立方体励磁コイルと渦巻状薄膜検出コイルを用いた 渦電流探傷試験法の現象解明

元 安 雄 大*・後 藤 雄 治**

Phenomenon Elucidation of Mutual Induction Type Eddy Current Testing
Consisting of Cube Exiting Coil and Spiral Thin Search Coil

Yuta MOTOYASU* and Yuji GOTOH**

The mutual induction type eddy current testing using a spiral type search coil is one of the eddy current testing (ECT). In this type ECT probe, since the thickness of a spiral search coil is very thin, the distance (lift-off: L_o) between the ECT probe and the specimen is able to set small. Therefore, the high detection sensitivity is obtained. However, since the wire is coiled in the shape of spiral, the evaluation of the flux density inside the spiral search coil is made difficult by experiment. Moreover, the phenomenon elucidation of inspection using this ECT probe is not carried out. In this paper, the inspection characteristic of a surface defect on an aluminum plate using this probe was investigated by 3-D alternating electromagnetic finite element method (FEM). Moreover, the evaluation in consideration of the characteristic of the spiral search coil in this ECT probe is also investigated by 3D FEM and experimental verification.

Key Words: surface defect, spiral thin search coil, non magnetic material, 3D finite element method

1. はじめに

石油化学プラントや各種発電プラントにおいて特に防錆や防錆を必要とする部分には非磁性材料が多く使用されている。これらは長期間の使用により欠陥が発生するため保守検査が必要とされる。現在、非磁性材料を対象とした非破壊試験の一つに、渦電流探傷試験法 (ECT: Eddy Current Testing) がある。この手法は金属に交流磁界を印加させ、渦電流を発生させる。欠陥などが存在する場合、渦電流の分布が変化するため、その変化をコイルのインピーダンスや磁界の変化量として検出して探傷を行なう。一般的な ECT は単一コイルに交流電流を流し、被試験体に近づけインピーダンス変化を測定する^{1), 2)}。そのため、欠陥が存在しない位置でも、ある一定のインピーダンスの値が得られるため、この値を差し引くなどの工夫が必要となる。そこで近年では、励磁コイルと検出コイルとで構成される相互誘導型 ECT が考案され、励磁コイルや検出コイルの構造や配置などにさまざまな工夫を施し、欠陥が存在しない位置では出力信号が得られない ECT

プローブの検討が行なわれている^{3)~6)}。本研究では立方体励磁コイルと渦巻状の薄膜検出コイル (プレーナー検出コイルと定義する。) とで構成された相互誘導型 ECT プローブを検討した。プレーナー検出コイルは半導体の基盤製造技術を使用して作られたコイルで、薄い基板上に渦巻状にコイル線を密に作成したコイルである。そのため、巻数が多く非常に薄いコイル作成が行なえ、これを検出コイルに用いれば、プローブと被試験体との距離 (リフトオフと定義する。) を小さく設置できる。また、これは渦巻状に巻かれた構造をしているため、磁界検出において検出コイルの中心部分に近づくにつれて重みを増した検知が行なえ、通常のコイルよりも検出感度が高いといわれている。そのため本手法は実験による探傷報告が多く出されている^{7)~14)}。しかし、この検出コイルは渦巻状に巻かれているため、実験によって得られた出力電圧から検出コイル内を鎖交する磁束密度の評価が難しいとの理由から、検査原理の解明や検出特性、プローブの改良があまり行なわれてこなかった。

そこで本研究では、検査対象を非磁性体であるアルミ板とし、表面スリット欠陥を探傷モデルとした場合において、このプローブの探傷原理を 3 次元有限要素法の電磁界解析と検証実験により明らかにした。また、渦巻状のプレーナー検出コイル内の出力信号においての実験と電磁界解析との比較および評価については、つぎの 2 手法での比較検討を行なった。まず、プレーナー検出コイル単体を既知の均一磁界中に配置し、均一磁界強度を変化させ、その磁界強度に対応した出力

* 大分大学工学研究科 大分市大字旦野原 700 番地

** 大分大学工学部 大分市大字旦野原 700 番地

* Graduate school of Engineering, University of Oita, 700 Dannoharu, Oita

** Faculty of Engineering, University of Oita, 700 Dannoharu, Oita

(Received March 3, 2015)

(Revised July 13, 2015)

電圧を算出し、磁界と出力電圧の関係をあらかじめ求めておく方法と、有限要素法の電磁界解析で渦巻状のプレーナー検出コイルの 1 ターンごとの出力電圧を計算する方法の 2 手法を検討した。

2. 解析条件と検討した探傷モデル

本研究では、立方体励磁コイルと薄型であるプレーナー検出コイルを用いた本プローブに関して、検査対象であるアルミ板 (120×120×10 mm) に表面スリット欠陥が施された場合の検出特性を 3 次元有限要素法による電磁界解析を用いて検討した。

2.1 解析条件

解析モデルの 1/2 領域を **Fig. 1** に示す。Fig. 1(a) は X-Z 平面図、Fig. 1(b) は X-Y 平面図、Fig. 1(c) は鳥瞰図をそれぞれ示す。励磁コイル (46 ターン) は立方体形状とし、X 軸方向に印加磁界が分布するように設定している。解析ではス

テップ・バイ・ステップ法¹⁵⁾を用い、正弦波で与える励磁電流の 1 周期を 16 分割 ($\Delta t = 1.25 \mu\text{s}$) として、定常状態になる 2.5 周期分 (40 steps) の計算を行なった。ここで、電磁界解析に用いた支配方程式を以下に示す。

$$\text{rot}(v \text{ rot } \mathbf{A}) = J_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad } \phi \right) \quad (1)$$

$$\text{div} \left\{ -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad } \phi \right) \right\} = 0 \quad (2)$$

ここでの $\mathbf{A}$ は磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ は電位スカラーポテンシャル、 v は磁気抵抗率 ($= 1/\mu$, μ : 透磁率)、 J_0 は強制電流密度、 σ は導電率をそれぞれ示している。なお、本研究での検査対象はアルミ板であるため、比透磁率は $\mu_r = 1$ としている。解析条件を **Table 1** に示す。

2.2 探傷モデル

本研究では、立方体励磁コイルの寸法は 6×6×6 mm で、励磁条件は励磁周波数が 25 kHz、励磁電流が 100 mA (実効値) 一定とした。また、検出コイルの寸法は Z 方向に厚み 0.1 mm 一定の渦巻状 (44 ターン) とし、外径を $\phi 2$ mm とした。ここで、本研究で用いる検出コイルは **Fig. 2** の写真のような構造をしており、導線と導線の間には空間が存在し、導線の幅は 45 μm である。アルミ板表面のスリット欠陥の寸法は X 方向に長さ 20 mm、Y 方向に奥行き 0.3 mm、Z 方向に深さ 1.0 mm とした。解析では検出コイルの中心部がスリット欠陥の中心に位置するときを $X = 0.0$ mm とし、スリット欠陥

Fig. 1 Inspection model (1/2 domain)

Table 1 Analysis conditions

Exciting current	4.6 AT(AT:ampere×Turns)
Frequency	25 kHz
Number of element	118188
Number of node	126786
Aluminum plate	$\sigma = 3.5 \times 10^7$ S/m 120×120×10 mm $\mu_r = 1$
Convergence judgment value	N-R method: 1×10^{-4} T ICCG method: 1×10^{-4}
The number of the steps	40 steps
Δt (second)	1.25×10^{-6}

Fig. 2 Enlargement of spiral search coil (44 turns)

を X 方向に 0.5 mm 刻みで ± 15 mm 程度移動させ、解析的に検査プローブの移動を模擬した。

3. 電磁界解析による検査原理の解明

ここでは、電磁界解析を使用し、磁束密度分布や渦電流分布などから本検査原理の解明を行なった。

3.1 探傷波形

プローブを X 方向に ± 15 mm 移動させた場合の探傷波形を電磁界解析を用いて求めた。解析結果を Fig. 3 に示す。図の縦軸であるプレーナ検出コイル内の Z 方向の磁束密度は、プレーナ検出コイルの巻き数である 44 ターンを、径の異なる 1 ターンコイルが 44 個直列に接続されているコイルだと仮定して、各ターンごとに鎖交している磁束密度をそれぞれ足し合わせた値を示している。また、図の縦軸の正負は、励磁電流波形と検出信号波形 (B_z) が同相の場合を正とし、位相が反転した場合を負として表わしている。図より、スリット欠陥の両端部の近傍 (± 9.5 mm) で最大の信号が得られ、スリット欠陥の探傷が行なえることがわかる。ここでは、なぜこのような探傷波形が得られるのかについての検討を行なった。

3.2 磁束分布と渦電流分布

Fig. 3 では、スリット欠陥の中心部分 ($X = 0.0$ mm) で検出信号がほとんど得られず、 $X = \pm 9.5$ mm のスリット欠陥両端部近傍で最大の信号が得られている。そこでここでは、両者の位置 ($X = 0$ mm, 9.5 mm) における磁束ベクトル分布、渦電流分布を示し、探傷波形の現象解明を行なった。Fig. 4 はプローブがスリット欠陥の中心に位置する ($X = 0.0$ mm) ときの磁束ベクトル分布を X-Z 平面で示している。

図より、励磁コイルから発生した磁束はスリット欠陥を水平 (X 方向) に分布していることがわかる。つぎに、Fig. 5 に Fig. 4 の Z 方向成分のみの磁束ベクトルを示す。Fig. 5 より、プレーナ検出コイル内に鎖交する Z 方向の磁束ベクトルは $\pm$ が相殺されてほぼゼロに等しいことがわかる。つぎに、プローブがスリット欠陥の端部 ($X = 9.5$ mm) に位置するときの磁束ベクトル分布を X-Z 平面図として Fig. 6 に示す。図より、磁束ベクトルは空气中に多く分布しており、アルミ板端部を迂回するような形で分布していることがわかる。そこで、Fig. 7 にアルミ板端部付近の X-Z 平面の渦電流等高分布

Fig. 3 Analysis result (25 kHz, 6.51 AT)

図を示す。Fig. 7 は色が濃いほど強い数値を示している。図より、磁束が迂回して分布しているアルミ板の端部付近で渦電流が強く発生していることがわかる。渦電流の流れを検討するために Fig. 8 に X-Y 平面のアルミ板表層内の渦電流ベクトル分布を示す。図より、渦電流は Y 方向に主に分布して

Fig. 4 Vector distribution of magnetic flux ($X = 0.0$ mm, $B_{\max} = 1.4 \times 10^{-3}$ T)

Fig. 5 Vector distribution of magnetic flux of only Z-direction ($X = 0.0$ mm, $B_{z\max} = 8.7 \times 10^{-4}$ T)

Fig. 6 Vector distribution of magnetic flux ($X = 9.5$ mm, $B_{\max} = 1.4 \times 10^{-3}$ T)

おり、スリット欠陥端部付近のアルミ板内に強く分布していることから、スリット欠陥端部付近で強い反抗磁界が発生することがわかる。

以上のことから Fig. 3 の探傷波形でスリット欠陥端部において最大信号が発生した要因は、励磁コイルから発生した印加磁界とスリット欠陥端部のアルミ板側で発生した渦電流により、スリット欠陥両端部付近で Z 方向成分の磁束密度が増

加したからだと考えられる。そこで、Fig. 9 に X-Z 平面の Z 方向成分のみの磁束分布を示す。図は Fig. 6 の磁束ベクトル分布の Z 方向成分のみを表示した。Fig. 9 より、Fig. 7 で渦電流が強く分布しているアルミ板端部のスリット欠陥側で Z 方向の磁束密度が強く分布し、プレーナー検出コイル内に鎖交する Z 方向の磁束ベクトルの正と負がアンバランスになっていることがわかる。

4. 検証実験

ここでは、Fig. 1 をモデルとした検証実験を行なった。励磁コイルは $6 \times 6 \times 6 \text{ mm}$ の立方体励磁コイルで Y 方向に 46 ターン巻いてある。励磁条件は解析と同様として実験を行なった。また、検出コイルは $\phi 2 \text{ mm}$ で導線を渦巻状に 44 ターン巻いて作られたプレーナー検出コイルを用いた。本実験ではプローブを X 方向に 0.2 mm 刻みずつ動かし、各位置でプレーナー検出コイル内に得られる出力電圧を測定した。

Fig. 10 に実験結果を示す。図より、解析結果 (Fig. 3) と同様な傾向が得られ、スリット欠陥の両端部付近で最大の出力電圧が得られることがわかった。

プレーナー検出コイルは渦巻状であるため、実験によって得られた出力電圧から、プレーナー検出コイル全体内を鎖交する磁束密度を求めることは容易ではない。そのため、実験値と有限要素法による電磁界解析値の比較が行なえず、電磁界解析結果の妥当性を示すことができない。そこで本研究では、実験と電磁界解析との比較法として、つぎの 2 手法での検討を行なった。なお、ここでは渦巻状のプレーナー検出コイルを Fig. 11 に示すように 1 ターンごとに独立した径を有したコイル群とし、これらのコイルが巻数分直列に接続されているコイルと仮定して、以下の検討を行なった。

①変換線を使用する方法

既知の均一磁界中にプレーナー検出コイルを配置し、均一磁界強度を変化させ、各磁界強度に対応した出力電圧をあらかじめ計算しておき、変換線としてまとめる手法

②各ターンごとの出力電圧を考慮する方法

有限要素法の電磁界解析で、渦巻状のプレーナー検出コイル各 1 ターンごとの出力電圧を計算する方法

以上の 2 種類の方法で実験と電磁界解析の比較を行なった。

Fig. 7 Distribution of eddy current density in aluminum plane ($X = 9.5 \text{ mm}$)

Fig. 8 Vector distribution of eddy current density ($X = 9.5 \text{ mm}$, $J_{e-\max} = 2.7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$)

Fig. 9 Vector distribution of magnetic flux of only Z-direction ($X = 9.5 \text{ mm}$, $B_{z-\max} = 9.1 \times 10^{-4} \text{ T}$)

Fig. 10 Experimental results (25 kHz, 6.51 AT)

Fig. 11 Magnetic induction search method

Fig. 12 Translation curve in uniform magnetic field (25 kHz)

4.1 変換線を使用する方法

ここでは、あらかじめ均一磁界下におけるプレーナー検出コイルの出力電圧を計算上で求め、均一磁界強度を変更して計算上で変換線を作成する。つぎに、実際の探傷実験を行ない、実験によって得られた出力電圧から変換線を使用することで、プレーナー検出コイル内に鎖交する磁束密度を求める手法を検討した。変換線の作成方法を以下に示す。

プレーナー検出コイルは渦巻状であるが、各ターンごとに独立した半径を有し、各ターンのコイルが直列に接続されていると仮定する。つぎに、ファラデーの法則から求めた(3)式を用いて各ターンごとの電圧 V_n を計算し、(4)式に示すように全ターン数分 $N (= 44)$ の合計電圧 V_{all} を求める。このとき、 S_n は各ターンごとの断面積、 V_n は各ターンごとの電圧をそれぞれ示す。また、磁束密度 B_z は各ターンに均一に鎖交していると仮定し、 $B_z = 1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ T}$ の範囲で計算を行なった。これによって得られた出力電圧 V_{all} と磁束密度 B_z の関係を Fig. 12 に示す。この図を用いて実験より得られた出力電圧 V_{all} を磁束密度 B_z に変換して電磁界解析との比較を行なった。

$$V_n = -S_n \frac{dB}{dt} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, 44) \quad (3)$$

$$V_{all} = \sum_{n=1}^{44} V_n \quad (4)$$

Fig. 13 に実験結果と解析結果とを比較したものを示す。こ

Fig. 13 Comparison of measured and calculated using translation curve (25 kHz, 6.51 AT)

Fig. 14 Comparison of measured and calculated using output voltage for every turn (25 kHz, 6.51 AT)

のとき、実験結果 (—●—) は Fig. 12 の変換線を用いて Fig. 10 の実験より得られた出力電圧 V の値を磁束密度 B_z に変換した値を示し、解析結果 (—◇—) は Fig. 3 に示す有限要素法の電磁界解析結果を示している。図より、実験値のほうが大きく表われている。この差の原因は、変換線を作成する際にプレーナー検出コイル内は均一な磁束が鎖交すると仮定しているが、実際にはプレーナー検出コイル内に鎖交する Z 方向の磁束は均一ではなく、プレーナー検出コイルの断面内でも微小な磁束の強弱が生じているためだと考えられる。

4.2 各ターンごとの出力電圧を考慮する方法

本節では渦巻状のプレーナー検出コイル (44 ターン) を、1 ターンごとに独立した径を有し、各ターンのコイルが直列に接続されていると仮定した。つぎに、有限要素法の電磁界解析を使用し、各ターンごとの Z 方向の磁束 B_z から出力電圧を計算し、44 ターン分の電圧を足し合わせた。この 44 ターン分の総合の出力電圧を Fig. 10 の実験より得られた出力電圧 V と比較を行なった。この計算方法は以下のとおりである。

電磁界解析より得られた渦巻状プレーナー検出コイル内の 1 ターンごとの Z 方向磁束密度の値を、(3) 式を用いて出力電圧に計算し、つぎに (4) 式に示すようにプレーナー検出コイルの巻き数である 44 ターンすべての値を足し合わせて求めた。Fig. 14 に Fig. 10 の実験結果と電磁界解析から出力電圧を求めた解析結果とを比較した図を示す。図内の実験結

果(—●—)はFig. 10の実験結果を示し、解析結果(—◇—)はFig. 3を1ターンごとに電圧 V を計算して44ターン足し合わせた結果をそれぞれに示す。Fig. 14から、実験結果と解析結果は全体的に良く一致していることがわかる。以上のことから、この手法が妥当であることがわかった。

5. プレーナー検出コイルと通常コイルとの比較

ここでは本プローブの検出コイルに、渦巻状プレーナー検出コイルを使用した場合と、通常空芯検出コイルを使用した場合とで探傷特性の比較を検討した。Fig. 15に、電磁界解析による探傷波形の比較結果を示す。黒丸(—●—)はプレーナー検出コイルによる探傷波形を示し、白丸(—○—)は通常の検出コイルによる探傷波形を示す。なお、両コイルの外径(= $\phi 2$ mm)やZ方向の厚み(= 0.1 mm)、巻き数(44ターン)は同じである。なお、ここでは磁束密度での比較を示す。図より、プレーナー検出コイルで探傷したほうが通常の検出コイルで探傷するよりも探傷感度が良いことがわかる。

ここで、プレーナー検出コイル近傍のZ方向磁束を拡大表

Fig. 15 Compare Spiral search coil and usual search coil (20 kHz, 6.51 AT)

Fig. 16 Vector distribution of magnetic flux of only Z-direction at search coil vicinity (X = 9.5 mm, $B_{z\max} = 9.1 \times 10^{-4}$ T)

示したものをFig. 16 (Fig. 9の拡大図)に示す。図より、検出コイル断面内でZ方向磁束の強弱が生じていることがわかる。通常の検出コイルは、そのすべての巻き数において断面積が同じであるので、検出コイル断面内の磁束の強弱の平均値が検出される。一方、プレーナー検出コイルの場合、磁束の強弱を各ターンごとに検出するので、検出コイル中心部に近づくにつれ重みがかかった検出が行なわれる。そのため、欠陥近傍の磁界の強弱をより高感度に検出することができるコイルであると考えられる。

6. 結 言

本研究で得られた結果を以下にまとめて示す。

- (1) 励磁コイルと渦巻状プレーナー検出コイルで構成された渦電流探傷プローブは、検査対象が非磁性体の平板材の場合、表面欠陥両端部では導体内に渦電流が集中し、印加磁束の導体への侵入が妨げられる。その結果、平板材に対して垂直方向(Z方向)磁束が表面欠陥の両端部で発生し、それを検出することで探傷が行なえることがわかった。
- (2) 渦巻状プレーナー検出コイルは1ターンごとの出力電圧を評価することで、コイル全体の出力信号の解析が行なえることを、検証実験との比較から明らかにした。
- (3) 渦巻状プレーナー検出コイルは、外径や厚みが等しく、巻き数も同じ通常の検出コイルよりも検出感度が優れていることがわかった。

なお、本検査プローブの励磁コイルおよび渦巻状プレーナー検出コイルの最適形状は今後の研究課題とする。

謝辞 本研究の実施にあたり、ご協力いただきました北斗電子工業株式会社、技術顧問の廣島龍夫様に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) N.J. Goldfine: Magnetometers for improved materials characterization in aerospace applications, *Materials Evaluation*, **51-3**, 396/405 (1993)
- 2) R.C. McMaster, P. McIntire and M.L. Mester: *Electromagnetic Testing, Nondestructive Testing Handbook*, **5**, 3rd edition, The American Society for Nondestructive Testing (2004)
- 3) 星川, 小山, 柄澤: リフトオフ雑音が発生しない渦流探傷用新型上置プローブに関する研究, 非破壊検査, **50-11**, 736/742 (2001)
- 4) 小山, 星川: 渦流探傷試験における一様渦電流プローブの基礎的特性に関する研究, 非破壊検査, **49-11**, 775/781 (2000)
- 5) 塚田, 鈴間: 直方体形状タンジェンシャルコイルによる鋼板の磁気/渦電流探傷について, 第18回表面探傷シンポジウム講演論文集, 41/46 (2015)
- 6) D.L. Atherton: Remote field eddy Current inspection, *IEEE Trans. on Magn.*, **31-6**, 4142/4147 (1995)
- 7) 廣島龍夫: 新しい磁束検出型上置プローブについて (1)—タンジェンシャル型励磁コイルを用いたプローブ—, 第10回表面探傷シンポジウム講演論文集, 136/139 (2007)
- 8) 廣島龍夫: 立方体励磁コイルを用いた磁束検出型上置プローブのきず検出特性, 第14回表面探傷シンポジウム講演論文集, 62/65 (2011)
- 9) 鈴間, 中尾, 阪本, 太田, 坂本: 重畳磁界回転法による強磁性

材料の全方向割れきず検出手法について，第 16 回表面探傷シンポジウム講演論文集，79/84 (2013)

- 10) 子安，山下，廣島：U 字コアとプレーナー検出コイルを用いた高感度プローブの開発，第 16 回表面探傷シンポジウム講演論文集，95/98 (2013)
- 11) 渡部，奥本，後藤，廣島：ドリル孔の Q プローブの特性に関する FEM 解析，非破壊検査に関する研究発表会講演概要集，25/28 (2013)
- 12) 子安，山下，渡部，廣島：立方体励磁コイルを用いた上置プローブと U 字コアを用いた上置プローブの特性比較，JSNDI 平成 25 年度秋季講演大会講演概要集，89/90 (2013)
- 13) 廣島，子安，山下，渡部：立方体励磁コイルを用いた上置プローブと U 字コアを用いた上置プローブの特性比較 2，第 17 回表面探傷シンポジウム講演論文集，13/16 (2014)
- 14) 廣島，子安，山下，渡部：磁束検出型渦電流探傷用プローブの比較検討励磁磁束形態による特性について，第 17 回表面探傷シンポジウム講演論文集，27/30 (2014)
- 15) 高橋則雄：磁界系有限要素法を用いた最適化，森北出版 (2001)

.....

[著 者 紹 介]

元 安 雄 大

2015 年，大分大学大学院工学研究科機械・エネルギーシステム工学専攻，現在に至る．電磁気を応用した渦電流探傷試験法 (ECT) の研究を行なう．

後 藤 雄 治 (正会員)

1998 年，職業能力開発大学校研究課程工学研究科電気・情報専攻修了．同年，中国職業能力開発大学校電子技術科講師，2003 年，青森職業能力開発短期大学校電子技術科講師，2004 年，久留米工業高等専門学校電気電子工学科助手，2007 年，大分大学工学部機械・エネルギーシステム工学科准教授，現在に至る．電磁現象を利用した非破壊検査の研究に従事 (博士 (工学)，岡山大学)．

.....