

(令和5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6年4月

危険物保安技術協会

目次

1. 概要.....	1
2. 経緯.....	1
3. 実施概要.....	2
4. 実施体制およびスケジュール.....	3
4. 1 実施体制.....	3
4. 2 実施スケジュール.....	4
5. シミュレーションによる検出性の検討.....	5
5. 1 シミュレーション1の条件.....	6
5. 2 スリット断面形状の影響.....	10
5. 3 スリット幅の影響.....	15
5. 4 スリット長さの評価.....	16
5. 5 シミュレーション2の条件.....	20
5. 6 数値実験のまとめ.....	25
6. 使用機器.....	26
7. 試験体.....	28
8. 試験方法.....	32
8. 1 材質の影響.....	32
8. 2 溶接余盛の影響.....	32
8. 3 コーティング厚さの影響.....	32
8. 4 きず深さの影響.....	33
8. 5 きず形状の影響.....	33
9. 試験結果.....	34
9. 1 材質の影響.....	34
9. 2 溶接余盛の影響.....	37
9. 3 コーティング厚さの影響.....	43
9. 4 きず深さの影響.....	46
9. 5 きず形状の影響.....	47
10. 渦電流探傷試験の適用方法の検討.....	48
11. まとめ.....	49
12. 課題.....	49
13. 最後に.....	50

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の溶接部検査において、渦電流探傷試験を適用し実施することが可能か調査研究を開始し、令和5年度も継続調査したところである。

本報告書は令和5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。

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、令和5年度も継続調査を実施したところである。

3 実施内容

令和5年度に実施した検出性確認試験では、実際の試験を実施する流れ(図3.1参照)のなかで求められる以下の事項について放電加工による「スリットきず」を用いた検討を行った。

- (1) 探傷器の感度設定方法及び基準
- (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。(装置の新規開発をしない)
- ・ 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。)

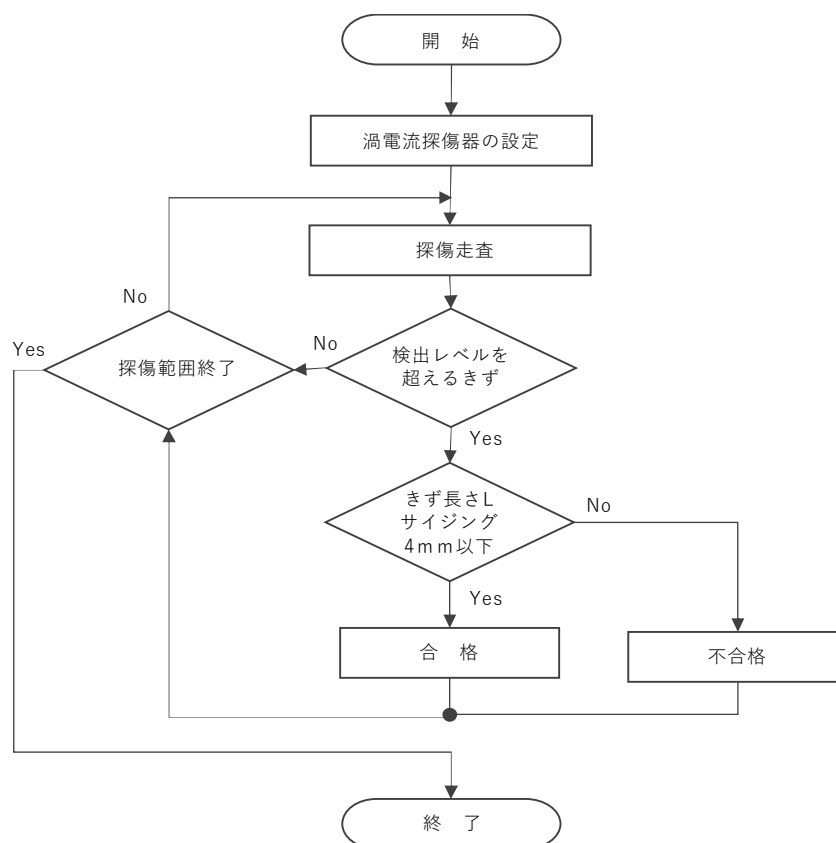


図 3.1 渦電流探傷試験の流れ

4 実施体制およびスケジュール

4.1 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本調査研究を実施した。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、詳細な試験データ採取及び検討を実施した。

危険物保安技術協会

杉山 章	企画部長
松坂 竜男	企画部次長
平野 晃史	企画部調査役
石井 直也	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
	出牛 利重	日本工業検査株式会社
	浦田 幹康	三菱重工業株式会社*1
	塙 晴行	一般社団法人日本非破壊検査工業会
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	株式会社ウイズソル
	深谷 義弘	ダイヤ電子応用株式会社
	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
	木本 三四郎	有限会社テステックス・ジャパン*1
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

*1：2024年2月から参画

4.2 実施スケジュール

主なスケジュールを以下に示す。

2023年9月15日 回送試験開始

2023年11月7日 立合い及び意見交換会（日本検査工業株式会社）

2023年11月22日 立合い及び意見交換会（ダイヤ電子応用株式会社）

2024年2月29日 報告会

5 シミュレーションによる検出性の検討

渦電流探傷試験 (ECT : Eddy Current Testing、以下「ECT」という。) は、自然きず (例えば疲労きず) のような幅が極めて小さいきずを検出することが可能である。ECT を適用する際には、装置の感度を設定するための基準きずを準備する必要がある。基準きずとして重要なことは、再現可能なきずであること、及び、計測器のダイナミックレンジを設定するために基準きずと対象とするきずの検出信号のレンジが大きく異なることである。したがって、検出対象とするきずと同等の形状を基準きずとすることが望ましいが、自然きずを十分な再現性を確保して製作することは技術的に困難である。そこで再現可能なきずを製作できる放電加工を用いた幅 0.25mm~1mm ほどの矩形スリットを基準きずとして一般的に用いられている。一方で自然きずにおいては、矩形スリットによる基準きずよりも一桁以上小さい幅のきずが存在する。

ここでは矩形スリットを基準きずとして用いたとき、基準きずより幅の狭い自然きずが、同等程度の検出信号の大きさであることを確認するため、シミュレーションを用いて試験を実施した。

自然きずの形状は、矩形スリットの形状と異なり深さ方向及び長さ方向に複雑な形状を持つことが予想される。ECT において、きず形状が検出信号に影響を与えることが知られていることから、基準きずの形状を決定するにあたり、きず形状が検出信号に与える影響を確認した。このシミュレーション結果から、基準きずの形状を決定するための情報を抽出し、以下にまとめた。

(1) スリット形状(矩形、円弧等)が検出信号に与える影響

円弧形状(開口部長さ \geq 深さ $\times 2$)を自然きずと仮定し、矩形スリットと円弧スリットの検出信号をシミュレーション上で比較し、きず形状が検出信号に与える影響を確認した。

(2) スリット幅が検出信号に与える影響

放電加工の技術的な制限により、疲労きずのような狭いきず幅のスリットを加工することは困難である。つまり、放電加工スリットのきず幅は疲労きず等の自然きずのきず幅と比較してかなり大きく、シミュレーション上でスリット幅を連続的に変化させ、スリット幅が検出信号に与える影響を確認した。

(3) スリット長さ評価法

ECT の検出信号には、きず長さだけではなく、きず深さ及びきず幅が影響を与える。したがって、検出信号だけでは、きず長さだけを評価することが困難である。検出信号の最大値ときずの長さ方向の検出信号のプロファイルを用いた手法を、後に提案する。

以上の目的を達成するためには、数多くのパラメータを変更したシミュレーションが求められる。各パラメータがきず信号に与える影響を確認するために、2種類の数値解析ソフトによりシミュレーションを実施した。ひとつは、NETGEN/NGSolve（シミュレーション1）とし、もうひとつはJMAG Designer（シミュレーション2）とした。シミュレーション1ではリフトオフを1mmに固定し、各パラメータがきず信号に与える影響を詳細に確認した。シミュレーション2では、代用的なパラメータを用いて各パラメータがきず信号に与える影響を大まかに確認した。

5.1 シミュレーション1の条件

シミュレーション1ではリフトオフを1mmに固定して他のパラメータ(きず断面形状、幅、長さ、及び深さ)の影響を詳細に評価した。それらの結果を5.2～5.4に示す。5.2～5.4で使用したシミュレーション条件を表5.1.1、図5.1.1～図5.1.3に示す。

得られた多くのデータをもとにし、きず長さ推定法の一案を提案した。

表 5.1.1 数値実験パラメータ(シミュレーション1)

項目	詳細
使用ソフトウェア	Negen/NGSolve, Vienna University of Technology
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(2通り)	矩形、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

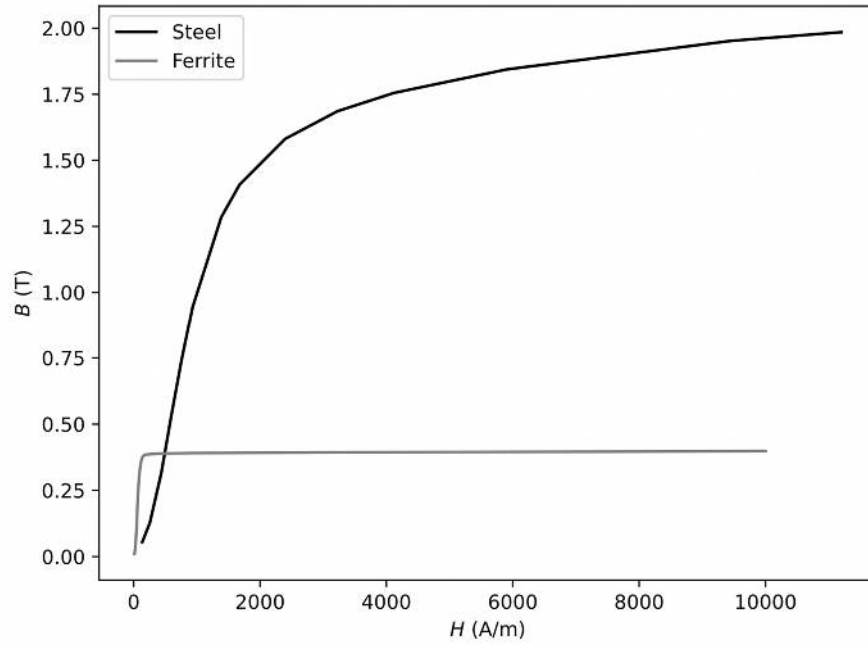


図 5.1.1 使用した BH カーブ(シミュレーション 1)

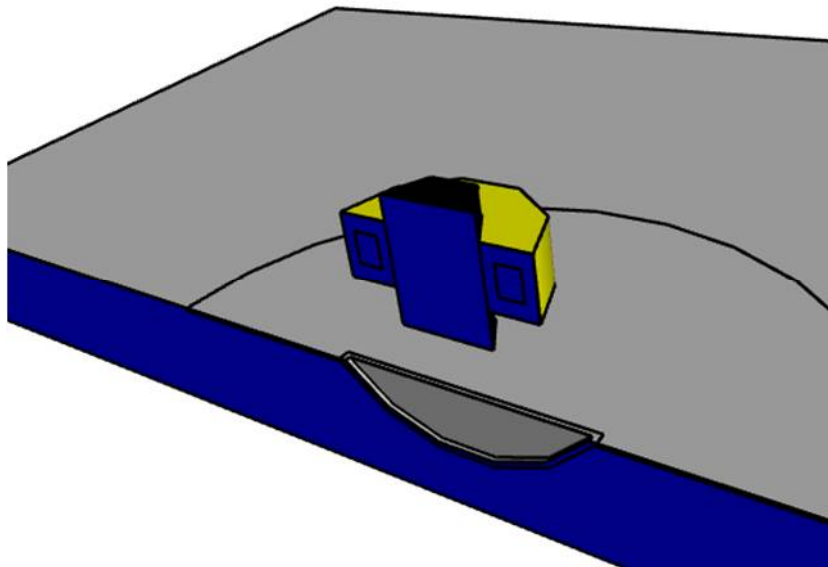
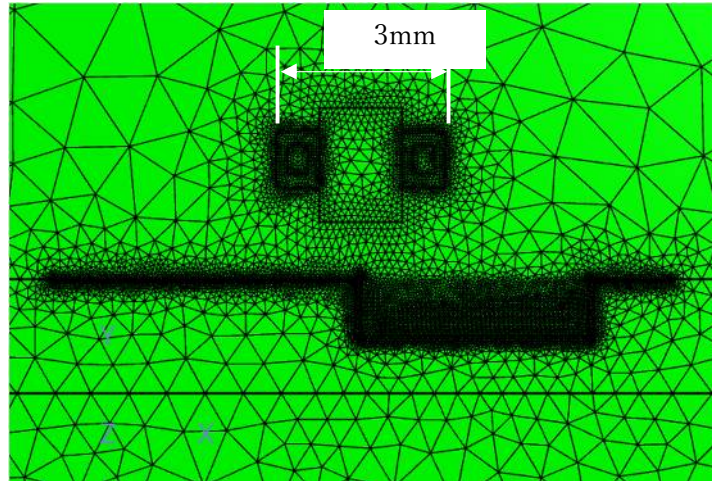
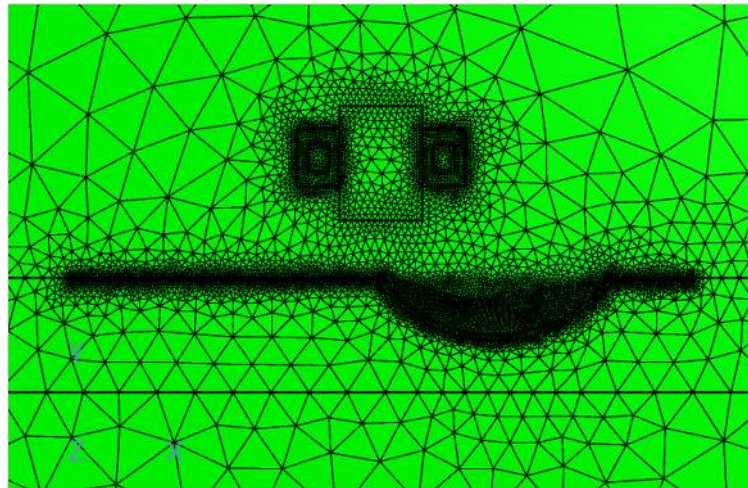


図 5.1.2 数値実験モデル(シミュレーション 1)



(a) 矩形スリット



(b) 円弧スリット

図 5.1.3 使用モデルのスリット断面のメッシュ(シミュレーション1)

5.2 スリット断面形状の影響

自然きずの断面形状は複雑な形状を有しているが、ここでは ECT の検出信号に与える影響についての議論を簡単にするために、矩形スリットおよび円弧スリットの 2 種類のスリット断面形状を設定し、試験体内部の渦電流分布と検出信号のシミュレーションを行い比較した。

図 5.2.1 に数値実験で得られたきず検出信号（きず幅 0.1mm、きず深さ 1mm）を示す。きず長さ、幅および深さが同一であっても、スリット断面形状によってきず検出信号が変化することが確認できる。リフトオフ信号を X 軸マイナス方向に設定した時、きず長さ 4mm の矩形及び円弧スリットのきず信号の振幅を比較すると、円弧スリットの方がきず信号の振幅がおおよそ 1.8 dB 低かった。これは、ほぼ同等の検出性と考えられる。

きず長さ 4mm に対しては、プローブ中心ときず中心が一致した点において検出信号はその両側より小さくなる。一方で、きず長さ 8mm に対しては、プローブ中心ときず中心が一致した点において検出信号が最大値となった。きず長さによって検出信号のプロファイルが複雑に変化していることが確認出来た。この要因を明確にするため、試験体内部の渦電流分布の可視化を試みた。図 5.2.2 および図 5.2.3 にきず長さ 4mm、深さ 1mm、幅 0.1mm の試験体内部の渦電流分布を示す。プローブ中心ときず中心が一致しているとき、きずの両側に電流密度が高い部分が存在していることがわかる。一方で、プローブ中心ときず中心間の距離が 2mm の時、0mm と比較して渦電流が妨げられることがわかる。図 5.2.1 からきず長さ 4mm のとき中心間距離が 2mm 付近で検出信号のピークを取ることから、それが裏付けられる。きず長さがプローブ径より長くなると、中心間距離が 0mm でもきず両側の渦電流が流れにくくなるため、中心間距離が 0mm のときに最も渦電流が流れにくくなり、検出信号は最大値を記録することとなる。つまり図 5.2.4 に示すようにきず長さによってきず周囲の渦電流 (Around flow)、きずによって分割される渦電流 (Separate flow)、きずの下部の渦電流 (Deep flow) の割合が複雑に変化することで、図 5.2.1 に示す複雑な検出信号のプロファイルを示すことが明らかになった。

きず長さ、きず深さおよびきず形状 (矩形・円弧) ごとのきず信号の最大値を図 5.2.5 および図 5.2.6 に示す。基準きずを矩形スリット長さ 4mm×深さ 1.5mm×幅 0.1mm とし、基準スリットに対する検出感度を縦軸にした。きず信号の最大振幅は、きずの深さに依存し、きず信号の最大振幅のみを用いて補修すべききずを判定する場合、きず深さ 1.5mm に満たないきずを区別できないことが、この図から明らかである。

この計算実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 円弧スリットと矩形スリットは、ほぼ同等の検出性である。
- (2) 検出信号の振幅のみによる長さ評価は、偽陽性(安全側の間違い)を避けられない。

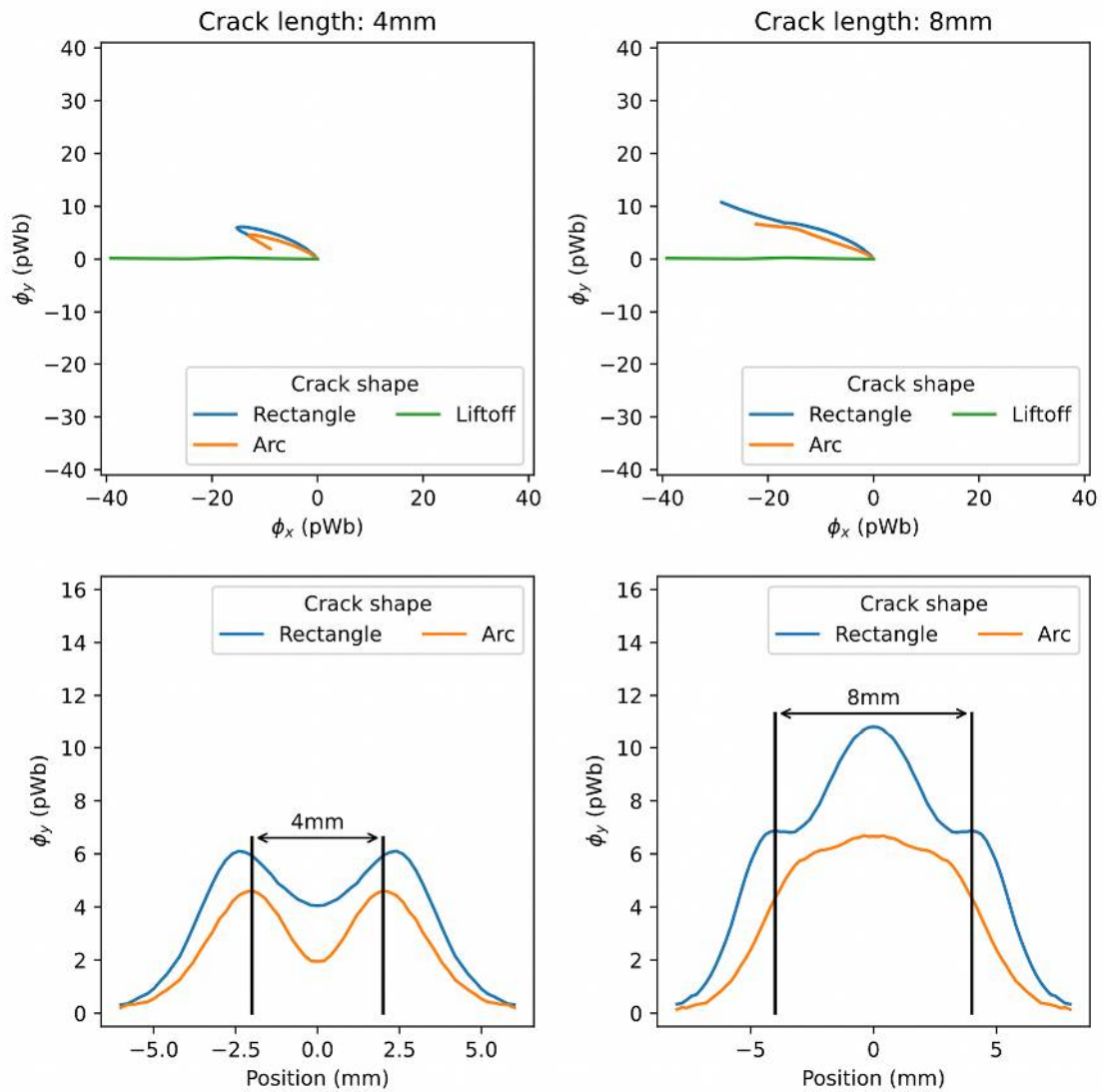
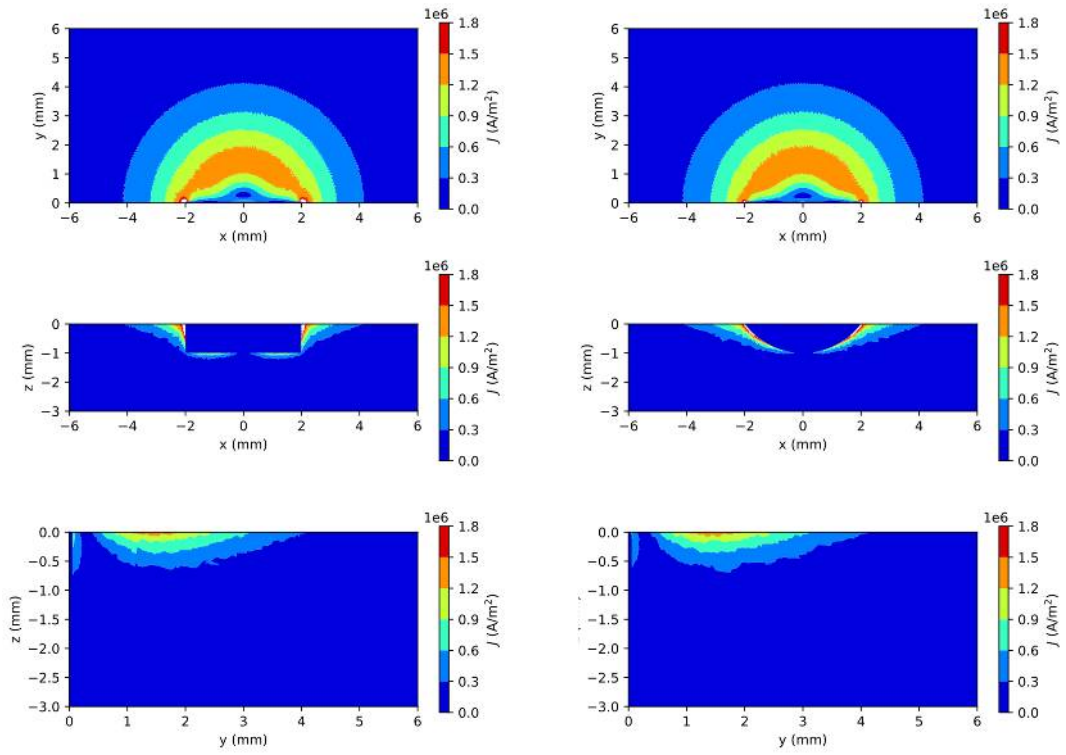


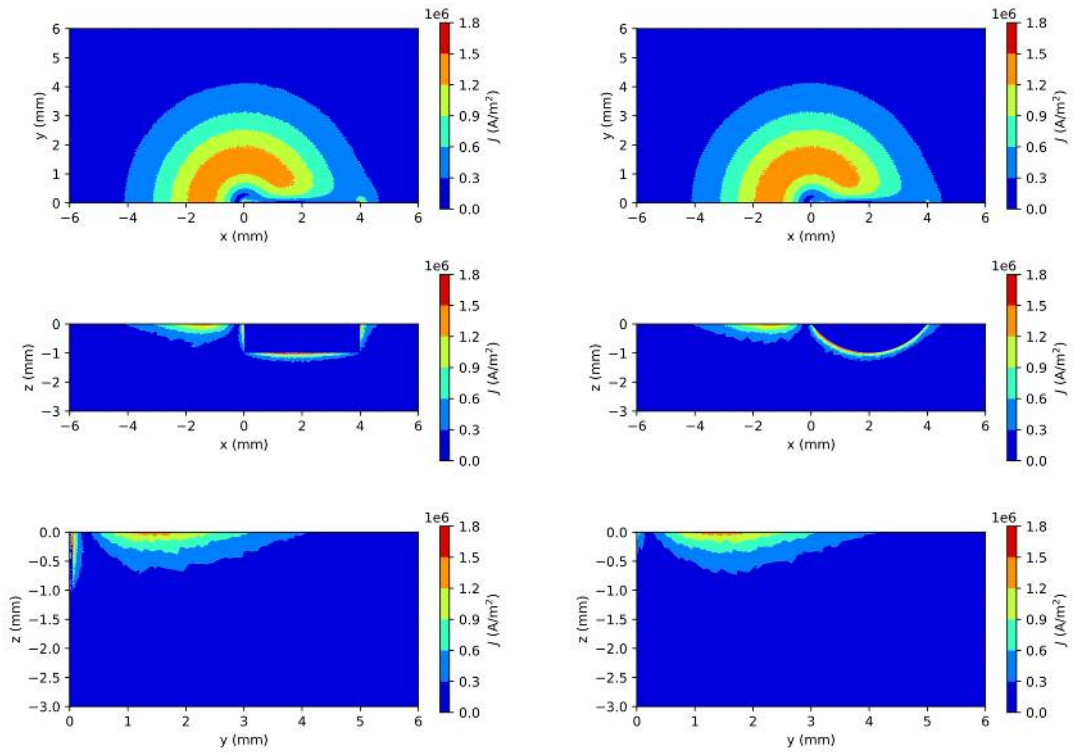
図 5.2.1 数値実験で得られたきず検出信号(きず幅 0.1mm、きず深さ 1mm)



(a) 矩形スリット

(b) 円弧スリット

図 5.2.2 渦電流分布(きず幅 0.1mm、きず深さ 1mm、コイル及びきず相対位置 0mm)



(a) 矩形スリット

(b) 円弧スリット

図 5.2.3 渦電流分布(きず幅 0.1mm、きず深さ 1mm、コイル及びきず相対位置 2mm)

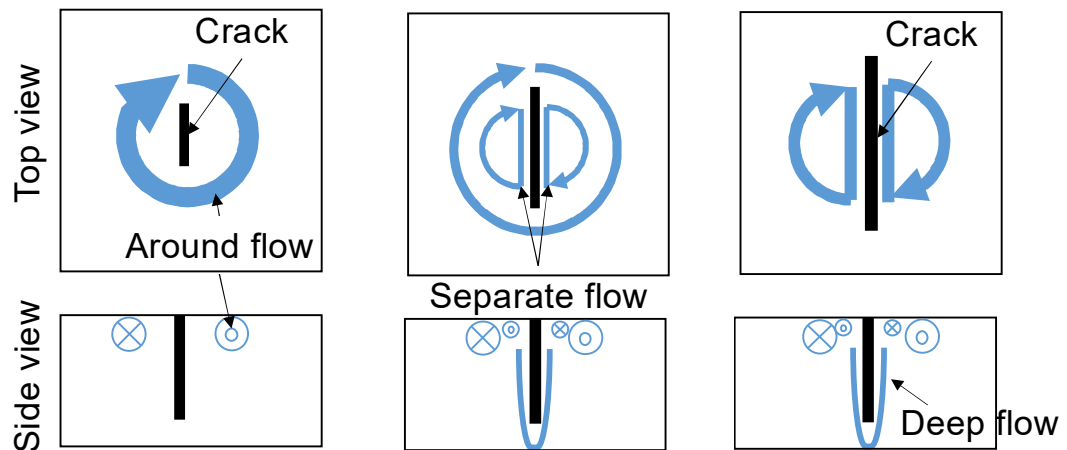


図 5.2.4 導体中の渦電流の流れ

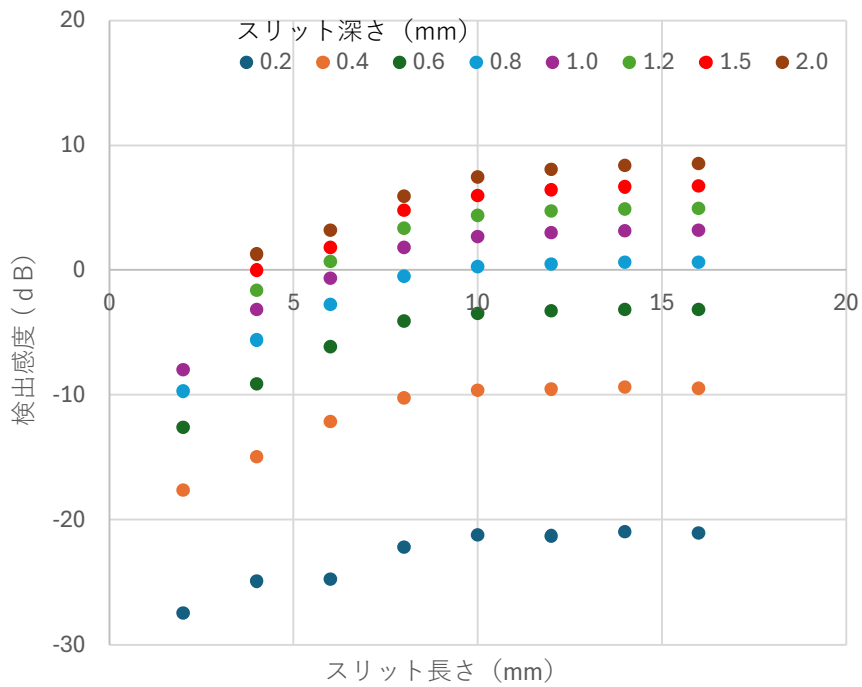


図 5.2.5 矩形スリットの検出信号-きず長さ特性(きず幅 0.1mm)

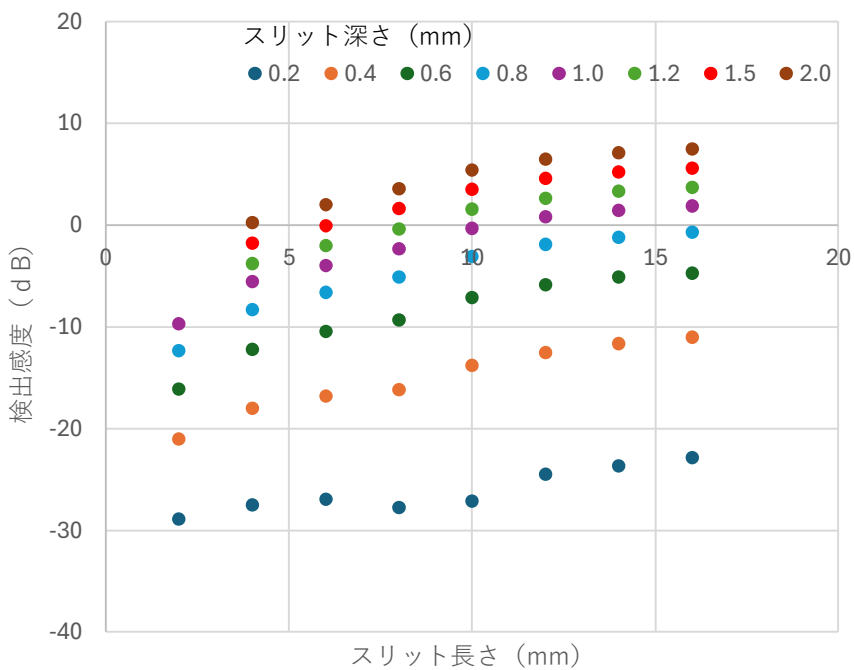


図 5.2.6 円弧スリットの検出信号-きず長さ特性(きず幅 0.1mm)

5.3 スリット幅の影響

ECT で用いられる基準きずには放電加工によって製作されるスリットが用いられる。技術的な制限により、そのスリット幅は疲労きず等の自然きずより明らかに広い。そこでスリット幅が検出信号に与える影響について数値実験により定量化した。図 5.3.1 に矩形スリット、深さ 1mm のときのスリット幅検出特性を示す。この計算実験では検出信号の y 方向成分はスリット幅の影響が十分小さいことが確認できた。

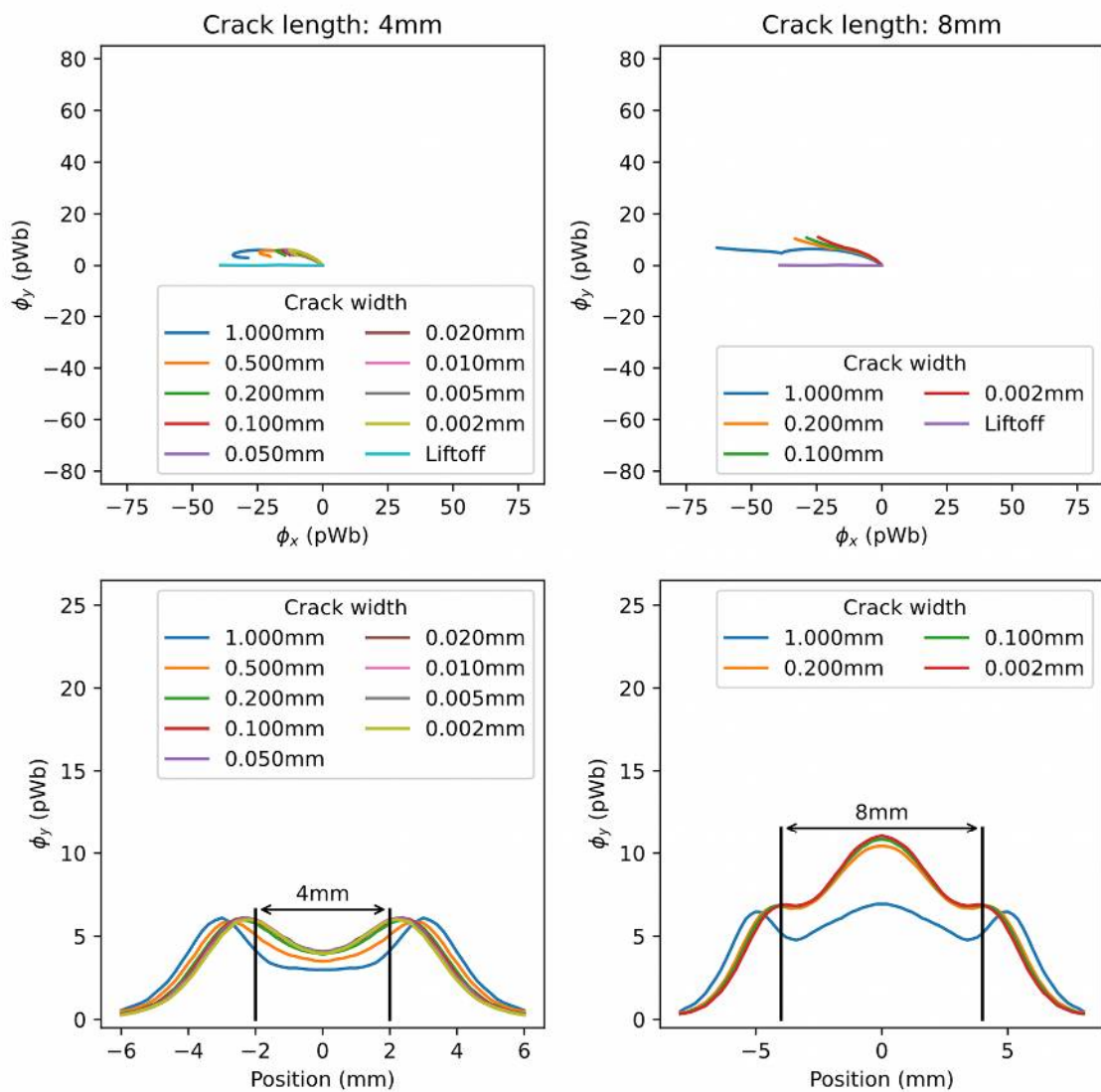


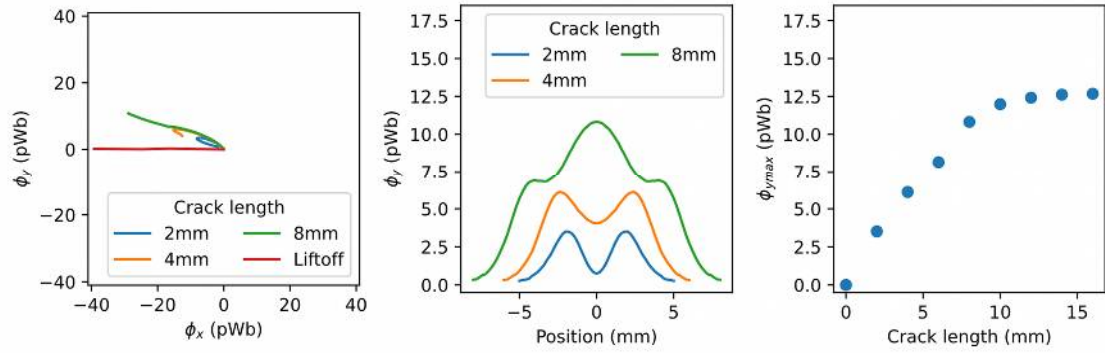
図 5.3.1 スリット幅検出特性(矩形スリット、深さ 1mm)

5.4 スリット長さの評価方法

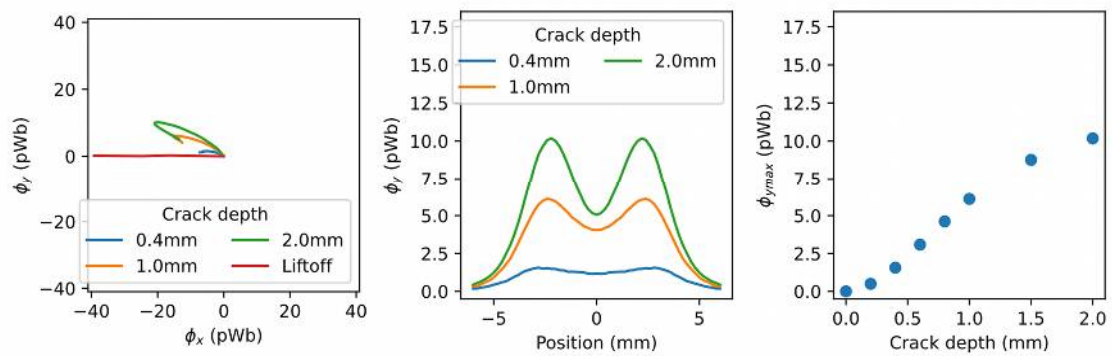
スリット長さの評価方法について数値実験上で検討を行った。図 5.4.1 はきず長さまたは深さを变化させたときの検出信号を示している。きず長さおよび深さがプローブ形状より十分大きくないとき、検出信号の振幅はそれぞれの影響を受けることが確認できる。よって検出信号の振幅のみではきず長さや深さを判別できない。そこで、JIS Z 2316 で定義されている「応答長さ(図 5.4.2)」を導入することで、スリット長さの推定を試みた。

図 5.4.3 は「振幅-きず長さ特性」、図 5.4.4 は「応答長さ-きず長さ特性」を示している。それぞれの図からはきず深さによらずきず長さを推定できないことがわかる。そこで、図 5.4.5 に示す「振幅-応答長さ平面」を定義する。この平面上の任意の点はきず長さや深さを一意に示すことができる。この分布上の複数の点を基準きずとし、基準きずの点間を補完することで任意の点のきず長さや深さを推定することができる。補間に放射規定関数を用いたきず形状推定結果を図 5.4.6 に示す。

上記のきず長さ推定法は基準きずの数が多いほど、推定精度が向上する。しかしながら、きず長さ 4mm×きず深さ 1mm およびきず長さ 4mm×2mm の 2 つ以上の基準きずによって得られる判定曲線を定義することで、きず長さが 4mm を超えていることを評価することが可能であると考えられる。



(a) きず長さ特性(きず深さ 1mm)



(b) きず深さ特性(きず長さ 4mm)

図 5.4.1 スリット幅検出特性(矩形スリット、きず幅 0.1mm)

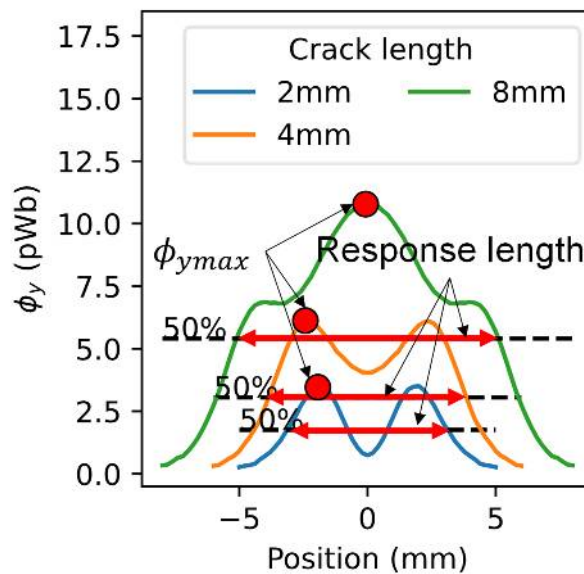


図 5.4.2 検出信号 $\phi_{y,max}$ と応答長さの定義

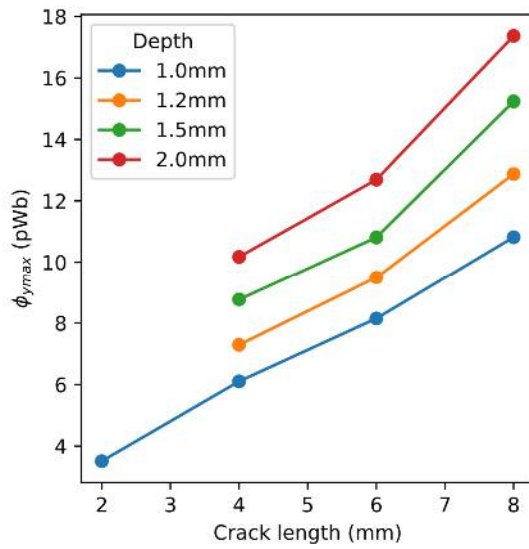


図 5.4.3 振幅-きず長さ特性

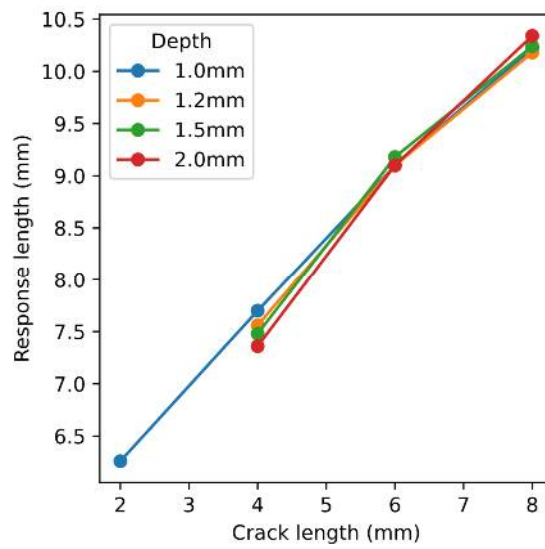


図 5.4.4 応答長さ-きず長さ特性

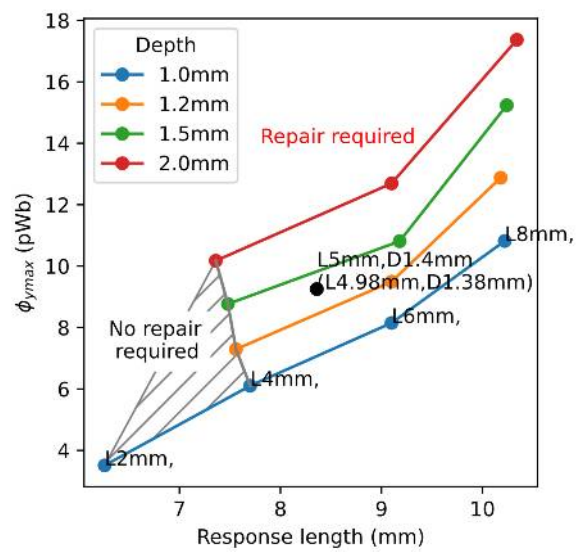
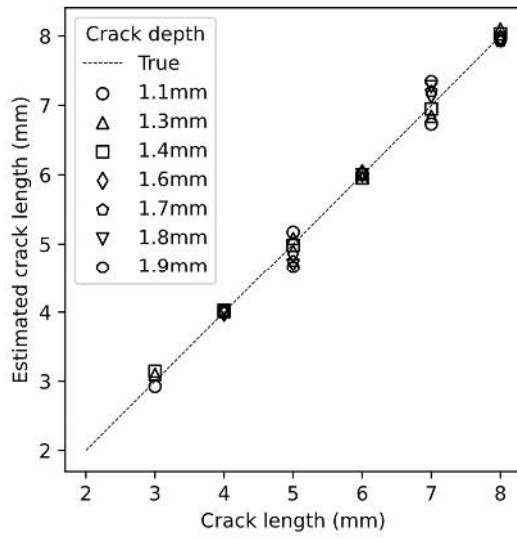
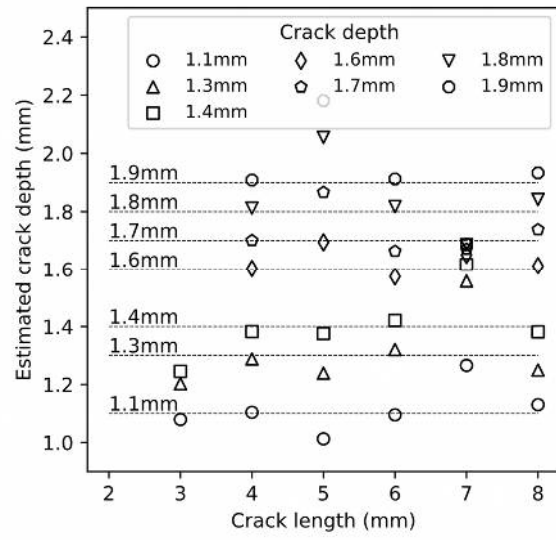


図 5.4.5 振幅-応答長さ平面



(a) きず長さ



(b) きず深さ

図 5.4.6 きず形状推定結果

5.5 シミュレーション 2

ここではパラメータを限定し、きず形状が検出信号に与える影響を定量化した。リフトオフを変化させたシミュレーションは、「シミュレーション 2」のみで行っている。表 5.5.1、図 5.5.1～図 5.5.3 がシミュレーション 2 のシミュレーション条件である。

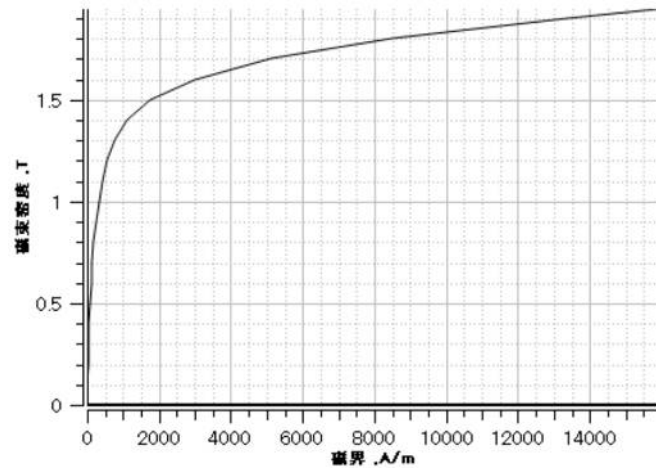
図 5.5.4 はスリット断面が矩形と円弧の検出信号を示している。スリット形状は、きず指示の出方に大きな影響を与えていないことが確認できる。

図 5.5.5 はスリット幅を 0.02～0.25mm まで変化させたときの検出信号を示している。スリット幅が 0.1 mm を超えたあたりから、きず指示の位相特性が大幅に変わっている。

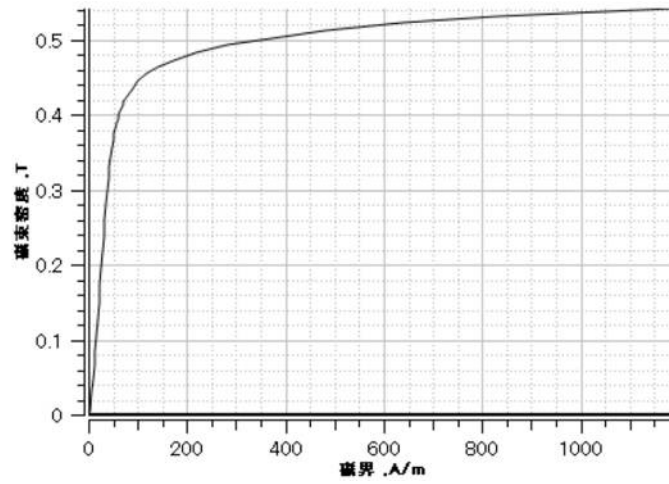
図 5.5.6 はスリット幅を 0.02～0.25mm まで変化させたときの検出信号を示している。リフトオフが増加すると、きず指示の大きさは急速に減少するが、位相特性には大きな影響はない。

表 5.5.1 数値実験パラメータ(シミュレーション 2)

項目	詳細
使用ソフトウェア	JMAG Designer, (株)JSOL
試験体の導電率	5.9×10^6 S/m
フェライトの導電率	0.16 S/m
励磁電流	100 kHz, 100 回巻×10 mA
リフトオフ	0.2, 0.7, 1.2, 2.2 mm
きず形状	長さ : 4mm 形状 : 矩形、円弧 幅 : 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 mm



(a) SS400



(b) JFE フェライト MB3

図 5.5.1 数値実験モデル(シミュレーション 2)

計算条件

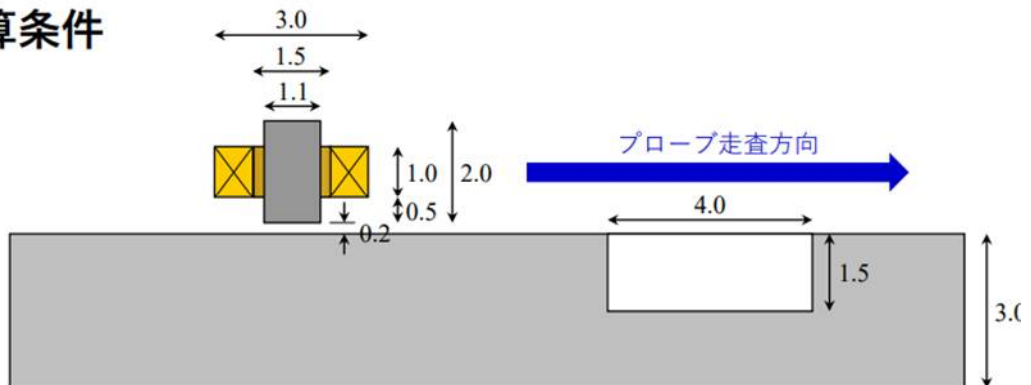
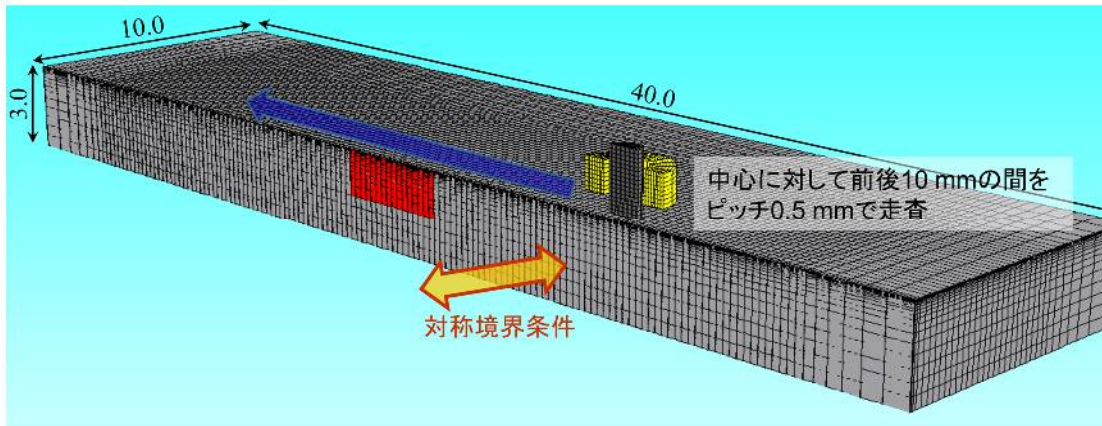
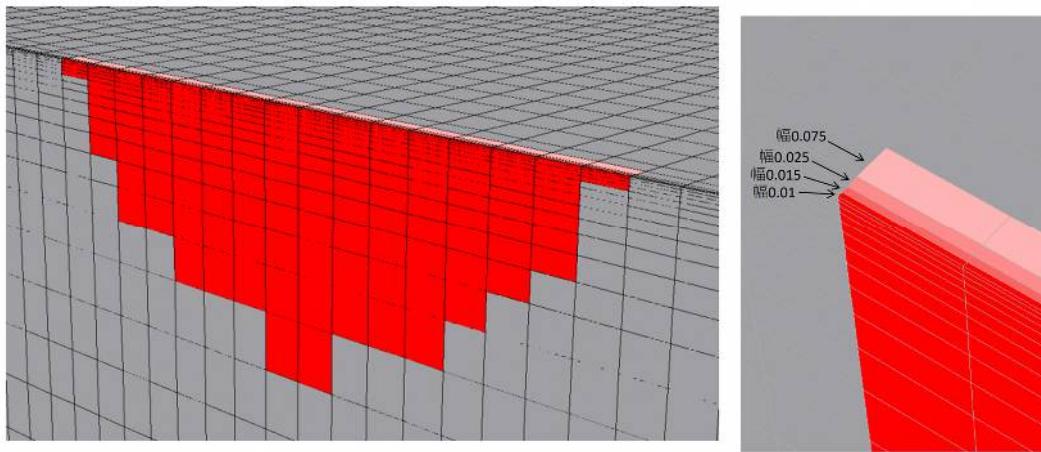


図 5.5.2 数値実験モデル(シミュレーション 2)

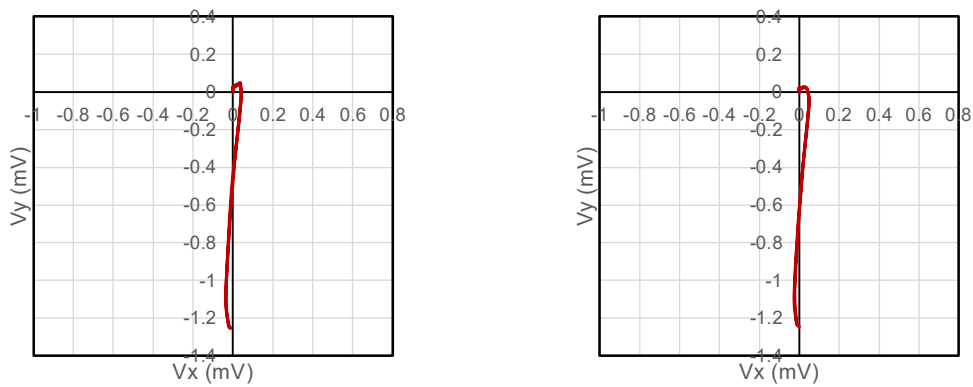


(a) 全体



(b) 円弧きず周辺

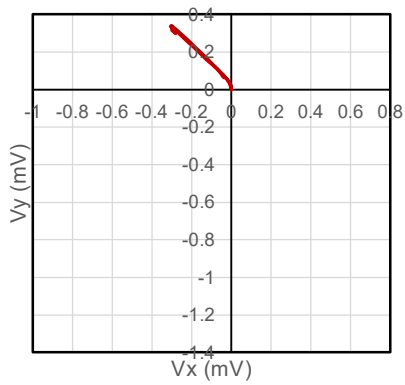
図 5.5.3 使用モデルのメッシュ(シミュレーション 2)



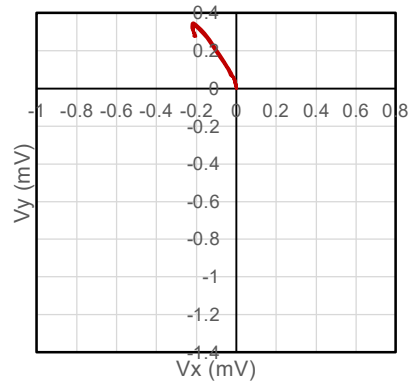
(a) 矩形

(b) 円弧

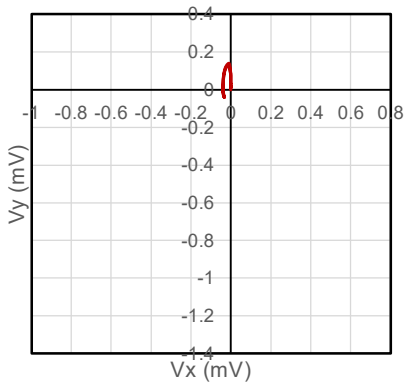
図 5.5.4 スリット形状比較(スリット幅 0.25mm)



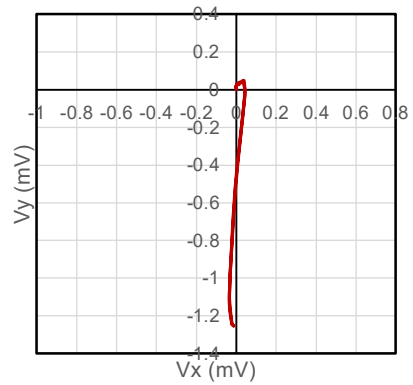
(a) 0.02mm



(b) 0.05mm

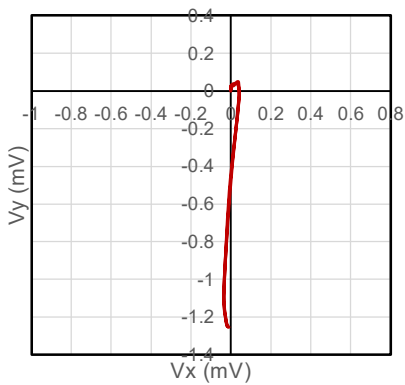


(c) 0.1mm

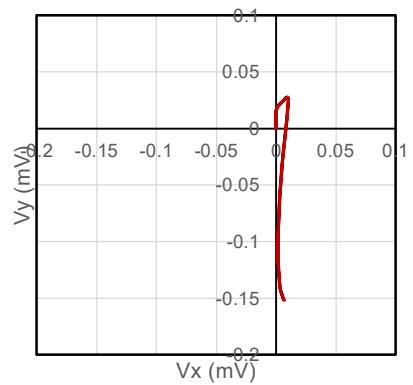


(d) 0.25mm

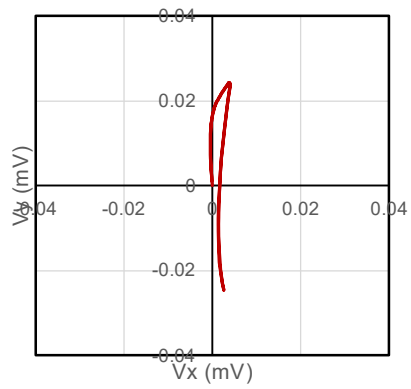
図 5.5.5 スリット幅比較(リフトオフ 0.2mm)



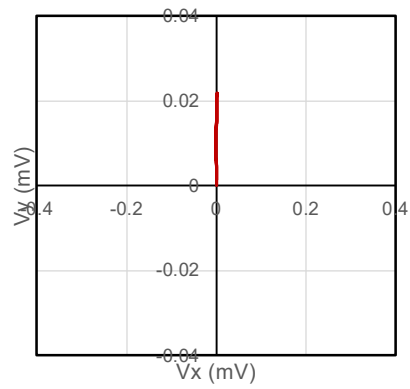
(a) 0.2mm



(b) 0.5mm



(c) 0.12mm



(d) 2.2mm

図 5.5.6 リフトオフ比較(スリット幅 0.25mm)

5.6 数値実験のまとめ

数値実験で得られた知見を以下に示す。

- ・ 円弧スリットは、矩形スリットとほぼ同等の検出感度。
- ・ 自然きずと比較して広い幅を持つ放電加工スリットを基準きずとして用いることは可能である。
- ・ スリット長さ評価方法を提案した。

これらの知見は、図 5.1.3 及び図 5.5.2 に示すパンケーキコイルで構成されたプローブを想定したシミュレーションによって得られた。他のプローブにおいて同様の知見を得られることを保証するものではなく、それぞれシミュレーションを実施して確認する必要がある。

6 使用機器

検出性確認試験は表 6.1 に示すチームが試験体を持回りする回送試験の形式で実施した。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	200 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

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	株式会社 NF 回路設計ブロック	LI5640	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 社	REDDY	Eddyfi 社	I-Flex
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 平板スリット一覧表

番号	形状	材質	コーティング厚さ (μm)	位置	きず性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
S6	平板	SS400	0	平板表面	矩形スリット	4	1.5	0.25
S7	平板	SS400	0	平板表面	矩形スリット	3	1.5	0.25
S8	平板	SS400	0	平板表面	矩形スリット	2	1.5	0.25
S9	平板	SPV490Q	0	平板表面	矩形スリット	4	1.5	0.25※
S10	平板	SPV490Q	0	平板表面	矩形スリット	3	1.5	0.25※
S11	平板	SPV490Q	0	平板表面	矩形スリット	2	1.5	0.25※
S15	平板	SS400	0	平板表面	矩形スリット	4	1.0	0.25※
S16	平板	SS400	0	平板表面	円弧スリット	4	1.5	0.25※

注：S6～S8：2022 年度製作済み、S9～S11：2023 製作予定（支給品）

S15～S16：2023 製作予定（2022.12 見積時より変更追加分・支給品）

表 7.2 溶接部スリット一覧表


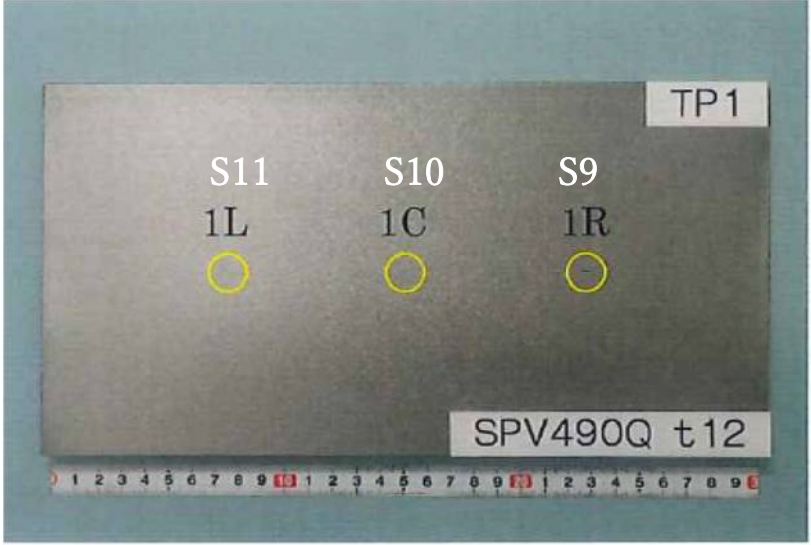
きず番号	形状	溶接方法	コーティング厚さ (μm)	位置	きず性状	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
S12	重ね継手	綺麗な手動	0	溶接止端	矩形スリット	4	1.0	0.25
S13	重ね継手	荒れた手動	0	溶接止端	矩形スリット	4	1.0	0.25
S14	重ね継手	サブマージ 自動	0	溶接止端	矩形スリット	4	1.0	0.25

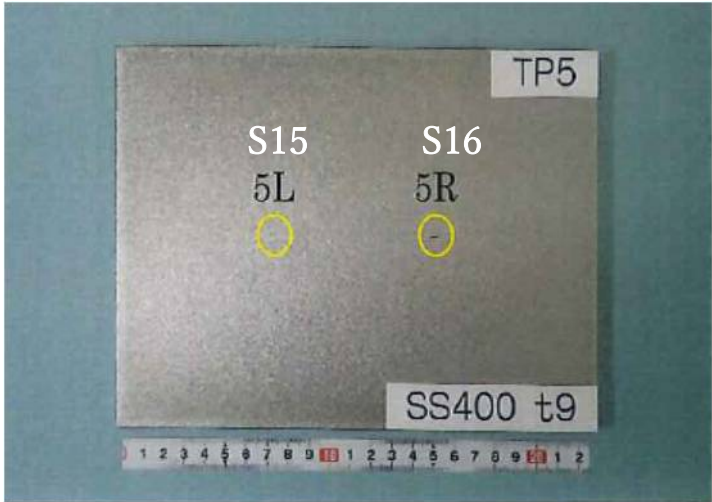

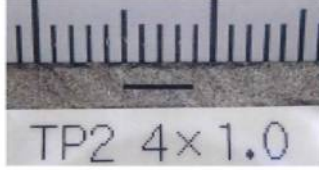
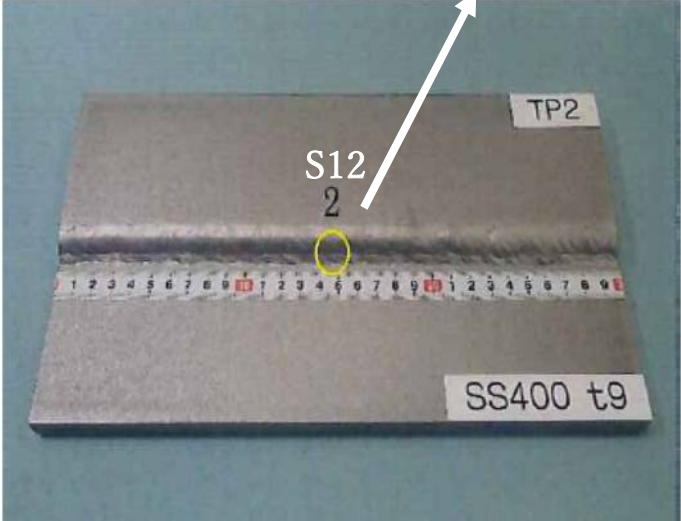
注：S12～S14：2023 年度製作予定（危険物保安技術協会が製作）

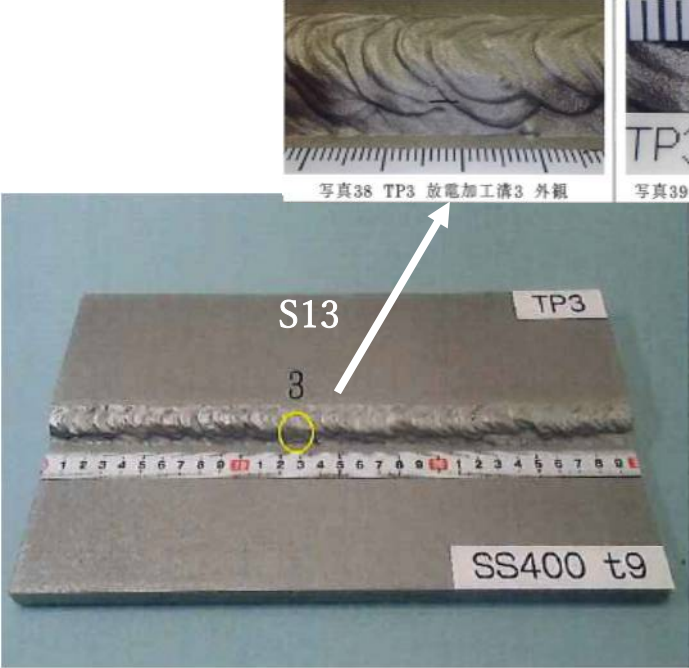
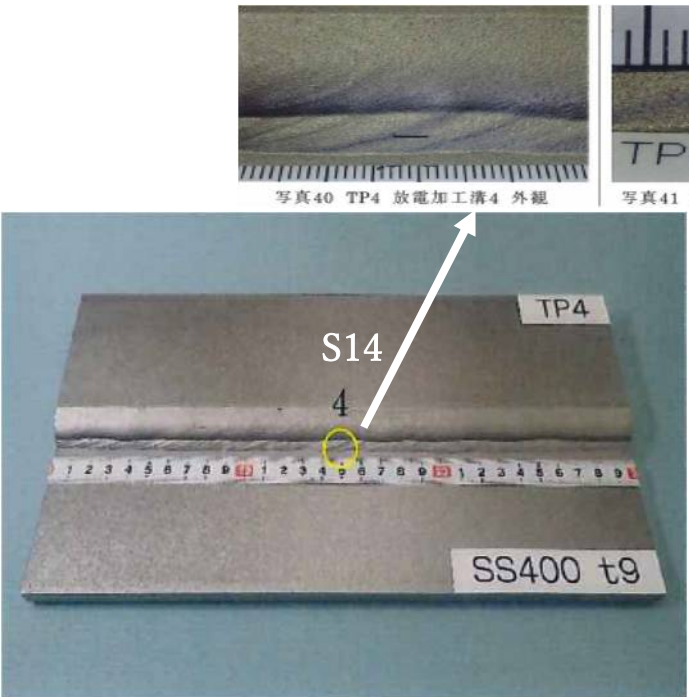
スリット幅は、 $0.25 \pm 0.2\text{mm}$ 程度になる場合がある。

重ね継手に付与するスリットは、加工精度の面から深さ 1mm とする。

表 7.3 回送試験に用いた試験体写真一覧

きず 番号	写 真
<p>S6 S7 S8 S15</p>	
<p>S9 S10 S11</p>	

きず 番号	写 真
S15 S16	
S12	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>写真36 TP2 放電加工溝2 外観</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>写真37 TP2 放電加工溝2 外観(拡大)</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  </div>

きず 番号	写 真
S13	 <p>写真38 TP3 放電加工溝3 外観</p> <p>写真39 TP3 放電加工溝3 外観(拡大)</p> <p>S13</p> <p>TP3</p> <p>3</p> <p>SS400 t9</p>
S14	 <p>写真40 TP4 放電加工溝4 外観</p> <p>写真41 TP4 放電加工溝4 外観(拡大)</p> <p>S14</p> <p>TP4</p> <p>4</p> <p>SS400 t9</p>

8 試験方法

令和4年度に実施した試験に引き続き、渦電流探傷試験による検出性について材質の影響、溶接余盛の影響、コーティング厚さの影響、きず深さの影響、きず形状の影響及びきず幅の影響を検討する。ただし、きず幅の影響については、シミュレーションにより検出性を検討する。また、試験は、一般社団法人日本非破壊検査工業会の会員企業の協力を得て、試験体を回送して実施する回送試験方式で実施した。以下に、試験項目と試験方法を示す。

8.1 材質の影響

- (1) 目的：令和4年度に実施したSS400材に対して、アニュラに多く採用されているSPV490材における検出性を確認する。
- (2) 対象：SS400とSPV490Qに付与した表1に示すスリット(S6～S11)。
- (3) コーティング厚さ：0mm
- (4) 試験：スリット中央部を通り、スリットの長さ方向に走査し、出力を記録する。
- (5) 記録：スリットからの信号振幅を記録する。
- (6) 検討：SS400とSPV490Qの検出感度を比較し、炭素鋼材に対しての検出性を検討する。

8.2 溶接余盛の影響

- (1) 目的：溶接余盛が検出性に与える影響を確認する。
- (2) 対象：重ね継手の止端部に付与した表2に示すスリット(S12～S14)。
- (3) コーティング厚さ：0mm
- (4) 試験：スリット中央部を通り、スリットの長さ方向に走査し、出力を記録する。
- (5) 記録：スリットからの信号振幅を記録する。
- (6) 検討：溶接余盛の形状が及ぼす検出感度を検討する。

8.3 コーティング厚さの影響

- (1) 目的：重ね継手においてコーティングの厚さが検出性に与える影響を確認する。
- (2) 対象：重ね継手の止端部に付与した表2に示すスリット(S12～S14)。
- (3) コーティング厚さ：0mm、500 μ m、1000 μ m、1500 μ m、2000 μ m。
- (4) 試験：コーティング厚さを模したテープ等を被せて、スリット中央部を通り、スリットの長さ方向に走査し、出力を記録する。
- (5) 記録：スリットからの信号振幅を記録する。

- (6) 検討：コーティング厚さと検出感度の関係を検討する。

8.4 きず深さの影響

- (1) 目的：きずの深さが検出性に与える影響を確認する。
- (2) 対象：平板に付与した表 1 に示す S6 (1.5mm) と S15 (1.0mm) スリット。
- (3) コーティング厚さ：0mm
- (4) 試験：スリット中央部を通り、スリットの長さ方向に走査し、出力を記録する。
- (5) 記録：スリットからの信号振幅を記録する。
- (6) 検討：スリット深さ 1.5mm と 1.0mm での検出感度を検討する。

8.5 きず形状の影響

- (1) 目的：割れの形状を円弧でモデル化した場合、きずの形状が検出性及び長さ測定に与える影響を確認する。
- (2) 対象：平板に付与した表 1 に示す S6 (矩形) と S16 (円弧) スリット。
- (3) コーティング厚さ：0mm
- (4) 試験：スリット中央部を通り、スリットの長さ方向に走査し、出力を記録する。
- (5) 記録：スリットからの信号振幅と座標位置を記録する。
- (6) 検討：スリット形状として矩形と円弧での検出感度を比較検討するとともに、きず長さ測定に及ぼす影響を検討する。

9 試験結果

9.1 材質の影響

令和4年度試験の対象としたSS400材に対して、アニュラに多く採用されているSPV490材における検出性を確認した。

回送試験で実施した9チームの個別試験結果を図9.1.1～図9.1.9に示す。SS400材の平板に付与した長さ4mm×深さ1.5mmのスリット(S6)を検出した感度を基準(0dB)として、SS400材の長さ3mm(S7)、長さ2mm(S8)のスリットの検出感度を青色で表示している。また、SPV490Q材に付与した長さ4mm(S9)、長さ3mm(S10)、長さ2mm(S11)スリットの検出感度を赤色で示す。

スリットの長さが小さくなると、各社ともに検出感度が低下するが、その感度低下の程度は探傷装置とコイル仕様等によって異なる。

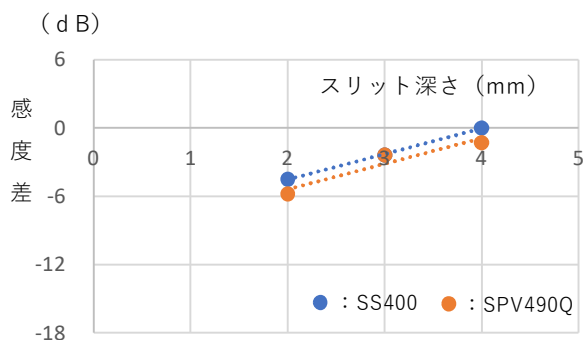


図9.1.1 材質の影響 (PTU)

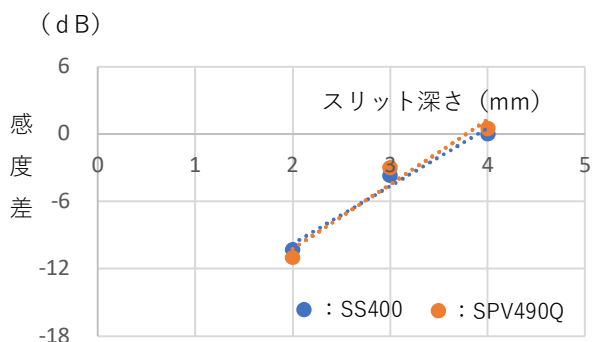


図9.1.2 材質の影響 (A)

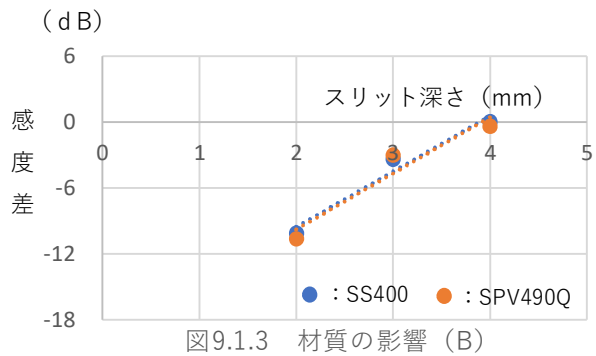


図9.1.3 材質の影響 (B)

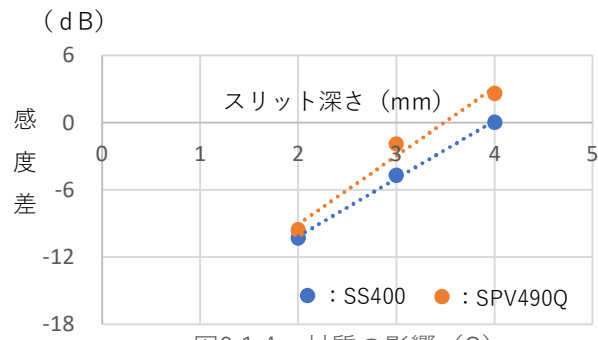


図9.1.4 材質の影響 (C)



図9.1.5 材質の影響 (D)

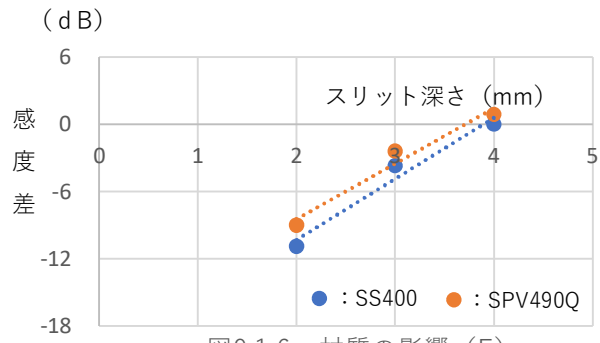


図9.1.6 材質の影響 (E)

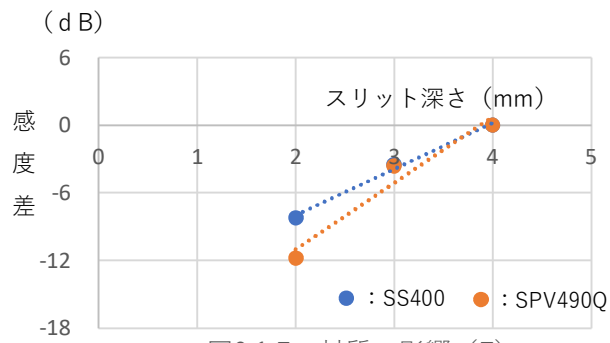


図9.1.7 材質の影響 (F)

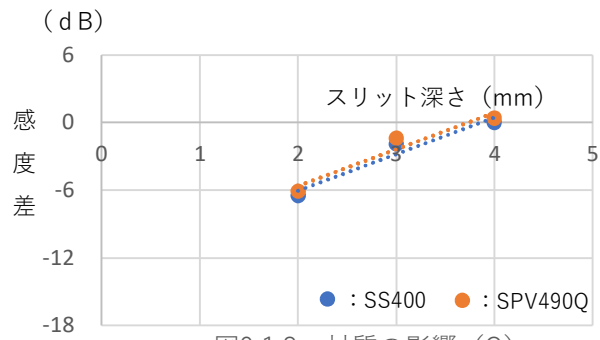


図9.1.8 材質の影響 (G)

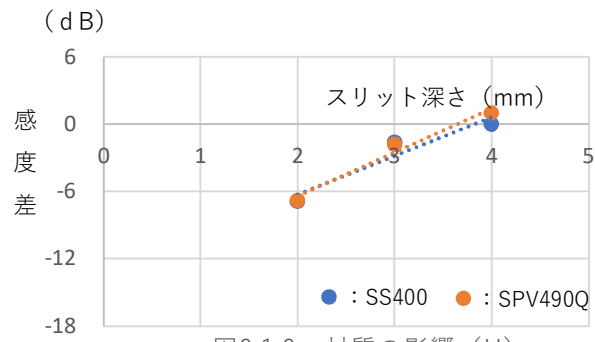


図9.1.9 材質の影響 (H)

また、スリット深さごとの SS400 材と SPV490Q の検出感度差を図 9.1.10 に示す。感度差の平均値は 0.2 dB、標準偏差は 2.5 dB であり、SPV490Q 材の検出感度は SS400 材の検出感度と同程度である。

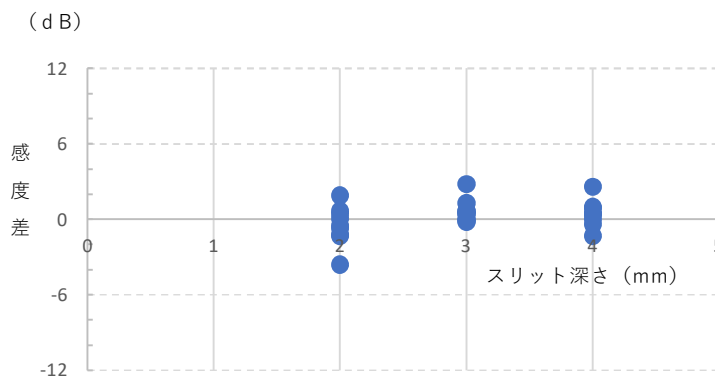


図9.1.10 検出感度差

9.2 溶接余盛の影響

渦電流探傷試験において、溶接余盛の形状が検出性に与える影響を確認する。重ね継手については、綺麗な手動溶接、荒い手動溶接及びサブマージ自動溶接（平滑な溶接余盛）の3種類を準備した。

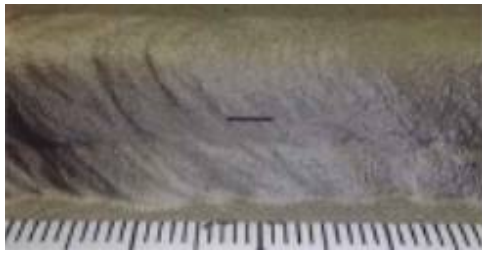


図 9.2.1 綺麗な手動 (S12)



図 9.2.2 荒れた手動 (S13)

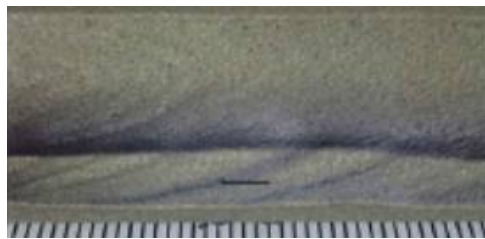


図 9.2.3 サブマージ自動 (S14)

溶接余盛部に長さ 4mm×深さ 1mm のスリットを付与し、溶接余盛に対して平行にプローブを走査して試験を実施した。

綺麗な手動溶接部のスリット (S12) をアレイプローブにより走査した試験結果の例を図 9.2.4 に示す。C スコープ画像も明瞭に得られているとともに、チャートの指示も大きな SN で識別ができています。各チームの平板での検出感度との感度差を図 9.2.5 に示す。チームによるばらつきはあるが、綺麗な手動の溶接部の検出性は、平板に対してやや低下する傾向がみられる。

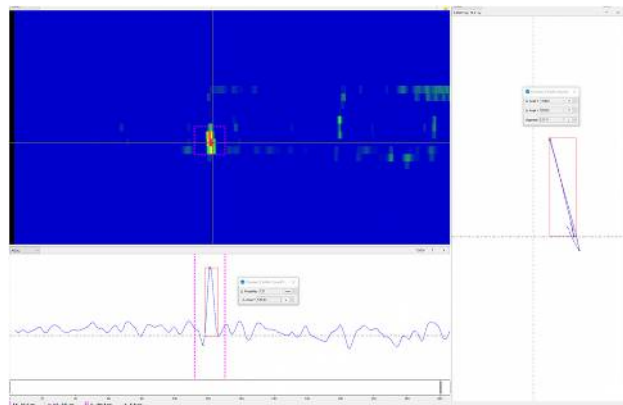


図 9.2.4 試験結果例 (綺麗な手動)

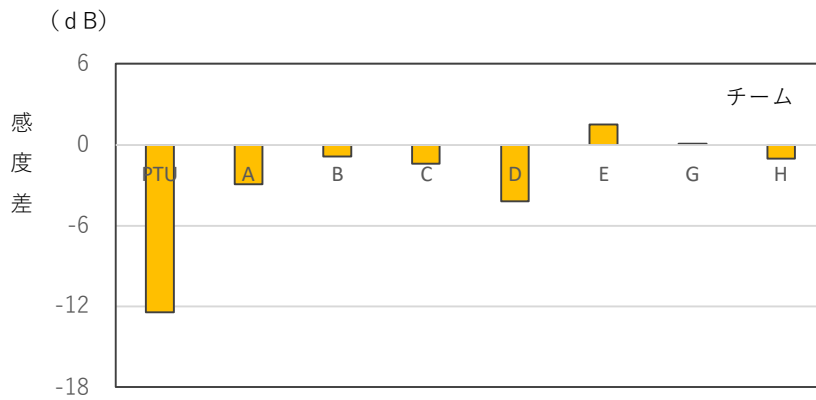


図9.2.5 余盛の影響（綺麗な手動）

荒れた手動の溶接余盛に付与されたスリットの探傷結果の例を図 9.2.6 及び図 9.2.7 に示す。C スコープでは溶接余盛の形状による信号とスリットとの識別はできていない。チャートではスリット信号と形状による信号の位相が異なることから、抽出することは可能であるが、現場探傷では検出が困難であると判断される。また、別のチームの C スコープ画像を見ても、C スコープからきずを検出することは困難と考えらるる。

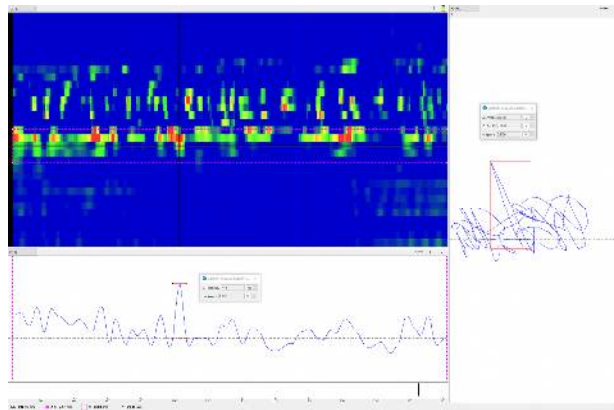


図 9.2.6 試験結果例（荒れた手動）

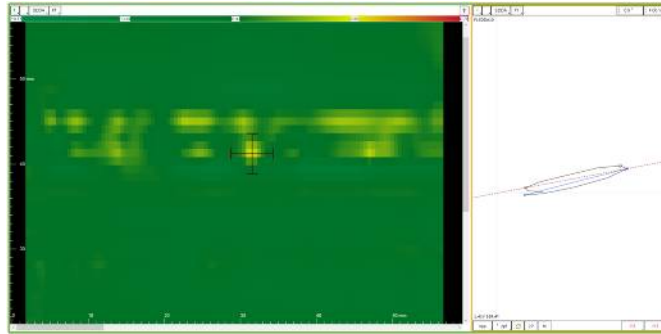


図 9.2.7 試験結果例（荒れた手動）

一方、荒れた形状による信号場探傷では困難

た例を図 9.2.8 に示す。余盛着目して検出しているが、現

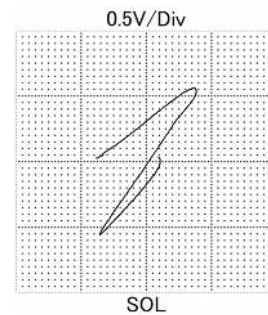
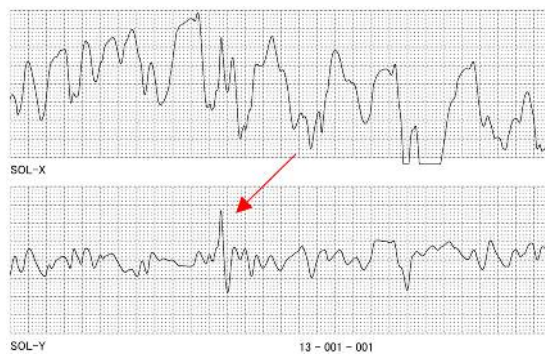


図 9.2.8 試験結果例（荒れた手動）

図 9.2.9 に、平板検出感度差を示す。

手動溶接部のスリットの出すことは困難である。

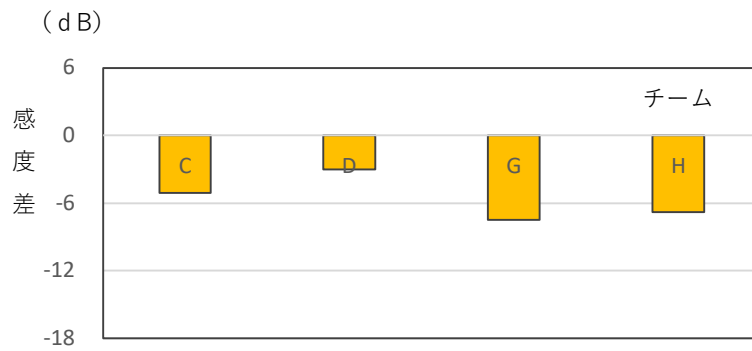


図9.2.9 余盛の影響（荒れた手動）

サブマージ自動溶接の余盛に付与したスリットの検出結果の例を図 9.2.10 及び図 9.2.11 に示し、平板に付与したスリット検出感度との感度差を図 9.2.12 に示す。C スコープ画像及びチャートの指示も良好に得られている。チームにより感度差が多少大きな例があるが、平板に付与したスリットに対してやや低い感度あるいは同程度に検出できると考えられる。

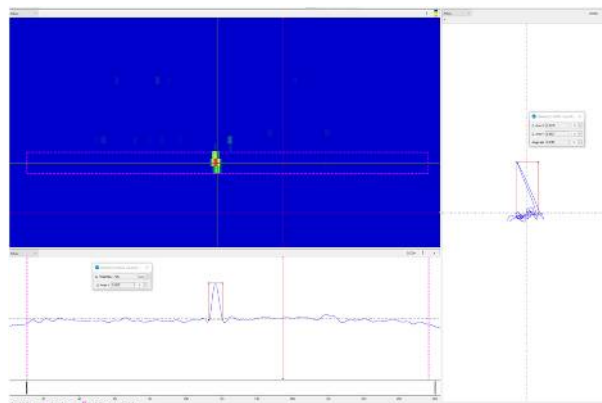


図 9.2.10 試験結果例（サブマージ自動）

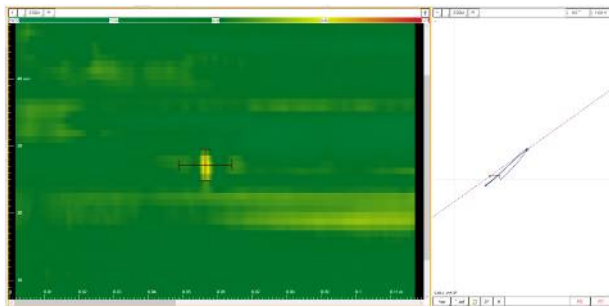


図 9.2.11 試験結果例 (サブマージ自動)

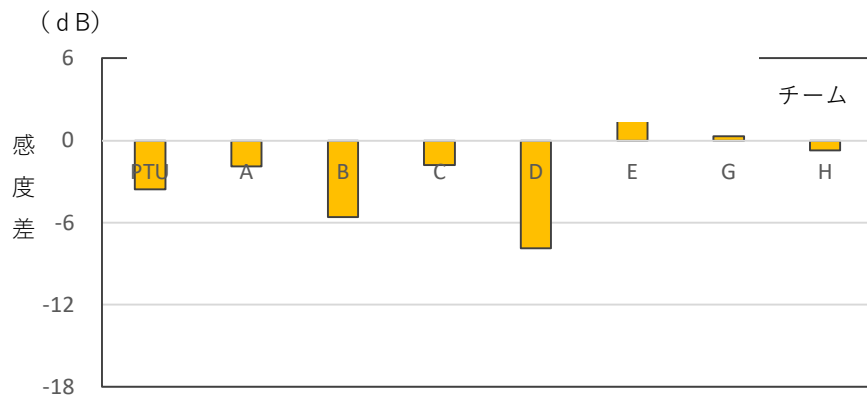


図9.2.12 余盛の影響 (サブマージ自動)

9.3 コーティング厚さの影響

溶接余盛部に付与した長さ4mm×深さ1mmのスリットに対して、樹脂テープ等にてコーティングを模擬した状態（※1）における検出性を確認した。その結果を図9.3.1～図9.3.9に示す。

平板に付与したスリットでのコーティング厚さの影響を図中に示しているが、各チームともに、溶接余盛がある場合コーティング厚さの影響は平板の場合と同程度である。

※1 令和4年度にて検証した内容 : 令和4年度の同名報告書参照

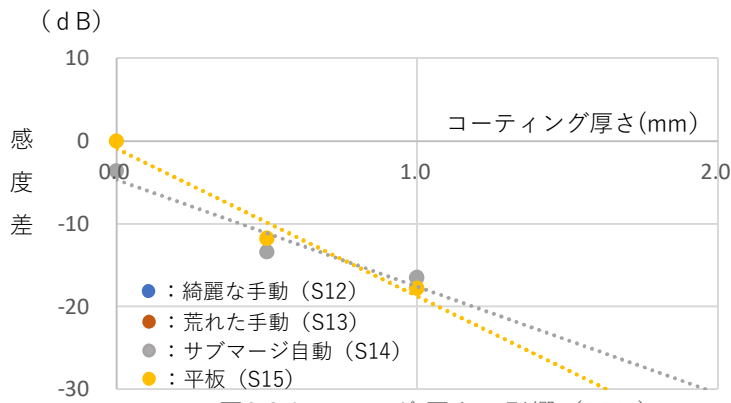


図9.3.1 コーティング厚さの影響 (PTU)

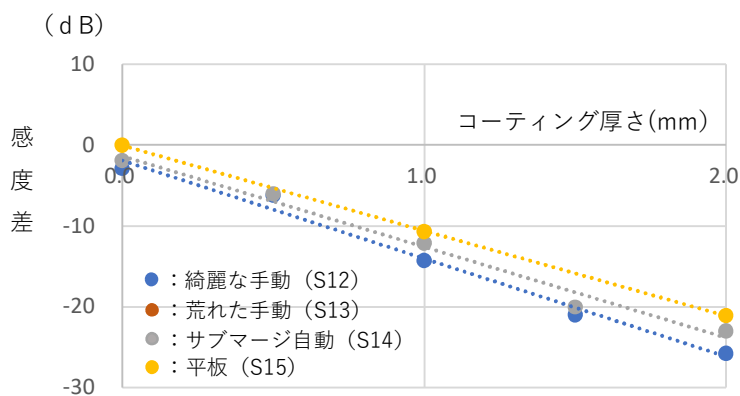


図9.3.2 コーティング厚さの影響 (A)

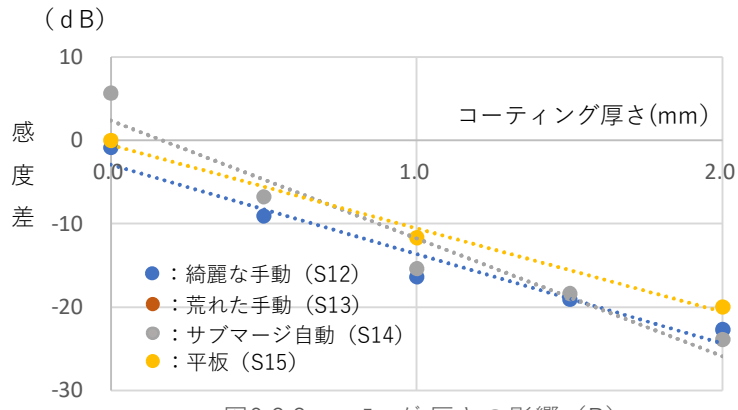


図9.3.3 コーティング厚さの影響 (B)

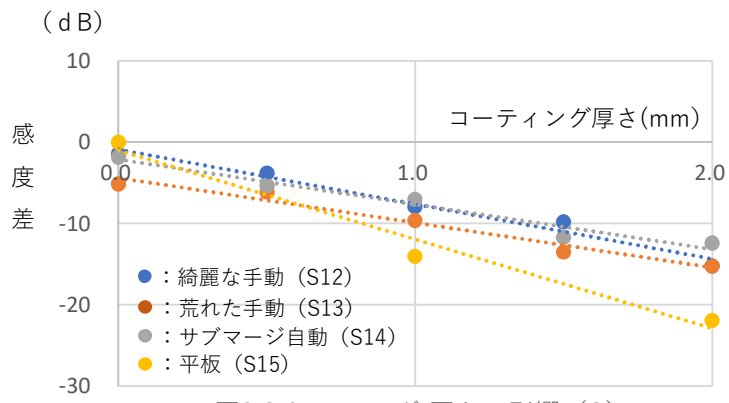


図9.3.4 コーティング厚さの影響 (C)

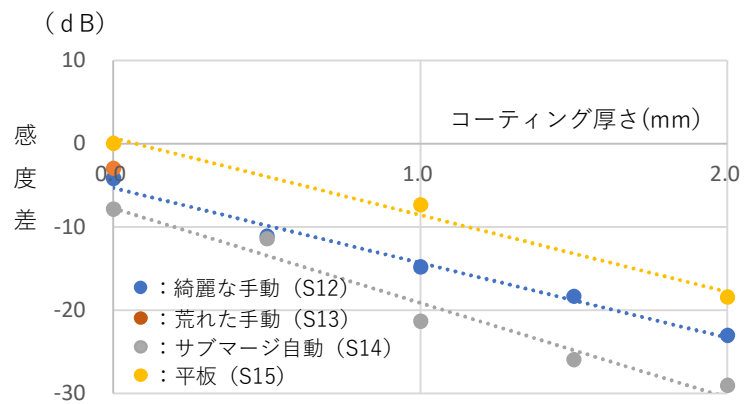


図9.3.5 コーティング厚さの影響 (D)

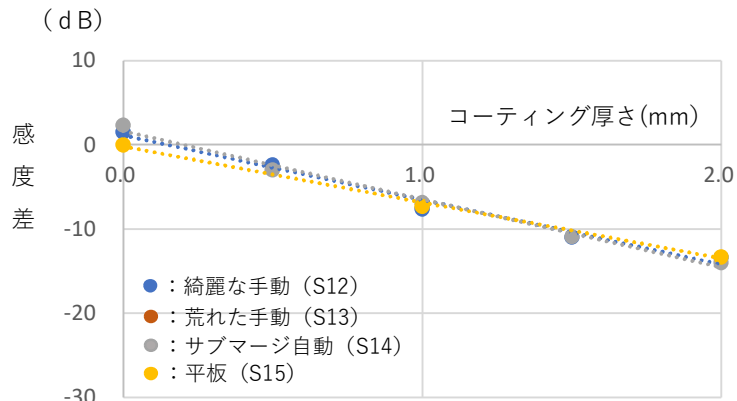


図9.3.6 コーティング厚さの影響 (E)

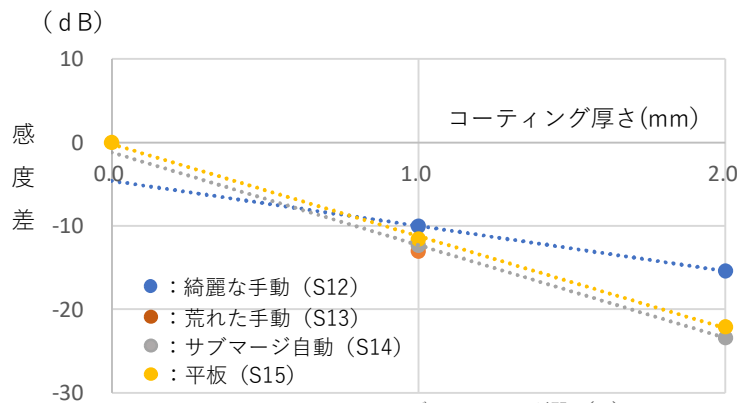


図9.3.7 コーティング厚さの影響 (F)

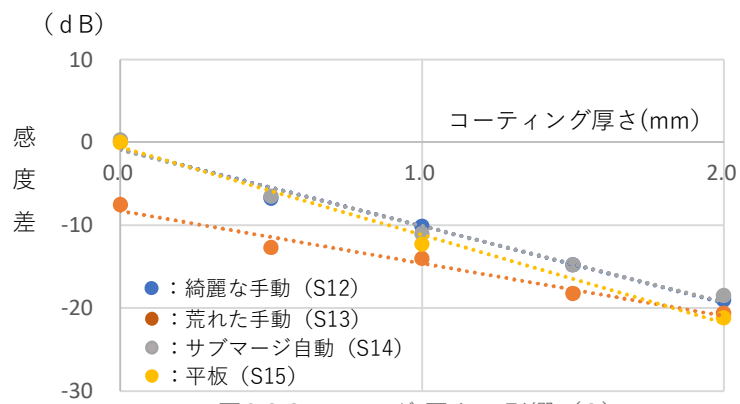


図9.3.8 コーティング厚さの影響 (G)

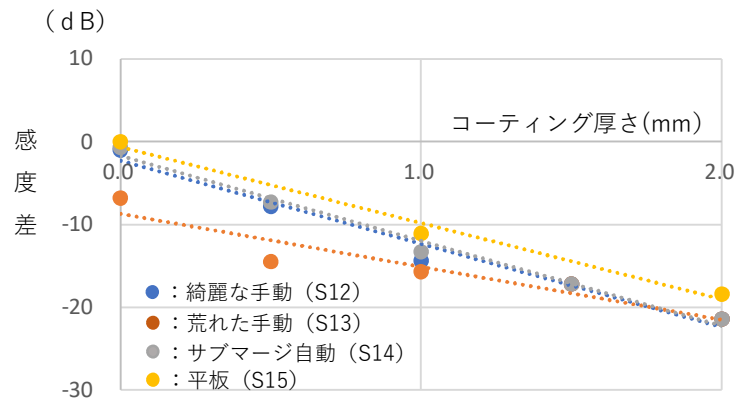


図9.3.9 コーティング厚さの影響 (H)

9.4 きず深さの影響

長さ 4mm×深さ 1.5mm (S6) と長さ 4mm×深さ 1.0mm (15) の矩形スリットの検出性を比較した結果を図 9.4.1 に示す。

深さ 1.5mm のスリットに対して、深さ 1.0mm のスリットの検出感度差は、平均値で-1.1 dB、標準偏差 1.3 dB であった。装置毎に多少の差はあるがほぼ同程度に検出できることを確認した。

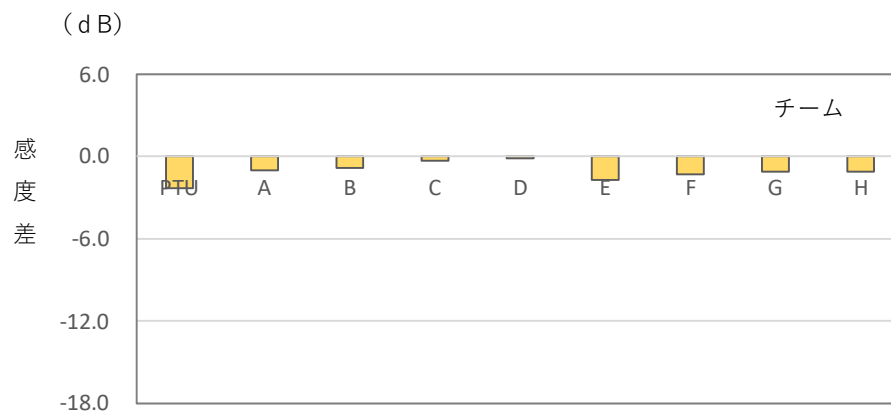


図9.4.1 きず深さの影響

9.5 きず形状の影響

きずの検出性の確認試験は、製作しやすい矩形の放電加工スリットで行うが、割れの形状が異なる場合の検出性の影響を確認するために、円弧スリットと矩形スリットの検出性の比較を実施した。その結果を図 9.5.1 に示す。

長さ 4 mm×深さ 1.5mmの矩形スリット (S6) に対して、長さ 4mm×深さ 1.5mmの円弧スリット (S16) の検出感度差を図 9.5.1 に示す。感度差は平均値 0.3 dB、標準偏差 1.7 dB であった。このことから円弧形状スリットの検出感度は、矩形形状スリットの感度と同程度であることを確認した。

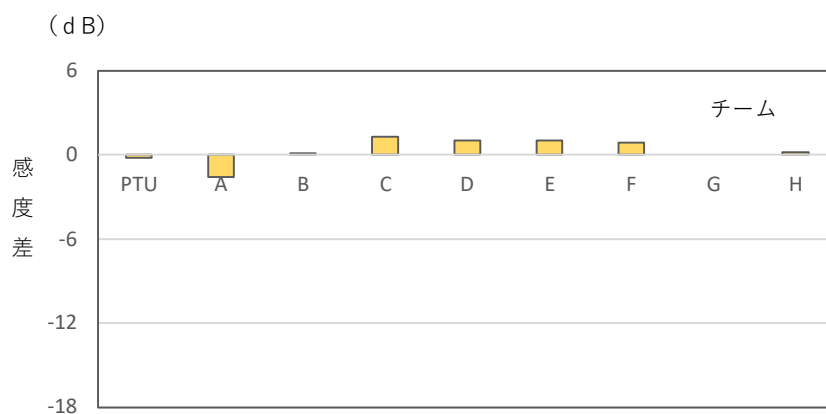


図9.5.1 きず形状の影響

10 渦電流探傷試験の適用方法の検討

溶接施工に伴う表面きずの探傷、および供用後の定期点検として渦電流探傷試験を行う場合の適用例を図 11.1 に示す。

渦電流探傷試験は表面が荒れた形状の溶接部に適用することは困難である。もし適用した場合にはノイズ発生部のコーティングを剥離し確認することが予想される。結果としてコーティングを多く剥離するようなことになっては、この渦電流探傷試験のメリットが得られにくいと考える。そこで溶接表面が平滑（凹凸が小さい）であるほどノイズが発生し難く適用しやすいとの考えに基づき、渦電流探傷試験の適用方法の一案を検討した。

定期点検でコーティングの上から渦電流探傷試験を計画する場合には、コーティング施工後にコーティングの上から渦電流探傷試験を実施し、これを初期データとする。この渦電流探傷試験を実施する時には、磁粉探傷試験等で合格になっており、長さ 4mm を超えるきずは無い状態での探傷になる。

採取した初期データを基にして、定期点検時にコーティングの上から渦電流探傷試験を実施した際には、新たに発生もしくは進展したきずの有無を、初期データと比較し評価することになる。

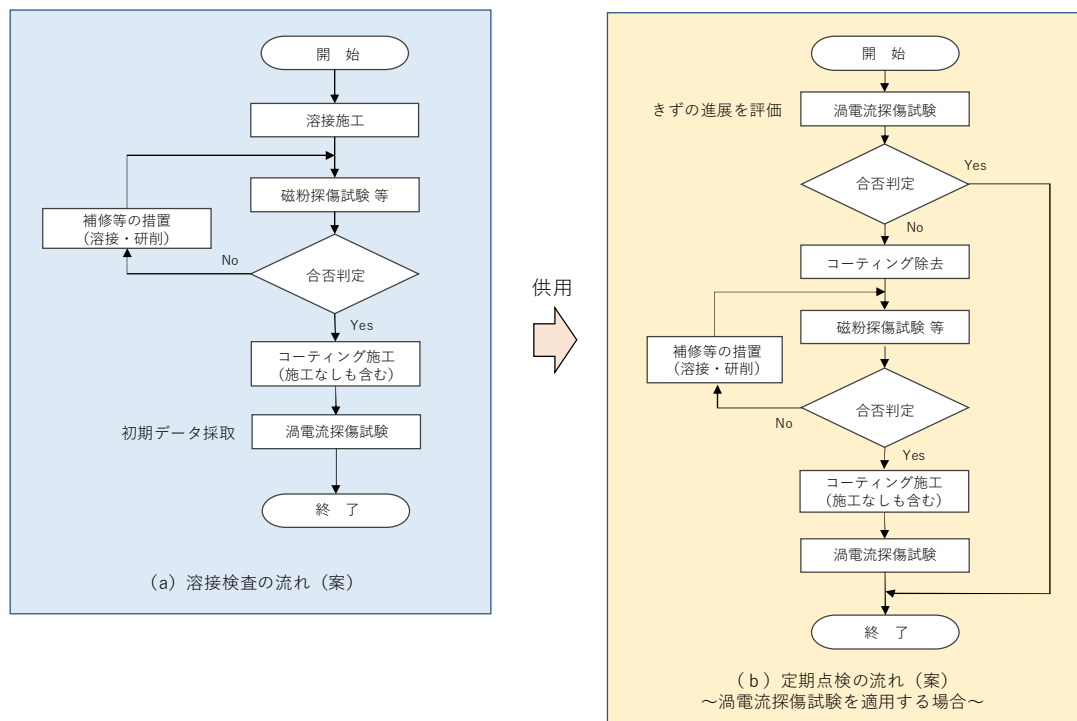


図 11.1 渦電流探傷試験の適用の例

11 まとめ

令和5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、多くの成果及び知見を得られた。得られた成果及び知見を以下にまとめる。

- (1) シミュレーションにより、以下の知見を得た。
 - ・ 矩形スリットと円弧スリットの検出信号の振幅は同程度である。
 - ・ 自然きずと比較して広い幅を持つ放電加工スリットを基準きずとして用いることは可能である。
 - ・ スリット長さ評価方法を提案した。
- (2) 材質の影響を確認するために SPV490Q 材と SS400 材の検出感度を比較した結果、ほぼ同程度の検出性であることが確認できた。
- (3) 綺麗な手動、荒れた手動およびサブマージ自動の溶接余盛に付与したスリットの検出性試験結果、きずの検出性は溶接余盛の形状に影響されることを確認した。
- (4) 溶接余盛に付与されたスリットのコーティング厚さによる検出性は、平板におけるコーティング厚さの影響と同程度であることを確認した。
- (5) 深さ 1.0mm のスリットの検出感度は、深さ 1.5mm のスリットに比べ、1 dB 程度小さくなることを確認した。
- (6) スリットが円弧形状と矩形形状では、検出性に差が無いことを確認した。
- (7) コーティング上からの渦電流探傷試験の適用方法の一案について検討した。

12 課題

令和4年度及び令和5年度の2年間で多くの知見が得られた。今後は実機での実証試験を行う必要があると考えている。さらに以下の事項について試験、検討が必要と考える。

- (1) 長さ 4mm 程度の自然きず（割れ）の検出性の確認
- (2) 隅肉溶接の止端部の検出性の確認
- (3) 合否基準の判定方法の提案
- (4) コーティング上からの渦電流探傷試験方法の提案

13 最後に

基礎的なデータ採取作業及び検討を令和6年度以降も継続調査する予定でしたが、令和6年4月10日付けにて消防庁より受託業務「令和6年度 新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討業務」が公告され、渦電流探傷試験について調査検討が進められることから、自主研究はこれにて終了とします。

これまでに得た試験データ及び知見等は、その調査検討業務に引き継がれ検討されます。

これまでに本調査研究に多くのデータ採取と検討にご尽力を頂きました一般社団法人日本非破壊検査工業会の皆様、渦電流探傷試験ワーキングの皆様に感謝の意を表します。