

学術論文

ニューラルネットワークを用いた2軸MFLTによる傾斜欠陥の形状推定 - 2次元静磁場解析による検討 -

Profile Estimation of Oblique Flaw by Biaxial MFLT using Neural Network -Consideration Based on Two-dimensional Magnetostatic Analysis-

安部 正高* (学生員), 琵琶 志朗* (正員), 松本 英治* (正員)

Masataka ABE (Stu. Mem.), Shiro BIWA (Mem.), Eiji MATSUMOTO (Mem.)

In this paper, we attempt to estimate the two-dimensional profile of an oblique flaw including its located surface by biaxial Magnetic Flux Leakage Testing using neural network. The flaw is assumed to be inclined to the normal direction of the specimen surface, whose cross section is characterized by the width, the depth, the oblique angle and its located surface. The specimen is a magnetic material subjected to the magnetic field, and the magnetic flux in the specimen leaks near the flaw. We conduct the two-dimensional magnetostatic analysis by use of Finite Element Method to calculate the distribution of the Magnetic Flux Leakage near the flaw. Then we extract the characteristic quantities from the calculated biaxial MFL distributions, i.e., the tangential and the normal components of the MFL distribution, by Approximate Analytical Method. Neural network is used to predict the profile of the cross section of the flaw from the above extracted characteristic quantities. After training with respect to several known flaws, the neural network is found to be able to estimate the two-dimensional profile of unknown flaws in a good accuracy.

Keywords: NDT, MFLT, flaw detection, oblique flaw, amorphous magnetic impedance sensor, neural network.

1 緒言

漏洩磁束探傷法 (Magnetic Flux Leakage Testing) は石油・ガスパイプラインの非破壊検査法として広く用いられており、鉄道レールや石油タンク底板といった各種構造物の検査法としても注目を集めている[1]。磁場中に置かれた磁性体の表面や内部にき裂などの欠陥が存在すると、磁性体中を通る磁束が欠陥周辺で漏洩する。MFLT では、この漏洩磁束の空間分布と欠陥形状との相関関係を利用して欠陥形状を評価する。しかし、一般にこの相関関係は非常に複雑なため、ニューラルネットワーク (Neural Network) を用いてこの相関関係を求める逆解析手法が多く用いられている[2]。

NN の構築は、欠陥によって生じる漏洩磁束の分布をインプット、欠陥形状をアウトプットとして学習させることで行う。学習効率や再構成精度の向上のために、漏洩磁束分布から適当な特徴量を抽出して、NN のインプットとして用いることが有効であることが知られている。筆者らはこれまで、漏洩磁束分布から特徴量を簡便に抽出する方法として近似解析法 (Approximate Analytical Method) を提案し、簡単な溝

状欠陥に対する MFLT においてその有用性を検討してきた[3]。しかし、一般に欠陥は材料表面に垂直な欠陥ばかりではなく、材料表面に対してある角度を持っていることも考えられる。このような傾斜欠陥の角度や長さは部材の余寿命や健全性に大きく影響するため、傾斜欠陥に対する評価法を開発することは重要である。AAM では測定される漏洩磁束分布を数個の係数によって表される簡単な分布関数で最小二乗近似し、決定される係数の値を特徴量として抽出する。よって、傾斜欠陥近傍の漏洩磁束分布を表す適当な分布関数が与えられれば、傾斜欠陥への応用は比較的容易である。

本論文では、まず、傾斜欠陥の近傍で生じる漏洩磁束の近似的な分布関数を磁気双極子モデルに基づき導出する。続いて、いくつかの既知の欠陥形状について有限要素法を用いた2次元静磁場解析を行い、計算される漏洩磁束分布から AAM により特徴量を抽出し、NN の学習を行う。最後に、未知の傾斜欠陥について同様に2次元静磁場解析を行い、構築した NN を用いて欠陥形状の評価を試みる。

2 漏洩磁束分布関数

2.1 傾斜欠陥における漏洩磁束分布関数の導出

漏洩磁束分布から AAM により特徴量を抽出するに

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エネルギー変換科学専攻,
e-mail: abe@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp
*京都大学

あたっては、欠陥近傍で生じる漏洩磁束分布を定性的によく表現することができる分布関数が必要となる。ここでは、磁気双極子モデルに基づいて傾斜欠陥における近似的な漏洩磁束分布関数を導出する。

漏洩磁束の最も代表的な解析的表現である磁気双極子モデルでは、欠陥近傍で生じる漏洩磁束は欠陥の両端面に一樣に分布する正負の磁荷によって生じる空間磁場で表される[4]。Fig.1 のように、材料表面の法線方向に対して θ だけ傾き、 θ 方向深さ L 、幅 w_0 の傾斜溝が y 軸方向（紙面に垂直な方向）に無限に伸びているとすると、空間上の点 $P(x, z)$ における漏洩磁束の接線成分 B_x および法線成分 B_z は次式のように求められる。

$$B_x = 2\sigma\mu_0 \left[\cos\theta \tan^{-1} \frac{L\{(x+w_0/2)\cos\theta + z\sin\theta\}}{(x+w_0/2)^2 + z^2 + L\{z\cos\theta - (x+w_0/2)\sin\theta\}} - \frac{\sin\theta}{2} \ln \frac{(x+w_0/2)^2 + z^2 + L^2 + 2L\{z\cos\theta - (x+w_0/2)\sin\theta\}}{(x+w_0/2)^2 + z^2} \right] - 2\sigma\mu_0 \left[\cos\theta \tan^{-1} \frac{L\{(x-w_0/2)\cos\theta + z\sin\theta\}}{(x-w_0/2)^2 + z^2 + L\{z\cos\theta - (x-w_0/2)\sin\theta\}} - \frac{\sin\theta}{2} \ln \frac{(x-w_0/2)^2 + z^2 + L^2 + 2L\{z\cos\theta - (x-w_0/2)\sin\theta\}}{(x-w_0/2)^2 + z^2} \right] \quad (1)$$

$$B_z = \mu_0\sigma \left[\cos\theta \ln \frac{(x+w_0/2)^2 + z^2 + L^2 + 2L\{z\cos\theta - (x+w_0/2)\sin\theta\}}{(x+w_0/2)^2 + z^2} + 2\sin\theta \tan^{-1} \frac{L\{(x+w_0/2)\cos\theta + z\sin\theta\}}{(x+w_0/2)^2 + z^2 + L\{z\cos\theta - (x+w_0/2)\sin\theta\}} \right] - \mu_0\sigma \left[\cos\theta \ln \frac{(x-w_0/2)^2 + z^2 + L^2 + 2L\{z\cos\theta - (x-w_0/2)\sin\theta\}}{(x-w_0/2)^2 + z^2} + 2\sin\theta \tan^{-1} \frac{L\{(x-w_0/2)\cos\theta + z\sin\theta\}}{(x-w_0/2)^2 + z^2 + L\{z\cos\theta - (x-w_0/2)\sin\theta\}} \right] \quad (2)$$

上式において、溝幅 w_0 が十分小さいと仮定すると、以下のような近似関数が導かれる。

$$B_x = 2\sigma\mu_0 w_0 \cos\theta \left[\frac{z + x \tan\theta}{x^2 + z^2} - \frac{z + L \cos\theta + (x - L \sin\theta) \tan\theta}{(x - L \sin\theta)^2 + (z + L \cos\theta)^2} \right] \quad (3)$$

$$B_z = -2\mu_0\sigma w_0 \cos\theta \left[\frac{x - z \tan\theta}{x^2 + z^2} - \frac{(x - L \sin\theta) - (z + L \cos\theta) \tan\theta}{(x - L \sin\theta)^2 + (z + L \cos\theta)^2} \right] \quad (4)$$

ここで、 $L\cos\theta$ は欠陥の垂直方向深さ d を表している。MFLT においては一定のリフトオフにおける漏洩磁束分布を測定するので、リフトオフ一定として係数を置

き換え、さらに接線方向位置およびバイアス磁場（ x 軸正方向）の影響を考慮し、以下の分布関数を得る。

$$B_x = a_x \left[\frac{b_x + h_x(x-d_x)}{(x-d_x)^2 + b_x^2} - \frac{c_x + h_x(x-d_x-i_x)}{(x-d_x-i_x)^2 + c_x^2} \right] + e_x \quad (5)$$

$$B_z = -a_z \left[\frac{(x-d_z)-h_z b_z}{(x-d_z)^2 + b_z^2} - \frac{(x-d_z-i_z)-h_z c_z}{(x-d_z-i_z)^2 + c_z^2} \right] - e_z(x-d_z) + f_z \quad (6)$$

上式で、係数 h および i は欠陥の傾斜角度に深い相関を持つパラメータである。

2.2 特徴量について

AAM では、測定により得られる漏洩磁束分布を、適当な分布関数で最小二乗近似し、決定される係数を特徴量として抽出する。本論文では以降、式(5)および式(6)を分布関数として採用する。Fig.2 の丸印は、Fig.1 の傾斜欠陥について FEM を用いて計算した漏洩磁束

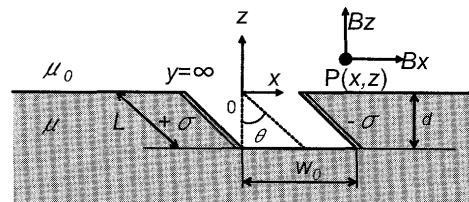
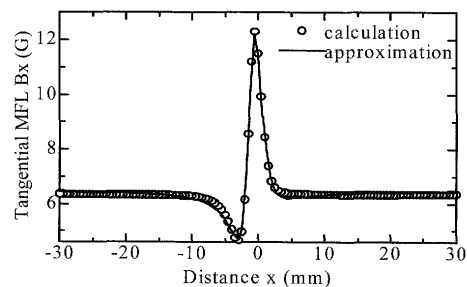
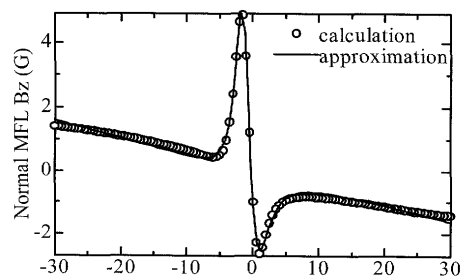


Fig. 1 Oblique flaw parameters.



(a) B_z (tangential)



(b) B_z (normal)

Fig. 2 Approximation of biaxial MFL distributions.

分布の接線成分および法線成分を示している。Fig.2 の実線は式(5), (6)による近似の結果を示している。近似曲線は FEM の計算データとよく一致しており、定性的に漏洩磁束分布をよく表現できていることが確認できる。

式(5), (6)において係数 d_x および d_z は欠陥の水平位置を表し、係数 e_x , e_z および f_z は欠陥から十分離れた位置でのバイアス磁束密度分布を表す。よって、これらの係数を除いた 10 個の係数 a_x , b_x , c_x , h_x , i_x , a_z , b_z , c_z , h_z , i_z が欠陥形状と特に相関の高い特徴量である。以降では、これら 10 個の係数を特徴量として採用し、欠陥形状パラメータ（幅 w , 深さ d , 傾斜角度 θ および欠陥存在面を示すシンボル）との相関関係を NN により求める。

3 次元静磁場解析による漏洩磁束の計算

Fig.3 に解析モデルを示す。磁化方法は極間式直流磁化で磁極間隔は 115mm とした。磁極材質にはケイ素鋼板を想定し比透磁率は 20000 に設定した。試験片材質には SS400 鋼を想定し、予備実験によって測定した B-H 曲線を用いた非線形解析を行った。Fig.4 に SS400 鋼の B-H 曲線を示す。試験片形状は長さ 250mm, 厚さ 5mm で、試験片の表面中央に傾斜欠陥を設けた。NN の学習のために、幅 w と深さ d が Fig.5 の黒丸で示されるような 15 種類の欠陥について解析を行った。また、それぞれの欠陥について傾斜角度 θ が -60° , -30° , 0° , 30° , 60° の場合、さらに欠陥存在面が測定面（磁極設置面）から見て表面および背面の場合について解析を行った。すなわち、合計で 160 通りの欠陥形状について解析を行った。一方で、未知欠陥の形状推定用の欠陥として、幅 w と深さ d が Fig.5 の白丸で示される 1 種類の欠陥について解析を行った。学習用と同様に 5 通りの傾斜角度および 2 通りの欠陥存在面について解析を行い、合計で 10 通りの欠陥形状について解析を行った。

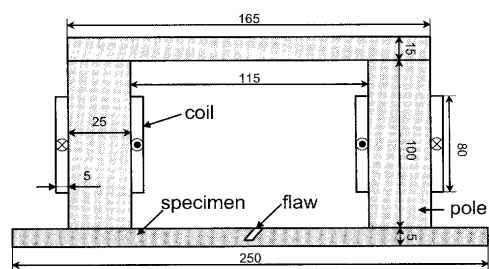


Fig. 3 Analytical model.

解析に際して、磁化電流値は欠陥が無い状態の試験片中央断面で約 0.6(T)となるように設定した。漏洩磁束分布は試験片表面からのリフトオフが 1mm の空間上において、欠陥開口部を中心とした ± 30 mm の範囲の接線成分および法線成分を解析結果として取り出し、以降の検討に用いた。

4 ニューラルネットワークの学習

4.1 学習方法

NN の学習には、前章で計算した 160 通りの欠陥に対する漏洩磁束分布データを用いた。これらの漏洩磁束分布から AAM により抽出される 10 個の特徴量 a_x , b_x , c_x , h_x , i_x , a_z , b_z , c_z , h_z , i_z をインプット、欠陥形状をアウトプットとして NN に学習させた。本論文では NN ソフトウェアとして、Neural Ware 社の Neural Works Predict を用いた。

NN の構築にあたっては、評価精度の向上のために 2 段階の NN を構築した。まず、欠陥存在面が表面か背面かを判断する NN を構築した。この NN を localization-NN と呼ぶ。この localization-NN においては、AAM により抽出される 10 個の特徴量をインプット、欠陥存在面を表すシンボル f および b をアウトプットとして学習させた。以降、シンボル f は表面欠陥

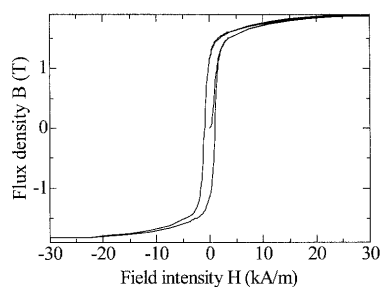


Fig. 4 B-H curve of SS400 steel.

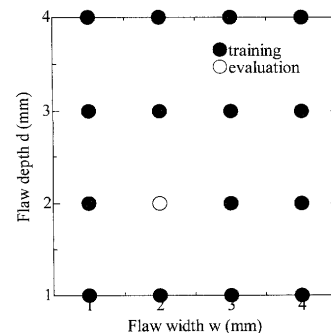


Fig. 5 Widths and depths of prepared flaws.

をシンボル b は背面欠陥を表すとする。

次に欠陥形状を推定する NN を構築した。この NN を identification-NN と呼ぶ。この identification-NN においては AAM により抽出される 10 個の特徴量ならびに欠陥存在面を表すシンボルをインプット、欠陥幅 w 、欠陥深さ d ならびに傾斜角度 θ をアウトプットとして学習させた。

4.2 学習結果

前節のように 160 種類の既知欠陥について NN を学習させた後、再び同じ 160 種類の欠陥についてこの NN を用いて形状を評価し、学習結果を確認した。形状評価にあたっては、以下の 2 段階の手順を踏んだ。

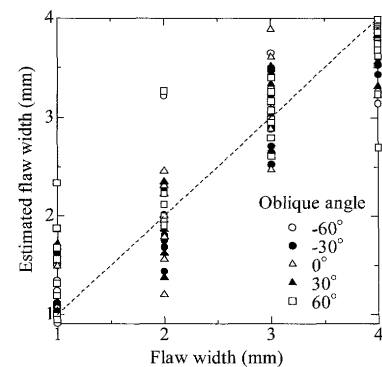
- (1) localization-NN を用いて 10 個の特徴量から欠陥存在面を評価する。
- (2) localization-NN による欠陥存在面の評価結果と 10 個の特徴量から、identification-NN を用いて欠陥断面の形状評価を行う。

Fig.6 および Table 1 に学習結果を示す。Fig.6 は欠陥幅 w 、欠陥深さ d および傾斜角度 θ の真値を横軸にとり、NN によりそれぞれを評価した結果を縦軸にとったグラフである。また、Table 1 には学習結果全体における平均誤差および最大誤差を示した。欠陥存在面については 100% の精度で評価されており、NN および評価手順を 2 段階にわけ、2 段階目の NN (identification-NN) のインプットとして欠陥存在面を含めることは、評価精度の向上のための方法として妥当であることが確認された。欠陥幅および傾斜角度については若干の誤差が見られるが、欠陥深さについては非常に評価精度が高い NN が構築されていることがわかる。

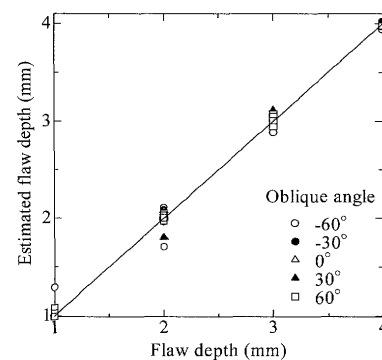
5 未知欠陥の形状推定

未知欠陥の形状推定には、3 章で計算した 10 通りの欠陥に対する漏洩磁束分布データを用いた。これらの漏洩磁束分布から特徴量 $a_x, b_x, c_x, h_x, i_x, a_z, b_z, c_z, h_z, i_z$ を AAM により抽出し、前章で学習済みの NN に入力して、未知欠陥の形状を評価させた。未知欠陥の形状評価においても、前章と同様に 2 段階の評価手順を踏んだ。

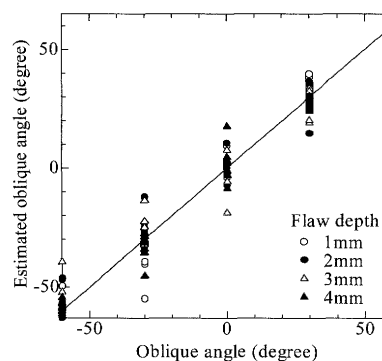
Table 2 および Table 3 に評価結果を示す。Table 2 にはそれぞれの欠陥形状に対する NN の推定値を示した。また、Table 3 には評価結果全体における平均誤差およ



(a) flaw width



(b) flaw depth



(c) oblique angle

Fig. 6 Evaluation of flaws used for training of neural network.

び最大誤差を示した。学習データにおける評価と同様に、欠陥存在面については 100% の精度で評価されている。また、欠陥の断面形状についてもそれぞれ高精度に評価されている。Table 2 より、今回構築した NN では、傾斜角度が小さくなるほど欠陥幅 w は小さく、欠陥深さ d は大きく評価される傾向があることがわかる。傾斜角度も全体として精度よく評価されており、傾斜欠陥の形状推定において、今回提案した手法が有効であることが確認された。

Table 2 Evaluation of unknown flaws.

Width	Depth	Located surface	Oblique angle	Estimated width	Estimated depth	Estimated located surface	Estimated oblique angle
2mm	2mm	Front	-60°	2.29mm	1.91mm	Front	-53.9°
			-30°	1.71mm	2.08mm		-16.2°
			0°	1.63mm	2.09mm		12.2°
			30°	1.75mm	1.93mm		30.0°
			60°	2.39mm	2.09mm		60.5°
		Back	-60°	2.13mm	2.01mm	Back	-54.9°
			-30°	1.72mm	2.07mm		-34.4°
			0°	1.99mm	2.12mm		-10.2°
			30°	1.73mm	2.08mm		30.4°
			60°	2.25mm	2.02mm		63.7°

Table 1 Errors in evaluation of flaws used for training.

	Average error	Maximum error
Located surface	100% accuracy	
Width	0.3mm	1.3mm
Depth	0.1mm	0.3mm
Oblique angle	8.5°	24.9°

Table 3 Errors in evaluation of unknown flaws.

	Average error	Maximum error
Located surface	100% accuracy	
Width	0.25mm	0.4mm
Depth	0.07mm	0.12mm
Oblique angle	5.66°	13.8°

6 結言

本論文では、ニューラルネットワークを用いた2軸MFLTによる傾斜欠陥の形状推定法について、有限要素法を用いた2次元静磁場解析を行い検討した。その結果以下のような結論を得た。

- 1) 漏洩磁束分布から特徴量を抽出するための手法として近似解析法 (Approximate Analytical Method) を提案した。また、AAMに必要な漏洩磁束分布関数を、傾斜欠陥における磁気双極子モデルから導いた。
- 2) 有限要素法を用いた2次元静磁場解析を行い、様々な傾斜欠陥により生じる漏洩磁束分布を計算した。さらに、これらの漏洩磁束分布からAAMにより抽出される特徴量をインプットとしたニューラルネットワークを構築し、傾斜欠陥の2次元形状推定を行った。
- 3) 評価の結果、欠陥の存在面(測定面から見て表面または背面)は100%の精度で評価された。また、欠陥幅、欠陥深さおよび傾斜角度は、それぞれ1.3mm、0.3mm、24.9°以内の誤差で評価することが出来た。これにより、傾斜欠陥の形状推定において、今回提案した手法が有効であることが確認された。

今後は、実際の材料についても今回提案した評価手

法を適用し、その実効性を検証していく必要がある。

また、同手法に基づいて欠陥の3次元形状を推定する具体的な方法についても検討を行いたい。さらに、同手法をより現実的なき裂の検査に適用し得る手法とするためには、背面欠陥の場合の板厚による探傷限界の検討や、閉じたき裂への適用可能性の検討が課題となる。また、より微小な表面欠陥に対しては、加工による材料表面の磁性の不均質や、表面粗さ、塗装、供用中に生じた錆びなどの電磁特性の分布により生じる漏洩磁束分布と、微小な表面欠陥により生じる漏洩磁束分布とを分離する方法についても今後検討する必要がある。

(2008年10月23日受付, 2008年12月22日再受付)

参考文献

- [1] T. Jin, P. Que, L. Chen, T. Chen and L. Li, Research on recognition algorithm of offshore oil pipeline defect inspection based on magnetic flux leakage method, *J. JPI*, Vol.48, No.5, pp.243-249, 2005.
- [2] A. A. Carblho, J. M. A. Rebello, L. V. S. Sagrilo, C. S. Camerini and I. V. J. Miranda, MFL signals and artificial neural networks applied to detection and classification of pipe weld defects, *NDT&E International*, Vol.39, pp.661-667, 2006.
- [3] 安部 正高, 琵琶 志朗, 松本 英治, ニューラルネットワークを用いた2軸MFLTによる溝状欠陥の3次元形状評価, 第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.45-50, 2003.
- [4] Zatspin N. N. and Scherbinin V. E., Calculation of the magnetostatic field of surface defects, *Defektoskopiya*, pp.50-59, 1966.