非磁性体であるSUS304鋼に関して、磁気的手法による劣化診断の可能性について述べた。応力を負荷することで、塑性変形領域においてマルテンサイト変態を起こし、その部分が強磁性を示すようになる様子が示された。今回開発したような漏洩磁束密度から磁化分布を逆解析する手法を用いれば、応力集中箇所を特定することが可能である。

ただし磁気的手法による劣化診断手法が実用化されるためには、いくつかの課題が存在する。まず、より詳しい応力と磁気的物理量の関係を求めることが必要である。塑性変形により様々な磁気的物理量が変化することが示されているが、実用化にはまだ不十分である。複雑な状況でも成り立つ関係を明らかにする必要がある。また、漏洩磁束密度から磁化分布を求める問題はいわゆる逆問題であり一意に解が求まらない¹⁸⁾。そのため、あらかじめ妥当な磁化分布を仮定しなければならない。他の磁気的物理量を逆解析する際にも同じ問題が発生することが考えられる。妥当なモデルをたてるためには、塑性変形により磁気的物理量が変化する理由を解明する必要がある。より現実に近いモデルをたてることで逆解析をより効率的に行うことができ、結果の高精度化が期待される。同時に計算手法の高度化も求められる。

参考文献：

- 1) H. Kronmuller, "Magnetic techniques for the study of dislocations in ferromagnetic materials", Int. J. Nondestruct. Testing, 3, 315 (1972).
- 2) H. Tranble, in Magnetism and Metallurgy, edited by A.E.Berkowitz and E. Kneller, Academic, New York, 1969, Chap.XIII, pp.621.
- 3) S. Takahashi and K. Ikeda, "Magnetic moment distribution and super-lattice dislocations in the L1₂-type structure", Phys.Rev. B 28, 5225 (1983).
- 4) S.Takahashi, J.Echigoya, and Z.Motoki, "Magnetization curves of plastically deformed Fe metals and alloys", J.Appl.Phys., 87, 805 (2000).
- 5) S.Takahashi, and K.Yaegashi, "Two magnetic parameters of ENDE in ferromagnetic materials", Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V), IOS Press, 2001, pp.275.
- 6) Y.Tomita, K.Hashimoto and N.Osawa, 'Nondestructive estimation of fatigue damage for steel by Barkhausen noise analysis', NDT&E Int.,29- 5, pp.275 (1996).
- 7) M.Uesaka, A. Gilanyi, T.Sukegawa, K. Miya, K. Yamada, S. Toyooka, N. Kasai, A.Chiba, S. Takahashi, K. Morishita, K. Ara, N. Ebine, Y. Isobe, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II), IOS Press, 1998, pp.39.
- 8) 日本AEM学会, 電磁破壊力学を応用した劣化・損傷の非破壊評価技術に関する調査研究分科会報告書:JSAME-R-9903, pp.80 (2000).
- 9) R.C. Popa and K. Miya, "Approximate inverse mapping in ECT, based on aperture shifting and neural network regression", J. Nondestr. Eval., 17-4, pp.293 (1998).
- 10) 日本AEM学会,電磁破壊力学を応用した劣化・損傷の非破壊評価技術に関する調査研究分科会報告書:JSAME-R-9903, pp.48 (2000).
- 11) Z.Chen and K.Miya, "ECT Inversion Using a Knowledge-Based Forward Solver", J. Nondestr. Eval., 17-3, pp.167(1998).
- 12) O.Mihalache, 'Direct and Inverse Analyses in Nondestructive Testing of Ferromagnetic Materials', ph.D.Thesis, University of Tokyo, Faculty of Engineering (2000).
- 13) 坂佐井馨, 高温超伝導体/磁界センサ体系による磁束源の非破壊検出に関する研究
(平成11年度博士論文, 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻)

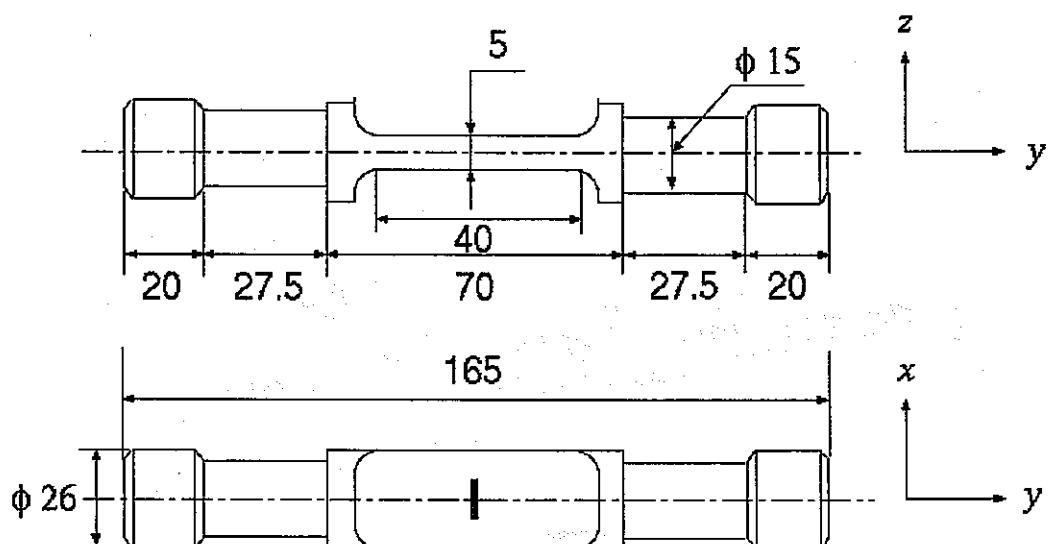


Fig.1 Size of the specimen

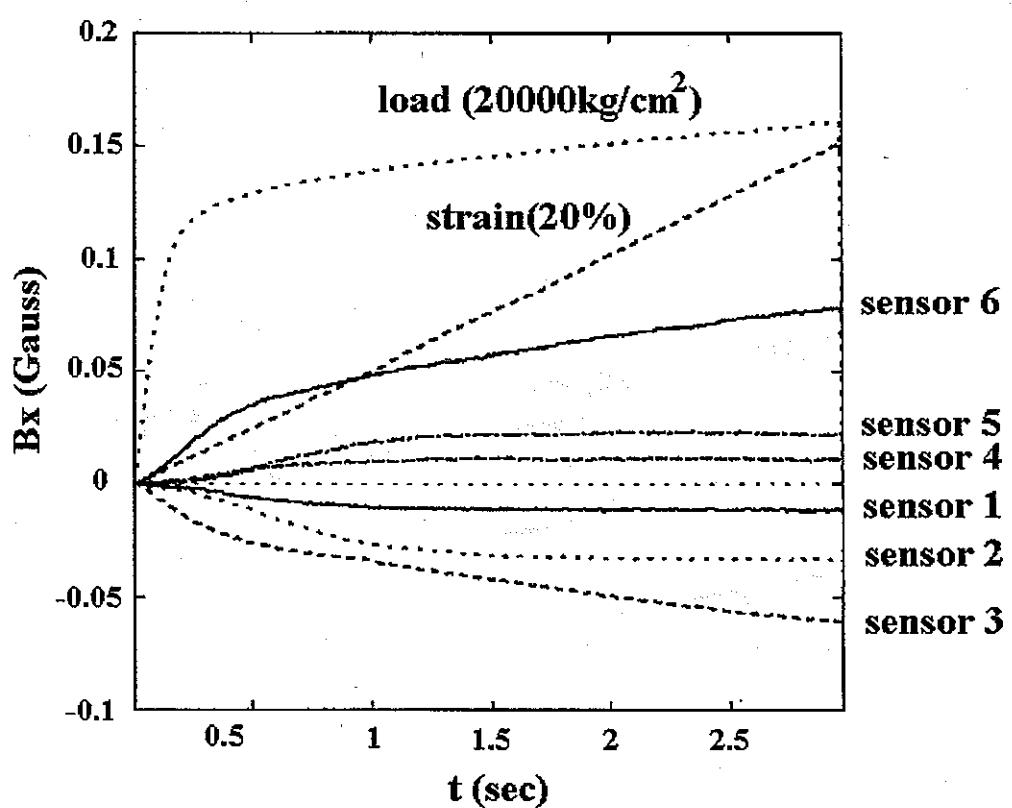
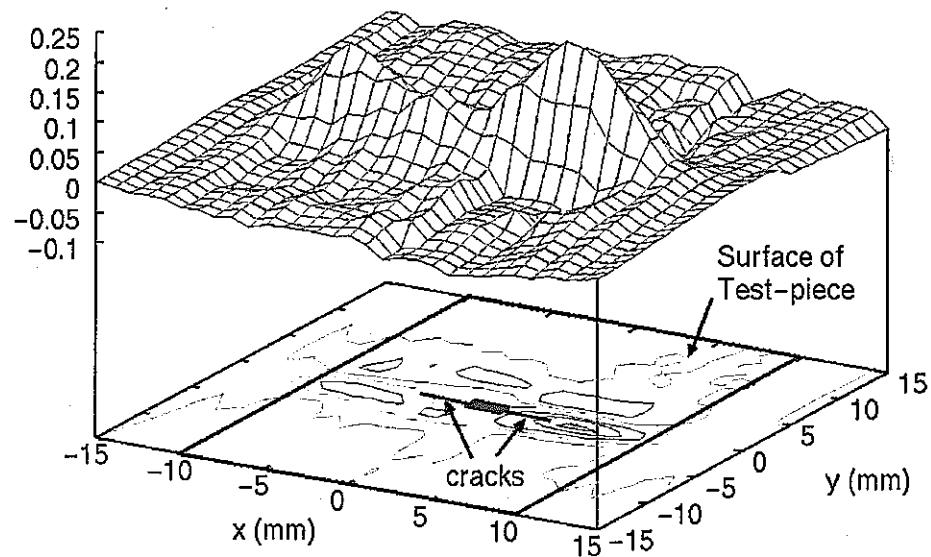


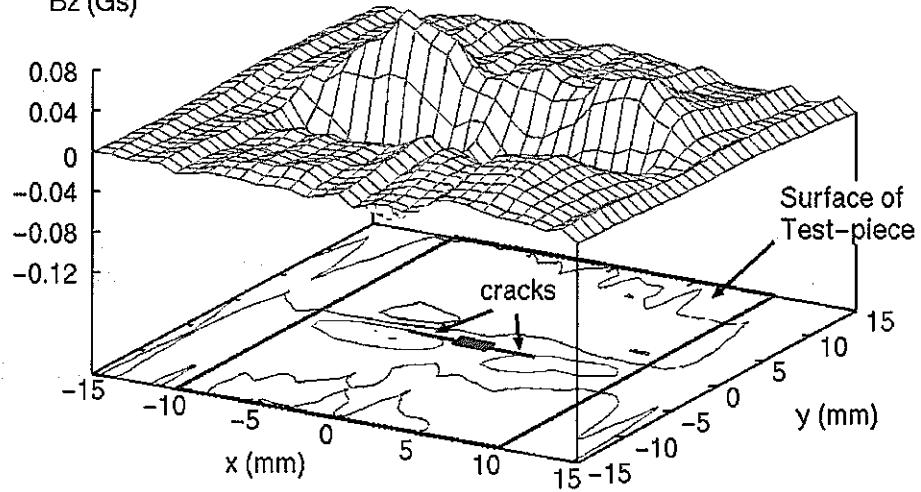
Fig.2 In-situ measuring result during tensile testing (0~3%)
(Z.Chen et al.⁸⁾)

By (Gs)



(a) y component of magnetic flux density

Bz (Gs)



(b) z component of magnetic flux density

Fig.3 Distribution of magnetic flux density
(Z.Chen et al.⁸⁾)

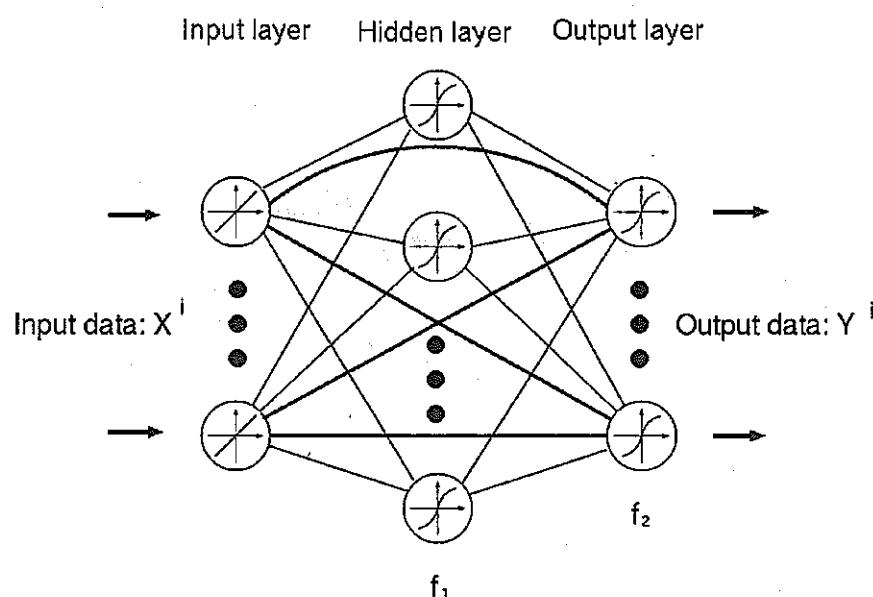


Fig.4 Neural network architecture

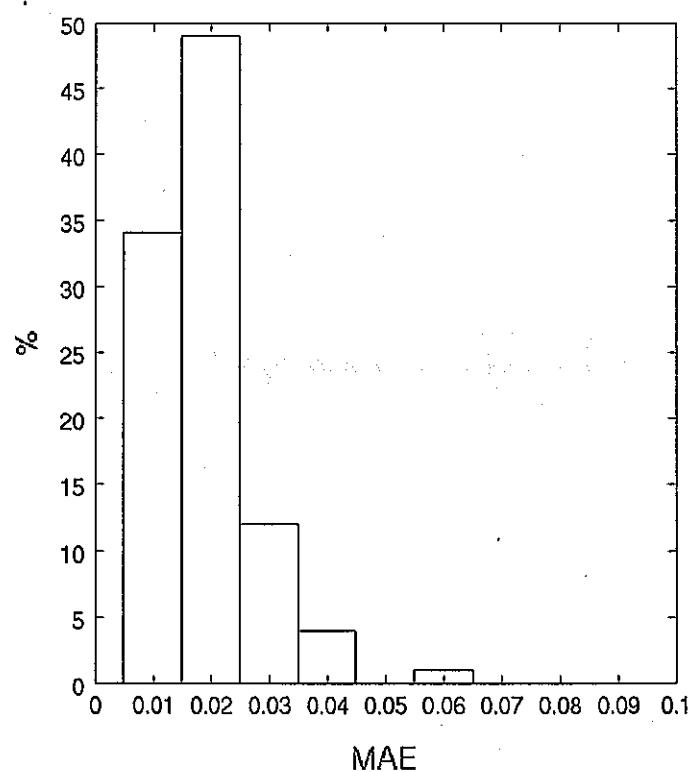
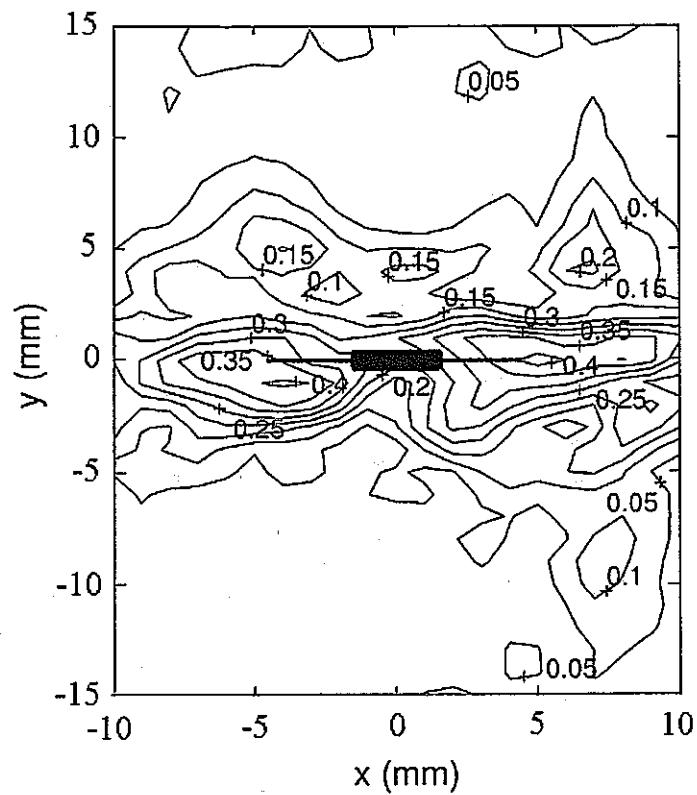
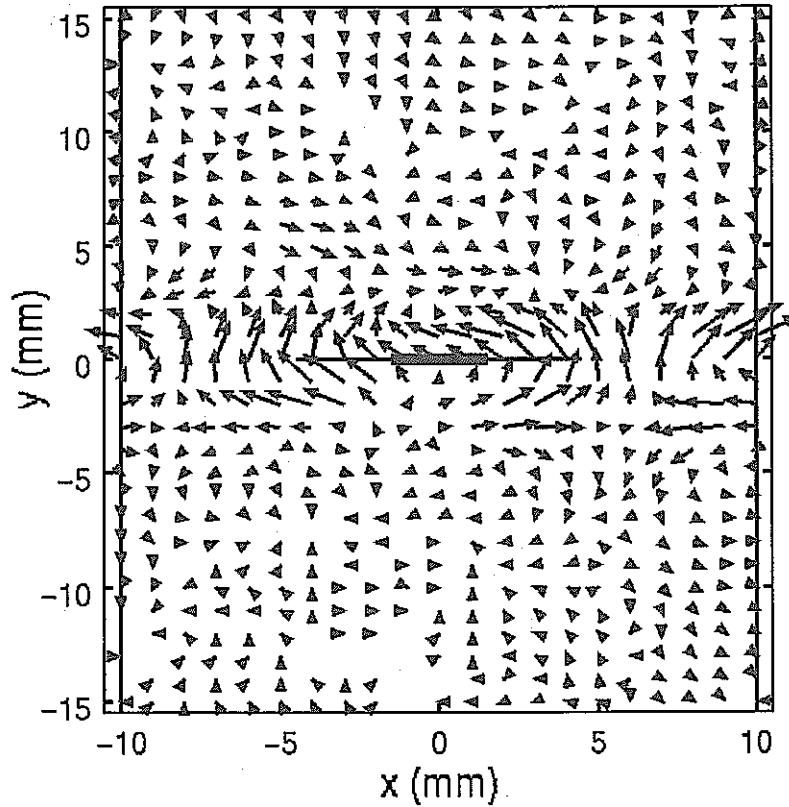


Fig.5 The error distribution about verification sets

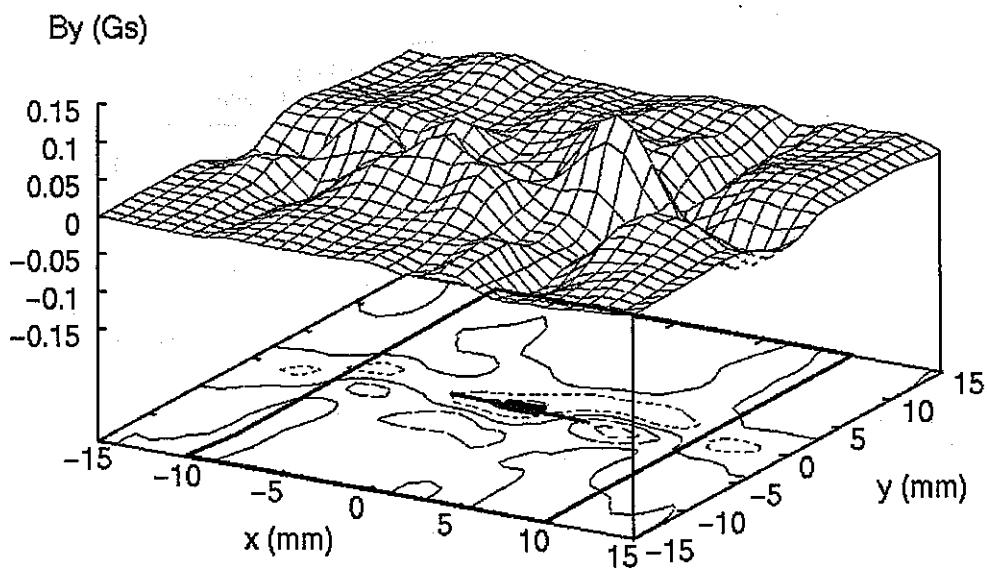


(a) the absolute value of magnetization

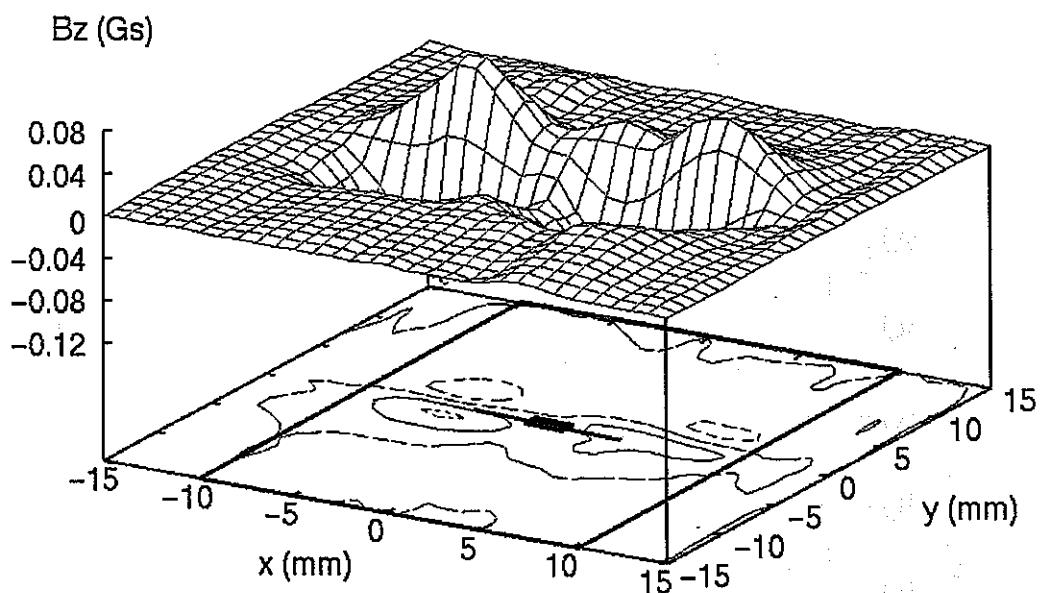


(b) vector expression of x , y components of magnetization

Fig.6 the magnetization distribution analyzed inversely



(a) y component of magnetic flux density



(b) z component of magnetic flux density

Fig.7 the distribution of calculated magnetic flux density due to the reconstructed magnetization.

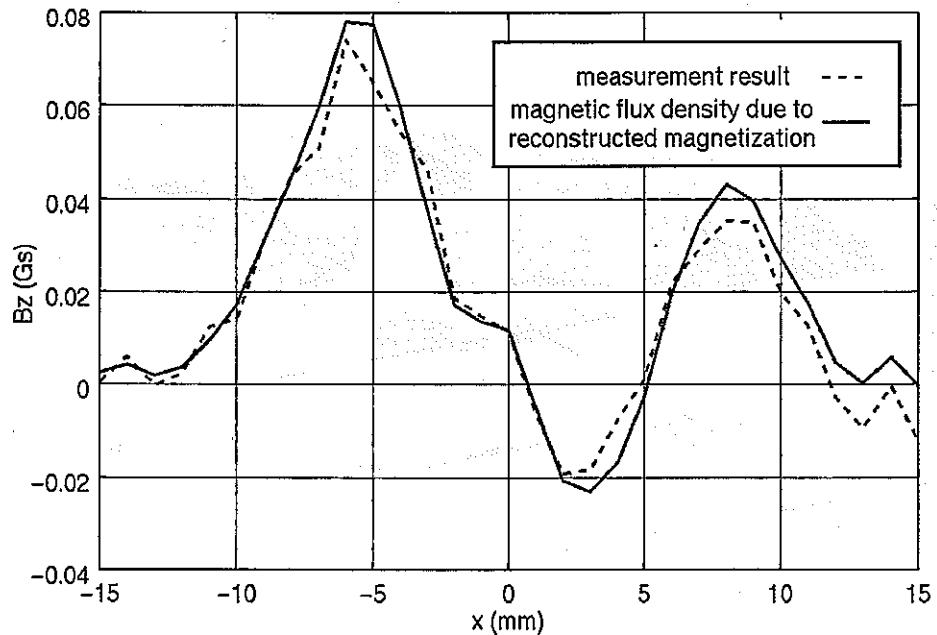


Fig.8 Comparison between the measurement results of magnetic flux density and calculated one due to reconstructed magnetization

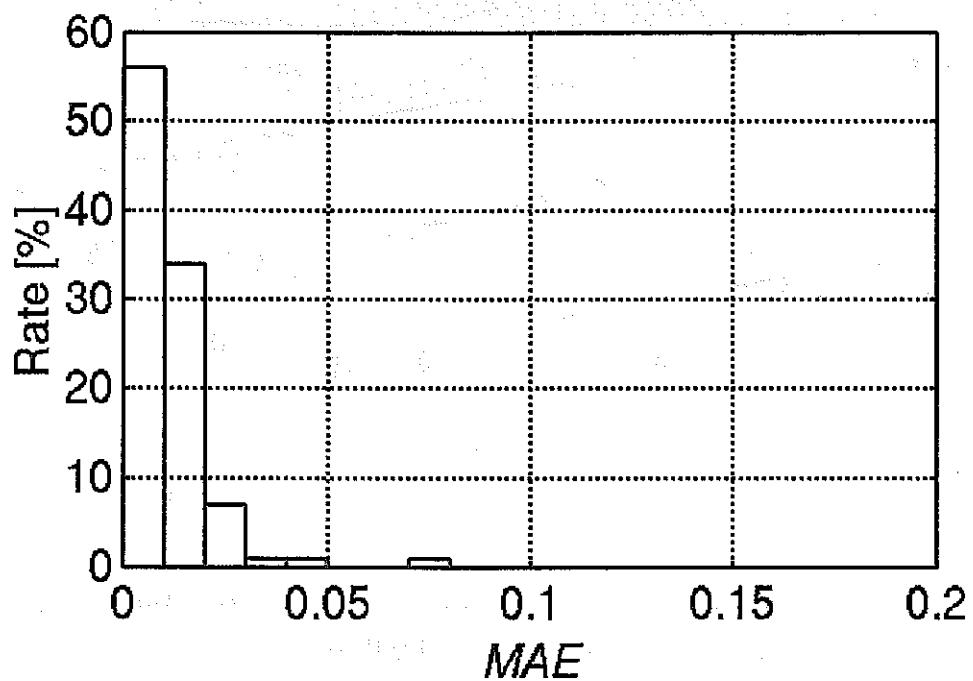
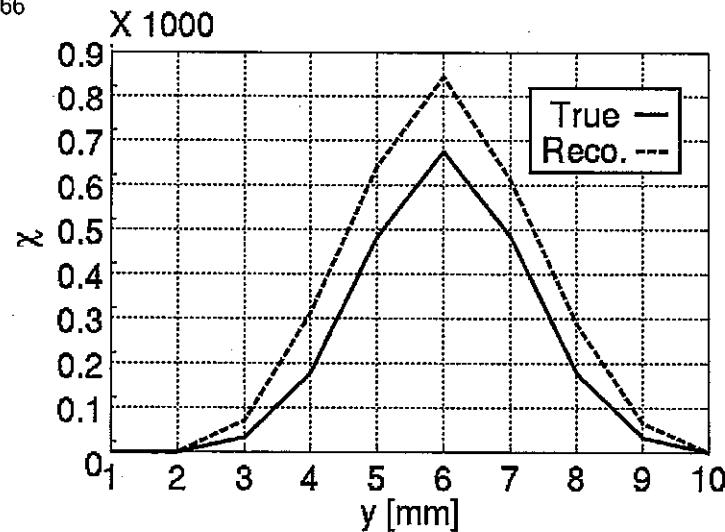
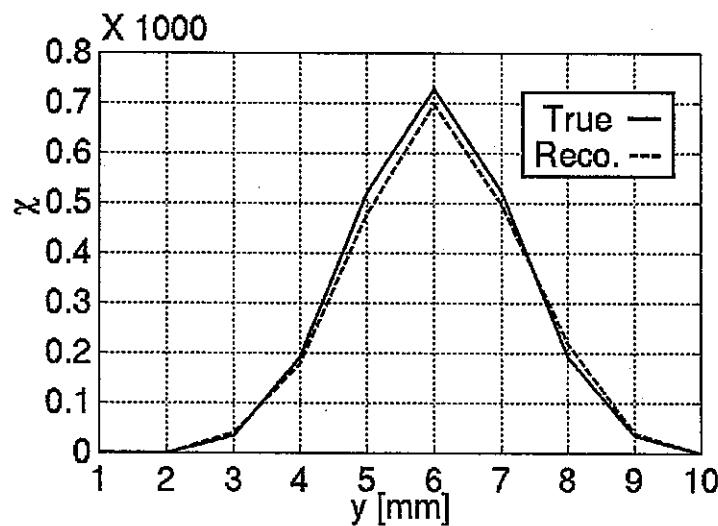


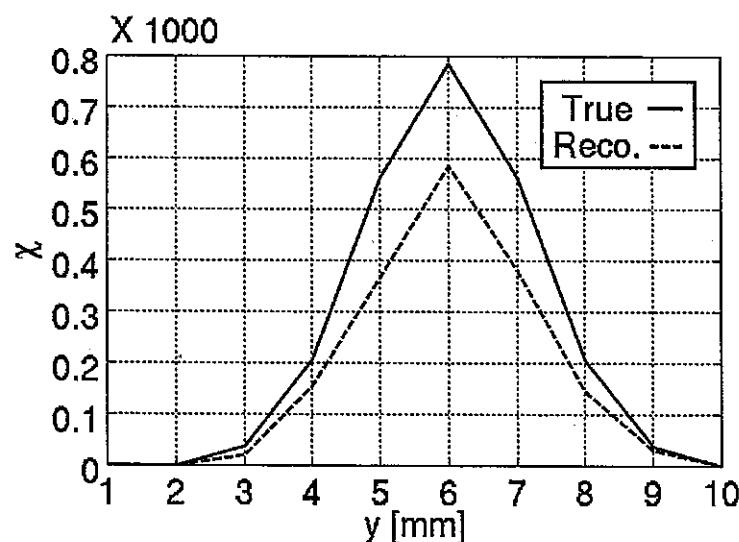
Fig.9 The error distribution about verification sets



(a) 1st layer



(b) 2nd layer



(b) 3rd layer

Fig.10 Comparison between true distributions of susceptibility and simulated results