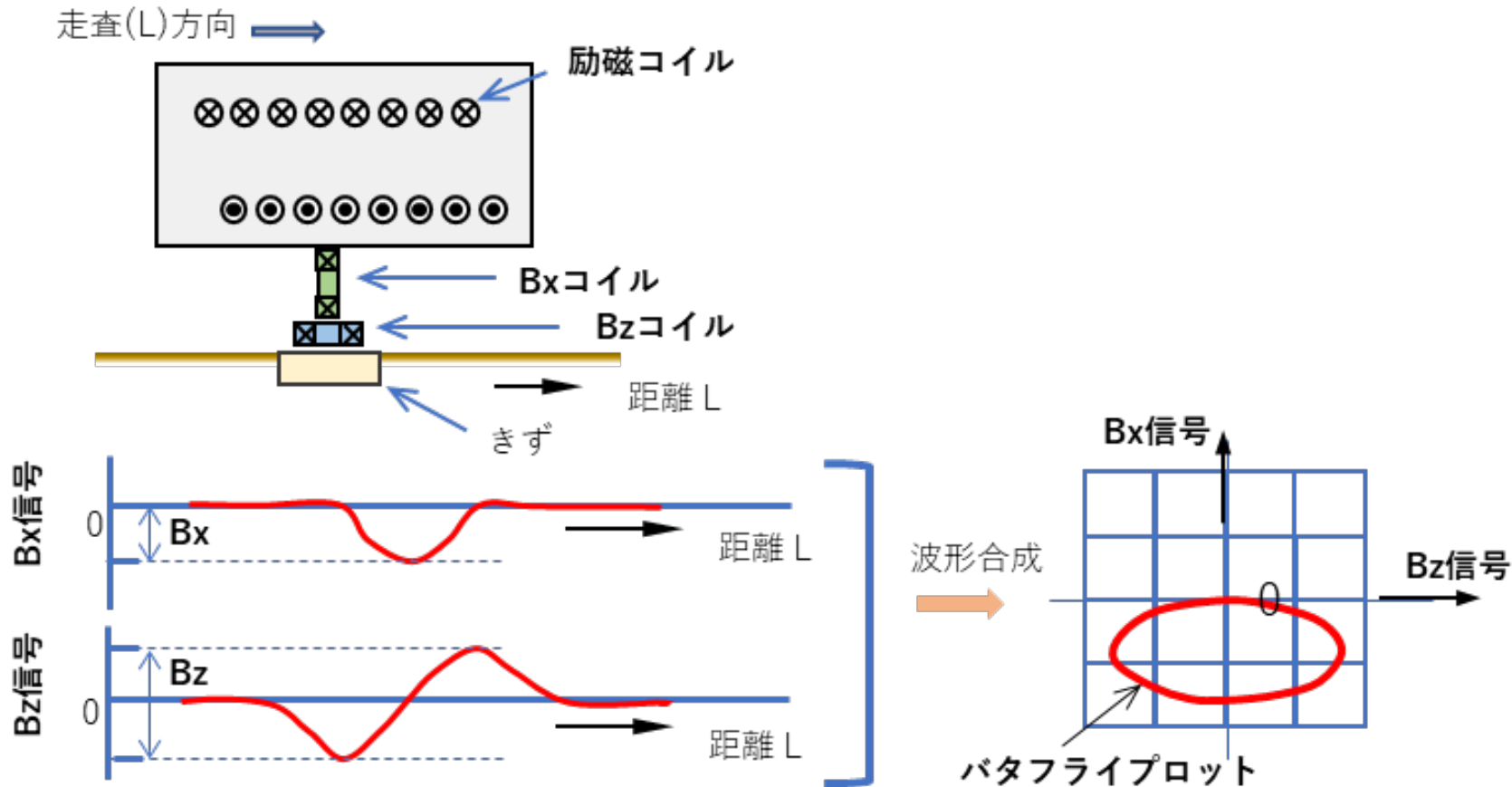


交流電磁場測定法の検証結果について

～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報告書 第2章抜粋～

交流電磁場測定法の検証による項目と方法

No.	項目	方法
(1)	きず幅の影響	・自然きず（割れ）の幅は小さなものが想定されるが、その検出性を確認するために製作する人工きず（スリット）の幅は加工技術により制約される。そこで、製作可能なスリットの幅をパラメータとして試験データを得て、スリットの幅が検出性に与える影響を確認する。
(2)	きず形状の影響	・屋外貯蔵タンクの底部溶接部が完成検査前検査で合格した後、供用中に発生することが想定されるきずとして割れがあるが、割れの性状を特定することは困難である。そこで、一般には矩形のスリットで代表するが、割れが円弧の形状の場合を想定し、矩形と円弧の形状の違いによる検出性の影響を試験により確認する。
(3)	材質の影響	・多くのタンクは炭素鋼で製作されており、代表的な材質であるSS400、SPV490Q、SM400の3種類の材質を用いて、材質の違いによる検出性の影響を確認する。
(4)	角度感度特性	・電磁場や渦電流を利用した電磁誘導試験では、センサ（コイル）ときずの向きで出力値が異なることが判っている。そこで、センサときずの向きによる出力値の関係を角度感度特性として把握する試験を実施する。
(5)	オフセット特性	・きずの中心とセンサ中心を一致させて走査した時に最も大きな出力が得られ、きずの中心からセンサ中心が離れることで出力値が低下する傾向がある。その程度は、探傷システムによって異なるが、試験に用いるシステムにおけるオフセット特性を確認する。
(6)	コーティングの厚さの影響（リフトオフ特性）	・タンクの底部溶接にはコーティングが施工されている場合があり、上記7項のきずの大きさによる検出性に与えるコーティングの厚さの影響を確認する。
(7)	きずの大きさによる影響	・一般に、きずの長さや深さが大きくなると出力値は大きくなり、一定の大きさになると出力値は飽和する。屋外貯蔵タンクの底部溶接部の検査においては、長さ4mm×深さ1.5mmを検出目標としているので、きず（矩形スリット）の長さを3mm、4mm、5mm、深さを1mm、1.5mm、2mmをパラメータとして検出性を確認する。
(8)	シミュレーション	・交流電磁場測定法（ACFM）の検出原理等を確認するために、磁束密度分布や渦電流分布のシミュレーション（数値解析）を実施する。また、1～7について、応答特性を確認する。
(9)	溶接部の表面形状による影響	・試験対象となるタンクの底部溶接部の表面形状は、溶接余盛がそのままのものや、ドレッシングを施して滑らかになっているものなど、種々の表面形状が想定される。これらの表面形状が検出性に与える影響を、綺麗な手動溶接、荒れた手動溶接及びサブマージ自動溶接の3種類の溶接試験片を製作し、検出目標である基準スリット（長さ4mm×深さ1.5mm）の出力値で評価する。
(10)	溶接部のコーティングの厚さの影響	・上記9項の溶接部の表面形状による検出性に与えるコーティングの厚さの影響を確認する。
(11)	自然きずの検出性	突合せ溶接試験片に割れを製作し、自然割れの検出性を確認する。自然割れは長さ4mm～10mm、深さ3mmを目標として製作するが、曲げによる製作で割れ寸法の十分な制御ができないので、目標に近い寸法で製作された自然割れ試験片を用いて試験を実施する。その際、割れの長さや深さを測定する。
(12)	試験技術者レベルによる試験結果への影響	ACFMを適用する試験技術者として必要な事項を検討するために、JISZ2305技術者認証で技術的に最も近い渦電流探傷試験(ET)技術者による検出性確認試験を実施する。試験では、ETレベル2およびレベル3技術者各々1名で試験を実施し、熟練者との比較を行う。



励磁コイルにより一様な誘導電流を試験体表面に発生させ、表面きずで生じる磁場の変化を2つの検出コイルで検出する。検出コイルは主にきずの深さ方向へ迂回した誘導電流で生じる磁束の変化を検出するBxコイルと、主にきずの長さ方向へ迂回した誘導電流で生じる磁束の変化を検出するBzコイルがあり、2つの検出コイルから得られるBx信号、Bz信号を合成したバタフライプロットからきずを視覚的に捉える測定方法である。

きずの幅、きずの形状、材質の影響

基準となるきずの寸法、形状を検討するため、渦電流探傷試験の基準きずの検討と同様に長さ4.0mm、深さ1.5mmのきずを指標として、きずの幅の寸法、きずの形状による検出信号への影響、また、基準きずを設ける試験片の材質による検出信号への影響に関する試験を計画した。

検証用の試験片及び使用機器を以下に示す。検証用の試験片は計画に基づいて、平板に放電加工により各種スリットきずを設けて製作した。

試験片仕様

試験片No	材質	きず							
		スリットNo	形状	長さ※1 L(mm)	深さ※1 D(mm)	幅※1 W(mm)			
TP-1	SM400A	S50	矩形	4.0	1.5	0.3			
		S51				0.5			
		S52				0.75			
		S53				1.0			
		S54	円弧			0.3			
TP-2	SS400	S55	矩形			4.0	1.5	0.3	
		S56						0.5	
		S57						0.75	
		S58						1.0	
TP-3	SPV490Q	S59						矩形	4.0
		S60		0.5					
		S61		0.75					
		S62		1.0					

※1 許容寸法 L : ±0.1mm、D : ±0.1mm、W : ±0.2mm

探傷機器及びプローブ

チーム	装置	プローブ	備考
A	Eddyfi Technologies社 AMIGO2	Eddyfi Technologies社 8chマルチ : TUCA005-08T-40A	エンコーダー機能付き
B	SGNDT社 μS2G2	SGNDT社 16chマルチ : WAVE-180	すみ肉溶接用プローブ 自動走査機能を別途付与 (一軸のスキャナー)

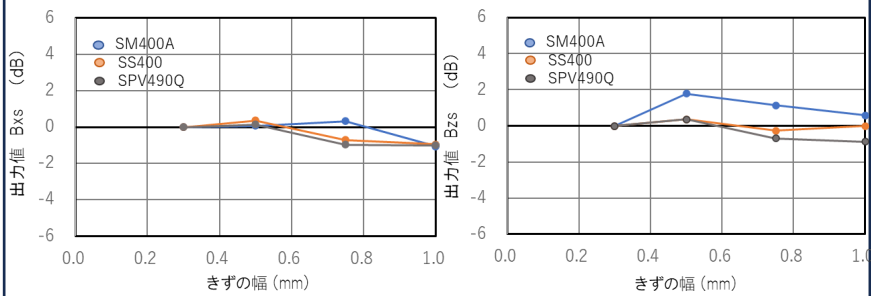


①きずの幅の検証結果

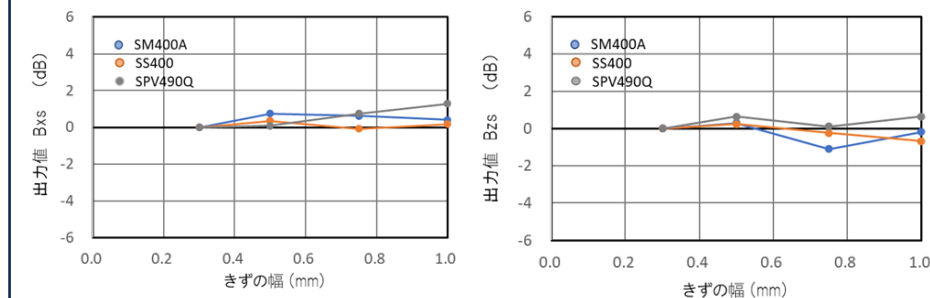
試験パラメーター

対象きず：TP-1 (S50～S53)
きずの幅：0.3mm、0.5mm、0.75mm、1.0mm

きずの幅の影響 (Aチーム Bxs、Bzs)



きずの幅の影響 (Bチーム Bxs、Bzs)



検証結果及び考察

きずの幅 0.3～1.0mmの範囲では検出性及び評価に与える影響は小さいことを確認した。
よって、基準きずの幅は、製作精度及び加工性を考慮すると0.5mm以下が妥当と考えられる。

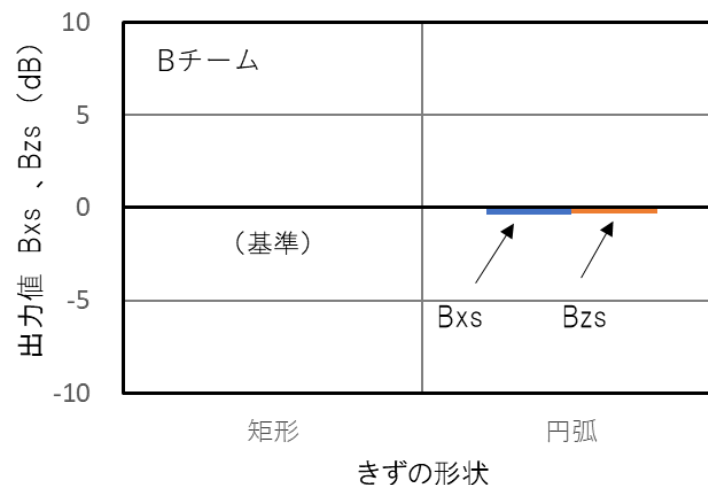
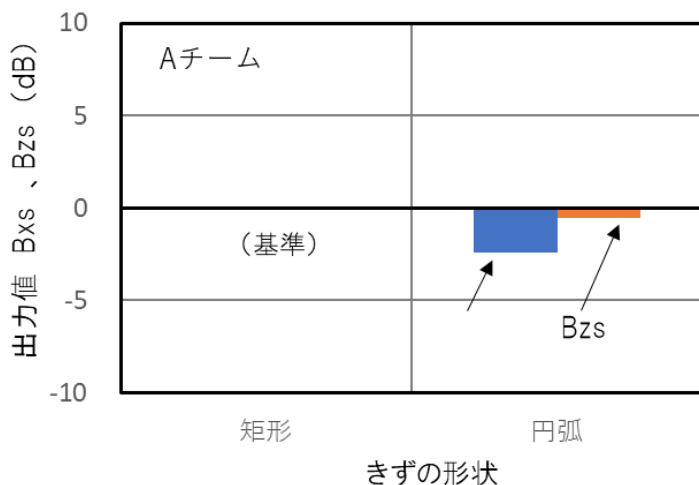


②きずの形状の検証結果

試験パラメーター

対象きず : TP-1 (S50、S54)
きずの形状 : 矩形、円弧

きずの形状の影響 (Bxs、Bzs)



検証結果及び考察

プローブの走査を手動で行っていることを考慮すると矩形と円弧のきず形状ではきずの検出性に与える影響は小さいと考えられる。一方で、ACFMの機器によっては、Bx信号はきずの形状によって若干の影響があることが確認された。

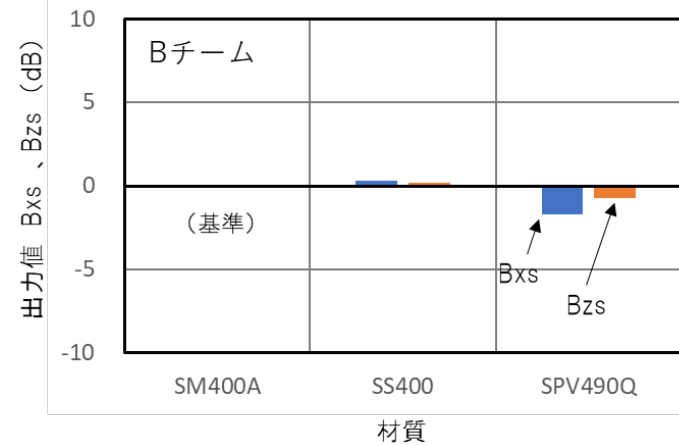
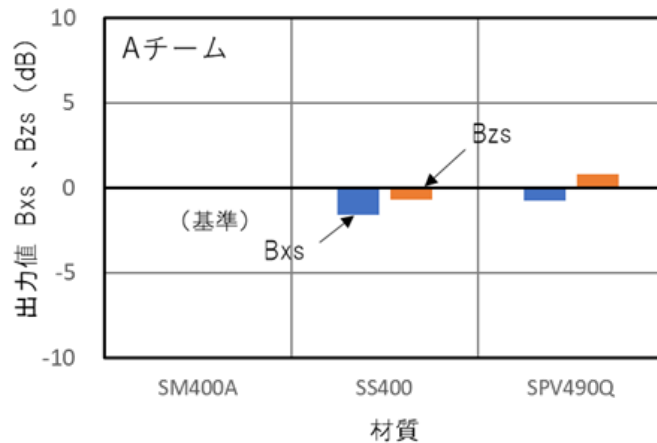


③材質の影響の検証結果

試験パラメーター

対象きず：TP-1 (S50~S53)、TP-2 (S55~S58)、TP-3 (S59~S62)
試験片の材質：SM400A、SS400、SPV490Q

材質の影響 (Bxs、Bzs)



検証結果及び考察

材質の影響は少ないことを確認した。プローブの走査を手動で行っていることを考慮すると、材質の影響は低炭素鋼においてはきずの検出性及び評価に与える影響は小さいと考えられる。

基準きずの幅は、長さ4.0mm、深さ1.5mmにおける製作精度が担保される最小寸法の0.3mmとし、基準きずの形状は矩形とした。試験片の材質は一定の品質であるSM400とした。

試験片仕様

試験片No	材質	きず				
		スリットNo	形状	長さ※1 L(mm)	深さ※1 D(mm)	幅※1 W(mm)
TP-4	SM400A	S63	矩形	3.0	1.0	0.3
		S64			1.5	
		S65			2.0	
		S66		4.0	1.0	
		S67			1.5	
		S68			2.0	
		S69		5.0	1.0	
		S70			1.5	
		S71			2.0	
		S72		4.5	1.7	
		S73		3.5	1.2	

※1 許容寸法 L：±0.1mm、D：±0.1mm、W：±0.2mm

探傷機器及びプローブ

チーム	装置	プローブ	備考
A	Eddyfi Technologies社 AMIGO2	Eddyfi Technologies社 8chマルチ：TUCA005-08T-40A	エンコーダー機能付き
B	SGNDT社 μS2G2	SGNDT社 16chマルチ：WAVE-180	すみ肉溶接用プローブ 自動走査機能を別途付与 (一軸のスキャナー)
C	アスワン電子株式会社 aect-LF01	アスワン電子株式会社 シングル：MS-LF01-CH16	—

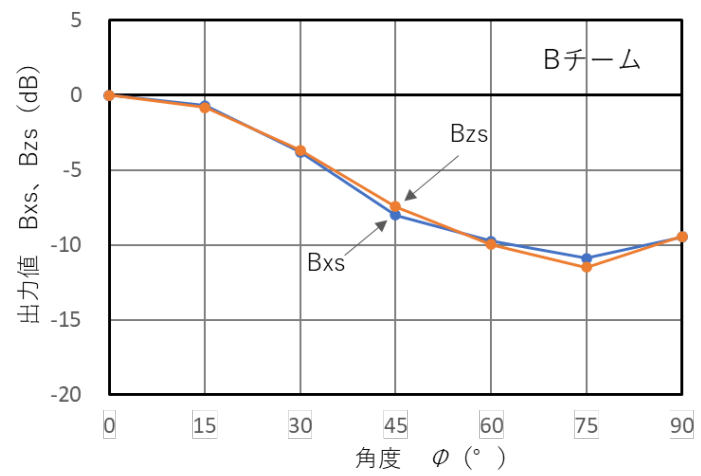
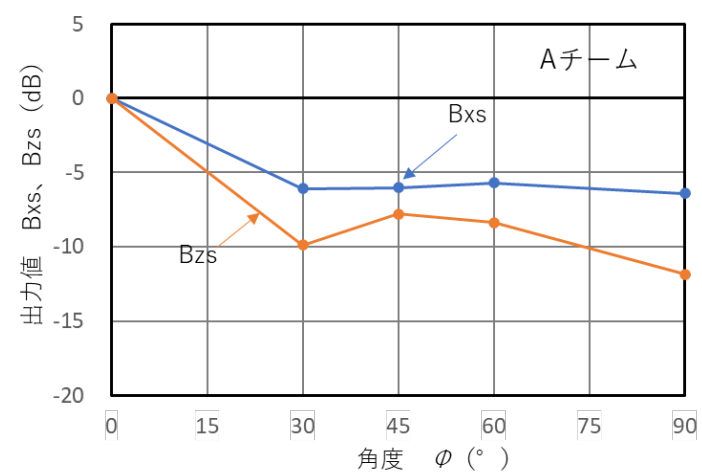
④角度感度特性の検証結果

タンクで発生するきずの方向は種々確認されているため、きずの長さ方向とプローブの走査方向のなす角の検出信号に対する影響を確認する。

試験パラメーター

試験片：TP-4 (S67)
なす角：0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°

角度感度特性 (Bxs、Bzs)



検証結果及び考察

角度が大きくなると検出信号が低下し、最大-12dB程度まで低下した。また、使用機器によって角度の影響が異なることを確認した。よって、きずの角度はきずの検出に影響を与えるため、次の2点を行う必要がある。

- ① 角度感度特性を把握したうえで感度を設定すること
- ② 設定した感度できずが検出できることを確認すること
(感度補正ができない場合は、角度を有するきずを検出できること、または複数の方向でプローブを走査すること)

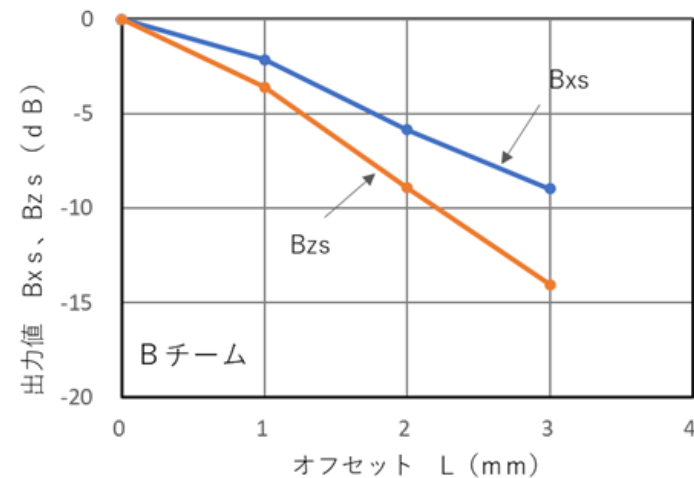
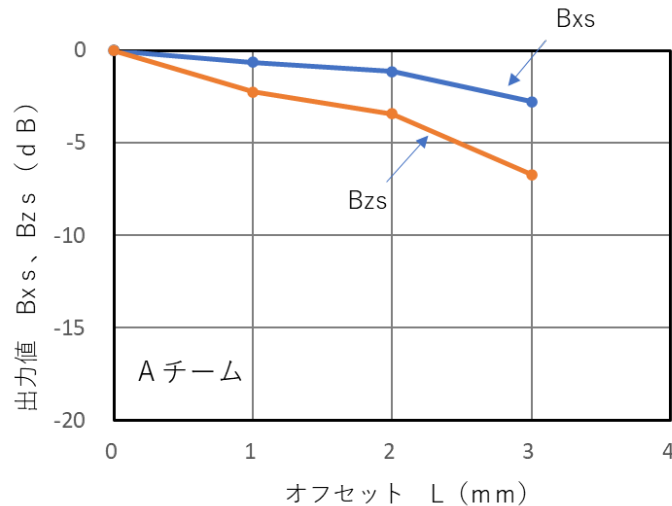
⑤ オフセット特性の検証結果

溶接部検査の対象範囲はプローブの断面より広く、実際の試験では対象範囲を網羅的に走査する必要があるため、きず方向と走査方向のオフセット距離による検出信号の影響を確認する。

試験パラメーター

試験片：TP-4 (S67)
オフセット距離：0mm、1mm、2mm、3mm

オフセット特性 (Bxs、Bzs)



検証結果及び考察

オフセット距離に応じて検出信号が低下し、オフセット距離3mmでは検出信号が-14dB程度まで低下することを確認した。また、オフセット特性は使用機器によって異なることを確認した。よって、オフセットはきずの検出に影響を与えるため、次の2点を行う必要がある。

- ① オフセット特性を把握したうえで感度を設定すること
- ② 設定した感度できずが検出できることを確認すること
(感度補正ができない場合は、プローブの走査範囲においてきずを検出できること)

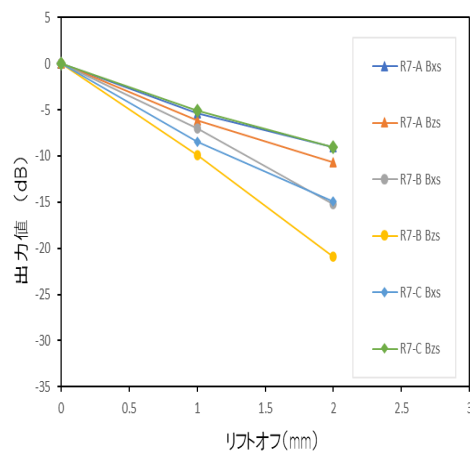
⑥ コーティングの厚さの影響の検証結果

コーティングの厚さ（リフトオフ）として0～2 mmにおける検出性を確認する。
なお、リフトオフは非磁性かつ非導電性の樹脂テープにより模擬する。

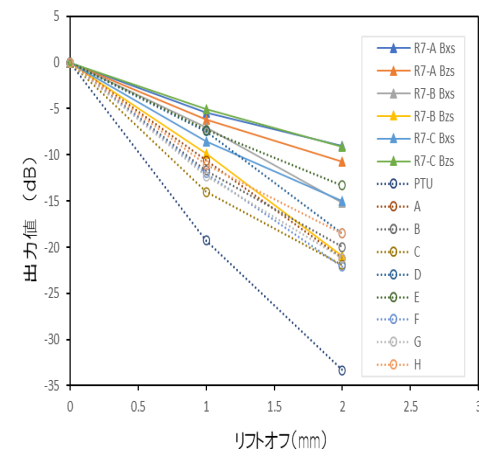
試験パラメーター

試験片：TP-4 (S67)
リフトオフ：0mm、1 mm、
2mm

リフトオフ（Aチーム、Bチーム、Cチーム）



リフトオフ（ECTとの比較:参考）



第二回検討会で提示（Bチームの結果を追記）



検証結果及び考察

リフトオフに応じて検出信号が低下することを確認した。また、機器によってはリフトオフ特性が異なることを確認した。よって、リフトオフはきずの検出に影響を与えるため、機器ごとに次の2点を行う必要がある。

- ① リフトオフ特性を把握したうえで感度を設定すること
- ② ①を踏まえ、設定した感度できずが検出できることを確認すること
(感度補正ができない場合は、きずを検出できるリフトオフ範囲で試験を行うこと)

令和6年度に用いた渦電流探傷試験の機器（パンケーキ型プローブ）よりリフトオフに対して強い傾向があるが、機器によりリフトオフ性能は異なる。

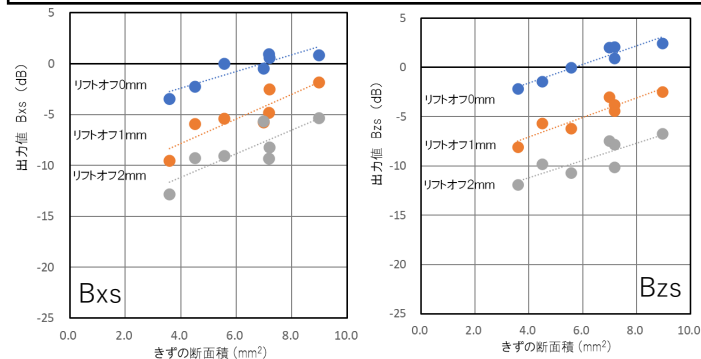
⑦きずの大きさによる影響の検証結果

きずの大きさと検出信号に関係性が見込まれる場合、基準きずから得られた検出信号との比較により合否判定が可能と考えられるため、基準きず及び基準きずに類するきずから得られる検出信号を確認する。また、リフトオフが生じた場合におけるきずの大きさの評価性についても確認する。

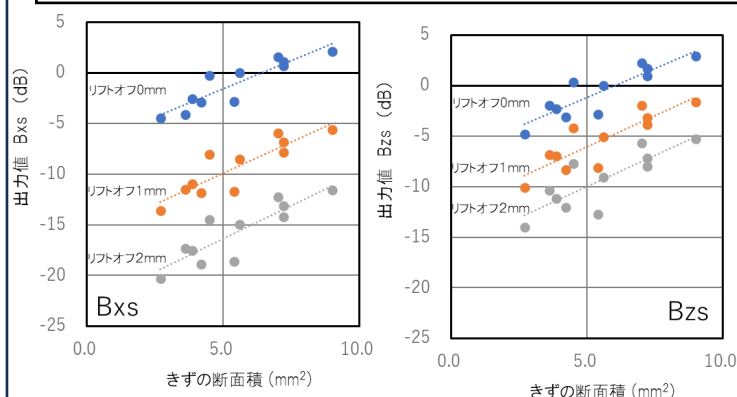
試験パラメーター

試験片 : TP-4 (S63~S73)
リフトオフ : 0mm、1mm、2mm

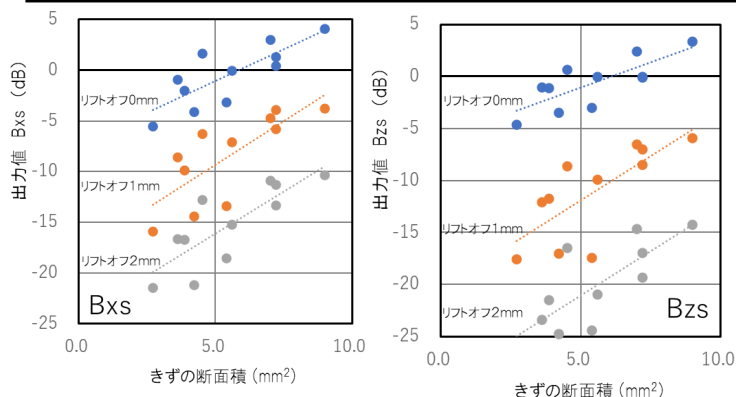
きずの大きさの評価性 (Aチーム Bxs、Bzs)



きずの大きさの評価性 (Bチーム Bxs、Bzs)



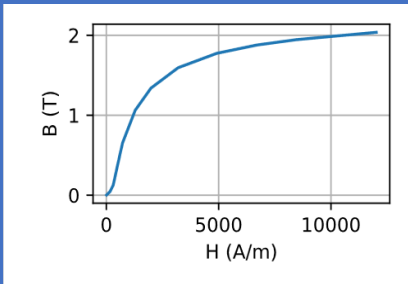
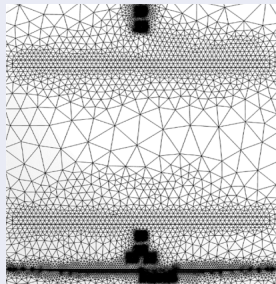
きずの大きさの評価性 (Cチーム Bxs、Bzs)



検証結果及び考察

リフトオフが一定条件下では、Bxs及びBzs共に検出信号ときずの断面積に正の相関があることを確認した。なお、Aチームにおいては長さ4.0mm以上のきずについて同様の結果を確認し、4.0mm未満の場合は正の相関を確認できなかったが、基準きず信号よりは小さい検出信号であることを確認した。よって、合格基準を渦電流探傷試験と同様に長さ4.0mm、深さ1.5mmのきずから得られた検出信号を超えないこととし、きずを評価することが可能と考えられる。



計算条件	
項目	詳細
励磁コイルボビン	L30×H20×W10
励磁コイル	600ターン, 0.2A, 5kHz Φ0.18mmマグネットワイヤー
検出コイル	外径3mm、高さ1mm、130巻
支配方程式	$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) + j\omega\sigma \mathbf{A} = \mathbf{j}$
FEMライブラリ	NETGEN/NGSolve
試験体のBHカーブ	プローブ付近要素分割
	

計算モデル

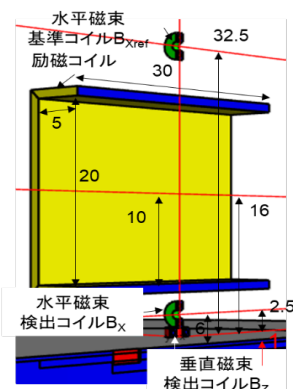


Fig. 1. 本調査独自の ACFMプローブ

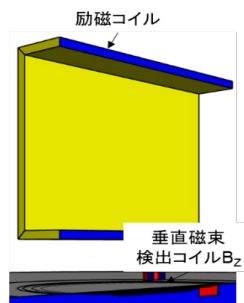


Fig. 2. 一様渦電流 (ACFMから水平磁束検出コイルを削除)

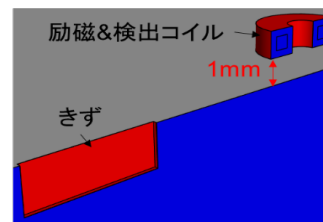


Fig. 3. パンケーキECT (垂直磁束検出コイルのみ)

- 既製品の寸法とは異なる。
- プローブは「製作しやすさ」と「信号の大きさ」を重視して設計された。

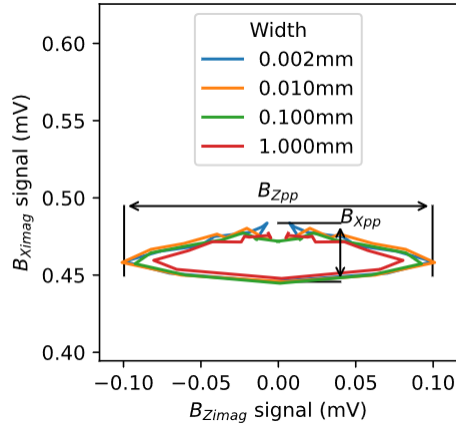


⑧ シミュレーションの検証結果

(1) : きずの幅の影響

シミュレーションパラメーター

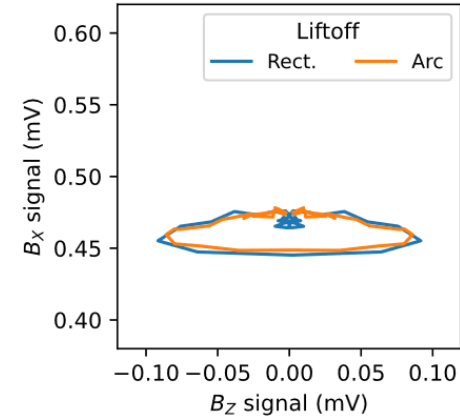
きずの幅 : 0.002mm、0.01mm、0.1mm、1mm



(2) : きずの形状の影響

シミュレーションパラメーター

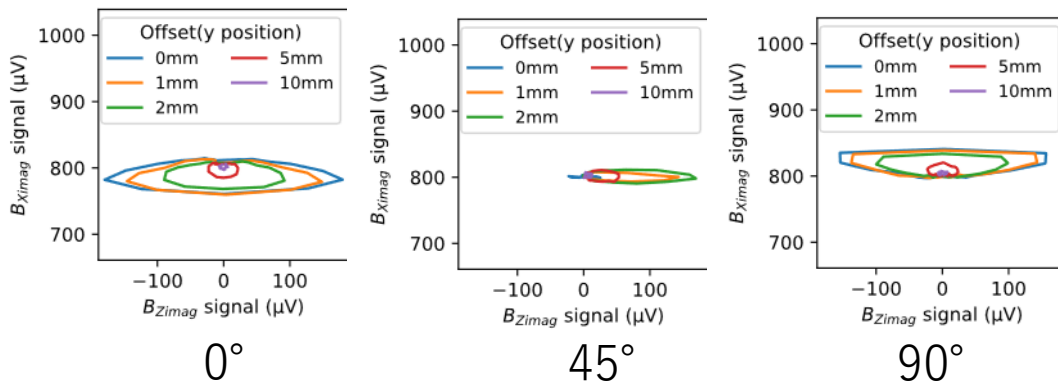
きずの形状 : 矩形、円弧



(4) : 角度感度特性

シミュレーションパラメーター

対象きず : 長さ4mm、深さ1.5mm、幅0.25mm
なす角 : 0°、45°、90°



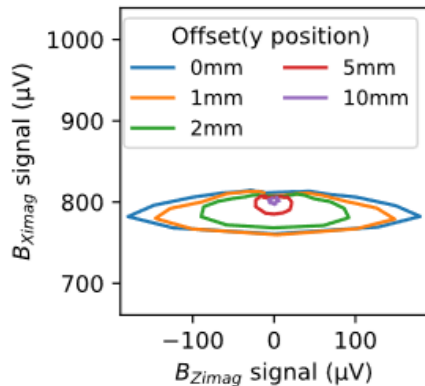


⑧シミュレーションの検証結果

(5) : オフセット特性

シミュレーションパラメーター

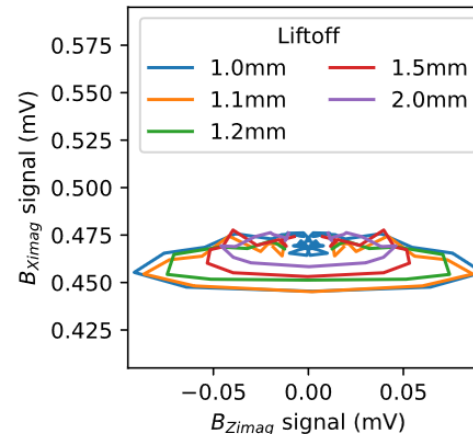
対象きず：長さ4mm、深さ1.5mm、幅0.25mm
オフセット距離：0mm、1mm、2mm、5mm、10mm



(6) : リフトオフ特性

シミュレーションパラメーター

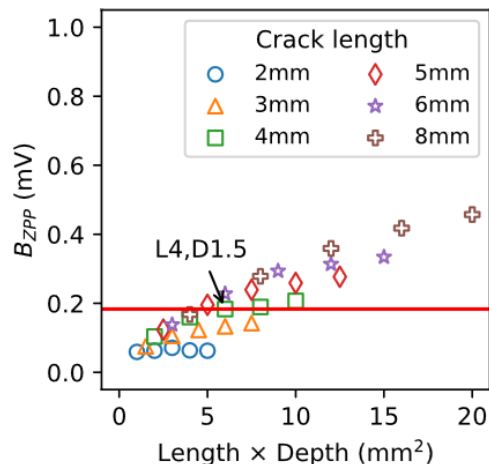
対象きず：長さ4mm、深さ1.5mm、幅0.25mm
リフトオフ：0mm、1mm、2mm、5mm



(7) : きずの大きさの評価性

シミュレーションパラメーター

対象きず：長さ2mm~8mm、深さ0.5mm~2.5mm、幅0.25mm



検証結果及び考察

各項目において、室内試験と同様の傾向の結果を示した。

また、ACFMは渦電流探傷試験の一樣渦電流に検出コイルとしてBxコイルを付与したものであり、機能として一定の深さ、かつ長さを有するきずを検出した場合、バタフライプロットにより視認性が向上するものと考えられる。

溶接部の表面形状による影響、溶接部のコーティングの厚さの影響、自然きずの検出性について

試験対象物とプローブで隙間（リフトオフ）が発生するような溶接部では検出信号が低下することが予想されるため、断面形状が大きく変化する重ね継手を実環境に沿った試験片とし、基準きずの検出性を確認する。

試験片仕様

試験片№	材質	溶接継手	きず						
			スリット№	位置	角度※ ¹ (°)	形状	長さ※ ² L(mm)	深さ※ ² D(mm)	幅※ ² W(mm)
TP-5	SM 400A	きれいな 重ね継手	S74	上止端	0	矩形	4.0	1.5	0.3
			S75	余盛	0				
			S76	下止端	0				
			S77	余盛	90				
			S78	余盛	45				
TP-6		荒れた 重ね継手	S79	上止端	0				
			S80	余盛	0				
			S81	下止端	0				
			S82	余盛	90				
TP-7		サブマーシ 重ね継手	S83	余盛	45				
			S84	上止端	0				
			S85	余盛	0				
			S86	下止端	0				
			S87	余盛	90				
			S88	余盛	45				
TP-8	きれいな 突合せ継手	S89	止端	0	割れ	32※ ³	5※ ³	—	

※¹ 溶接線方向を0°とする

※² 許容寸法 L：±0.1mm、D：±0.1mm、W：±0.2mm

※³ フェーズドアレイ超音波探傷の結果に基づく

探傷機器及びプローブ

チーム	装置	プローブ	備考
A	Eddyfi Technologies社 AMIGO2	Eddyfi Technologies社 シングル：TMRA005-22A 3chマルチ：TMXA005-03X-22A 8chマルチ：TUCA005-08T-40A	8chマルチプローブのみ エンコーダー機能付き
B	SGNDT社 μS2G2	SGNDT社 16chマルチ：WAVE-180	すみ肉溶接用プローブ 自動走査機能を別途付与（一軸のスキャナー）
C	アスワン電子株式会社 aect-LF01	アスワン電子株式会社 シングル：MS-LF01-CH16	—

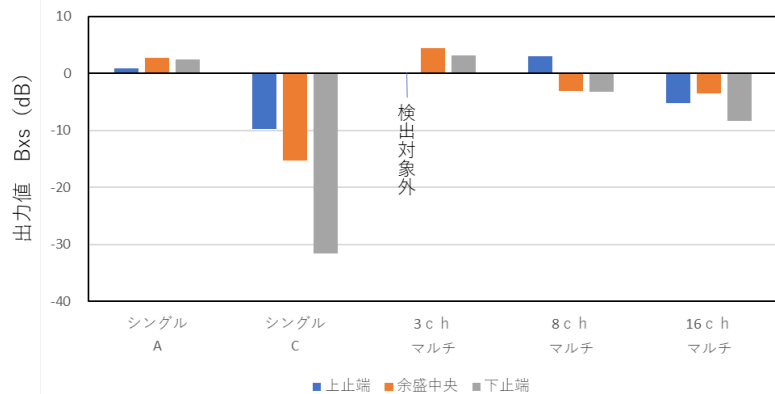
⑨溶接部の表面形状による影響の検証結果

<きずの位置及び方向について>
標準と考えられるきれいな手動溶接を試験片として比較する。

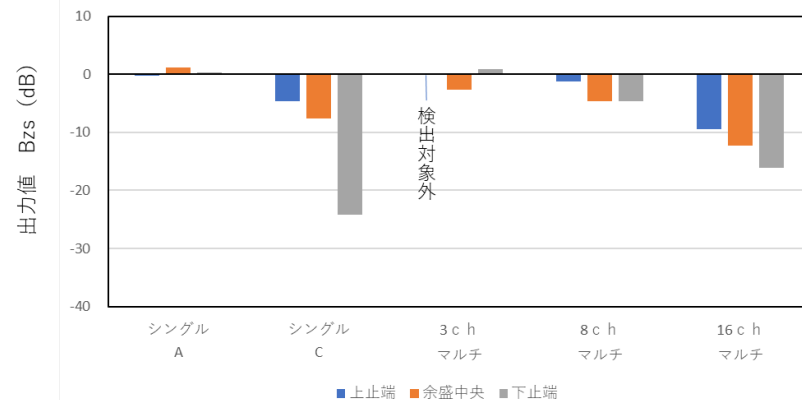
試験パラメーター

試験片 : TP-5 (S74~S78)
きずの位置 : 上止端部、余盛部、下止端部
きずの方向 : 余盛中央 (溶接線方向 = 0°)、余盛横 (90°)、余盛斜 (45°)

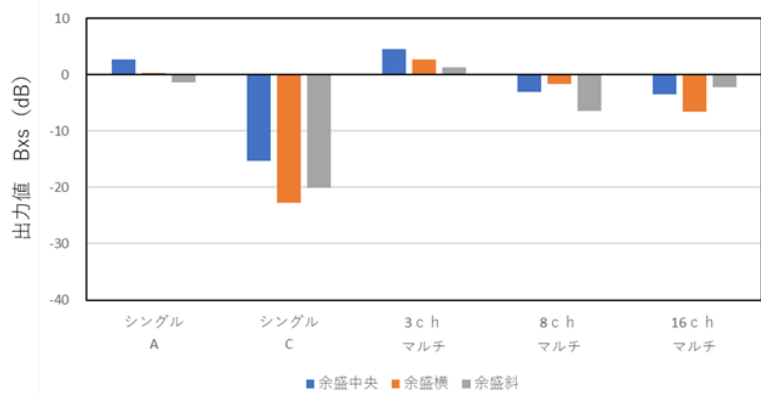
溶接部のきずの位置の影響 (Bxs)



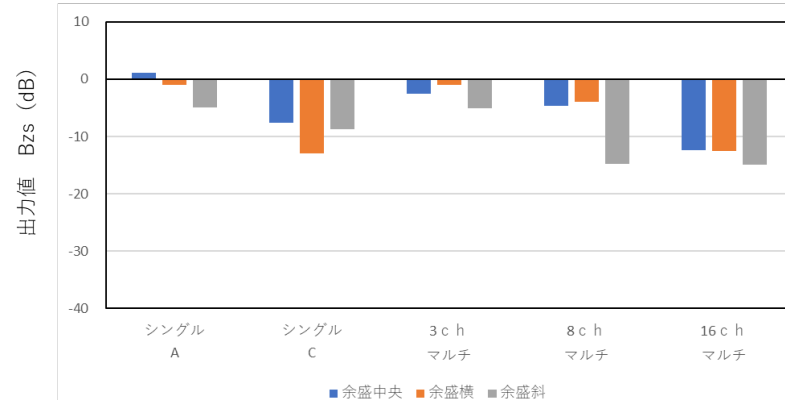
溶接部のきずの位置の影響 (Bzs)



溶接部のきずの角度の影響 (Bxs)



溶接部のきずの角度の影響 (Bzs)



⑨溶接部の表面形状による影響の検証結果

<きずの位置及び方向について>

標準と考えられる綺麗な手動溶接を試験片として比較する。

試験パラメーター

試験片 : TP-5 (S74~S78)
 きずの位置 : 上止端部、余盛部、下止端部
 きずの方向 : 0° (溶接線方向)、45°、90°



検証結果及び考察

全ての検出信号でバタフライプロットが形成され、きずを検出した。検出信号は、上止端部、余盛部、下止端部の順に低下する傾向を確認した。きずの位置による検出信号の低下の程度は機器により異なり、機器によってはきずの位置の影響に対して堅牢であるものが確認された。検出信号は試験面とプローブの接触状況から隙間（リフトオフ）が発生したことにより低下したと推察される。検証結果から、溶接部におけるきずの位置はプローブとの接触状況によりきずの検出に大きく影響を与えることが確認されたため、機器ごとに次の2点を行う必要がある。

- ① 試験対象の溶接部の形状とプローブとの隙間の状況に応じた感度の設定を行うこと。
- ② ①を踏まえ、設定した感度できずが検出できることを確認すること。
 (感度補正ができない場合は、試験対象の溶接部とプローブの接触状況できずを検出できること。)

方式	溶接余盛形状とプローブの接触状態 (概念)
シングル方式	
マルチ方式	
ETアレイ	

⑨溶接部の表面形状による影響の検証結果

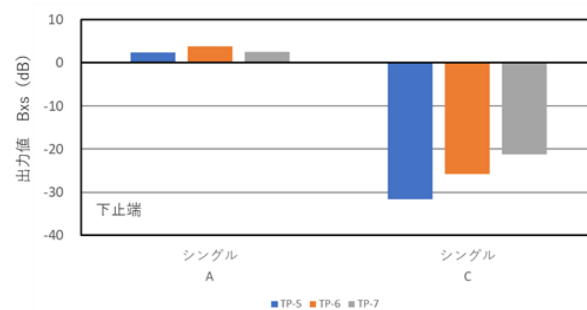
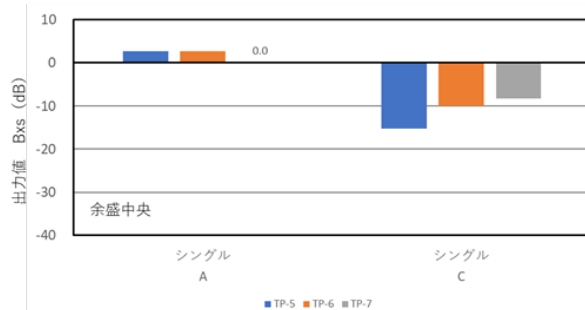
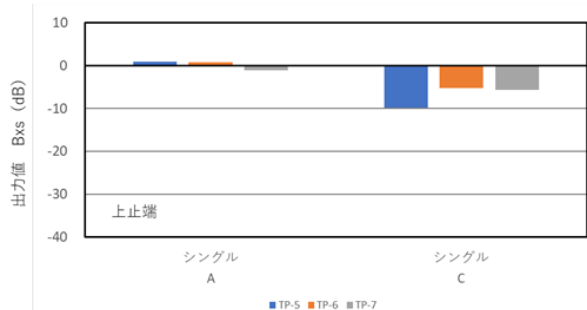
<表面形状について（シングルプローブの結果）>

表面形状の比較として、きれいな手動溶接、荒れた手動溶接、サブマージ自動溶接の検出信号を確認する。

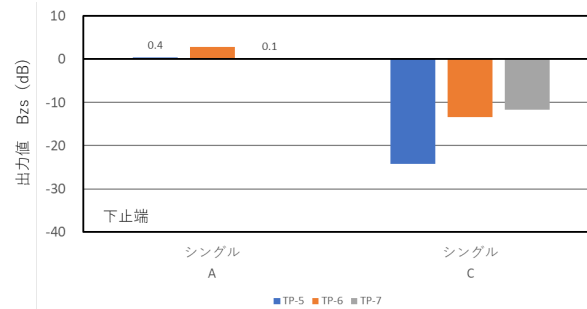
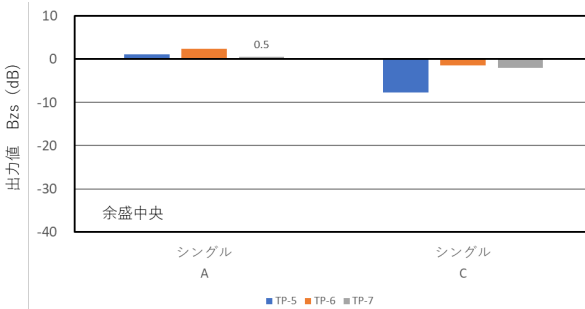
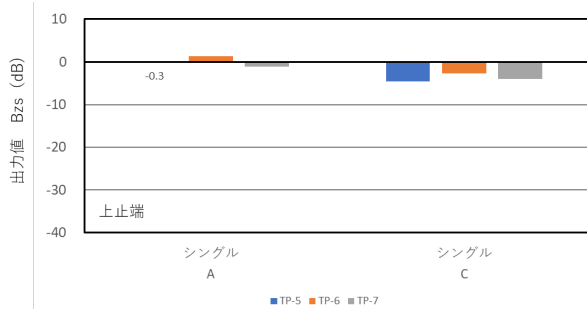
試験パラメーター

対象きず：TP-5（S74～S78：きれいな溶接部）、TP-6（S79～S83：荒れた溶接部）、TP-7（S84～S88：サブマージ溶接部）

表面形状の影響（Bxs：シングルプローブ）



表面形状の影響（Bzs：シングルプローブ）



⑨溶接部の表面形状による影響の検証結果

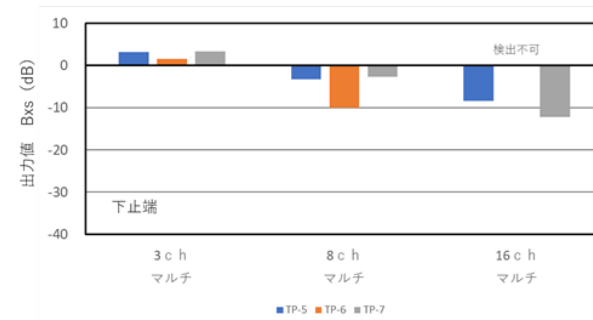
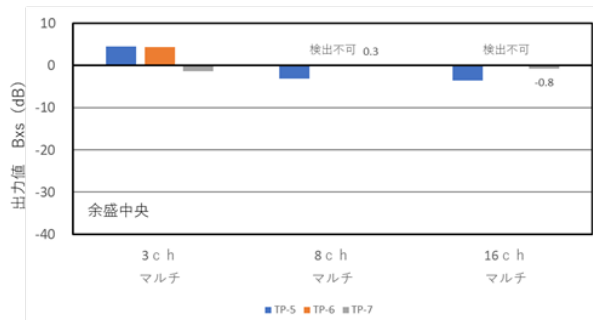
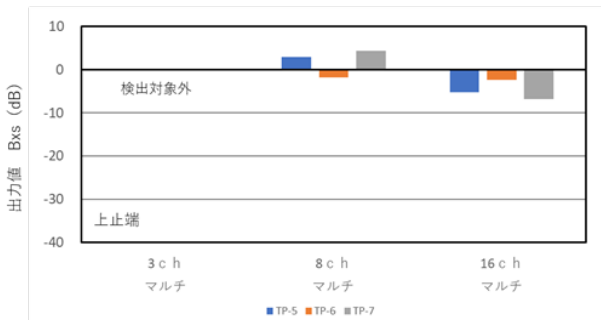
<表面形状について（マルチプローブの結果）>

表面形状の比較として、きれいな手動溶接、荒れた手動溶接、サブマージ自動溶接の検出信号を確認する。

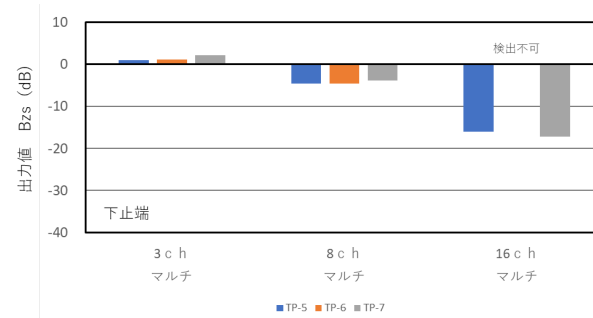
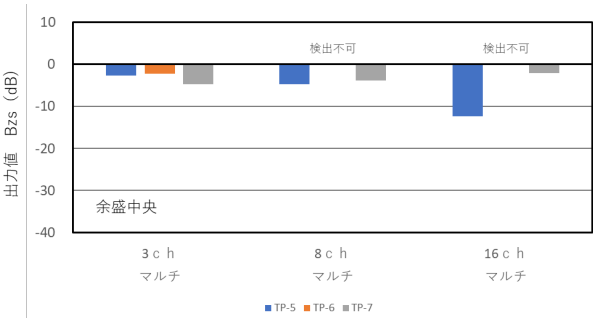
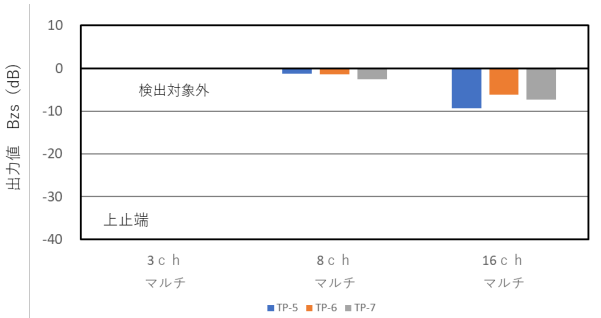
試験パラメーター

対象きず：TP-5（S74～S78：きれいな溶接部）、TP-6（S79～S83：荒れた溶接部）、TP-7（S84～S88：サブマージ溶接部）

表面形状の影響（Bxs：マルチプローブ）



表面形状の影響（Bzs：マルチプローブ）



⑨溶接部の表面形状による影響の検証結果

<表面形状について>

表面形状の比較として、きれいな手動溶接、荒れた手動溶接、サブマージ自動溶接の検出信号を確認する。

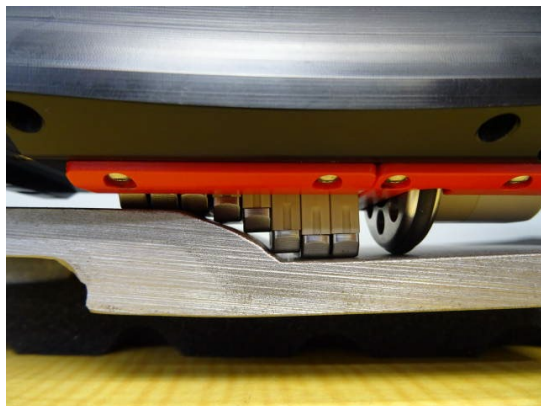
検証結果及び考察

表面形状の影響について確認した結果、シングルプローブでは全てのきずを検出することを確認した。一方、マルチプローブでは、表面形状が荒れている場合、きずを検出することが困難なケースが確認された。

シングルプローブでは機器より表面形状に対する影響が異なり、表面形状の影響を受けやすい機器では感度補正等の重要性がより高まるため、感度を高めに設定する。又は、溶接継手の表面形状を調整すること等が求められる。

一方、マルチプローブのうち、チャンネル数の多いタイプでは大きなうねりのある荒い溶接では、バタフライプロットを形成しないケースが確認された。プローブと試験面で数mm単位のリフトオフが発生し、かつ、表面の凹凸による更なるリフトオフが発生し、さらに、その状況による幾何学的効果によるノイズ信号により、バタフライプロットが形成されなかったと示唆される。よって、溶接継手の表面形状はきずの検出に大きく影響を与えるため、機器ごとに次の3点を行う必要がある。

- ① 表面形状に追従するプローブの走査方法の検討を行うこと。
- ② ①を踏まえ、表面形状に応じた感度の設定を行うこと。
- ③ ①②を踏まえ、設定した感度できずが検出できることを確認すること。
(感度補正ができない場合は、試験面においてきずを検出できること。)



方式	溶接余盛形状とプローブの接触状態 (概念)
シングル方式	
マルチ方式	
ETアレイ	

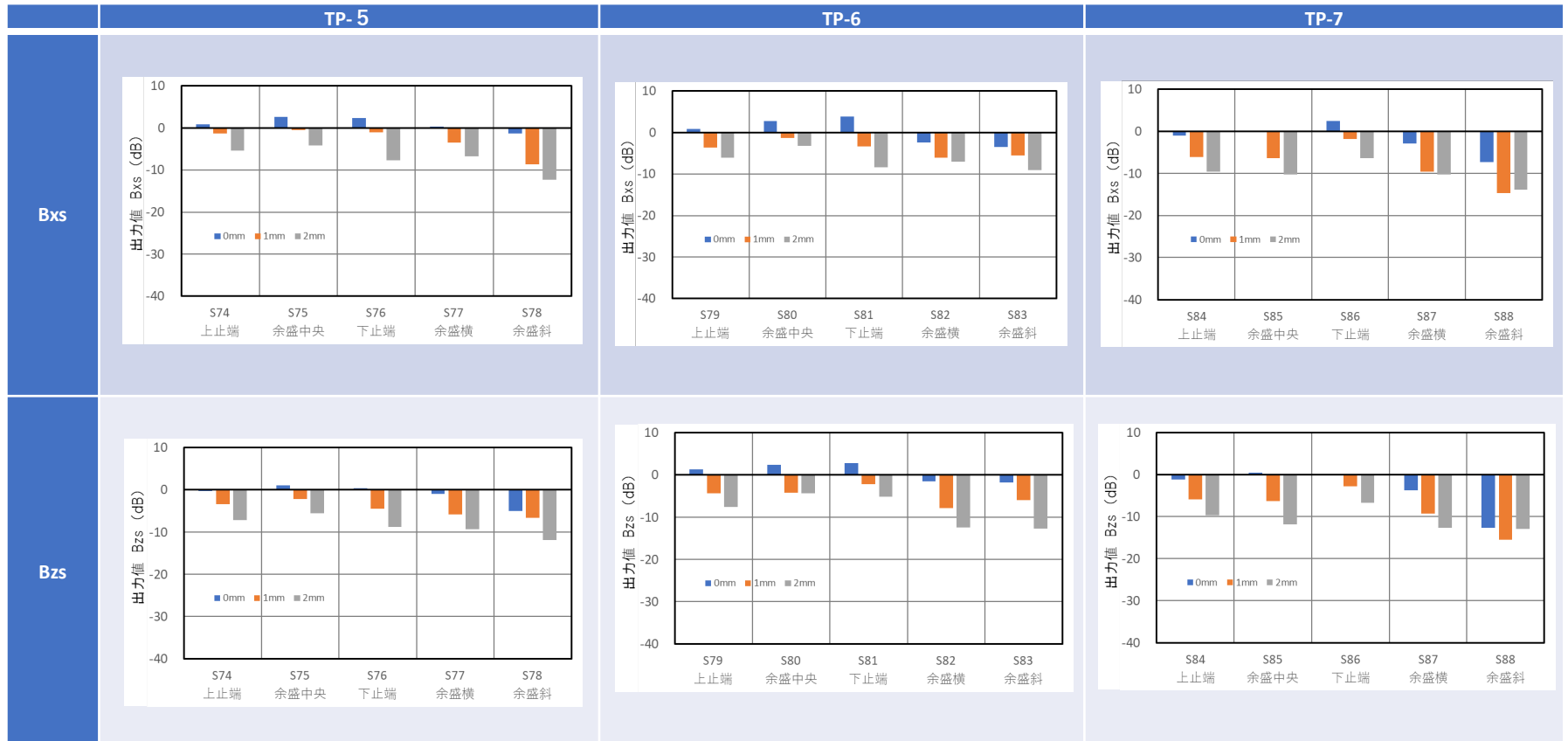
⑩溶接部のコーティングの厚さの影響の検証結果

コーティングの厚さ（リフトオフ）による基準きずの検出性を確認する。
 リフトオフは理想環境における検証と同様に0mm、1mm、2mmとした。
 なお、リフトオフは理想環境における検出性と同様に非磁性かつ非導電性の樹脂テープにより模擬した。

試験パラメーター

試験片：TP-5（きれいな溶接部）、TP-6（荒れた溶接部）、TP-7（サブマージ溶接部）
 リフトオフ：0mm、1mm、2mm

溶接部におけるリフトオフの影響（シングルプローブ Aチーム）



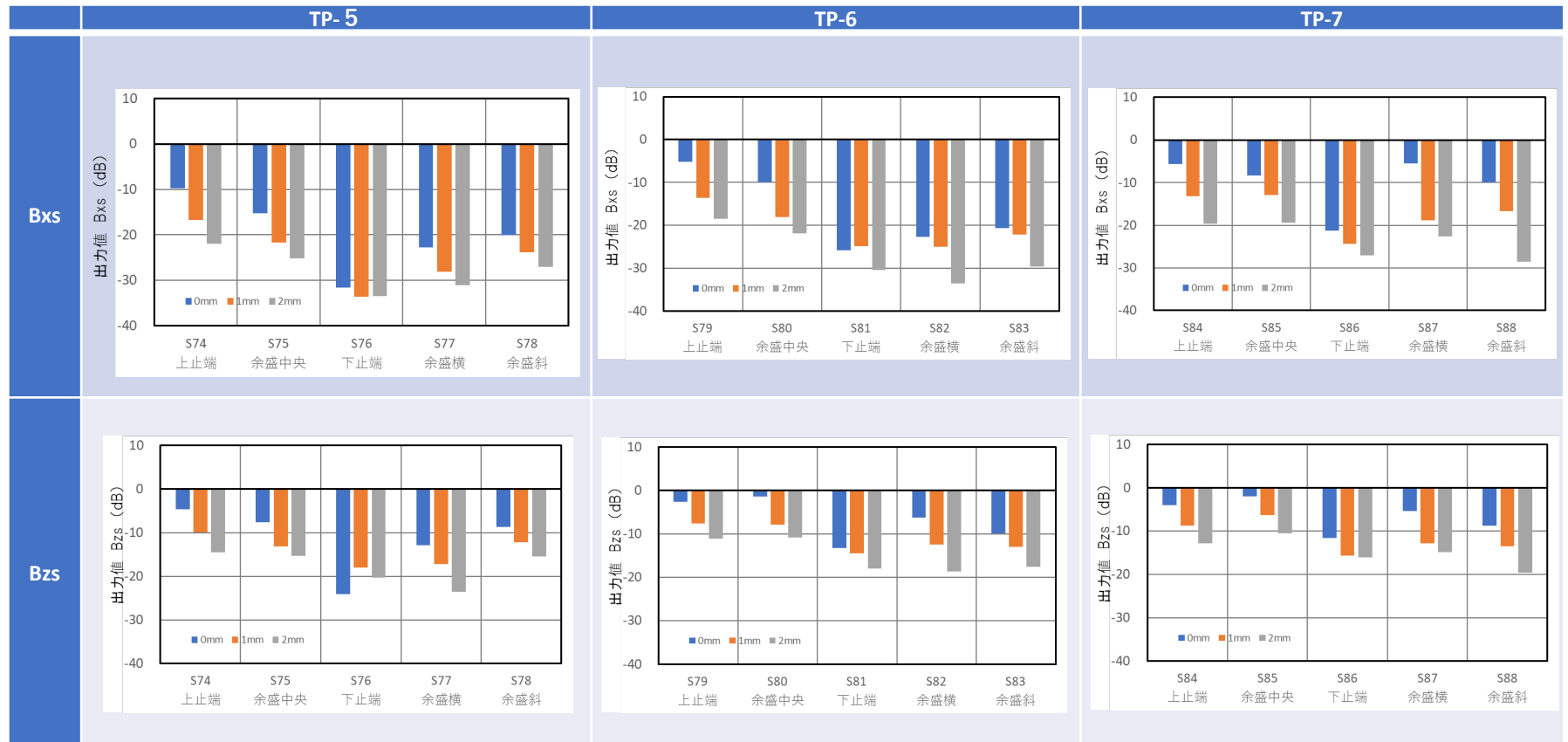
⑩溶接部のコーティングの厚さの影響の検証結果

コーティングの厚さ（リフトオフ）による基準きずの検出性を確認する。
 リフトオフは理想環境における検証と同様に0mm、1mm、2mmとした。
 なお、リフトオフは理想環境における検出性と同等に非磁性かつ非導電性の樹脂テープにより模擬した。

試験パラメーター

試験片：TP-5（きれいな溶接部）、TP-6（荒れた溶接部）、TP-7（サブマーシブ溶接部）
 リフトオフ：0mm、1mm、2mm

溶接部におけるリフトオフの影響（シングルプローブ Cチーム）



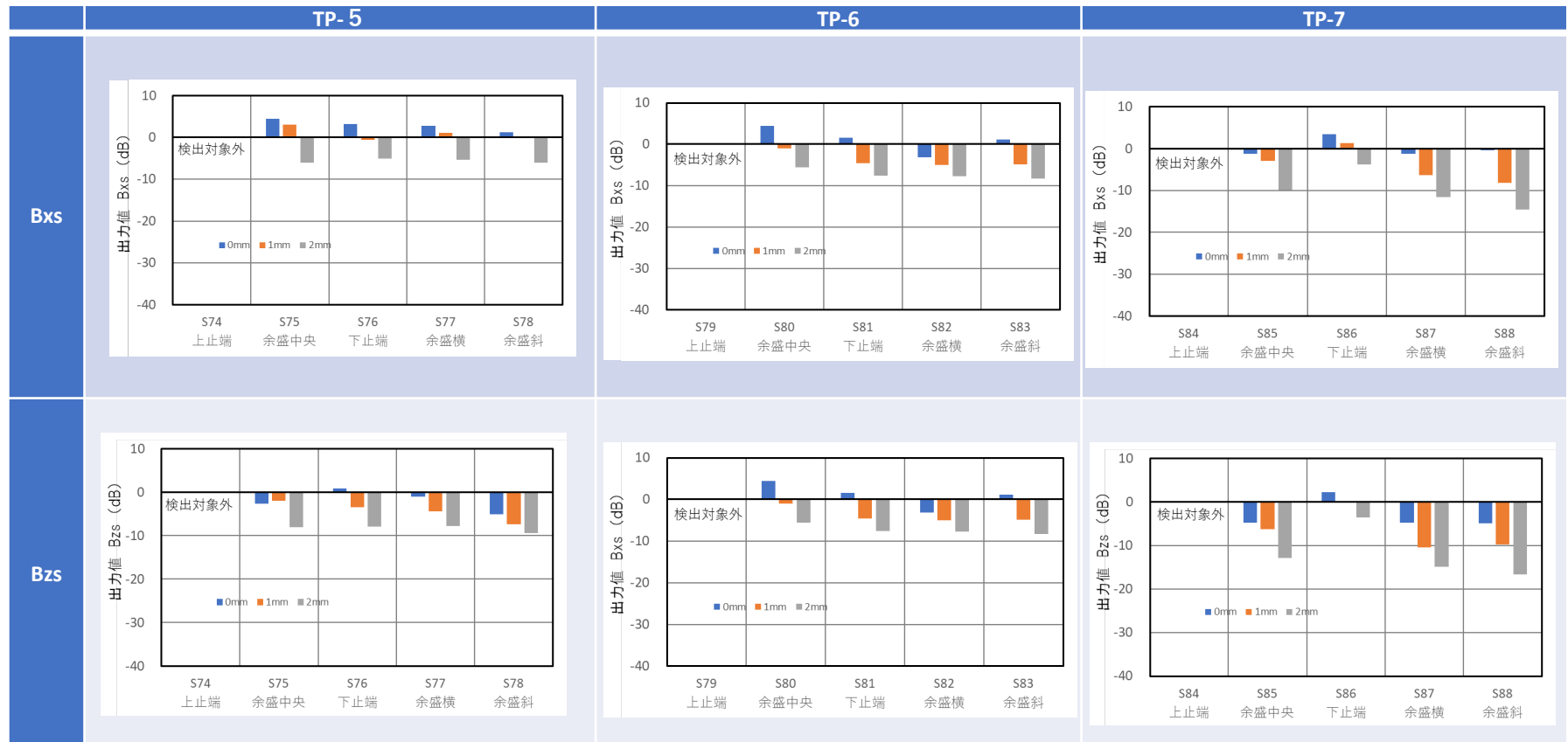
⑩溶接部のコーティングの厚さの影響の検証結果

コーティングの厚さ（リフトオフ）による基準きずの検出性を確認する。
 リフトオフは理想環境における検証と同様に0mm、1mm、2mmとした。
 なお、リフトオフは理想環境における検出性と同等に非磁性かつ非導電性の樹脂テープにより模擬した。

試験パラメーター

試験片 : TP-5 (きれいな溶接部)、TP-6 (荒れた溶接部)、TP-7 (サブマージ溶接部)
 リフトオフ : 0mm、1mm、2mm

溶接部におけるリフトオフの影響 (3chマルチプローブ Aチーム)



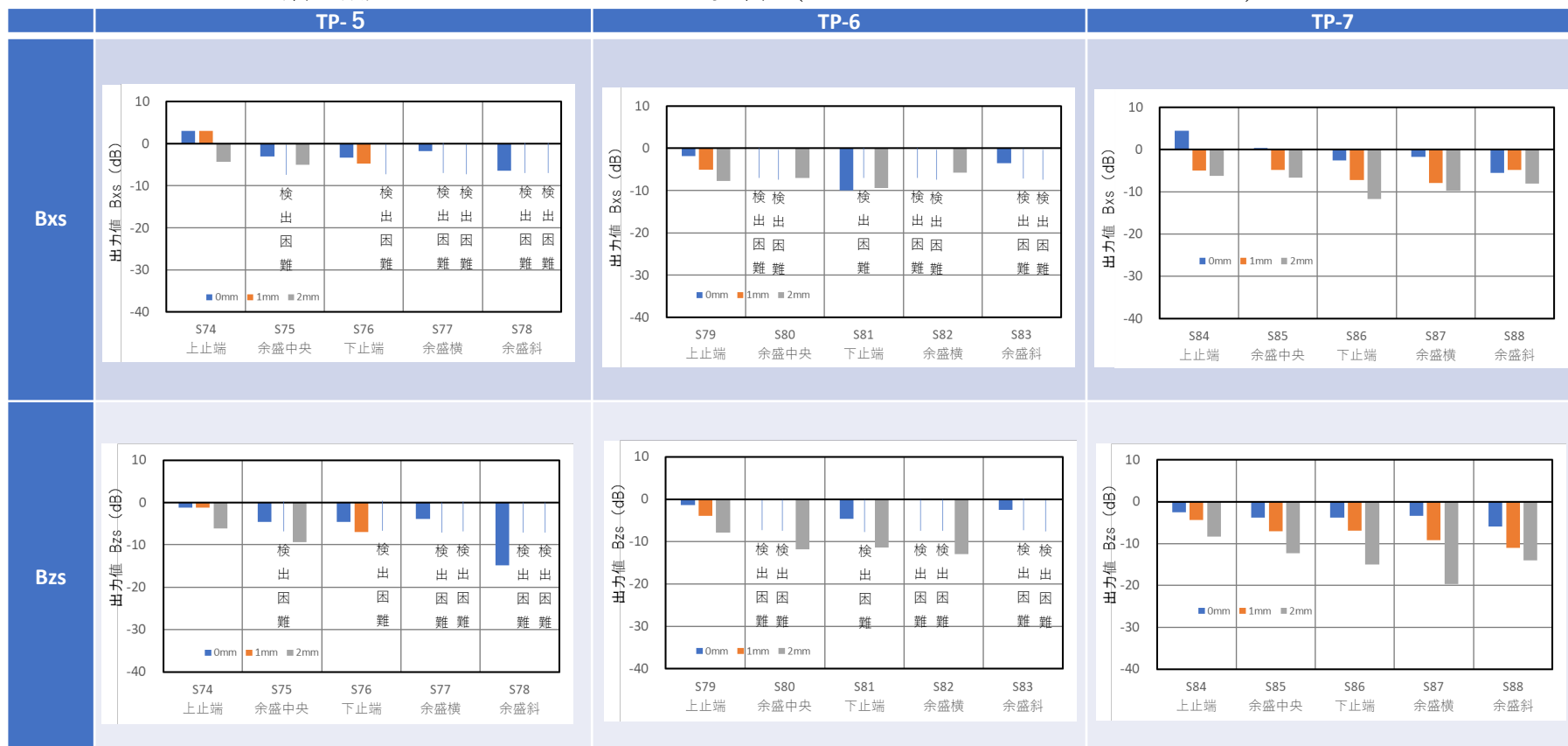
⑩溶接部のコーティングの厚さの影響の検証結果

コーティングの厚さ（リフトオフ）による基準きずの検出性を確認する。
 リフトオフは理想環境における検証と同様に0mm、1mm、2mmとした。
 なお、リフトオフは理想環境における検出性と同様に非磁性かつ非導電性の樹脂テープにより模擬した。

試験パラメーター

試験片：TP-5（きれいな溶接部）、TP-6（荒れた溶接部）、TP-7（サブマージ溶接部）
 リフトオフ：0mm、1mm、2mm

溶接部におけるリフトオフの影響（8chマルチプローブ Aチーム）



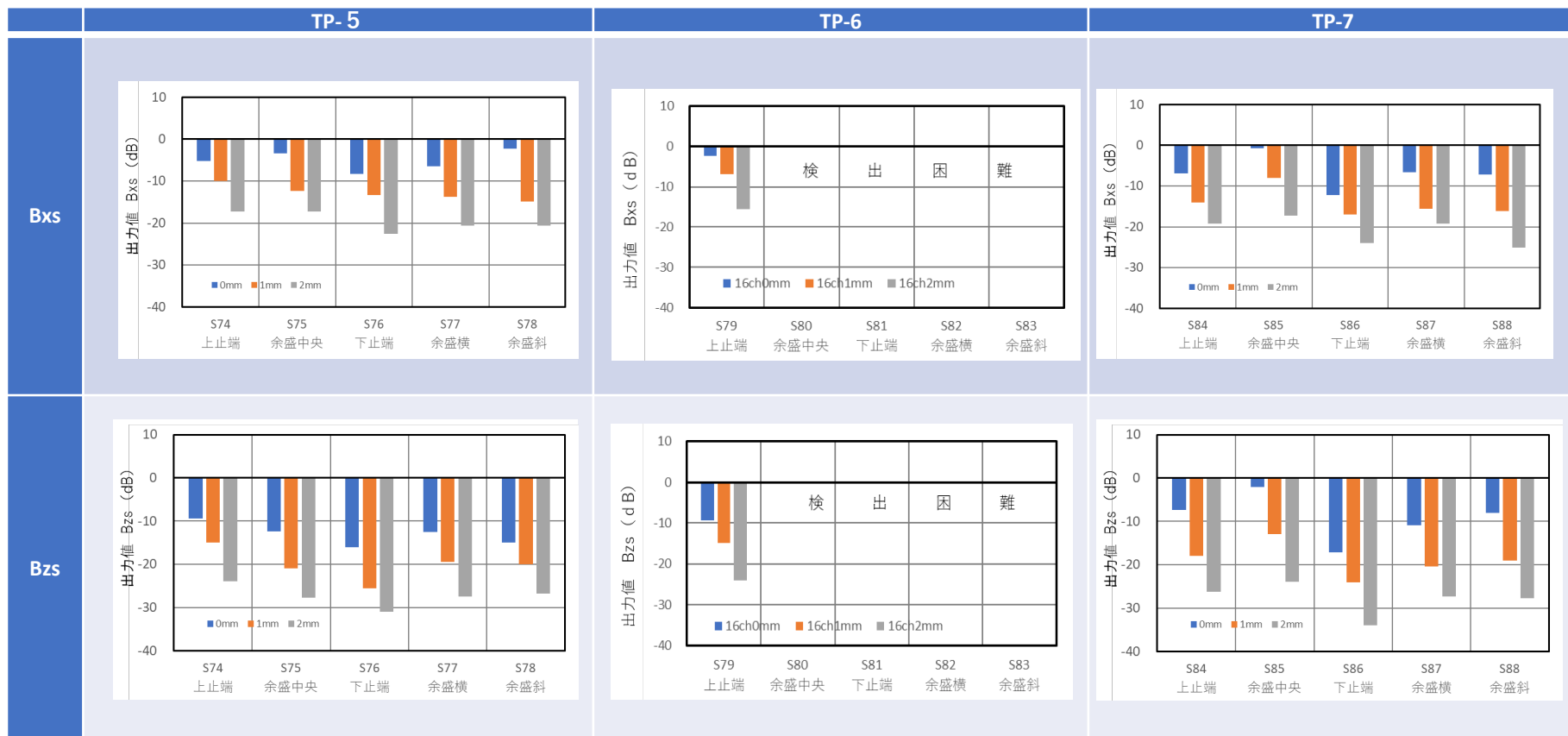
⑩溶接部のコーティングの厚さの影響の検証結果

コーティングの厚さ（リフトオフ）による基準きずの検出性を確認する。
 リフトオフは理想環境における検証と同様に0mm、1mm、2mmとした。
 なお、リフトオフは理想環境における検出性と同様に非磁性かつ非導電性の樹脂テープにより模擬した。

試験パラメーター

試験片：TP-5（きれいな溶接部）、TP-6（荒れた溶接部）、TP-7（サブマージ溶接部）
 リフトオフ：0mm、1mm、2mm

溶接部におけるリフトオフの影響（16chマルチプローブ Bチーム）



⑩溶接部のコーティングの厚さの影響の検証結果

コーティングの厚さ（リフトオフ）による基準きずの検出性を確認する。
リフトオフは理想環境における検証と同様に0mm、1mm、2mmとした。
なお、リフトオフは理想環境における検出性と同様に非磁性かつ非導電性の樹脂テープにより模擬した。

試験パラメーター

試験片：TP-5（きれいな溶接部）、TP-6（荒れた溶接部）、TP-7（サブマージ溶接部）
リフトオフ：0mm、1mm、2mm



検証結果及び考察

リフトオフに応じて検出信号が低下する傾向を確認した。理想環境の結果と比較すると同程度の検出信号の低下であるため、同様に感度設定等をする必要がある。

きずの検出については、サブマージ溶接継手では全ての検出信号からバタフライプロットを形成し、きずを検出した。荒れた又はきれいな重ね継手では、リフトオフ1mm、2mmにおいて、チャンネル数の多いアレイタイプでバタフライプロットが確認できないケースが確認され、きずの検出が困難であった。一方で、一部でリフトオフ1mmでは検出困難であったケースがリフトオフ2mmでは検出可となるケースが確認されたこと、シングルプローブ及びチャンネル数の少ないプローブではきずの検出が可能であったことから、試験面とプローブの接触状況がきずの検出に大きな影響を与えていることが示唆された。よって、試験面の表面形状及びリフトオフはきずの検出に大きく影響するため、溶接継手の表面形状と同様に感度設定等をする必要がある。また、コーティングがある状態においても溶接部の表面形状はきずの検出性に大きく影響することから溶接部の表面を滑らかに調整することは効果的であると考えられる。



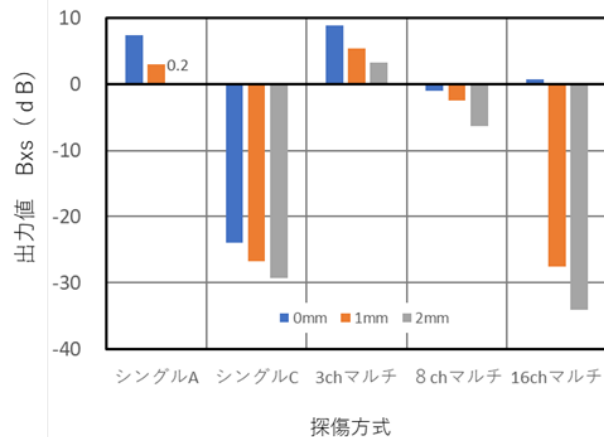
⑪自然きずの検出性の検証結果

自然きずの検出性を確認するため、突合せ溶接継手の止端部に割れを発生させた試験片を製作した。
なお、割れの寸法は製作上の理由から基準きずより大きくなるため、参考として計画したものである。

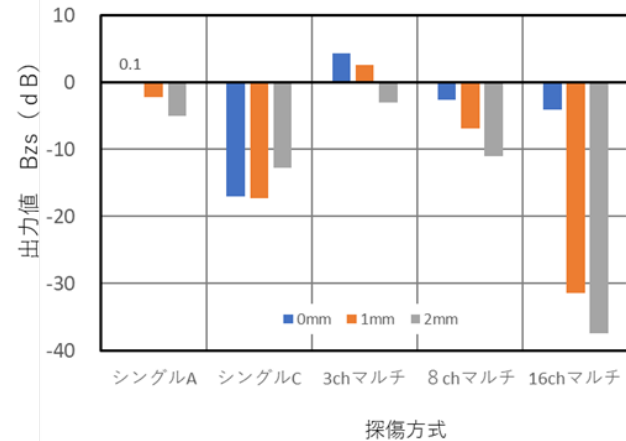
試験パラメーター

試験片 : TP-8
対象きず : 自然きず
リフトオフ : 0mm、1mm、2mm

自然きずの検出性 (Bxs)



自然きずの検出性 (Bzs)



検証結果及び考察

16チャンネルマルチプローブは、すみ肉溶接用プローブであったため、自動走査ではなく、手動走査を行った。そのことによりオフセット 0 mmと 1 mmで検出信号が大きく低下したと推測される。また、16チャンネルマルチプローブは、1軸のスキャナーを用いた自動走査あるため、表面形状の凹凸とプローブが干渉し、プローブが破損する可能性があった。このことから表面形状に応じたプローブの選択、及び選択したプローブに適した走査方法で試験を実施することが重要であることを確認した。

試験技術者レベルによる試験結果への影響

【規格調査】

(1) 試験技術者に関する次の規格について、調査した。

国内規格：JIS Z 2305

海外規格：PCN24/GEN/APP/ET

(2) 試験方法に関する次の規格について、調査した。

海外規格：ASTM E2261/E2261M-17(2021)

【試験技術者による検出性】

試験技術者によるきずの検出性を評価するため、表の試験条件で各試験技術者が行った試験結果を比較する。

チーム	A		
試験技術者	ACFM 熟練者 ^{※1} ET レベル 2 資格保有者 ^{※2} (試行回数：3回) ET レベル 3 資格保有者 ^{※2} (試行回数：3回)		
プローブ形式	シングル	3 ch マルチ	8ch マルチ
試験片	TP-5~8	TP-5~7	TP-7
対象きず	下止端部 ^{※3}	上止端部を除くきず ^{※4}	全てのきず
リフトオフ	0mm、1mm、2mm		

※1 指標とするため、通常通り走査し、最も検出信号が高いデータを採用

※2 ACFMのプローブを初めて触れ、溶接部の操作方法を簡単にレクチャーした者

※3 検出信号が低下し易い下止端部を対象とした

※4 下止端部を含めた1回の走査で探傷可能な範囲を対象とした

⑫試験技術者レベル試験結果への影響の検証結果

【規格調査】

試験技術者に関する規格

< JIS Z 2305 >

JIS Z 2305はISO 9712を取り入れ、国際基準に整合した規格であり、技術者の技量をレベル1からレベル3までのカテゴリに分けた認証に関する規格である。レベル1はレベル2以上の技術者管理の下で指示書に従い試験を行い、一定の結果を得ることが求められる。レベル2はレベル1の他に、レベル2以下の技術者の手順書に基づいた作業管理、結果に対する一定の解釈（判定）が求められる。レベル3はレベル2の他に、レベル3以下の技術者の技術指導の他、方法選定や適用限界の判断等が求められる。

ACFMに類似する渦電流探傷試験に関する資格認証はあるがACFMに関する記載は確認されなかった。一方、附属書F（参考）「技法に関する訓練」に非破壊検査試験方法の枠組みの中で開発された非破壊試験技法の利用拡大を考慮した指針が示されており、その中では新たな技法の利用における推奨追加訓練時間等が記載されている。よって、新たな技法の利用においては、一定の訓練を設けることで利用することが可能と考えられる。

資格認証を行っている日本非破壊検査協会が公開している渦電流探傷試験に必要な訓練を示すシラバスを確認するとACFMを屋外貯蔵タンクに適用する場合に必要と考えられる訓練事項を表2-13にまとめた。なお、表2-13のうち、屋外貯蔵タンクを対象に試験するための訓練事項の屋外貯蔵タンクで発生するきず、省令、施工通知、運用通知については、合格基準が示された場合は対象とするきずが明確なものとなることから特別な訓練は不要と考えられる。

表 ACFMを屋外貯蔵タンクに適用する場合に必要と考えられる訓練事項

JSDIシラバスより抜粋		ACFMを屋外貯蔵タンクに適用する場合に必要と考えられる訓練事項	
訓練内容	主な訓練項目	ACFM技術者として必要な訓練事項	屋外貯蔵タンクを対象に試験するための訓練事項
電磁誘導試験の適用	試験コイル（内挿、貫通、上置）	ACFM用コイルの特徴	—
	励磁と検出方法	バタフライプロットの原理	—
訓練事項	等級、状態や形状	—	屋外貯蔵タンクの溶接部の状態
対比試験片	対比試験片の目的	—	屋外貯蔵タンクの探傷用の対比試験片
探傷試験の実際	上置プローブ	ACFM用コイルの走査方法	—
	プラント構造物と配管に発生するきず	—	屋外貯蔵タンクで発生するきず
評価	合否基準（コード、標準）	—	屋外貯蔵タンクの合否判定
品質アспект	国内外の試験方法と製品規格	—	省令、施行通知、運用通知

【規格調査】

試験技術者に関する規格

< PCN24/GEN/APP/ET >

英国非破壊検査協会（BINDT）が運営する資格認証制度（PCN：Personnel Certification in Non-Destructive Testing）の2024年版をPCN24と表記しており、PCN24はISO 9712を取り入れ国際基準に整合した認証制度である。PCN24/GEN/APP/ETは電磁探傷法（ET：the electromagnetic testing method）の技術者のPCN認定資格及び試験要件を定めたものであり、本規格では、電磁探傷法のうち、溶接部を対象とした渦電流探傷試験、ACFM等の資格認証について記載されている。渦電流探傷試験とACFMのシラバス上での主な差異は、ACFMでは長さ、深さのサイジングに関する部分が含まれることであるが、本検討対象である溶接部における基準きずではきずの長さ、深さをサイジングすることは困難であるため、影響はないと考えられる。

【規格調査】

試験方法に関する規格

< ASTM E2261/E2261M-17(2021) >

ASTMインターナショナル（旧称 ASTM（米国材料試験協会））が設定、発行しているASTM規格の一つであり、ACFMを用いた溶接部試験の標準的な手法を示した規格である。適用範囲、作業者の資格、要求事項等の一般的な事項の他に試験における留意事項等が記載されている。

本規定の中で、タンク溶接部においてきずの検出性に大きく影響があると考えられる項目としては、次の2点である。詳細については、当該規格を参照されたい。

- ① 溶接部に適したプローブの選択
- ② 適切な走査方法

⑫試験技術者レベル試験結果への影響の検証結果

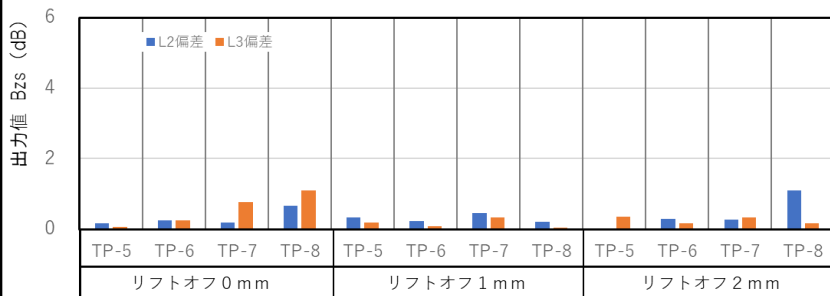
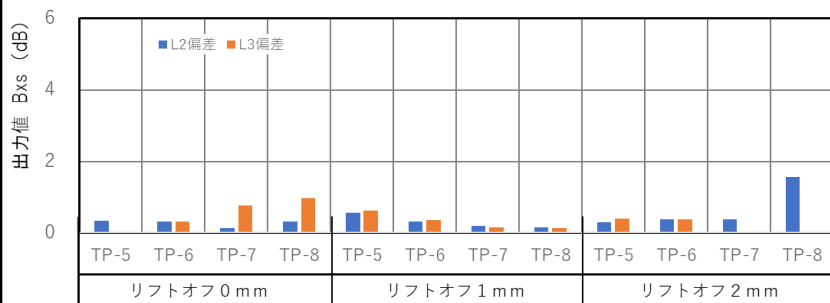
【試験技術者による検出性】

渦電流探傷試験資格保有者における走査のばらつきを確認するため、ACFMの熟練者が実施したS67の検出信号を基準信号とし、各種きずから得られた検出信号をdB表記でまとめた。次にきず毎にACFM熟練者の検出信号と渦電流探傷試験技術者の検出信号を差分し、その差を確認した。

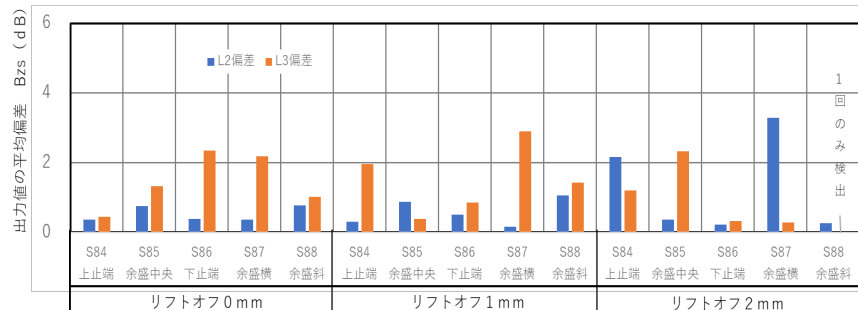
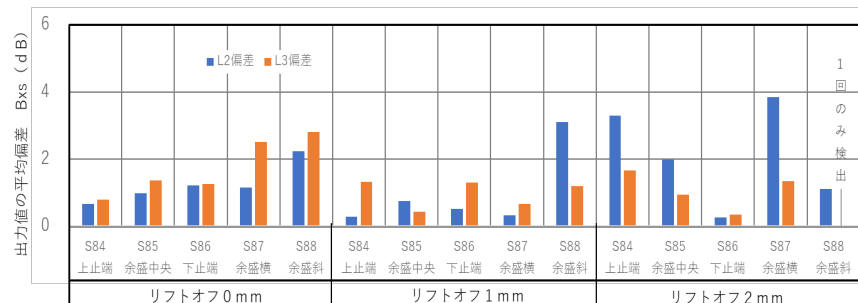
<渦電流探傷試験資格保有者事の偏差>

下図に示した通り、シングルプローブを用いた場合、Bxsで最大1.6dB、Bzsで最大1.1dBであり、資格保有者は再現性のある走査方法で試行したことが推察される。マルチアレイプローブを用いた場合、各きずの信号の偏差はBxsで3.8dB、Bzsで3.3dBとなった。シングルプローブと同様に再現性のある走査を行っていることが推察されるが、マルチアレイプローブではきずの検出は問題なく行えるが、評価を行うデータを採取する場合は検出信号が最も大きくなるように再走査するなど対応が必要である。

シングルプローブにおける試験技術者毎の偏差
(TP-5～8 下止端部)



8 chアレイプローブにおける試験技術者毎の偏差
(TP-7)



⑫試験技術者レベル試験結果への影響の検証結果

【試験技術者による検出性】

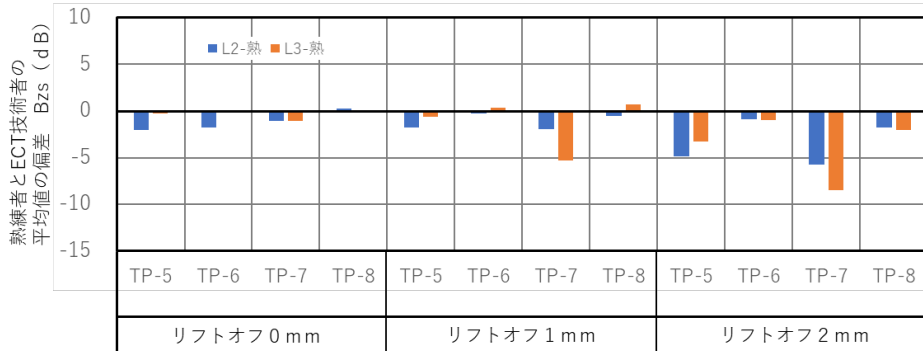
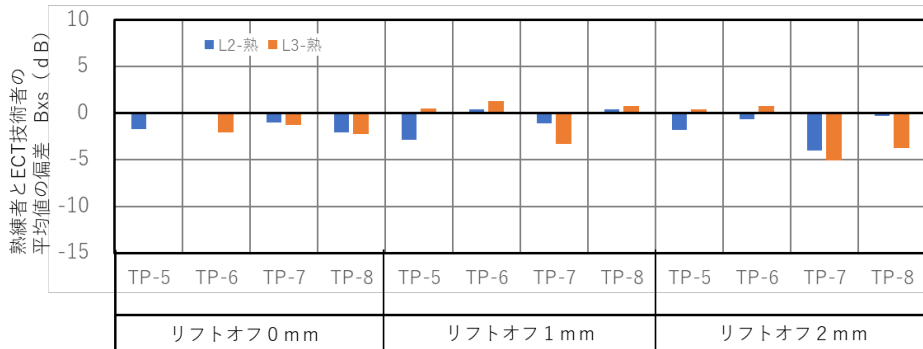
ECT資格保有者における走査のばらつきを確認するため、ACFMの熟練者が実施したS67の検出信号を基準信号とし、各種きずから得られた検出信号をdB表記でまとめた。次にきず毎にACFM熟練者の検出信号とECT技術者の検出信号を差分し、その差を確認した。

< 渦電流探傷試験資格保有者とACFM熟練者との差 >

(1) シングルプローブの場合

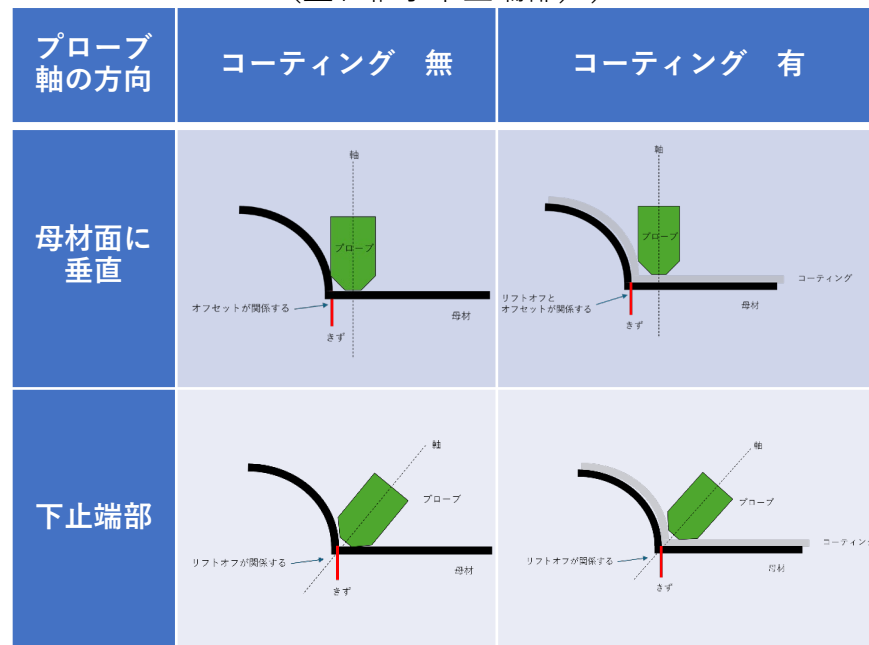
下図に熟練者と渦電流探傷試験資格保有者が試験を実施した検出信号の差を示した。リフトオフに応じて、熟練者との差が大きくなる傾向が確認された。コーティングがある場合、きず位置とプローブの走査方法例に示すようなきずとプローブの位置関係からリフトオフ又はオフセットが生じやすいため、プローブの径等に応じた走査方法を熟知しておく必要がある。

シングルプローブにおける試験技術者による差 (TP-5～8 下止端部)



L2-熟：ETレベル2資格保有者とACFM熟練者の検出信号の差
L3-熟：ETレベル3資格保有者とACFM熟練者の検出信号の差

きずとプローブの位置関係による影響例 (重ね継手下止端部)



⑫試験技術者レベル試験結果への影響の検証結果

【試験技術者による検出性】

ECT資格保有者における走査のばらつきを確認するため、ACFMの熟練者が実施したS67の検出信号を基準信号とし、各種きずから得られた検出信号をdB表記でまとめた。次にきず毎にACFM熟練者の検出信号とECT技術者の検出信号を差分し、その差を確認した。

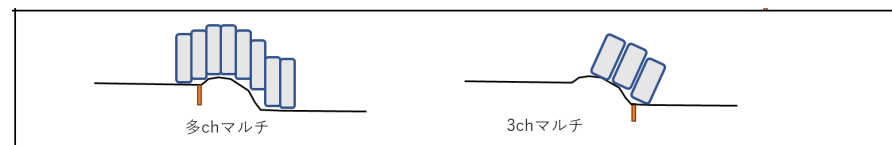
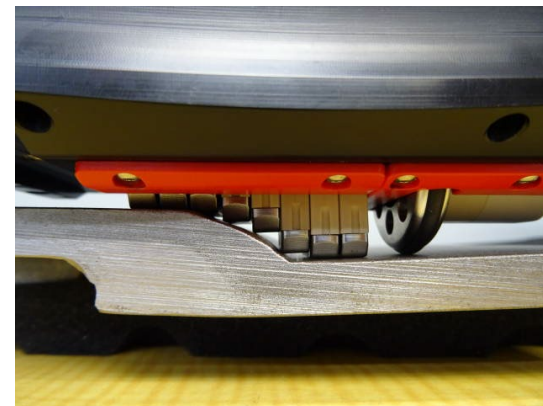
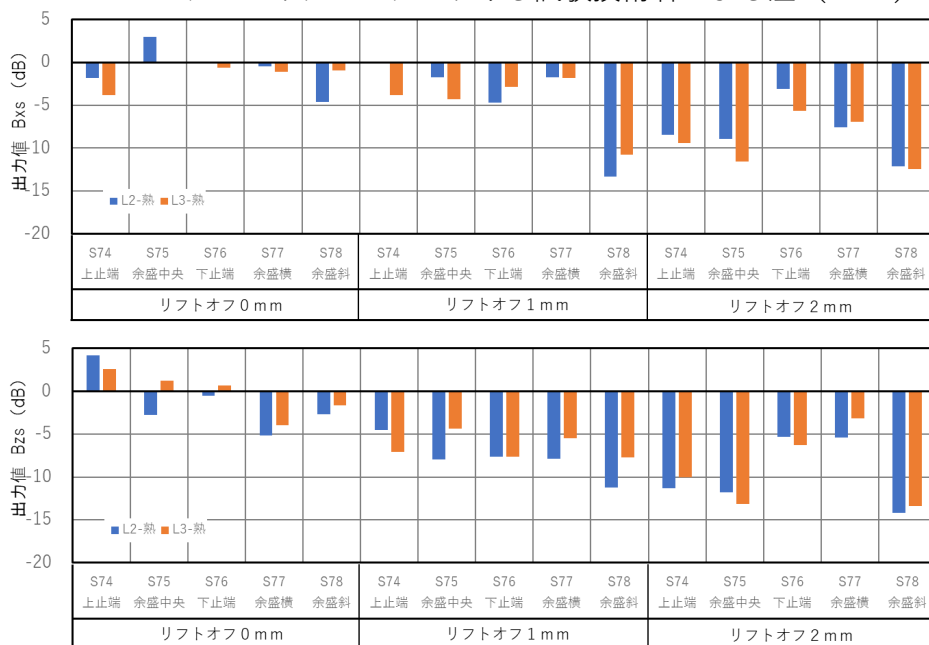
<渦電流探傷試験資格保有者とACFM熟練者との差>

(2) :マルチプローブの場合

下図に示す通り、熟練者の検出信号より渦電流探傷試験資格保有者の検出信号が小さくなる傾向が確認された。マルチプローブは複数のプローブが並んでいるため、シングルプローブのように溶接部の形状に沿った走査方法が困難であるため、きず位置とプローブの走査方法例の様にリフトオフとオフセットが顕著に発生する。

よって、プローブの特性等を熟知し、検出信号が最も大きくなる走査をする必要がある。また、実運用では漏れなくきずを検出するために、溶接部に適したプローブの選択、適切な検出感度の設定、適切な走査方法を検討し、基準きずを検出できることを確認することが重要である。

8chマルチアレイプローブにおける試験技術者による差 (TP-5)



L2-熟：ETレベル2資格保有者とACFM熟練者の検出信号の差

L3-熟：ETレベル3資格保有者とACFM熟練者の検出信号の差

交流電磁場測定法の検証による項目と方法（まとめ）

1. ACFMの特性について

< 基準きずの設定 >

長さ4.0mm、深さ1.5mmのきずを指標として、きずの幅については検出信号への影響が小さいことを確認したことから、きずの製作の精度及び施工性の観点から基準きずの幅は0.5mm以下とすることが妥当であると考えられる。

また、きずの形状による検出信号の影響は、矩形と円弧を比較した結果、Bx信号では形状による影響が確認されたが、Bz信号では形状による影響は少ないことが確認されたことから、基準きずの形状は矩形とすることが妥当であると考えられる。なお、基準きずを設ける対比試験片の材質については、強磁性体の低炭素鋼については検出信号への影響が少ないことが確認されたことから、強磁性体の低炭素鋼については品質及び入手性の観点からSM400材が妥当と考えられる。

アルミニウム合金、ステンレス鋼等については検討を行っていないため、材質による影響を確認し、基準きず及び材質による影響を確認する必要がある

< 基準きずの検出性 >

理想環境（平板）における基準きずの検出性について調査した結果、使用した機器で全てのきずを検出できることを確認したが、機器毎に検出感度が異なったため、機器に応じた感度補正等が必要である。理想環境における感度補正の項目は以下の①～③に示す。

① 角度感度特性 ② オフセット特性 ③ リフトオフ特性

きずの大きさの評価性として、基準きずに類する寸法のきずではバタフライプロットが形成することを確認した。バタフライプロットは、一定以上の深さを有する線状のきずがあることを示しており、きずの検出はバタフライプロットの有無で判断することが妥当と考えられる。次に、きず断面積と検出信号の振幅値に正の相関が確認されたことから、きずの断面積に対してBx信号より強い相関を示したBz信号より評価することが妥当と考えられる。よって、合格基準は規則第20条の8第4項と同様に、「溶接継手を模した試験片に製作した基準きずを走査したときに生ずるBz信号を超えないこと」とすることが妥当と考えられる。

実環境（溶接継手）における基準きずの検出性について調査した結果、表面形状が急激に変化する重ね継手の止端部や表面形状が荒い手動溶接でバタフライプロットを形成しないことが確認された。実環境（溶接継手）における感度補正の項目としては、上記①～③の他に以下である。

④ きずの位置 ⑤ 溶接継手表面形状

きずの検出が困難であった要因は、試験面とプローブの接触状況によりリフトオフ等が発生したと推察された。対策例を次に示す。

- ・ 試験面をプローブが沿うように滑らかな形状に調整する。
- ・ 試験面に応じた走査方法を検討し、その走査方法によりプローブを走査する。
- ・ 試験面の表面形状を考慮し、試験面に沿うようなプローブを選択する。

2. 試験技術者

試験技術者に関する規格として、PCN24/GEN/APP/ETを調査した結果、電磁探傷法の一部としてACFMは扱われており、同列の技法として渦電流探傷試験があることを確認した。また、PCN24のACFMと渦電流探傷試験のシラバスでは大きな差がないことを確認した。次に、国内の認証機関である日本非破壊検査協会が公開している渦電流探傷試験のシラバスを比較するとACFMの機器構成、検出信号（Bx信号及びBz信号）及びバタフライプロットに関する部分等が含まれていないことを確認した。よって、ACFM試験技術者には渦電流探傷試験資格を保有していることと共にACFMの機器構成等について習熟していることが望ましい。

試験方法に関する規格として、ASTM E2261/E2261M-17(2021)を調査した結果、検出性に影響がある項目として、主なものは溶接部に適したプローブの選択と走査方法であることを確認した。また、試験技術者による検出性を確認した結果、マルチアレイプローブのように表面形状との接触性を確保し難い場合、熟練者との差異があることが確認された。よって、ACFM試験技術者には溶接部に適したプローブの選択と走査方法等について習熟していることが望ましい。