

(令和4年度) 渦電流探傷試験によるコーティング上から
の溶接線検査の適用に向けた調査研究報告書

令和5年3月

危険物保安技術協会

目次

1	概要.....	1
2	経緯.....	1
3	実施内容.....	2
4	実施体制.....	3
5	実施スケジュール.....	4
6	使用機器.....	5
7	試験体.....	7
8	試験方法.....	14
8.1	基準信号.....	14
8.2	無欠陥部のリフトオフ特性.....	14
8.3	コーティング材質の出力への影響.....	15
8.4	コーティング厚さ特性.....	15
8.5	角度感度特性.....	16
8.6	スリット応答領域.....	16
8.7	自然きずの検出性.....	16
9	試験結果.....	17
9.1	基準信号.....	17
9.2	無欠陥部のリフトオフ特性.....	20
9.3	コーティング材質の出力への影響.....	22
9.4	コーティング厚さ特性.....	23
9.5	角度感度特性.....	26
9.6	スリット応答領域.....	28
9.7	自然きずの検出性.....	32
10	まとめ.....	38
11	今後の課題.....	38

添付資料

添付資料 1 試験記録

1 概要

令和4年度から特定屋外タンク貯蔵所のタンク底部溶接部を対象として、渦電流探傷法によるコーティング上からの溶接部検査の適用に向けた調査研究を開始した。

本報告書は令和4年度に実施した試験内容及び試験データを報告するものである。

2 経緯

特定屋外タンク貯蔵所については、消防法第14条の3の2の規定に基づく危険物の規制に関する規則第62条の5に規定される内部点検を実施する際、タンク底部の板の厚さ及び溶接部が危険物の規制に関する政令に定められた技術上の基準に適合していることを確認することとされている。

内部点検を実施する際、タンク底部の溶接部に内面腐食から保護することを目的としたコーティングが施工されている場合、コーティングを剥離し規則第20条の8に規定される磁粉探傷試験（浸透探傷試験を含む。）にて確認しているところである。このコーティングの剥離及び再塗装に係る作業においては、開放期間の長期化、施工費の増加等を伴うものであることから事業者にとって負担となっている。

そのような状況から平成10年度及び平成11年度に消防庁では危険物技術基準委員会が開催され、コーティング上から溶接部検査を行うことのできる可能性のある非破壊試験の方法が選定及び実証試験等が行われ、その検討内容から「特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する運用について」（平成12年8月24日付け消防危第93号、改正：平成14年1月22日付け消防危第17号）が示された。その通知にはコーティング上からのタンク底部溶接部の検査について、技術的に実用に供し得る各種の探傷法が示されるとともに、当該探傷法に共通する試験要領、試験結果の評価（補修を要しない欠陥の大きさ）等が示されており、運用等の詳細は実用機が製作された段階で通知するとされた。そこに渦電流探傷試験も取り上げられていた。

その後、渦電流探傷法については近年のデジタル技術の進歩とともに探傷機器の性能及び検出精度が向上しており、更に検査性に優れたアレイ方式やマルチ方式などが開発され実用化されてきたところである。

このような経緯のもと、渦電流探傷法が溶接線検査の一つの手法として適用の可能か令和4年度から調査検討を開始したところである。

3 実施内容

令和 4 年度に実施した検出性確認試験においては、放電加工による「スリットきず」を用いて渦電流探傷試験の流れ(図 3.1 参照)のなかで求められる以下の事項について検討を行った。

- (1) 渦電流探傷器の感度を設定するための基準きずについて
- (2) きずと判定する検出レベルについて
- (3) きず長さのサイジング方法について

以下の前提条件のもとで検出性確認試験を実施した。

- ・ 市販されている既存の渦電流探傷装置を対象とした。(装置開発をしない)
- ・ 検出目標きず(最小欠陥)は、長さ 4mm×深さ 1.5mm×幅 0.25mm とした。

平成 12 年 8 月 24 日付け消防危第 93 号に示された長さ 4.0mm×深さ 1.5mm の欠陥を検出目標きずとした。(規則第 20 条の 8 に示される長さ 4mm 以下であることも考慮し、検出能力を確認した。)

検出目標きず 4mm より短い 3mm、2mm のスリットきずのほかに、溶接部に付与した自然きずに対して探傷し検出性を確認した。

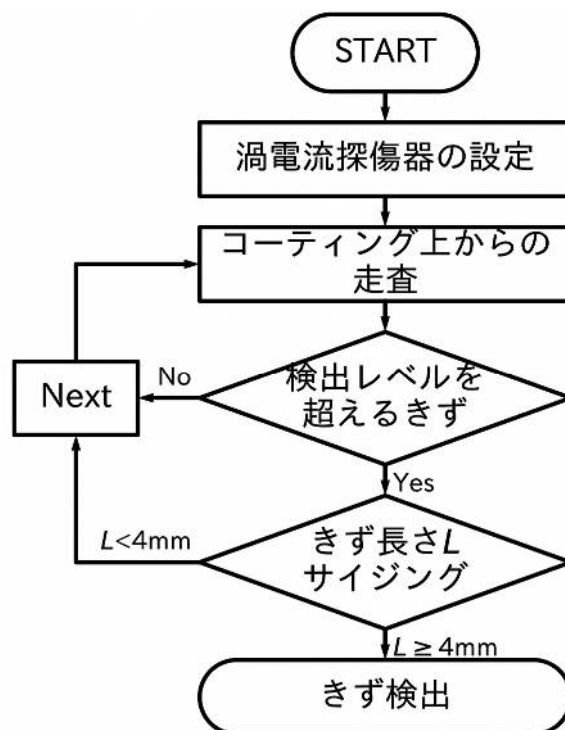


図 3.1 渦電流探傷試験の流れ

4 実施体制

危険物保安技術協会から（一社）日本非破壊検査工業会へ委託し試験を実施した。

さらに以下のような渦電流探傷試験ワーキングを（一社）日本非破壊検査工業会にて設置し詳細な検討を実施した。

危険物保安技術協会

杉山 章	企画部長
松坂 竜男	企画部課長
平野 晃史	企画部課長代理
伊藤 真人	企画部主任検査員

（一社）日本非破壊検査工業会 渦電流探傷試験ワーキング

主査	小坂 大吾	職業能力開発総合大学校准教授
幹事	安田 裕之	株式会社ジャスコ
	中村 英之	株式会社 IHI 検査計測
	塙 晴行	一般社団法人日本非破壊検査工業会
	出牛 利重	日本工業検査株式会社
委員	芳賀 勝巳	東亜非破壊検査株式会社
	泉 康博	日本非破壊検査株式会社
	川瀬 康	総合非破壊検査株式会社
	武岡 雅明	株式会社ウィズソル
	中川 祐二	ダイヤ電子株式会社
	正木 英行	株式会社日本工業試験所
	高鍋 雅則	株式会社アミック
	伊森 信恭	日本電測機株式会社
	橋本 真二	株式会社 IHI 検査計測
	堀 充孝	日本電磁測器株式会社
事務局	多根 裕子	一般社団法人日本非破壊検査工業会
	藤田 理絵	一般社団法人日本非破壊検査工業会

5 実施スケジュール

以下のようなスケジュールにて試験及び検討、報告会等を実施した。

2022 年 5 月～6 月	試験片製作期間
2022 年 8 月 22 日	意見交換会
2022 年 9 月 1 日	回送試験開始
2022 年 9 月 13 日	見学会（日本検査工業株式会社）
2022 年 10 月 24 日	見学会（職業能力開発総合大学校）
2023 年 3 月 1 日	報告会

6 使用機器

検出性確認試験は表 6.1 に示すチームにて実施した。試験体 1 セットをそれぞれのチームへ回送し試験を実施した（回送試験）。

使用した渦電流探傷装置とプローブを表 6.2 に示す。

表 6.1 試験条件

チーム	プローブ種別	試験周波数
PTU	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	100 kHz
A	アレイ方式、差動方式 コイル径 3mm	100 kHz
B	アレイ方式 差動方式	400 kHz
C	アレイ方式 差動方式	100 kHz
D	アレイ方式 差動方式	100kHz
E	シングル方式 差動方式	50 kHz
F	マルチ方式 相互誘導形絶対値方式	100 kHz
G	シングル方式 差動方式	30 kHz
H	シングル方式 相互誘導形	80 kHz

試験実施企業等：（順不同）職業能力開発総合大学校、日本工業検査(株)、東亜非破壊検査(株)、(株)ウィズソル、ダイヤ電子応用(株)、(株)日本工業試験所、(株)アミック、日本電測機(株)、(株)IHI 検査計測

表 6.2 使用機器

チーム	渦電流探傷装置		プローブ	
	メーカー	型式	メーカー	型式
PTU	Digilent 社	Analog Discovery 2	ACTUN 株式会社	AT-129
A	SG NDT 社	S2G2-800	SG NDT 社	SHAPE-LS050- TR-034-295-41P03
B	ZETEC 社	MIZ-21C	ZETEC 社	SURFXW-S01 (アレイ型)
C	Eddyfi 社	MIZ-21C	Eddyfi 社	SURFXW-S01
D	Eddyfi	MIZ-21C	Eddyfi 社	SURFXW-S01 SURFXT-S0010
E	ACTUNI 株式 会社	EddyStation HL	ACTUN 株式会社	CP-6B
F	アスワン電子 株式会社	aect- 2000Multi	アスワン電子 株式会社	L230
G	日本電測機 株式会社	MXD6011	日本電測機 株式会社	SWP03
H	株式会社 IHI 検査計測	Mobile EDDy®	株式会社 IHI 検査計測	I1-457

7 試験体

使用したスリット及び自然きずの一覧表を、表 7.1、表 7.2 及び表 7.3 に示す。

表 7.1 スリット一覧表

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)
S 1	平板	無	0	平板表面	スリット	6	3	1
S 2	平板	無	400	平板表面	スリット	6	3	1
S 3	平板	無	1000	平板表面	スリット	6	3	1
S 4	平板	無	1500	平板表面	スリット	6	3	1
S 5	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

注：コーティングは、ガラスフレークコーティングとする。

A1～C3：2022 年度製作（危険物保安技術協会）

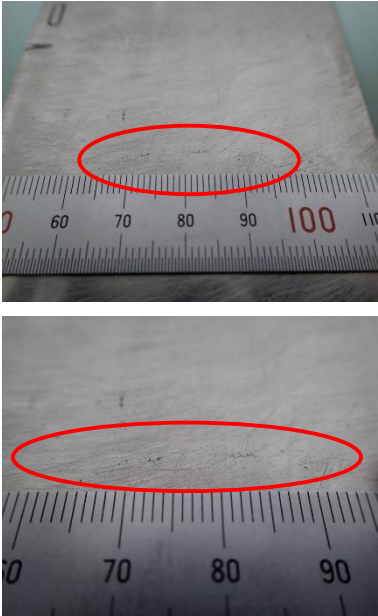
A3：検出目標スリット

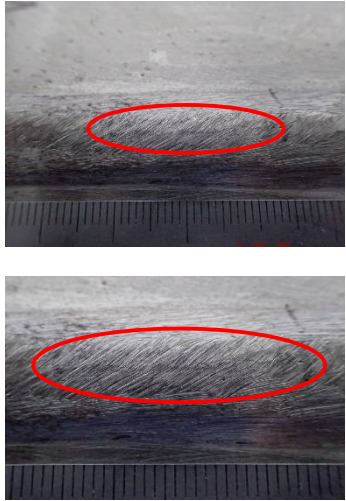
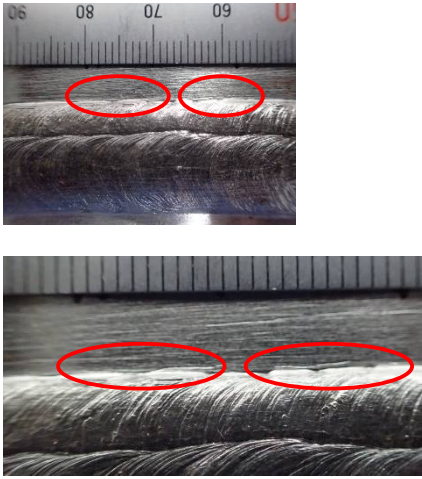
表 7.2 自然きず一覧表

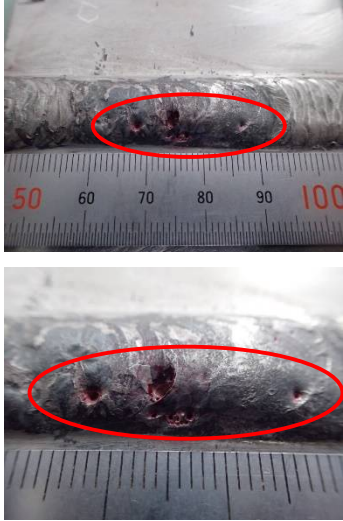
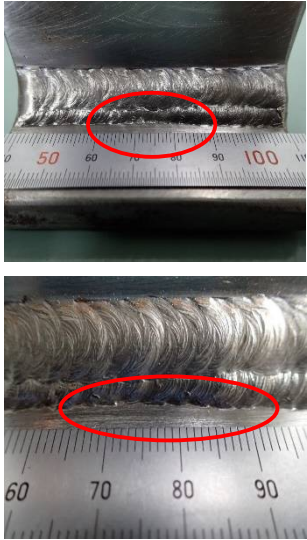
きず 番号	形状	余盛の 有無	コーティン グ厚さ(μ m)	位置	きず 性状	長 さ (mm)	深 さ (mm)	備考
21	突合継手	無	0	溶着金属 中央	縦割れ	25	—	
4	突合継手	有	0	余盛中央	縦割れ	25	—	
1	突合継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
6A	突合継手	有	0	余盛中央	表面ポ ロシテ ィ	25	—	
1A	T 継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
1B	T 継手	有	0	溶接止端	縦割れ	25	—	
L21	突合継手	有	0	溶接止端	縦割れ	17	3.2	TP- L2
L22	突合継手	有	0	溶着金属	縦割れ	12	1.6	
T21	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	

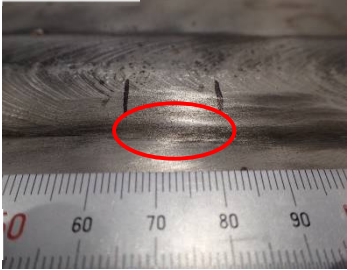
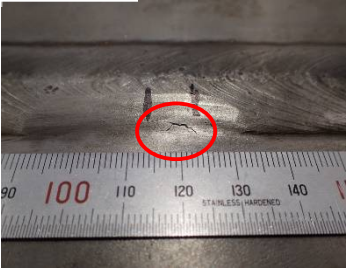
注：コーティング厚さ 0mm は、コーティング無し。

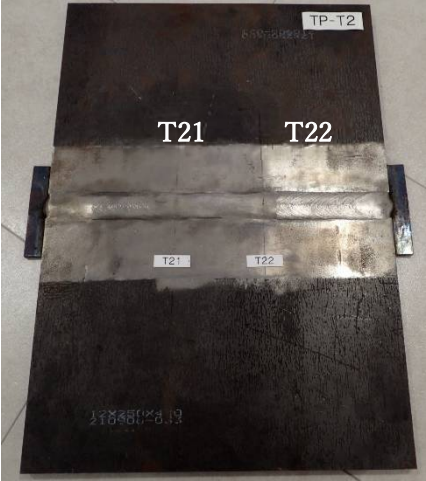
表 7.3 回送試験に用いた試験体写真一覧

きず 番号	写真
A1 A2 A3	
21	 拡大  

きず 番号	写真
4	A photograph of a rectangular metal plate with a ruler placed below it. The plate has markings "114 DEF 4" and "0" at the top. A red circle highlights a horizontal defect on the lower half of the plate. The ruler shows measurements from 30 to 150 mm. 拡大  Two magnified photographs of the defect highlighted in the first image. The top image shows a close-up of the defect with a red circle. The bottom image shows another magnified view of the same defect, also with a red circle. A ruler is visible at the bottom of each magnified image.
1	A photograph of a rectangular metal plate with a ruler placed below it. The plate has markings "114 DEF 1" and "0" at the top. A red circle highlights a horizontal defect on the lower half of the plate. The ruler shows measurements from 20 to 140 mm. 拡大  Two magnified photographs of the defect highlighted in the first image. The top image shows a close-up of the defect with a red circle. The bottom image shows another magnified view of the same defect, also with a red circle. A ruler is visible at the bottom of each magnified image.

きず 番号	写真
6A	 114 DEF 6A 0 拡大 
1A	 114 DEF 1A 0 拡大 

きず 番号	写真
1B	 拡大 →  
L21 L22	 拡大 → L21  L22 

きず 番号	写真
T21 T22	 A photograph of a rectangular metal specimen. The top half is dark and labeled 'TP-T2'. The bottom half is lighter and divided into two sections labeled 'T21' and 'T22'. Small labels 'T21' and 'T22' are also visible on the lighter section. 拡大 → T21  T22  Two magnified views of the metal surface. The top image, labeled 'T21', shows a vertical crack circled in red. The bottom image, labeled 'T22', shows a similar crack circled in red. Both images include a ruler for scale, with markings at 10, 20, 30, 40, and 50.

8 試験方法

JIS Z 2316-3:2014「非破壊試験－渦電流試験－第3部：プローブの特性及び検証」はプローブの機能的な特性を定義している。この規格で定義された一部の特性を活用して、コーティング上からきずを検出し、長さをサイジングする基準を検討するため、以下のような基礎的データの採取を行った。以下に、試験項目と試験方法を示す。

8.1 基準信号

平板（軟鋼 SS400 材）に放電加工によって付与した矩形のスリット（長さ 4.0mm×深さ 1.5mm×幅 0.25mm）を、検出目標のきずとした。（以下、「検出目標のスリット」という。）この検出目標のスリットに対して、垂直方向または平行方向にプローブを走査して出力信号を記録した。これを基準信号 S_{ref} とした。

以降の試験項目においても同じ基準信号 S_{ref} を用いる事で、得られたデータを正規化し、他の機器などとの相互比較が可能なデータ表記とした。JIS Z 2316-3 においては測定結果 S を基準信号 S_{ref} の比(S/S_{ref})により表現されるが、本報告書においては対数($20 \log_{10} S/S_{ref}$)を用いて表記した。

表 8.1 試験条件（基準信号の確認）

項目	パラメータ
試験体（きず番号）	A3 及び A1～C3
リフトオフ	0 mm

8.2 無欠陥部のリフトオフ特性

プローブと試験体との距離が近いほど渦電流試験の感度はよくなる。その距離（リフトオフ）の変動は雑音（ノイズ）となり現れ、程度によっては試験に障害となる。

渦電流探傷試験を行う上では、リフトオフによるノイズをいかに軽減するか必須である。まずは機器毎に異なるリフトオフ特性を把握するため試験を実施した。

試験体の平面部（無欠陥部）にプローブとの間にアクリル板を挟み、リフトオフによる出力信号を計測した。

表 8.2 試験条件（無欠陥部のリフトオフ特性）

項目	パラメータ
試験体（きず番号）	無欠陥部
リフトオフ	0, (0.5), 1, 2 mm

8.3 コーティング材質の出力への影響

コーティング材に磁気的な影響が含まれていないか確認するため、先の試験内容 8.2 と同様の試験を実施し出力信号を比較し確認した。

加えてガラスフレーク材によるコーティングの厚みが異なる試験片に対して、垂直方向または平行方向にプローブを走査したときと、プローブをリフトオフさせた出力信号を測定した。

次の試験項目及び結論を先に述べることになるが、リフトオフにて得られた出力信号とガラスフレーク材によるコーティングの異なる厚みから得られた出力信号の比較を行った。

さらにプローブと試験体との間にアクリル板を挟んだ場合において、リフトオフ及びコーティング材による出力信号と比較し、同等であることを確認した。

厚みの異なるアクリル板を挟むことでコーティングの厚みを模擬することと同等であることを確認した。

表 8.3 試験条件（コーティング材質の出力への影響）

項目	パラメータ
試験体（きず番号）	(S1～S5)
コーティング厚さ	0, 0.4, 1.0, 1.5, 2.0 mm
リフトオフ	0, 1.0, 2.0 mm

8.4 コーティング厚さ特性

コーティング厚さに対する検出感度特性を確認するため、コーティング厚さの変化による検出信号（ベース電圧）の変化量を評価した。平板に付与された検出目標のスリット（長さ 4.0mm×深さ 1.5mm×幅 0.25mm）に対して、リフトオフを 0mm、1mm、2mm としてスリットに平行にプローブを走査し、出力の大きさを記録した。

表 8.4 試験条件（コーティング厚さ特性）

項目	パラメータ
試験体（きず番号）	(A3)
リフトオフ	0, 1.0, 2.0 mm

8.5 角度感度特性

渦電流探傷試験に用いるプローブの構造及び検出方式は機器毎により異なる。そこでプローブに対してスリットの傾きに対する出力信号の変化（角度感度特性）について確認した。

プローブが検出目標のスリットに対しなす角度を 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° と変え、出力信号を記録し、きずの検出性を評価した。

表 8.5 試験条件（角度感度特性）

項目	パラメータ
試験体（きず番号）	(A3)
リフトオフ	0 mm
角度	0° 、 30° 、(45°)、 60° 、 90°

8.6 スリット応答領域

JIS Z 2316-3 に記載されるきず長さを測定する一つの手法に、-6dB 包絡線により長さを方法がある。このよるきず長さの測定の可能性を確認した。

表 8.6 試験条件（スリット応答領域）

項目	パラメータ
試験体（きず番号）	(A1~A3)
リフトオフ	0, 1.0, 2.0 mm

8.7 自然きずの検出性

溶接部に出来る複雑な形状や幅の狭いきず（自然きず：縦割れ、横割れ等）に対し検出性を確認した。検査手順及び基準を仮に定め、その妥当性を確認するため、自然きずに対する長さを測定し課題を多々抽出した。

9 試験結果

9.1 基準信号

プローブと試験体が接触したリフトオフの無い状態にて検出目標のスリット（長さ 4.0mm×深さ 1.5mm）を探索した。その表示画面の一例を図 9.1.1 に示す。図の左上の波形は、X 軸に電圧成分を Y 軸に電圧成分を時間で掃引し出力されたりサージュ波形である。図の左下の波形は、X 軸と Y 軸の出力電圧の変化を縦軸に、時間を横軸にしたチャート表示である。図の右上のグラフは、出力電圧を色階調で表示した C スキャンであり平面出力である。図の右下のグラフは出力電圧を色階調で表示した C スキャンの 3D グラフ表示である。

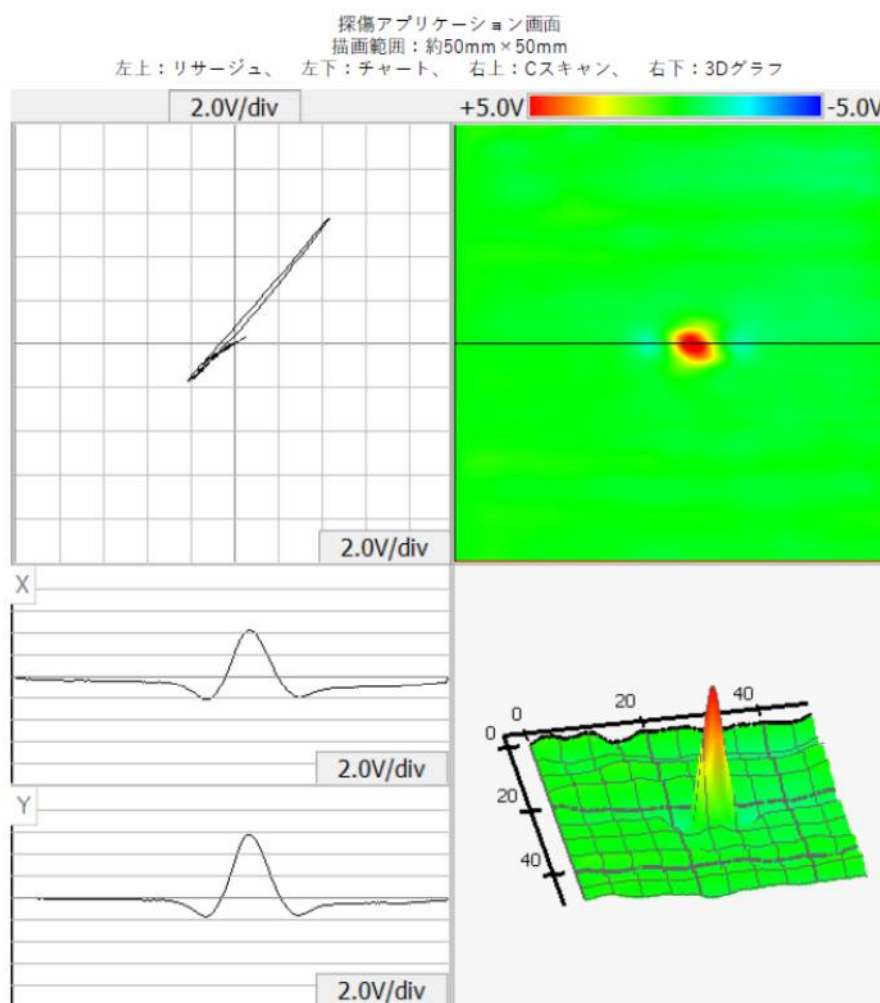


図 9.1.1 基準信号の確認出力例(F 社)

渦電流探傷試験におけるきずからの検出信号は、電圧（mV または V）として得られる。出力される電圧の大きさは、渦電流探傷装置や出力デバイスによりそれぞれ異なるため、出力電圧の大きさを基準化する必要がある。そのため基準となるスリットを定め、その基準と比較することで、きずの可否を判定する方法を採用することがある。

本試験では試験体 A3(長さ 4mm)を基準きずとし、その基準きずから得られた検出信号を基準信号とした。プローブがきずを鎖交したときに生じるきず信号のピークの最大値を基準信号とした。正負にピークが存在する場合、絶対値が大きい方のピークを採用した。各試験チームごとに採取した基準信号の値をまとめ、表 9.1.1 に示す。

各チームで用いた機器や測定条件は異なるため、表 9.1.1 の数値はその優劣を表すものではない。

表 9.1.1 基準信号

試験チーム	基準信号強度 (V)
PTU	0.18
A	0.52
B	1.68
C	2.0
D	2.21
E	2.0
F	6.0
G	3.0
H	2.0

リフトオフ 0mm の時のスリット幅及び長さをパラメータとし変化させた時の検出感度をまとめた結果を図 9.1.2 に示す。長さ 4mm、幅 0.25mm のスリットを基準とし比較すると、スリット幅は長さのパラメータと比較するとその影響は小さいことが確認出来た。スリット長さが短くなるに従い検出感度は大幅に減少することが確認出来た。

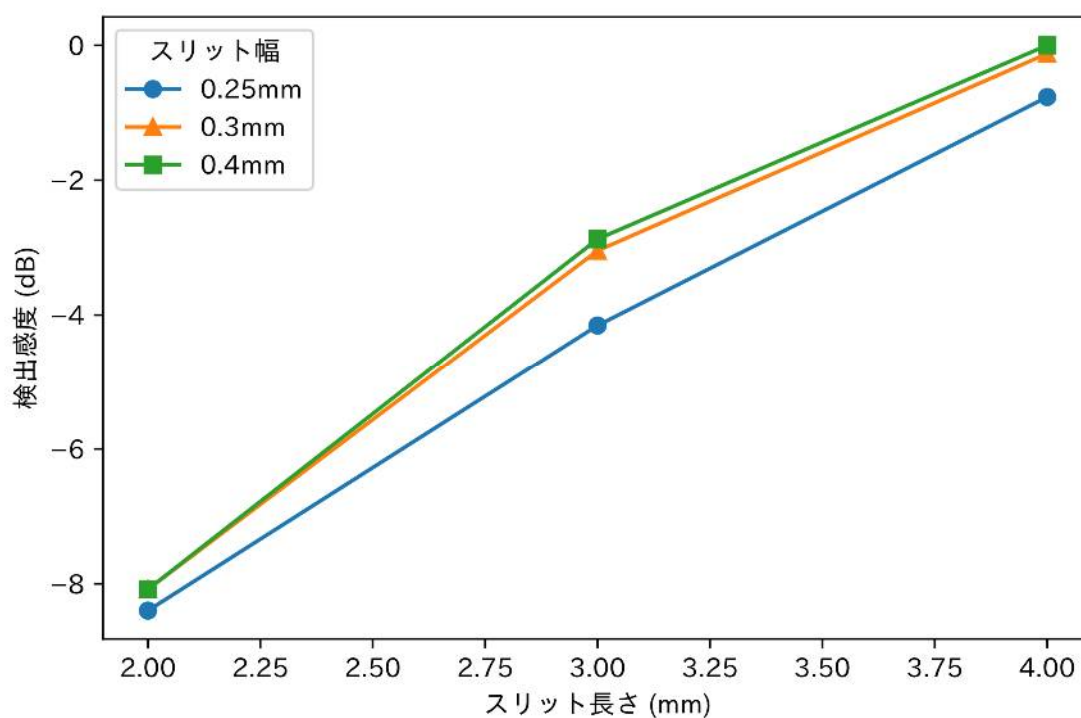


図 9.1.2 スリット長さ及び幅による検出感度の影響 (リフトオフ 0mm、A 社)

9.2 無欠陥部のリフトオフ特性

きず部から十分離れた試験体の無欠陥部にて、プローブを Z 軸方向に動かしリフトオフによる検出信号の変化を測定した。測定チームごとに得られたリフトオフ特性を、図 9.2.1 に示した。この図からは検出信号のベース電圧が変化する程度が基準信号に対して大きいプローブ(PTU、図 9.2.2 参照)と、小さいプローブ(PTU 以外)があることを示している。コーティング厚さの変化による検出信号の変化量が大きい前者はコーティング厚さを評価する機器に適していることを示し、逆に後者はコーティングの厚みの変化の影響を受けにくいことからきずを検出する機器に適していることを示している。

コーティング厚さの変化は検出信号に大きな影響を与えるが、渦電流探傷試験による検出信号には大きさと位相の情報を持ち併せており、平面表示では図 9.2.3 に示すような XY 平面上に出力される。

渦電流探傷ではリフトオフの変化により検出信号が変化するが、リフトオフときずの位相は異なることから、その判別が可能なプローブが存在する。PTU の用いた機器のように、きず信号よりリフトオフ信号の方が大きいプローブであっても、検出信号の絶対値ではなく Y 軸方向成分のみを評価することで、リフトオフ変化がきず評価に与える影響を軽減することが可能である。

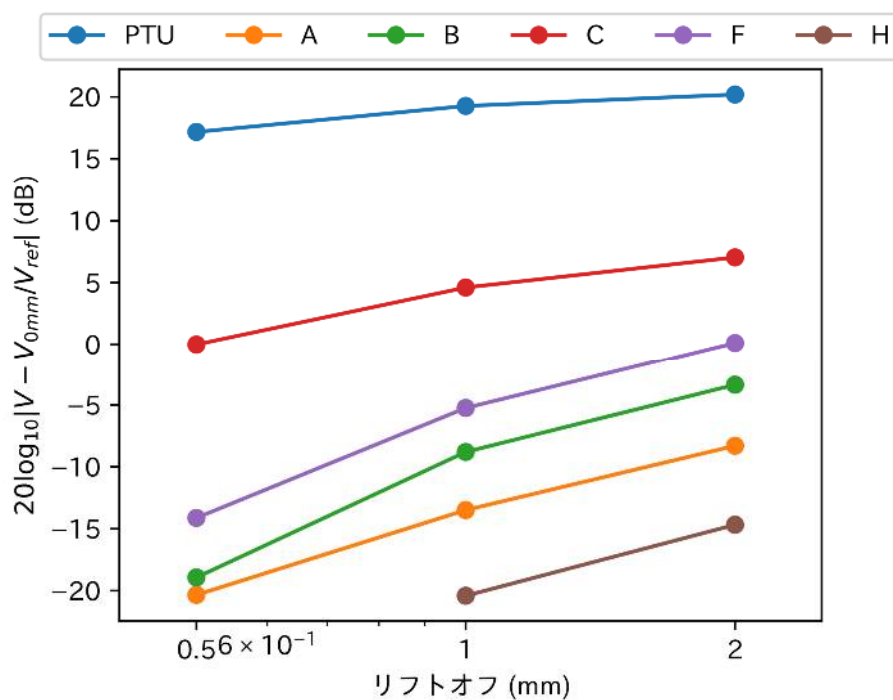


図 9.2.1 無欠陥部のリフトオフ特性

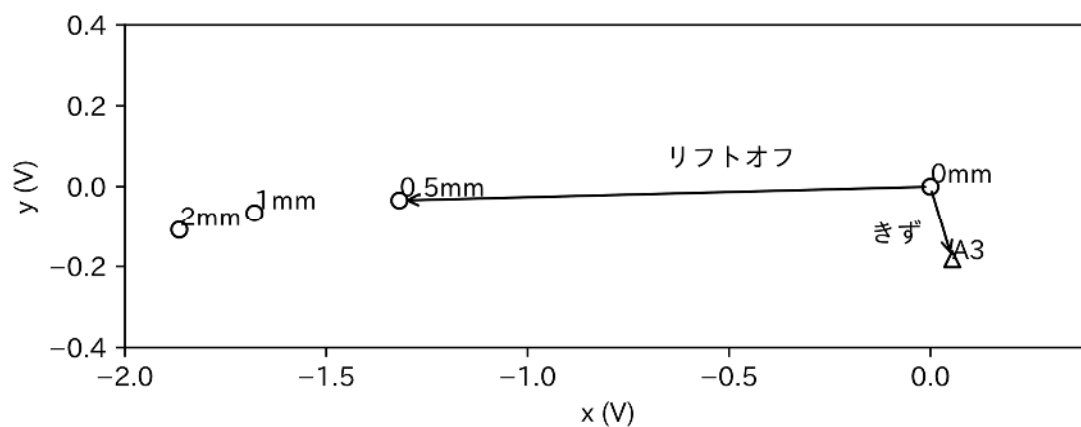
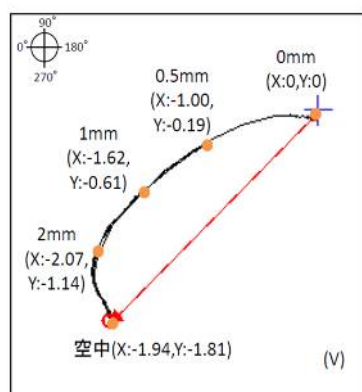
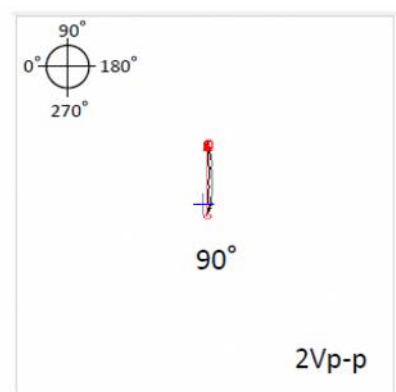


図 9.2.2 渦電流探傷試験の検出信号(PTU)



(a) リフトオフ



(b) 基準きず

図 9.2.3 渦電流探傷試験の検出信号(B 社)

9.3 コーティング材質の出力への影響

渦電流探傷に用いられる標準比較方式のプローブの場合、プローブが試験体表面から離れていると信号が出力される。プローブと試験体表面との距離をリフトオフと言う。

また、試験体にコーティングが施されている場合、リフトオフがあることと同様になるが、コーティング材に磁気的な性質（導電率、透磁率等）があると、単純にリフトオフがある場合とは異なった出力になることが想定される。

本試験では、磁気的な性質を持たないガラスフレークコーティングが施された試験体（S1～S5）による塗膜厚さによる出力の特性が、試験体（S1）の表面とプローブの間にアクリル樹脂製の板を挟んだ時のリフトオフ特性と同じであることを検証するために試験を実施した。

横軸にリフトオフ、縦軸に出力信号の強度を示すと、図 9.3.1 に示すようにリフトオフが大きくなるに従い出力信号強度は低下している。また、信号強度低下の程度は、ガラスフレークコーティングの場合と、アクリル樹脂を挟んだ場合とで同程度である。

したがって、塗膜厚さによる影響は、アクリル樹脂等を挟むことなどでプローブと試験体表面の距離をとることで試験評価することができる。

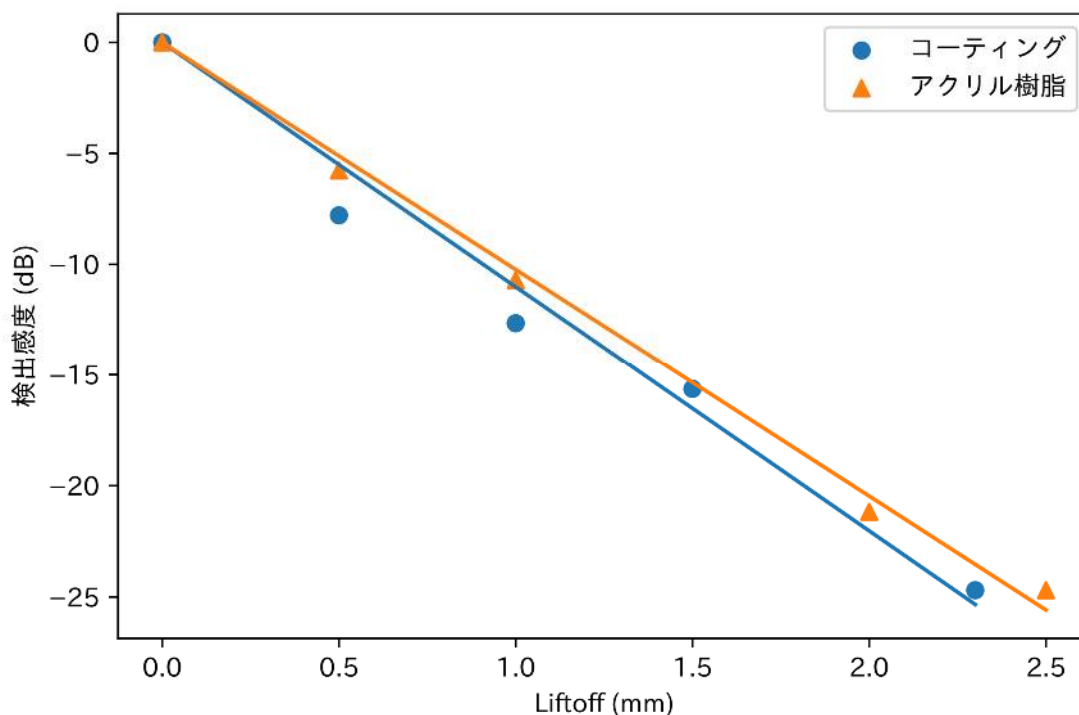


図 9.3.1 コーティング厚さの影響（A 社）

9.4 コーティング厚さ特性

コーティングの厚さによるきずの信号強度の影響を評価する。コーティング厚さはリフトオフと同義であることが 9.3 項で明らかになったことから、コーティング厚さをリフトオフで置き換えてスリット A3 の検出感度を測定した。コーティング厚さが 0mm での検出感度を基準とした測定結果を図 9.4.1 に示す。リフトオフが大きくなるとききずの検出強度が小さくなる。その減衰傾向はプローブによって異なる。

コーティングが施された試験面を探傷し、その出力電圧からきずの検出レベルを超える信号か否かを判別するためには、コーティング厚さを計測した後にきずからの出力信号の大きさを図 9.4.1 に示されるような装置毎に予め採取された厚さ特性値で補正することで可能である。

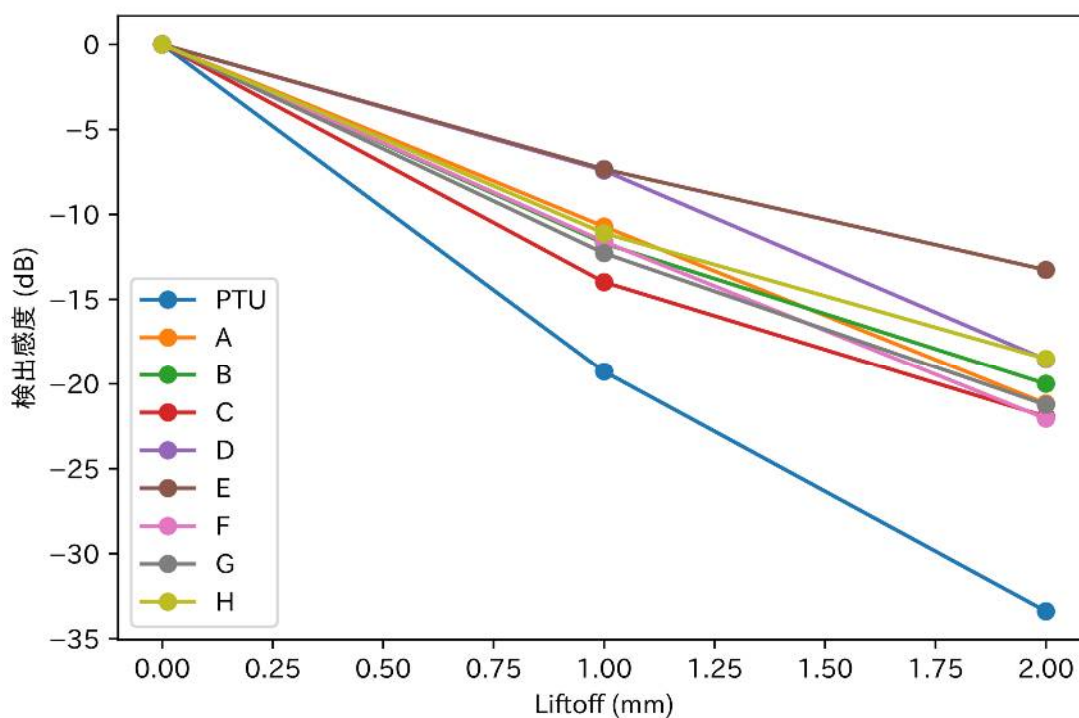


図 9.4.1 コーティング厚さによるスリットの検出特性 (A3: 長さ 4mm)

長さの異なるスリット（A1：長さ 2mm、A2：長さ 3mm、A3：長さ 4mm）で検出感度を確認した結果を、図 9. 4. 2～図 9. 4. 4 に示す。コーティング厚さにおける検出感度の低下の傾きは、同一プローブの場合、長さが異なる 3 種類のスリットとも同程度の結果が得られた。コーティング厚さが既知の場合、スリット長さを評価することが可能であることを示している。

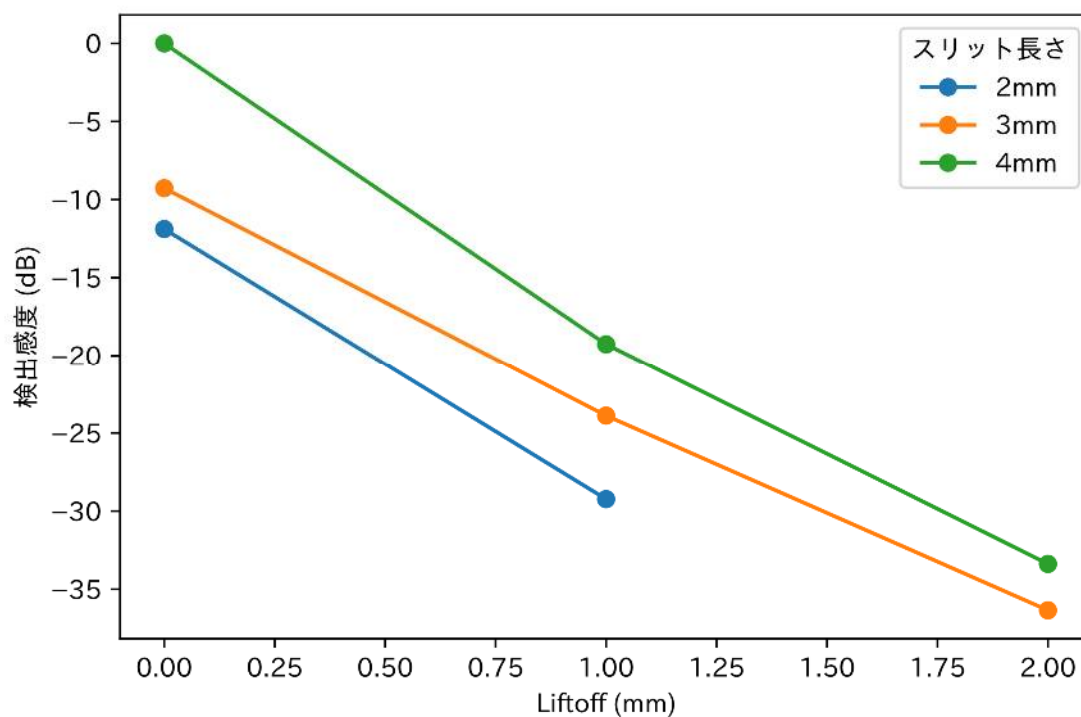


図 9.4.2 コーティング厚さによるスリットの検出特性 (PTU)

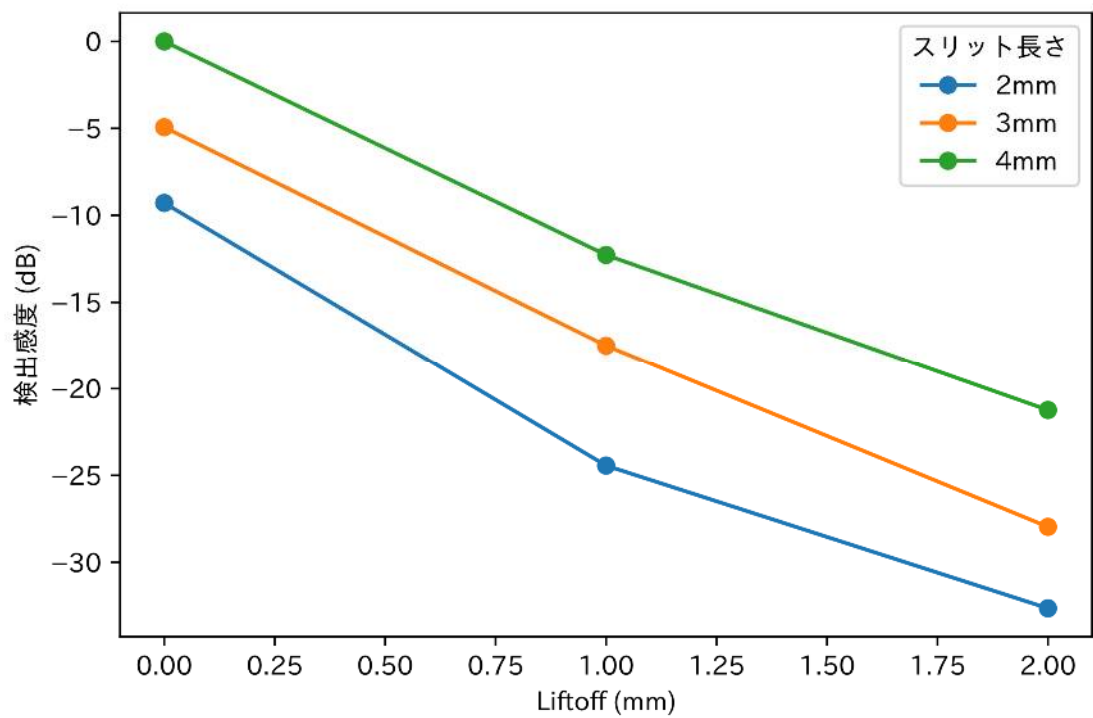


図 9.4.3 コーティング厚さによるスリットの検出特性（スリット長さ、G 社）

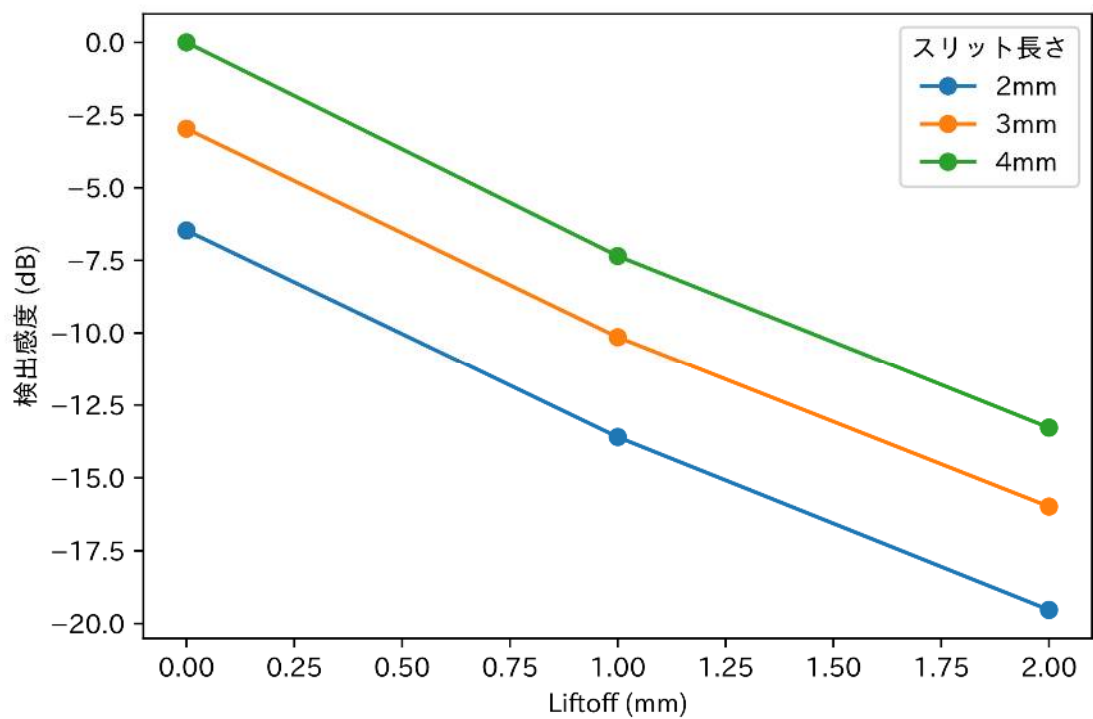


図 9.4.4 コーティング厚さによるスリットの検出特性（スリット長さ、H 社）

9.5 角度感度特性

プローブに対するスリットの角度により図 9.5.1 のように検出感度が変化するプローブが存在する。角度感度特性を持つプローブとスリットの角度が 0° の時を基準にして、 30° 、 45° 、 60° 及び 90° の時の検出感度を図 9.5.2 に示す。それらのプローブにおいてその角度が検出感度に与える影響の程度を確認するために、A3 スリット（長さ 4mm）に対して探傷走査方向を変えて検出感度を測定した。

本報告書で用いたプローブでは、スリットに傾きがある場合、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。

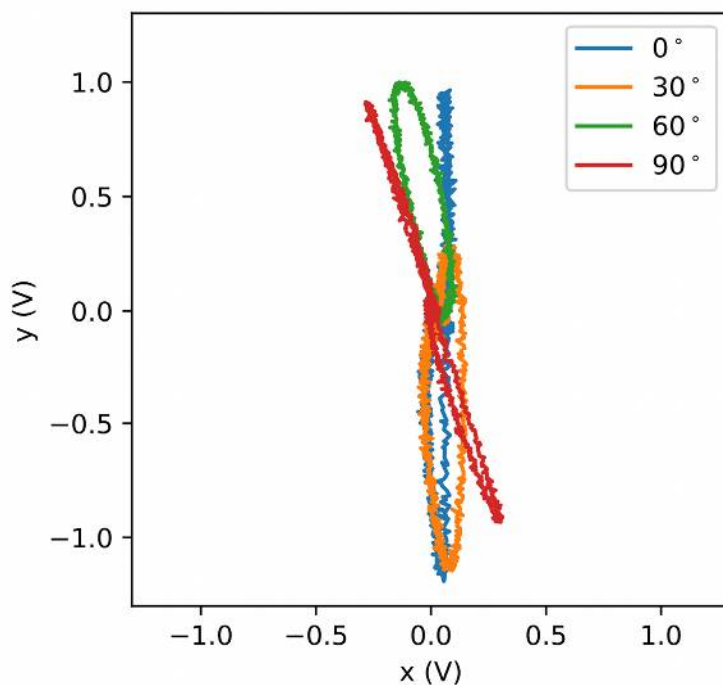


図 9.5.1 リフトオフ 0mm、A3 スリット (H 社)

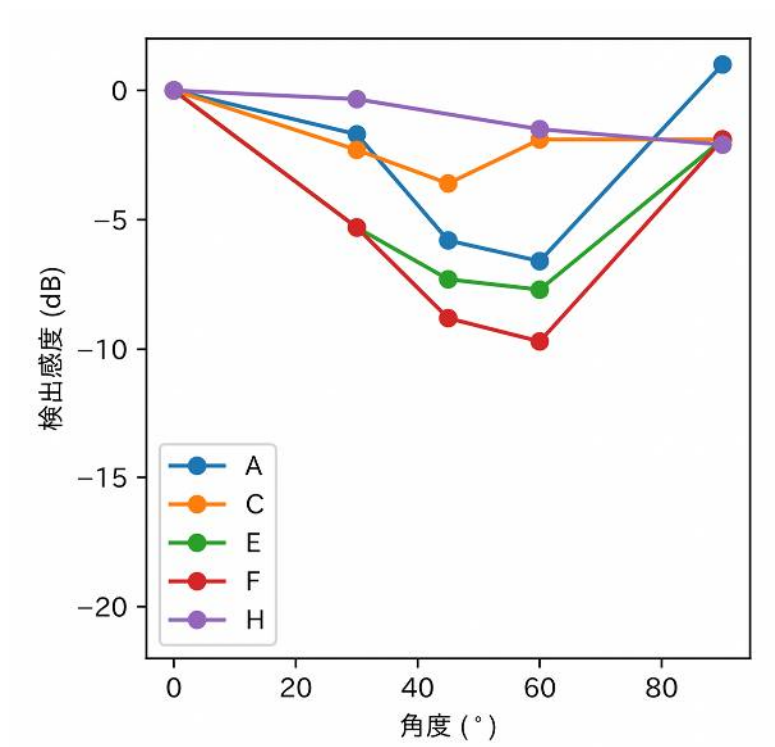


図 9.5.2 角度感度特性

9.6 スリット応答領域

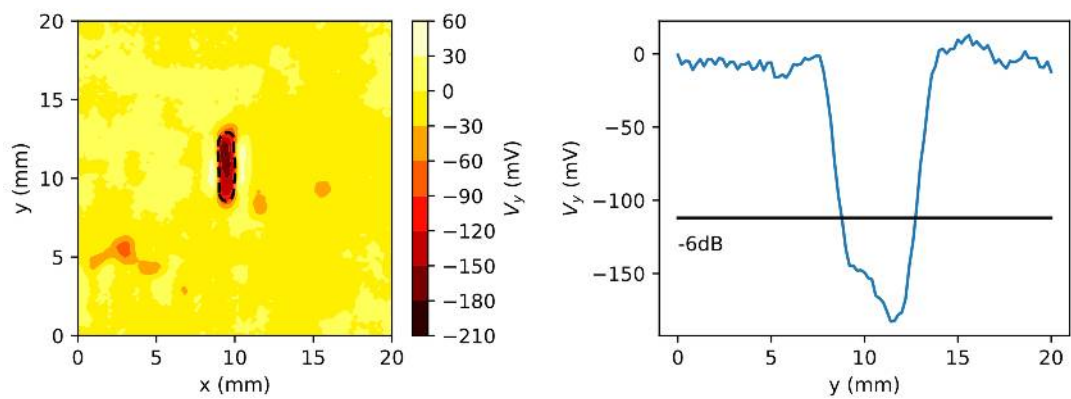
プローブに関する基本的な性能は、日本産業規格 JIS Z 2316-3 : 2014「プローブの特性及び検証」に規定されている。この規定によるスリット応答領域を確認した。スリット応答領域とは、スリットきずのピーク値から-6dB の領域を指す。

図 9.6.1 はシングル方式のプローブを用いたスリット応答領域の長さ測定結果を示す。(a)の破線はピーク値に対して-6dB の領域を示す。破線から内側に包含される領域がスリット応答領域である。シングル方式のプローブはこの図のように検出信号はきず中央付近をピークとした応答領域を示す。図 9.6.1(b)は x 座標が 9.4mm の V_y 電圧を示している。スリット応答領域の y 方向の長さは図 9.6.1(b)から評価することができる。

図 9.6.2 は差動方式プローブのスリット応答領域の長さの測定結果を示す。差動方式のプローブの検出信号はきず両端付近をピークとした応答領域を示し、きず両端付近のピーク間距離がきず長さとはよく一致する結果が得られた。

図 9.6.3 にスリット応答領域(-6dB)の長さの測定結果を示す。用いたプローブにおいては、スリット応答領域の長さときず長さの相関があり、きず応答領域の長さは、実際のきず長さより長かった。差動方式の場合、検出信号のピーク間距離がきず長さとは一致することから、きず長さの推定においてはプローブごとにきず長さ推定方法を設定することが望ましいことを確認した。

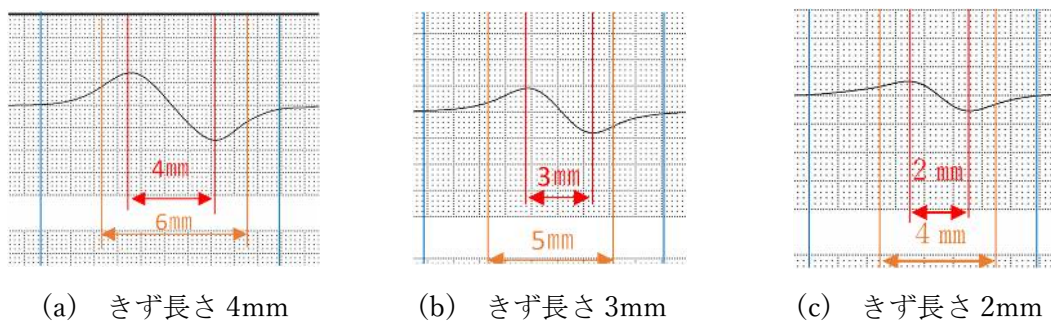
図 9.6.4,5 はリフトオフを 1,2mm としたときの A3 スリット応答領域の測定結果を示している。リフトオフを大きくするときず両端付近に検出信号のピークが現れた。図 9.6.6 はリフトオフごとのスリット応答領域(-6dB)の長さの測定結果を示す。リフトオフが大きいほどスリット応答領域の長さが長くなる傾向を確認できた。



(a) V_y の C スコープ

(b) $x = 9.4\text{mm}$ の V_y 電圧

図 9.6.1 リフトオフ 0mm の A3 スリット応答領域(PTU)



(a) きず長さ 4mm

(b) きず長さ 3mm

(c) きず長さ 2mm

図 9.6.2 リフトオフ 0mm のスリット応答領域(G 社)

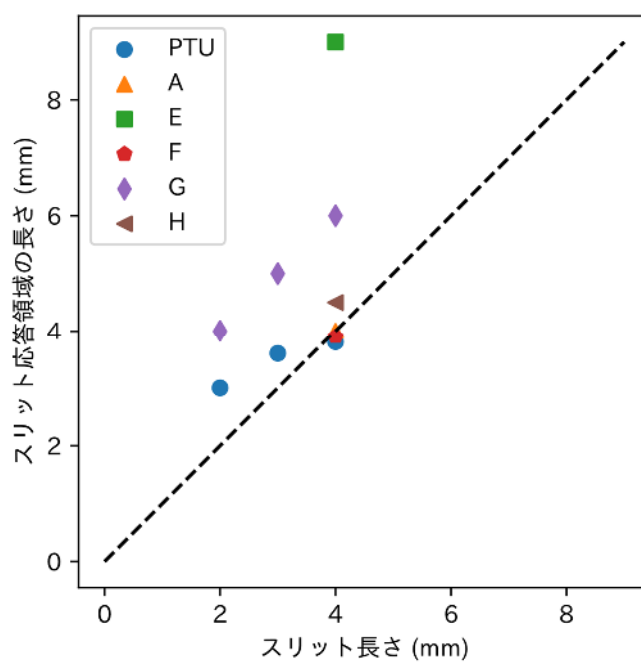
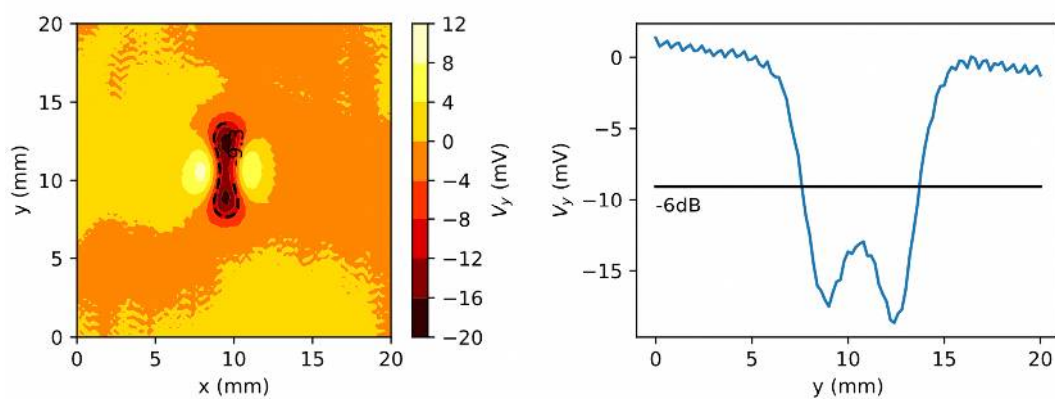


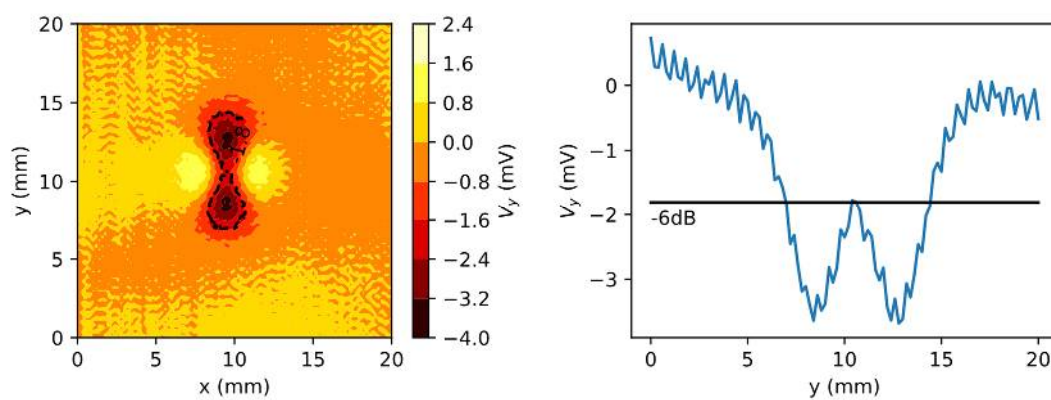
図 9.6.3 リフトオフ 0mm のスリット応答領域の長さ



(a) V_y の C スコープ

(b) $x = 9.4\text{mm}$ の V_y 電圧

図 9.6.4 リフトオフ 1mm の A3 スリット応答領域 (PTU)



(a) V_y の C スコープ

(b) $x = 9.4\text{mm}$ の V_y 電圧

図 9.6.5 リフトオフ 2mm の A3 スリット応答領域 (PTU)

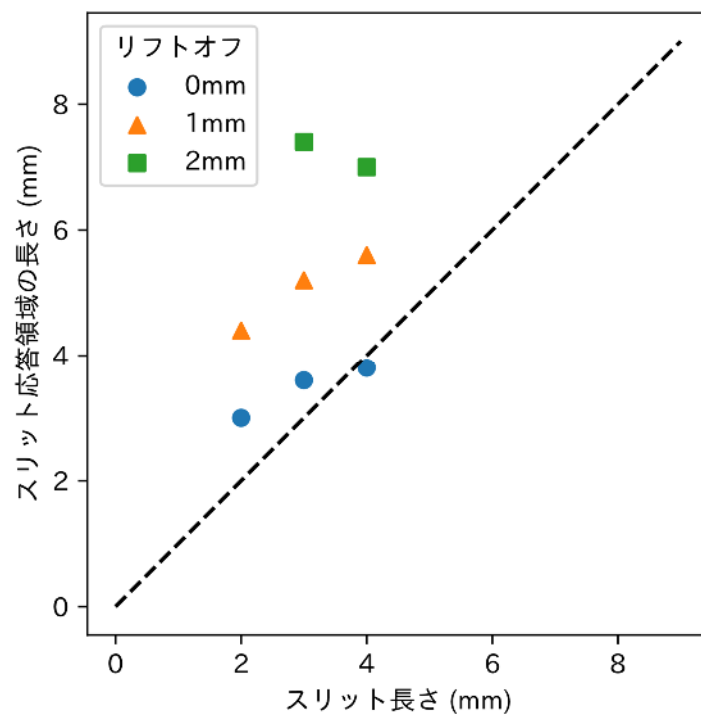


図 9.6.6 スリット応答領域の長さ (PTU)

9.7 自然きずの検出性

10 種類の自然きずを付与した試験片に対し渦電流探傷試験を適用し試験した。その試験結果のうち、例として図 9.7.1～図 9.7.4 に示す。ビード部を平坦に処理した試験体(DEF21)では、図 9.7.1 に示すようにリフトオフ 2mm でもきずの検出が可能であった。きず長さ 25mm に対して、-6dB の応答領域長さはリフトオフ 0mm で 25.4mm、リフトオフ 2mm で 22.2mm であった。ビード部中央にきずを付与した試験体(DEF4)でも、図 9.7.2 に示すようにリフトオフ 2mm でもきずの検出が可能であった。ビード部の淵にきずを付与した試験体(DEF1)では、リフトオフ 0mm ではきずの検出が可能であったが、リフトオフ 1mm では PTU が用いたプローブではきず検出が困難であった。なお PTU が用いたプローブはリフトオフ 0mm に最適化されたプローブである。

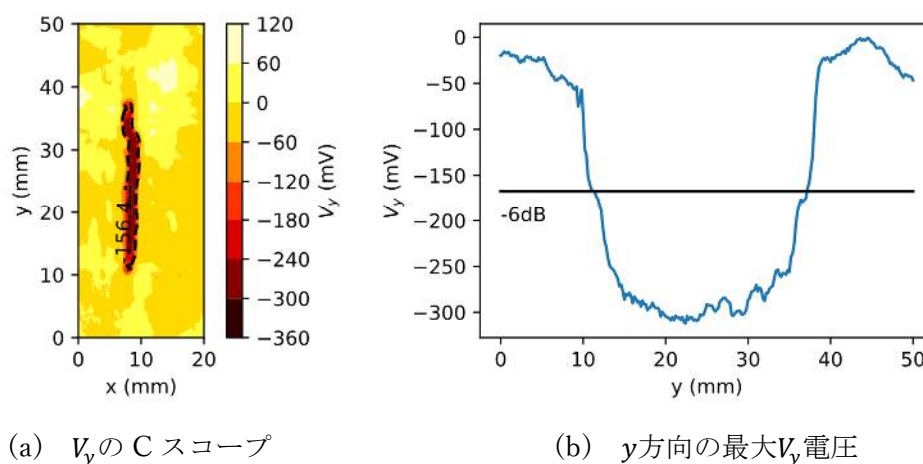


図 9.7.1 自然きずのスリット応答領域(試験体 DEF21, リフトオフ 0mm, 測定者 PTU)

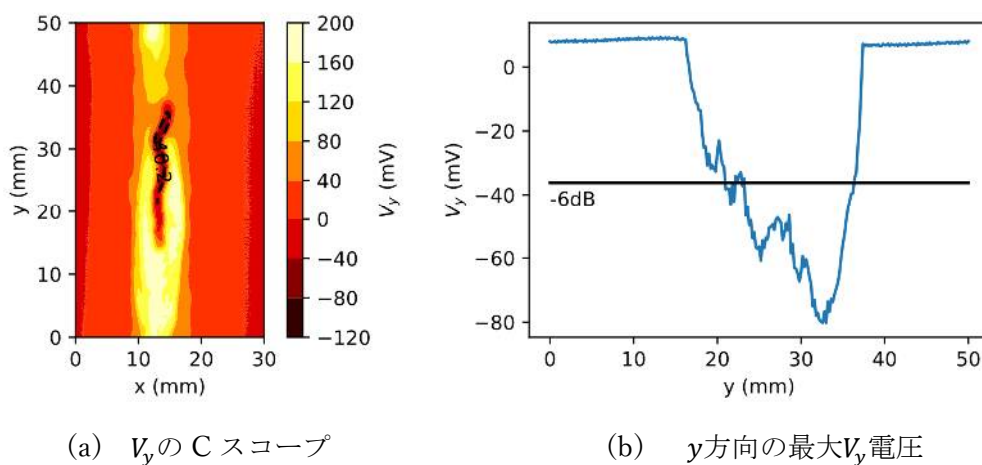
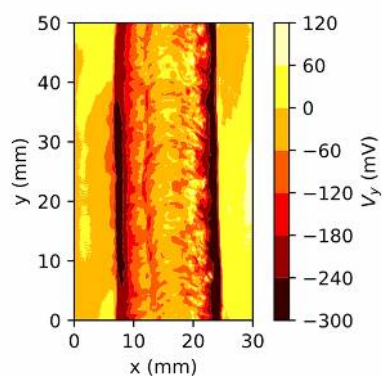
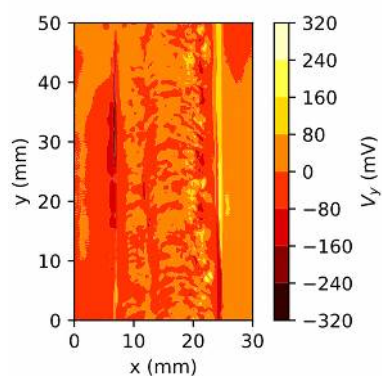


図 9.7.2 自然きずのスリット応答領域(試験体 DEF4, リフトオフ 0mm, 測定者 PTU)

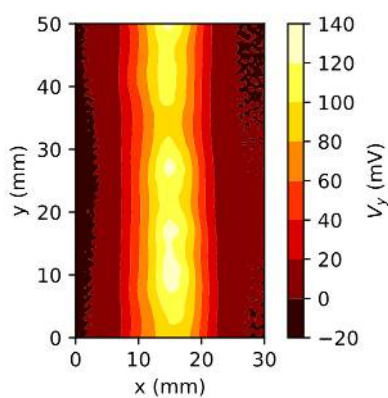


(a) y 方向差分処理なし

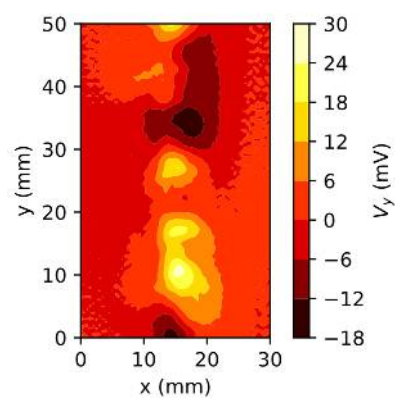


y 方向差分処理あり

図 9.7.3 自然きずのスリット応答領域(試験体 DEF1, リフトオフ 0mm, 測定者 PTU)



(a) y 方向差分処理なし



y 方向差分処理あり

図 9.7.4 自然きずのスリット応答領域(試験体 DEF1, リフトオフ 1mm, 測定者 PTU)

溶接継手に付与された自然きずの検出性を確認した検出感度を図 9.7.5、表 9.7.1 に示す。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。試験体 21(ビード処理あり)及び 4(ビード処理なし、ビード頂上部にきず)はすべてのプローブで基準信号より大きな検出信号を得られた。試験体 1A 及び L21 のようなビードと熱影響部の境界に存在するきずは検出は可能であったが、検出信号は基準信号より小さかった。自然きずの検出性は、コーティングが無い状態では概ね確認出来た。

この図 9.7.5 に対し、「9.4 コーティング厚さ特性」から得られた結果を足し合わせることで、コーティングの厚みに応じたきず検出感度を簡易に見積もることが出来る。コーティングの厚み 2mm においてはきずの検出感度が小さくなり、検出が難しくなることが予想される。

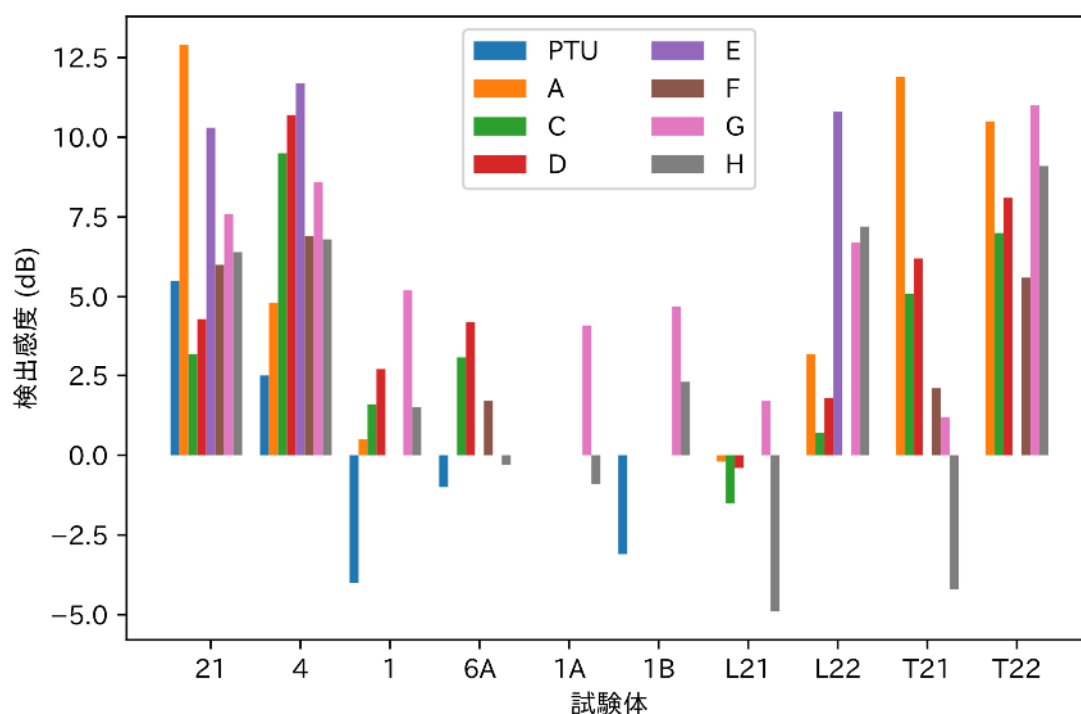


図 9.7.5 自然きずの検出感度

表 9.7.1 自然きずの検出性(ー:未実施)

きず 番号	形状	余盛	きず 性状	長さ (mm)	検出感度(dB)			
					PTU	A	C	D
21	突合継手	無	縦割れ	25	5.5	12.9	3.2	4.3
4	突合継手	有	縦割れ	25	2.5	4.8	9.5	10.7
1	突合継手	有	縦割れ	25	-4.0	0.5	1.6	2.7
6A	突合継手	有	ポロシティ	25	-1.0	ー	3.1	4.2
1A	T 継手	有	縦割れ	25	ー	ー	ー	ー
1B	T 継手	有	縦割れ	25	-3.1	ー	ー	ー
L21	突合継手	有	縦割れ	17	ー	-0.2	-1.5	-0.4
L22	突合継手	有	縦割れ	12	ー	3.2	0.7	1.8
T21	突合継手	有	横割れ	18	ー	11.9	5.1	6.2
T22	突合継手	有	横割れ	20	ー	10.5	7.0	8.1

きず 番号	形状	余盛	きず 性状	長さ (mm)	検出感度 (d B)			
					E	F	G	H
21	突合継手	無	縦割れ	25	10.3	6.0	7.6	6.4
4	突合継手	有	縦割れ	25	11.7	6.9	8.6	6.8
1	突合継手	有	縦割れ	25	ー	ー	5.2	1.5
6A	突合継手	有	ポロシティ	25	ー	1.7	ー	-0.3
1A	T 継手	有	縦割れ	25	ー	ー	4.1	-0.9
1B	T 継手	有	縦割れ	25	ー	ー	4.7	2.3
L21	突合継手	有	縦割れ	17	ー	ー	1.7	-4.9
L22	突合継手	有	縦割れ	12	10.8	ー	6.7	7.2
T21	突合継手	有	横割れ	18	ー	2.1	1.2	-4.2
T22	突合継手	有	横割れ	20	ー	5.6	11.0	9.1

令和4年度実施した結果を見てみると、課題はいくつか残るが概ね良好な結果が得られた。

実運用に向け今後必要となる検査手順を仮に定め、その検査手順（以下、「提案方法」という）を用いて試験を行い課題抽出を行った。

具体的には試験体4（きず番号4）を用いて、以下に示す感度設定及びきずのサイジング方法等を適用し確認した。

- (1) 探傷器の感度設定のための「基準きず」
 - ・ 被試験カ所と同じ材質の母材
 - ・ 放電加工による矩形スリットきず
 - ・ 最大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」 + α

「基準きず」は、試験体製作の再現性及び容易性を考慮し、「試験体 A3、リフトオフ 1mm」を基準きずと仮に設定した。試験体 A3 に付与されたきずの寸法は、長さ 4mm × 深さ 1.5mm × 幅 0.25mm である。

きず判定のための「検出レベル」を「基準きずの検出信号の-6dB」と設定した。これは基準きずの検出信号より小さな自然きずを、安全側に検出することを意図して設定した判定方法と考えている。図 9.7.6 は設定した基準きずの検出信号を示し、検出レベルは-9.7mV であった。

きず長さの推定方法は、応答領域の長さを補正する方法を用いて確認した。補正值 α は、スリット長さの異なるスリットきずの応答長さから得られた。図 9.7.7 はスリット長さの異なるきずのスリット応答長さを示している。スリット応答長さはスリット長さより 2.1mm 長かったことから補正值を α は-2.1mm とした。

目視により割れの開口部を確認し難い試験体4（きず長さ 25mm）に対し、提案方法を適用し確認した。図 9.7.8 にその結果を示す。検出信号の最大値は-85.7mV であり、検出レベルの 8.8 倍であった。応答領域の長さは 20.8mm であったことから、先に求めた補正值を用いてきず長さは 18.7mm と判定した。この結果からすると実際のきず長さより 6.3mm 過小評価したことになる。これは矩形スリットとほぼ開口していない自然きずでは以下のような関係にあることを示唆している。

矩形スリットきず：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

提案した「基準きず」及び「検出レベル」の妥当性については、想定する最小検出きずよりはるかに大きい自然きずを検証に用いたことを留意して評価する必要がある。

きず長さの「サイジング方法」については、設定した基準きずの形状も含めて問題点を抽出することが出来た。基準きずの形状を自然きずにより近づけるか、またはきず長さを短くするなど検討し、安全側に評価されるような基準が必要である。

したがって、提案した基準の妥当性を担保するためには、より詳細な検証が必要である。具体的には「11. 今後の課題」で述べる。

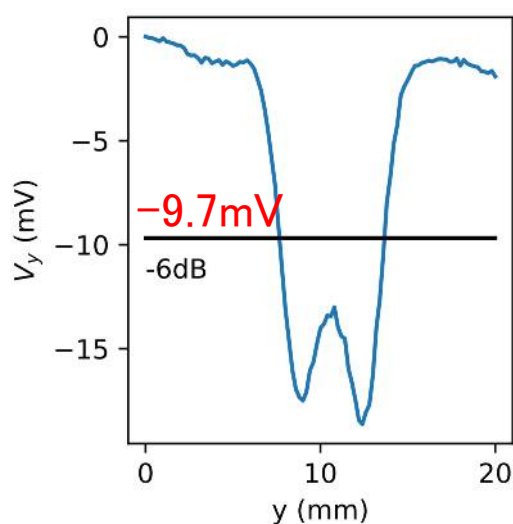


図 9.7.6 基準きずの検出信号
(試験体 A3、リフトオフ 1mm、測定者 PTU)

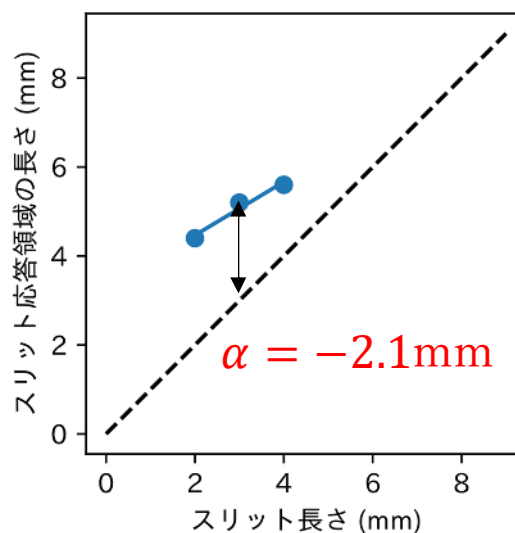


図 9.7.7 スリット応答長さ補正值
(リフトオフ 1mm、測定者 PTU)

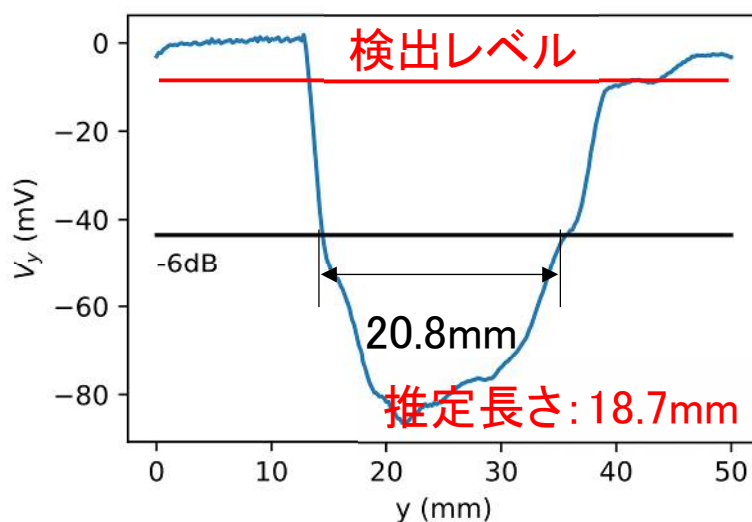


図 9.7.8 試験体 DEF4(きず長さ 25mm)の応答領域の長さ
(リフトオフ 1mm、測定者 PTU)

10 まとめ

令和4年度にて得られた成果を以下に示す。

- (1) 検査手順の中で求められる以下についての案を検討した。
 - ・ 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」
- (2) きず長さ 4mm の検査手順の妥当性を確認するため、溶接部に付与された長さ 25mm の自然きず(割れ)に対して試験した結果、容易に検出することが出来た。、次年度は自然きずの長さを短く加工し、再度確認する。
- (3) 応答領域を用いたきず長さサイジングにおいて、以下の傾向を得られた。
 - ・ 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
- (4) コーティング厚さによって検出感度が変化するため、測定カ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。

11 今後の課題

令和4年度では概ね計画通りに基礎的なデータの採取及び検討を行い、そのなかで課題も多く見つけることが出来た。近い将来、実タンクにおいて実証試験を行うことを計画しているが、以下の事項について試験、検討、評価方法の検討を更に深める必要がある。そこで令和5年度以降も本調査を継続し、実用化を目指していく。

- (1) 対象とする自然きずと同等以下の検出信号を得られる「基準きず」の提案
 - ・ 検出対象とするきずを明確化し、適切な基準きずを提案する。
 - ・ 材質の影響の差異を確認する。
- (2) きず長さ推定方法の提案
 - ・ 「応答領域の長さ」、「ピーク to ピーク間距離」の活用など検討が必要である。
- (3) 異なる溶接継手に対する自然きず試験体に対し、リフトオフ 2mm による検証
 - ・ 重ね継手の検出性の確認等を行い、検証データを積み上げる必要がある。
- (4) 試験材の材質の違いによる検出性の確認を行う必要がある。
など