

共振型 ECT センサの実装

An Implementation of Resonant ECT Sensor

奥田和哉

Kazuya OKUDA

指導教員 齊藤兆古

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

This paper describes the resonant connection for constructing a resonant circuit without any external capacitor. Resonance connection is an ingenious circuit connection which makes it possible to utilize the line to line capacitor and inductance for resonance not requiring any additional external capacitors. In this paper, we try to develop a resonance type eddy current sensor using a resonant connection.

As a result, good results have been obtained.

Key Words : Eddy current testing, Non-destructive testing, Resonant connection

1. はじめに

現代の文明社会を支えるのは人類の叡智が創造した多くの文明の利器である。例えば、高速な移動手段を提供する高速鉄道、自動車、航空機、そして電力生成・システムシステム、照明システム、セキュリティシステムなど、いわゆる産業プロダクトから鉄橋、大型ビルや高速道路などの社会的インフラストラクチャまで広汎で多岐に渡る文明の利器が存在し、人類の文明生活を支えているのは自明であろう。

これら産業プロダクトの構造を支える金属材料の非破壊検査は、高度な健全性や信頼性・安全性を確保するために極めて重要な技術である。金属の非破壊検査法として、超音波、放射線、電気抵抗、渦電流などを利用した方法が用いられている。この中で、超音波による金属の非破壊検査は精度が良く信頼性も高い反面、振動子を検査対象に接触させる必要がある。この意味では電気抵抗測定による非破壊検査も直接接点の必要性がある。放射線による方法は、安全性の観点から放射線の取り扱いに一定の基準が課されているため、使用上に制約がともなう。

金属の非破壊検査として、渦電流探傷法(Eddy Current Testing, 以後 ECT と略記)による方法は検査対象と直接接点の必要がなく、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。しかしながらその汎用性は高く、非接触で探査が可能であるため、他の非破壊検査法と比較して有利な特性を有する[1-3]。

ECT の動作原理は比較的単純であり、大別して二方

法がある。一方は交番磁界を検査対象に照射することで被検査対象中に渦電流を発生させ、被検査対象中の欠損の有無による渦電流分布の相違を電源から見た入力インピーダンスの変化で感知する方法である。ここでは、この ECT 法をインピーダンス感知型と呼ぶ。インピーダンス感知型 ECT の特徴は励磁コイルがセンサも兼ねる点にあり、構造が簡単で安価である。他方は、被検査対象中の欠損の有無に起因する渦電流分布の相違が喚起する漏れ磁束の変化を感知する励磁コイル以外の検出コイルを備えた励磁・検出コイル分離型である。励磁・検出コイル分離型 ECT は検出コイルの配置に自由度があり、インピーダンス感知型に比較して高感度とされているが、検出コイルの構造や設置場所など多くの経験的習熟度を必要とする。

本研究は共振結線を用いた ECT センサの感度向上について述べるものである。本稿では、巻線間の浮遊容量を利用した共振型渦電流センサ開発を試み、非共振型と比較して良好な結果が期待できることを報告する[3-5]。

2. ECT センサ

(1) ECT センサの動作原理

Fig.1(a)に示す有限長ソレノイドコイルを ECT センサとする。このセンサに欠損のない検査対象の導体板を設置したものが Fig.1(b)である。このセンサのコイルに交流電流を通電するとファラデーの法則により交番磁界が発生し渦電流が導体板に喚起される。センサの入力インピーダンスを測定することで、導体板に欠損

がない場合(Fig.1 (b))と欠損がある場合(Fig.1(c))との違いを判断することができる。これは、従来の単相変圧器において電源端子から見た二次側インピーダンスの変化を検知していることと同じ原理である。したがって、有限長ソレノイドコイルが導電性材料の欠陥を検知できることがわかる。これが ECT の基本的な動作原理である。この動作原理に基づくセンサをインピーダンス感知型 ECT と呼ぶこととする。

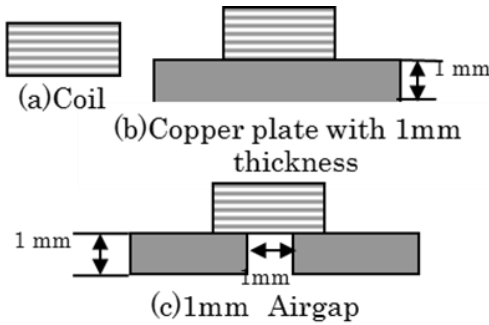


Fig.1 Tested coil and the measurement conditions.

(2) ECT コイルの共振現象及び駆動周波数

コイルに電流を流すことによりコイル周辺に磁界が発生する、このため ECT コイルは誘導性インピーダンス特性を持つ。しかし、ECT を構成するコイルの線間にキャパシタンスが存在するため、有限長ソレノイドコイルは Fig.2 に示すように共振現象を呈する。Fig.2 は周波数 f に対するインピーダンス $|Z|$ の特性である。

ECT の検査対象に対する感度および磁束の浸透深さは駆動周波数に対する依存性が極めて大きい。このため、ECT の駆動周波数は ECT 感度向上に最も重要な要素となる。理論上、ECT の駆動周波数は検査対象の導電率および表皮浸透深さを考慮に入れることで決定することができる。しかし多くの場合、最終的な駆動周波数は、過去の経験や実地試験によって決定される。

従来、筆者はセンサコイルを検査対象に欠損がない部分に位置した場合の共振周波数をセンサ駆動周波数としてきたが、本論文で注目すべき点は Fig.2 に示す周波数特性の頂点ではなく中腹にある。周波数特性の頂点、すなわち共振周波数を駆動周波数として扱う場合、感度の向上は望めるが共振周波数ただ一点のみでの測定となるため使い難い[2,5]。このことから、感度は低下するが、共振周波数近傍の駆動周波数を選択する方式が実用的である。

大多数の ECT センサでは、駆動周波数が 256kHz や 512kHz に設定されている。Fig.2 に示す周波数特性のように、駆動周波数が 256kHz の場合と共振周波数の場合では、インピーダンスの偏差 ΔZ_1 は共振周波数の偏差 ΔZ_2 より小さい。駆動周波数の自由度を得るために共振周波数以外の周波数で駆動する場合は、どのようにして共振周波数を駆動周波数 256kHz へ近づける

かが大きなポイントとなる。

本研究では、外付けコンデンサを用いずにコイル間の浮遊容量を巧みに用いることで共振周波数を低減させる方法を提案する。

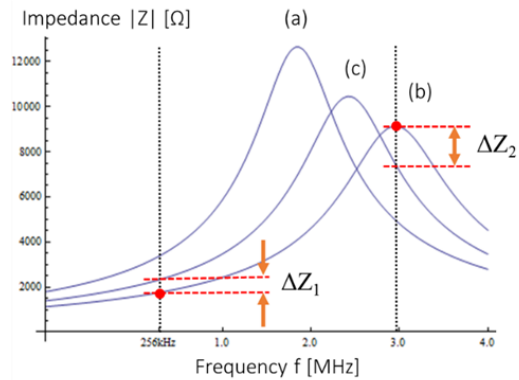


Fig.2 Frequency characteristics of the ECT probes.

3. 共振型 ECT センサ

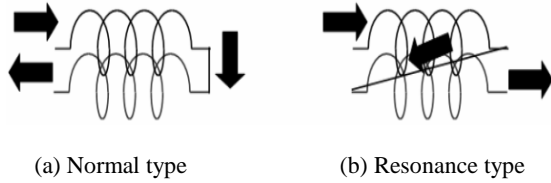
(1) 共振結線の導入

インピーダンス感知型 ECT の高感度化技術に関する一方法を考える。インピーダンス感知型 ECT は単純な有限長ソレノイド型コイルで大部分が作られる。ここでは、ECT そのものの幾何学的形状や機械的構造の変更でなく、ECT の本質的に有する電気的特性、すなわち、共振を利用した高感度化を考える。

ECT の持つ本質的で固有の電気的性質は共振現象である。単純な有限長ソレノイド型コイルはコイル間に浮遊容量が存在するため、交流電流を通電すると磁界のみならずコイル間に電界が発生し、通電電流の周波数を変更すると磁気エネルギーと電界エネルギーが拮抗し共振現象を呈する。

電気的な共振現象には入力インピーダンスが最小となる直列共振と最大となる並列共振がある。有限長ソレノイド型コイルの結線を変更することでコイル間電圧を制御しコイル間の浮遊容量を大きくすることを考える。ここでは入力インピーダンスが最大となる並列共振を利用して、インピーダンス感知型 ECT の高感度化を試みる。

共振結線型 ECT はコイル間の浮遊容量を大きくするために従来の ECT の結線方法を変更する。Fig.3 は通常と共振型結線との巻線法の相違を示す。共振型結線は、導線間の面する部分を平均的に均一化するため、Fig.4 に示すように 2 導線をツイストする。ツイストすることで Fig.3(b)の共振結線の巻線に比較して導線間の距離が均一化されキャパシタンスの効果が ECT コイル全般に渡って同等化される。これはいわゆるリッツ線の考え方と同じである。2 導線をツイストした結果、共振時の尖鋭度 Q 値が向上し、ECT センサの感度が向上する[3,4]。



(a) Normal type (b) Resonance type
Fig.3 Comparison of the normal and resonant coil connections.



Fig. 4 Example of a pair of twisted coils

共振結線型 ECT はセンサコイルを検査対象に欠損がない部分に位置した場合の共振周波数をセンサ駆動周波数とする。この場合、ECT センサの入力インピーダンスは Fig.2 のように最大値を取る。検査対象に欠損や物性的変化があると共振条件が崩れ、入力端子から見たインピーダンスは共振時よりも絶対値が減少する。したがって、検査対象が健全な場合と欠損がある場合でインピーダンスの変化が最大となる。

ECT センサコイルの感度を示す変化率 ϵ を

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

と定義する。ここで、式(1)の測定値と基準値はそれぞれ検査対象が健全な場合と欠損がある場合の ECT センサの入力インピーダンスである。

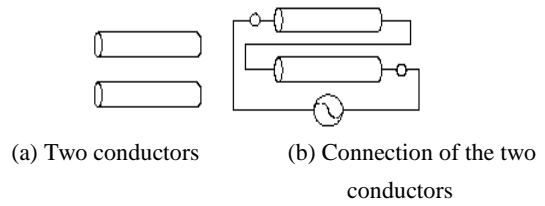
式(1)の変化率は、式(2)で定義される尖鋭度 Q に依存する。

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (2)$$

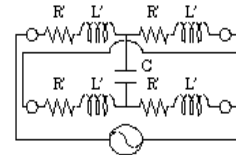
ここで f_0 と Δf は、それぞれ共振周波数と帯域幅である。

尖鋭度 Q はインピーダンスの周波数特性がもつ共振曲線の急峻度合いを表す。すなわち、式(2)の尖鋭度 Q が高い場合、式(1)の変化率 ϵ が向上することを意味する[6]。

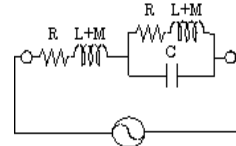
Fig.5 に示す共振結線型 ECT の構造は前述したように比較的簡単である。Fig.5(a)は 2 本の導線、5(b)はそれら 2 本の導線を共振結線したものである。図中の記号 R, L, M, C はそれぞれ抵抗、自己インダクタンス、相互インダクタンス、キャパシタンスである。Fig.5(b)の 2 本の導体間のキャパシタンス C を仮定し、Fig.5(c)の等価回路が導かれる。Fig.5(d)は、Fig.5(c)の回路を展開した等価回路である。



(a) Two conductors (b) Connection of the two conductors



(c) Equivalent electric circuit of the resonant coil connection.



(d) Modified equivalent circuit of the resonant coil connection.

Fig. 5 Principle of an ingenious resonant coil connection.

(2) 共振結線の共振周波数制御

共振型結線の一応用を提案する。線間浮遊容量の制御は、自然な共振現象を利用するための最良の方法である。Fig.5 の共振結線型は 2 個のコイル間の線間浮遊容量を利用する方法の一種である。共振結線を実装する場合、2 本の線と線との距離をどのように一定にするかということが非常に重要なキーポイントである。Fig.4 のようにコイルをツイストさせ、ツイストピッチを変更することによって共振周波数の制御を可能にする。

Table.1 に Fig.5(b)の結線で試作したソレノイド型の共振結線型 ECT の諸定数を示す。導線は直径 0.2mm、コイルの直径は 20mm、巻き数は 100turns である。

Table.1 Tested twist coils.

Twist pitch [turn/m]	Number of layers [layer]	Resonant frequency [kHz]
1470.6	1	309.0
1250.0	1	481.5
500.0	1	543.0
333.3	1	580.5
200.0	1	570.0
142.9	1	679.5
1470.6	2	233.5
500.0	2	173.0
333.3	2	181.5
200.0	2	180.0
142.9	2	252.5
1470.6	3	194.0
333.3	3	196.0

Table.1 の結果を用いて実験式を導出するために、共振周波数、ツイストピッチ、層数の関係を Fig.6 に示す。Fig.5 に示した x, y, z の座標系で、x, y, z はそれぞれ、ツイストピッチ、層数、共振周波数に対応する。

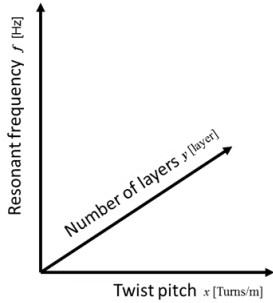


Fig.6 A x,y,z coordinate system, where x,y,z are corresponding to the twist pitch, number of layers and resonant frequency, respectively.

$$f = c_0 + a_1x + b_1y + a_2x^2 + b_2y^2 + c_{11}xy + a_3x^3 + c_{12}xy^2 + c_{21}x^2y \dots \quad (3)$$

式(3)のような実験式を考える。充分な数 m 個のデータが得られたとすれば、n 個の未知数は以下の最小自乗法で与えられる。

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \dots & x_1^{n-1}y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & \dots & x_2^{n-1}y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & \dots & x_3^{n-1}y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & \dots & x_4^{n-1}y_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_m & y_m & \dots & x_m^{n-1}y_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0 \\ a_1 \\ b_1 \\ \vdots \\ c_{m1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$m \gg n$,

$\mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}$,

$\mathbf{x} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{y}$,

ここで \mathbf{C} と \mathbf{C}^T はそれぞれシステム行列とその転置である。

Table.1 の結果が式(5)で表されると仮定する。

$$f = c_0 + a_1x + b_1y + a_2x^2 + b_2y^2 + c_1xy \quad (5)$$

試作コイルの数すなわち、共振周波数 f の数は 13 個、未知数は 6 個存在する。最小二乗法を用い未知数を求めた結果を式(6)に示す。

$$f = 1367.94 - 0.33453x + 0.0000283815x^2 - 874.771y + 0.116112xy + 156.323y^2 \quad (6)$$

Fig.7 に示すように、この実験式はツイストピッチと層数の関数として共振周波数の特性曲線を与える。

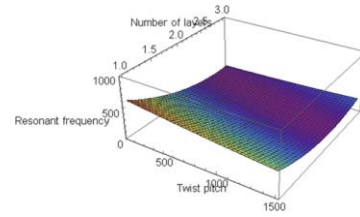


Fig.7 Design curves for the ingenious connection resonant circuit as a function of the twist pitch as well as number of layers.

Fig.7 より、ツイストピッチを多く、かつ層数を増やすほど共振周波数が低くなる傾向になる。Table.1 の試作ツイストコイルから、ツイスト 1 ピッチで進む距離は導線の円周に等しいときにキャパシタンスの効果が最大になり共振周波数が低減することが分かった。

コイル径が 0.2mm に制限されているにもかかわらず、所望の共振周波数が与えられたとき、図中の曲線からツイストピッチと層数の値を得ることができる。したがって、実験式(5)により共振型 ECT センサの共振周波数を制御可能となる。

4. 共振型と非共振型の比較

(1) インピーダンス感知型 ECT センサ


強磁性体を使って共振結線型 ECT コイルを試作する。Table.2 に試作した ECT コイルの諸定数を示す。採用した強磁性体は直径 6mm、長さ 30mm のマンガンジंक系フェライト棒である。

Fig.8 は被検査対象であり、中心に放電加工によって長さ 10mm、幅 0.2mm、深さ 0.3mm の人工欠損を持ち、両端は接合部から成る。試作共振結線型 ECT の欠損に対するインピーダンス |Z| 対共振周波数 f を測定する。

次に、Fig.8 に示す人工欠損を有する検査対象に対してコイルの入力インピーダンスを測定する。測定範囲は Fig.8 中の正方形 20mm×20mm 枠内であり、測定は”・”で示される 2.5mm 間隔でサンプリングされた 9 点×9 点の位置である。

共振結線をしない単純な有限長ソレノイドコイルと共振結線型コイル、それぞれのインピーダンス対周波数特性の比較を Fig.9 に示す。

Table.2 Various constants of the tested sensor.

	Length of entire coil	2260mm
	Coil diameter	0.1mm
	Number of turns	120turns
	Length of solenoidal coil	30mm
	Number of layer	1

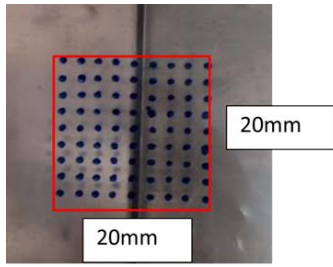
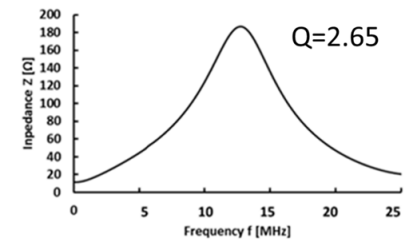
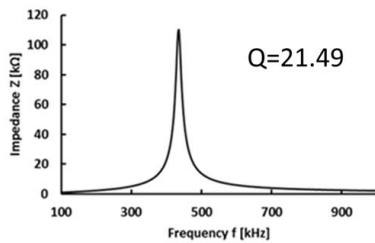


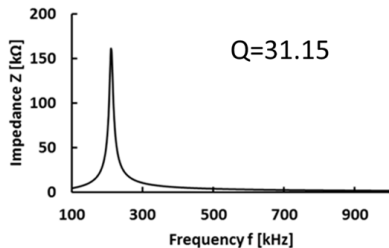
Fig.8 Tested target metal sheet having the 20mm width and 1mm depth artificial line defect.



(a) Normal connection.



(b) Resonant connection.



(c) 2-layers of resonant connection.

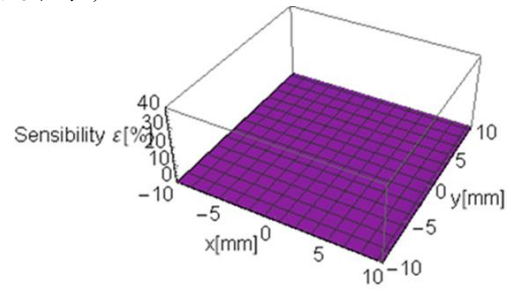
Fig.9 The frequency vs. impedance characteristics of the twist coils

Fig.9 から、非共振結線である単純な有限長ソレノイドコイルの共振周波数が約 13MHz であるのに対し、共振結線にした場合、約 450kHz となり、共振周波数が劇的に低下することが判る。更に、ツイスト結線したコイルを 2 層にすると共振周波数が従来の ECT で多く使われている 256kHz に近づいたことが判る。

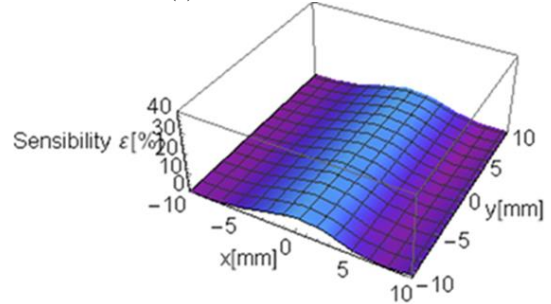
駆動周波数はそれぞれ 256kHz に各々設定する。Fig.8 の左下隅に示す点で測定したインピーダンス値を基準値、正方形枠内の”・”で示される測定点のインピーダンス値を測定値として式(1)から変化率 ε を求める。

共振結線をしない単純な有限長ソレノイドコイルと共振結線型コイルそれぞれのインピーダンス変化率を

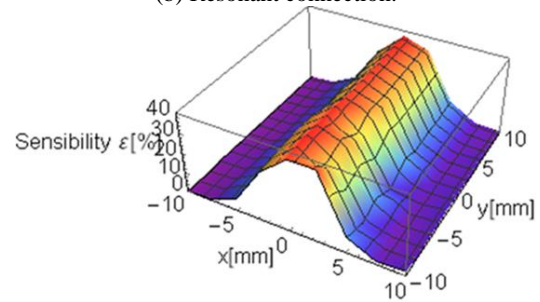
Fig.10 に示す。



(a) Normal connection.



(b) Resonant connection.



(c) 2-layers of resonant connection.

Fig.10 3D plot of empirical formula

Fig.9 のそれぞれの周波数特性から非共振型の場合駆動周波数 256kHz に対して共振周波数が約 13MHz であるので欠損部でのインピーダンス値があまり変わらず Fig.10(a)のような欠損を感知できない結果となった。しかしながら、Fig.9(b),(c)に示す共振型の場合、駆動周波数と共振周波数が近い値にあるので Fig.10(b)は約 10%、Fig.10(c)においては約 40%の最大変化率 ε が得られた。このことから、Q 値が高いほど変化率 ε の値も高くなる。

(2) 自己誘導型 ECT センサ

Fig.11 に自己誘導型 ECT プロブを示す。Fig.11 は同等の周波数特性を有する検出・励磁コイルを 2 個巻いた構造である。

欠損は 2 個のコイル間の差動出力電圧がセンサ出力電圧となる。すなわち、コイルの位置が欠損上に位置する場合と位置しない場合の電位差から欠損の有無が感知される。

本稿では、2 個のコイルを共振結線した場合としない場合のセンサ出力電圧および検出信号比の比較を行

う.

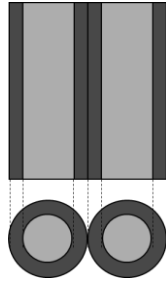


Fig.11 Schematic diagram of a self induction type ECT probe.

Tables 3, 4 は共振結線を検出コイルに採用しない従来型と検出コイルに共振結線を採用した場合のそれぞれのセンサの諸定数を示す。被検査対象は Fig.8 を用いる。

Table.3 Various constants of the conventional self-induction type ECT sensor.

Ferrite core material	MnZn
Ferrite core size	6×π×30mm
Coil diameter	0.2mm
Sensing coil	
Number of turns	106turns
Resonant frequency	8.9MHz

Table.4 Various constants of a new self-induction type ECT sensor employing the resonance connection to the sensing coils.

Ferrite core material	MnZn
Ferrite core size	6×π×30mm
Coil diameter	0.2mm
Sensing coil	
Number of turns	61turns
Resonant frequency	1.2MHz

Fig.8 に示す被検査対象上でリフトオフ 0.1mm として、単軸駆動マシンにより 100 mm/s の速度でセンサを移動した。出力電圧は電子磁気工業株式会社製の渦流探傷器「ET-5002」を用いて処理した。駆動周波数を 256 kHz, 512kHz, 1024kHz に設定して実験した。

Table.5 は自己誘導型による渦流探傷器「ET-5002」の設定条件及び探査結果を示す。

実際の実験では、誘起電圧の大きさではなくノイズ信号に対する検出信号比(Signal to Noise Ratio, SN 比)で評価する必要がある。

Table.5 Various parameters of the signal processor ET-5002 made by the EMIC Co. Japan and output results by self-induction.

Resonant connection	No			Yes		
	Exciting frequency [kHz]	256	512	1024	256	512
Setting sensitivity [dB]	30					
Max voltage (Defect) [V]	0.48	2.56	0.12	1.68	2.88	0.16
Max voltage (Non-Defect) [V]	0.16	3.56	0.12	0.16	0.20	0.04
S/N ratio	3.00	0.72	1.00	10.50	14.40	4.00

Table.5 に述べられているように、検出コイルに共振結線をしていない従来型と比較して、検出コイルに共振結線を採用した方式はいずれの励磁周波数でも感度が向上していることがわかる。

(3) 相互誘導型 ECT プローブ

Fig.12 に相互誘導型 ECT プローブを示す。Fig.12 は自己誘導型で用いたコイルを検出コイルとし、2 個の検出コイルの外周に励磁コイルを巻いた構造である。

自己誘導型と同様、内側の検出コイルの位置が欠損上に位置する場合と位置しない場合の電位差から欠損の有無が感知される。

本稿では、内側に位置する 2 個の検出コイルを共振結線した場合としない場合のセンサ出力電圧および検出信号比の比較を行う。

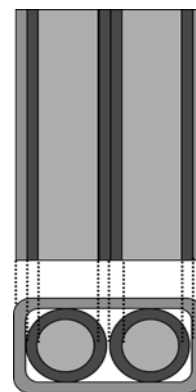


Fig.12 Schematic diagram of a mutual induction type ECT probe.

Tables 6, 7 は共振結線を検出コイルに採用しない従来型と検出コイルに共振結線を採用した場合、それぞれのセンサの諸定数を示す。被検査対象及び実験方法は自己誘導型に用いたコイルを使用する。

Table.6 Various constants of the conventional mutual induction type ECT sensor.

Ferrite core material	MnZn
Ferrite core size	6×π×30mm
Coil diameter	0.2mm
Exciting coil	
Number of turns	106turns
Resonant frequency	8.9MHz
Sensing coil	
Number of turns	61turns
Resonant frequency	8.9MHz

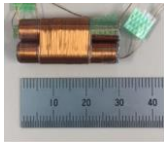
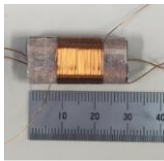


Table.7 Various constants of a new mutual induction type ECT sensor employing the resonance connection to the sensing coils.

Ferrite core material	MnZn
Ferrite core size	6×π×30mm
Coil diameter	0.2mm
Exciting coil	
Number of turns	106turns
Resonant frequency	750.1kHz
Sensing coil	
Number of turns	61turns
Resonant frequency	700.1kHz



Tabel.8 は相互誘導型による渦流探傷器「ET-5002」の設定条件及び探査結果を示す。

Table.8 Various parameters of the signal processor ET-5002 made by the EMIC Co. Japan and output results by mutual induction.

Resonant connection	No			Yes		
	Exciting frequency [kHz]	256	512	1024	256	512
Setting sensitivity [dB]	30					
Max voltage (Defect) [V]	0.48	2.56	0.12	1.68	2.88	0.16
Max voltage (Non-Defect) [V]	0.16	0.20	0.12	0.16	0.20	0.04
S/N ratio	3.00	12.80	1.00	10.50	14.40	4.00

Table.8 に述べられているように、相互誘導型においても検出コイルに共振結線をしなない従来型と比較して、検出コイルに共振結線を採用した方式はいずれの励磁周波数においても大幅に感度が向上していることがわかる。

5. まとめ

本論文では、共振結線を用いた ECT センサの感度向上に関して述べた。本稿で提案する共振結線型 ECT は、励磁コイルとなる重ね巻きの有限長ソレノイド型コイルの巻線法を工夫することで、通常の単純な ECT センサと比較して、低共振周波数で、共振時のインピーダンス、さらに回路の尖鋭度 Q 値も増加する。結果として、提案する共振型結線 ECT は従来の非共振型 ECT

の感度を向上する。

コイルの持つ線間浮遊容量を利用し制御することで共振周波数の低周波制御にも実験的にはあるが成功した。特筆すべきは、ツイストコイルのツイスト 1 ピッチで進む距離が導線の円周に等しいときにキャパシタンスの効果が最大になり共振周波数が低減する点にある。

共振結線の効果を検証する実験においては、電子磁気工業株式会社の製品である渦流探傷器「ET-5002」を使用し、インピーダンス感知型と自己誘導型及び相互誘導型の三種類の ECT センサについて測定した。従来のセンサと比較し、何れのセンサも共振結線を施すことによって高い SN 比を有することが判明した。

謝辞：本研究を進めるに当たり、齊藤兆古教授には数多くのご指導、ご支援を賜りました。厚く御礼申し上げます。

本研究で試料、実験環境を提供して戴くとともに有益なご助言を戴いた電子磁気工業株式会社の大内学氏をはじめとする多くの方々へ深く感謝致します。

また、多くのご協力を頂いた齊藤兆古研究室の皆様へ心より感謝致します。

参考文献

- 1) I.Marinova, S.Hayano and Y.Saito, Ployphase eddy current testing, Journal of Applied Physics, Vol. 75, No.10, pp. 5904-5906, 1994.
- 2) 細原隆史, 齊藤兆古, 堀井清之, 共振型 ECT センサによる金属欠損の可視化, 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム, 2009 年 7 月, P 01-006
- 3) Y.Midorikawa, S.Hayano and Y.Saito, A resonant phenomenon between adjacent series connected coils and its application to a noise filter, Elsevier, Studies in Applied Electromagnetics in Materials, Vol.6, pp. 633-639, 1995.
- 4) 緑川 洋一, 佐藤 貞弘, 早野 誠治, 齊藤 兆古, 共振型インダクタのフィルタへの応用, 電気学会マグネティックス研究会, 資料, 1995 年 2 月, MAG-95-32.
- 5) 細原隆史, 齊藤兆古, 新方式共振型 ECT の提案とその特性, 電気学会マグネティックス研究会資料, 2010 年 8 月, MAG-10-151.
- 6) 牧野泰才, Q 値, 平成 19 年 7 月 10 日, http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/public/makino/materials/20070710_Qfactor.pdf

渦電流探査技術に関する考察

A Study of Eddy Current Testing

日向隆大

Takahiro HYUGA

指導教員 齊藤兆古

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程

Previously, we have succeeded in exploiting a new high sensibility eddy current testing (ECT) sensor called the infinite (∞) coil. This paper proposes the other new ECT sensor to realize a further higher sensibility sensor than those of our previous one. The new sensor utilizes the magnetic fields in the parallel directions to a tested target surface, and this makes it possible to construct a shape whose sensing coil could be entirely surrounded by the exciting coil. Surrounding the sensing coil entirely by the exciting coil makes it possible to work the exciting coil as if a shielding coil to the external electromagnetic noise. Thus, good signal to noise ratio is expected and has been confirmed by the numerical simulations as well as practical experiments.

Key Words : Eddy current testing, Non-destructive testing, ∞ coil

1. はじめに

現代の文明社会を支えるのは人類の叡智が創造した多くの文明の利器である。例えば、高速な移動手段を提供する高速鉄道、自動車、航空機、そして電力生成・システム、照明システム、セキュリティシステムなど、いわゆる産業プロダクトから鉄橋、大型ビルや高速道路などの社会的インフラストラクチャまで広汎で多岐に渡る文明の利器が存在し、人類の文明生活を支えているのは自明であろう。これら産業プロダクトの構造を支える金属材料の非破壊検査は、高度な健全性や信頼性・安全性を確保するために極めて重要な技術である。金属の非破壊検査法として、超音波、放射線、電気抵抗、渦電流などを利用した方法が用いられている。この中で、超音波による金属の非破壊検査は精度が良く信頼性も高い反面、振動子を検査対象に接触させる必要がある。この意味では電気抵抗測定による非破壊検査も直接接触の必要性がある。放射線による方法は、安全性の観点から放射線の取り扱いに一定の基準が課されているため、使用上に制約がともなう。

金属の非破壊検査として、渦電流探傷法(Eddy Current Testing, 以後 ECT と略記)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。しかしながら、その汎用性は高く、非接触で探査が可能であるため、他の非破壊検査法に比較して有利な特性を有する[1-3]。

ECTの動作原理は比較的単純であり、大別して二方法がある。一方は交番磁界を検査対象に照射することで被検査対象中に渦電流を発生させ、被検査対象中の欠損の有無による渦電流分布の相違を電源から見た入力インピーダンスの変化で感知する方法である。ここでは、このECT法をインピーダンス感知型と呼ぶ。インピーダンス感知型 ECT の特徴は励磁コイルがセンサも兼ねる点にあり、構造が簡単で安価である。他方は、被検査対象中の欠損の有無に起因する渦電流分布の相違が喚起する漏れ磁束の変化を感知する励磁コイル以外の検出コイルを備えた励磁・検出コイル分離型である。励磁・検出コイル分離型 ECT は検出コイルの配置に自由度があり、インピーダンス感知型に比較して高感度であるが、検出コイルの構造や設置場所など多くの経験的習熟度を必要とする。

本研究は、筆者の所属する研究室で開発された新型渦電流センサ(∞ コイル)の改良と新方式の平面型 ECT センサの開発に関するものである。 ∞ コイルは従来のセンサに対して、高感度かつ高いリフトオフ特性を有するが、センサの構造上、曲面の被検査対象に対して感度が低下する欠点がある。この問題を解決するため、我々はフレキシブルな平面状励磁コイルを有する平面型 ∞ コイルを既に提案した。結果として曲面のみならず平面の欠損に対しても良好な感度を有する平面型 ∞ コイルの開発に成功した。[4, 5]

また、 ∞ コイルの改良として、 ∞ コイルの二個の励磁コイルが作り出すN極とS極の間に存在するゼロ磁界領域を、励磁コイルの形状を変化させることによって検出コイルを囲むように拡張することができる。この ∞ コイルが作る空間性を利用することによって従来の ∞ コイルと比べてノイズが少なく、検出感度の高いセンサの開発に成功することができた。[6]

他方、本研究で提唱する新方式の平面型 ECT センサ、すなわち外励磁型センサでは、励磁コイルの形状を隣接する二個の円形から検出コイルを囲む一個の矩形形状へ変更することで、従来の ∞ コイルと比べての単純で高感度なセンサの実現が可能であることを述べる。被検査対象の欠損に起因して生ずる渦電流の偏りによる磁束を検出コイルで感知する原理は同一である。すなわち、外励磁型センサは励磁コイル面と平行方向成分の磁束を感知し、構造的には検出コイルを励磁コイルで取り囲む形式で構成可能とする。このことにより、検出コイルが励磁コイルの作り出す電磁環境下に置かれることになり、励磁コイルの内側の閉じられた電磁環境内における磁束の変化を捉えやすくなり、また、励磁コイルが外部電磁界ノイズを検出コイルから遮蔽することになる。ゆえに、従来型の ECT プロブと比較して良好な信号対雑音比が得ることができ、新しい方式のセンサの開発に成功した。[7]

2. 平面型 ∞ コイル

(1) 平面型 ∞ コイルの構造

Fig.1 に平面型 ∞ コイルの構造を示す。 ∞ コイルは二個の励磁コイルとコアに磁性体を持つ検出コイルから構成されている。検出コイルの巻線軸は二個の励磁コイルの中心線を結ぶ線と直交するように設置される。我々は励磁コイル形状から Fig.1 に示すコイルを“ ∞ コイル”と呼んでいる。

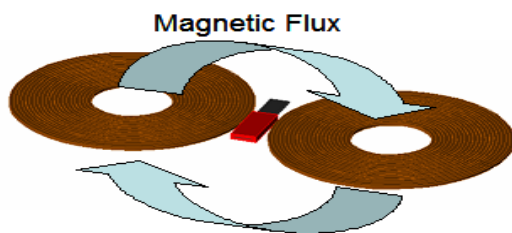


Fig.1 Schematic diagram of the ∞ coil, where the circular coils on both side are the planar exciting coils. The rectangular box located between a mid point of both exciting coils is the sensing coil wound around a ferrite bar. The thin grey colored arrows show the magnetic fluxes caused by the exciting currents when no target metallic materials.

二個の励磁コイルを互いに隣接して配置し、それらに互いに逆位相の電流を流して ∞ コイルの三次元有限要素シミュレーションを行う。Fig.2 はシミュレーション結果

の一例である。

Fig.1 に示すように、励磁電流により生じる磁界分布は励磁コイルを垂直に貫通するループ状磁束を生成する。Fig.1 のようにN極とS極を形成する二個の励磁コイル間にはN極でもS極でも無い磁界領域、すなわち、ゼロ磁気スカラーポテンシャル領域が存在する。ゼロ磁気スカラーポテンシャル領域にフェライトなどの磁性体をコア材として作成した検出コイルを Fig.1 に示すように設置する。

このような検出コイルの配置により、検出コイルの軸方向が励磁磁界と常に直交となり、励磁磁界は検出コイルで感知されない。また、ゼロ磁気ポテンシャル領域へ磁性体が配置されるため、磁性体による励磁磁界分布の乱れは存在しない。

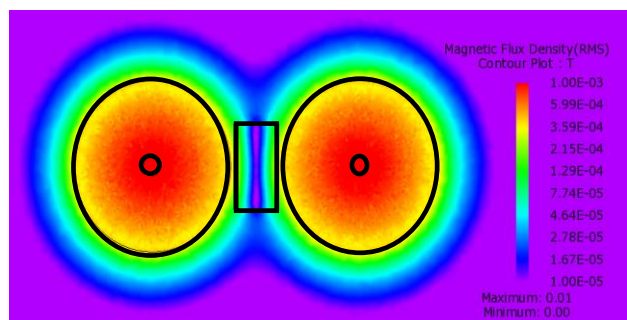


Fig.2 Simulated magnetic flux density distributions due to the ∞ coil.

(2) 平面型 ∞ コイルの動作原理

∞ コイルを欠損のない健全な被検査対象上に設置した場合、励磁磁界を打ち消すため被検査対象中には励磁電流の逆方向に渦電流が流れる。被検査対象中の渦電流によって生じる磁束は励磁磁束を打ち消す方向であるため検出コイルの面に対して平行成分となり、誘起電圧は発生しない。しかし、被検査対象が不健全で検査対象に欠損が存在する場合、欠損を迂回するように渦電流が流れ、検出コイル面に対して垂直な磁束成分が発生する。このため、検出コイルに誘起電圧が発生し、欠損の有無を識別することが可能になる。

Fig.1 に示す平面型 ∞ コイルの動作原理を検証するため株式会社JSOLの三次元有限要素法パッケージJMAGを用いてシミュレーションを行う。

Table 1 に励磁コイルと検出コイルそれぞれの諸定数を示す。平面型 ∞ コイルは縦 100mm、横 200mm、厚さ 1mm の銅板上にリフトオフ 0.2mm として配置されており、励磁コイルへ実効値 300mA、256kHz の正弦波電流を励磁電流とし通電する。欠損がない場合、検出コイルの巻線軸に対して欠損が 0 度、90 度 45 度の場合についてシミュレーションを行う。

Table 1 Various constants of the simulation model.

Exciting coil	
Coil outer diameter	9.0 [mm]
Coil inner diameter	1.0 [mm]
Coil length	0.2 [mm]
Number of turns	20 turn
Input voltage (peak)	2.5 [V]
Frequency	256 [kHz]
Sensing coil	
Coil outer diameter	1.4 [mm]×2.4 [mm]
Coil inner diameter	1.0 [mm]×2.0 [mm]
Coil length	6 [mm]
Number of turns	100 turn
Axis core	MnZn/ferrite (permiability:3000)

Fig.3 は被検査対象が健全である場合と直線状欠損を有する場合それぞれの被検査対象(銅板)に流れる渦電流(左図)と検出コイルのフェライトコア内の磁束密度分布(右図)を示している。

Fig.3(a)左図に示すように健全な被検査対象である場合、銅板中の渦電流は励磁コイルと平行に流れる。よって、渦電流によって生じる磁束密度は検出コイルの面に対し平行方向のみであるため Fig.3(a)右図に示す方向となる。したがって欠損が存在しない場合、検出コイルに誘起電圧は発生しない。

Fig.3(b)左図は 2.0mm 幅の直線状欠損が検出コイル軸に平行(0度)に配置された場合の渦電流分布である。渦電流は欠損に沿う方向に流れ、検出コイル面に垂直方向の磁束密度を生成しない。このため、検出コイル部分の磁束密度は Fig.3(b)右図のようになる。

Fig.3(c)左図は 2.0mm 幅の直線状欠損が検出コイル軸に対し 45度をなす場合の渦電流分布を示す。渦電流は欠損に沿って流れ検出コイル面に垂直成分を含む磁束密度を生成する。このため、検出コイル部分の磁束密度が Fig.3(c)右図に示すようになり、検出コイルに誘起電圧が生ずる。

Fig.3(d) 左図は 2.0mm 幅の直線状欠損が検出コイル軸に対し 90度をなす場合の渦電流分布を示す。銅板中の渦電流は欠損によって妨げられ検出コイル面に垂直方向成分を持つ磁束を生成する。しかしながら、欠損の両端で発生する渦電流は互いに打ち消しあう方向に流れるため、Fig.3(d) 右図に示す様に検出コイル部分の磁束密度も互いに逆方向となる。結果として、検出コイルに電圧は誘起しない。

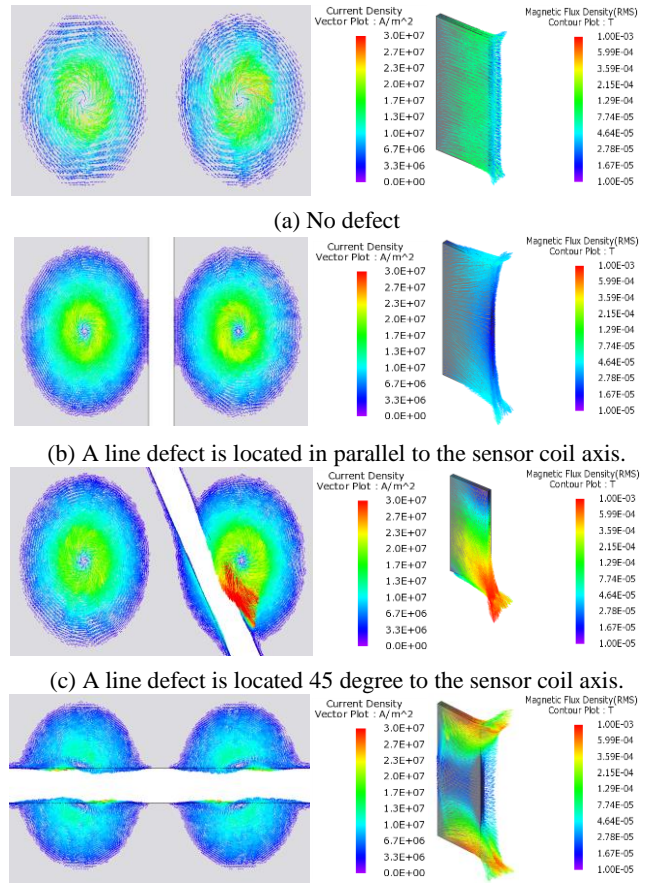


Fig.3 Eddy current distributions in various defect conditions. Black solid lines are the outline of the coils.

Fig.4 は被検査対象が健全である場合と検出コイル軸に対して直線状欠損が 0度、45度、90度である場合それぞれの誘起電圧波形を示す。Fig.4 の結果は、迂回する渦電流が検出コイル面に対して垂直成分を持つ磁束を生じさせる場合、検出コイルに誘起電圧が発生することが分かる。このことから、∞コイルは欠損の方向で感度が異なる指向性を持ったセンサであることが分かる。

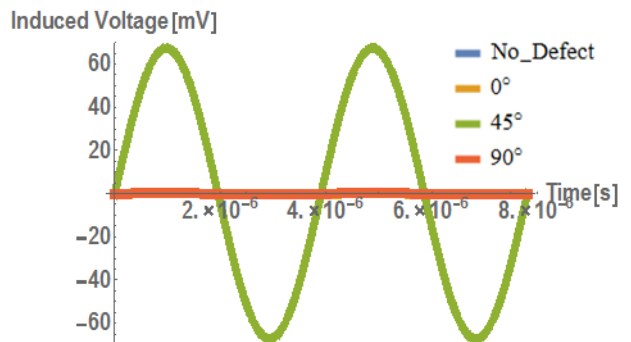


Fig.4 Each of the induced voltages depends on the angle between the sensor coil axis and the magnetic flux flowing direction.

3. 外励磁型 ECT センサ

(1) 考え方

ECT センサとりわけ ∞ コイルの動作は被検査対象に渦電流が励磁コイルと平行方向へ流れる限り検出コイルに電圧が誘起しない動作原理に基づいている。 ∞ コイルの検出コイルは隣接する励磁コイル間の中間に位置し、検出コイル軸は励磁磁束の ECT センサとりわけ ∞ コイルの動作は被検査対象に渦電流が励磁コイルと平行方向へ流れる限り検出コイルに電圧が誘起しない動作原理に基づいている。 ∞ コイルの検出コイルは隣接する励磁コイル間の中間に位置し、検出コイル軸は励磁磁束の流れに直交する方向である。このため、励磁磁束、ひいては渦電流に起因する磁束を含めた全ての磁束がセンサコイルの軸方向成分を含まない限り検出コイルに電圧が誘起しない。逆に、全ての磁束中に検出コイルの軸方向成分を含む場合に検出コイルに電圧が誘起し、この誘起電圧を観測することで検査対象の健全性が評価される。これが検出コイル軸と励磁磁束間の直交性を利用した ∞ コイルの動作原理である。

本論文では、Fig.5 に示すように励磁コイルの形状を隣接する二個の円形から検出コイルを囲む一個の矩形状へ変更することで、従来の ∞ コイルと比べての単純で高感度なセンサの実現が可能であることを述べる。

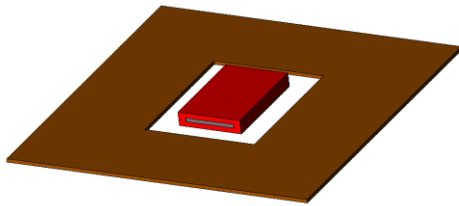


Fig.5 A new flat ECT sensor whose sensing coil located in a center and is entirely surrounded by the square shape exciting coil. Surrounding the sensing coil entirely by the exciting coil makes it possible to shield the sensor coil to the external electromagnetic noise.

新しい平面型 ECT センサ(外励磁型 ECT センサ)の動作原理は、被検査対象の欠損に起因して生ずる渦電流の偏りに起因する磁束を検出コイルで感知する方式であり、これは従来の ∞ コイルと同一である。すなわち、励磁コイルが生ずる励磁磁束は励磁コイルの面に対してすべて垂直方向であり、励磁磁束は検出コイルの軸方向成分を含まない。このため、励磁磁束は検出コイルに電圧を誘起しない。したがって、励磁コイルが検出コイルを取り囲む構造が可能となる。

従来の ∞ コイルと大きな違いとして、励磁コイルが検出コイル全体を囲むことで検出コイルの電磁環境は外部の電磁界から遮断(シールド)されるメリットを考慮することが出来る。検出コイルが設置される励磁コイルの内側の空間は、外側の励磁コイルによって一定の環境を構築

することになる。そのため、検出コイルが設置される内側の閉じられた環境内における磁束の変化を検出コイルが感知することを可能にする。さらに、外部のノイズ信号から励磁コイルの内部を遮蔽することができる。励磁コイルが外部の電磁界に対して非常に大きな磁界を発生するので、外部からくるノイズ信号に対して励磁信号が圧倒的に大きいことになる。そのため、測定に伴う周辺の電磁ノイズの影響を削減し、結果として良好な S/N 比を得ることが考えられる。

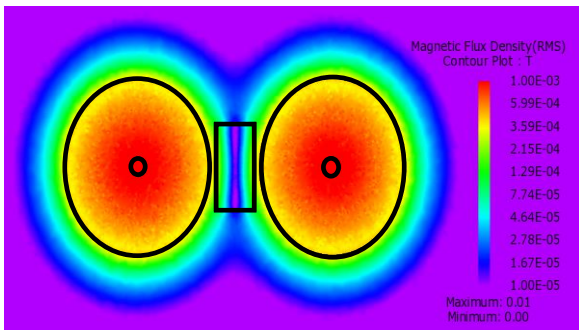
(2) 外励磁型 ECT センサの検証実験

矩形励磁コイルを用いた ECT センサの動作をシミュレーションと実験で検証した。Table 2 は励磁コイルと検出コイルの諸定数を示している。供試 ECT センサは縦 100mm, 横 100mm, 厚さ 1mm の銅板上に配置する。被検査対象が健全な場合、検出コイルの巻線軸に対して直線状欠損が 45 度の場合についてシミュレーションを行う。励磁コイルには実効値 300mA, 周波数 256kHz の正弦波電流を通電する。

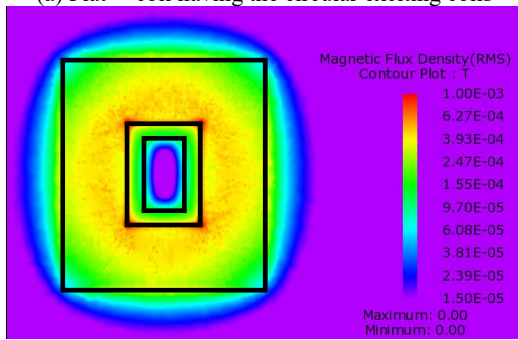
Fig.6 は従来の ∞ コイルと新方式平面型センサそれぞれの検査対象面とセンサコイル面間における磁束密度(絶対値)分布を示している。Fig.6 から励磁コイル間のゼロ磁気スカラーポテンシャル領域を比較する。ゼロ磁気スカラーポテンシャル領域は、 ∞ コイルでは二個の励磁コイルが隣接する点領域、新方式平面型センサでは励磁コイルの中心に位置する矩形形状部、それぞれに存在する。

Table 2 Various constants for the simulations and experiments.

Circular exciting coils	
Outer diameter	9.0 [mm]
Inner diameter	0.5 [mm]
Coil length	0.2 [mm]
Number of turns	20 turn
Input voltage(peak)	2.5 [V]
Frequency	256 [kHz]
Rectangular exciting coil	
Outer length	13.5×14.0 [mm]
Inner length	4.5×5.0 [mm]
Coil length	0.2 [mm]
Number of turns	20 turn
Input voltage(peak)	2.5 [V]
Frequency	256 [kHz]
Sensing coil	
Outer diameter	1.5 × 2.8 [mm]
Inner diameter	0.5 × 2.0 [mm]
Length	4.5 [mm]
Number of turns	100 turn
Axis core	MnZn/ferrite (Permeability: 3000)



(a) Flat ∞ coil having the circular exciting coils



(b) A new flat ECT coil

Fig.6 The simulated magnetic flux density distributions of the flat circular ∞ (a) and new flat ECT (b) coils. Black solid lines are the outline of the coils.

シミュレーションの結果の妥当性を実際の実験で評価した。実験に用いる被検査材料として Fig.7 に示すような厚さ 1mm の平面銅板を採用する。この銅板には幅 2mm、長さ 100mm の直線状の欠損が施されている。さらにセンサとして従来型および平面型の ∞ コイルを試作した。

図 8 に各試作 ∞ コイルの諸定数および写真を示す。従来型 ∞ コイル、外励磁型 ECT センサの励磁コイルは比較のため、同じ巻数・寸法で作成され、検出コイルは両者とも同一のものを使用した。

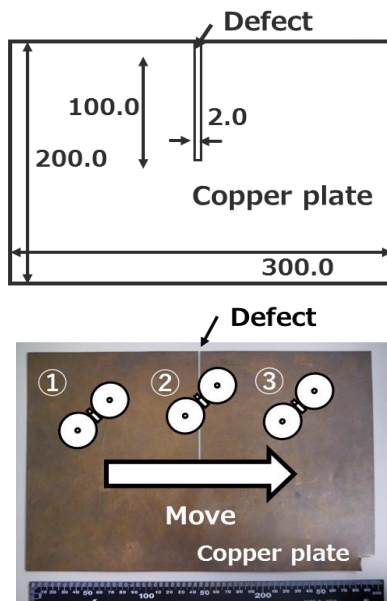
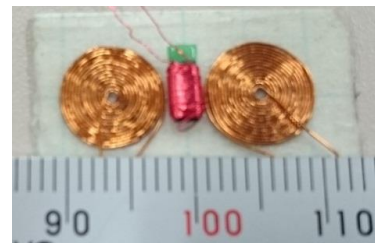
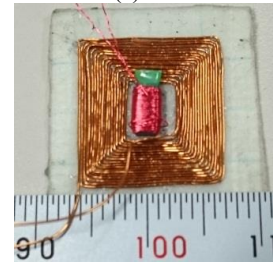


Fig.7 The target tested piece.



(a) ∞ coil



(b) A new flat ECT sensor



(c) Sensing coil

Fig.8 (a) Tested ∞ coils, and (b) Tested new flat ECT sensor.

実験方法として、リフトオフ 1.0mm に設定した ECT センサを Fig.7 に示すように ∞ コイルが銅板上の①～③の点に位置した場合の検出コイルに誘起する電圧を測定する。測定条件は、励磁電流は 300mA(rms)、励磁周波数は 256kHz である。実験結果は S/N 比で評価した。

Table 3 は Fig.8(a) に示す従来の ∞ コイル、Fig.8(b) に示す新方式平面型 ECT センサ、それぞれに対するシミュレーションと実験による結果をまとめたものである。Table 3 より励磁コイルを検出コイルを挟む二個の円形から検出コイルを囲む矩形型へと変更した場合、シミュレーションと実験結果ともに S/N 比の向上が得られた。欠損探査感度も従来の ∞ コイルよりも新方式平面型 ECT センサは良好である。

以上の結果より、本論文で提案する新方式平面型 ECT センサは、従来の ∞ コイルを上回る高感度なセンサであることがシミュレーションと実験によって実証された。

Table 3 S/N ratios and peak detected voltages.

	Tested ∞ coils		A new flat ECT sensor	
	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
No-defect	5.7.E ⁻² [mV]	3.5 [mV]	1.7.E ⁻² [mV]	34 [mV]
45°	25.2 [mV]	18 [mV]	420 [mV]	504 [mV]
S/N ratio	4.4.E ²	5.10	9.8.E ²	16.7

1. まとめ

本研究は、従来提唱された「励磁・検出コイル分離型」ECT センサの開発と改良および、その設計に関して考察

した。従来の「 ∞ コイル型 ECT センサ」は、有限要素法によるシミュレーションと実験的検証により、その動作と欠損検出能力の高さを実証した。しかし、従来型 ∞ コイルは構造上、曲面の被検査対象の欠損探査には不向きであるという欠点を持つことが判明した。

この欠点を克服するため、本研究では「平面型 ∞ コイル ECT センサ」を提案した。この平面型 ∞ コイル ECT センサは従来型 ∞ コイルの高機能・高感度型とも位置づけられ、従来型の構造に起因する問題点、すなわち、磁界がゼロとなる位置へ磁性体を用いた検出コイルを配置することを可能とした。

結果として、提案する平面型 ∞ コイル ECT センサは、平面状の被検査対象のみならず、曲面状の被検査対象に対する欠損探査においても、従来型を凌駕する感度であることが三次元有限要素法を用いたシミュレーションのみならず実験的にも実証された。

さらに、本研究で新しく提唱した外励磁型センサでは、励磁コイルの形状を隣接する二個の円形から検出コイルを囲む一個の矩形状へ変更することで、従来の ∞ コイルと比べての単純な構造で高感度なセンサの実現が可能であることを述べた。外励磁型センサは励磁コイル面と平行方向成分の磁束を感知し、構造的には検出コイルを励磁コイルで取り囲む形式で構成可能とする。このことにより、検出コイルが励磁コイルの作り出す電磁環境下に置かれることになり、励磁コイル内の閉じられた電磁環境内における磁束の変化を捉えやすくなり、また、励磁コイルが外部電磁界ノイズを検出コイルから遮蔽することになる。ゆえに、従来型の ECT プロブと比較して良好な信号対雑音比が得ることができ、従来にない新しい方式のセンサの開発に成功した。

謝辞：本研究を進めるに当たり、齋藤兆古教授には数多くのご指導、ご支援を賜りました。厚く御礼申し上げます。

本研究で試料、実験環境を提供して戴くとともに有益なご助言を戴いた電子磁気工業株式会社の児島隆治社長、茂木秀夫氏、大内学氏に深く感謝致します。

また、多くのご協力を頂いた齋藤兆古研究室の皆様にご心より感謝致します。

参考文献

- 1) I.Marino, S.Hayano and Y.Saito, “Polyphase eddy current testing, Journal of Applied Physics”, Vol. 75, No.10, pp. 5904-5906, 1994.
- 2) N.Burais and A.Nicolas, “Electromagnetic field analysis in remote field eddy current testing systems”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.25, No.4, pp.3010-3012, 1989.
- 3) S.McFee and J.P.Webb, “Automatic mesh generation for h-p adaption”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.29, No.2, pp.1894-1897, 1993.
- 4) Hiroki KIKUCHIHARA, Iliana MARINOVA, Yoshifuru SAITO, Manabu OHUCH, Hideo MOGI, Yoshiro OIKAWA, “Optimization of the Eddy Current Testing”, The 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Oita Japan November 11-14 2014, WC4-4, pp.495.
- 5) Kouki MARUYAMA, Iliana MARINOVA, Yoshifuru SAITO, “Developments of Flat ∞ Coil for Defect Searching in the Curved Surfaces”, The 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology, (ICMST-Kobe 2014), November 2-5 2014, Proceedings, pp.209-210.
- 6) Takahiro HYUGA, Naoto ISHIKAWA, Yoshifuru SAITO, Iliana MARINOVA, Manabu OHUCH, Takaharu KOJIMA, “Enhance the Sensibility of the Film Infinite Eddy Current Sensors”, The 20th International Conference on Electrical Engineering, July 3-7 2016, Proceedings.
- 7) 日向隆大, 齊藤兆古, 大内学, 及川芳郎, 児島隆治, “平面型渦電流センサの改良に関する研究”, 第 25 回 MAGDA コンファレンス in 桐生講演論文集, pp.309-313, 2016.