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（1）

坂　眞澄*・岩田　成弘†・児島　隆治‡

1. はじめに

機器・構造物の安全な使用にはき裂の非破壊検査が不可欠である．そのための手法の 1 つに直流電位差法があり，これに関する多くの先駆的な研究がなされてきた．たとえば文献[1)～7)]などにその大略をみることができる．従来の研究の中で，直流電位差法で表面き裂とよばれる被検査物表面に突き出たき裂を高感度に計測し評価する手法として，近接端子を導入した手法（Closely Coupled Probes Potential Drop Technique ; CCPPD 法）の提案がある[8)～10)]．この手法は，電流入出力と電位差計測の合計 4 本の端子を近接させて設置したセンサを被検査物表面に接触させることにより，極めて高感度に小さい表面き裂の寸法（被検査物表面からの奥行深さ）を評価することを実現したものである．長方形板状の 2 次元き裂のみならず半だ円板状 3 次元き裂まで対象とできる．またこの手法はき裂の非破壊評価においてしばしば問題となるき裂閉口に鈍感であり，影響されにくいことが示されている[11)]．

ところで近接端子直流電位差法は，小さい表面き裂を高感度に計測して評価することを目的として開発されたものであるため, き裂が大きくなり，その奥行深さが大きくなると，計測される電位差の値がき裂深さに対して飽和傾向を示すようになり，電位差計測からき裂寸法を精度よく評価することが困難となる．これを踏まえ一例として，電流入出力端子間隔が 6mm で電位差計測端子間隔が 3mm なるセンサを使用した場合には，き裂深さが目安として 5mm 程度より小さいき裂への適用が推奨されている[10)]．また大きなき裂評価にともなうこのような問題点を解決するために，大きなき裂に対して端子間隔を広げる手法が提案された[12)]．そこでは 2 次元き裂を対象として先駆的な手法が示されている．

本稿は以上に鑑み，2 次元のみならず 3 次元の表面き裂をも対象とし，はじめに当該センサにおいて端子間隔とき裂寸法の比を保ったとき，電位差とき裂寸法との間の無次元関係式（き裂評価式）はき裂寸法の大小によらず不変であることを示す．つぎにこれを踏まえて，大きいき裂に対しては文献[12)]に倣い端子間隔を広げるが，ただし端子間隔を比例的に，すなわち電位差計測端子間隔に対する電流入出力端子間隔の比は保ったまま端子間隔を広げるという工夫を新たに導入し，近接端子直流電位差法をき裂評価式は生かしたままで大きいき裂に拡張する方法を提案する．これにより小さいき裂から大きいき裂まで広範囲の表面き裂の寸法（奥行深さ）評価を可能にする．

2. 電位差とき裂寸法の関係の無次元関数表示の特徴について

図 1 に示すように板厚 t なる導電性材料の表面に垂直に存在する長さ $2a$，最大深さ b（$b \leq a$ で $b < t$）なる半だ円板状 3 次元表面き裂を対象とし，き裂長さの中心を通るき裂に垂直な線上において端子間隔 $2s_1$ で直流電流 I を負荷し，端子間隔 $2s_2$ で電位差 V を計測することにより，き裂寸法を評価する問題を考える．なお $a = \infty$ の場合は，2 次元表面き裂を対象にしていることになる．き裂が存在する場合の V を V_1 と表し，き裂が存在しない場合の V を V_0 と表す．

図 1 に示す直流電流問題の支配方程式は，オームの法則と電流保存則よりつぎのように表される．

* 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）

0368-5713/22/¥500/1 論文/JCOPY

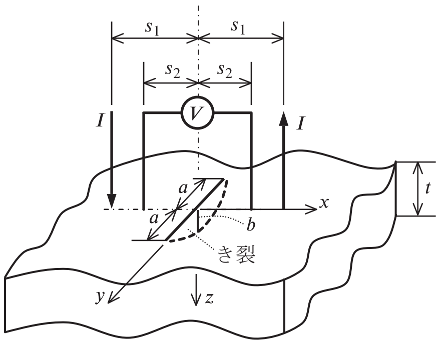

図 1　表面き裂に対する電流入出力ならびに電位差計測のための 4 端子

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}=0 \qquad (1)$$

ここに Φ は電位，(x, y, z) は図 1 に示す直角座標系である．式(1)は，たとえば t を座標の無次元化の基準にすれば，つぎのように変形できる．

$$\frac{1}{t^2}\left\{\frac{\partial^2 \Phi}{\partial (x/t)^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial (y/t)^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial (z/t)^2}\right\}=0 \qquad (2)$$

式(2)の解は，x/t，y/t，z/t の関数となる．これを，対象とする問題を特徴化している s_1，a，b を考慮して，つぎのように表すことにする．

$$\Phi=\frac{\rho I}{t} h_1\left(\frac{x}{t},\frac{y}{t},\frac{z}{t},\frac{s_1}{t},\frac{a}{t},\frac{b}{t}\right) \qquad (3)$$

ここに ρ は電気抵抗率である．式(3)を用いて図 1 の $y=z=0$ において，$x=-s_2$ と $x=s_2$ 間の電位差 V_1，V_0 はつぎのように表すことができる．

$$\left.\begin{aligned} V_1&=\frac{\rho I}{t}\left\{h_1\left(-\frac{s_2}{t},\frac{0}{t},\frac{0}{t},\frac{s_1}{t},\frac{a}{t},\frac{b}{t}\right)\right.\\ &\qquad\left.-h_1\left(\frac{s_2}{t},\frac{0}{t},\frac{0}{t},\frac{s_1}{t},\frac{a}{t},\frac{b}{t}\right)\right\}\\ V_0&=\frac{\rho I}{t}\left\{h_1\left(-\frac{s_2}{t},\frac{0}{t},\frac{0}{t},\frac{s_1}{t},\frac{0}{t},\frac{0}{t}\right)\right.\\ &\qquad\left.-h_1\left(\frac{s_2}{t},\frac{0}{t},\frac{0}{t},\frac{s_1}{t},\frac{0}{t},\frac{0}{t}\right)\right\}\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

式(4)より V_1/V_0 はつぎのように表すことができる．

$$\frac{V_1}{V_0}=h_2\left(\frac{s_1}{t},\frac{s_2}{t},\frac{a}{t},\frac{b}{t}\right) \qquad (5)$$

上記において h_1, h_2 はそれぞれ括弧内のカンマで区切られた諸量の無次元関数を表す．ここで式(5)において，s_1，s_2，a，b，t を等倍した相似の 2 つの状況を考えてみよう．これら 2 つの状況に対し，h_2 の括弧内の無次元量はいずれも値が変わらず，したがって V_1/V_0 の値は変わらないことがわかる．本稿はこの知見を基盤とするものである．

3. 近接端子直流電位差法の概要と大きいき裂評価における問題点

近接端子直流電位差法では，V_1/V_0 は次式で与えられる[9),10)]．

$$\frac{V_1}{V_0}=\left\{F\left(\frac{b}{s_2}\right)D\left(\frac{a}{s_2},\frac{b}{a}\right)+1\right\}\times C\left(\frac{a}{s_2},\frac{b}{t},\frac{s_2}{t}\right) \qquad (6)$$

ここに

$$F\left(\frac{b}{s_2}\right)=\xi\times\ln\left[\frac{\ln\left\{\left(\alpha\frac{b}{s_2}\right)^{\beta}+1\right\}}{\gamma}+1\right] \qquad (7)$$

$$D\left(\frac{a}{s_2},\frac{b}{a}\right)=exp\left[-\delta\left(\frac{a}{s_2}\right)^{-\zeta}\left(\frac{b}{a}\right)^{\{\eta(a/s_2)+\varphi\}}\right] \qquad (8)$$

$$C\left(\frac{a}{s_2},\frac{b}{t},\frac{s_2}{t}\right)=\begin{cases}\left(\lambda\dfrac{s_2}{t}\right)^{\kappa}\dfrac{a}{s_2}\left(\dfrac{b}{t}\right)^3+1 & (\text{for } a\leq 20\,\text{mm})\\ \theta\left(\dfrac{s_2}{t}\right)^{\chi}\dfrac{b/t}{1-b/t}+1 & (\text{for } a=\infty)\end{cases} \qquad (9)$$

一例として $2s_1=6\,\text{mm}$，$2s_2=3\,\text{mm}$ とした近接端子を対象として，a と t の値が種々の場合について，式中の α～χ なるギリシャ文字の数値が示されている[10)]．式(6)～(9)は，近接端子直流電位

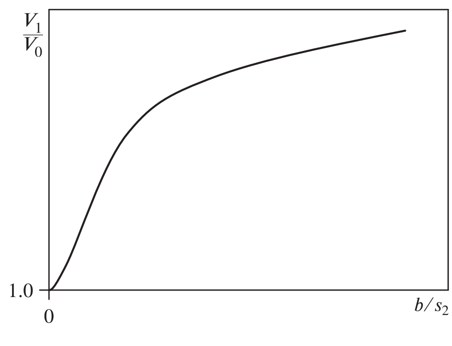

図 2　s_1，s_2，a，t の値が定められたときの V_1/V_0 と b/s_2 の関係の模式図

差法の無次元き裂評価式である．V_0 と V_1 の値を計測より求めた後，それらと a および t の値を式(6)に代入すれば，式(6)を満足するき裂深さの評価値 b が求められる．

図 2 には式(6)より描くことができる V_1/V_0 と b/s_2 の関係を模式的に示す．V_1/V_0 は b/s_2 の大きい範囲で飽和する傾向を示す．これより b が大きい場合には，V_0，V_1 の計測に若干の誤差が含まれると，b の評価値が大きく変わることになり信頼性の高い評価が困難になる．大きいき裂を評価するには上記の問題点を解決した上で，大きいき裂に適用できるき裂評価式を整備することが課題となる．

4. 大きいき裂評価への近接端子直流電位差法の拡張

式(6)は，長さの次元をもつ変数をすべて t で無次元化して表しても変わらず，式(5)の右辺を具体的な関数形で表現したものである．s_1，s_2，a，b，t を等倍した相似の状況に対し，V_1/V_0 の値は変わらない．文献[9]においては，(s_1, s_2)が(3 mm，2.5 mm)，(1.5 mm，1 mm)，(0.75 mm，0.25 mm)なる 3 つの場合について，また前述したように文献[10]では(3 mm，1.5 mm)の場合なる，s_1 と s_2 の種々の組み合わせについて式(6)が成り立つことが示され，それぞれの場合における α〜χ の数値が示されている．

このように s_2 に対する s_1 の比を定めた上で，き裂と端子の位置関係，き裂形状・板厚が幾何学的に相似なる 2 つの場合を比較したときには，s_2/t が同一で，b/t も同一で，かつ s_1/t も同一，a/t も同一であるため，V_1/V_0 の値は同一の $b/s_2\,[=(b/t)/(s_2/t)]$ の値に対して同じ値になる．これより b が大きな値の場合においては，s_2 に対する s_1 の比は近接端子の場合と変えずに，s_2 を大きくして b/s_2 の値を小さくすることにより，近接端子に対する α〜χ の数値を用いた式(6)による図 2 の曲線において飽和領域を避けて精度の高いき裂寸法評価を実現しうることがわかる．

以上を踏まえ，小さいき裂から大きいき裂まで広範囲の表面き裂の寸法評価手順を以下に示す(**図 3** 参照)．はじめに $r(=s_1/s_2)$ の値を 1 つ定める．r の値は任意でよいが，ここでは実用的な近接端子を扱った文献[10]で $r=2$ が採用され，α〜χ の値が示されていることより，それを含めた式(6)〜(9)を以降で活用することを考え，$r=2$ とする．まずセンサの端子間隔の設定をおこなうために，基準として 2 次元き裂に対する図 2 を使うことにする．被検査き裂は 3 次元あるいは 2 次元表面き裂であり，これにセンサを設置して V_1, V_0 を計測し，V_1/V_0 が図 2 の飽和した領域から離れた範囲に入る s_2 の値を選定する．その際，s_2 として 1.5 mm から始めて，上記範囲に入らない場合には，s_2 を少し大きくしたセンサで試行して s_2 の適する値を見出す．なお文献[12]を参考にすれば上記範囲の目安は $V_1/V_0 < 1.7$ と表すことができる．

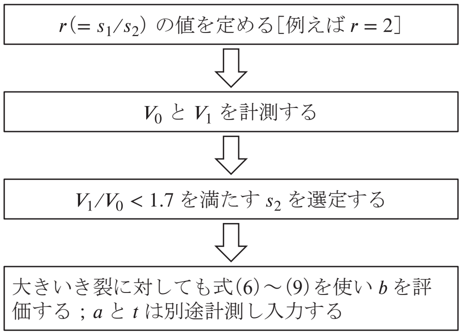

図 3　近接端子直流電位差法に基づく広範囲の寸法の表面き裂の深さの評価手順

以上により s_1，s_2 の値を決めた後，それらの値を用いて求めた V_1, V_0 の計測値と a, t の値を式(6)〜(9)に入力することによりき裂深さ b を求める．ここに式(9)の $a \leq 20$ mm なる表示は $a/s_2 \leq 13.3(=20/1.5)$ に置き換える．同様にして，文献[10]において示されている α〜χ の数値の適用範囲の a，t，b による区分けについても，これらを s_2 で無次元化した表現にし，適用範囲を表す数値については文献[10]に記されている数値を 1.5 で除した値に置き換える．なお a の値は被検査物表面上の観察より求めるものとする．本手順により，小から大までの 2 次元はもとより 3 次元表面き裂の寸法を評価できることになる．

5. おわりに

小さい表面き裂を高感度に計測し評価できる手法として近接端子直流電位差法がある．本稿はそこで用いられるき裂評価式をそのまま用いて大き

い表面き裂まで評価できる手法を提案したものである．まず電位差計測端子間隔に対する電流入出力端子間隔の比については，大きいき裂評価に際しても小さいき裂の場合と同じ値を用いるものとする．その上で，被検査き裂を試行計測することを通して $V_1/V_0 < 1.7$ を満足する高精度評価に適する電位差計測端子間隔を決定する．き裂と端子の位置関係，き裂寸法，被検査物の板厚のすべてを比例的に変えた 2 つの場合を考えると，無次元き裂評価式は両場合で同一である．したがって上記の端子間隔の使用を前提として，近接端子直流電位差法の無次元き裂評価式を被検査き裂である大きい表面き裂にもそのまま使うことができる．

以上のように近接端子直流電位差法を拡張して，小さいき裂から大きいき裂まで広範囲の 2 次元，3 次元表面き裂の寸法を定量評価することができる．

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）H. H. Johnson : “Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth”, Materials Research & Standards, 5, 9（1965）pp.442–445.
2）矢川元基・福田俊彦：「破壊力学における電位差法の適用(3)」，機械の研究, 36, 1（1984）pp.27–32.
3）阪上隆英・久保司郎・大路清嗣・山本賢治・中塚顕二：「電気ポテンシャル CT 法による三次元内部き裂の同定」，日本機械学会論文集（A 編），56，521（1990）pp.27–32.
4）嘉納　豊・阿部博之：「直流電位差法による溶接部に存在する三次元き裂の形状評価」，日本機械学会論文集（A 編）, 58, 547（1992）pp.420–425.
5）N. Tada, Y. Hayashi, T. Kitamura and R. Ohtani : “Analysis of direct current potential field around multiple random cracks”, International Journal of Fracture, 75, 1（1996）pp.69–84.
6）林　眞琴・大高正廣：「マルチターミナルポテンシャル法による片側貫通き裂のオンラインモニタリングシステム」，材料, 47, 7（1998）pp.749–754.
7）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.
8）M. Saka, A. Oouchi and H. Abé : “NDE of a crack by using closely coupled probes for DCPD technique”, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 118, 2（1996）pp.198–202.
9）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.
10）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.
11）S. R. Ahmed, M. Saka, Y. Matsuura, D. Kobayashi, Y. Miyachi and Y. Kagiya : “An effective method of local thermal treatment for sensitive NDE of closed surface cracks”, Research in Nondestructive Evaluation, 20, 1（2009）pp.51–70.
12）F. Takeo, M. Saka, S. R. Ahmed, S. Hamada and M. Hayakawa : “Selecting suitable probes distances for sizing deep surface cracks using the DCPD technique”, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 129, 1（2007）pp.205–210.

（次号へつづく）