

(一社)日本非破壊検査工業会

資料2

The Japan Association for Non-Destructive Testing Industry

危険物保安技術協会
 新技術を活用した危険物施設の保安設備等に関する研究会(第8回)
 令和6年4月22日(月)14:00~16:00

渦電流探傷試験(ET)による コーティング上からの溶接線 検査への適用に向けた調査 報告(2)

(一社)日本非破壊検査工業会 渦電流試験ワーキンググループ

小坂 大吾

職業能力開発総合大学校

講師紹介 小坂大吾

- 職業能力開発総合大学校
 - 電気専攻 准教授
- アイオワ州立大学(2013-2015)
 - 非破壊評価センター 博士研究員
- 日本非破壊検査協会
 - ISO委員会SC4グループ 委員
 - 標準化委員会
 - 渦電流専門別委員会 委員
 - 認証試験委員会
 - 渦電流探傷試験部会 部会長
- 日本電気協会
 - 原子力規格委員会 構造分科会 渦電流探傷試験検討会 委員
- 電気学会
 - ものづくり技術委員会 委員長



JANDT

Eddy Current Working Group

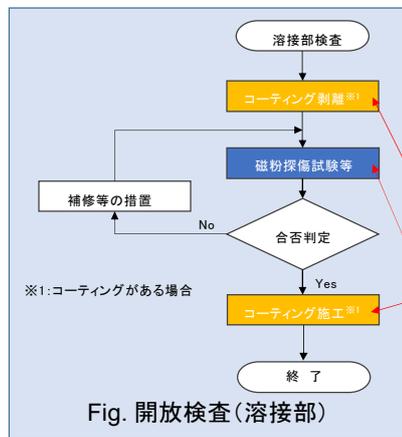
2

目次

1. 背景・目的
2. 渦電流探傷試験とは
3. 数値実験
4. 計測実験
5. まとめ

1. 背景・目的

背景～特定屋外タンクの 溶接部検査の流れ(現状)～



特定屋外タンク

課題1:コーティング

- ・ 剥離及び再塗装の手間と費用(工期)

課題2:磁粉探傷試験

- ・ 検査結果の保存が困難

提案:コーティング上からの渦電流探傷試験

5

目的

- ・ 試験の流れの中で求められる以下の事項について放電加工による「スリットきず」を用いた検討を行う。
 - ① 探傷器の感度設定のための基準きず(きず幅の決定)
 - ② きず判定のための検出レベル決定基準
 - ③ きず長さサイジング方法及び基準
- 以下の点を前提条件とする。
 - ・ 既存の渦電流探傷装置を対象とする。
 - ・ 検出目標きず(最小欠陥)は4.0mm×深さ1.5mmとする。
- ・ 溶接部に付与したいいくつかの自然きずに対して、提案方法及び基準を適用し、提案方法の有効性を確認する。

策定すべき「基準」

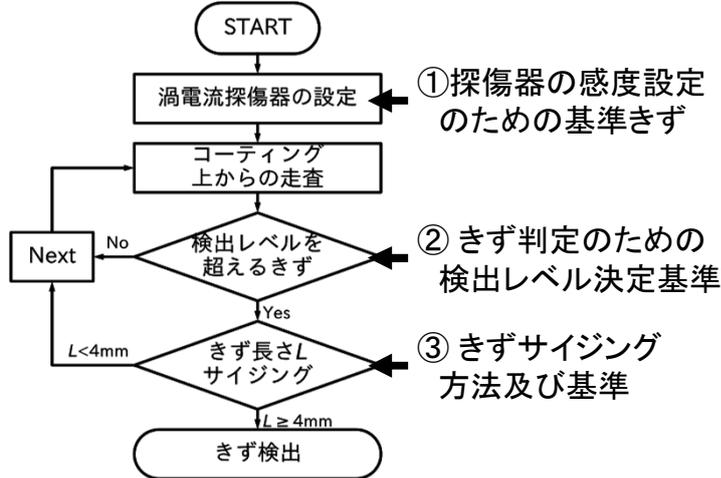
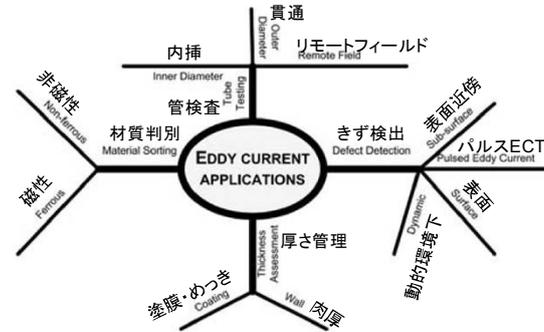


図 渦電流探傷試験の検査手順

2. 渦電流探傷試験とは

渦電流探傷試験アプリケーション

- 材料判別
- 管検査
- 厚さ管理
- **きず検出**



Hansen, J. "The eddy current inspection method." *Insight* 46.5 (2004): 279-281.

Figure 24. Eddy current applications

1.1 安全と非破壊検査技術

航空機のクラック発生個所

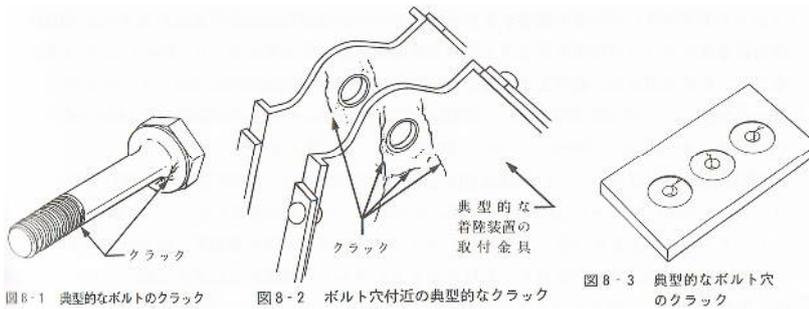


図 8-1 典型的なボルトのクラック

図 8-2 ボルト穴付近の典型的なクラック

図 8-3 典型的なボルト穴のクラック

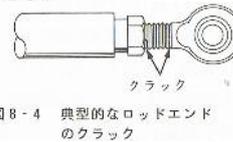


図 8-4 典型的なロッドエンドのクラック

- ボルト頭部と軸部との間の周部、及び、ねじ部。
- ボルト穴あるいはピン穴の縁、及び、穴の内側。
- 溶接部の縁、及び、ビードの中心に沿って。

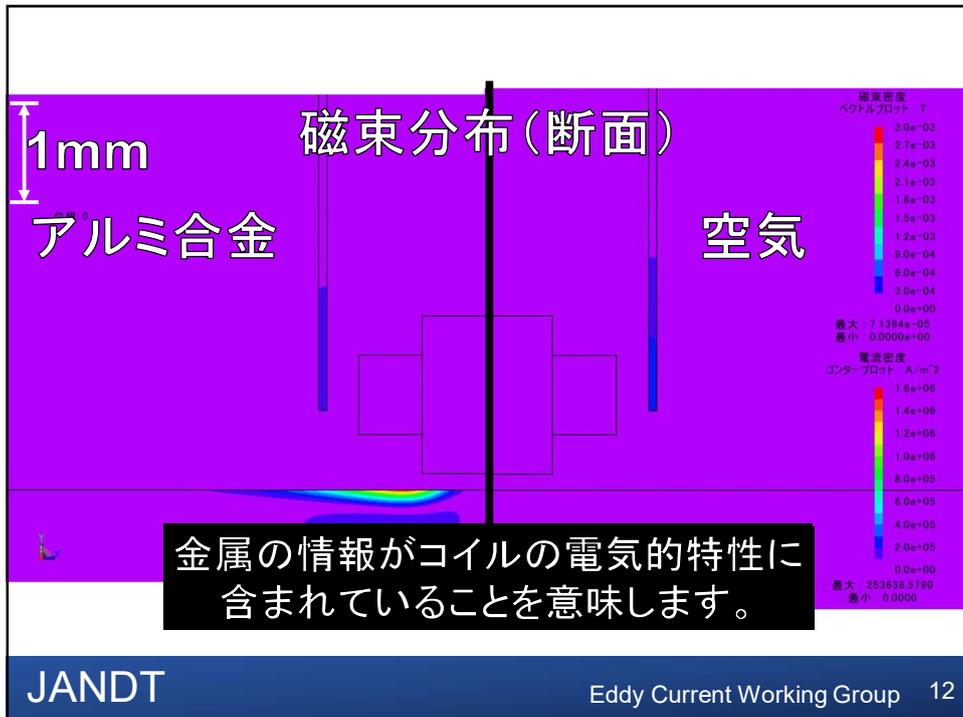
(社)日本航空技術協会、航空整備作業の基準、p. 151

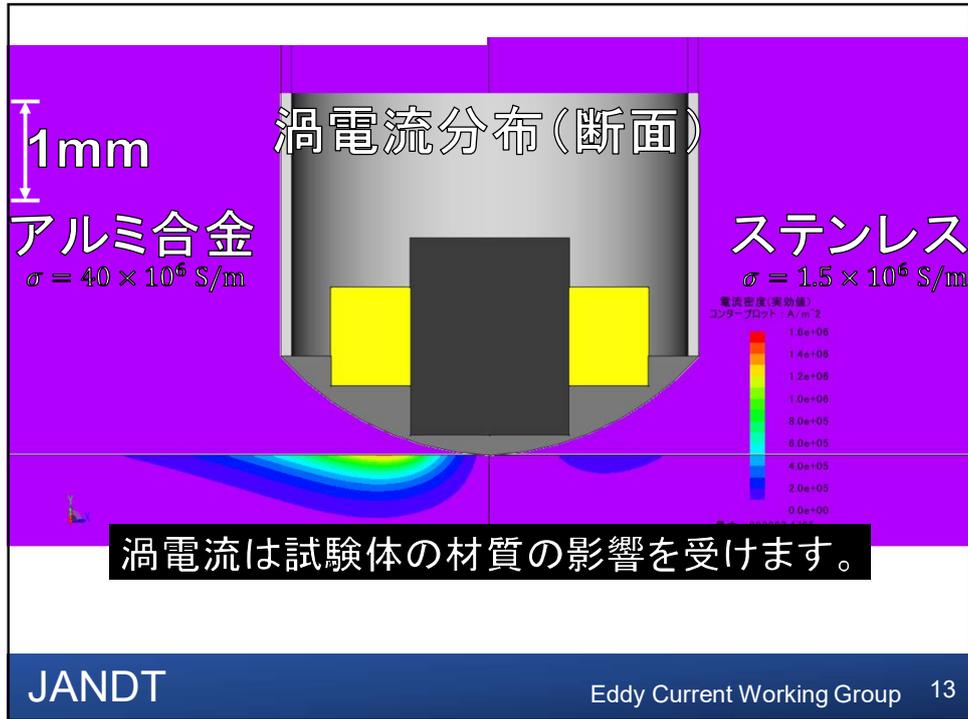
ポイント①

初期の疲労きず
(微小きず)
の検出が可能。

JANDT

Eddy Current Working Group 11

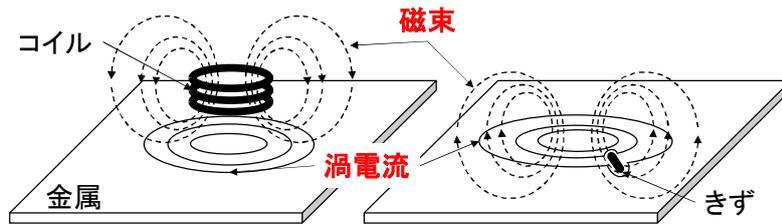




ポイント②

材質の影響を受ける。

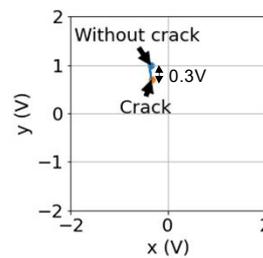
きずの検出原理



JANDT

Eddy Current Working Group 15

きずによる検出信号の変化



プローブ先端がきずを通過すると、きず信号が生じます。

JANDT

Eddy Current Working Group 16

ポイント③

検査の基準が必要

3. 数値実験

数値解析の背景・目的

背景

- 塗装の上から、きず長さ4mm、深さ1.5mmの検出が求められている。
- 基準試験体製作において長さ4mmの疲労きずを十分な再現性を確保して製作することは困難である。
- 放電加工スリットの幅は疲労きず等の自然きずの幅と比較してかなり大きく、基準きずとして妥当なのか疑問。

目的

- 放電加工スリットを基準きずを用いて検出レベルを決定することの妥当性を確認する。
- 基準きずの長さ・幅・深さを決定する。
 - 問題を簡単にするためにきず形状は矩形、及び円弧とし、「深さ \leq 開口部長さ/2」に限定する。
 - 検出対象とする疲労きずのきず幅は0.1mm以下とする。
 - リフトオフは固定とする。
- 長さ4mmかつ深さ1.5mmを超えるきずを判定する手法を提案する。

明らかにすること

1. スリット断面形状の影響
2. スリット幅の影響
3. スリット長さの評価方法

数値実験

数値解析

- 使用ソフトウェア: **Netgen/NGSolve**
- ウィーン工科大学で開発されたFEMライブラリ
- 任意の偏微分方程式を実装可能
- **高次要素**を適用可能(一次要素より表現力が高い)



- 偏微分方程式: A法(A Φ 法より省メモリ)
- 要素の次元: 二次辺要素(最小要素辺高さ1 μ m)

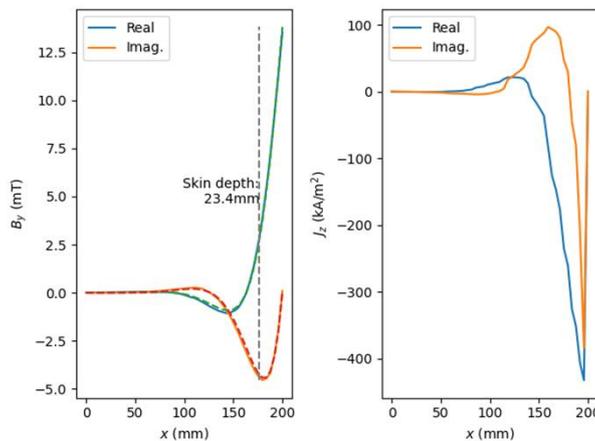
[1] Joachim Schöberl, C++ 11 implementation of finite elements in NGSolve. ASC Report 30/2014, Institute for analysis and scientific computing, Vienna University of Technology, 2014.
 [2] REININGER, Alexander, et al. Efficient Simulation Model of a Circular Piezoelectric Actuator with TDNNS Elements in Netgen/NGSolve. In: ACTUATOR: International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021. VDE, 2021. pp. 1-3.

JANDT

Eddy Current Working Group 21

数値実験

正確さ～理論値との比較～ (破線が理論値、実線が計算値)



JANDT

Eddy Current Working Group 22

数値実験

数値解析条件

Table 数値解析パラメータ

項目	値
試験体	1.26×10^7 S/m, $\mu_r=267$ (初期値)
フェライト	$\mu_r=521$ (初期値)
励磁電流	100 kHz, 1.56×10^7 A/m ²
走査ピッチ	0.2 mm
リフトオフ	1 mm
スリット形状(3通り)	矩形、円弧、連続円弧
スリット幅(9通り)	0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 mm
スリット深さ(8通り)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 mm
スリット長さ(8通り)	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 mm
組み合わせ数	200通り超

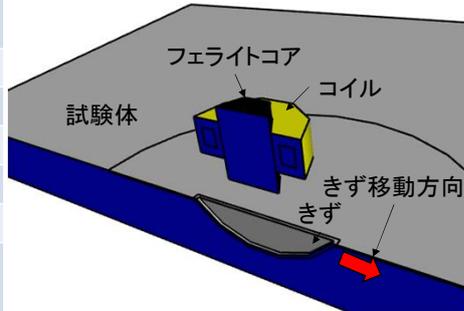


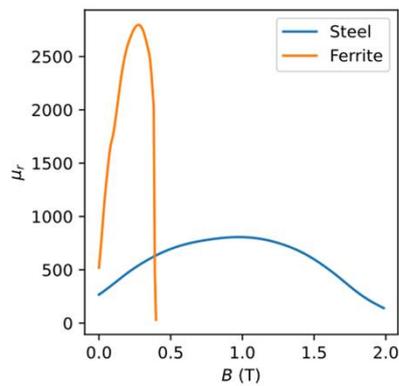
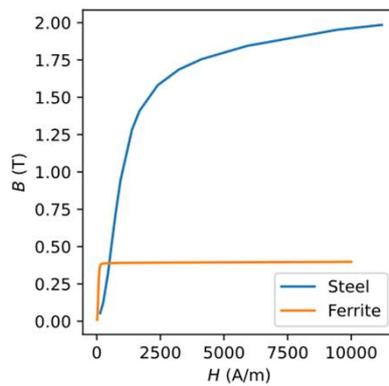
Fig. 数値解析モデル

JANDT

Eddy Current Working Group 23

数値実験

数値解析条件: BHカーブ



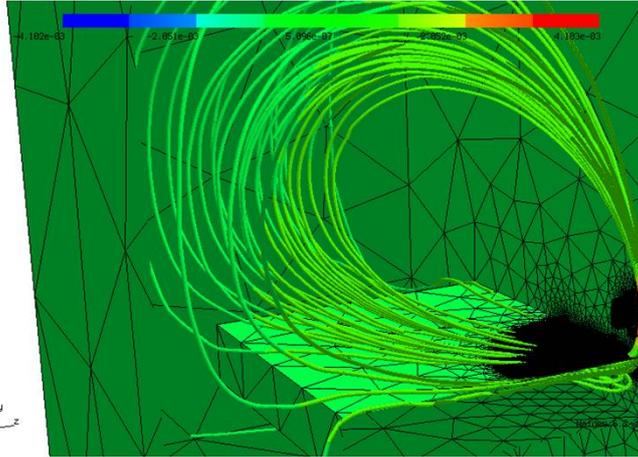
電気伝導率
 SS400: 1.26×10^7 S/m
 フェライト: 0 S/m

JANDT

Eddy Current Working Group 24

数値実験

磁束の可視化の例

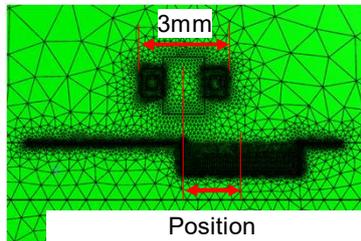


JANDT

Eddy Current Working Group 25

数値実験

1. スリット断面形状の影響



Position
(コイル中心-スリット中心間距離)

Fig. 1 矩形スリット

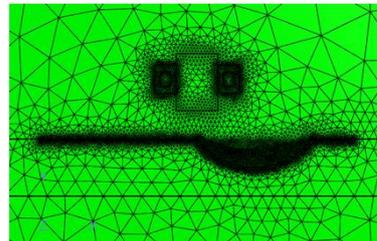
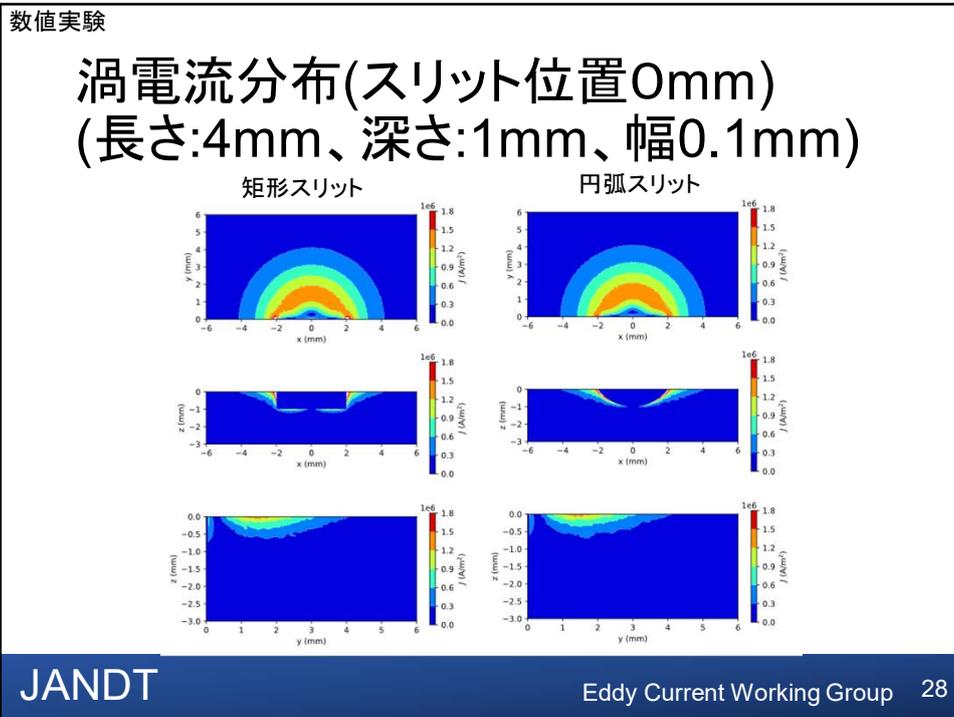
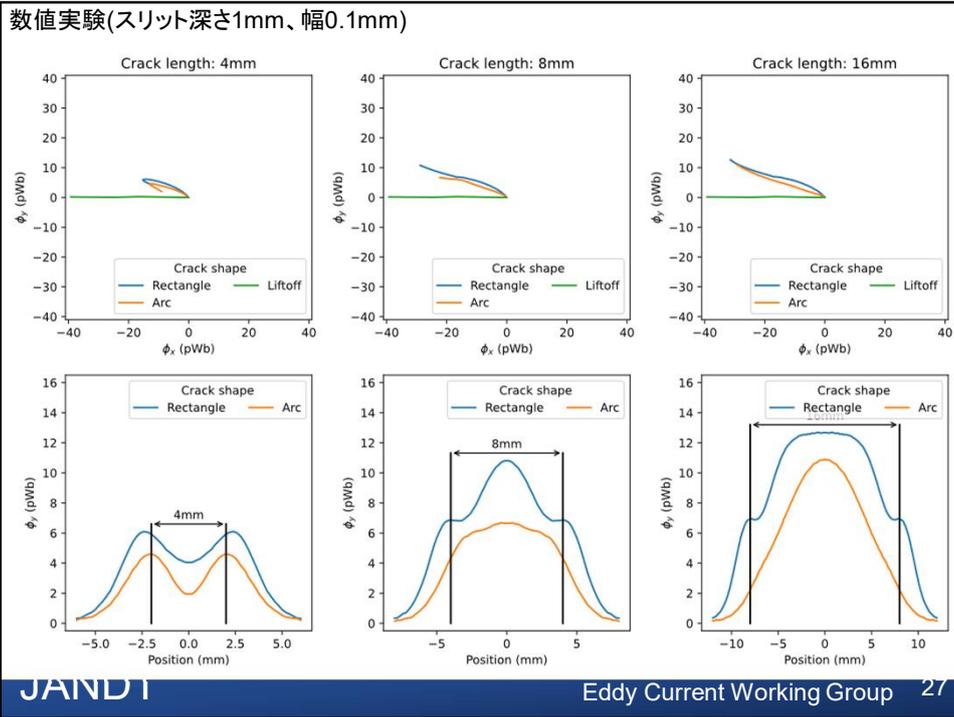


Fig. 2 円弧スリット

JANDT

Eddy Current Working Group 26

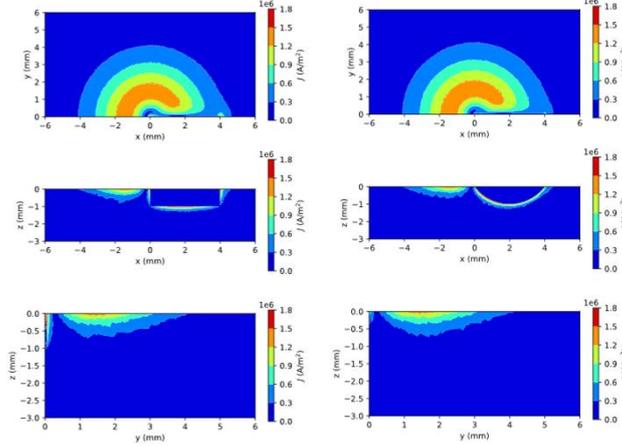


数値実験

渦電流分布(スリット位置2mm) (長さ:4mm、深さ:1mm、幅0.1mm)

矩形スリット

円弧スリット



JANDT

Eddy Current Working Group 29

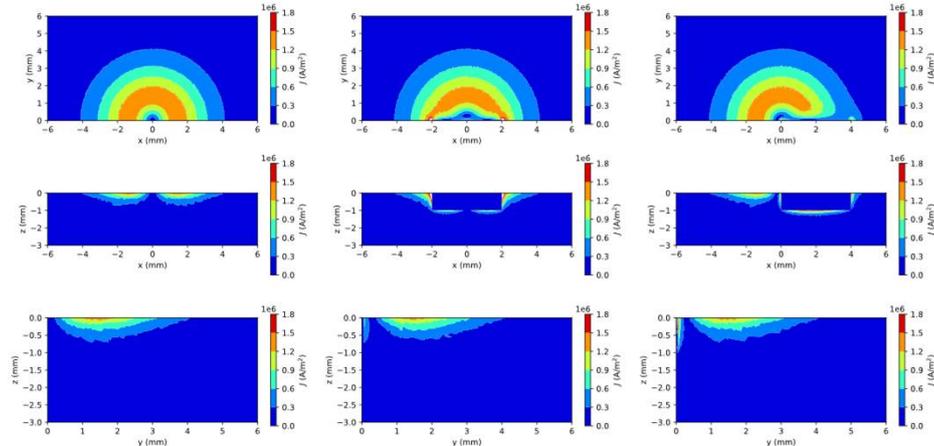
数値実験

渦電流分布 (長さ:4mm、深さ:1mm、幅0.1mm)

スリットなし

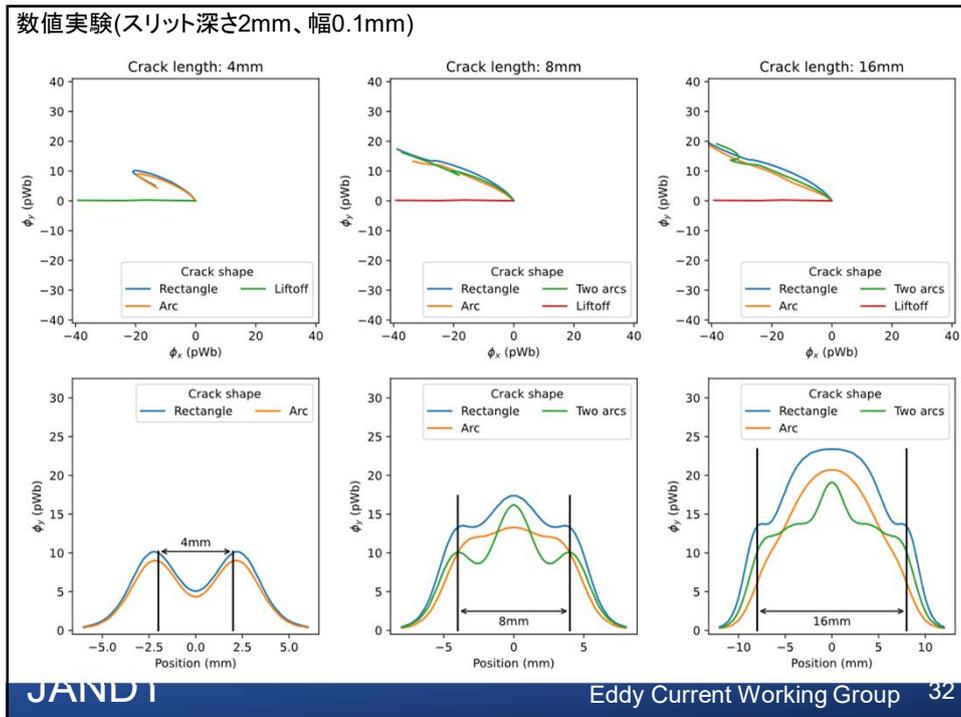
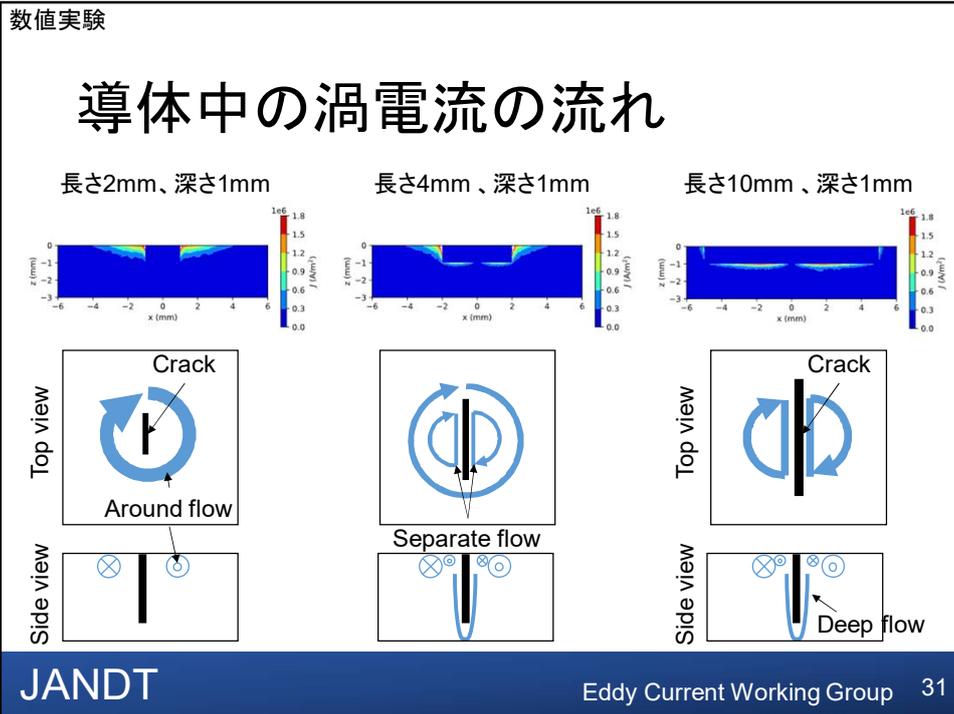
スリット中心位置0mm

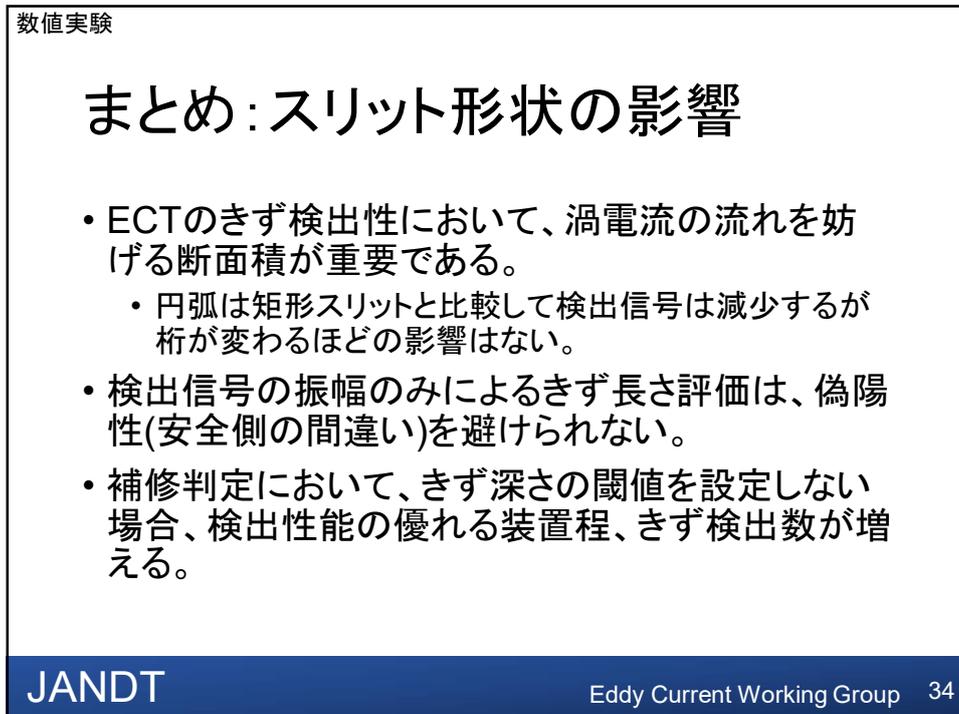
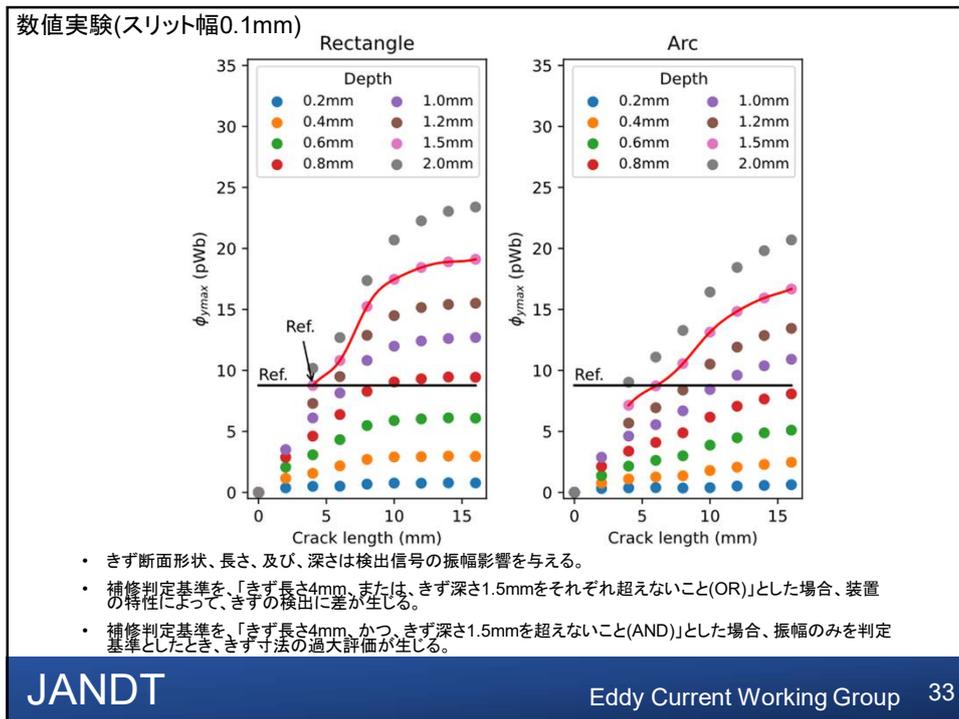
スリット中心位置2mm



JANDT

Eddy Current Working Group 30





数値解析1

2. スリット幅の影響

- 検出信号の振幅ときず長手方向の検出信号プロファイルへのスリット幅の影響を確認。

- スリット幅を0.002mm~1mm
- スリット長さ: 2~8mm
- スリット深さ: 1, 2mm

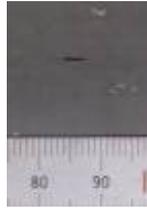


Fig. EDMスリットきず

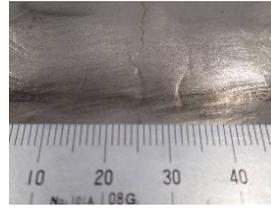
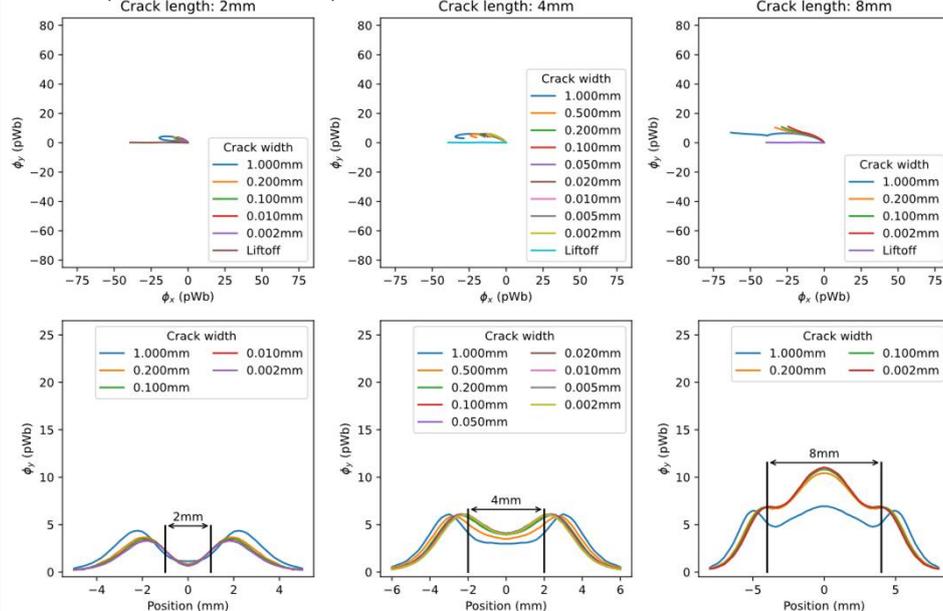


Fig. 疲労きず

JANDT

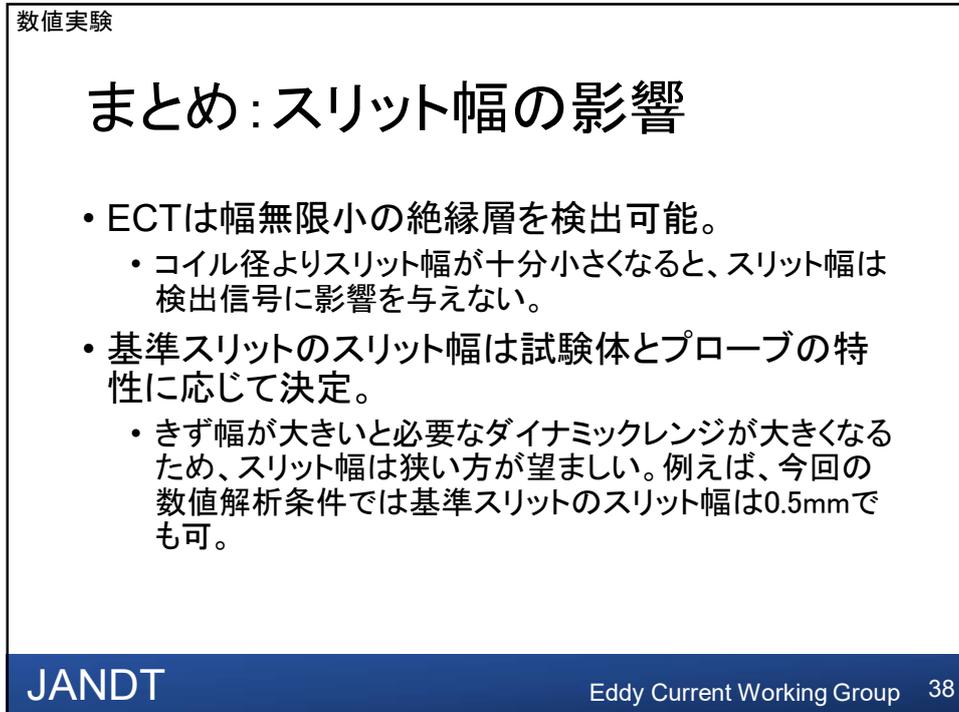
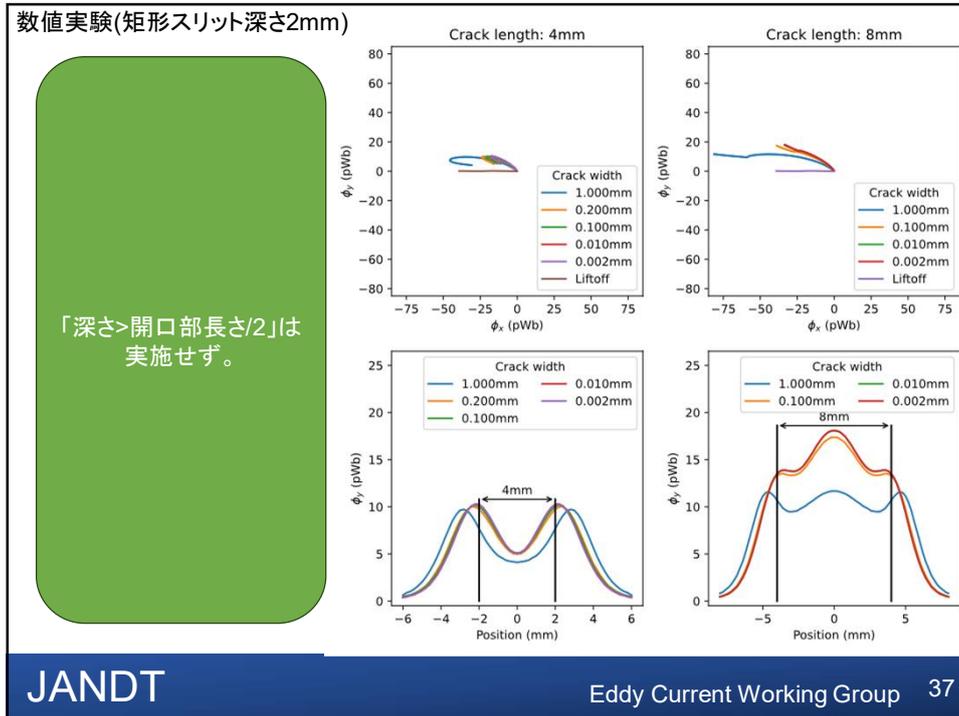
Eddy Current Working Group 35

数値実験(矩形スリット深さ1mm)



JANDT

Eddy Current Working Group 36



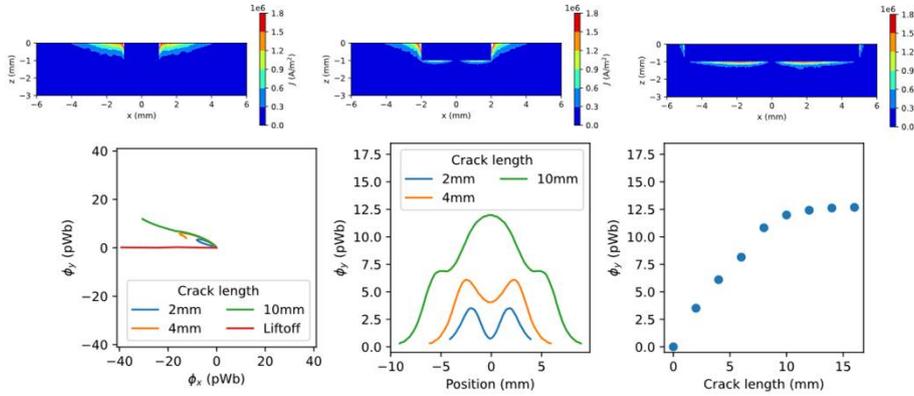
数値実験

3. スリット長さの評価方法

深さ1mm、長さ2mm

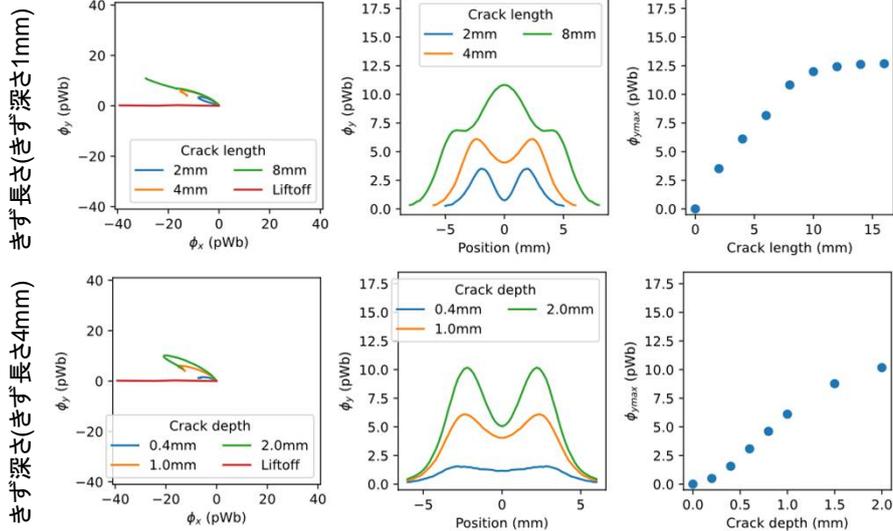
深さ1mm、長さ4mm

深さ1mm、長さ10mm



- きず長さによって、渦電流の経路が変化する。

数値実験1(矩形、スリット幅0.1mm)



- 検出信号の振幅はきず長さときず深さの影響を受ける。

数値実験

RBF補間きず長さ推定法①

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \phi(\|x - x_i\|)$$

ω_i : 重み, x_i : 校正点

ϕ : RBF(放射規定関数)

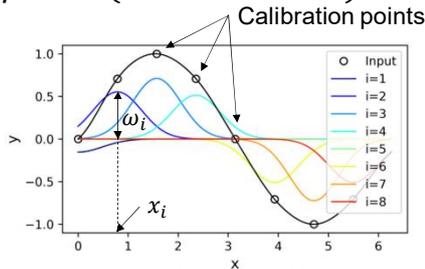


Fig. 正弦波のRBF補間

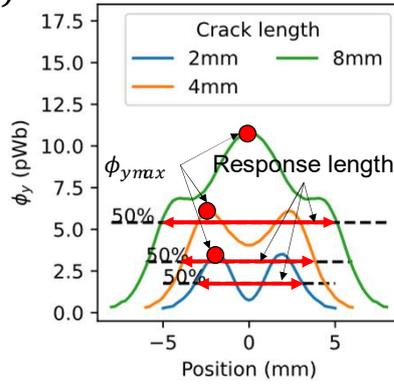


Fig. 検出信号 $\phi_{y_{max}}$ と応答長さの定義

JANDT

Eddy Current Working Group 41

数値実験

RBF補間きず長さ推定法②

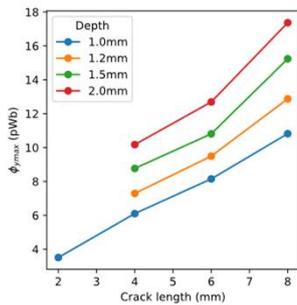


Fig. A. 振幅-きず長さ

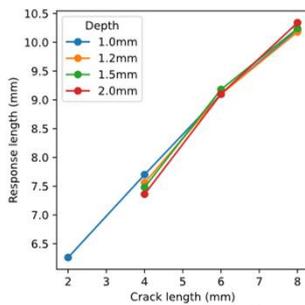


Fig. B. 応答長さ-きず長さ

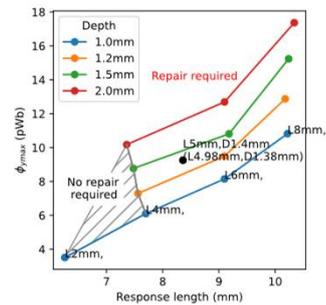


Fig. C. 振幅-応答長さ平面

• きず長さ推定法

- 最小きずの検出信号を閾値とする方法
- 検出信号と応答長さを用いた方法

JANDT

Eddy Current Working Group 42

数値実験

RBF補間きず長さ推定法③

1. 最小きずの検出信号を閾値とする方法
 - 偽陽性が生じる。
2. 検出信号と応答長さをを用いた方法
 - 長さ4mm、深さの異なるきず複数をを用いて「振幅-応答長さライン」を作成し、判定。
3. RBF補間きず長さ推定法
 - 長さ、及び深さの異なるきず複数をを用いて「振幅-応答長さ分布」を作成し、判定。

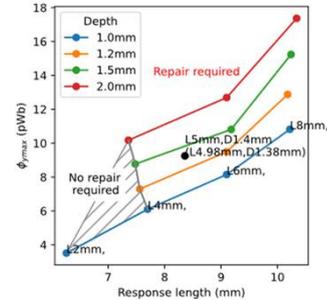


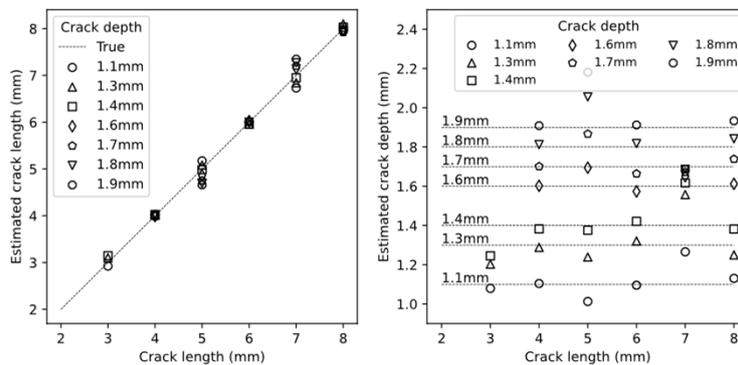
Fig. 振幅-応答長さ分布

JANDT

Eddy Current Working Group 43

数値実験1

RBF補間きず長さ推定法④



JANDT

Eddy Current Working Group 44

まとめ:スリット長さの評価方法

- 使用した計算条件(リフトオフ1mm、コイル径3mm、きず長さ4mm等)では、検出信号の振幅のみできず長さを評価することは困難である。
 - 検出信号には長さや深さの影響が含まれる。
- 検出信号の軌跡はきず形状(長さ、深さ)によって複雑に変化する。
 - 導電体中の渦電流は複数の経路を持ち、その経路の渦電流の割合が検出信号の軌跡を決定する。
- スリット長さ評価法を提案した。
 - 最小きずの検出信号を閾値とする方法
 - 検出信号と応答長さをを用いた方法

数値実験 まとめ

- 矩形スリットと円弧スリットの検出信号を定量化した。
 - 自然きずと比較して大きいスリット幅の影響は考慮可能である。
 - 矩形スリットと円弧スリットの検出信号の振幅は桁が変わるほどの違いはない。
- 基準きずの形状・長さ・幅・深さ
 - 想定されるきず形状を明確にして決定する必要がある。
 - 最小きず1つ、またはきず深さが異なるきずを複数用いる。
- スリット長さ評価方法を提案した。
 - 最小きずの検出信号を閾値とする方法
 - 検出信号と応答長さをを用いた方法
- 消防危第93号「3 試験結果の評価」において最小検出きず深さを決めることが望ましい。
 - 補修判定を、きず長さときず深さのOR(それぞれ超えない)としたとき、検出性能の優れる装置程、きず検出数が増える。
- 試験体材質、プローブごとに数値実験で得られた知見の妥当性を確認する必要がある。

数値実験

提案

- きず長さときず深さの基準を「AND」条件で決めるべき。
 - 偽陰性を軽減することができる。
 - 検出信号の振幅だけで補修判断が可能になる。
- 想定される深さ方向のきず形状を限定する(例えば円弧)ことが望ましい。
 - 正確なきず長さ判定が可能になる。

JANDT

Eddy Current Working Group 47

4. 計測実験

JANDT

Eddy Current Working Group 48

計測実験

計測実験の目的

1. 材質の影響
2. きず深さ・スリット形状(矩形・円弧)の影響
3. 余盛部の影響
4. コーティング厚さの影響

※「スリット幅の影響」は0.25mmより小さいスリット幅を持つ試験体を用意できなかったため、計測実験で再現不可能。

JANDT

Eddy Current Working Group 49

計測実験

計測条件

略称	協力団体名	プローブ種別	励磁周波数
PTU	職業能力開発総合大学校	シングル方式 自己誘導形絶対値方式 フェライトコア径1.65mm	100kHz
A	日本工業検査(株)	アレイ方式、差動方式 コイル径3mm	100kHz
B	東亜非破壊検査(株)	アレイ方式、差動方式	400kHz
C	(株)ウィズソル	アレイ方式、差動方式	100kHz
D	ダイヤモンド電子応用(株)	アレイ方式、差動方式	100kHz
E	(株)日本工業試験所	シングル方式、差動方式	50kHz
F	(株)アミック	マルチ方式 相互誘導形絶対値方式	100kHz
G	日本電測機(株)	シングル方式、差動方式	30kHz
H	(株)IHI検査計測	シングル方式、相互誘導形	80kHz

JANDT

Eddy Current Working Group 50

計測実験

渦電流プローブ

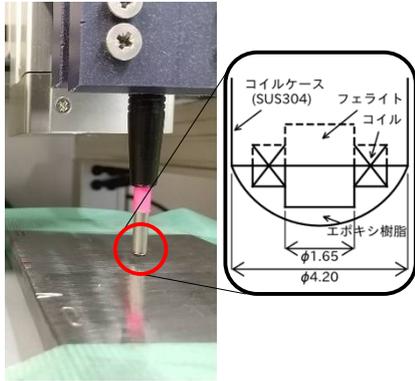


Fig. シングルプローブの例

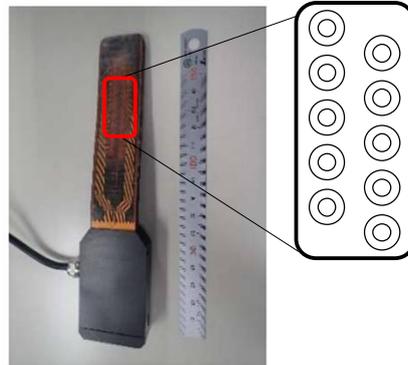


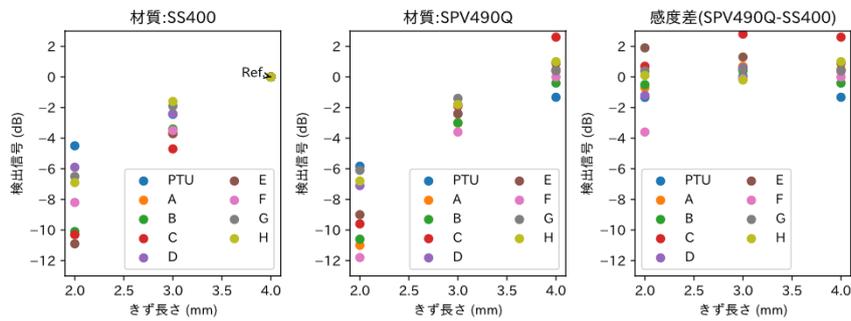
Fig. アレイプローブの例

JANDT

Eddy Current Working Group 51

計測実験

材質の影響



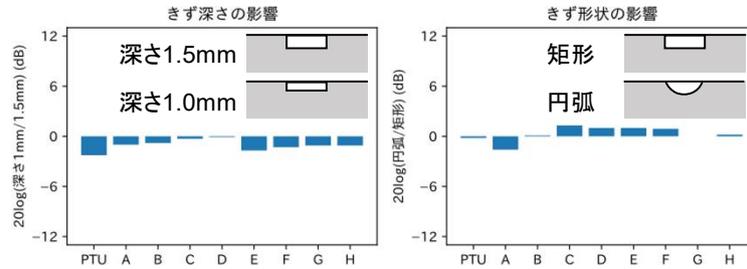
- 今回使用した試験体間において、大きな差はみられなかった。

JANDT

Eddy Current Working Group 52

計測実験

きず深さ・形状の影響



- 深さ(1mm、1.5mm)、及びきず形状(矩形・円弧)において、大きな差はみられなかった。

JANDT

Eddy Current Working Group 53

計測実験

余盛部の影響

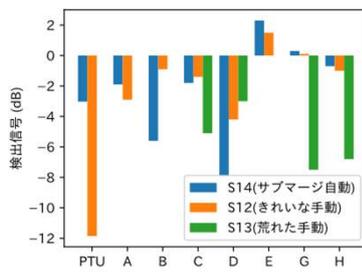


Fig. 検出信号

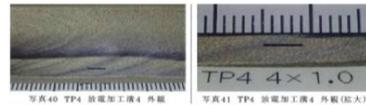


Fig. S14(サブマージ自動)

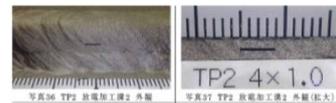


Fig. S12(きれいな手動)

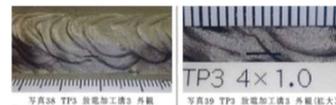


Fig. S13(荒れた手動)

- 想定通り、溶接部ビードの処理の影響を受ける。
- 溶接ビードの状態を定量化(無欠陥部のピークtoピーク等)し、適用の可否を決定する。

JANDT

Eddy Current Working Group 54

計測実験

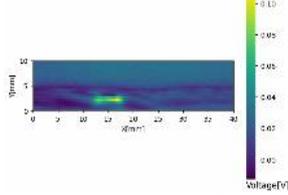
PTU(リフトオフ0mm)

S14(サブマージ自動)

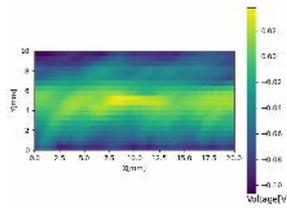
S12(きれいな手動)

S13(荒れた手動)

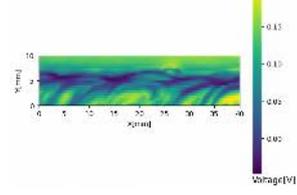
S14(Length4.0mm_Depth1.0mm)



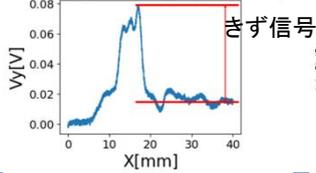
S12(Length4.0mm_Depth1.0mm)



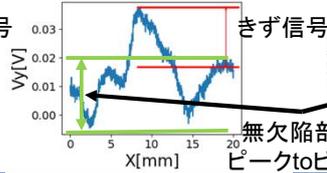
S13(Length4.0mm_Depth1.0mm)



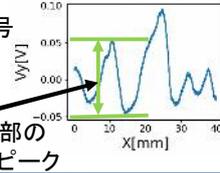
S14(Length4.0mm_Depth1.0mm)



S12(Length4.0mm_Depth1.0mm)



S13(Length4.0mm_Depth1.0mm)



JANDT

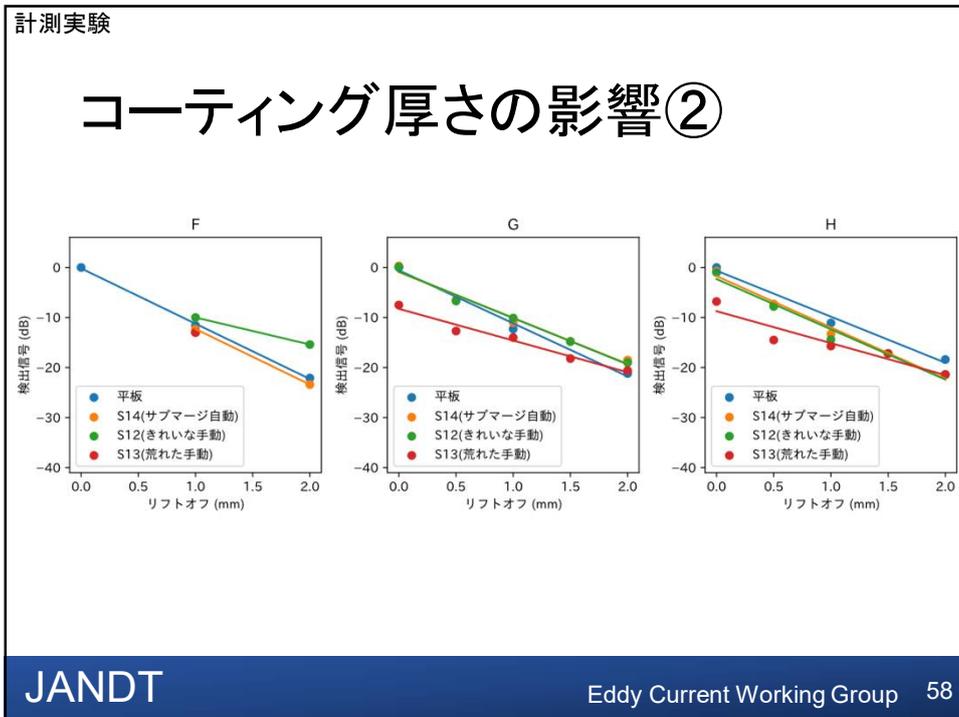
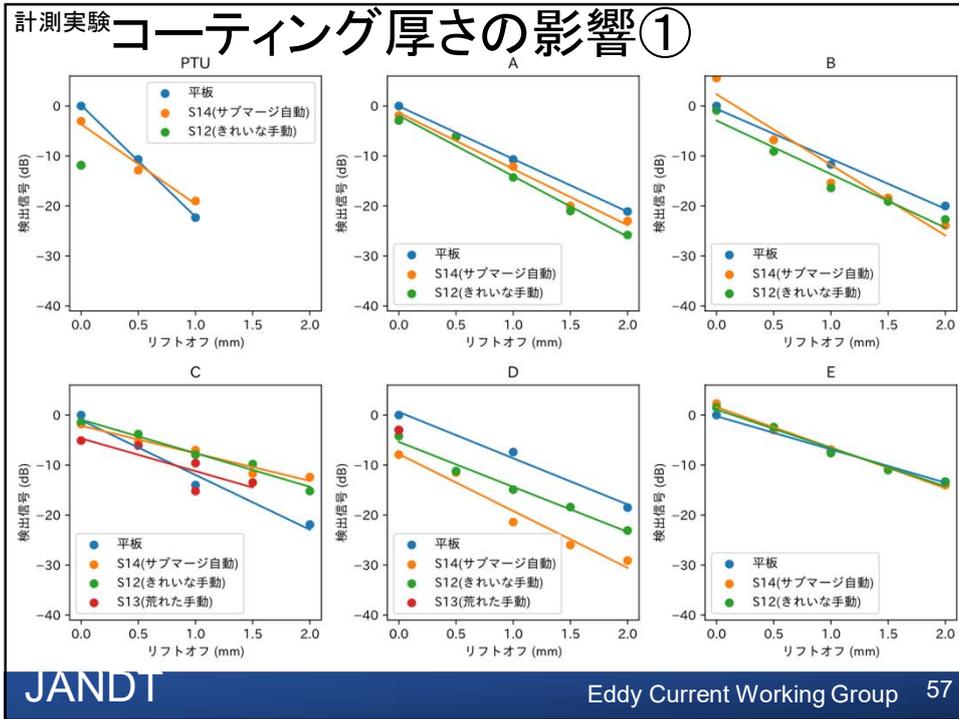
Eddy Current Working Group 55

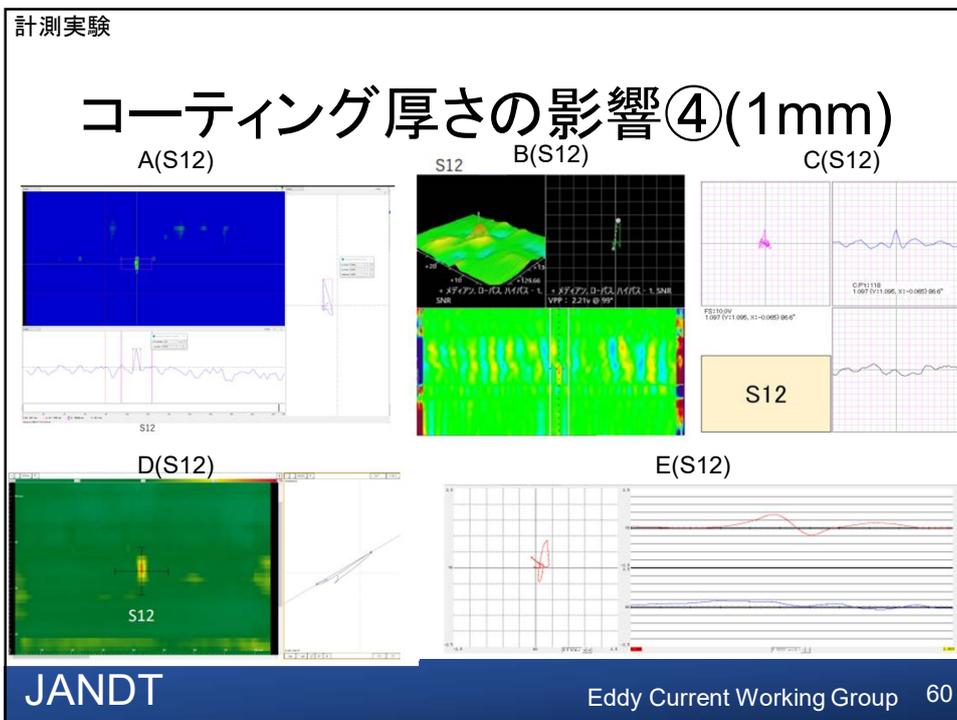
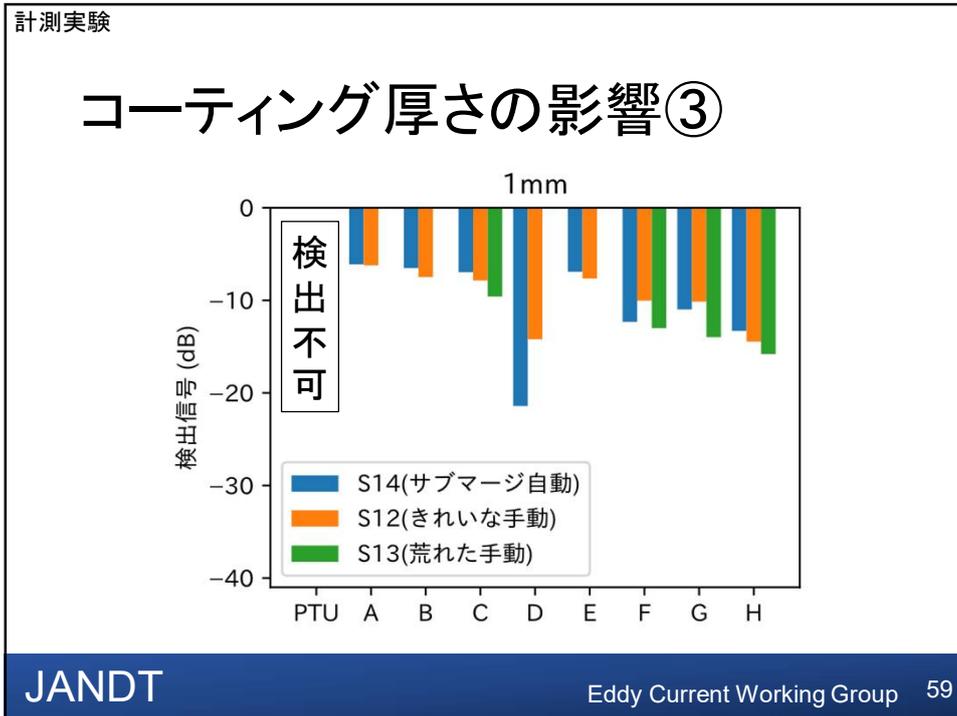
余盛部の影響 まとめ

- 「基準きず」と「無欠陥部のピークtoピーク」の比で、適用の可否を決定する。

JANDT

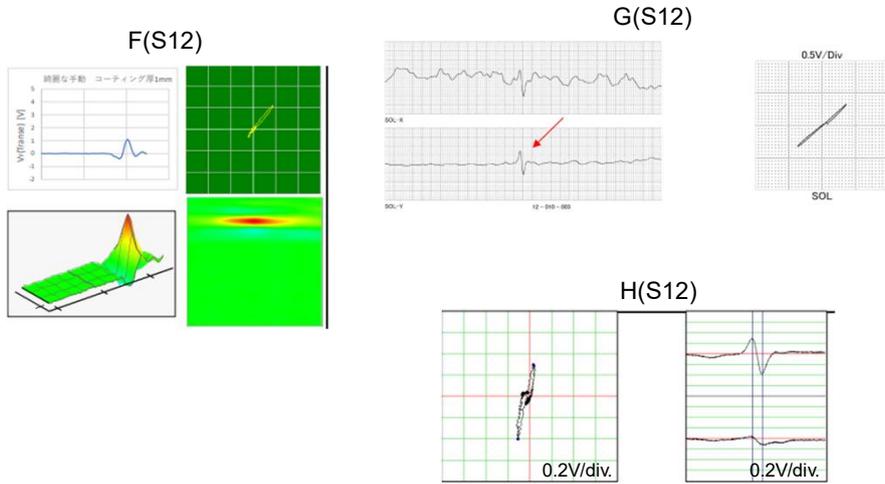
Eddy Current Working Group 56





計測実験

コーティング厚さの影響⑤(1mm)



JANDT

Eddy Current Working Group 61

溶接検査の流れ (1案)

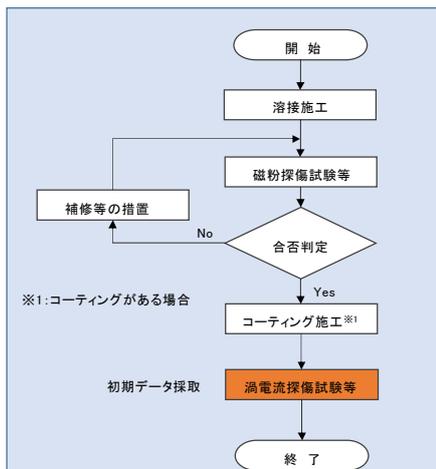


Fig. 供用前検査

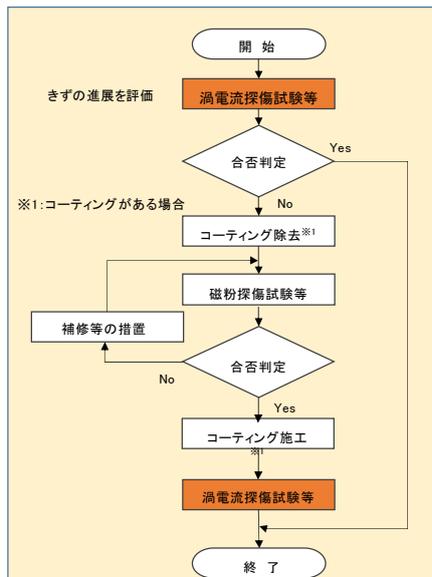


Fig. 供用中定期点検

JANDT

Eddy Current Working Group 62

4. まとめ

- (計算)ECTでは幅が無限小の絶縁層を検出可能である。
- (計算)検出信号最大値と、応答長さ(検出信号最大値の50%間の長さ)からきず長さを推定することは可能である。
- (計算・計測)材質(SS400/SPV490Q)、スリット形状(矩形/円弧)の影響は桁が変わるほどではない。
- (計測)余盛部・コーティングの影響を受ける。プローブごとの補正が必要。

※試験体材質、プローブごとに妥当性を確認する必要がある。