直流電位差法による三次元き裂の形状評価法の提案*

嘉 納 豊^{*1}, 阿 部 博 之^{*2}Proposal for Nondestructive Evaluation Procedure of 3D Crack Shape
by Means of Electrical Potential Method

Yutaka KANO and Hiroyuki ABÉ

A new procedure is proposed to evaluate the 3D crack shape nondestructively with high accuracy by utilizing the direct current electrical potential method. The evaluation procedure is carried out by comparing the measured values of electrical potential distribution and those calculated from an analytical method where the crack is modeled as a continuous distribution of 3D double sources. The optimization method is used in order to find accurate solutions. An elliptical embedded crack and a semielliptical surface crack on the back wall in a plate for any aspect ratio of major to minor axes are evaluated especially with respect to location, length and inclination of the crack. The availability of the procedure is verified by some experiments using stainless steels.

Key Words: Nondestructive Inspection, Fracture Mechanics, Inverse Problem, Computational Mechanics, 3D Crack Shape, Electrical Potential Method

1. 結 言

原子力・火力発電プラント, 石油化学プラントなどの余寿命評価における破壊力学の適用に際しては, 応力拡大係数, J 積分等の破壊パラメータを算出することが必要である。このとき荷重条件とともにき裂の大きさ, 形状を非破壊的に評価することが重要である。

直流電位差法を用いて実構造物に存在する三次元き裂の形状を評価した例として, 林ら⁽¹⁾⁽²⁾, 久保ら⁽³⁾の研究などがある。上述の研究例の中で対象とされているき裂は, 測定面に対して垂直な三次元き裂である。これに対し実在するき裂は任意のアスペクト比の三次元形状を有し, 測定面に対して傾いている場合も多い。しかしこのような一般的なき裂を直流電位差法により, 定量的に非破壊評価した例はなく, 当該問題の解決は今後の課題とされていた。

著者らは先に直流電位差法を用いてアスペクト比が零に近い細長い傾いた三次元き裂を対象として, その形状評価を行っている⁽⁴⁾。そこでは, 電位の特異点法により導出した二次元解をき裂の長手方向に沿って逐

次適用し, これらの結果を総合することで, き裂形状の第一近似評価を行っている。しかし同手法をアスペクト比が 1 に近い円板状のき裂に適用した場合, その評価結果は大きな誤差を含むことになる。

本報では, 細長いき裂を含めた任意のアスペクト比を有する傾いた三次元き裂を対象とし, 直流電位差法を用いた, 第一近似評価に比べより高精度なき裂形状の評価手法の提案を行う。電位の特異点法を三次元問題に拡張した解析手法を開発し, 同手法を用いたき裂評価手順の有効性を実験により検証する。

2. き 裂 評 価 手 順

き裂評価手順として, 図 1 に示す手順を用いる。本報では, 図中に示すような平板中に存在する半円板状の裏面き裂, または円板状の埋没き裂の形状を評価する問題を扱う。き裂面は $y-z$ 平面に対して垂直で, かつ $x-y$ 平面と平行あるいはある角度を成すものとする。

まず図中(a)に示すように, 電流入出力端子と電位差測定端子の相対的位置を固定したセンサを測定面上で検査方向(z 方向)に走査する。このときき裂近傍で, センサの中心位置と得られる電位差の関係は(b)のようになる。グラフが最大値を示すセンサの中心位置 a_m

* 原稿受付 平成 3 年 8 月 8 日。

*¹ 正員, 東洋エンジニアリング(株) (〒275 習志野市茜浜 2-8-1)。*² 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

は、き裂の検査方向の位置とほぼ一致する。これより同位置を持ってき裂の検査方向の概略位置とする。測定においては、き裂がない場合に x 方向に一樣になるように電流を供給する。次に(c)に示すように電位差測定端子の中央の z 方向位置が検査方向の概略位置に一致するようにして x 方向に沿った複数箇所での z 方向の電位差分布を測定する。ここで得られた電位差分布が最大値をとる x 方向の位置を a_{cc} とする [(d) 参照]。さらに(e)に示すように、(c)と同様にして $x = a_{cc}$ の線上において、 z 方向の電位差分布 [(f)] を測定する。結局、き裂近傍の x 方向および z 方向の十字線上の電位差分布を得る。最後に得られた電位差分布と、解析的に求められた三次元き裂に対する電位差分布 $\Delta\phi_k$ を最適化法を用いて計算機内で照合することにより、逆問題を解く。このとき以下のような関数 F

$$F = \sum_{k=1}^K (\Delta\phi_k - \Delta\phi_{mk})^2 \dots\dots\dots (1)$$

を定義し、関数値が最小となるようなき裂形状を探索する。ここに K は測定点数を、 $\Delta\phi_{mk}$ は測定より得られる電位差分布を表す。最適化には Powell の共役方向法⁽⁵⁾を用いる。

3. 電位差分布の逆問題とその解法

前章で述べたような手順の実行に当たっては計算機内において仮定されるさまざまな三次元き裂に対する

図 1 き裂の高精度評価手順

電位分布の計算が必要となる。この計算はなるべく容易に行えることが望ましい。任意の三次元き裂を有する測定面上の電位分布を理論的に導出する手法としては、有限要素法⁽¹⁾、境界要素法⁽²⁾、ラインスプリングを組み込んだ有限要素法⁽³⁾、解析解を近似した簡便手法⁽⁷⁾、電位の特異点法⁽⁸⁾がある。有限要素法、境界要素法は全く任意な形状のき裂、部材等を取扱える反面、用意すべきデータ量が膨大、計算時間が長いという欠点を有する。またラインスプリング法、簡便手法では計算は容易に行えるが、取扱えるき裂のアスペクト比、種類に制限がある。これに対し阿部ら⁽⁸⁾は、二次元き裂を対象として電位の特異点法を提案している。同手法によれば、円管内のき裂に対して、精度のよい解を比較的容易に求めることができる。

以上を踏まえ、本報では、電位の特異点法を三次元問題に拡張した手法により、測定面上の電位分布を導出する。本章では、この解析手法について説明する。

ここでは図2に示すような、裏面き裂あるいは埋没き裂を有する平板に遠方で一樣電流を負荷したときの測定面上の電位分布を求める問題を考える。実際の測定においては、電流は測定面より点入出力するが、入出力端子間隔を十分に広げることにより、測定を行う入出力端子間の中央付近では測定値とここで導出する理論値は十分に一致する。ただし同平板の x 方向、 z 方向の広がりは無限であるとし、測定面 (面 ABCD) および裏面 (面 EFGH) は電氣的に絶縁であるとする。また裏面き裂および埋没き裂の形状はそれぞれ半だ円板状およびだ円板状とする。図3(a)、(b)に示すように裏面き裂の形状は、検査方向の位置 a 、き裂面と x - y 平面の成す角度 β 、長さ a 、 c で、埋没き裂の形状は a 、 β 、 a 、 c 、板厚方向 (y 方向) の位置 d の諸量で定義されるものとする。

き裂の代わりに有限の開口幅を持つスリットを用いた場合、両者の間ではき裂先端近傍の電位場は異なる。しかし必要としているのは、き裂先端近傍の電位場ではなく、測定面上の電位場である。さらにき裂長

図 2 一樣電流を入出力されるき裂を有する無限平板

さに比べスリット幅を十分に小さくすれば、精度上問題ないことを数値実験によって確認している。そこで図4に示すようにき裂をスリットで置換する。ここにスリットの開口幅を $2T$ とする。なお、これより後の説明は、便宜上、裏面き裂を対象とした問題を中心として進める。埋没き裂の問題についての説明は、両者の問題に対する説明が異なる場合のみに行う。

図5に示すように、半円板状スリットを有する無限平板に一樣電流が負荷される問題を、スリットを有

さない無限平板に一樣電流が負荷される問題1 [同図(a)]と、問題1に仮想スリットを考え、同スリット面で問題1と大きさが同じで逆向きの電流が負荷される問題2 [同図(b)] の重ね合わせにより表すことを考える。

問題1の電位分布 ϕ_1 は原点における値を零とすれば、次のように表される⁽⁹⁾。

$$\phi_1 = Uz \dots\dots\dots (2)$$

ここに U は z 方向の一樣電流密度である。座標系として、原点 0 が裏面の中央にあり、 x - z 平面が裏面に一致するような直角座標系を考える。

次に問題2について説明する。問題2は図6に示すように x - z 平面を境界とする半無限体中に電流の入出力があるスリットが存在する問題2-1[同図(a)]と、測定面 ABCD で問題2-1と大きさが同じで逆向きの電流が負荷される問題2-2[同図(b)] の重ね合わせで表すことができる。このとき問題2のき裂面における電流は、問題2-1のき裂面における電流および問題2-2において測定面 ABCD より入出力される電流によ

(a) 裏面き裂

(b) 埋没き裂

図3 三次元き裂の形状

図4 き裂およびスリット

(a) 問題1

(b) 問題2

図5 一樣電流を入出力されるスリットを有する無限平板

(a) 問題2-1

(b) 問題2-2

図6 電流の入出力があるスリットを有する無限平板

図 7 三次元二重吹き出し

図 8 三次元二重吹き出しの連続分布によるスリットの表現

り仮想き裂面上に引き起こされる電流の重ね合わせで表される。

問題 2-1 について考える。ここでは、スリット面での電流の入出力を表すために図 7 に示すような流線を持つ、 y 軸と θ なる角度を持つ方向を軸とする三次元の二重吹き出しを導入する。二重吹き出しの強さを b 、その位置を (x_0, y_0, z_0) とする。

x - z 平面を境界とする半無限体中に二重吹き出しが存在するときの電位分布 ϕ_{2-1} は、鏡像の位置 $(x_0, -y_0, z_0)$ に y 軸と $\pi - \theta$ なる角度を持つ方向を軸とする同じ強さの二重吹き出しを置くことで、次のように表される⁽⁹⁾。

$$\phi_{2-1} = b \frac{(y-y_0)\cos\theta + (z-z_0)\sin\theta}{\{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2\}^{3/2}} + b \frac{-(y+y_0)\cos\theta + (z-z_0)\sin\theta}{\{(x-x_0)^2 + (y+y_0)^2 + (z-z_0)^2\}^{3/2}} \quad (3)$$

z 方向を軸とする二重吹き出しに、 z 方向の一樣流れを重ね合わせると、その流れは一樣流体中に置かれた球の回りの流れを表すことはよく知られている。そのとき球の半径は、二重吹き出しの強さと、一樣流れの電流密度の関数となる。そこで本報では、図 8 のように式 (3) で表される半無限体中の三次元の二重吹き出しを平面上に分布させることにより、問題 2-1 の面上で電流の入出力のある半無限体中に存在するスリットを表すことを考える。このとき二重吹き出しの軸の向きは、スリット面に垂直な方向とする。

これより問題 2-1 を表す電位分布 ϕ_{2-1} を次のように得る。

$$\phi_{2-1} = \int_A b \left[\frac{-(y-y_0)\sin\beta + (z-z_0)\cos\beta}{\{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2\}^{3/2}} + \frac{(y+y_0)\sin\beta + (z-z_0)\cos\beta}{\{(x-x_0)^2 + (y+y_0)^2 + (z-z_0)^2\}^{3/2}} \right] dA \quad (4)$$

ここで A は二重吹き出しを分布させる面の面積を表す。

上式中の積分の離散化を考える。まず A を M 個の長方形に分割する。裏面き裂および埋没き裂に対する分割例を、図 9 (a), (b) に示す。同図に示すように、き裂を ξ_1 方向に M_1 分割し、さらにそれぞれを ξ_2 方向に M_2 分割する。ただ分割した各長方形のそれぞれの辺は、図中のようなスリット面上にとった局所座標系 (ξ_1, ξ_2) の ξ_1 軸および ξ_2 軸と平行とする。ここで図中の諸量は次式のように定義される。

$$\xi_{1a_i}^m = c \cos\left(\frac{i+0.5}{2M_1+1}\pi\right), \xi_{2a_i}^m = y_{\max}, \xi_{1b_i}^m = c \cos\left(\frac{i-0.5}{2M_1+1}\pi\right), \xi_{2b_i}^m = y_{\max}, \quad (5)$$

ここに

$$y_{\max} = a \left(1 - \frac{\chi_i^2}{c^2}\right)^{1/2}, \chi_i = c \cos\left(\frac{i}{2M_1+1}\pi\right) \quad (6)$$

次に各分割において、二重吹き出しの強さ b は一定であるとし、 m 番めの分割の強さを b^m で表す。 m 番めの長方形の面積を A^m とすれば積分は次のように離散化される。

$$\phi_{2-1} = \sum_{m=1}^M b^m I^m \quad (7)$$

ここで

$$I^m = \left[\tan^{-1} \left\{ \frac{(\xi_2 - B_1) D_{bi}}{A_1 \sqrt{(\xi_2 - B_1)^2 + D_{bi}^2 + A_1^2}} \right\} - \tan^{-1} \left\{ \frac{(\xi_2 - B_1) D_{ai}}{A_1 \sqrt{(\xi_2 - B_1)^2 + D_{ai}^2 + A_1^2}} \right\} \right]$$

$$+ \tan^{-1} \left\{ \frac{(\xi_2 - B_2) D_{bi}}{A_2 \sqrt{(\xi_2 - B_2)^2 + D_{bi}^2 + A_2^2}} \right\} - \tan^{-1} \left\{ \frac{(\xi_2 - B_2) D_{ai}}{A_2 \sqrt{(\xi_2 - B_2)^2 + D_{ai}^2 + A_2^2}} \right\} \Big] \xi_{2i}^m, \dots \dots \dots (8)$$

ただし、裏面き裂の場合には

$$A_1 = -y \sin \beta + (z - a) \cos \beta$$

$$A_2 = y \sin \beta + (z - a) \cos \beta$$

$$B_1 = y \cos \beta + (z - a) \sin \beta$$

$$B_2 = -y \cos \beta + (z - a) \sin \beta$$

$$D_{bi} = \xi_{1i}^m - x, D_{ai} = \xi_{1i}^m - x$$

.....(9・a)

埋没き裂の場合には、

$$A_1 = -(y - d) \sin \beta + (z - a) \cos \beta$$

$$A_2 = (y + d) \sin \beta + (z - a) \cos \beta$$

$$B_1 = (y - d) \cos \beta + (z - a) \sin \beta$$

$$B_2 = -(y + d) \cos \beta + (z - a) \sin \beta$$

$$D_{bi} = \xi_{1i}^m - x, D_{ai} = \xi_{1i}^m - x$$

.....(9・b)

一方、問題 2-2 を表す電位 Φ_{2-2} を解析的に表現するのは困難であると思われる。そこでここでは以下に述べるような数値解法を導入する。まず図 6 (b) に示す平板の横方向の広がりをも有限とする。ただし、平板の横方向の広がりには板厚に比べて非常に大きく、AB

≫ AE, AD ≫ AE とする。

ここで有限要素法と同様に同平板に対して三次元要素分割を行い、各節点の釣合いを考えれば、問題 2-2 の電位分布 Φ_{2-2} の各節点における値 Φ_{2-2i} に関して次式を得る。

$$\sum_{j=1}^N A_{2-2a}(j, i) \Phi_{2-2j} = q_j \quad (j=1, N) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここに N は、要素分割における総節点数を表す。 $A_{2-2a}(j, i)$ はラプラスの式より定式化される本問題の剛性マトリックス、 q_j は節点電流である。

本問題の境界条件は次のようになる。まず面 AEFB, BFGC, CGHD, DHEA については、二重吹き出しの集合で表されるスリットから十分に離れていることより、電気的に絶縁されていると考える。すなわち

$$q_j = 0 \quad \dots \dots \dots (11)$$

次に面 ABCD における境界条件は、問題 2-1 と大きさが同じで逆向きの電流が負荷されるものとする。すなわち、同面上の負荷される電流密度 q は、

$$q = - \left(- \frac{\partial \Phi_{2-1}}{\partial n} \right) = \frac{\partial \Phi_{2-1}}{\partial y} \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここに n は面 ABCD の外向き単位法線ベクトルであり、この場合 $n=y$ であることを考慮している。

さらに、上式の q を用いて面 ABCD 上の各節点に負荷される電流は各要素毎に次式で与えられる。

$$q_r^e = - \int_{S^e} q N_r dS^e \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここに添字 e は要素であることを表し、 N_r は形状関数を、 S^e は要素を構成する面の中で、面 ABCD に含まれる面の面積を表す。

式(13)は要素内にとった局所座標系 (η_1, η_2, η_3) を用いて次のように書き直される。ただし、 η_1, η_2, η_3 軸はそれぞれ x, y, z 軸と平行であり、 $\eta_1 = \pm 1$ は要素分割の z 軸と平行な辺を、 $\eta_2 = 1$ は面 ABCD 上を、 $\eta_3 = \pm 1$ は要素分割の x 軸と平行な辺を表す。

$$q_r^e = - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 q N_r |J| d\eta_1 d\eta_3 \quad \dots \dots \dots (14)$$

さらに式(7)、(12)を考慮すると

$$q_r^e = - \sum_{m=1}^M \left\{ - \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\partial I^m}{\partial y} N_r |J| d\eta_1 d\eta_3 \right\} b^m \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここで $|J|$ はヤコビアンである。本報では上式の計算にあたっては、Gauss-Legendre の四点公式を適用する。以上から式(15)で表される節点電流を面 ABCD を構成するすべての要素に対して重ね合わせれば、境界条件として、面 ABCD 上の各節点の電流が得られる。

最後に問題 2-2 の性質上、面 EFGH は電気的に絶

(a) 裏面き裂

(b) 埋没き裂

図 9 二重吹き出しを分布させる面の分割

縁の境界条件となる。すなわち、

$$q_j = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

これまで述べてきたように、問題 2-2 の境界条件は、すべて節点電流で与えられる。これより式(10)は次のように変形でき、

$$\phi_{2-2i} = \sum_{j=1}^N A_{2-2a}^{-1}(i, j) q_j \quad (i=1, N) \quad \dots\dots\dots (17)$$

さらに式(15)を上式に代入することにより、各節点における ϕ_{2-2i} を次のように得る。

$$\phi_{2-2i} = \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^N A_{2-2a}^{-1}(i, j) A_{2-2b}(j, m) \right\} b^m \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで $A_{2-2b}(j, m)$ は、式(15)中の $\{ \}$ 内の部分を要素分割全体にわたって重ね合わせることににより得られる、 N 行 $\times M$ 列の行列である。

これより任意の点の問題 2-2 における電位分布 ϕ_{2-2} は、形状関数 N_r を用いて次のように表すことができる。ここでは 20 節点アイソパラメトリック二次要素を用いる。

$$\phi_{2-2} = \sum_{m=1}^M \left[\sum_{r=1}^{20} N_r \left\{ \sum_{j=1}^N A_{2-2a}^{-1}(i, j) A_{2-2b}(j, m) \right\} \right] b^m \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 i は任意の点が含まれる要素の r 番めの節点番号を表す。

以上より、問題 1, 2-1, 2-2 の電位分布を表す式(2), (7), (19)を重ね合わせることで、本報で対象としている、裏面き裂あるいは埋没き裂を有する平板に遠方で一様電流を负荷したときの任意の点の電位分布 ϕ を次のように得る。

$$\phi = U_z + \sum_{m=1}^M \left[I_m + \sum_{r=1}^{20} N_r \times \left\{ \sum_{j=1}^N A_{2-2a}^{-1}(i, j) A_{2-2b}(j, m) \right\} \right] b^m \quad \dots\dots\dots (20)$$

式(20)を用いて電位差分布を計算するにあたっては、あらかじめパラメータとして、

- ① スリット面の分割
- ② スリット幅とき裂長さとの比
- ③ 要素分割

図 10 スリット面上の境界条件

を与える。

未知関数 b_m が求まれば上式を用いて、電位分布を計算することができる。図 10 に示すようなスリットを考える。二重吹き出しは図中の点 P から Q にかけて分布させる。

未知関数 b_m を決定するための境界条件は次のようにする。すなわちスリット面上は電氣的に絶縁であるとする。スリット面上の法線ベクトルを n_s とすれば、この条件は次のように書き表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_s} = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで上式に式(20)を代入し結局、境界条件式として、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \left\{ -\sin \beta \frac{\partial I_m}{\partial y} + \cos \beta \frac{\partial I_m}{\partial z} \right. \\ & \quad + \sum_{r=1}^{20} \left(-\sin \beta \frac{\partial N_r}{\partial y} + \cos \beta \frac{\partial N_r}{\partial z} \right) \\ & \quad \times \sum_{j=1}^N A_{2-2a}^{-1}(i, j) A_{2-2b}(j, m) \left. \right\} b^m \\ & = -U \cos \beta \quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

本来上述の境界条件はスリット全面にわたって成立しなければならない。しかし本解法においては、同条件を以下のようにする。すなわち境界条件は図 10 に示すスリット片面上の点 V から W までの範囲中の規則的に選んだ M 個の点 (図 9 中の・印で示した点) 上で成立するものとする。これより式(22)に示した境界条件式は最終的に b_m に関する M 元の連立方程式に帰着する。なお裏面き裂に関して、同点の座標 (x_m, y_m, z_m) は次のようにとる [図 9 (a) 参照]。

$$\left. \begin{aligned} x_m &= x_i \\ y_m &= T \sin \beta + y_{ij} \cos \beta \\ z_m &= -T \cos \beta + y_{ij} \sin \beta + a \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (23 \cdot a)$$

同様に埋没き裂に関しては、図 9 (b) に示すように、

$$\left. \begin{aligned} x_m &= x_i \\ y_m &= T \sin \beta + y_{ij} \cos \beta + d \\ z_m &= -T \cos \beta + y_{ij} \sin \beta + a \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (23 \cdot b)$$

ただし、

図 11 要素分割

$$y_{ij} = y_{\max} \cos\left(\frac{j}{2M_1+1}\pi\right) \dots\dots\dots (24)$$

4. 実験方法と評価例

最後に本報で提案したき裂の高精度評価手法の有効性を実験により検証する。一例として裏面き裂を取り上げる。

平板の上下面での境界条件を表すため、本報で使用

図 12 実験装置の体系図

図 13 試験片およびき裂形状

した要素分割を図 11 に示す。x, z 方向を 10 分割, y 方向を 3 分割している。また電位分布を求める上で必要なパラメータは, $M_1=4$, $T/a=1.0 \times 10^{-3}$ とした。上述の要素分割, パラメータの使用にあたっては, あらかじめ十分に収束した結果が得られることを確認している。

図 12 に実験の様子を示す。

同図(a)に示すき裂の検査方向の概略位置の見積もりの段階においては, 市販のマイクロボルトメータを用いる。同器は電流入出力端子と電位差測定端子が一体となったセンサを有している。電流入出力端子間隔は $4t(40 \text{ mm})$, 電位差測定端子間隔は $1t(10 \text{ mm})$ である。供給する電流量は 5 A である。

(a) き裂①

(b) き裂②

(c) き裂③

図 14 き裂形状の評価結果

次段階の検査方向の概略位置近傍の電位差分布の測定の様子を同図(b)に示す。5 A の電流を前述のマイクロボルトメータより、き裂の長手方向に一樣電流となるように試験片の端面の複数点で入出力する。試験片と定電流源の中間に参照用抵抗を設置して、同抵抗両端の電圧をデジタルボルトメータにより測定することで、供給している電流量をモニタする。電位差の測定は、マイクロボルトメータの出力をデジタルボルトメータに入力し、デジタルボルトメータの表示を読取ることで行う。電位差測定端子間隔は1t(10 mm)である。このとき自作の測定治具を使用する。本段階の測定においては、概略位置近傍における多数の点での電位差の測定が必要になる。そのため、同治具は短時間にこのような動作が行えるよう、極めて簡単に移動できる構造になっている。さらにばねを用いて測定端子を固定することにより、各測定位置での測定状況をできるだけ均一にするようになっている。

図13に試験片および評価の対象とするき裂形状を示す。試験片はステンレス鋼(SUS 304)製で100×10×250 mmを有している。いずれの試験片もその中央部に裏面き裂を有している。同図に示すように3種類のき裂を対象としている。①はアスペクト比が1に近いき裂、③はアスペクト比が零に近いき裂である。①および③のき裂は測定面に対して垂直なき裂、②は測定面に対して傾いたき裂である。ここでき裂は放電加工により作成したスリット(幅0.5 mm)により模擬している。

最後に得られたき裂形状の評価結果を図14に示す。

図中の実線は評価の対象としたき裂形状を、破線は評価したき裂形状を示す。いずれのき裂、すなわちアスペクト比が零に近い細長いき裂から、1に近いような丸いき裂に対して傾きまで含めてそれらの形状をよく評価している。これより本報で提案したき裂の高精度評価手法が有効であることがわかる。

5. 結 言

本報では、アスペクト比が零に近い細長いき裂から1に近い丸いき裂まで、任意のアスペクト比を持つ傾いた三次元の裏面き裂および埋没き裂を対象として、これらを高精度に評価する手法の提案を行った。

まずき裂の高精度評価の手順を示した。次に同手順で用いる電位差分布を求めるための、電位の特異点法を三次元に拡張した解析手法を開発した。最後に同手法を用いたき裂評価手法の有効性を実験により検証した。

文 献

- (1) 林・ほか4名, 材料, 35-395 (1986), 936.
- (2) 林・ほか4名, 材料, 37-419 (1988), 964.
- (3) 久保・ほか4名, 機論, 54-498, A (1988), 218.
- (4) 坂・ほか2名, 非破壊検査, 38-10 (1989), 999.
- (5) 坂和, 最適化と最適制御, (1980), 50, 森北出版.
- (6) 三好・中野, 機論, 52-476, A (1986), 1097.
- (7) 多田・ほか3名, 機論, 56-522, A (1990), 259.
- (8) 阿部・ほか2名, 非破壊検査, 35-5 (1986), 326.
- (9) Batchelor, G. K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, (1967), 615, Cambridge Univ. Press.