資料1-5

令和5年度までの渦電流探傷試験 に関する調査結果概要





各種試験方法にも	キ通的に引用される :	規格						
J I S Z 2 3 0 0	:2020 非破壞	 裏試験用語						
J I S Z 2 3 0 5	1 S 7 2 3 0 5 : 2 0 1 3 非破壊試験 技術者の資格及び検証							
ECTに関する」I	S 規格							
J S Z 2 3 1 6	5-1:2014 一般通	 通 則						
J S Z 2 3 1 6	5-2:2014 渦電泳	乱験器の特性及び検証						
J S Z 2 3 1 6	5-3:2014 プロ-	- ブの特性及び検証						
J I S Z 2 3 1 6	-4:2014 シスラ	テムの特性及び検証						
– JIS Z 2316 – 1 – ₇	_ JIS Z 2316 − 2 _	_ JIS Z 2316-3 _	┌ JIS Z 2316-4 -					
 目次 1.適用範囲 2.引用規格 3.用規格 3.用規及び定義 4.一般原理 5.技術者の資格 6.試験の目的及び試験品 7.測定技術 8.装置 9.試験の準備 10.渦電流試験システムの 検証 11.試験体の準備 12.試験 13.文書類 附属書JA 	 目次 1.適用範囲 2.引用規格 3.用語及び定義 4.渦電流試験器の種類 5.検証 (※対比試験片) 6.渦電流試験器の電気的 特性の測定 7.試験報告書 附属書A 附属書B 附属書JA 	 目次 1.適用範囲 2.引用規格 3.用語及び定義 4. プローブ及び接続要素 の特性 5.検証 (※対比試験片) 6. プローブの電気的及び 機能的諸特性の測定 7.接続要素の影響 8.試験報告書 附属書JA 	目次 1. 適用範囲 2. 引用規格 3. 用語及び定義 4. システムの特性 <u>5. 検証 (※対比試験片)</u> 6. 総合機能点検の実施 7. 試験報告書 附属書JA					

・ECTの適用に向け<mark>着色部</mark>の項目に対し検証試験及び検討が必要。

(課題)





JIS Z 2316-1:2014 一般通則

※一部省略・編集しています。













JIS Z 2316-1:2014 一般通則

※一部省略・編集しています。



験にて検証する必要がある。







渦電流探傷試験に関する調査結果

【参考資料1-4】

(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

【参考資料1-5】

(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

の内容を以下抜粋







先に示した課題を整理するため、以下の試験内容を実施した。

No.	項目	目的
(1)	基準信号の確認	検出目標スリットの検出性を確認した。
(2)	スリット応答長さ スリット応答幅	スリット長さ及び幅が出力信号に与える影響を確認 した。
(3)	角度感度特性	プローブに対するスリットの角度が出力信号に与え る影響を確認した。
(4)	無欠陥部のリフトオフ特性	リフトオフによる出力信号を確認した。
(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 を確認した。
(6)	コーティング厚さ特性 (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 を確認した。
(7)	スリットの応答領域	スリットの応答領域を確認した。
(8)	自然きずの検出性	自然きずの検出性を確認した。







No.	項目	目的
(9)	数値解析(シミュレーション) −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法の検討	 ・スリット形状(矩形、円弧)、長さ・深さ及び幅 が検出信号に与える影響を確認した。 ⇒対比試験片について検討した。 ⇒長さ評価法について検討した。
(10)	材質の影響	・SS400材とSPV490Q材に対し検出信号を確認した。
(11)	溶接余盛の影響 (試験体の表面性状:表面粗さ)	 ・隅肉溶接表面の形状が急変した箇所が検出信号に 与える影響を確認した。 (きれいな表面の手動溶接、荒れた表面の手動溶接、 サブマージ溶接)
(12)	溶接余盛+コーティング厚さの影 響	 ・現地試験に向け室内検証試験を実施した。 (コーティングは樹脂テープ等にて模擬し、隅肉溶 接表面の形状による検出信号を確認した。)
(13)	きず深さ・形状の影響	 ・矩形スリットの深さ1mm・1.5mmに対し検出信号を確認した。 ・スリット形状(矩形・円弧)に対し検出信号を確認した。



使用機器及び試験周波数



試験データは以下の探傷機器及びプローブと周波数を用いて採取した(9社)

エ ノ	渦電流 探	紧傷装置		プローブ			
τ-Δ	メーカ	型式	メーカ	型式	プローブ種別	試験周波数	
PTU	株式会社NF回路 設計ブロック	LI5640	ACTUN 株式会社	AT-129	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	
А	SG NDT社	S2G2-800	SG NDT社	SHAPE-LS050- TR-034-295- 41P03	アレイ方式、差動方式 コイル径3mm	100 kHz	
В	ZETEC社	MIZ-21C	ZETEC社	SURFXW-S01	アレイ方式 差動方式	200 kHz	
С	Eddyfi社	MIZ-21C	Eddyfi社	SURFXW-S01	アレイ方式 差動方式	100 kHz	
D	Eddyfi社	MIZ-21C REDDY	Eddyfi社	SURFXW-S01 SURFXT-S0010 I-Flex	アレイ方式 差動方式	100kHz	
E	ACTUNI 株式会社	EddyStation HL	ACTUN 株式会社	CP-6B	シングル方式 差動方式	50 kHz	
F	アスワン電子 株式会社	aect-2000Multi	アスワン電子 株式会社	L230	マルチ方式 相互誘導形絶対値方式	100 kHz	
G	日本電測機 株式会社	MXD6011	日本電測機 株式会社	SWP03	シングル方式 差動方式	30 kHz	
н	株式会社IHI 検査計測	Mobile EDDy [®]	株式会社IHI 検査計測	11-457	シングル方式 相互誘導形	80 kHz	



シングルプローブによる試験データの表示例



A3 リフトオフOmm(Yチャート)

プローブ:シングル 走 査:一方向走査













アレイプローブによる試験データの表示例









試験片 (平板)

番号	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)
S 1		0					
S2		400					
S 3	SS400	1000	平板表面	矩形スリット	6	3	1
S 4		1500					
S 5		2000					
S 6					4		
S 7	SS400	0	平板表面	矩形スリット	3	1.5	0.25
S 8					2		
S 9					4		
S10	SPV490	0	平板表面	矩形スリット	3	1.5	0.25
S11	Q				2		
S15	SS400	0	平板表面	矩形スリット	4	1.0	0.25
S16	SS400	0	平板表面	円弧スリット	4	1.5	0.25



これまで検証試験に用いた試験片の一覧



試験片 (平板)

番号	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)
A1					2		
A2					3		0.25
A3					4		
B1					2		
B2	SS400	0	平板表面	矩形スリット	3	1.5	0.3
B 3					4		
C1				2			
C2					3		0.4
C3					4		

試験片(重ね継手隅肉溶接)

番号	溶接方法	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)
S12	きれいな手動	SS400	0	溶接表面	矩形スリット	4	1.0	0.25
S13	荒れた手動	SS400	0	溶接表面	矩形スリット	4	1.0	0.25
S14	サブマージ自動	SS400	0	溶接表面	矩形スリット	4	1.0	0.25

















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-
L22	突合継手	有	0	溶着金属	縦割れ	12	1.6	L2
T21	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	18	1.8	TP-
T22	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	20	1.7	T2
						~ ~		

材質:SS400



試験項目(1)基準信号の確認



 ・放電加工による長さ4mm×深さ1.5mm×幅0.25mmの矩形スリットを (仮)基準きずとし、基準信号を確認した。



※検出信号が最大になる走査方向も可





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

 \bigcirc

試験項目(2)スリット応答長さ及び幅



 ・矩形スリット(長さ2~4mm、深さ1.5mm、幅0.25~0.4mm)きずの検出信号を 確認した。



	長さ2mm	長さ3mm	長さ
幅 0.25mr	A1	A2	4mm (仮) 其進きず
幅0.3m	m ^{B1} —	B2	(版) 泰平です B <u>3</u>
幅0.4m	m ^{C1}	C2	C <u>3</u>

番号	長さ (mm)	深さ (mm)	幅 (mm)
A1	2	1.5	0.25
A2	3	1.5	0.25
A3	4	1.5	0.25
B1	2	1.5	0.3
B2	3	1.5	0.3
B3	4	1.5	0.3
C 1	2	1.5	0.4
C 2	3	1.5	0.4
C 3	4	1.5	0.4





試験項目(2)スリット応答長さ及び幅



・矩形スリット(長さ2~4mm、深さ1.5mm、幅0.25~0.4mm)きずに
 対して得られた検出信号を以下の図に示す。



• スリット長さ及び幅が長いほど検出信号が大きくなる。



試験項目(3)角度感度特性



• 矩形スリット(長さ4mm、深さ1.5mm、幅0.25mm)きずに対するプ ローブの走査方向を変え、プローブの角度感度特性を確認した。



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

• スリットに対しプローブの走査方向に傾きがある場合、最大10 dB程 度の検出感度の低下を確認した。



試験項目(4) 無欠陥部のリフトオフ特性



・無欠陥部にてリフトオフによる検出信号を確認した。



- 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)。



試験項目(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検出信号を確認した。
 ・アクリル樹脂板がある場合の検出信号と比較した。



非磁性を有する(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。

(樹脂板やテープなどで容易にコーティングを模擬できる)



試験項目(6)コーティング厚さ特性



・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した。
 (アクリル樹脂板)



- コーティングが厚くなるほど、検出感度が落ちることを確認した。
- 測定カ所のコーティング厚さが既知であることが重要。 (コーティング厚さ0.4~1.5mmでは約10dBの感度差)





・長さ2,3,4mmのスリットの応答領域を確認した。(リフトオフ0mm)



- 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とよく一致した。
- 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。





・長さ2,3,4 mmのスリットの応答領域を確認した。
 (リフトオフ0,1,2 mm)



- 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。
- JIS Z 2316-3:2014(6.2.3.8)にて規定される「応答領域(-6dB)長さ」による評価 +α を検討する必要がある。





・自然きずの検出性を確認した。

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	—	













・自然きずの検出性を確認した。

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	трір
L22	突合継手	有	0	溶着金属	縦割れ	12	1.6	IF-LZ
T21	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	18	1.8	
T22	突合継手	有	0	溶着金属	横割れ	20	1.7	16-12











試験項目(8)自然きずの検出性



・自然きずより得られた検出信号を以下の図に示す。



- 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。
- T継手試験片(1A,1B)では、隅肉溶接止端部を走査しやすいペン型が有効であっ 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。



試験項目(8)自然きずの検出性







2V/Div

G社









C社



 ・ 突合せ溶接接手の割れきずに対する検出は可能であった。

(溶接表面が滑らかな形状であること、更にプローブの走査が容易等から、隅肉継手と比べ てECTを適用しやすい。 ⇒ 隅肉溶接接手での検証データが不足している。



試験項目(8)自然きずの検出性





• 割れきずと比べ検出性は低いが、検出は可能である。





数値解析の背景・目的

- 長さ4mm、深さ1.5mmの疲労きずを有する対比試験片を、十分な再現性を確保し製作することは困難である。再現性の良い放電加工による矩形スリットを基準きずと考えている。基準きずの形状(長さ・深さ・幅)を検討するため数値解析により確認した。
 - きず形状を矩形及び円弧に単純化し、検出信号を確認した。
 - きずの長さ・深さが検出信号に与える影響について確認した。
 - きずの幅が検出信号に与える影響について確認した。
- きず長さの評価方法について検討し、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した。





試験項目(9)数値解析









自然きずの断面形状は複雑な形状を有しているが、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、断面形状の異なる円弧スリットと矩形 スリットを比較した。

- ・矩形スリットは対比試験片へ施すきずを想定している。
- ・円弧スリットは自然きずを模した。



きず両端の断面形状は異なるが、検出性にどれ程影響を与えるか?





Fig.1 矩形スリット



(9) - 1 スリット断面形状の影響





・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することを確認した。

であることを確認した。



(9) -1 スリット断面形状の影響



きず長さによって複雑に変化する検出信号のプロファイルを詳細に調査した。









- ・きず長さにより、きず周囲を流れる渦電流、きずにより分割される渦電流、きず下部を 流れる渦電流が複雑に変化することが確認できた。
- ・ECTのきず検出性において、渦電流の流れを妨げる断面積(長さ、深さ)が重要である。 36





導体中の渦電流の流れの可視化とイメージ



きず長さ・深さによって、渦電流の経路が変化



(9) -1スリット断面形状の影響



数値実験(スリット幅0.1mm)



- きず断面形状、長さ及び深さは検出信号の振幅に影響を与える。
- きず断面積(長さと深さ)によって変化する検出信号からきず
 を評価することになる。



(9) - 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 の影響を確認した。

【条件】

- スリット幅 :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

スリット幅の影響について(まとめ)

- ECTは幅無限小の絶縁層を検出可能。
 - コイル径よりスリット幅が十分小さくなると、スリット幅は検出信号に影響を与えない。
- 基準スリットのスリット幅は試験体とプローブの特性に応じて決定。
 - きず幅が大きいと必要なダイナミックレンジが大きくなるため、スリット 幅は狭い方が望ましい。
 - 今回の数値解析の結果から基準きずのスリット幅は0.5mmでも可。



(9) - 2 スリット幅の影響







幅0.002~0.5mmまでの検出信号は概ね一致した。きず長さ8mm幅1mmにおける数値解析の結果は、検出信号に差が見られた。



(9) - 2 スリット幅の影響



(矩形スリット深さ2mm)



41



(9) - 3 スリット長さの評価方法









 JIS Z 2316-3:2014 (6.2.3.7) にて規定されるスリットの応答領域(※)、 スリット応答長さにより、きず長さを推定する。

(※信号の最大値より 6dB(50%)低い信号領域)

• 長さと深さ両方の影響を受けた信号を評価している。



(9) - 3 スリット長さの評価方法

とは困難





・右図Fig.A.(振幅-きず長さ特性)は、きず 長さに対する振幅のみを評価するため、単純で分かりやすい。しかしながら、きず長 さ及び深さがプローブのコイル径より十分 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。 ・偽陽性が生じる。 振幅のみで



Fig. A. 振幅-きず長さ特性



⇒振幅のみ、または応答長さのみで 評価することは困難



44





②振幅と応答長さを用いて閾値とする方法

Fig.A. (振幅-きず長さ特性) における振幅データ(縦軸) と、Fig.B. (応答長さ‐きず長さ 特性) における応答長さのデータ(縦軸)を使い、一つにした図がFig.C. (振幅-応答長さ 平面) となる。



評価したいきず(ここでは長さ4mm、深さ1.5mmの例)を中心に、異なる長さと深さによる複数の基準きずにより得られた判定曲線を用いて判定する方法



(9) - 3 スリット長さの評価方法



②振幅と応答長さを用いて閾値とする方法

- Fig.C.「振幅-応答長さ平面」の任意の点は、き ず長さと深さを一意に示すことができる。
- 複数の基準きずの点間を補間することで、任意の点のきず長さと深さを推定することができる。

振幅-応答長さ平面を用いて閾値を定め、きず長 さと深さを評価する方法を提案する。





- RBF(放射規定関数)を用いて、Fig.D.きず形状推定 結果を示す。
- 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。



試験項目(10)材質の影響



• 屋外貯蔵タンクの側板及びアニュラ板に多く用いられているSPV490Q材、底板 に多く用いられているSS400材に対し、検出信号を確認した。



- 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。但し、SS400材 は炭素量やマンガンなどの含有量の上限が規定されていない。このことから、 対比試験片の材質は、SPV490Q材などの方が適していると考えられる。
 - ⇒ SM材もタンクの材質として使用されていること、加えて対比試験片の材質の候補として検証試験を実施する予定である。



試験項目(11)溶接余盛の影響









Fig. S14(サブマージ自動)







Fig. S13(荒れた手動)

- 想定通り溶接部の表面粗さの影響を受け、試験片S13(荒れた手動溶接)の検出性は 難しいが、検出可能な装置もあることを確認できた。
- 表面が綺麗な溶接部のリフトオフ0mmに対しては、検出可能であることを確認した。



試験項目(11)溶接余盛の影響



隅肉溶接表面の急変した形状が検出信号に与える影響を確認した。 以下に試験データの一例を示す。 PTU(リフトオフ0mm)の例



• 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。









-40

PTU

Α

В

С

D

Е

F

G

Н

試験項目(12)溶接余盛+コーティングの影響







試験項目(12)溶接余盛+コーティングの影響



試験データの表示例を示す。













5

W(Transe) [V]

-1

試験項目(12)溶接余盛+コーティングの影響



G(S12) F(S12) 0.5V/Div 綺麗な手動 コーティング厚1mm SOL-> SOL 50L-1 12 - 010 - 000H(S12)

・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。

0.2V/div.

0.2V/div.



試験項目(13)きず深さ・形状の影響



スリットきずの深さと断面形状(矩形・円弧)が検出信号に与える影響を 確認した。(シミュレーション結果の妥当性確認も兼ねる)

以下、試験データを示す。



- きず形状(矩形・円弧)に対する検出信号に、大きな差はなかった。
- きず深さ(1mm、1.5mm)に対する検出信号は、大きな差ではないが深いほど信号 が大きくなる傾向が見られた。

⇒対比試験片に施すスリットきずの形状等を検討するデータを採取したが、

いくつかの項目について検証が必要な状況である。

- 対比試験片に施す基準きずの形状を矩形にて進める。
- ・振幅-応答長さ平面を用いたきずの評価を出来る可能性がある。