

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7回)  
令和5年5月10日(水)10:00~12:00

## コーティング上からの溶接 線検査に係る渦電流探傷 法の検出性能の評価

(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 委員長
  - 認証試験委員会
    - 渦電流探傷試験部会 部会長
- 電気学会
  - 和文論文委員会 D部門D4主査
  - ものづくり技術委員会 副委員長



# 目次

1. 目的
2. 試験項目・方法
3. 試験片
4. 試験結果
5. まとめ

# 1. 目的～基準の策定～

- 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」を用いて検討を行う。

① 探傷器の感度設定のための基準きず

② きず判定のための検出レベル決定基準

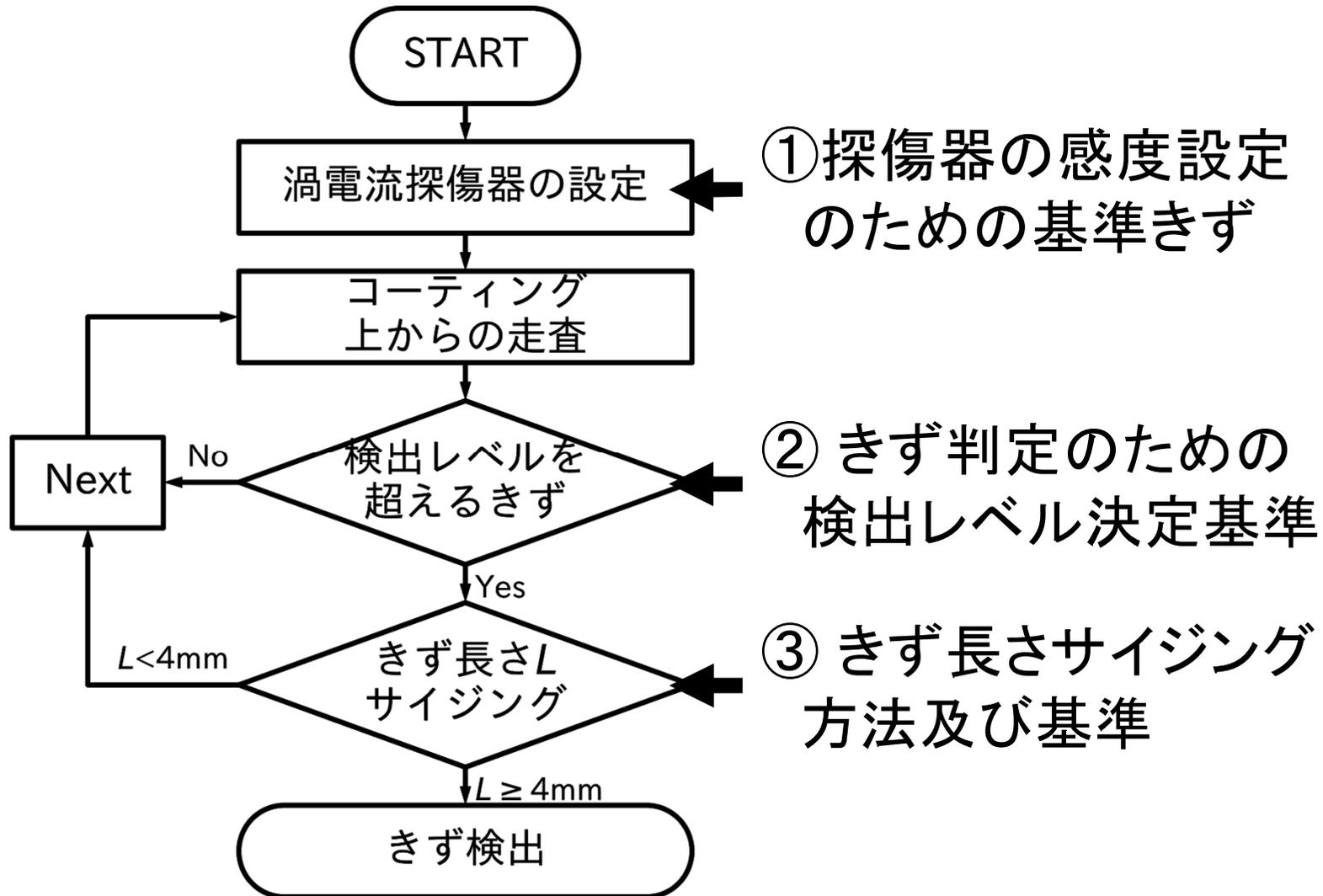
③ きず長さサイジング方法及び基準

装置開発を  
目的としない。

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 × 幅0.25mmとする。
- 溶接部に付与した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」



渦電流探傷試験の検査手順

## 2. 試験項目・方法

JIS Z 2316-3

### 非破壊試験－渦電流試験－ 第3部：プローブの特性及び検証

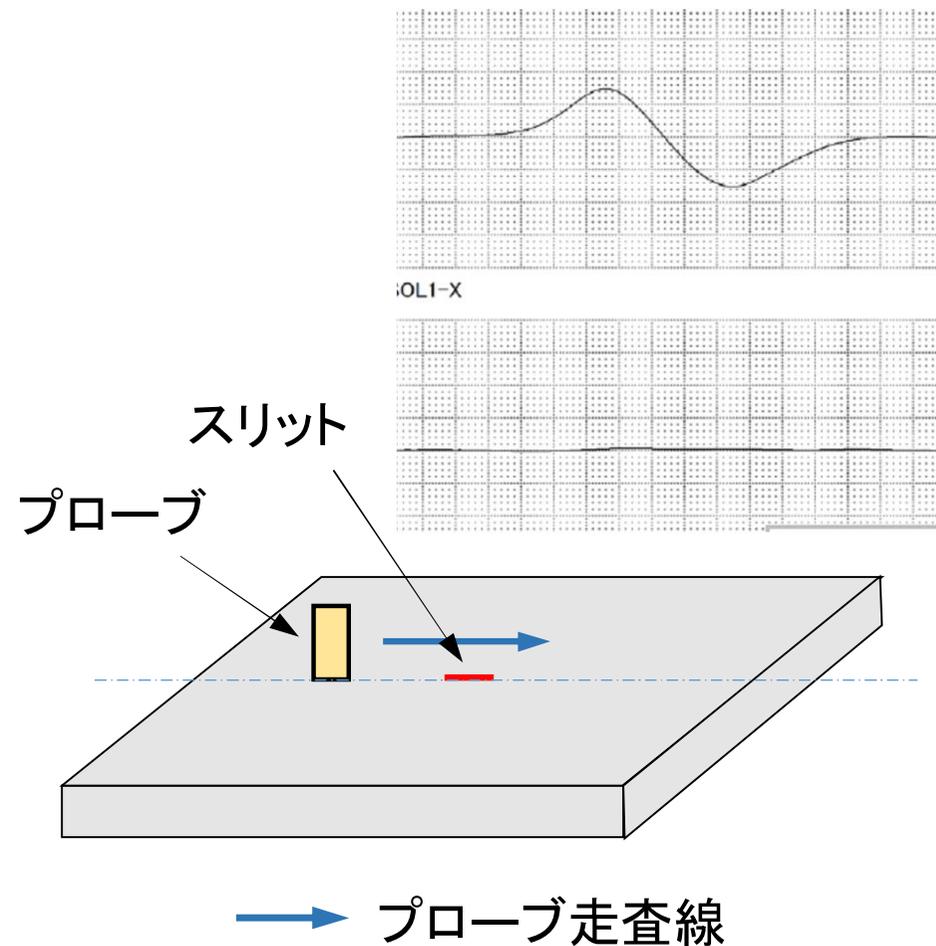
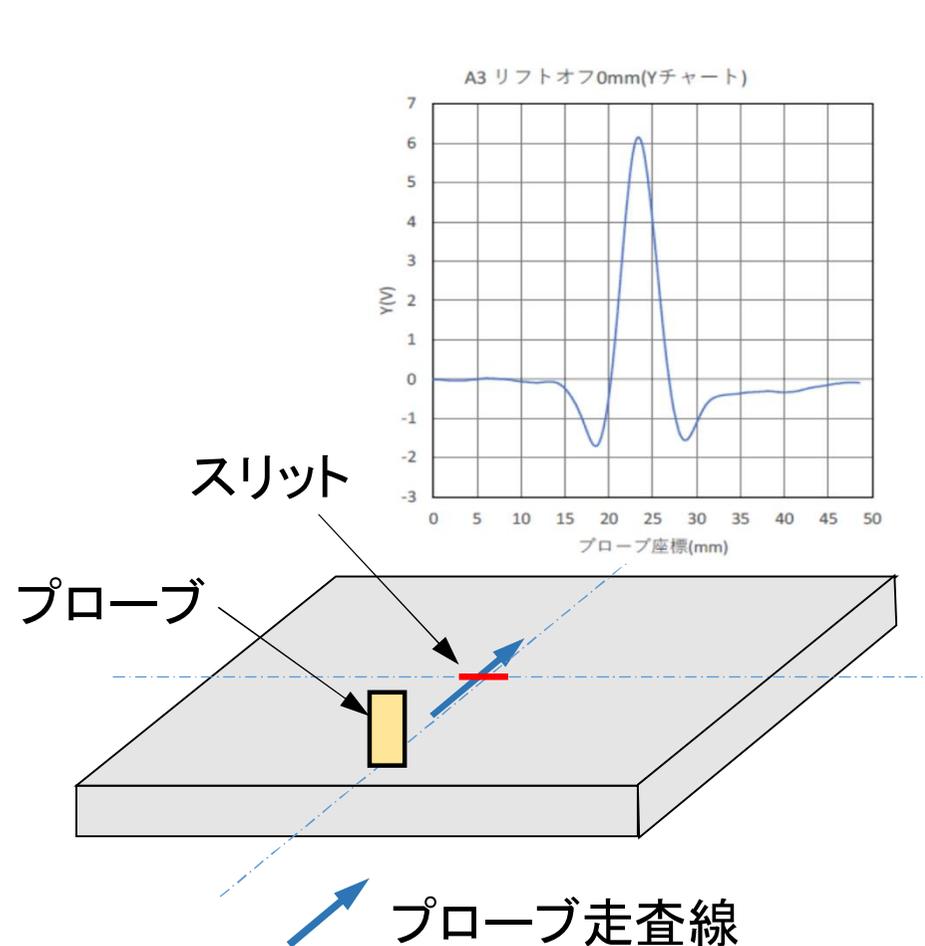
- プローブの機能的な特性を定義している。
- 適用目的に合致した信頼性のある渦電流試験システムを構築できる。
- 基準信号で測定信号を正規化することで、相互比較を可能にする。

## 2試験項目 (8項目、複数パラメータ)

No.	項目 (JIS掲載箇所)	目的
(1)	基準信号の確認 (6.2.3.2)	検出目標スリットの検出性を確認する。
(2)	スリット応答長さ (6.2.3.8) スリット応答幅 (6.2.3.9)	スリット長さ及び幅が出力信号に与える影響を確認する。
(3)	角度感度特性 (6.2.3.3)	プローブに対するスリットの角度が出力信号に与える影響を確認する。
(4)	無欠陥部のリフトオフ特性 (6.2.3.12 リフトオフ特性)	リフトオフによる出力信号を確認する。
(5)	コーティング材質の出力への影響	ガラスフレークコーティングがある場合の出力信号を確認する。
(6)	コーティング厚さ特性 (6.2.3.13 スリット応答に対するプローブクリアランス特性)	コーティング厚さによるスリットの信号強度の影響を確認する。
(7)	スリットの応答領域 (6.2.3.7)	スリットの応答領域を確認する。
(8)	自然きずの検出性	自然きずの検出性を確認する。

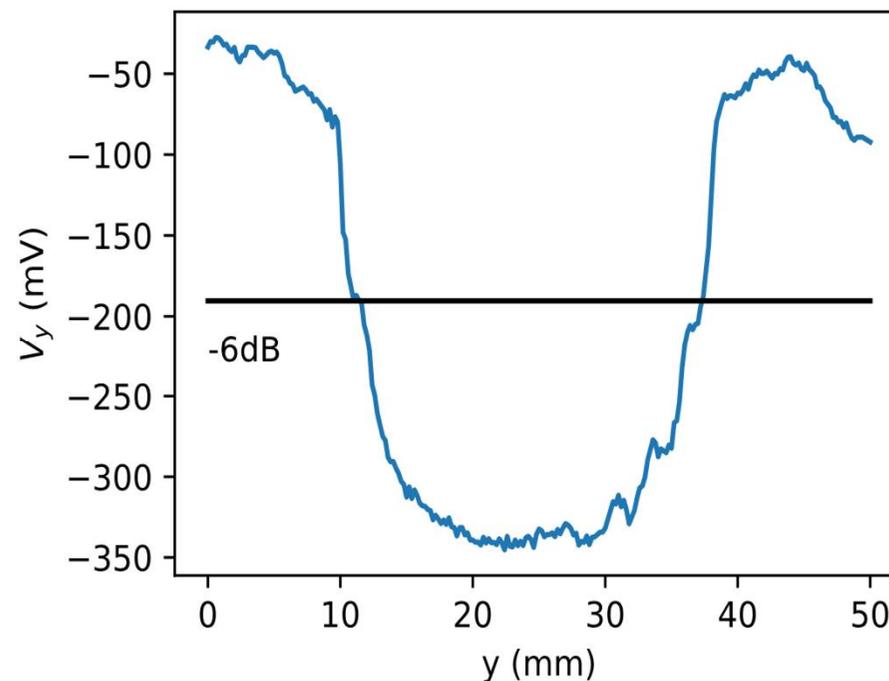
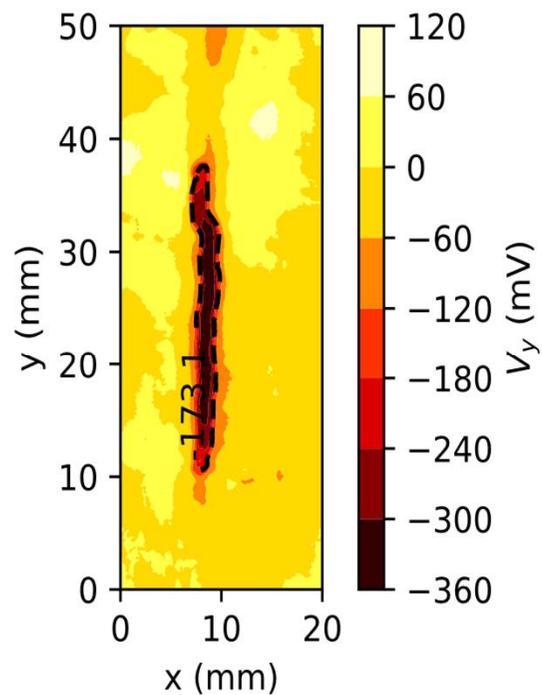
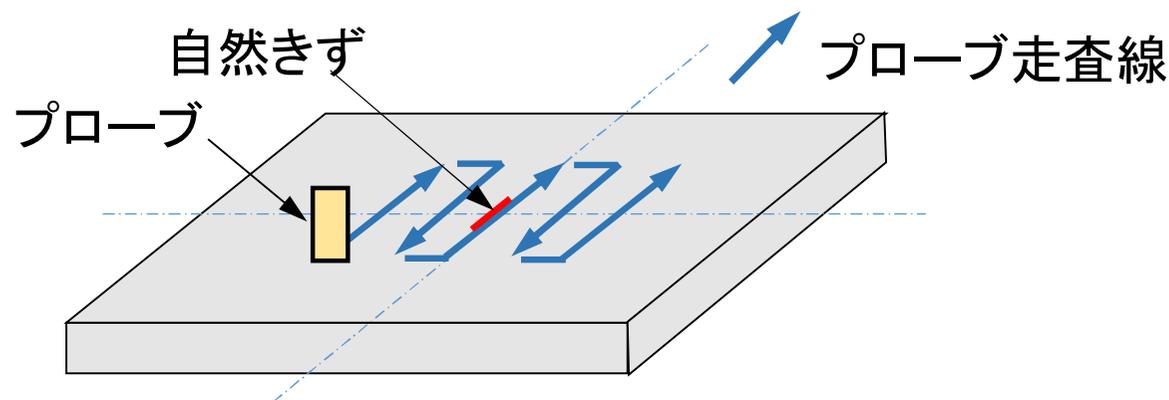
## 2. 試験項目・方法

プローブ: シングル  
走査: 一方向走査



## 2. 試験項目・方法

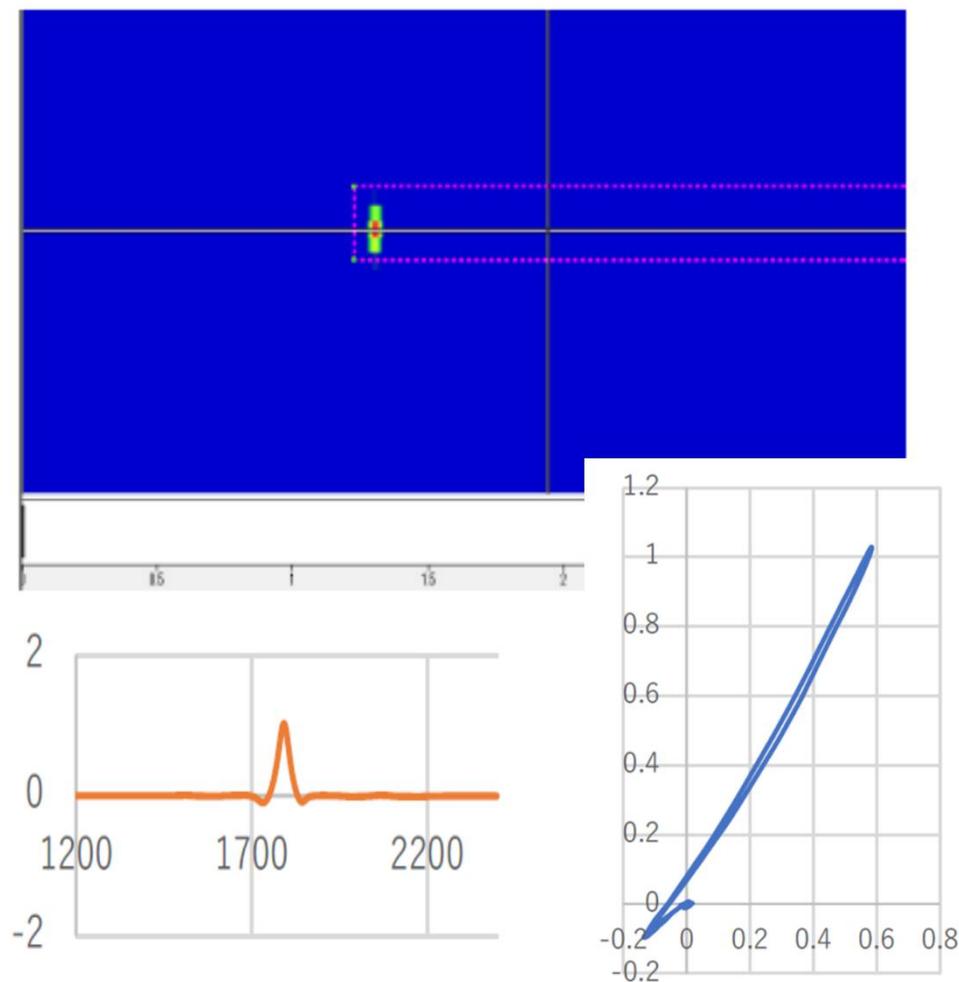
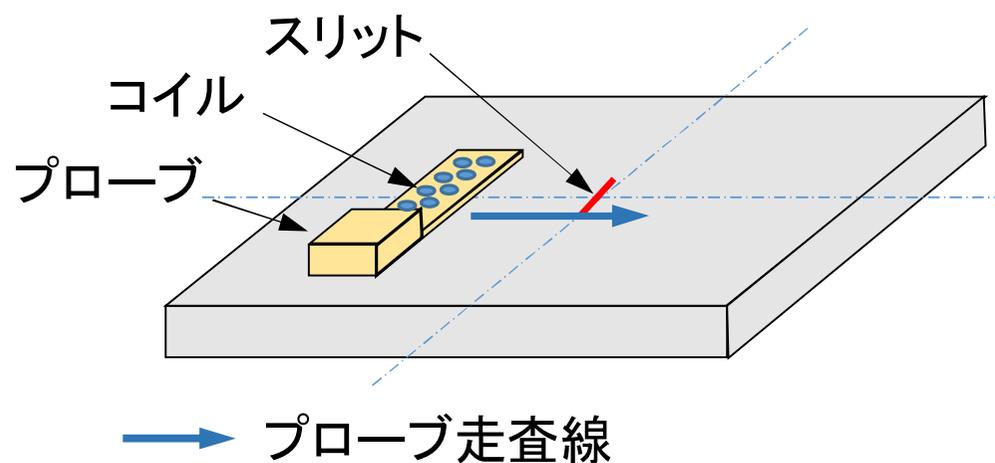
プローブ: シングル  
走査: 方形走査



## 2. 試験項目・方法

プローブ: アレイ

走査: 一方向走査



## 2. 試験項目・方法

# 使用機器 複数の装置で実施(9種類)

[装置] 表面探傷検査技術 渦電流アレイ検査システム



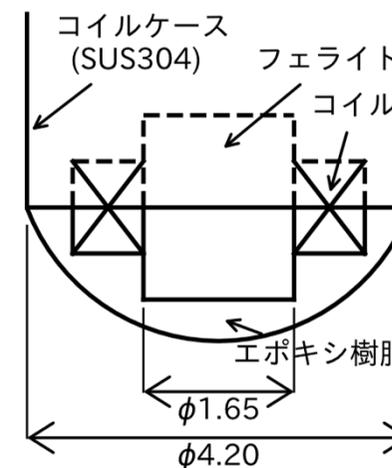
装置一式



ECAプローブ



試験片による調整



### [仕様]

- ・ 探傷機 S2G2-800/SG NDT製(カナダ) バッテリー及びAC100V対応
- ・ 記録計 ノートPC
- ・ プローブ フレキシブルタイプ ETアレイプローブ
- ・ 対象 導体材料の表面きず(表面直下を含む)
- ・ 適用温度 表面温度約50℃まで

### [特長]

- ・ 表面開口きずだけでなく表面直下のきずも検出可能
- ・ 非接触のため高速かつ前処理/後処理が簡便でPTのような溶剤も必要なし
- ・ コーティングや塗装を剥離することなく探傷が可能
- ・ 走査箇所はカラーマップ表示として記録

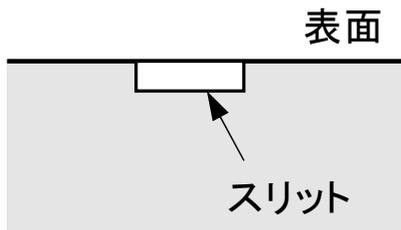
# 3. 試験片

## 人工きず14個、自然きず10個

人工きず(スリット)例

自然きず(例)

人工きずは、  
放電加工による  
矩形スリット



### 3. 試験片(スリット)

基準きず A3:長さ4mm×深さ1.5mm

番号	形状	余盛の有無	コーティング厚さ(μm)	位置	きず性状	長さ(mm)	深さ(mm)	幅(mm)
S1	平板	無	0	平板表面	スリット	6	3	1
S2	平板	無	400	平板表面	スリット	6	3	1
S3	平板	無	1000	平板表面	スリット	6	3	1
S4	平板	無	1500	平板表面	スリット	6	3	1
S5	平板	無	2000	平板表面	スリット	6	3	1
A1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.25
A2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.25
A3	平板	無	0	平板表面	スリット	4	1.5	0.25
B1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.3
B2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.3
B3	平板	無	0	平板表面	スリット	4	1.5	0.3
C1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.4
C2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.4
C3	平板	無	0	平板表面	スリット	4	1.5	0.4

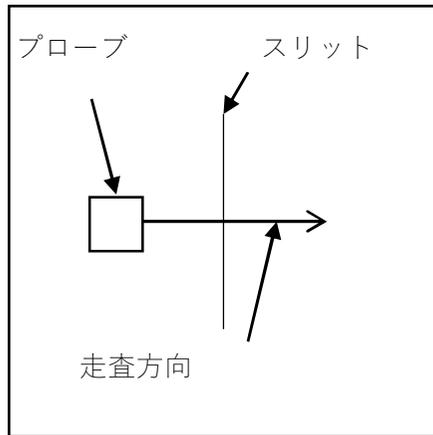
### 3. 試験片(自然きず)

きず 番号	形状	余盛 の有無	コーティン グ厚さ(μm)	位置	きず 性状	長さ (mm)	深さ (mm)	備考
21	突合継手	無	0	溶着金属 中央	縦割れ	25	—	
4	突合継手	有	0	余盛中央	縦割れ	25	—	
1	突合継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
6A	突合継手	有	0	余盛中央	表面ポ ロシティ	25	—	
1A	T継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
1B	T継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
L21	突合継手	有	0	溶接止端	縦割れ	17	3.2	TP- L2
L22	突合継手	有	0	溶着金属	縦割れ	12	1.6	
T21	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	18	1.8	TP- T2
T22	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	20	1.7	

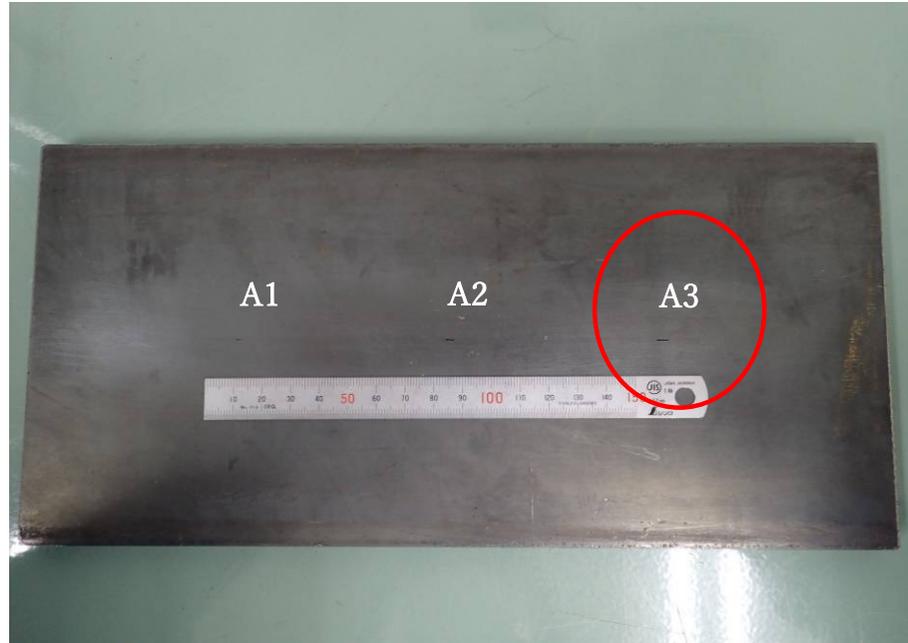
# 4. 試験結果

## (1) 基準信号の確認

### 試験方法・試験片



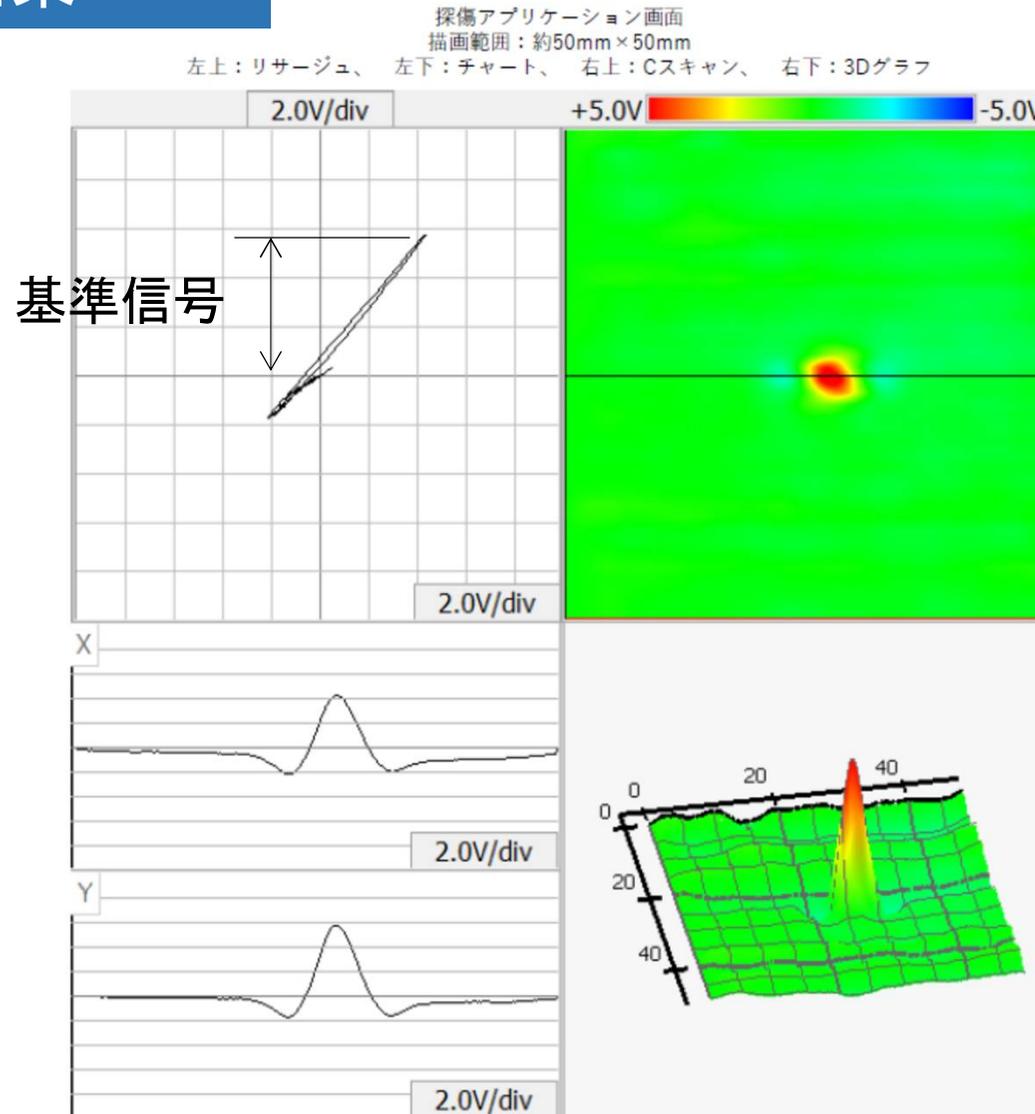
※スリットに対して平行な走査も可。



番号	形状	余盛の有 無	コーティング厚さ ( $\mu\text{m}$ )	位置	きず 性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
A1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.25
A2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.25
<b>A3</b>	<b>平板</b>	<b>無</b>	<b>0</b>	<b>平板表面</b>	<b>スリット</b>	<b>4</b>	<b>1.5</b>	<b>0.25</b>

# (1) 基準信号の確認

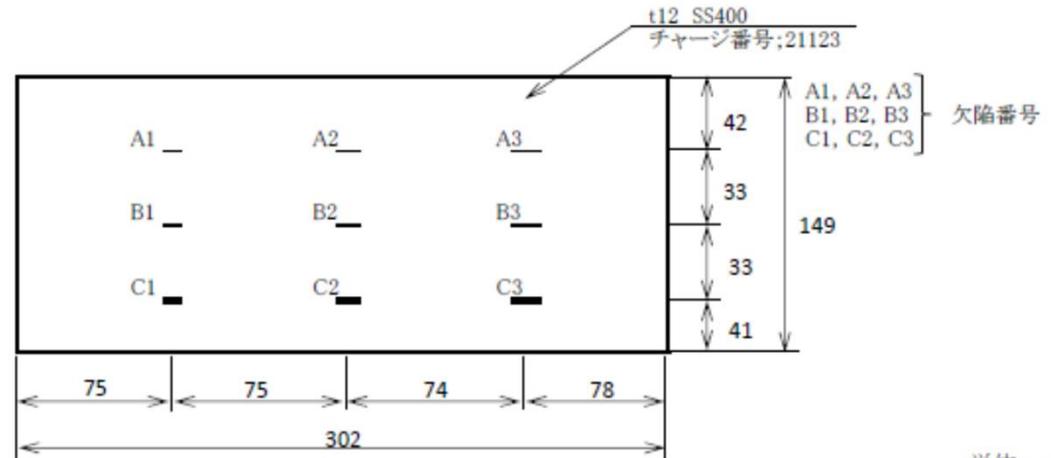
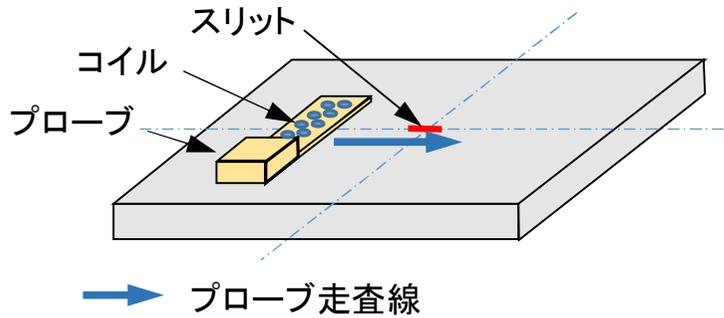
## 試験結果



出力例(F社)

## (2) スリット応答長さ(及び幅)

### 試験方法・試験片

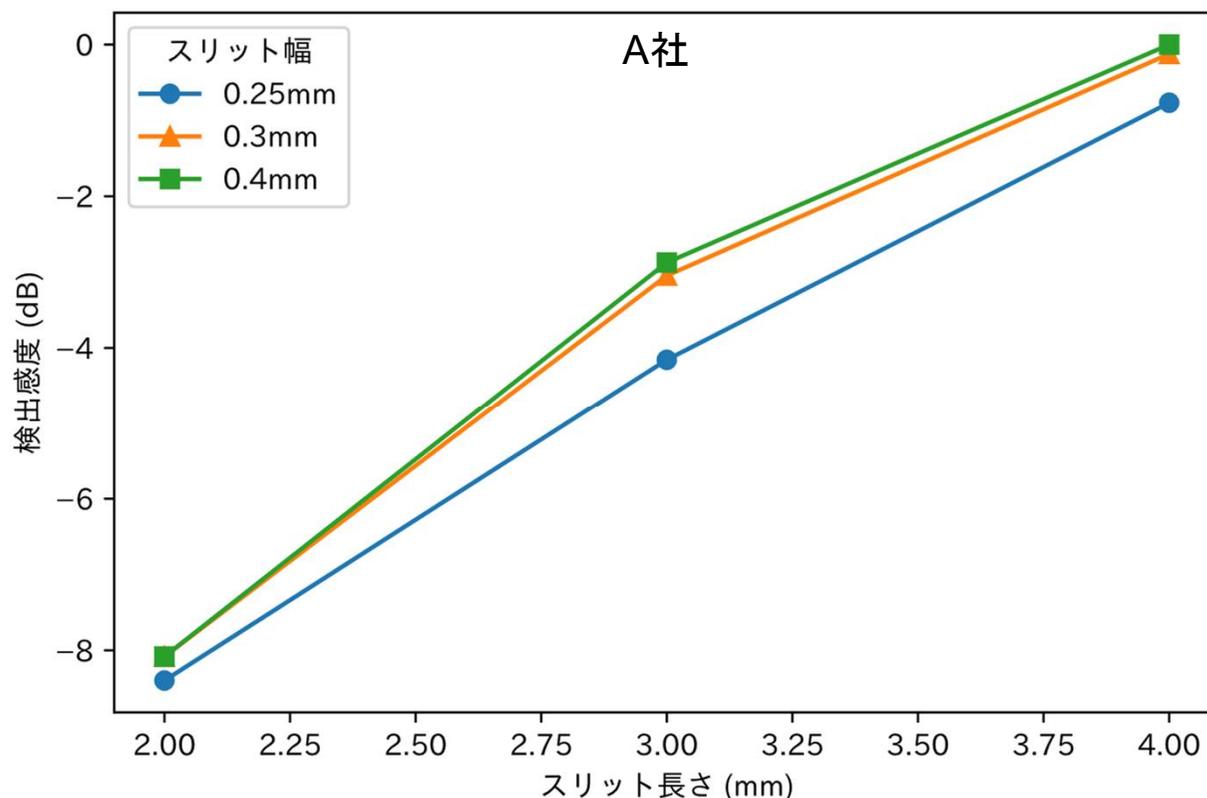


番号	形状	きず性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
A1	平板	スリット	2	1.5	0.25
A2	平板	スリット	3	1.5	0.25
A3	平板	スリット	4	1.5	0.25
B1	平板	スリット	2	1.5	0.3
B2	平板	スリット	3	1.5	0.3
B3	平板	スリット	4	1.5	0.3
C1	平板	スリット	2	1.5	0.4
C2	平板	スリット	3	1.5	0.4
C3	平板	スリット	4	1.5	0.4



## (2) スリット応答長さ(及び幅)

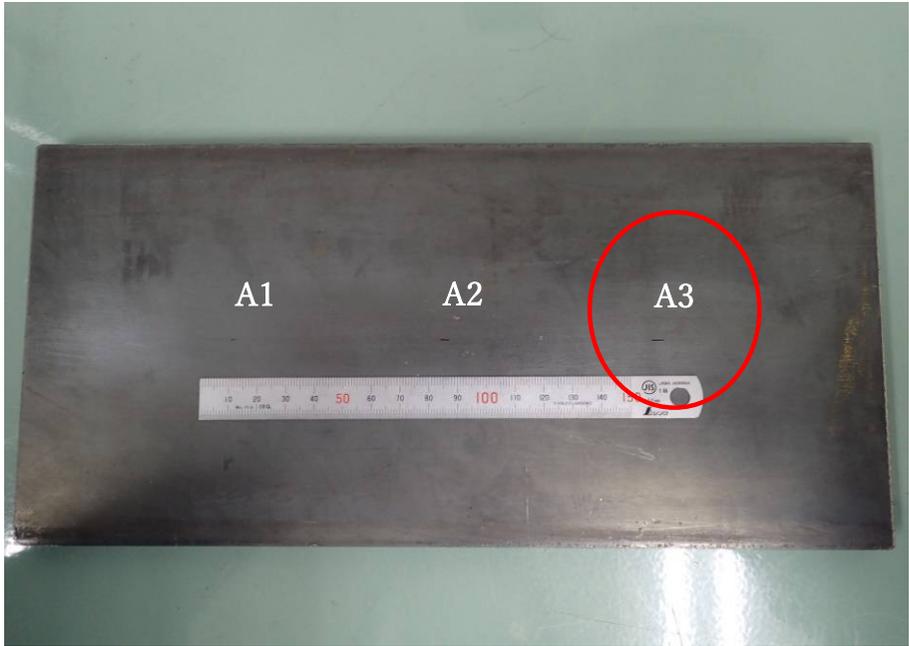
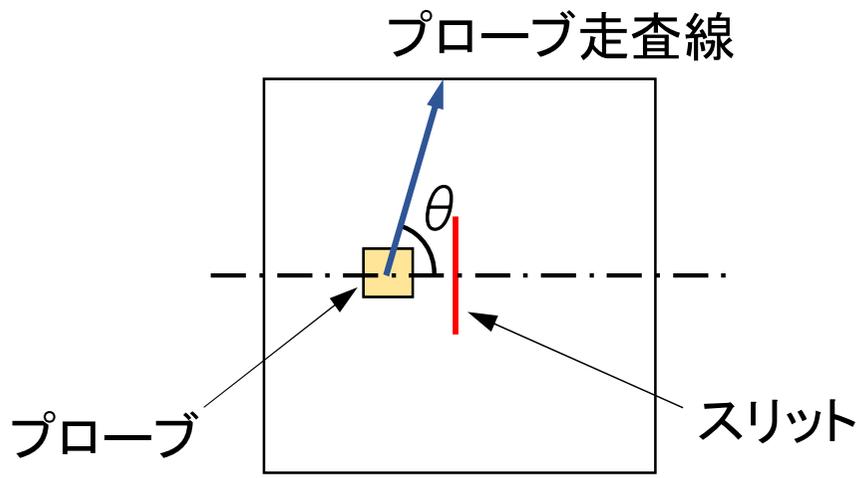
### 試験結果



- スリット長さ・幅が長いほど検出信号が大きくなる。
- 今回用いた自然きずの長さは最小で12mmであることに留意する必要がある。

# (3)角度感度特性

## 試験方法・試験片

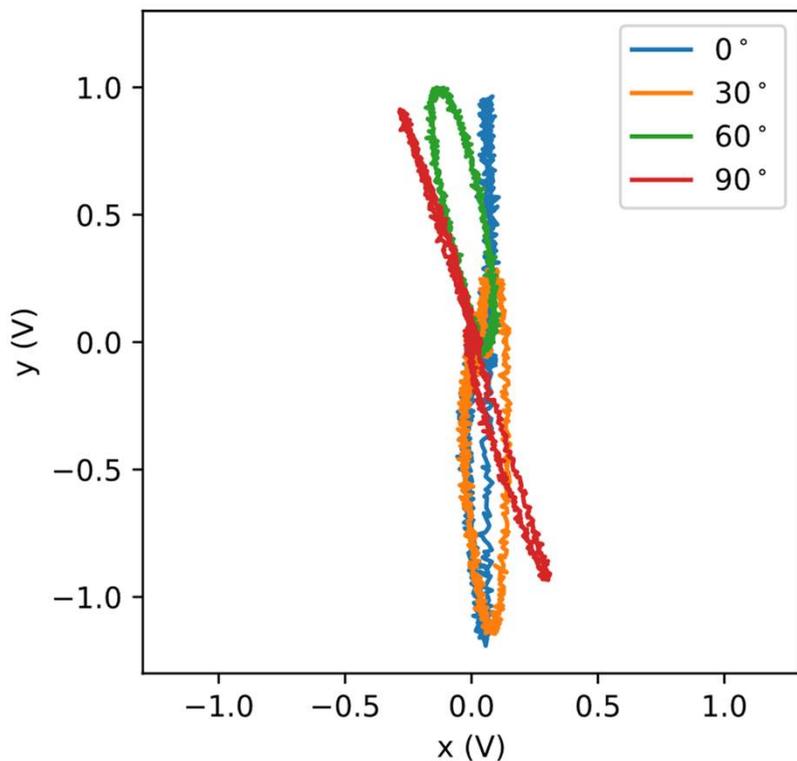


番号	形状	余盛の有無	コーティング厚さ (μm)	位置	きず性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
A1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.25
A2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.25
<b>A3</b>	<b>平板</b>	<b>無</b>	<b>0</b>	<b>平板表面</b>	<b>スリット</b>	<b>4</b>	<b>1.5</b>	<b>0.25</b>

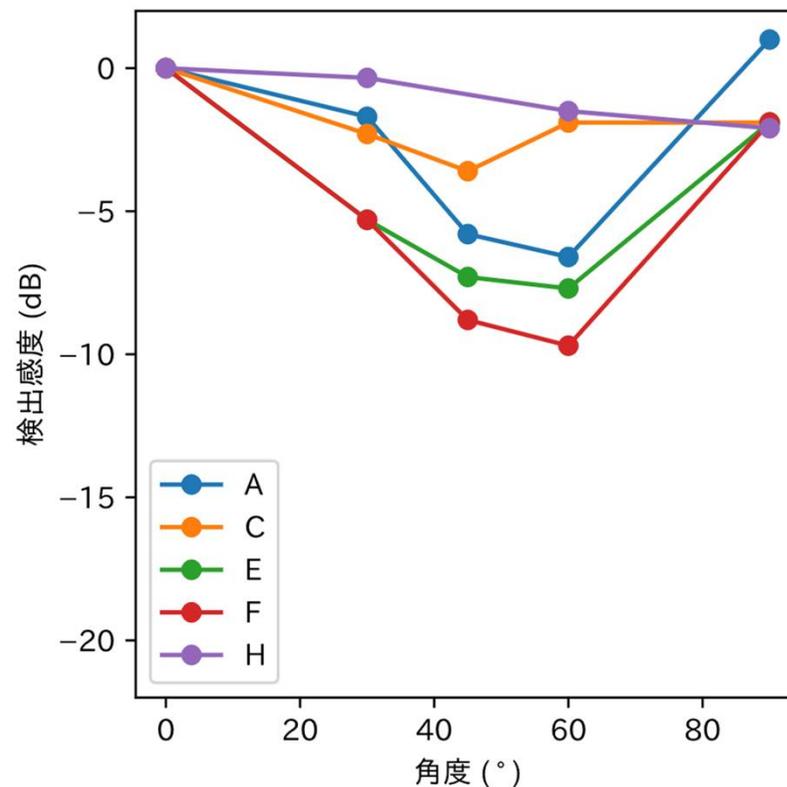
# (3)角度感度特性

## 試験結果

方向性のあるプローブの測定例



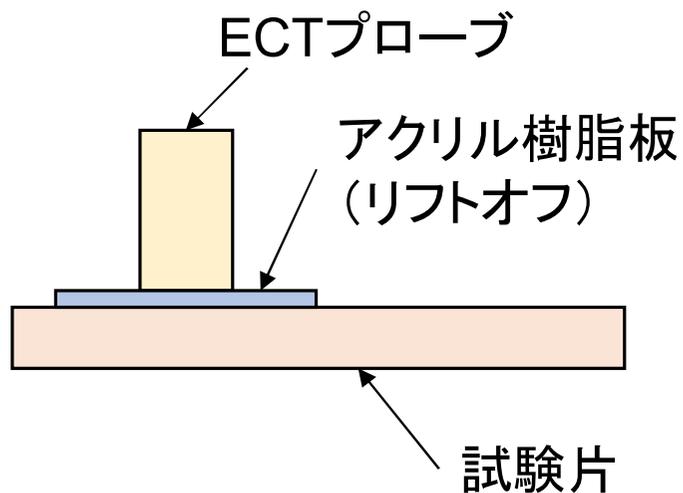
各プローブの角度感度特性



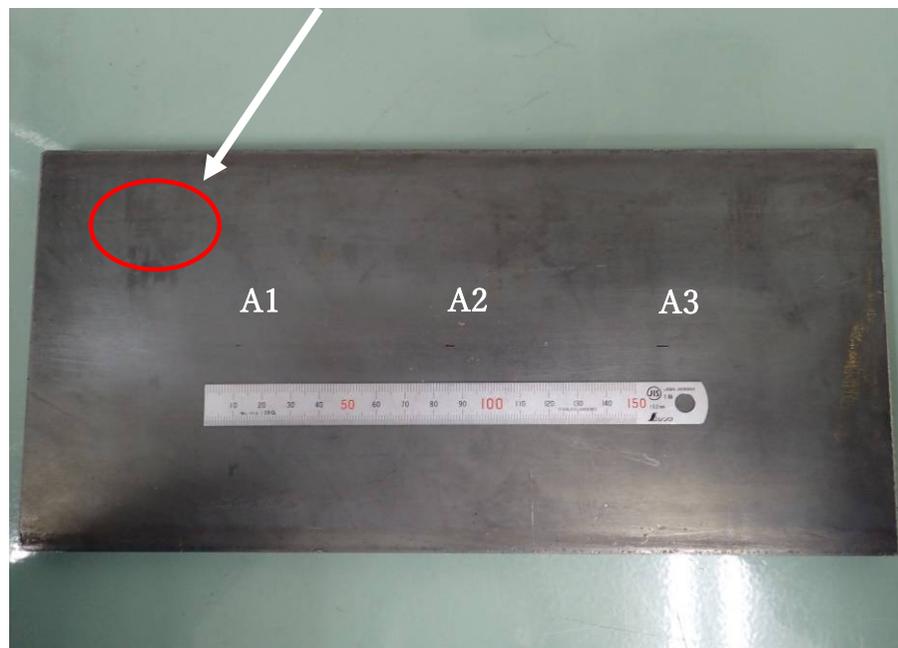
- 用いたプローブでは、スリットに傾きがある場合、最大10 dB程度の検出感度の低下がある場合があることが確認できた。

# (4)無欠陥部のリフトオフ特性

## 試験方法・試験片



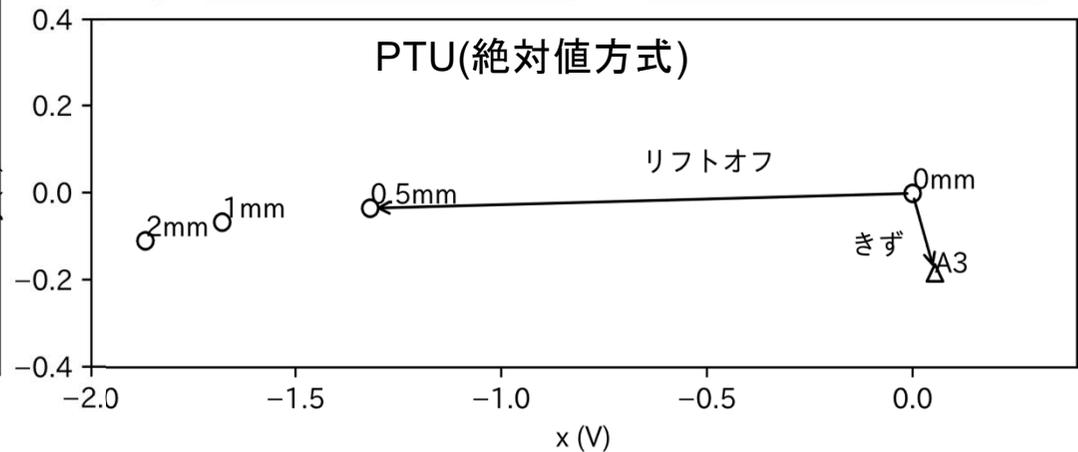
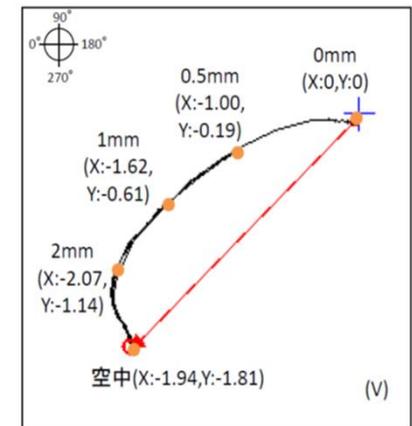
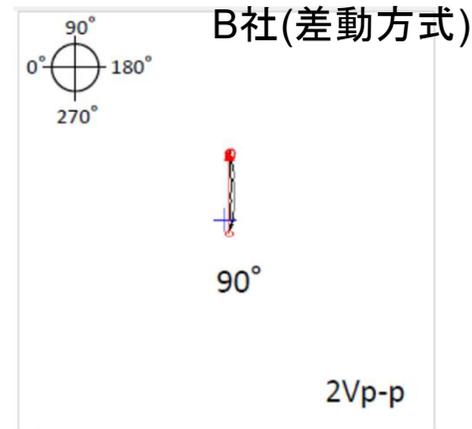
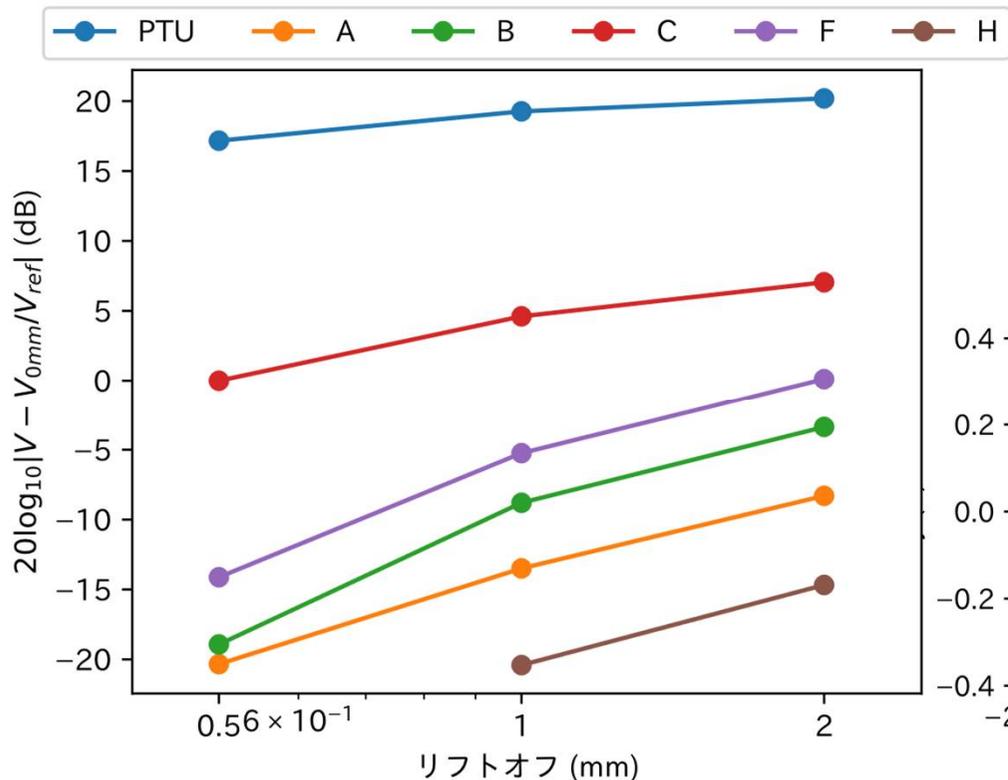
試験箇所: スリットの無い部位



番号	形状	余盛の有無	コーティング厚さ (μm)	位置	きず性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
A1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.25
A2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.25
A3	平板	無	0	平板表面	スリット	4	1.5	0.25

# (4)無欠陥部のリフトオフ特性

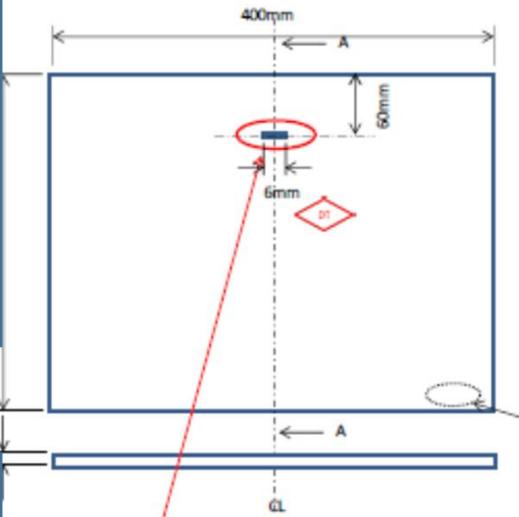
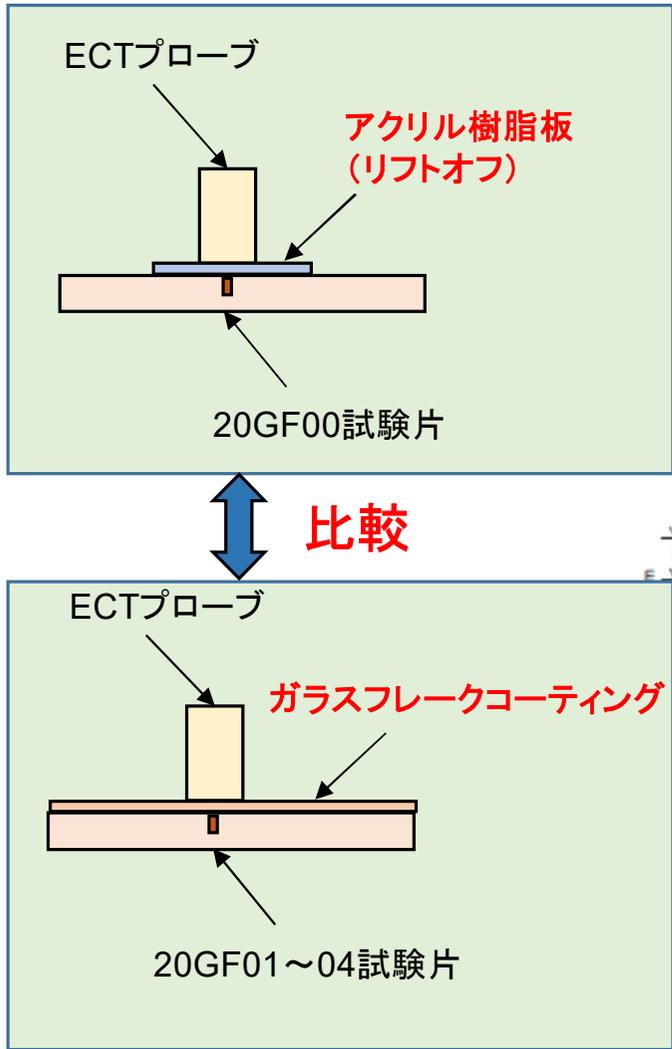
## 試験結果



- 検査中のコーティング厚さの変化によって検出信号のベース電圧が変化する程度を示している。
- 周波数フィルタを用いることで影響の軽減可能(今回はあえてOFFで測定)。

# (5)コーティング材質の出力への影響

## 試験方法・試験片



※1 : 模擬欠陥 (放電加工)  
 サイズ:長さ6mm×深さ3mm×幅1mm  
 方向:板厚(垂直)方向に深さ3mm  
 数量:1か所

コーティング0mm



20GF00

コーティング0.5mm



20GF00

コーティング1.0mm



20GF00

コーティング1.5mm



20GF00

コーティング2.5mm

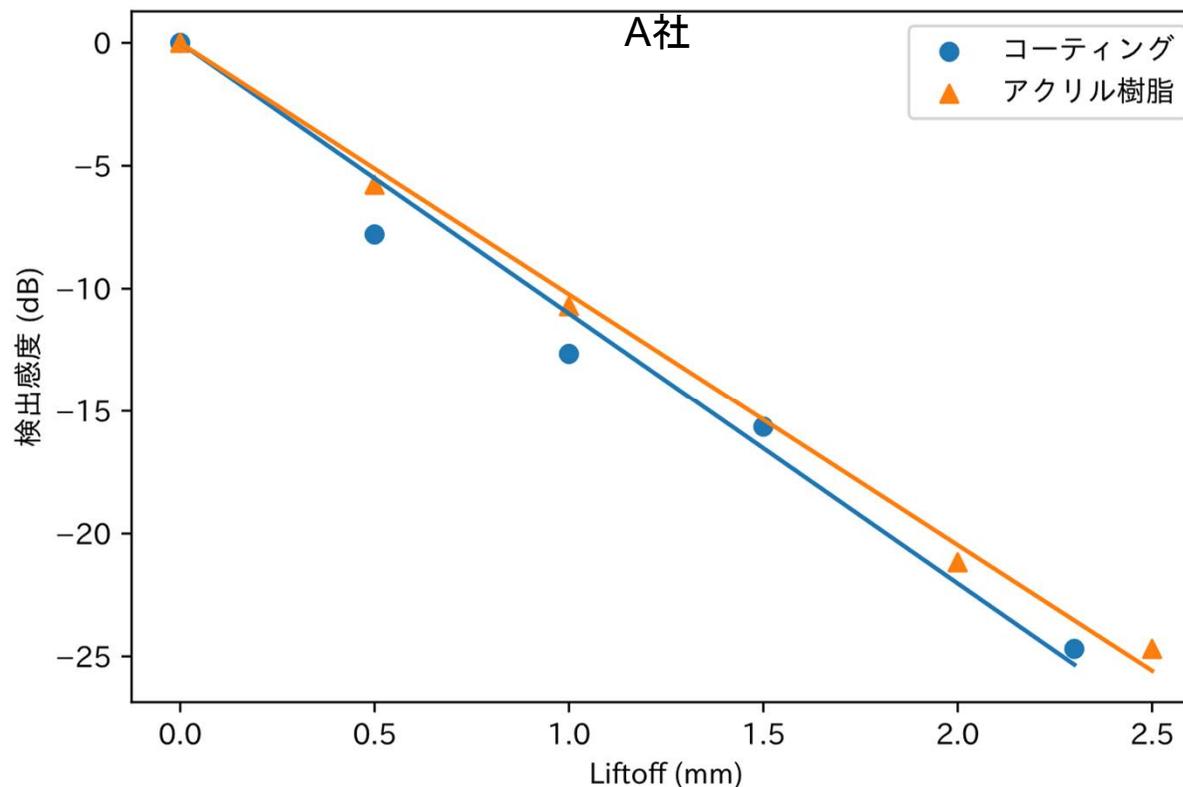


20GF00

ガラスフレーク試験片

# (5)コーティング材質の出力への影響

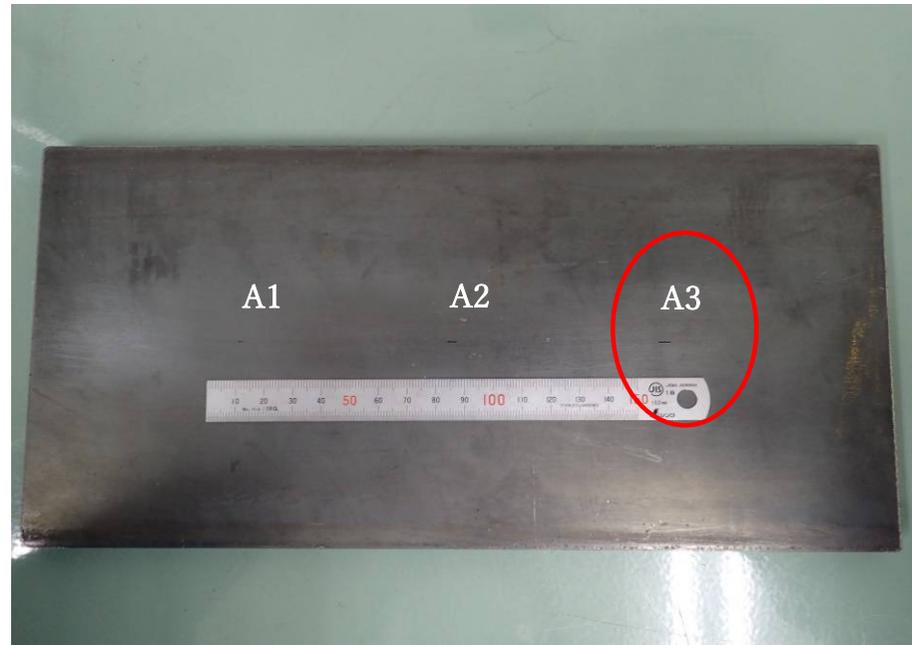
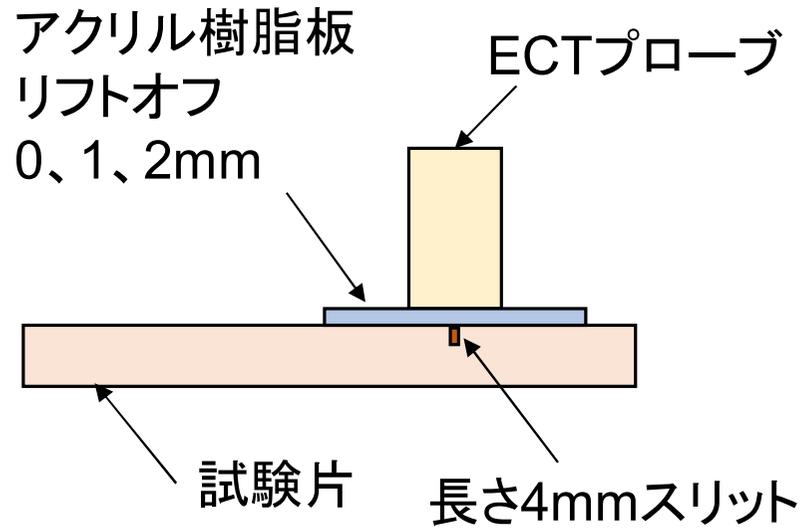
## 試験結果



- (ガラスフレーク)コーティングをアクリル樹脂(空気の層)と同等とみなせることを確認した。

# (6)コーティング厚さ特性

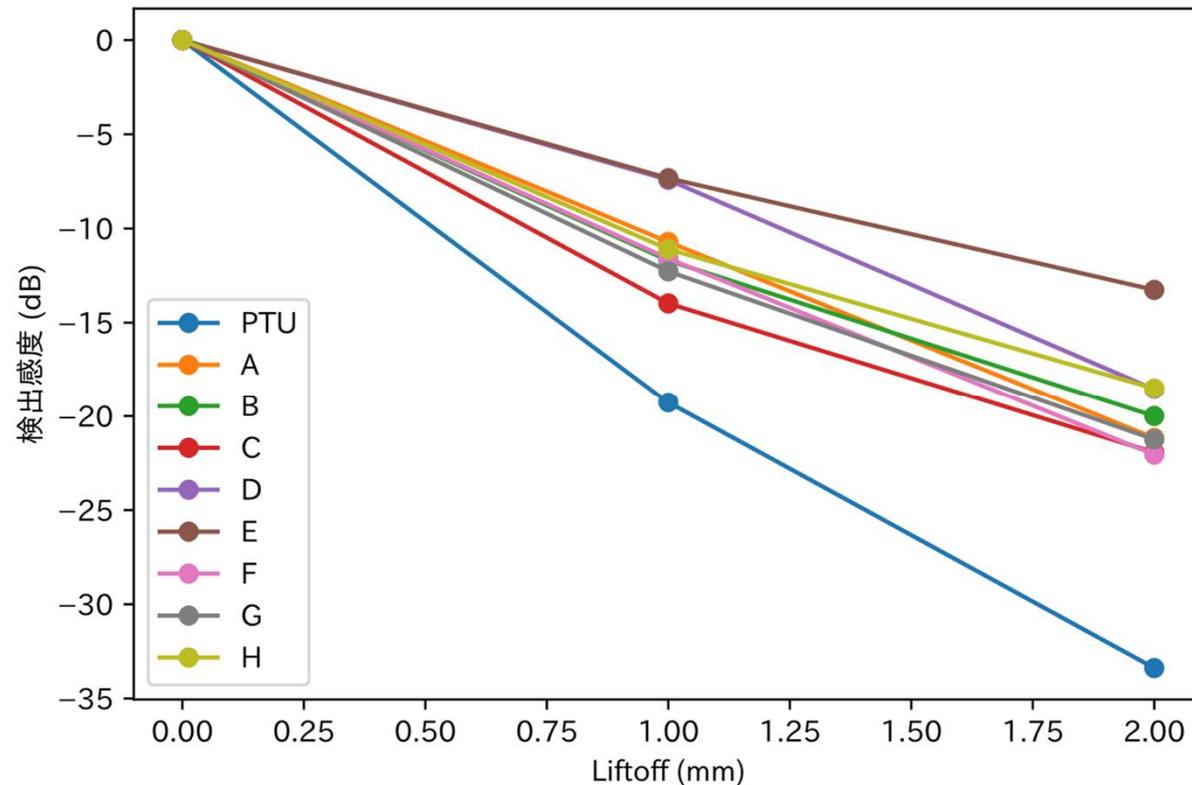
## 試験方法・試験片



番号	形状	余盛の有無	コーティング厚さ (μm)	位置	きず性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
A1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.25
A2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.25
A3	平板	無	0	平板表面	スリット	4	1.5	0.25

# (6)コーティング厚さ特性

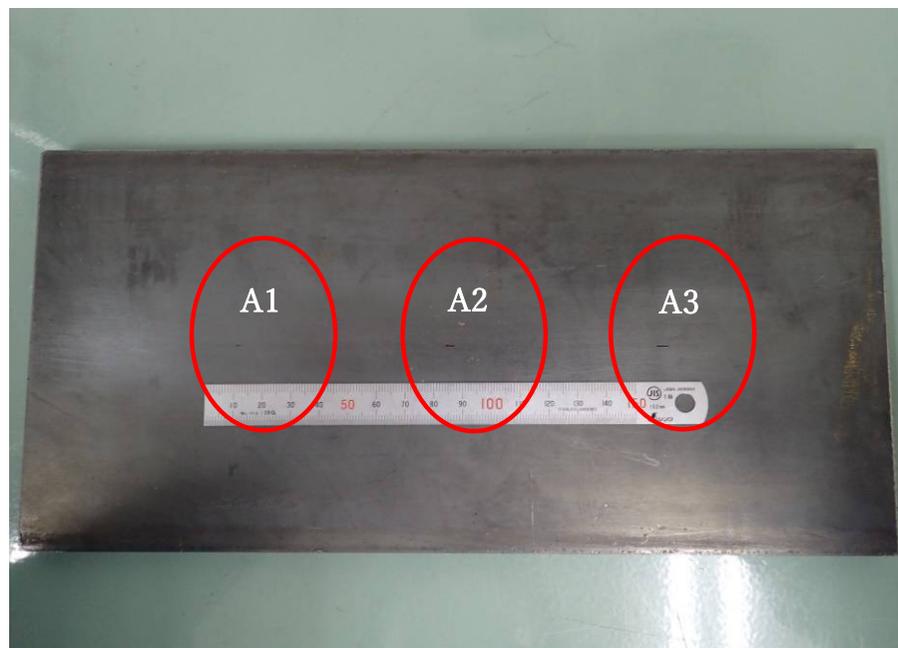
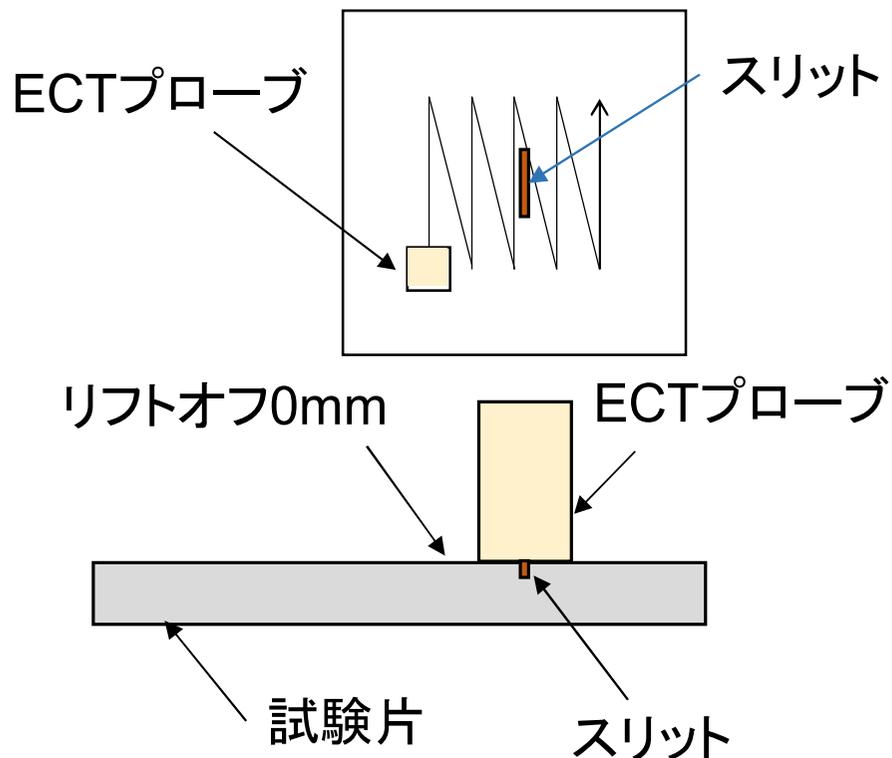
## 試験結果



- コーティング厚さが大きくなるほど、検出感度が落ちることを示している。
- 測定力所のコーティング厚さが既知であることが重要。

# (7)スリット応答領域 (リフトオフ0mm)

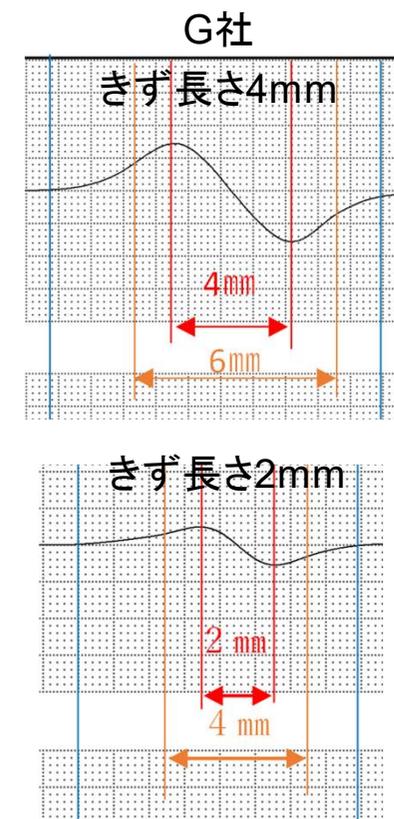
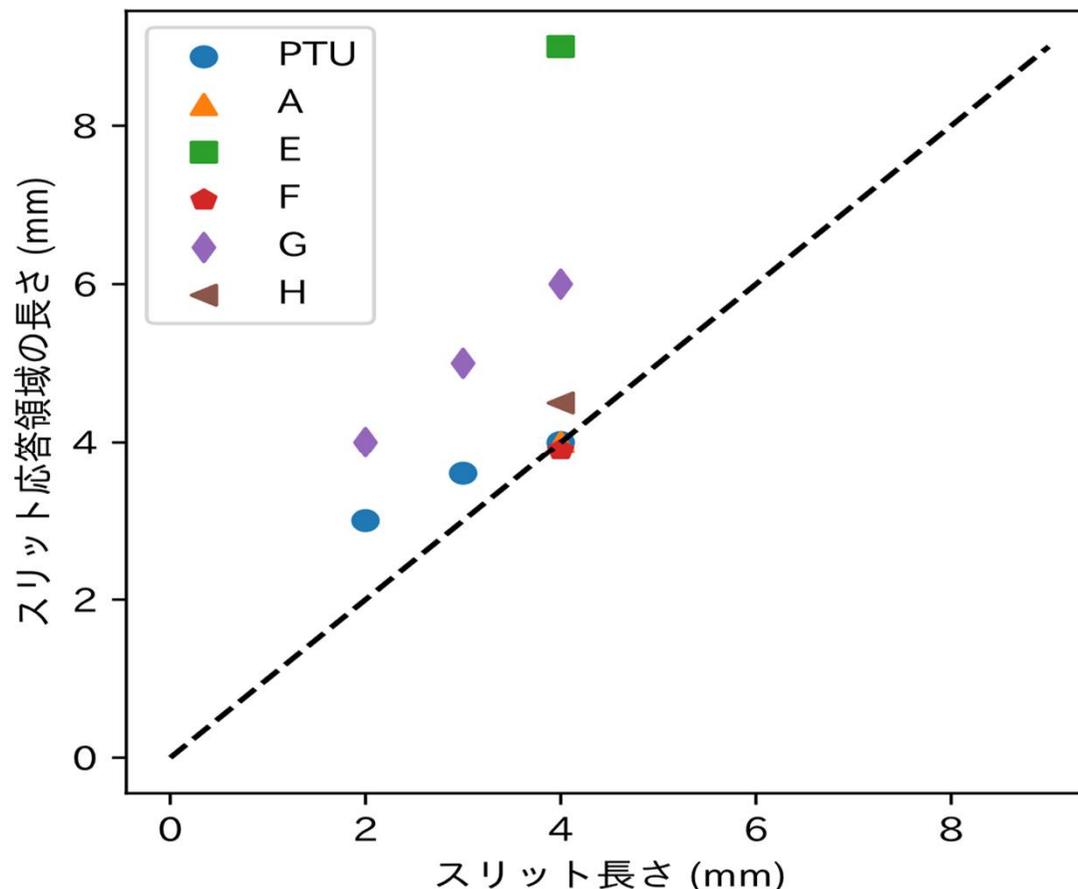
## 試験方法・試験片



番号	形状	余盛の有無	コーティング厚さ (μm)	位置	きず性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
A1	平板	無	0	平板表面	スリット	2	1.5	0.25
A2	平板	無	0	平板表面	スリット	3	1.5	0.25
A3	平板	無	0	平板表面	スリット	4	1.5	0.25

# (7)スリット応答領域 (リフトオフ0mm)

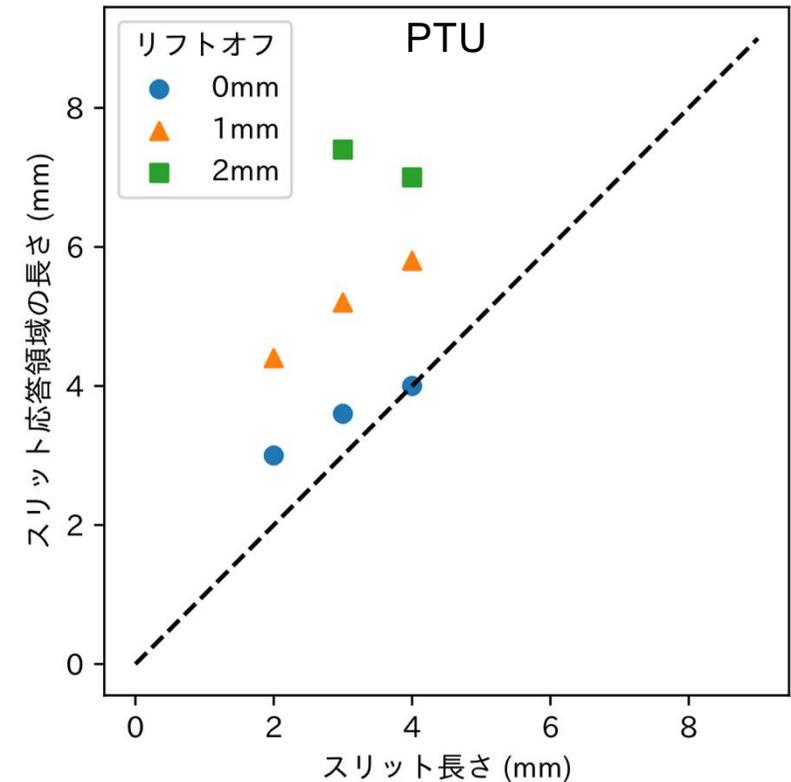
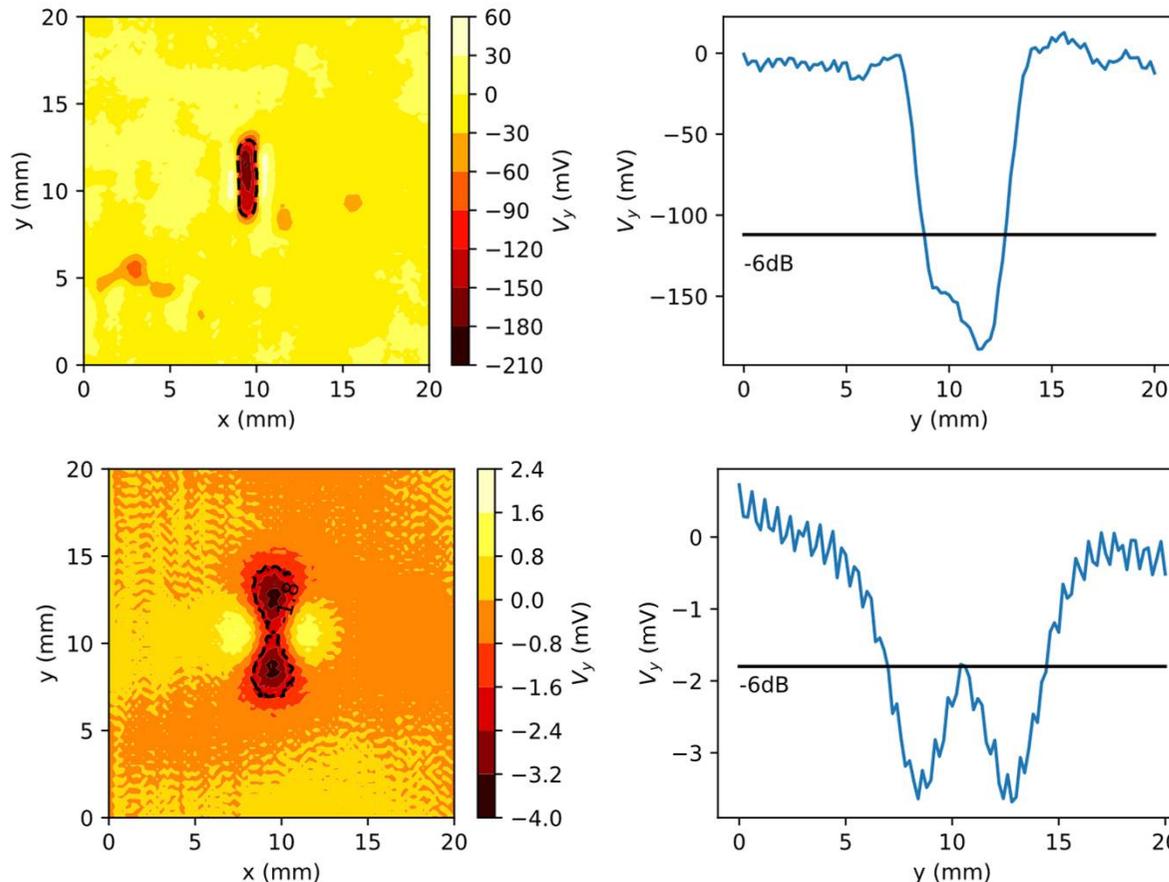
## 試験結果



- 差動方式のプローブはきず両端付近をピークとした応答領域を示す。
- きず両端付近のピーク間距離がきず長さによく一致した。
- スリットきずの応答領域の長さは、実際のきず長さより長かった。

# (7)スリット応答領域 (リフトオフ0, 1, 2mm)

## 試験結果

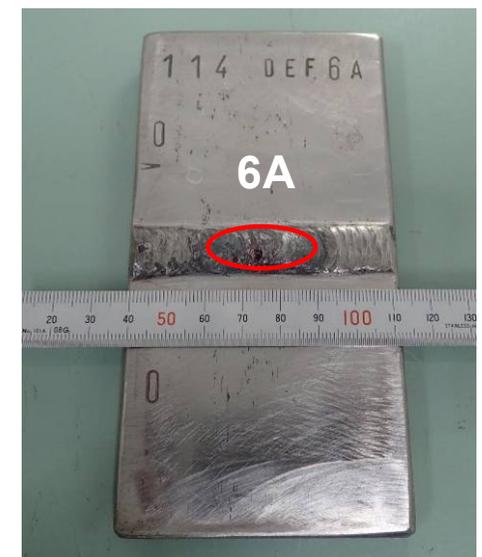


- リフトオフが大きくなると、スリット応答領域は安全側(実際のきず長さより長く)に評価される。
- 「応答領域(-6dB)長さ」+ $\alpha$

# (8)自然きずの検出性

## 試験方法・試験片

きず 番号	形状	余盛の 有無	コーティング 厚さ(μm)	位置	きず 性状	長さ (mm)	深さ (mm)	備考
21	突合継手	無	0	溶着金属中 央	縦割れ	25	—	
4	突合継手	有	0	余盛中央	縦割れ	25	—	
1	突合継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
6A	突合継手	有	0	余盛中央	表面ポロ シティ	25	—	



# (8)自然きずの検出性

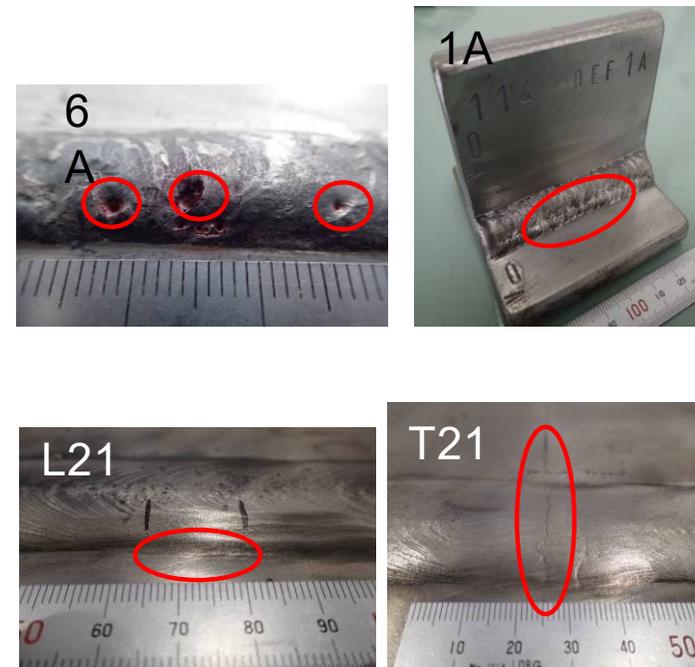
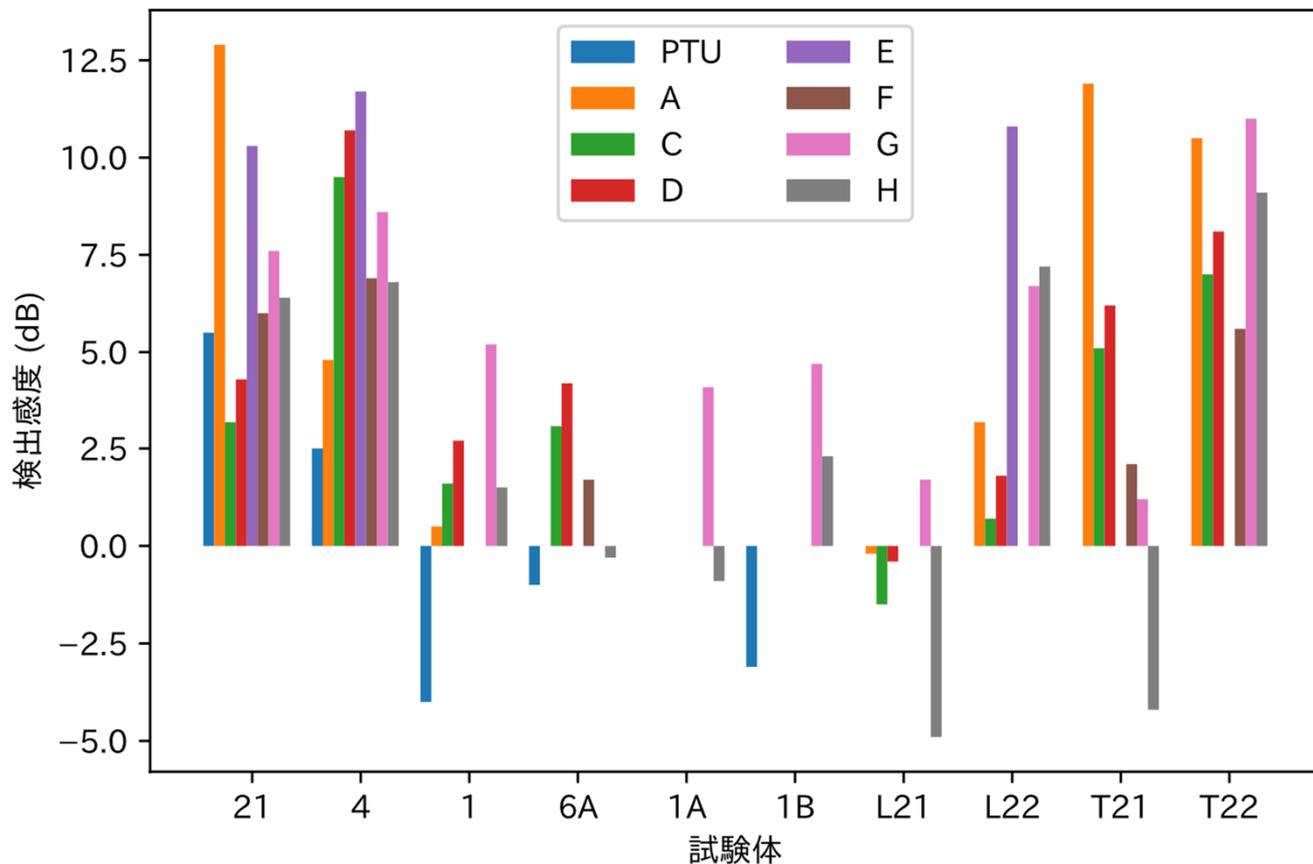
## 試験方法・試験片

きず番号	形状	余盛の有無	コーティング厚さ(μm)	位置	きず性状	長さ(mm)	深さ(mm)	備考
1A	T継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
1B	T継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
L21	突合継手	有	0	溶接止端	縦割れ	17	3.2	TP-L2
L22	突合継手	有	0	溶着金属	縦割れ	12	1.6	
T21	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	18	1.8	TP-T2
T22	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	20	1.7	



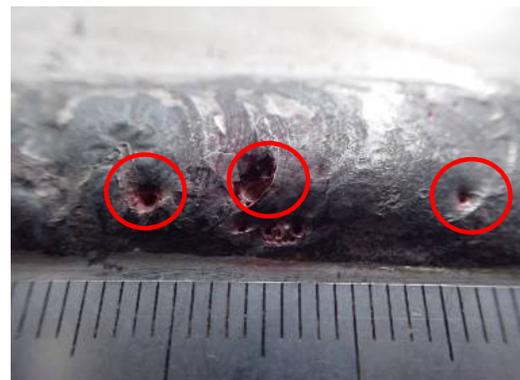
# (8)自然きずの検出性 (リフトオフ0mm)

## 試験結果



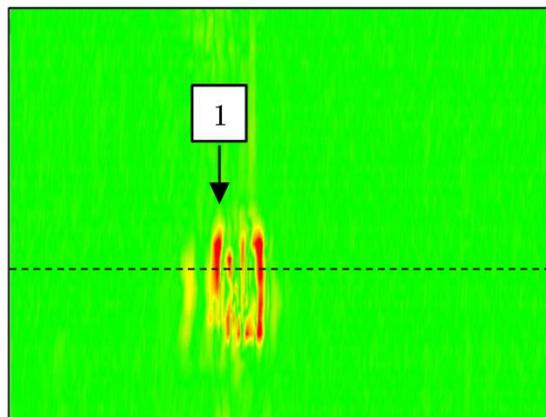
- コーティングが無い状態では、いずれのきずも検出が可能であった。
- 「コーティング厚さ特性」から、リフトオフが2mmになると0mmより検出信号が-10dB以下になることが予想される。

# (8)自然きずの検出性 (6A)

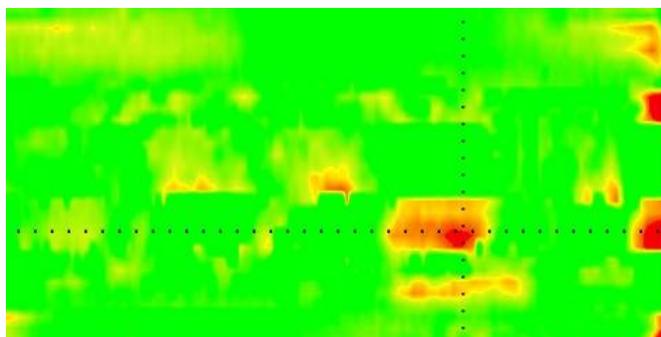


## 試験結果

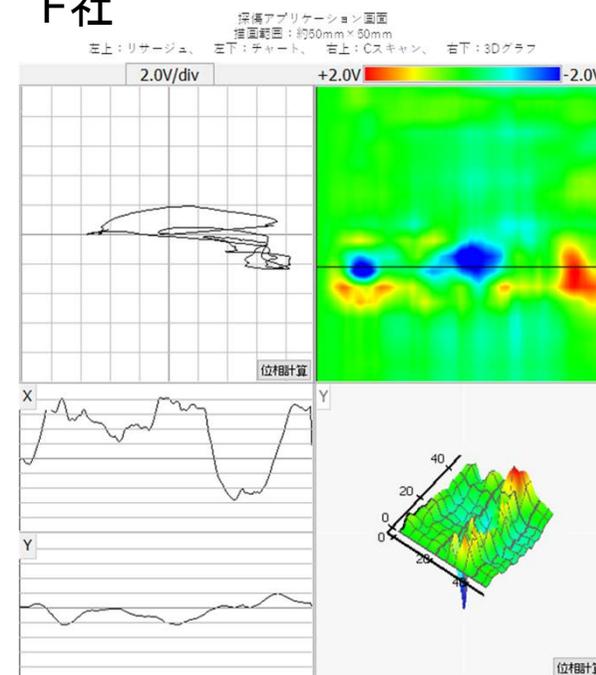
Axial C社



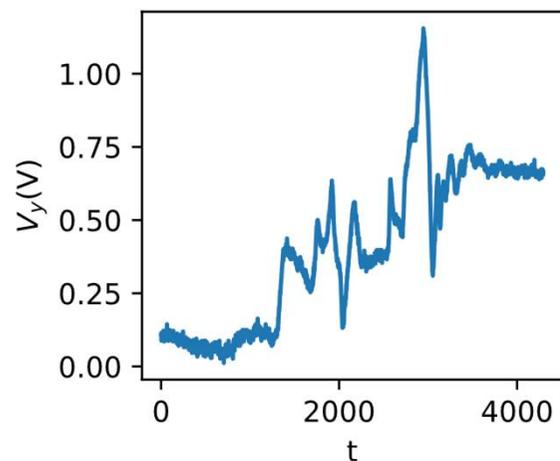
D社



F社



H社

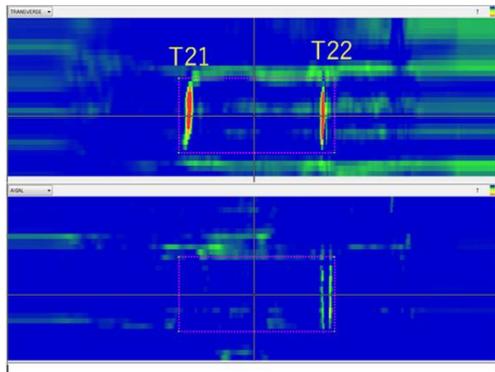


# (8)自然きずの検出性 (T21)

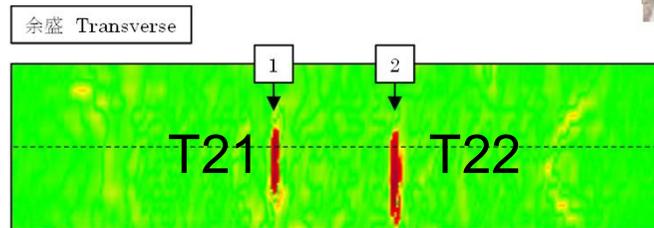


## 試験結果

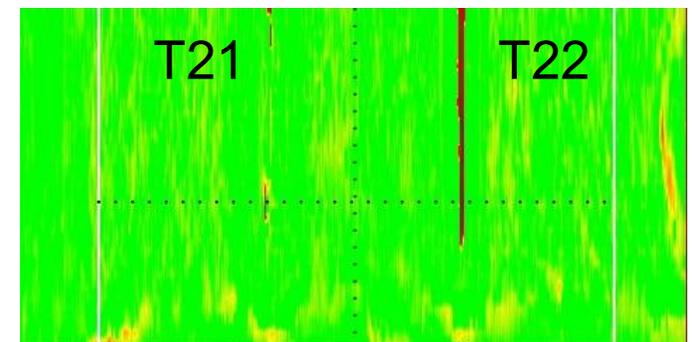
A社



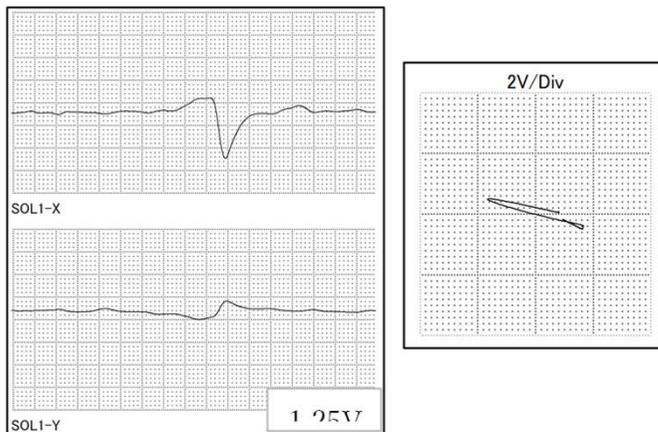
C社



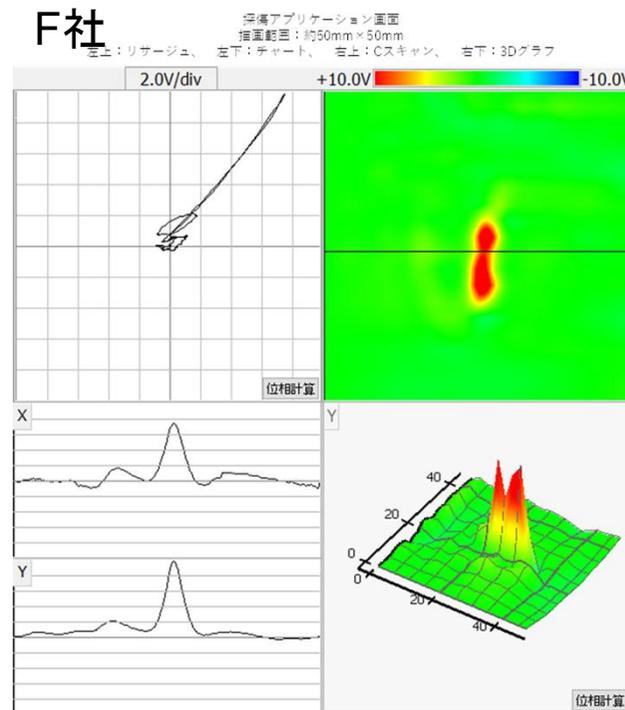
D社



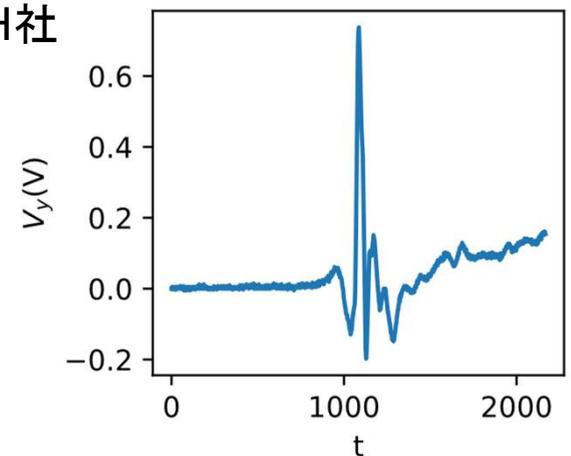
G社



F社



H社



# 検査手順における「基準」(案)

## 1. 探傷器の感度設定のための「基準きず」

- 被試験力所と同じ材質の母材
- 放電加工によるスリットきず
- コーティング厚さに相当するリフトオフ

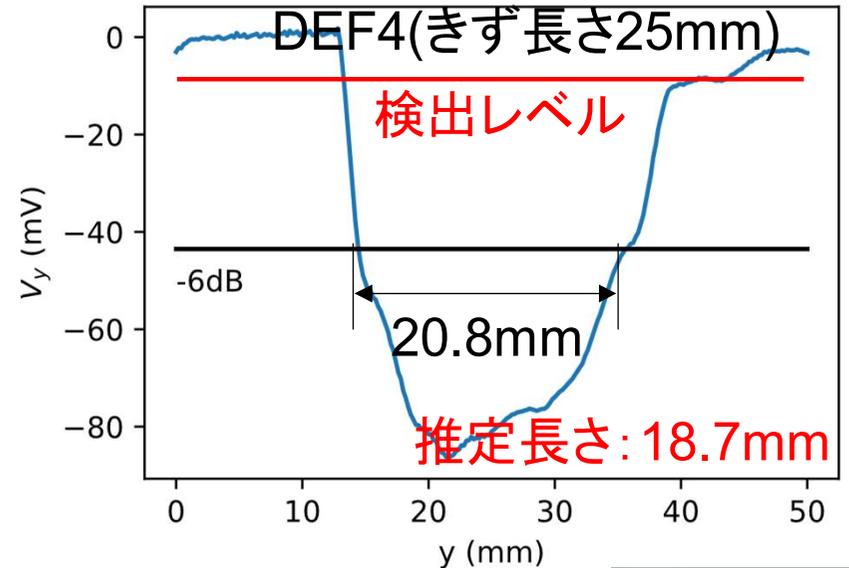
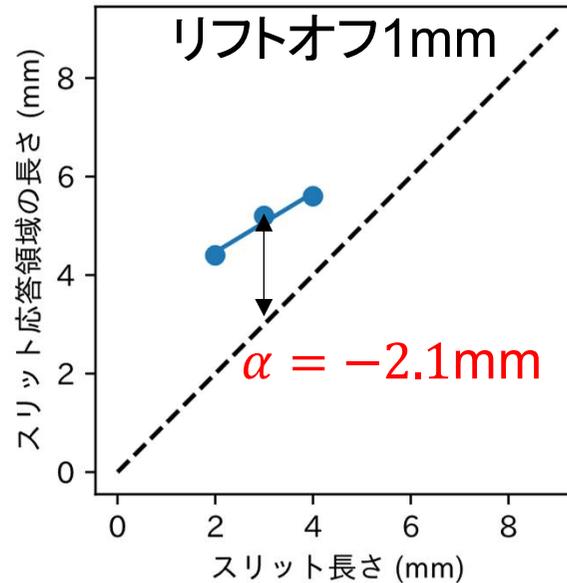
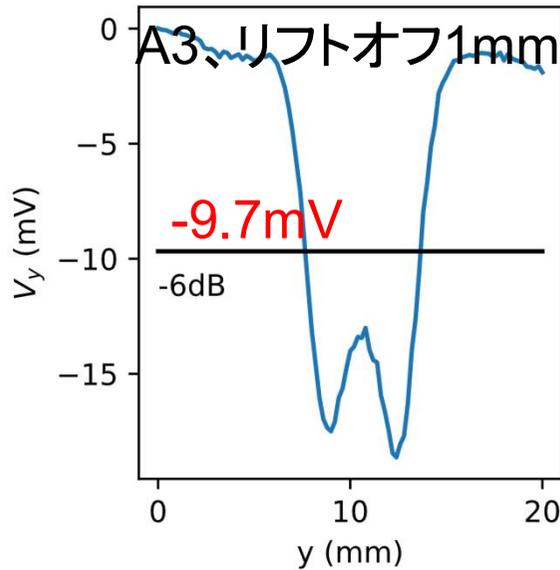
## 2. きず判定のための「検出レベル」

- 「基準きずの-6dB(または50%)」-「角度感度補正の最大減衰」

## 3. きず長さの「サイジング方法」

- 「応答領域(-6dBまたは50%)の長さ」+  $\alpha$
- ピークtoピーク+  $\alpha$

# 自然きずへの提案方法の適用①



## 1. 探傷器の感度設定のための「基準きず」

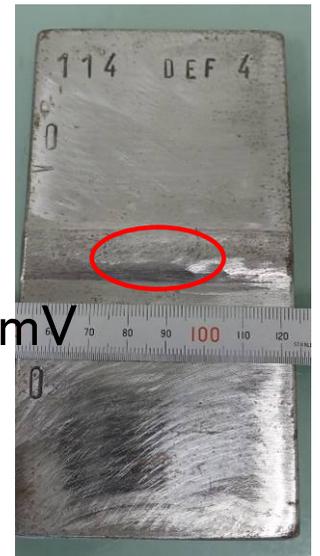
- A3、リフトオフ1mm

## 2. きず判定のための「検出レベル」

- 「基準きずの-6dB」-「角度感度補正」⇒検出レベル9.7mV<<85.7mV

## 3. きず長さ「サイジング方法」

- 応答領域+ $\alpha$  ⇒ 応答領域20.8-2.1=18.7mm<きず長さ25mm



# 自然きずへの提案方法の適用②

- 対象とした自然きずの検出信号の振幅は、検出レベルの8.8倍であった。

用意した自然きずは大きすぎる。

- 応答領域の長さは自然きずの長さを過小評価する。

長方体スリットきず：応答領域の長さ > きず長さ

自然きず：応答領域の長さは < きず長さ

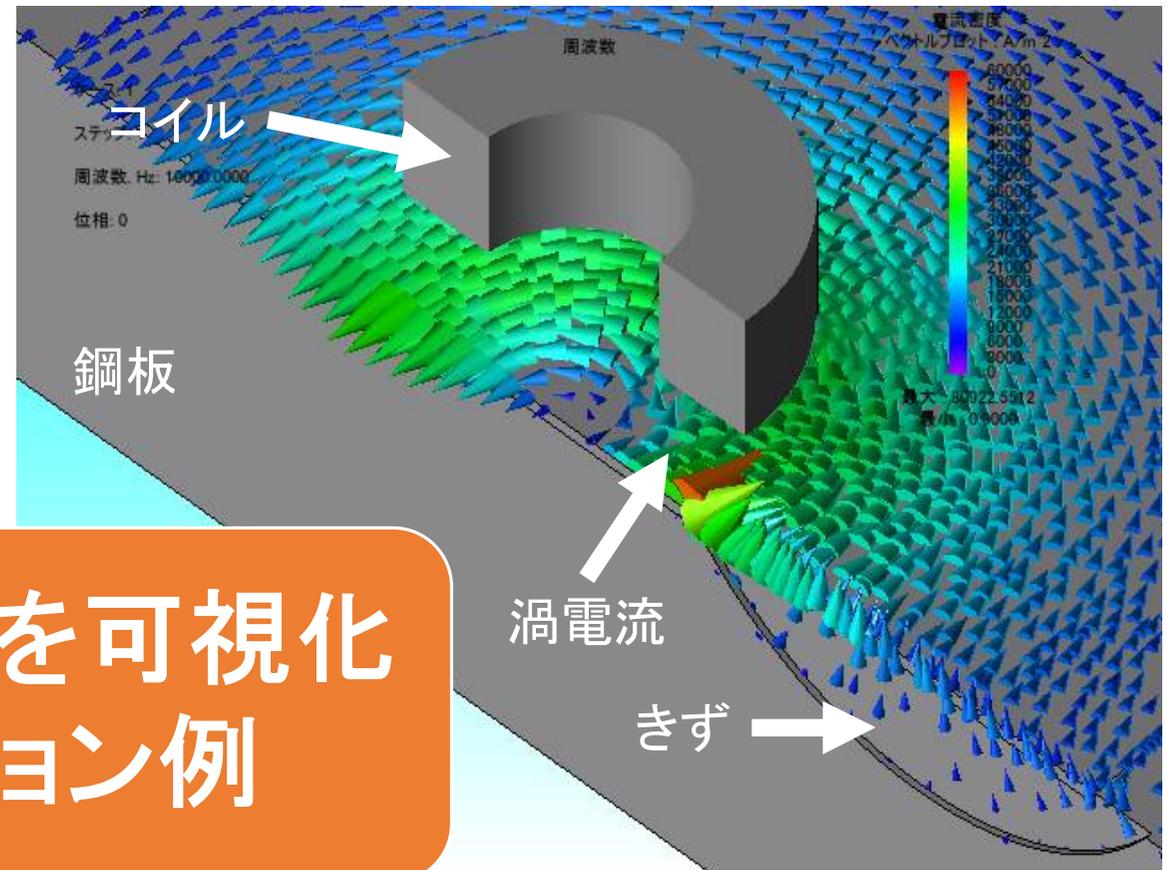


## 5. まとめ

- 検査手順の中で求められる以下についての案を提案した。
  - 探傷器の感度設定のための「基準きず」
  - きず判定のための「検出レベル」
  - きず長さ「サイジング方法」
- 溶接部に付与した長さ25mmの自然きずに対して、提案方法を適用したが、きず長さ4mmの検査手順の妥当性確認の試験体としては自然きずが長すぎたため、検出が容易であった。
- コーティング厚さによって検出感度が変化するため、測定力所のコーティング厚さが既知であることが重要であることを確認した。

# 今後の課題

- 渦電流探傷試験結果の評価手法の確立
  - 基準きず形状の策定
  - 材質の影響の定量化



渦電流分布の変化を可視化したシミュレーション例