

マルチ化した一様渦電流プローブの開発と SCC 探傷特性評価

Development of uniform eddy current multi-probe and characteristic evaluation of SCC detection

職業能力開発総合大学校 福岡 克弘 Katsuhiko FUKUOKA Non-Member
職業能力開発総合大学校 橋本 光男 Mitsuo HASHIMOTO Member

In this research, a uniform eddy current multi-probe to apply to the complex structure and inspect the cracks at high-speed data acquisition was developed. Pick-up coils of the developed probe were arranged on a flexible printed circuit board. It was confirmed that the SCC (stress corrosion cracking) of real flaw was able to be detected with developed uniform eddy current multi-probe by using the ferrite core for the exciting coil and considering the impedance matching of the exciting coil and the flaw detection device.

Keywords: Eddy current testing, uniform eddy current probe, stress corrosion cracking, multi-probe

1. はじめに

近年、原子力発電プラントにおける炉内構造物や配管において自然き裂の発生が報告されている。プラント構造物に発生するき裂は、応力腐食割れ (SCC) などの複雑な形状を持つ自然き裂である。一般的に SCC はき裂に枝分かれがあり、複数のき裂が隣接し部分的に接触している箇所も存在する。したがって、微小且つ複雑に分布する自然き裂を、精度よく診断できる非破壊検査技術の確立が必要不可欠になっている。これまで我々のグループでは、高速にき裂を探傷することが可能な、電磁誘導現象を利用した非破壊検査手法である渦電流探傷試験 (ECT) について検討を行ってきた。ECT におけるプローブは、自然き裂の複雑な分布形状を把握するのに有利な一様渦電流プローブに着目し開発を行ってきた[1]。

実機におけるプラント構造物は、平面な部分だけではなく立体的に複雑な形状をしている部分も存在する。これまで我々のグループで開発してきた一様渦電流プローブでは検出コイルが 1 個であるため、立体的な形状をした構造物のき裂を探傷するためには、プローブを三次元的に走査する必要があるため測定が複雑になる。この問題を解決するには、プローブの検出コイルを複数用意し、且つフレキシブルな構造とすることにより、構造物の形状にプローブを変形させ探傷することが有効である。また、複数の検出コイルを用いるこ

とにより線計測から面計測となり、探傷時間も短縮できる。そこで本研究では、実機において一様渦電流プローブを適用することを目的として、フレキシブルで且つマルチ構造の一様渦電流プローブ[2]とその探傷装置の開発を行った。本論文では平板金属に自然き裂を設けた試験体について探傷試験を行い、開発したマルチプローブの自然き裂検出における基本性能について報告する。さらに、励磁コイルにフェライトコアを用い、且つ励磁コイルと探傷装置とのインピーダンスのマッチングを考慮することにより、自然き裂に対する検出性能の向上を試みた。

2. 32ch マルチ一様渦電流プローブの開発と実験方法

開発したマルチ一様渦電流プローブの構成を図 1 に示す。励磁コイルは、き裂の長手方向に対して垂直および平行に渦電流を発生させるための二種類のコイルを使用した。これらの二つのコイルはそれぞれのコイル軸が 90° に交わるよう二層に巻かれている。励磁コイルの形状は、信号を検出するピックアップコイル (検出コイル) の位置する箇所において、一様な方向に均一な渦電流を流すために、 $72\text{mm} \times 72\text{mm} \times 7\text{mm}^1$ と検出コイルに対して十分大きく設計した。巻き回数はそれぞれ 480 ターンである。検出コイルは、外径 2.2mm、内径 1.2mm、高さ 0.7mm、巻数 140 ターンのコイルを使用した。この検出コイルを一行に並べて配置すると、測定間隔はコイルの外径 2.2mm が限界になる。したがって、隣り合うコイルの間にき裂が位置した場合、検出感度が低下するといった問題が考えられる。そこで図 1 のように、16 個並べた検出コイルを二列に配置し、

連絡先: 福岡克弘、〒229-1196 神奈川県相模原市橋本台 4-1-1、職業能力開発総合大学校電気システム工学科、電話: 042-763-9148、e-mail: kfukuoka@uitec.ac.jp

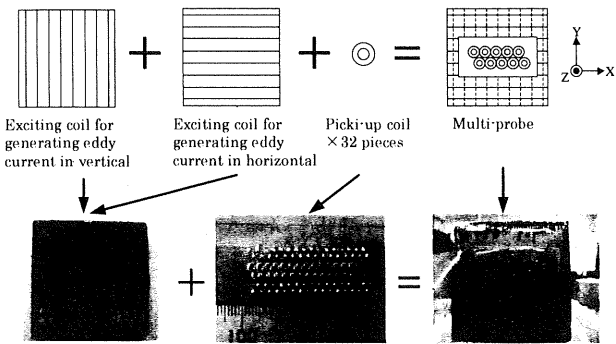


Fig.1 Composition of uniform eddy current multi-probe.

二列目を一列目に対して検出コイルの半径分ずらしして配置することにより測定間隔を細かくした。また、この検出コイルは複雑形状部のき裂探傷を可能とするために、フレキシブルなプリント基板上に配置した。各コイルの間隔はプローブを曲げることを考慮して2.4mmとし、R25mmの曲面に適応できるように設計した。マルチ様渦電流プローブは、励磁コイルの表面に検出コイル基板を貼り付けて構成される。検出コイルの軸をZ方向とすれば、二つの励磁コイルの軸はそれぞれX,Y軸となる。

開発した32chマルチ様渦電流プローブを精密ステージのアームに取り付けて、試験体表面をスキャンした。ステージの制御はRS-232Cインターフェースを用いて行った。プローブからの検出信号は、32chマルチプローブ用探傷装置により測定し、LANを用いてコンピュータに収集した。収集した検出信号の二次元画像を描くことによりき裂探傷結果を評価する。また、ステージの駆動とデータ収集の同期を取るため、コンピュータから探傷装置にデータ収集開始のトリガ信号を発信した。検出コイルと試験体とのリフトオフは0.5mmとした。測定ピッチは、高速に探傷するのと検出コイルの配置間隔に対応させるため1.2mmとした。測定周波数は100kHz~400kHzで行った。

3. SCC 探傷特性評価

3.1 シングルとマルチプローブの比較

図2に示すSCCを付与した試験体(SCC_No.1)を用いて、検出コイルを1個用いたシングルタイプの一様渦電流プローブと、32chマルチタイプ一様渦電流プローブの検出信号の比較を行う。ここで使用する試験体は、SUS304に深さ5mmのSCCを設けることを目標にして作製した。図3はシングルプローブ、図4はマ

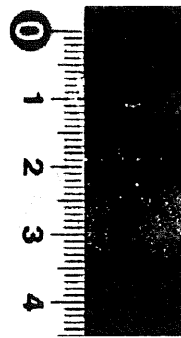


Fig.2 SCC test specimen. (SCC_No.1)

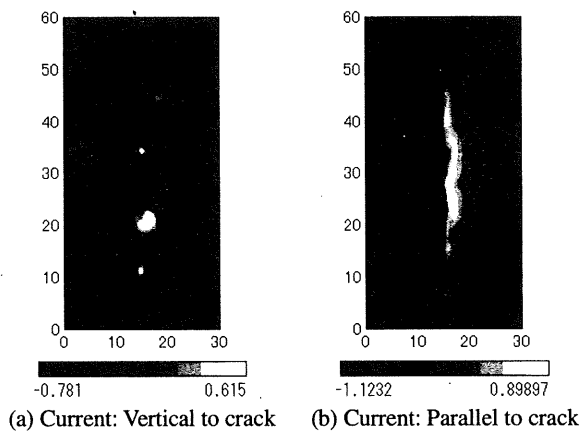


Fig.3 Detection results using single-probe.

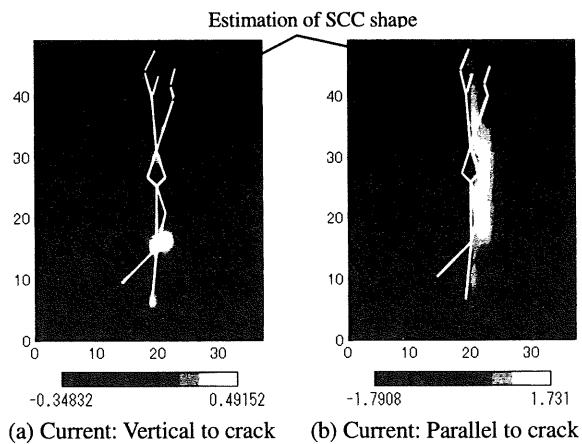


Fig.4 Detection results using multi-probe.

ルチプローブの検出結果である。各図の(a)は渦電流をき裂の長手方向に対して垂直に流した結果、(b)は平行に流した結果である。測定周波数は、各プローブで使用した探傷装置の最大周波数で、シングルプローブが500kHz、マルチプローブが400kHzとした。シングルプローブでは、詳細検査を目的としているため、測定ピッチは0.5mmと細かく設定した。(a)の渦電流をき裂に対して垂直に流した結果では、き裂のエッジ部およ

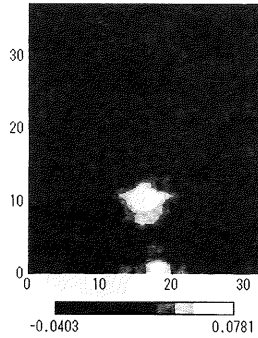


Fig.5 Detection results at 100 kHz.

び枝分かれ部分において信号強度が強くなること判る。また、(b)の渦電流をき裂に平行に流した結果では、き裂の形状に沿って左右に信号が観測される。図4にはマルチプローブの検出信号より推定したき裂の形状を示す。このき裂形状は図2のき裂の表面観察とよい一致が得られる。したがって、マルチプローブを用いて測定ピッチを1.2mmと荒くし、高速に探傷した場合においても、シングルプローブと同様のき裂検出信号が得られ、実欠陥であるSCCが探傷可能であることが確認された。

3.2 渦電流分布の把握

図4においてはき裂の形状を把握するために、試験周波数を高くして試験体表面に渦電流を集中させて探傷を行った。き裂の深さを評価するには周波数を下げ、渦電流を試験体のより深くまで流す必要がある。図5に示すのは、周波数100kHzにおいてき裂に対して垂直に渦電流を流した場合のマルチプローブの探傷結果である。周波数を下げ100kHzで探傷した場合、検出信号の強度が約1桁低下し、き裂の判別評価が難しくなることが確認できる。ここで、金属導体表面に流れる渦電流分布を把握するために、有限要素法を用いた数値解析を行い評価した。解析結果を図6に示す。周波数は100kHzで、励磁電流を0.14A(ゼロピーク)一定とした。解析は1/4領域のモデルで行い、励磁コイルの中心は画像の右下に位置する。励磁コイルの向きは、画像のY方向がコイルの軸方向である。試験体(SUS304)の導電率は $1.3 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、比透磁率は1として解析した。(a)は空芯励磁コイルのモデルとし、(b)のモデルでは励磁コイルにフェライトコアを用い、フェライトの導電率を 0 S/m 、比透磁率を1000一定とした。(a)の空芯の励磁コイルでは、渦電流分布はコイルの軸方向に不均一で、コイル中心部分の電流密度は低

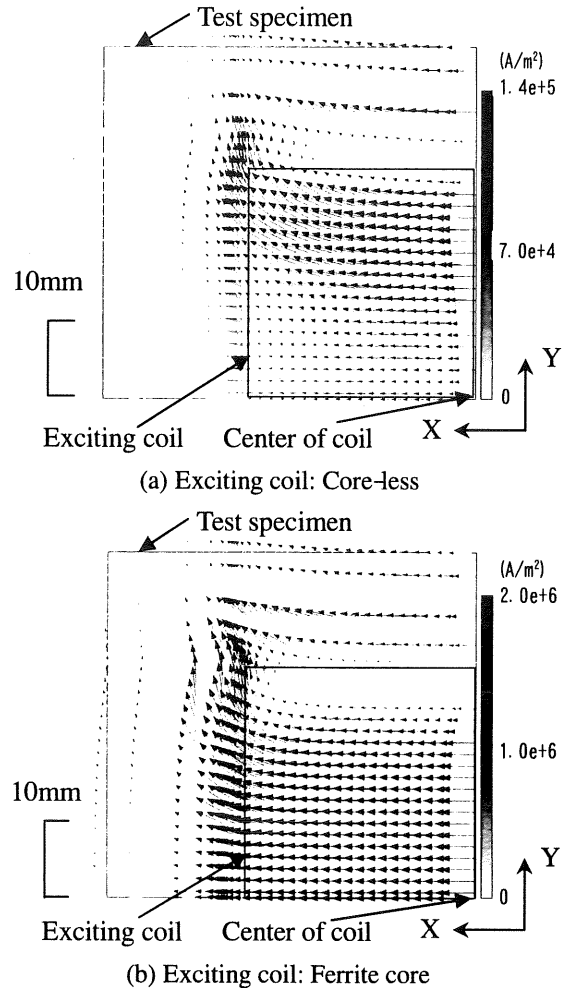


Fig.6 Distributions of eddy current.

いことが確認される。検出コイルは励磁コイルの中心部に配置するため、この部分の電流密度が低いと検出感度が低下する。したがって、これを改善するために励磁コイルにフェライトコアを用いることを検討した。(b)のフェライトコアを用いた励磁コイルでは、空芯励磁コイルに比べ均一な渦電流分布となり、コイルの中心部分においても電流密度が低下しないことが確認される。以上の解析結果より、励磁コイルにフェライトコアを用いることで検出感度が向上すると予想できる。

3.3 励磁コイルの改良およびSCC微小き裂の検出特性評価

次に微小なSCCを設けた試験体の探傷について検討する。ここで用いる試験体(SCC_No.2)は、深さ2mmの比較的浅いSCCを設けることを目標にして、SUS304にSCCを付与した。また、SCCの長さにおいてもSCC_No.1(図2)に比較して短い。き裂の深さが浅く

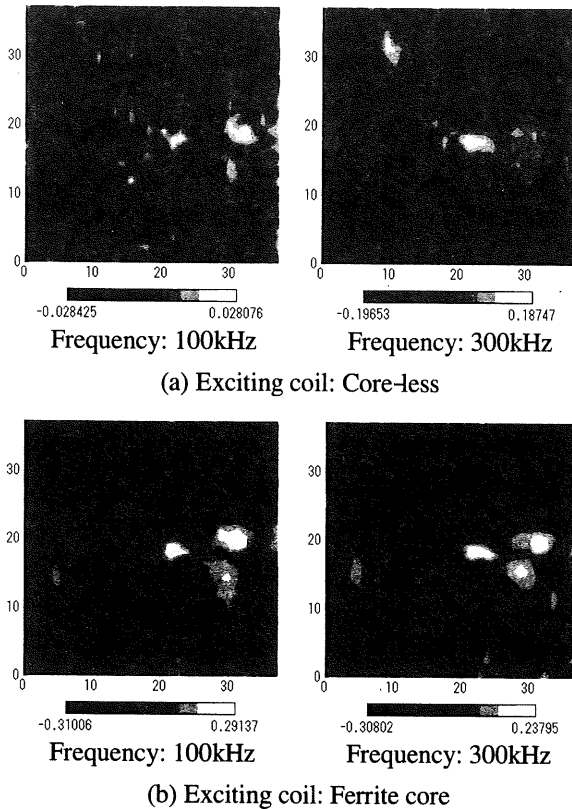


Fig.7 Detection properties of small SCC.

なると、き裂を避ける電流が少なくなり、検出信号は小さくなる。また、SCCでは部分的にき裂が閉じている箇所もあり、高感度なプローブが必要になる。そこで、図6(b)の解析結果を基に、フェライトコアを用いた励磁コイルについて検討した。フェライトコア入り励磁コイルの形状は、検出コイルの位置する領域（励磁コイルの中心部で4.8mm×39.6mm）で渦電流分布が均一になるよう設計を行い61mm×61mm×4mm¹とした。しかし、励磁コイルにフェライトコアを用いることにより励磁コイルのインピーダンスが高くなり、探傷装置の内部インピーダンスとのマッチングが悪くなる。そこで、フェライトコア入り励磁コイルの巻き線を複数に分割し、その接続を直並列で組み合わせることにより励磁コイルのインピーダンスを調整し、探傷装置のインピーダンスとのマッチングを取ることを検討した。探傷装置の内部インピーダンスは100kHz～400kHzの範囲で50Ω～100Ωであった。フェライトをコアとした励磁コイルの巻き線を40ターンごとに8個に分割して巻き（合計320ターン）すべて並列接続した。これによりプローブのインピーダンスが低下し、100kHz～400kHzで50Ω～220Ωにでき探傷装置とマッ

チさせた。

励磁コイルにフェライトコアを用いたプローブにより探傷した結果を、空芯の励磁コイルの結果と比較して図7に示す。空芯の励磁コイルは前述のコイルである。渦電流はき裂に対して垂直に流した。空芯励磁コイルのプローブでは、周波数の低い100kHzにおいて検出信号が極端に小さくなる。一方、フェライトコアを用いたプローブでは、100kHzにおいても十分な強度の検出信号が出力されていることが判る。周波数を低くすると渦電流は導体の深くまで流れるので、深い領域の情報が得られる。図7(b)のX軸10mm、Y軸15mm近辺に着目すると、周波数の低い100kHzにおいて広い範囲でき裂の検出信号が観測される。したがって、この領域では導体内部においてき裂が広がって分布しているか、他の部分よりもき裂が深く進展しているものと考えられる。プローブの改良により、周波数を低くした内部のき裂情報を持つ信号のS/Nが改善することを確認した。

4. まとめ

立体的な形状の実機プラント構造物に適用可能で、且つ高速に探傷できるフレキシブルなマルチ様渦電流プローブの開発を行い、自然き裂に対する探傷特性について評価した。シングル様渦電流プローブとの比較から、マルチ様渦電流プローブにおいても自然き裂であるSCCが、十分な精度で探傷可能であることを確認した。励磁コイルにフェライトコアを用い、且つ探傷装置とのインピーダンスのマッチングを考慮した。これにより、試験体表面の渦電流分布が均一になり、低周波数においても高い検出信号が得られ、周波数を低くした内部のき裂情報を持つ信号のS/Nが改善することを確認した。

参考文献

- [1] M.Hashimoto and D.Kosaka: "Development of Rotation ECT Probe Detecting Axial and Circumferential Cracks using Uniform Eddy Current Excitation Coils", Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V), IOS press, 2001, pp242-247.
- [2] 福岡克弘、橋本光男、松井哲也、小池正浩、西水亮「一様渦電流マルチプローブによるき裂診断評価」、日本原子力学会、2005年秋の大会、2005, p.245.