

B202

## 磁界分布の可視化による変形ロゴウスキコイル型ECTの動作原理検証

廣田 章博<sup>○</sup>, 早野 誠治, 齋藤 兆古 (法政大学)

堀井 清之 (白百合女子大学)

### Operation Principle Verification of the Modified Rogowski Coil Type ECT by Magnetic Fields Visualization

Akihiro HIROTA, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

#### ABSTRACT

Eddy current testing (ECT) does not require any direct contact and can be composed of a relatively simple mechanical structure. Further, it is possible to carry out the nondestructive testing with high speed. Thereby, ECT is widely applied to the maintenance works of various fields.

Previously, we have proposed the current viewer based on the Ampere's law. This current viewer has theoretically infinite high-resolution capability searching for the current flowing paths in the printed circuit boards (PCBs). Furthermore, we have developed the vector current viewer, which makes it possible to on-line visualization of the current distributions on the PCBs.

Principal purpose of this paper is to check up the possibility of our current viewer as a new ECT probe. As an initial test, we have carried out several experiments to identify the cracks in metallic materials, e.g. aluminum and copper. And we have visualized the magnetic field distribution by finite element method. As a result, it is revealed that the operating principle of our method is verified by the visualized magnetic field distributions.

**Keywords:** ECT, Eddy current, Finite element method

#### 1. 結論

エレベータやエスカレータ, 航空機, さらに原子炉などの機械的構造の主要材料である金属材料の非破壊検査は安全性確保のために極めて重要な技術である。また, 金属そのものの品質評価要素として, 材料の均一性, ゆがみ, たわみなどがあり, これらの要素を評価する手段としての非破壊検査技術もある。いずれの非破壊検査においても最も重要な具備すべき大きな特徴は高信頼性, 検査の高速な実行, さらに取り扱いの容易さにある。

金属の非破壊検査法には, 超音波, 放射線, 電気抵抗, 渦電流などを利用した方法が知られている。この中で, 超音波による非破壊検査法は比較的, 精度のみならず信頼性も高い反面, 超音波振動子を検査対象に直接接触させる必要があり, 高速な検査の実行が難しい。同様に, 電気抵抗測定による非破壊検査法も検査対象へ直接接触の必要性がある。他方, 放射線を用いた非破壊検査法は, 検査対象へ非接触で検査を可能とするが, 安全性の観点

から装置の取り扱いに一定の基準が課せられている。渦電流を利用した非破壊検査法は検査対象へ直接接触する必要がなく, 比較的簡単な装置で高速な作業が行える反面, 渦電流の流れる方向によっては金属中の欠損を探知できない問題点もある。しかしながら, 比較的簡単な機械・電氣的構造で構成され, 信頼性が高いため, 主として厳格な安全性の確保や検査の迅速性が必要な原子炉など様々な分野において広汎に用いられている<sup>1-4)</sup>。

筆者らは, 主としてプリント基板上の電流分布, すなわち, 回路の健全性を非破壊的・非侵襲的に行うため, 変形ロゴウスキコイルを用いたカレントビューアを提唱し, 平面回路上の電流分布探査を試みた。カレントビューアは電流と磁界間の基本的な関係で有るアンペアの周回積分の原理を直接利用することから, 理想的に実現できれば理論上無限大の解像度で平面状の電流分布が探査可能で有る。さらに, オンラインで平面状電流分布の大きさと方向を可視化可能とするベクトルカレントビューアを試作し, 基本的な動作原理の検証を行ってきた<sup>5-7)</sup>。

このような、筆者らが従来から提唱し、動作原理を検証してきたカレントビューアやベクトルカレントビューアは平面状に分布する電流が生成する磁界を受動的（パッシブ）に感知する方式である。従来のECTプローブはプローブが発生する交流磁界に喚起される渦電流分布で、検査対象中の欠損の有無に起因する分布の相違をプローブの入力インピーダンスの変化として検出する。

本論文で提案する変形ロゴウスキコイル型ECTプローブは、励磁コイルとセンサーコイルからなる。アクティブ型エディカレントビューアである。は円弧状の2脚からなり、励磁コイルは平面状対象金属に渦電流を喚起し、検査対象中の渦電流分布の差異を独立に装着された差動コイルで検出する。このため、アクティブ型エディカレントビューアの両脚下の渦電流が異なる場合、出力電圧が得られ、両脚下の何れかに欠損、若しくは異なる材料であることが検出される。すなわち、アクティブ型エディカレントビューアに装着された励磁コイルの生成する磁界に対する応答を空間的ブリッジである差動コイルで検出する原理に基づく。本論文では、この動作原理を有限要素法より磁界分布を可視化し、筆者等の提案するセンサーの動作検証をする。

## 2. 変形ロゴウスキコイル型 ECT プローブ

### 2.1 センサーの形状

通常、ループ状ソレノイドコイルを用いたサーチコイル法による磁界測定で高解像度を実現する場合、巻き数を増加し断面積を小さくする必要がある。さらに、サーチコイルは電流近傍へ位置する必要がある。

他方、筆者等は電流に起因する磁界の検出感度向上を図るため、形状が半円弧状の変形ロゴウスキコイル型カレントビューアを提案した。その結果、通常のソレノイド型サーチコイルに比較して、筆者らの提案するカレントビューアは遥かに高解像度で磁界を測定可能とした。Fig. 1にカレントビューアの動作原理を示す。Fig. 1に示すカレントビューアに同方向へ磁束を生成する励磁コイルを装着し、さらに磁束の相違を検出するため、差動コイルを同軸上に設ける。

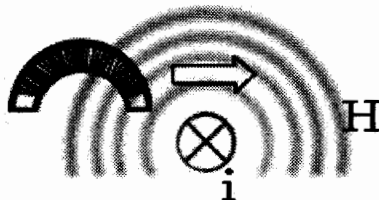


Fig. 1 Current Searching by Current Viewer

### 2.2 差動コイル型磁気センサー

磁気センサーは大きく分けて材料の特性を利用した、たとえばホールセンサーのような物性応用に基づく形式とコイルを巻いて作成するサーチコイル形式に分類される。ホールセンサーは、AV機器のみならず、コンピュ

ータで代表される映像情報処理機器へ広汎に採用されている。他方、サーチコイル形式は、環境依存性が低く、過酷な環境に耐えられるため、単純な原子炉の熱交換器をはじめ多くの金属構造物に対する非破壊検査に広範に採用されている。これは、ホールセンサーで代表される物性利用型磁気センサーは温度など環境依存性が高いために装置中に固定して使用されるのに対し、サーチコイル型は環境依存性が殆ど無く、可搬性に富むため、定期的な検査を必要とするエレベータや原子炉などへ適していることに起因する。

サーチコイル型磁気センサーの中で、差動コイル型磁気センサーは出力信号が直接差動コイルで微分演算されるため、信号処理用電子回路への依存性が低く、且つ、高感度である。このため、本論文で提案するセンサーは、差動コイル型磁気センサーを採用した。Fig. 2に差動コイル型磁気センサーの動作原理を示す。

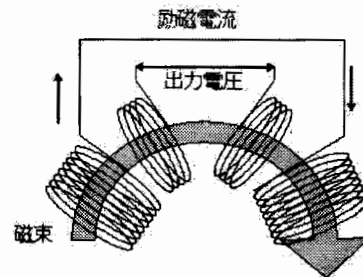


Fig. 2 Differential Coil Type Magnetic Sensor

複数個の角型コイルを組み合わせた同心円状のサーチコイルで構成された変形ロゴウスキコイル型 ECT プローブは、アンペアの周回積分の法則を直接利用するロゴウスキコイルを部分的に取り出した形状であり、センシング部分は電流が流れる導線を覆う構造とした。ロゴウスキコイルを部分的に利用するため、変形ロゴウスキコイル型 ECT プローブは対象物の表面で、渦電流の作る磁界をコイルで囲むことなく効果的に測定可能とする磁気センサーである。

## 3. 原理検証実験

### 3.1 センサーの構造

Table 1に試作ECTの諸定数および検査対象金属の寸法等を示す。試作センサーは、Fig. 3に示すような、ロゴウスキコイルを利用した半円弧状の変形ロゴウスキコイル型 ECT プローブである。



Fig. 3 Tested Differential Coil Type ECT

Table 1 Various Constants of the Tested ECT Probe and the Target Materials

Diameter of the sensor	30[mm]	
	Exciting coils	Search coils
Diameter of the winding coils	0.2[mm]	0.2[mm]
Number of turns	85[turn]	56[turn]
Thickness of the target metallic materials	Aluminum: 0.5[mm] Copper: 0.5[mm]	

3.2 貫通欠損探査

Fig. 4 に示すように、実際の直線状貫通欠損を幅 0.5,1mm、深さ 0.5,1mm のスリットで模擬した。供試プローブをスリットから 3cm 離れた左端から 0.5cm ずつ欠損に対し水平方向に走査させ、サーチコイルに検出する誘起電圧を測定した。

検査対象材料は Table 1 に示す厚みの異なるアルミ板と銅板である。また、励磁コイルには 10kHz、0.5A を通電した。

Fig. 5 は探査結果である電圧分布を示す。左右のセンサー端子が欠損上を通過すると 2 回比較的大きな出力が

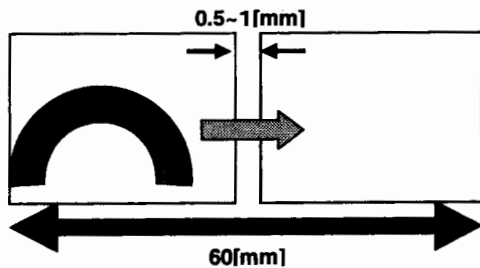


Fig. 4 Schematic Diagram of the Piecing Defect Searching Tests

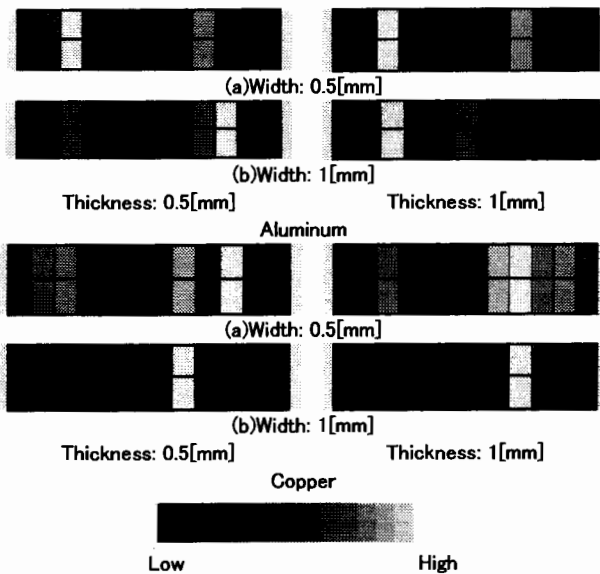


Fig. 5 Output Voltage Distributions along the Surfaces with Targets with Piecing Defects

得られることがわかる。導電率の大きい銅板では、厚みが最も薄い 0.5mm の場合、本来 2 箇所ピーク電圧が存在すべきであるが、3 箇所ピークを持つ電圧分布となった。通常、励磁コイルが対象物に接近して喚起された渦電流はセンサーがつくる磁界を打ち消す方向に磁束を形成するが、全てが打ち消されなく、渦電流が作る磁束の一部がリモートフィールド法と同じ機能を発揮するために 3 箇所ピークを持つ電圧分布となると考えられる。

3.3 非貫通欠損探査

Fig. 6 に示すように、実際の直線状非貫通欠損を幅 1mm、深さ 0.5,1mm のスリットで模擬し、欠損の深さは 1mm と 0.5mm の厚さの異なる検査対象板を 2 枚重ねることで 33% と 66% 欠損深さを模擬した。

実験は 3.2 節と同様に走査範囲を 6cm とし、供試プローブを 1cm 間隔で左方から右方向へ走査して出力電圧を測定した。励磁条件も 3.2 節と同様で、励磁コイルへ 10kHz、0.5A を通電した。

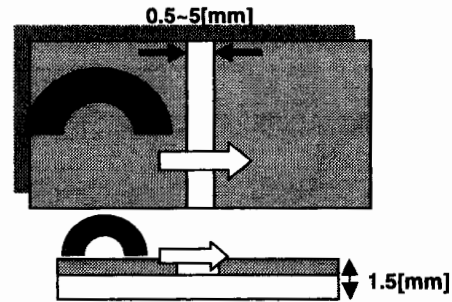


Fig. 6 Schematic Diagram of the Non-piecing Defect Searching Tests

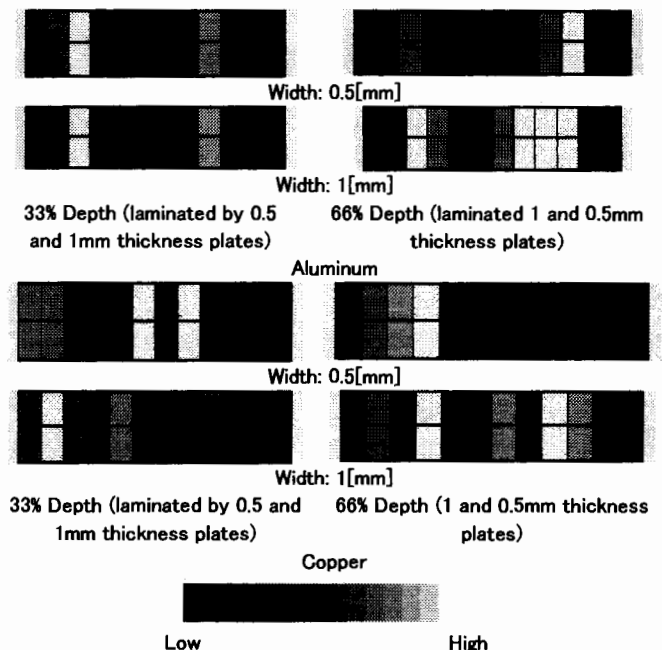


Fig. 7 Output Voltage Distributions along the Surfaces with the Target with Non-piecing Defects

Fig. 7 は非貫通欠損に対する実験結果を示す。非貫通欠損の場合、検査対象金属の導電率の相違が出力電圧分布に直接反映せず、欠損の深さに反映することが Fig. 7 の結果から判る。また、33%の欠損深さで有っても、供試プローブの持つ2点探査機能の何れかに探知されることが判る。換言すれば、筆者らの提案する ECT プローブが持つ特長が反映され、比較的浅く狭い欠損も探知可能で有ると考えられる。当然であるが、欠損の幅が広がる程、明確に2点ピーク電圧分布として探査される。

### 3.4 磁界分布解析

本論文では有限要素法を使い、磁界分布のシミュレーションを行った。Fig. 8 はセンサーが欠損上を通過時の磁界分布を示す。シミュレーションの励磁条件は3.2節、3.3節と同様である。

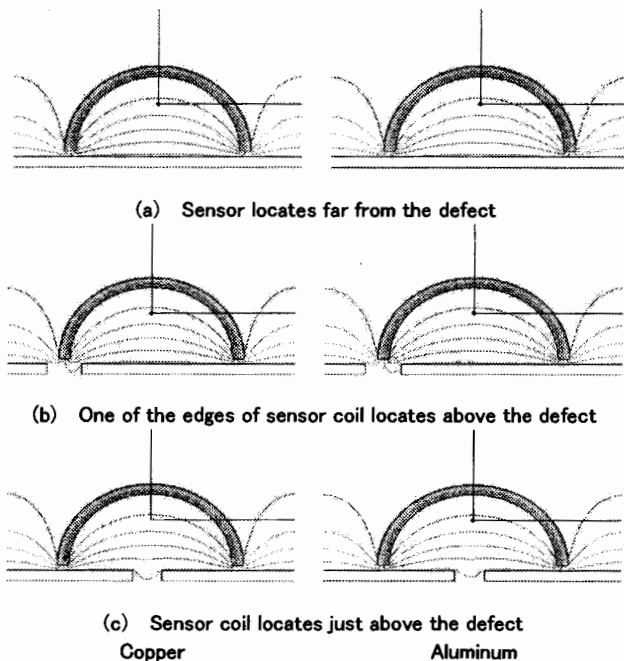


Fig. 8 Magnetic Field Distributions by Modified Rogowski Coil Type ECT Sensor (Simulated by FEM)

また、Fig. 9 はセンサーを欠損に対し走査した場合における励磁コイルの自己インダクタンスのシミュレーションによる変化である。この結果から、センサー端子が欠損上部に来るとき、励磁コイルの自己インダクタンスが大きく変化することがわかる。

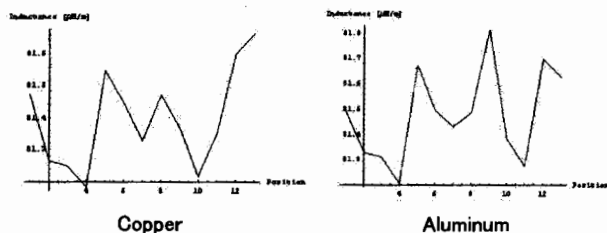


Fig. 9 Variation of Inductance Depending on the Relative Locations Between Sensor and Defect

## 4. まとめ

本論文では、筆者らが従来提案してきた電流分布探査センサーであるカレントビューアをアクティブ型渦電流センサーとして利用する方法を提案した。カレントビューアはアンペアの法則を直接利用して電流を測定するロゴウスキコイルを変形したセンサーで有る。このカレントビューア上に励磁コイルを全体に巻き、励磁コイルを覆う形で差動コイルを巻いた ECT プローブはセンサー端子が両脚に存在するため、1ヶ所の欠損に対して2回走査を可能とする。また、有限要素法を用いて磁界分布のシミュレーションを行った結果、欠損上部に左右に配置してあるセンサー端子が来るとき、励磁コイルの自己インダクタンスが大きく変化することがわかった。この結果、同一欠損を2回走査可能とし、従来型の ECT プローブに比べより信頼性の高い ECT プローブ実現の可能性が判明した。

## 参考文献

- 1) 橋本光男：原子炉構造機器の電磁現象を応用した欠陥診断法に関する研究，東京大学学位論文(1990)。
- 2) 藤田 穰，寺島義浩，笹田一郎・野田 保：フラックスゲートを組み込んだ Dahle 型プローブによる強磁性体の傷検出，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-01-217(2001)。
- 3) 浦田秀行，市丸 靖，笹田一郎：多チャンネル化マイクロ磁気プローブの試作，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-01-218(2001)。
- 4) 斎藤兆古，亀澤高志，平間 豊：三相交流磁気センサ，電学論 A，115，10(1995) pp. 956-961。
- 5) 青木 誠，早野誠治，斎藤兆古：カレントビューアによる2次元電流分布の測定，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-99-150(1999)。
- 6) 廣田章博，早野誠治，斎藤兆古：ベクトルカレントビューアによる電流分布の可視化，可視化情報学会，Vol. 22，No. 1(2002) pp. 81-84。
- 7) 廣田章博，早野誠治：ベクトルカレントビューアアレイの試作，応用磁気学会誌，Vol. 27，No. 4(2003) pp. 389-392。