

令和7年度 新技術を活用した効果的な予防保全に関する調査検討報告書

添付資料4

シミュレーションに関する試験結果報告書

図書番号 NDT-D-028

新たな検査手法の検証に関する業務

シミュレーション報告書

令和8年2月

一般社団法人日本非破壊検査工業会

## 目次

1. 緒言 .....	1
1.1. 背景 .....	1
1.2. 目的 .....	2
2. 文献調査 .....	4
3. 計算条件 .....	6
4. 検出原理と基本特性 .....	10
4.1. 試験体表面の磁束密度・渦電流分布 .....	10
4.2. バタフライプロットとリフトオフ特性 .....	13
4.3. きず角度特性及びオフセット特性 .....	16
5. きず形状応答特性 .....	23
5.1. きず断面形状の影響 .....	23
5.2. きず幅特性 .....	24
5.3. きず長さ特性 .....	25
5.4. きず深さ特性 .....	25
5.5. きず断面積特性 .....	26
6. 計測実験 .....	29
6.1. 計測システム .....	29
6.2. リフトオフ特性 .....	34
6.3. きず角度特性 .....	36
6.4. きず幅・断面形状特性 .....	38
6.5. きず長さ特性 .....	38
6.6. きず深さ特性 .....	39
6.7. きず断面積特性 .....	40
7. 結言 .....	42
7.1. 得られた知見 .....	42
7.2. 適用に向けた提言 .....	43
参考文献 .....	44

# 1. 緒言

## 1.1. 背景

石油備蓄タンクの保守検査において、現行の標準的な手法である磁粉探傷試験(MT)や浸透探傷試験(PT)に対し、ACFM(Alternating Current Field Measurement)がどのようなメリットを持つかを表 1-1 に示す。石油タンクのような大型構造物では、ACFM が塗装を剥がさず検査できるため、検査効率の向上、環境負荷の低減、記録性の向上という導入メリットが得られる。そのためには ACFM プローブのいくつかの特性をエビデンスとして有効な形で示す必要がある。

表 1-1 石油備蓄タンク検査における ECT・ACFM と従来法(MT/PT)の比較

比較項目	ECT・ACFM プローブの優位性
表面処理 (検査効率,環境負荷)	<b>ECT・ACFM: 剥離不要</b> コーティング上から検査可能。  <b>MT/PT: 原則剥離が必要</b> MT は極薄膜なら可だが、PT は完全除去が必須。  <b>結論: 工期・コストの大幅削減</b> ECT と ACFM はリフトオフ(コーティング厚)の影響を受けにくく、塗装上からでもきず信号を検出可能。
廃棄物・環境 (環境負荷)	<b>ECT・ACFM: なし</b> 電気信号のみを使用。  <b>MT/PT: あり</b> 洗浄液、浸透液、現像液、磁粉などの産業廃棄物が発生。  <b>結論: 環境負荷の低減</b> ECT と ACFM は非接触の電磁気的な手法であるため、検査に伴う廃液や消耗品が出ない。
記録・保存 (トレーサビリティ)	<b>ECT・ACFM: デジタル記録可能</b> 測定条件は電氣的に制御可能。検出波形のデジタル保存が容易。  <b>MT/PT: アナログ・目視</b>

---

再現性を担保するための測定条件(磁粉濃度や塗布の仕方、照度等)の管理が ECT ほど容易ではない。記録は写真撮影やスケッチ、報告書への転記が主。

**結論: DX・経年管理への対応**

ECT と ACFM は測定条件を一致させた検出波形の保存が容易。過去データとの比較や遠隔地での解析など、高度な管理が可能。

---

**きずの定量評価**  
(深さ・長さ)

**ECT・ACFM: 推定可能**

信号から「きず断面積」を推定。

**MT/PT: きず深さの定量評価は困難**

表面の長さ(指示模様)のみで、深さは不明。

**結論: 定量的評価の可能性**

ECT と ACFM は信号振幅から「きず断面積」のおおよその評価が可能。

---

**判定の客観性**  
(データ管理)

**ECT・ACFM: 高い**

信号波形や閾値による判定。

**MT/PT: 低い(属人的)**

検査員の目視判断に依存。

**結論: 検査品質の均一化**

ECT と ACFM の測定結果はデジタル信号であるため、検査員の熟練度に依存しにくい客観的な判定が可能。特に ACFM のバタフライプロットはきず信号とリフトオフ信号を明確に区別できる。

---

## 1.2. 目的

背景で述べた ACFM プローブの優位性を計算実験により確認することを目的とする。確認する項目は以下の3点である。

- **検出原理の解明:** ACFM の磁束密度分布や渦電流分布を可視化し、その検出原理を明らかにする。
- **リフトオフ特性の調査:** リフトオフによってきず信号が減衰する程度(リフトオフ特性)

を明らかにする。

- **きず形状応答特性の調査:** きずの幅、長さ、深さ、角度に対する応答特性を調査する。
- **計測実験による検証:** 上記で得られた知見を、独自のプローブを用いた計測実験によって確認する。

## 2. 文献調査

文献調査による従来技術との比較により、ACFM の定義を明らかにする。文献調査から ACFM によく似た以下の ECT(Eddy Current Testing)プローブの存在が明らかになった(図 2-1、表 2-1 参照)。

- **ACFM:** 1991 年に米国で特許取得されている [1]。近年では橋梁 [2] や管の探傷 [3] などにも応用されている。図 2-1(a) に示すように、プローブはタンジェンシャル(試験体に対してコイルの軸が接線方向)励磁コイルと垂直・水平磁束コイルで構成される。検出コイルの信号を組み合わせることで、バタフライプロットによる信号解析を行う点が特徴である [2]。
- **Tangential Eddy Current Array (TECA) [4]:** ACFM と比較して検出コイルのコイル配置が若干異なる(図 2-1(b) 参照)。ACFM は垂直及び水平磁束コイルの水平方向の中心が一致しているが、TECA は水平磁束検出コイルを試験体表面に近づけることを優先している。これにより、水平磁束検出コイルの信号強度が改善することが期待できるが、バタフライプロットによる信号解析が困難になる。
- **一様渦電流プローブ:** ACFM から水平磁束検出コイルを取り除いたプローブである(図 2-1(c) 参照)。励磁コイルを矩形にすることで試験体表面の磁束密度を上げることが期待しているプローブが提案されている [5]。また、伝熱管の内部からの探傷 [6] や磁性体への適用 [7] について報告されている。

ACFM は渦電流を用いた表面きずの検出を対象とした手法の一つであり、同様の手法と比較して「バタフライプロット」を提案している点が特徴といえる。本報告では、ACFM プローブの特性を明確にするため、類似構造を持つ一様渦電流プローブ、及び、最も基本的な ECT プローブであるパンケーキ ECT プローブとの比較を行う。

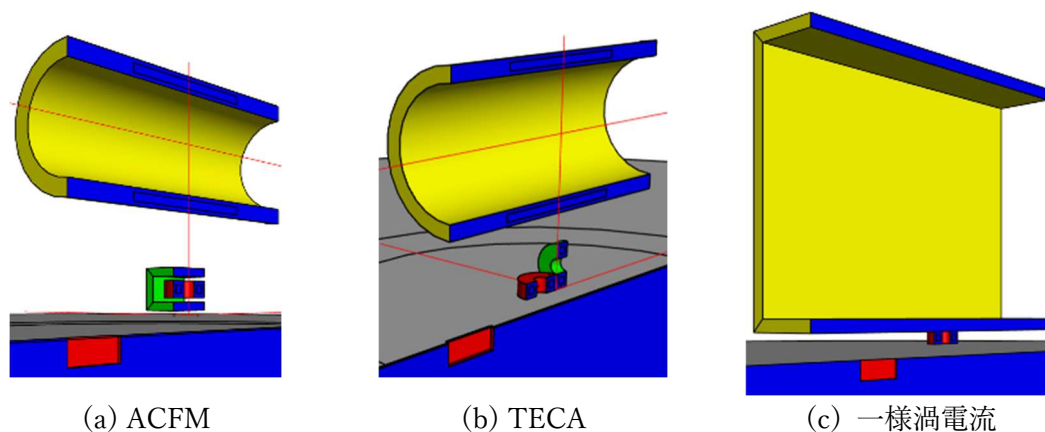


図 2-1 ACFM によく似た ECT プローブの例(1/2 モデル)

表 2-1 プローブの特徴

	ACFM	TECA	一様渦電流
励磁コイル	タンジェンシャル	タンジェンシャル	タンジェンシャル
検出コイル	垂直磁束検出	垂直磁束検出	垂直磁束検出
	水平磁束検出	水平磁束検出	
信号解析	バタフライプロット	複素平面	複素平面

### 3. 計算条件

本報告独自の ACFM プローブモデルを設計し計算実験を行った。既製品のブラックボックス化された仕様に依存せず、物理現象を正確に比較検証するため、一様渦電流プローブ及びパンケーキ ECT プローブと一部使用を共通とする独自プローブモデルを構築した。したがって、ここで得られた結果は既製品の性能の限界を示すものではない。ここで示す結果は以下の項目について明らかにすることを目的とする。

- ・ ACFM プローブの検出原理と特徴
- ・ ACFM プローブのきず形状応答特性

使用したプローブを図 3-1 に示す。図 3-1(a)に示す ACFM プローブは矩形のタンジェンシャル励磁コイルと、三つの検出コイルで構成されている。矩形励磁コイルは円形励磁コイルと比較して励磁電流が試験面により近づき、試験面表面の渦電流密度が高くなることを期待している。プローブ下部の水平磁束検出コイルはきずの有無にかかわらず常に励磁コイルの作る磁束を検出する。対象とするきずに由来する鎖交磁束はそれよりもかなり小さい。これは AD 変換器に求められるダイナミックレンジと分解能が垂直磁束検出コイルより高くなることを意味する。そこでプローブ上部に水平磁束基準コイルを配置し、検出コイルと差分を取ることで、それらが改善することを期待している。なお、垂直磁束検出コイルは検出コイル付近にきずが存在するときのみ磁束を検出するため、基準コイルを必要としない。改めて述べるが、ここで使用する ACFM プローブの構造は本報告独自の構造である。

図 3-1(b)に示す一様渦電流プローブは、ACFM プローブから水平磁束検出・基準コイルを取り除いたものである。計算実験では、ACFM プローブの垂直磁束検出の信号で代用する。図 3-1(c)に示すパンケーキ ECT プローブは、ACFM プローブの垂直磁束検出コイルのみを用いたものである。励磁と検出を同一のコイルで行う自己誘導型 ECT プローブである。図 3-2 は ACFM プローブの要素分割を示している。検出コイル及びきずについては、微小な変化を表現できるよう特に要素分割を細かくした。ほとんどの計算実験では 1/2 モデルで計算を行い、1/2 では表現できないきず長手方向の軸とプローブの軸が一致しないオフセット特性の計算(4.3 きず角度特性及びオフセット特性)のみ 1/1 モデルで実施した。

その他の計算条件、及び初期磁化曲線を表 3-1、図 3-2 に示す。計算実験に用いたプログラムは、有限要素法のためのプリミティブな関数やクラスを提供するオープンソース有限要素法ライブラリ NETGEN/NGSolve を用いて構築した。このライブラリは、ウィーン工科大学の Joachim Schöberl 氏らによって開発され、固体力学、流体力学、電磁気学の解析に広く適用されている。支配方程式は以下に示す磁気ベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  を未知数とする A 法を用いた。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) + j\omega\sigma\mathbf{A} = \mathbf{J}_0$$

ここで、 $\nu$ は透磁率の逆数、 $j$ は虚数単位、 $\omega$ は角周波数、 $\sigma$ は導電率、 $\mathbf{J}_0$ は励磁電流を表す。電磁界解析には電気スカラーポテンシャル $\phi$ を同時用いる $\mathbf{A}$ - $\phi$ 法が用いられることが多いが、今回は強磁性体を対象にし、かつ、微小なきずを扱うことから $\mu\text{m}$ オーダーの要素分割が求められる。そのため未知数の少ない $\mathbf{A}$ 法を選択した。 $\phi$ を用いないこと、及びBH曲線のヒステリシスを考慮しない $j\omega$ 法を用いることの妥当性は、計測実験との比較検証により確認する。

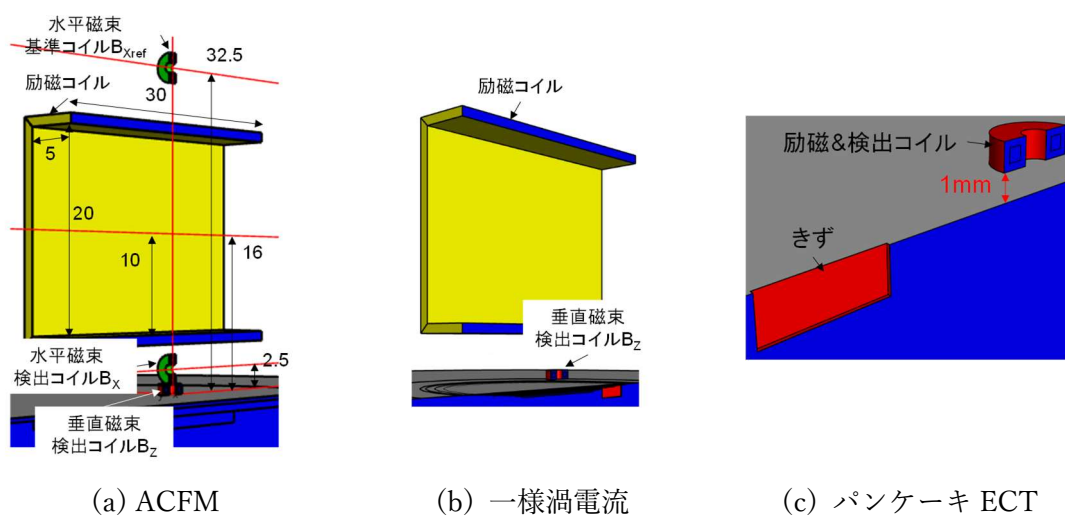


図 3-1 計算実験に使用したプローブ形状(1/2 モデル)

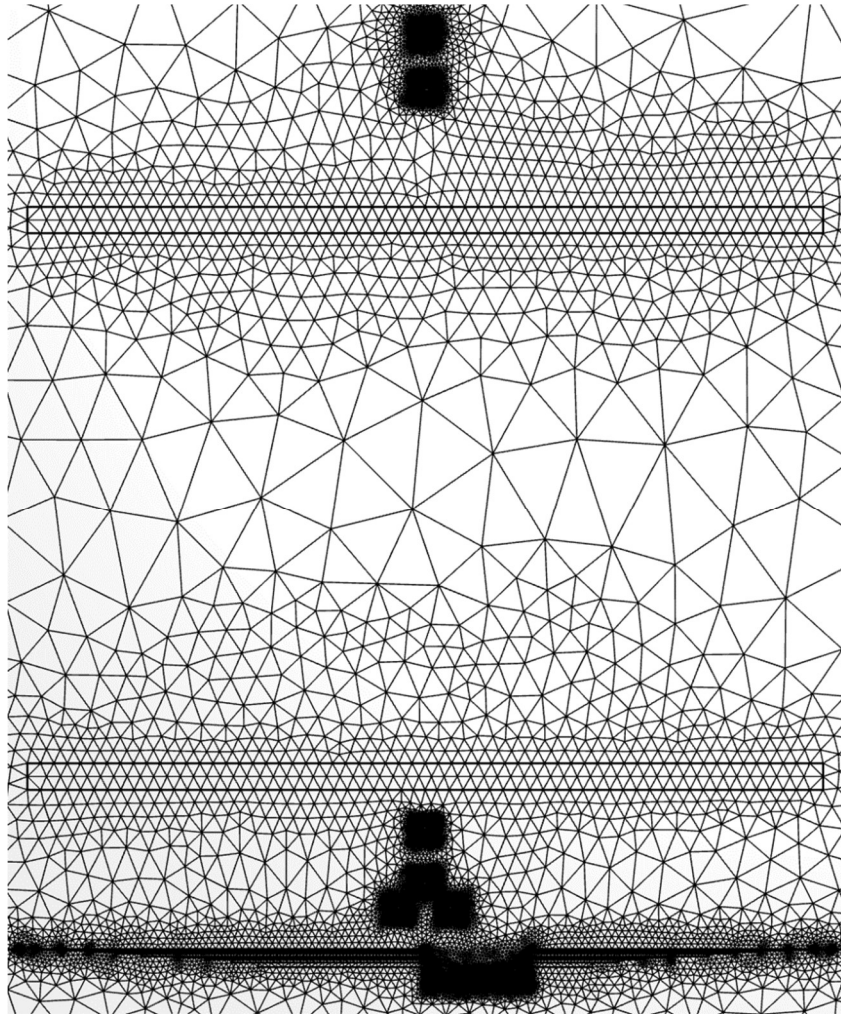


図 3-2 プローブ付近の要素分割

表 3-1 計算条件

項目	ACFM	一様渦電流	パンケーキ ECT
励磁コイルボビン	L30 × H20 × W10 mm		検出コイルと同じ
検出コイル形状		外径 3mm、高さ 1mm、130 巻	
励磁条件	600 ターン、0.2A、5kHz		130 ターン、0.2A、5kHz

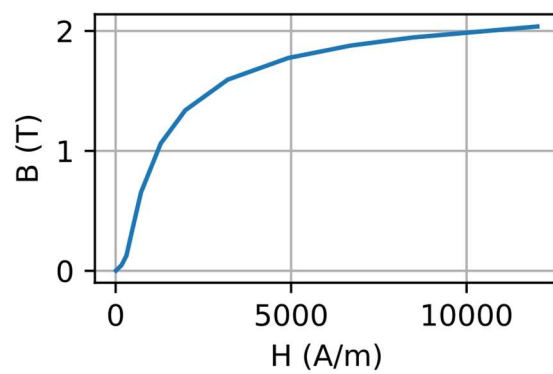


図 3-3 試験体の初期磁化曲線

## 4. 検出原理と基本特性

ここでは以下に示す ACFM プローブの基本的な特性を一様渦電流プローブ及びパンケーキ ECT と比較しながら示す。

- ・ 試験体表面の磁束密度・渦電流分布
- ・ バタフライプロットとリフトオフ特性
- ・ きず角度特性及びオフセット特性

### 4.1. 試験体表面の磁束密度・渦電流分布

図 4.1-1,2 に試験体表面の ACFM プローブ及び一様渦電流プローブの磁束密度及び電流密度分布を示す。検出領域(検出コイル付近)は、強度および向きが一様な磁束および渦電流密度が存在することが確認できる。

図 4.1-3,4 に試験体の深さ方向の磁束密度及び電流密度分布を示す。パンケーキ ECT プローブの結果は、表面の磁束密度が最も高い位置の結果を示している。ACFM 及び一様渦電流プローブは、パンケーキ ECT プローブと比較して磁束密度が高い。本実験において ACFM プローブとパンケーキ ECT プローブの励磁電流密度は同じとしたが、巻き数は ACFM プローブが 600 に対してパンケーキ ECT プローブは 130 であり、起磁力は ACFM プローブの方が大きく、起磁力に大きな差がある。リフトオフが試験体中の磁束密度と電流密度の減衰に与える影響で比較すると ACFM 及び一様渦電流プローブの磁束密度は、パンケーキ ECT プローブと比較して変化が小さい。この効果から、リフトオフによるきず信号の減衰がパンケーキ ECT と比較して緩やかになることが期待できる。これが試験体表面の広い領域に磁束密度分布を作る利点の一つであると言える。

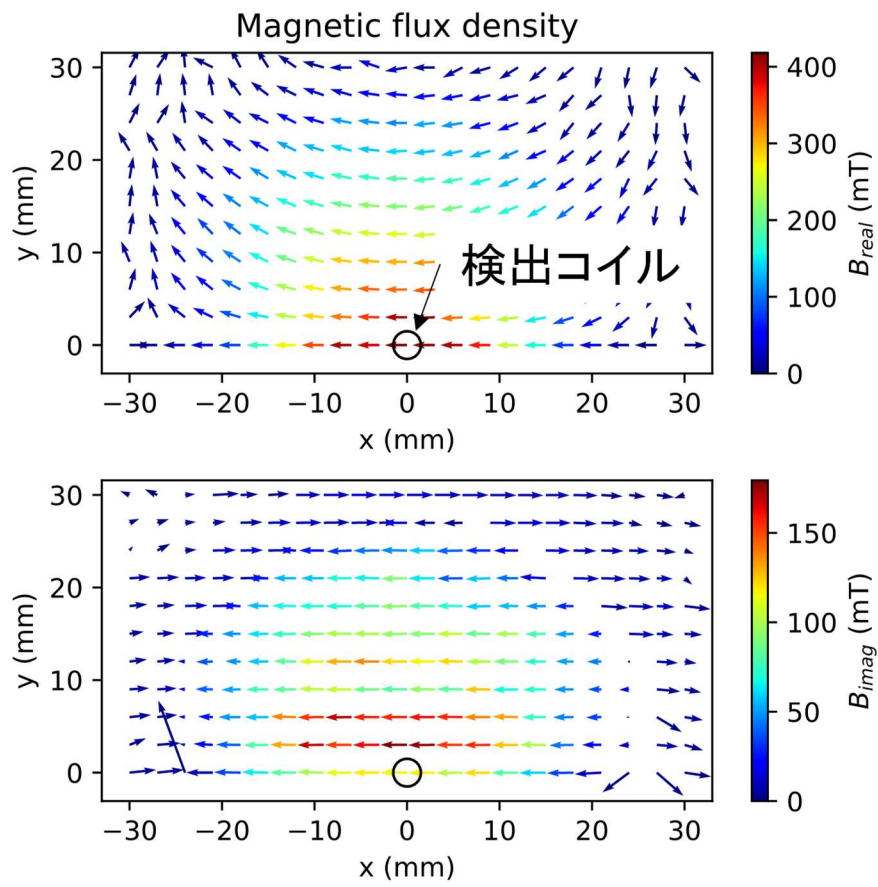


図 4.1-1 ACFM 及び一様渦電流プローブの  
試験体表面の磁束密度分布(リフトオフ 1mm)

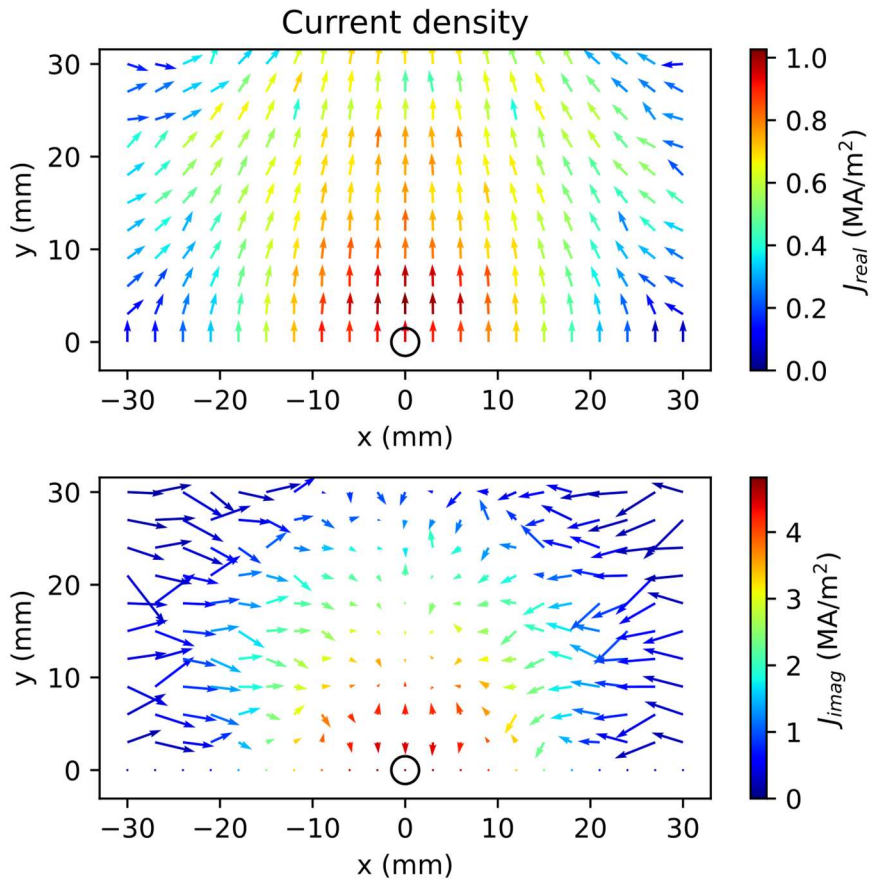
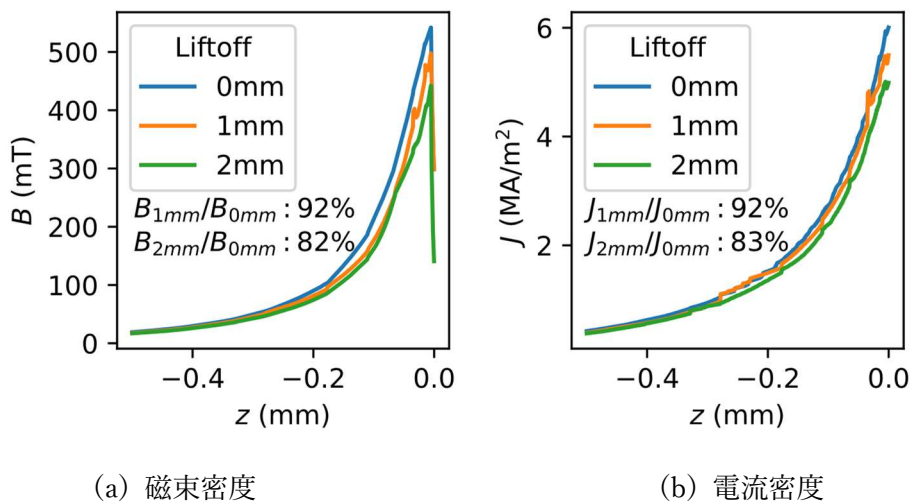


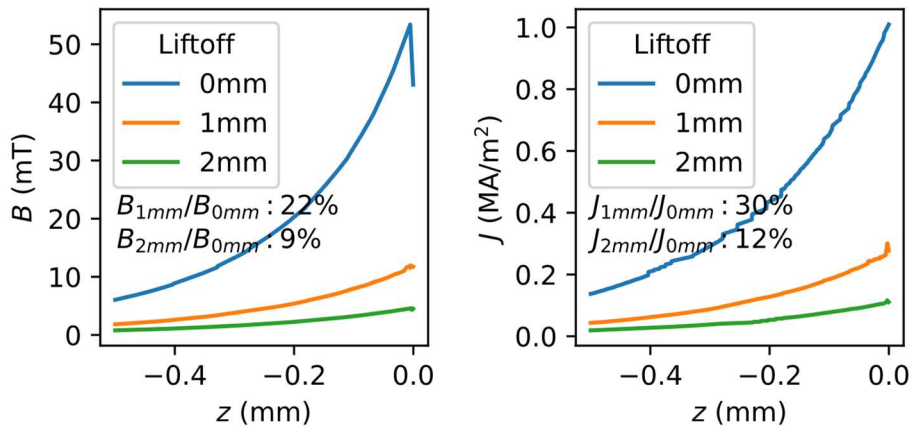
図 4.1-2 ACFM 及び一様渦電流プローブの試験体表面の電流密度分布(リフトオフ 1mm)



(a) 磁束密度

(b) 電流密度

図 4.1-3 試験体深さ方向の磁束密度及び電流密度分布(ACFM 及び一様渦電流プローブ)



(a) 磁束密度

(b) 電流密度

図 4.1-4 試験体深さ方向の磁束密度及び電流密度分布(パンケーキ ECT)

#### 4.2. バタフライプロットとリフトオフ特性

ここでは、ACFM プローブの検出信号をリフトオフ特性と同時に説明する。リフトオフとは試験面からセンサー底面までの距離を言い、コーティング厚さに相当する。一般にリフトオフが大きくなると試験体表面の電磁界は小さくなるため、きず由来する検出信号が小さくなる。このため、リフトオフによってきず信号が減衰する程度(リフトオフ特性)を把握することは対応可能なコーティング厚さを知るうえで、またきずの定量評価のために重要である。

図 4.2-1 はプローブときずの相対位置を示している。図 4.2-2 は図 4.2-1 の「きず相対位置  $x$ 」を 0~20mm まで変化させたときのきず由来する検出信号(きず信号)を示している。きずの形状は、長さ 4mm、深さ 1.5mm、幅 0.25mm とした。図 4.2-2(a)には水平磁束検出コイルの検出信号(以下、 $B_x$  信号)と垂直磁束検出コイルの検出信号(以下、 $B_z$  信号)を示している。 $B_z$  信号は一樣渦電流プローブの検出信号と等価である。 $B_x$  信号はリフトオフが大きくなるときず信号の振幅が小さくなるとともに、実数成分のマイナス方向に大きく変化していることが確認できる。一方、 $B_z$  信号はリフトオフが大きくなるときず信号は小さくなるが、リフトオフ変化によって検出信号に変化がないことが確認できる。 $B_x$  信号の実数成分はリフトオフの影響を受けるものの、 $B_x$  信号の虚数成分や  $B_z$  信号はリフトオフ変化に対して比較的堅牢である。リフトオフ変化に対して堅牢な  $B_x$  信号と  $B_z$  信号の虚数成分を図 4.2-2(b)に示す。横軸はプローブ中心ときず中心の相対距離(きず相対位置  $x$ 、図 4.2-1 参照)を示している。この図からは応答長さ(JIS Z 2314)及びピーク間距離を得ることができる。これらは検出信号の振幅とともにきず形状の推定に用いることができる。 $B_x$  信号と  $B_z$  信号の虚数成分を XY 平面のそれぞれの軸に当てはめた図を図 4.2-2(c)に示す。プローブをきず直上で走査することで軌跡が閉じた曲線を書くように変化する。これをバタフライプ

ロットと呼ぶ。このようなプロットを定義する最大の利点は、この平面上でリフトオフ信号がほぼ現れず(もしくはわずかに直線状に変化する)、きず信号をリフトオフ信号と明確に区別できる点にある。

図 4.2-3 はリフトオフごとのパンケーキ ECT プローブのきず信号を示している。図 4.2-3(a)に示すように、リフトオフ 1mm から 2mm のきず信号を同時に評価しようとする、必要とされる有効桁が 4~5 桁程度必要になることがわかる。これは必要なダイナミックレンジが大きいことによる。図 4.2-3(b)に各きず信号の始点を複素平面の原点としたときの検出信号を示す。リフトオフに対する振幅の変化を図 4.2-4 に示す。ACFM プローブと比較してパンケーキ ECT プローブはリフトオフに対するきず信号の減衰が大きいことが確認できる。

本項目で明らかになったことを以下にまとめる。

- ・ 磁束・電流密度分布: ACFM プローブ及び一様渦電流プローブは、パンケーキ ECT と比較して磁束及び電流密度の大きさと方向が一様で、リフトオフに対するそれらの減衰が小さい。
- ・ きず信号: ACFM プローブは、きず直上を走査した時「バタフライプロット」を描く。ACFM プローブと一様渦電流プローブは、パンケーキ ECT プローブと比較してリフトオフに対するきず信号の減衰が小さい。

つまり、ACFM プローブは、検出領域において強度と向きが一様な磁束密度・渦電流分布を持つ点で一様渦電流プローブと共通しており、パンケーキ ECT よりもリフトオフ効果(コーティング厚さによる影響)が小さいという特性を持つ。

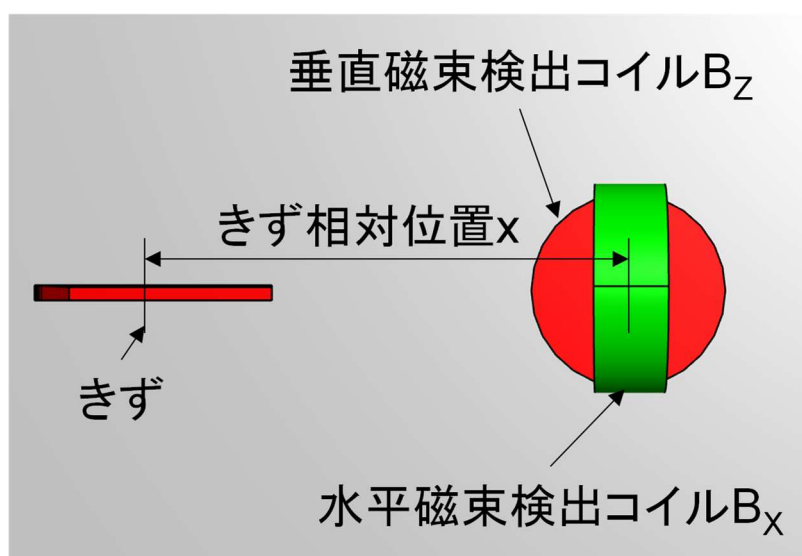
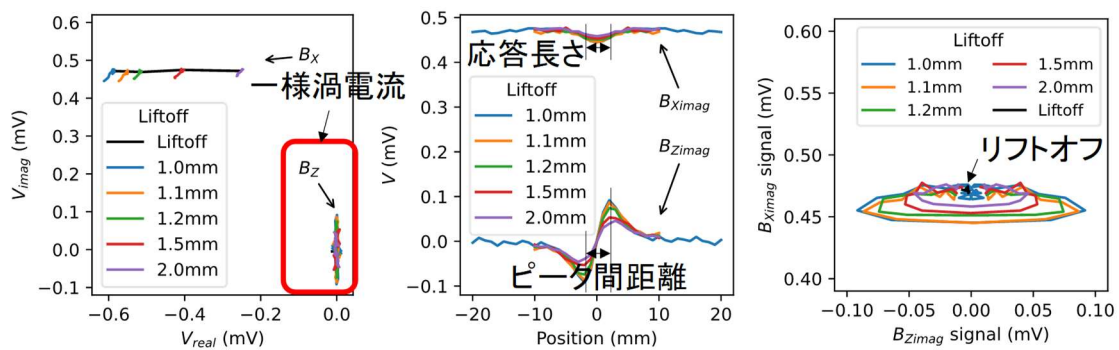
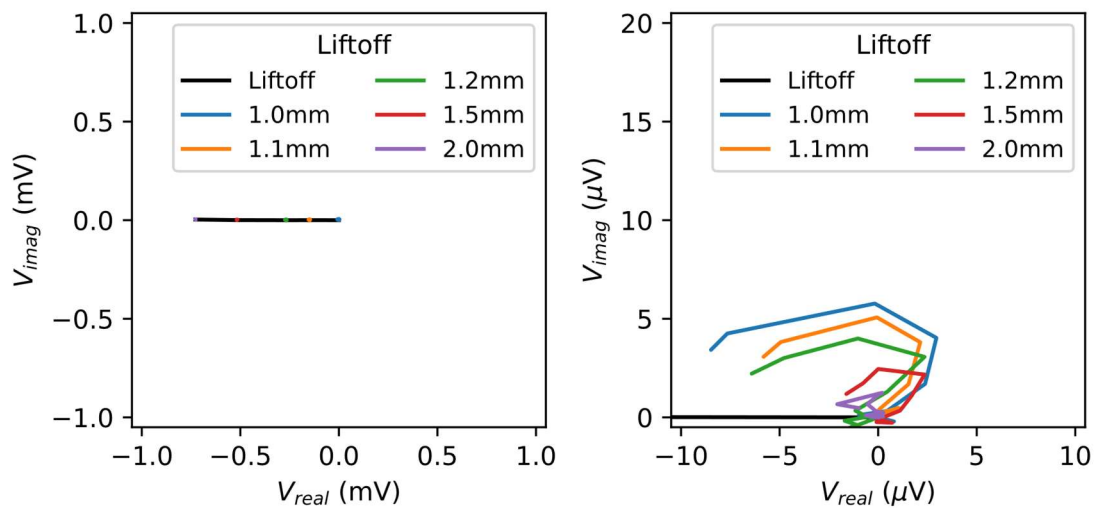


図 4.2-1 リフトオフ特性のためのプローブ走査方法



(a) 複素平面 (b) 虚数成分 (c) バタフライプロット

図 4.2-2 ACFM のリフトオフ特性(L4mm, D1.5mm, W0.25mm)



(a) 複素平面 (b) 各信号の始点を(0,0)として表示

図 4.2-3 パンケーキ ECT プローブのリフトオフ特性(L4mm, D1.5mm, W0.25mm)

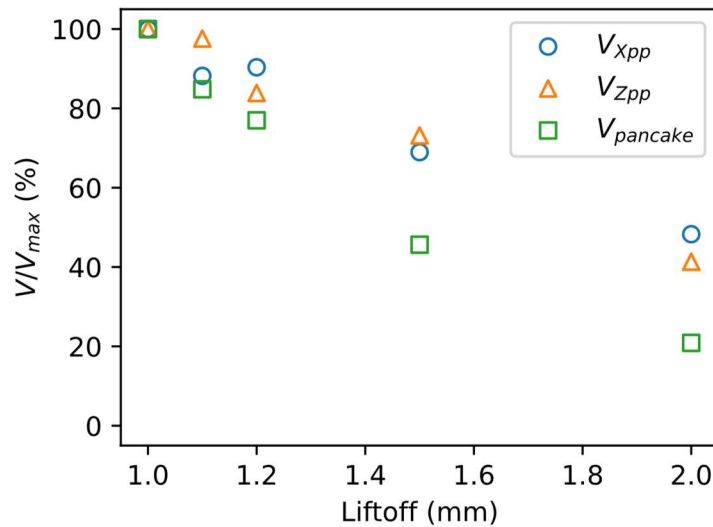


図 4.2-4 リフトオフによるきず信号の減衰(L4mm, D1.5mm, W0.25mm)

#### 4.3. きず角度特性及びオフセット特性

プローブの走査方向に対してきず角度を変化させ、かつプローブを図 4.3-1 に示すように二次元に走査した時の検出信号を計算実験で求めた。その目的は以下について明らかにすることである。

- ・ きず角度による検出信号の変化
- ・ きず直上からの距離(オフセット)による検出信号の変化

ACFM プローブはその構造が線対称であり、きず角度に対して検出信号が変化することが想定される。また、プローブがきず直上からずれていた場合、その距離(オフセット)によっても検出信号が変化することが想定される。これらの特性は、きずの見逃しを防ぐための、走査方法の設定、またはプローブのアレイ・マルチ化設計に不可欠な特性である。しかしながら、プローブを二次元に走査することからプローブ及び試験体を部分的に省略することができない 1/1 モデルでの計算が求められ極めて高い計算コストが必要とされる。そこで、多数のケーススタディを効率的に実施し、傾向を把握することを主目的とするため、本項では線形計算を採用した。当然ながら、透磁率を非線形で解くべき問題を線形として計算するため、その差が問題になる。図 4.3-2 に透磁率以外の条件を同一としたときのそれぞれの計算結果を示す。非線形計算に比べて線形計算の結果は検出信号が大きくなる傾向が明らかになった。これは、図 4.1-2 に示すように試験体表面付近の磁束密度が 0.5T 程度になるとき、非線形計算では図 3-3 に示す初期磁化曲線の 0.5T 付近の透磁率が用いられる。一方で、線形計算ではすべての要素において磁束密度によらずに非線形計算における透磁率の初期

値である 0T 付近の透磁率(初透磁率)が用いられる。透磁率とは BH 曲線における傾き(初期磁化曲線の接線の傾きではなく、b 切片が 0 となる線型方程式の傾き)であり、図 3-2 から明らかなように線形計算の傾きが大きい。つまり、非線形計算と比較して線形計算で検出信号が大きくなるのは、後者のほうが大きい透磁率を用いているためである。したがって、ここで示す結果については他の項目と定量的な比較をすることはできないことに留意する必要がある。一方で、図 4.3-2(a), (b)はピークの現れ方やオフセット特性の変化の傾向は一致している。実検査においては、絶対的な電圧値(定量値)は機器のゲイン設定や校正によって変わるため重要ではなく、きずの有無や角度による「信号パターンの変化(定性傾向)」が一致していることが最も重要であるため、線形計算の結果は十分に有効である。計測実験で同一の実験を行うことを前提に、図 4.3-3 は線形計算とすることで計算コストと得られる知見の両立を図った。

図 4.3-3 に ACFM プローブの計算実験の結果を示す。きず角度が 0 度と 90 度ではバタフライプロットが上下に反転し、45 度では検出信号の振幅は減衰し、オフセットによってはバタフライプロットが横向きになった。この現象について説明する。図 4.1-1 に示すように ACFM と同様渦電流は試験体表面に一樣な磁束密度分布と渦電流分布を作る。そして渦電流と磁束密度は直交している。図 4.3-5 に示すように、きず角度が 0 度のとき、きず長さが渦電流分布を乱す一方で、磁束密度分布はきず幅によって乱されるが、きず幅はきず長さに対して十分小さいためその影響も小さい。きず角度が 90 度のとき、きず長さが磁束密度分布を乱す一方で、渦電流分布はきず幅によって乱されるが、きず幅はきず長さに対して十分小さいためその影響も小さい。これは、0 度と 90 度では、検出コイルを鎖交する磁束の由来が以下のように異なっていることを示している。

- ・ 0 度: きずによって変化する渦電流に起因する磁束を検出
- ・ 90 度: きずによって変化する励磁電流に起因する磁束を検出
- ・ 0 度~90 度: 渦電流と励磁電流によって変化する磁束の両方の磁束を検出

これを確認するために強磁性体材料と非磁性材料のバタフライプロットを比較した結果を図 4.3-4 に示す。なお、図 4.3-4(a)はきず直上(オフセット 0mm)1 ラインのみであり計算コストが図 4.3-3 と比較して小さいため非線形計算により求めた。強磁性材料(図 4.3-4(a))はきず角度 45 度をもっとも検出信号の振幅が小さく、0 度から 90 度にかけてバタフライプロットが反転するほどダイナミックに変化した。これは、「渦電流に由来する磁束」と「渦電流に起因する磁束」の割合が変化していることを示している。非磁性材料のそれは 0 度が最もバタフライプロットが大きく、90 度のそれは小さくなった。これは、非磁性材料は透磁率が空気と同一であり、きずによって励磁電流に起因する磁束は乱されないということを示している。つまり、図 4.3-5 に示すように、検出コイルを鎖交磁束は、きず角度が 0 度の時は渦電流を起因にする磁束が支配的であり、きず角度が 90 度の時は励磁電流に起因

する磁束が支配的であること、及び、それぞれの磁束は位相が 180 度近く異なることから、強磁性体においてバタフライプロットが反転すると言える。なお、 $B_z$  のみに着目しても位相の反転が確認できることから、一様渦電流プローブでもきず角度の識別は可能である。

また、オフセット特性については、すべての角度においてプローブがきず両端を通過するときに最もきず信号が大きくなった。つまり、45 度のきず中央を走査した時はきず信号は最も小さくなった。このようにきず角度によって検出信号の振幅が変化するため、振幅を閾値にする場合、きず角度の情報が必要である。また、オフセット特性からプローブの有効検出幅を定義することができる。例えば、きず角度 0 度のとき、信号低下率が 50% 以内の範囲はおおよそ  $\pm 2\text{mm}$  であることがわかる。有効検出幅は走査ピッチやマルチプローブの単位プローブ間隔を決定するのに活用できる。

図 4.3-6 にパンケーキ ECT プローブの結果を示す。このプローブは方向性を持たないため、検出信号の最大値はきず角度の影響を受けていない。オフセット特性については、きず両端付近で最大値を取ることが確認できる。また、図 4.3-6 右図のオフセット 2mm のように、オフセットによっては検出信号がマイナスの値を示すことは留意する必要がある。パンケーキ ECT プローブのようなシングル ECT プローブの場合、図 4.3-6 右図に示すオフセット特性を踏まえて、走査ピッチを決定する必要があり、マルチプローブの場合、きず信号を見逃さないようにコイル配置を決定する必要がある。

本項目で明らかになったことを以下にまとめる。

- ・ ACFM プローブは、バタフライプロットの形状からきず角度を識別できる。
- ・ ACFM プローブは、きず角度 0 度できず直上を走査したとき、最もきず信号が大きくなる。検出電圧を閾値にする場合、きず角度とオフセットの情報が必要である。
- ・ ACFM プローブ及び ECT プローブは、オフセット特性を踏まえて走査ピッチ、またはマルチプローブの単位プローブ間隔を決定する必要がある。

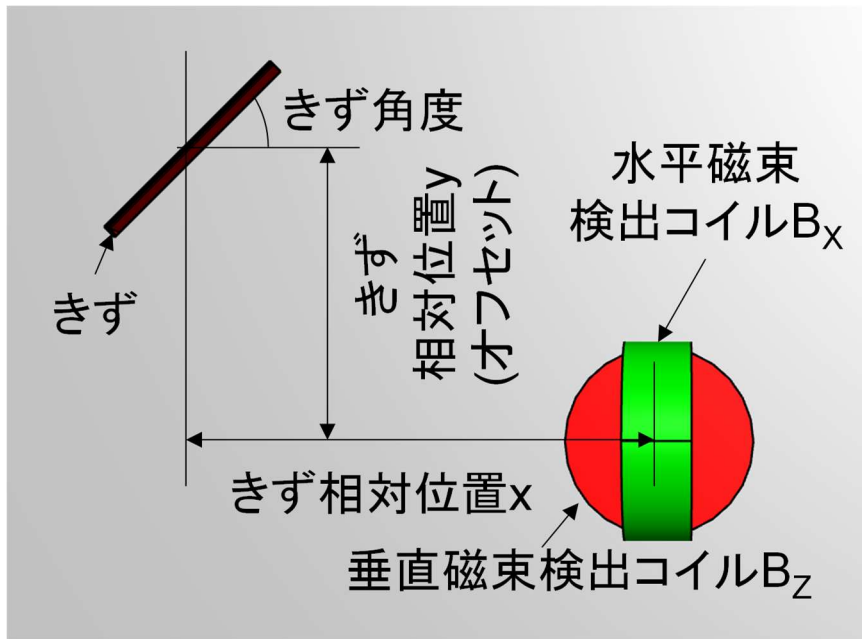
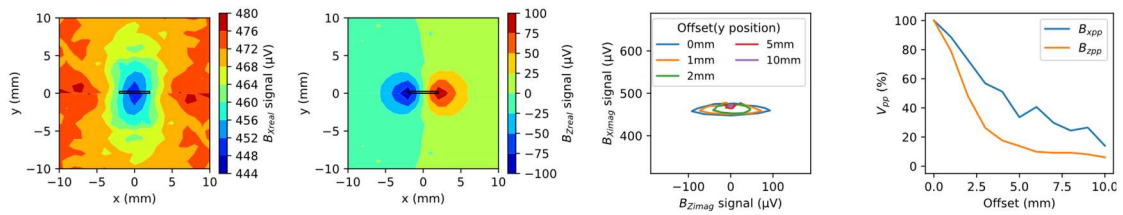
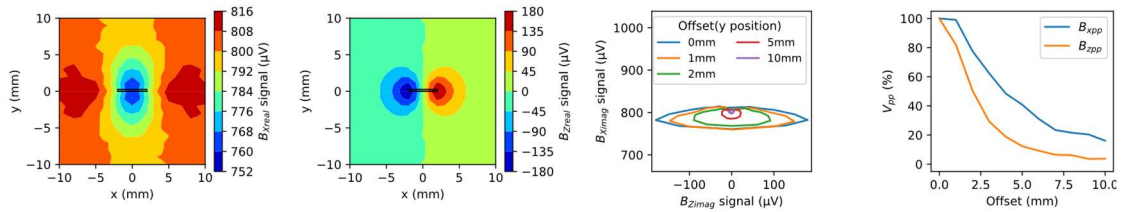


図 4.3-1 きず角度特性及びオフセット特性のためのプローブ走査方法

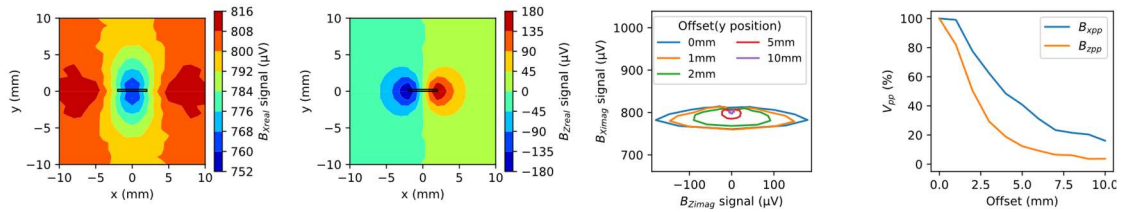


(a) 非線形

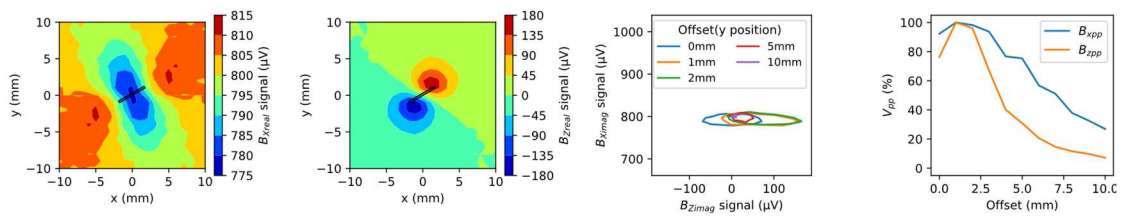


(b) 線形

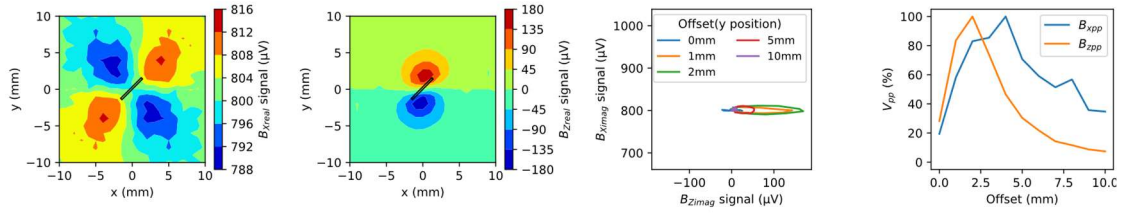
図 4.3-2 非線形計算と線形計算の比較(L4mm、D1.5mm、W0.25mm、 $0^\circ$ )



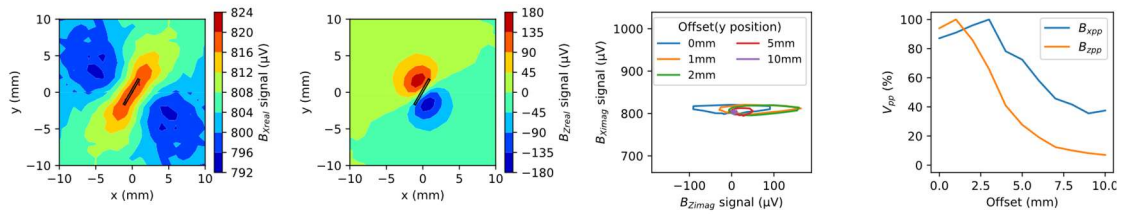
(a)  $0^\circ$



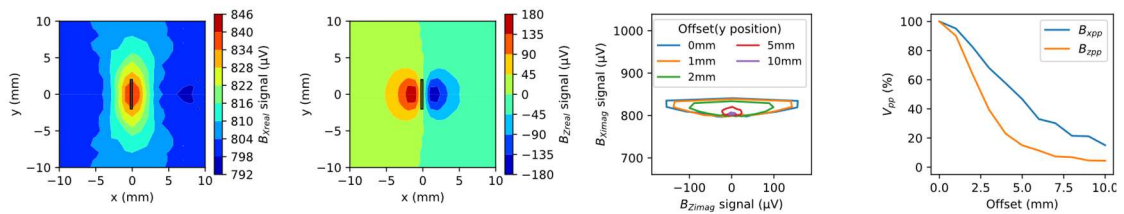
(b)  $30^\circ$



(c)  $45^\circ$

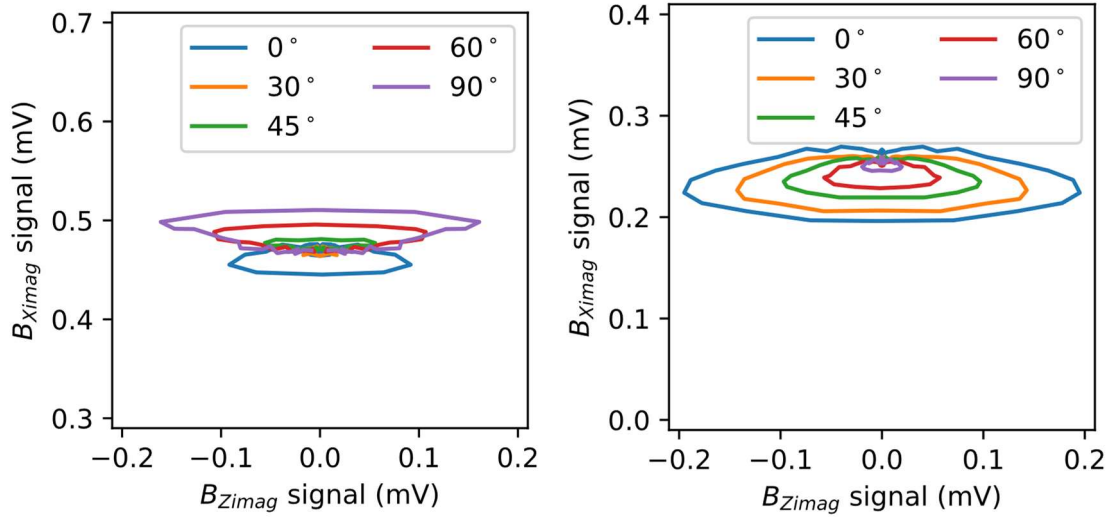


(d)  $60^\circ$



(e)  $90^\circ$

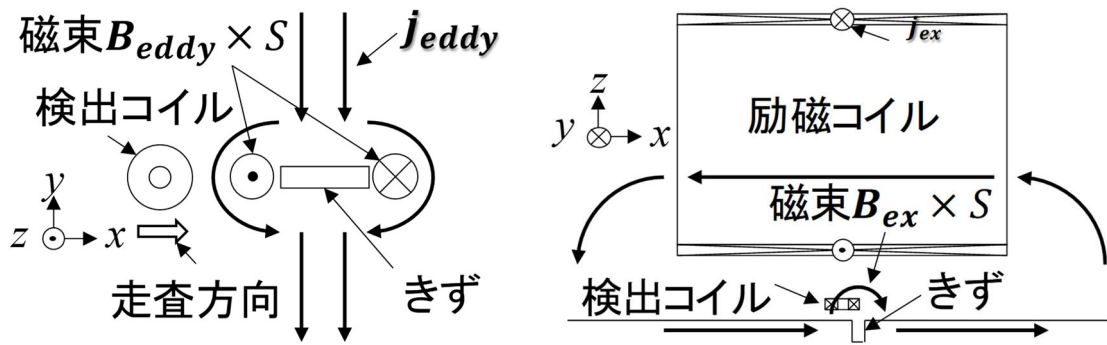
図 4.3-3 きず角度特性及びオフセット特性(線形計算、ACFM)



(a) 強磁性材料

(b) 非磁性材料 A5052

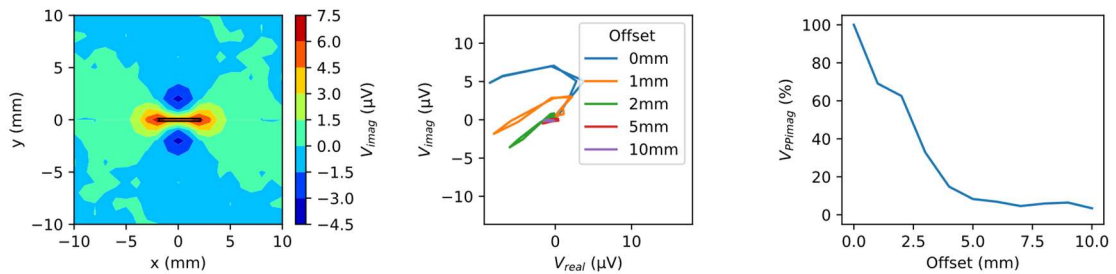
図 4.3-4 きず角度特性及びオフセット特性(オフセット 0mm、L4mm、D1.5mm)



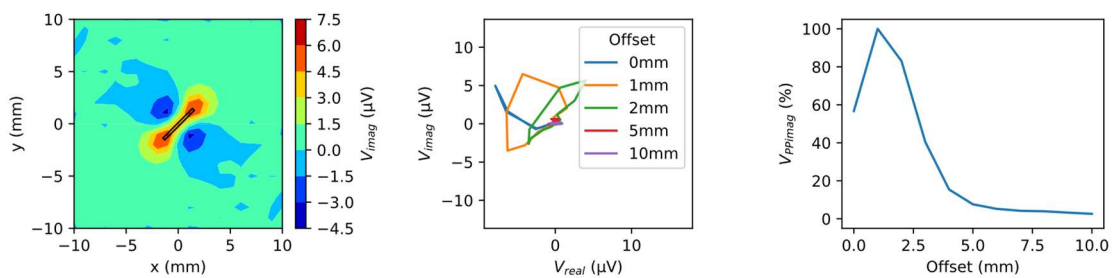
(a) 渦電流に起因する磁束(きず 0度)

(b) きず起因する磁束(きず 90度)

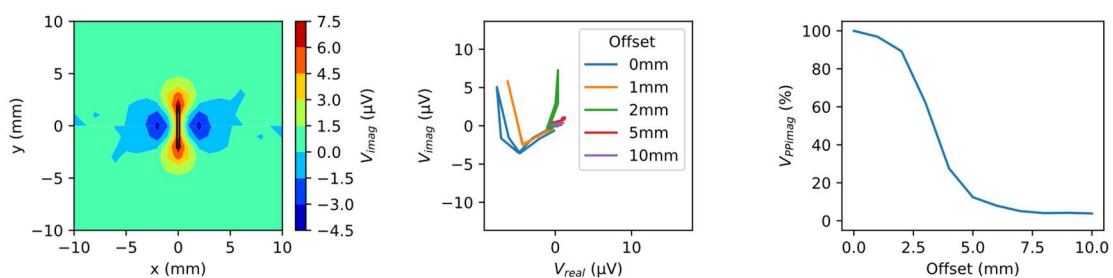
図 4.3-5 きずによる電磁場の乱れ



(a) 0°



(b) 45°



(c) 90°

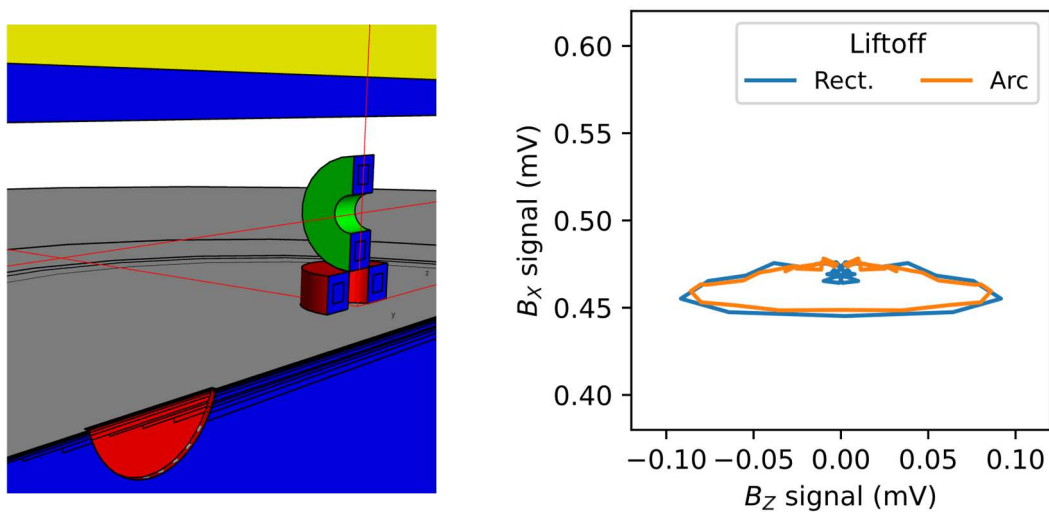
図 4.3-6 きず角度特性及びオフセット特性(線形計算、パンケーキ ECT)

## 5. きず形状応答特性

きずの直上を走査した場合の、きずの寸法（断面形状、幅、長さ、深さ）による信号変化を調査した。

### 5.1. きず断面形状の影響

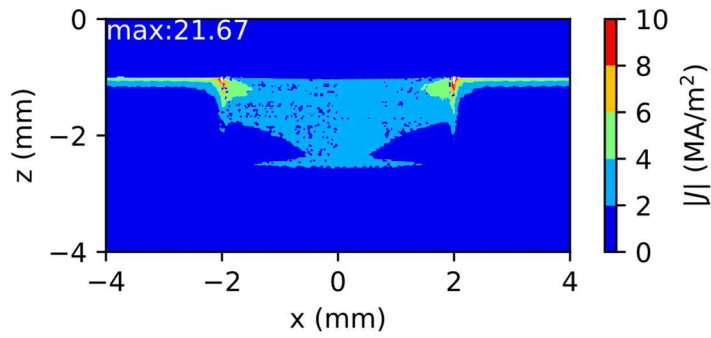
きず断面形状が矩形と図 5.1-1(a)に示す円弧の場合で同じ長さ及び深さのきずの検出信号を比較した。図 5.1-1(b)に示すように矩形きずと円弧きずの差は十分小さいと言える。図 5.1-2 に試験体断面(きず側面)の電流密度分布を示す。矩形・円弧きずともに表面付近のきず両端に電流密度が高くなっている。また円弧きずはきず形状に沿って電流が流れているのに対して、矩形きずはきずの両端(-2,-1.5)及び(2,-1.5)付近が電流の流れを妨げるのに寄与していないように見える。矩形きずは検出信号に影響を与える実質的なきず断面積が $6\text{mm}^2$ より小さいことを示唆しており、結果としてきず断面積が $4.4\text{mm}^2$ の円弧との検出信号の差が表れなかったことが想定される。疲労割れのきず断面積は矩形や円弧より複雑であることが想定されるが、疲労割れは表面から進行する事、図 5.1-1,2 に示したように表面付近のきず形状が検出信号に与える影響が大きいことから、矩形きずを基準きずとして用いる事は妥当である。



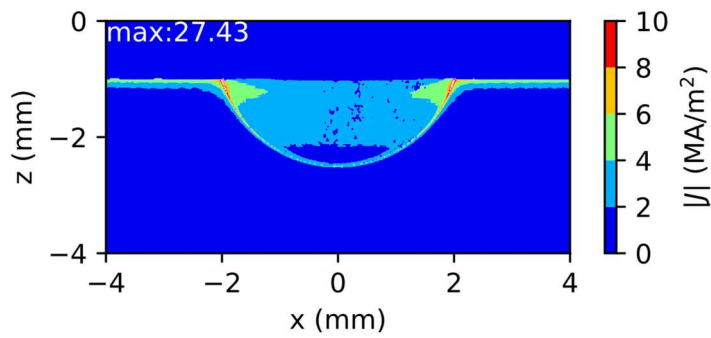
(a) 円弧モデル

(b) バタフライプロット

図 5.1-1 パンケーキ ECT プローブのリフトオフ特性(L4mm, D1.5mm, W0.25mm)



(a) 矩形(6mm<sup>2</sup>)

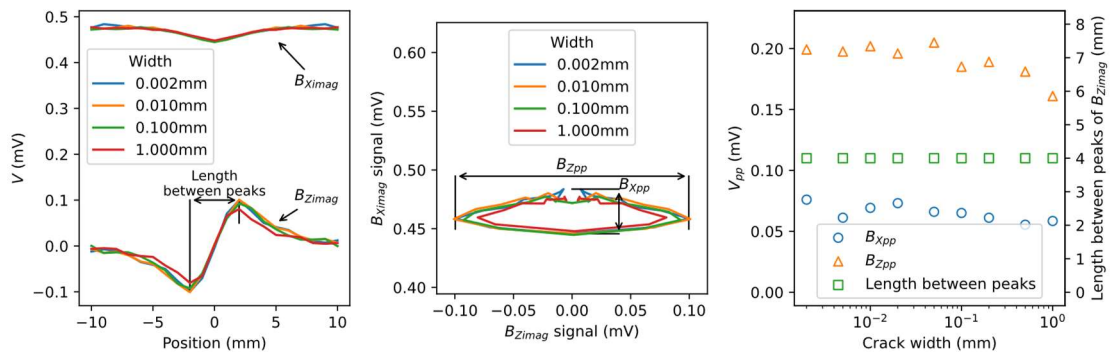


(b) 円弧(4.4mm<sup>2</sup>)

図 5.1-2 渦電流分布(L4mm, D1.5mm, W0.25mm, y=0.125mm)

## 5.2. きず幅特性

きず幅を  $2\mu\text{m}$  から  $1\text{mm}$  の範囲で変化させたときの検出信号を図 5.2 に示す。きず幅の増大に伴い振幅はわずかに減少するものの、その変化率は小さい。このことは、本手法がきず幅の変動に対してロバストであり、微細な幅のきずであっても十分な信号強度が得られることを示唆している。図 5.2(a) の  $B_{Z\text{imag}}$  からピーク間距離を定義したとき、図 5.2(c) に示すようにきず幅の影響は十分小さかった。

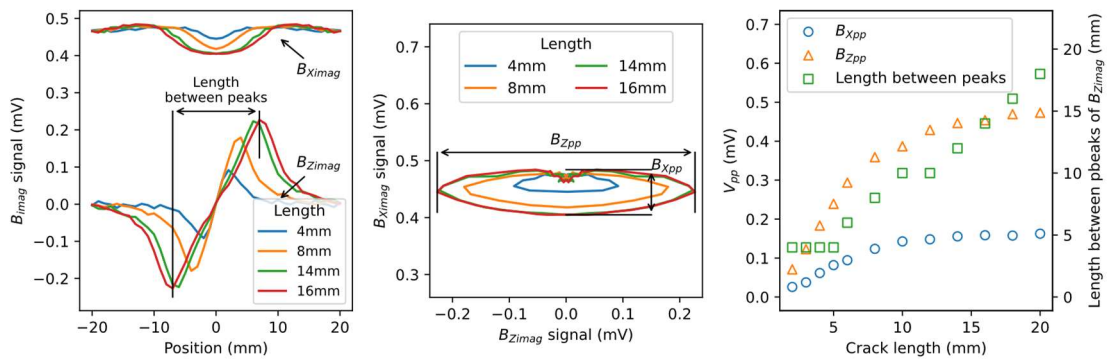


(a) 移動方向プロファイル      (b) バタフライプロット      (c) きず幅特性

図 5.2 きず幅特性

### 5.3. きず長さ特性

きず長さを 2mm から 20mm の範囲で変化させたときの検出信号を図 5.3 に示す。きず長さが検出コイルより十分大きくなると検出信号の振幅はサチレーションする。図 5.3(c)に示すようにきず長さはピーク間距離と相関を持っていることが確認できる。

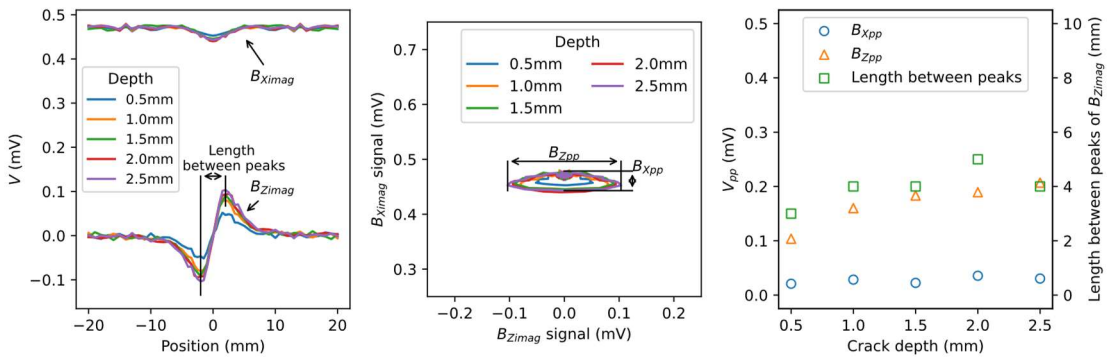


(a) 移動方向プロファイル      (b) バタフライプロット      (c) きず長さ特性

図 5.3 きず長さ特性

### 5.4. きず深さ特性

きず深さを 0.5mm から 2.5mm の範囲で変化させたときの検出信号を図 5.4 に示す。きずが深くなるにつれ、信号振幅は増大する。また、図 5.4(c)に示すようにきず深さがピーク間距離に与える影響は小さい。



(a) 移動方向プロファイル      (b) バタフライプロット      (c) きず深さ特性

図 5.4 きず深さ特性

## 5.5. きず断面積特性

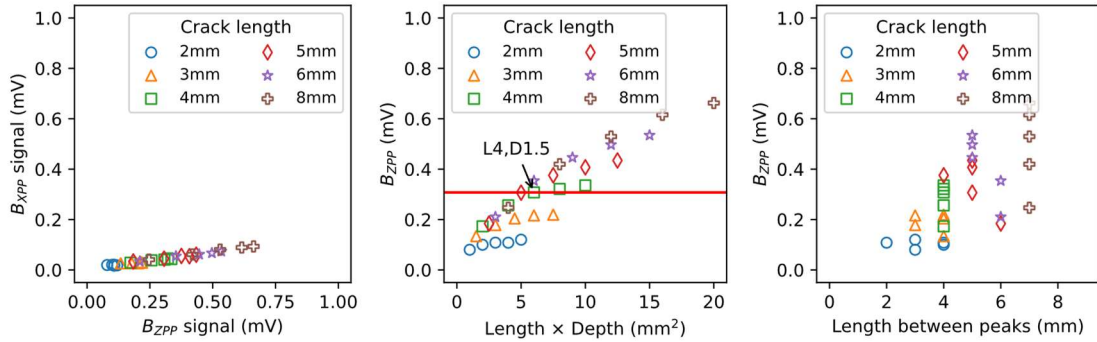
図 5.5-1 にきず断面積ときず信号の振幅の関係を示す。図 5.5-1(a)から  $B_x$  と  $B_z$  は線形の関係にあり、きず断面積の変化から受ける影響は同等であることがわかる。また、きず長さ 2mm のような検出コイルより小さなきずは検出が困難な傾向がある。それは  $B_x$  において顕著であるように見える。そこで、図 5.5-1(b)に  $B_z$  に着目したきず断面積との関係を示す。 $B_z$  からおおよそのきず断面積を推定可能であることが確認できるが、きず長さや深さが検出信号の振幅に影響を与え、同じ断面積でもきず長さが短いと振幅は小さくなる傾向がある。つまり、検出信号の振幅のみでは、きずの「長さ」と「深さ」を分離して評価することは困難である。これは  $L4\text{mm} \times D1.5\text{mm}$  のきずの  $B_z$  を判定基準としたとき、 $L3\text{mm} \times D2\text{mm}$  のきずを見落とす可能性があることを示す。この問題は、きず長さを推定可能なピーク間距離と振幅を組み合わせて評価することで解決が期待できる<sup>[3,8]</sup>。しかしながら、きず断面積におけるきず長さの影響以外にリフトオフの影響も無視できない程度に大きい。

図 5.5-2,3 はリフトオフごとに結果を示している。これをまとめた結果を図 5.1-4 に示す。エラーバーはリフトオフ  $\pm 0.5\text{mm}$  を示す。リフトオフ 1mm の  $L4\text{mm} \times D1.5\text{mm}$  のきずを判定基準としてリフトオフ 1.5mm に適用すると、 $L4\text{mm} \times D2.5\text{mm}$  のきずを見落とす可能性がある。また、「4.3 きず角度特性及びオフセット特性」で示したようにプローブがきず直上を通らない場合(オフセットが存在する場合)でもきず信号の振幅は減衰する。

本項目で明らかになったことを以下にまとめる。

- ・ 検出信号の振幅のみでは、きずの「長さ」と「深さ」を分離して評価することは困難である。
- ・ 検出信号の振幅からおおよそのきず断面積を評価可能である。
- ・ 振幅に与えるリフトオフやオフセットの影響を考慮する必要がある。

つまり、ACFM プローブまたは一様渦電流プローブは、「検出信号の振幅」と「コーティング厚さの管理」により、おおよそのきず断面積を評価可能である。ここでいう「コーティング厚さの管理」とは、コーティングの最大厚さ、または、リアルタイムのコーティング厚さ評価のことを言う。

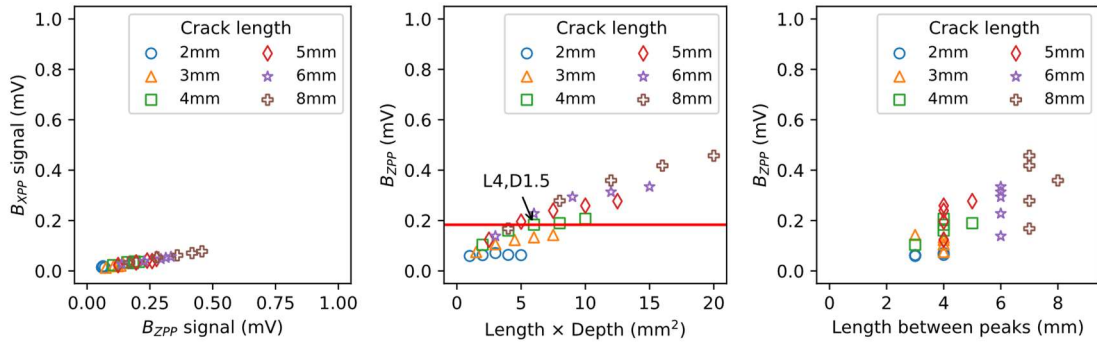


(a)  $B_x$  - $B_z$  平面

(b) 検出電圧ときず断面積との相関

(c) V-L 平面

図 5.5-1 きず形状ときず信号の振幅の関係(リフトオフ 0.5mm, D0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 mm)

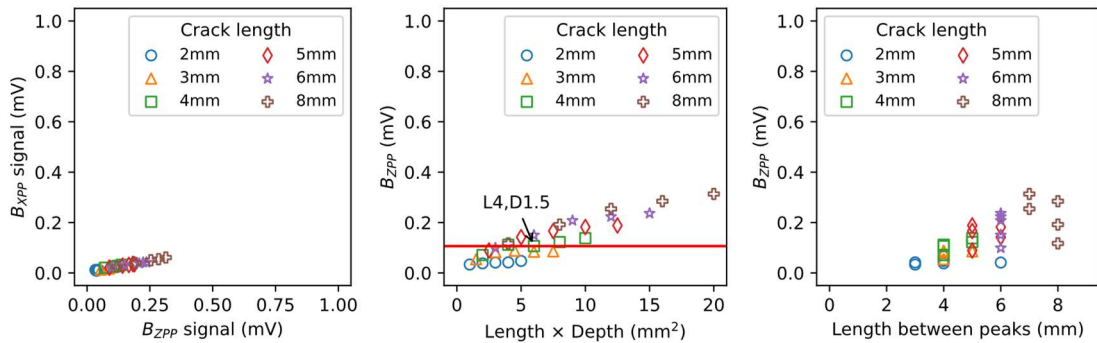


(a)  $B_x$  - $B_z$  平面

(b) 検出電圧ときず断面積との相関

(c) V-L 平面

図 5.5-2 きず形状ときず信号の振幅の関係(リフトオフ 1mm, D0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 mm)



(a)  $B_x$  - $B_z$  平面

(b) 検出電圧ときず断面積との相関

(c) V-L 平面

図 5.5-3 きず形状ときず信号の振幅の関係(リフトオフ 1.5mm, D0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 mm)

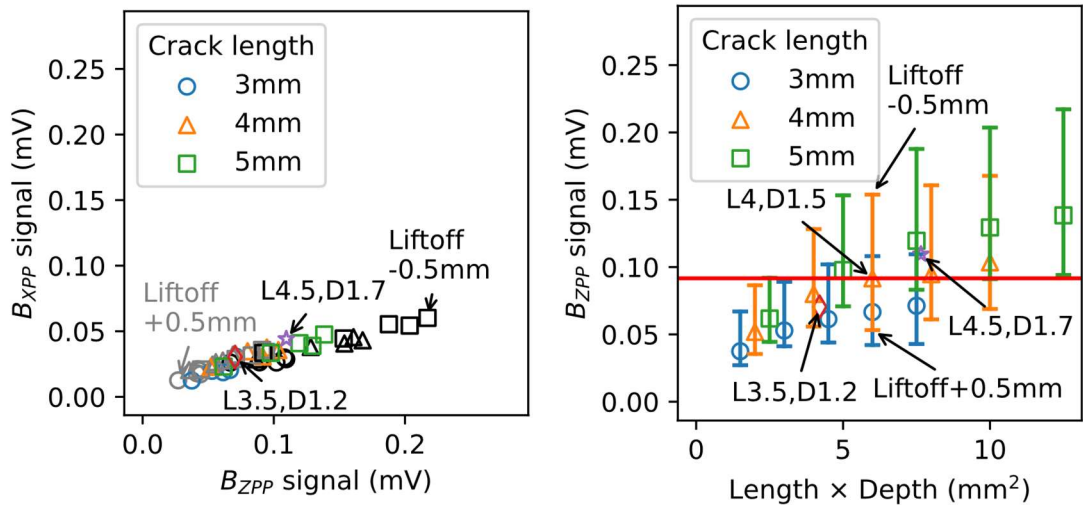


図 5.5-4 きず断面積評価におけるリフトオフの影響  
(リフトオフ  $1\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$ ,  $D0.5, 1, 1.5, 2, 2.5\text{mm}$ )

## 6. 計測実験

計算実験の結果を検証するため、計算実験で用いた ACFM プローブ及び計測システムを製作し、計測実験を行った。ここでは、以下の項目について計測実験を行った。

- ・ リフトオフ特性
- ・ きず角度特性
- ・ きず幅・形状特性
- ・ きず長さ特性
- ・ きず深さ特性

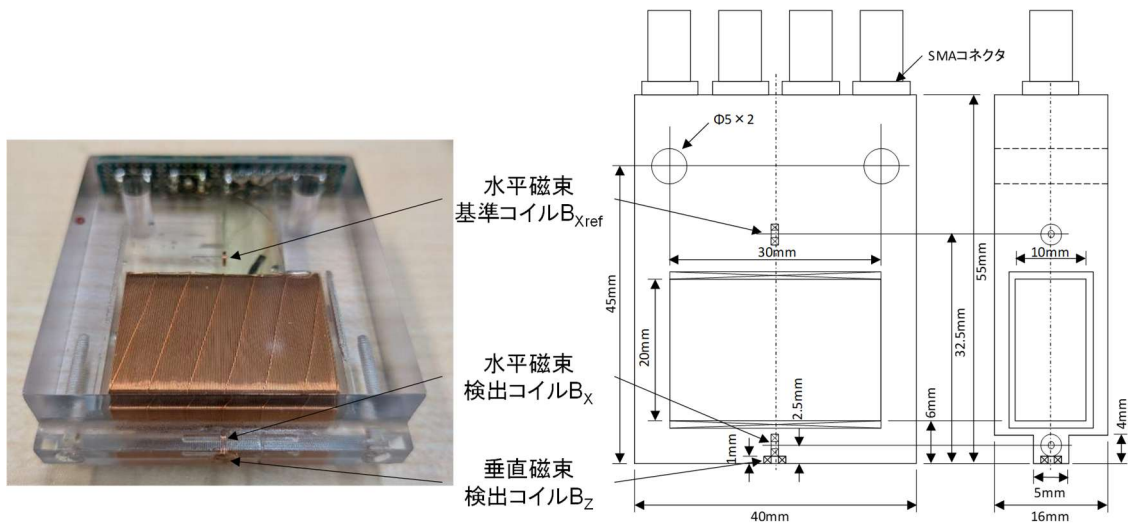
### 6.1. 計測システム

計測システムの構成を図 6.1-1 に示す。計測システムは ACFM プローブ(プローブ、プリアンプ、データ収集装置(DAQ))、XYZ テーブル(テーブル、テーブルコントローラー)、及び、制御用 PC で構成されている。ACFM プローブを図 6.1-2 に示す。図 6.1-2(a)に示すように、ACFM は水平磁束検出コイルと垂直磁束検出コイルの二つの検出コイルを持ち、それらを鎖交する磁束を同時に検出する必要がある。また、磁気雑音の低減を期待して永久磁石(10mm×5mm×2mm、表面磁束密度 0.3T)を図 6.1-2(b)に示すように配置したプローブによる測定を一部行った。

ACFM プローブの特性を計測実験において評価するには、すべてのパラメータを変更可能な探傷器に接続することが望ましい。そこで、内部がブラックボックス化された既製品ではなく ACFM プローブや一様渦電流プローブ等を接続可能な、汎用・2チャンネル・フルデジタル・ソフトウェア・ロックインアンプ、を製作した。ロックインアンプとは位相敏感検波(または同期検波)アルゴリズムを利用した微小信号増幅器のことで、渦電流探傷器を実現するうえで最も重要な機能として知られている。この装置は DAQ と図 6.1-3 に示すプリアンプ、及び、2チャンネル位相敏感検波器等の機能をパソコン上で実装したソフトウェアで構成されている。シングル及び2チャンネルまでの ECT プローブを SMA コネクタ経由で接続可能な汎用性を持ち、二つの検出コイルにはそれぞれ一つの計装アンプをプリアンプとして用いた。使用した計装アンプは 74dB という非常に高い増幅率で用いている。このような場合、二つのオペアンプで増幅率を分割することが定石だが、ここでは被測定対象とするきずの検出が可能であったことと、回路が単純になることを優先しこのような回路とした。この点以外にも製作した装置(ACFM プローブを含む)には改善の余地が多数あり、ここで示す結果は既存の ACFM プローブ及び装置の性能の限界を示すものではないことに留意する必要がある。

制作したソフトウェアは測定条件の設定や、検出コイルの誘導起電力の時間変化波形・複





(a) プローブ形状



(b) 直流磁化併用 ACFM プロブ

図 6.1-2 検証用 ACFM プロブ

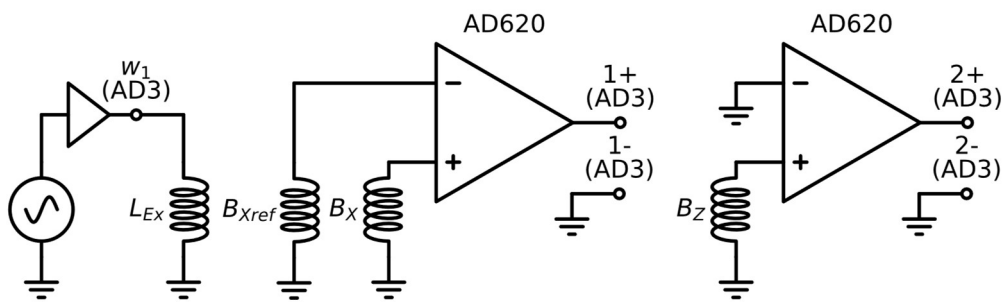


図 6.1-3 プリアンプ回路図

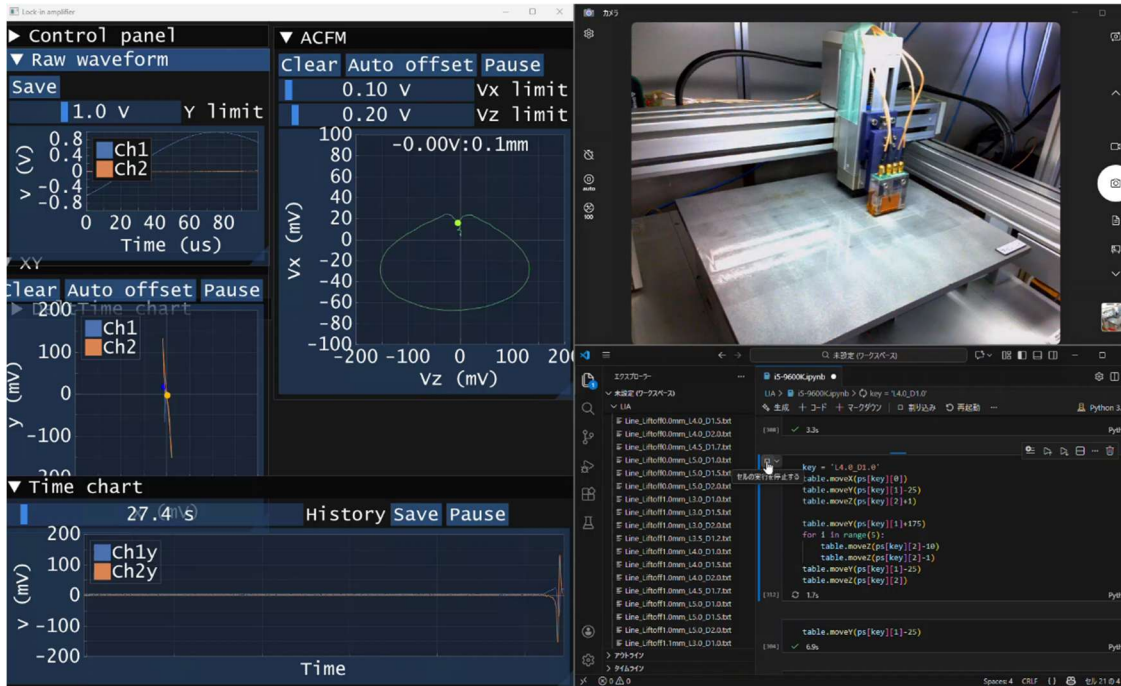


図 6.1-4 テーブル制御用プログラム



(a) きず幅及び矩形・円弧用試験体(R7-TP1-2)



(b) 矩形きず長さ・深さ用試験体(R7-TP4)

図 6.1-5 試験体

表 6.1-1 計測条件

項目	詳細
プローブ	励磁コイルインピーダンス 88Ω(5kHz 時)
データ収集装置(DAQ)	Digilent Analog Discovery 3 AD 変換: ±2.5V, 14bit
プリアンプ	Analog Devices AD620 (GBW: 12MHz 相当) 水平磁束: 74dB(設計値)、垂直磁束: 60dB(設計値)
励磁条件	10Vpp, 5kHz
XYZ テーブル	IAI TT-C3-I-4040-05B(繰り返し位置決め精度 0.05mm)
試験体	材質: SM400A R7-TP1-2: 矩形きず L4mm, D1.5mm, W0.3, 0.5, 1mm, 計 3 個 円弧きず L4mm, D1.5mm, W0.3mm, 計 1 個 R7-TP4: 基準矩形きず L3,4,5mm, D1,1.5,2mm, W0.3mm, 計 9 個 矩形きず L 3.5mm×D1.2mm, L 4.5mm×D1.7mm, 計 2 個

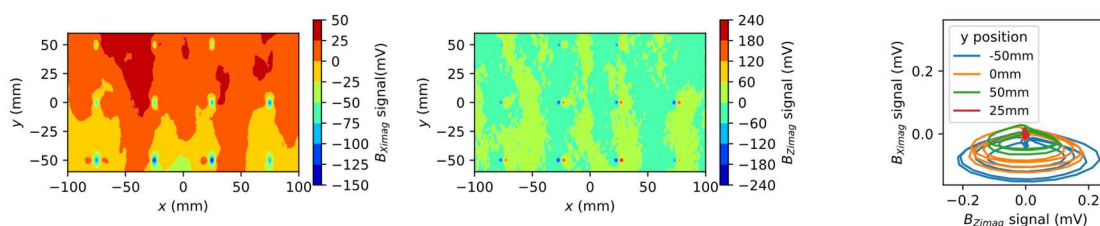
表 6.1-2 求められる探傷器の機能

項目	一様渦電流・パンケーキ ECT	ACFM
必須の励磁源の数	1	1
必須の入力チャンネル数	1	2
解析手法	複素平面	バタフライプロット

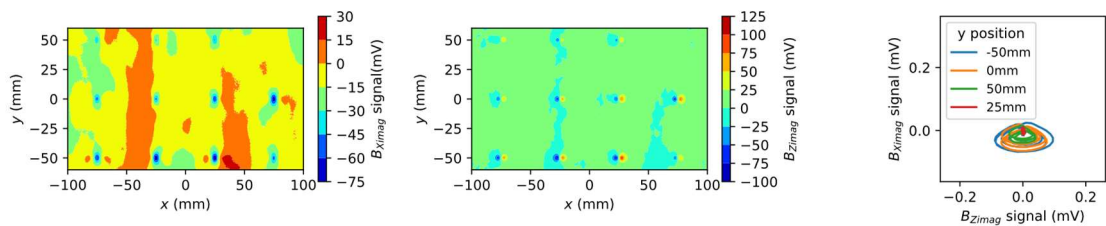
## 6.2. リフトオフ特性

図 6.2-1 に試験体(R7-TP4)の測定結果を示す。左から  $B_x$ 、 $B_z$ 、バタフライプロットを示している。リフトオフが大きくなるにつれ、検出信号の振幅が小さくなっていることがわかる。また、 $B_x$  においてきず存在しない部分で検出信号の振幅の変動「磁気雑音/きず信号」 $B_z$  と比較して目立つ。これは ECT において問題になる材料の磁気的特性ムラから生じる「磁気雑音」であると予想している。 $B_z$  は試験体表面のきずを含む電磁気性質の絶対値的な変化を検出しているのに対して、 $B_x$  は微分的な変化を検出している。磁気雑音(透磁率のムラ)は検出コイル形状と比較してきずほど局所的な変化ではないため、 $B_z$  では磁気雑音が目立たないと考えられる。磁気雑音は磁化を併用することで抑制できることが知られている。直流磁化を併用した測定結果を図 6.2-2 に示す。直流磁化を併用することで、きずが存在しない部分での検出信号の振幅の変動(磁気雑音)が小さくなったが、まだ十分抑制できているとは言えない。しかし、強すぎる直流磁化は試験体の透磁率の減少を招ききず角度が 90 度の時の漏洩磁束が減少することが予想される。このように直流磁化には調整が求められる一方で、リフトオフ 1mm において直流磁化なしでも十分にきずを検出することができていることから、以降は直流磁化を併用することなく評価することとする。

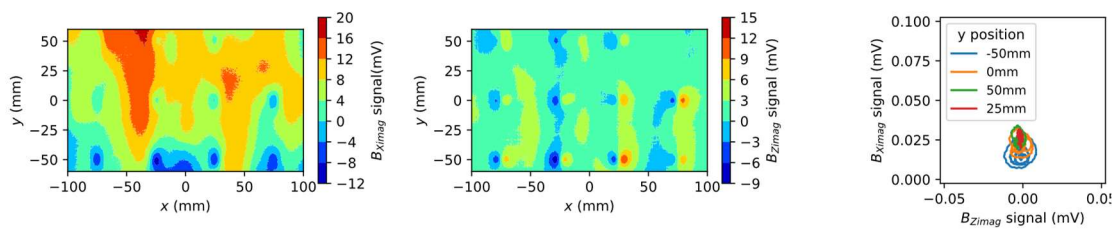
図 6.2-3 に L4mm, D1.5mm のリフトオフ特性を示す。左から  $B_x$ 、 $B_z$ 、バタフライプロット、オフセット特性を示している。同一のきずであっても、オフセットやリフトオフが大きくなると検出信号の振幅が減衰することが確認できる。図 6.2-4 にオフセット 0mm の L4mm, D1.5mm のリフトオフ特性を示す。図 6.2-4(a)からは  $B_x$  がリフトオフによって大きく変化することで、必要とするダイナミックレンジが大きいこと  $B_z$  のそれより大きいことがわかる。図 6.2-4(b),(c)からは  $B_x$  に磁気雑音が表示されていることが確認できる。



(a) リフトオフ 0mm

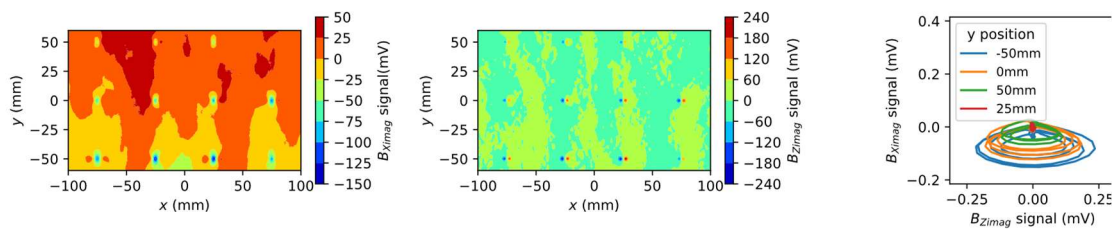


(b) リフトオフ 1mm

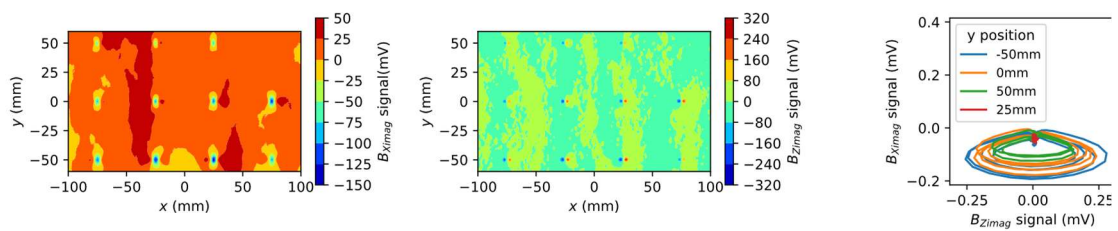


(c) リフトオフ 5mm

図 6.2-1 リフトオフ特性

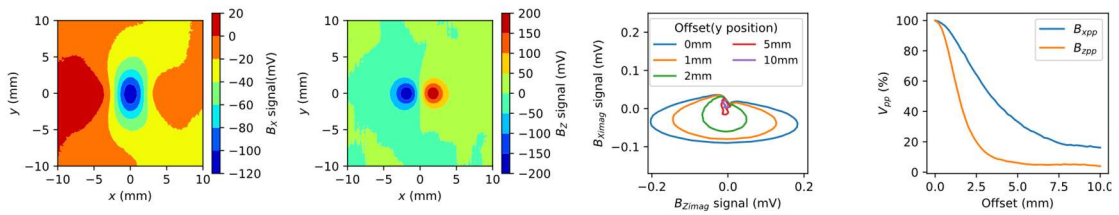


(a) 直流磁化なし

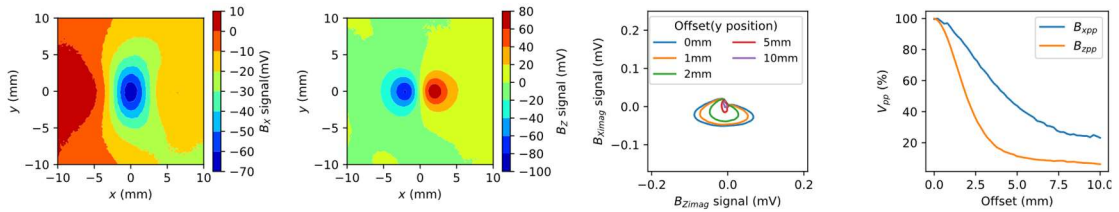


(b) 直流磁化あり

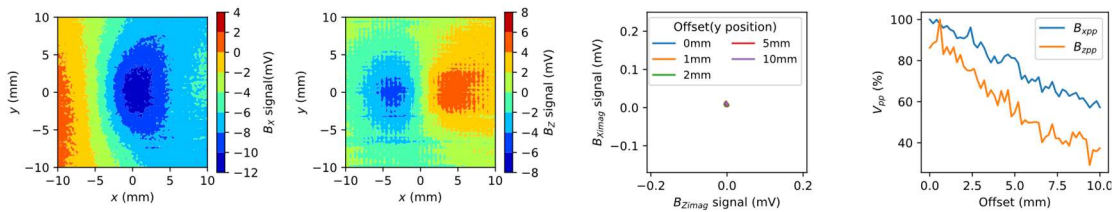
図 6.2-2 直流磁化(リフトオフ 0mm)



(a) リフトオフ 0mm

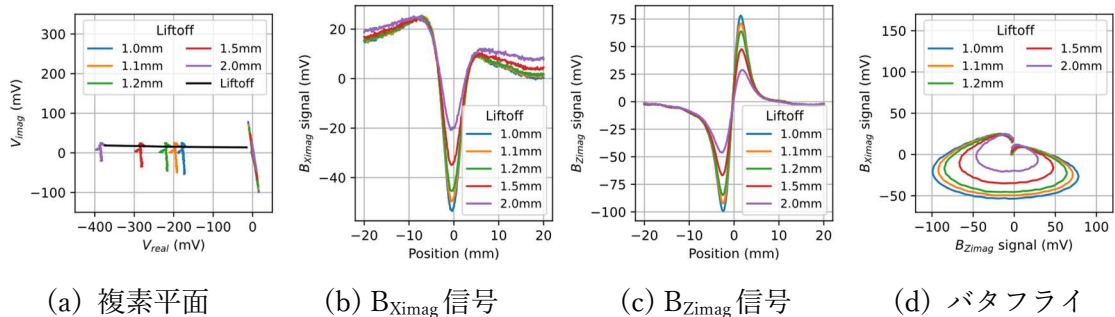


(b) リフトオフ 1mm



(c) リフトオフ 5mm

図 6.2-3 リフトオフ特性(L4mm, D1.5mm)



(a) 複素平面

(b)  $B_{ximag}$  信号

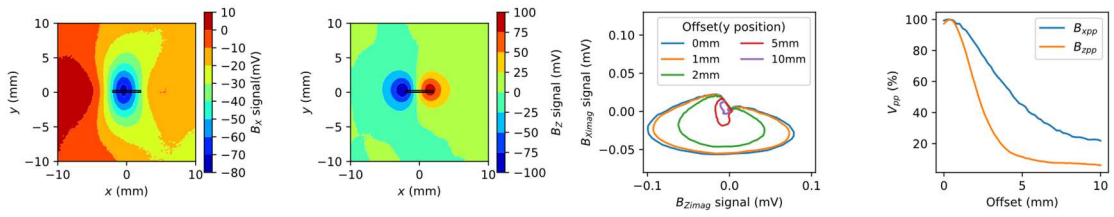
(c)  $B_{zimag}$  信号

(d) バタフライ

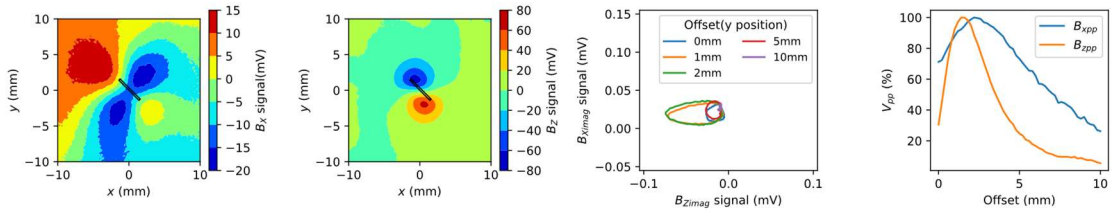
図 6.2-4 リフトオフ特性(オフセット 0mm、L4mm, D1.5mm)

### 6.3. きず角度特性

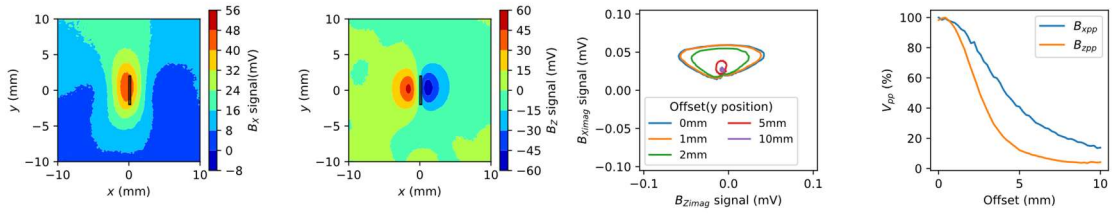
図 6.3-1 にきず角度を 0 度, 45 度, 90 度としたときのきず(L4mm, D1.5mm)の検出信号を示す。角度によってバタフライプロットがダイナミックに変化していることがわかる。図 6.3-2 に非磁性体材料の試験体を測定した結果を示す。きず角度が 0 度のとき最も検出信号が大きく、90 度のとき最も小さいことがわかる。これは計算実験(図 4.3-4)の結果と同じである。



(a)  $0^\circ$

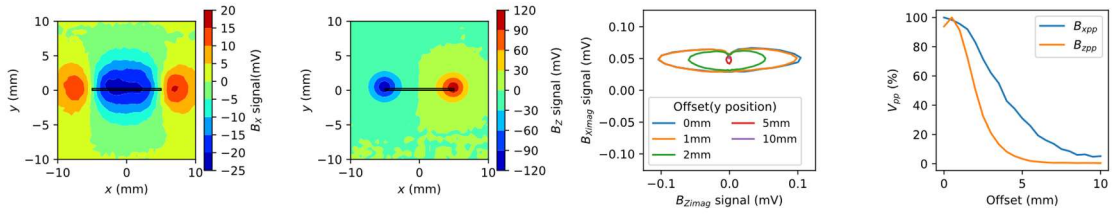


(b)  $45^\circ$

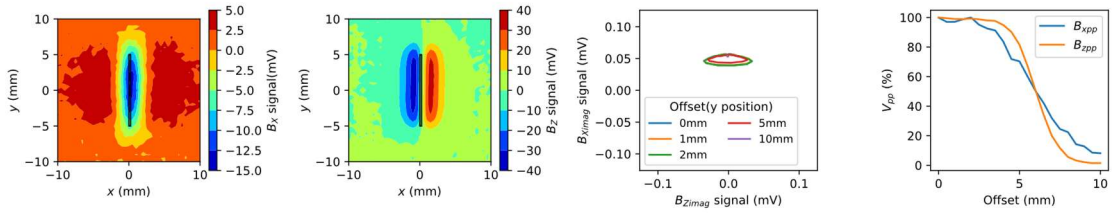


(c)  $90^\circ$

図 6.3-1 きず角度特性(リフトオフ 1mm, L4mm, D1.5mm)



(a)  $0^\circ$

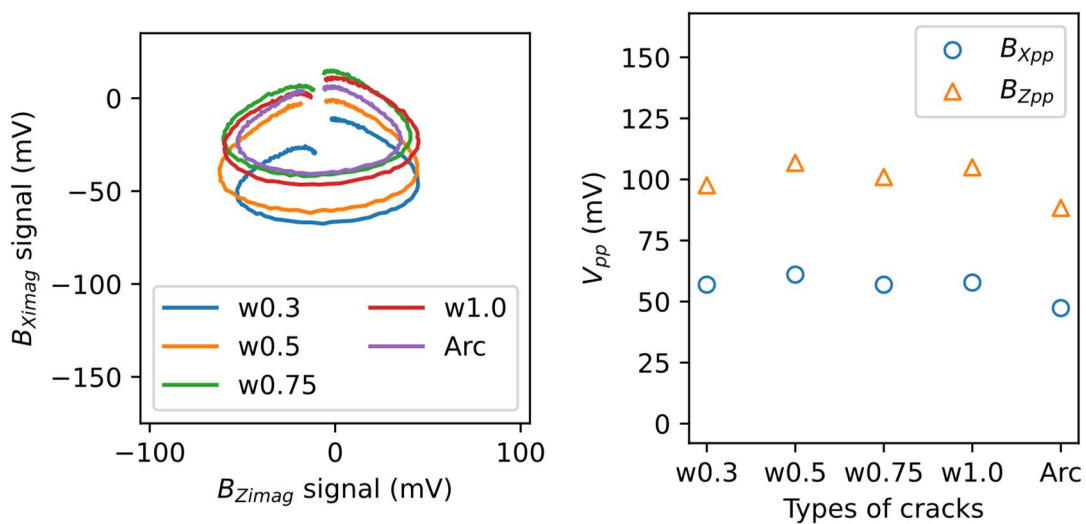


(b)  $90^\circ$

図 6.3-2 非磁性体(A5052, リフトオフ 0mm, L10mm, D1mm)

#### 6.4. きず幅・断面形状特性

図 6.4 にきず幅を 0.3, 0.5, 0.75, 1mm、長さ 4mm、深さ 1.5mm のときの検出信号を示す。また、図中の「Arc」は断面形状が円弧で、かつ、きず幅 0.3mm、長さ 4mm、深さ 1.5mm のきずの検出信号を示している。きず幅・断面形状の影響は十分小さいことが確認できた。



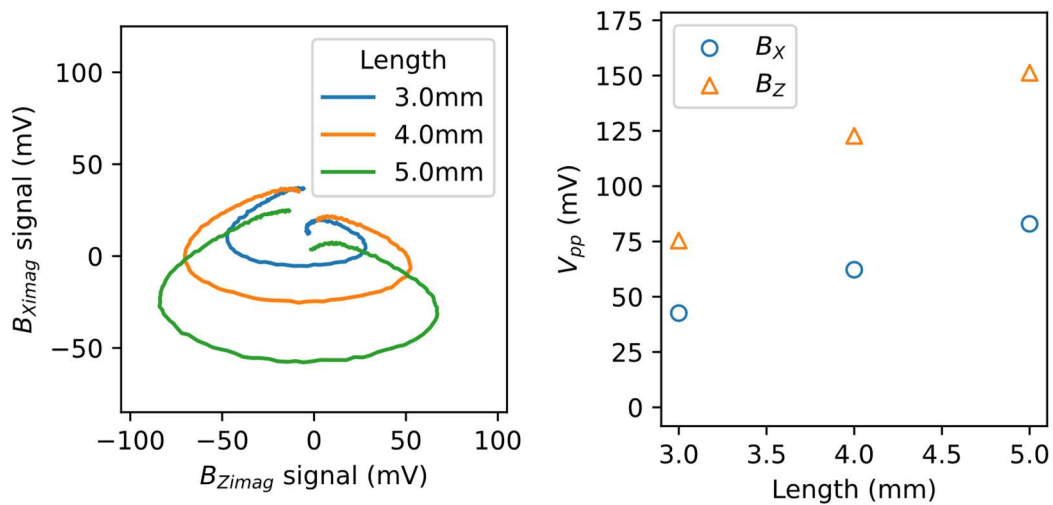
(a) バタフライプロット

(b) きず幅・形状特性

図 6.4 きず幅・形状特性(リフトオフ 1mm)

#### 6.5. きず長さ特性

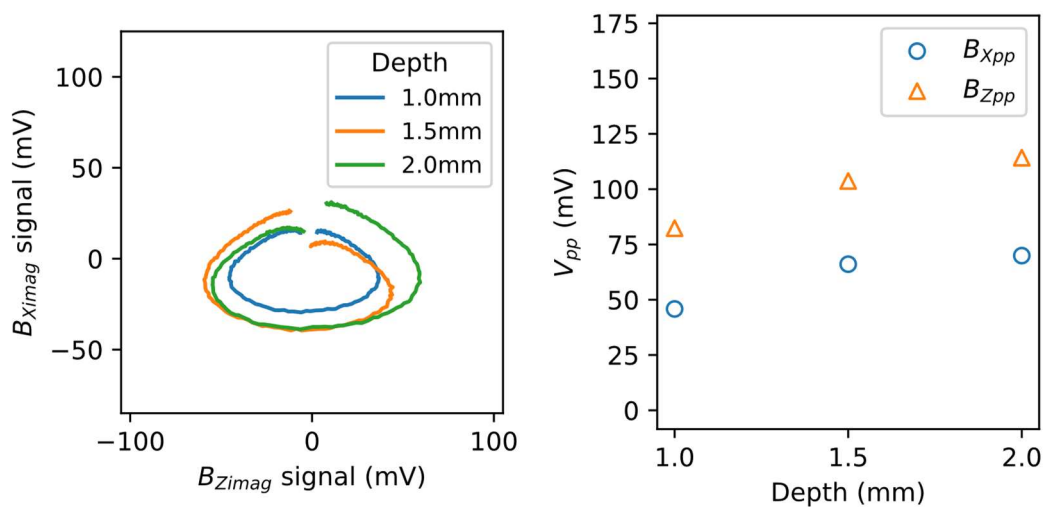
図 6.5-1,2 にきず長さ 3, 4, 5mm、深さ 1.5mm、幅 0.3mm のときの検出信号を示す。きず深さと検出信号の振幅に相関がみられる。一方で、リフトオフが 1mm から 1.5mm に変化すると、検出信号が減衰するので、測定個所のリフトオフの管理が必要である。



(a) バタフライプロット

(b) きず長さ特性

図 6.5-1 きず長さ特性(リフトオフ 1mm)



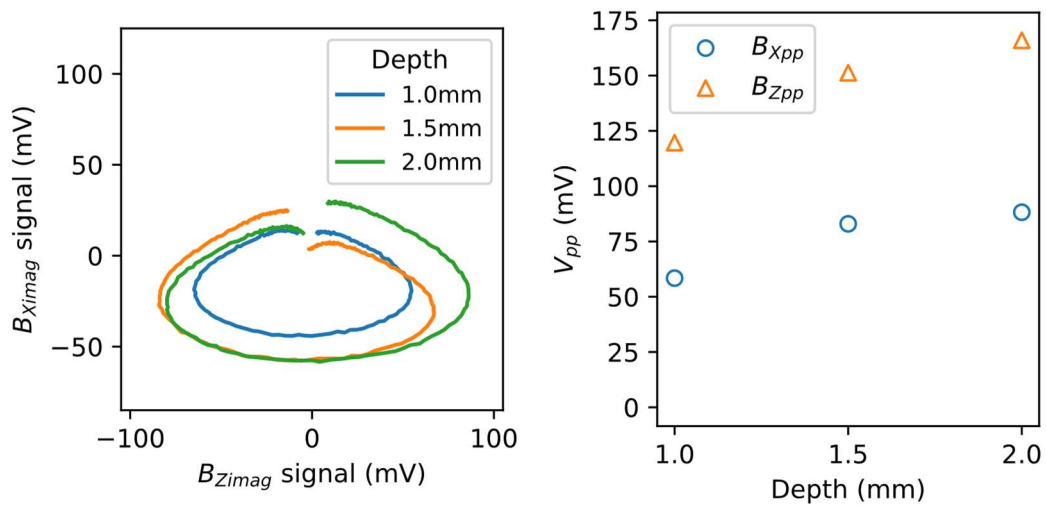
(a) バタフライプロット

(b) きず長さ特性

図 6.5-2 きず長さ特性(リフトオフ 1.5mm)

## 6.6. きず深さ特性

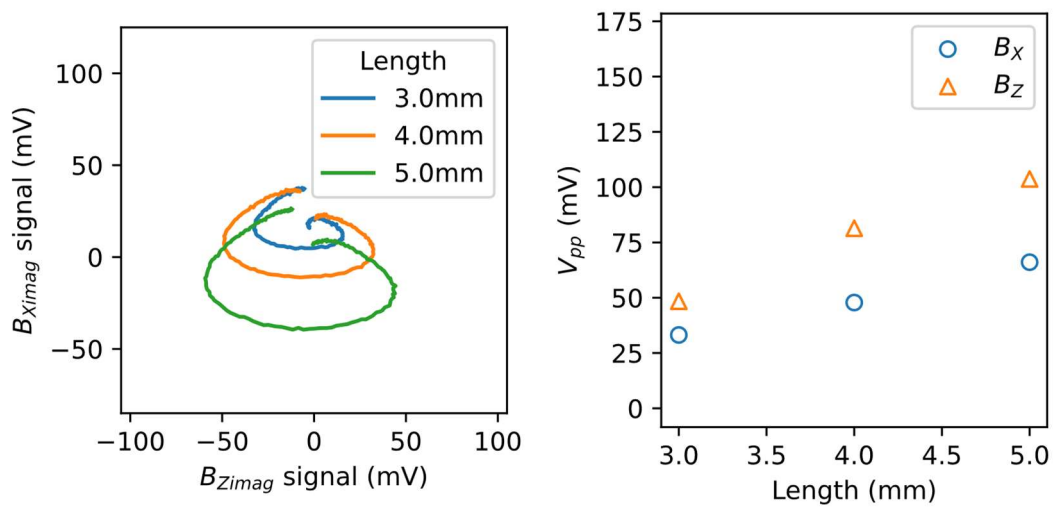
図 6.6-1,2 きず深さ 1, 1.5, 2mm、長さ 4mm、幅 0.3mm のときの検出信号を図に示す。きず長さと検出信号の振幅に相関がみられる。一方で、リフトオフが 1mm から 1.5mm に変化すると、検出信号が減衰するので、測定個所のリフトオフの管理が必要である。



(a) バタフライプロット

(b) きず深さ特性

図 6.6-1 きず深さ特性(リフトオフ 1mm)



(a) バタフライプロット

(b) きず深さ特性

図 6.6-2 きず深さ特性(リフトオフ 1.5mm)

## 6.7. きず断面積特性

図 6.7-1 にリフトオフ 1mm のときのきず断面積特性を示す。きず長さ及び深さが検出信号の振幅に影響を与えており、振幅のみではそれぞれを分離して評価することができないことがわかる。図 6.7-2 にリフトオフ 1.5mm ± 0.5mm のときのきず断面積特性を示す。検出信号の振幅はリフトオフの影響を受け、リフトオフ ± 0.5mm の影響は無視できないこと

がわかる。これらは計算実験と同等の結論である。

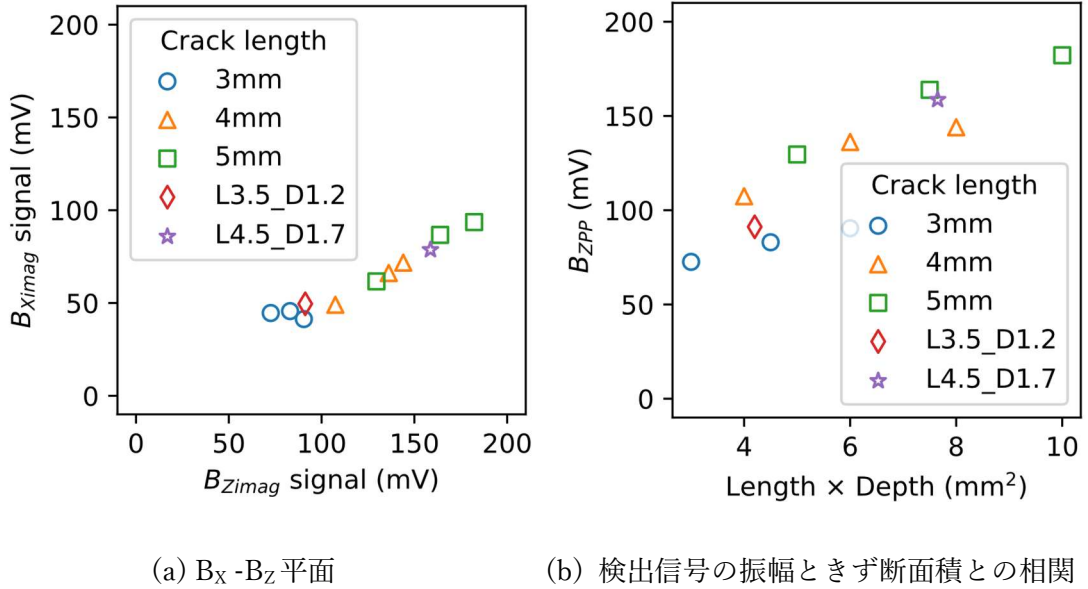


図 6.7-1 きず断面積特性(リフトオフ 1mm)

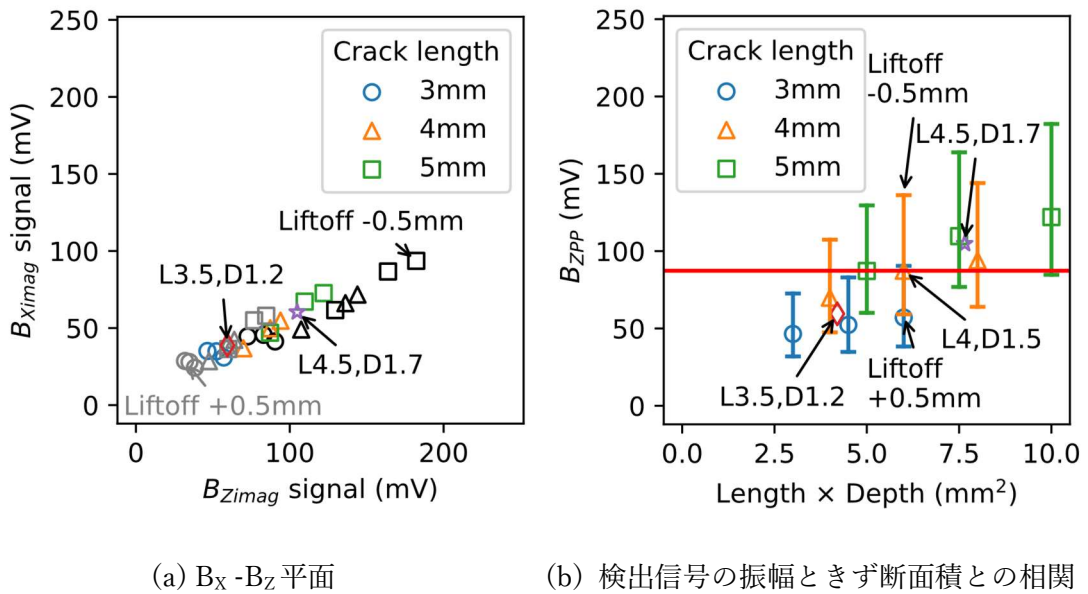


図 6.7-2 きず断面積評価におけるコーティング厚さの影響(リフトオフ 1.5mm±0.5mm)

## 7. 結言

ACFM プローブの検出原理の解明、及び、きず形状応答特性を調査することを目的に、計算実験と計測実験を行った。ここでは、得られた知見と提言をまとめる。

### 7.1. 得られた知見

得られた知見を以下にまとめる。

- ・ **リフトオフ耐性**
  - ACFM プローブと一様渦電流プローブは、従来のプラスポイントプローブや差動型 ECT プローブと同様に、リフトオフ耐性に優れている。
- ・ **きず角度の識別**
  - ACFM プローブはバタフライプロットにより、きずの有無だけでなく角度識別が可能である。これはきず角度が不明なきずの見落としの軽減に有効である。なお、 $B_z$  のみに着目しても位相の反転が確認できることから、一様渦電流プローブでもきず角度の推定は可能である。
- ・ **定量評価の限界**
  - 従来の ECT プローブと同様に、検出信号の振幅のみでは「深さ」と「長さ」の分離は困難であり、およそその断面積推定に留まる。
  - ACFM プローブは、きず角度 0 度できず直上を走査したとき、最もきず信号が大きくなる。検出信号の振幅を閾値にする場合、「コーティング厚さ」、「きず角度」と「オフセット」の情報が必要である。
- ・ **技術的な位置づけ**
  - ACFM プローブは、ECT と同一の技術に基づきつつ、さらにバタフライプロットによるきず識別が可能になった技術と言える。

したがって、ACFM プローブは、「検出信号の振幅」と「コーティング厚さの管理」により、およそそのきず断面積を評価可能であり、石油タンク等の大型構造物の保守検査への適用が期待できる。「コーティング厚さの管理」とは、コーティングの最大厚さ、または、リアルタイムの厚さ評価のことを示す。

計算実験では考慮していないが、一般的な知見として以下のことが言える。

- ・ 従来の ECT プローブと同様に、溶接線近傍の熱影響部では透磁率が局所的に変化し、ノイズとなる可能性がある。
- ・ 従来の ECT プローブと同様に、余盛及び止端部の形状がリフトオフ変化として検出信

号に影響(きず信号の低下)を与える可能性がある。

## 7.2. 適用に向けた提言

適用に向けた提言を以下にまとめる。

### ・ 運用上の注意

- 従来の ECT プローブと同様に、リフトオフ変化が検出信号の振幅に影響するため、コーティング厚さ管理(最大厚さの事前調査、または膜厚計の併用)を推奨する。
- 従来の ECT プローブと同様に、走査ピッチまたはマルチプローブの単位プローブ間の間隔は、有効検出幅より小さくなくてはならない。
- 従来の ECT プローブと同様に、実質的なリフトオフが小さくなるよう、ビードの高さを小さくすめらかにするなどの処理は、適用範囲を広げるのに効果的である。

### ・ 技術的拡張:

- 磁気雑音の低減: 従来の ECT プローブと同様に、磁化や消磁を組み合わせることで磁気雑音の低減が期待できる。
- リフトオフ補正機能の実装: コーティング厚さの同時測定を踏まえたリフトオフ補正アルゴリズムの開発により、より精密な計測が期待できる。
- きず深さ・長さ評価法の開発: 従来の ECT プローブと同様に、検出信号の振幅だけでなく、ピーク間距離などを組み合わせることできず深さと長さを評価することが期待できる。
- プローブのマルチ化: 従来の ECT プローブと同様に、プローブをマルチ化することで、オフセット(プローブの最も感度が高い場所からのきずの位置ずれ)による信号低下の軽減と検査速度の両立が期待できる。

## 参考文献

- [1] US Patent: US5574376A, 1991.
- [2] Charles Tremblay, Ahmed Sweedy and Noah Johnson, Rapid Inspection of Steel Bridges using ACFM, The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, 2022.
- [3] Xin'an Yuan, et al., Recent development of alternating current field measurement technology for defects detection: A review, NDT & E International, Volume 155, 2025.10.
- [4] Casper Wassink, Matthew Wolf and Michael Sirois, Standard development for Eddy Current Arrays in lieu of Magnetic Particle Testing, ECNDT 2023.
- [5] 小山 潔, 星川 洋, 渦流探傷試験における一様渦電流プローブの基礎的特性に関する研究, 非破壊検査 49.5 (2000), pp. 775-781.
- [6] 小坂 大吾, 橋本 光男, 数値解析支援に適する ECT 内挿回転プローブの開発, 非破壊検査, 50.10(2001), pp. 664-669.
- [7] 星川洋, 小山潔, 三橋宗太郎. “一様渦電流プローブによる磁性体の渦流探傷と漏洩磁束探傷について.” 非破壊検査 54.2 (2005), pp. 84-90.
- [8] D. Kosaka, H. Hanawa and K. Hirano, "Method for Estimating Crack Length and Depth Using Radial Basis Function in Eddy Current Testing," 2025 Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG), New Orleans, LA, USA, 2025, pp. 1-6.