直流ポテンシャル法による表面き裂形状の検出†

林 真 琴* 坂 田 信 二**
清 水 翼** 志 田 茂*

DC Potential Technique for Surface Crack Growth Monitoring

by

Makoto HAYASHI, Shinji SAKATA, Tasuku SHIMIZU and Shigeru SHIDA

(Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tsuchiura)

Feasibility of DC potential technique for monitoring surface cracks was discussed by applying the reversing DC potential method to the plates with a simulated surface crack.

Disturbance of electrical field occurred near the crack. Then the sensitivity of the crack measurement rapidly decreased with the distance of measuring position from the crack. Less than a half of the plate thickness was desirable as the measuring distance. Although the potential difference depended on the crack aspect ratio a/c , the crack area could be estimated from the potential ratio at the crack center.

The potential distribution along the crack almost corresponded to the crack shape. A lack of singularity at the crack tip on the surface, however, made it difficult to determine the crack tip position. By using a proportional relation between the potential ratio V/V_0 and the crack depth a/t , and by assuming that a surface crack takes a semi-circular configuration, the crack length c on the surface and the crack depth can be estimated.

The optimum method to determine the crack shape is to repeat the finite element analysis until the potential obtained analytically coincides with that obtained experimentally.

(Received Sep. 1, 1983)

キー・ワード：表面き裂，直流ポテンシャル法，電位差

1 緒 言

大型構造部材が多い発電プラントの機器や配管の寿命診断ではき裂発生とき裂進展を精度良く評価する必要があり、このうちき裂発生までの寿命予知に関しては結晶組織の変化に敏感なX線回折法を適用して、電気部品として使われる銀入り銅の荷重制御下の疲労寿命、および蒸気タービンで使われるCr-Mo-V 鋼のクリープ疲労相互作用下の疲労寿命の予知法を確立し、一部実機へも適用した^{1,2)}。き裂進展量の評価に関しては直流ポテンシャル法と高周波交流ポテンシャル法による貫通き裂長さの検出法およびシステムについて検討してきた³⁾⁻⁵⁾。ところが大型の構造物では貫通き裂はまれであり、ほとんどが非貫通き裂、あるいは表面き裂で、その形状検出が必要である。

き裂の非破壊的な検出法としては超音波探傷^{6,7)}、磁粉探傷、X線透過探傷⁸⁾、AE、ポテンシャル法など多くの方法が検討されている。これらのうちポテンシャル法によるき裂検出は特殊なセンサや測定器を必要とせず、On-lineでの測定法として優れていることから実験室における破壊じん性試験やき裂進展試験においてき裂発生およびき裂進展量の測定に広く利用されている⁹⁾⁻¹³⁾。最近では非線形破壊力学パラメータ J_{Ic} の決定にポテンシャル法を適用することが考えられ、日本機械学会で規格化が行われている¹⁴⁾。

ポテンシャル法によって測定される電位差はき裂形状や部材の大きさなどに影響される。実機に適用するに当って、その都度実機モデルを作成し、模擬き裂を導入して電位差を測定していたのでは効率が悪い。そこで有限要素法によって電場を解析してき裂周辺の電位分布を求め、実測値との比較からき裂形状を決定する手法が有効となってくる。筆者らは有限要素法による電場解析手法を確立するため初めにCT試験片について検討した。その結果に基づいてき裂長さを高精度

† 本報を「電気ポテンシャル法による表面き裂計測法の開発（第2報）」(Development of Measuring Method for Surface Crack Configuration with Electrical Potential Method, II)とする。

原稿受理 昭和58年9月1日

* 正会員 (株)日立製作所機械研究所 土浦市神立町

** (株)日立製作所機械研究所 土浦市神立町

で検出するための最適配線位置を決定し、実験値との比較を行って良好な結果を得た。続いて機器や配管に発生する表面き裂に対するポテンシャル法の適用性を検討し、き裂形状の決定法を提案した。¹⁵⁾ 一方、矢川¹⁶⁾は二次元、三次元有限要素法を用いて貫通き裂と矩形表面き裂についてき裂形状検出を検討し、最適化手法を用いたき裂形状推定法を提案し、一次元の例題で推定が良好に行われることを示した。しかしながら三次元表面き裂への適用が課題として残されており、また種々の形状の三次元表面き裂周辺の電位分布を詳細に測定した例は見当らない。本報では表面き裂を模擬した試験片を作成して電位差分布を測定し、前報の解析結果の有効性を確認すると共にき裂形状決定法を提案した。¹⁶⁾

2 実験方法

実験に供した材料は ASME 規格の A516 鋼 Grade 70 に相当するものである。試験片の形状は Fig. 1 に示すように $200^L \times 200^B \times 20^t$ の平板である。表面き裂は試験片の中央に放電加工により入れた。スリットの

Fig. 1. Shape of specimen with a surface crack.

幅は 0.3 mm である。表面き裂の形状はアスペクト比 a/c が 1.0 の半円と 0.5 の半円弧であり、き裂深さ a/t は 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75 の 5 種類とした。なお、 $a/c=0.5$, $a/t=0.5$ の矩形形状のものも作成した。

電位差測定回路を Fig. 2 に示す。直流電流は安定化電源から供給した。電流値は 30 A で、安定度は 0.03 % 以下であった。電流入力位置は試験片の端面の中央、表面から 5 mm である。電位差測定には市販の微少電圧計を用いた。分解能は $1 \mu V$ である。電位差測定位置は Fig. 1 に示したように試験片表面の中心線に沿

Fig. 2. Block diagram of DC potential system.

った z 方向と、 $z=\pm 5$ mm の x 方向である。

測定端子の材質は α 黄銅で低合金鋼との間には熱起電力はほとんど発生しないはずであるが、測定電位差に若干の変動がみられた。また予備実験の結果、測定値が非常に小さく、分解能 $1 \mu V$ 以下の測定精度が必要となった。そのため Fig. 2 に示したように試験片に流す電流の極性を Twin timer とマグネットスイッチを用いて 3 秒間隔で切換え、切換る直前の値を読みとり、10 回の平均値で評価した。この手法を図式化したのが Fig. 3 である。いま正の電流が流れているときの電位差を V_M^+ とする。仮に試験片に温度分布があれば測定端子間には測定端子と試験片の材質の相違による熱起電力 V_T が加わる。試験片の測定端子間の電位差 V_M だけ測るためには電流を off にして V_T を測り、 V_M^+ から差引かねばならない。いま、別の問題として水環境中での測定を考える。腐食疲労などの場合腐食電位が大きく影響する。直流ポテンシャル法で環境中のき裂長さを測ろうとすると、その電場が局部電位を変化させ、模擬環境を壊してしまう恐れがある。電場の影響を打消す方法としては電流の極性を短時間で切換え、かつ、測定を適当な時間間隔ごとに行えば良い。負の電流を流したときの電位差を V_M^- とすれば、試験片の測定端子間の電位差 V_M は $V_M = (V_M^+ - V_M^-)/2$ となり、熱起電力を測る必要もなくなる。この方法を Reversing DC potential 法と呼ぶ。

Fig. 3. Reversing DC potential method.

19)

でいる。

3 実験結果

試験片の中心線, すなわち $x=0$ mm に沿って z 軸方向で測定した電位差とき裂中央のき裂深さとの関係を Fig. 4 と 5 に示す。ここで縦軸はき裂がない試験片の電位差 V_0 で規準化した電位差比 V/V_0 であり, 横軸は板厚 t で規準化したき裂深さ a/t である。Fig. 4 と 5 のアスペクト比 a/c はそれぞれ 1.0 と 0.5 である。各測定値は前述したように 10 回正負電流を流したときの平均値である。電位差比 V/V_0 は

Fig. 4. Relation between crack depth and electrical potential ratio at crack center ($a/c=1.0$).

Fig. 5. Relation between crack depth and electrical potential ratio at crack center ($a/c=0.5$).

き裂が大きくなると共に大きくなる。しかしながら感度は測定位置がき裂から遠ざかるにつれて急激に減少する。き裂深さを 1 mm 以下の精度で検出しようとすれば測定位置はき裂から板厚の約半分以内の距離にする必要がある。またアスペクト比 a/c に関しては a/c が小さい程電位差比は大きい。これは同じき裂深さであってもアスペクト比の小さいき裂の面積が大きいためである。

x 方向での電位差の分布を Fig. 6 と 7 に示す。参

Fig. 6. Distribution of electrical potential difference in half-circular cracked specimens ($a/c=1.0$).

Fig. 7. Distribution of electrical potential difference in semi-circular cracked specimens ($a/c=0.5$).

考のため図中にき裂の形状を描いた。電位差は試験片の端で約 $15\mu\text{V}$ である。電流入力位置が試験片端面の板幅中央の 1 点であるため電流密度が中央部では高く, き裂がない試験片でも中央部の電位差は大きい。このように試験片の中央に近づくにつれて電位差は徐々に増加するが, き裂の近傍で急増する。図中に示したき裂形状と対比させれば分かるように電位差分布はき裂形状によく対応しており, アスペクト比 a/c が小さい方の電位差分布のプロファイルは幅が広い。Fig. 8 には矩形の表面き裂を有する試験片での電位差分布を示す。

Fig. 8. Distribution of electrical potential difference in rectangular cracked specimen ($a/c=0.5$, $a/t=0.5$).

同図には比較のため同じアスペクト比 $a/c=0.5$, 同じき裂深さ $a/t=0.5$ の円弧状表面き裂の電位差分布を合せて示した。同じアスペクト比のき裂であっても電位差分布は大きく異なる。き裂形状に対応して矩形き裂の場合電位差プロファイルは幅が広く、また Peak 周辺は平坦になっている。

き裂面積比 S/S_0 (S : き裂面積, S_0 : 試験片の断面積) と試験片中央 $z=\pm 5$ mm における電位差比 V/V_0 との関係を Fig. 9 に示す。アスペクト比 a/c が大きいと電位差比 V/V_0 はやや大きい、 S/S_0 が 10% 以下であれば電位差比が分るとき裂面積がある程度推定されそうである。ただし、矩形き裂の場合は若干小さい値となる。これは同じき裂面積を有するき裂であっても矩形のき裂が中央では浅いこと、および矩形き裂のコーナ付近の Flux は不均一であっても、き裂の中

Fig. 9. Relation between crack area ratio S/S_0 and electrical potential ratio V/V_0 at crack center.

央前方では Flux は均一で、かつ密度が高いことによると思われる。

各測定点における電位差比 V/V_0 とき裂深さ a/t との関係を Fig. 10 に示す。Fig. 6 と 7 に電位差分布を示したように表面におけるき裂の先端において電位差分布は特異性を持たないため、Fig. 10 の $a/t=0$, すなわち、表面のき裂先端においても電位差比は相当大きい値を示す。 a/t が 0.25 以下の浅いところを除けばアスペクト比 $a/c=1.0$ と $a/c=0.5$ でそれぞれほぼ同じ線上にのる。

Fig. 10. Relation of crack depth a/t to electrical potential ratio V/V_0 at each measured position.

4 考 察

有限要素法による電場の解析は前報¹⁶⁾で示したように Fig. 11 に示すようなモデルについて行った。対称性から実際の解析領域は全体の 1/4 とした。得られた電位差分布を Fig. 12 と 13 に示す。アスペクト比はそれぞれ $a/c=1.0$ と $a/c=0.5$ である。解析に用いた電

Fig. 11. Analytical model of finite element method ($a/c=0.5$).

Fig. 12. Distribution of electrical potential difference in half-circular cracked specimens obtained by FEM analysis ($a/c=1.0$).

Fig. 13. Distribution of electrical potential difference in semi-circular cracked specimens obtained by FEM analysis ($a/c=0.5$).

流値および材料の固有抵抗値は1.0で、縦軸は任意の値である。その理由は得られる電位差は材料の固有抵抗に依存し、また固有抵抗が温度に依存するので解析結果の整理はすべて電位差比で行うためである。CT試験片のき裂長さ測定に当って有限要素法により最適測定端子位置を調べるため、材料の固有抵抗値と電流値を入力して電位差を求めたところ実験値の約1.5倍の値が得られた。解析方法には数学的には誤りはなく、初期き裂長さにおける電位差 V_0 を用いて規準化した電位差比 V/V_0 とき裂長さ a/W (a : き裂長さ, W : 試験片板幅) の関係は実験値と極めて良く一致した¹⁵⁾。有限要素法による解析値が実験値と一致しない理由は現在のところ不明である。いずれにしても電位差比 V/V_0 で評価すれば有限要素法による解析値はCT試験片だけでなく、SEN試験片でも実験値と一致することが確認されている。Fig. 6と7に示した実験値はFig. 12と13に示した解析値と良く一致する。ただし、き裂がないときの電位差は若干小さいように思われる。

Fig. 14 はき裂中央における電位差比 V/V_0 の解析

Fig. 14. Comparison of experimental values with analyzed values.

値 $V/V_0(\text{Cal.})$ と実験値 $V/V_0(\text{Exp.})$ を比較したものである。両者は非常に良い直線関係にあるが、実験値の方が約10%大きい。き裂のない試験片については数回測定し直したが、同じような結果が得られた。試験片はすべて同じ素材から切出したものである。き裂のない試験片だけが部分的に材質に差、あるいは組織に差があった可能性がある。他の理由として次のことが考えられる。本方法を実機表面き裂の On-line 測定を目指して、測定用リード線を直接試験片表面に接続することを試みた。リード線の材質として Ni, SUS 304, 純鉄を選び、パーカッションウェルダで溶接した。ところがいずれの材料も材質として不適合で強度的に弱い、熱起電力が大きいなどの問題が生じたためリード線を溶接することは断念した。溶接時の入熱量はパーカッションウェルドであるので非常に少ないが、数回も溶接を繰り返したために測定点近傍の組織が入熱により変化し、これが電位差の低下となって現れたものと思われる。Fig. 14 の結果からき裂のある試験片については問題ないと仮定して、次式によりき裂がない試験片の電位差 V_0 を推定した。

$$V_0 = \sum_{i=1}^n \left(V_i^E \cdot \frac{V_0^A}{V_i^A} \right) / n$$

ここで V_i^E は測定値、 V_0^A と V_i^A は解析値である。この V_0 を基に改めて解析値と実験値の対応を求めると Fig. 15 に示したように両者は極めて良く一致した¹⁶⁾。このことより前報で述べた方法により電位差比分布から表面におけるき裂先端位置およびアスペクト比を決定することが可能である。

解析で得られた各位置における電位差比 V/V_0 とき裂深さ a/t の関係は $a/c=1.0$ および $a/c=0.5$ の場

Fig. 15. Comparison of experimental values with analyzed values using modified reference potential difference.

合は実験結果と良く一致し、 $a/t > 0.25$ では V/V_0 は a/t と比例関係にあった。したがってそのこの配からアスペクト比 a/c の推定ができると共にき裂深さの推定も可能となる。ところが $a/c = 0.25$ と $a/c = 0.125$ の場合には V/V_0 と a/t は直線関係にあるが、き裂の大きさに影響され、それぞれ別の直線になった。アスペクト比が小さくなる程貫通き裂に近づくため V/V_0 と a/t の関係はアスペクト比の影響を受けなくなることが考えられる。Wilkowski²⁰⁾ らも内面に表面き裂有するパイプにおいて $a/c < 0.16$ では V/V_0 vs. a/t はアスペクト比に影響されないという結果を得ている。Wilkowski らの測定方法は不明であるが、本研究と異なり、給電端子と測定端子を一緒に走査するようなものであるとすればアスペクト比に依存しない可能性がある。すなわち、給電端子を測定端子のすぐ横に配置して測定する4端子法で電位差を測定する場合、電流は給電端子間の周辺だけを流れるため、電流の Flux がある部分だけを取出せばき裂はほぼ貫通き裂とみなすことができるのである。逆に本研究のように試験片の端面から入力させた場合試験片幅方向 (x 方向) で Flux の分布があるが、表面き裂全体が Flux の中にあり、各測定点の電位差は表面き裂周辺全体の電場の乱れに影響された値となる。そのためアスペクト比が異なれば V/V_0 vs. a/t の関係は異なったものとなり、さらにアスペクト比が小さい場合にはき裂の大きさによっても異なってくると考えられる。しかし実際に発生するき裂は機器によって様々であり、パイプ内面に円周方向に成長するき裂もあれば、すき間腐食効果のために板厚方向に大きく成長するものもある。したが

ってアスペクト比の大きいき裂についても検討が必要である。

本研究の結果、実験値が解析値と良く一致したことから前報で述べたような方法でき裂形状を決定すれば良いが、若干精度上に不安がある。最適な方法としては実験値と解析値が一致するように解析で入力するき裂形状を変えることを数回繰返し、一致したときの入力したき裂形状を実際の形状とするものである。その手順の一例を Fig. 16 に示す。初めに部材の断面を小さい正方形の要素に分割する。Fig. 6 と 12 あるいは Fig. 7 と 13 を見れば分るように電位差のプロフィールはき裂形状と良く対応するので、第1回目にはプロフィールと一致するように■印で示した部分をき裂として電位分布を解析する (1st step)。解析値と実験で得られ

Fig. 16. Crack shape determining method by using comparison of analyzed values with experimental values.

た電位差に差があれば、部分的にき裂を深くしたり、浅くしたりして形状を変え、●印の要素をき裂として追加し、再度電位分布を解析する (2nd step)。その結果、まだ誤差があればさらにき裂形状を変えて解析する。これを繰返して誤差が例えば電位差比で1%以下となれば、そのときのき裂形状 (Fig. 16 で ■印の要素を加えた形状) を実際のき裂形状とするものである。

直流ポテンシャル法による表面き裂形状の検出法で問題と思われるのは Fig. 17 に示したアスペクト比が 1.0 以上のき裂と内部き裂の測定精度である。(a)のアスペクト比が 1.0 以上のき裂の場合、破線で示したようにアスペクト比が 1.0 に近いき裂のように過大に評価してしまう恐れがある。しかし Tunnel 効果が著しく、 a/c が 1.0 よりはるかに大きい場合にはき裂形状を一意的に決定できない恐れがあるが、 a/c が 1.0 よりそれほど大きくなければ電位分布は一意的であり、き裂形状を決定できると思われる。一方、(b)のような内部き裂の場合には表面のき裂となっていない箇所を電流が流れるため過小に評価する可能性がある。いま内部き裂については対象外としているが、鋳鋼品におけるクリープき裂では Fig. 17 (a) のような Tunnel 効果の顕著な場合があるので今後の検討課題である。²¹⁾

Fig. 17. Surface crack shape with aspect ratio of more than 1.0 and internal crack shape.

5 結 言

直流ポテンシャル法による表面き裂の形状検出法を検討した結果をまとめると以下の通りである。

- (1) Reversing DC potential 法を採用することにより熱起電力の補正なしで電位差を測定できた。この手法は腐食環境中でも適用できる。
 - (2) 電場の乱れはき裂周辺に限定されるためき裂深さを良く測定するためには測定位置をき裂から板厚の半分以内の距離にしなければならない。
 - (3) き裂中央の電位差比はアスペクト比が小さい程大きい。き裂面積比で整理すると形状に依存せず、ほぼ同じ線上にのる。
 - (4) 電位差の分布はほぼき裂形状に対応するが、表面でのき裂先端近傍で特異性が存在しないため、表面のき裂先端を特定するのは困難と思われた。
 - (5) ただし、き裂深さ a/t が 0.25 以上であれば電位差比 V/V_0 とき裂深さ a/t の間に直線関係があり、その配が $a/c=1.0$ と $a/c=0.5$ では異なるのでアスペクト比を決定でき、き裂深さの推定および表面のき裂先端の特定も可能である。
 - (6) 表面き裂形状の決定法としては対象物のき裂周辺だけ細い要素に分割し、初めに測定された電位差プロフィールに合致するようにき裂とする要素を決定し、つぎに解析値が実験値と一致するまでき裂とする要素の数を増減して補正していくのが最適である。
- 終りに本研究を行うに当たり、材料を提供していただ

いた当社 日立工場 齊藤高一氏に謝意を表する。

(昭和58年6月22日 第2回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 林 眞琴, 清水 翼, 志田 茂, 第17回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 34 (1980).
- 2) 林 眞琴, 清水 翼, 志田 茂, 第19回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 91 (1982).
- 3) 林 眞琴, 清水 翼, 志田 茂, NDI 昭和56年秋季大会前刷, p. 746 (1981).
- 4) 林 眞琴, 坂田信二, 清水 翼, NDI 第3分科会資料 No. 3709 (1982).
- 5) 大高正廣, 林 眞琴, 菅野 智, 清水 翼, 日本機械学会日立地方講演会前刷, p. 71 (1983).
- 6) 伊達和博, 島田平八, 伊東義晃, 非破壊検査, **31**, 247 (1982).
- 7) 佐々木莊二, 佐藤弑也, 日立評論, **62**, 777 (1980).
- 8) 大平貴規, 岸 輝雄, 堀内 良, 非破壊検査, **29**, 189 (1980).
- 9) L. A. Simpson and C. F. Clarke, Atomic Energy of Canada Limited Report-5815 (1977).
- 10) G. H. Aronson and R. O. Richie, J. Testing and Evaluation, **7**, 208 (1979).
- 11) A. Saxena, Eng. Frac. Mech., **13**, 741 (1980).
- 12) K. H. Schwalbe and D. Hellmann, J. Testing and Evaluation, **9**, 218 (1981).
- 13) R. P. Wei and R. L. Brazill, ASTM STP 738, 103 (1981).
- 14) 小林英男, 日本機械学会第516回講習会教材, p. 17 (1981).
- 15) 林 眞琴, 坂田信二, 清水 翼, 第18回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, p. 125 (1981).
- 16) 坂田信二, 林 眞琴, 清水 翼, 志田 茂, 材料, **32**, 334 (1983).
- 17) 矢川元基, 福田俊彦, 日本機械学会講演会論文集, No. 820-11, 290 (1982).
- 18) 福田俊彦, 矢川元基, 第32回応力連合講演会講演論文抄録集, p. 251 (1982).
- 19) T. A. Prater and L. F. Coffin, Proc. 2nd Int. Conf. on Environmental Degradation of Engineering Materials, p. 59 (1981).
- 20) G. M. Wilkowski and W. A. Maxey, Battelle Columbus Laboratory, NG-18 Paper No. 80-8 (1981).
- 21) 森 時彦, 大阪大学博士論文 (1981).