法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-31

∞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

HAMANAKA, Shunichi / 濱中, 峻一

(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)
57
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
6
(発行年 / Year)
2016-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00013656

∞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 ∞ 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修士課程

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・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 平面型の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極の磁極の中間には必ず存 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 象の欠損を通した場合のみとする.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 的に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.

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{1}$$

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

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

$$f$$
:周波数 [Hz],

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

$\sigma:$ 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る.

Table.1 Various constants of	f the flat shap	pe 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			
	1. (11111) (2. (11111)			
Coil inner diameter	1.0mm×2.0mm			
Coil inner diameter Coil length	1.0mm×2.0mm 6mm			
Coil inner diameter Coil length Number of turn	1.0mm×2.0mm 6mm 100			
Coil inner diameter Coil length Number of turn Axis core	1.0mm×2.0mm 6mm 100 MnZn/ferrite			

∞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.



(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 Fig3(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	e flat	shape	of
----------	---------	-----------	--------	--------	-------	----

prototype ∞ coil				
Exciting coil	Coil outer diameter			
		21.0mm		
XIX	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 layer	rs 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 ∞ コイルを、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.これらを比較するため、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.





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.

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対象だけ 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 心より感謝致します.

参考文献

- 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 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, "DevelopmentSNf Flat ∞ Coil for Defect Searching in the Curved Surfaces, E-Journal of Advanced Maintenace Vol. 7-1, pp.59-65, 2015.
- 6) Shunichi Hamanaka, Yoshifuru Saito, Iliana Marinova, Manabu Ohuch, 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