集中誘導型交流電位差法に関する研究 —欠陥寸法の評価精度および周波数依存性の検討—[†]

金 塚* 庄子哲雄**

A Study on Induced Current Focusing Potential Drop (ICFPD) Technique — Examination of the Sizing Accuracy of Defects and Its Frequency Dependence —

by

Hoon KIM* and Tetsuo SHOJI**

Aiming at nondestructive detection and size prediction of defects with high accuracy and resolution, an Induced Current Focusing Potential Drop (ICFPD) technique has been developed. This technique can be applied for determining the location and size of defects in components with not only simple shape such as plain surface but also more complex shape and geometry such as curved surface and dissimilar joint.

This paper describes the basic principle of ICFPD and its probe development. In this ICFPD, current was induced in a conductive material by a straight induction wire, which is electrically isolated, placed on it. The benefits of this new technique compared with the conventional ACPD are :

- (1) Current is induced and focused only at an exploring region.
- (2) Applicable to defect detection by scanning the sensor probe in an exploring region.
- (3) Applicable to defect detection in a weld joint of austenitic stainless steel.

As the results of the innovation in instrumentation and the improvement in evaluation procedure by use of suitable parameters, the existence of defects is clearly observed as the variation of potential drops, and the nondimensional parameter ($V_{c, \max} / V_{avK}$) has a direct correlation with crack depth. Especially, for the depth less than 5 mm, the ICFPD shows higher sensitivity than the conventional ACPD at the frequencies of 3, 10 and 30 kHz.

Key words : NDE, Induced current, Focused current, Potential drop, Frequency, Induction wire, Pick-up probe

1 結 言

平成3年度に生じた美浜発電所2号機の蒸気発生器伝熱管の損傷は微小き裂の発生・成長による疲労破壊の1つの例として挙げられるが、原子力・火力発電、石油プラントあるいは航空機等さまざまな環境下で使用される構造物で起こる疲労損傷や応力腐食割れ等によるき裂発生および進展を検知することは極めて重要な課題である。特に、き裂あるいは欠陥の存在が確認された場合には破壊力学に基づいた構造物の健全性評価およびその寿命管理が必要であるが、そのためには材料の性質や運転環境の情報と共にき裂あるいは欠陥を検出し、その大きさを定量的に評価することが不可欠である。したがって、破壊力学的解析に必要な情報を提供し十分な安全性確保のために劣化した部材を適

切な時期に交換あるいは補修するためには、構造物に存在するき裂や欠陥をより高い精度で探傷し、その大きさを測定する技術あるいはき裂の発生を稼動中に検出するモニタリング手法の開発が望まれている。

したがって、構造物に存在するき裂を評価する非破壊技術には大きな努力が払われ、大きな進歩を見せてきている。例えば、超音波探傷、X線、渦電流および直流・交流電位差法等は実験室レベルで、あるいは実構造物において広く用いられてきた。しかしながら、これらの手法は欠陥の位置、形状および寸法の検出精度が必ずしも充分とはいえない場合も少なくない。

これらの測定方法の中で、特に表面き裂の深さ測定のため Dover^{1), 2)} によって開発された交流電位差 (ACPD) は実験室レベルで表面き裂の深さを測定す

[†] 本報を「集中誘導型交流電位差法に関する研究 (第1報)」(A Study on Induced Current Focusing Potential Drop (ICFPD) Technique, I) とする。

原稿受理 平成5年11月15日 Received Nov. 15, 1993

* 学生会員 東北大学大学院 〒980 仙台市青葉区荒巻青葉, Graduate Student, Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai, 980

** 東北大学工学部附属破壊力学応用研究施設 〒980 仙台市青葉区荒巻青葉, Dept. of Faculty Eng., Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai, 980

る上で大きな進展を見せた。³⁾⁻⁷⁾しかしながら、この方法は測定金属に直接、できるだけ一様に交流電流を流すことを前提としており、3次元欠陥の測定結果の定量評価は必ずしも容易ではない。

本研究では、構造物に存在するき裂を探傷し、さらにその深さの計測において、従来の交流電位差方法(ACPD)が抱えていた問題点を解決するため、今回新たに交流電流を探傷領域に集中的に誘導することができる集中誘導型交流電位差方法(Induced Current Focusing Potential Drop, ICFPD)を開発し、この方法を用いて、実際の構造物に存在する3次元き裂の探傷、寸法評価を可能とするための手法の確立を目的とした第1報である。具体的には片側貫通切欠を有する試験片について、本研究で開発した集中誘導型交流電位差方法(ICFPD)と従来の交流電位差方法(ACPD)の結果を比較し、本手法がその検出感度、探傷法としてより優れた手法であることを明らかにする。

2 原 理

無限に長い導線に電流 I を流すと周りに磁界 H が生じる。^{8),9)}この磁界 H は Fig. 1 に示すようにアンペアの右ねじの法則によって誘導される。無限に長い電流導線を無限平板の導体の表面に置いた場合、導線周りの磁界は導体に電流を誘導する。この電流は導線の直下でより大きな電流値を示し、導線から任意の距離に誘導される電流は距離に反比例して減少する。すなわち導線の直下に電流が集中した形となる。また、この

Fig. 1. Principle of ICFPD. It is seen that a focused induction current is led on the surface of metal beneath an induction wire, and the potential drops (V and V_c) and measured with a potential pick-up probe of which with is Δ .

誘導電流は一定の大きさを持ち、交流と同じ特性を有する。

誘導電流は表皮効果 (skin effect) により導体の表面の薄い層 (skin または layer) に集中して流れ、その深さすなわち表皮深さ (skin depth) δ は次の式で表わされる。⁸⁾

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}} \quad (1)$$

μ : 透磁率, σ : 導電率, f : 周波数, ω : 角速度

この表皮深さは式によれば透磁率、導電率および周波数のいずれかが変化すれば変わるが、実際の導体では透磁率と導電率はほとんど一定であるため、周波数によって表皮効果の大きさは決められてしまう。この周波数依存性により、材料とき裂の深さに応じる最適な周波数の選択が必要となる場合もある。

ここで、き裂が存在する場合、き裂面に沿って流れる誘導電流は表面を流れる誘導電流の分布と同じであると仮定する。誘導電流により生ずる表面における電位差を間隔が Δ の端子により測定すると、欠陥がない場所の電位差 (V_0) は端子間隔 Δ に比例し、き裂がある部位の電位差 (V_c) は電流がき裂面に沿って流れるために、端子間隔 Δ とき裂深さの2倍 ($2d$) の和に比例する。表皮深さが無限に薄い理想的なモデルにおいては、この2つの電位差の関係からき裂の深さは

$$d = \frac{\Delta}{2} \left(\frac{V_c}{V_0} - 1 \right) \quad (2)$$

で表わされる。したがって、導体表面に流れる誘導電流による電位差を正確に測定すると、他の参照電位差がなくてもき裂深さの測定ができるものであるが、実際には表皮深さは有限であり、この仮定は必ずしも正しくない。

本研究で提案する集中誘導型交流電位差法の特徴および利点は、

- (1) 探傷領域に局所的に集中する電流を誘導する。
- (2) 電位差を測定する時に必要な電源は、導体の大きさに依存しない。
- (3) 電流電源の大きさが小さくても、導体の探傷部分に十分な電流の誘導できる。
- (4) 電流を直接測定物に流さないで、大きい測定物も迅速に探傷できる。
- (5) 参照の測定物が不要。

ことなどが挙げられる。

3 誘導電流の評価

無限に長い導線を無限平板の常磁性体 (金属) 表面において電流を流すと、誘導電流により常磁性体の任意断面に電位分布が生じる。ここでは、有限要素法を用いて定性的にその断面に生ずる電位分布の解析を行った。

Table I. Chemical composition of A508 CL III steel (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.21	0.20	1.45	0.003	0.003	0.78	0.15	0.48	0.05	0.0088

Table II. Mechanical properties of A508 CL III steel (at room temperature).

Material	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
A508 CL III	449	587	26.2	70.8

無限に長い電流導線および無限平板の断面に生じる電位分布解析は2次元で行い、対象とする試験片は幅150 mm、板厚20 mmとし、透磁性および導電率はA508 CL III 鋼の値としておのおの300, 0.6×10^7 (ν/m)を用いた。解析対象の断面を四角形八節点のアイソパラメトリック要素を用いて有限要素分割し、全要素数408, 全節点数1307とした。導線近傍は小さく分割(0.2 mm)し、誘導線は試験片表面から0.2 mmの高さに位置させた。有限要素のプログラムは準定常電流問題に対するMaxwellの方程式を解くことにより得られる次の場の方程式¹⁰⁾に基づいている。

$$\left(\nu_y \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \partial \nu_{yz} \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} + \nu_z \frac{\partial^2}{\partial y^2} - i\omega \sigma_x \right) A_x(y, z) + i_x(y, z) = 0 \quad (3)$$

ここに

A_x : 修正 vector potential の x 成分 (複素数)

σ_x : 導電率の x 成分

ω : 角周波数 $j = \sqrt{-1}$

i_x : 強制電流密度の x 成分 (複素数)

ν : 磁気抵抗率 $= \mu^{-1}$ (μ : 透磁率)

$$= \begin{bmatrix} \nu_y & \nu_{yz} \\ \nu_{yz} & \nu_z \end{bmatrix}$$

有限要素法によって求められた常磁性体の任意断面での電位分布を強制電流の導線からの距離に対して Fig. 2 に示す。この結果は0.3, 100 kHzの周波数で得られたものである。周波数が高いほど誘導線直下の電位

Fig. 2. The distribution of electric field at the surface of a cross section of material calculated by FEM as an infinite induction wire carrying AC is set on the surface of an infinite conductive material.

が最大であり、電位が集中して誘導されることを示している。また、導線から任意距離離れた位置の誘導電位はその距離に反比例して急激に減少していることが明らかであり、集中誘導型の特性が示されている。

4 実験方法

4.1 供試材

本研究で使用した材料は軽水炉压力容器用鋼 A508 CL III であり、化学組成および室温での機械的性質を Table I と Table II に示す。本実験に用いた片側貫通き裂試験片の寸法および切欠深さを Fig. 3 に示す。片側貫通き裂は直径0.2 mmのワイヤー放電加工機を用いて、幅0.3 mm、深さ0.5, 1, 2.5, 5, 10 および15 mmのスリットを入れた。

4.2 測定探触子

本実験に用いた探触子の概略図を Fig. 4 に示す。電位差を測定する端子には、燐青銅を用いた。端子の大きさは直径1.5 mm、長さ28 mmであるが、接触面は接触面積をできるだけ小さくするためシャープな形(120°のV形)とした。この端子の周りには外部からの誘導の影響を遮断するため、低透磁率の材料である99.5%のアルミニウムと高透磁率の材料である78パーマロイでシールドした。端子と測定点との接触条件を一定にするため、端子が一定な圧力で接触するように圧縮ばねを用いた。また、探触子本体と供試材との電気的接触を遮断するため、薄い絶縁フィルムを使用した。

Fig. 5 は本研究で行った短い導線を使う集中誘導型交流電位差法に用いた探触子の底面の概略図である。導線は直径0.4 mm、長さ30 mmであるエナメル線を使用し、測定端子から2.5 mm離れて、 0.5×0.5 (mm)の溝を探触子本体の底面に切り、その中に導線を固定

Fig. 3. The geometry of slit specimen.

Fig. 4. Scheme of the potential pick-up probe used in measuring the potential induced on the surface of specimen.

Fig. 5. Scheme of the arrangement of an induction wire and shield wire placed on the bottom side of the potential pick-up probe.

した。誘導部以外はシールド線を用いる。

4・3 電位差測定方法

本試験では集中誘導型交流電位差法 (ICFPD) に加えて参照のため従来の交流電位差法 (ACPD) も併用した。今回の実験での交流電流の供給方法の模式図を Fig. 6(a) および (b) に示す。(a) は従来の交流電位差法で試験片の両端に直接交流電流を供給し、(b) は集中誘導型交流電位差法で探触子の底面に設置した誘導線に交流電流を供給して試験片表面に電流を誘導する。測定装置は英国の Matelect 社の汎用交流電位差

Fig. 6. The methods supplying the alternative current source used in the experiments of conventional ACPD and ICFPD.

測定装置である CGM5 を使い、測定電位差はデジタルマルチメータにより直読した。

(1) 従来の交流電位差法 (ACPD)

試験片の両端に直接交流電流を供給すると、供給点の間の交流電流は一樣に試験片の表面に分布しようとするが、表面上に欠陥が存在すると電流は欠陥面に沿って流れるために電流経路が変化する。すなわち、経路が長くなるため、抵抗が大きくなり電位差が増加する。このような特性を有する従来の交流電位差法を用いて、本研究では Fig. 6(a) に示すように試験片の両端に電流を直接供給し、探触子を用いて表面の電位差を測定した。

(2) 集中誘導型交流電位差法 (ICFPD)

本研究で開発した集中誘導型交流電位差法における、交流電流を供給する誘導線の位置を Fig. 6(b) に示す。この手法では Fig. 5 に示したように長さ約 30 mm のエナメル導線を探触子の底面に固定させ、この探触子を用いて、試験片表面の測定場所に電流を誘導させて表面の電位差を測定する。誘導線は試験片表面にできるだけ大きな電流を集中して誘導させるために、試験片表面に密着するよう探触子の底面に設置した。そして、誘導線から 2.5 mm 離れた位置に 10 mm 間隔の端子を設置し、この端子間での電位差を測定する。なお、実験では誘導線をき裂に対して直角に配置し、表面電流の測定を行った。

5 実験結果および考察

片側貫通き裂の各試験片に対して、従来の交流電位差法 (ACPD) および集中誘導型交流電位差法を用い、き裂長さ方向に対して直角方向の電位差の測定を行った。測定周波数は 0.3, 1, 3, 10, 30 および 100 kHz とした。

5・1 各測定方法により得られた電位差分布

Fig. 7. The distribution of potential drop at each measuring position away from the slit in each specimen measured by conventional ACPD at the frequency of 10 kHz.

Fig. 8. The distribution of potential drop at each measuring position away from the slit in each specimen measured by ICFPD at the frequency of 1 and 10 kHz.

従来の交流電位差法を用いて、各周波数条件で測定した電位差分布のうち 10 kHz の周波数で測定した電位差分布をき裂中心から端子の中心までの距離に対して整理したものが Fig. 7 である（他の周波数での電位差分布もほぼ同じ形であった）。電位差分布は従来報告されているように欠陥部で電位差が上昇し、片側貫通き裂深さの差によってその値が変化する。図から分かるように、端子がき裂に近づくにつれて (2) 電位差はごくわずかが減少する。そして、端子がき裂をまたがるようになると (3), 電位差は急激に大きくなる。端子がき裂をまたがることによって現われる電位差は、周波数に依存する表皮深さおよび欠陥の深さにより大きく変化する。

集中誘導型交流電位差法を用いて、各片側貫通き裂試験片の表面電位差分布を調べるため前述の各周波数条件で測定した。1 kHz および 10 kHz の周波数で測定した電位差分布をき裂の中心から端子の中心までの距離に対して整理したものがおのおの Fig. 8 (a) および (b) である。いずれの周波数で測定した場合でも、探触子の測定位置による電位差分布の変化は大きく大略 3 つの領域に分けられる。すなわち、端子間に欠陥がない領域 (1), 端子がき裂端に近い領域 (2) および端子間にき裂がある領域 (3) である。

探触子がき裂端部に位置する場合 (2), 端子がき裂端に近いほど、またき裂の深さが深くなるほど電位差分布が急に増加する。また、この部位の電位差分布は従来の交流電位差法を用いて測定した電位差分布 (Fig. 7) と比較してみると逆の傾向を示し、この 2 つの測定方法の大きな相違点である。測定端子間にき裂がある場合 (3), 従来の交流電位差法による電位差分布と異なり、電位差は端子の測定位置によって大きく変化する。き裂の深さおよび測定周波数によってその分布は複雑な形となる。1 kHz で測定した場合、10 kHz の場合と異なり、き裂深さが 0.5~2.5 mm のときの電位差は欠陥がない部分の電位差より小さく、き裂が深くなるに従って電位差は小さくなる（周波数 0.3 kHz での電位差分布もほぼ同じ形であった）。10 kHz で測定した場合、き裂部の電位差は欠陥がない部分の電位差よりも大きく、き裂が深くなるほど電位差は大きくなる（周波数 3, 30 および 100 kHz での電位差分布もほぼ同じ形であった）。このような電位差分布の変化は測定周波数、欠陥の存在による磁束漏れ、探触子の誘導線の回路の大きさおよびその方向、探触子の材質などによりもたらされると考えられる。

5・2 各実験における電位差比

従来の交流電位差法によって得られた電位差分布から、き裂部 (Fig. 7 ③) の最大電位差 ($V_{c, \max}$) とき裂端部 (Fig. 7 ②) の最小電位差 ($V_{\min}$) との比 ($V_{c, \max}/$

$V_{\min}$) を求め、実際のき裂深さに対して整理したものを Fig. 9 に示す。各周波数の電位差比はき裂深さが深くなるにつれてほぼ直線的に増加する。一方、周波数を 0.3 kHz から 30 kHz まで増加させると電位差比はだんだん減少するが、100 kHz での電位差比は逆に大きくなり、周波数依存性を示す。Fig. 10 に欠陥寸法 1 mm, 5 mm および 15 mm について得られた電位差比の周波数依存性を示す。この図より、欠陥寸法に依存して複雑な周波数依存性を示すが、100 kHz で最も大きな値が得られる。

つぎに、集中誘導型交流電位差法により得られた電位差分布から、き裂部 (Fig. 8 ③) の最大電位差 ($V_{c, \max}$) と欠陥がない部分 (Fig. 8 ②) の電位差の平均値 (V_{avg}) との比 ($V_{c, \max}/V_{avg}$) を求め、実際のき裂深さに対して整理したものを Fig. 11 に示す。周波数 3, 10, 30 および 100 kHz の電位差比はき裂深さが深くなるにつれて増加する。また、10 kHz の場合が最も高感度で計測できることがわかる。しかし、0.3 および 1 kHz での電位差比は、き裂深さが 0.5 mm から 2.5 mm の間でいったん減少し、5 mm から増加し始

Fig. 9. The relation between each slit depth and the normalized potential drop ($V_{c, \max}/V_{\min}$) which is measured in each slit specimen by conventional ACPD at each measuring condition.

Fig. 10. The relation between frequency and the normalized potential drop ($V_{c, \max}/V_{\min}$) by conventional ACPD.

Fig. 11. The relation between each slit depth and the normalized potential drop ($V_{c. max}/V_{avg}$) which is measured in each slit specimen by ICFPD at each measuring condition.

Fig. 12. The relation between frequency and the normalized potential drop ($V_{c. max}/V_{avg}$) by ICFPD.

Fig. 13. Comparison in normalized potential drop between ICFPD and conventional ACPD.

めている。Fig. 10 と同じく欠陥寸法 1 mm, 5 mm および 15 mm についての周波数依存性をまとめて Fig. 12 に示す。本集中誘導型交流電位差法では 10 kHz において最も高感度で欠陥を評価することができる。この現象の原因としては次の 2 つの因子が考えられる。すなわち、導体に誘導される電流に直接影響を及ぼす因子と測定電位差に影響を及ぼす探触子因子である。前者は交流電流が流れる誘導線と導体（試験片）との相互インダクタンスによって生ずる起電力に影響を及

ぼす導体の透磁率、導体に誘導する電流の大きさおよび電位の分布に影響を及ぼす導体の電導率、測定周波数、欠陥の存在による磁束漏れなどが挙げられる¹²⁾。一方、後者は探触子の材質、探触子の誘導線の回路の大きさおよびその方向、測定端子の間隔などが挙げられる。

以上の 2 つの測定方法により求められた最も高感度な条件での電位差比を比較して見たのが Fig. 13 である。集中誘導型交流電位差法（10 kHz）はすべての欠陥寸法において従来の交流電位差法（100 kHz）よりも大きな電位差比が得られ、微小表面欠陥に対してより高感度の探傷ができ、微小表面欠陥寸法の高精度評価が可能であることを示している。

6 結 言

新たに開発した集中誘導型交流電位差法（ICFPD）を用いて、人工片側貫通き裂の探傷および寸法（特に欠陥の深さ）評価の検討を行った。その結果を従来の交流電位差法（ACPD）と比較した結果、次の知見が得られた。

(1) 集中誘導型交流電位差法（ICFPD）を用いて測定した場合、欠陥深さの変化は電位差比で定量的に評価・測定できる。

(2) 集中誘導型交流電位差法（ICFPD）は従来の交流電位差法に比べ、高感度で欠陥を検出することができる。

（平成 5 年 5 月 26 日 日本材料学会第 42 期通常総会および学術講演会にて講演）

参 考 文 献

- 1) W. D. Dover, R. Collins and D. H. Michael, British Journal of NDT, **33**, 121 (1991).
- 2) R. Collins, W. D. Dover and D. H. Michael, "Research Techniques in Non-Destructive Testing (vol. 8)", R. S. Sharpe, Academic Press, London, p. 211 (1985).
- 3) M. McIver, Proc. R. Soc. Lond. A421, p. 179 (1989).
- 4) D. H. Michael, R. Collins and W. D. Dover, Proc. R. Soc. Lond. A 385, p. 145 (1983).
- 5) W. D. Dover, Fatigue of Engineering Materials and Structures, **5**, p. 349 (1982).
- 6) T. V. Venkatasubramanian and B. A. Unvala, J. Phys. E: Sci. Instrum., **17**, p. 765 (1984).
- 7) W. D. Dover, F. D. W. Charlesworth, K. A. Taylor, R. Collins and D. H. Michael, "Edd-current characterization of materials and structures" ed G. Birnbaum and G. Free. ASTM STP 722, p. 401 (1981).
- 8) W. H. Hayt, "Engineering Electromagnetic, 5th edition", Chap. 8, 11 (1992) McGraw-Hill
- 9) 田中勝広 "電磁気学計算法", 4 章 (1989) 日本理工出版会
- 10) 中田高義, 高橋則雄, "電気工学の有限要素法" 5 章 (1992) 森北社
- 11) M. C. Lugg, NDT International, vol. **22**, p. 149 (1980).
- 12) D. Mirspeakar-Syahkal, R. Collins and D. H. Michael, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. **4 A**, p. 349 (1985).