

### 共振型 ECT センサの実装

奥田, 和哉 / Okuda, Kazuya

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014163>

# 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・系統システム、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高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。

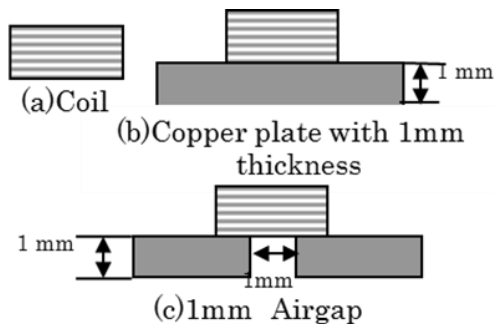


Fig.1 Tested coil and the measurement conditions.

## (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  $\Delta Z_1$  は共振周波数の偏差  $\Delta Z_2$  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。

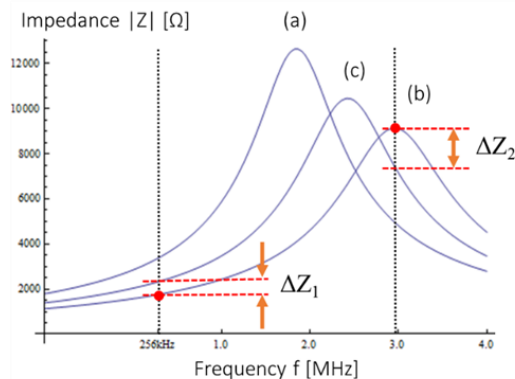


Fig.2 Frequency characteristics of the ECT probes.

## 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]。

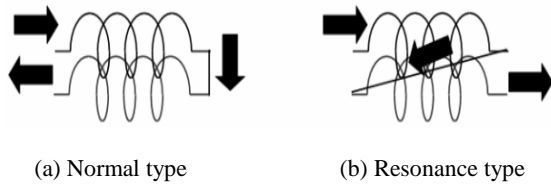


Fig.3 Comparison of the normal and resonant coil connections.



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、入力端子からみ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  $\varepsilon$  を

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

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。

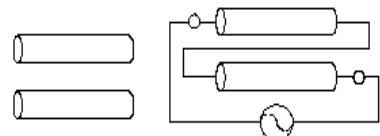
式(1)の変化率は、式(2)で定義される尖鋭度  $Q$  に依存する。

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

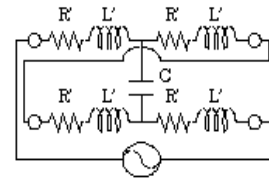
ここで  $f_0$  と  $\Delta f$  は、それぞれ共振周波数と帯域幅である。

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  $\varepsilon$  が向上することを意味する[6]。

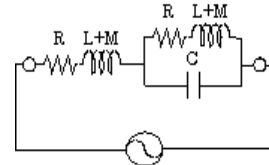
Fig.5 に示す共振結線型 ECT の構造は前述したように比較的簡単である。Fig.5(a)は 2 本の導線、5(b)はそれら 2 本の導線を共振結線したものである。図中の記号  $R, L, M, C$  はそれぞれ抵抗、自己インダクタンス、相互インダクタンス、キャパシタンスである。Fig.5(b)の 2 本の導体間のキャパシタンス  $C$  を仮定し、Fig.5(c)の等価回路が導かれる。Fig.5(d)は、Fig.5(c)の回路を展開した等価回路である。



(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 本の線と線の間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<br>[turn/m] | Number of layers<br>[layer] | Resonant frequency<br>[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。

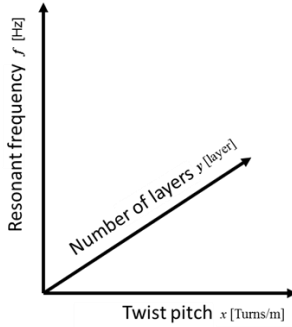


Fig.6 A x,y,z coordinate system, where x,y,z are corresponding to the twist pitch, number of layers and resonant frequency, respectively.

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

式(3)のような実験式を考える。十分な数 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。

$$f = c_0 + a_1x + b_1y + a_2x^2 + b_2y^2 + c_{11}xy \quad (5)$$

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。

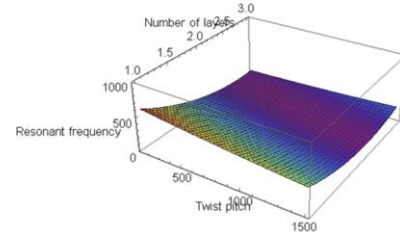


Fig.7 Design curves for the ingenious connection resonant circuit as a function of the twist pitch as well as number of layers.

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

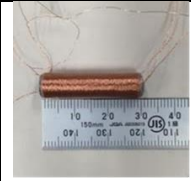
強磁性体を使って共振結線型 ECT コイルを試作する。Table.2 に試作した ECT コイルの諸定数を示す。採用した強磁性体は直径 6mm、長さ 30mm のマンガジンク系フェライト棒である。

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        |

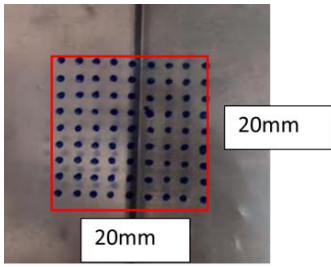
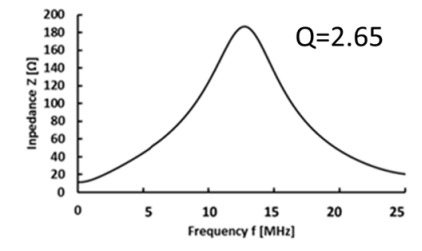
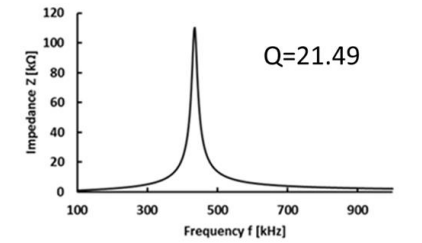


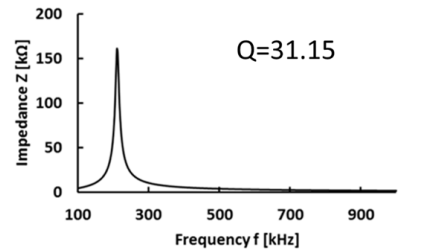
Fig.8 Tested target metal sheet having the 20mm width and 1mm depth artificial line defect.



(a) Normal connection.



(b) Resonant connection.



(c) 2-layers of resonant connection.

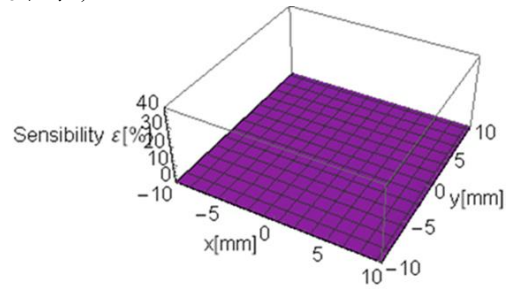
Fig.9 The frequency vs. impedance characteristics of the twist coils

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。

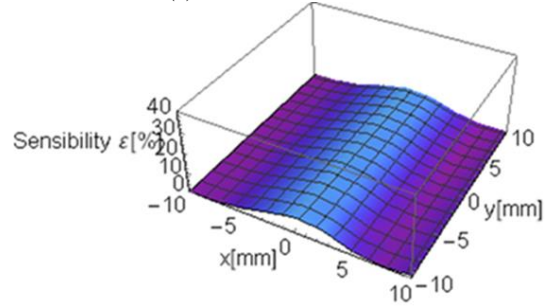
駆動周波数はそれぞれ 256kHz に各々設定する。Fig.8 の左下隅に示す点で測定したインピーダンス値を基準値、正方形枠内の”・”で示される測定点のインピーダンス値を測定値として式(1)から変化率  $\varepsilon$  を求める。

共振結線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

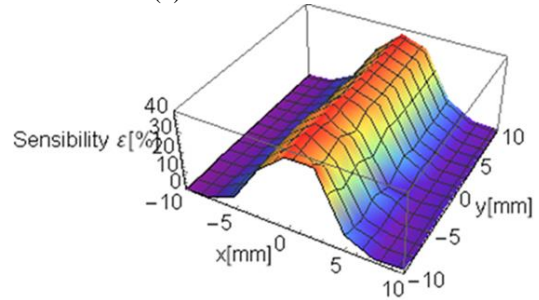
Fig.10 に示す。



(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なず 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  $\varepsilon$  が得られた。このことから、Q 値が高いほど変化率  $\varepsilon$  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 プローブを示す。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。



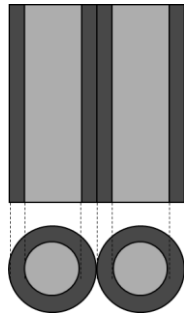


Fig.11 Schematic diagram of a self induction type ECT probe.

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.

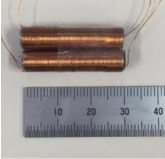
|  |                       |          |
|--|-----------------------|----------|
|  | Ferrite core material | MnZn     |
|  | Ferrite core size     | 6×π×30mm |
|  | Coil diameter         | 0.2mm    |
| Sensing coil   |                       |          |
|  | Number of turns       | 106turns |
|  | Resonant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

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

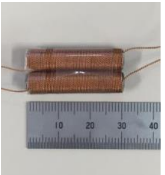
|   |                       |          |
|---|-----------------------|----------|
|  | Ferrite core material | MnZn     |
|   | Ferrite core size     | 6×π×30mm |
|   | Coil diameter         | 0.2mm    |
| Sensing coil  |                       |          |
|   | Number of turns       | 61turns  |
|   | 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。

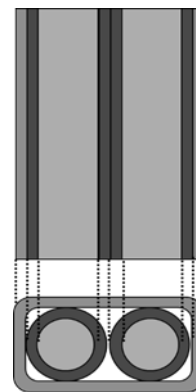


Fig.12 Schematic diagram of a mutual induction type ECT probe.

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× $\pi$ ×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         |

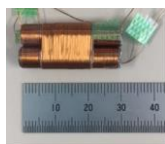


Table.7 Various constants of a new mutual induction type ECT sensor employing the resonance connection to the sensing coils.

|                       |                |
|-----------------------|----------------|
| Ferrite core material | MnZn           |
| Ferrite core size     | 6× $\pi$ ×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       |

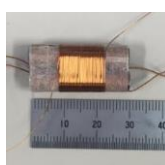


Table.8 は相互誘導型による渦流探傷器「ET-5002」の設定条件及び探査結果を示す。

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いうる従来型と比較して、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ではあるが成功した。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り高い 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に深く感謝致します。

また、多くのご協力を頂いた齊藤兆古研究室の皆様にご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](http://www.hapis.k.u-tokyo.ac.jp/public/makino/materials/20070710_Qfactor.pdf)