

# アモルファスMIセンサを用いた2方向センシングおよび漏洩磁束密度分布関数のパラメータによる欠陥深さと欠陥位置の評価

Evaluation of Depth and Location of Defects Based on 2-Axis Sensing with Amorphous MI Sensors and Parameter Evaluation of Leakage Flux Density Function

京都大学エネルギー科学研究科 安部 正高 Masataka ABE  
京都大学エネルギー科学研究科 琵琶 志朗 Shiro BIWA Member  
京都大学エネルギー科学研究科 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

There are few works using 2-dimensional measurement in Magnetic Flux Leakage testing. We attempt to estimate the flaw depth and distinguish front or back surface flaw by estimating horizontal component  $B_x$  and vertical component  $B_z$  of the magnetic leakage flux density from magnetic structural material. We first calculate the distribution of magnetic flux density near a specimen surface by use of FEM analysis. The distribution is assumed to be approximated by exponential function according to the dipole model of MFL. It is found that the horizontal location and the depth of the flaw can be measured by the parameters of approximated distribution function. It is also shown that front surface or back surface flaw can be distinguished by correlation of two parameters. In order to verify the theoretical result, we carry out an experiment on SS400 steel strip with several depths of artificial flaws.

**Keywords:** MFL Testing, 2-Axis Sensing, Amorphous MI Sensor, Nondestructive Testing

## 1. 緒言

磁性体の表面または内部に傷などの欠陥があると、磁性体と欠陥部との境界で磁氣的性質が異なるため、欠陥部周辺で磁束線が試験片表面から漏れる。この漏洩磁束密度の分布と強度を適当な磁界センサを用いて計測することにより欠陥を検出するのが漏洩磁束探傷法 (Magnetic Flux Leakage Testing) である。従来のMFLTでは、試験片のヒステリシスの影響を除くために磁化器によって磁気飽和に近い状態まで磁化し、漏洩磁束密度の垂直方向成分のみを測定するのが一般的である。しかし、高感度でかつ測定レンジの広いセンサを用いれば、より小型の磁化器や地磁気のみでの漏洩磁束が精度よく測定ができる。さらに、2方向の漏洩磁束成分を共に測定することができ、より情報量の多い探傷が可能になるはずである。

本研究ではそのような高感度で測定レンジの広いセンサとしてアモルファスMIセンサを用い、弱く直流磁化した試験片表面近傍の水平および垂直方向の磁束密度成分  $B_x$ 、 $B_z$  を測定する。その結果を用いて、試験片に存在する表面欠陥および背面欠陥の傷深さと存在する面の表と裏を識別することを試みる。そのために、

磁気双極子モデルから導かれた磁束密度分布を簡単な初等関数を用いて近似して、実測した磁束密度分布に対してその関数に含まれるパラメータを決定する。

## 2. 漏洩磁束密度分布関数

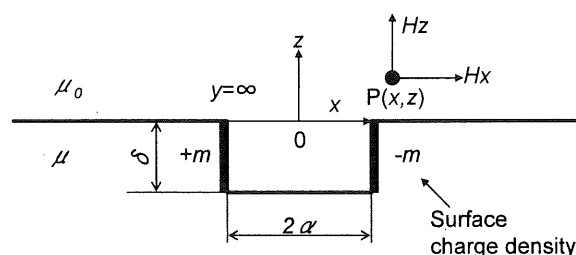


Fig.1 Dipole model of MFL

磁気双極子モデルは漏洩磁束の代表的な解析的表現であり、Zatspin と Shcherbinin<sup>[1]</sup>によって提示された。これは、直流磁化された試験片中に存在する溝状傷の向き合った両面に正負の磁荷を一樣に分布させ、漏洩磁界はそれらの作り出す磁界により表されるとしたものである。それによると、傷両端面に分布する単位面積あたりの磁荷を  $m(\text{Wb}/\text{m}^2)$ 、真空の透磁率を  $\mu_0(\text{H}/\text{m})$  とすれば、Fig.1 のような二次元モデルについて磁界分布  $H(\text{A}/\text{m})$  は、以下ようになる。

連絡先:安部正高、〒606-8501 京都市左京区吉田本町、  
京都大学エネルギー科学研究科、電話: 075-753-3565、  
e-mail:abe@system.energy.kyoto-u.ac.jp

$$H_x = \frac{m}{2\pi\mu_0} \cdot \left( \tan^{-1} \frac{y}{x-\alpha} - \tan^{-1} \frac{y}{x+\alpha} - \tan^{-1} \frac{y+\delta}{x-\alpha} + \tan^{-1} \frac{y+\delta}{x+\alpha} \right) \quad (1)$$

$$H_z = \frac{m}{2\pi\mu_0} \cdot \left( \ln \frac{(x+\alpha)^2 + (y+\delta)^2}{(x-\alpha)^2 + y^2} - \ln \frac{(x-\alpha)^2 + (y+\delta)^2}{(x+\alpha)^2 + y^2} \right) \quad (2)$$

しかし、この関数は理想的な表面欠陥においてのみ有効であり、背面欠陥には適用できない。そのため、この磁界分布を次のような簡単な関数で近似する。

$$B_x = a_1 \cdot \exp\left[-b_1 \cdot (x-d_1)^2\right] + c_1 \quad (3)$$

$$B_z = -a_2 \cdot x \cdot \exp\left[-b_2 \cdot (x-d_2)^2\right] - c_2 \cdot x + e_2 \quad (4)$$

ただし、上式は(1)、(2)式においてリフトオフは一定とした  $x$  軸方向の分布を近似したものである。この式中のパラメータ  $a_1, a_2$  は磁束密度のピーク値を表し、 $b_1, b_2$  はピークの鋭さを表す。次章ではこれらのパラメータを用いて、溝幅を固定した欠陥の、深さに対する評価を試みる。

### 3. 二次元静磁界解析

#### 3.1 解析モデル

Fig.2 に解析モデルを示す。磁化器としてコイルを用い、コイル間距離は 140mm、コイル内磁束密度は 0.5(T) とした。試験片は SS400 を想定し、比透磁率は 3000、保持力は 80(A/m) とした。試験片は長さ 200mm、厚さ 5mm で中央部には欠陥として幅 1mm の溝を設け、その深さ  $\xi$  を 1、2、3、4mm の間で変化させた。また、溝が試験片表面に存在する場合（表面欠陥）と背面に存在する場合（背面欠陥）について解析した。

#### 3.2 解析結果

前節の解析により得られたリフトオフ 1mm における磁束密度分布を Fig.3 に示す。表面欠陥、背面欠陥共に深さが大きくなるほど漏洩磁束密度のピーク値が

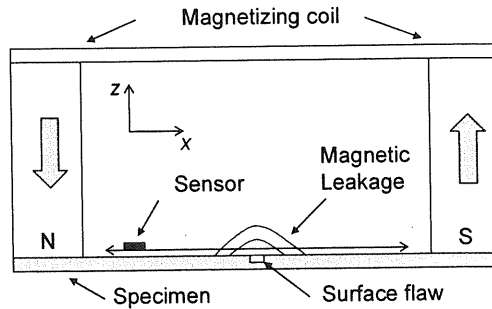


Fig.2 Analytical model

大きくなっていることがわかる。

この磁束密度分布を(3)、(4)式で近似して定まるパラメータ  $a_1, b_1$  および  $a_2, b_2$  を、深さ  $\xi$  に対してプロットしたものが Fig.4、Fig.5 である。図の実線は、実測値を下式で最小二乗近似したものである。

$$B = f \cdot \exp(g \cdot x) + h \quad (5)$$

表面欠陥では  $B_x$  および  $B_z$  共にパラメータ  $a_1, a_2$  は深さ  $\xi$  に対して指数関数的に増加しており、パラメータ  $b_1, b_2$  は指数関数的に減少している。一方、背面欠陥では、パラメータ  $a_1, a_2$  については表面欠陥と同様の相関を示しているが、パラメータ  $b_1, b_2$  については深さ  $\xi$  に対して指数関数的に増加していることがわかる。また、表面欠陥にくらべて背面欠陥の方のパラメータは小さく、それは特にパラメータ  $b_1, b_2$  について顕著に見られる。しかし、パラメータ  $b_1, b_2$  については深さが浅い場合は非常に変化の度合いが小さく、単独で深さを評価することは困難である。そのため、パラメータ  $a_1, b_1$  と  $a_2, b_2$  を組み合わせて評価する必要がある。

以上の結果から欠陥の表裏および深さが未知の欠陥を同定する方法について述べる。ただし、欠陥の幅については既知であると仮定する。

(P1) あらかじめ同じ材質と厚みの試験片について、既知の幅および数種類の異なる深さを持つ模擬欠陥を作成し、一定のリフトオフにおける欠陥面および裏面の磁束密度分布  $B_x, B_z$  を測定する。

(P2) 得られた磁束密度分布から Fig.4 に相当するグラフに測定点をプロットする。

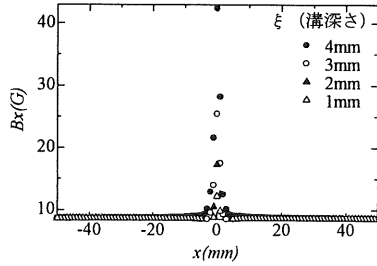
(P3) (5)式を用いて測定点を最小二乗近似したものを上のグラフに描き込む。

(P4) 未知の欠陥を持つ試験片について、(P1)と

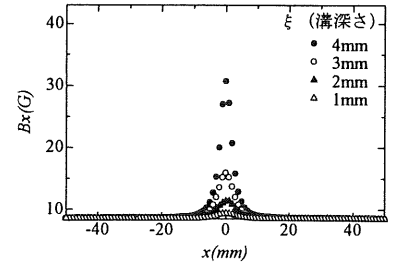
同じリフトオフにおいて磁束密度分布  $B_x$ 、 $B_z$ を測定する。

- (P5) 得られた磁束密度分布を(3)、(4)式で最小二乗近似し、パラメータ  $a_1$ 、 $b_1$ と  $a_2$ 、 $b_2$ を決定する。
- (P6) パラメータ  $a_1$ 、 $a_2$ の値と Fig.4(a)、(c)の近似曲線との交点を求め、表面あるいは背面欠陥の場合の深さ  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ を決定する。

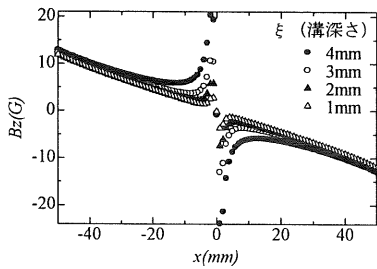
- (P7) 深さ  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ の値と Fig.4(b)、(d)の近似曲線との交点を求め、表面あるいは背面欠陥の場合のパラメータ  $b_1$ 、 $b_2$ の推定値を決定する。
- (P8) (P5)において実測値から得られたパラメータ  $b_1$ 、 $b_2$ と、(P7)の推定値を比較し、 $b_1$ が近い場合には表面欠陥で深さが  $\xi_1$ 、 $b_2$ が近い場合には背面欠陥で深さが  $\xi_2$ とする。



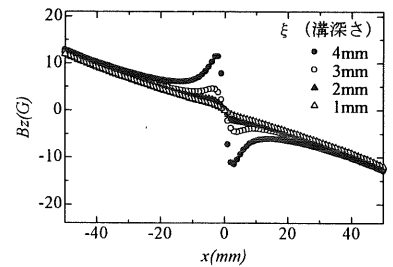
(a) Distribution of  $B_x$  (Front surface flow)



(b) Distribution of  $B_x$  (Back surface flow)

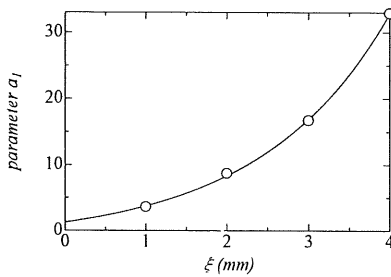


(c) Distribution of  $B_z$  (Front surface flow)

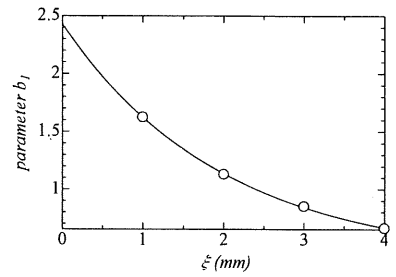


(d) Distribution of  $B_z$  (Back surface flow)

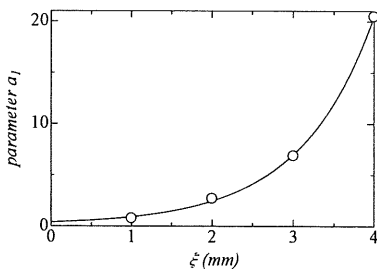
Fig.3 Calculated results



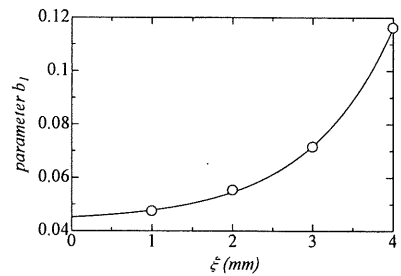
(a) Dependence of parameter  $a_1$  on flaw depth  $\xi$   
(Front surface flow)



(b) Dependence of parameter  $b_1$  on flaw depth  $\xi$   
(Front surface flow)

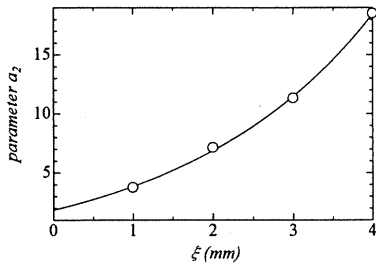


(c) Dependence of parameter  $a_1$  on flaw depth  $\xi$   
(Back surface flow)

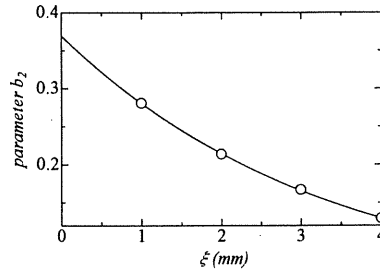


(d) Dependence of parameter  $b_1$  on flaw depth  $\xi$   
(Back surface flow)

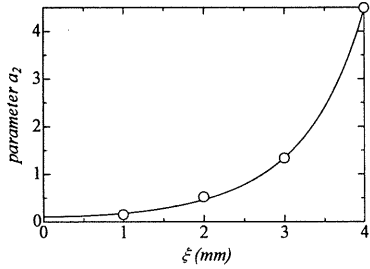
Fig.4 Approximation parameters of horizontal component  $B_x$



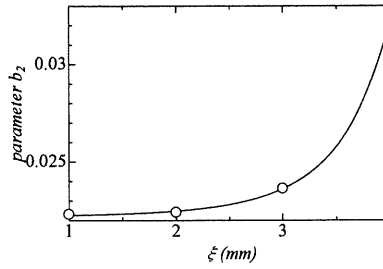
(a) Dependence of parameter  $a_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Front surface flow)



(b) Dependence of parameter  $b_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Front surface flow)



(c) Dependence of parameter  $a_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Back surface flow)



(d) Dependence of parameter  $b_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Back surface flow)

Fig.5 Approximation parameters of vertical component  $B_z$

#### 4. アモルファスMIセンサを用いた計測

##### 4.1 試験片および計測方法

前章で述べた欠陥の表裏および深さを推定するための基準となるパラメータを決定するための試験片形状を Fig.6 に示す。長さ 250mm、幅 30mm、厚さ 5mm の短冊状試験片(SS400 鋼)の中央に、幅 1mm、長さ 15mm の長方形 (正しくは両端には加工に用いたエンドミルの半径 0.5mm のRがついている) で深さが 1、2、3、4mm の非貫通溝を設ける。

計測システムの概略図を Fig.7 に示す。(株) 栄進化学製 HMA-1 を用いて試験片を直流磁化する。磁極間隔は 140mm、磁極形状は 25mm 角である。磁化電流値は 0.4(A)とし、それによって生じる磁束密度はおよそ 0.13(T)である。磁極と試験片の接触が理想的ではないことから、より磁極の影響を受けにくくするため、3章における解析の値よりも磁束密度の値を小さくした。磁束密度センサには (株) AMI 製アモルファス MI センサを用いた。センサの素子部の形状は約 0.45mm 角と空間分解能が高く、 $\pm 30G$  の広い測定範囲と 1mG の高感度を併せ持つという特徴がある。計測に際してリフトオフは約 1mm とし、また欠陥を中心とする  $\pm 30mm$  の直線上を走査した。ここでは同一のセンサを用いて、感磁方向を試験片の長さ方向および垂直方向

として、磁束密度  $B_x$ 、 $B_z$  を 1mm 間隔で測定した。

##### 4.2 計測結果

計測によって得られた磁束密度分布を Fig.8 に示す。この磁束密度分布を(3)、(4)式で近似して得られたパラメータ  $a_1$ 、 $b_1$  および  $a_2$ 、 $b_2$  を、深さ  $\xi$  に対してプロットしたものが Fig.9、Fig.10 である。解析結果と同様の相関関係を示していることがわかる。これにより、SS400 鋼からなる厚さ 5mm の部材表面に存在する幅 1mm の欠陥に対しては、手順(P1)~(P8)に従って欠陥の表裏および深さを推定することが可能である。

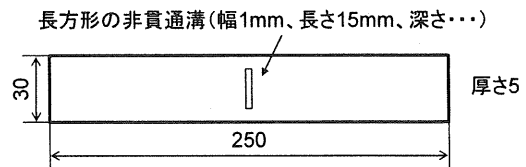


Fig.6 Specimen

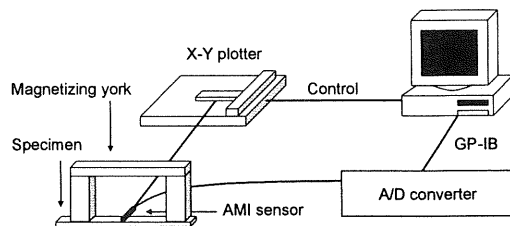


Fig.7 Experimental system

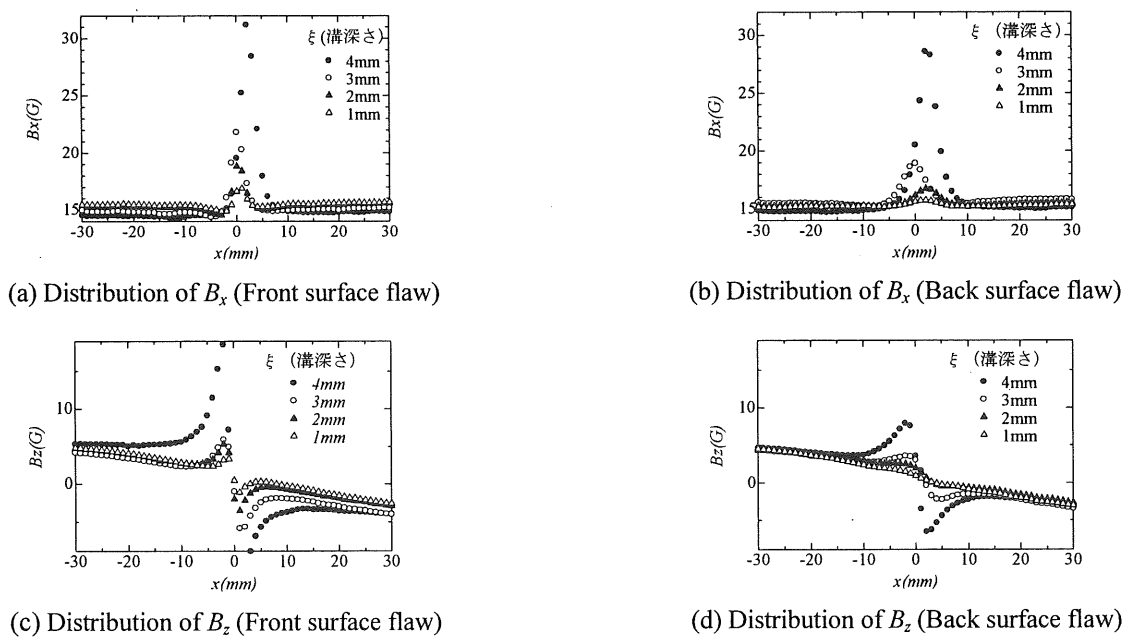


Fig.8 Experimental result

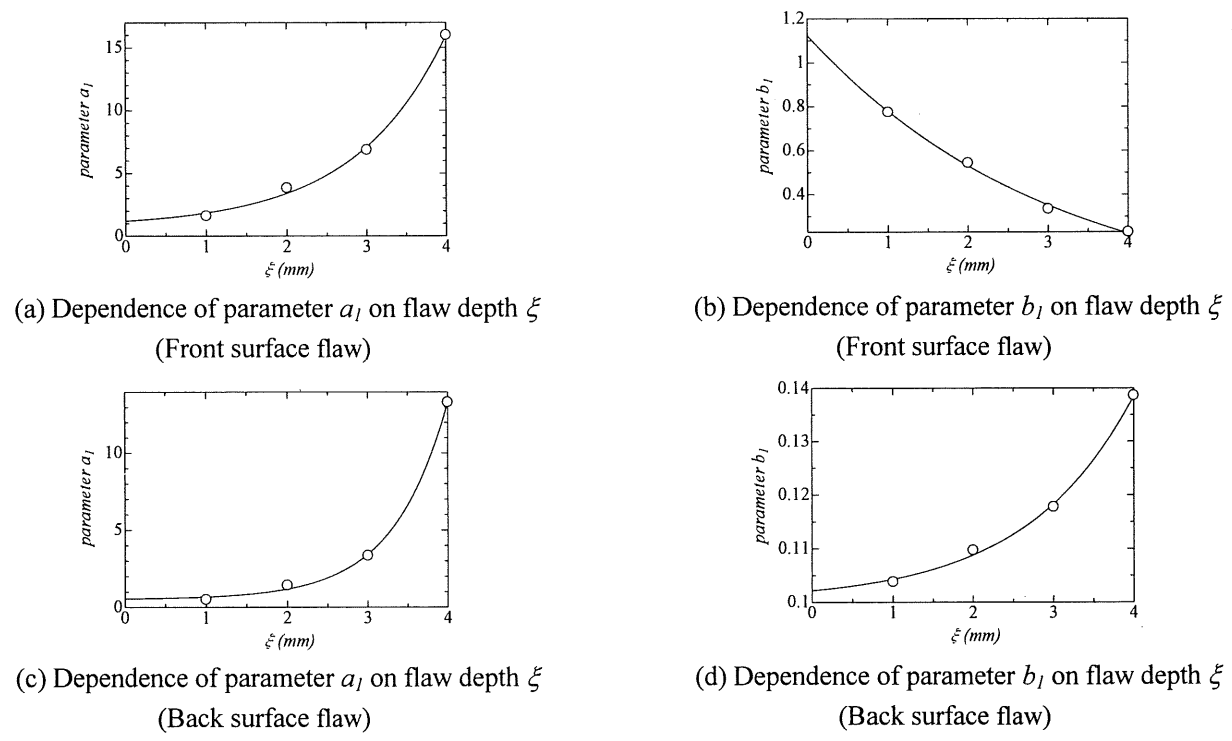
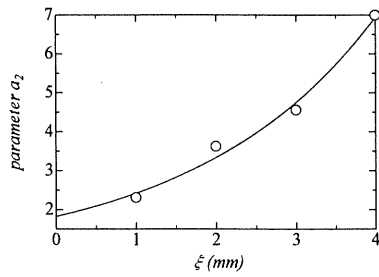
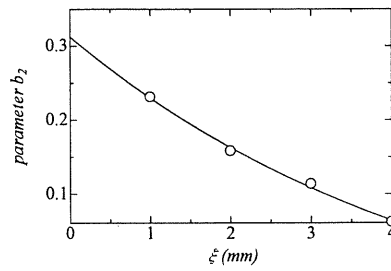


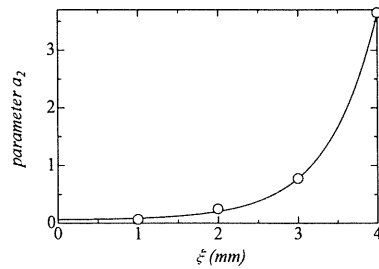
Fig.9 Approximation parameters of horizontal component  $B_x$



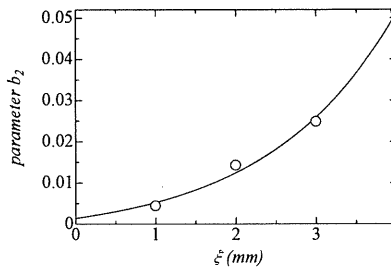
(a) Dependence of parameter  $a_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Front surface flow)



(b) Dependence of parameter  $b_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Front surface flow)



(c) Dependence of parameter  $a_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Back surface flow)



(d) Dependence of parameter  $b_2$  on flaw depth  $\xi$   
(Back surface flow)

Fig.10 Approximation parameters of vertical component  $B_z$

## 5. 結言

二次元静磁界解析を用いて、漏洩磁束密度分布関数のパラメータから、欠陥幅が既知の場合に欠陥深さと欠陥位置を同定する方法を示した。すなわち、

- 1) FEMによる二次元静磁界解析に基づいて、磁束密度分布の垂直方向成分および水平方向成分を測定し、未知の欠陥の表裏および深さの推定が可能であることを示した (手順(P1)~(P8))
- 2) 高感度で測定レンジの広いアモルファスMIセンサを用いて、SS400鋼における欠陥に対して、上記の推定法に必要なパラメータと欠陥位置および欠陥深さとの関係を求めた。

## 参考文献

- [1] N. N. Zatspin and V. E. Shcherbinin, "Defektoskopiya", 2, 1966, pp.50.
- [2] C. E. Edwards and S. B. Palmer, "The magnetic leakage field of surface-breaking cracks", J. Phys. D., 19, 1986, pp.657-667.
- [3] 関根和喜, "磁気探傷法による鋼の欠陥評価技術の現状と問題点", 鉄と鋼, 74, 1988, pp.2231-2238.
- [4] D. Minkov and J. Lee and T. Shoji, "Determining the sizes of 3-D surface cracks using dipole model of a crack and Hall element measurements", Journal of JAEM, Vol.9, No.1, 2001, pp.78-84.
- [5] 社団法人日本非破壊検査協会, "非破壊評価工学", 1998, pp.78-101.
- [6] 笠井尚哉, 関根和喜, 丸山裕章, "Far-side 漏洩磁束探傷法によるタンク底板の表面傷と裏面きずの識別手法", 非破壊検査, Vol.51, No.10, 2002, pp.650-656.