直流磁場測定による多重き裂の定量的非破壊評価*

坂 真澄^{*1}, 菅原 岳宏^{*2}, 阿部 博之^{*1}NDE of Multiple Cracks by Means of Measurement of Magnetic Field
Produced by D. C. Current Flow

Masumi SAKA, Takehiro SUGAWARA and Hiroyuki ABÉ

A method is developed for nondestructive evaluation of multiple cracks by means of measurement of magnetic field produced by d. c. current flow. Two dimensional multiple cracks are treated. The distance between cracks is assumed to be known in advance and the depth of cracks is to be found. First the distribution of the change in magnetic flux density is measured over each crack by input and output of d. c. current on both sides of each crack. Next the distribution of the change in magnetic flux density is calculated numerically by assuming the depth of every crack. Then by comparing the measured and calculated changes in magnetic flux density, a correction factor is obtained for the assumed depth of the respective cracks. Modifying the crack depth by the correction factor is repeated until the difference between the measured and calculated distributions of the change in magnetic flux density is minimized. It is shown that multiple cracks are sized accurately by the present method.

Key Words: Nondestructive Inspection, Finite Element Method, Computational Mechanics, Multiple Cracks, D. C. Current, Magnetic Field

1. 緒 言

機器・構造物の破壊力学に基づく健全性評価では、き裂の非破壊評価が不可欠である。従来から単一き裂の非破壊評価に関する研究は、数多くなされてきた。これに対し複数のき裂が重なった、すなわち多重き裂の非破壊評価に関する研究は、大きく遅れをとっている。

化学プラント、発電プラント等における応力腐食割れは、しばしば複数個が近接して、多重き裂の様相を呈して発生する⁽¹⁾。多重き裂を有する機器・構造物の寿命予測には、多重き裂に適用し得る手法により、き裂を定量的に評価することが肝要である。非破壊検査の代表的な手法の一つに超音波探傷法があるが、多重き裂ではき裂間隔が探触子寸法に比べて小さい場合が多くあり、同き裂への適用には不向きである。

最近になってようやく、二次元の表面多重き裂を対象とした非破壊評価手法が提案された⁽²⁾。同手法は直流電位差法に基づくものである。

一方、単一き裂を対象としたものではあるが、き裂により乱された交流電流場による被検査物表面近傍の磁場変化を計測し、これに基づきき裂を非破壊評価する手法が検討されている⁽³⁾。この手法の特徴は、非接触の測定を可能にするという点にある。

以上を踏まえ、本研究では、材料表面に存在し、存在位置は既知であるが深さが未知なる二次元多重き裂を対象として、直流電流を被検査物に流すことにより生じる磁場を非接触で測定し、これに基づきき裂を非破壊評価するという手法を提案する。本研究は文献(2)の非接触評価への展開として位置づけられる。なお対象とした材料は常磁性体である。実験および数値解析の実施により、本手法の有効性を検証する。

2. 評価方法

図1に示すような平板表面に垂直に存在する二次元多重き裂を対象とする。電流入力側から数えて1番めのき裂の板幅方向の中心を原点とする直角座標系(x, y, z)を導入する。ここでき裂の総数を n 、平板の厚さを w 、 i 番め($i=1\sim n$)のき裂深さを a_i とする。磁場変化を表すパラメータとして、き裂がない場合の $z=0$ 、リフトオフ b の位置における z 方向の空気中の磁束密度 B_0 と、き裂がある場合の同位置における z 方

* 原稿受付 1995年3月16日。

^{*1} 正員、東北大学工学研究科 (〒980 77 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*2} 准員、北海道電力(株) (〒059 17 北海道勇払郡厚真町字浜厚真615)。

向の磁束密度 B との差, すなわち磁束密度変化 $\Delta B (= B_0 - B)$ を用いる。各き裂の深さを以下に提案する手順で非破壊評価する。

(1) i 番めのき裂をはさんで電流 I を入出力し、磁束密度変化を測定する。その測定値を ΔB_i^M とする。

(2) i 番めのき裂深さとして、適当な仮定値 a_{iA} を与える。

(3) 上記ステップ2の仮定に基づき数値解析を行い、それより得られる i 番めのき裂の磁束密度変化を ΔB_i^A とする。ここに試験片表面上におけるすべてのき裂の存在位置は既知であり、数値解析はこれを踏まえて実施する。

(4) 次式で定義される目的関数 F の値を求める。

$$F = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta B_i^M - \Delta B_i^A}{B_0} \right)^2 \quad (1)$$

F が微小量 ϵ 未満であれば、 i 番めのき裂深さを a_{iA} と評価する。そうでないときには、次式により i 番めのき裂深さの仮定値を補正する。

$$a'_{iA} = a_{iA} + c_i \quad (2)$$

ここに

$$c_i = \begin{cases} \frac{\Delta B_i^M - \Delta B_i^A}{\Delta B_{\max}^M} (w - a_{iA}) (\Delta B_i^M > \Delta B_i^A \text{ のとき}) & \dots\dots\dots (3 \cdot a) \\ \frac{\Delta B_i^M - \Delta B_i^A}{\Delta B_{\max}^A} a_{iA} (\Delta B_i^M < \Delta B_i^A \text{ のとき}) & \dots\dots\dots (3 \cdot b) \end{cases}$$

ここで $\Delta B_{\max}^M$ および $\Delta B_{\max}^A$ はそれぞれ ΔB_i^M および ΔB_i^A の最大値である。 a'_{iA} を新たな仮定値 a_{iA} としてステップ3を繰返す。

ここで式(2)、(3)について説明する。 $\Delta B_i^M > \Delta B_i^A$ の場合、すなわち計算値が実験値より小さい場合は、仮定したき裂深さが実際のき裂深さよりも小さいことを表しているため、仮定したき裂深さを増さなければならない。このときリガメントを越えないようにき裂深さを増す必要がある。そこで現仮定のリガメント深さ $(w - a_{iA})$ に1より小さい正の数を掛けることを考え、ここでは増加分 c_i を式(3・a)の形で与える。

一方、 $\Delta B_i^M < \Delta B_i^A$ の場合、すなわち計算値が実験値よりも大きい場合は、仮定したき裂深さが実際のき裂深さよりも大きいことを表しているため、仮定したき裂深さを減さなければならない。このときき裂深さが負とならないようにき裂深さを減す必要がある。そこで現仮定のき裂深さ a_{iA} に絶対値が1より小さい負の数を掛けることを考え、ここでは減少分 c_i を式(3・b)の形で与える。

3. 実験

3・1 試験片 本実験では多重き裂のき裂間隔分布ならびにき裂深さの分布が異なる2本の試験片 S1、S2 および単一き裂試験片 S3 を用いた。いずれの試験片もオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 製であり、幅、厚さおよび長さはそれぞれ 25、5 mm および 300 mm である。なおき裂は放電加工により導入した幅 0.1 mm のスリットで模擬している。各試験片のき裂位置を図2に示す。

3・2 実験方法 実験方法の概略を図3に示す。定電流源より試験片に一定電流 ($I = 2.0$ A) を流した。電

Fig. 1 Modeling of multiple cracks

Fig. 2 Positions of cracks

Fig. 3 Schematic diagram of experiment

流入出力端子は針状のものとし、0.5 mm の端子間隔の中心にき裂が位置するように配置し、試験片表面の中心軸上で入出力を行った。磁束密度の測定にはガウスメータを用い、センサのリフトオフ値は一定 ($b=8$ mm) に保った。測定点は、各き裂の板幅方向中心上とした。なお、本実験方法との比較の目的で、試験片の両端で電流を入出力した場合の測定も実施した。同比較を付録に記す。

4. 数 値 解 析

金属平板が常磁性体(比透磁率 $\cong 1$) よりなる場合、平板近傍の空气中における磁束密度 B の分布は、Biot-Savart の法則

$$B(r_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{J(r_1) \times (r_2 - r_1)}{|r_2 - r_1|^3} dV \dots\dots\dots (4)$$

により求まる。ここに $\mu_0 (=4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2})$ は真空の透磁率であり、 r_1, r_2 は平板内微小要素および空气中の測定点の位置ベクトル、 $J(r_1)$ は位置 r_1 における電流密度ベクトルである。また V は平板の体積である。

平板に直流電流が流れる問題は電位 ϕ に関する次の Laplace 方程式で支配される。

$$\nabla^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$ である。本問題では、図1に示すようにき裂は二次元であるが電流入出力方法が点入出力のため電流は三次元的に流れる。よって式(5)を三次元有限要素法を用いて解き ϕ を求め、電流密度 J を次式より求める。

$$J = -\frac{1}{\rho} \text{grad } \phi \dots\dots\dots (6)$$

ここで ρ は抵抗率である。

Fig. 4 Extent of element division for FEM

Fig. 5 An example of mesh for analysis (Specimen S 1)

本問題では、電流の流れは $z=0$ 面について対称となるため、有限要素解析では $z \geq 0$ の領域についてのみ要素分割を行っている。要素分割領域および要素分割の一例を図4, 5に示す。なお本解析では8節点アイソパラメトリック要素を使用し、剛性マトリックスの計算では Gauss の積分公式において積分点を1要素につき8点としている。 J は各節点における ϕ の値より式(6)を用いて各積分点ごとに求められる。

求められた J を用いて式(4)を離散化した次式

$$B(r_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^{8 \times N} \frac{J(r_1) \times (r_2 - r_1)}{|r_2 - r_1|^3} \Delta V_i \dots\dots\dots (7)$$

により、空气中的磁束密度 B を計算する。ここに N は平板内の分割要素数、 ΔV_i は要素の体積の1/8である。実験で測定を行った位置と同じ点における z 方向の磁束密度変化を計算することにより、それぞれのき裂の磁束密度変化 ΔB_i^A を得る。

仮定するき裂深さの初期値は、すべてのき裂に対して同じとする。繰返し計算の収束に要する計算回数への影響を調べるため、試験片 S1 において厚さ w の25%および50%を初期値として与える。試験片 S2 においては50%の場合についてのみ計算する。

Fig. 6 Comparison of calculated crack depths, a_{iA} , with actual depths, a_i (Specimen S 1, initially $a_{iA} = 0.25w$)

Fig. 7 Comparison of calculated changes in magnetic flux density, ΔB_i^A , with measured changes, ΔB_i^M (Specimen S 1, initially $a_{iA} = 0.25w$)

5. 結 果

試験片 S1 について、き裂深さの仮定値の初期値を $0.25w$ および $0.50w$ として得られた結果を図 6~10 に、また試験片 S2 について初期値を $0.50w$ として得られた結果を図 11~13 に示す。図 6, 8 および図 11 は繰返し計算の各ステップにおけるき裂深さの計算値と実際値の比較であり、図 7, 9 および図 12 は磁束密度変化の計算値と実験値の比較である。図 6, 8 および図 11 において横軸はき裂位置、縦軸はき裂深さであ

り、一方、図 7, 9 および図 12 では横軸はき裂位置、縦軸は磁束密度変化である。図 6~9, 11 および図 12 から収束の過程を観察することができる。図 10, 13 に繰返し計算回数と式 (1) で定義される F との関係を示す。ここで横軸は繰返し計算回数、縦軸は F である。なお図 10, 13 では F の変化を詳細にみるため縦軸に対数をとっている。ここでは収束条件 $F < \epsilon$ の ϵ として 0.5×10^{-4} をとった。図 10 より試験片 S1 において初期値が $0.25w$ および $0.50w$ のそれぞれの場合について、繰返し計算回数 19 回および 8 回で収束してい

Fig. 8 Comparison of calculated crack depths, a_{iA} , with actual depths, a_i (Specimen S1, initially $a_{iA} = 0.50w$)

Fig. 11 Comparison of calculated crack depths, a_{iA} , with actual depths, a_i (Specimen S2, initially $a_{iA} = 0.50w$)

Fig. 9 Comparison of calculated changes in magnetic flux density, ΔB_i^A , with measured changes, ΔB_i^M (Specimen S1, initially $a_{iA} = 0.50w$)

Fig. 12 Comparison of calculated changes in magnetic flux density, ΔB_i^A , with measured changes, ΔB_i^M (Specimen S2, initially $a_{iA} = 0.50w$)

Fig. 10 F versus repetition number of calculation (Specimen S1)

Fig. 13 F versus repetition number of calculation (Specimen S2)

ることがわかる。同様に、図 13 より試験片 S2 では初期値 $0.50w$ に対して 16 回で収束していることがわかる。図 10 より、仮定するき裂深さの初期値は繰返し計算の収束に要する回数に影響することがわかる。試験片 S1 における各初期値 $0.25w$ および $0.50w$ に対する、また試験片 S2 について初期値 $0.50w$ に対するき裂深さの計算最終値、すなわち評価値と実際のき裂深さとの比較を図 14, 15 に示す。図 14 を見ると、初期値が $0.25w$ の場合と $0.50w$ の場合で評価値はほぼ同一とみれることがわかる。この結果より評価値は初期値によらないといえる。

図 14, 15 よりき裂深さの評価値は実際の深さに比べてたかだか $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ ほど大きめになっている程度であり、き裂間隔によらず良好に深さを評価できていることがわかる。なお若干大きめに評価がでてい

Table 1 Comparison of measured changes in magnetic flux density, ΔB_i^M , in multiple cracks with that in single crack

		Crack Depth mm	ΔB_i^M mG
Single Crack (Specimen S3)		2.5	33.2
Multiple Crack (Specimen S1)	Crack No. 5	2.5	16.5
	Crack No. 11	2.5	14.7
	Crack No. 25	2.5	21.3

Fig. 14 Comparison of final values of calculated crack depths with actual depths (Specimen S1)

Fig. 15 Comparison of final values of calculated crack depths with actual depths (Specimen S2)

る一因として、数値解析ではき裂の幅はないものとして計算しているのに対し、スリットにより模擬したき裂は 0.1 mm の有限幅を有しており、これにより実際のき裂の場合に比べ若干大きめの磁束密度変化を与え、それを ΔB_i^M として採用していることが考えられる。実際のき裂幅はスリットの幅に比べ非常に小さく、零とみなせるため、本手法は高精度で実際の多重き裂を評価することができる。

6. 考 察

多重き裂の場合と単一き裂の場合とを比較してみる。単一き裂試験片 S3 の磁束密度変化の測定結果と、多重き裂試験片 S1 の各き裂のうち単一き裂試験片 S3 と同じき裂深さ $a_i/w = 0.50$ を有する番号 5, 11 および 25 のき裂に対する磁束密度変化の測定結果との比較を表 1 および図 16 に示す。表 1 および図 16 をみると、多重き裂と単一き裂では磁束密度変化が大きく異なることがわかる。この理由として次のようなことが考えられる。単一き裂の場合、図 17(a) に示すよう

Fig. 16 Comparison of measured changes in magnetic flux density, ΔB_i^M , in multiple cracks with that in single crack

(a) Single crack

(b) Multiple cracks

Fig. 17 Flow of current

Fig. 18 Schematic diagram of experiment by input and output of d. c. current on both sides of specimen

Fig. 19 Measured change in magnetic flux density, ΔB_v , in specimen S1 by input and output of d. c. current on both sides of specimen

に電流はまわりに広がるように流れる。これに対し、多重き裂の場合は図 17(b)に示すように、両隣りのき裂が壁の役割をするため電流はまわりには広がらず、き裂のまわりに集中的に流れる。よって、単一き裂の場合に比べて、き裂材での磁束密度が大となり、したがってき裂なし材の磁束密度からそれをひいて得られる磁束密度変化は小さくなる。

以上より、同じき裂深さであっても電流の流れ方が異なると磁束密度変化は大きく異なることがわかる。多重き裂の場合、電流の流れ方に影響を及ぼすものとして、両隣りのき裂との間隔やそれらのき裂深さおよびそのまた隣りのき裂との間隔やそれらのき裂深さなど多くのものがある。すなわち多重き裂では、これら多くの要因による影響を受けているということがいえる。

本論文では、き裂の相互干渉が、多重き裂を対象として有限要素解析を実施することにより的確に評価に考慮されている。

7. 結 言

本論文では、常磁性体材料表面に存在する、存在位置は既知であるが深さが未知なる二次元多重き裂を対

Fig. 20 Flow of current by input and output of d. c. current on both sides of specimen

象として、直流電流を被検査物に流すことにより生じる磁場を非接触で測定し、これに基づきき裂を非破壊評価するという手法を提案した。実験および数値解析の実施により、本手法の有効性を検証した。

付 録

定電流源より一定電流 ($I=2.0$ A) を試験片の両端から流した場合の実験方法の概略および試験片 S1 における磁束密度変化の測定結果を図 18 および図 19 に示す。図 19 を見ると、磁束密度変化は x に対し滑らかな凸形となっており、これより多重き裂による全体的な影響はわかる。しかしこれから各き裂の情報を得ることはむずかしい。

磁束密度変化の分布が上記のごとくなる理由として以下のことが考えられる。図 20 に示すように、多重き裂の場合、き裂間隔が小さいため、電流はき裂とき裂の間にはあまり流れず、その大部分がリガメント部を流れている。そのため、き裂とき裂の間を流れる電流により生じる磁場に比べて、リガメント部を流れる電流により生じる磁場が格段に大きく、この中にき裂間を流れる電流に含まれるき裂の情報が埋没してしまっているのである。

これに対し、本論文の、き裂をはさんで電流を入出力する方法では、個々のき裂の情報が磁束密度変化の分布に的確に現れてくる。

文 献

- (1) Parkins, R. N. and Singh, P. M., *J. Sci. Eng. Corrosion*, **46** 6 (1990), 485-499.
- (2) Ghajarieh, R., ほか 5 名, *NDT & E Int.*, **27** 3 (1994), 143-150.
- (3) Beissner, R. E., ほか 4 名, *ASTM STP*, 722 (1981), 428-446.