

渦電流を用いた構造物適応型非破壊評価技術の開発

Development of Structure Adaptive Nondestructive Evaluation Technology using Eddy Currents

東北大学流体科学研究所 高木 敏行 Toshiyuki TAKAGI Member

Abstract This article outlines the development of structure adaptive nondestructive evaluation technology using eddy currents. A couple of eddy current testing (ECT) systems are utilized. One performs high spatial resolution with multi-coil array probes, enabling us to identify crack positions by means of image processing. The other employs double excitation coil probes to detect relatively deep cracks from the scanning surface, showing detectability more than 5mm in depth. Profiling/sizing cracks estimated from ECT signals suggest a computer-aided approach of quantitative nondestructive evaluation as efficient inspection.

Keywords: Eddy Current Testing, Crack Profile Estimation, Deep Cracks

E-mail: takagi@ifs.tohoku.ac.jp

1. 緒言

渦電流試験 (Eddy Current Testing, ECT) を用いた非破壊評価は、金属構造物の欠陥検査、膜厚測定、導電率測定と多岐にわたる。とりわけ金属構造物の欠陥検査の分野では、ECT の優れた表面欠陥に対する検出性と迅速性より、加圧水型原子炉 (PWR) の蒸気発生器内に存在する伝熱管 (SG 管) の供用中検査に用いられてきた [1]。また、ECT に関する数値シミュレーション技術の大幅な進展により計算機支援検査、すなわち、き裂形状の定量的評価が可能となり、検査の高精度化が達成されている [2]。

金属構造物の内部および裏面の欠陥検査技術は、超音波試験 (Ultrasonic Testing, UT) が主流であるが、最近の原子力発電関連プラント金属構造物における応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, SCC) 問題や維持規格の法制化などに起因して、非破壊評価技術の更なる高度化が社会的に求められている。UT と ECT のベストミックスによる検査の信頼性向上を目的に、特に、表層部欠陥に対しては、ECT を用いた欠陥サイジング技術の検討が進められている。筆者の研究グループでは、PWR の SG 管欠陥検査の分野で培ってきたセンサ技術と計算機支援検査技術を基盤にして、ECT の適用範囲の拡大と応用の展開を進めている。

本稿では、渦電流を用いた非破壊評価法において、最近筆者の研究グループが進めてきた研究の成果を紹介する。金属構造物の健全性を評

価可能とする渦電流応用として、第一に、マルチコイル ECT プロブからなる高空間分解能 ECT システムを紹介する。複数の ECT センサをアレイ状に配置したプロブによって高い空間分解能特性を実現し、ECT 信号を画像的に扱うことを可能とする [3]。ECT の優れた表面欠陥の検出性に加え、検出困難である SCC など複雑形状のき裂の検出、さらには ECT 信号に対して画像処理的手法を応用することにより計算機支援検査技術の高度化を目指している [4]。第二に、厚肉金属部対応 ECT プロブを紹介する。本来 ECT は、表皮効果の影響により厚肉金属部に対応することが困難であるが、2 ケの励磁コイルからなる ECT プロブを用いることで検査対象の深部に高い密度の渦電流を誘導することが可能となり、従来検出限界であった深さ 5mm 以上のき裂の検出能力が改善された [5] [6]。計算機支援検査技術による深いき裂の定量的評価と併せて、UT とベストミックスできる ECT 技術を目指している。

2. マルチアレイ ECT システム

2.1 マルチコイル ECT プロブ

目標とする高空間分解能 ECT システムを Fig. 1 に図示する。マルチコイル ECT プロブのコイルセンサ要素がレンズ、駆動周波数が絞り、ECT 信号による画像がフィルム、計算機支援要素が現像及び写真というように、欠陥の検査過程と写真の現像過程を対応させた“ECT カメラ”を提案している [4]。

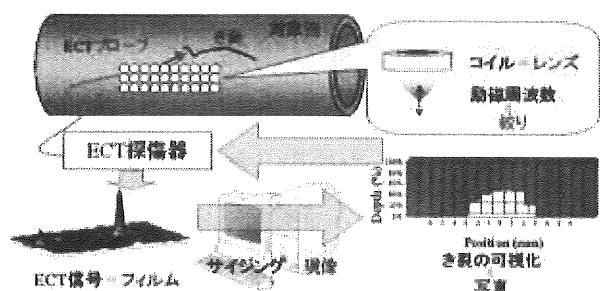


Fig. 1 Concept of ECT camera.

高空間分解能 ECT システムの根幹をなすマルチコイル ECT プロブとして、Fig. 2 に示す 48ch マルチコイル ECT プロブを試作した。センサ部は、2 列のコイル列、35 列のコイルから構成されており、ECT 信号が 2 次元画像として得られる。検出方法として、高 SN 比が期待できる TR (Transmit-Receive) 型を採用し、水平方向と垂直方向のき裂を区別して検出することが可能である [7]。空間分解能 3mm を目標性能とし、表層欠陥へも対応できるように駆動励磁周波数は 20k~40kHz に設定した。計算機支援設計よりコイル内径、外径、高さはそれぞれ 1.0, 2.4, 2.0mm と決定した。探傷器に内蔵されているマルチプレクサ回路のスイッチング制御によって、コイル間の相互干渉を回避しながらスキャンすることが可能であるため、直接画像処理等を応用し、複数近接き裂の数、位置、形状の認識が期待できる。

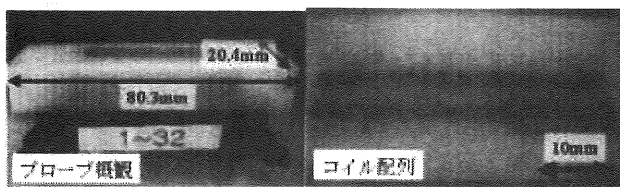


Fig. 2 48-ch multi-coil ECT probe.

2.2 複数近接き裂の検出性能

Fig. 3 は、試作したマルチコイル ECT プロブの空間分解能評価試験結果の一部を示す。空間分解能を評価するために、SUS304 ステンレス鋼板に放電加工機で模擬き裂 (以下 EDM スリットと略記) を 3mm 間隔で 5 箇所施した試験体を作製し、プローブを一方向に走査した。図中、出力電圧 V_R , V_I は、それぞれ検出コイル出力電圧の実部、虚部である。EDM スリットの位置に対応する出力電圧のピークが得られ、空間分解能 3mm が達成された。

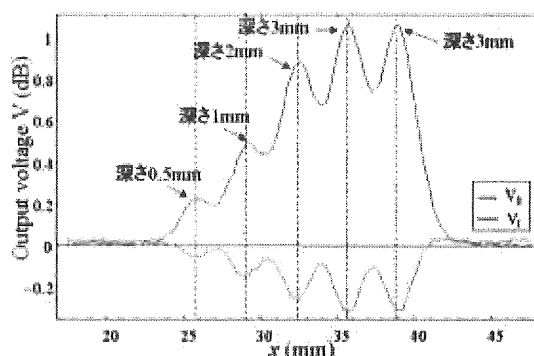


Fig. 3 Spatial resolution of 48-ch multi-coil ECT probe. (40kHz, EDM slit interval:3mm)

2.3 き裂位置同定

Fig. 4 は、前節の測定から得られる出力電圧を画像化したものに対して、画像処理法の一つであるテンプレートマッチングによる模擬き裂位置の同定結果である。テンプレートマッチングによって、測定で得られる画像の中からき裂形状が既知であるときの画像 (テンプレート) を参照して、類似した画像部分を探索する [8]。その結果、図中の四角枠が同定位置を示すように 5 箇所のき裂を同定した。それぞれの模擬き裂の間隔は左から 3.075mm, 3.075mm, 2.95mm, 3.075mm であり、良好な同定結果が得られた。位置同定結果に基づいて、き裂形状の定量的評価を詳細におこなうことができる。

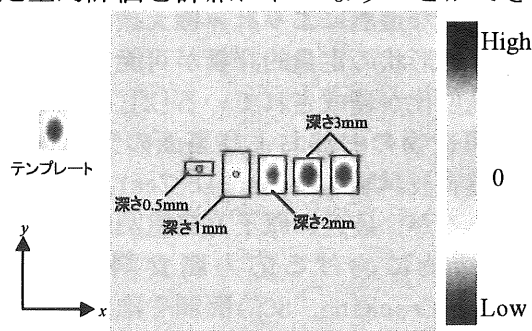


Fig. 4 Template matching for crack position identification. (40kHz, EDM slit interval:3mm, V_R signal is used.)

3. 厚肉金属部対応 ECT プロブ

3.1 2 励磁方式 ECT センサ

Fig. 5 は、2 励磁コイル方式を採用した厚肉金属部対応 ECT プロブである。厚肉検査対象の深部まで渦電流が分布するように 2 列の励磁コイルを配置し、その中心に検出コイルを配置してある。励磁電流は、プローブ中心で磁束

が相殺するように通電する[5]。これより、検出コイルに近接する探傷表層部の渦電流密度を低くし、深部に起因する情報を取得することが可能となる。駆動励磁周波数を 1k~10kHz と設定し、渦電流場数値計算による計算機支援設計により、コイルの仕様・間隔を設計した。Fig. 5 に示す試作プローブにおいて、励磁コイル間の間隔は 25mm である。また、励磁および検出コイルの仕様を Table 1 にまとめる[6]。

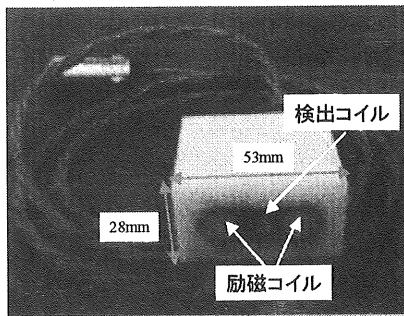


Fig. 5 Double excitation coil probe for thick metal structures.

Table 1 Configuration of the probe in Fig. 5.

	Inner Diameter	Outer Diameter	Height	Turns
Excitation	6mm	14mm	4mm	1281
Pickup	3mm	7mm	2mm	1093

3.2 深いき裂の検出性能

厚肉金属部対応 ECT プローブの性能評価試験を実施するために、SUS304 板に異なる深さの EDM スリット、および表面加工を施し試験体を作製した。試験は、1) 深さ検出性能評価と、2) 表面粗さの影響評価の 2 項目に関して実施した。EDM スリットが存在する面を探傷面として、スリット直上を長さ方向に対して平行にプローブを走査して測定する。プローブの向きは、2 個の励磁コイル円筒の中心を結ぶ直線が、EDM スリットと平行になるように設置し、検査対象-プローブ間の距離リフトオフは 1.0mm とした。

1) 深さ検出性能

Fig. 6 は、深さ 5, 10, 15mm の EDM スリットに対してプローブを走査したときの出力信号である。自己差動(プローブ中心での磁束相殺)のため、スリット中心の出力電圧は零であり、

出力電圧のピーク間隔はスリット長さに対応して広がる。ピーク出力電圧は、スリット深さに対応して変化し、スリット深さが深いほど出力電圧は高くなることわかる。Fig. 6 において、スリット深さ 10mm と 15mm のプローブ出力差が 10.7%程度となり、位相差からも深さの識別可能である。

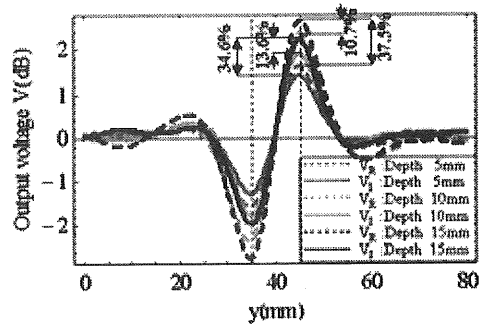


Fig. 6 Detectability in depth. (1kHz, EDM slit length:10mm)

2) 表面粗さの影響

深さ 10mm の EDM スリットで異なる表面粗さをもつ試験体を用意し、表面粗さの影響を評価した。表面の粗さは、グラインダ(目の粗いものから #36, #60, #80) で実現した。比較のためにフライス加工したものも用意した。フライス加工とグラインダ #36 で表面粗さ、すなわち EDM スリット以外の部分での深さの変位は、それぞれ最大で $7.5\mu\text{m}$ と $23.0\mu\text{m}$ であった。Fig. 7 は、深さ検出性能の実験と同様に EDM スリットに対してプローブを走査したときの出力信号である。スリット設置位置から離れている位置で出力にばらつきが確認できるが、スリットの部分でばらつきはほとんど認められないことがわかる。

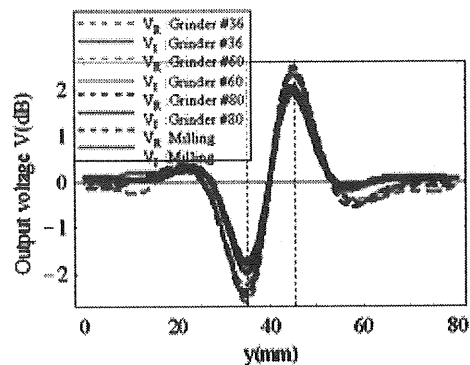


Fig. 7 Dependence on surface roughness of the target. (1kHz, EDM slit length:10mm, EDM slit depth:10mm)

3.3 き裂深さの定量的評価

深さ検出性能での実験結果を用いて、き裂の長さ及び深さを計算機支援により定量的に評価した。有限要素法に基づく ECT 高速シミュレーターを用い、計算した ECT 信号と測定 ECT 信号の最小二乗誤差を最小化する最急降下法でき裂形状を推定した[9][10]。Table 2 は推定結果を定量的にまとめたものである。EDM スリット長さ 10, 20mm, スリット深さ 5, 10, 15mm いずれの場合においても良好な推定結果を与える。最大誤差をもたらしたのは、EDM スリット長さ 10mm, 深さ 5mm のときであり、き裂深さで最大 2mm 深く見積もる結果となった。これは、厚肉金属部対応 ECT プローブが探傷表面の情報に関して多少鈍感であることに起因していると考えられる。

従来 ECT の適用範囲はき裂深さ 5mm 以内であったが、厚肉金属部対応 ECT プローブの出力電圧のみでも十分に深さ 10mm と 15mm のき裂が識別可能である。さらに、計算機支援検査技術によるき裂形状推定により、き裂の深さサイジングの高精度化が期待できる。

Table 2 Summary of crack sizing (VT-Alpha667, Mem. :512MByte)

	D05L20	D10L20	D15L20	D05L10	D10L10	D15L10
Reconstructed depth (mm)	4.9	9.3	14.0	7.0	9.9	15.3
Error of depth (mm)	-0.1	-0.7	-1.0	+2.0	-0.1	+0.3
Reconstructed length (mm)	20	20	20	10	10	10
Error of length (mm)	0	0	0	0	0	0
Computing time (s)	300	306	305	468	370	412

4. 結言

本稿は渦電流を用いた非破壊評価法として、第一に、マルチコイル ECT プローブからなる高空間分解能 ECT システム、第二に、厚肉金属部対応 ECT プローブについて紹介した。ECT の優れた表面欠陥の検出性をさらに洗練し、欠点の一つであった深いき裂に対する検出能力の改善の糸口を見出した。

謝辞

本技術開発は「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」((財)エネルギー総合工学研究所)として実施した。

参考文献

- [1] 高松 洋, 宮 健三, 陳 振茂, “加圧水型原子力発電所における電磁非破壊検査技術開発の経緯”, 日本 AEM 学会誌, 8-1, 2000, pp. 95-101.
- [2] T. Takagi, and H. Fukutomi, “Benchmark Activities of Eddy Current Testing for Steam Generator Tubes,” Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 17:Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV) (eds. S. S. Udpa et al.), IOS Press, 2000, pp. 235-252.
- [3] 櫻井望, 黄皓宇, 高木敏行, 内一哲哉, “数値シミュレーション支援によるアレイマルチコイル型渦電流探傷プローブの開発”, 機械学会論文集, 69-676, A, 2002, pp. 119-126.
- [4] 長屋嘉明, 遠藤久, 黄皓宇, 内一哲哉, 高木敏行, 西水亮, 小池正浩, 松井哲也, “構造物適応型 ECT カメラに関する研究 (1) -マルチコイル ECT プローブの基礎特性-”, 原子力学会秋季大会, 2003, p. 236.
- [5] 佐藤一彦, 黄皓宇, 内一哲哉, 高木敏行, “厚肉材用渦電流探傷プローブの開発とき裂の定量的評価”, 機械学会論文集, 69-678, A, 2003, pp. 455-462.
- [6] 遠藤久, 黄皓宇, 内一哲哉, 高木敏行, 西水亮, 小池正浩, 松井哲也, “渦電流探傷に基づく厚肉材における深いき裂の定量的評価”, 非破壊検協会秋季大会講演概要集, 2003, pp. 75-77.
- [7] 福富広幸他, “渦電流法に基づくガスタービン動翼の非破壊損傷評価 第 3 報: 動翼非破壊き裂検出装置の開発”, 電中研報告, <http://criepi.denken.or.jp/jpn/kenkikaku/rd-info/pdf/T01045.pdf>.
- [8] 長屋嘉明, 高木敏行, 黄皓宇, 内一哲哉, “テンプレートマッチングを用いた画像処理による渦電流探傷信号からの複数き裂の同定”, 機械学会論文集, 69-684, A, 2003, pp. 1236-1243.
- [9] H. Huang and T. Takagi, “Inverse Analyses for Natural and Multi-Cracks using Signals from a Differential Transmit-Receive ECT Probe,” IEEE Trans. Magn., 38, 2, 2002, pp. 1009-1012.
- [10] H. Huang, H. Fukutomi, T. Takagi, and J. Tani, “Forward and Inverse Analyses of ECT Signals Based on Reduced Vector Potential Method using Database,” Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 14:Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II), IOS Press, 1998, pp. 313-321.