

共振型 ECT センサによる金属中欠損の一可視化法

A Method of Defect Visualization in the Metallic Materials

by Resonance Type ECT Sensor

細原 隆史¹⁾ 齋藤 兆古¹⁾

Takafumi Hosohara, Yoshifuru Saito

¹⁾ 法政大学工学研究科電気工学専攻

ECT (eddy current testing) is extensively used to inspect such as elevator, escalator, and airplane, nuclear electric and power plant without any destruction. This paper proposes a method of resonance type ECT sensor system which makes it possible to detect the defect of metallic plate. Operating principle of this system is based on the essential nature of parallel resonant electrical circuit. When the primary coil is working as a sensing part and the secondary coil, i.e. a target metallic material, is magnetically coupled with the primary coil, the primary resonance frequency and impedance of the ECT sensor system greatly depend on the secondary impedance change caused by a defect such as cracks.

By means of a simple eddy current property, we have tried to visualize the capacitance arisen in cracks of which the traditional ECT sensor system neglects this capacitance effect. Even though more precise experimentally proof is necessarily, we have succeeded in visualizing a crack effect in the target thin metallic materials.

Keywords : ECT sensor, Resonance type, Defect visualization, Defect capacitance

1. はじめに

エレベータやエスカレータ、さらに航空機などの構造を支え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。金属の非破壊検査として、渦電流(ECT)による方法は検査対象と直接接触の必要がなく、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金属中の欠損を探知できない問題もあるが、非接触で探査可能であり他の非破壊検査法に比較して有利な特性を有する¹⁾。

本論文で取り上げる共振型 ECT センサ系は励磁コイルの並列共振周波数とインピーダンスが磁氣的に結合する検査対象金属の状態に依存して変化することを利用してしている。すなわち、励磁コイルの入力端から見た共振条件が励磁コイルと磁氣的に結合する検査対象中のクラックなどの欠損を反映することを利用したセンサ系である。

本論文では、共振型 ECT センサによる金属板中の欠損を可視化することで共振型 ECT の有効性を示す。

2. 共振型 ECT センサ

2.1 動作原理

共振型 ECT センサの原理を述べる。Fig.1 に示すセンサーコイルで、(a)コイル単独のインピーダンス $|Z|$ と位相 ϕ の周波数特性を測定する。次に、(b)コイル下に平行金属板を設置して、コイルのインピーダンス $|Z|$ と位相 ϕ の周波数特性を測定する。さらに、(c)コイル下に 1mm の空隙がある金属板を設置して、コイルのインピーダンス $|Z|$ と位相 ϕ の周波数特性を測定する。

Fig.2 にインピーダンス $|Z|$ および位相 ϕ の周波数特性を示す。最も共振時のインピーダンスが大きく共振周波数が低い場合はコイル単体時(1)であり、最も共振時のインピーダンスが小さく共振周波数が高

いは場合はコイルが金属板に面している場合(2)である。金属板に空隙が有る場合(3)の共振時のインピーダンスと共振周波数は両者間に位置する値となる。

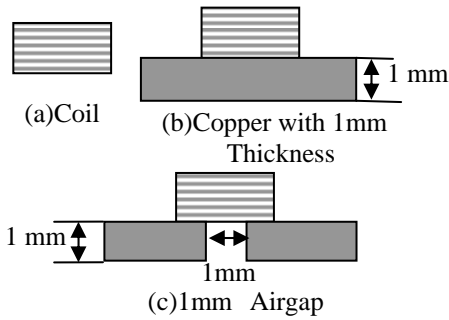


Fig.1 Tested Coil and Measurements.

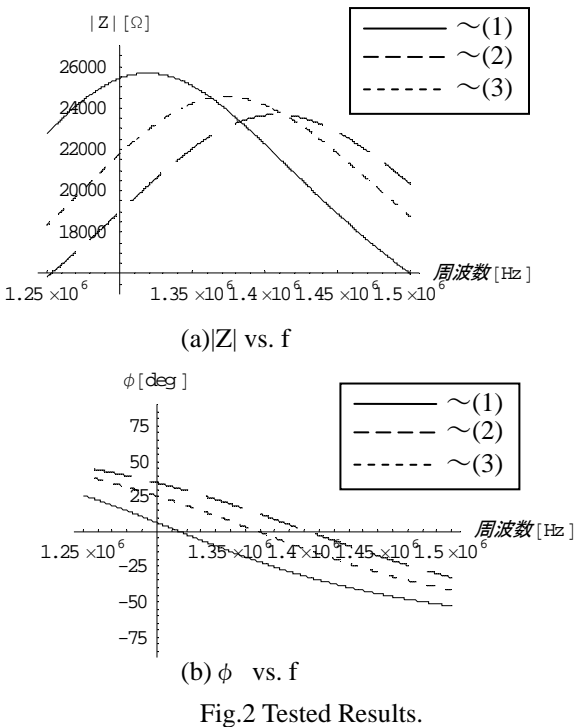


Fig.2 Tested Results.

2. 2 欠損の可視化

Table 1 に測定に用いた有限長ソレノイド型試作センサの諸定数を示す。実験は Fig.3 に示す銅板の欠損を共振時のインピーダンス|Z|と位相φを用いて可視化する。

Fig.4 は、共振型 ECT を用いて銅板の欠損を可視化した結果である。実際の欠損は縦 1cm×横 5mm であるが、インピーダンス|Z|、位相φのいずれの結果においても約 2 倍近く大きな輪郭のイメージとなった。ここで、Fig.4 のコントラストに対応するパラメータであるインピーダンスと位相の変化率は、式(1)で計算した。さらに、測定点数は 2.5mm 間隔で縦横共に 11 点とした。

$$\text{変化率} = \frac{\text{測定値} - \text{基準値}}{\text{基準値}} \times 100\% \quad (1)$$

Table 1 Various constants of a tested sensor coil.

巻数	500[回]
外径	10[mm]
内径	5[mm]
長さ	10[mm]
巻線径	0.2[mm]

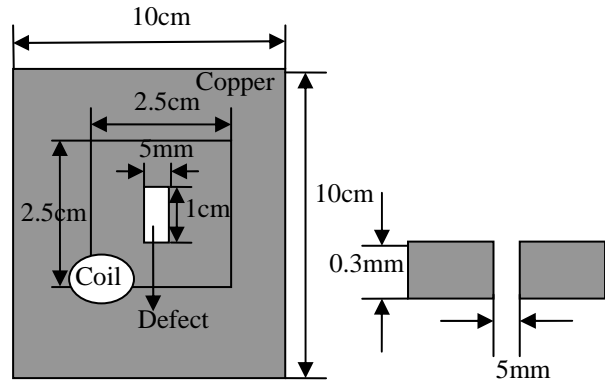
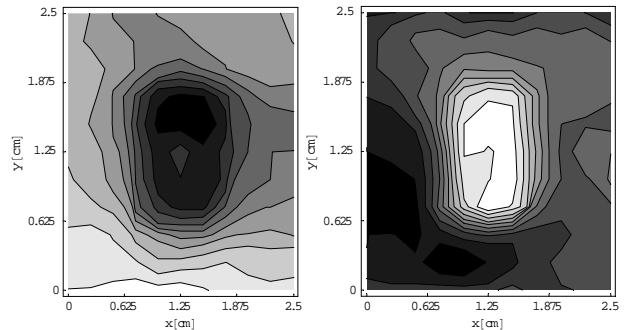


Fig.3 Tested target copper sheet with rectangular defect.



(a)Frequency (b)Impedance

Fig.4 Visualized defect of resonance type ECT.

3. 欠損中のキャパシタンスの測定

3. 1 欠損に起因するキャパシタンス

本論文は被検査対象中の欠損、特にひび割れなどのクラックが持つキャパシタンスを励磁コイルの入力インピーダンスから感知可能か否かを吟味する。通常、ECT の数値解析では被検査対象中の欠損に起因するキャパシタンスが無視出来ると仮定する。ECT センサ系を数値解析する場合、クラックは「面積を有するが距離が無限に小さい部分」としてモデル化される。しかし、これをキャパシタンスで考え

れば、クラック中に空気しか存在しないと考えると、無限大のキャパシタンスを意味することに他ならない。このキャパシタンスが無視出来る根拠が理解出来ない。

本論文はクラックに起因するキャパシタンスを吟味する一方法として、励磁コイルの入力インピーダンスが最大遅れ位相を取る周波数を測定する。具体的には、Fig.5の丸で囲まれる部分に存在する位相遅れが最大となる周波数の測定である。この考え方は、誘導性リアクタンスの大きさを削減する要素を単純に直列に接続されたキャパシタンスと仮定したことを意味する。

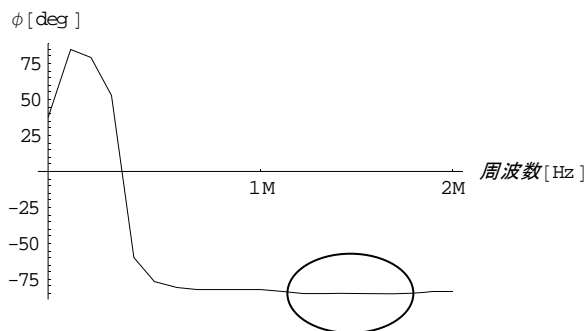


Fig.5 Frequency characteristic of phase.

3. 2 検証実験

Table 2 に測定に用いた有限長ソレノイド型試作センサの諸定数を示す。Fig.6 はスリット状の欠損を持つ厚さ 0.1mm の銅板である。実験は、Fig.6 に示すように平均径 40mm のセンサコイルを左方から 5mm 間隔で右方へ動かし、励磁コイルの入力インピーダンスで位相遅れが最大となる周波数を測定した。

Fig.7 が実験結果である。明らかに Fig.7 の結果は、スリット状欠損のキャパシタンスが無視出来ないか、若しくは渦電流分布モードの劇的な変化が存在することを意味する。被検査対象中を渦電流は励磁電流と逆方向の影像電流となって流れる。しかし、被検査対象にクラックが有り、このクラックが理論上のモデルから想定される無限大のキャパシタンスを持てば、励磁コイルの入力インピーダンスで位相遅れが最大となる周波数は、励磁コイル径とクラック長の関係を示唆する Fig.7 のような結果を与えるとは考えられない。

励磁コイル半径よりも励磁コイル内へ浅くクラックが進入した場合、渦電流はクラックを迂回した経路を取る。そのため、見かけ上、被検査対象の電気抵抗の増加を促し、結果として励磁コイルの入力イ

ンピーダンスで位相遅れが最大となる周波数の増加へ繋がる。

しかし、励磁コイル半径よりも励磁コイル内へ深くクラックが進入すると、渦電流が迂回する経路のインピーダンスは大きくなり、クラックのキャパシタンスが無視出来ない値、若しくは渦電流の分布モードの劇的な変化となる。すなわち、クラックのキャパシタンスへ渦電流が分流するか、若しくは渦電流の分布モード(渦電流の経路)が劇的に変化する。この状態遷移が起こる位置はクラックが励磁コイルの中心近傍に達した点と考えられる。または、Fig.7 から、この点を中心として何らかの共振現象が存在するのかも知れない。

励磁コイルの両端がスリット状欠損に跨ると、渦電流は必ずクラックのキャパシタンスを通過するか、若しくは渦電流(経路)分布モードが完全に固定化する。一般に、キャパシタンスの入力インピーダンスは周波数に反比例するから、この条件以上にクラックのキャパシタンスの効果、若しくは渦電流分布モードの変化を励磁コイルの入力インピーダンスから感知するのは困難である。

Table 2 Various constants of a tested sensor coil.

巻数	200[回]
外径	45[mm]
内径	35[mm]
長さ	10[mm]
巻線径	0.4[mm]

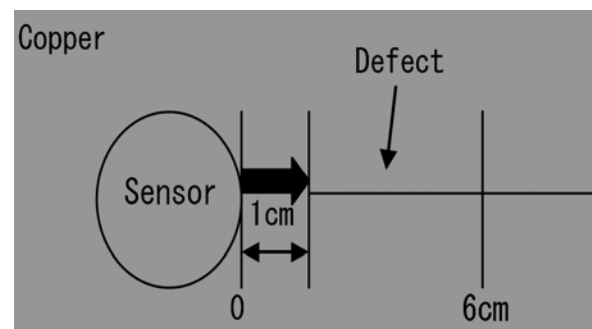


Fig.6 Schematic diagram of experiment.

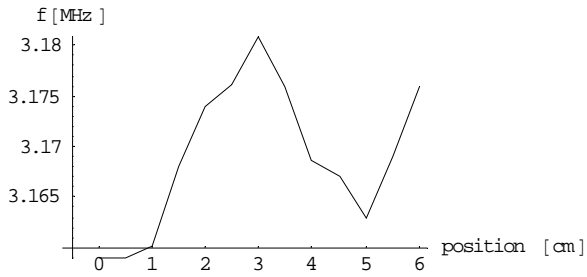


Fig.7 Position versus frequency taking maximum phase lag.

4. まとめ

本論文では欠損部に生じるキャパシタンスの可視化を試みた。その結果、欠損部に生じるキャパシタンスの影響を可視化できたのか否かは確認出来なかった。これは、測定対象とした入力インピーダンスで位相遅れが最大となる周波数が欠損のキャパシタンスのみならず渦電流の分布モード（渦電流の流れる経路）によって変わるためである。

従って、今後の課題として更なる実験的検証や解析的検証を行う必要がある。

参考文献

- [1]佐藤庸平，早野誠治，齋藤兆古，堀井清之，“三相交流磁気センサの高度化と薄板状金属の欠損可視化”，可視化情報学会誌，Vol. 25, No. 1, pp. 185-188，(2005).
- [2]細原隆史，齋藤兆古，堀井清之，“共振型 ECT センサによる金属欠損の可視化，2009 年 7 月，P01-006.