

∞コイル型渦電流センサによる 裏側欠損探傷に関する研究

A Study on Backside Defect Searching by means of the Flat ∞ Coil Eddy Current Sensor

濱中峻一

Shunichi HAMANAKA

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

This paper describes the backside defect searching by means of the low frequency excitation to the flat shape of ∞ coil eddy current sensor. Low frequency excitation to the eddy current sensors confronts to an environmental noise problem in the practical field tests. To overcome this difficulty, this paper employs two methodologies. One is an averaged sum and the other is the Fourier transform signal processing methods to reduce the higher frequency noise components.

As a result, we have elucidated that the backside defect searching is possible by employing the low frequency excitation to the flat shape of ∞ coil eddy current sensor. Experimental as well as numerical verifications along with intensive three-dimensional finite element method simulations are carried out to confirm our results.

Key Words : Eddy current testing, Non-destructive testing, Flat shape of ∞ 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。

本論文は、励磁・検出コイル分離型 ECT の一種である平面型∞コイルを用いた被検査対象の裏面探査に関する研究である[4-6]。

ECT は周波数が高いと高感度であるが表皮浸透深さ

は浅くなり、結果として検査対象の表面しか探査できない。周波数が低いと感度は下がるが表皮浸透深さは深くなり、被検査対象の表面のみならず対象の深部の欠損まで探査できる。

さらに、配管減肉など曲面を有する被検査対象などの欠損探査が課題とされている背景から、本論文では曲面探傷に柔軟に対応可能なフレキシブルな平面型 ∞ コイル ECT センサを用いる裏面欠損探査を提案する。

その結果、平面型 ∞ コイル ECT センサは単純な平面のみならず曲面を有する被検査対象の比較的深部の欠損や裏面欠損が探査可能であることを 3 次元有限要素法に拠る数値シミュレーションとその実験的検証で明らかにする。

2. ∞ コイル型 ECT センサ

(1) 動作原理

∞ コイルの原理的な特徴は、 ∞ 文字状に巻かれた二個の励磁コイルに通電し、左右の励磁コイル下端に N 極と S 極の磁極を形成し、N 極と S 極の磁極の間には必ず存在するゼロ磁界領域に磁性体コアに巻いた検出コイルを配置する点にある。被検査対象が存在しない、もしくは被検査対象に欠損が存在しない場合、励磁コイルが生成する磁界強度分布の対象性が保たれるから、ゼロ磁界領域も維持され検出コイルには電圧は誘起しない。しかし、磁界強度分布の対象性が被検査対象中の欠損に起因して崩され、結果としてセンサコイルに誘起する電圧から欠損が感知される。

換言すれば、N 極と S 極間には必ずゼロ磁界領域が存在する。励磁コイルが生成する N 極と S 極の磁界強度分布が対象である限り、励磁コイル間のゼロ磁界領域は維持される。しかし、被検査対象に欠損があれば、欠損に起因する渦電流分布の非対称性に起因する磁界は検出コイルへ鎖交する。結果として検出コイルに電圧が誘起し欠損が探知される。

実際は、磁界がゼロとなる領域は限られた微小範囲であるため、検出コイル軸はゼロ領域へ平行に被検査対象面へ最も接近した位置へ配置する。すなわち、 ∞ 文字状の励磁コイル軸へ磁界が直交する方向へ検出コイルの軸を配置し、励磁コイルと検出コイル間の相互インダクタンスをゼロにする。両者に相互結合が起こるのは検査対象の欠損を通じた場合のみとする。これが回路的な観点から見た ∞ コイルの動作原理である [4, 5]。

(2) 低周波励磁

ECT の検査対象に対する磁束の表皮浸透深さは駆動周波数に依存性する。磁束の表皮浸透深さは駆動周波数の平方根に反比例するため、駆動周波数が数メガ Hz と比較的高い場合検査対象の深部まで浸透せず、欠損の表面のみしか渦電流が誘起されない。すなわち探査範囲が表面に限定される。

励磁周波数を低減することにより検査対象の深部まで磁束が浸透し、渦電流が検査対象の深くまで誘起されるため、結果として検査対象の裏側の欠損探傷が可能と考えられる。

(3) 表皮浸透深さ

表皮浸透深さ d は以下のように定義される。

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (1)$$

ここで、被検査対象の比透磁率は 1 とし、式(1)のパラメータは以下の通りである。

$$\omega : 2\pi f,$$

$$f : \text{周波数 [Hz]},$$

$$\mu : \text{真空中の透磁率 } 4\pi \times 10^{-7} [\text{Hm}],$$

$$\sigma : \text{導電率 [S/m]}$$

電流は表面から内部に浸透するに従い $e^{-x/d}$ の形で減少する。表面から内部への浸透深さ $x = d$ の点での電流が表面の値が $1/e$ になる。この d が表皮浸透深さと呼ばれる [3] [6]

3. 裏側欠損探査実験

(1) 平面欠損探査

(1-1) シミュレーション

リフトオフとは、ECT センサと被検査対象間の距離である。このリフトオフと感度の関係、すなわち、リフトオフ特性が ECT として最も重要であることは自明である。

ここでは、リフトオフを 0.2mm から 3mm まで変化した場合のセンサ出力電圧を吟味する。

被検査対象は厚さ 2mm の銅板からなり、裏面に幅 2mm、深さ 1mm の直線状欠損が存在からなる。Fig.1 は、三次元有限要素法のシミュレーションモデルを示し、Table.1 は、励磁コイルと検出コイル、それぞれの諸定数を示す。

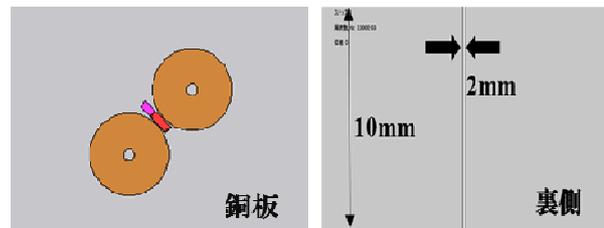


Fig.1. Schematic diagram of the 3D FEM simulation

リフトオフを 0.2mm から 3mm まで変化した場合のシミュレーション結果に関して述べる。

励磁周波数を 2kHz とした場合、表皮浸透深さは(1)式

より

$$d = 1.477 [mm]$$

となる。

よって、深さ 1mm 以上の深さに存在する裏側欠損探傷が可能であると考えられる。

Table.1 Various constants of the flat shape of ∞ coil.

(a) Exciting coil	
Coil outer diameter	22.0mm
Coil inner diameter	3.0mm
Coil length	0.4mm
Number of turn	20
Input voltage(peak)	3V
Frequency	2kHz
(b) Sensing coil	
Coil outer diameter	1.4mm×2.4mm
Coil inner diameter	1.0mm×2.0mm
Coil length	6mm
Number of turn	100
Axis core	MnZn/ferrite (permiability:3000)

∞ コイルの探査感度、すなわち、直線状欠損による渦電流の乱れが検出コイルの電圧を最大とする場合は、直線状欠損が検出コイル軸に対して 45 度である場合であり、全てのシミュレーションは上記の最大感度条件で行う。

Fig.2 はリフトオフが 0.2mm から 3mm とした場合のシミュレーションによるピーク出力電圧である。Fig.2 で、センサピーク誘起電圧は、リフトオフ 0.2、0.6、1、2、さらに 3mm に対してそれぞれ 2.95、2.52、2.02、1.59、0.93mV である。これはリフトオフを 0.2mm から 3mm まで不規則な間隔で 5 点変更した場合、センサピーク出力電圧はリフトオフに対して反比例する傾向を示すことを意味する。

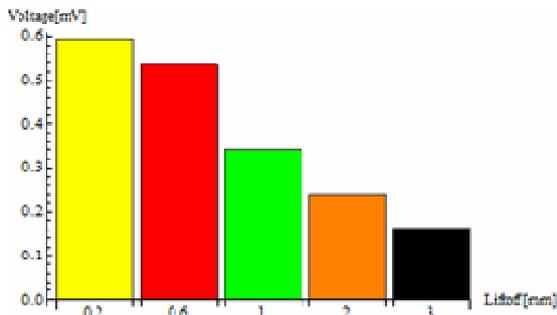


Fig.2. Induced voltage vs. liftoff

(1-2) 実験

a) 実験方法

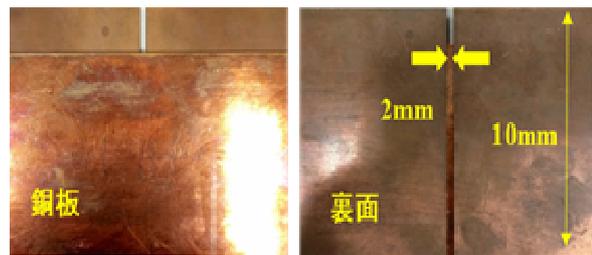
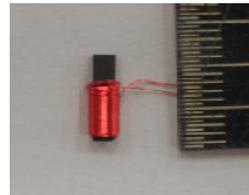
シミュレーション結果の妥当性をしらべるため、Table.2 の仕様で作成された諸定数の試作平面型 ∞ コイルのリフトオフ特性を実験で求める。実験に使用した被検

査対象である銅版と試作平面型 ∞ コイルをそれぞれ Fig.3(a)と 3(b)に示す。

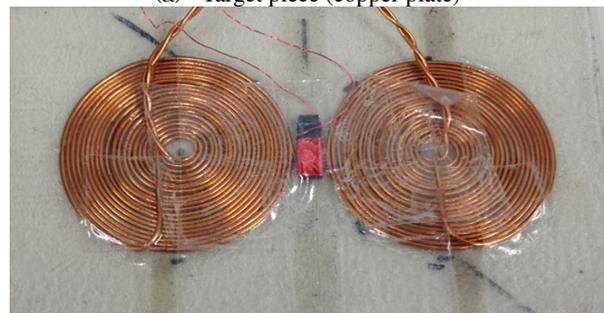
Fig.3(a)に示す被検査対象中の幅 2mm、深さ 1mm の直線状裏面欠損は幅 2mm の銅板の裏面に厚さ 1mm の無欠損な銅板 2 枚を 2mm の間隔を空けて重ねることで模擬した。Fig.3(b)に示す試作 ∞ コイルは 2 個の励磁コイルと 1 個の検出コイルからなり、諸定数はシミュレーションで用いた Fig.1 のそれらと同一である。

Table.2. Various constants of the flat shape of prototype ∞ coil

Exciting coil	Coil outer diameter
	21.0mm
	Coil inner diameter
	17.0mm
	Coil length
	8.0mm
	Number of turn
	20
	Input voltage(peak)
	3V
	Frequency
	2kHz
Sensing coil	Coil outer diameter
	1.4mm×2.4mm
	Coil inner diameter
	1.0mm×2.0mm
	Diameter of conductor
	0.1mm
	Coil length
	6mm
	Number of turn
	100
	Number of coil layers
	2
	Axis core
	MnZn/ferrite (permiability:3000)



(a) Target piece (copper plate)



(b) Flat shape of ∞ coil

Fig.3. The target piece and flat shape of ∞ coil

試作の coils を、手動で移動させ、渦流探傷器 ET-5002 によって欠損に起因する信号を測定する。Fig.4 に示す ET-5002 は、センサが欠損上を移動するとき、ブリッジで信号を検出しリサージュ表示する。励磁周波数を 2 kHz に設定し、リフトオフは 0.2mm から 3mm まで不規則な間隔で 5 点変更して測定した。また、ET-5002 の Gain、ハイパスフィルタ、ローパスフィルタをそれぞれ 60dB、off、10Hz に設定した。



Fig.4. ET-5002 ECT signal processor made by Emic (Denshijiki Industry Co., Ltd).

b) 実験結果

ET-5002 によって得られた検出信号波形を Fig.5 に示す。検出信号には 5 個のピークが存在し、それぞれ裏面欠損付近をセンサが通過した場合の検出信号波形に対応する。5 個のピーク誘起電圧の大きさは 5 段階のリフトオフ位置に対応している。

Fig.5 で、センサピーク出力電圧は、リフトオフ 0.2、0.6、1、2、さらに 3mm に対してそれぞれ 2.95、2.52、2.02、1.59、0.93mV である。これは、リフトオフを 0.2mm から 3mm まで不規則な間隔で 5 点変更した場合、センサピーク出力電圧はリフトオフに対して反比例する傾向を示すことを意味する。すなわち、リフトオフが大きくなればセンサピーク出力電圧は減少する

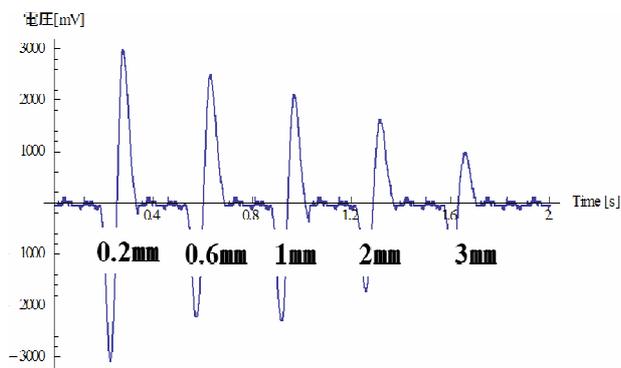


Fig.5. Induced voltage vs. lift-off (flat surface)

c) シミュレーションと実験値の比較

Fig.2 と Fig.5 を比較すると、概ねの傾向は一致しているが、センサピーク出力電圧の値に差異がある。これらと比較するため、それぞれの結果をそれぞれの絶対最大

値を基準として正規化する。すなわち、Fig.2 と Fig.5 それぞれの絶対最大値でそれぞれの出力信号を割り算し、両者の最大値を 1 と正規化して、両者を比較する。Fig.6 が結果である。

Fig.6 から、リフトオフが大きくなると実験とシミュレーション値の相違が大きく、シミュレーションの方が大きな値をとる。これは、リフトオフが大きくなるほど実際の実験環境の影響が大きくなることを意味する。より具体的には、実際の実験環境では実験装置を支える機材が強磁性体である鉄で構成されるため、リフトオフが大きくなるほど磁性体の影響が支配的となりセンサ感度低下を促したことを示唆している。

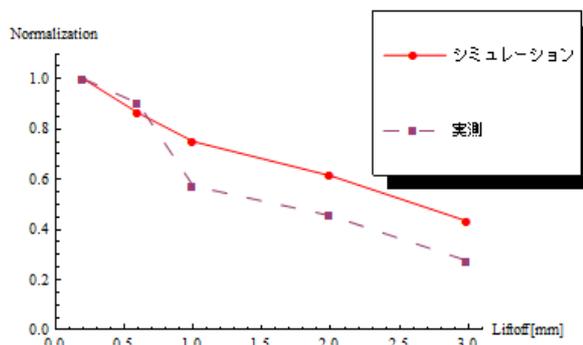


Fig.6 Comparison between the normalized simulation and experimental results.

(2) 曲面中の欠損探査

(2-1) シミュレーション

ここでは、リフトオフを 0.2mm から 3mm まで変化した場合、曲面形状を持つ検査対象のセンサ出力電圧特性を吟味する。

曲面形状を持つ被検査対象は厚さ 2mm の銅板からなり、裏面に幅 2mm、深さ 1mm の直線状欠損が存在する。Fig.7 は、三次元有限要素法のシミュレーションモデルを示し、励磁コイルと検出コイル、それぞれの諸定数は、Table.1 と同様である。

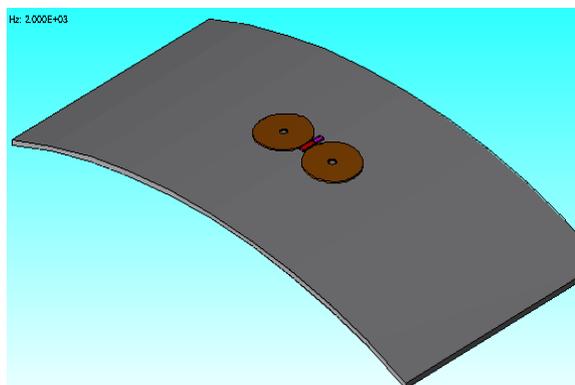


Fig.7. Schematic diagram of the 3D FEM

Fig.8 はシミュレーションに拠る検出コイルのピーク

出力電圧とリフトオフの関係である。

Fig.8 で、センサピーク出力電圧は、リフトオフ 0.2、0.6、1、2、さらに 3mm に対してそれぞれ 3.56、2.98、2.63、1.61、1.33mV である。したがって、Fig.8 のシミュレーション結果は、リフトオフを 0.2mm から 3mm まで不規則な間隔で 5 点変更した場合、Fig.2 と同様にセンサピーク出力電圧はリフトオフ距離に反比例する傾向を示す。

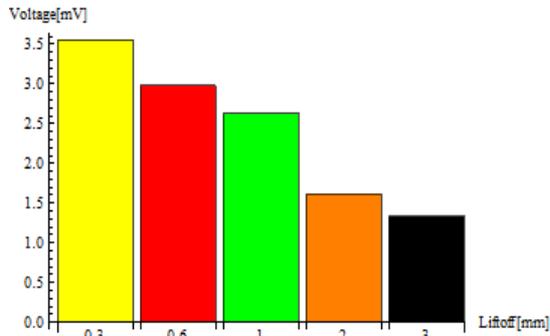


Fig. 8. Induced voltage vs. liftoff

(2-2) 実験

a) 実験方法・結果

シミュレーション結果の妥当性を調べるため、Table.2 の仕様で作成された諸定数の試作平面型 ∞ コイルのリフトオフ特性を実験で測定する。実験に使用した被検査対象である銅版を Fig.9 に示す。試作 ∞ コイルは Fig.3(b) と同一である。実験方法は、平面裏面探査の場合と同様に行った。

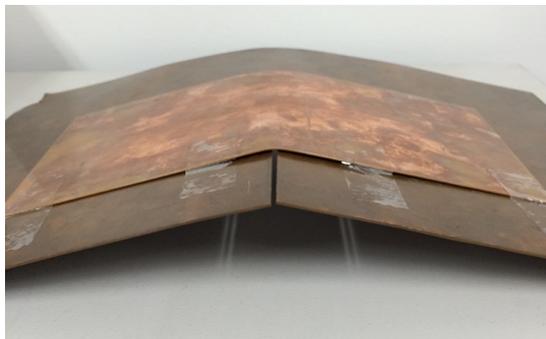


Fig.9. The target tested piece(curved surface)

ET-5002 によって得られた検出信号波形を Fig.10 に示す。

平面裏面探査と同様で出力信号には 5 個のピークが存在し、それぞれ、裏面欠損付近をセンサが通過した場合の出力信号波形であり、5 個のピーク出力電圧の大きさは 5 段階のリフトオフに対応している。

Fig.10 で、センサピーク出力電圧は、リフトオフ 0.2、0.6、1、2、さらに 3mm に対してそれぞれ 2.24、2.08、1.6、1.2、0.72mV である。すなわち、Fig.10 は、リフトオフを 0.2mm から 3mm まで不規則な間隔で 5 点変更した場合、センサピーク出力電圧はリフトオフに対して反比例する。言い換えれば、リフトオフが大きくなればセンサピーク出力電圧は減少する。

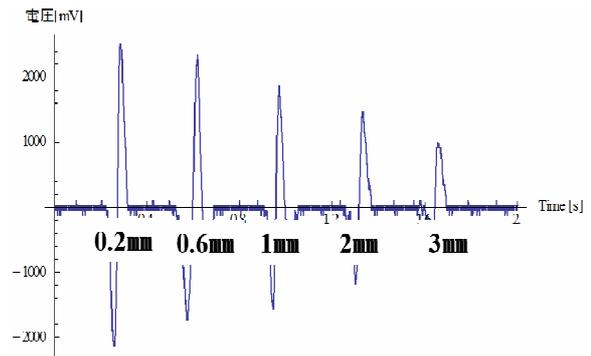


Fig.10. Induced voltage vs. liftoff (curved surface)

b) シミュレーションと実験値の比較

Fig.8 と Fig.10 を比較すると、いずれの結果もリフトオフが大きくなればセンサピーク出力電圧は減少傾向を呈するがわかる。

この傾向を詳細に評価するため、被検査対象が平面の場合と同様に、Fig.8 と Fig.10 それぞれを最大値 1、最小値 0 へ正規化して Fig.8 のシミュレーションと Fig.10 の実験結果を比較する。

Fig.11 が結果である。正規化された出力は、シミュレーション結果に対して、リフトオフ 0.2、0.6、1、2、さらに 3mm に対してそれぞれ 1、0.86、0.75、0.61、0.43 であり、実験値に対して、それぞれ 1、0.9、0.57、0.45、0.27 である。

Fig.11 から、リフトオフが大きくなると実験とシミュレーション値の相違がほとんどなく、リフトオフに対して反比例する傾向が伺える。

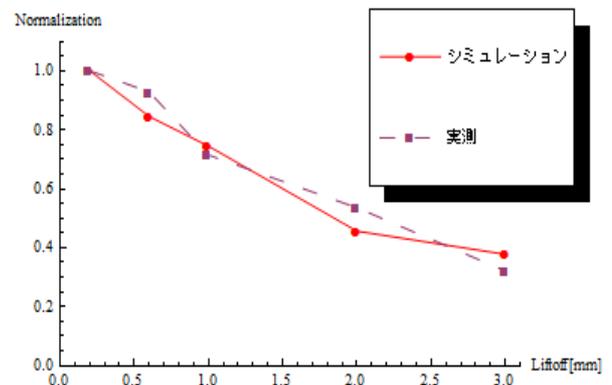


Fig.11 Comparison between the normalized simulation and experimental results.(curved surface)

Fig.6 と Fig.11 を比較すると、曲面探査の方が平面探査と比べ、シミュレーションと実験で差異が生じなかった。これは、曲面探査において被検査対象を磁束が通過する磁路が短くなるためセンサ誘起電圧が高く、絶対的なセンサ感度が向上し環境ノイズの影響が無視できるためと考えられる。

参考文献

4. まとめ

本研究は、平面型 ∞ コイルセンサの低周波駆動による裏側欠損探査に関して述べた。その結果、有限要素法によるシミュレーションと実際の実験結果で平面对象だけではなく曲面対象においても、裏面欠損探査が可能であることを明らかにした。

平面型 ∞ コイルの欠損検出能力の高さは、有限要素法によるシミュレーションと実験的検証によって実証されている。しかしながら、表面に対する欠損に関しては高感度であったが裏面探査に対して有効性があるのか未知であった。本論文では平面型 ∞ コイルの低周波駆動による裏面探査に関して考究した。

その結果、平面型 ∞ コイルの低周波駆動で平面のみならず曲面の裏面欠損探査が可能であり、特にリフトオフ特性は有限要素法を用いたシミュレーションと実際の実験結果は良好に一致することを示した。

一般に曲面の裏面探査は平面のそれに比較して困難と考えられるが、平面型 ∞ コイルの励磁コイルはフレキシブルに検査対象の曲面を覆うことが可能であり、平面よりも曲面の裏面探査が高感度に行えることは興味深い。

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、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。

- 1) I.Marinova, 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 Transaction on Magnetics*, Vol.25, No.4, pp.3010-3012, 1989.
- 3) S.McFee and J.P.Webb, "Automatic mesh generation for h-p adaptation, " *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.29, No.2, pp.1894-1897, 1993.
- 4) 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.
- 5) Kouki MARUYAMA, Iliana MARINOVA, Yoshifuru SAITO, "Development of Flat ∞ Coil for Defect Searching in the Curved Surfaces, " *E-Journal of Advanced Maintenance* Vol. 7-1, pp.59-65, 2015.
- 6) Shunichi Hamanaka, Yoshifuru Saito, Iliana Marinova, Manabu Ohuchi, Hideo Mogi and Yoshiro Oikawa, "Backside Defect Searching by Means of the Low Frequency ∞ Coil Excitation" *SIELA 2014 18th International Symposium*, 29-31 May 2014, published by IEEE