

コーティング上からの溶接線検査に係る検討委員会

報告書

令和4年3月

コーティング上からの溶接線検査に係る検討委員会

はじめに

危険物を大量に貯蔵する特定屋外貯蔵タンクの多くは、内面腐食防止の観点から底部全面にコーティングが施工されており、定期的なタンク底部の溶接部検査については、コーティング上からの検査手法の確立が望まれ、その検討が進められてきた。平成 12 年には消防危第 93 号「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」（以下、消防危第 93 号）において、その有用性が確認された検査方法及び破壊力学的な考察により補修を要しない欠陥の大きさ等が示された。

現行の検査手法である磁粉探傷試験、又は浸透探傷試験が、表面或いは表面直下の欠陥長さをサブ mm オーダーの微小欠陥も計測できるのに対し、超音波探傷法の一つであるフェーズドアレイ（以下、P A）超音波探傷法は、mm オーダーのマクロ欠陥を長さに加えて部材強度に直結する深さ情報も計測できるという特性を考慮して、J O G M E C は平成 21 年度から P A 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ついて検討を開始した。一方、消防庁は平成 28 年度から平成 30 年度に「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」を立ち上げ、調査検討を進め、P A 探傷法による溶接部検査への適用上の課題を提起した。

今回のプロジェクトでは、これら課題の解決に向けて消防危第 93 号に基づき、長さ 6 mm、深さ 3 mm 以上のきずを検出する P A 探傷装置を開発し、その有効性を検証したもので、原子力発電機器やガスパイプライン等における P A の適用実績等も考慮しながら、さらにき裂部の応力分布やき裂の進展予測等を行い、コーティング上からの溶接部検査のための P A 探傷法を提案した。

本報告書は、これらの成果をまとめたものであり、現行の溶接部検査の基準が 4 mm であることから、長さ 4 mm、深さ 2 mm 以上の欠陥を検出するための探傷条件についても言及した。

今後、コーティング上から P A 探傷法を用いた非破壊検査が行われ、実用機での探傷データの蓄積に伴い、P A 探傷法の信頼性が広く共有されていくと考える。さらに、P A 探傷法がタンク底部溶接部の強度保証に繋がる中核的探傷法として、広く利用されていくことを期待する。

本報告書の取りまとめにあたり、ご多忙中にも関わらず検討委員会に積極的に参画され、貴重なご意見をいただいた委員各位のご尽力によるところであり、深く感謝申し上げます。

令和 4 年 3 月

コーティング上からの溶接線検査に係る検討委員会

座長 三 原 毅

目次

第一章 調査検討の概要.....	1
1.1 本調査検討の経緯.....	1
1.2 本調査検討の目的.....	2
1.3 調査検討の実施概要.....	2
(1) 令和元年度.....	2
(2) 令和2年度.....	2
(3) 令和3年度.....	2
1.4 調査検討体制.....	4
1.5 調査検討経過.....	5
第二章 現状把握と課題の整理.....	6
2.1 現行の底部溶接部検査.....	6
2.2 超音波探傷法の特性とPA探傷法の適用事例.....	6
2.3 平成30年度までの検討概要.....	7
(1) 消防危第93号通知におけるコーティング上からの溶接部検査の現状.....	7
(2) 超音波探傷法を用いた溶接部検査のこれまでの取り組み(JOGMEC).....	8
(3) 平成28~30年度の調査検討会(消防庁).....	8
2.4 PA探傷法による溶接部検査の課題の整理.....	9
第三章 調査検討方法.....	10
3.1 PA探傷法による溶接部検査に係る検討項目.....	10
(1) 前提条件の設定.....	10
(2) 探傷性能に係る検証.....	10
(3) 検査制度に係る要件の検討.....	10
(4) その他.....	10
3.2 調査項目及び調査方法等.....	11
(1) 前提条件の設定.....	11
(2) 探傷性能に係る検証.....	11
(3) 検査制度に係る要件の検討.....	12
(4) その他.....	12
第四章 前提条件の設定.....	13
4.1 溶接継手形状.....	13
4.2 部位.....	13

4.3 材質及び板厚	14
4.4 検査対象範囲	14
(1) 水平方向	14
(2) 深さ方向	15
4.5 きずの傾き	15
(1) 鉛直方向の傾き	15
(2) 水平方向の傾き	17
4.6 PAの検証条件	17
(1) Aパターン	18
(2) Bパターン	19
4.7 感度校正方法	20
4.8 指示長さの定義	20
 第五章 探傷性能に係る検証	 21
5.1 傾ききずの検出性	21
(1) 鉛直方向の傾き	21
(2) 水平方向の傾き	23
5.2 実きずの検出性	34
(1) 過去の検証	34
(2) 令和2年度の検証	35
(3) 令和3年度の検証	36
5.3 外乱要因による探傷性能への影響	49
(1) 実タンク特有の外乱要因	49
(2) 探傷及びカップリングチェックの方法	50
(3) 測定箇所	51
(4) 結果（カップリングチェック）	54
(5) （参考）結果（表面きずの検出）	57
5.4 SN比	58
(1) コーティングの種類による比較	58
(2) 実タンクのガラスフレークコーティングの塗膜厚さ	61
(3) ウェッジ内エコーの改善	66
(4) SN比（ガラスフレークコーティング）	68
5.5 探傷機としての製作と性能確認	68
(1) 改良型自動探傷装置	68
(2) カップリングチェックに関する確認	70
(3) 自動探傷における塗膜の影響	74

(4) 自動探傷における探傷性能確認.....	76
第六章 検査制度に係る要件の検討.....	80
6.1 付帯条件の検討	80
(1) 現状の調査.....	80
(2) 効率的な検査の付帯条件の検討.....	81
(3) 付帯条件に関するまとめ.....	85
6.2 検査に係る工程	86
6.3 探傷機の客観的な性能確認	86
6.4 P A 探傷機を用いた溶接部探傷実施者の技能レベルの確保	86
第七章 課題に対する回答	87
7.1 ①実タンクにおける検証データの不足	87
(1) 実タンク特有の外乱要因の影響.....	87
(2) 実きずに対するP Aの検出性	87
7.2 ②底板の裏面腐食に対する探傷性能の検討.....	87
(1) 実タンク特有の外乱要因の影響.....	87
7.3 ③傾ききずの検討	88
(1) 鉛直方向の傾き	88
(2) 水平方向の傾き	88
7.4 ④探傷機としての製作やその客観的な性能確認（第三者機関の評価等）	88
(1) 探傷機としての製作や性能確認.....	88
(2) 探傷機の客観的な性能確認.....	88
7.5 ⑤P A 探傷機を用いた溶接部探傷実施者の技能レベルの確保.....	88
(1) 求められる技能レベル	88
7.6 その他	88
(1) S N比の検討	88
(2) 判定基準	89
(3) 運用方法案.....	89
第八章 まとめ	90

第一章 調査検討の概要

1.1 本調査検討の経緯

特定屋外貯蔵タンクの多くは底部の内面腐食から保護することを目的にコーティングを施工されている。タンク底部の溶接部検査は、磁粉探傷試験（以下、MT）又は浸透探傷試験（以下、PT）で確認することが法令上定められており、検査前にはコーティングの剥離、検査後にはコーティングを再塗装する必要があるため事業者にとって負担となっている。コーティング上からの溶接部検査が可能となれば、図 1 のようにコーティングの剥離が不要となり開放期間の短期化、施工費の減少等が見込まれる。

このような背景の下、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（以下、JOGMEC）は、コーティング上からの溶接部検査手法としてPA探傷法の検討を平成 21 年度から検討を開始し、平成 30 年度まで検証データを積み重ねた。

平成 28 年度から平成 30 年度には、消防庁が主催した「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」（以下、平成 30 年度検討会）において、JOGMEC が積み重ねた検証データを基に調査検討が進められ、コーティング上からの溶接部検査におけるPA探傷法の課題が示された（添付資料 1）。

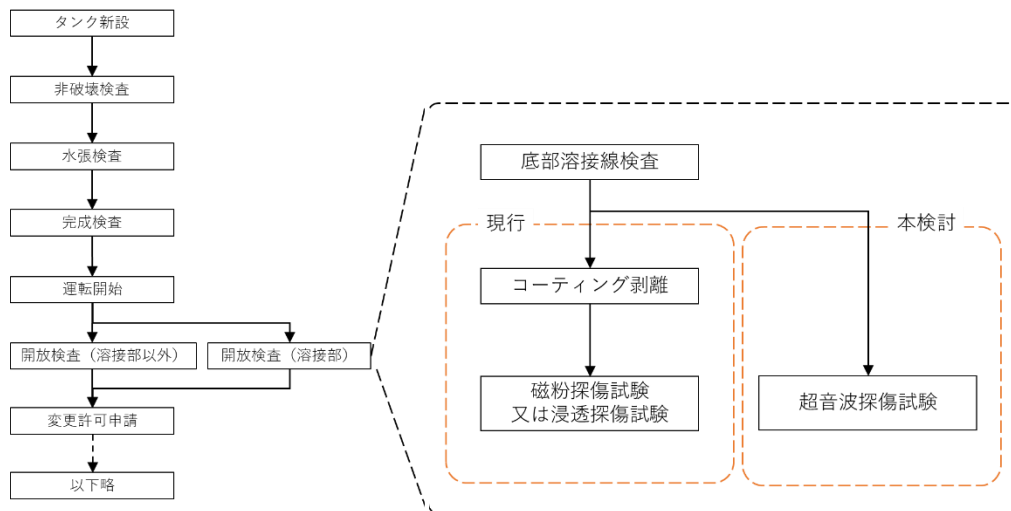


図 1 コーティング上からの溶接部検査の工程イメージ

1.2 本調査検討の目的

平成 30 年度検討会で示された課題に対して回答することを目的とする。

平成 30 年度検討会報告書で示された課題

- ①実タンクにおける検証データの不足
- ②底板の裏面腐食に対する探傷性能の検討
- ③傾ききずの検討
- ④実用機としての製作やその客観的な性能確認（第三者機関の評価等）
- ⑤ P A 試作機を用いた溶接部探傷実施者の技能レベルの確保

1.3 調査検討の実施概要

（１）令和元年度

調査検討事項を具体化するために資料調査等を実施した結果、平成 30 年度検討会で示された課題の他に、「⑥ S N 比に関する検討」が必要であることがわかった。また、平成 30 年度検討会では種々の探傷条件で検証しており、一様な評価が困難であったことから、本検討委員会では探傷条件を統一した試験を課題①～④、⑥に対して実施する方針を定めた。なお、課題⑤については、他の規格を調査し、レベル 2 以上の有資格者が実施することが妥当と判断した。

令和元年度の検討で判明した課題

- ⑥ S N 比に関する検討

（２）令和２年度

課題①、②、④の検討に先立ち、課題③、⑥について、手動探傷やシミュレーションによって、後述する A パターン（図 14）における探傷性能を検証した。その結果、探触子単体で探傷可能な角度範囲が $\pm 2 \sim 5 \text{ deg.}$ 程度であることが確認された。現行の MT と同様に表面の傾ききずについて全方向を対象とする場合、A パターンでの対象角度範囲の約 90 deg. 分に対して、多数の探触子を配置する必要があることが確認された。

（３）令和３年度

課題③について、手動探傷やシミュレーションを用いて、後述する B パターン（図 15）における探傷性能を検証した。その結果、A パターン、B パターンを併用しても傾ききずについて全方向を対象とすることは、実運用も含めて困難であることが確認され、他の規格と同様に溶接線方向のきずを対象とする「⑦適用範囲の絞り込みに関する付帯条件」について並行して検討した。

他の課題に対する検証結果を踏まえて装置を製作し、実タンクでの検証や資料調査等

に基づいて、客観的な性能や付帯条件について整理し、全ての課題に対する回答を検討した。

令和３年度の検討で判明した課題

⑦適用範囲の絞り込みに関する付帯条件

1.4 調査検討体制

コーティング上からの溶接線検査に係る検討委員会委員名簿（敬称略）

※（ ）は前任者

座 長	三原 毅	東北大学 大学院工学研究科教授
委 員	座間 信作	横浜国立大学 リスク共生社会創造センター客員教授
	鈴木 知基	消防庁予防課危険物保安室課長補佐（令和2年度から）
	（内藤 浩由	消防庁予防課危険物保安室課長補佐（令和年度））
	村上 治三郎	川崎市消防局予防部危険物課長（令和3年度）
	（小川 晶	川崎市消防局予防部危険物課長（令和2年度まで））
	森 成司	北九州市消防局予防部規制課長（令和2年度から）
	（山下 一之	北九州市消防局予防部規制課長（令和元年度））
	西 晴樹	消防庁消防研究センター火災災害調査部長
	木村 亨	石油連盟 設備管理専門委員会（令和2年度から）
	（坂巻 正登	石油連盟 設備管理専門委員会（令和元年度））
	高橋 弘幸	一般社団法人 日本非破壊検査工業会
	出牛 利重	一般社団法人 日本非破壊検査工業会
	杉山 章	危険物保安技術協会企画部長
	渡辺 剛英	危険物保安技術協会タンク審査部長（令和3年度）
	（中本 敦也	危険物保安技術協会タンク審査部長（令和2年度まで））
	高橋 典之	危険物保安技術協会業務部長（令和3年度）
	山田 實	危険物保安技術協会 事故防止調査研修センター総括調査役
事 務 局	松坂 竜男	危険物保安技術協会企画部企画課長
	（中村 成孝	危険物保安技術協会企画部企画課（令和2年度まで））
	平野 晃史	危険物保安技術協会企画部企画課
	伊藤 真人	危険物保安技術協会企画部企画課
	森井 統正	危険物保安技術協会企画部企画課（令和2年度から）
	（奥 洋人	危険物保安技術協会企画部企画課（令和元年度））
	井手 悦子	危険物保安技術協会企画部企画課（令和3年度）
	森 拓也	危険物保安技術協会企画部企画課（令和3年度）
	中田 雅之	危険物保安技術協会企画部企画課（令和2年度から）

1.5 調査検討経過

検討の経過は以下のとおりである。

○令和元年度

第1回検討委員会 令和2年 2月 10 日

○令和2年度

第1回検討委員会 令和2年 8月 28 日

第2回検討委員会 令和2年 11月 9日、11月 10 日

第3回検討委員会 令和2年 12月 22 日

第4回検討委員会 令和3年 2月 8 日

○令和3年度

第1回検討委員会 令和3年 7月 12 日

第2回検討委員会 令和3年 10月 28 日

第3回検討委員会 令和3年 12月 22 日

第4回検討委員会 令和4年 2月 16 日

第二章 現状把握と課題の整理

2.1 現行の底部溶接部検査

現行の底部溶接部検査は、強磁性体の鋼板の溶接部に対しては、交流式極間法のMTを主に適用しており、非磁性体のステンレス鋼等の溶接部に対しては、PTを適用している。表 1 に現行の底部溶接部検査で定められている項目について示した。MTは実験室レベルで表面から深さ2mm程度までのきずが検出可能と言われており、PTは毛管現象を利用した検査手法のため、開口きずのみを対象としている。両検査は全方向の細かい表面きずを検出することを特徴としており、タンクの底部溶接部については全部位について適用可能である。表面の検査範囲としては、熱影響部を含む溶接部を対象としており、熱影響部は溶接線止端から板厚の1/2の範囲とされている。判定基準として、規則20条の8第2項第3号及び同条第3項第3号には指示模様長さが4mm以下であること等が定められている。

表 1 現行の検査手法

		検査手法	
		MT（交流式極間法）	PT
対象部位		底部溶接線	
検査対象範囲	水平方向	熱影響部を含む溶接線	
	深さ方向	表層 最大2mm程度	表面
対象となるキズの傾き		全方向	
判定基準		あり（指示模様長さ等）	

2.2 超音波探傷法の特性とPA探傷法の適用事例

「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）（添付資料2以下、消防危第93号）において、コーティング上からの溶接部検査の探傷法の一つとして超音波探傷法が示されている。超音波探傷法は超音波が金属中を伝搬し、不連続部からのエコーを受信し、位置や大きさを測定する検査手法である。そのため、超音波の伝搬方向に垂直な広がりを持つきずなどは検出が容易となる。

超音波探傷試験には大きく分けて垂直探傷法と斜角探傷法があり、垂直探傷法は探傷面に対して垂直に超音波を出力して探傷を行う方法であり、斜角探傷法は、探傷面に対し斜めに超音波を入射させる方法である。対象物の表面形状や検出すべききずの発生位置や向きに合わせて選定する必要がある。今回対象となる様な溶接部等では斜角探傷法が

用いられている。なお、本検討ではコーティング上からの溶接部の検査方法としてPAを用いた斜角探傷法を採用している。

一般的な超音波プローブは一つの能動素子、または、発信用と受信用の対となる素子で構成されるが、より高度にパルス制御し取り扱う探傷方法として、PAが知られている。PAは個別にパルス発信できる素子から成るプローブの組み合わせで構成され、プローブの個々の素子を微妙な時間差を付けながらパルス動作させ、反射した超音波を個々の素子が検知した到着時間と振幅に応じて空間的に分類し、取り扱うことが可能となる。こういった利点があり、PA探傷法は欧州の石油・ガスパイプライン等で規格（参考資料1、2、3）が定められるなど活用が進められている。

平成30年度までの検討では、PAの超音波の発信方向は、表面きずに加え内部きずについても検出感度を持たせるため、図2の様に板厚方向に対して扇状に発信する方式を採用している。本検討も課題の前提条件と合わせるために過去の検討と同様の発信方式とした。



図2 本検討の超音波の発信方向のイメージ図

2.3 平成30年度までの検討概要

（1）消防危第93号通知におけるコーティング上からの溶接部検査の現状

平成10年度及び平成11年度の消防庁の危険物技術基準委員会において、コーティング上からの溶接部検査に供することのできる可能性のある非破壊試験の方法を選定し、その実証試験等が行われた。

その結果、当時の技術開発の状況として実用化には至らなかったが、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は、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（補修を要しないきずの大きさ（長さ6mm、深さ3mm））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。なお、これに関する通知は現時点では発出されていない。

(2) 超音波探傷法を用いた溶接部検査のこれまでの取り組み（JOGMEC）

JOGMECは、平成 21～23 年度及び平成 26～30 年度にかけて、「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）」で PA によるタンク底部のコーティング上からの溶接線検査装置について実証試験を踏まえながら検討を進めた。平成 28～30 年度には、消防庁が主催した「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」に対して、実用化に向けて検証結果等を提供した。JOGMEC が平成 30 年度までに実施した検証結果一覧を添付資料 3 に示す。いずれの検討も消防危第 93 号に基づき、長さ 6mm、深さ 3mm のきずを検出する方針で進めている。

平成 23 年度までは主に溶接線方向のきずを対象とし、突合せ溶接線に対して直交する様に探触子を配置した A パターン（図 3）での各種きずの検出性を確認しており、長さ 6mm、深さ 3mm のノッチきず、開口長さ 4mm 以下の表面きずが検出可能であることを確認している。また、ガラスフレークコーティングによる超音波の減衰に対する補正感度を確認した上で、ガラスフレークコーティングを有する実タンクで実証試験を実施している。

平成 26 年度以降は、鉛直方向の傾きを有するきず、溶接線方向から傾いたきずの検出性について確認するため、シミュレーション（CIVA（添付資料 4））も使用しながら検証を進めている。鉛直方向の傾きを有するきずでは、きずの傾き角度と位置によってエコーが異なる傾向が確認された。溶接線方向から傾いたきずに対しては、横割れの様な溶接線に対して直交した方向のきずを検出するため、図 3 の B パターンでの検証も進め、ノッチきずや実きずでの検出性を確認している。各探傷パターンにおいて、実きずも含めて検出可能であった。ただし、きずの傾き等に合わせて探傷条件を若干変更しながら検証を進めている。

平成 30 年度には、実タンクを対象とし、探傷装置による実証試験を実施し、A パターンで内部のきずと考えられる指示エコーが検出された。なお、当該指示箇所に対して、MT を実施したが指示は確認されなかった。



図 3 探傷パターン（探触子配置及び発受信のパターン）

(3) 平成 28～30 年度の調査検討会（消防庁）

JOGMEC がこれまでに実施してきた検証を基に消防庁が主催した「屋外貯蔵タ

ンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」において、P Aを用いたコーティング上からの溶接部検査の実運用に供するにあたって、以下のような課題が示された。

- ①実タンクにおける検証データの不足
- ②底板の裏面腐食に対する探傷性能の検討
- ③傾ききずの検討
- ④実用機としての製作やその客観的な性能確認
- ⑤P A試作機を用いた溶接部探傷実施者の技能レベルの確保 等

課題以外にも以下の内容が示された。

- ・P A試作機の仕様
- ・感度校正方法
- ・指示長さ、きず指示が近接している場合の取扱い
- ・(参考) きずを有する各試験片における疲労破壊試験
- ・P A試作機を用いた溶接きずの評価手法

2.4 P A探傷法による溶接部検査の課題の整理

平成 30 年度までの検証では探傷条件等が定まっていなかったため、一様な評価が困難であった。本検討では、前提条件を設けて一定条件で探傷試験を行い、検討を進める。

平成 30 年度検討会報告書で示された課題①～⑤の他に、1.2 で示した通り⑥、⑦の課題について検討が必要である。課題①～⑦は探傷性能に係る課題と検査制度に係る課題に分けられ、①～④、⑥、⑦が探傷性能に係る課題、④、⑤、⑦が検査制度に係る課題となる。

本検討で追加となった課題

- ⑥S N比に関する検討
- ⑦適用範囲の絞り込みに関する付帯条件の検討

第三章 調査検討方法

3.1 P A探傷法による溶接部検査に係る検討項目

関係法令や通知・通達、報告書及び現行の溶接部検査で適用されている条件等に基づき、前提条件を設定し、探傷性能に係る検証を実施し、検証結果を受けて検査制度に係る検討を行い、課題に対する検討を実施した。

(1) 前提条件の設定

(適用対象)

- ・溶接継手形状（T継手、重ね、突合せ）
- ・部位
- ・材質及び板厚
- ・検査対象範囲（水平方向、深さ方向）
- ・きずの傾き
- ・P Aの検証条件
- ・感度校正方法
- ・指示長さの定義

(2) 探傷性能に係る検証

- ・傾ききずの検出性
- ・実きずの検出性
- ・外乱要因（裏面腐食等）による探傷性能への影響
- ・S N比
- ・探傷機としての製作と性能確認

(3) 検査制度に係る要件の検討

- ・適用に関する付帯条件
- ・検査に係る工程
- ・探傷機としての客観的な性能確認
- ・P A探傷機を用いて溶接部探傷実施者の技能レベルの確保

(4) その他

- ・判定基準

3.2 調査項目及び調査方法等

(1) 前提条件の設定

項目	調査方法等	備考
溶接継手形状（T継手、重ね、突合せ）	超音波の特性とタンク底部溶接部との適性	4.1
部位	溶接線の余盛と探傷装置との干渉による適用部位の整理	4.2
材質及び板厚	実タンクで用いられている鋼材の調査	4.3
検査対象範囲（水平方向、深さ方向）	現行の溶接部検査と超音波探傷法の特性に基づいた検査対象範囲の整理	4.4
きずの傾き	平成30年度検討会報告書に基づいた整理	4.5
PAの検証条件	Aパターン、Bパターンの探触子の配置	4.6
感度校正方法	平成30年度検討会報告書に基づいた感度校正方法の整理	4.7
指示長さの定義	過去の検討内容の整理	4.8

(2) 探傷性能に係る検証

項目	調査方法等	備考
傾ききずの検出性	検出可能な傾ききずの確認 検出対象とする傾きの検討	5.1
		5.2
		5.5
		7.3
実きずの検出性	実きずの検出性の確認	5.2
		7.1
		7.2
外乱要因（裏面腐食等）による探傷性能への影響	実タンク特有の探傷性能への影響の確認	5.3
		7.1
		7.2
SN比	コーティングや溶接形状に伴う感度補正によるノイズの影響を確認	5.4
		5.5
		7.6
探傷機の製作と性能確認	探傷機の製作 探傷機の検出性の確認	5.5
		7.4

(3) 検査制度に係る要件の検討

項目	調査方法等	備考
付帯条件	検出対象の絞り込みに関する条件の検討	6.1
検査に係る工程	付帯条件に伴う工程の検討	6.2
探傷機の客観的な性能確認	性能評価の条件の検討	6.3
P A 探傷機を用いて溶接部探傷実施者の技能レベルの確保	必要な技能及び知識レベルの検討	6.4 7.5

(4) その他

項目	調査方法等	備考
判定基準	検証結果等に基づいた判定基準の検討	7.6

第四章 前提条件の設定

4.1 溶接継手形状

タンク底部の溶接継手は、アニュラ板×側板はT継手、アニュラ板相互は突合せ継手、アニュラ板×底板は突合せ継手又は重ね継手、底板相互は突合せ継手又は重ね継手で施工されている。なお、タンク底部の溶接部に対する超音波探傷は、タンク底部の裏面側は基礎があるため、タンク内表面側から斜角探傷法で探傷することとなる。

アニュラ板×側板のT継手は、部分溶け込みグループ溶接であり、内部の不連続面が不均一できずとの判別がつかないため、斜角探傷法は適さない。また、重ね継手はすみ肉溶接のど厚が一定ではないため、斜角探傷法は適さない。突合せ継手で同板厚の場合は探傷の条件が一定となるため、斜角探傷法が適す。よって、PA探傷の対象とする溶接継手は同板厚の突合せ継手とする（図 4）。

継手形状	T継手	重ね継手	突合せ継手
部位	側板×アニュラ板 (部分溶け込みグループ溶接)	アニュラ板×底板 底板相互	アニュラ板相互 アニュラ板×底板 底板相互
適性	不適	不適	同板厚の場合 適している

図 4 PA探傷の溶接継手との適性

4.2 部位

同板厚の突合せ継手はアニュラ板相互、アニュラ板×底板、底板相互が挙げられる。アニュラ板相互で採用される板厚はタンクによって異なり、検証には多くの時間とコストを要する。更にアニュラ板相互の溶接線長は全溶接線長に対して短いことから、アニュラ板相互は本検証から除いた。

次に、突合せ継手は余盛を有しており、図 5 の様に溶接線の 3 交点部は探触子が干渉するため、3 交点部を除いた溶接線の直線部を適用対象とする。よって、同板厚のアニュラ板×底板突合せ溶接線の直線部と底板相互突合せ溶接線の直線部が対象部位となる（図 6）。

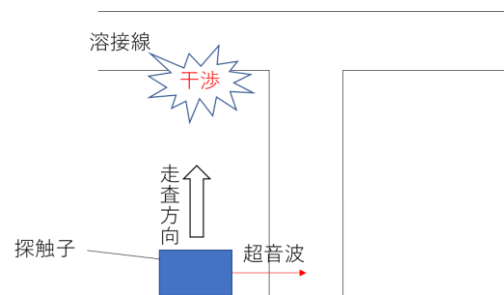


図 5 探触子と溶接線の干渉（3 交点）

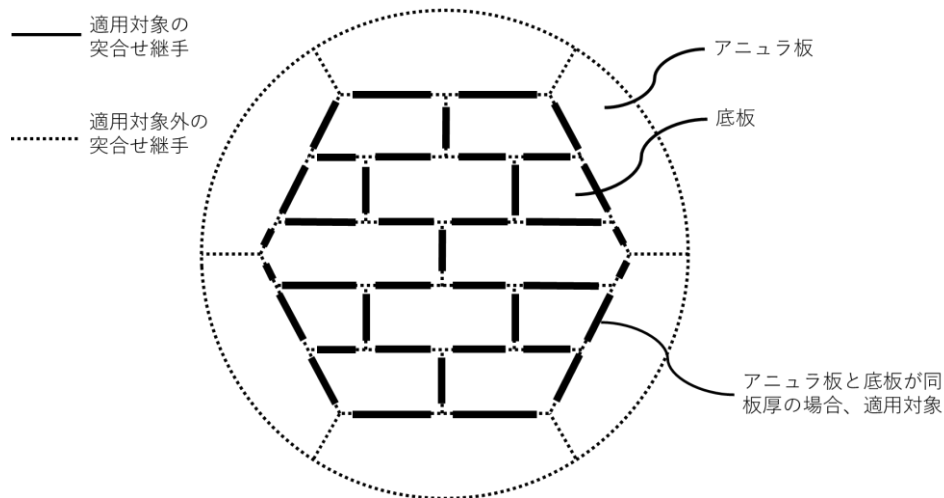


図 6 適用部位概要図

4.3 材質及び板厚

特定屋外貯蔵タンクにおいて底板相互突合せ溶接を採用している場合、底板は材質 SS400、板厚 12mm が多く用いられているため、本検証では同様に SS400、12mm を用いる。なお、過去の検証においても SS400、12mm における突合せ溶接部についての検証データを最も多く積み上げてきている。

4.4 検査対象範囲

（１）水平方向

水平方向の検査対象範囲は図 7 の通り、現行の溶接部検査の範囲と同様とし、熱影響部を含む溶接部とする。熱影響部は溶接止端から母材板厚の 1/2 の距離までとする。

溶接線幅（溶接最終層のビード幅）については、実タンクでは 22mm 程度であったため、安全側の評価として 25mm とした。よって、水平方向の対象範囲は熱影響部を含めて溶接線片側 18.5mm、両側で 37mm とする。

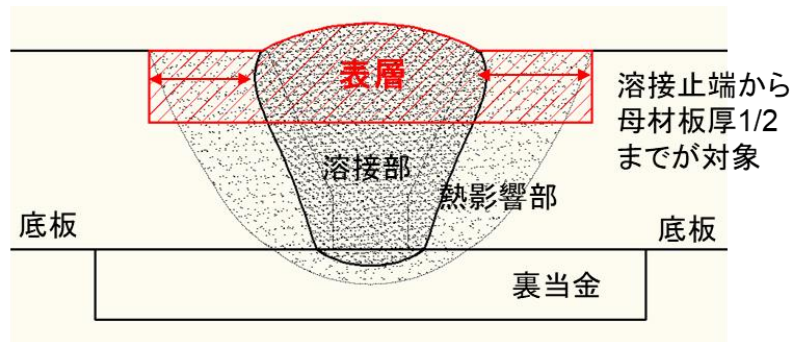


図 7 PA探傷の対象範囲

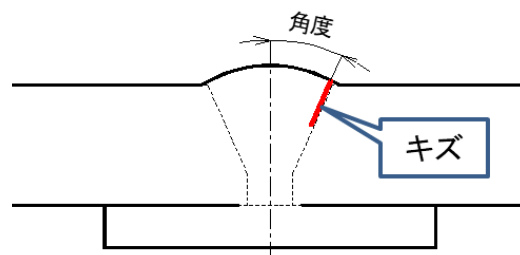
(2) 深さ方向

現行のMTの範囲と同様に深さ方向の検査対象範囲は表面から深さ 2 mm までとする。ただし、超音波探傷の特性を考慮し、表面から深さ 6 mm 程度までに位置するきずに対する検証も実施する。

4.5 きずの傾き

(1) 鉛直方向の傾き

鉛直方向の傾きは図 8 の通り、鉛直方向を角度 0 deg. とし、対象とする角度範囲は、0 deg. ～32.5deg. とする。角度範囲については、平成 30 年度検討会報告書（添付資料 1）の「3.6.2 鉛直方向の傾ききずの探傷について」において、「きずの想定としては、供用期間中に、タンク底板への疲労割れが発生する場合、突合せ溶接部においては、力学的には溶接線の鉛直方向に対して 0 deg. に入るきずが一般的と言われているが、溶接線止端部の形状急変部より開先に沿って割れが発生することは構造上考えられる。」とあるため、溶接の開先角度に沿ったきずを考慮し、現存するタンクで確認された角度範囲とした（図 9～図 12）。



（鉛直方向を角度 0° とする）

図 8 鉛直方向からの傾き

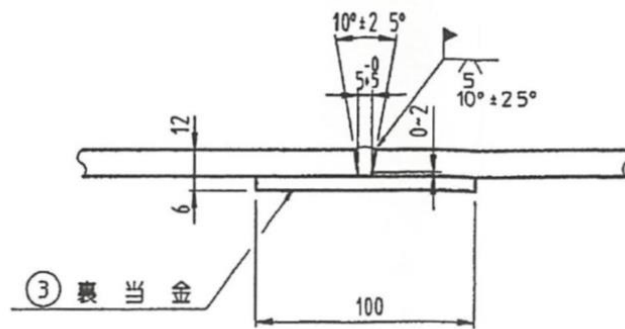


図 9 底板突合せ継手の例 開先角度 10deg.

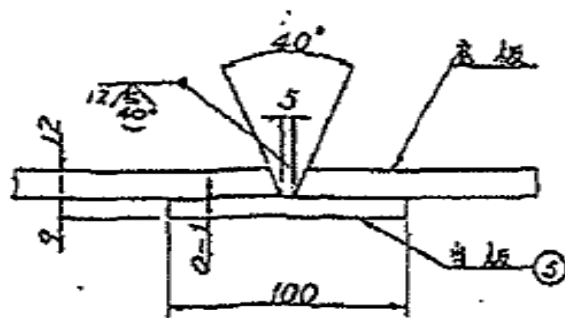


図 10 底板突合せ継手の例 開先角度 40deg.

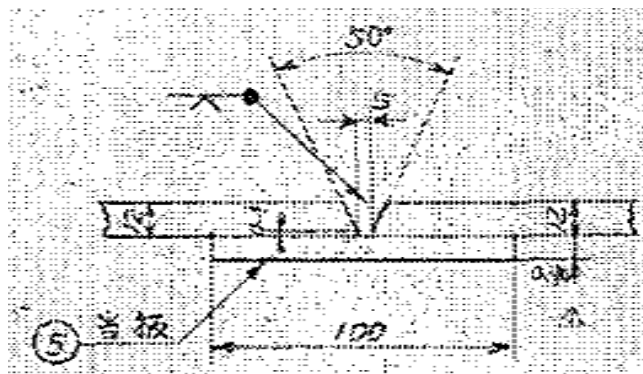


図 11 底板突合せ継手の例 開先角度 50deg.

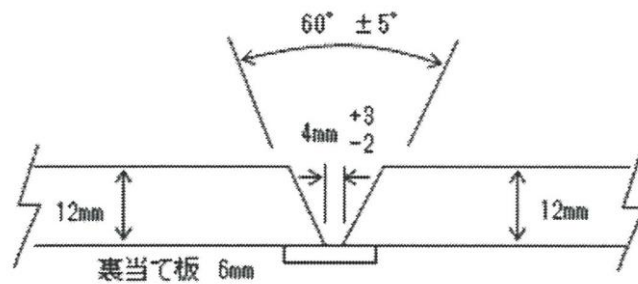
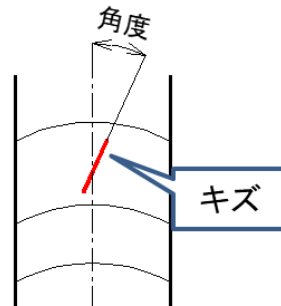


図 12 底板突合せ継手の例 開先角度 60deg.

(2) 水平方向の傾き

図 13 の通り、溶接線方向を角度 0 deg. とした傾きの角度を水平方向の傾きとする。
対象とする角度範囲は現行の溶接部検査と同様に全方向とする。



(溶接線方向を角度 0° とする)

図 13 水平方向の傾き

4.6 PAの検証条件

突合せ継手を対象とした斜角探傷法では探触子単体で送受信するAパターン（図 14）と送信用・受信用の対となる探触子を用いるBパターン（図 15）が想定される。タンク底部の溶接線は余盛を有しており、図 16 のようにアレイプローブを取り付けるウェッジと溶接線の余盛が物理的に干渉し、Aパターンのみでは、全方向のきずを対象とすることが困難であるため、Bパターンを併用して水平方向の傾きを有するきずを検出する方法を検討する。

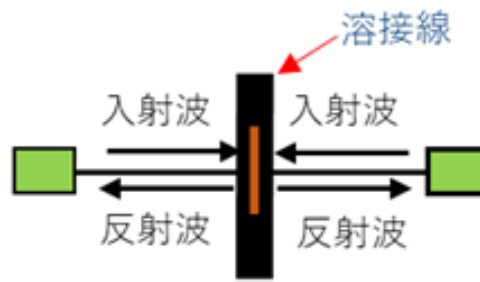


図 14 探傷方法（Aパターン）

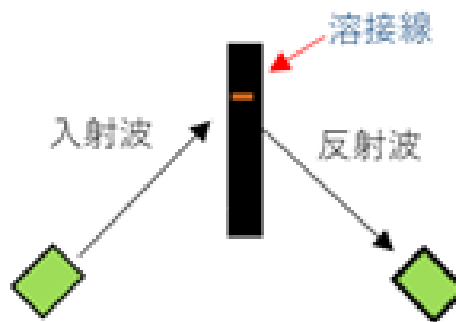


図 15 探傷方法（Bパターン）

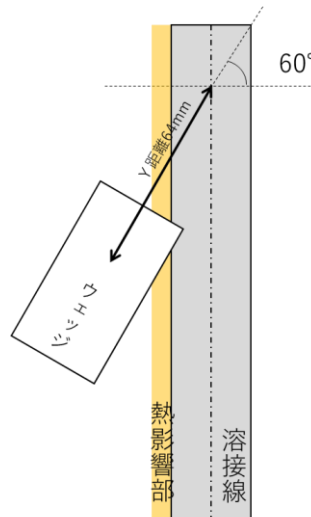


図 16 溶接線とウェッジの干渉

（１）Aパターン

溶接線止端部の鉛直方向の傾き 20deg. を有するきずを検出し易い様に、屈折角を 45～75deg. とし、基本配置としては、溶接線中央から入射点までの距離は 64mm とする(図 18)。

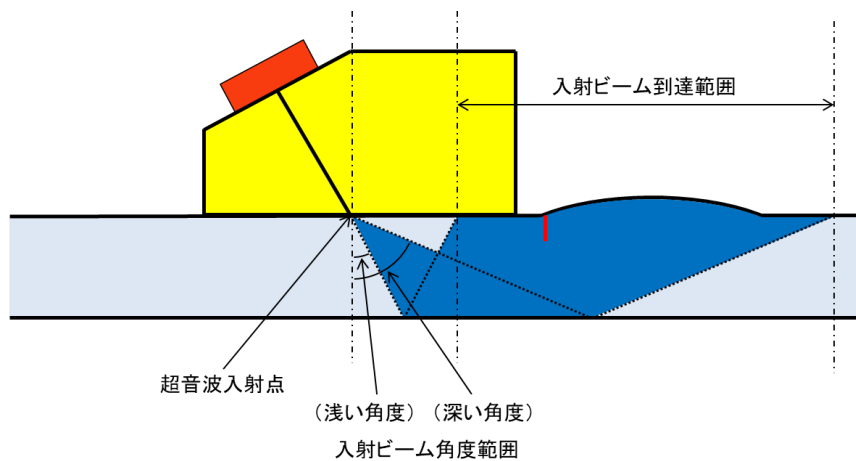


図 17 超音波入射イメージ図

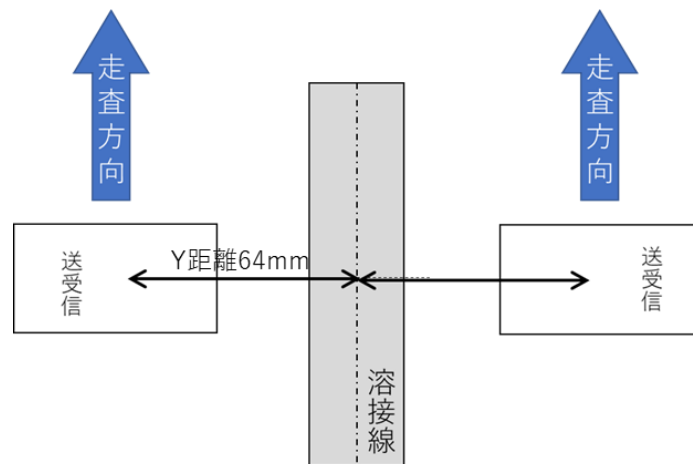


図 18 探触子基本配置（Aパターン）

（２）Bパターン

Aパターンにおける基礎的なデータを利用するため、超音波の屈折角についてはAパターンと同様とし、送信、受信用探触子の配置としては、溶接線中央から入射点が 64mm の同心円状に配置する。基本的な探触子の配置角度は図 19 の通り、溶接線に直交する方向から 35deg. とする。

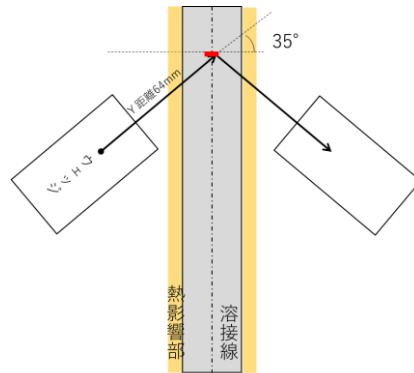


図 19 探触子基本配置（Bパターン）

4.7 感度校正方法

平成 30 年度検討会報告書と同様に消防危第 93 号の試験結果の評価（補修を要しないきずの大きさ）に基づき、感度校正は長さ 6 mm、深さ 3 mm のノッチきずを有する試験片を用いて、反射エコー高さが 80%となる感度（基準レベル）とする。Aパターンでは溶接線方向の溶接線中央部（Y距離 64mm）、Bパターンでは溶接線に直交方向の溶接線中央部（Y距離 64mm）に配置したノッチきずにおいて校正する。なお、コーティングによる超音波の減衰に合わせて感度校正する。

4.8 指示長さの定義

平成 30 年度検討会報告書に基づき、4.6 で示した基準レベル（80%）に対し、検出レベルは基準レベルの-12dB（20%）とし、指示長さは検出レベル以上のエコー高さが得られた範囲の長さとする。きず指示が近接している場合の取扱いは、平成 30 年度検討会報告書（3.3.3（4））と同様とする。

第五章 探傷性能に係る検証

2.3 で示した通り、課題①～⑦は探傷性能に係る課題と検査制度に係る課題に分けられ、①～④、⑥、⑦が探傷性能に係る課題となる。第五章では表 2 の通り、課題①～④、⑥について検証した。課題⑦については 6.1 でまとめた。

表 2 探傷性能に係る検証概要

課題	検証項目	検証内容
③傾ききずの検討	傾ききずの検出性	鉛直方向の傾ききずの検出性について検証
		水平方向の傾ききずの検出性について検証
①実タンクにおける検証データの不足	実きずの検出性	実探傷、シミュレーションによる実きずの検出性について検証
②底板の裏面腐食に対する探傷性能の検討	外乱要因による探傷性能への影響	実タンク特有の外乱要因による影響をカップリングチェックで検証
⑥SN比に関する検討	コーティング等による影響	コーティングによる感度調整量を検証し、SN比を確認した。
		実タンクの膜厚調査し、PA探傷で考慮する点について整理
		ウェッジの製作（ウェッジ内エコーの改善）
④実用機としての製作やその客観的な性能確認（第三者機関の評価等）	探傷機としての製作と性能確認	改良型自動探傷装置の製作
		カップリングチェックに関する確認
		自動探傷における塗膜の影響
		自動探傷における探傷性能確認

5.1 傾ききずの検出性

装置化を踏まえ、Aパターン、Bパターンの探触子単体又は対での探傷性能を確認した。

（１）鉛直方向の傾き

鉛直方向の傾きを有するきずの検出性試験の概要図を図 20、試験条件を表 3 に示した。試験の結果、いずれの条件においても、検出可能であることを確認した（図 21、図 22）。また、シミュレーションは手動探傷を概ね再現していることが確認された（図 23、図 24）。手動探傷で使用した試験片は添付資料 5 に示した。

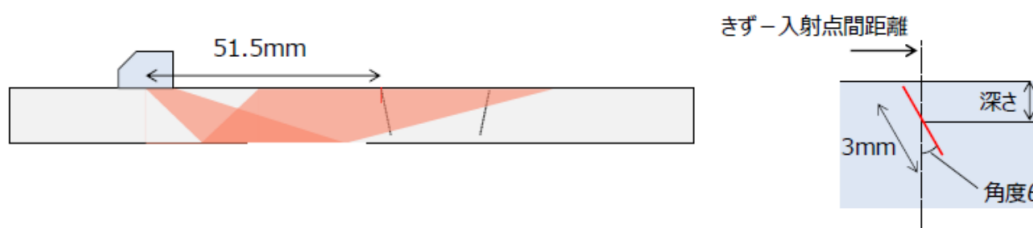


図 20 鉛直方向の傾きを有するきずの検出性試験概要図

表 3 鉛直方向の傾きに対する検出性能確認試験条件

項目	単位	条件	備考
確認方法	[-]	実探傷（手動）、シミュレーション	—
周波数	[MHz]	2.25、5	—
ノッチきず 長さ6mm×深さ3mm	位置	51.5（溶接線止端部）	—
	中心深さ	1.5、4、6	手動は1.5のみ
鉛直方向の傾き	[deg.]	0~40	—
水平方向の傾き	[deg.]	0	—

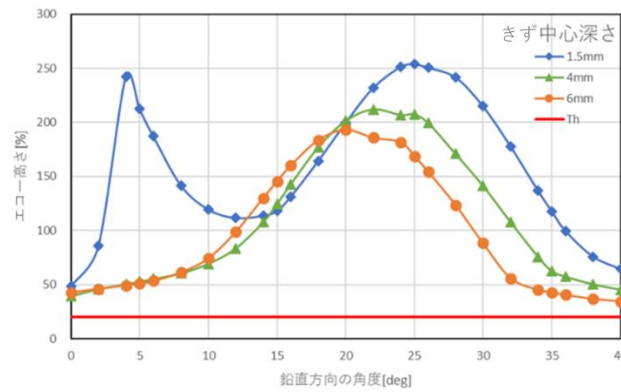


図 21 鉛直方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ
(シミュレーション 周波数 2.25MHz)

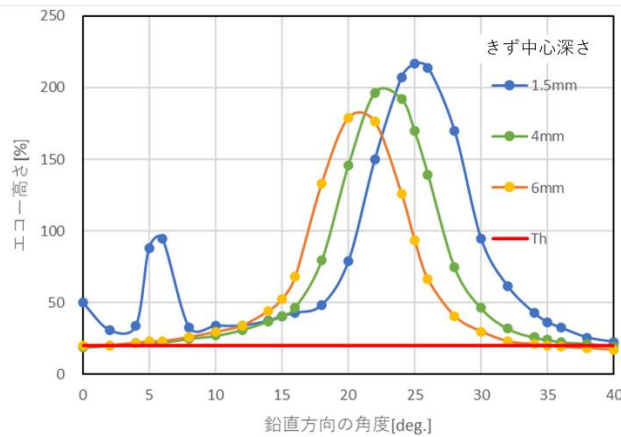


図 22 鉛直方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ
(シミュレーション 周波数 5 MHz)

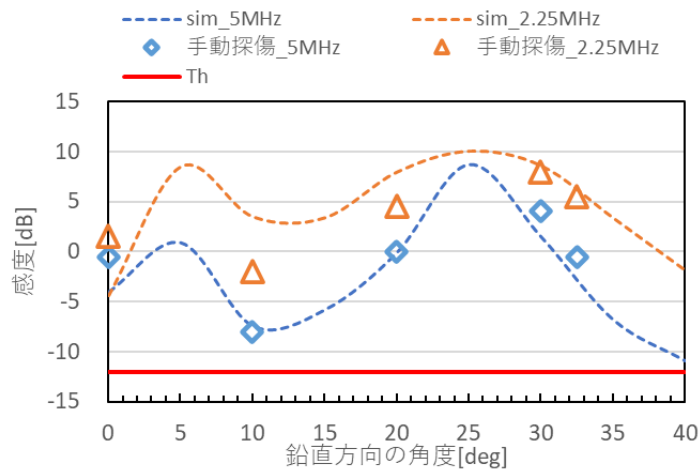


図 23 実探傷とシミュレーションのエコー高さ（表面きず）

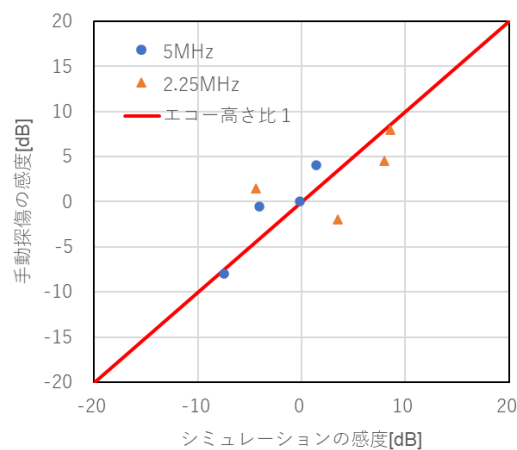


図 24 実探傷とシミュレーションの比較
（鉛直方向の傾きを有するノッチきずの感度）

（２）水平方向の傾き

ア Aパターンの検出性

水平方向の傾きを有するきずの検出性試験の概要図を図 25 に、試験条件を表 4 に示した。手動探傷で使用した試験片は添付資料 5 に示した。

試験の結果、表面きずを想定した場合、周波数 2.25MHz では± 5 deg. 程度（図 26）、周波数 5 MHz では± 2 deg. 程度（図 29）まで検出可能であることが確認された。

検出可能な角度範囲の広い周波数 2.25MHz において、実探傷（手動）とシミュレーションのエコー高さを比較した（図 32、図 33）。検出可能な± 5 deg. の範囲内において、シミュレーションは実探傷を概ね再現されていることを確認した。Y 距離 34mm、45.5mm においてはシミュレーションより実探傷のエコー高さが低くなる場合も確認されたが、

エコー高さは 50%以上あり、検出可否に影響しない範囲のため、シミュレーションは使用可能である。

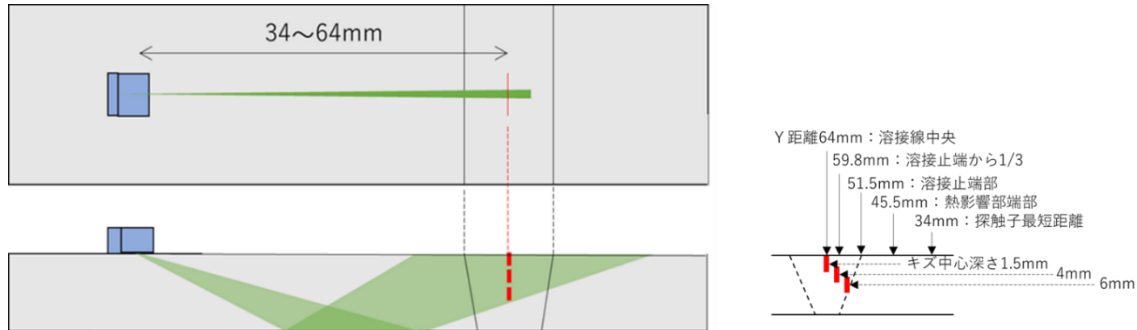


図 25 試験概要図（水平方向 Aパターン）

表 4 水平方向の傾きに対する検出性能確認試験条件（Aパターン）

項目	単位	条件	備考
確認方法	[-]	実探傷（手動）、シミュレーション	—
周波数	[MHz]	2.25、5	—
ノッチきず 長さ6mm×深さ3mm	位置	34~64	—
	中心深さ	1.5、4、6	手動は1.5のみ
鉛直方向の傾き	[deg.]	0	—
水平方向の傾き	[deg.]	0~15	—

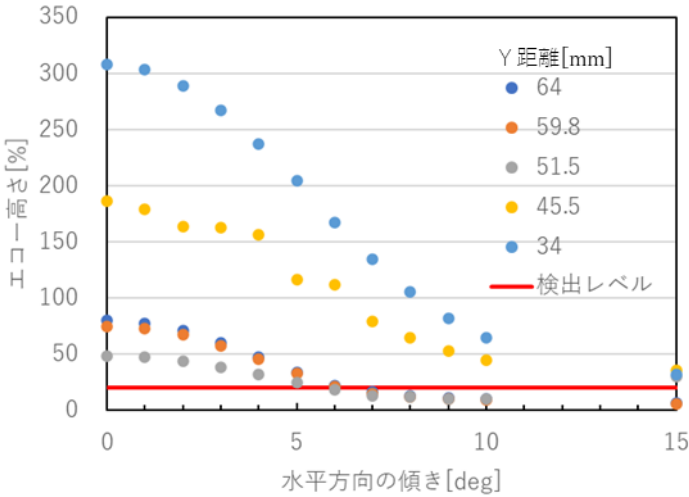


図 26 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ[%]
(シミュレーション 表面きず 周波数 2.25MHz)

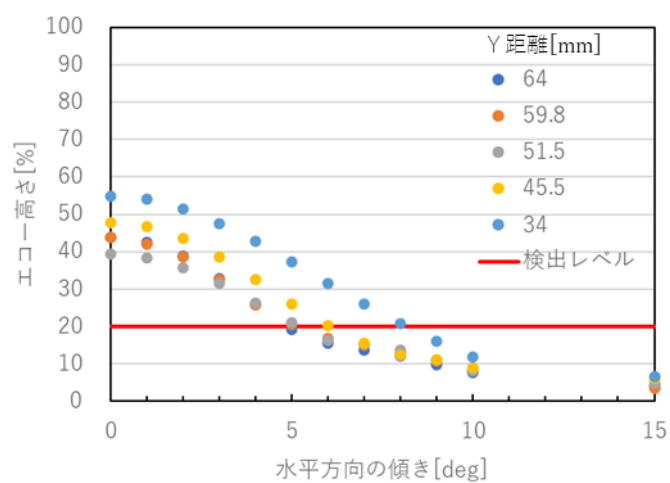


図 27 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ[%]
(シミュレーション 中心深さ 4 mm 周波数 2.25MHz)

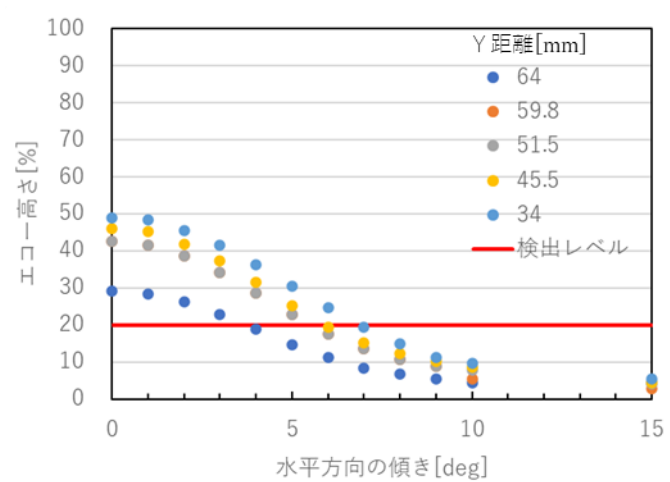


図 28 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ[%]
(シミュレーション 中心深さ 6 mm 周波数 2.25MHz)

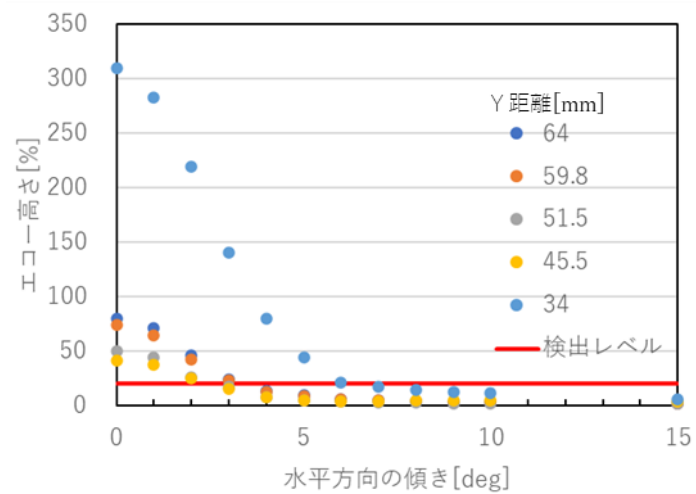


図 29 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ [%]
(シミュレーション 表面きず 周波数 5 MHz)

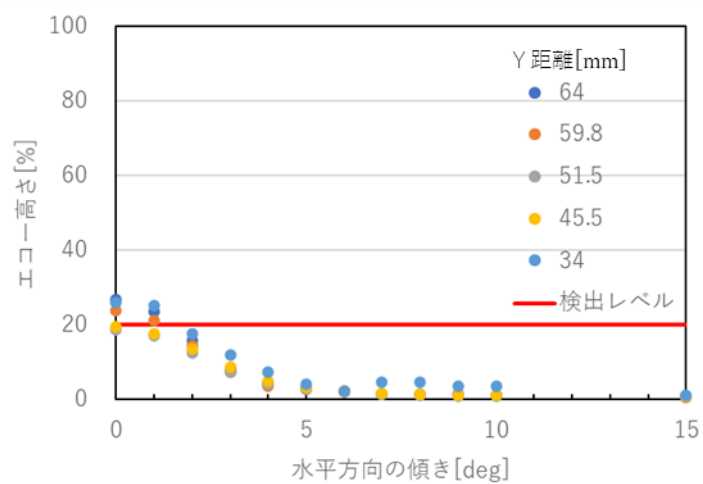


図 30 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ [%]
(シミュレーション 中心深さ 4 mm 周波数 5 MHz)

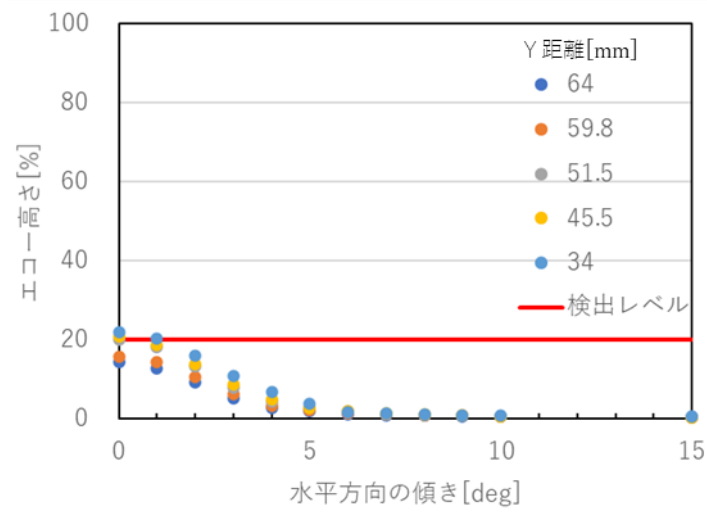


図 31 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ[%]
(シミュレーション 中心深さ 6 mm 周波数 5 MHz)

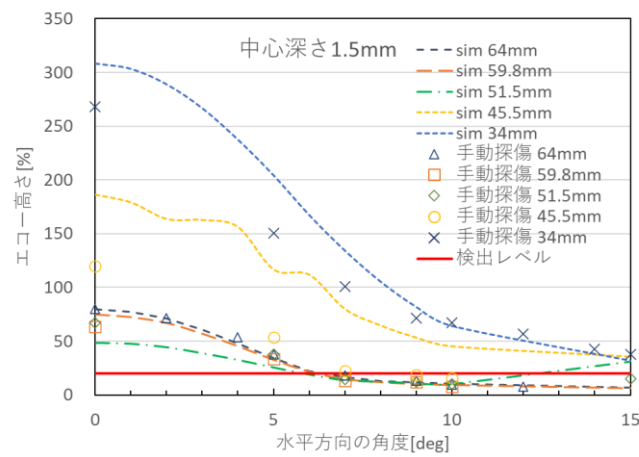


図 32 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ[%]
(シミュレーション及び手動探傷 表面きず 周波数 2.25MHz)

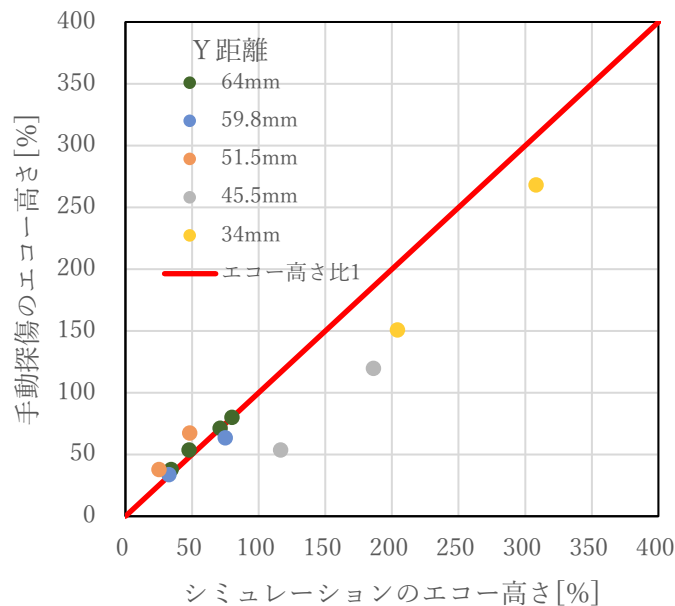


図 33 水平方向の傾きを有するノッチきずのエコー高さ[%]の比較
(シミュレーション及び手動探傷 表面きず 周波数 2.25MHz)

イ B パターンの検出性

検出性試験の概要図を図 34、図 35、試験条件を表 5 に示した。試験では送信側の探触子を固定し、受信側の探触子を振子走査した場合における検出可能な角度範囲を確認した。なお、周波数は、A パターンの検証で検出可能な角度範囲が広がった 2.25MHz とした。

シミュレーションの結果、基本配置から受信側の探触子の振子角度 θ_2 に対する表面きずからの反射エコー高さは、 θ_2 が小さくなるほど低下した (図 36)。また、表面きずの水平位置に対するエコー高さは、溶接線中央部からずれるほど低下する傾向を示した。表面きずにおいて検出可能な範囲は、水平位置が 0 ～ 8 mm において、 θ_2 は -1 deg. まで検出可能であった。

同様に、基本配置におけるきずの深さ方向に対するエコー高さは、きずが深くなるほど低下した。基本配置における深さ方向に対して検出可能な範囲は、きずの水平位置が 0 ～ 8 mm において、表面から中心深さ 4 mm においては検出可能であることが確認された (図 37)。

シミュレーションの再現性を確認するため、実探傷 (手動) とシミュレーションの表面きずからの反射エコー高さの関係を図 38～図 43 に示した。また、実探傷 (手動) とシミュレーションの比較結果を図 44 に示した。シミュレーションは実探傷 (手動) を概ね再現しており、実探傷のエコー高さが若干高い傾向を示し、シミュレーションはより安全側の評価となることが確認された。

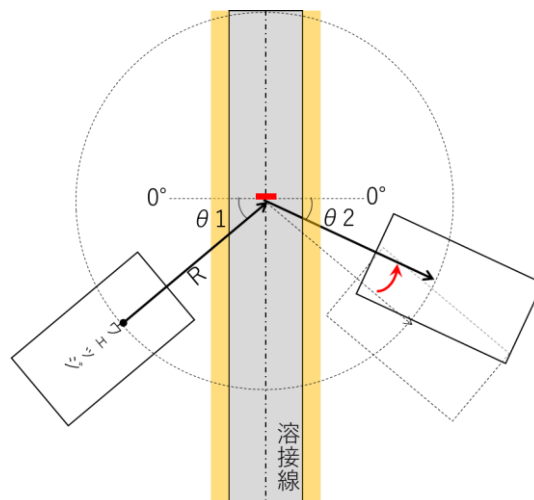


図 34 検出試験概要図（水平方向の傾きに対する検出性）

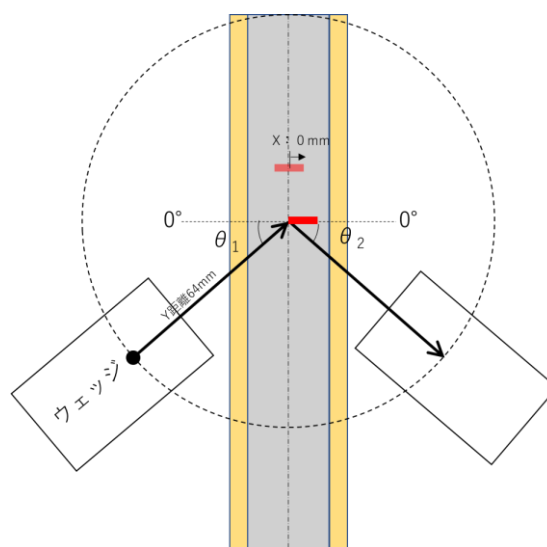


図 35 検出試験概要図（水平移動に対する検出性）

表 5 水平方向の傾きに対する検出性能確認試験条件（B パターン）

項目			単位	条件						備考
確認方法			[-]	実探傷（手動）、シミュレーション						—
周波数			[MHz]	2.25						—
探触子	送信側	θ_1	[deg.]	35						—
探触子	受信側	θ_2	[deg.]	35	25	15	5	-1	-5	—
ノッチきず 長さ6mm×深さ3mm	水平位置	X	[mm]	0~12						—
	中心深さ	d	[mm]	1.5、4、6						手動は1.5のみ
	鉛直方向の傾き		[deg.]	0						—
	水平方向の傾き		[deg.]	90						—

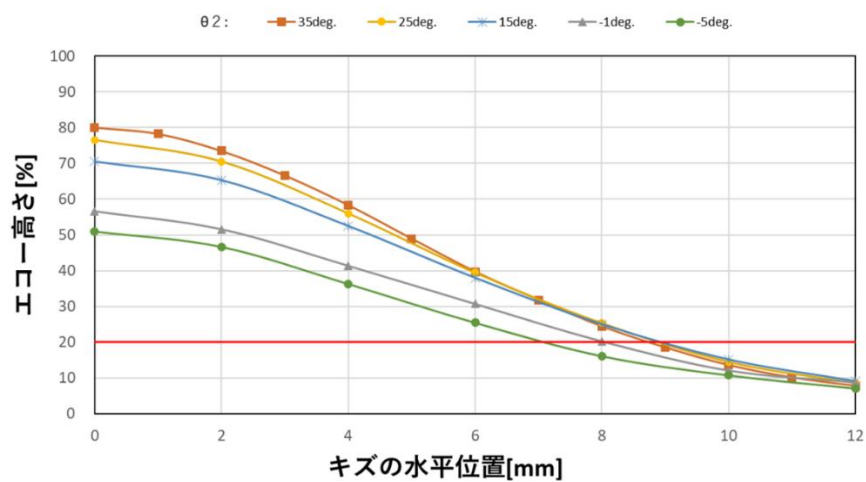


図 36 振子角度と水平位置におけるエコー高さ[%]の関係

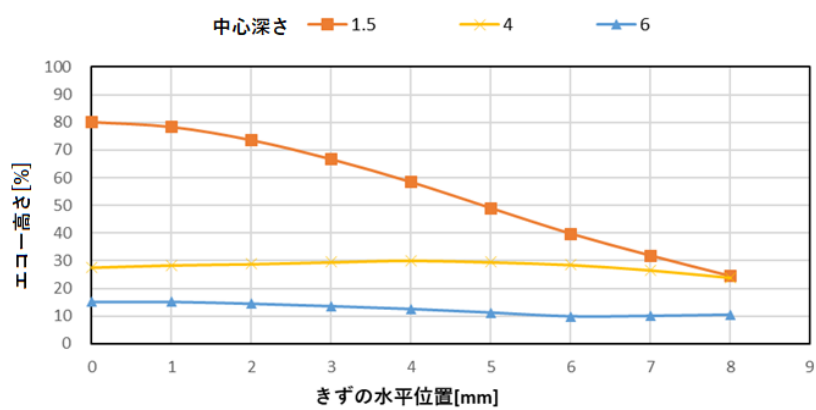


図 37 基本配置におけるきずの中心深さと水平位置に対するエコー高さ[%]

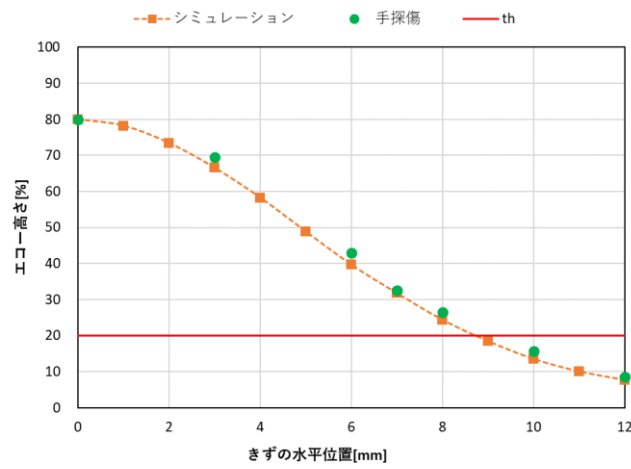


図 38 基本配置におけるきずの水平位置に対するエコー高さ[%]

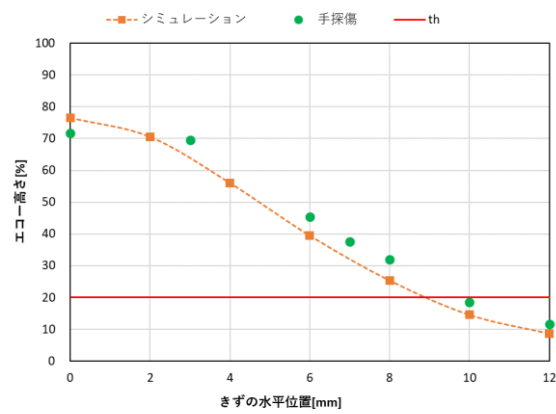


図 39 $\theta_2: 25\text{deg.}$ におけるきずの水平位置に対するエコー高さ[%]

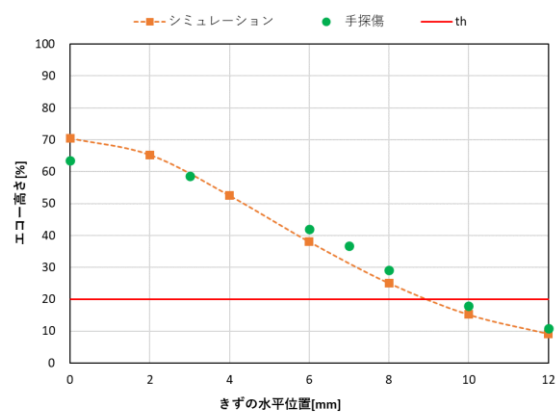


図 40 $\theta_2: 15\text{deg.}$ におけるきずの水平位置に対するエコー高さ[%]

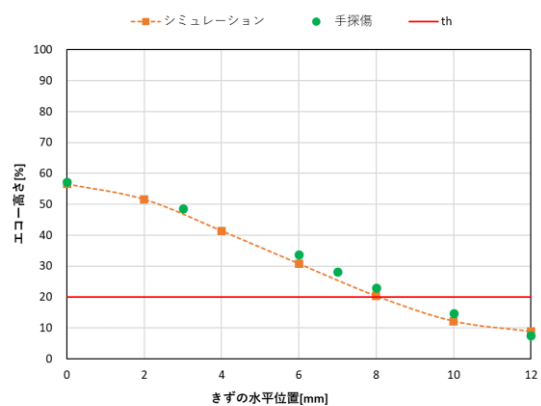


図 41 $\theta_2: 5\text{deg.}$ におけるきずの水平位置に対するエコー高さ[%]

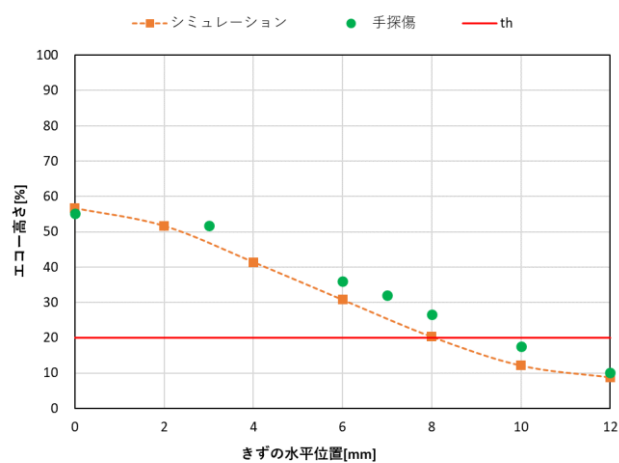


図 42 $\theta_2: -1\text{deg.}$ におけるきずの水平位置に対するエコー高さ[%]

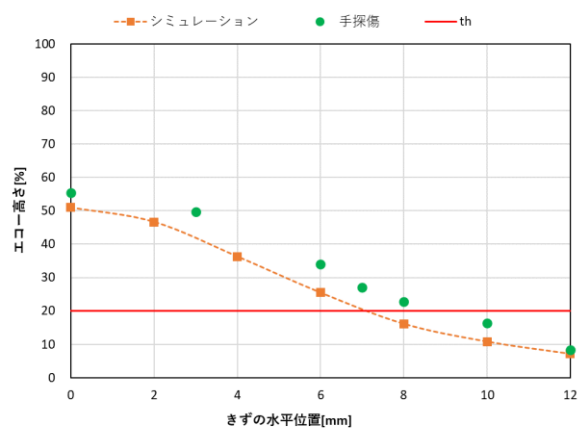


図 43 $\theta_2: -5\text{deg.}$ におけるきずの水平位置に対するエコー高さ[%]

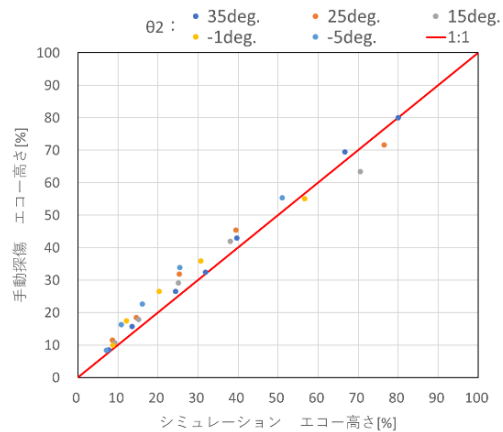


図 44 実探傷（手動）とシミュレーションのエコー高さ[%]の比較

ウ A/Bパターンを組み合わせた検出性の検討

Aパターンで配置可能な角度範囲について、溶接線から直交する方向 90deg. までに絞って検討した場合、探触子の配置角度は装置化におけるプローブホルダの密着性等を考慮すると最大 40deg. (図 45) である。一方、周波数 2.25MHz において探傷可能な角度範囲は ± 5 deg. であるため、Aパターンで探傷可能な角度範囲は最大で 45deg. 程度となることがわかった。

Bパターンでは、探触子と余盛の干渉から送信側の探触子は基本配置 (35deg.) から同心円状に溶接線側へ 5 deg. 寄せることが可能である。次に、きずに対する超音波の入射角度が異なった場合において、振子走査で検出可能なきずの角度範囲が同じと仮定すると検出可能なきずの水平方向傾きは 18deg. であり、Bパターンで探傷可能な角度範囲が 23deg. となる。よって、Aパターン、Bパターンを組み合わせた検出可能な水平方向の角度範囲は図 46 であり、全方向を探傷対象とすることは困難である。更に、上述の角度範囲をカバーするためには多くの探触子を配置する必要があり、運用上の理由からPA探傷装置を適用することは困難と考えられる。

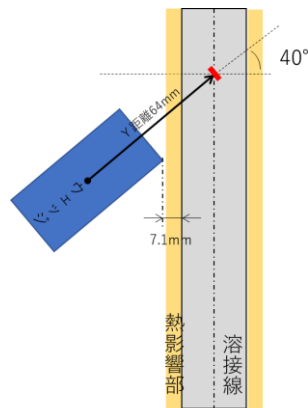


図 45 A パターンの最大配置角度

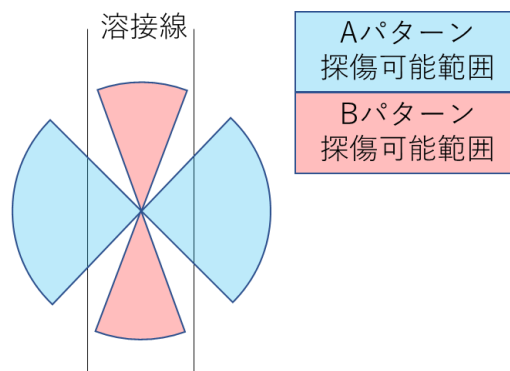


図 46 A／B パターンを組み合わせた検出可能な角度範囲（イメージ図）

5.2 実きずの検出性

（１）過去の検証

平成 30 年度までに実施した検証としては、シミュレーションと実探傷で確認されている。

ア シミュレーション

平成 27 年度、28 年度において、溶接線方向の割れを模したきずを対象に検出性を確認し、検出可能であることが示されている（参考資料 7，8 参照）。

イ 実探傷

平成 29 年度において、表面割れ（2mm～20mm）、内部割れ（3mm～42mm）を有する試験片を製作し、実きずの検出性を確認している。いずれも検出可能であることが平成 30 年度検討会報告書（添付資料 1 3.4.1（4））に示されている。

(2) 令和2年度の検証

水平方向の傾きを有する実きずの検出性について、シミュレーションで長さ6mm、深さ3mmの実きずを模擬して検証した(表6、図47)。その結果、水平方向の傾きに対する検出性はノッチきずより実きずの方が高いことが確認された(図48、図49)。なお、模擬したきずは、同じ製法で製造された止端割れの試験片の表面形状と断面形状を組み合わせ合成したものとした。長さ方向については止端割れの端部から6mmをトリミングし、深さ方向については表面から深さ3mmをトリミングし合成した。

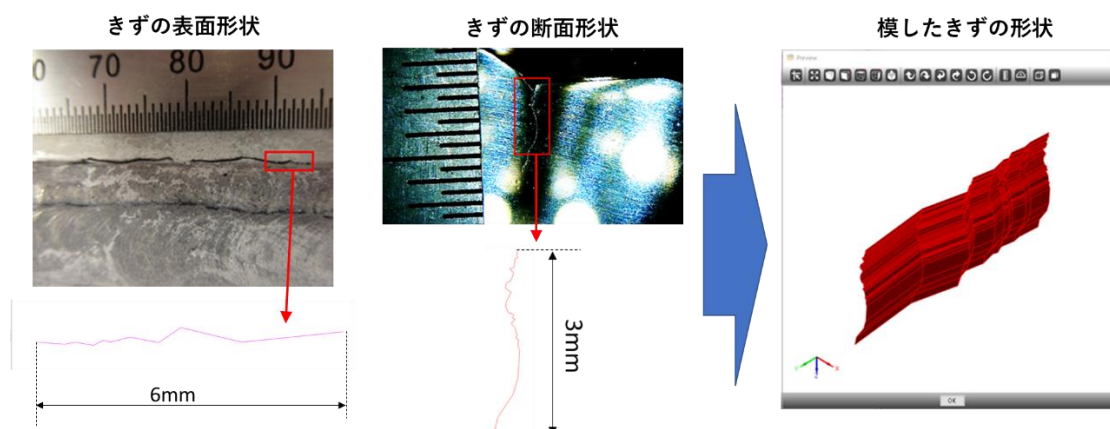


図 47 止端割れの模擬きず(令和2年度)

表 6 試験条件(模擬きずにおける検出性 令和2年度)

項目		条件	備考
探傷パターン		Aパターン	—
周波数		2.25MHz	—
きず	形状	模擬きず (6mm×3mm)	—
		ノッチきず (6mm×3mm)	—
	位置	溶接線止端部相当	Y距離51.5mm
		溶接線中央部相当	Y距離64mm
	深さ	表面	中心深さ1.5mm
	鉛直方向の傾き	0deg.	—
	水平方向の傾き	0~15deg.	—

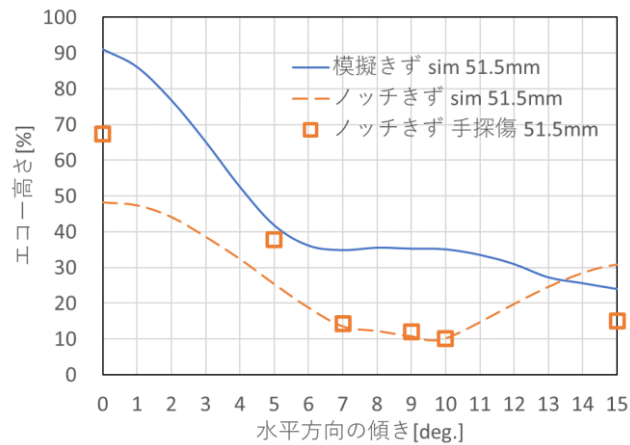


図 48 実きずの検出性 (シミュレーション 溶接止端部)

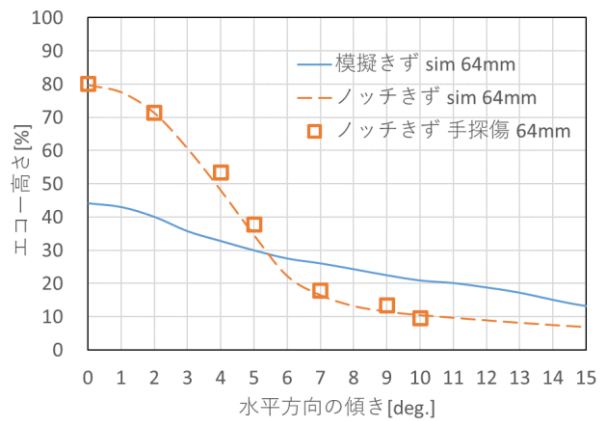


図 49 実きずの検出性 (シミュレーション 溶接線中央部)

(3) 令和3年度の検証

実きずを有する試験片を製作し、手動探傷、自動探傷での実きずの検出性を確認した。その結果、手動探傷、自動探傷共に実きずを検出でき、エコー高さ及び指示長さは同程度であることを確認した。

ア 試験片

実きずの検出性について、Aパターン、Bパターンで各々確認するため、止端割れ、横割れの試験片を製作した (図 50、図 51)。詳細については添付資料 6 に示す。

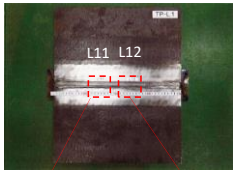
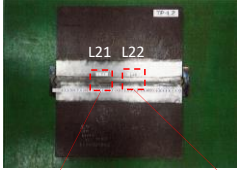
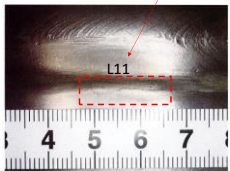
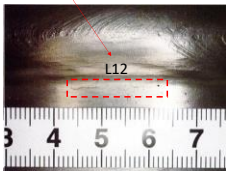
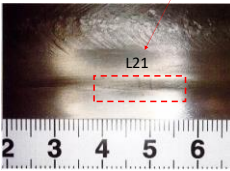
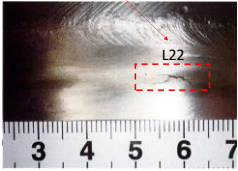
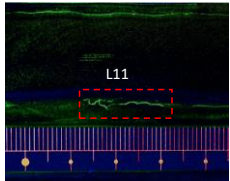
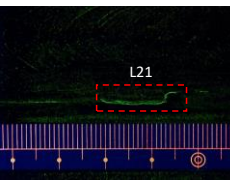
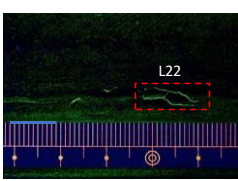
試験体No.	TP-L1		TP-L2	
試験体外観				
試験体外観 (きず部拡大)				
MT結果				
MT結果 (指示長さ)	17mm		12mm	

図 50 止端割れの試験片（令和 3 年度）

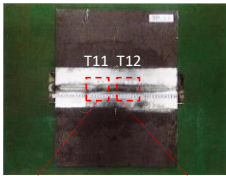
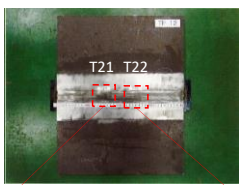
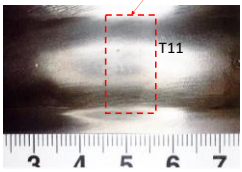
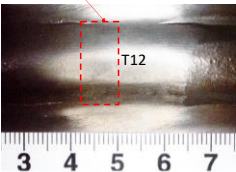
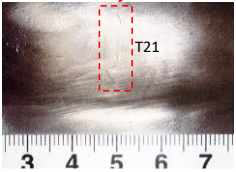
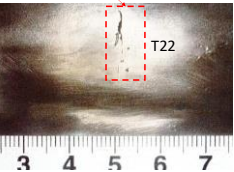
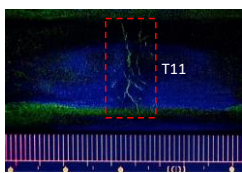
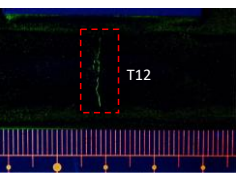
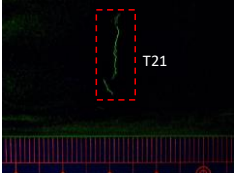
試験体No.	TP-T1		TP-T2	
試験体外観				
試験体外観 (きず部拡大)				
MT結果				
MT結果 (指示長さ)	17mm		20mm	

図 51 横割れの試験片（令和 3 年度）

イ 止端割れの検出性

試験条件を表 7、試験概要図を図 52 に示した。各試験で得た指示長さを表 8、表 9

に示した。全ての実きずが検出可能であり、手動探傷、自動探傷における有意な差はなかった。よって、探傷条件を適切に設定した自動探傷は手動探傷と同様に表層の実きずを検出できることが確認された。

表 7 試験条件（実探傷 止端割れ Aパターン）

送受信用 探触子	位置	溶接線中心と入射点間距離が64mm
	角度	溶接線に直交する方向～12deg.（自動探傷は0deg.）
周波数		2.25MHz
感度		y64mm，塗膜厚さ0mm，溶接線方向の傾き0deg.の ノッチきずのエコー高さが80%となる感度を0dB
塗膜厚さ		0mm
指示長さ		エコー高さが-12dB（エコー高さ20%に相当）以上 となる範囲の長さ

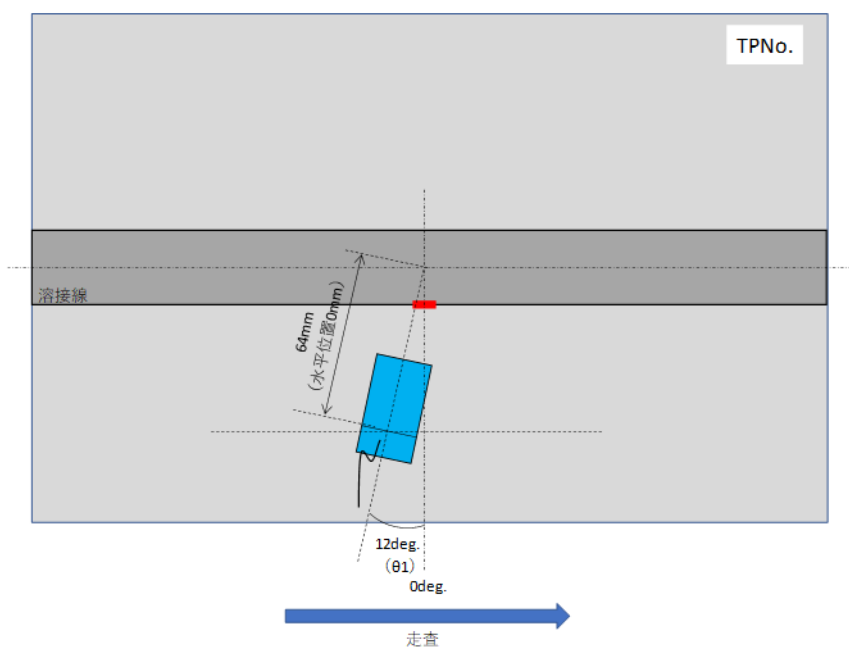


図 52 試験概要図（実探傷 止端割れ Aパターン）

表 8 試験結果（実探傷（手動） 止端割れ Aパターン）

			送受信用探触子の配置角度[deg.]					MT指示長さ [mm]
			0	3	6	9	12	
きずNO.	L11	指示長さ[mm]	24	22	24	20	22	17
	L12	指示長さ[mm]	26	24	24	18	22	21
	L21	指示長さ[mm]	26	28	26	24	22	17
	L22	指示長さ[mm]	22	20	14	16	16	12

表 9 自動探傷と手動探傷の比較（止端割れ Aパターン）

			自動探傷	手動探傷	MT指示長さ [mm]
きずNO.	L11	指示長さ[mm]	22	24	17
	L12	指示長さ[mm]	22	26	21
	L21	指示長さ[mm]	26	26	17
	L22	指示長さ[mm]	24	22	12

ウ 横割れの検出性

試験条件を表 10、試験概要図を図 53 に示した。試験の結果、全ての実きずを検出可能であることが確認された（表 11、表 12）。また、手動探傷、自動探傷における有意な差はなかった。よって、探傷条件を適切に設定した自動探傷は手動探傷と同様に表層の実きずを検出できることが確認された。

表 10 試験条件（実探傷 横割れ Bパターン）

周波数		2.25MHz
送信用探触子	位置	溶接線中心と入射点間距離が64mm
	角度	溶接線に直交する方向から35deg.
受信用探触子	位置	溶接線中心と入射点間距離が64mm
	角度	溶接線に直交する方向から35~-5deg.（自動探傷35deg.）
感度		y64mm, 塗膜厚さ0mm, 溶接線方向の傾き0deg.の ノッチきずのエコー高さが80%となる感度を0dB
塗膜厚さ		0mm

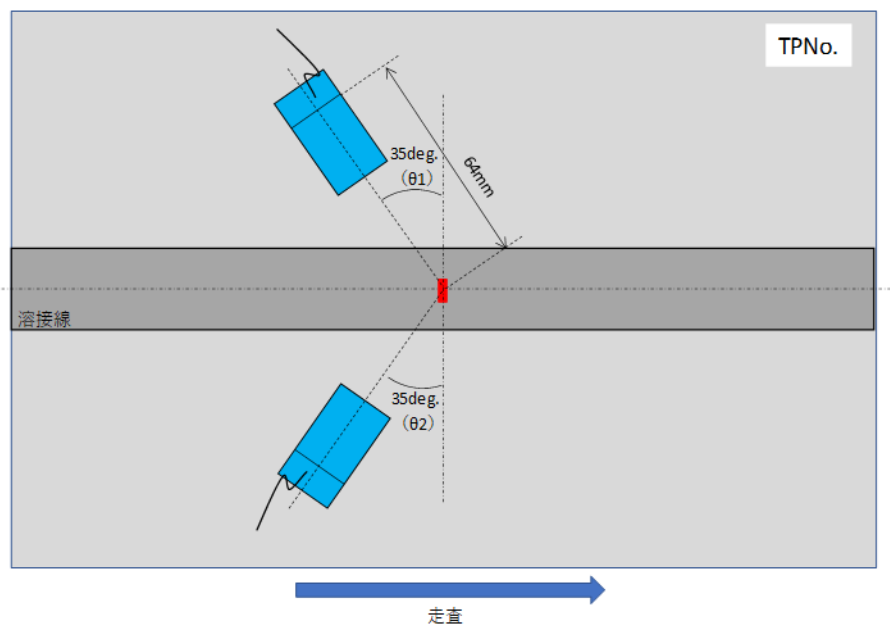


図 53 試験概要図（実探傷 横割れ Bパターン）

表 11 試験結果（実探傷（手動） 横割れ Bパターン）

$\theta 1$:送信用探触子の配置角度[deg.]			35					参考 MT指示長さ[mm]
$\theta 2$:受信用探触子の配置角度[deg.]			35	25	15	5	-5	
きずNO.	T11	感度[dB]	-4	-7	-6	-7	-4	17
	T12	感度[dB]	4	2	-4	-6	-15	15
	T21	感度[dB]	-2	-2	-9	-7	-8	18
	T22	感度[dB]	-1	-1	1	-4	-7	20

表 12 自動探傷と手動探傷の比較（止端割れ Aパターン）

			自動探傷	手動探傷	MT指示長さ [mm]
きずNO.	T11	感度[dB]	-4	-10	17
	T12	感度[dB]	4	2	21
	T21	感度[dB]	-2	-4	17
	T22	感度[dB]	-1	-3	12

エ より小さい実きずの検出性

長さ4mm 以下の実きずを意図して製作することは時間、コストの面から困難であったため、シミュレーションを用いて検証した。

シミュレーションによる検証にあたり、ノッチきずを対象とした検出性において再

現性が高いこと、実きずを模した場合において適切な評価となることを確認した。そして、同シミュレーションを用いて、長さ4mm、深さ2mmの実きずを模した縦割れの検出性について確認した。なお、検証はAパターンを対象とした。

(ア) シミュレーションの再現性の確認

a 長さ6mm×深さ3mmのノッチきずの指示長さの比較

図 54 の様にきず中心がプローブ交軸となる位置を0mmとし、-10mm から 10mm まで1mm ピッチで走査し、各点におけるエコー高さを調査した。周波数 2.25MHz、5 MHz における実探傷とシミュレーションのエコー高さを比較した。その結果を図 55～図 56 に示した。周波数に寄らず、シミュレーションは実探傷を再現していることが確認された (図 57)。

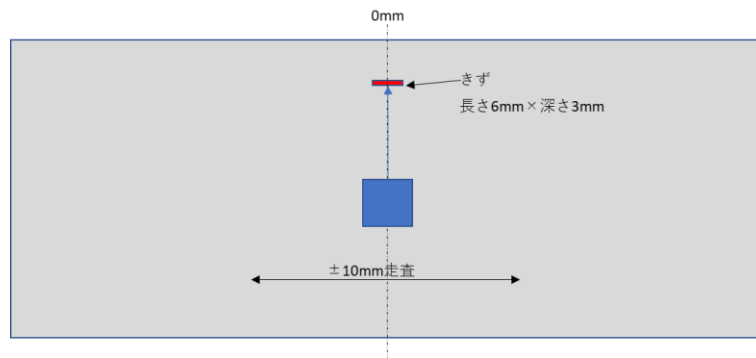


図 54 試験方法概要図 (鉛直方向のノッチきず水平走査)

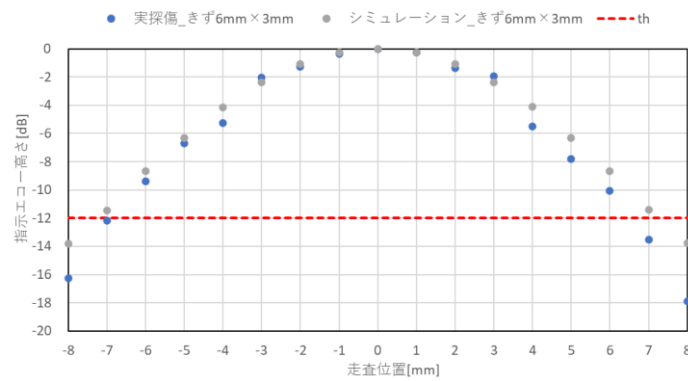


図 55 実探傷とシミュレーションのエコー高さ (周波数 2.25MHz)

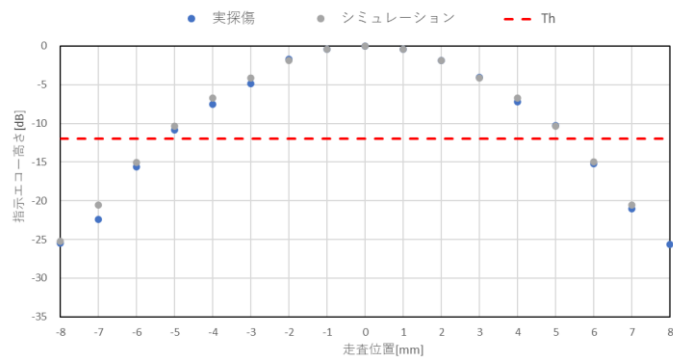


図 56 実探傷とシミュレーションのエコー高さ（周波数 5 MHz）

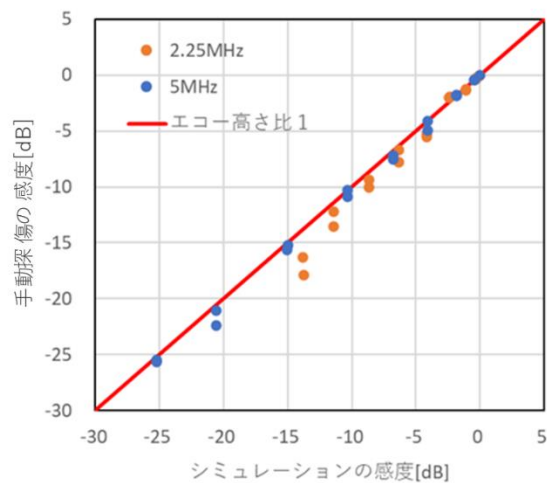


図 57 実探傷とシミュレーションの比較

b 鉛直方向の傾きを有するノッチきずの感度の比較

5.1(1) 鉛直方向の傾きに示した通り、周波数 2.25MHz、5 MHz における実探傷とシミュレーションのエコー高さを比較した結果、周波数に寄らず、シミュレーションは実探傷を概ね再現していることが確認された。

c Y 距離に対する感度の比較（ノッチきず）

図 58 の様にノッチきずが探触子側へ移動した（Y 距離が小さくなる）場合におけるエコー高さを調査した。周波数 2.25MHz、5 MHz における実探傷とシミュレーションのエコー高さを比較した結果（図 59）、Y 距離が小さくなるほど実探傷よりシミュレーションの感度が低く、シミュレーションは安全側の評価となることが確認された（図 60）。

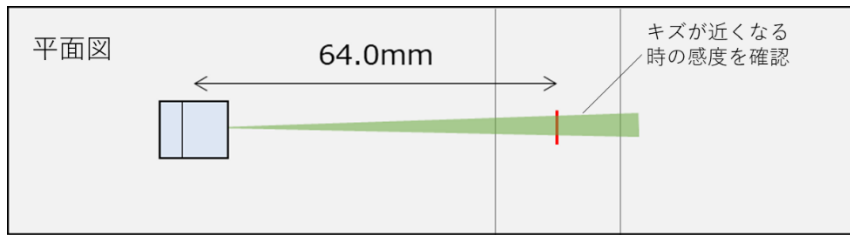


図 58 試験方法概要図（Y 距離に対する感度比較—水平走査）

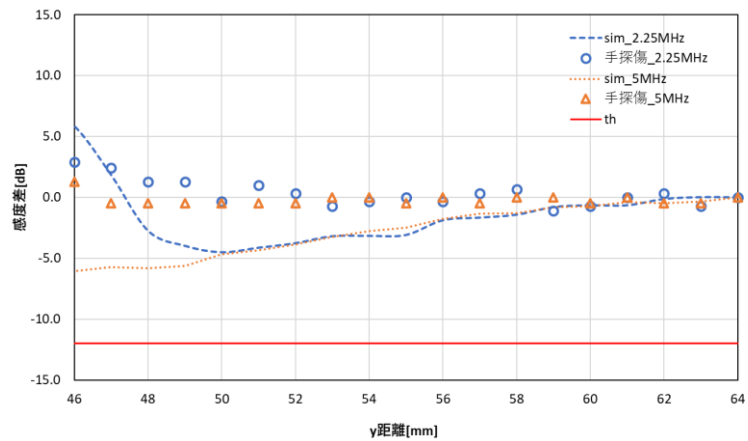


図 59 Y 距離に対するエコー高さ

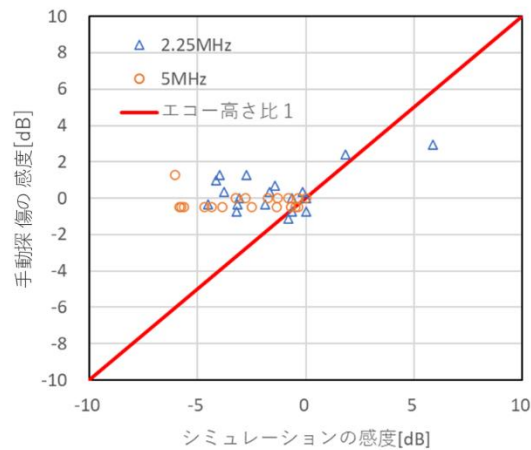


図 60 実探傷とシミュレーションの比較（Y 距離に対する感度）

（イ） 実探傷と実きずを模擬したシミュレーションの感度の比較

アの試験片の縦割れ（T11）について、研削とMTを繰り返すことで深さ方向の広がりについて調査し、シミュレーションで縦割れを模した模擬きずを作成した。なお、模擬きずについては、シミュレーションの仕様から表面形状を深さ方向に延伸した（図 61）。模擬きずと併せて、実きずの長さと同くしたノッチきずを作成し

た。各きずの反射エコー高さについて調査し、実探傷と比較した（表 13、図 62）。

実きずの実探傷（手動探傷、自動探傷）とノッチきずのシミュレーションの結果を比較すると同等の指示長さとなった。本シミュレーションは対象とするきずをノッチきずとした場合、実きずに近い評価となると考えられた。一方、実きずを模した模擬きずのシミュレーションではエコー高さは他より低い傾向にあり、実探傷より安全側の評価となることが確認された。

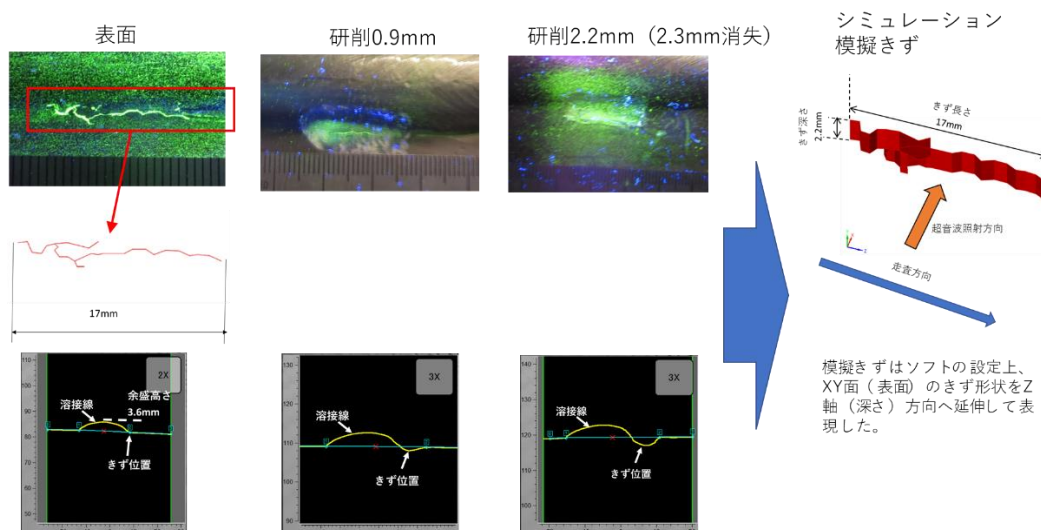


図 61 模擬きずの作成

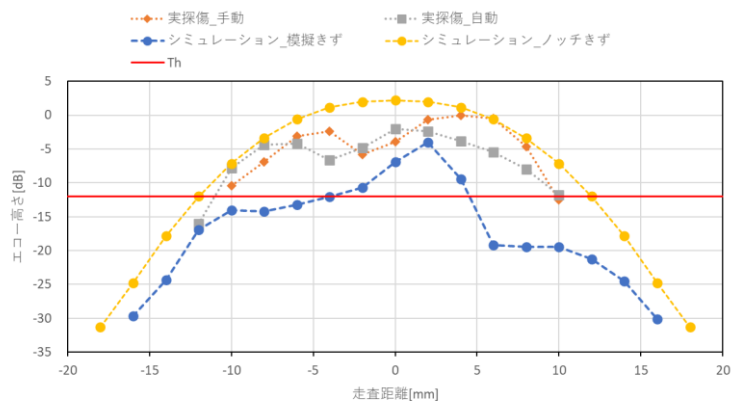


図 62 実探傷とシミュレーションの比較（実きず）

表 13 実探傷とシミュレーションの比較（実きず）

検証方法[-]	指示長さ[mm]	評価の程度
シミュレーション (ノッチキズ 17mm×2.2mm)	24	実探傷と同程度
実探傷 手動	24	—
実探傷 自動	22	手動と同程度
シミュレーション (模擬きず)	8	実探傷より安全側

（ウ） 長さ 4 mm 以下の実きずの模擬

令和 2 年度において、実きずをシミュレーション上でより正確に表現するため、止端割れの表面形状と断面形状を合成した模擬きずを作成した。その模擬きずからの反射エコー高さを調査した結果、検出可能であることが確認されている。本検討では令和 2 年度の模擬きずをトリミングして、長さ 4 mm、深さ 2 mm の模擬きずとした（図 63）。トリミングするにあたり、模擬きずは 3 ケース作成した。深さ方向については、3 ケースとも表面から深さ 2 mm までの断面形状とした。長さ方向については、長手方向の両端部 2 mm を組み合わせ長さ 4 mm としたものを 1 ケース、端部 4 mm をトリミングしたものを 2 ケース（両側）とした。

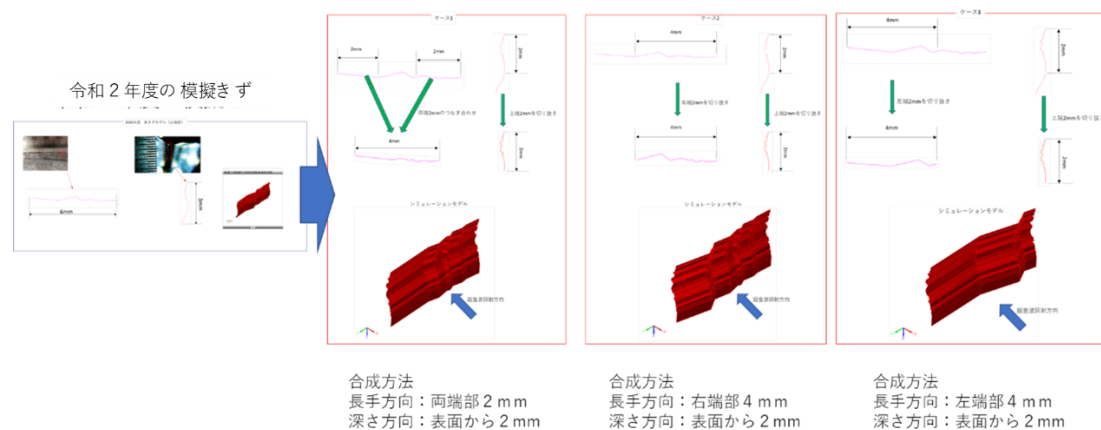


図 63 長さ 4mm、深さ 2mm の実きずを模したきず

（エ） 長さ 4 mm、深さ 2 mm の実きずを模したきずにおける検出性

（ウ）の 3 ケースの模擬きずの反射エコー高さについて、きずの位置、深さ、鉛直方向の傾きをパラメータとして調査した（表 14、図 64）。図 65～図 70 に結果を示した。いずれの条件においても検出可能であることが確認された。校正は前提条件の通り、Y 距離 64mm の長さ 6 mm、深さ 3 mm のノッチきずを基準とした。

表 14 試験条件（長さ 4mm、深さ 2mm の実きずを模したきず、ノッチきずの検出性）

きず	条件	備考
位置 (Y距離)	溶接線中央部(64mm)	—
	溶接線止端部(51.5mm)	—
	熱影響部(45.5mm)	—
中心深さ	1 mm	—
	3 mm	—
	5 mm	—
鉛直方向の傾き	0 deg.	溶接止端部のみ
	10deg.	
	20deg.	
	30deg.	
	40deg.	

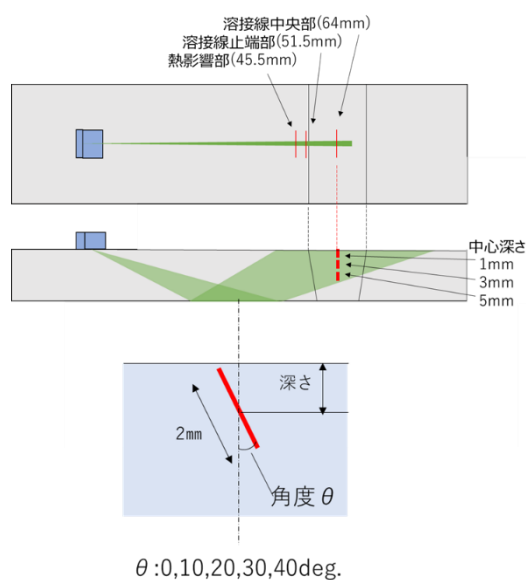


図 64 試験概要図（長さ 4mm、深さ 2mm の実きずを模したきず、ノッチきずの検出性）

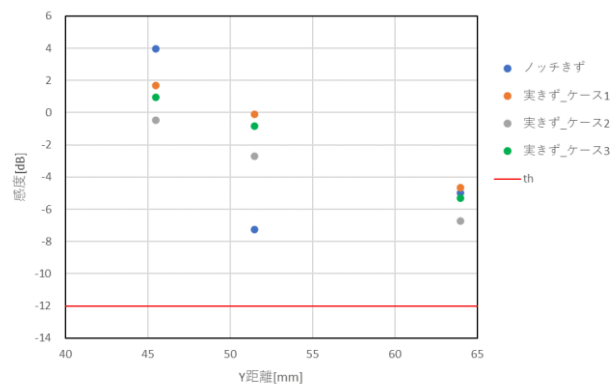


図 65 鉛直方向 開口きず (中心深さ 1 mm)

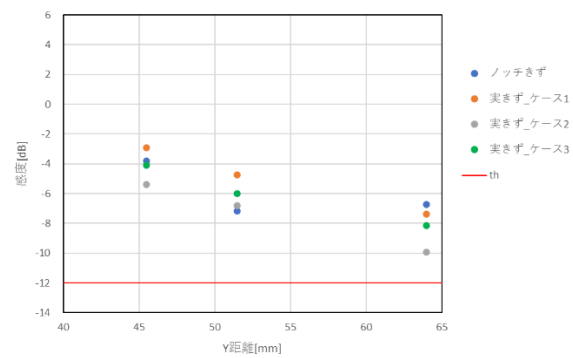


図 66 鉛直方向内部きず (中心深さ 3 mm)

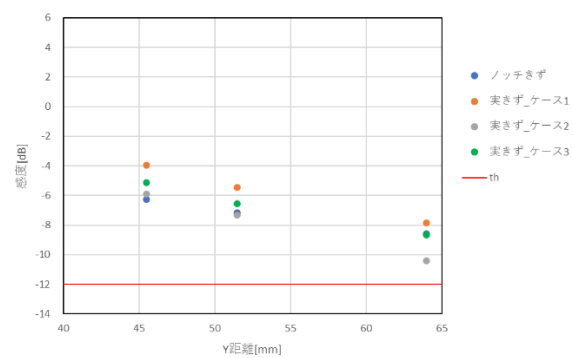


図 67 鉛直方向内部きず (中心深さ 5 mm)

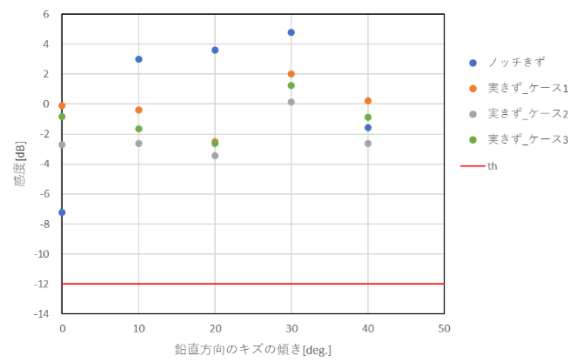


図 68 鉛直方向の傾きを有する表面きず（中心深さ 1 mm）

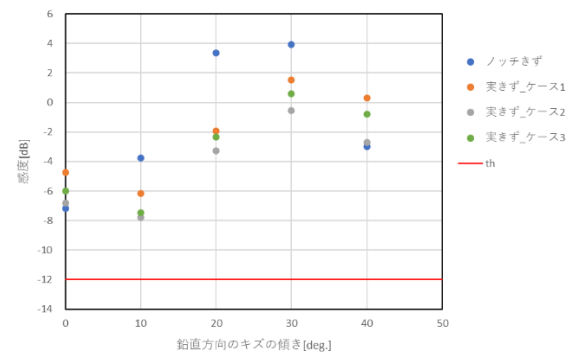


図 69 鉛直方向の傾きを有する内部きず（中心深さ 3 mm）

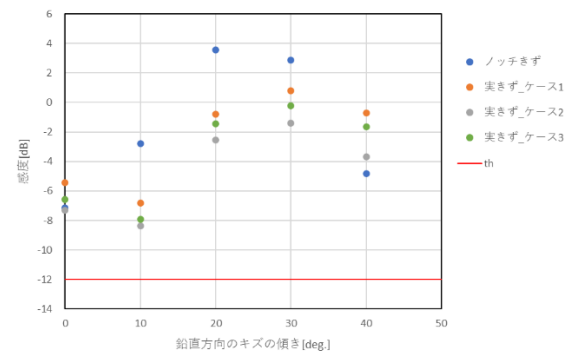


図 70 鉛直方向の傾きを有する内部きず（中心深さ 5 mm）

オ（参考）長さ 6 mm、深さ 3 mm より小さいノッチきずの検出性

A パターンにおいて、Y 距離 64 mm のノッチきず（長さ 6 mm、深さ 3 mm）からの反射エコーを基準感度とし、より小さいノッチきずの検出性についてシミュレーションで検証した（表 15、図 71、図 72）。いずれも Y 距離 64 mm で水平に走査して、検出可能であった。

表 15 ノッチきずの寸法と指示長さ[mm]

ノッチきず寸法 [mm]	周波数 2.25MHz 指示長さ[mm]	周波数 5MHz 指示長さ[mm]
長さ 6×深さ 3	14	10
長さ 4×深さ 2	10	6
長さ 3×深さ 1.5	6	4

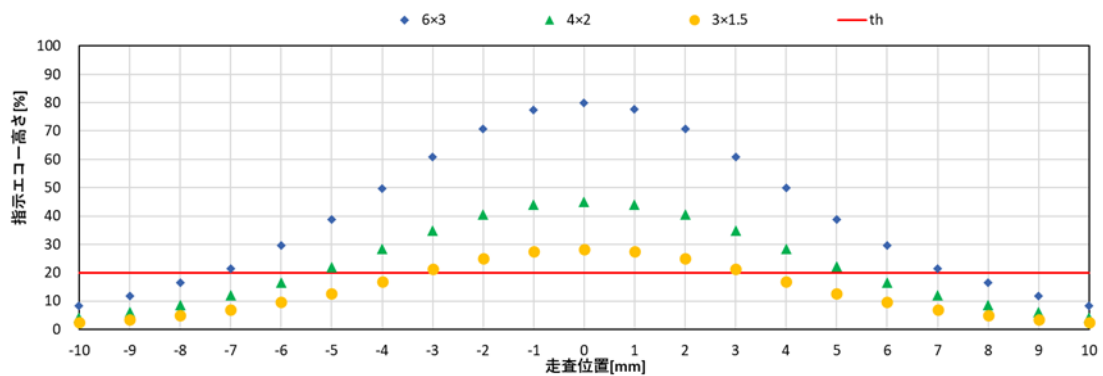


図 71 ノッチきず寸法とエコー高さ（周波数 2.25MHz）

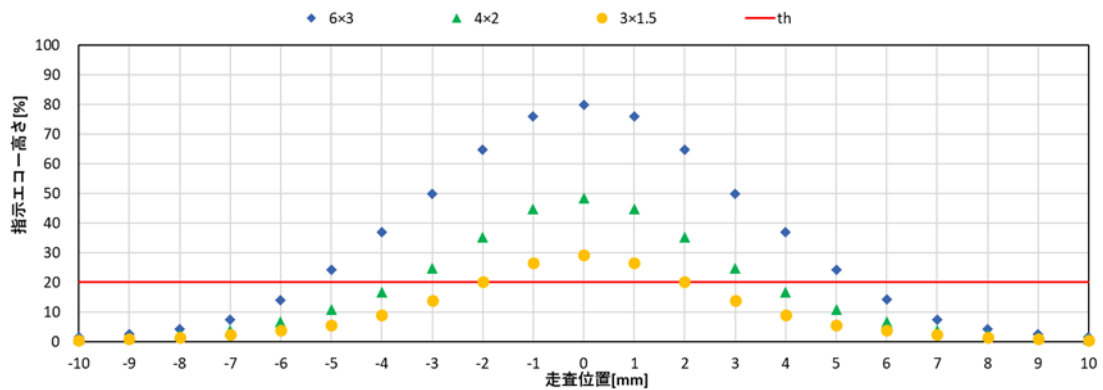


図 72 ノッチきず寸法とエコー高さ（周波数 5MHz）

5.3 外乱要因による探傷性能への影響

（１）実タンク特有の外乱要因

実際のタンクでは裏面腐食や内面減肉、コーティングの凹凸等があり、図 73 の様に受信レベルを下げる外乱要因となり得るが、裏面腐食等を試験片で再現することは困難で

ある。そこで、むつ小川原石油備蓄基地のNo.44 タンク（表 16）の実タンクにて、外乱要因の影響をカップリングチェックにより検証した。

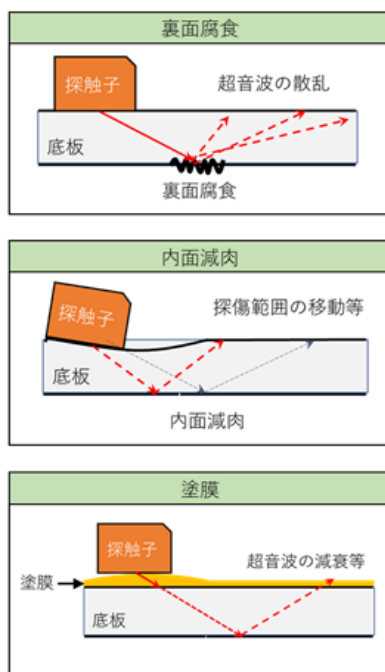


図 73 実タンク特有の外乱要因例

表 16 タンク概要

事業所		むつ小川原石油備蓄基地
タンク	名称	No.44
	内径	81.5m
	高さ	24m
	許可容量	11000kL級
備考		連続板厚測定結果あり

（２）探傷及びカップリングチェックの方法

図 74 の通り、Aパターン、Bパターン共に基本配置による探傷を実施した。同時にカップリングチェック（透過方式）も基本配置の条件で外乱要因によるエコー低下について検証した。

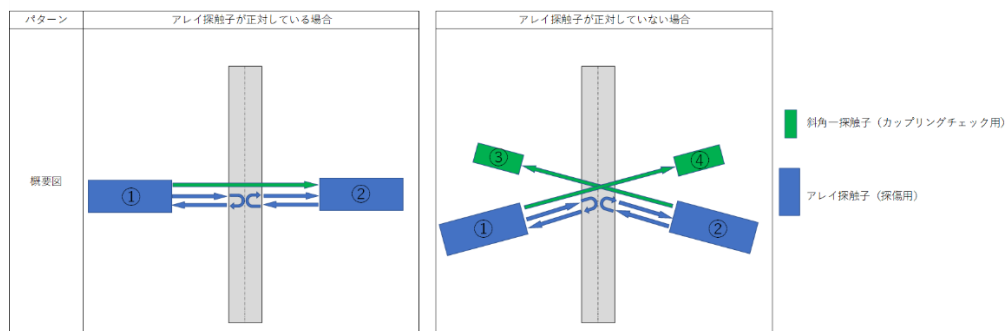


図 74 探傷及びカップリングチェック（透過方式）配置概要図

（３）測定箇所

測定箇所を図 75 に示した。No.44 タンクは休止前に連続板厚測定を実施しており、裏面腐食や内面減肉箇所が事前に把握可能なタンクであったが、板厚の 10%程度を超えて減肉している箇所については別の検査用にコーティングが剥いであったため、事前に把握していた裏面腐食箇所近傍の裏面腐食状況や目視による内面減肉の状況に基づいて選定した。

外乱要因の影響の確認後に表面きずの検出を目的とし、Aパターンで溶接線長 75m に対して探傷した。

実施期間は令和 3 年 11 月 8 日（月）～12 日（金）、15 日（月）～19 日（金）の 計 10 日間（うち 8 日が測定、2 日は準備と撤収）であった。

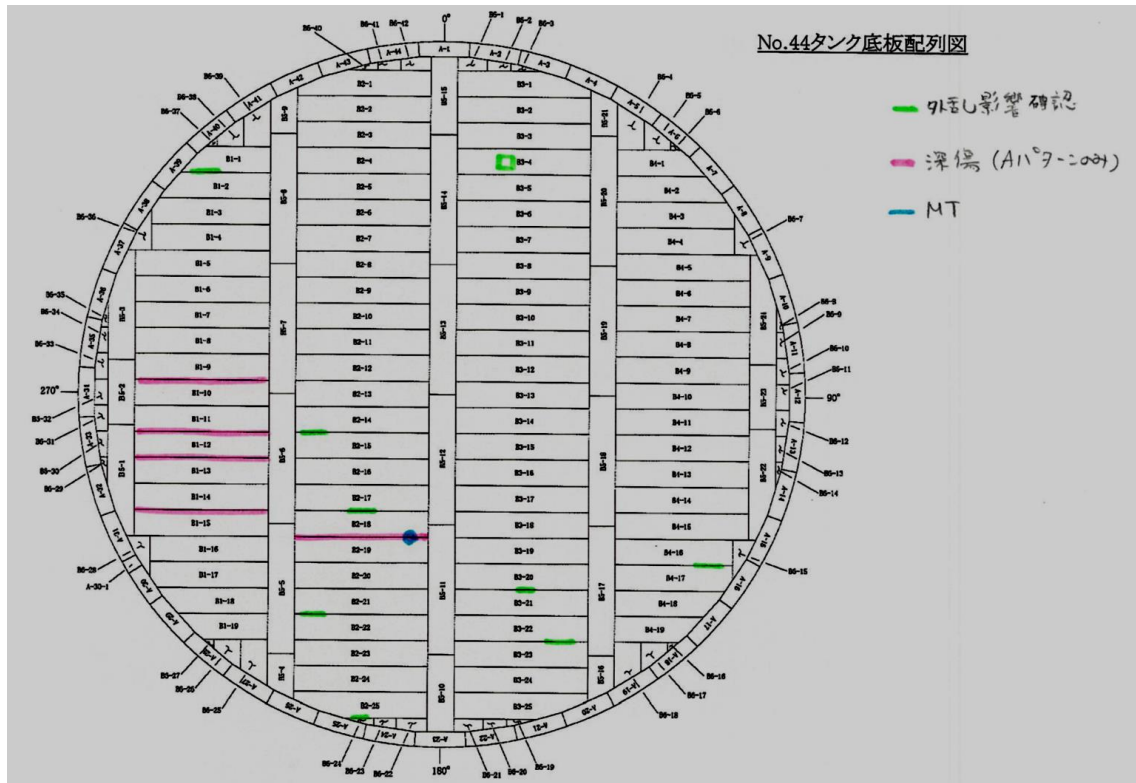


図 75 現地調査測定位置図



図 76 自動探傷の様子



図 77 手動探傷の様子

(4) 結果（カップリングチェック）

減肉が認められた箇所やコーティングの凹凸等がある箇所ではエコーの低下が確認された。その他に、外観上問題がなく減肉が認められない箇所においてもエコーの低下が確認された。よって、探傷時にはカップリングチェックを同時に実施する必要があることがわかった。

ア 裏面腐食

図 78 の通り、エコーの低下が確認された。

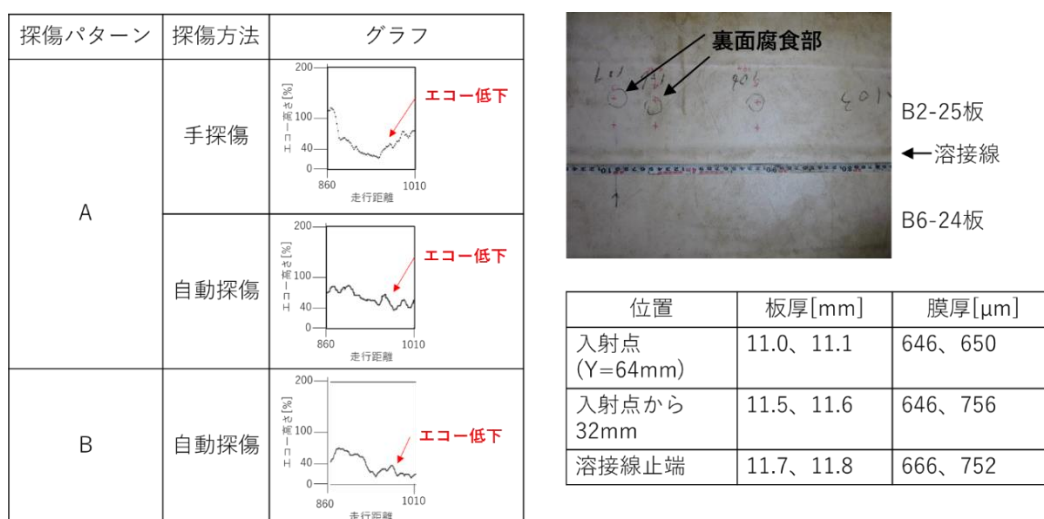
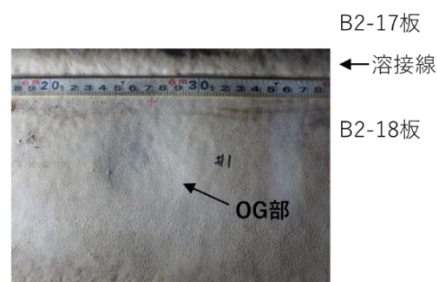
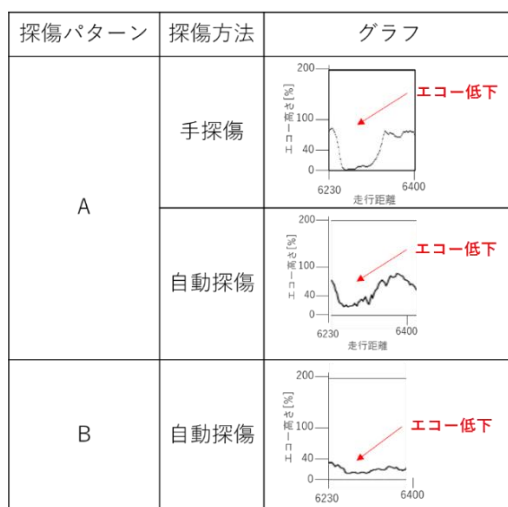


図 78 裏面腐食の影響（エコー高さ、外観、板厚（裏面腐食）、塗膜厚さ）

イ 内面減肉

図 79 の通り、エコーの低下が確認された。



OG部：板厚11.5mm、膜厚575 μ m
 健全部：板厚11.9mm、膜厚500 μ m
 減肉状況：

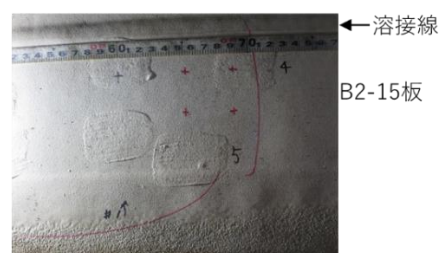
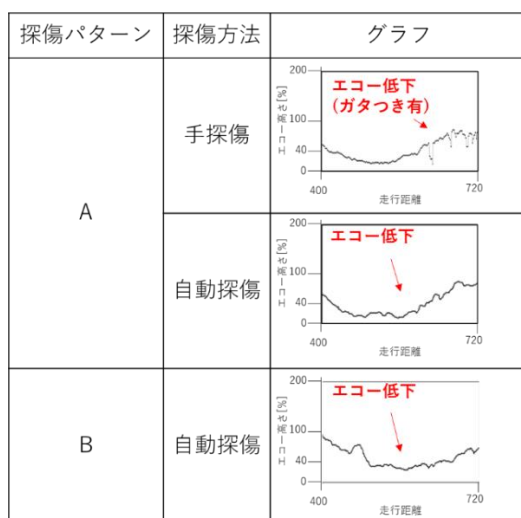


図 79 内面減肉の影響（エコー高さ、外観、板厚（内面減肉）、塗膜厚さ）

ウ コーティング

（ア）塗膜厚さ（コーティング補修部）

図 80 の通り、塗膜厚さが厚いほどエコーの低下が確認された。また、コーティング補修部の段差により、エコー高さでがたつきが確認された。



位置	板厚[mm]	膜厚[μ m]
入射点 (Y=64mm)	11.9~12.1	1047~1307
入射点から 32mm	11.6~12.0	896~1243
溶接線止端	11.8~12.3	900~1347

図 80 コーティング補修部の影響（エコー高さ、外観、板厚、塗膜厚さ）

（イ）凹凸

外観からはコーティング表面とウェッジの接触性が悪化し、エコーの低下が予想されたが、図 81 の通り、エコーの増減が確認された。

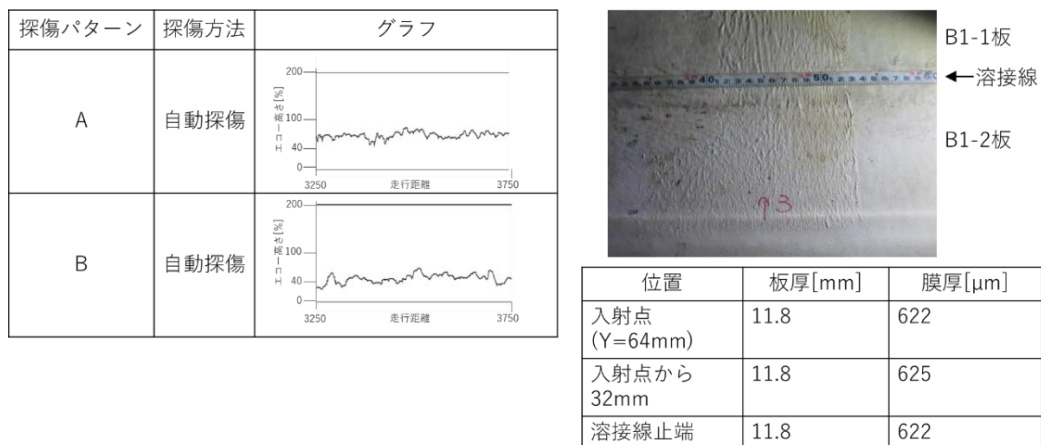
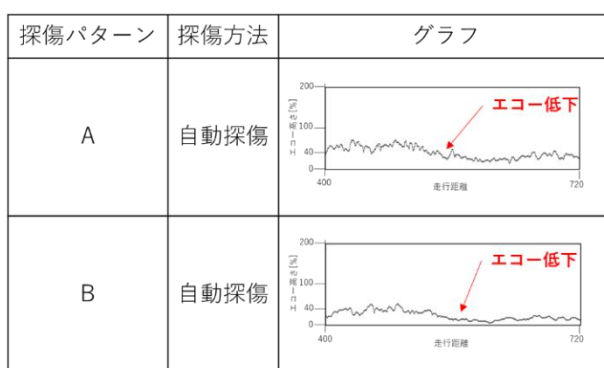


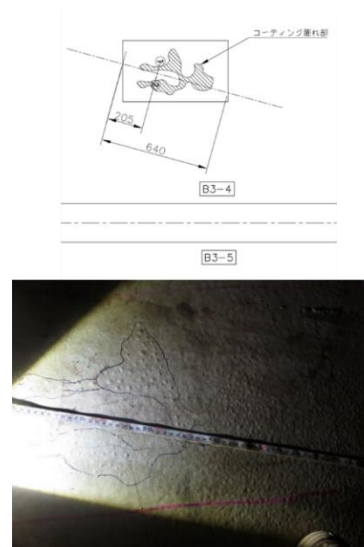
図 81 コーティング凹凸部の影響（エコー高さ、外観、板厚、塗膜厚さ）

（ウ）膨れ

図 82 の通り、全体的にエコーが低く、明瞭な膨れ箇所ではエコーの低下が確認された。



全体的にエコーが低く、膨れ箇所ではエコーが更に低下した



膨れ部：板厚 測定不可、膜厚850μm

図 82 コーティングの膨れの影響（エコー高さ、外観、板厚、塗膜厚さ）

（エ） その他

外観、裏面腐食、内面減肉の状況からは健全部と考えられる箇所においても、エコーの低下が確認された（図 83）。

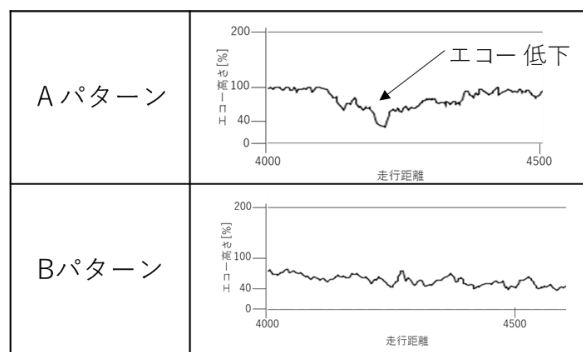


図 83 外乱要因の影響（その他）

（５）（参考）結果（表面きずの検出）

Aパターンで溶接線長 75mに対して自動探傷を実施した。その結果、4箇所で指示を確認した。当該箇所に対して手動探傷を実施した結果、いずれの箇所も表面から深さ 6 mm 程度の内部からのエコーであることが確認された。4か所のうち1箇所について、コーティングを研削し、MTを実施したが指示は確認されなかった（図 84～図 87）。

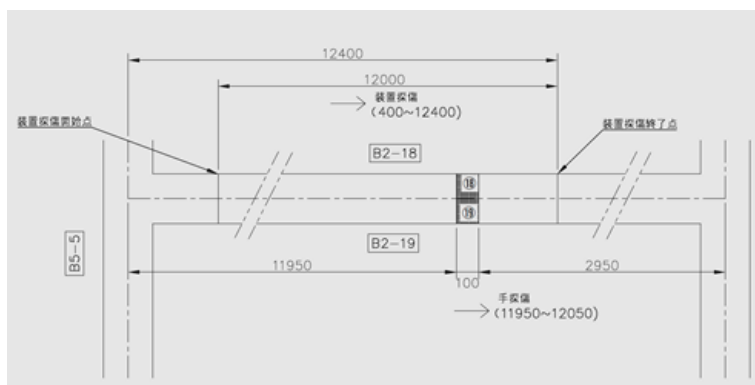


図 84 指示位置図（MT実施箇所）

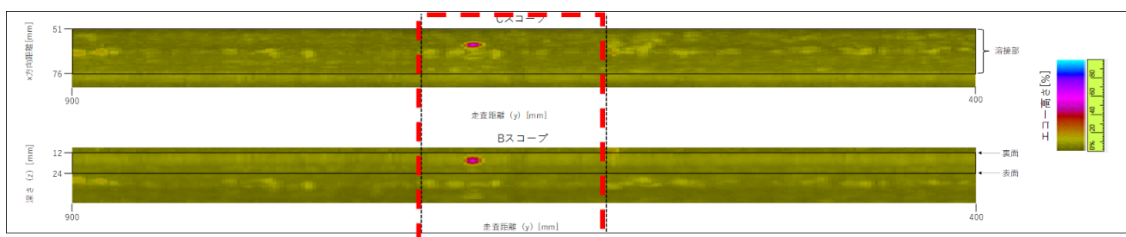


図 85 自動探傷コンター図（C スコープ、B スコープ）

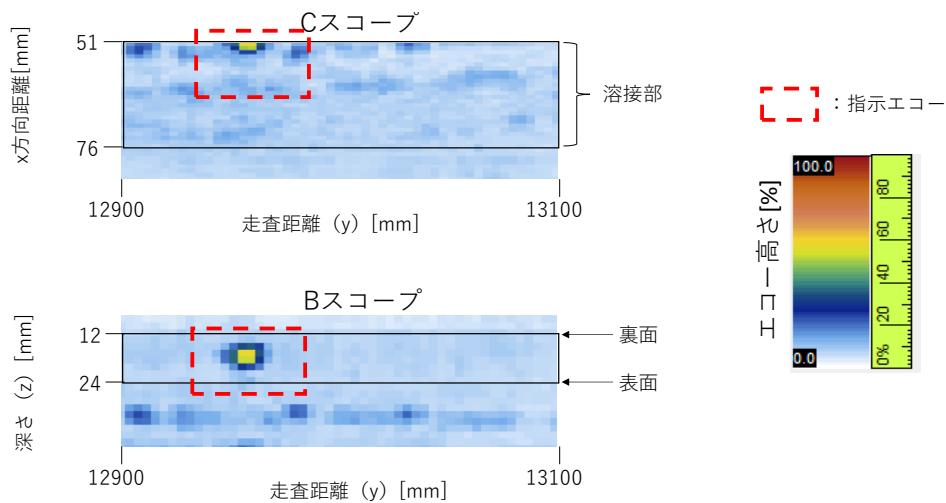


図 86 手動探傷コンター図 (C スコープ、B スコープ)

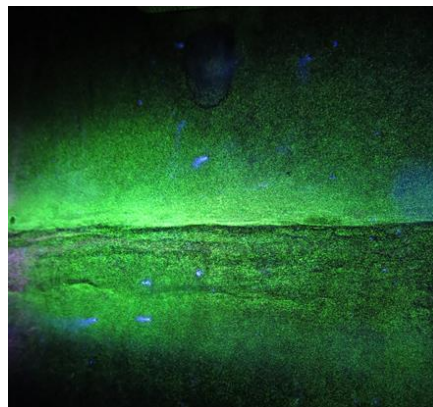


図 87 MT実施時の表面 (指示なし)

5.4 SN比

超音波探傷法では、超音波の減衰に応じて受信感度を増幅してきずを検出し易くするが、同時にノイズが大きくなり実運用に影響する場合がある。そこで、コーティングの塗膜厚さに対して必要な感度補正量について検証した。検証したコーティング材は実タンクで実績の多いガラスフレークコーティングとエポキシ樹脂コーティングである。なお、ノイズの主な要因はウェッジ内エコーによるため、送受信探触子を用いるAパターンにおいて問題となり易い。よって、SN比はAパターンについて検証する。

(1) コーティングの種類による比較

長さ6mm、深さ3mmの垂直なノッチきずを有した各種塗膜厚さの異なるコーティングを塗布した試験片を製作し、校正時に必要な感度を調査した。塗膜厚さについては、平成

6年消防危第74号 個別延長コーティングに関する指針（添付資料7）に基づいて、最低塗膜厚さを設定し、他の塗膜厚さは比較検証や実タンクでの最大塗膜厚さ等を考慮し設定した。

ア エポキシ樹脂コーティング

コーティング無し、Y距離 64mm における感度を基準（0 dB）とし、塗膜厚さ毎に同等のエコー高さとなる感度補正量を計測した（表 17）。ガラスフレークコーティングと比較のため、Y距離 51.5mm と 59.8mm について計測した。

表 17 コーティングによる感度補正量[dB]
（Aパターン エポキシ樹脂コーティング 周波数 5MHz）

塗膜厚さ [mm]	入射点からキズまでの距離[mm]				
	45.5	51.5	59.8	64	76.5
0		-1.5	-1		
0.25		-4.5	-4		
0.4		-7.5	-7.5		
0.7		-11.5	-10		
1		-15.5	-14		

イ ガラスフレークコーティング

エポキシ樹脂コーティング同様に、コーティング無し、Y距離 64mm における感度を基準（0 dB）とし、塗膜厚さ毎に同等のエコー高さとなる感度補正量を計測した（表 18、表 19）。

表 18 コーティングによる感度補正量[dB]
（Aパターン ガラスフレークコーティング 周波数 5MHz）

塗膜厚さ [mm]	入射点からキズまでの距離[mm]				
	45.5	51.5	59.8	64	76.5
0	0	-1.5	-1	0	-3
0.4	-4.5	-9.5	-8.5	-8	-8.5
1	-12.5	-18	-15.5	-15	-16
1.5	-10.5	-18	-19	-19.5	-21
2	-17	-25	-27.5	-27.5	-26

表 19 コーティングによる感度補正量[dB]
(Aパターン ガラスフレークコーティング 2.25MHz)

塗膜厚さ [mm]	入射点からキズまでの距離[mm]				
	45.5	51.5	59.8	64	76.5
0	3.5	-1.5	-2	0	-1.5
0.4	-4.5	-8.5	-9	-9	-10.5
1	-2	-7.5	-10.5	-11	-10.5
1.5	-3.5	-9.5	-12	-11.5	-12
2	-5	-10.5	-15	-15	-15

ウ エポキシ樹脂コーティングとガラスフレークコーティングの比較

図 88、図 89 に周波数 5 MHz における比較結果を示した。ガラスフレークコーティングの方が感度補正量は大きいため、S/N比の検証では安全側の評価となるガラスフレークコーティングを用いることとした。

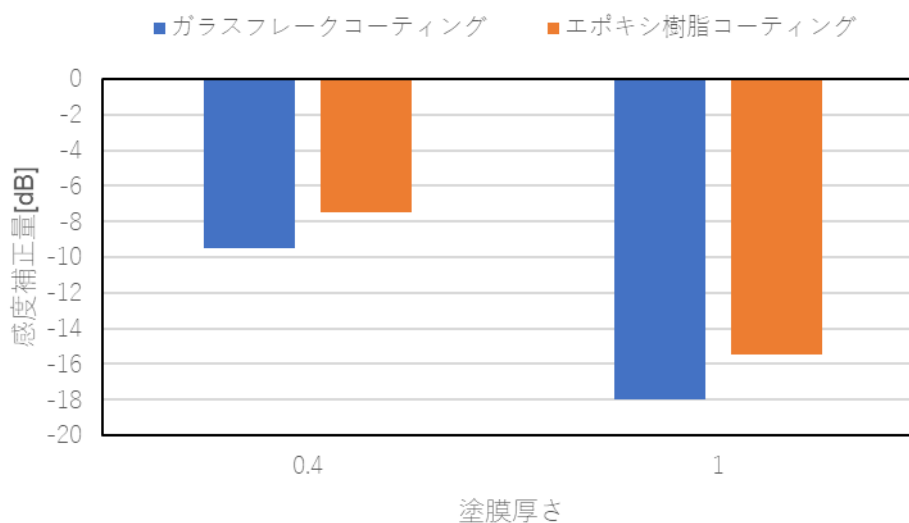


図 88 コーティングによる感度補正量の比較[dB]
(Aパターン Y距離 51.5mm 周波数 5 MHz)

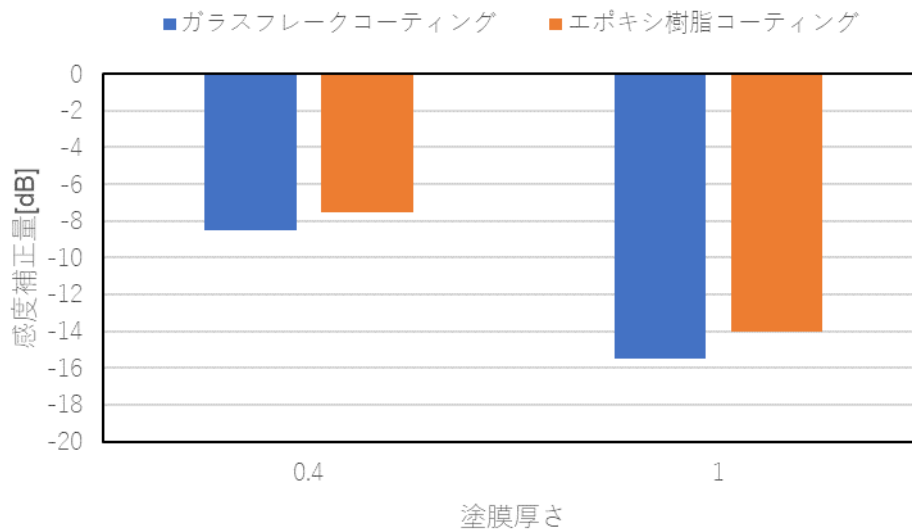


図 89 コーティングによる感度補正量の比較[dB]
(Aパターン Y距離 59.8mm 周波数 5 MHz)

(2) 実タンクのガラスフレークコーティングの塗膜厚さ

実タンクの溶接線近傍のコーティングに関する情報を集めるため、現地調査予定のタンクで施工している会社に取り組み調査を実施した。その結果を下記に示す。

- ・開放期間中の溶接線近傍のコーティングについては、MT検査のために剥離されるため、詳細なデータを持ち合わせていない。
- ・溶接線近傍のコーティングは、スプレーガンを用いて、腕の長さ+α分の2mピッチで若干ラップしながら施工されることが多い。
- ・施工時の塗膜厚さ測定は、コーティング指針（添付資料7）に示される最低塗膜厚さを下回っていないことを確認することを目的としているため、塗膜厚さが厚い箇所は除外している傾向がある。

開放時の実タンクの溶接線近傍の塗膜厚さを調査する必要性が確認されたため、表 20 の通り、2基のタンクについて塗膜厚さを調査した。塗膜の薄い部分から厚い部分まで調査するため、塗膜厚さの1箇所当たりの測定は、2m分を5cmピッチ（40点）とし、タンク1基あたり30箇所について測定した（表 21、図 90、図 91）。

表 20 タンク概要（コーティング調査）

事業所		むつ小川原石油備蓄基地	志布志石油備蓄基地
タンク	名称	No.44	No.20原油タンク
	内径	81.5m	83.3m
	高さ	24m	22m
	許可容量	11000kL級	11000kL級
備考		連続板厚測定結果あり	—

表 21 塗膜厚さ測定条件

事業所	むつ小川原石油備蓄基地	志布志石油備蓄基地
1 基あたりの測定箇所数	30箇所	30箇所
1 箇所当たりの測定範囲	2 m（5cmピッチ）：40点	2 m（5cmピッチ）：40点
30箇所の内訳	タンクを90° で4 分割し、90° 毎に6箇所。残りは目視の状況からランダムに選択。	タンクを90° で4 分割し、90° 毎に7～8 箇所。

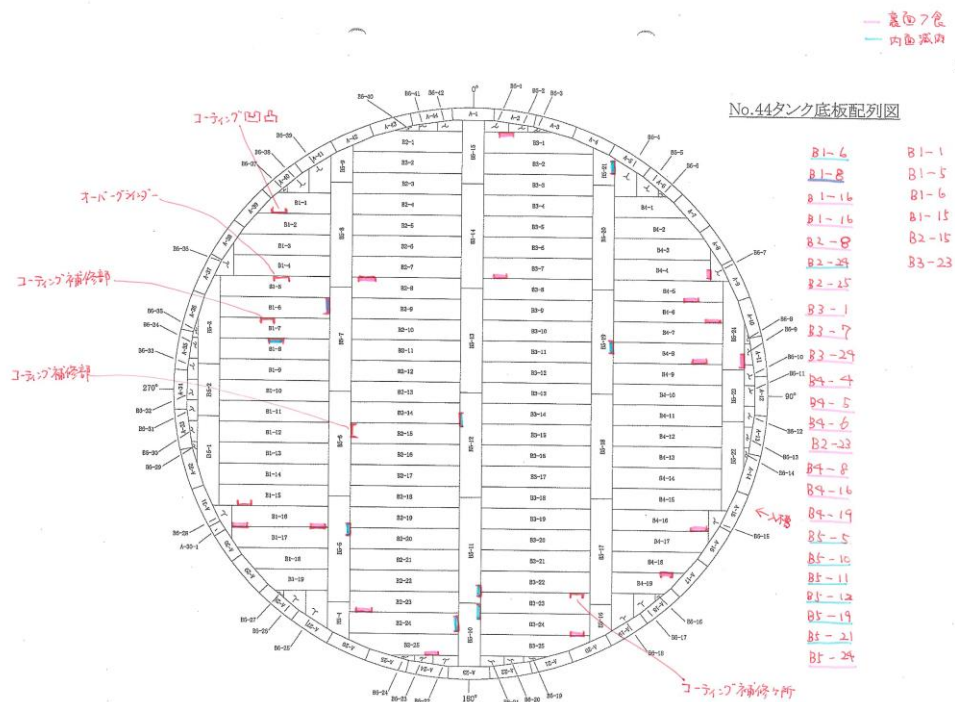


図 90 コーティング調査位置図（むつ）

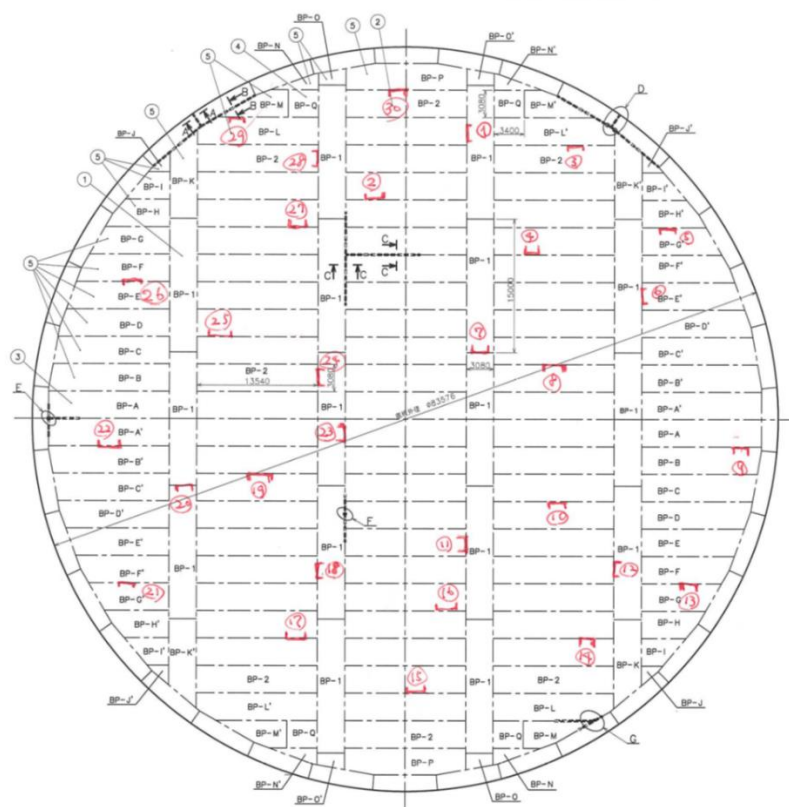


図 91 コーティング調査位置図（志布志）

ア むつ小川原石油備蓄基地 No. 44 タンクの塗膜調査結果

連続板厚測定結果に基づいて、表面健全部と内面減肉部の対象箇所を選定した。また、目視によりコーティング補修部の対象箇所を選定した。塗膜厚さの調査結果を表 22、図 92～図 95 に示した。全体としては、最大塗膜厚さは 1500 μ m 程度であり、最小塗膜厚さは 400 μ m 程度であることが確認された。各部の塗膜厚さには有意な差はないことが確認された。ただし、最大塗膜厚さが確認された箇所は図 96 のようなコーティング補修部であった。塗膜が厚いほど感度補正量を大きくする必要があるため、コーティング補修箇所は探傷前に測定することが望ましいと考えられる。

表 22 塗膜厚さ調査結果（むつ小川原石油備蓄基地 No. 44 タンク）

部位	全最大値	全最小値	全中央値	全平均値
全体	1540	386	679	701.0
健全部（裏面腐食部）	1510	469	684.5	698.0
内面減肉部	1460	386	687.5	720.3
コーティング補修部	1540	441	645	679.4

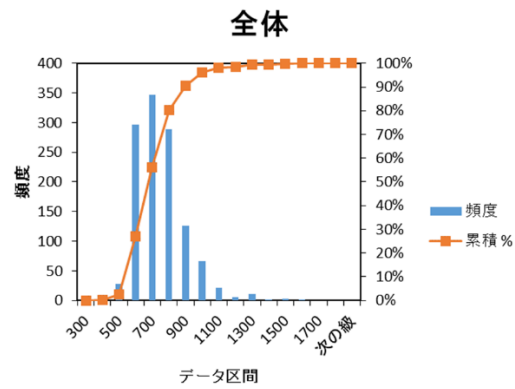


図 92 全データの塗膜厚さ分布 (No.44 タンク)

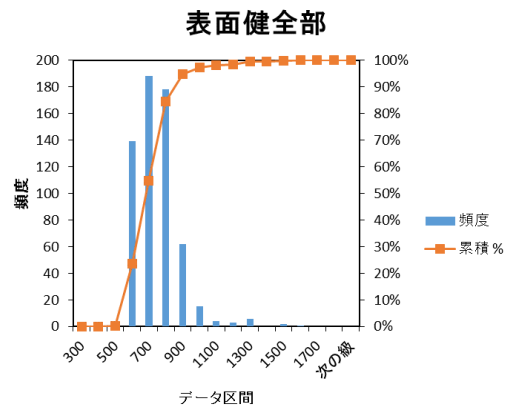


図 93 表面健全部の塗膜厚さ分布 (No.44 タンク)

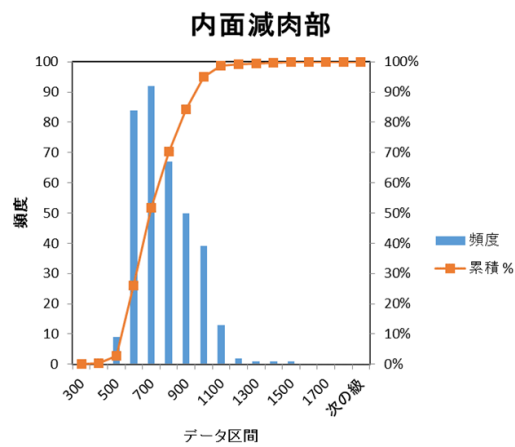


図 94 内面減肉部の塗膜厚さ分布 (No.44 タンク)

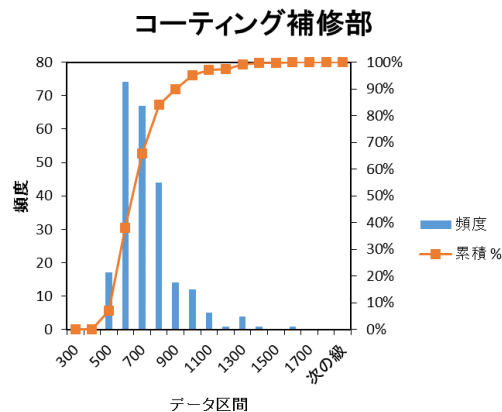


図 95 コーティング補修部の塗膜厚さ分布 (No.44 タンク)

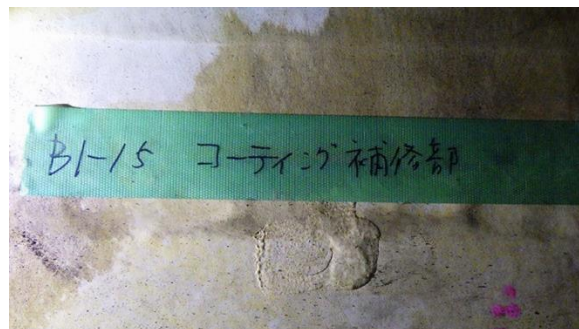


図 96 コーティング補修部外観 (タッチアップ補修)

イ 志布志石油備蓄 No. 20 原油タンクの塗膜調査結果

No.20 原油タンクは開放点検中のタンクであり連続板厚測定データがなかったため、測定箇所は無作為で 30 箇所を選択して塗膜厚さを調査した。塗膜厚さの調査結果を表 23、図 97 に示した。塗膜厚さは 500 μm から 1900 μm 程度まで分布していることが確認された。一部では図 98 のような内面減肉箇所等も確認されたが、塗膜厚さ調査の結果は、最大で 1270 μm 、最小 571 μm 、平均 726 μm であり、他の測定箇所と比較しても大きな差はなく、むつ小川原油備蓄基地の No. 44 タンクの結果と同様であった。よって、最大塗膜厚さを有しているようなコーティング補修部について塗膜厚さを事前に測定することが P A 探傷において重要と考えられる。

表 23 塗膜厚さ調査結果 (No. 20 原油タンク)

最大値 [μm]	最小値 [μm]	平均値 [μm]	中央値 [μm]
1870	508	829	805

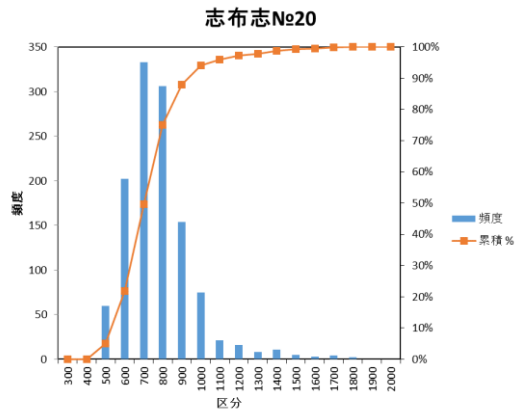


図 97 全データの塗膜厚さ分布 (No.20 原油タンク)

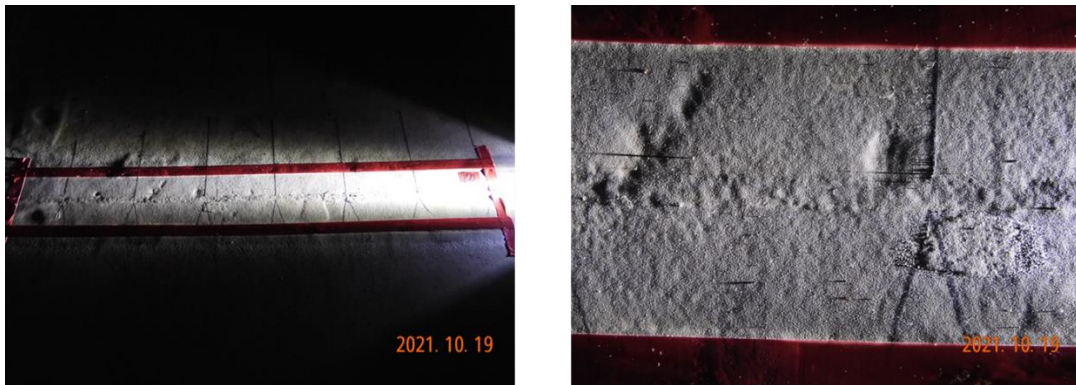


図 98 内面減肉箇所測定部 全景と接写

(3) ウェッジ内エコーの改善

ノイズの主要因であるウェッジ内エコーが発生するAパターンにおけるS/N比を(1)の結果において検証した。感度補正量が最も大きい塗膜厚さ2mmのガラスフレークコーティングにおけるS/N比は4.1であり、探傷可能であることが確認されたが、余裕代が小さいため、令和3年度にウェッジを改良した(図99)。その結果、S/N比は6.1となり改善された。

ウェッジ交換による感度への影響について、シミュレーションを用いて、表面開口したノッチきずのY距離と水平方向の傾きをパラメータとして検証した。その結果、令和2年度、令和3年度に製作したウェッジによる感度差はないと考えられた(図100、図101)。



図 99 製作したウェッジ

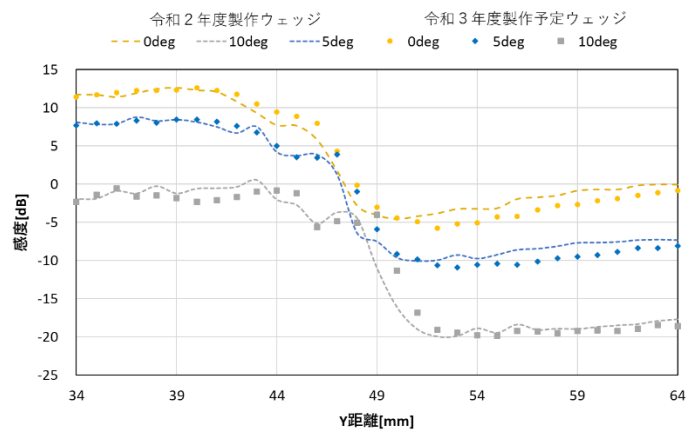


図 100 ウェッジによるエコー高さ[dB]

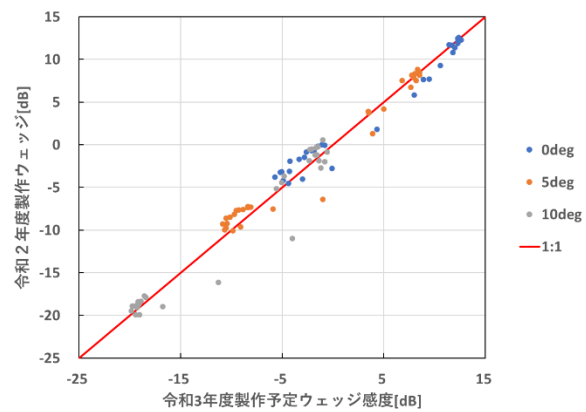


図 101 ウェッジによるエコー高さ比較[dB]

(4) SN比（ガラスフレークコーティング）

令和3年度に製作したウェッジを用いて、ガラスフレークコーティングの塗膜厚さに対する感度補正量を再計測した。なお、手動探傷と自動探傷において比較した。詳細は5.5(3) 自動探傷における塗膜の影響に示す。

5.5 探傷機としての製作と性能確認

(1) 改良型自動探傷装置

探傷性能の試験結果と平成30年度までに示された自動探傷装置の改善案を考慮し、既存の試作機を一部改造し、より実用機に近い改良型自動探傷装置を製作した。図102～図106に主な変更点、全体図、製作された探傷装置、プローブホルダを示した。詳細については、添付資料8に示す。

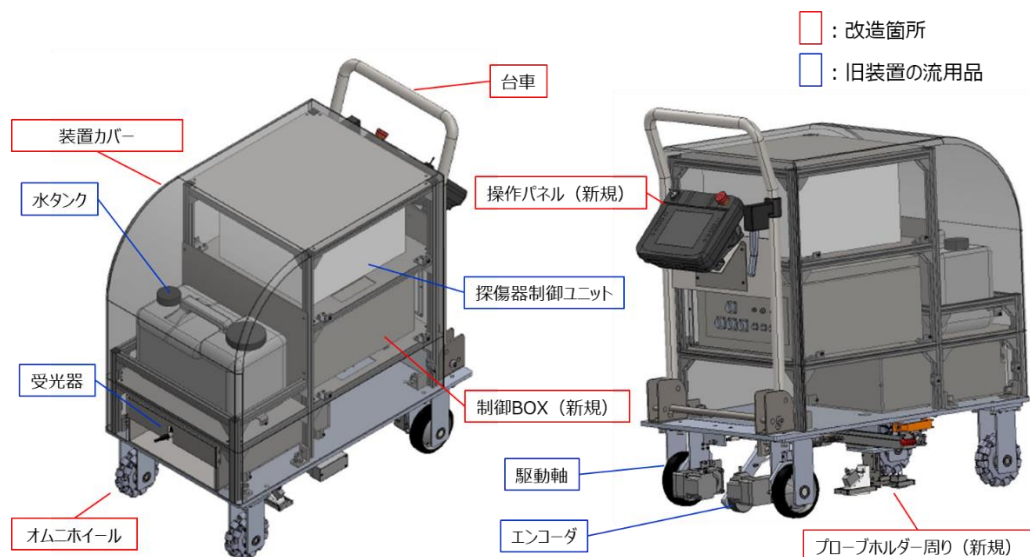


図 102 自探傷装置の主な変更点①

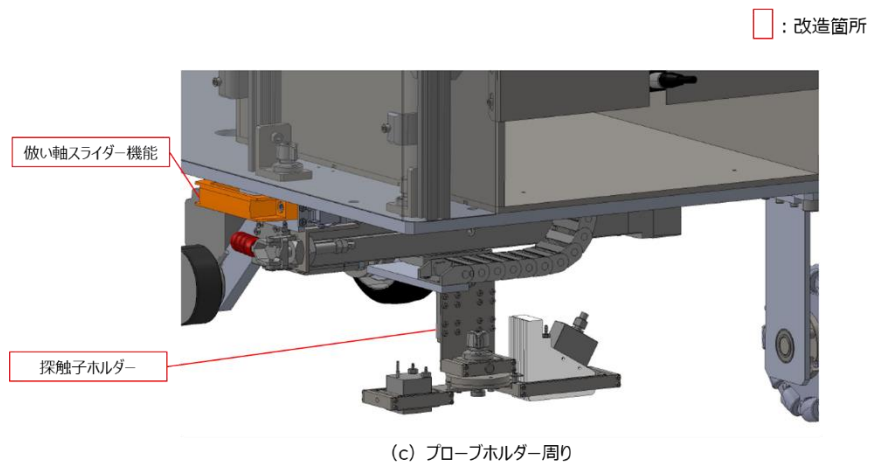


図 103 自探傷装置の主な変更点②

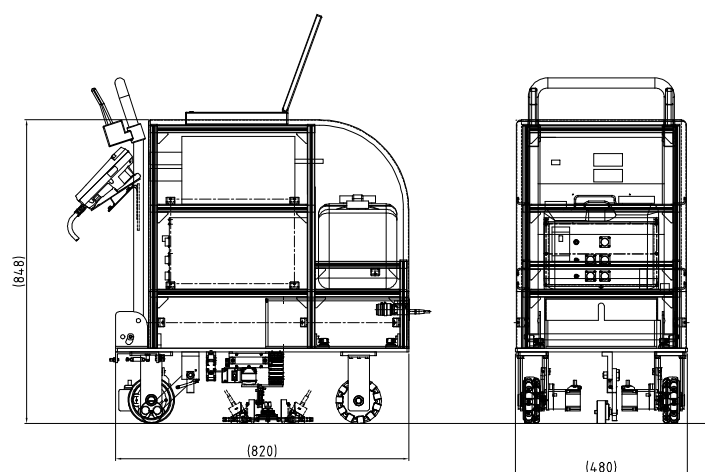


図 104 自探傷装置全体図

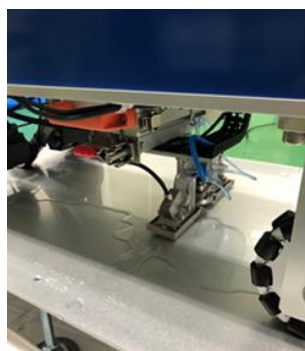


(a) カバー無し



(b) カバー有り

図 105 自探傷装置外観



(a) スライド前



(b) スライド後

図 106 倣い軸スライダ外観

(2) カップリングチェックに関する確認

実タンクでは裏面腐食等により超音波が適切に送受信されていない可能性がある(図 73)。そこで、超音波の送受信について確認するため、図 74 の様に、送信側の探触子は従前のアレイ探触子とし、受信側を一斜角探触子とする透過方式のカップリングチェックを採用した。

ア ch 数による影響

カップリングチェック機能を付与するため、探触子の 32ch のうち 2ch をカップリングチェック用とした。これまでの検証においては、32ch において実施してきたため、30ch における探傷性能を確認した。表 24 に試験条件、図 107、図 108 に結果を示した。30ch と 32ch における感度には影響がないことが確認された。

表 24 試験条件 (ch 数による影響)

項目		条件	備考
探傷パターン		A パターン	—
周波数		2.25MHz	—
ch数		30、32ch	—
きず	形状および寸法	ノッチきず (6mm×3mm)	—
	位置	Y距離34-64mm	—
	深さ	表面	中心深さ1.5mm
	鉛直方向の傾き	0deg.	—
	水平方向の傾き	0、5、10deg.	—

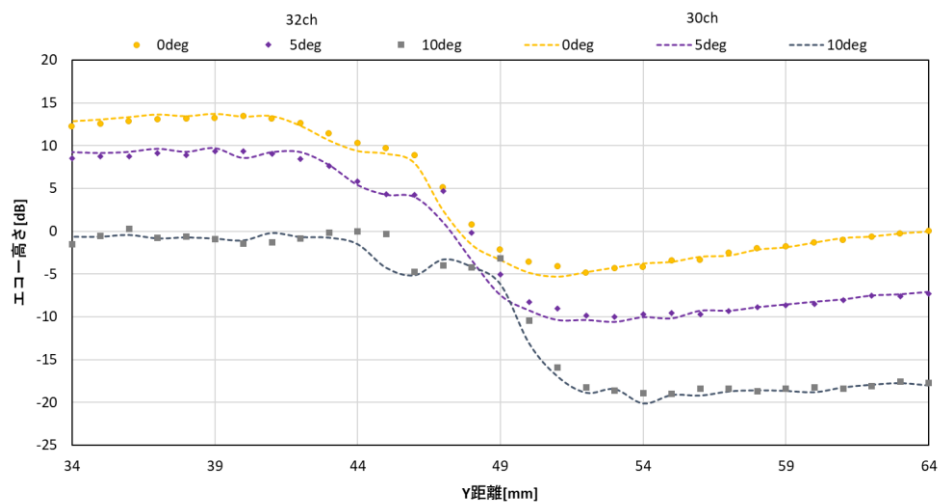


図 107 30ch と 32ch におけるエコー高さ[dB]

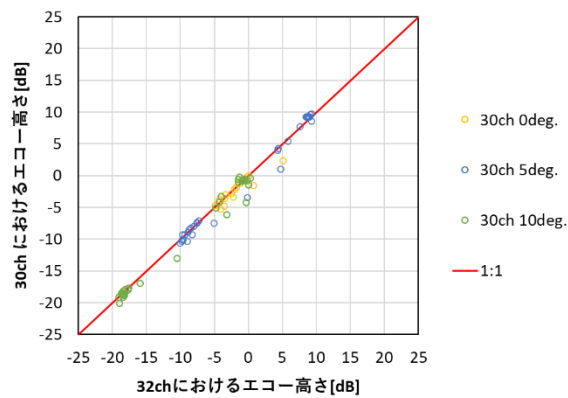


図 108 30ch と 32ch のエコー高さ[dB]比較

イ 塗膜厚さによる影響

塗膜厚さの異なるガラスフレークコーティングにおける必要な感度補正量について、各探傷パターン（図 109）、各探傷方法（手動、自動探傷）に分けて検証した（表 25）。自動探傷の走行速度は過去と同様に 20mm/s とした。比較のために塗膜なしの条件を基準（0 dB）とした。

手動探傷及び自動探傷時におけるカップリングチェックの感度差はAパターン、Bパターン共に-4 dB であり、同程度であることを確認した。よって、手動探傷、自動探傷時は各々で校正を行う必要がある。

次に、塗膜厚さに対する手動探傷及び自動探傷における感度差を確認した結果（表 26）、Aパターンは、±1 dB 程度であった（図 110）。Bパターンは、手動探傷より自動探傷の感度が若干高い傾向が確認された（図 111）。よって、A、Bパターン共に手動探傷と自動探傷に対する塗膜厚さの影響はないと考えられる。

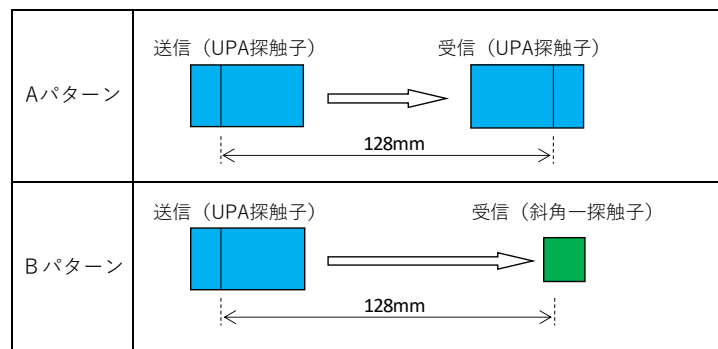


図 109 試験概要図（カップリングチェック）

表 25 試験条件（カップリングチェック）

探傷パターン	A、Bパターン
探傷方法	手動探傷、自動探傷
Y距離	64mm（送受信間距離128mm）
周波数	2.25MHz
感度	手探傷および装置探傷では、塗膜0mmにおける各パターンの透過エコー高さが80%となる感度を0dBとする
塗膜厚さ（GF）	0mm、0.4mm、1mm、1.5mm、2mm

表 26 試験結果（カップリングチェック）

探傷パターン		A					B				
塗膜厚さ[mm]		0	0.4	1	1.5	2	0	0.4	1	1.5	2
感度[dB]	手動探傷	0	-11.5	-12.0	-12.5	-13.0	0	-11.0	-11.5	-12.0	-13.0
	自動探傷	0	-11.0	-11.5	-13.0	-14.0	0	-9.5	-10.0	-11.0	-12.0
	差	0	-0.5	-0.5	0.5	1.0	0	-1.5	-1.5	-1.0	-1.0

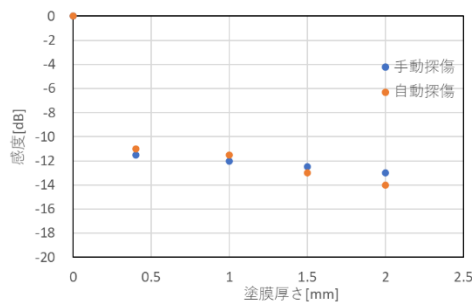


図 110 手動と自動探傷における塗膜厚さによる感度[dB]（Aパターン）

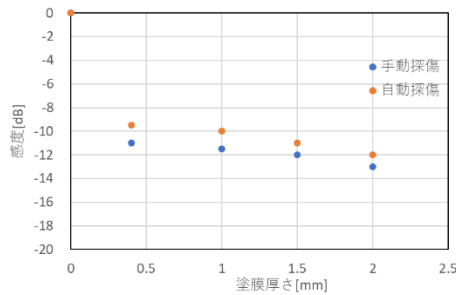


図 111 手動と自動探傷における塗膜厚さによる感度[dB]（Bパターン）

ウ 実タンクと同様の継手におけるカップリングチェックの校正に関して

実タンクでは裏当金を有する突合せ溶接継手であり、超音波が裏当金に入射する分感度が低下する。令和3年度に製作した実きずを有する試験片を用いて、カップリングチェック（Aパターン、Bパターン 周波数 2.25MHz）における溶接部での感度低下について検証した。Aパターン、Bパターン共に、裏当金がない母材での感度に対して、溶接部での感度は6 dB低下した。

今回での検証では効率的な探触子配置として溶接線中央部から探触子の入射点が64mm、入射点間距離としては128mmとなる様に探触子を配置したため、超音波が裏当金に入射して感度が低下したと考えられる。超音波が母材で底面反射する様に探触子を配置することが望ましいと考えられる。

(3) 自動探傷における塗膜の影響

過去に実施されている実タンクでの検証は、走行速度は 20mm/s で実施されており、今回においても同様の走行速度とし、自動探傷時におけるガラスフレークコーティングの影響を確認した。

ア 塗膜厚さによる影響

令和 3 年度に作成したウェッジを使用して、ガラスフレークコーティングの塗膜厚さによる影響について、手動と自動探傷で比較した。探触子の配置条件は、校正時の感度設定を考慮し、A パターン、B パターンの基本的配置とした。ノッチきず(長さ 6 mm、深さ 3 mm) は Y 距離 64mm の開口きずとし、水平方向の傾きは A パターンでは 0 deg.、B パターンでは 90deg. とした。

(ア) 手動探傷と自動探傷の感度の比較

塗膜厚さに対する手動探傷及び自動探傷における感度差を確認するため、コーティング無しを基準(0 dB)として評価した(表 27)。なお、手動探傷と自動探傷ではコーティング無しの探傷感度は 4 dB の差があり、手動探傷、自動探傷時は各々で校正を行う必要がある。

塗膜厚さに対する手動探傷及び自動探傷における感度差を確認した結果、カップリングチェックの結果と同様に有意な差はなく、A、B パターン共に手動探傷と自動探傷に対する塗膜厚さの影響はないと考えられる(図 112、図 113)。

表 27 手動と自動探傷における感度[dB]

探傷パターン		A					B				
塗膜厚さ[mm]		0	0.4	1	1.5	2	0	0.4	1	1.5	2
感度[dB]	手探傷	0	-6.5	-7.0	-9.0	-10.0	0	-9.0	-11.0	-12.0	-13.0
	自動探傷	0	-6.5	-7.0	-9.0	-10.0	0	-10.5	-11.0	-12.0	-13.0
	感度差	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1.5	0.0	0.0	0.0

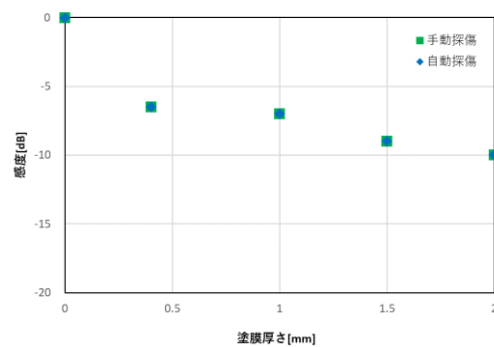


図 112 手動と自動探傷における感度[dB]（Aパターン）

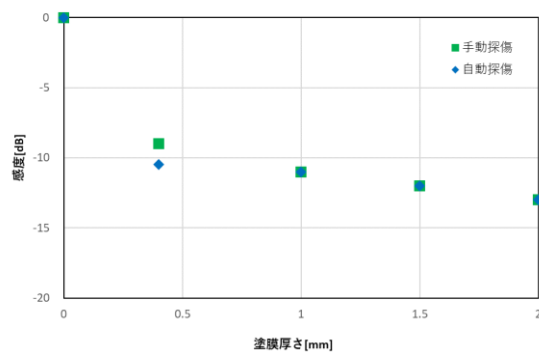


図 113 手動と自動探傷における感度[dB]（Bパターン）

（イ） S N比の比較

（ア）の結果について、前述の通り、ノイズの主要因であるウェッジ内エコーが発生するAパターンにおけるS N比を検証した（表 28、図 114）。

手動探傷と自動探傷の感度補正量は自動探傷では4 dB 分大きく、S N比は手動探傷より自動探傷は小さくなることが確認された。よって、手動探傷と自動探傷毎に校正し、S N比について確認する必要がある。

表 28 手動と自動探傷のノイズのエコー高さ[%]と SN 比

塗膜厚さ[mm]		0	0.4	1	1.5	2
手動探傷	ノイズのエコー高さ[%]	4	8.1	8.2	9.0	9.2
	SN比	19.9	9.9	9.8	9.0	8.8
自動探傷	ノイズのエコー高さ[%]	8.6	10.9	11.5	12.6	13.0
	SN比	9.4	7.4	7.0	6.4	6.3

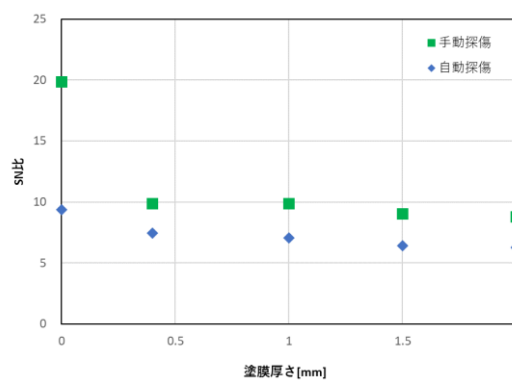


図 114 手動と自動探傷における SN 比[-] (Aパターン)

(4) 自動探傷における探傷性能確認

手動探傷と自動探傷の性能について、Aパターン、Bパターン毎に確認した。Aパターンは走査方向ときずの長手方向が一致するため、指示長さにより比較した。Bパターンについては、走査方向と長手方向が直交するため、エコー高さで比較した。

ア Aパターン

試験条件を表 29、指示長さを表 30 に示した。手動探傷と自動探傷では指示長さに有意な差はなく、探傷条件を適切に設定することで自動探傷は手動探傷と同等の探傷性能を有することが確認された。

(ア) 鉛直方向の傾き

鉛直方向の傾きに対する検出性の評価には 0 deg. および 10deg. が安全側の評価となる (5.1 (1))。手動探傷と自動探傷の比較に関する試験概要図を図 115、試験条件を表 29 に示した。手動探傷と自動探傷の指示長さを表 30 に示した。手動探傷と自動探傷では指示長さに有意な差はなく、探傷条件を適切に設定することで自動探傷は手動探傷と同等の探傷性能を有することが確認された。

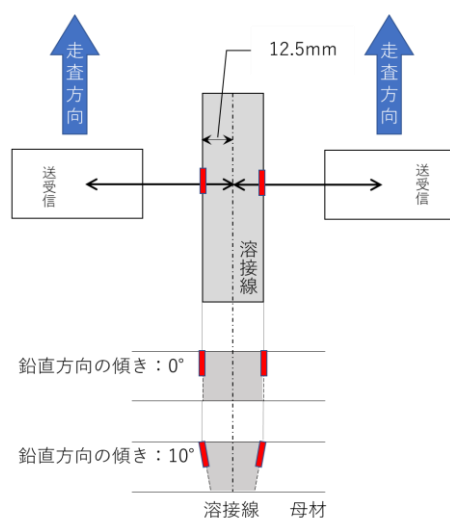


図 115 試験概要図（自動探傷、鉛直方向の傾き）

表 29 試験条件（自動探傷、鉛直方向の傾き）

大項目	項目	記号	単位	条件			
溶接線	溶接線幅	T	[mm]	25			
探触子	周波数	f	[MHz]	2.25			
	送受信用探触子の配置角度	$\theta 1$	[deg.]	0			
	入射点から溶接線中央までの距離	R	[mm]	64			
きず	中心深さ	D	[mm]	1.5			
	水平位置	X	[mm]	12.5			
	水平方向の傾き	$\theta 3$	[deg.]	0			
	鉛直方向の傾き	$\theta 4$	[deg.]	0	10	0	10
GF	塗膜厚さ	t	[mm]	0	2		

GF: ガラスフレークコーティング

表 30 手動探傷と自動探傷における指示長さ[mm]（自動探傷、鉛直方向の傾き）

探傷方法		手探傷		自動探傷	
鉛直方向のノッチきずの角度[deg.]		0	10	0	10
塗膜厚さ[mm]	0	14	12	16	16
	2	10	8	14	12

（イ） 水平方向の傾き

水平方向の傾きに対する検出性の評価には Y 距離 51.5mm での検証が安全側の評価となる (5.1 (2))。また、比較のしやすさから探触子と正対したノッチきずからの反射エコー高さについて検証した。手動探傷と自動探傷の比較に関する試験概要図を図 116、試験条件を表 31 に示した。また、手動探傷と自動探傷の指示長さを表 32 に示した。

指示長さは手動探傷より自動探傷が若干長い傾向を示し、自動探傷が安全側の評価となった。自動探傷は適切な感度調整を行うことで手動探傷と同等に探傷可能である。

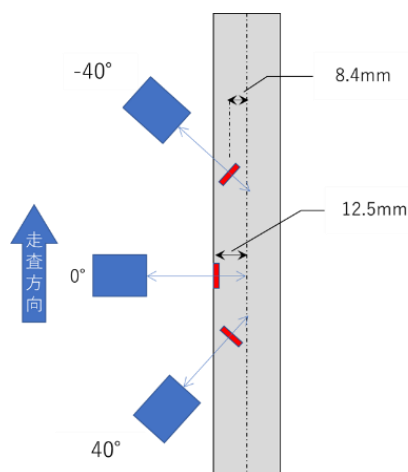


図 116 試験概要図（自動探傷、水平方向の傾き）

表 31 試験条件（自動探傷、水平方向の傾き）

大項目	項目	記号	単位	条件						
溶接線	溶接線幅	T	[mm]	25						
探触子	周波数	f	[MHz]	2.25						
	入射点から溶接線中央までの距離	R	[mm]	64						
	送受信用探触子の配置角度	$\theta 1$	[deg.]	0	40	-40	0	40	-40	
きず	中心深さ	D	[mm]	1.5						
	水平位置	X	[mm]	0						
	水平方向の傾き	$\theta 3$	[deg.]	0	40	-40	0	40	-40	
	鉛直方向の傾き	$\theta 4$	[deg.]	0						
GF	塗膜厚さ	t	[mm]	0			2			

GF: ガラスフレークコーティング

表 32 手動探傷と自動探傷における指示長さ[mm]（Aパターン 水平方向の傾き）

探傷方法		手探傷			自動探傷		
$\theta 1$:送受信用探触子の配置角度[deg.]		-40	0	40	-40	0	40
溶接線方向のノッチきずの角度[deg.]		-40	0	40	-40	0	40
塗膜厚さ[mm]	0	20	14	20	20	16	20
	2	16	10	16	18	14	18

イ Bパターン

手動探傷と自動探傷の比較に関する試験概要図を図 117、試験条件を表 33 に示した。手動探傷と自動探傷の最高エコー高さを表 34 に示した。いずれの条件においても

自動探傷は手動探傷と同様に検出可能であることが確認された。

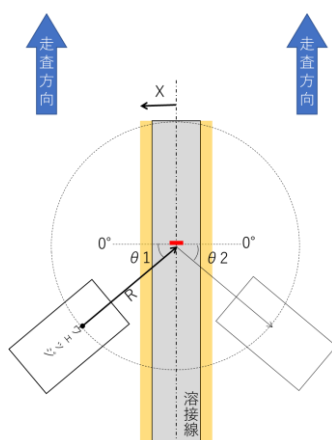


図 117 試験概要図（自動探傷 B パターン）

表 33 試験条件（自動探傷、B パターン）

大項目	項目	記号	単位	条件					
溶接線	溶接線幅	T	[mm]	25					
探触子	周波数	f	[MHz]	2.25					
	円形配置の半径（Y距離）R	R	[mm]	64					
	送信用探触子の配置角度 $\theta 1$	$\theta 1$	[deg.]	40	35	-40	40	35	-40
	受信用探触子の配置角度 $\theta 2$	$\theta 2$	[deg.]	30	35	-30	30	35	-30
きず	中心深さ	D	[mm]	1.5					
	水平位置	X	[mm]	0					
	水平方向の傾き	$\theta 3$	[deg.]	95	90	-95	95	90	-95
	鉛直方向の傾き	$\theta 4$	[deg.]	0					
塗膜	GF塗膜厚さ	t	[mm]	0			2		

GF: ガラスフレークコーティング

表 34 手動探傷と自動探傷における最高エコー高さ[dB]
（B パターン 水平方向の傾き）

探傷方法		手探傷			自動探傷		
$\theta 1$:送信用探触子の配置角度[deg.]		-40	35	40	-40	35	40
$\theta 2$:受信用探触子の配置角度[deg.]		-30	35	30	-30	35	30
溶接線方向のノッチきずの角度[deg.]		-95	90	95	-95	90	95
塗膜厚さ[mm]	0	0	0	0	0	0	0
	2	-13	-13	-13	-13	-13	-13

第六章 検査制度に係る要件の検討

6.1 付帯条件の検討

水平方向の傾きについて、全方向を対象とすることは困難であることが確認された。一方で他の規格（参考資料 1、2、3）では検出対象は溶接線方向のきずを検出する方法が採用されている。特定屋外貯蔵タンクにおける底部溶接部に対する P A 探傷が効果的・効率的な検査に資するように、他規格同様に溶接線方向を検査対象とする付帯条件について検討した。

（1）現状の調査

ア 現行の検査について

現行の底部溶接部検査は、強磁性体の鋼板の溶接部に対しては、交流式極間法の MT を主に適用しており、非磁性体のステンレス鋼等の溶接部に対しては、P T を適用している。両検査は全方向の細かい表面きずを検出することを特徴とした検査手法である。

イ 他の P A 規格

超音波を溶接線に直交する方向から板厚方向に扇状に振って入射させ、溶接線方向の深さを有するきずの検出に優れた方法を採用している。板厚の厚いパイプラインや船では、全板厚方向に対して同様に検出するために深さ方向及び水平方向に領域を設け、各領域に対して適切な条件で探傷する事が定められている（参考資料 1、3）。

ウ 本検討の P A の特性

超音波を板厚方向に扇状に振って入射させており、水平方向の傾きに対する検出性が劣る反面で深さ方向のきずの検出性においては、MT、P T より優れ、比較的大きなきずを検出する有効な検査手法である。表層を対象とする場合は、他規格の様に領域を設ける必要はない。

エ 実タンクでの MT 検査記録

底板が板厚 12mm の突合せ溶接である 1 万 k L 以上の新法タンクを多数有する国家石油備蓄基地を対象に開放検査時の MT 検査記録で確認された線状指示の方向性について調査を行った（表 35）。調査対象のタンク的前提条件は有害な変形等がないタンクであり、適切な施工管理の下で溶接及びコーティングが施工されていることである。

調査の結果、全指示の 1 割程度で線状指示が確認されており、その半数程度は溶接線方向の線状指示、残りは溶接線に直交方向の指示（最大指示長さ 3 mm）が確認され、斜め方向の指示は確認されなかった（表 36）。

表 35 調査概要

基地数	4 基地（苫東、むつ、福井、志布志）
	開放検査時期：平成30年度～令和 2 年度（3 年分）
タンク基数	6 1 基（全基数185基のうち 3 割程度）
	（タンクの本体に構造上の影響を与える有害な変形はなし）
対象溶接線	溶接施工方法確認試験で確認済みの溶接施工された溶接線、
	且つ、溶接線近傍にコーティングが施工されており、前々回の開放検査でMT検査を実施した溶接線
調査内容	全指示のうち、線状指示の個数及び線状指示の方向性

表 36 調査結果

基地	A	B	C	D	全基地
全検出箇所数	52	109	185	73	419
線状指示箇所数	8	0	1	38	47
縦方向指示箇所数	8	0	0	17	25
ななめ方向指示箇所数	0	0	0	0	0
直交方向指示箇所数	0	0	1	21	22
直交方向最大指示模様長さ	-	-	1mm	3mm	3mm

（２）効率的な検査の付帯条件の検討

ア 斜め方向のきず

上述した（１）エの調査は、次の前提条件がある。

- ・適切に施工管理された溶接線
 - a 溶接施工方法確認試験で確認された方法で施工された 3 交点を除く底板相互突合せ継手。
 - b a の継手を補修した場合は適切に管理されて施工されている。
 - c 前回の開放点検では、MTを底部溶接部の全線に実施している。
- ・適切なMT 検査等で基準に適合している。
- ・供用前に適切に施工管理されたコーティングを塗布している。

コーティング塗布前の底部溶接部にはきずがほとんど無いことが想定され、斜め方向のきずとしては、供用期間中に発生する応力腐食割れが想定される。応力腐食割れは材料、応力、腐食環境が揃ったときに発生するため、適切なコーティングにより腐食環境を排除した場合は斜め方向のきずは発生しないと考えられる。

一方で、P Aを適用する箇所以外で応力腐食割れ等が確認されるようなレアなケースでは、P A適用箇所についても同様に施工されていると考えられるため、P Aの適用は望ましくない。また、現場の試験において、応力腐食割れと他の割れを判断すること

は困難である。

イ 適切なコーティング

消防危第74号 個別延長コーティングに関する指針 別添2. 2 ガラスフレークコーティング（添付資料7）において、既存コーティングの外観試験、塗膜厚さ試験が示されている。これらを参考として、次の様な条件を満足することが望ましい。

（ア） 試験の実施条件

塗膜表面は十分に清掃し、かつ、乾燥しているとともに、タンク洗浄等においてタンク内の温度が60℃を超えないよう措置されたものであること。

（イ） 性能

次の各試験に適合するものであること。

a 外観試験

表面状態を目視により溶接線近傍のコーティングについて観察し、割れ、剥離、膨れ、傷、異物の混入、塗りもれ等がないこと。

b 塗膜厚さ試験

溶接線近傍のコーティングの厚さを測定し、探傷装置の仕様の厚さ以下の値であること。特にコーティング補修部は塗膜が厚い傾向があるため注意すること。

ウ 横方向のきず

平成30年度検討会では「屋外貯蔵タンクの底部の溶接部補修に係る水張検査の合理化」についても検討している。その検討では供用期間中の疲労き裂進展解析について、WES2805に基づいて評価している（添付資料1）。

同様に、各種きずを想定し、安全側の評価となる局部沈下における疲労き裂進展性を評価した（表37）。MT検査記録で確認された溶接線に直交方向の最大指示模様長さ3mmに基づいて、長さ3mm、深さ1.5mmの横割れを基準として比較した。なお、深さについては、長さ6mm、深さ3mmとアスペクト比を同じとした。その他に、長さ3mm、深さ1.5mmの止端割れ、長さ6mm、深さ3mmの止端割れ、横割れ、安全を考慮して長い横割れにおける疲労き裂進展性を評価した。

長さ3mm、深さ1.5mmの止端割れでは繰り返し荷重8900回で破壊靱性値を超えるが、横割れでは繰り返し荷重10000回においても破壊靱性値に至らず、十分な靱性を有していることが確認された（図118）。同様に、長さを倍とした長さ6mm、深さ3mmの横割れにおいても繰り返し荷重10000回では十分な靱性を有することが確認された（図119）。次に、より長い横割れの疲労き裂進展性について評価した結果、長さ12mm、深さ3mmでは繰り返し荷重10000回においても靱性を有しており、長さ18mm、深さ3mmにおいても、7300回まで靱性を有していることを確認した（図120）。これらの結果が

らタンクの保安検査で確認される溶接線に直交する方向のきずが破壊に繋がるような蓋然性は低いと考えられる。ただし、机上検討で得られる繰り返し回数が上限とは限らず、平成6年消防危74号に示される既存コーティングの経過年数を超えない範囲でMT検査等で確認することが有効と考えられる（図121）。

令和元年消防危第117号「屋外タンク貯蔵所に係る水張検査の代替に関する運用等について」（添付資料9）に示されるWES2805に基づいた疲労き裂進展解析では、平成12年消防危31号の別表「特定屋外貯蔵タンクに構造上の影響を与える有害な変形」（添付資料10）において示されている有害な変形がないことを前提としている。また、評価で用いる板厚は、連続板厚測定で得られた実板厚を用いている。

本検討に対し、稀に発生する震度6弱を超えるような地震をタンクが受けた場合は横割れ等が発生する可能性があり、当該タンクに近い震度計で確認された際には、注意する必要があると考えられる。

表 37 疲労き裂進展解析条件

項目		単位	止端割れ		横割れ			
容量		[万kl]	11					
内径		[m]	82					
高さ		[m]	24					
液高さ		[m]	21					
液比重		[-]	1					
底板	材質	[-]	SS400					
	継手	[mm]	突合せ					
	厚さ	[-]	12					
初期亀裂	長さ	[mm]	3	6	3	6	12	18
	深さ	[mm]	1.5	3	1.5	3		

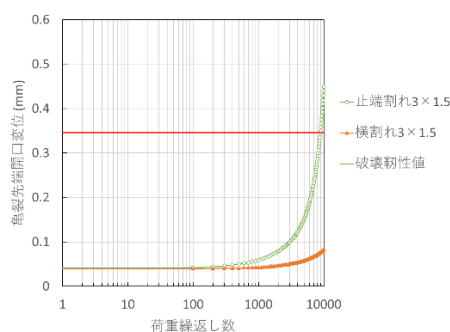


図 118 止端割れと横割れの解析結果
(きず寸法長さ 3 mm、深さ 1.5 mm)

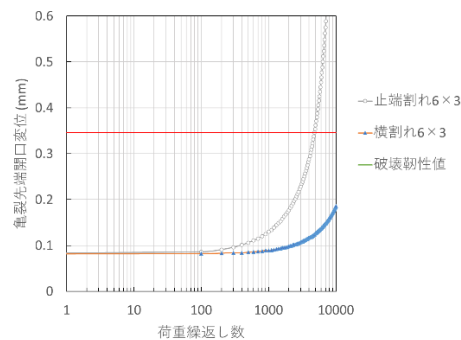


図 119 止端割れと横割れの解析結果
(きず寸法長さ 6mm、深さ 3mm)

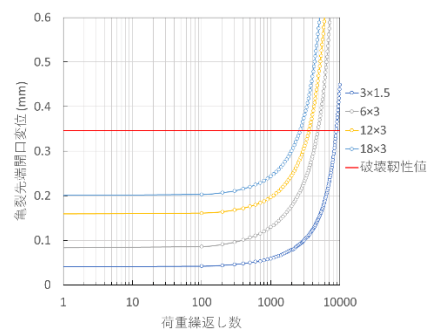
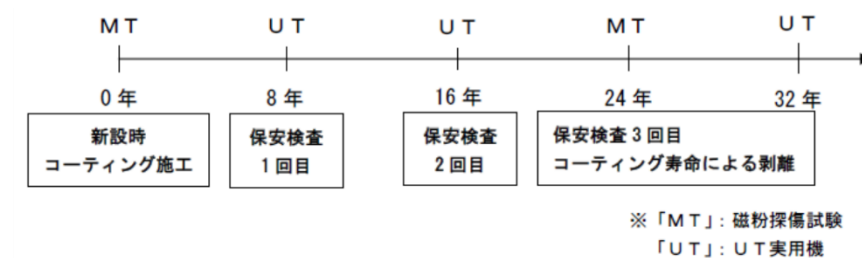


図 120 横割れの解析結果

新設を起点とした実施イメージ（平成30年度検討会報告書より）



保安検査を起点とした実施イメージ

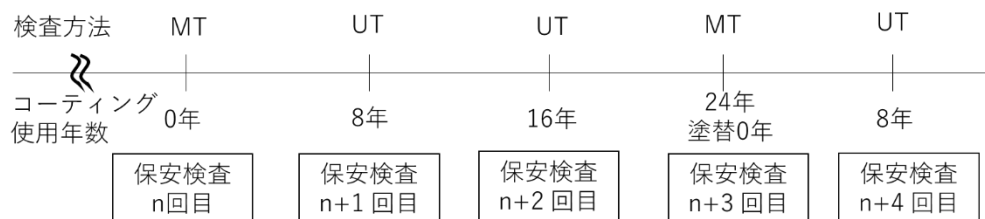


図 121 溶接部検査の実施時期のイメージ

エ 溶接線方向のきずを対象とする検査の付帯条件案

これまでの検討を踏まえ、以下に付帯条件案を示す。

- ・溶接施工方法確認試験で確認された方法相当で施工されたアニュラ相互溶接線及び3交点を除く同板厚の突合せ継手であること。
- ・過去に実施した開放点検のうち、磁粉探傷試験を適用した直近の開放点検においては、当該試験が底部溶接部の全線に実施されていること。
- ・応力腐食割れの発生要因の一つである腐食環境を排除するため、適切なコーティングであること。また、フェーズアレイ探傷を適用する開放検査において、PAを適用する継手を除く底部溶接継手で溶接線に直交する方向又は斜め方向の割れないこと。
- ・年間の受入回数（空満の繰り返し回数）や連続板厚測定で得られた実板厚等からタンクの疲労度を整理し、疲労亀裂進展評価によって十分な靱性を有していること。
- ・タンクの本体に構造上の影響を与える有害な変形がないこと。供用期間中に当該タンクの地域で震度6弱以上の地震の情報を得た場合は特に注意すること。

（3）付帯条件に関するまとめ

6.1（2）で示した付帯条件について、継手、コーティング、タンク、検出する方向に関する項目に分けて取り纏めた（添付資料11）。

6.2 検査に係る工程

付帯条件に合わせて、図 122 に P A 探傷の適用に関するフローを示した。

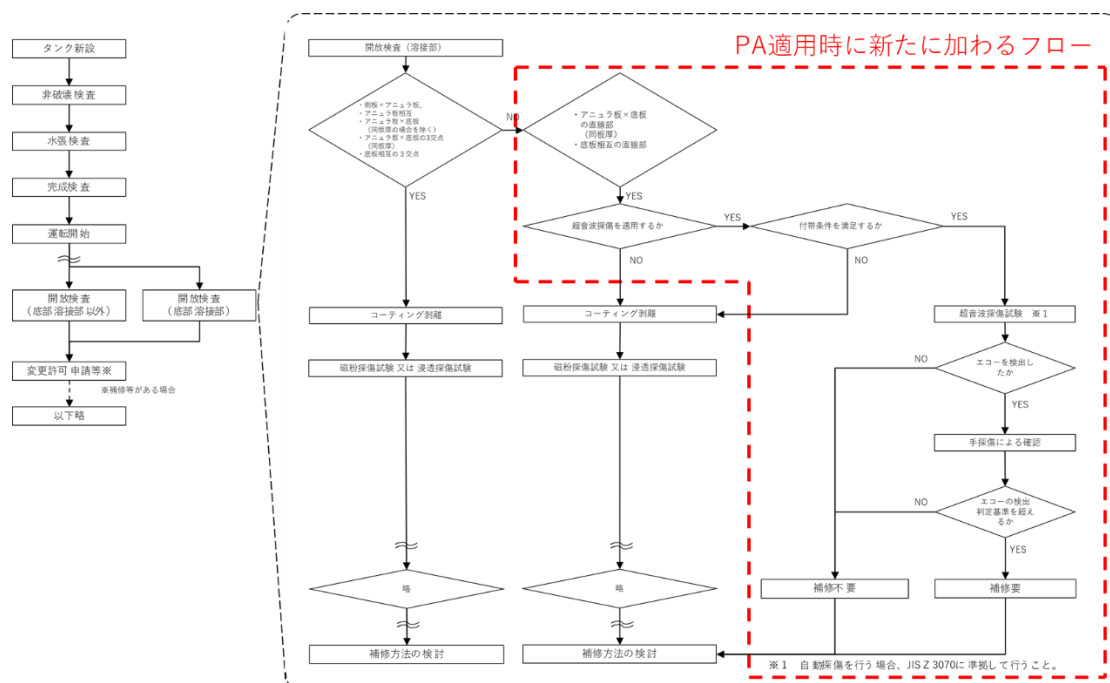


図 122 検査に係るフロー

6.3 探傷機の客観的な性能確認

平成 30 年度検討会報告書の参考資料 3－7「コーティング上からの P A 試作機における要求・運用性能（案）」において、必要な要求性能の案や運用方法案が示されている。これまでの検証に基づいて、同案を修正した（添付資料 12）。

6.4 P A 探傷機を用いた溶接部探傷実施者の技能レベルの確保

他の P A の規格では、作業員については、共通して JIS Z 2305「非破壊試験技術者」に記載されている U T のレベル 2 相当以上の資格を有していることを求められており、その他には対象物に対して十分な知識、経験を有していること等を求めている。

P A 探傷を用いた溶接部検査の作業員においては、他の規格と同様に、U T のレベル 2 相当以上の資格を有していること、その他には特定屋外貯蔵タンクの構造や溶接部のきずの発生状態、腐食発生実態、コーティング等に関する知識が求められる。

第七章 課題に対する回答

令和元年度から3年度にかけて、平成30年度検討会報告書に示された課題に対する回答を検討した。

7.1 ①実タンクにおける検証データの不足

(1) 実タンク特有の外乱要因の影響

実タンクにおける検証データを取得し、実運用における測定条件を整理した。また、溶接線開先に沿った内部きずと考えられる指示を確認した。

ア 具体的な実績

令和3年11月8日～19日の間、むつ小川原石油備蓄基地において、実タンク特有の外乱要因の影響について確認し、適用における条件について整理した。また、検証した溶接線長75m程度(15m×5本)において、4箇所で指示を確認した。いずれの指示も溶接の開先に沿った深さ6mm～8mm程度の位置で確認された。4箇所のうち1箇所についてMTを実施したところ、指示は確認されなかった。

(2) 実きずに対するPAの検出性

PA探傷で実きずが検出されることを確認した。

ア 具体的な実績

- (ア) 平成29年度において、実きずを有する試験片を用いて、PAの実きずの検出性について周波数2.25MHzより優位である5MHzにおいて、試験片中の全ての表面割れ(2個)を検出した。
- (イ) 令和3年度において、実タンクの検証ではMTで検出可能な表層のきず指示が確認されなかったため、実きずを有する試験片を用いて、検出性を確認した。平成29年度と同様に周波数2.25MHzの条件で全ての表面割れ(8個)を検出した。
- (ウ) 安全側の評価となることが確認されたシミュレーションにおいて、長さ4mm、深さ2mmの実きずを模したきずが検出可能であることを確認した。

7.2 ②底板の裏面腐食に対する探傷性能の検討

(1) 実タンク特有の外乱要因の影響

実タンクにおいて、裏面腐食の他に表面形状(内面減肉、塗膜の凹凸)、塗膜の膨れ等による影響について、カップリングチェック(透過方式)で確認した結果、エコーの低下を確認した。よって、裏面腐食以外の探傷性能への影響を考慮して、基準レベルが維持できるようにカップリングチェック機能を有することが必要であることを確認した。

7.3 ③傾ききずの検討

(1) 鉛直方向の傾き

対象とする角度範囲は、平成 30 年度検討会報告書に基づき溶接開先に沿った傾き 0～32.5deg. とした。その角度範囲内にある長さ 4mm、深さ 2mm の表層ノッチきずは検出可能であった。

(2) 水平方向の傾き

全方向を検出対象とすることは実運用上困難であった。よって、付帯条件 (6.1) を設けることにより、溶接線方向の表面きずを対象とする効果的、効率的な溶接部検査について提案した。

7.4 ④探傷機としての製作やその客観的な性能確認 (第三者機関の評価等)

(1) 探傷機としての製作や性能確認

検証結果に基づいて探傷装置を製作し、4.6 の基本配置において、探傷範囲内では長さ 4mm、深さ 2mm のきずを検出可能であることを確認した。また、適切な基準感度を設定した自動探傷は手動探傷と同等の探傷性能を有することを確認した。

(2) 探傷機の客観的な性能確認

探傷装置として必要な要求性能や運用方法案についてまとめた (添付資料 12)。なお、超音波探傷法によるコーティング上からの溶接部検査で用いる超音波探傷機の要求される性能を担保するためには、タンクの全体構造、溶接施工、各種検査等に関する高度な専門技術が必要となることから、タンクについて高度な知見を有する第三者機関を活用することが望ましいと考えられる。

7.5 ⑤P A探傷機を用いた溶接部探傷実施者の技能レベルの確保

(1) 求められる技能レベル

P A探傷を用いた溶接部検査の作業者においては、以下を満足する必要がある。

- ・ JIS Z 2305「非破壊試験技術者」に記載されている U T のレベル 2 相当以上の資格を有していること。
- ・ 特定屋外貯蔵タンクの構造や溶接部のきずの発生状態、腐食発生実態、コーティング等に関する知識

7.6 その他

(1) S N比の検討

2 基の実タンクを対象に溶接線近傍の塗膜厚さを調査した結果、コーティング補修部では厚い傾向が確認され、P A探傷の際には、装置性能で確認された範囲内の塗膜厚さで

あるか事前に調査することが望ましいことが分かった。なお、確認された最大塗膜厚さは 1.8mm 程度であった。

実タンクでの自動探傷を想定して、塗膜厚さ 2 mm の試験片を用いて S N 比について検証した結果、概ね探傷可能であることが確認された。

(2) 判定基準

本検討委員会において、消防庁から示された判定基準は、現行の底部溶接部検査の基準と同様に「長さ 4 mm 以下の実きずを検出可能であること」であった。5.2(3)に示した通り、長さ 6 mm、深さ 3 mm のノッチきずで Y 距離 64mm において校正した条件では、きずのアスペクト比を同じとした長さ 4 mm、深さ 2 mm のきずが検出可能であり、求められる要求性能を満足していると考えられる。

(3) 運用方法案

実運用の参照用として運用方法案をまとめた（添付資料 13）。

第八章 まとめ

PA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ついては、平成30年度検討会において「5つの課題がクリアされた段階で、実運用に供することが適当である。」と示された。本検討委員会では令和元年度から3か年にわたり、課題をクリアすることを目的に調査検討を進めた。

調査検討に先立ち、実タンクでの実態調査や文献調査を基に必要な前提条件及び探傷条件を定めて、各課題に対する検証項目を整理した。検証では室内試験、シミュレーションによりデータを積み上げ、令和3年度には既存のPA探傷機に必要な機能を付加し、自動探傷においても手動探傷と同様に実きずも含めて検出可能であることを確認した。次に、実タンクでの実証試験を実施し、探傷中の探傷条件のチェック機能として透過方式のカップリングチェックが有用であることを確認した。これらの結果に基づき、検出性能に係る課題に対する回答を示した。また、検証結果や他の規格等を参考にPA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必要な付帯条件や要求性能等を検討し、検査制度に係る課題に対する回答を示した。

本検討委員会で平成30年度検討委員会報告書に示された課題に対する回答を示すことができたと考えられる。また、本調査検討により改造したPA探傷機は付帯条件及び要求性能を満足する実用機と判断される。今後、消防庁から通知等が示され、実運用に供されることを期待する。

添付資料

- 1 屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討報告書（消防庁平成 31 年 3 月）
- 2 平成 12 年 8 月 24 日消防危第 93 号通知
- 3 令和元年度コーティング上からの溶接線検査に係る検討委員会資料 参考資料 3
過年度のフェーズドアレイの検証データ（時系列）
- 4 非破壊検査用シミュレーションソフト『CIVA（シバ）』概要
- 5 令和 2 年度製作試験片
- 6 令和 3 年度製作試験片（TRL-011-’21 試験片の製作 検査記録）
- 7 平成 6 年 9 月 1 日消防危第 74 号通知
- 8 令和 3 年度コーティング上からの溶接線検査に係る検討委員会（第三回） 資料 2
令和 3 年度に製作した装置について装置概要
- 9 令和元年 8 月 27 日消防危第 117 号通知
- 10 平成 12 年 3 月 21 日消防危第 31 号通知
- 11 PA 探傷の適用に関する付帯条件
- 12 屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討報告書（平成 31 年 3 月） 参考資料 3-7 「コーティング上からの PA 試作機における要求・運用性能（案）」修正
- 13 超音波探傷法を用いたタンク底部の溶接部検査に関する運用方法案

参考資料

- 1 ASTM E1961-16 STANDARD PRACTICE FOR MECHANIZED ULTRASONIC TESTING OF GIRTH WELDS USING ZONAL DISCRIMINATION WITH FOCUSED SEARCH UNITS
- 2 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規定
- 3 CLASSNK フェーズドアレイ超音波探傷試験による非破壊検査ガイドライン
- 4 「平成 21 年度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）」委託業務成果報告書
- 5 「平成 22 年度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）」委託業務成果報告書タンク開放検査の合理化に関する調査報告書
- 6 「平成 23 年度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）」委託業務成果報告書
- 7 「平成 26 年度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）」委託業務成果報告書
- 8 「平成 27 年度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）」委託業務成果報告書
- 9 「平成 28 年度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）」委託業務成果報告書
- 10 「平成 29 年度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)」委託業務成果報告書
- 11 「平成 30 年度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）」委託業務成果報告書
 - 12 「平成 31 年度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）」委託業務成果報告書
 - 13 「令和 2 年度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）」委託業務成果報告書
 - 14 JIS Z 2351 : (2011) 超音波探傷器の電氣的性能測定方法
 - 15 JIS Z 2352 : (2010) 超音波探傷装置の性能測定方法
 - 16 JIS Z 3060 : (2015) 鋼溶接部の超音波探傷試験方法
 - 17 JIS Z 3070 : (1998) 鋼溶接部の超音波自動探傷方法