

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 3 1 年 3 月

屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会

はじめに

危険物を大量に貯蔵する屋外タンク貯蔵所の検査方法については、多くの時間や費用がかかる項目もあり、シミュレーションや非破壊検査の活用による検査技術の高度化が期待されている。

このような状況を踏まえ、消防庁では、大量の工業用水を使用してタンクの変形や漏えいの有無を確認する水張検査や、タンク底部の腐食防止用のコーティングを剥離して行う溶接部検査について、検査水準を確保したうえで、新しい技術を用いて検査方法の高度化・合理化を図ることを目的に、平成 28 年度から「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」を開催し、検討を行ってきた。

屋外貯蔵タンクの水張検査については、溶接補修に関する実態や不具合の発生状況を調査するとともに、破壊力学に基づくシミュレーション等を用いた溶接部欠陥の評価手法を整理した。

また、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、「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）第 2 において、新技術を用いた非破壊検査の実用機が製作された段階で通知する旨が示されていることを踏まえ、本検討会においては、近年開発が進んでいる超音波技術の一つであるフェーズドアレイを用いた探傷装置を対象として、実験等により性能確認を行うとともに、実運用に供する場合の要件や、解決すべき課題等を整理した。

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熱意と努力によるところが大であり、深く感謝申し上げる次第である。

平成 31 年 3 月

屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会

座長 亀 井 浅 道

目次

第1章 調査検討の概要	1
1. 1 調査検討の目的	3
1. 2 調査検討事項	3
1. 2. 1 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関する事項	3
1. 2. 2 屋外貯蔵タンクのコーティング上からの底部溶接部検査に関する事項	3
1. 3 調査検討体制	4
1. 4 調査検討経過	5
第2章 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	7
2. 1 調査検討の趣旨	9
2. 2 調査検討事項	9
2. 3 屋外貯蔵タンクの補修状況、水張検査における不具合事例の調査	10
2. 4 シミュレーションによる評価手法の検討	15
2. 4. 1 WES2805の概要	16
2. 4. 2 屋外貯蔵タンクの評価に供する際の計算条件の設定	16
2. 4. 3 ケーススタディ：試験片を用いた疲労試験との比較	21
2. 4. 4 ケーススタディ：初期不整又は局部沈下を有する底板への適用	23
2. 4. 5 ケーススタディ：大規模地震時のタンク隅角部への適用	28
2. 5 水張検査の代替となる確認方法	42
2. 6 今後の課題	47
第3章 コーティング上からの溶接部検査	49
3. 1 調査検討の趣旨	51
3. 2 調査検討事項	51
3. 3 PA試作機の検出原理等の概要	51
3. 3. 1 フェーズドアレイとは	51
3. 3. 2 PA試作機的主要な装置仕様	53
3. 3. 3 PA試作機の探触子外観	55
3. 3. 4 PA試作機の欠陥検出性能	61
3. 4 試験片及び実タンクにおけるPA試作機の性能確認	62
3. 4. 1 PA試作機の試験片による性能確認	62
3. 4. 2 PA試作機の実タンクによる性能確認	68
3. 5 PA試作機を用いた溶接欠陥の評価手法	71
3. 5. 1 PA試作機の運用等に係る前提条件	71
3. 5. 2 PA試作機の運用イメージ	72

3. 6	PA試作機におけるまとめと今後の課題	73
3.6.1	裏面腐食への対応方法の検討	73
3.6.2	鉛直方向の傾き欠陥の探傷について	74

参考資料	77
1－1 屋外タンク貯蔵所に係る検査制度の概要等	79
2－1 アンケート実施要領	83
2－2 H30年度水張検査の合理化に係る調査検討業務報告書	87
3－1 塗膜厚さの影響試験結果	337
3－2 超音波探傷法によるコーティング上からの底部溶接部検査に関する検討	357
3－3 塗装あり試験片 探傷結果データシート	365
3－4 疲労破壊試験の試験片の製作状況	379
3－5 欠陥を有する溶接継ぎ手の疲労破壊試験結果	399
3－6 超音波探傷法によるコーティング上からのタンク底部溶接部検査に係る検討 実タンクにおける探傷性能の確認試験結果について	411
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）	427

第 1 章 調査検討の概要

第1章 調査検討の概要

1. 1 調査検討の目的

危険物を大量に貯蔵する屋外タンク貯蔵所は、過去の流出事故等の教訓を踏まえ、補修工事や保安検査等の際に各種検査を行い、その健全性を確認することとされている（資料1-1）。

現在の検査方法の中には多くの時間や費用がかかるものもあり、このような検査項目については、安全を確保しつつ、合理化を進めることが求められている。

他方、シミュレーションや非破壊検査の技術が進展しており、屋外貯蔵タンクの検査に活用できる可能性のあるものも見られるところである。

これらの状況を踏まえ、シミュレーションや非破壊検査の活用により検査技術の高度化を図り、もって工事等の際の検査方法の合理化を進めることを目的として調査検討を行う。

1. 2 調査検討事項

屋外貯蔵タンクに係る検査において、新技術による高度化・合理化が期待される次の事項について調査検討を行う。

1.2.1 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関する事項

シミュレーション等を活用した溶接部欠陥評価について、下記の調査検討を行う。

- (1) 屋外貯蔵タンクの補修状況、水張検査における不具合事例の調査
- (2) シミュレーションによる評価手法検討
- (3) 水張検査の代替となる確認方法

1.2.2 屋外貯蔵タンクのコーティング上からの底部溶接部検査に関する事項

近年開発が進んでいる超音波技術の一つであるフェーズドアレイを用いた検査機器（以下「PA試作機」という。）について、下記の調査検討を行う。

- (1) PA試作機の検出原理等
- (2) 試験片及び実タンクにおけるPA試作機の性能確認
- (3) PA試作機を用いた溶接部欠陥の評価手法

1. 3 調査検討体制

屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会委員名簿（五十音順 敬称略）

※()は前任者

座 長	亀井 浅道	元横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 特任教授
委 員	小川 晶	川崎市消防局 予防部 危険物課長（平成 30 年度）
	(菅野 浩一	川崎市消防局 予防部 危険物課長（平成 29 年度まで）
	三枝 浩也	横浜市消防局 予防部 保安課長（平成 30 年度）
	(加賀谷 敦己	横浜市消防局 予防部 保安課長（平成 29 年度）
	(土橋 正彦	横浜市消防局 予防部 指導課長（平成 28 年度）
	佐川 平	電気事業連合会 工務部副部長（平成 30 年度 7 月から）
	(今木 圭	電気事業連合会 工務部副部長（平成 30 年度 6 月まで）
	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
	高橋 弘幸	一般社団法人 日本非破壊検査工業会
	竹原 昌彦	石油連盟 設備管理専門委員会（平成 30 年度）
	(岸川 有一	石油連盟 設備管理専門委員会 タンク部会長（平成 29 年度まで）
	千葉 真	独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 資源備蓄本部 環境安全・技術部技術課長代理（平成 29 年度から）
	(塩見 晃也	独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 備蓄企画部 特命調査役（平成 28 年度）
	中本 敦也	危険物保安技術協会 タンク審査部長（平成 30 年度）
	(寒川 慎也	危険物保安技術協会 タンク審査部長（平成 29 年度まで）
	西 晴樹	消防庁消防研究センター 火災災害調査部長
	西上 真人	石油化学工業協会
	野本 敏治	東京大学名誉教授
	三原 毅	東北大学大学院工学研究科 材料システム工学専攻 教授
	八木 高志	危険物保安技術協会 土木審査部長
	山内 芳彦	危険物保安技術協会 技術アドバイザー
	山田 實	元横浜国立大学 リスク共生社会創造センター 客員教授
	山中 宏之	一般財団法人 エンジニアリング協会
事務局	渡辺 剛英	消防庁危険物保安室長（平成 30 年度）
	(秋葉 洋	消防庁危険物保安室長（平成 29 年度まで）
	内藤 浩由	消防庁危険物保安室課長補佐（平成 30 年度）
	(岡澤 尚美	消防庁危険物保安室課長補佐（平成 29 年度）
	(七條 勇佑	消防庁危険物保安室課長補佐（平成 28 年度）
	清野 昇亨	消防庁危険物保安室パイプライン係長（平成 29 年度から）
	(松坂 竜男	消防庁危険物保安室パイプライン係長（平成 28 年度）
	門前 祐児	消防庁危険物保安室総務事務官（平成 30 年度）
	(佐々木 隆行	消防庁危険物保安室総務事務官（平成 29 年度まで）

1. 4 調査検討経過

検討の経過は以下のとおりである。

○平成 28 年度

- 第 1 回検討会 平成 28 年 9 月 12 日
- 第 2 回検討会 平成 28 年 12 月 9 日
- 第 3 回検討会 平成 29 年 1 月 16 日
- 第 4 回検討会 平成 29 年 3 月 22 日

○平成 29 年度

- 第 1 回検討会 平成 29 年 7 月 19 日
- 第 2 回検討会 平成 30 年 2 月 1 日
- 第 3 回検討会 平成 30 年 3 月 13 日

○平成 30 年度

- 第 1 回検討会 平成 30 年 6 月 27 日
- 第 2 回検討会 平成 30 年 12 月 18 日
- 第 3 回検討会 平成 31 年 2 月 28 日

※ 本報告書で使用する略語は以下のとおり

○消防法（昭和 23 年法律第 186 号）・・・法

○危険物の規制に関する政令（昭和 34 年政令第 306 号）・・・政令

○危険物の規制に関する規則（昭和 34 年総理府令第 55 号）・・・規則

○危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示（昭和 49 年自治省告示第 99 号）・・・告示

○屋外タンク貯蔵所のタンク本体・・・タンク

○屋外タンク貯蔵所の基礎・地盤・・・基礎・地盤

○危険物の規制に関する政令及び消防法施行令の一部を改正する政令（昭和 52 年政令第 10 号）の施行後に設置許可の申請がなされた特定屋外タンク貯蔵所・・・新法タンク

○危険物の規制に関する政令及び消防法施行令の一部を改正する政令（昭和 52 年政令第 10 号）の施行の際、現に法第 11 条第 1 項前段の規定による設置に係る許可を受け、又は当該許可の申請がされていた特定屋外タンク貯蔵所で、その構造及び設備が政令第 11 条第 1 項第 3 号の 2 又は第 4 号に定める技術上の基準に適合していなかったもののうち、その構造及び設備が昭和 52 年政令第 10 号附則第 3 項各号に定める技術基準に適合しているもの・・・旧法タンク

第 2 章 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

第2章 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

2. 1 調査検討の趣旨

水張検査は、消防法（昭和23年法律第186号）第11条の2に基づく完成検査前検査の一環として、工事後のタンクに水を張ることにより、応力を加えて漏れ及び変形の有無を確認するとともに、基礎・地盤の不等沈下を確認するものであり、実際の使用環境を模してタンクの健全性を包括的に評価する検査項目である。

しかしながら、水張検査は、大量の水の使用、試験後の水処理、タンク清掃、検査期間の長期化等、事業者側の負担が大きいことから、検査水準を確保した上で合理化を図ることが期待されている。

このため、屋外貯蔵タンクの補修状況や水張検査における不具合事例、シミュレーションによる評価手法等について調査・検討を行い、水張検査の代替となる確認方法を検討するものである。

2. 2 調査検討事項

（1）屋外貯蔵タンクの補修状況、水張検査における不具合の調査

屋外貯蔵タンクの溶接補修の実態、過去の水張検査における不具合の発生状況等のデータ収集を目的として、主な事業者団体等に対してアンケート調査を行った。

（2）シミュレーションによる評価手法の検討

タンクに液体の危険物を満たした場合、漏れや変形の主な原因として溶接部の欠陥があると考えられる。

溶接構造物の健全性を評価する方法として、日本溶接協会規格 WES2805 において、破壊力学に基づき割れ等の溶接欠陥が進展していくかどうか評価するための計算手法が示されており、低温貯槽、船舶、海洋構造物、パイプライン等において活用された実績を有している。

本検討会では、WES2805 の方法を用いてシミュレーションを行い、タンク底部の溶接部補修の評価に適用することの妥当性や適用する際の条件設定等について検討した。

（3）水張検査の代替となる確認方法

（1）及び（2）で調査・検討した結果を踏まえ、水張検査の代替要件等について検討した。

- ① 補修溶接に関する要件
- ② タンクに関する要件
- ③ 破壊力学に基づく欠陥評価 等

2. 3 屋外貯蔵タンクの補修状況、水張検査における不具合事例の調査

屋外貯蔵タンクの溶接補修の実態、過去の水張検査における不具合の発生状況等のデータ収集を目的として、石油連盟、石油化学工業協会、電気事業連合会、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構に対してアンケート調査を行った（参考資料 2-1 参照）。

主な調査結果は以下のとおりである（参考資料 2-2 参照）。

（1）回答件数

各団体に対し、タンクの容量区分（1 千kl～10 万キロ超までを5つに区分）ごとに新法タンク及び旧法タンクについて各5基程度選定して、下記の事項について調査を依頼した。その結果、次の回答数のデータを得ることができた。

- 屋外貯蔵タンクの補修状況等に関する調査：115 基（365 回分の開放点検データ）
- 水張検査時の不具合事例に関する調査：12 事案
- 受払いに関する調査：157 基
- 地震の被災に関する調査：157 基

（2）溶接補修に係る調査

① 補修溶接の理由・深さ・長さ

補修理由は、旧法タンクと新法タンクで同様の傾向を示しており、ブローホールが最も多く、ついで、その他（形状不良等）、アンダーカットの順となっている。マイクロ割れや他の割れは出現率が低いものの、各部位で発生している。

補修深さについては、底部溶接線検査に用いられる検査手法（目視、MT、PT）で検出できるのは表層（MTでは深さ3mm程度まで）のみであり、検出された欠陥を全て除去することから、補修される深さは3mm～5mmと推定される。

補修長さについては、全体的に旧法タンクより新法タンクの短い傾向となっている。特に10万kl以上の新法タンクは、非常に短い傾向が見られる。

なお、最小補修長さについては、JIS B 8501（鋼製石油貯槽の構造（全溶接製））で、軟鋼で25mm以上、高張力鋼で50mm以上とされており、欠陥の発生しやすい短い溶接は避けるように規定されている。

② 溶接欠陥の状況

ア 継手形状

危険物保安技術協会が過去10年間に実施した保安検査及び完成検査前検査における溶接部検査の記録から、底部溶接線の割れによる不適合事案は23件あり、その内訳は補修溶接不良が14件、既設検査不備が9件である。底部溶接線の割れによる不適合事案を溶接部位毎に見てみると、内タライ（側板×アニュラ板）16件、アニュラ板相互1件、亀甲（アニュラ板×底板）2件、底板相互4件であり、そのうち亀甲及び底板相互の溶接継手形状については、全て重ね継手である。

重ね継手に不具合が多い理由として、突合せ継手と比較して、施工から年月が経っているものが多い、溶接士の技量の影響が出やすい手溶接による施工などが考えられる。

表 2.1 底部溶接線の割れによる不適合案件一覧表

平成30年1月19日現在

No.	年度	検査区分	容量(KL)	部位	割れの原因	割れの概要
1	H20	保安	11,200	内タライ	既設検査不備	内タライ・アニュー板側止端部に線状磁粉模様4.5mm、1箇所有り
2	H20	保安	145,910	亀甲 (隅肉溶接)	既設検査不備	亀甲部未補修部のアニュー板母材部に15本の線状指示模様を確認。割れと判定。
3	H21	保安	31,836	内タライ	既設検査不備	側板内タライ溶接線からパーシャルアニュー板母部に向かつて6mmの線状指示模様有り。
4	H21	保安	12,795	内タライ	既設検査不備	内タライの側板側溶接線止端部に線状磁粉模様(長さ11mm及び7mm)2箇所有り。
5	H21	保安	46,789	内タライ	補修溶接不良	内タライの側板側溶接線止端部に線状磁粉模様(長さ9.0mm)1箇所有り。
6	H22	完前	5,127	アニュー相互	補修溶接不良	アニュー板相互溶接部(抜取No.8)熱影響部に割れ(磁粉模様長さ3mm)1箇所あり
7	H23	保安	97,417	内タライ	補修溶接不良	タライ内側溶接線側板側溶接線止端部に線状磁粉模様8.0mm1箇所あり。
8	H23	保安	34,625	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	底板当板溶接部の熱影響部(抜き取りNo.38)に割れ(線状磁粉模様 長さ4.0mm)1箇所あり。
9	H23	保安	18,900	内タライ	既設検査不備	内タライ溶接線止端部からアニュー板母材側に割れ有り(抜き取りNo.37)。
10	H23	保安	48,034	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	底板相互溶接線(抜取No.34)近傍2mmに線状磁粉模様(長さ4.5mm)1箇所あり。
11	H23	完前	2,000	内タライ	補修溶接不良	内タライ溶接部(抜き取りNo.6)に線状磁粉模様 合計長さ13.5mm)有り。(145.5mm範囲に7箇所)
12	H24	保安	106,340	内タライ	既設検査不備	側板xアニュー板の内タライ溶接線のアニュー側止端部に線状指示模様4.1mm1カ所が確認。他に1.5mm長さが2カ所確認された。
13	H24	完前	9,999	内タライ	補修溶接不良	内タライ溶接溶接線に線状磁粉模様5.5mm 1箇所確認。(1mm+0.5mm(間隔)+1mm+0.5mm(間隔)+2.5mm=5.5mm同一線上)後日、スンプ試験の結果から割れと判明。
14	H24	保安	353,981	内タライ	既設検査不備	側板とナックル板との溶接部(抜き取りNo.14)に線状磁粉模様5.5mmを確認した。詳細は2.5mmの模様+1.0mmの間隔+2.0mmの模様で合計5.5mmとした。
15	H24	保安	46,363	内タライ	補修溶接不良	側板xアニュー板の内タライ溶接線のアニュー側止端部に線状指示模様、合算長さ20.0mm(4mm、間隔1mm、15mm) 1箇所確認
16	H25	完前	1,862	亀甲 (隅肉溶接)	補修溶接不良	MT実施中、亀甲廻り溶接線(熱影響部 No.9抜き取り箇所)に線状指示模様 5.0mm 1箇所 有り。 不適合とした。
17	H25	完前	1,862	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	MT実施中、底板相互溶接線の止端部から2mmの箇所(No.12抜き取り箇所)に割れによる線状磁粉模様 3.5mm 1箇所が有り、不適合とした。
18	H26	保安	51,012	内タライ	補修溶接不良	側板×アニュー板内側溶接部アニュー母材側(抜き取りNo.20)に割れ有り。
19	H28	保安	20,500	内タライ	既設検査不備	MT検査時、側板×アニュー板内側溶接線(抜き取りNo.7)に線状磁粉模様8箇所(25cm内に指示模様長さ1mmを超えるもの×8箇所 合計長さ17.1mm)あり。
20	H28	保安	14,660	底板相互 (隅肉溶接)	既設検査不備	MT検査時、底板相互溶接線(抜き取りNo.28)の熱影響部から母材部にかけて割れが3箇所(4.5mm、2.5mm、2.0mm)有り、不適合としたもの。なお、当該部分は開放検査で所見が無く、補修範囲外の部分であった。
21	H29	完前	4,570	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	底板相互溶接部(すみ肉溶接)に、抜き取り番号No.13に線状磁粉探傷模様(25cm内に長さ1.1mm以上 x 5カ所 合計8.1mm)が確認された。(模様は割れ形状を示していた) 不適合とした。
22	H29	保安	64,467	内タライ	補修溶接不良	側板×アニュー板溶接部の下端側母材部(抜き取りNo.19)に割れ(指示模様長さ3.5mm)を確認されたため、不適合とした。
23	H29	完前	7,003.7	内タライ相当	補修溶接不良	ヘミスヘロイドタンクの側板×圧縮リング内側溶接線(抜き取りNo.21)に割れ(長さ1.0mm×1箇所、0.5mm×8箇所)が確認されたため、不適合とした。

イ 補修部位

補修部位による欠陥の種類や出現率の違いは見られない。

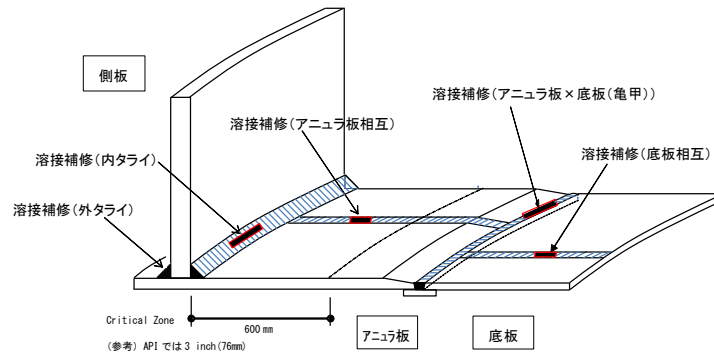
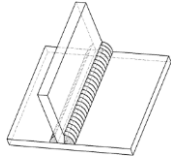
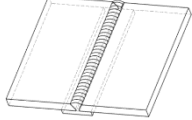
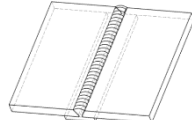
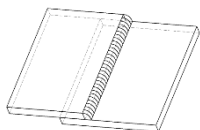


図 2.1 溶接補修部位

現行基準においては、部位ごとに継手形状が規定されている。（表 2.2 参照）

表 2.2 部位毎に規定される継手形状

部位	構造
側板×アニュラ板	部分溶込みグループ溶接又はこれと同等以上 
アニュラ板相互	裏当て材を用いた突合せ溶接又はこれと同等以上 
アニュラ板×底板 底板相互	板厚 9 mm を超える ⇒裏当て材を用いた突合せ溶接 又はこれと同等以上  板厚 9 mm 以下 ⇒すみ肉溶接でも可 

（３）水張検査時の不具合事例に関する調査

水張検査時の不具合事例のうち、底部の不具合に係るものは 5 件あり、そのうち 2 件が漏水に至った事例、3 件が水張検査後の溶接部の非破壊検査における不具合発見事例であった。なお、漏水に至った事例 2 件は、いずれも底板相互の重ね継手の破断であった。

表 2.3 水張検査時の不具合事例に関する調査結果

No.	タンク容量 (KL)	貯蔵品名称	設置許可 年月	発生 年月	水張りの対象となる変更内容	不具合内容	その後の対応
1	154,642	原油	S46.5	H23.5	底端板部分取替え補修	水張検査の水張時に底板溶接線が破断し漏水が発生した。水抜き後の調査により、 <u>底板のすみ肉溶接線</u> に割れ(約1,000mm)を確認した。原因は、建設時の基礎の転圧不足による基礎の陥没により、局部的にタンク底板と基礎との間に許容以上の隙間が発生していたため、溶接線の一部に応力が集中し破断に至った。	底部溶接線全線のMTを実施し、溶接線割れ近傍に線状欠陥を検出した。また底板の形状測定及び間隙測定を実施し、割れ近傍の基礎が局部的に陥没し100mm以上の空隙を確認した。基礎を含む補修実施後、再度水張検査を実施し、異常がないことを確認した。
2	98,410	原油	S43.5	H20.8	・アニュラ板取替、底板当板、その他溶接線補修 ・側板肉盛補修 ・基礎修正	保安検査合格後の水張り途中に、 <u>アニュラ板と基礎の間より漏水を認めた</u> 。水張りを中止し、内部確認した結果、 <u>底板の3枚重ね溶接線</u> に割れ(120mm)を認めた。	不具合原因の調査ならびに、底板全溶接線ののど厚測定とMTを実施。溶接線補修を実施後、再度保安検査を受検、水張り検査を実施した。
3	34,350	軽油	S44.2	H16.6	アニュラ板部分取替(1箇所)、内タライ全周、底板相互(30%)溶接線補修	水張検査の水抜き後に、内タライ溶接線のMTを実施したところ、アニュラ板取替部両側の溶接線補修部の底板側止端部に、線状指示(4箇所、最大長さ910mm)を検出した。	その他の溶接線については欠陥は検出されなかった。アニュラ板不具合部の2箇所取替、再度溶接部検査、水張検査を実施し、異状が無い事を確認した。
4	14,350	重油	S48.5	H29.1	底板部分取替え、内タライ全周溶接補修、アニュラ板相互17m、アニュラ×底板全周補修、底板17m溶接補修	水抜き後底板溶接線のMTを実施したところ補修部近くの既設溶接線に線状指示模様を検出した(指示模様長さ110mm)	欠陥を補修後、溶接部検査受検、再度水張検査を実施し、異状が無いことを確認した。
5	2,000	メタクル酸メチル	S55.2	H29.8	底板溶接線補修	水張検査後にバキューム検査を実施したところ、底板治具跡の溶接線に溶接欠陥が見つかった。溶接欠陥は製作時の治具跡補修時にできたブローホールが経年使用によって貫通したものと推測する。(水張検査後のタンク内部目視点検時に当該治具跡付近に付着物があることに違和感を覚え、バキューム検査を実施したところ、溶接欠陥であることが判明。)	他治具跡についてPTを行い、異状のないことを確認した。当該溶接欠陥部は肉盛補修後、PT及びバキューム検査にて異状がないことを確認した。
6	30,000	重油	S54.8	H28.9	内タライ、アニュラ相互、溶接線補修及び底板全面更新、側板最下段底板搬入用開口部設置	水張検査の水張中、側板より漏水があった。 位置:底板より17.41m タンク内面、泡消火配管ノズル直下の中間スティフナー上部腐食による開孔 1c m×2cm (17.538m/30,000kl)	類似箇所5箇所の目視及び肉厚測定を実施したが、異常な減肉は無かった。当該箇所をはめ板補修し、完成検査前検査及び水張検査にて異状が無いことを確認した。
7	124,959	原油	S53.8	H19.7	側板ノズル出し、内タライ、アニュラ相互溶接線補修及び浮き屋根更新	側ノズル(16B)の補強板隅肉溶接部に割れを検出した。	欠陥除去後、再溶接を行い、MT・PTを実施し、異常がないことを確認した。
8	510	有機液	S46.4	H27.11	側板下部500mm切断	当該タンクの改造工事を終え、消防検査(満水検査)のため水張りを実施。タンク上部に繋げたホースからの水流出により満水を確認後、水張りを停止したが、サイフォン現象によりオーバーフローし続けてタンク内が減圧となりタンク上部が変形した。	タンク上部更新。
9	400	ジメチルホルムアミド	S51.3	H29.9	側板肉盛補修及び底板当板補修	水張り検査前、変更許可申請以外の小口径ノズルは再塗装を実施していた。塗装の塗膜で水張り検査時漏洩はなかったが、実液を張り込んだ際、実液で塗膜が溶け、変更許可申請以外の小口径ノズルから、微漏洩した。	基本的に、全面プラストし再塗装する際、許可申請以外の小口径ノズルも未塗装で水張り検査を受検する。(市の消防局と個別相談)
10	276	伸展油、 老化防止剤等	H11.3	H11.8	屋外貯蔵タンクの新設(設置)	当該タンクは、5つの室に仕切った5分割タケであり、1室ずつ水張検査を行っていたところ3室目に水を張った際、タンクが変形した。水張検査を行う事でタンクの仕切板、側板等の強度不足が顕在化した。	タンクの仕切板、側板を補強後、再度水張検査を行い漏れ変形がないことを確認した。
11	185	クエンチオイル (重質油)	S42.8	H18.1	天板全面および側板部分更新	溶接後のMT検査で不具合は見つからなかったが、水張り時に天板とトップアングルの溶接線から滲み漏れが発生した。	当該部の溶接補修後、再度MT検査を実施、問題ないため水張り試験を行い、異常はなかった
12	-	-	-	-	水張り検査全般	水張りによりCS製タンクで錆びが生じる、使う水(工業用水)によって泥が溜まるので、再洗浄が必要。	-

(4) 受払い回数

受払い回数は、タンクごとに1年間に行った内容物の受入れ・払出しの回数を調査した。

業態別でみると、製油所、油槽所、石油化学が多く、電力、備蓄基地が少ない傾向となっている。一方、同じ業態でも、個別のタンクごとのばらつきは大きく、例えば製油所、油槽所、石油化学の中にも受払い回数が少ないものもある。

このように業態ごとの主なタンク運用（一時受け用、備蓄用等）の違い等によるものと考えられる受払回数の傾向の違いも見られるが、同業態の中でも個別のタンクにより大きく異なっていることが分かる。

このため、危険物の受払いに伴うタンク部材の疲労を考える場合には、個別のタンクの実績をベースとすることが適当と考えられる。

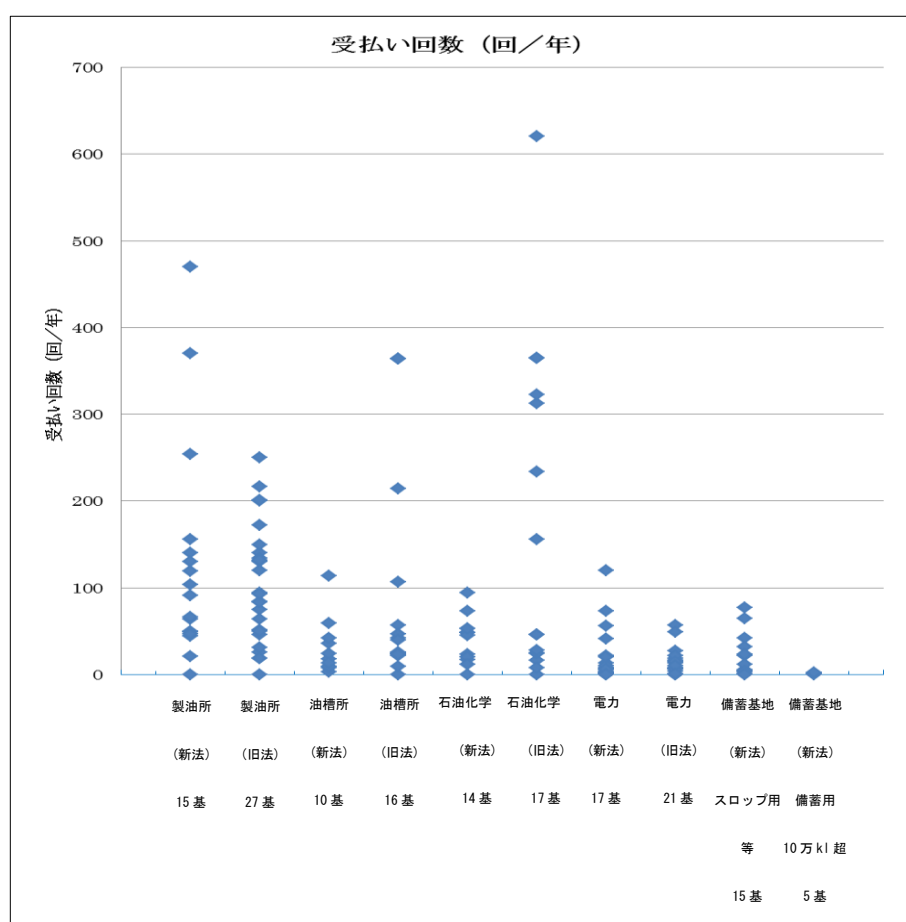


図 2.3 業態別受払い回数 (回/年)

(5) 地震動の影響

震度6弱相当以上の地震を経験したタンクは、回答のあった157基中15基であった。

全国的に大規模地震の発生が懸念されるところであり、地震動の影響に伴うタンク部材の疲労も考慮する必要があると考えられる。また、評価する上では、個々のタンクごとに過去の被災状況を含めて検証する必要があると考えられる。

表 2.4 震度 6 弱相当以上の地震を経験したタンク

No.	地震被災回数	タンク所在地	業態	適用法令	容量区分 (kl)	受払い回数 (回/年)	1回の受払い量 (最大数量に対する割合%)		
1	1	大阪	石油化学	旧法	1万～5万	24	10	～	70
2	1	大阪	石油化学	新法	1万～5万	73	10	～	80
3	1	不明	電力	新法	1千～5千	0	0	～	0
4	1	不明	電力	新法	5万～10万	56	1	～	25
5	1	不明	電力	新法	5万～10万	20	6	～	20
6	1	茨城	製油所	新法	1千～5千	119	11	～	72
7	1	茨城	製油所	新法	5千～1万	64	3	～	46
8	1	茨城	製油所	新法	1万～5万	49	8	～	85
9	1	茨城	製油所	新法	5万～10万	156	1	～	59
10	1	茨城	製油所	旧法	1千～5千	83	16	～	49
11	1	茨城	製油所	旧法	5千～1万	217	2	～	81
12	1	茨城	製油所	旧法	1万～5万	134	3	～	69
13	1	茨城	製油所	旧法	5万～10万	93	10	～	34
14	1	茨城	製油所	旧法	10万KL超	201	2	～	74
15	1	不明	油槽所	新法	1千～5千	36	20	～	70

2. 4 シミュレーションによる評価手法の検討

屋外貯蔵タンクの溶接補修後において漏れが発生する場合は、タンクを液体で満たした際に、溶接補修で生じた欠陥部に応力が集中して割れが進展し、開口部が生ずるに至るものと考えられる。

溶接構造物の健全性を評価する方法として WES2805 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法に基づく溶接欠陥評価の適用検討があり、低温貯槽、船舶、海洋構造物、パイプライン等において活用された実績を有している。WES2805 では、溶接構造物一般を対象として、構造的に不連続となる部分（溶接継手の割れ等）が疲労によって進展し、ぜい性破壊に繋がるかについて評価する手法が規定されている。

本検討会では、本規格を屋外貯蔵タンクの溶接補修部の評価に適用することができるか否かについて、その妥当性や適用する際の条件設定等について検討した（参考資料 2-2 参照）。

2.4.1 WES2805 の概要

図 2.3 に、WES2805 に基づく溶接欠陥の評価フローを示す。

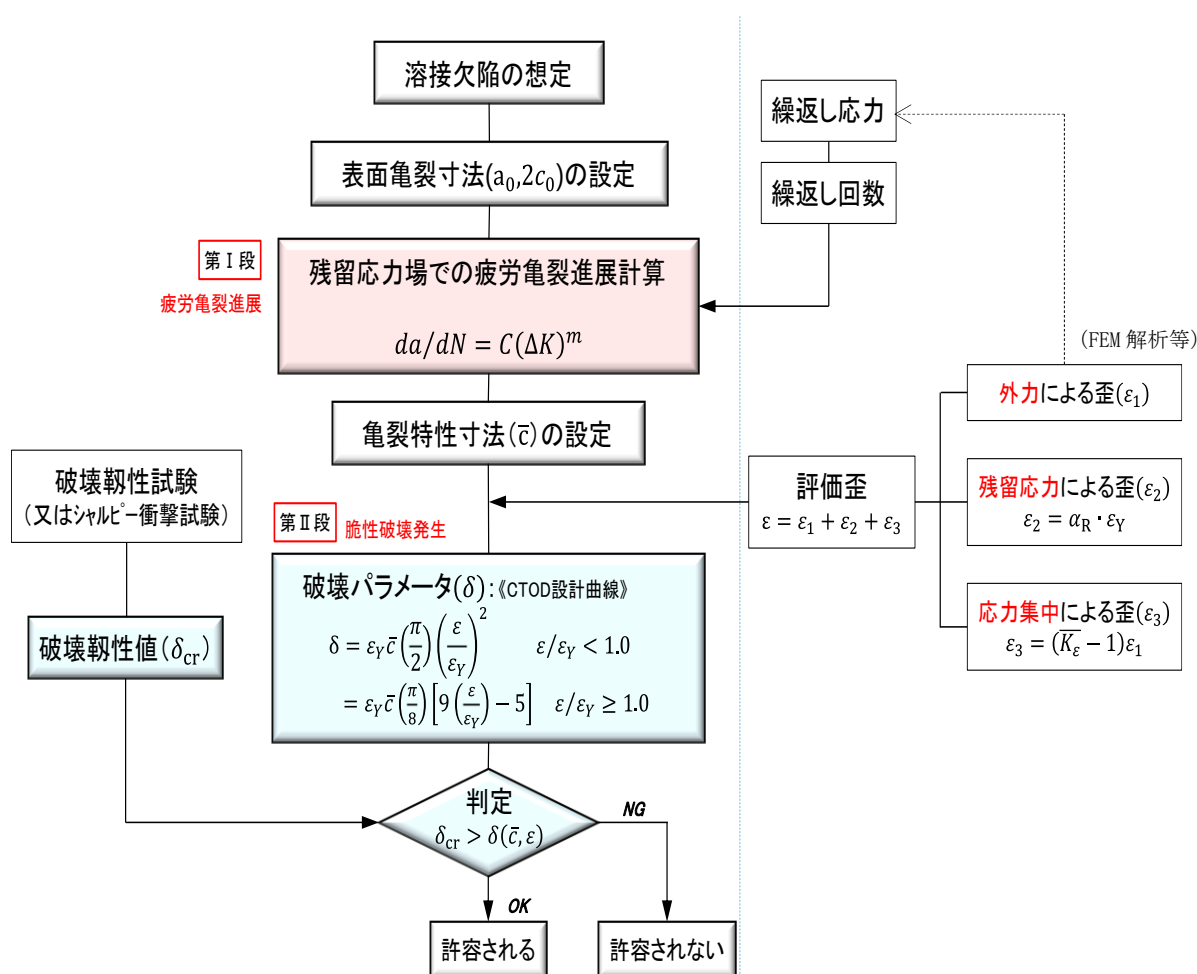


図 2.3 WES2805 に基づく溶接欠陥の評価フロー

2.4.2 屋外貯蔵タンクの評価に供する際の計算条件の設定

WES2805 は溶接構造物一般の評価方法であり、屋外貯蔵タンクの評価に供するに当たり、タンクの設計・施工や運用に即した計算条件を設定することが必要となる（図 2.3 参照）。

ここでは、個別のタンクに固有の計算条件（板厚等）を除き、タンク全般に共通的な計算条件を検討した。

なお、現時点において、重ね継手については、WES2805 の評価に用いることのできる簡便かつ合理的な破壊力学的モデルが見当たらないことから、今回のシミュレーションの対象外とした。

（1）表面亀裂寸法

「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 日消防第 93 号）により、タンク底部溶接部の試験結果の評価について以下のとおり示されている。

底板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 1.5 mmを、長さが 4.0 mm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については、深さが 3.0 mmを、長さが 6.0 mmをそれぞれ超えないものであること。

このことを踏まえ、今回のシミュレーションでは、上記寸法の欠陥を想定するとともに、寸法に係る計算上の感度をみるため、長さが2倍・3倍の欠陥を想定して計算を行う。

(2) 評価歪み ε の設定 (参考資料 2-2 6.3.2 参照)

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

ここに、 ε_1 : 境界力 (外力) による歪

ε_2 : 残留応力による歪

ε_3 : 応力集中による歪

① 外力による歪(ε_1)

屋外貯蔵タンクの底部に作用する外力として、底板部には内容液の受入れ・払出しにより発生する応力、隅角部には大規模地震時に発生する応力を設定した。評価には、有限要素法(FEM)による数値解析を用いるものとした。図 2.8 に、隅角部に用いる軸対称シェル要素解析による一例を示す。

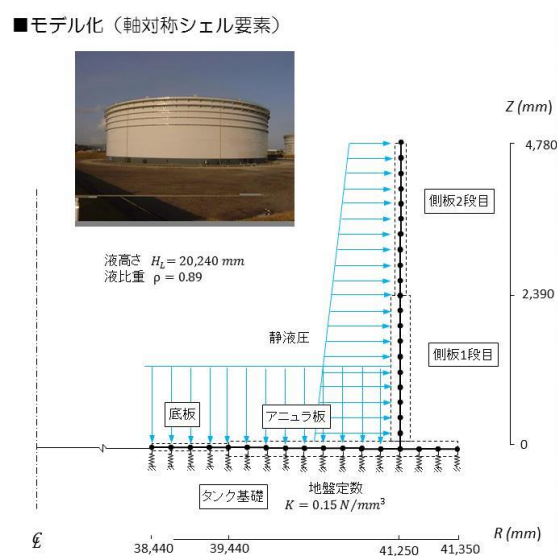


図 2.8 軸対称要素による解析モデルの一例

② 溶接残留応力による歪(ε_2)

屋外貯蔵タンクの溶接継手部に生じる残留応力の大きさ・分布を知るためには、有限要素法による熱弾塑性解析等の適用が考えられるが、計算に多大な労力を必要とするなど実用的でないことから、本検討では、WES2805 に示されている残留応力の取扱い方法に従って、溶接線近傍の溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力が存在した場合の評価を行うものとした。

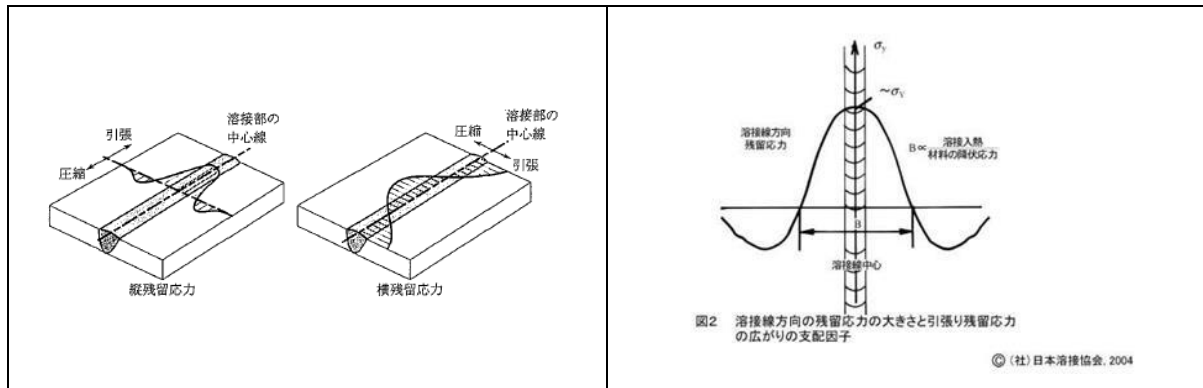


図 2.9 溶接継手の残留応力分布

③ 応力集中による歪(ε_3)

屋外貯蔵タンクの溶接継手に存在する亀裂に対しては、評価において歪み集中を考慮する必要がある。

タンク底板相互の溶接継手では、溶接線と亀裂長さ方向との関係で次の 3 種類、タンク隅角部近傍の溶接継手では側板×アニュラ板のすみ肉溶接継手とアニュラ板相互、アニュラ板×底板の 3 種類の形態が考えられる。

ここでは、WES2805 の規定が、米国の石油タンクの材料や設計などを規定する規格である米国石油協会規格 API Standard 650 Appendix M 「Requirements for Tanks Operating at Elevated Temperatures」 に規定される値と概ね一致することを確認した。このため、WES2805 の規定に従って評価を行うものとした。

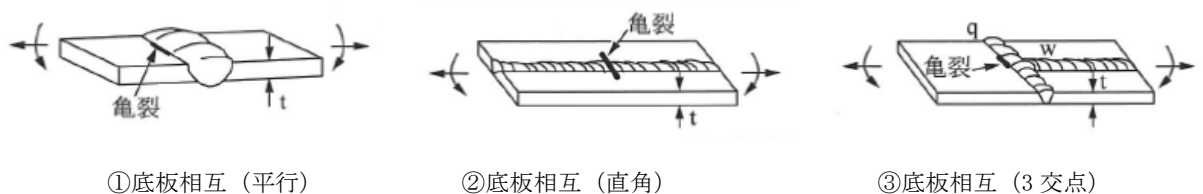


図 2.10 表面亀裂を有する底板溶接継手（突合せ）

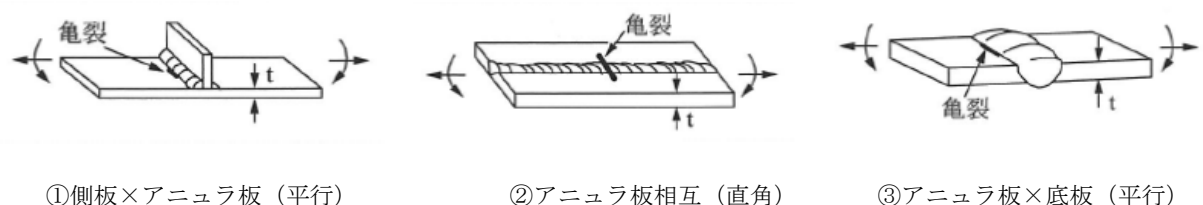


図 2.11 タンク隅角部の溶接継手形式

(3) 繰り返し応力（照査荷重）

① 危険物の受払いに伴う応力

底板部の評価は、実タンクに想定される底板の変形として、米国石油協会規格 API Standard 653 「Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction」に規定される底板の初期不整と局部沈下を考慮し、内容液の受払い（空～満液）による底板の歪振幅に対する評価を行うものとした。なお、受払い回数については、2.3（4）から個別のタンクの実績をベースとすることが適当と考えられる。

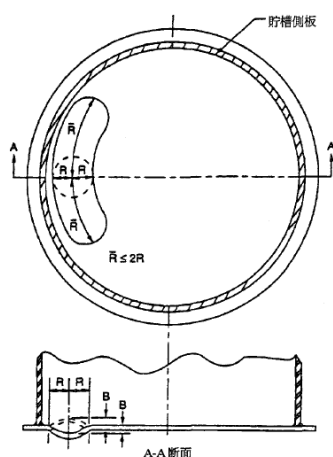


図 B-7 側板近くの底板沈下

【タイプ A】

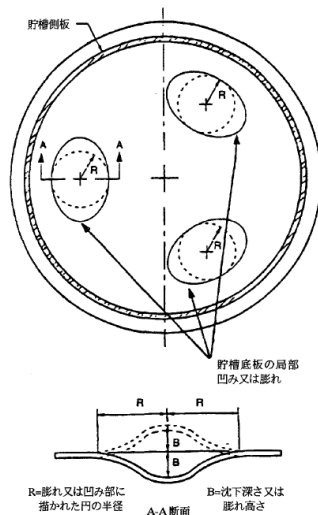


図 B-8 側板から離れた底板局部凹み又は膨れ

【タイプ B】

図 2.12 API653 による底板局部沈下

表 2.5 底板の照査荷重条件

【通常時】 初期凸状変形を有する底板	【通常時】 基礎不支持域を有する底板
不陸高さ（B）を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価 $y = B \left\{ \left(\frac{x}{R} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{R} \right)^2 + 1 \right\}$ (a) 初期凸状変形を有する底板	基礎沈下深さ（B）を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価 (b) 基礎不支持域を有する底板

② 地震に伴う応力

全国的に大規模地震の発生が懸念されていることを勘案すると、実際に水を張って確認することなく計算により評価を行おうとするに当たり、2.3（5）で述べたとおり地震動の影響を含め多角的に評価を行うことが適当である。

地震に伴い大きな応力のかかるタンク隅角部については、特定屋外貯蔵タンクの耐震基準において、地震の影響による必要保有水平耐力以上であることとなっていることから、今回のシミュレーションでは保有水平耐力の評価における、大規模地震時のタンク隅角部の浮上り挙動による終局浮き上がり変位に対する評価を行うものとした。

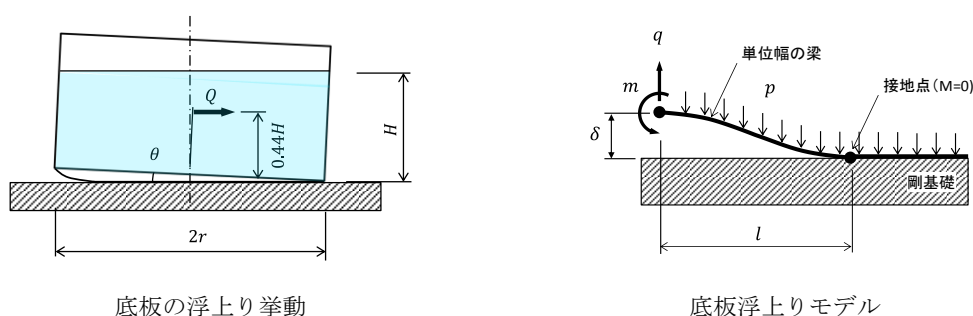


図 2.13 タンク底板浮上り挙動

荷重の繰返し回数については、既往の調査検討において、大規模地震時のタンク隅角部底板の浮上り挙動の繰返し回数を 100 回に設定しており、今回の調査検討においても継続的な観点から、大規模地震時のタンク隅角部浮上り挙動に対する荷重繰返し回数 100 回を採用した。

表 2.6 照査用荷重条件

タンク隅角部の浮上り	浮上り変位
	告示第 79 条に基づき、タンク隅角部浮上り終局変位δ_Bを設定 ・$\delta_B = 14\delta_y$ (軟鋼) ・$\delta_B = 4\delta_y$ (高張力鋼) 但し、$\delta_y = \frac{3 t_a \sigma_y^2}{8 E p}$ $q_y = \frac{2 t_a \sqrt{1.5 p \sigma_y}}{3}$

(4) 屋外貯蔵タンクで使用する鋼板の破壊靱性値 δ_{cr} の設定（参考資料 2-2 7 参照）

本評価手法では、亀裂の寸法や歪みから得られる破壊パラメータ $\delta(\bar{c}, \varepsilon)$ （亀裂進展開口変位：CTOD）が、材料の破壊靱性値 δ_{cr} （限界 CTOD）より小さければ、その欠陥は許容されると判断する。

$$\delta_{cr} > \delta(\bar{c}, \varepsilon)$$

ここでは、実機タンクの底板及びアニュラ板に使用される一般構造用鋼板 SS400、压力容器用鋼板 SPV490Q 及び溶接構造用鋼板 SM490 について、シャルピー衝撃試験の結果より破壊靱性値 δ_{cr} を推定し、下記①～③により評価を行うものとした。

なお、JIS B 8501:2013「鋼製石油貯槽の構造（全溶接製）」より、設計最低メタル温度は、設計最低使用温度（その貯槽が設置されている地域のできるだけ長期間にわたる 1 日平均気温の記録の中から、最も低い日の気温を求め、それに 8℃を加算した温度）又は水張試験時の水温のうち、いずれか低い方の温度に等しいメタル温度と規定されていることから、設計最低メタル温度は 0℃と仮定した。

- ① 一般構造用鋼板 SS400 : $\delta_{cr} \cong 0.346mm (0^\circ C)$
- ② 压力容器用鋼板 SPV490Q : $\delta_{cr} \cong 0.356mm (0^\circ C)$
- ③ 溶接構造用鋼板 SM490 : $\delta_{cr} \cong 0.364mm (0^\circ C)$

2.4.3 ケーススタディ：試験片を用いた疲労試験との比較（参考資料 2-2 6.2.3 参照）

屋外貯蔵タンクへの適用性やシミュレーションの特性等を確認するため、既往の調査検討「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」（消防庁 平成 10～11 年度）で実施した底板突合せ継手疲労亀裂進展性試験のうち、曲げ疲労試験結果との比較検討を行った。

(1) 既往の曲げ疲労試験

既往の調査検討では、初期亀裂を有する底板の突合せ継手を想定し、放電加工による人工的な欠陥を入れた試験片に対し、4 点曲げ疲労試験を実施している。なお、既往の調査検討「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」（消防庁 平成 10～11 年度）においては空満繰返し回数 18.5 回/年等より、底板に対する荷重繰返し回数を 1,000 回（設計寿命 50 年）」に設定している。



図 2.4 初期欠陥（人工欠陥）

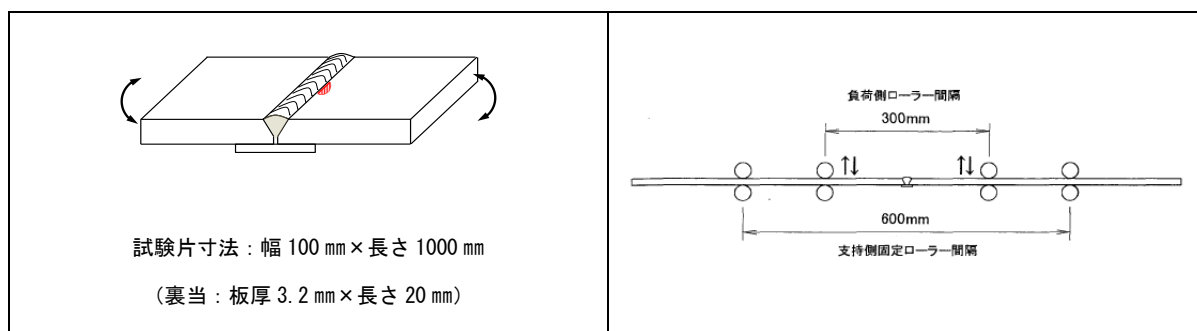


図 2.5 4点曲げ試験片

(2) 計算結果との比較

疲労亀裂進展解析は、太田らの提案した設計疲労亀裂伝播曲線（図 2.6）に示す 99.5%信頼限界（WES2805 の最安全側）と下限側の材料定数を用いて実施した。

その結果、疲労亀裂進展解析において、太田らの設計疲労亀裂伝播曲線に示す回帰曲線（中間値）又は下限側の材料定数を用いた場合と良く一致し、更に、99.5%信頼限界の材料定数を用いた場合には、全て安全側の結果を示すことが確認された。

以上より、WES2805 の適用に際しては、最安全側である 99.5%信頼限界の材料定数を用いることにより、疲労破壊に対して十分な安全性を確保できるものと考えられる。

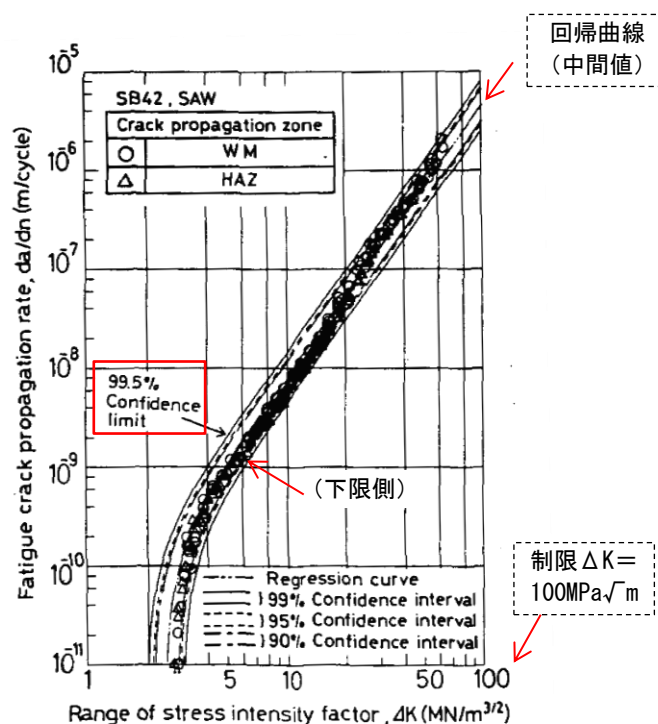


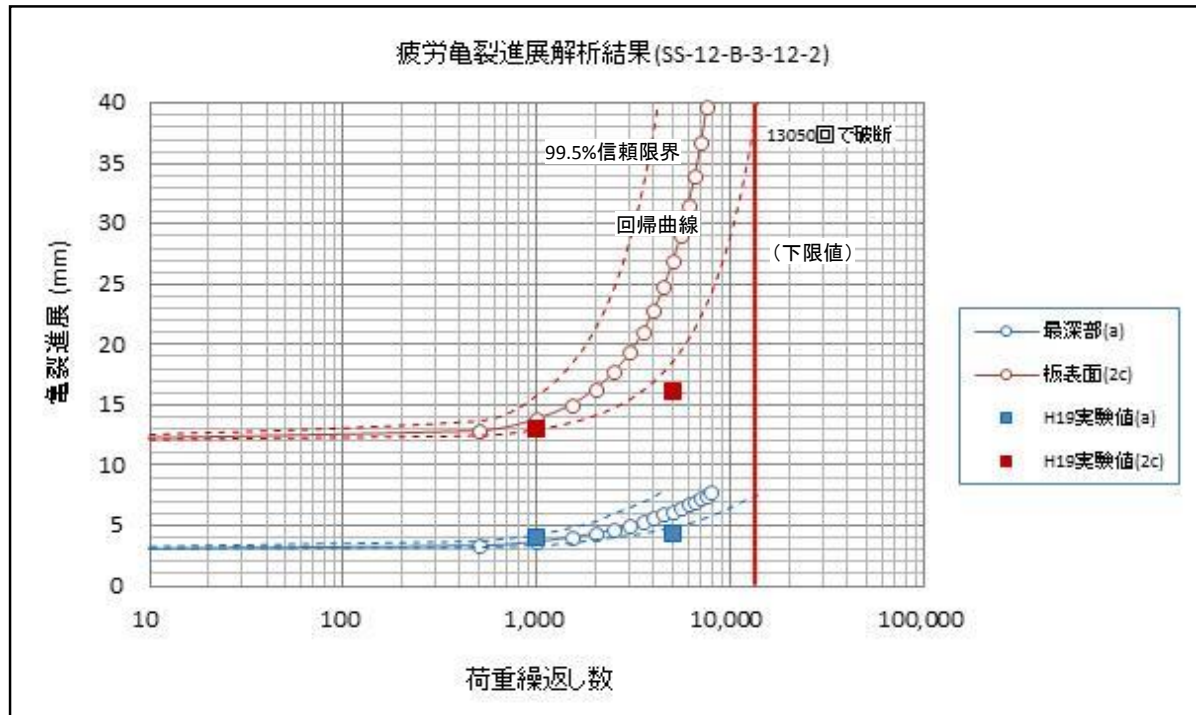
Fig. 1 Effect of Crack Propagation Zone on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

図 2.6 疲労亀裂進展速度の実験結果

表 2.7 材料定数（試験結果）

	C値	m値	ΔK_{th}
99.5%信頼限界	2.60×10^{-11}	2.75	2.00
回帰曲線	1.45×10^{-11}	2.75	2.40
（下限側）	(0.8×10^{-11})	2.75	(3.0)

○解析結果の一例



【結果】破断回数 $N_f = 13,050$ 回（溶接止端部で破断）

図 2.7 板厚 12 mm、初期亀裂(3 mm×12 mm)の解析結果

過去の板厚 12 mm、初期亀裂 3 mm×12 mmの試験片の 4 点曲げ疲労試験（図 2.7）では、荷重繰返し回数 13,050 回で突合溶接継手の溶接止端部より破断（図中赤実線）した。本解析手法における、下限側の材料定数を用いた場合（赤点線）と良く一致している。

2.4.4 ケーススタディ：初期不整又は局部沈下を有する底板への適用

（1）解析条件

荷重の繰返し回数（受払い回数）については、既往の調査検討「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」（消防庁 平成 10～11 年度）において、底板に対する荷重繰返し回数を 1,000 回（設計寿命 50 年）」に設定しており、今回のシミュレーションにおいても、通常運転時の荷重繰返し回数を 1,000 回と仮置きした。

(2) 解析対象タンク

表 2.8 に、解析対象タンクを示す。

表 2.8 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	底板			備考
						材質	板厚	継手	
新法	110.000	82,000	24,000	21,000	1.0	SS400	12 mm	突合せ	検討対象

(3) 解析モデル

材料及び幾何学的非線形性を考慮した解析では、表 2.9 に示す 3 種類の不陸範囲 R (半幅) を設定した。

表 2.9 不陸高さと不陸範囲

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸高さ B (mm)	備考
1	500	30.83	$\frac{B}{2R} \cong 1/32$
2	1,000	61.66	
3	1,500	92.49	

図 2.15 に初期不整（凸型変形）を有する底板の要素分割図を、図 2.16 に局部沈下（凹型変形）を有する底板要素分割図を示す。

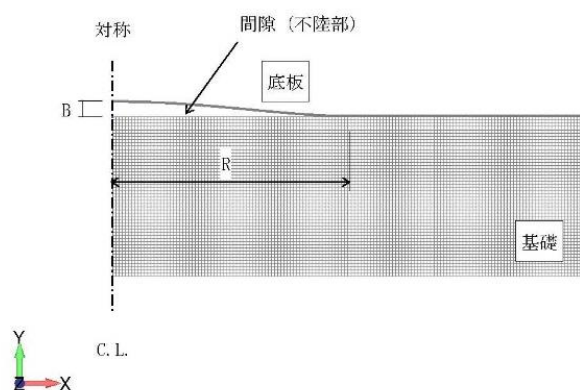


図 2.14 要素分割図（初期凸型変形を有する底板）

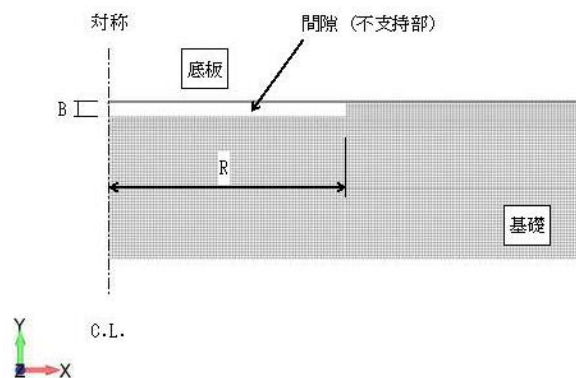


図 2.15 要素分割図（基礎不支持域を有する底板）

（４）検討結果

① 初期不整（凸型変形）を有する底板の検討結果

検討結果の一例として不陸範囲 $R=1,500$ の結果を示す。

ア 疲労亀裂進展解析結果

初期不整（凸型変形）を有する底板の場合、溶接線近傍の表面亀裂については、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し回数（想定 1,000 回）に対して、表面亀裂の進展は殆ど認められない。

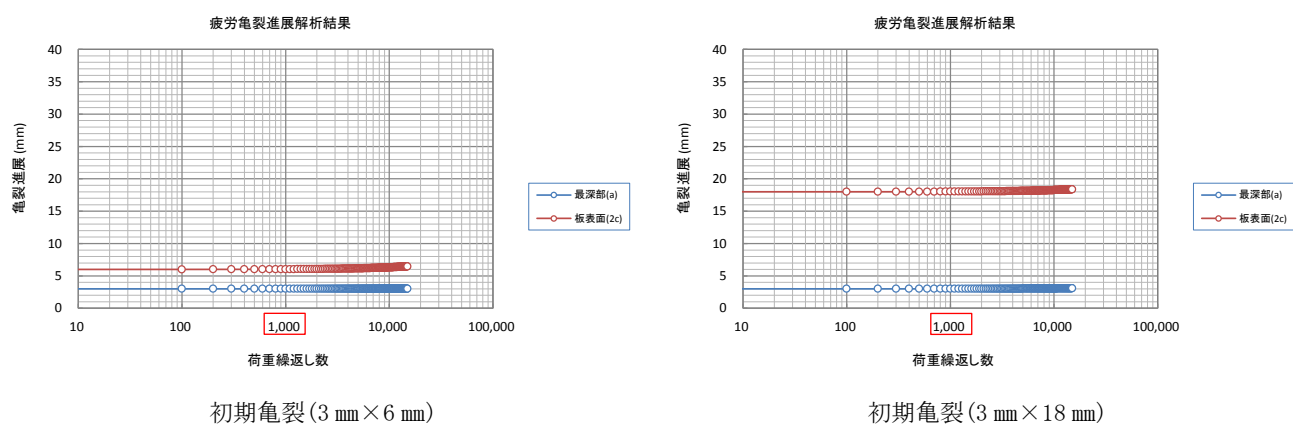


図 2.16 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 $R=1,500$ mm）

イ 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

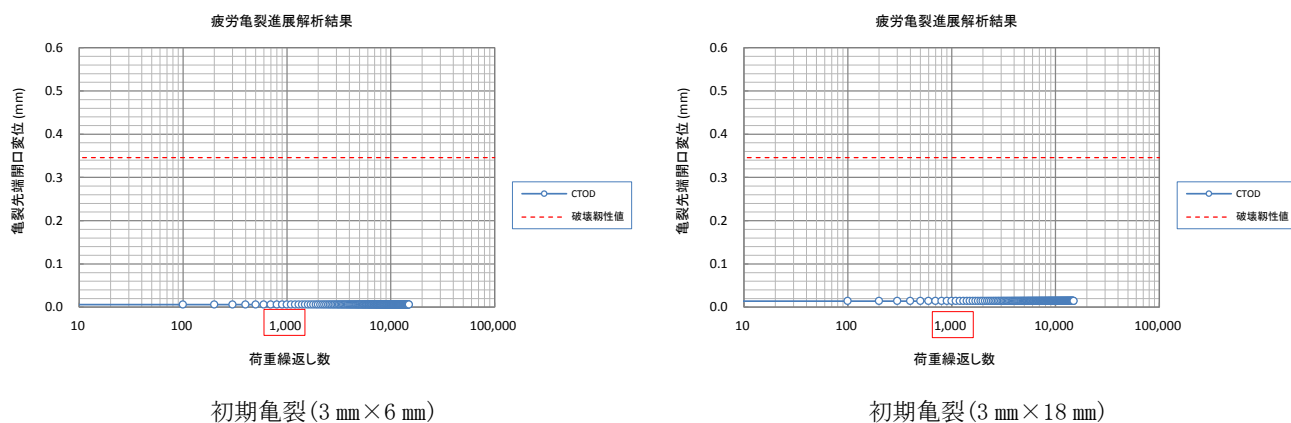


図 2.17 亀裂先端開口変位（不陸範囲 R=1, 500 mm）

ウ 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

検討結果より、底板の突合せ溶接継手に亀裂深さ 3 mm、亀裂長さ 6 mm～18 mm の半楕円表面亀裂を想定した場合、最大歪み（ $\varepsilon_{\max}=0.074\%$ ）における脆性破壊発生に対して 20 倍程度以上の余裕度（＝限界 CTOD／CTOD）を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は極めて小さいと判断される。

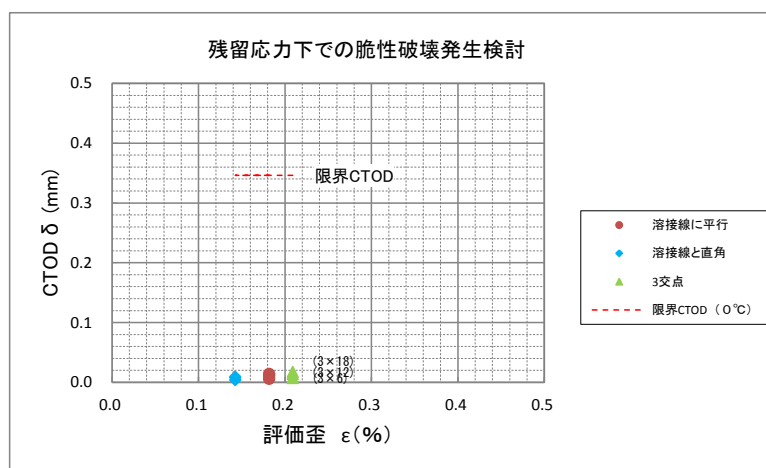


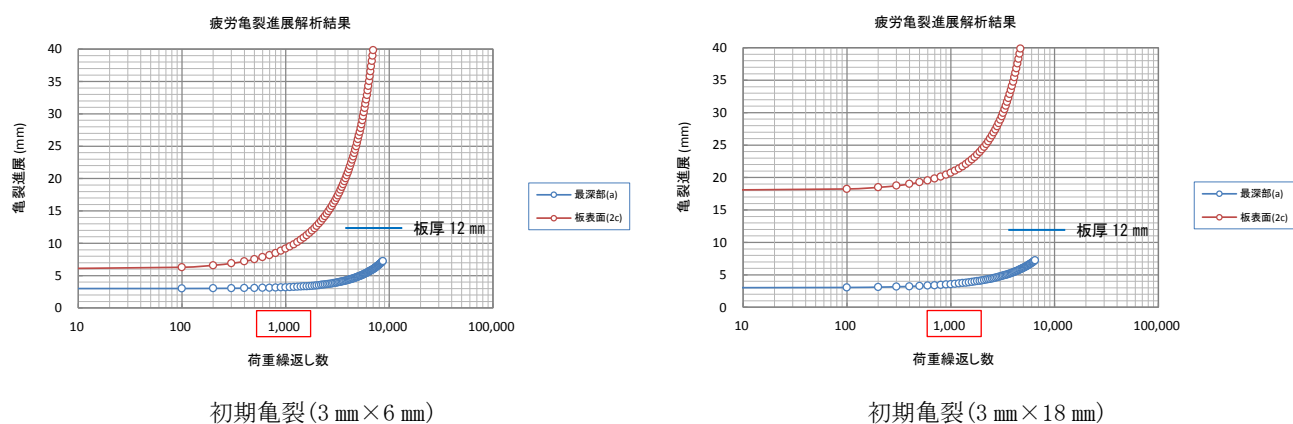
図 2.18 脆性破壊発生検討結果（不陸範囲 R=1, 500 mm）

② 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果

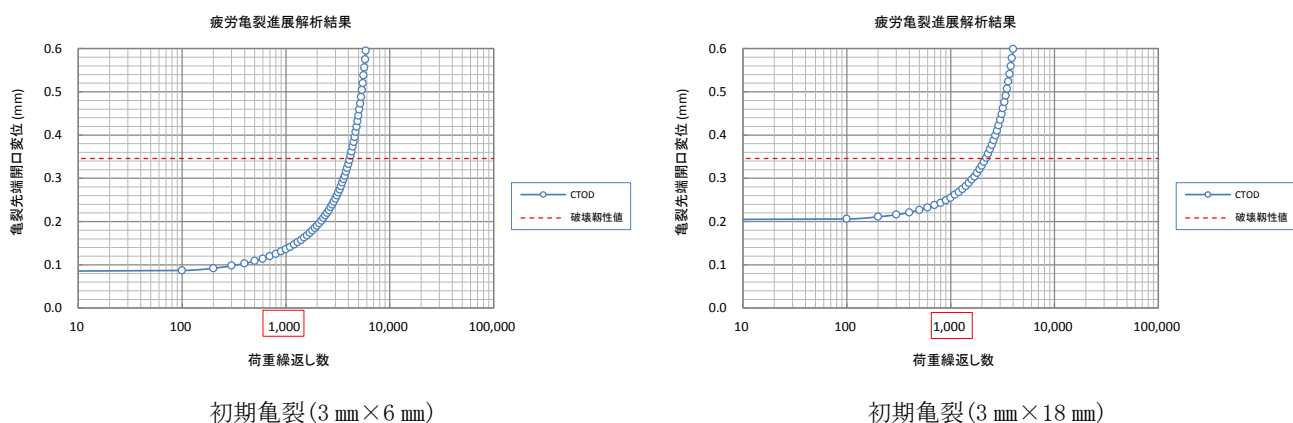
検討結果の一例として不陸範囲 $R=1,500$ の結果を示す。

ア 疲労亀裂進展解析結果

局部沈下（凹型変形）を有する底板の場合、溶接線近傍の表面亀裂については、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し回数（想定 1,000 回）に対して、表面亀裂の進展は殆ど認められない。



イ 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



ウ 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

検討結果より、底板の突合せ溶接継手に亀裂深さ 3 mm、亀裂長さ 6 mm～18 mm の半楕円表面亀裂を想定し、液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し（1,000 回程度）を受けた場合、疲労亀裂進展後の脆性破壊発生に対して、最も厳しい条件下においても 1.3 倍程度以上の余裕度（＝限界 CTOD / CTOD）を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は小さいと判断される。

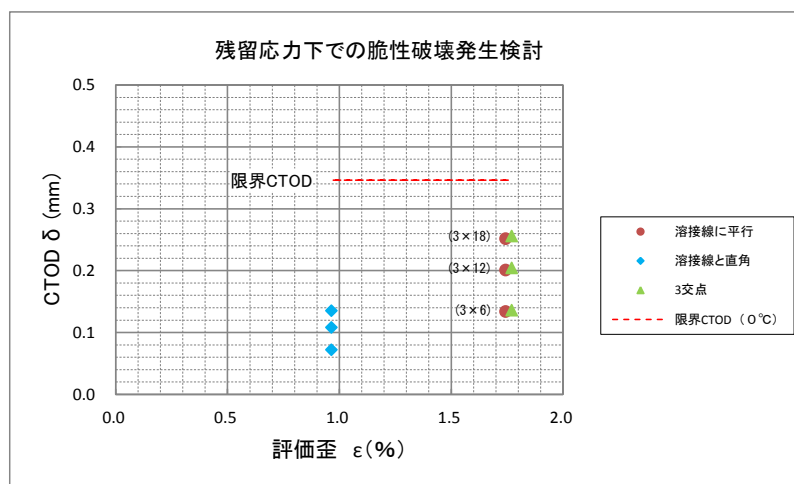


図 2.21 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1, 500 mm）※亀裂進展後

③ 供用期間中の受払回数（推定）

本検討では、荷重の繰返し回数を一律 1,000 回（設計寿命 50 年）と仮置きして、タンクの安全性に対する評価を行ったが、実際の受け払いの状況（図 2.3）を考慮すると、タンク個別に運用状況（受払回数）に基づく荷重繰返し回数を設定して、疲労亀裂の進展性及び脆性破壊発生に対する評価を行うことが合理的であると考えられる。

2.4.5 ケーススタディ：大規模地震時のタンク隅角部への適用

（１）照査荷重

大規模地震時には、タンクの隅角部が基礎面から浮き上がる現象を繰り返すことにより、当該隅角部のすみ肉溶接部から亀裂が進展し、破損にいたるおそれがあると考えられている。本検討では、消防法で規定される大規模地震時のタンク隅角部の浮上り挙動に対する保有水平耐力の評価における、終局浮き上がり変位に対する評価を行うものとした。

（２）解析対象

解析対象タンクとアニュラ板の浮き上がり変位量を示す。

表 2.10 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)			終局変位 δ_B (mm)	備考
							底板	アニュラ板	側板		
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6	6	18	67.9	$\delta_B = 14\delta_y$
新基準	9,900	29,000	16,730	15,000	1.0	SS400	6	9	18	93.6	"
新法	18,200	34,500	22,695	19,470	1.0	SM490C	9	12	20	169.2	$\delta_B = 14\delta_y$
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20	107.1	$\delta_B = 4\delta_y$
新法	60,000	62,800	22,000	19,800	1.0	SPV490Q	12	18	26	162.1	"
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36	178.6	$\delta_B = 4\delta_y$

底板の浮き上がりによるタンク全体の傾斜角度を示す。同図より、18,200kl タンク (材質 SM490C) を除き、全体の傾斜角度 θ は概ね同じ程度となった。

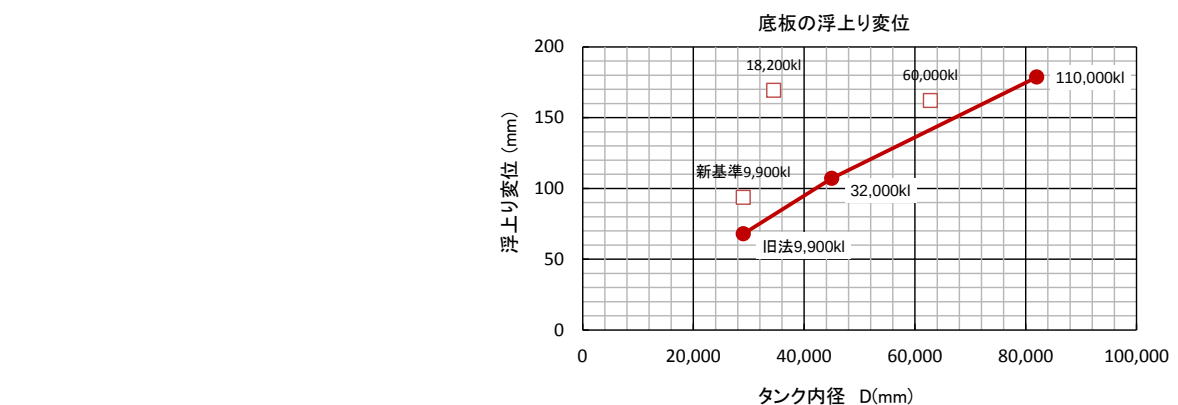


図 2.22 底板の浮上り変位

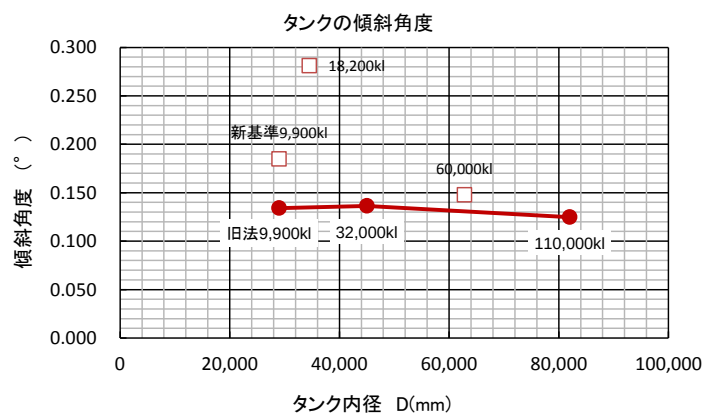
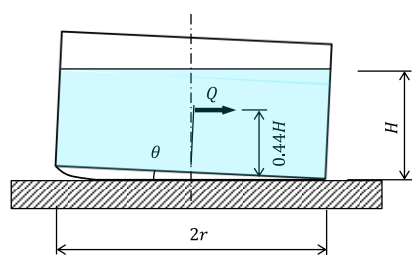


図 2.23 タンクの全体傾斜角度

(3) 解析モデル

図 2.24 に、タンク隅角部の解析モデル範囲（側部は 1,000 mm 高さ、底部は 2,500 mm 幅）を示す。



図 2.24 タンク隅角部の解析モデル

図 2.25～2.27 に、解析対象タンクの解析モデル図をそれぞれ示す。

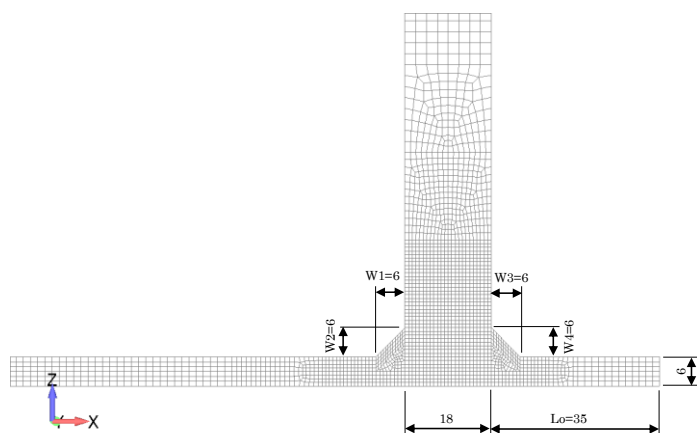


図 2.25 【旧法】9,900kl タンクの解析モデル

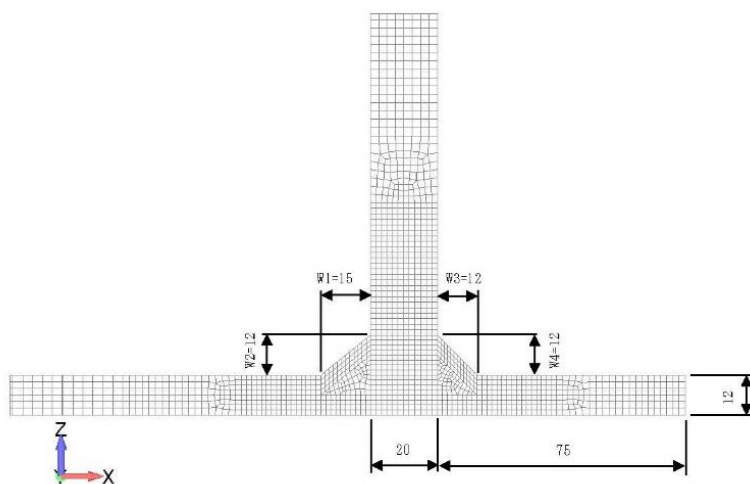


図 2.26 32,000kl タンクの解析モデル

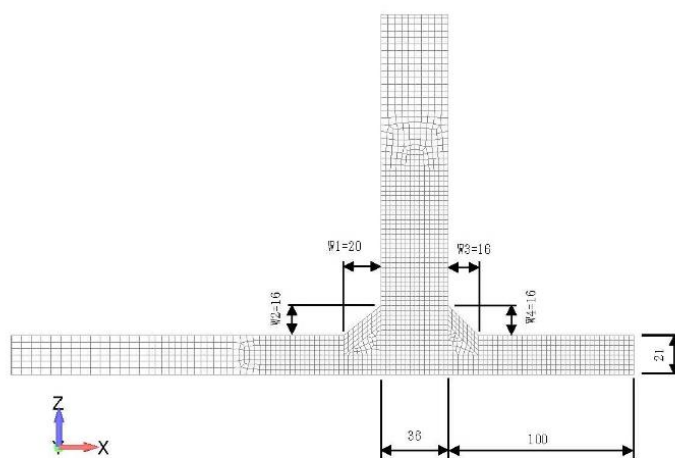


図 2.27 110,000kl タンク解析モデル

(4) 解析結果

タンク隅角部の浮上り終局変位 δ_B は、鋼材の降伏比による影響が大きいことから、解析結果については、アニュラ板の鋼種に応じて整理した。

なお、アニュラ板の鋼種に応じて次式で得られる。

- ・降伏比が 80%未満の場合 (SS400, SM490 等), $\delta_B = 14\delta_y$
- ・降伏比が 80%以上の場合 (SPV490Q 等), $\delta_B = 4\delta_y$

表 2.11 アニュラ板の降伏比

材質	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_B (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_B	備考
SS400	245	400	0.61	$t \leq 16$
SM490	325	490	0.66	$t \leq 16$
SPV490Q	490	610	0.803	

① 側板×アニュラ板溶接継手

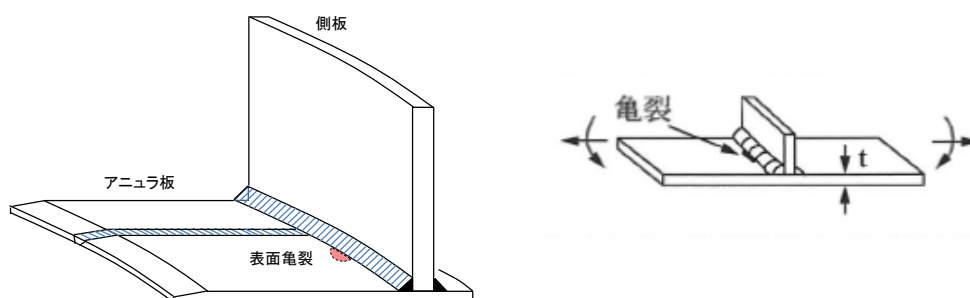


図 2.28 側板×アニュラ板溶接継手 (T 継手)

ア 降伏比が 80%未満の場合【SS400, SM490】

容量が 3 万 k l 未満程度のタンクのアニュラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400，溶接構造用鋼板 SM490 等の低強度鋼板が採用されている。

検討結果の一例として新基準 9, 900k l タンクの解析結果を示す。

a 疲労亀裂進展解析結果

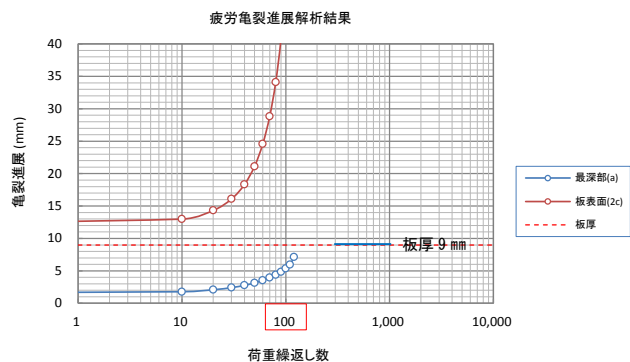
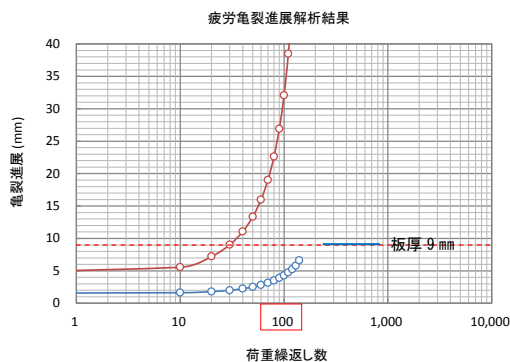


図 2.29 疲労亀裂進展解析結果（新基準 9, 900k l タンク）

【アニュラ板】材質 SS400，板厚 9 mm

b 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

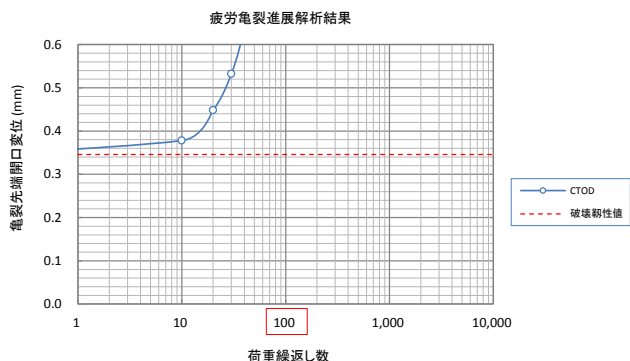
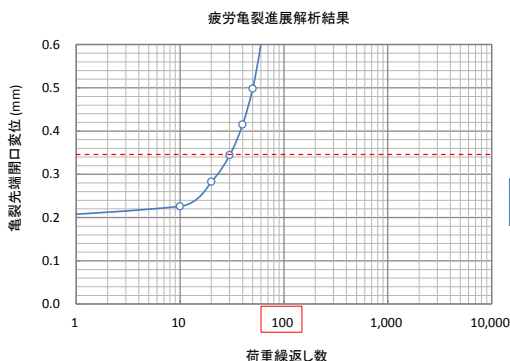


図 2.30 亀裂先端開口変位（新基準 9, 900k l タンク）

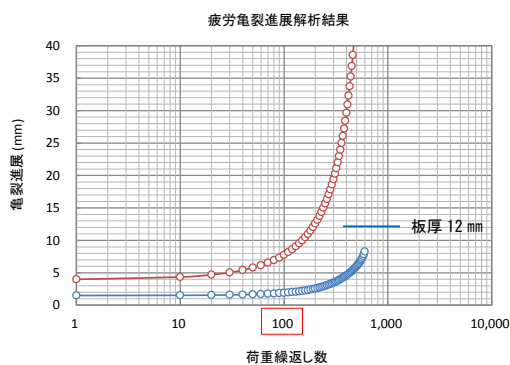
【アニュラ板】材質 SS400，板厚 9 mm

イ 降伏比が 80%以上の場合【SPV490Q】

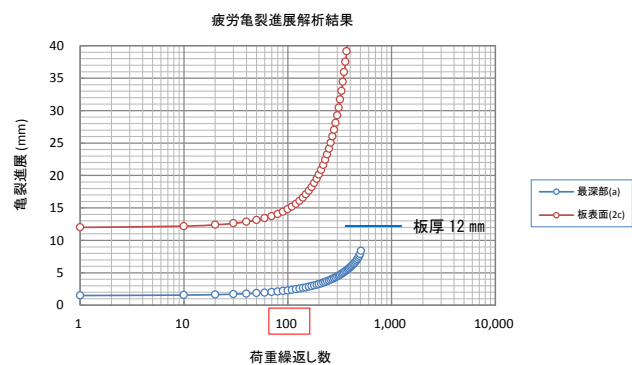
大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 SPV490Q が採用される。

検討結果の一例として新基準 32,000kl タンクの解析結果を示す。

a 疲労亀裂進展解析結果



初期亀裂(1.5 mm×4 mm)

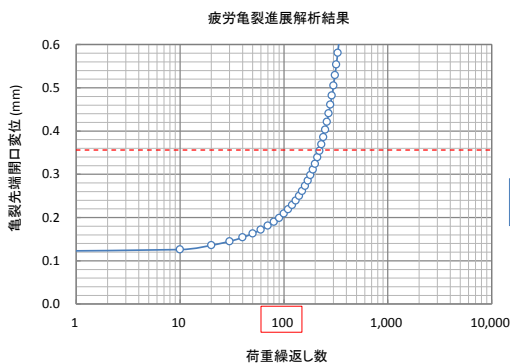


初期亀裂(1.5 mm×12 mm)

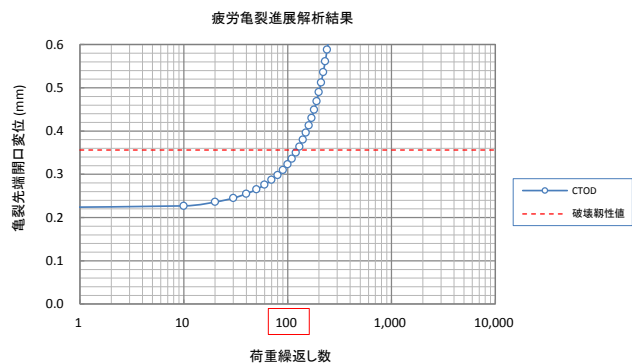
図 2.31 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12 mm

b 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



初期亀裂(1.5 mm×4 mm)



初期亀裂(1.5 mm×12 mm)

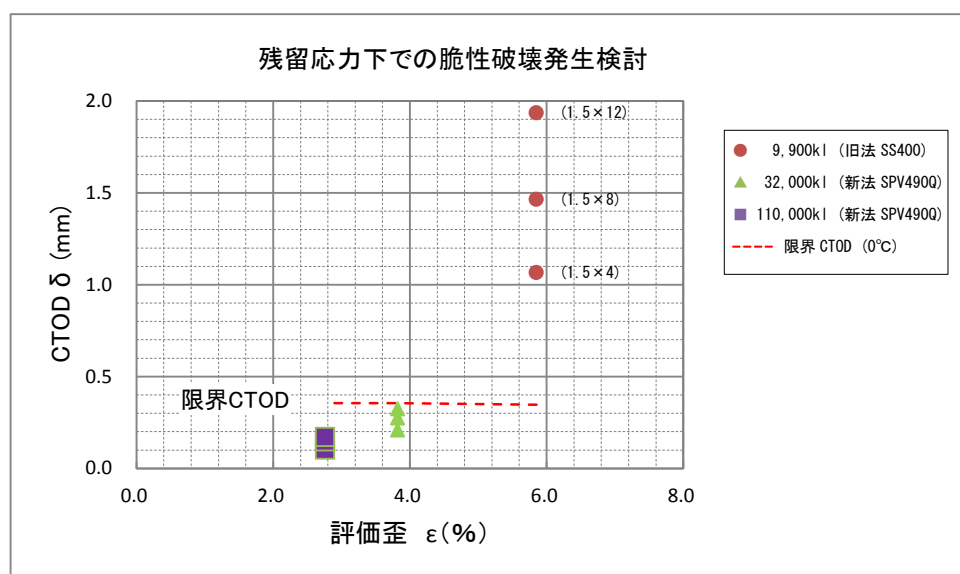
図 2.32 亀裂先端開口変位 (32,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12 mm

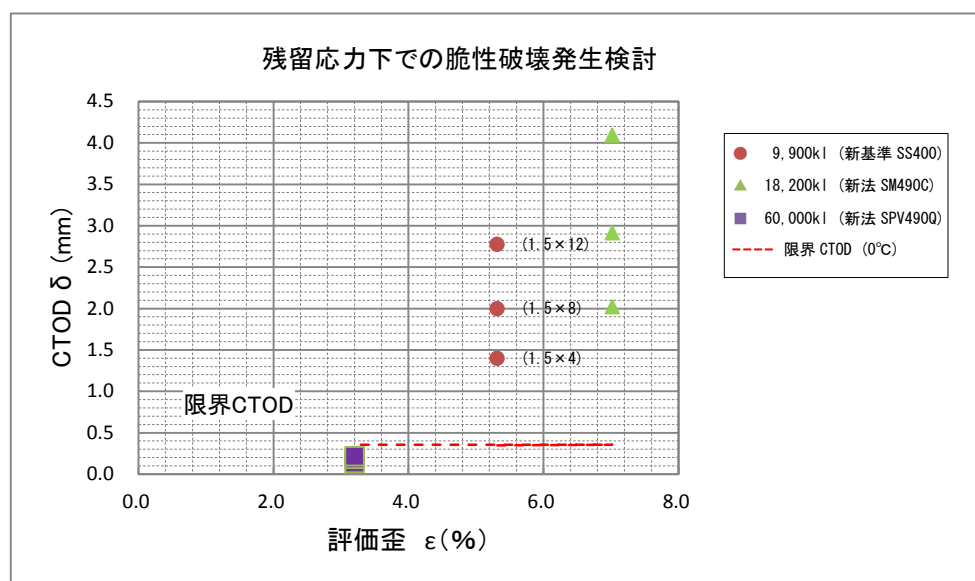
ウ 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

降伏比が 80%未満の鋼材（SS400、SM490C）を使用している【旧法】 9,900kl タンク、【新基準】 9,900kl タンク及び 18,200kl タンクでは、初期亀裂の深さが 1.5 mm で、亀裂長さが 4 mm ～ 12 mm 程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、降伏比が 80%以上の鋼材（SPV490Q）を使用している【新法】 32,000kl タンク、【新法】 110,000kl タンク及び 60,000kl タンクでは、上記の初期亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも 1.1 倍以上の余裕度を有している。



※旧法 9,900kl タンクは荷重繰返し 50 回



※18,200kl タンクは荷重繰返し 60 回

② アニュラ板相互溶接継手（突合せ）

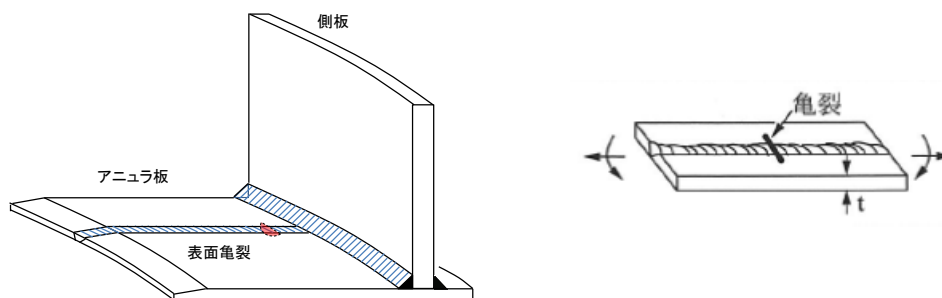
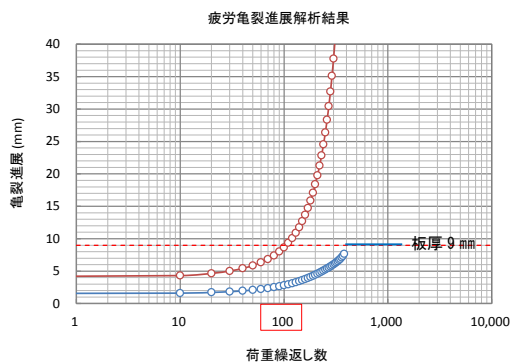


図 2.35 アニュラ板相互溶接継手（直角）

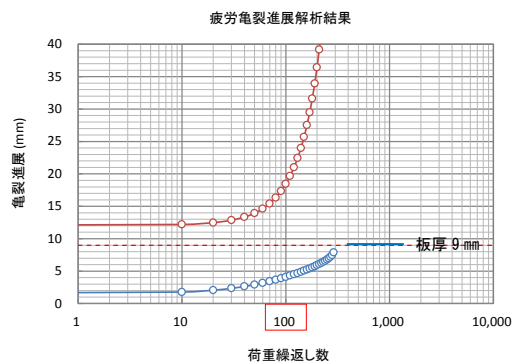
ア 降伏比が 80%未満の場合【SS400, SM490】

検討結果の一例として新基準 9,900kl タンクの解析結果を示す。

a 疲労亀裂進展解析結果



初期亀裂(1.5 mm×4 mm)

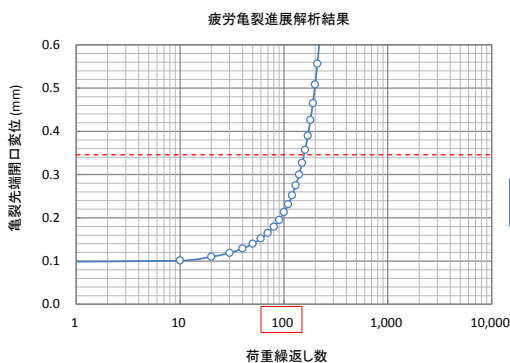


初期亀裂(1.5 mm×12 mm)

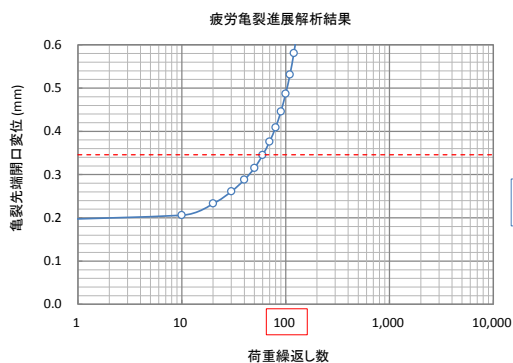
図 2.36 疲労亀裂進展解析結果（新基準 9,900kl タンク）

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9 mm

b 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



初期亀裂(1.5 mm×4 mm)



初期亀裂(1.5 mm×12 mm)

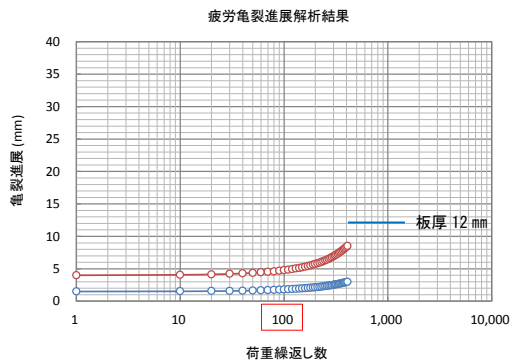
図 2.37 亀裂先端開口変位（新基準 9,900kl タンク）

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9 mm

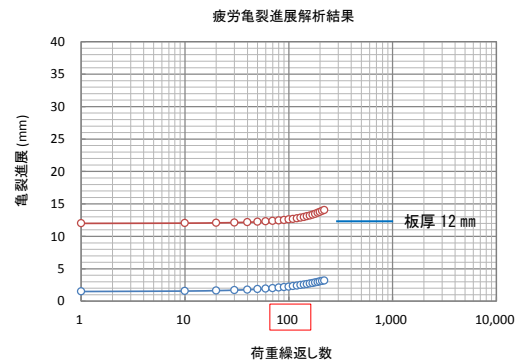
イ 降伏比が 80%以上の場合【SPV490Q】

検討結果の一例として 32,000kl タンクの解析結果を示す。

a 疲労亀裂進展解析結果



初期亀裂(1.5 mm×4 mm)

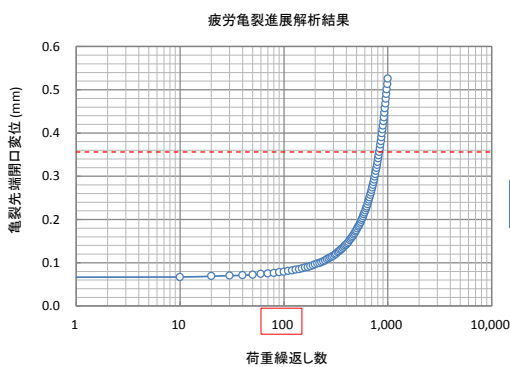


初期亀裂(1.5 mm×12 mm)

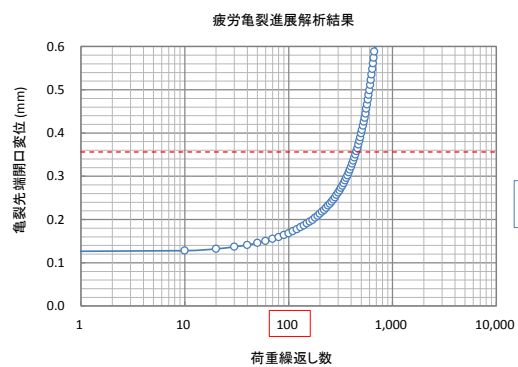
図 2.38 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12 mm

b 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



初期亀裂(1.5 mm×4 mm)



初期亀裂(1.5 mm×12 mm)

図 2.39 亀裂先端開口変位 (32,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12 mm

ウ 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

降伏比が 80%未満の鋼材を使用している【旧法】9,900kl タンク、【新基準】9,900kl タンク及び 18,200kl では、初期亀裂の深さが 1.5 mm で、亀裂長さが 4 mm ～12 mm 程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、降伏比が 80%以上の鋼材を使用している【新法】32,000kl タンク、【新法】110,000kl タンク及び 60,000kl タンクでは、初期亀裂の深さが 1.5 mm で、亀裂長さが 4 mm ～12 mm 程度の表面亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも 1.9 倍以上の余裕度を有している。

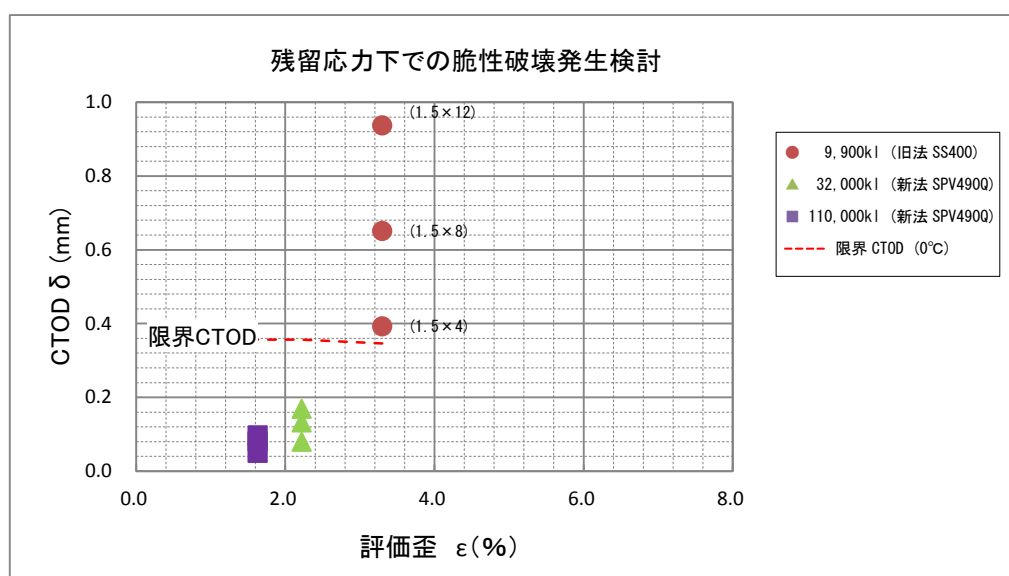


図 2.40 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

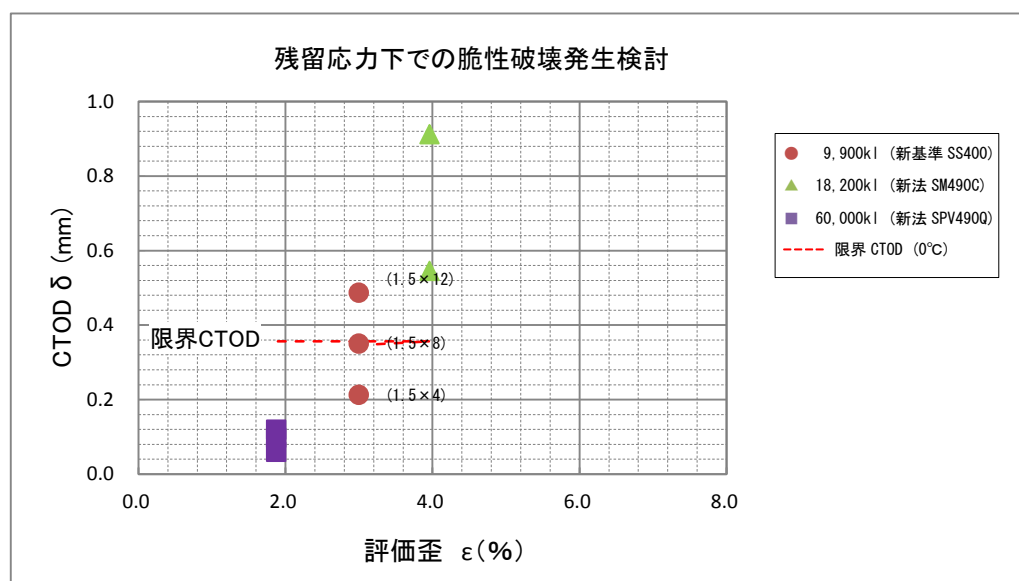


図 2.41 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

(5) アニュラ板に生じる塑性域の影響（参考）

参考として（４）におけるアニュラ板に使用する鋼材の降伏比が 80%未満の場合と 80%以上の場合における解析結果の違いについて、FEM 解析の結果から考察した。

ア 降伏比が 80%未満の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニュラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400、溶接構造用鋼板 SM490 等の低中強度鋼板が採用されている。

一例として、【旧法】9,900k1 タンクの底板浮上り時において、アニュラ板に生じる塑性域の進展状況を、図 2.42 示す。

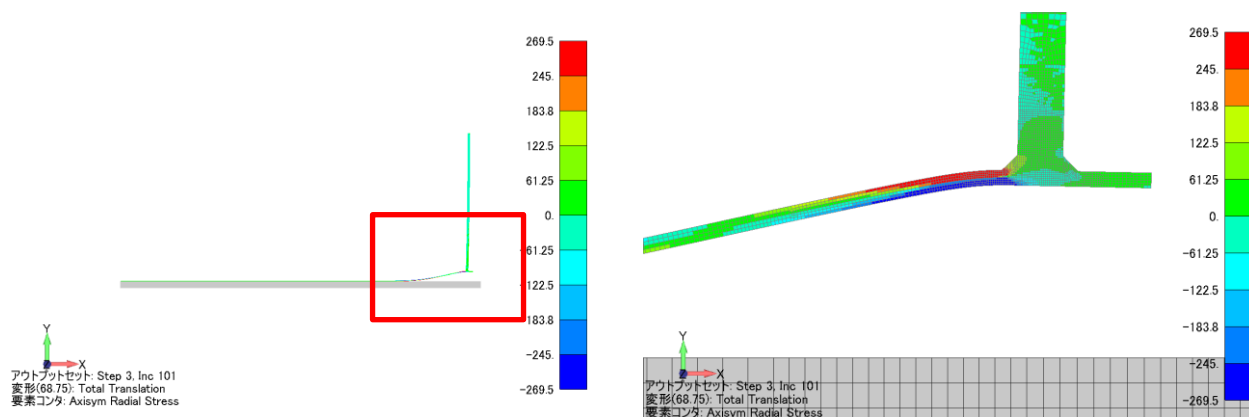


図 2.42 タンク隅角部の応力分布（旧法 9,900k1 タンク）

【アニュラ板】材質 SS400、板厚 6 mm

図 2.43 には、タンク隅角部の応力分布の拡大図を示す。同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、最初に側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じる。更に、タンク底板浮上り変位が増加するのに伴って、タンク中心方向の側板から離れた位置で、アニュラ板に広く塑性域（第二塑性関節）が生じることが分かる。その結果、当該部分の曲げ剛性が低下するに従って、側板近傍のアニュラ板の曲げモーメントが増大し、当該箇所の曲げ歪み・曲げ応力の負担が増加することが分かる。

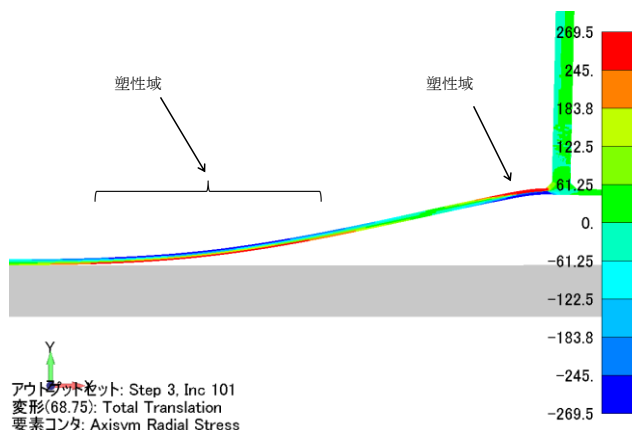


図 2.43 タンク隅角部の応力分布（旧法 9,900k1 タンク）【拡大図】

なお、【新基準】9,900k1 タンク（SS400）及び 18,200k1 タンク（SM490C）とも同様の傾向を示す。

イ 降伏比が 80%以上の場合【SPV490Q】

大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 SPV490Q が採用される。

一例として、32,000kl タンクの底板浮上り時において、アニュラ板に生じる塑性域の進展状況を、図 2.44 示す。

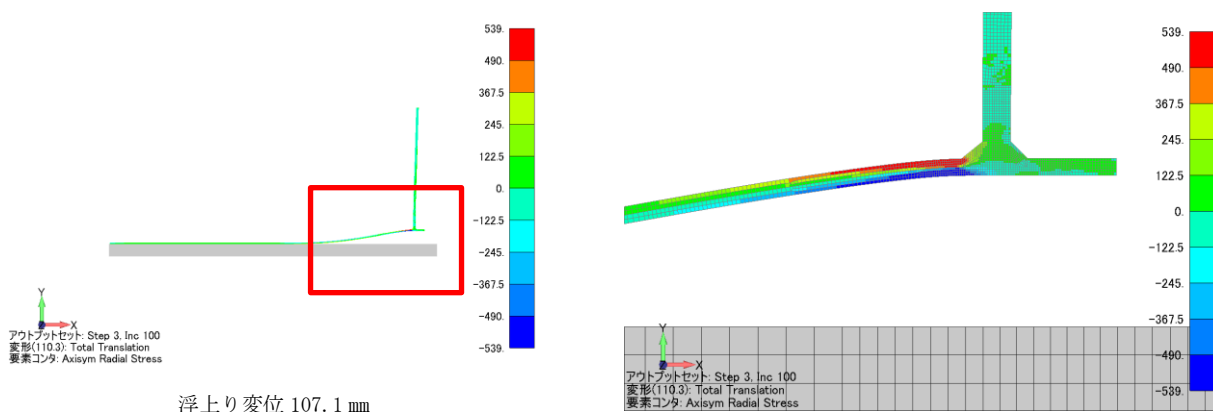


図 2.44 タンク隅角部の応力分布（32,000kl タンク）

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12 mm

図 2.45 には、タンク隅角部の応力分布の拡大図を示す。同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じるが、タンク底板浮上りが増加しても、タンク中心方向のアニュラ板は塑性化せず、弾性域に留まっていることが分かる。

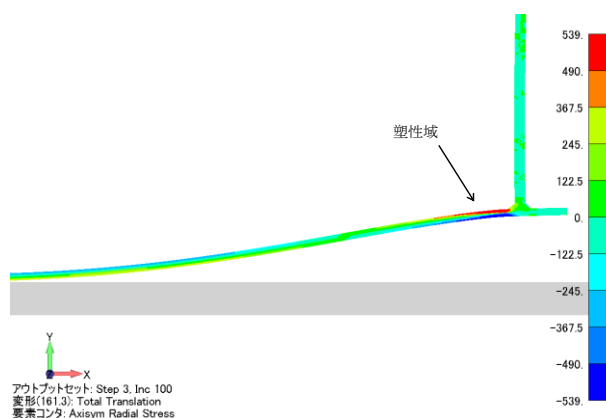
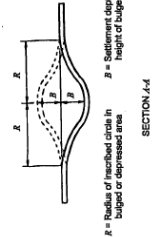


図 2.45 タンク隅角部の応力分布（32,000kl タンク）【拡大図】

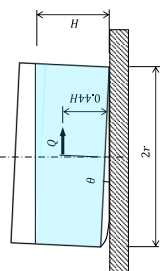
なお、60,000kl タンク（SPV490Q）及び 110,000kl タンク（SPV490Q）とも同様の傾向を示す。

表 2.12 「2.4.4 ケーススタディ：初期不整又は局部沈下を有する底板への適用」評価結果（底板）

確認項目	着眼点	「破壊力学」に基づく代替評価方法	【新法】110, 000kl タンク
前提条件		【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。	→
【照査荷重】	外力の影響	 R = Radius of buckled area in length of depressed area B = Settlement depth or length of buckle SECTION A-A	【沈下範囲】 R=1500 mm 【沈下深さ】 B=92.5 mm
	残留応力の影響	溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力を考慮する。	【溶接線と平行】 $\epsilon_2 = 0.36\epsilon_y$ 【溶接線と直角】 $\epsilon_2 = 0.6\epsilon_y$
仮定条件	—	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。	【溶接欠陥】 3 mm×6～18 mm 【繰返し回数】 受入払出 1000 回
変形・破壊	耐圧強度	計算で耐圧強度を確認する。	最大歪み 0.896%＜伸び 18%
	脆性破壊	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。	【3×6】 余裕度 2.55 > 1.0 【3×18】 余裕度 1.35 > 1.0
	疲労強度	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長	【3×6】 長さ 9.7 mm < (100 mm) 【3×18】 長さ 21.2 mm < (100 mm)
	隅角部 終局強度	計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。	—
	—	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無	【3×6】 深さ 3.2 mm < 10 mm 【3×18】 深さ 3.6 mm < 10 mm
タンク基礎の健全性	—	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い	※有害な変形が無い

備考：【 】内は表面亀裂寸法（深さ×長さ）を示す。

表 2.13 「2.4.5 ケーススタディ：大規模地震時のタンク隅角部への適用」 評価結果（タンク隅角部）

確認項目	着眼点	「破壊力学」に基づく代替評価方法	【旧法】9,900 k l タンク	【新法】32,000k l タンク	【新法】110, 000k l タンク
前提条件		【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。	→	→	→
【照査荷重】	外力の影響	【隅角部】地震時底板浮上りによる終局変位を想定する。 	【浮上り変位】 $\delta_B = 68$ mm	【浮上り変位】 $\delta_B = 107$ mm	【浮上り変位】 $\delta_B = 179$ mm
	残応力の影響	溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力を考慮する。	【溶接線と平行】$\varepsilon_2 = 0.36\varepsilon_y$ 【溶接線と直角】$\varepsilon_2 = 0.6\varepsilon_y$	→	→
	—	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。	【溶接欠陥】1.5 mm×4～12 mm 【繰返し回数】底浮上り100回	→	→
仮定条件	耐圧強度	計算で耐圧強度を確認する。	最大歪み 3.228%＜伸び 24%	最大歪み 2.077%＜伸び 18%	最大歪み 1.486%＜伸び 18%
変形・破壊	脆性破壊	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。	【1.5×4】破壊する×	【1.5×4】余裕度 1.70＞1.0	【1.5×4】余裕度 3.49＞1.0
	疲労強度	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長	【1.5×12】破壊する×	【1.5×12】余裕度 1.10＞1.0	【1.5×12】余裕度 2.08＞1.0
	隅角部	計算で「隅角部」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長	【1.5×4】進展する×	【1.5×4】長さ 7.8 mm＜(100 mm)	【1.5×4】長さ 5.1 mm＜(100 mm)
	終局強度	【隅角部】計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。	【1.5×12】進展する×	【1.5×12】長さ 14.8 mm＜(100 mm)	【1.5×12】長さ 12.6 mm＜(100 mm)
漏れ	—	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無	最大歪み 3.228%＜伸び 24%	最大歪み 2.077%＜伸び 18%	最大歪み 1.486%＜伸び 18%
タンク基礎の健全性	—	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い	【1.5×4】進展する× 【1.5×12】進展する×	【1.5×4】深さ 1.9 mm＜12 mm 【1.5×12】深さ 2.3 mm＜12 mm	【1.5×4】深さ 1.6 mm＜21 mm 【1.5×12】深さ 1.74 mm＜21 mm

備考：【 】内は表面亀裂寸法（深さ×長さ）を示す。

2. 5 水張検査の代替となる確認方法

水張検査は、タンクの実際の使用環境を模して漏れ及び変形の有無を確認するものであるが、水を張らないこととする場合でも、タンク全体として構造上の影響を与える有害な変形がなく、溶接補修が部分的なものであれば、溶接部検査により溶接の適切な実施が担保されていることを前提として、シミュレーション等による評価に代替することができると考えられる。これに当たり、上記2. 3で調査した溶接補修の実態等や、シミュレーションの精度を考慮すると、仮に溶接に伴う欠陥があったとしても、その後の危険物の受払いや地震によって容易に当該欠陥が進展し、漏えいに至ることがないよう多角的に確認することが適当であると考えられる。

本検討会では、その要件について、下記（１）～（３）のとおり整理した。

（１）補修溶接の要件

① 補修部位、継手形状

ア アニュラ板相互、底板相互、アニュラ板と底板との溶接継手：突合せ継手に限る。

（重ね継手は対象外）

イ 側板とアニュラ板との溶接継手：T型継手

② 補修内容

溶接線補修に限る（板の取替、当板等を除く）。

③ 補修長さ

補修溶接の層数は２層以上とし、最小長さは50 mm以上とする（短ビード溶接は避ける）。

④ 溶接補修を行った箇所の検査

真空試験によって漏れがないものでなければならないこと。

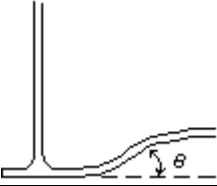
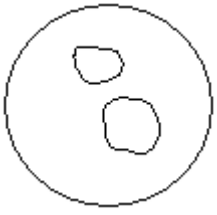
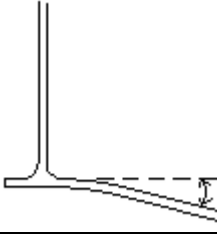
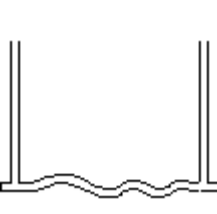
連続板厚測定により、構造上必要な板厚を有していることが確認されていること。

（２）タンクの要件

有害な変形（基礎含む）がないこと。

有害な変形については、「容量が1万キロリットル未満の特定屋外タンク貯蔵所の内部点検の時期等に関する運用について」（平成12年3月21日付け消防危第31号通知）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」として示されている変形とする。

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

	沈下の状況	沈下の状況図	有害な変形
底板部	側板に接する底板（アニュラ板）のリング状沈下		設計時からの変位角度 θ が 10 度以上であること。(L = 100 mmの角度計を使用するものとする。また、 θ は初期設計角度からの変化角度とする。)
	底板全体の皿状沈下		設計時からの直径に対する最大沈下の割合が 100 分の 1 以上又は最大沈下量が 300 mm以上であること。
	底板内部の局部沈下		沈下部分の内接円の直径に対する最大沈下の割合が 50 分の 1 以上又は最大沈下量が 200 mm以上であること。
	底板（アニュラ板）内部の沈下		設計時からの変位角度 θ が 5 度以上であること。(L = 100 mmの角度計を使用するものとする。)
	底板内部の浮き上がり、歪み、変形		浮き上がり部分の内接円の直径に対する設計レベルからの浮き上がり高さの割合が 10 分の 1 以上であること。ただし、溶接線が浮き上がり部分にならない場合は、当該割合は 5 分の 1 以上とすること。
側板部	側板の変形（歪み）		角度計は長さ 1m の型板を用い、水平、垂直ともに ± 15 mmを超えるものとする。(なお、側板の厚さ 10 mm未満の軟鋼には適用しない。)

(3) 破壊力学に基づく欠陥評価

日本溶接協会規格 WES2805 に基づく溶接欠陥評価を行い、底板一般及びタンク隅角部の破壊パラメータ（亀裂進展開口変位：CTOD）がそれぞれ破壊靱性値（限界 CTOD）以下であること。この場合において、共通的な計算条件は以下によること。

① 板厚

連続板厚測定により得られた実板厚を用いる。

屋外貯蔵タンクの底部の腐食管理の方法として、開放点検時の板厚測定方法が挙げられる。板厚測定方法については、以下の3通りの測定方法が示されており、事業者の判断により選択されている。

- 昭和 52 年 3 月 30 日付消防危第 56 号通知 定点測定
- 昭和 54 年 12 月 25 日付消防危第 169 号通知 定点測定
- 平成 15 年 3 月 28 日付消防危第 27 号通知 連続測定

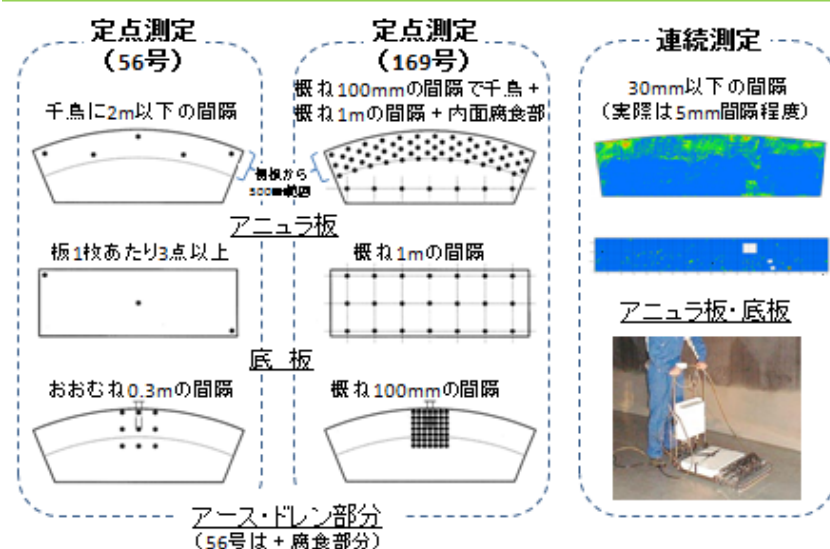


図 2.46 板厚測定方法の比較

定点測定はサンプリング検査であるが、連続測定は全面を測定するため、板厚を評価する上で最も信頼性が高い測定値を得ることが出来る。

② 想定亀裂

ア 底板一般

亀裂深さ 3 mm、亀裂長さ 6 mm 程度の表面亀裂

イ タンク隅角部

亀裂深さ 1.5 mm、亀裂長さ 4 mm 程度の表面亀裂

* 寸法に係る計算上の感度を確認し、総合的に評価する観点から、長さが 2 倍・3 倍の欠陥を想定した計算も行うことが適当。

③ 照査荷重

ア 底板一般：API653 に規定している底板局部沈下パターン（タイプ A：帯状）を想定し、局部沈下範囲の半幅（R）は最大 1,500 mm 程度とする。荷重繰返し回数として、供用期間中のタンクの実態に応じた受払回数を見込む。

イ タンク隅角部：大規模地震時の底板浮上り終局変位を想定する。保有水平耐力の評価における、大規模地震時のタンク隅角部の浮上り挙動による終局浮き上がり変位に対する評価を行い、荷重繰返し回数として、供用期間中の底板浮上り回数を 100 回と見込む。

④ アニュラ板に使用する材料等

側板×アニュラ板溶接継手の疲労亀裂進展解析等の結果（2.4.5）を踏まえ、原則として、アニュラ板に降伏比が 80% 以上の鋼材（SPV490Q 等）を採用していること。

（4）留意事項

供用開始後 24 時間程度は、漏れ、変形に対し、特に注意を払うこと。

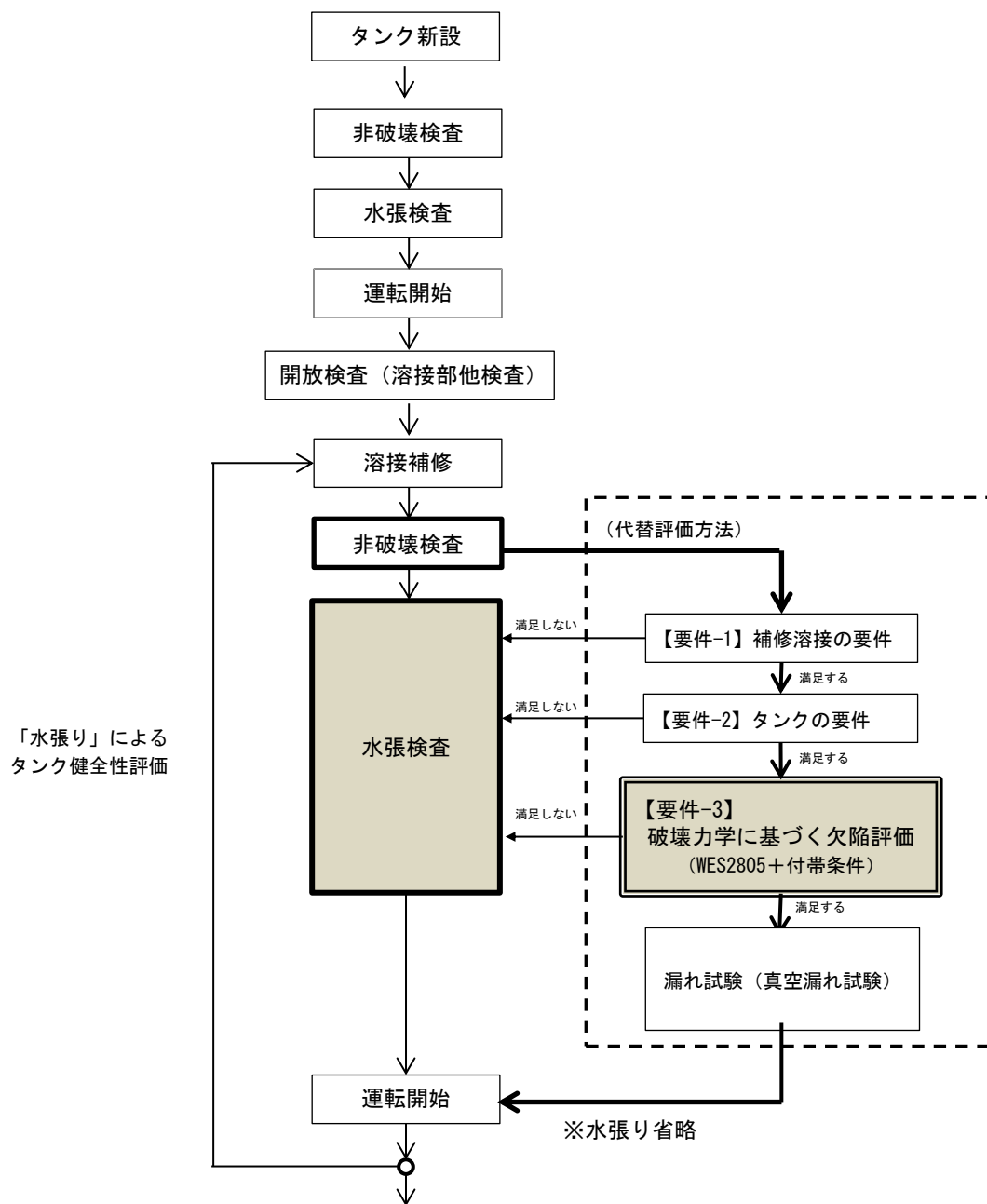


図 2.47 水張検査の代替評価フロー

2. 6 今後の課題

○重ね継手を用いた底板への適用

屋外貯蔵タンクの補修状況等の調査検討結果より、水張検査時の不具合事例として、底板相互の重ね継手の破断により漏水に至った事案が2件報告されている（表2.3）。

また、底部溶接線の割れに関する不適合事例では、側板×アニュラ板溶接継手（T継手）及びアニュラ板相互溶接継手（突合せ継手）の他に、重ね継手によるアニュラ板×底板溶接継手が2件、同じく底板相互溶接継手が4件の報告があった（表2.1）。

これら不具合事例の背景として、底板重ね溶接継手においては、コーティング剥離時のブラスト処理、非破壊検査時のグラインダー処理等により、タンクの経年使用に伴ってすみ肉溶接ののど厚が不足してくることが挙げられる。

加えて、破壊力学的見地からは、底板重ね溶接継手のルート部に亀裂を有する場合の簡便かつ合理的な力学モデルが、現時点で見当たらない。

これらのことから、今回の調査検討では、重ね継手による底板については検討対象から除外した。

今後、水張検査の合理化検討に際しては、経年使用したタンク底板の重ね継手ののど厚を推定する非破壊検査技術の開発と、簡便かつ合理的な破壊力学モデルの構築が望まれる。

第3章 コーティング上からの溶接部検査

第3章 コーティング上からの溶接部検査

3. 1 調査検討の趣旨

特定屋外タンク貯蔵所のタンク底部の溶接部検査は、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験で確認することが定められており、コーティングを施工している場合には、これを剥離して試験を実施することが必要となっている。

コーティングの剥離及び再塗装は、開放期間の長期化、施工費の増加等を伴うものであり事業者にとって負担となっていることから、コーティング上から溶接部検査を行うことのできる技術が望まれており、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は、当該用途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、消防庁から「特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する運用について」（平成12年8月24日付け消防危第93号、改正：平成14年1月22日付け消防危第17号）が示されている。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（補修を要しない欠陥の大きさ）等が示されており、運用等の詳細は実用機が製作された段階で通知するとされている。

今般、上記通知において探傷法の1つとして示されている超音波探傷法を用いた装置として、フェーズドアレイ技術を用いた探傷装置（以下「PA試作機」という。）が、独立行政法人石油ガス天然ガス・金属鉱物資源機構（以下 JOGMEC）において製作されたことを踏まえ、その活用可能性等について検討するものである。

3. 2 調査検討事項

- （1）PA試作機の検出原理等
- （2）試験片及び実タンクにおけるPA試作機の性能確認
- （3）PA試作機を用いた溶接欠陥の評価手法

3. 3 PA試作機の検出原理等の概要

3.3.1 フェーズドアレイとは

金属片に割れ等の構造欠陥が存在している場合、図3.1のとおり探触子から発射された超音波は、欠陥の境界面で一部又は全部が反射されることになる。超音波探傷機では、これらの反射波による受信（エコー）波形を観測することにより、欠陥を検知している。フェーズドアレイ探触子とは、一筐体の中に複数の振動素子が多数入っているものをいい、振動素子はプログラム化されたパターンで個別に発信のタイミングが制御されている。このことにより、装置全体として発する超音波を、平面波としたり、焦点付きの波面としたりすることが可能となる（図3.2）。

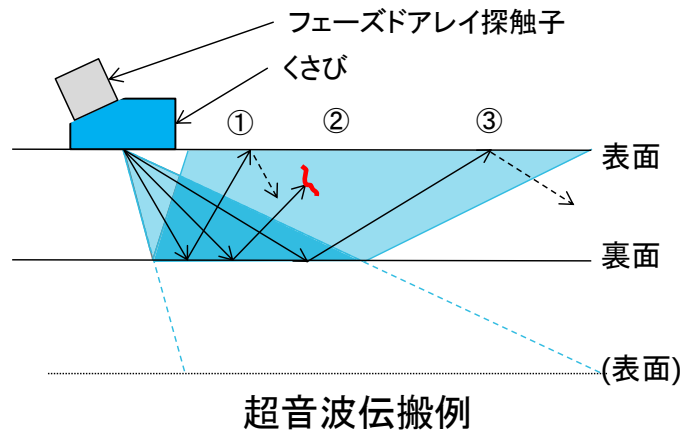
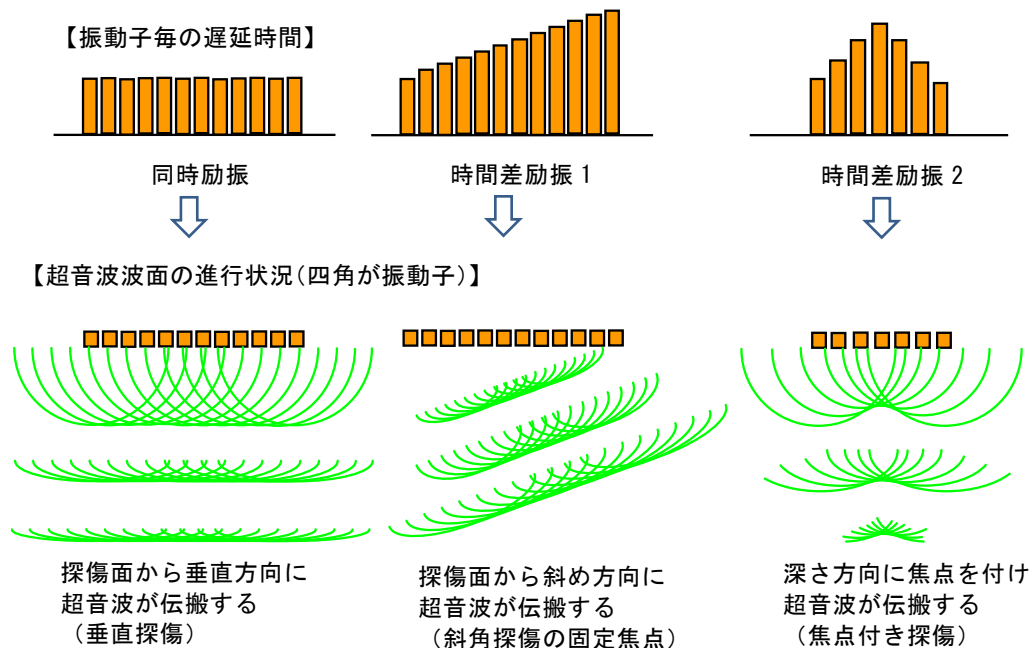


図 3.1 フェーズドアレイ超音波探傷機の原理

超音波フェーズドアレイ（Ultrasonic Phased Array）を用いた溶接部検査やクラック検出は、幅広い産業分野で使用されてきている。超音波フェーズドアレイ技術が従来型の超音波検査と比較し優れている点として、溶接部検査において、一つの探触子で溶接部を広視野角で検査できるため、欠陥検出確率を高めることができる。また、スキャンしたデータをリアルタイムで映像として表示することが可能な装置として開発がなされており、検査や補修の効率的な実施が可能となる（図 3.3）。

また、超音波を用いた計測であるため、表面にコーティングが施工されていても、それを通して金属部分の欠陥を検出することが原理的に可能であることがあげられる。更に、磁粉探傷試験と P A 試作機による溶接部検査の特徴を表 3.1 に示す。



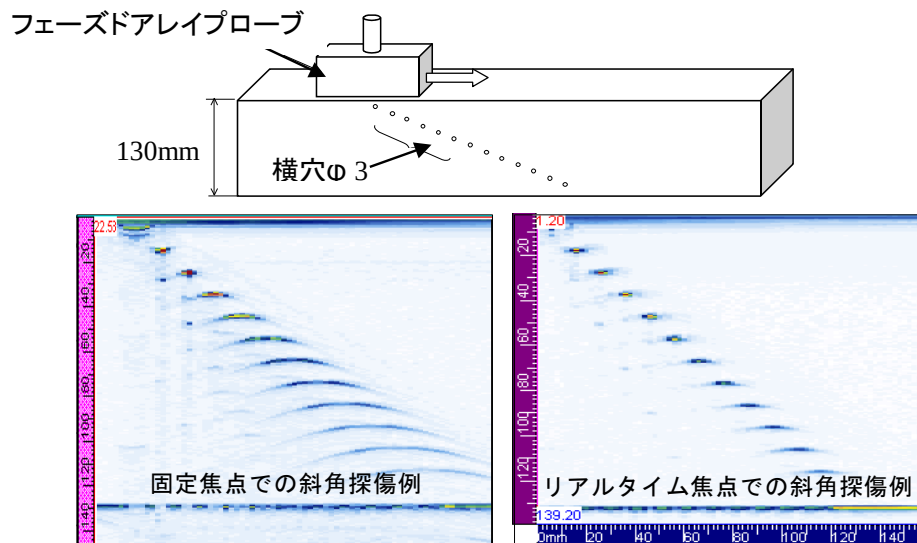


図 3.3 フェーズドアレイを用いた固定焦点とリアルタイム焦点のエコーの違い

表 3.1 磁粉探傷試験とPA試作機による溶接部検査の特徴

	磁粉探傷試験（MT）	P A 試作機
検出原理	・ 強磁性体を磁化した場合に、表層部に磁束を妨げる欠陥が存在するとき、外部空間に漏れ磁束を生ずる。この漏洩磁束によって吸着された磁粉模様から表層部の欠陥を検出する方法。	・ 個々の振動子が超音波を送受信するタイミングを独立に制御し、合成された超音波波面を形成することにより超音波ビームの制御を行う。超音波の入射方向や焦点距離を自由に変えて、多面的に欠陥を探傷する方法。
検出性能	・ 表面及び表層の微細な欠陥の検出が可能。	・ 表面及び内部の欠陥の検出が可能。
検査環境	・ コーティング上から検査出来ない。	・ コーティング上から検査出来る。
その他	・ 溶接線上のコーティングの剥離及び復旧が必要となり、復旧部分の重ね合わせ部が厚膜化する。	・ コーティングの剥離作業、復旧工事が省略され、工期の短縮が見込まれる。

3.3.2 P A 試作機的主要装置仕様

屋外貯蔵タンク用に開発が進められている、P A 試作機的主要仕様及び外観（図 3.5）は、以下のとおりである。

(1) P A 探傷システム：セクタースキャン^{*1}

^{*1}：セクタースキャンは、設定した角度範囲に対してビームを制御し各角度に対して探傷する方法。

(2) 寸法：長さ；約 1,000mm、幅；約 600mm、高さ；約 800mm、重量；約 40kg

(3) 電源：外部電源（AC100V）

- (4) 超音波探触子：5 MHz、32ch リニア配列のフェーズドアレイ探触子
 (5) 探触子の配置：溶接線直交配置（Aパターン）及び、溶接線斜交（45°）配置（Bパターン）（図 3.4 参照）。

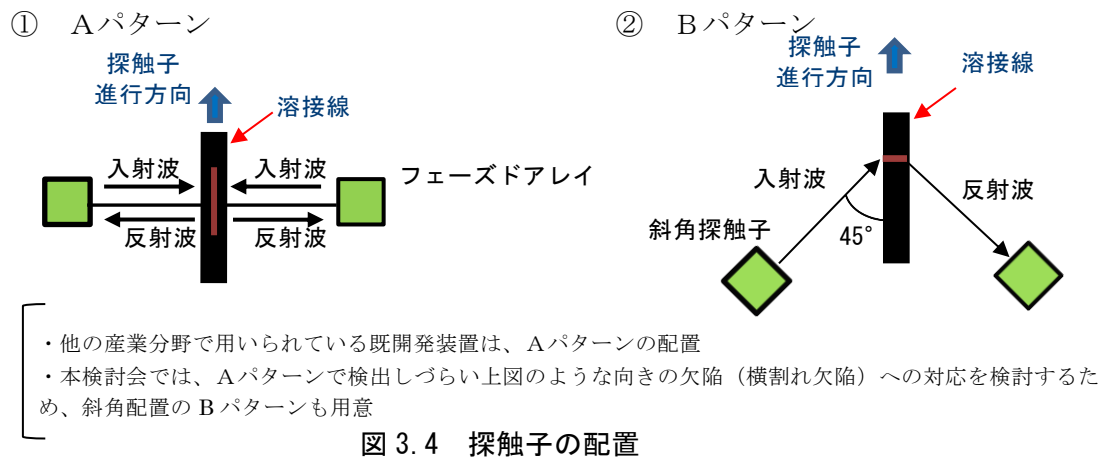


図 3.4 探触子の配置

- (6) 計測速度：20mm/sec
 (7) データ取得ピッチ：2 mm
 (8) 走査方法：自動走行
 (9) 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）
 (10) 底板の傾き補正：傾斜計を搭載
 (11) 接触媒体：水
 (12) 対象溶接線：突合せ溶接部（すみ肉溶接部は当該装置では測定不可）



図 3.5 P A 試作機の外観

3.3.3 P A試作機の探触子外観

今回、開発が進められている、P A試作機のフェーズドアレイ探触子を図 3.6 に示す。

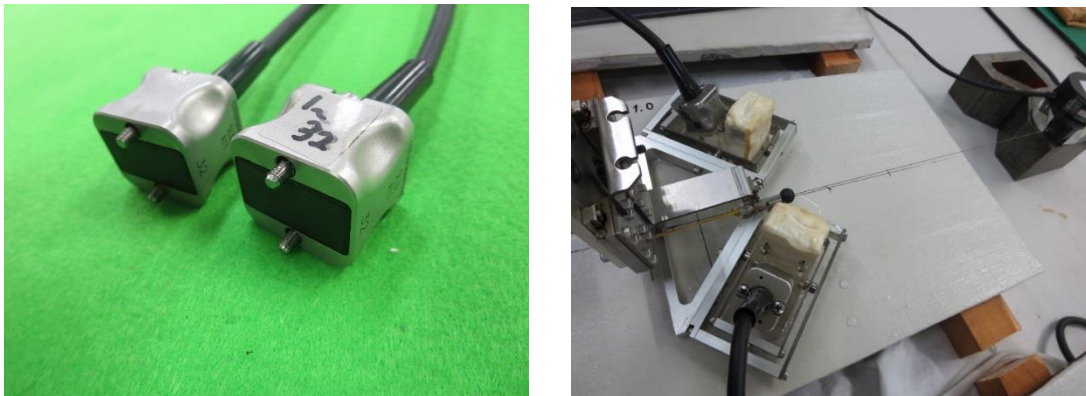


図 3.6 P A試作機のフェーズドアレイ探触子の外観と探傷の様子（Bパターン）

（１）超音波探傷映像の種類

探傷図形（Aスコープ）と呼ばれる受信波形に含まれる情報として垂直探傷の場合は、表面エコー「S」、底面エコー「B」、そして内部欠陥からの反射エコー「F」があり、これらの超音波の伝搬距離の違いが波形で表される。探傷図形（Aスコープ）における表面エコー「S」と底面エコー「B」の到達時間差は試験片厚みに相当し、表面エコー「S」と内部欠陥からの反射エコー「F」の到達時間差は試験片表面から内部欠陥までの距離に相当する。また、「F」の反射エコー強度の情報から、内部欠陥の定性的な大きさを判断することになる。すなわち、超音波探傷映像装置は、反射エコー強度を表示するものであり、特に超音波を斜め入射する斜角探傷においては、内部の欠陥や定性的寸法を判断するには、複雑な幾何学的計算や熟練した技能が必要となる。こうした問題を解決するため、探傷図形に加えて直観的にわかりやすい、断面投影図（Bスコープ）や、上面投影図（Cスコープ）で可視化可能な超音波探傷映像装置を、P A試作機にも採用している。各スコープの特徴を以下に示す（図 3.7）。

① 探傷図形（Aスコープ）

一般的な探傷器の表示波形。超音波探触子における受信エコー強度（波形）と超音波の伝搬時間（距離）とを直角座標上に映像表示可能。

② 断面投影図（Bスコープ）

試験片の「断層像」。Aスコープ波形を輝度変調（又は色変調）して線で表し、試験片上での超音波探触子の位置と超音波伝搬時間（距離）とを直角座標にとったもの（XZ 平面）。欠陥部の存在・分布状態・深さを直観的に可視化することが可能。

③ 上面投影図（Cスコープ）

試験片内のある深さの「スライス画像」。光学顕微鏡像と同じで超音波探触子における、ある深さの受信エコー強度を輝度変調して、試験片上における位置に表示したものです（XY 平面）。平面的な異常の広がり分布等を把握することが可能。

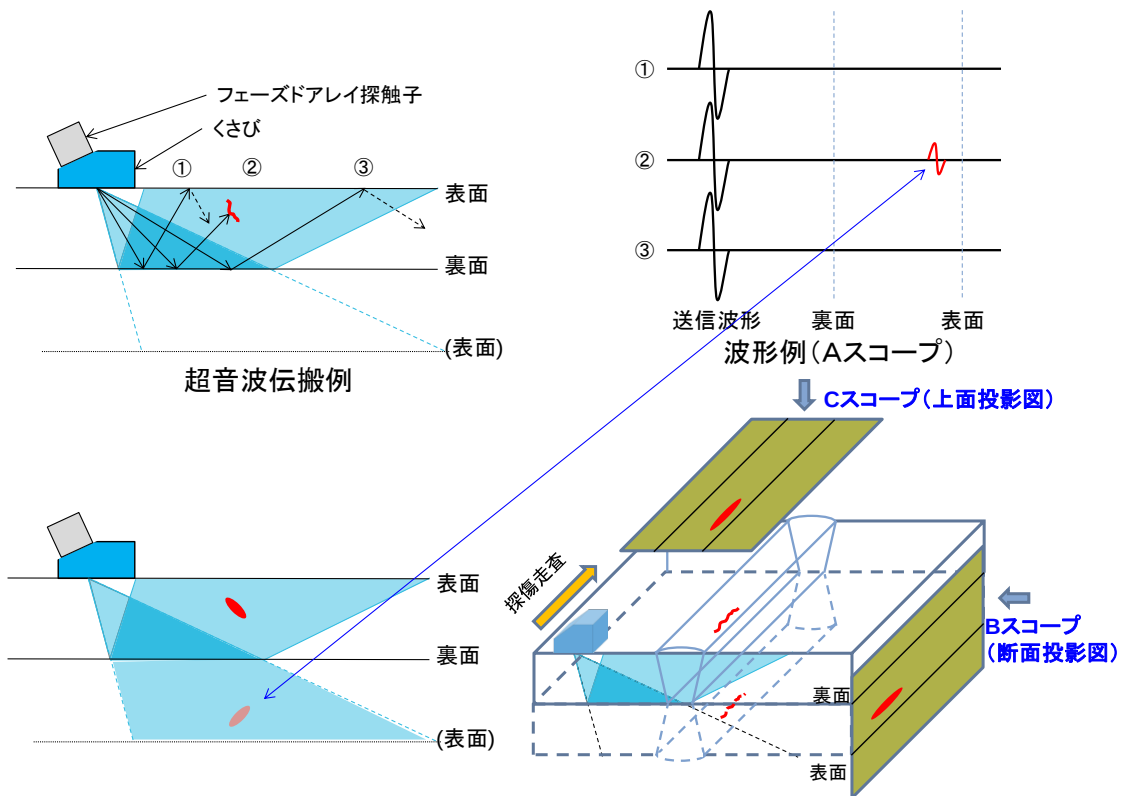


図 3.7 超音波フェーズドアレイによる結果表示例

(2) P A 試作機の感度校正方法

検出感度を調整するために、図 3.8、図 3.9 に示す、縦割れ欠陥、横割れ欠陥（長さ 6 mm×深さ 3 mm）を有した校正試験片を作成し、検出感度（反射エコー強度）が 80% となる感度（基準感度）を定め校正を行うこととしている。

図 3.8 は、校正試験片のスリット位置、間隔、探触子の移動方向等を示しており、A パターン探傷により、各欠陥の反射エコー強度の計測を行っている。図中左側は、C スコープ、B スコープと反射エコー強度の信号を示しており、「塗装なし」条件で、縦割れ欠陥を模擬したスリットにおいて、反射エコー強度が 80% となるように、感度調整を行い検出できることを示している。さらに、図中右側に示す、各スコープ等は、校正試験片に塗装を施し、塗膜厚さ 1 mm に対する、反射エコー強度を示しており、最大反射エコー強度が 28% であることを示している。塗膜の影響で、反射エコー強度は、無塗装状態に比べ、約 50% 以上減衰している。そのため、基準感度に対し +9 dB 印加することで、検出反射エコー強度を概ね 80% に増幅するように校正することとしている。

また、図 3.9 は、B パターン（屈折角 70° ）探傷で、図 3.8 と同様な検討を行っており、「塗装なし」条件で、横割れ欠陥に対し基準感度を 80% としたとき、「塗装あり」の条件における反射エコー強度が 7% まで減衰することがわかった。そこで B パターン探傷では、基準感度に対し +21 dB 印加することで、検出反射エコー強度を概ね 80% に増幅するように校正することとしている。

さらに、図 3.10 は、B パターン（屈折角 70° ）探傷で、角度付欠陥に対して同様な検討を行った結果を示しており、塗膜厚さ 1 mm に対して、6% まで反射エコー強度が減衰

している。そのため、基準感度に対し+21dB印加することで、検出反射エコー強度を80%まで増幅するように校正することとしている。

このように、横割れ欠陥探傷・角度付欠陥探傷の感度補正量は、縦割れ欠陥探傷と比較して塗装による減衰の影響が大きく、感度補正量をまとめると以下のとおりとなる。

- ① 縦割れ欠陥探傷の感度補正量＝基準感度 ＋ 9 dB（屈折角 55°）
- ② 横割れ欠陥探傷・角度付欠陥探傷の感度補正量＝基準感度 ＋ 21dB（屈折角 70°）

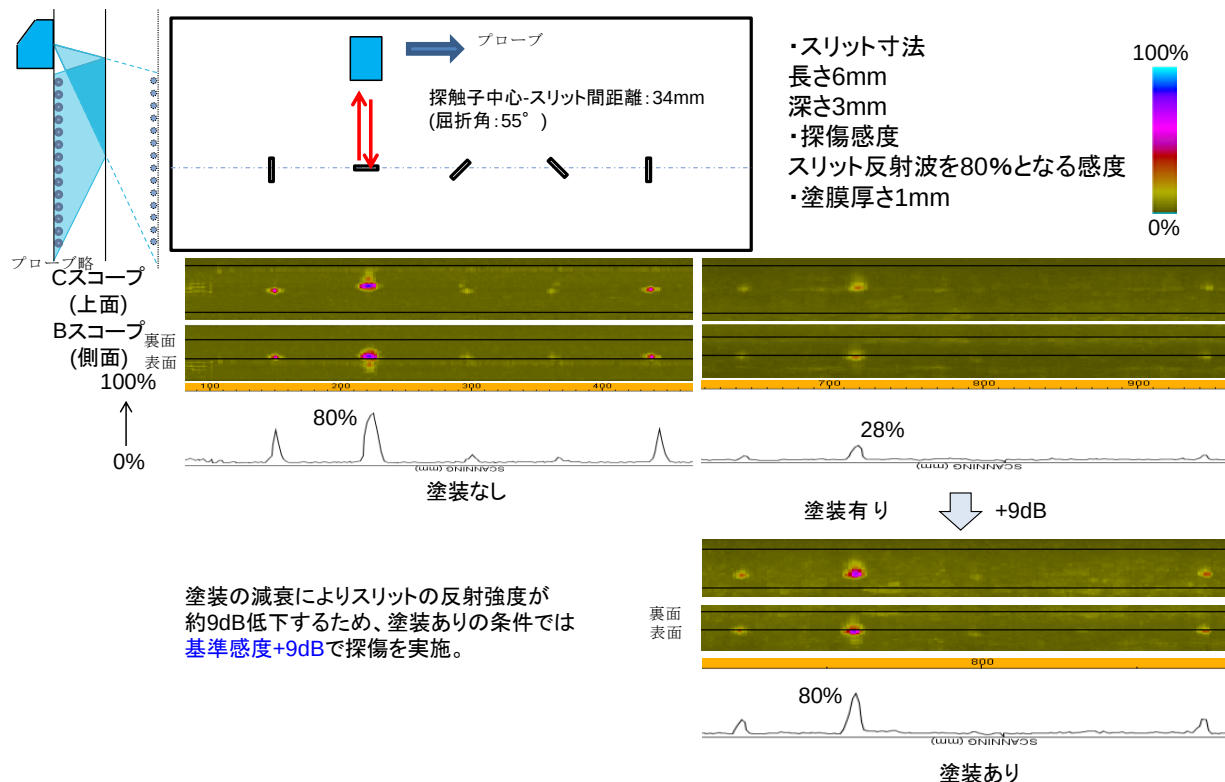


図 3.8 P A 試作機の縦割れ欠陥探傷の感度校正

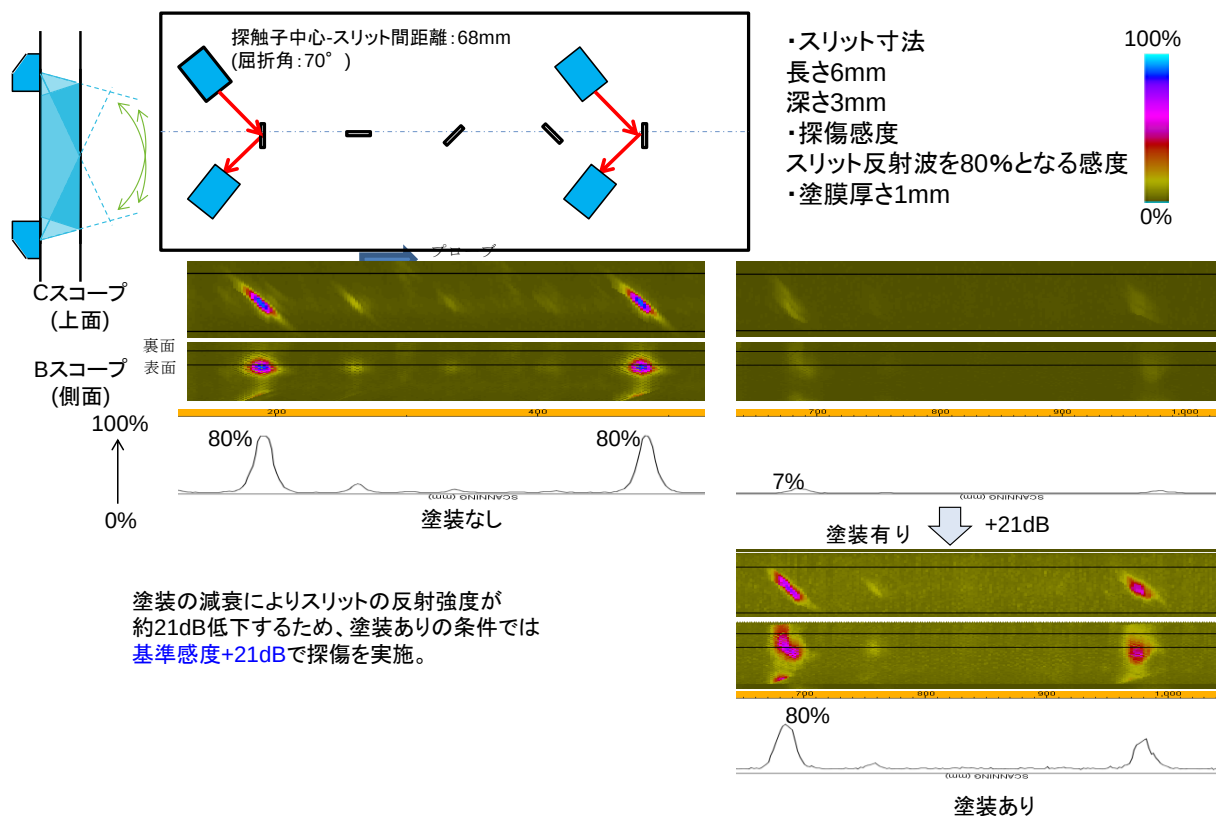


図 3.9 PA試作機の横割れ欠陥探傷の感度校正

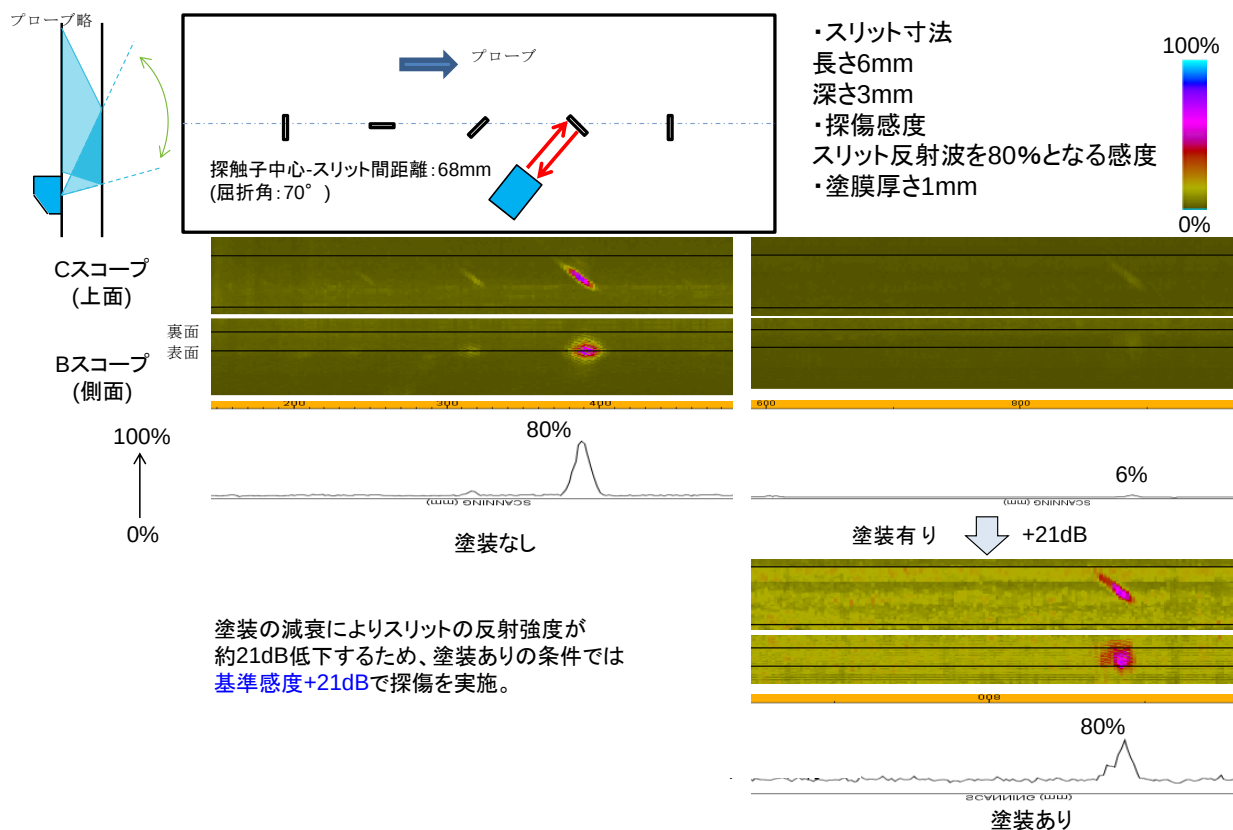


図 3.10 PA試作機の角度付き欠陥探傷の感度校正 (B パターン)

なお、図 3.8～3.10 の反射エコー強度をみると、欠陥の向き×プローブの向きで反射波の強度が異なることがわかる。このため、今回の実験では、A パターン、B パターンの探触子を用いて測定を行っている。また、縦割れ欠陥探傷の評価においては、図 3.11 に示すように、余盛が存在する試験片では、探傷側と反対側の溶接止端部からの形状による反射波が発生する可能性がある。この溶接止端部からの反射波の強度は余盛の形状や高さなどにより異なってくるため評価は困難である。そのため、実運用では探傷側と反対側の溶接止端部での指示は評価の対象外とし、探傷側と同じ側の結果により評価を行うこととする。

更に、図 3.12 に示す 2 回反射での伝搬経路は長くなるため、他の経路の反射やノイズの影響を受けやすくなる。そのため、本試験では 1 回反射での表面をターゲットとした感度校正を行っており、2 回反射で得られた指示は評価対象外とした。

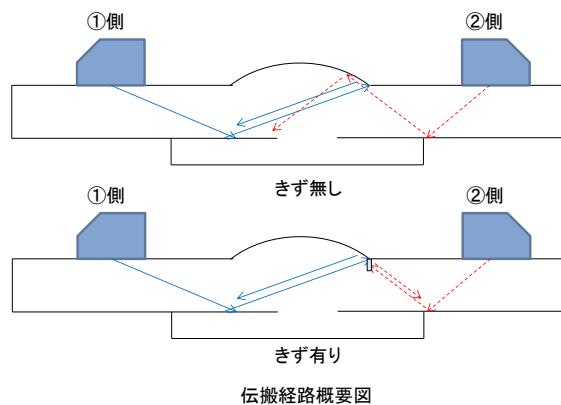


図 3.11 P A 試作機の評価対象外とする欠陥（縦割れ欠陥探傷の評価）

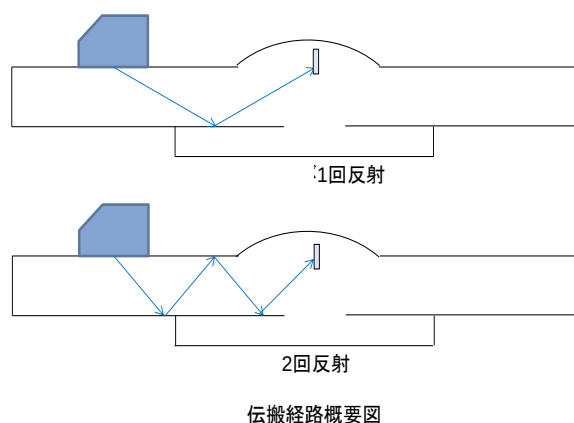


図 3.12 P A 試作機の評価対象外とする欠陥（2 回反射時の伝搬の評価）

(3) 指示長さについて

実際の欠陥のサイズとPA試作機によって評価されるサイズ（指示長さ）については、以下のとおりである。

- ① 「指示長さ」は、20%以上のエコー強度が得られた範囲の長さとする。
- ② 指示長さは、実際の欠陥の長さよりも大きい傾向がある（安全側に評価できる）。
- ③ 装置は、長さ6mmの欠陥が、80%以上のエコー強度となるように校正している（20%以上のしきい値は安全側と評価できる）。
- ④ 塗膜厚さ1.5mm(当該装置が許容できる最大の塗膜厚さ)においても長さ6mm以上の欠陥は、20%以上のエコー強度になる（安全側と評価できる）。
- ⑤ 消防危93号通知（平成12年8月24日）では、連続板厚測定のパA試作機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、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、長さが6.0mmをそれぞれ超えないものであれば、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とされている。今回、参考資料3-1に示す「塗膜厚さの影響試験結果」より、感度校正用試験片の人工欠陥（長さ6mm×深さ3mm）の反射エコー強度を80%に調整し、各パターンの感度補正を行い、各塗膜厚さ（0mm～2mm）に対して、図3.13に示す様にエコー強度が20%以上（当該装置における、欠陥検出のエコー強度の閾値）となる指示長さを求めた。その結果、塗装の影響を加味しても、指示長さは、概ね6mm以上の値となることが明らかになった。

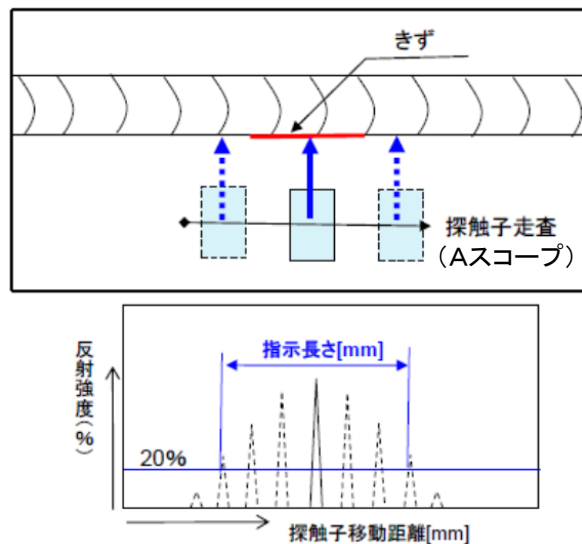


図 3.13 PA試作機の指示長さの求め方

(4) 欠陥指示が近接している場合の取扱い

欠陥指示が近接している場合の欠陥の指示長さの測定法は、以下のとおりとした。また近接する2つの欠陥指示を ℓ_1 、 ℓ_2 とし、欠陥の指示長さは、 $\ell_1 < \ell_2$ とした。

① 指示と指示の間隔が ℓ_2 より長い場合

ア 欠陥指示は2つとする。

イ 欠陥指示の長さは、それぞれ ℓ_1 、 ℓ_2 とする。

② 指示と指示の間隔が ℓ_2 より短い場合

ア 欠陥指示は1つとする。

イ 欠陥指示の指示長さは、 ℓ_1 、 ℓ_2 及び間隔を含めた長さとする。

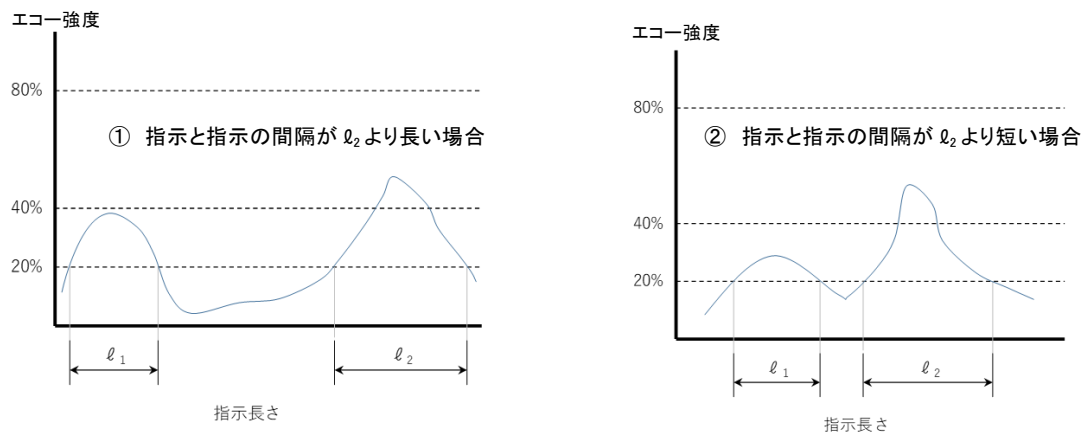


図 3.14 近接している欠陥指示と指示長さの測定方法

3.3.4 PA試作機の欠陥検出性能

PA試作機による溶接線の欠陥の検出性能は、平成28年度にJOGMECが実施した試験（参考資料3-2）においては、以下のとおり報告されている。

(1) 手探傷試験による探触子単体での検証結果

① 溶接線に平行方向の人工欠陥

探触子配置Aパターン、塗膜厚さ1500 μ mにおいて、溶接線止端部、溶接線中央及び溶接線1/3幅の表面に位置する欠陥は、深さ1.5mm×長さ4.0mmの欠陥検出が可能である。

② 溶接線に直交方向の人工欠陥

探触子配置Bパターン、塗膜厚さ1500 μ mにおいて、溶接線中央の表面に位置する欠陥は、深さ1.5mm×長さ4.0mmの欠陥検出が可能となり、また、探触子配置Bパターン、塗膜厚さ700 μ mにおいて、溶接線止端部の表面に位置する欠陥は、深さ3.0mm×長さ6.0mmの欠陥検出が可能である。

③ コーティング材の違いによる影響

試験片に塗布したコーティング材は、ガラスフレークコーティングである。コーティング材の違いによる影響を確認するためメーカー3社の材料を使用したけど、メーカーの違いによる影響は認められなかった。

(2) P A 試作機での検証結果

① 測定条件等

- ア 探触子配置：A パターン＋B パターン
- イ 速度：30mm/sec（手押し）
- ウ 塗膜厚さ：614～635 μ m
- エ 表面粗さ：Rz40～65 μ m

② 溶接線に平行方向の人工欠陥の検出

溶接線止端部、溶接線中央及び溶接線 1/3 幅の表面に位置する欠陥は、深さ 1.0mm×長さ 3.0mm の欠陥検出が可能である。

③ 溶接線に直交方向の人工欠陥の検出

未実施。

(3) シミュレーションによる検証結果

① ブローホールの検出

ブローホールはシミュレーションでは検出できなかった。

② 溶接線内部の欠陥の検出

溶接線一層目付近の欠陥は、反射エコーが裏当て板上面の非溶接部に逃げるため検出できないが、一層目付近の欠陥以外は、検出可能である。

3. 4 試験片及び実タンクにおける P A 試作機の性能確認

3.4.1 P A 試作機の試験片による性能確認

P A 試作機について、JOGMEC における研究開発では、参考資料 3-3 のとおり実験が行われている。

本検討会においては、当該データを踏まえつつ、下記のとおり試験片及び実タンクにおける P A 試作機の性能確認を行った。

(1) 実験概要

- ① 実験場所：株式会社 IHI 検査計測本社（神奈川県横浜市金沢区福浦 2-6-17）
- ② 実験日時：平成 29 年 12 月 19 日

(2) 試験片の仕様

P A 試作機に必要な性能を検討するため、溶接欠陥の影響や内部欠陥の亀裂進展に対する影響も併せて確認するため、溶接部に人工的に欠陥を導入した試験片を製作し、疲労破壊試験を実施した。また、製作した試験片は、P A 試作機の欠陥検出性能の確認に活用する。

製作した試験片の概要は、以下のとおりである。

① 鋼板の材料及び板厚等

鋼板の材質は、JIS G 3101 の SS400 であり、鋼板板厚は、9 mm、12mm 及び 20mm（JIS 公差）とする。

② 試験片の継手の種類

試験片の継手の種類は、突合せ継手及び重ね継手とする。

- ア 板厚 12mm 裏当て付き突合せ溶接（試験片のサイズ：500mm×500mm）

イ 板厚 20mm 裏当て付き突合せ溶接（試験片のサイズ：500mm×500mm）

ウ 板厚 9mm 重ね溶接（試験片のサイズ：500mm×500mm）

③ 試験片の溶接欠陥の種類

表面欠陥、内部欠陥等を含むものとし、欠陥の種類は以下のとおりであり、表 3.2 へ溶接欠陥を有する各試験片を示す。

ア ブローホール

ブローホールとは、窒素、一酸化炭素、水素等のガス成分や亜鉛など金属蒸気等が取り込まれることにより発生する溶接金属内の気孔である。

イ 融合不良

融合不良とは、溶融境界の一部に未溶融部分が残存することである。

ウ 溶込不良

溶込み不良は、設計溶込みに比べ実溶込みが不足していることが原因で発生。すみ肉溶接でルート部が溶融されずに残った状態の欠陥も溶込み不良に含んでいる。

エ 表面割れ

溶接直後の高温状態で溶接部に発生するひび割れを指す。「凝固割れ」「液化割れ」に大別され、凝固割れは凝固時に発生する割れで、液化割れは多層溶接時に前の溶接層が次の溶接により溶けて発生する割れを言う。

オ 内部割れ

溶接部の内部に発生するひび割れを指す。

カ アンダーカット

アンダーカットは、溶接止端部の母材が溶けすぎて欠損した状態を指し、溶接電流や溶接速度が過剰に高すぎるものが主な発生原因となる。

キ 無欠陥

④ 塗膜種類及び厚さ

ア 塗膜の種類：ガラスフレークコーティング

イ 塗膜厚さ：1 mm

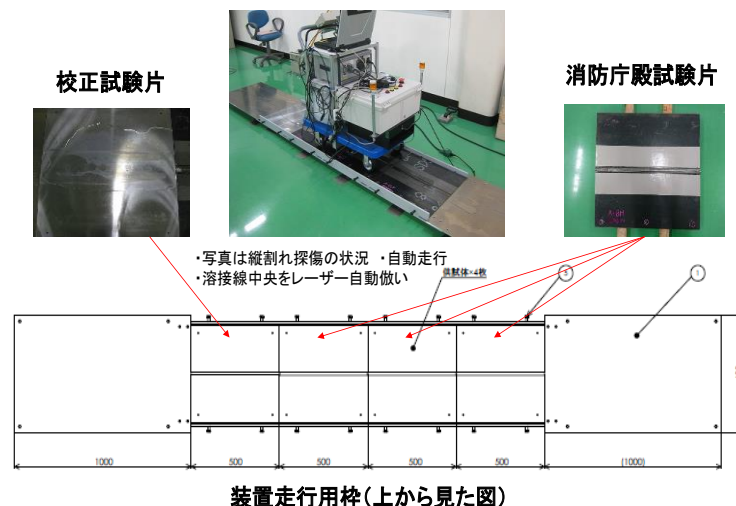


図 3.15 PA試作機の試験片での探傷試験の様子

表 3.2 溶接欠陥を有する試験片の一覧

継手の種類		No.	表示番号	欠陥の種類	欠陥位置 ^{*2}	溶接方法	検査方法 ^{*1}
A	板厚12mm 裏当付き 突合せ溶接	1	A-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	PT RT
		2	A-IP	溶込不良	初層	半自動	PT
		3	A-CLR	内部割れ	初層	半自動	RT
		4	A-CLF	表面割れ	最終層	半自動	MT RT
		5	A-UC	アンダーカット	最終層	半自動 被覆アーク	PT RT
		6	A-ND	無欠陥	—	半自動	RT
B	板厚20mm 裏当付き 突合せ溶接	7	B-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	PT RT
		8	B-IP	溶込不良	初層	半自動	RT
		9	B-CLR	内部割れ	初層	半自動	RT
		10	B-CLF	表面割れ	表層	半自動	MT RT
		11	B-UC	アンダーカット	表層	半自動 被覆アーク	PT RT
		12	B-LF	融合不良	中間層	半自動	RT
		13	B-ND	無欠陥	—	半自動	RT
C	板厚9mm 重ね溶接	14	C-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	PT RT
		15	C-IP	溶込不良	初層	半自動	RT
		16	C-CLR	内部割れ	初層	半自動	RT
		17	C-CLF	表面割れ	表層	半自動	MT RT
		18	C-UC	アンダカット	表層	半自動 被覆アーク	PT RT
		19	C-ND	無欠陥	—	半自動	RT

*1 RT:放射線透過試験, PT:浸透探傷試験, MT:磁粉探傷試験

*2 母材の板厚が薄い(2~3mm程度)場合、一層での溶接で接合できるが、母材が厚い場合は、溶接層数やパス数を増やして溶接する必要がある、欠陥を有する溶接層の位置を示す。

(3) 試験片の欠陥の事前確認

欠陥の所在を確認するため、放射線透過試験（以下「R T」）を、各試験片に対し行い、また表面欠陥やブローホール等の確認においては、磁粉探傷試験（以下「M T」）、浸透探傷試験（以下「P T」）を実施した。試験時の例として、表 3.2 の No. 1、No. 10 の試験片の写真を、図 3.16、図 3.17 へ示す。

図 3.16 は、ブローホールの欠陥を有する試験片であり、直接写真からも欠陥位置が概ね確認できるが、P Tにおいて欠陥指示模様が検出されており、ブローホールの存在が確認できる。また、図 3.17 は、材料表面に開口欠陥（クラック）と、表面直下の欠陥を有する試験片であり、M Tにおいて、磁粉模様が現れており、溶接線の斜め方向や縦方向のクラックが複数観察できる。また、R Tも同様な欠陥指示が検出されており、各試験片の欠陥の所在が確認できている。各試験片の全データは、参考資料 3-4 のとおりである。

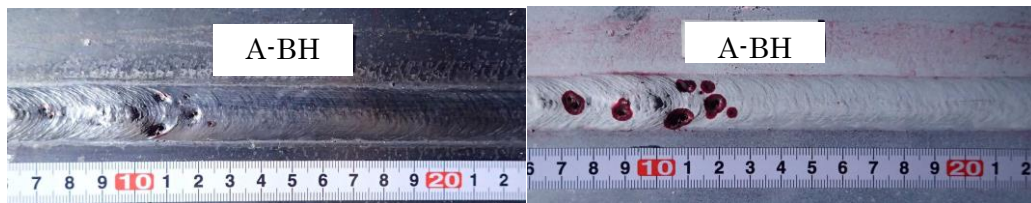


図 3.16 ブローホールを有する試験片：No.1（左：直接写真、右：PT）

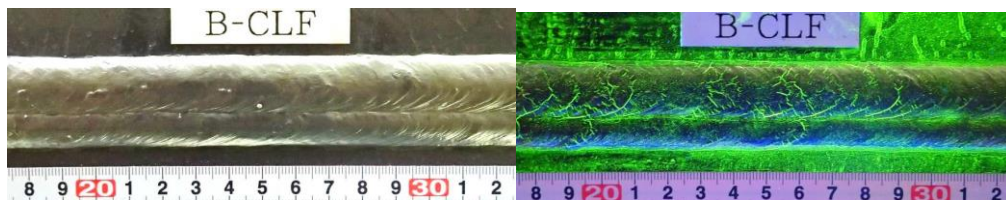


図 3.17 表面欠陥を有する試験片：No. 10（左：直接写真、右：M T）

(4) P A 試作機の試験片の探傷結果

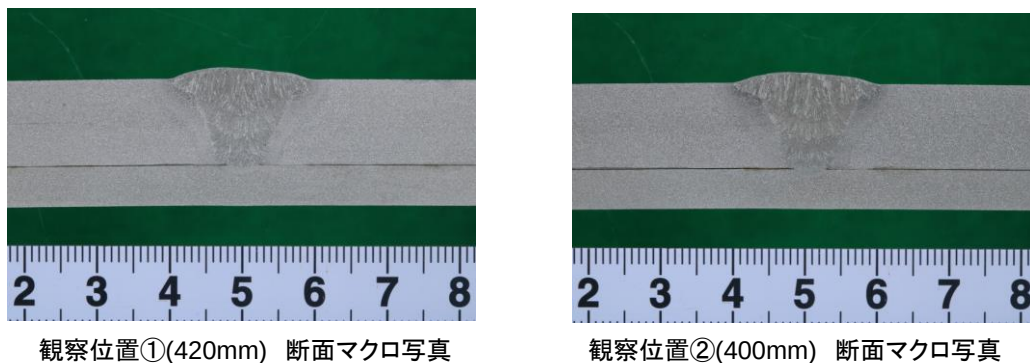
表 3.3 に、NO. 1～NO. 13 の試験片の溶接欠陥箇所（R T、P T、M T）と、探傷図形（A スコープ）、断面投影図（B スコープ）、上面投影図（C スコープ）の検出データに基づく各溶接欠陥の探傷判定及び、探傷結果を示す。

なお、探傷判定の「○」は、R T、M T、P Tで確認された欠陥箇所において、P A 試作機でも、その箇所を探傷できたことを示し、「×」は、その逆となる。そして、不一致「－」は、R T、M T、P Tで確認された欠陥箇所と P A 試作機との検出箇所が不一致の場合を示す。

その結果、ブローホール、内部割れ、表面割れ、アンダーカットの欠陥を有する、試験片の探傷は、検出可能となり、P A 試作機による検出性能は、概ね良好の結果となった。

しかしながら、試験片 No. 2、No. 8 の「溶込不良」時の欠陥は、RT、MT、PTで確認された欠陥箇所とPA試作機との検出箇所が不一致との結果となった。そこで、再度試験片の断面観察を行った結果、図 3.18 に示す様に、裏当てまで溶け込んでいることから、溶け込み不良では無いことが判断できる。RTで一部指示が表れているが、これは裏当てと母材の隙間であると考えられ、検出箇所の不一致となった理由は、試験片側に起因するものと考えられる。

以上のことから、今回の溶接欠陥を有する試験片に対し、PA試作機の探傷性能は、塗膜有りの場合においても、概ね良好であるといえる。



断面観察の結果、裏当てまで溶け込んでいることから溶け込み不良では無いと判断できる。RTで一部指示が表れているが、これは裏当てと母材の隙間であると考えられる。

図 3.18 溶込不良欠陥試験片の断面観察の結果

表 3.3 P A 試作機の試験片探傷結果および判定結果

試験片種類	UT実用機 探傷結果	探傷判定
No. 1 (ブローホール)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で数多くの表面指示が得られた事から表面に密集したブローホールが検出されたと考えられる。探傷側と反対の溶接止端部で指示が確認されたが溶接形状の影響であり評価対象外とする。特に角度付きず探傷法でブローホールが明瞭に検出された。	○
No. 2 (溶込不良)	縦割れきず探傷では、ビード中央部の表面からの指示が得られたが、RT 結果が示す溶込不良の部位からは反射指示が得られなかった。また、横割れきず探傷、角度付きず探傷においても指示は確認できなかった。溶込不良試験片の断面観察の結果、裏当てまでの溶け込みを確認した。断面観察の結果は別途言及する。	— * 1
No. 3 (内部割れ)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で表面と内部からの複数の指示が得られた。また、横割れきず探傷で、ビード中央部で内部からの指示が確認されたが、この指示は試験片内を2回反射した後の指示のため評価対象外とする。	○
No. 4 (表面割れ)	縦割れきず探傷では、探傷側止端部で指示を検出した。表面割れがビード止端部まで進展していることが考えられる。角度付きず探傷にてビード中央部で表面からの指示が多く検出された。また、RT指示部以外の指示があり今後調査する必要がある。	○
No. 5 (アンダーカット)	縦割れきず探傷において、ビード止端部表面からの強い指示を検出した。探傷側のビード止端部で指示が検出されていることからアンダーカットなどのきず指示であると考えられる。また、角度付きず探傷では、ビード止端部で表面から高い指示が数か所確認されが、ビード形状からの反射と評価する。	○
No. 6 (無欠陥)	縦割れきず探傷において、ビード止端部で表面および余盛部からの指示が得られた。溶接形状の影響による指示が考えられるが、試験片表面を確認し最終評価とする。RT では指示が無く、UTで指示が得られた箇所については今後調査を行う。また、横割れきず探傷、角度付きず探傷では、特に指示は確認されなかった。	—
No. 7 (ブローホール)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で数多くの表面指示が得られた事から、表面に密集したブローホールが検出されたと考えられる。探傷側と反対の溶接止端部で指示が確認されたが、溶接形状の影響であり評価対象外とする。特に角度付きず探傷法でブローホールが明瞭に検出された。	○
No. 8 (溶込不良)	縦割れきず探傷では、表面からの指示は得られたが、RT 結果が示す溶け込み不良の部位からは反射指示が得られなかった。また、角度付きず探傷においても表面からの指示を確認した。	—
No. 9 (内部割れ)	縦割れきず探傷では、ビード中央部・止端部で表面と内部からの複数の指示が得られた。また、角度付きず探傷で、ビード止端部内部からの指示を確認した。	○
No. 10 (表面割れ)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で表面から連続的な指示が得られた。角度付きず探傷もビード中央部から止端部にかけて表面からの指示が多く検出された。これは、複数のきずからの反射が重なり広い範囲で指示が検出されたためと考えられる。RT指示部以外の指示があり、調査の必要性がある。	○
No. 11 (アンダーカット)	縦割れきず探傷において、ビード止端部で表面からの指示が得られた。探傷側の止端部で検出されていることからアンダーカットなどのきず指示と考えられる。また、角度付きず探傷では、ビード止端部で表面から高い指示が数ヶ所確認されが、ビード形状からの反射と評価する。	○
No. 12 (融合不良)	縦割れきず探傷では、試験体の内部から裏面にかけて複数の指示を確認した。PA で検出された指示はRTと同様の結果を示している。	○
No. 13 (無欠陥)	縦割れきず探傷において、ビード止端部で表面および余盛部からの指示が得られた。溶接形状およびアンダーカットなどが考えられるが、試験体表面を確認し最終評価とする。RT では指示が無く、PA で指示が得られた箇所についても、調査を行う必要あり。	—

※1：断面観察の結果、裏当てまでの溶込を確認

RT, MT, PT 指示部で PA 指示あり：○, RT, MT, PT 指示部で PA 指示なし：×, 不一致：—

（参考）欠陥を有する各試験片における疲労破壊試験

屋外貯蔵タンクの底板の溶接継手を想定して製作した、内部及び表面欠陥を有する溶接継手の試験片について、4点曲げ疲労試験及び引張圧縮疲労試験を実施した。疲労試験の実施前後に放射線透過試験を実施し、試験結果の比較を行った。詳細な結果は、参考資料 3-5 に示す。

4点曲げ疲労試験を実施した結果、全ての欠陥の種類において、欠陥の進展はみられなかった。一方、引張圧縮疲労試験については、無欠陥の試験片で溶接箇所が破断したものや、欠陥の試験片で母材が破断したものを除き、他の欠陥における進展は、観測されなかった。なお、引張圧縮疲労試験における発生応力は、屋外貯蔵タンクで予測される実応力とは現象的に異なるため、参考値として評価すべきと考えられる。

また、疲労試験実施後の欠陥状況を確認するため、欠陥の種類（ブローホール、初層溶け込み不良、初層割れ、最終層割れ、アンダーカット、溶接不良）ごとに、試験片を破断又は切断し、顕微鏡等（マイクロスコープ、電子顕微鏡）により断面の観察を行った結果、いずれも欠陥等の進展は確認されなかった。

以上のことから、全ての欠陥の種類（ブローホール、初層溶け込み不良、初層割れ、最終層割れ、アンダーカット、溶接不良）において、欠陥の進展はみられず、溶接線内部欠陥の疲労進展する可能性は、低いことが明らかとなった。

3.4.2 PA試作機の実タンクによる性能確認

（1）実験概要

開放検査中のタンクにおいて、タンククリーニング後と溶接線コーティング剥離前の間の下記の期間で実証試験を実施した。

- ① むつ小川原国家石油備蓄基地：平成 30 年 5/17～19、5/21～22
- ② 福井国家石油備蓄基地：平成 30 年 9/6～9/8、9/10～11

（2）PA試作機の探傷方法

PA試作機は、3.4.1 節で用いたものと同じものを用い、縦割れ欠陥検出用の A パターン、横割れ欠陥検出用の B-2 パターン、斜め欠陥検出用の B'-2 パターンとして、実タンクの探傷を実施した。また、超音波フェーズドアレイの設定条件は、以下の条件で実施し、探傷箇所は当該装置にて探傷可能であるタンク底板突合せ溶接部を対象とした。

① 探傷条件

- ア 探傷（走行）速度：20mm/s
- イ データ採取ピッチ：探傷部位が不連続とならないように実施し、2mm ピッチで記録
- ウ 超音波探触子：5MHz、32ch リニア配列のフェーズドアレイ探触子
- エ 接触媒質：水道水または工業用水
- オ 基準感度：深さ 3mm×長さ 6mm、幅 1mm の表面開口スリットのエコー強度 80%
- カ 探傷感度*：A パターン：基準感度+9dB、B パターン：基準感度+21dB（塗膜補正）
※探傷感度の調整方法については、3.3.3 節(2)の検出感度の決定基準に記載
- キ 探傷長さ：約 15m

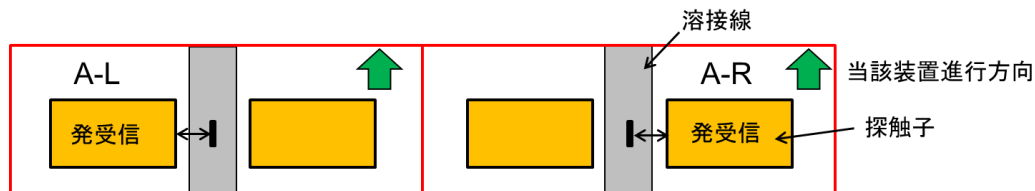
- 1) 始点を横断する溶接線の中心から、溶接線終点を横断する溶接線の中心までの距離

2) 途中で障害物があり走行できない場合は、一旦検査を中断し障害物を迂回した後に再探傷を実施。(一部、検査を続行しながら障害物の迂回を試行したデータあり)

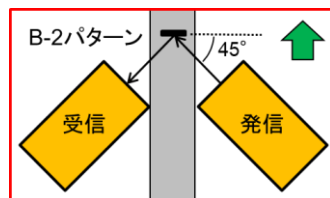
② 探触子の配置と探傷パターン探傷条件

P A 試作機の検証の結果、あらゆる角度の欠陥を検出するために、3通りの探触子の配置パターンで実タンクの探傷を実施した。

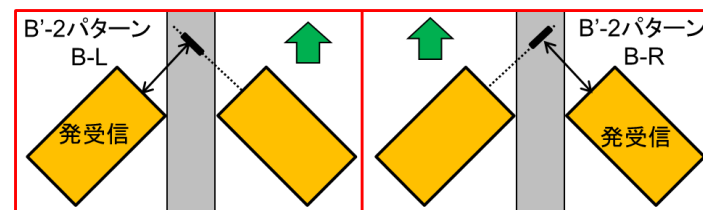
ア 縦割れ欠陥探傷 (Aパターン)



イ 横割れ欠陥探傷 (B-2パターン)



ウ 角度付欠陥探傷 (B'-2パターン)



③ 試験前の感度調整

参考資料 3-1 に示す「塗膜厚さの影響試験結果」より、

ア ガラスフレークコーティングの塗膜厚が 1 mm のときにエコー強度が 80% となる感度補正値を採用した。

イ 塗膜厚が 0.7 mm、1.0 mm、1.5 mm の人工欠陥試験片にて、Aパターンは基準感度+9 dB、Bパターンは基準感度+21dB にて補正すれば、エコー強度が 20% 以上になり、欠陥検出が可能であることを確認した。

ウ 人工欠陥角度が、0°、5°、15°、25°、35°、45°、55°、65°、75°、90° の試験片において、Aパターンは基準感度+9 dB、Bパターンは基準感度+21dB にて補正すれば、いずれかのパターンにおいてエコー強度が 20% 以上になり、欠陥検出が可能であることを確認した。

(3) P A 試作機の実タンクの探傷結果

① 実タンクの諸元

P A 試作機の実タンクによる探傷試験を下記のタンクで実施した。

ア むつ小川原国家石油備蓄基地

- ・ タンク番号 No.39
- ・ 完成検査年月日 昭和 60 年 3 月 20 日
- ・ 内径 81,500mm
- ・ 高さ 24,000mm
- ・ 許可容量 111,212kL
- ・ 底板材質 SM41B
- ・ 底板厚さ 12mm
- ・ コーティング種類 ビニルエステル樹脂ガラスフレークコーティング
- ・ コーティング設計厚さ 平均 650 μ m

イ 福井国家石油備蓄基地

- ・ タンク番号 TK-101
- ・ 完成検査年月日 昭和 61 年 5 月 10 日
- ・ 内径 82,500mm
- ・ 高さ 24,000mm
- ・ 許可容量 113,829.7kL
- ・ 底板材質 SM41B
- ・ 底板厚さ 12mm
- ・ コーティング種類 ビニルエステル樹脂ガラスフレークコーティング
- ・ コーティング設計厚さ 平均 590 μ m

② 実タンクの探傷結果

実タンクの探傷結果の詳細については、参考資料 3-6「実タンクでのフィールド試験（全波形データ集）」に示す。なお、探傷の際、エコー強度が 20%以上となる箇所を、溶接欠陥箇所として扱った。今回、試験を実施した国家備蓄基地のタンクは、コーティングを剥がした上で全線の MT を実施した結果、以下の欠陥箇所が検出された。

当該欠陥の MT としての指示模様は極めて小さく、全線を PA 試作機により探傷を行ったとしても検出は困難であったと考えられる。

ア むつ小川原国家石油備蓄基地：51 ヶ所（全てブローホール）

イ 福井国家石油備蓄基地：162 ヶ所（線状指示模様 7 ヶ所以外は全てブローホール）

③ 検出された欠陥について

今回、実タンクの実証試験を実施した PA 試作機は、表面への開口の有無を判定することが難しい。そのため探傷時に、20%以上のエコー強度の指示が得られた箇所について、MT、PT を実施した結果、溶接線表面の開口欠陥等は、認められなかった。このことは、溶接線内部に存在するブローホールや割れ等と考えられ、表層での欠陥は、今回の試験では、検出されなかった。なお、PA 試作機で 20%以上のエコー強度の指示が得られなかった箇所も、MT、PT を実施しているが、溶接線表面の開口きず等は、認められていない。軽微な表層欠陥は、コーティング剥離時のブラスト処理によっても、影響を受けると考えられ、今回は、MT、PT においても検出されなかったものと考えられる。

④ PA 試作機の探傷検出限界について

本検討では、試験片表面の長さ 6 mm 深さ 3 mm の欠陥を検出目標とし、試験片表面母材部に長さ 6 mm 深さ 3 mm の加工をして、このスリットを基準として装置の感度校正を行い、基準感度を 80% に調整している。その基準感度に対し、どのような欠陥のサイズまで検出可能であるか、探傷検出限界の検討を行った。図 3.19 に、P A 試作機の欠陥検出限界のシミュレーション結果を示す。各エコー強度に対する、試験片の欠陥の大きさを示しており、エコー強度 20% の検出限界を赤の破線で示している。その結果、試験片の欠陥の長さが 2 mm × 深さ 2 mm の欠陥までは、探傷可能であり、検出目標の欠陥である長さ 6 mm × 深さ 3 mm は、原理的に検出でき、かつ、探傷の裕度もあることがわかる。

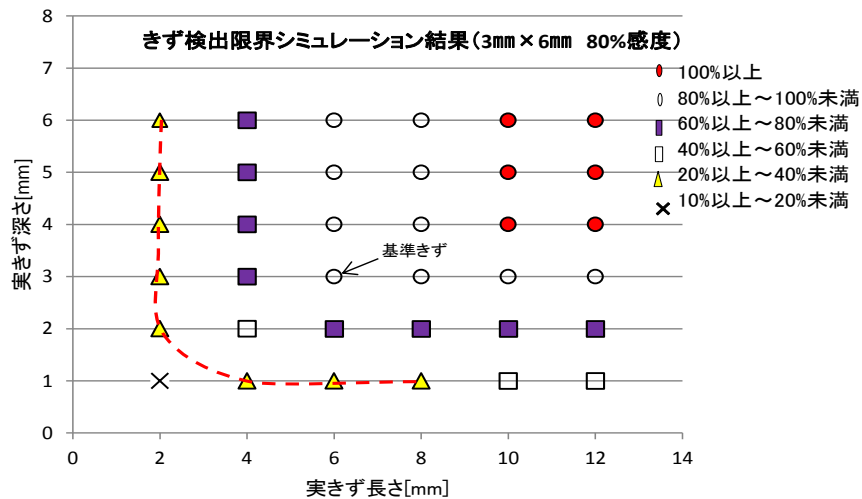


図 3.19 P A 試作機の欠陥検出限界シミュレーション結果

3. 5 P A 試作機を用いた溶接欠陥の評価手法

3.5.1 P A 試作機の運用等に係る前提条件

P A 試作機の特性を踏まえ、その運用等による前提条件を整理した。

- (1) 底部の溶接部全線において、過去にMTを実施し、その記録が確認できる(図 3.20)。
- (2) 検査する溶接部は、底板相互及びアニュラ板相互の溶接継手のうち、突合せ溶接部で、かつ、溶接施工法確認試験(危険物の規制に関する規則第 20 条の 4 第 3 項)で確認された溶接方法で施工されているものとする。

【新法タンクの場合】

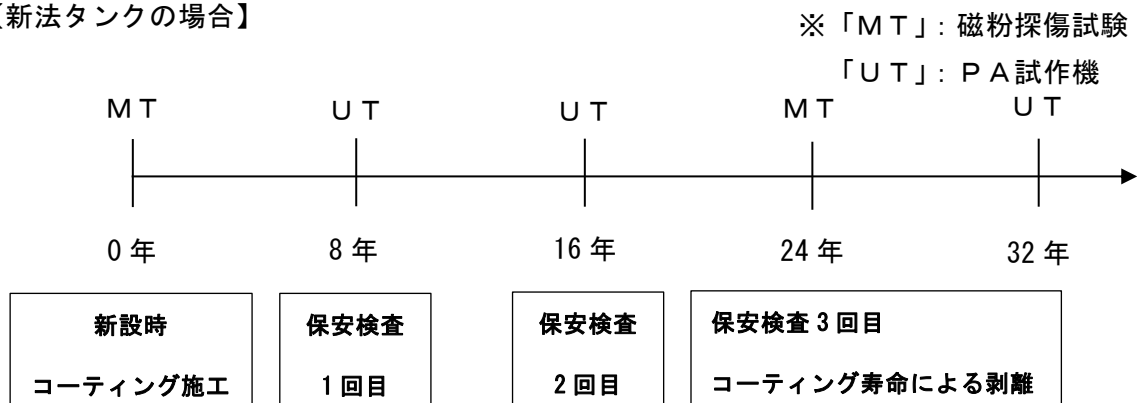


図 3.20 本検討における溶接部検査の実施時期のイメージ

3.5.2 P A試作機の運用イメージ

「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）において示されている溶接欠陥の標準的な評価手法に、P A試作機を当てはめると下記のとおりとなる。また、JOGMECにおいて整理したP A試作機の要求性能・運用性能（素案）は、参考資料3-7のとおりである。

（１） 試験要領

溶接部試験の標準的な試験要領を以下に示す。

① 準備

溶接部試験を行うに際しては、以下の準備及び確認を行うこと。

ア 溶接部及びコーティングの把握

- (ア) タンク底部の溶接部近傍及び溶接部の検査並びに補修履歴を確認すること。
- (イ) コーティングの種類及び厚さを確認すること。

イ P A試作機の試験性能の確認

- (ア) P A試作機の試験性能の確認（試験現場において、P A試作機が仕様書に記載されている性能等を維持していることを底部溶接部試験用対比試験片を用いて確認することをいう。以下同じ。）を、溶接部試験実施の直前に行うこと。

なお、底部溶接部試験用対比試験片は、溶接部試験を行うタンクの底部溶接継手のサイズ及びビードの形状、タンク底板又は側板の材質及び板厚並びにコーティングの種類及び厚さを勘案して作成されたものであること。

- (イ) 試験性能の確認は2回以上行い、P A試作機の検出データの再現性を確認すること。

ウ 溶接部試験を実施する溶接継手の前処理

溶接部試験を実施する溶接継手に油分等が存在し、試験に支障がある場合はクリーニング等により除去すること。

② 試験

ア 試験範囲の確定

- (ア) P A試作機の構造面又は機能面から、適用対象は底部突合せ溶接とし、このうち溶接部試験が可能な範囲を確定し、不可能な部位については、コーティングを剥離し磁粉探傷試験を行うこと。
- (イ) 溶接部試験の対象範囲は、試験作業や試験記録の管理を明確化するため、試験基準（開始）点及び試験（測定器の操作）方向などの条件を確認すること。

イ 試験方法の確認

溶接部試験の方法については、P A試作機により操作方法が異なるので仕様書等から、確認すること。

③ 試験中又は試験後の試験性能の確認

- ア 溶接部試験の作業中でも必要に応じて試験性能の確認を実施すること。
- イ 全てのタンク溶接部試験が終了した後、試験性能の確認を速やかに実施すること。
- ウ P A試作機の試験性能の確認の結果、異常があり、試験データへの影響が認められる場合には、影響の認められた範囲について再度測定を行うこと。

④ 試験記録

以下に示す溶接部試験の記録を作成して、保存すること。

ア 試験タンクを特定する事項

イ 試験実施者及び試験年月日

ウ 底部溶接部試験用対比試験片による試験性能の確認データ

エ P A 試作機、試験条件及び試験範囲に関する資料

オ 溶接部試験の結果

(ア) 溶接部試験データ

(イ) P A 試作機から出力された試験記録類

カ その他必要と認められる事項

(2) 試験結果の評価

P A 試作機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、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 3.0mm、長さが 6.0mm をそれぞれ超えないものであること。

3. 6 P A 試作機におけるまとめと今後の課題

本検討においては、P A 試作機が JOGMEC で製作されたことを踏まえ、その活用可能性や探傷性能等について検討を行ってきた。その結果として、原理的には、溶接欠陥の探傷ができることが明らかとなったが、実運用に供するに当たっては、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 (3.6.1)、③傾き欠陥の検討

(3.6.2)、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等の課題があると考えられる。

今後、これら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。

3.6.1 裏面腐食への対応方法の検討

タンク底部に裏面腐食が生じていた場合、裏面は凹凸のある状態となっている。当該装置の探傷法は探触子から送信した超音波を裏面で 1 回反射させて欠陥に入射する方式としている。そのため、裏面に激しい凹凸のある状態では、裏面において乱反射となり、正確な探傷が行えない。対応策として、超音波探傷と同時に、図 3.21 に示すように、別の探触子にて超音波が反射する箇所の裏面の状態を確認しながら探傷することで、裏面腐食の影響を確認し、裏面腐食が認められた場合には、その部位の探傷データは無効扱いとし、通常の磁粉探傷試験に切り替える方法が考えられる。

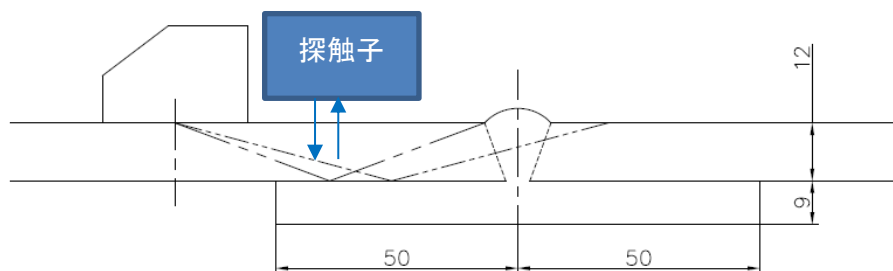


図 3.21 裏面反射の位置の腐食確認方法

また、連続板厚測定で裏面腐食が認められた場合においても同様な取扱いが考えられる。
本検討会では、裏面腐食の影響は、具体的に検討していないため、実用化に当たっては整理しておく必要がある。

3.6.2 鉛直方向の傾き欠陥の探傷について

現在、装置の校正試験片の人工欠陥は、鉛直方向に対して 0° の欠陥としている。しかしながら、実タンクにおける欠陥は、様々な角度で存在する可能性がある。当該装置において、鉛直方向に角度を有する欠陥の検出性能の評価は行っておらず、検出性能を確認する必要がある。欠陥の想定としては、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° に入る欠陥が一般的と言われているが、溶接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。そこで、底板の開先角度となる鉛直方向に対して、 20° 傾いた欠陥を想定し、欠陥の検出性能を確認した。図3.22に示すように、実タンクの探傷条件となる、Aパターン探触子条件におけるY距離（溶接中心位置と探触子中心距離）を、38mmから64mm（屈折角度： 55° から 70° ）へ変化させて探傷を行った。図3.23に、Y距離38mmにおける、鉛直方向の傾き角度に対するエコー強度及び指示長さのシミュレーション結果を示す。鉛直方向の傾き角度 0° のときに、エコー強度80%になるように調整し、傾き角度が 10° となると、エコー強度は約20%、指示長さも2mmまで減衰する。更に、実際の欠陥として想定される傾き角度 20° の欠陥に対しては、エコー強度が約17%、指示長さは0mmとなり、欠陥としては検出できない結果となった。そのため、実際に想定される傾き角度 20° の欠陥が検出できるように、Y距離すなわち屈折角度の最適化を行い、図3.24に、Y距離64mm（屈折角度 70° ）のシミュレーション結果を示した。Y距離38mmと同様に、鉛直方向の傾き角度 0° のときに、エコー強度80%になるように調整し、傾き角度が 10° となると、エコー強度は約46%、指示長さも8mmとなり、更に、想定される傾き角度 20° の欠陥に対しては、エコー強度が100%を超え、指示長さも12mmとなり、Y距離を64mm（屈折角度 70° ）にすることで、傾き角度 30° まで、欠陥を検出できることがわかった。なお、Bパターン探触子条件は、実タンクで探傷した同じ条件（Y距離68mm（屈折角度 70° ））で、想定される傾き角度 20° の欠陥も検出できると考えられる。しかしながら、鉛直方向の傾き欠陥の実探傷は実施していないため、実用化に当たっては検証することが必要である。

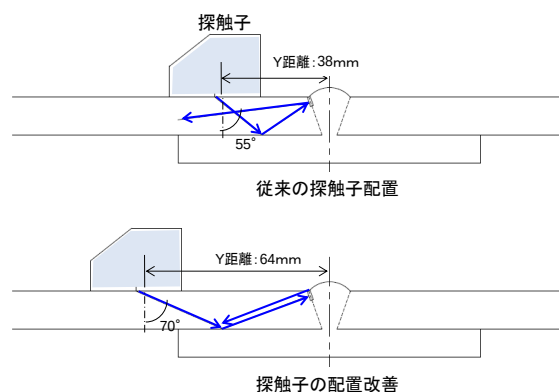


図 3.22 Aパターン探触子の設定条件

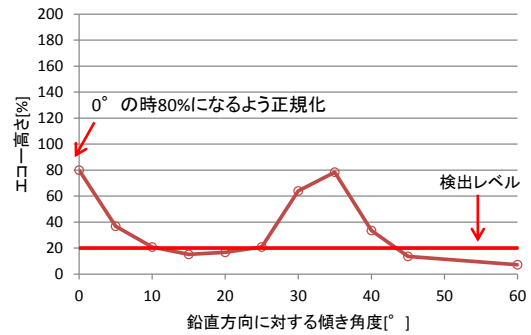
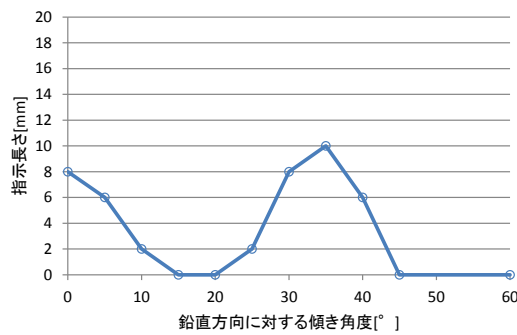


図 3.23 鉛直方向の傾き角度に対するエコー強度及び指示長さの関係（Y 距離：38mm）

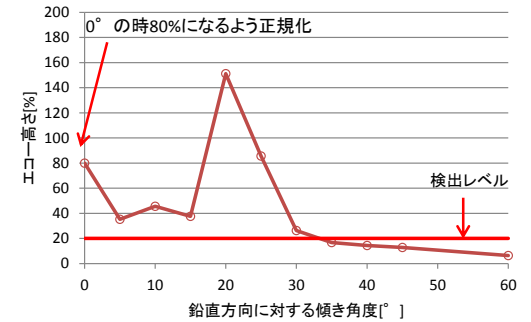
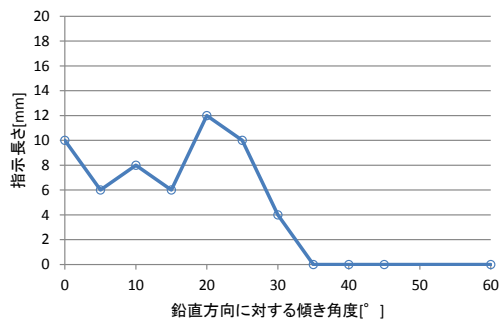


図 3.24 鉛直方向の傾き角度に対するエコー強度及び指示長さの関係（Y 距離：64mm）

参考資料

屋外タンク貯蔵所に係る検査制度の概要等

1 検査制度の概要

屋外タンク貯蔵所は、設置や変更に係る工事完了時、また使用開始後も一定期間ごとに、技術基準に適合していることを確認するための各種検査等を受けることとされている。全体の流れは図 1 に示すとおりである。

2. 2 主な検査項目

2.2.1 完成検査前検査

屋外タンク貯蔵所のうち、液体の危険物を扱うタンクを設置又は変更の許可を受けた者は、技術上の基準に適合しているかどうかについて、完成検査前検査を受けなければならないとされている。

完成検査前検査は、施設が完成した後では確認できない部分を、工事の進捗状況に合わせて市町村長等が実施する検査であり、基礎・地盤検査、溶接部検査、水張検査等の検査がある。このうち、溶接部検査は 1,000 K L 以上の大規模なタンクのみが対象である。

(1) 基礎・地盤検査

基礎・地盤検査は、タンク新設時や一定規模の補修を行った際に行われる検査であり、基礎・地盤の堅固さについて、標準貫入試験、平板載荷試験、圧密度試験等により確認を行うものである。

(2) 溶接部検査

溶接部検査は、タンク本体の側板及び底板の溶接部が対象であり、側板の溶接部は放射線透過試験、底部の溶接部は原則として磁粉探傷試験を行うこととされている。

磁粉探傷試験は鉄鋼材料などの表面およびその近傍のきずを検出することに適した探傷試験であり、強磁性体に磁気を作用させ、磁粉探傷剤を散布することで、表面および表面直下の比較的浅い部分のきずから生じた漏洩磁束（きず部分から漏れ出した磁束）に磁粉が付着し、きずが拡大された磁粉模様として現れるものである。

(3) 水張検査

水張検査は、タンク新設時や一定規模の補修を行った際に、水を張ることにより応力を加えて「漏れ」「変形」の有無を確認する。実際の使用環境を模した検査であり、タンクの健全性を包括的に評価するものである。

特定屋外タンク貯蔵所における水張検査では、側板最下端の水平度や底部の凹凸状態の測定を行うこととされている。また、貯蔵する石油以上に比重の重い水を張ることにより、副次的に不等沈下の有無等のタンク基礎の健全性を確認できる効果もある。

2.2.2 完成検査

設置や変更に係る工事完了時に、屋外タンク貯蔵所の位置・構造・設備が許可どおりとなっていることを確認する。主として、目視検査によって行われる。

2.2.3 保安検査

10,000K L以上の屋外タンク貯蔵所は、7年～15年に1回の頻度で保安検査を受けることとされている。また、不等沈下があった場合には臨時に保安検査が行われる。

保安検査は、タンク底部の溶接部及び底部の板厚が技術上の基準に適合していることを市町村長等が である。

(1) 底部溶接部の検査

底部溶接部の検査は、原則として磁粉探傷試験を行うこととされている。タンク底部にコーティングが施工されている場合には、検査精度を向上させるため溶接線上のコーティングを剥離した上で磁粉探傷試験を実施する。

(2) 底部板厚の検査

底部板厚の検査は、主に超音波板厚計やデプスゲージ等により板厚の確認が行われている。タンク底部にコーティングが施工されている場合であっても、コーティングを剥離することなく板厚が測定可能な装置も使用されている。また、測定箇所については、抜き取りで行う定点測定のほか、底部全面を連続的に行う全面連続板厚測定等がある。

2.2.4 内部点検

1,000K L以上 10,000K L未満の屋外タンク貯蔵所は、12年～15年に1回、内部点検を行うこととされている。

内部点検は、タンク底部の溶接部及び底部の板厚が技術上の基準に適合していることを事業者自らが確認する点検であり、検査項目・方法等については保安検査と同じである。

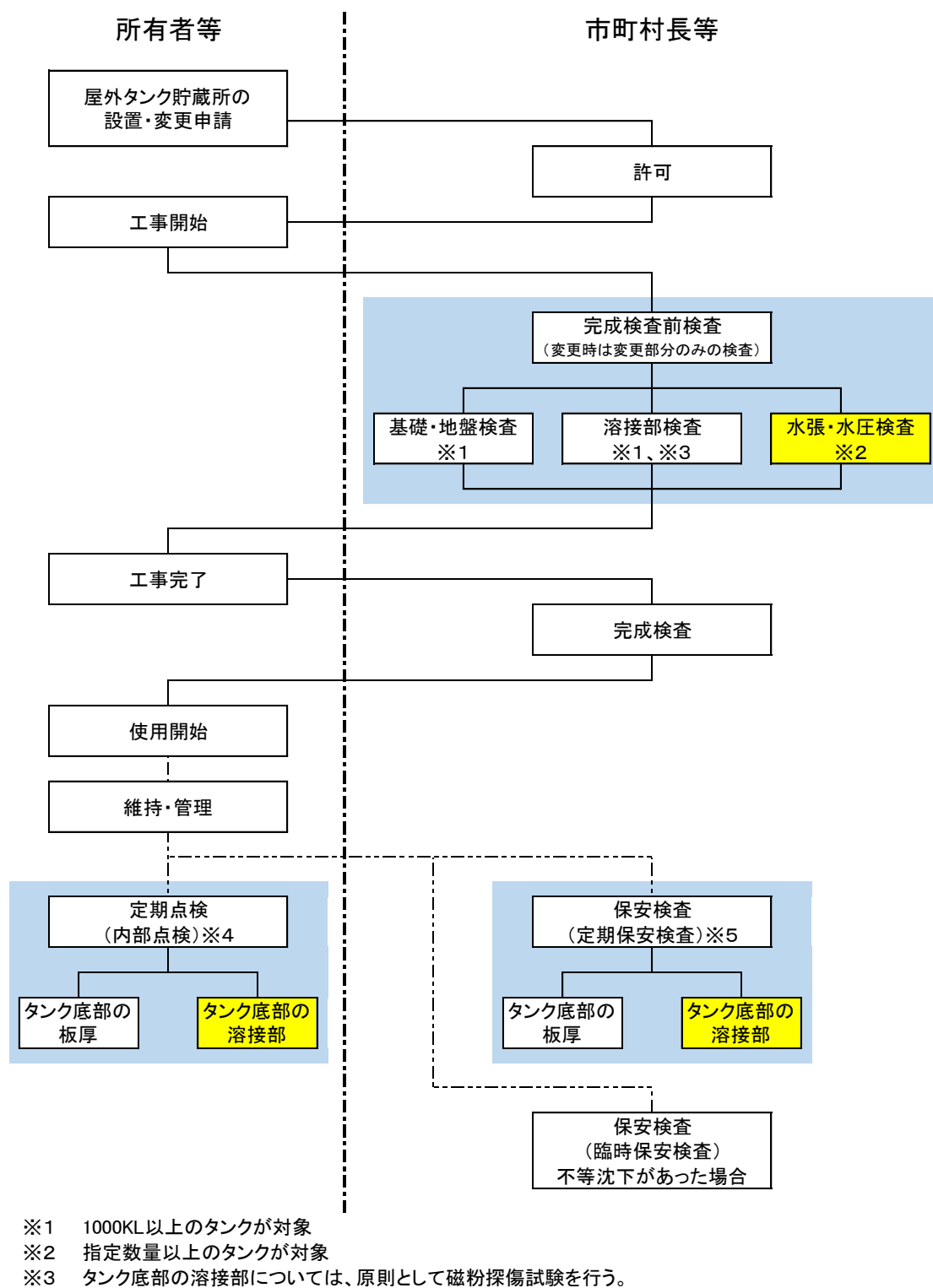


図1 屋外タンク貯蔵所に係る各種検査の流れ

アンケート実施要領

1 特定屋外タンクの補修状況等に関する調査（既存の要目表）

- （1）溶接部検査及び保安検査の際にKHKが提出を依頼している「特定屋外貯蔵タンク要目表」をご提出下さい。
- （2）下表に示す業態、適用法令、容量の区分ごとに、各5基ずつご提出ください。
- （3）基本的に過去3回以上のタンク開放時の要目表が保管されているタンクとし、保管分はすべてご提出下さい。
- （4）該当するタンク基数や要目表が不足する場合には、揃う分だけご提出下さい。
- （5）タンクの選定は、できるだけ所在事業所や使用条件等に偏りが出ないように、各団体においてご選定下さい。

2

受払いについては、概ねの受払いの回数と1回の受払い量の幅を、下表で選定したタンクごとにご回答下さい。

3 地震の被災に関する調査（様式1）

地震の被災回数は、震度6弱相当 以上の地震（震度6以上は過去66回：気象庁データベース）を被災した回数を、下表で選定したタンクごとにご回答下さい。

表 アンケート対象基数

（単位：基）

団体		石連				石化協		電事連		JOGMEC	
加盟会社数		12社（石化協と重複が3社）				28社		10社		10基地	
業態		製油所		油槽所		化学工場		発電所		備蓄基地	
適用法令		旧法	新法	旧法	新法	旧法	新法	旧法	新法	旧法	新法
容量区分	1千～5千KL	5	5	5	5	5	5	5	5	0	5
	5千～1万KL	5	5	5	5	5	5	5	5	0	5
	1万～5万KL	5	5	5	5	5	5	5	5	0	5
	5万～10万KL	5	5	5	5	5	5	5	5	0	5
	10万KL超	5	5	5	5	—	—	—	—	—	5
計		25	25	25	25	20	20	20	20	0	25
		50		50		40		40		25	
		100				40		40		25	

4 水張検査時の不具合事例に関する調査（様式2）

各団体において、事業者にご配布頂き、水張検査時の不具合事例について、把握している範囲でご回答下さい。なお、不具合内容についてはできるだけ詳しくご記入ください。

以 上

受払い・地震の被災に関する調査

団体名：

業態	製油所 ・ 油槽所 ・ 石油化学 ・ 電力 ・ 備蓄基地
適用法令	新法 ・ 旧法

容量区分	No.	受払い回数 (回／年)	1回の受払い量 (最大数量に対する割合%) 最小 最大	地震被災回数 震度6弱相当以上 (回)
1千～5千KL	1		～	
	2		～	
	3		～	
	4		～	
	5		～	
5千～1万KL	1		～	
	2		～	
	3		～	
	4		～	
	5		～	
1万～5万KL	1		～	
	2		～	
	3		～	
	4		～	
	5		～	
5万～10万KL	1		～	
	2		～	
	3		～	
	4		～	
	5		～	
10万KL超	1		～	
	2		～	
	3		～	
	4		～	
	5		～	

消防庁「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」
平成 30 年度屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る検討解析
業務報告書

平成 31 年 3 月 5 日

危険物保安技術協会

内容

1. はじめに
2. 調査検討方法
 - 2.1 水張検査の代替確認方法に係る検討内容
 - 2.2 検討内容及びその調査方法等
3. 既往の調査検討
 - 3.1 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
 - 3.2 水張検査の合理化に関する検討業務
 - 3.3 陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討
4. 屋外貯蔵タンクの補修状況等に関する調査結果
 - 4.1 補修溶接の要件に係る整理
 - 4.1.1 継手形状に関する調査結果
 - 4.1.2 補修部位及び補修溶接の理由・深さ・長さに関する調査結果
 - 4.2 タンクの要件に係る整理等
 - 4.2.1
 - 4.2.2 運転履歴に関する調査結果
 - 4.2.3 腐食管理状況に関する調査結果
 - 4.2.4 有害な変形に関する調査結果
 - 4.3 調査結果のまとめ
5. 補修溶接及びタンクの要件に関連する法令・通知等の整理
 - 5.1 補修溶接の要件に係る整理
 - 5.1.1 継手形状に関する整理
 - 5.1.2 補修部位に関する整理
 - 5.1.3 補修溶接の理由・深さ・長さに関する整理
 - 5.2 タンクの要件に係る整理等
 - 5.2.1 補修率・補修履歴（基礎含む）の整理
 - 5.2.2 運転履歴の整理
 - 5.2.3 腐食管理状況の整理
 - 5.2.4 有害な変形（基礎含む）の整理
 - 5.3 その他の要件に関連する法令・通知等の整理等

6. WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価の適用検討
 - 6.1 適用範囲
 - 6.2 疲労亀裂進展特性
 - 6.3 評価に用いる亀裂寸法と歪
 - 6.4 破壊パラメータ δ の力学算定式
 - 6.5 材料の破壊靱性値 δ_{cr} の設定
 - 6.6 許容判定
7. 実機タンクで使用する鋼板の破壊靱性値 δ_{cr} の推定
 - 7.1 一般構造用鋼板 SS400
 - 7.2 压力容器用鋼板 SPV490Q
 - 7.3 溶接構造用鋼板 SM490
8. 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用
 - 8.1 照査荷重
 - 8.2 解析対象
 - 8.3 残留応力場での疲労亀裂進展解析
 - 8.3.1 初期不整（凸型変形）を有する底板の解析結果
 - 8.3.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の解析結果
 - 8.4 残留応力場での脆性破壊発生検討
 - 8.4.1 初期不整（凸型変形）を有する底板の検討結果
 - 8.4.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果
9. 高レベル地震時のタンク隅角部への適用
 - 9.1 照査荷重
 - 9.2 解析対象
 - 9.3 残留応力場での疲労亀裂進展解析
 - 9.3.1 側板×アニュラ板溶接継手
 - 9.3.2 アニュラ板相互溶接継手
 - 9.4 残留応力場での脆性破壊発生検討
 - 9.4.1 側板×アニュラ板溶接継手
 - 9.4.2 アニュラ板相互溶接継手
10. まとめ
 - 10.1 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用
 - 10.1.1 初期不整（凸型変形）を有する底板
 - 10.1.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板
 - 10.1.3 供用期間中の受払回数（推定）

- 10.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用
 - 10.2.1 側板×アニュラ板溶接継手
 - 10.2.2 アニュラ板相互溶接継手
 - 10.2.3 アニュラ板に生じる塑性域の影響
- 10.3 水張検査を省略することができる評価方法（案）
 - 10.3.1 評価フロー
 - 10.3.2 水張り検査要否の判定基準（案）
 - 10.3.3 補修溶接後の検査（案）
 - 10.3.4 補修溶接の実施要領（案）
- 10.4 今後の課題
 - 10.4.1 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用
 - 10.4.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

[参考文献]

- [添付資料-1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, Appendix A :
Analysis of Flaws（抜粋）
- [添付資料-2] WES2805:2011 解説表 11.4「相関式構築に用いた基礎データ」
- [添付資料-3] 2015 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Division 2 の
算定式による応力歪み線図

- [付属書-1] 液の受入れ払出しを受けるタンク隅角部への適用【通常時】
- [付属書-2] 磁粉探傷試験結果の一例
- [付属書-3] 局部沈下を有する底板の検証解析結果（軸対称解析）
- [付属書-4] 【新基準】 9,900k1 タンクの解析結果（高レベル地震時）
- [付属書-5] 【新法】 18,200k1 タンクの解析結果（高レベル地震時）
- [付属書-6] 【新法】 60,000k1 タンクの解析結果（高レベル地震時）
- [付属書-7] 底板浮上り挙動への弾塑性関節法の適用（簡易解析法の提案）
- [付属書-8] 欠陥を有する溶接継手の疲労破壊試験（検証解析）

1. はじめに

タンク新設時や板の取替えやはめ板などの大規模補修時に行われる水張検査は、実際の使用環境を模した検査であり、水による荷重を加えてタンク本体の「漏れ」、「変形」の有無を確認することに加え、基礎・地盤の不等沈下等を確認しており、タンクの健全性を包括的に評価するものであると考えられる。一方、溶接補修時に行う水張検査は、その補修内容による影響のみを確認するものであると考えられる。

現在、実施されている水張検査以外の検査や確認については、内容物の液圧がかかった状態で行われているものではなく、またこのような状態で確認を行う方法は現時点では存しないと考えられる。

したがって、水張検査を他の確認方法で代替する場合には、内容物の液圧のかからない状態で行うこととなり、水張検査と全く同じ内容を確認することはできないと考えられる。

しかしながら、溶接補修を行う部位、規模等及び適用するタンクを限定することにより、他の確認方法を適用した場合であっても、実際の使用環境下で安全性を担保することができると考える。

表 1.1 タンク底部に対する水張検査の確認内容とその他の検査・確認の整理

	漏れ、変形の要因	新設・大規模補修 (取替・はめ板補修)		小規模補修 (溶接線補修のみ)	
		水張検査での 確認	その他の 検査・確認等	水張検査での 確認	その他の 検査・確認等
漏 れ	設計不備による強度不足	有	・書類審査		
	溶接の不具合	有	・目視検査 ・溶接部検査	有	・目視検査 ・溶接部検査
	溶接による材料脆化、 残留応力に起因する脆性破壊	有	未実施	有	未実施
	隅肉溶接部ののど厚不足			有	未実施
変 形	設計不備による強度不足	有	・書類審査		
	溶接の熱影響による変形	有	・目視検査	有	・目視検査
	基礎の不等沈下等	有	・標準貫入試験等		

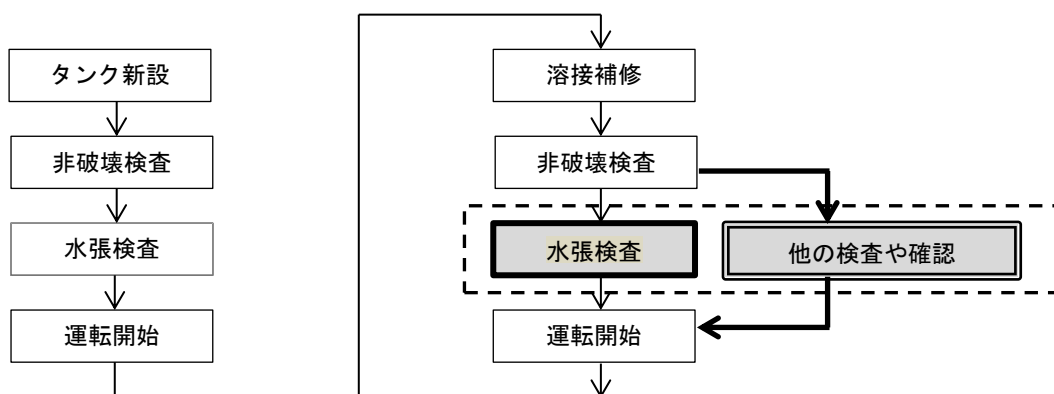


図 1.1 水張検査の代替イメージ

2. 調査検討方法

2.1 水張検査の代替確認方法に係る検討内容

前項1の整理を踏まえ、新設時や大規模補修時に水張試験を実施しているものの、実際の使用環境下で底部の溶接線補修時に実施する水張検査について代替する方法を、次のとおり検討を行うこととする。

(1) 水張検査の代替確認方法の確立

(確認すべき事項)

- ・溶接の不具合
- ・溶接による材料脆化、残留応力に起因する脆性破壊
- ・隅肉溶接部ののど厚不足
- ・溶接の熱影響による変形

(2) 代替確認方法の検討対象

① 補修溶接の要件

- ・継手形状（重ね、突合せ、隅角部）
- ・補修部位
- ・補修溶接の理由・深さ・長さ

② タンクの要件

- ・補修率・補修履歴（基礎含む）
- ・運転履歴（タンクの疲労度）
- ・腐食管理状況
- ・有害な変形（基礎含む）

尚、継手形式のうち「底板重ね継手」は、後述 4.1.1 項のとおり検討対象外とした。

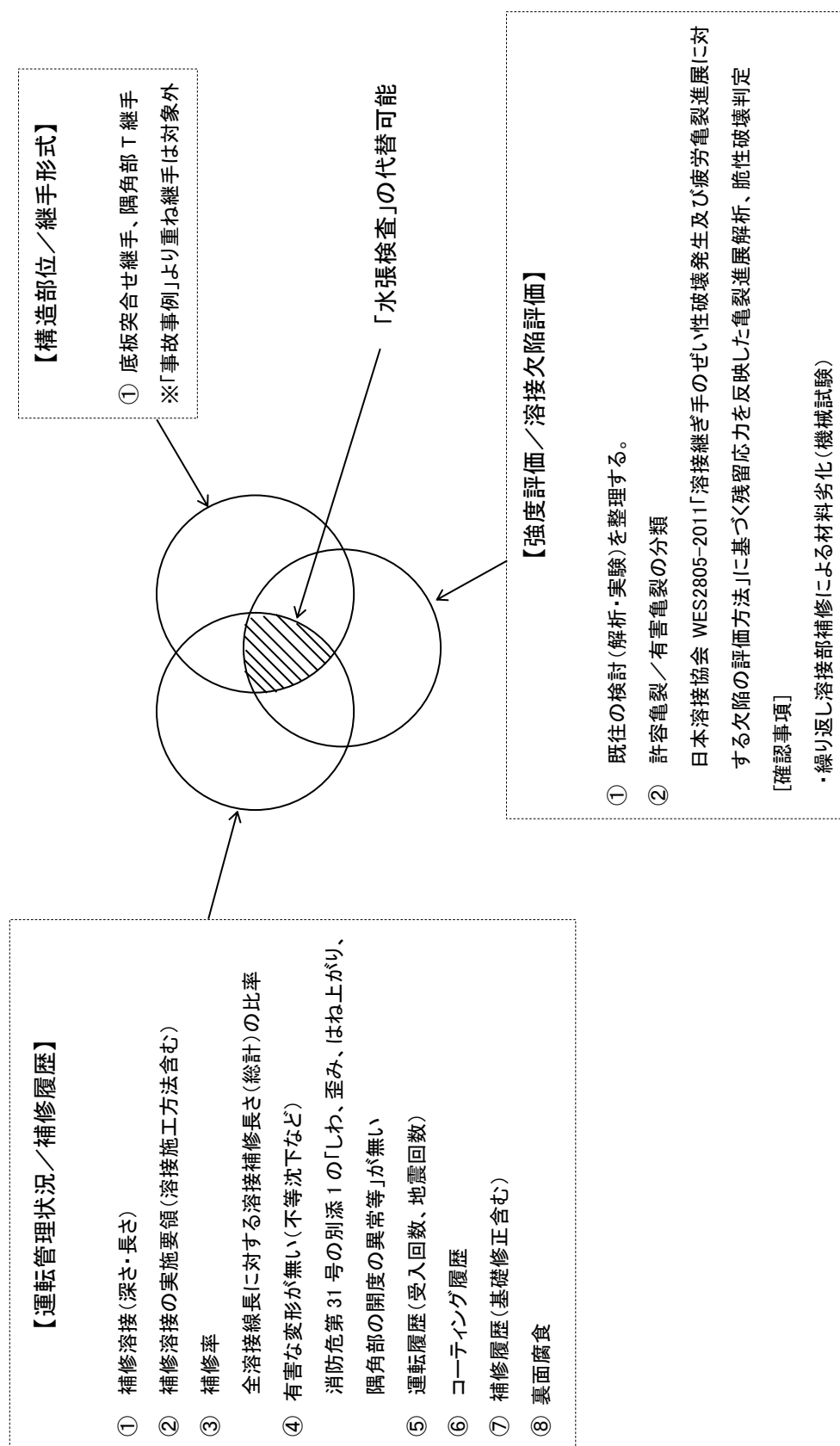


図 2.1 調査検討のイメージ

2.2 検討内容及びその調査方法等

(1) 水張検査の代替確認方法の確立

項目	調査方法等	備考
溶接欠陥の影響	有害欠陥の影響について過去の調査検討内容を整理する。 【調査方法】既往の検討（解析・実験）の整理	3 章
熱影響、残留応力の影響	過去の検討結果を含め、残留応力による亀裂進展の影響、脆性破壊の影響、繰り返し溶接による材料劣化について評価・整理する。 【検討方法】WES2805-2011 に基づく残留応力を反映した亀裂進展解析、脆性破壊判定による評価	3.2(5) 6～9 章
施工管理状況	施工管理が良好か否かを判断する方法について整理する。 〔例〕溶接施工方法確認試験により確認済 等	4 章

(2) 代替確認方法の適用対象

①補修溶接の要件【要件-1】

項目	調査方法等	備考
継手形状	手形式について整理する。 【調査方法】水張検査に関する不具合事例調査	4 章
補修部位	側板から 600mm の範囲を含めて、考え方について整理する。 【調査方法】過去の調査結果や事業所に対する調査	4 章
補修溶接の理由・深さ・長さ	実施されている補修溶接の理由等を調査し、対象となる補修長さや深さ等を整理する。 【調査方法】事業所に対する調査	4 章

②タンクの要件【要件-2】

項目	調査方法等	備考
補修率・補修履歴（基礎含む）	旧法、新法、使用用途等でタンクを分類し、補修率・補修履歴等を調査し、対象となるタンクの条件を整理する。 【調査方法】事業所に対する調査	4 章
運転履歴（タンクの疲労度）	年間の受入回数（空満の繰り返し回数）や過去の地震の被災回数等からタンクの疲労度を整理する。 【調査方法】事業所に対する調査	4 章
腐食管理状況	腐食対策や腐食に対する管理状況等から、対象となるタンクの要件を整理する。 【調査方法】事業所に対する調査	4 章
有害な変形（基礎含む）	基礎地盤の不等沈下や補修実態を調査し、有害な変形について整理する。 【調査方法】事業所に対する調査 〔例〕平成 12 年消防危第 31 号通知別表に示す有害な変形がないこと 等	4 章

3. 既往の調査検討

3.1 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（JOGMEC 委託）¹⁾

危険物保安技術協会, H12～H13 年度

特定屋外タンク貯蔵所の底部溶接部（底板の突合せ溶接部、底板の重ね溶接部及び側板×アニュラ板の隅肉溶接部）に着目して、実験的・解析的に調査研究を行い、使用条件下における当該溶接部のきずに対する評価を行った。

その結果、消防第 93 号平成 12 年 8 月 24 日「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」により、タンク底部溶接部の試験結果の評価について以下の通り示された。

底板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。

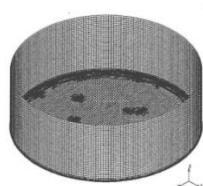
- （1）側板とアニュラ板の溶接継手については、深さが 1.5mm を、長さが 4.0mm をそれぞれ超えないものであること。
- （2）側板とアニュラ板の溶接継手以外については、深さが 3.0mm を、長さが 6.0mm をそれぞれ超えないものであること。

3.2 水張検査の合理化に関する検討業務（JOGMEC 委託）²⁾

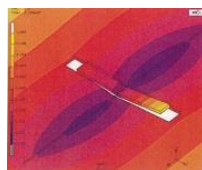
危険物保安技術協会, H19～H20 年度

- （1）補修部位：側板から 600mm 以上離れた底板溶接部（アニュラ板相互・アニュラ板×底板・底板相互）を対象にして、
- （2）補修部位の材質：実タンク底板の材質 SS400、SM400B
- （3）補修長さ・補修間隔：補修実態調査より、補修長さ 50mm～最大 700mm
- （4）補修深さ：補修実態調査より、主な補修深さ 3mm～最大 8mm

底部溶接部補修の変形等に関する FEM 解析（熱弾塑性解析）→解析モデル（2.4m×2.4m 周囲拘束）より、溶接角変形量を強制変位として考慮。



〔全体モデル〕



〔底板継手モデル〕

- （5）繰り返し補修回数：材質 SM400B、板厚 12mm の試験体を作成し、溶接補修 0 回材（未補修）、5 回材、10 回材の引張試験、衝撃試験、硬さ試験を実施し、引張試験、衝撃試験、硬さ試験の値は殆ど変わらず、材料劣化は見られない。尚、H19 年度及び H20 年度に実施した繰り返し溶接による材料劣化の影響を調査した結果を、表 3.1 に示す。
- （6）基礎・地盤：「堅固な基礎・地盤」の条件として、実機 15,000k1 タンク水張りをを行った影響による底板の変形量（沈下量）と水張り前後における変形量を計測、FEM 解析を実施した。

表 3.1 繰返し溶接による材料劣化の影響調査

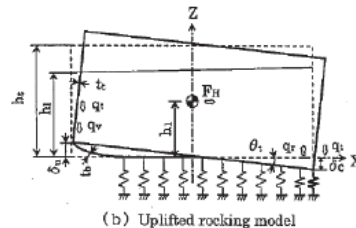
年度	材質	板厚	試験内容	試験結果	備考
H19	SM400B	12mm	【3 種類】 補修溶接 0 回（未補修） 補修溶接 5 回 補修溶接 10 回	材料劣化は見られなかった。	
H20	SPV490Q	15mm	【4 種類】 補修溶接 0 回（未補修） 補修溶接 1 回 補修溶接 3 回 補修溶接 5 回	材料劣化は見られなかった。	

3.3 陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討（JOGMEC 委託）³⁾

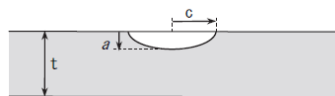
横浜国立大学, H23～H25 年度

サブテーマ 3「水張検査の合理化と経年劣化に係る隅角部の構造健全性評価」

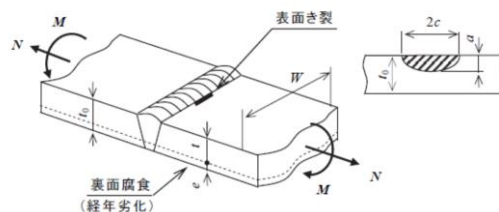
（1）隅角部浮上り地震応答解析（IHI モデル・CYD モデル、三次元 FEM 解析）



（2）隅角部隅肉溶接部のき裂進展検討: アップリフト時のアニュラ板初期亀裂(幅 26mm×深さ 1～10mm)の進展を HPI 提案式で評価。



（3）備蓄タンクのアニュラ板溶接部の亀裂進展検討: WES2805 による初期亀裂（幅 6mm×深さ 3mm）、引張応力範囲 490MPa を仮定して評価



（4）水張検査に係るクリティカルゾーンの検討→減肉・残存板厚率 80%を許容限界として、 $L_{cr} = 7 \cdot t_a$ を提案

4. 屋外貯蔵タンクの補修状況等の調査結果

「解析用タンクデータの提供について」（平成 29 年 10 月 5 日付消防危第 196 号）で、消防庁危険物保安室長から各業界団体（石油連盟、石油化学工業協会、電気事業連合会、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構）に対して調査した結果、次のとおりデータが提出された。

- 特定屋外タンクの補修状況等に関する調査（既存の要目表）

115 基分の要目表（開放データ）が提出され、これらに危険物保安技術協会（以下、「協会」と言う。）で保有する開放データを補完した。

→ 対象タンク基数：115 基、365 開放データ（1 基あたり約 3 開放データ）

- 受払いに関する調査

157 基分のデータが提出された。

- 地震の被災に関する調査

157 基分のデータが提出された。

- 水張検査時の不具合事例に関する調査

12 事案が提出された。

上記のデータについて、整理した結果を以下に示す。

4.1 補修溶接の要件に係る整理

4.1.1 継手形状に関する調査結果

表 4.1 に、水張検査時の不具合事例に関する調査結果を示す。水張検査の結果、底部溶接線破断により漏水に至った事案は 2 件あり、いずれも破断部位は底板相互で、溶接継手形状は重ね隅肉溶接継手である。

表 4.1 水張検査時の不具合事例に関する調査結果

No.	タンク容量 (KL)	貯蔵品名称	設置許可年月	発生年月	水張りの対象となる変更内容	不具合内容	その後の対応
1	154,642	原油	S46.5	H23.5	底端板部分取替え補修	水張検査の水張時に底板溶接線が破断し、漏水が発生した。水抜き後の調査により、底板のすみ肉溶接線に割れ(約1,000mm)を確認した。原因は、建設時の基礎の底圧不足による基礎の陥没により、局部的にタンク底板と基礎との間に許容以上の隙間が発生していたため、溶接線の一部に応力が集中し破断に至った。	底部溶接線全線のMTを実施し、溶接線割れ近傍に線状欠陥を検出した。また底板の形状測定及び間隙測定を実施し、割れ近傍の基礎が局部的に陥没し100mm以上の空隙を確認した。基礎を含む補修実施後、再度水張検査を実施し、異常がないことを確認した。
2	98,410	原油	S43.5	H20.8	・アニューラ板取替、底板当板、その他溶接線補修 ・側板肉盛補修 ・基礎修正	保安検査合格後の水張り塗中に、アニューラ板と基礎の間より漏水を認め、水張りを中止し、内部確認した結果、底板の3枚重ね溶接線に割れ(120mm)を認めた。	不具合原因の調査ならびに、底板全溶接線のもの厚測定とMTを実施。溶接線補修を実施後、再度保安検査を受検、水張り検査を実施した。
3	34,350	軽油	S44.2	H16.6	アニューラ板部分取替(1箇所)、内タライ全周、底板相互(30%)溶接線補修	水張検査の水抜き後、内タライ溶接線のMTを実施したところ、アニューラ板取替箇所側の溶接線補修部の底板側止端部に、線状指示(4箇所、最大長さ910mm)を検出した。	その他の溶接線については欠陥は検出されなかった。アニューラ板不具合部の2箇所取替、再度溶接部検査、水張検査を実施し、異常がないことを確認した。
4	14,350	重油	S48.5	H29.1	底板部分取替え、内タライ全周溶接補修、アニューラ板相互17m、アニューラ×底板全周補修、底板17m溶接補修	水抜き後底板溶接線のMTを実施したところ補修部近くの既設溶接線に線状指示線検出(指示線長さ110mm)	欠陥を補修後、溶接部検査受検、再度水張検査を実施し、異常がないことを確認した。
5	2,000	タタリ酸ガソリン	S55.2	H29.8	底板溶接線補修	水張検査後にバキューム検査を実施したところ、底板治具跡の溶接線に溶接欠陥が見つかった。溶接欠陥は製作時の治具跡補修時にできたブローホールが経年使用によって貫通したものと推測する。(水張検査後のタンク内底部目視点検時に当該治具跡付近に付着物があることに違和感を覚え、バキューム検査を実施したところ、溶接欠陥であることが判明。)	他治具跡についてPTを行い、異常のないことを確認した。当該溶接欠陥部は肉盛補修後、PT及びバキューム検査にて異常がないことを確認した。
6	30,000	重油	S54.8	H28.9	内タライ、アニューラ相互、溶接線補修及び底板全面更新、側板最下段底板搬入用開口部設置	水張検査の水張中、側板より漏水があった。位置：底板より17.41m タンク内面、泡消火配管ノズル直下の中間スライファナー上部腐食による開孔 1c m×2cm (17.538m/30,000kl)	類似箇所5箇所を目視及び肉厚測定を実施したが、異常な減肉はなかった。当該箇所を止め板補修し、完成検査前検査及び水張検査にて異常がないことを確認した。
7	124,959	原油	S53.8	H19.7	側板ノズル出し、内タライ、アニューラ相互溶接線補修及び浮き屋根更新	側ノズル(16B)の補強板隅肉溶接部に割れを検出した。	欠陥除去後、再溶接を行い、MT・PTを実施し、異常がないことを確認した。
8	510	有機液	S46.4	H27.11	側板下部500mm切断	当該タンクの改造工事を終え、消防検査(満水検査)のため水張りを実施。タンク上部に繋げたホースからの水流出により満水を確認後、水張りを停止したが、サイフォン現象によりオーバーフローが続きタンク内が減圧となりタンク上部が変形した。	タンク上部更新。
9	400	ジメチルホルムジド	S51.3	H29.9	側板肉盛補修及び底板当板補修	水張り検査前、変更許可申請以外の小口径ノズルは再塗装を実施していた。塗装の塗膜で水張り検査時漏洩はなかったが、実液を張り込んだ際、実液で塗膜が溶け、変更許可申請以外の小口径ノズルから、微漏洩した。	基本的に、全面ブラストし再塗装する際、許可申請以外の小口径ノズルも未塗装で水張り検査を受検する。(市の消防局と個別相談)
10	276	伸展油、老化防止剤等	H11.3	H11.8	屋外貯蔵タンクの新設(設置)	当該タンクは、5つの室に仕切った5分割タンクであり、1室ずつ水張検査を行っていたところ5室目に水を溜った際、タンクが変形した。水張検査を行う事でタンクの仕切板、側板等の強度不足が顕在化した。	タンクの仕切板、側板を補強後、再度水張検査を行い漏れ変形がないことを確認した。
11	185	クエンチオイル(重質油)	S42.8	H18.1	天板全面および側板部分更新	溶接後のMT検査で不具合は見つからなかったが、水張り時に天板とトップアニューラの溶接線から滲み漏れが発生した。	当該部の溶接補修後、再度MT検査を実施、問題ないため水張り試験を行い、異常はなかった。
12	-	-	-	-	水張り検査全般	水張りによりCS製タンクで錆びが生じる、使う水(工業用水)によって泥が溜まるので、再洗浄が必要。	-

また、参考として、表 4.2 及び表 4.3 に協会が、平成 20～29 年度（平成 30 年 1 月 19 日現在）までの間に実施した保安検査及び完成検査前検査において、底板溶接線の割れによる不適合案件を示す。不適合事案は 23 件あり、その内訳は補修溶接不良が 14 件、既設検査不備が 9 件である。

底部溶接線の割れによる不適合事案を溶接部位毎に見てみると、内タライ（側板×アニュラ板）16 件、アニュラ板相互 1 件、亀甲（アニュラ板×底板）2 件、底板相互 4 件であり、そのうち亀甲及び底板相互の溶接継手形状については、全て重ね隅肉溶接継手である。

表 4.2 底部溶接線の割れによる不適合案件

平成30年1月19日現在

平成30年1月15日現在

年度	溶接部位				合計	割れの原因	
	内タライ	アニュラ相互	亀甲※1	底板相互※1			
						補修溶接不良※2	既設検査不備※3
H20	1		1		2		2
H21	3				3	1	2
H22		1			1	1	
H23	4			1	5	4	1
H24	4				4	2	2
H25			1	1	2	2	
H26	1				1	1	
H27					0		
H28	1			1	2		2
H29	2			1	3	3	0
合計	16	1	2	4	23	14	9

※1 割れが認められた亀甲及び底板相互の溶接継手形状は**全て隅肉溶接**

※2 補修溶接不良：補修溶接を行った後の非破壊検査にての見落とし（遅れ割れ等を含む）

※3 既設検査不備：開放検査による既設溶接線の欠陥の見落とし（応力腐食割れ等を含む）

これらの不具合事例を考慮して、今回の調査検討では、「底板重ね溶接継手」を検討対象から除外することとした。

表 4.3 底部溶接線の割れによる不適合案件一覧表

平成30年1月19日現在

No.	年度	検査区分	容量(KL)	部位	割れの原因	割れの概要
1	H20	保安	11,200	内タライ	既設検査不備	内タライ・アニュー板側止端部に線状磁粉模様4.5mm、1箇所有り
2	H20	保安	145,910	亀甲 (隅肉溶接)	既設検査不備	亀甲部未補修部のアニュー板母材部に15本の線状指示模様を確認。割れと判定。
3	H21	保安	31,836	内タライ	既設検査不備	側板内タライ溶接線からパーシャルアニュー板母部に向かつて6mmの線状指示模様有り。
4	H21	保安	12,795	内タライ	既設検査不備	内タライの側板側溶接線止端部に線状磁粉模様(長さ11mm及び7mm)2箇所有り。
5	H21	保安	46,789	内タライ	補修溶接不良	内タライの側板側溶接線止端部に線状磁粉模様(長さ9.0mm)1箇所有り。
6	H22	完前	5,127	アニュー相互	補修溶接不良	アニュー板相互溶接部(抜取No.8)熱影響部に割れ(磁粉模様長さ3mm)1箇所あり
7	H23	保安	97,417	内タライ	補修溶接不良	タライ内側溶接線側板側溶接線止端部に線状磁粉模様8.0mm1箇所あり。
8	H23	保安	34,625	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	底板当板溶接部の熱影響部(抜き取りNo38)に割れ(線状磁粉模様 長さ4.0mm)1箇所あり。
9	H23	保安	18,900	内タライ	既設検査不備	内タライ溶接線止端部からアニュー板母材側に割れ有り(抜き取りNo.37)。
10	H23	保安	48,034	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	底板相互溶接線(抜取No.34)近傍2mmに線状磁粉模様(長さ4.5mm)1箇所あり。
11	H23	完前	2,000	内タライ	補修溶接不良	内タライ溶接部(抜き取りNo.6)に線状磁粉模様 合計長さ13.5mm)有り。(145.5mm範囲に7箇所)
12	H24	保安	106,340	内タライ	既設検査不備	側板xアニュー板の内タライ溶接線のアニュー側止端部に線状指示模様4.1mm1カ所が確認。他に1.5mm長さが2カ所確認された。
13	H24	完前	9,999	内タライ	補修溶接不良	内タライ溶接溶接線に線状磁粉模様5.5mm 1箇所確認。(1mm+0.5mm(間隔)+1mm+0.5mm(間隔)+2.5mm=5.5mm同一線上)後日、スンプ試験の結果から割れと判明。
14	H24	保安	353,981	内タライ	既設検査不備	側板とナックル板との溶接部(抜き取りNo.14)に線状磁粉模様5.5mmを確認した。詳細は2.5mmの模様+1.0mmの間隔+2.0mmの模様で合計5.5mmとした。
15	H24	保安	46,363	内タライ	補修溶接不良	側板xアニュー板の内タライ溶接線のアニュー側止端部に線状指示模様、合算長さ20.0mm(4mm、間隔1mm、15mm) 1箇所確認
16	H25	完前	1,862	亀甲 (隅肉溶接)	補修溶接不良	MT実施中、亀甲廻り溶接線(熱影響部 No.9抜き取り箇所)に線状指示模様 5.0mm 1箇所 有り。 不適合とした。
17	H25	完前	1,862	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	MT実施中、底板相互溶接線の止端部から2mmの箇所(No.12抜き取り箇所)に割れによる線状磁粉模様 3.5mm 1箇所が有り、不適合とした。
18	H26	保安	51,012	内タライ	補修溶接不良	側板xアニュー板内側溶接部アニュー母材側(抜き取りNo.20)に割れ有り。
19	H28	保安	20,500	内タライ	既設検査不備	MT検査時、側板xアニュー板内側溶接線(抜き取りNo.7)に線状磁粉模様8箇所(25cm以内に指示模様長さ1mmを超えるものx8箇所 合計長さ17.1mm)あり。
20	H28	保安	14,660	底板相互 (隅肉溶接)	既設検査不備	MT検査時、底板相互溶接線(抜き取りNo.28)の熱影響部から母材部にかけて割れが3箇所(4.5mm、2.5mm、2.0mm)有り、不適合としたもの。なお、当該部分は開放検査で所見が無く、補修範囲外の部分であった。
21	H29	完前	4,570	底板相互 (隅肉溶接)	補修溶接不良	底板相互溶接部(すみ肉溶接)に、抜き取り番号No.13に線状磁粉探傷模様(25cm以内に長さ1.1mm以上 x 5カ所 合計8.1mm)が確認された。(模様は割れ形状を示していた) 不適合とした。
22	H29	保安	64,467	内タライ	補修溶接不良	側板xアニュー板溶接部の下端側母材部(抜き取りNo.19)に割れ(指示模様長さ3.5mm)を確認されたため、不適合とした。
23	H29	完前	7,003.7	内タライ相当	補修溶接不良	ヘミスヘロイドタンクの側板x圧縮リング内側溶接線(抜き取りNo.21)に割れ(長さ1.0mmx1箇所、0.5mmx8箇所)が確認されたため、不適合とした。

4.1.2 補修部位及び補修溶接の理由・深さ・長さに関する調査結果

図 4.1 のように、溶接部位については、内外タライ（側板×アニュラ板）、アニュラ板相互、亀甲（アニュラ板×底板）及び底板相互に分けられる。側板から 600 mm の範囲の部位は、内タライとアニュラ板相互（一部）が該当する。

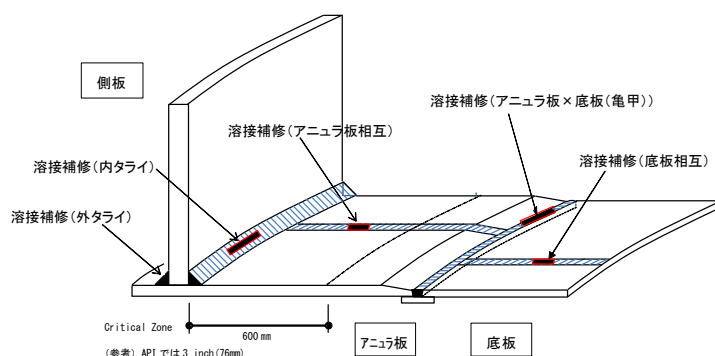


図 4.1 溶接補修部位

尚、後述のグラフ等で使用する用語の定義は以下のとおり。

グラフで使用する用語の定義

- ◆ 溶接線補修率 : 溶接線長さに対する補修した長さの割合
(事業所申告値)
- ◆ 溶接線補修長さ : 溶接線長さに補修率を掛けたもの
(溶接線補修長さ = 溶接線長さ × 補修率)
- ◆ 欠陥出現率 : 開放データ数に対する各欠陥が出現したデータ数の割合
(欠陥出現率 = 各欠陥が出現したデータ数 / 開放データ数)
- ◆ 使用年数 : 設置の完成検査年からの使用年数
- ◆ 不等沈下率 : タンク直径に対する不等沈下量の割合
(不等沈下率 = 不等沈下量 / タンク直径)

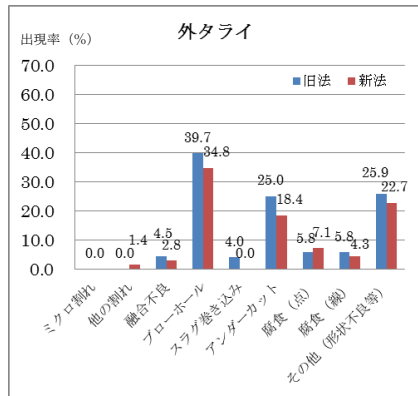
(1) 欠陥出現率

図 4.2 に、溶接線補修部位ごとの欠陥出現率（開放データ数に対する各欠陥が出現したデータ数の割合）を示す。

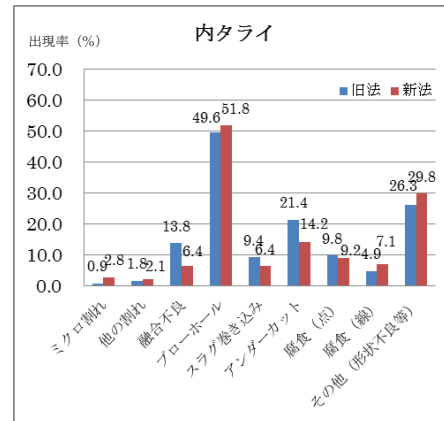
補修理由（欠陥種類）については、各部位でほぼ同様の傾向がみられる。

ただし、補修理由の中で割れは最も有害な欠陥であり、その原因は、溶接時の施工不良がもたらす割れや、供用中の繰り返し荷重による疲労割れ等が考えられる。割れが検出されたタンクについては、溶接全線の健全性を確認する必要があると考える。

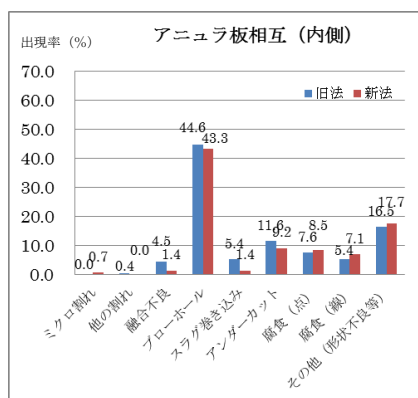
なお、各欠陥は、事業所による開放検査時に検出したものであり、全て補修がされている。



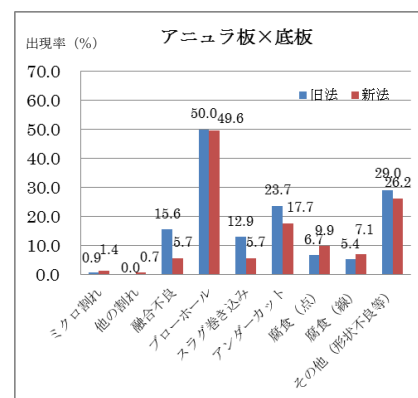
(a) 側板×アニュラ板 (外タライ)



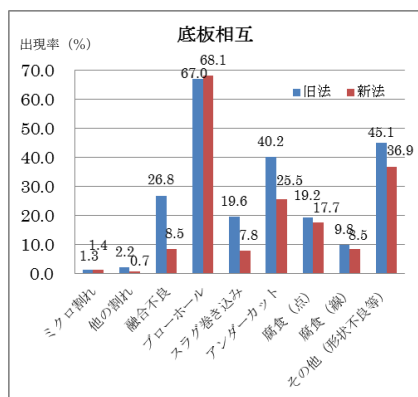
(b) 側板×アニュラ板 (内タライ)



(c) アニュラ板相互 (内側)



(d) アニュラ板×底板



(e) 底板相互

図 4.2 溶接線補修部位ごとの欠陥出現率

(2) 底部溶接線補修長さ

図 4.3 に部位・容量別の底部溶接線平均補修長さ、図 4.4～4.7 に使用年数と底部溶接線補修長さの関係を示す。

溶接線補修長さ（板替に係る溶接線は補修に含めない）については、溶接線長さに溶接線補修率を乗

して算出した。なお、溶接線長さは、次の算出要領に基づき算出した。

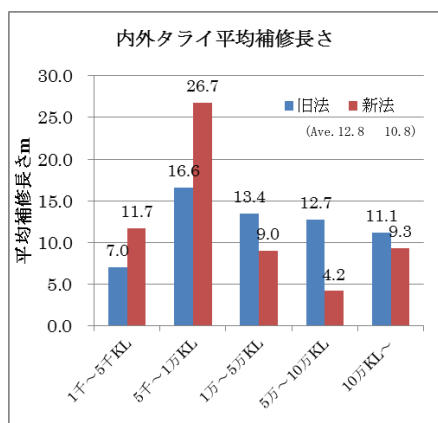
- ・ 内外タライ → 対象タンクの内径から算出
- ・ アニュラ板及び亀甲 → 代表タンク※の内径に比例して算出
- ・ 底板相互 → 代表タンク※内径の二乗に比例して算出（面積比）

※代表タンク（許可容量：24,020kl、内径：43.6m、アニュラ板相互：18.435m、亀甲：127.935m、底板相互：680.864m）

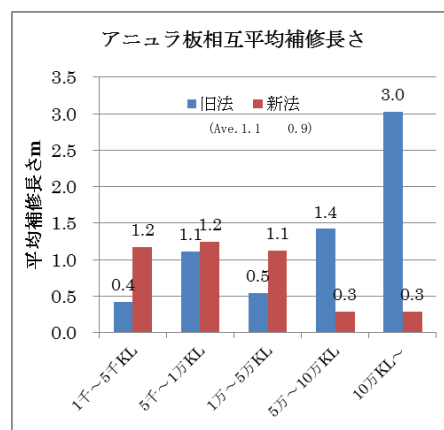
平均補修長さ（全体）について、旧法タンクより新法タンクの方が各部位共通して短い傾向となっている。容量別に比較すると10万kl以上の新法タンクは、旧法タンクに比べて非常に短い。

なお、H28年度に協会が実施した事前調査でも同様の傾向が見られた。

溶接継手の肉盛り補修長さについては、JIS B 8501（鋼製石油貯槽の構造（全溶接製））で、軟鋼で25mm以上、高張力鋼でmm以上とされており、補修溶接の深さについては、底部溶接線検査に用いられる検査手法（目視、MT、PT）で検出できるのは表層（MTでは深さ3mm程度まで）のみであり、検出された欠陥を全て除去することから、補修される深さは3mm～5mmと推定する。

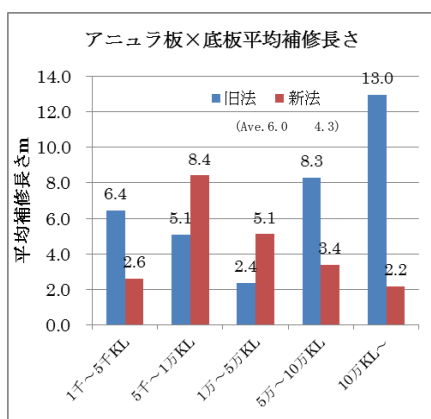


(a) 側板×アニュラ板 (※)

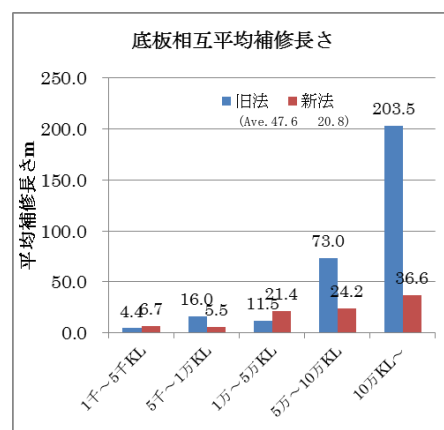


(b) アニュラ板相互

※ 内外タライ補修長さについては、内タライと外タライそれぞれの溶接線補修長さの平均値とした。

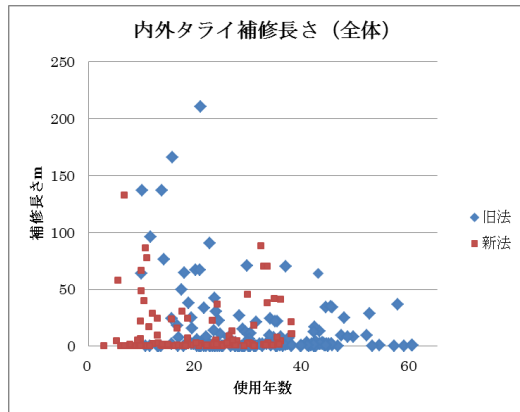


(c) アニュラ板×底板

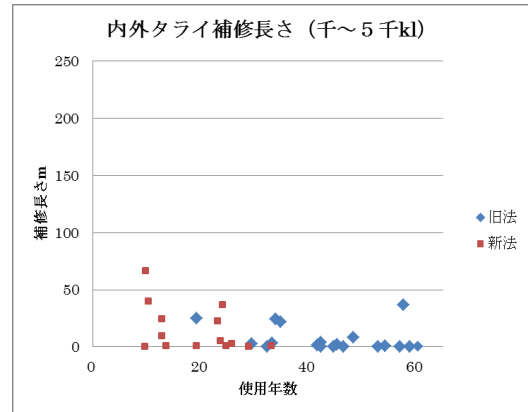


(d) 底板相互

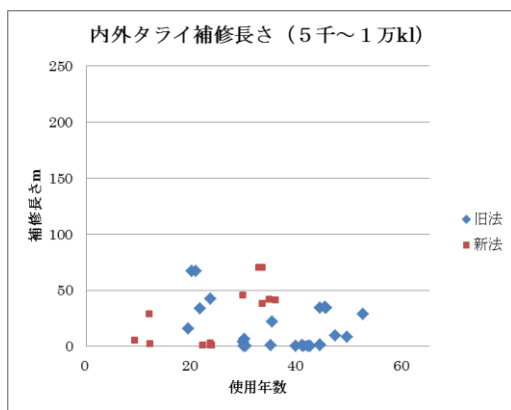
図 4.3 部位・容量別の底部溶接線補修長さ【平均補修長さ】



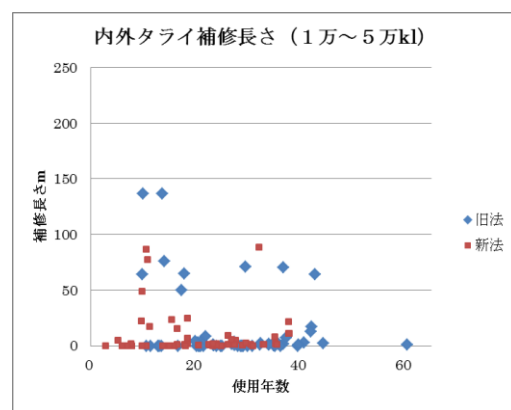
(a) 全体



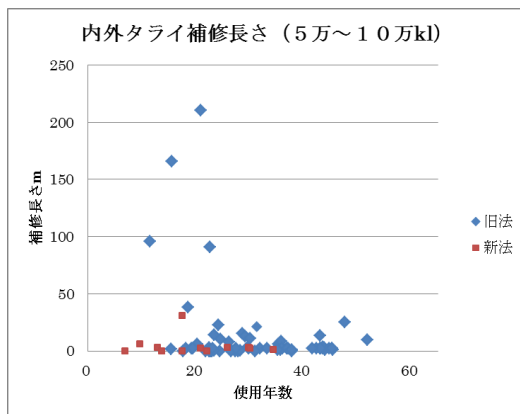
(b) 千～5千kl



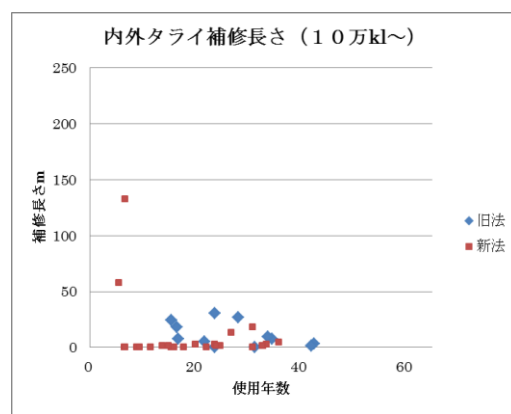
(c) 5千～1万kl



(d) 1万～5万kl

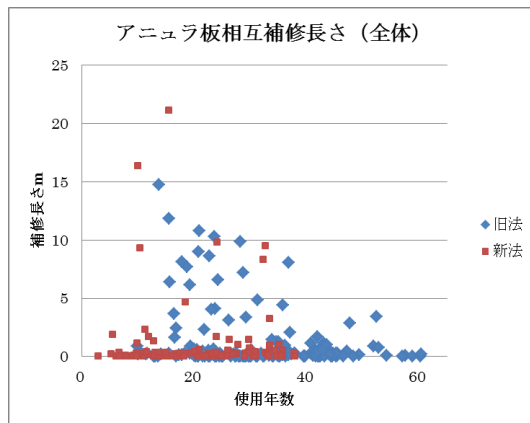


(e) 5万～10万kl

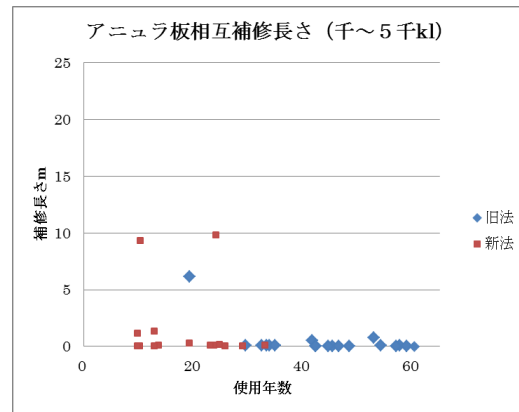


(f) 10万kl～

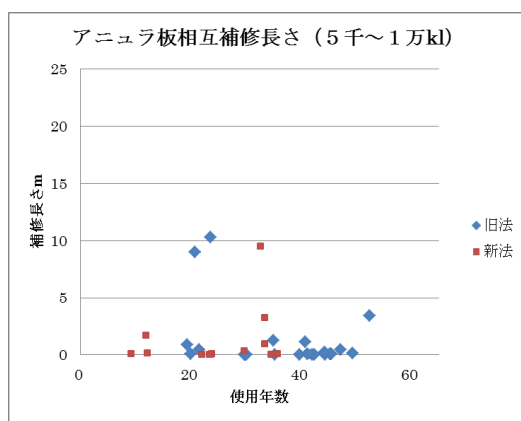
図 4.4(1) 使用年数と底部溶接線補修長さの関係
側板×アニュラ板 (内外タイ)】



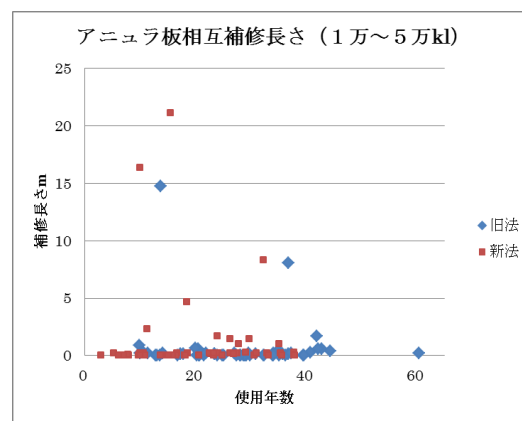
(a) 全体



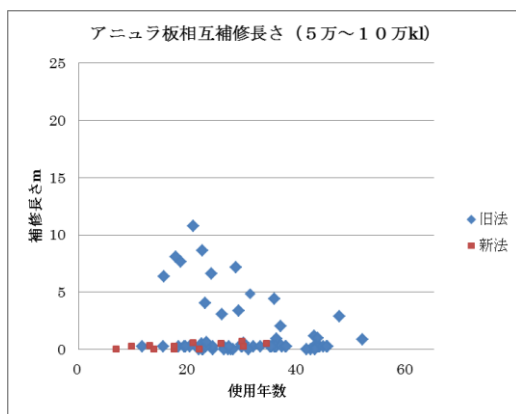
(b) 千～5千kl



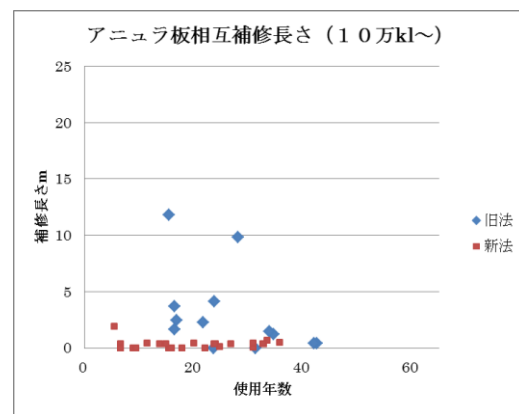
(c) 5千～1万kl



(d) 1万～5万kl

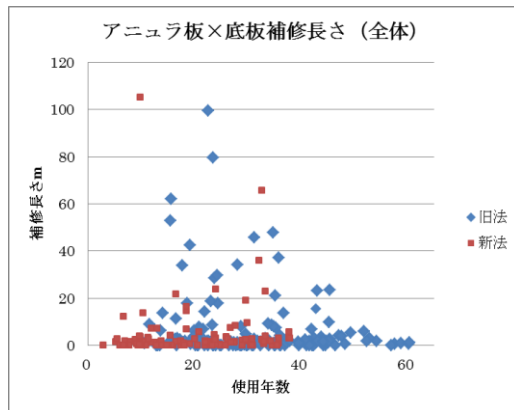


(e) 5万～10万kl

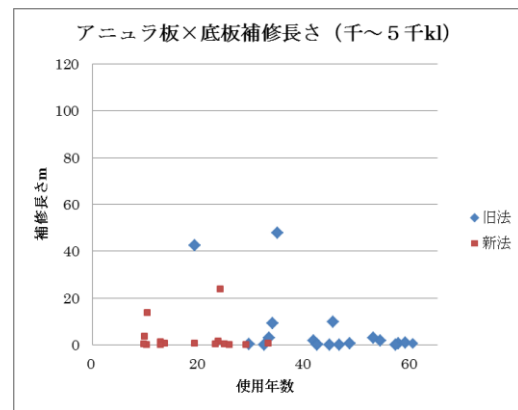


(f) 10万kl～

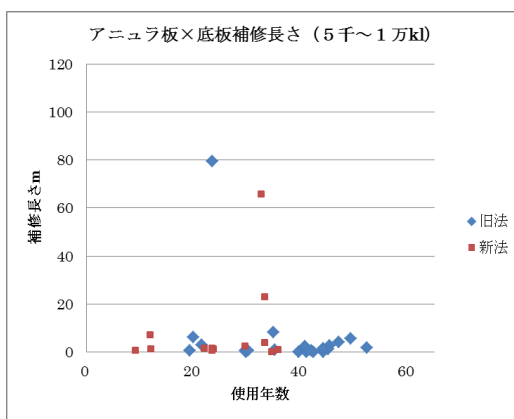
図 4.4(2) 使用年数と底部溶接線補修長さの関係【アニュラ板相互（内側）】



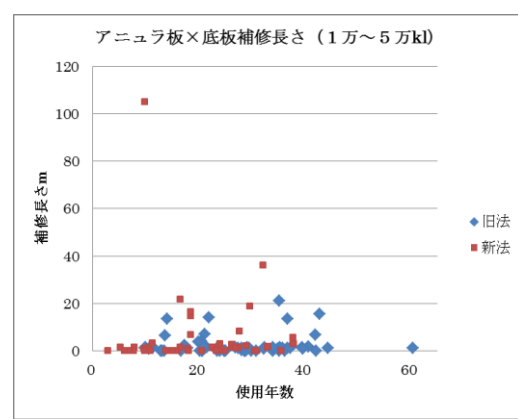
(a) 全体



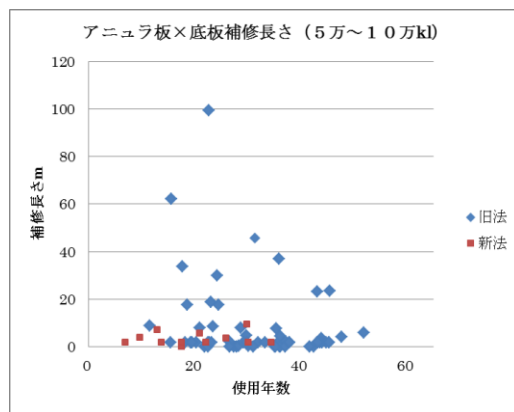
(b) 千～5 千 kl



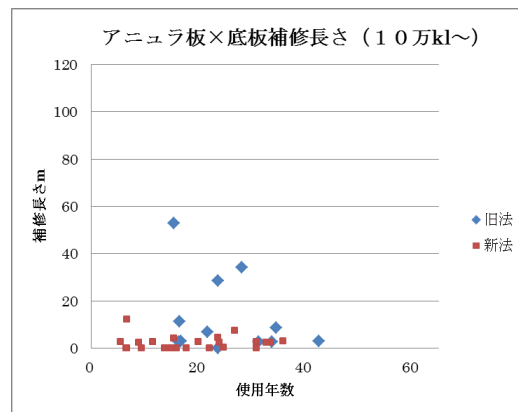
(c) 5 千～1 万 kl



(d) 1 万～5 万 kl

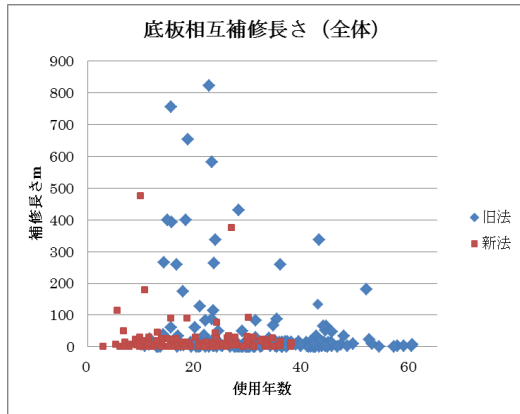


(e) 5 万～10 万 kl

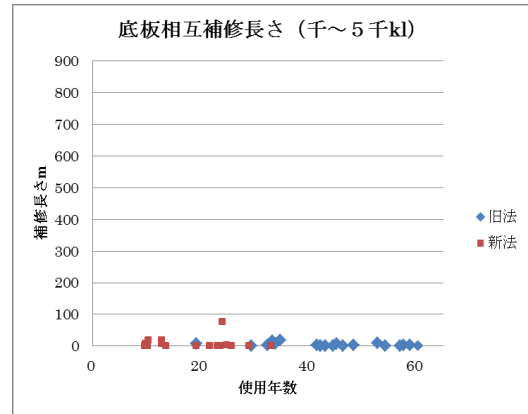


(f) 10 万 kl～

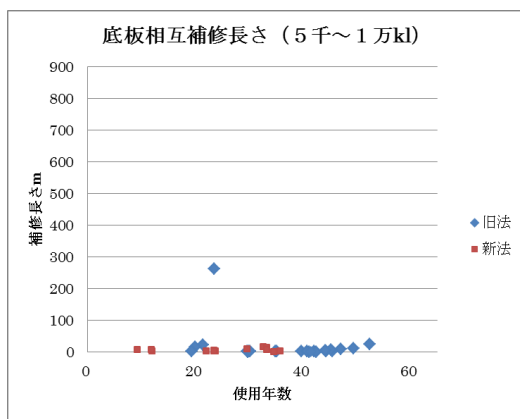
図 4.4(3) 使用年数と底部溶接線補修長さの関係【アニュラ板×底板（亀甲）】



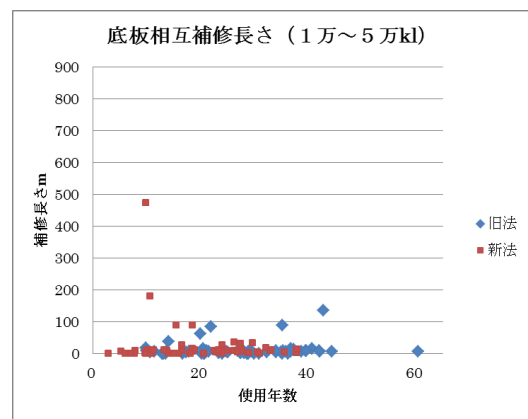
(a) 全体



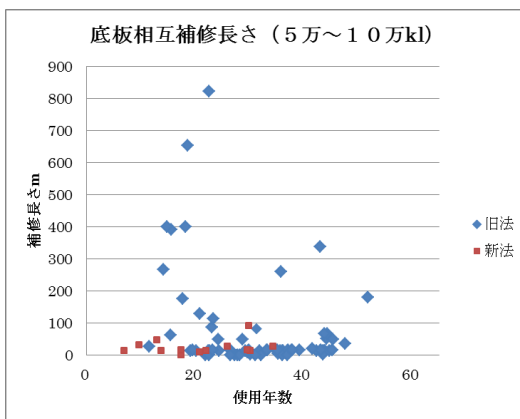
(b) 千～5千kl



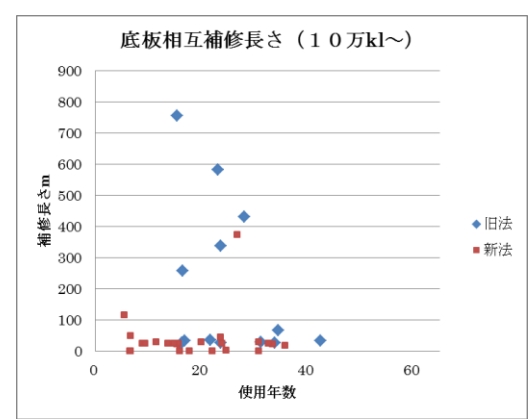
(c) 5千～1万kl



(d) 1万～5万kl



(e) 5万～10万kl



(f) 10万kl～

図 (4) 使用年数と底部溶接線補修長さの関係【底板相互】

4.2 タンクの要件に係る整理等

4.2.1 補修率・補修履歴（基礎含む）に関する調査結果

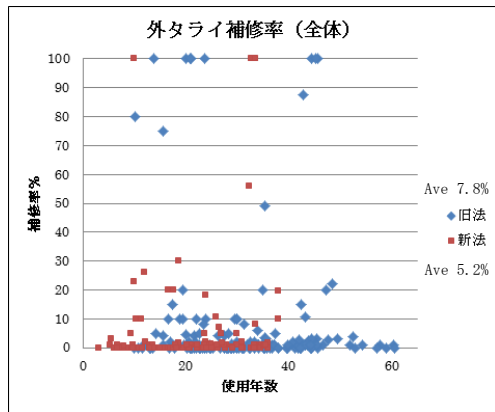
図 4.8～4.11 に業態別の使用年数と底部溶接線補修率の関係、表 4.4 に補修率 100%を抽出したリストを示す。

溶接線補修率は、溶接線長さに対する補修した長さの割合で、事業所が算出した数値である。

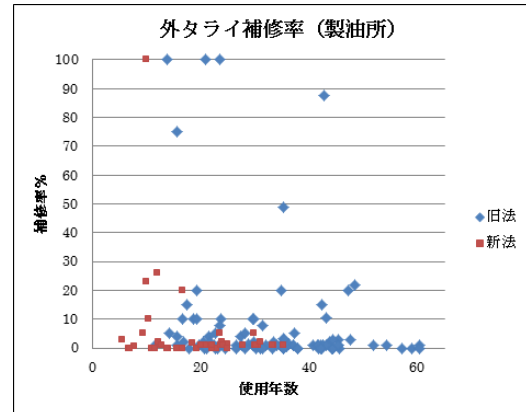
新法タンクと旧法タンクを比較すると、今回（H29 年度）の調査結果からは明確な補修率の違いはなかった。

なお、H28 年度に協会が実施した事前調査結果では、新法タンクの補修率は旧法タンクの補修率より低い傾向となっていた。

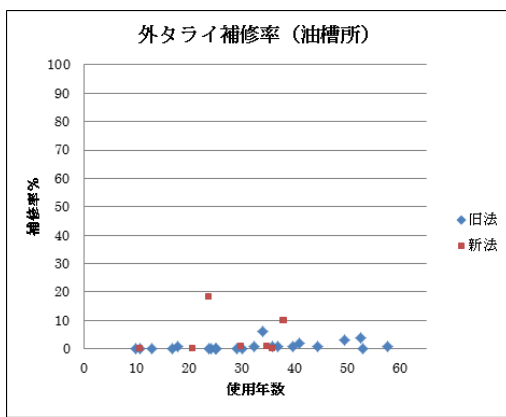
また、補修率が 100%となっているデータを抽出しその補修理由をみると、ミクロ割れ（M）、他の割れ（K）が 1 件のうち 9 件（18.0%）発生している。



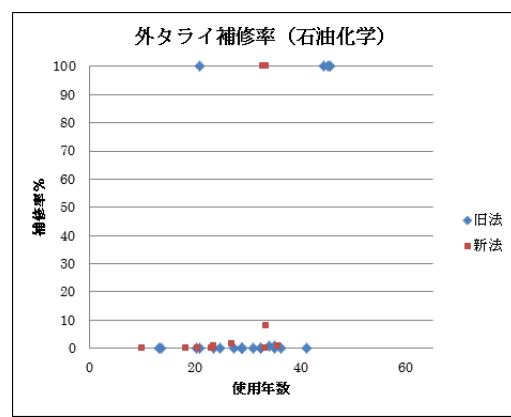
(a) 全体



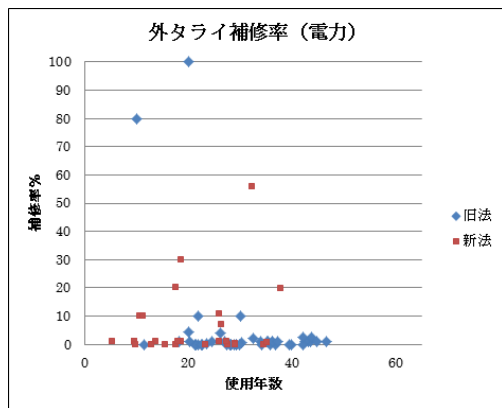
(b) 製油所



(c) 油槽所



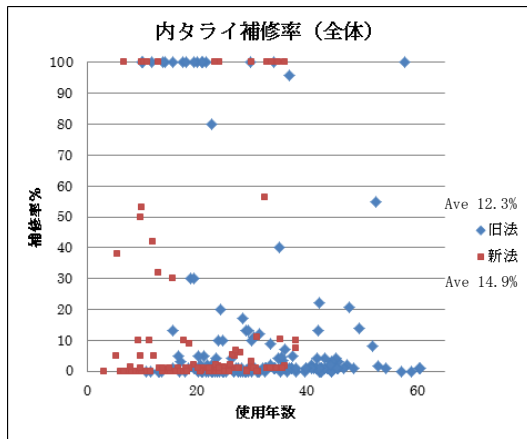
(d) 石油化学



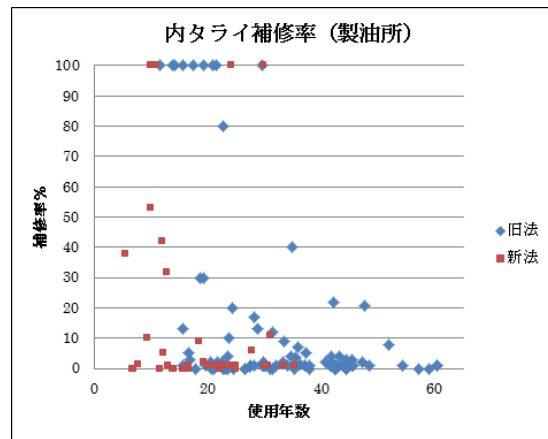
(e) 電力

(f) 備蓄基地

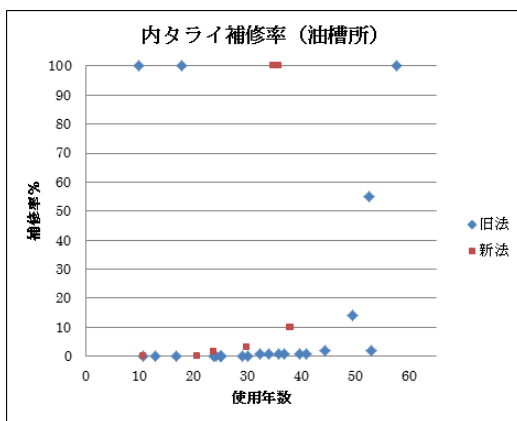
図 4.8 (a) 業態別の使用年数と底部溶接線補修率の関係
【側板×アニュラ板（外タライ）】



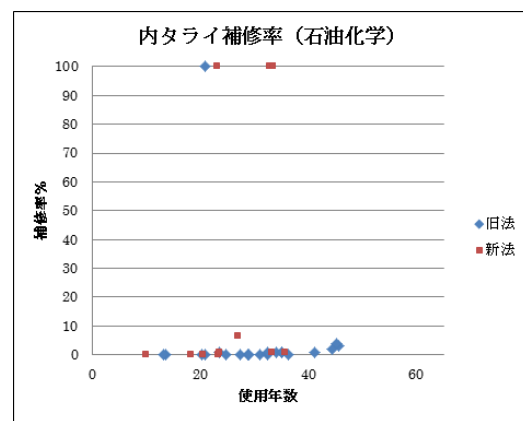
(a) 全体



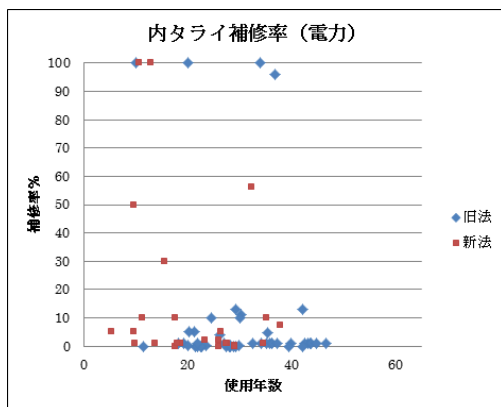
(b) 製油所



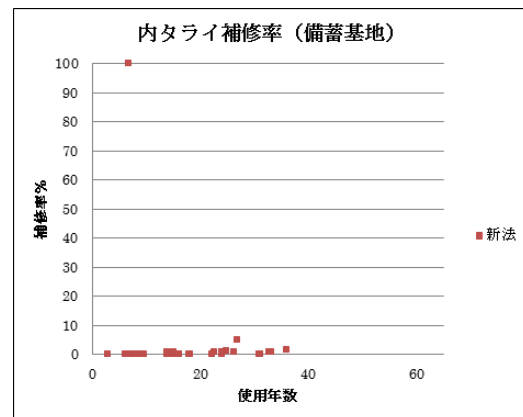
油槽所



(d) 石油化学

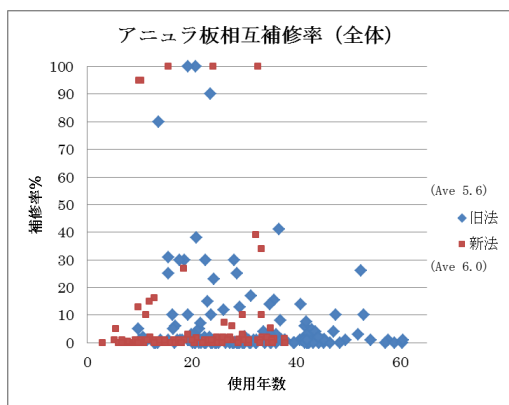


(e) 電力

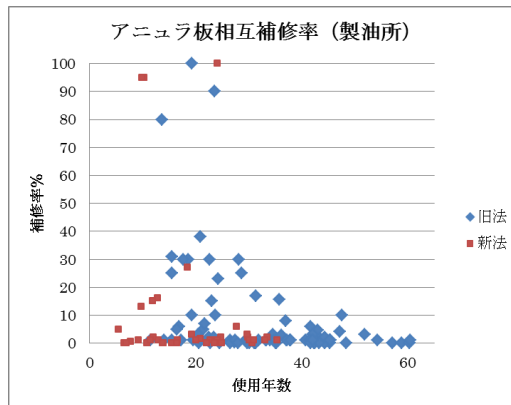


(f) 備蓄基地

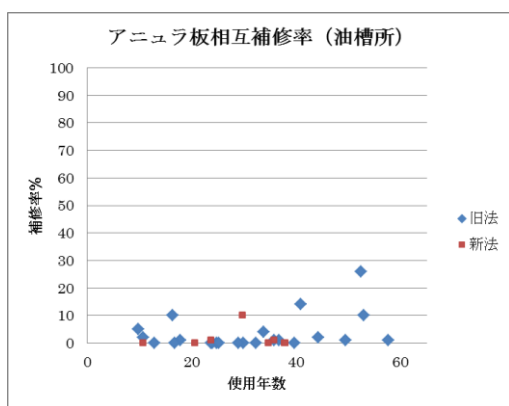
図 4.8 (b) 業態別の使用年数と底部溶接線補修率の関係
【側板×アニュラ板（内タライ）】



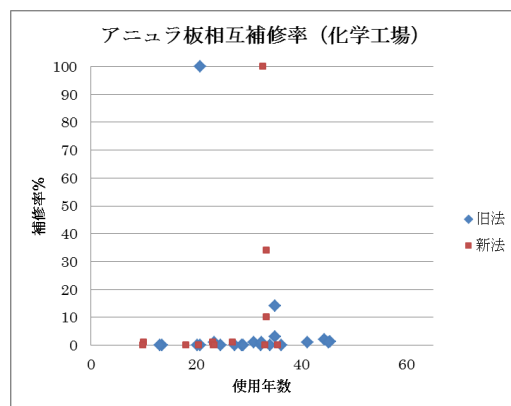
(a) 全体



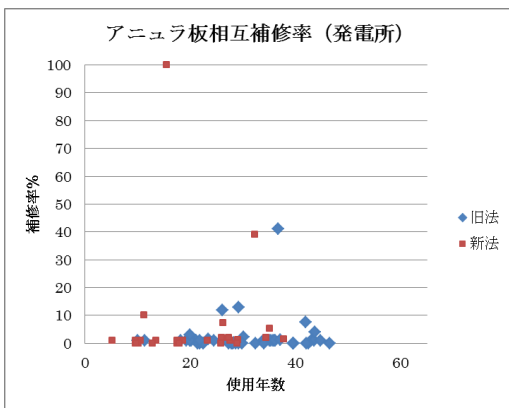
(b) 製油所



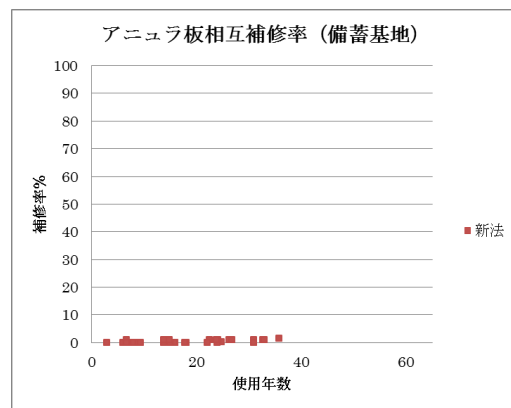
(c) 油槽所



(d) 石油化学

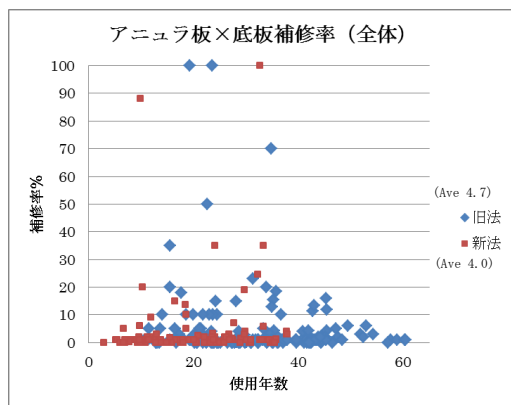


(e) 電力

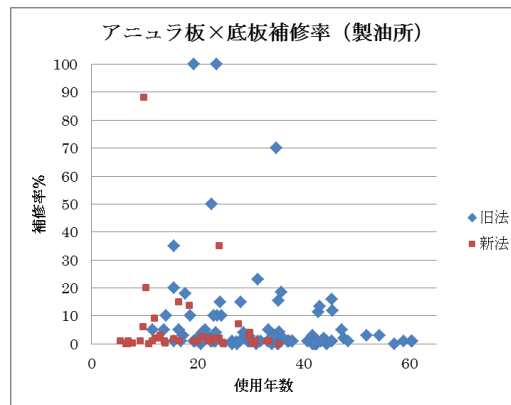


(f) 備蓄基地

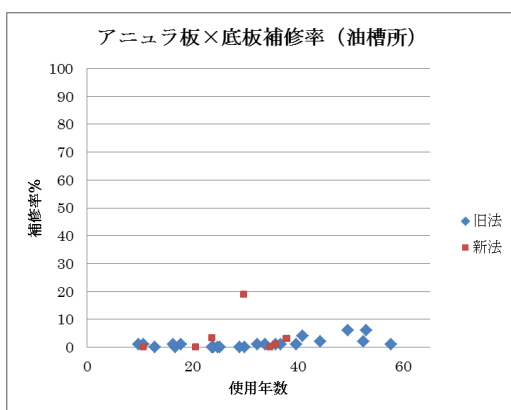
図 4.9 業態別の使用年数と底部溶接線補修率の関係【アニュラ板相互（内側）】



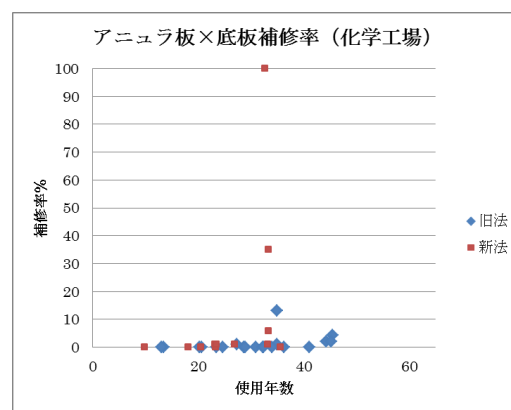
(a) 全体



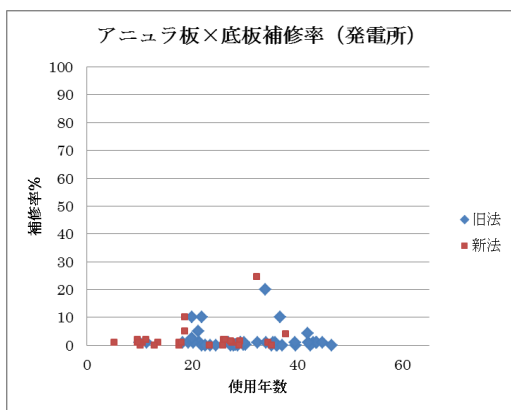
(b) 製油所



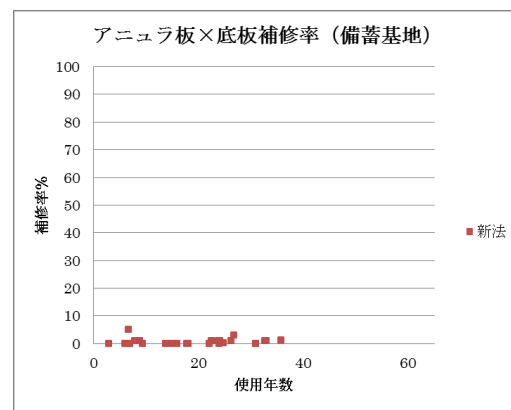
(c) 油槽所



(d) 石油化学

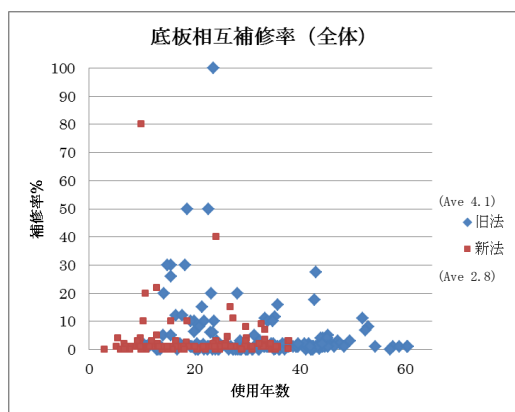


(e) 電力

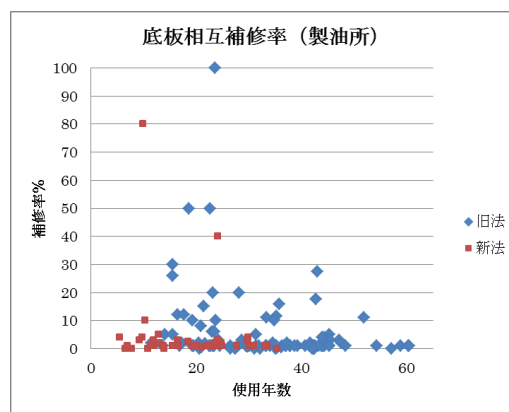


(f) 備蓄基地

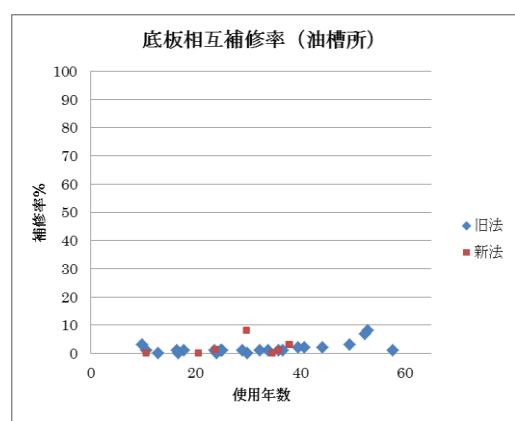
図 4.10 業態別の使用年数と底部溶接線補修率の関係【アニュラ板×底板（亀甲）】



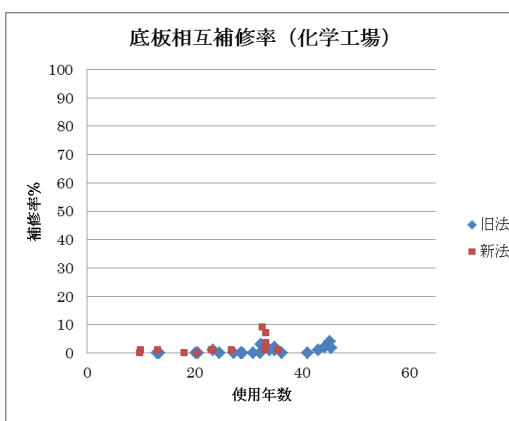
(a) 全体



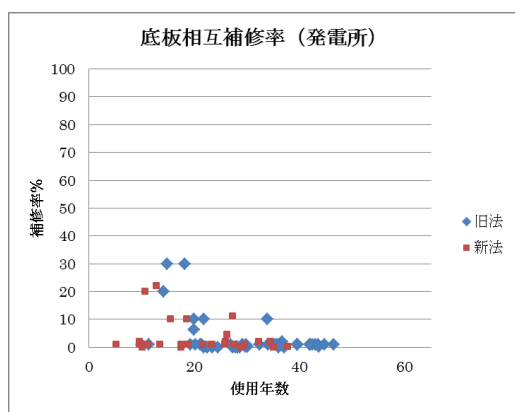
(b) 製油所



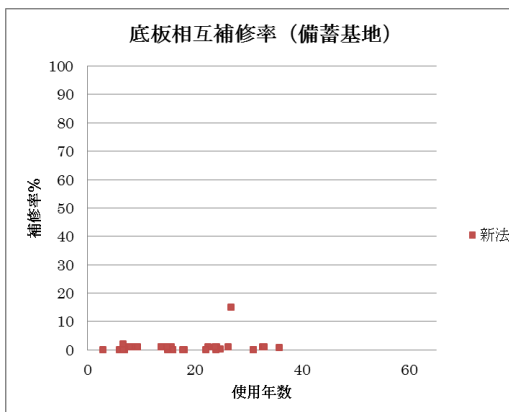
(c) 油槽所



(d) 石油化学



(e) 電力



(f) 備蓄基地

図 4. 業態別の使用年数と底部溶接線補修率の関係【底板相互】

表 4.4 補修率 100%リスト

部位		No.	設置許可 年月	完成検査 年月	業態	容量	現場審査 年月	補修理由 (※)
内タライ	新法	1	S58.6	S58.10	製油所	1千～5千KL	H5.8	S
		2	S56.3	S56.9	製油所	1千～5千KL	H4.2	MHGS
		3	S56.3	S56.9	製油所	1千～5千KL	H17.10	UPGS
		4	S52.7	S53.4	製油所	5千～1万KL	H20.2	HS
		5	S52.9	S53.8	製油所	1万～5万KL	H1.8	US
		6	S55.9	S56.10	油槽所	5千～1万KL	H28.7	M
		7	S55.9	S56.10	油槽所	5千～1万KL	H29.8	M
		8	S55.2	S55.7	石油化学	1千～5千KL	H15.9	PS
		9	S53.12	S54.10	石油化学	5千～1万KL	H24.8	MHUS
		10	S53.12	S54.10	石油化学	5千～1万KL	H25.4	HUPS
		11	S55.7	S56.7	石油化学	5千～1万KL	H27.1	KIUS
		12	H2.10	H3.3	電力	1千～5千KL	H16.2	H
		13	S52.8	S54.4	電力	1万～5万KL	H1.12	HGS
		14	S53.8	S54.11	備蓄基地	10万KL～	S61.8	HG
	旧法	15	S43.9	S44.11	製油所	1千～5千KL	H1.2	UGS
		16	S45.8	S46.5	製油所	5千～1万KL	H4.12	S
		17	S44.3	S45.3	製油所	1万～5万KL	S62.8	S
		18	S48.4	S49.3	製油所	1万～5万KL	S63.4	UPS
		19	S31.7	S32.2	製油所	1万～5万KL	S61.9	HIUS
		20	S49.12	S50.10	製油所	1万～5万KL	H1.6	UHPG
		21	S46.12	S48.5	製油所	5万～10万KL	S60.1	S
		22	S46.12	S48.8	製油所	5万～10万KL	H1.3	UHPS
		23	S42.11	S43.8	製油所	5万～10万KL	H1.8	HUS
		24	S49.11	S53.9	油槽所	1万～5万KL	H8.8	US
		25	S49.11	S53.9	油槽所	1万～5万KL	S63.8	HS
		26	S32.7	S33.3	油槽所	1千～5千KL	H27.12	M
		27	S44.12	S45.4	石油化学	5千～1万KL	H3.1	S
		28	S38.11	S39.4	電力	1千～5千KL	H10.4	G
		29	S42.7	S43.1	電力	5千～1万KL	S63.2	KUS
		30	S50.5	S51.10	電力	1万～5万KL	S61.10	HUS
外タライ	新法	31	S58.6	S58.10	製油所	1千～5千KL	H5.8	S
		32	S53.12	S54.10	石油化学	5千～1万KL	H24.8	HUS
		33	S55.7	S56.7	石油化学	5千～1万KL	H27.1	US
	旧法	34	S43.5	S43.10	製油所	5千～1万KL	H4.5	S
		35	S49.12	S50.10	製油所	1万～5万KL	H1.6	UHS
		36	S42.11	S43.8	製油所	5万～10万KL	H1.8	HUS
		37	S44.12	S45.4	石油化学	5千～1万KL	H3.1	S
		38	S44.12	S45.4	石油化学	5千～1万KL	H26.9	HU
		39	S44.12	S45.5	石油化学	5千～1万KL	H27.12	HUG
		40	S45.7	S45.12	石油化学	5千～1万KL	H28.4	R
		41	S42.7	S43.1	電力	5千～1万KL	S63.2	S
アニュラ板 相互	新法	42	S56.3	S56.9	製油所	1千～5千KL	H17.10	HUG
		43	S53.12	S54.10	石油化学	5千～1万KL	H24.8	MHU
		44	S56.7	S57.10	電力	1万～5万KL	H10.5	HP
	旧法	45	S43.9	S44.11	製油所	1千～5千KL	H1.2	UG
亀甲	新法	46	S44.12	S45.4	石油化学	5千～1万KL	H3.1	PS
		47	S53.12	S54.10	石油化学	5千～1万KL	H24.8	MHUS
	旧法	48	S43.9	S44.11	製油所	1千～5千KL	H1.2	G
底板相互	旧法	49	S43.5	S43.10	製油所	5千～1万KL	H4.5	S
		50	S43.5	S43.10	製油所	5千～1万KL	H4.5	S

※ M:ミクロ割れ、K:他の割れ、F:融合不良、H:ブローホール、I:スラグ巻き込み、U:アンダーカット、P:腐食(点)、G:腐食(線)、R:形状不良、S:その他

4.2.2 運転履歴に関する調査結果

(1) 全体的な傾向

図 4.12 に、H29 年度アンケート調査における事業所からの回答に基づき、業態別の受払い回数（回／年）を示す。同図より、製油所、油槽所、石油化学が多く、電力、備蓄基地が少ない傾向となっているが、製油所、油槽所、石油化学の中にも受払い回数が少ないものがある。

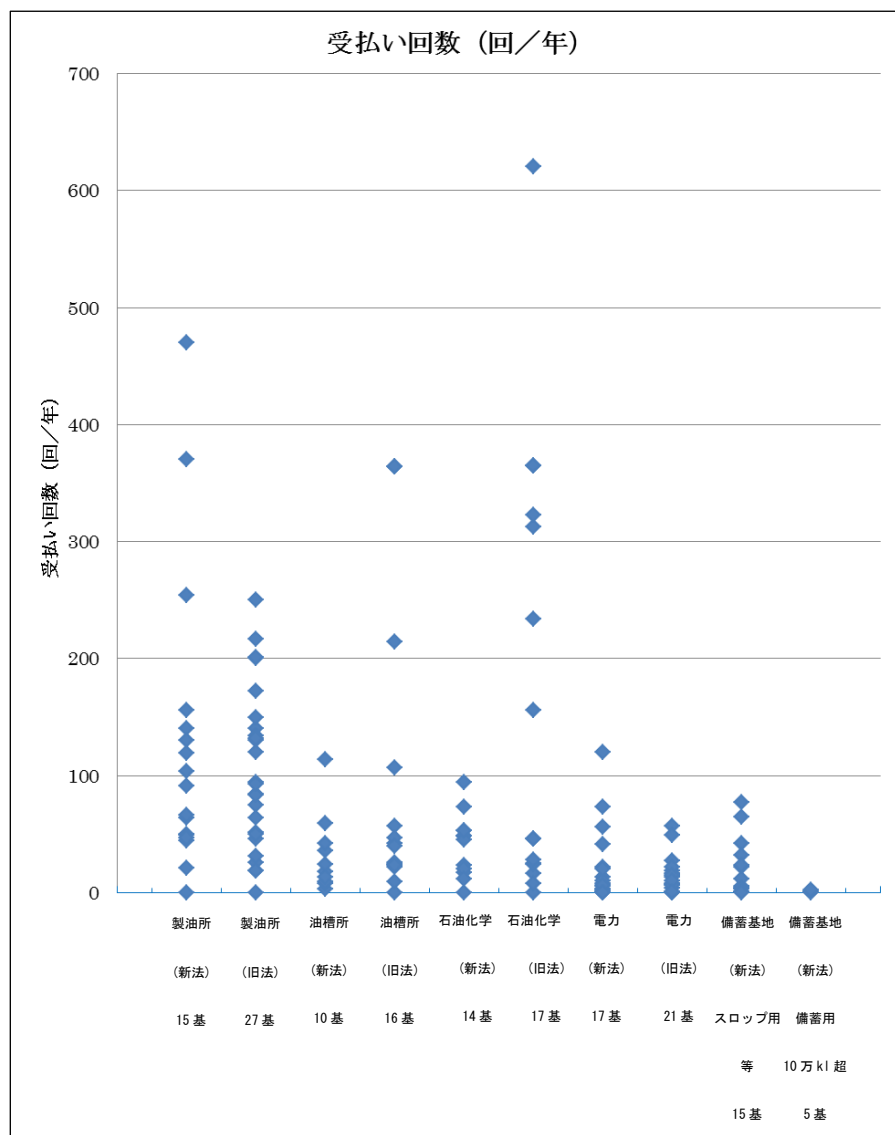


図 4.12 業態別受払い回数（回／年）

(2) 業態別の年間受払回数

ここでは、図 4.12 の H29 年度アンケート調査結果に基づき、業態別にタンク容量区分毎に年間受入れ払出し回数を再整理した。表 4.5 には、タンクの容量区分に従ってサンプリングしたタンクの調査基数（総計 157 基）のうち、受払回数が無回答のもの 3 基、その他 2 基を除く計 152 基の内訳を示す。

表 4.5 タンク受払回数の調査基数

区分	容量(kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000～5,000	8	9	10	10	5	計 152 基
II	5,000～10,000	8	8	9		5	
III	10,000～50,000	9	7	8	10	5	
IV	50,000～100,000	10	－	2	9	－	
V	100,000 超	5	1	－	－	5	
	合計	40	25	29	38	20	

(備考) 無回答 3 基 (石油化学 2 基, 油槽所 1 基)、除外: 製油所 2 基

図 4.13(a)～図 4.13(e)に、調査結果に基づきタンクの業態別の年間受払回数を示す。

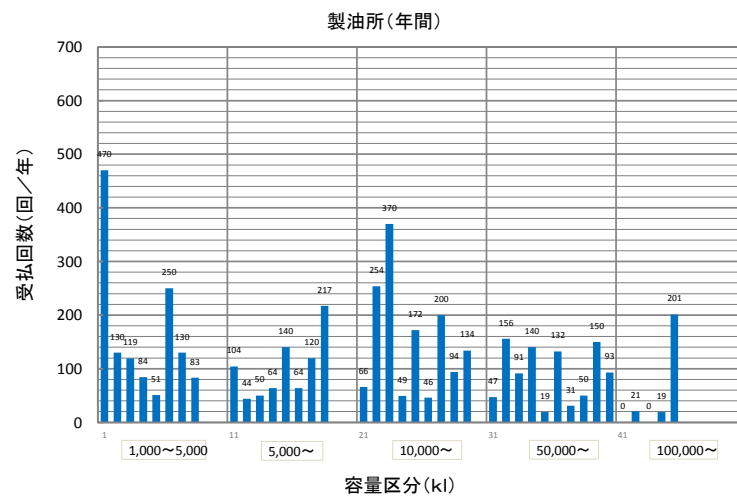


図 4.13(a) 年間受払回数 (製油所)

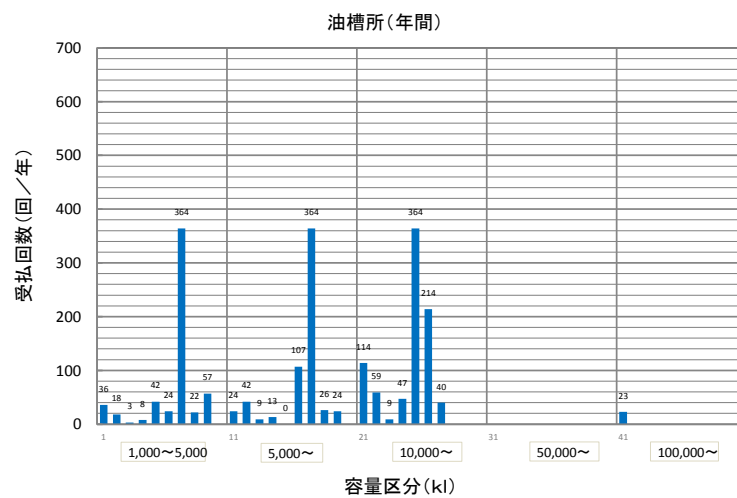


図 4.13(b) 年間受払回数 (油槽所)

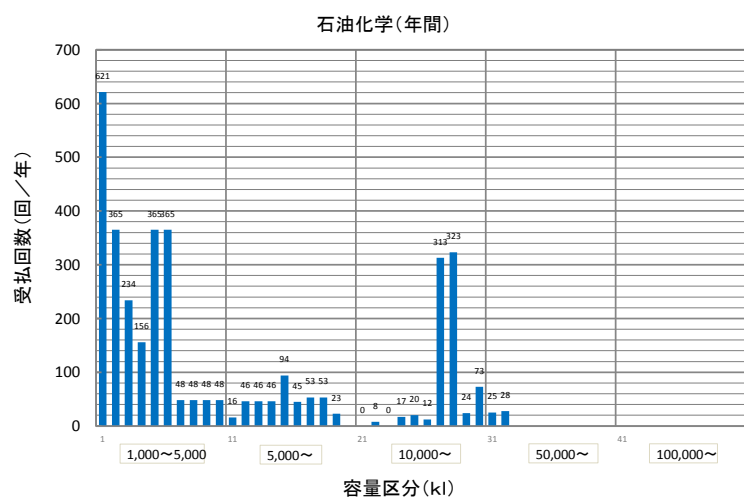


図 4. 13(c) 年間受払回数 (石油化学)

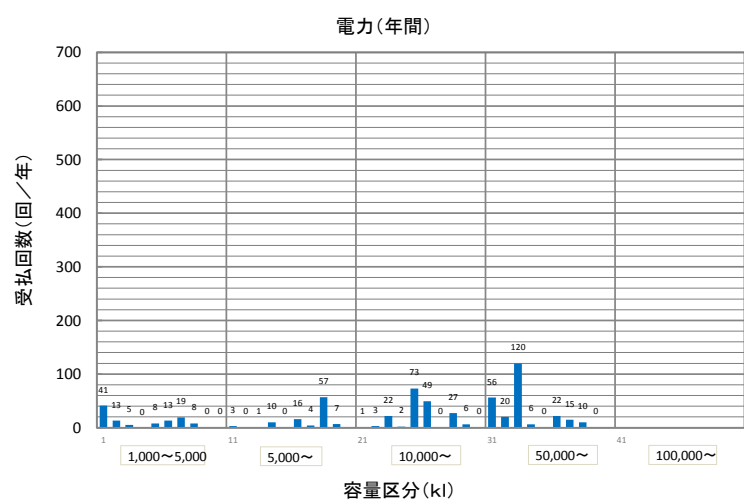


図 4. 13(d) 年間受払回数 (電力)

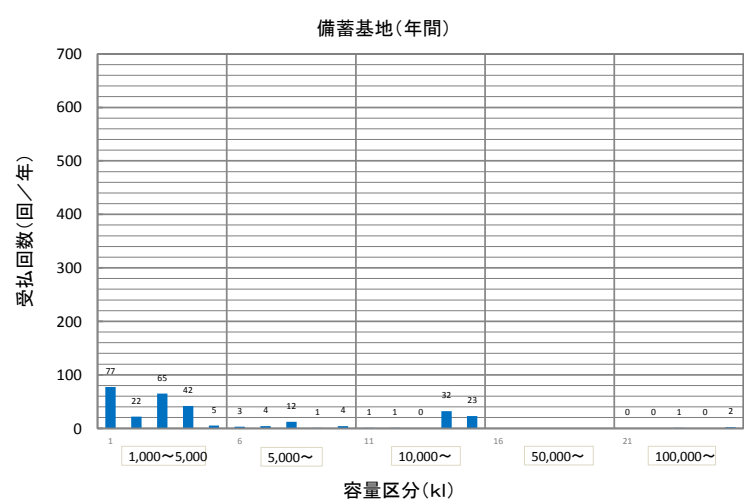


図 4. 13(e) 年間受払回数 (備蓄基地)

調査結果より、タンク業態別の平均的な年間受払回数を表 4.6 及び図 4.14 に示す。同図より、業態別にタンクの運用が異なることから、それに応じて年間受払回数に差異があることが分かる。

表 4.6 タンク容量区分別の年間平均受払回数

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000～5,000	(470)	64 (364)	230 (621)	11 (41)	42 (77)	
II	5,000～10,000	100 (217)	76 (364)	47 (94)	1 (57)	5 (12)	
III	10,000～50,000	154 (370)	121 (364)	99 (323)	18 (73)	11 (32)	
IV	50,000～100,000	77 (156)	－	27 (28)	28 (120)	－	
V	100,000 超	48 (201)	23 (23)	－	－	0.7 (2)	

注：() 内は最大受払回数

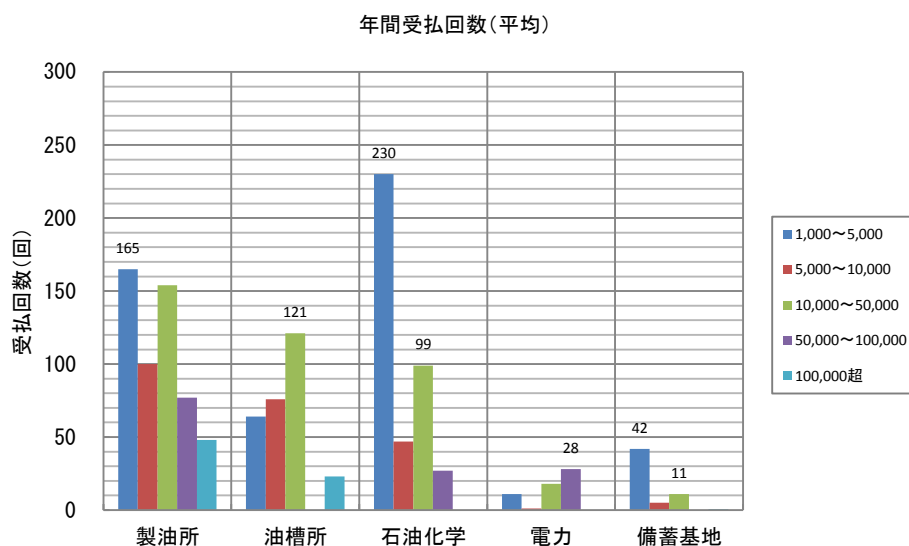


図 4.14 業態別の年間受払回数（平均）

表 4.7 に、地震（震度 6 弱相当以上）被災を受けたタンクリストを示す。同表より、地震（震度 6 弱相当以上）被災を受けたタンクについては、157 基中 15 基であった。地震被災の影響を評価する上では、個々のタンクごとに検証する必要があると考える。

表 4.7 地震（震度 6 弱相当以上）被災を受けたタンク

No.	地震被災 回数	タンク 所在地	業態	適用 法令	容量区分 (kl)	受払い回数 (回/年)	1回の受払い量 (最大数量に 対する割合%)		
1	1	大阪	石油化学	旧法	1万～5万	24	10	～	70
2	1	大阪	石油化学	新法	1万～5万	73	10	～	80
3	1	不明	電力	新法	1千～5千	0	0	～	0
4	1	不明	電力	新法	5万～10万	56	1	～	25
5	1	不明	電力	新法	5万～10万	20	6	～	20
6	1	茨城	製油所	新法	1千～5千	119	11	～	72
7	1	茨城	製油所	新法	5千～1万	64	3	～	46
8	1	茨城	製油所	新法	1万～5万	49	8	～	85
9	1	茨城	製油所	新法	5万～10万	156	1	～	59
10	1	茨城	製油所	旧法	1千～5千	83	16	～	49
11	1	茨城	製油所	旧法	5千～1万	217	2	～	81
12	1	茨城	製油所	旧法	1万～5万	134	3	～	69
13	1	茨城	製油所	旧法	5万～10万	93	10	～	34
14	1	茨城	製油所	旧法	10万KL超	201	2	～	74
15	1	不明	油槽所	新法	1千～5千	36	20	～	70

4.2.3 腐食管理状況に関する調査結果

図 4.15 に業態別の使用年数とアニュラ板裏面腐食量の関係、図 4.16 に業態別の使用年数と底板腐食量の関係を示す。

アニュラ板及び底板の裏面腐食量の平均値は、ともに旧法タンクより新法タンクのほうが少ない。

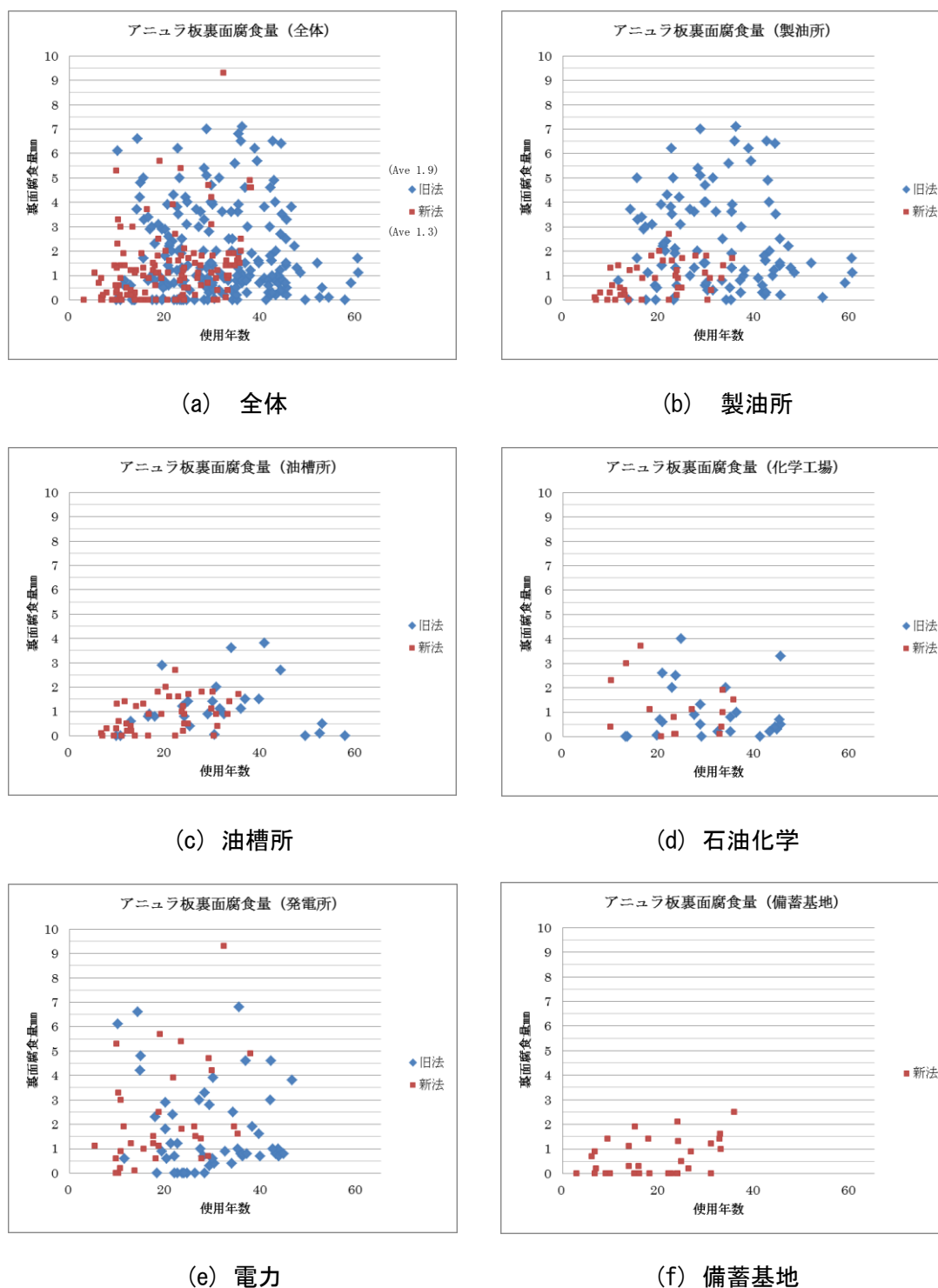
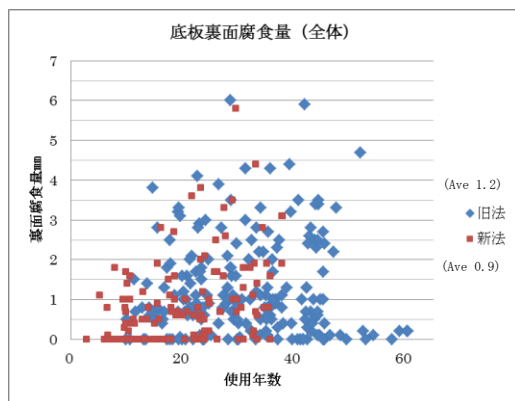
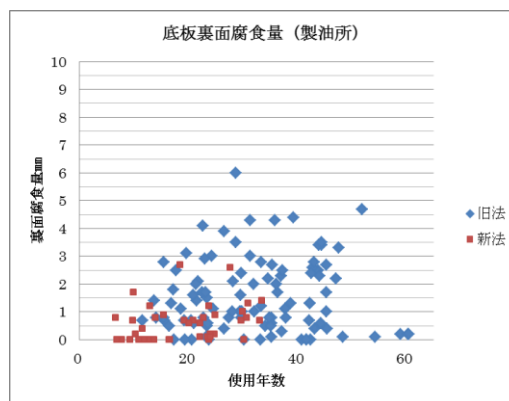


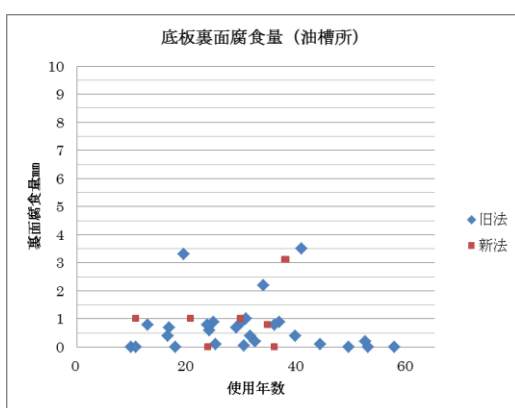
図 4.15 業態別の使用年数とアニュラ板裏面腐食量の関係【アニュラ板】



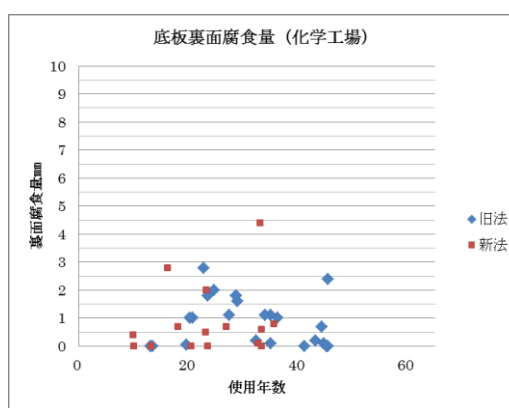
(a) 全体



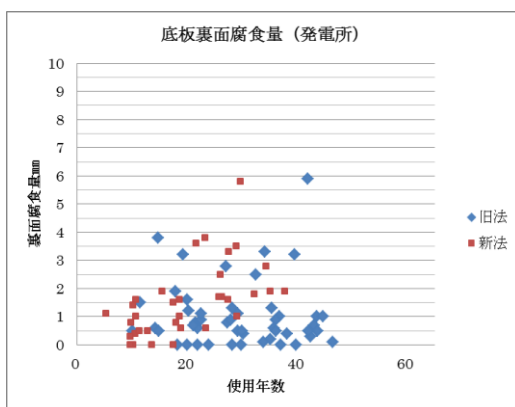
(b) 製油所



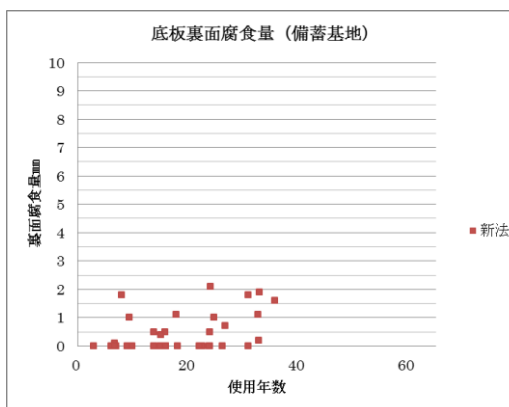
(c) 油槽所



(d) 石油化学



(e) 電力



(f) 備蓄基地

図 4.16 業態別の使用年数と底板裏面腐食量の関係【底板】

4.2.4 有害な変形に関する調査結果

図 4.17 に、業態別の使用年数と不等沈下率の関係を示す。

不等沈下率はタンク直径に対する不等沈下量の割合で、平均値をみると旧法タンクより新法タンクが低い。

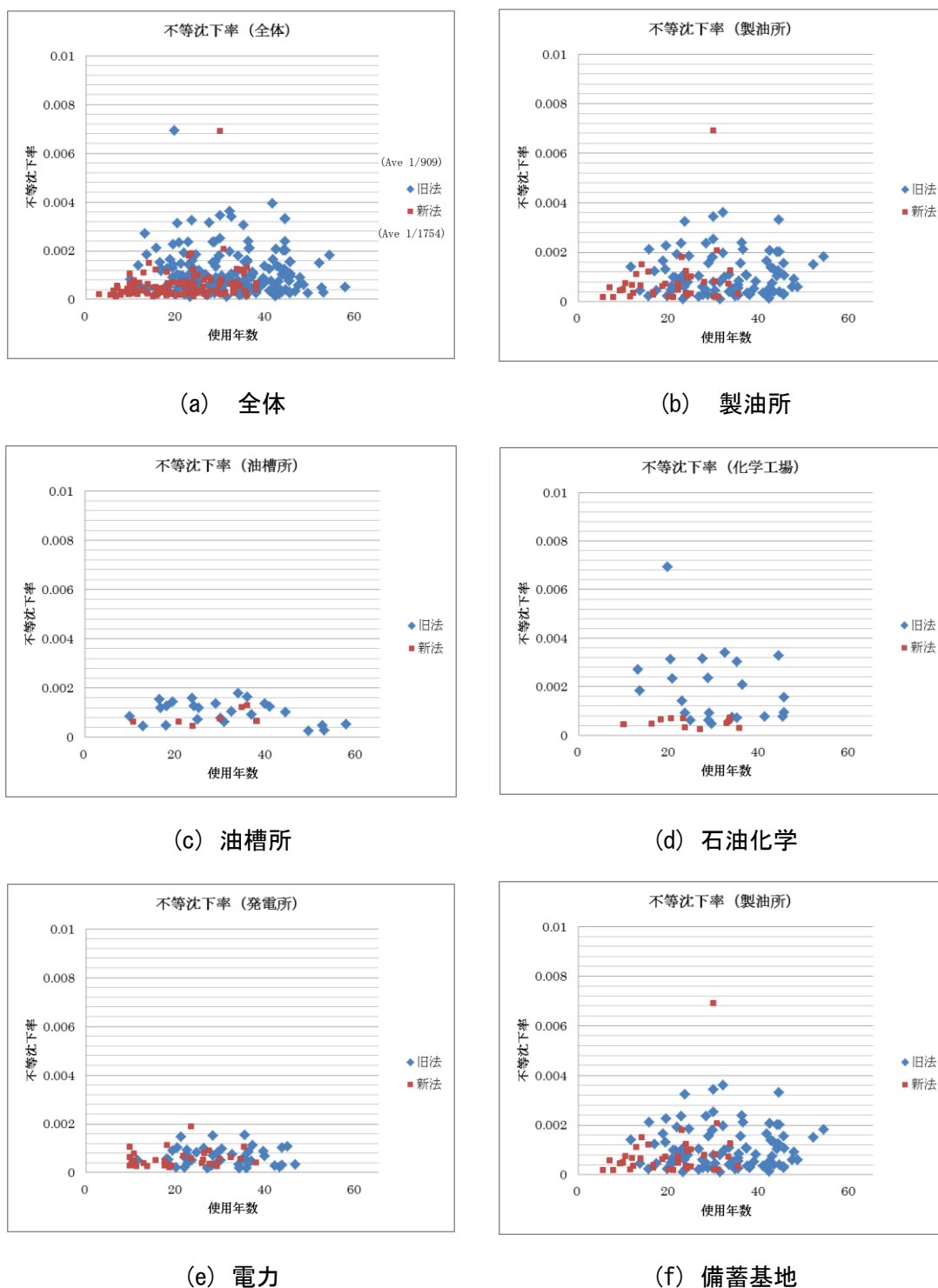


図 4.17 業態別の使用年数と不等沈下率の関係

また、参考として、危険物保安技術協会が臨時保安検査を実施した基数を表 4.8 に示す。

表 4.8 臨時保安検査実施基数（参考）

実施年度	基数	不等沈下の理由等
平成 7 年度	15 基	阪神淡路大震災
平成 23 年度	1 基	徐々に進行（H15 1/101 → H22 1/98） 【タンク情報】 設置許可年：昭和 3 8 年（旧法） 業態：製油所 容量：7,122kl

4.3 調査結果のまとめ

前記 4.1 及び 4.2 の調査結果をまとめたものを表 4.8 及び表 4.9 に示す。

水張検査の代替確認方法の適用対象を決定するための検討材料の 1 つとして、本検討結果を活用されたい。

表 4.8 補修溶接の要件に係る調査のまとめ

項目	内容
継手形状	- 水張検査の結果、底部溶接線破断により漏水に至った事案は 2 件あり、いずれも破断部位は底板相互で、溶接継手形状は重ね隅肉溶接継手である。 - 危険物保安技術協会が過去 10 年間に実施した保安検査及び完成検査前検査の記録から、底部溶接線の割れによる不適合事案は 23 件あり、その内訳は補修溶接不良が 14 件、既設検査不備が 9 件である。 底部溶接線の割れによる不適合事案を溶接部位毎に見てみると、内タライ（側板×アニュラ板）16 件、アニュラ板相互 1 件、亀甲（アニュラ板×底板）2 件、底板相互 4 件であり、そのうち亀甲及び底板相互の溶接継手形状については、全て重ね隅肉溶接継手である。
補修部位	- 溶接部位については、内外タライ、アニュラ板相互、亀甲及び底板相互に分けられる。側板から 600 mm の範囲の部位は、内タライとアニュラ板相互（一部）が該当する。 - 補修理由（欠陥種類）については、各部位でほぼ同様の傾向がみられた。 ただし、補修理由の中で割れは最も有害な欠陥であり、その原因は、溶接時の施工不良がもたらす割れや、供用中の繰り返し荷重による疲労割れ等が考えられる。割れが検出されたタンクについては、溶接全線の健全性を確認する必要があると考える。
補修溶接の理由・深さ・長さ	- 補修溶接の理由 各部位毎に補修溶接する欠陥種類をまとめた。各部位共通して欠陥出現率は、ブローホールが最も多く、ついで、その他（形状不良等）、アンダーカットの順となっている。 旧法タンクと新法タンクで、欠陥出現率は同様の傾向となっている。 割れは出現率が低いものの、各部位で発生している。 - 補修溶接の深さ 底部溶接線検査に用いられる検査手法（目視、MT、PT）で検出できるのは表層（MT では深さ 3 mm 程度まで）のみである。検出された欠陥を全て除去することから、補修される深さは 3 mm ～ 5 mm と推定する。 - 補修溶接の長さ 平均補修長さ（全体）について、旧法タンクより新法タンクの方が各部位共通して短い傾向となっている。 容量別に比較すると 10 万 k1 以上の新法タンクは、旧法タンクに比べて非常

に短い。なお、H28 年度に協会が実施した事前調査でも同様の傾向が見られた。

平均補修長さ(m)

区分	内外タライ	アニュラ板相互	亀甲	底板相互
全体(旧法)	12.8	1.1	6.0	47.6
全体(新法)	10.8	0.9	4.3	20.8
10万kl～(旧法)	11.1	3.0	13.0	203.5
10万kl～(新法)	9.3	0.3	2.2	36.6

表 4.9 タンクの要件に係る調査のまとめ

項目	内容
補修率・補修履歴 (基礎含む)	

5. 補修溶接及びタンクの要件に関連する法令・通知等の整理

補修溶接 びタンクの要件に関連する法令・通知等の調査と整理を行った。

5.1 補修溶接の要件に係る整理等

補修溶接の要件に係る関連する法令・通知等について、継手形状、補修部位、補修溶接の理由・深さ・長さの3項目あり、それぞれの要件に関連する法令・通知等の調査と整理を行った。

5.1.1 継手形状に関する整理

継手形状について関連する法定・通知等については、以下の通りである。また、施工管理の状況について、ここに記載する。

(1) 継手形状について

【新法タンク】

- ・ 部位ごとに継手形状が、規則第20条の4第3項により規定されている。(表5.1参照)
- ・ 告示第4条の21の2に規定される溶接施工方法確認試験において、基準に適合した溶接方法で施工されている。

表 5.1 部位毎に規定される継手形状

部位	構造
側板×アニュラ板	部分溶込みグルーブ溶接又はこれと同等以上
アニュラ板相互	裏当て材を用いた突合せ溶接 又はこれと同等以上
アニュラ板×底板 底板相互	板厚 9 mm を超える ⇒裏当て材を用いた突合せ溶接 又はこれと同等以上 板厚 9 mm 以下 ⇒すみ肉溶接でも可

【旧法】

- ・ 溶接の方法について法令による規定なし。
- ・ 新法タンクに準じた施工をしているタンクも存在する。

(2) 施工管理状況の確認について

- ・ 特定屋外貯蔵タンクの完成検査前検査及び変更を伴う保安検査の書類審査では、溶接施工管理記録の

書類を確認している。その記録から、適切な溶接施工方法を用いて施工がなされているか確認している。溶接施工管理記録は溶接線の品質を確認する上で重要な書類である。

新法タンクでは溶接施工管理記録は、設置時から現在に至るまでの補修に係る溶接施工管理記録が残っている。一方、旧法タンクでは、設置時等の古い溶接施工管理記録は残されていないものがある。

関連法令

【新法】

特定屋外貯蔵タンクの溶接	: 規則第 20 条の 4 第 3 項
溶接施工方法確認試験の方法及び合格基準	: 告示第 4 条の 21 の 2
溶接士の資格	: 昭和 52 年 3 月 30 日付 消防危第 56 号通知
溶接施工方法確認試験の区分	: 平成 9 年 9 月 1 日付 消防危第 89 号通知

【旧法】

溶接施工方法確認試験の方法 : 規定されていない

ただし、平成 9 年 3 月 26 日付消防危第 29 号通知では、溶接施工方法確認試験の方法によることが望ましいこと、と記載されている。

5.1.2 補修部位に関する整理

補修部位について関連する法令・通知等による規定はない。

5.1.3 補修溶接の理由・深さ・長さに関連する整理

補修溶接の理由・深さ・長さについて関連する法令・通知等について調査した。

まず補修理由について規定はない。次に補修長さについては以下の通りである。

平成 9 年 3 月 26 日付消防危第 36 号通知において、タンク本体構造への影響が軽微なもの等とされ、水張りを必要としない溶接工事について、以下のように規定されている。

(抜粋) 側板内面から 600mm の範囲以外の底部に係る溶接部補修工事で、1 箇所当たりの補修長さが 0.3m 以下であり、かつ、全体の補修長さが次に示すもの。

特定以外の屋外貯蔵タンク	1.0m 以下
1 万キロリットル未満の特定屋外貯蔵タンク	3.0m 以下
1 万キロリットル以上の特定屋外貯蔵タンク	5.0m 以下

(参考) 容量 1 万キロリットルタンクと 10 万キロリットルタンクの底部溶接線延長を比べると 5~6 倍程度差があるが、軽微な変更工事となる条件は、同じである。

肉盛り補修工事についても同様。

最後に、補修深さについて規定はない。

5.2 タンクの要件に関連する法令・通知等の整理

タンクの要件に関連する法令・通知等について、補修率・補修履歴（基礎含む）、運転履歴（タンクの疲労度）、腐食管理状況、および有害な変形の4項目について、それぞれ関連する法令・通知等の調査と整理を行った。

5.2.1 補修率・補修履歴（基礎含む）の整理

補修率・補修履歴（基礎含む）について関連する法令・通知による規定はない。

5.2.2 運転履歴の整理

運転履歴（タンクの疲労度）について関連する法令・通知による規定はない。

5.2.3 腐食管理状況の整理

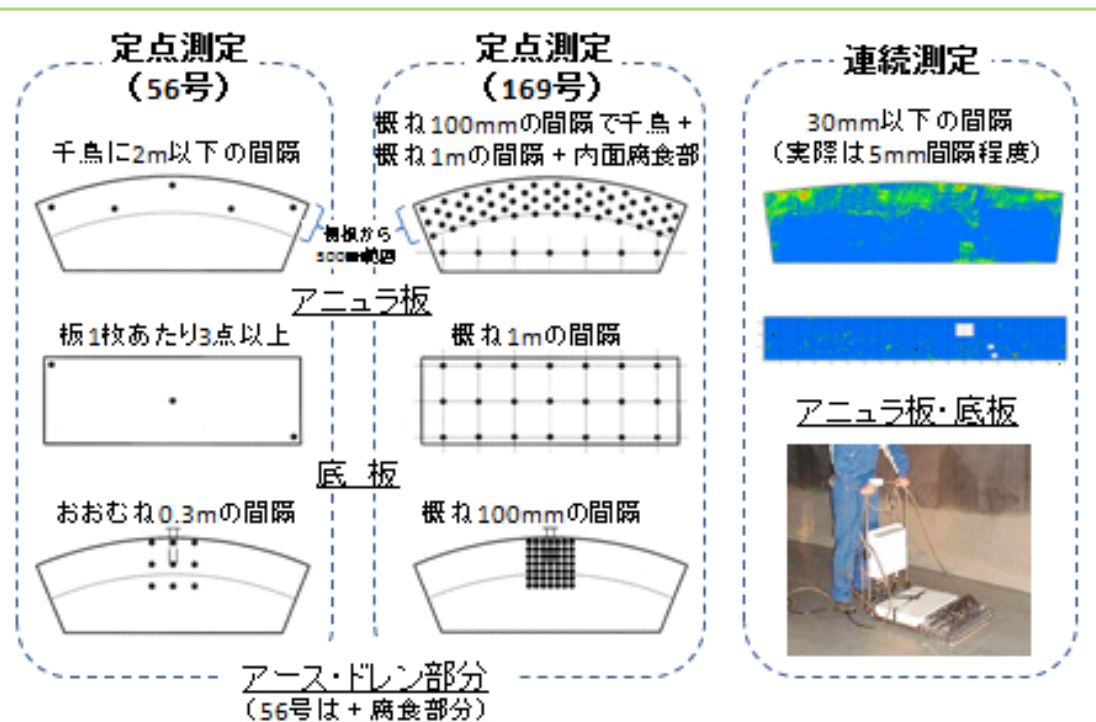
板厚測定方法について、またその板厚評価方法について関連する法令・通知等について調査し、以下に整理した。

【板厚の測定方法について】

・容量千 KL 以上の屋外タンクは、一定の期間で内部を開放し、底部の板厚（腐食の状況）や溶接部を点検することが義務付けられている。消防法では以下の3通りの測定方法が示されており、事業者の判断により選択されている。

昭和 52 年 3 月 30 日付消防危第 56 号通知	定点測定
昭和 54 年 12 月 25 日付消防危第 169 号通知	定点測定
平成 15 年 3 月 28 日付消防危第 27 号通知	連続測定

測定方法の違いについて、以下簡単な図で示す。



(参考) 定点測定はサンプリング検査であるが、連続板厚は全面を測定するため、板厚評価する上で最も信頼性が高い測定値を得ることが出来る。

定点測定と連続測定とで裏面腐食量の検出精度にどれほどの差があるか、危険物保安技術協会が過去に行った自主研究の結果では3倍程度の違いが確認されている。

【新法と旧法による板厚基準の比較について】

新法タンクと旧法タンクでは、板厚の管理基準が異なる。さらに、板厚の測定方法によっても補修が必要となる基準が異なっている。

	部位	項目	必要板厚	
新法	アニュラ板	最小厚さから	側板最下段の厚さ (mm)	アニュラ板の最小厚さ
			15を超え20以下	12mm
			20を超え25以下	15mm
			25を超え30以下	18mm
			30を超えるもの	21mm
		保有水平耐力から	アニュラ部必要最小厚さ ≤ アニュラ部測定実板厚 (500mm幅)	
旧法	底板	最小厚さから	1千㎏以上 1万㎏未満	9mm
			1万㎏以上	12mm
旧法	アニュラ板	最小厚さから	3.2mm以上	
		保有水平耐力から	アニュラ部必要最小厚さ ≤ アニュラ部測定実板厚 (500mm幅)	
	底板	最小厚さから	3.2mm以上	

I

板厚基準の比較

適用法令	部位	法令上必要な板厚	定点評価 (新基準:146号、新法:58号通知)	連続評価(93号→17号→27号通知) (消防本部により要件が異なる場合あり)
新基準タンク	ア エ フ 板	①3.2mm以上 ②保有水平耐力を満足する厚さ以上	①測定板厚平均値 > 80% 値 ②板厚最小値 $\geq t$ 値 (4.5 or 5.5) ③側板から500mm範囲の平均値 $\geq$ 最小必要板厚 (保有水平耐力)	①測定板厚平均値 > 80% 値 ②板厚最小値 $\geq t$ 値 (4.5) ③側板から500mm範囲の平均値 $\geq$ 最小必要板厚 (保有水平耐力)
	底板	①3.2mm以上	①測定板厚平均値 > 80% 値 ②板厚最小値 $\geq t$ 値 (4.5 or 5.0)	①板厚最小値 $\geq 3.2mm$
新法タンク	ア エ フ 板	①告示第4条の17の最小厚さ(基準板厚)以上 ②保有水平耐力を満足する厚さ以上	①測定板厚平均値 > 80% 値 ② $\Delta C \leq 3.0mm$ ③側板から500mm範囲の平均値 $\geq$ 最小必要板厚 (保有水平耐力)	①測定板厚平均値 $\geq 80\%$ 値 ② $\Delta C \leq 3.0mm$ ③側板から500mm範囲の平均値 $\geq$ 最小必要板厚 (保有水平耐力)
	底板	①告示第4条の17の最小厚さ(基準板厚)以上	①測定板厚平均値 > 80% 値 ② $\Delta C \leq 3.0mm$	①測定板厚平均値 $\geq 80\%$ 値 ② $\Delta C \leq 3.0mm$
測定板厚平均値の算出方法			基準板厚(新基準は設計板厚)の90%以下の箇所を中心に半径300mmの範囲を概ね30mmピッチ	基準板厚(新基準は設計板厚)の80%以下の箇所を中心に半径60mmの範囲を30mmピッチ以下

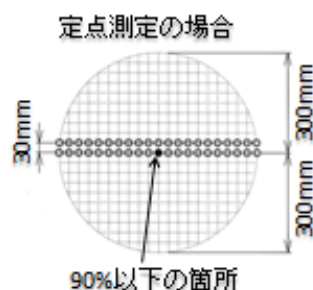
枠内: 上乗せ要件となる(新基準) 枠内: 特例要件となる(新法)

板厚評価に関する用語の説明

測定板厚平均値

○定点測定: 最小厚さ(新基準タンクは設計板厚)の90%以下の箇所を中心に半径300mmの範囲を概ね30mmピッチで測定した平均値(複数ある場合は平均値の最小値)

○連続測定: 最小厚さ(新基準タンクは設計板厚)の80%以下の箇所を中心に半径60mmの範囲を30mmピッチ以下で測定した平均値(複数ある場合は平均値の最小値)



80%値: 最小厚さ(新基準タンクは設計板厚)の80%の値

ΔC : 最小厚さ(基準板厚)からの板厚減少量(新法タンクに用いる)
($\Delta C = \text{基準板厚} - \text{板厚最小値}$)

t 値: 次回開放時に必要な板厚を満足するための、過去の腐食率から計算によって求まる板厚(新基準タンクに用いる)

t 値 = $\frac{\text{最大腐食量}}{\text{板の使用年数}} \times \text{次回開放までの年数} + \text{次回開放時に必要な板厚}$

	部位	項目	必要板厚	
新法	アニュラ板	最小厚さから	側板最下段の厚さ (mm)	アニュラ板の最小厚さ
			15を超え20以下	12mm
			20を超え25以下	15mm
			25を超え30以下	18mm
			30を超えるもの	21mm
		保有水平耐力 から	アニュラ部必要最小厚さ ≤ アニュラ部測定実板厚 (500mm幅)	
旧法	底板	最小厚さから	1千kℓ以上 1万kℓ未満	9mm
			1万kℓ以上	12mm
旧法	アニュラ板	最小厚さから	3.2mm以上	
		保有水平耐力 から	アニュラ部必要最小厚さ ≤ アニュラ部測定実板厚 (500mm幅)	
	底板	最小厚さから	3.2mm以上	

旧法タンクより新法タンクの方が厳しい板厚基準が求められている。

(参考)

- ・政令第8条の4第2項第1号イに規定され、規則第62条の2の2第1項2号及び3号で示され
0.05mm/年以下であること等、より厳しい
条件が求められる。
- ・政令第8条の4第2項第1号ロに規定され、規則第62条の2の2第2項で示される保安のため
の措置を講じているものは、腐食率 0.2mm/年（連続測定を用いた測定値が2開放検査分必要）
等の厳しい条件が求められる。

5.2.4 有害な変形（基礎含む）について関連する法令・通知等の整理

有害な変形について関連する法令・通知等について調査し、以下に整理した。

政令 8 条の 4 第 5 項では、直径に対する不等沈下の割合が 1/100 以上となる場合、臨時で保安検査や定期点検を実施するよう示されている。

更に厳しい条件として、規則第 62 条の 2 の 2 で示される保安のための措置に必要とされる要件には、不等沈下および地盤の安全性（平成 6 年 9 月 1 日付け消防危第 73 号通知、平成 12 年 3 月 21 日付け消防危第 31 号通知、平成 16 年 3 月 31 日付け消防危第 42 号通知、平成 23 年 2 月 25 日付け消防危第 45 号通知）、有害な変形（平成 12 年 3 月 21 日付け消防危第 31 号通知）について以下のように示されている。

【不等沈下について】

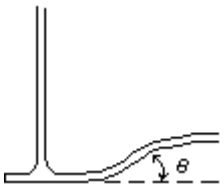
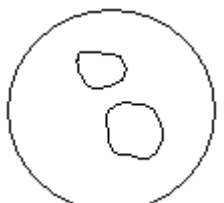
・直径に対する不等沈下の割合が 1/300（タンク荷重を支える地層が水平層状である場合は 1/100 以上）となるおそれがないものであること。

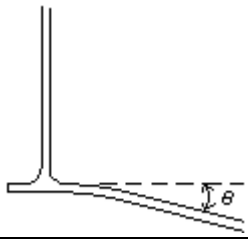
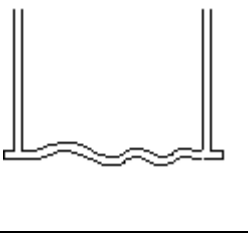
【地盤の安全性について】

・支持力及び沈下に関する地盤の安全性については、経年的な沈下量の測定結果による年平均沈下量が 1cm 以内であること。

【有害な変形について】

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

	沈下の状況	沈下の状況図	有害な変形
底板部	側板に接する底板（アニュラ板）のリング状沈下		設計時からの変位角度 θ が 10 度以上であること。（ $L = 100\text{mm}$ の角度計を使用するものとする。また、 θ は初期設計角度からの変化角度とする。）
	底板全体の皿状沈下		設計時からの直径に対する最大沈下の割合が 100 分の 1 以上又は最大沈下量が 300mm 以上であること。
	底板内部の局部沈下		沈下部分の内接円の直径に対する最大沈下の割合が 50 分の 1 以上又は最大沈下量が 200mm 以上であること。

側 板 部	底板（アニュラ 板）内部の沈下		設計時からの変位角度 θ が 5 度以上であること。(L = 100mm の角度計を使用するものとする。)
	底板内部の浮き 上がり、歪み、 変形		浮き上がり部分の内接円の直径に対する設計レベルからの浮き上がり高さの割合が 10 分の 1 以上であること。ただし、溶接線が浮き上がり部分にならない場合は、当該割合は 5 分の 1 以上とすること。
	側板の変形（歪 み）		角度計は長さ 1m の型板を用い、水平、垂直ともに $\pm 15\text{mm}$ を超えるものとする。(なお、側板の厚さ 10mm 未満の軟鋼には適用しない。)

5.3 その他の要件について関連する法令・通知等の整理

水張検査の目的の一つに漏れの確認がある。今年度検討した補修溶接の要件及びタンクの要件には、漏れを確認する代替方法について含まれていなかったが、漏れ試験（バキューム試験等）にて漏れを確認することが必要であると考ええる。

6. WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価の適用検討

6.1 適用範囲

一般に、溶接構造物における脆性破壊の多くは、構造的な不連続部などの局部的に応力集中を生じている箇所から起こっている（図 6.1）。

この規格（WES2805:2011）は、一般溶接構造物に用いられる鋼材を対象として、溶接継手の割れ（又は平面状欠陥）からの脆性破壊、及び各種欠陥より生じた疲労亀裂の進展による損傷と脆性破壊への移行に対する評価方法について規定している⁴⁾。

尚、最終的な損傷形態として脆性破壊を取る場合には、評価対象となる欠陥は構造要素の応力集中部（周囲を弾性応力場で囲まれるような位置）に存在する欠陥に限定する。

ここでは、屋外貯蔵タンクへの WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価法の適用について検討する。図 6.2 には、WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価フローを示す。

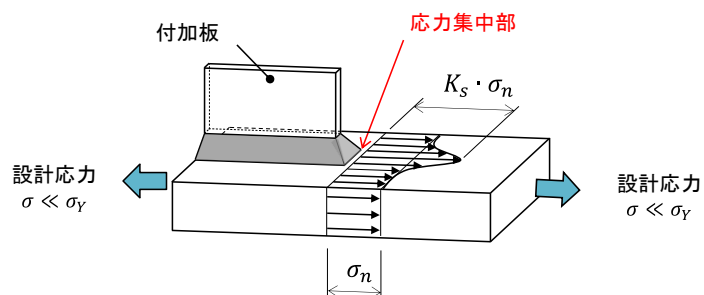


図 6.1 構造的応力集中を有する継ぎ手

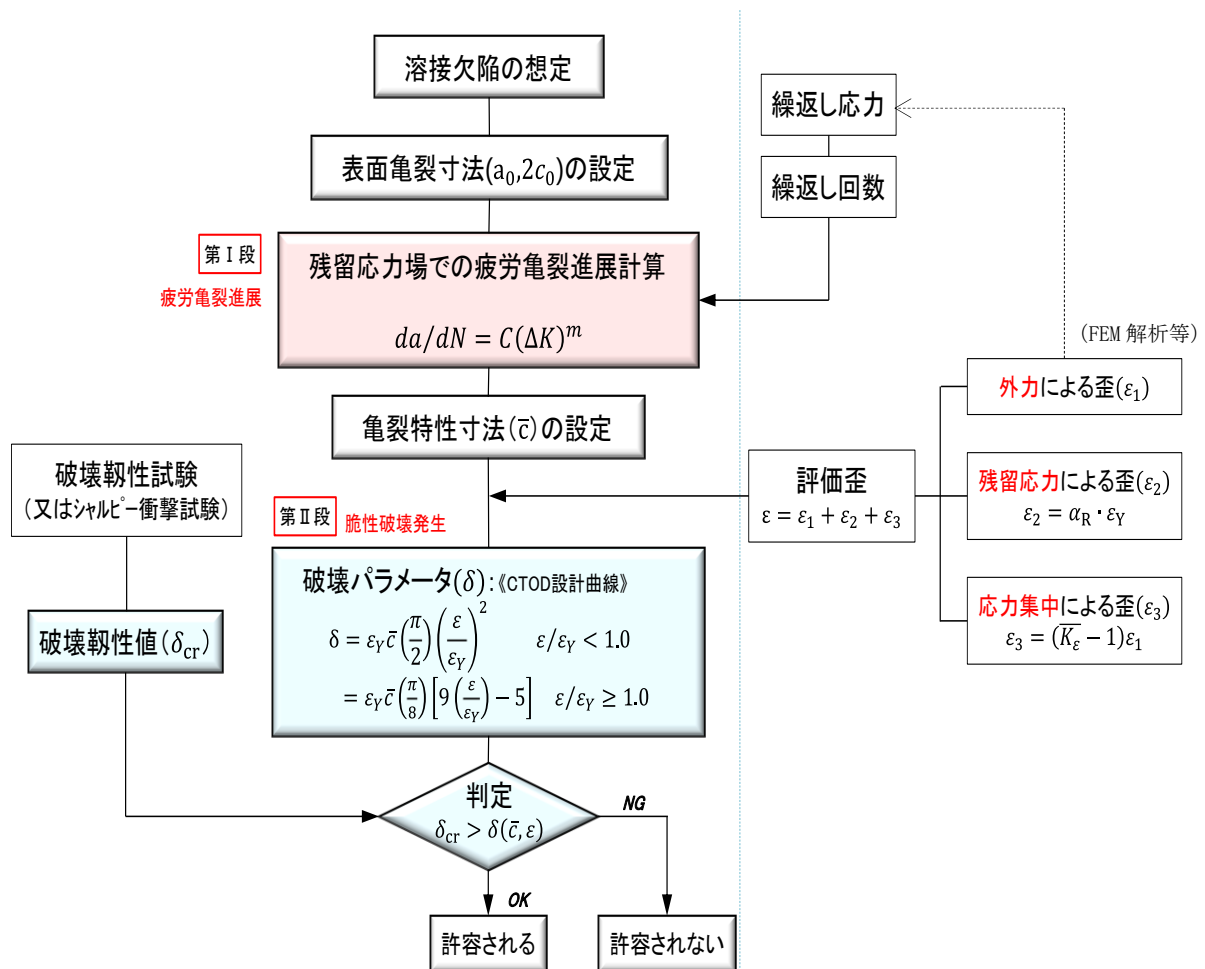


図 6.2 WES2805-2011 に基づく溶接欠陥評価フロー

6.2 疲労亀裂進展特性

6.2.1 亀裂進展特性を表す材料定数

表面亀裂の疲労亀裂進展速度 dl/dN (m/回) は、疲労亀裂進展則 (Paris 則) に基づき次式により評価する。

$$dl/dN = C(\Delta K)^m \quad \Delta K > \Delta K_{th} \quad (6.1a)$$

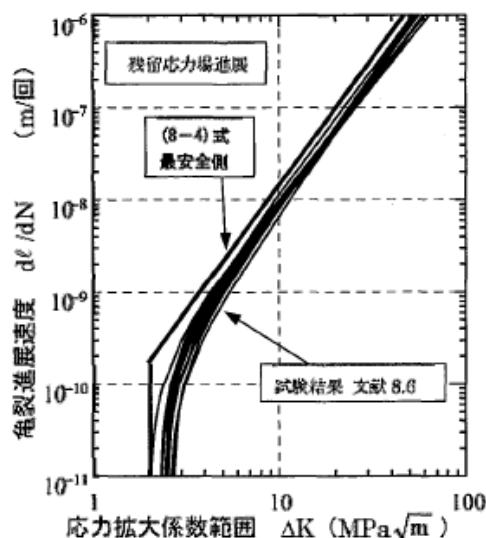
$$dl/dN = 0 \quad \Delta K \leq \Delta K_{th} \quad (6.1b)$$

ここに、 ΔK : 応力拡大係数範囲 ($MPa\sqrt{m}$)、 C , m : 亀裂進展特性を表す材料定数、 ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲 ($MPa\sqrt{m}$) を示す (表 6.1)。尚、表中には残留応力の影響を考慮した「最安全側」の値と、応力比 $R(\sigma_{min}/\sigma_{max}) = 0$ で引張残留応力が存在しない場合の安全側の値も与えられており、評価対象に応じて選択できる。

表 6.1 材料定数 (WES2805)

	C値	m値	ΔK_{th}
最安全側	2.60×10^{-11}	2.75	2.00
残留応力なし	4.34×10^{-12}	3.30	3.50

図 6.3 には、疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合の試験結果との比較を示す。同図より、「最安全側」の材料定数 C , m , ΔK_{th} を用いれば各種試験結果と比較して安全側の評価を与える。



解説図 8.3 疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合の試験結果との比較

図 6.3 WES2805:2011 の疲労亀裂進展速度表示

6.2.2 疲労亀裂進展寿命の算定

半楕円表面亀裂（図 6.4）の疲労亀裂進展計算には、次の二つの方法がある（添付資料-1）。

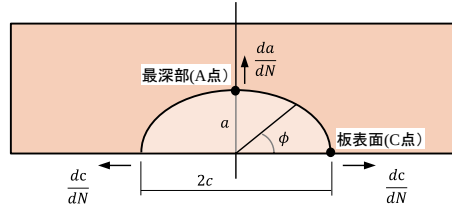


図 6.4 半楕円表面亀裂

（1）最深部／板表面の亀裂進展速度に関する微分方程式を数値積分して算定する方法

$$\text{最深部 (A 点)} : \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6.2a)$$

$$\text{板表面 (C 点)} : \frac{dc}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6.2b)$$

（2）簡易算定法⁵⁾ ※ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.XI, Appendix A

亀裂の深さ方向への進展は、パリズ則を数値積分することにより求め、亀裂の板表面での進展は亀裂形状変化に基づく以下の関係式に亀裂深さを代入することにより求める。

$$\text{最深部 (A 点)} : \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6.2a)$$

板表面 (C 点) : 初期亀裂の板表面での半長 c_0 、深さ a_0 とし、
亀裂形状変化に基づく関係式（表 6.2）に亀裂深さを代入する。

表 6.2 板表面の亀裂進展 (ASME)

$$\begin{aligned} &1) \frac{a_0}{c_0} \leq A - B \cdot \frac{a_0}{t} \text{ の場合} \\ &\quad c = a \left[\left(A - B \cdot \frac{a}{t} \right)^{-n} + e \left(\frac{a}{t} \right)^{-n} \right]^{1/n} \\ &\quad e = \left(\frac{c_0}{t} \right)^n - \left(A \cdot \frac{t}{a_0} - B \right)^{-n} \\ &2) \frac{a_0}{c_0} > A - B \cdot \frac{a_0}{t} \text{ の場合} \\ &\quad c = \frac{a}{A[1 - f(a/t)^{-n}]^{-1/n} - B \cdot a/t} \\ &\quad f = \left(\frac{a_0}{t} \right)^n - \left(\frac{A}{t/c_0 + B} \right)^n \\ &\quad A = 0.92 + 0.03R_b, \quad B = 0.10 + 0.80R_b \\ &\quad R_b = \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_t + \Delta\sigma_b} \quad n = 2.8 \end{aligned}$$

上記の2法（数値積分法、ASMEの簡易算定法）は、応力集中の無い「平滑材」では亀裂進展解析結果に大差を生じないが、後述する溶接継手部近傍の応力集中係数のうち、板表面側（C点）を考慮する場合には、上記（1）の数値積分法による必要がある。

尚、半楕円表面亀裂の最深部（A点）及び板表面（C点）の応力拡大係数（ K ）は、表6.3による。

表 6.3 半楕円表面亀裂の応力拡大係数（ K ）

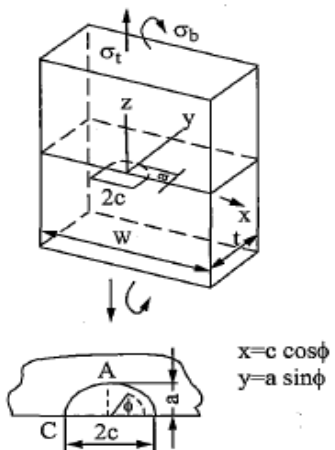
$K = (\sigma_t \cdot F_t + \sigma_b \cdot F_b) \sqrt{\pi a}$ ここで、 $F_t = F_0 / \Phi$, $F_b = H \cdot F_0 / \Phi$ $F_0 = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] f_\phi \cdot g \cdot f_w$ $H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi$ $f_w = \left[\sec \left[\frac{\pi c}{W} \left(\frac{a}{t} \right)^{1/2} \right] \right]^{1/2}$ 1) $0 < a/c \leq 1, 0 < a/t \leq 1, 2c/W < 0.5, 0 \leq \phi < \pi$ の場合 $f_\phi = \left[\sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi \right]^{1/4}$ $M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right), M_2 = -0.54 + 0.89 / (0.2 + a/c)$ $M_3 = 0.5 - 1.0 / (0.62 + a/c) + 14(1.0 - a/c)^{24}$ $g = 1 + \left[1 + 0.35 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2$ $p = 0.2 + a/c + 0.6(a/t)$ $H_1 = 1 + 0.34 \frac{a}{t} - 0.11 \frac{a}{c} \left(\frac{a}{t} \right), H_2 = 1 + G_1 \frac{a}{t} + G_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2$ $G_1 = -1.22 - 0.12 \frac{a}{c}, G_2 = 0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{c} \right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.5}$ $\Phi = \left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \right]^{1/2}$ 2) $1 < a/c \leq 2$, $0 < a/t \leq 1, 2c/W < 0.5, 0 \leq \phi < \pi$ の場合→省略	 半楕円表面亀裂 (Raju-Newmann モデル)
---	--

図 6.5 に、疲労亀裂進展寿命の算定フローを示す。

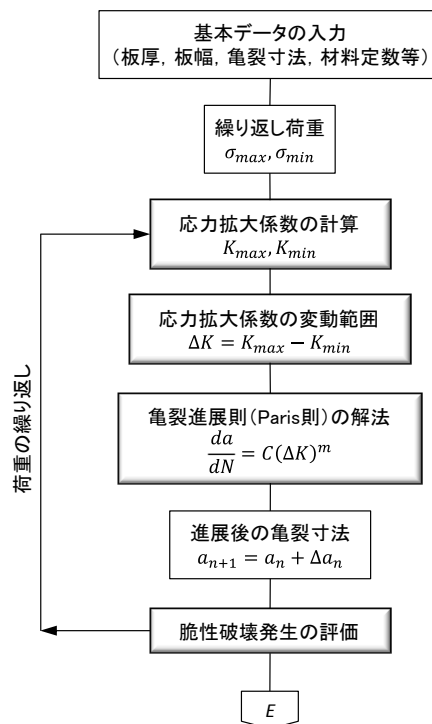


図 6.5 疲労亀裂進展寿命の計算フロー

6.2.3 検証（疲労試験結果との比較）

ここでは、既往の調査検討「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（JOGMEC 委託）」¹⁾で実施した底板突合せ継ぎ疲労亀裂進展性試験のうち、曲げ疲労試験結果との比較検討を行って、当該疲労進展解析手法の妥当性を検証する。

（1）設計疲労亀裂伝播曲線

太田ら⁶⁾は引張残留応力場にある各種溶接継手の疲労亀裂試験を行い、設計疲労亀裂伝播曲線を求めている（図 6.6）。同図は、定荷重振幅試験で求めた応力除去焼鈍を施していない溶接継手試験 38 本について、応力比 R が 0.5, 0, -1 で求めた亀裂伝播特性データ 3,335 点の回帰計算に基づいて描かれている。これより、回帰曲線（中間値）の定数 $C=1.45 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, $\Delta K_{th} = 2.40$ に対し、99.5%信頼限界 ($C=2.60 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, $\Delta K_{th} = 2.00$) を「設計疲労亀裂伝播曲線」として提案している。

表 6.4 には、これら 99.5%信頼限界、回帰曲線（中間値）の他に、参考としてグラフより読み取った下限側の値を示している。WES2805:2011 における「最安全側」は、この太田ら⁶⁾の試験結果のうち 99.5%信頼限界に相当している。

尚、疲労亀裂進展速度の算定における適用制限として、図 6.6 の応力拡大係数範囲が $\Delta K \leq 100 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であることに留意する必要がある。

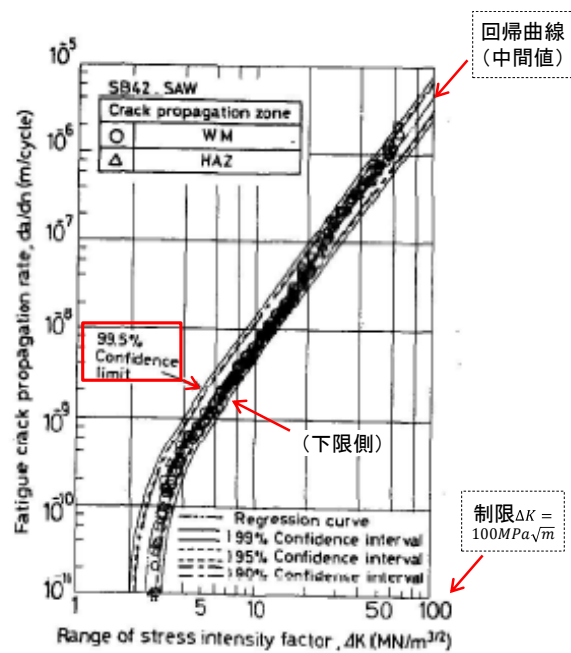


Fig. 1 Effect of Crack Propagation Zone on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

図 6.6 疲労亀裂進展速度の実験結果⁶⁾

表 6.4 材料定数（試験結果）⁶⁾

	C値	m値	ΔK_{th}
99.5%信頼限界	2.60×10^{-11}	2.75	2.00
回帰曲線	1.45×10^{-11}	2.75	2.40
(下限側)	(0.8×10^{-11})	2.75	(3.0)

(2) 既往の曲げ疲労試験

既往の調査検討では、疲労亀裂の初期欠陥（人工的な欠陥）として、図 6.7 に示す「放電加工＋疲労予亀裂」による半楕円表面亀裂を再現し、初期亀裂を有する底板突合せ継手の 4 点曲げ疲労試験を実施している（図 6.8）。



図 6.7 初期欠陥（人工欠陥）

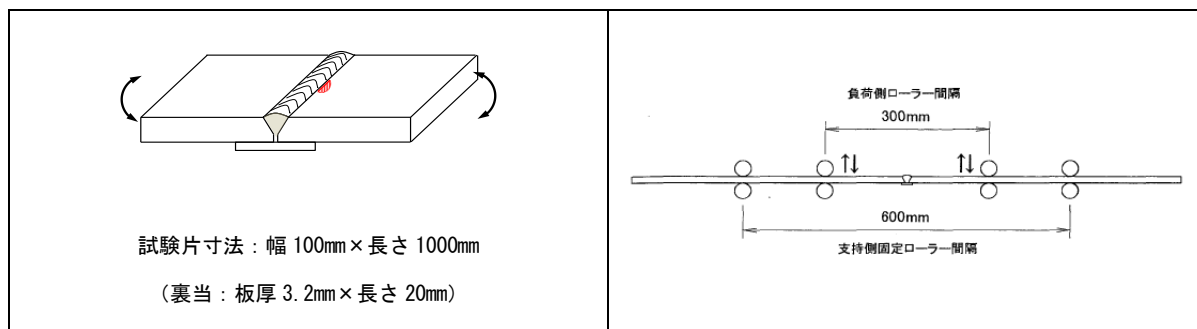


図 6.8 4 点曲げ試験片

表 6.5 には、既往の疲労試験で製作した初期欠陥（半楕円表面亀裂）を有する疲労試験片と、歪制御負荷を示す。

表 6.5 疲労試験片

No.	板厚(mm)	材質	初期亀裂 (深さ×長さ)	数量	歪制御(%)	備考
①	6	SS400	3.0×6.0	2	0.2, 0.28	
			3.0×9.0	2	0.2, 0.30	※
			3.0×12.0	2	0.2, 0.24	
			3.0×18.0	2	0.2, 0.30	※
②	12	SS400	---	4	0.12~0.70	
			1.5×3.0	4	0.12~0.75	
			3.0×6.0	4	0.12~ 0.625	
③	12	SS400	3.0×12.0	2	0.12, 0.50	※
			3.0×18.0	2	0.12, 0.26	※

尚、既往の調査検討においては「“低温タンクの耐久性委員会報告書”の空満繰返し回数 18.5 回/年等より、底板に対する荷重繰返し回数を 1000 回（設計寿命 50 年）」に設定している。

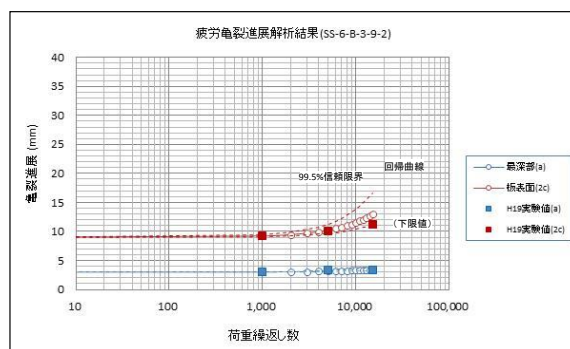
(3) 計算結果との比較

疲労亀裂進展解析では、解析モデルの板幅を $W=100\text{mm}$ とし、亀裂進展速度に関する微分方程式(6.2)の解法として 4 次の Runge-Kutta 法（間隔 $\Delta N=10$ ）を用い、

表 6.5 の疲労試験片のうち、No. ①に示す板厚 6mm で初期亀裂(3mm×9mm)の試験結果を図 6.9 に、同じく初期亀裂(3mm×18mm)の試験結果を図 6.10 に示し、解析結果と比較した。図中には、試験結果（■印）のうち最深部（A 点）を青色、板表面（C 点）を赤色で示す。

一方、疲労進展解析では、太田ら⁶⁾の試験結果を基にして、前出の表 6.4 に示す回帰曲線（中間値）を○印で、99.5%信頼限界（WES2805:2011 の最安全側）と下限側の値を用いた結果を点線（……）で示した。

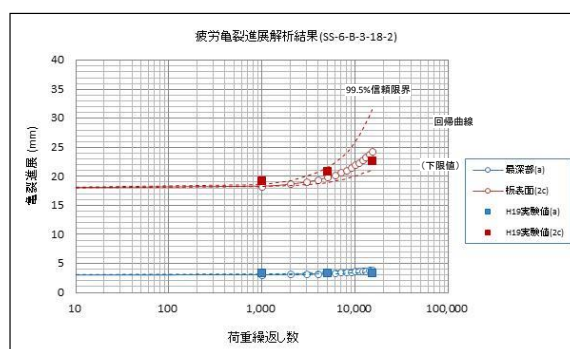
図 6.9 及び図 6.10 の試験結果は、疲労進展解析において、表 6.4 の回帰曲線（中間値）又は下限側の材料定数を用いた場合と良く一致している。更に、表 6.5 の 99.5%信頼曲線の材料定数を用いた場合には、全て安全側の結果を示すことが明となった。



※歪制御 0.3% (−0.04%~0.26%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f \geq 15,000$ 回 (破断せず)

図 6.9 板厚 6mm、初期亀裂 (3mm×9mm) の解析結果



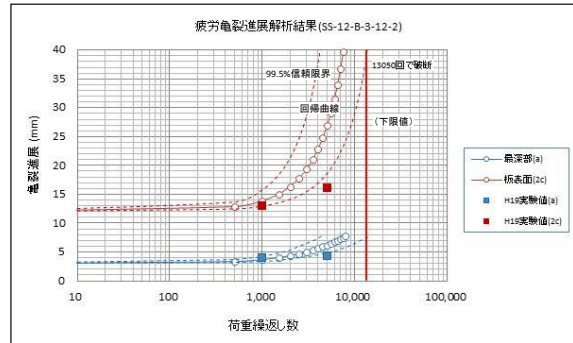
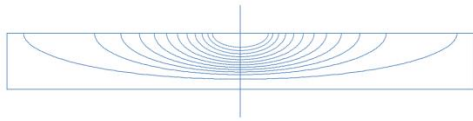
※歪制御 0.3% (−0.08%~0.22%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f \geq 15,000$ 回 (破断せず)

図 6.10 板厚 6mm、初期亀裂 (3mm×18mm) の解析結果

同様に、表 6.5 の疲労試験片のうち、No. ③に示す板厚 12mm で初期亀裂 (3mm×12mm) の試験結果を図 6.11 に、同じく初期亀裂 (3mm×18mm) の試験結果を図 6.12 に示し、解析結果と比較した。図中には、試験結果 (■印) のうち最深部 (A点) を青色、板表面 (C点) を赤色で示す。

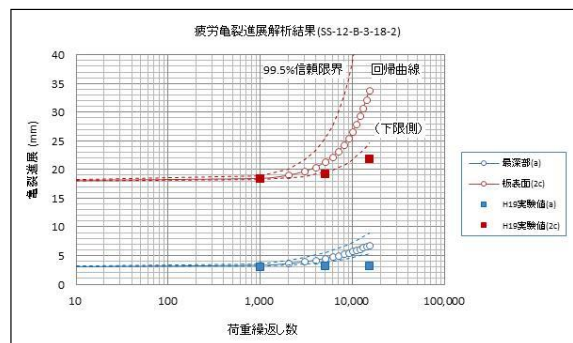
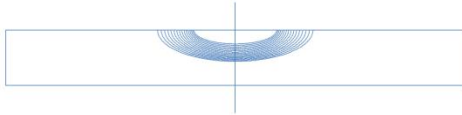
図 6.11 より、当該試験では突合溶接継手の溶接止端部より、荷重繰返し回数 $N_f = 13,050$ 回で破断したとしている。図 6.11 及び図 6.12 の試験結果は、疲労進展解析において、前出の表 6.4 に示す回帰曲線 (中間値) 又は下限側の材料定数を用いた場合と良く一致している。更に、表 6.5 の 99.5%信頼曲線の材料定数を用いた場合には、全て安全側の結果を示すことが明かとなった。



※歪制御 0.5% (−0.1%〜0.4%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f = 13,050$ 回 (溶接止端部で破断)

図 6.11 板厚 12mm、初期亀裂 (3mm×12mm) の解析結果



※歪制御 0.26% (0.0%〜0.26%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f \geq 15,000$ 回 (破断せず)

図 6.12 板厚 12mm、初期亀裂 (3mm×18mm) の解析結果

以上より、WES2805:2011 の適用に際しては、後述する疲労亀裂進展検討では、99.5%信頼限界 (WES2805:2011 の最安全側) の材料定数を用いることにより、疲労破壊に対して十分な安全性を確保できるものと判断される。

6.3 評価に用いる亀裂寸法と歪

6.3.1 K 値等価則による亀裂特性寸法の設定

破壊パラメータ CTOD（亀裂先端開口変位）の力学的関係は 2 次元の板厚貫通亀裂に対するものであるのに対し、構造物で問題となる欠陥は 3 次元の板厚非貫通亀裂（表面亀裂・埋没亀裂）が多い。そのため線形破壊力学による『K 値の等価則』を用いて、板厚非貫通亀裂を力学的に等価な 2 次元貫通亀裂に置き換える。

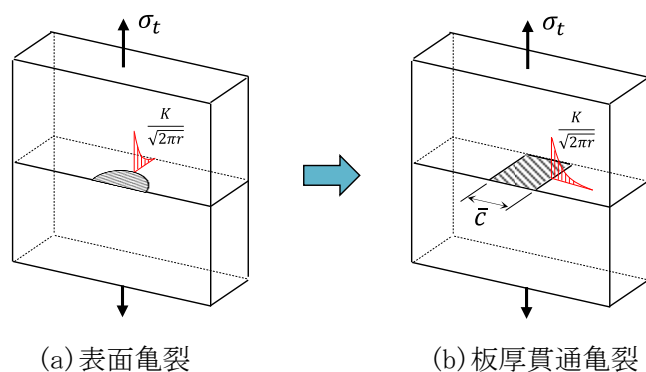


図 6.13 K 値等価則

ここでは、一律に半楕円表面亀裂の最深部（A 点）における K 値が等しくなるように亀裂特性寸法 $\bar{c}$ を決定し。

$$\left. \begin{aligned} K &= F_{tA} \sigma_t \sqrt{\pi a} \\ K &= \sigma_t \sqrt{\pi \bar{c}} \end{aligned} \right\} \therefore \bar{c} = a \cdot F_t^2 \quad (6.3)$$

ここに、a: 半楕円表面亀裂の深さ、係数 F_t は表 6.3 による。

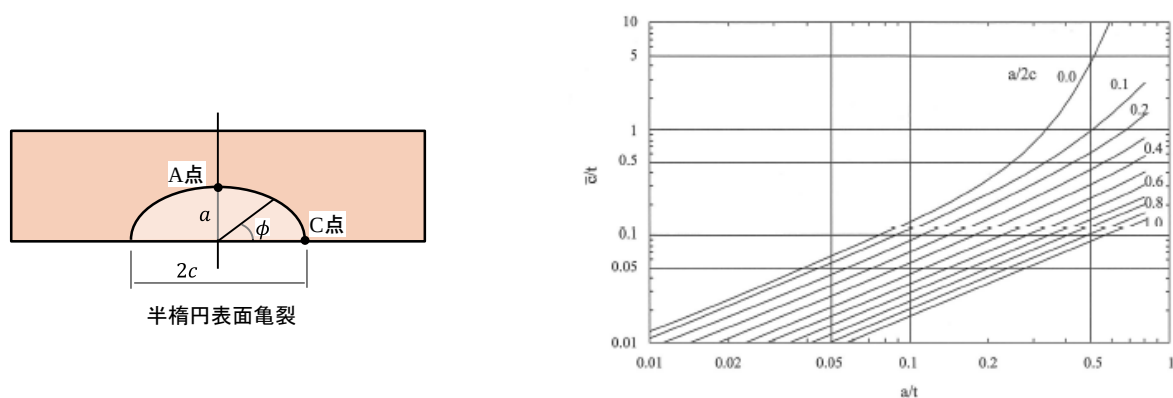


図 9.1 亀裂特性寸法（表面亀裂）

図 6.14 亀裂特性寸法（表面亀裂）

6.3.2 評価歪み(ε)の算定

亀裂の評価に用いる歪 ε は、溶接残留応力の有無、歪集中部の有無を考慮して設定する。

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (6.4)$$

ここに、 ε_1 ：境界力（外力）による歪

ε_2 ：残留応力による歪

ε_3 ：応力集中による歪

（１）外力による歪(ε_1)

屋外貯蔵タンクの場合、内容液の受入れ・払出しによるタンク構成部材に発生する応力、高レベル地震動時のタンク隅角部に発生する応力を評価する場合、一般に、有限要素法 (FEM) による数値解析が用いられる。図 6.15 に、軸対称シェル要素解析による一例を示す。

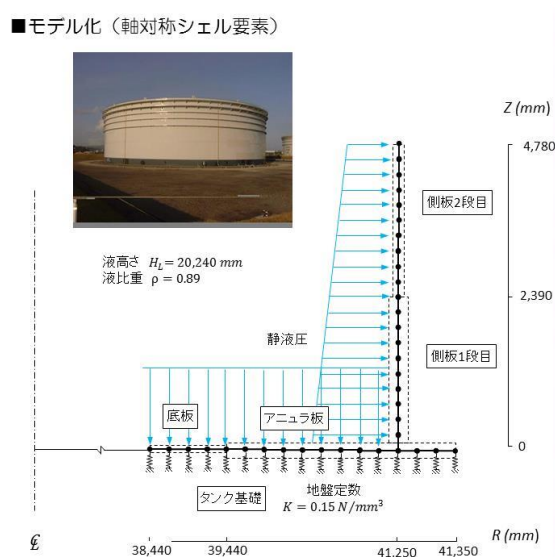


図 6.15 軸対称要素による解析モデルの一例

（２）溶接残留応力による歪(ε_2)

溶接部に存在する欠陥には溶接残留応力が作用することから、破壊強度を評価する場合には、残留応力の影響を考慮する必要がある。

一般的に、残留応力は溶接継手の方向によって、その最大値と分布が異なる（図 6.16）。即ち、溶接線ビード付近で室温の降伏応力 σ_Y にほぼ等しい引張残留応力が生じる。一方、溶接線に垂直方向の残留応力は、その方向の拘束状態に影響され、熱収縮が拘束されない自由な状態では小さな値となる。

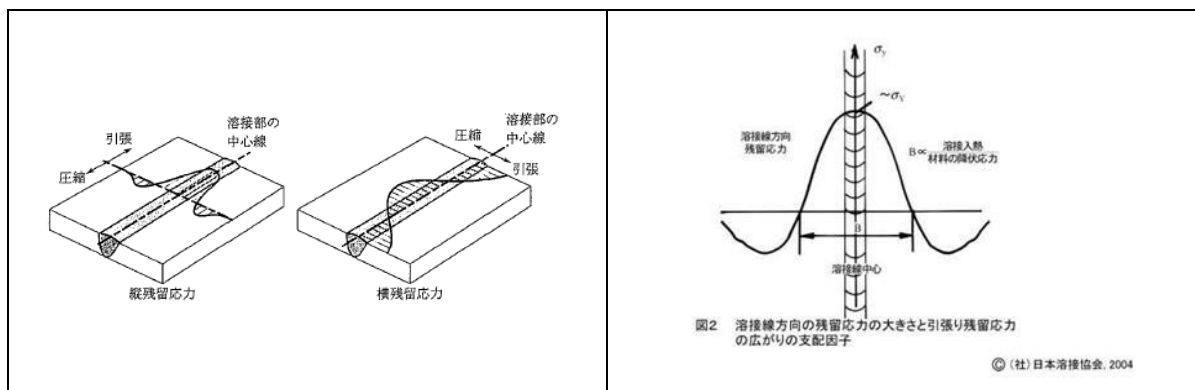


図 6.16 溶接継手の残留応力分布

実機の既設屋外貯蔵タンクの溶接継手部に生じる残留応力の大きさ・分布を知るためには、有限要素法による熱弾塑性解析等の適用が考えられるが、対象となる溶接継手の拘束度が残留応力の評価に大きく影響することから、事前にタンクの組立て方法、溶接手順、熱履歴などの解析条件を、タンク個々の溶接継手部について明かにする必要がある。この様に、大型溶接構造物である屋外貯蔵 熱弾塑性解析等を適用するには不確定要素が多く、計算に多大な労力を必要とすることからも現実的でない。

ここでは、WES2805:2011 に示されている残留応力の取扱い方法に従って、残留応力下での表面亀裂進展特性及び脆性破壊発生の評価を行うものとする。

溶接残留応力による歪(ε_2)は、鋼板の降伏歪み(ε_Y)に対する比(α_R)を用いて、次のように定義する。

$$\varepsilon_2 = \alpha_R \cdot \varepsilon_Y \quad (6.5)$$

ここで、突合せ及び隅肉溶接継手において、係数 α_R は亀裂の種類、溶接線と亀裂の長さ方向との関係(図 6.17 参照)で、次表のような数値となる。

表 6.6 α_R の値

亀裂の種類	溶接線と平行	溶接線と直角
貫通亀裂	0	0.6
埋没亀裂	0	0.6
表面亀裂	0.36	0.6

表 6.6 において溶接線に直角な亀裂では $\alpha_R = 0.6$ となっているが、これは溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力が存在した場合、その残留応力場に存在する亀裂の CTOD は、残留応力の無い平板が $0.6\varepsilon_Y$ の作用歪を遠方で受ける場合の CTOD にほぼ等しいことによる。

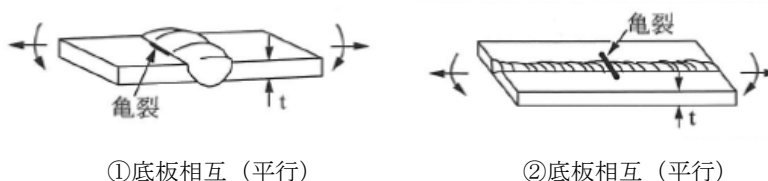


図 6.17 表面亀裂を有する底板溶接継手（突合せ）

(3) 応力集中による歪(ε_3)

継手形状の不連続による応力集中部に存在する亀裂に対しては、歪集中を考慮しなければならない。平均的歪集中係数を $\bar{K}_\varepsilon$ とすれば、歪集中による歪増分 ε_3 は次式のように定義される。

$$\varepsilon_3 = (\bar{K}_\varepsilon - 1)\varepsilon_1 \quad (6.6)$$

① タンク底板相互の溶接継手（突合せ）

表面亀裂を有するタンク底板相互の突合せ溶接継手では、溶接線と亀裂長さ方向との関係で、次の3種類の形態が考えられる。このうち、表面亀裂が溶接線に直角（図 6.17 の②）に存在する場合には、余盛りによる応力集中の影響は無いもの($\bar{K}_t = 1$)としている。

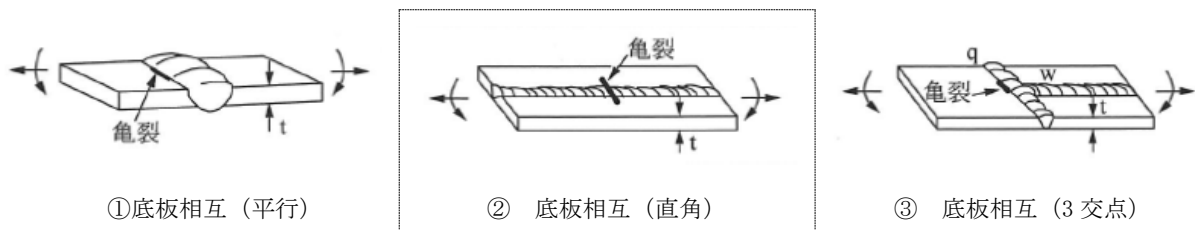


図 6.17 表面亀裂を有する底板溶接継手（突合せ）

一方、表面亀裂が溶接線に平行（図 6.17 の①、③）に存在する場合には、余盛り幅 L と亀裂深さ a とに応じて、弾性応力集中係数を算定する（図 6.19）。

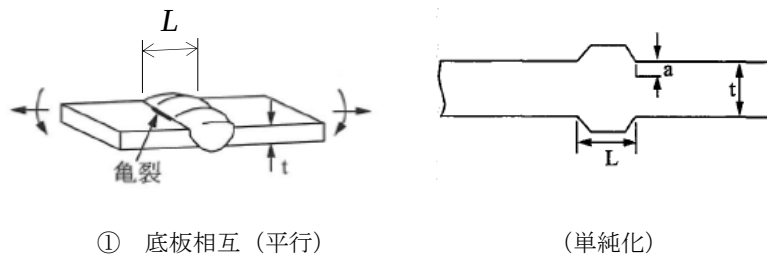


図 6.18 余盛り幅と亀裂深さ

【曲げ負荷】 ※WES2805:2011 の表 13.4 参照

半楕円表面亀裂	弾性応力集中係数：$\bar{K}_t = M_{kA}$ 又は M_{kC} $M_{kC} = M_{kA} + M_{k(C-A)}$ $M_{kA} = \alpha(a/t)^\beta$ $M_{k(C-A)} = 1.15 \cdot \exp(-9.74 \times a/t)$ ※定数 α、β は表 6.8 による。
----------------	---

表 6.7 定数 α 、 β

	a/t	α	β
$L/t \leq 1$	$\leq 0.03[L/t]^{0.55}$	$0.45[L/t]^{0.21}$	-0.31
	$> 0.03[L/t]^{0.55}$	0.68	$-0.19[L/t]^{0.21}$
$L/t > 1$	≤ 0.03	0.45	-0.31
	> 0.03	0.68	-0.19

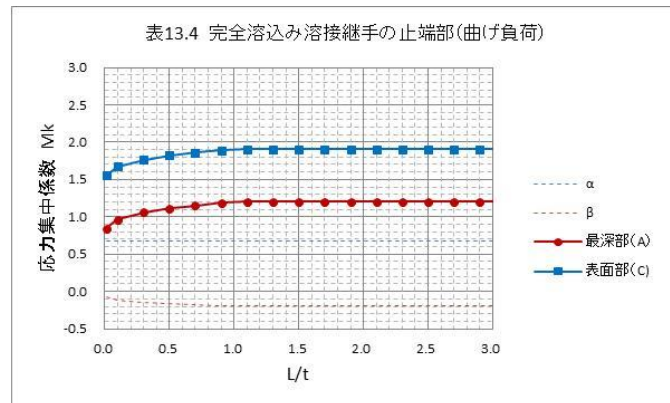


図 6.19 突合せ溶接止端部の応力集中係数 $\bar{K}_t$

ここで、API Standard 650 Appendix M「Requirements for Tanks Operating at Elevated Temperatures」⁷⁾ではアニュラ板相互の突合せ溶接止端部の応力集中係数を $K = 2.0$ と規定しており、図 6.19 の板表面(C点)の値とほぼ一致している。

K = stress concentration factor for the bottom plate at the toe of the inside shell-to-bottom fillet weld
 = 4.0 for shell-to-bottom fillet welds and lap-welded bottom plates
 = 2.0 for butt-welded annular plates where the shell-to-bottom fillet welds have been inspected by 100% magnetic particle examination (see 8.2). This magnetic particle examination shall be performed on the root pass at every 13 mm of deposited weld metal while the weld is being made and on the completed weld. The examination shall be performed before hydrostatic testing

② タンク隅角部近傍の溶接継手

表面亀裂を有するタンク隅角部近傍の溶接継手では、側板×アニュラ板の隅肉溶接継手とアニュラ板相互、アニュラ板×底板の3種類の形態が考えられる(図 6.20)。このうち、アニュラ板相互(直角)及びアニュラ板×底板(平行)は前出のタンク底板相互の溶接継手と同じ(図 6.17 の①、②参照)。

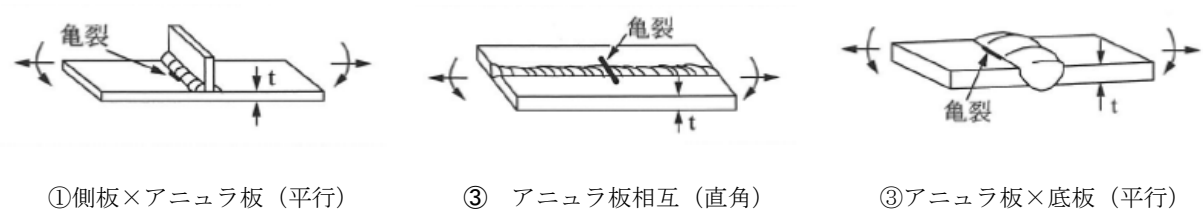


図 6.20 タンク隅角部の溶接継手形式

一方、側板×アニュラ板の隅肉溶接継手では、隅肉脚長 L と溶接止端部の角度 θ に応じて、弾性応力集中係数を算定する（図 6.22）。

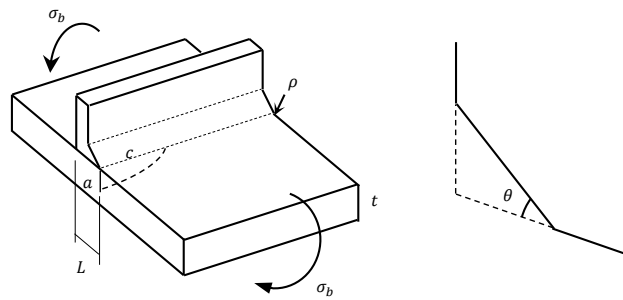


図 6.21 隅肉溶接継手

【曲げ負荷】※WES2805:2011 の表 13.8, 表 13.10 参照

半楕円表面亀裂	弾性応力集中係数：$\bar{K}_t = M_{kba}$ 又は M_{kbc} $M_{kba} = f_1\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}\right) + f_2\left(\frac{a}{t}, \theta\right) + f_3\left(\frac{a}{t}, \theta, \frac{L}{t}\right) \quad M_{kba} \geq 1$ $M_{kbc} = f_1\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{L}{t}\right) + f_2\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \theta\right) + f_3\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \theta, \frac{L}{t}\right) \quad M_{kbc} \geq 1$
----------------	---

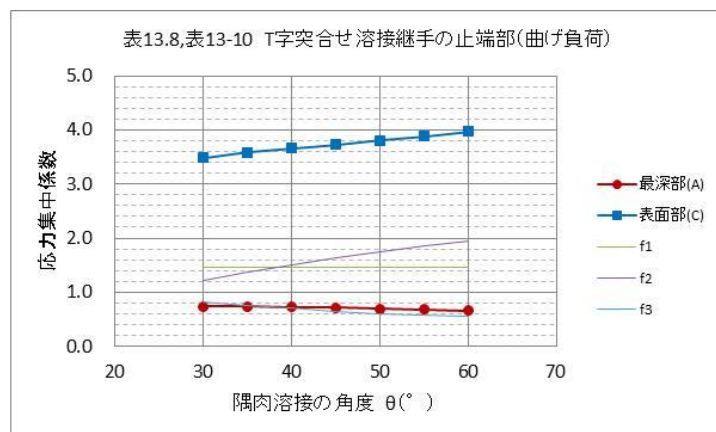


図 6.22 隅肉溶接止端部の応力集中係数 $\bar{K}_t$

ここで、前出の API Standard 650 Appendix M 「Requirements for Tanks Operating at Elevated Temperatures」⁷⁾では、側板×アニュラ板相互の隅肉溶接止端部の応力集中係数を $K = 4.0$ と規定しており、図 6.22 の板表面(C 点) の値と概ね一致している。但し、隅肉溶接止端部の曲率半径に制限 ($0 \leq \rho/t \leq 0.1$) があることに留意する必要がある。

K = stress concentration factor for the bottom plate at the toe of the inside shell-to-bottom fillet weld = <u>4.0 for shell-to-bottom fillet welds and lap-welded bottom plates</u> = 2.0 for butt-welded annular plates where the shell-to-bottom fillet welds have been inspected by 100% magnetic particle examination (see 8.2). This magnetic particle examination shall be performed on the root pass at every 13 mm of deposited weld metal while the weld is being made and on the completed weld. The examination shall be performed before hydrostatic testing

6.4 破壊パラメータ δ の力学算定式（CTOD 設計曲線）

一般に、構造物で欠陥評価の対象となる塑性変形は応力（歪み）集中部に限定され、その周囲は弾性状態にある。この歪み集中部に欠陥が存在する場合、歪み集中域に本来要求されている変形能力に見合うだけの亀裂の開口（CTOD）が耐えられればよいと考える（図 6.23）。

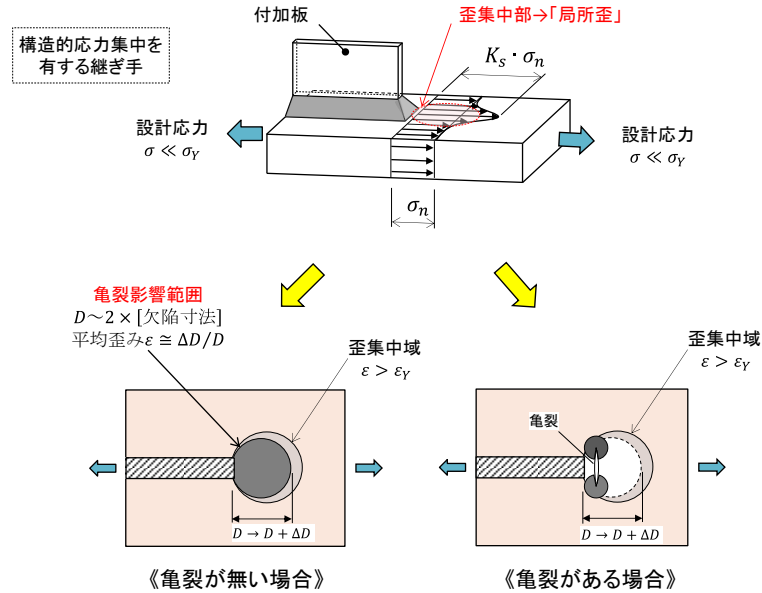


図 6.23 応力集中部の歪と亀裂の変形

無限平板の板厚貫通亀裂（長さ $2\bar{c}$ ）に特性化された亀裂の破壊駆動力は、多くの数値解析と大型実験の結果をもとに、次式の CTOD 設計曲線で評価される（図 6.24）⁸⁾。

$$\delta = \varepsilon_y \bar{c} \left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} \right)^2 \quad \varepsilon / \varepsilon_Y < 1.0 \quad (6.7a)$$

$$= \varepsilon_Y \bar{c} \left(\frac{\pi}{8} \right) \left[9 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} \right) - 5 \right] \quad \varepsilon / \varepsilon_Y \geq 1.0 \quad (6.7b)$$

ここで、歪み ε は亀裂の存在しない場合に亀裂想定部に働く局所歪みを示す。これより、応力集中部に作用する局所歪（Overall Strain） ε が求まれば、当該箇所に存在する亀裂の開口変位 CTOD δ が評価できる。

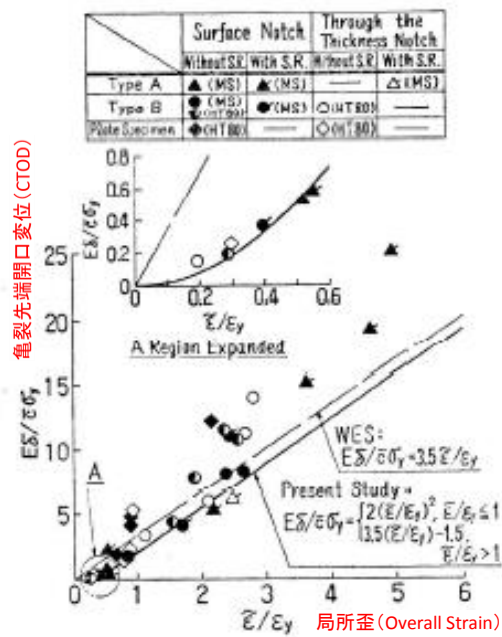


Fig. 10 COD design curve

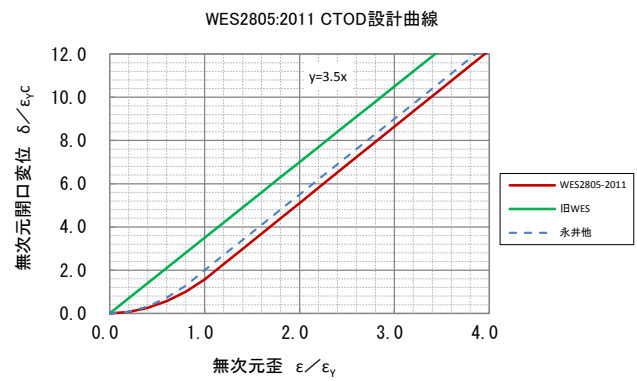


圖 6. 24 CTOD 設計曲線 (WES2805-2011) ⁹⁾

6.5 材料の破壊靱性値 δ_{cr} の設定

6.5.1 限界 CTOD（平均値 δ_c ）

V ノッチシャルピー試験片の衝撃試験結果から、次式により限界 CTOD（平均値 δ_c ）を推定する。

$$\delta_c(T) = \frac{1}{250} \cdot {}_vE(T + \Delta T) \quad (6.8)$$

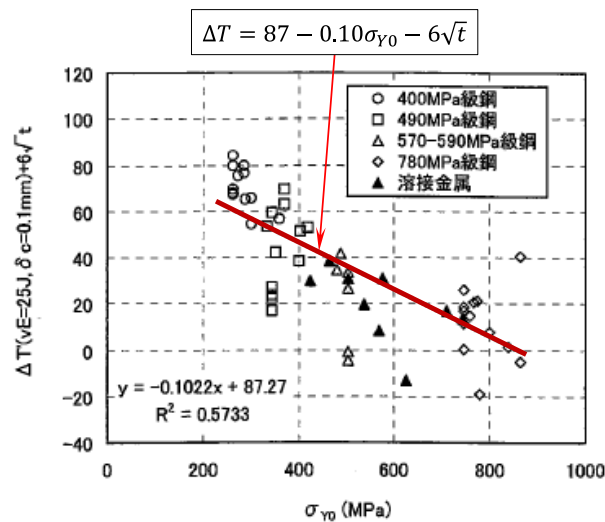
$$\Delta T = 87 - 0.10\sigma_{Y0} - 6\sqrt{t} \quad (6.9)$$

ここに、 $\delta_c(T)$ ：評価温度 $T(^{\circ}\text{C})$ における限界 CTOD の平均値(mm)

${}_vE(T + \Delta T)$ ：温度 $T + \Delta T(^{\circ}\text{C})$ におけるシャルピー吸収エネルギーの平均値(J)

σ_{Y0} ：室温における材料の降伏応力(MPa)

t ：対象とする鋼板の厚さ(mm)



解説図 11.8 シャルピーと CTOD の遷移温度差 ΔT と降伏応力 σ_{Y0} の関係

6.5.2 評価に用いる破壊靱性値 δ_{cr}

上記の相関式(6.8)は、シャルピー値の平均値と、限界 CTOD の平均値の相関式である。従って、評価に用いる際には、3本の最低値に相当する限界 CTOD である破壊靱性値 δ_{cr} に換算する必要がある。

$$\delta_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3}} [\delta_c(T) + 0.01 \cdot (\sqrt{3} - 1)] \quad (6.10)$$

尚、『3箇の試験片の最低靱性値を用いる』ということは、統計的観点からは『87.5%の確率で母集団靱性分布の中央値を下回る値を評価する』ということを意味する。

6.6 許容判定

亀裂特性寸法 $\bar{c}$ と評価歪 ε から得られる破壊パラメータ δ と、材料の破壊靱性値 δ_{cr} が、次式を満足するならば、その欠陥は許容される。

$$\delta_{cr} > \delta(\bar{c}, \varepsilon) \quad (6.11)$$

尚、当該 WES2805:2011 では、評価の各段階における種々の不確実要因に関して安全側になるように配慮されている。従って、この規格による評価の各過程に安全係数を設定する必要はない。

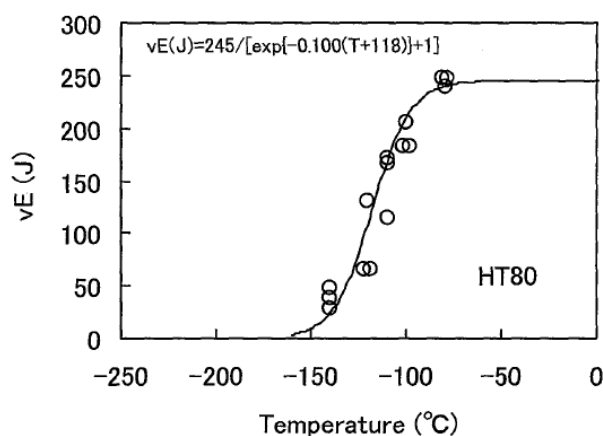
7. 実機タンクで使用する鋼板の破壊靱性値 δ_{cr} の推定

の解説 11.4 に『相関式構築に用いた基礎データ』（添付資料-2）として、シャルピー遷移曲線の数式近似結果が示されている¹⁰⁾。ここでは、実機タンクの底板及びアニュラ板に使用される一般構造用鋼板 SS400、圧力容器用鋼板 SPV490Q 及び溶接構造用鋼板 SM490 について、シャルピー衝撃試験の結果より破壊靱性値 δ_{cr} を推定する。

ここで、WES2805:2011 ではシャルピー遷移曲線の数式近似として、次のように示している。

$${}_vE(T) = \frac{{}_vE_{shelf}}{\exp[k_a(T - {}_vT_E)] + 1} \quad (7.1)$$

ここに、 ${}_vE(T)$ ：温度 T (°C) におけるシャルピー衝撃吸収エネルギー (J)、 ${}_vE_{shelf}$ ：上部棚吸収エネルギー(J)、 ${}_vT_E$ ：エネルギー遷移温度 (°C)、 k_a ：定数を示す。図 7.1 に、決定した遷移曲線の一例を示す。



(a) シャルピー遷移曲線

図 7.1 シャルピー遷移曲線の数式近似（一例）

7.1 一般構造用鋼板 SS400

表 7.1 に、一般構造用鋼板 SS400 の機械的性質を示す。

表 7.1 SS400 の機械的性質

降伏点	σ_Y	245MPa	$t \leq 16\text{mm}$
		235MPa	$t > 16\text{mm}$
引張強度	σ_t	400MPa	

表 7.2 には、『相関式構築に用いた基礎データ』のうち、強度レベル（降伏点）がほぼ同じクラスの鋼板を抜粋した。更に、参考文献¹¹⁾¹²⁾のデータを追加した。

表 7.2 シャルピー遷移曲線（基礎データ）

	鋼種	記号	板厚 t (mm)	降伏点 σ_Y (MPa)	遷移温度 ${}_vT_E$ (°C)	上部棚 ${}_vE_{shelf}$ (J)	係数 k_a	備考
①	建築構造用鋼板	SN400	12	287	-30	240	-0.084	文献 4)
②	"	SN400A	9	360	30	150	-0.070	" ※不採用
②	"	SN400B	9	287	-20	160	-0.070	"
④	溶接構造用鋼板	SM41B	10	263	-31	196	-0.084	"
⑤	一般構造用鋼板	SS400	10	267	-7.7	213	-0.0571	文献 11)
	"	SS400	22	(267)	-45	340	(-0.08)	文献 12)

図 7.2 に、各鋼種に対するシャルピー遷移曲線の結果を示す。このうち、建築構造用鋼板 SN400, SN400A 及び一般構造用鋼板 SS400 にはシャルピー衝撃試験値の規定が無く、シャルピー遷移曲線にばらつきが見られる。

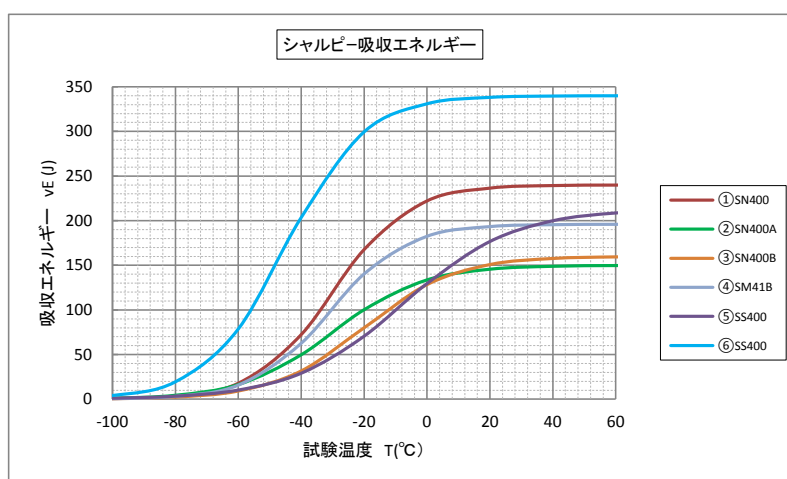


図 7.2 シャルピー遷移曲線

図 7.3 に、各鋼種に対して式(6.10)を用いて換算した限界 CTOD の平均値 δ_c を実線で示す。更に、各鋼種に対して式(6.12)で計算した破壊靱性値 δ_{cr} のうちで最小となる値を点線で示す。

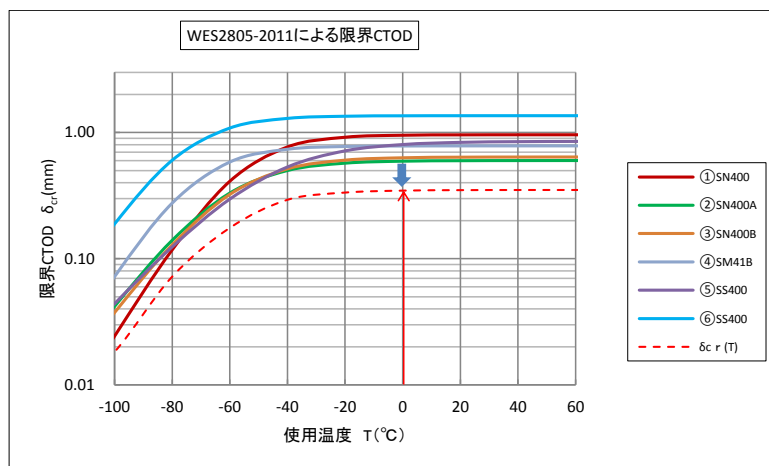


図 7.3 限界 CTOD の算定

同図より、設計メタル温度を 0℃と仮定すると、一般構造用鋼板 SS400 の破壊靱性値として、 $\delta_{cr} \cong 0.346\text{mm}$ (0℃)が得られる。

尚、JIS B 8501:2013「鋼製石油貯槽の構造（全溶接製）」より、設計最低メタル温度は、設計最低使用温度（その貯槽が設置されている地域のできるだけ長期間にわたる 1 日平均気温の記録の中から、最も低い日の気温を求め、それに 8℃を加算した温度）又は水張試験時の水温のうち、いずれか低い方の温度に等しいメタル温度と規定されている。

7.2 圧力容器用鋼板 SPV490Q

表 7.3 に、圧力容器用鋼板 SPV490Q の機械的性質を示す。

表 7.3 SPV490Q の機械的性質

降伏点	σ_Y	490MPa	
引張強度	σ_U	610MPa	

表 7.4 には、『相関式構築に用いた基礎データ』のうち、強度レベル（降伏点）がほぼ同じクラスの鋼板を抜粋した。

表 7.4 シャルピー遷移曲線（基礎データ）

	鋼種	記号	板厚 t (mm)	降伏点 σ_Y (MPa)	遷移温度 ${}_vT_E$ (°C)	上部棚 ${}_vE_{shelf}$ (J)	係数 k_a	備考
①	溶接用高張力鋼板	HW45	10	505	-40	158	-0.057	文献 4)
②	"	HW45	20	505	-40	158	-0.057	"
③	"	HW45	30	505	-60	201	-0.056	"
④	"	HW45	50	505	-60	201	-0.056	"

図 7.4 に、各鋼種に対するシャルピー遷移曲線の結果を示す。図中には、H20 年度に実施した「水張検

査の合理化に関する検討業務」のうち、圧力容器用鋼板 SPV490Q のシャルピー衝撃試験結果の一例を参考として示す。
 ×印) は JIS B 8501:2013 に規定されている「必要最小吸収エネルギー」(3 個の平均) を示す。

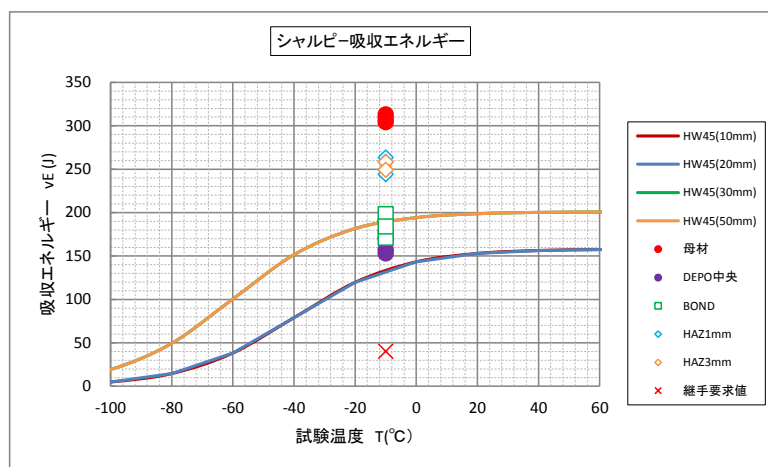


図 7.4 シャルピー遷移曲線

図 7.5 に、各鋼種に対して式(6. 10)を用いて換算した限界 CTOD の平均値 δ_c を実線で示す。更に、各鋼種に対して式(6. 12)で計算した破壊靱性値 δ_{cr} のうちで最小となる値を点線で示す。

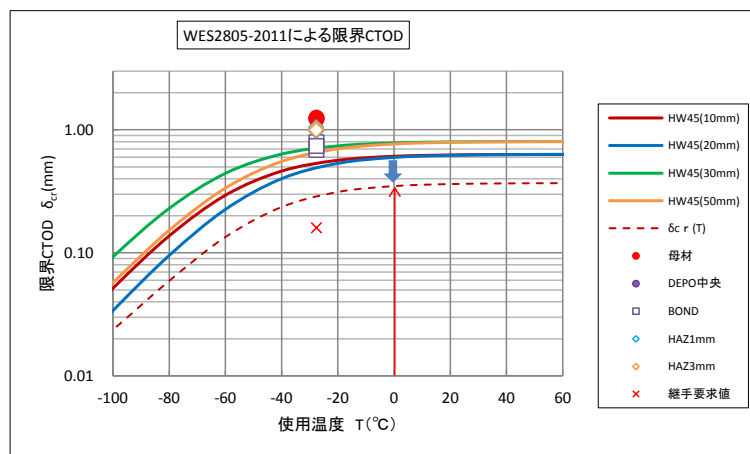


図 7.5 限界 CTOD の算定

同図より、設計メタル温度を 0°C と仮定すると、圧力容器用鋼板 SPV490Q の破壊靱性値として、 $\delta_{cr} \cong 0.356\text{mm}$ (0°C) が得られる。

【参考】既往の実験結果（抜粋）²⁾

5.3 衝撃試験結果

母材及び材料劣化度合い確認用の衝撃試験結果を表 4.7、溶接継手の衝撃試験片のノッチ導入位置概要を図 4.6 に示す（参考）。なお、試験片へのノッチ罫書き状況及び試験後の破面状況を写真 4.2、写真 4.3 に示す。図 4.7～図 4.10 に衝撃試験の結果を示す。補修溶接による材料劣化は観察されなかった。

表 4.7 母材及び溶接継手の衝撃試験結果

補修 回数	衝撃試験部位、ノッチ位置及び試験結果（吸収エネルギー：J）																			
	母材				Depo 中央				BOND				HAZ 1mm				HAZ 3mm			
	試験温度：-10℃				試験温度：-10℃				試験温度：-10℃				試験温度：-10℃				試験温度：-10℃			
	個々値			Av	個々値			Av	個々値			Av	個々値			Av	個々値			Av
	-1	-2	-3		-1	-2	-3		-4	-5	-6		-7	-8	-9		-10	-11	-12	
母材部	308	304	313	308	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0	—	—	—	—	157	153	171	160	171	198	184	184	263	244	258	255	249	258	249	252
1 回	—	—	—	—	153	127	140	140	202	216	198	205	249	276	281	269	263	244	239	249
3 回	—	—	—	—	144	140	114	133	207	207	193	202	244	239	249	244	244	244	258	249
5 回	—	—	—	—	180	166	162	169	198	198	193	196	244	263	244	250	263	244	249	252

JISZ3128 V ノッチ試験片

（規格値（SPV490Q）：1 個の最低 28 J， 3 個の平均 40 J[-10℃]）

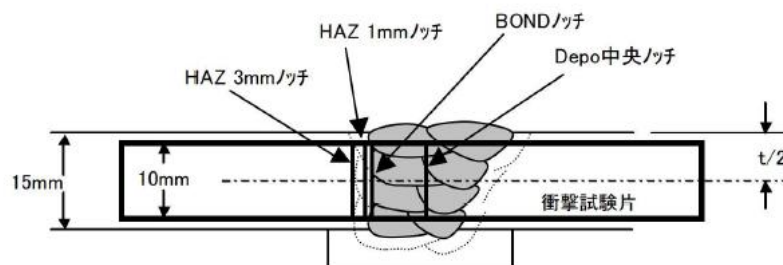


図 4.6 衝撃試験片のノッチ導入位置の概要

7.3 溶接構造用鋼板 SM490

表 7.5 に、溶接構造用鋼板 SM490 の機械的性質を示す。

表 7.5 SM490 の機械的性質

降伏点	σ_Y	325MPa	$t \leq 16\text{mm}$
		315MPa	$t > 16\text{mm}$
引張強度	σ_t	490MPa	

表 7.6 には、『相関式構築に用いた基礎データ』のうち、強度レベル（降伏点）がほぼ同じクラスの鋼板を抜粋した。

表 7.6 シャルピー遷移曲線（基礎データ）

	鋼種	記号	板厚 t (mm)	降伏点 σ_Y (MPa)	遷移温度 ${}_vT_E$ (°C)	上部棚 ${}_vE_{shelf}$ (J)	係数 k_a	備考
①	溶接構造用鋼板	SM50B	10	345	-30	161	-0.059	文献 4)
②	"	SM50B	25	345	-41	175	-0.041	"
③	"	SM50B	50	345	-41	175	-0.041	"

図 7.6 に、各鋼種に対するシャルピー遷移曲線の結果を示す。図中には、H20 年度に実施した「水張検査の合理化に関する検討業務」のうち、溶接構造用鋼板 SM400 の結果の一例を参考として示す。尚、図中の継手要求値（×印）は JIS B 8501:2013 に規定されている「必要最小吸収エネルギー」（3 個の平均）を示す。

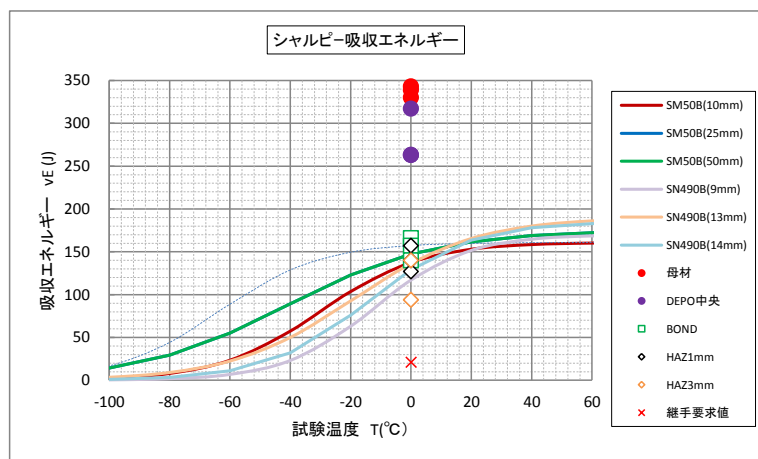


図 7.6 シャルピー遷移曲線

図 7.7 に、各鋼種に対して式(6.10)を用いて換算した限界 CTOD の平均値 δ_c を実線で示す。更に、各鋼種に対して式(6.12)で計算した破壊靱性値 δ_{cr} のうちで最小となる値を点線で示す。

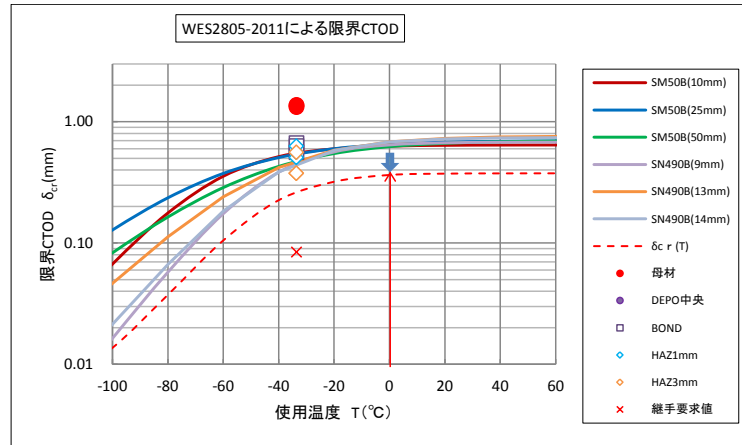


図 7.7 限界 CTOD の算定

同図より、設計メタル温度を 0°C と仮定すると、溶接構造用鋼板 SM490 の破壊靱性値として、 $\delta_{cr} \cong 0.364\text{mm}$ (0°C) が得られる。

【参考】既往の実験結果（抜粋）²⁾

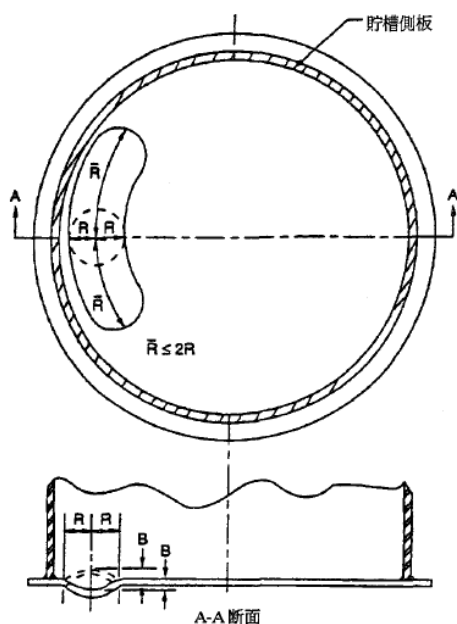
表 16. 衝撃試験結果

継手名称	補修溶接			試験片 採取位置	衝撃試験(吸収エネルギー、J)												判定			
	補修区分	補修長さ (mm)	補修深さ (mm)		溶接金属						熱影響部(底板側)				熱影響部(アニュー板側)					
					試験片 記号	試験温度:0℃			試験片 記号	試験温度:0℃			試験片 記号	試験温度:-10℃						
						個々値	平均値			個々値	平均値			個々値	平均値					
アニュー板 (21t) x 底板 (12t) (突合せ 溶接継手)	健全部	—	—	中央	32K 1~3	60	71	64	65	32K 4~6	98	131	127	119	32K 7~9	235	321	313	290	合格
	補修1	300	3	スタート	31R 1~3	75	82	71	76	31R10~12	166	153	148	156	31R19~21	286	153	110	183	合格
				中央	31R 4~6	67	67	53	62	31R13~15	175	161	170	169	31R22~25	60	86	98	81	合格
				エンド	31R 7~9	60	71	53	61	31R16~18	189	189	175	184	31R26~27	157	317	313	262	合格
	補修1	500	3	スタート	32R 1~3	46	82	60	63	32R10~12	166	175	179	173	32R13~15	299	317	202	273	合格
				中央	32R 4~6	67	82	64	71	32R16~18	189	189	175	184	32R19~21	304	304	189	266	合格
				エンド	32R 7~9	82	82	64	76	31R22~24	184	179	225	196	32R25~27	326	317	308	317	合格
	補修1	1000	3	スタート	33R 1~3	57	71	57	62	33R 4~6	144	127	94	122	33R 7~9	308	317	313	313	合格
				中央	33R10~12	82	71	64	72	33R13~15	94	110	64	89	33R16~18	326	304	308	313	合格
				エンド	33R19~21	80	64	86	70	33R22~24	153	166	102	140	33R25~27	321	272	330	308	合格
	補修2	300	6	スタート	34R 1~3	118	71	94	94	34R10~12	281	276	207	255	34R19~21	343	299	343	328	合格
				中央	34R 4~6	166	110	94	123	34R13~15	86	276	225	196	34R22~25	313	276	212	267	合格
				エンド	34R 7~9	131	102	106	113	34R16~18	198	216	263	226	34R26~27	263	321	304	296	合格
	補修2	500	6	スタート	35R 1~3	82	75	86	81	35R10~12	106	110	102	106	35R13~15	122	321	330	258	合格
				中央	35R 4~6	82	98	114	98	35R16~18	122	90	118	110	35R19~21	175	225	258	219	合格
				エンド	35R 7~9	148	106	90	115	35R22~24	67	114	110	97	35R25~27	304	308	334	315	合格
	補修2	1000	6	スタート	36R 1~3	78	67	60	68	36R 4~6	189	148	135	157	36R 7~9	212	244	276	244	合格
				中央	36R10~12	57	64	94	72	36R13~15	127	135	139	134	36R16~18	313	343	326	327	合格
				エンド	36R19~21	94	135	110	113	36R22~24	131	139	118	129	36R25~28	321	308	313	314	合格
	補修3	300	12	スタート	37R 1~3	82	244	326	217	37R10~12	106	90	118	105	37R19~21	299	189	308	265	合格
				中央	37R 4~6	253	225	239	239	37R13~15	106	131	131	123	37R22~24	317	321	144	261	合格
				エンド	37R 7~9	253	326	253	277	37R16~18	148	144	139	144	37R25~27	189	189	253	210	合格
	補修3	500	12	スタート	38R 1~3	198	244	263	235	38R10~12	139	131	135	135	38R13~15	212	317	299	276	合格
				中央	38R 4~6	267	347	276	297	38R16~18	114	139	144	132	38R19~21	308	286	189	261	合格
				エンド	38R 7~9	184	258	258	233	38R22~24	127	122	144	131	38R25~27	281	179	244	235	合格
底板 (12t) x 底板 (12t) (突合せ 溶接継手)	健全部	—	—	中央	44K 1~3	53	57	75	62	44K 4~6	127	127	135	130						合格
	補修1	300	3	スタート	41R 1~3	82	64	82	76	41R10~12	212	114	258	195						合格
				中央	41R 4~6	82	47	82	70	41R13~15	272	272	281	275						合格
				エンド	41R 7~9	67	71	57	65	41R16~18	267	267	286	273						合格
	補修1	500	3	スタート	42R 1~3	78	82	64	75	42R10~12	175	179	157	170						合格
				中央	42R 4~6	75	75	78	76	42R13~15	127	166	161	151						合格
				エンド	42R 7~9	67	67	67	67	42R16~18	170	179	170	173						合格
	補修1	1000	3	スタート	43R 1~3	71	57	44	57	43R 4~6	166	175	166	169						合格
				中央	43R 7~9	86	64	71	74	43R10~12	157	135	157	150						合格
				エンド	43R13~15	57	53	60	57	43R16~18	148	166	153	156						合格
	補修2	300	6	スタート	44R 1~3	148	189	153	163	44R10~12	148	127	122	132						合格
				中央	44R 4~6	179	144	139	154	44R13~15	153	148	106	136						合格
				エンド	44R 7~9	131	157	144	144	44R16~18	110	131	106	116						合格
	補修2	500	6	スタート	45R 1~3	135	166	106	136	45R10~12	272	267	175	238						合格
				中央	45R 4~6	166	82	166	138	45R13~15	225	249	175	216						合格
				エンド	45R 7~9	131	114	98	114	45R16~18	263	272	253	263						合格
	補修2	1000	6	スタート	46R 1~3	71	110	106	96	46R 4~6	90	131	131	117						合格
				中央	46R 7~9	44	106	94	81	46R10~12	230	131	175	179						合格
				エンド	46R13~15	78	110	127	105	46R16~18	175	235	189	200						合格
	補修3	300	12	スタート	47R 1~3	253	253	383	296	47R10~12	235	189	161	195						合格
				中央	47R 4~6	376	380	391	382	47R13~15	157	161	170	163						合格
				エンド	47R 7~9	364	207	253	275	47R16~18	225	184	235	215						合格
	補修3	500	12	スタート	48R 1~3	216	368	202	262	48R10~12	276	131	102	170						合格
				中央	48R 4~6	395	387	299	360	48R13~15	110	131	175	139						合格
				エンド	48R 7~9	347	395	391	378	48R16~18	263	216	122	200						合格
備考																				
1. 試験方法 : JIS Z 2242「金属材料衝撃試験方法」																				
2. 判定基準 : SM400B:吸収エネルギーの平均 21J以上(1個の最低 14J以上)、(試験温度:0℃)																				
SPV490Q: " " 40J " (" 28 ")、(試験温度:-10℃)																				

8. 初期不陸又は局部沈下を有する底板への適用

8.1 照査荷重

アメリカ石油協会規格 API Standard 653:2009 「Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction」¹⁴⁾では、図 8.1 のように底板の初期不陸（凸型変形, Bulge）の高さと幅、又は局部沈下（凹型変形, Settlement）の深さと幅を規定している。ここで、B：底板の初期不陸（“不陸”と称する）又は局部沈下（“不支持”と称する）の最大値、R：底板の不陸／不支持範囲（全幅 2R）で示す。尚、API653 では、図 8.1 のように不陸／不支持部を半径 R の内接円で近似している。



R=膨れ部又は凹み部に描かれた円の半径
B=沈下又は凹み深さあるいは膨れの高さ

図 B-7 側板近くの底板沈下

【タイプ A】

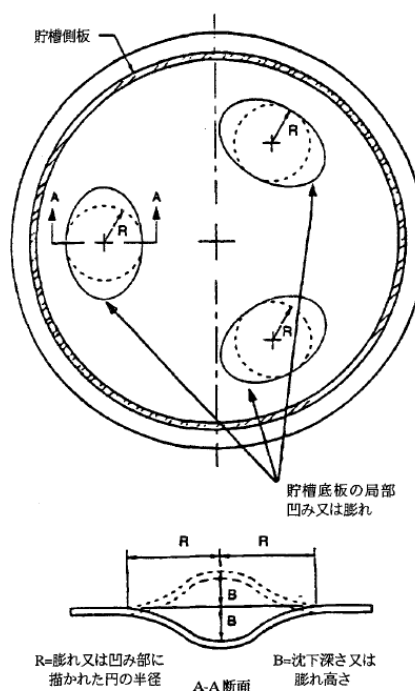


図 B-8 側板から離れた底板局部凹み又は膨れ

【タイプ B】

図 8.1 API653 による底板局部沈下

ここで、API653 における底板不陸量に対する許容値は、不陸高さ B(in), 不陸範囲 R (ft) を用いて、 $B = 0.37R$ (in) と規定している。これを、SI 単位系に換算すると、

$$B = 0.03083R \quad (8.1)$$

式(8.1)は、一層重ね隅肉溶接継手(Single Pass Welds)を有するタンク底板に適用するもので、この要件を超える場合には、経験的に詳細解析又は補修が必要であるとしている。

ここでは、タンク底板の照査用荷重条件として、既往の調査検討¹³⁾と同様に、より安全を考慮して API653 の規定値 B を 2 倍した不陸量を用いることとする。

$$B = 2 \times 0.03083R \quad (8.2)$$

(1) 初期不整（凸型変形）を有する底板【通常時】

不陸高さ（B）を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価する。

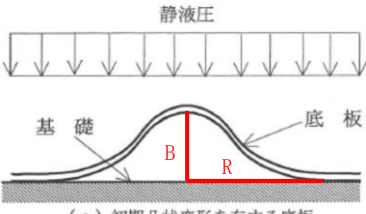
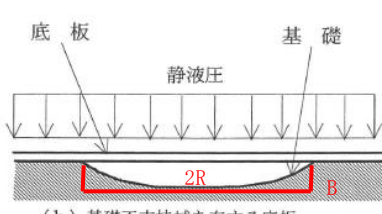
$$y = B \left\{ \left(\frac{x}{R} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{R} \right)^2 + 1 \right\} \quad (8.3)$$

(2) 局部沈下を有する底板【通常時】

基礎の沈下深さ（B）を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価する。

表 8.1 に、上記の照査荷重条件を纏めて示す。

表 8.1 底板の照査荷重条件

【通常時】初期凸状変形を有する底板	【通常時】基礎不支持域を有する底板
不陸高さ（B）を$B = 2 \times 0.03083R$として、 $y = B \left\{ \left(\frac{x}{R} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{R} \right)^2 + 1 \right\}$  (a) 初期凸状変形を有する底板	基礎沈下深さ（B）を$B = 2 \times 0.03083R$として、空～満液時の歪振幅を評価  (b) 基礎不支持域を有する底板

(3) 荷重の繰返し回数

既往の調査検討においては「低温タンクの耐久性委員会報告書」の空満繰返し回数 18.5 回/年等より、底板に対する荷重繰返し回数を 1000 回（設計寿命 50 年）に設定しており、今回の調査検討においても継続的な観点から、通常運転時の荷重繰返し回数を 1000 回と仮置きする。

8.2 解析対象

(1) 対象タンク

表 8.2 に、解析対象タンクを示す。このうち、【旧法】9,900k1 タンク及び【新法】32,000k1 タンクの底板は「重ね継手」形式を採用していることから、今回の解析対象から除外することとし、ここでは【新法】110,000k1 タンクのみを解析対象とする。

表 8.2 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	底板			備考
						材質	板厚	継手	
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6 mm	重ね	対象外
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SS400	9 mm	重ね	対象外
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SS400	12 mm	突合せ	検討対象

(2) 解析条件

- ・二次元平面ひずみ解析 ※図 8.1 の【タイプ A】を想定
- ・4 節点アイソパラメトリック要素
- ・弾塑性大変形解析
- ・硬化則：等方硬化則 $H' = E/100$
- ・基礎と底板との離間・接触を考慮

尚、解析に用いた一般構造用鋼板 SS400 の材料定数は、表 8.3 に示すとおり。

表 8.3 材料定数 (SS400)

縦弾性係数	E	205,939.7 N/mm ²
ポアソン比	ν	0.3
降伏応力	σ_Y	245 N/mm ² (t ≤ 16)
引張強さ	σ_t	400 N/mm ²
ひずみ硬化率	H'	E/100 (等方硬化)
基礎ばね定数	Kb	0.3 N/mm ³

尚、材料の加工硬化特性については、別添資料-3 に示す「2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Division 2」¹⁵⁾の算定式による応力-歪み線図を比較して、等方硬化則 $H' = E/100$ を採用した。

(3) 解析モデル

材料及び幾何学的非線形性を考慮した解析では、表 8.4 に示す 3 種類の不陸範囲 R (半幅) を設定した。

表 8.4 不陸高さと不陸範囲

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸高さ B (mm)	備考
1	500	30.83	
2	1000	61.66	
3	1500	92.49	

図 8.3 に初期不整（凸型変形）を有する底板の要素分割図を、図 8.4 に局部沈下（凹型変形）を有する底板要素分割図を示す。

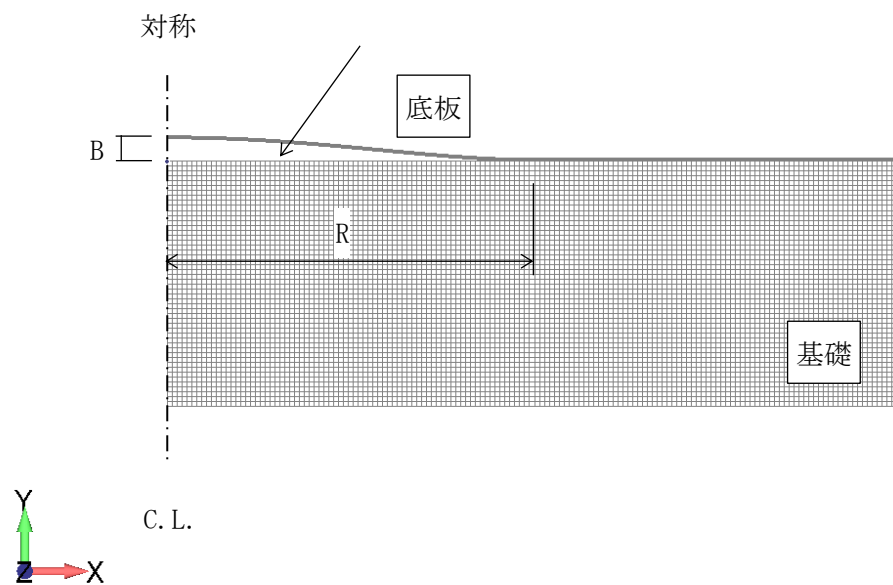


図 8.3 要素分割図（初期凸型変形を有する底板）

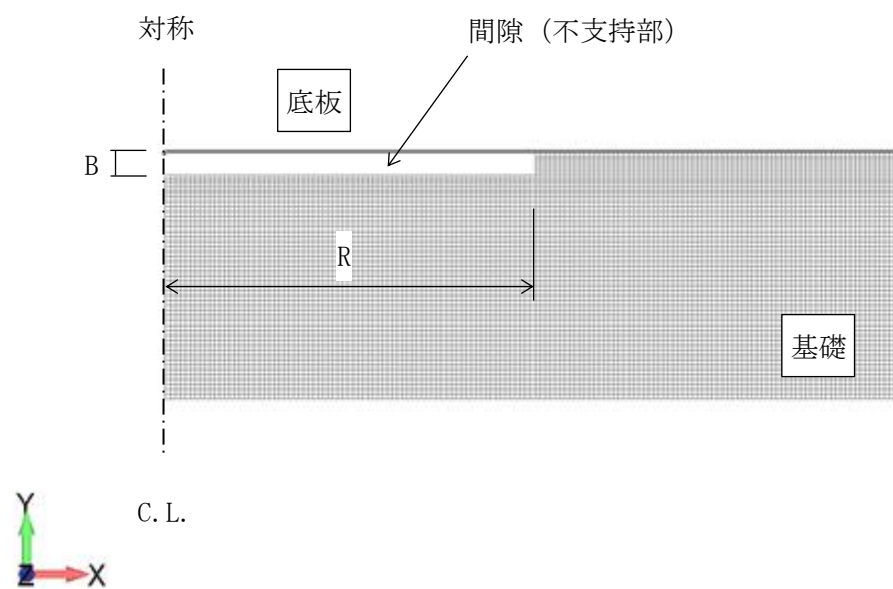


図 8.4 要素分割図（基礎不支持域を有する底板）

8.3 残留応力場での疲労亀裂進展解析

ここでは、110,000kl タンクの底板相互突合せ溶接継手を対象にして、図 8.5 に示す位置に表面亀裂がそれぞれ存在した場合を想定して疲労亀裂進展解析を適用する。

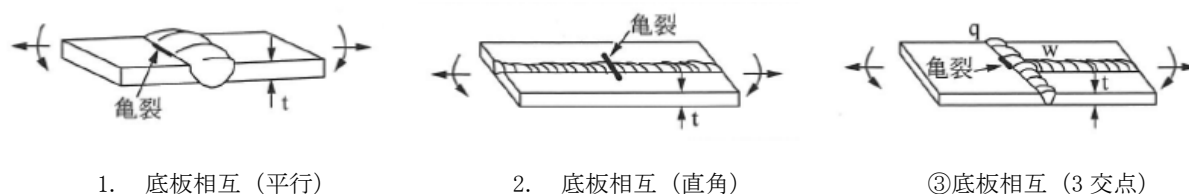


図 8.5 表面亀裂を有する底板溶接継手

図 8.6 に、110,000kl タンクの底板相互突合せ溶接継手の一例を示す。ここに、底板々厚 $t = 12\text{mm}$ （材質 SS400）、開先角度 $\theta = 50^\circ$ 、ルートギャップ $g = 6\text{mm}$ とすると、突合せ溶接の余盛り幅 L は次のとおり。

$$L = g + 2t \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = 17.2\text{mm} \quad (8.4)$$

$$\therefore L/t \cong 1.43 \quad (8.5)$$

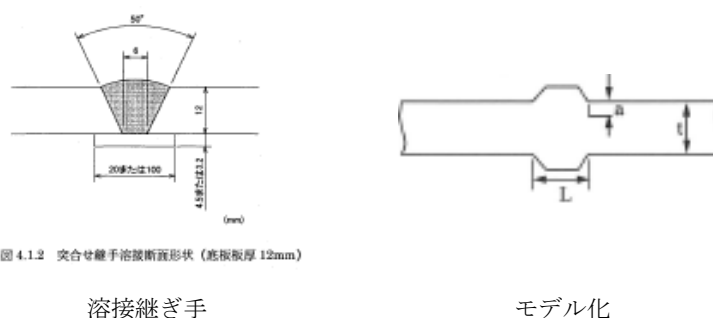


図 4.1.2 突合せ継手溶接断面形状（底板板厚 12mm）

溶接継ぎ手

モデル化

図 8.6 実機タンクの底板突合せ溶接継手（一例）

これより、図 6.19（突合せ溶接止端部の応力集中係数 $\bar{K}_t$ ）より、表面亀裂を有する底板溶接継手の応力集中係数は表 8.5 に示すとおり評価する。

表 8.5 底板溶接継手の応力集中係数

記号	部位	継手	亀裂の方向	応力集中係数 M_K （曲げ）		備考
				最深部 (A)	板表面 (C)	
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	1.2	1.9	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	1.0	1.0	
③	底板相互	突合せ	3 交点	1.2	1.9	

これより、底板相互の突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合（記号①）が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。

8.3.1 初期不整（凸型変形）を有する底板の解析結果

（1）変位履歴

図 8.7 に、不陸中央部の鉛直方向変位の履歴を示す。同図より、液の受入れ払出しによる繰返し荷重に対して、不陸範囲 R が小さい場合には、ほぼ初期不整の形状を保持したまま線形的に変位するのに対し、不陸範囲が大きくなるに従って、液圧の増加に応じて不陸部の接地範囲の割合が小さくなり、底板の非線形挙動がより顕著になる。何れの場合にも不陸中央部が接地することはない。

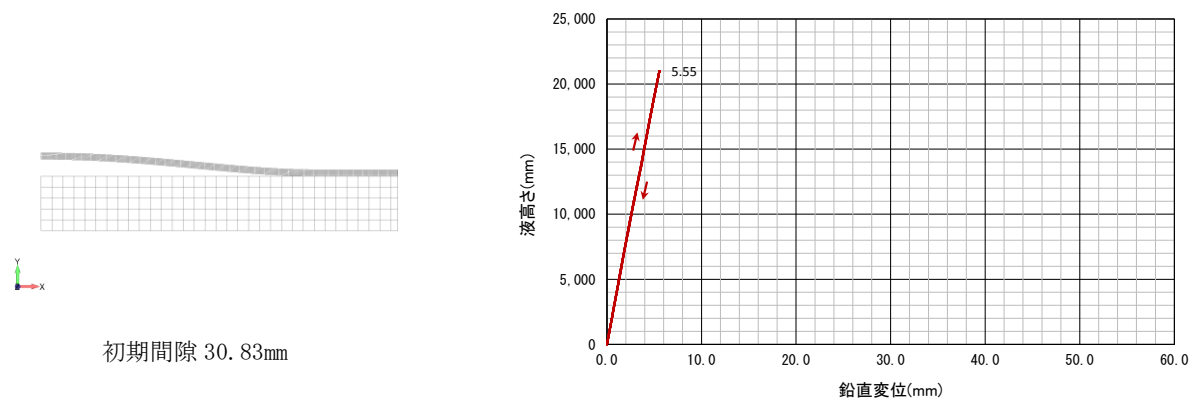


図 8.7(a) 底板の変位履歴（不陸範囲 $R=500\text{mm}$ ）

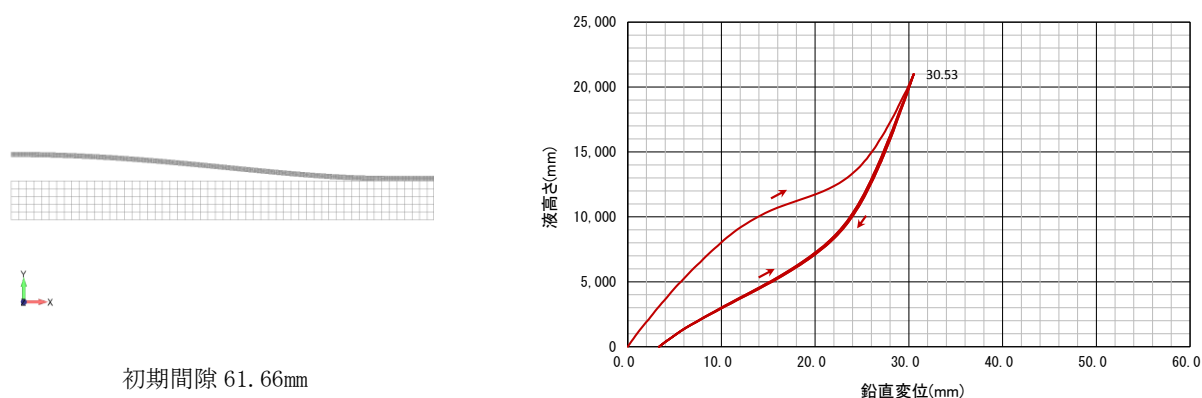


図 8.7(b) 底板の変位履歴（不陸範囲 $R=1000\text{mm}$ ）

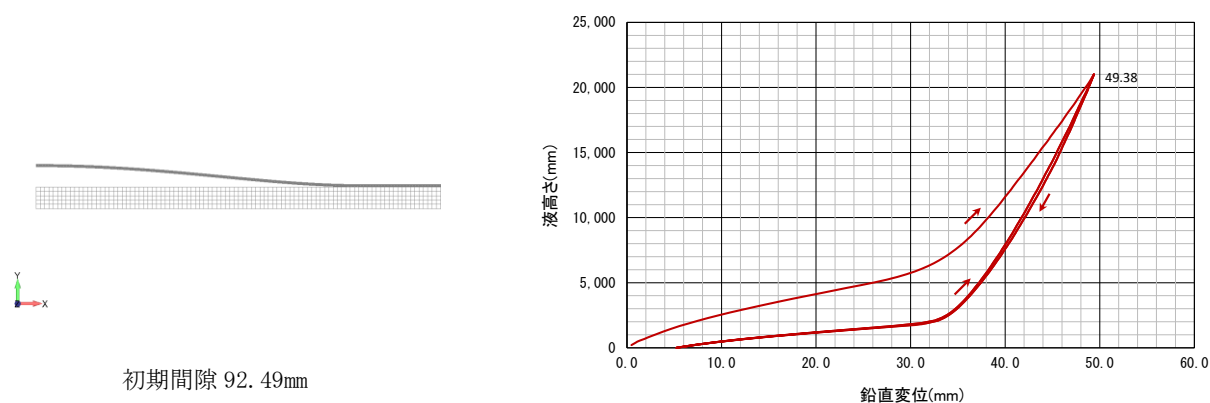


図 8.7(c) 底板の変位履歴（不陸範囲 $R=1500\text{mm}$ ）

(2) 応力分布

図 8.8 に、第 1 回液受け入れ時の最高液面高さにおけるタンク底板の応力状態を示す。同図より、何れの場合においても、底板不陸部の外周において曲げ応力の負担が大きいことが分かる。

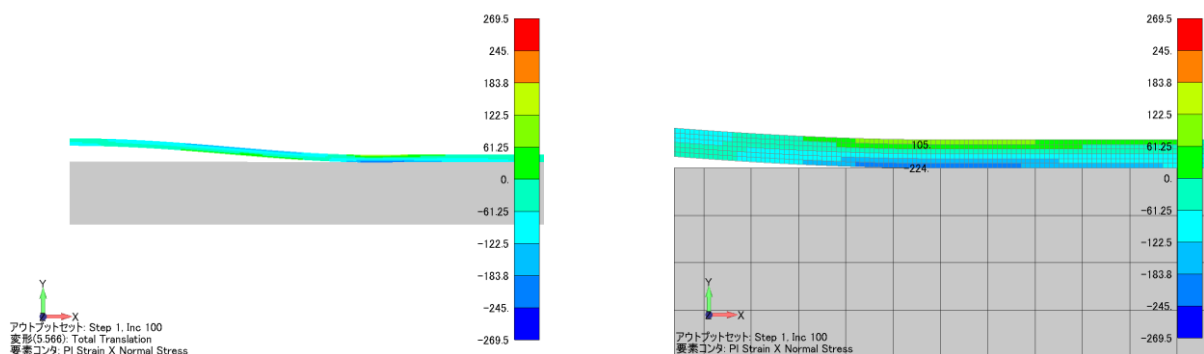


図 8.8(a) 底板の応力状態（不陸範囲 R=500mm）

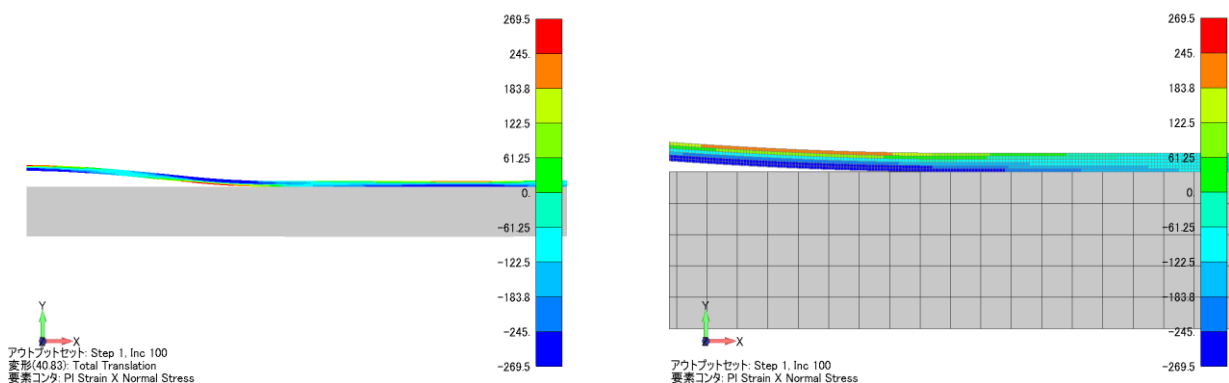


図 8.8(b) 底板の応力状態（不陸範囲 R=1000mm）

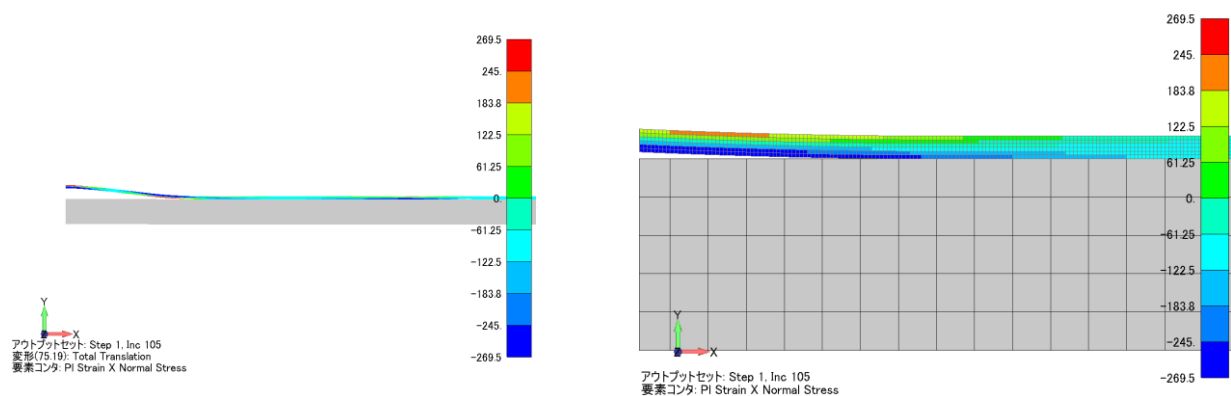


図 8.8(c) 底板の応力状態（不陸範囲 R=1500mm）

(3) 歪み履歴

液の受入れ・払出しに伴う底板不陸部（図 8.9）の最大歪み履歴を、図 8.10 に示す。同図より、液の受入れ払出しによる繰返し荷重に対して、不陸範囲 R が小さい場合には、ほぼ比例的な歪み履歴を示す

のに対し、不陸範囲が大きくなるに従って、歪み履歴の非線形挙動がより顕著になる。

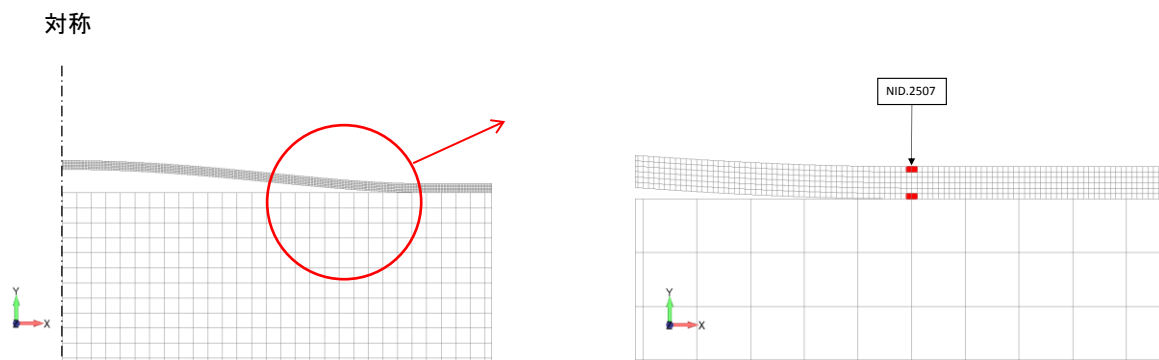


図 8.9 底板不陸部の外周部要素

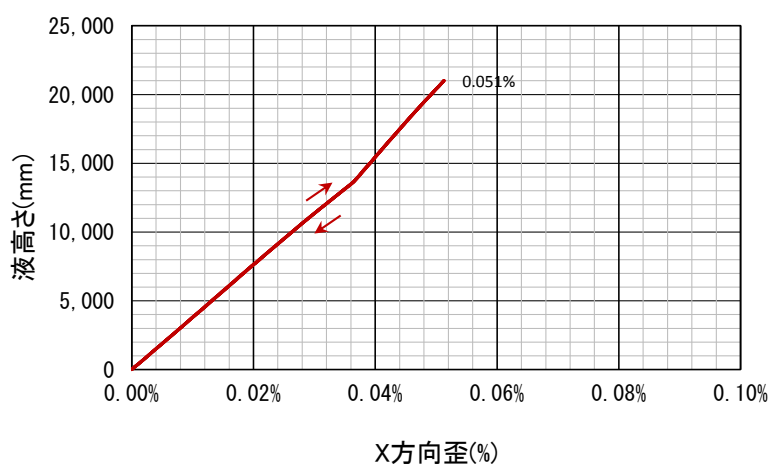


図 8.10 (a) 底板表面の歪み履歴（不陸範囲 R=500mm）

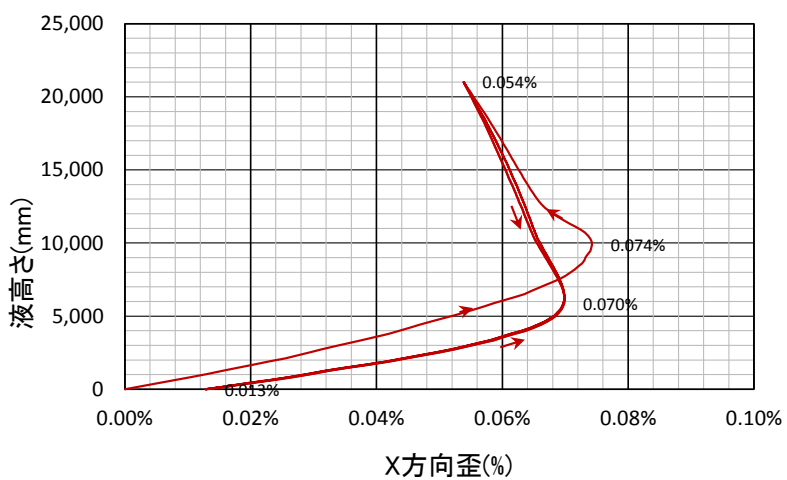


図 8.10 (b) 底板表面の歪み履歴（不陸範囲 R=1000mm）

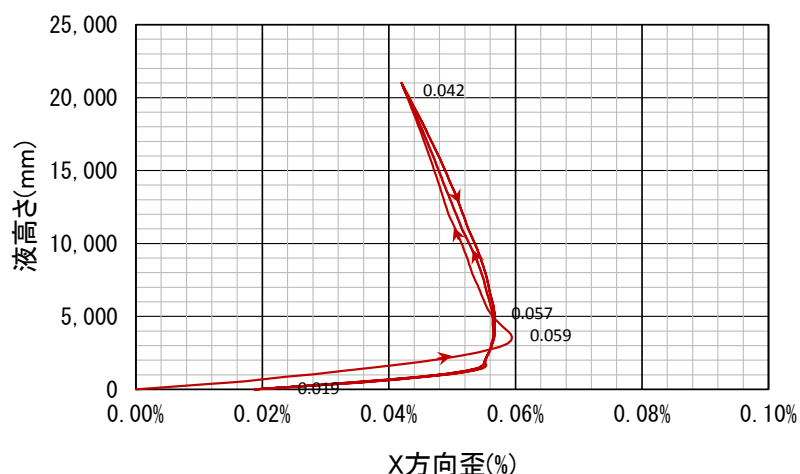


図 8.10 (c) 底板表面の歪み履歴（不陸範囲 R=1500mm）

以上の歪み履歴の結果を、表 8.6 に纏めて示す。

表 8.6 歪み履歴（底板凸型変形）

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸高さ B (mm)	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	最小歪み $\varepsilon_{\min}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	0.051	0.000	0.051	
2	1000	61.66	0.074	0.013	0.057	
3	1500	92.49	0.059	0.019	0.040	

（４）疲労亀裂進展結果

【新法】110,000kl タンクを対象にした疲労亀裂進展解析では、疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合を想定して、WES2805:2011 におけ 「最安全側」の材料定数 C , m , ΔK_{th} を用いるものとする。

表 8.7 材料定数（WES2805）

	C 値	m 値	ΔK_{th}
最安全側	2.60×10^{-11}	2.75	2.00

解析では、底板相互の突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合（記号①）が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。このとき、底板相互の突合せ溶接継手止端部の応力集中係数として、半楕円表面亀裂の最深部（A 点）で 1.2、板表面（C 点）で 1.9 を考慮する。

表 8.8 応力集中係数（底板×底板）

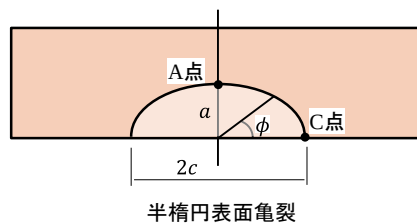
亀裂の方向	最深部 (A 点)	板表面 (C 点)
溶接線に平行	1.2	1.9

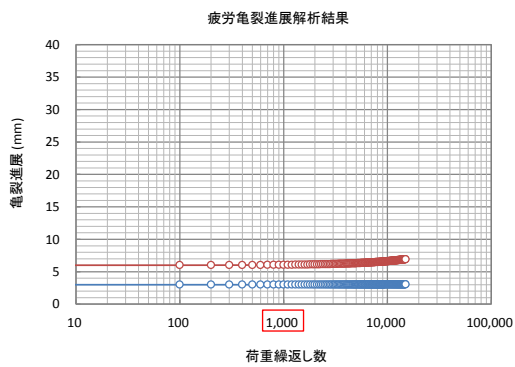
解析結果（最安全側）を、表 8.9 及び図 8.11 に示す。解析結果より、初期不整（凸型変形）を有する底板の場合、溶接線近傍の表面亀裂については、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返しに対して、表面亀裂進展の進展は殆ど認められない。

表 8.9 解析結果（荷重繰返し 1000 回）

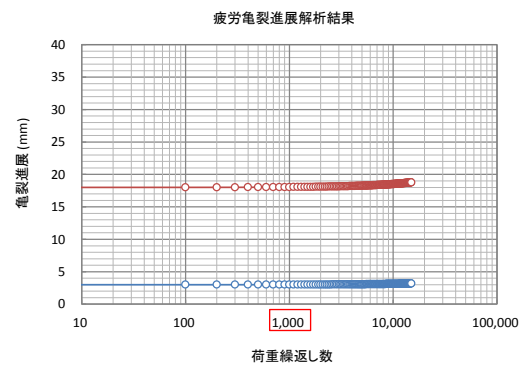
No.	不陸範囲 R (mm)	歪振幅 $\Delta\varepsilon(\%)$	応力振幅 $\Delta\sigma(MPa)$	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考
1	500	0.051	105	1000	3×6	3.00×6.06	0.00×0.06	
					3×12	3.01×12.06	0.01×0.06	
					3×18	3.01×18.05	0.01×0.05	
2	1000	0.057	117	1000	3×6	3.00×6.08	0.00×0.08	
					3×12	3.01×12.08	0.01×0.08	
					3×18	3.02×18.07	0.02×0.07	
3	1500	0.040	82	1000	3×6	3.00×6.03	0.00×0.03	
					3×12	3.00×12.03	0.00×0.03	
					3×18	3.01×18.02	0.01×0.02	

（備考）応力集中係数：最深部（A 点）1.2、板表面（C 点）1.9 を考慮



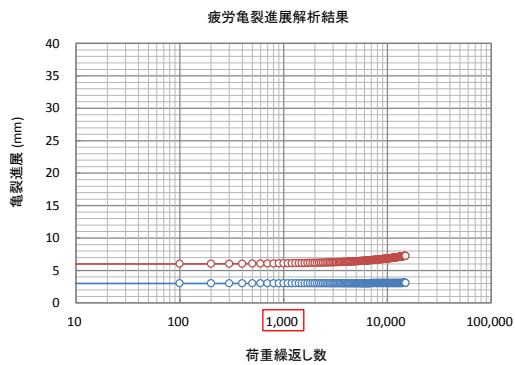


初期亀裂 (3mm×6mm)

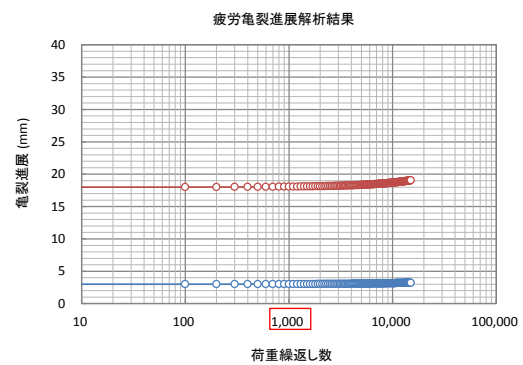


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 11 (a) 疲労亀裂進展解析結果 (不陸範囲 R=500mm)

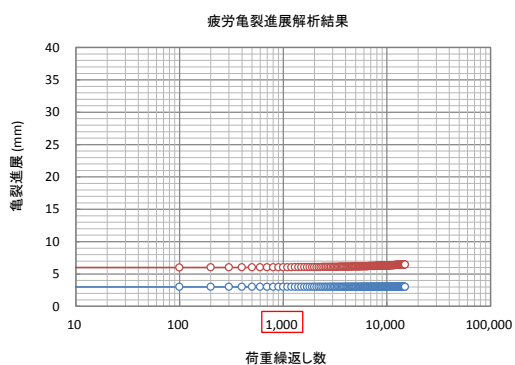


初期亀裂 (3mm×6mm)

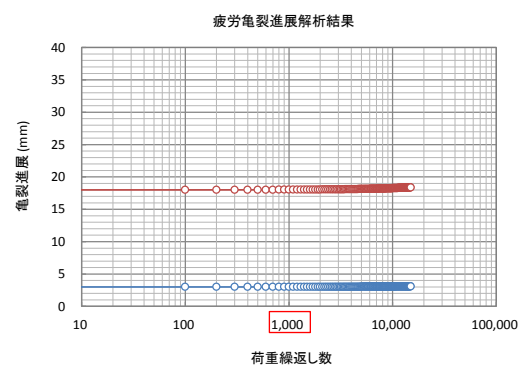


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 11 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (不陸範囲 R=1000mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 11 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (不陸範囲 R=1500mm)

8.3.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の解析結果

(1) 変位履歴

図 8.12 に、不支持中央部の鉛直方向変位の履歴を示す。同図より、液の受入れ払出しによる繰返し荷重に対して、不支持範囲 R が大きくなるに従って底板の非線形挙動がより顕著になるが、何れの場合にも不支持中央部のタンク基礎に接地することはない。想定する不支持深さ (B) が小さい場合には、底板がタンク基礎に接地することにより局部沈下は抑えられる。

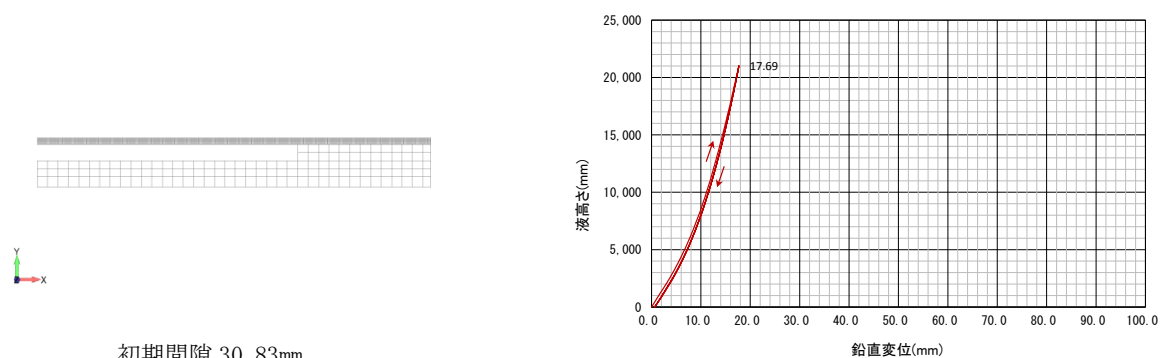


図 8.12 (a) 底板中央の変位履歴 (不支持範囲 $R=500\text{mm}$)

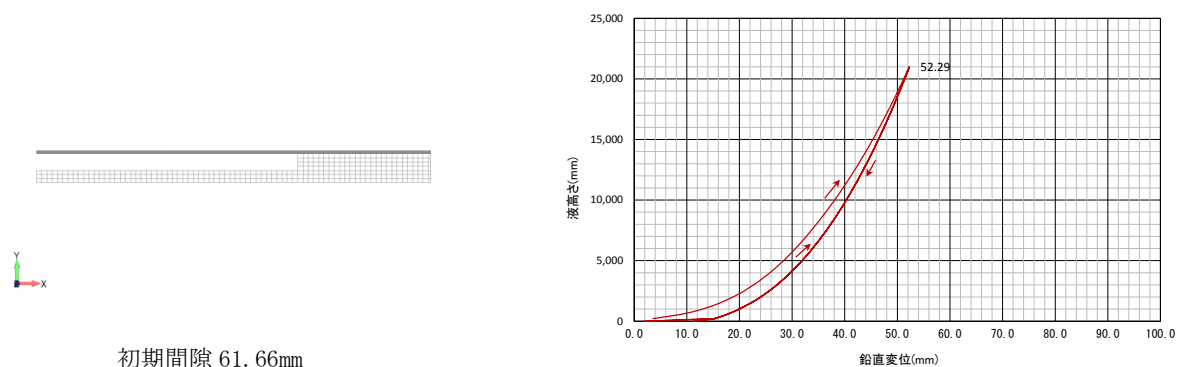


図 8.12 (b) 底板中央の変位履歴 (不支持範囲 $R=1000\text{mm}$)

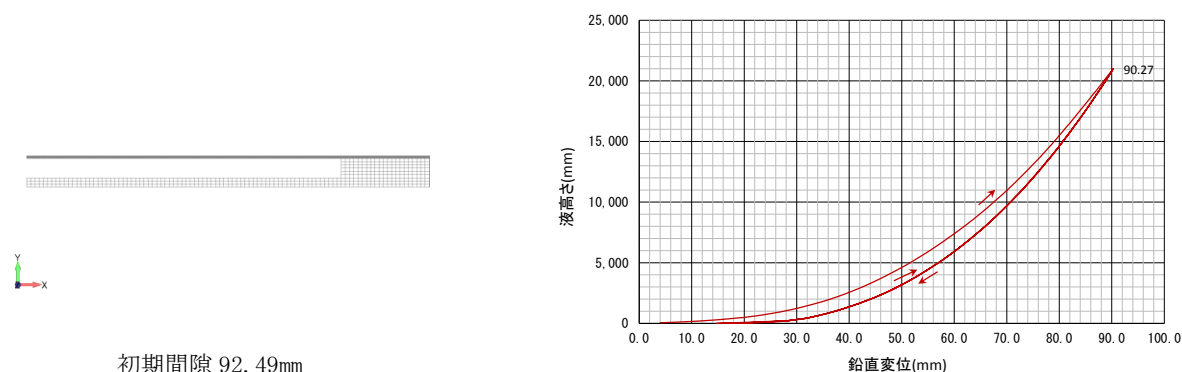


図 8.12 (c) 底板中央の変位履歴 (不支持範囲 $R=1500\text{mm}$)

図 8.13 に、最高液面高さ（第 3 回液受入れ）における不支持部周辺基礎の沈下状況を示す。同図より、不支持部以遠のタンク底板が基礎に接地している範囲では、概ね 0.7mm の一様沈下を示すが、不支持外周端に近づくにつれて、徐々に沈下量が増大して行く様子が分かる。不支持範囲 $R=1500\text{mm}$ の場合、不支持部近傍 300mm の範囲で最大 5.5mm の沈下量となる。

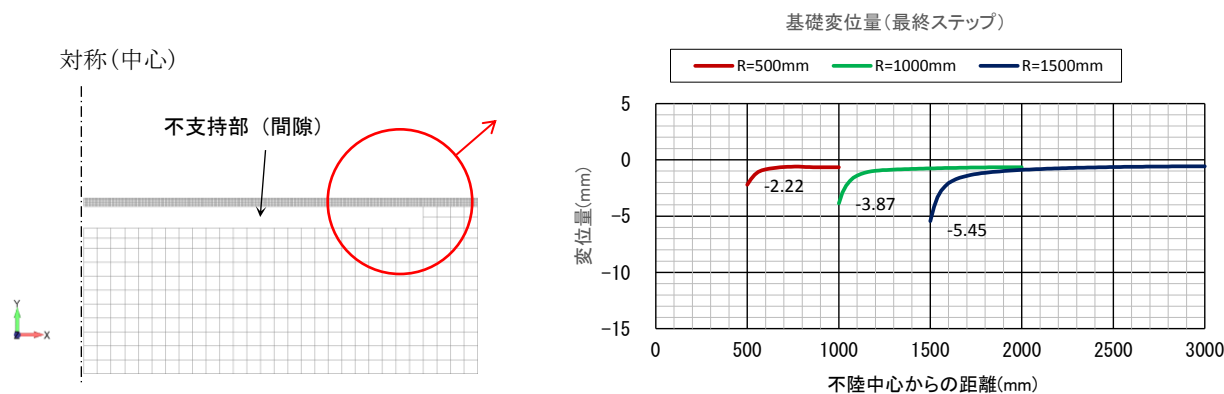


図 8.13 不支持外周部の基礎沈下

(2) 応力分布

図 8.14 に、第 1 回液受け入れ時の最高液面高さにおけるタンク底板の応力状態を示す。同図より、不支持範囲 R が小さい場合には、不支持外周端部の底板表面に部分的な降伏域が発生するのに対し、不支持範囲 R が大きくなるに従って、降伏域が底板全体に拡大することが分かる。

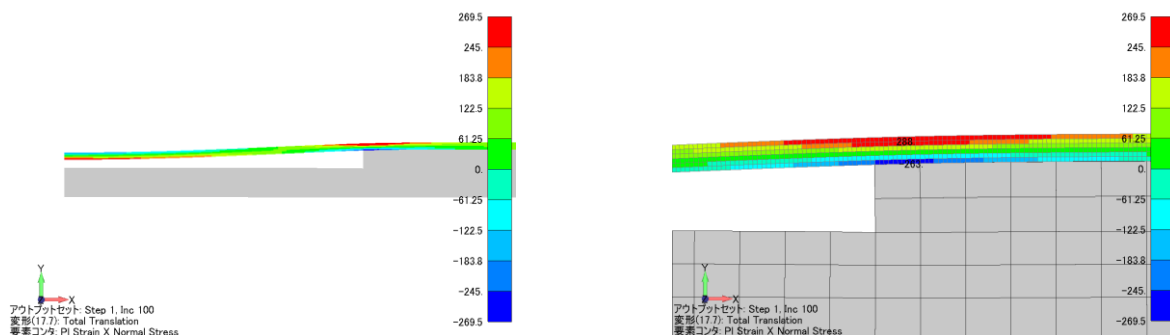


図 8.14(a) 底板の変形と応力（不支持範囲 $R=500\text{mm}$ ）

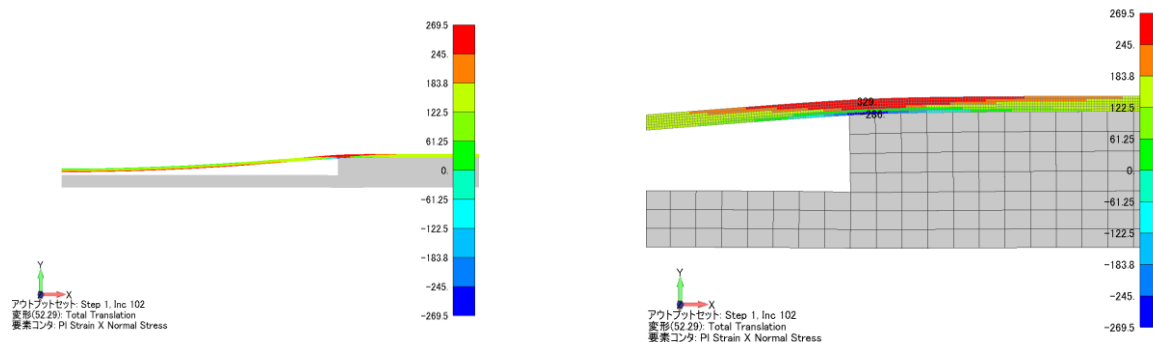


図 8.14(b) 底板の変形と応力（不支持範囲 $R=1000\text{mm}$ ）

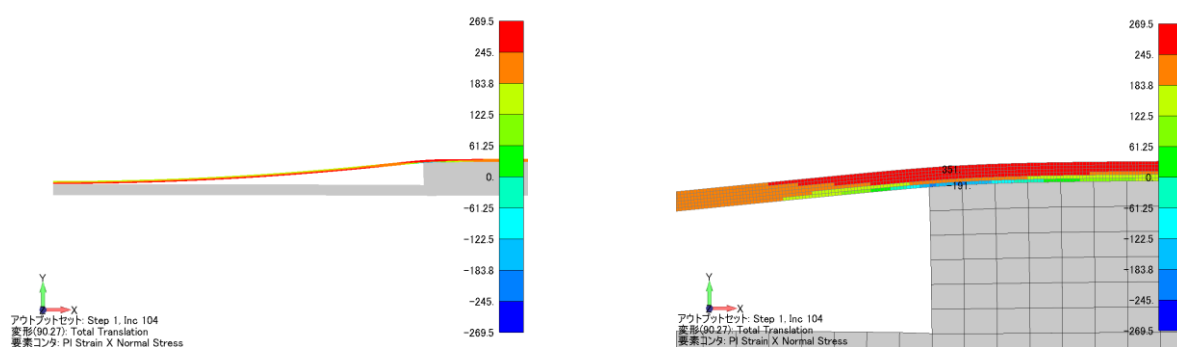


図 8.14(c) 底板の変形と応力（不支持範囲 R=1500mm）

（3）歪み履歴

液の受入れ・払出しに伴う底板不支持部（図 8.15）の最大歪み履歴を、図 8.16 に示す。同図より、液の受入れ・払出しによる繰返し荷重に対して、不支持範囲 R が小さい場合には、ほぼ比例的な歪み履歴を示すのに対し、不支持範囲が大きくなるに従って、歪み履歴の非線形挙動がより顕著になる。

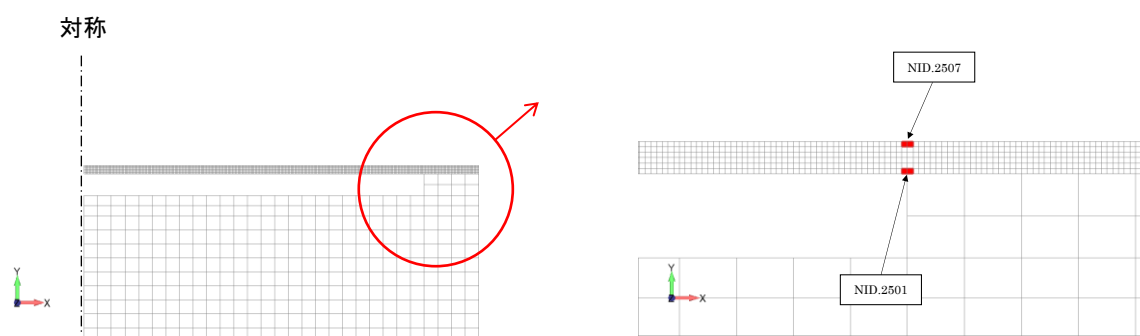


図 8.15 底板不支持部の外周部要素

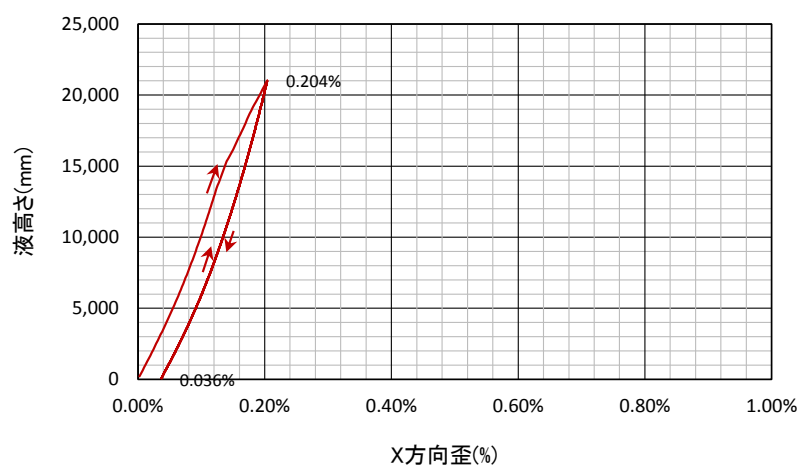


図 8.16(a) 歪み履歴（不支持範囲 R=500mm）

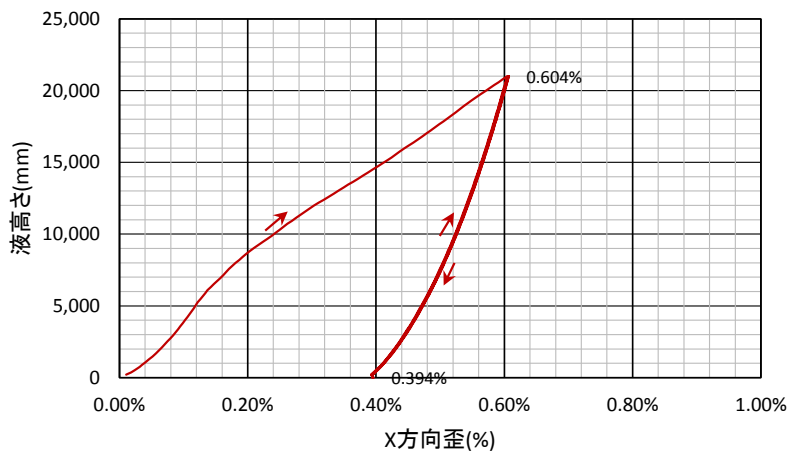


図 8. 16 (b) 歪み履歴（不支持範囲 R=1000mm）

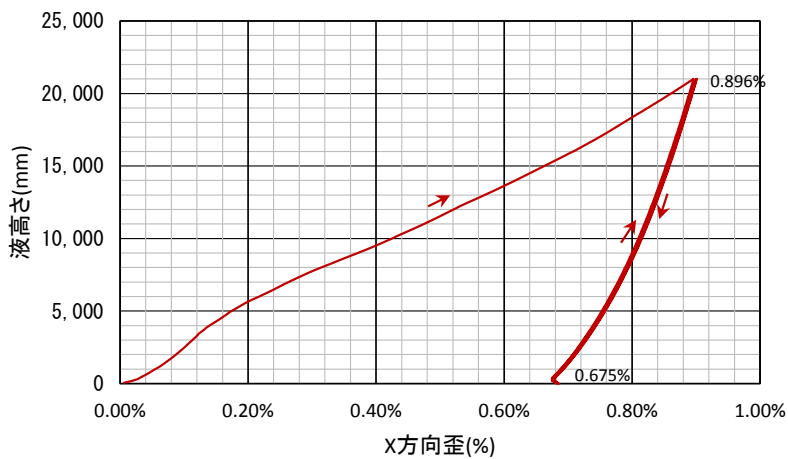


図 8. 16 (c) 歪み履歴（不支持範囲 R=1500mm）

以上の歪み履歴の結果を、表 8. 10 に纏めて示す。

表 8. 10 歪み履歴（局部沈下）

No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	最小歪み $\varepsilon_{\min}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	0.204	0.036	0.168	
2	1000	61.66	0.604	0.394	0.210	
3	1500	92.49	0.896	0.675	0.221	

(4) 疲労亀裂進展結果

【新法】110, 000kl タンクを対象にした疲労亀裂進展解析では、疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合を想定して、前出の WES2805:2011 における「最安全側」の材料定数 C , m , ΔK_{th} を用いるものとする。

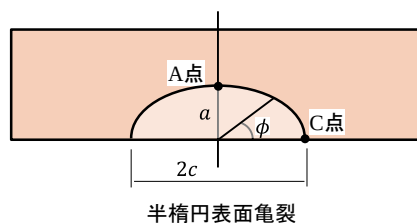
解析では、底板相互の突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合（記号①）が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。このとき、解析結果（平滑材）に、応力集中係数として最深部（A 点）1.2、板表面（C 点）1.9 を考慮する。

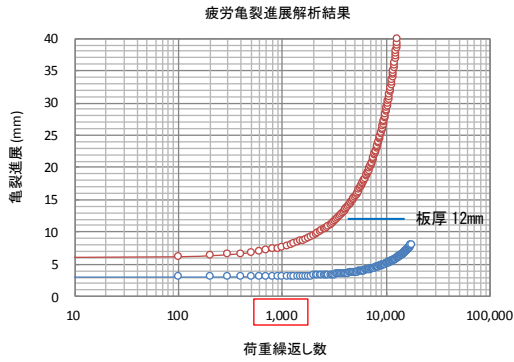
解析結果（最安全側）より、疲労亀裂の進展状況を図 8.17 に、応力拡大係数範囲を図 8.18 に示す。更に、結果の纏めを表 8.11 に示す。解析では、板表面（C 点）の応力拡大係数範囲 ΔK が適用限界（ ）に達するまで計算を行った。これより、局部沈下（凹型変形）を有する底板の場合、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重繰返し回数（仮想 1000 回）に対して、溶接線近傍の表面亀裂は、主に板表面方向に 1.4～3.2mm 程度の亀裂進展が認められる。一方、板厚方向には最大 0.64mm 程度の進展量に留まり、板厚 12mm に対し亀裂が貫通する可能性は低い（ $a/t \approx 0.30$ ）。

表 8.11 疲労亀裂進展解析結果（荷重繰返し 1000 回）

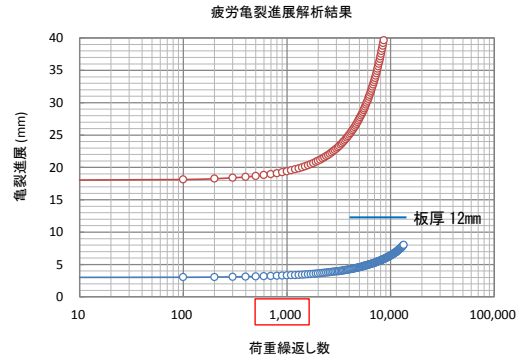
No.	不支持範囲 R (mm)	歪振幅 $\Delta \varepsilon (\%)$	応力振幅 $\Delta \sigma (MPa)$	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考
1	500	0.168	346	1000	3×6	3.09×7.66	0.09×1.66	
					3×12	3.21×13.64	0.21×1.64	
					3×18	3.29×19.39	0.29×1.39	
2	1000	0.210	432	1000	3×6	3.19×9.16	0.19×3.16	
					3×12	3.40×15.11	0.40×3.11	
					3×18	3.55×20.76	0.55×2.73	
3	1500	0.221	455	1000	3×6	3.23×9.67	0.23×3.67	
					3×12	3.46×15.63	0.46×3.63	
					3×18	3.64×21.23	0.64×3.23	

（備考）応力集中係数：最深部（A 点）1.2、板表面（C 点）1.9 を考慮



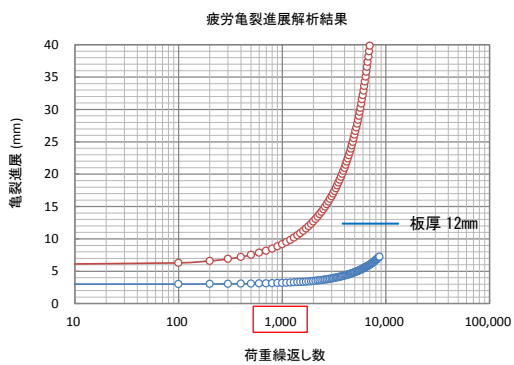


初期亀裂 (3mm×6mm)

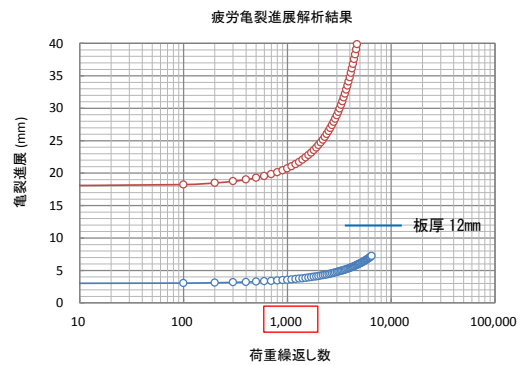


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 17 (a) 疲労亀裂進展解析結果 (不支持範囲 R=500mm)

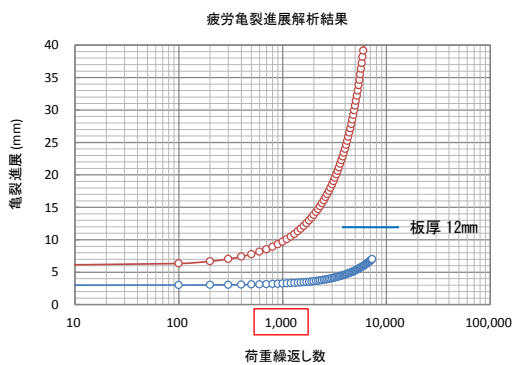


初期亀裂 (3mm×6mm)

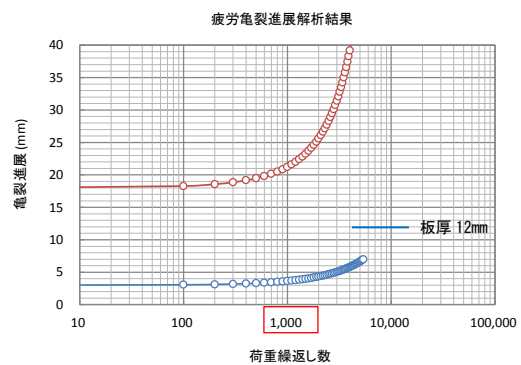


初期亀裂 (mm×18mm)

図 8. 17 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (不支持範囲 R=1000mm)

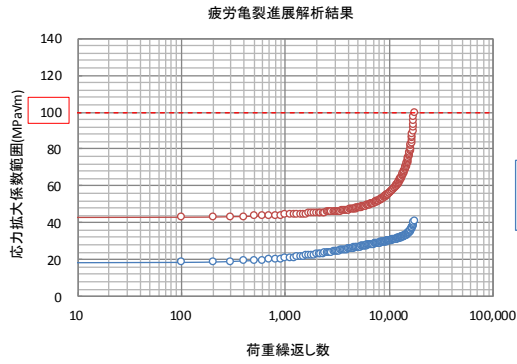


初期亀裂 (3mm×6mm)

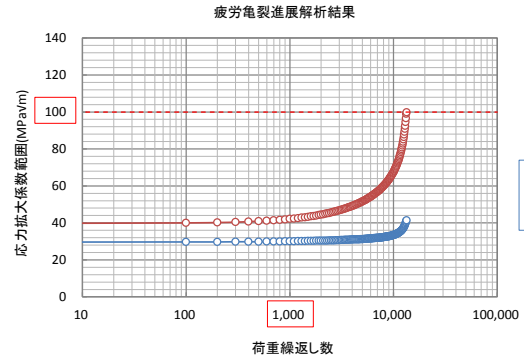


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 17 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (不支持範囲 R=1500mm)

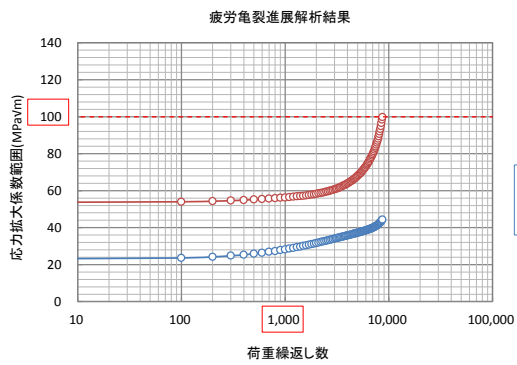


初期亀裂 (3mm×6mm)

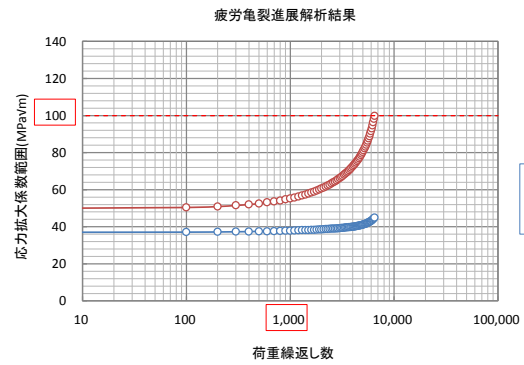


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 18 (a) 応力拡大係数範囲 (不支持範囲 R=500mm)

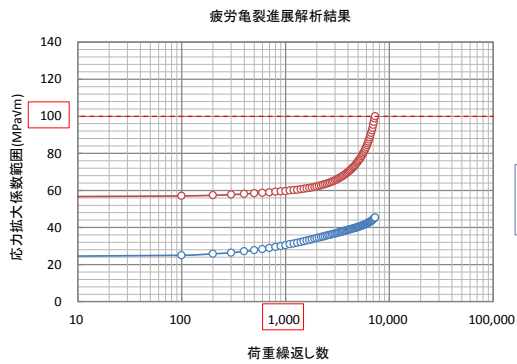


初期亀裂 (3mm×6mm)

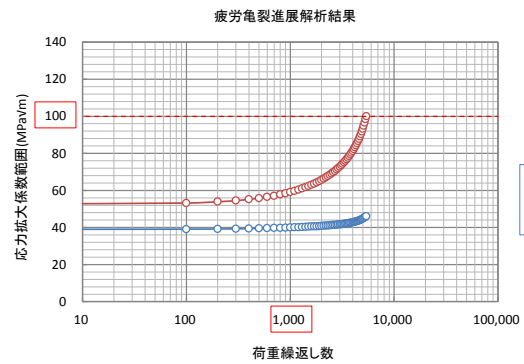


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 18 (b) 応力拡大係数範囲 (不支持範囲 R=1000mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 18 (c) 応力拡大係数範囲 (不支持範囲 R=1500mm)

8.4 残留応力場での脆性破壊発生検討

ここでは、図 8.19 の表面亀裂を有するタンク底板突合せ溶接継手において、それぞれ溶接残留応力の影響を考慮した脆性破壊発生の可能性を検討する。

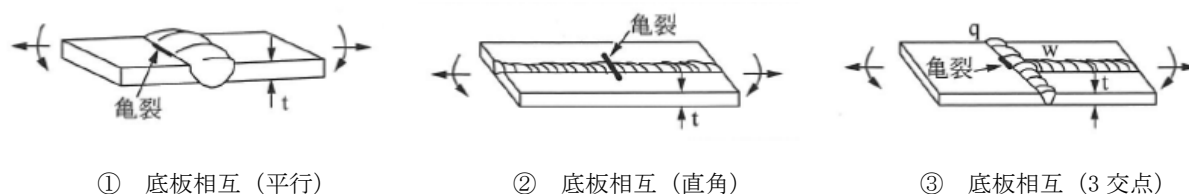


図 8.19 表面亀裂を有する底板溶接継手

尚、溶接残留応力による歪 $\varepsilon_2(=\alpha_R \cdot \varepsilon_Y)$ は、表面亀裂が溶接線と平行に位置する場合は $\alpha_R = 0.36$ 、溶接線と直角に位置する場合は $\alpha_R = 0.6$ を見込む(表 8.12)。

表 8.12 α_R の値

亀裂の種類	溶接線と平行	溶接線と直角
表面亀裂	0.36	0.6

8.4.1 初期不整(凸型変形)を有する底板の検討結果

(1) 評価歪み

表 8.6 に、当該底板の歪み履歴(凸型変形)を改めて示す。ここでは、下表のうち最大歪み($\varepsilon_{\max}=0.074\%$)発生時における脆性破壊発生の可能性を検討する。

表 8.6 歪み履歴(凸型変形)

No.	不陸範囲 R(mm)	不陸高さ B(mm)	最大歪み $\varepsilon_{\max}(\%)$	最小歪み $\varepsilon_{\min}(\%)$	歪み振幅 $\Delta \varepsilon(\%)$	備考
1	500	30.83	0.051	0.000	0.051	
2	1000	61.66	0.074	0.013	0.057	
3	1500	92.49	0.059	0.019	0.040	

(2) 亀裂先端開口変位

【新法】110,000kl タンクを対象にして、応力集中部に作用する局所歪 ε より 図 8.20 の CTOD 設計曲線を用いて、当該箇所が存在する亀裂の開口変位 CTOD δ を評価した結果を、表 8.11 に示す。

表 8.13 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果

記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	0.074%	0.041%	0.067%	0.182%	0.114%	1.59	3.66
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	0.074%	0.069%	0.000%	0.143%	0.114%	1.25	2.45
③	底板相互	突合せ	3交点	0.074%	0.069%	0.067%	0.209%	0.114%	1.83	4.51

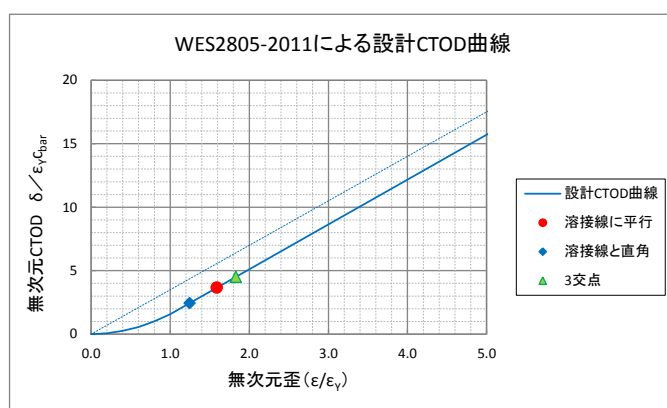


図 8.20 CTOD 設計曲線（不陸範囲 R=1000mm）

(3) 脆性破壊発生検討結果

亀裂特性寸法 $\bar{c}$ と評価歪 ε から得られる破壊パラメータ δ (CTOD) が、材料の破壊靱性値 δ_{cr} (限界 CTOD) を下回っていれば、その欠陥から脆性破壊が発生する可能性が無いものと判断される。表 8.14 に、検討結果を示す。

表 8.14 脆性破壊発生検討結果（初期亀裂）

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				(a × 2c)	F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	3 × 6	0.671	1.35	0.006	0.346	61.35	
				3 × 12	0.935	2.62	0.011	0.346	31.59	
				3 × 18	1.055	3.34	0.014	0.346	24.79	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	3 × 6	0.671	1.35	0.004	0.346	91.74	
				3 × 12	0.935	2.62	0.007	0.346	47.24	
				3 × 18	1.055	3.34	0.009	0.346	37.07	
③	底板相互	突合せ	3交点	3 × 6	0.671	1.35	0.007	0.346	49.80	
				3 × 12	0.935	2.62	0.013	0.346	25.65	
				3 × 18	1.055	3.34	0.017	0.346	20.12	

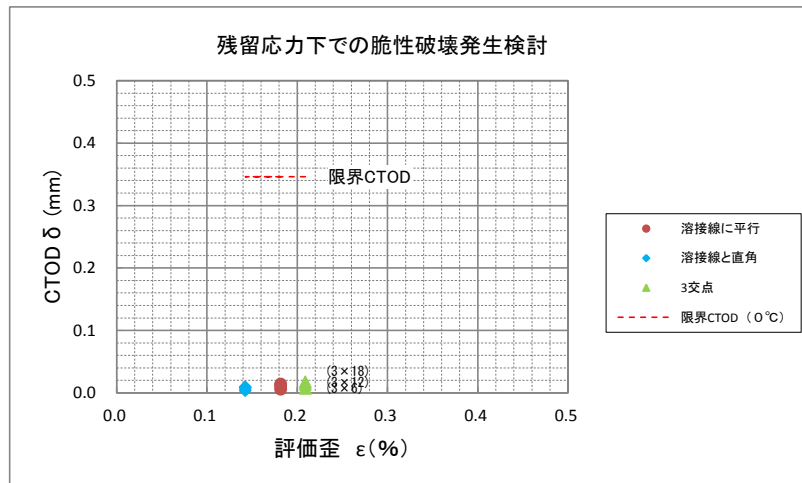
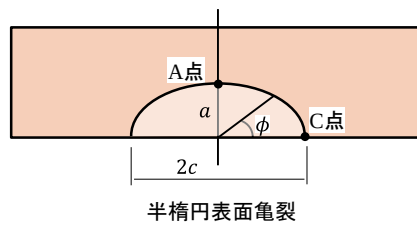
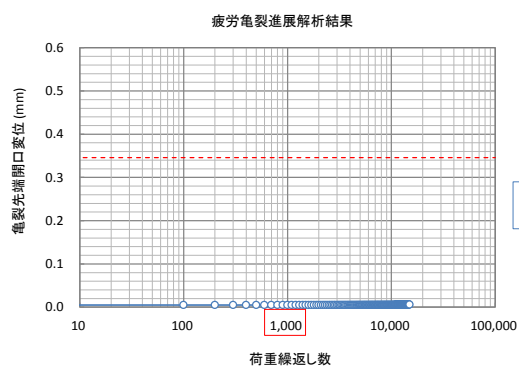


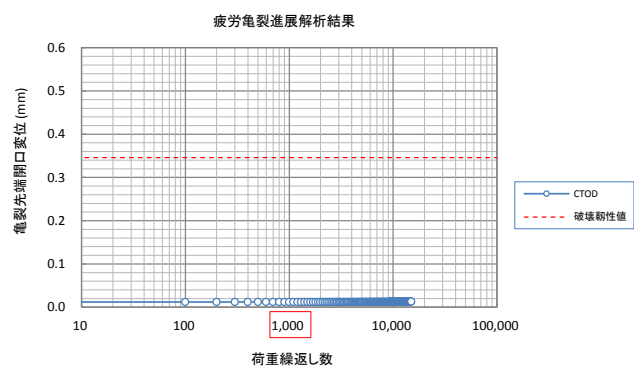
図 8.21 脆性破壊発生検討結果（初期亀裂）

検討結果より、底板突合せ溶接継手に亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm～18mm の半楕円表面亀裂を想定した場合、脆性破壊発生に対して 20 倍程度以上の余裕度（＝限界 CTOD／CTOD）を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は極めて小さいと判断される。

(補足) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

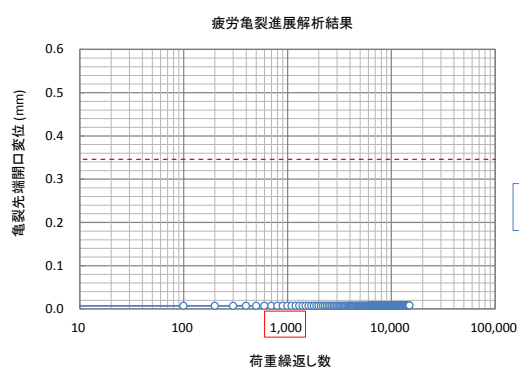


初期亀裂 (3mm×6mm)

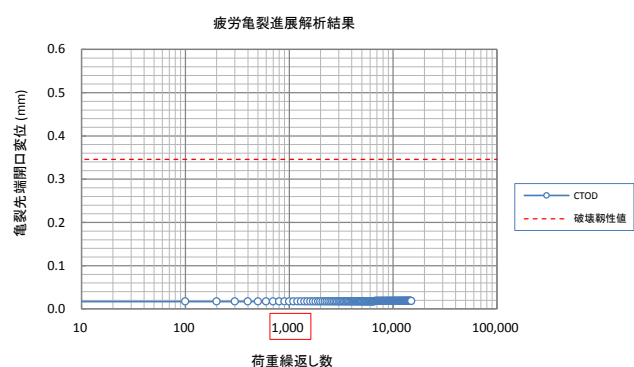


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 22 (a) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=500mm)

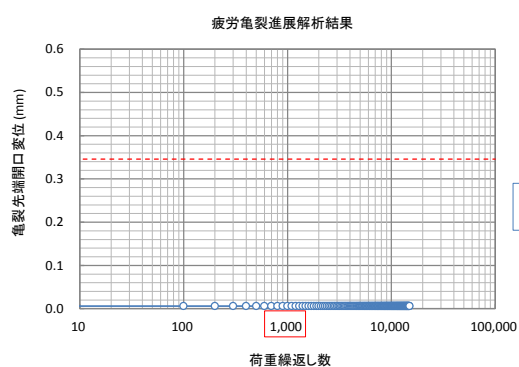


初期亀裂 (3mm×6mm)

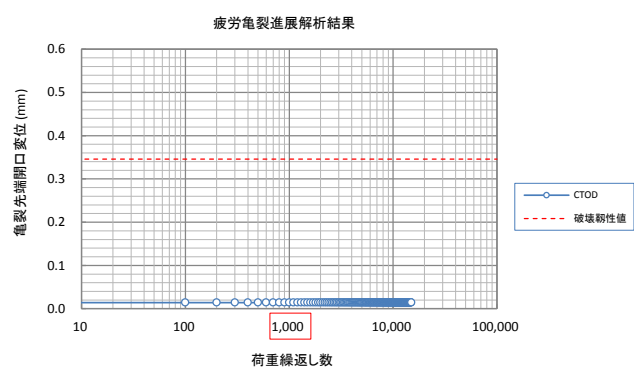


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 22 (b) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=1000mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 22 (c) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=1500mm)

8.4.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果

（１）評価歪み

表 8.10 に、当該底板の歪み履歴（局部沈下）を再記載する。ここでは、不支持範囲 R 毎の最大歪み発生点における脆性破壊発生の可能性を検討する。

表 8.10 歪み履歴（局部沈下）

No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	最小歪み $\varepsilon_{\min}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	0.204	0.036	0.168	
2	1000	61.66	0.604	0.394	0.210	
3	1500	92.49	0.896	0.675	0.221	

（２）亀裂先端開口変位

【新法】110,000kl タンクを対象にして、応力集中部に作用する局所歪 ε より 図 8.23 の CTOD 設計曲線を用いて、当該箇所が存在する亀裂の開口変位 CTOD δ を評価した結果を、表 8.15 に示す。

表 8.15(a) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（不支持範囲 R=500mm）

記号	部位	継手	亀裂の 方向	境界力 ε_1 (%)	残留応力 ε_2 (%)	応力集中 ε_3 (%)	評価歪 ε (%)	降伏歪 ε_Y (%)	無次元歪 $\varepsilon/\varepsilon_Y$	無次元CTOD $\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	底板相互	突合せ	溶接線に 平行	0.204%	0.043%	0.184%	0.430%	0.119%	3.62	10.82
②	底板相互	突合せ	溶接線と 直角	0.204%	0.071%	0.000%	0.275%	0.119%	2.31	6.22
③	底板相互	突合せ	3交点	0.204%	0.071%	0.184%	0.459%	0.119%	3.86	11.67

表 8.15(b) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（不支持範囲 R=1000mm）

記号	部位	継手	亀裂の 方向	境界力 ε_1 (%)	残留応力 ε_2 (%)	応力集中 ε_3 (%)	評価歪 ε (%)	降伏歪 ε_Y (%)	無次元歪 $\varepsilon/\varepsilon_Y$	無次元CTOD $\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	底板相互	突合せ	溶接線に 平行	0.604%	0.043%	0.544%	1.190%	0.119%	10.01	33.40
②	底板相互	突合せ	溶接線と 直角	0.604%	0.071%	0.000%	0.675%	0.119%	5.68	18.10
③	底板相互	突合せ	3交点	0.604%	0.071%	0.544%	1.219%	0.119%	10.25	34.25

表 8.15(c) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (不支持範囲 R=1500mm)

記号	部位	継手	亀裂の 方向	境界力 ε_1 (%)	残留応力 ε_2 (%)	応力集中 ε_3 (%)	評価歪 ε (%)	降伏歪 ε_Y (%)	無次元歪 $\varepsilon/\varepsilon_Y$	無次元CTOD $\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	底板相互	突合せ	溶接線に 平行	0.896%	0.043%	0.806%	1.745%	0.119%	14.67	49.88
②	底板相互	突合せ	溶接線と 直角	0.896%	0.071%	0.000%	0.967%	0.119%	8.13	26.78
③	底板相互	突合せ	3交点	0.896%	0.071%	0.806%	1.774%	0.119%	14.91	50.73

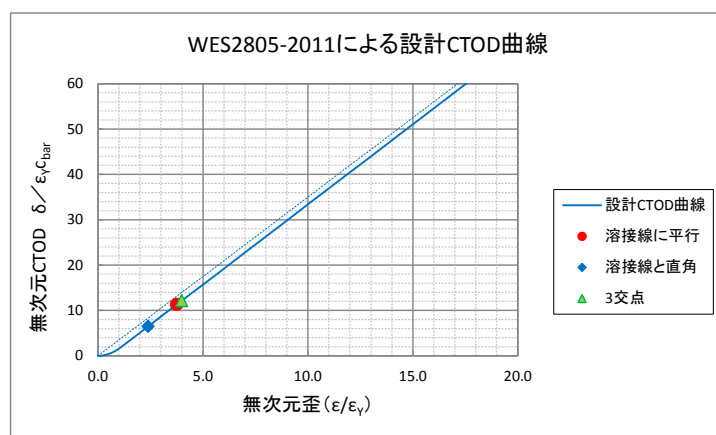


図 8.23 (a) CTOD 設計曲線 (不支持範囲 R=500mm)

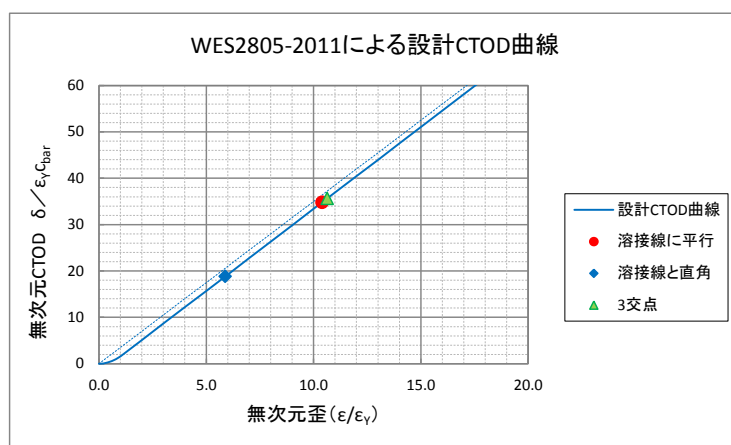


図 8.23 (b) CTOD 設計曲線 (不支持範囲 R=1000mm)

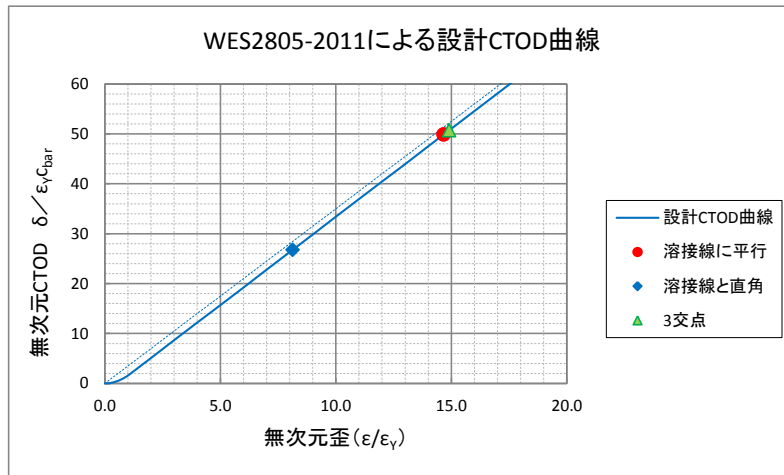


図 8. 23 (c) CTOD 設計曲線 (不支持範囲 R=1500mm)

(3) 脆性破壊発生検討結果

亀裂特性寸法 $\bar{c}$ と評価歪 ε から得られる破壊パラメータ δ (CTOD) が、材料の破壊靱性値 δ_{cr} (限界 CTOD) を下回っていれば、その欠陥から脆性破壊が発生する可能性が無いものと判断される。表 8. 16 及び図 23 に、検討結果を示す。

表 8. 16 (a) 脆性破壊発生検討結果 (不支持範囲 R=500mm) ※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD $\delta (mm)$	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)				$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	3 × 6	0.671	1.35	0.017	0.346	19.91	
				3 × 12	0.935	2.62	0.034	0.346	10.25	
				3 × 18	1.055	3.34	0.043	0.346	8.05	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	3 × 6	0.671	1.35	0.010	0.346	34.66	
				3 × 12	0.935	2.62	0.019	0.346	17.85	
				3 × 18	1.055	3.34	0.025	0.346	14.01	
③	底板相互	突合せ	3交点	3 × 6	0.671	1.35	0.019	0.346	18.47	
				3 × 12	0.935	2.62	0.036	0.346	9.51	
				3 × 18	1.055	3.34	0.046	0.346	7.46	

表 8. 16 (b) 脆性破壊発生検討結果 (不支持範囲 R=1000mm) ※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD $\delta (mm)$	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)				$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	3 × 6	0.671	1.35	0.054	0.346	6.45	
				3 × 12	0.935	2.62	0.104	0.346	3.32	
				3 × 18	1.055	3.34	0.133	0.346	2.61	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	3 × 6	0.671	1.35	0.029	0.346	11.91	
				3 × 12	0.935	2.62	0.056	0.346	6.13	
				3 × 18	1.055	3.34	0.072	0.346	4.81	
③	底板相互	突合せ	3交点	3 × 6	0.671	1.35	0.055	0.346	6.29	
				3 × 12	0.935	2.62	0.107	0.346	3.24	
				3 × 18	1.055	3.34	0.136	0.346	2.54	

表 8.16(c) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1500mm）※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数 F_t	特性寸法 $\bar{c}$ (mm)	CTOD δ (mm)	限界CTOD δ_{cr} (mm)	余裕度 δ_{cr}/δ	備考
				3	×	6						
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	3	×	6	0.671	1.35	0.080	0.346	4.32	
				3	×	12	0.935	2.62	0.156	0.346	2.22	
				3	×	18	1.055	3.34	0.198	0.346	1.75	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	3	×	6	0.671	1.35	0.043	0.346	8.05	
				3	×	12	0.935	2.62	0.083	0.346	4.15	
				3	×	18	1.055	3.34	0.106	0.346	3.25	
③	底板相互	突合せ	3交点	3	×	6	0.671	1.35	0.081	0.346	4.25	
				3	×	12	0.935	2.62	0.158	0.346	2.19	
				3	×	18	1.055	3.34	0.202	0.346	1.72	

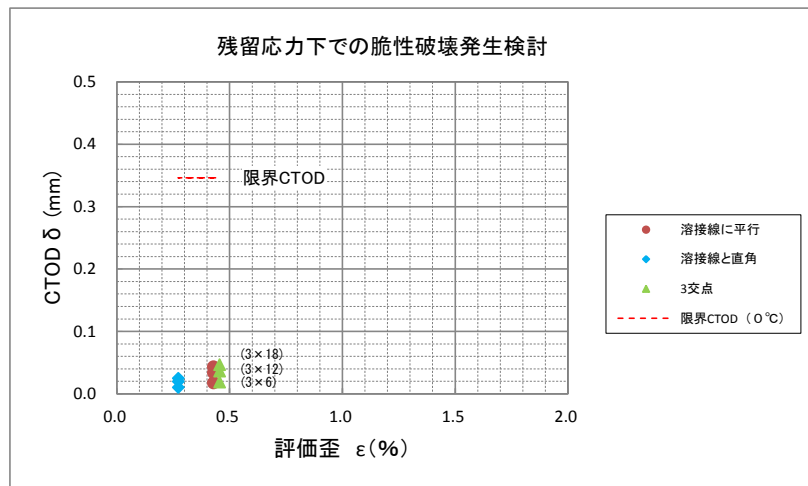


図 8.24(a) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=500mm）※初期亀裂

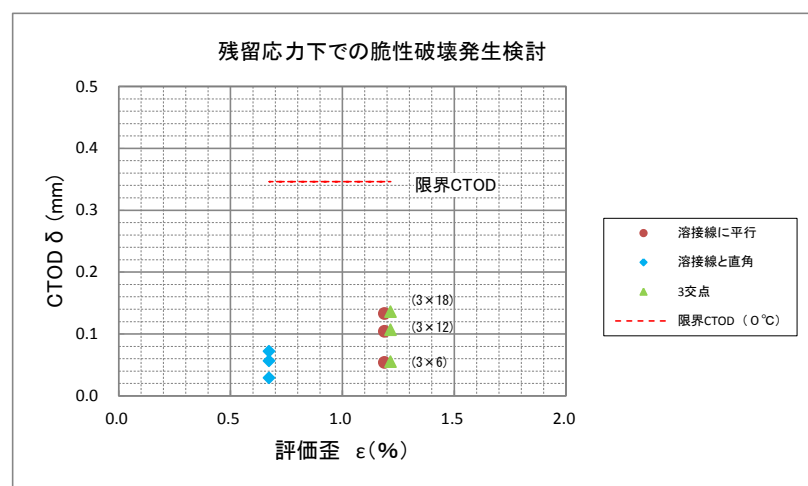


図 8.24(b) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1000mm）※初期亀裂

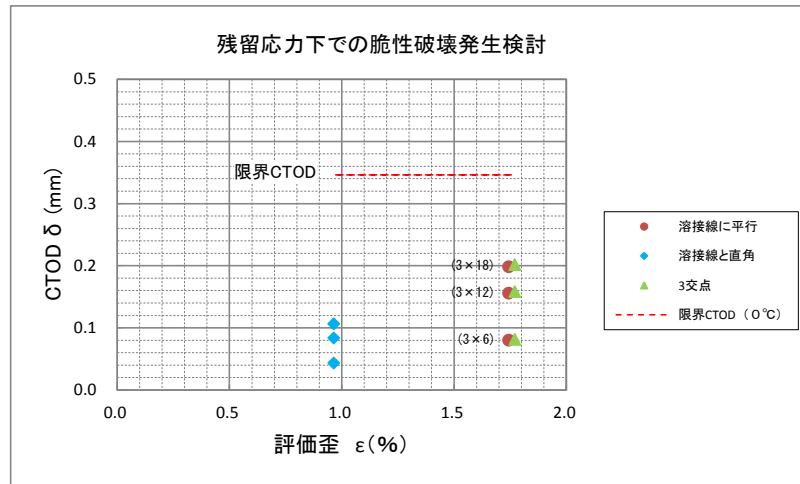


図 8. 24 (c) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1500mm）※初期亀裂

検討結果より、底板突合せ溶接継手に初期亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm～18mm の半楕円表面亀裂を想定した場合、脆性破壊発生に対して 1.7 倍程度以上の余裕度（＝限界 CTOD／CTOD）を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は小さいと判断される。

(4) 亀裂進展後の脆性破壊発生検討結果

供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し（仮想 1000 回）を受けて、表面亀裂が進展した後の亀裂寸法（表 8.11）に対して、脆性破壊発生を検討した結果を、表 8.17 及び図 24 に示す。

表 8.17(a) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=500mm）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の 方向	表面亀裂		係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考	
				(a×2c)								F_t
①	底板相互	突合せ	溶接線に 平行	3.09	×	7.66	0.759	1.78	0.023	0.346	15.07	
				3.21	×	13.64	0.961	2.96	0.038	0.346	9.05	
				3.29	×	19.39	1.064	3.72	0.048	0.346	7.20	
②	底板相互	突合せ	溶接線と 直角	3.09	×	7.66	0.759	1.78	0.013	0.346	26.32	
				3.21	×	13.64	0.961	2.96	0.022	0.346	15.81	
				3.29	×	19.39	1.064	3.72	0.028	0.346	12.57	
③	底板相互	突合せ	3交点	3.09	×	7.66	0.759	1.78	0.025	0.346	14.01	
				3.21	×	13.64	0.961	2.96	0.041	0.346	8.42	
				3.29	×	19.39	1.064	3.72	0.052	0.346	6.70	

表 8.17(b) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1000mm）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂		係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考	
				(a×2c)								F_t
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	3.19	×	9.16	0.818	2.14	0.085	0.346	4.07	
				3.40	×	15.11	0.982	3.28	0.130	0.346	2.66	
				3.55	×	20.76	1.075	4.10	0.163	0.346	2.12	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	3.19	×	9.16	0.818	2.14	0.046	0.346	7.53	
				3.40	×	15.11	0.982	3.28	0.071	0.346	4.91	
				3.55	×	20.76	1.075	4.10	0.088	0.346	3.92	
③	底板相互	突合せ	3交点	3.19	×	9.16	0.818	2.14	0.087	0.346	3.98	
				3.40	×	15.11	0.982	3.28	0.133	0.346	2.59	
				3.55	×	20.76	1.075	4.10	0.167	0.346	2.07	

表 8.17(c) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1500mm）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂		係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考	
				(a×2c)								F_t
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	3.23	×	9.67	0.835	2.25	0.134	0.346	2.59	
				3.46	×	15.63	0.989	3.38	0.201	0.346	1.72	
				3.64	×	21.23	1.079	4.24	0.251	0.346	1.38	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	3.23	×	9.67	0.835	2.25	0.072	0.346	4.82	
				3.46	×	15.63	0.989	3.38	0.108	0.346	3.21	
				3.64	×	21.23	1.079	4.24	0.135	0.346	2.57	
③	底板相互	突合せ	3交点	3.23	×	9.67	0.835	2.25	0.136	0.346	2.55	
				3.46	×	15.63	0.989	3.38	0.204	0.346	1.69	
				3.64	×	21.23	1.079	4.24	0.256	0.346	1.35	

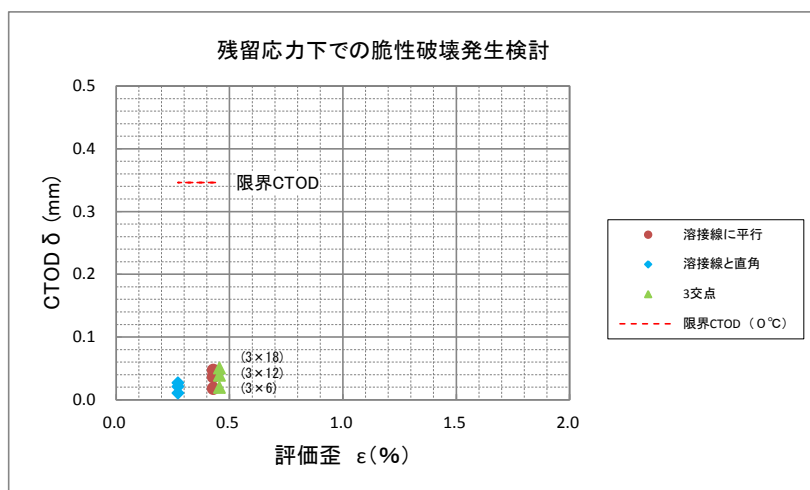


図 8. 25 (a) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=500mm）※亀裂進展後

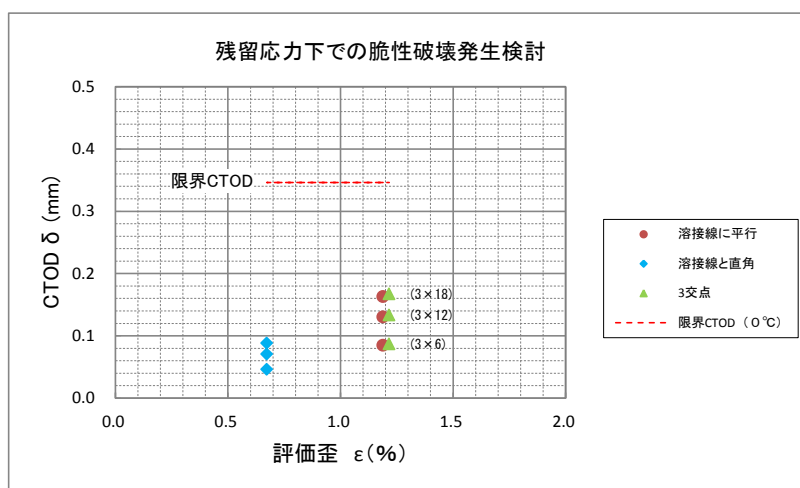


図 8. 25 (b) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1000mm）※亀裂進展後

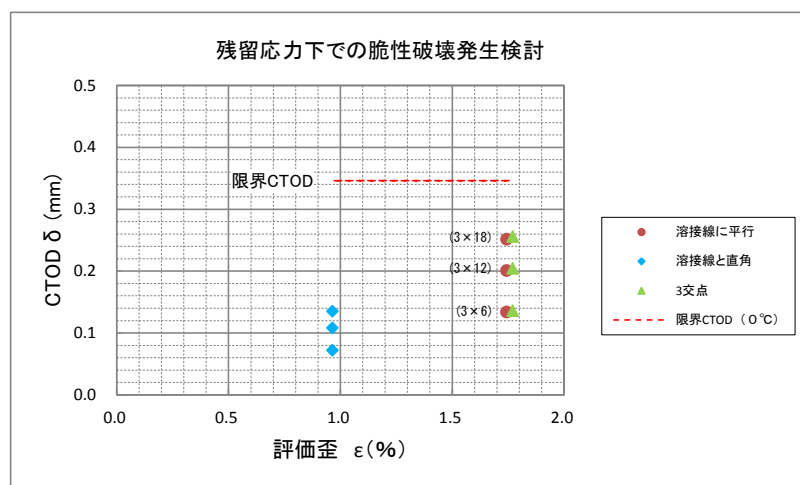
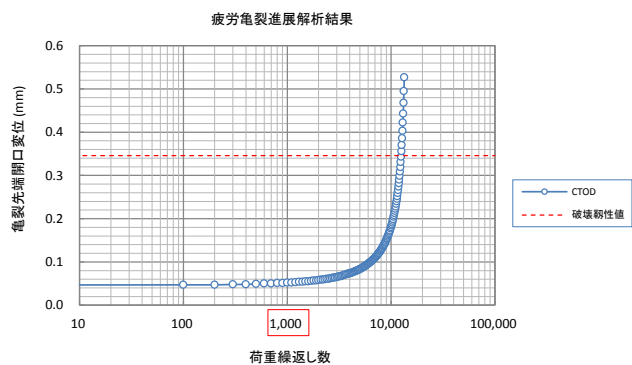
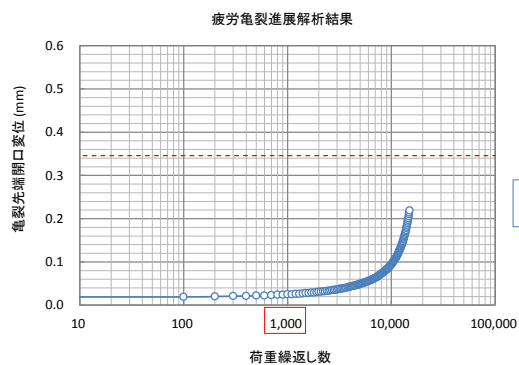


図 8. 25 (c) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1500mm）※亀裂進展後

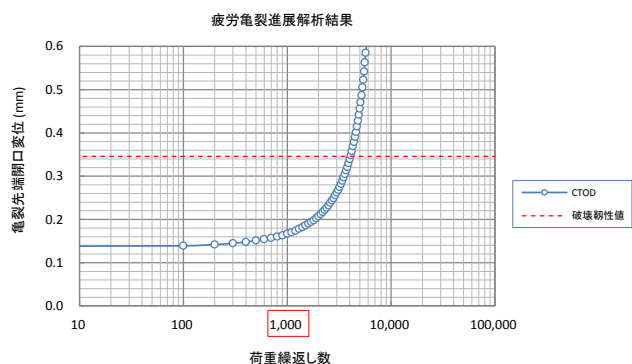
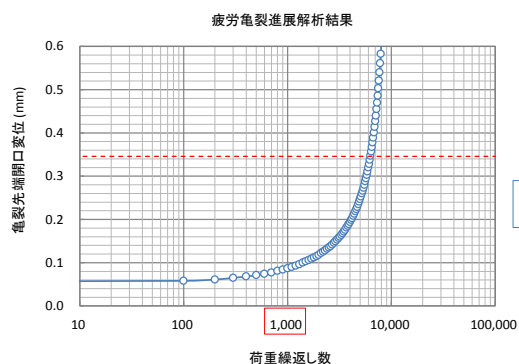
(補足) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



初期亀裂 (3mm×6mm)

初期亀裂 (3mm×18mm)

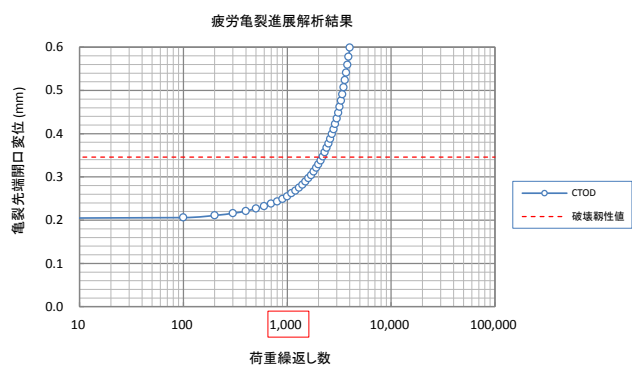
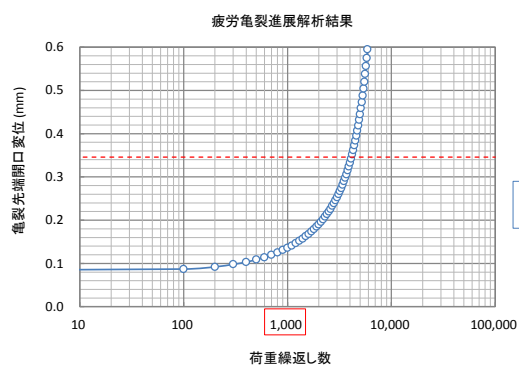
図 8. 26 (a) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=500mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)

初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 26 (b) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1000mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)

初期亀裂 (3mm×18mm)

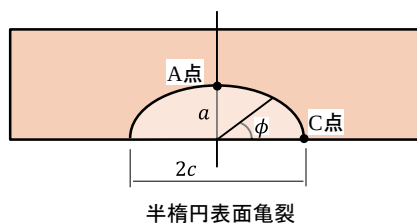
図 8. 26 (c) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1500mm)

検討結果より、底板突合せ溶接継手に亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm～18mm の半楕円表面亀裂を想定し、液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返しを受け場合、疲労亀裂進展後の脆性破壊発生に対して、最も厳しい条件下においても 1.4 倍程度以上の余裕度（＝限界 CTOD／CTOD）を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は小さいと判断される。

表 8. 18 には、以上の検討結果を纏めて示す。

表 8. 18 脆性破壊発生検討結果（3 交点）※亀裂進展後

No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	初期亀裂 ($a \times 2c$)	CTOD δ (mm)	限界 CTOD δ_{cr} (mm)	余裕度 δ_{cr}/δ	備考
1	500	30. 83	3 × 6	0. 025	0. 346	14. 01	図 8. 21 (a)
			3 × 12	0. 041	0. 346	8. 42	
			3 × 18	0. 052	0. 346	6. 70	
2	1000	61. 66	3 × 6	0. 087	0. 346	3. 98	図 8. 21 (b)
			3 × 12	0. 133	0. 346	2. 59	
			3 × 18	0. 167	0. 346	2. 07	
3	1500	92. 49	3 × 6	0. 136	0. 346	2. 55	図 8. 21 (c)
			3 × 12	0. 204	0. 346	1. 69	
			3 × 18	0. 256	0. 346	1. 35	



9. 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

9.1 照査荷重

タンク隅角部溶接継手亀裂の照査用荷重として、高レベル地震時のタンク隅角部の浮上り現象に対するアニュラ板の終局強度を考える¹⁶⁾。

(1) 底板浮上り挙動¹⁶⁾

図 9.1 に示すように底板を単位幅の梁に近似すると、釣合方程式は以下の通り。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (9.1)$$

これより、側板反力 q 、底板浮上り量 δ 、及び底板端部の曲げモーメント M_f は、それぞれ次のようになる。

$$q = \frac{2pl}{3} \quad (9.2)$$

$$\delta = \frac{9q^4}{128EI p^3} \quad (9.3)$$

$$M_f = \frac{pl^2}{6} \quad (9.4)$$

M_f を底板の単位は場当たりの全塑性モーメント $\left(\frac{\sigma_y t^2}{4}\right)$ と等値すれば、底板の降伏耐力 q_y 、降伏耐力時の浮上り変位 δ_y はそれぞれ次のようになる【第 1 塑性関節(ヒンジ)発生点】。

$$q_y = \frac{2t\sqrt{1.5p\sigma_y}}{3} \quad (9.5)$$

$$\delta_y = \frac{3t\sigma_y^2}{8Ep} \quad (9.6)$$

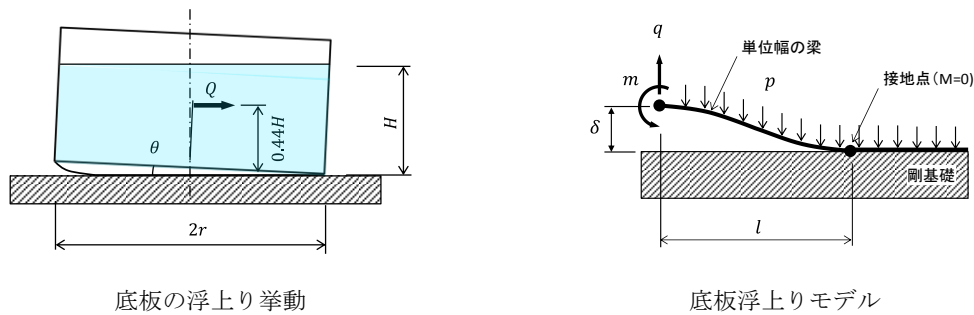


図 9.1 タンク底板浮上り挙動

(2) 浮上り終局変位： δ_B

底板が降伏（第 1 塑性関節発生）した後の浮上り量 δ と曲げモーメント M_f の関係は、次式で表される。

$$\frac{\delta}{\delta_y} = 1 + 32 \left(\frac{M_f}{M_y} - 1 \right) \quad (9.7)$$

M_f が底板の引張強度 σ_B を用いた全塑性モーメントに達したときに底板破断が生じると仮定すると、 M_f/M_y の最大値は次の値となる。

$$\left(\frac{M_f}{M_y}\right)_{max} = \frac{\sigma_y}{\sigma_B} \quad (9.8)$$

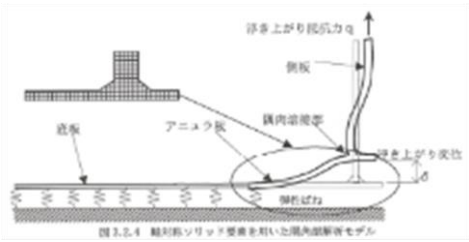
更に、底板の鋼種に応じて、降伏比が 80%未満の場合は $\sigma_B/\sigma_y = 1.45$ 、降伏比が 80%以上の場合は $\sigma_B/\sigma_y = 1.10$ とし、これらの値を式(9.7)に代入することにより、底板の終局浮上り量として次式が得られる¹⁶⁾。

$$\cdot \text{降伏比が 80\%未満の場合,} \quad \delta_B = 14\delta_y \quad (9.9a)$$

$$\cdot \text{降伏比が 80\%以上の場合,} \quad \delta_B = 4\delta_y \quad (9.9b)$$

表 9.1 に、上記の荷重条件を纏めて示す。

表 9.1 照査用荷重条件

タンク隅角部の浮上り	浮上り変位
	告示 79 号に基づき、タンク隅角部浮上り終局変位δ_Bを設定 ・$\delta_B = 14\delta_y$ (軟鋼) ・$\delta_B = 4\delta_y$ (高張力鋼) 但し、$\delta_y = \frac{3 t_a \sigma_y^2}{8 E p}$ $q_y = \frac{2 t_a \sqrt{1.5 p \sigma_y}}{3}$

(3) 荷重の繰返し回数

既往の調査検討においては、高レベル地震時のタンク隅角部底板の浮上り挙動の繰返し回数を 100 回に設定しており、今回の調査検討においても継続的な観点から、高レベル地震時のタンク隅角部浮上り挙動に対する荷重繰返し回数 100 回を採用する。

ここで、1 回の地震を受けた場合の底板浮上り回数を検討した例として、河野らは 11 万 k1 タンク（内径 81.5m, 高さ 24m）を対象にして、1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震のうち葺合記録 N45W 波（最大加速度 834gal）を用いて解析しており、その結果を図 9.2 に示す。同図より、1 回の地震に対して底板浮上り回数は高々数回程度としている¹⁷⁾。

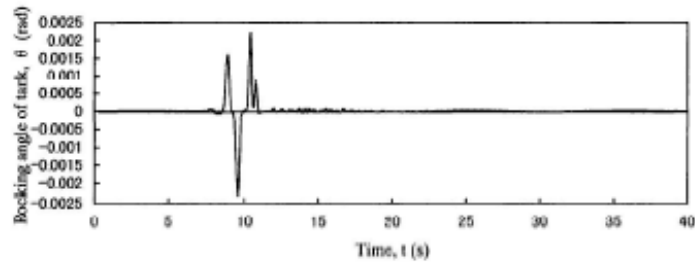


Fig. 4 Time history of rocking angle θt (Fukiai Case2)

図 9.2 11 万 kl タンクの底板浮上り挙動例¹⁵⁾

一方、消防庁「屋外タンク貯蔵所の耐震安全性に関する調査検討報告」(H29 年 3 月)における屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討では、【旧法】3 万 KL タンク (内径 $\phi 45.1\text{m}$, 高さ 21.3m) を対象にして、想定南海トラフ地震 (A 地区 EW 方向の最大加速度 767gal) を用いて解析しており、その結果を図 9.3 に示す。同図より、1 回の地震に対して底板浮上り回数は小さな浮き上がりを含め総計 34 回であるが、実質的な底板浮上り回数としては高々数回程度である¹⁸⁾。

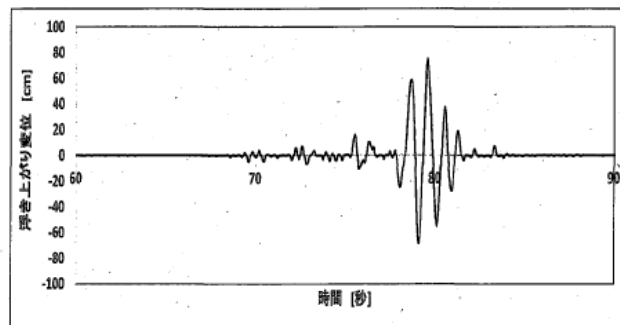


図 3.2.17 浮き上がり変位の時刻歴 (定式化による Q- Δ 線図使用)

図 9.3 3 万 KL タンクの底板浮上り挙動例¹⁶⁾

以上より、何れも 1 回の地震における実質的な底板浮上り回数は、高々数回程度と見込まれ、タンク供用期間中に遭遇する高レベル地震の回数を考慮しても、タンク隅角部底板の浮上り挙動は高々 100 回程度と考えられる。

9.2 解析対象

(1) 対象タンク

表 9.2 に、解析対象タンクを示す。

表 9.2 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)			備考
							底板	アニール板	側板	
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6	6	18	旧基準
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20	
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36	

(2) 解析条件

- ・ 軸対称ソリッド解析
- ・ 6 節点／8 節点アイソパラメトリック要素
- ・ 弾塑性大変形解析
- ・ 硬化則：等方硬化
- ・ 基礎と底板との離間・接触を考慮

※解析コード：汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS を使用。

尚、解析に用いた圧力容器用鋼板 SPV490Q の材料定数を表 9.3 に示す。

表 9.3 鋼板の材料定数

	記号	SPV490Q
縦弾性係数	E	205,939.7 N/mm ²
ポアソン比	ν	0.3
降伏応力	σ_y	490 N/mm ²
引張強さ	σ_t	610 N/mm ²
ひずみ硬化率	H'	E/100 (等方硬化)
基礎ばね定数	Kb	0.3 N/mm ³

尚、材料の加工硬化特性については、-1 に示す「2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Division 2」の算定式による応力-歪み線図を比較して、等方硬化則 $H' = E/100$ を採用した。

(3) 底板の終局浮上り量

表 9.4 に、対象タンクのアニユラ板浮き上がり量を示す。

表 9.4 底板の浮上り変位

区分	容量 (kl)	液圧 p (N/mm ²)	アニユラ板 材質	アニユラ板 t_a (mm)	降伏点 (N/mm ²)	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_B (mm)	備考
旧法	9,900	0.1353	SS400	6	245	4.847	67.9	$\delta_B = 14\delta_y$
新法	32,000	0.1961	SPV490Q	12	490	26.754	107.1	$\delta_B = 4\delta_y$
新法	110,000	0.2059	SPV490Q	21	490	44.591	178.6	$\delta_B = 4\delta_y$

図 9.4 に、底板浮き上がりによるタンク全体に傾斜角度を示す。同図より、タンク全体の傾斜角度 θ はほぼ同じ程度となる。

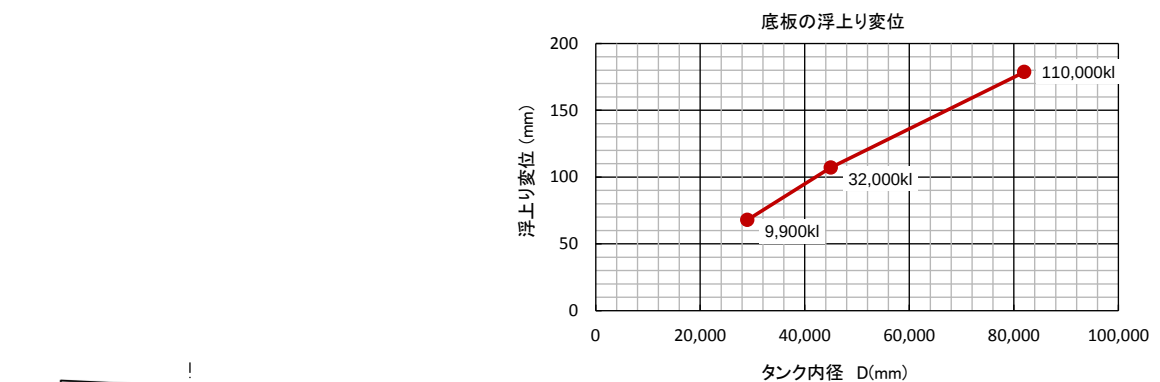


図 9.4(a) 底板の浮上り変位

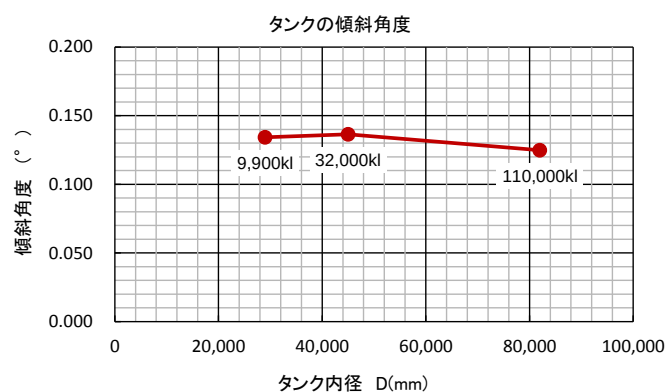
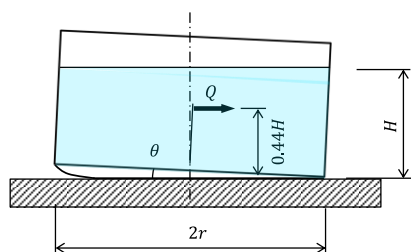


図 9.4(b) タンクの全体傾斜角度

(4) 解析モデル

図 9.5 に、タンク隅角部の解析モデル範囲（側部は 1000mm 高さ, 底部は 2500mm 幅）を示す。

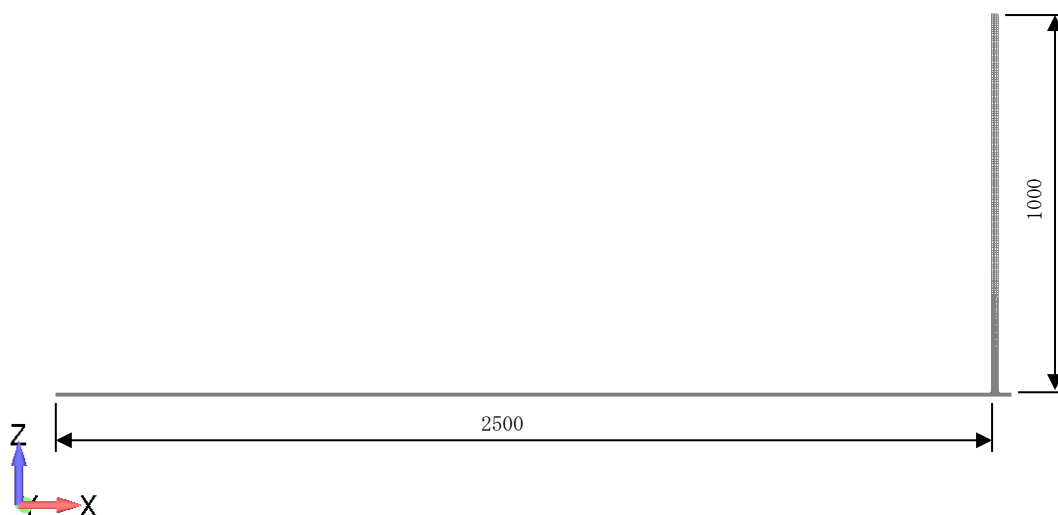


図 9.5 タンク隅角部の解析モデル

図 9.6 に、解析対象タンクの解析モデル図をそれぞれ示す。

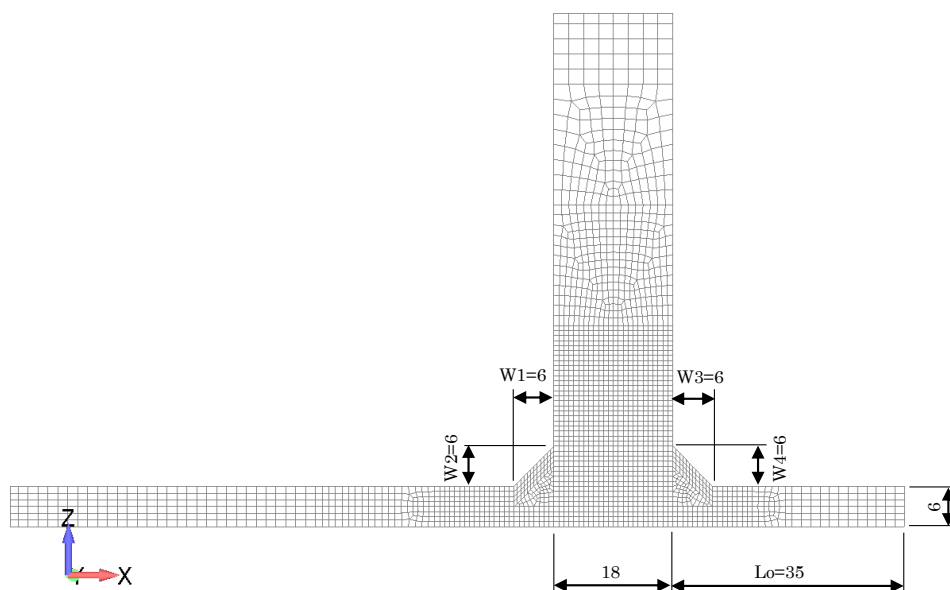


図 9.6(a) 【旧法】9,900kl タンクの解析モデル

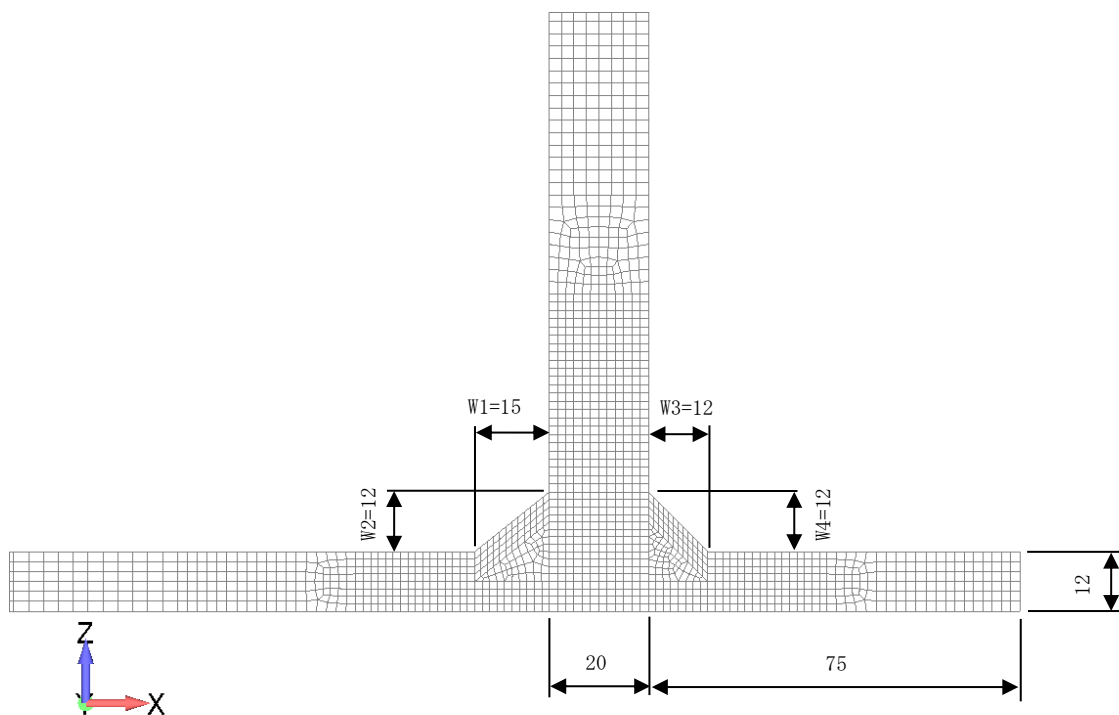


図 9. 6 (b) 32, 000kl タンクの解析モデル

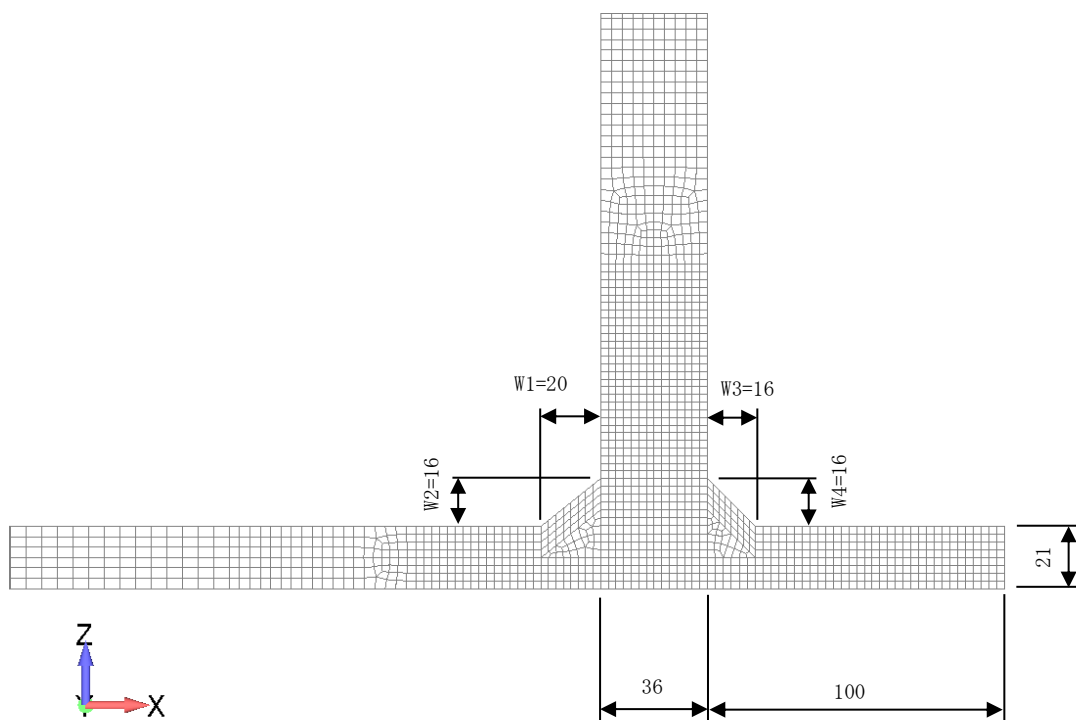


図 9. 6 (c) 110, 000kl タンクの解析モデル

9.3 残留応力場での疲労亀裂進展解析

ここでは、タンク隅角部を対象にして、図 9.7 に示す位置に表面亀裂がそれぞれ存在した場合を想定して疲労亀裂進展解析を適用する。

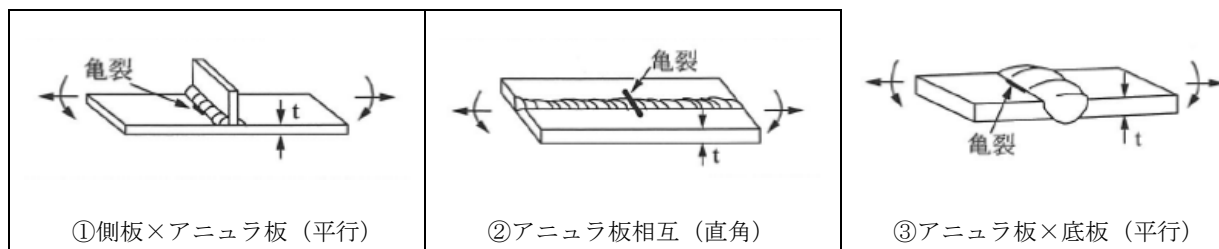


図 9.7 表面亀裂を有するタンク隅角部溶接継手

表 9.5 に、解析対象タンクにおける側板×アニュラ板溶接継手の隅肉脚長を示す。

表 9.5 側板×アニュラ板溶接継手

区分	容量 (kl)	材質	板厚構成 (mm)			隅肉寸法 (mm)				備考
			底板	アニュラ板	側板	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	
旧法	9,900	SS400	6	6	18	6	6	6	6	θ=45°
新法	32,000	SPV490Q	12	12	20	15	12	12	12	θ=39°
新法	110,000	SPV490Q	12	21	36	20	16	16	16	θ=39°

(1) 応力集中係数

一般的に、実機タンクの側板×アニュラ板溶接継手には部分溶込みグループ溶接が用いられて、タンク内面側の隅肉溶接は、アニュラ板側の隅肉脚長 (W₁) が側板側 (W₂) より長い不等脚長 (W₁ ≥ W₂) となっている。実機タンクの隅肉溶接寸法より、次式を用いてビード立上り角度 θ (図 9.8) を計算すると、図 9.9 のように概ね θ=35~40° 程度となっている。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \quad (9.10)$$

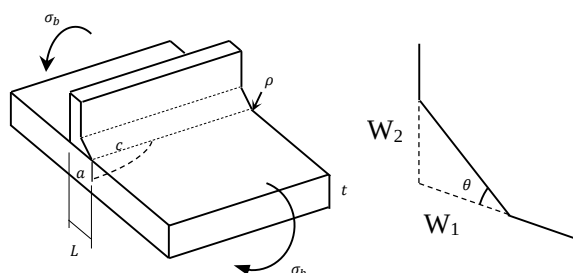


図 9.8 側板×アニュラ板隅肉溶接継手

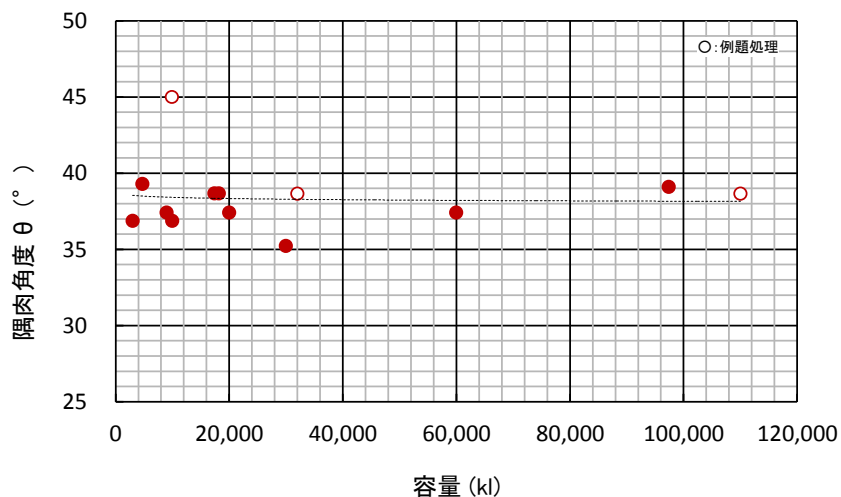


図 9.9 タンク内面側の隅肉溶接角度

これより、側板×アニュラ板溶接継手の隅肉溶接止端部における応力集中係数は、図 6.22（隅肉溶接止端部の応力集中係数 $\bar{K}_t$ ）において、安全側の取扱いとして隅肉溶接角度 $\theta = 40^\circ$ として評価すると概ね $K=3.7$ となる。但し、溶接止端部の曲率半径として $0 \leq \rho/t \leq 0.1$ の適用制限があり、止端部形状が滑らかでないものを想定している。

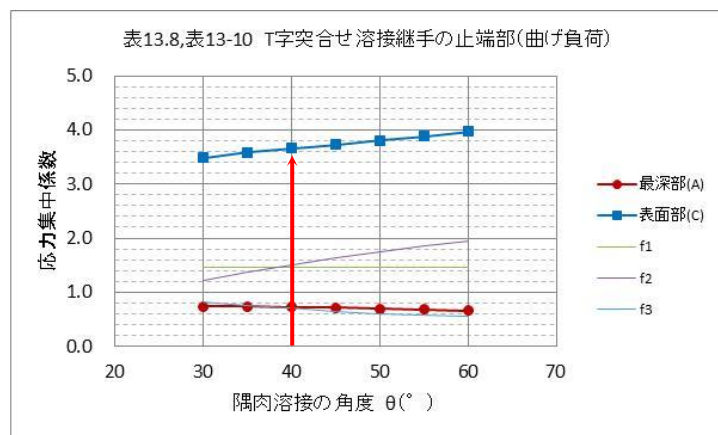
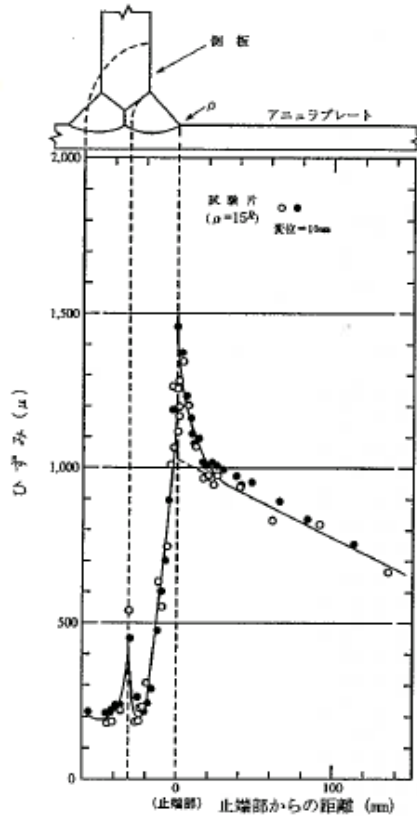
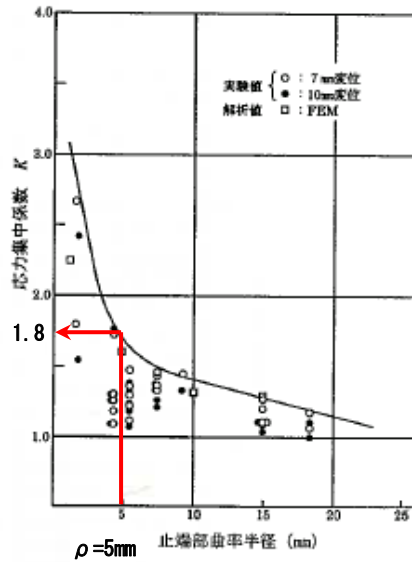


図 6.22 隅肉溶接止端部の応力集中係数 $\bar{K}_t$

一方、危険物を貯蔵する屋外貯蔵タンクでは、消防法令上、当該溶接ビードは滑らかな形状を有することが要求される【規則第 20 条 4】。従って、図 9.10 の「LNG 地上式貯槽指針」¹⁹⁾において止端部曲率半径を概ね $\rho=5\text{mm}$ 程度とすると、隅肉溶接止端部の応力集中係数は、現実的には $K=1.8$ 程度と考えるのが妥当である。



解図 4.15 L形曲げ試験によるひずみ分布



解図 4.16 応力集中係数と止端部曲率半径の
関係¹⁾ (FEM解と実験値の比較)

図 9.10 側板×アニュラ板隅肉溶接継手止端部の応力集中係数¹⁹⁾

【参考】消防危第 169 号「屋外タンク貯蔵所の地震対策について」、昭和 54 年 12 月 25 日
地震防災対策強化地域（強化地域）内の屋外タンク貯蔵所に対する措置のうち、「側板とアニュラ板の内
側隅肉溶接アニュラ板側脚長について」において、応力集中を軽減するために当該ビードの形状をアニ
ュラ板の板厚に応じて規定している。

(参考表 6.1) 隅肉溶接ビード形状標準値

アニュラ板 の板厚 (mm)	溶接止端部の 曲率半径 (mm)	備考
12未満	3	
12以上18未満	20以上	
18以上21未満	30以上	
21以上24未満	40以上	
24以上	40以上	

アニュラ板相互の突合せ溶接継手の止端部における応力集中係数は、図 6.19（突合せ溶接止端部の応力集中係数 $\bar{K}_t$ ）より、前出と同様に評価するものとする、表面亀裂を有するタンク隅角部溶接継手の応力集中係数として、表 9.6 に示す値を用いる。

表 9.6 タンク隅角部溶接継手の応力集中係数

記号	部位	継手	亀裂の方向	残留応力項 α_R	応力集中 係数 M_K	備考
①	側板×アニュラ板	T 継手	溶接線に平行	0.36	1.8	隅肉溶接止端部 曲率半径 R=5mm 程度
②	アニュラ板相互	突合せ	溶接線と直角	0.6	1.0	
③	アニュラ×底板	突合せ	溶接線と直角	0.36	1.9	(曲げ応力の影響小)

これより、タンク隅角部溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合（記号①）が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。

(2) 変形状態

図 9.11 に、底板浮上り時におけるタンク隅角部の変形状態及び応力分布を示す。

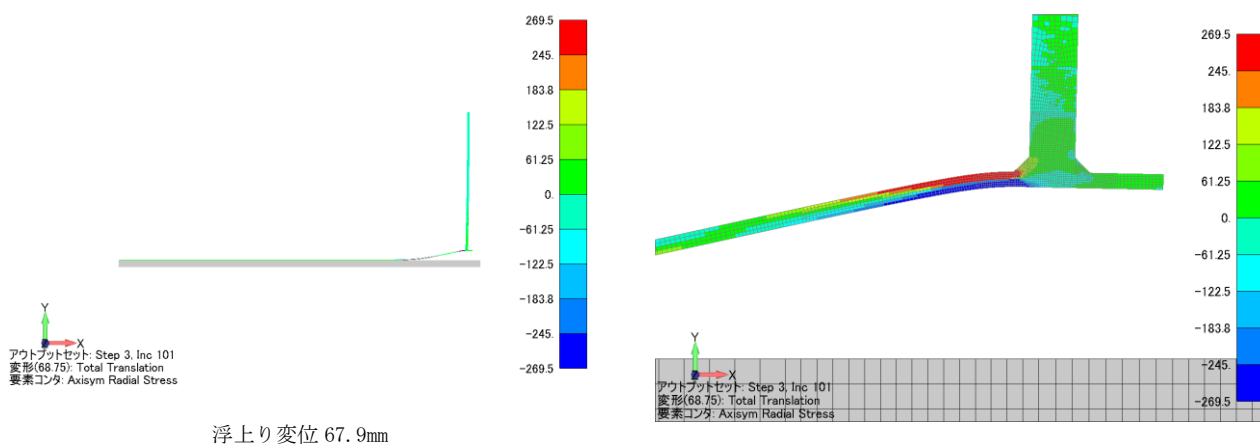


図 9.11(a) タンク隅角部の応力分布 (旧法 9,900kl タンク)

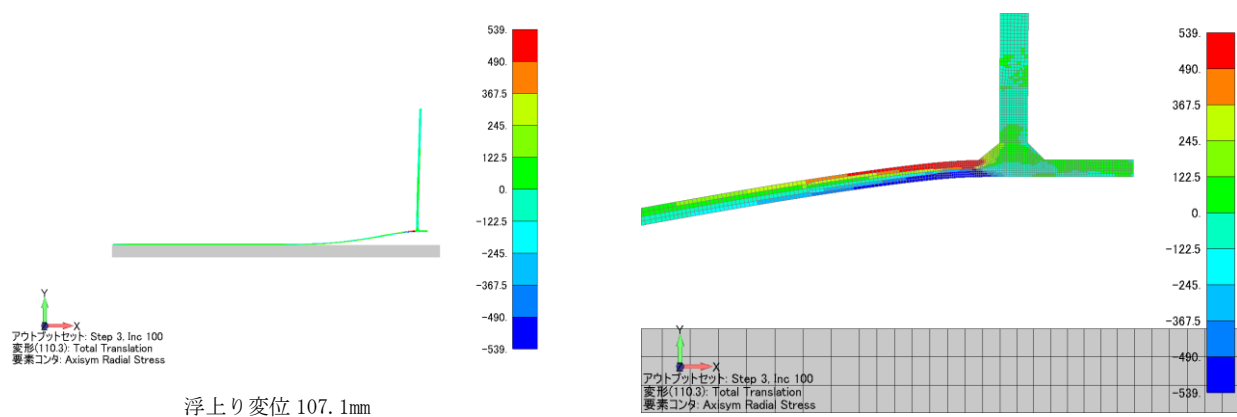


図 9.11(b) タンク隅角部の応力分布 (32,000kl タンク)

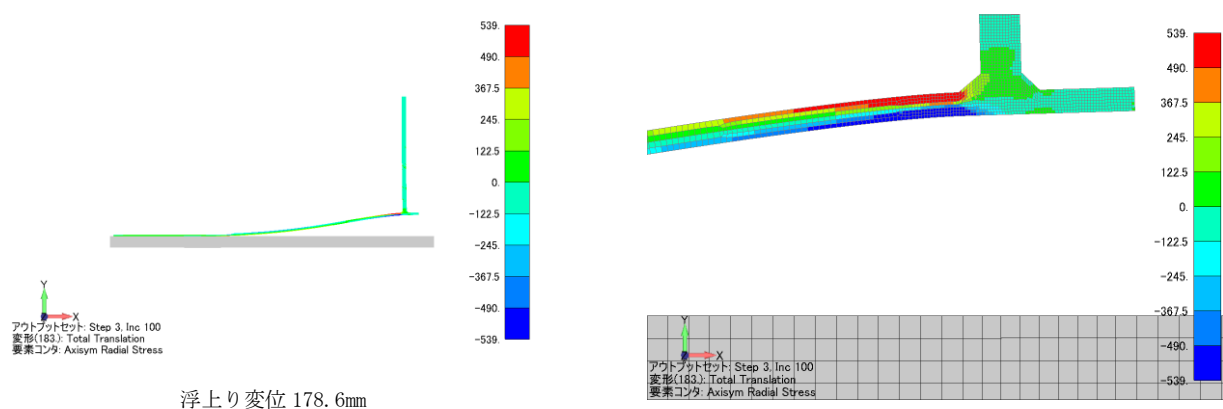


図 9.11(c) タンク隅角部の応力分布 (110,000kl タンク)

(3) タンク内表面の応力・歪み

図 9.12 に、タンク内面側（接液側）における半径方向の応力分布及び歪み分布を示す。同図より、何れのタンクにおいても隅肉溶接止端部より 100mm～150mm の範囲で材料の降伏点を超えており、特に止端部より概ね 50mm の範囲ではやや強い歪み領域となっている。

図 9.13 に、タンク内面側（接液側）における円周方向の応力分布及び歪み分布を示す。同図より、半径方向応力に比べて、円周方向応力の発生は小さいことが分かる。又、地震時の底板浮上り挙動を軸対称変形問題に近似したことから、円周方向歪みの発生は小さい。

ここで、【旧法】9,900kl タンクの側板×アニュラ板溶接継手部において、図 9.12(a) のタンク内面側の隅肉溶接止端部に発生する半径方向及び円周方向ピーク応力の履歴を、図 9.14 に示す。

同図より、地震時の底板浮上り挙動の繰返しに応じて、隅肉溶接止端部の半径方向応力がループを描いて増加する様子が分かる。当該タンクのアニュラ板は、旧基準による比較的薄い板厚 6mm（材質 SS400）を採用していることから、底板浮上りによる終局変位（ $\delta_B = 67.9\text{mm}$ ）を繰返し 3 回負荷した範囲では、応力－歪み関係は収束に至っていない。

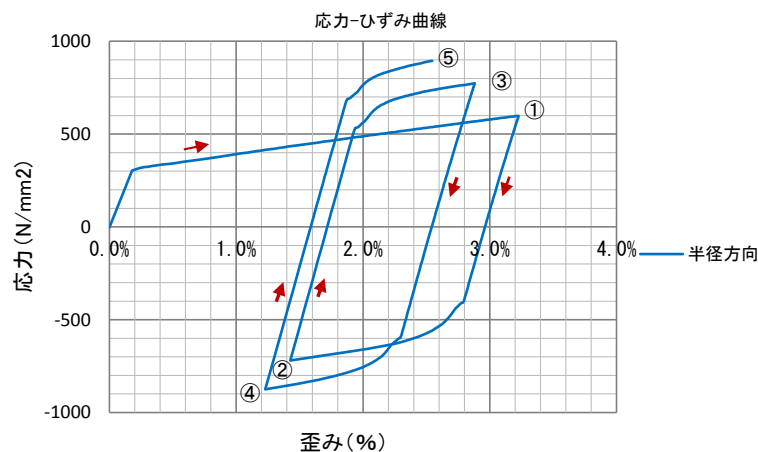


図 9.14(a) 半径方向応力の履歴（旧法 9,900kl タンク）

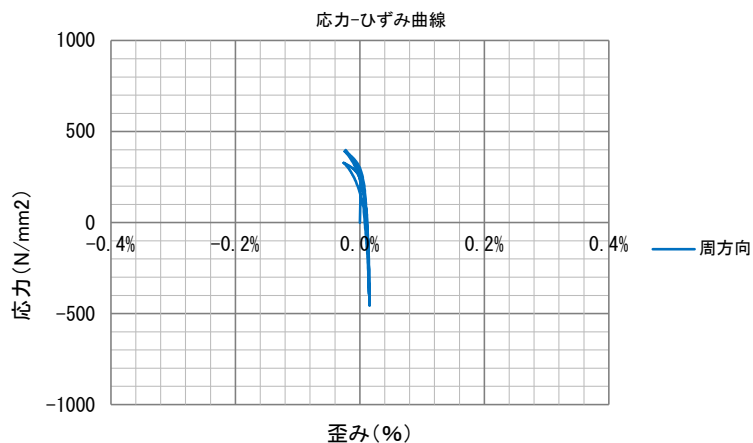


図 9.14(b) 円周方向応力の履歴（旧法 9,900kl タンク）

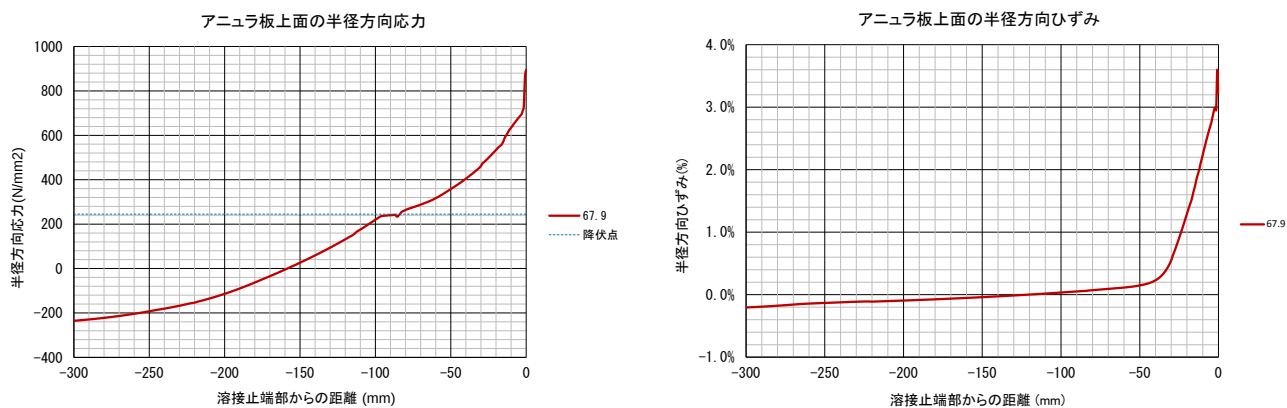


図 9.12 (a) 半径方向の表面応力・表面歪み（旧法 9,900kl タンク）

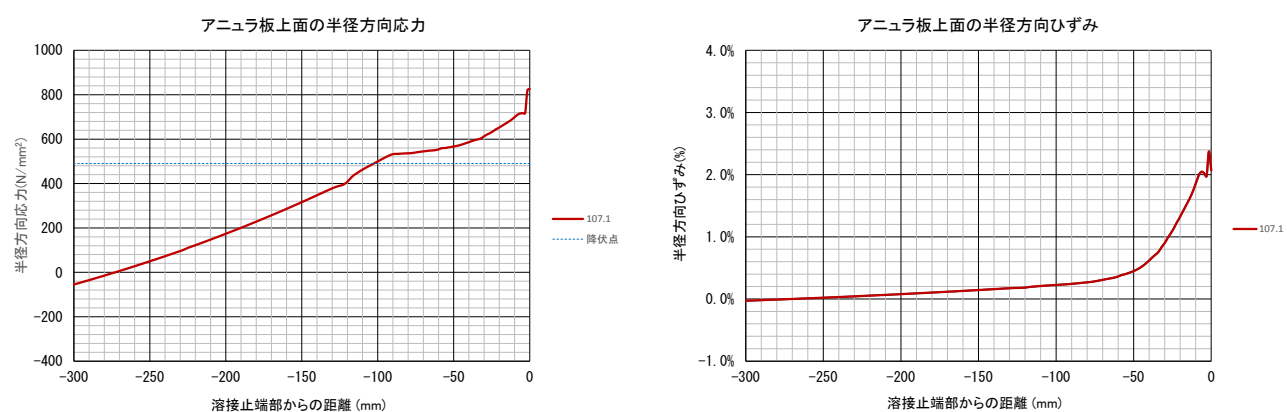


図 9.12 (b) 半径方向の表面応力・表面歪み（32,000kl タンク）

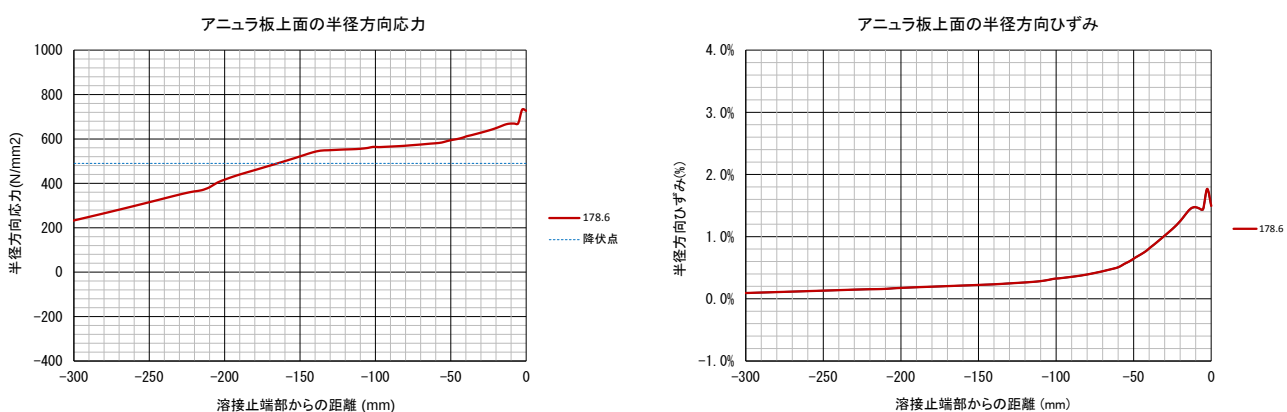


図 9.12 (c) 半径方向の表面応力・表面歪み（110,000kl タンク）

(円周方向の表面応力・表面歪み)

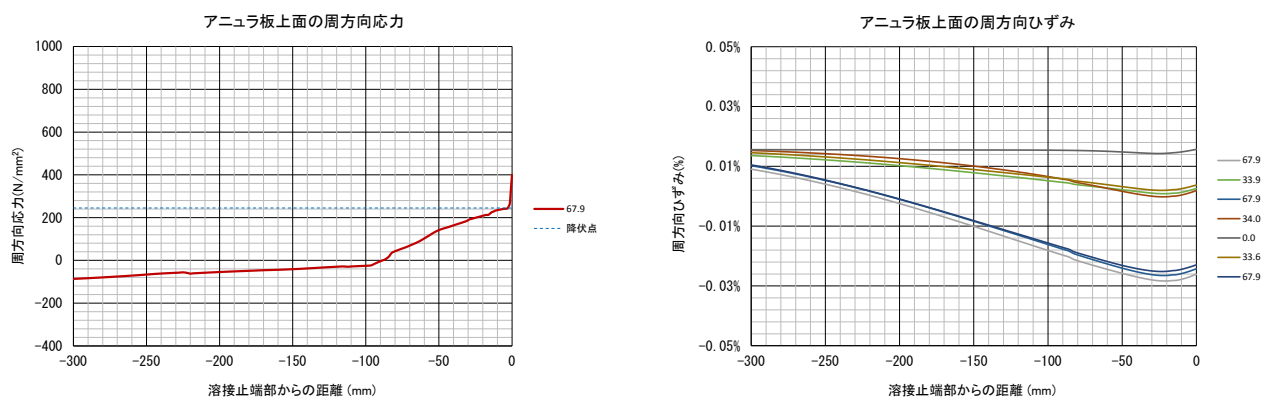


図 9.13(a) 円周方向の表面応力・表面歪み (旧法 9,900kl タンク)

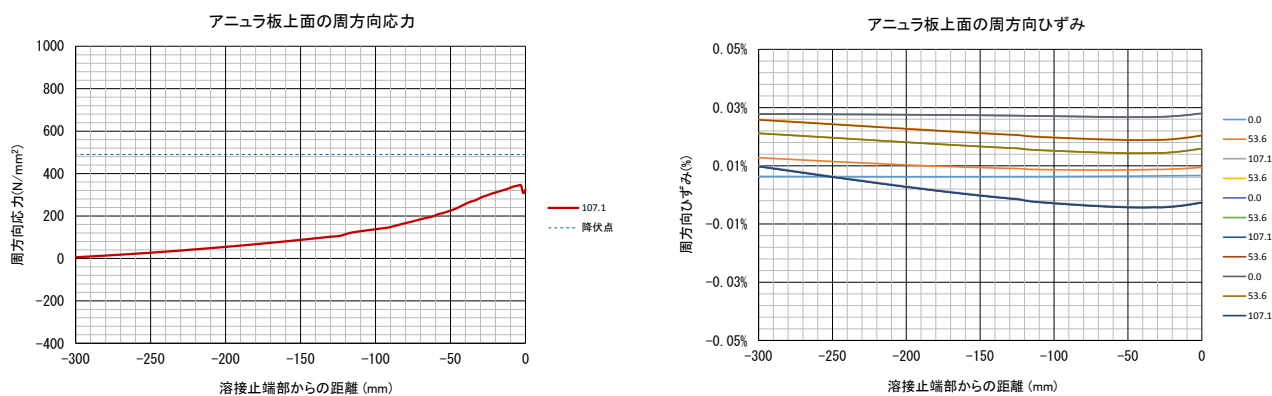


図 9.13(b) 円周方向の表面応力・表面歪み (32,000kl タンク)

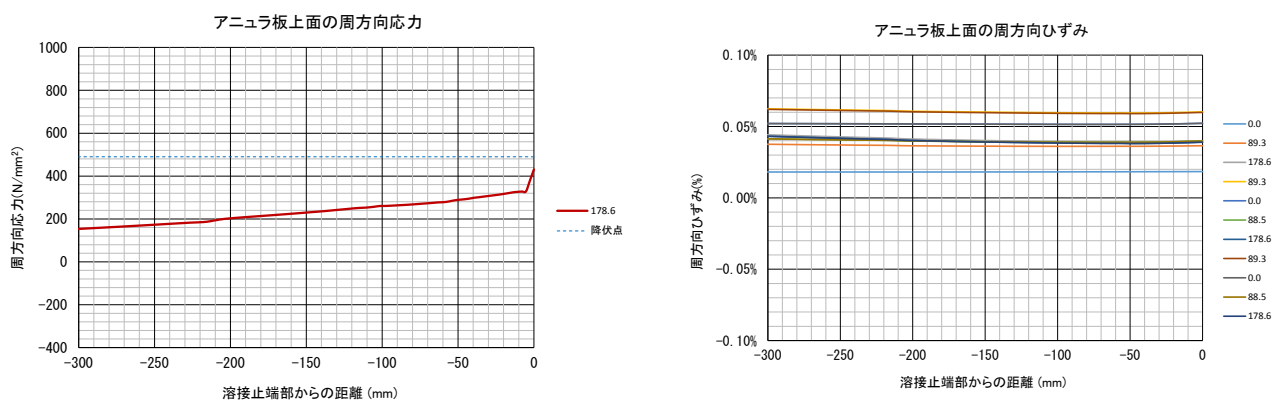


図 9.13(c) 円周方向の表面応力・表面歪み (110,000kl タンク)

(4) 歪み履歴

ここで、タンク隅角部の隅肉溶接止端部近傍に発生する応力は、構造的な不連続に起因した二次応力と、溶接止端部形状による応力集中（ピーク応力）に分類される。このとき、FEM 弾塑性解析により、応力集中部となる隅肉溶接止端部近傍のビード形状、要素分割（メッシュの粗さ）が解析精度に大きく影響する。そこで、溶接止端部の応力を、溶接ビード形状による局所的な応力集中を含まない、二次応力を「ホットスポット応力」として定義される。

ここでは、ホットスポット応力の算定法として、隅肉溶接止端部から板厚の 0.5 倍と 1.5 倍の位置における応力値（歪み）を直線（最小二乗法）で結び、溶接止端部位置に外挿した応力値（SR202 B 法）に、上記の応力集中係数を乗じる。

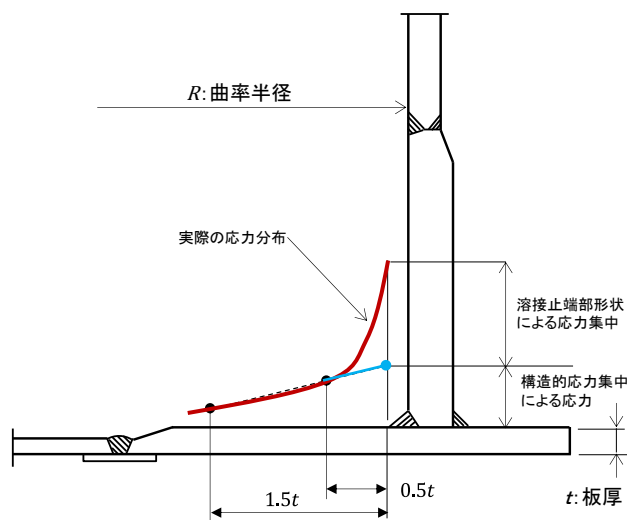


図 9.15 ホットスポット応力

図 9.16 に、底板浮上り挙動時の隅肉溶接止端部のホットスポット歪みの履歴を示す。

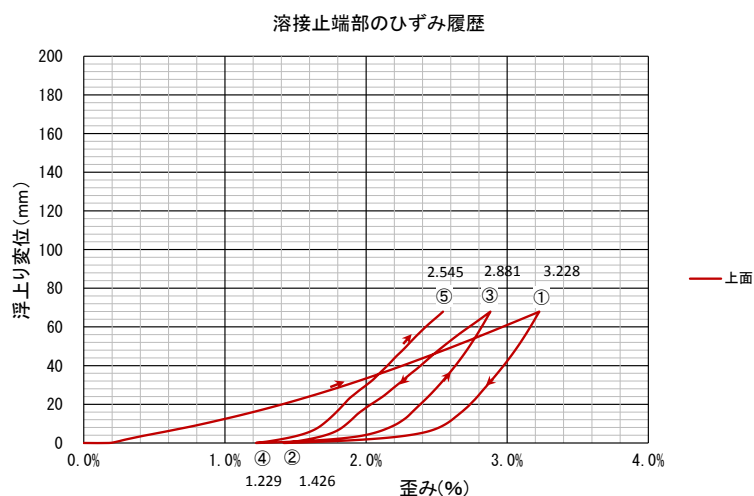


図 9.16(a) 隅肉溶接止端部の歪み履歴（旧法 9,900kl タンク）

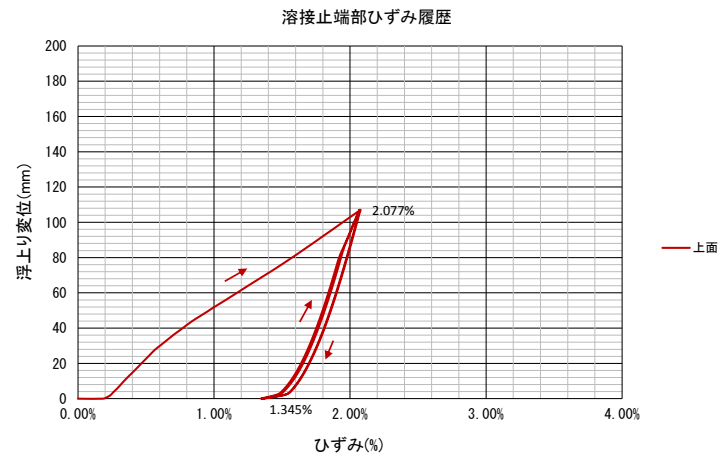


図 9.16 (b) 隅肉溶接止端部の歪み履歴 (32,000kl タンク)

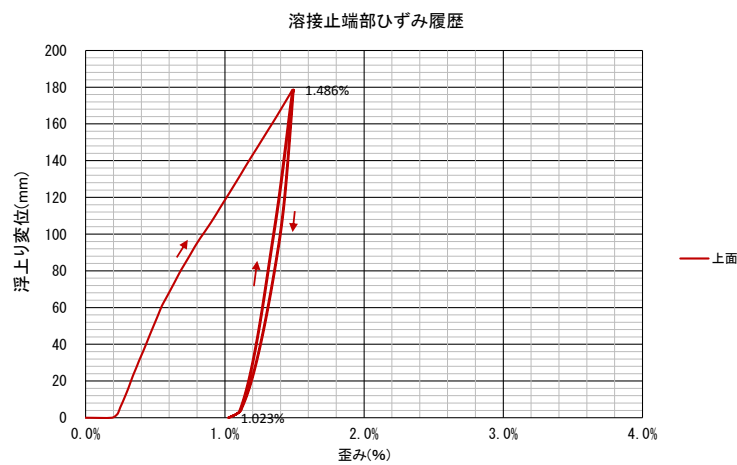


図 9.16 (c) 隅肉溶接止端部の歪み履歴 (110,000kl タンク)

表 9.7 に、底板浮上り挙動時の疲労亀裂進展解析及び脆性破壊発生検討に用いる最大歪みと歪み振幅を示す。尚、【旧法】9,900kl タンクについては、図 9.14(a)の半径方向応力履歴と同様に収束に至っていないことから、この間の経路の平均値を用いることにした。

表 9.7 歪み振幅（底板浮上り時）

区分	容量 (kl)	7ニ17板厚 (mm)	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	経路	歪み ε (%)	備考
旧法	9,900	6	3.228	1.556 (平均)	①→②	3.228→1.426	1.802
					②→③	1.426→2.881	1.455
					③→④	2.881→1.229	1.652
					④→⑤	1.229→2.545	1.316
新法	32,000	12	2.077	0.732	—	1.345→2.077	
新法	110.000	21	1.486	0.463	—	1.023→1.486	

9.3.1 側板×アニュラ板溶接継手（隅肉溶接）

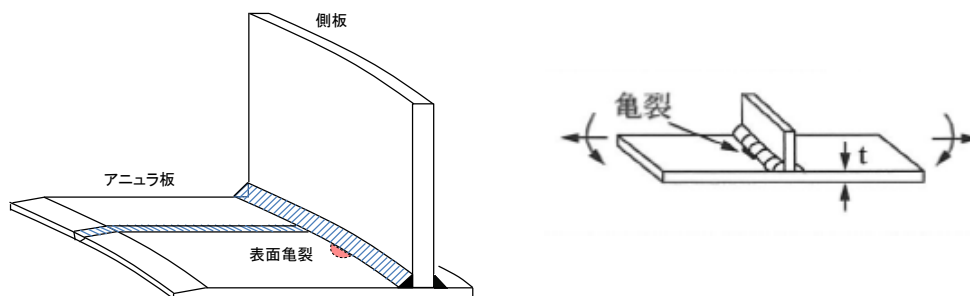


図 9.17 側板×アニュラ板溶接継手（T 継手）

（1）疲労亀裂進展結果

解析では、側板×アニュラ板隅肉溶接止端部において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合を想定して、表 9.8 に示す応力集中係数を考慮した。

表 9.8 応力集中係数（側板×アニュラ板）

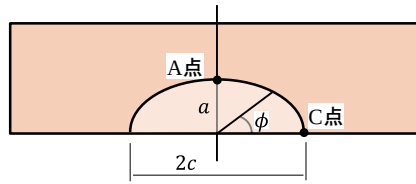
亀裂の方向	最深部 (A 点)	板表面 (C 点)
溶接線に平行	1.0	1.8

解析結果（最安全側）より、疲労亀裂の進展状況を図 9.18 に、応力拡大係数範囲を図 9.19 に示す。更に、結果の纏めを表 9.9 に示す。表 9.9 のうち、【旧法】9,900kl タンクにおいては、初期亀裂に対しても応力拡大係数範囲 ΔK が適用範囲 ($\Delta K \leq 100\text{MPa}\sqrt{m}$) を大きく超えている（図 9.20）。同様に、【新法】32,000kl タンクにおいては適用範囲をやや超える結果となった。一方、【新法】110,000kl タンクでは、板表面（C 点）の応力拡大係数範囲が適用限界に達するまで計算を行った。

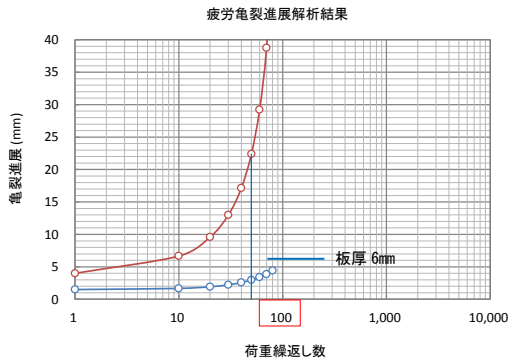
表 9.9 残留応力下での疲労進展解析結果（荷重繰返し 100 回）

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK_C)
旧法	9,900 (6mm)	1.556	3204	(50)	1.5×4	(2.97×22.37)	(1.47×18.37)	271 *
					1.5×8	(3.33×28.52)	(1.83×20.52)	251 *
					1.5×12	(3.63×34.58)	(2.13×22.58)	225 *
新法	32,000 (12mm)	0.732	1507	100	1.5×4	1.91×7.76	0.41×3.76	131 *
					1.5×8	2.13×11.31	0.63×3.34	118 *
					1.5×12	2.27×14.79	0.77×2.79	104 *
新法	110.000 (21mm)	0.463	954	100	1.5×4	1.61×5.05	0.11×1.05	84
					1.5×8	1.69×8.82	0.19×0.82	75
					1.5×12	1.74×12.61	0.24×0.61	66

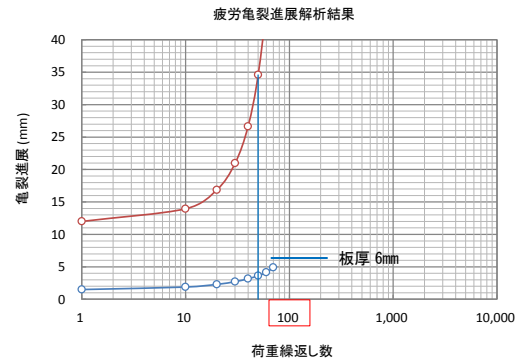
（備考）応力集中係数：最深部（A 点）1.0、板表面（C 点）1.8 を考慮



半楕円表面亀裂

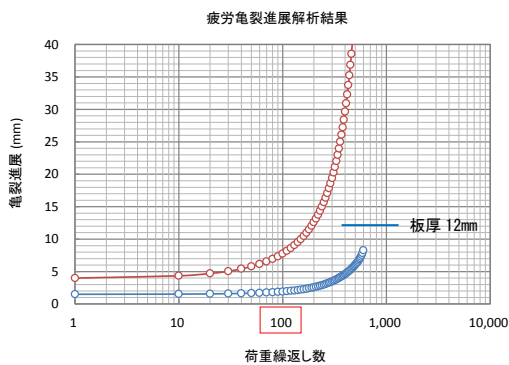


初期亀裂(1.5mm×4mm)

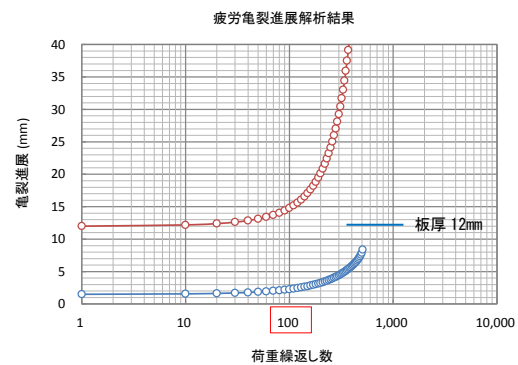


初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.18 (a) 疲労亀裂進展解析結果 (旧法 9,900kI タンク)

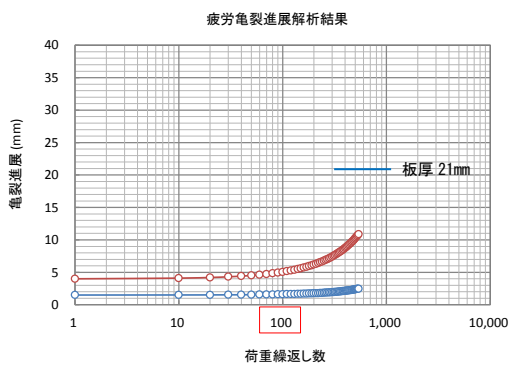


初期亀裂(1.5mm×4mm)

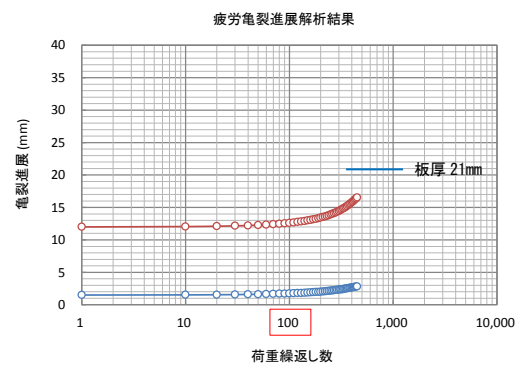


初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.18 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kI タンク)

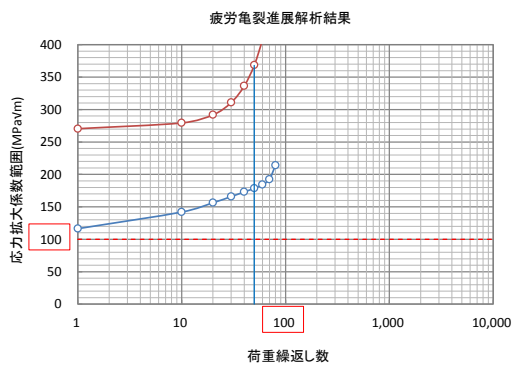


初期亀裂(1.5mm×4mm)

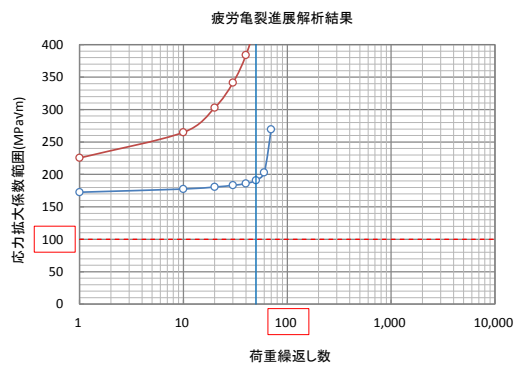


初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.18 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (110,000kI タンク)

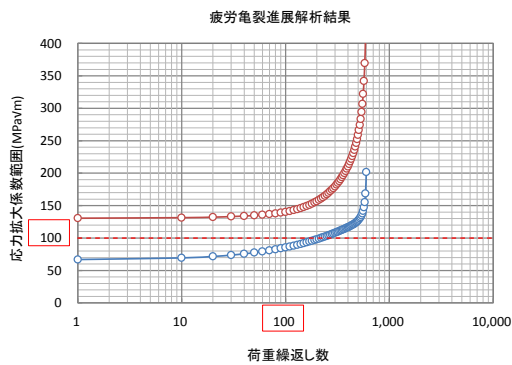


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

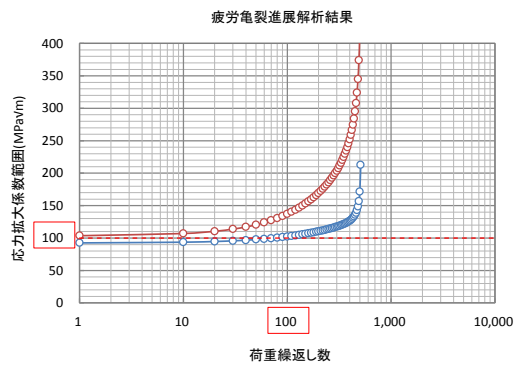


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.19(a) 応力拡大係数範囲 (旧法 9,900kl タンク)

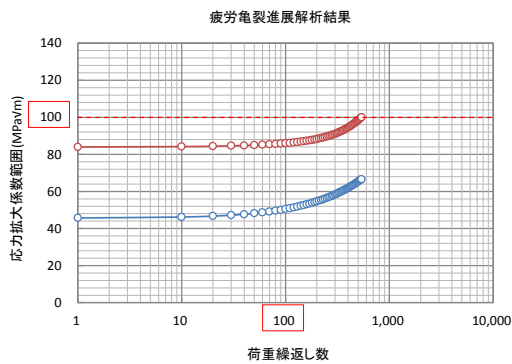


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

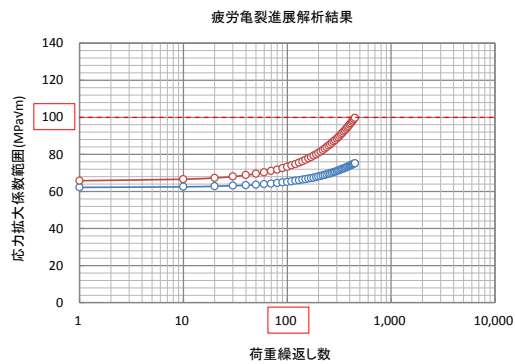


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.19(b) 応力拡大係数範囲 (32,000kl タンク)



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.19(c) 応力拡大係数範囲 (110,000kl タンク)

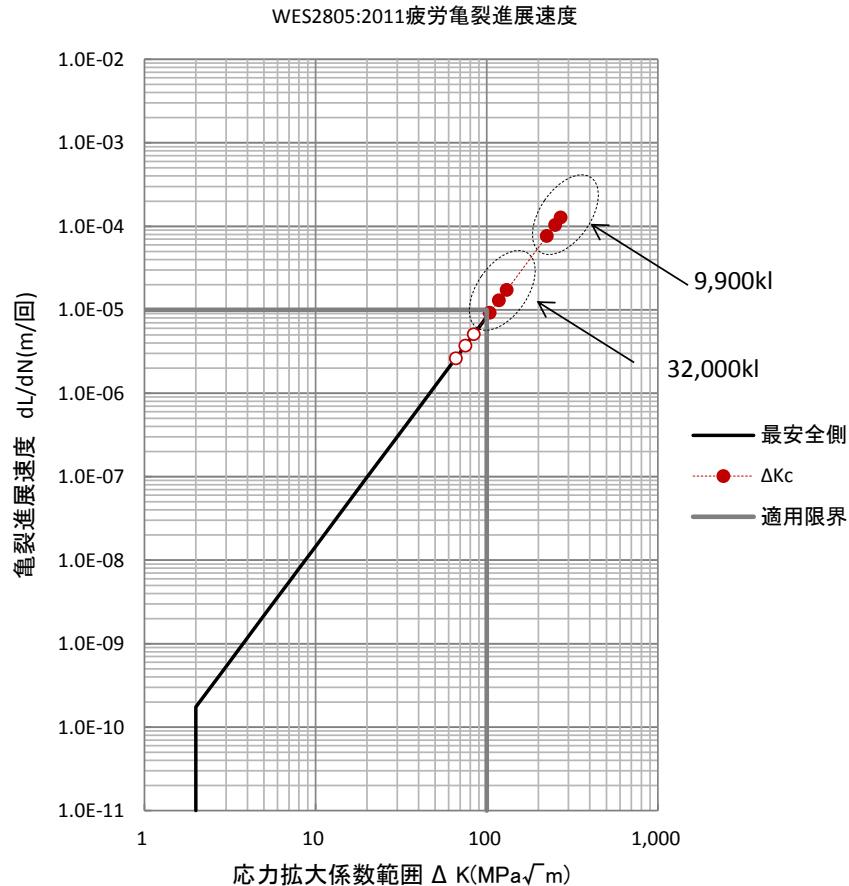


図 9.20 応力拡大係数範囲（初期亀裂）

地震時の底板浮上り挙動（想定 100 回）に対して、側板×アニュラ板溶接継手部の隅肉溶接止端部に想定した表面亀裂（溶接線に平行）の疲労亀裂進展解析の結果は、以下の通り。

【旧法】9,900kl タンクでは初期亀裂直後から板表面方向に急激に進展拡大し、板厚方向（ $t=6\text{mm}$ ）にも亀裂が進展して貫通に至ることが分かる。

一方、【新法】32,000kl タンクでは、板幅方向に 2.8mm～3.8mm 程度の進展量が認められるが、板厚方向（ $t=12\text{mm}$ ）には初期亀裂 1.5mm に対して最大深さが 2.3mm 程度に留まり、板厚を貫通する可能性は低い（ $a/t \doteq 0.19$ ）。

同様に、【新法】110,000kl タンクでは、板幅方向に 0.6mm～1.1mm 程度の進展量に留まり、板厚方向（ $t = \text{mm}$ ）にも最大深さが 1.7mm 程度に留まり、板厚を貫通する可能性は極めて低い（ $a/t \doteq 0.08$ ）。

9.3.2 アニュラ板相互溶接継手（突合せ溶接）

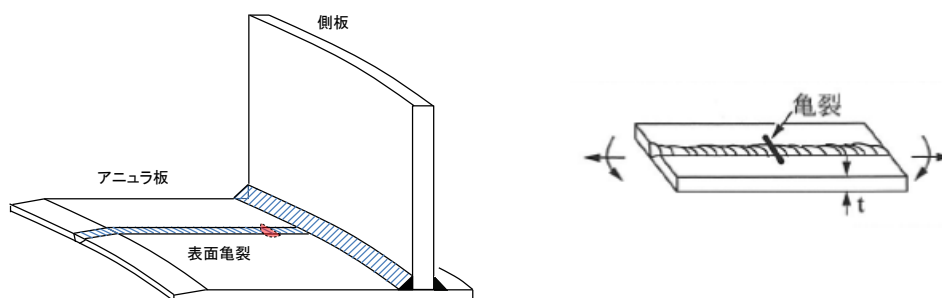


図 9.21 アニュラ板相互溶接継手（直角）

（１）疲労亀裂進展結果

解析では、側板内面近傍のアニュラ板相互突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に直角に位置する場合を想定して、表 9.10 に示す応力集中係数を考慮した。

表 9.10 応力集中係数（アニュラ板相互）

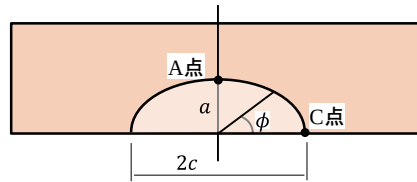
亀裂の方向	最深部 (A 点)	板表面 (C 点)
溶接線に直交	1.0	1.0

解析結果（最安全側）より、疲労亀裂の進展状況を図 9.22 に、応力拡大係数範囲を図 9.23 に示す。更に、結果の纏めを表 9.11 に示す。表 9.11 のうち、【旧法】9,900kl タンクにおいては、初期亀裂に対しても応力拡大係数範囲 ΔK が適用範囲 ($\Delta K \leq 100 \text{MPa}\sqrt{m}$) をやや超える結果となった（図 9.24）。それ以外では、板表面（C 点）の応力拡大係数範囲が適用限界に達するまで計算を行った。

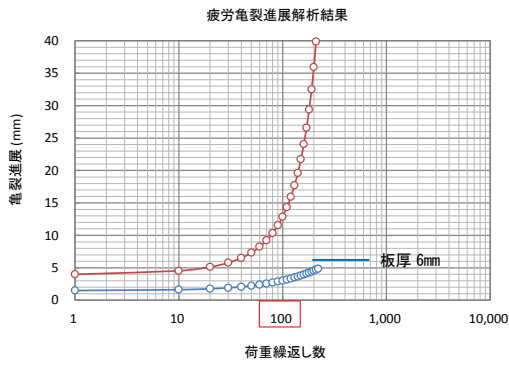
表 9.11 残留応力下での疲労進展解析結果（荷重繰返し 100 回）

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK)
旧法	9,900 (6mm)	1.556	3204	100	1.5×4	3.03×12.87	1.53×8.87	150 *
					1.5×8	3.60×19.55	2.10×11.55	139 *
					1.5×12	4.00×25.86	2.50×13.86	125 *
新法	32,000 (12mm)	0.732	1507	100	1.5×4	1.79×4.76	0.29×0.76	73
					1.5×8	2.07×8.70	0.57×0.70	65
					1.5×12	2.24×12.59	0.74×0.59	58
新法	110,000 (21mm)	0.463	954	100	1.5×4	1.60×4.21	0.10×0.21	47
					1.5×8	1.69×8.17	0.19×0.17	42
					1.5×12	1.74×12.12	0.24×0.12	37

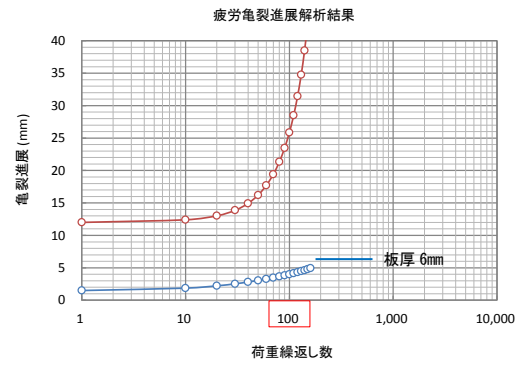
（備考）応力集中係数：最深部（A 点）1.0、板表面（C 点）1.0 考慮



半楕円表面亀裂

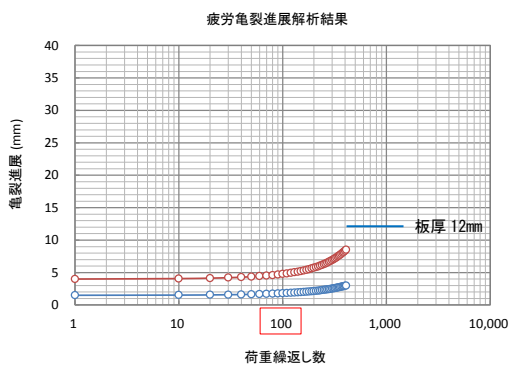


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

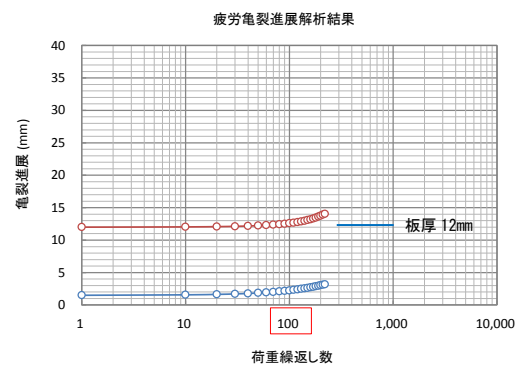


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.22 (a) 疲労亀裂進展解析結果 (旧法 9,900kI タンク)

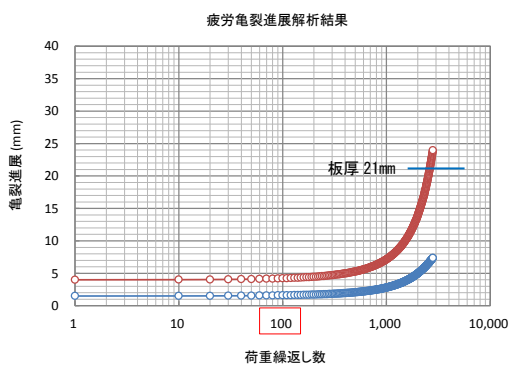


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

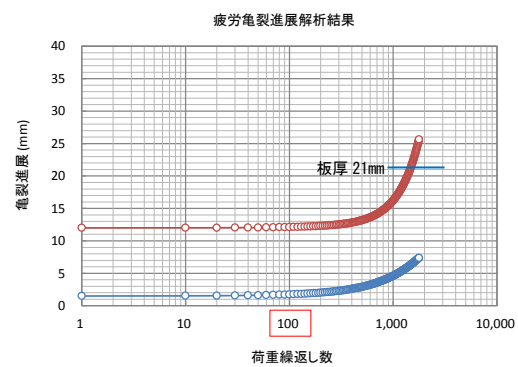


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.22 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kI タンク)

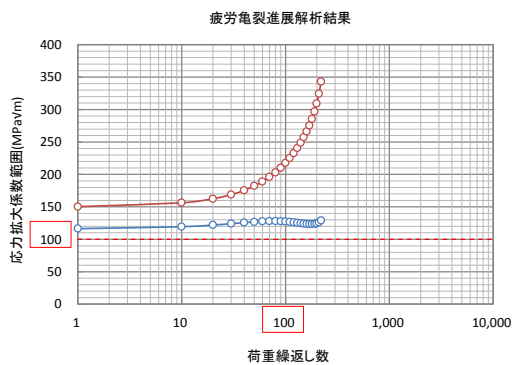


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

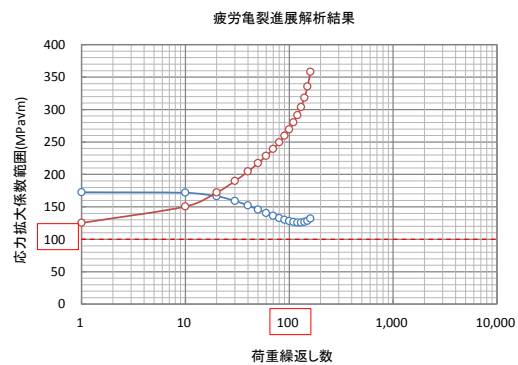


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.22 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (タンク)

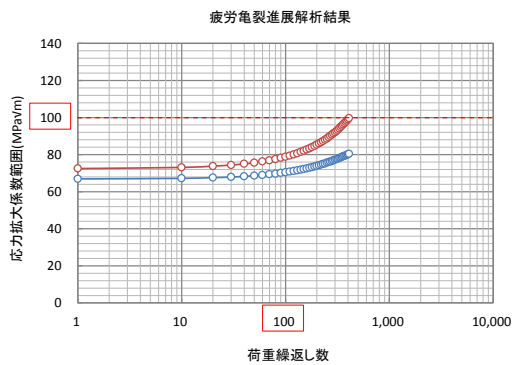


初期亀裂(1.5mm×4mm)

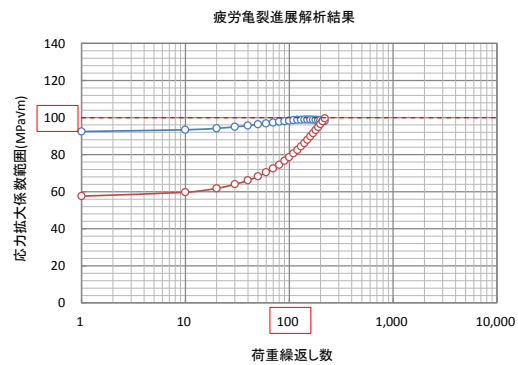


初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9. 23(a) 応力拡大係数範囲 (旧法 9, 900kI タンク)

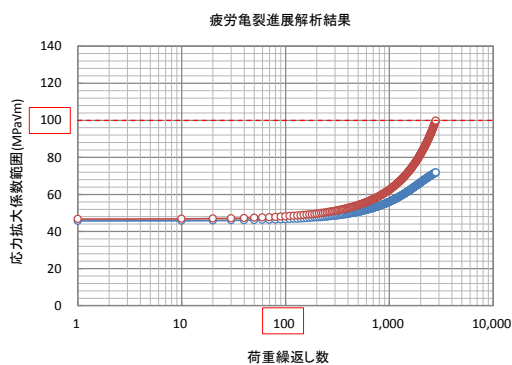


初期亀裂(1.5mm×4mm)

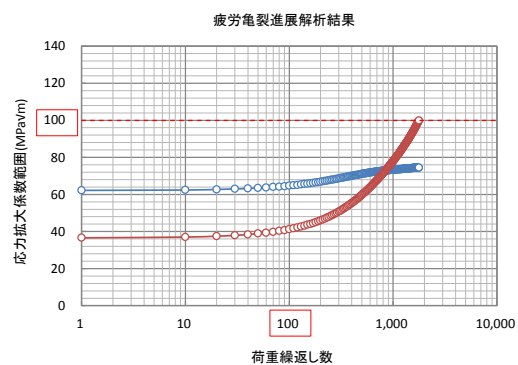


初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9. 23(b) 応力拡大係数範囲 (32, 000kI タンク)



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9. 23(c)

(110, 000kI タンク)

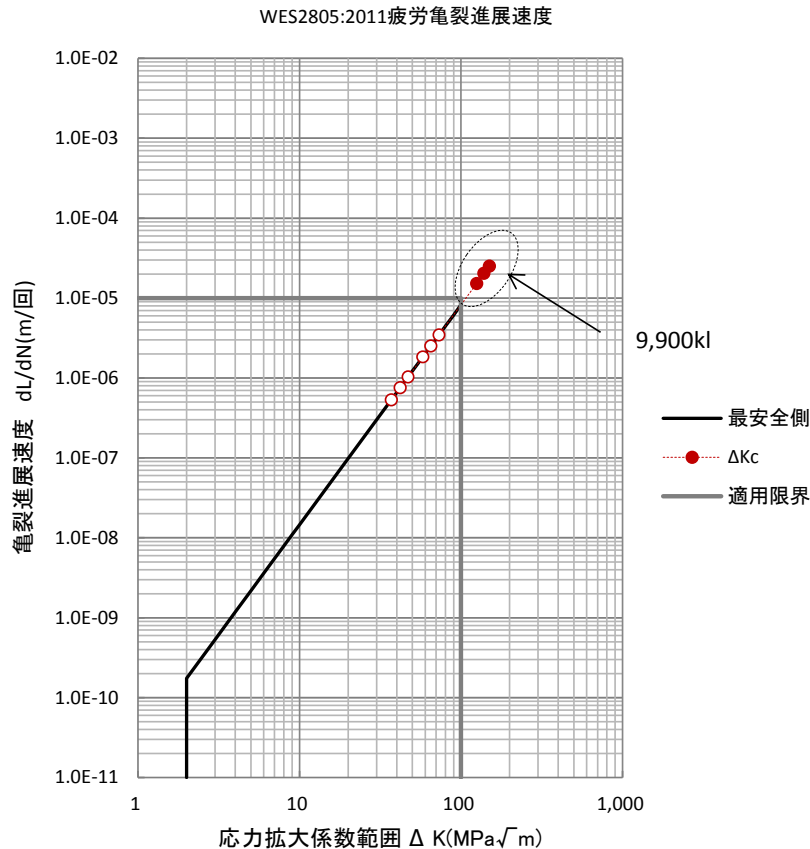


図 9.24 応力拡大係数範囲（初期亀裂）

地震時の底板浮上り挙動（想定 100 回）に対して、側板近傍のアニュラ板相互溶接継手部の隅肉溶接止端部に想定した表面亀裂（溶接線に直交）の疲労亀裂進展解析の結果は、以下の通り。

【旧法】9,900kl タンクでは初期亀裂直後から板表面方向に進展拡大し、板厚方向（ $t=6\text{mm}$ ）には初期亀裂 1.5mm に対して最大深さが 4.0mm 程度に進展しており、亀裂貫通に至る可能性がある（ $a/t \approx 0.67$ ）。

一方、【新法】32,000kl タンクでは、板幅方向に 0.6mm～0.8mm 程度の進展量に留まり、板厚方向（ $t=12\text{mm}$ ）にも初期亀裂 1.5mm に対して最大深さが 2.2mm 程度に留まり、板厚を貫通する可能性は低い（ $a/t \approx 0.19$ ）。

同様に、【新法】110,000kl タンクでは、板幅方向に 0.1mm～0.2mm t
 $=21\text{mm}$ ）にも最大深さが 1.7mm 程度に留まり、板厚を貫通する可能性は極めて低い（ $a/t \approx 0.08$ ）。

9.4 残留応力下での脆性破壊発生検討

9.4.1 側板×アニュラ板溶接継手（隅肉溶接）

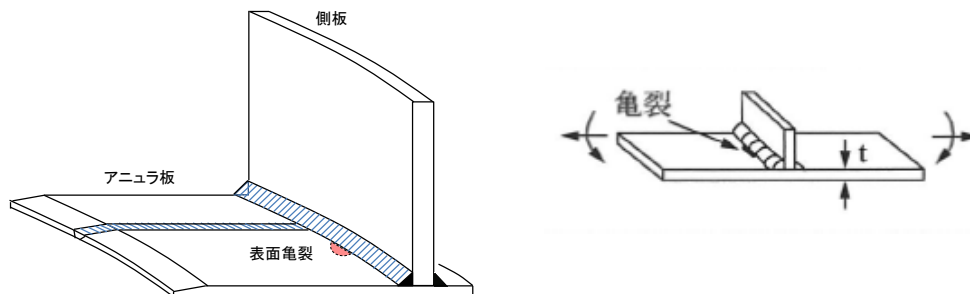


図 9.25 側板×板×アニュラ板溶接継手（T 継手）

（1）亀裂先端開口変位 CTOD の算定

側板×アニュラ板溶接継手部の内側隅肉溶接止端部の応力集中係数を $K=1.8$ （表 9.8）と置くと、応力集中部に作用する局所歪 ε より、CTOD 設計曲線（図 9.26）を用いて当該箇所に存在する亀裂の開口変位 CTOD δ を評価した結果を、表 9.12 に示す。

表 9.12(a) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（旧法 9,900kl タンク）

記号	部位	継手	亀裂の 方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	側板× アニュラ板	T継手	溶接線に 平行	3.228%	0.043%	2.582%	5.853%	0.119%	49.20	171.93

表 9.12(b) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（32,000kl タンク）

記号	部位	継手	亀裂の 方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	側板× アニュラ板	T継手	溶接線に 平行	2.077%	0.086%	1.662%	3.824%	0.238%	16.07	54.84

表 9.12(c) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（110,000kl タンク）

記号	部位	継手	亀裂の 方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	側板× アニュラ板	T継手	溶接線に 平行	1.486%	0.086%	1.189%	2.760%	0.238%	11.60	39.04

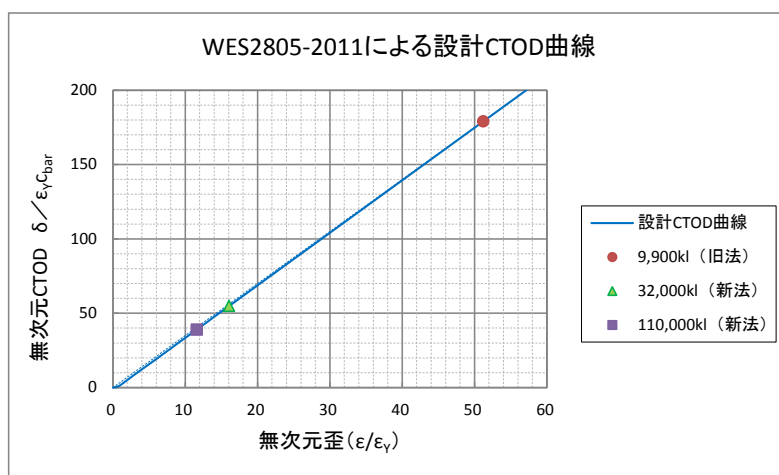


図 9.26 CTOD 設計曲線（側板×アニュラ板）

（2）脆性破壊発生検討

地震時底板浮上り挙動による繰返し（100 回想定）において、初期亀裂に対する脆性破壊発生の可能性を検討した結果を、表 9.13 及び図 9.27 に示す。

表 9.13(a) 脆性破壊発生検討結果（旧法 9,900kl タンク）※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)			$\delta (mm)$	$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.5 × 4	0.786	0.93	0.190	0.346	1.82	
				1.5 × 8	1.020	1.56	0.319	0.346	1.08	
				1.5 × 12	1.118	1.87	0.383	0.346	0.90	*

表 9.13(b) 脆性破壊発生検討結果（32,000kl タンク）※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)			$\delta (mm)$	$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.5 × 4	0.773	0.90	0.117	0.356	3.04	
				1.5 × 8	0.979	1.44	0.188	0.356	1.90	
				1.5 × 12	1.055	1.67	0.218	0.356	1.63	

表 9.13(c) 脆性破壊発生検討結果（110,000kl タンク）※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)			$\delta (mm)$	$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.5 × 4	0.770	0.89	0.083	0.356	4.31	
				1.5 × 8	0.970	1.41	0.131	0.356	2.72	
				1.5 × 12	1.041	1.63	0.151	0.356	2.36	

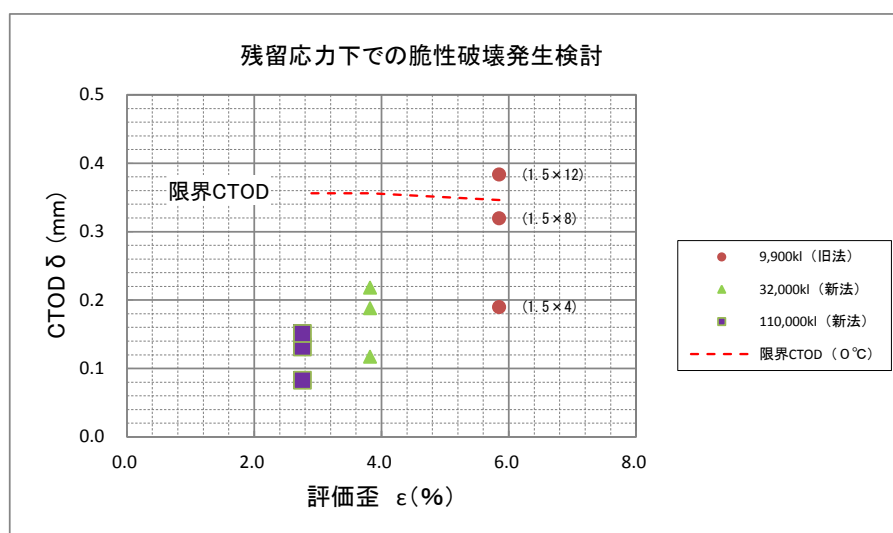


図 9.27 脆性破壊発生検討結果（初期亀裂）

図 9.27 より、【旧法】9,900kl タンクでは、初期亀裂の深さが 1.5mm で、亀裂長さが 4mm～8mm 程度の表面亀裂であれば、脆性破壊に対して少なくとも 1.08 倍程度以上の余裕度を有するが、亀裂長さが 12mm 程度になると脆性破壊に対する余裕度は確保出来ない。

一方、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクでは、初期亀裂の深さが 1.5mm で、長さが 4mm～12mm 程度であれば、脆性破壊に対して少なくとも 1.6 倍以上の余裕度を有している。

（3）亀裂進展後の脆性破壊発生検討

地震時底板浮上り挙動による繰返し（100 回想定）に対して、進展後の亀裂から脆性破壊発生の可能性を検討した結果を、表 9.14 及びに図 9.28 示す。

表 9.14(a) 脆性破壊発生検討結果（旧法 9,900kl タンク）※荷重繰返し 50 回

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c}$ (mm)	CTOD δ (mm)	限界CTOD δ_{cr} (mm)	余裕度 δ_{cr} / δ	備考
				(a × 2c)						
①	側板 × アニュラ板	T継手	溶接線に平行	2.97 × 22.37	1.324	5.21	1.066	0.346	0.32	*
				3.33 × 28.52	1.467	7.16	1.465	0.346	0.24	*
				3.63 × 34.58	1.615	9.47	1.936	0.346	0.18	*

表 9.14(b) 脆性破壊発生検討結果（32,000kl タンク）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c}$ (mm)	CTOD δ (mm)	限界CTOD δ_{cr} (mm)	余裕度 δ_{cr} / δ	備考
				(a × 2c)						
①	側板 × アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.91 × 7.76	0.916	1.60	0.209	0.356	1.70	
				2.13 × 11.31	0.993	2.10	0.274	0.356	1.30	
				2.27 × 14.79	1.044	2.48	0.323	0.356	1.10	

表 9.14(c) 脆性破壊発生検討結果（110,000kl タンク）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a × 2c)			係数 F_t	特性寸法 $\bar{c}$ (mm)	CTOD δ (mm)	限界CTOD δ_{cr} (mm)	余裕度 δ_{cr} / δ	備考
①	側板 × アニュラ板	T継手	溶接線に 平行	1.61	×	5.05	0.826	1.10	0.102	0.356	3.49	
				1.69	×	8.82	0.966	1.58	0.147	0.356	2.43	
				1.74	×	12.61	1.029	1.84	0.171	0.356	2.08	

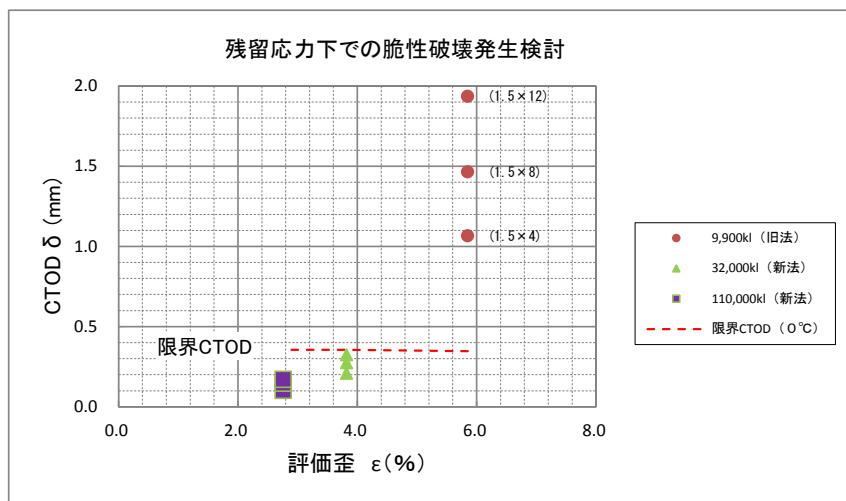


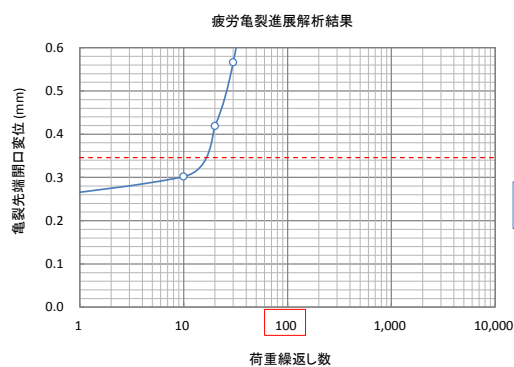
図 9.28 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

※旧法 9,900kl タンクは荷重繰返し 50 回

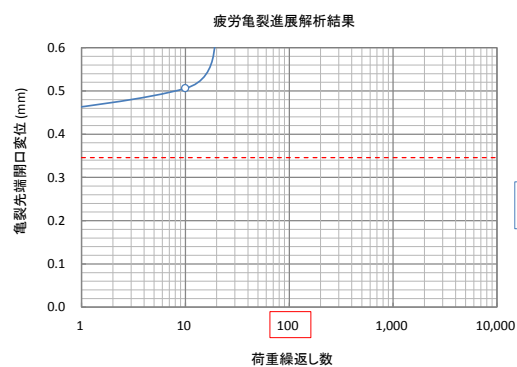
図 9.28 より、【旧法】9,900kl タンクでは、初期亀裂の深さが 1.5mm で、亀裂長さが 4mm～12mm 程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクでは、上記の初期亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも 1.1 倍以上の余裕度を有している。

(補足) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

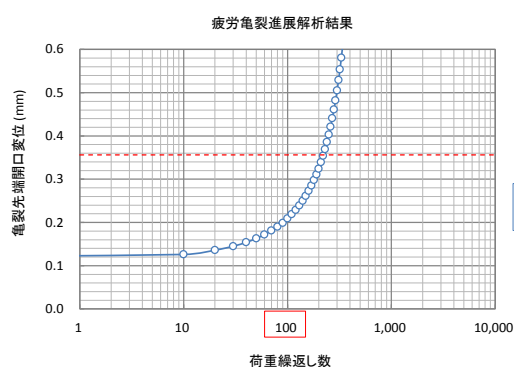


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

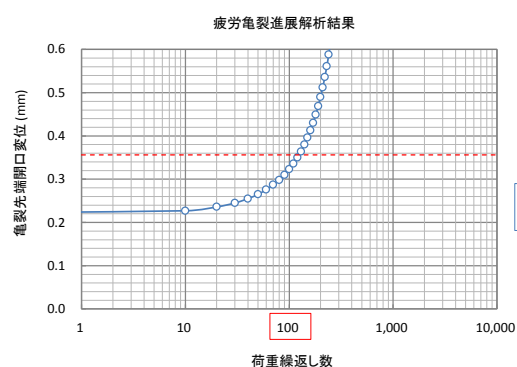


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9. 29 (a) 亀裂先端開口変位 (旧法 9, 900kI タンク)

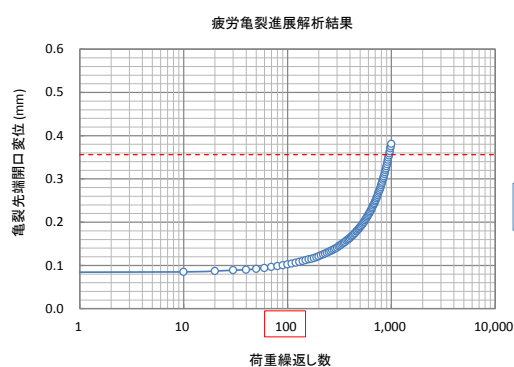


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

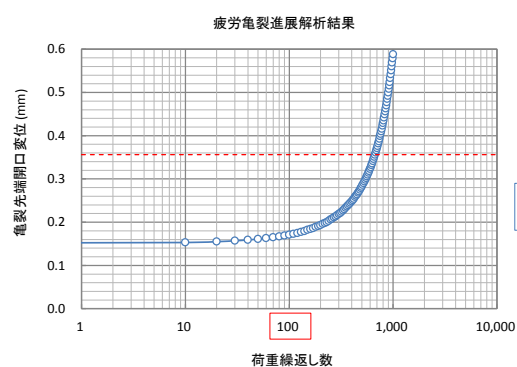


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9. 29 (b) 亀裂先端開口変位 (32, 000kI タンク)



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9. 29 (c) 亀裂先端開口変位 (110, 000kI タンク)

9.4.2 アニュラ板相互溶接継手（突合せ溶接）

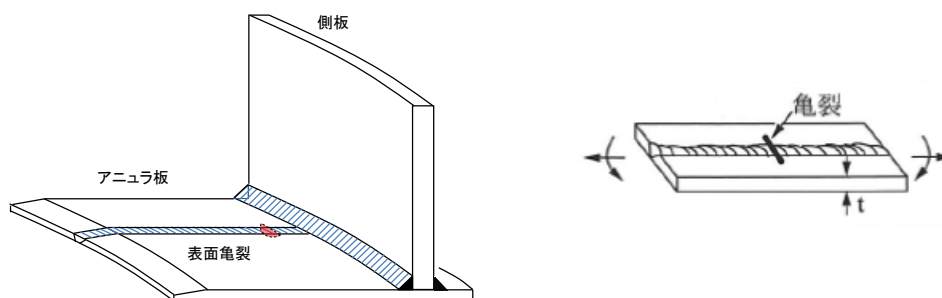


図 9.30 アニュラ板相互溶接継手（直角）

（1）亀裂先端開口変位 CTOD の算定

側板内面近傍のアニュラ板相互突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に直角に位置する場合を想定して、突合せ溶接止端部の応力集中係数を $K=1.0$ （表 9.10）と置くと、応力集中部に作用する局所歪 ε より、CTOD 設計曲線（図 9.31）を用いて当該箇所に存在する亀裂の開口変位 CTOD δ を評価した結果を、表 9.15 に示す。

表 9.15(a) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（旧法 9,900kI タンク）

記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	3.228%	0.071%	0.000%	3.299%	0.119%	27.73	96.06

表 9.15(b) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（32,000kI タンク）

記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	2.077%	0.143%	0.000%	2.220%	0.238%	9.33	31.01

表 9.15(c) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（110,000kI タンク）

記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.486%	0.143%	0.000%	1.629%	0.238%	6.85	22.23

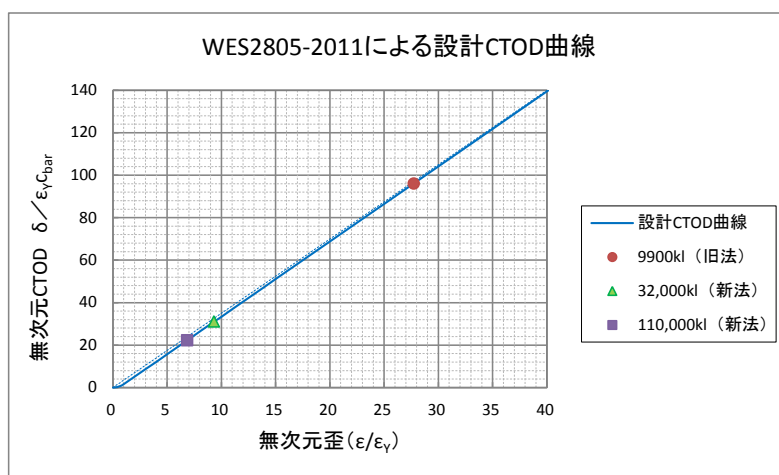


図 9.31 CTOD 設計曲線（アニュラ板相互）

（４）脆性破壊発生検討（初期亀裂）

地震時底板浮上り挙動による繰返し（100 回想定）に対して、初期亀裂において脆性破壊発生の可能性を検討した結果を、表 9.16 及び図 9.32 に示す。

表 9.16(a) 脆性破壊発生検討結果（旧法 9,900kl タンク）※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)			$\delta (mm)$	$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.5 × 4	0.786	0.93	0.106	0.346	3.27	
				1.5 × 8	1.019	1.56	0.178	0.346	1.94	
				1.5 × 12	1.118	1.87	0.214	0.346	1.62	

表 9.16(b) 脆性破壊発生検討結果（32,000kl タンク）※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)			$\delta (mm)$	$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.5 × 4	0.773	0.90	0.066	0.356	5.38	
				1.5 × 8	0.979	1.44	0.106	0.356	3.36	
				1.5 × 12	1.054	1.67	0.123	0.356	2.89	

表 9.16(c) 脆性破壊発生検討結果（110,000kl タンク）※初期亀裂

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} (mm)$	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				($a \times 2c$)			$\delta (mm)$	$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.5 × 4	0.770	0.89	0.047	0.356	7.56	
				1.5 × 8	0.970	1.41	0.075	0.356	4.77	
				1.5 × 12	1.041	1.63	0.086	0.356	4.14	

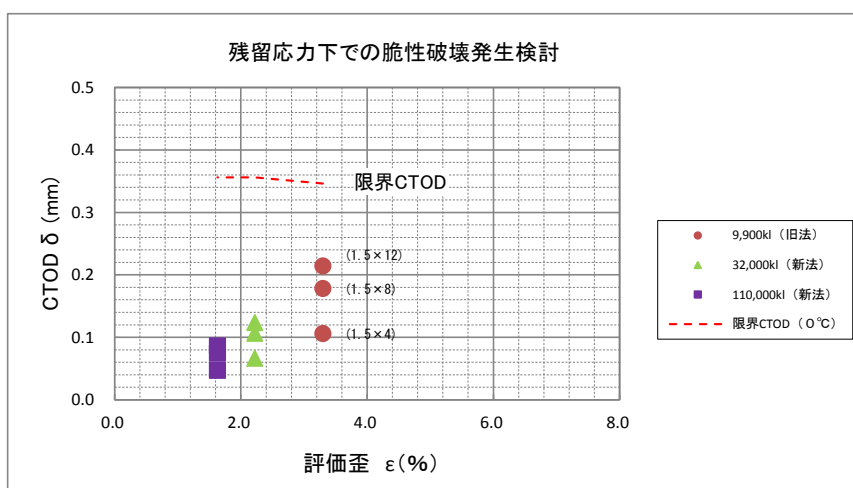


図 9.32 脆性破壊発生検討結果（初期亀裂）

図 9.32 より、【旧法】9,900kl タンク、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクで、初期亀裂の深さが 1.5mm で、亀裂長さが 4mm～12mm 程度の表面亀裂であれば、脆性破壊に対して少なくとも 1.6 倍以上の余裕度を有している。

（５）亀裂進展後の脆性破壊発生検討

地震時底板浮上り挙動による繰返し（100 回想定）に対して、進展後の亀裂から脆性破壊発生の可能性を検討した結果を、表 9.17 及び図 9.33 に示す。

表 9.17(a) 脆性破壊発生検討結果（旧法 9,900kl タンク）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				(a × 2c)	F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr} / δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	3.03 × 12.87	1.064	3.43	0.392	0.346	0.88	*
				3.60 × 19.55	1.258	5.70	0.651	0.346	0.53	*
				4.00 × 25.86	1.432	8.20	0.937	0.346	0.37	*

表 9.17(b) 脆性破壊発生検討結果（32,000kl タンク）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂	係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				(a × 2c)	F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr} / δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.79 × 4.76	0.774	1.07	0.079	0.356	4.50	
				2.07 × 8.70	0.929	1.79	0.132	0.356	2.70	
				2.24 × 12.59	1.010	2.28	0.169	0.356	2.11	

表 9.17(c) 脆性破壊発生検討結果（110,000kl タンク）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の 方向	表面亀裂		係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考	
				(a×2c)								F_t
①	アニユラ板 相互	突合せ	溶接線に 直角	1.60	×	4.21	0.766	0.94	0.050	0.356	7.18	
				1.69	×	8.17	0.949	1.52	0.080	0.356	4.42	
				1.74	×	12.12	1.022	1.82	0.096	0.356	3.70	

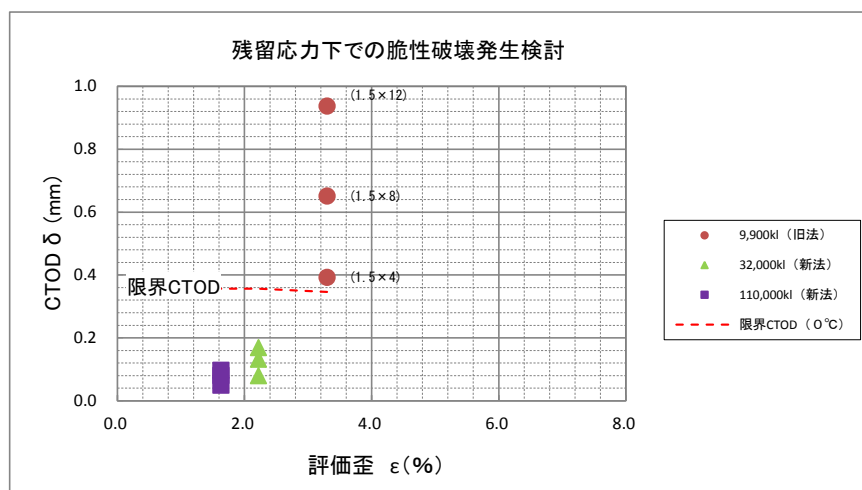
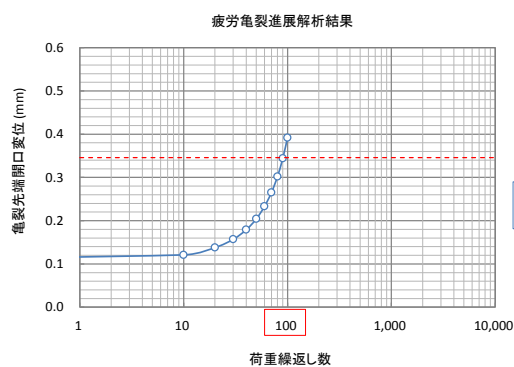


図 9.33 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

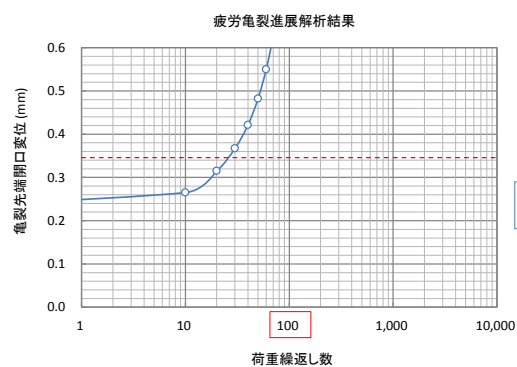
図 9.33 より、【旧法】9,900kl タンクでは、初期亀裂の深さが 1.5mm で、亀裂長さが 4mm～12mm 程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクでは、初期亀裂の深さが 1.5mm で、亀裂長さが 4mm～12mm 程度の表面亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも 1.9 倍以上の余裕度を有している。

(補足) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

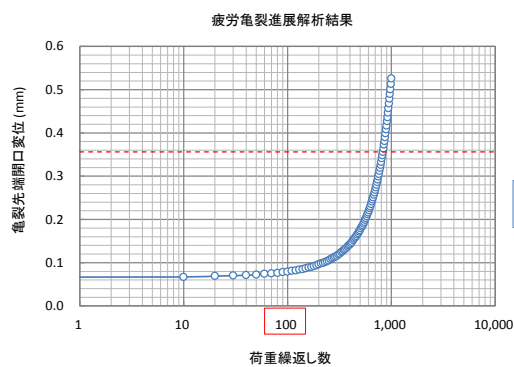


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

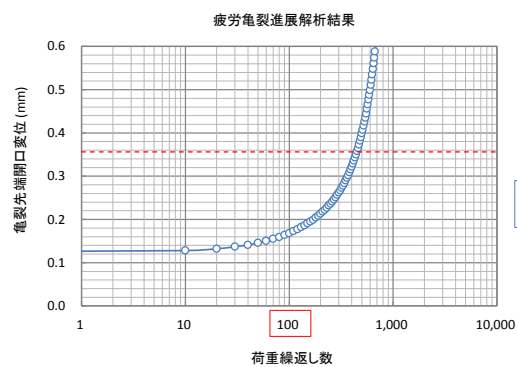


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.34(a) 亀裂先端開口変位 (旧法 9,900kI タンク)

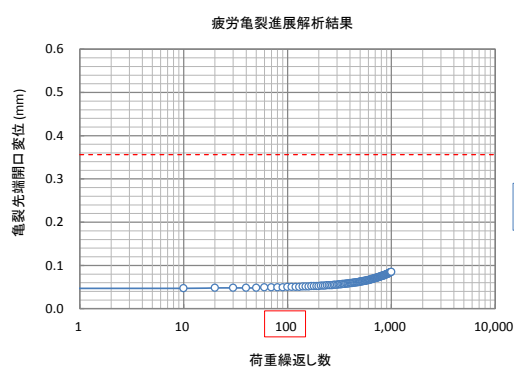


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

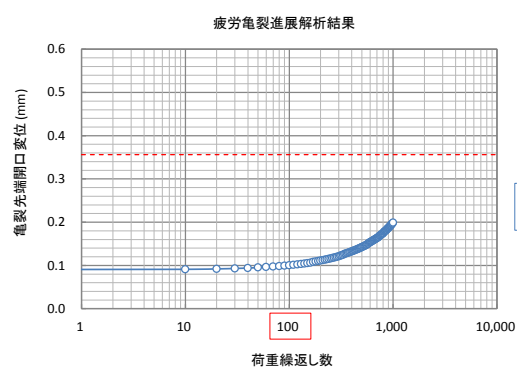


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.34(b) 亀裂先端開口変位 (32,000kI タンク)



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.34(c) 亀裂先端開口変位 (110,000kI タンク)

10. まとめ

10.1 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用

既往の調査検討¹⁾では、底板に対する空液～満液までの荷重繰返し回数を 1000 回（設計寿命 50 年）に設定しており、今回の調査検討においても継続的な観点から、通常運転時の荷重繰返し回数を 1000 回と仮置きした（表 8.1）。

表 8.1 底板の照査荷重条件

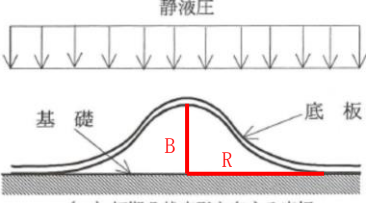
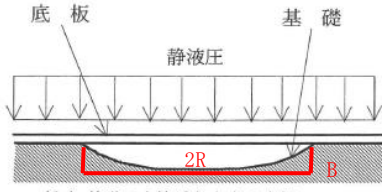
【通常時】初期凸状変形を有する底板	【通常時】基礎不支持域を有する底板
不陸高さ（B）を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価 $y = B \left\{ \left(\frac{x}{R} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{R} \right)^2 + 1 \right\}$  （a）初期凸状変形を有する底板	 （b）基礎不支持域を有する底板

表 8.2 に、解析対象タンクを示す。このうち、【旧法】9,900kl タンク及び【新法】32,000kl タンクの底板は「重ね継手」形式を採用していることから、今回の解析対象から除外することとし、ここでは【新法】110,000kl タンクのみを解析対象とする。

表 8.2 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	底板			備考
						材質	板厚	継手	
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6 mm	重ね	対象外
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SS400	9 mm	重ね	対象外
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SS400	12 mm	突合せ	検討対象

解析では、表 8.4 に示す 3 種類の不陸範囲 R（半幅）を設定した。尚、不陸高さ B の全幅（2R）に対する割合は約 1/32 となる。

表 8.4 不陸高さ和不陸範囲

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸高さ B (mm)	備考
1	500	30.83	$\frac{B}{2R} \cong 1/32$
2	1000	61.66	
3	1500	92.49	

10.1.1 初期不整（凸型変形）を有する底板の検討結果

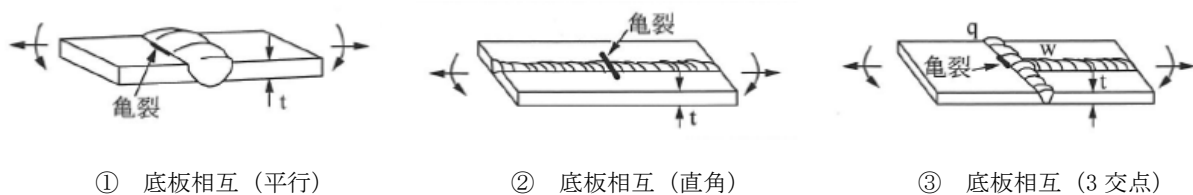


図 8.19 表面亀裂を有する底板溶接継手

（1）疲労亀裂進展解析結果

初期不整（凸型変形）を有する底板の場合、溶接線近傍の表面亀裂については、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し回数（想定 1000 回）に対して、表面亀裂進展の進展は殆ど認められない。

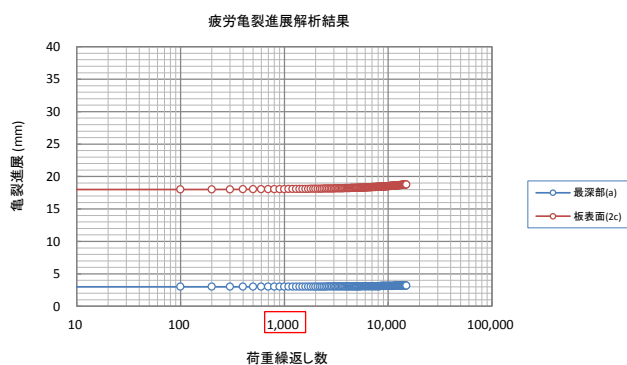
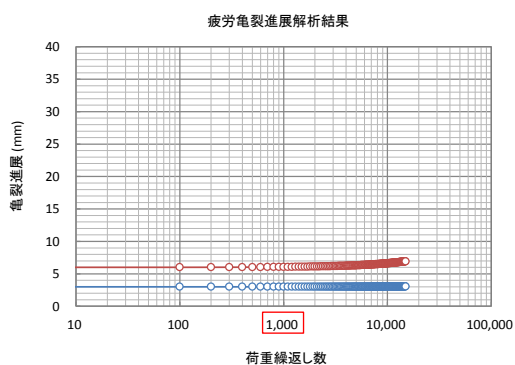
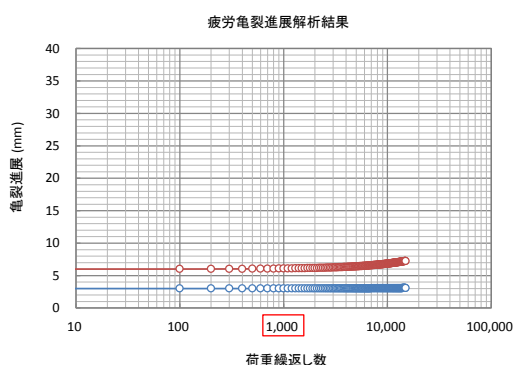
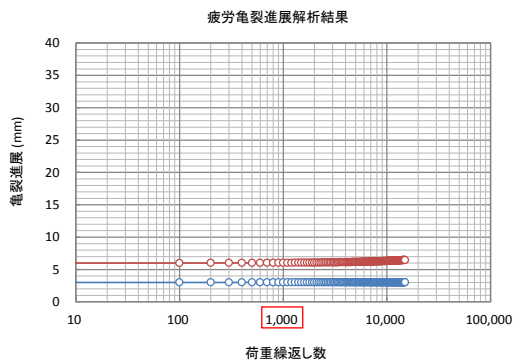


図 8.11 (a) 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 R=500mm）

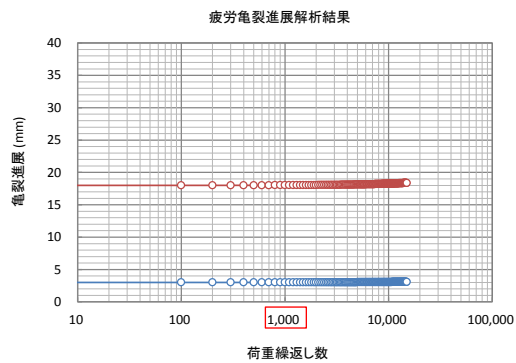


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8.11 (b) 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 R=1000mm）



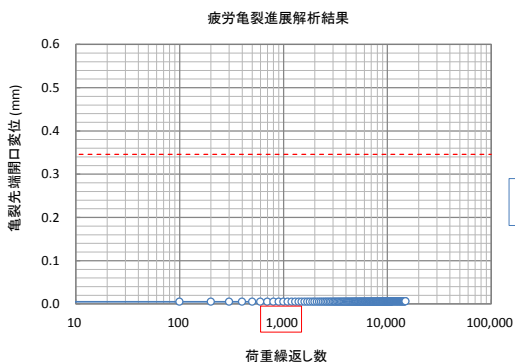
初期亀裂 (3mm×6mm)



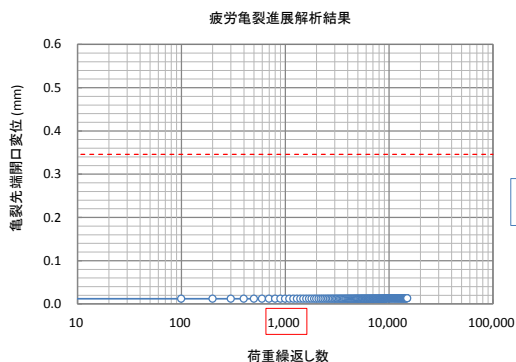
初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 11 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (不陸範囲 R=1500mm)

(2) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

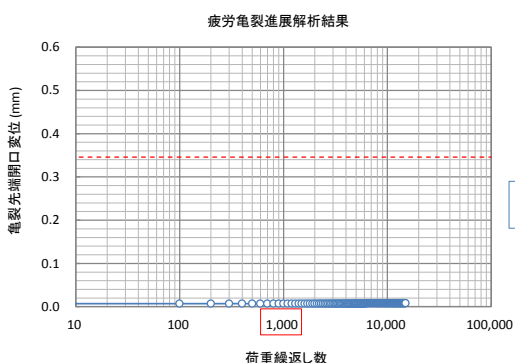


初期亀裂 (3mm×6mm)

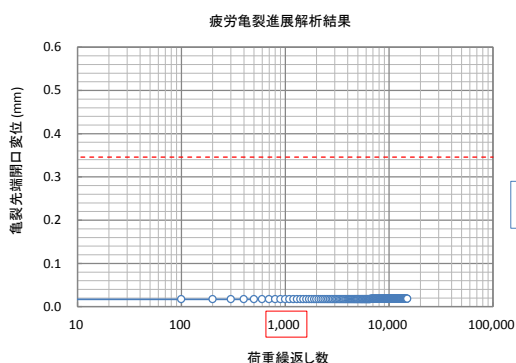


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 22 a) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=500mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 22 (b) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=1000mm)

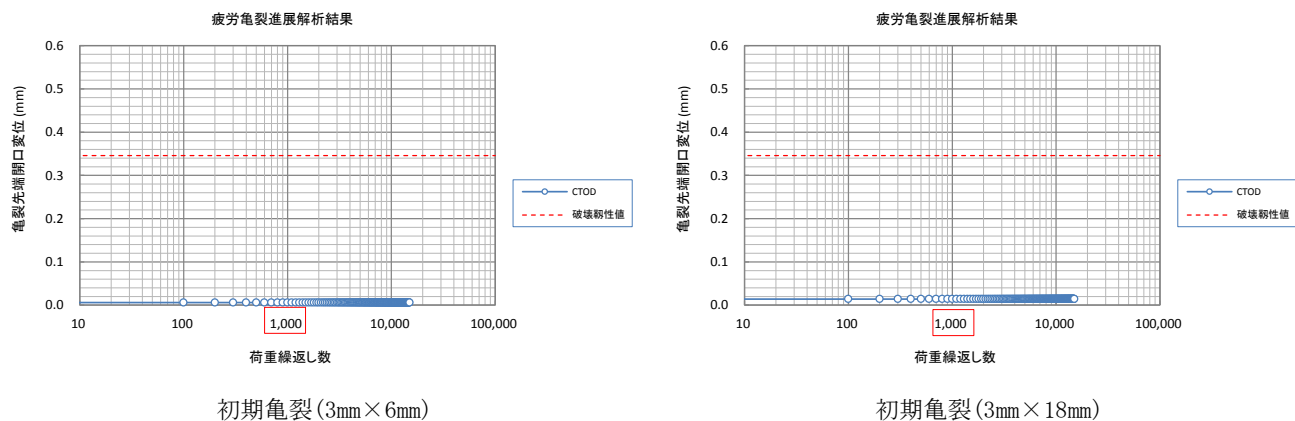


図 8. 22 (c) 亀裂先端開口変位（不陸範囲 R=1500mm）

（3）残留応力場での脆性破壊発生検討結果

検討結果より、底板突合せ溶接継手に亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm～18mm の半楕円表面亀裂を想定した場合、最大歪み（ $\varepsilon_{\max}=0.074\%$ ）における脆性破壊発生に対して 20 倍程度以上の余裕度（＝限界 CTOD／CTOD）を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は極めて小さいと判断される。

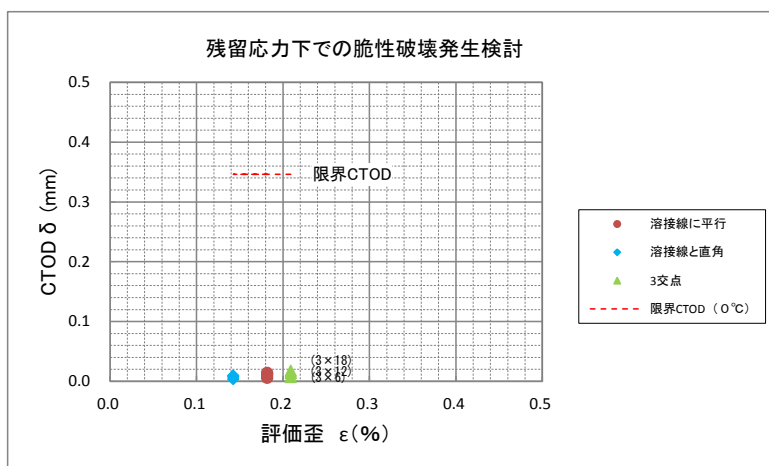
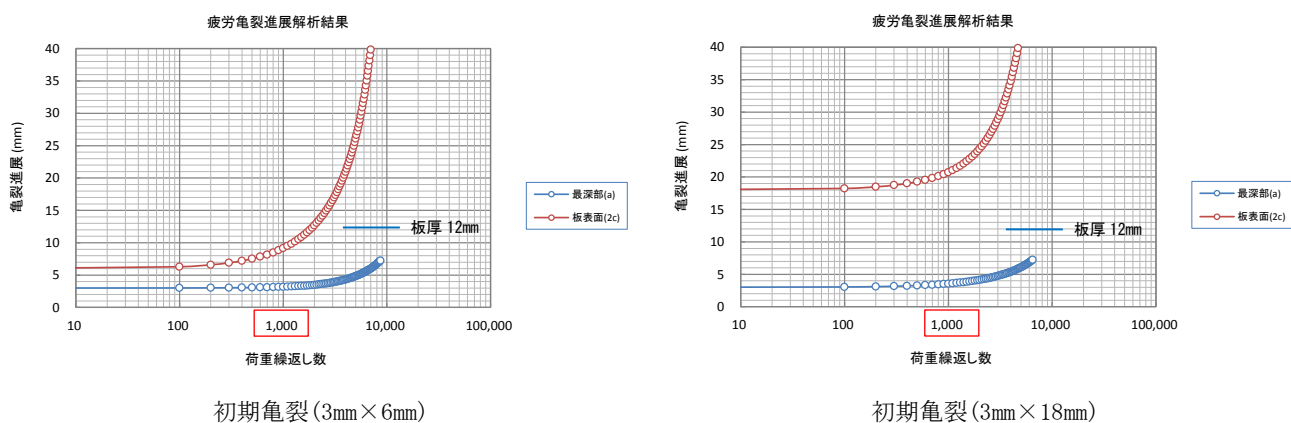
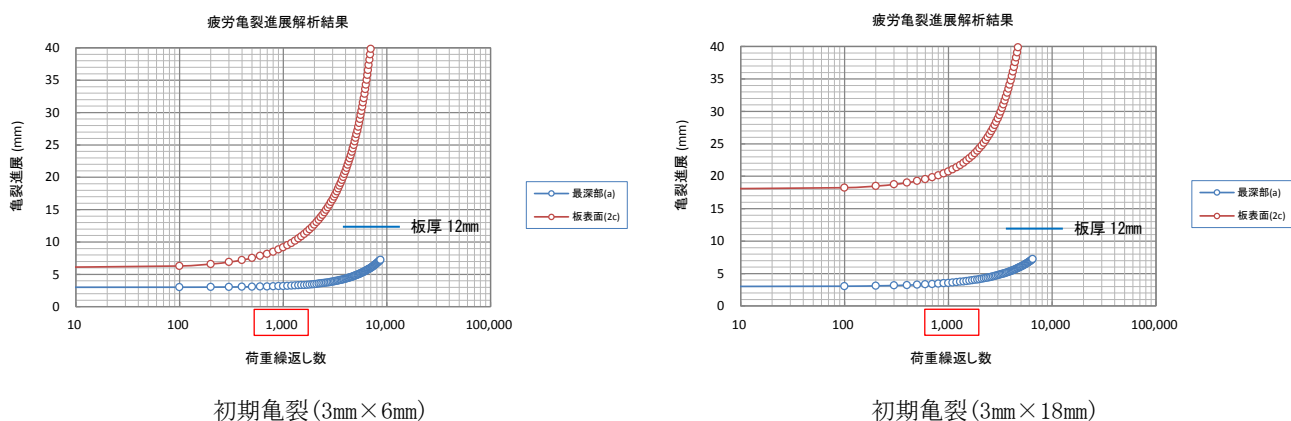
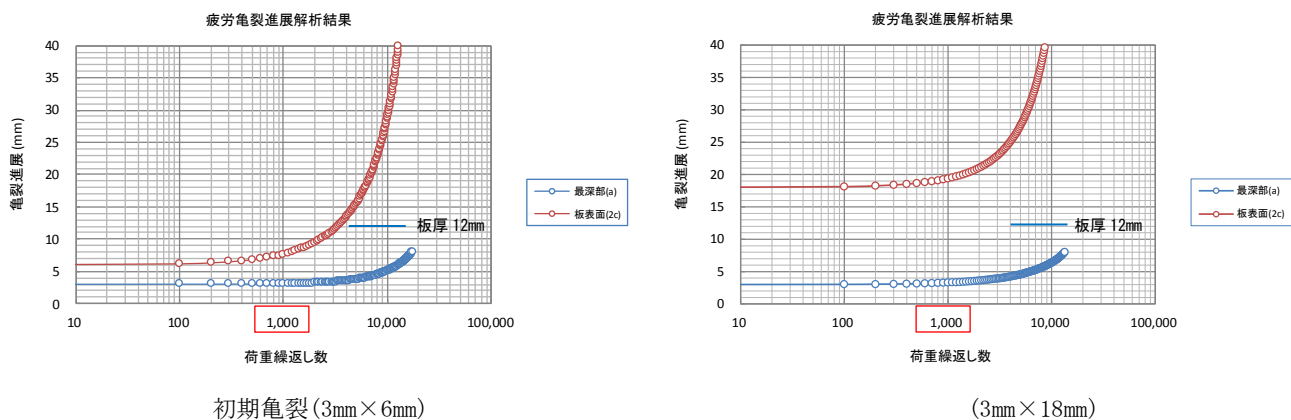


図 8. 21 脆性破壊発生検討結果（不陸範囲 R=1500mm）

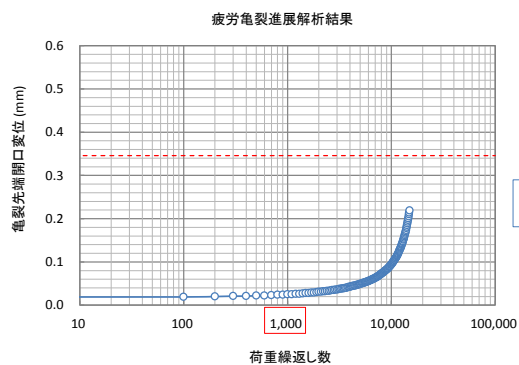
10.1.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果

（１）疲労亀裂進展解析結果

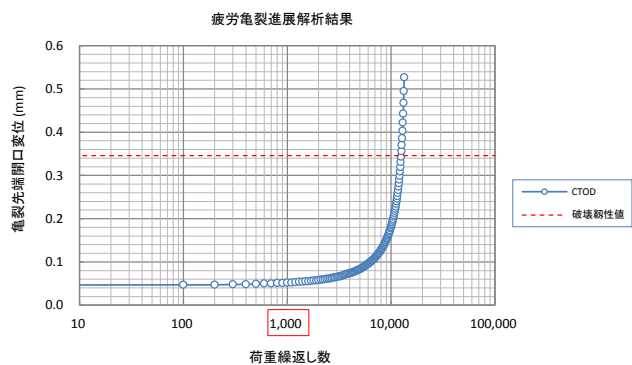
局部沈下（凹型変形）を有する底板の場合、溶接線近傍の表面亀裂については、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し回数（想定 1000 回）に対して、表面亀裂進展の進展は殆ど認められない。



(2) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

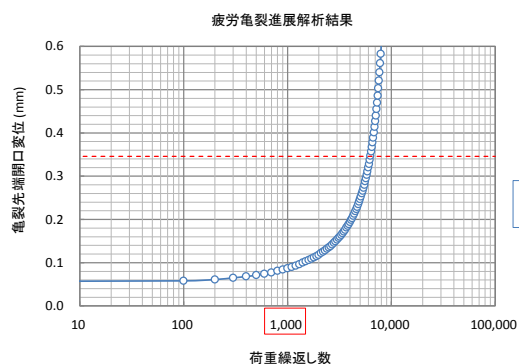


初期亀裂 (3mm×6mm)

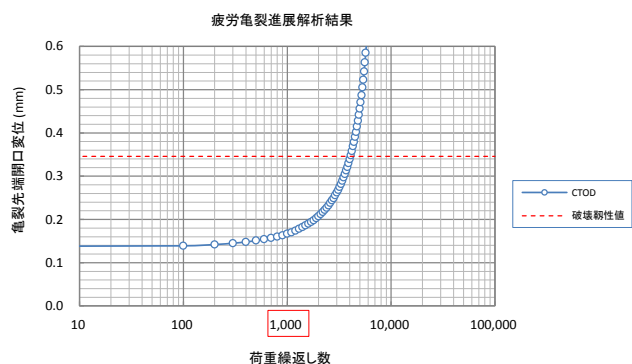


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 26 (a) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=500mm)

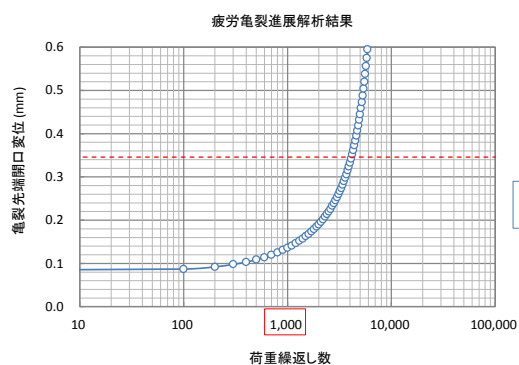


初期亀裂 (3mm×6mm)

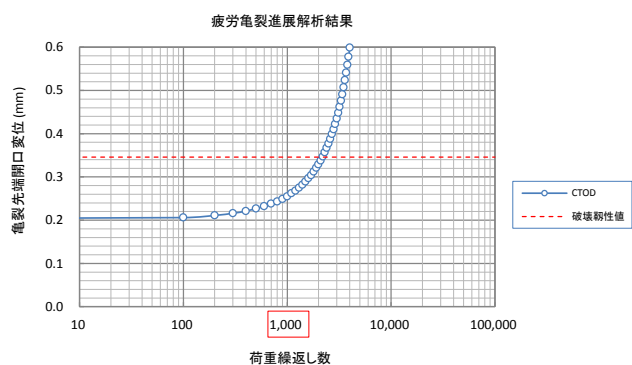


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 26 (b) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1000mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 26 (c) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1500mm)

(3) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

検討結果より、底板突合せ溶接継手に亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm～18mm の半楕円表面亀裂を想定し、液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し（1000 回程度）を受けた場合、疲労亀裂進展後の脆性破壊発生に対して、最も厳しい条件下においても 1.3 倍程度以上の余裕度（＝限界 CTOD／CTOD）を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は小さいと判断される。

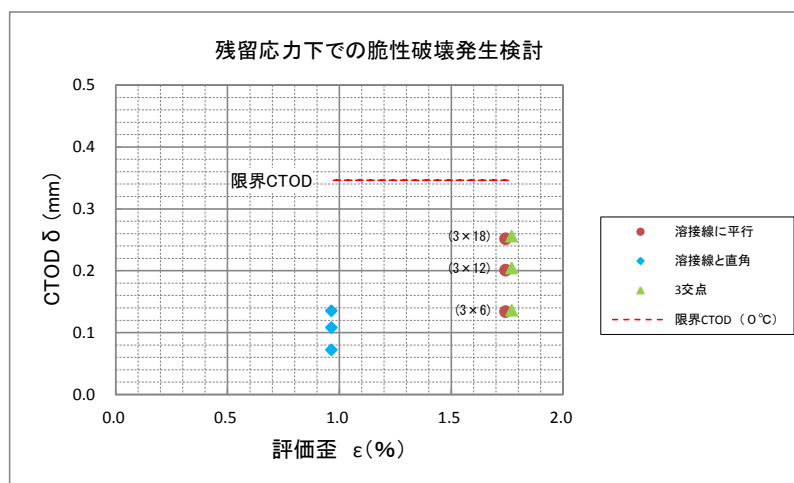


図 8. 25 (c) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1500mm）※亀裂進展後

10.1.3 供用期間中の受払回数（推定）

表 4.5 の H29 年度アンケート調査における事業所からの回答に基づき、業態別の年間受入れ払出し回数を整理した（図 4.13）。ここでは、タンクの供用期間を 50 年と仮定して、この年間受払回数に供用期間 50 年を乗じることにより、タンク供用期間中の受払回数を推定した。図 10.1(a)～図 10.1(e)に、業態別のタンク供用期間中の受払回数（推定）を示す。

表 4.5 タンク受払回数の調査基数

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000～5,000	8	9	10	10	5	総計 152 基
II	5,000～10,000	8	8	9	9	5	
III	10,000～50,000	9	7	8	10	5	
IV	50,000～100,000	10	–	2	9	–	
V	100,000 超	5	1	–	–	5	
	合計	40	25	29	38	20	

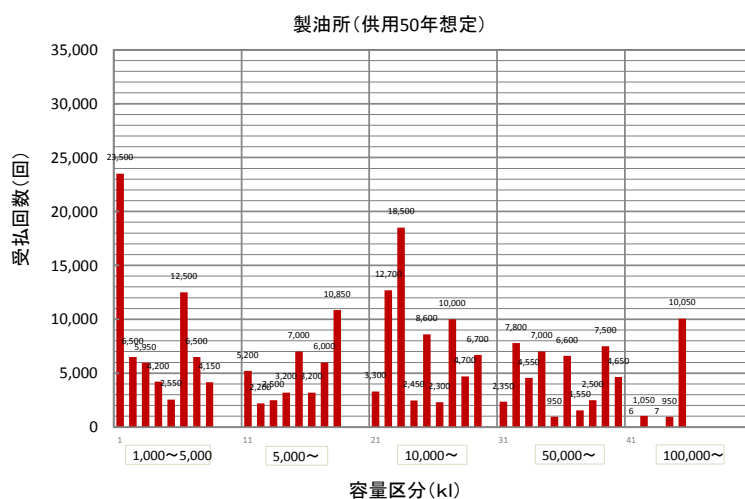


図 10.1(a) 供用期間中の受払回数（製油所）

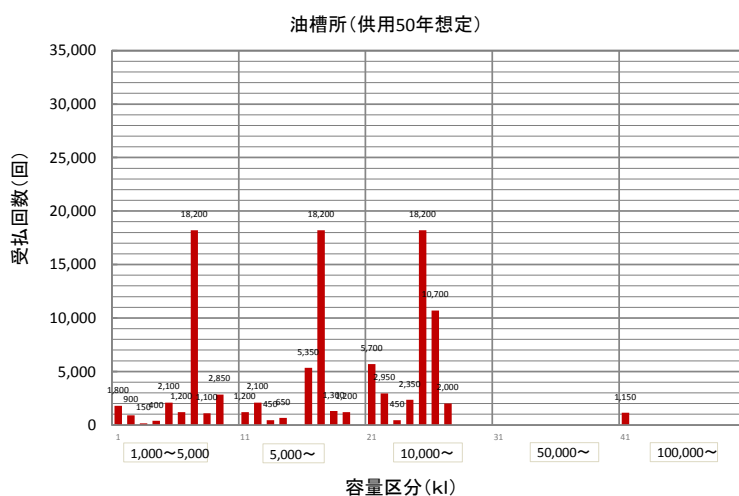


図 10.1(b) 供用期間中の受払回数（油槽所）

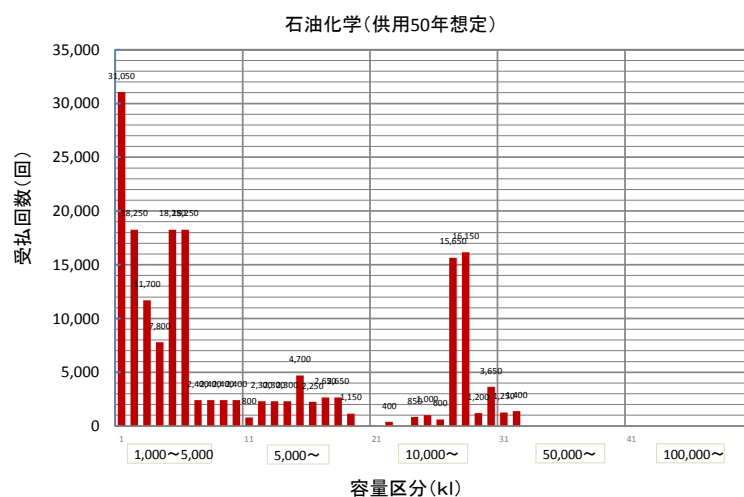


図 10.1 (c) 供用期間中の受払回数 (石油化学)

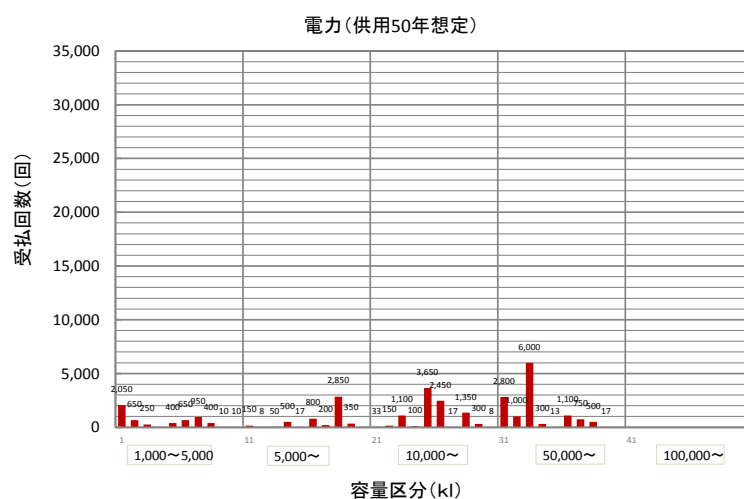


図 10.1 (d) 供用期間中の受払回数 (電力)

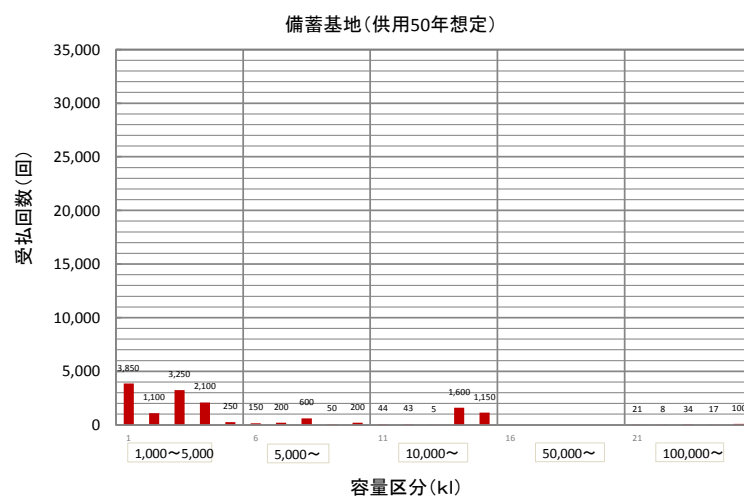


図 10.1 (e) 供用期間中の受払回数 (備蓄基地)

更に、タンク業態別の供用期間（供用 50 年）中の平均的な受払回数を、表 10.1 及び図 10.2 に示す。同図より、業態別にタンクの運用が異なることから、それに応じて供用期間中の受払回数も大きく異なるのが分かる。

表 10.1 供用期間中の平均受払回数想定

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000～5,000	8,231 (23,500)	3,189 (18,200)	11,490 (31,050)	597 (2,050)	2,110 (3,850)	
II	5,000～10,000	5,019 (10,850)	3,806 (18,200)	2,344 (4,700)	597 (2,850)	240 (600)	
III	10,000～50,000	7,694 (18,500)	6,050 (18,200)	4,938 (16,150)	916 (3,650)	568 (1,600)	
IV	50,000～100,000	3,835 (7,800)	—	1,325 (1,400)	1,387 (6,000)	—	
V	100,000 超	2,413 (10,050)	1,150 (1,150)	—	—	36 (100)	

注：（ ）内は最大受払回数

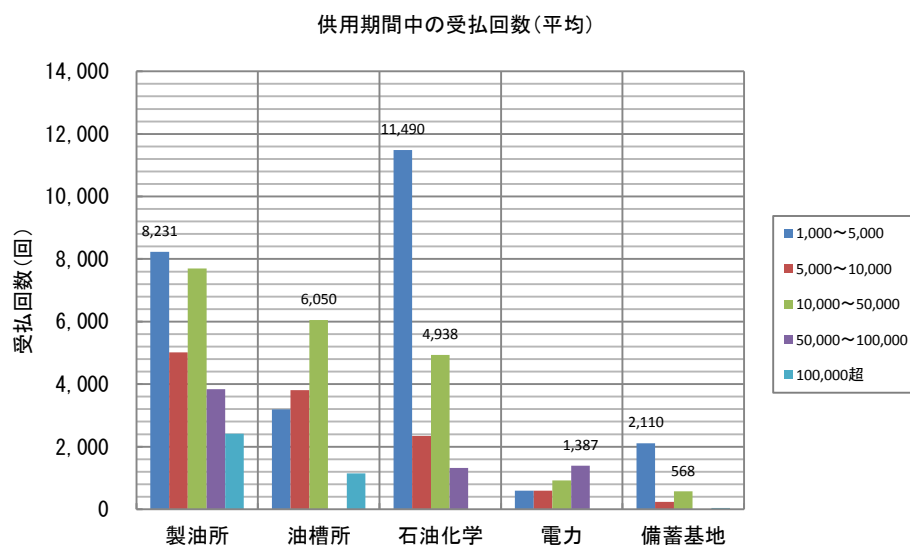


図 10.2 供用期間中の受払回数（平均）

従って、前出の「初期不整又は局部沈下を有する底板の疲労亀裂進展解析」では、荷重の繰返し回数を一律 1000 回（設計寿命 50 年）と仮定して、タンクの安全性に対する評価を行ったが、実際的には、タンク個別に業態別の運用状況（受払回数）に基づく荷重繰返し回数を設定して、疲労亀裂の進展性及び脆性破壊発生に対する評価を行うのが合理的である。

10.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

タンク隅角部溶接継手亀裂の照査用荷重として、高レベル地震時のタンク隅角部の浮上り現象に対するアニュラ板の終局強度を考えた。

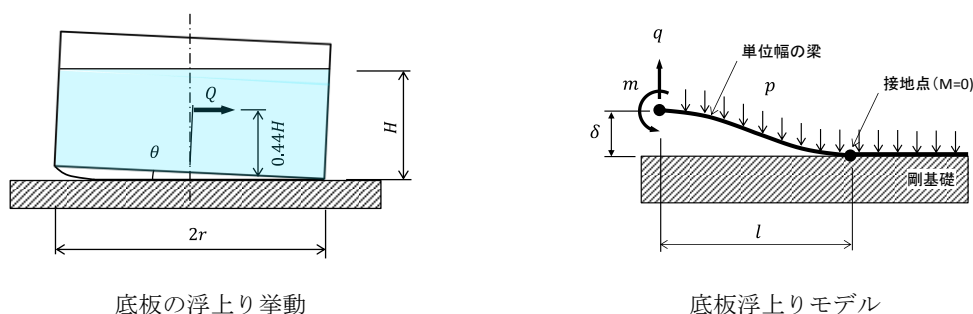


図 9.1 タンク底板浮上り挙動

ここで、タンク隅角部浮上り終局変位 δ_B は、底板の鋼種に応じて次式で得られる（告示 79 号）。

・ 降伏比が 80%未満の場合， $\delta_B = 14\delta_y$ (9.9a)

・ 降伏比が 80%以上の場合， $\delta_B = 4\delta_y$ (9.9b)

従って、解析結果については、アニュラ板の鋼種に応じて整理する。

表 9.2 に、H29 年度及び H30 年度に検討した解析対象タンクを示す。

表 9.2 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)			終局変位 δ_B (mm)	備考
							底板	アニュラ板	側板		
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6	6	18	67.9	$\delta_B = 14\delta_y$
新基準	9,900	29,000	16,730	15,000	1.0	SS400	6	9	18	93.6	〃
新法	18,200	34,500	22,695	19,470	1.0	SM490C	9	12	20	169.2	$\delta_B = 14\delta_y$
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20	107.1	$\delta_B = 4\delta_y$
新法	60,000	62,800	22,000	19,800	1.0	SPV490Q	12	18	26	162.1	〃
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36	178.6	$\delta_B = 4\delta_y$

【注記】 □内は H30 年度追加解析を示す。

図 9.4 (H29 年度) の底板浮き上がりによるタンク全体の傾斜角度に、H30 年度に解析したタンクを追加して示す。同図より、18,200kl タンク(材質 SM490C)を除き、全体の傾斜角度 θ は概ね同じ程度となる。

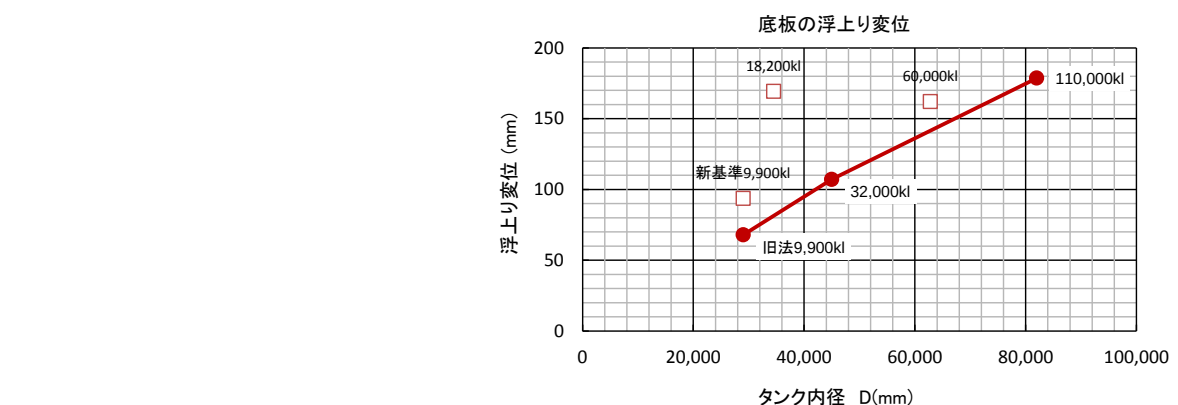


図 9.4(a) 底版の浮上り変位

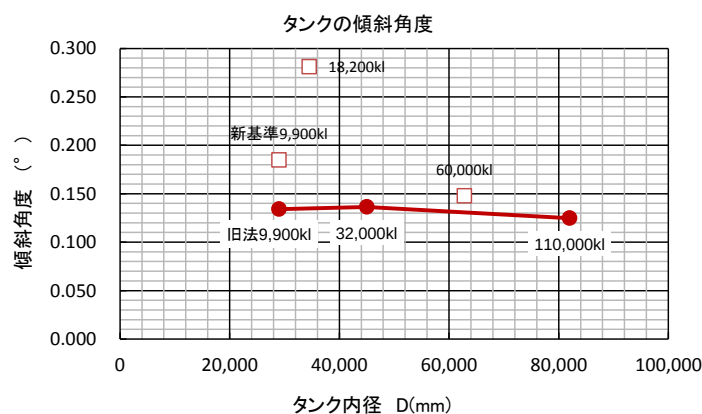
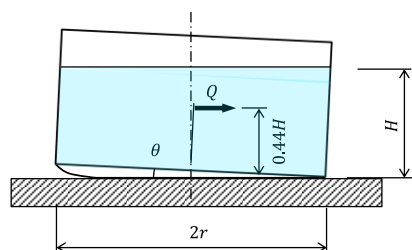


図 9.4(b) タンクの全体傾斜角度

【注記】 白抜き口は H30 年度解析を示す。

尚、何れも 1 回の地震における実質的な底板浮上り回数は、高々数回程度と見込まれ、タンク供用期間中に遭遇する高レベル地震の回数を考慮しても、タンク隅角部底板の浮上り挙動は高々 100 回程度と考えられることから、高レベル地震時のタンク隅角部浮上り挙動に対する荷重繰返し回数 100 回を採用した。

10.2.1 側板×アニュラ板溶接継手

地震時の底板浮上り挙動（想定 100 回）に対して、側板×アニュラ板溶接継手部の隅肉溶接止端部に想定した表面亀裂（溶接線に平行）の疲労亀裂進展解析及び脆性破壊発生検討の結果は、以下の通り。

尚、当該部位には、構造不連続による歪みと、側板内面の隅肉溶接止端部による応力集中による歪み及び残留応力による歪みを考慮した（図 9.10）。

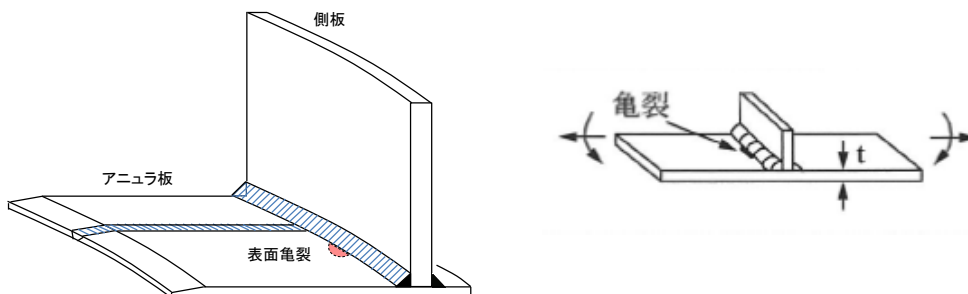


図 9.17 側板×アニュラ板溶接継手（T 継手）

（１）降伏比が 80%未満の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニュラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400、溶接構造用鋼板 SM490 等の低強度鋼板が採用されている。この場合、材料の降伏比（＝降伏点／引張強度）は 80%未満となる（表 10.2）。

表 10.2 アニュラ板の降伏比（その 1）

材質	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_B (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_B	備考
SS400	245	400	0.61	$t \leq 16$
SM490	325	490	0.66	$t \leq 16$

a) 疲労亀裂進展解析結果

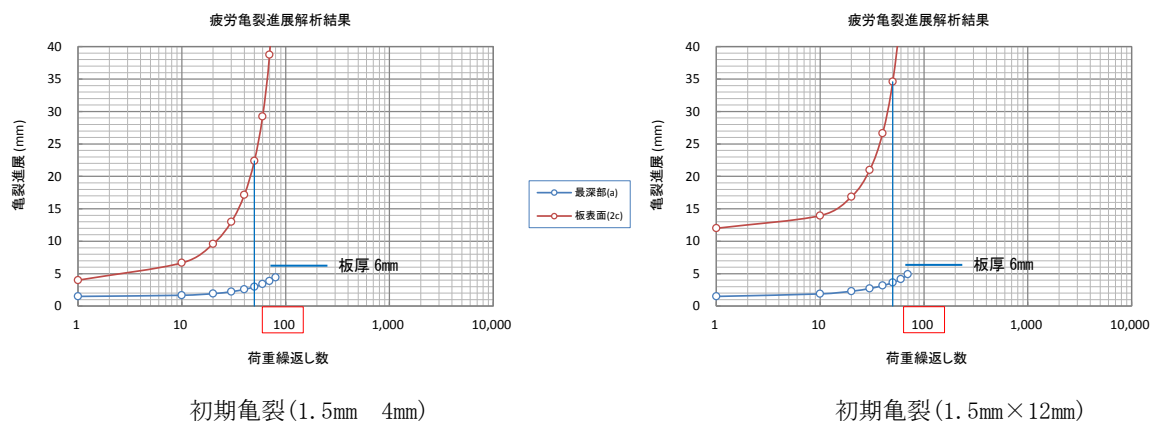
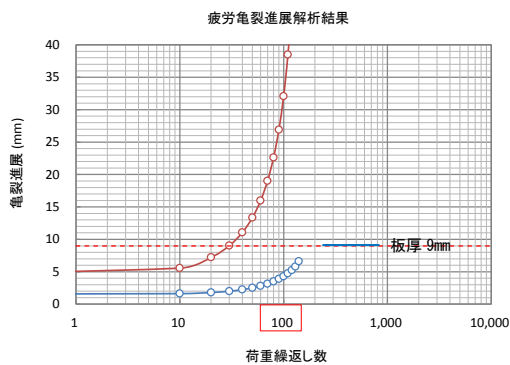
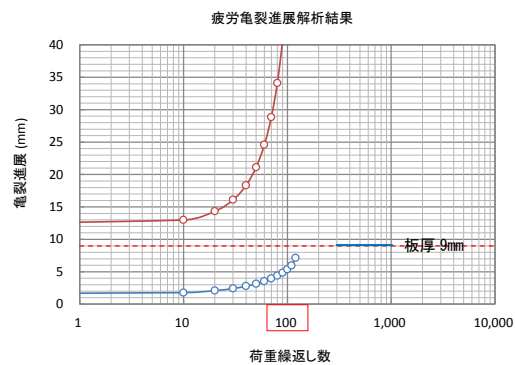


図 9.18 (a) 疲労亀裂進展解析結果（旧法 9,900kl タンク）

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 6mm



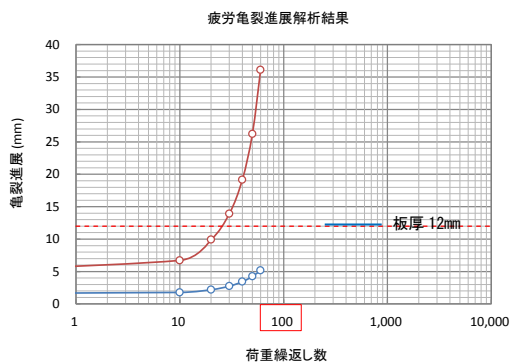
初期亀裂(1.5mm×4mm)



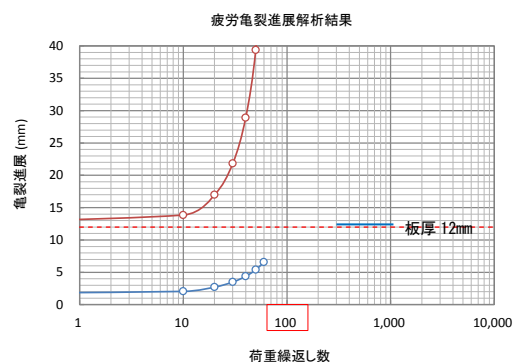
初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 4.6 疲労亀裂進展解析結果(新基準 9,900kl タンク)

【アニユラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



初期亀裂(1.5mm×4mm)

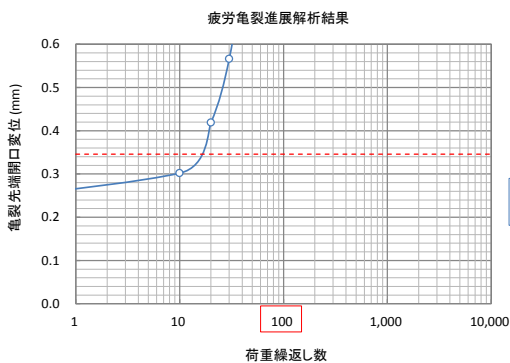


初期亀裂(1.5mm×12mm)

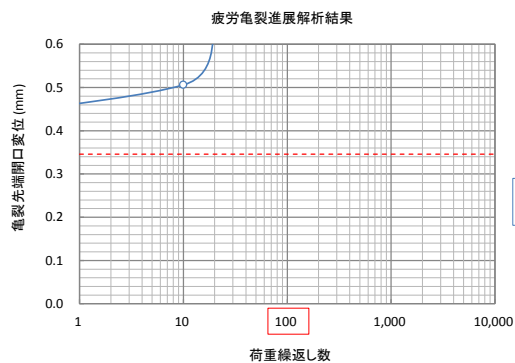
付図 5.6 疲労亀裂進展解析結果(18,200kl タンク)

【アニユラ板】材質 SM490C, 板厚 12mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



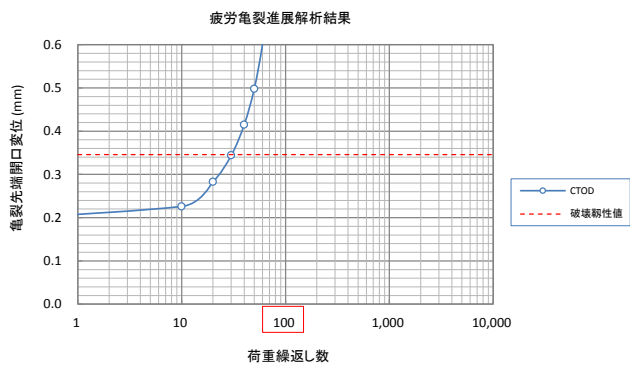
初期亀裂(1.5mm×4mm)



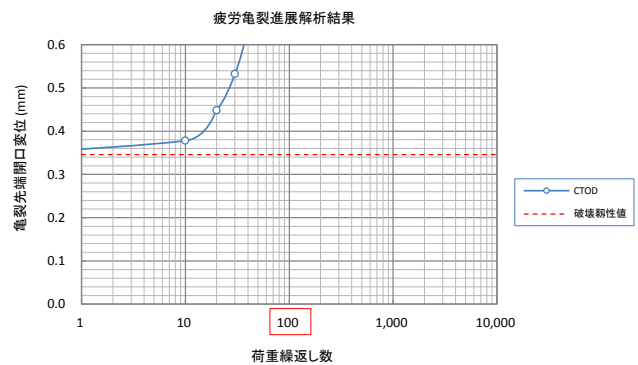
初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.29(a) 亀裂先端開口変位(旧法 9,900kl タンク)

【アニユラ板】材質 SS400, 板厚 6mm



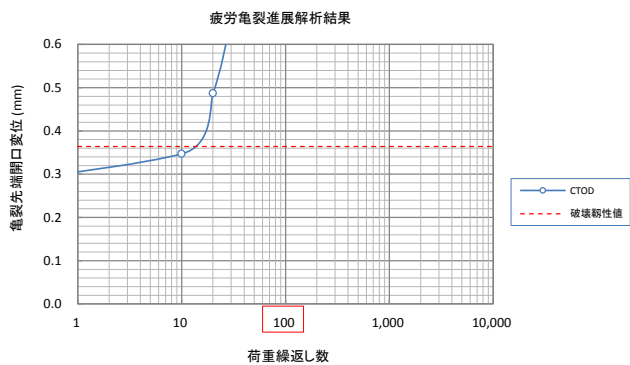
初期亀裂(1.5mm×4mm)



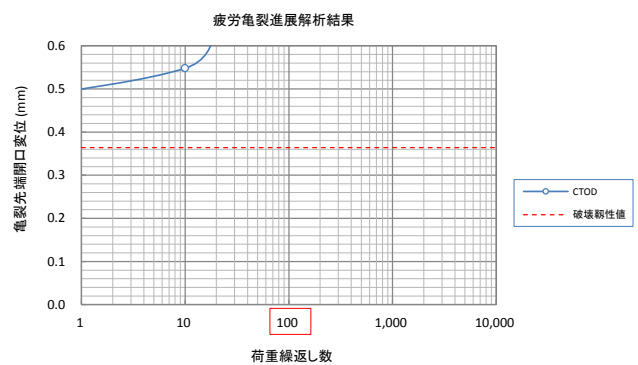
初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 4.8 亀裂先端開口変位 (新基準 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 5.8 亀裂先端開口変位 (18,200kl タンク)

【アニュラ板】材質 SM490, 板厚 12mm

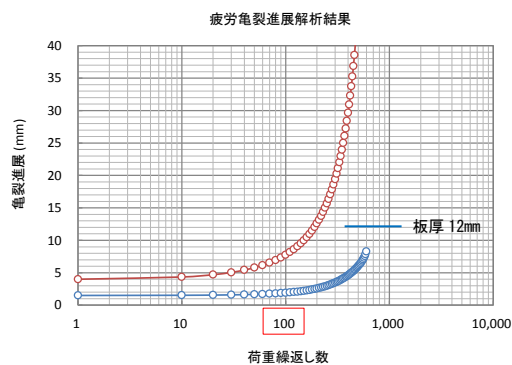
(2) 降伏比が 80%**以上**の場合【SPV490Q】

大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 **SPV490Q** が採用される。この場合、材料の降伏比(＝降伏点／引張強度)は 80%**以上となる**(表 10.3)。

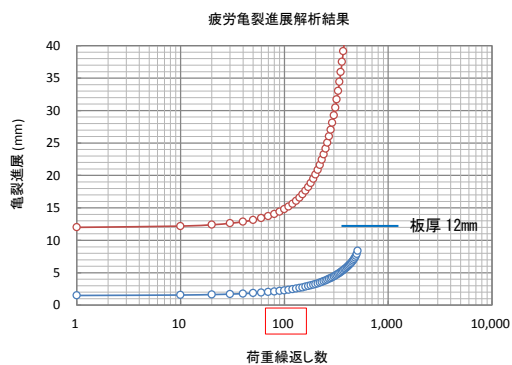
表 10.3 アニュラ板の降伏比 (その 2)

材質	降伏点 σ_y ²⁾	引張強度 σ_B (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_B	備考
SPV490Q	490	610	0.803	

a) 疲労亀裂進展解析結果



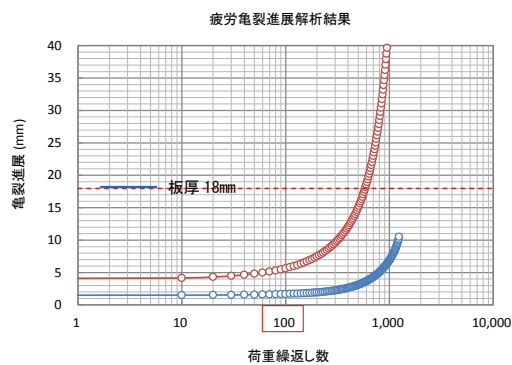
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



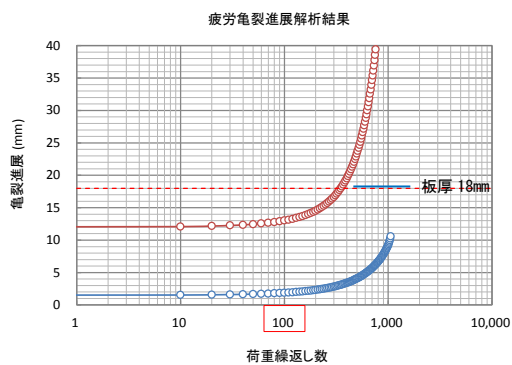
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.18 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kl タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm



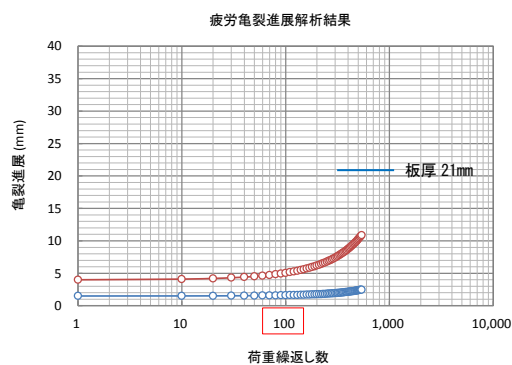
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



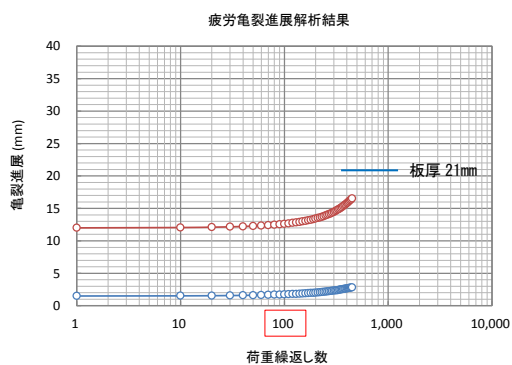
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.6 疲労亀裂進展解析結果 (60,000kl タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.18 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (110,000kl タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

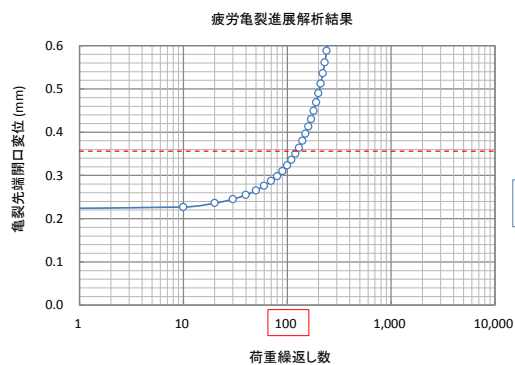
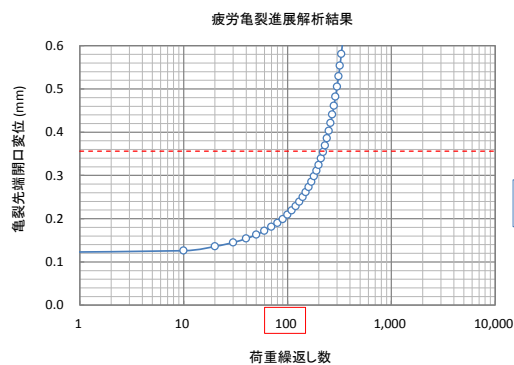
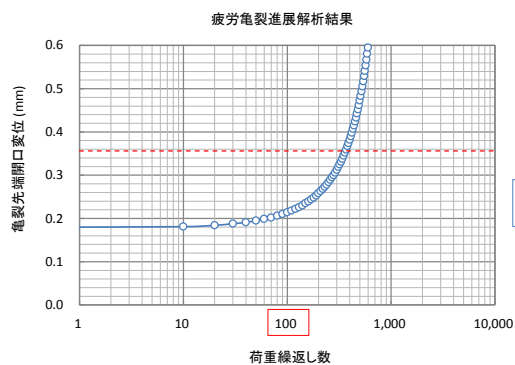
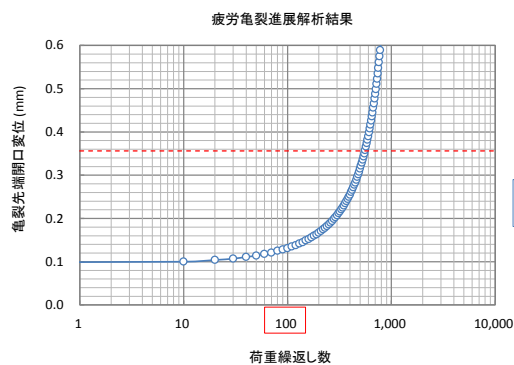


図 9.29(b) 亀裂先端開口変位 (32,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm



付図 6.8 亀裂先端開口変位 (60,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm

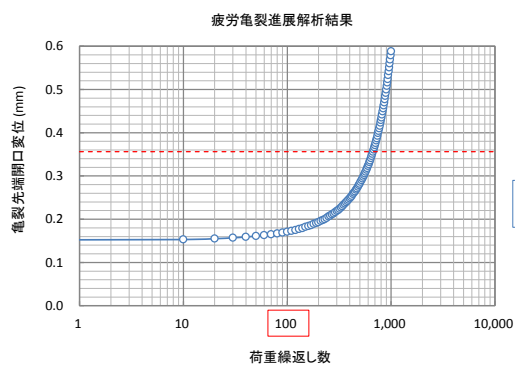
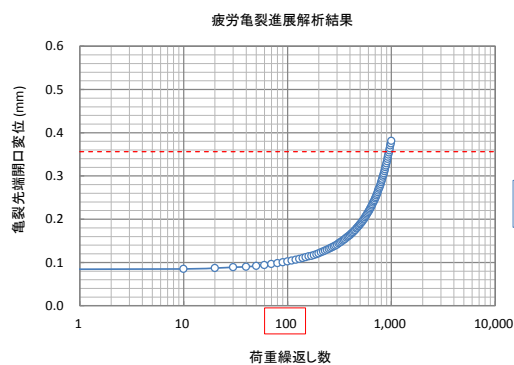


図 9.29 亀裂先端開口変位 (110,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

(3) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

【旧法】9,900kl タンクでは、初期亀裂の深さが1.5mmで、亀裂長さが4mm～12mm程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクでは、上記の初期亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも1.1倍以上の余裕度を有している。

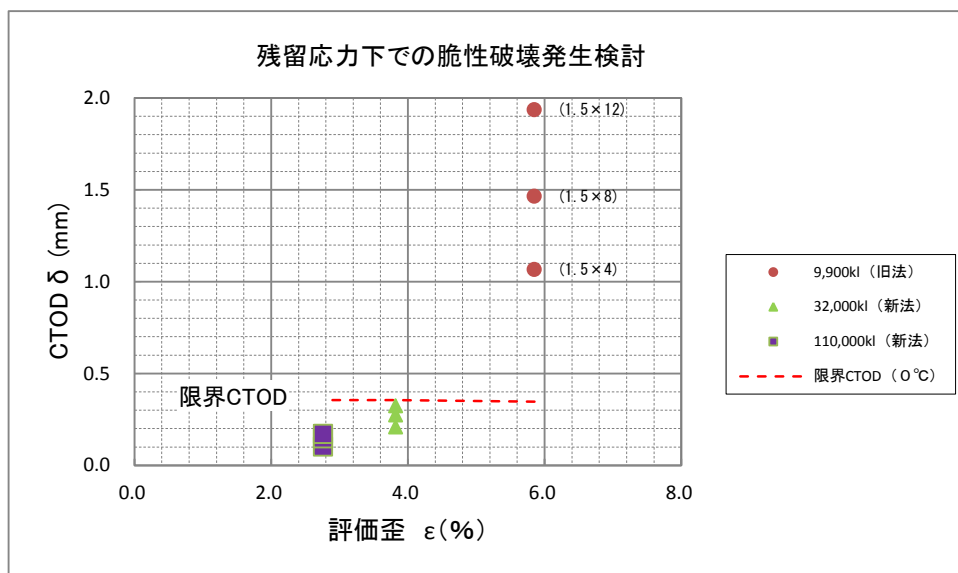


図 9.28 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

※旧法 9,900kl タンクは荷重繰返し 50 回

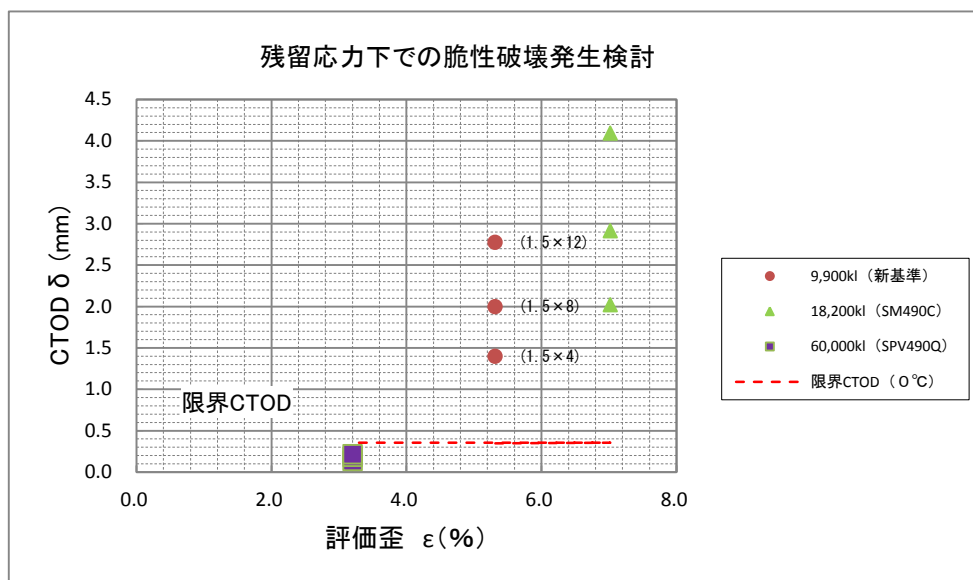


図 10.3 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後） 【追加解析】

※18,200kl タンクは荷重繰返し 60 回

10.2.2 アニュラ板相互溶接継手（突合せ溶接）

地震時の底板浮上り挙動（想定 100 回）に対して、側板近傍のアニュラ板相互溶接継手部の隅肉溶接止端部に想定した表面亀裂（溶接線に直交）の疲労亀裂進展解析及び脆性破壊発生検討の結果は、以下の通り。尚、当該部位には、側板内面の隅肉溶接止端部による応力集中の影響を受けない位置を想定し、構造不連続による歪と残留応力による歪みを考慮した（図 9.10）。

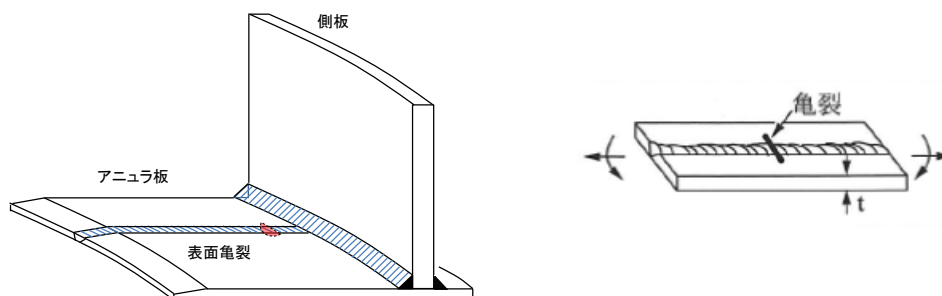


図 9.21 アニュラ板相互溶接継手（直角）

（１）降伏比が 80%未満の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニュラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400，溶接構造用鋼板 SM490 等の低強度鋼板が採用されている。この場合、材料の降伏比（＝降伏点／引張強度）は 80%未満となる（表 10.2）。

a) 疲労亀裂進展解析結果

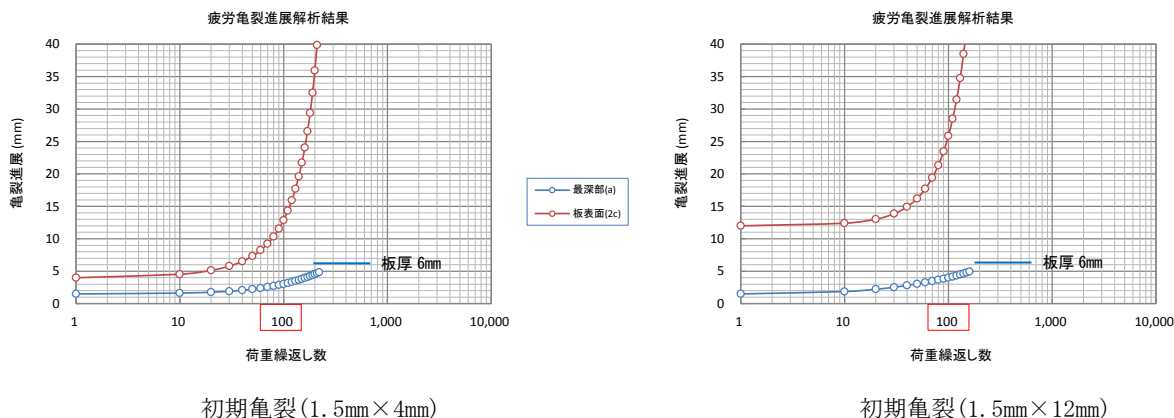
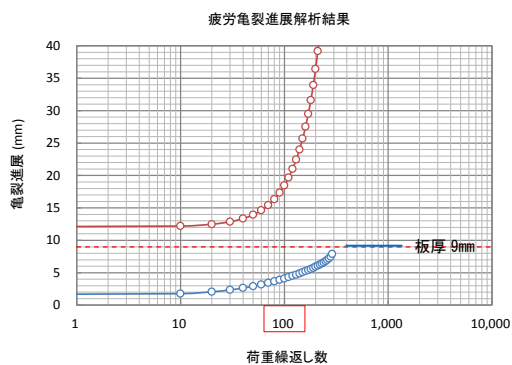
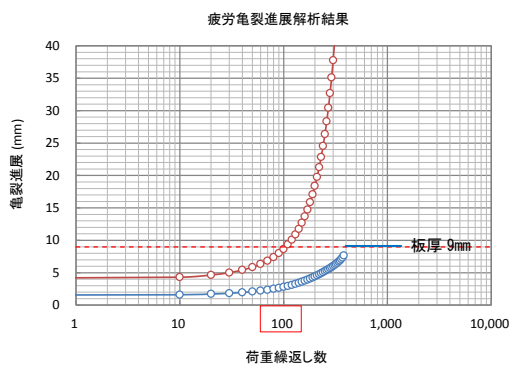


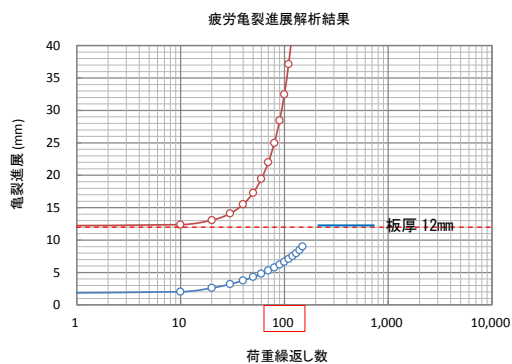
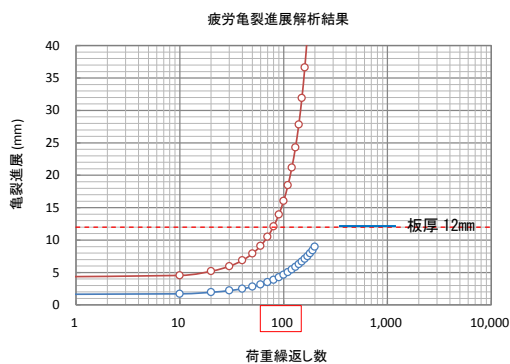
図 9.22(a) 疲労亀裂進展解析結果（旧法 9,900kL タンク）

【アニュラ板】材質 SS400，板厚 6mm



付図 4.9 疲労亀裂進展解析結果（新基準 9,900kl タンク）

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



付図 疲労亀裂進展解析結果（18,200kl タンク）

【アニュラ板】材質 SM490C, 板厚 12mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

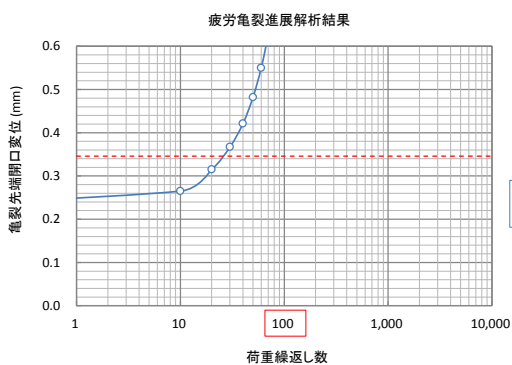
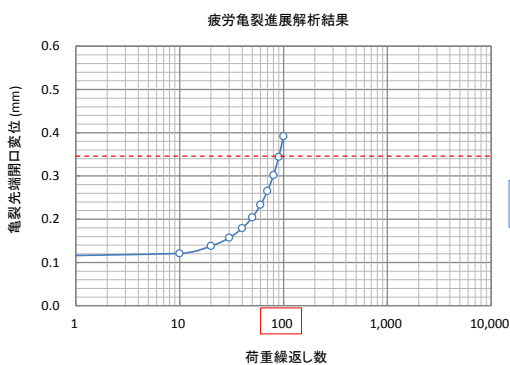
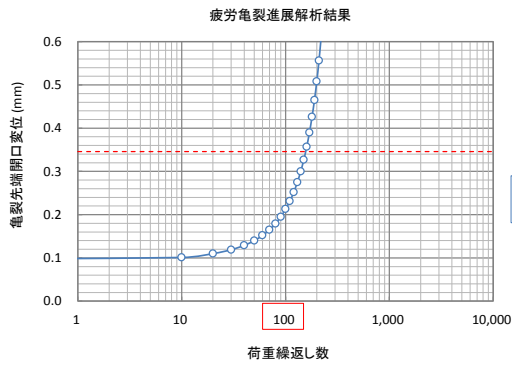
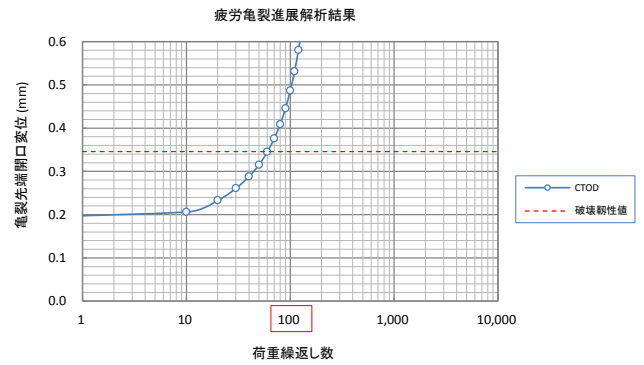


図 9.34(a) 亀裂先端開口変位（旧法 9,900kl タンク）

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 6mm



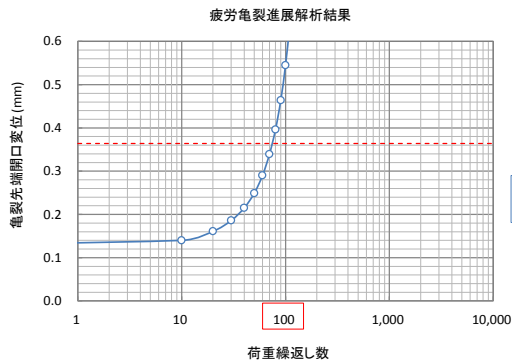
初期亀裂(1.5mm×4mm)



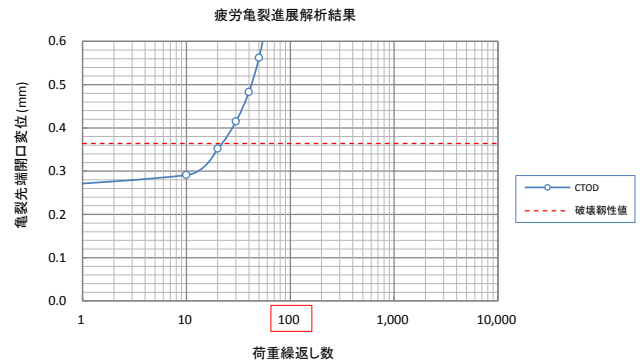
初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 4.11 亀裂先端開口変位 (新基準 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

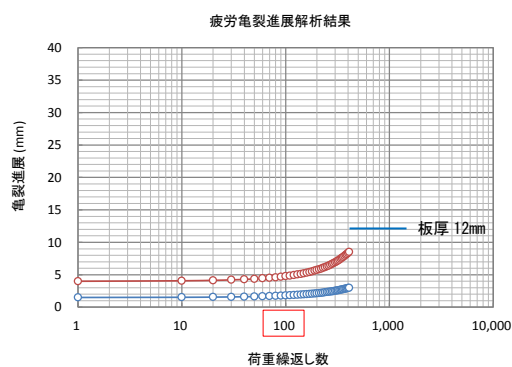
付図 5.11 亀裂先端開口変位 (18,200kl タンク)

【アニュラ板】材質 SM490, 板厚 12mm

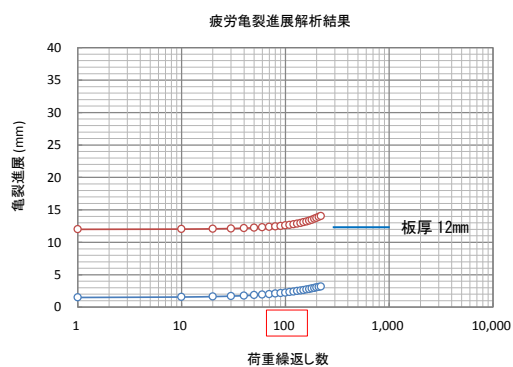
(2) 降伏比が 80%**以上**の場合【SPV490Q】

大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 **SPV490Q** が採用される。この場合、材料の降伏比 (=降伏点／引張強度) は 80%**以上となる** (表 10.3)。

a) 疲労亀裂進展解析結果



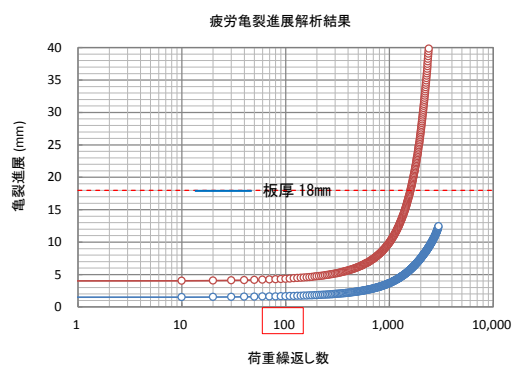
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



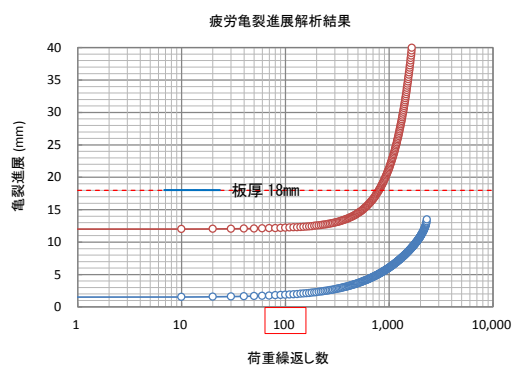
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.22 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm



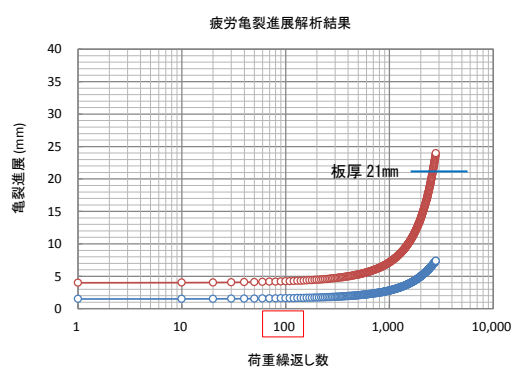
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



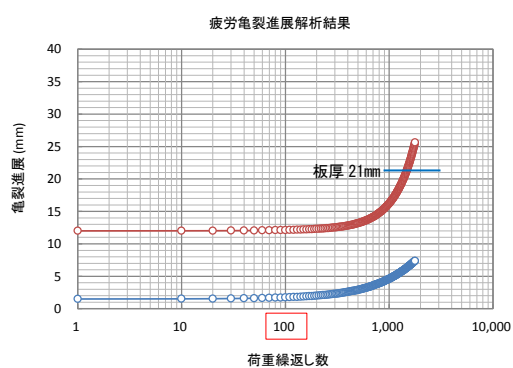
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.9 疲労亀裂進展解析結果 (60,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm



初期亀裂 (1.5mm×4mm)

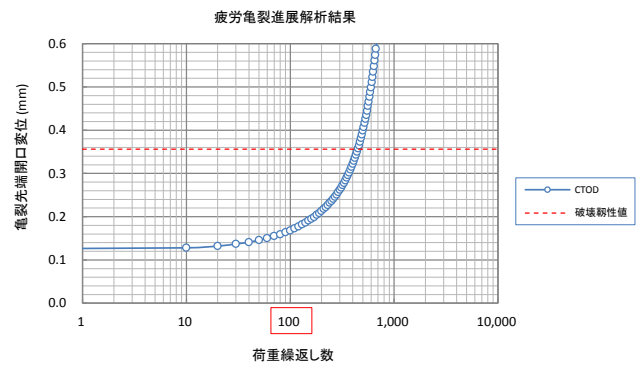
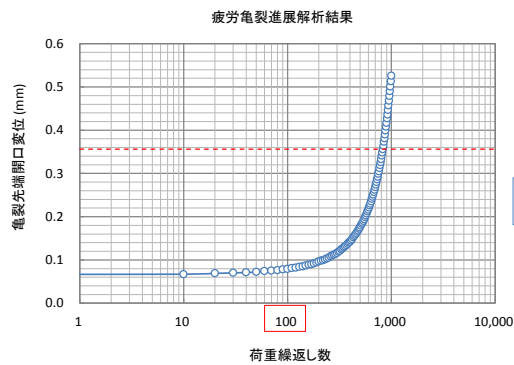


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.22 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (110,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

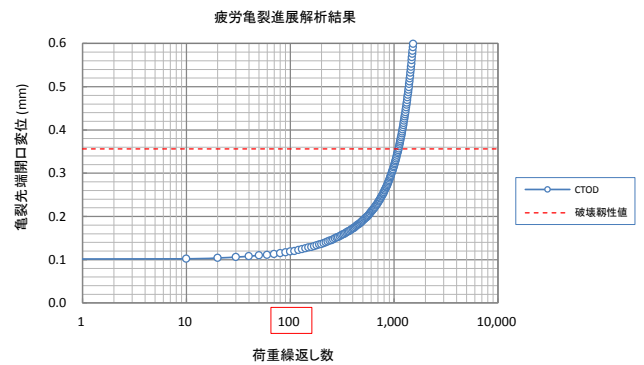
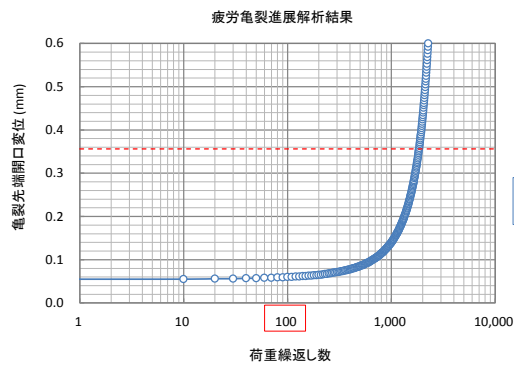


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.34 (b) 亀裂先端開口変位 (32,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm

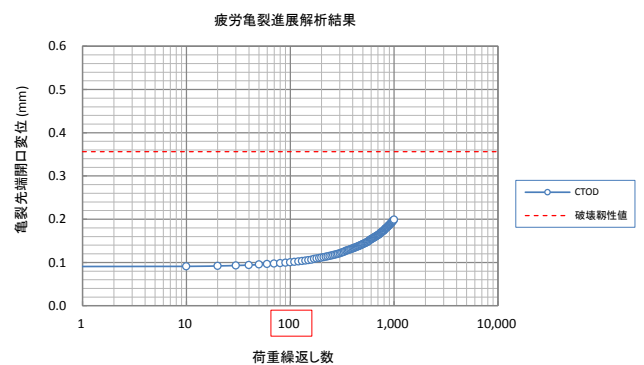
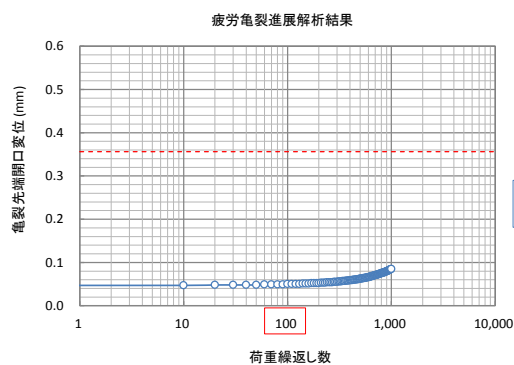


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.11 亀裂先端開口変位 (60,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm



初期亀裂 (1.5mm×4mm)

初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.34 (c) 亀裂先端開口変位 (110,000kI タンク)

【アニユラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

(3) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

【旧法】9,900kl タンクでは、初期亀裂の深さが1.5mmで、亀裂長さが4mm～12mm程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクでは、初期亀裂の深さが1.5mmで、亀裂長さが4mm～12mm程度の表面亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも1.9倍以上の余裕度を有している。

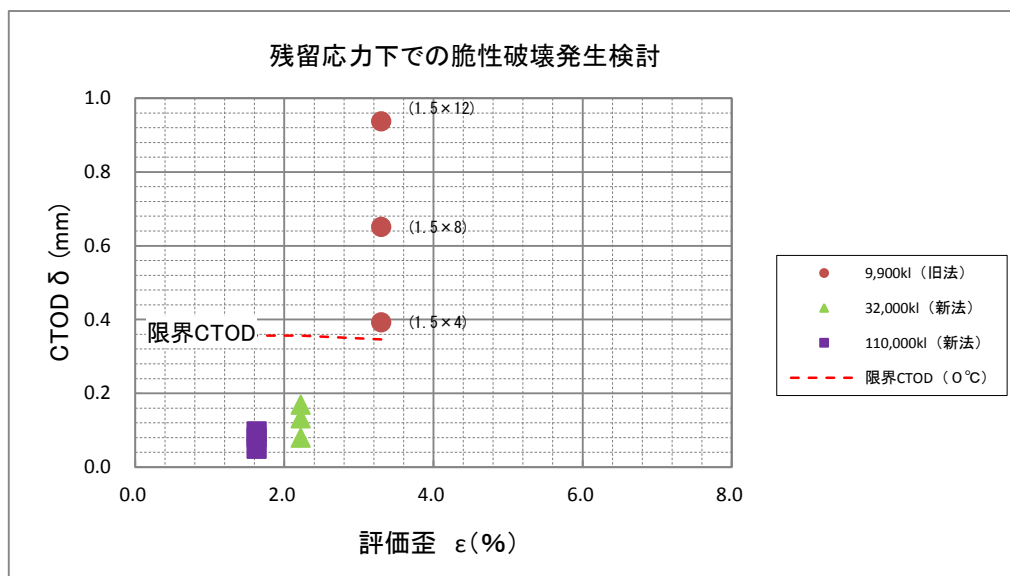


図 9.33 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

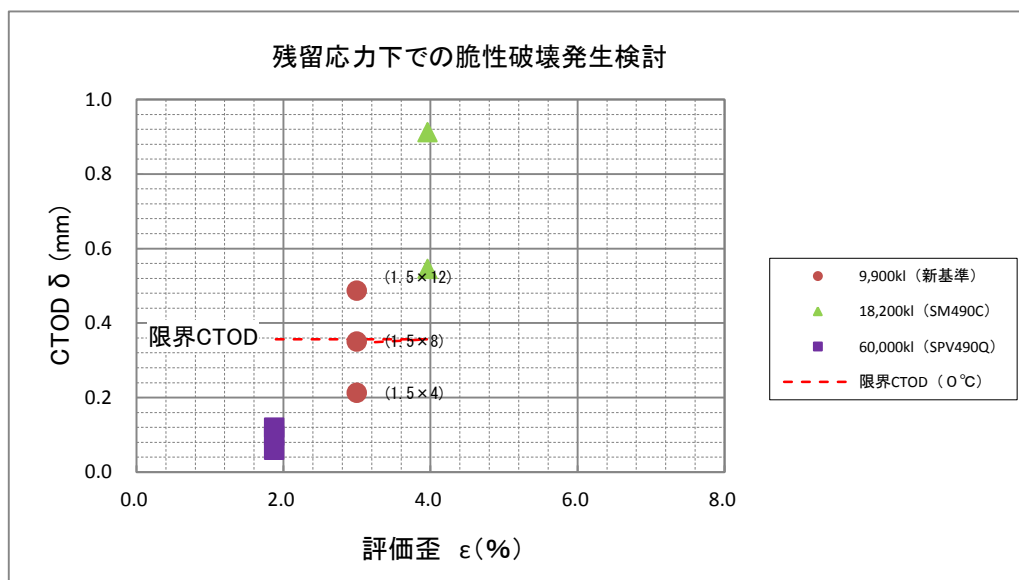


図 10.4 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後） 【追加解析】

10.2.3 アニュラ板に生じる塑性域の影響

(1) 降伏比が 80%未満の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニュラ板には、通常、一般構造用鋼板 **SS400**、溶接構造用鋼板 **SM490** 等の低中強度鋼板が採用されている。この場合、材料の降伏比(=降伏点/引張強度)は 80%未満となる(表 10.2)。

一例として、H29 年度に解析した【旧法】9,900k1 タンクの底板浮上り時において、アニュラ板に生じる塑性域の進展状況を、図 9.11(a) 示す。

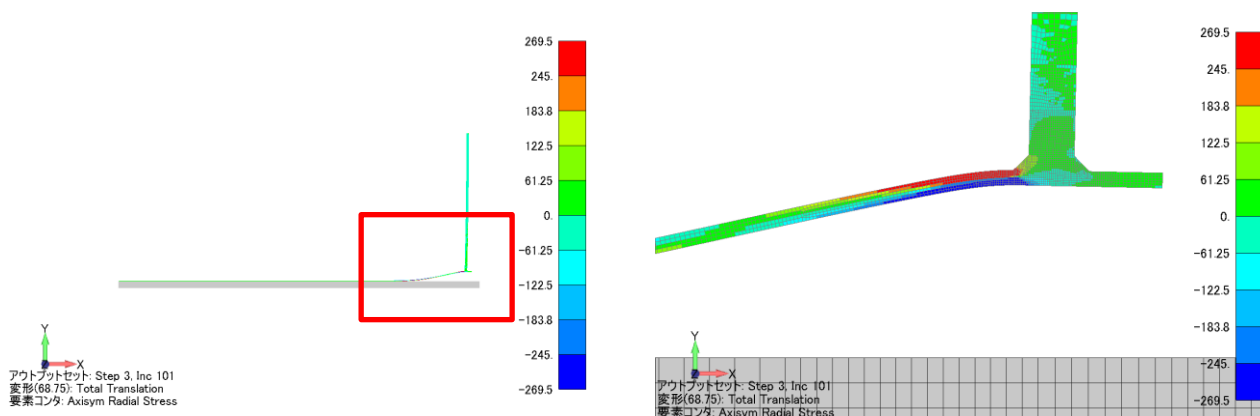


図 9.11(a) タンク隅角部の応力分布 (旧法 9,900k1 タンク)

【アニュラ板】材質 SS400、板厚 6mm

図 10.5 には、タンク隅角部の応力分布の拡大図を示す。同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、最初に側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じる。更に、タンク底板浮上り変位が増加するのに伴って、タンク中心方向の側板から離れた位置で、アニュラ板に広く塑性域（第二塑性関節）が生じることが分かる。その結果、当該部分の曲げ剛性が低下するに従って、側板近傍のアニュラ板の曲げモーメントが増大し、当該箇所の曲げ歪み・曲げ応力の負担が増加することが分かる。

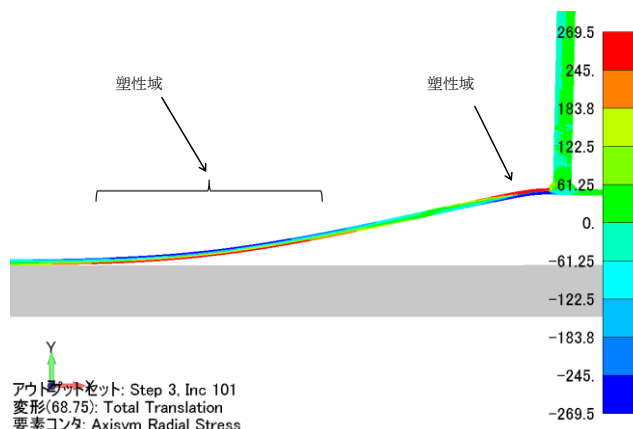


図 10.5 タンク隅角部の応力分布 (旧法 9,900k1 タンク)【拡大図】

尚、【新基準】9,900k1 タンク (SS400) 及び 18,200k1 タンク (SM490C) と同様の傾向を示す。

(2) 降伏比が 80%**以上**の場合【SPV490Q】

大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 **SPV490Q** が採用される。この場合、材料の降伏比（＝降伏点／引張強度）は 80%**以上**となる（表 10. 3）。

一例として、H29 年度に解析した 32, 000kl タンクの底板浮上り時において、アニュラ板に生じる塑性域の進展状況を、**図 9. 11 (b)** 示す。

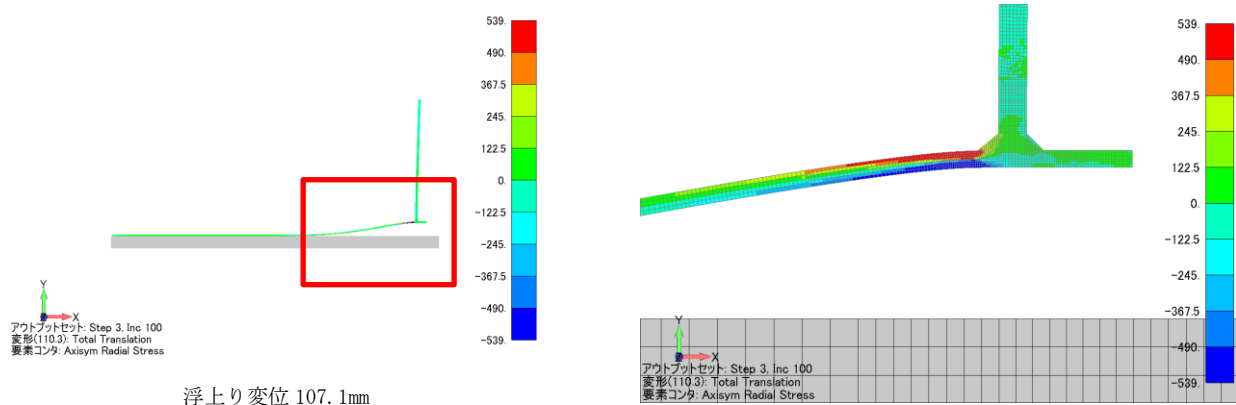


図 9. 11 (b) タンク隅角部の応力分布（32, 000kl タンク）

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm

図 10. 6 には、タンク隅角部の応力分布の拡大図を示す。同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じるが、タンク底板浮上りが増加しても、タンク中心方向のアニュラ板は塑性化せず、弾性域に留まっていることが分かる。

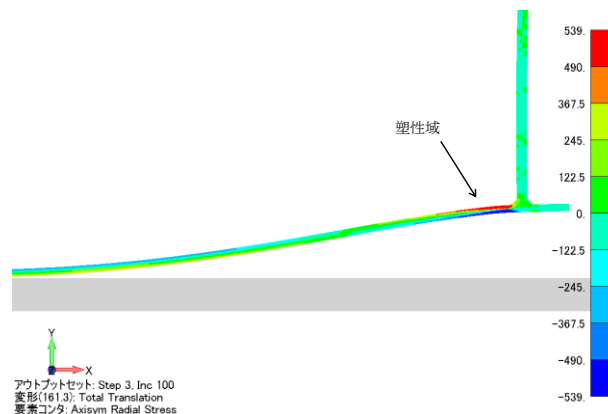


図 10. 6 タンク隅角部の応力分布（32, 000kl タンク）【拡大図】

尚、60, 000kl タンク（SPV490Q）及び 110, 000kl タンク（SPV490Q）とも同様の傾向を示す。

10.3 水張検査を省略することができる評価方法（案）

10.3.1 評価フロー → ※詳細は H30 年 6 月 27 日付け “資料 1-5 “参照のこと。

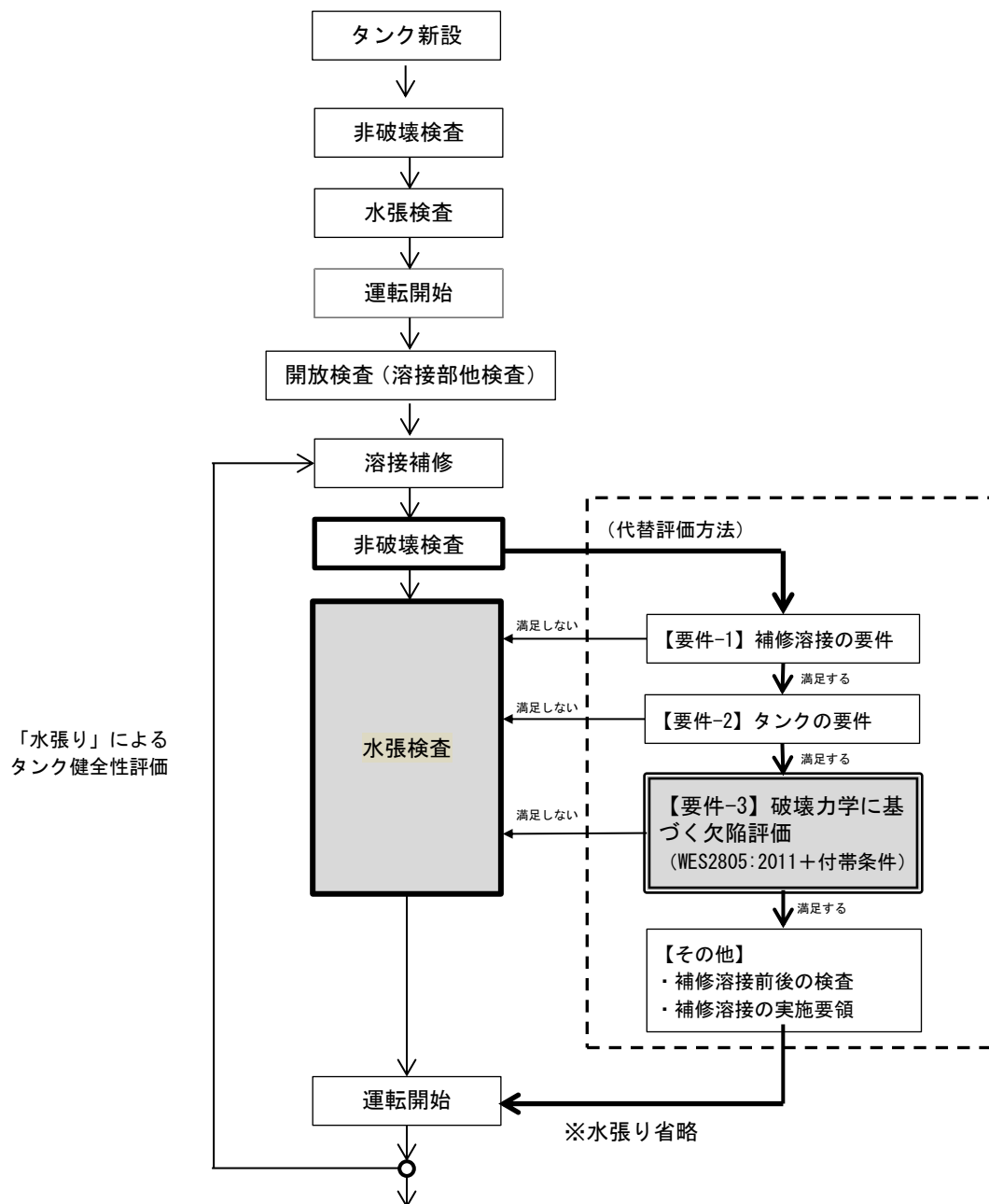


図 10.7 評価フロー

表 10.4 評価方法の比較

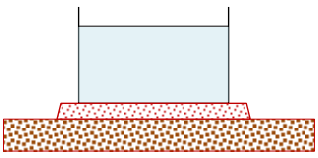
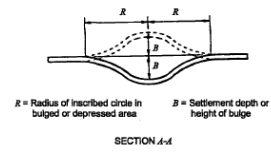
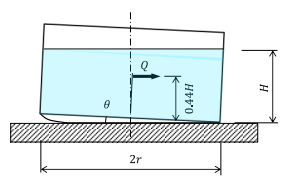
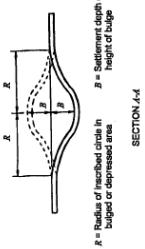
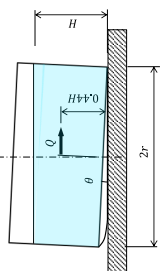
確認項目	着眼点	「水張り」による健全性評価	「破壊力学」に基づく代替評価方法
前提条件		不要	【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。
【照査荷重】	外力の影響	水張り荷重（満水） 	【底板】受入払出時の局部沈下を想定する。  【隅角部】地震時底板浮上りによる終局変位を想定する。 
	残留応力の影響	実際の溶接線近傍に内在する残留応力を考慮している。	溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力を考慮する。
仮定条件	—	無し	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。
耐圧強度		目視で「変形」が無いことを確認	計算で耐圧強度を確認する。
変形・破壊	脆性破壊	目視で「破壊」が無いことを確認	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。
	疲労強度	(※確認出来ない。)	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長
	終局強度	(※確認出来ない。)	【隅角部】計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。
漏れ	—	目視で「漏れ」が無いことを確認 ※底板からの漏れの確認は容易ではない	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無
タンク基礎の健全性	—	目視（計測）で「変形」が無いことを確認	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い
備考			

表 10.5(a) 「破壊力学」に基づく評価結果（底板）

確認項目	着眼点	「破壊力学」に基づく代替評価方法	【旧法】 9,900 k l タンク	【新法】 32,000k1 タンク	【新法】 110, 000k1 タンク
前提条件		【要件-1】 補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】 タンクの要件を満足する。 【底板】 受入払出時の局部沈下を想定する。	—	—	→
【照査荷重】	外力の影響		—	—	【沈下範囲】 R=1500mm 【沈下深さ】 B=92.5mm
	残留応力の影響	溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力を考慮する。	—	—	【溶接線と平行】 $\varepsilon_2 = 0.36\varepsilon_y$ 【溶接線と直角】 $\varepsilon_2 = 0.6\varepsilon_y$
	—	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。	—	—	【溶接欠陥】 3mm×6～18mm 【繰返し回数】 受入払出1000回
	耐圧強度	計算で耐圧強度を確認する。	—	—	最大歪み 0.896%＜伸び 18%
	脆性破壊	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。	—	—	【3×6】 余裕度 2.55 > 1.0 【3×18】 余裕度 1.35 > 1.0
変形・破壊	疲労強度	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長	—	—	【3×6】 長さ 9.7mm < (100mm) 【3×18】 長さ 21.2mm < (100mm)
	終局強度	【隅角部】 計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。	—	—	—
	—	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無	—	—	【3×6】 深さ 3.2mm < 10mm 【3×18】 深さ 3.6mm < 10mm
タンク基礎の健全性	—	【要件-2】 タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い	—	—	※有害な変形が無い

備考：【 】 内は表面亀裂寸法（深さ×長さ）を示す。

表 10.5 (b) 「破壊力学」に基づく評価結果（タンク隅角部）

確認項目	着眼点	「破壊力学」に基づく代替評価方法	【旧法】9,900 k l タンク	【新法】32,000k l タンク	【新法】110, 000k l タンク
前提条件		【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。	→	→	→
【照査荷重】	外力の影響	【隅角部】地震時底板浮上りによる終局変位を想定する。 	【浮上り変位】 $\delta_B = 68 \text{ mm}$	【浮上り変位】 $\delta_B = 107 \text{ mm}$	【浮上り変位】 $\delta_B = 179 \text{ mm}$
	残留応力の影響	溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力を考慮する。	【溶接線と平行】$\varepsilon_2 = 0.36\varepsilon_y$ 【溶接線と直角】$\varepsilon_2 = 0.6\varepsilon_y$	→	→
	仮定条件	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。	【溶接欠陥】1.5mm×4～12mm 【繰返し回数】底浮上り100回	→	→
	耐圧強度	計算で耐圧強度を確認する。	最大歪み 3.228% < 伸び 24%	最大歪み 2.077% < 伸び 18%	最大歪み 1.486% < 伸び 18%
変形・破壊	脆性破壊	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。	【1.5×4】破壊する×	【1.5×4】余裕度 1.70 > 1.0	【1.5×4】余裕度 3.49 > 1.0
	疲労強度	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長	【1.5×12】破壊する×	【1.5×12】余裕度 1.10 > 1.0	【1.5×12】余裕度 2.08 > 1.0
	終局強度	【隅角部】計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。	【1.5×4】進展する×	【1.5×4】長さ 7.8mm < (100mm)	【1.5×4】長さ 5.1mm < (100mm)
			【1.5×12】進展する×	【1.5×12】長さ 14.8mm < (100mm)	【1.5×12】長さ 12.6mm < (100mm)
漏れ			最大歪み 3.228% 24%	最大歪み 2.077% < 伸び 18%	最大歪み 1.486% < 伸び 18%
	—	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無	【1.5×4】進展する×	【1.5×4】長さ 1.9mm < 12mm	【1.5×4】長さ 1.6mm < 21mm
			【1.5×12】進展する×	【1.5×12】長さ 2.3mm < 12mm	【1.5×12】長さ 1.74mm < 21mm
タンク基礎の健全性	—	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い	※有害な変形が無い	→	→

備考：【 】内は表面亀裂寸法（深さ×長さ）を示す。

10.3.2 水張り検査要否の判定基準（案）

下記の【要件-1】補修溶接の要件及び【要件-2】タンクの要件を満足し、且つ、【要件-3】破壊力学に基づく欠陥評価 10.3.3 の補修溶接前後の非破壊検査に合格する場合に限り、補修溶接後の水張り検査を省略することができるものとする。

（１）補修溶接の要件【要件-1】

a) 継手形状

- 1) アニュラ板相互、底板相互、アニュラ板と底板との溶接継手のうち、突合せ継手に限る（重ね継手は対象外）。
- 2) 側板とアニュラ板との溶接継手（T 継手）

b) 補修部位

溶接線補修に限る（板の取替、当板等を除く）。

c) 総補修長さ

- 1) 底板一般（側板内面から 600mm の範囲以外）：補修長さの制限なし。
- 2) タンク隅角部（側板内面から 600mm の範囲内）：補修長さの制限なし。

（２）タンクの要件【要件-2】

a) 有害な変形（基礎含む）

平成 12 年消防危第 31 号通知別表に示す有害な変形がないこと。

b) 使用する材料等の制限

10.2.1 項に示す側板×アニュラ板溶接継手の疲労亀裂進展解析等の結果により、原則として、アニュラ板に降伏比が 80%**以上**の鋼材（容量 3 万 k1 以上のタンクに相当）を採用していること。

（３）破壊力学に基づく欠陥評価【要件-3】

WES2805-2011（日本溶接協会）に基づく溶接欠陥評価を適用し、残留応力の影響及び溶接止端部の応力集中の影響を考慮する。

a) 板厚

連続板厚測定により、必要厚さが確保されていることを確認された実板厚を用いる。

b) 想定亀裂

1) 底板一般

亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6～18mm 程度の表面亀裂

2) タンク隅角部

亀裂深さ 1.5mm、亀裂長さ 4～12mm 程度の表面亀裂

c) 照査荷重

- 1) 底板一般：API653 に規定している底板局部沈下パターン（タイプ A：帯状）を想定し、局部沈下範囲の半幅（R）は最大 1500mm 程度とする。但し、荷重繰返し回数として、供用期間中のタンクの業態に応じた受払回数を見込む。

- 2) タンク隅角部：高レベル地震時の底板浮上り終局変位を想定する。但し、荷重繰返し回数として、供用期間中の底板浮上り回数として 100 回程度見込む。

3 補修溶接前後の検査（案）

（1）補修溶接前

欠陥除去部の表面検査（MT 等）を行い、有害な欠陥が無いこと。

（2）補修溶接後

補修溶接後に表面検査（MT 等）を行い、有害な欠陥が無いこと。

補修溶接部の漏れ試験（VT）を公的機関が行い、安全性を確認出来たもの。

10.3.4 補修溶接の実施要領（案）

（1）溶接施工方法

消防法告示第 4 条の 21 の 2（溶接施工方法確認試験の方法等）により、事前に確認された溶接施工方法に準じる。

（2）溶接士の資格

消防危第 56 号通達（昭和 52 年 3 月 30 日付）

（3）層数及び溶接長

補修溶接の層数は 2 層以上とし、溶接長は 50mm 以上とする（短ビード溶接は避ける）。

10.4 今後の課題

10.4.1 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用

屋外貯蔵タンクの補修状況等の調査検討結果より、水張検査時の不具合事例として、底板相互の重ね隅肉溶接継手の破断により漏水に至った事案が2件報告されている（表4.1）。

更に、底部溶接線の割れに関する不適合事例では、側板×アニュラ板溶接継手（T継手）及びアニュラ板相互溶接継手（突合せ継手）の他に、重ね隅肉溶接継手を用いたアニュラ板×底板溶接継手が2件、同じく底板相互溶接継手 4件の報告があった（表4.3）。

このことから、今回の調査検討では、これらの不具合事例を考慮して底板重ね溶接継手を検討対象から除外した。

これら不具合事例の背景として、底板重ね溶接継手においては、コーティング剥離時のブラスト処理、非破壊検査時のグラインダー処理等により、タンクの経年使用に伴って隅肉溶接ののど厚が不足してることが挙げられる。一方、破壊力学的見地からは、底板重ね溶接継手のルート部に亀裂を有する場合の簡便かつ合理的な力学モデルが、現時点で見当たらない。

今後、水張検査の合理化検討に際しては、経年使用したタンクの底板重ね溶接継手ののど厚を推定する非破壊検査技術の開発と、簡便かつ合理的な破壊力学モデルの構築が望まれるが、それとともに、屋外貯蔵タンクの所有者等にあつては、水張検査の合理化に向けて、底板の溶接継手形式を突合せ継手に改修したり、アニュラ板を降伏比が80%**以上**の材料（SPV490Q等）に取り替えていくなど、タンクの更なる安全性向上に努めていくことが重要と考える。

10.4.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

今回、表面亀裂を有するタンク隅角部溶接継手の照査用荷重として、高レベル地震時のタンク底板浮上り現象におけるアニュラ板の終局変位状態を考えた。このとき、タンク隅角部浮上り終局変位 δ_B は、アニュラ板の鋼種に応じて次式で得られる（告示79号）¹⁶⁾。但し、 δ_y は降伏耐力時の浮上り変位を示す。

$$\begin{aligned} \bullet \text{ 降伏比が80\%未満の場合, } \quad \delta_B = 14\delta_y \quad (9.9a) \end{aligned}$$

$$\bullet \text{ 降伏比が80\%以上の場合, } \quad \delta_B = 4\delta_y \quad (9.9b)$$

解析結果より、降伏比が80%**未満**の場合（SS400、SM490C）には、タンク底板浮上り変位の増加に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じ、更に、浮上り変位が増加するに従って、側板から離れた位置のアニュラ板に広く塑性域（第二塑性関節）が生じる。その結果、側板近傍のアニュラ板の曲げ歪みが増大することが分かった。

一方、降伏比が80%**以上**の場合（SPV490Q）には、タンク底板浮上り変位の増加に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じるが、側板から離れた位置ではアニュラ板は塑性化せず、弾性域に留まることが分かった。

照査用荷重として与えたアニュラ板の終局変位 δ_B は、同規模のタンク寸法、板厚構成であっても、アニュラ板の材質によって大きく異なる（表9.2参照）。

今後、アニュラ板の降伏比が80%**未満**の場合において、上述の第二塑性関節の影響を考慮した簡便かつ合理的な歪み評価方法の開発が望まれる。

以上

【参考文献】

- 1) 危険物保安技術協会, “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”, H1 ～H13 年度
- 2) 危険物保安技術協会, “水張検査の合理化に関する検討業務”, H19 年～H20 年
- 3) 横浜国大, “陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討”, H23～H25 年度
- 4) 日本溶接協会, “WES2805 溶接継手の脆性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法”, 2011
- 5) アメリカ機械学会, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, Appendix A : Analysis of Flaws”
- 6) 太田他, “引張残留応力場にある溶接継手の設計疲労き裂伝ば曲線”, 溶接学会論文集, 第 7 巻, 第 3 号, 1989
- 7) API Standard 650, Appendix M, “Requirements for Tanks Operating at Elevated Temperatures”
- 8) 永井他, “構造的応力集中部における脆性破壊発生特性について”, 日本造船学会論文集, 第 144 号, 昭和 53 年
- 9) 永井他, “構造的応力集中部における脆性破壊発生特性について (第 4 報)”, 日本造船学会論文集, 第 155 号, 昭和 59 年
- 10) WES2805-2011 解説表 11. 4
- 11) 表他, 寒地土木研究所月報, No. 700, 2011 年 9 月
- 12) 清水他, 寒地土木研究所月報, No. 700, 2011 年 9 月
- 13) 日本高圧力技術協会, “経年変化を考慮した長期備蓄基地タンクの診断保全技術に関する調査研究委員会報告”, H10～H12 年度
- 14) API Standard 653, “Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction”, 4th Edition, 2009
- 15) アメリカ機械学会, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 2”, 2015
- 16) 日本建築学会, “容器構造設計指針・同解説”, 2001
- 17) 河野他, “地震時に浮き上がり挙動する大型石油タンク隅角部の局部応力”, 圧力技術, Vol. 35, No. 6, 1997
- 18) 消防庁, “屋外タンク貯蔵所の耐震安全性に関する調査検討報告”, H29 年 3 月
- 19) 日本ガス協会, “LNG 地上式貯槽指針”, 1981

A-5200 END-OF-PERIOD FLAW SIZE

(a) In order to determine the maximum potential for fatigue flaw growth of the observed flaw indication during normal operation, a cumulative fatigue flaw growth study of the component should be performed using appropriate fatigue crack growth rates given in A-4300. The design transients prescribed in the system Design Specification that apply to the remainder of the evaluation period for the component should be included. Cumulative fatigue crack growth analysis of components need not include emergency and faulted conditions. Stress intensity factors should be determined for each transient using the bounding elliptical or semielliptical flaw model described in Article A-2000 and consistent with the methods for K_I determination outlined in Article A-3000. The plastic zone correction need not be taken into account in calculating K_I . K_I can be determined by setting the plastic zone correction factor $q_p = 0$ in Article A-3000. Each transient should be considered in approximate chronological order in the following manner.

- (1) Determine the range of K_I fluctuation associated with the transient, ΔK_I .
- (2) Find the incremental flaw growth Δa and $\Delta \ell$ corresponding to ΔK_I from the fatigue flaw growth rate data.
- (3) Update the flaw dimensions a and ℓ .
- (4) Repeat these calculations for the next transient using the updated flaw dimensions.

(b) For surface flaws, either of the following two methods is acceptable for determining Δa and $\Delta \ell$ for the increment of time in the calculation.

(1) Linearized Stress Ratio Approach

(-a) Calculate the incremental flaw growth Δa at Point 1 in Figure A-3100-1, illustration (b), by integration of eq. A-4300(a)(1).

(-b) Determine the parameters A and B from the ranges of membrane stress, $\Delta \sigma_m$, and bending stress, $\Delta \sigma_b$, obtained in accordance with A-3200 and Figure A-3210-3, illustration (b) as follows:

$$A = 0.92 + 0.03 R_b$$

$$B = 0.10 + 0.80 R_b$$

where

$$R_b = \Delta \sigma_b / (\Delta \sigma_m + \Delta \sigma_b)$$

(-c) Calculate the parameters e and f from the initial flaw dimensions a_0 and ℓ_0 for the increment, as follows:

$$e = (\ell_0 / 2t)^m - [At / a_0 - B]^{-m}$$

$$f = (a_0 / t)^m - [A / (2t / \ell_0 + B)]^m$$

where t is the component wall thickness and $m = 2.8$.

(-d) Calculate the flaw length $\ell = \ell_0 + \Delta \ell$ as illustrated by Point 2 in (b), at the end of the increment, as a function of the flaw depth $a = a_0 + \Delta a$ at the end of the increment, as follows:

$$\ell = 2a \left[(A - Ba/t)^{-m} + e(a/t)^{-m} \right]^{1/m}$$

if $2a_0 / \ell_0 \leq (A - Ba_0/t)$

$$\ell = 2a \left\{ A \left[1 - f(a/t)^{-m} \right]^{-1/m} - Ba/t \right\}$$

if $2a_0 / \ell_0 > (A - Ba_0/t)$

(2) Generalized Stress Approach

(-a) Calculate the incremental flaw growth, Δa , at Point 1 in Figure A-3100-1, illustration (b), by integration of eq. A-4300(a)(1).

(-b) Calculate the incremental flaw growth, $\Delta \ell$, at Point 2 in Figure A-3100-1, illustration (b), by integration of the following equation:

$$d\ell / dN = 2 C_0 (\Delta K_I)^n$$

where n and C_0 are as defined in A-4300.

The above procedure, after all transients have been considered, yields the expected end-of-period flaw size a_f and ℓ_f .

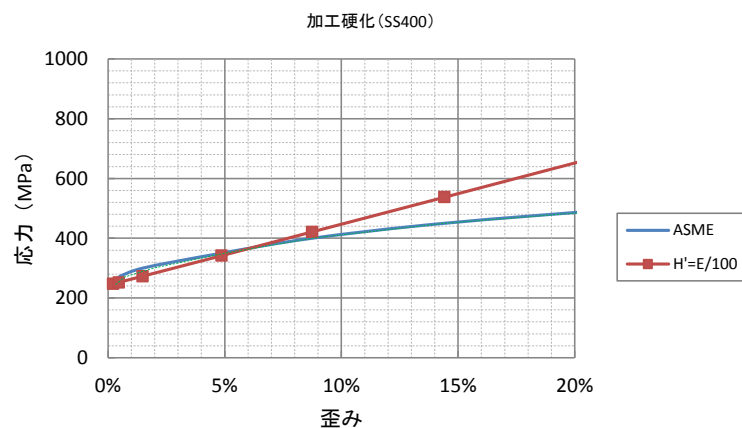
解説表 11.4 相関式構築に用いた基礎データ
(シャルピー遷移曲線及び限界 CTOD 遷移曲線の数式近似結果)

鋼	記号	板厚・寸法 (mm)	YS (MPa)	CTOD 試験片 長さ (mm)	vT_0 (°C)	T_{d100} (°C)	vC_{100} (J)	k_1	T_0 (°C)	T_{d100} (°C)	σ_{d100} (mm)	k_2	σ_1 (mm)	T_0 (°C)	出典
SN400	-	12×28	287	28	-30	-55	240	-0.094	-53	-93	2.20	-0.058	0.393	-74	文献11.24
SN400A	-	9×14	280	9	30	7	150	-0.070	1	-31	0.80	-0.060	0.353	-3	
SN400B	-	9×14	287	14	-17	-44	170	-0.085	-58	-101	1.10	-0.059	0.383	-70	
	-	9×14	287	9	-20	-44	160	-0.070	-65	-103	1.10	-0.061	0.383	-75	
	-	9×14	302	14	-22	-54	235	-0.097	-59	-97	1.28	-0.060	0.377	-71	
	-	9×14	302	9	-25	-50	205	-0.090	-55	-98	1.30	-0.060	0.377	-70	
SM41B	MA	100	263	10	-31	-54	190	-0.084	-71	-102	1.32	-0.060	0.393	-82	文献11.25
	MA	100	263	25	-28	-57	230	-0.072	-59	-95	0.95	-0.066	0.393	-78	
	MA	100	263	50	-28	-57	230	-0.072	-23	-84	0.15	-0.064	0.393	-82	
	MA	100	263	75	-26	-57	230	-0.072	-1	-85	7.24	-0.061	0.393	-57	
	MA	100	263	100	-28	-57	230	-0.072	-13	-81	5.78	-0.059	0.393	-57	
	MB	20	272	20	-6	-30	210	-0.082	-18	-79	3.21	-0.067	0.389	-53	
S24508	-	25	351	25	-15	-46	190	-0.090	0	-59	1.50	-0.045	0.357	-26	文献11.24
	-	40	324	40	-18	-50	190	-0.045	-10	-75	2.00	-0.045	0.364	-43	
	-	13×24	401	13	-19	-56	190	-0.049	-40	-74	1.40	-0.075	0.337	-56	
	-	9×14	371	14	-14	-45	185	-0.090	-48	-82	1.00	-0.060	0.349	-60	
	-	9×14	371	9	-12	-38	170	-0.086	-40	-84	1.00	-0.060	0.349	-52	
	-	9×19	404	19	-51	-71	195	-0.095	-70	-96	1.20	-0.100	0.335	-62	
SM50B	-	12×28	420	28	-47	-67	220	-0.105	-55	-88	2.00	-0.090	0.339	-72	文献11.25
	HSA	100	345	10	-30	-59	161	-0.039	-75	-89	1.00	-0.062	0.359	-82	
	HSA	100	345	25	-41	-84	175	-0.041	-29	-78	2.62	-0.065	0.359	-57	
	HSA	100	345	50	-41	-84	175	-0.041	34	-58	2.40	-0.034	0.359	-16	
	HSA	100	345	75	-41	-84	175	-0.041	18	-55	2.08	-0.041	0.359	-20	
SA440	-	25	488	25	-105	-143	230	-0.035	-120	-153	0.90	-0.060	0.301	-131	文献11.24
SM579Q	-	25	482	25	-73	-103	300	-0.080	-85	-108	1.40	-0.080	0.304	-86	
HW45	HBA	75	505	10	-40	-70	193	-0.057	-59	-77	0.43	-0.067	0.294	-46	文献11.25
	HBA	75	505	20	-40	-70	198	-0.057	-49	-76	0.70	-0.065	0.294	-54	
	HBA	75	505	30	-60	-85	201	-0.056	-15	-62	1.24	-0.083	0.294	-36	
	HBA	75	505	50	-60	-85	201	-0.056	-2	-48	1.14	-0.051	0.294	-23	
	HBA	75	505	75	-60	-85	201	-0.056	8	-42	1.00	-0.044	0.294	-12	
HT700	S	25	837	25	-75	-97	210	-0.092	-94	-88	0.40	-0.062	0.159	-59	文献11.21
I	25	799	25	-140	-170	274	-0.079	-107	-148	0.99	-0.064	0.174	-138		
HW70	HBA	75	745	75	-93	-129	216	-0.066	-86	-94	0.80	-0.068	0.186	-82	文献11.25
	HBA	75	745	50	-99	-129	216	-0.066	-46	-87	0.61	-0.040	0.186	-66	
	HBA	75	745	30	-96	-129	216	-0.066	-98	-109	0.28	-0.061	0.186	-84	
	HBA	75	745	20	-86	-122	229	-0.057	-94	-114	0.67	-0.057	0.186	-96	
	HBA	75	745	10	-85	-122	229	-0.057	-122	-129	0.26	-0.098	0.186	-105	
	HBB	20	863	20	-92	-131	183	-0.047	-101	-96	0.18	-0.107	0.148	-87	
HT80	A	20	785	20	-102	-126	178	-0.074	-92	-120	0.46	-0.045	0.188	-100	文献11.26
	B	20	775	20	-118	-139	245	-0.100	-105	-134	0.79	-0.068	0.184	-123	
	R-SR	20	769	20	-113	-141	237	-0.074	-98	-129	0.77	-0.061	0.180	-116	
	D	20	863	20	-67	-92	159	-0.065	-115	-108	0.16	-0.049	0.148	-64	
WM	G	20	780	20	-76	-125	170	-0.035	-54	-80	0.30	-0.044	0.182	-54	文献11.22
	-	25	424	25	-30	-56	127	-0.050	-24	-58	1.00	-0.065	0.327	-35	
	-	25	537	25	-43	-70	190	-0.063	-32	-60	0.70	-0.085	0.281	-38	
	YQW21	-	25	569	25	-25	-49	145	-0.065	0	-27	0.40	-0.040	0.268	
YQW24	1	17.7	742	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.197	-	
YQW12	2	17.7	824	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.345	-	
YQW17	3	17.7	505	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.294	-	
YQW24	4	17.7	710	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.210	-	
YQW12	5	17.7	577	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.265	-	
YQW17	6	17.7	466	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.210	-	

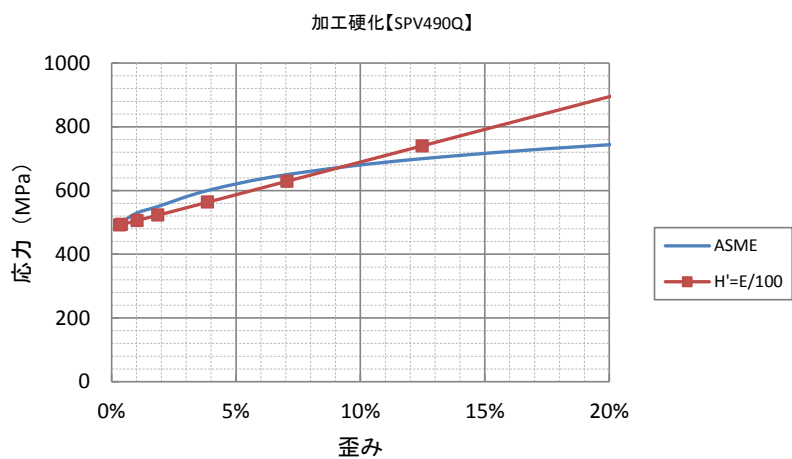
注1) シャルピー遷移曲線は、試験片長さ30mm以下の場合1/2 σ_1 、20mmを超える場合は1/4 σ_1 の値を採用

注2) σ_1 は解(1)-(2)式による推定値

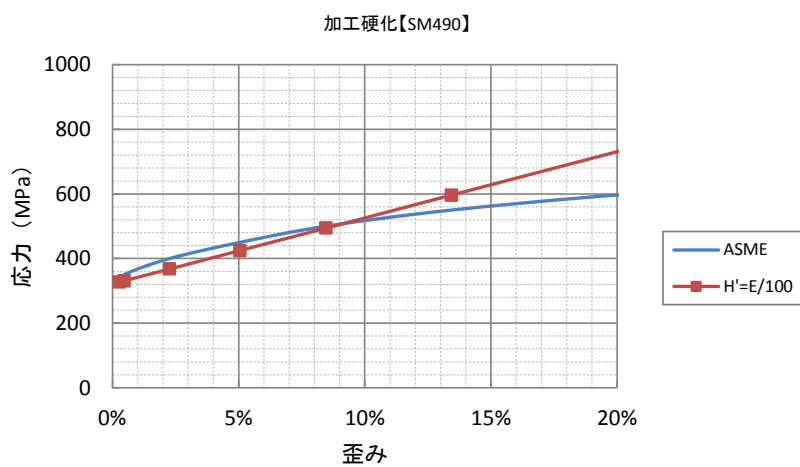
[添付資料-3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 2-2015 の算定式による
応力-歪み線図



添付図 3.1 加工硬化の比較 (SS400)



添付図 3.2 加工硬化の比較 (SPV490Q)



添付図 3.3 SM490)

3-D.3 STRESS STRAIN CURVE

The following model for the stress-strain curve shall be used in design calculations where required by this Division when the strain hardening characteristics of the stress-strain curve are to be considered. The yield strength and ultimate tensile strength in 3-D.1 and 3-D.2 may be used in this model to determine a stress-strain curve at a specified temperature.

$$\epsilon_t = \frac{\sigma_t}{E_y} + \gamma_1 + \gamma_2 \quad (3-D.1)$$

where

$$\gamma_1 = \frac{\epsilon_1}{2} \left(1.0 - \tanh[H] \right) \quad (3-D.2)$$

$$\gamma_2 = \frac{\epsilon_2}{2} \left(1.0 + \tanh[H] \right) \quad (3-D.3)$$

$$\epsilon_1 = \left(\frac{\sigma_t}{A_1} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (3-D.4)$$

$$A_1 = \frac{\sigma_{ys}(1 + \epsilon_{ys})}{\left[\ln[1 + \epsilon_{ys}] \right]^{\frac{1}{m_1}}} \quad (3-D.5)$$

$$m_1 = \frac{\ln[R] + (\epsilon_p - \epsilon_{ys})}{\ln \left[\frac{\ln[1 + \epsilon_p]}{\ln[1 + \epsilon_{ys}]} \right]} \quad (3-D.6)$$

$$\epsilon_2 = \left(\frac{\sigma_t}{A_2} \right)^{\frac{1}{m_2}} \quad (3-D.7)$$

$$A_2 = \frac{\sigma_{uts} \exp[m_2]}{m_2^{m_2}} \quad (3-D.8)$$

$$H = \frac{2 \left[\sigma_t - \left(\sigma_{ys} + K \left(\sigma_{uts} - \sigma_{ys} \right) \right) \right]}{K \left(\sigma_{uts} - \sigma_{ys} \right)} \quad (3-D.9)$$

$$R = \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}} \quad (3-D.10)$$

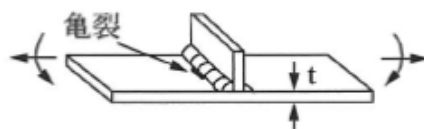
$$\epsilon_{ys} = 0.002 \quad (3-D.11)$$

$$K = 1.5R^{1.5} - 0.5R^{2.5} - R^{3.5} \quad (3-D.12)$$

The parameters m_2 , and ϵ_p are provided in Table 3-D.1. The development of the stress strain curve should be limited to a value of true ultimate tensile stress at true ultimate tensile strain. The stress strain curve beyond this point should be perfectly plastic. The value of true ultimate tensile stress at true ultimate tensile strain is calculated as follows:

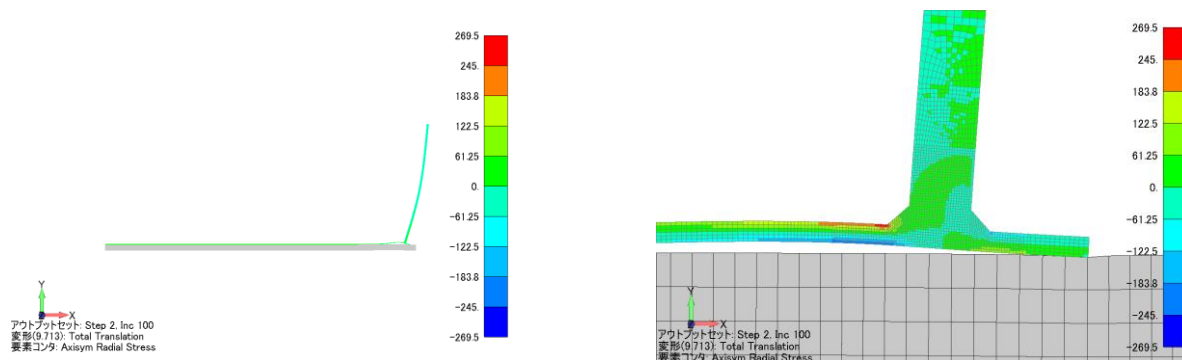
$$\sigma_{uts,t} = \sigma_{uts} \exp[m_2] \quad (3-D.13)$$

〔付属書-1〕 液の受入れ払出しを受けるタンク隅角部への適用【通常時】

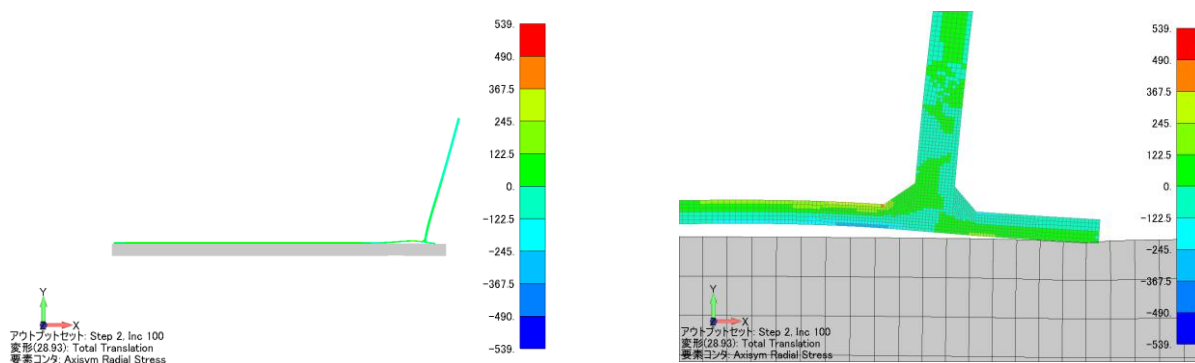


付図 1.1 側板×アニュラ板溶接継手 (T 継手)

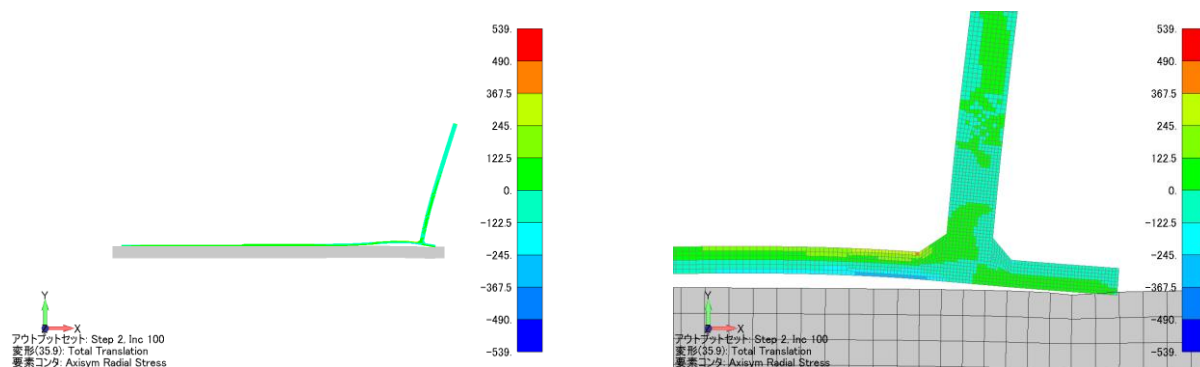
(1) 変形状態



付図 1.2(a) タンク隅角部の応力分布 (旧法 9,900kl タンク)

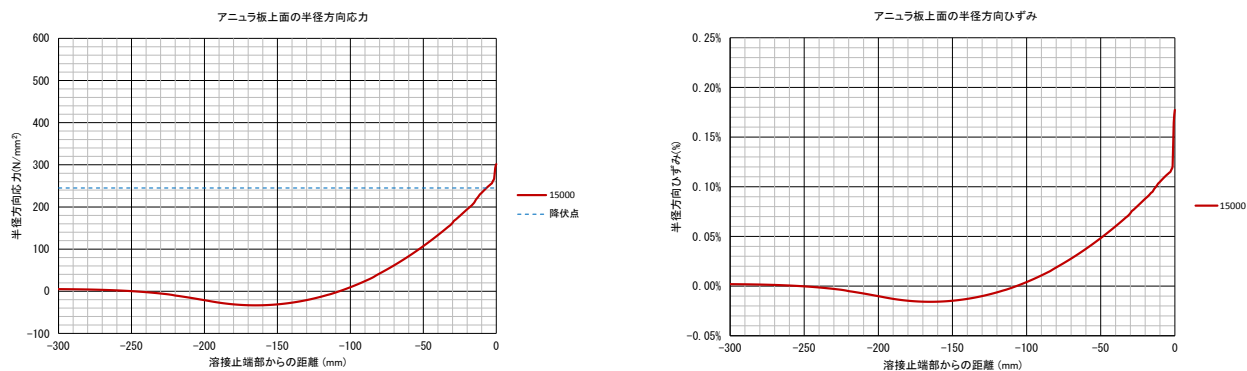


付図 1.2(b) タンク隅角部の応力分布 (32,000kl タンク)

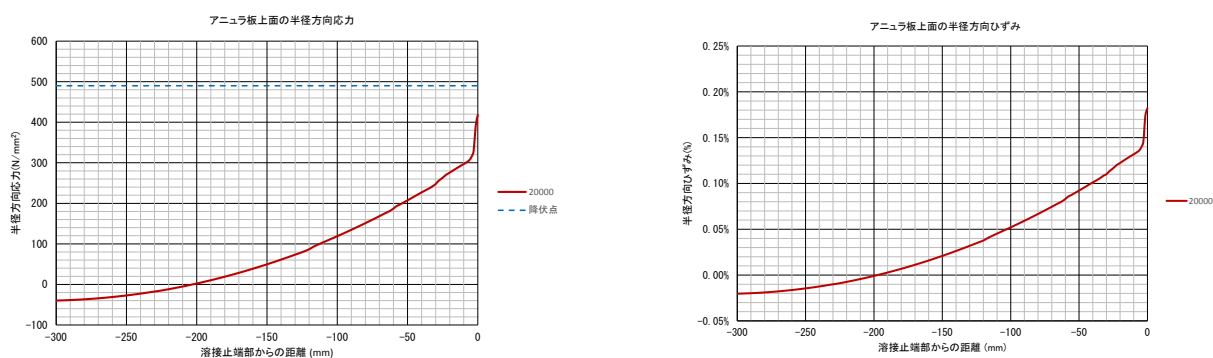


付図 1.2(c) タンク隅角部の応力分布 (110,000kl タンク)

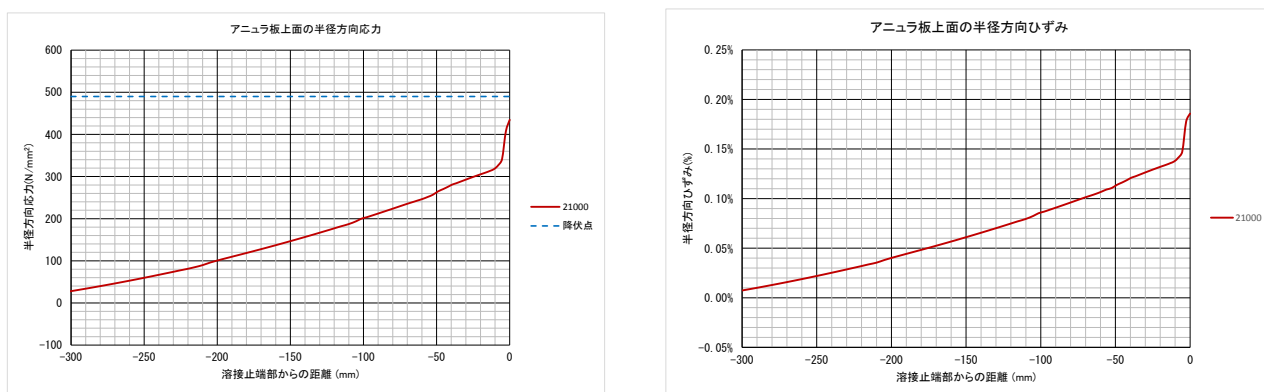
(2) タンク内表面の応力・歪み



付図 1.3(a) 表面応力・表面歪み（旧法 9,900kl タンク）

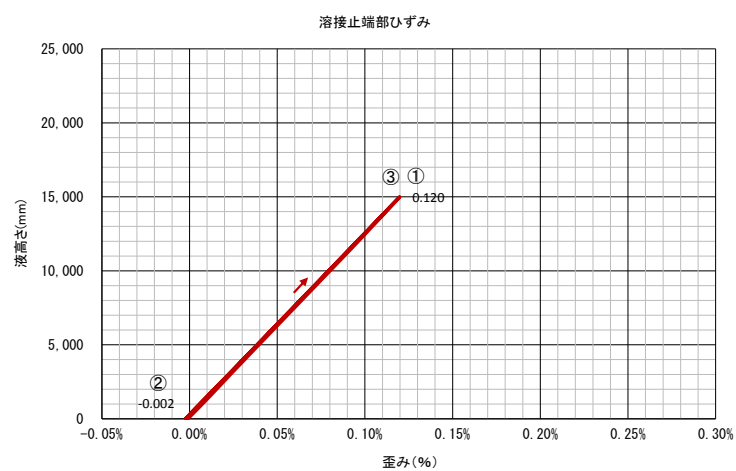


付図 1.3(b) 表面応力・表面歪み（32,000kl タンク）

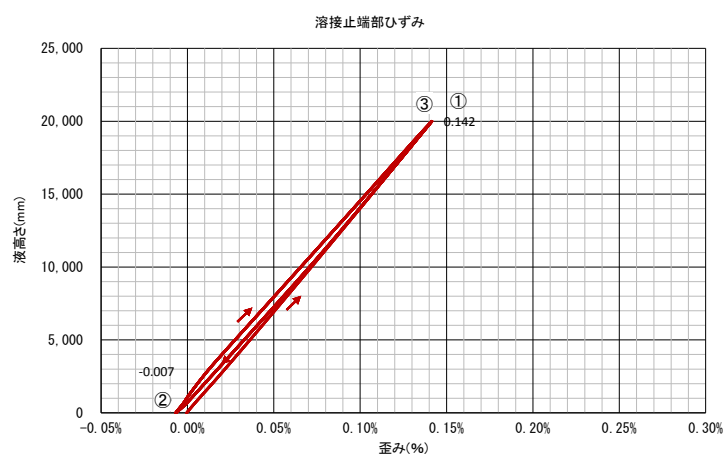


付図 1.3(c) 表面応力・表面歪み（110,000kl タンク）

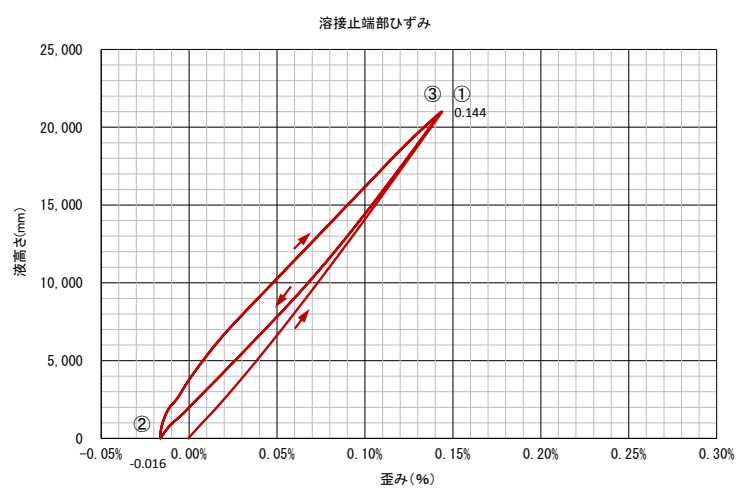
(3) 歪み履歴



付図 1.4(a) 歪み履歴 (旧法 9,900kL タンク)



付図 1.4(b) 歪み履歴 (32,000kL タンク)



付図 1.4(c) 歪み履歴 (110,000kL タンク)

付表 1.1 歪み履歴（受入れ払出し時）

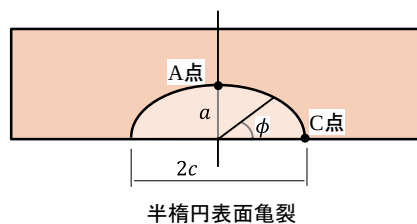
区分	容量 (kl)	7ニ15板厚 (mm)	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	経路	歪み ε (%)	備考
旧法	9,900	6	0.120	0.122	②→③	-0.002→0.120	
新法	32,000	12	0.142	0.149	②→③	-0.007→0.142	
新法	110.000	21	0.144	0.160	②→③	-0.016→0.144	

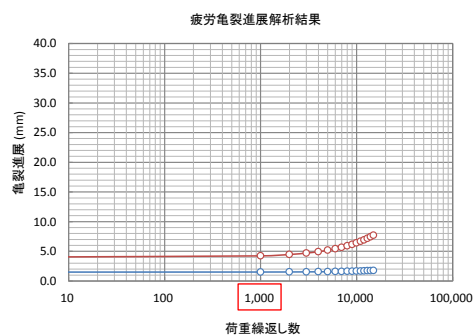
(4) 疲労亀裂進展解析結果

付表 1.2 残留応力下での疲労進展解析結果（荷重繰返し 1000 回）

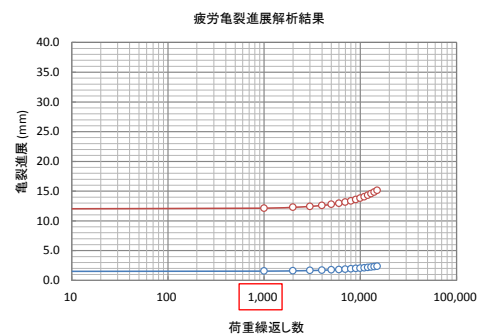
区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考
旧法	9,900	0.122	251	1000	1.5×4	1.51×4.23	0.01×0.23	
					1.5×8	1.53×8.19	0.03×0.19	
					1.5×12	1.53×12.14	0.03×0.14	
新法	32,000	0.149	307	1000	1.5×4	1.54×4.44	0.04×0.44	
					1.5×8	1.57×8.34	0.07×0.34	
					1.5×12	1.59×12.24	0.09×0.24	
新法	110.000	0.160	330	1000	1.5×4	1.54×4.57	0.04×0.57	
					1.5×8	1.58×8.43	0.08×0.43	
					1.5×12	1.61×12.31	0.11×0.31	

(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.0、板表面 (C 点) 1.8 を考慮



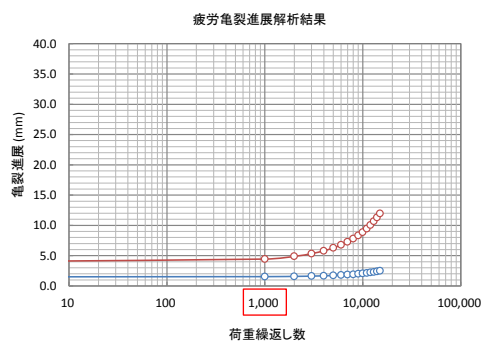


初期亀裂(1.5mm×4mm)

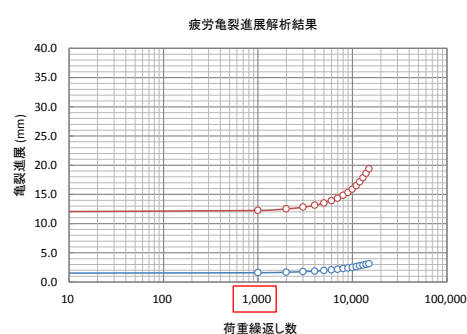


初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 1.5(a) 疲労進展解析結果 (旧法 9,900kl タンク)

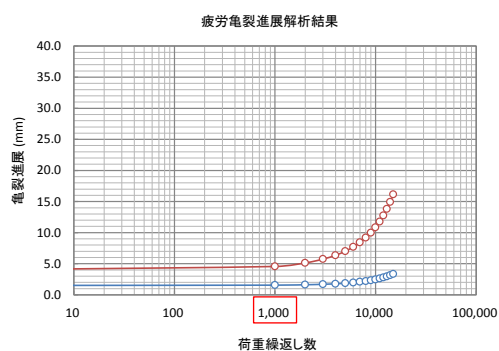


初期亀裂(1.5mm×4mm)

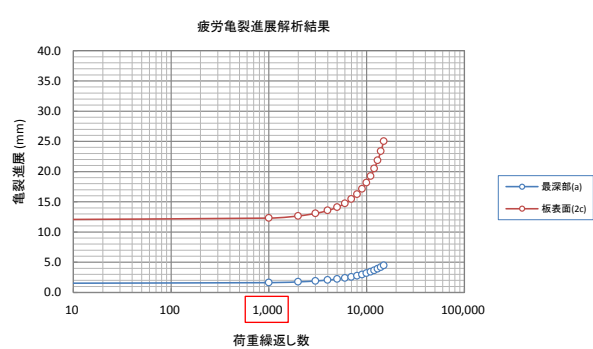


初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 1.5(b) 疲労進展解析結果 (32,000kl タンク)



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm 12mm)

付図 1.5(c) 疲労進展解析結果 (110,000kl タンク)

(5) 脆性破壊発生検討結果 ※亀裂進展後

付表 1.3(a) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (旧法 9,900kl タンク)

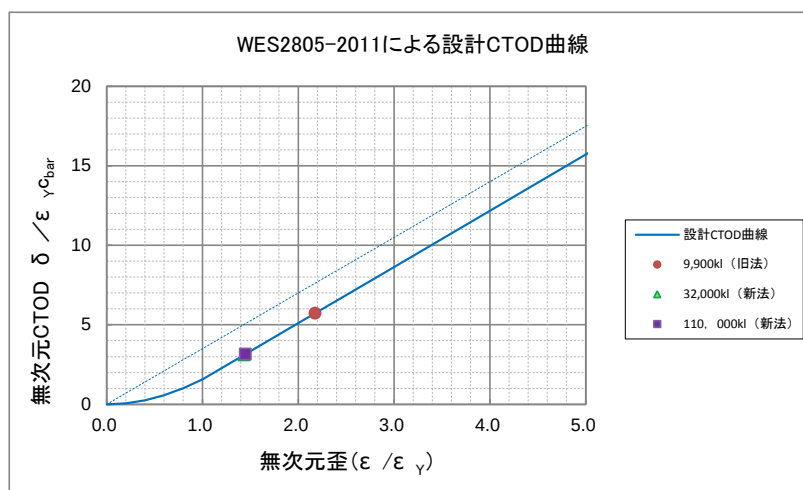
記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	0.120%	0.043%	0.096%	0.259%	0.119%	2.18	5.73

付表 1.3(b) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (32,000kl タンク)

記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	0.142%	0.086%	0.114%	0.341%	0.238%	1.43	3.11

付表 1.3(c) 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (110,000kl タンク)

記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	0.144%	0.086%	0.115%	0.345%	0.238%	1.45	3.16



付図 1.6 CTOD 設計曲線 (側板×アニュラ板)

付表 1.4(a) 脆性破壊発生検討結果（旧法 9,900kl タンク）※亀裂進展後

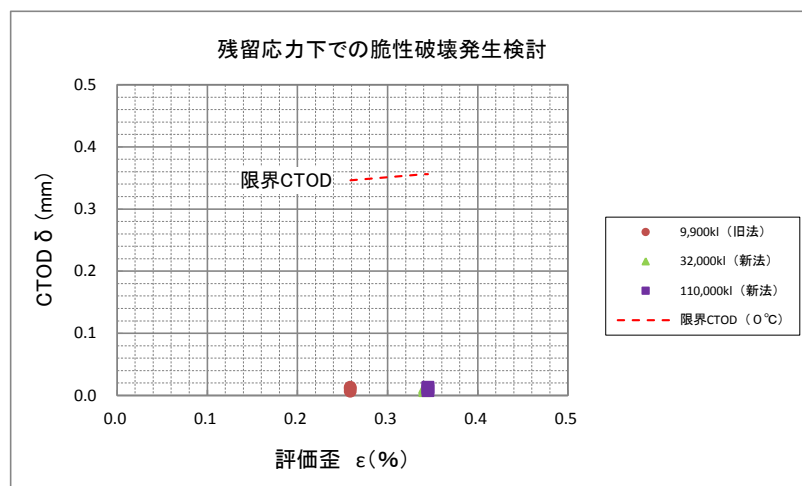
記号	部位	継手	亀裂の 方向	表面亀裂		係数 F_t	特性寸法 $\bar{c} \text{ (mm)}$	CTOD $\delta \text{ (mm)}$	限界CTOD $\delta_{cr} \text{ (mm)}$	余裕度 δ_{cr} / δ	備考
				(a × 2c)							
①	側板 × アニュラ板	T継手	溶接線に 平行	1.51	× 4.23	0.806	0.98	0.007	0.346	51.84	
				1.53	× 8.19	1.023	1.60	0.011	0.346	31.71	
				1.53	× 12.14	1.119	1.92	0.013	0.346	26.51	

付表 1.4(b) 脆性破壊発生検討結果（32,000kl タンク）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の 方向	表面亀裂	係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				(a×2c)	F_t	$\bar{c} (mm)$	$\delta (mm)$	$\delta_{cr} (mm)$	δ_{cr} / δ	
①	側板× アニュラ板	T継手	溶接線に 平行	1.54 × 4.44	0.801	0.99	0.007	0.356	48.73	
				1.57 × 8.34	0.980	1.51	0.011	0.356	31.96	
				1.59 × 12.24	1.052	1.76	0.013	0.356	27.38	

付表 1.4(c) 脆性破壊発生検討結果（110,000kl タンク）※亀裂進展後

記号	部位	継手	亀裂の 方向	表面亀裂		係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考	
				(a×2c)								F_t
①	側板× アニュラ板	T継手	溶接線に 平行	1.54	×	4.57	0.807	1.00	0.008	0.356	47.19	
				1.58	×	8.43	0.971	1.49	0.011	0.356	31.82	
				1.61	×	12.31	1.036	1.73	0.013	0.356	27.43	

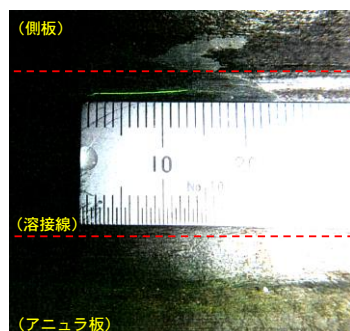


付図 1.7 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

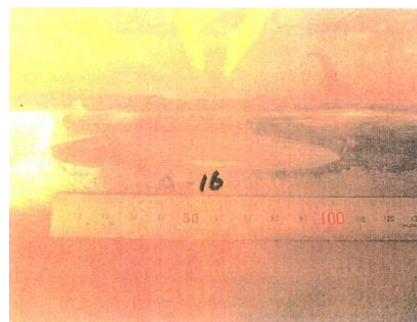
[付属書-2] 磁粉探傷試験結果の一例

(1) MT 検査による溶接欠陥検出寸法

付図 2.1 に、側板×アニュラ板溶接継手に対する磁粉探傷試験結果の一例を示す。付図 2.2 に、補修溶接前の欠陥除去（開先加工）の一例を示す。この例では、当該部の溶接欠陥を除去する際に、グラインダー等による機械的方法により、研削長さ 105mm×幅 15mm×深さ 4mm 程度の開先加工を行っている。



付図 2.1 磁粉探傷試験結果の一例¹⁾



付図 2.2 補修溶接前の開先加工例²⁾

通常、タンク底板の補修溶接を実施する際には、溶接欠陥除去記録として、検出された溶接欠陥の種類、欠陥指示模様の長さ（欠陥長さ）、及びグラインダーによる機械加工等で欠陥を除去した後の寸法を記録として残している（付表 2.1）。

付表 2.1 溶接欠陥除去記録（例）

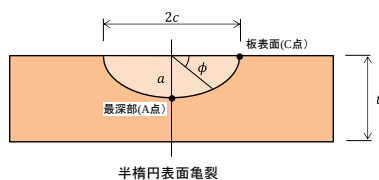
No.	部 位 (溶接継手)	検出欠陥		欠陥除去寸法 (mm)			備考
		きずの種類	指示長さ	長さ	幅	深さ	
	側板×アニュラ板	線状(LF)	ℓ4mm	50	10	2.0	
2	アニュラ板相互	ブローホール (BH)	φ4mm	50	10	2.0	
3	アニュラ板×底板	スラグ 巻込 (SI)	ℓ4mm	35	6	1.5	
4	底板相互	...	...				

そこで、付表 2. 2 に示す溶接欠陥除去記録のある計 44 基のタンクを任意に抽出して、タンク開放時の磁粉探傷試験（MT）により検出された線状の溶接欠陥長さ等の記録を調査した。

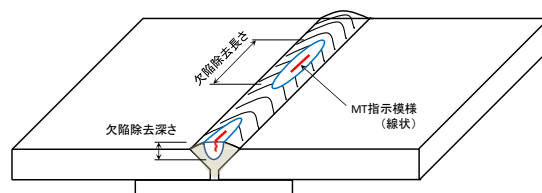
付表 2.2 タンク調査基数

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000～5,000	6	1	4	1	－	
II	5,000～10,000	7	2	－	－	－	
III	10,000～50,000	4	1	4	－	－	
IV	50,000～100,000	3	－	1	－	2	
V	100,000 超	2	－	－	－	6	
	合計	22	4	9	1	8	総計 44 基

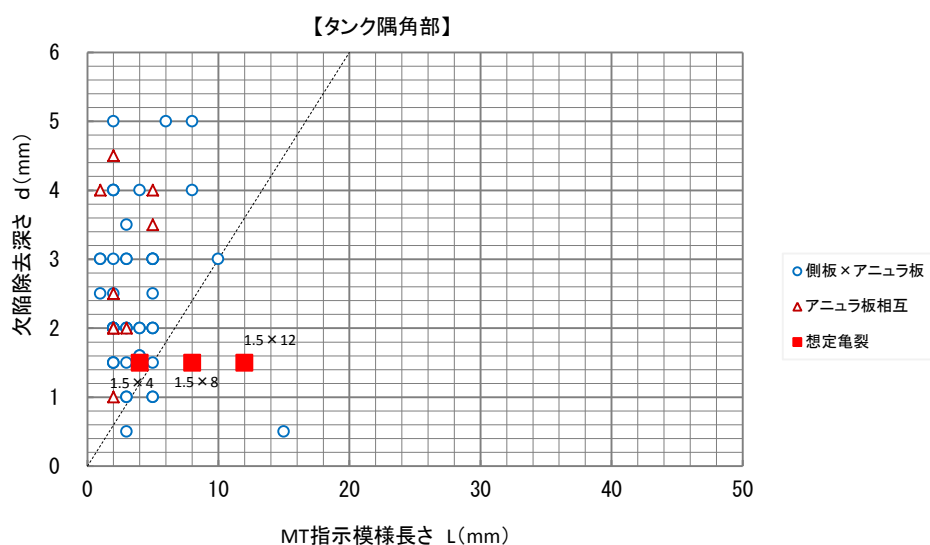
調査結果より、ブローホール（BH）を除く『線状指示模様欠陥』の検出例を、付図 2.4（側板×アニュラ板溶接継手）及び付図 2.5（底板相互溶接継手）に示す。この磁粉探傷試験では、アニュラ板表面における溶接欠陥の長さは“MT 指示模様長さ”として得られるが、欠陥深さに関する情報は得られない。ここでは、欠陥評価に用いた想定亀裂寸法と溶接欠陥除去寸法の比較を参考として示す。



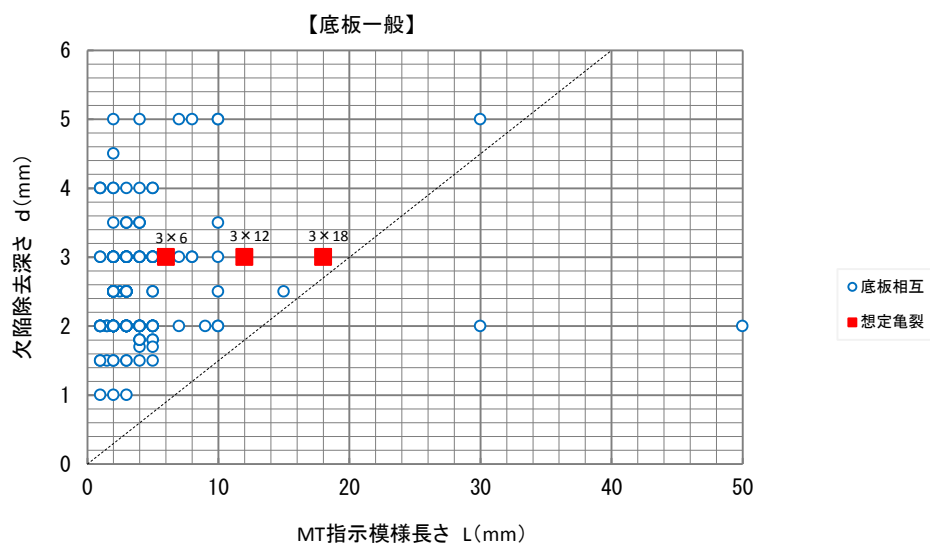
付図 2.3(a) 半楕円表面亀裂



付図 2.3(b) 溶接欠陥除去寸法



付図 2.4 磁粉探傷試験結果例（側板×アニュラ板溶接継手）



付図 2.5 磁粉探傷試験結果例（底板相互溶接継手）

※アニュラ板×底板溶接継手を含む。

図中には、本文の 8 項（初期不整又は局部沈下を有する底板への適用）、及び 9 項（高レベル地震時のタンク隅角部への適用）の試計算で用いた想定亀裂寸法を示している。同図より、想定亀裂は概ね実機タンクの磁粉探傷試験結果と対応していることが分かる。

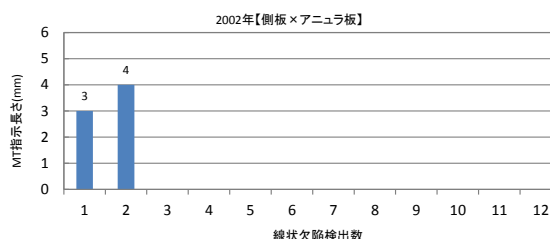
（２）MT 検査における欠陥検出履歴

ここでは、付表 2.3 の 10 万 kl 級タンクを例にして、タンク開放検査時における磁粉探傷検査の検出履歴を示す。当該タンクの側板×アニュラ板溶接継手部（タンク内面側）において、過去 回の MT 検査で検出した溶接欠陥のうち、球状のブローホール（BH）を除いた線状欠陥の検出履歴を、付図 2.6 に示す。

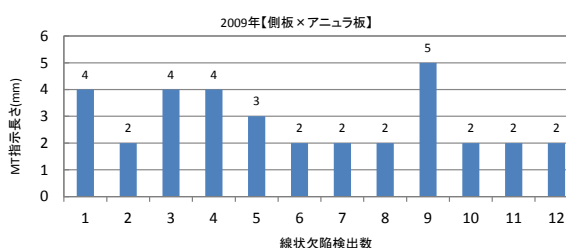
付表 2.3 10 万 kl 級タンクの諸元

項目	記号	数値	備考
タンク内径	D	78,200 mm	
高さ	H _T	24,500 mm	
液面高さ	H _L	21,800 mm	
液比重	ρ	1.0	
アニュラ板厚さ	t _a	25 mm	側最下段 36mm
降伏点	σ_y	490 N/mm ²	材質:SPV490Q

(a) 2002 年開放検査
【線状欠陥 2 箇所】



(b) 2009 年開放検査
【線状欠陥 12 箇所】



(c) 2017 年開放検査
【線状欠陥 2 箇所】



付図 2.6 溶接欠陥検出履歴（側板×アニュラ板溶接継手部）

当該タンクの例では、開放周期 7 年毎に溶接線全線を対象にして MT 検査を実施しているが、タンク開放毎に検出された溶接欠陥の箇所、数量及び MT 指示模様長さが異なっている。

【参考】

ここで、MT 検査による欠陥検出確率（POD）の一例を、付図 2.7 に示す。同図より、線状欠陥のうち欠陥長さが 5mm 程度以下の小さいものについては、MT 検査時に見逃されて、残留する可能性があることを示している⁴⁾。同様のことは、本文の表 4.3（底板溶接線の割れによる不適合案件一覧表）の“既設検査不備”として示されている。

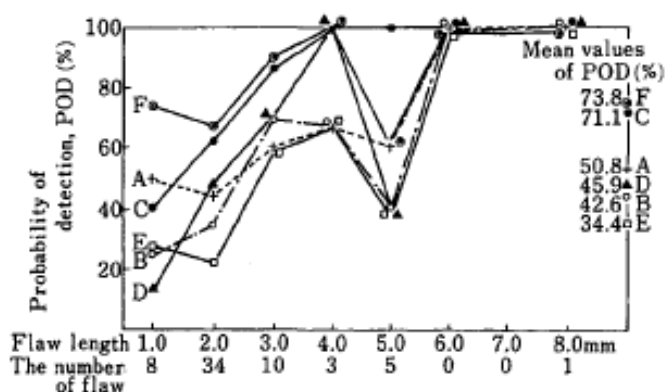


Fig. 7. Probability of detection as a function of flaw length by magnetic particle inspection in welds of gas storage tank. The inspection teams are denoted by A-F.

付図 2.7 MT 検査による欠陥検出確率例³⁾

【参考文献】

- 1) 危険物保安技術協会，“屋外タンク実務担当者講習会資料”，H30 年 11 月
- 2) 危険物保安技術協会，“水張検査の合理化に関する検討業務”，H19 年 3 月
- 3) 日本溶接協会，“プラント圧力設備溶接補修指針”，H21 年 11 月
- 4) 関根和喜，“磁気探傷法による鋼の欠陥評価技術の現状と問題点”，鉄と鋼, 第 74 年(1988), 第 12 号

〔付属書-3〕 局部沈下を有する底板の検証解析結果（軸対称解析）

API Standard 653:2009「Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction」では、図 8.1 のように底板の初期不整（凸型変形）又は局部沈下（凹型変形）を規定しており、不陸／不支持部を半径 R の内接円で近似している。

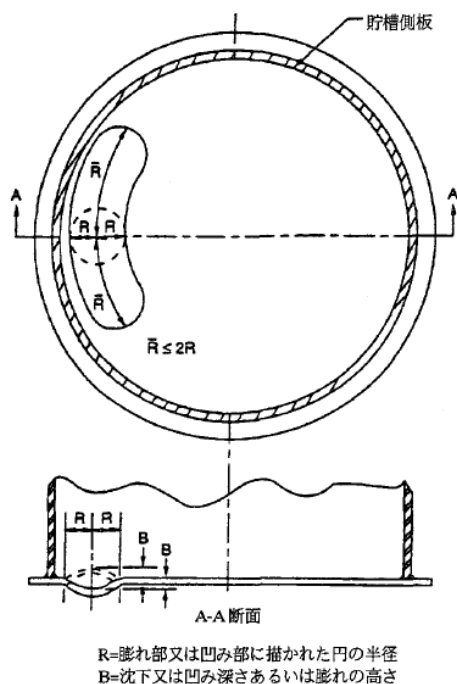


図 B-7 側板近くの底板沈下

【タイプ A】

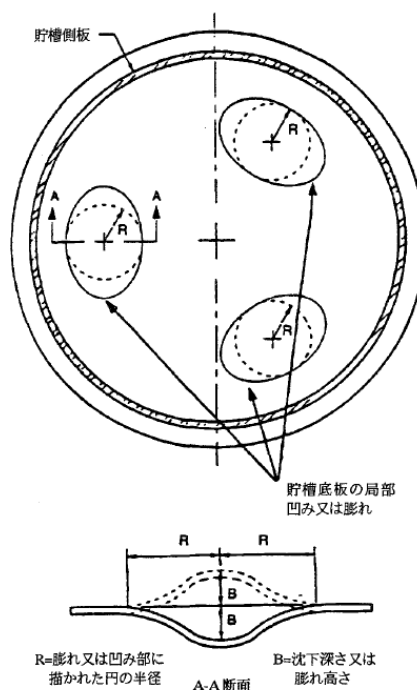


図 B-8 側板から離れた底板局部凹み又は膨れ

【タイプ B】

付図 3.1 API653 による底板局部沈下パターン

【本文】8 章では、安全側の取り扱いとして、底板局部沈下パターン【タイプ A】を想定した二次元平面ひずみ解析を適用した。

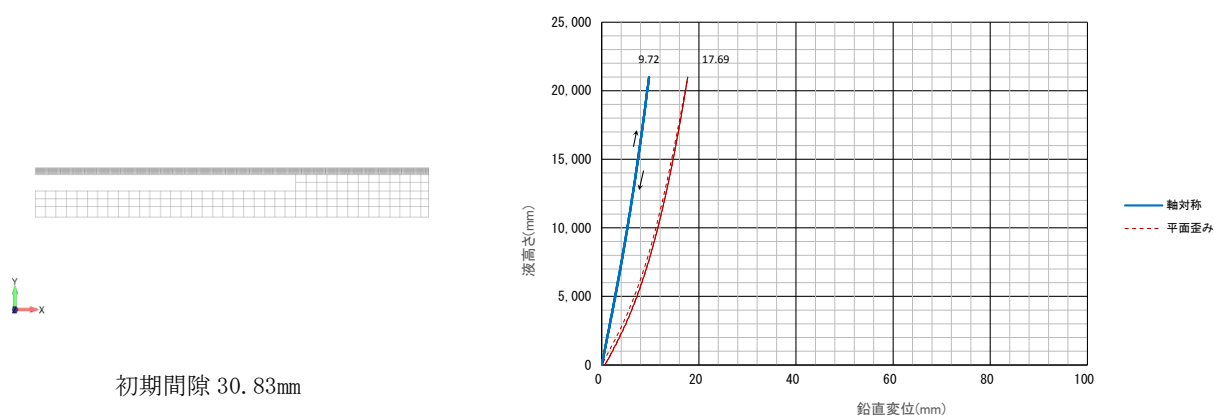
ここでは、軸対称解析（軸対称ソリッド要素）を適用して、局部沈下パターン【タイプ B】を想定した解析を実施して、前出の平面ひずみ解析結果が安全側にあることを確認した。

但し、解析ケースは下記の「（2）局部沈下」とする。

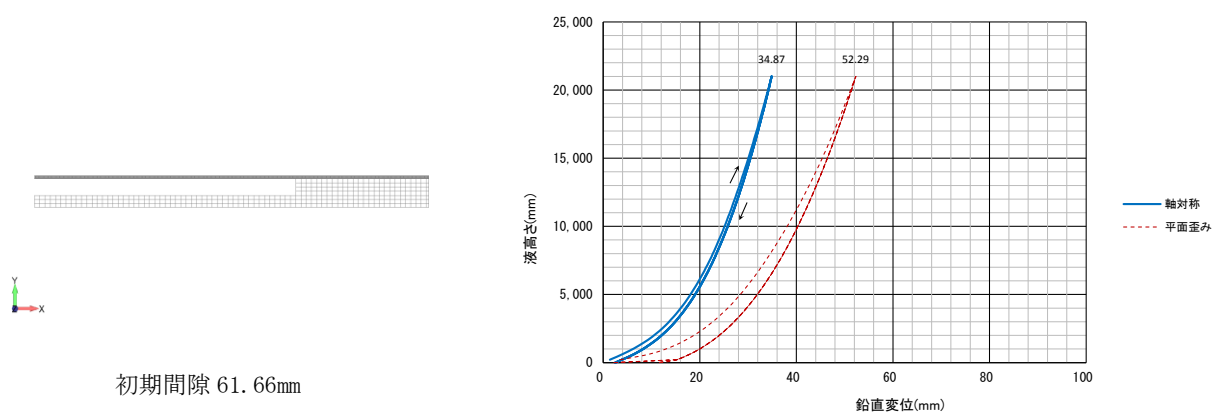
- （1）初期不整（凸型変形）を有する底板の検討 …… 【検討省略】
- （2）局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討 ※解析対象[R=500mm, 1000mm, 1500mm]

【参考文献】横浜国大，“陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討” 23～H25 年度

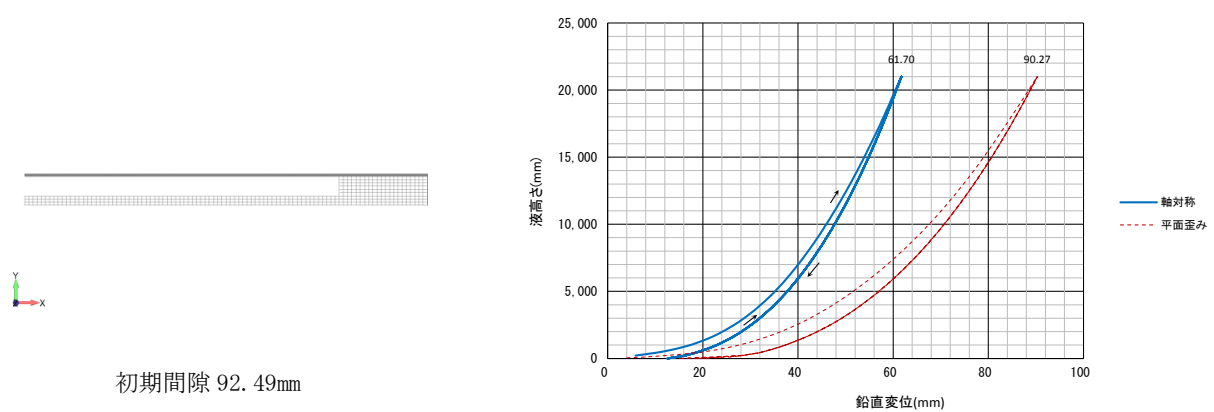
(1) 変位履歴



付図 3.2(a) 底板中央の変位履歴(不支持範囲 R=500mm)

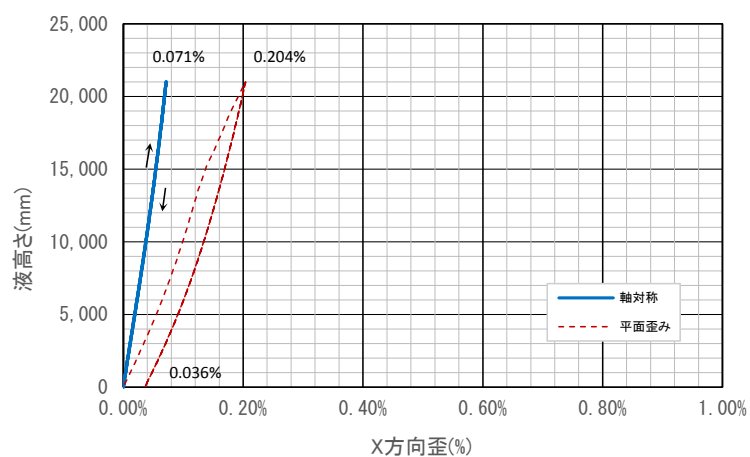


付図 3.2(b) 底板中央の変位履歴(不支持範囲 R=1000mm)

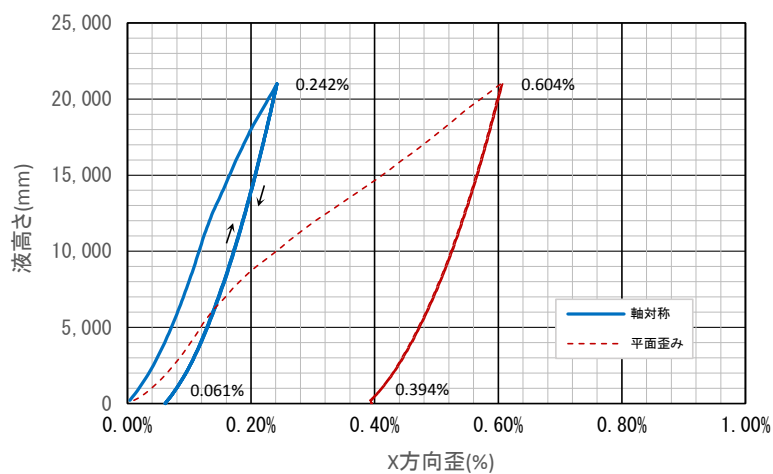


付図 3.2(c) 底板中央の変位履歴(不支持範囲 R=1500mm)

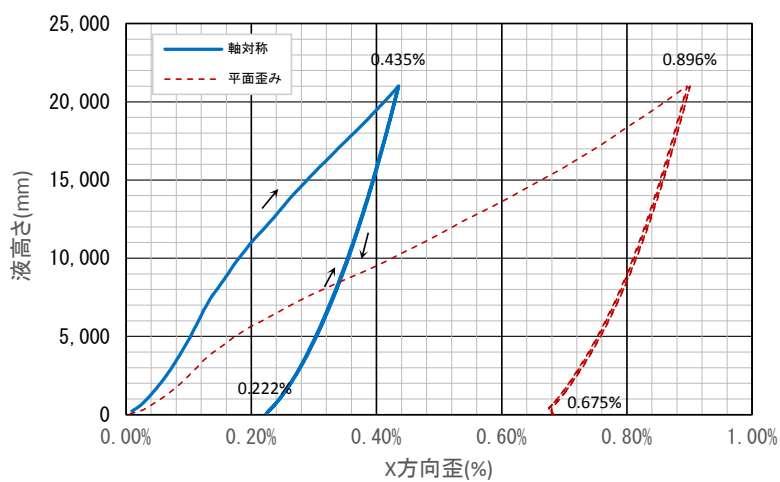
(2) 歪み履歴



付図 3.3 (a) 歪み履歴 (不支持範囲 R=500mm)



付図 3.3 (b) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1000mm)



付図 3.3 (c) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1500mm)

付表 3.1 (a) 歪み履歴 (不支持範囲 R=500mm)

No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	解析 モデル	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	最小歪み $\varepsilon_{\min}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	軸対称	0.071 (0.35 倍)	0.000	0.071 (0.42 倍)	
			平面歪み	0.204	0.036	0.168	

【注記】() 内は平面歪み解析結果に対する割合

付表 3.1 (b) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1000mm)

No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	解析 モデル	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	最小歪み $\varepsilon_{\min}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
2	1000	61.66	軸対称	0.242 (0.40 倍)	0.061	0.181 (0.86 倍)	
			平面歪み	0.604	0.394	0.210	

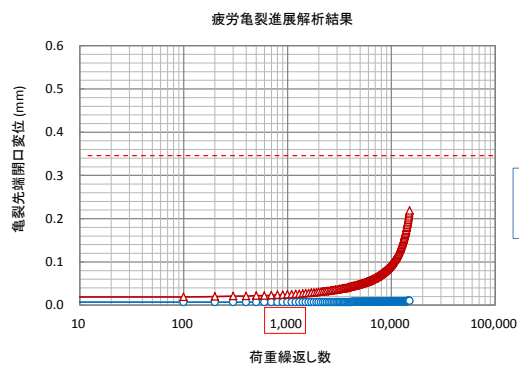
【注記】() 内は平面歪み解析結果に対する割合

付表 3.1 (c) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1500mm)

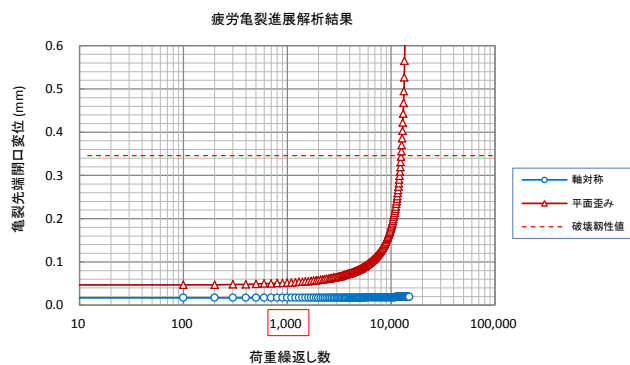
No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	解析 モデル	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	最小歪み $\varepsilon_{\min}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
3	1500	92.49	軸対称	0.435 (0.49 倍)	0.222	0.213 (0.96 倍)	
			平面歪み	0.896	0.675	0.221	

【注記】() 内は平面歪み解析結果に対する割合

(3) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

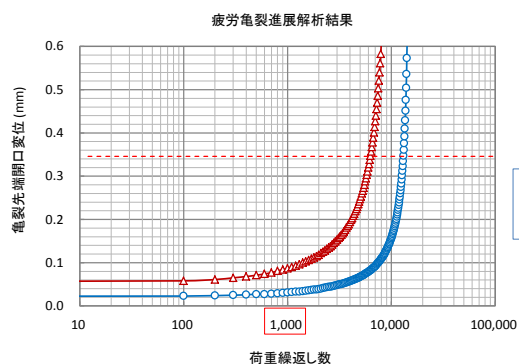


初期亀裂 (3mm×6mm)

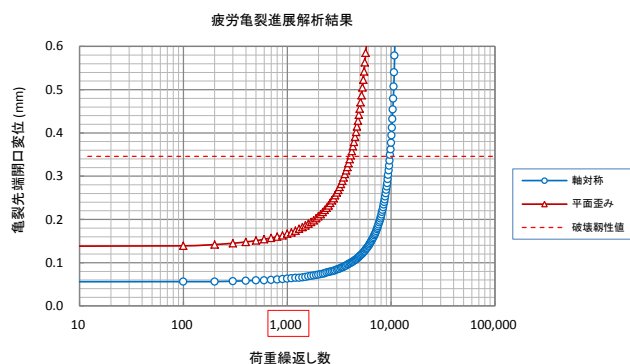


初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 3.4 (a) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=500mm)

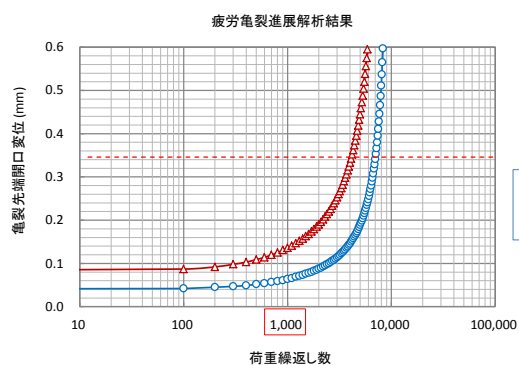


初期亀裂 (3mm×6mm)

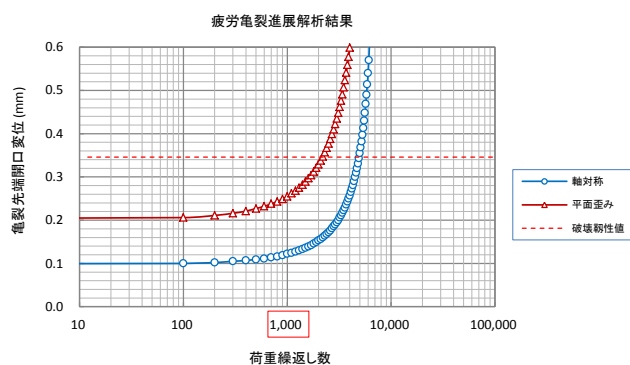


初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 3.4 (b) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1000mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 3.4 (c) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1500mm)

[付属書-4] 【新基準】 9,900kl タンクの解析結果（高レベル地震時）

(1) 対象タンク

付表 4.1 対象タンク

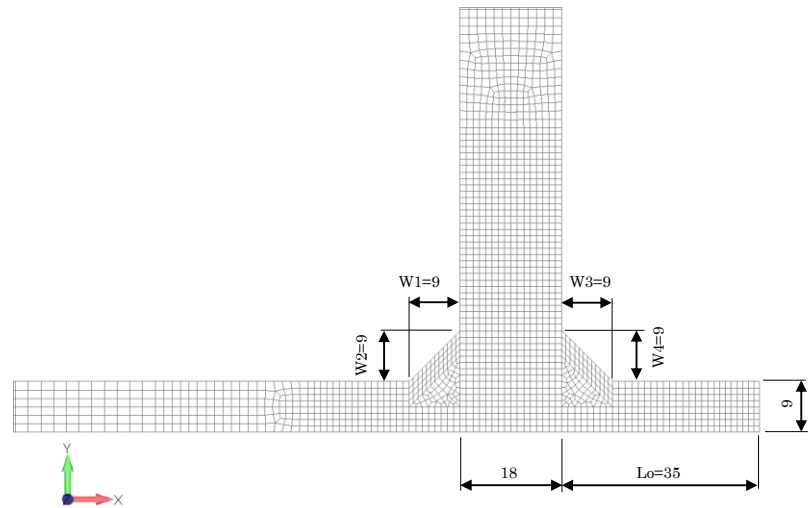
区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)			備考
							底板	アニユラ板	側板	
新基準	9,900	29,000	16,730	15,000	1.0	SS400	6	9	18	新基準

付表 4.2 底板の浮上り変位

区分	容量 (kl)	液圧 p (N/mm ²)	アニユラ板 材質	アニユラ板 t_a (mm)	降伏点 (N/mm ²)	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_B (mm)	備考
新基準	9,900	0.1471	SS400	9	245	6.686	93.6	$\delta_B = 14\delta_y$

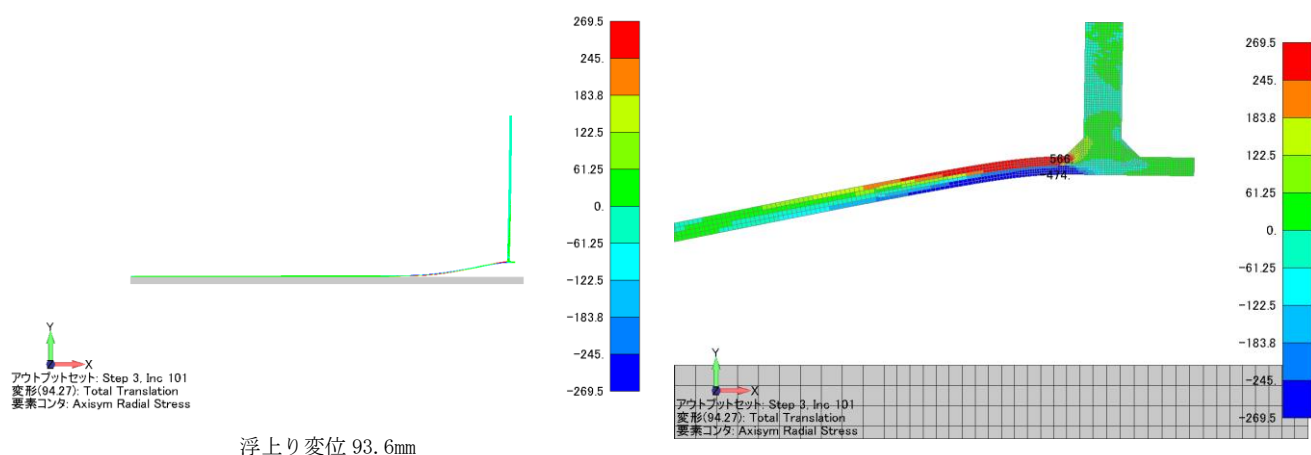
付表 4.3 側板×アニユラ板溶接継手

区分	容量 (kl)	材質	板厚構成 (mm)			隅肉寸法 (mm)				備考
			底板	アニユラ板	側板	W_1	W_2	W_3	W_4	
新基準	9,900	SS400	6	9	18	9	9	9	9	$\theta=45^\circ$

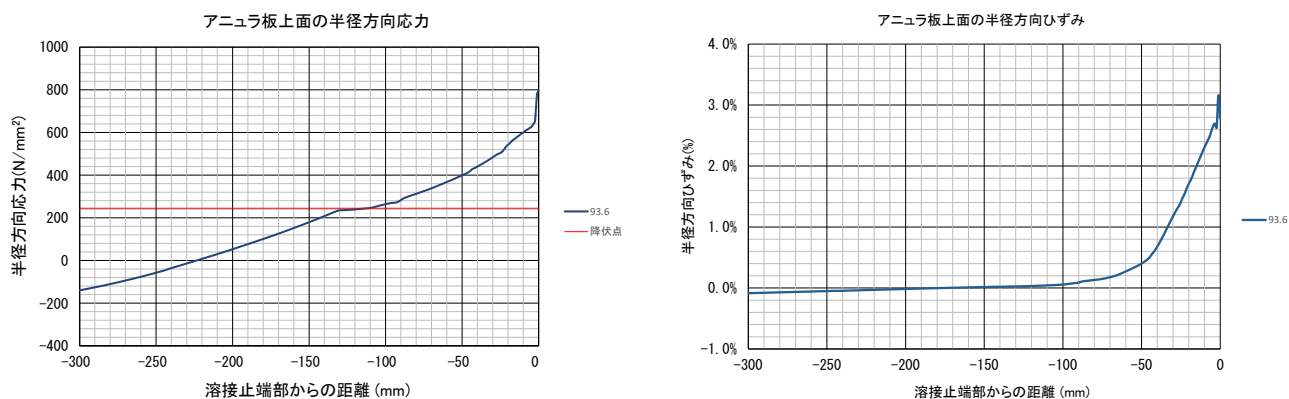


付図 4.1 【新基準】 9,900kl タンクの解析モデル

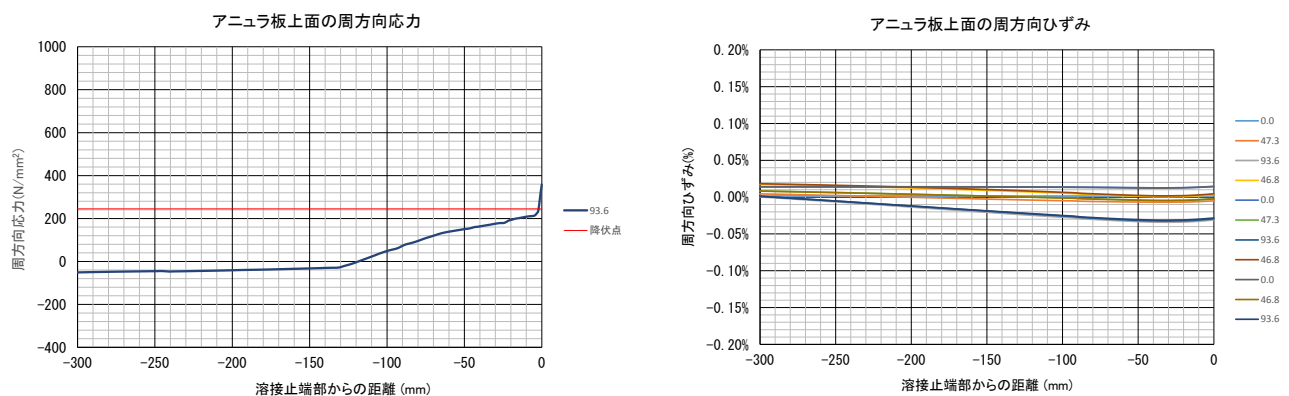
(2) 応力解析結果



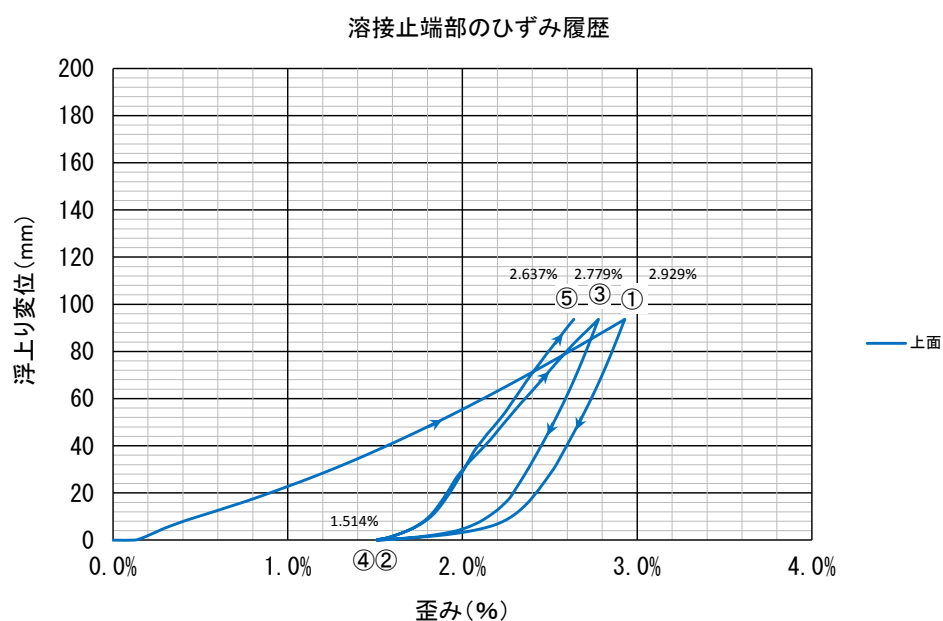
付図 4.2 タンク隅角部の応力分布 (新基準 9,900kl タンク)



付図 4.3 半径方向の表面応力・表面歪み (新基準 9,900kl タンク)



付図 4.4 円周方向の表面応力・表面歪み (新基準 9,900kl タンク)



0 付図 4.5 隅肉溶接止端部の歪み履歴（新基準 9,900kl タンク）

付表 4.4 歪み振幅（底板浮上り時）

区分	容量 (kl)	アニュラ板厚 (mm)	最大歪み ε_{max} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	経路	歪み ε (%)	備考 (差)
新基準	9,900	9	2.929	1.267 (平均)	① ②	2.929→1.514	1.415
					②→③	1.514→2.779	1.265
					③→④	2.779→1.514	
					④→⑤	1.514→2.637	1.123

（３）側板×アニュラ板溶接継手（隅肉溶接）

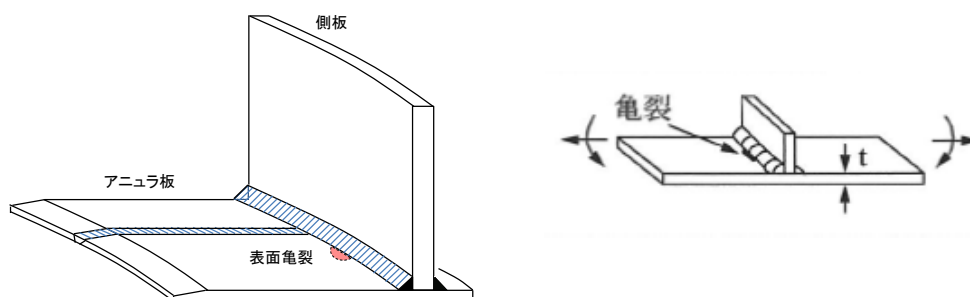


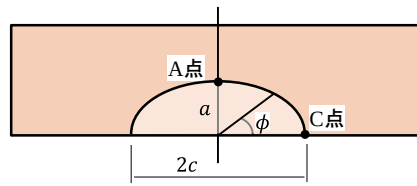
図 9.17 側板×アニュラ板溶接継手（T 継手）

(3.1) 残留応力場での疲労亀裂進展解析結果

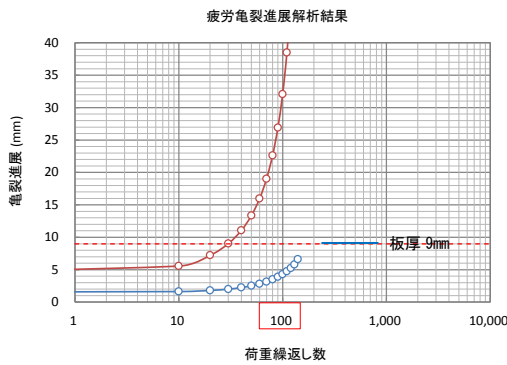
付表 4.5 残留応力下での疲労進展解析結果（荷重繰返し 100 回）

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK_c)
新基準	9,900 (9mm)	1.267	2609	100	1.5×4	4.30×32.08	2.80×28.08	364 *
					1.5×8	4.88×40.92	3.38×32.92	407 *
					1.5×12	5.36×49.71	3.86×37.71	453 *

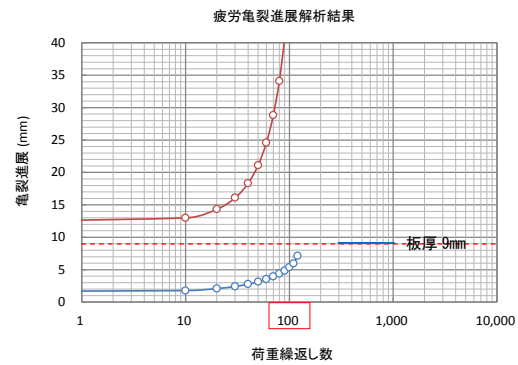
(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.0, 板表面 (C 点) 1.8 を考慮



半楕円表面亀裂

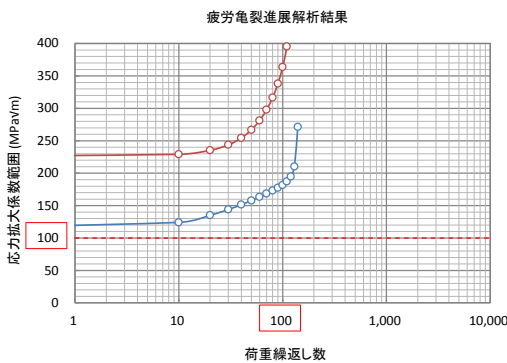


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

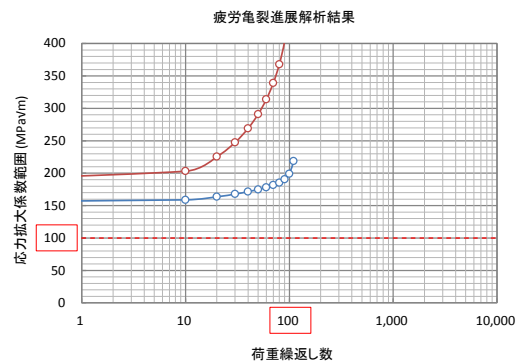


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 4.6 疲労亀裂進展解析結果（新基準 9,900kl タンク）



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 4.7 応力拡大係数範囲（新基準 9,900kl タンク）

(3.2) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

付表 4.6 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果（新基準 9,900kl タンク）

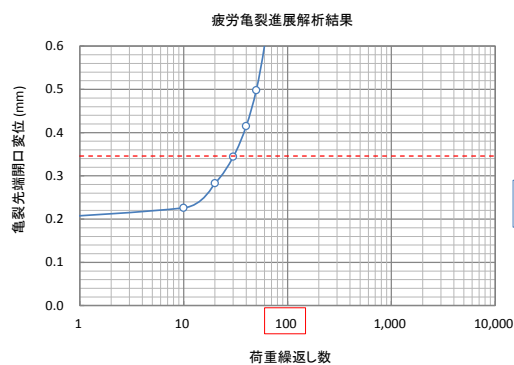
記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	2.929%	0.043%	2.343%	5.315%	0.119%	44.68	155.94

付表 4.7 脆性破壊発生検討結果（新基準 9,900kl タンク）※初期亀裂

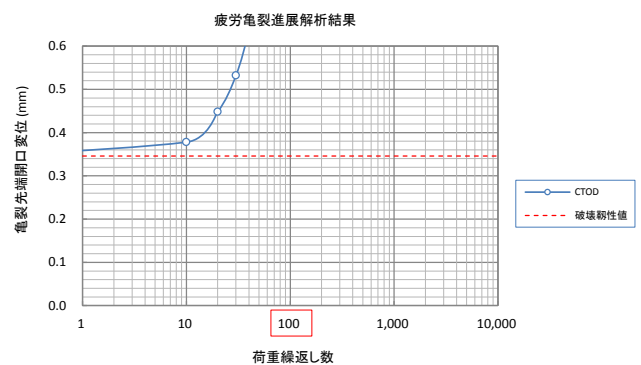
記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
							F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.5	×	4	0.777	0.90	0.168	0.346	2.06	
				1.5	×	8	0.990	1.47	0.273	0.346	1.27	
				1.5	×	12	1.072	1.72	0.320	0.346	1.08	

付表 4.8 脆性破壊発生検討結果（新基準 9,900kl タンク）※荷重繰返し 100 回

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
							F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	4.30	×	32.08	1.324	7.54	1.398	0.346	0.25	*
				4.88	×	40.92	1.485	10.76	1.996	0.346	0.17	*
				5.36	×	49.71	1.670	14.94	2.772	0.346	0.12	*



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 4.8 亀裂先端開口変位（新基準 9,900kl タンク）

(4) アニュラ板相互溶接継手（突合せ溶接）

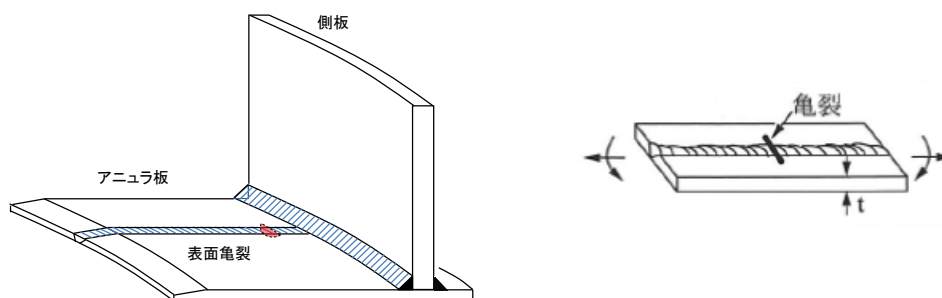


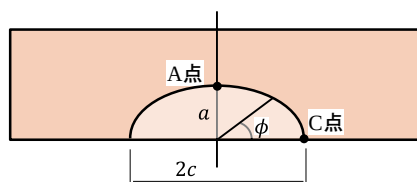
図 9.21 アニュラ板相互溶接継手（直角）

(4.1) 残留応力場での疲労亀裂進展解析結果

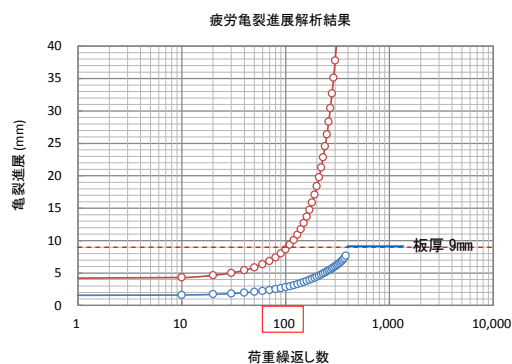
付表 4.9 残留応力下での疲労進展解析結果（荷重繰返し 100 回）

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK)
新基準	9,900 (9mm)	1.267	2609	100	1.5×4	2.80×8.65	1.30×4.65	167 *
					1.5×8	3.57×13.75	1.07×5.75	188 *
					1.5×12	4.10×18.45	2.60×6.45	204 *

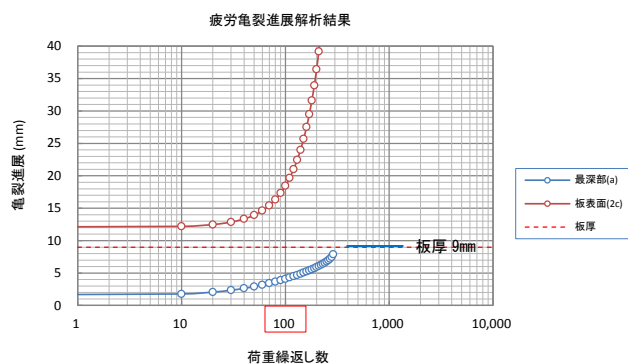
(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.0, 板表面 (C 点) 1.0 考慮



半楕円表面亀裂

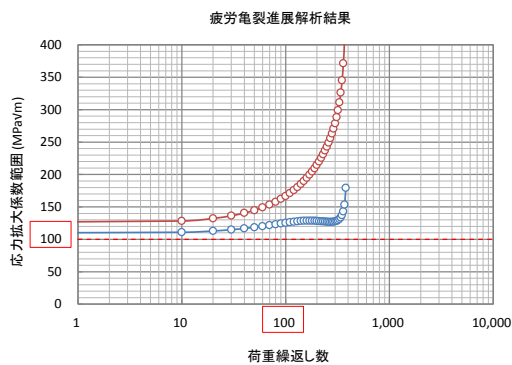


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

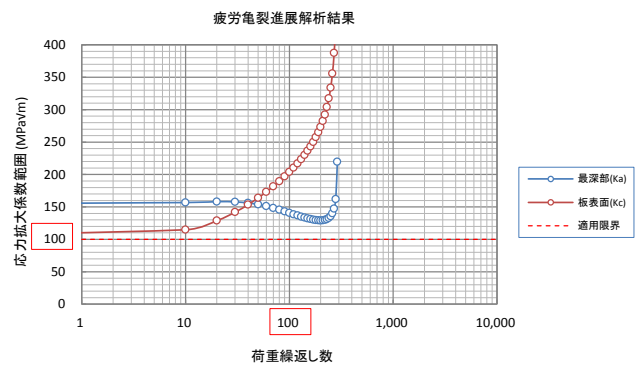


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 4.9 疲労亀裂進展解析結果（新基準 9,900kl タンク）



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 4.10 応力拡大係数範囲(新基準 9,900kl タンク)

(4.2) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

付表 4.10 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果(新基準 9,900kl タンク)

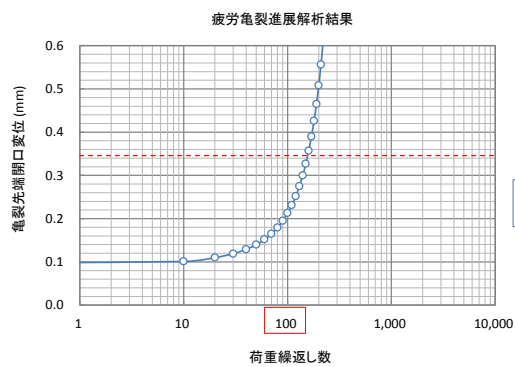
記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	2.929%	0.071%	0.000%	3.000%	0.119%	25.22	87.17

付表 4.11 脆性破壊発生検討結果(新基準 9,900kl タンク) ※初期亀裂

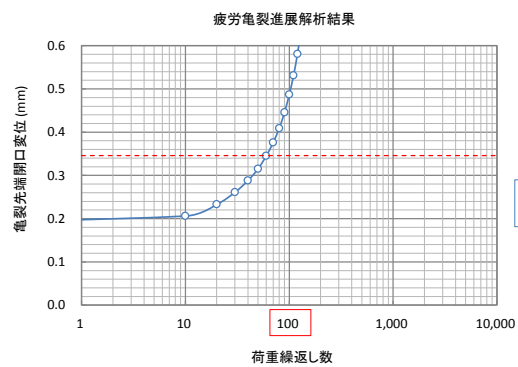
記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				a	×	c	F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.5	×	4	0.777	0.90	0.094	0.346	3.69	
				1.5	×	8	0.990	1.47	0.152	0.346	2.27	
				1.5	×	12	1.072	1.72	0.179	0.346	1.94	

付表 4.12 脆性破壊発生検討結果(新基準 9,900kl タンク) ※荷重繰返し 100 回

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				a	×	c	F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	2.80	×	8.65	0.856	2.05	0.213	0.346	1.63	
				3.57	×	13.75	0.973	3.38	0.350	0.346	0.99	*
				4.10	×	18.45	1.070	4.69	0.487	0.346	0.71	*



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 4.11 亀裂先端開口変位 (新基準 9,900kl タンク)

[付属書-5] 【新法】 18,200kl タンクの解析結果（高レベル地震時）

(1) 対象タンク

付表 5.1 対象タンク

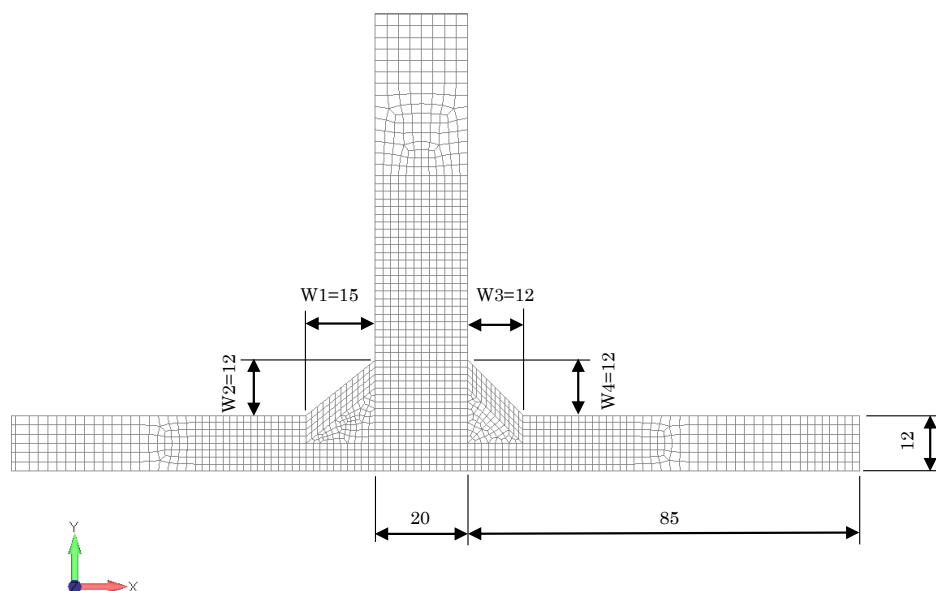
区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)			備考
							底板	アニユラ板	側板	
新法	18,200	34,500	22,695	19,470	1.0	SM490C	9	12	20	

付表 5.2 底板の浮上り変位

区分	容量 (kl)	液圧 p (N/mm ²)	アニユラ板 材質	アニユラ板 t_a (mm)	降伏点 (N/mm ²)	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_B (mm)	備考
新法	18,200	0.1909	SM490C	12	325	12.086	169.2	$\delta_B = 14\delta_y$

付表 5.3 側板×アニユラ板溶接継手

区分	容量 (kl)	材質	板厚構成 (mm)			隅肉寸法 (mm)				備考
			底板	アニユラ板	側板	W_1	W_2	W_3	W_4	
新法	18,200	SM490C	9	12	20	15	12	12	12	$\theta = 38.7^\circ$

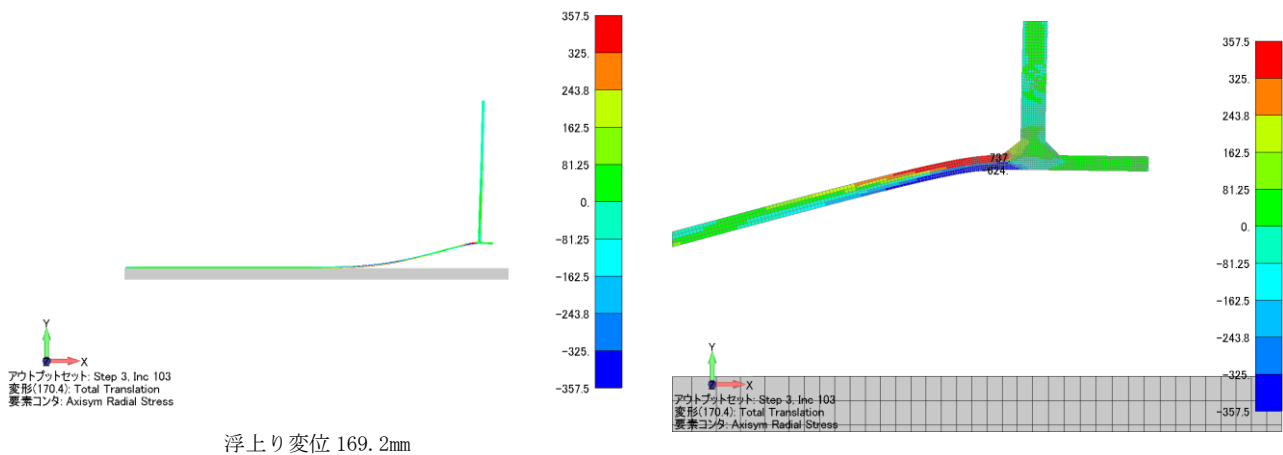


付図 5.1 【新法】 18,200kl タンクの解析モデル

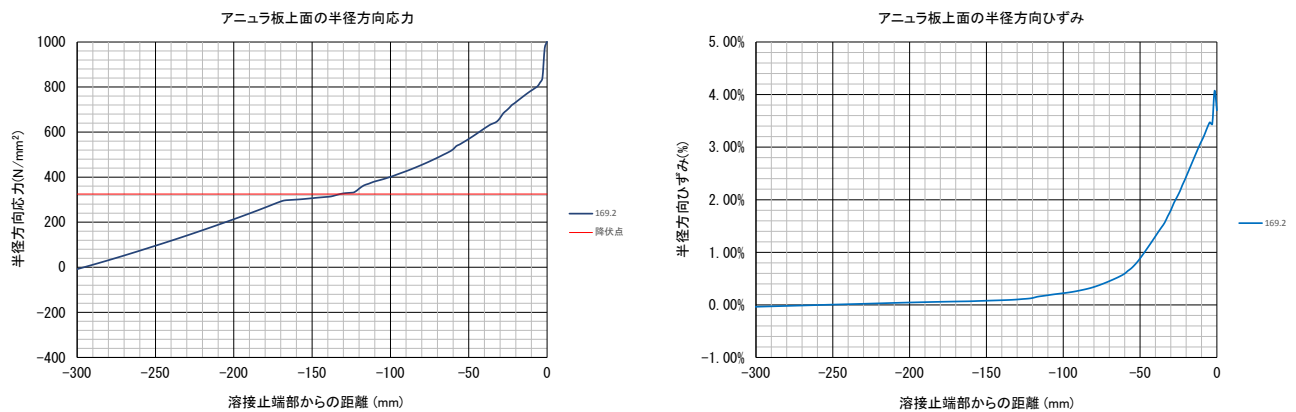
付表 5.4 材料定数[SM490]

縦弾性係数	E	205,939.7 N/mm ²
ポアソン比	ν	0.3
降伏応力	σ_Y	325 N/mm ² (t $\leq$ 16)
引張強さ	σ_t	490 N/mm ²
ひずみ硬化率	H'	E/100 (等方硬化)
基礎ばね定数	Kb	0.3 N/mm ³

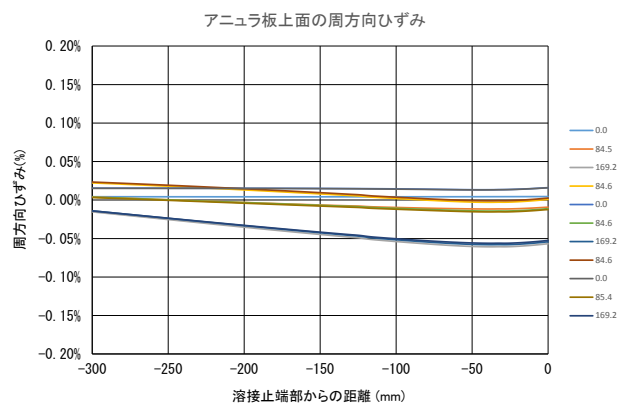
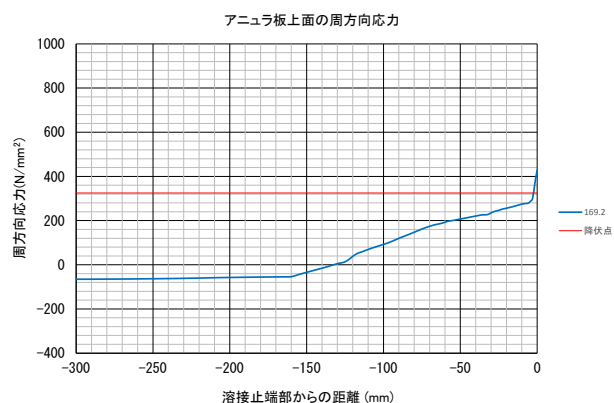
(2) 応力解析結果



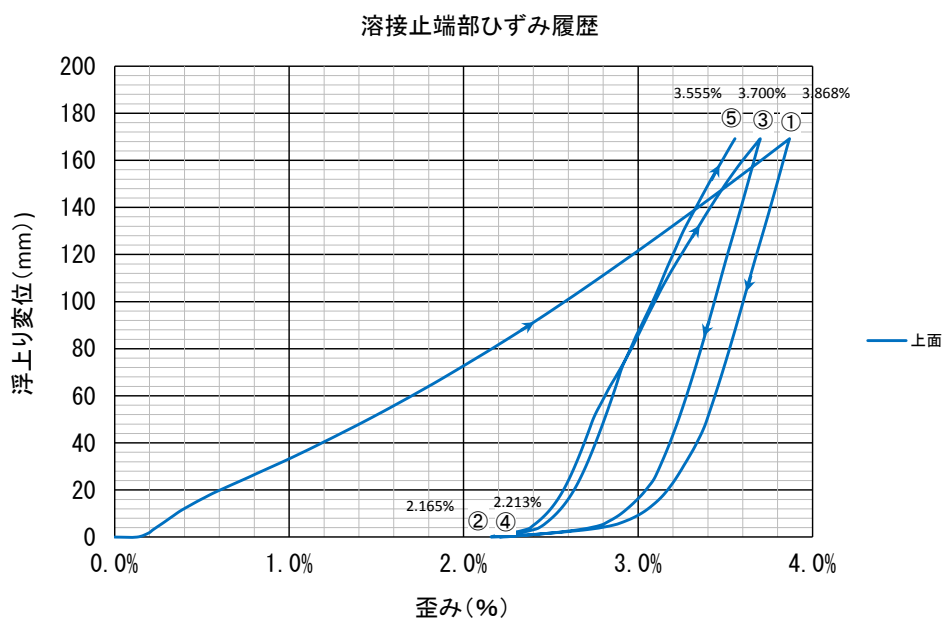
付図 5.2 タンク隅角部の応力分布 (18, 200kl タンク)



付図 5.3 半径方向の表面応力・表面歪み (18, 200kl タンク)



付図 5.4 円周方向の表面応力・表面歪み (18, 200kl タンク)



付図 5.5 隅肉溶接止端部の歪み履歴 (18, 200kl タンク)

付表 5.5 歪み振幅 (底板浮上り時)

区分	容量 (kl)	アニラ板厚 (mm)	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	経路	歪み ε (%)	備考 (差)
新法	18, 200	12	3.868	1.517 (平均)	①→②	3.868→2.165	1.703
					②→③	2.165→3.700	1.535
					③→④	3.700→2.213	1.487
					④→⑤	2.213→3.555	1.342

(3) 側板×アニュラ板溶接継手 (隅肉溶接)

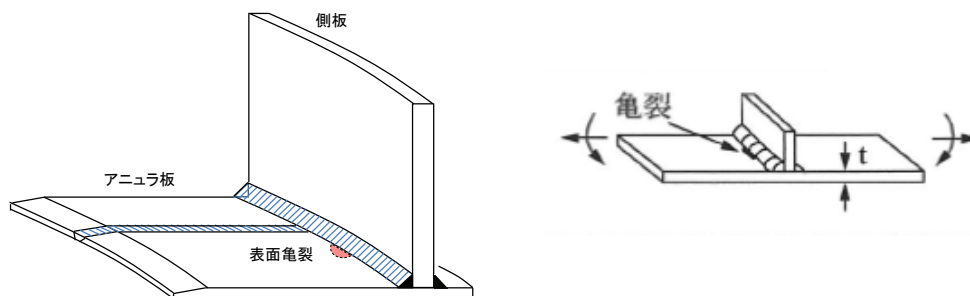


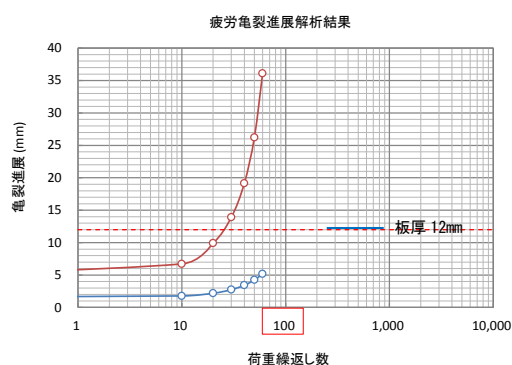
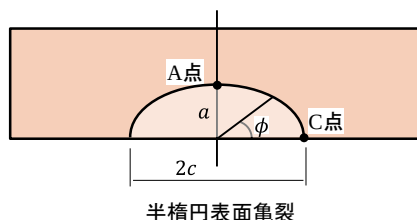
図 9.17 側板×アニュラ板溶接継手 (T 継手)

(3.1) 残留応力場での疲労亀裂進展解析結果

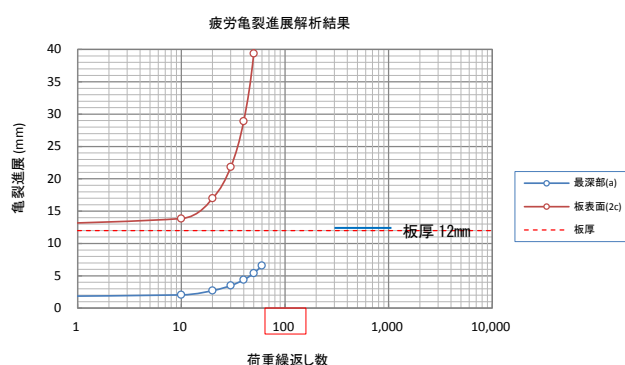
付表 5.6 残留応力下での疲労進展解析結果 (荷重繰返し 60 回)

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK_I)
新法	18, (12mm)	1.517	3124	100	1.5×4	5.19×36.11	3.69×32.11	474 *
					1.5×8	5.96×46.30	4.49×38.30	535 *
					1.5×12	6.59×56.30	5.09×44.30	601 *

(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.0、板表面 (C 点) 1.8 を考慮

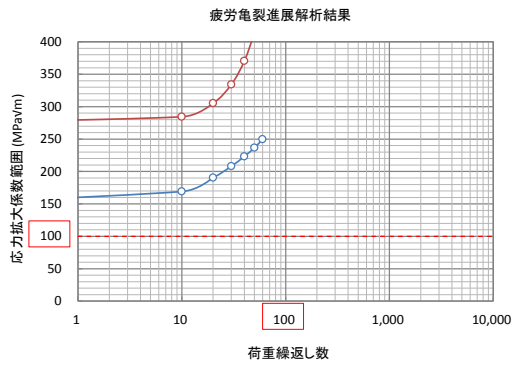


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

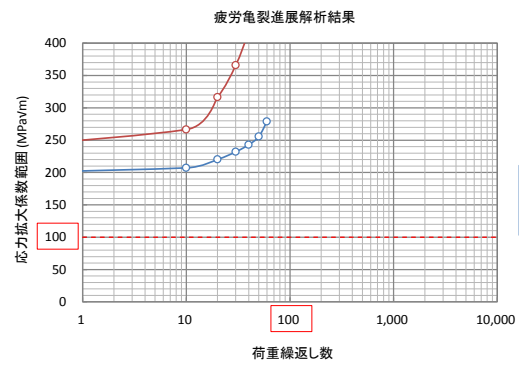


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 5.6 疲労亀裂進展解析結果 (18, 200kl タンク)



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 5.7 応力拡大係数範囲 (18, 200kl タンク)

(3.2) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

付表 5.7 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (18, 200kl タンク)

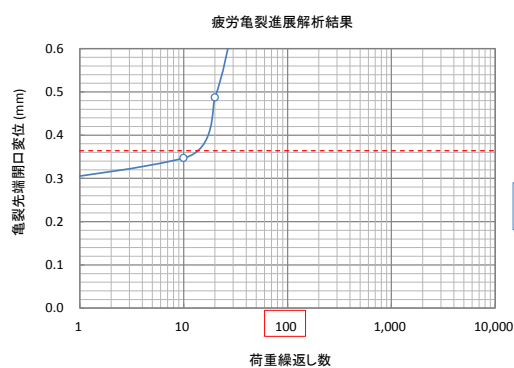
記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	3.868%	0.057%	3.094%	7.019%	0.158%	44.48	155.23

付表 5.8 脆性破壊発生検討結果 (18, 200kl タンク) ※初期亀裂

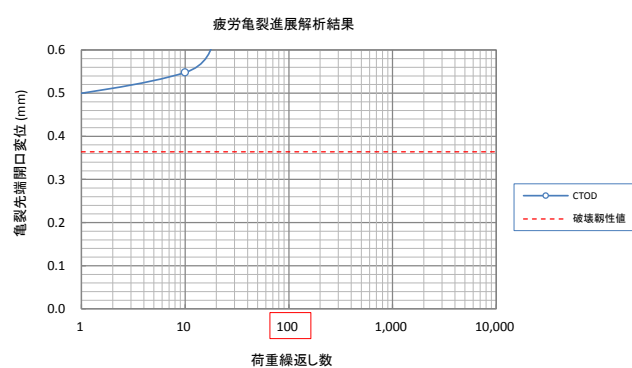
記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				(a×2c)			F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.5	×	4	0.773	0.90	0.220	0.364	1.66	
				1.5	×	8	0.979	1.44	0.352	0.364	1.03	
				1.5	×	12	1.055	1.67	0.409	0.364	0.89	*

付表 5.9 脆性破壊発生検討結果 (18, 200kl タンク) ※荷重繰返し 60 回

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				(a×2c)			F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	5.19	×	36.11	1.260	8.24	2.019	0.356	0.18	*
				5.96	×	46.3	1.412	11.89	2.912	0.356	0.12	*
				6.59	×	56.3	1.592	16.70	4.092	0.356	0.09	*



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 5.8 亀裂先端開口変位 (18, 200kl タンク)

(4) アニュラ板相互溶接継手 (突合せ溶接)

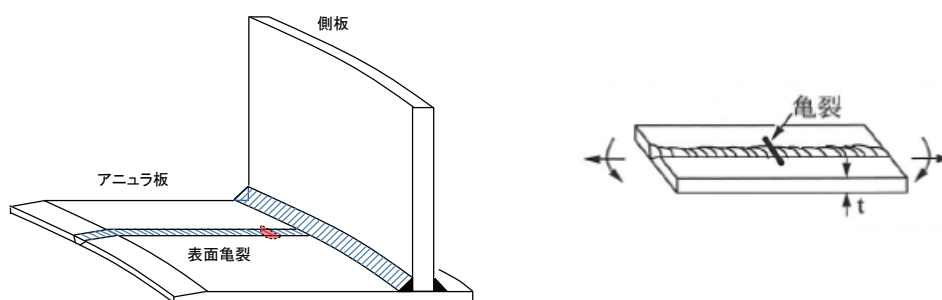


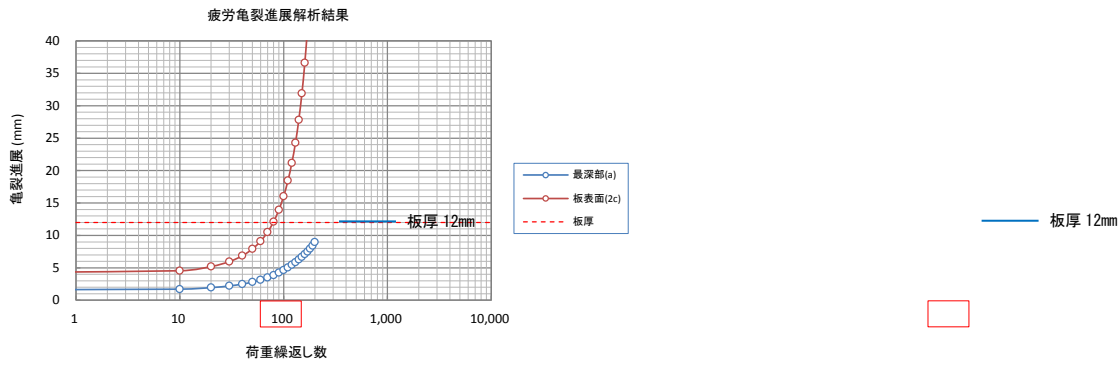
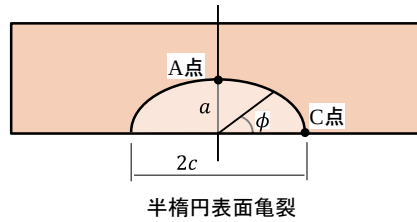
図 9.21 アニュラ板相互溶接継手 (直角)

(4.1) 残留応力場での疲労亀裂進展解析結果

5.10 残留応力下での疲労進展解析結果 (荷重繰返し 100 回)

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK)
新法	18, 200 (12mm)	1.517	3124	100	1.5×4	4.65×16.05	3.15×12.05	259 *
					1.5×8	5.86×24.68	4.36×16.68	298 *
					1.5×12	6.65×32.46	5.15×20.46	328 *

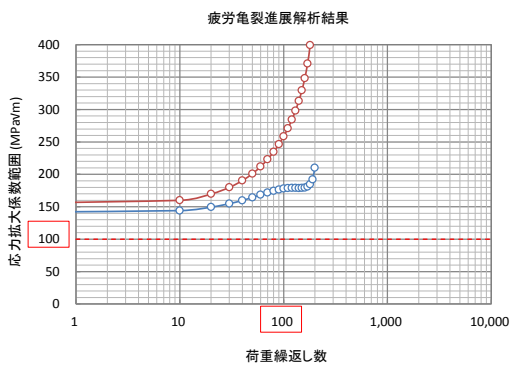
(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.0, 板表面 (C 点) 1.0 考慮



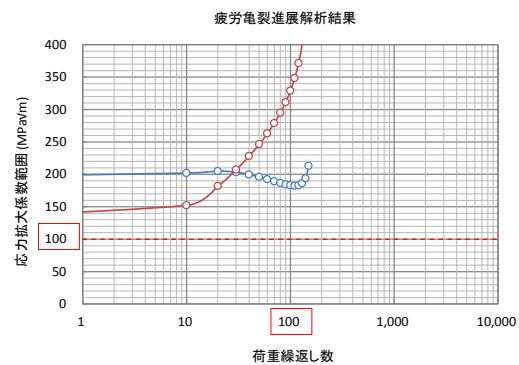
初期亀裂(1.5mm×4mm)

初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 5.9 疲労亀裂進展解析結果 (18, 200kl タンク)



初期亀裂(1.5mm×4mm)



初期亀裂(1.5mm×12mm)

付図 5.10 応力拡大係数範囲 (18, 200kl タンク)

(4.2) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

付表 5.11 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (18, 200kl タンク)

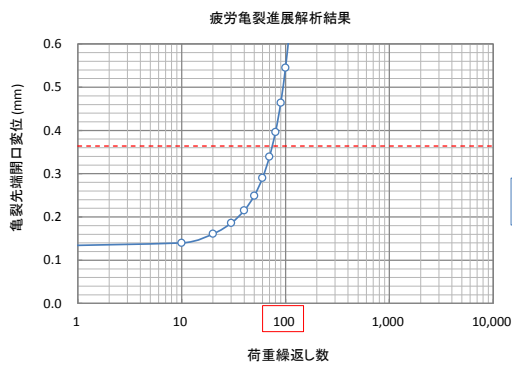
記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力 ε_1 (%)	残留応力 ε_2 (%)	応力集中 ε_3 (%)	評価歪 ε (%)	降伏歪 ε_Y (%)	無次元歪 $\varepsilon/\varepsilon_Y$	無次元CTOD $\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	3.868%	0.095%	0.000%	3.963%	0.158%	25.11	86.78

付表 5.12 脆性破壊発生検討結果（18, 200kI タンク）※初期亀裂

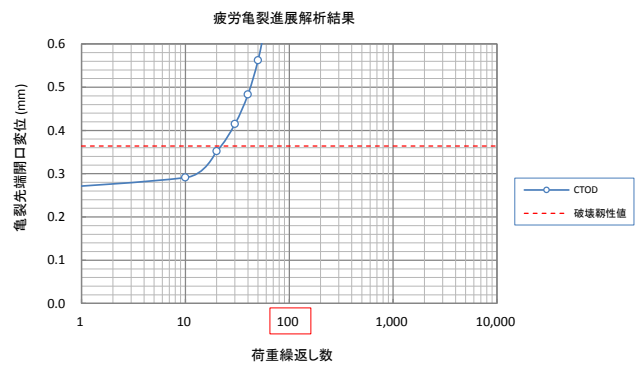
記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 ($a \times 2c$)			係数 F_t	特性寸法 $\bar{c}$ (mm)	CTOD δ (mm)	限界CTOD δ_{cr} (mm)	余裕度 δ_{cr} / δ	備考
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.5	×	4	0.773	0.90	0.123	0.364	2.96	
				1.5	×	8	0.979	1.44	0.197	0.364	1.85	
				1.5	×	12	1.055	1.67	0.229	0.364	1.59	

付表 5.13 脆性破壊発生検討結果（18, 200kI タンク）※荷重繰返し 100 回

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 ($a \times 2c$)			係数 F_t	特性寸法 $\bar{c}$ (mm)	CTOD δ (mm)	限界CTOD δ_{cr} (mm)	余裕度 δ_{cr} / δ	備考
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	4.65	×	16.05	0.925	3.98	0.545	0.356	0.65	*
				5.86	×	24.68	1.066	6.66	0.912	0.356	0.39	*
				6.65	×	32.46	1.197	9.53	1.306	0.356	0.27	*



初期亀裂 (1.5mm × 4mm)



初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 5.11 亀裂先端開口変位（18, 200kI タンク）

[付属書-6] 【新法】60,000kl タンクの解析結果（高レベル地震時）

(1) 対象タンク

付表 6.1 対象タンク

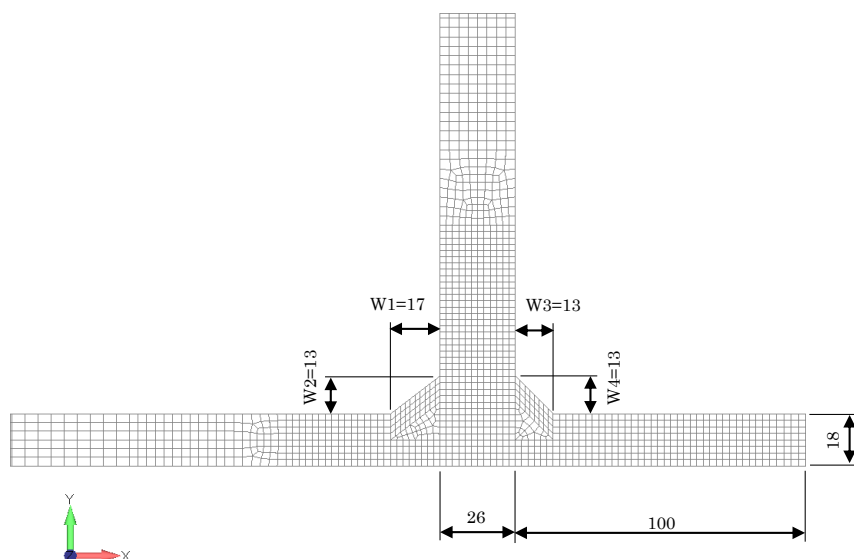
区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)			備考
							底板	アニラ板	側板	
新法	60,000	62,800	22,000	19,800	1.0	SPV490Q	12	18	26	

付表 6.2 底板の浮上り変位

区分	容量 (kl)	液圧 p (N/mm ²)	アニラ板 材質	アニラ板 t _a (mm)	降伏点 (N/mm ²)	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_B (mm)	備考
新法	60,000	0.1942	SPV490Q	18	490	40.52	162.1	$\delta_B = 4\delta_y$

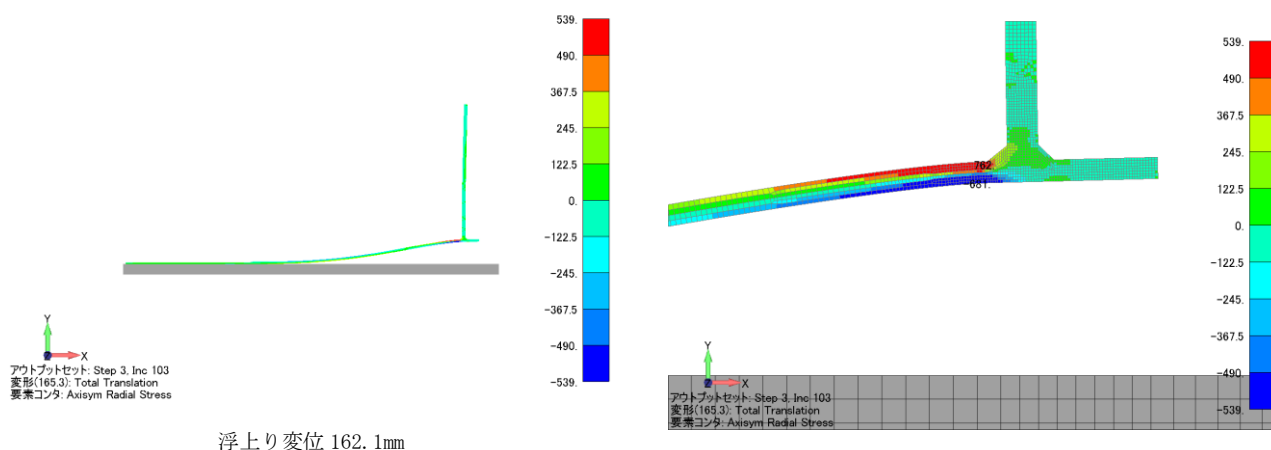
付表 6.3 側板×アニラ板溶接継手

区分	容量 (kl)	材質	板厚構成 (mm)			隅肉寸法 (mm)				備考
			底板	アニラ板	側板	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	
新法	60,000	SPV490Q	12	18	26	17	13	13	13	$\theta = 37.4^\circ$

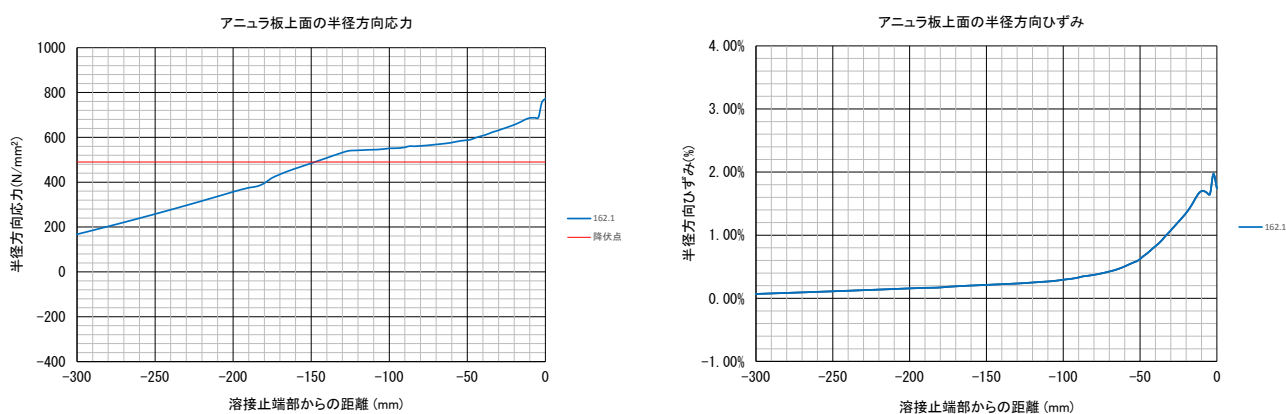


付図 6.1 【新法】60,000kl タンクの解析モデル

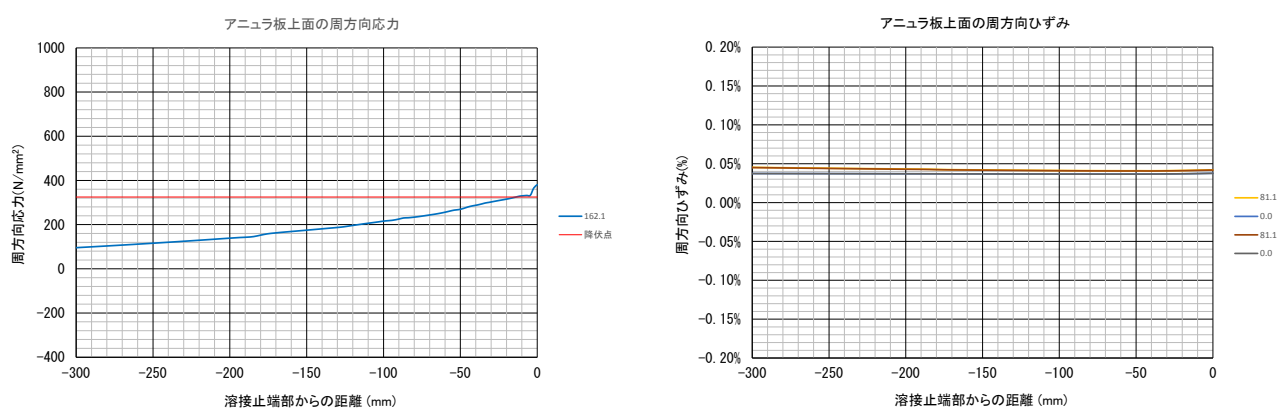
(2) 応力解析結果



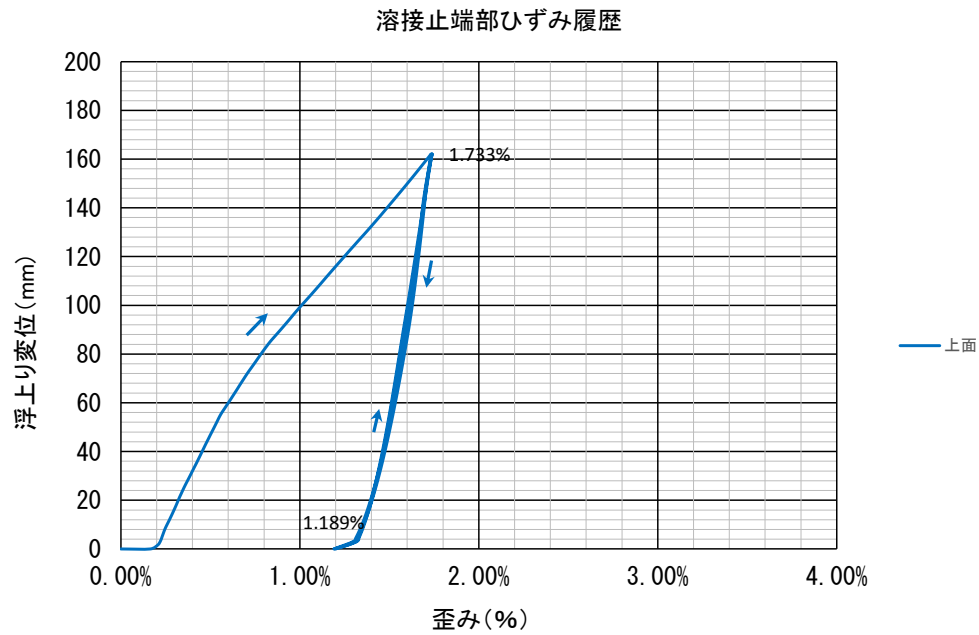
付図 6.2 タンク隅角部の応力分布 (60,000kI タンク)



付図 6.3 半径方向の表面応力・表面歪み (60,000kI タンク)



付図 6.4 円周方向の表面応力・表面歪み (60,000kI タンク)



付図 6.5 隅肉溶接止端部の歪み履歴 (60,000kl タンク)

付表 6.1 歪み振幅 (底板浮上り時)

区分	容量 (kl)	アニュラ板厚 (mm)	最大歪み ε_{max} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	経路	歪み ε (%)	備考
新法	60,000	18	1.733	0.544	—	1.733→1.189	

(3) 側板×アニュラ板溶接継手 (隅肉溶接)

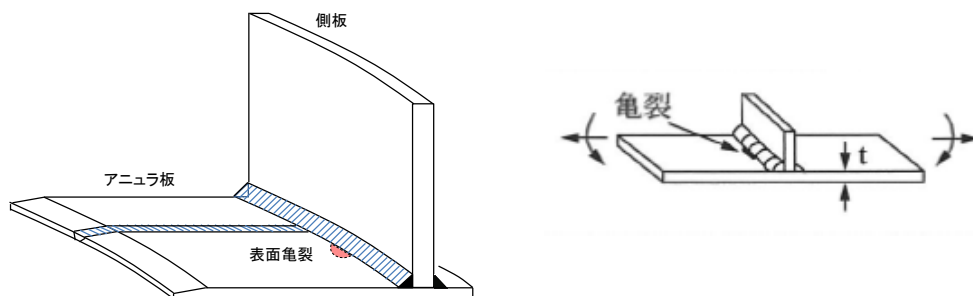


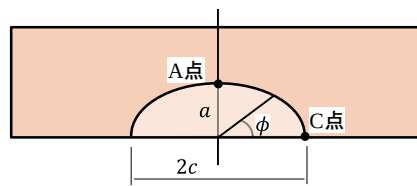
図 9.17 側板×アニュラ板溶接継手 (T 継手)

(3.1) 残留応力場での疲労亀裂進展解析結果

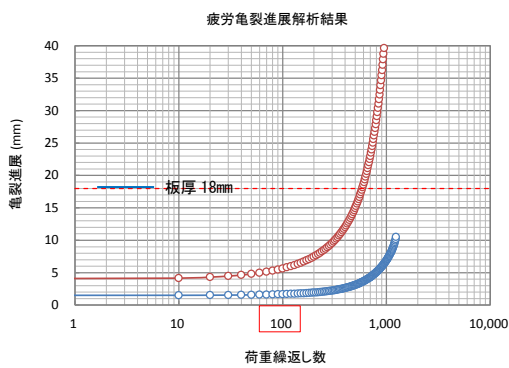
付表 6.2 残留応力下での疲労進展解析結果（荷重繰返し 100 回）

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK_{IC})
新法	60,000 (18mm)	0.544	1120	100	1.5×4	1.68×5.64	0.18×1.64	102
					1.5×8	1.80×9.32	0.30×1.32	97
					1.5×12	1.86×13.01	0.36×1.01	90

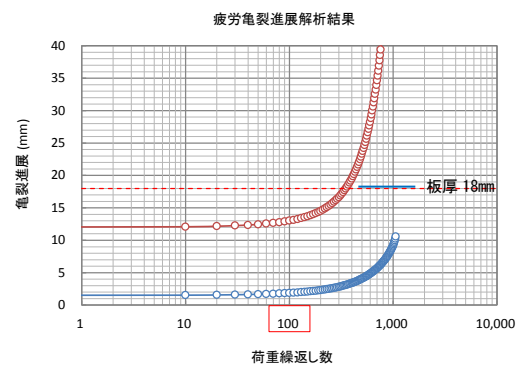
(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.0、板表面 (C 点) 1.8 を考慮



半楕円表面亀裂

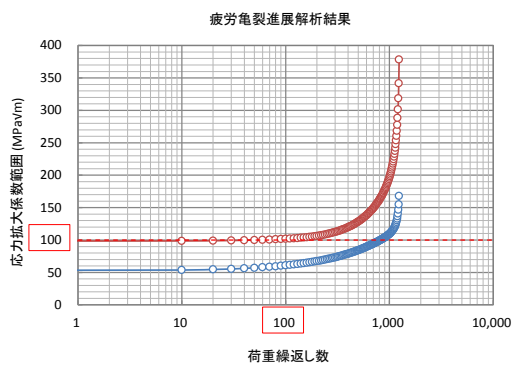


初期亀裂 (1.5mm×4mm)

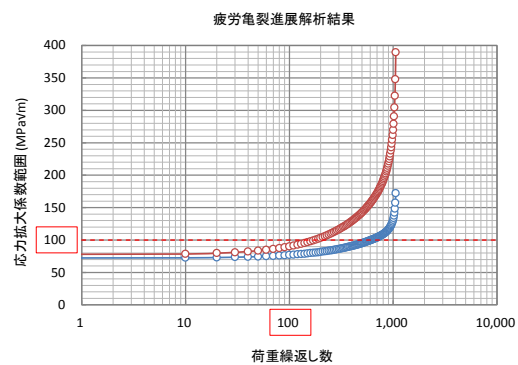


初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.6 疲労亀裂進展解析結果 (60,000kl タンク)



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.7 応力拡大係数範囲 (60,000kl タンク)

(3.2) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

付表 6.3 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (60,000kI タンク)

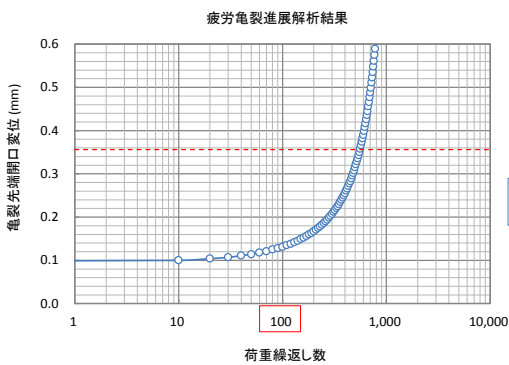
記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.733%	0.086%	1.386%	3.205%	0.238%	13.47	45.64

付表 6.4 脆性破壊発生検討結果 (60,000kI タンク) ※初期亀裂

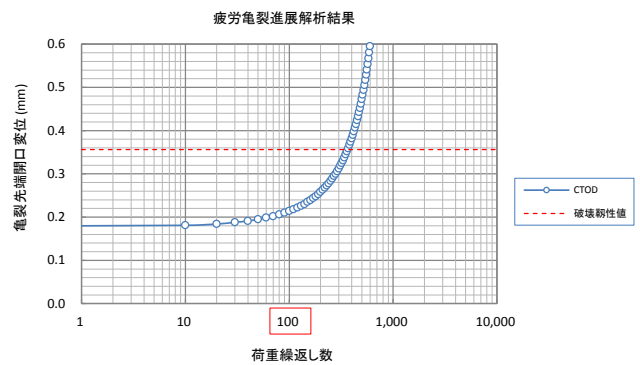
記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
							F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.5	×	4	0.771	0.89	0.097	0.356	3.68	
				1.5	×	8	0.972	1.42	0.154	0.356	2.32	
				1.5	×	12	1.043	1.63	0.177	0.356	2.01	

付表 6.5 脆性破壊発生検討結果 (60,000kI タンク) ※荷重繰返し 100 回

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
							F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	側板×アニュラ板	T継手	溶接線に平行	1.68	×	5.64	0.849	1.21	0.132	0.356	2.71	
				1.80	×	9.32	0.968	1.69	0.183	0.356	1.94	
				1.86	×	13.01	1.028	1.97	0.213	0.356	1.67	



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.8 亀裂先端開口変位 (60,000kI タンク)

(4) アニュラ板相互溶接継手（突合せ溶接）

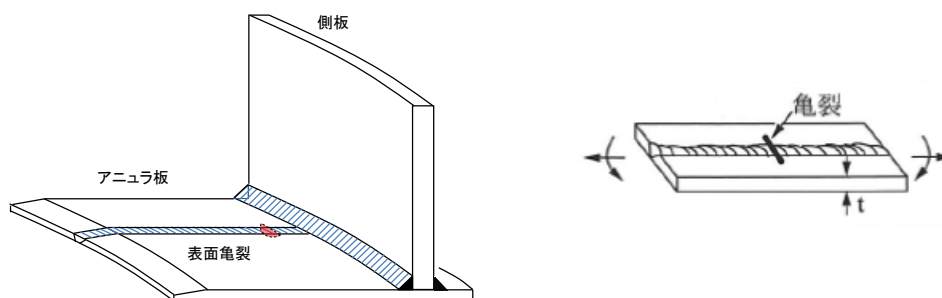


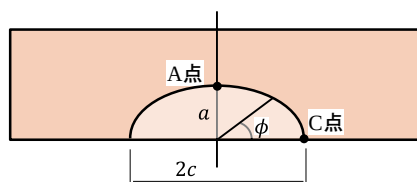
図 9.21 アニュラ板相互溶接継手（直角）

(4.1) 残留応力場での疲労亀裂進展解析結果

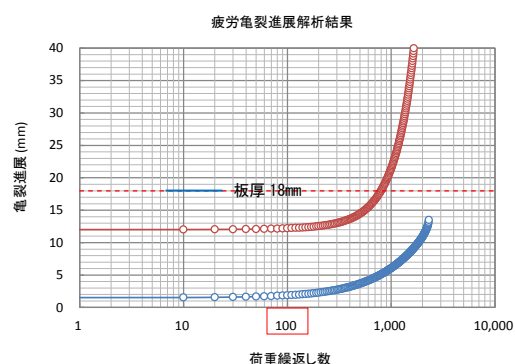
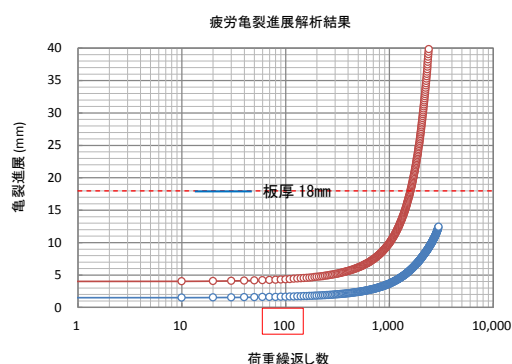
付表 6.6 残留応力下での疲労進展解析結果（荷重繰返し 100 回）

区分	容量 (kl)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	応力振幅 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考 (ΔK)
新基準	60,000 (9mm)	0.544	1120	100	1.5×4	1.65×4.33	0.15×0.33	57
					1.5×8	1.79×8.27	0.29×0.27	69
					1.5×12	1.86×12.21	0.36×0.21	76

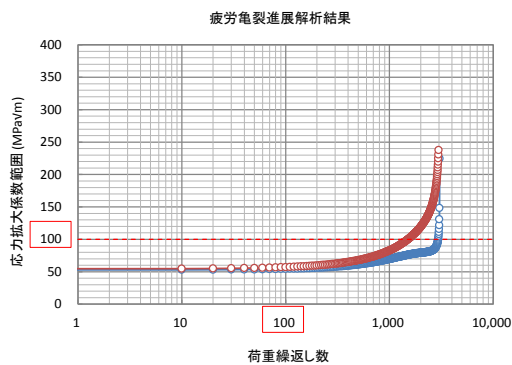
(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.0, 板表面 (C 点) 1.0 考慮



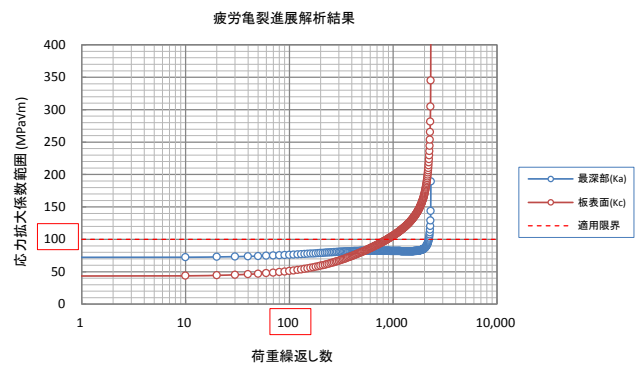
半楕円表面亀裂



付図 6.9 疲労亀裂進展解析結果 (60,000kl タンク)



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.10 応力拡大係数範囲 (60,000kI タンク)

(4.2) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

付表 6.7 亀裂先端開口変位 CTOD の計算結果 (60,000kI タンク)

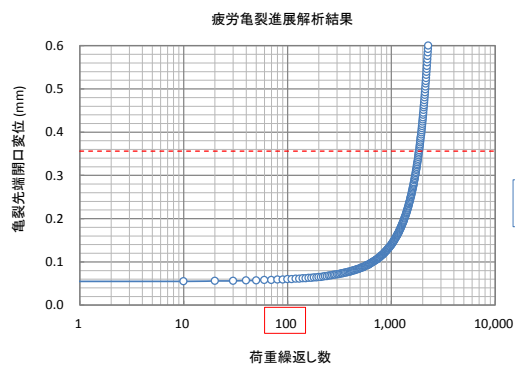
記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.733%	0.143%	0.000%	1.876%	0.238%	7.88	25.90

付表 6.8 脆性破壊発生検討結果 (60,000kI タンク) ※初期亀裂

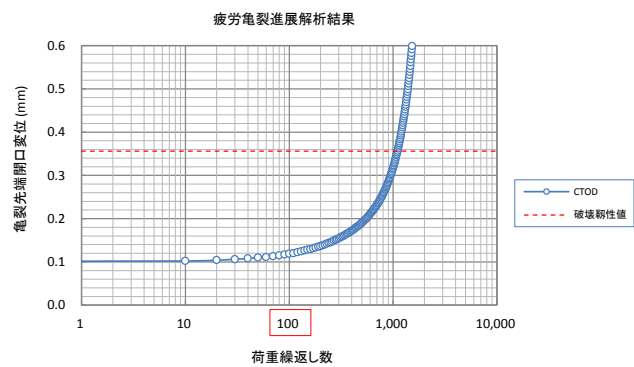
記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				a	×	2c	F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.5	×	4	0.771	0.89	0.055	0.356	6.48	
				1.5	×	8	0.972	1.42	0.087	0.356	4.08	
				1.5	×	12	1.043	1.63	0.101	0.356	3.54	

付表 6.9 脆性破壊発生検討結果 (60,000kI タンク) ※荷重繰返し 100 回

記号	部位	継手	亀裂の方向	表面亀裂 (a×2c)			係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
				a	×	2c	F_t	$\bar{c}$ (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr}/δ	
①	アニュラ板相互	突合せ	溶接線に直角	1.65	×	4.33	0.765	0.97	0.060	0.356	5.98	
				1.79	×	8.27	0.941	1.58	0.098	0.356	3.65	
				1.86	×	12.21	1.017	1.92	0.119	0.356	3.00	



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.11 亀裂先端開口変位 (60,000kl タンク)

1. 材料の加工硬化特性を考慮した骨組構造物の弾塑性解析

ここでは、栖原ら¹⁾²⁾による弾塑性関節法をタンク底板浮き上がり挙動に応用する。弾塑性関節法と、従来の極限解析における塑性関節による方法の違いは、

- i) 弾塑性関節のモーメント～折れ角間の特性を考慮して、弾塑性節点における塑性変形の発生及びその変化を追跡できること。
- ii) 材料の加工硬化の影響を考慮できること。

等があげられる。このことから、極限解析による崩壊荷重の決定のみでなく、それに至る途中の荷重、応力、歪み又は変形などを追跡できる利点がある。

1.1 各単位部材及び節点に関する基礎方程式

付図 7.1 に示す部材 ik の部材端に働くモーメント及び剪断力をそれぞれ M, Q とし、回転角及び変形をそれぞれ θ, u とすると、それらの間の関係は弾性変形をなす部材に対する撓角法の基本公式を適用し、マトリックス形式で表示すると、

$$\begin{Bmatrix} M_i \\ M_k \\ Q_i \\ Q_k \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/a & 1/a & 3/a^2 & -3/a^2 \\ 1/a & 2/a & 3/a^2 & -3/a^2 \\ 3/a^2 & 3/a^2 & 6/a^3 & -6/a^3 \\ -3/a^2 & -3/a^2 & -6/a^3 & 6/a^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_i \\ \theta_k \\ u_i \\ u_k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{M}_i \\ \bar{M}_k \\ \bar{Q}_i \\ \bar{Q}_k \end{Bmatrix} \quad (1)$$

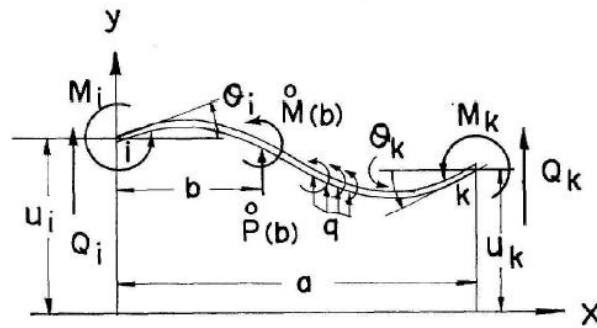


Fig. 1

付図 7.1 骨組部材の釣合

上式中 $\bar{M}_i, \bar{M}_k, \bar{Q}_i$ 及び $\bar{Q}_k$ はそれぞれ ik 部材の中間に作用する外から働くモーメント、外荷重によって生じる ik 部材が両端固定のときのそれぞれ i, k 端のモーメント及び支持力の値を示す。

次に、図 7.2 に示すような単位部材 $(\alpha-1, \alpha), (\alpha, \alpha+1)$ の結合点 α における力及びモーメントの平衡条件は次のようになる。

$$Q_{\alpha-1} + Q_{\alpha+1} = \bar{P}_\alpha \quad (2a)$$

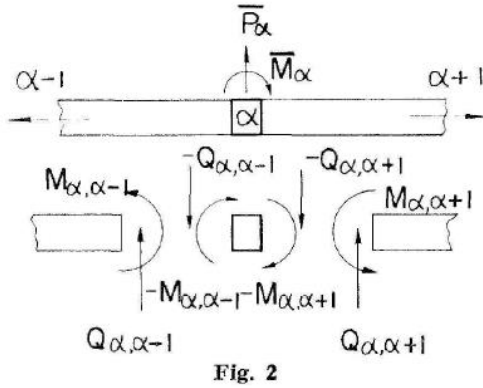
$$M_{\alpha-1} + M_{\alpha+1} = \bar{M}_\alpha \quad (2b)$$

更に、弾塑性域において、式(2)の他に次のような特性を持った弾塑性関節を仮定する（付図 7.3）。

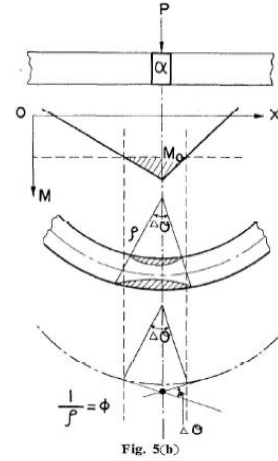
即ち、 $M_{\alpha,\alpha-1}$ 又は $M_{\alpha,\alpha+1}$ を M_α と書くことにして、

$$M_\alpha = M_0 + K \cdot \Delta\theta \quad (3)$$

但し、 M_0 は初期降伏モーメント M_e 又は全塑性モーメント M_0 とする。



付図 7.2 結合点 α の釣合



付図 7.3 弾塑性関節

1.2 曲げモーメント～曲率関係式 ※

ここでは、矩形断面を有する梁の曲げモーメント (M) と曲率 (ϕ) の関係を考える。

(I) 加工硬化が無い場合 ($\sigma \sim \varepsilon$ 関係において、 $H' = 0$)

$$\frac{M}{M_y} = \frac{3}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi_y}{\phi} \right)^2 \right\} \quad (\phi \geq \phi_y) \quad (4a)$$

(II) 加工硬化を考慮した場合 ($\sigma \sim \varepsilon$ 関係において、 $\lambda = H'/E$)

$$\frac{M}{M_y} = \frac{3}{2} \left[\left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi_y}{\phi} \right)^2 \right\} (1 - \lambda) + \frac{2\lambda}{3} \cdot \frac{\phi}{\phi_y} \right] \quad (\phi \geq \phi_y) \quad (4b)$$

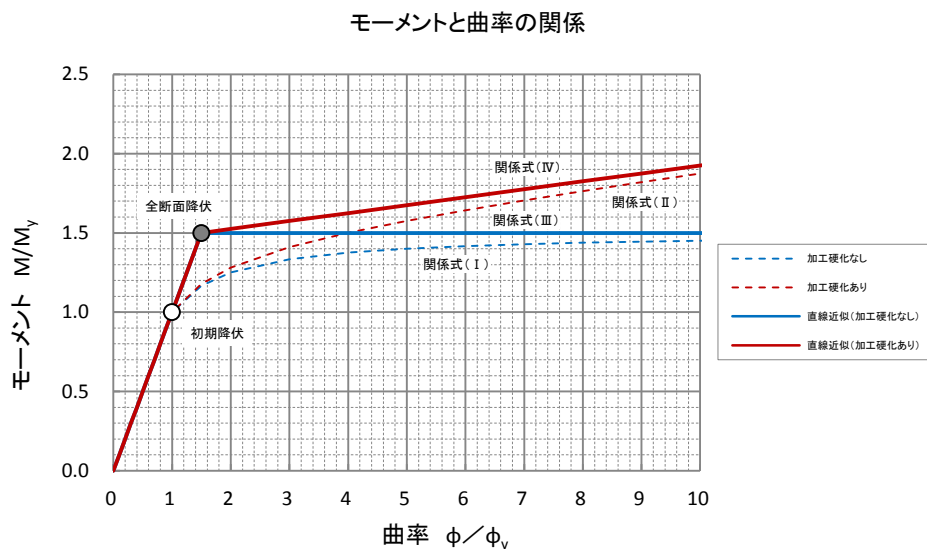
(III) 関係式 (I) を直線近似した場合 (加工硬化なし)

$$\frac{M}{M_p} = 1 \quad (\phi \geq \phi_p) \quad (4c)$$

(IV) 関係式 (II) を直線近似した場合 (加工硬化を考慮)

$$\frac{M}{M_p} = \lambda \frac{\phi}{\phi_p} + (1 - \lambda) \quad (\phi \geq \phi_p) \quad (4d)$$

ここに、 M_y, ϕ_y は初期降伏時のモーメントと曲率、 M_p, ϕ_p は全断面降伏時のモーメントと曲率をそれぞれ示す。これらの関係を付図 7.4 に示す。

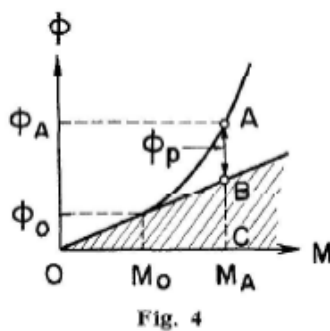


付図 7.4 曲げモーメントと曲率の関係

1.3 弾塑性関節における折れ角 $\Delta\theta$

一般に、広がりを持った弾塑性域を弾塑性関節に置き換える方法は、先ず曲げモーメント～曲率関係 $\phi \equiv \phi(M)$ から、曲率の弾性部分を差し引いた ϕ_p が、弾塑性関節における折れ角を生じる原因であるとして、次のように置く。

$$\phi_p(M) \equiv \phi(M) - \frac{M}{EI} \quad (5)$$



付図 7.5 曲率の弾塑性成分

次に、結合点 α の両側における単位部材の曲げモーメント分布 $M(x)$ から、節点 α の j 節点側及び k 節点側で式(5)を積分すると、結合点 α に生じる弾塑性関節の回転角 θ_{jp}, θ_{kp} が得られる。更に、 $\Delta\theta \equiv \theta_{jp} - \theta_{kp}$ として、

$$\Delta\theta = \int_{x_j} \phi_p[M_j(x)] dx - \int_{x_k} \phi_p[M_k(x)] dx \quad (6)$$

ここで、 x_j, x_k は単位部材中間の曲げモーメント分布 $M(x)$ が、 M_e を超えた弾塑性域の長さである。

これより、式(4)の曲げモーメントと曲率の関係から、式(6)のモーメント M と折れ角 $\Delta\theta$ の非線形な関係が求まる。そのモーメントの値に対応した K の値を用いて、弾塑性節点の関係式(3)に置き換えることにより、後述の節点方程式を作ることが出来る。

一方、不静定問題では、剛性 K の初期値を仮定した繰り返し計算（収束計算）を行い、最終的な各節点のモーメントなどの値を求める必要がある

1.4 検証例題

解析方法の妥当性を確認するために、矩形断面を有する梁の先端に集中荷重を受ける場合と、同じく等分布荷重を受ける場合について、梁先端の撓みを比較した。

(1) 集中荷重を受ける片持ち梁

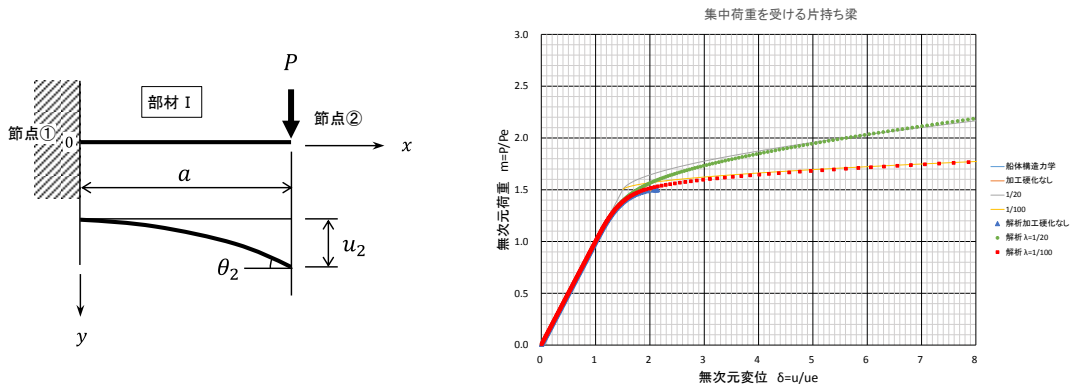
弾塑性関節法より、無次元撓みは、 $P_y = M_y/a$, $u_y = P_y a^3/3EI$, $m = P/P_y$, $\delta = u/u_y$ と置いて、次のとおり求まる。ここに、 M_y は初期降伏モーメントを示す。付図 7.6 より、何れも他の参考文献及び FEM 解析と一致する。

a) 加工硬化が無い場合

$$\delta = \frac{3}{2m} \left\{ 3 - 2\sqrt{3-2m} - \frac{m^2}{3} \right\} \quad (7a)$$

加工硬化あり（直線近似）

$$\delta = m + \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) (2m - 3)^2 \quad (7b)$$



付図 7.6 集中荷重を受ける片持ち梁

(2) 等分布荷重を受ける片持ち梁

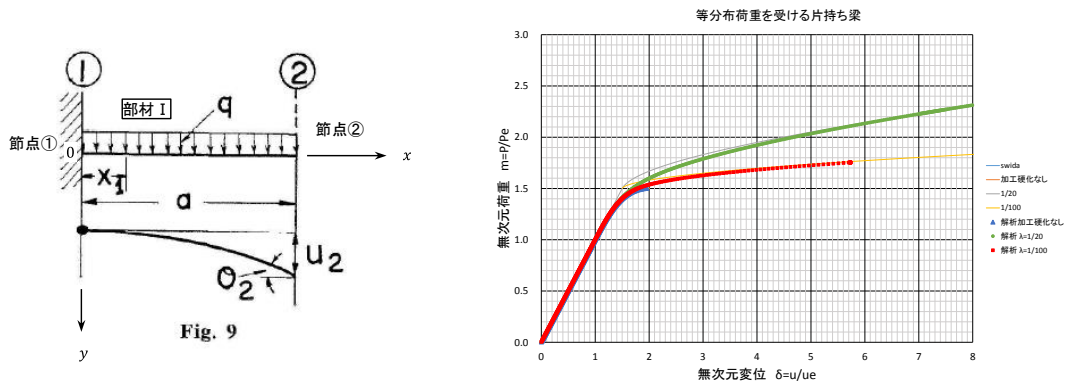
弾塑性関節法より、無次元撓みは、 $q_y = 2M_y/a^2$, $u_y = q_y a^4/8EI$, $m = q/q_y$, $\delta = u/u_y$ と置いて、次のとおり求まる。付図 7.7 より、何れも他の参考文献及び FEM 解析と一致している。

a) 加工硬化が無い場合

$$\delta = m + 4 \left[\sqrt{\frac{1}{2m}} \left(\sin^{-1} \sqrt{\frac{2}{3}m} - \sin^{-1} \sqrt{\frac{2}{3}} \right) - \frac{m}{3} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{m^3}} \right) \right] \quad (8a)$$

b) 加工硬化あり（直線近似）

$$\delta = m + 4\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)\left(\frac{m}{3} - \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{3}{2m}}\right) \quad (8b)$$



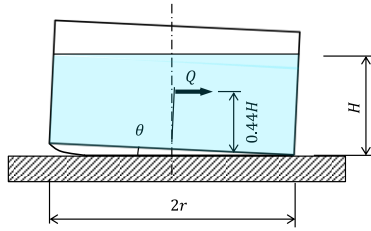
付図 7.7 等分布荷重を受ける片持ち梁

【参考文献】

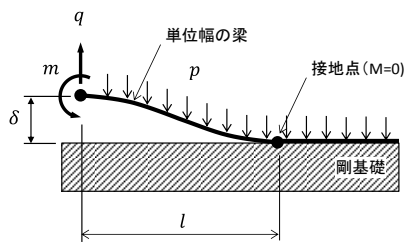
- 1) 栖原, 永野, “材料の加工硬化特性を考慮した骨組構造物の弾塑性解析”, 西部造船会々報, 第 40 号, 昭和 45 年
- 2) 栖原, 永野, “補足エネルギーによる鋼骨組構造の弾塑性解析法”, 西部造船会々報, 第 62 号, 昭和 56 年

2. タンク底板浮上り挙動への弾塑性関節法の応用

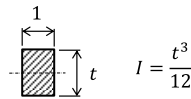
■底板の浮上り挙動



■底板浮上りモデル

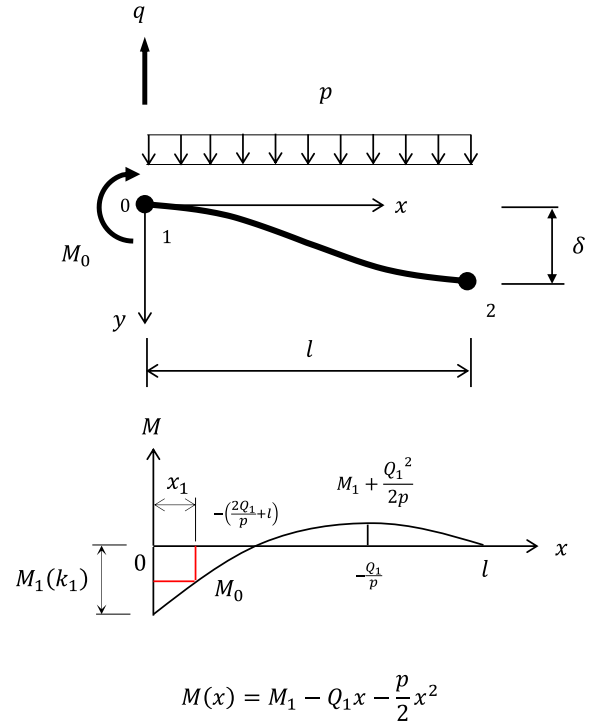


《単位幅の梁》



【出典】日本建築学会、「容器構造設計指針・同解説」、1996

付図 7.8 底板浮上りモデル



付図 7.9 底板浮上りモデル

2.1 基礎方程式

(1) 部材の釣合式

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/l & 1/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 1/l & 2/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 3/l^2 & 3/l^2 & 6/l^3 & -6/l^3 \\ -3/l^2 & -3/l^2 & -6/l^3 & 6/l^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -pl^2/12 \\ pl^2/12 \\ -pl/2 \\ -pl/2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

(2) 境界条件

$$u_1 = 0, \theta_2 = 0 \quad (10)$$

既知の条件を考慮して次のマトリックスを用いて計算の簡易化を計る。

$$\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [\beta] \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

これを上式に代入して、

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/l & 1/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 1/l & 2/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 3/l^2 & 3/l^2 & 6/l^3 & -6/l^3 \\ -3/l^2 & -3/l^2 & -6/l^3 & 6/l^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -pl^2/12 \\ pl^2/12 \\ -pl/2 \\ -pl/2 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\therefore \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/l & -3/l^2 \\ 1/l & -3/l^2 \\ 3/l^2 & -6/l^3 \\ -3/l^2 & 6/l^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -pl^2/12 \\ pl^2/12 \\ -pl/2 \\ -pl/2 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

(3) 弾塑性条件 (固定端①)

$$M_1 = M_0 + K \cdot \Delta\theta \quad (14)$$

$$K \cdot \Delta\theta = 2EI(\theta_1) = 2EI[k \quad 0] \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

(4) 各節点での力の釣合

$$\text{節点②} : M_2 = 0 \quad (16a)$$

$$\text{節点①} : M_1 - K \cdot \Delta\theta = M_0 \quad (16b)$$

(5) 平衡方程式

$$\begin{Bmatrix} M_2 \\ M_1 - K \cdot \Delta\theta \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 1/l & -3/l^2 \\ 2/l - k & -3/l^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} pl^2/12 \\ -pl^2/12 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

上式を解いて、未知の変位量は弾塑性関節の回転剛性 (k) の関数として、次のように求まる。

$$u_2 = \frac{l^2}{6EI(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) + \frac{pl^4}{72EI} \quad (18a)$$

$$\theta_1 = \frac{l}{2EI(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) \quad (18b)$$

(6) 部材端部の節点力

式(18)を式(13)に代入して、部材端部の節点力は次のとおり求まる。

$$M_1 = \frac{1}{(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) - \frac{pl^2}{6} \quad (19a)$$

$$M_2 = 0 \quad (19b)$$

$$Q_1 = \frac{1}{l(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) - \frac{2pl}{3} \quad (19c)$$

$$Q_2 = -\frac{1}{l(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) - \frac{pl}{3} \quad (19d)$$

2.2 底板浮上り挙動

(1) 塑性域の長さ

付図 7.9 より、底板端部近傍において全断面塑性となる領域の範囲は、次式のようになる。

$$x_1 = -\frac{Q_1}{p} - \frac{1}{p} \sqrt{Q_1^2 + 2p(M_1 - M_0)} \quad (20)$$

(2) 底板端部の折れ角 ($\Delta\theta$)

曲げモーメント (M) と曲率 (ϕ) の関係として、関係式 (IV) (関係式 (II) を直線近似した場合) を用いると、式(6)より底板端部の折れ角が次のように求まる。

$$\Delta\theta = -\int_0^{x_1} \left[\phi(M) - \frac{M}{EI} \right] dx$$

$$= -\frac{1}{EI} \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) x_1 \left(-\frac{p}{6} x_1^2 - \frac{Q_1}{2} x_1 + M_1 - M_0 \right) \quad (21)$$

(3) 剛性係数 (k)

$$k = \frac{M_1 - M_0}{2EI \cdot \Delta\theta} \quad (22)$$

(4) 底板浮り変位 (δ)

底板浮り変位 (δ) が与えられると、 $M_0 = -M_f$ (固定端のモーメントが負の場合) と置き、初期剛性 (k) を仮定した繰り返し計算 (収束計算) により、式(23)を満足する底板浮上り長さ (l) を求める。

$$\delta = \frac{l^2}{6EI(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) + \frac{pl^4}{72EI} \quad (23)$$

これより、浮上り抵抗 (側板反力) $q = Q_1$ 及び底板端部のモーメント M_1 は、式(19)より求まる。

(5) 底板端部の曲率 (ϕ_1)

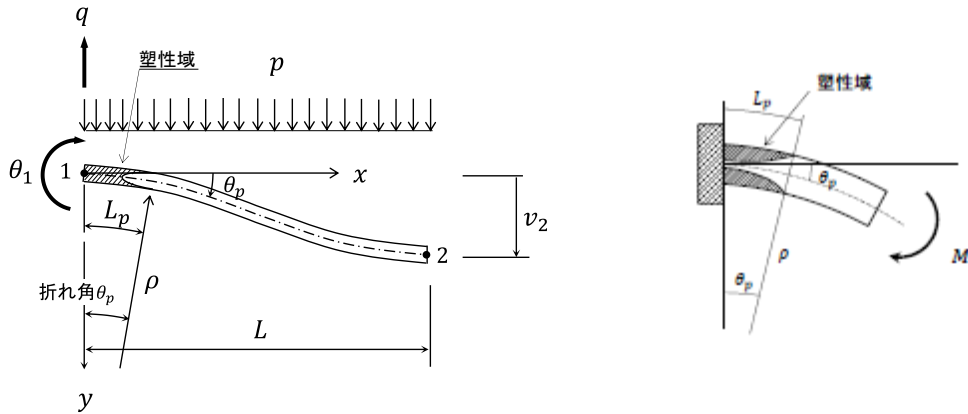
$$\phi_1 = \phi_{1e} + \phi_{1p} \quad (24)$$

ここに、 ϕ_{1e} は弾性成分、 ϕ_{1p} は塑性成分で次のとおり。

$$\phi_{1p} \cong \theta_{1p} / L_p \quad (25)$$

(6) 底板端部の表面歪み (ε_{max})

$$\varepsilon_{max} = \frac{t}{2} \phi_1 \quad (26)$$



付図 7.10 底板端部の曲率算定

2.3 材料の加工硬化の影響検証【試計算】

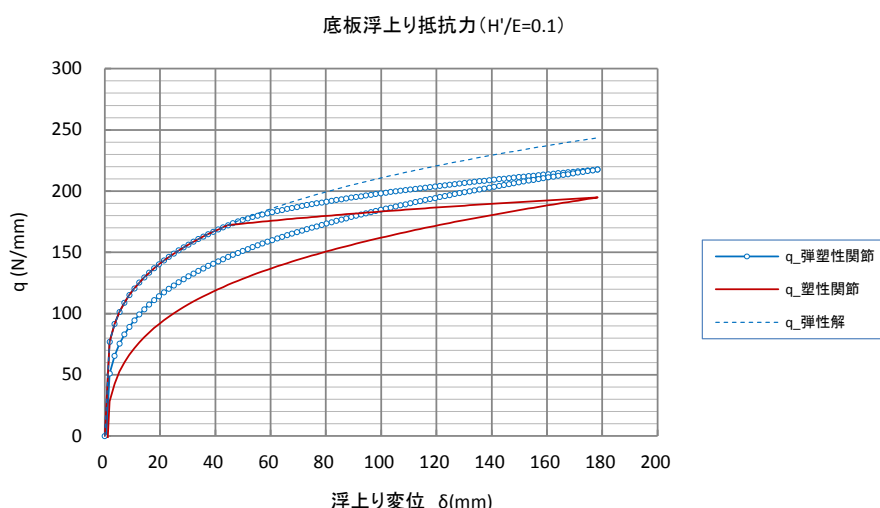
付表 7.1 の 110,000kl タンクを例にして、材料の加工硬化の影響を検証する。ここでは、曲げモーメントと曲率の関係として、関係式 (IV) (関係式 (II) を直線近似した場合) を採用し、アニュラ板の加工硬化 (H') を縦弾性係数 (E) の $1/10$ と仮定した。

尚、計算では式 (18) の未知変位量が弾塑性関節の回転剛性 (k) の関数となることから、剛性 k の初期値を仮定して繰り返し計算 (収束計算) を行い、最終的な底板浮上り変位等を求めた。

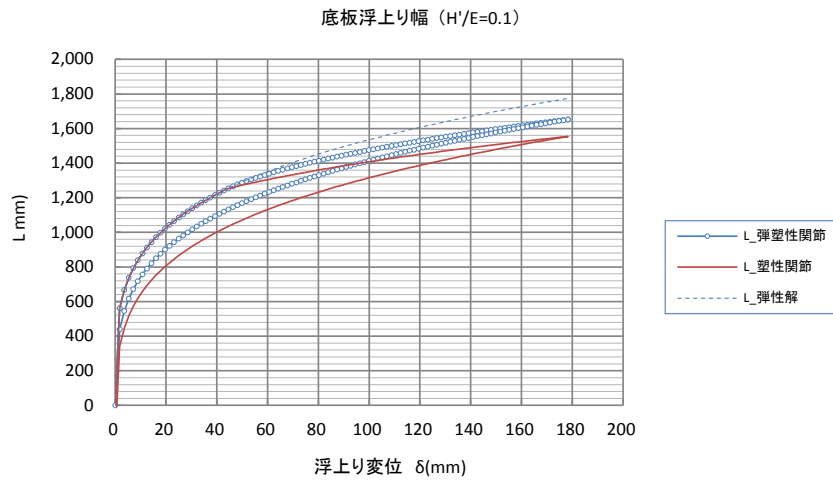
付表 7.1 110,000kl タンク諸元

項目	記号	数値	備考
タンク内径	D	82,000 mm	
高さ	H_T	24,000 mm	
液面高さ	H_L	21,000 mm	
液比重	ρ	1.0	
アニュラ板厚さ	t_a	21 mm	
降伏点	σ_y	490 N/mm ²	材質:SPV490Q
縦弾性係数	E	205,939.7 N/mm ²	
加工硬化率	H'	$E/10$	$H'/E = 0.1$

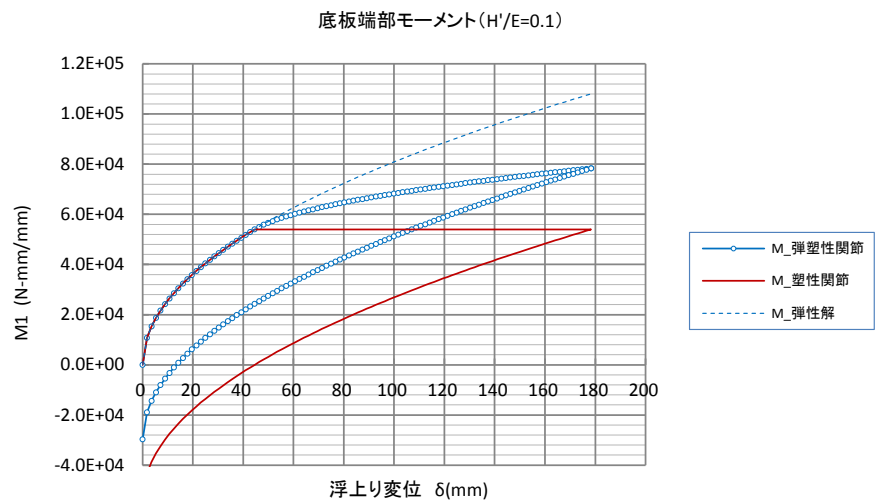
計算結果を、付図 7.11 (a)～付図 7.11 (f) に示す。同図より、いずれの計算結果も極限解析解 (塑性関節) と弾性解との中間の値を示している。尚、加工硬化が $H' \cong E$ の場合には弾性解に、 $H' \cong 0$ の場合には塑性関節の解に近づく。更に、付図 7.11 (d) より、塑性関節発生後に底板端部の曲率が増加することがわかる。この曲率を用いて、側板近傍のアニュラ板に発生する歪を評価することが可能になった。



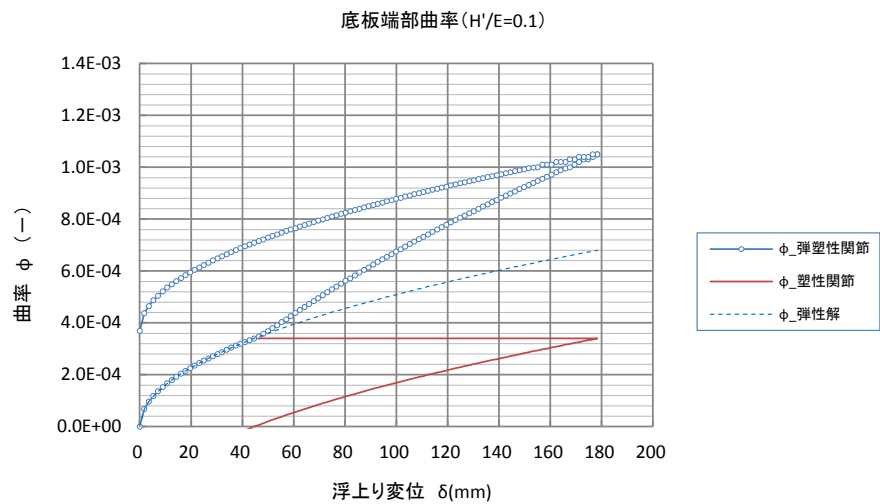
付図 7.11 (a) 底板浮上り抵抗 (110,000kl タンク)



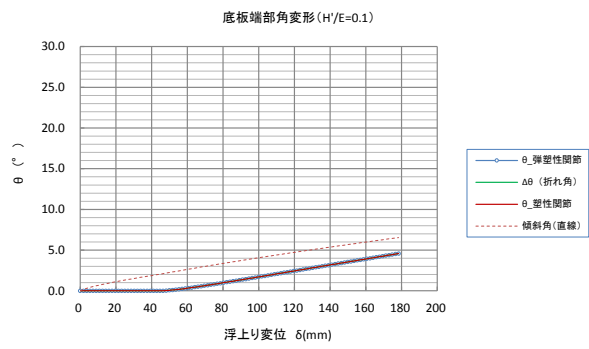
付図 7. 11 (b) 底板浮上り幅 (110, 000kl タンク)



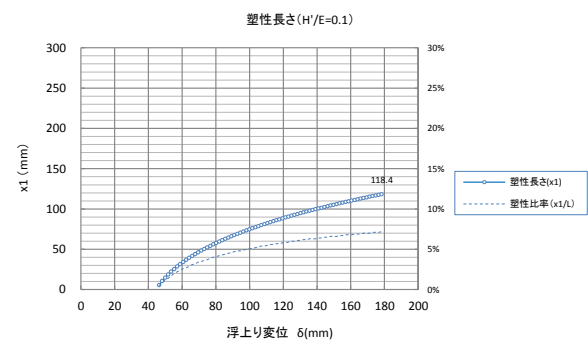
付図 7. 11 (c) 底板端部モーメント (110, 000kl タンク)



付図 7. 11 (d) 底板端部の曲率 (110, 000kl タンク)



付図 7.11 (e) 底板端部の角変形



付図 7.11 (f) 底板端部の塑性長さ

3. 実機タンクへの適用

表 9.2 に、H29 年度及び H30 年度に検討した解析対象タンクを示す。

表 9.2 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)			終局変位 δ_B (mm)	備考
							底板	アニユラ板	側板		
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6	6	18	67.9	$\delta_B = 14\delta_y$
新基準	9,900	29,000	16,730	15,000	1.0	SS400	6	9	18	93.6	"
新法	18,200	34,500	22,695		1.0	SM490C	9	12	20	169.2	$\delta_B = 14\delta_y$
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20	107.1	$\delta_B = 4\delta_y$
新法	60,000	62,800	22,000	19,800	1.0	SPV490Q	12	18	26	162.1	"
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36	178.6	$\delta_B = 4\delta_y$

【注記】□内は H30 年度追加解析を示す。

本文 9. 項で実施したタンク隅角部の底板浮上り解析（FEM 解析）と、弾塑性関節法との解析上の相違を付表 7.2 示す。

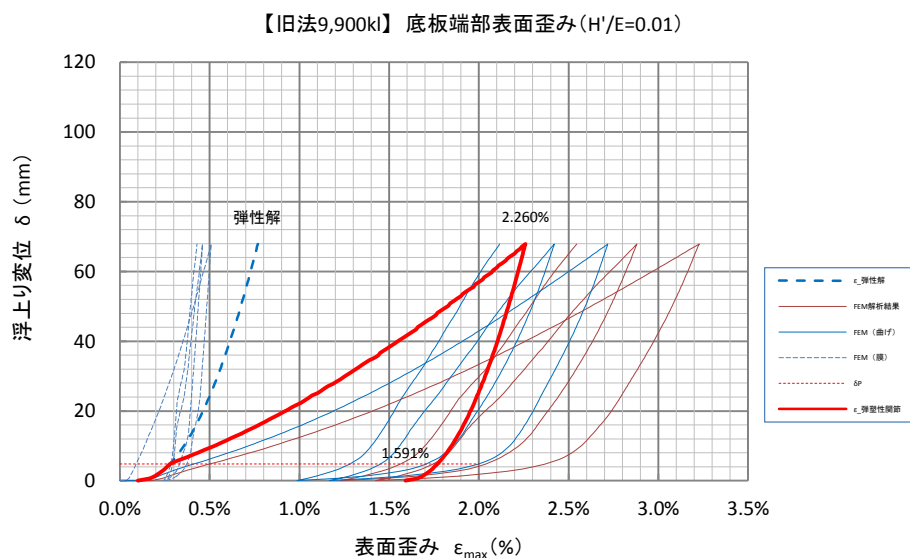
付表 7.2 解析方法の比較

項目	【FEM 解析】	【弾塑性関節法】	備考
アニユラ板	軸対称モデル	二次元梁モデル※	※平面応力
側板	軸対称モデル	—	
材料非線形	歪増分理論	弾塑性関節	
幾何学非線形	有限変形	微小変形	
側部自重	考慮	—	

3.1 降伏比が80%未満の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニユラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400、溶接構造用鋼板 SM490 等の低中強度鋼板が採用されている。この場合、材料の降伏比(=降伏点/引張強度)は80%未満となる(表 10. 2)。

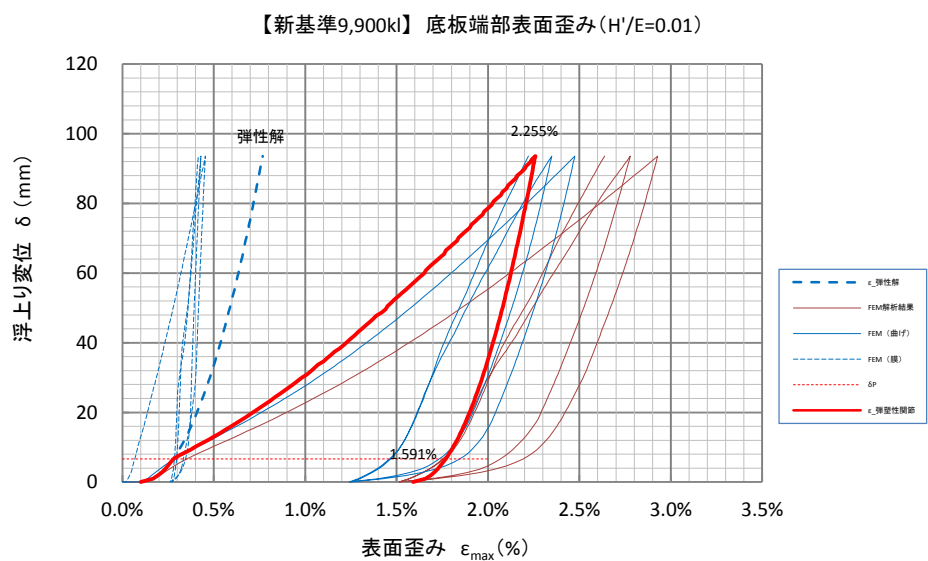
簡易解法では、液圧及び側板自重の影響項として、一律、初期歪み 0.1%を考慮した。又、表中の()内の数値は、FEM 解析結果に対する簡易解法の比を示す。



付図 7.12 溶接部止端部の歪み履歴 (旧法 9, 900kl タンク)

付表 7.3 解析結果の比較 (旧法 9, 900kl タンク)

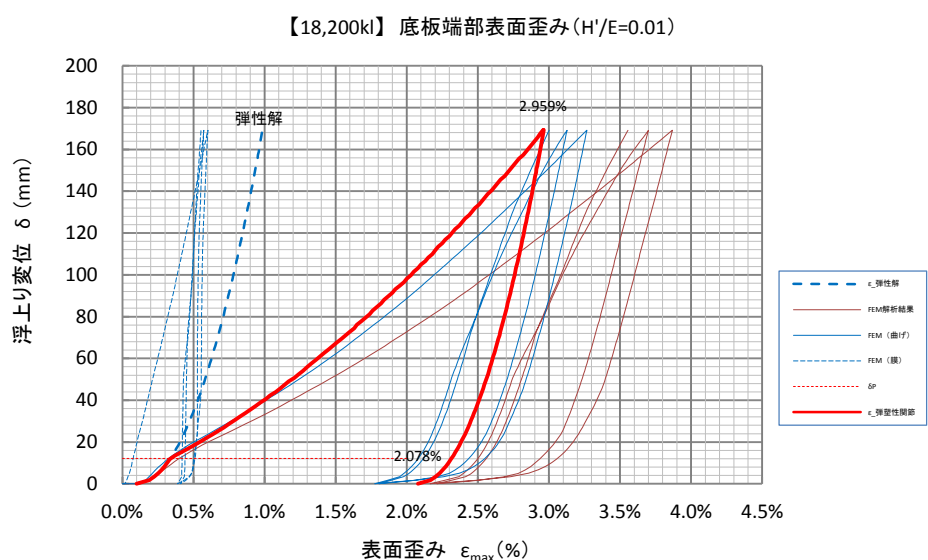
区分	容量 (kl)	アニユラ板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
旧法	9, 900	SS400	6	FEM	3. 228	1. 556	(平均)
				簡易	2. 260 (0. 70)	0. 669 (0. 43)	



付図 7.13 溶接部止端部の歪み履歴 (新基準 9,900kl タンク)

付表 7.4 解析結果の比較 (新基準 9,900kl タンク)

区分	容量 (kl)	7=17板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新基準	9,900	SS400	9	FEM	2.929	1.267	(平均)
				簡易	2.255 (0.77)	0.664 (0.52)	



付図 7.14 溶接部止端部の歪み履歴 (18,200kl タンク)

付表 7.5 解析結果の比較 (18, 200kl タンク)

区分	容量 (kl)	アニュラ板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新法	18, 200	SM490C	12	FEM	3.868	1.517	(平均)
				簡易	2.959 (0.76)	0.881 (0.58)	

一例として、H29 年度に解析した【旧法】9900kl タンクの底板浮上り時において、アニュラ板に生じる塑性域の進展状況を、図 10.5 に示す。

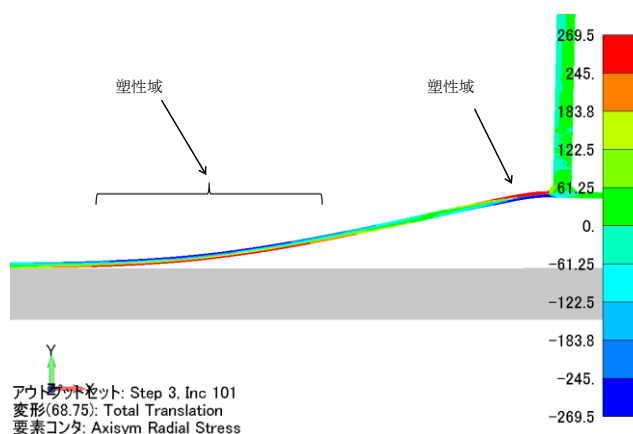


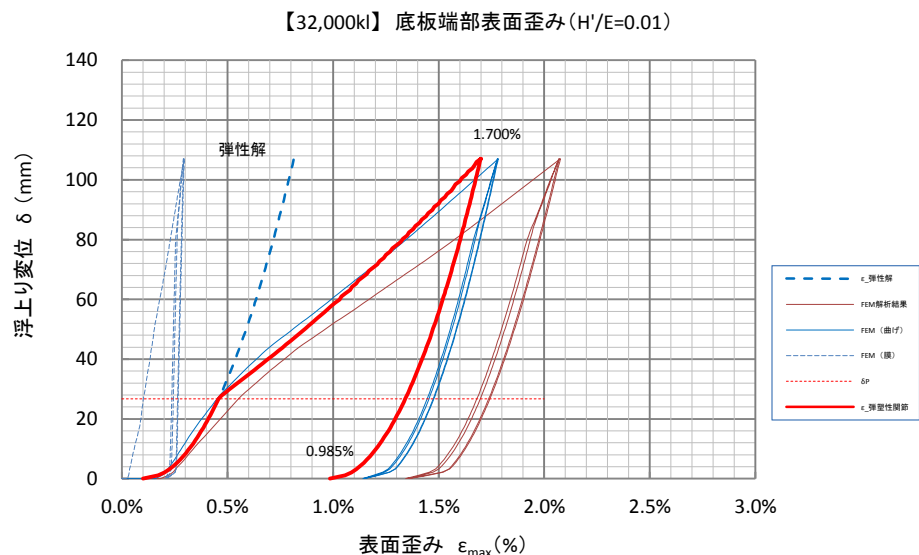
図 10.5 タンク隅角部の応力分布 (旧法 9,900 タンク) 【拡大図】

【アニュラ板】材質 SS400、板厚 6mm

同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、最初に側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じる。更に、タンク底板浮上り変位が増加するのに伴って、タンク中心方向の側板から離れた位置で、アニュラ板に広く塑性域（第二塑性関節）が生じることが分かる。その結果、当該部分の曲げ剛性が低下するに従って、側板近傍のアニュラ板の曲げモーメントが増大し、当該箇所曲げ歪み・曲げ応力の負担が増加することが分かる。

3.2 降伏比が80%以上の場合【SPV490Q】

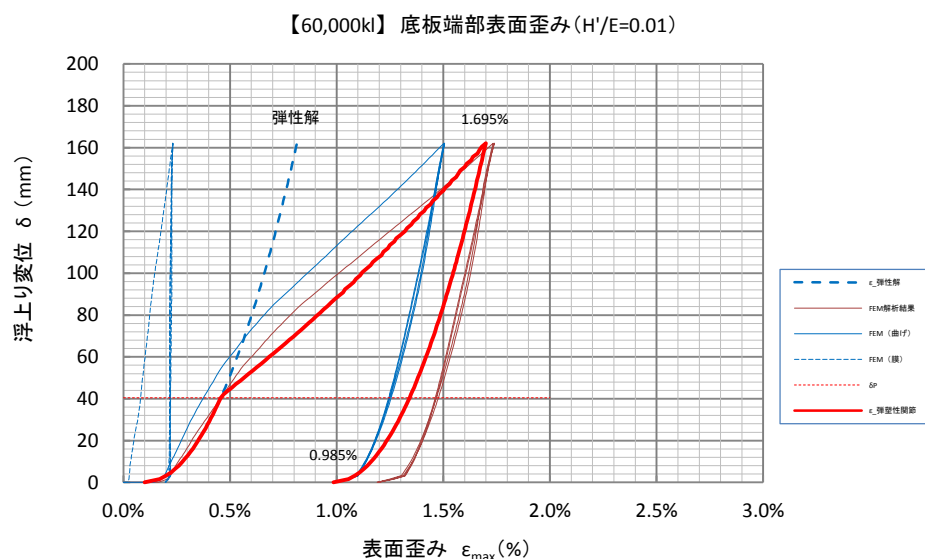
大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 SPV490Q が採用される。この場合、材料の降伏比（＝降伏点／引張強度）は80%以上となる（表 10.3）。



付図 7.15 溶接部止端部の歪み履歴（32,000kl タンク）

付表 7.6 解析結果の比較（32,000kl タンク）

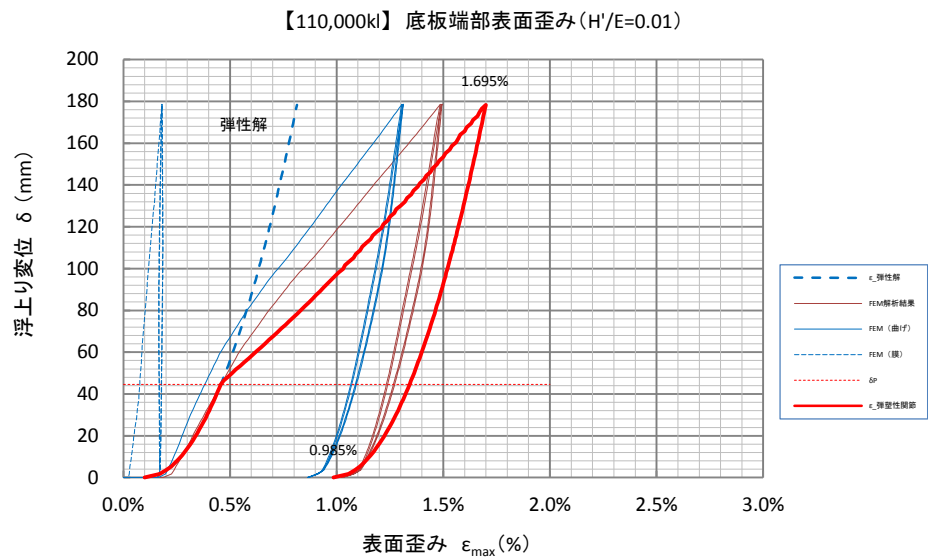
区分	容量 (kl)	7ニムラ板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新法	32,000	SPV490Q	12	FEM	2.077	0.732	
				簡易	1.700 (0.82)	0.715 (0.98)	



付図 7.16 溶接部止端部の歪み履歴（60,000kl タンク）

付表 7.7 解析結果の比較 (60,000kl タンク)

区分	容量 (kl)	7ニ15板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新法	60,000	SPV490Q	18	FEM	1.733	0.544	
				簡易	1.695 (0.98)	0.710 (1.31)	

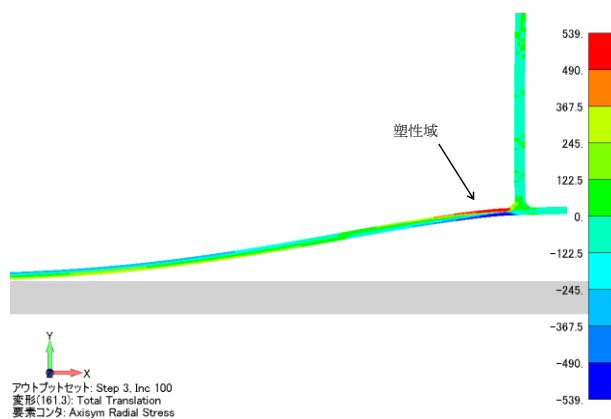


付図 7.17 溶接部止端部の歪み履歴 (110,000kl タンク)

付表 7.8 解析結果の比較 (110,000kl タンク)

区分	容量 (kl)	7ニ15板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み $\varepsilon_{\max}$ (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新法	110.000	SPV490Q	21	FEM	1.486	0.463	
				簡易	1.695 (1.14)	0.710 (1.53)	

一例として、H29 年度に解析した 32,000k1 タンクの底板浮上り時において、アニュラ板に生じる塑性域の進展状況を、図 10.6 示す。



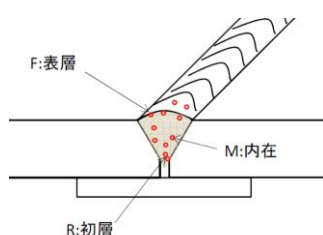
同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じるが、タンク底板浮上りが増加しても、タンク中心方向のアニュラ板は塑性化せず、弾性域に留まっていることが分かる。

[付属書-8] 欠陥を有する溶接継手の疲労破壊試験（検証解析）

1. 疲労試験概要

(1) 供試体

疲労破壊試験においては、溶接実作業を模擬した人為的な溶接欠陥を有する供試体を製作した。付図 8.1 に溶接欠陥の発生位置を、付表 8.1 に内在欠陥を有する突合せ継手（板厚 12mm）における試験片断面の一例を示す。



付図 8.1 溶接欠陥の部位
（一例）

付表 8.1 突合せ継手（ $t=12\text{mm}/\text{SS400}$ ）

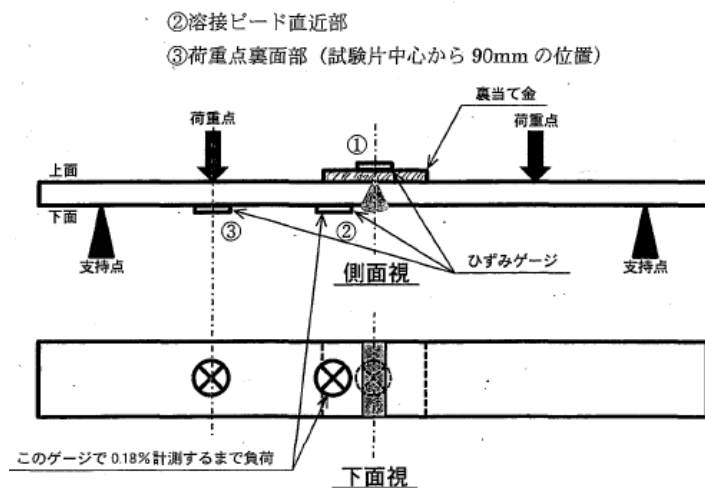
No.	溶接欠陥	記号	試験片断面	備考
1	ブローホール	BH		BH0.5~1.0φ 散在
2	初層溶込不良	IP		IP37mm, 83mm
3	初層割れ	CLR	(省略)	C3~7mmLF 混在
4	最終層割れ	CLF		C2~20mm 散在
5	アンダーカット	UD		UD 全線
6	融合不良	LF	(省略)	-

(2) 試験片

付表 8.2 に示す板厚の異なる疲労試験片を作成し、4点曲げによる疲労試験を実施した。当該4点曲げ疲労試験では、付図 8.2 に示すように突合せ溶接継手部が下面側（引張側）に、裏当金が上面側（圧縮側）になるように試験片をセットし、溶接ビード直近部の歪みが概ね 0.18%になるまで静的に負荷し、そのストロークで最大 サイクル繰り返した。

付表 8.2 疲労試験片

試験片	長さ	幅	板厚	材質	強制変位（試験）	備考
TP-A	500 mm	100 mm	12 mm	SS400	5.1mm~6.0mm	
TP-B	500 mm	100 mm	20 mm	SS400	3.7mm~4.2mm	



- 支持点間距離: $L_1=460\text{mm}$
(中心より $L_1/2=230\text{mm}$)
- 荷重点間距離: $L_2=180\text{mm}$
(中心より $L_2/2=90\text{mm}$)
- 裏当て金: FB100×6

図1 ひずみゲージ貼り付け位置

付図 8.2 疲労試験 (4 点曲げ)

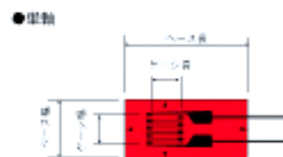
(3) 歪みゲージ位置

4 点曲げ疲労試験では、付表 8.3 に示す試験片の位置 (3 箇所) に、一般用歪みゲージを貼り付けた。

【仕様】 一般用ひずみゲージ

型番: FLA-5-11-3LJCT

ゲージ長さ 5mm, 幅 1.5mm



付表 8.3 歪みゲージ位置

試験片	貼付位置	試験片中心からの距離	備考
ゲージ①	裏当て金中心部	0 mm	
ゲージ②	溶接ビード直近部	12.65 mm (止端 9.15mm+ゲージ中央 3.5mm)	$\varepsilon = 0.18\%$ 目標
ゲージ③	荷重点裏面部	90mm	

2. FEM 解析

2.1 試験片【TP-A／板厚 12mm】

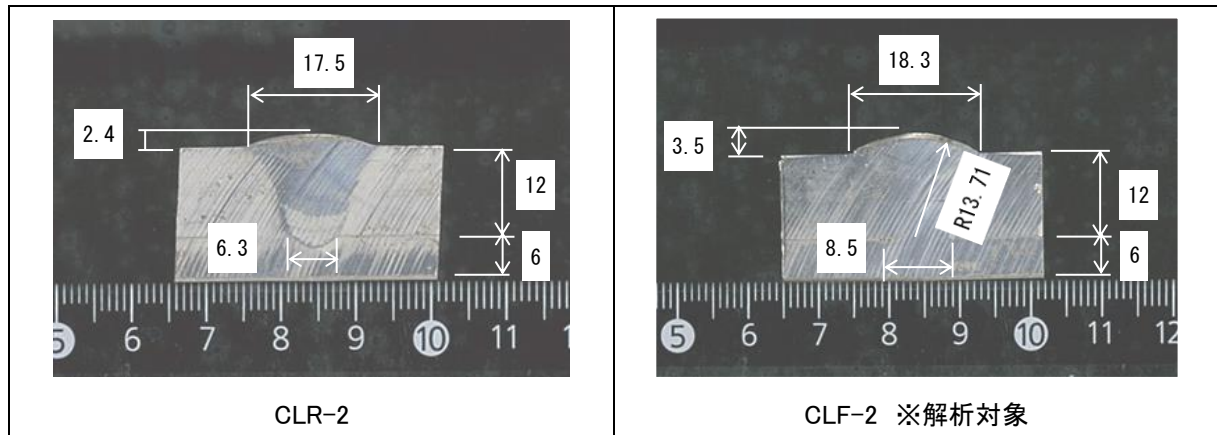
(1) 解析モデル

ここでは、試験片 TP-A (板厚 12mm) を対象にして、試験片 2 種類 (CLR-2, CLF-2) の溶接継手断面寸法を付図 8.3 に示す。このうち、解析対象 (記号 CLF-2) としての溶接継手の余盛り形状は、実測に基づき円弧近似 (曲率半径 R13.71mm) とし、試験片と裏当金とは 8.5mm の範囲で溶融しているものとした。

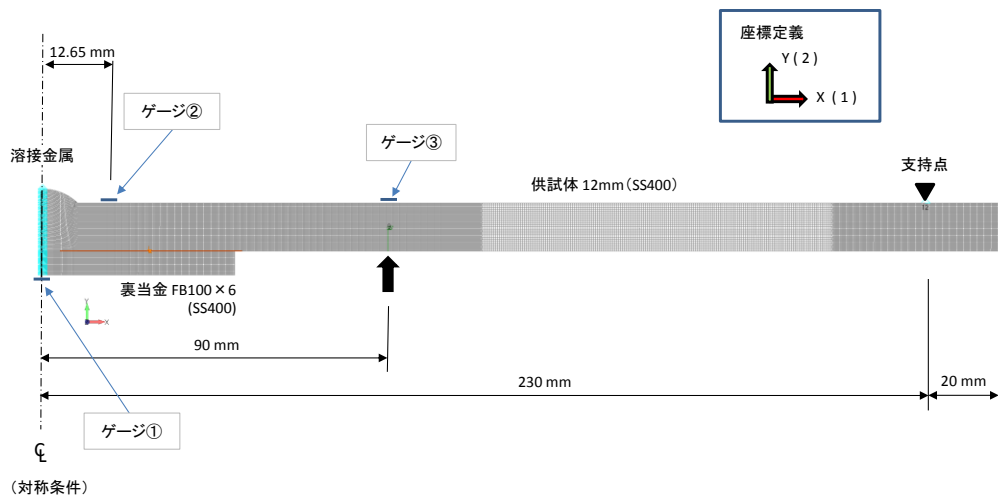
又、試験片と裏当金との間隙は 0mm としたが、試験体と裏当金は相互に接触・干渉しないものとして取り扱った (試験片と裏当金を接触扱いとした予備解析で、当該継手部分の曲げ剛性が高くなり過ぎた

ことによる)。

二次元平面歪み解析では、3 節点/4 節点アイソパラメトリック要素を用い、弾塑性微小変形解析を適用した。解析モデルは、対称性を考慮して 1/2 モデルとした（付図 8.4）。又、試験片【SS400】の材料定数として、縦弾性係数 $E=205,939.7 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、降伏応力 $\sigma_Y=245 \text{ N/mm}^2$ 、加工硬化は $H' = E/100$ とした。



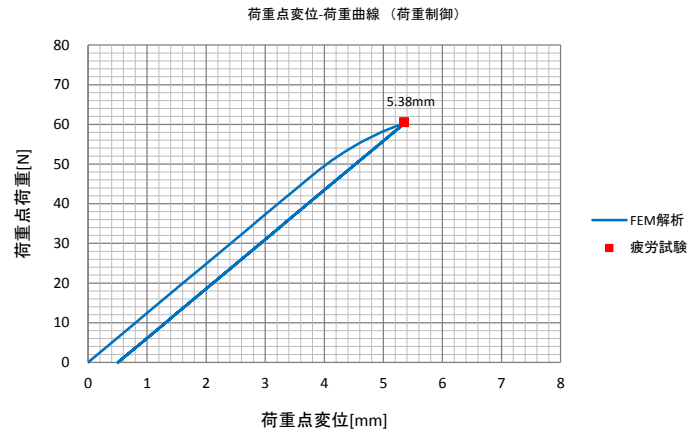
付図 8.3 試験片断面寸法【TP-A/板厚 12mm】



付図 8.4 解析モデル（1/2 モデル）【TP-A/板厚 12mm】

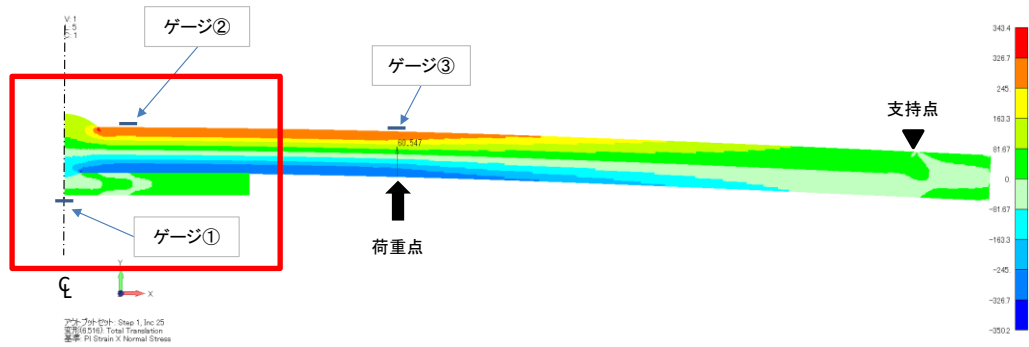
（2）解析結果

付図 8.5 に、荷重と荷重点変位の履歴を示す。疲労試験片のうち記号（CLF）における荷重点のストローク量は 5.3mm～5.4mm であり、FEM 解析結果（荷重点変位 5.38mm）と一致する。



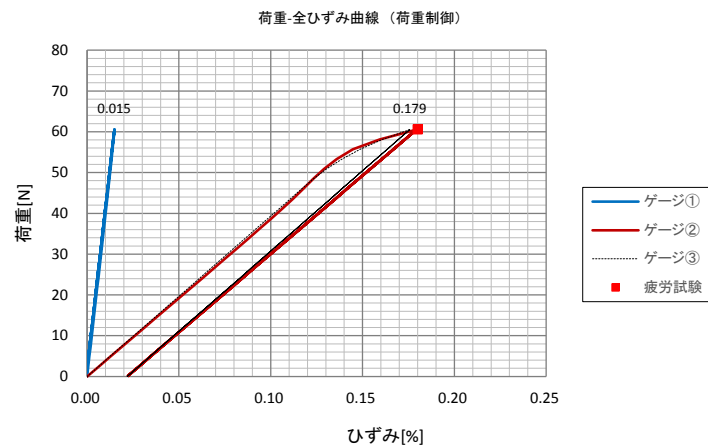
付図 8.5 荷重－荷重点変位の履歴

付図 8.6 に、最大荷重時における当該試験片の応力分布（長手方向成分）を示す。4 点曲げ試験により、溶接継手近傍から荷重点に至る一様な曲げ応力状態が確認出来る。



付図 8.6 応力分布（長手方向成分）

図 8.7 に、試験片 3 箇所貼り付けた歪みゲージ①～③の歪み履歴（長手方向成分）を示す。このうち、溶接止端部近傍に貼付た歪みゲージ②概ね 0.18% を示しており、FEM 解析結果と整合する（荷重点の歪みゲージ③も同様）。



付図 8.7 荷重－歪み履歴（歪みゲージ）

付図 8.8 に、最大荷重時における溶接継手近傍の歪み分布（長手方向成分）を拡大して示す（付図 8.6 参照）。但し、図中の図中の A 点は溶接継手の中央、B 点は溶接止端部、C 点は試験片と裏当金との溶融端部近傍を示す。

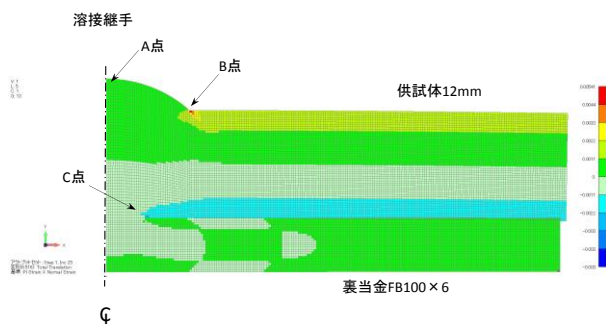
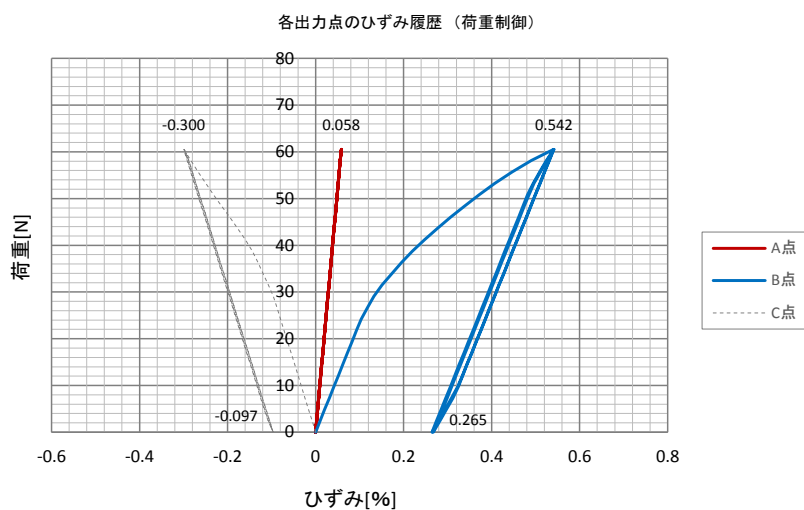


図 8.8 溶接継手近傍の歪み分布（拡大図）

同図より、溶接継手部の各点（A～C 点）に生じる歪みの履歴（長手方向成分）を付図 8.9 に示す。尚、B 点（溶接止端部）の歪みは応力集中の影響を含んでいる。解析結果より、各点に生じる歪み振幅を付表 8.4 に示す。



付図 8.9 荷重－歪み履歴（溶接継手部）

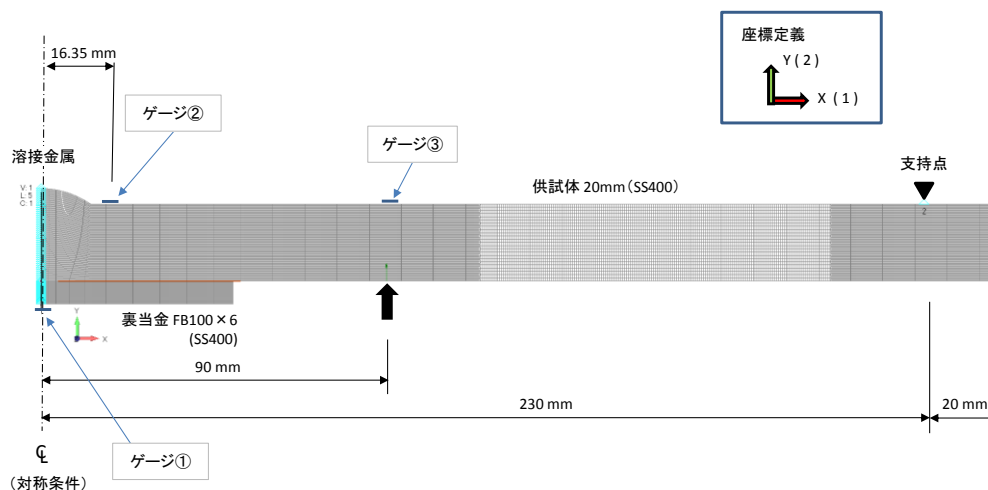
付表 8.4 歪み振幅【TP-A／板厚 12mm】

歪みゲージ No.	最大歪み $\varepsilon_{\max}(\%)$	最小歪み $\varepsilon_{\min}(\%)$	歪み振幅 $\Delta \varepsilon(\%)$	備考
A 点	0.058	0.0	0.058	継手中央
B 点	0.542	0.265	0.277	溶接止端部 ※応力集中含む
(C 点)	-0.300	-0.097	0.203	裏当金溶融点

2.2 試験片【TP-B／板厚 20mm】

(1) 解析モデル

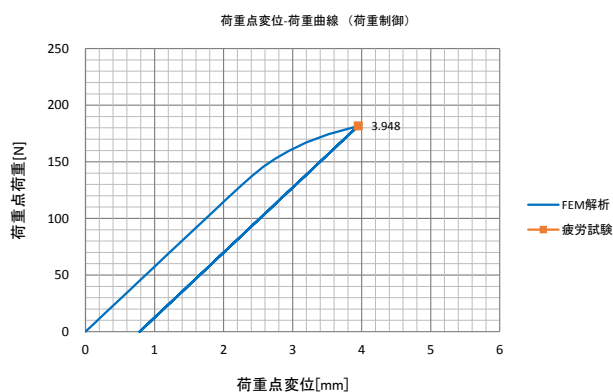
解析対象（記号 CLF-2）とした溶接継手の余盛り形状は、余盛りの高さ 4mm、幅 25.7mm の実測に基づき円弧近似（曲率半径 R22.7mm）とし、TP-A と同様に試験片と裏当金とは 8.5mm の範囲で溶融しているものとした。



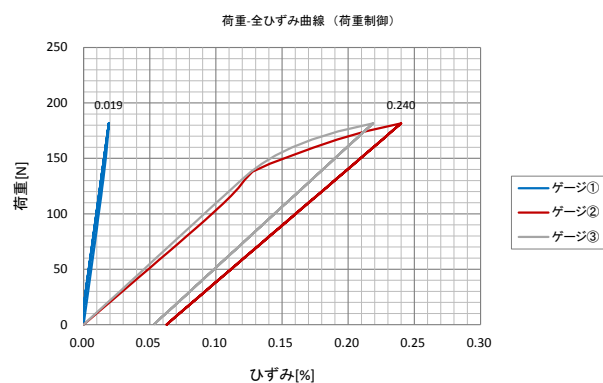
付図 8.11 解析モデル（1/2 モデル）【TP-B／板厚 20mm】

(2) 解析結果

解析結果を付図 8.12～付図 8.15 に、各点に生じる歪み振幅を付表 8.5 に示す。



付図 8.12 荷重－荷重点変位の履歴



付図 8.13 荷重－歪み履歴（歪みゲージ）

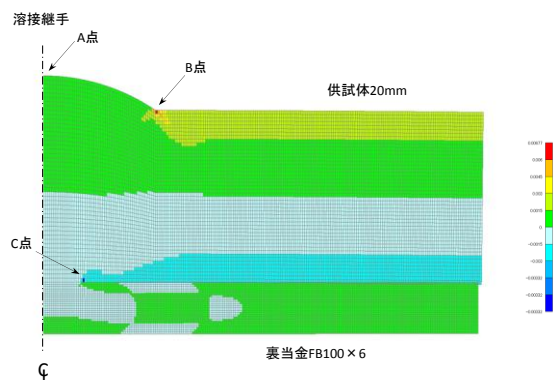
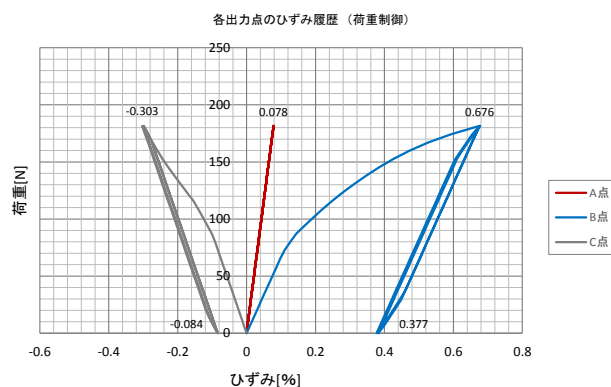


図 8.14 溶接継手近傍の歪み分布（拡大図）



付図 8.15 荷重－歪み履歴（溶接継手部）

付表 8.5 歪み振幅【TP-B／板厚 20mm】

歪みゲージ No.	最大歪み $\varepsilon_{\max} (\%)$	最小歪み $\varepsilon_{\min} (\%)$	歪み振幅 $\Delta \varepsilon (\%)$	備考
A 点	0.078	0.0	0.078	継手中央
B 点	0.676	0.377	0.299	溶接止端部 ※応力集中含む
(C 点)	-0.303	-0.084	0.219	裏当金溶融点

3. 欠陥寸法評価

（1）疲労亀裂解析結果

ここでは、試験片【TP-A／板厚 12mm】を対象にして、疲労試験片の突合せ溶接継手止端部（B 点）に、亀裂深さが 3mm 程度、亀裂長さが 20mm 程度（付表 8.1 の記号 CFL 参照）の半楕円表面亀裂を想定して、本文と同様の方法により疲労亀裂進展解析を実施した。但し、亀裂進展特性の材料定数としては回帰曲線の値（中間値）を用いる。

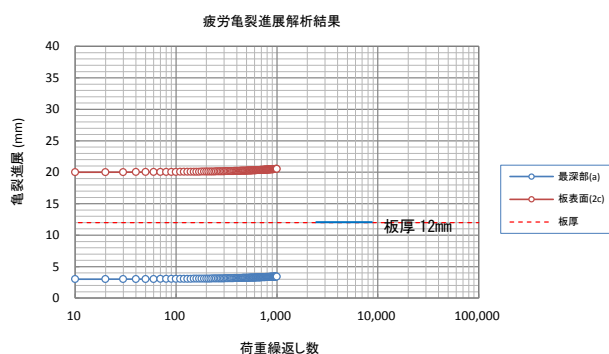
表 6.4 材料定数（Paris 則）

	C 値	m 値	ΔK_{th} ($MPa\sqrt{m}$)
99.5%信頼限界	2.60×10^{-11}	2.75	2.00
回帰曲線	1.45×10^{-11}	2.75	2.40
(下限側)	(0.8×10^{-11})	2.75	(3.0)

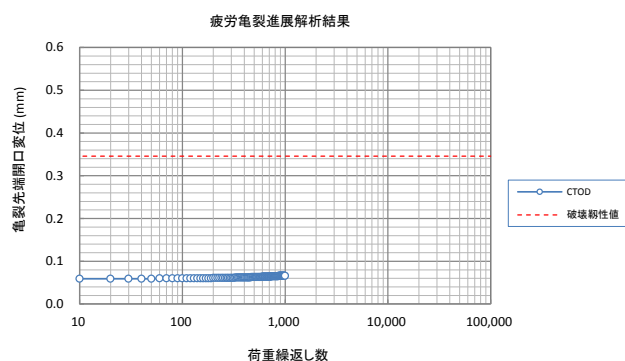
解析結果を、付図 8.16(a) 及び付図 8.16 (b) に示す。同図より、荷重繰返し数 1000 回では、当該表面亀裂からの疲労亀裂の進展及び脆性破壊の発生は認められない。

尚、埋没した溶接欠陥については、同規模の表面亀裂に比べて応力拡大係数範囲 (ΔK) が小さくなることから、当該溶接継手部からの疲労亀裂の進展及び脆性破壊は無いものとする。

更に、試験片【TP-B／板厚 20mm】についても同様の結果が得られた。



付図 8. 16 (a) 亀裂進展解析結果



付図 8. 16 (b) 亀裂先端開口変位 CTOD

(2) ブローホールやスラグ巻き込み等の小さい欠陥寸法評価（参考）¹⁾

a) 下限界応力拡大係数範囲 (ΔK_{th}) による評価

$$\Delta K_{th} = M \Delta \sigma \sqrt{\pi a_{th}}$$

$$\therefore a_{th} = \frac{1}{\pi M^2} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2$$

但し、 a_{th} : 亀裂進展開始寸法、 M : 補正係数、 $\Delta \sigma$: 応力範囲を示す。

ここで、溶接継手中央の表面 (A 点) の歪み振幅 $\Delta \varepsilon = 0.058\%$ を用いると、

$$\Delta \sigma = E \cdot \Delta \varepsilon = 205,939.7 \times 0.00058 \cong 119 \text{ MPa}$$

更に、下限界応力拡大係数範囲 (ΔK_{th}) として回帰曲線 (中央値) を用いて試算すると、

$$a_{th} = \frac{1}{\pi M^2} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2.4}{119} \right)^2 \cong 1.29 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.129 \text{ mm}$$

b) 諸規格における許容欠陥寸法（評価不要欠陥寸法）

解説表 8.1

規格	欠陥種類	許容欠陥	備考
JSSC 日本鋼構造協会 鋼構造物の疲労設計指針・同解説	ブローホール	幅 1.5mm 高さ 4mm 以下	
IIW 国際溶接学会 Fatigue design of welded joints and components	ブローホール 及び介在物	1.5mm	
ECCS 欧州鋼構造協会連合協議会 Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures	ブローホール	min(3mm, t/4)	

【参考文献】

- 1) 日本溶接協会, “WES2805 溶接継手の脆性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法”, 2011

塗膜厚さの影響試験 結果

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

1. 試験体の製作

塗膜厚さの影響試験 用試験体は、300mm×210mm×板厚12mmの試験体に放電加工による人工きず（長さ6mm×深さ3mm）を傾き角度0°、45°、-45°、90°の4か所加工し、0mm、0.7mm、1.0mm、1.5mm、2.0mmの塗膜を施した5体の試験体を製作した。（図1参照。）

また塗膜塗料は、一般的なタンクに施されているビニールエステルガラスフレークとした。

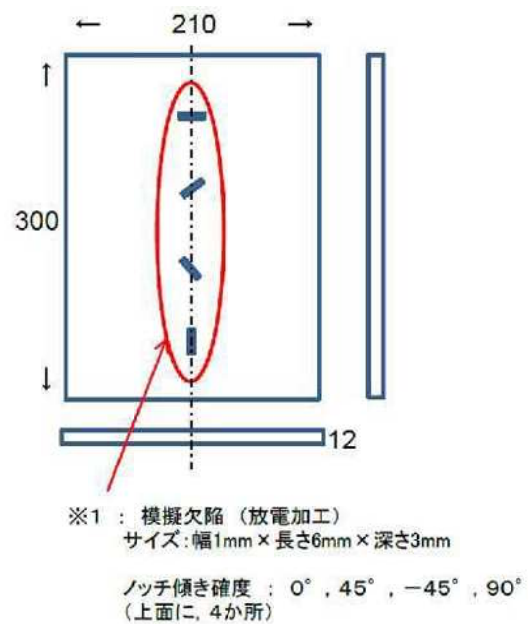


図1 塗膜厚さ影響確認試験体

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

1-1.試験体 外観写真

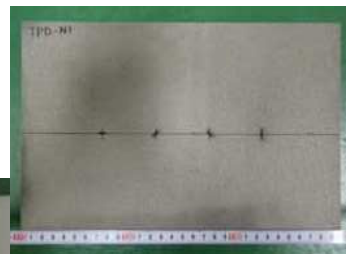


塗膜厚さ0.7mm試験体 (TPD-P1)



塗膜厚さ1.0mm試験体 (TPD-P2)

塗膜0mm試験体
(TPD-N1)



塗膜厚さ1.5mm試験体 (TPD-P3)



塗膜厚さ2.0mm試験体 (TPD-P4)

図2 塗膜厚さ影響確認試験体外観写真

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

1-2.試験体の製作工程

試験体製作工程の写真を図3～図8に示す。

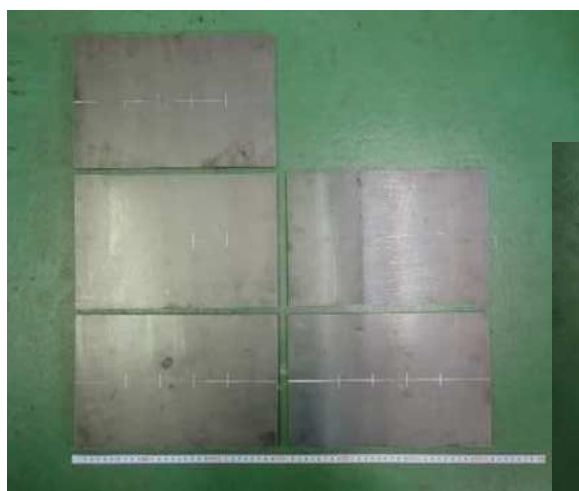


図3 試験体材料加工



図4 表面サンドブラスト処理

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

1-2.試験体の製作工程

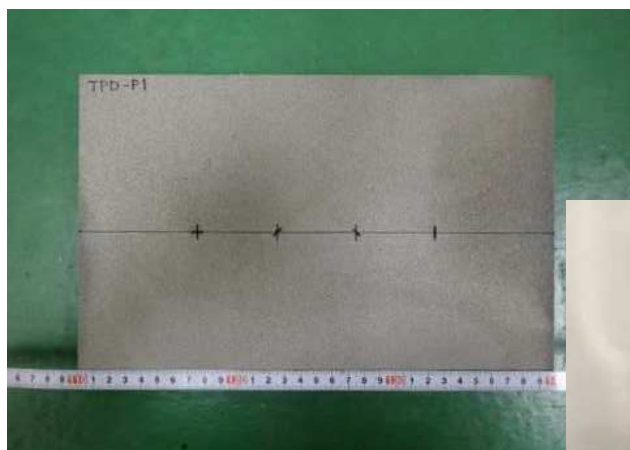


図5 人工きず加工後(放電加工)



図6 下塗り後(フレークガードプライマー)

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

1-2.試験体の製作工程



図7 中塗り後(ビニールエステルガラスフレーク)



図8 上塗り後(ビニールエステルガラスフレーク)

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

1-3.塗膜厚測定結果

塗膜厚さ測定は、図9に示すようにA部、B部の100mm四方で5点の測定を行った。その結果を表1に示す。

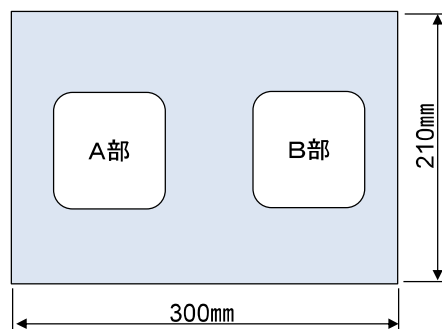


表1 塗膜厚さ測定結果

図9 塗膜厚さ測定部位

TP No. (膜厚)	測定箇所	膜厚[μm]						標準偏差
		1回	2回	3回	4回	5回	平均	
TPD-P1 (0.7mm)	A部位	729	622	683	709	755	700	50.8
	B部位	705	736	722	644	748	711	40.7
TPD-P2 (1.0mm)	A部位	974	983	1045	1005	995	1000	27.6
	B部位	858	893	1041	901	1071	953	96.2
TPD-P3 (1.5mm)	A部位	1393	1447	1428	1484	1521	1455	49.6
	B部位	1510	1567	1534	1474	1601	1537	49.3
TPD-P4 (2.0mm)	A部位	1912	1865	1857	2013	2011	1932	76.3
	B部位	1944	1912	2062	1944	1865	1945	72.8

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

2. 超音波探傷試験

(1) 試験方法

各探傷パターンに対して対象とした人工きずと探触子の走査方法を図10に示す。各塗膜厚さの異なる試験体での人工きずに対し、最大となる超音波反射波強度を80%に調整し、この時の探傷器の感度レンジ(アンプ)の値を記録し、塗膜と超音波減衰率の関係を確認した。また、この状態での20%を超える指示範囲の指示長さを求めた。

- ①Aパターン(A-R, A-L)探傷:0° きず
- ②Bパターン(B-R)探傷:45° きず
- ③Bパターン(B-L)探傷:-45° きず
- ④B-2パターン探傷:90° きず

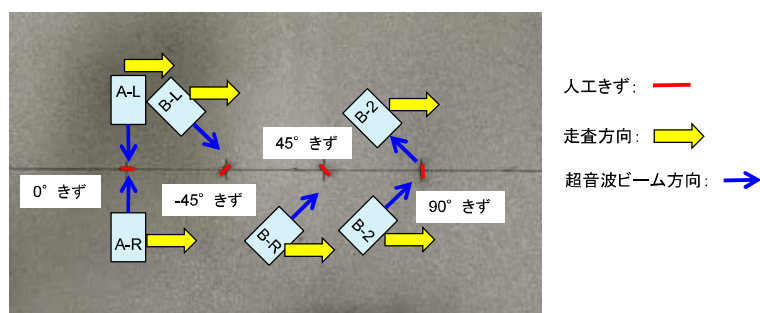


図10 探傷パターンとプローブ走査

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

2. 超音波探傷試験

(1) 試験方法（探傷状況写真）

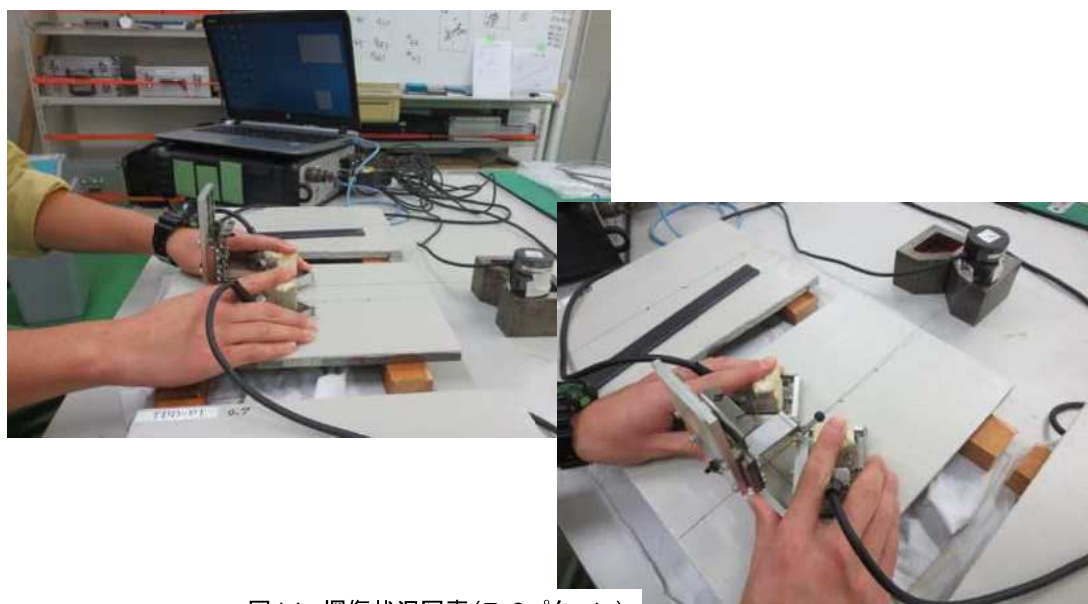


図11 探傷状況写真(B-2パターン)

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

2. 超音波探傷試験

(2) 塗膜厚と超音波減衰率について

感度校正用試験片(CAL-TP)の6mm×3mmきずを80%に調整した場合と各塗膜厚試験体の人工きずを80%に調整し、塗膜厚さによる減衰を確認した。各探傷パターンにて、各塗膜厚さでの人工きずからの超音波反射強度を探傷器の感度レンジ(アンプ)から、dB値での減衰量を表2に示す。

表2 塗膜厚さによる減衰

塗膜試験体UTデータ											
試験体		A-R		A-L		B-R		B-L		B-2	
塗膜厚さ (mm)	試験片No.	80%感度 [dB]	CAL-TPとの 感度差[dB]	80%感度 [dB]	CAL-TPとの 感度差[dB]	80%感度 [dB]	CAL-TPとの 感度差[dB]	80%感度 [dB]	CAL-TPとの 感度差[dB]	80%感度 [dB]	CAL-TPとの 感度差[dB]
0	CAL-TP	30.2	0.00	31.9	0.00	41.6	0	47.4	0	38.2	0
0.7	TPD-P1	37.4	-7.20	39.2	-7.30	54.5	-12.90	59	-11.60	55.2	-17.00
1	TPD-P2	40.3	-10.10	43.4	-11.50	57.3	-15.70	61.9	-14.50	58.8	-20.60
1.5	TPD-P3	41.5	-11.30	43.3	-11.40	63.9	-22.30	64.7	-17.30	64	-25.80
2	TPD-P4	50.2	-20.00	48.2	-16.30	69	-27.40	72.1	-24.70	68.6	-30.40
0(サンブラ面)	TPD-N1	32.7	-2.50	34	-2.10	47.3	-5.70	47.9	-0.50	45	-6.80

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

3. 塗膜厚と超音波減衰カーブ

(1) Aパターンの塗膜厚と超音波減衰カーブ

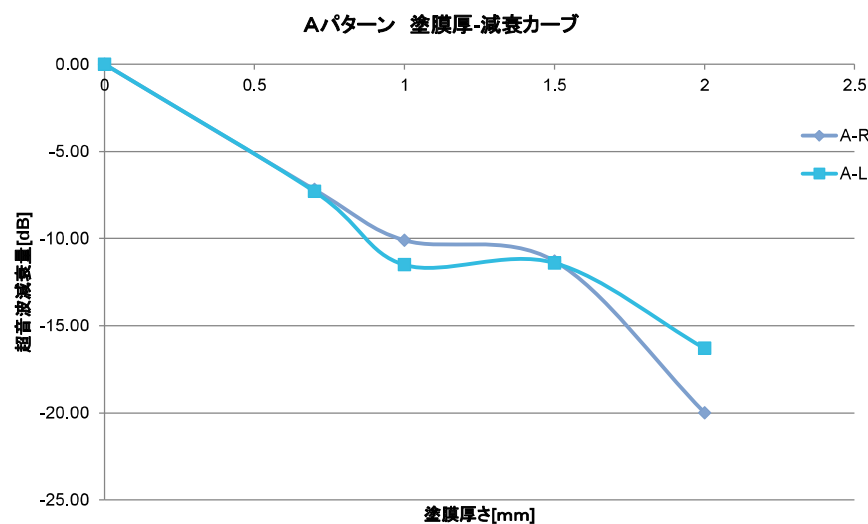


図12 Aパターン 塗膜厚-減衰カーブ

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

3. 塗膜厚と超音波減衰カーブ

(2) Bパターン, B-2パターンの塗膜厚と超音波減衰カーブ

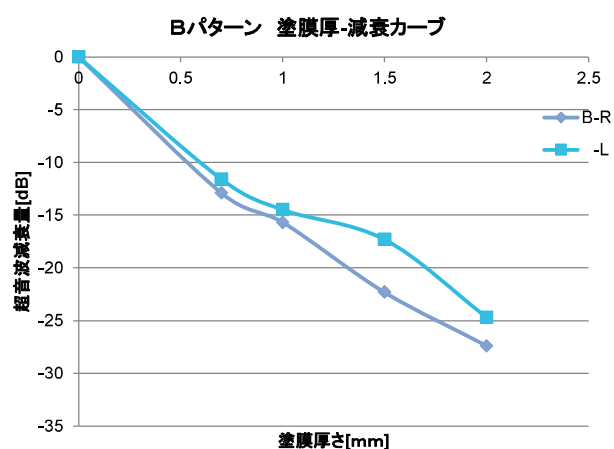


図13 Bパターン 塗膜厚-減衰カーブ

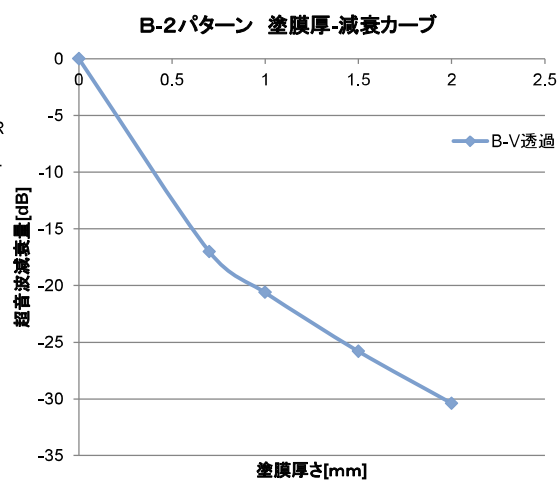


図14 B-2パターン 塗膜厚-減衰カーブ

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

4. 指示長さの検討

指示長さの検討として、各塗膜厚さの6mm×3mmきずからの反射エコーから、図15に示すように、反射強度20%を超える探触子の移動距離から指示長さを求めた。この結果を以降に示す。

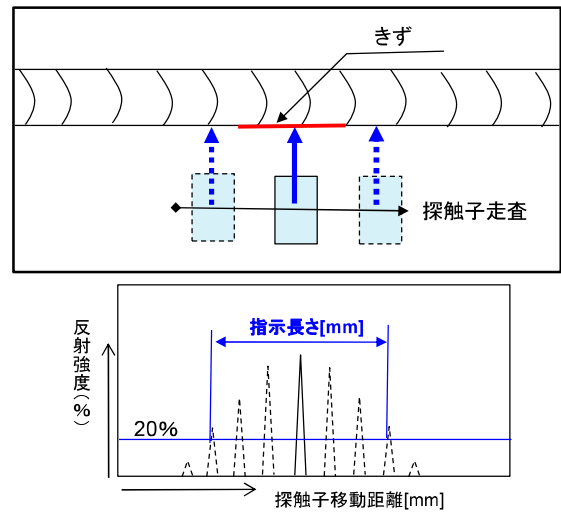


図15 指示長さの求め方

4. 指示長さの検討

感度校正用試験片の人工きず(6mm×3mm)の反射エコーを80%に調整した後、各パターンの感度補正を行い、各塗膜厚さでの6mm×3mmきずの指示長さを求めた結果を表3に示す。塗膜厚さ0.7mm～1.5mmに関しては、Aパターンは、8mm～10mmであり、Bパターンに関しては、14mm～20mm、B-2パターンでは、10mm～18mmであった。

塗膜厚さ2mmに関しては、A-Rにおいて指示長さ2mmで、6mmを下回る結果となったが、塗膜の凹凸の影響によるものと考えられる。その他については、指示長さ6mm以上の値が得られた。

表3 塗膜厚さによる指示長さ

試験体No.	塗膜 (mm)	Aパターン				Bパターン				B-2パターン(V透過)	
		R		L		R		L		-	
		エコー高さ [%]	指示長さ [mm]	エコー高さ [%]	指示長さ [mm]	エコー高さ [%]	指示長さ [mm]	エコー高さ [%]	指示長さ [mm]	エコー高さ [%]	指示長さ [mm]
CAL-TP	0	80	10	80	10	80	16	80	16	80	16
TPD-P1	0.7	100<	10	98	10	100<	20	100<	20	100<	18
TPD-P2	1	71	8	60	8	100<	18	100<	20	84	13
TPD-P3	1.5	62	8	61	8	100<	14	100<	18	46	10
TPD-P4	2	24	2	34	6	64	12	52	12	26	6
TPD-N1 サンブラ面	0	61	6	64	10	80	14	77	14	38	8

5. 指示長さCスコープ画像

Aパターン指示長さCスコープ画像例

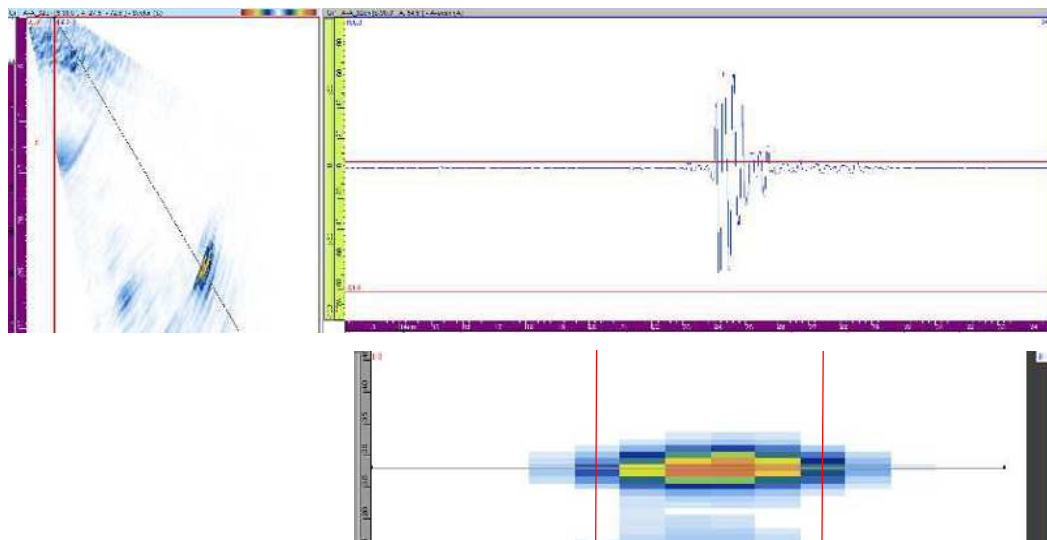


図16 Aパターン(A-R)塗膜厚さ1mmCスコープ画像

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

5. 指示長さCスコープ画像

Bパターン指示長さCスコープ画像例

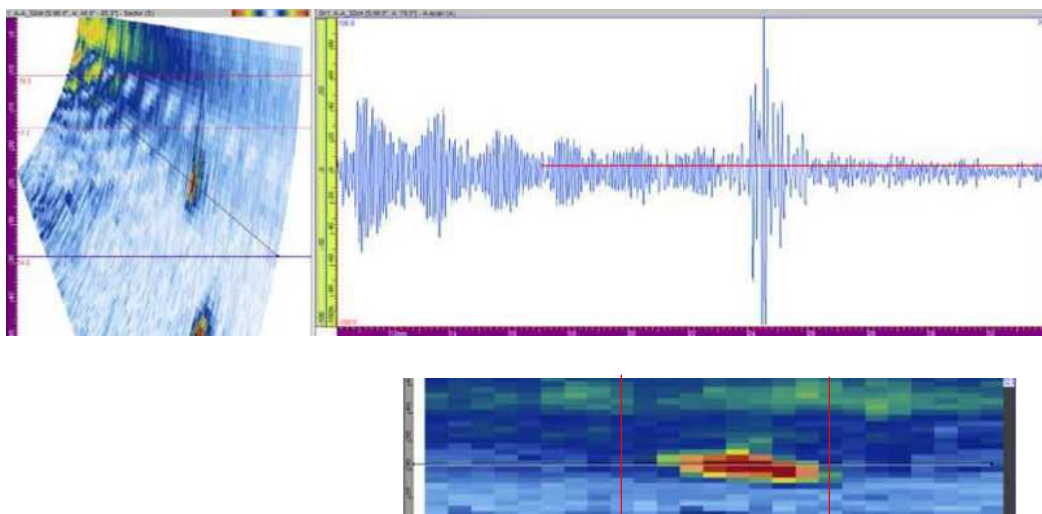


図17 Bパターン(B-R)塗膜厚さ1mmCスコープ画像

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

5. 指示長さCスコープ画像

B-2パターン指示長さCスコープ画像例

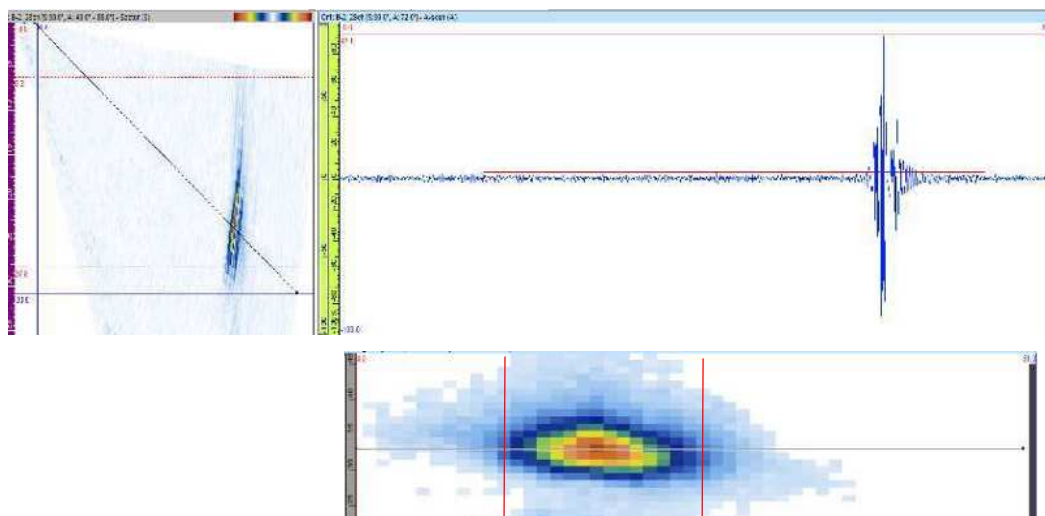


図18 B-2パターン塗膜厚さ1mmCスコープ画像

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

6. 探傷感度の設定

(1) Aパターン探傷の感度補正

Aパターン探傷での塗膜厚さによる感度補正は、塗膜厚さ1mm相当の減衰分として感度校正用試験片の感度に**プラス9dB**を探傷感度としている。今回の塗膜厚さ1mmの試験体結果からもA-Rで-10dB, A-Lでは-11dBの結果であり、超音波探傷での一般的な誤差として $\pm 2\text{dB}$ とされるなかで、妥当な感度補正量と判断する。また、この探傷感度80%より、しきい値レベルを20%としている事から、80%に対し反射強度が1/4レベルを検出している点から、更に**プラス12dB(合計21dB)**の**検出感度**である。従って、**塗膜厚さ2mm**においても**6mm×3mm**のきず検出が可能である。(図19参照)

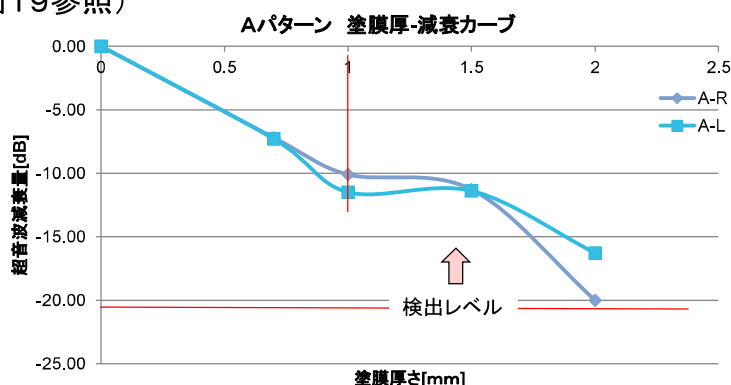


図19 Aパターン探傷感度補正(検出レベル)

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

6. 探傷感度の設定

(2) Bパターン探傷の感度補正

Bパターン探傷での塗膜厚さによる感度補正は、塗膜厚さ1mm相当の減衰分として感度校正用試験片の感度に**プラス21dB**を探傷感度としている。今回の塗膜厚さ1mmの試験体結果からB-Rで約-16dB、B-Lでは約-15dBの結果であり、B-2では約-21dBであった。従ってBパターンにおいても、妥当な感度補正量と判断する。

また、この探傷感度(80%)より、しきい値レベルを20%としていることから、Aパターンと同様に、更に**プラス12dB(合計33dB)**の検出感度である。従って、**塗膜厚さが2mm以上においても6mm×3mmのきず検出が可能**である。(図20, 図21参照)

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

6. 探傷感度の設定

(2) Bパターン探傷の感度補正

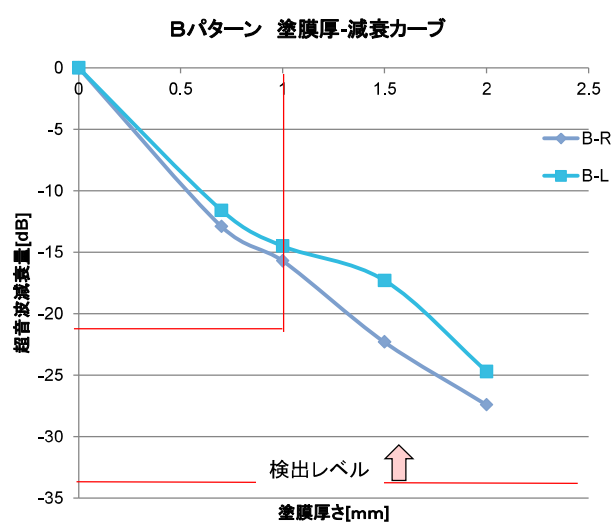


図20 Bパターン探傷感度補正(検出レベル)

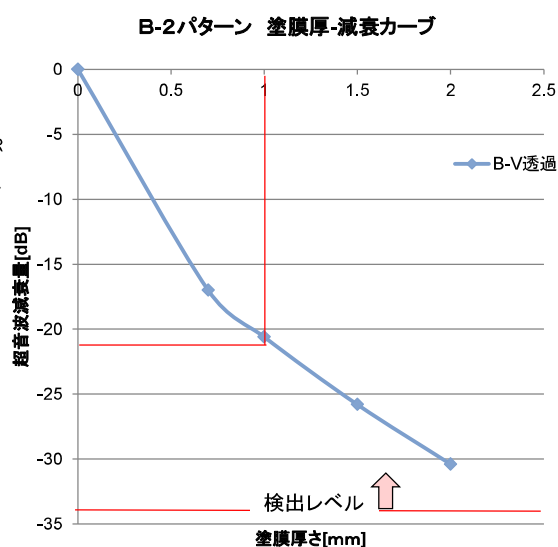


図21 Bパターン探傷感度補正(検出レベル)

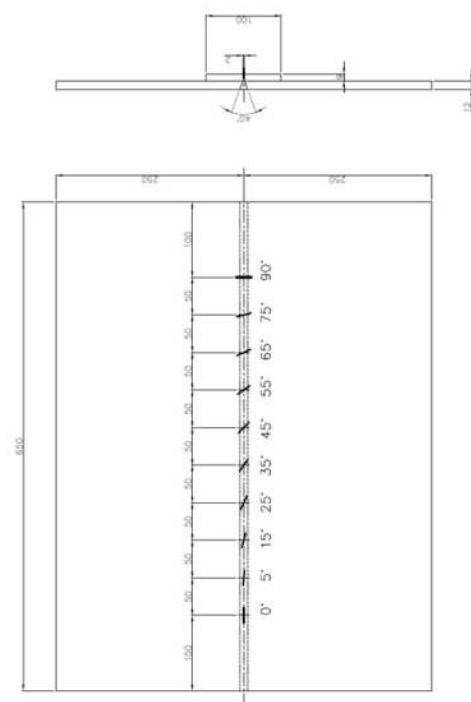
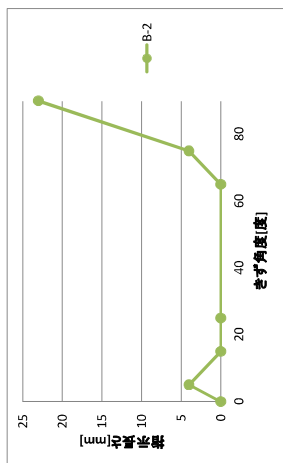
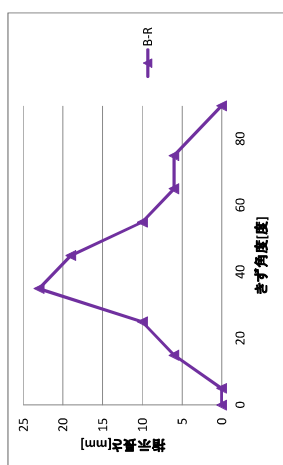
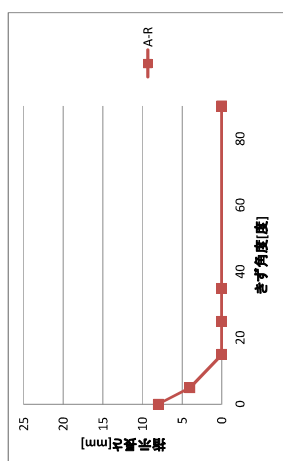
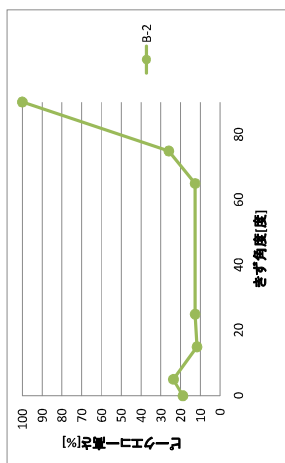
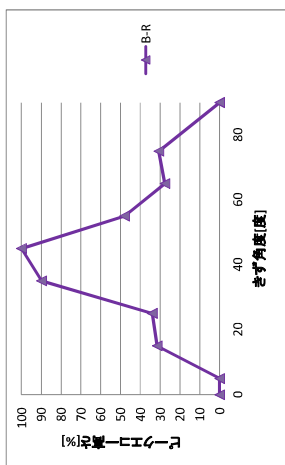
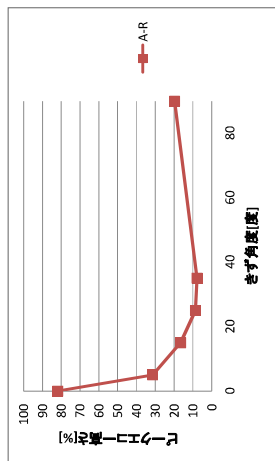
IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

試験体No.	塗膜厚[mm]	きず角度[度]	Aパターン		Bパターン		B-2パターン(V透過)	
			R	L	R	L	R	L
TPS-N2	1.0	0	8	81.9	—	—	0	—
		5	4	31.5	—	—	4	23.6
		15	0	16.5	6	31.5	0	11.8
		25	0	8.7	10	33.9	0	12.6
		35	0	7.9	23	89.8	—	—
		45	—	—	19	100	—	—
		55	—	—	10	48	—	—
		65	—	—	6	27.6	0	12.6
		75	—	—	6	30.7	4	26
		90	0	19.7	—	—	23	100

A-R
A-L
B-R
B-2



試験片サイズ：幅1mm×長さ6mm×厚さ3mm
 試験片表面のきず角：0°、5°、15°、25°、35°、45°、55°、65°、75°、90°
 （各きず角に10箇所）
 試験速度：1mm

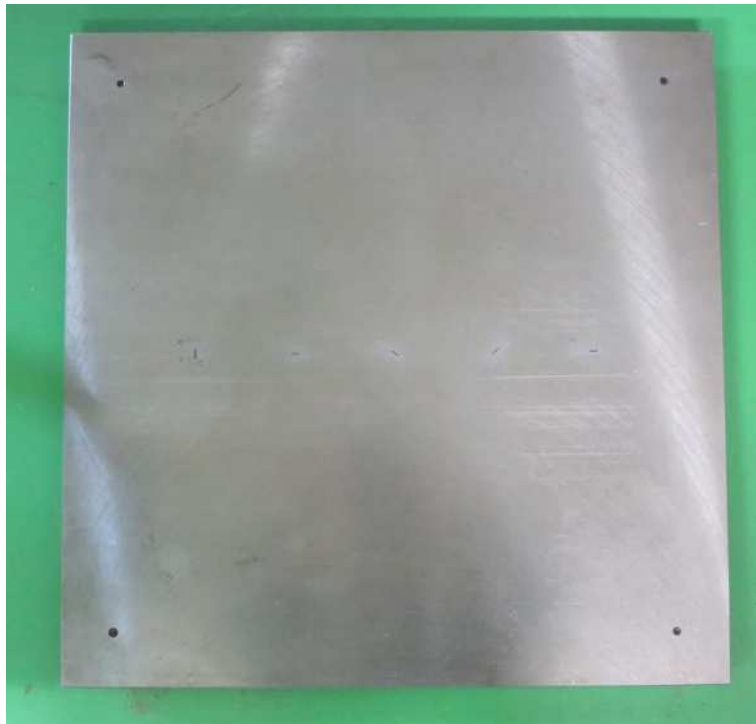


7. 標準試験片の製作及び当該装置の校正方法の検討

超音波探傷装置は装置毎で信号強度にばらつきが存在す。そこで、各超音波探傷装置でのばらつきを低減するために超音波探傷を実施する際には装置感度の校正を行う必要がある。そこで、本検討では試験体表面の長さ6mm深さ3mmのきずを検出目標とし、試験体表面母材部に長さ6mm深さ3mmのスリットを加工して、このスリットを基準として装置感度の校正を行った。本検討では溶接線に対して傾きをもつ全ての角度のきずを検出可能とするため、縦割れきず探傷(Aパターン)、横割れきず探傷(B-2パターン)、角度付ききず探傷(B'-2パターン)の3種類の探傷方法を用いて探傷試験を実施した。そこで、基準感度は各探傷方法で反射強度が最も高くなる角度のスリットを用いてその反射エコーが80%となるように探傷装置の感度を校正した。例えば、縦割れきず探傷(Aパターン)では溶接線方向(探傷装置の走査方向)に長さをもつスリットを基準とし、横割れきず探傷(B-2パターン)では溶接線に直行する方向のスリットを基準とし感度の校正を行った。感度校正に用いるために作製した標準試験片を図7.1に示す。図7.1(a)はタンク底板を模擬した板厚12mmの標準試験片を、図7.1(b)はアニュラ部を模擬した板厚20mmの標準試験片を示している。図7.1の標準試験片は試験体中心の1ラインに角度の異なる長さ6mm深さ3mmのスリットを加工している。溶接線検査装置をこのライン上で走査することにより、Aパターン、B-2パターン、B'-2パターンすべての探傷方法で感度が校正可能である。



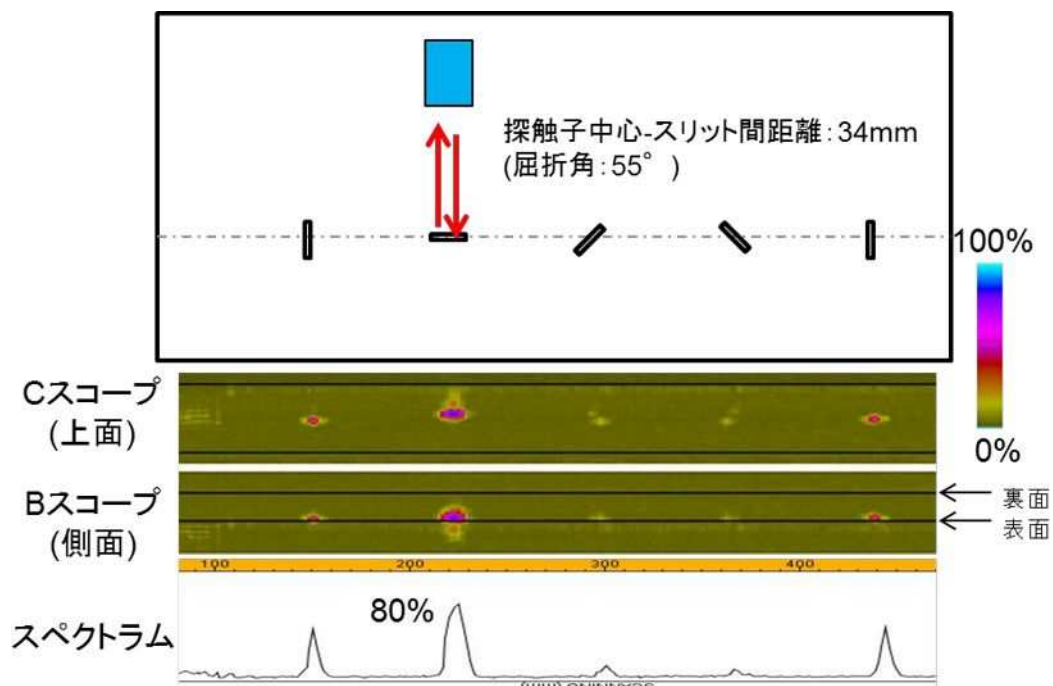
(a) タンク底板(板厚12mm)



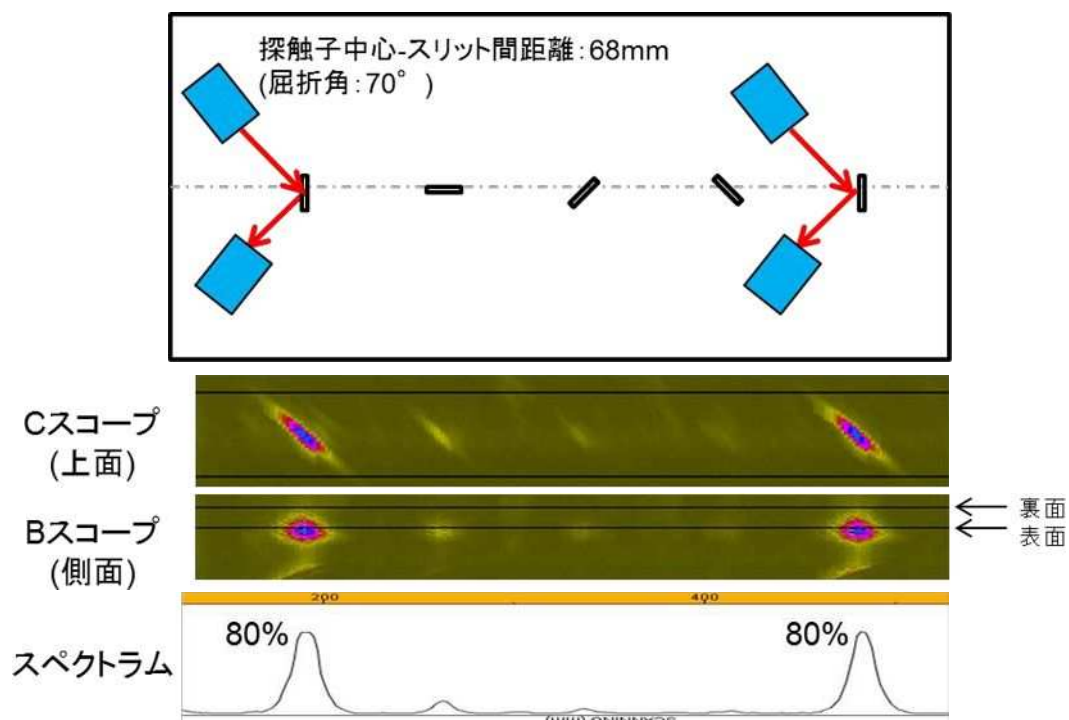
(b) アニュラ部(板厚20mm)

図7.1 標準試験片

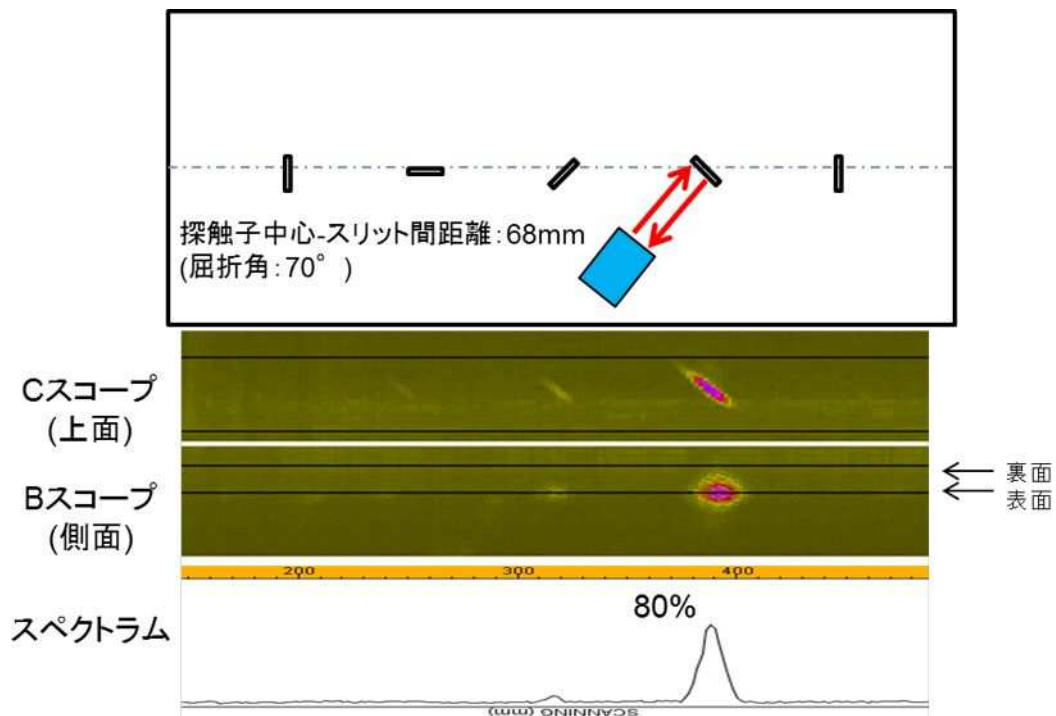
図7.1(a)のタンク底板(板厚12mm)を対象とした標準試験片を溶接線検査装置で探傷走査した結果を図7.2に、アニュラ部(板厚20mm)を対象とした標準試験片の探傷結果を図7.3に示す。(a)にAパターンでの探傷結果を、(b)にB-2パターンでの探傷結果を、(c)にB'-2パターンでの探傷結果をそれぞれ示している。なお、探傷感度はそれぞれの探傷パターンで反射エコーが最大となるスリットを80%となるように装置感度を校正している。スペクトラムは各探傷走査での探触子位置で超音波を複数の角度で電子走査し得られた最大の反射エコーの値をプロットしている。図7.2、図7.3よりそれぞれの探傷パターンで異なる角度のスリットからの反射エコーが最大となっていることがわかる。これらの3種類の探傷方法により溶接線方向に対する全ての角度の探傷が可能であると考えらる。



(a) 縦割れきず探傷 (Aパターン)

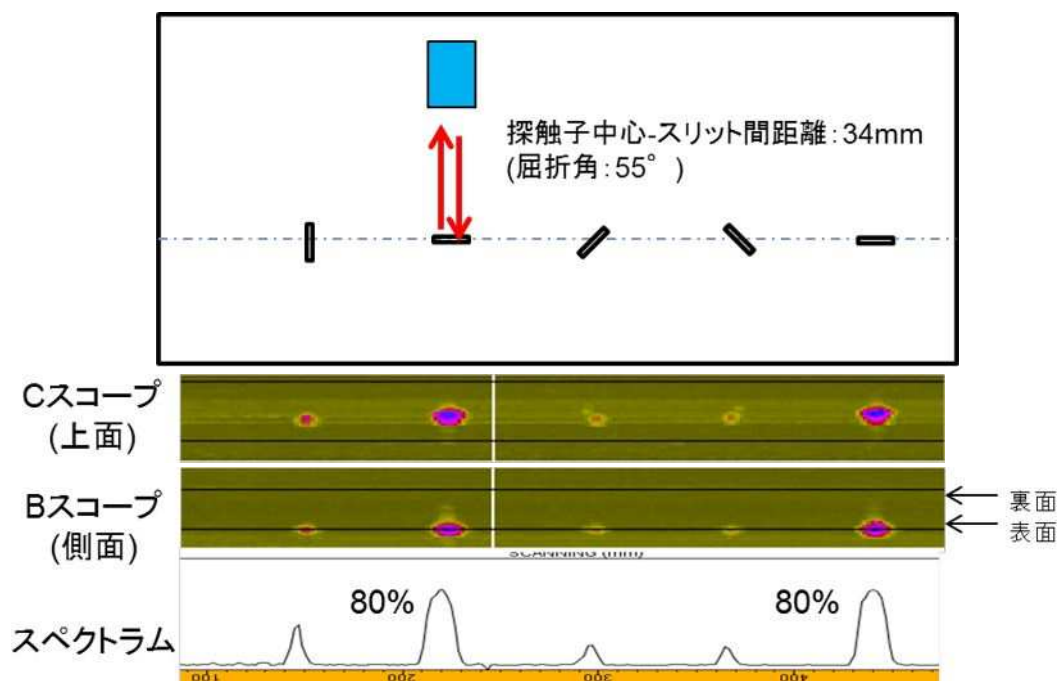


(b) 横割れきず探傷 (Bパターン)

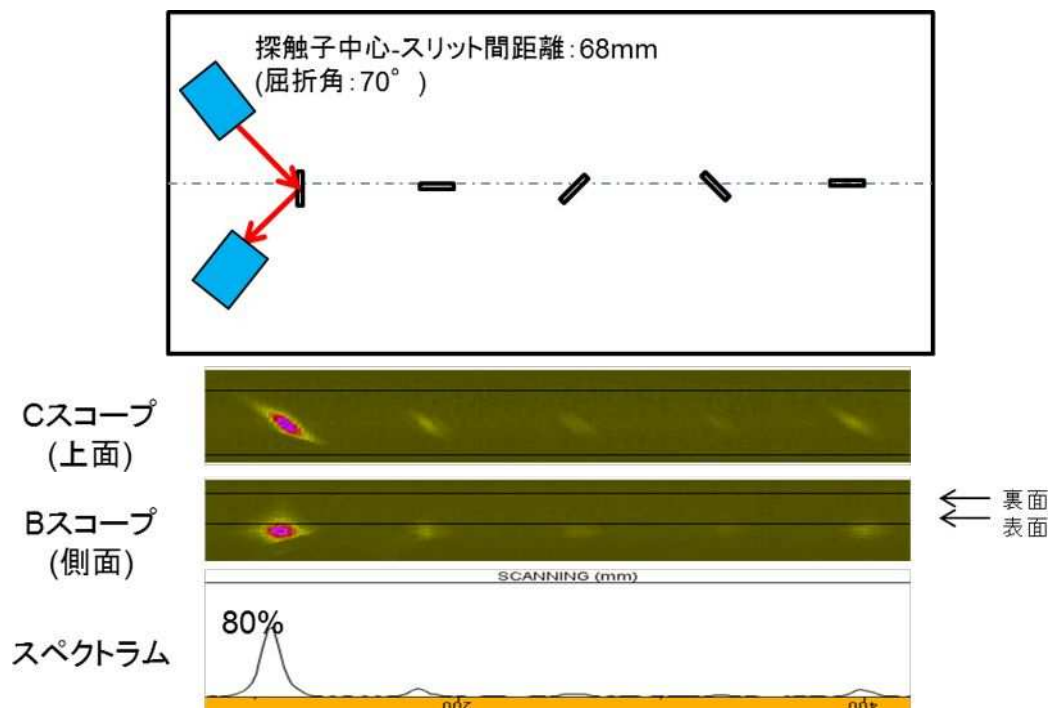


(c) 角度付き探傷(B'-2パターン)

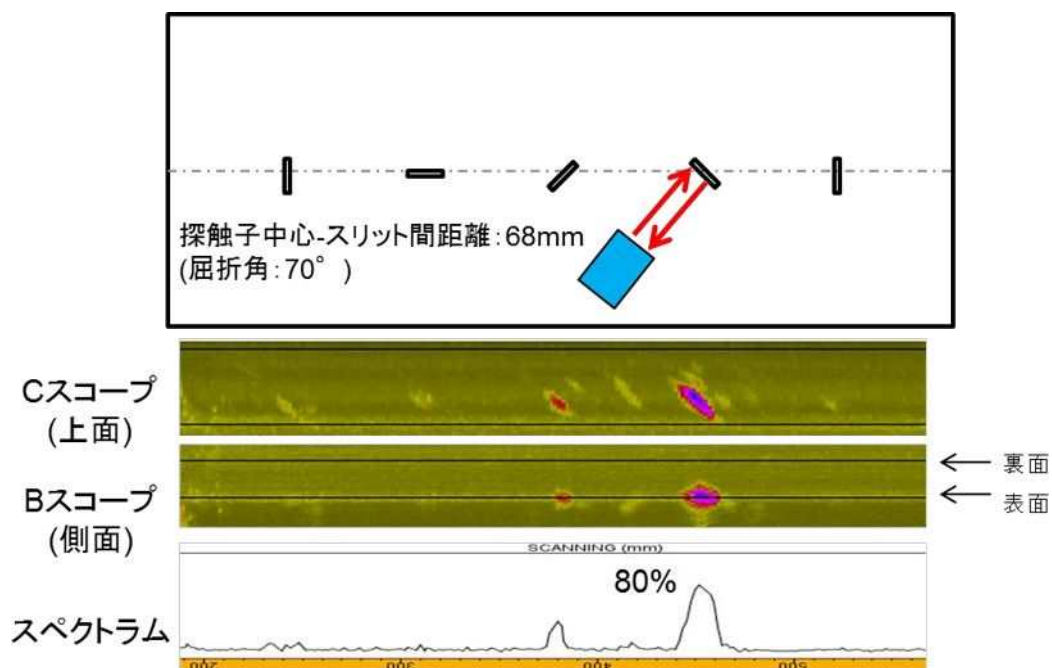
図7.2 標準試験片探傷結果(板厚12mm)



(a) 縦割れきず探傷(Aパターン)



(b) 横割れきず探傷 (Bパターン)



(c) 角度付ききず探傷 (B' -2パターン)

図7.3 標準試験片探傷結果 (板厚20mm)

本検討ではコーティング上か の探傷を対象としてきずの検出性を検討する必要がある。

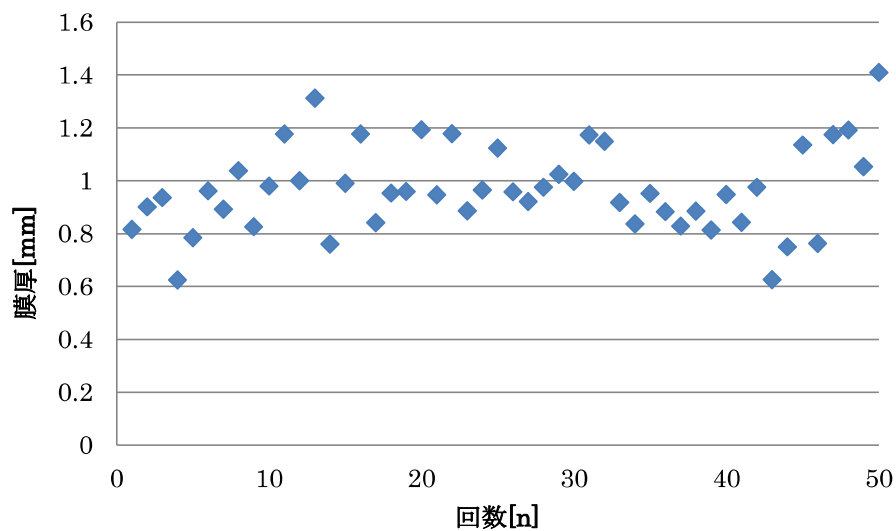
そこで、本検討ではタンク底板を模擬した標準試験片(板厚12mm)との比較を行うため、図7.1(a)と同形状の試験体を作製し、その上から塗装を行い、塗装が超音波探傷に及ぼす影響について検討を行った。作製した塗装試験片を図7.4に示す。実タンクでの塗装状況と同様するため、下記の手順にて塗装を実施した。

- ① サンブラストによる表面処理：Ra30～100 μ m
- ② 下塗（フレークガードプライマ）約50 μ m
- ③ 中塗（ビニールエステルガラスフレーク）約500 μ m
- ④ 上塗（ビニールエステルガラスフレーク）約500 μ m

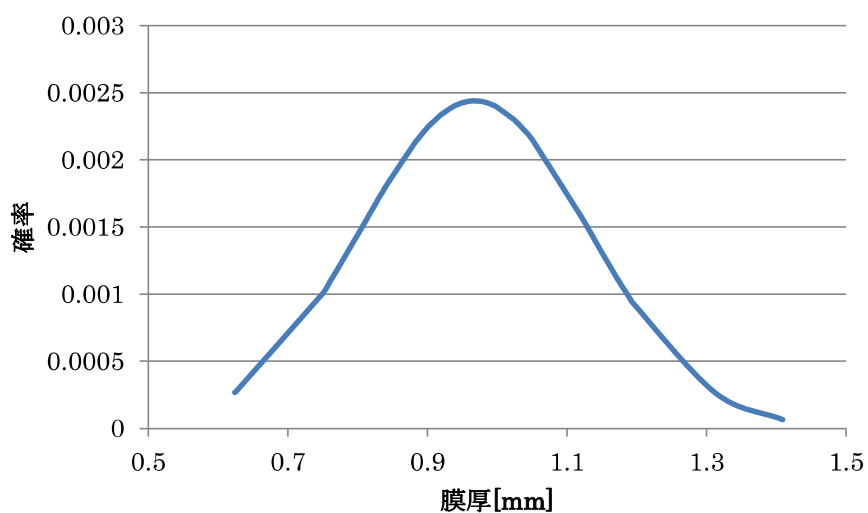
塗装した試験片の塗膜厚さを電磁膜厚計にて測定した結果を図7.5に示す。塗膜厚さは超音波探傷の際に探触子が接触する箇所を平均的に50回測定した。塗膜厚さ測定の結果、塗膜厚さ平均は0.968mm、標準偏差0.163mm、最大値1.41mm、最小値0.624mmであった。



図7.4 塗装試験片(板厚12mm)



(a) 測定値



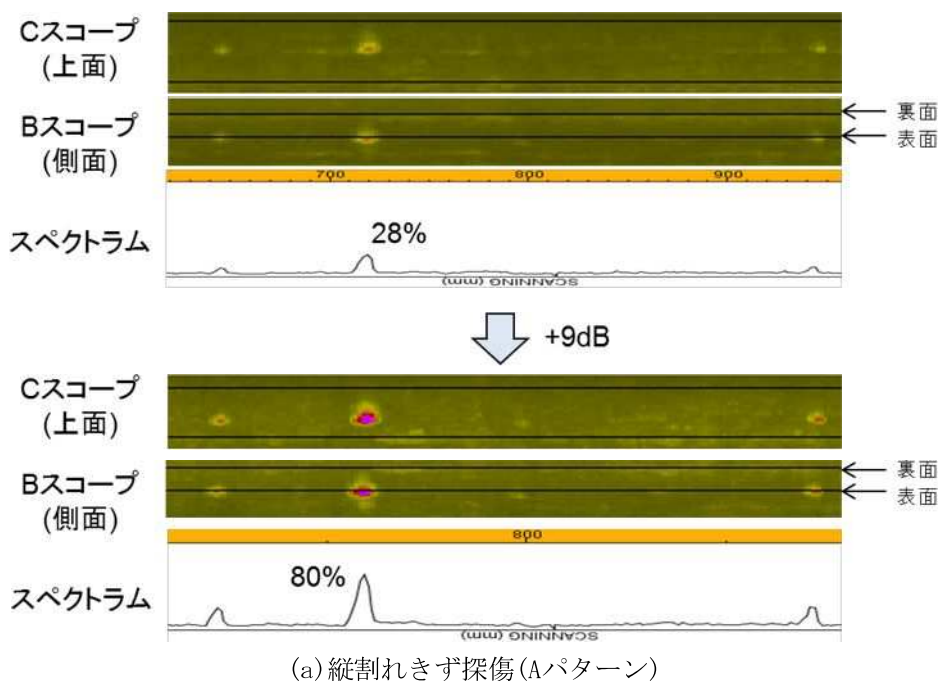
(b) 確率分布

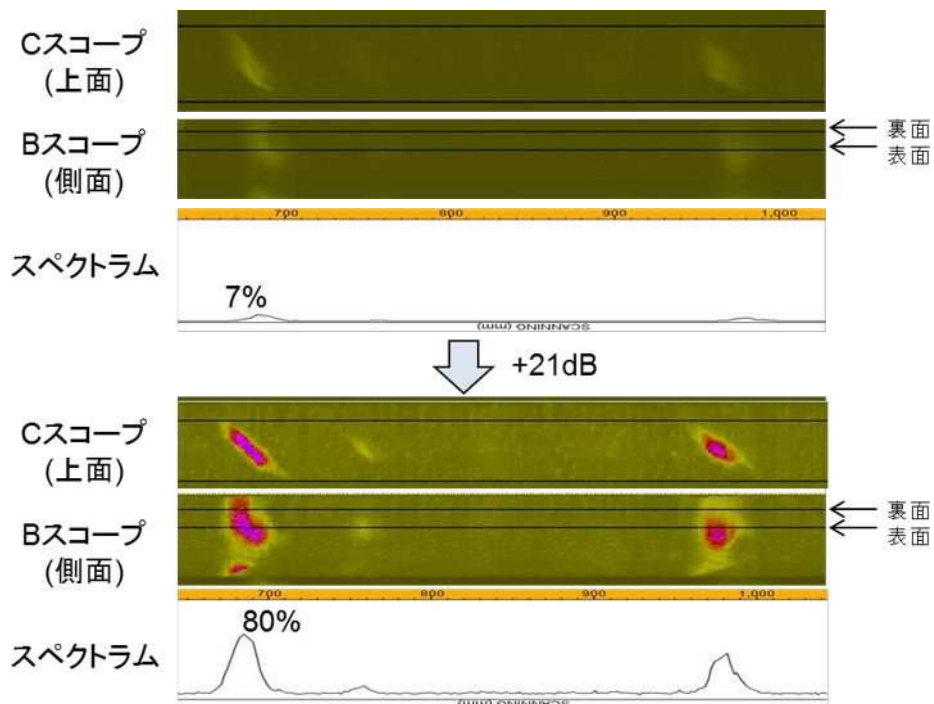
図7.5 塗膜厚さ測定結果

図7.4の塗装試験片を標準試験片で定めた感度で探傷した結果を図7.6に示す。図7.6より塗装の影響により全パターンでスリットからの反射エコー強度の低下を確認した。これは、試験体上の塗装により、塗装内での伝搬による減衰と塗装-試験片界面による試験片への透過率の低下によるものと考えられる。実タンクでは塗装されている面からの探傷となるため塗装条件下で検討を行う必要がある。そこで、各パターンで塗装の有無によるスリットからの反射エコー強度の差を把握し、塗装による減衰分を装置感度で補正する必要がある。標準試験片と塗装試験片の探傷比較の結果、縦割れきず探傷(Aパターン)では塗装によりスリットからの反射エコー強度が約9dB低下していることが確認された。また、横割

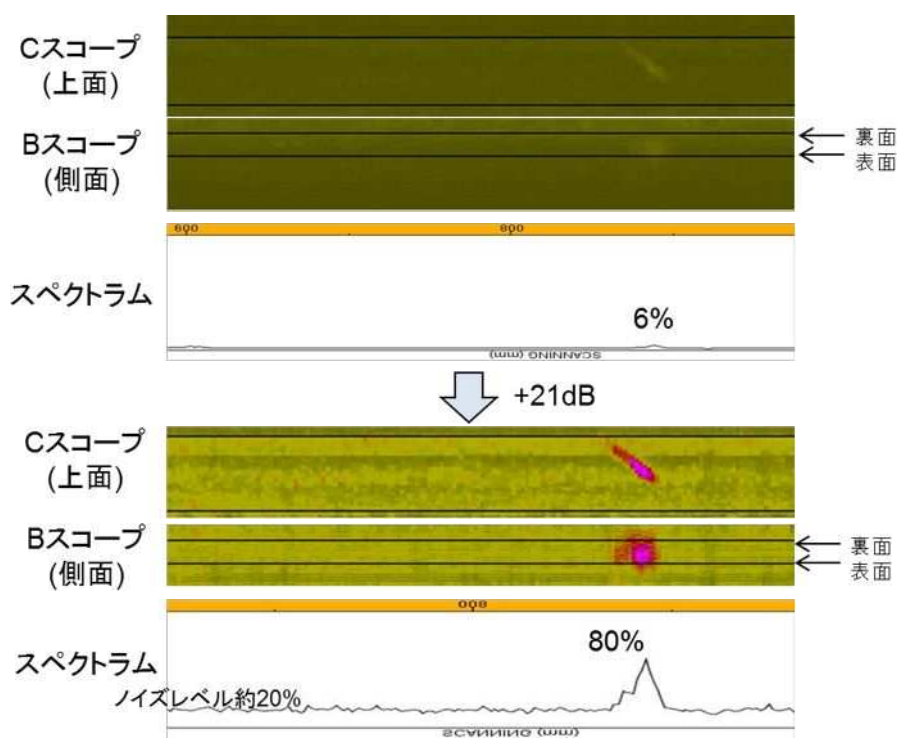
れきず探傷(B-2パターン)及び角度付き探傷(B'-2パターン)では約21dB低下した。各探傷パターンでの減衰率を比較するとAパターンと比較してB-2パターン、B'-2パターンでは塗装による減衰の影響が大きくなることが確認された。この原因として、塗膜内の伝搬距離の違いによる影響が考えられる。Aパターンは溶接線に垂直に探触子を配置しているが、B-2パターン、B'-2パターンは溶接線に対して45°に探触子を配置しているため超音波の伝搬距離が長くなっている。例えば、図7.2に示している探触子配置で塗膜厚さ1mmと仮定すると。縦割れきず探傷では塗膜内部を往復で3.5mm伝搬するのに対して、B-2パターン、B'-2パターンでは往復で5.8mm伝搬する計算となる。この塗膜内の伝搬により減衰率に違いが表れたと考えられる。また、探触子とスリットの距離が違ふことにより試験片内に透過した超音波の屈折角が変化する。この屈折角の違いにより塗装-試験体界面の入射効率が変化し減衰率の違いとして表れたことも要因の一つであると考えられる。図7.6には塗装試験片を標準試験片で定めた感度と塗装試験片での減衰を考慮して補正した際の探傷結果を併せて示している。

塗装による減衰を考慮して感度を補正した探傷結果は図7.2の標準試験片の探傷結果と同等の値を示している。このように、塗装による減衰分の感度を補正することで標準試験片での校正した結果と同等の結果を得ることが可能である。そこで、本試験及び実タンクでの運用の際には標準試験片による校正と感度補正を実施することで、異なるサイト毎での探傷の際の評価が可能であると考えられる。





(a) 横割れきず探傷 (B-2パターン)



(a) 角度付ききず探傷 (B'-2パターン)

図7.6 塗装試験片探傷結果 (板厚12mm)

超音波探傷法によるコーティング上からの底部溶接部検査に関する検討

1 屋外タンク貯蔵所に係る溶接部検査の概要

屋外タンク貯蔵所は、設置や変更工事、保安検査時等において、各種検査を受けることとされている。各種検査の概要は以下のとおりである。

(1) 完成検査前検査

屋外タンク貯蔵所のうち、液体の危険物を扱うタンクを設置又は変更しようとする者は、完成検査前検査を受けることとされている。

完成検査前検査は、施設が完成した後では確認できない部分を工事の進捗状況に合わせて市町村長等が実施する検査であり、基礎・地盤検査、溶接部検査及び水張検査がある。このうち、基礎・地盤検査、溶接部検査については、容量が 1,000KL 以上の大規模なタンクのみが対象となる。

(2) 保安検査

容量が 10,000KL 以上の屋外タンク貯蔵所は、7 年～15 年に 1 回又は不等沈下があった場合、保安検査を受けることとされている。

保安検査は、タンク底部の溶接部及び底部の板厚が技術上の基準に適合していることを市町村長等が確認する検査である。

(3) 内部点検

容量が 1,000KL 以上 10,000KL 未満の屋外タンク貯蔵所は、12 年～15 年に 1 回、内部点検を行うこととされている。

内部点検は、タンク底部の溶接部及び底部の板厚が技術上の基準に適合していることを事業者自らが確認する点検である。

(4) タンク底部の溶接部検査

溶接部検査のうち、タンク底部の溶接部の検査については、原則として磁粉探傷試験を行うこととされている。磁粉探傷試験は、強磁性体の鉄鋼材料等の表面及びその近傍のきずを検出することに適した試験方法であり、磁化させた試験体に検査液を適用することで、きず部から漏えいした磁束に磁粉が引き寄せられ磁粉模様を形成し、きずを可視化する試験方法である。

2 経緯等

平成 10 年度及び平成 11 年度の消防庁危険物技術基準委員会において、「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」が行われた。当該委員会が開催された背景として、法令上特定屋外タンク貯蔵所のタンク底部の溶接部検査は磁粉探傷試験（浸透探傷試験を含む。）で確認することが定められているが、コーティングを施工している場合には磁粉探傷試験の検査精度を向上させるためコーティングを剥離して実施しており、コーティングの剥離、再塗装は開放期間の長期化、施工費等の観点から事業者にとって負担となっていた。このことから、溶接部検査においてコーティングを剥離することなく実施できるシステムが望まれており、当該委員会では、コーティング上から行うことができる可能性のある溶接部の非破壊試験の方法を選定し、その検査精度等について実証試験等を行うとともに、

一方で強度的に容認可能な欠陥寸法について解析、試験等の調査検討を行うため、検討項目ごとに分科会を設け検討が行われた。

当該委員会の検討結果を踏まえ、消防庁では、「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）を発出している。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、当該通知の第 2 において、標準的な試験要領、試験結果の評価等を定めており、運用等の詳細については、実用機が制作された段階で通知するとしている。

今般、フェーズドアレイ技術を用いた超音波探傷法による検査装置の実用機（以下「UT 実用機」という。）が制作されたことから、その特徴を踏まえ、運用等について検討するものである。

3 UT 実用機の性能等

(1) フェーズドアレイとは

UT 実用機に用いる超音波フェーズドアレイ（Ultrasonic Phased Array）は、探触子内部にある数個の超音波振動子から発信するタイミング（遅延時間）を変えることによって、超音波の屈折角、焦点を変化させることが可能な探傷方法（図 3.1）であり、特徴として探傷結果を映像表示（図 3.2）できる。

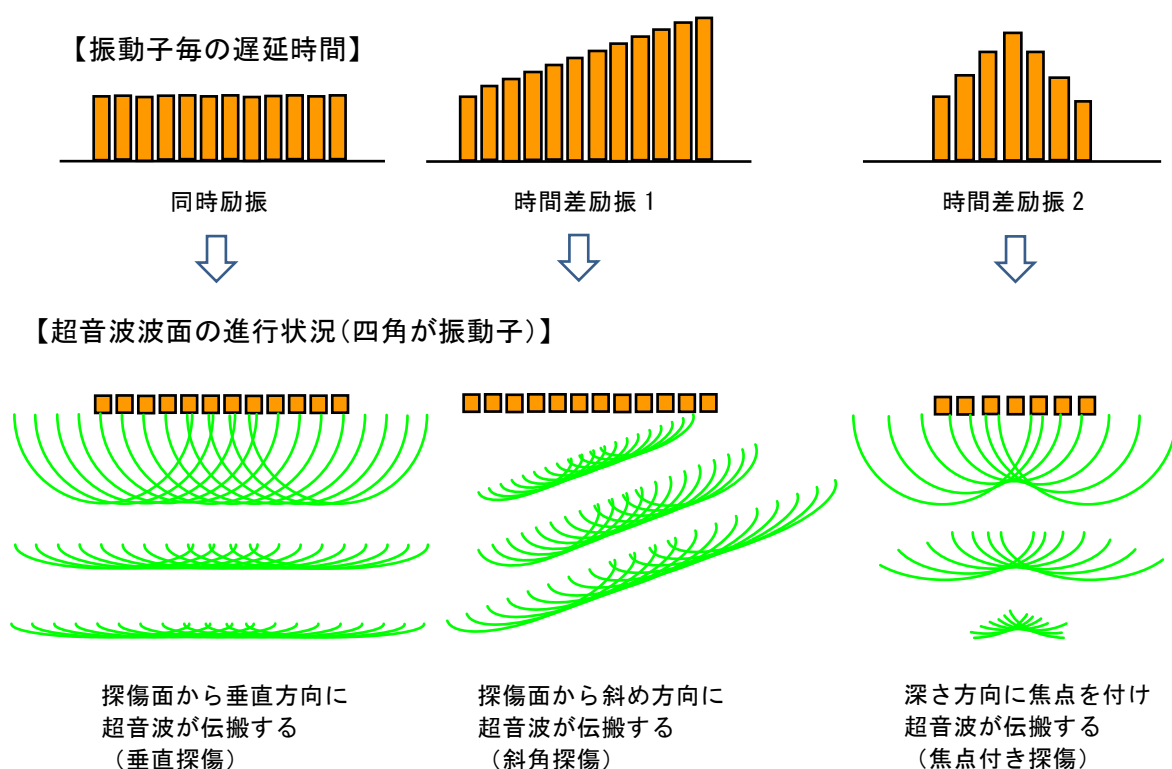


図 3.1 フェーズドアレイ励振方法

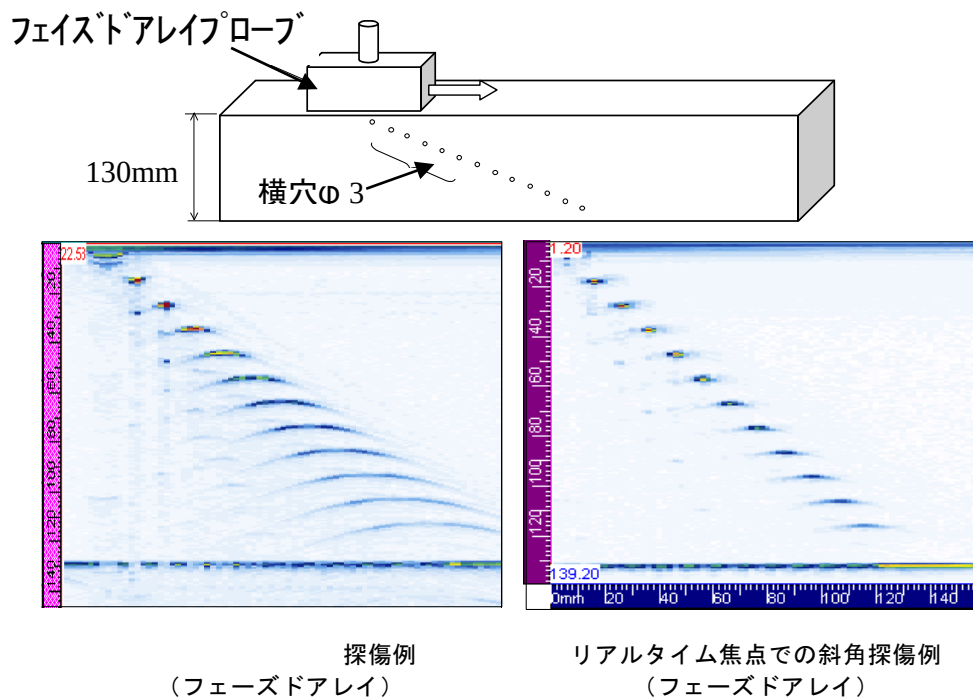
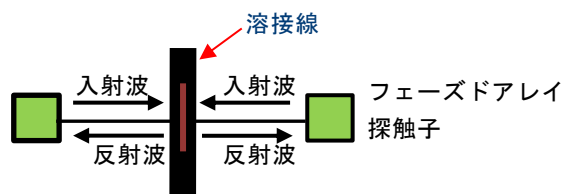


図 3.2 固定焦点（フェーズドアレイ）と
リアルタイム焦点（フェーズドアレイ）のエコーの違い

(2) UT 実用機の主な装置仕様

- ア 探傷システム：フェーズドアレイ探傷のセクタスキャン
- イ 外形等：長さ；約 1000mm、幅；約 600mm、高さ；約 800mm、重量；約 40kg
- ウ 電源：外部電源（AC100V）
- エ 探触子：フェーズドアレイ探触子（溶接線直交配置；A パターン）＋斜角探触子（溶接線斜交（45°）配置；B パターン）（図 3.3 参照）

① A パターン



② B パターン

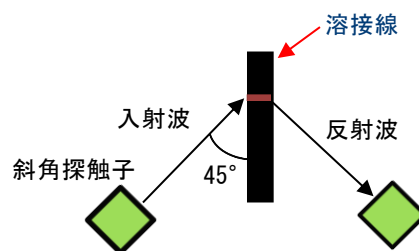


図 3.3 探触子の配置

- オ 計測速度：50mm/sec
- カ 走査方法：自動走行
- キ 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）
- ク 溶接線倣い機構：レーザトレース方式
- ケ 底板の傾き補正：傾斜計を搭載
- コ 接触媒体：0.3mm ギャップ法、水の自動供給

- サ 膜厚測定：電磁膜厚計（Error 時はアラーム表示）
- シ 対象溶接線：突き合わせ溶接部（すみ肉溶接部は測定不可）
- ス 対象溶接線の溶接方法：自動溶接

(3) UT 実用機の

ア 手探傷試験による探触子単体での検証結果

(ア) 溶接線に平行方向の人工きず

探触子配置 A パターン、塗膜厚さ $1500\mu\text{m}$ において、溶接線止端部、溶接線中央及び溶接線 $1/3W$ の表面に位置するきずは、深さ $1.5\text{mm}\times$ 長さ 4.0mm のきず検出が可能である。

(イ) 溶接線に直交方向の人工きず

探触子配置 B パターン、塗膜厚さ $1500\mu\text{m}$ において、溶接線中央の表面に位置するきずは、深さ $1.5\text{mm}\times$ 長さ 4.0mm のきず検出が可能。また、探触子配置 B パターン、塗膜厚さ $700\mu\text{m}$ において、溶接線止端部の表面に位置するきずは、深さ $3.0\text{mm}\times$ 長さ 6.0mm のきず検出が可能である。

(ウ) コーティング材の違いによる影響

試験体に塗布したコーティング材はガラスフレークコーティングである。コーティング材の違いによる影響を確認するためメーカー3社の材料を使用した、メーカーの違いによる影響は認められなかった。

イ 検査装置での検証結果

(ア) 測定条件等

- ・探触子配置：A パターン+B パターン
- ・速度： 30mm/sec （手押し）
- ・塗膜厚さ： $614\sim 635\mu\text{m}$
- ・表面粗さ： $\text{Rz}40\sim 65\mu\text{m}$

(イ) 溶接線に平行方向の人工きず

溶接線止端部、溶接線中央及び溶接線 $1/3W$ の表面に位置するきずは、深さ $1.0\text{mm}\times$ 長さ 3.0mm のきず検出が可能である。

(ウ) 溶接線に直交方向の人工きず

未実施。

ウ シミュレーションによる検証結果

(ア) ブローホール

ブローホールは検出できない。

(イ) 内部きず

一層目付近のきずは、反射エコーが裏当て板上面の非溶接部に逃げるため検出できない。一層目付近のきず以外は検出可能である。

(4) UT 実用機による溶接部検査の特徴

磁粉探傷試験と UT 実用機の溶接部検査に係る特徴は下表のとおりである。

	磁粉探傷試験	UT 実用機
検出性能	・ 表面及び表層の微細なきずの検出が可能。	・ 表面及び内部のなきずの検出がある程度可能。
検査環境	・ コーティング上から検査出来ない。	・ コーティング上から検査出来る。
その他	・ 溶接線上のコーティングの剥離及び復旧が必要となり、復旧部分の重ね合わせ部が厚膜化する。	・ コーティングの剥離・復旧工事が省略され、工期の短縮が見込まれる。

(5) 今後の課題等

表面の直交方向、斜め方向のきず及び内部きずに対する検出性能を上げるため、探触子の種類、配置等の改良について再検討する。

4 UT 実用機の運用等に係る検討の前提条件

UT 実用機の運用等を検討する上で多くの論点が考えられるが、議論を絞り込むため以下の前提条件で検討を行うものとする。

- (1) 特定屋外貯蔵タンクの内部点検及び保安検査の際に行う溶接部検査として UT 実用機を用いる場合について検討する。
- (2) 検査する溶接部は、底板相互及びアニュラ板相互の溶接継手のうち、突き合わせ溶接部で、かつ、溶接施工法確認試験（危険物の規制に関する規則第 20 条の 4 第 3 項）で確認された溶接方法とする。
- (3) 前の開放検査時（今回が初めての開放検査の場合はタンク新設時。以下同じ。）に底部の溶接部全線で磁粉探傷試験を実施しているものとする。
- (4) UT 実用機により、対象とする溶接部の全ての箇所を検査することとする。
- (5) 上記以外の溶接部については、上記の検討結果を踏まえ適宜検討する。

【新法タンクの場合】

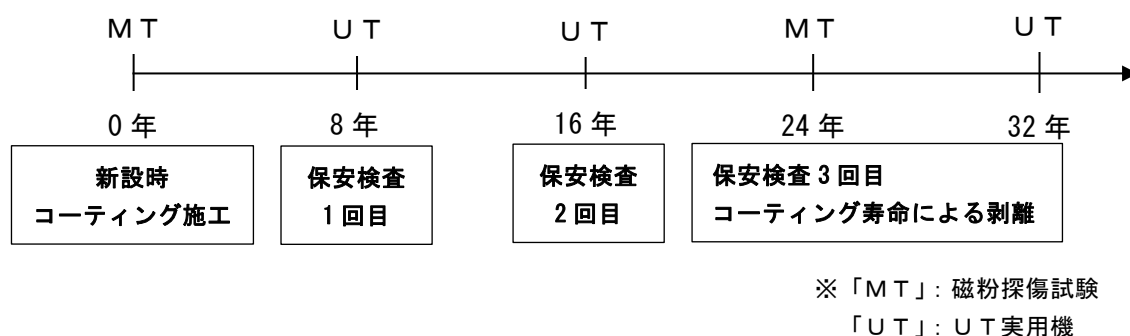


図 4.1 本検討における溶接部検査の実施時期のイメージ

6 溶接継ぎ手の疲労破壊試験

(1) 目的

UT実用機に必要な性能を検討する上で参考とするため、溶接欠陥の影響、特に内部きずの亀裂進展に対する影響を確認するため、溶接継ぎ手の種類ごとに溶接部に人工的にきずを導入した試験片を製作し、疲労破壊試験を実施する。

また、製作した試験片は、UT実用機のきず検出性能の確認に活用する。

(2) 試験片

平成 28 年度に制作する試験片の概要は以下のとおりである。(資料 4-2 参照)

ア 鋼板の材料及び板厚等

鋼板の材料は JIS G 3101 の SS400、板厚は 9mm、12mm 及び 20mm (JIS 公差) とする。

イ 試験片の継ぎ手の種類

試験片の継ぎ手の種類は、突き合わせ継ぎ手及び重ね継ぎ手とする。

(ア) 板厚 12mm 裏当て付き突き合わせ溶接 (試験片のサイズ：500mm×500mm)

(イ) 板厚 20mm 裏当て付き突き合わせ溶接 (試験片のサイズ：500mm×500mm)

(ウ) 板厚 9mm 重ね溶接 (試験片のサイズ：500mm×500mm)

ウ きずの種類等

表面きず、内部きず等を含むものとし、きずの種類は次のとおりとする。

(ア) ブローホール

(イ) 融合不良

(ウ) 溶け込み不良

(エ) 割れ

(オ) アンダーカット

(カ) 無欠陥

(3) 実施事項及び実施時期

ア 試験片製作

平成 28 年度に製作した試験片は、きずの所在を確認するため放射線透過試験を行い、試験記録を作成する。また、必要に応じて、超音波探傷試験、磁粉探傷試験等を行う。(資料 4-2 参照)

また、別の試験片の製作が必要な場合は、平成 29 年度以降に検討する。

イ 疲労破壊試験

溶接欠陥のある溶接部の強度を確認するため、平成 29 年度以降に疲労破壊試験を行う。

ウ きず検出性能の確認

製作した試験片を使用しての UT 実用機によるきず検出性能確認は、平成 29 年度以降に行う。

7 次年度以降の調査検討事項

次年度以降は、以下の項目について調査検討を行うものとする。

- (1) 溶接欠陥のある溶接部の強度及び内部きずの亀裂進展への影響等を確認するため、疲労破壊試験等を行う。
- (2) (1)の試験結果等を踏まえ、今後検証すべき項目や具備すべき条件等について検討する。
- (3) UT 実用機による溶接欠陥の検出性能等を確認するため、無塗装状態で磁粉探傷試験と UT 実用機による比較試験を行うとともに、コーティング上から UT 実用機による試験を行う。
- (4) UT 実用機の運用等の詳細について検討する。

上記(1)～(3)の項目を調査するため、以下の手順で実験を行う。

- ① 溶接部に人工的にきずを導入した試験片について、UT実用機とMTにより検査を行い、検出性能を調査する。
- ② 溶接部に人工的にきずを導入した試験片にコーティングを行い、UT実用機とMTにより検査を行い、検出性能を調査する。
- ③ 溶接部に人工的にきずを導入した試験片を用いて疲労破壊試験を行い、亀裂新転移有害な欠陥と無害な欠陥を調査する。

以上

塗装あり試験片 探傷結果データシート

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd. All Rights Reserved.

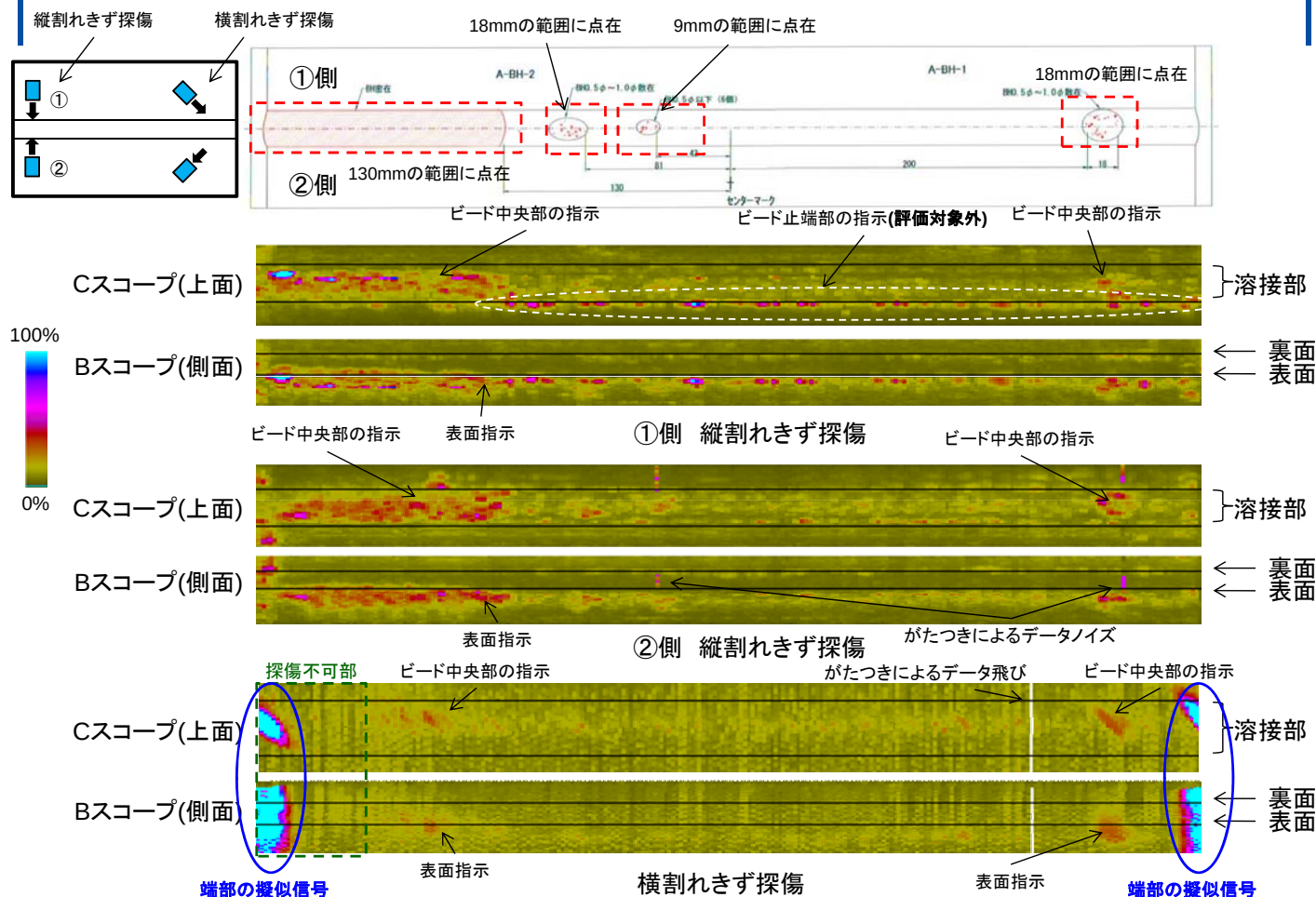
データシートレイアウト

IHI

- ・試験片毎に2頁
- ・縦割れきず探傷、横割れきず探傷(1頁目)
- ・角度付ききず探傷、考察(2頁目)

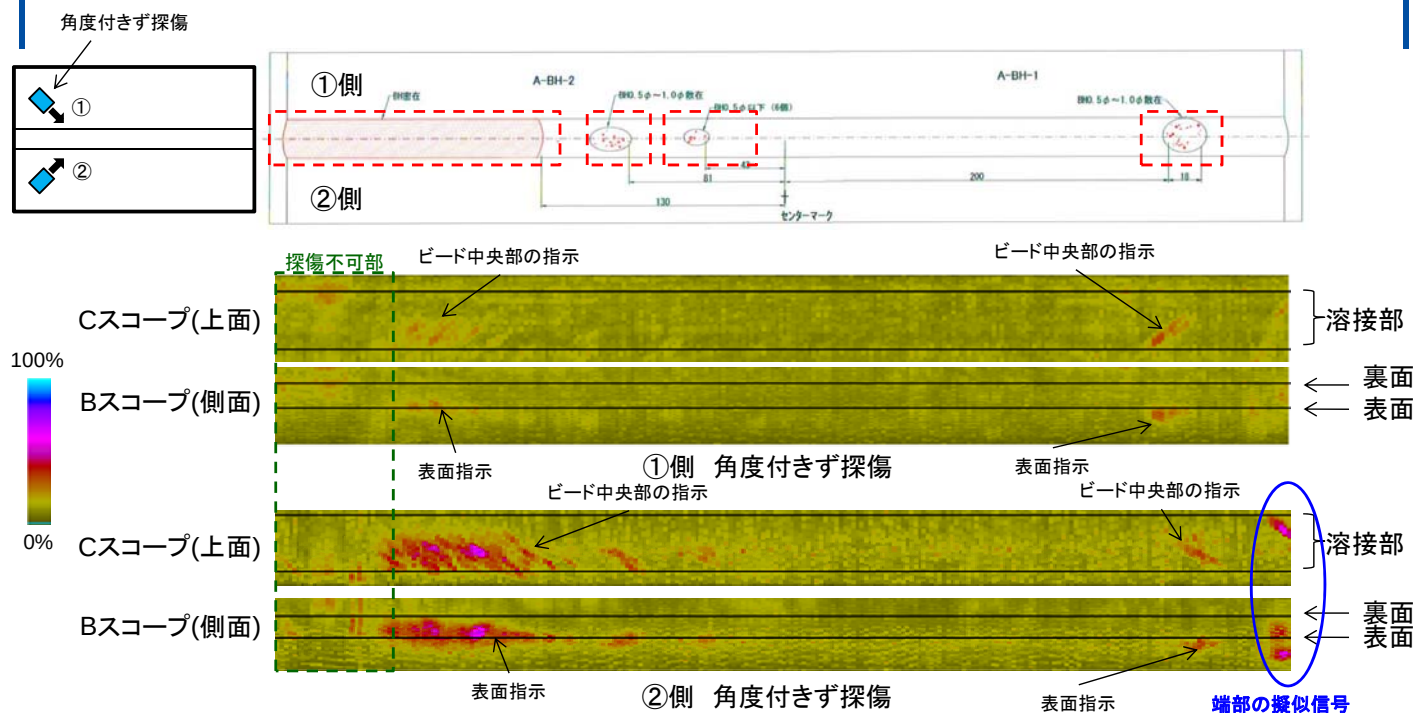
No. 1試験片 ブローホール 塗装あり 板厚12mm(その1)

IHI



No. 1試験片 ブローホール 塗装あり 板厚12mm(その2)

IHI



○縦割れきず探傷

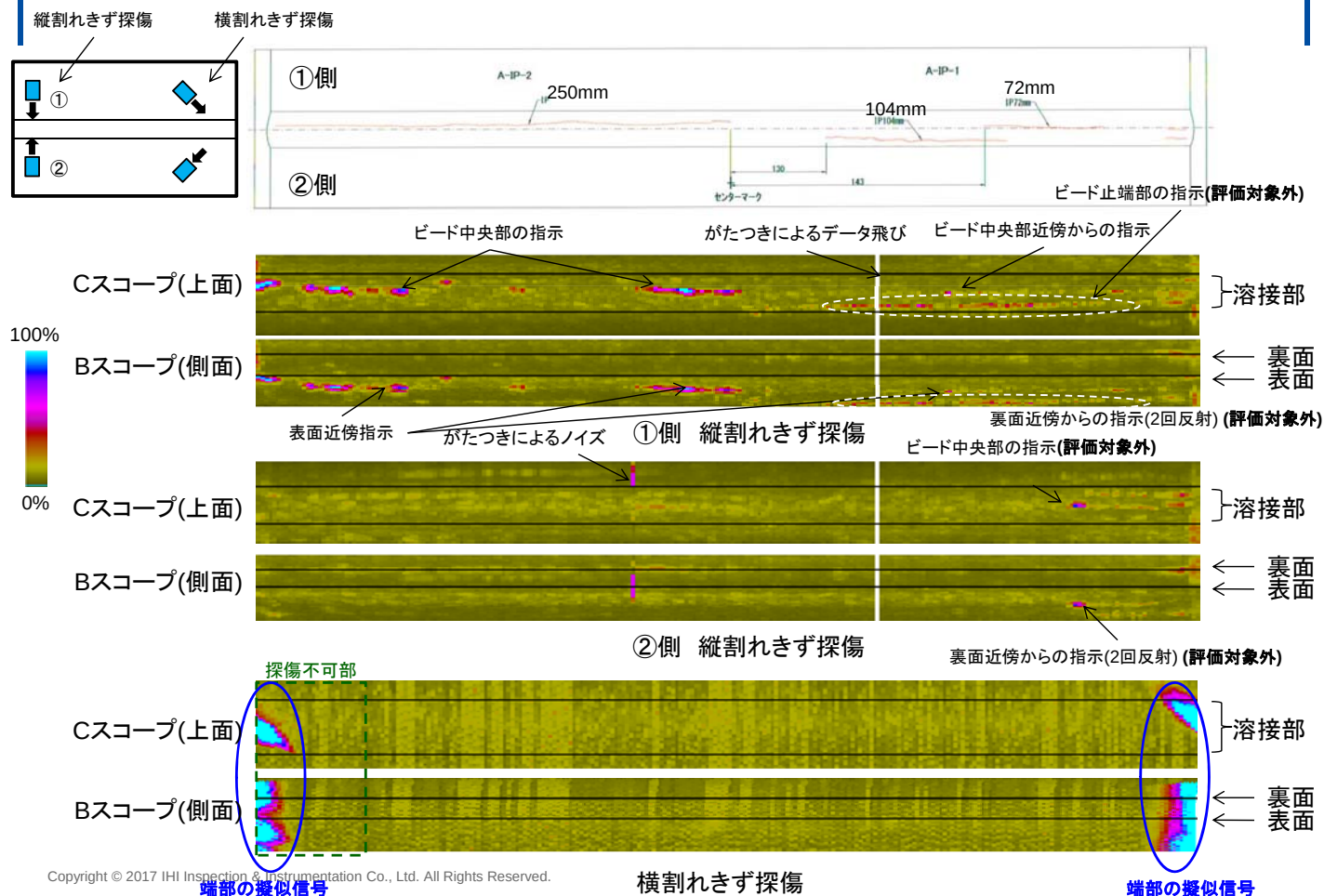
ビード中央部で数多くの表面指示が得られた事から表面に密集したクラックまたはブローホールと推測される。この他に、ビード止端部表面で溶接形状と考えられる指示を確認した。探傷側と反対のビード止端部表面の指示は溶接形状による影響が大きいので評価対象外とする。止端部からの指示の評価概要については別途説明する。

○横割れきず探傷、角度付き探傷

特に角度付き探傷法でビード中央部で表面からの指示が検出された。

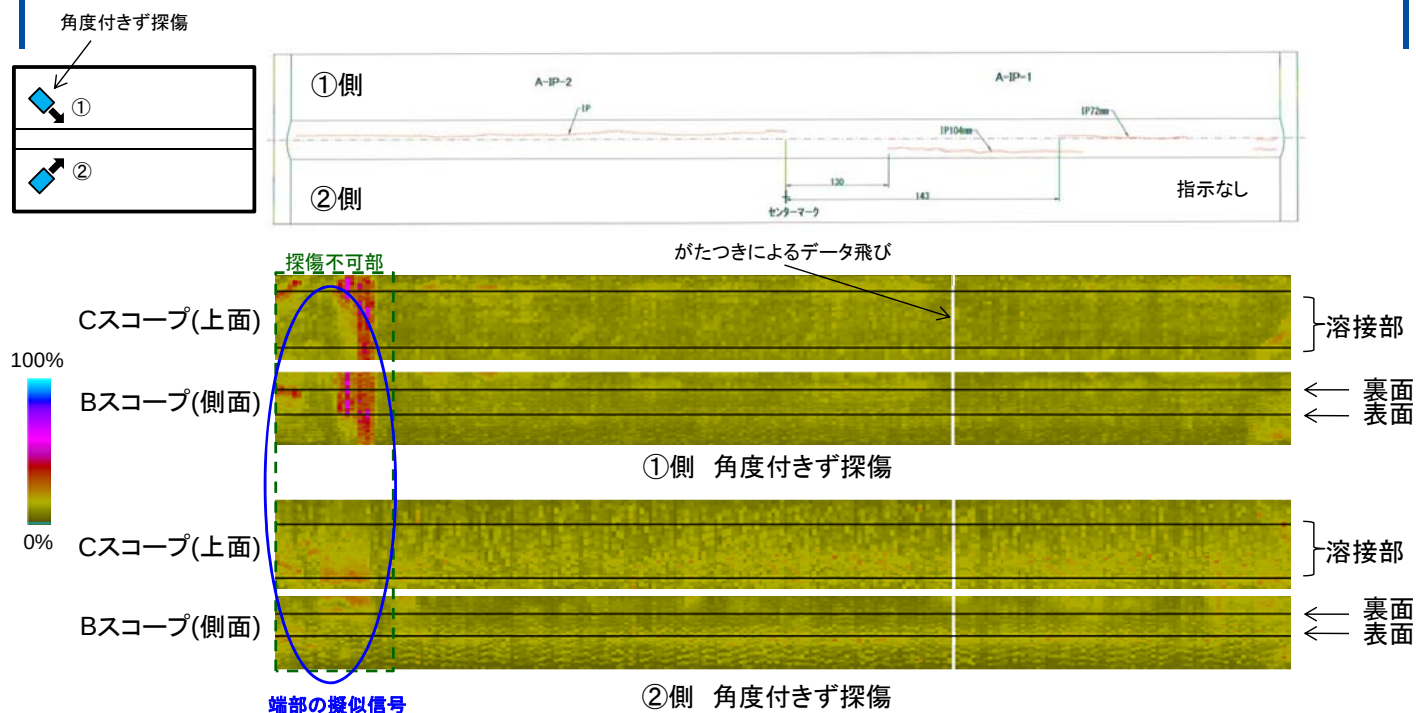
No. 2試験片 溶込不良 塗装あり 板厚12mm(その1)

IHI



No. 2試験片 溶込不良 塗装あり 板厚12mm(その2)

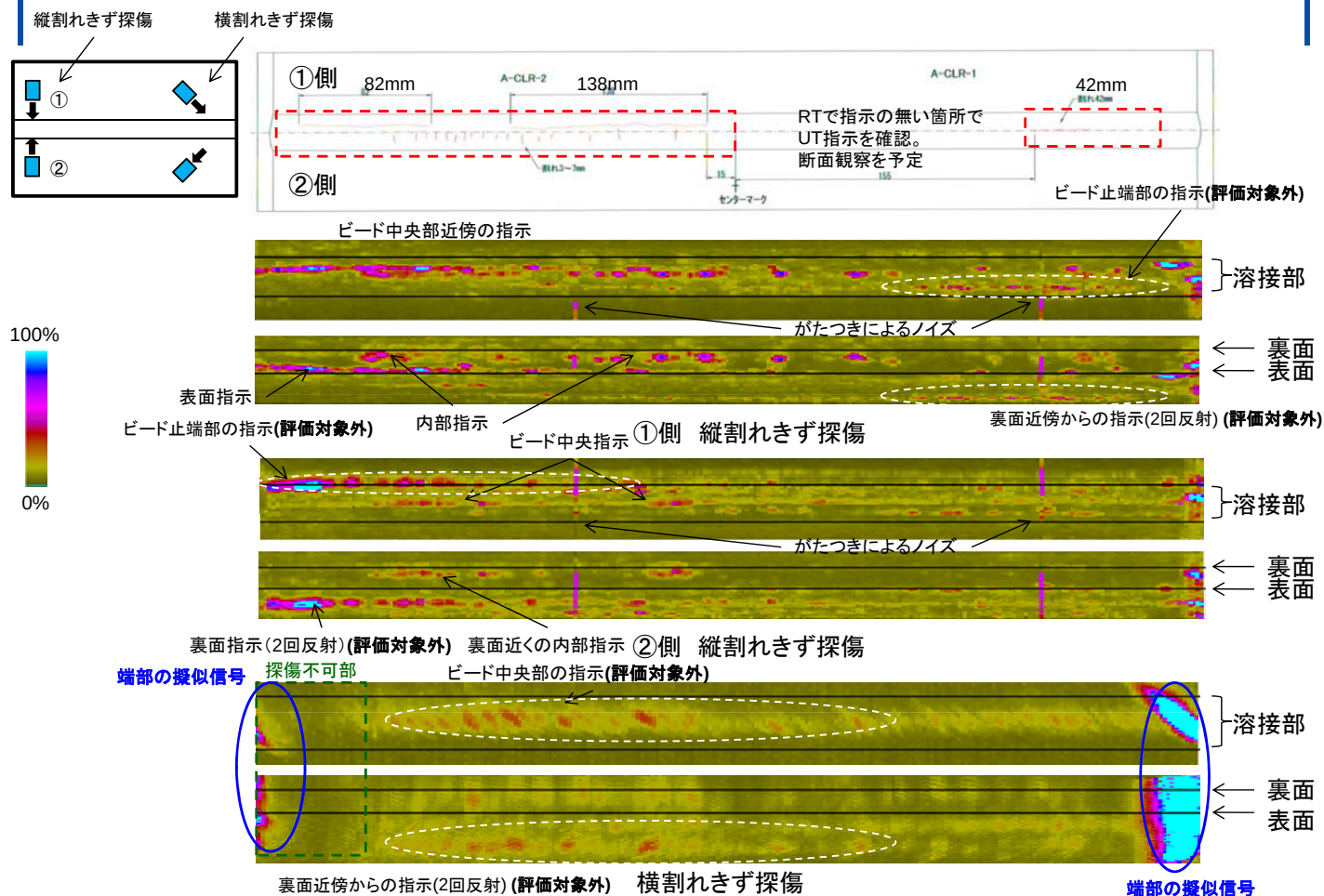
IHI



- 縦割れきず探傷
ビード中央部の表面からの指示が得られた。しかし、RT結果が示す溶け込み不良の部位からの反射指示が得られなかった。探傷側と反対の溶接止端部で指示が確認されたが評価対象外である。
- 横割れきず探傷、角度付き探傷
共にUT指示は確認されなかった。

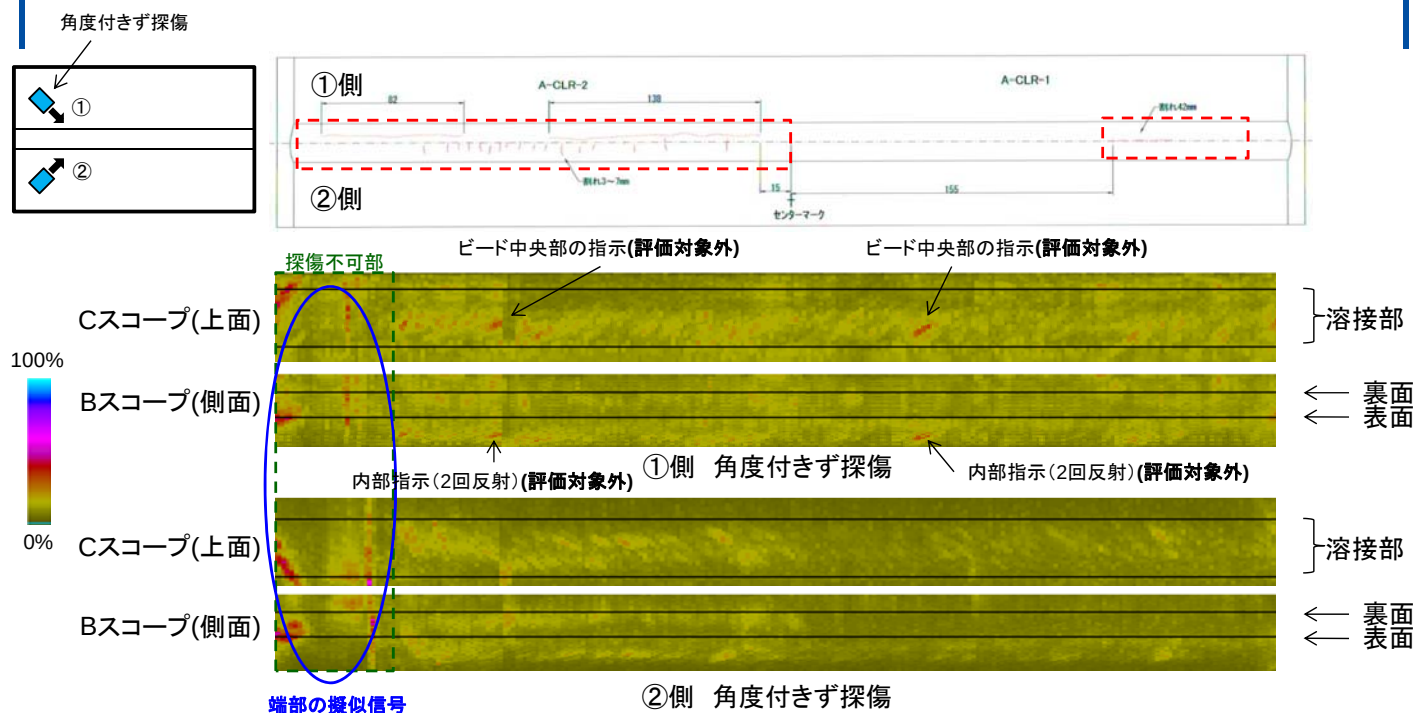
No. 3試験片 内部割れ 塗装あり 板厚12mm(その1)

IHI



No. 3試験片 内部割れ 塗装あり 板厚12mm(その2)

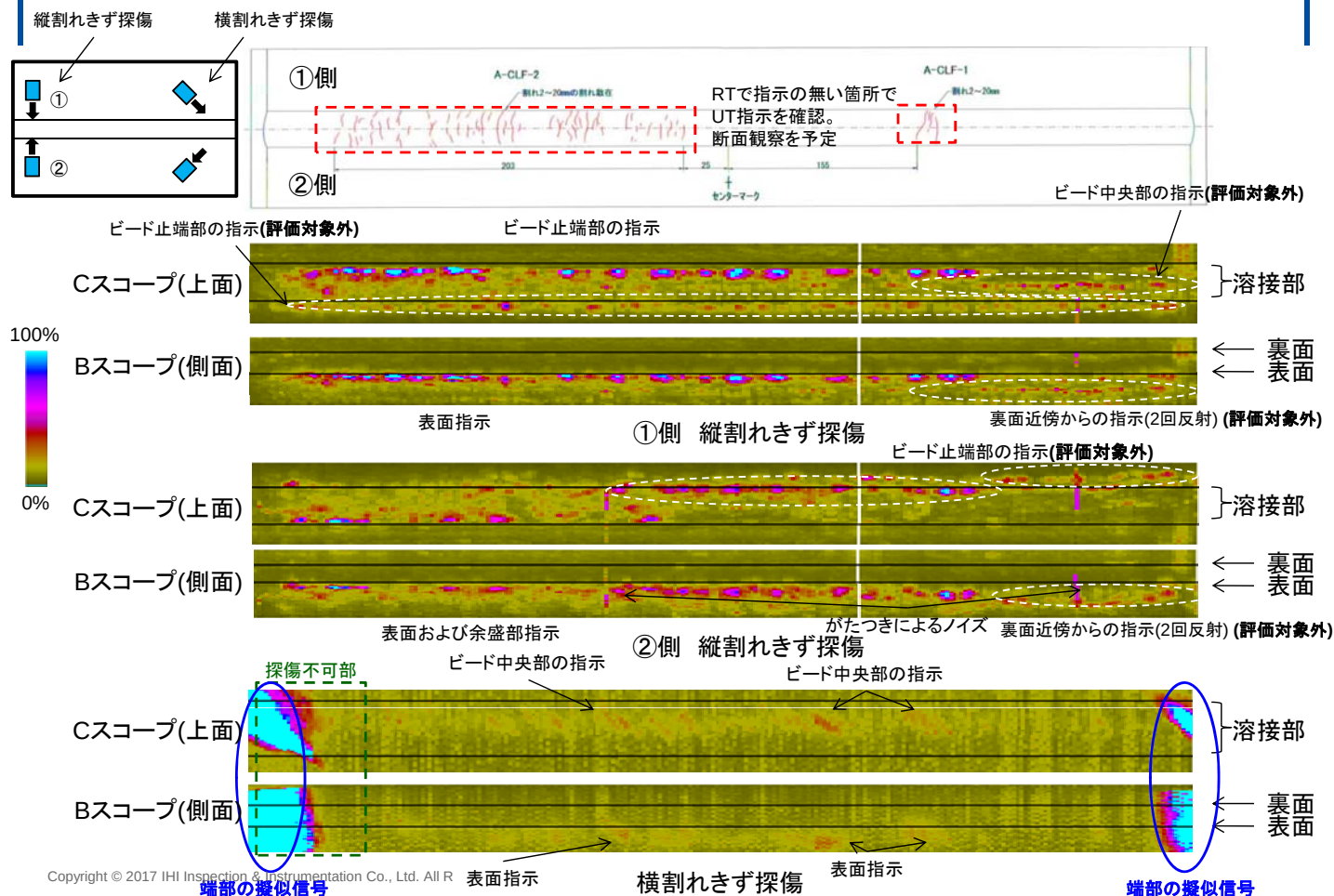
IHI



- 縦割れきず探傷
ビード中央部で表面と内部から複数の指示が得られた。
- 横割れきず探傷、角度付き探傷
ビード中央部で内部からの指示が得られた。この指示は試験片内を2回反射して得られたものであり、1回反射時と比較して超音波の伝搬経路が長くなり複数の波の影響が考えられるため評価対象外とする。

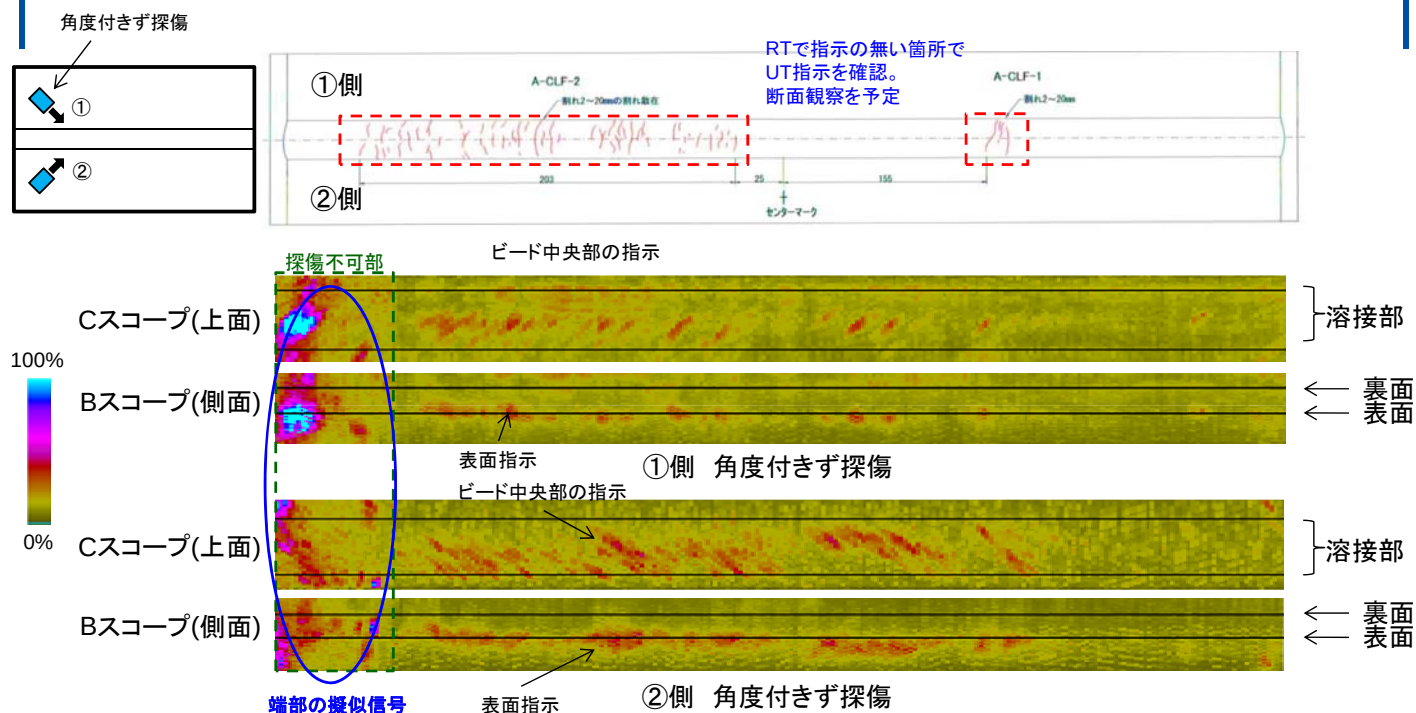
No. 4試験片 表面割れ 塗装あり 板厚12mm(その1)

IHI



No. 4試験片 表面割れ 塗装あり 板厚12mm(その2)

IHI



○縦割れきず探傷

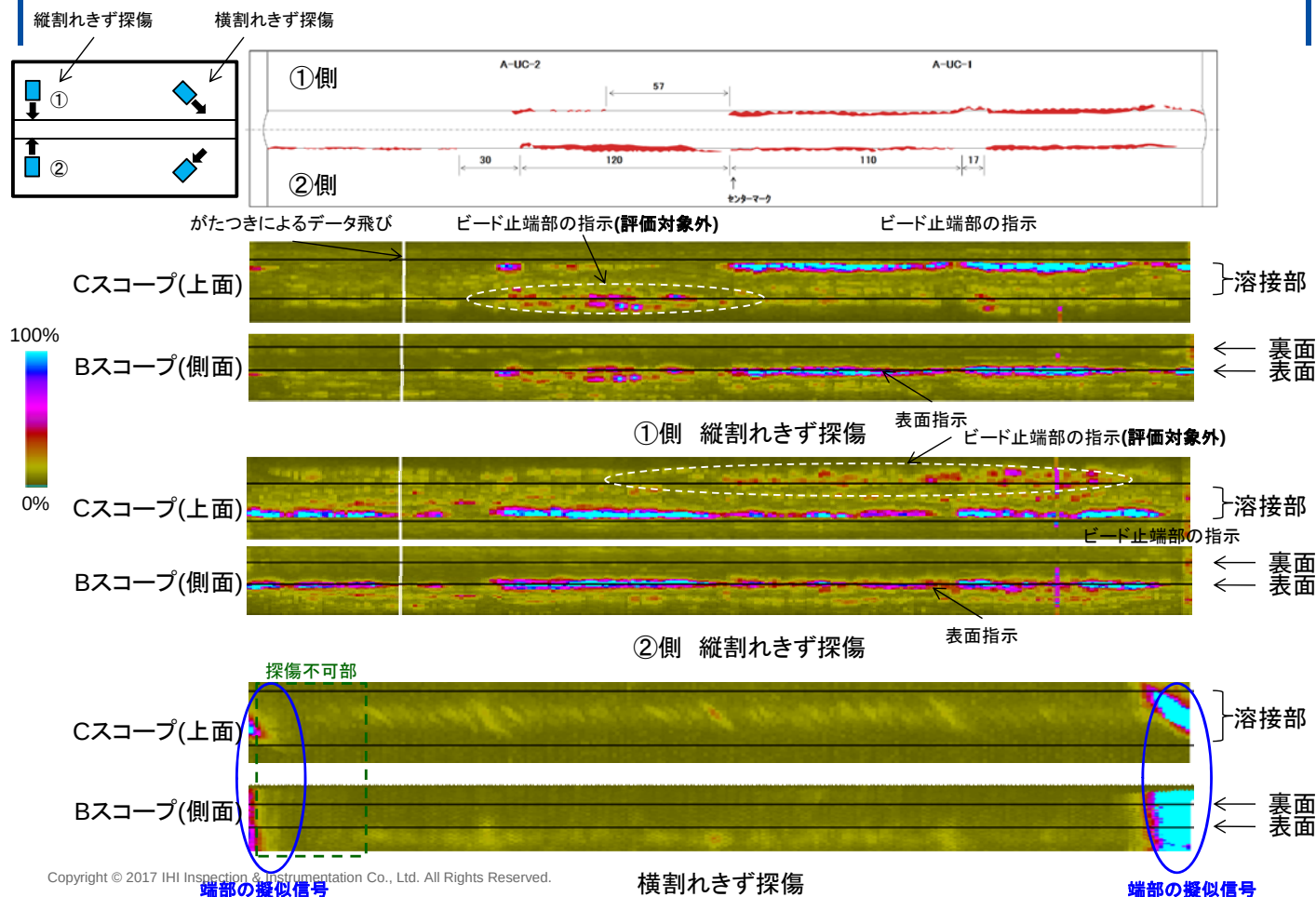
ビード止端部で表面から連続的な指示が得られた。探傷側の止端部からの指示を確認した。探傷側と反対のビード止端部表面の指示は溶接形状による影響が大きいため評価対象外とする。

○横割れきず探傷、角度付き探傷

特に、角度付き探傷にてビード中央部で表面からの指示が多く検出された。また、RT指示部以外の指示があり今後調査する予定である。

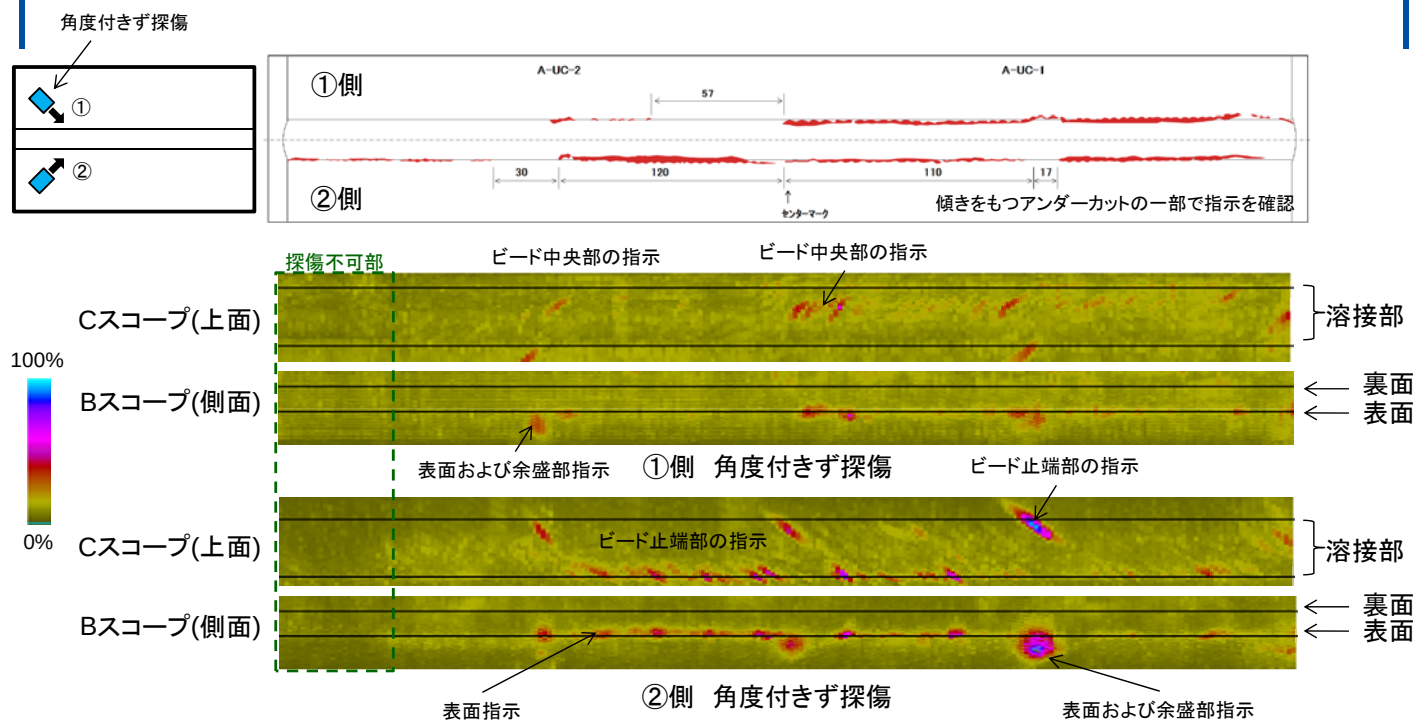
No. 5試験片 アンダーカット 塗装あり 板厚12mm(その1)

IHI



No. 5試験片 アンダーカット 塗装あり 板厚12mm(その2)

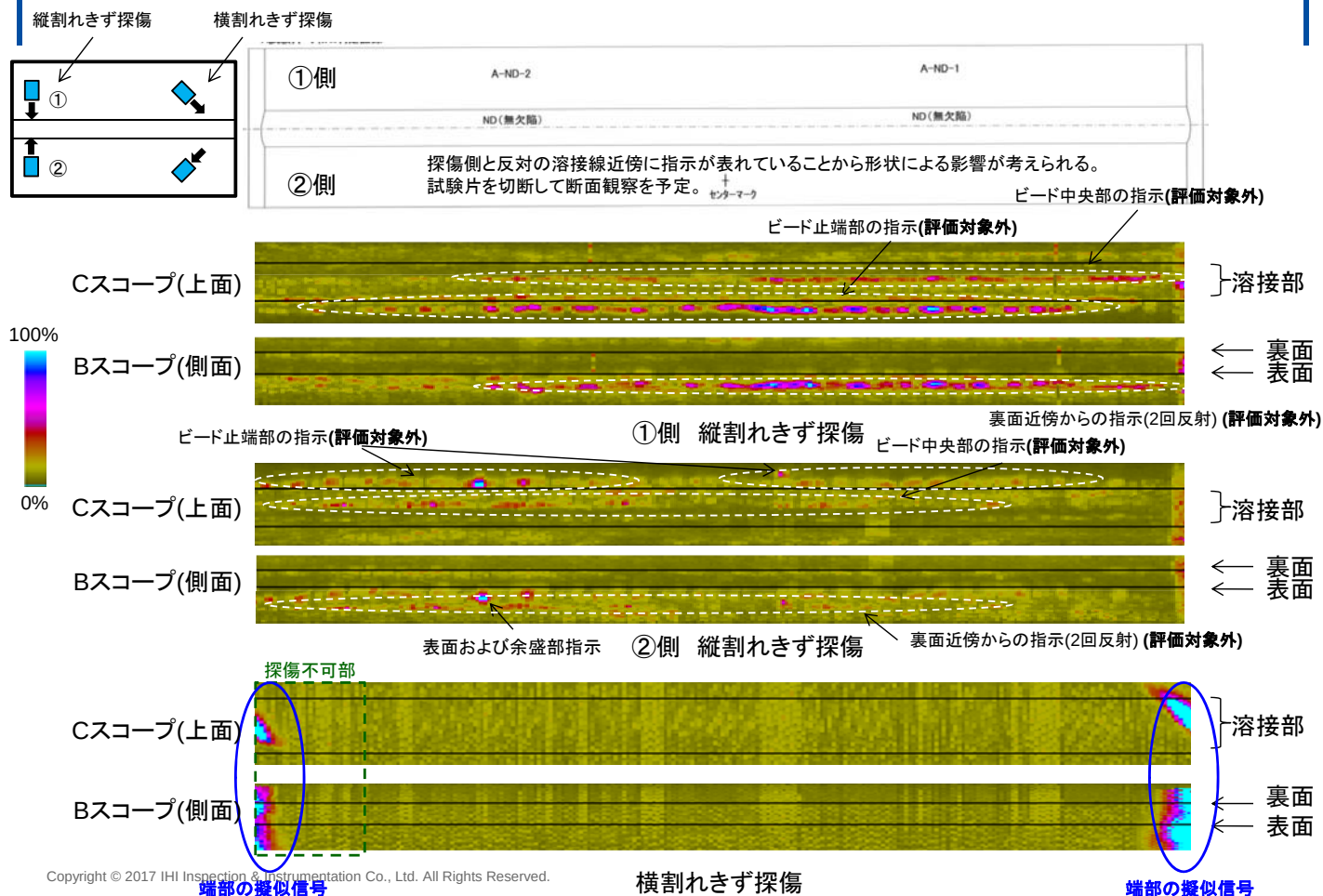
IHI



- 縦割れきず探傷
ビード止端部表面からの強い指示を検出した。探傷側のビード止端部で指示が長く検出された。
- 横割れきず探傷、角度付き探傷
角度付き探傷では、ビード止端部で表面から高い指示が数か所確認され、ビード形状からの反射と評価する。

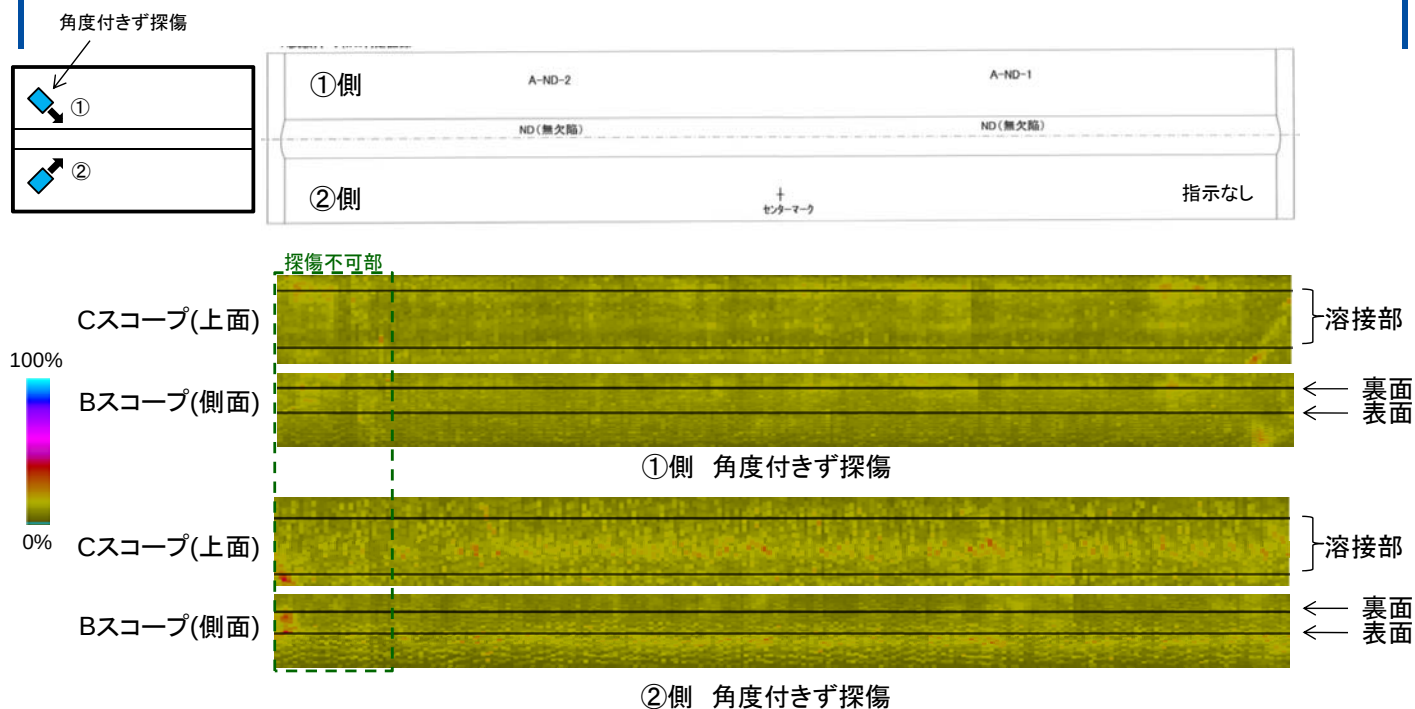
No. 6試験片 無欠陥 塗装あり 板厚12mm(その1)

IHI



No. 6試験片 無欠陥 塗装あり 板厚12mm(その2)

IHI



○縦割れきず探傷

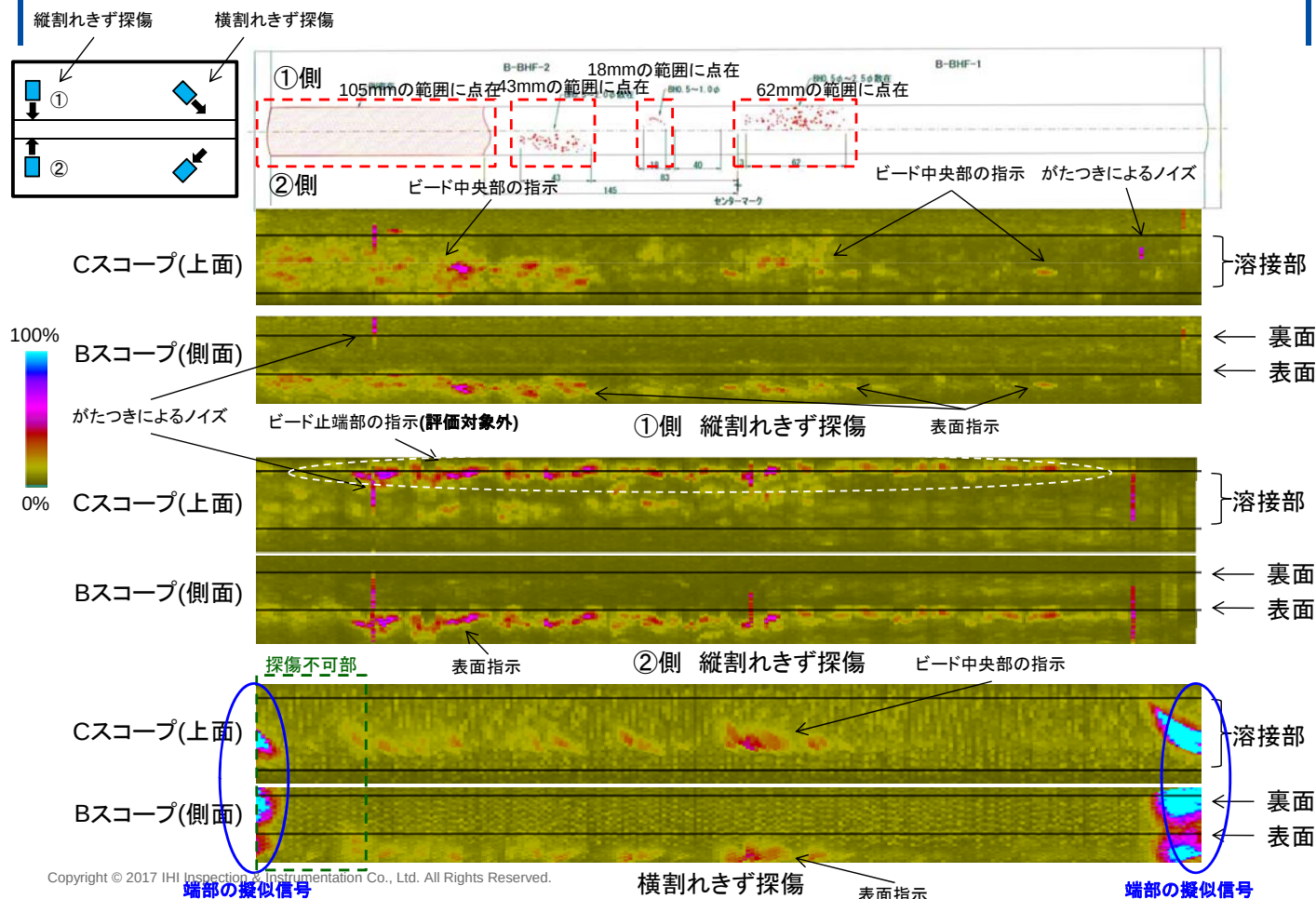
ビード止端部で表面および余盛部からの指示が得られた。溶接形状の影響による指示が考えられるが、試験片表面を確認し最終評価とする。RTでは指示が無く、指示が得られた箇所については今後調査を行う。

○横割れきず探傷、角度付き探傷

共に指示は確認されなかった。

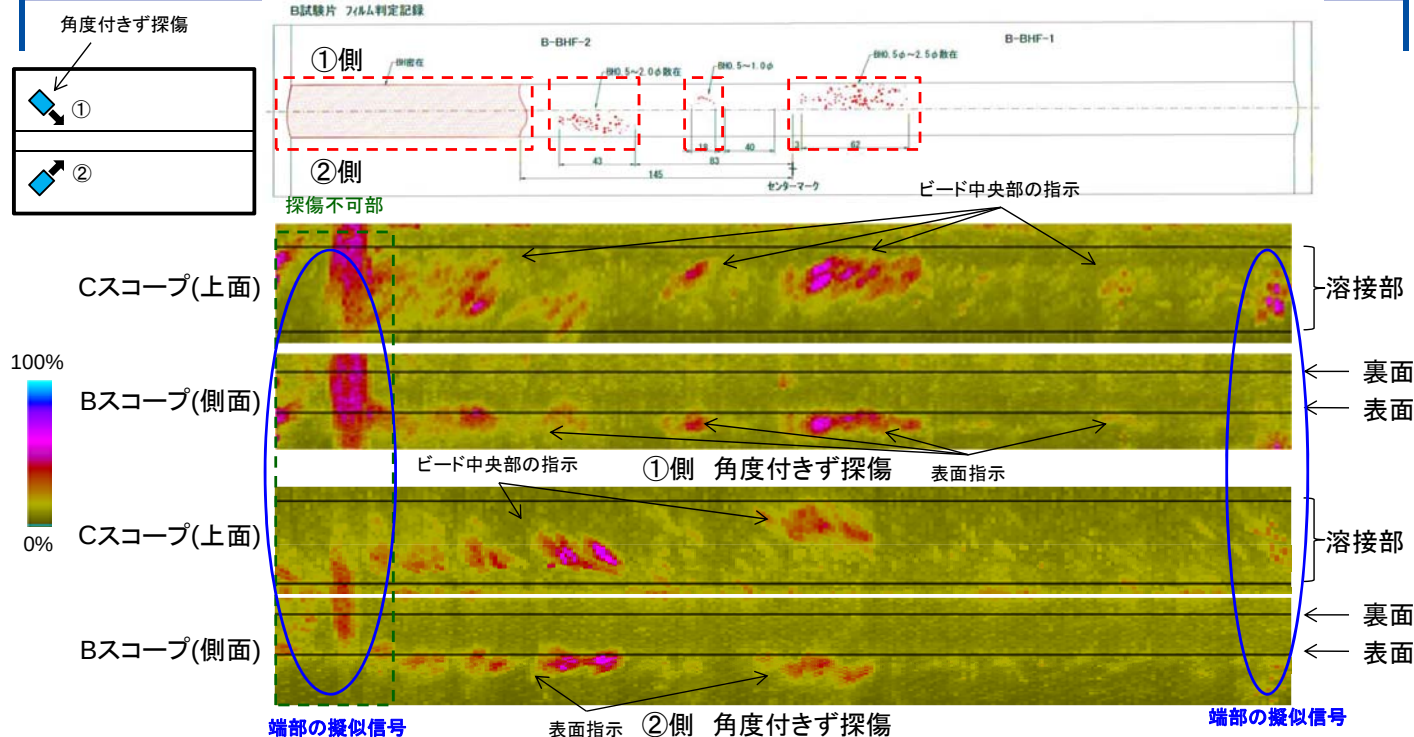
No. 7試験片 ブローホール 塗装あり 板厚20mm(その1)

IHI



No. 7試験片 ブローホール 塗装あり 板厚20mm(その2)

IHI



○縦割れきず探傷

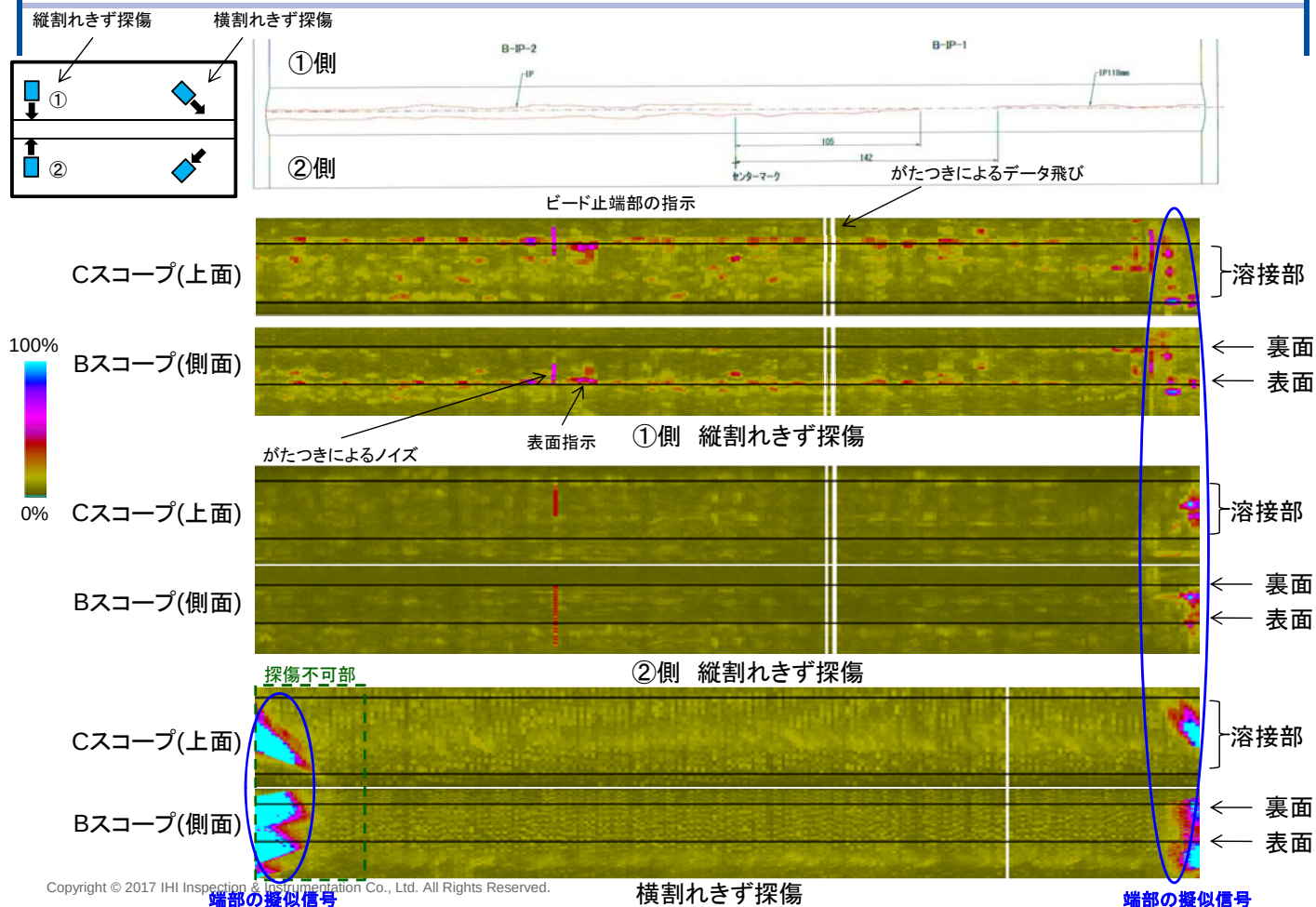
ビード中央部で数多くの表面指示が得られたことから表面に密集したブローホールと推測される。この他に、ビード止端部での表面指示が検出されたが溶接形状からの指示と考えられるため評価対象外とする。

○横割れきず探傷、角度付き探傷

横割れきず探傷、角度付き探傷ともにビード中央部で表面からの指示が検出された。

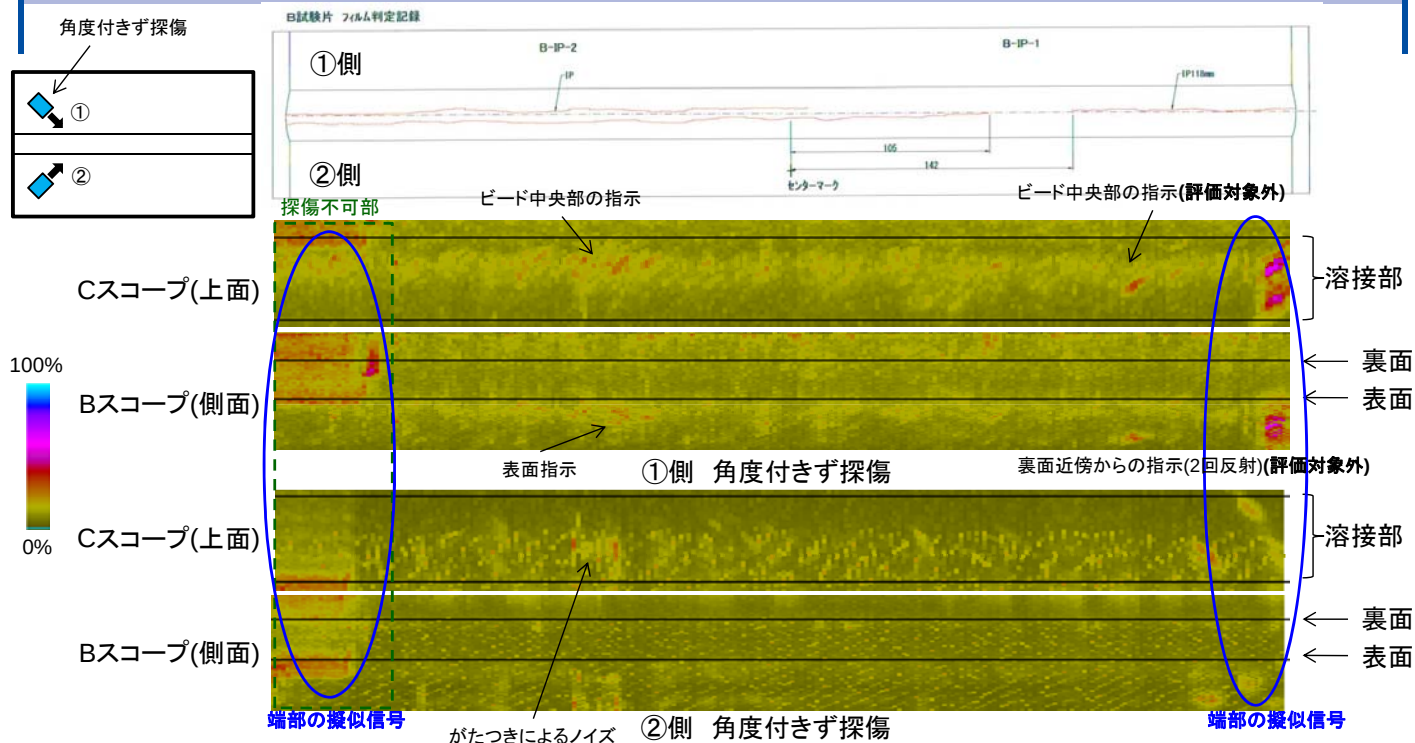
No. 8試験片 溶込不良 塗装あり 板厚20mm(その1)

IHI



No. 8試験片 溶込不良 塗装あり 板厚20mm(その2)

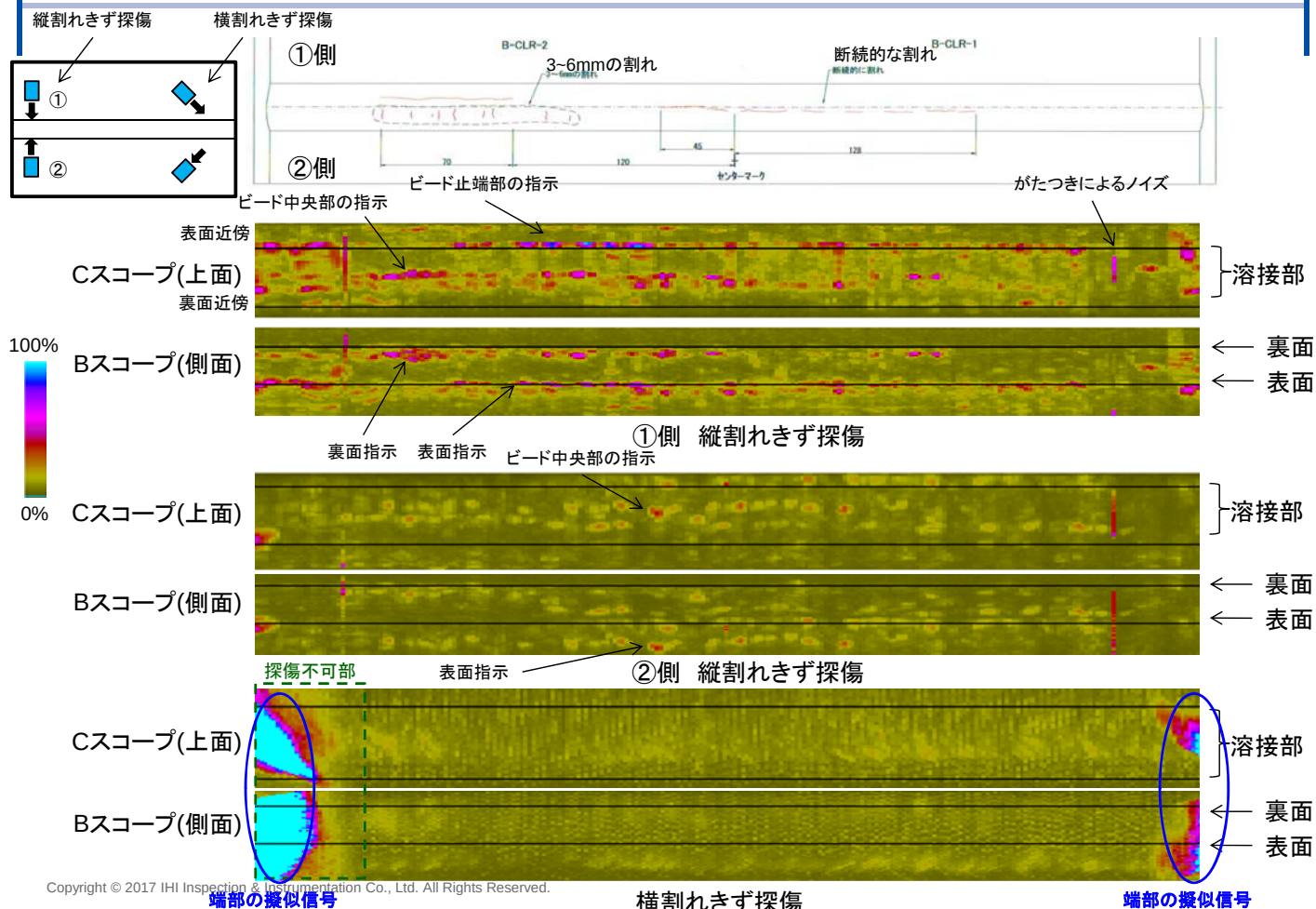
IHI



- 縦割れきず探傷
探傷側のビード止端部の表面からの指示が得られた。しかし、RT結果が示す溶け込み不良の部位からは反射指示が得られなかった。
- 横割れきず探傷、角度付き探傷
角度付き探傷では中央部の表面に指示からの指示が検出された。

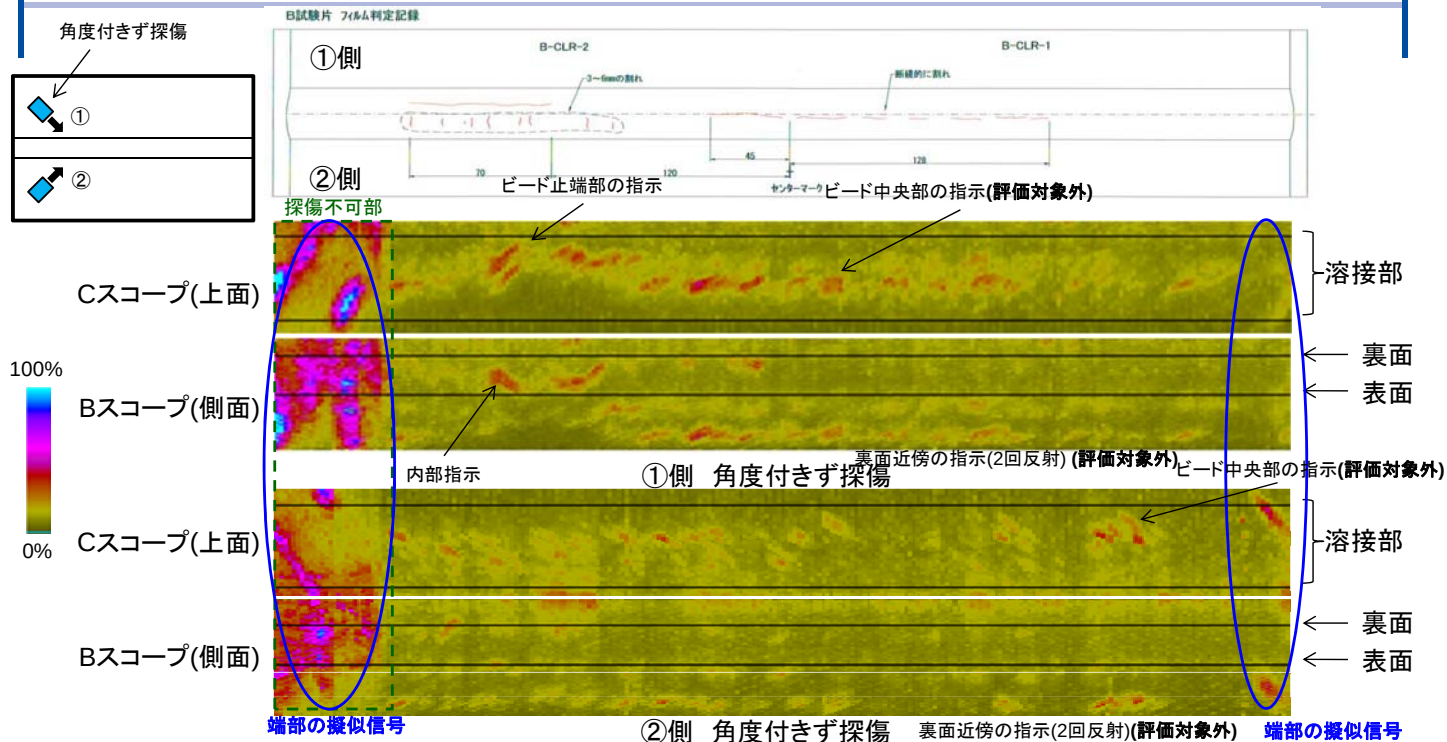
No. 9試験片 内部割れ 塗装あり 板厚20mm(その1)

IHI



No. 9試験片 内部割れ 塗装あり 板厚20mm(その2)

IHI



○縦割れきず探傷

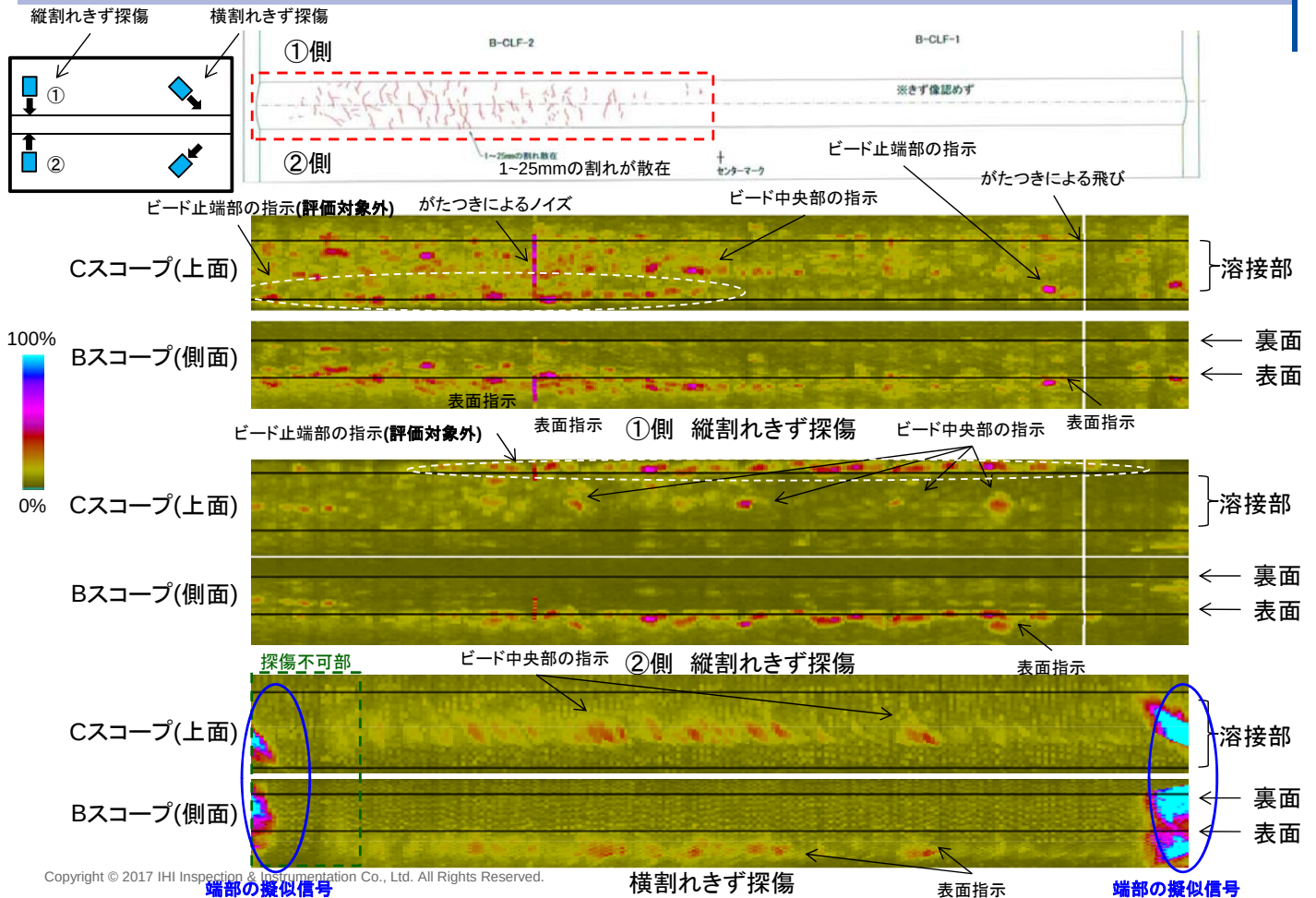
ビード中央部では試験片内部から、ビード止端部では試験片表面からの指示が確認された。

○横割れきず探傷、角度付き探傷

角度付き探傷によりビード止端部で内部からの指示が得られた。また、ビード中央部から超音波が試験体を内を2回反射して表れた指示が確認された。これは、伝搬距離が長く複数の路程が考えられるため評価対象外とした。

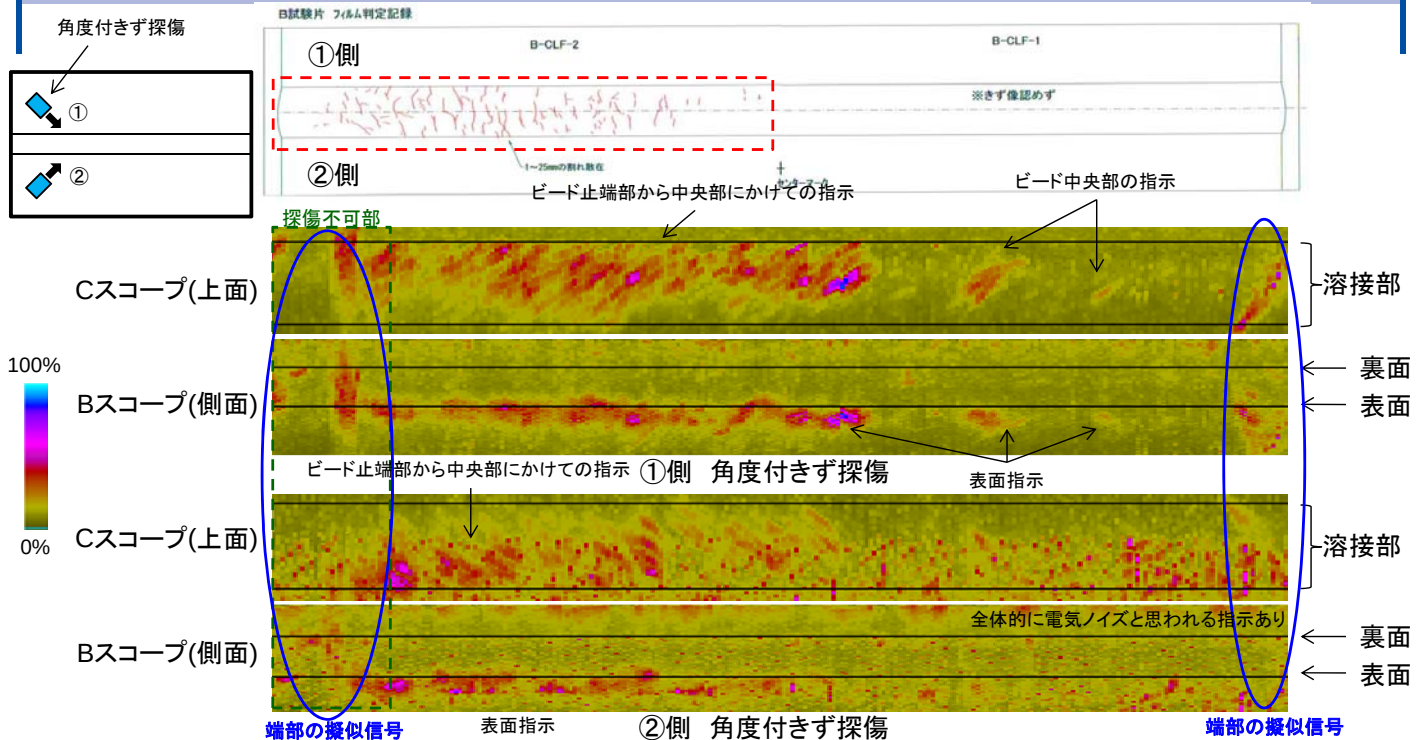
No. 10試験片 表面割れ 塗装あり 板厚20mm(その1)

IHI



No. 10試験片 表面割れ 塗装あり 板厚20mm(その2)

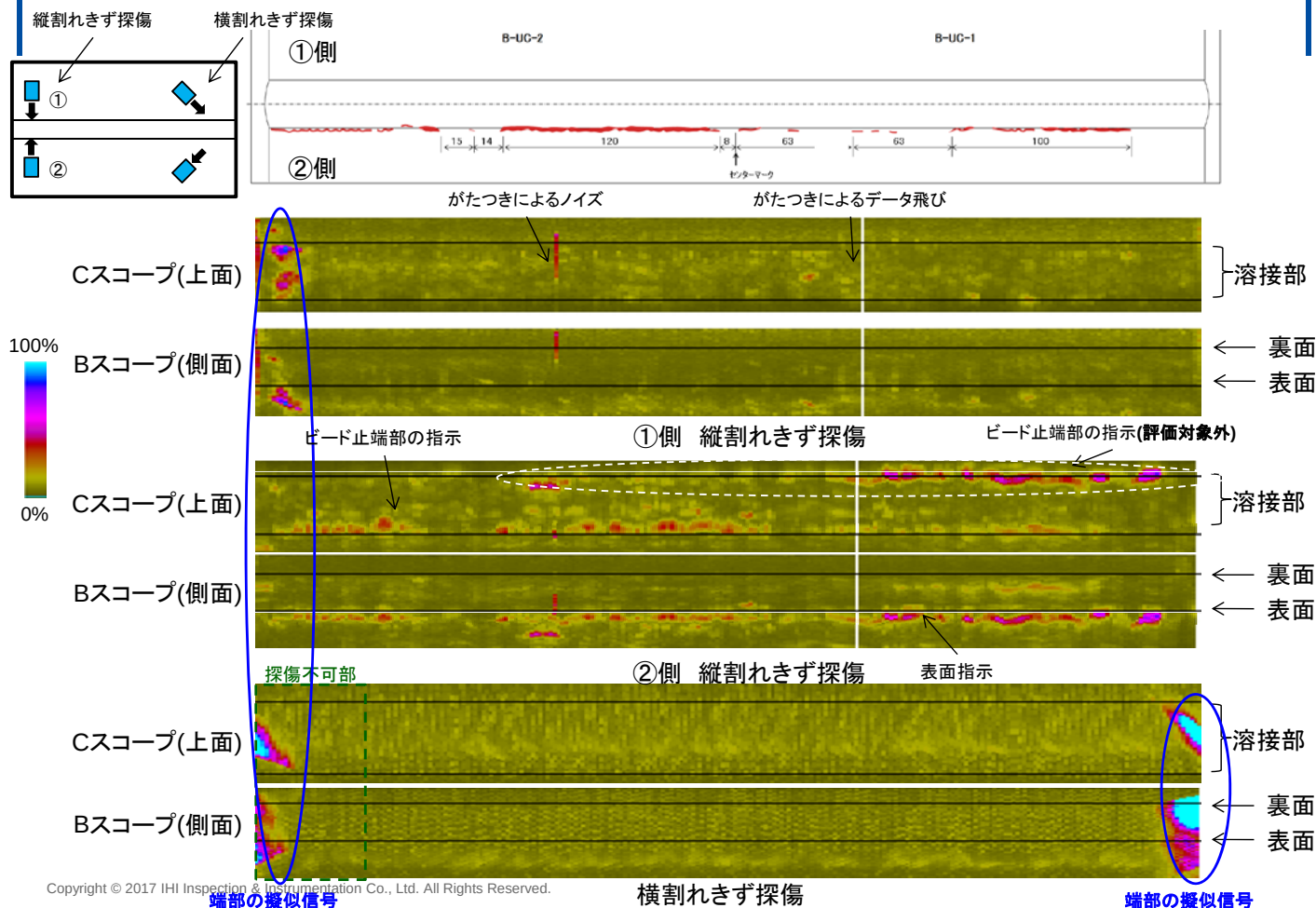
IHI



- 縦割れきず探傷
ビード中央部で表面から連続的な指示が得られた。複数のきずからの反射が重なり広い範囲で指示が検出されたと考えられる。
- 横割れきず探傷、角度付ききず探傷
特に、角度付ききず探傷にてビード中央部で表面からの指示が多く検出された。また、RT指示部以外の指示があり今後調査する予定である。

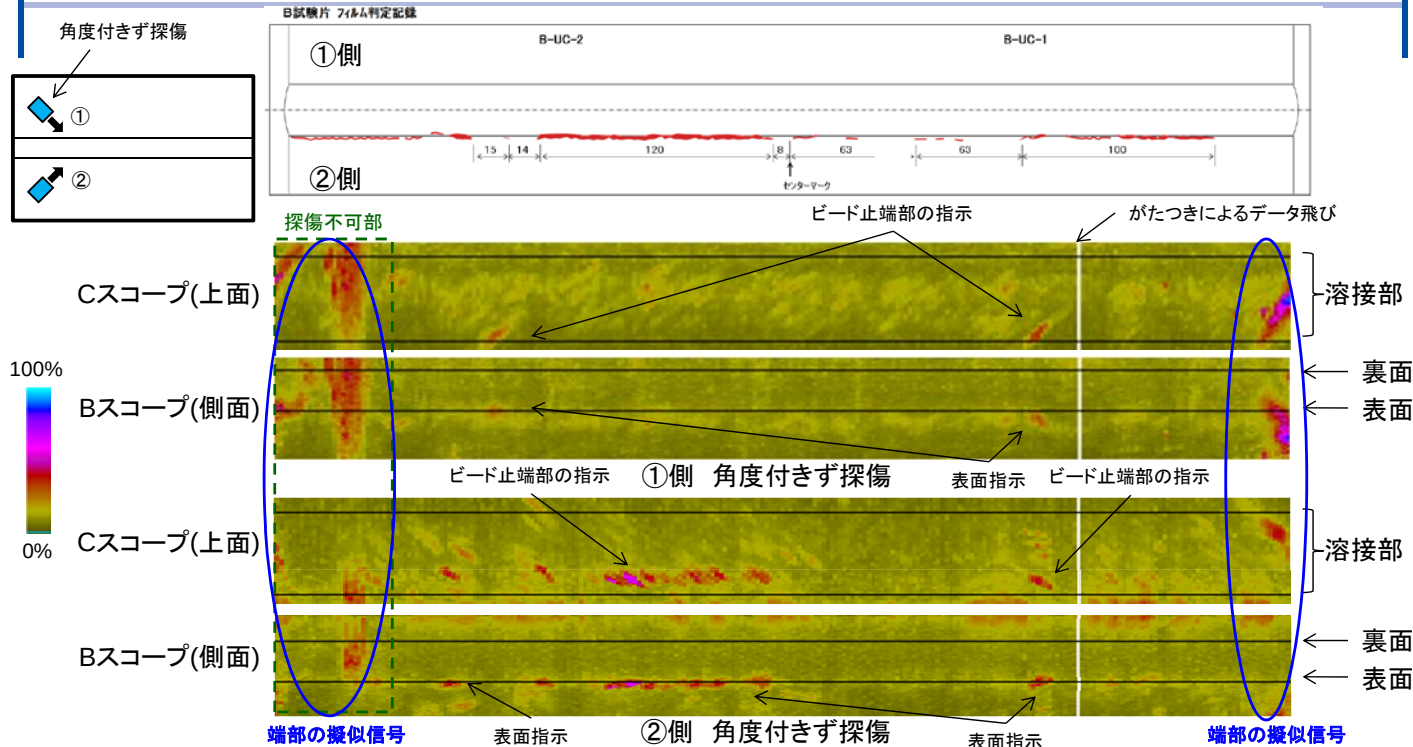
No. 11試験片 アンダーカット 塗装あり 板厚20mm(その1)

IHI



No. 11試験片 アンダーカット 塗装あり 板厚20mm(その2)

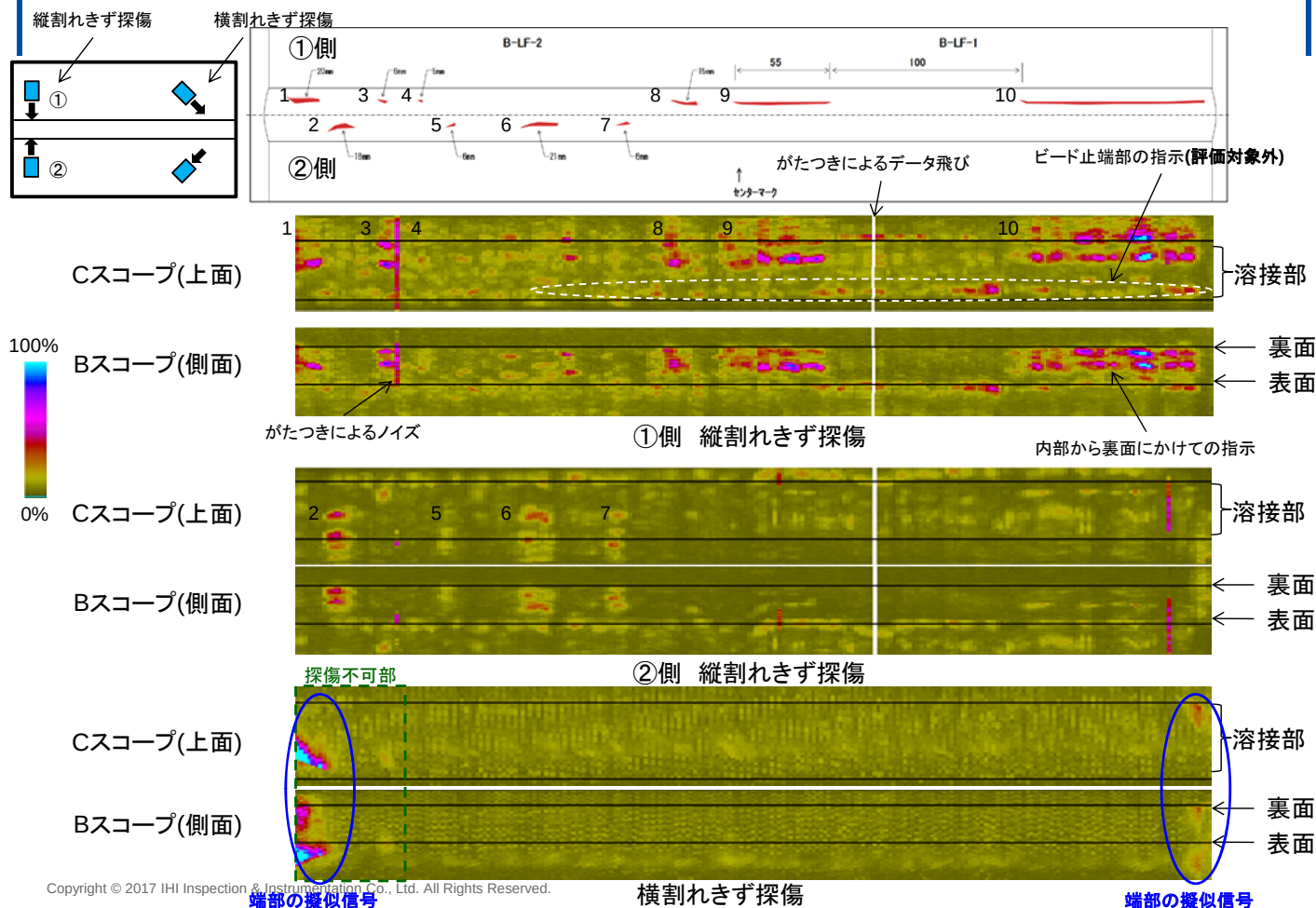
IHI



- 縦割れきず探傷
ビード止端部表面からの強い指示を検出した。探傷側のビード止端部で指示が長く検出された。
- 横割れきず探傷、角度付き探傷
角度付き探傷では、ビード止端部で表面から高い指示が数か所確認され、ビード形状からの反射と評価する。

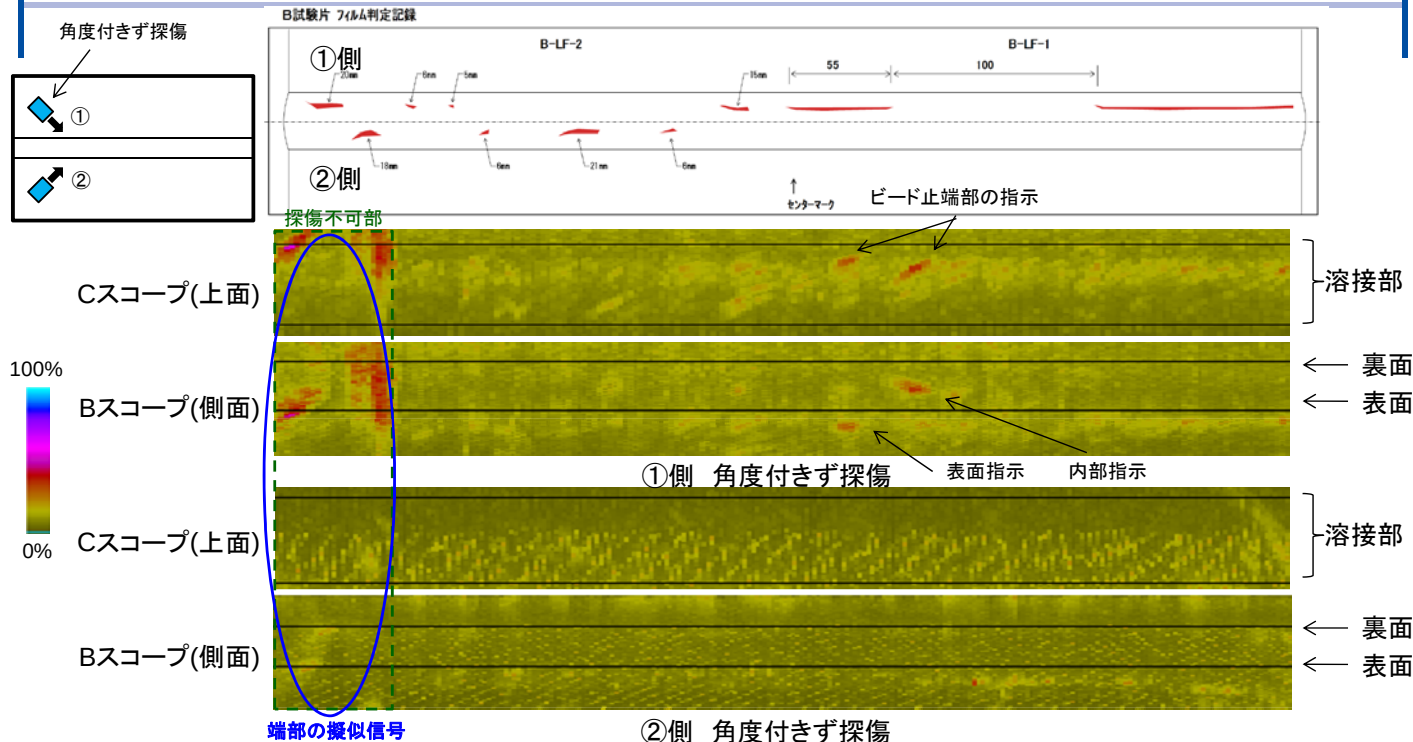
No. 12試験片 融合不良 塗装あり 板厚20mm(その1)

IHI



No. 12試験片 融合不良 塗装あり 板厚20mm(その2)

IHI



○縦割れきず探傷

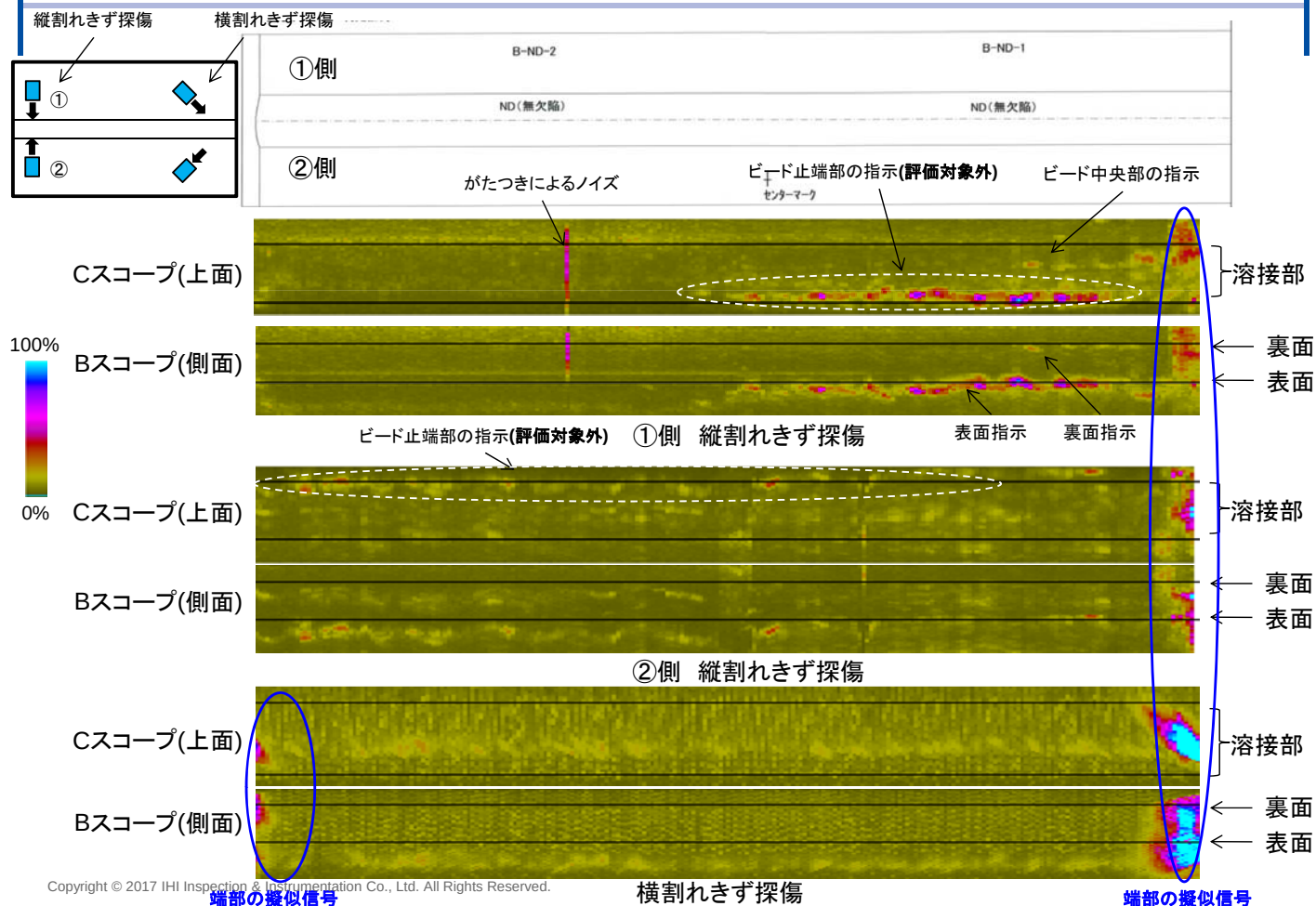
試験体の内部から裏面にかけて複数の指示が検出された。ビード止端部での指示も検出されているが、溶接試験体の形状の影響が考えられる。各UT指示はRT指示と同等の結果を示している。

○横割れきず探傷、角度付き探傷

角度付き探傷にてビード止端部近傍に表面および内部きずの検出を確認した。

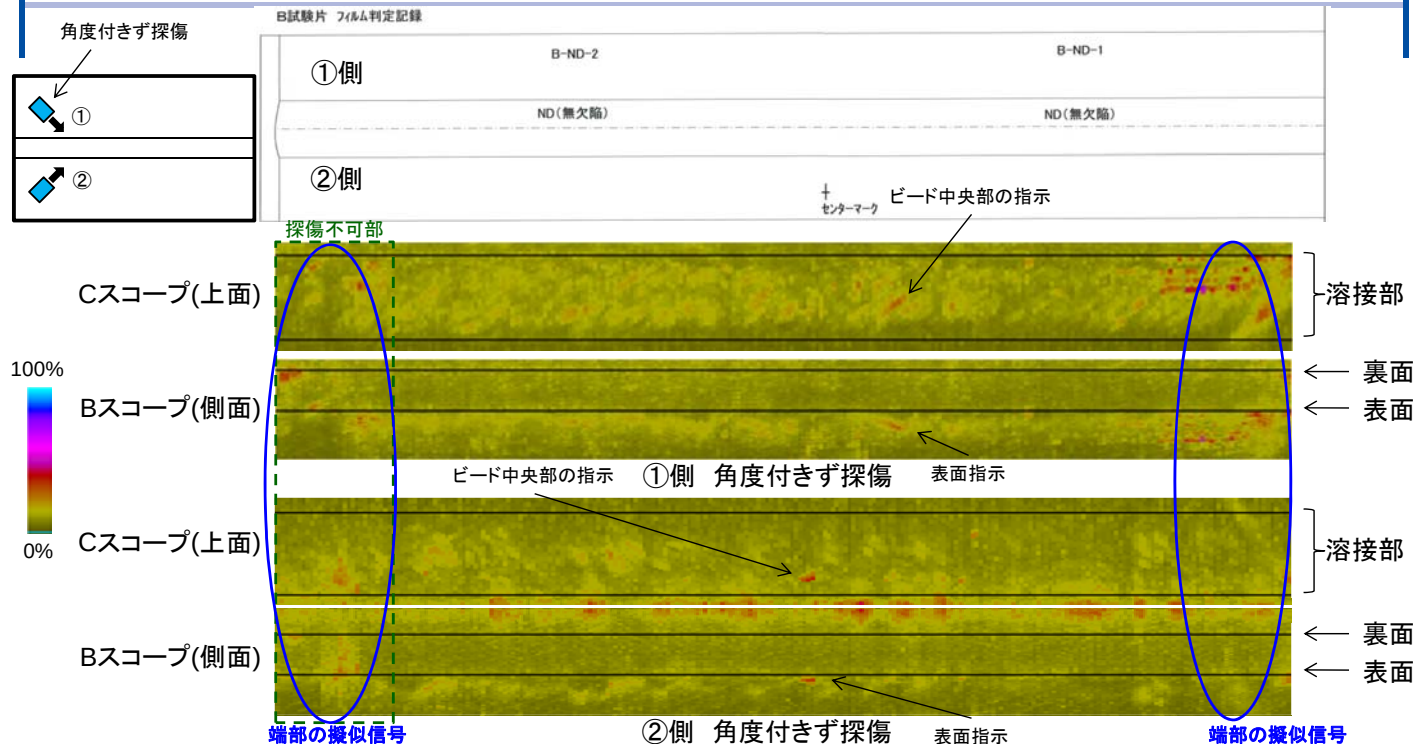
No. 13試験片 無欠陥 塗装あり 板厚20mm(その1)

IHI



No. 13試験片 無欠陥 塗装あり 板厚20mm(その2)

IHI



- 縦割れきず探傷
ビード止端部で表面および余盛部からの指示が得られた。探傷側と反対の止端部で指示が表れているため、溶接形状からの指示であり評価対象外とする。
- 横割れきず探傷、角度付き探傷
角度付き探傷ではビード中央部の表面指示が検出された。

疲労破壊試験の試験片の製作状況(石井鐵工所)

1. 欠陥を有する溶接継手試験板の製作状況

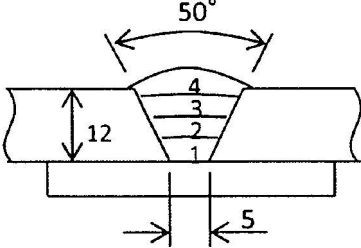
表1 試験板の製作状況 (2017年3月21日現在)

継手の種類		No.	管理番号	欠陥の種類	欠陥位置	溶接		検査	
A	板厚 12mm 裏当付き 突合せ溶接	1	A-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	済	PT RT	済 済
		2	A-IP	溶込不良	初層	半自動	済	RT	済
		3	A-CLR	内部割れ	初層	半自動	済	RT	済
		4	A-CLF	表面割れ	最終層	半自動	済	MT RT	済 済
		5	A-UC	アンダカット	最終層	半自動 被覆アーク	済	PT RT	済
		6	A-ND	無欠陥	—	半自動	済	RT	済
B	板厚 20mm 裏当付き 突合せ溶接	7	B-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	済	PT RT	済 済
		8	B-IP	溶込不良	初層	半自動	済	RT	済
		9	B-CLR	内部割れ	初層	半自動	済	RT	済
		10	B-CLF	表面割れ	表層	半自動	済	MT RT	済 済
		11	B-UC	アンダカット	表層	半自動 被覆アーク	済	PT RT	済
		12	B-LF	融合不良	中間層	半自動	済	RT	済
		13	B-ND	無欠陥	—	半自動	済	RT	済
C	板厚 9mm 重ね溶接	14	C-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	済	PT RT	済
		15	C-IP	溶込不良	初層	半自動	済	RT	
		16	C-CLR	内部割れ	初層	半自動	済	RT	
		17	C-CLF	表面割れ	表層	半自動	済	MT RT	済
		18	C-UC	アンダカット	表層	半自動 被覆アーク	済	PT RT	済
		19	C-ND	無欠陥	—	半自動	済	RT	

2. 代表的な溶接条件

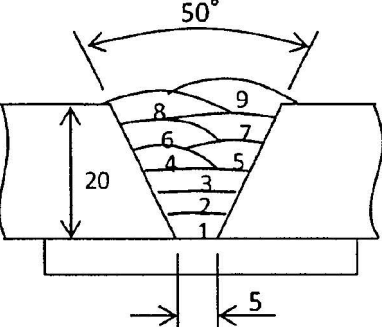
(1) 試験板A

表2 試験板Aの溶接条件

積層図	パス No.	溶接 方法	溶接材料 銘柄	径	電流	電圧	速度	入熱	パス間温度
				mm	A	V	cm/min	KJ/cm	℃
	1	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	33	13.6	20
	2	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	26	17.3	100
	3	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	21	21.4	140
	4	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	18	25.0	160
	- 以下余白 -								

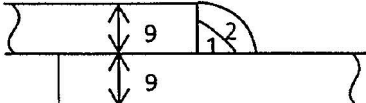
(2) 試験板B

表3 試験板Bの溶接条件

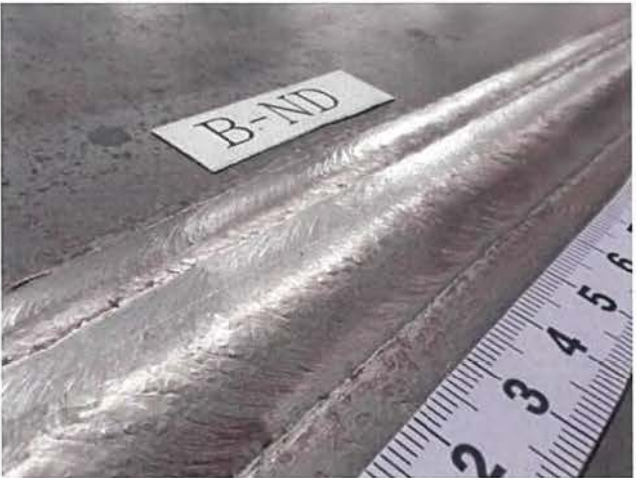
積層図	パス No.	溶接 方法	溶接材料 銘柄	径	電流	電圧	速度	入熱	パス間温度
				mm	A	V	cm/min	KJ/cm	℃
	1	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	33	13.6	20
	2	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	26	17.3	100
	3	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	21	21.4	140
	4	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	33	13.6	160
	5	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	33	13.6	170
	6	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	26	17.3	180
	7	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	26	17.3	180
	8	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	22	20.5	180
	9	半自動溶接	SM-1F	1.2	250	30	22	20.5	180

(3) 試験板C

表4 試験板Cの溶接条件

積層図	パス No.	溶接 方法	溶接材料 銘柄	径	電流	電圧	速度	入熱	パス間温度
				mm	A	V	cm/min	KJ/cm	℃
	1	半自動溶接	SM-1F	1.2	210	25	33	9.5	20
	2	半自動溶接	SM-1F	1.2	210	25	25	12.6	50
	- 以下余白 -								

3. 試験板の外観

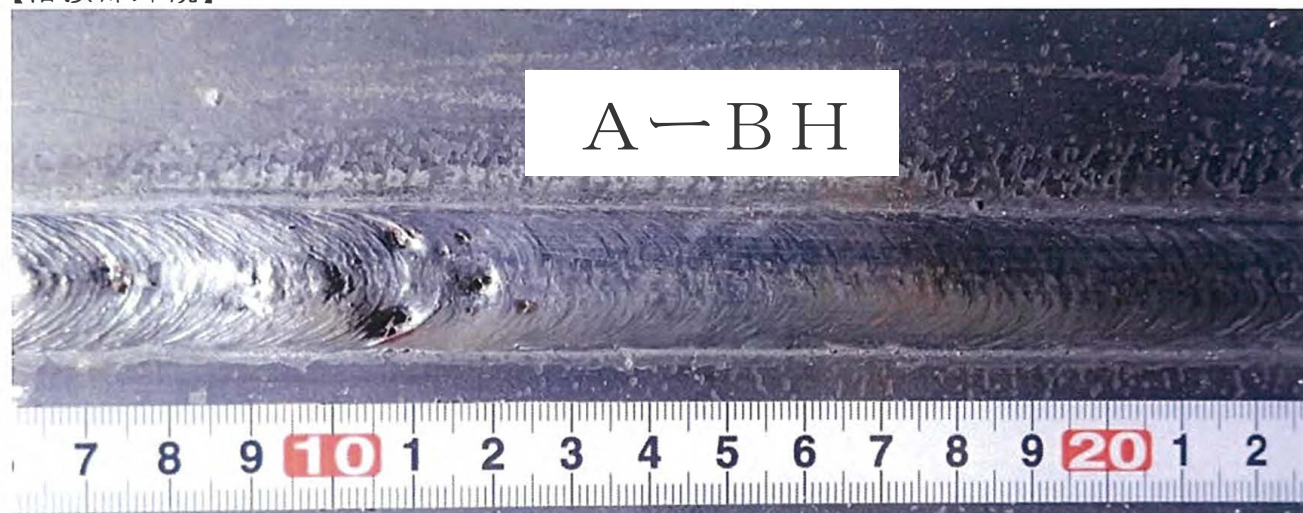
試験板全景	溶接部拡大
【試験板A】  Specimen A is a dark, rectangular plate with a horizontal weld line across the center. A white label 'A-IP' is attached to the top. Red handwritten text at the bottom reads 'A-IP (材質不明)' and 'R112'. Three small red circles are marked along the bottom edge.	 A close-up of the weld on specimen A, showing a rough, textured surface. A white label 'A-IP' is visible. A ruler is placed below the weld for scale, showing markings from 4 to 8 cm.
【試験板B】  Specimen B is a dark, rectangular plate with a horizontal weld line. A white label 'B-ND' is attached to the top. Red handwritten text at the bottom reads 'B-ND' and '無欠陥'. Two small red circles are marked along the bottom edge.	 A close-up of the weld on specimen B, showing a smoother surface than specimen A. A white label 'B-ND' is visible. A ruler is placed below the weld for scale, showing markings from 2 to 6 cm.
試験板C  Specimen C is a dark, rectangular plate with a horizontal weld line. A white label 'C-ND' is attached to the top. Red handwritten text at the bottom reads 'C-ND' and '無欠陥'. Three small red circles are marked along the bottom edge.	 A close-up of the weld on specimen C, showing a smooth surface. A white label 'C-ND' is visible. A ruler is placed below the weld for scale, showing markings from 4 to 10 cm.

4. 溶接欠陥の詳細

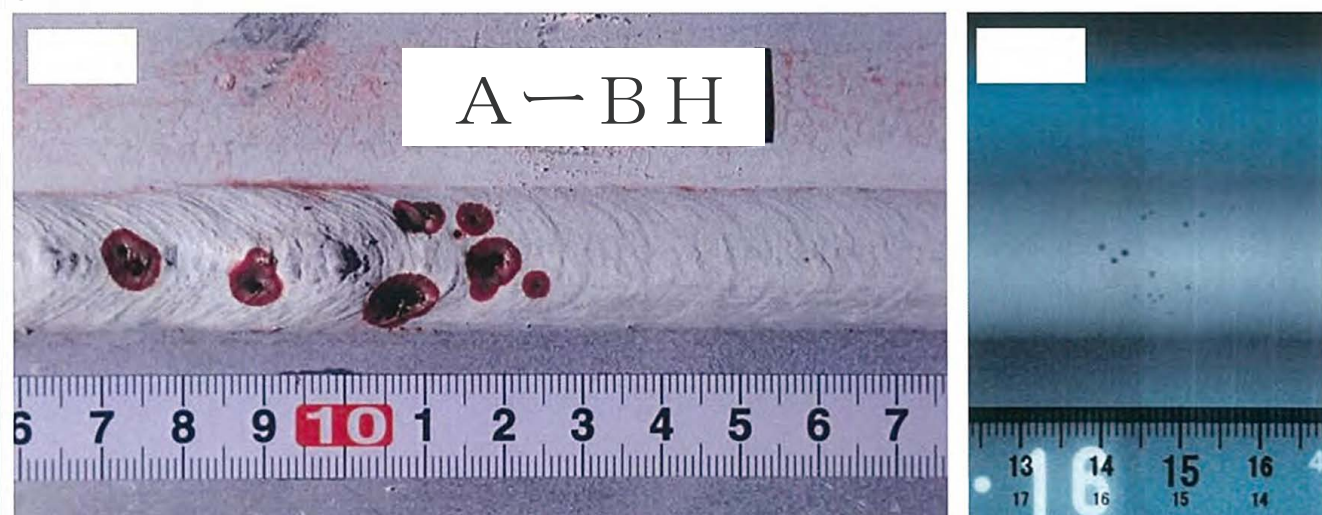
(1) 試験板A の溶接欠陥

No.	【継手の種類】	板厚12mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】	【記号】
1	【欠陥の種類】	ブローホール	初層・最終層	A-BH

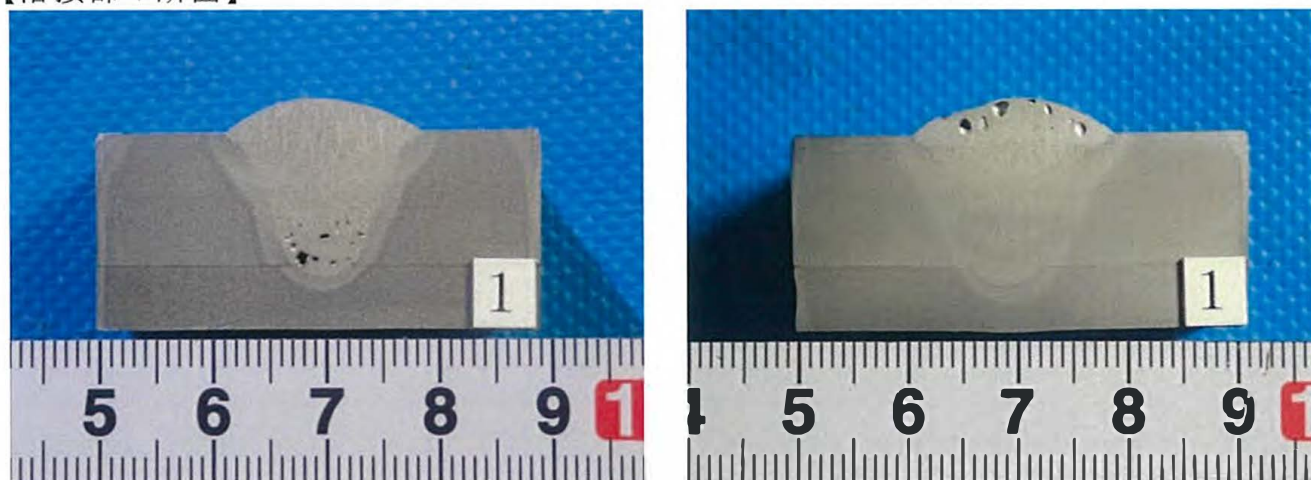
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】

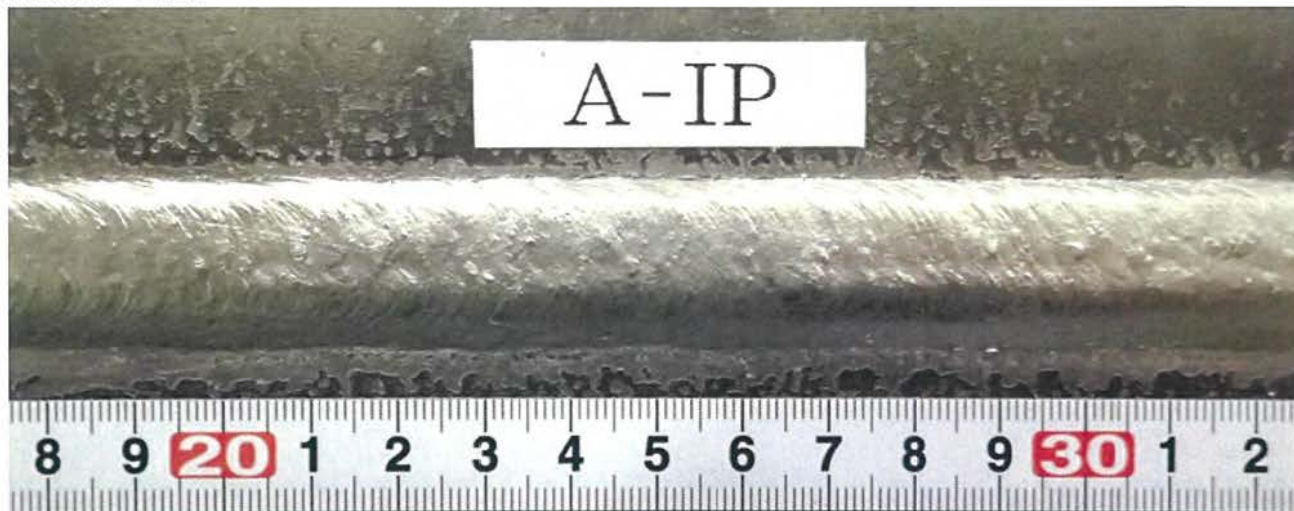


【溶接部の断面】

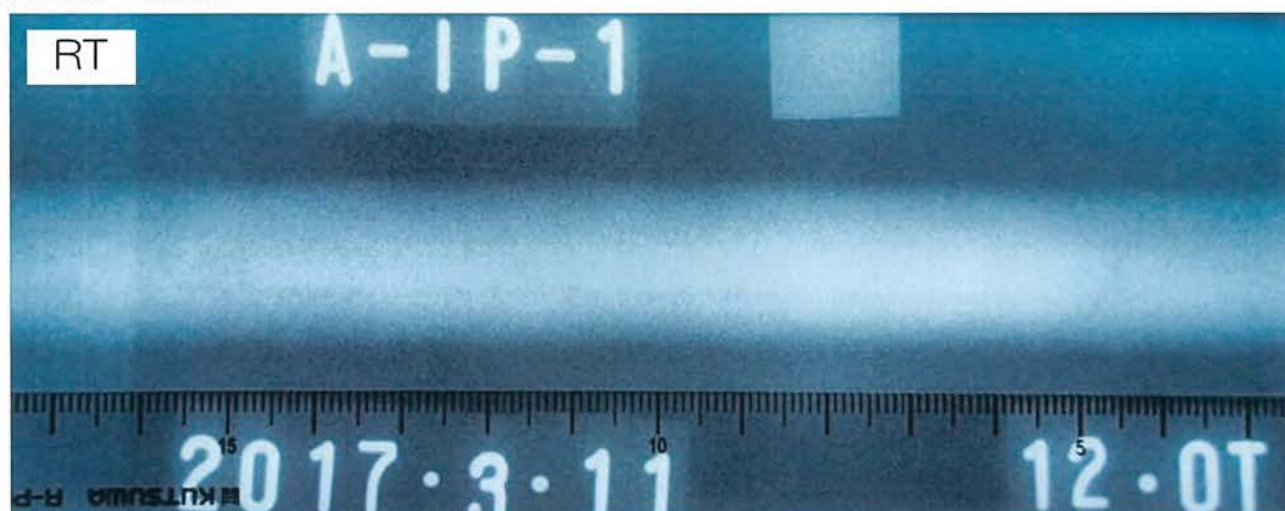


No.	【継手の種類】	板厚12mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】	【記号】
	2	【欠陥の種類】 溶込不良		
			初層	A-IP

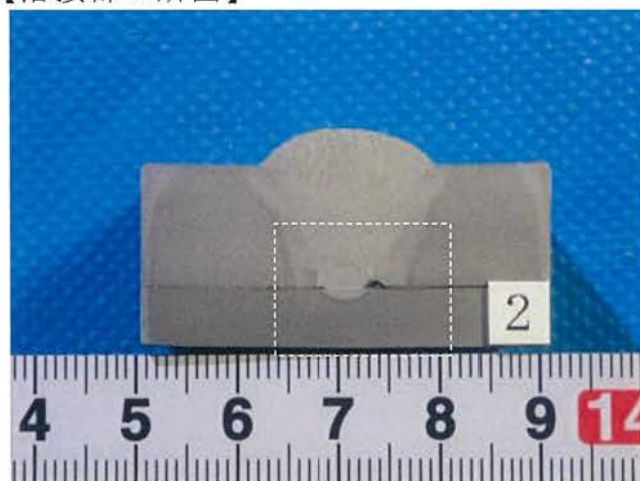
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】



【溶接部の断面】



(左写真破線部 拡大)



No. 3	【継手の種類】 板厚12mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】 初層	【記号】 A-CLR
	【欠陥の種類】 内部割れ		

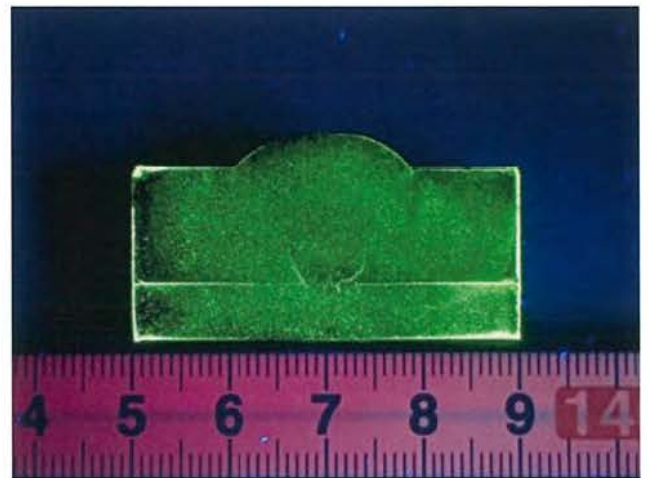
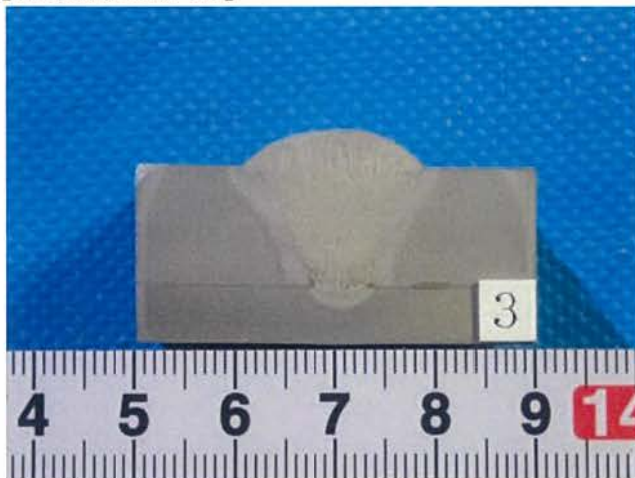
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】



【溶接部の断面】



No.	【継手の種類】	板厚12mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】	【記号】
	4	【欠陥の種類】 表面割れ		
			最終層	A-CLF

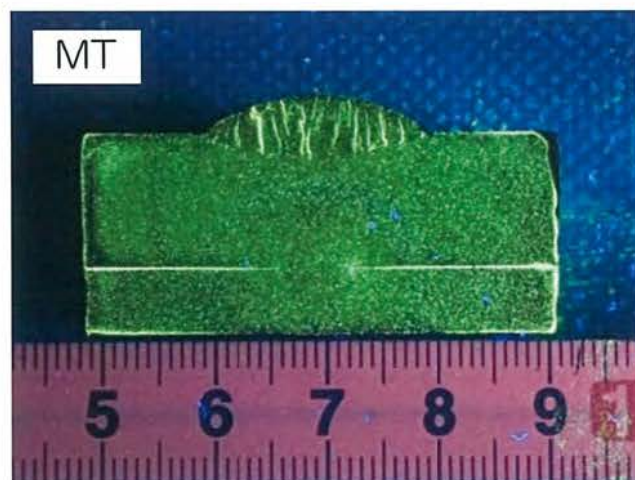
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】

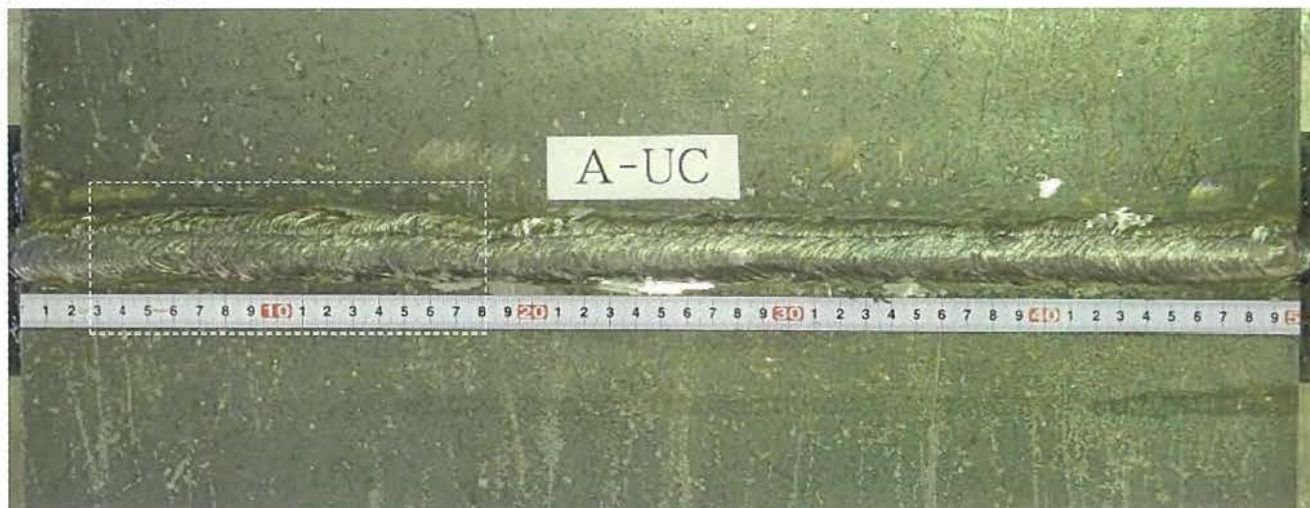


【溶接部の断面】

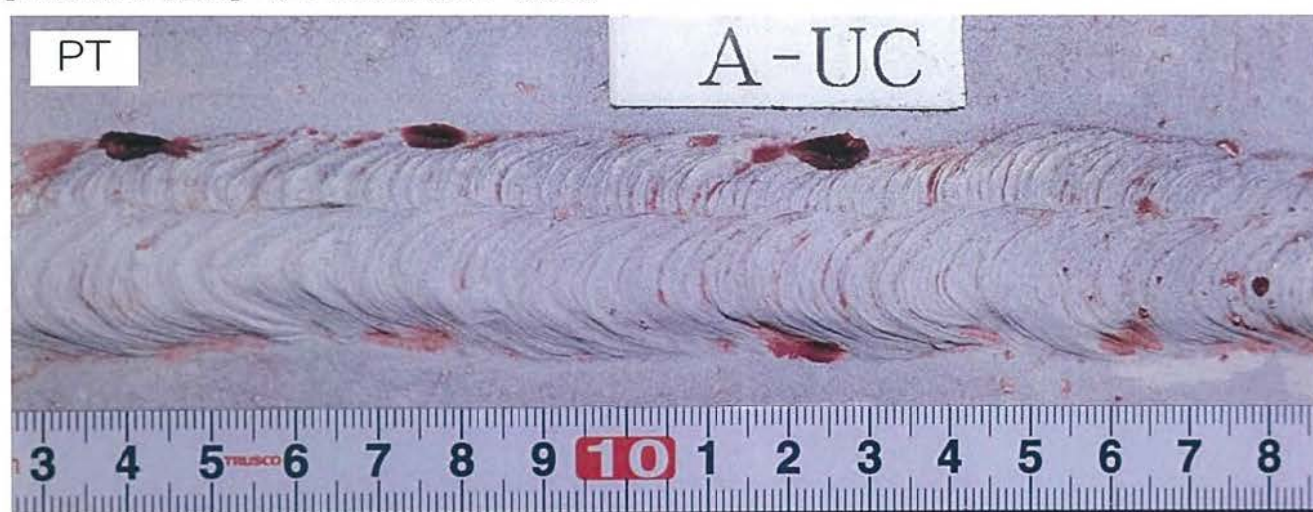


No. 5	【継手の種類】 板厚12mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】 最終層	【記号】 A-UC
	【欠陥の種類】 アンダーカット		

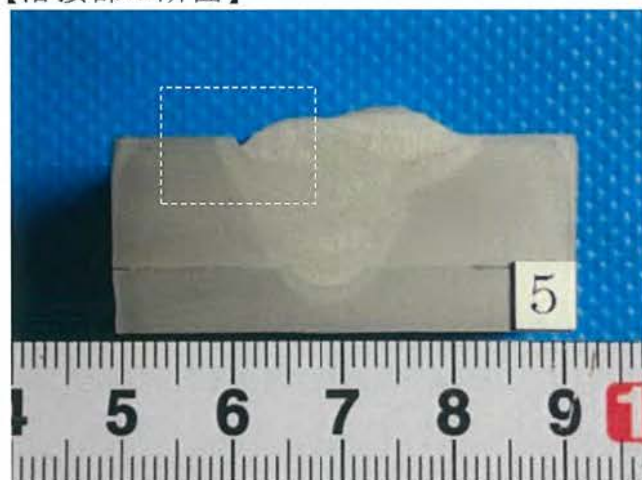
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】（上写真破線部 拡大）



【溶接部の断面】

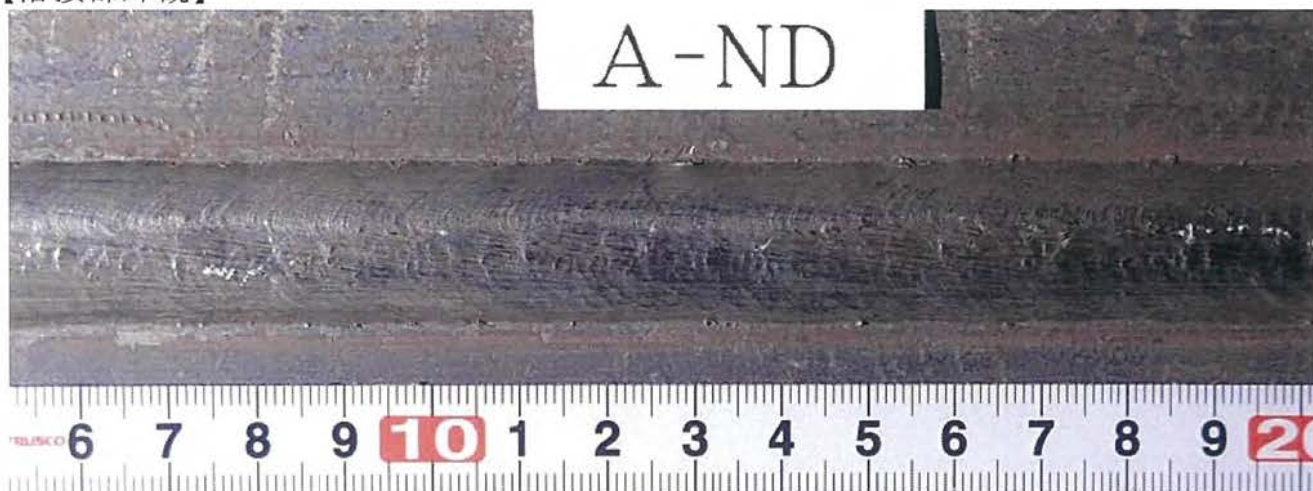


（左写真破線部 拡大）

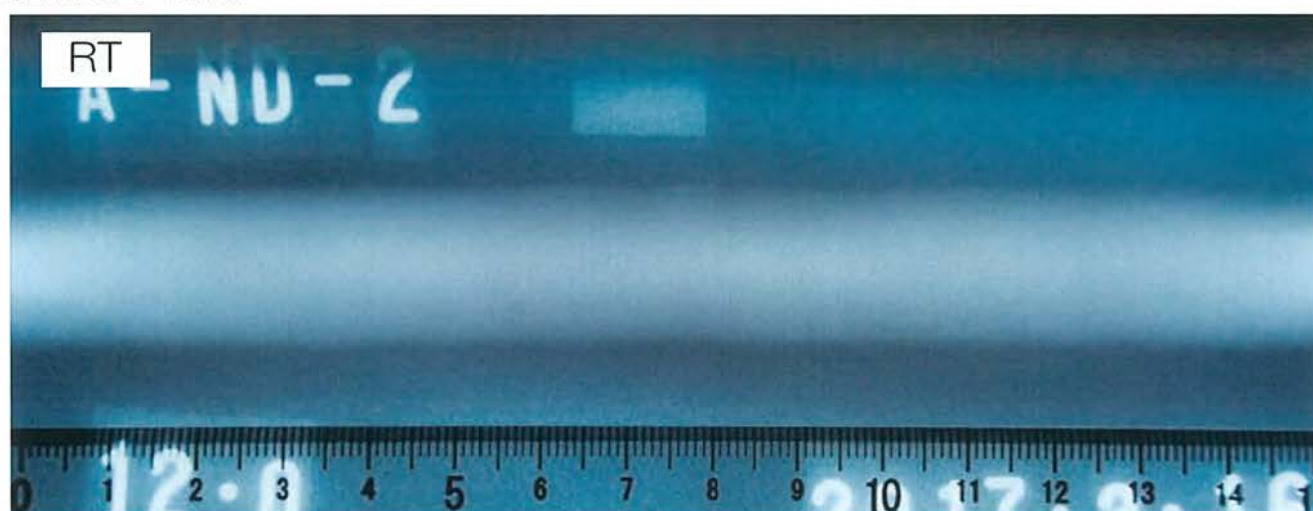


No.	【継手の種類】 板厚12mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】 —	【記号】 A-ND
	【欠陥の種類】 無欠陥		

【溶接部外観】



【欠陥指示模様】



【溶接部の断面】



(2) 試験板B の溶接欠陥 (抜粋)

No.	【継手の種類】 板厚20mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】	【記号】
7	【欠陥の種類】 ブローホール	最終層	B-BH

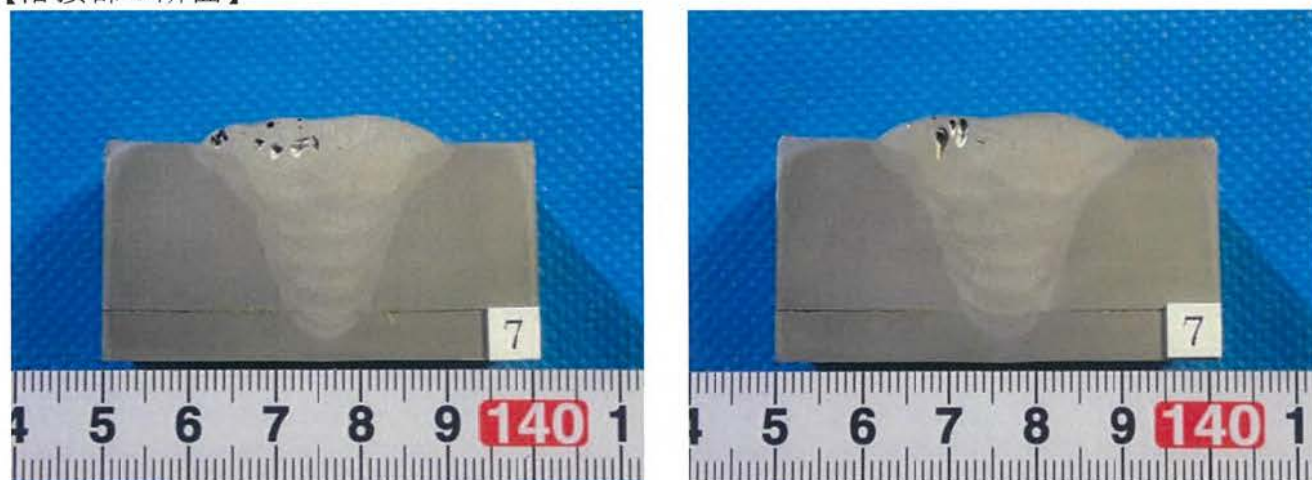
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】



【溶接部の断面】

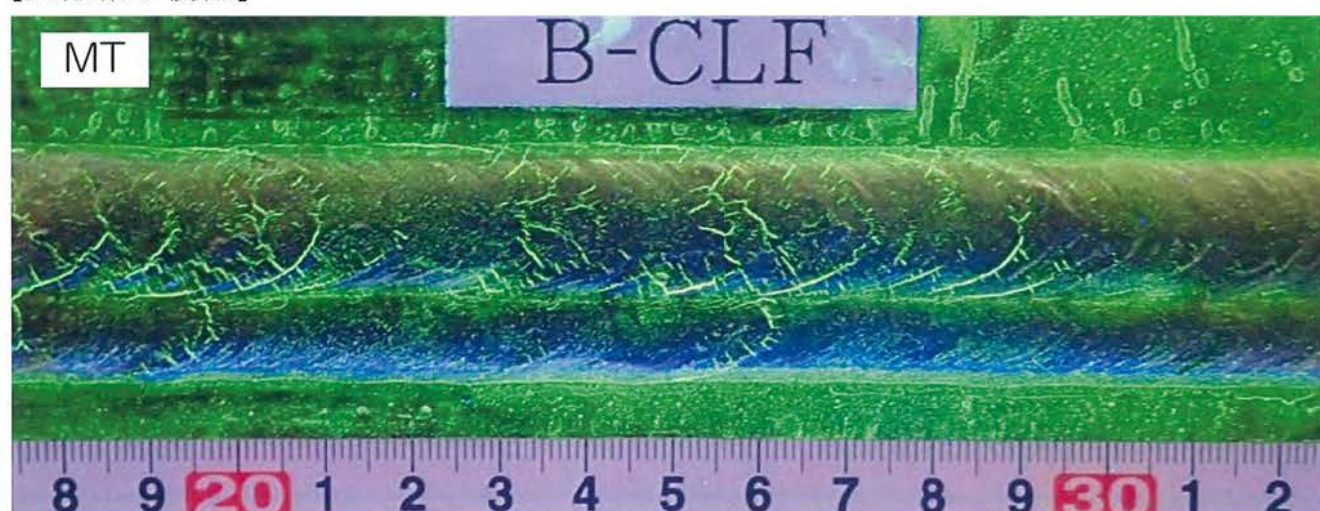


No.	【継手の種類】 板厚20mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】	【記号】
10	【欠陥の種類】 表面割れ	最終層	B-CLF

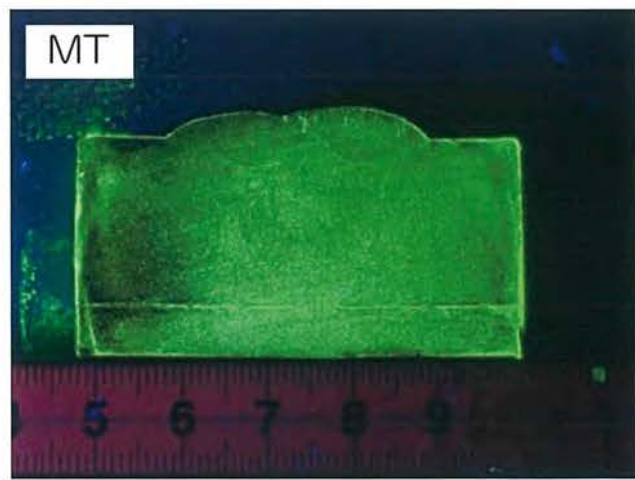
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】



【溶接部の断面】

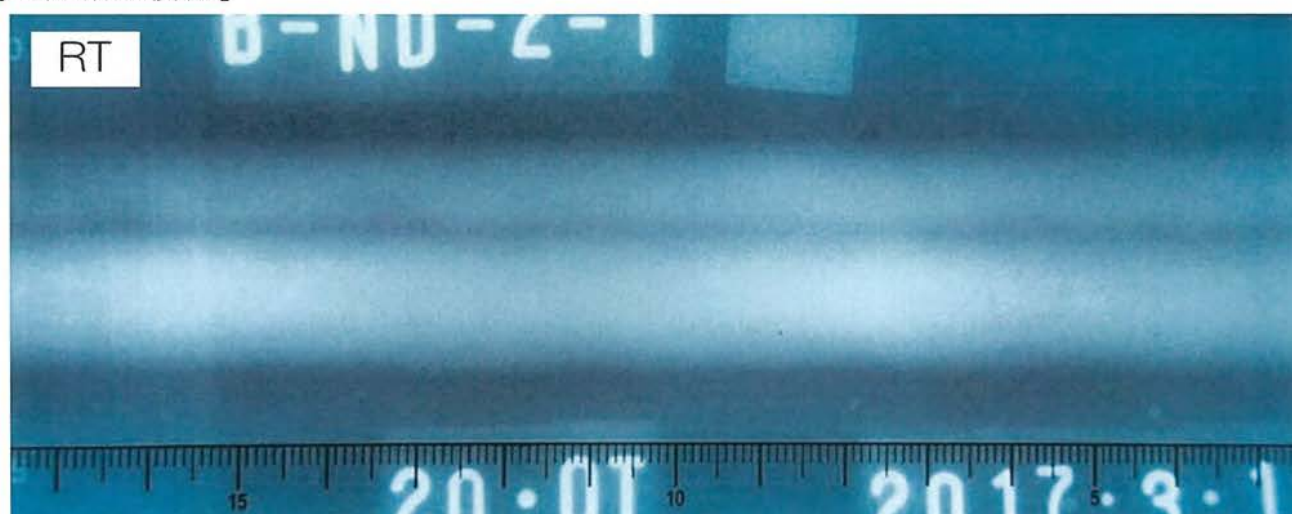


No.	【継手の種類】 板厚20mm 裏当付き突合せ溶接	【欠陥位置】	【記号】
13	【欠陥の種類】 無欠陥	—	B-ND

【溶接部外観】



【欠陥指示模様】



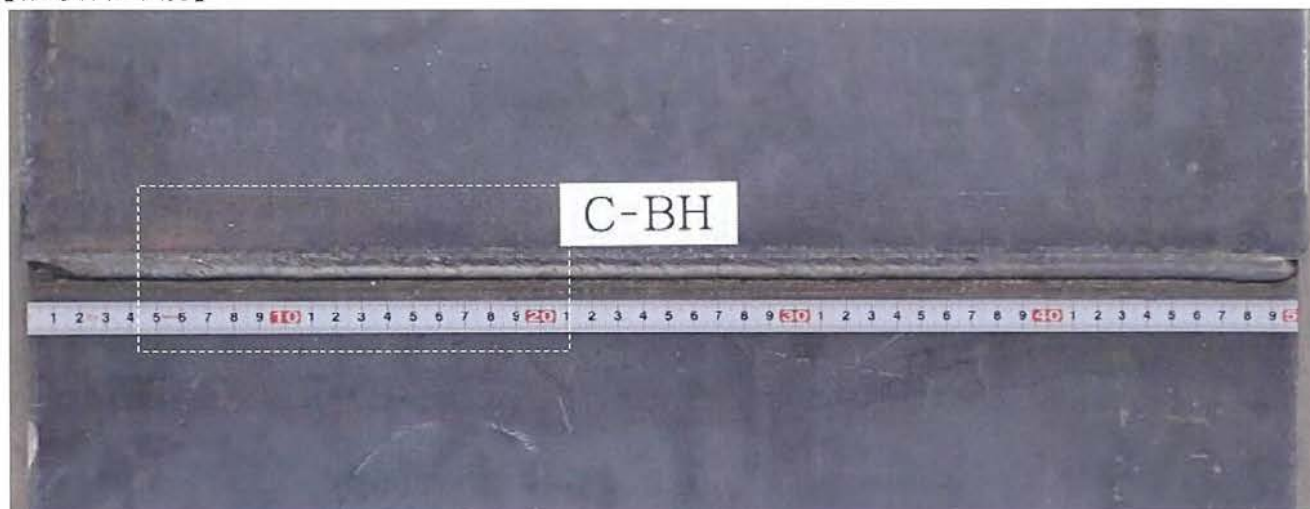
【溶接部の断面】



(3) 試験板C の溶接欠陥 (抜粋)

No. 14	【継手の種類】 板厚9mm 重ね溶接	【欠陥位置】 最終層	【記号】 C-BH
	【欠陥の種類】 ブローホール		

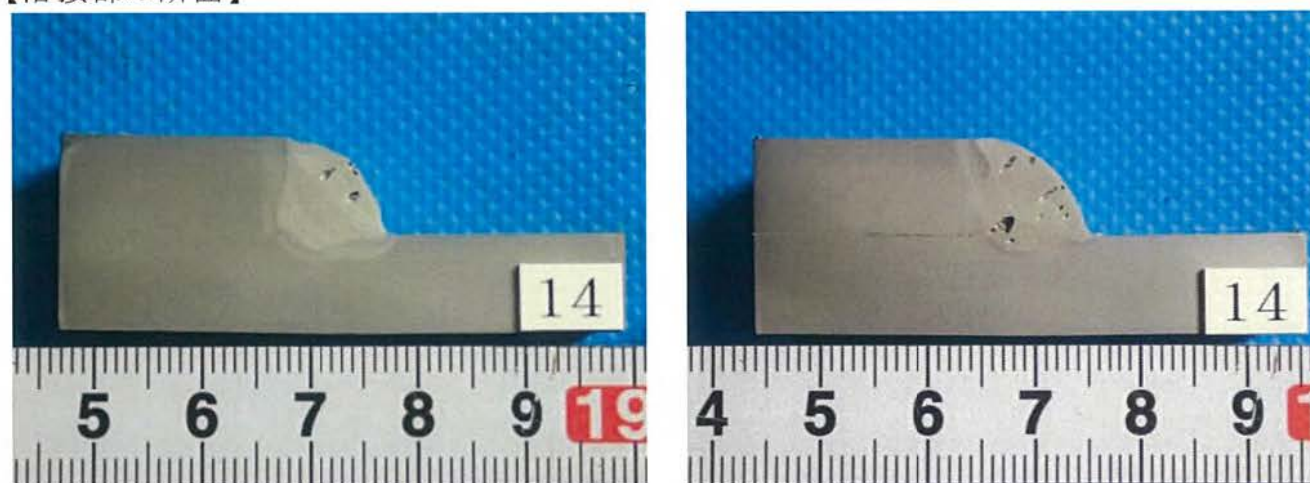
【溶接部外観】



【欠陥指示模様】 (上写真破線部 拡大)

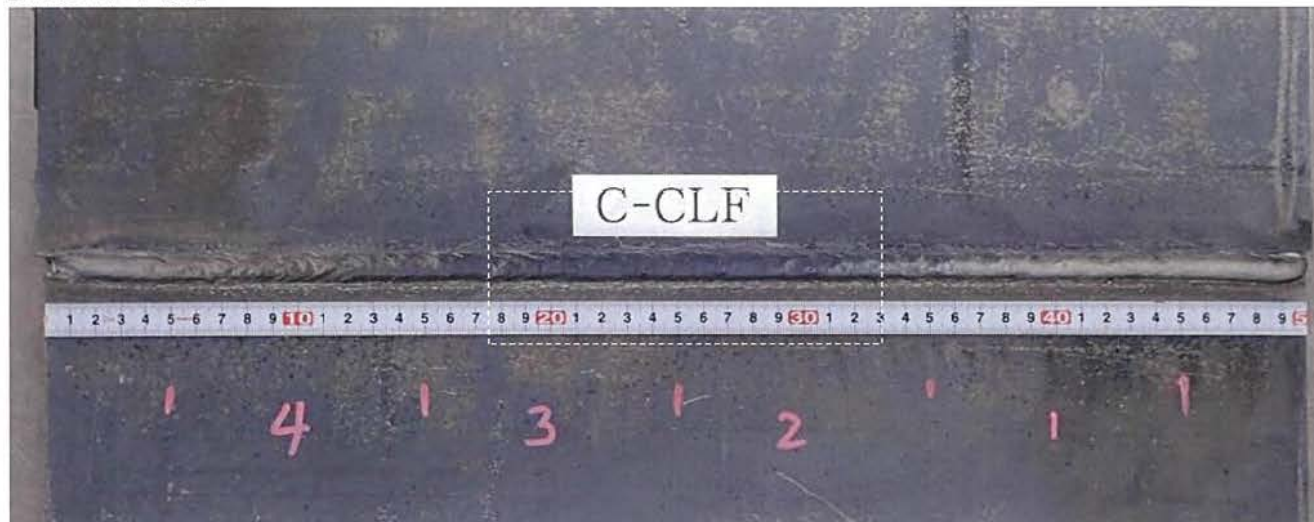


【溶接部の断面】

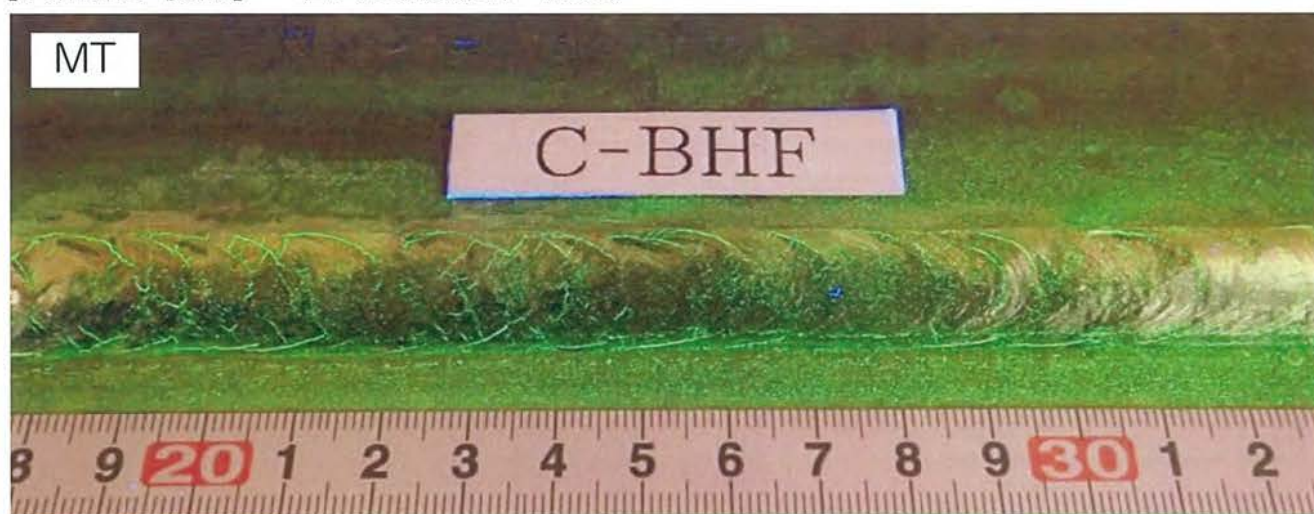


No.	【継手の種類】 板厚9mm 重ね溶接	【欠陥位置】	【記号】
17	【欠陥の種類】 表面割れ	最終層	C-CLF

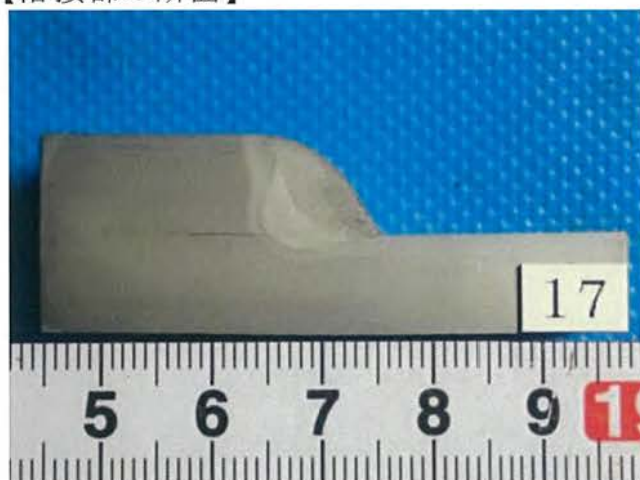
【溶接部外観】



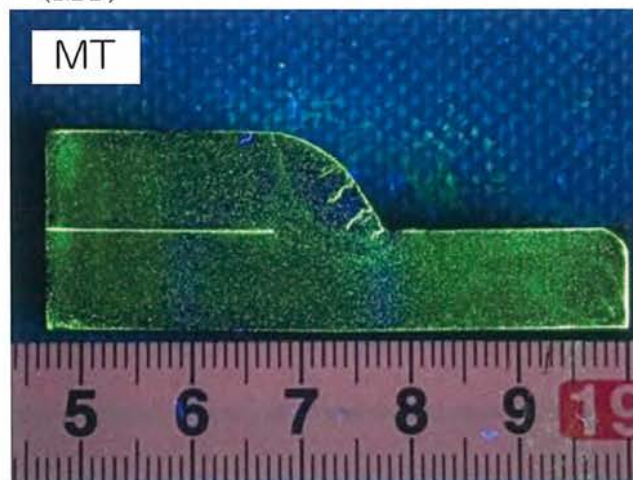
【欠陥指示模様】 (上写真破線部 拡大)



【溶接部の断面】

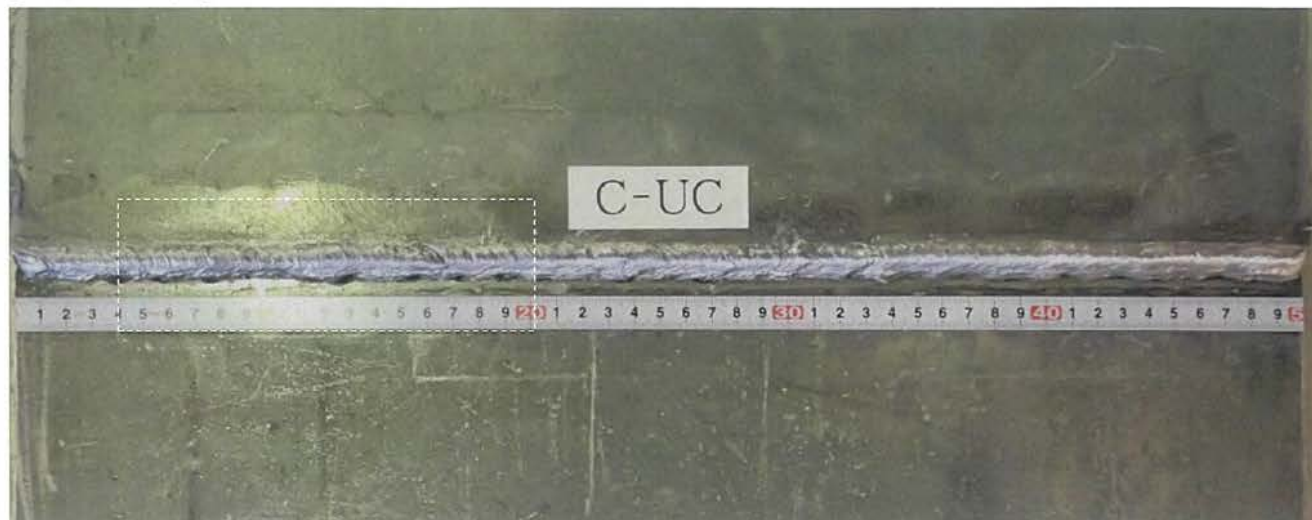


(MT)

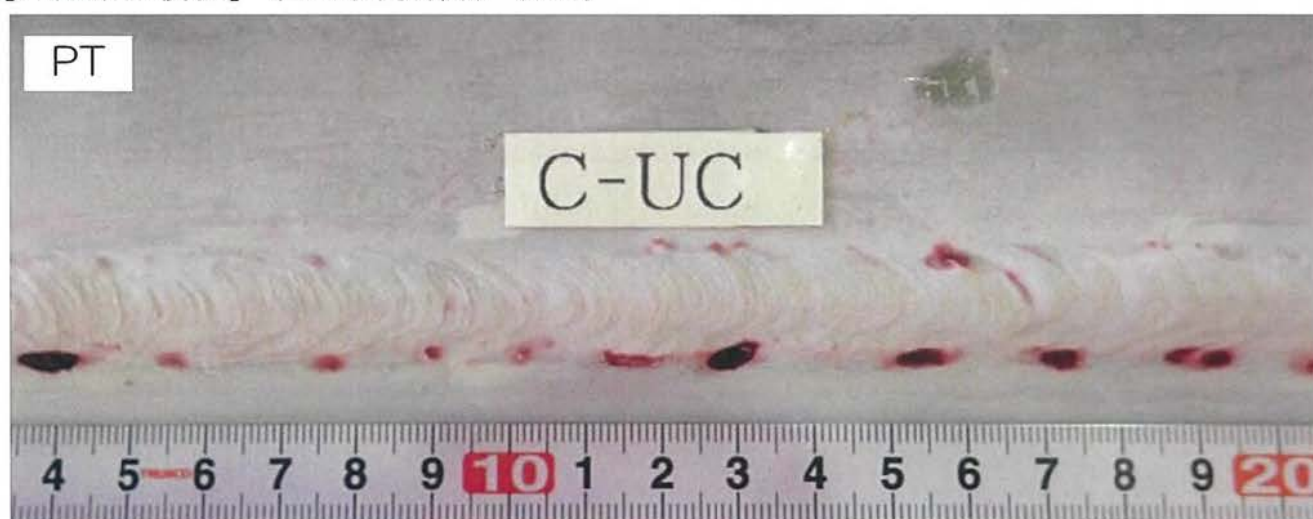


No.	【継手の種類】 板厚9mm 重ね溶接	【欠陥位置】	【記号】
18	【欠陥の種類】 アンダーカット	最終層	C-UC

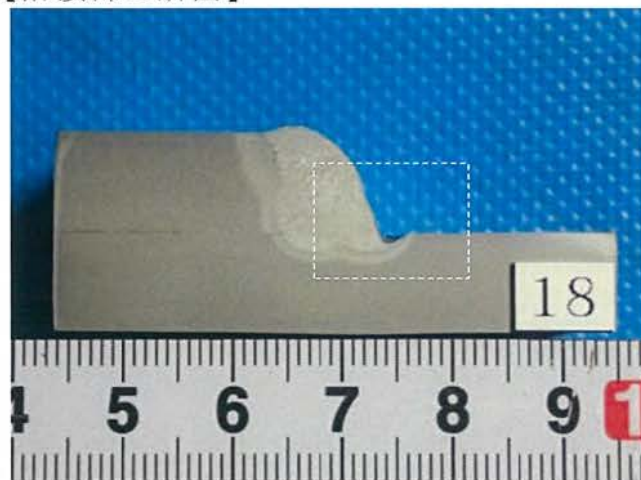
【溶接部外観】



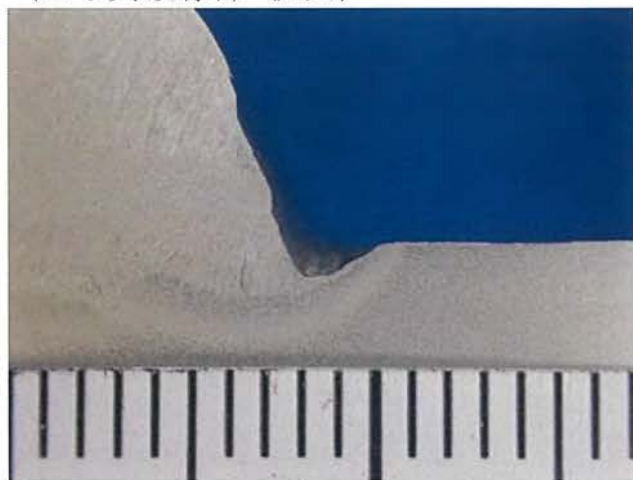
【欠陥指示模様】（上写真破線部 拡大）



【溶接部の断面】

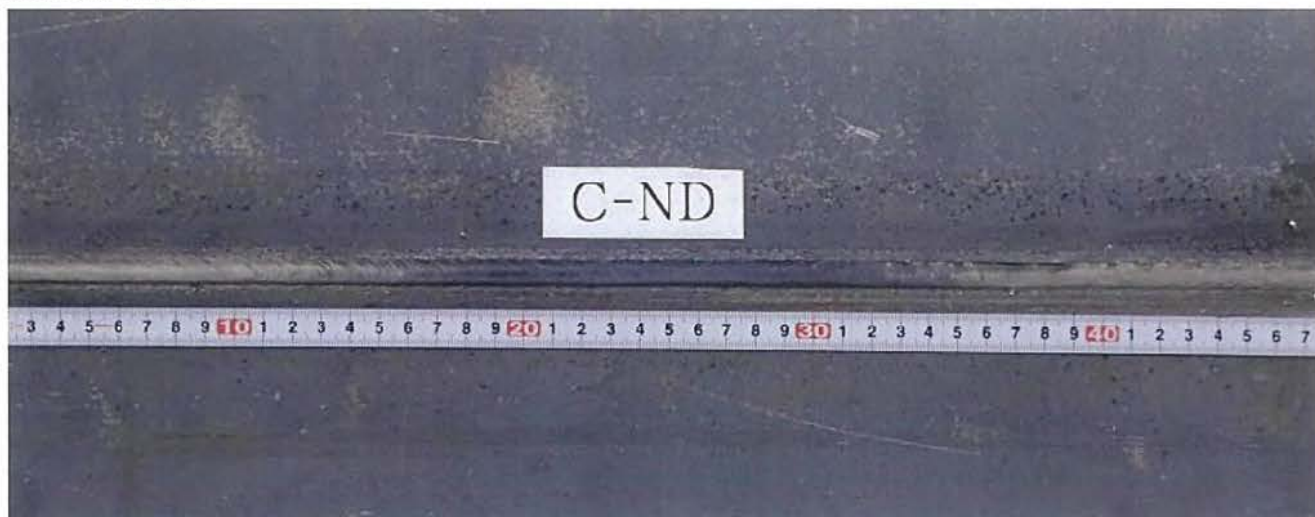


（左写真破線部 拡大）

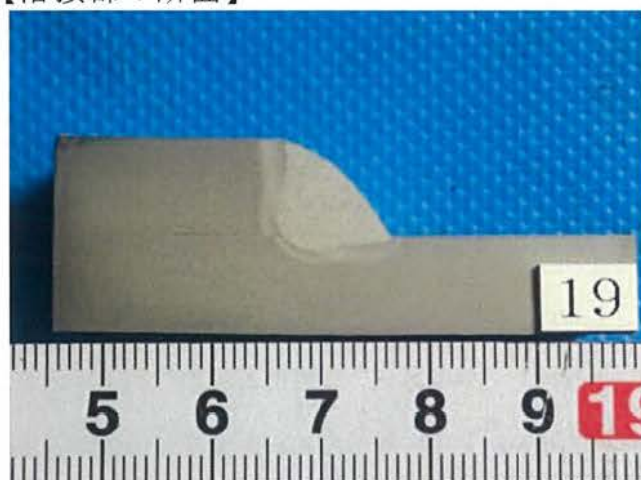


No.	【継手の種類】 板厚9mm 重ね溶接	【欠陥位置】 —	【記号】 C-ND
19	【欠陥の種類】 無欠陥		

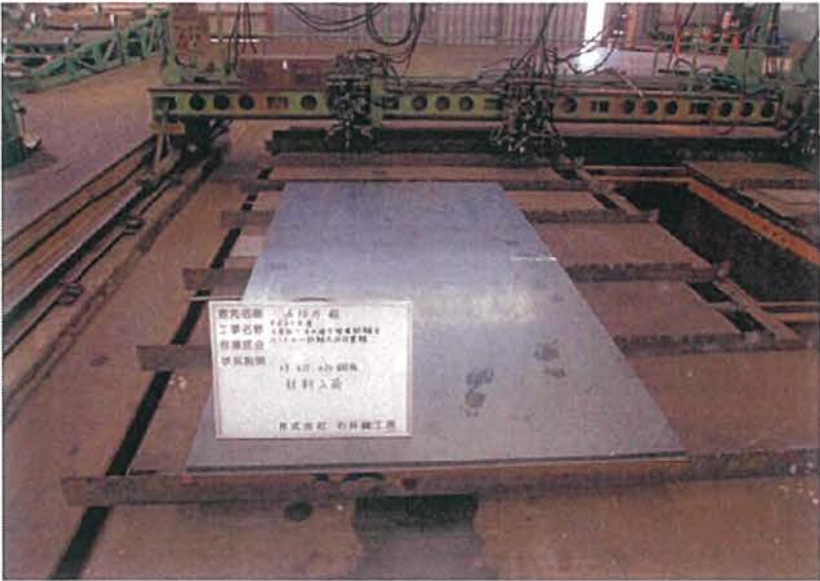
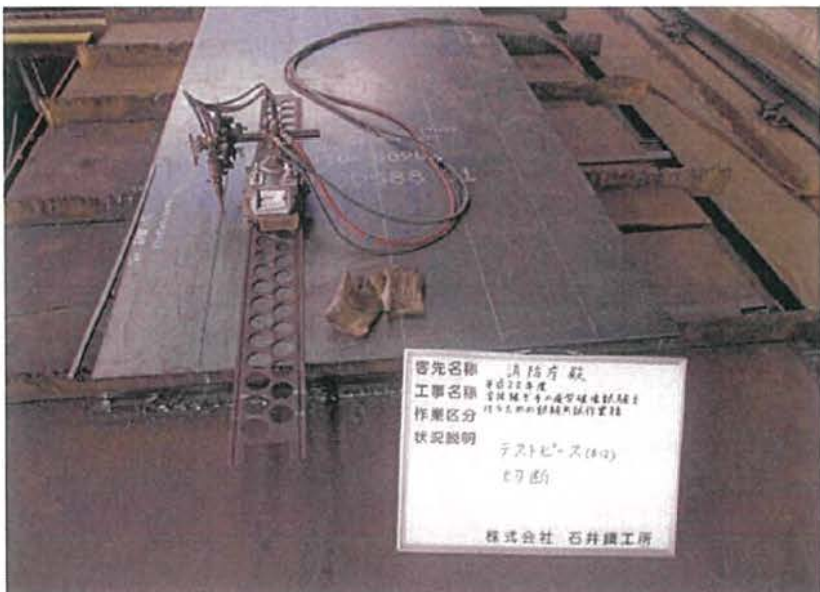
【溶接部外観】



【溶接部の断面】



5. 作業状況

	試験板A,B,C素材 t12, t20, t9鋼板 材料入荷 板幅・長さ : 1524×3048
	試験板A t12鋼板 ケガキ
	試験板A t12鋼板 切断



試験板B

t20鋼板 開先加工



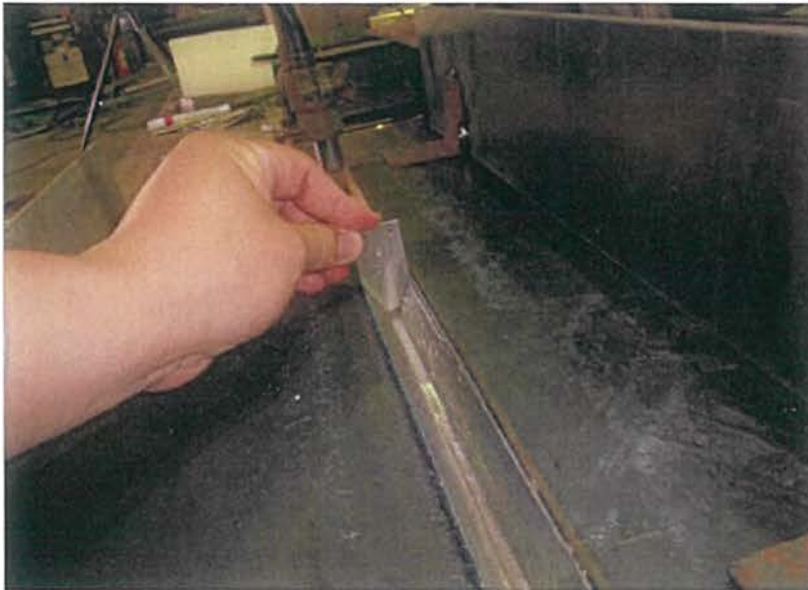
試験板A,B,C

切断・開先加工後



試験板A

組立



試験板B

開先検査(50°)



試験板B

溶接



試験板C

溶接

欠陥を有する溶接継ぎ手の疲労破壊試験結果

屋外貯蔵タンクの底板の溶接継ぎ手を想定して製作した、内部及び表面欠陥を有する溶接継ぎ手の試験体について、4点曲げ疲労試験及び引張圧縮疲労試験を実施した。疲労試験の実施前後に放射線透過試験（以下 RT）を実施し、試験結果の比較を行った。

4点曲げ疲労試験を実施した結果、全ての欠陥の種類において、欠陥の進展はみられなかった。一方、無欠陥の試験体で溶接箇所が破断したものや、欠陥の試験体で母材が破断したもの（写真参照）を除き、他の欠陥における進展は、観測されなかった。なお、引張圧縮疲労試験における発生応力は、屋外貯蔵タンクで予測される実応力とは現象的に異なるため、参考値として評価すべきと考えられる。

また、疲労試験実施後の欠陥状況を確認するため、欠陥の種類（ブローホール、初層溶け込み不良、初層割れ、最終層割れ、アンダーカット、溶接不良）ごとに、試験体を破断又は切断し、顕微鏡等（マイクロ스코プ、電子顕微鏡）により断面の観察を行い、いずれも欠陥の進展は確認されなかった。

以下に実施内容を示す。

1. 試験片

裏当て付突合せ溶接継手

寸法：500mm×100mm

材質及び板厚：SS400×12mm, SS400×20mm

欠陥の種類：無欠陥を含む7種類（表1参照）

表1 試験体内訳

欠陥の種類（略号） 板厚	A : 12mm	B : 20mm
	（試験体番号）	（試験体番号）
ブローホール (BH)	3 体 (1～3)	3 体 (1～3)
初層溶け込み不良 (IP)	3 体 (1～3)	3 体 (1～3)
初層割れ (CLR)	3 体 (1～3)	3 体 (1～3)
最終層割れ (CLF)	3 体 (1～3)	2 体 (1～2)
アンダーカット (UC)	3 体 (1～3)	3 体 (1～3)
融合不良 (LF)	—	3 体 (1～3)
無欠陥 (ND)	3 体 (1～3)	3 体 (1～3)

※試験体番号 1 及び 2 は 4 点曲げ疲労試験を実施。3 は引張圧縮疲労試験を実施。

2. ひずみゲージ

型番：FLA-5-11-3LJCT

貼付け位置（図1参照）：①裏当て金中心部

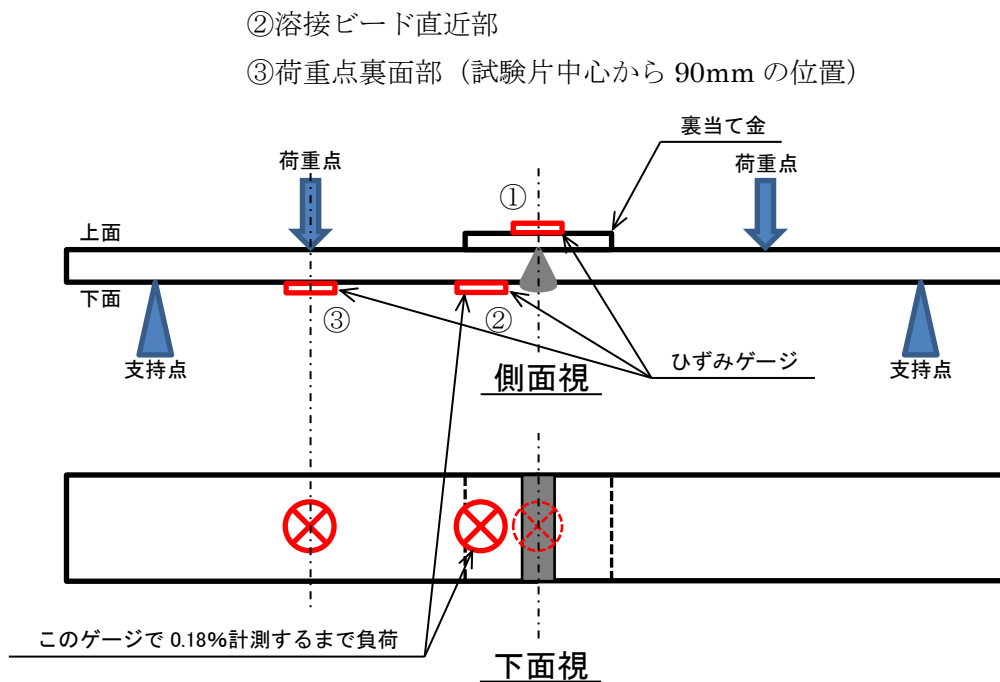


図1 ひずみゲージ貼り付け位置

3. 試験条件

(1) 4点曲げ疲労試験

試験機：島津製作所製 油圧サーボ式疲労試験機（容量 50kN）

スパン（支持間距離）：上 180mm、下 460mm

制御方法：ストローク制御

繰返し速度：0.5Hz

最大繰返し数：1,000 サイクル

リミッター：初期荷重より 25%低下時

ストローク条件：溶接ビード直近部（②）のひずみが 0.18%となるまで静的に負荷し、その時のストロークで疲労試験を実施した。

(2) 引張疲労試験

試験機：島津製作所製 油圧サーボ式疲労試験機（容量 750kN）

制御方法：ストローク制御

繰返し速度：0.5Hz

最大繰返し数：1,000 サイクル

リミッター：初期荷重より 25%低下時

ストローク条件：溶接ビード直近部（②）のひずみが±0.18%となるまで静的に負荷し、その時のストロークで疲労試験を実施。一部の試験片では引張圧縮それぞれで降伏が起きた時のストロークで疲労試験を実施した。ひずみが 0.18%となる前に降伏が発生した試験片においては、降伏が発生したときのストロークで疲労試験を実施した。

4. 試験結果

(1) 4点曲げ疲労試験

各試験体について4点曲げ疲労試験を実施し、疲労試験前と疲労試験後の放射線透過試験(RT)の結果を比較し、欠陥の進展状況を確認した結果を表2に示す。

表2 4点曲げ疲労試験結果

板厚	欠陥種類 (探傷の可否)	番号	スローク量 (mm)	繰返し数 (回)	RTによる 確認結果	備考
A 12mm	BH (可)	1	5.7	1,000	進展なし	BH0.5~1.0φ 散在
		2	5.6	1,000	進展なし	BH0.5~1.0φ 散在
	IP (否)	1	5.9	1,000	進展なし	IP83mm
		2	5.9	1,000	進展なし	IP37mm
	CLR (可)	1	5.7	1,000	進展なし	C3mm
		2	6.0	1,000	進展なし	C3~7mmLF 混在
	CLF (可)	1	5.4	1,000	進展なし	C2~20mm
		2	5.3	1,000	進展なし	C2~20mm 散在
	UC (可)	1	5.6	1,000	進展なし	UC 全線
		2	5.5	1,000	進展なし	UC 全線
	ND (一)	1	5.1	1,000	進展なし	
		2	5.6	1,000	進展なし	
B 20mm	BH (可)	1	3.9	1,000	進展なし	BH0.5~2.5φ 散在
		2	3.7	1,000	進展なし	BH0.5~2.0φ 散在
	IP (否)	1	4.1	1,000	進展なし	IP 全線
		2	4.2	1,000	進展なし	IP55mm,21mm
	CLR (可)	1	3.8	1,000	進展なし	C2~6mm 点在
		2	3.8	1,000	進展なし	C3~6mm 点在
	CLF (可)	1	3.9	1,000	進展なし	C1~25mm 散在
		2	4.0	1,000	進展なし	C1~25mm 散在
	UC (可)	1	4.1	1,000	進展なし	UC 全線
		2	4.0	1,000	進展なし	UC 全線
	LF (可)	1	4.0	1,000	進展なし	LF78mm
		2	4.0	1,000	進展なし	LF65mm
	ND (一)	1	3.7	1,000	進展なし	
		2	3.9	1,000	進展なし	

注：欠陥種類欄の0内は、本検討会で検証しているフェーズドアレイ探傷機による探傷の可否を示す。

(2) 引張圧縮疲労試験

各試験体について引張圧縮疲労試験を実施し、疲労試験前と疲労試験後の放射線透過試験(RT)の結果を比較し、欠陥の進展状況を確認した結果を表3に示す。

表3 引張圧縮疲労試験結果

板厚	欠陥種類	番号	ストローク条件	ストローク量 (mm)	繰返し数 (回)	RTによる 確認結果	備考
A 12mm	BH	3	±0.18%	—	—	—	圧縮時に座屈※ ¹
	IP	3	降伏時	1.3	1,000	進展なし	IP32mm
	CLR	3	降伏時	1.1	1,000	進展なし	C3～7mm 散在
	CLF	3	降伏時	1.3	1,000	進展なし	C2～20mm 散在
	UC	3	±0.18%	—	—	—	圧縮時に座屈※ ²
	ND	3	降伏時	1.4	1,000	進展なし	
B 20mm	BH	3	±0.18%	2.5	1,000	進展なし	BH 密材
	IP	3	±0.18%	—	—	—	母材伸び※ ³
	CLR	3	±0.18%	—	—	—	圧縮時に座屈※ ⁴
	CLF						試験体なし
	UC	3	±0.18%	2.5	1,000	進展なし	UC 全線
	LF	3	±0.18%	4.5	235	—	破断※ ⁵
	ND	3	±0.18%	3.3	357	—	破断※ ⁶

※1 ストローク量を決定する段階において負荷をかけ圧縮していたところ、ビード直近のひずみが減少し、裏当て金のひずみが増大したことから、裏当て金の変形→座屈と判断したもの。

※2 ストローク量を決定する段階において負荷をかけ圧縮していたところ、面外変形したもの。試験開始前から溶接部に少し変形があり、座屈しやすくなっていたと考えられる。

※3 ストローク量を決定する段階において変位量約 6mm まで引張ったところ、ビード直近のひずみは増加しなかったものの、母材部のひずみが増加したもの。

※4 ストローク量を決定する段階において圧縮時に座屈したもの。ひずみ約 0.15%で降伏開始。

※5 ひずみ±0.18%で疲労試験を開始したところ、235回で溶接部(溶着金属と母材の境界付近)から破断したもの。ただし破断部は溶接欠陥が存在しない部位であった。



B-LF-3 破断状況(1)

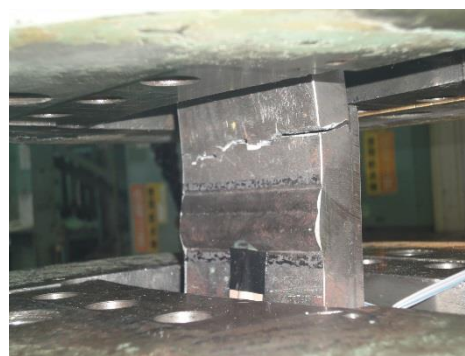


B-LF-3 破断状況(2)

※6 ひずみ $\pm 0.18\%$ で疲労試験を開始したところ、357回で母材部が破断したもの。



B-ND-3 破断状況(1)



B-ND-3 破断状況(2)

5. 断面観察

欠陥の種類ごとに試験片1体を選定し、欠陥が存在すると思われる部位を切断または破断し、当該部分の観察により欠陥の伸展の有無について観察を行った結果を表4、写真を表5に示す。

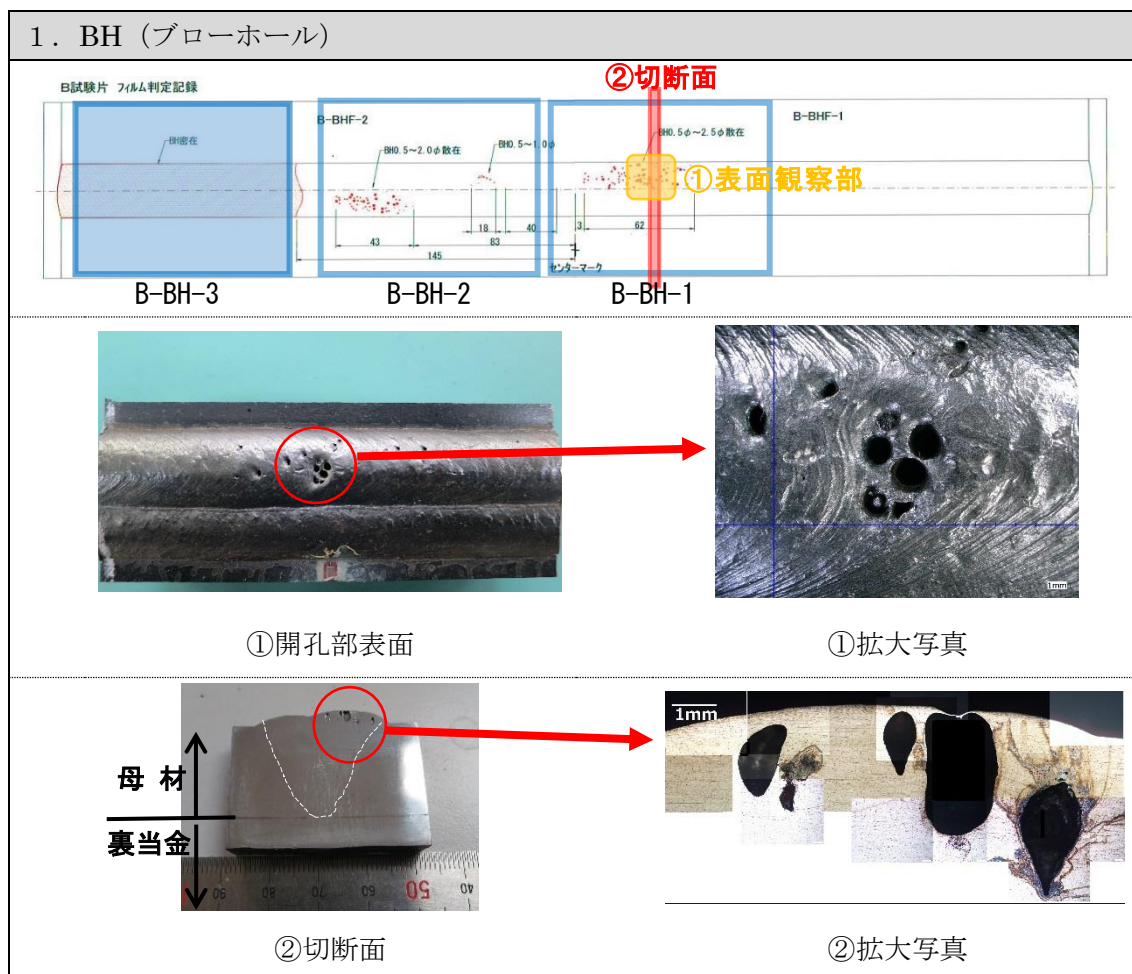
表4 破面観察結果

板厚	欠陥種類	番号	観察面	観察方法	観察結果	備考
B	BH	1	①開孔部表面 ②鏡面加工※7	①光学顕微鏡 ②光学顕微鏡	①進展なし ②進展なし	BH 最大 2.5φ
A	IP	1	鏡面加工※7	光学顕微鏡	進展なし	IP 最大 104mm
A	CLR	2	破断部※8	電子顕微鏡	進展なし	C 最大 7 mm
A	CLF	2	破断部※8	電子顕微鏡	進展なし	C 最大 20mm
A	UC	1	①表面 ②破断部※8	①光学顕微鏡 ②電子顕微鏡	①進展なし ②進展なし	全線アンダーカット
B	LF	1	鏡面加工※7	光学顕微鏡	進展なし	LF 最大 100mm

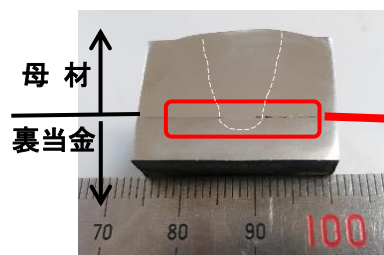
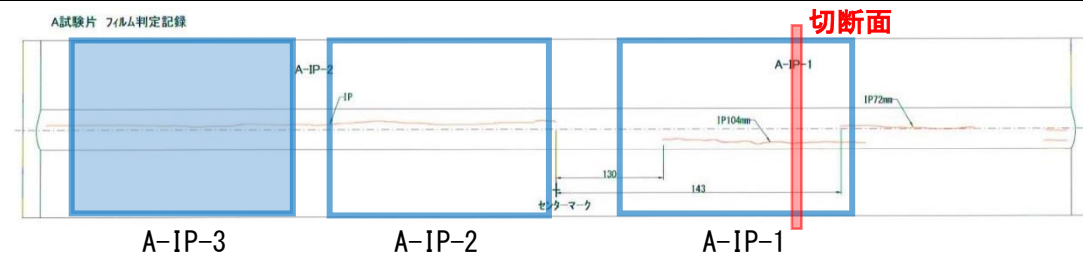
※7 バンドソーを用いて切断後、切断面を鏡面加工し観察した。

※8 液体窒素を用いて冷却後に破断し、破断面を観察した。

表5 破面観察写真



2. IP (初層溶け込み不良)

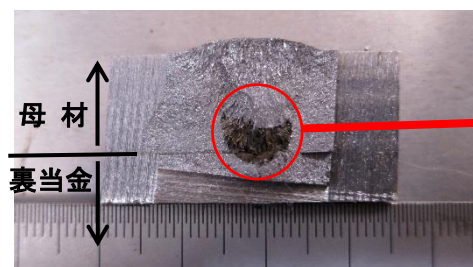
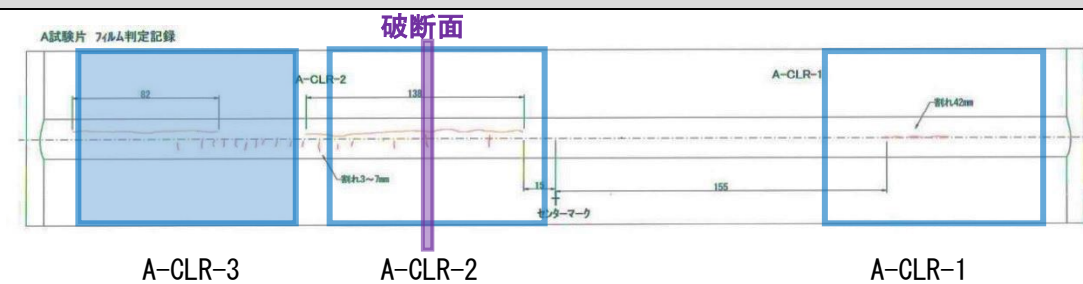


切断面

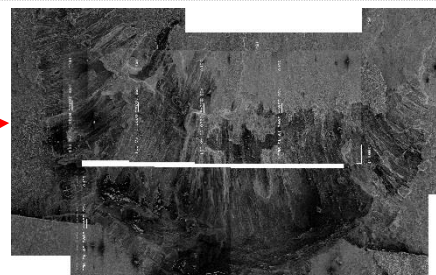


拡大写真

CLR (初層割れ)

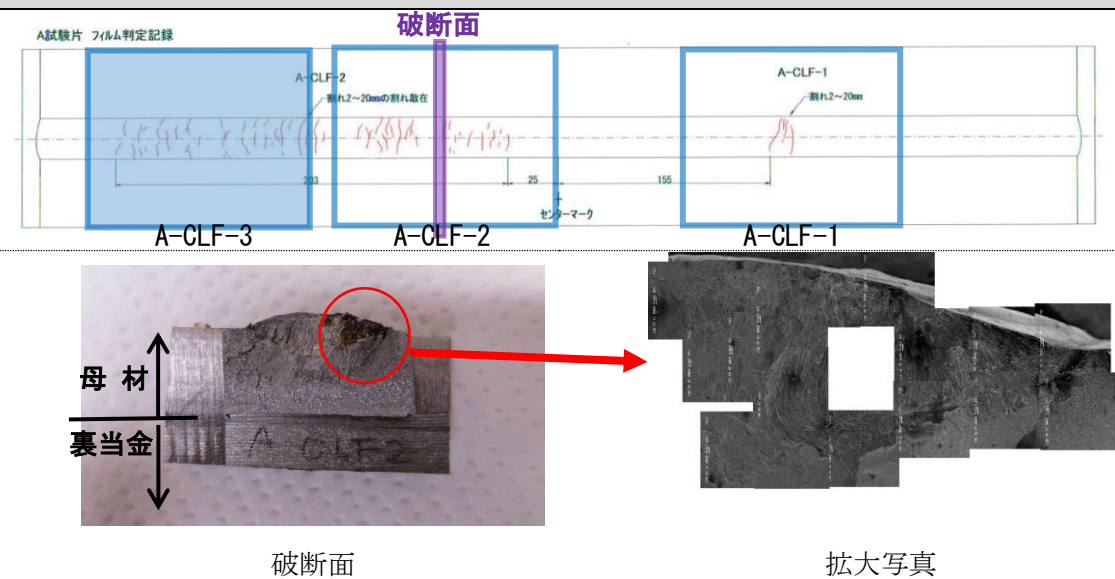


破断面

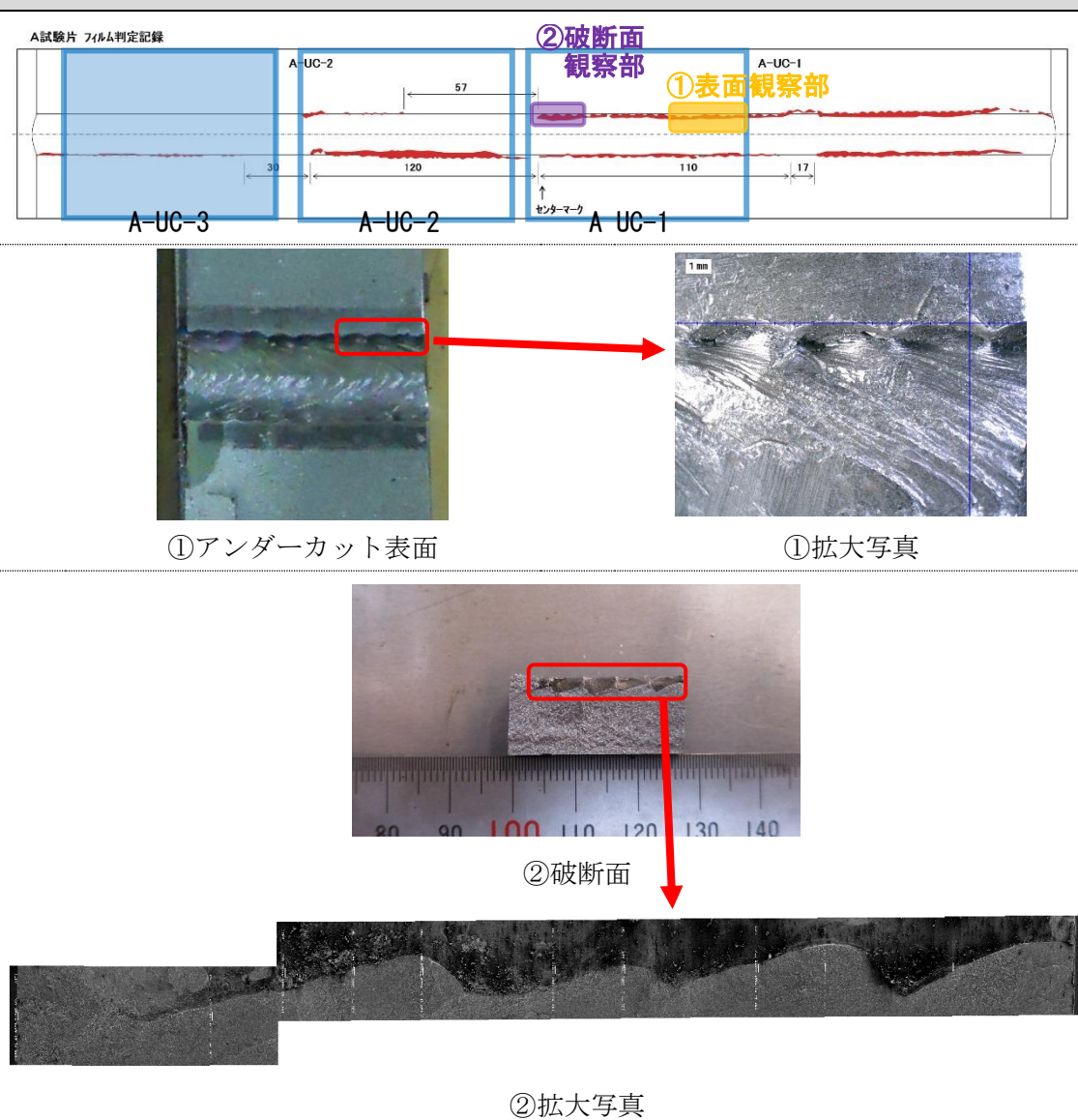


拡大写真

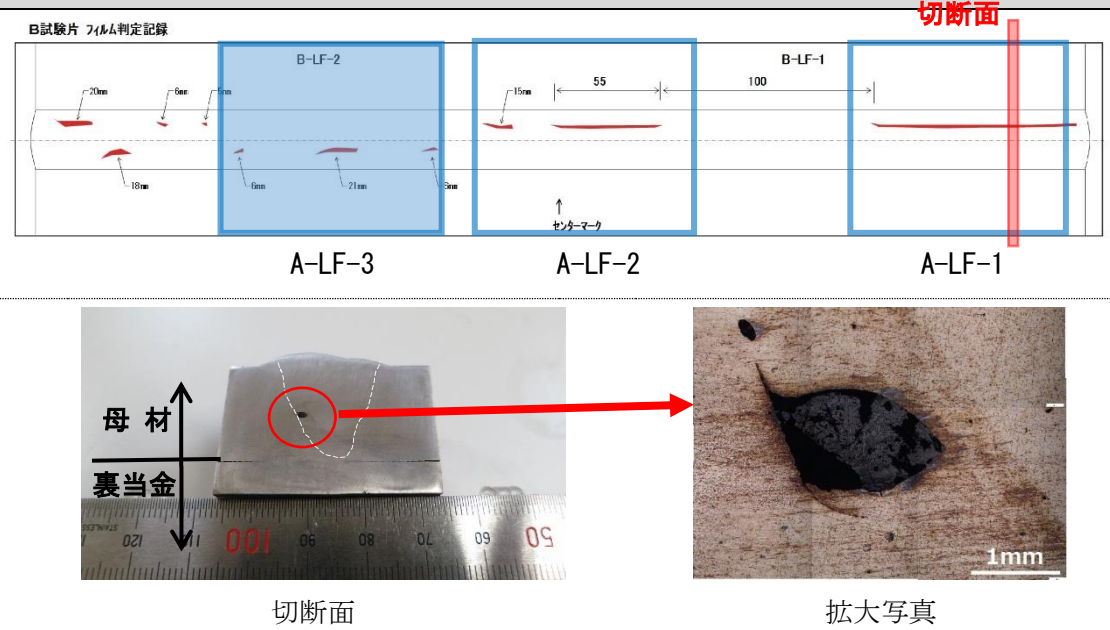
4. CLF（最終層割れ）



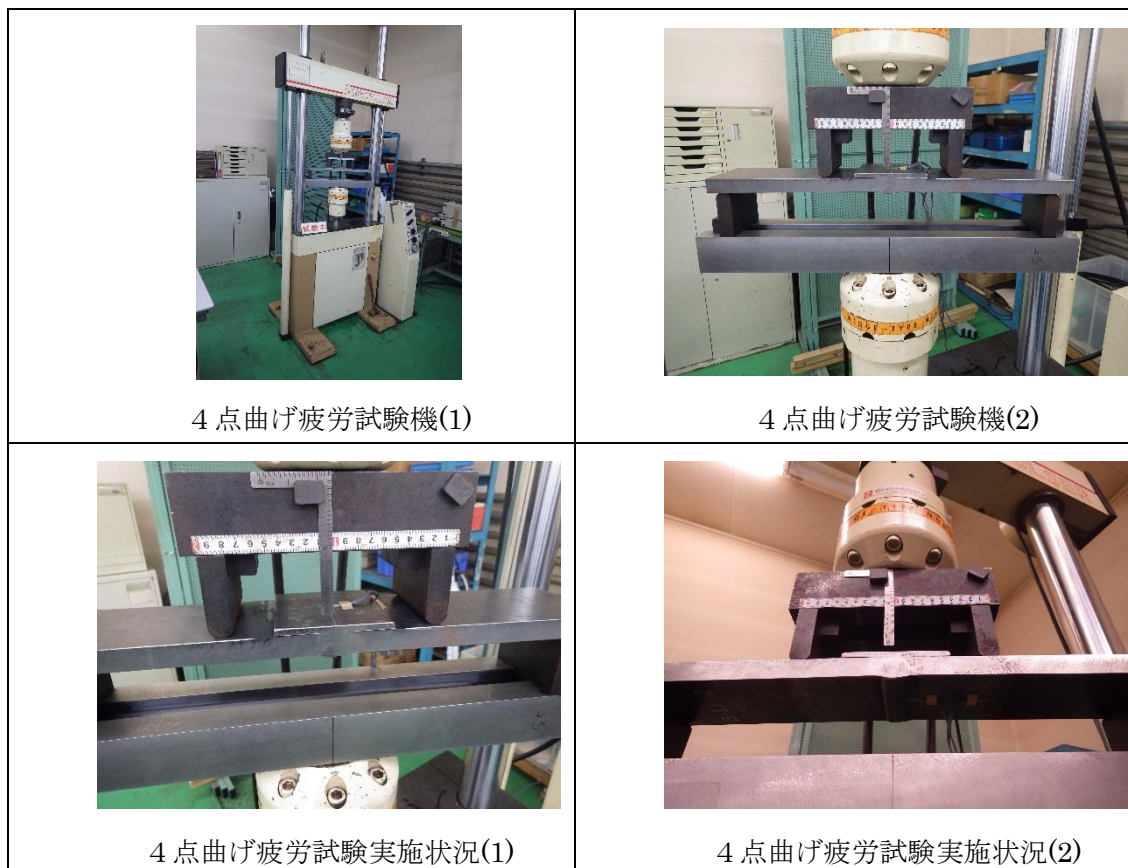
5. UC（アンダーカット）



6. LF（融合不良）



6. 疲労試験実施状況





引張疲労試験機(1)



引張疲労試験機(2)



引張圧縮疲労試験実施状況(1)



引張圧縮疲労試験実施状況(2)

7. 破面観察実施状況



試験片の切断(1)



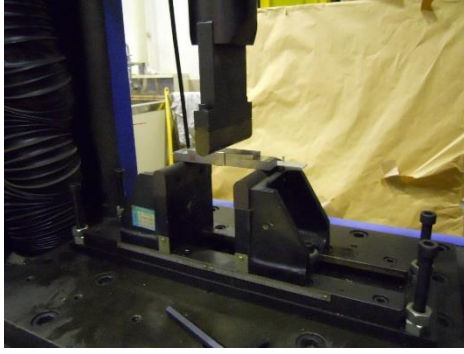
試験片の切断(2)



試験片切断状況



液体窒素による試験片の冷却



冷却試験片の破断



破断直後

超音波探傷法によるコーティング上からのタンク底部溶接部検査に係る検討 実タンクにおける探傷性能の確認試験結果について

IHI

2018年6月27日

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構
株式会社 IHI検査計測

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

1. 目 的

平成29年度に消防庁殿試験片(12mmと20mmの裏当て継手)を工場での性能試験を実施した。
平成30年度は、実タンクでのフィールド試験にて、機器の性能や運用方法、データ評価方法について確認することを目的とした。



- 走行装置操作盤
- 探傷装置制御PC
- フェーズドアレイ超音波探傷装置
- 制御BOX
- 接触媒質用水タンク
- レーザー受光部

当該装置 外観

IHI

2. 現地試験日程

現地試験は5月16日から5月23日で下記の項目について実施した。
探傷試験は5月17日から5月22日の5日間で行った。

現地試験日程

	5/14		5/15		5/16		5/17		5/18		5/19		5/20		5/21		5/22		5/23	
	月		火		水		木		金		土		日		月		火		水	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
機材準備・発送（六ヶ所）	←				→															
現地移動				↔																
安全教育、入構手続き						↔														
荷物開梱 準備						↔														
探傷試験							←								→					
現場片づけ・結果報告																		↔		
機材積込（横浜行き）																			↔	
横浜移動																				↔

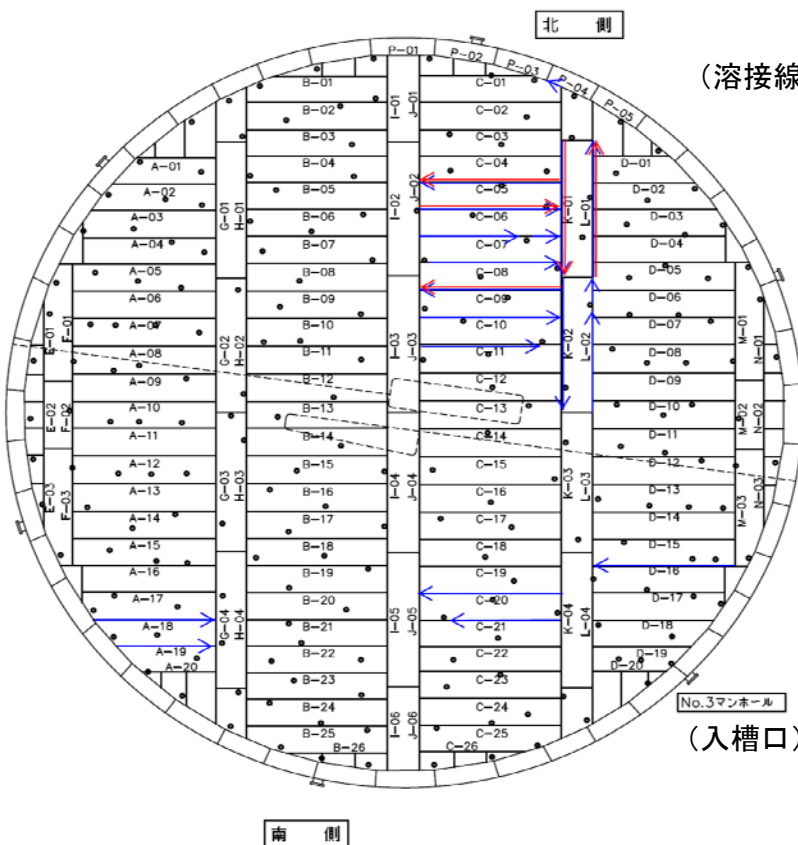
IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

3. 検査実施箇所（No.39タンク）

むつ小川原石油備蓄基地 No.39タンク



（溶接線番号は弊社独自のものの）

→ Aパターン探傷

→ Bパターン探傷

（探傷パターンについては後述）



（入槽口）

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

4. 探傷方法

探傷の方法は、平成29年度に工場にて実施した性能試験と同じ方法の超音波フェーズドアレイで実施し、縦割れきず検出用のAパターン、横割れきず検出用のB-2パターン、斜めきず検出用B'-2パターンとした。また、超音波フェーズドアレイの設定条件も平成29年度と同様条件で実施した。

4-1.探傷条件

- ①探傷(走行)速度:20mm/s(溶接線一本の検査に約12分)
- ②データ採取ピッチ:2mm
- ③超音波探触子:5MHz 32chリニア配列のフェーズドアレイ探触子
- ④接触媒質:水道水
- ⑤基準感度:長さ6mm、深さ3mm、幅1mmの表面開口スリットのエコー高さ80%
- ⑥探傷感度:Aパターン:基準感度+9dB、Bパターン:基準感度+21dB(塗膜補正)
- ⑦探傷長さ:約15m
(始点を横断する溶接線の中心から、溶接線終点を横断する溶接線の中心までの距離)
- ⑧途中に障害物があり走行できない場合:一旦検査を中断し障害物を迂回した後に再探傷を実施
(一部、検査を続行しながら障害物の迂回を試行したデータあり)

IHI

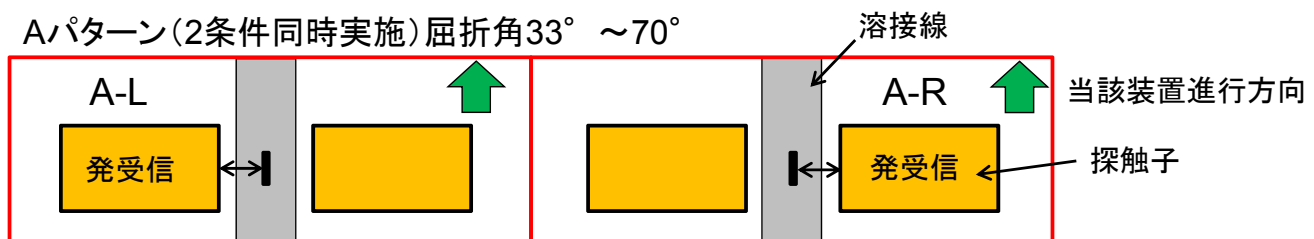
Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

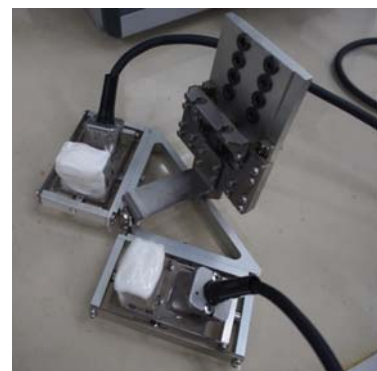
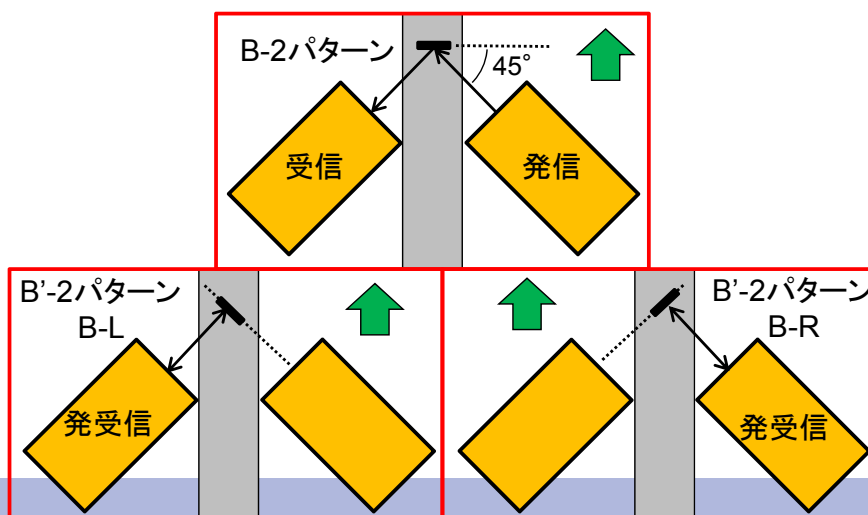
4. 探傷方法

4-2.探触子の配置と探傷パターン

Aパターン(2条件同時実施)屈折角 $33^{\circ} \sim 70^{\circ}$



Bパターン(3条件同時実施)屈折角 $40^{\circ} \sim 73^{\circ}$



Bパターンの探触子配置

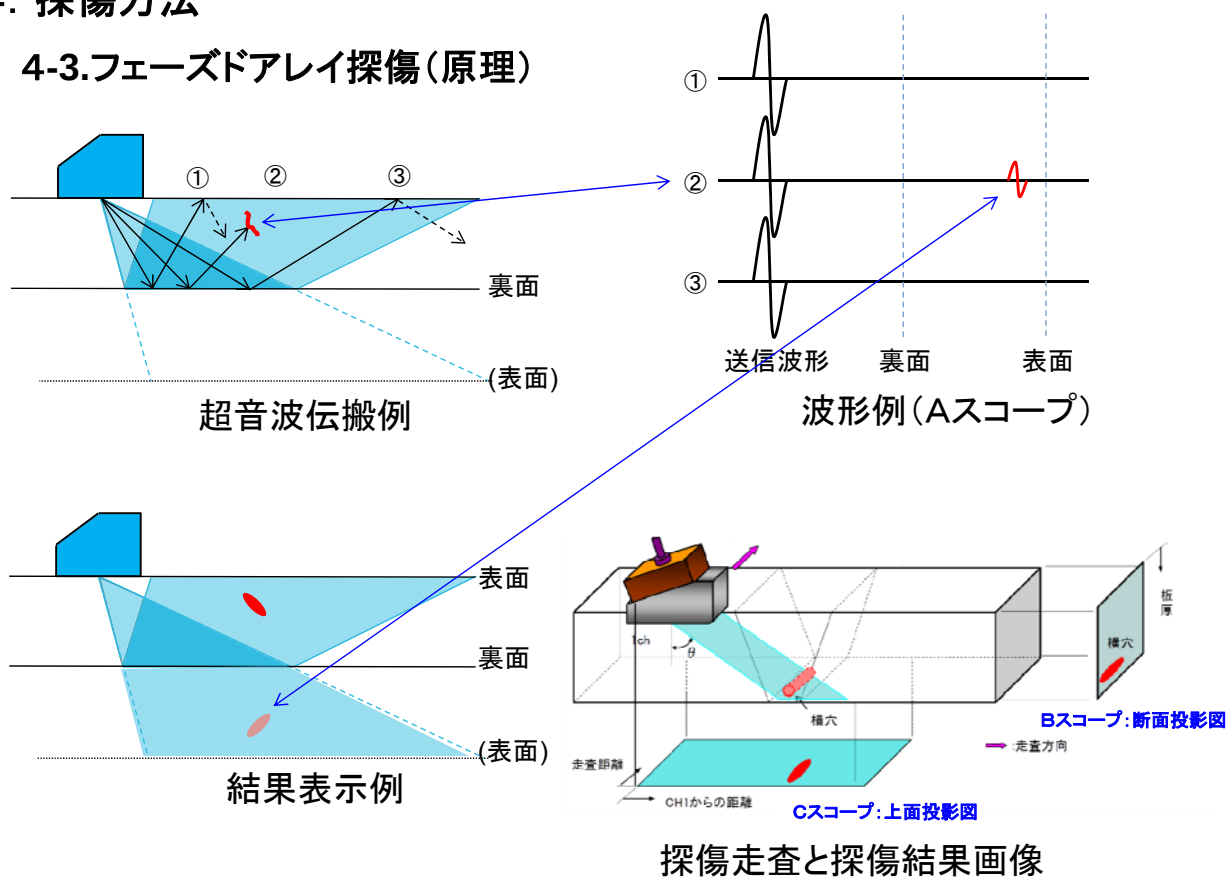
IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

4. 探傷方法

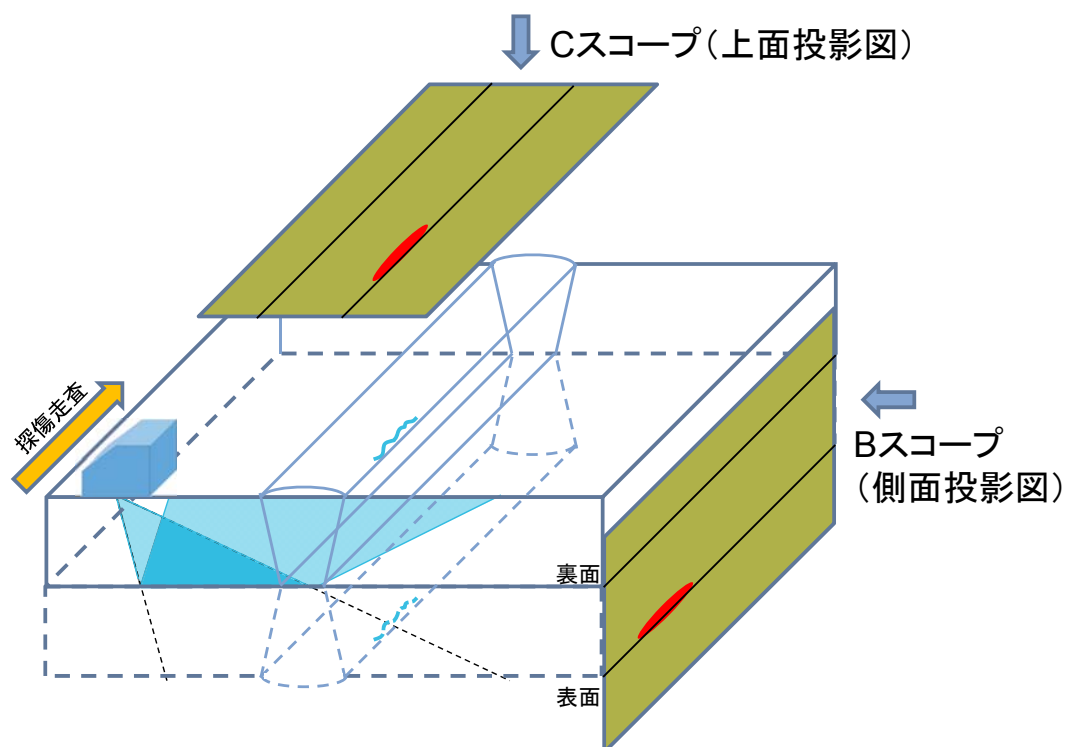
4-3.フェーズドアレイ探傷(原理)



IHI

4. 探傷方法

4-3.フェーズドアレイ探傷(探傷結果の表示)



IHI

4. 探傷方法

4-4. 現地試験の探傷作業状況



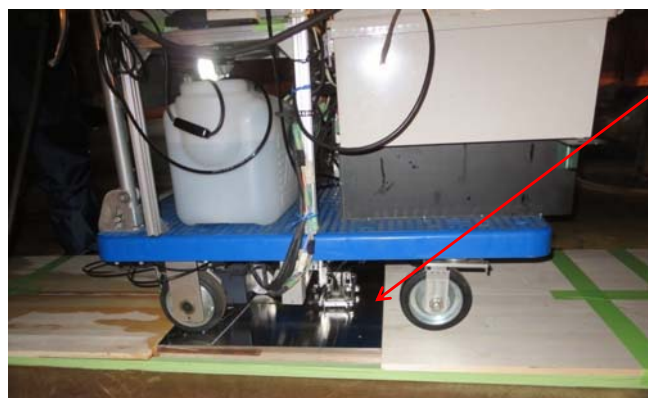
IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

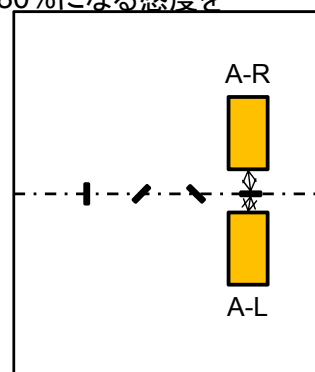
5. 感度校正結果

5-1. Aターン感度校正結果

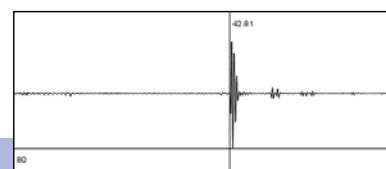
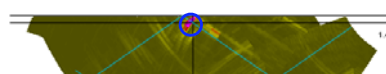
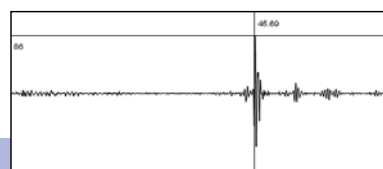
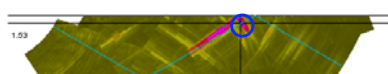


A-L

校正用試験体
長さ6mm、深さ3mm、幅1mmのスリットを導入
→このスリットの指示が80%になる感度を
基準感度とした



A-R



I

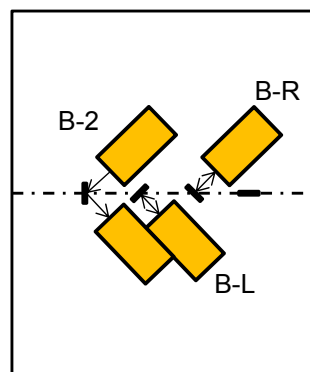
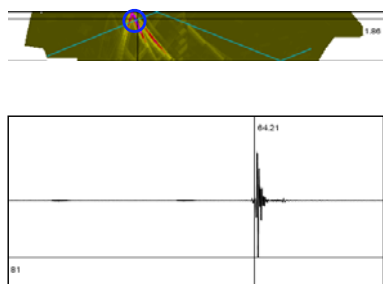
Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

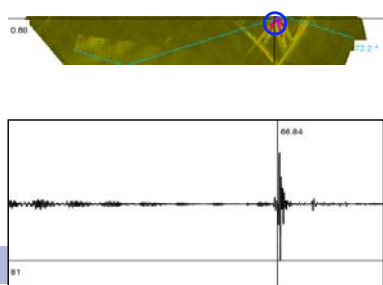
5. 感度校正結果

5-2.Bパターン感度校正結果

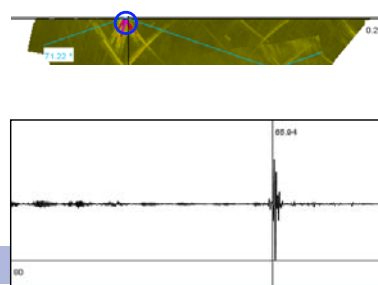
B-2パターン



B'-2パターン B-L



B'-2パターン B-R

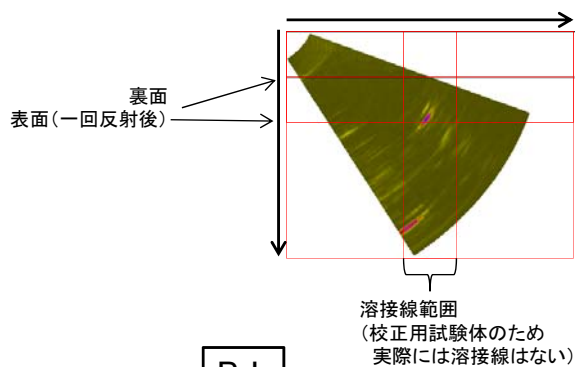


Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

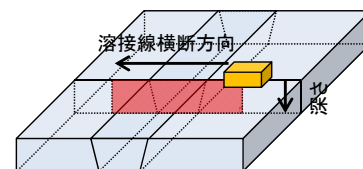
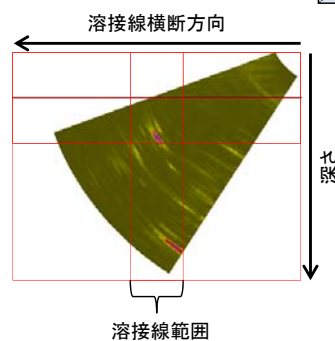
株式会社IHI検査計測

感度校正結果 断面像

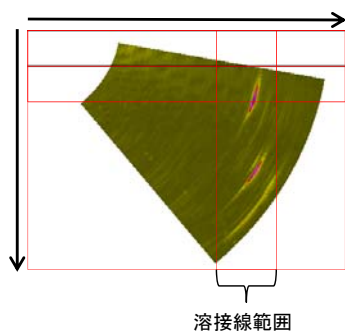
A-L



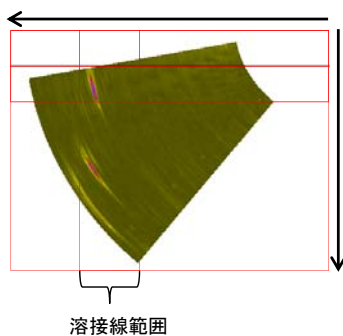
A-R



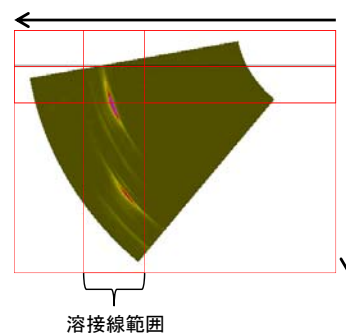
B-L



B-R



B-2



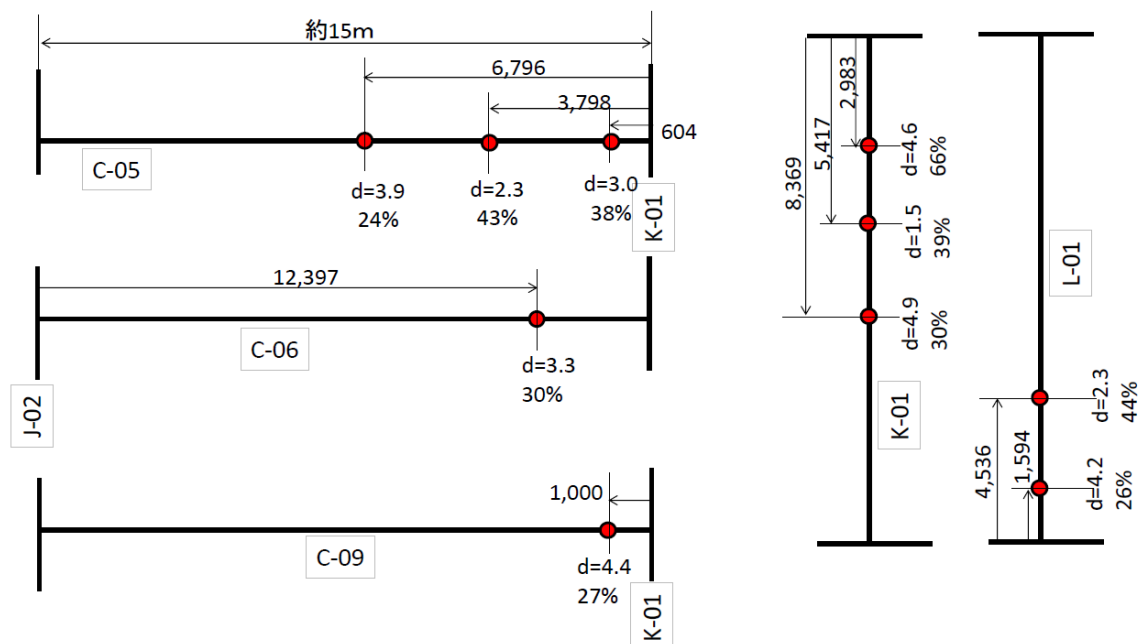
溶接線範囲
(校正用試験体のため
実際には溶接線はない)

IHI

6. 探傷結果

6-1.探傷結果指示

長さ15mの溶接線で溶接線番号C-05,C-06,C-09,K-01,L-01の5ラインの内、C-05:3ヶ所、C-06:1ヶ所、C-09:1ヶ所、K-01:3ヶ所、L-01:2ヶ所の合計10ヶ所に指示が得られた。
以下に指示の位置図を示す。



IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

6. 探傷結果

6-2.探傷パターンによる指示

10ヶ所の指示が得られた探傷パターンを以下に示す。その結果、Bパターンでは指示が得られていない、全てがAパターン探傷での指示であった。従って、溶接線に対し長手方向のきず、または介在物からの反射と考えられる。

溶接No	C-05			C-06	C-09
位置[mm]	604	3,798	6,796	12,396	1,000
A-R	○	×	○	○	○
A-L	△<20%	○	○	×	×
B-2	×	×	—	×	×
B-R	×	×	—	×	×
B-L	×	×	—	×	×

溶接No	K-01			L-01	
位置[mm]	2,983	5,417	8,369	1,594	4,536
A-R	×	×	×	×	×
A-L	○	○	○	○	○
B-2	×	×	×	×	×
B-R	×	×	×	×	×
B-L	×	×	×	×	×

○: 指示あり
△: <20%
×: 指示なし
—: 探傷未実施

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

6-3.指示波形

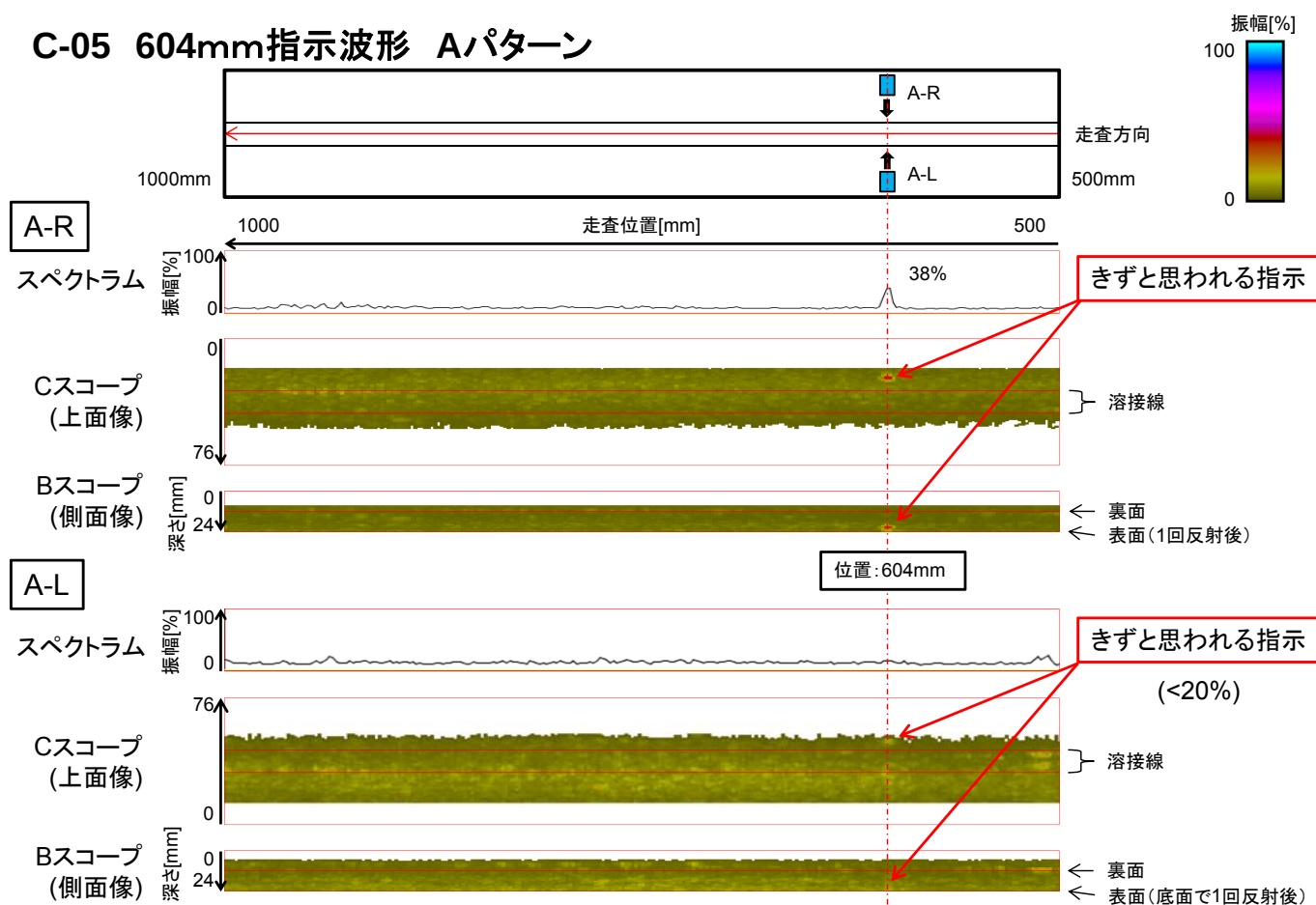
探傷結果、指示が得られた部位のAパターンの指示波形を次に示す。

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

C-05 604mm指示波形 Aパターン

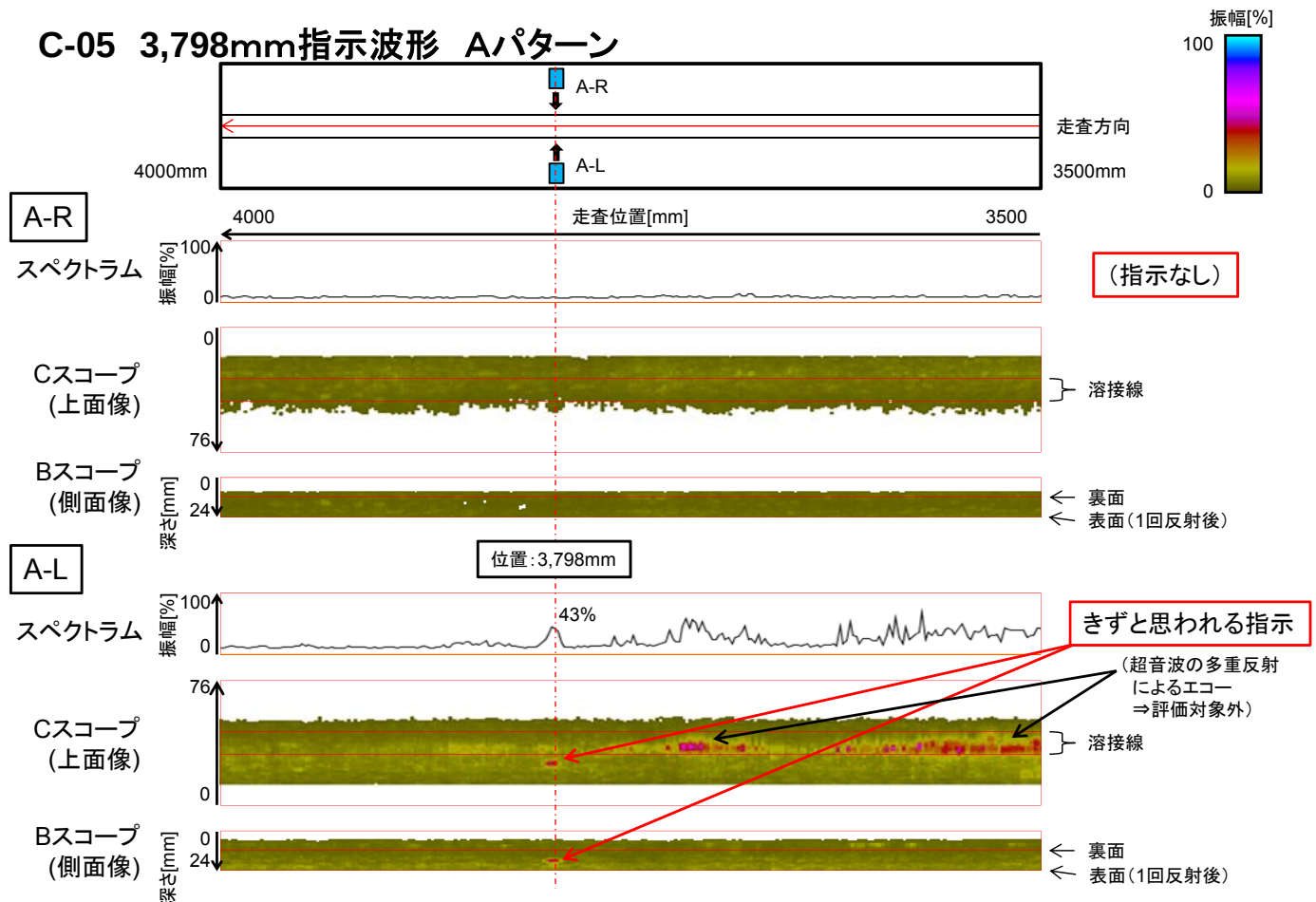


IHI

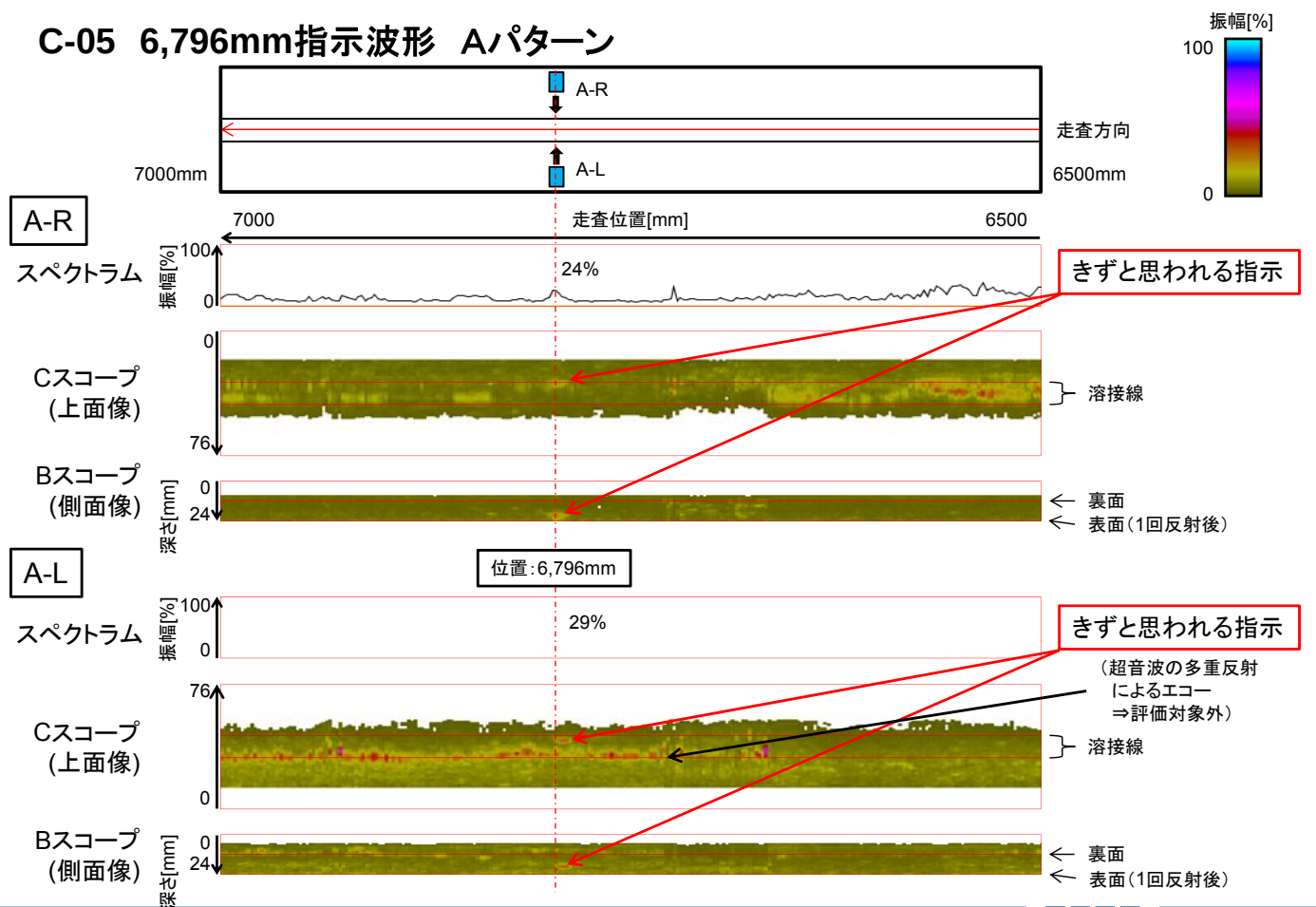
Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

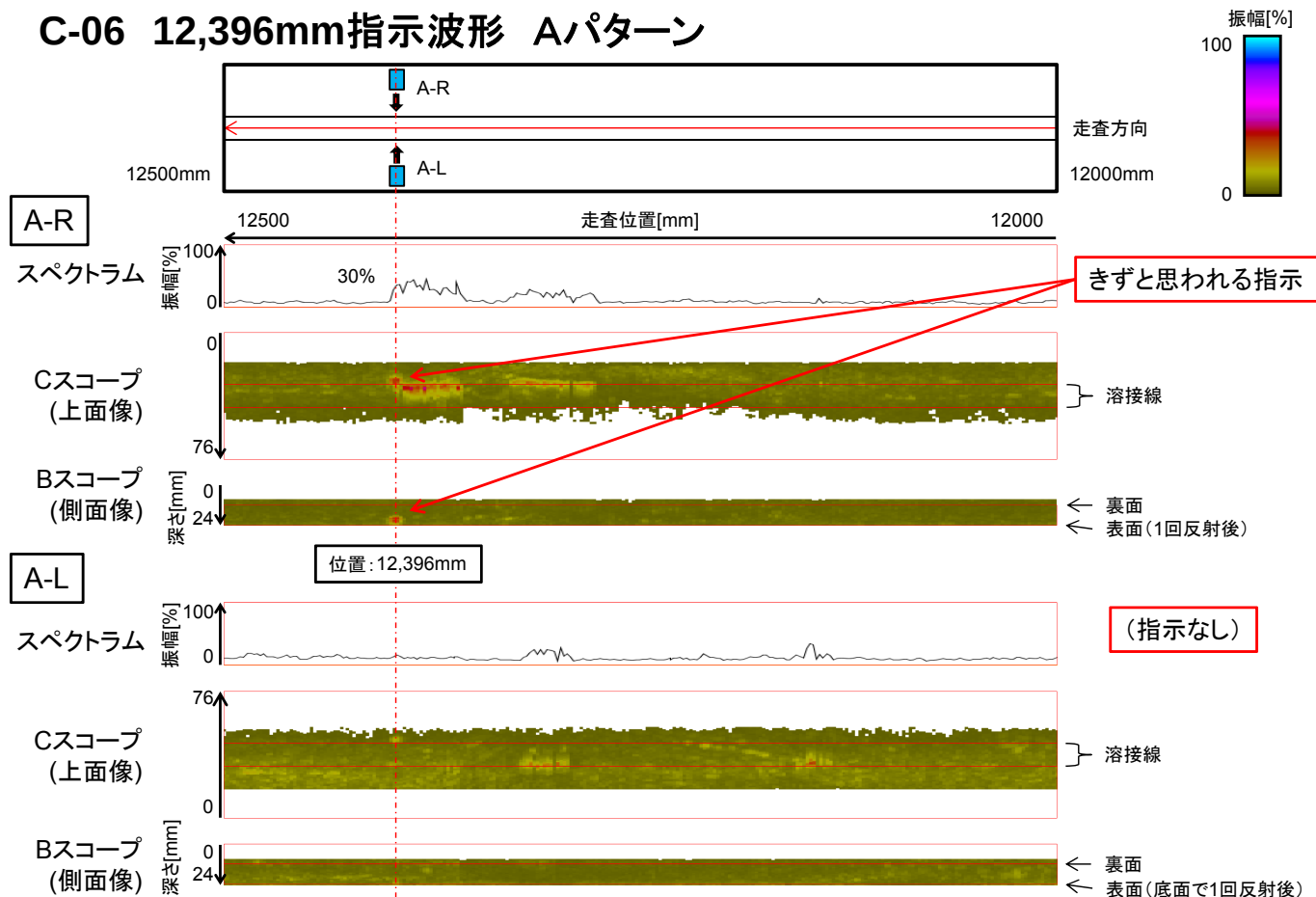
C-05 3,798mm指示波形 Aパターン



C-05 6,796mm指示波形 Aパターン



C-06 12,396mm指示波形 Aパターン

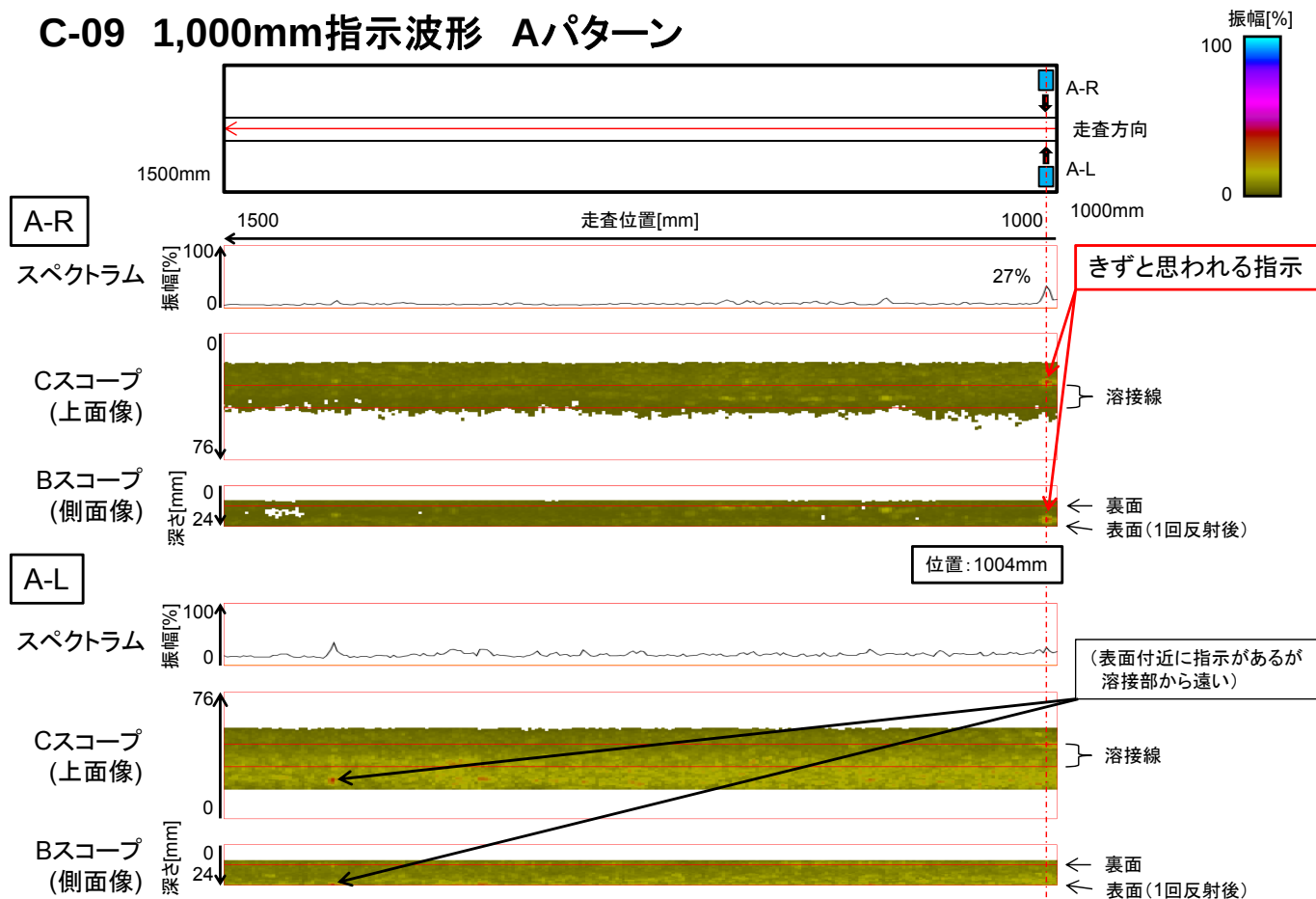


IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

C-09 1,000mm指示波形 Aパターン

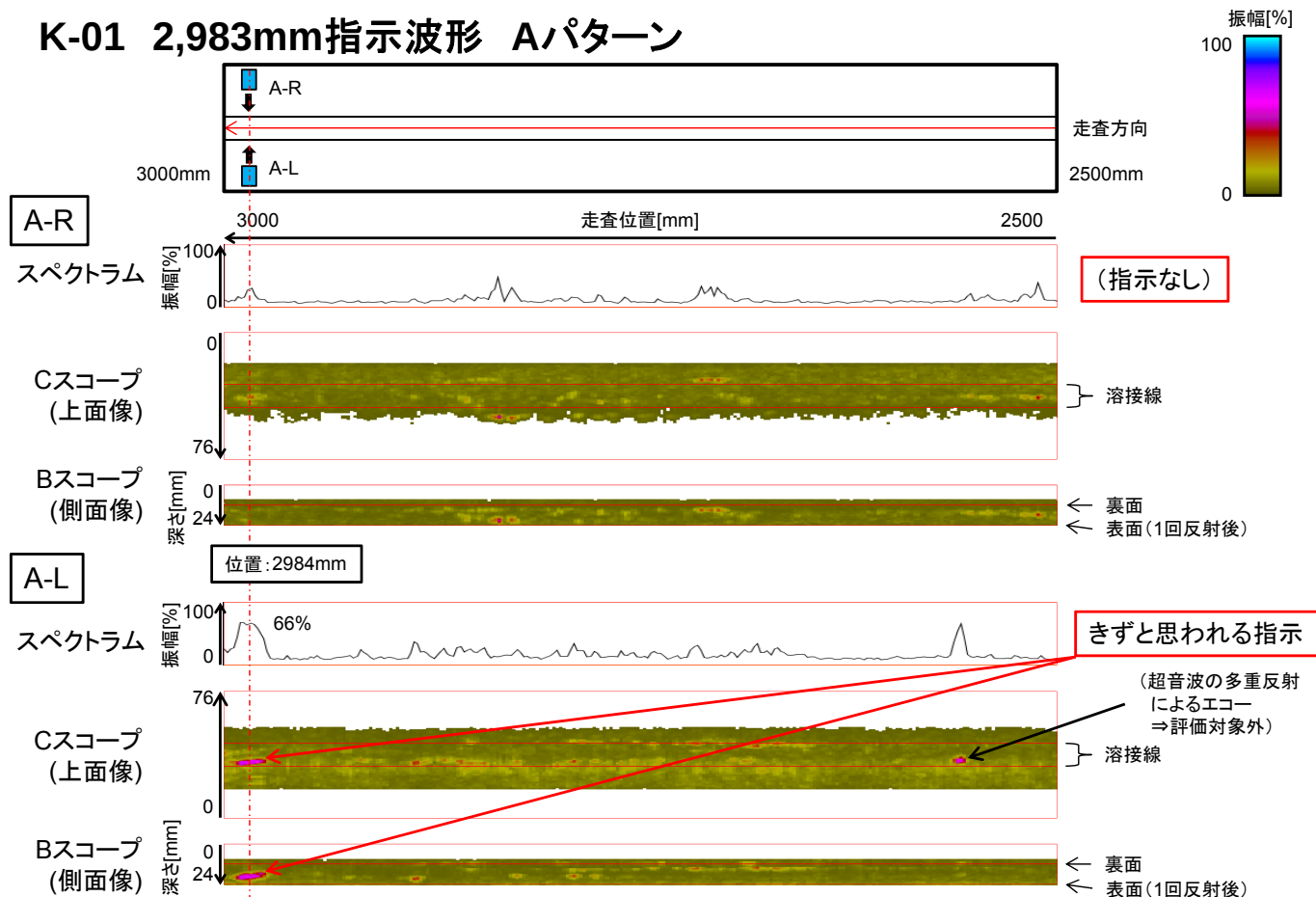


IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

K-01 2,983mm指示波形 Aパターン

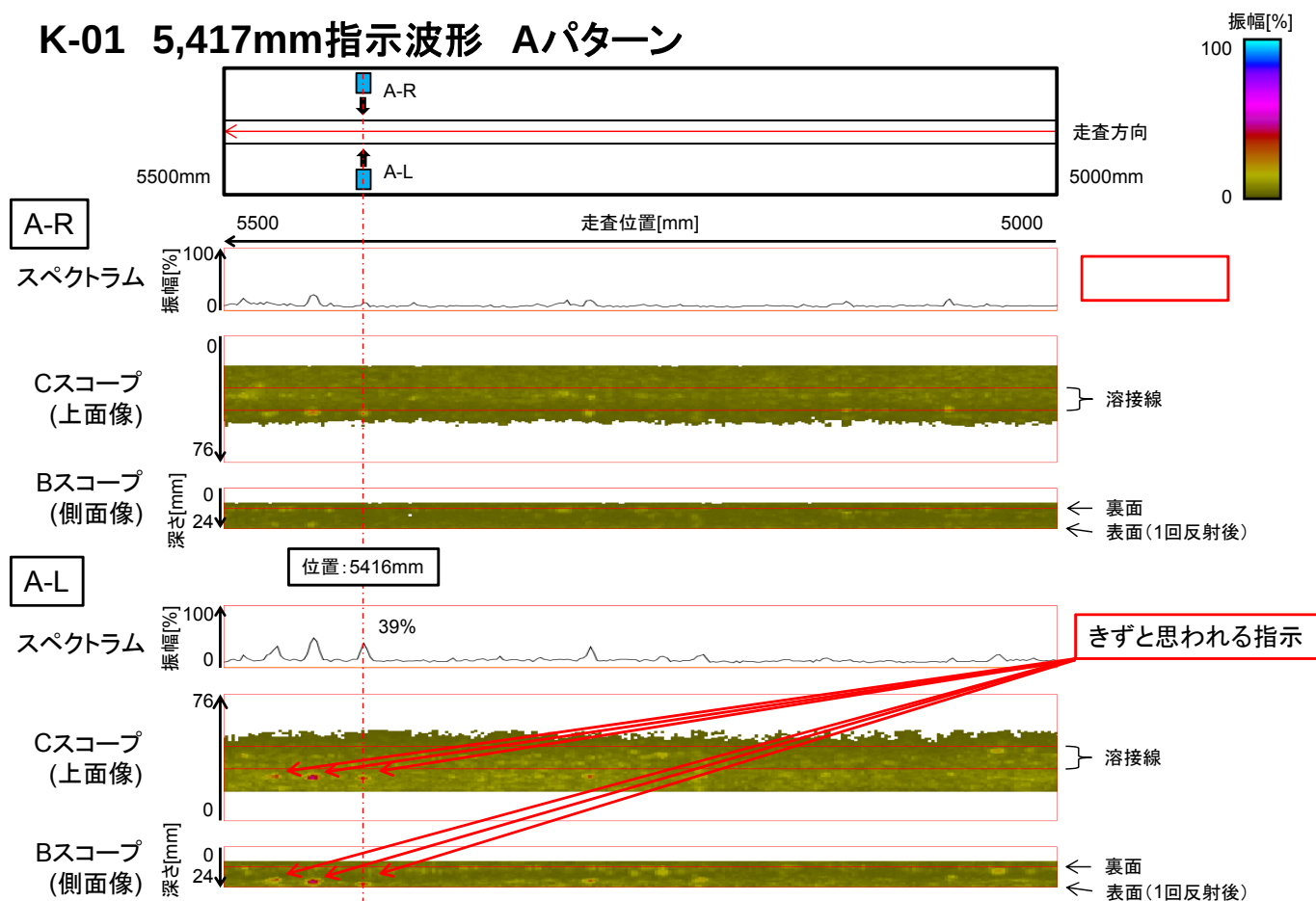


IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

K-01 5,417mm指示波形 Aパターン

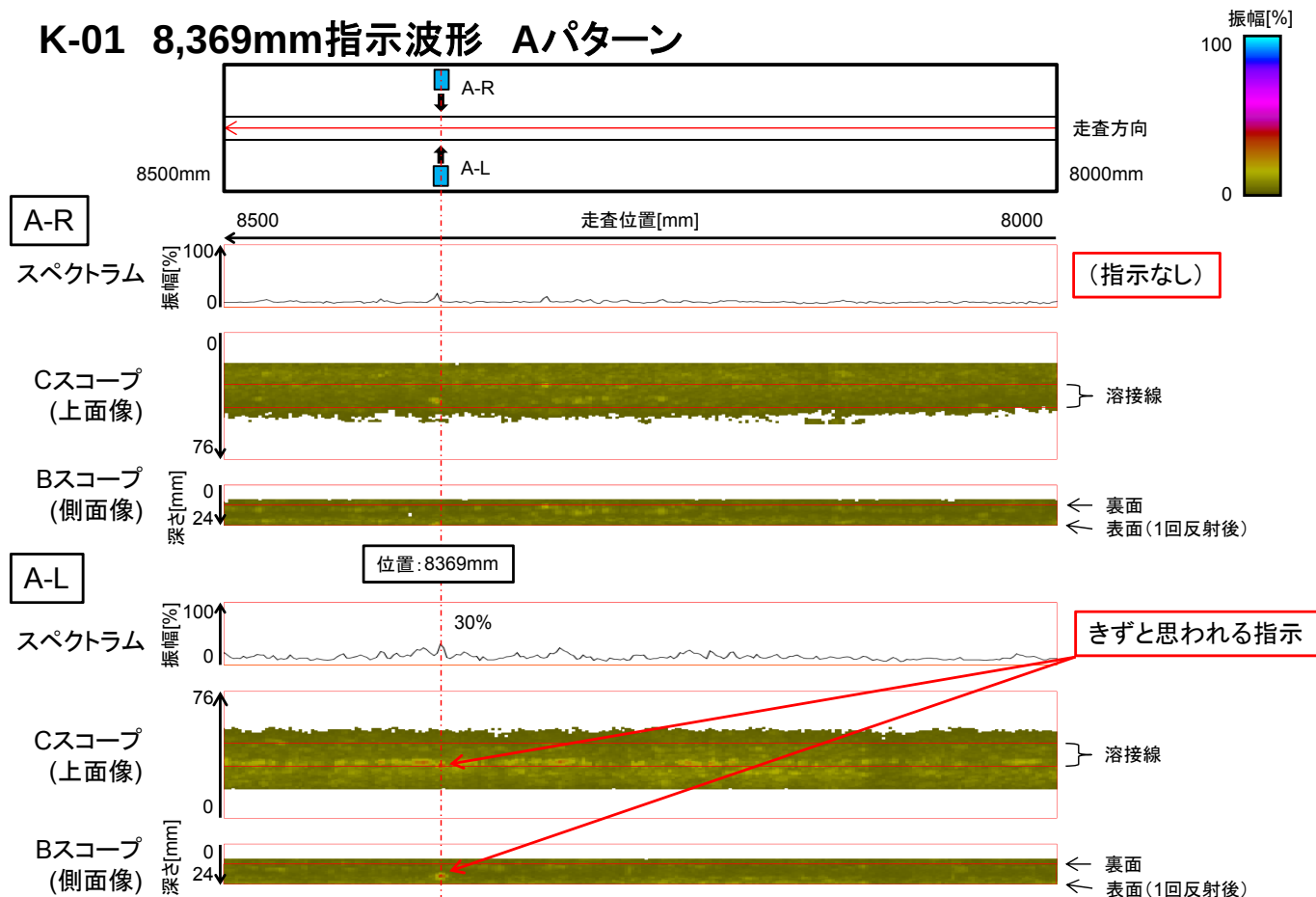


IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

K-01 8,369mm指示波形 Aパターン

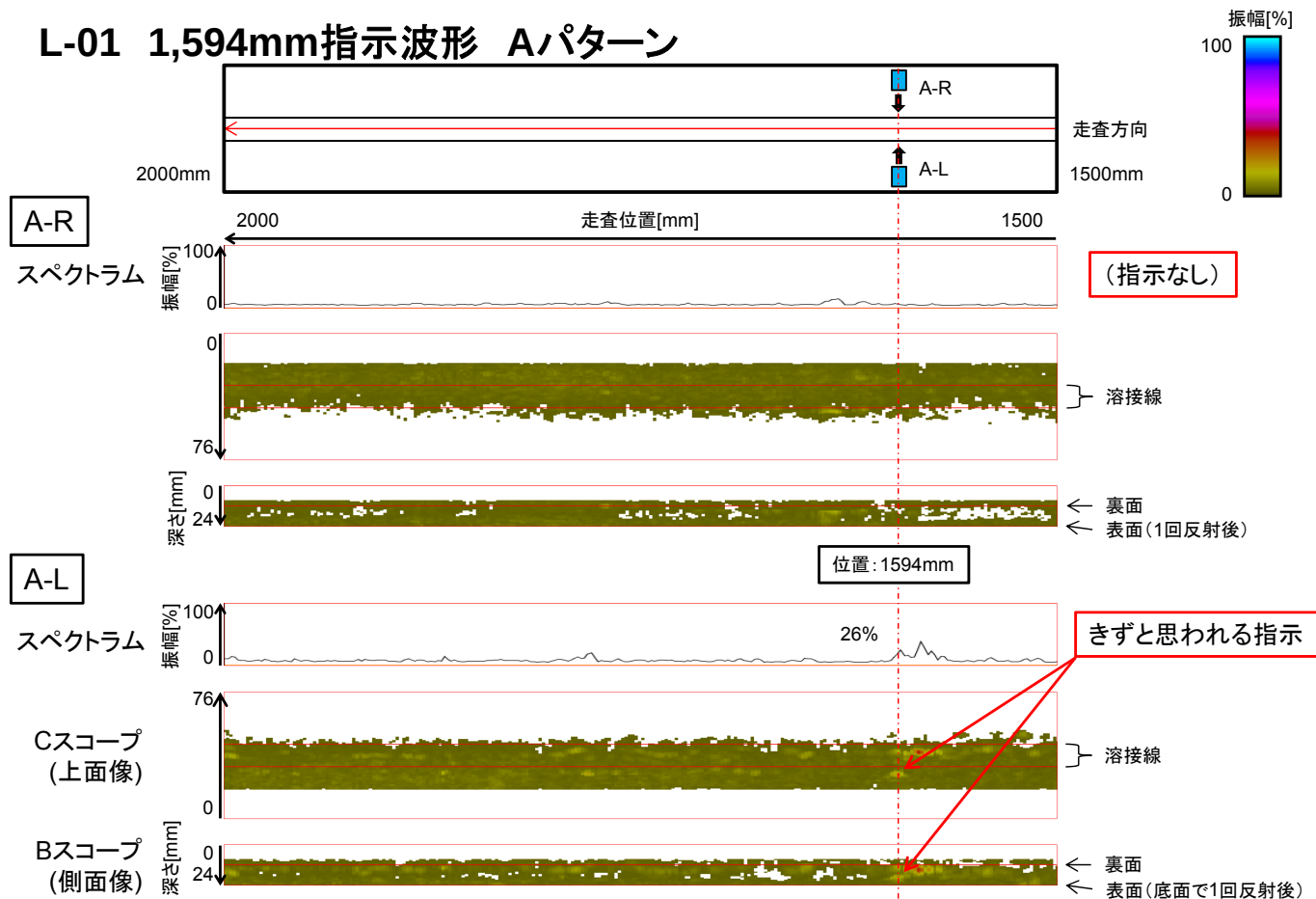


IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

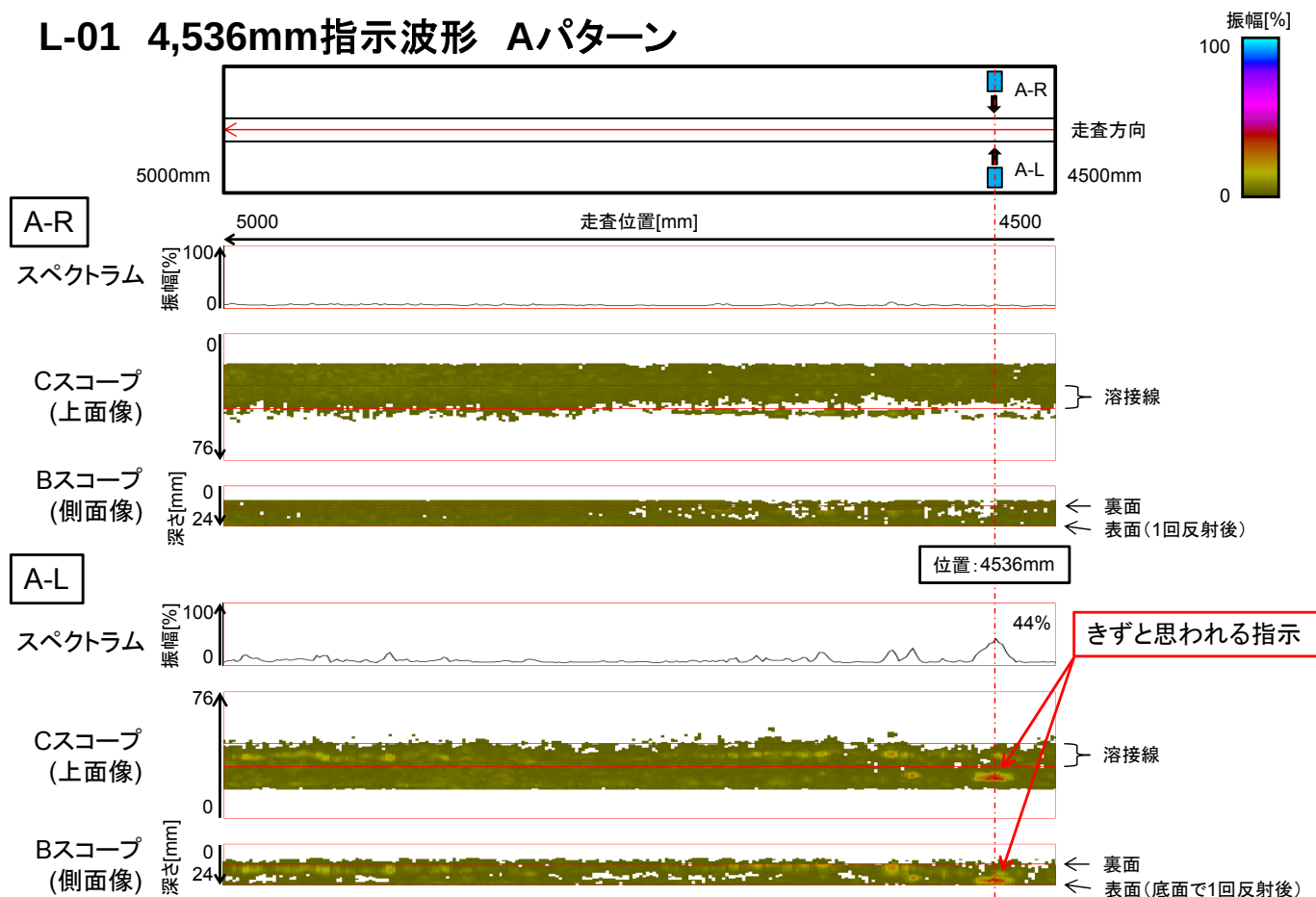
株式会社IHI検査計測

L-01 1,594mm指示波形 Aパターン



IHI

L-01 4,536mm指示波形 Aパターン

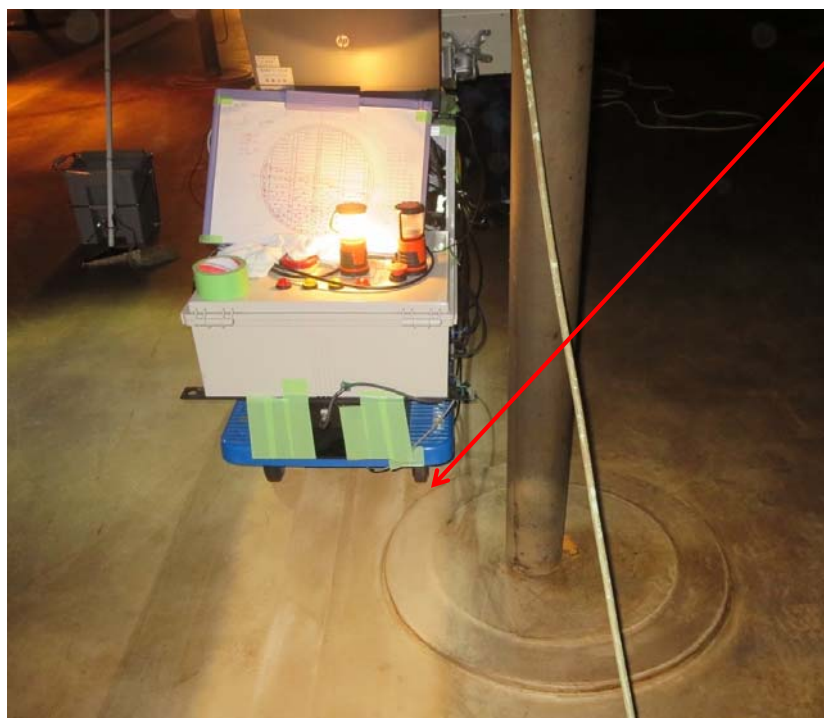


IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

7. 実機試験での障害物箇所について



天井支柱の土台が溶接線に接近し
台車タイヤに干渉する部分は
台車が走行できない

- ・台車の横幅を小さくすることで
適用可能な範囲を拡大できる
- ・台車の適用が困難な場合は
探触子を取り外し、手動探傷にて
実施する

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

8. 今後の課題

今後は、

- 実タンクでの2回目のフィールド試験
 - 塗膜厚さの影響試験
 - 性能規定及び実機運用条件の整理
- を実施予定です。

以 上

IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

補足資料(多重反射エコーについて)

IHI

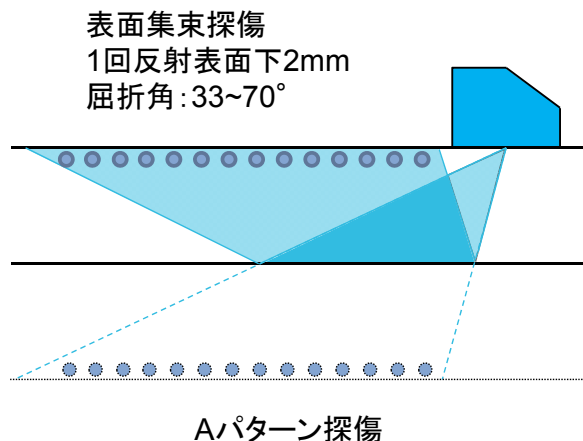
Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

当該装置の超音波フェーズドアレイのパターン模式図

当該装置での超音波フェーズドアレイ探傷の模式図を以下に示す。

今までの、試験片などの試験の結果から、Aパターン探傷の超音波屈折角度は、 $33^{\circ} \sim 70^{\circ}$ の範囲が適正であり、Bパターン探傷では、屈折角 $40^{\circ} \sim 73^{\circ}$ が適正である結果が得られている。

● : 集束点



セクタスキャン: 屈折角 $40 \sim 73^{\circ}$
ビーム発信数33点(1° ピッチ)

Bパターン探傷

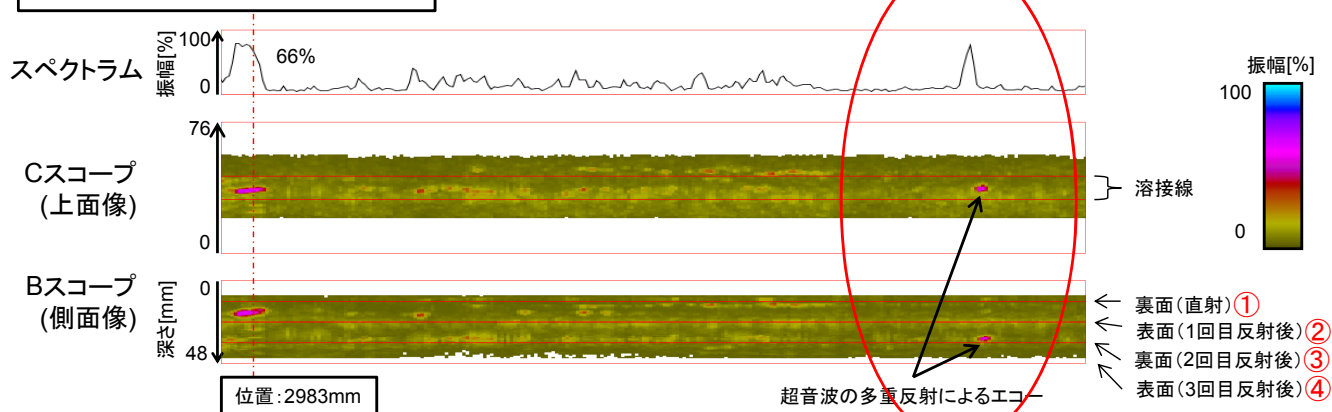
IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

多重反射エコーの評価について

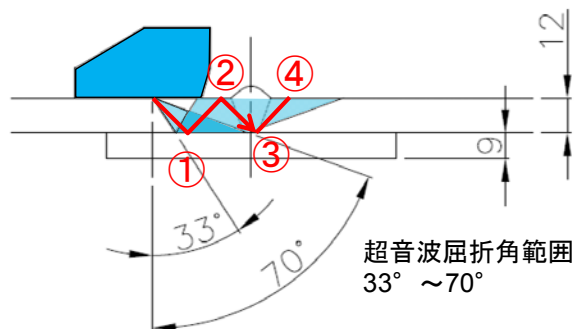
K-01 AパターンA-Lの例



評価対象は、超音波伝搬経路の①に示す直射(底板裏面)から②の一回目反射で捕える(底板表面)までとした。

②以降の超音波伝搬については、多重反射による評価対象外とする。上図に示す超音波の多重反射によるエコーは、2回目反射③の裏当金部からの反射であり、きず等の指示とは考えられない。

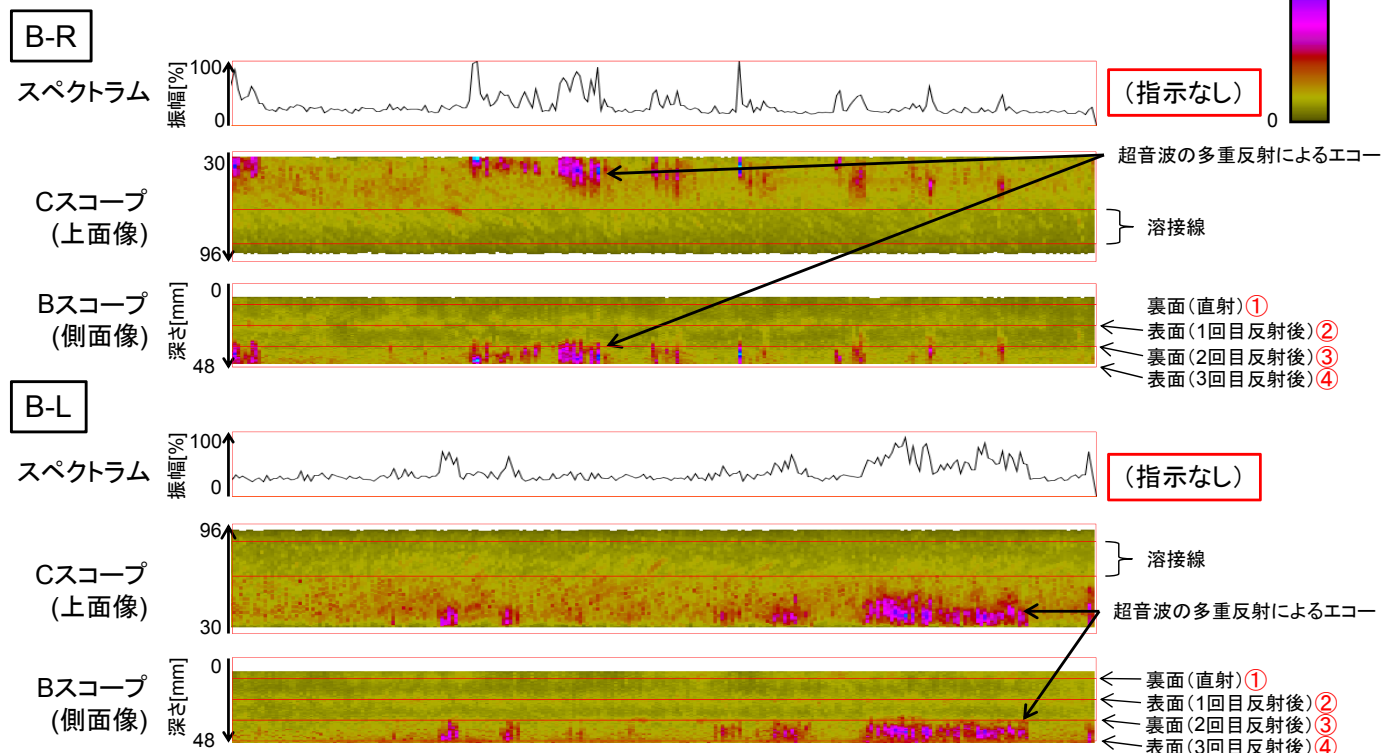
探傷結果画像の側面像のBスコープは、①裏面から②表面までの表示としているが、上面像Cスコープ上には全ての反射結果が表示される。



IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

B'-2パターンでの多重反射について



IHI

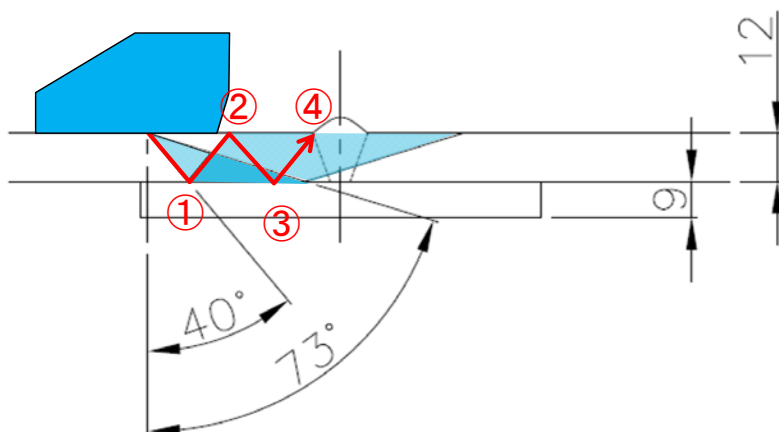
Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

株式会社IHI検査計測

B'-2パターンでの多重反射について

B'-2パターンの評価もAパターンと同様に、超音波伝搬経路の①に示す直射(底板裏面)から②の一回目反射で捕える(底板表面)までとした。

B'-2パターンでは、主に屈折角が 40° 付近の小さな角度での多重反射が多く現れている。また、③の2回目反射以降から④の3回目反射以降の多重反射が多い事がわかる。③から④にかけての反射は、超音波の広がりから、底板板厚に対して垂直に近い底板底面からの反射と考えられる。



IHI

Copyright © 2017 IHI Inspection & Instrumentation Corporation All Rights Reserved.

「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）」

3.6 コーティング上からの PA 試作機における要求性能（案）

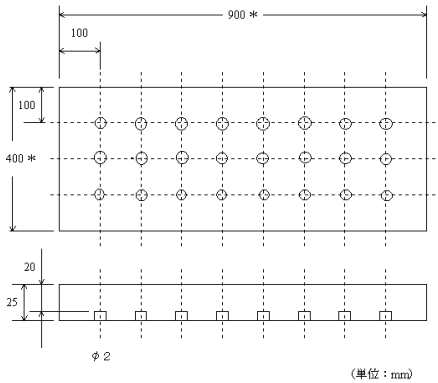
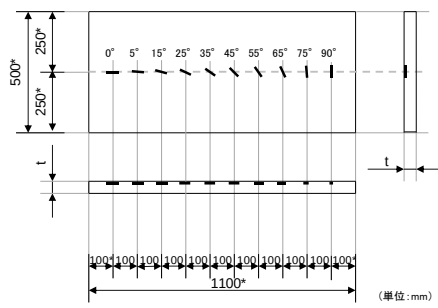
当該 P A 試作機の開発事業者から提案された要求性能（案）を下記に示す。

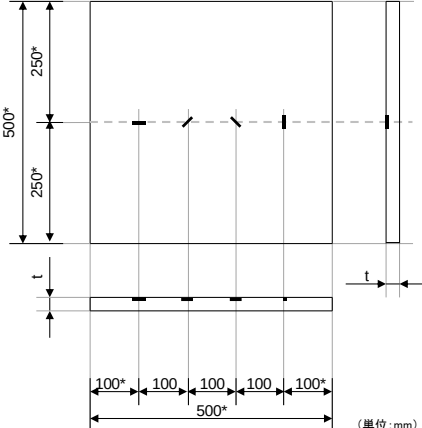
項目	連続板厚測定装置に関する性能 (平成 15 年 3 月 28 日消防危第 27 号 別添 1)	超音波探傷法によるコーティング上からのタンク底部溶接部探傷装置に関する性能	備考
性能確認	性能の確認は、始業時、終業時等に実施する位置検出精度及び腐食部検出精度を除き、原則として当該連続板厚測定装置について実施されている試験データ等を活用して行うことができるものとする。 なお、コーティング上からタンク底部の板厚を測定する場合は、コーティングの種類及び厚さを勘案した装置の適用の可否について併せて確認する必要がある。	性能の確認は、始業時、終業時等に実施する位置検出精度及び欠陥部検出精度を除き、原則として当該溶接部探傷装置について実施されている試験データ等を活用して行うことができるものとする。 なお、 コーティング上からタンク底部の溶接部試験を行うため 、コーティングの種類及び厚さを勘案した装置の適用の可否について併せて確認する必要がある。	異なる部分は赤字
用語	JIS Z2300「非破壊試験用語」による。	JIS Z2300「非破壊試験用語」による。	
試験データ等確認上の留意事項	ア 実施条件、実施方法等の明示 イ 試験データは、各 5 回以上測定した平均値。ただし、1 回でも異常表示又は不表示を示した場合は、異常表示又は不表示として扱う。 ウ コーティング上からの測定に関する性能確認にあたっては、各試験片に施工されるコーティングは、適用されるコーティングの種類及び厚さと同等の樹脂シートを使用できるものとする。	ア 実施条件、実施方法等の明示 イ 試験データは、各 5 回以上 試験 した平均値。ただし、1 回でも異常表示又は不表示を示した場合は、異常表示又は不表示として扱う。 ウ コーティング上からの試験に関する性能確認にあたっては、各試験片に施工されるコーティングは、適用されるコーティングの種類及び厚さと同等の樹脂シートを使用できるものとする。	
性能確認項目	①直線性試験 ②コーティング厚さに対する試験 ③温度安定性試験 ④時間安定性試験 ⑤電圧影響試験 ⑥位置検出精度試験 ⑦腐食部検出精度試験	① 増幅直線性試験、時間軸直線性試験、感度余裕値試験 ②コーティング厚さに対する試験 ③ 周囲温度に対する安定度試験 ④時間安定性試験 ⑤ 電源電圧変動に対する安定度試験 ⑥位置検出精度試験 ⑦欠陥部検出精度試験 ⑧ 超音波受発信確認試験（カップリングチェック）	「電圧影響試験」は「電源電圧変動に対する安定度試験」とす 「温度安定性試験」は「周囲

			温度に対する安定度試験」とする。
① 直線性試験	ア①直線性試験 【昭和 63 年 5 月 27 日付消防危第 72 号】 3-3 直線性試験 RB-T(JIS Z 2355)及び RB-D(JIS G 0801) を使用して、実厚値、厚さ計による測定値及びその差を記録する。実厚値は、マイクロメーターにより探触子の当たる部分を 3～4 点測定し、平均した厚さの小数点以下 3 桁目を四捨五入した値とする。 4-1 鋼材の測定可能範囲 3-3(直線性試験)の結果、測定範囲が連続して±0.1mm 以内である板厚範囲を鋼材の測定可能範囲として表示する。	①-1 増幅直線性試験 増幅直線性は JIS Z 2352「超音波探傷装置の性能測定方法」6.2.2 (増幅直線性)、またはこれに準じた性能測定を行い、評価は JIS Z 3060 附属書 A で規定する±3%の範囲であること。 ①-2 時間軸直線性試験 時間軸直線性は JIS Z 2352「超音波探傷装置の性能測定方法」6.1.1 (時間軸直線性)、またはこれに準じた性能測定を行い、評価は JIS Z 3060 附属書 A で規定する±1%の範囲であること。 ①-3 感度余裕値試験 感度余裕値は JIS Z 2352「超音波探傷装置の性能測定方法」6.5、またはこれに準じた性能測定を行い、エコー高さは JIS Z 3060 附属書 A で規定する 40dB の範囲であること。	JIS Z 3060 附属書 A 2.2 探傷器に必要な性能 探傷器に必要な性能は、次による。 a) 増幅直線性は、JIS Z 2352 の 6.2.2 (増幅直線性)で測定し、±3%の範囲内とする。 b) 時間軸の直線性は、JIS Z 2352 の 6.1.1 (時間軸直線性)で測定し、±1%の範囲内とする。 c) 感度余裕値は、JIS Z 2352 の 6.5 (垂直探傷の感度余

			裕値)で測定し、40 dB以上とする。
②コーティング厚さに対する試験	ア②コーティング厚さに対する試験 【昭和 63 年 5 月 27 日付消防危第 72 号】 4-2 測定可能なコーティング材の種類及び厚さ 3-4(コーティング厚さに対する試験)の結果、測定値差が±0.1mm以内であり、かつ、 3-5-1(腐食部に対する試験(1))の結果、測定値差が±0.2mm以内又は不表示となるものを測定可能なコーティング材の種類及び厚さとして表示する。 表示は、上記を満たした最大コーティング厚さとする。	②コーティング厚さに対する試験 適用しようとするコーティングの種類毎に、人工欠陥のエコー高さが 80%となるように、コーティング厚さ毎の感度調整試験を行い、感度を記録する。 感度調整試験の結果、探傷可能なコーティング種類と厚さを表示する。	
③温度安定性試験	ア③温度安定性試験 人工腐食部の板厚測定誤差が±0.1mm/20±20℃以内であること。 【昭和 63 年 5 月 27 日付消防危第 72 号】 3-6 温度安定性試験 4-4 温度安定性	③周囲温度に対する安定度試験 JIS Z 2351「超音波探傷器の電气的性能測定方法」6.1(温度に対する安定性)、またはこれに準じた性能測定を行い、温度 0℃～40℃の範囲で最小と最大とでエコー高さが 3dB 以内、時間軸で 0.1mm 以内であること。	JIS Z 2351 及び平成 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)の報告書に記載されている試験内容、評価基準を参考とした。
④時間安定性試験	ア④時間安定性試験 人工腐食部の板厚測定誤差が±0.1mm/3H 以内であること。 【昭和 63 年 5 月 27 日付消防危第 72 号】	④時間安定性試験 電源投入後、3 時間以上、1 時間毎に測定を行い、計測値が最大と最小とでエコー高さが 1dB 以内、時間軸で 0.1mm であること。	平成 22 年度タンク開放検査の合理化に関

	3-7 時間安定性試験 4-5 時間安定性		する調査(コーティング上からの溶接線検査)の報告書に記載されている試験内容、評価基準を参考とした。
⑤ 電圧影響	イ 電圧影響試験 R B - E 試験片 (JISG0801) 又は R B - T 試験片 (JISZ2355) から任意の厚さが選択され、連続板厚測定装置の定格電圧で厚さ測定を行ったときの測定値と、当該連続板厚測定装置の許容電圧の上限及び下限における測定値との差が、 ± 0.1 mm 以内であること。	⑤ 電源電圧の変動に対する安定度試験 電源電圧の変動に対する安定度は JIS Z 2351「超音波探傷器の電氣的性能測定方法」6.2(電源電圧に対する安定性)、またはこれに準じた性能測定を行い、定格電圧 $\pm 10\%$ の範囲内での感度変化は、 ± 1 dB の範囲内、時間軸の移動量は、フルスケールの $\pm 2\%$ の範囲内であること。	JIS Z 3060 付属書 A 2.2 探傷器に必要な性能 探傷器に必要な性能は、次による。 d) 電源電圧の変動に対する安定度は、JIS Z 2351 の簡条 6.2 (電源電圧に対する安定性)で測定し、定格電圧 $\pm 10\%$ の範囲内での感度変化は、 ± 1 dB の範囲内、時間軸の移

			動量は、フルスケールの±2%の範囲内とする。
⑥ 位置検出精度	ウ 位置検出精度試験 測定値と実測値の縦方向及び横方向の位置のずれの最大値が±30mmの範囲以内であること。又、測定データから位置の特定が可能となっていること。	⑥位置検出精度試験 人工欠陥のある試験片を用い、測定値と実測値の溶接線と同方向の位置のずれの最大値が±30mm、及び溶接線と直行方向の位置のずれの最大値が±5mmの範囲以内であること。又、試験データから位置の特定が可能となっていること。	
⑦ 腐食部検出精度	エ 腐食部検出精度試験 当該装置の適用範囲において異常表示又は不表示がなく、かつ、人工腐食部の板厚測定値の差が、±0.2mm以内であること。 別図-3 超音波探傷法連続板厚測定性能確認試験片  備考 1 *の寸法に関しては、連続板厚測定装置の仕様により変更することができる。 2 φ2mmの裏面人工腐食部は、垂直にあげ、平底とする。加工は、放電加工又は機械加工とする。 3 φ2mmの裏面人工腐食部の間隔は、100mmとし、加工数、配列、加工位置は連続板厚測定装置の仕様により変更することができる。 4 コーティング上から連続板厚測定を行う装置の試験片の表面は、コーティング加工し、コーティングの	⑦欠陥部検出精度試験 当該装置の適用範囲において異常表示又は不表示がなく、かつ、エコー高さが検出可能な値以上であること。 図-1 超音波探傷法溶接部検査装置性能確認試験片 (I型)  備考 1 *の寸法に関しては、超音波探傷装置の仕様により変更 2 人工欠陥は試験片表面に製作する。加工は放電加工、機械加工とする。 3 欠陥寸法：深さ3mm×長さ6mm×幅0.3mm 4 方向：板厚方向に垂直(*1) 5 人工欠陥角度：0°、5°、15°、25°、35°、45°、55°、65°、75°、90°(試験片上面から見て) 6 試験片厚さ：測定対象とするタンク底部と同じ板厚とする。 7 試験片材質：	(*1) 垂直方向からのきず傾きの

	種類は、測定対象とするタンク底部のコーティング材と同種類のものとする。コーティングの厚さは測定対象とするタンク底部のコーティングの最大厚さとする。	測定対象とするタンク底部と同種類のものとする。 8 コーティング厚さ：測定対象とするタンク底部のコーティング厚さの最大厚さとする。 9 コーティング種類：測定対象とするタンク底部のコーティング材と同種類のものとする。 なお、始業時等性能確認、作業開始後 4 時間以内ごと及び終業時性能確認は、図－2 に示す試験片にて性能確認を行うことができるものとする。 図－2 超音波探傷法溶接部検査装置性能確認試験片（Ⅱ型）  備考 *の寸法に関しては、超音波探傷装置の仕様により変更することができる。 - 人工欠陥は試験片表面に製作する。加工は放電加工、機械加工とする。 - 欠陥寸法：深さ 3mm×長さ 6mm×幅 0.3mm - 方向：板厚方向に垂直 - 人工欠陥角度：0°、5°、15°、25°、35°、45°、55°、65°、75°、90°（試験片上面から見て） - 試験片厚さ：測定対象とするタンク底部と同じ板厚とする。 - 試験片材質：測定対象とするタンク底部と同種類のものとする。	影響について、シミュレーションにより確認中。必要に応じ追加。
--	--	---	---------------------------------------

		8 コーティング厚さ：測定対象とするタンク底部のコーティング厚さの最大厚さとする。 9 コーティング種類：測定対象とするタンク底部のコーティング材と同種類のものとする。	
⑧ 超音波受発信	—	⑧超音波受発信確認試験（カップリングチェック） 超音波の受発信が適切であることを常時監視できるシステムであること。	
⑨ 性能表示	(3)性能表示 連続板厚測定装置の仕様書等には、タンク底部の板厚、コーティングの種類等に応じた適用範囲等の適用条件及び保有性能に関する次の事項が表示されているとともに、測定対象タンクへの適用に問題がないことを確認すること。 ア 測定可能な鋼材の種類及び厚さの範囲 イ 測定可能なコーティング材の種類及び厚さの範囲 ウ 測定速度 エ 直線性 オ 温度安定性 カ 時間安定性 キ 電圧影響 ク 位置検出精度 ケ 腐食部検出精度	(3)性能表示 溶接部探傷装置の仕様書等には、タンク底部の板厚、コーティングの種類等に応じた適用範囲等の適用条件及び保有性能に関する次の事項が表示されているとともに、測定対象タンクへの適用に問題がないことを確認すること。 ア 測定可能な鋼材の種類及び厚さの範囲 イ 測定可能なコーティング材の種類及び厚さの範囲 ウ 測定速度 エ 増幅直線性 オ 時間軸直線性 カ 周囲温度に対する安定性 キ 電源電圧変動に対する安定性 ク 位置検出精度 ケ 欠陥部検出精度 コ 超音波受発信監視方法（カップリングチェック） サ 検出可能なきずの最小寸法（*2）	（*2） 3mm × 6mm より小さいきずが発見可能であることを示す。

3.7 コーティング上からのPA試作機における運用方法(案)

当該PA試作機の開発事業者から提案された運用性能（案）を下記に示す。

項目	連続板厚測定	溶接部試験	備考
通知	平成 15 年 3 月 28 日 消防令第 27 号	—	
件名	連続板厚測定方法による特定屋外貯蔵タンク底部の板厚測定に関する運用について	超音波探傷法を用いた特定屋外貯蔵タンク底部の溶接部の試験に関する運用について	異なる部分は赤字
適用対象	特定屋外貯蔵タンクの底部の板	特定屋外貯蔵タンクの底部の	

	厚測定 コーティングの有無にかかわらず適用	溶接部試験 コーティング有りのみ適用	
測定方法の概要	別図－１「超音波探傷法による連続板厚測定装置を用いた連続板厚測定方法」フロー	別図－１「超音波探傷法による溶接部探傷装置を用いた溶接部試験方法」フロー	
性能確認試験	①コーティング厚さに対する試験 ②温度安定性試験 ③時間安定性試験 ④電圧影響試験 ⑤位置検出精度試験 ⑥腐食部検出精度試験 ⑦直線性試験	①コーティング厚さに対する試験 ②周囲温度に対する安定度試験 ③時間安定性試験 ④電源電圧変動に対する安定度試験 ⑤位置検出精度試験 ⑥欠陥部検出精度試験 ⑦増幅直線性試験 ⑧時間軸直線性試験 ⑨感度余裕値試験 ⑩超音波受発信確認試験	
事前の確認	①設計図書等による適用性の確認	①設計図書等による適用性の確認 ②直近の開放点検等で磁粉探傷試験が行われ、確認された欠陥は全て補修されていること。	
始業時の性能確認	①位置検出精度試験 ②腐食部検出精度試験 休憩後も実施	①位置検出精度試験 ②欠陥部検出精度試験 休憩後も実施	
範囲の設定	装置の性能に基づき、測定実施範囲を設定	装置の性能に基づき、探傷実施範囲を設定	
測定・探傷間隔	30mmピッチ以下の間隔	探傷部位が不連続とならないように実施し、2mmピッチ以下の間隔で記録	
測定・探傷速度	性能確認がなされている速度	性能確認がなされている速度	
不表示 ^{*1,2} 部の確認方法	当該装置による再度の板厚測定 又は 定点測定法による板厚測定 ＊１ 不表示：測定値が得られない測定不能の状態	当該装置による再度の溶接部試験 又はコーティングを剥離し磁粉探傷試験 ＊２ 不表示：試験結果が得られない状態	
異常表示 ^{*3,4} 部の確認方法	当該装置による再度の板厚測定 又は 定点測定法による板厚測定 ＊３ 異常表示：腐食、コーティング等の影響により過大な板厚測定値を示す状態、又は表示値が安定しない状態	当該装置による再度の溶接部試験 又はコーティングを剥離し磁粉探傷試験 ＊４ 異常表示：腐食、コーティング等の影響により試験結果が安定しない状態	
終業時の性能確認	①位置検出精度試験 ②腐食部検出精度試験 所定の性能が確認できない場	①位置検出精度試験 ②欠陥部検出精度試験 所定の性能が確認できない場	

	合は、定点測定法による板厚測定	合は、コーティングを剥離し磁粉探傷試験 ※終業時だけでなく、作業開始後 4 時間以内にも実施	
測定不可部の確認方法	定点測定法による板厚測定	コーティングを剥離し磁粉探傷試験	
評価	(省略)	側板とアニュラ板の溶接継手以外の溶接継手： 表面きずのエコー高さが、深さ 3.0mm×長さ 6.0mm のきずに相当するエコー高さを超えないこと。	「側板とアニュラ板の溶接継手」については、H12 年 93 号通知に、深さ 1.5mm、長さ 4.0mm を超えないものとの記述があるが、本装置では探傷不可としていることから触れないものとする。
測定者に必要な知識及び技能	①連続板厚測定装置を用いて行う測定方法に関し必要な知識及び技能（例：社団法人日本非破壊検査協会 非破壊検査 2 種技術者） ②定点測定法による板厚測定に関し必要な知識及び技能 ③特定屋外貯蔵タンクのタンク構造、腐食発生実態、コーティング等に関する知識	①溶接部探傷装置を用いて行う溶接部試験に関し必要な知識及び技能（例：一般社団法人日本非破壊検査協会 超音波探傷試験レベル 2 技術者） ②特定屋外貯蔵タンクのタンク構造、溶接部の欠陥発生実態、腐食発生実態、コーティング等に関する知識	「社団法人日本非破壊検査協会 非破壊検査 2 種技術者」と「一般社団法人日本非破壊検査協会 超音波探傷試験レベル 2 技術者」は同じ。名称変更によるもの。