3次元 Boundary Fit 変換法を援用した直流ポテンシャル法 による表面き裂形状の同定

林 眞 琴*

Determination of Surface Crack Configuration by DC Potential Drop Method Assisted by Three-Dimensional Boundary Fitted Coordinates Transformation Technique

by

Makoto HAYASHI*

DC potential drop method enables to determine surface crack configurations. A batch processing program for the determination of surface crack configuration by DC potential drop method has been developed. The production of the mesh element has been considerably improved by the introduction of a three dimensional boundary fitted coordinates transformation technique. The curved grid can be automatically changed to correspond to the actual crack shape. The program is available for the plate like material and the pipes with the surface crack. The results of application to the simulated surface crack showed good agreement between the analyzed crack configuration and the actual one with an accuracy of about 0.1mm.

Key word: Potential drop method, Potential difference, Inverse method, Surface crack, Finite element method, Boundary fitted coordinates transformation technique

1 緒 言

構造部材に発生したき裂を検出する方法としての直流ポテンシャル法(PDM)は、直流電流を供給する給電端子と電位差を測定する測定端子をそれぞれ2個設けた測定ヘッドで欠陥周辺を走査して電位差分布を測定すれば、欠陥形状を検出できるという特長を有している。そのため、PDMによりき裂形状を検出する試みが数多くなされてきた。PDMに関する研究としては、2次元および3次元FEMによる貫通き裂と矩形表面き裂に関する矢川らの研究がある^{1),2)}。一方、大路らはPDMのX線CT的な利用法を検討し、2次元および3次元BEMによる逆問題解析法による研究を積極的に行っている³⁾⁻⁸⁾。3次元FEMによる表面き裂形状同定の場合、正確で計算時間は短いものの、反面としてメッシュ作成に長時間を要するという問題がある。その解決法として三好らは3次元問題を2次元問題として近似的に解析できるラインスプリング法を提案している⁹⁾。また、多田らは電位差法による斜め表面き裂形状の同定方法を提案するとともに、平板や円管の表面や内面に存在するき裂形状を高速で推定する手法を開発している¹⁰⁾⁻¹²⁾。

筆者らもPDMの表面き裂形状検出への適用性を種々検討してきた¹³⁾⁻¹⁸⁾。直流電源により部材に電場を形成してき裂周辺の電位差を測定すれば、き裂形状をある程度の精度で検出できるという利点があるが、測定された電位差はき裂全体の形状の影響を受ける^{13),14)}。従って、き裂形状を精度良く決定するためにはFEM電場

解析と測定された電位差分布を比較演算するのが最適であるが、現場で使用可能なパソコンでは計算に多大な時間を要する。そのため、種々のき裂形状に対するFEM電場解析結果を基に簡易表面き裂形状決定法を考案すると共に、配管用の検査システムも開発してきた¹⁶⁾。それらのシステムは特定形状部材での欠陥検出専用であるため、汎用的に使用することはできない。そこで、現場へ持ち運んで手動で欠陥検査ができるような検査装置を開発した¹⁸⁾。これらの機器では、表面き裂形状の検出精度は $\pm 0.3\text{mm}$ 程度である。一方、裏面き裂形状検出については簡易形状決定法を考案し、高温純水中での腐食疲労き裂形状検出に適用したが、精度は十分とは言えない状況である¹⁷⁾。そこで、原子力発電所などの現場において4端子法などで測定した表面き裂周辺の電位差分布を使い、その場で直ぐにパソコンで比較的短時間に表面き裂形状を同定できるようにするシステムの開発を目指した。そのため、新たに3次元Boundary Fit変換法^{19),20)}を採用して、測定対象である配管形状と表面き裂形状に合致したような有限要素法のメッシュを自動で作成して電場解析を行い、測定結果との比較からメッシュ形状に修正を加えて繰返し電場解析を行うことによって、精度良く表面き裂形状を判定する逆問題解析法によりき裂形状を同定するプログラムを開発した。ここで、表面き裂先端座標と深さ方向座標の修正方法を工夫することにより少ない修正回数で収束し、短時間での解析を可能とした。

+ 原稿受理 平成30年10月31日 Received Oc. 31, 2018©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 総合科学研究機構中性子科学センター 〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方, Neutron Science Center, Comprehensive Research Organization for Science and Society, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1106

2 電場解析の基本式と境界条件

導体における電流密度 J と電界 E の関係は、

$$J = \sigma E \quad (2-1)$$

である。ここで σ は導電率 ($1/\Omega m$) である

電界 E と電位 V の関係は、

$$E = -\nabla V \quad (2-2)$$

である。閉曲面を通過する電流 $I(A)$ は、

$$\begin{aligned} I &= \int_{vol} J \cdot dA = \int_{vol} V \cdot J \, dv \\ &= -\int_{vol} V \cdot \sigma \nabla V \, dv \end{aligned} \quad (2-3)$$

である。ここで dA は面積要素、 dv は体積要素である。

電流入力一点より与えられるものとする、

$$I = \int_{vol} \delta(x_0, y_0, z_0) i_p \, dv \quad (2-4)$$

である。ここで δ は δ 関数、 (x_0, y_0, z_0) は電流入力点の座標、 i_p は入力電流値である。従って、電場の基本式は、

$$\int_{vol} \{ V \cdot \sigma \nabla V + \delta((x_0, y_0, z_0) i_p) \, dv \} = 0 \quad (2-5)$$

となる。

境界条件は、導体の境界面上の一点で、

$$V = 0 \quad (2-6)$$

他の境界面では自然境界条件である

$$\partial V / \partial n = 0 \quad (2-7)$$

とする。

以上に基づいて有限要素法による定式化を行った。

すなわち、基本式(2-5)に対応する Galerkin 式 FEM の積分方程式は、

$$\begin{aligned} \int_{vol} \{ V \cdot \sigma \nabla V + \delta(x_0, y_0, z_0) i_p \, dv \} - \int_e V^* \sigma \partial V / \partial n \, dA \\ = \int_{vol} (\nabla V^*) \sigma (\nabla V) \, dv + \int_{vol} V^* \delta(x_0, y_0, z_0) i_p \, dv = 0 \end{aligned} \quad (2-8)$$

である。上式を

$$\int_{vol} dv = \sum_e \int_e dv \quad (2-9)$$

により各要素毎の積分和に置き換える。更に Shape function を用い、各要素内で要素 e の内部の座標と要素 e の内部の電位の値を

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \sum h_i \begin{bmatrix} x_i^e \\ y_i^e \\ z_i^e \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$$V = \sum h_i V_i^e \quad (2-11)$$

$$V^* = \sum h_i V_i^{e*} \quad (2-12)$$

と近似することにより積分計算を行い、 V^* の任意性により各節点の電位に関する連立一次方程式を得る。

3 Boundary Fit 変換法による自動要素分割

本プログラムで扱う測定対象は板と配管である。配管のケースでは、軸方向に並行な内表面き裂と外表面き裂、また、配管の軸方向に垂直な内表面き裂と外表面き裂が存在する4つの場合を想定した。ここで、き裂の検出においてき裂と同じ面で測定した電位差分布からき裂を検出する場合を表面き裂と呼び、き裂と反対側の面で測定した電位差分布からき裂を検出する場合を裏面き裂と呼ぶものとする。

3.1 Boundary Fit 変換法

要素分割は Boundary Fit 変換法により曲線格子網を発

生させる方法を採用し自動的に行えるようにした。

Boundary Fit 変換法は (ξ, η, ζ) の正方格子空間の写像平面から曲線座標格子点 (x, y, z) の実平面上への写像を意味する。

ここでは対象としたモデルの形状から ξ - η 平面についてのみ Boundary Fit 変換法を適用し、軸方向については適用しなかった。従って Boundary Fit 変換法は正方格子点 (ξ, η) の写像平面から曲線座標格子点 (x, y) の実平面上への写像を意味する。この写像は次に示すポアソン方程式

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = P(\xi, \eta) \quad (3-1)$$

において独立変数 (x, y) と従属変数 (ξ, η) を入れ換えた式、

$$\alpha_{\xi\xi} x - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = -J^2 [x_{\xi} P(\xi, \eta) + x_{\eta} Q(\xi, \eta)] \quad (3-2)$$

$$\alpha_{\xi\xi} y - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} = -J^2 [y_{\xi} P(\xi, \eta) + y_{\eta} Q(\xi, \eta)]$$

ここで、

$$\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2$$

$$\beta = x_{\xi} y_{\eta} + x_{\eta} y_{\xi}$$

$$\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$$

$$J = x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}$$

により、境界条件すなわちモデルの境界形状を与えることにより得られる。(3-1)式の関数 P 、 Q は格子間隔の粗密を制御する作用があり次式で表される。 Q については同形のため省略する。

$$\begin{aligned} P(\xi, \eta) &= -\sum a_i \operatorname{sgn}(\xi - \xi_i) \exp(-c_i |\xi - \xi_i|) \\ &\quad - \sum b_j \operatorname{sgn}(\xi - \xi_j) \exp[-d_j \sqrt{(\xi - \xi_j)^2 + (\eta - \eta_j)^2}] \end{aligned} \quad (3-3)$$

ここで右辺第1項は $\xi = \xi_i$ の格子線に、また第2項は (ξ_j, η_j) の格子点に周囲の格子を引き寄せる作用をし、それぞれ

Fig.1 Transformation of curved element from rectangular element by Boundary Fit Transformation method.

れの係数(a_i, c_i), (b_j, d_j)によってその度合いを調節することができる. なお $\text{sgn}(x)$ は x の符号を意味する.

本プログラムでは $P=0, Q=0$ としている. また, $\xi-\eta$ 平面を差分格子に分割し, (3-1)式を差分法により離散化し, Active Matrix 法により解を求めた. Fig.1 にき裂が存在する面での格子線の変換の例を示す. このようにすることにより表面き裂形状に合わせてメッシュ形状を容易に作成できることが分かる.

3.2 プログラムの概要

プログラムの概要をFig.2に示す. プログラムは要素自動分割プログラム, 電場解析プログラム, 要素分割修正プログラムおよびポストプロセッサの4つのサブプログラムで構成される. Boundary Fit 変換法による要素形状の最適化は要素自動分割プログラムで, 電位分布解析は電場解析プログラムで, き裂形状(要素分割)の修正は要素分割修正プログラムで, き裂形状の出力はポストプロセッサで行う. 本プログラムは基本的には Fig.1 に示したように, 測定対象の初期要素分割を行って電場を解析し, き裂周辺の電位差分布を解析し, 解析で得られた電位差分布とき裂周辺で測定された電位差分布との比較を行う. このとき解析値と実測値との比に応じてき裂形状の修正を行い, 再び電場を解析し, 解析で得られた電位差分布と測定された電位差分布の比較を行う. この過程を繰返して, 電位差分布の解析値と実測値が一致したときのき裂形状を実際のき裂形状と判定するものである. 但し, 解析値と実測値が完全に一致するまで解析する必要はなく, 両者の誤差が 1% 以内に収まれば計算を収束させることとした.

本プログラムで対象とした部材形状とき裂条件を Table 1 に示す. 部材の形状は平板とパイプである. き裂位置は内面と外面で, き裂の方向はパイプで言えば軸方向と周方向である. き裂数は単一で, 表面き裂と裏面き裂を対象とした.

Fig.2 Outline of program.

Table 1 Objection of program.

Shape	Plate, Pipe
Crack position	Inside, Outside surface
Crack direction	Axial, Circumferential
Number of cracks	Single
Crack classification	Surface, Reverse-face crack

3.3 き裂形状メッシュの修正方法

表面き裂形状を同定するために電位差分布測定結果と FEM で解析された電位差分布を比較してメッシュ形状を修正する. 以下に具体的な方法を示す.

測定された電位差比分布と FEM で得られた電位差比分布の模式図を Fig.3 に示す. 実線が測定値 $V/V_0(M)$ で, 破線が解析値 $V/V_0(A)$ である. 通常は電位差比分布は 5 次式で近似する. なお, Fig.3 で横軸と縦軸の数値は仮の数値である.

Fig.3 Measured and analyzed potential difference ratio distributions near surface crack.

初めに, 表面におけるき裂先端座標の修正を行う. Fig.4 に示したように, 電位差比分布の最大値 $V/V_0(M)$ と $V/V_0(A)$ の 10% の値と電位差比分布曲線の交点を仮に表面におけるき裂先端座標として求める. Fig.4 では表面 2 カ所の座標は測定値では $a_1(M)$ と $a_2(M)$, 解析値では $a_1(A)$

Fig.4 Modification of crack front coordinates on the surface based on measured and analyzed potential difference ratio distributions near surface crack.

と $a_2(A)$ である. 解析における表面のき裂先端座標 $a_1(A)$ と $a_2(A)$ を測定値から得られた座標 $a_1(M)$ と $a_2(M)$ と一致するように修正する. 具体的には, Fig.7 に太い実線で示したき裂先端に相当するメッシュ線の表面上の座標を $a_1(M)$ と $a_2(M)$ に修正する. それに合わせてき裂面内のす

すべての座標も比例配分のかたちで修正する。

き裂の深さの修正は、各電位差測定位置において電位差比の解析値と測定値の比によりき裂深さを修正する単純な方法を採用した。すなわち、Fig.5 に示すように測定された電位差比を $V/V_0(M)$ 、解析で得られた電位差比を $V/V_0(A)$ 、修正前のき裂深さを $a(A)$ とすると、修正後のき裂深さ $a(A)'$ は次式で与えられるものとした。

$$a(A)' = a(A) \frac{V/V_0(M)}{V/V_0(A)} \quad (3-4)$$

この方法によれば、後述するように要素形状は大体 2 回修正するだけで解析値と測定値は一致し、最終き裂形状を決定することができる。久保らは解析値と実測値の比較により境界残差最小化法で形状を修正する方法を提案しているが、プログラムが複雑であり、き裂形状全体での残差を最小にするため、収束計算の回数が増えることになる³⁾⁻⁶⁾。

Fig.5 Modification of crack front coordinates in the depth direction based on measured and analyzed potential difference ratio distributions near surface crack.

要素形状の修正は電位差分布の解析値と測定値が 1% の誤差で一致するまで自動的に繰返すため、修正回数は基本的には入力不要であるが、他のデータの入力設定ミス等により収束しない場合に備えて、通常は 5 回に設定している。

要素分割数は多いほど精度が上がるが、余り多くすると解析に時間が掛かったり、使用するコンピュータの容量の関係で解析不能となるので全要素数が 4,000 程度以下となるように設定している。後述する Fig.7 に示すように、表面長さ方向では 10 分割程度、深さ方向では深さ 1~2mm ごとに分割すれば十分である。

3.4 解析値による検証

開発したプログラムの精度を FEM 解析値を用いて検証した。

厚さ 20mm, 200mm 角の平板の中央にあるアスペクト比 $a/c=0.5$ の半だ円表面き裂周辺においてき裂から垂直方向に 2mm 離れた位置における電位差分布を Fig.6 に示す¹³⁾。なお、電流は平板の端部中央の 1 点から入力した。そのため、き裂がない場合でも幅方向の電位分布は不均一で、平板中央部の電位差がやや大きい目となっている。

す¹³⁾。なお、電流は平板の端部中央の 1 点から入力した。そのため、き裂がない場合でも幅方向の電位分布は不均一で、平板中央部の電位差がやや大きい目となっている。

Fig.6 Potential difference distributions near the surface cracks with aspect ratio of 0.5 in the 20mm thick 200mm square plate.

Fig.7 Initial mesh shape for surface crack with aspect ratio of 0.5 ($2c=40\text{mm}$, $a=10\text{mm}$).

解析の代表例として $2c=40\text{mm}$, $a=10\text{mm}$ のき裂に対する解析結果を示す。Fig.7 に初期メッシュ形状の例を示す。仮に初期き裂長さ $2c=38\text{mm}$ 、最大深さ $a=8\text{mm}$ としたときのものである。太い実線がき裂先端に相当する。き裂の深さ方向には 5 分割、長さ方向には 20 分割としている。

解析におけるき裂形状の収束状況を Fig.8 に示す。(a) は初期き裂寸法を $2c=38\text{mm}$, $a=8\text{mm}$ とし、長ささと深さともに解析値よりも小さい値に設定した場合の結果である。初期き裂形状 $2c=38\text{mm}$, $a=8\text{mm}$ に対して、1 回目のメッシュ形状修正で $2c=39.5\text{mm}$, $a=9.6\text{mm}$ 、2 回目のメッシュ形状修正で $2c=39.8\text{mm}$, $a=9.9\text{mm}$ となり、電位差比の誤差が 1% 以下となって解析を終了した。実際のき裂形状を実線、解析によるき裂形状を 2 点鎖線で示した。ほとんど重なるほど精度良く解析できていることが分かる。

Fig.8(b)には初期き裂寸法を $2c=42\text{mm}$, $a=12\text{mm}$ とし、長ささと深さともに解析値よりも大きい値に設定した場合の結果である。初期き裂形状 $2c=42\text{mm}$, $a=12\text{mm}$ に対して、1 回目のメッシュ形状修正で $2c=40.5\text{mm}$, $a=10.4\text{mm}$ 、2 回目のメッシュ形状修正で $2c=40.2\text{mm}$, $a=10.1\text{mm}$ とな

(a) Initial crack length shorter and shallower than actual crack.

(b) Initial crack length longer and deeper than actual crack.

(c) Initial crack length shorter and deeper than actual crack.

Fig.8 Crack shape iteration for the surface crack with aspect ratio of 0.5 ($2c=40\text{mm}$, $a=10\text{mm}$).

り、電位差比の誤差が1%以下となって解析を終了した。

Fig.8(c)には初期き裂寸法を $2c=38\text{mm}$, $a=12\text{mm}$ として、解析値よりも長さを短く、深さを大きい値に設定した場合の結果である。初期き裂形状 $2c=38\text{mm}$, $a=12\text{mm}$ に対して、1回目のメッシュ形状修正で $2c=39.7\text{mm}$, $a=10.4\text{mm}$ 、2回目のメッシュ形状修正で $2c=39.9\text{mm}$, $a=10.1\text{mm}$ となり、電位差比の誤差が1%以下となって解析を終了した。

き裂のアスペクト比が $a/c=1.0$, 0.5 , 0.25 , および 0.125 の合計18個の表面き裂についてFEM解析値を用いて解析した結果をFig.9に示す。(a)の表面長さ、(b)の最大深さとともに解析値はFEM解析値と非常に良く一致した。

なお、Fig.9にはエラーバーを表示していないが、誤差は記号よりも小さい範囲に収まっている。

3.5 実表面き裂への適用

本プログラムを実際の表面き裂に適用した結果を示す。Fig.10にはSUS304ステンレス鋼の平板($200\times 200\times 20\text{mm}$)の中央部に放電加工により形成した模擬表面き裂の周辺で測定された電位差分布を示す。電位差分布はいわゆる4端子法で測定したもので、測定端子間距離は5mmである。き裂形状は表面長さ $2c=20\text{mm}$ 、最大深さが5mmの半円弧状である。Fig.10で縦軸はき裂から離れた位置で測定された電位差 V で基準化した電位差比 V/V_0 である。横軸はき裂の中心と思われる測定位置からの距離である。き裂から少し離れた位置では電場は均一であるため電位差比 V/V_0 はほぼ1.0である。き裂横での電位

(a) Crack length on the surface

(b) Maximum crack depth

Fig.9 Comparisons of length and depth of analyzed and actual cracks.

差比はほぼき裂形状に応じた分布となっている。

前述したように、開発したプログラムでは、き裂寸法の初期設定として、適当な表面長さ $2c$ と最大き裂深さ a を入力しても解析可能である。しかし、収束性を考慮すると、予め簡易表面き裂形状決定法により求めたき裂形状を入力するのが良い。簡易表面き裂形状決定法では $2c=20.2\text{mm}$, $a=5.1\text{mm}$ が得られたが、ここでは解析精度と収束性を確認するため、 $2c=19.0\text{mm}$, $a=3.5\text{mm}$ を初期き裂形状寸法として解析した。

プログラムで自動生成されたメッシュ図をFig.11(a)に示す。全要素数は1,760、節点数は2,268である。板厚方向(深さ方向)におけるき裂先端までの要素数は3に設定した。収束計算の結果得られた最終メッシュ図をFig.11(b)に、実際のき裂形状と解析で得られたき裂形状の比較をFig.12に示す。この解析では、メッシュ形状の修正は2回だけであった。解析で得られたき裂形状は $2c=20.2\text{mm}$, $a=5.053\text{mm}$ であり、実際の形状と非常に良く一致する。き裂中心からの距離 $x=-6\text{mm}$ における電位差比はばらつきのある関係でやや小さい値が測定されているが、得られた形状はそれに応じて多少凹んだようになり、本プログラムで得られるき裂形状が測定結果に忠実であることを示している。これは本プログラムの形状決定が設計通りに機能していることを示している。

Fig.10 Potential difference ratio distribution measured around EDM-simulated surface crack in SUS304 stainless steel plate.

Fig.11 Mesh shape for analysis.

Fig.12 Comparison of analyzed and actual crack shape.

Fig.13 Final mesh shape for the surface crack inside of the pipe.

Boundary Fit 変換法を持ちいる利点としてパイプの表面き裂への適用がある。パイプ内面の周方向表面き裂の周辺で Fig.10 に示したような電位差比分布が得られたと仮定して解析を行った結果を Fig.13 に示す。パイプのように外表面が曲線形状であっても平板と同様にき裂形状を決定でき、Boundary Fit 変換法を適用したき裂形状決定法の有用性が高いことが分かる。

4 結 言

Boundary Fit 換法を用いて直流ポテンシャル法により表面き裂形状を同定する有限要素法のプログラムを開発した、その結果をまとめると、以下の通りである、

- (1) 測定対象とき裂形状に合わせてメッシュ分割ができる 3 次元 Boundary Fit 変換法を用い、逆問題解析手法により平板やパイプ内外面の表面き裂形状を精度良

く決定できるき裂形状判定プログラムを開発した。

- (2) 開発したシステムでは、簡易表面き裂形状決定法で得られるき裂長さ最大深さを入力すれば、欠陥形状の修正を 2 回行うだけで最終欠陥形状を判定することが可能である。また、有限要素法で解析した電位差分布を用いて検出精度を検証した結果、誤差は 1% 程度であることが分かった。さらに、模擬欠陥に対して適用した結果、5mm 程度の欠陥であれば、電位差分布の測定結果に忠実に $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の精度で欠陥形状を判定できることが分かった。

本システムを開発するに当たり、当時日立エンジニアリング㈱の千葉優作氏にご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

補足説明：「簡易表面き裂形状決定法」

Fig.14 に簡易表面き裂形状決定法のフロー図を示す。PC には予め大型コンピュータで解析した $a/c=1.0, 0.5, 0.25, 0.125$ の 4 種類のアスペクト比の半円表面を有する板材の、板材表面における表面き裂に垂直な方向の電位差分布を 5 次式で近似した結果をデータベースとして入力してある。

なお、PDM では測定対象の材質や温度の影響を除くため、き裂から離れた位置での電位差を基準電位差 V_0 として、それに対する電位差比 V/V_0 で評価する。

表面き裂に沿って測定された電位差比分布を 3 次～5 次式で近似し、き裂中央位置に対応する最大電位差 V/V_{omax} と、電位差比 $V/V_0=1.0$ との交点から表面き裂長さ $2c^*$ を求める。なお、板材の板厚は 20mm であるので、実際に測定した板材の板厚との比で補正することが必要である。

電位差比データベースから測定端子間距離に対応した位置における各き裂深さに対する電位差比 V/V_0 とアスペクト比 a/c との関係を作成する。この関係からアスペクト比 $a/c=0.5$ に対する電位差比 V/V_0 と板厚 t で基準化したき裂深さ a/t とのマスターカーブを作成する。そのマスターカーブを用いて $a/c=0.5$ に対する電位差比 V/V_0 とき裂深さ a/t の関係を作成する。それに測定された最大電位差比 V/V_{omax} を代入してき裂深さ a^* を求める。それで得られるアスペクト比 a^*/c^* はマスターカーブの $a/c=0.5$ とは異なる。そこで改めて電位差比 V/V_0 とアスペクト比 a/c の関係から a^*/c^* に対する V/V_0 と a/t の関係を作成し、 V/V_{omax} を代入してき裂深さ a^* を求め、 a^*/c^* と a^*/c^* と比較する。これを繰返して得られたアスペクト比とマスターカーブのアスペクト比の差が 0.01 以下となれば、計算を終了する。そして、アスペクト比が一致したときのマスターカーブにき裂周辺の電位差比分布を入力してき裂全体の形状を決定する。

この手法を PC に組み込み、EDM 模擬欠陥を測定した結果を Fig.15 に示す。欠陥サイズは表面長さが 50mm、深さが 4mm の円弧状であるが、測定結果は表面長さが 50.08mm、深さが 4.07mm で非常に精度良く測定できることが分かる。

Fig.14 Flow diagram of simplified method for determining surface crack configuration.

Fig.15 PC display expression of surface crack configuration obtained by simplified inverse method.

参考文献

- 1) G. Yagawa and T. Fukuda, "Crack shape recognition using electrical potential drop method", Proc., JSME, No.820-11, p.290 (1982).
- 2) G. Yagawa and T. Fukuda, "Application of electrical potential drop method in fracture mechanics II", Kikainokenkyu, Vol.35, pp.1324-1330 (1983).
- 3) K. Ohji, S. Kubo and T. Sakagami, "Electric potential CT method for measuring location and size of two- and three-dimensional cracks. (Development of boundary element inverse analysis method for electric potential problems and its application to non-destructive crack measurement)", Trans. JSME, Vol.51, pp.1818-1827 (1985).
- 4) K. Ohji, S. Kubo, T. Sakagami and T. Hashimoto, "Experimental study on two-dimensional crack shape measurement by electrical potential CT method", J. JSMS, Vol.35, pp.942-947 (1986).
- 5) S. Kubo, T. Sakagami, K. Ohji, T. Hashimoto and Y. Matsumuro, "Quantitative measurement of three-dimensional surface cracks by the electric potential CT method", Trans. JSME, Vol.54 pp.218-225 (1988).
- 6) T. Sakagami, "Fundamental study on surface crack measurement by electrical potential CT method", Doctor Thesis, Osaka Univ., (1988).
- 7) S. Kubo, T. Sakagami and K. Ohji, "On the uniqueness of the inverse solution in crack determination by the electric potential CT method", Trans. JSME, Vol.55, pp.2316-2319 (1989).
- 8) K. Ohji, S. Kubo, T. Sakagami, S. Yasuda and K. Fujisita, "A D.C. potential method for measuring sizes of semi-elliptical surface cracks", J. JSMS, Vol.39, pp.1167-1172 (1989).
- 9) T. Miyoshi and S. Nakano, "A study of the determination of surface crack shape by the electric potential method", Trans. JSME, Vol.52, pp. 1097-1102 (1986).
- 10) N. Tada and E. Nakayama, "Evaluation of Size, Shape and Location of a Semi-Elliptical Surface Crack Using Direct Current Electrical Potential Method", J. NDI, 1.48, pp.697-704 (1999).
- 11) N. Tada, J. Iwamoto and M. Okada, "Experimental Study of Three-Dimensional Identification of Surface Crack by Means of Direct-Current Electrical Potential Difference Method of Multiple-Point Measurement Type", Trans. JSME, Vol.72, pp.332-339 (2006).
- 12) N. Tada and M. Uchida, "Electric Field Analysis of Simultaneous Evaluation of Crack on an Inner Pipe Surface and Pipe Wall Thickness Using Direct-Current Potential Difference Method of Multiple-Probe Type", J. Pressure Vessel Technol Vol.134(4), 041501 (2012).
- 13) S. Sakata, M. Hayashi, T. Shimizu and S. Shida, "Finite element analysis of surface crack configuration obtained by electrical potential method", J. JSMS, Vol.32, pp.334-339 (1983).
- 14) M. Hayashi, S. Sakata, T. Shimizu and S. Shida, "DC potential technique for surface crack growth monitoring", J. JSMS, Vol.33, pp.602-608 (1984).
- 15) M. Hayashi, M. Ohtaka, K. Enomoto, T. Sasaki and T. Kikuchi, "Detection of configuration of surface fatigue crack in inside of stainless steel pipe by DC potential drop method", J. JSMS, Vol.35, pp.936-941 (1986).
- 16) M. Hayashi, M. Ohtaka and A. A. Naruse, "Surface crack configuration detection system by DC potential drop method", J. JMS, Vol.47, pp.989-995 (1997).
- 17) M. Hayashi, M. Ohtaka, K. Matsumoto, T. Koike and N. Chiba, "Detection of configuration of surface cracks at inside surface of a pipe from outside surface by DC potential drop method", J. JSMS, Vol.35, pp.964-970 (1988).
- 18) M. Hayashi, "Inspection of surface defect in component and pipe by potential drop technique", Maintenance, pp.38-50 (1988) April.
- 19) F. J. Thompson, F. C. Thames and C. W. Mastic, "Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies", J. Computational Physics, Vol.15, pp.299-319 (1974).
- 20) H. Aoi, K. Kowari, M. Miyazaki and K. Miki, "Application of boundary fit transformation method to super-computer", Hitachi Hyoron, Vol.69, pp.1153-1160 (1987).