

# マルチコイルプローブを用いた渦電流探傷による 磁性材に対する割れ抽出技術

Crack Extraction technique for Magnetic Materials  
by Eddy Current Testing with Multi Coil Probe

(株) 日立製作所	三木 将裕	Masahiro Miki	
	成重 将史	Soushi Narishige	
	遠藤 久	Hisashi Endou	Member
日立 GE (株)	吉田 功	Isao Yoshida	
東北大学	高木 敏行	Toshiyuki Takagi	Member
	内一 哲哉	Tetsuya Uchimoto	Member

## Abstract

Eddy current testing (ECT) with multi coil probe has been developing for enhancing surface inspection. Defect extraction method based on phase angle of lissajous waveform was effective to identify between defects and noises. This paper describes applicability of crack extraction method for magnetic material. The criteria based on feature of phase angle on magnetic material could extract defects to separate from noises like liftoff using experiment and simulation.

**Keywords:** Eddy current testing, multi coil probe, magnetic material, phase angle analysis, crack extraction

## 1. 緒言

渦電流探傷法(ECT)は、構造物の表面検査技術を非接触で定量的に評価できる手法であるため、多くの研究開発がなされている。著者らは一回のプローブ走査で広範囲を測定できるマルチコイル (アレイ) プローブを用いた検査技術の開発を推進している。

マルチコイルプローブはフレキシブルなシートの上に複数のコイルを配列した構造であるため、一度に広範囲を測定でき、構造物の形状に追従して測定できる特性を利用して曲面などの複雑形状部でも検査できる[1][2]。これまでに、マルチコイルプローブによる割れ検出性は、ステンレス鋼や高ニッケル合金などの非磁性材に対する測定結果が報告されている。また、磁性材に対する割れの検出性能についても報告されている[3][4]。

一方で、ECT ではリフトオフに代表されるノイズと割れ信号を識別することが重要である。これまでに、非磁性材においてはマルチコイルプローブの位相角に着目してノイズと割れを識別できることが示されている[5]。本報告では、磁性材における割れ信号の特徴を実験とシミュレーションで分析し、これらの特徴に基づいてノイズを分離して割れ信号を抽出する技術に関して報告する。

## 2. マルチコイルプローブによる探傷

著者らが適用を進めているマルチコイルプローブの構成と測定方法について説明する。図1 に示すマルチコイルプローブは複数のコイルを千鳥状に配列した構造であり、コイルの励磁と検出を電子的に切り替えて測定を行う。測定には2つの測定モードを用いる。第1の測定モードは、左列に並んだコイルから励磁コイルと検出コイルを組合せて (例えば、 $E_v$  と  $D_v$ ) 測定する V 検出モードである。第2の測定モードは、左列に並んだ励磁コイルと右列に並んだ検出コイル(例えば、 $E_H$  と  $D_H$ )を組合せて測定する H 検出モードである。コイルの組合せを切替えながら測定することで、割れの進展方向によらず任意の

連絡先:三木将裕、〒319-1221 茨城県日立市大みか町  
7-2-1, (株)日立製作所 研究開発グループ エネルギー  
イノベーションセンタ 原子力システム研究部  
E-mail: masahiro.miki.np@hitachi.com

方向の割れに対して検出できる。

測定例として試験体表面に加工したノッチの測定体系を図2に示す。表面に沿ってプローブを移動させて測定を行う。この測定結果はCスコープ画像で表示して、割れの表面性状を確認できる。図3は、磁性材に付与したプローブ長手方向の深さ1mmのノッチの測定結果である。磁性材の場合、V検出モードでは正值、H検出モードでは負値の信号として表示される。

また、割れの識別評価にはリサージュ波形を用いる。図4に示す2つの結果は図2の体系で測定した。リサージュ波形では各検出モードの信号の振幅と位相角 $\theta$ に基づいて評価するが、これらは材料の磁気特性に依存する。図4(a)に示す非磁性材のリサージュ波形の特徴はV検出モードの振幅は大きく $\theta$ は $90^\circ$ となる。また、H検出モードの振幅は小さい。図4(b)に示す磁性材のリサージュ波形の特徴はV検出モードの振幅は大きく $\theta$ は $90^\circ$ となる。H検出モードの振幅も大きく、 $\theta$ は $250^\circ$ である。

### 3. シミュレーションによる検討

前章で示したように磁性材と非磁性材のリサージュ波形の特徴が異なる。この違いをシミュレーションにより考察した。シミュレーションには変形磁気ベクトルポテンシャル法に基づいた3次元渦電流解析コードを用いた[6]。ここでは割れと検出モードの方向がなす角 $\alpha$ の2つの場合に対する結果を示す。

はじめにV検出モードに相当するコイル配置での結果について述べる。図5に $\alpha$ が $0^\circ$ の場合のコイルおよび試験体断面の磁束密度に関するシミュレーション結果を示す。図5(a)には解析時のコイルと割れの配置を示し、図5(b)には非磁性材、図5(c)には磁性材における検出コイル近傍の解析結果を示す。非磁性材では割れを迂回するように渦電流が試験体内部まで流れ、コイルに磁束が発生する。しかし、磁性材では渦電流が試験体表層部に強く流れ、検出コイルの試験体近傍に強い磁束が発生する。これらの磁束変化をV検出モード信号として検出する。

次に、H検出モードに相当するコイル配置での結果について述べる。図6に $\alpha$ が $90^\circ$ の場合のコイルおよび試験体断面の磁束密度に関するシミュレーション結果を示す。図6(a)には解析時のコイルと割れの配置を示し、図6(b)には非磁性材、図6(c)には磁性材における検出コイル近傍の解析結果を示す。非磁性材ではコイル内部の磁束変化は小さいが、磁性材では試験体近傍のコイル中心に

強い磁束変化が発生する。これは漏洩磁束によるものであり、磁性材ではこの変化のためH検出モードで強い信号を検知している。

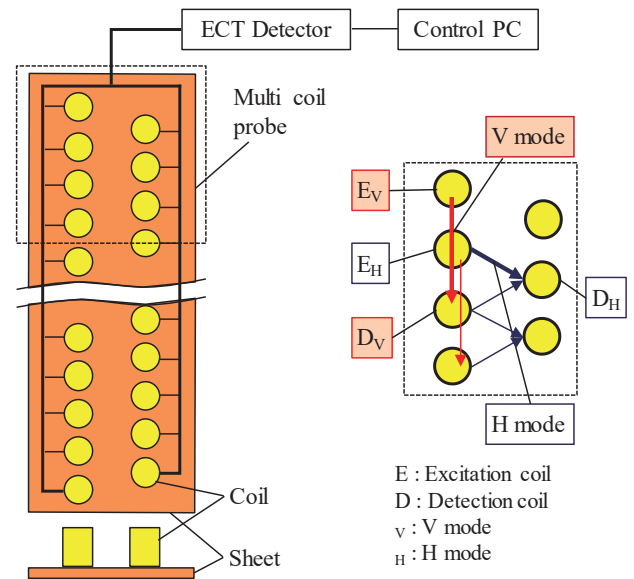


Fig.1 Multi coil probe and scan mode on measurement

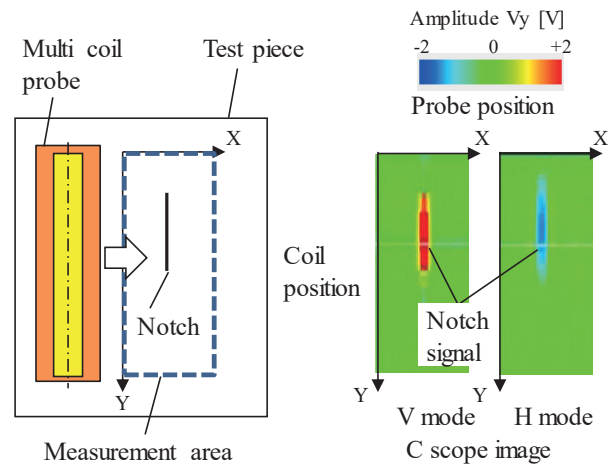
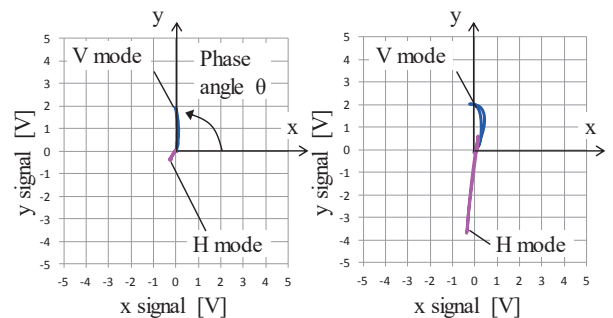


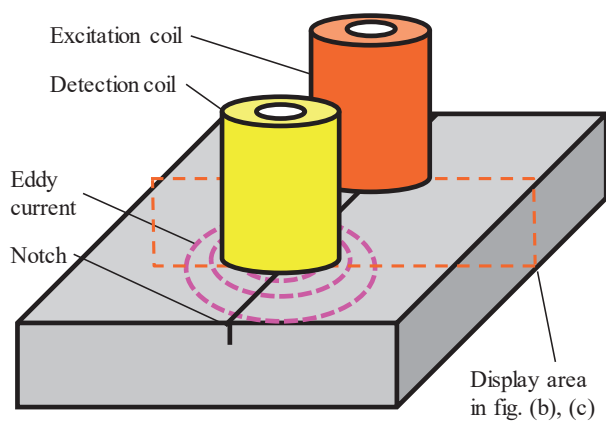
Fig.2 Measurement setup for test piece with notch

Fig.3 Result with multi coil probe for magnetic material

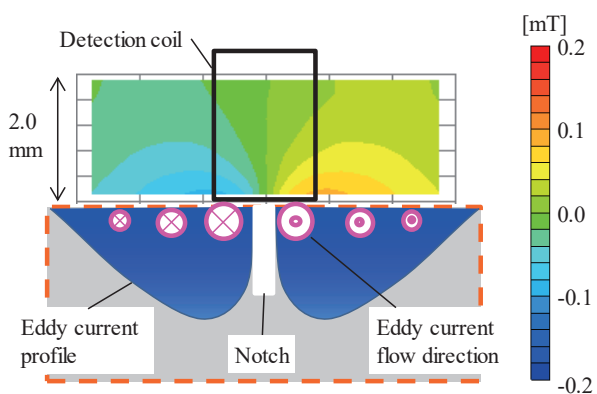


(a) Nonmagnetic material (b) Magnetic material

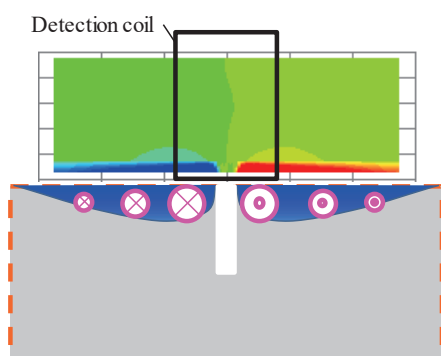
Fig.4 Comparison of lissajous waveform between non-magnetic material and magnetic material



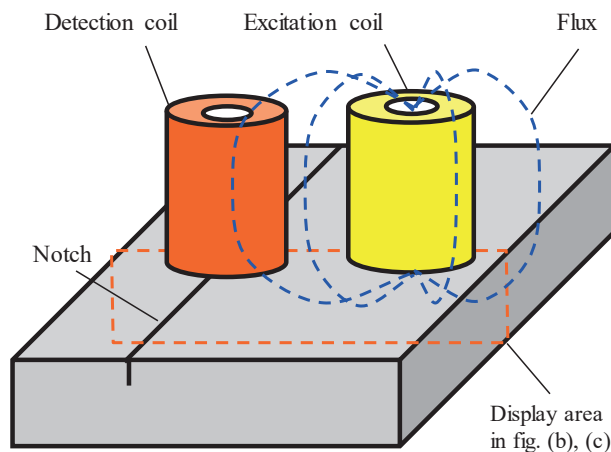
(a) Coil arrangement against slit



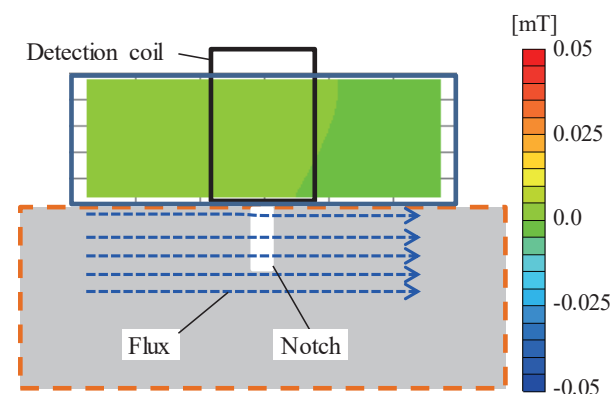
(b) Result of non-magnetic material



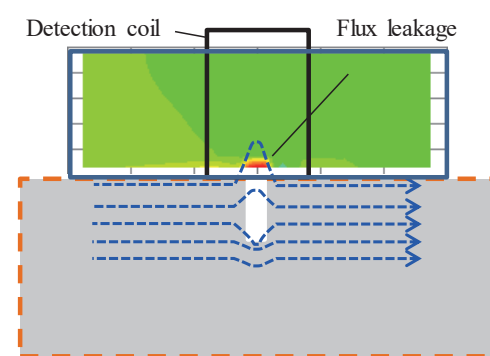
(c) Result of magnetic material



(a) Coil arrangement against slit



(b) Result of non-magnetic material



(c) Result of magnetic material

**Fig.5 Flux density profile due to eddy current flow at  $\alpha=0$  deg. by simulation**

**Fig.6 Flux density profile due to flux leakage at  $\alpha=90$  deg. by simulation**

#### 4. 割れ抽出技術

前章までに検討したV検出モードとH検出モードでのリサージュ波形の特徴である信号振幅と位相角に考慮した信号処理によって、割れ信号の抽出技術を開発した。これまでに非磁性材では有効であることを確認されているため[5]、磁性材に対する有効性を確認した。

ここでは、表面部をガウジング加工した試験体での検出試験について説明する。マルチコイルプローブでの測定結果を図7に示す。試験体は磁性材である低合金鋼を用いた。試験体には2つのノッチを縦方向に加工し、点線で囲んだ範囲の試験体表面部はガウジング加工した。これにより、表面部では試験体とコイルの距離が不均一となるためリフトオフノイズが発生する。図7(a)にマルチコイルプローブでの測定結果を示す。V検出モードの測定画像において、ノッチ信号の他に、ガウジング部の境界および中央部でリフトオフにより生じた強いノイズ信号を測定した。この測定信号に対して、割れ信号の抽出処理を実施した結果を図7(b)に示す。ガウジング部のノイズ信号は除去でき、ノッチ信号のみを抽出できることを確認した。

#### 5. まとめ

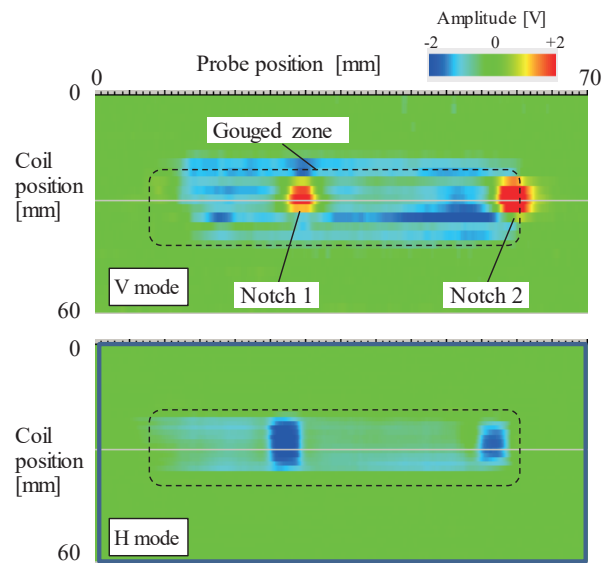
マルチコイルプローブを用いたECTの磁性材への適用を検討している。磁性材での割れ信号の特徴として、V検出モードとH検出モードの2つの測定方式で強い信号が発生する。特にH検出モードではシミュレーションにより漏洩磁束に起因することが分った。また、リサージュ波形の位相角に注目した信号処理により、ノイズを分離して割れ信号のみを抽出できることを確認した。

#### 参考文献

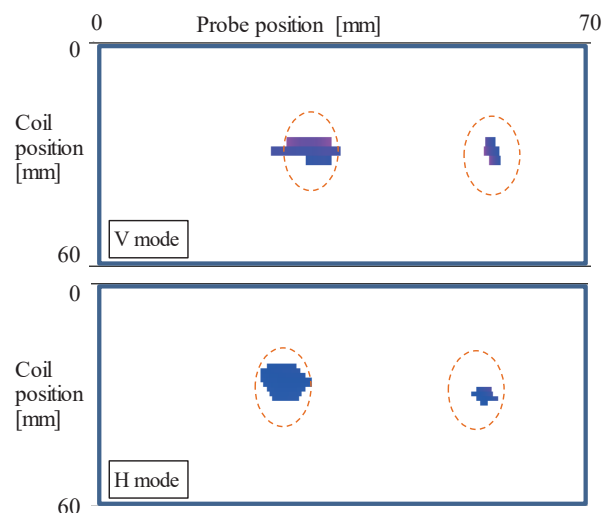
- [1] 西水亮 他, "複雑形状部検査のための渦電流探傷システムの開発", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.7, No.2, 2008, pp.142-151
- [2] Marchand B. 他, "Innovative Flexible Eddy Current Probes for the Inspection of Complex Parts", World Conference on NDT, Durban, April 2012.
- [3] 三木将裕 他, "マルチコイルプローブを用いた磁性材の欠陥検出性評価", (社)日本非破壊検査協会平成28年度秋季講演大会 講演概要集, 2016, pp.11-12
- [4] "Development of the Eddy Current Testing (ECT)

technique for the Feedwater nozzles of Nuclear Power Plant Reactor Pressure Vessels.", EJAM, Vol.8, No.4, NT82, 2017

- [5] 遠藤久 他, "フレキシブルアレイプローブの欠陥信号自動判定システムの開発", (社)日本非破壊検査協会平成22年度春季講演大会 講演概要集, 2008, pp.11-12
- [6] 黄皓宇 他, "ノイズを含む渦流探傷信号の高速シミュレーション", 日本機械学会論文集(A編), 65巻638号, 1999, pp.2024-2031,



(a) Defect detection result



(b) Defect extraction result

**Fig.7 Result of crack extraction for alloy steel gouged at surface by multi coil probe**