

渦電流探傷画像のベクトル化による表面きず評価について

Surface Flaw Evaluation by Vectorized Eddy Current Testing Image

東北大学流体科学研究所 遠藤 久 Hisashi ENDO Member
東北大学流体科学研究所 高木 敏行 Toshiyuki TAKAGI Member

A method of eddy current testing (ECT) data mapping for surface breaking evaluation is studied. The multicoil ECT probe utilized in this paper consists of Transmit-Receive (TR) type sensors as array elements to obtain the information on crack directions. Switching two directional scans, U- and T- modes, gives two-dimensional vector mapping as ECT images. The ECT signals of the TR type sensor also give the information on crack directions from their variation displayed on the complex number plane. Extracting a complex number component of the signals makes it possible to visualize directions of numerically simulated proximate EDM slits.

Keywords: Multicoil type ECT probe, Transmit-Receive type sensor, Vector imaging

1. 緒言

渦電流探傷(Eddy Current Testing, ECT)は、金属材料の表面のきず、き裂などを検出する非破壊検査法の1つである。その原理は、1)励磁コイルに交流電流を印加して交流磁束を生成する。2)交流磁束を検査対象に分布させることにより、電圧が誘起し、導電率などの材料因子に応じた渦電流が流れる。3)このとき、きずなどの欠陥が存在すれば、渦電流経路の変化に起因して磁場分布の変化がする。4)磁場分布の変化をセンサのインピーダンス変化などとして捕らえるというものである[1]。磁場系の現象を用いることにより検査対象に対して非接触かつ高速に計測が可能である。

近年の計算機ハードウェア・ソフトウェア技術の進歩により渦電流探傷は、計測結果に対して電磁場数値解析をベースにした定量的評価の分野—計算電磁非破壊評価学(Computational Electromagnetic Non-Destructive Evaluation, CENDE)—に拍車がかかり、プラント構造物内におけるき裂深さサイジング手法の実用化開発が注目されている[2-4]。さらに、プラント保全活動最適化が議論されているなかで、各種検査技術の迅速化、高精度化が社会的に要求されている。これらを背景に、瞬時に計測データを画像化できるマルチコイル渦電流探傷センサを開発し、画像処理、電磁場数値解析を利用した「ECTカメラシステム」の開発に取り組んでいる。Fig.1は、ECTカメラシステム構想を表現したものである。マルチコイル型ECTのセンサ部であるコイルを"Lens"、その励磁周波数を"Focus"、センサから得ら

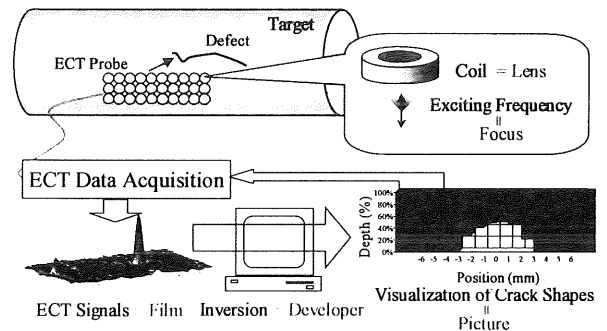


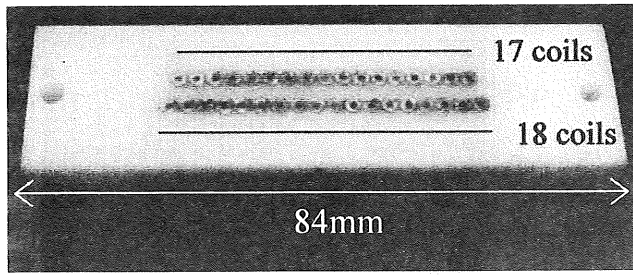
Fig.1 Concept of ECT camera.

れる画像化データを"Film"、計測データからの定量的評価を"Developer"、評価結果可視化を"Picture"、というように検査から評価までの一連のプロセスを写真が現像される過程と対応されたアプローチである。

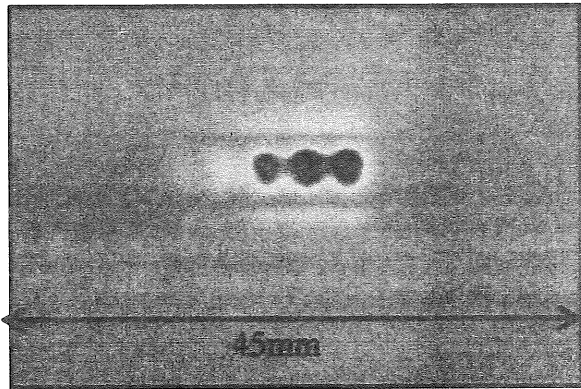
本論文では、プラント構造物保全において極めて重要となるき裂表面形状の情報を可視化する手法として、マルチコイル型ECTプローブの2次元コイル配列を生かしたベクトルイメージング方法を検討する。これは、Fig.1のECTカメラシステム構想における情報リッチな画像化データ生成に対応する要素技術開発であり、"Developer"と"Picture"の前段に組み込むことによって検査の迅速化、高精度化を図る。

2. マルチコイル型ECTプローブ

Fig.2に示すマルチコイル型ECTセンサはECTカメラの"Lens"に対応する。センサコイルは2列に並べられており、外径2.5mmのコイル35ヶから構成されている。探傷器のマルチプレクサ回路のスイッチング制御により、1ヶのコイルが励磁、検出の両方の機能を



(a) Probe head

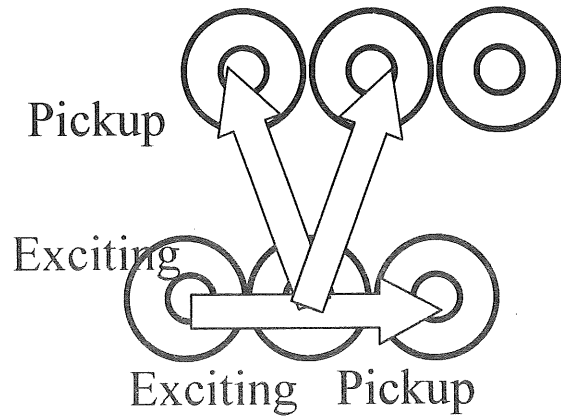


(b) An example of ECT image for proximate EDM slits

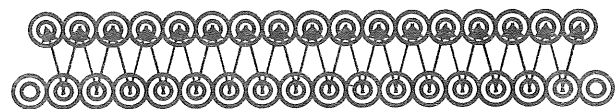
Fig.2 Multicoil ECT probe.

有し、コイル間の相互干渉を回避しながら各チャンネルの励磁パターンを実現する。またマルチコイルであるために一方のみの走査により ECT 信号を Fig.2(b) のような 2 次元画像として得ることが出来るという特長をもつ[5]。ここで 2 列のコイル位置がコイル半径分シフトしているのは、一方の走査において、センサコイルが検査対象直上を通らない面積、すなわち不感帯領域を削減するためである。Fig.2(b) の ECT 画像は、励磁周波数 40kHz でステンレス平板上に放電加工機で付与したスリット状人工模擬き裂(以降、EDM スリットと略記)を測定したものである。3mm 間隔で 5 本の EDM スリットが存在するが、スリットの(長手)方向を判断するのは困難である。

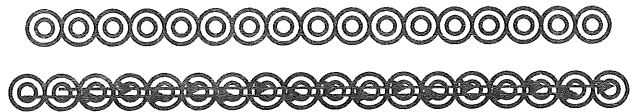
き裂方向の情報を取得できる ECT プローブとして、Fig.3 に示すようなコイル駆動方式を採用する。マルチコイル型 ECT プローブを構成するセンサ要素として、励磁および検出コイルを 1 ヶづつ用いた Transmit-Receive (TR)型センサを用いる。TR 型センサは、き裂直上で、励磁・検出コイルの配列とき裂の長手方向とが平行になるような位置関係のときに大きなセンサ出力をもたらす。一方、励磁・検出コイルの配



(a) TR sensor elements



(b) U scan mode



(c) T scan mode

Fig.3 Sensor elements and scan modes of the multicoil ECT probe.

列とき裂の長手方向とが垂直になるような位置関係の場合、き裂の端で大きなセンサ出力を得るが、き裂の直上での出力値は比較して小さくなる性質がある。さらに、TR 型センサは励磁と検出コイルがある一定の間隔をもつために、支配的になりやすい励磁コイル直下の検査対象情報を抑え、深い場所に誘起された渦電流に起因する情報を取得することが可能である[6]。

この TR 型センサを Fig.2(a) のプローブヘッドで実現することを考え、Figs. 3(b)(c) に示すスキャンパターンを採用する。一方は、コイル列をまたぐように励磁・検出コイルを組み合わせる U スキャンモード (32 チャンネル)、他方は、18 ヶから成るコイル列方向に励磁・検出コイルを組み合わせる T スキャンモード (16 チャンネル) である。U スキャン、T スキャンそれぞれのモードで得られる ECT 画像データをベクトルの方向成分に対応させて画像化することによって、き裂方向を可視化することが基本的な考え方である。しかしながら、コイル列の位置的なずれや、U スキャンモード、T スキャンモードのチャンネル数の違い、さらにセンサの空間分解能など問題に起因して、ベクトル ECT 画像生成には多くの課題が存在する。

3. ベクトル化 ECT 画像の検討

ベクトル ECT 画像生成法を検討するために、Fig. 4 に示すような近接 EDM スリットモデルに対して渦電流場における有限要素解析[7]より、U スキャンモード、T スキャンモードの ECT 信号および画像の性質を調査する。このモデルでは、同図左から深さ 0.5, 1, 2, 3, 3mm の矩形 EDM スリットを 4mm 間隔で仮定している。

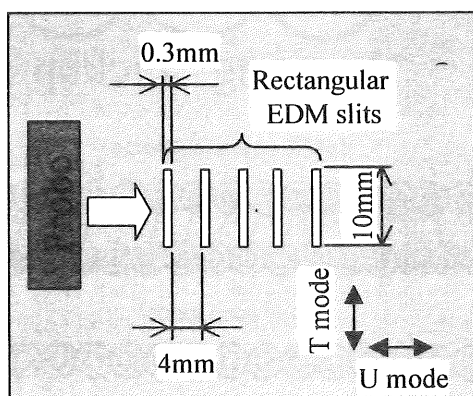


Fig. 4 Proximate EDM slit model.

Fig. 5 は、U スキャンモード、T スキャンモードで得られる ECT 画像を計算した結果である。また、Fig. 6 は、同計算で得られるセンサ出力を複素平面上にプロットしたものである。ここで、 V_R 、 V_I (V) はそれぞれ渦電流探傷装置によって計測されたセンサ出力電圧の実数成分、虚数成分であり、偏角 $\theta = \arctan(V_R/V_I)$ は入力電圧と出力電圧の位相差に対応している。EDM スリットの存在していないセンサ位置での出力を複素平面上の原点に置き、そこから EDM スリットの有無等に起因する出力電圧の差および位相の変化を示しており、渦電流探傷においては、Fig. 6 のようなデータ表示法が広く用いられている。EDM スリット長手方向と励磁・検出コイルの配列とが平行の位置関係にある T スキャンモードでは、EDM スリット直上で大きなセンサ出力をもたらす。一方で、励磁・検出コイルの配列とき裂の長手方向とが垂直になるような位置関係の場合、き裂の端で大きなセンサ出力をもたらすが、き裂の直上での出力値は比較して小さくなる傾向が計算結果からもわかる。Fig. 6 の ECT 信号複素平面表示をみると、EDM スリットによる渦電流のさえぎられ方に起因して、U スキャンモード、T スキャンモードで明らかな信号位相方向の大きな違いがある。この性質を利用してベクトル ECT 画像生成を試みる。

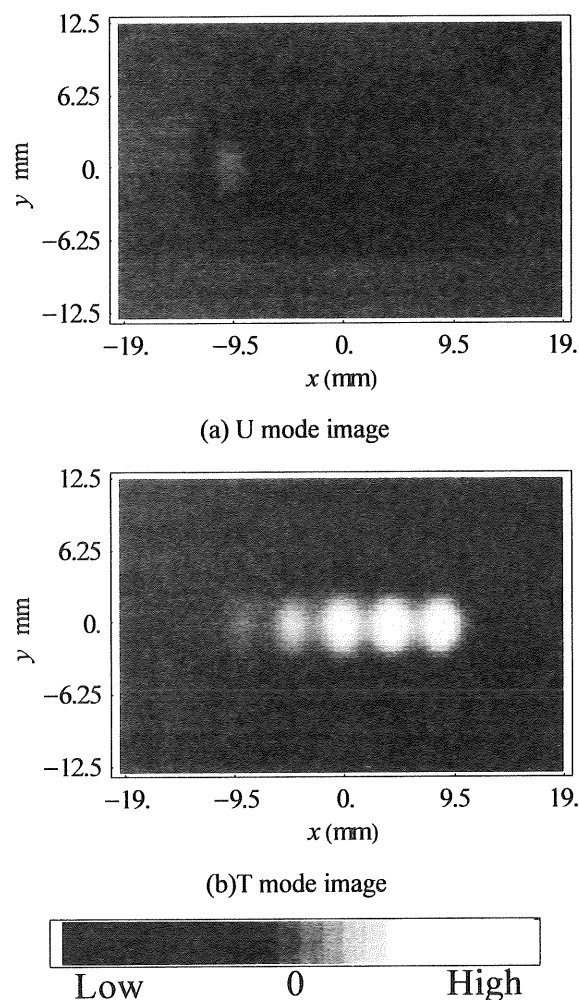
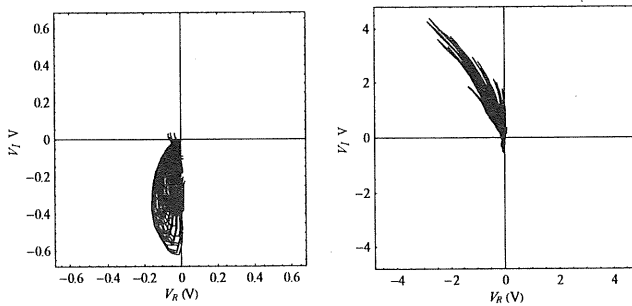


Fig. 5 ECT images representing the model in Fig. 4. (100kHz, V_I components)

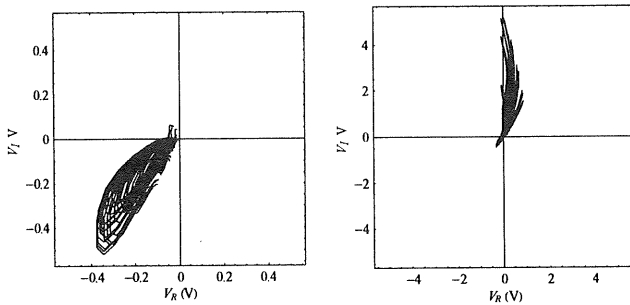
センサ出力は、 V_R 、 V_I の 2 変数あるが、画像の 픽セル輝度は、1 変数である。センサ出力をその絶対値や位相などに置き換えて表示するか、または、 V_R 、 V_I どちらか 1 成分を表示するかであるが、Fig. 6 で示した TR 型センサの性質である U スキャンモード、T スキャンモードの信号位相の違いを利用して、センサ出力の 1 成分を表示することにする。ここで、ECT 信号が交流回路理論の上に成り立っているから、センサ出力の 1 成分を表示することは、ある時間における瞬時値電圧を観測していることを意味する。また、EDM スリットの方法が既知であるから、その方向が最も大きくなる電圧成分を基準位相におき、同相、逆相成分をベクトル画像生成に用いれば、直交するベクトル成分の値が小さくなり、き裂方向のベクトル指示が強くなる。例えば、Fig. 7 に示すように T スキャンモードの最大

値を V_I 軸に位置するように U スキャンモード、T スキャンモードの全サンプル信号に位相の回転の補正を施す。各測定点に対して、ベクトルの x 方向成分を U スキャンモード、 y 方向成分を T スキャンモードの V_I 信号値を対応させれば、Fig. 8 のようなベクトル ECT 画像生成することが可能である。



(a) U mode signals (b) T mode signals

Fig. 6 ECT signal variations representing the model in Fig. 4. (100kHz)



(a) U mode signals (b) T mode signals

Fig. 7 Phase-shifted ECT signal variations shown in Fig. 6. (100kHz)

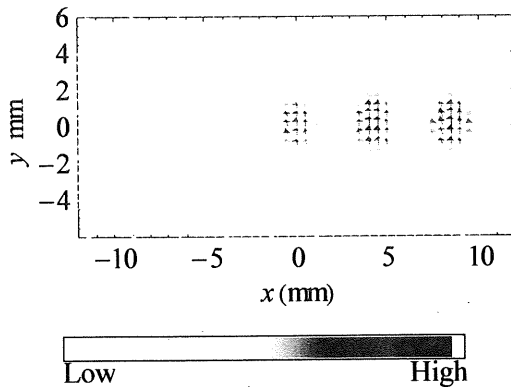


Fig. 8 Vector ECT image using V_I signals in Fig. 7.

4. 結言

き裂表面形状の情報を可視化する手法として、ベクトル ECT 画像について検討した。TR 型センサを採用することにより、き裂方向が比較的簡単な信号処理で可視化できることを示した。き裂長さのサイジングの高度化などへの寄与が期待されるが、近接き裂の場合や実際のプローブを用いる上でき裂に起因する信号の分離や画像の補間法等、未だ解決すべき問題が多く存在する。

謝辞

本研究の一部は、文部科学研究補助金特別研究員奨励費(課題番号 16*2972)、日本学術振興会重点研究国際協力事業によって実施された。また、ステンレス鋼試験体をご提供いただいた(財)エネルギー総合工学研究所、測定装置の管理をしていただいた東北大学流体力学研究所 佐藤武志氏への感謝の意をここに記す。

参考文献

- [1] M. Kurokawa, et al., "New eddy current probe for NDE of steam generator tubes", Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 15, IOS Press, Amsterdam, 1999, pp. 57-64.
- [2] T. Sollier, et al., "CODECI, A new system for the inspection of surface breaking flaws based on eddy current array probe and high resolution CCD camera", Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 24, IOS Press, Amsterdam, 2004, pp. 215-222.
- [3] M. Rebican, et al., "Reconstruction of multiple cracks in an ECT round-robin test", Int. J. Appl. Electromagn. Mech., Vol. 19, Nos. 1-4, 2004, pp. 399-404.
- [4] H. Huang, and T. Takagi, "Inverse analyses for natural and multi-cracks using signals from a differential transmit-receive ECT probe", IEEE Trans. Magn., Vol. 38, No. 2, 2002, pp. 1009-1012.
- [5] 遠藤、他:渦電流探傷画像からの複雑形状欠陥再構成の試み, 日本非破壊検査協会表面探傷分科会, 2004, pp.1-3.
- [6] 高木、遠藤:厚肉構造物のための渦電流探傷技術、非破壊検査、Vol.53, No.10, 2004, pp.602-607.
- [7] 高木、遊佐:渦電流探傷試験の数値解析, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.1, 2001 pp.48-54.