

周波数掃引渦電流試験および周波数応答特性解析 による金属板厚評価

Thickness Measurement of Metal Plates Using Swept-Frequency Eddy Current Testing and Spectral Analysis

(一財) 発電設備技術検査協会 程 衛英 Weiyang CHENG Member

Abstract. Swept-frequency eddy current testing is applied to measure a metal plate's thickness. The swept-frequency eddy current testing signals are normalized and spectral analysis was conducted on the normalized impedances. Theoretical and experimental studies show that the extreme value of the normalized impedance is correlated with the plate thickness. The thickness of a non-magnetic plate can be measured by SFECT and spectral analysis on the normalized impedance even without knowing the conductivity of the test object.

Keywords: swept-frequency eddy current testing, thickness measurement, phase, spectral analysis

1. 諸言

渦電流検査 (ECT) は、導電性金属構造物の損傷検出・評価に最も一般的に使われる非破壊検査法の一つである。ECT 信号は、損傷の形態、被検体の電磁気特性、試験条件などの諸要素によって変化する。試験条件であるプローブの寸法、試験周波数、励磁強度などが一般に把握可能だが、現場にある被検体の材質、あるいはその導電率や透磁率などの電磁気特性の事前把握は困難である。例えば材質が把握できて、その電磁気特性がハンドブックから得られるでも、その値はメーカー、製造プロセスなどによって異なることがあり、また、長期的な稼働や経年劣化等によって変化することもあり得る。すなわち、事前に現場にある被検構造物の電気伝導率および透磁率の正確な値を把握することは困難である。被検体の電磁気特性が不明である場合、欠陥の寸法や肉厚の変化等の定量化は不可能である。また、現場に使われているマスターカーブによる欠陥評価法においてすべての検査対象に適用できるマスターカーブの作成はほぼ不可能である。このような状況において、一番望ましい損傷評価法は導電率および透磁率に依存せず、導電率および透磁率を知らなくても損傷定量化可能なものである。次の選択肢は、現場で被検体の電磁気特性を簡単かつ非破壊的に測定できるものである。

本研究は周波数掃引渦電流試験 (SFECT:

連絡先: 〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町 14-1、(一財) 発電設備技術検査協会、溶接・非破壊検査技術センター
E-mail: cheng-weiyang@japeic.or.jp

Swept-frequency eddy current testing) および周波数応答特性解析を用いて、非磁性導電金属構造材の減肉評価を目的とする導電率に依存しない金属板厚評価法を構築する。

2. 周波数掃引渦電流試験および周波数応答特性解析

通常の渦電流試験では、単一あるいは複数の周波数を有する励磁電流を用いて測定を行う。渦電流の浸透深さは励磁周波数や材料の電磁気特性に左右されるため、被検体の電磁気特性が不明な場合、最適な試験周波数の設定は不可能である。周波数掃引渦電流試験は、励磁電流がある周波数範囲内に掃引して測定を行うため、最適周波数の設定は不要である。

ここではパンケーキ状の空心コイルを用いて、周波数掃引渦電流試験の信号であるコイルインピーダンスおよびその周波数応答特性を分析する。

図 1 は試験の概念図である。仮定の被検体は表面が十分大きく、厚さが d の導電性板である。被検体の電磁気特性は均一で、透磁率と導電率はそれぞれ μ と σ である。

パンケーキコイルの内外半径はそれぞれ r_1 、 r_2 、高さは $z_2 - z_1$ である。コイル底面と被検体表面の間隔は z_1 である。

[1] によって、コイル自身のインピーダンス、すなわ

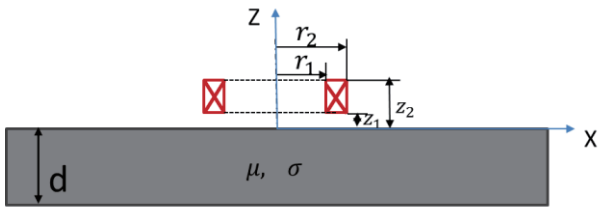


Fig. 1 Schematic of SPECT of a planar plate

ち、コイルが空气中に置かれるときのインピーダンス Z_0 、と検査コイルが試験片上に置かれたときのインピーダンスの変化量 ΔZ は以下の式で計算できる。

$$Z_0 = R_0 + jX_0 = R_0 + j\omega L_0 = j2\pi\omega\mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \frac{\chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} [\lambda_0(z_2 - z_1) + e^{-\lambda_0(z_2 - z_1)} - 1] d\lambda_0 \quad (1)$$

$$\Delta Z = \Delta R + j\Delta X = \Delta R + j\omega\Delta L = j2\pi\omega\mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \frac{\chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} (e^{-\lambda_0 z_1} - e^{-\lambda_0 z_2})^2 R(\lambda_0) d\lambda_0 \quad (2)$$

式(2)中の $R(\lambda_0)$ は試験体の形態（電磁気特性や幾何形状など）を反映する reflection coefficient である。ここで、

$$\lambda_1 = \sqrt{\lambda_0^2 + j\omega\mu_0\mu_r\sigma}, \quad \mu_r \text{ は比透磁率である} \\ (\mu_r = \mu/\mu_0)。$$

コイルが試験体上に置かれるときのインピーダンスはコイル自身のインピーダンスとインピーダンス変化量の和である。

$$Z = Z_0 + \Delta Z = R + jX \quad (3)$$

Z_0 、 ΔZ はともに励磁周波数に比例しており、測定信号であるインピーダンス Z は励磁周波数によって変化する。下記のインピーダンス正規化によって、インピーダンスを同じスケールに変換させ、同じスケールで各周波数の信号を分析する。

$$Z_{nor} = \frac{Z}{Z_0} = \frac{\Delta R + j\omega\Delta L + j\omega L_0}{\omega L_0} = \frac{\Delta Z}{\omega L_0} + j. \quad (4)$$

Z_{nor} は正規化インピーダンスであり、

$$\frac{\Delta Z}{\omega L_0} = \frac{j\pi\omega\mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \frac{\chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} (e^{-\lambda_0 z_1} - e^{-\lambda_0 z_2})^2 R(\lambda_0) d\lambda_0}{j2\pi\omega\mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \frac{\chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} [\lambda_0(z_2 - z_1) + e^{-\lambda_0(z_2 - z_1)} - 1] d\lambda_0} \quad (5)$$

である。

被検体为非磁性である場合、比透磁率 μ_r は 1 である。

λ_1 の式および式(4)、(5)は非磁性被検体の正規化インピーダンス Z_{nor} が導電率と周波数の積である σf の関数であることを示した。 Z_{nor} の実数成分や虚数成分、位相も同様である。同じ厚みの非磁性板において、 σf が同じであれば、 Z_{nor} やその位相は同じである。以下では、この‘同等’さを利用して板厚評価を行う。

2.1 理論解析

まず、(1) ~ (5) の理論式を用いて、パンケーキコイルを用いた SPECT 試験を解析する。解析対象は表面が十分大きい非磁性被検体であり、導電率がそれぞれ 4.1MS/m、8.2MS/m および 37MS/m であるとし、厚さは 1~6mm の 1mm 間隔で変化させる。パンケーキコイルの内半径はそれぞれ 8mm、10mm とし、コイル高さは 3mm、リフトオフは 1mm である。解析用周波数は 1、2、5、10、20、30、40、50、100、200、1k、2k、3k、4k、6k、8k、10k、20k、40k、60k、80k、100k、200k、400k、600kHz である。

以上の諸パラメータを用いて各導電率、厚みの試験体の SPECT インピーダンスおよびその正規化インピーダンスを計算した。Fig. 2 は導電率が 4.1MS/m の各肉厚試験体の正規化インピーダンスである。また、各正規化インピーダンスの位相を計算し、 σf による位相変化を Fig. 3 に示す。一定の板厚において、ある σf の値で最大位相が現れることを示した。

各導電率、板厚の試験体の正規化 SPECT インピーダンスの位相を抽出して、最大位相 θ_{max} と板厚の関係を Fig. 4 にプロットした。導電率に依存せず正規化インピーダンスの最大位相と板厚に特定の関係があることが示された。正規化インピーダンスの最大位相は非磁性導電性板の板

厚評価に適する物理量であることを示した。

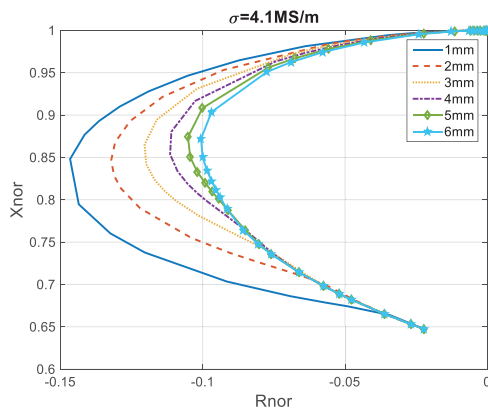


Fig. 2 Normalized impedance of plates whose conductivity is 4.1MS/m.

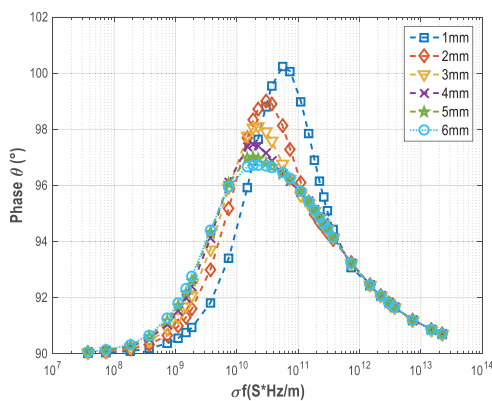


Fig. 3 Change of the phases of normalized impedances with σf (the conductivity is 4.1MS/m)

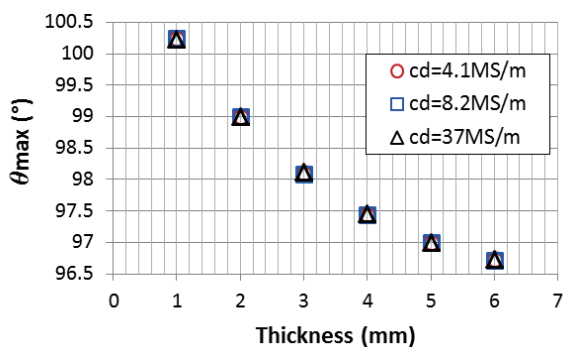


Fig. 4 Change of the maximum phase with plate thickness (cd: conductivity).

2.2 基礎試験

空心パンケーキコイルと LCR メーターを用いて基礎試験を行い、以上の SFECT および周波数特性応答解析による非磁性導電性板の板厚測定の適用性を確認する。

試験体は 150 mm X150 mm Xd (d=0.5mm, 1mm, 2mm) のアルミニウム板、150 mm X150 mm Xd (d=3mm, 4mm, 5mm, 6mm) のアルミニウム合金板、150 mm X150 mm Xd (d=1, 2, 3, 4, 5, 6mm) の SUS304 板および 100 mm X100 mmXd (d=3, 4, 6mm) の SUS304 板である。これらの全ての試験体の導電率は未知である。パンケーキコイルの内外半径はそれぞれ 5mm と 8mm であり、コイルの高さは 2mm である。LCR メータ (HIOKI IM3536) を 4Hz ~200kHz 周波数帯域内対数スケールの 100 ポイント等間隔で掃引すると設定した。励磁電流は 5mA 正弦波定電流である。

まず、コイルを空气中に置き、コイル自身の SFECT インピーダンス Z_0 を測定した。その後、コイルを各試験体上に置き、SFECT インピーダンス Z を測定した。コイルのリフトオフは 0.5 mm である。Fig. 5 にコイルが空気中およびアルミニウム板やアルミニウム合金板上に置きときのインピーダンスを示す。実のコイルの抵抗は 0 ではない、また、インピーダンスが周波数の変化によって大きく変化することを示した。厚さ 2mm 以上の板は SFECT インピーダンス (Fig. 5) によりほぼ識別不可能である。

Fig. 6 に正規化インピーダンスを示す。各板厚試験片の正規化インピーダンスはインピーダンスより区別しやすいである。すなわち、正規化インピーダンスは板厚評価に適する。

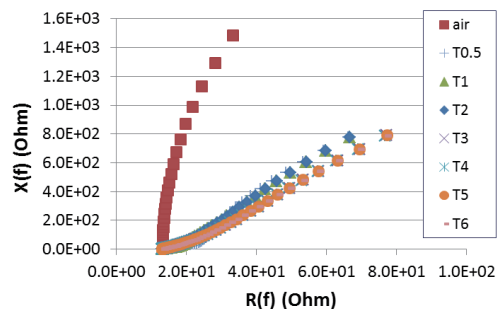


Fig. 5 SFECT impedances of Aluminum or Aluminum alloy plates (air: in the air; T: thickness ; number: thickness in mm).

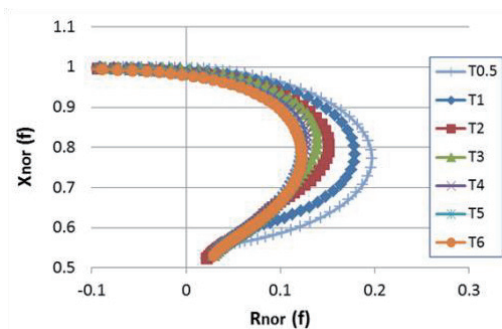


Fig. 6 Normalized impedance of SFECT on Aluminum and Aluminum alloy plates.

さらに、各正規化インピーダンスの位相を計算し、その最小位相を抽出した。アルミニウム板、アルミニウム合金板の正規化インピーダンスの最小位相と板厚の関係を Fig. 7 にプロットした。ここでは、アルミニウムおよびアルミニウム合金は板厚既知の参照試験体とし、それらの最小位相と板厚の関係からマスターカーブを構築した。

最後、SUS304 板を対象に同じ SFECT 測定試験を行った。同様の手順で正規化インピーダンス計算し、正規化インピーダンスの周波数応答解析を行い、最小位相を抽出した。各板に対応する最小位相も Fig. 7 にプロットした。同じ板厚において、SUS304 板の最小位相がアルミニウムやアルミニウム合金板とほぼ同じであることを示した。すなわち、導電率の違いにかかわらず、同じ板厚にはほぼ同じ最小位相に対応する。厚さ不明の試験体の SFECT 信号の最小位相をマスターカーブ上の最小位相の比較によって、板厚推定可能である。なお、マスターカーブを構築する試験体や板厚を求める試験体の導電率は必ず必要ではない。

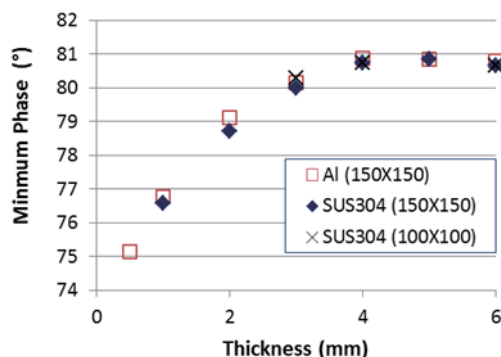


Fig. 7 Change of the minimum phase with plate thickness (Al: Aluminum or Aluminum alloy; unit: mm)

以上の理論分析および基礎試験では、非磁性導電性板の厚さは、周波数掃引渦電流試験および周波数応答特性解析によって測定・評価可能であることを示した。

3. まとめ

本研究では、理論分析、シミュレーション解析、基礎試験を用いて、周波数掃引渦電流試験法で得られた正規化インピーダンスの周波数応答解析によって、試験体の電磁気特性に依存しない導電性金属板の厚さ評価法を構築した。

非磁性導電性板の正規化 SFECT インピーダンスは導電率と周波数の積の関数であり、その位相の極値は板厚と特有の関係がある。この関係は被検体の導電率に依存しない。マスターカーブを構築した試験体や被検体の導電率が知らなくとも、マスターカーブ上の位相との比較によって非磁性導電板の板厚を評価可能である。

参考文献

- [1] T. P. Theodoulidis, E. E. Kriezis, *Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation)*, USA: Tech Science Press, 1st Ed. 2006.