

タンク開放検査の合理化に関する調査  
(コーティング上からの溶接線検査)  
超音波探傷による溶接線検査装置の  
調査・開発状況

平成28年12月9日(金)

石油天然ガス・金属鉱物資源機構

# 資料の構成

- 1. 背景及び経緯
- 2. 溶接線検査装置の開発
- 3. 超音波探傷の基本性能確認
- 4. 基本性能の整理
- 5. 実機試験による性能確認
- 6. 内部キズ等の検出性能
- 7. 斜め方向キズの検出性能
- 8. 溶接線応力検討
- 9. まとめ

# 1. 背景及び経緯

平成12年8月24日付け消防危第93号通達により示された新技術を用いて、コーティング上から、溶接部について非破壊試験を行い、溶接部に存在する欠陥を探傷する探傷装置の開発を目的に、平成21年度からJOGMECの委託事業として、(株)IHI検査計測が調査・開発に着手。

(消防危第93号通達、抜粋)

底部溶接部探傷装置によりコーティング上から溶接部試験をした場合の欠陥の大きさが以下に示す場合については、火災予防上支障がないと認め、政令第23条の規定を適用して、補修を行わなくても差し支えないものであること。

(1) 側板とアニュラ板の溶接継手については、**深さが1.5mmを、長さが4.0mm**をそれぞれ超えないものであること。

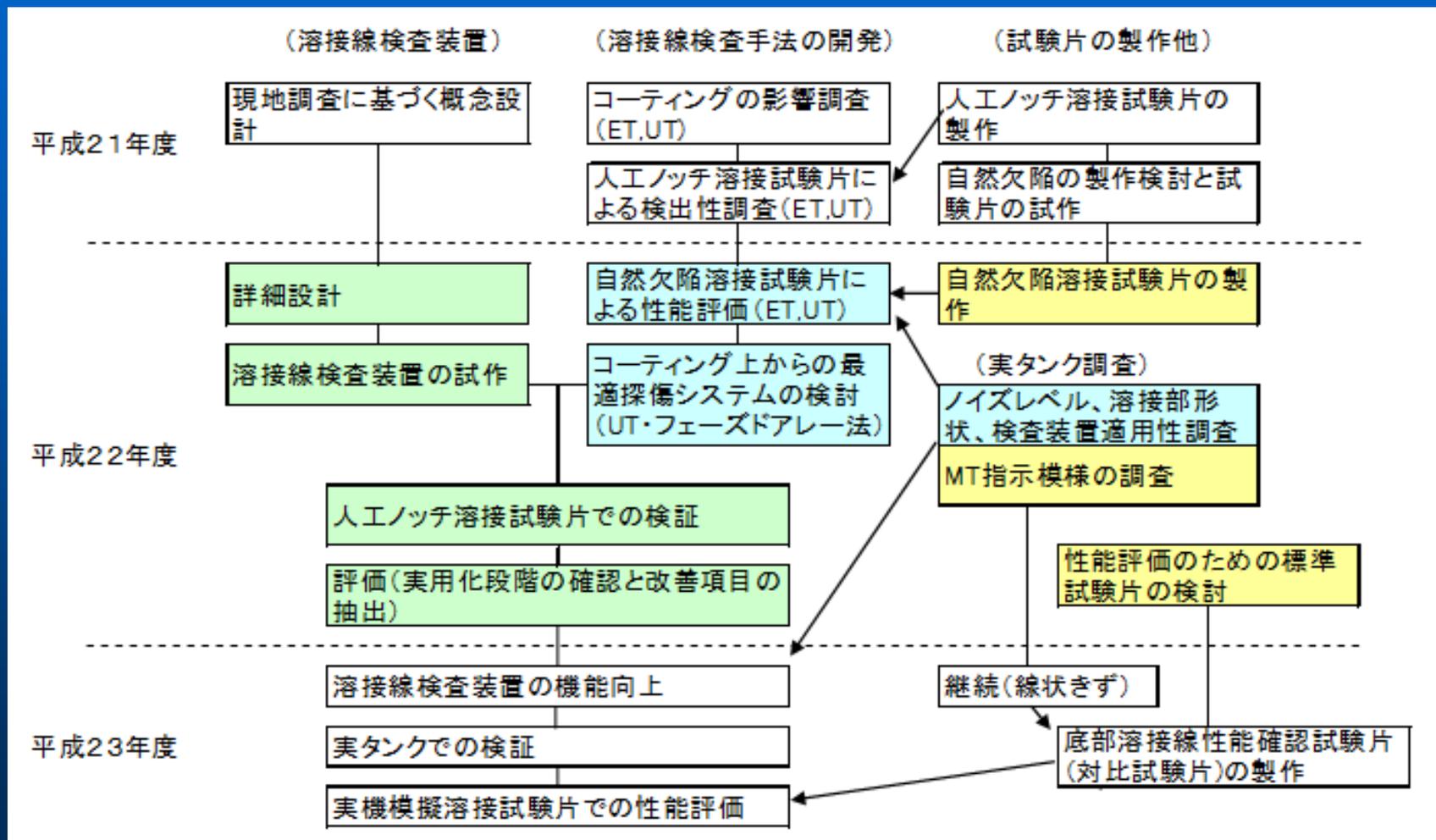
(2) 側板とアニュラ板の溶接継手以外の溶接継手については、**深さが3.0mmを、長さが6.0mm**をそれぞれ超えないものであること。

# 1. 背景及び経緯

- 平成21年度から平成23年度までの3か年で、フェーズドアレイ(超音波探触子)を用いた探傷装置の開発を行い、試験装置を試作、室内試験、実タンク試験で、基本的な装置性能を確認。
- 探傷装置の性能確認は、溶接線に平行及び直交する表面キズを対象に実施。
- 平成26年度からは3か年(予定)で、表面キズだけでなく、内部キズや斜め方向のキズの検出性能など、装置の詳細性能の把握を実施中。

# 1. 背景及び経緯

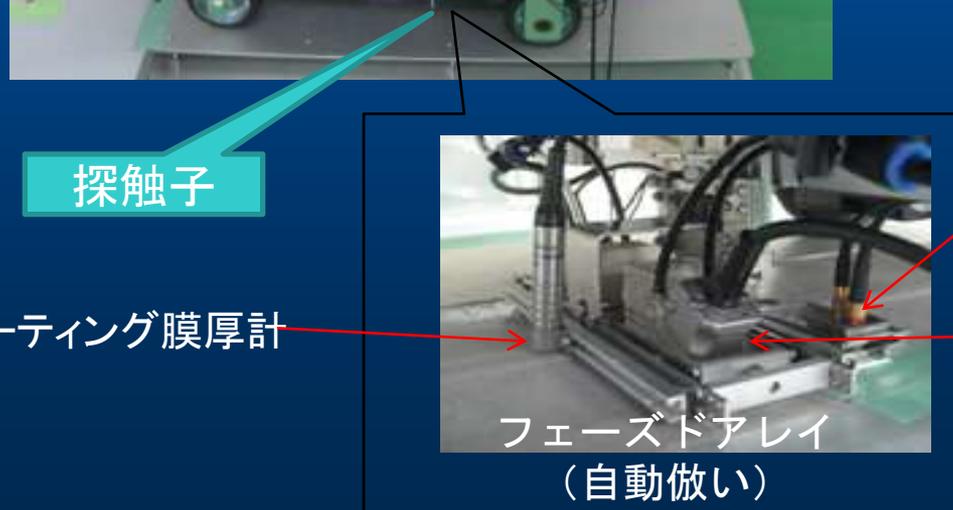
## 平成23年度までの調査・開発の流れ



## 2. 溶接線検査装置の開発



コーティングされた特定屋外貯蔵タンクの底板について、コーティングを剥ぐことなく、高感度の超音波探傷システムにより溶接部の欠陥を確認する装置。



溶接線直交配置一振動子探触子  
(溶接線に直交するキズ検知用)

溶接線斜交配置探触子  
(溶接線に並行するキズ検知用)

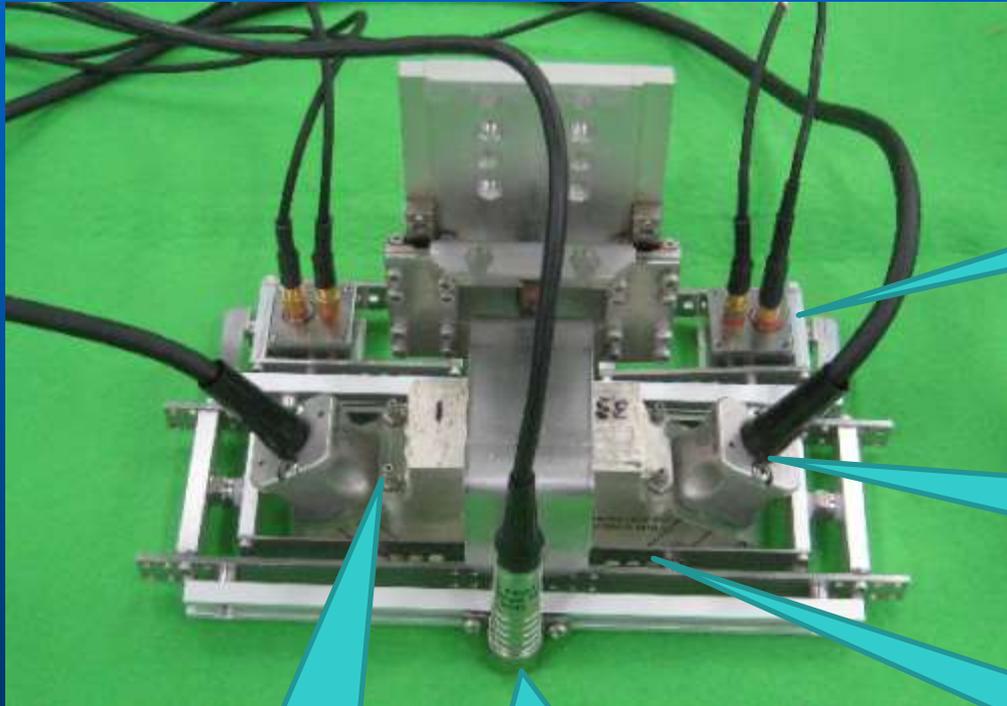
## 2. 溶接線検査装置の開発

### 主な装置仕様

- ・外形等：長さ約1000mm、幅約600mm、高さ約800mm、約40kg
- ・探傷システム：フェーズドアレイ探傷のセクタスキャン
- ・溶接線倣い機構：レーザトレース方式（市販の墨出し器レーザ（クラス1M）を溶接ビード中心に灯光して倣う方式（精度50m先で±1mm）
- ・底板の傾き補正：傾斜計搭載による補正
- ・計測速度：50mm/sec（自動走行、15mの溶接線で計測時間が5分程度）
- ・走行速度距離計：エンコーダーによる走行速度・距離測定（分解能：0.1mm）
- ・膜厚測定：電磁膜厚計により測定し、設定した膜厚と異なる場合アラーム表示
- ・接触媒質：0.3mmギャップ法、水の自動供給

## 2. 溶接線検査装置の開発

### センサ部



斜交方向キズ検出用の  
斜角探触子

並行方向キズ検出用  
フェーズドアレイ探触子

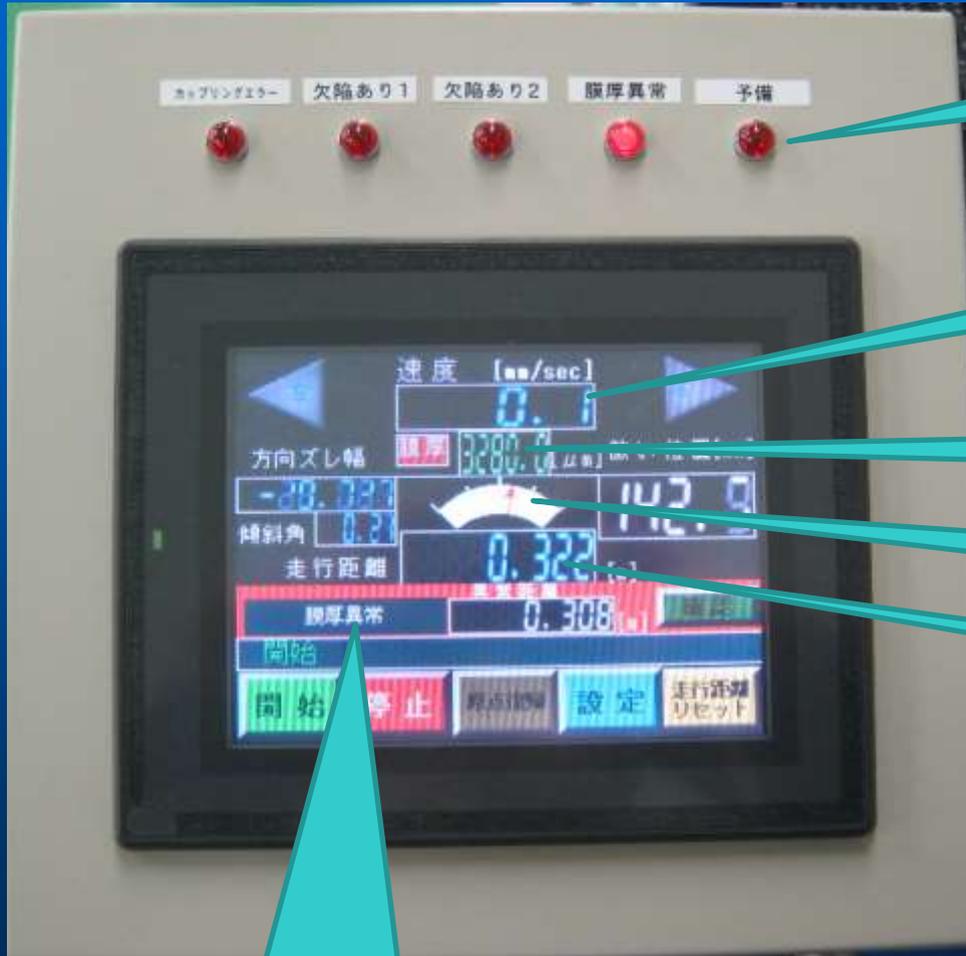
電磁膜厚計

くさび

カップリング用の水の  
供給口

# 2. 溶接線検査装置の開発

## 制御部



異常警告ランプ

現在走行速度

膜厚表示

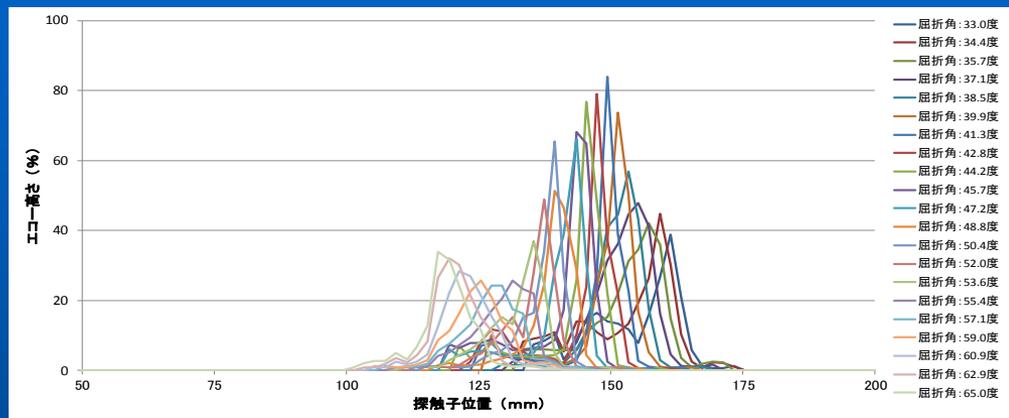
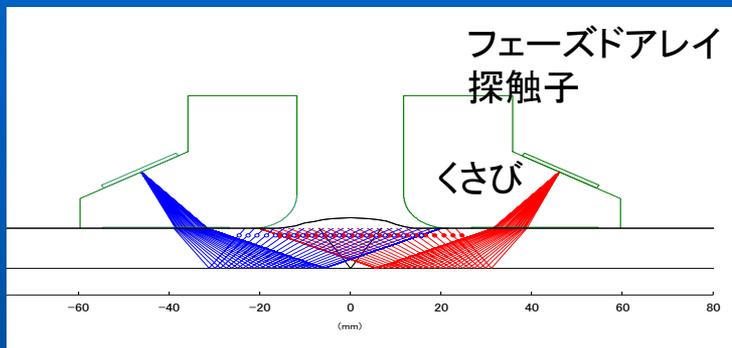
レーザーとのズレ

基準からの走行距離

異常発生警告画面  
(膜厚異常の例)

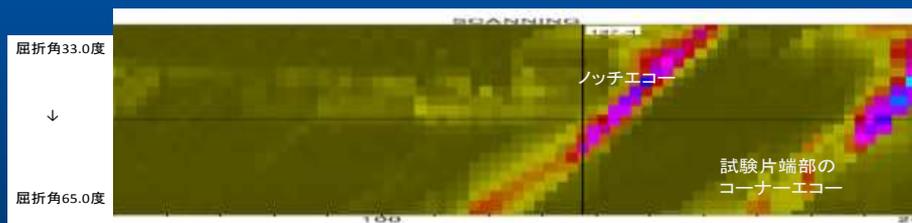
# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (1) 超音波探傷の概念



- 溶接線を挟み左右の探触子から超音波ビームを扇状に出すフェーズドアレイ探傷

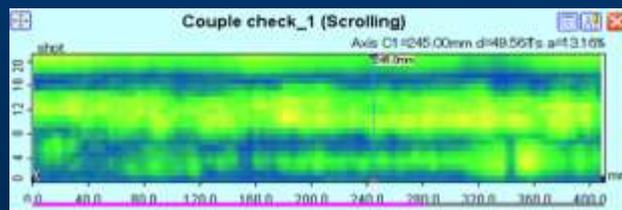
(線集束ビームによるセクタスキャン)



探触子ときずの距離を変えたときのノッチ検出性

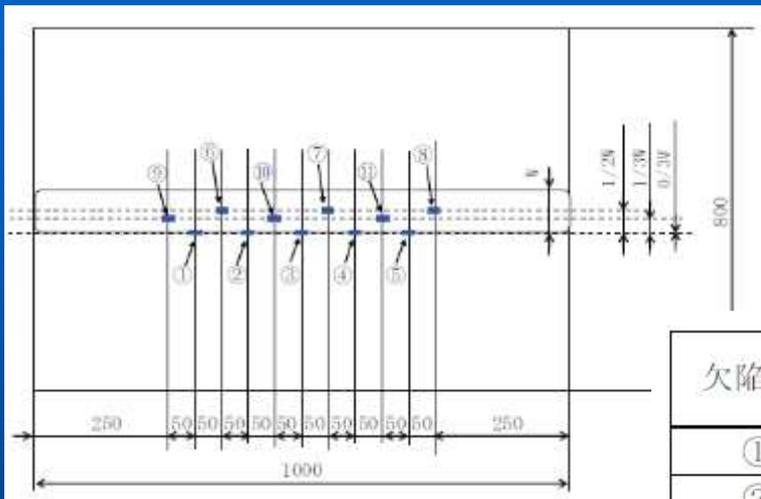
- ピッチ&キャッチによるカップリングチェック

カップリングチェックの例

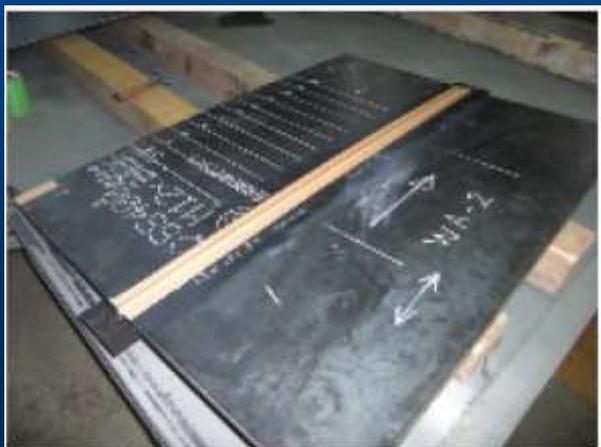


# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (2) 人工欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H21)



- ・底板厚12mm、当板厚9mm、放電加工による人工欠陥(深さ1~2mm、長さ3~6mm)
- ・試験体は、塗膜厚さ600 $\mu$ mと1000 $\mu$ mのもの、表面に凹凸を施した塗膜厚さ600 $\mu$ mの3体



欠陥No.	欠陥位置	人工欠陥(mm)	
		長さ	深さ
①	0/3W(止端部)	3	1.0
②		4	1.0
③		4	1.5
④		4	2.0
⑤		6	2.0
⑥	1/2W(ビード中央部)	3	1.0
⑦		4	1.5
⑧		6	2.0
⑨	1/3W	3	1.0
⑩		4	1.5
⑪		6	2.0

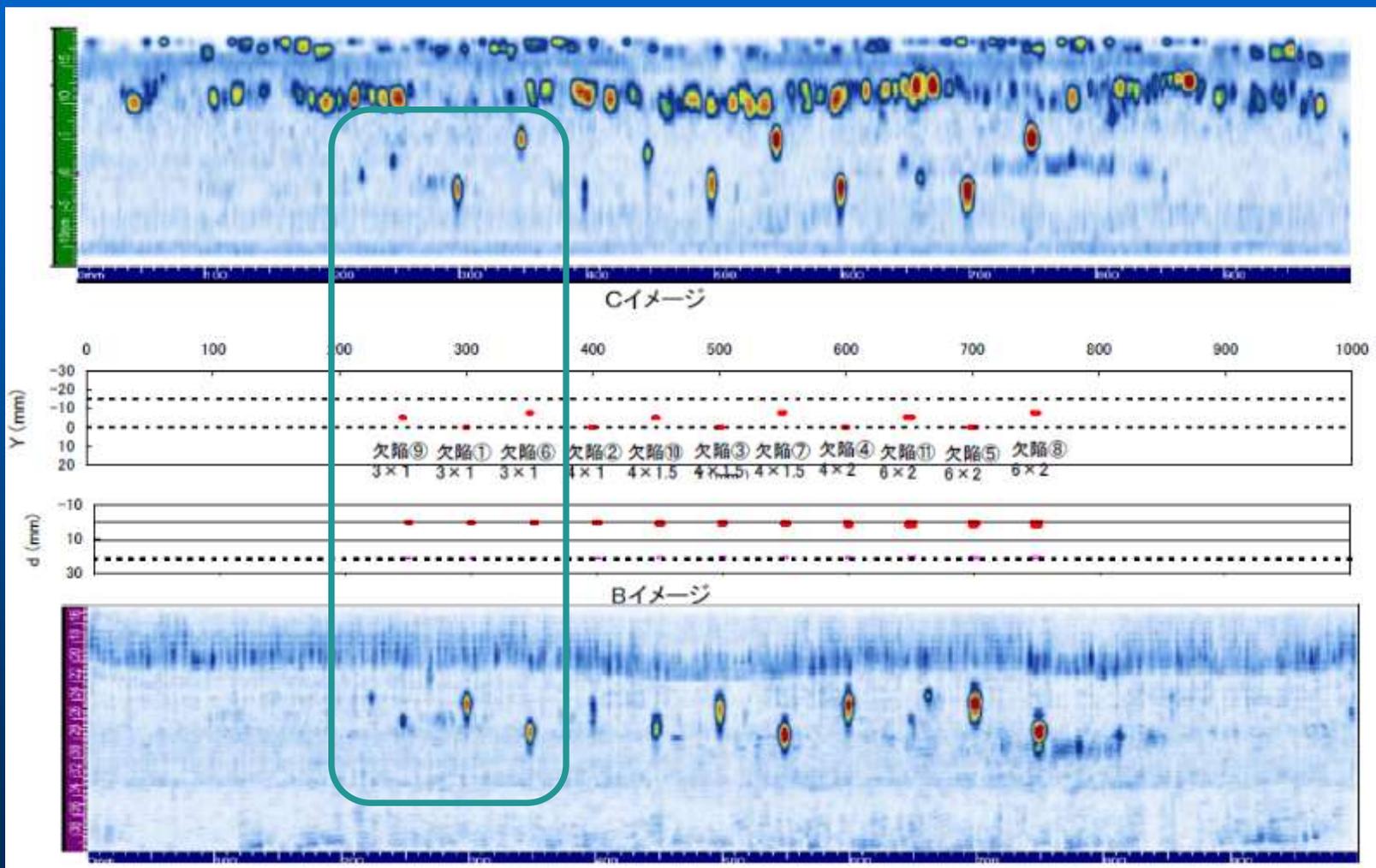
# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (2) 人工欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H21)



# 3. 超音波探傷の基本性能確認

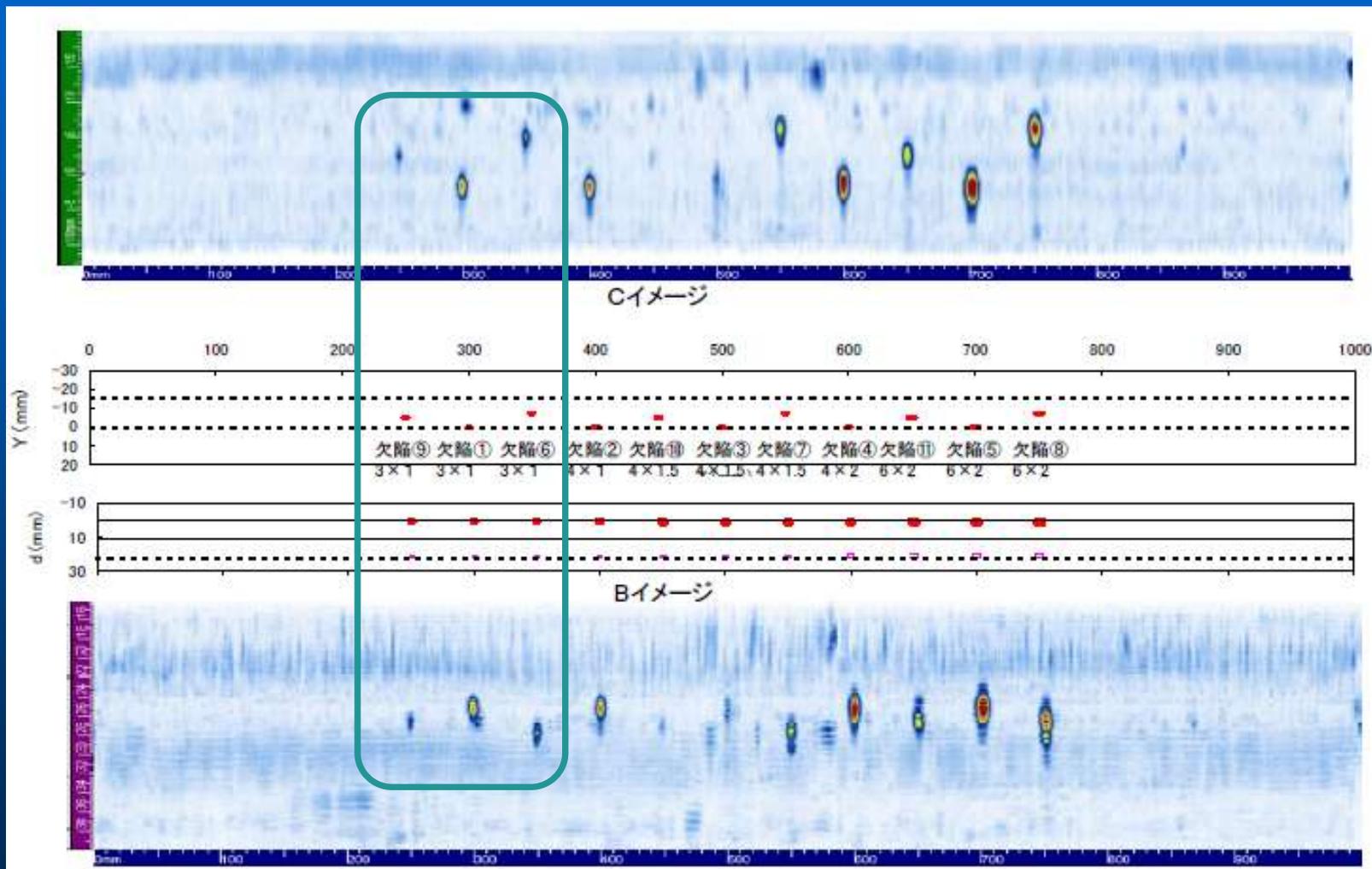
## (2) 人工欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H21)



コーティング600µmの試験結果

# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (2) 人工欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H21)



コーティング1000µmの試験結果

# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (2) 人工欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H21)

	欠陥No.	⑨	①	⑥	②	⑩	③	⑦	④	⑪	⑤	⑧
	ノッチ深さ	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	2	2	2	2
	ノッチ長さ	3	3	3	4	4	4	4	4	6	6	6
	ノッチ位置	1/3W	止端部	中央	止端部	1/3W	止端部	中央	止端部	1/3W	止端部	中央
35度～55度のセクタスキャンによるフェーズドアレー探傷	WA1	○	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	○	◎	◎
	WA2	○	◎	○	◎	△(◎)	△(◎)	○	◎	○	◎	◎
	WA3	△	◎	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎
50度～70度のセクタスキャンによるフェーズドアレー探傷	WA1	○	◎	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	WA2	△(○)	◎	○	◎	×(◎)	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	WA3	△	○	△	○	△	◎	◎	◎	◎	◎	◎

WA2の( )内は反対側探傷での評価結果

- ◎ 明瞭に指示を識別可能
- かなり明瞭に識別可能
- △ 指示が薄い識別
- × 識別が困難

塗膜厚さ1000μmの試験体(WA3)による試験により、深さ1mm、長さ3mmのきずを検出できる性能を有することが判明

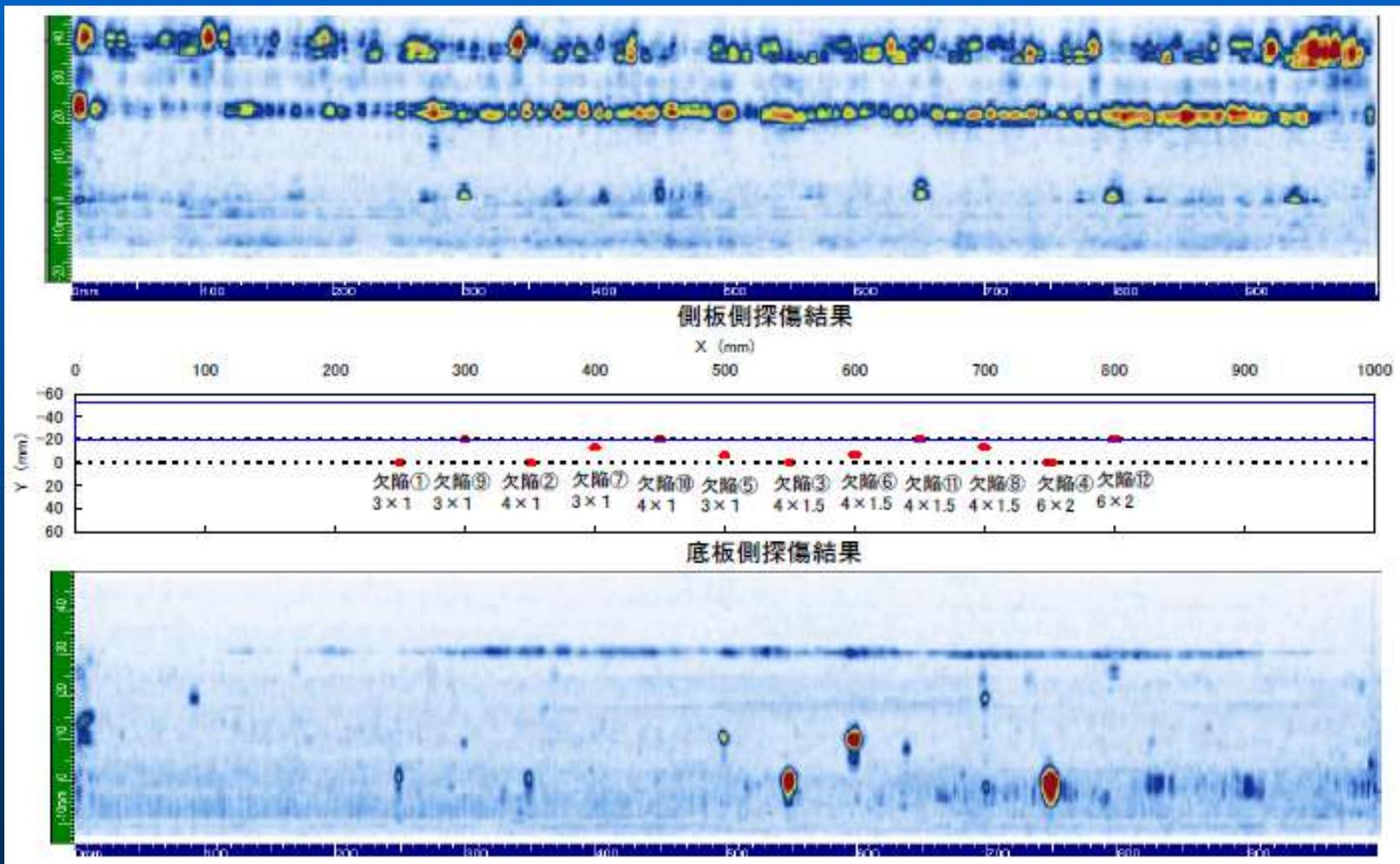
# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (3) 人工隅肉溶接試験体による手探傷試験(H21)



# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (3) 人工隅肉溶接試験体による手探傷試験(H21)



コーティング1000 $\mu$ mの試験結果

# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (3) 人工隅肉溶接試験体による手探傷試験 (H21)

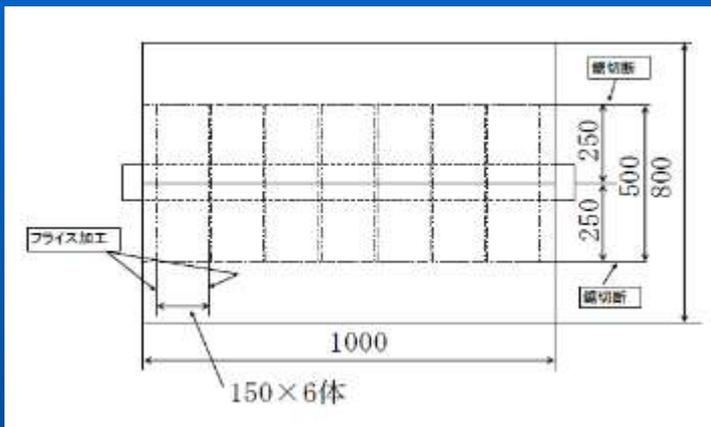
欠陥No.	①	⑨	②	⑦	⑩	⑤	③	⑥	⑪	⑧	④	⑫
ノッチ深さ	1	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2
ノッチ長さ	3	3	4	3	4	3	4	4	4	4	6	6
ノッチ位置	底板側止端部	側板側止端部	底板側止端部	2/3W	側板側止端部	1/3W	底板側止端部	1/3W	側板側止端部	2/3W	底板側止端部	側板側止端部
35度～55度のセクタスキャンによるフェーズドアレー探傷	WA1	◎	◎	◎	○	○	◎	◎	○	◎	◎	◎
	WA2	○	○	○	△	○	◎	◎	○	○	◎	◎
	WA3	◎	◎	◎	×	△	○	◎	◎	◎	◎	◎

- ◎ 明瞭に指示を識別可能
- かなり明瞭に識別可能
- △ 指示が薄い識別
- × 識別が困難

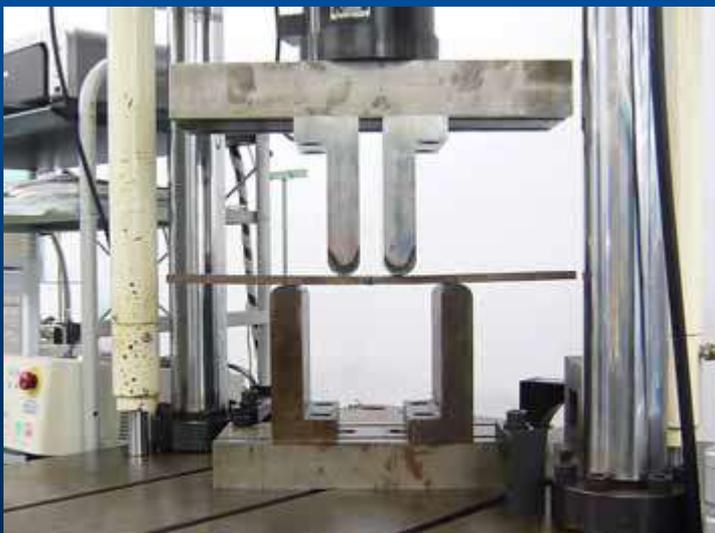
長さ6mm × 深さ2mmの人工ノッチであれば止端部については検出可能であるが、幾何学的形状から溶接線中央部に超音波が届きにくい。また検査装置に組み込んだ場合、非常に複雑な構造となる。よって現実的には測定ができないため、突合せ溶接のみを対象とする。

# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (4) 自然欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H22)



施工 順序	実施内容	図示例	施工 順序	実施内容	図示例
1	本溶接		5	欠陥長さ・深さ確認 PT	
2	欠陥導入部削除		6	盛り込み部溶接	
3	融合不良導入		7	表面溶接部への疲 勞き裂導入	
4	表面溶接				



自然欠陥(溶接欠陥・疲労欠陥)を模擬

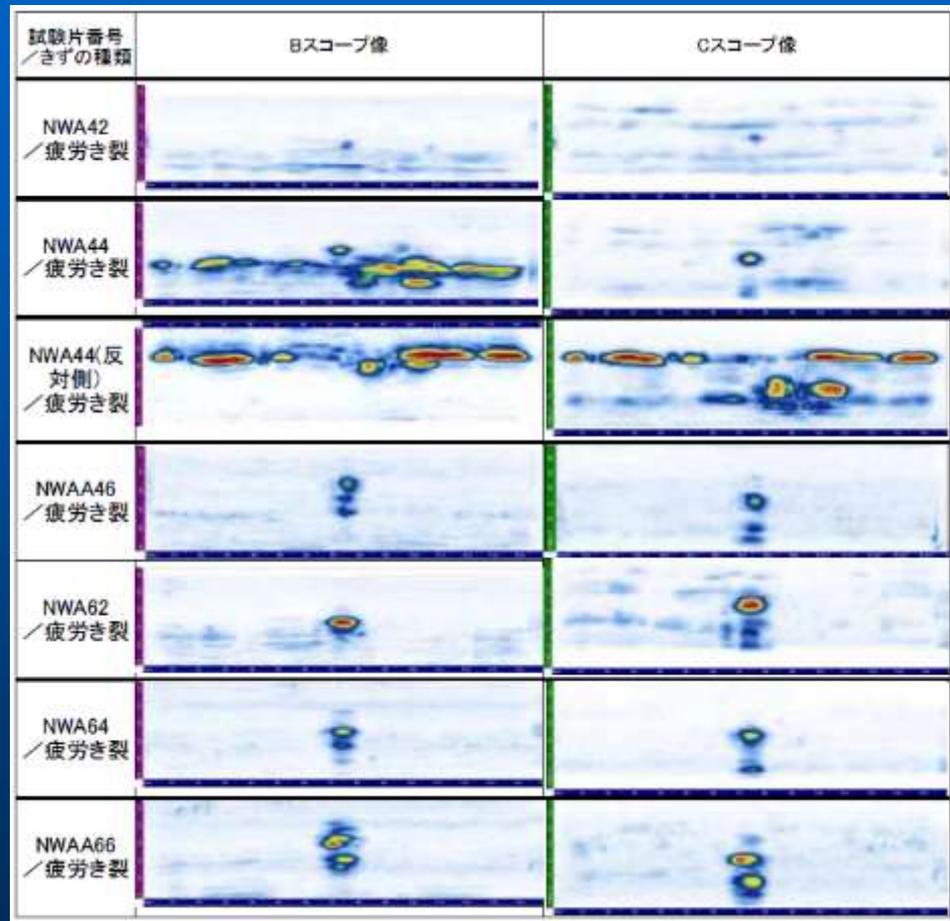
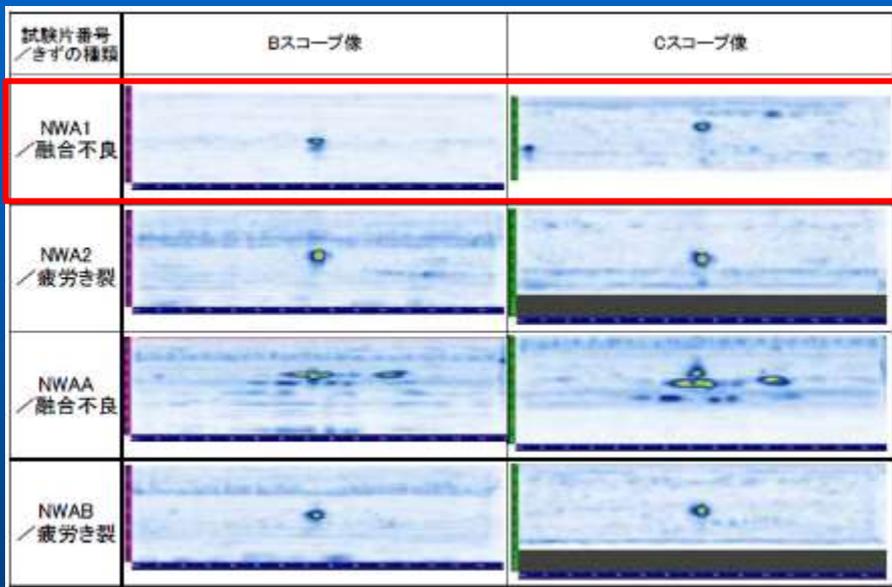
# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (4) 自然欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H22)

試験片 No	キズ No	試験片 製作 年度	試験 年度	キズのタイプ	製作時確認寸法			切断による確認			検出 結果	
					深さ (最大)	長さ	位置	深さ (最大)	長さ (最大)	長さ		
NWA1		平成 21 年度	平成 22 年度	融合不良	2.2	3.4	止端部	切断せず			○	
NWA2				疲労き裂	4.1	4.7	中央部	切断せず			○	
NWAA				融合不良	2.2	4.3	止端部	2.7	5.3	4.4	○	
NWAB				疲労き裂	4.3	4.6	中央部	3.2	7	4.6	○	
NWA42		平成 22 年度		平成 22 年度	融合不良+疲 労により表面 開口	2.6	3.5	中央部	切断せず			○
NWA44	A					5.3	8	中央部	切断せず			○
	B				—	50	中央部	切断せず			○	
NWA46					融合不良+疲 労により表面 開口	8	3	中央部	6.9	10.3	5.3	○
NWA62						4	16	中央部	切断せず			○
NWA64						5.3	2	中央部	4.1	8.9	2.2	○
NWA66						7	11	中央部	切断せず			○

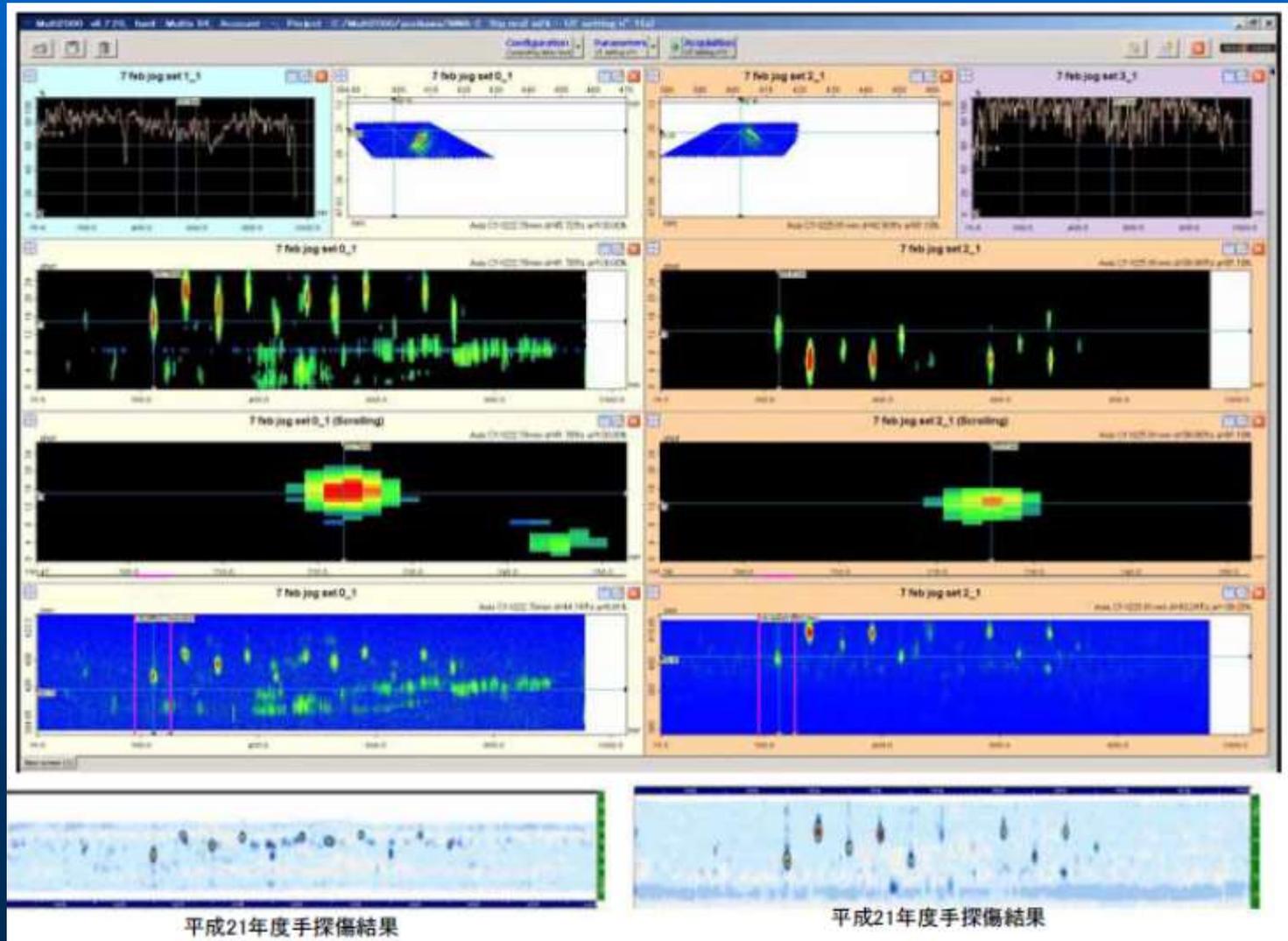
# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (4) 自然欠陥突合せ溶接試験体による手探傷試験(H22)



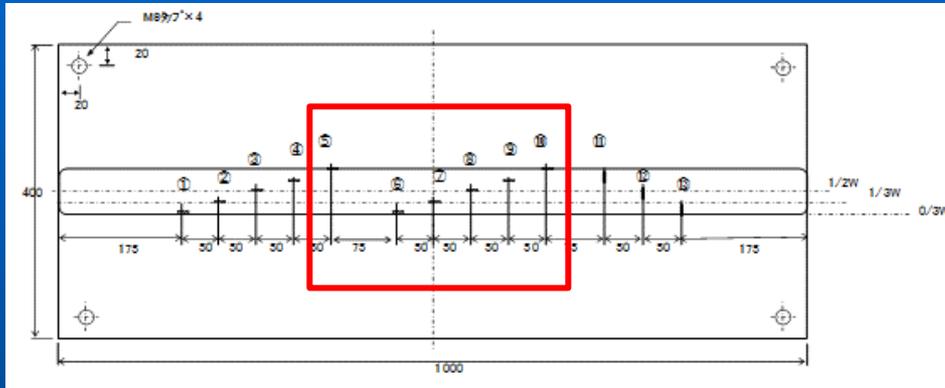
# 3. 超音波探傷の基本性能確認

## (5) 人工欠陥突合せ溶接試験体による 溶接線検査装置試験(手探傷との比較)

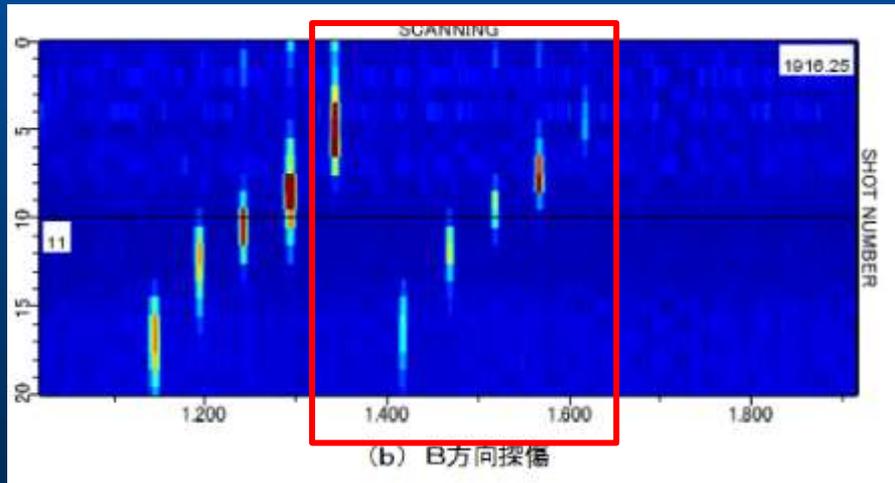


# 3. 超音波探傷の基本性能確認

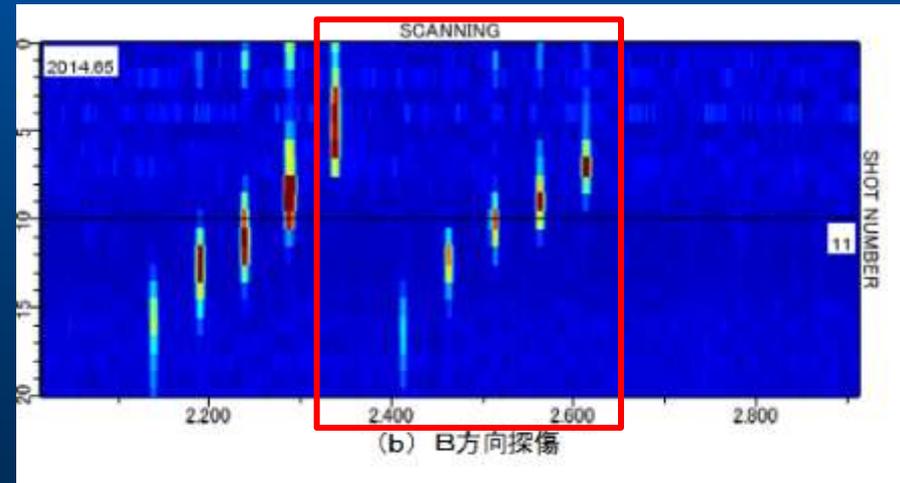
## (5) 人工欠陥突合せ溶接試験体による 溶接線検査装置試験(塗膜厚差異の比較)



試験体	ノッチNO	ノッチの種類	長さL	深さd	塗膜厚
B	①~⑤	縦方向ノッチ	6	3	1500 $\mu$
	⑥~⑩	縦方向ノッチ	4	1.5	
C	①~⑤	横方向ノッチ	4	1.5	700 $\mu$
	⑥~⑩	縦方向ノッチ	5	2.5	
	⑪~⑬	横方向ノッチ	3	1.5	



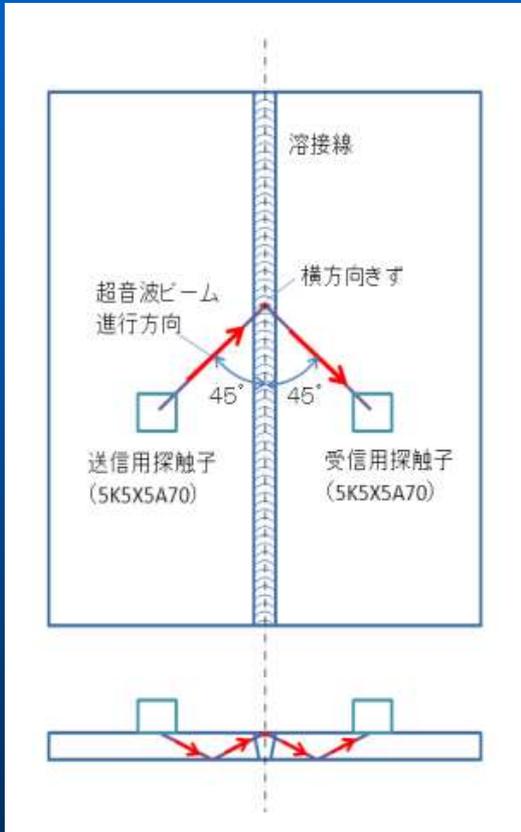
試験体B(塗膜厚1500 $\mu$ m)



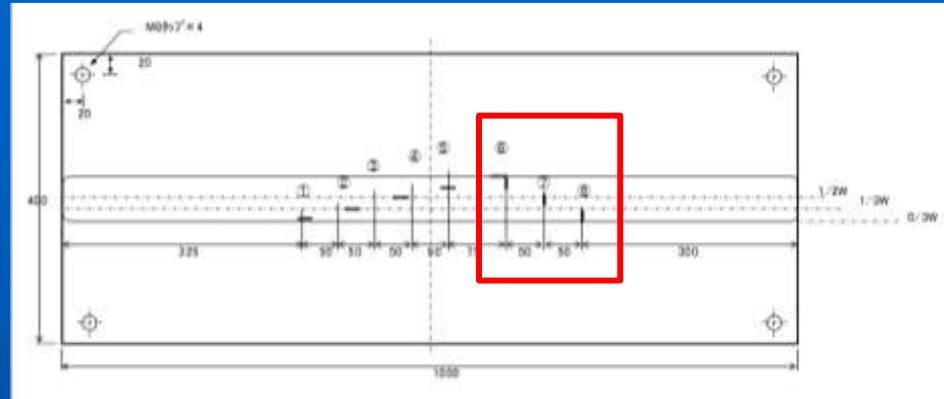
試験体C(塗膜厚700 $\mu$ m)

# 3. 超音波探傷の基本性能確認

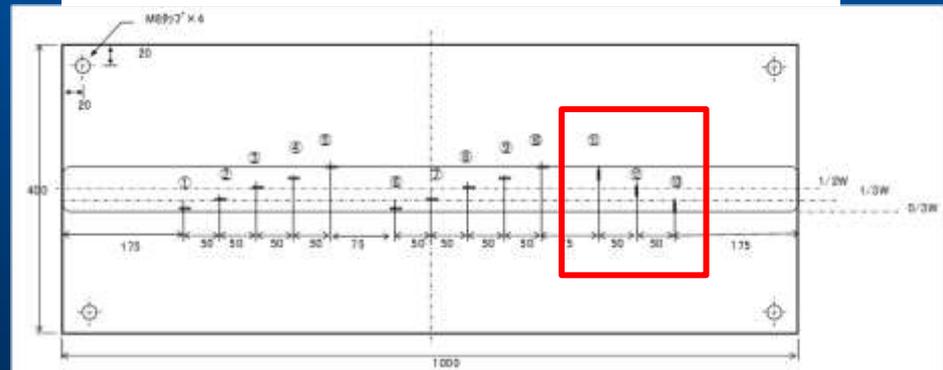
## (6) 手探傷による溶接線に直交方向のキズの検出確認



探傷方法



試験体	ノッチNO	ノッチの種類	長さ:L	深さ:d	参照厚さ
A	①~⑤	縦方向ノッチ	4	1.5	700 $\mu$
	⑥~⑧	横方向ノッチ	4	1.5	
D	①~⑤	縦方向ノッチ	6	3	700 $\mu$
	⑥~⑧	横方向ノッチ	6	3	

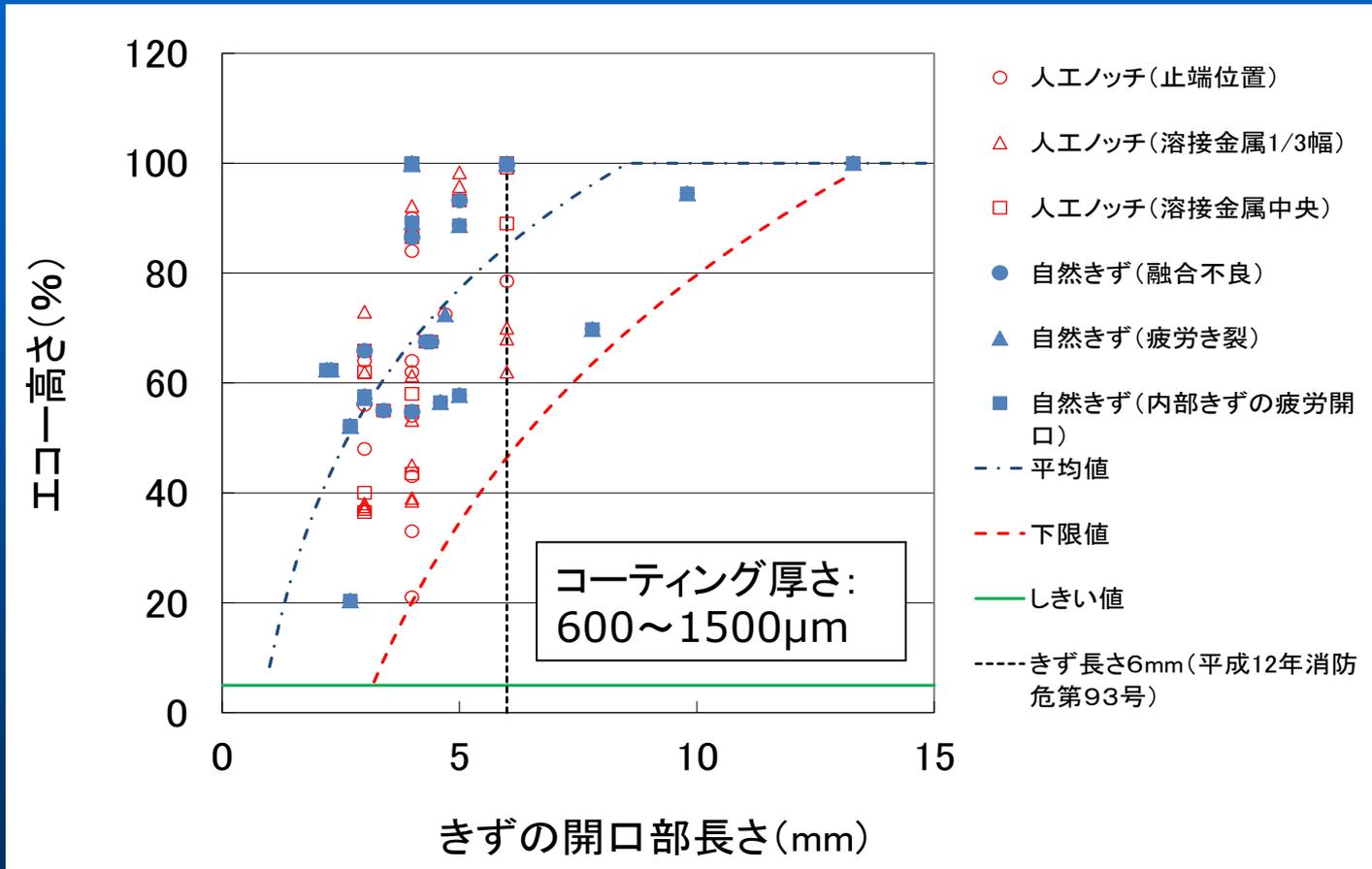


試験体	ノッチNO	ノッチの種類	長さ:L	深さ:d	参照厚さ
B	①~⑤	縦方向ノッチ	6	3	1500 $\mu$
	⑤~⑩	縦方向ノッチ	4	1.5	
	⑪~⑬	横方向ノッチ	4	1.5	
C	①~⑤	縦方向ノッチ	5	2.5	700 $\mu$
	⑤~⑩	縦方向ノッチ	3	1.5	
	⑪~⑬	横方向ノッチ	3	1.5	



# 4. 基本性能の整理

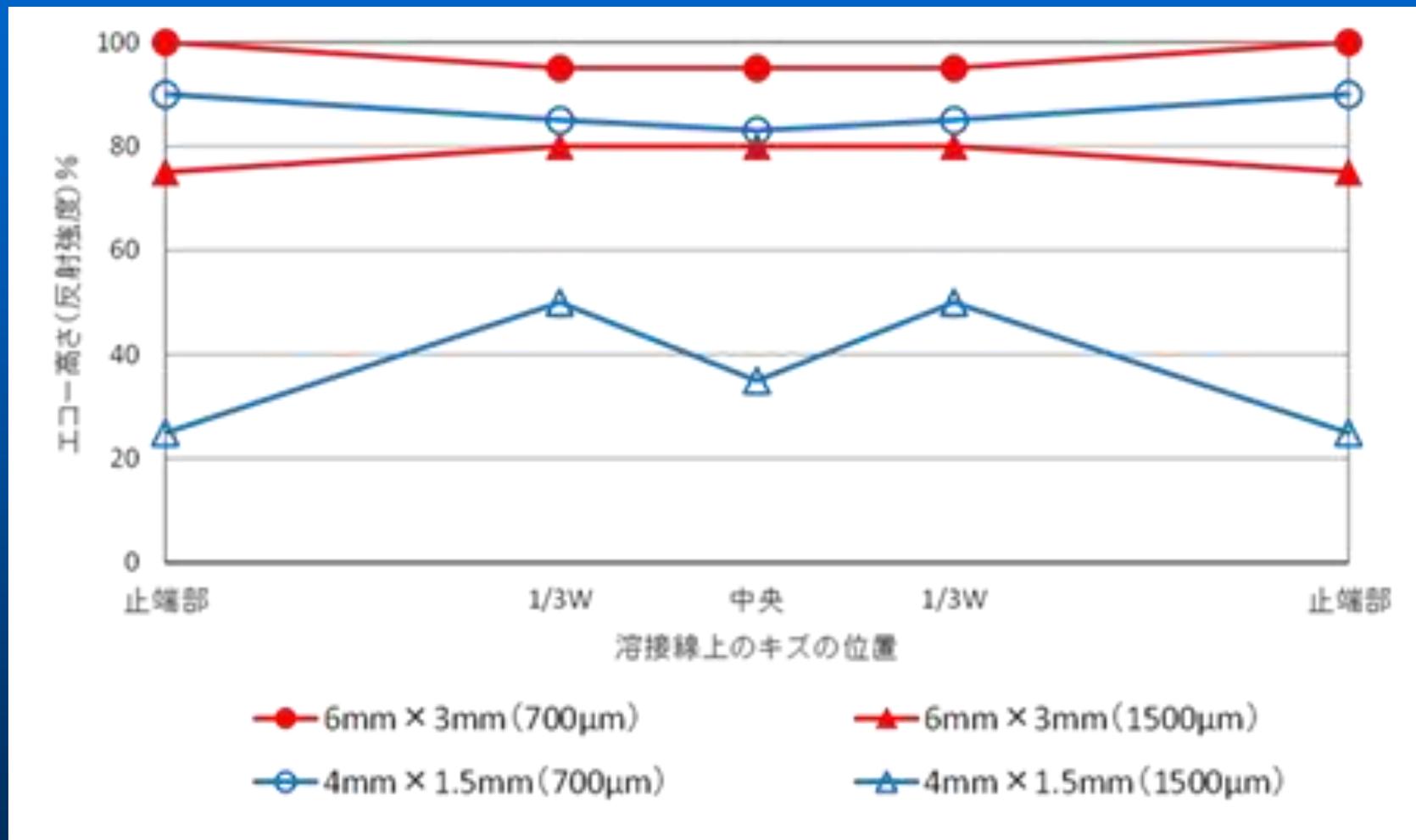
## (1) 溶接線平行キズの人工ノッチと自然キズとの検出性能比較



人工ノッチ (赤マーク群) のサンプルは深さ1~3.0mm、長さ3.0~6.0mm、塗膜厚は600 $\mu$ m、700 $\mu$ m、1000 $\mu$ m、1500 $\mu$ m  
自然欠陥 (青マーク群) のサンプルは深さ2.2~8.0mm、長さ2.0~16.0mm、塗膜厚さは600 $\mu$ m、1000 $\mu$ m

# 4. 基本性能の整理

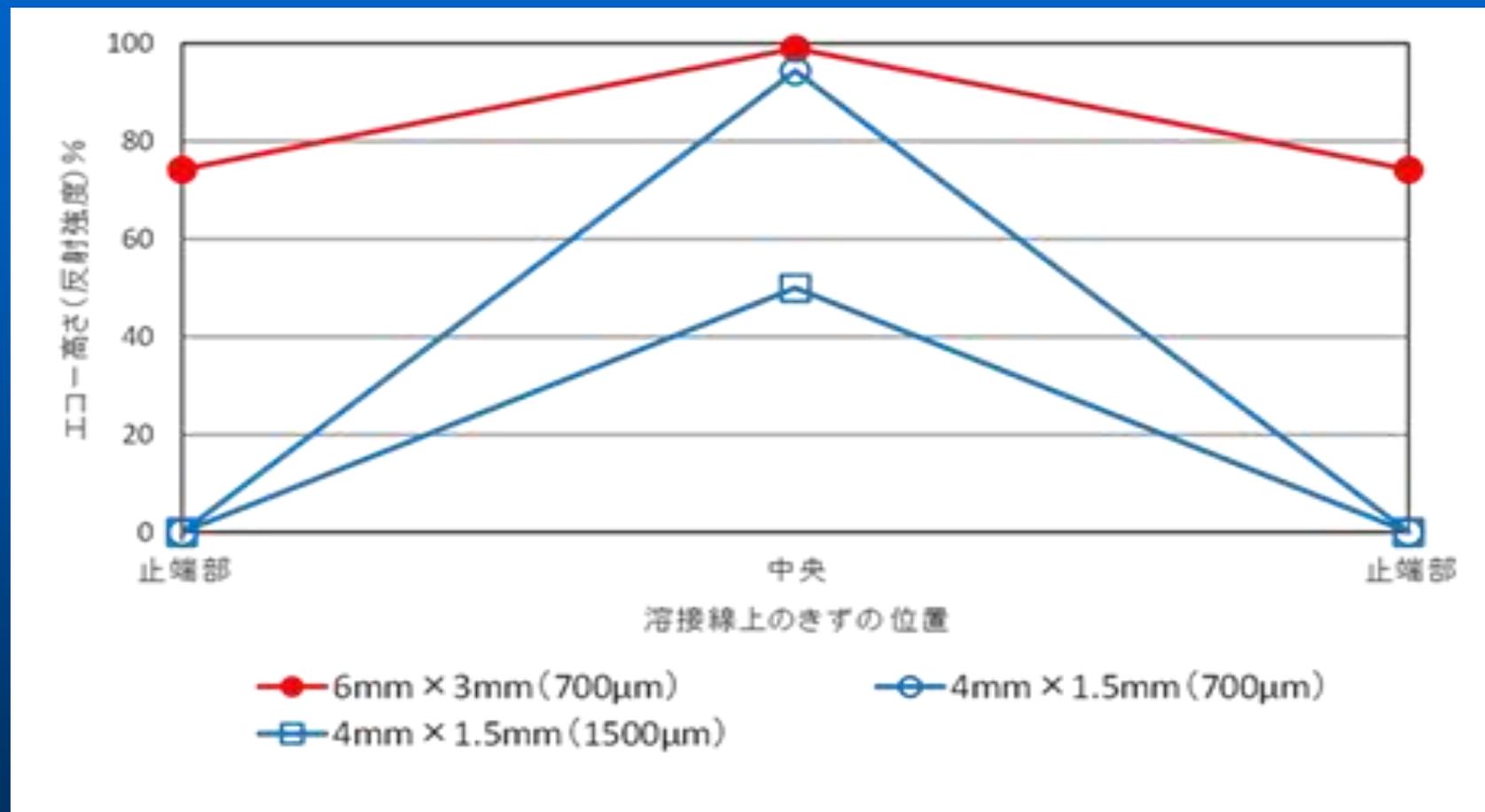
## (2) 塗膜厚(コーティング厚さ)の影響



溶接線に平行な縦方向人工ノッチについては、塗膜厚1500μmでも検出可能

# 4. 基本性能の整理

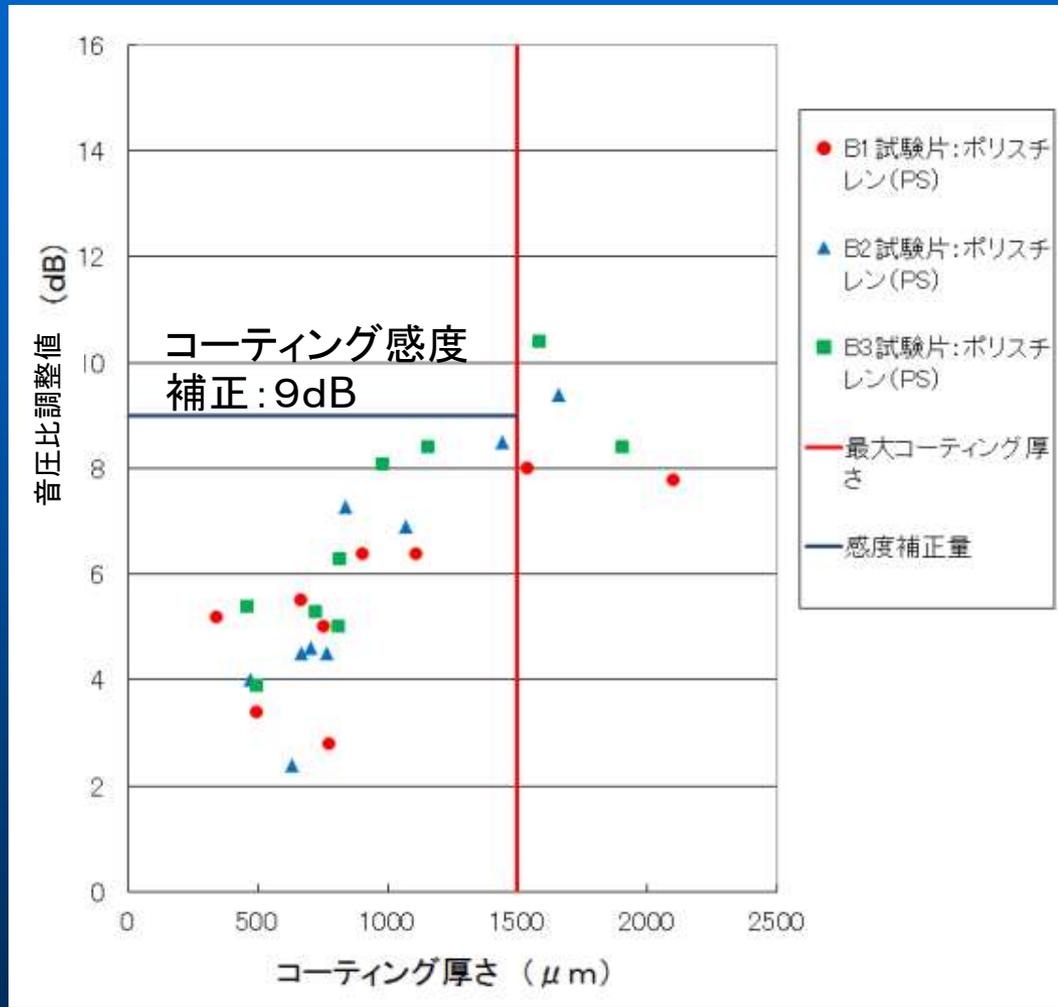
## (4) 溶接線直交方向キズの検出性能



- ・溶接中央部ノッチは、長さ3mm × 深さ1.5mm (700µm)、長さ4mm × 深さ1.5mm (1500µm)、が検出可能
- ・溶接止端部ノッチは、長さ6mm × 深さ3mm (700µm)が検出可能

# 4. 基本性能の整理

## (3) コーティング厚さの補正量



エコー高さを検出可能なレベルまで増幅させるための音圧比調整値

# 4. 基本性能の整理

## 溶接線超音波探傷の性能

### 1. 探触子単体の性能

適用する溶接線の種類:

- タンク底板部の突合せ溶接を対象

検出性能

溶接線に平行方向のキズ:

- 深さ1.5mm×長さ4mmの表面キズ  
(塗膜厚1500 $\mu$ m)

溶接線に直交方向のキズ:

- 深さ1.5mm×長さ4mmの表面キズ(溶接中央部のみ)  
(塗膜厚1500 $\mu$ m)
- 深さ3mm×長さ6mmの表面キズ(溶接中央部及び止端部)  
(塗膜厚700 $\mu$ m、1500 $\mu$ mは未実施)

### 2. 検査装置の性能

検出性能

溶接線に平行方向のキズ:

- 深さ1mm×長さ3mmの表面キズ

溶接線に直交方向のキズ:

- 未実施

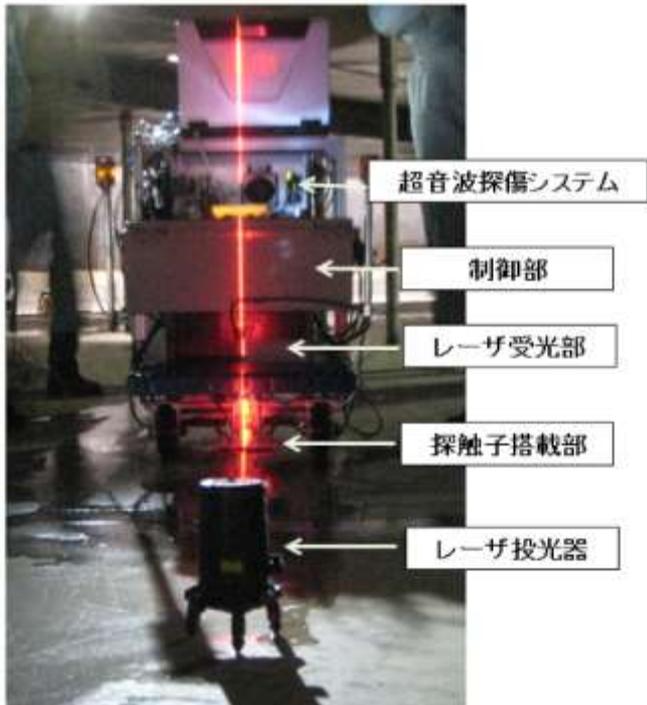
# 5. 実機試験による性能確認

## 開放検査中のタンクを使った検査装置試験

- 平成23年度にむつ小川原基地で2回(2タンク)、志布志基地1回(1タンク)実機試験を実施。
- 試験実施延長は、むつ小川原基地で400m及び405m、志布志基地で680m。
- 実機試験では、検査装置による測定の前に、ノイズレベルの測定を行い、データ取得に影響しないレベルであることを確認。
- 試験の結果、MT検査による指示箇所において、UTによる明瞭な指示は確認されなかった。これは、MTの指示が全てブローホールであり、超音波探傷が検出対象として想定する線状キズがなかったことに起因する。

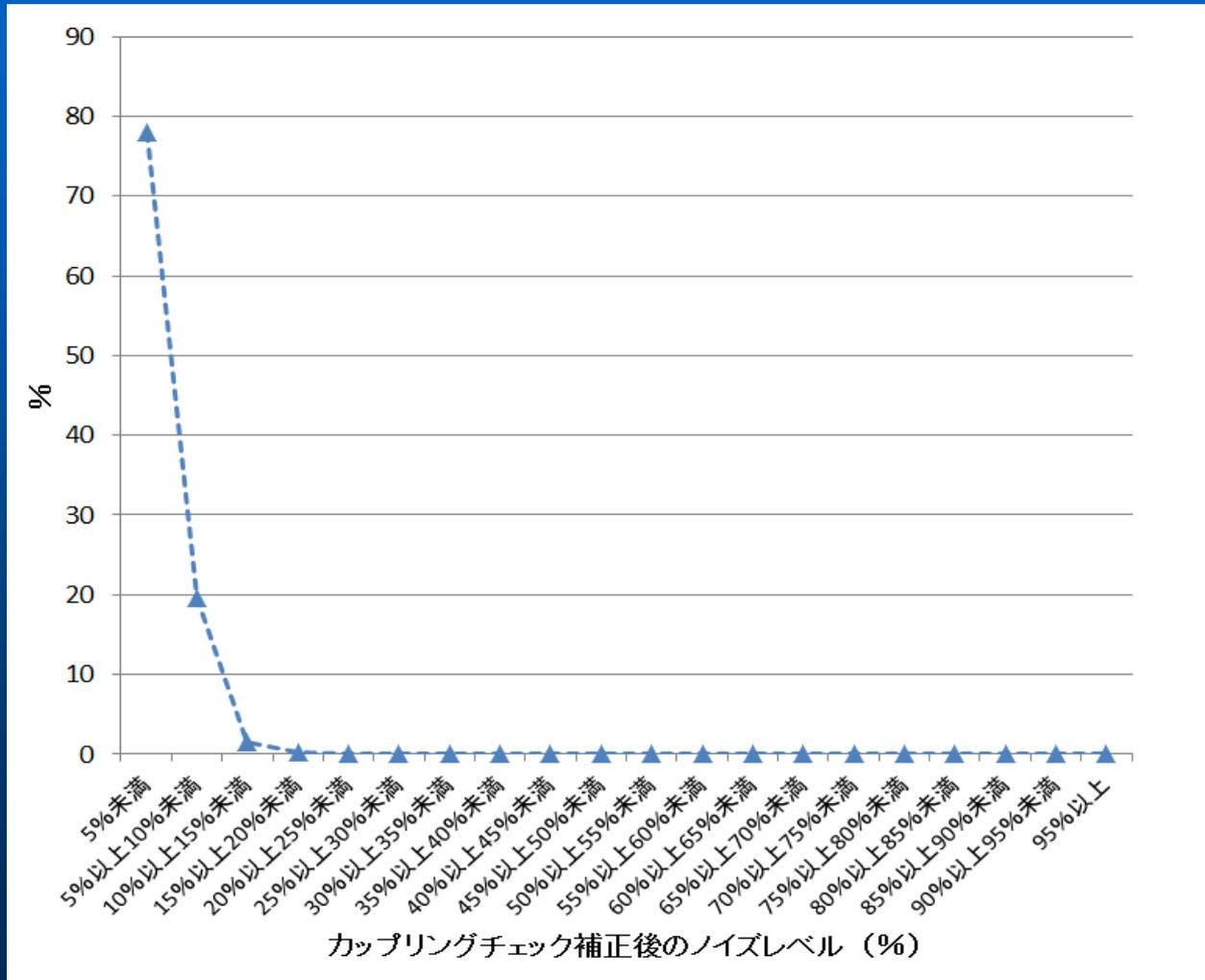
# 5. 実機試験による性能確認

## 開放検査中のタンクを使った検査装置試験



# 5. 実機試験による性能確認

## 実タンクのノイズレベル調査の結果



# 5. 実機試験による性能確認

## 実機試験の結果

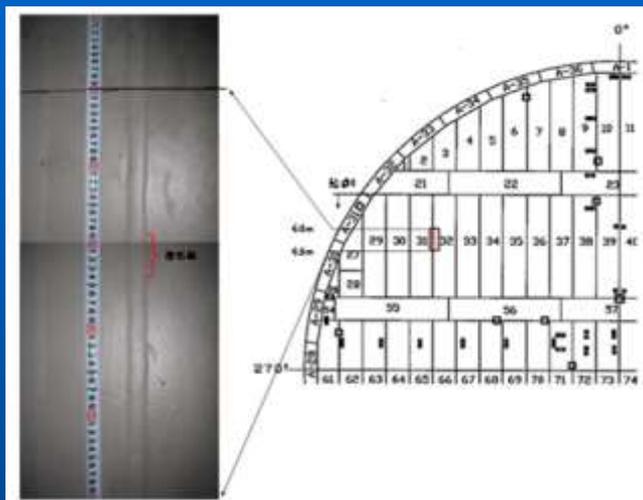


別紙参照

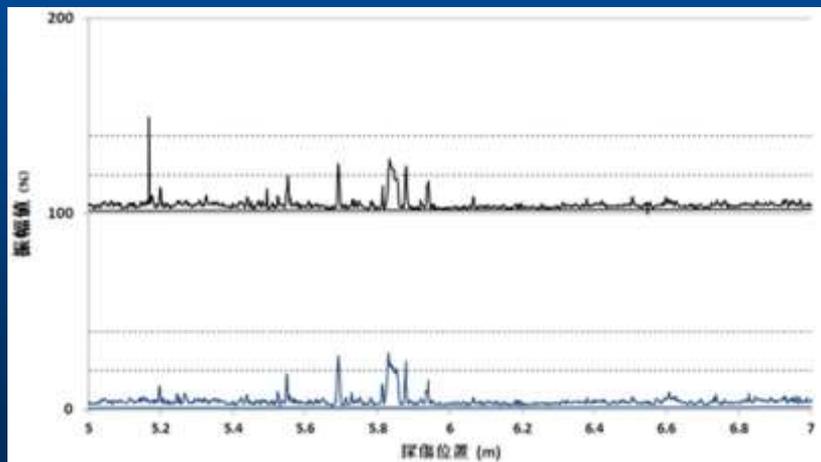
平成23年度 実機タンクでの調査箇所

国備基地	タンクNo.	箇所No.	結果			
			UT	MT	PT	SUMP
むつ	No.48	MT検査記録番号52	指示なし	指示あり	-	-
		MT検査記録番号64	指示なし	指示あり	-	-
		MT検査記録番号19	指示なし	-	指示あり	実施
		MT検査記録番号25	指示なし	-	指示あり	実施
		MT検査記録番号71	指示なし	-	指示あり	実施
	No.44	MT検査記録番号23	指示なし	指示あり	-	-
		MT検査記録番号24	指示なし	指示あり	-	-
		MT検査記録番号27	指示なし	指示あり	-	-
		MT検査記録番号28	指示なし	指示あり	指示なし	-
		MT検査記録番号58	指示なし	指示あり	指示あり	-
志布志	No.11	MT検査記録番号98	指示なし	指示あり	-	-
		MT検査記録番号99	指示なし	指示あり	指示なし	-
		MT検査記録番号101	指示なし	指示あり	指示あり	実施
		溶接線番号31	指示あり	指示なし	-	-
		溶接線番号7	指示あり	指示なし	-	-
		溶接線番号35	指示あり	指示なし	-	-
		溶接線番号36	指示あり	指示なし	-	-

# 6. 内部キズ等の検出性能



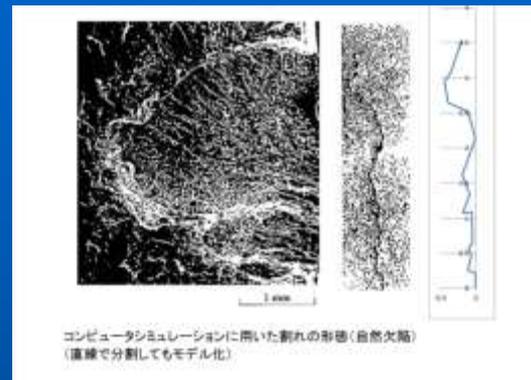
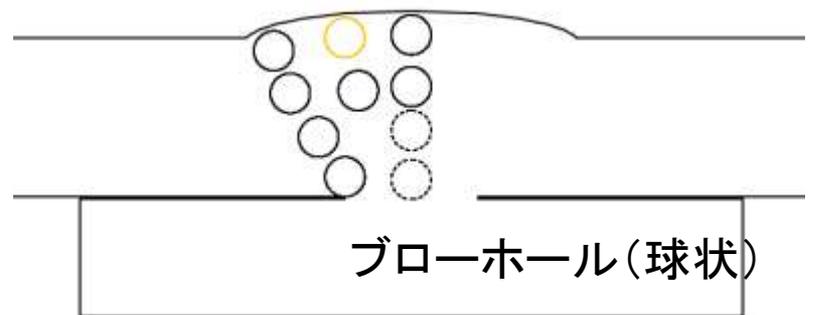
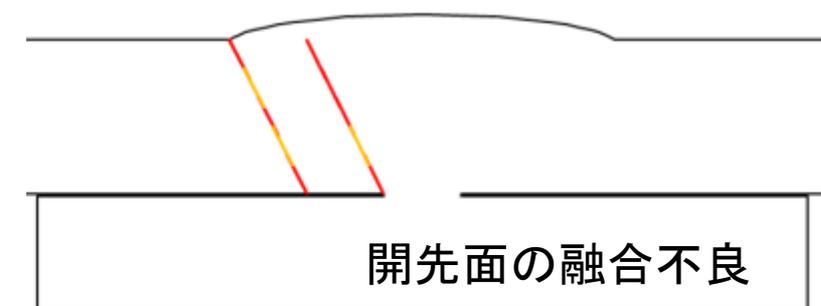
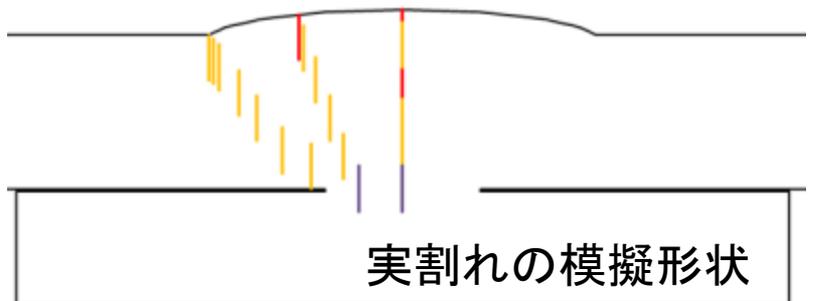
実機試験で確認された内部キズ



きず	磁粉探傷試験(MT)	超音波探傷(UT):フェーズドアレー探傷
埋没融合不良 (埋没深さ:約 0.9mm)	 指示なし	 Bイメージ画像  Cイメージ画像
埋没融合不良 (埋没深さ:約 1.7mm)	 指示なし	 Bイメージ画像  Cイメージ画像

# 6. 内部キズ等の検出性能

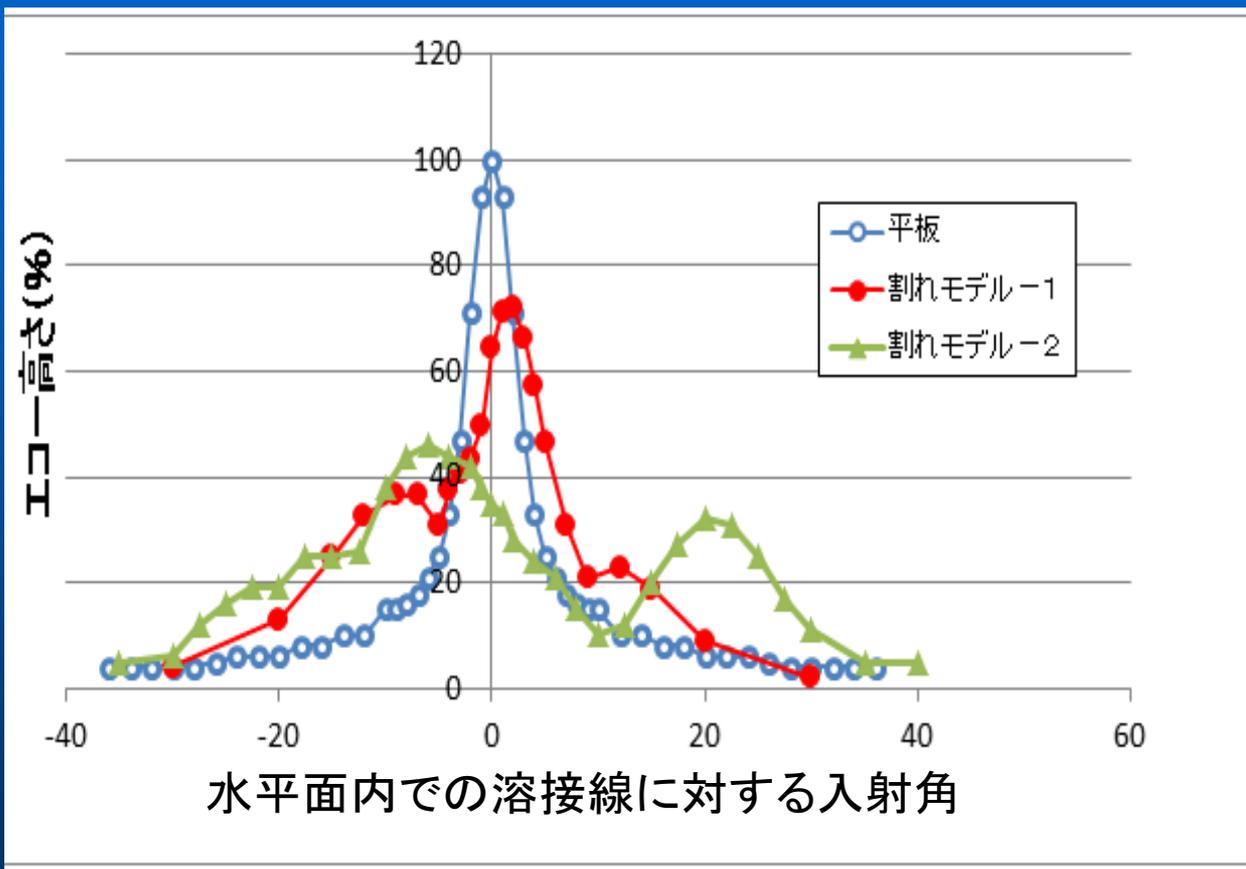
## 内部きずのシミュレーションでの検出性能検討



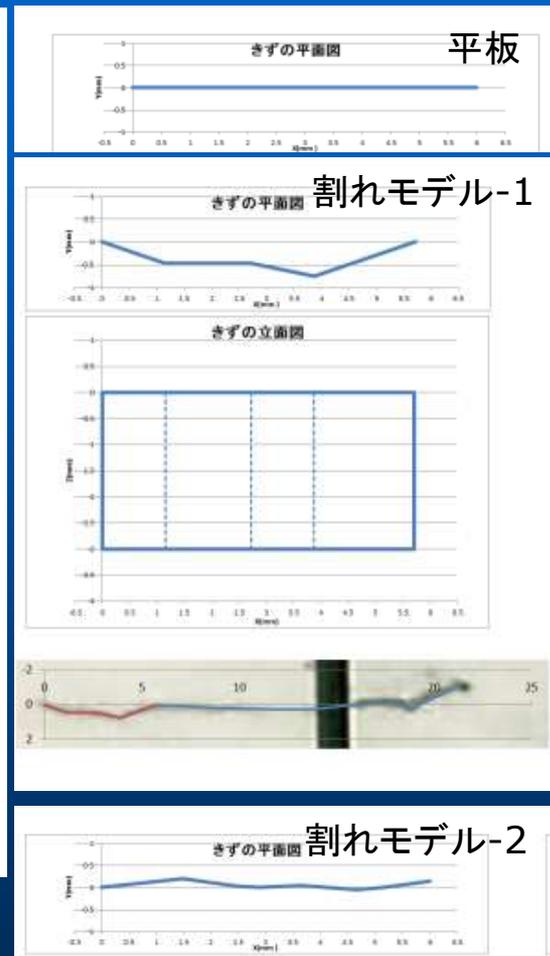
但し、キズの監視範囲を板厚全体に拡大する必要がある

- 40%以上
- 20%以上40%未満
- 10%以上20%未満
- 5%以上10%未満
- - - - 5%未満

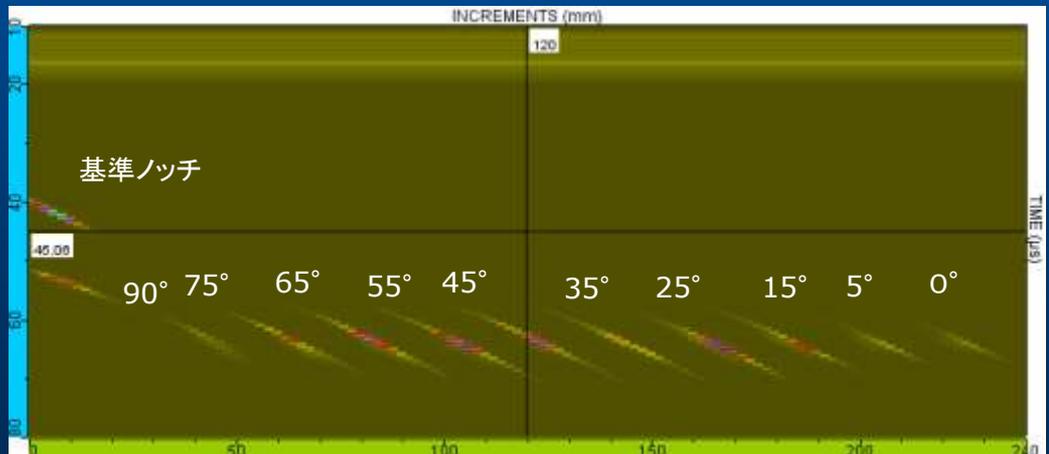
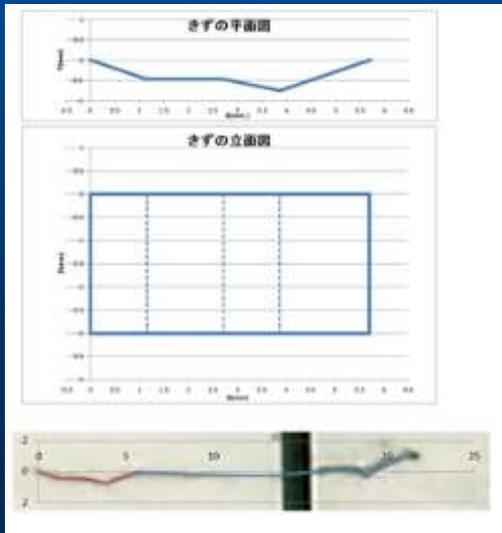
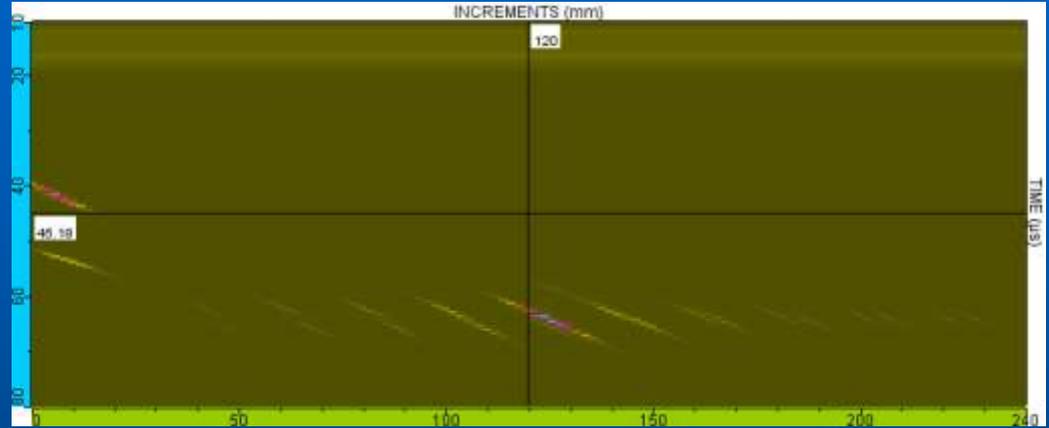
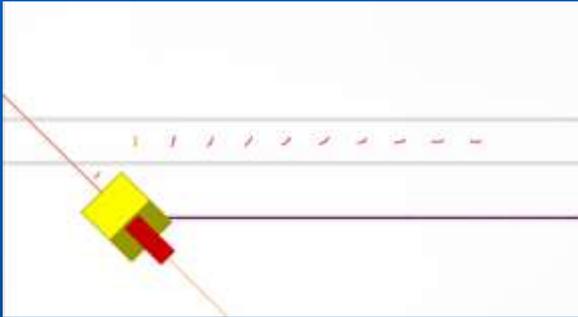
# 7. 斜め方向キズの検出性能 指向性の比較(数値シミュレーション結果)



実欠陥(割れ)を想定すると、検出できる角度範囲はかなり広がる



# 7. 斜め方向キズの検出性能 45度入射角探傷(2スキップ)の有効性 (数値シミュレーション結果)



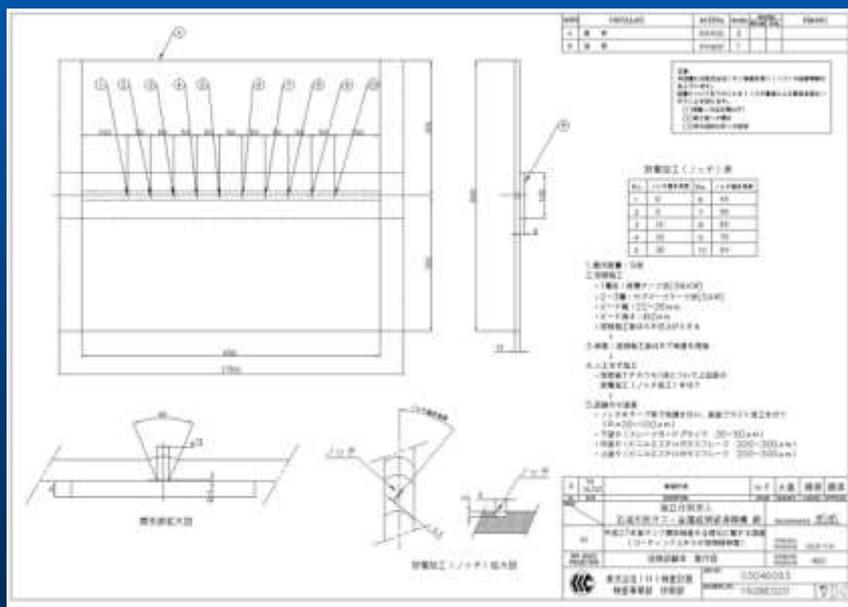
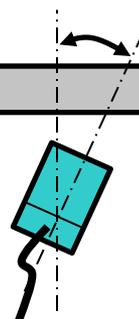
# 7. 斜め方向キズの検出性能 (検出性確認試験)

## ・試験方法

溶接線に対し、水平面内における溶接線に対する探触子の入射角度を変え、手探傷により斜めキズの検出範囲を確認するとともに、探触子角度の検討を行う。

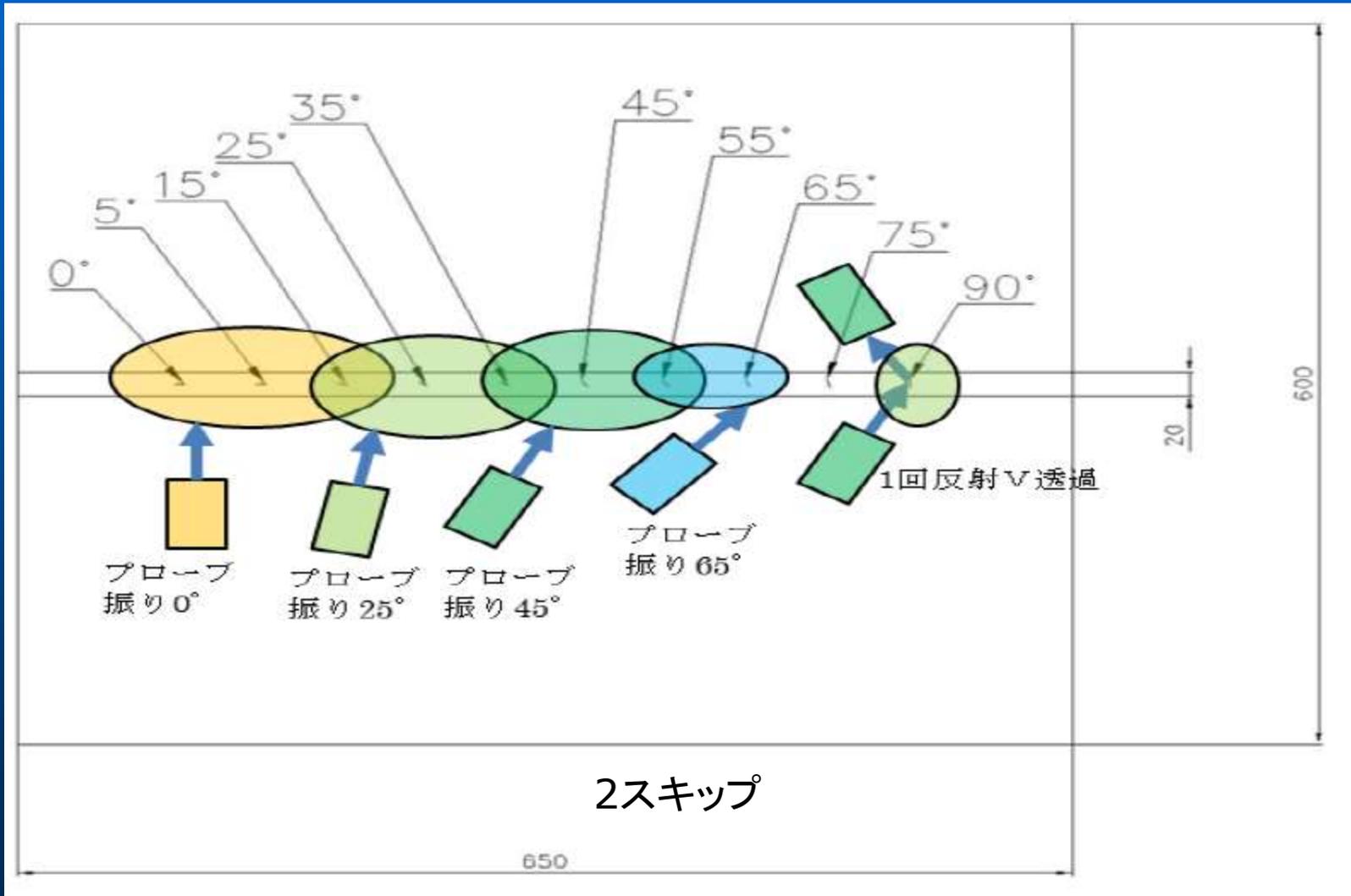


探触子角度



・深さ3mm × 長さ6mmの人工ノッチ・塗膜厚は700 $\mu$ m

# 7. 斜め方向キズの検出性能 (検出性確認試験結果)



# 7. 斜め方向キズの検出性能 (検出性確認試験結果)

## 試験結果(中心屈折角45°・2ステップ)

		キズの角度 (°)										
		0	5	15	25	35	45	55	65	75	90	
探触子の首振り角 (°)	0	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	5	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
	15	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
	25	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	35	×	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×
	45	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	×
	55	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×
	65	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×
	75	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

※きずの傾き角度90度のものは、検査装置に装備される横方向キズ検出用の斜角探触子で確認可能

## 8. 溶接線応力検討 (文献調査)

- 底板と底板の突合わせ溶接に限定する.
- KHK, HPIIによる既往研究成果を中心に文献を調査.

### 着目点

- 有害キズ→供用期間中に底板に損傷をもたらさないキズの大きさが特定できるか否か.
- 底板に発生する応力レベルはどの程度なのか.

## 8. 溶接線応力検討

(調査対象とした主な文献)

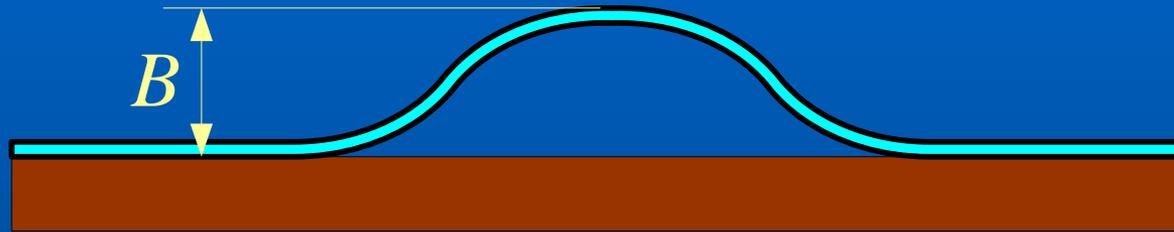
- 「屋外貯蔵タンク底板溶接部の強度評価に関する研究」報告書(平成5年)
- 新技術を活用した石油タンクの検査・判定方法に関する調査検討報告書(平成12年3月, 危険物保安技術協会)
- 特定屋外タンク貯蔵所の開放周期の算定方法に係る性能規定化に関する調査検討報告書(平成13年3月, 危険物保安技術協会)

etc...

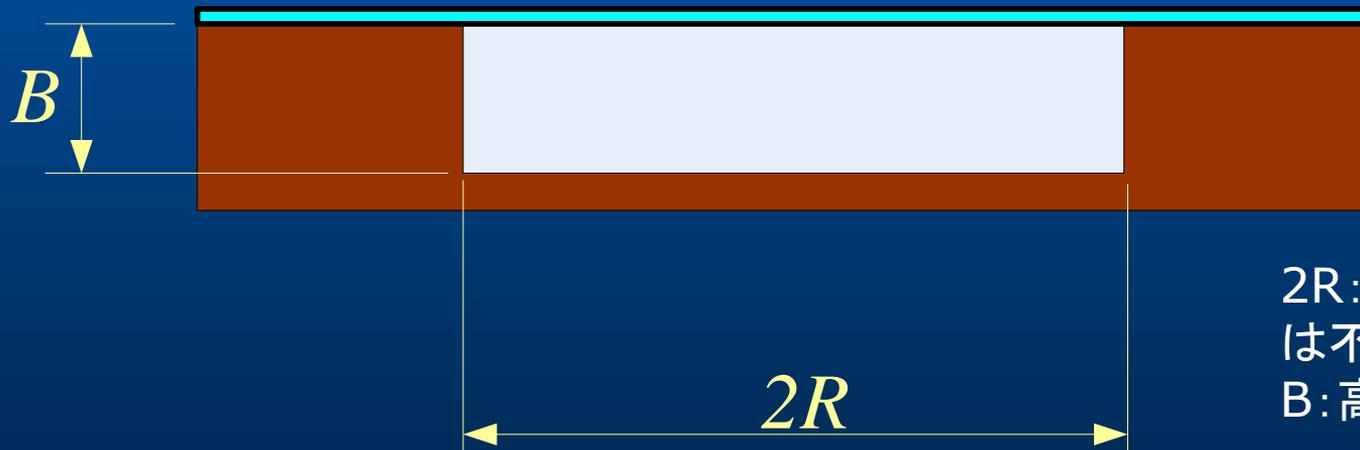
## 8. 溶接線応力検討 (調査結果)

- 文献では、国備タンクを対象とした場合、空満回数を0.25回/年としており、このように液面変動が少ない場合、底板(厚さ12mm)の突合わせ継手止端部に初期き裂(6mm×3mm)が存在していたとしても供用中のき裂進展は無視し得ると考えられる。
- $B/R=0.031$  (2R: 初期凸状変形範囲または不支持領域, B: 高さまたは沈下量)の初期凸状変形, 並びに同程度の基礎不支持域があった場合, 底板 (SM400, 12mm厚)が通常運転時による静水圧を繰返し受けた場合, 当該底板部に発生する繰返し最大ひずみはSM400の降伏ひずみ程度である。

# 8. 溶接線応力検討 (調査結果)



$R=200, 1000$   
 $B=40, 61.7$



$R=1000$   
 $B=61.7$

$2R$ : 初期凸状変形範囲または不支持領域  
 $B$ : 高さまたは沈下量

検討に用いられた底板のモデル

## 8. 溶接線応力検討 (調査結果)

- 繰返し回数1000回で、き裂深さが板厚の80%に達する場合の初期き裂の深さが解析で求められている。

底板厚さ	$\Delta\varepsilon=0.114\%$ (降伏応力に相当するひずみ)			$\Delta\varepsilon=0.228\%$ (降伏応力に相当するひずみ×2倍)		
	き裂幅			き裂幅		
	2a=5mm	2a=10mm	2a=20mm	2a=5mm	2a=10mm	2a=20mm
6.0	---	4.65	---	---	2.85	---
4.5	3.55	3.45	3.15	2.74	2.15	1.58
3.2	2.56	2.44	2.19	2.00	1.50	1.09

引張り膜応力を作用させた場合  
---は実施されていない

# 8. 溶接線応力検討 (調査結果)

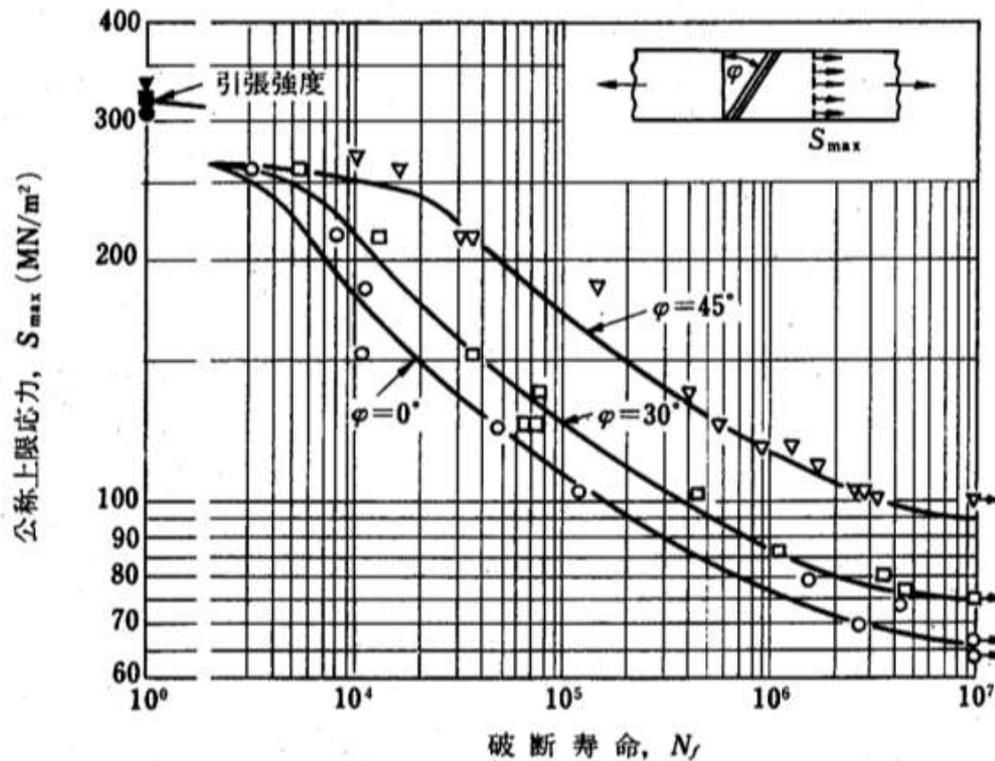


図 3.122 斜め切欠付平板の片振り疲労強度線図<sup>103)</sup>

## 斜めきずの疲労強度

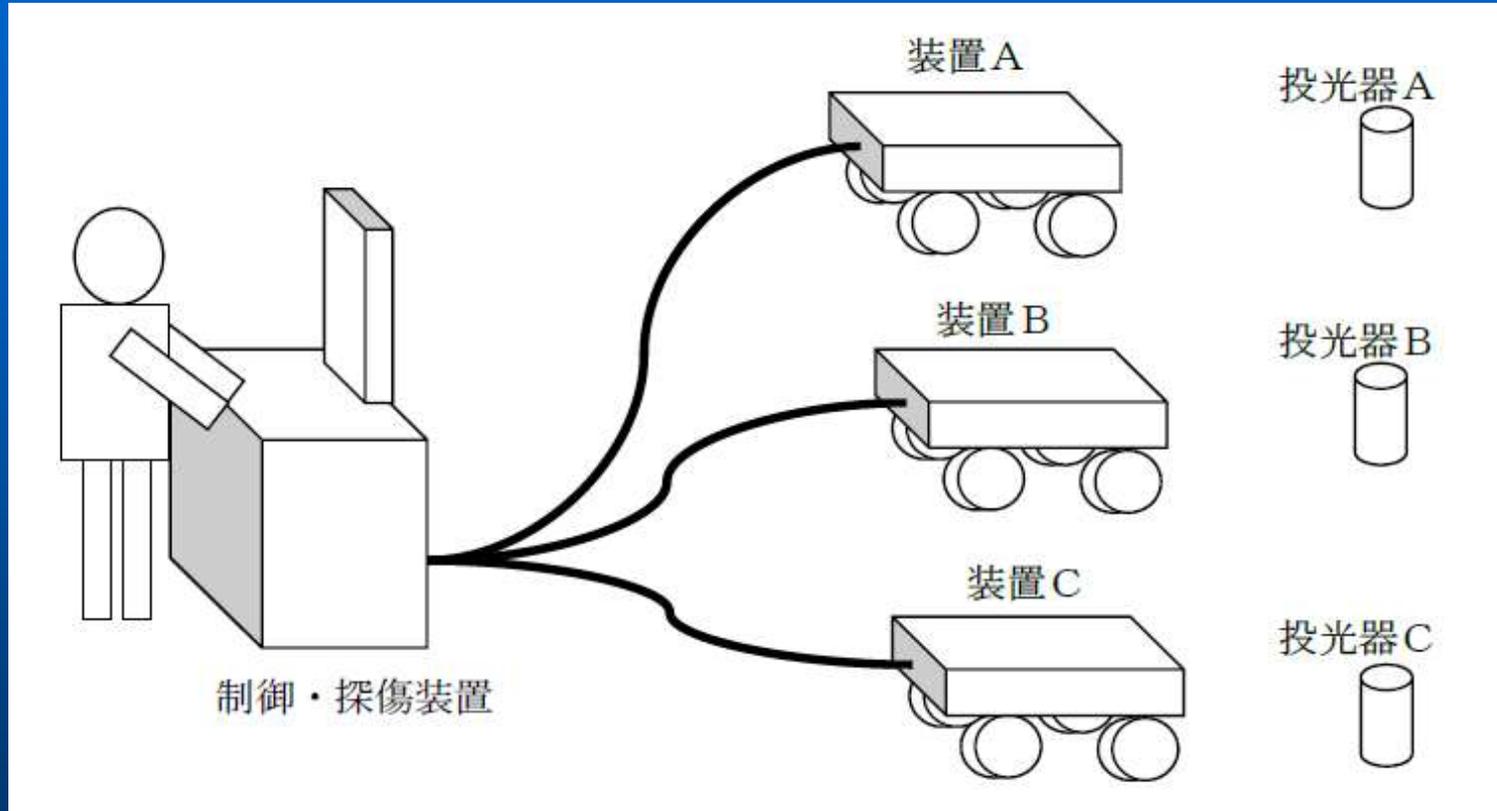
溶接継手の強度(産報出版, 第2版, 平成8年)より

K.Wellinger,H.Gassmann:Schweissen und Schneiden, 20No.1(1968)

## 9. まとめ

- 超音波探傷では、斜め方向キズの一部を除き、**深さ3mm × 長さ6mm**の表面キズの検出は可能。
- 対象範囲は**突合せ溶接**。
- 装置の速度を落とせば理論的には、表面キズは溶接線平行方向で**深さ1mm × 長さ3mm**、溶接線直交方向（溶接中央部）で**深さ1.5mm × 長さ3mm**を検出可能。
- 内部キズ検出のシミュレーションの実施結果では、深さ3.5mm × 長さ6mmを超える開先面の融合不良や割れは検出可能、球状のブローホールは検出不可。

# 9. まとめ



## 検査装置の運用イメージ

1タンク当り、突合せ溶接が2000mの場合、50mm/secの検査スピードでは、セッティング時間も含め、3日(8時間/日計算)  
(5分準備、5分探査で、15mを探傷として計算)