

新 ∞ コイル型渦電流センサに関する研究

菊地原, 弘基 / KIKUCHIHARA, Hiroki

(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

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010405>

新 ∞ コイル型渦電流センサに関する研究

A STUDY OF NEW ∞ EDDY CURRENT SENSOR

菊地原弘基

Hiroki KIKUCHIHARA

指導教員 齊藤兆古

法政大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程

Eddy current testing (ECT) is one of the most representative nondestructive testing methods for metallic materials, parts, structures and so on. Operating principle of ECT is based on two major properties of the magnetic field. One is that alternating magnetic field induces eddy current in conducting materials. Thereby, an input impedance of the magnetic field source, i.e., electric source, depends on the eddy current path. Second is that the magnetic field distribution depends not only on the exciting but also on the reactive magnetic fields caused by the eddy currents in targets. Former and latter are the impedance sensing and magnetic flux sensing types, respectively.

This paper concerns with an optimization of a new magnetic flux sensing type sensor named “ ∞ coil”. Exciting and sensing coils are composed of ∞ shape coil and a finite length solenoid coil wound on ferrite bar, respectively. Development of this ∞ coil fully depends on the 2D and 3D finite elements method modeling. According to the simulation results, we have worked out two types of ∞ coils. Practical experiments reflect the validity of both simulation and design aims, quite well. Thus, we have succeeded in developing ∞ coil having a higher sensibility compared with that of conventional one.

Key Words : Eddy current, Nondestructive testing

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。

これら文明の利器の多くは何らかの形で機械的構造を持ち、強度や形状維持のフレームが存在する。多くのフレームは金属材料からなり、それぞれの産業プロダクトの機能を維持するため、機械的ストレスを受け続けている。産業プロダクトの中で、大量輸送に関わる大型バス、高速列車、大型旅客機のみならず、原子力発電所で代表される大規模エネルギー変換システムなどのプラントや社会的インフラストラクチャ設備では、機械的ストレスだけでなく熱応力、中性子による劣化などが発生する。当然ではあるが、これらの産業プロダクトではフレームの健全性が高度な信頼性、安全性の確保が要求されるために極めて重要な要素である。

金属の健全性を確保する手段として最も基幹的で重要な技術が、金属材料に対する非破壊検査技術である。金属の非破壊検査法として、渦電流探査法(Eddy Current Testing, 以後 ECT と略記)、電気ポテンシャル法、超音波映像法およびX線断層撮影法のような様々な方法がある。この中で、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検査が可能である。このため、ECT は自動車の個々の部品検査から橋梁の劣化検査など極めて多くの分野で広汎に使われている。これは、人類の創造する文明の利器の力学的強度維持は、大部分が導電性を有する金属材料からなるためであり、特に ECT は選択的に非接触で金属部分のみ検査可能である[1-3]。

本稿は、 ∞ コイル型渦電流センサに関するものである。開発には有限要素法によるシミュレーションを用い、検査対象中に欠損が存在する場合のみ生じる磁束成分を検出コイルが検知できるモデルに設計した。二個の励磁コイルを互いに逆位相の電流を流すことでN極とS極を形成する。励磁コイル間の中心は磁界が極めて小さい値であるため、励磁コイルによる磁界を乱さずに磁性体のコアに持つ検出コイルを配置でき感度の向上に繋がった。

2. ∞コイル型 ECT センサ

(1) ECT センサの動作原理

ECT の動作原理は、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。この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。この励磁・検出コイル分離型は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磁束の変化を感知する検出コイルの配置に自由度を持つ。このため、励磁・検出コイル分離型は、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。∞コイル型 ECT センサの動作原理は励磁・検出コイル分離型に属し、検査対象上に欠損が存在する場合のみ生じる磁束成分を検出コイルが検知できるモデルに設計された。

(2) ∞コイル型 ECT センサの動作原理

本論文で提案する∞コイル型 ECT センサは、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。二個の励磁コイルを隣り合う位置に配置し、互いに逆位相の電流を流す。励磁電流により生じる磁界分布は逆の極性を持ちループ状に形成されるため二個の励磁コイルの間には磁界が極めて小さい値となる部分が生まれる。コアにフェライトなどの磁性体を持つ検出コイルを二個の励磁コイルの間に励磁コイルの面に対し垂直な方向に設置する。検出コイルの面が励磁コイルによって生じる磁界と常に平行となるため検出コイルには誘起電圧が発生しない。更に磁界が極めて小さい部分に配置されることにより検出コイルが持つ磁性体の影響が少なく、元の磁界分布を乱さない設計となっている。我々はこの ECT センサの形状から“∞コイル”と呼ぶ。この∞コイルを健全な検査対象上に設置した場合、検査対象中には励磁電流の逆方向に渦電流が流れる。検査対象中の渦電流によって生じる磁束は検出コイルの面に対し平行成分となるため誘起電圧は発生しない。しかし、検査対象中に欠損が存在する場合、欠損を迂回するように流れる渦電流が発生し、検出コイルの面に対し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となる[4]。

(3) ∞コイルのモデリング

∞コイルのモデリングには有限要素法によるシミュレーションを用いコイルデザインの最適化を行った。Fig.1 は二個の隣り合う励磁コイルを示し、Fig. 2(a)はこれら二個の励磁コイルに逆位相の電流を流した場合の磁束密度分布例である。コイル内の磁束密度の値に対しコイル間の磁束密度は小さくなっていることがわかる。Fig. 2(b)

は二個のコイル間にフェライトコアを持つ検出コイルを挿入したシミュレーション結果である。検出コイルを磁束密度が極めて小さい部分に配置するため励磁コイルによる磁界に影響を与えない。更に、コアに磁性体を使用することが可能となるため感度の向上に繋がる。

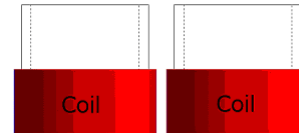
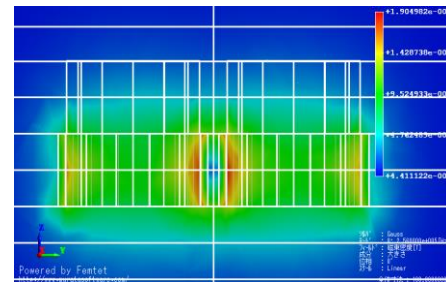
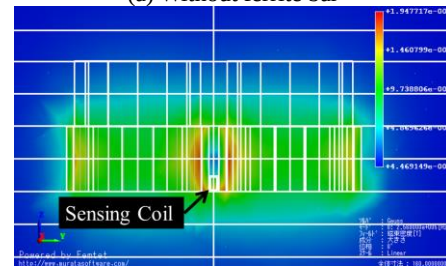


Fig.1 Two exciting coils



(a) Without ferrite bar



(b) With ferrite bar

Fig. 2 Magnetic fields intensity distribution

(4) ∞コイルの 3DFEM シミュレーション

Fig. 3 に示す∞コイルの動作原理を検証するために三次元の有限要素法による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の諸定数を示す。∞コイルは厚さ 1 mm の銅板上に配置され、欠損が無い場合、検出コイルに対し欠損が 0 度、90 度、45 度の場合について計算する。

Table 1 Various constants used in the 3D simulation.

Exciting coil	
Coil outer diameter:	22.4mm
Coil inner diameter:	20mm
Coil length:	10mm
Number of turn:	75
Input current(peak):	250mA
Frequency:	256kHz
Sensing coil	
Coil outer diameter:	1.4mm×2.4mm
Coil inner diameter:	1mm×2mm
Coil length:	6mm
Number of turn:	100
Axis core:	JFEferrite_MB1H_23℃

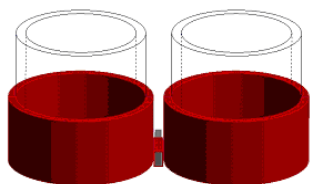
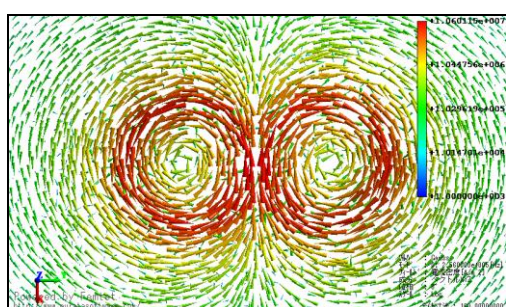
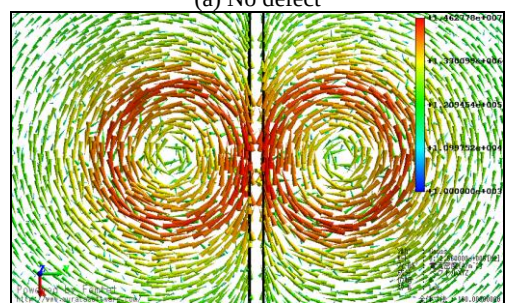


Fig. 3 3D simulation model of the ∞ coil

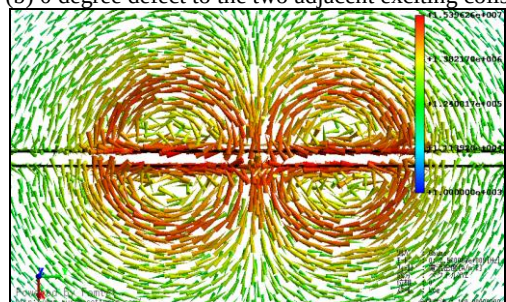
Fig. 4, 5 はそれぞれ銅板上に流れる渦電流と検出コイルのフェライトコア内の磁束密度分布を示している。銅板中に欠損が存在しない場合, Fig. 4(a)に示す渦電流が流れる。渦電流によって生じる磁束密度は検出コイルの面に対し平行方向のみであるため Fig. 5(a)に示す方向となる。したがって欠損が存在しない場合, 検出コイルに誘起電圧は発生しない。



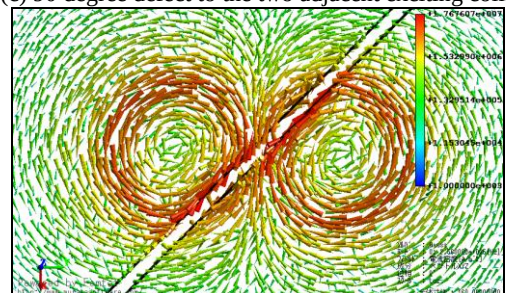
(a) No defect



(b) 0 degree defect to the two adjacent exciting coils



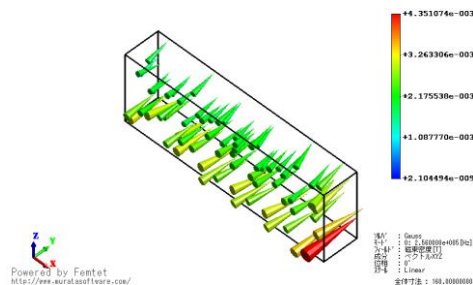
(c) 90 degree defect to the two adjacent exciting coils



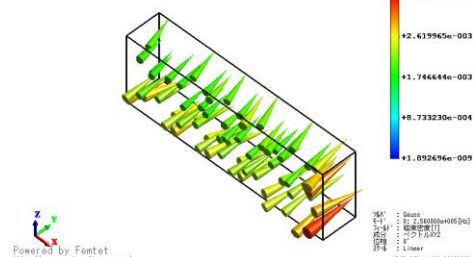
(d) 45 degree defect to the two adjacent exciting coils

Fig.4 Eddy currents in a plane metallic target

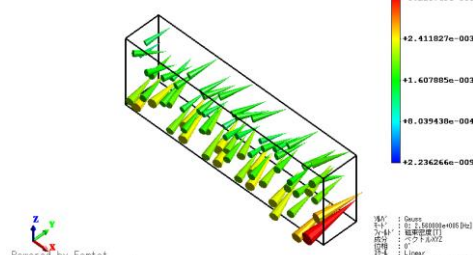
Fig. 4(b)は2 mm の幅の欠損が検出コイルに対し0 度に配置された時の渦電流分布である。渦電流は欠損に沿う方向に流れるが, 検出コイルの面に垂直の磁界を生む成分は流れないためフェライトコア内の磁束密度は Fig. 5(b)となる。0 度の場合も検出コイルに誘起電圧は発生せず, 欠損を検知することは難しい。Fig. 4(c)に欠損が検出コイルに対し90 度に配置した時の渦電流分布を示す。銅板中の渦電流は欠損によって妨げられ, 検出コイルの面に垂直に磁界を作る方向に流れる。しかしながら, 欠損の両端で発生する渦電流は, 互いに打ち消し合う方向に流れるためフェライトコア内の磁束密度は垂直方向に発生しない(Fig. 5(c))。Fig. 4(d) に欠損が検出コイルに対し45 度に配置した時の渦電流分布を示す。渦電流は欠損沿って流れ, 検出コイルに垂直成分を含む磁界を生成する。Fig.5(d)に示すように45 度の方向に磁束が発生するため, 検出コイルに誘起電圧が発生する。



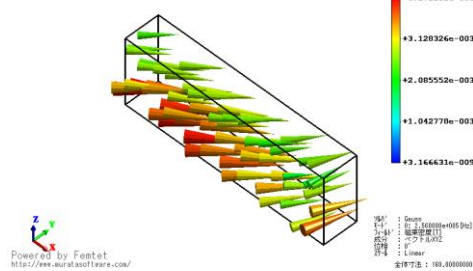
(a) No defect



(b) 0 degree defect to the two adjacent exciting coils



(c) 90 degree defect to the two adjacent exciting coils



(d) 45 degree defect to the two adjacent exciting coils

Fig.5 Magnetic flux density vector distributions in the ferrite bar

Fig. 5(a)-(d)における検出コイルの誘起電圧を Fig. 6 に示す. Fig. 6 より欠損が 45 度の場合, 高い誘起電圧が発生し欠損の有無を識別できることがわかる.

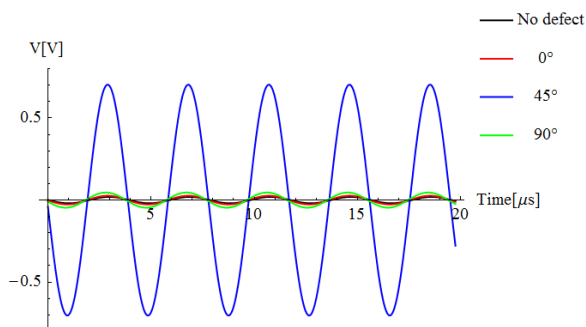


Fig.6 Induced voltages in the sensor coil

3. 実験

(1) 測定方法

検査材料として厚さ 1 mm の二枚の銅板を使用する. 一枚は欠損が無く, 他方は幅が 2 mm の貫通欠損を持つ. Table 2 に ∞ コイルに使用した励磁コイルと検出コイルの諸定数を示す. 我々は二個の励磁コイルと一つの検出コイルを用い Fig.7 に示す ∞ コイルを作製した. Fig.7 に示す ∞ コイルの諸定数は 3D シミュレーションで使用した Fig.3 のモデルと一致している. Fig.7 に示す ∞ コイルを検査材料上に配置し, 欠損が無い場合, 検出コイルに対し欠損が 0 度, 45 度, 90 度の場合で検出コイルの誘起電圧を測定する.

Table 2 Various constants of the prototype ∞ coil

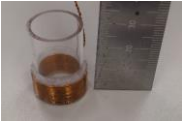
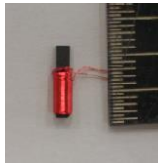
	Exciting coil	
	Conductorlength:	4.7m
	Diameter of conductor:	0.4mm
	Coil outer diameter:	23mm
	Coil inner diameter:	20mm
	Coil length:	10mm
	Number of turn:	75
	Number of coil layers:	3
	Number of coils:	2
	Input current(peak):	250mA
	Frequency:	256kHz
	Sensing coil	
	Conductor length:	60cm
	Diameter of conductor:	0.1mm
	Axis core:	Ferrite bar (MnZn)
	Coil outer diameter:	2.4mm×2.4mm
	Coil inner diameter:	1.4mm×1.4mm
	Coil length:	6mm
	Number of turn:	100
	Number of coil layers:	2
	Number of coils:	1



Fig.7 Picture of the prototype ∞ coil

(2) 測定結果

Fig.8 に検出コイルの誘起電圧を示す. シミュレーションの計算結果と同様に欠損が検出コイルに対し 45 度の場合に高い誘起電圧が発生する. Fig.6 のシミュレーション結果と比較し誘起電圧の値は低くなるが同じ傾向を示していることがわかる. ∞ コイルによって欠損の有無を識別することが可能となった.

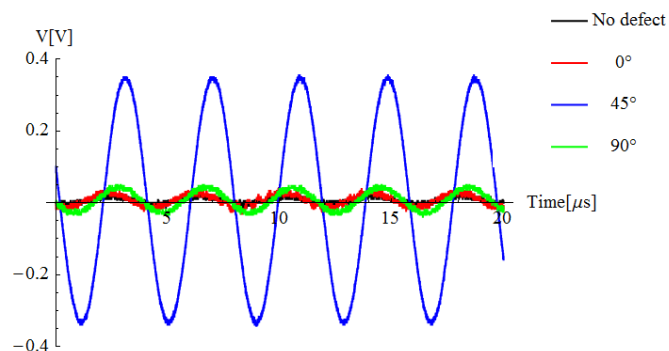


Fig.8 Measured voltages of the practical

4. 従来型 ECT センサに対する優位性

(1) 測定方法

∞ コイルと従来型ECTセンサの特性を比較するために, 三種類のECTセンサのリフトオフ特性を測定する. 測定に使用したSS400から成る検査対象をFig.9に示す. 検査対象の表面上には, 長さ20 mm, 幅0.2 mm, 深さ0.2, 0.3, 0.4 mmの三種類の欠損が存在する. 欠損は, 放電加工によって人工的に作成されたものである. 三種類のECTセンサは二軸駆動マシンにより 50 mm/sの速度で移動させ, 電子磁気工業株式会社の製品である渦流探傷器「ET-5002」によって欠損の信号を測定する. Fig.10に示すET-5002の動作原理は, センサが欠損上を移動するとき, ブリッジ回路の平衡バランスが乱れることによる変化を信号として表示する. 駆動周波数は256 kHzに設定し, リフトオフは, 1 mmから10 mmまで1 mm間隔で測定を行う. また, それぞれのリフトオフ距離において三種類のセンサに対するET-5002のパラメーターは統一する[5].

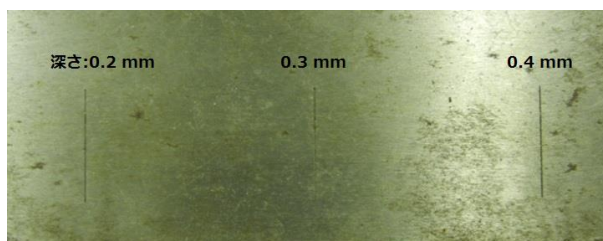


Fig.9 Target piece with three defects



Fig.10 ET-5002 produced by Denshijiki Industry Co., Ltd.

測定に使用した三種類のECTセンサのモデルと諸定数をTable 3,4に示す。従来型ECTセンサとして電子磁気工業株式会社製で励磁・検出コイル分離型とインピーダンス感知型の原理に基づく二種類(Table 4)を用いる。Table 4に示す励磁・検出コイル分離型ECTセンサは励磁コイルに励磁電流を流し、8の字に配置された2個の検出コイルに発生する誘起電圧を信号とする。また、インピーダンス感知型ECTセンサは8の字に配置されたコイルが励磁コイルと検出コイルを兼ね、双方の入力インピーダンスの変化を信号とし、欠損を識別する。

Table 3 Various constants of ∞ coil	
∞ コイル	
Sensing coil	
Diameter of conductor:	0.1mm
Axis core:	Ferrite bar (MnZn)
Coil inner diameter:	0.5mm×2mm
Coil length:	4mm
Number of turn:	100
Number of coil layers:	3
Number of coils:	1
Exciting coil	
Diameter of conductor:	0.12mm
Axis core:	No
Coil inner diameter:	6mm
Coil length:	6mm
Number of turn:	100
Number of coil layers:	3
Number of coils:	2

Table 4 Various constants of the conventional ECT sensor

励磁・検出コイル分離型	
Sensing coil	
Diameter of conductor:	0.1mm
Axis core:	Ferrite bar (MnZn)
Coil inner diameter:	1mm×2mm
Coil length:	10mm
Number of turn:	50
Number of coil layers:	2
Number of coils:	2
Exciting coil	
Diameter of conductor:	0.12mm
Axis core:	No
Coil inner diameter:	4mm
Coil length:	12mm
Number of turn:	100
Number of coil layers:	1
Number of coils:	1
インピーダンス感知型	
Sensing coil	
Diameter of conductor:	0.1mm
Axis core:	Ferrite bar (MnZn)
Coil inner diameter:	0.5mm×2mm
Coil length:	10mm
Number of turn:	100
Number of coil layers:	3
Num4ber of coils:	2
Exciting coil	
X	

(2) 測定結果

ET-5002によって得られた三種類の測定信号をFig.11に示す。三種類のセンサとも5個のピークが生じていることがわかる。5個のピークの中で、検査対象上の欠損によって生じた信号はFig.11に示す②-④である。①と⑤の信号は、それぞれセンサが検査対象に近づいた場合と離れた場合に生じた信号であるため、ここでは②-④の信号について議論していく。全てのセンサにおいて、3個のピークの大きさは欠損の深さに比例していることがわかる。Fig.11の信号の中で、 ∞ コイルで得られた信号は、他のセンサと比較して、最も感度が高いことがわかる。より詳細な特性を評価するために、深さ0.2 mmの欠損によって生じた②の信号に注目する。

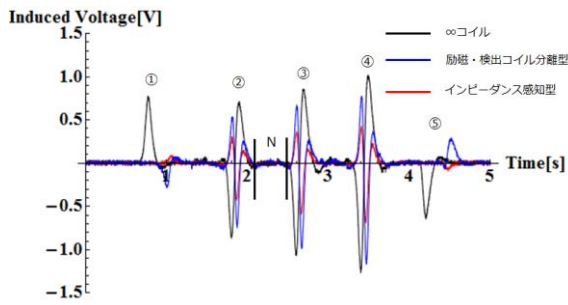


Fig.11 Induced voltage (lift-off = 2mm)

(3) 測定の比較

リフトオフを1 mmから10 mmに変えたときの②信号のピーク値をFig.12に示す。∞コイルの誘起電圧が多くのリフトオフ条件で従来型と比較し優位性があることがわかる。しかし、リフトオフが1 mmと6 mmの場合、励磁・検出コイル分離型が最も高い誘起電圧を発生している。欠損を測定する場合、GAINを大きくすると誘起電圧が大きくなり検出感度は高くなるが、欠損以外のノイズ信号も増幅してしまう。したがって、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, 以後、SN比と略記)で評価する必要がある。Fig.13にリフトオフを1 mmから10 mmに変えたときのSN比特性を示す。ここで、検出信号Sは②信号のピーク値であり、ノイズ信号NはFig.11に示すNの区間の最大値をノイズ信号とする。Fig.13で示すように、SN比はリフトオフの大きさに逆比例している。SN比の評価では全てのリフトオフにおいて、∞コイルに優位性があることがわかった。

今回の測定ではリフトオフに対するET-5002の設定値を経験的に決定したが、検査対象の条件に応じて設定値を決定する必要がある。すなわち、欠損の判定は最終的には過去のデータに基づく経験的閾値で決定せざるを得ない。

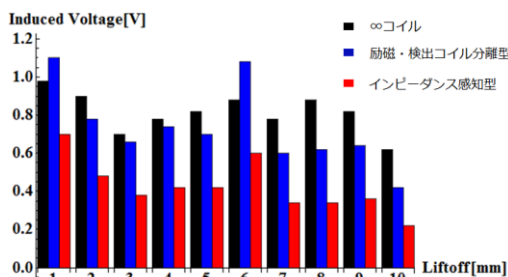


Fig.12 Peak signal magnitude vs. lift-off

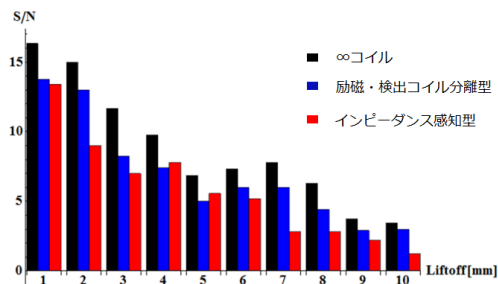


Fig.13 SNR vs. lift-off

5. まとめ

本論文は∞コイル型渦電流センサを提唱し、有限要素法によるシミュレーションと実験的検証、および従来型 ECT センサと特性比較を行った。2, 3 章では、三次元の有限要素法シミュレーションによって新型の高感度渦電流センサ「∞コイル」を開発について提案した。

∞コイルは励磁電流により磁界がループ状に形成されるため、二個の励磁コイルの間に磁界が極めて小さい値となる部分が生まれる。この磁界が小さい値になる部分へ検出コイルを配置する概念が最も大きなキーポイントであり、検査対象中に欠損が存在する場合のみに発生する磁界変化を検出できる高感度のセンサに繋がった。

4 章では、∞コイルと市販されている従来型 ECT センサの比較実験を行った。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、∞コイルと二種類の従来型 ECT センサのリフトオフ特性を測定した。SS400 の検査材料では∞コイルが従来のセンサと比較し、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、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及川芳朗会長、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.Marinoa, S.Hayano and Y.Saito: Ployphase 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) 菊地原弘基, 齋藤兆古, 大内学, 茂木秀夫, 及川芳朗: 新∞型渦電流センサの開発, 第 21 回 MAGDA コンフェランス in 仙台, OS6-8, pp.181-185, 2012.
- 5) Hiroki KIKUCHIHARA, Iliana MARINOVA, Yoshifuru SAITO, Manabu OHUCHI, 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.