

展望・総説・総論

広範囲の寸法の表面き裂の直流電位差法評価(2)

坂 眞澄*・岩田 成弘†・児島 隆治‡

1. はじめに

広範囲の寸法の2次元ならびに3次元表面き裂の奥行き深さを直流電位差法を用いて高精度に評価する手法について前報¹⁾で説明した。本稿は、その二三の展開について述べる。はじめに被検査物表面上のき裂長さ a と板厚 t を入力せずに、3次元表面き裂の深さを2次元き裂評価に基づき評価する簡易法を提案する。つぎにコーナー部のき裂評価への展開について記す。最後に補足として、き裂に対するセンサの位置決めにあたっての補助的知見について述べる。

2. き裂長さと板厚を入力値としない簡易評価法

対象とするき裂と直流電流 I の入出力端子間隔 $2s_1$ ならびに電位差計測端子間隔 $2s_2$ の位置関係は前報と同じである(図1参照)。なお $s_1/s_2=2$ とする。検査現場の状況によっては被検査物表面上

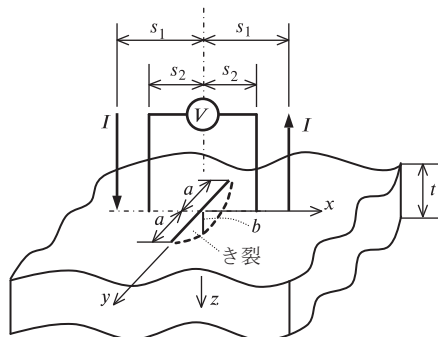


図1 表面き裂に対する電流入出力ならびに電位差計測のための4端子¹⁾

のき裂長さ $2a$ を測らずに、また板厚 t の値も入力せずにき裂深さ b を評価したいという場合もあるであろうことを考え、 a と t の値の入力を省いた簡易評価法について記す。なお評価精度は若干犠牲になるとしても受容可能なものとなるようにする。

はじめに前報に記したやり方の前半部分にしたがい、被検査き裂に対する端子間隔を定めた後、き裂がある場合の電位差 V_1 とき裂がない場合の電位差 V_0 の計測値を求める。つぎに、板厚が大きな被検査物に2次元表面き裂が存在する場合を基準として考え、以下に示す式(1)[前報の式(6)]を $a=\infty$ 、 $t=\infty$ なる場合について考えた上で、 V_1 、 V_0 の計測値を代入し、 b の値を求める。なお式(1)の詳細は前報に記されている。

$$\frac{V_1}{V_0} = \left\{ F \left(\frac{b}{s_2} \right) D \left(\frac{a}{s_2}, \frac{b}{a} \right) + 1 \right\} \times C \left(\frac{a}{s_2}, \frac{b}{t}, \frac{s_2}{t} \right) \quad (1)$$

被検査き裂が3次元表面き裂である場合には、2次元き裂を仮定して求めた b の値は小さめに評価されることになる。これを図2を用いて模式的に説明する。3次元き裂のき裂深さを $b_{(3D)}$ 、電位差を $V_{1(3D)}$ と表し、2次元き裂の深さを $b_{(2D)}$ 、電位差を $V_{1(2D)}$ と表すことにすれば、 $b_{(3D)}=b_{(2D)}$ の場合を考えると、3次元き裂では電流がき裂の横を回って流れることもできるために、2次元き裂に比べて電気抵抗が小さく、したがって $V_{1(3D)} < V_{1(2D)}$ となる。そのため $V_{1(3D)}=V_{1(2D)}$ の状況を考えると、 $b_{(3D)} > b_{(2D)}$ となる。

そこで2次元き裂から形状が離れる顕著な例として、 $2s_2=3\text{mm}$ で $2a=10\text{mm}$ を対象とする場合の寸法比 $a/s_2=b/s_2=3.3$ の半円き裂が $t=\infty$ なる部材上にある場合に、これを計測し評価することを考えてみる。この場合、式(1)より $V_1/V_0=1.5$ となり、この電位差比の値を用いて式(1)で $a=\infty$ 、 $t=\infty$ と仮定して b/s_2 を評価すると $b/s_2=2.4$ と

* 電子磁気工業(株) 顧問(東北大学 名誉教授)
(Masumi Saka)

† 電子磁気工業(株) 開発部 次長
(Masahiro Iwata)

‡ 電子磁気工業(株) 代表取締役
(Takaharu Kojima)

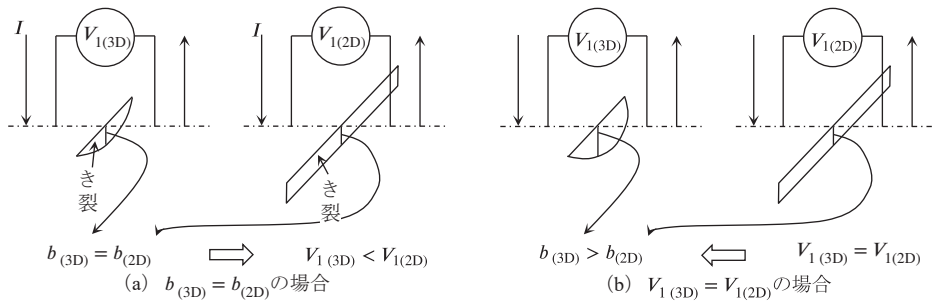


図2 3次元表面き裂と2次元表面き裂に対する電位差の比較

1/1.4 倍に小さく評価される. もう1つの例として $a/s_2 = b/s_2 = 1.7$ の半円き裂の場合を考えると, 同様にして $b/s_2 = 1.2$ と 1/1.4 倍に評価される. 以上の2つの例を参考にして, 2次元き裂を仮定して求めたき裂深さの評価値に1より大きい定数を掛けて評価値として出力することを提案する.

なお, 被検査き裂が2次元き裂であった場合には, 2次元き裂を仮定した評価が正しいわけであるので, ここでは被検査き裂が3次元および2次元のすべての場合を対象として, 上記の1より大きい定数として1から離れすぎでもない1.2を採用することにする. 被検査き裂が2次元き裂であった場合には, 真の値の1.2倍の値を評価値として出力することになるが, 扁平な半円板状の被検査き裂の場合には真の値に対する評価値の倍率は1に近づくことになる.

以上により, 被検査物表面上のき裂長さを測らずに, また板厚の値を入力せずに, 3次元および2次元の表面き裂深さを簡易に評価できる. 本簡易評価の手順をまとめて図3に示す. 図中の b の評価式は式(1)より導かれるものに1.2を掛けたものであり, またギリシヤ文字 $\alpha, \beta, \gamma, \xi$ の数値は文献²⁾によるものである.

3. コーナー部における広範囲の寸法の表面き裂評価への拡張についての考察

コーナー部は応力集中を生じるためき裂発生箇所となりやすい. 文献³⁾にはコーナー部にできる小さいき裂の深さを近接端子直流電位差法により高感度に評価する実用的な手法が示されている.

本章では文献³⁾に示されている成果を活用して, コーナー部の表面き裂の深さを広範囲の寸法を対象として評価することへの手法¹⁾の拡張について考察する.

図4に対象とするき裂と4端子の配置を示す. コーナーの角度を θ , 底部半径を R で表す. また板厚 t は電位差に影響を及ぼさない程度に十分大きいものとし ∞ と仮定する. き裂線に沿った方向の被検査物寸法も十分大きく電位差に影響を及ぼさないものとする. き裂は θ を2等分する面内に

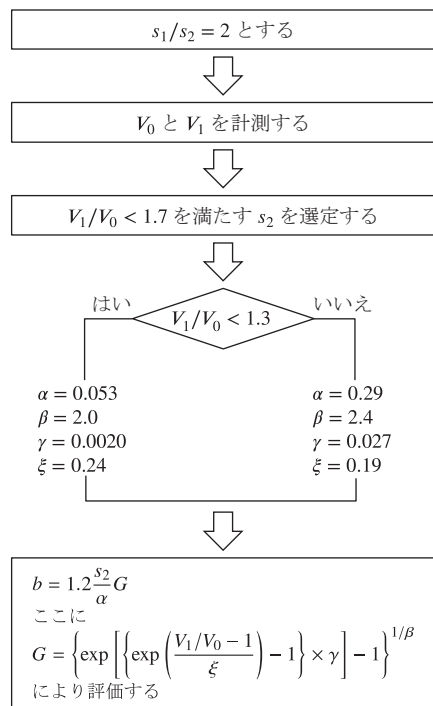


図3 表面き裂深さの簡易評価の手順

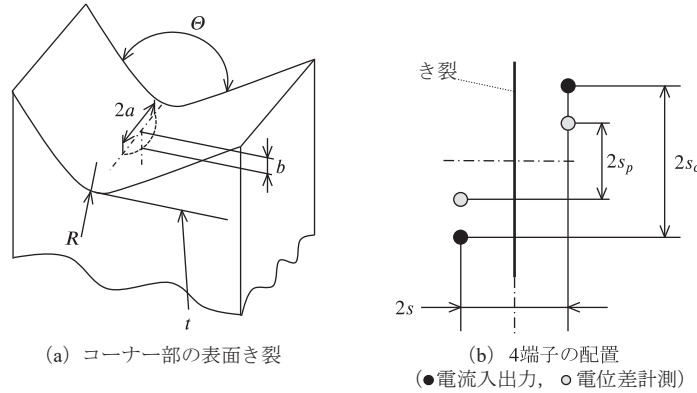


図4 コーナー部のき裂評価

存在するものとする．狭いコーナーへのセンサの配置をおこないやすくするために，き裂線に平行に電流入出力端子の1つと電位差計測端子の1つを配置する場合を対象とする．き裂線を挟んだ電流入出力端子間隔を $2s$ ，き裂線に平行な電流入出力端子間隔を $2s_c$ ，電位差計測端子間隔を $2s_p$ と表す．文献³⁾では $s_c/s_p = 2$ ， $s_p = 1.5\text{mm}$ とし， $s = 1\text{mm}$ とした場合が扱われ，き裂がある場合の電位差 V_1 とき裂がない場合の電位差 V_0 の比 V_1/V_0 が， $\theta = 180^\circ$ のとき，前報¹⁾の式(6)～(8)において s_2 を s で置き換えた式で表現されることが示されている．なおギリシヤ文字の数値については前報とは異なったものとなる(付録1参照)．以上より図4に示した4端子の配置に対しても前報の第2章と同様の議論が成り立つことは明らかである．

電位差に及ぼす θ と R の影響は以下のように考慮する．まず $R = 0$ なる場合を考え，電位差に及ぼす θ の影響を表す関数 $f(\theta)$ を次式のように導入する．

$$\left[\frac{V_1 - V_0}{V_0} \right]_{R=0} = f(\theta) \left[\frac{V_1 - V_0}{V_0} \right]_{\theta=180} \quad (2)$$

ここに右辺の $[(V_1 - V_0)/V_0]_{\theta=180}$ は $\theta = 180^\circ$ に対する値であり，上述のごとく式表示される．文献³⁾では， $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ なる範囲の θ について $f(\theta)$ の値が示されている[文献³⁾の図5]．一例として $\theta = 90^\circ$ の場合には $f(\theta)$ は 0.43 となる．

つぎに電位差に及ぼす R の影響を表す関数 $g(R/s, \theta)$ を次式のように導入する．

$$\frac{V_1 - V_0}{V_0} = g(R/s, \theta) \left[\frac{V_1 - V_0}{V_0} \right]_{R=0} \quad (3)$$

ここに $g(R/s, \theta)$ は R/s と θ の関数である．文献³⁾では， $0 \leq R/s \leq 5$ ， $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ なる範囲のこれらの値に対して $g(R/s, \theta)$ の値が示されている[文献³⁾の図9]．一例として $\theta = 90^\circ$ ， $R/s = 5$ の場合には $g(R/s, \theta) = 1.9$ となる．結局，式(2)，(3)より次式が得られる．

$$\frac{V_1 - V_0}{V_0} = f(\theta)g(R/s, \theta) \left[\frac{V_1 - V_0}{V_0} \right]_{\theta=180} \quad (4)$$

式(4)によりコーナー部のき裂の電位差を表現する．なお式(4)において右辺の $[(V_1 - V_0)/V_0]_{\theta=180}$ が b の関数となっている．

s の値の選定については， $s_c/s_p = 2$ ， $s_p/s = 1.5$ とした上で， $V_1/V_0 - 1$ が目安として $0.7f(\theta) \times g(R/s, \theta)$ より小さくなるようにおこなう．ここに 0.7 なる数値は，図1のき裂と端子配置の状況に対して前報に記した選定基準の $V_1/V_0 < 1.7$ を参考にしたものである．このように s の値を選定した上で，式(1)に変えて式(4)を用いることが，コーナー部における広範囲の寸法の表面き裂深さの評価に基本として資すると考える．

4. き裂に対するセンサの位置決めについて

前報ならびに本稿の第2章で記述している手法は図1に示したようにセンサの中心がき裂長さの中心上にあり，4端子がき裂長さの中心を通りき

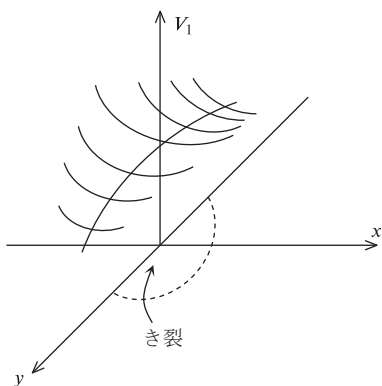


図5 図1の状況を対象としたき裂線近傍におけるセンサの中心位置 (x, y) と電位差 V_1 の関係の模式図

裂に垂直な線上にある場合を対象にしている。ここで補足として図1の状況に対するセンサの位置決めに関して実用的な参考事項を記しておく。

文献⁴⁾にはセンサの中心がき裂長さの中心からずれる場合に V_1 がいかなる変化を示すかについて詳細な議論がなされている。それを参考にして図5にはき裂長さの中心を通り、き裂に垂直な方向を x 軸とする直角座標系 (x, y) を導入し、センサの中心が点 (x, y) 上にあるときの y 軸近辺における電位差 V_1 の分布を模式的に示す。なお4端子は x 軸に平行な線上にあるとしている。 y 軸近辺において V_1 の分布は鞍形をしている。 y 軸に沿って V_1 の変化をみたとき、最大き裂深さの位置である $y = 0$ において V_1 は最大値をとる。またその位置において x 軸に沿った変化をみれば $x = 0$ において V_1 は最小値をとる。 V_1 分布におけるこれらの特徴を参考にすれば、センサを若干走査して y 方向の V_1 の最大位置、そこでの x 方向の最小位置を探し出してセンサの中心をき裂長さの中心 $(x = y = 0)$ にあわせて設置することができる。

5. おわりに

前報¹⁾において近接端子直流電位差法を扱い、小から大まで広範囲の表面き裂なる高精度深さ評価の対象の拡張について記した。本稿では簡易評価、そしてコーナー部のき裂評価への前報の展開について論じた。補足として、き裂に対するセンサの位置決めに関する参考事項についても記した。本稿はき裂寸法評価を主題としたものであり、 V_1/V_0 に注目して議論を展開した。 V_0 のみに注目すれば、減肉評価を扱うことができることをここに付記しておく(付録2参照)。前報ならびに本稿が、機器・構造物の安全な使用に役立つことを期待する。

謝 辞

本稿の作成にあたり電子磁気工業(株)名誉会長故 及川芳朗氏に多大なご支援を賜ったことを記し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 坂 眞澄・岩田成弘・児島隆治:「広範囲の寸法の表面き裂の直流電位差法評価(1)」, 機械の研究, 74, 4 (2022) pp.252-255.
- 2) F. Takeo and M. Saka: "Advancement of the closely coupled probes potential drop technique for NDE of surface cracks", Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, (2004) CD-ROM, pp.1-6.
- 3) 武尾文雄・多田直哉:「電界計測の応用とその新展開 直流電位差計測に基づくき裂評価手法の展開」, 非破壊検査, 60, 10 (2011) pp.572-578.
- 4) H. Tohmyoh, T. Suzuki, S.R. Ahmed and M. Saka: "Measurement of potential drop distribution by scanning the closely coupled probes sensor for sensitive NDE of shallow surface cracks", Materials Transactions, 48, 6 (2007) pp.1166-1172.
- 5) M. Saka, D. Hirota, H. Abé and I. Komura: "NDE of a 3-D surface crack using closely coupled probes for DCPD technique", Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 120, 4(1998) pp.374-378.
- 6) 武尾文雄:「近接4端子直流電位差法による金属材料の材質および欠陥の複合評価に関する研究」, 東北大学博士学位論文, (2007) p.110.

(完)

付録1 式(1)をコーナ一部のき裂に適用する際のギリシヤ文字の数値の簡易的求め方

式(1)における $F \sim C$ の具体的な関数形は前報に記されている。コーナ一部のき裂に式(1)を適用するに際しては、本文に記したように s_2 を s で置き換える。そのようにした式において $t = \infty$ とすれば式(1)における関数 C は 1 となる。ここではじめに $a = \infty$ なる 2 次元き裂の場合を考えれば、関数 D も 1 となる。結局、式(1)の右辺は $F + 1$ となる。文献³⁾の図 4 には $\theta = 180^\circ$ に対する有限要素解析結果が示されており、 F に含まれるギリシヤ文字の数値はそれを表現できるように求めればよい。つぎに、半だ円板状き裂の場合には $D \neq 1$ となり、 D に含まれるギリシヤ文字の数値は、文献³⁾の図 6 に示されている $b/a = 0.6$ なる場合の $\theta = 180^\circ$ に対する有限要素解析結果を表現できるように求めればよい。

付録2 減肉評価への V_0 の適用

図 1 のセンサ配置において V_0 は被検査物板厚 t と次式で関係づけられる⁵⁾。

$$V_0 = \frac{2\rho I}{\pi t} \frac{s_2/t}{(s_1/t)^2 - (s_2/t)^2} \left\{ \left(\omega \frac{s_2}{t} \right)^\nu + 1 \right\} \quad (A1)$$

ここに ρ は電気抵抗率である。式(A1)を $s_1/s_2 = 2$ の場合について考えると

$$V_0 = \frac{2\rho I}{3\pi s_2} \left\{ \left(\omega \frac{s_2}{t} \right)^\nu + 1 \right\} \quad (A2)$$

文献⁶⁾にはこの場合の ω , ν の値がそれぞれ $\omega = 0.82$, $\nu = 2.0$ と求められている。

減肉していない箇所 t の値が既知である場合には、 I , s_2 の値を定め、減肉していない箇所における V_0 の計測値を求め、これらの数値を式(A2)に代入すれば ρ の値が求まる。次に減肉部における V_0 の計測値を求め、それと上記の ρ の値を式(A2)に代入すれば、減肉部の板厚 t の値を求めることができる。

一方、減肉していない箇所 t の値が未知の場合には、 $s_1/s_2 = 2$ なる条件下で、 s_2 の異なる 2 つの値 $s_{2(1)}$, $s_{2(2)}$ に対し、それぞれ減肉部における V_0 の計測値 $V_{0(1)}$, $V_{0(2)}$ を求め

$$\frac{V_{0(2)}}{V_{0(1)}} = \frac{s_{2(1)} (0.82 s_{2(2)} / t)^{2.0} + 1}{s_{2(2)} (0.82 s_{2(1)} / t)^{2.0} + 1} \quad (A3)$$

を満足する減肉部の板厚 t の値を求めればよい。

以上のようにして減肉部の板厚を直流電位差法で求めることができる。