

平成 28 年度
石油ガス供給事業安全管理技術開発等事業
(ガス工作物技術基準適合性評価等 (LPG 貯槽等溶接継
手部の材質評価))

- L P G 貯槽用材料特性（破壊韌性値）調査 -

調査報告書

平成 29 年 2 月
一般社団法人日本ガス協会

目次

1. LPG貯槽用材料特性（破壊革性値）調査の概要	1
1. 1 調査目的	1
1. 2 調査概要	1
1. 3 調査体制	3
1. 4 調査スケジュール	4
2. 試験材料の準備	5
2. 1 試験材料	5
2. 2 板厚	5
2. 3 母材	6
2. 4 溶接方法	7
2. 5 溶接材料	7
2. 6 溶接条件	8
2. 7 非破壊検査	9
2. 8 溶接施工結果	9
2. 9 供試材の形状	9
3. 引張試験	11
3. 1 目的	11
3. 2 試験片採取位置	11
3. 3 試験方法	13
3. 4 引張試験結果	14
4. マクロ観察及び硬さ試験	16
4. 1 目的	16
4. 2 マクロ試験	16
4. 3 硬さ試験	18
4. 3. 1 試験方法	18
4. 3. 2 試験結果	18
5. シャルピー衝撃試験	23
5. 1 目的	23
5. 2 試験片採取位置	23
5. 3 試験方法	26
5. 4 試験結果	26
6. J_{Ic} 試験	34
6. 1 目的	34
6. 2 試験片採取位置	34
6. 3 試験片形状	36
6. 4 切欠き導入位置	39
6. 5 疲労予き裂導入試験	40
6. 6 破壊革性試験	43
6. 6. 1 試験概要	43
6. 6. 2 試験方法	44
6. 6. 3 J_{Ic} の算出方法	47
6. 6. 4 試験結果	52
6. 7 J 換算 C T O D の算出	67

6.7.1 算出方法と算出結果	67
6.7.2 J 換算 C T O D の物理的意味	68
6.8 母材組織観察結果	69
6.8.1 観察結果及び市販材と解体材の比較	69
6.8.2 解体材母材部の縞状延性破面と組織の関係	72
6.9 破面観察結果及びセパレーションが韌性に及ぼす影響の考察	74
6.9.1 セパレーションの発生要因と破面観察	74
6.9.2 セパレーションが韌性に及ぼす影響	77
6.10 上部棚シャルピー吸収エネルギーと J_{Ic} の関係	77
6.11 過去の試験結果との比較	79
6.12 J_{Ic} 試験のまとめ	81
 7. 既設 L P G 貯槽の韌性調査	
7.1 材料、溶接技術等の技術進展動向の調査	83
7.1.1 母材	83
7.1.2 溶接材料	84
7.1.3 溶接技術	84
7.2 既設 L P G 貯槽のシャルピー吸収エネルギー値（ミルシート）の調査等	85
7.2.1 SPV450 系材料円筒形 L P G 貯槽の年代別設置基数	85
7.2.2 母材（胴板・鏡板）のシャルピー吸収エネルギー値	86
7.2.3 7.2.3 溶接部のシャルピー吸収エネルギー値	87
7.2.4 SPV450 系円筒形 L P G 貯槽の母材（胴板・鏡板）化学成分	88
7.3 既設 L P G 貯槽の韌性調査のまとめ	88
 8. まとめ	89
8.1 試験・調査結果のまとめ	89
8.2 試験結果の活用方法の提言	90
8.2.1 指針改訂の提言	90
8.2.2 将来に向けた提言	90
 参考文献	91
 添付資料 1 市販材 板厚測定記録	93
添付資料 2 解体材 板厚測定結果及び採取位置	94
添付資料 3 市販材（母材） ミルシート	96
添付資料 4 解体材（母材） ミルシート	98
添付資料 5 市販材（溶接材料） ミルシート	101
添付資料 6 市販材 溶接施工要領書	103
添付資料 7 市販材 溶接施工記録	104
添付資料 8 解体材 溶接施工記録	110
添付資料 9 試験片採取要領（引張試験、硬さ試験、シャルピー衝撃試験）	120
添付資料 10 引張試験記録詳細	122
添付資料 11 シャルピー衝撃試験片の加工要領及び寸法測定結果	128
添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真	131
添付資料 13 破壊韌性試験片 檢査成績書	138
添付資料 14 破壊韌性試験片の切欠き導入位置	145
添付資料 15 作製した破壊韌性試験片の外観一覧	149
添付資料 16 ヤング率の温度依存性	158
添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧	159
添付資料 18 $J-R$ カーブ一覧	169

添付資料 19	試験後の破面外観一覧	180
添付資料 20	疲労予き裂形状拡大写真一覧	189
添付資料 21	延性き裂先端トレース画像一覧	193
添付資料 22	CTOD の板厚方向分布と各規格における CTOD の物理的意味	196
添付資料 23	δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用	197
添付資料 24	破壊靭性値と板厚の関係	214
添付資料 25	J_{Ic} と上部棚シャルピー吸収エネルギーの関係	215
添付資料 26	J_{Ic} の定義	218
添付資料 27	J_{Ic} 試験から算出される CTOD の比較	219
添付資料 28	疲労き裂進展特性に関する文献調査	223
添付資料 29	材料規格の規定内容の変遷	225
添付資料 30	製鋼・精錬・鋳造・圧延・熱処理などの各製作工程の推移	226
添付資料 31	容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 追補改訂 新旧対照表（案）	231
添付資料 32	L P G 貯槽指針 追補改訂 新旧対照表（案）	235
添付資料 33	添付資料中の参考文献	250

1. LPG貯槽用材料特性（破壊靭性値）調査の概要

1. 1 調査目的

LPG貯槽やガスホルダーなどの高張力鋼を使用した圧力容器は、溶接部の疲労き裂の検査・評価・補修を適切に行い、維持管理していくことが重要である。

近年では、検査技術の進歩や最新の評価技術の発展により、溶接部の疲労き裂について、圧力容器毎の個別評価が可能となり、適切な検査周期を定めることで、より一層の保安向上を図ることが可能になってきている。

これらの評価には、溶接継手部の破壊靭性値を確認する必要があるが、公表されている破壊靭性値はSPV490系材料の溶接継手部の破壊靭性値など、限られた鋼種のものしかない^[1]。そのため、現状では、大半の貯槽は、これまでの経験等に基づいた一律の周期で検査を行っている。

本調査は、平成27年度事業に引き続き、ガス事業法適用のLPG貯槽を含め、国内で広く一般的に使用されている圧力容器材料であるSPV450系材料の溶接継手部の破壊靭性値を調査し、当該材料を使用する貯槽について、最新の評価技術の適用（疲労き裂を想定した破壊評価（FAD（破壊評価線図）評価）による検査周期の個別設定等）を可能にすることを目的としている。

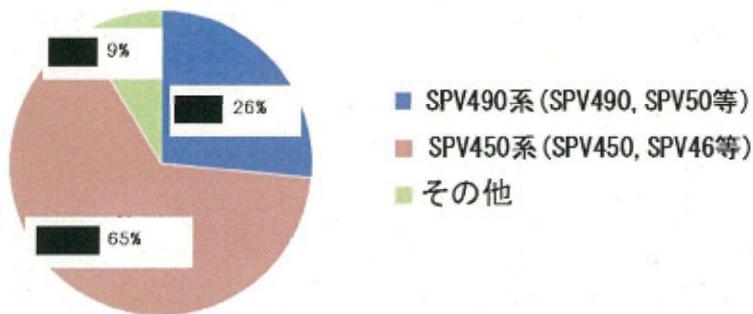


図1.1 ガス事業者が保有するLPG貯槽の使用材料

1. 2 調査概要

今年度は表1.1に示す調査を実施し、調査結果の評価及び調査結果の活用方法等の提言について取り纏めた。

表1.1 調査概要

調査項目	概要
(1)試験材料の準備	<ul style="list-style-type: none">SPV450Q-SRを購入し、溶接条件、溶接材料を選定し、溶接継手を作製した。（市販材）経年設備の靭性を評価するため、過去にSPV450系材料で製作された溶接継手を準備した。（解体材）
(2)引張試験	<ul style="list-style-type: none">市販材、解体材それぞれについて、JIS Z 2241^[2]に準拠して引張試験を行い、破壊靭性値の算出に必要な材料の機械的性質を取得した。
(3)硬さ試験	<ul style="list-style-type: none">市販材、解体材それぞれについて、JIS Z 2244^[3]に準拠してビックカース硬さ試験を行い、鋼材の溶接性や溶接部近傍の機械的性質を把握した。
(4)シャルピー衝撃試験	<ul style="list-style-type: none">市販材、解体材それぞれについて、JIS Z 2242^[4]に準拠してシャルピー衝撃試験を行い、市販材と解体材の靭性レベルの比較や切欠き位置毎の靭性レベルの把握等を行った。
(5)J _{IC} 試験	<ul style="list-style-type: none">市販材、解体材それぞれについて、ISO 12135^[5]

	Annex H に記載される単一試験法により J_{IC} 試験を行い、評価対象溶接部の韌性評価に用いるパラメータ (J_{IC} : 平面ひずみ破壊韌性値) を取得した。
(6)既設 LPG貯槽の韌性調査	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 材料、溶接技術等の技術進展動向の調査を行い、それらが韌性に与えた影響を整理した。 ▪ 既設貯槽のシャルピー吸収エネルギー値の調査等を行い、製作年代による傾向を調査するとともに、本調査のシャルピー衝撃試験結果との比較を行い、ガス事業者が保有する既設 LPG 貯槽の韌性レベルを確認した。

具体的な調査の内容、結果については「2. 試験材料の準備」、「3. 引張試験」、「4. マクロ観察及び硬さ試験」、「5. シャルピー衝撃試験」、「6. J_{IC} 試験」、「7. 既設 LPG 貯槽の韌性調査」に記載し、試験結果の評価及び調査結果の活用方法等の提言は「8. まとめ」に記載する。

1. 3 調査体制

本事業の実施にあたって、(一社)日本ガス協会内に「LPG貯槽用材料特性調査ワーキンググループ(WG)」を設置し、WGで行った各調査・検討を(一社)日本ガス協会ガス工作物等技術基準調査委員会及び同第一小委員会にて審議する体制とした。事業実施体制を図1.2に、各組織の概要と役割分担を表1.2に示す。

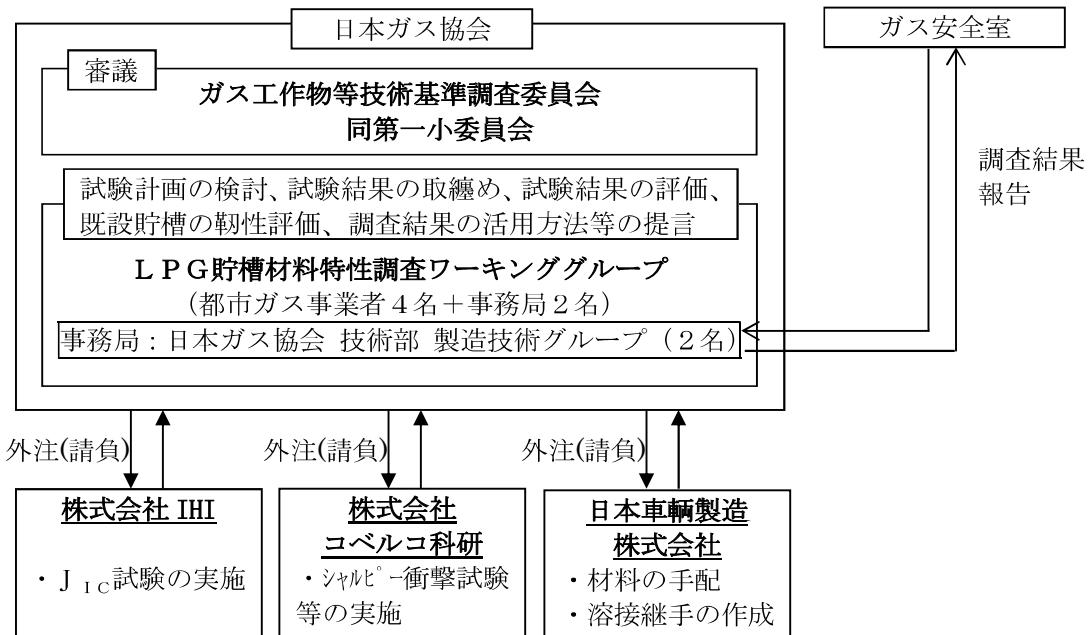


図1.2 事業実施体制

表1.2 各組織の概要と役割分担

組織名	人数	構成メンバー及び役割分担
ガス工作物等技術基準調査委員会	21人程度	<ul style="list-style-type: none"> ○構成メンバー 学識経験者9人程度、民間有識者8人程度、ガス事業者3人、日本ガス協会1人 ○役割分担 第一小委員会が纏めた各種検討事項について、専門的知識、豊富な材料物性知見、圧力容器の設計・製作知見等より助言・最終的な評価を実施
第一小委員会	13人	<ul style="list-style-type: none"> ○構成メンバー 学識経験者2人、ガス事業者10人、日本ガス協会1人 ○役割分担 調査ワーキングが纏めた各種検討事項について、専門的知識、豊富な材料物性知見、圧力容器の設計・製作知見及びガス事業法に対する豊富な知見等より助言・評価を実施
LPG貯槽用材料特性調査ワーキンググループ	6人	<ul style="list-style-type: none"> ○構成メンバー ガス事業者(4人) 日本ガス協会技術部製造技術グループ(2人) ○役割分担 試験計画の策定、試験材料の準備、試験結果の取纏め、試験結果の評価、既設貯槽の韌性調査、調査結果の活用方法等の提言検討、報告書作成等

1. 4 調査スケジュール

調査スケジュールの実績を表 1.3 に示す。

表 1.3 調査スケジュール（実績）

作業内容	平成28年度									備考
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
(1)試験材料の準備										
a.市販材の手配				■■■■■						
b.解体材の手配			■■■■■							
(2)各種試験・調査の実施										
a.試験計画の検討			■■■■■							
b.試験片の作成				■■■■■						
c.引張試験の実施					■■■					
d.硬さ試験の実施					■■■					
e.シャルピー衝撃試験の実施					■■■■■					
f.JIS試験の実施					■■■■■					
g.既設貯槽の韌性調査			■■■■■							
(3)試験結果の収集め・試験結果の評価・調査結果の活用方法等の検討										
a.試験結果の収集め						■■■■■				
b.試験結果の評価						■■■■■				
c.調査結果の活用方法等の検討						■■■■■				
(4)委員会の開催・報告書の提出										
a.委員会の開催・報告書提出				第一小委員会 8/30	工作物委員会 9/28					第一小委員会・工作物委員会 1/31 2/8 報告書提出
b.ワーキンググループの開催				9/8		11/14	12/13	1/11		
作業内容	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	

2. 試験材料の準備

2. 1 試験材料

以下のとおり、試験材料を準備した。

①市販材

現行の圧力容器用鋼板 SPV450Q-SR (JISG3115:2010)^[6]を購入し、溶接を行った。なお、円筒形 L P G 貯槽は貯槽全体を溶接後熱処理するため、熱処理後の材料強度を保証した SR 材とした。

②解体材

1978 年に製作された SPV46Q-SR (JISG3115) (1991 年に SPV450Q-SR に名称変更) 製の横置円筒形 L P G 貯槽(廃止済みの貯槽)の胴板の周溶接部近傍から採取した。

2. 2 板厚

①市販材

H27 年度の L P G 貯槽用材料特性（破壊靱性値）調査^[7]における試験材料と同様に板厚は 20mm とした。

ガス事業者が保有する SPV450 系材料を用いた円筒形 L P G 貯槽胴板の板厚は、図 2.1 に示すとおり、14mm 以上～15mm 未満と 19mm 以上～20mm 未満にピークがある。その上で、板厚が厚い方が破壊靱性値の試験をする上で安全側となるため、板厚 20mm を採用している。市販材の板厚測定記録を添付資料 1 に示す。

(基数)

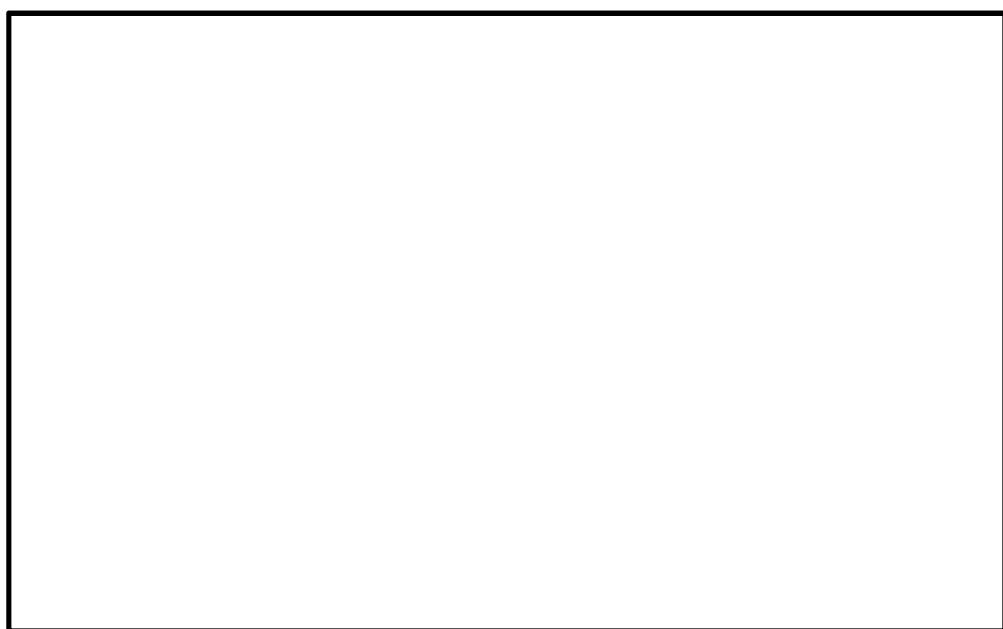


図 2.1 SPV450 系材料を用いた円筒形 L P G 貯槽胴板の板厚

②解体材

解体材を採取した貯槽の胴板の公称板厚は 11.0mm である。現地で周溶接線近傍の胴板の板厚を測定し、板厚が比較的厚く、ばらつきの少ない部位から採取した（板厚が厚

い方が J_{1C} 試験において平面歪条件を満足する可能性が高くなるため)。

添付資料 2 に解体材の板厚測定結果及び採取位置を示す。

2. 3 母材

表 2.1 に市販材、表 2.2 に解体材の母材化学成分(ミルシート値)を示す。解体材は化学成分がわずかに異なる解体材(a)と解体材(b)からなる溶接継手となる。市販材と解体材とではP及びS成分の規格値が異なっており、実際の成分においても違いが見られる。なお、表 2.1、表 2.2 中の炭素当量 C_{eq} は式(2.1)で算定したものである。

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%) \quad (2.1)$$

表 2.3 に市販材、表 2.4 に解体材の機械的性質(ミルシート値)を示す。

市販材及び解体材のミルシートを添付資料 3、添付資料 4 に示す。

表 2.1 市販材(母材)の化学成分(ミルシート値)

母材	化学成分 mass%									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	V	Cr	C_{eq}
規格値 SPV450Q-SR	0.18 以下	0.75 以下	1.60 以下	0.030 以下	0.030 以下	-	-	-	-	0.44 以下
市販材	0.14	0.25	1.35	0.009	0.003	0.01	0.04	0.03	0.02	0.39

表 2.2 解体材(母材)の化学成分(ミルシート値)

母材	化学成分 mass%									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	V	Cr	C_{eq}
規格値 SPV46Q-SR	0.18 以下	0.15～ 0.75	1.60 以下	0.035 以下	0.040 以下	-	-	-	-	0.44 以下
解体材(a)	0.14	0.26	1.38	0.021	0.003	0.03	0.01	0.034	0.03	0.39
解体材(b)	0.15	0.26	1.37	0.018	0.007	0.03	<0.01	0.036	0.04	0.40

表 2.3 市販材(母材)の機械的性質(ミルシート値)

母材	引張試験(室温)			衝撃試験				
	降伏点/0.2%耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	試験 温度 ℃	吸収エネルギー J			
					個々の 試験片の値	3 個の試験片 の平均値		
規格値 SPV450Q-SR	450 以上		570～700	26 以上	-10	27 以上		
市販材	562		651	38	-10	263 251 261	258	

表 2.4 解体材（母材）の機械的性質(ミルシート値)

母材	引張試験(室温)			衝撃試験		
	降伏点/0.2%耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	試験 温度 ℃	吸収エネルギー J	
					個々の 試験片の値	3 個の試験片 の平均値
規格値 SPV46Q-SR	450 以上	570～700	26 以上	(注 1)	(注 1)	(注 1)
解体材(a)	568	637	29	(注 1)	(注 1)	(注 1)
解体材(b)	588	666	26	(注 1)	(注 1)	(注 1)

(注 1) JIS G3115 では衝撃試験の要求は厚さ 12mm を超えるものが対象となるため未実施。

2. 4 溶接方法

市販材の溶接方法は H27 年度の LPG 貯槽用材料特性（破壊靱性値）調査^[7]と同様、サブマージアーク溶接とした。

なお、円筒形 LPG 貯槽はほとんどが工場製作されており、メーカーヒアリングおよび都市ガス事業者が保有している LPG 貯槽の溶接条件を調査した結果、大多数はサブマージアーク溶接が採用されている。

解体材についても、サブマージアーク溶接によって製作されている。

2. 5 溶接材料

①市販材

市販材の溶接材料は H27 年度の LPG 貯槽用材料特性（破壊靱性値）調査^[7]と同様、次の材料を用いた。

- ・溶加材 : NSSW Y-DM (JIS Z 3351:2012^[8] YS-M5)
- ・フラックス : NSSW YF-15B (JIS Z 3352:2010^[9] SFCS1)

表 2.5 に NSSW Y-DM の化学成分を、表 2.6 に NSSW YF-15B の化学成分および公称粒度メッシュを示す。

市販材の溶加材およびフラックスのミルシートを添付資料 5 に示す。

表 2.5 NSSW Y-DM の化学成分(ミルシート値)

ワイヤ径 mm	化学成分 mass%						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo
4.8	0.13	0.02	2.11	0.011	0.004	0.06	0.48

表 2.6 NSSW YF-15B の化学成分および公称粒度メッシュ(ミルシート値)

化学成分 mass%		公称 粒度 メッシュ	粒度分布メッシュ						
CaO+MgO+MgO ₂	CaO+MgO		12×20	20×48	48×65	65×100	100×150	150×200	200×D
63	23	20×200	0.3	47.5	18.2	14.1	12.2	6.9	0.8

②解体材

解体材の溶接材料は、市販材と同種の銘柄（当時）となっており、溶加材に Y-DM、フラックスに YF-15 が用いられている。

2. 6 溶接条件

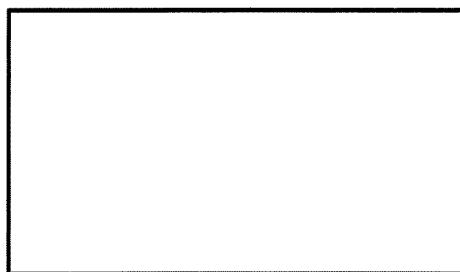
表 2.7 に市販材、解体材の溶接条件を示す。市販材の開先形状は図 2.2(a)に示す Y 開先とし、図 2.3(a)に示すように 3 パス側を溶接後、裏はつりを経て 1 パス溶接とした。

解体材については図 2.2(b)、図 2.3(b)に示すとおり 1 パス側を溶接後、裏はつりを実施し 1 パス溶接している。

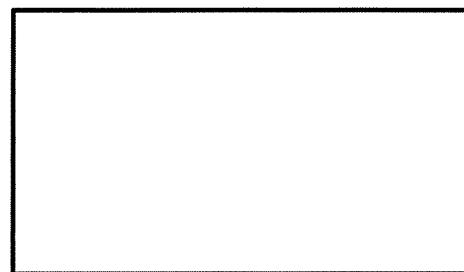
市販材、解体材共に溶接後に応力除去焼鈍処理を実施している。添付資料 6 に市販材の溶接施工要領書を示す。

表 2.7 溶接条件

	市販材	解体材
母材(公称板厚)	SPV450Q-SR(20mm)	SPV46Q-SR(11mm)
溶接金属 溶加材	NSSW Y-DM	Y-DM
溶接金属 フラックス	NSSW YF-15B	YF-15
溶接方法	サブマージアーク溶接	サブマージアーク溶接
予熱	なし	記録なし
電流	■～■A	■A
電圧	■～■V	■V
溶接速度	■～■cm/min	■cm/min
溶接パス数	4 パス	2 パス
パス間温度	■℃以下	記録なし
溶接後熱処理	■■℃/■時間	■■℃/■時間



(a) 市販材



(b) 解体材

図 2.2 開先形状

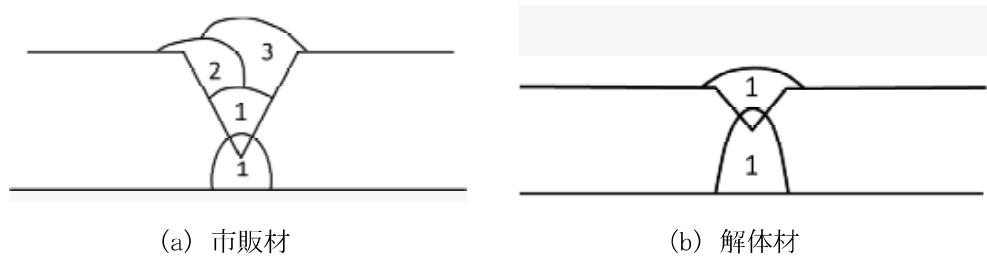


図 2.3 積層図

2. 7 非破壊検査

市販材は、裏はつり後、溶接後、熱処理後にそれぞれ磁粉探傷試験を実施し、溶接後に放射線透過試験を実施した。

解体材は、製作時に放射線透過試験と磁粉探傷試験を実施しているが、今回、試験片を採取した後に、改めて放射線透過試験と磁粉探傷試験を実施した。

2. 8 溶接施工結果

添付資料7に市販材の溶接施工記録(溶接施工記録、熱処理記録、放射線透過試験記録、磁粉探傷試験記録及び角変形量測定記録)を示す。角変形量はH27年度の調査に用いた試験片と同等程度であり、試験結果にほとんど影響を及ぼさない程度であることを確認している。

添付資料8に解体材の溶接施工記録(溶接施工記録、熱処理記録、放射線透過試験記録(製作時)、磁粉探傷試験記録(製作時)、放射線透過試験記録(解体材採取後)、磁粉探傷試験記録(解体材採取後)及び角変形量確認記録)を示す。角変形は採取した範囲において、角変形がほとんどない状態であることを確認している。

なお、各試験片は非破壊検査で検出されたきずの部分を避けて作成した。

2. 9 供試材の形状

供試材の形状をそれぞれ図 2.4 および図 2.5 に示す。

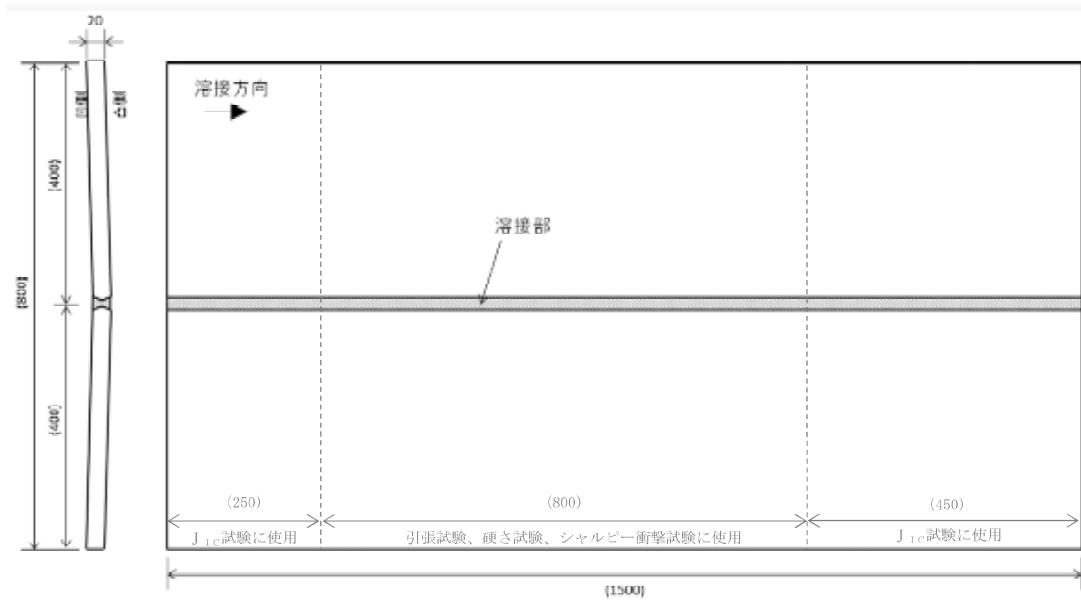


図 2.4 市販材

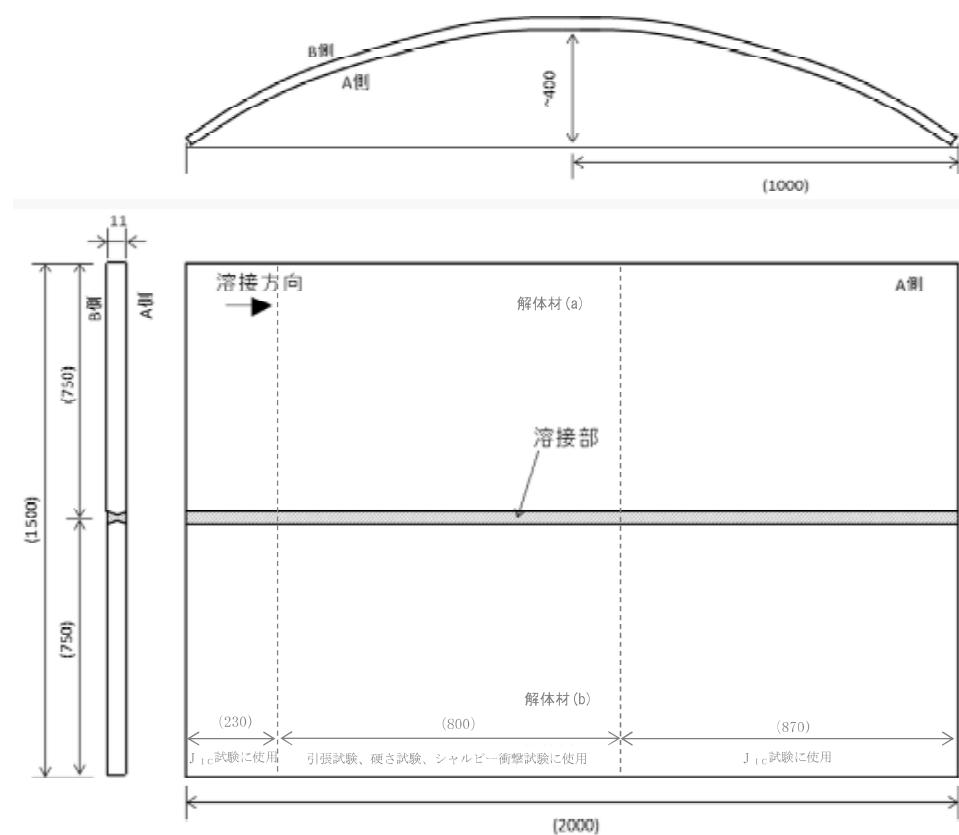


図 2.5 解体材

3. 引張試験

3. 1 目的

破壊革性値の算出に必要な材料の機械的性質を取得するために、引張試験を実施した。試験温度は、LPG 貯槽の最低使用温度として一般的である-10°Cとした。

3. 2 試験片採取位置

溶接継手全体からの試験片採取要領図を添付資料 9 に示す。

採取方向は、溶接金属は溶接線方向、母材は溶接線方向とそれに垂直な方向の 2 方向とした。これらの採取方向の概略図を図 3.1 に示す。

板厚方向における採取位置は、市販材の母材は凸側面より $t/4$ の位置、解体材の母材は A 側面（内径面）より約 $t/4$ の位置を目安とした。溶接金属から採取する引張試験片は、試験片全体が溶接金属になる位置とした。これらの板厚方向における採取要領図を図 3.2 に示す。

これらの採取要領をまとめて表 3. 1 に示す。

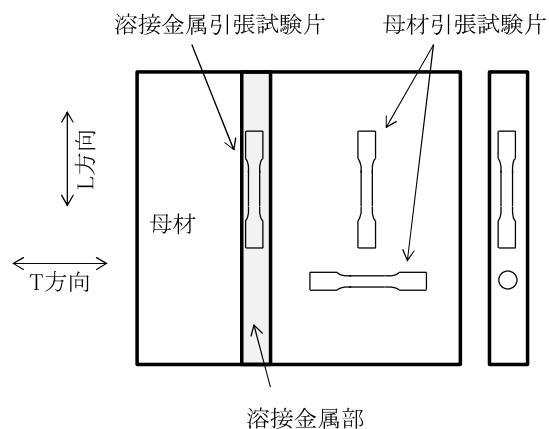


図 3.1 引張試験片の採取方向の概略図

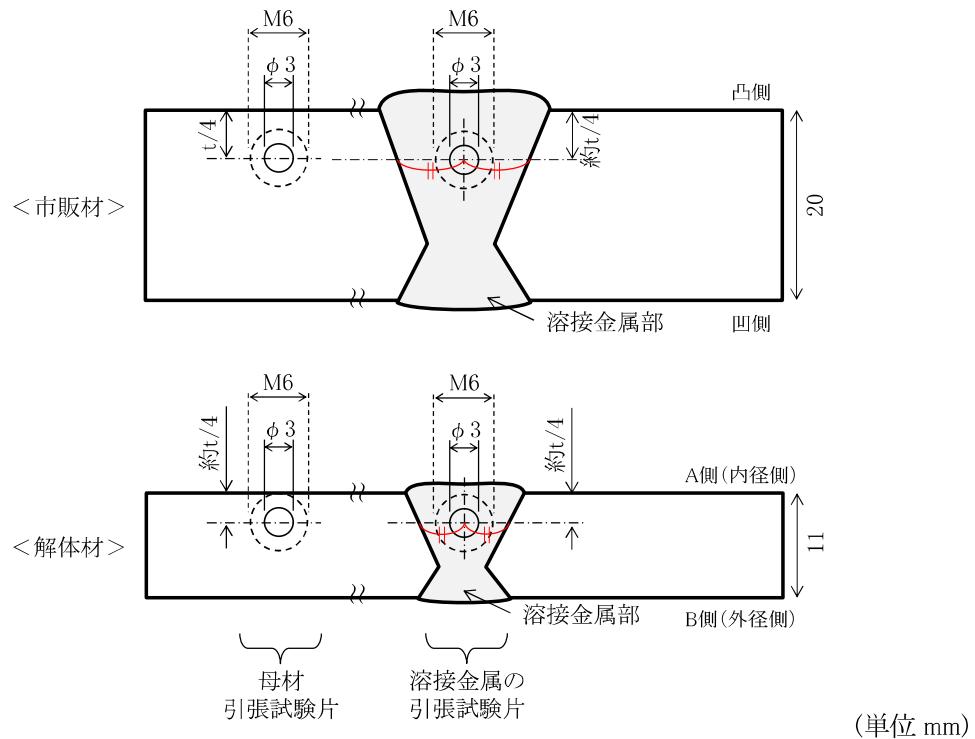


図 3.2 引張試験片の板厚方向における採取位置

表 3.1 引張試験片採取要領

溶接継手区分	採取-			本数
	箇所	方向	板厚位置	
市販材 (板厚 20mm)	溶接金属	溶接方向	t/4	1
	母材	L 方向	t/4	1
		T 方向	t/4	1
解体材 (板厚 11mm)	溶接金属	溶接方向	t/4	1
	母材	L 方向	t/4	1
		T 方向	t/4	1

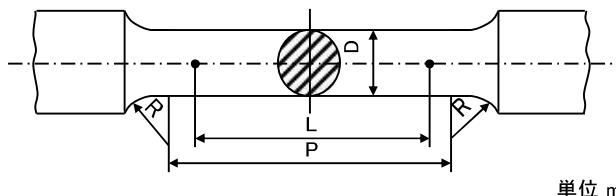
3. 3 試験方法

引張試験は JIS Z 2241:2011^[2]に準拠して実施した。試験片形状を図 3.3 に、試験条件を表 3.2 に示す。

なお、数値として報告する伸び値(%)は、試験後の試験片の破断面を突き合わせたときの標点間を原標点距離(15mm)で除した値とするが、提出する応力-ひずみ曲線で見られるひずみ(=伸び)は、10mmの伸び計で採取したものであるため、それぞれの伸びの値には差異が生じる。

また、H27 年度に実施している引張試験^[7]の応力-ひずみ曲線は、15mmの伸び計で採取したひずみを用いて作成されていたため、今回の試験で得られた応力-ひずみ曲線とは単純な比較はできない。平行部の伸び計間にには、平行部が均一に伸びる“一様伸び”の範囲と、断面収縮によるくびれを伴う“局部伸び”の範囲が存在するが、前回と今回では伸び計長さに対する局部伸び長さの割合が異なるためである。今回(伸び計 10mm)の方が、応力-ひずみ曲線から得られる伸び値は大きくなる。

なお、伸び値は、局部伸びが評価範囲(標点間や伸び計間)のどの位置に生じるか(評価範囲の内側か外側か)によって値に特に大きな差異が生じる。



単位 mm

径 D	標点距離 L	平行部の長さ P	肩部の半径 R
3	15	17以上	15以上

図 3.3 引張試験片形状 (JIS Z 2241 比例試験片)

表 3.2 引張試験 試験条件

試験規格	JIS Z 2241:2011 ^[2]
試験温度	-10°C
試験速度	YP or 0.2%YS 取得まで：応力増加速度 10MPa/sec YP or 0.2%YS 取得以降：ひずみ速度 20%/min
使用試験機	精密万能試験機 (インストロン社製 5566 型)

3. 4 引張試験結果

試験結果一覧を表 3.3 に示す。また、母材の応力-ひずみ曲線を図 3.4 に、溶接金属部の応力-ひずみ曲線を図 3.5 に示す。試験結果の詳細は添付資料 10 に示す。

以下に試験結果に対するコメントをまとめる。

- ① 市販材はミルシート値と比べて 0.2%耐力が約 90MPa、引張強さが約 80MPa 高い値を示していた。また、解体材に比べても 0.2%耐力、引張強さ共に約 60MPa 高い結果となっていた。一方、解体材はミルシート値と比べて 0.2%耐力、引張強さ共にほぼ同等の値を示していた。

今回の低温引張試験において市販材の強度が著しく高い値を示した原因としては、

- 低温 (-10°C) での試験であること (BS7910(2013)^[10]の推定式によると、-10°C の引張強さは常温 (23°C) の引張強さに対して 4%程度大きくなる。)
- 試験片が $\phi 3\text{mm}$ と極細であることから、板厚内部の硬度変化の影響を受けたこと（たまたま硬い部位から試験片を採取した（図 4.3 のビッカース硬さ試験では、母材表層近傍の硬さ分布は母材内部の硬さ分布より 1~2 割程度大きくなっている。））
- SR 温度の違い（今回 570°C、ミルシート 585°C）

以上の要因が考えられるが、ミルシートと同条件（試験片形状、試験温度等）での試験や板厚方向の細部に渡る硬さ変化、また、SR 温度の強度への影響等を調査しなければ、原因の特定は困難と考える。

- ② 解体材の母材でのみ降伏点が確認された。一般的に、降伏点はコットレル雰囲気に転位が固着され降伏応力が高くなることによって現れることが知られているが、解体材では、ロール加工によって歪が入って転位が生じており、SR 処理でも消滅しなかった転位が残っていたことで降伏点が表れたのではないかと考えられる。

表 3.3 引張試験結果一覧

溶接継手区分	採取箇所	採取方向	試験片符号	直径	断面積	標点間距離	上降伏点		0.2%耐力		引張強さ		伸び	絞り	破断位置
				mm	mm ²	mm	N	MPa	N	MPa	N	MPa	%	%	
市販材	溶接金属	溶接方向	LSW	3.009	7.11	15.02	-	-	4110	578	4711	663	27	68	A
	母材	L	LSBL	3.013	7.13	15.02	-	-	4689	658	5186	727	22	78	A
		T	LSBT	3.010	7.12	15.01	-	-	4649	653	5206	731	23	77	A
解体材	溶接金属	溶接方向	LKW	3.010	7.12	15.03	-	-	3753	527	4555	640	27	63	A
	母材	L	LKBL	3.008	7.11	15.03	4301	605	4237	596	4773	671	26	74	A
		T	LGBT	3.011	7.12	15.03	4251	597	4225	593	4756	668	24	65	A

* 試験片符号 LSW, LKW, LSBL, LSBT は明瞭な降伏現象が認められなかったため、上降伏点無し

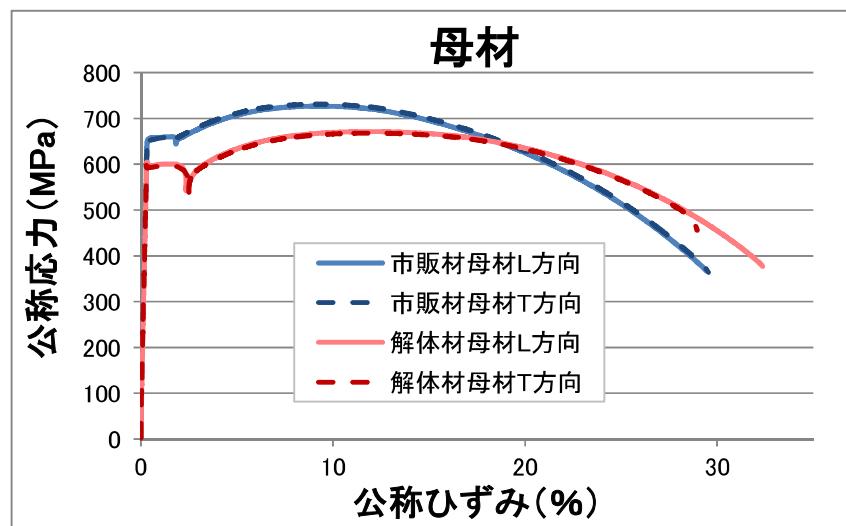


図 3.4 母材の応力-ひずみ曲線図

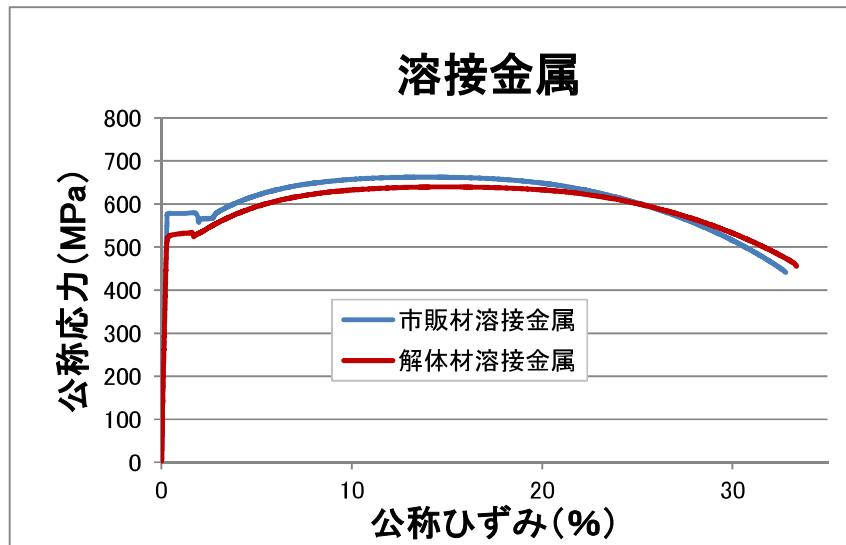


図 3.5 溶接金属の応力-ひずみ曲線図

4. マクロ観察及び硬さ試験

4. 1 目的

本報で使用する溶接継手の溶接断面形状を確認するために、マクロ観察を実施した。また、溶接継手の硬さは、その鋼材の溶接性や機械的性質を示す指標の一つである。そこで、溶接部近傍の機械的性質を把握する目的で、溶接部断面のビックアース硬さ試験を実施した。

これらの試験には共通のサンプルを用いており（マクロ試験の後に硬さ試験を実施）、溶接継手からの試験片採取要領を添付資料9に示す。

4. 2 マクロ観察

市販材、解体材それぞれについて、溶接断面形状を確認する目的で、硬さ試験に先立つて、溶接線に垂直な断面のマクロ観察を実施した。

マクロ観察写真を図4.1に示す。

市販材、解体材ともに溶接欠陥もなく良好なマクロ組織を呈していた。熱影響部の幅に違いがみられるのは、溶接入熱量および板厚の影響によるものと考えられる。

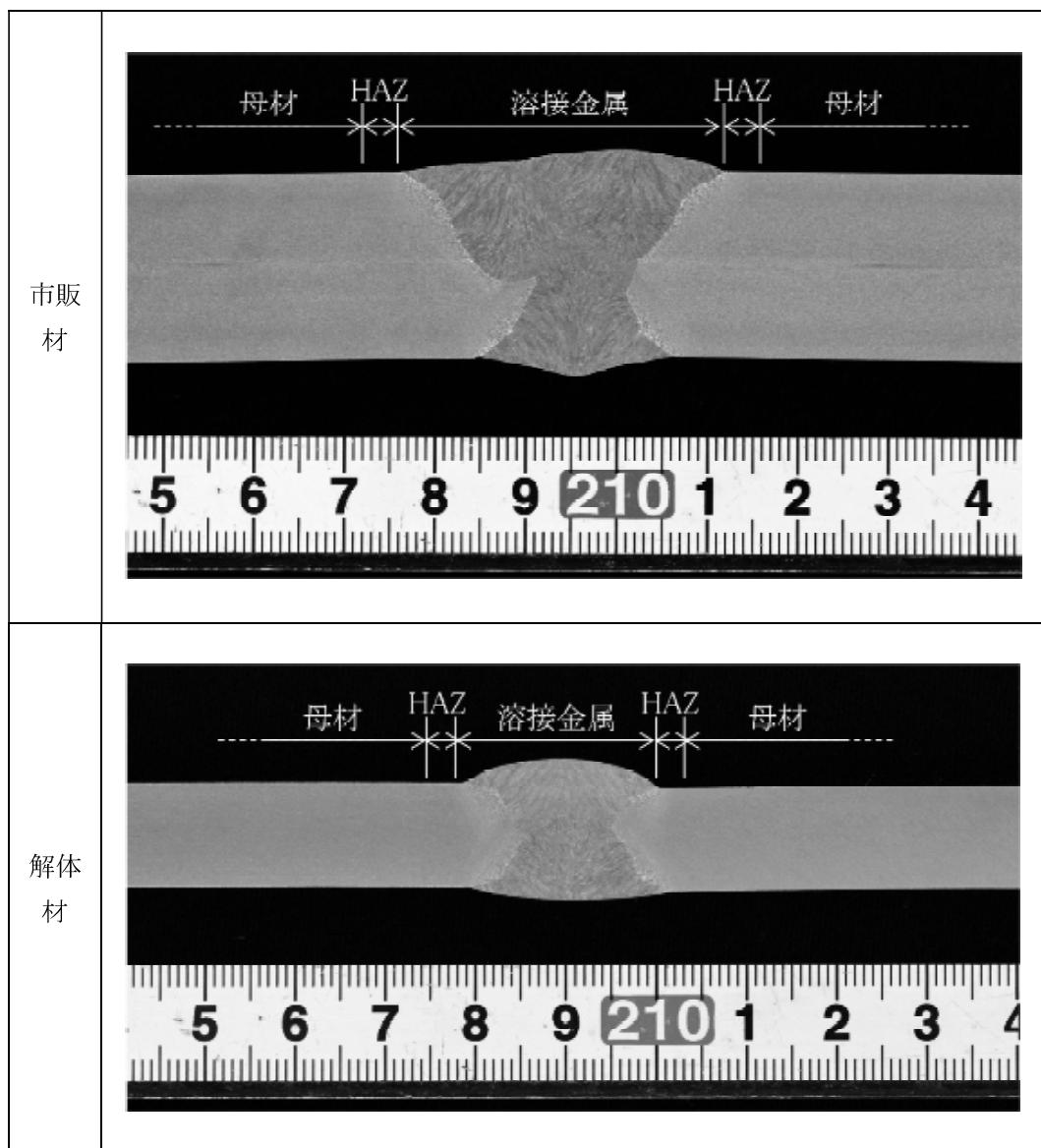


図 4.1 マクロ観察写真

4. 3 硬さ試験

4.3.1 試験方法

JIS Z 2244:2009^[3]に準拠して、硬さ試験を実施した。測定位置は図 4.2 に示す通り、市販材は 6 ライン、解体材は 4 ラインとした。市販材のライン 1 は表面から 1mm、ライン 6 は裏面から 1mm、ライン 2～6 はライン 1 と 6 の間で等間隔になるように設定し(約 3.6mm)、解体材のライン 1 は外径側の面から 1mm、ライン 4 は内径側の面から 1mm、ライン 2, 3 はライン 1 と 4 の間で等間隔になるように設定した(約 3mm)。なお、表裏面からの距離は、それぞれの溶接止端部から板厚方向に測定した距離とした。試験荷重は、HAZ から 4 点程度のデータが取得できるように 1kgf とし、保持時間は 10 秒とした。

4.3.2 試験結果

硬さ試験結果を図 4.3、4.4 に示す。

市販材、解体材とともに、熱影響部は母材および溶接金属に対して約 50HV 軟化している。また、市販材と解体材はほぼ同等の硬さレベルであった。

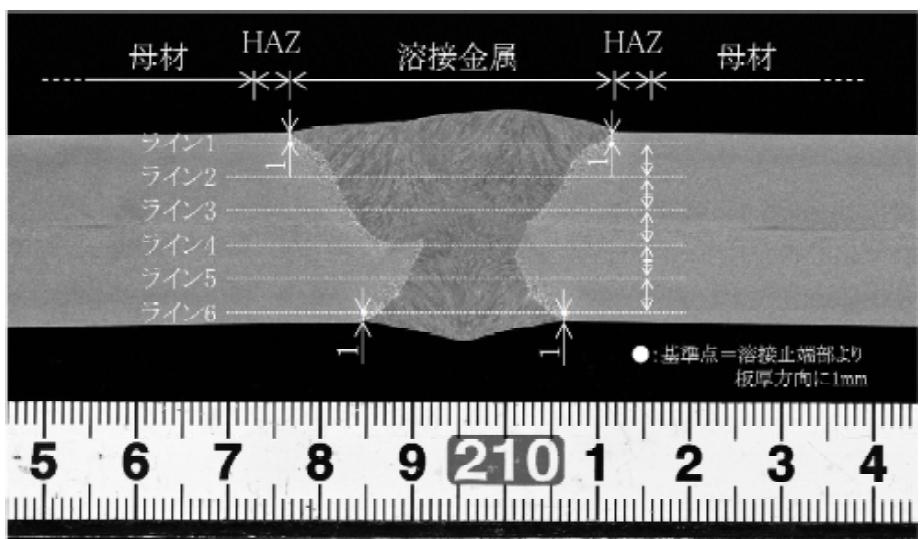
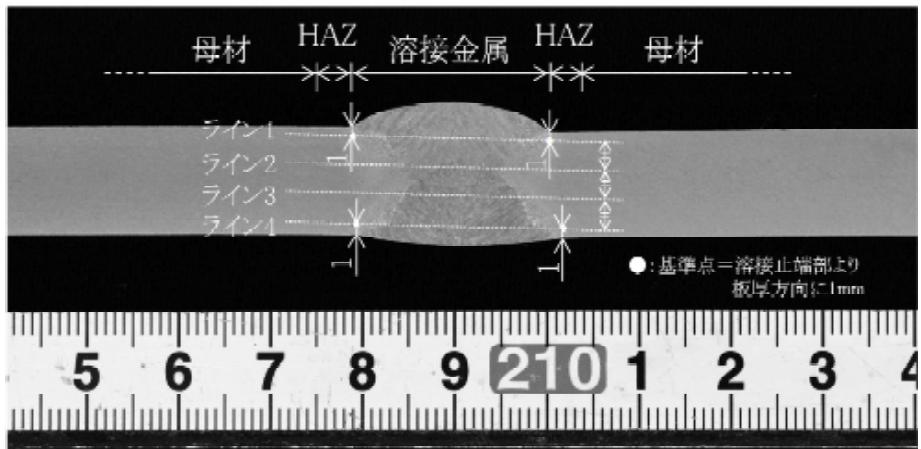
溶接 継手 区分	ビックカース硬さ測定位置
市販 材	
解体 材	

図 4.2 ビックカース硬さ測定位置

(単位 mm)

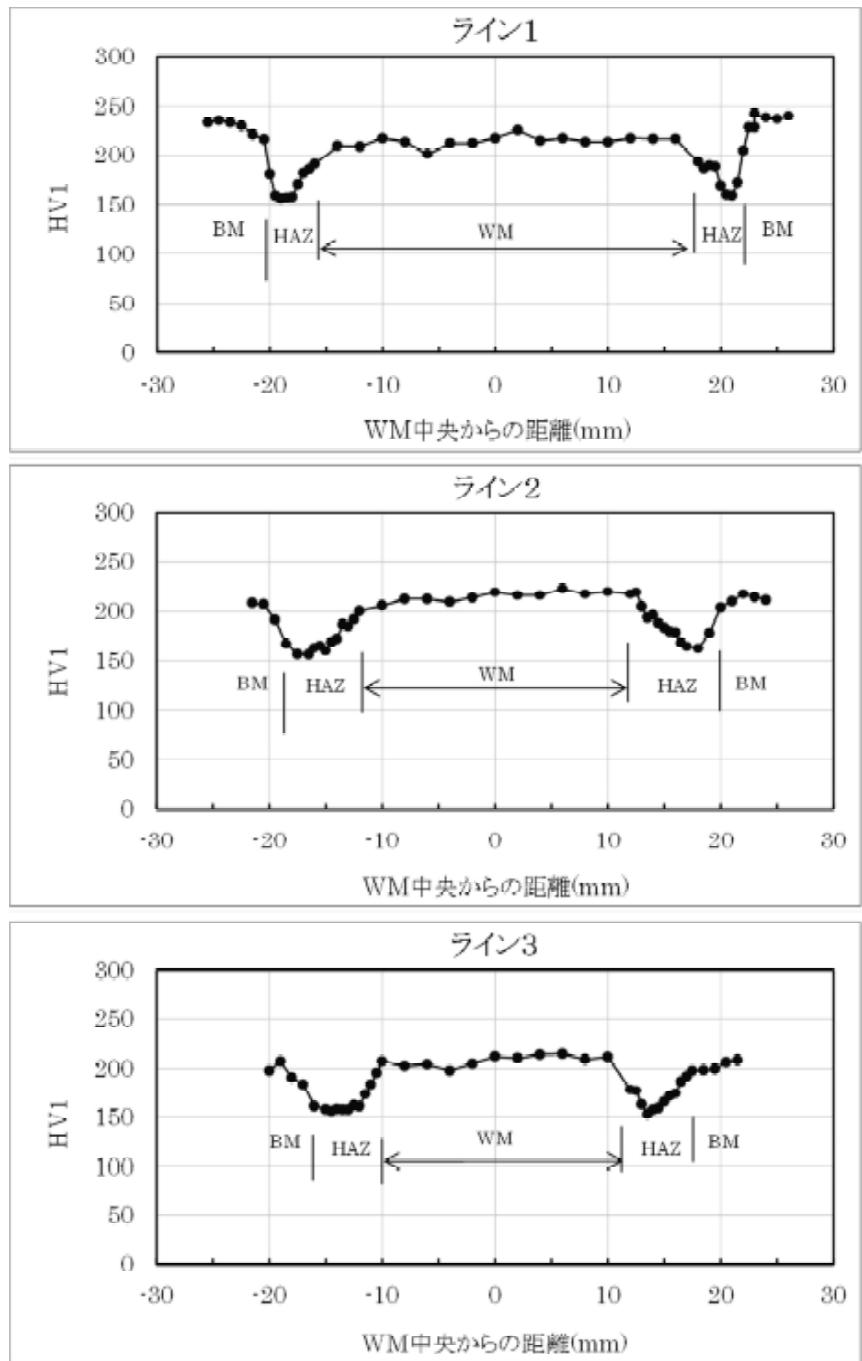


図 4.3 ビックカース硬さ試験結果 (市販材)

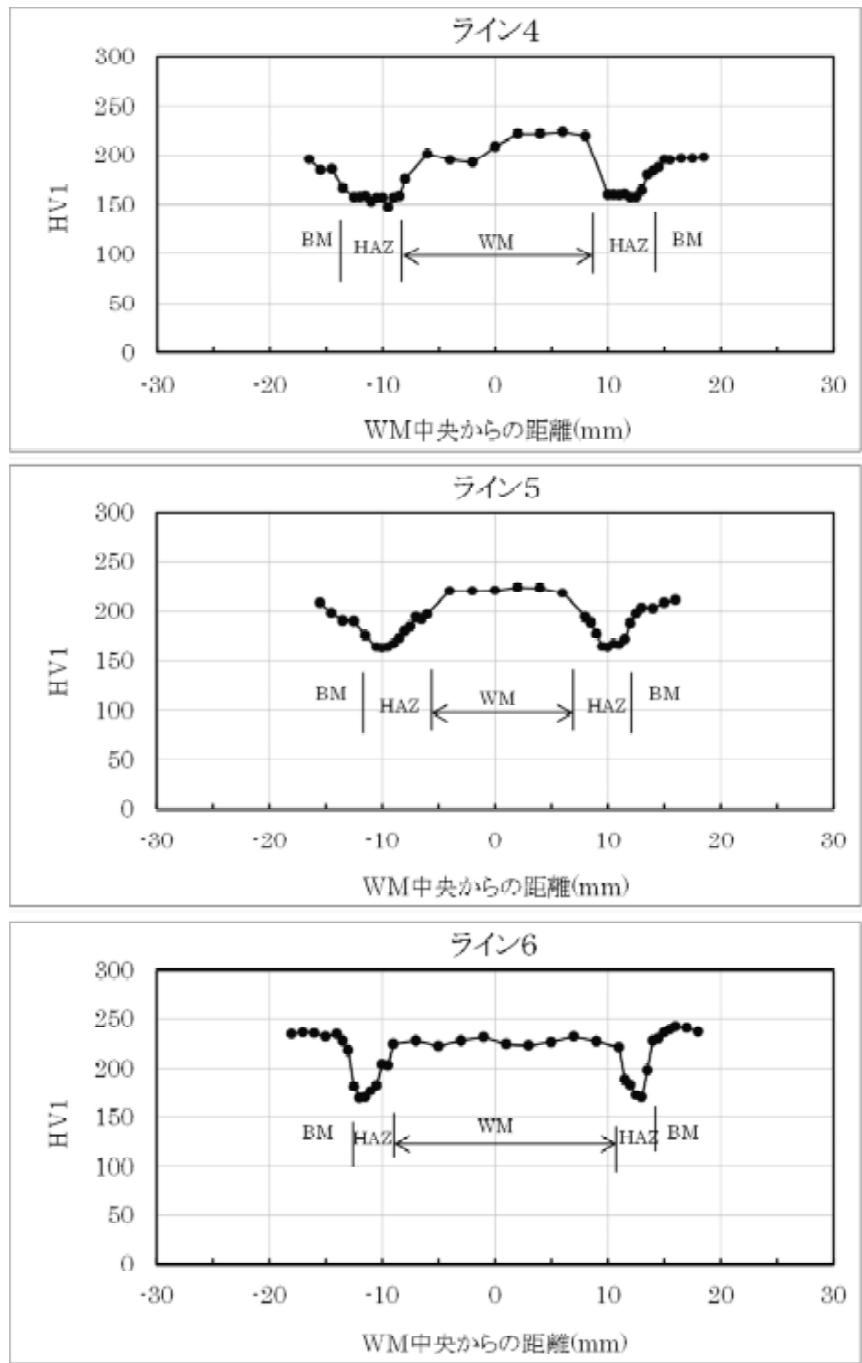


図 4.3 ビッカース硬さ試験結果 (市販材) (続き)

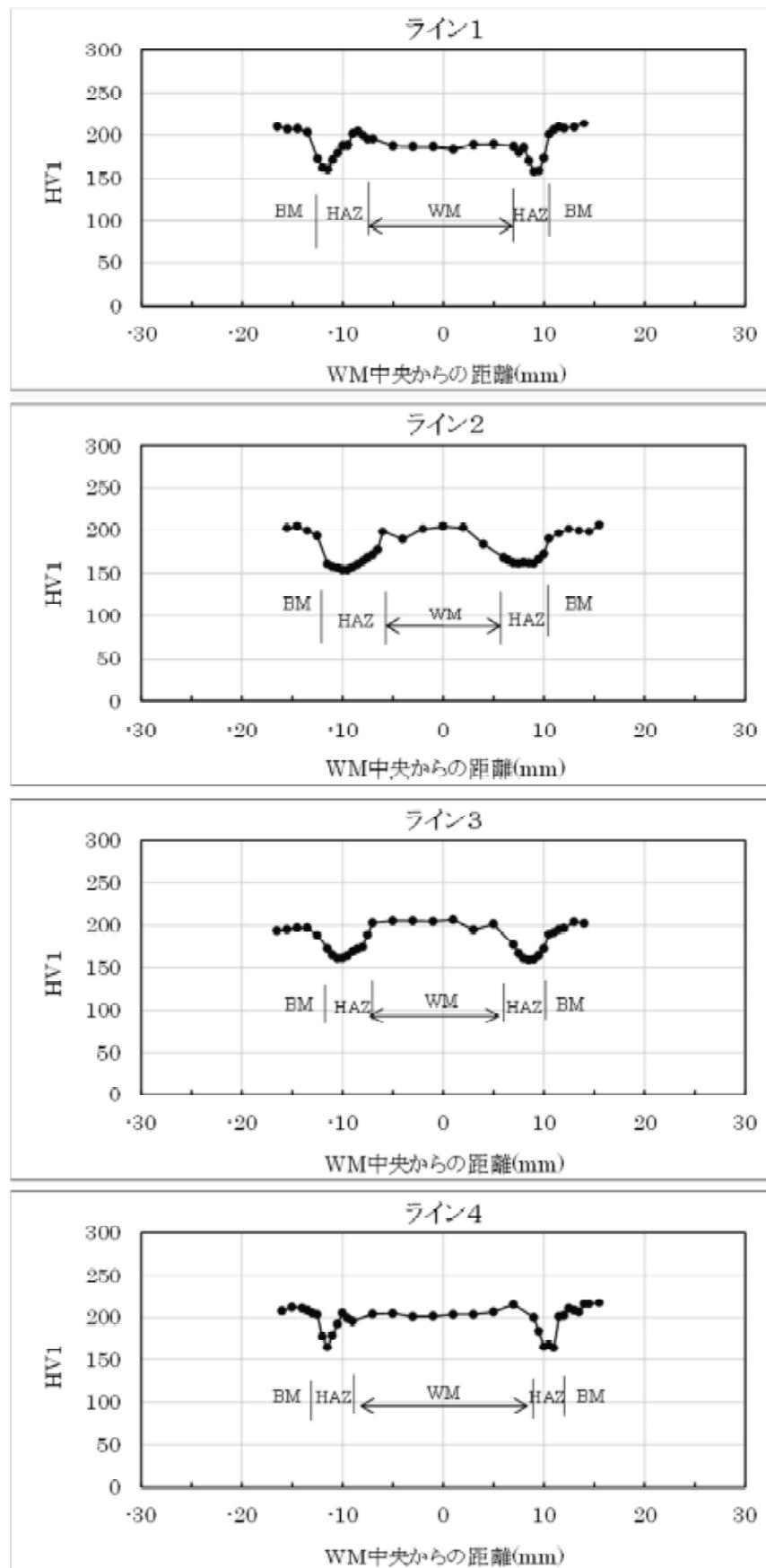


図 4.4 ビッカース硬さ試験結果 (解体材)

5. シャルピー衝撃試験

5. 1 目的

市販材と解体材の韌性レベルの比較、及び切欠き位置毎の韌性レベルの把握を行うために、シャルピー衝撃試験を実施した。試験温度は、SPV450 系貯槽の最低使用温度である -10°C を含む 7 温度とし、吸収エネルギー及び延性・脆性破面率を求め、延性-脆性遷移温度を確認した。

5. 2 試験片採取位置

溶接継手全体からの試験片採取要領図を添付資料 9 に示す。

試験片の採取方向は、解体材の採取方向を変えた母材 L 方向のみ溶接線方向とし、それ以外の市販材および解体材の母材（T 方向）、ボンド部、溶接金属中央は溶接線方向に垂直な方向とした。これらの採取方向の概略図を図 5.1 に示す。

板厚方向における採取位置および切欠位置は図 5.2、5.3 に示す位置とした。母材以外の切欠位置は、採取試験片の片側断面を研磨および腐食して決定した。なお、市販材の切欠位置ボンドの試験片の採取位置は、全厚に対する垂直ボンド線上でシャルピー試験片厚 10mm に対して垂直ボンドとなる板厚位置とした（詳細は添付資料 11 参照）。垂直ボンドの定義は図 5.4 に示す通り「母材と溶接金属の比が 1:1 となる位置」とした。

これらの採取要領をまとめて表 5.1 に示す。

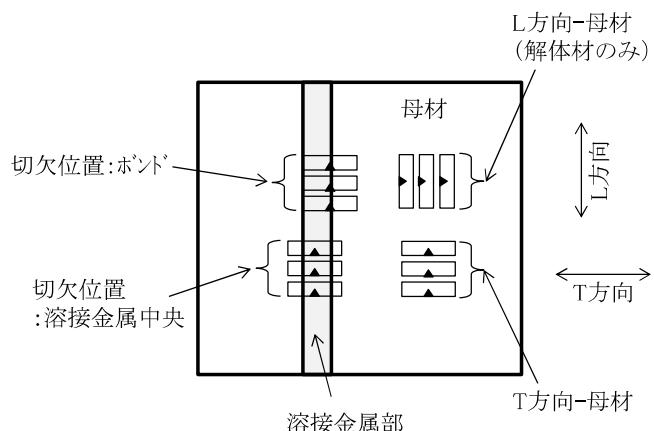


図 5.1 試験片採取位置の概略図

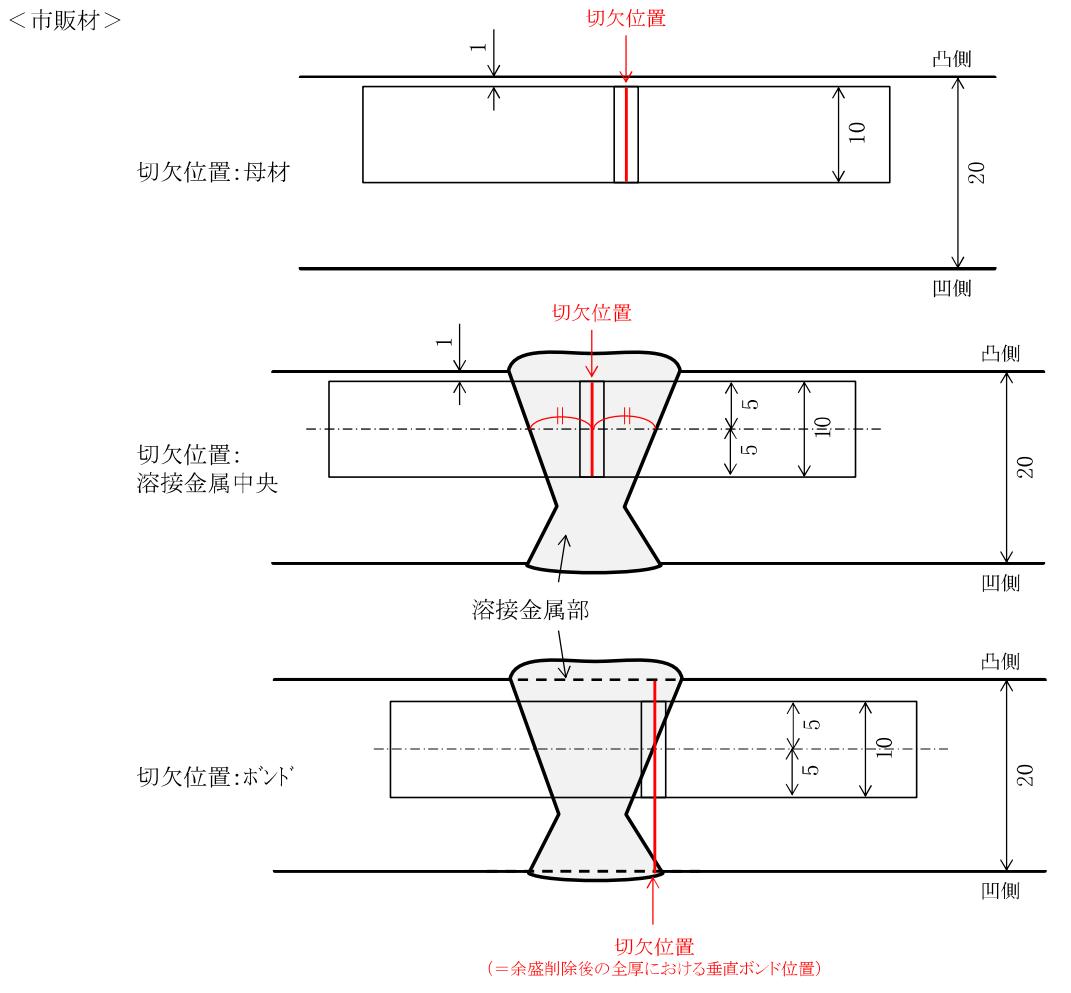


図 5.2 シャルピー衝撃試験片の板厚方向における採取要領および切欠位置 (市販材)

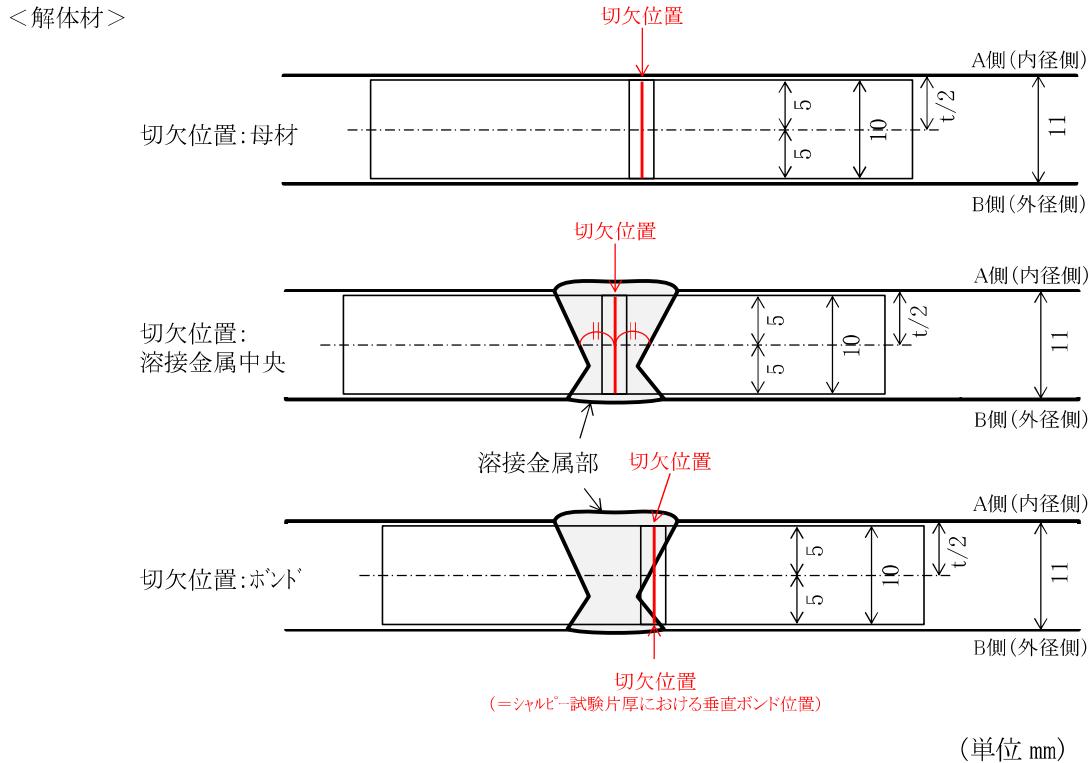


図 5.3 シャルピー衝撃試験片の板厚方向における採取要領および切欠位置（解体材）

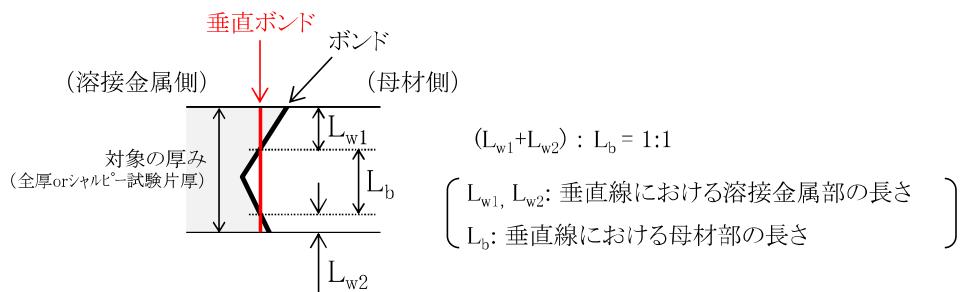


図 5.4 垂直线のボンドの定義

表 5.1 シャルピー衝撃試験片採取要領

溶接継手区分	切欠位置	板厚位置	採取方向	本数
市販材 (板厚 20mm)	母材	表面下 1mm	T 方向	(n:3) × 7 温度
	ボンド部	図 5.4 および図 a.11 参照	溶接方向に垂直	(n:3) × 7 温度
	溶接金属中央	表面下 1mm	溶接方向に垂直	(n:3) × 7 温度
解体材 (板厚 11mm)	母材	t/2	L 方向	(n:3) × 7 温度
		t/2	T 方向	(n:3) × 7 温度
	ボンド部	t/2	溶接方向に垂直	(n:3) × 7 温度
	溶接金属中央	t/2	溶接方向に垂直	(n:3) × 7 温度

5. 3 試験方法

JIS Z 2242:2005^[4]に準拠して試験を実施した。試験片形状を図 5.5 に、試験条件を表 5.2 に示す。試験では、各試験片を所定の試験温度±1°Cに維持した冷媒に浸して 5 分間以上経過した後、ハンマで衝撃を与えた。なお、切欠位置ボンドおよび溶接金属の試験片は、初めに必須温度である-10°Cの試験を実施し、その脆性破面率に応じて次の試験温度を決定した。その作業を繰り返して、上部棚温度を含む計 7 温度分の試験を実施した。

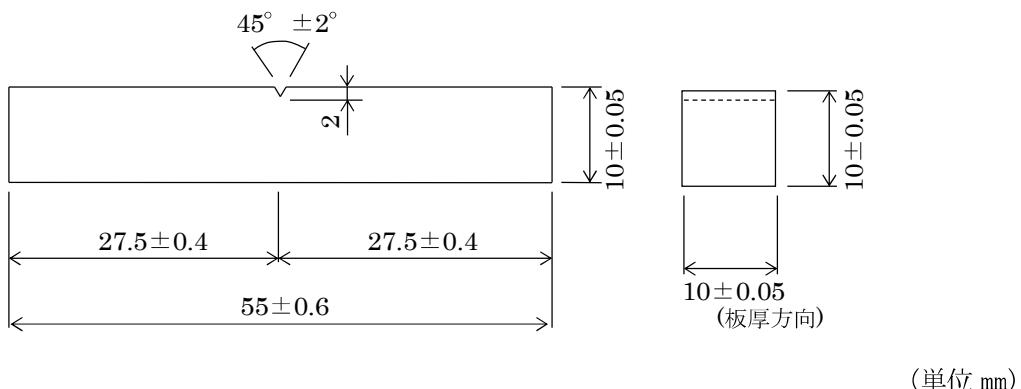


図 5.5 シャルピー衝撃試験片形状 (JIS Z 2242 V ノッチ試験片)

表 5.2 シャルピー衝撃試験 試験条件

試験規格	JIS Z 2242:2005 ^[4]
試験温度	-10°Cを含む計 7 温度
使用試験機	株東京衡機製造所 衝撃試験機シャルピー式 (491.3J)

5. 4 試験結果

試験結果一覧を表 5.3-1~3 に、切欠位置ボンド部と溶接金属部の遷移曲線を図 5.6-1 ~3 に示す。また、試験後の破面写真を添付資料 12 に示す。

以下に試験結果に対するコメントをまとめる。

- ① 市販材の遷移温度は、母材部の T 方向で-65°C、ボンド部で-46°C、溶接部で-32°Cであった。一方、解体材の遷移温度は、母材部の T 方向で-29°C、ボンド部で-31°C、溶接部で-23°Cであった。また、-10°Cの吸収エネルギー（平均値）については、市販材の母材部の T 方向で 227J、ボンド部で 189J、溶接金属部で 81J であった。一方、解体材の母材部の T 方向で 46J、ボンド部で 56J、溶接金属部で 54J であった。
- ② 市販材と解体材の母材の遷移温度を比較すると、市販材の方が 30°C以上低かった。また、-10°Cの吸収エネルギーは市販材は解体材の約 4.9 倍になっている。昭和 50 年代後半までは、当該材料は IC(インゴットキャスト)製法で製造されていた。一方、昭和 50 年代後半以降は連続鋳造方式となり、鋼材中の偏析レベルが改善されたことや、シャルピー衝撃試験の試験片の採取方向の指定によるクロス圧延の適用が、吸収エネルギーや遷移温度の差に表れたと考えられる。
- ③ 市販材と解体材の溶接金属の遷移温度を比較すると、市販材の方が 10°C程度低くなっている。また、-10°Cの吸収エネルギーは市販材は解体材の 1.5 倍になっている。母材ほどではないが、溶接材料についても韌性の向上が図られており、不純物成分の

低減等が吸収エネルギーや遷移温度の差に表れたと考えられる。

- ④ 市販材、解体材共に、ボンドの切欠位置には、母材、HAZ および溶接金属が共存することから、それぞれの韌性が平均化されてボンドの遷移温度として現れていると解釈できる。破面上では HAZ の結晶粒が明らかに粗大化しており、HAZ そのものの韌性は悪いことが推測できるが、その影響はボンドの遷移温度には顕著に現れなかつたものと考えられる。
- ⑤ 解体材の母材 T 方向の破面には、亀裂進展方向に沿って細かい筋が確認できた。この細かい筋は、偏析に沿って現れたもので、素材鋼板にはミクロ偏析があることが考えられる。また、解体材 L 方向の破面には、顕著なセパレーションが見受けられた。一般的に考えられている理屈として、L 方向採取の試験片は、試験片長手方向（= 破面に対しては奥行方向）が圧延方向となり、その方向に偏析が伸びているため、破面に深いセパレーションが生じることとなる。
- ⑥ 解体材の L 方向と T 方向の結果を比較すると、L 方向の吸収エネルギーが T 方向の 3 倍近くであった。この原因を一般論から述べると、T 方向採取の試験片は、圧延で延伸した組織に沿って亀裂が発生/進展するが、L 方向採取の試験片は圧延で延伸した組織を横切って亀裂が発生/進展するため、それらには多くのエネルギーが必要となる。つまり、T 方向より L 方向採取の方が吸収エネルギーは大きくなる。この L 方向と T 方向の吸収エネルギーの差が、脆性破面率、さらには遷移温度の差に表れたと考えられる。

表 5.3-1 シャルピー衝撃試験結果一覧 (市販材)

切欠位置	試験温度 (°C)	試験片 記号	吸収エネルギー(J)		延性破面率(%)		vTs (°C)
			個々の値	平均値	個々の値	平均値	
母材 (T方向)	20	LSB7	1 239		100		-65
			2 250	248	100		
			3 256		100		
	-10	LSB1	1 230		100		
			2 239	227	100		
			3 211		90		
	-40	LSB2	1 162		65		
			2 240	191	100		
			3 170		70		
	-60	LSB4	1 149		60		
			2 132	146	55		
			3 156		60		
ボンド部	-70	LSB6	1 155		55		-46
			2 121	133	40		
			3 122		40		
	-80	LSB3	1 30		10		
			2 127	93	35		
			3 122		30		
	-100	LSB5	1 14		5		
			2 38	46	15		
			3 87		20		
溶接金属 中央	60	LSF7	1 203		100		-32
			2 200	201	100		
			3 200		100		
	20	LSF6	1 170		90		
			2 181	189	95		
			3 215		100		
	-10	LSF1	1 163		90		
			2 154	162	80		
			3 169		90		
	-20	LSF5	1 98		75		
			2 136	123	80		
			3 135		80		
溶接金属 端部	-40	LSF2	1 91		60		-32
			2 56	81	50		
			3 97		55		
	-60	LSF3	1 39		40		
			2 49	41	35		
			3 36		40		
	-80	LSF4	1 30		25		
			2 25	21	25		
			3 8		15		
溶接金属 端部	60	LSW7	1 131		100		-32
			2 135	133	100		
			3 133		100		
	20	LSW6	1 120		85		
			2 105	113	80		
			3 114		85		
	-10	LSW1	1 75		65		
			2 88	81	65		
			3 81		65		
	-20	LSW5	1 72		65		
			2 75	70	60		
			3 64		60		
溶接金属 端部	-40	LSW2	1 41		40		-32
			2 33	43	45		
			3 56		45		
	-60	LSW3	1 35		35		
			2 22	27	30		
			3 25		35		
	-80	LSW4	1 12		15		
			2 10	11	15		
			3 10		15		

表 5.3-2 シャルピー衝撃試験結果一覧 (解体材-母材)

切欠位置	試験温度 (°C)	試験片 記号	吸収エネルギー(J)		延性破面率(%)		vTs (°C)	
			個々の値	平均値	個々の値	平均値		
母材 (L方向)	20	LKBBL3	1 160	163	100	100	-48	
			2 172		100			
			3 157		100			
	-10	LKBBL1	1 151	155	100	100		
			2 153		100			
			3 162		100			
	-40	LKBBL2	1 105	105	80	80		
			2 101		75			
			3 109		85			
	-50	LKBBL7	1 91	67	60	43		
			2 71		55			
			3 40		15			
母材 (T方向)	-60	LKBBL6	1 29	25	10	12	-29	
			2 14		10			
			3 33		15			
	-80	LKBBL5	1 9	10	5	5		
			2 11		5			
			3 10		5			
	-100	LKBBL4	1 3	3	5	5		
			2 3		5			
			3 3		5			
	60	LKB7	1 57	56	100	100		
			2 56		100			
			3 55		100			
	20	LKB4	1 56	54	95	95		
			2 53		95			
			3 53		95			
	-10	LKB1	1 46	46	75	70		
			2 49		80			
			3 42		55			
	-20	LKB5	1 38	39	60	60		
			2 42		65			
			3 37		60			
	-30	LKB6	1 33	31	60	57		
			2 27		55			
			3 32		55			
	-40	LKB2	1 20	22	30	32		
			2 21		30			
			3 25		35			
	-60	LKB3	1 15	16	15	15		
			2 16		15			
			3 17		15			

表 5.3-3 シャルピー衝撃試験結果一覧 (解体材-ボンド部、溶接金属中央)

切欠位置	試験温度 (°C)	試験片 記号	吸収エネルギー(J)		延性破面率(%)		vTs (°C)	
			個々の値	平均値	個々の値	平均値		
ボンド部	60	LKF7	1 103	106	95	97	-31	
			2 108		100			
			3 107		95			
	20	LKF6	1 67	76	80	85		
			2 89		90			
			3 72		85			
	-10	LKF1	1 56	56	60	63		
			2 54		65			
			3 58		65			
	-20	LKF5	1 48	48	60	62		
			2 44		60			
			3 52		65			
溶接金属 中央	-40	LKF2	1 33	36	40	43	-23	
			2 41		45			
			3 33		45			
	-60	LKF3	1 23	24	30	27		
			2 21		25			
			3 28		25			
	-80	LKF4	1 18	15	20	22		
			2 17		20			
			3 10		25			
	60	LKW7	1 97	96	100	100		
			2 98		100			
			3 94		100			
	20	LKW4	1 83	82	95	92		
			2 84		90			
			3 80		90			
	-10	LKW1	1 49	54	65	63		
			2 61		70			
			3 53		55			
	-20	LKW5	1 46	45	55	53		
			2 48		55			
			3 41		50			
	-30	LKW6	1 36	38	35	37		
			2 35		30			
			3 44		45			
	-40	LKW2	1 33	27	45	38		
			2 23		35			
			3 26		35			
	-60	LKW3	1 13	13	15	15		
			2 10		15			
			3 16		15			

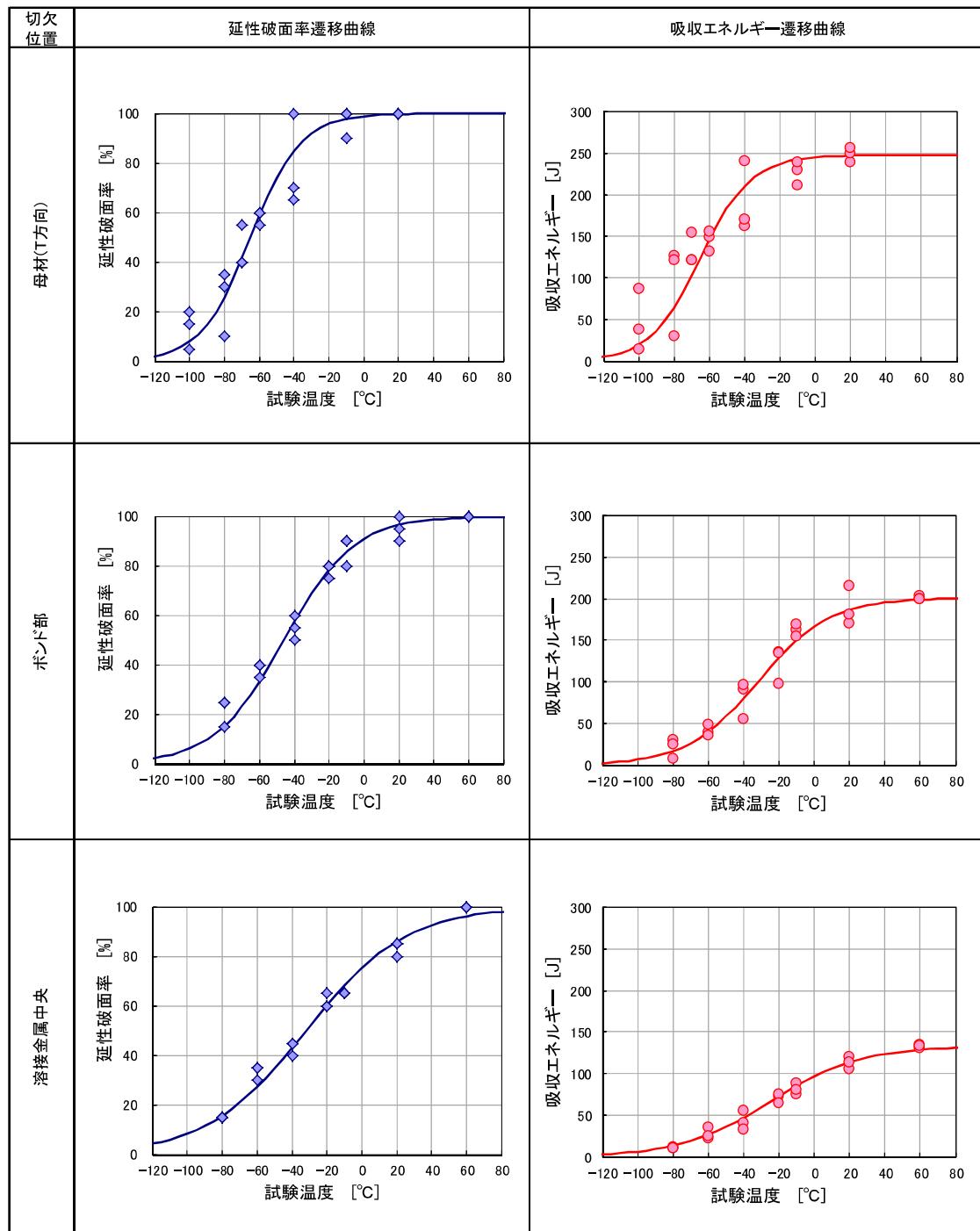


図 5.6-1 シャルピー衝撃試験 遷移曲線 (市販材)

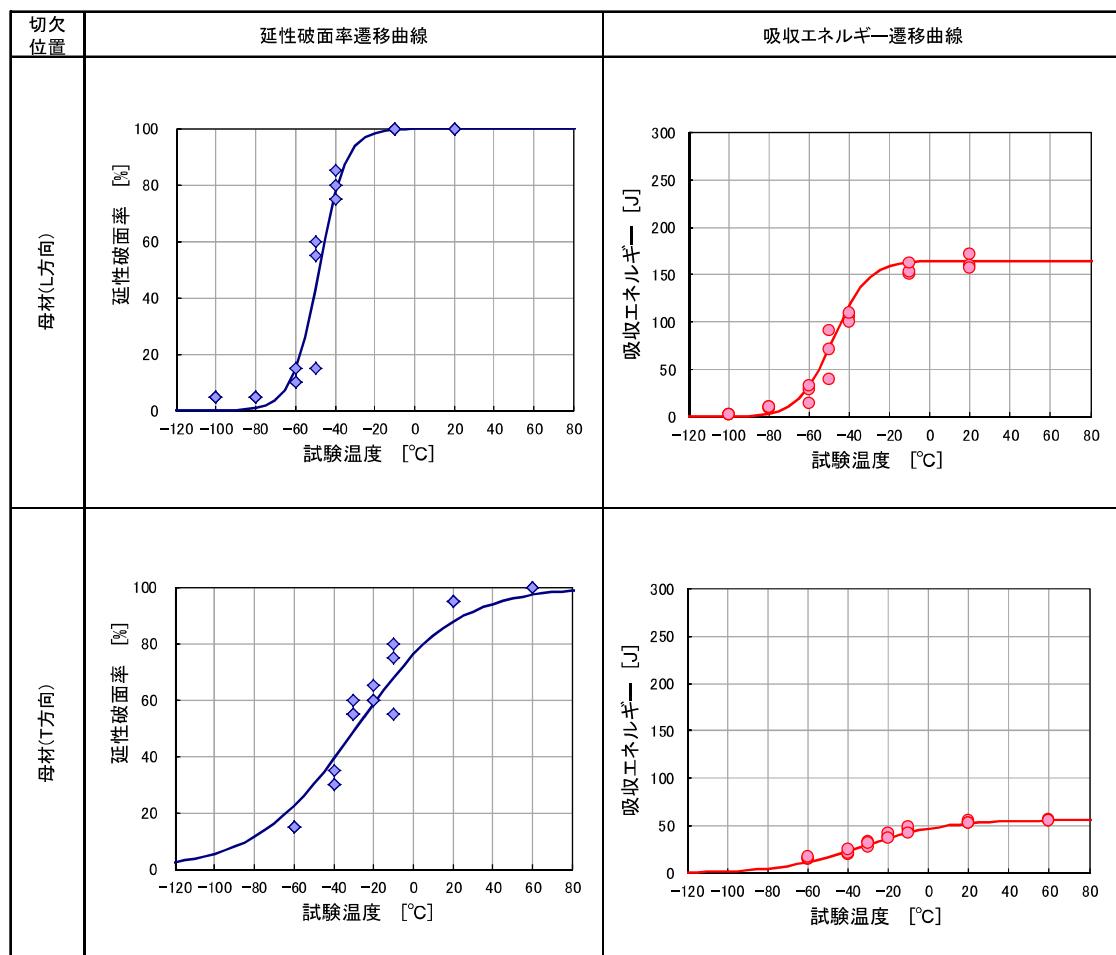


図 5.6-2 シヤルピー衝撃試験 遷移曲線 (解体材-母材)

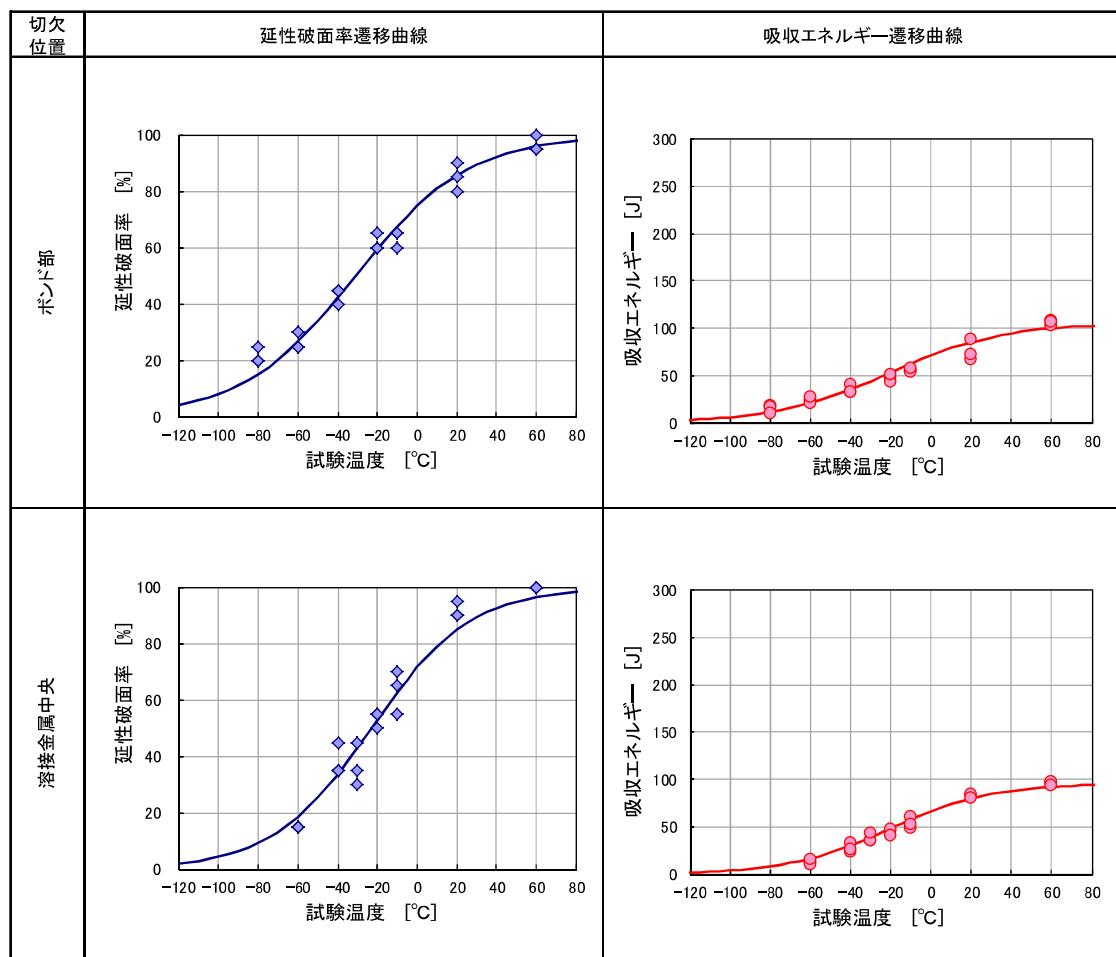


図 5.6-3 シャルピー衝撃試験 遷移曲線 (解体材-ボンド部、溶接金属中央)

6. J_{IC} 試験

6. 1 目的

FAD評価に用いる破壊靱性値 J_{IC} の取得を目的として J_{IC} 試験を実施した。溶接部の破壊靱性値はき裂位置により異なることが予想されるが、安全側評価としては、FAD評価に溶接継手破壊靱性値の最低値を用いる必要がある。そこで本試験では、市販材および解体材の溶接継手からそれぞれ母材部、ボンド部および溶接金属部をき裂先端とした破壊靱性試験片を作製し、各破壊靱性値 J_{IC} およびそれらにおける最低値を取得した。

また、 J_{IC} 試験はJGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」^[11]に記載があるISO12135(2002)^[5]に従って実施した。

6. 2 試験片採取位置

市販材および解体材の元板からの板取要領図をそれぞれ図6.1および図6.2に示す。市販材の破壊靱性試験片の採取位置は、添付資料7に示す非破壊検査結果の指示位置を避け採取した。解体材の元板については添付資料8に示すように非破壊検査の指示はなかつた。

また、市販材の角変形量と溶接線方向位置の関係を図6.3に示す。角変形量は図6.4に示す位置の長さであり、計測位置は、図6.5に記載するように外表面側の溶接止端部とした。測定間隔は50mmとした。図6.3に示すように溶接線位置で角変形量が大きく異なるため、採取位置は角変形量を考慮せずに図6.1のように決めた。解体材については、角変形が認められなかった。

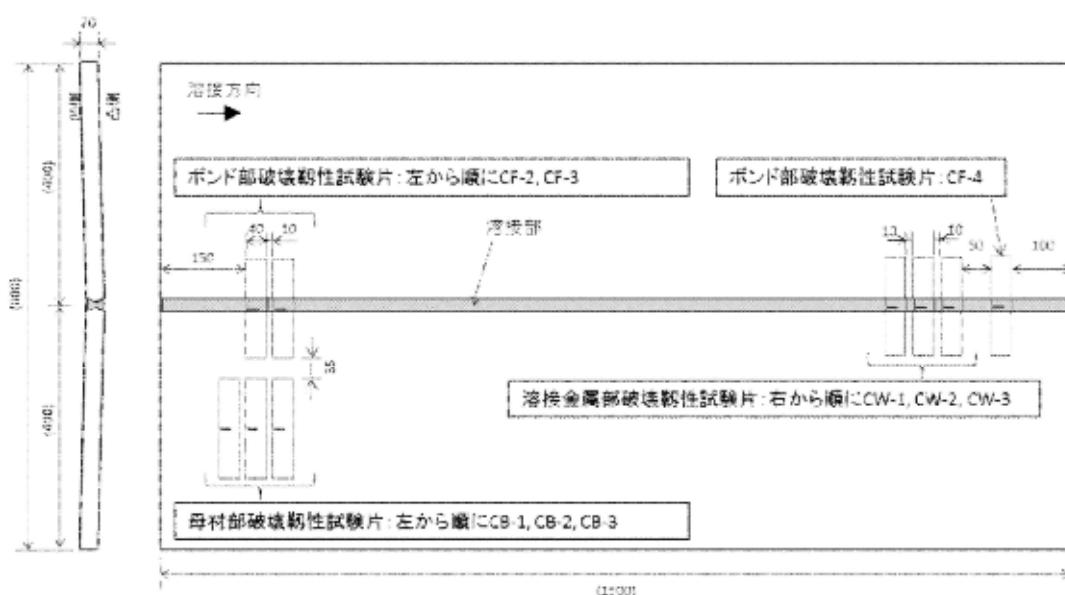


図6.1 市販材の板取要領

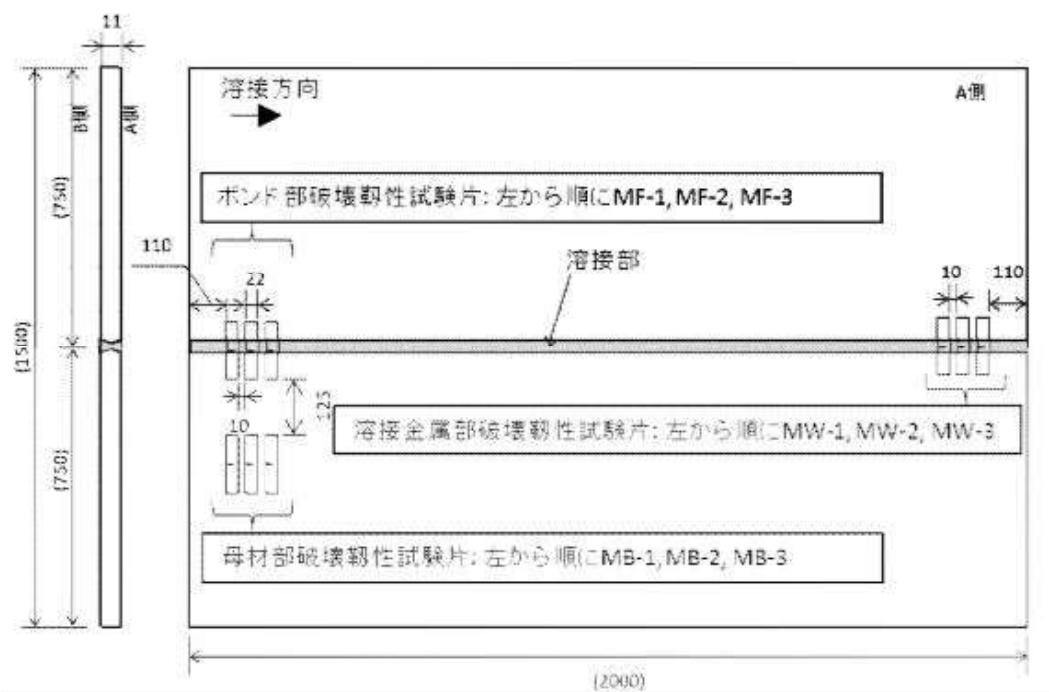


図 6.2 解体材の板取要領

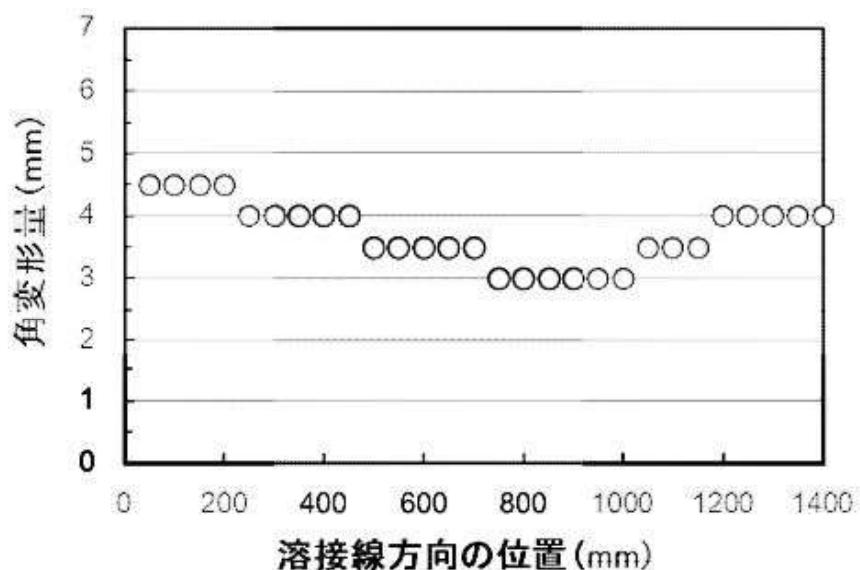


図 6.3 角変形量と溶接線方向の位置の関係（市販材）

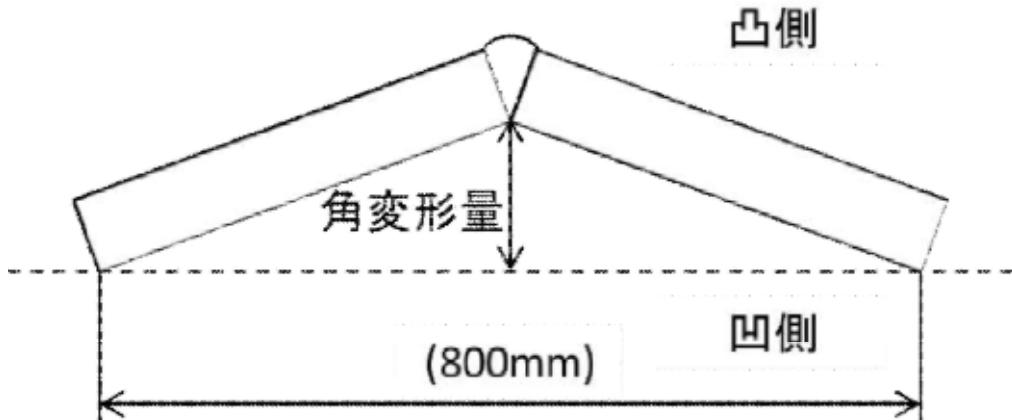


図 6.4 角変形量の定義（市販材）

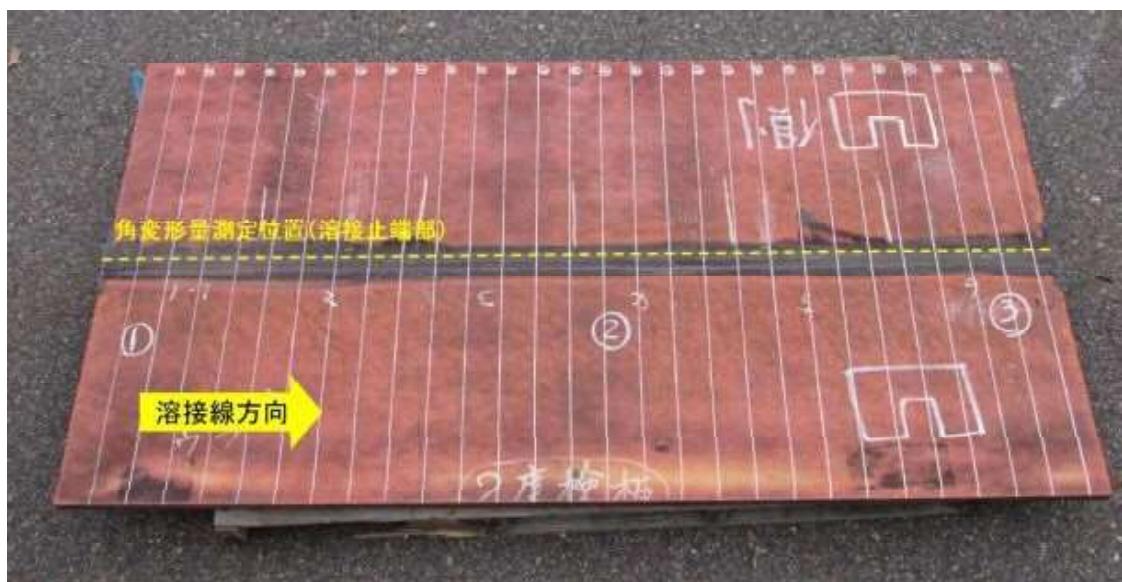


図 6.5 角変形量計測位置（市販材）

6. 3 試験片形状

試験片形状は 3 点曲げ試験片とし、市販材および解体材の試験片形状・寸法をそれぞれ図 6.6～図 6.9 に示す。表 6.1 に試験マトリクスを示す。作製した試験片の寸法一覧を添付資料 13 に示す。試験片形状は下記の条件を満たす必要がある。

- ① $1.0 \leq W/B \leq 4.0$
- ② $0.45 \leq a_{0s}/W \leq 0.70$

ここで、 W は試験片幅、 B は試験片板厚および a_{0s} は試験片表面で計測した初期き裂長さ（機械ノッチ長さと疲労予き裂長さの和）である。

本試験では、各試験片の機械ノッチ長さ（市販材：18mm、解体材 9mm）は疲労予き裂（3.5 節参照）をそれぞれ 2mm 導入したときに、試験片表面における初期き裂長さ a_{0s} の試験片

幅 W (市販材 : 40mm、解体材 : 22mm) に対する比 a_{0s}/W が 0.5 となるように決定した。

ボンド部試験片および溶接金属部試験片 (CF2~4、MF1~3、CW1~3、MW1~3) においては、角変形は残して溶接金属余盛部のみを切削し、切欠き導入部の板厚ができるだけ元厚に近い板厚となるように設定した。図 6.10 に示すように、溶接金属余盛部の切削は、溶接金属余盛部の止端部から止端部を切削した。

表 6.1 試験マトリクス

試験片 No.	材料	切欠き位置	試験温度 (°C)	
CB-1	市販材	母材部	-10	
CB-2				
CB-3		ボンド部		
CF-2				
CF-3				
CF-4		溶接金属部		
CW-1				
CW-2				
CW-3				
MB-1	解体材	母材部	-10	
MB-2				
MB-3		ボンド部		
MF-1				
MF-2				
MF-3		溶接金属部		
MW-1				
MW-2				
MW-3				

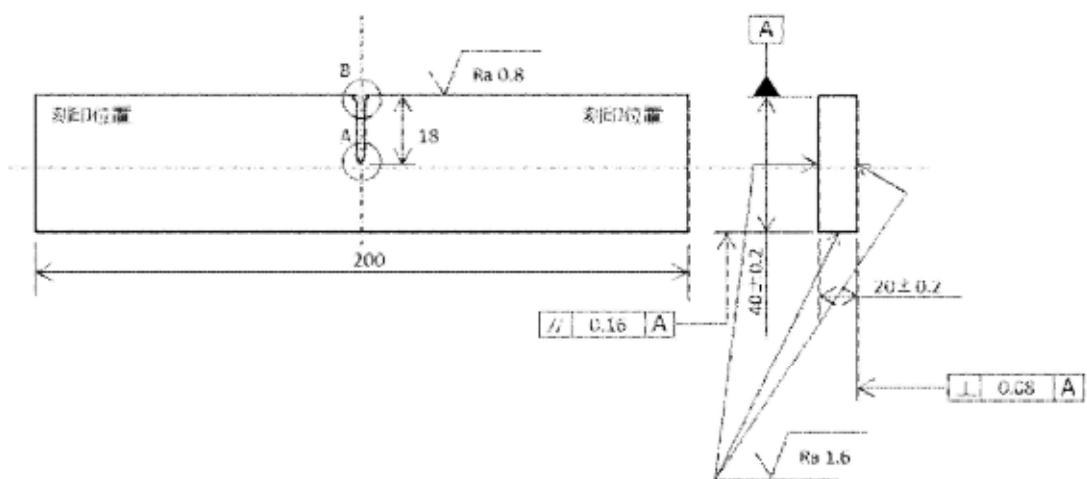


図 6.6 試験片形状 (市販材)

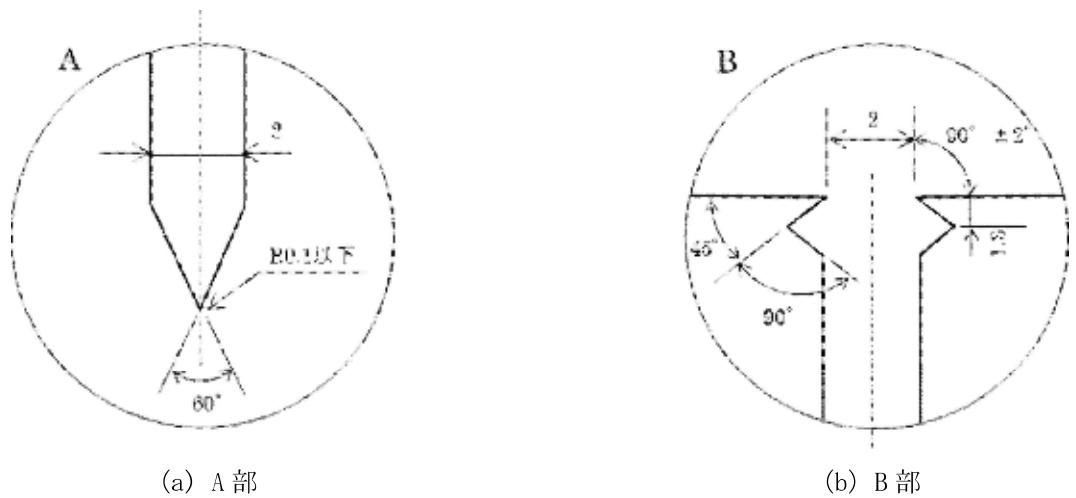


図 6.7 図 6.6 中の詳細図

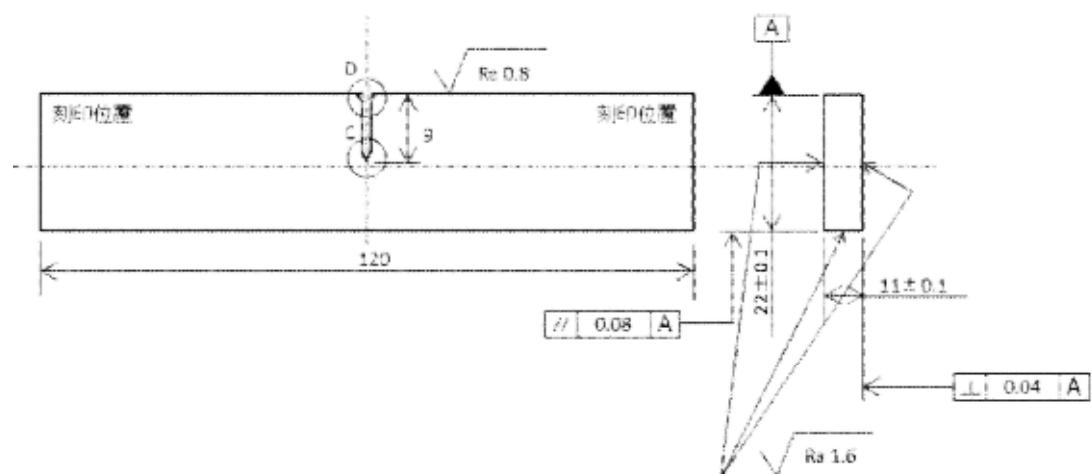


図 6.8 試験片形状（解体材）

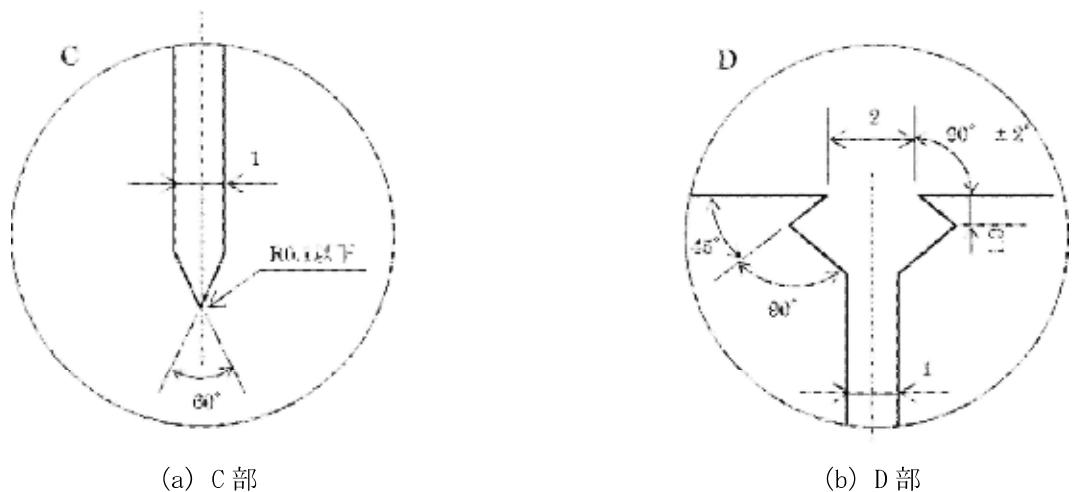


図 6.9 図 6.8 中の詳細図

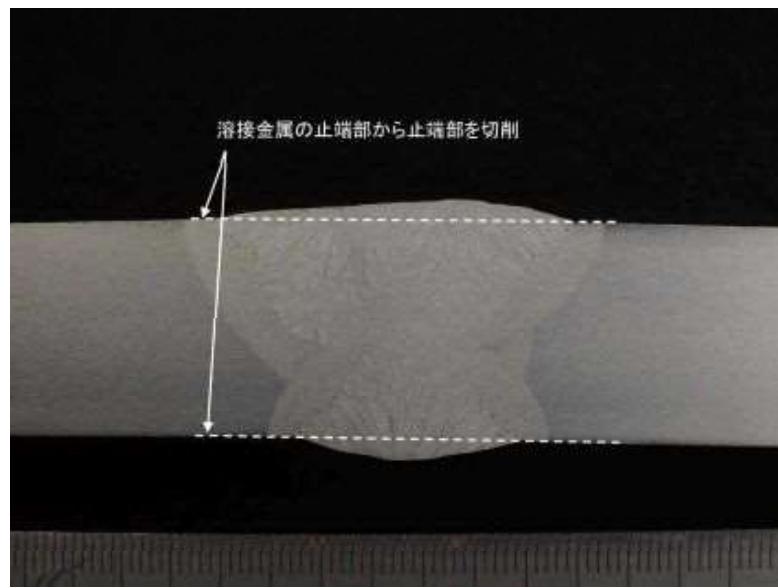
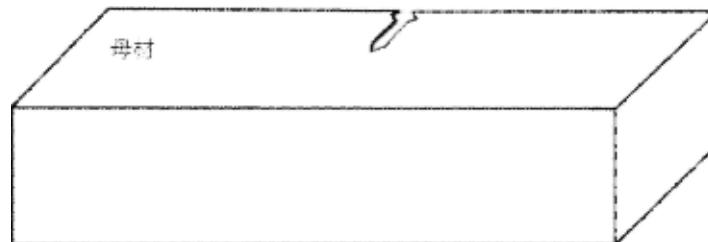


図 6.10 溶接金属余盛部の切削要領

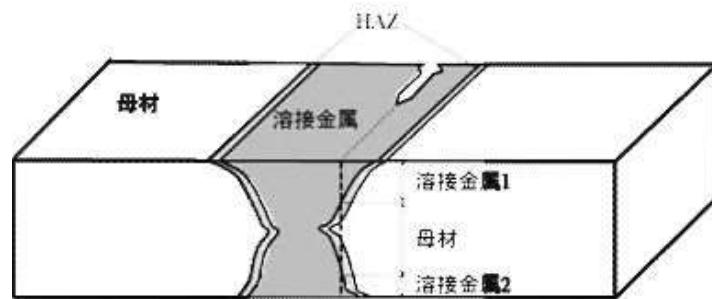
6. 4 切欠き導入位置

各試験片の切欠き導入位置を図 6.11 に示す。切欠きは板厚貫通き裂とし、ボンド部試験片においては切欠き先端の母材と溶接金属の比が 1:1 となる位置に、溶接金属部試験片においては溶接金属部が最もくびれた箇所を二分する位置にそれぞれ切欠きを導入した。切欠き位置は試験片毎に実施する溶接部断面のマクロ観察結果から決定した。

実際の切欠き導入位置をボンド部試験片 No. CF-4 試験片を例に取り、図 6.12 に示す。破線で示したように、図 6.11(b) で定義されるボンド部が切欠き先端部となるように切欠き位置を決定した。試験片 No. CF-4 を含むボンド部および溶接金属部試験片の切欠き導入位置の一覧については、添付資料 14 に記載する。

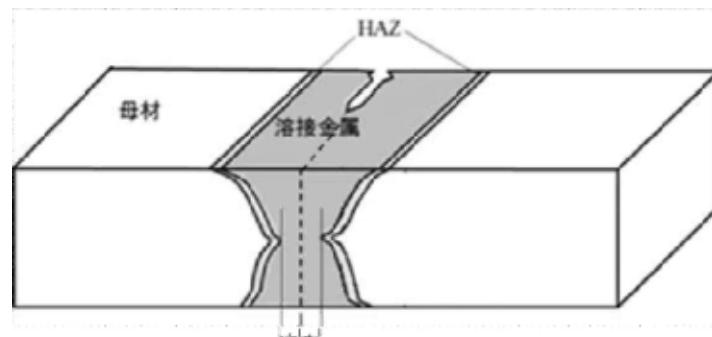


(a) 母材部試験片



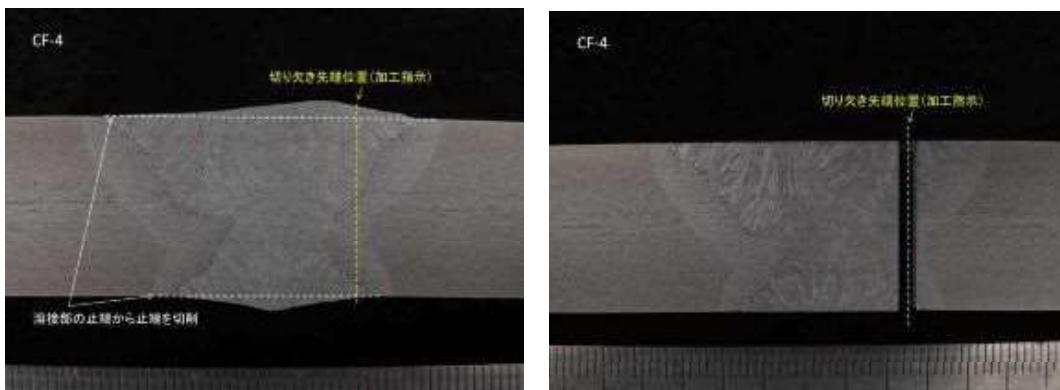
溶接金属1+溶接金属2 : 母材 = 1 : 1

(b) ポンド部試験片



(c) 溶接金属部試験片

図 6.11 切欠き導入位置



(a) 切欠き導入前

(b) 切欠き導入後

図 6.12 切欠き導入位置(CF-4)

6. 5 疲労予き裂導入試験

疲労予き裂の導入は、ISO12135(2002)^[5]を参考に、室温下の3点曲げ試験で実施した。疲労予き裂を導入する際の荷重 F_f は次式(6.1)、(6.2)から求めた荷重のいずれか小さい値以下となるように設定した。

$$F_f = 0.8 \times \frac{B(W - a_{0s})^2}{S} \times R_{p0.2} \quad (6.1)$$

$$F_f = \xi \times E \left[\frac{(W \times B \times B_N)^{0.8}}{g_1 \left(\frac{a_{0s}}{W} \right)} \right] \left(\frac{W}{S} \right) \times \frac{R_{p0.2}^2}{R_{p0.2}^2} \quad (6.2)$$

ここで、 B は試験片板厚[mm]、 W は試験片幅[mm]、 a_{0s} は初期き裂長さ[mm]、 $R_{p0.2}$ は疲労予き裂導入試験温度における0.2%耐力 $R_{p0.2}^1$ [MPa]と J_{lc} 破壊韌性試験温度における0.2%耐力 $R_{p0.2}^2$ [MPa]のうち小さい方を採用し、 ξ は $1.6 \times 10^{-4} m^{1/2}$ 、 E は試験温度におけるヤング率[GPa]、 B_N はサイドグループ間の正味板厚[mm](今回、サイドグループはないので $B_N = B$ とする)である。 S は図6.13に示す3点曲げ試験の荷重スパン長さであり、式(6.3)で与えられている。本試験では、荷重スパン長さを $4W$ とした(市販材： $S=160\text{mm}$ 、解体材： $S=88\text{mm}$)。

$$S = 4W \pm 0.2W \quad (6.3)$$

$g_1(a_{0s}/W)$ は、 a_{0s}/W に関する係数で、ISO12135(2002) Annex D^[5]に記載されており、試験片毎に異なる値となる。

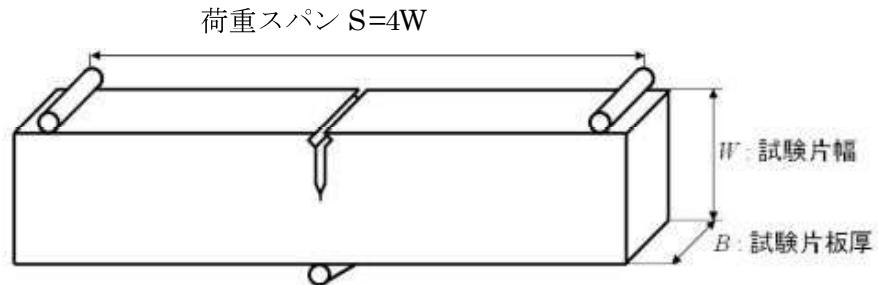


図6.13 3点曲げ試験 概略図

ISO12135(2002)^[5]には、疲労予き裂導入量は、1.3mmと板幅 W の2.5%のどちらか大きい方以上としなければならないと記載されている。本報では、 $W=40\text{mm}$ もしくは 22mm の試験片を用いているため、1.3mm以上の疲労予き裂の導入を求められることになる。本試験では、全試験片について疲労予き裂導入長さ2mmを目標とし、試験片両表面を目視で観察しながら導入した。図6.14に初期き裂長さ a_{0s} 、機械ノッチ長さ a_s 、疲労予き裂導入長さ Δa_{0s} の関係を示す。

疲労予き裂導入条件および試験後の目視による試験片表面の初期き裂長さ a_{0s} を表6.2に示す。

疲労予き裂導入後の試験片の外観一覧を添付資料15に示す。

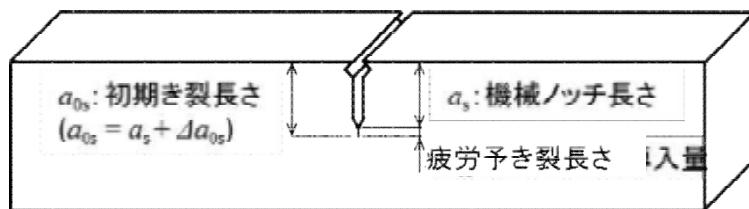


図 6.14 3 点曲げ試験 き裂長さの定義

表 6.2 疲労予き裂導入条件および導入後の初期き裂長さ

試験片 No.	荷重スパン <i>S</i> (mm)	最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	最大応力 拡大係数* (MPa · m ^{1/2})	繰返し数 (回)	初期き裂長さ <i>a</i> _{0s} (mm)	
						内表面側	外表面側
CB-1	160	10	0.5	26.6	6.5 × 10 ⁴	19.99	19.94
CB-2					7.1 × 10 ⁴	19.89	19.99
CB-3					7.2 × 10 ⁴	19.98	19.93
CF-2					8.2 × 10 ⁴	19.88	20.05
CF-3					7.7 × 10 ⁴	19.99	19.96
CF-4					6.7 × 10 ⁴	19.98	20.09
CW-1					6.5 × 10 ⁴	20.20	19.96
CW-2					6.1 × 10 ⁴	19.94	20.10
CW-3					6.2 × 10 ⁴	19.98	19.95
MB-1	88	4	0.2	26.1	5.2 × 10 ⁴	10.98	10.93
MB-2					5.1 × 10 ⁴	10.98	11.03
MB-3					5.0 × 10 ⁴	10.92	10.97
MF-1					7.6 × 10 ⁴	10.97	11.02
MF-2					6.8 × 10 ⁴	10.93	11.03
MF-3					6.6 × 10 ⁴	10.93	10.98
MW-1					W5 × 10 ⁴	10.96	11.03
MW-2					8.4 × 10 ⁴	10.94	10.99
MW-3					W9 × 10 ⁴	11.06	10.94

* 疲労予き裂導入中の最大応力拡大係数

6. 6 破壊非性試験

6.6.1 試験概要

破壊非性試験は、ISO12135(2002)^[5]に記載のある单一試験片法に準拠して、3点曲げ試験により実施した。单一試験片法では、試験中に除荷と再負荷を繰り返し、各除荷時の除荷弾性コンプライアンス C (図 6.15 参照) を取得する。その除荷弾性コンプライアンス C から延性き裂進展量 Δa_{est} を推定し、別途計算する J 積分から $J-R$ カーブ (J と Δa の関係、図 6.16 参照) を求める。求めた $J-R$ カーブから安定き裂成長開始点における破壊非性値 J_{Ic} の候補値 J_q を求め、複数の valid/invalid 条件が全て valid となる場合に J_q が J_{Ic} として認められる。以下に試験方法、 J_{Ic} 算出方法および試験結果の詳細について述べる。

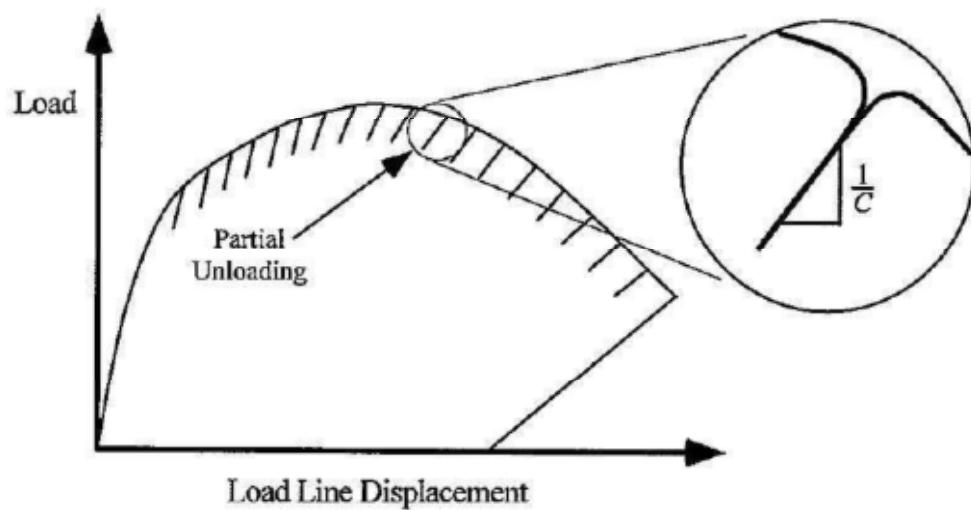


図 6.15 単一試験片法による荷重-荷重線変位曲線と除荷弾性コンプライアンスの概念図^[5]

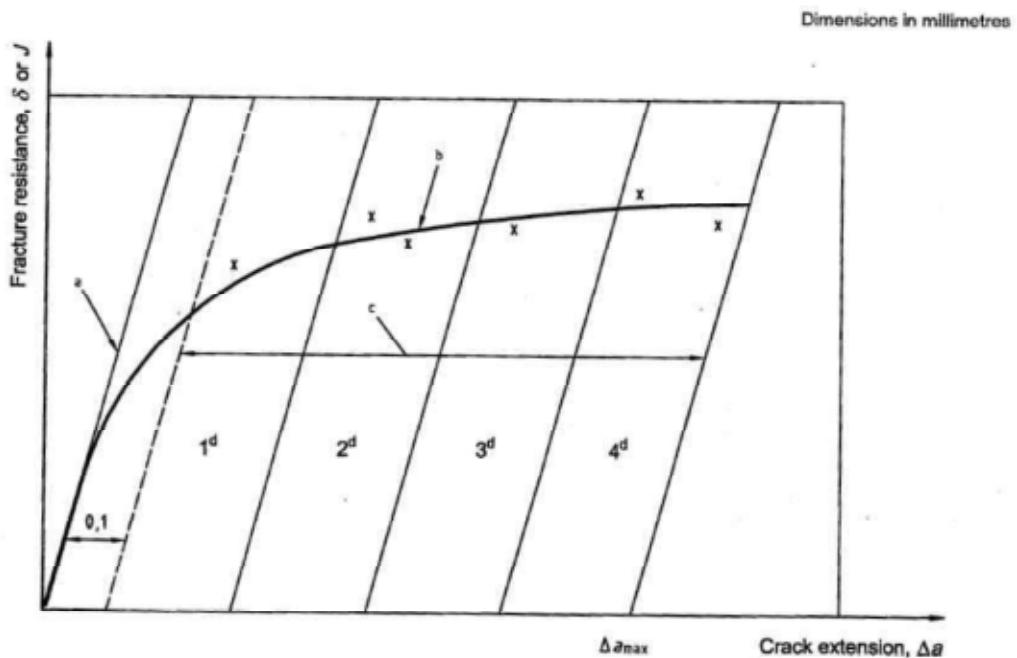


図 6.16 J - R カーブの概念図^[5]

6.6.2 試験方法

6.6.2.1 試験片冷却

低温試験を実施するために、図 6.17 のような冷却槽を使用した。また、図 6.18 および図 6.19 に試験片組付時および試験外観写真をそれぞれ示す。低温環境を作るために、ドライアイスを用いて冷却したエタノール内に試験片を設置した。試験片の温度は表裏面の初期き裂先端から 5mm 以内に取り付けた熱電対により計測し、試験中は随时ドライアイスを追加し、試験温度に対して $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内に保持した。破壊非性試験は、試験片の温度が試験温度に到達した後、20 分以上保持してから開始した。

6.6.2.2 負荷/除荷時の試験機制御方法

負荷時は試験機のストローク変位制御で実施し、変位速度は全試験片において $0.5\text{mm}/\text{min}$ とした。一方除荷時は荷重制御で実施し、負荷速度は市販材試験片および解体材試験片においてそれぞれ $0.5\text{kN}/\text{s}$ および $0.2\text{kN}/\text{s}$ とした。

6.6.2.3 計測項目および試験機

試験中は試験機のストローク変位、試験荷重 F 、クリップゲージで取得されるクリップゲージ変位（き裂開口変位） V および棒変位計で取得される荷重線変位 q を自動計測した。なお、試験に用いた試験機は、島津製作所製の油圧サーボ試験機（EHF-UG300kN-40L）である。

6.6.2.4 最大ストローク変位量と除荷時変位間隔

6.6.3項で述べるように、本試験は、適切な間隔で除荷を実施（試験中に延性き裂進展量 Δa が増加していく様子を高解像度で得る）しつつ、一定以上の延性き裂進展量 Δa を得る必要がある。しかしながら、延性き裂進展量 Δa は試験後のデータ整理によって得られるものであり、試験実施中に知ることができない。そのため、試験終了時の最大ストローク変位量および除荷間の変位間隔は同一材の試験片の結果を参考に決定した。本試験の最大ストローク変位量と除荷時変位間隔を表6.3に示す。

6.6.2.5 試験後の強制破面出しと破面観察用サンプルの作製

6.6.3項で述べるように、試験終了後に実測初期き裂長さ a_0 および実測最終き裂長さ a_f をデジタルマイクロスコープ等により計測する必要があるため、試験後の3点曲げ試験片を脆性破壊によって強制破面出しした（試験中に進展した延性き裂と判別できるように脆性き裂のみによって強制破面出しする必要がある）。

本試験では液体窒素に試験片をどぶ漬けした後に、荷重もしくは衝撃力を加えて強制破面出しを実施した。その後、試験片をファインカッターにより観察しやすいサイズに切断した。

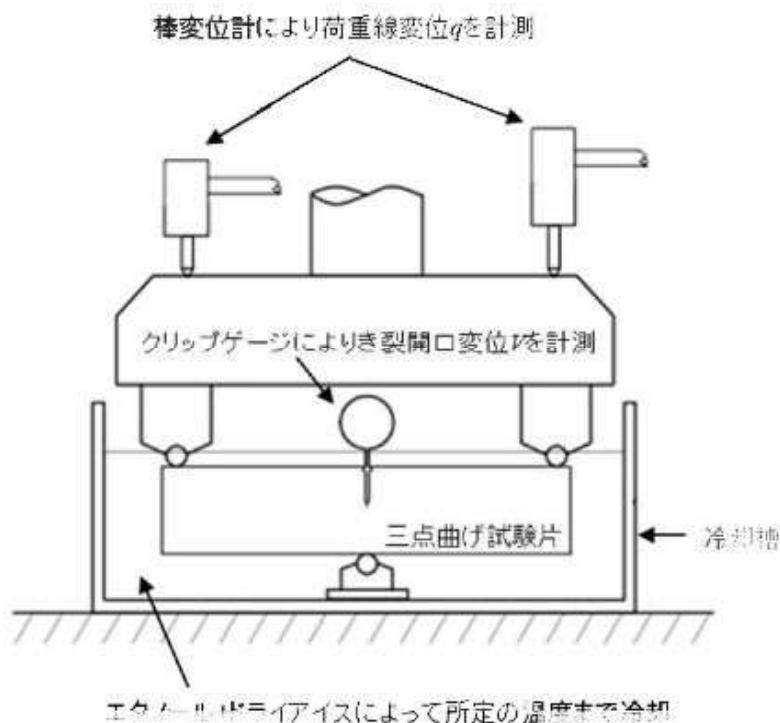


図6.17 破壊非性試験の概略図



図 6.18 試験片組付時写真

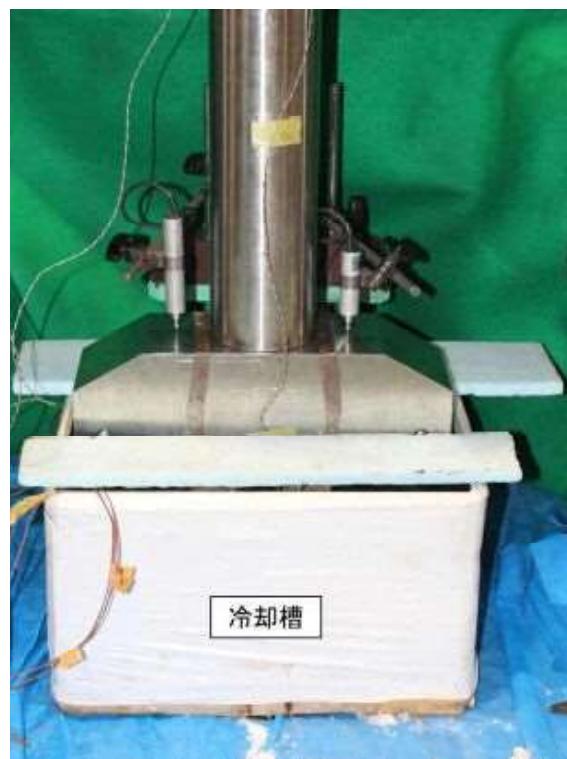


図 6.19 破壊非性試験外観写真

表 6.3 最大ストローク変位量と除荷間の変位間隔

試験片 No.	最大ストローク変位量 (mm)	除荷間の変位間隔 (mm)
CB-1	8.780	0.280
CB-2	10.920	0.280
CB-3	10.920	0.280
CF-2	10.360	0.280
CF-3	10.640	0.280
CF-4	10.640	0.280
CW-1	8.000	0.400
CW-2	8.800	0.400
CW-3	8.400	0.400
MB-1	4.340	0.140
MB-2	3.267	0.093
MB-3	3.080	0.093
MF-1	4.853	0.093
MF-2	4.060	0.140
MF-3	4.480	0.140
MW-1	4.400	0.200
MW-2	4.400	0.200
MW-3	4.400	0.200

6.6.3 J_{Ic} の算出方法^[5]

6.6.3.1 延性き裂進展量 Δa の算出

ISO 12135(2002) Annex H^[5]では、3点曲げ試験で実施する場合、荷重-荷重線変位関係 ($F-q$ 関係) ではコンプライアンス C に誤差が生じやすいため、荷重-クリップゲージ変位関係 ($F-V$ 関係) から求める方法を推奨している。本試験では、クリップゲージ変位 V も計測しているため、 $F-V$ 関係から延性き裂進展量 Δa を算出した。 $F-V$ 関係からき裂進展量を算出する場合、以下の式を用いる。

$$\Delta a = a_{est} - a_0 \quad (6.4)$$

$$\frac{a_{est}}{W} = 0.999748 - 3.9504\mu + 2.9821\mu^2 - 3.21408\mu^3 + 51.5156\mu^4 - 113.031\mu^5 \quad (6.5)$$

$$\mu = \frac{1}{\left[\left(\frac{4W}{S} \right) B e^{ABC} \right]^{0.5} + 1} \quad (6.6)$$

$$B_e = B - (B - B_N)^2/B \quad (6.7)$$

$$\lambda = \frac{g_s(a_0/W)}{g_s(a_{0,est}/W)} \quad (6.8)$$

ここで、 a_{est} は除荷弾性コンプライアンス法により予測されるき裂長さ[mm]、 a_0 は実測の初期き裂長さ[mm]、 W は試験片板幅[mm]、 S は荷重スパン長さ[mm]、 E は試験温度におけるヤング率[GPa]、 C は除荷時の F - V 関係から得られるコンプライアンス、 B は試験片板厚[mm]、 B_N はサイドグループ間の正味板厚[mm](今回、サイドグループはないので $B_N=B$ である)、 $a_{0,est}$ は式(6.5)で推定される初期き裂長さ[mm]である。 $g_s(a_0/W)$ および $g_s(a_{0,est}/W)$ は a/W に関する係数で、ISO 12135(2002) Annex D で^[5]与えられる。

実測初期き裂長さ a_0 は、試験後の破面観察から次式を用いて算出した。

$$a_0 = \frac{1}{8} \left[\left(\frac{a_1 + a_9}{2} \right) + \sum_{t=2}^8 a_t \right] \quad (6.9)$$

ここで、 $a_1 \sim a_9$ は、図 6.20 に示すように、最もくびれた表面から板厚方向に 0.01B の位置で 2 点、それらの間を等間隔にとった 7 点の計 9 点で実測した初期き裂長さである。

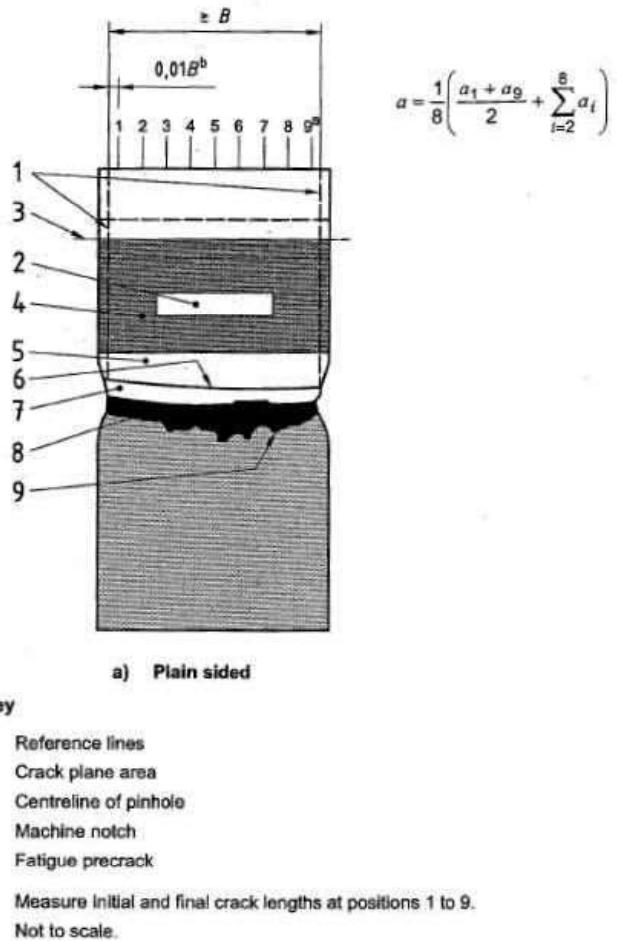


図 6.20 き裂長さの計測方法^[6]

6.6.3.2 J積分の算出

J積分は、次式で表される。

$$J = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{(B B_n W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1 - \nu^2)}{E} \right] + \left[\frac{2 U_p}{B_n (W - a_0)} \right] \left[1 - \left(\frac{\Delta \sigma}{2(W - a_0)} \right) \right] \quad (6.10)$$

ここで、 S は荷重スパン [mm]、 F は除荷前の荷重 [kN]、 ν はポアソン比、 E は試験温度におけるヤング率 [GPa] である。 U_p は図 6.21 に示すように除荷開始点までに試験機が試験片に与えた塑性仕事 [J] であり、 $F-q$ 関係を除荷開始点まで積分した値から弾性仕事分を差し引いたものである。弾性係数（図 6.21 中の c の傾き）は、 $F-q$ 関係における原点と弾性限界とを結ぶ線分の傾き（図 6.21 中の OA）と等しい。 $g_1(a_0/W)$ は、 a_0/W に関する係数で、ISO12135(2002) Annex D^[5] で与えられている。

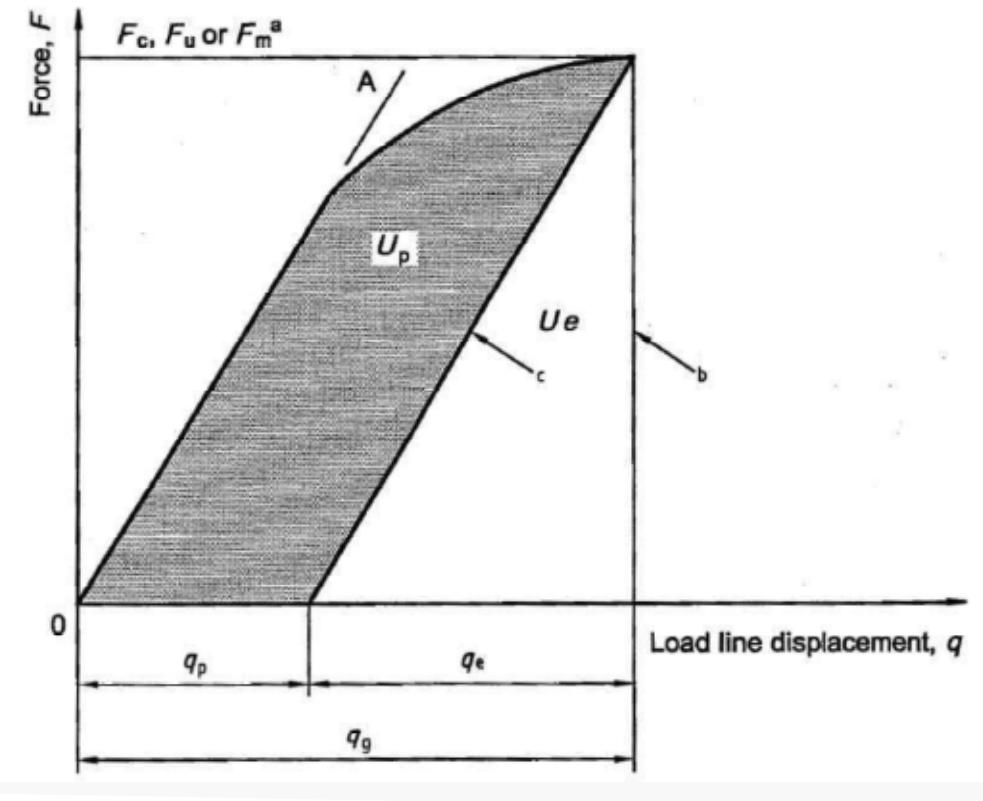


図 6.21 U_p の算出方法概念図^[6]

6.6.3.3 J-Rカーブの作成

上述の方法で計算した Δa および J 積分のプロットに対して、図 6.16 中の曲線 b のような近似曲線(以降、J-R カーブと記載する)を作成する。その際に、以下の条件を満たしている必要がある。

- ① 少なくとも 6 データから J-R カーブを作成している
- ② 図 6.16 中の 1^d～4^d の 4 つの領域において、少なくとも 1 データがプロットされている

上記の条件②中の 1^d～4^d の 4 つの領域の設定方法について述べる。まず、図 6.16 中の Δa_{\max} は試験片の形状によって定まる変数であり、以下の式で表される。

$$\Delta a_{\max} = 0.10(W - a_0) \quad (6.11)$$

次に、図 6.16 中の線分 a のことを construction line と言い、以下の式で表される。

$$J = 3.75 \times R_m \times \Delta a \times 10^{-3} \quad (6.12)$$

ここで、 R_m は試験温度における引張強さである。 R_m 、 Δa の単位をそれぞれ[MPa]、[mm]とすると、式(6.12)から求められる J の単位は[MJ/m²]となる。

図 6.16 中の 1^d～4^d の 4 つの領域は、construction line から 0.1mm オフセットした線（以降、0.1mm exclusion line と記載する）と Δa_{max} を通り construction line と同様の傾きを持つ線（以降、 Δa_{max} exclusion line と記載する）で挟まれる領域を 4 分割した領域と定義される。

上記の条件①および②を満たしている場合に、 $J-R$ カーブは 1^d～4^d の 4 つの領域中のプロットのみを用いて以下の式に最もフィットする曲線として定義される。

$$J = \alpha + \beta \Delta a^{\gamma} \quad (6.13)$$

ここで、 α 、 β 、 γ は係数であり、 $\alpha, \beta \geq 0$ かつ $0 \leq \gamma \leq 1$ でなければならない。本試験では、最小二乗法により 3 つの係数を決定した。

6.6.3.4 J_{Ic} の算出

6.6.3.4.1 J_{Ic} 候補値 J_q の算出

作成した $J-R$ カーブを用いて、破壊韌性値 J_{Ic} の候補値 J_q を算出する。図 6.22 で示されているように、 $\Delta a = 0.2\text{mm}$ を通り construction line と同じ傾きを持つ直線 (0.2mm offset line) と、 $J-R$ カーブの交点を J_{Ic} の候補値 J_q (図 6.22 中では、 $J_{0.2BL}$ と表記) とする。ただし、以下の条件を満たしていることが必要である。

- ③ 図 6.22 中の b の範囲に少なくとも 1 データがプロットされている
- ④ 図 6.22 中の c の範囲に少なくとも 2 データがプロットされている

ここで、図 6.22 中の b は、0.1mm exclusion line と 0.3mm exclusion line で挟まれる領域であり、c は 0.1mm exclusion line と 0.5mm exclusion line で挟まれる領域である。3.6.3.3 に記載した条件①、②に加えて上述の条件③、④を満たしやすくするために、ISO12135(2002)^[5]では計 30 回程度の除荷-再負荷を推奨している。

6.6.3.4.2 J_q の J_{Ic} 判定条件

J_{Ic} 候補値 J_q は下記に示す 8 条件を全て満たした場合に J_{Ic} とする。各条件について以下に述べる。

- (1) $J-R$ カーブ作成時条件: 6.5.3.3 および 6.5.3.4.1 で述べた $J-R$ カーブに関連した条件①～④
- (2) $J-R$ カーブ形状に関する条件: (J_q を算出した点における $J-R$ 曲線の接線の傾き) $\leq 1.875R_m$
- (3) 平面歪状態成立条件: $40J_q/(R_{p0.2}+R_m) \leq a_0$
- (4) 平面歪状態成立条件: $40J_q/(R_{p0.2}+R_m) \leq B$

- (5) 平面歪状態成立条件 : $40J_q/(R_{p0.2}+R_m) \leq W - a_0$
- (6) 初期き裂形状に関する条件 : 3.6.3.1 で述べた板厚内部の 7 点における各実測初期き裂長さ $a_2 \sim a_8$ が実測初期き裂長さ a_0 に対して誤差 10% 以内である
- (7) 初期き裂長さに関する条件 : $0.45 \leq a_0/W \leq 0.70$
- (8) 初期き裂長さ予測精度に関する条件 : $a_{0,est}/W$ が a_0/W に対して誤差 2% 以内である

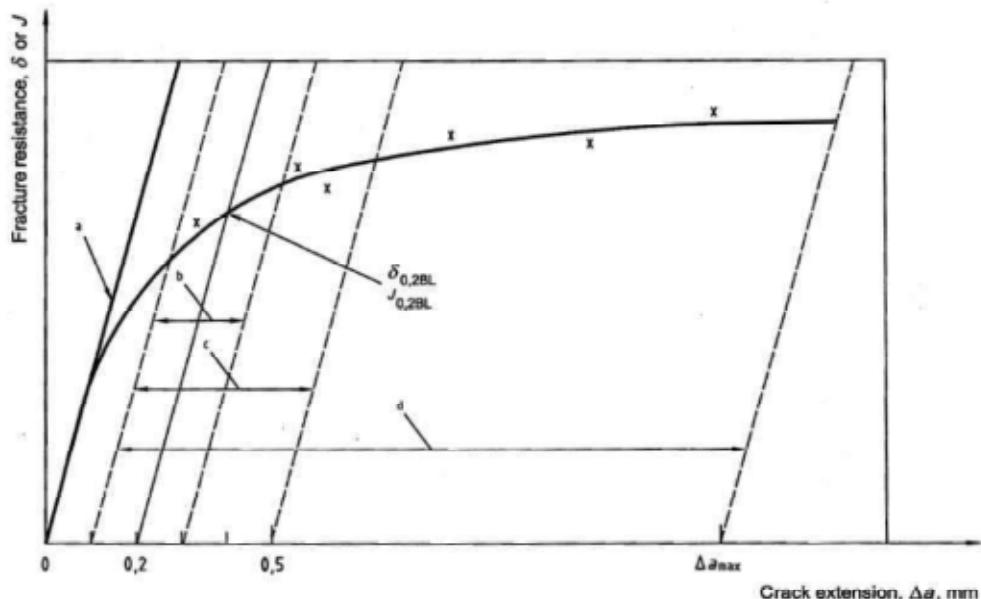


図 6.22 J_{lc} 候補値 J_q (図中では $J_{0.2BL}$ と記載) の算出の概念図^[5]

6.6.3.4.3 J_q と J_{lc} の違い

一般的に、破壊靭性値は板厚が増加するにつれて低下するが、一定以上の板厚になるとそれ以上は低下せず、下限値をとる。下限値となるような状態を平面歪状態といい、その下限値のことを平面歪破壊靭性値という。

J_q は試験片の板厚に特有の靭性値であり、同一材料かつ同一温度の場合に、 J_q を板厚の異なる構造物の靭性評価値として用いることはできない。一方、6.5.3.4.2 で述べた条件を全て満たす J_{lc} は平面歪破壊靭性値であるため、同一材料かつ同一温度の場合に、それを用いていかなる板厚の構造物に対しても安全側の評価が可能である。

6.6.4 試験結果

6.6.4.1 概要

試験後のき裂形状測定結果一覧および除荷コンプライアンス法によるき裂長さの予測結果を表 6.4 および表 6.5 に示し、 J_q および J_{lc} 判定条件の判定結果一覧を表 6.6 に示す。試験片 CB-1、CB-3 および CF-1 を除く 15 体の試験片について J_{lc} を取得し、その最低値は解体材母材部試験片 MB-2 の 0.105 MJ/m^2 となった。また、試験片 CF-2、CW-1 および CW-3 においては試験中に大きな荷重低下を伴う脆性破壊が生じた。脆性破壊が生じた試験片については、脆性破壊が生じる以前のデータのみを使って評価した。試

験片 MB-2 では、試験中に主破面に対して垂直に縦割れ（以降、セパレーションと記載する）が生じたが、大きな荷重低下は見られなかつたため、試験中の全データを用いて評価した。セパレーションの破面観察及び韌性に与える影響についての考察は 6.9 節で述べる。

表 6.7 に試験結果の評価に用いた試験片形状および機械的特性を記載しており、前者は添付資料 13 に示す計測点の平均値を記載しており、後者は表 2.3 から対応する値を記載しており、母材部においては試験片の荷重方向と同方向である T 方向の試験結果を用いて評価した。また、ボンド部試験片においては、IS015653(2010)^[12]に従いき裂先端に存在する材質（ここでは、母材部、熱影響部、溶接金属部が該当）の中で最も大きい値を持つ母材部の機械的性質を代表値として評価に用いた。また、ヤング率は添付資料 16 に示すように、温度依存性を考慮し、206.5GPa を用いた。

各試験片の荷重-荷重線変位関係 ($F-q$ 関係) を添付資料 17 に、 $J-R$ カーブを添付資料 18 (式(6.13) 中の変数の値一覧含む) に示す。ここでは、CB 材、CF 材、CW 材、MB 材、MF 材および MW 材のそれぞれ 3 体の試験片をまとめて図示した $F-q$ 関係および $J-R$ プロットを図 6.23 および図 6.34 に示す。 $J-R$ プロットにおいて、原点を通る実線は construction line、点線は 0.2mm offset line であり、灰色の実線によって 1^d～4^d の 4 つの領域を分割して示している。同一材かつ同一欠き位置の試験片の $F-q$ 関係および $J-R$ プロットにおいては大きなばらつきは見られず、再現性を有する正確な試験が実施されたことがわかる。

市販材における母材部、ボンド部および溶接金属部の $F-q$ 関係および $J-R$ プロットの比較を図 6.35 および図 6.36 に示す。同様に、解体材における母材部、ボンド部および溶接金属部の $F-q$ 関係および $J-R$ プロットの比較を図 6.37 および図 6.38 に示す。 $F-q$ 関係において、最大荷重が小さく、かつ最大荷重から早期の荷重低下を示す試験片ほど低韌性 ($J-R$ プロットが全体的に下にシフト) となることがわかる。市販材においては溶接金属部 (CW 材) が最も低韌性となり、一方解体材においては母材部 (MW 材) が最も低韌性となった。このことから、母材として使用される鋼材が顕著に高韌性化してきているのに対して、溶接材の高韌性化は母材用鋼材ほどには進んでいないことが推測される。

各試験片の試験後の破面外観を添付資料 19 に、疲労予き裂形状を添付資料 20 に、延性き裂先端をトレースした図を添付資料 21 に示す（延性き裂先端を点線で、一部脆性破壊した試験片に関してはそのき裂先端を破線で示す）。解体材母材部試験片 MB 材および解体材ボンド部試験片 MF 材の板厚中央付近（つまり、母材部）では特徴的な縞状の延性破面が観察された。材料組織と縞状破面の関係について 6.8.2 で述べる。

6.6.4.2 脆性破壊について

市販材ボンド部試験片 CF-2 および市販材溶接金属部試験片 CW-1, 3 において試験中に脆性破壊が生じた。上記試験片の試験後の破面を図 a21.2 および図 a21.3 に示す。図 a21.2 および図 a21.3 と図 6.24 および図 6.25 から、3 試験片ともに延性き裂が十分に生じた後に脆性破壊が生じていることがわかる。本材料においては実構造物にお

いても、延性き裂が先行して生じると推測される。また、生じた脆性破壊はそれ以前のデータには影響を与えないため、脆性破壊が生じる以前のデータを用いて延性き裂成長開始点における破壊靭性値 J_{IC} を評価してもよいと考える。

脆性破壊が生じた市販材ボンド部試験片 CF-2 および市販材溶接金属部試験片 CW-1, 3 はともにき裂先端に溶接金属部が含まれるため、市販材の溶接金属部を起点に生じたものと推測される。

表 6.4 実測初期き裂長さと予測初期き裂長さの一覧

切欠き位置	試験片No.	実測初期き裂形状							実測初期き裂長さ a_0	予測初期き裂長さ $a_{0,est}$		
		a_1 mm	a_2 mm	a_3 mm	a_4 mm	a_5 mm	a_6 mm	a_7 mm	a_8 mm	a_9 mm		
市販材	CB-1	20.30	20.58	20.74	20.79	20.83	20.81	20.74	20.60	20.31	20.63	20.62
	CB-2	20.32	20.58	20.70	20.80	20.85	20.81	20.73	20.56	20.30	20.63	20.63
	CB-3	20.23	20.47	20.63	20.73	20.79	20.75	20.68	20.50	20.32	20.57	20.58
	CF-2	20.39	20.84	21.07	21.23	21.27	21.19	20.97	20.55	20.25	20.86	20.88
ボンド部	CF-3	20.36	20.80	21.09	21.25	21.33	21.39	21.18	20.80	20.36	20.95	20.91
	CF-4	20.40	20.92	21.04	21.14	21.22	21.29	21.04	20.64	20.24	20.88	20.89
	CW-1	20.32	20.81	21.06	21.13	21.13	21.04	20.95	20.81	20.39	20.91	20.87
	CW-2	20.42	20.90	21.08	21.21	21.17	21.06	20.93	20.71	20.33	20.93	20.90
溶接金属部	CW-3	20.26	20.73	20.92	20.99	20.97	20.88	20.75	20.60	20.23	20.76	20.71
	MB-1	11.12	11.29	11.36	11.41	11.45	11.39	11.35	11.26	11.20	11.41	11.33
	MB-2	11.28	11.45	11.58	11.62	11.63	11.62	11.62	11.47	11.25	11.50	11.45
	MB-3	11.10	11.29	11.38	11.42	11.38	11.37	11.32	11.24	11.04	11.28	11.21
解体材	MF-1	11.15	11.39	11.49	11.57	11.68	11.68	11.64	11.54	11.24	11.49	11.38
	MF-2	11.08	11.37	11.47	11.54	11.65	11.68	11.63	11.48	11.25	11.46	11.42
	MF-3	11.09	11.34	11.48	11.50	11.58	11.65	11.62	11.48	11.18	11.43	11.39
	MW-1	11.19	11.41	11.54	11.58	11.62	11.60	11.56	11.44	11.18	11.49	11.41
溶接金属部	MW-2	11.12	11.38	11.48	11.49	11.49	11.51	11.41	11.35	11.16	11.41	11.36
	MW-3	11.27	11.56	11.66	11.70	11.70	11.64	11.57	11.46	11.19	11.57	11.50

表 6.5 実測最終き裂長さと予測最終き裂長さの一覧

切欠き位置	試験片No.	実測最終き裂形状									予測最終き裂長さ a_{fest}	備考
		a_{f1} mm	a_{f2} mm	a_{f3} mm	a_{f4} mm	a_{f5} mm	a_{f6} mm	a_{f7} mm	a_{f8} mm	a_{f9} mm		
母材部	CB-1	21.56	21.84	22.98	23.51	23.97	24.33	23.62	22.08	22.09	22.98	22.13
	CB-2	23.15	23.27	24.53	25.45	25.60	24.97	24.29	23.03	22.89	24.23	22.91
	CB-3	21.77	21.96	23.75	25.36	25.40	25.60	24.83	22.95	22.22	23.95	22.87
	CF-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	脆性破壊が生じた
	CF-3	23.78	24.02	25.13	26.04	26.34	25.83	25.45	23.27	23.10	24.86	23.48
	CF-4	23.82	24.14	25.08	25.93	26.24	25.73	25.31	23.11	22.99	24.91	23.69
市販材 ボンド部	CW-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	脆性破壊が生じた
	CW-2	23.93	24.86	26.35	27.54	28.26	28.97	28.96	25.68	23.27	26.78	25.17
	CW-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	脆性破壊が生じた
	MB-1	15.21	16.30	18.43	18.50	18.52	18.56	18.74	16.98	15.82	17.76	14.82
	MB-2	12.00	13.35	15.85	15.74	11.63	15.60	16.33	14.07	12.03	14.30	13.48
	MB-3	12.11	14.02	14.82	16.89	17.24	17.31	17.27	14.44	11.94	15.26	13.79
解体材 ボンド部	MF-1	12.76	14.29	16.04	16.17	16.28	16.13	15.12	14.03	12.85	15.07	13.95
	MF-2	12.25	13.06	14.37	15.36	14.84	14.87	14.63	13.37	11.98	14.04	13.17
	MF-3	11.99	13.00	14.42	15.19	15.36	14.85	14.45	13.07	12.02	14.01	13.18
	MW-1	12.40	14.17	15.96	16.00	15.84	15.56	14.58	12.96	12.25	14.68	13.72
	MW-2	13.46	14.76	16.54	15.99	15.90	15.82	15.08	13.25	12.34	15.03	13.83
	MW-3	12.46	13.09	14.76	15.07	15.21	15.28	15.38	13.81	12.49	14.39	13.61

表 6.6 J_{IC} 判定結果一覧

切欠き位置	試験片No.	J_{IC} 候補値 J_q MJ/m ²	条件(1)				条件(2)				条件(3)				条件(4)				条件(5)				条件(6)				条件(7)				J_{IC} MJ/m ²				
			①		②		③		④		①		②		③		④		①		②		③		④		①		②		③		④		
			母材部	CB-1	0.582	Valid	Invalid	Valid																											
市販材	ボンド部	CB-2	0.649	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	0.649				
	CB-3	0.690	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	CF-2	0.413	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	CF-3	0.500	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	CF-4	0.603	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	CW-1	0.288	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
溶接金属部	CW-2	0.266	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	CW-3	0.277	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	MB-1	0.111	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	MB-2	0.105	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	MB-3	0.115	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	MF-1	0.169	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
解体材	ボンド部	MF-2	0.219	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	0.219			
	MF-3	0.203	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	MW-1	0.165	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	MW-2	0.167	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				
	MW-3	0.209	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid				

表 6.7 試験結果の評価に用いた試験片形状と機械的性質の一覧

切欠き位置	試験片 No.	試験片形状		機械的性質			
		板幅 W	板厚 B	0.2%耐力	引張強度	ヤング率	ポアソン比
				$R_{p0.2}$	R_m	E	ν
市販材	母材部	CB-1	40.04	20.03	653	731	206.5 0.3
		CB-2	40.04	20.03	653	731	
		CB-3	40.04	20.03	653	731	
	ボンド部	CF-2	40.00	20.89	653	731	
		CF-3	40.00	20.83	653	731	
		CF-4	40.00	20.71	653	731	
	溶接金属部	CW-1	40.00	20.77	578	663	
		CW-2	39.99	20.76	578	663	
		CW-3	39.99	20.76	578	663	
解体材	母材部	MB-1	22.01	11.00	593	668	206.5 0.3
		MB-2	22.02	11.00	593	668	
		MB-3	22.01	11.00	593	668	
	ボンド部	MF-1	22.00	11.71	593	668	
		MF-2	22.00	11.67	593	668	
		MF-3	22.00	11.65	593	668	
	溶接金属部	MW-1	21.98	11.68	527	640	
		MW-2	22.00	11.69	527	640	
		MW-3	21.99	11.64	527	640	

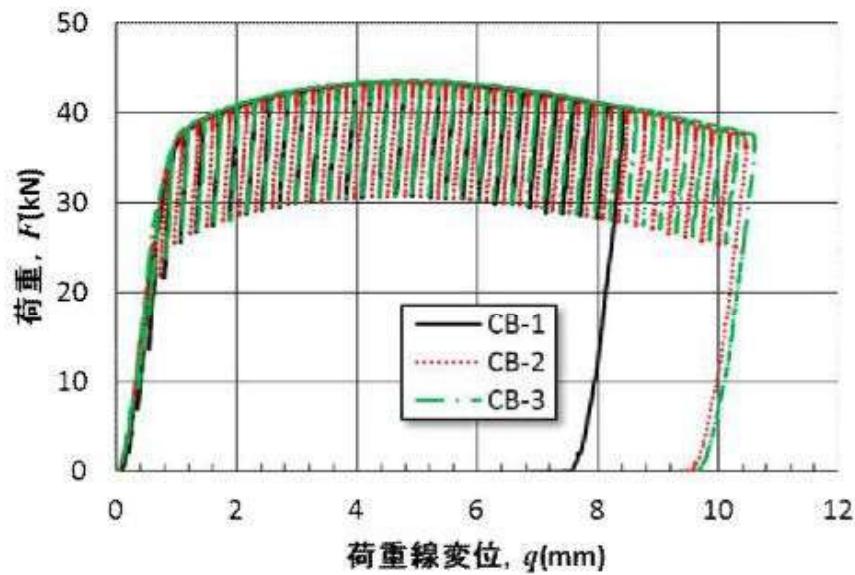


図 6.23 F - q 関係、市販材母材部 (CB 材)

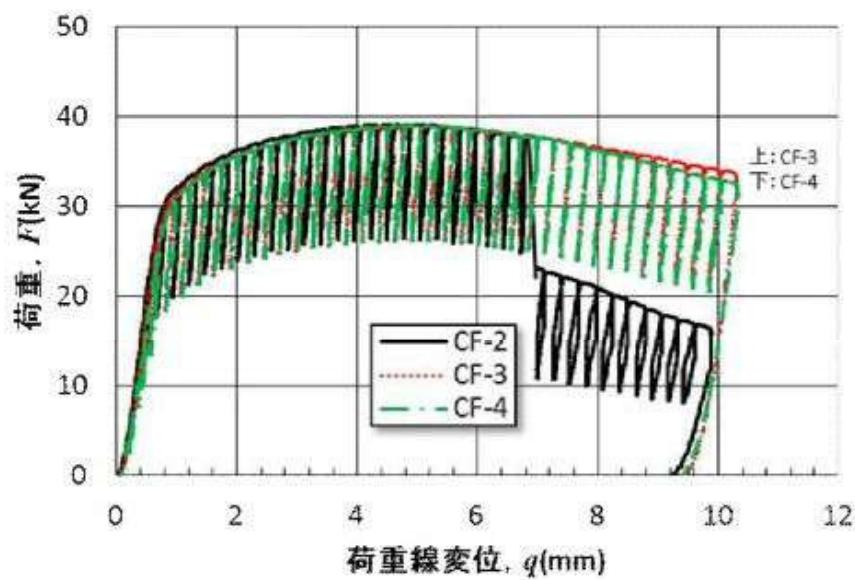


図 6.24 F - q 関係、市販材ボンド部 (CF 材)

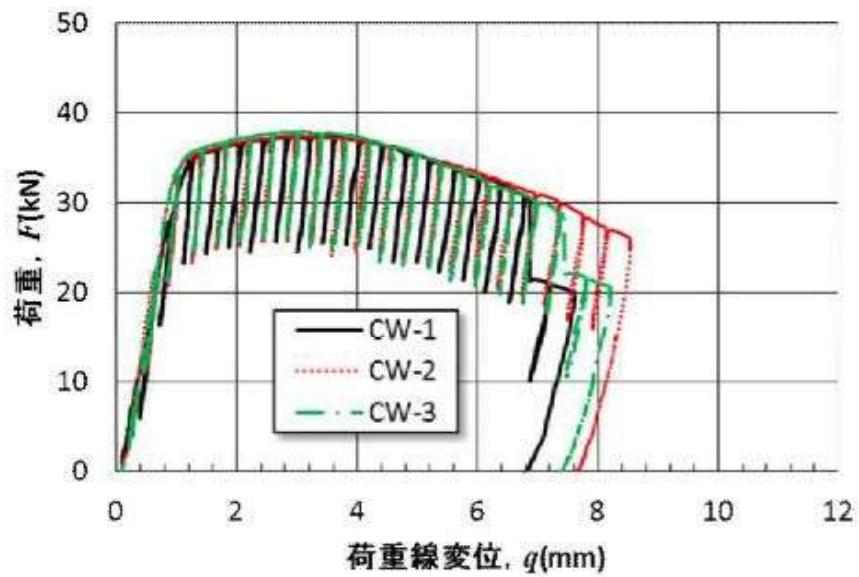


図 6.25 F - q 関係、市販材溶接金属部 (CW 材)

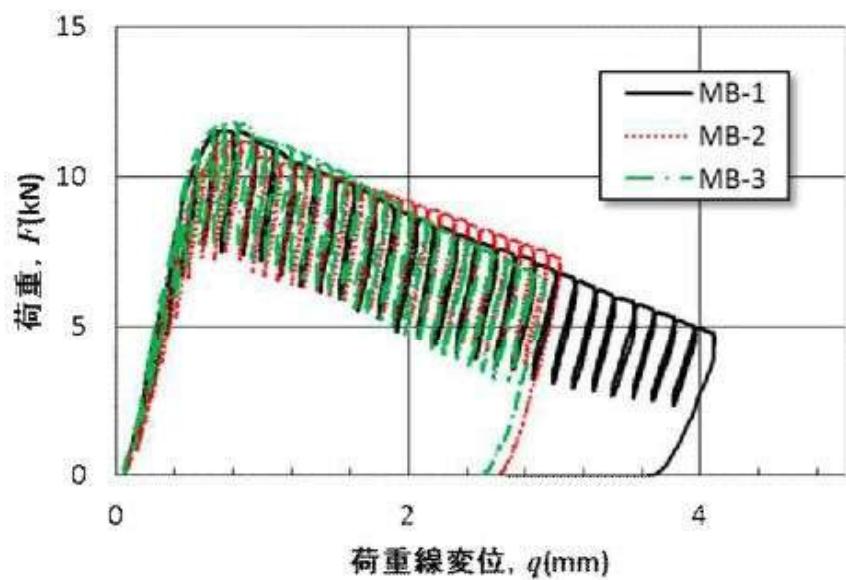


図 6.26 F - q 関係、解体材母材部 (MB 材)

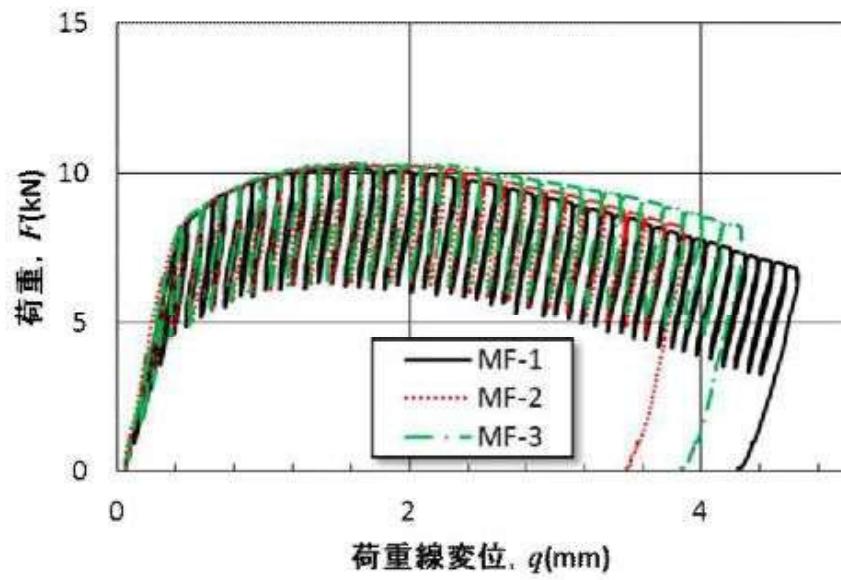


図 6.27 F - q 関係、解体材ボンド部 (MF 材)

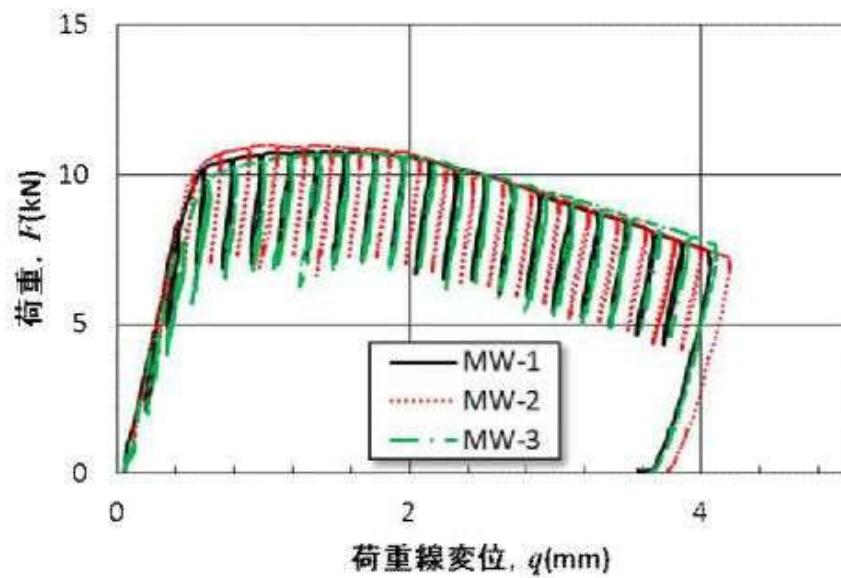


図 6.28 F - q 関係、解体材溶接金属部 (MW 材)

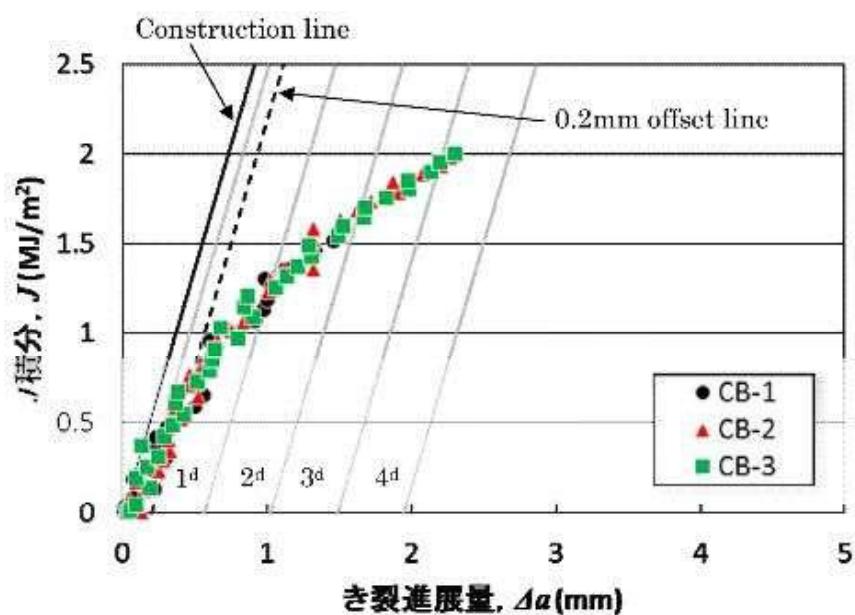


図 6.29 J - R プロット、市販材母材部 (CB 材)

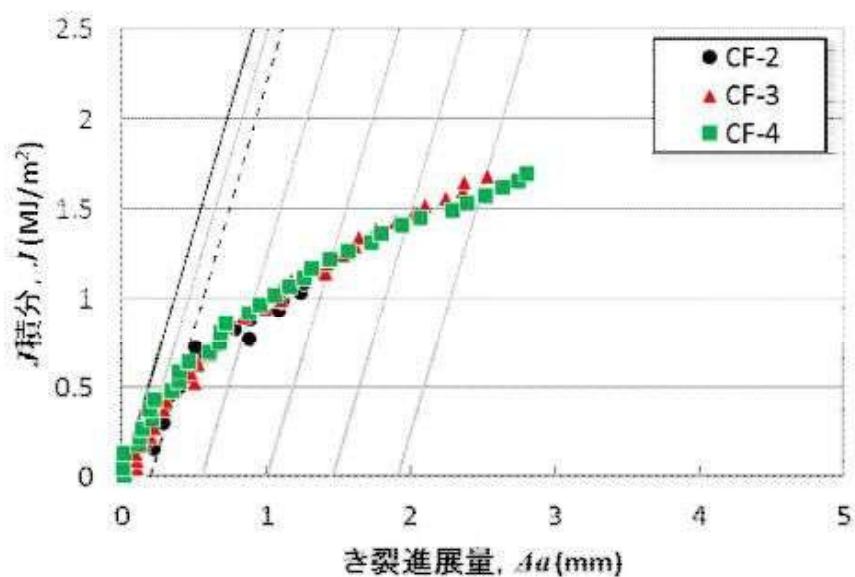


図 6.30 J - R プロット、市販材ボンド部 (CF 材)

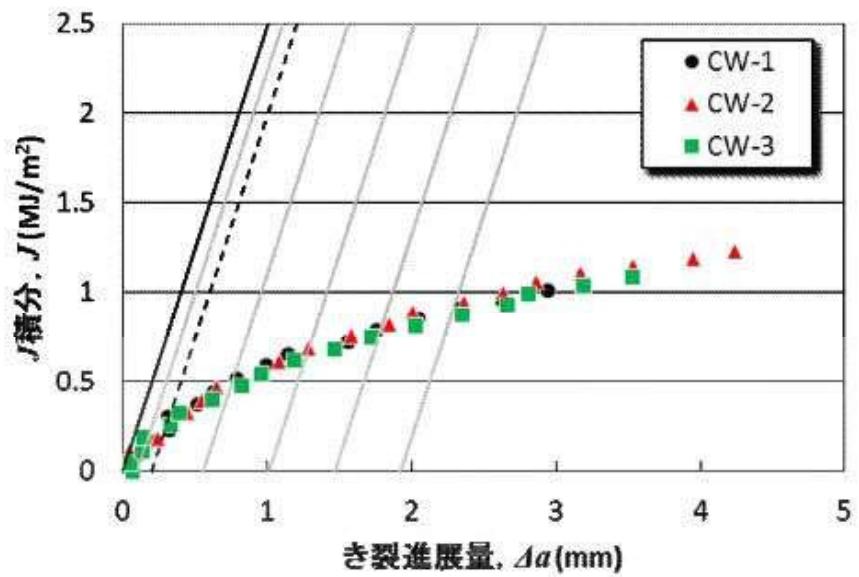


図 6.31 J - R プロット、市販材溶接金属部 (CW 材)

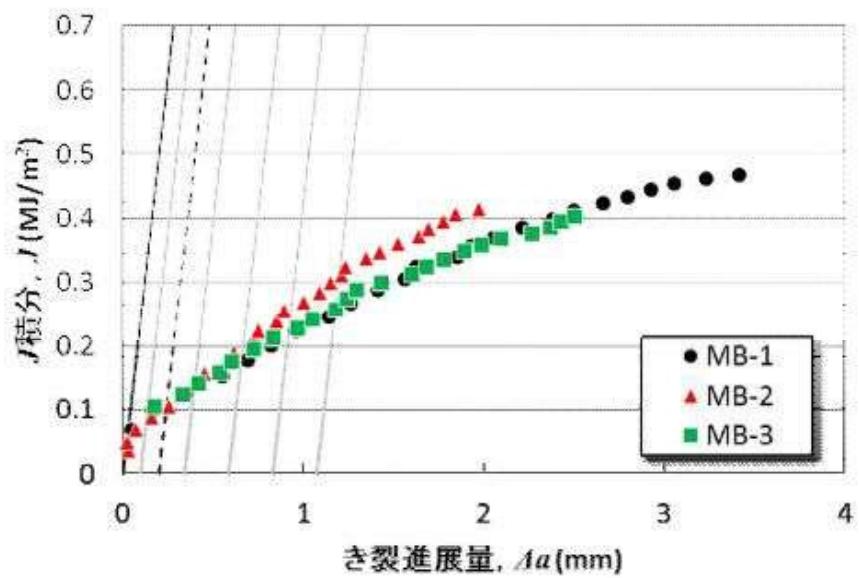


図 6.32 J - R プロット、解体材母材部 (MB 材)

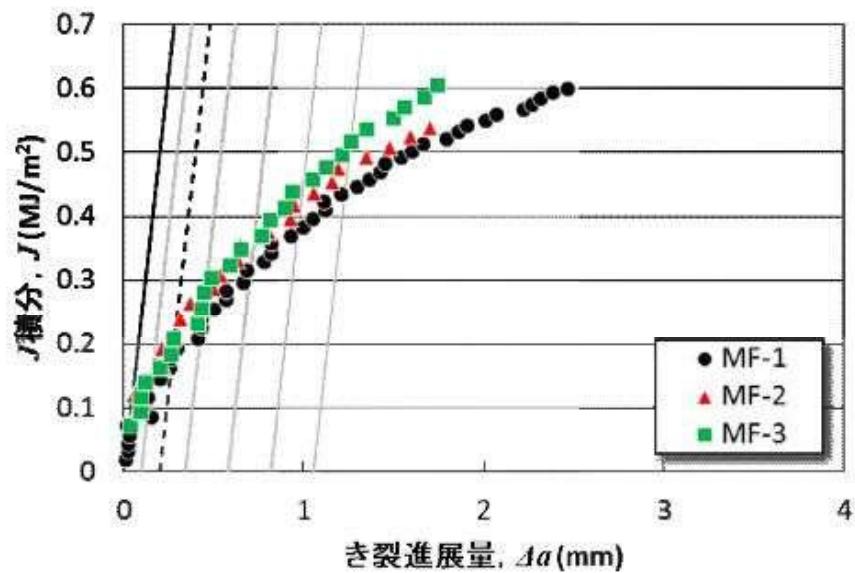


図 6.33 J - R プロット、解体材ボンド部 (MF 材)

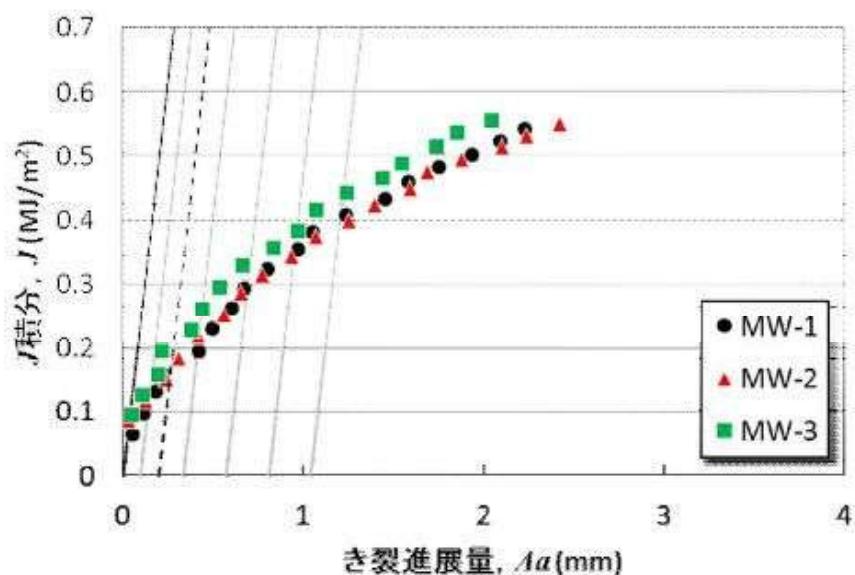


図 6.34 J - R プロット、解体材溶接金属部 (MW 材)

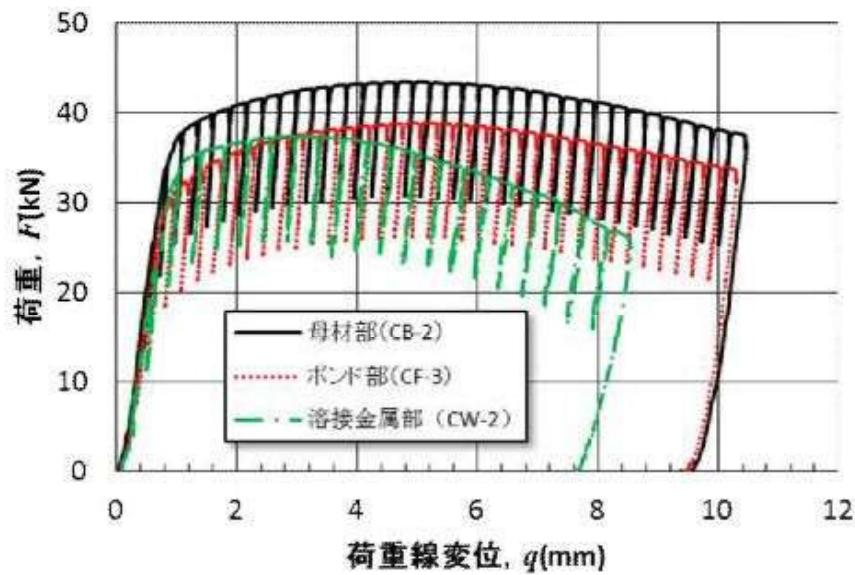


図 6.35 市販材の F - q 関係比較

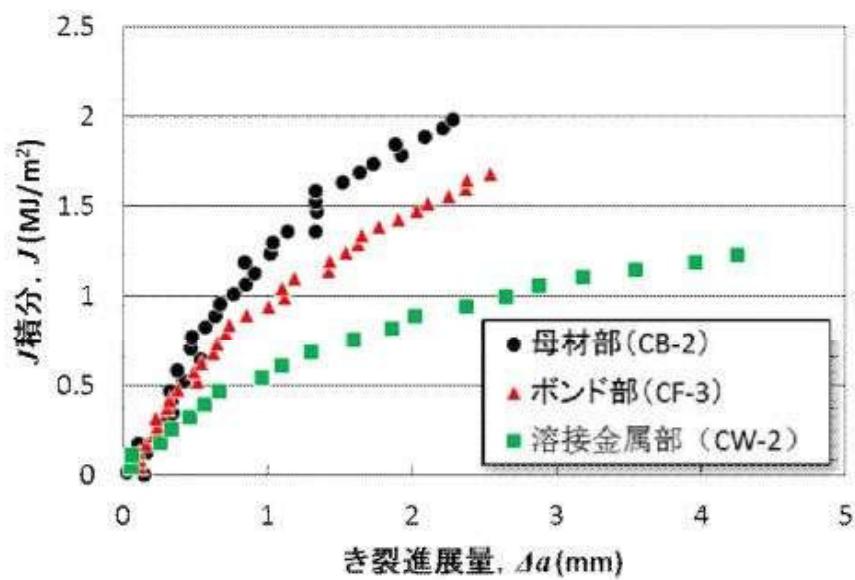


図 6.36 市販材の J - R プロット比較

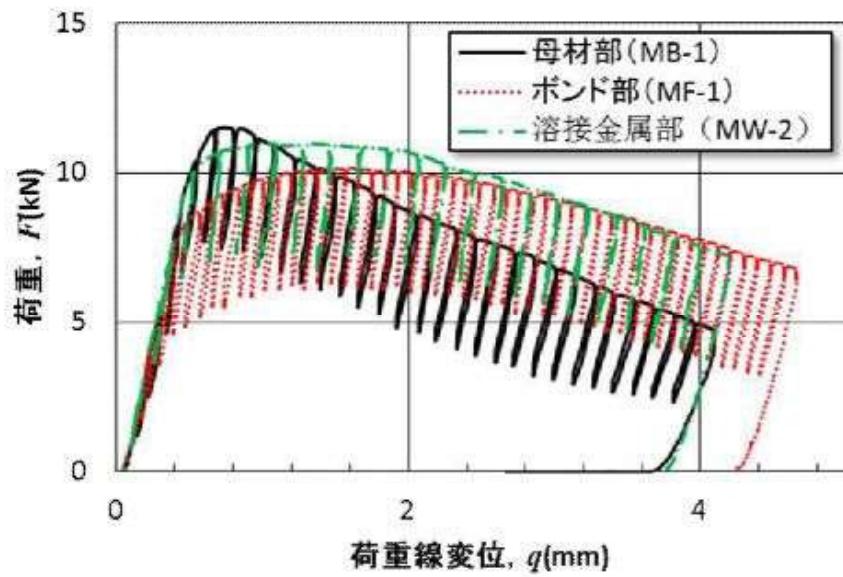


図 6.37 解体材の F - q 関係比較

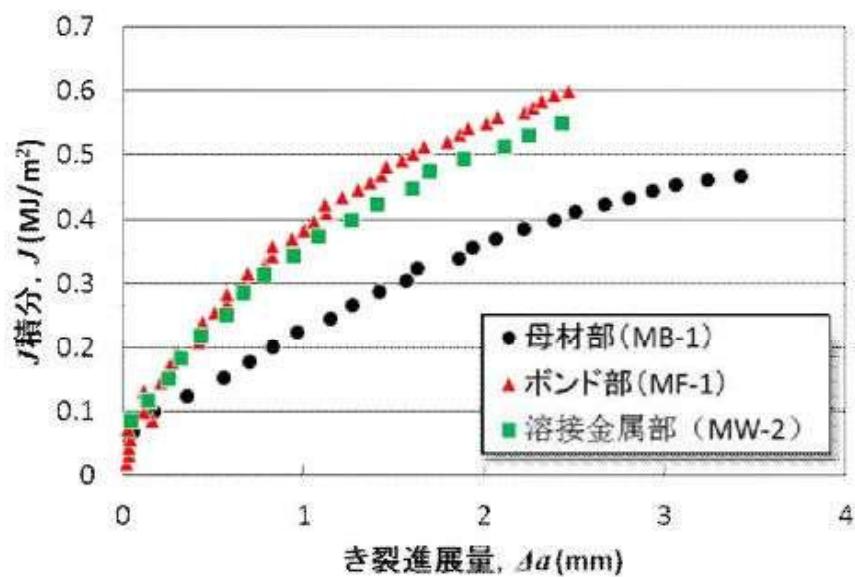


図 6.38 解体材の J - R プロット比較

6. 7 J換算 CTOD の算出

6.7.1 算出方法と算出結果

今回実施した破壊革性試験では、 J 積分を取得したが、参考として ASTM E1820(2013)^[13]による J 換算 CTOD、 $\delta_{\text{conv.}}$ を算出する。ASTM E1820(2013)^[13]では、限界 CTOD、 δ と J 積分の関係式として次式が示されている。

$$\delta = \frac{J}{m\sigma_y} \quad (6.14)$$

$$m = A_0 - A_1 \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} + A_2 \times \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right)^2 - A_3 \times \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right)^3 \quad (6.15)$$

$$A_0 = 3.18 - 0.22 \times \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (6.16)$$

$$A_1 = 4.32 - 2.23 \times \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (6.17)$$

$$A_2 = 4.44 - 2.29 \times \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (6.18)$$

$$A_3 = 2.05 - 1.06 \times \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (6.19)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{ts}}{2} \quad (6.20)$$

ここで、 σ_{ys} は試験温度における 0.2%耐力 [MPa]、 σ_{ts} は試験温度における引張強さ [MPa]、 a_0 は実測初期き裂長さ [mm]、 W は試験片幅 [mm] である。

本試験で算出した J_q からの換算 CTOD、 $\delta_{\text{conv.}}$ を表 6.8 に示す。また、表 6.8 では J_{Ic} 判定結果も合わせて示している。

表 6.8 J_q からの換算 CTOD、 $\delta_{\text{conv.}}$ 一覧

	切欠き位置	試験片 No.	J_q	J_{Ic} 判定結果	換算 CTOD、 $\delta_{\text{conv.}}$
			MJ/m ²		mm
市 販 材	母材部	CB-1	0.582	Invalid	0.505
		CB-2	0.649	Valid	0.564
		CB-3	0.690	Invalid	0.600
	ボンド部	CF-2	0.413	Invalid	0.358
		CF-3	0.500	Valid	0.433
		CF-4	0.603	Valid	0.522
	溶接金属部	CW-1	0.288	Valid	0.279
		CW-2	0.266	Valid	0.257
		CW-3	0.277	Valid	0.268
解 体 材	母材部	MB-1	0.111	Valid	0.106
		MB-2	0.105	Valid	0.100
		MB-3	0.115	Valid	0.110
	ボンド部	MF-1	0.169	Valid	0.161
		MF-2	0.219	Valid	0.208
		MF-3	0.203	Valid	0.193
	溶接金属部	MW-1	0.165	Valid	0.171
		MW-2	0.167	Valid	0.173
		MW-3	0.209	Valid	0.216

6.7.2 J 換算 CTOD の物理的意味

添付資料 22 に示すとおり、CTOD は板厚方向で異なり、板厚中央付近で最も大きく板表面に近づくに従って小さくなる。本試験で求めた J_q (または、 J_{Ic}) [MJ/m²] は試験で得られる荷重-荷重線変位曲線を積分して得るため、そこから換算された CTOD (表 6.8 参照) は板厚方向の平均値であるとみなされる。ISO12135(2002)^[5]では、板厚中央の CTOD を求める手法 (添付資料 22 に記載のある BS7448^[14] と同様の手法) も記載されており、 $J-R$ カーブと同様に δ と Δa の関係を得ることができる。その手法を、本報告書では $\delta-R$ カーブ法と呼ぶ。 $\delta-R$ カーブ法によって求められる CTOD は上述したように表 6.8 の換算 CTOD よりも大きくなる傾向にあり、その概要と算出結果については添付資料 23 で述べる。

6. 8 母材組織観察結果

6.8.1 観察結果および市販材と解体材の比較

市販材と解体材の材料組織の違いを把握するために、光学顕微鏡による観察を実施した。1500番サンドペーパーまで研磨した後に、 $3\text{ }\mu\text{m}$ から $1\text{ }\mu\text{m}$ までダイヤモンド研磨を実施し、仕上げとしてコロイド状シリカ懸濁液OP-Sを用いて研磨を実施した。研磨後、3%ナイタルを用いて研磨面を腐食した。

観察は市販材母材部試験片(CB-2)および解体材母材部試験片(MB-1)を対象に、破面と平行な面と垂直な面の2つの面を観察した。破面と平行な面の倍率100, 500, 1000倍の観察結果を図6.39～図6.41に示し、破面と垂直な面の倍率100, 500, 1000倍の観察結果を図6.42～図6.44に示す。

市販材および解体材とともに、破面と平行な面では濃淡が付いたバンド組織が確認され、破面と垂直な面では一様な組織が確認された。また、解体材のほうがより顕著なバンド組織が確認された。ナイタル腐食では炭化物が黒く見えるため、バンド組織中の黒く見えている箇所は、高炭素濃度となっていると推測される。また、合金元素濃度が高い箇所は熱処理の冷却中に炭化物が生成し易いため、黒く見えている箇所は合金元素濃度も高くなっているものと推測される。

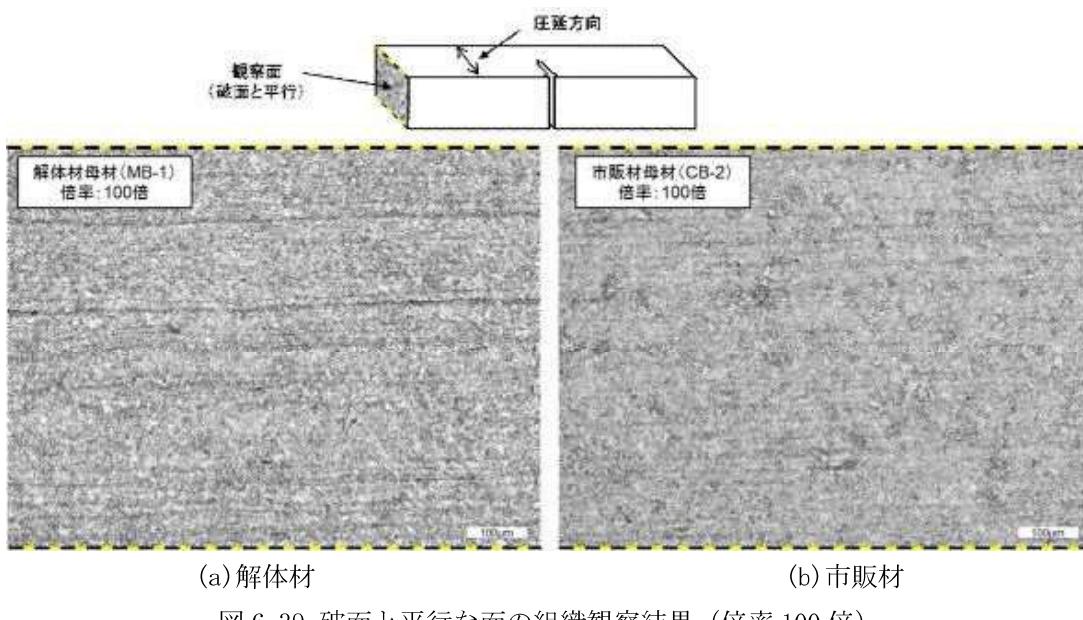


図6.39 破面と平行な面の組織観察結果（倍率100倍）

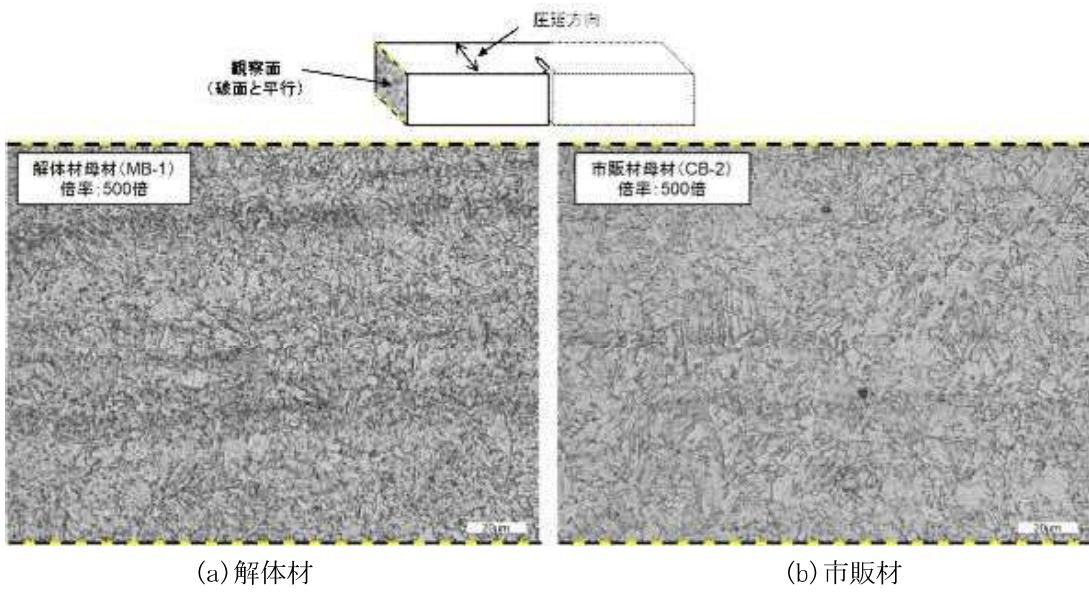


図 6.40 破面と平行な面の組織観察結果（倍率 500 倍）

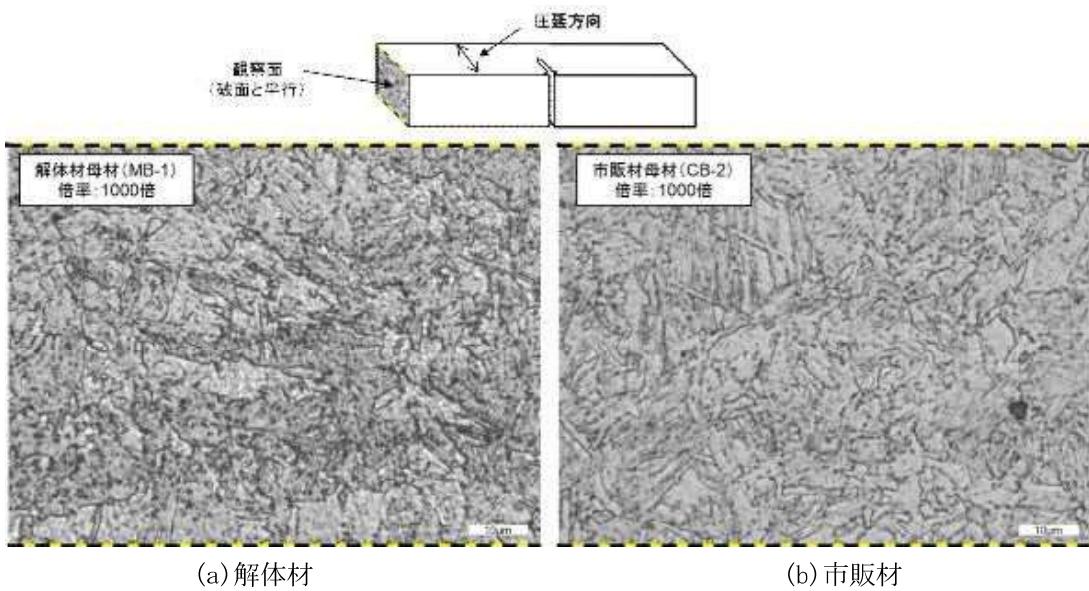
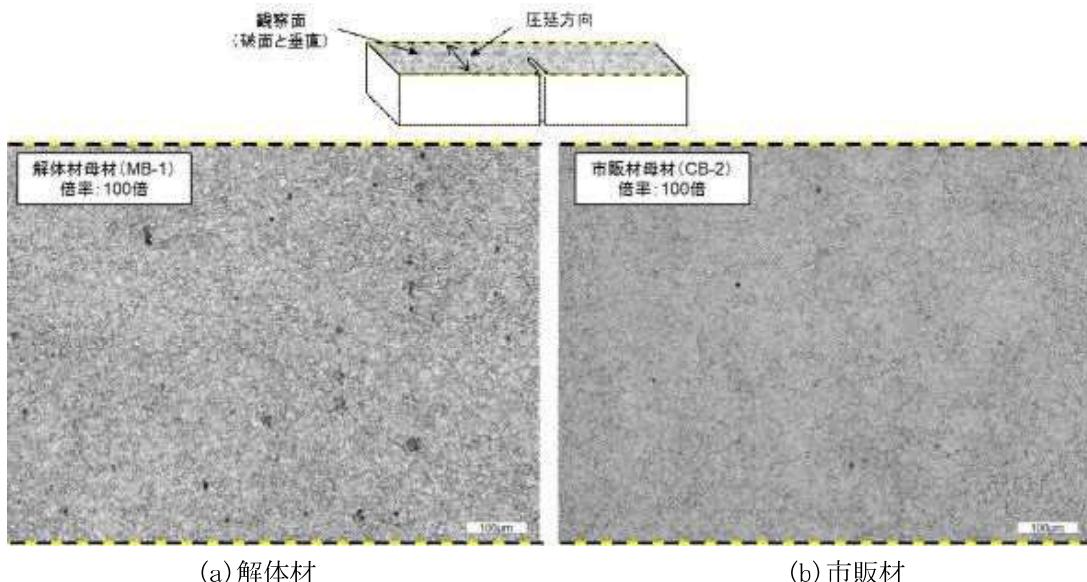
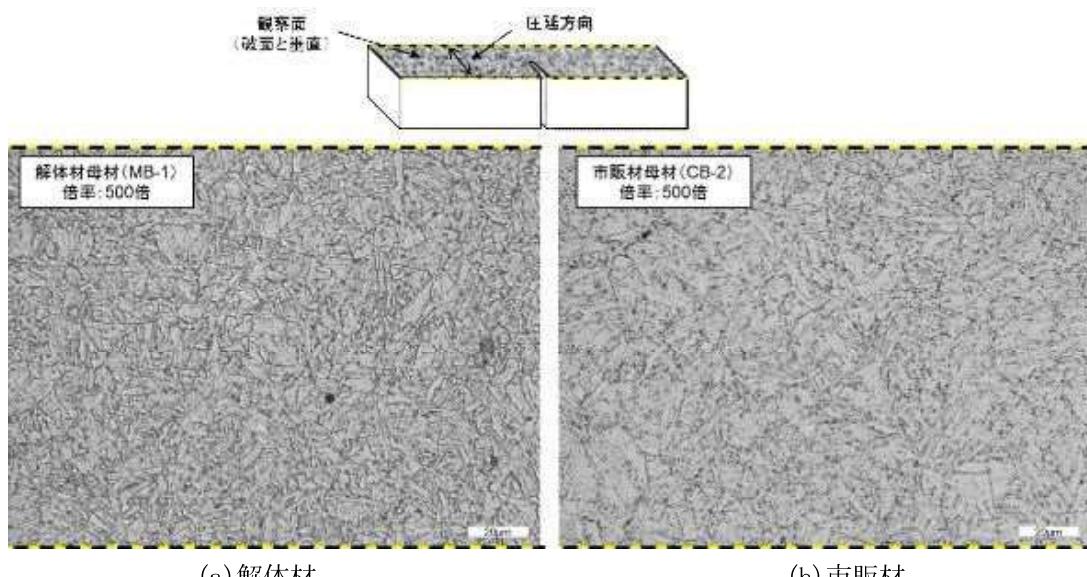


図 6.41 破面と平行な面の組織観察結果（倍率 1000 倍）



(a) 解体材 (b) 市販材

図 6.42 破面と垂直な面の組織観察結果（倍率 100 倍）



(a) 解体材 (b) 市販材

図 6.43 破面と垂直な面の組織観察結果（倍率 500 倍）

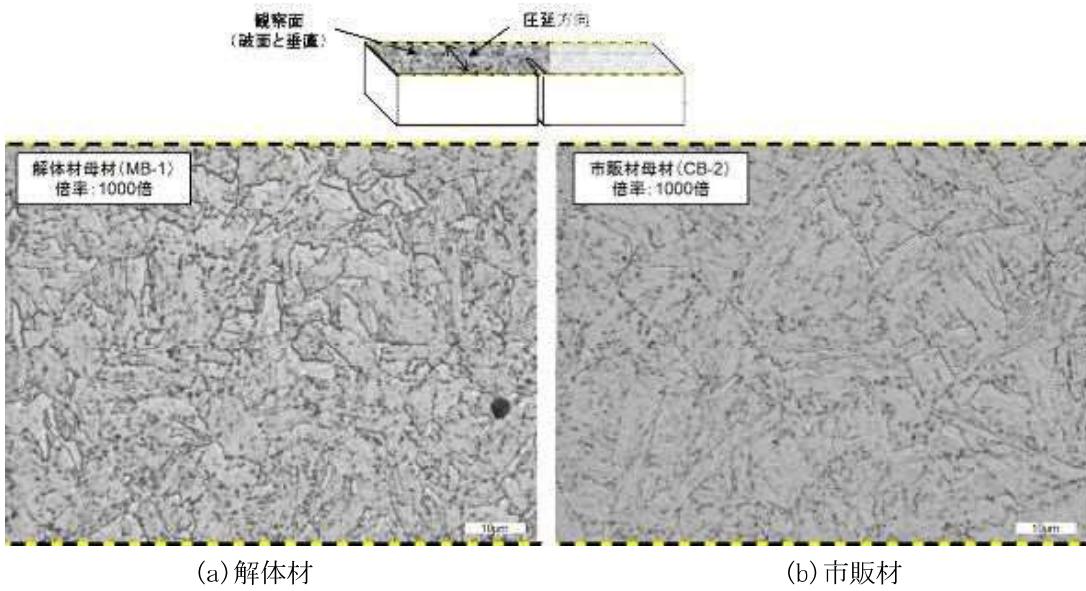


図 6.44 破面と垂直な面の組織観察結果（倍率 1000 倍）

6.8.2 解体材母材部の縞状延性破面と組織の関係

解体材母材部試験片と解体材ボンド部試験片の板厚中央付近（つまり、母材部）では特徴的な縞状の延性破面が観察された。図 6.45 に解体材母材部試験片（MB-1）の縞状延性破面を示す。図中に示すように代表的な縞幅を計測したところ～0.15mm であった。一方で、図 6.46 に示すように、同一試験片の破面と平行方向の観察面上でバンド幅を計測したところ同様に～0.15mm であった。破面上の縞幅および組織観察面上のバンド幅ともにばらつきはあるものの、総じてオーダーは同じといえる。以上より、組織観察で確認されたバンド組織と破面上で確認された縞状模様には関連があると推測される。

破面上の縞状模様を詳細に観察するために、SEM (Scanning Electron Microscope、走査型電子顕微鏡) による観察を実施した。観察対象は MB-2 試験片とした。観察結果を、図 6.47 に示す。図 6.47(c) および(d) の左側では大小のくぼみが連結することで破面を形成しているのに対して、右側ではのっぺりとした平滑な破面となっていることが確認できた。この異なる 2 つの破面形状が縞状に連続することで、図 6.45 に示すようなマクロ的な縞状模様として見えていることがわかった。図 6.47(c) および(d) の左側に見える大小のくぼみのことをボイドという。それらが連結して形成された破面をディンプルといい、延性破壊に特徴的な破面形態の 1 つである。特に、図中にある円状のディンプルを等軸ディンプルといい、炭化物や介在物の界面割れおよび結晶粒界の割れ等が起点となって生じたボイドが引張静水圧によって球状に成長・連結することで生じる。以上の観察より、組織観察で確認されたバンド幅と破面上で確認された縞状延性破面の関係について以下のように推測する。

- ・解体材母材部では炭化物および合金元素（介在物）の濃度が高いと思われる領域（図 6.46において黒ずんでいる領域）と低い領域が顕著に縞状になっている
- ・炭化物や合金元素（介在物）はボイドの発生起点となるため、高濃度領域で先行して

ポイドが引張静水圧下で成長し、等軸ディンプルを形成する（図 6.47(c) や(d) で見られる大小のくぼみ）

つまり、炭化物および合金元素の高濃度領域と低濃度領域では、ディンプルの形成挙動が異なる可能性があり、それが縞状破面に現れたものと推測される。

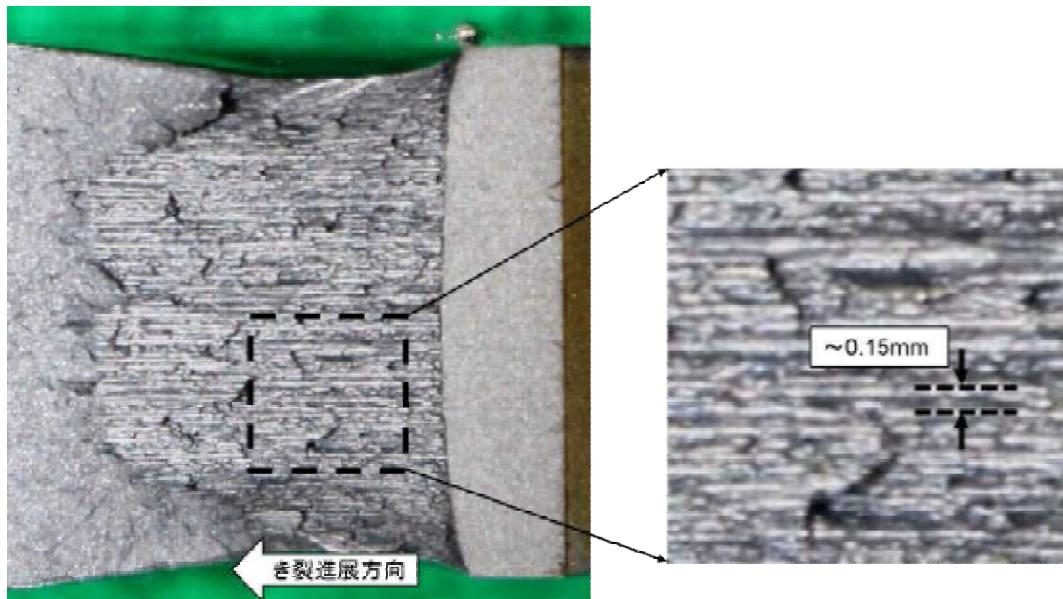


図 6.45 解体材母材部試験片 (MB-1) の縞状延性破面と代表的な縞幅

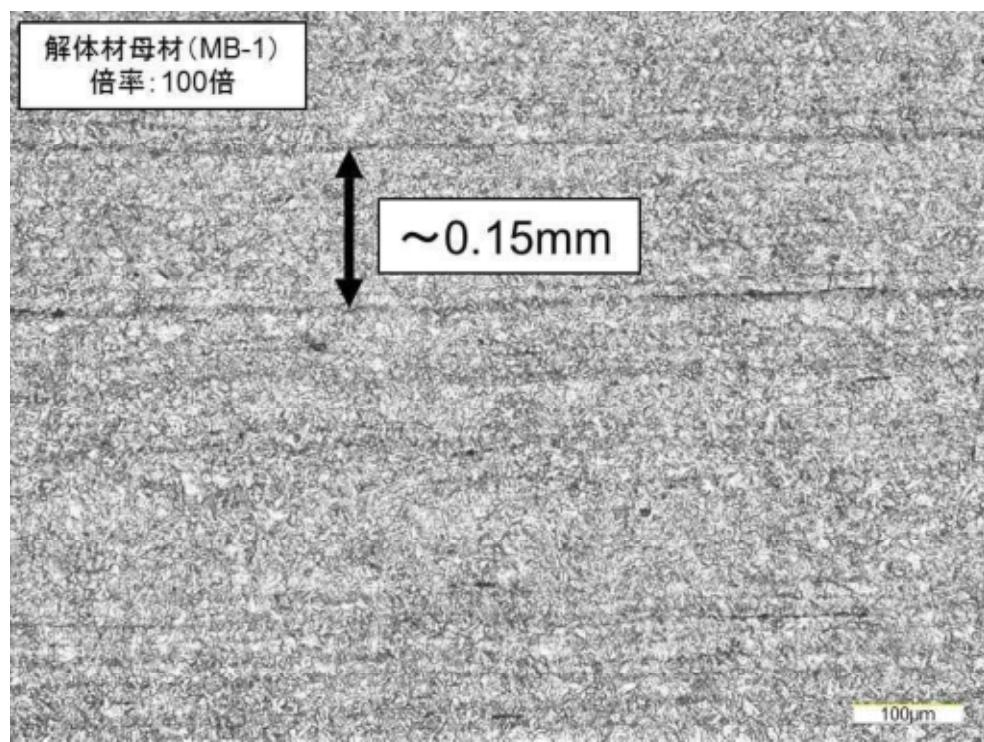


図 6.46 解体材母材部試験片 (MB-1) の破面と平行な面の組織観察結果と代表的なバンド幅

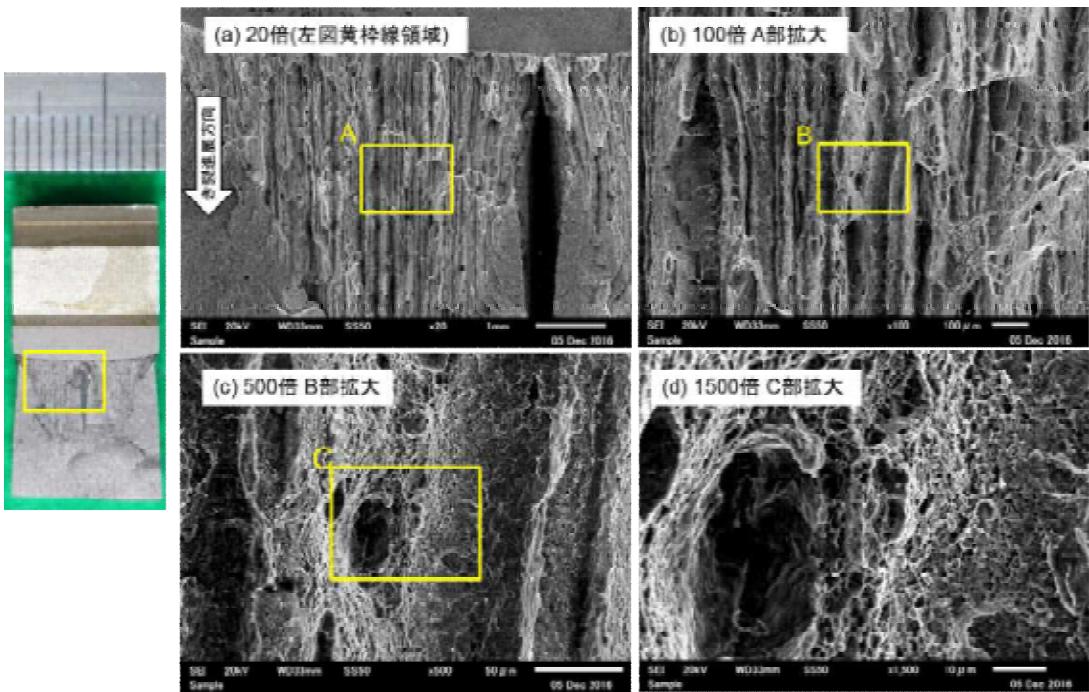


図 6.47 解体材母材部試験片（MB-2）の縞状延性破面の SEM 観察結果

6. 9 破面観察結果およびセパレーションが韌性に及ぼす影響の考察

6.9.1 セパレーションの発生要因と破面観察

図 6.48(a)に示すように、解体材母材部試験片（MB-2）において、主破面に垂直な縦割れ（セパレーション）が板厚方向の中央付近で生じた。また、図 6.48(b)に示すように、セパレーション発生と思われる時点で微小な荷重低下が確認された。

このセパレーションは平面歪状態が最も強い板厚中央部で生じる板厚方向の引張応力が駆動力となって生じたものと考えられる。また、図 6.48(b)に示すようにセパレーションが生じたのは最大荷重付近であるため、延性き裂があまり進展していない段階で生じたと思われる。参考として、セパレーション発生直前の除荷時の弾性コンプライアンスから予測される延性き裂進展量は 0.259mm であった。

セパレーションは一般的に脆性破壊によって生じるが、本試験で生じたセパレーションの破壊様式を同定・確認するために SEM 観察を実施した。図 6.49 に SEM 観察結果を示す。図 6.49(b)に示すように、崖のようになっているセパレーション破面を順次拡大しながら観察を実施したところ、図 6.49(d)に示すような典型的なへき開破面が確認された。へき開破面は脆性破壊に特徴的な破面形態であり、結晶粒が引張応力を受けて特定の面で割れることで生じる。以上より、一般的なセパレーションと同様に本試験で生じたセパレーションも脆性破壊によって生じたものであると確認できた。

図 6.50 に本試験片において確認されたセパレーション発生と延性き裂進展の様子を模式的に示す。延性き裂が大きく進展する前にセパレーションが生じたため、あたかも半分の板厚の試験片 2 体を同時に試験しているかのように、セパレーションを境に延性き裂がそれぞれ進展した。自由表面近傍の延性破面はシェアリップと呼ばれ、せん断応力支配の伸長ディンプルが破面上に形成される。図 6.51 および図 6.52 に自由表面近傍

およびセパレーション近傍のシェアリップのSEM観察結果を示す。両シェアリップで見え方が若干異なるが、両方ともにせん断応力支配によって生じる伸長ディンプルが確認される。

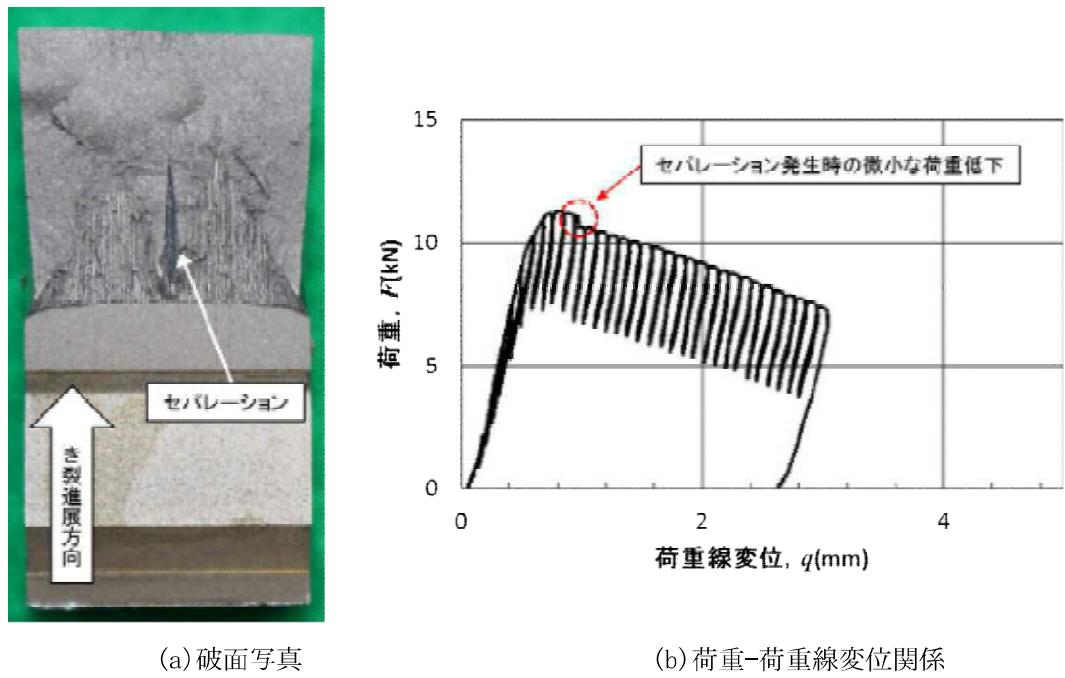


図 6.48 試験片 MB-2 の破面写真と荷重-荷重線変位関係

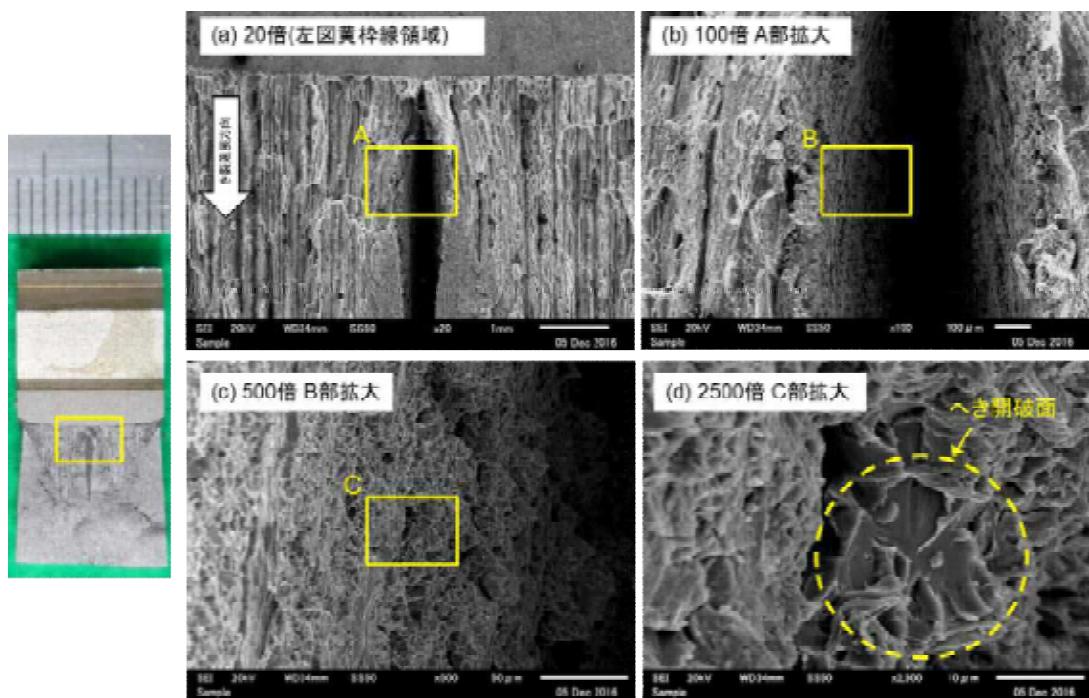


図 6.49 セパレーション破面の SEM 観察結果

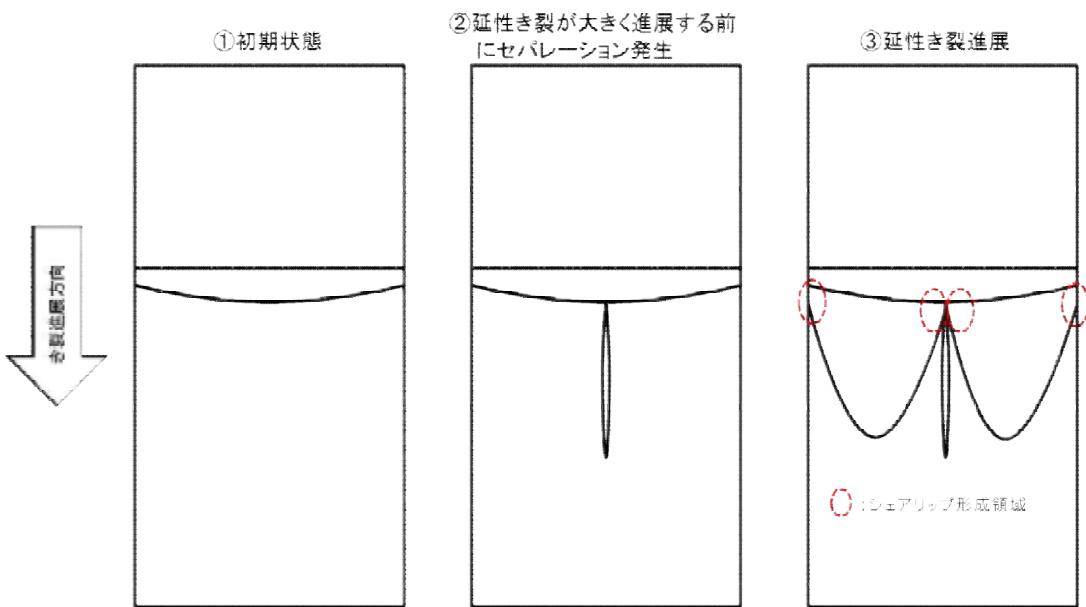


図 6.50 セパレーション発生と延性き裂進展の様子

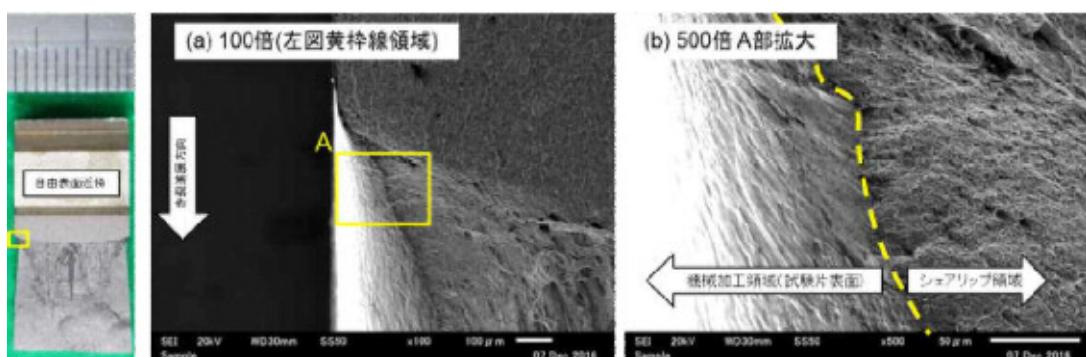


図 6.51 自由表面近傍のシェアリップ SEM 画像

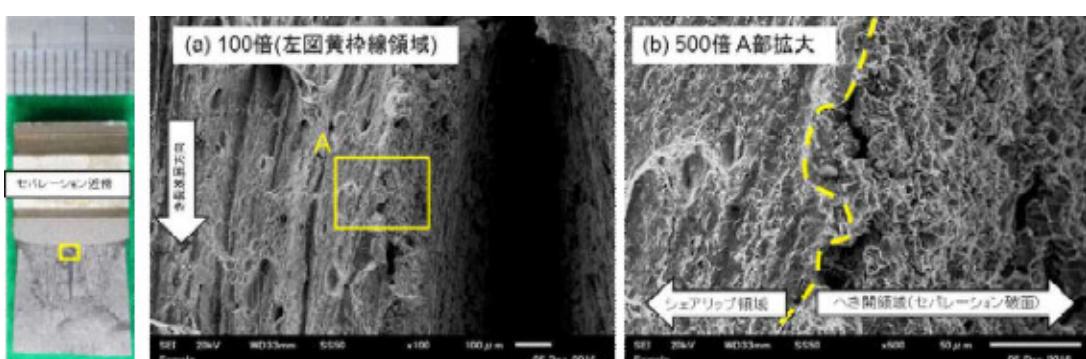


図 6.52 セパレーション近傍のシェアリップ SEM 画像

6.9.2 セパレーションが韌性に及ぼす影響

表 6.6 に示すように、セパレーションが生じた試験片 MB-2 と試験片 MB-1, 3 を比較しても J_q (または、 J_{Ic}) に大きな差は見られないため、実験事実としてセパレーションが延性き裂の進展開始に悪影響を及ぼす可能性は低いと思われる。むしろ、図 6.32 に示すように延性き裂が進展するに従って、セパレーションが生じた試験片 MB-2 の方がき裂進展抵抗が大きくなっていることがわかる。添付資料 24 に記載するように、一般的に破壊韌性は板厚が減少するに従って大きくなることが知られている。6.8.1 で述べたように、セパレーションの発生は板厚減少効果と同様の効果を少なからず生じさせると考えられるため、本試験で確認された程度のセパレーションに関しては、破壊韌性値を低下させるように影響しなかったものと考えられる。

6. 10 上部棚シャルピー吸収エネルギーと J_{Ic} の関係

上部棚のシャルピー吸収エネルギー（延性破面率 100% 時のシャルピー吸収エネルギー）と J_{Ic} には相関があることが知られている（添付資料 25）。そこで本章では、5 章に示す上部棚シャルピー吸収エネルギーと J_{Ic} に相関関係が成立するかについて確認した。

図 6.53 に上部棚シャルピー吸収エネルギー CVN_{US} と本試験から得られた J_{Ic} との関係を示す。上部棚シャルピー吸収エネルギー CVN_{US} および J_{Ic} ともに平均値を用いてプロットしており、 J_{Ic} 判定条件を満たしていない市販材母材部試験片 CB-1, 3 および市販材ボンド部試験片 CF-2 のデータは除いて平均値を算出した。また 5 章に示すように、解体材ボンド部については 60°Cにおいても上部棚シャルピー吸収エネルギーが得られていないが、脆性破面率がほぼ 0% であるため、本章においては上部棚として扱うこととした。

図 6.53 に示すように、上部棚シャルピー吸収エネルギー CVN_{US} と J_{Ic} の間には線形関係が見られた。よって、SPV450Q 材に対しては上部棚シャルピー吸収エネルギーから破壊韌性値 J_{Ic} を簡易的に予測することが可能であると考えられる。また、上部棚シャルピー吸収エネルギーのデータがなく、最低使用温度である -10°C のシャルピー吸収エネルギー $CVN_{-10°C}$ のデータしかない場合においても、 $CVN_{-10°C}$ を図 6.53 中の線形近似式に代入することで破壊韌性値 J_{Ic} を安全側に見積もることができる。

添付資料 25 に示すように、K. Wallin は上部棚シャルピー吸収エネルギーと J_{Ic} の関係を推定する式(a19. 1)～式(a19. 4)を提案した^[15]。そこで、それらの式を本試験の SPV450Q 材に適用した結果を図 6.54 に示す。K. Wallin による推定によると、上部棚シャルピー吸収エネルギーと J_{Ic} の関係は降伏応力（もしくは、0.2%耐力）に依存し、降伏応力（もしくは、0.2%耐力）が高いほど、同じ上部棚シャルピー吸収エネルギーから予測される破壊韌性値 J_{Ic} は低くなる。

図 6.55 に今年度の試験結果と K. Wallin による推定式を合わせて図示する。K. Wallin による推定式として、最も低く J_{Ic} を予測する 0.2% 耐力が 653MPa (CB 材および CF 材に相当) の場合を採用して図示している。図 6.55 に示すように、K. Wallin の推定曲線は今年度の全試験結果よりも下側にあるため、K. Wallin の推定式を用いることで、上部棚シャルピー吸収エネルギーから破壊韌性値 J_{Ic} を安全側に予測できると考えられる。

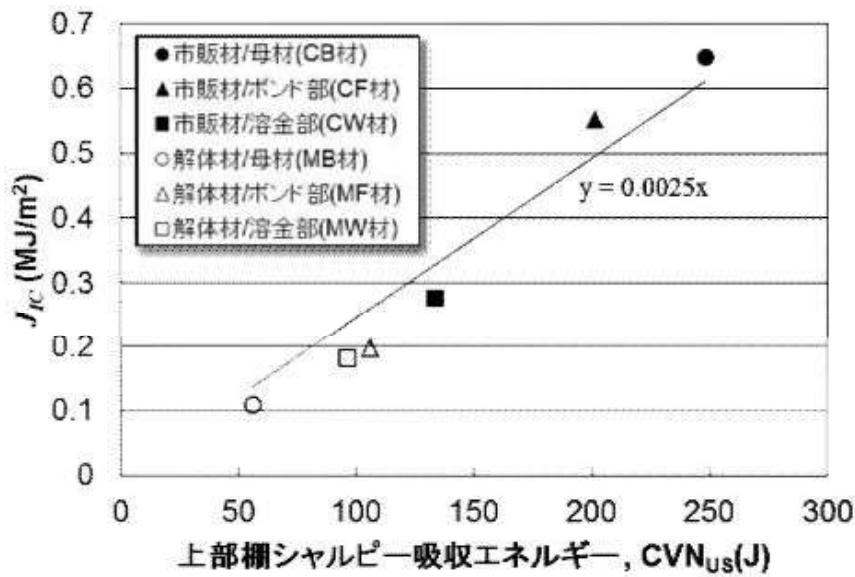


図 6.53 上部棚シャルピー吸収エネルギー CVN_{us} と J_{Ic} の関係

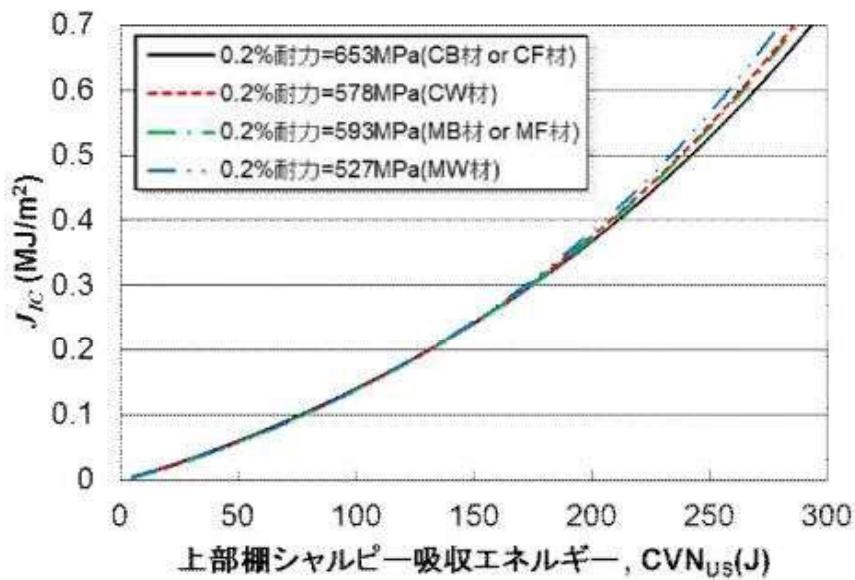


図 6.54 K. Wallin^[15]による上部棚シャルピー吸収エネルギー CVN_{us} と J_{Ic} の推定関係式

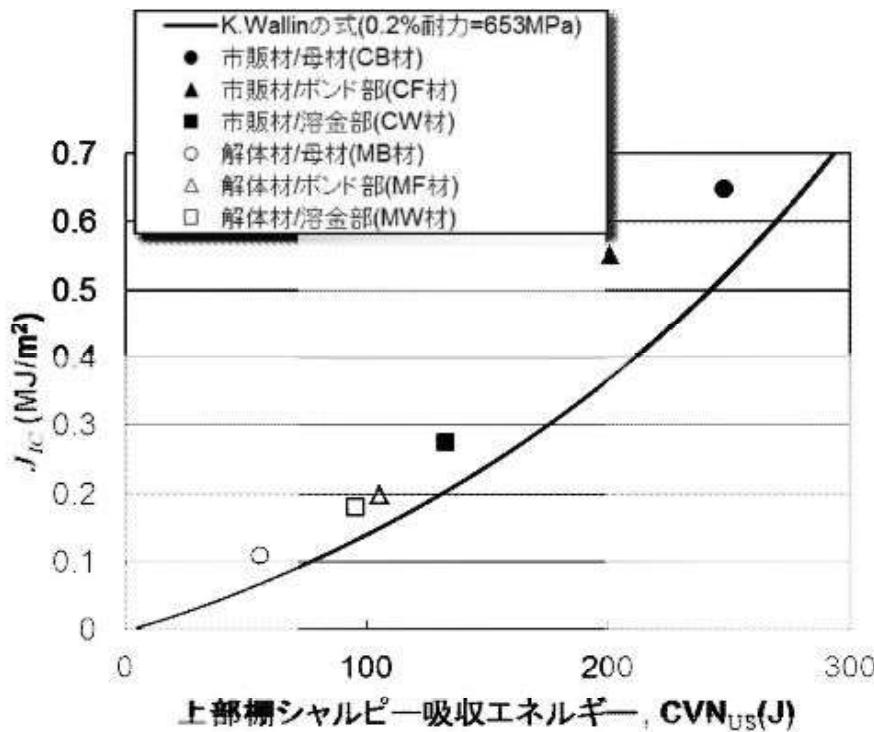


図 6.55 上部棚シャルピー吸収エネルギー CVN_{USt} と J_{Ic} の関係およびK.Wallinによる推定曲線

6. 11 過去の試験結果との比較

過去に日本ガス協会が通商産業省資源エネルギー庁から受託したガス工作物設置基準調査「球形ガスホルダー技術基準調査報告書(昭和62年3月)」^[1]では、鋼種HW50およびHW70(どちらも当時の市販材)に対してCTOD試験(以降、S62CTOD試験と記載する)を実施している。S62CTOD試験は、脆性破壊発生に対する韌性評価を主たる目的としているが、延性き裂の発生が認められた試験片に対しては延性き裂発生時のCTOD、 δ_i を別途取得している。そこで、S62CTOD試験の貫通切欠付きボンド部試験片(切欠き位置の定義は図6.11に示す今年度試験と同じ)の δ_i と今年度実施したボンド部および参考として母材部の結果を比較する。今年度の試験は J_{Ic} 取得を目的とした試験であるが、ISO12135(2002)^[5]には、 δ -Rカーブを作成し、そこから延性き裂発生時のCTODを評価する δ -Rカーブ法も記載されている。S62CTOD試験との比較には δ -Rカーブ法より求めた δ_i を用いた。添付資料23に、 δ -Rカーブ法の概要と、今年度の試験へ適用して得られた δ_i について記載する。

また、表6.9に今年度の供試材とS62CTOD試験の供試材の機械的性質を示す。今年度用いた市販材および解体材とともにHW50に近い機械的性質を持つことがわかる。

図6.56に今年度試験とS62CTOD試験のCTOD、 δ_i の比較を示す。重なるプロットは重複して表示しており、温度が-30、-10および15°Cの結果のみが表示されている。切欠き位置がボンド部の結果について比較すると、解体材はHW50およびHW70と同等の δ_i であり、市販材はそれより高韌性であることがわかる。解体材母材部の δ_i は、S62CTOD試

験の結果より小さかった。S62CTOD 試験、市販材および解体材の韌性に影響を与える要因として、素材の機械的性質、材料組織、板厚、溶接入熱量および熱処理の有無（S62 は熱処理無し）などが考えられる。

表 6.9 今年度の供試材と S62CTOD 試験の供試材の機械的性質

	供試材	溶接部位置	方向	降伏点 /0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	温度 (°C)
今年度	SPV450Q SR 市販材	母材	L	658	727	-10
			T	653	731	
		溶接金属	L	578	663	
	SPV450Q SR 解体材	母材	L	596	671	
			T	593	668	
		溶接金属	L	527	640	
S62	HW70	母材	不明	833	892	不明 (おそらく室温)
		溶接金属		706	813	
	HW50	母材	不明	598	666	
		溶接金属		549	627	

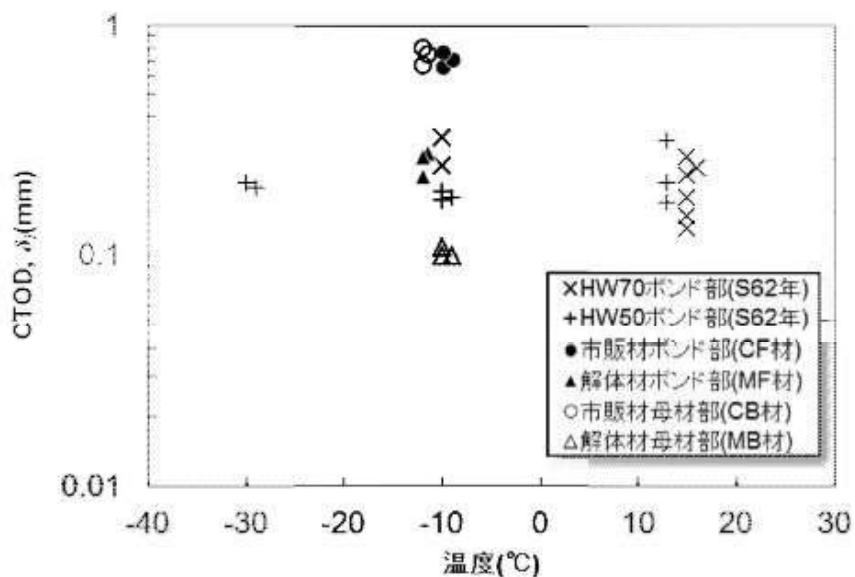


図 6.56 今年度試験と S62CTOD 試験の CTOD、 δ_i の比較

6. 12 J_{Ic} 試験のまとめ

横置き円筒形貯槽を対象にFAD評価を実施する際に必要となるSPV450Q材の破壊靄性値 J_{Ic} 取得を目的として、市販材および解体材（1978年に設置した廃止済横置き円筒形貯槽から切り出した）を対象に J_{Ic} 破壊靄性試験（ISO12135(2002)^[5]に準拠）を実施した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 市販材および解体材に対して、それぞれ母材部、ボンド部および溶接金属部に切欠きを導入した試験片を製作し、単一試験片法により J_{Ic} 破壊靄性試験を実施した。試験結果のまとめを表 6.10 に示す。
- (2) 得られた J_{Ic} のうち、解体材母材部試験片 MB-2 で得られた 0.105MJ/m² が最低値であった。
- (3) 上部棚シャルピー吸収エネルギーと J_{Ic} の間によい相関があることが示唆された。

表 6.10 J_{IC} 破壊非性試験結果まとめ

切欠き位置	試験片No.	試験片形状			機械的性質(-10°C における)			疲労予き裂導入条件 ^{*1}			き裂形状			疲労韧性試験			備考	
		板幅W/mm	板厚B/mm	荷重スパンS/mm	0.2%耐力 $R_{p0.2}$ /MPa	引張強度 R_u /MPa	ヤング率 E /GPa	ボアン比 v	最大荷重 kN	最大応力 σ_u MPa $\cdot m^{1/2}$	繰返し回数 $\times 10^4$ 回	き裂初期長さ a_0 mm	試験温度 $^{\circ}\text{C}$	き裂長さ a mm	試験 J_q Ma/m ²	計算 J_{IC} Ma/m ²	判定条件 ^{*4}	換算 CTOD ^{*5} mm
市材 母材部	CB-1	40.04	20.03									6.5	20.63		0.0000 1.185 0.803 0.503	0.502	Invalid	0.305
	CB-2	40.04	20.03									7.1	20.63		0.0000 1.173 0.715 0.649	0.564	Valid	0.364
	CB-3	40.04	20.03									7.2	20.57		0.0000 1.180 0.675 0.630	0.630	Invalid	0.300
	CF-2	40.00	20.89	653	731				10	0.5	26.6	8.2	20.36	0.0000 0.896 0.739 0.413	0.413	Invalid	0.358	
	CF-3	40.00	20.83	160								7.7	20.35		0.0000 0.940 0.658 0.500	0.500	Valid	0.433
	CF-4	40.00	20.71									6.7	20.38		0.0000 0.974 0.553 0.603	0.603	Valid	0.522
溶接金属部	CW-1	40.00	20.77									6.5	20.91		0.0000 0.573 0.596 0.288	0.288	Valid	0.279
	CW-2	39.99	20.76	578	663							6.1	20.33		0.0000 0.570 0.644 0.226	0.226	Valid	0.255
	CW-3	39.99	20.76									6.2	20.26	-10	0.0000 0.550 0.588 0.277	0.277	Valid	0.268
	CW-4	39.99	20.76									5.2	11.41		0.012 0.155 0.989 0.111	0.111	Valid	0.106
母材部	MB-1	22.01	11.00									5.1	11.50		0.036 0.234 0.855 0.105	0.105	Valid	0.100
	MB-2	22.02	11.00									5	11.28		0.071 0.165 0.942 0.115	0.115	Valid	0.110
	MB-3	22.01	11.00															
	MF-1	22.00	11.71															
解体部	MF-2	22.00	11.87	88														
	MF-3	22.00	11.65															
	MW-1	21.98	11.68															
	MW-2	22.00	11.69	527	640													
溶接金属部	MW-3	21.99	11.64															

^{*1} 疲労予き裂導入は3点曲げ試験で実施し、荷重スパンは試験片形状欄に記載の値と同じ^{*2} 疲労予き裂導入中の最大応力拡大係数^{*3} $J-R$ カーブを決める式(6.13)中の係数^{*4} 6, 6, 3, 4, 2 で述べた8条件を全て満たした場合にValid、それ以外はInvalid^{*5} 6, 7 で述べた手法による換算 CTOD

7. 既設 LPG 貯槽の韌性調査

7. 1 材料、溶接技術等の技術進展動向の調査

材料(母材・溶接材料)、溶接技術等の技術進展動向の調査を行い、それらが韌性に与えた影響を整理した。

7.1.1 母材

① SPV450 系材料規格の規定内容の変遷

SPV450 系高張力鋼材料の材料規格(JISG3115^[6]:SPV450(1968 年制定))について、衝撃試験規格値、化学成分規格値の変遷を調査した。

調査の結果、SPV450 については、衝撃試験規格値は規格制定以降変更がないものの、韌性に影響の大きい P、S 成分は 1983 年から規定値が低減されていることを確認した。

1970 代にかけて低 P、低 S 化技術が進歩し、LPG 貯槽指針^[16]が制定された 1981 年頃には、現状の P、S 規格値を満足する材料が供給されていたと推測できる。材料規格の規定内容の変遷を添付資料 29 に示す。

② 厚鋼板の製造方法の推移

SPV450 を含む厚鋼板の製造方法の推移について、ミルメーカーへのヒアリングや文献調査等により調査した。

調査の結果、製鋼・精錬・鋳造・圧延・熱処理などの各製作工程において、材料の韌性の向上に寄与する開発・改良が各年代で行われていることを確認した。

<調査結果概要>

- ・ 化学成分は、1970 年代を中心に、溶銑予備処理、転炉、2 次精錬技術等の開発・改善が進み、不純物元素が年々低減されている^[17]。
- ・ 鋳造については、連続鋳造技術の採用・進歩により、介在物の低減、偏析の改善が進んでいる^[18]。SPV450 でも 1980 年代初頭には連続鋳造の採用が一般的になっている。
- ・ 圧延技術は、1969 年に TAPS(トランス・アラスカ・パイプライン・システム)からラインパイプ用鋼管を大量に受注したことを契機に制御圧延の基礎研究や応用研究が加速し、1980 年頃までに制御圧延法の基礎が確立された。また、1980 年代初頭には加速冷却型 TMCP(制御圧延+加速冷却)技術が広く実用化されている。^{[19] [20]}

製鋼・精錬・鋳造・圧延・熱処理などの各製作工程の推移等を示した資料を添付資料 30 に示す。

③ 解体材を製造したミルメーカーへのヒアリング

5. シャルピー衝撃試験、6. J_{1C} 試験で示しているとおり、解体材の母材韌性が市販材の母材と比べて著しく低い結果となった。また、解体材の母材組織には帶状のバンド組織が確認されるとともに、J_{1C} 試験破面、シャルピー衝撃試験破面について、市販材の母材破面と大きく異なる縦縞模様の破面が確認された。

市販材と解体材の差異を確認するため、解体材を製造したミルメーカーに対して、解体材が製造された当時の SPV450 の製造方法及び韌性特性等についてヒアリングを実施した。

調査の結果、解体材(1978年製)は複雑な偏析が発生しやすい I C (インゴットキャスト) 製法の素材を「ストレート圧延」により製造された鋼材*のため、圧延方向 (L 方向)、圧延直角方向 (T 方向) のシャルピー衝撃試験値の差が顕著に表れた (T 方向の韌性が低い) ことが判明した。また、母材組織に見られるバンド組織はミクロ偏析ではあるものの、当時の鋼材としては通常レベルであり、韌性レベルについても、同一製法 (I C 製法、ストレート圧延、S Rあり)・成分系の SPV450 系鋼材のシャルピー吸収遷移温度と比較することにより、当時の平均的なレベルであることを確認した。

なお、L P G 貯槽指針^[16]制定 (1981 年) 以降は、材料(母材)の衝撃試験を圧延直角方向 (T 方向) から採取することを要求していることに加え、1982, 3 年頃には、鋼材中の偏析レベルが改善された連続鋳造方式の採用が一般的となり、ストレート圧延のみの場合でも圧延方向と圧延直角方向のシャルピー衝撃試験値の差は少なく (T 方向の韌性が改善された) なっている。

* 当時、シャルピー衝撃試験片を圧延直角方向から採取する要求がある場合には「クロス圧延」を行い、クロス圧延を行った材料は圧延方向と圧延直角方向のシャルピー衝撃試験値の差は少なくなる傾向にあった。一方、解体材は L P G 貯槽指針^[16]制定前の材料であり、かつ板厚 12mm 以下そのため、シャルピー衝撃試験が要求されない条件となっており、当該条件においては「ストレート圧延」にて製造されたものと推測される。

7.1.2 溶接材料

溶接材料メーカーに対して、サブマージドアーク溶接材料(溶加材、フラックス)について技術進展動向の確認をしたところ、P、Sなどの不純物成分の低減等が進んでおり、溶接材料の韌性向上が図られていることを確認した。

7.1.3 溶接技術

貯槽メーカーに対して、サブマージドアーク溶接技術の技術進展動向を確認した結果、開先形状(角度・深さ)の変更はあるものの、1970 年代から溶接条件等に大きな変更はないことを確認した。

7. 2 既設 LPG 貯槽のシャルピー吸収エネルギー値（ミルシート）の調査等

ガス事業者が保有する既設 LPG 貯槽の韌性レベルを確認するため、全国のガス事業者から調査対象貯槽のミルシートや溶接部機械試験記録を収集し、シャルピー吸収エネルギー値の調査等を行った。

7.2.1 SPV450 系材料円筒形 LPG 貯槽の年代別設置基数

既設 SPV450 系材料円筒形 LPG 貯槽の年代別の設置基数は図 7.1 の通り。今回、これらの貯槽を対象に、調査を行った。

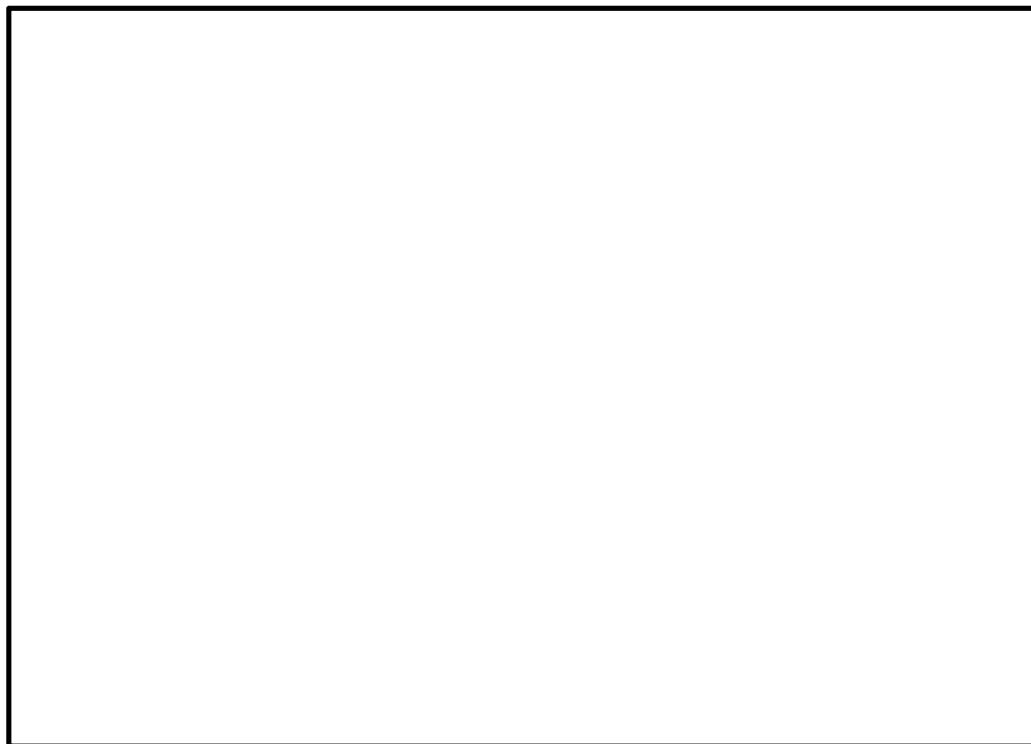


図 7.1 SPV450 系材料円筒形 LPG 貯槽の年代別設置基数

7.2.2 母材（胴板・鏡板）のシャルピー吸収エネルギー値

母材韌性の製作年代による傾向を調査するため、既設 SPV450 系材料円筒形 L P G 貯槽の母材（胴板・鏡板）のシャルピー吸収エネルギー値を全国のガス事業者が所有するミルシートを収集して調査した。収集したミルシートに記載されている吸収エネルギー値を製作年毎にプロットしたものを図 7.2 に示す。

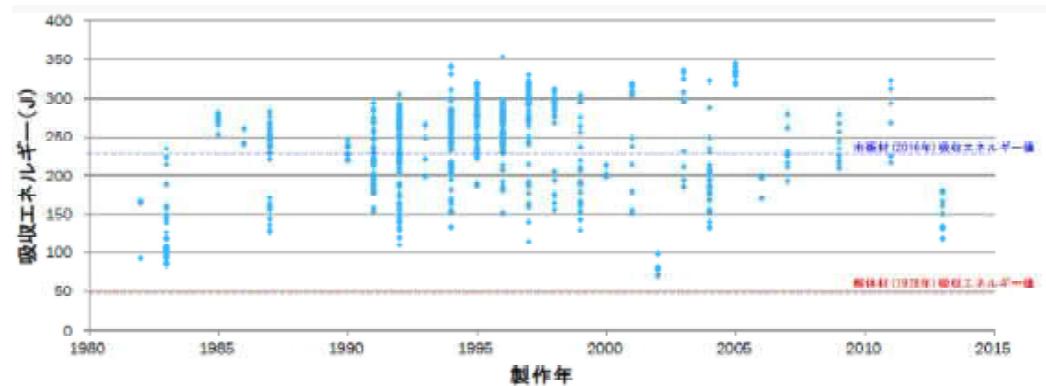


図 7.2 母材（胴板・鏡板）のシャルピー吸収エネルギー値*

* 対象 : JISG3115^[6] SPV450Q(SPV46Q を含む)

L P G 貯槽指針^[16]制定（1981 年）以降に製作されたもの

試験片採取方向：圧延直角方向（T 方向）

試験温度 : -10°C

試験片サイズ：フルサイズ

吸収エネルギー値は、ばらつきはあるものの、年代を追うごとに緩やかに上昇している傾向が見て取れる。また、L P G 貯槽指針^[16]制定（1981 年）以降に製作されたすべての貯槽材料の吸収エネルギー値は、解体材試験片（圧延直角方向）で得られた吸収エネルギー値（平均 46J）より大きくなっている。これは、L P G 貯槽指針^[16]において圧延直角方向での衝撃試験を要求し、その判定条件を平均 47J 以上としているためである。これにより、今回の試験に供した解体材の試験結果において、L P G 貯槽指針^[16]制定以降に製作された貯槽のほぼ最低の韌性値を取得しているものと推定できることになる。

7.2.3 溶接部のシャルピー吸収エネルギー値

既設 SPV450 系材料円筒形 LPG 貯槽の溶接部のシャルピー吸収エネルギー値について、全国のガス事業者が所有する機械試験記録を収集して調査した。調査結果を図 7.3 に示す。

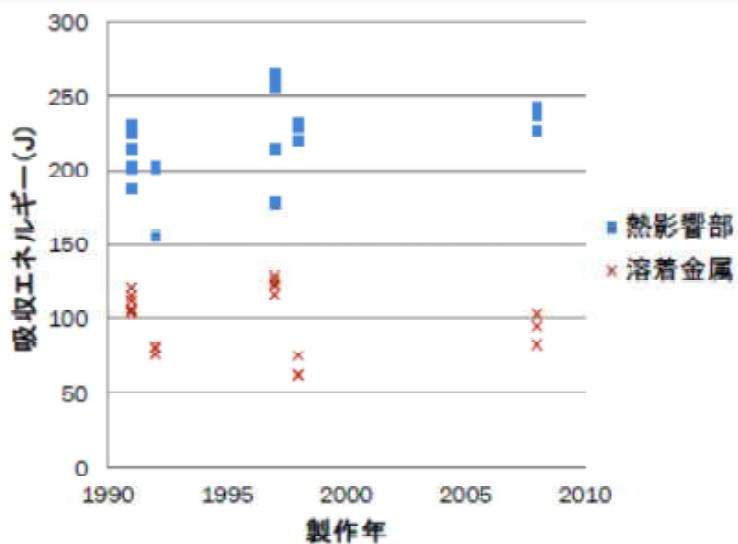


図 7.3 溶接部シャルピー吸収エネルギー値(母材:SPV450Q、溶接材料:Y-DM×YF-15B)

データ数は少ない*ものの、熱影響部の吸収エネルギーは年代を追うごとに緩やかに上昇している傾向がある。一方で、溶着金属の吸収エネルギーは年代で値に差はほんく一定の傾向にある。これは今回の市販材や解体材の試験結果と同様の傾向を示している。

* ガス事業法技術基準において、衝撃試験は最低使用温度が-30°C以下の場合に要求されているため、通常は実施していないことが多い。

7.2.4 SPV450 系円筒形 LPG 貯槽の母材（胴板・鏡板）化学成分

既設 SPV450 系材料円筒形 LPG 貯槽の母材（胴板・鏡板）の化学成分について、全国のガス事業者が所有するミルシートを収集して調査した。調査結果を図 7.4 に示す。

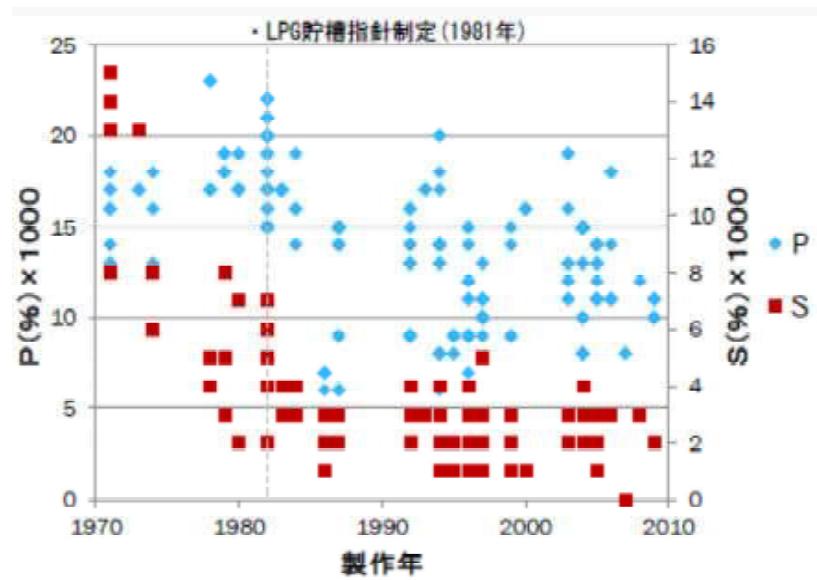


図 7.4 SPV450 系材料の母材（胴板・鏡板）化学成分

図 7.4 より、母材の化学成分として韌性に影響の大きい S 成分は 1970 年代に大幅に減少していることが見て取れる。また、P 成分も 1980 年代にかけて減少している傾向が見て取れる。

7.3 既設 LPG 貯槽の韌性調査のまとめ

技術進展動向の調査結果から、近年製作された貯槽については、材料の品質改善等により、溶接部近傍の韌性が大きく向上していることを確認した。

また、既設貯槽の調査結果から、今回試験に供した解体材(1978 年製)の試験結果において、LPG 貯槽指針^[16]制定(1981 年)以降に製作された貯槽のほぼ最低の韌性値を取得しているものと推定できることを確認した。

8.まとめ

8.1 試験・調査結果のまとめ

国内で広く一般的に使用されている圧力容器材料であるS P V 4 5 0系材料を使用する貯槽について、最新の評価技術の適用（疲労き裂を想定した破壊評価（F A D（破壊評価線図）評価）による検査周期の個別設定等）を可能にすることを目的とし、当該材料の破壊靭性に係わる一連の調査を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

市販材および解体材（1978年に設置された貯槽から切り出した材料）のそれぞれについて、母材部・熱影響部・溶接金属部の3部位、計6部位の破壊靭性値（ J_{Ic} 値）を J_{Ic} 試験により取得した。その結果は以下の通りであった。

- いずれの試験片においても、脆性的な不安定破壊は先行せず、安定き裂の成長を伴う破壊形態であることを確認した。
- 計6部位の試験それぞれについて、平面ひずみ等の条件を満足する有効な J_{Ic} 値を取得することができた。
- 市販材と解体材のいずれにおいても、熱影響部は、母材部と溶接金属部の中間的な J_{Ic} 値であった。
- 熱影響部以外の J_{Ic} 値については、解体材の母材部 < 解体材の溶接金属部 < 市販材の溶接金属部 < 市販材の母材部、という大小関係であった。
- 今回の試験において最も小さい J_{Ic} 値は、解体材の母材部で測定された 0.105 MJ/m^2 という値であった。

最も小さな J_{Ic} 値が得られた解体材（1978年）の母材部におけるシャルピー吸収エネルギーは平均 46 J （ -10°C 、T方向）であった。この値は、LPG貯槽指針^[16]制定（1981年）以降に製作された既設貯槽ミルシート値の最低値を下回る値であった。

加えて、技術調査の結果から、1970年代を中心とした技術進展により材料の靭性が大きく向上していることを確認した。

これらのことから、LPG貯槽指針に基づき製作された貯槽全般について、今回得られた J_{Ic} 値の最低値（ 0.105 MJ/m^2 ）を用いて十分安全に破壊評価を行うことが可能である。（LPG貯槽指針^[16]制定前に製作された貯槽については、適用の可否をミルシートやシャルピー吸収エネルギーの値等から個別に判断する必要がある。）

得られた J_{Ic} 値と上部棚シャルピー吸収エネルギーの間には顕著な相関が見られた。既存文献に記載される算定式（添付資料25。多数の実験結果を統計的に処理した保守的な評価式。上部棚シャルピー吸収エネルギーと降伏応力を入力として J_{Ic} 値を算定するもの。）は、今回得られた J_{Ic} 値を保守的に評価した。

8. 2 試験結果の活用方法の提言

8.2.1 指針改訂の提言

今年度の調査結果を踏まえ、解体材母材部のデータ（取得した J_{Ic} の最低値）（ $J=0.105$ MJ/m²、換算 $\delta=0.100$ mm）を、SPV450LPG貯槽全般の破壊評価に使用可能なFAD評価パラメータとして、容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針^[11]、LPG貯槽指針^[21]に追記する改訂（追補改訂）を提言する。追補改訂の新旧対照表（案）を添付資料31、32に示す。

8.2.2 将来に向けた提言

① シャルピー吸収エネルギーを用いた簡便な個別評価の実現

8.1節で述べたように、今回得られた J_{Ic} 値は上部棚シャルピー吸収エネルギー等を入力することで、既存算定式（添付資料25）により保守的に評価可能であった。このことは、評価対象部位の上部棚シャルピー吸収エネルギーのみ有していれば、 J_{Ic} 試験のような煩雑な試験を行わずとも、個別貯槽の材料特性を反映した検査周期の評価が実施できる可能性を示唆している。

貯槽製作時には上部棚の値を取得することは必ずしも一般的ではないが、運用最低温度（例えば-10°C）での試験を行うことで、上部棚以下の吸収エネルギーが得られる。この値を算定式の入力として用いることで、保守的な J_{Ic} 値が算定される。

実際の適用にあたっては、使用材料・溶接条件・検査記録等を精査した上で評価に用いる靭性値を検討する必要がある。また、溶接部の評価にあたっては溶接部のシャルピー吸収エネルギーの値が必要になる場合があり、その場合は事前のデータ取得が必要になる。

なお、FAD評価に J_{Ic} 値を用いることは、脆性的な不安定破壊が先行せず、安定き裂の成長を伴う破壊形態となる材料であることを前提としている点に、留意が必要である。

② 破壊評価の高精度化

FAD評価に基づき破壊が生じるかを判定する際には、破壊評価線図が用いられる。一般に用いられている破壊評価線図は保守的な評価結果を与える傾向があることから、破壊評価の高精度化を図る取り組みが近年進められている（例えば、参考文献[22]～[24]）。このような最新の技術を取り込むことで、より高精度かつ信頼性の高い評価が実施できる可能性がある。

これらにより、個別貯槽の材料特性を精緻に反映した検査周期の評価が簡便かつ合理的に実施できるようになれば、適切な検査周期を定めることで、より一層の保安向上を図ることが期待できる。

参考文献

- [1] 昭和 61 年度 通商産業省資源エネルギー庁委託研究 ガス工作物設置基準調査 “球形ガスホルダー技術基準調査報告書” (1987)
- [2] JIS Z 2241:2011, “金属材料引張試験方法” (2011)
- [3] JIS Z 2244:2009, “ビックカース硬さ試験—試験方法” (2009)
- [4] JIS Z 2242:2005, “金属材料のシャルピー衝撃試験方法” (2005)
- [5] ISO 12135 : 2002, “Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness” (2002)
- [6] JIS G 3115 : 2010, “圧力容器用鋼板” (2010)
- [7] 平成 27 年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査（ガス工作物技術基準適合性評価等（技術基準調査等事業））“LPG 貯槽用材料特性(破壊靱性値)調査 調査報告書” (2016)
- [8] JIS Z 3351 : 2012, “炭素鋼及び低合金鋼用サブマージアーク溶接ソリッドワイヤ” (2012)
- [9] JIS Z 3352 : 2010, “サブマージアーク溶接用フラックス” (2010)
- [10] BS7910:2013, “Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures” (2013)
- [11] (一社) 日本ガス協会 “容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 JGA 指 109-14” (2014)
- [12] ISO 15653 : 2010, “Metallic materials - Methods of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds” (2010)
- [13] ASTM E 1820:2013, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness” (2013)
- [14] BS7448:1991, “Fracture mechanics toughness tests, Part1. Method for the determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials” (1991)
- [15] K. Wallin, “Low-cost $J-R$ curve estimation based on CVN upper shelf energy”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 24, Issue 8, pp. 537-549 (2001)
- [16] (社) 日本ガス協会, “LPG 貯槽指針 指-製-0805-81” (1981)
- [17] 瀬村康一郎・松浦宏行, “二次精鍛技術の開発、発展の歴史と将来展望”, 鉄と鋼, vol. 100, No. 4, pp. 456-471, (2014)
- [18] 川本正幸・柳楽知也 , “我が国における鋼の連続鋳造プロセスの開花と未来へのシーズ”, 鉄と鋼, vol. 100, No. 4, pp. 472-484, (2014)
- [19] (社) 日本鉄鋼協会 “わが国における厚板技術史” (2001)
- [20] 津山青史 , “厚板技術の 100 年 世界をリードする加工熱処理技術”, 鉄と鋼, vol. 100, No. 1, pp. 77-81, (2014)
- [21] (一社) 日本ガス協会, “LPG 貯槽指針 JGA 指 106-15” (2015)
- [22] 釜谷ら, “維持規格における弾塑性破壊力学評価のための Z 係数式”, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 841, 16-00263 (2016)
- [23] Seko, et al., “Brittle fracture assessment of embedded flaw in heat-affected zone

based on Weibull stress criterion” , 68th International Institute of Weld Assembly
Commission X (2015)

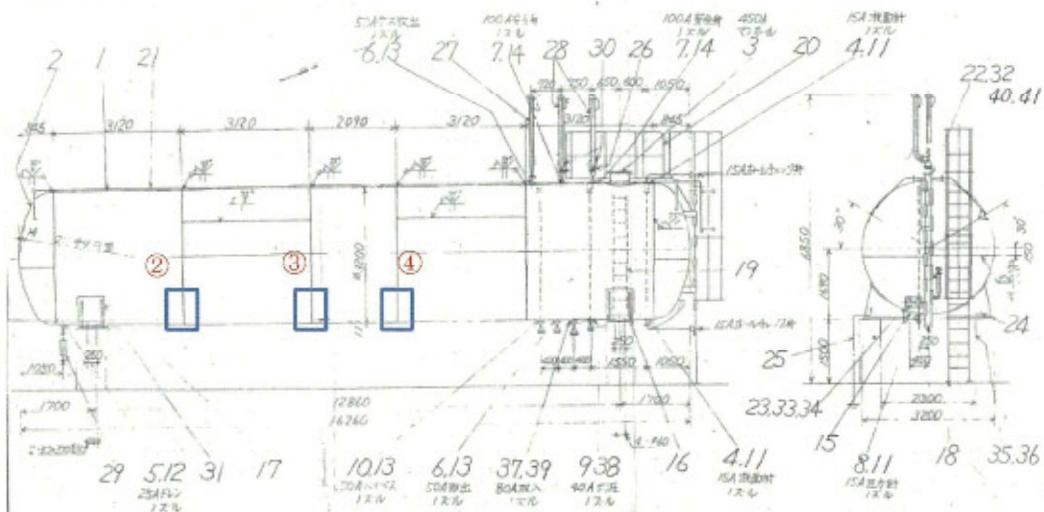
[24] ISO 27306 : 2009, “Metallic materials - Method of constraint loss correction of CTOD
fracture toughness for fracture assessment of steel components” (2009)

添付資料 1 市販材板厚測定記録

板 厚 測 定 記 錄					工号／J O B No. 8X0080																																																						
RESULT OF PLATE THICKNESS INSPECTION																																																											
機器名称 : L P G 計槽溶接継手			検査年月日 : 平成28年8月10日																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">番号 No</th> <th style="width: 15%;">材質 Material</th> <th style="width: 15%;">素材寸法 Size(mm)</th> <th style="width: 15%;">製鋼番号 ChargeNo.</th> <th style="width: 15%;">製鋼所 Maker of Material</th> <th style="width: 15%;">数量 Q'ty</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>SPV450Q SR</td><td>20×3890×7790</td><td>TN30001</td><td>JFEスチール</td><td>1 枚</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>						番号 No	材質 Material	素材寸法 Size(mm)	製鋼番号 ChargeNo.	製鋼所 Maker of Material	数量 Q'ty	1	SPV450Q SR	20×3890×7790	TN30001	JFEスチール	1 枚	2						3						4						5						6						7						8					
番号 No	材質 Material	素材寸法 Size(mm)	製鋼番号 ChargeNo.	製鋼所 Maker of Material	数量 Q'ty																																																						
1	SPV450Q SR	20×3890×7790	TN30001	JFEスチール	1 枚																																																						
2																																																											
3																																																											
4																																																											
5																																																											
6																																																											
7																																																											
8																																																											
板厚測定位置図(単位mm) Measured Points(Unit in mm)			チャージ Charge <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D </div>																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">番号 No</th> <th style="width: 15%;">A</th> <th style="width: 15%;">B</th> <th style="width: 15%;">C</th> <th style="width: 15%;">D</th> <th style="width: 15%;">備考 : Remarks</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>20.90</td><td>20.83</td><td>20.79</td><td>20.98</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>						番号 No	A	B	C	D	備考 : Remarks	1	20.90	20.83	20.79	20.98		2						3						4						5						6						7						8					
番号 No	A	B	C	D	備考 : Remarks																																																						
1	20.90	20.83	20.79	20.98																																																							
2																																																											
3																																																											
4																																																											
5																																																											
6																																																											
7																																																											
8																																																											
測定器 (マイクロメーター) Tester: Micrometer																																																											
備考 : Remarks 立会者 : Surveyor 検査員 : Inspector																																																											

添付資料2 解体材 板厚測定結果及び採取位置

○測定位置



○板厚測定記録 (単位 mm)

	溶接線②		溶接線③		溶接線④		(目的のサンプルを記入)
図面奥	1m -	11.7 11.2	.....	11.2 11.4	.....	11.5 11.8	
貯槽下部(B 位置)	0.5m -	11.6 11.6	.....	11.4 11.4	.....	11.5 11.8	J G A
	.....	11.8 11.8	.....	11.1 11.3	.....	11.8 11.7	
	0.5m -	11.6 11.2	.....	11.4 11.4	.....	11.4 11.5	
図面手前	1m -	11.7 11.6	.....	11.2 11.4	.....	11.4 11.7	

板厚が比較的厚く、ばらつきの少ない溶接線④を採取した。

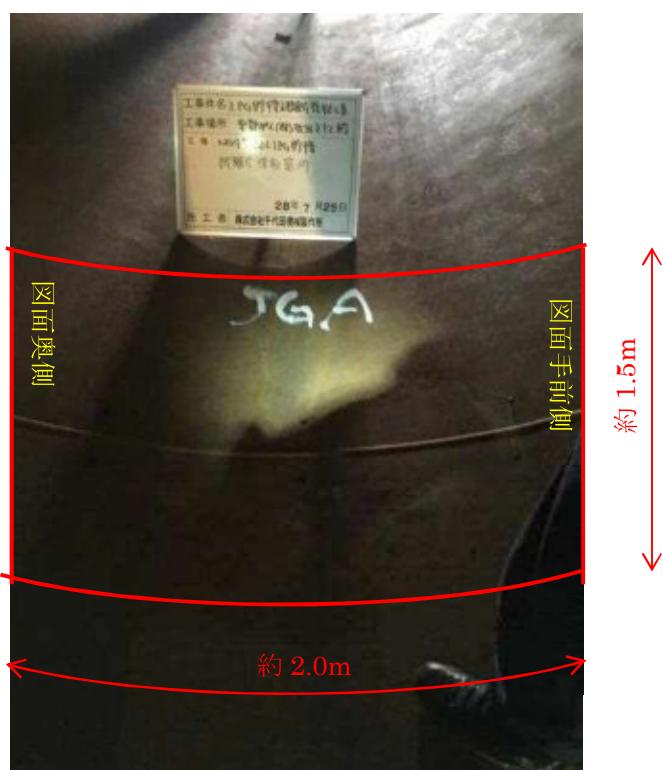
○定期測定記録 (H22.9) (参考)

内面測定

測定 結果		E ₁ -1	E ₁ -2	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₁	E ₂ -1	E ₂ -2	判定
	C	13.3	13.3						13.4	12.9	合格
T	13.7			12.1	12.1	11.8	11.6	11.7	13.4		合格
R	13.3	13.3		12.3	12.0	11.7	11.7	12.0	13.1	13.0	合格
L	13.2	13.4	12.0	12.1	11.7	11.7	11.8	12.8	13.0		合格
B			13.8	12.2	12.1	11.7	11.6	12.0		13.4	合格

② ③ ④

○参考写真



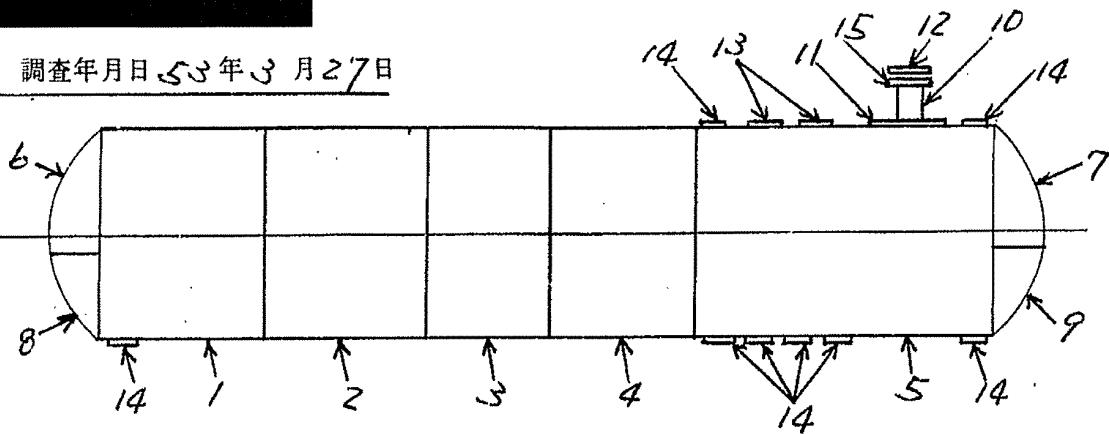
採取範囲



以上

鋼材使用明細

調査年月日 53年3月27日



番号	使用箇所	材質	製鋼所	製鋼、製品番号	寸法
1	胴	SPV46Q-SR	新日鉄	SP1460 840879-1	11x3140x10110
2	"	"	"	SP1460 840879-3	"
3	"	"	"	SM1167 827764-4	11x2120x10110
4	"	"	"	SP1460 840876-1	11x3140x10110
5	"	"	"	SP1460 840877-1	"
6	鏡	SPV46N-SR	日本鋼管	S212 FP841-2	14x2300x8620
7	"	"	"	"	"
8	"	"	"	S212 FP840-2	14x2010x8620
9	"	"	"	"	"
10	マントル 胴	H.T.60	新日鉄	S82154 729824-2	12x1524x6096
11	マントル 補強板	"	日本鋼管	4971 PP342-3	13x1980x7920
12	マントル フフ	"	新日鉄	SE3327 778307-1	50x1524x6096
13	マントル 管座	"	"	"	"
14	"	"	"	SE3327 813717-1	40x1524x6096
15	マントル フランジ	S25C	愛知製鋼	07359	Φ50Φ

**INSPECTION CERTIFICATE
検査証明書**

Customer
(需要家) 日本車両製造 株式会社 衣浦製作所

Certificate No.
(証明書番号)
1606321N

Trade Designation
(鉛柄)
NSSW Y-DM

Size
(寸法)
4.8

mm
(製造番号)
5Z55102064

Manuf.No.
(製造番号)
M28089

Heat No.
(製鋼番号)
JIS Z 3351 VS-M5

Weight
(数量)
kg
-

Remark
(備考)

Group Manager, Quality Control Dept
Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.
Chiba Plant (Marashino)

千葉工場 品質管理グループ長
7-6-1,HIGASHINARASHINO,NARASHINO-CITY,CHIBA,JAPAN
千葉県習志野市東習志野7-6-1 TEL 047(479)1171 FAX 047(475)6130

日鑄住金溶接工業株式会社

We hereby certify that above welding materials satisfy
the requirements of the applicable specification.

上記溶接材料は、適用規格の要求事項を満足していることを証明します。

101

INSPECTION CERTIFICATE

検査証明書

Customer
(需求家) 日本車輪製造 株式会社 衣浦製作所

Certificate No.

(証明書番号)

1606179N

Date (発行日)

平成28年8月16日

Trade Designation (鉱柄)	Nominal Size,Mesh (公称粒度メッシュ)	Manuf.No. (製造番号)	Weight (数量)	kg	Remark (備考)
NSSW YF-15B	20 × 200	6V17101000	-	JIS Z 3352 SFCS1	

Chemical Composition (化学成分) %	
CaO+MgO+SiO ₂	CaO+MgO
63	23

Grain Size Distribution,Mesh (粒度分布メッシュ)	
12×20	20×48
0.3	47.5

We hereby certify that above welding materials satisfy
the requirements of the applicable specification.

上記溶接材料は、適用規格の要求事項を満足していることを証明します。

Group Manager, Quality Control Dept

Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.

Chiba Plant (Narashino)

日鋼住金溶接工業株式会社

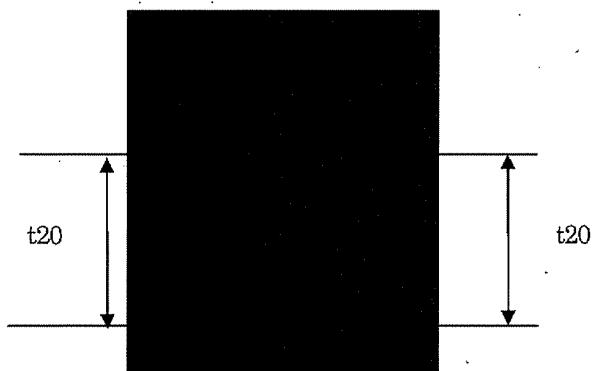
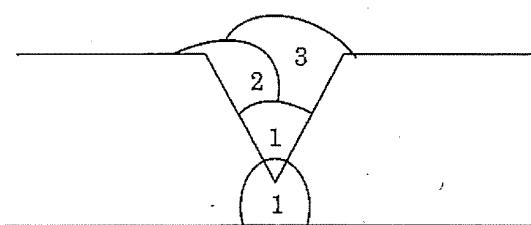
千葉工場 品質管理グループ長

7-6-1,HIGASHINARASHINO,NARASHINO-CITY,CHIBA,JAPAN
子葉県習志野市東習志野7-6-1 TEL 047(479)1171 FAX 047(475)6430

添付資料6 市販材 溶接施工要領書

平成28年 8月 11日

溶接施工要領書

施工名	機械試験用テストピース製作									
溶接実施日	平成 28年 8月 (予定)									
溶接方法	J		溶接姿勢		下向き (f)					
試験材	母材区分	P-1 (3)	溶接後熱処理		応力除去焼純					
	材料規格	JIS G 3115 SPV450Q-SR	入熱量							
	寸 法	t20	パス間温度							
予 熱	行わない		裏あて		—					
溶接棒、溶加材 又は心線	溶接方法	種 類	規 格		銘 柄	棒 径				
	J	E-2	JIS Z 3351 YS-M5		日鐵住金溶接工業(株) Y-DM	Φ4.8				
フラックスの銘柄	日鐵住金溶接工業(株) YF-15B		溶 接 機		種 類	サブマージアーケット溶接				
シールドガス	使用しない						直交流の別及び極性	交流		
裏面からのガス保護	行わない								電極の数	1
溶接条件	バス 数	溶接 方法	溶接材料 銘 柄	棒 径 (mm)	電 流 (A)	電 壓 (V)	速 度 (cm/min)	入 热 (kJ/cm)	バ 斯間温 度 (℃)	
	1~3 裏ハツリ 1	J	Y-DM	Φ4.8 Φ4.8						
溶接作業責任者			溶 接 士							
開先形状 					積層図 					

添付資料 7 市販材 溶接施工記録

平成 28年 8月 30日

溶接施工結果報告書 (1/2)

溶接施工事業所等の名称 日本車両製造株式会社 輸機・インフラ本部

溶接施工事業所等の所在地 愛知県半田市 11号地 20番地

溶接責任者の氏名

施工名	機械試験用テストピース製作								
溶接実施日	平成 28年 8月 25日								
適用範囲	一		溶接後熱処理		応力除去焼鈍		-		
溶接方法	J		ノズル (E S)		-		-		
溶接姿勢	下向き (f)		電圧 (E S)		電流 (E S)		-		
試験材	母材区分	P-1 (3)	揺動 (E S)		-		-		
	材料規格	JIS G 3115 SPV450Q-SR	あて金 (E S, E G)		-		-		
	寸 法	t20	入熱量		-		-		
予 熱	行わない		バス間温度		-		-		
裏あて	-		衝撃試験		-		-		
溶接棒、溶加材 又は心線	溶接方法	種 類	規 格		銘 柄		棒 径		
	J	E-2	JIS Z 3351		日鐵住金溶接工業(株)		Φ4.8		
			YS-M5		Y-DM		Φ4.8		
フラックスの銘柄	日鐵住金溶接工業(株) YF-15B		種 類		サブマージアーフ溶接法		-		
シールドガス	使用しない		溶 接 機		直交流の別及び極性		交流		
裏面からのガス保護	行わない		電極の数		1		-		
溶接条件	バス 数	溶接 方法	溶接材料 銘 柄	棒 径 (mm)	電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)	バス間温度 (°C)
	1	J	Y-DM	Φ4.8					
	2	J	Y-DM	Φ4.8					
	3	J	Y-DM	Φ4.8					
	裏ハツリ								
	1	J	Y-DM	Φ4.8					
溶 接 士	氏 名		施工範囲						
	[REDACTED]		J						

平成 28年 8月 30日

溶接施工結果報告書 (2/2)

溶接施工事業所等の名称

日本車輌製造株式会社 輸機・インフラ本部



施工名		機械試験用テストピース製作						整理番号
								—
開先形状								積層図
衝撃 試験	試験片 番号	試験温度 (℃)	位置	吸収エネルギー (J) 個別	吸収エネルギー (J) 平均	横膨出量 (mm)	規定値 個別 (J)	規定値 平均 (J)
							合否	写真
曲げ 試験	試験片 番号	試験 種類	曲げ半径 (mm)	曲げ角度 (°)	欠陥			合否
								写真
引張 試験	試験片 番号	幅×厚さ (mm)	最大荷重 (N)	最大引張強さ (N/mm ²)	規格値 (N/mm ²)	合否	破断位置	写真

C 895c

.895c

CHART NO. B-100EX V

1910

KOKUSANSHI

9
8
7
6
5
4
3
2
1
0.7693

24

1

1

1

*

1

1

•

23

1

1

1

1

1

放射線透過試験成績書

RESULT OF RADIOGRAPHIC TESTING

工号／J O B No.
8X0080

機器名称：L P G 貯槽溶接継手

検査年月日：平成28年8月25日

撮影条件

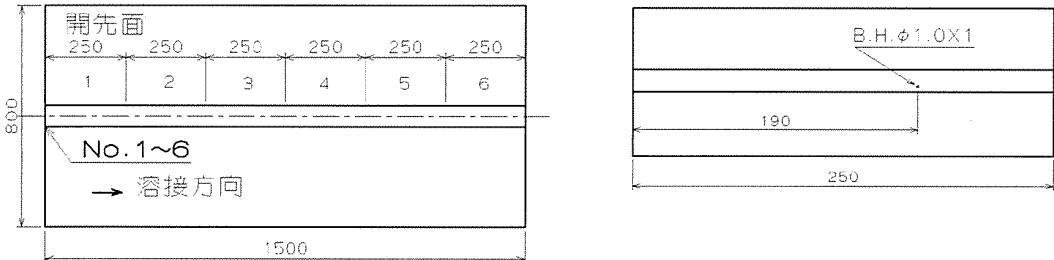
Condition of Test

フィルム Film	富士 #100 Fuji #100(3·1/3×12)	階調計 Contract Meter	15 形
電圧 Tube Voltage used	240 KV	透過度計 Penetra Meter	0.8 F
電流 Tube Current used	5 mA	増感紙 Intensifying Screen	鉛箔 Lead Foil
露出時間 Time of Exposure	1分30秒 min. sec.	現像 Developing	30°C 5.5分 Temp. min.
F·F·D Focus to Film Distance	650 mm	適用規格 Applied Code	JIS Z 3104(1995) A級
板厚 Nominal Thickness	20 mm	撮影枚数 Number of Photographed Sheet	6 枚 sheet
記号 Film Mark	8X0080	抜取率 Rate of Success	100%

撮影図

Outline Sketch

No. 4欠陥位置詳細



判定結果

Results of Testing

撮影位置	結果
No. 1	欠陥無し
No. 2	欠陥無し
No. 3	欠陥無し
No. 4	ブローホール有り (位置上図)
No. 5	欠陥無し
No. 6	欠陥無し

判定者 / EXAMINED

立会者 / SURVEYOR

承認 / APPROVED

磁粉探傷試験成績書

RESULT OF MAGNETIC PARTICLE TESTING

工号／JOB No.

8X0080

機器名称： LPG貯槽溶接継手

検査年月日： 平成28年9月2日

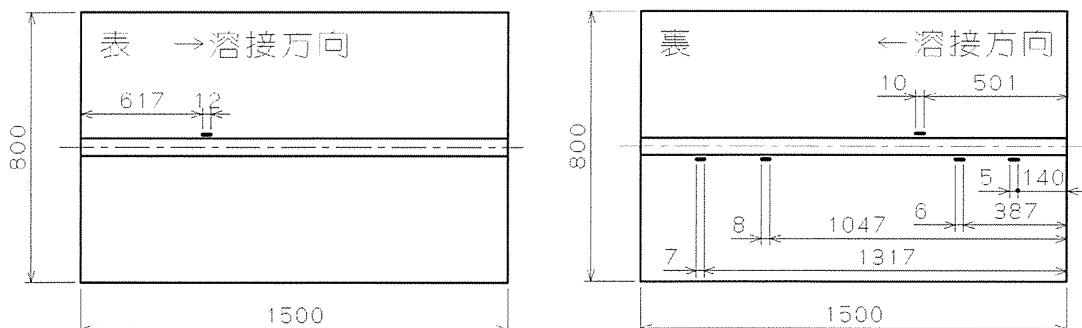
探傷条件

Condition of Test

検査時期 Test Stage	耐圧後 After Hydro-Test	磁化方法 Magnetizing Method	極間法 AC-Yoke
探傷器 Flaw Detector	Um-3A型 Denshijiki Industry Co. Ltd	試験方法 Test Method	湿式法及連続法 Wet and Continuous Method
磁化 Magnetizing	AC 100V 5A	磁粉 Magnetic Particles	蛍光磁粉 Fluorescent Particle
起磁力 Magnetomotive Force	3,000 A·T	磁粉濃度 Particle Density	1.0 g/ℓ
極間 Pole Spacing	130mm	紫外線照射灯 Ultraviolet Lamp	BS-100(100W)
通電時間 Current Flow Time	5sec	標準試験片 Standard Test Piece	JIS A-Type T.P. A2-30/100(μ)

探傷位置図

Detecting Location



探傷結果

Results of detection

探傷位置 Detecting Position	結果 Results
裏はつり部	ワレ・其の他有害な欠陥はなく合格。
溶接後内外面	アンダーカット有り (位置上図)
溶接後熱処理36時間後の 溶接後内外面	同上

判定者 / EXAMINED

立会者 / SURVEYOR

承認 / APPROVED

角変形量測定記録

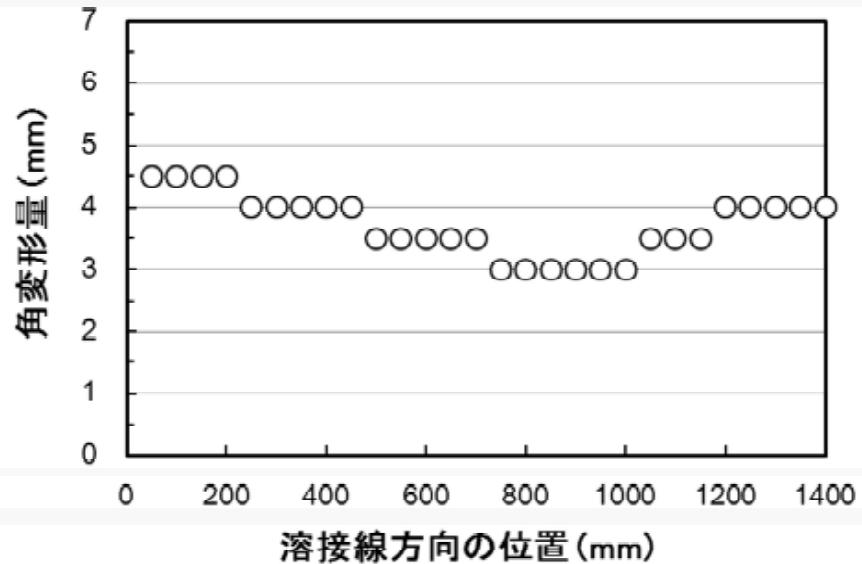


図 a7.1 角変形量と溶接線方向の位置の関係（市販材）

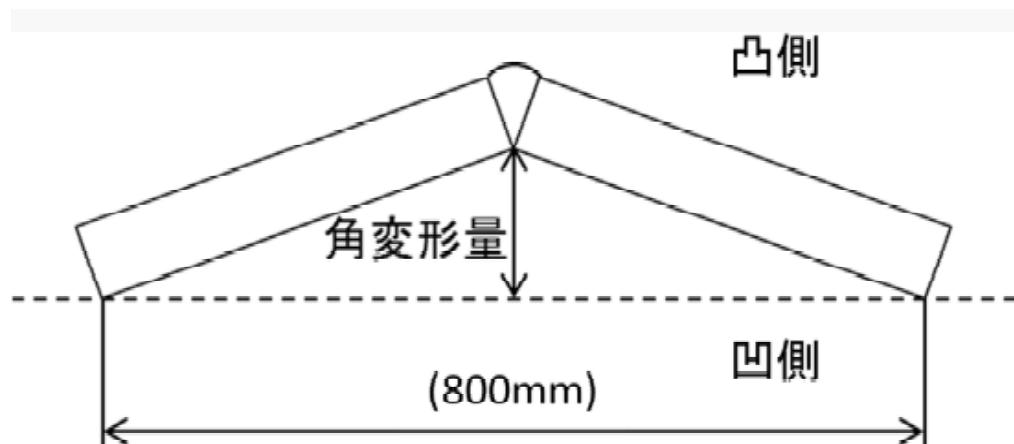


図 a7.2 角変形量の定義（市販材）

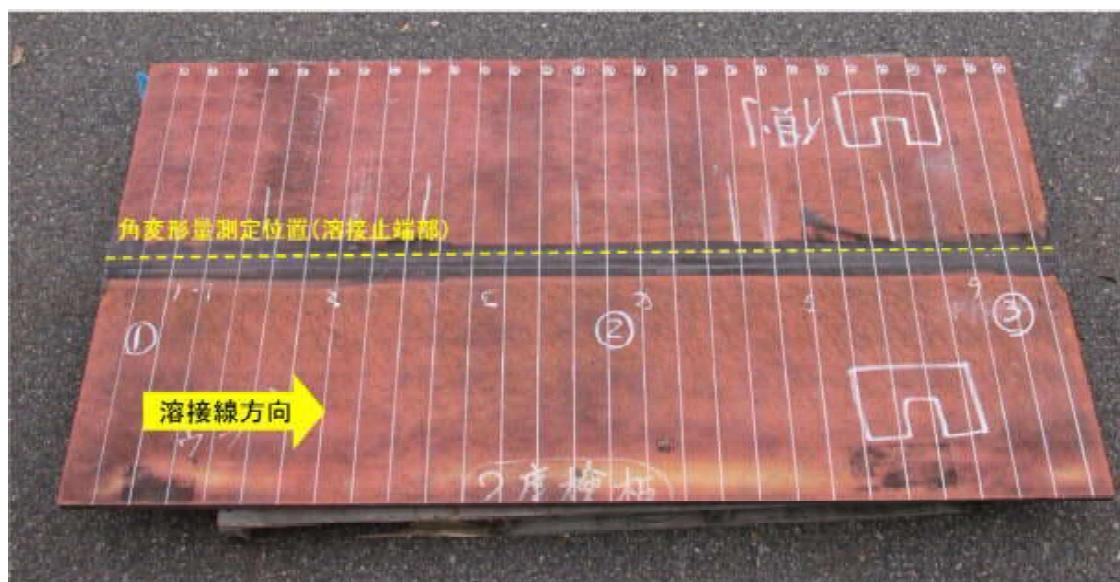


図 a7.3 角変形量計測位置（市販材）

添付資料8 解体材 溶接施工記録

No.

溶接施工記録

名称 LPガス 125.4m³

溶接箇所	検査年月日	溶接方法	溶接要領	裏ハツリ	確認者
本体 長手継手	3月3日	サブマージ アーク溶接	心線 Y-DM 4.8 フラックス YF-15 電流 [REDACTED] 電圧 [REDACTED] 速度 [REDACTED] 溶接士 [REDACTED]	[REDACTED]	良
本体 周継手	4月3日	サブマージ アーク溶接	心線 Y-DM 4.8 フラックス YF-15 電流 [REDACTED] 電圧 [REDACTED] 速度 [REDACTED] 溶接士 [REDACTED]	[REDACTED]	良
マンホール胴	4月3日	炭酸ガス 半自動溶接	心線 YM-60C 電流 [REDACTED] 電圧 [REDACTED] 溶接士 [REDACTED]	[REDACTED]	良
管座・ノズル マンホール溶接	4月7日	手アーク溶接	溶接棒 L-60 電流 [REDACTED] 電圧 [REDACTED] 溶接士 [REDACTED]	[REDACTED]	良
補強板溶接	4月7日	炭酸ガス 半自動溶接	心線 YM-60C シールドガス CO2 電流 [REDACTED] 電圧 [REDACTED] 溶接士 [REDACTED]	[REDACTED]	—

KN-8021-S

13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23

KN-8021-S

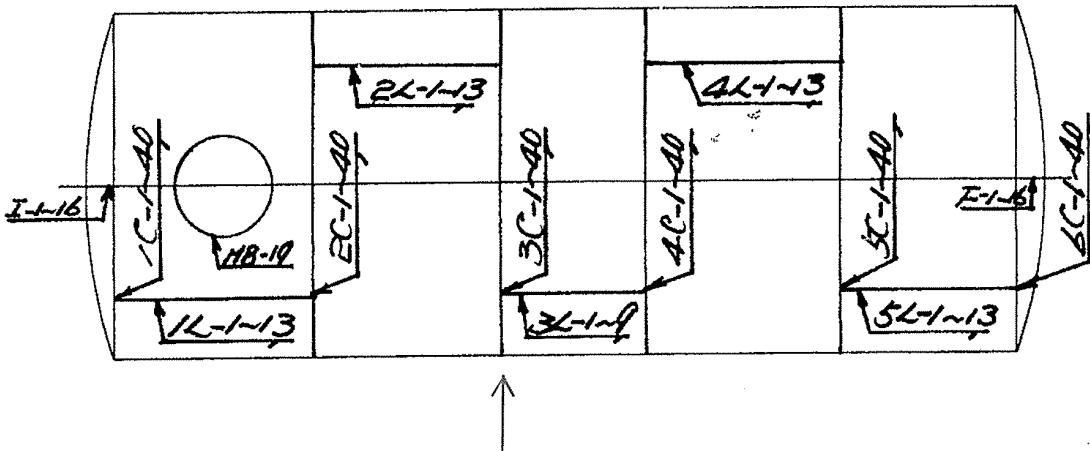
X線検査成績書

昭和 53 年 4 月 14 日

撮影条件

撮影年月日	昭和 53 年 4 月 14 日	F. F. D.	650 mm
フィルム	富士 #100	露出時間	1 分
電 壓	190 KV	増 感 紙	Pb. Foil
電 流	5 mA	現 像	20 °C 5 分

板 厚	11.14 mm	撮影枚数	334 枚
記 号	78-38-27	抜 取 率	100 %



判定結果

第1種の欠陥1級、第2種の欠陥1級

9

判 定 結 果

78-3S-27

No. E

フィルム No.	総欠陥数	J I S 等級	備 考	フィルム No.	総欠陥数	J I S 等級	備 考
21	0	1		11	0	1	
22	0	1		12	0	1	
23	0	1		13	0	1	
24	0	1		14	0	1	
25	0	1		15	0	1	
26	1	1		16	0	1	
27	1	1		17	0	1	
28	0	1		18	0	1	
29	1	1		19	0	1	
30	1	1		20	0	1	
31	0	1		21	0	1	
32	1	1		22	0	1	
33	0	1		23	0	1	
34	1	1		24	0	1	
35	0	1		25	0	1	
36	1	1		26	0	1	
37	0	1		27	0	1	
38	1	1		28	0	1	
39	1	1		29	0	1	
40	1	1		30	0	1	
3C-1	0	1		31	0	1	
2	0	1		32	0	1	
3	0	1		33	0	1	
4	0	1		34	0	1	
5	0	1		35	0	1	
6	0	1		36	0	1	
7	0	1		37	0	1	
8	1	1		38	0	1	
9	0	1		39	0	1	
10	1	1		40	1	1	

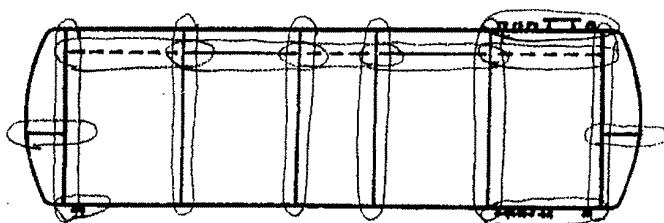
磁粉探傷試験成績表

品名:

検査年月日: 53年4月17日

探傷条件	探傷器	UM-3型(電子磁気工業製)
	磁化方式	AC100V-6A(起電力2300AT)
	磁化方法	極間法
	磁粉の種類	螢光磁粉

探傷位置



探傷結果

探傷位置	結果
円周及長手縫手部	ワレ・その他欠陥なし
マンホール及ノズル部	ワレ・その他欠陥なし

RT	検査記録番号 RECORD NO.			IN PAGE 1/2
放射線検査記録 RADIOGRAPHIC EXAMINATION RECORD		検査項目 SUBJECT		撮影日 DATE FILM EXPOSED 8-23-2016
注文主 CUSTOMER 株式会社 IHI 技術開発本部 段		ブロック/部材名稱 BLOCK / PART NAME —		
契約番号 CUSTOMER'S REF. NO. —		部材/接合番号 PARTS / JOINT NO. —	図面番号 DWG NO. REV. —	
工事番号 MANUFACTURER'S ORDER NO. 50258VX-M360		方策/要領書 SPEC / PROCEDURE REV. JIS Z3104:1995	材質 MATERIAL 母材 BASE METAL: SPV450Q	
工事名稱 PROJECT WORK NAME 溶接維手の非破壊検査		検査場所 LOCATION (株)IHI 検査計測 横浜検査部	溶接部 WELD METAL: —	
<input type="checkbox"/> ライナック LINAC	エネルギー ENERGY MeV	被曝線量 DOSE mR/kg	距離 DISTANCE mm	時間 TIME min
<input checked="" type="checkbox"/> エクスラ X-RAY MG452	電圧 VOLTAGE 230 KVP	電流 CURRENT 5 mA	距離 DISTANCE mm	時間 TIME 1 min
<input type="checkbox"/> アイソトープ ISOTOPE	源 SOURCE Co-60	被曝線量 CURIES Ci-hr	距離 DISTANCE mm	焦点 FOCAL SPOT mm
板厚 THICKNESS 11mm		被曝線量 CURIES Ci-hr	時間 TIME min	被曝線量 CURIES Ci-hr
板厚 JOINT THICKNESS Weld: 11 mm Reinforcement: — mm		透視度計 PENETRAMETER NO. 04F	* SOURCE SIDE	シム厚さ SHIM THICKNESS mm
フィルム FILM TYPE FUJI IX80		フィルムサイズ FILM SIZE 4 1/2" x 17"	感光板 SCREEN NAME —	前面 FRONT 0.03 mm 後面 BACK 0.1 mm
現像処理 FILM PROCESSING <input checked="" type="checkbox"/> 自動現像機 AUTOMATIC		現像液 DEVELOPER スーパーードールI		
		時間 TIME 11 min 25 °C		
撮影方法 FILM TECHNIQUE パノラマ撮影 PANORAMA		<input checked="" type="checkbox"/> Single Wall Exposure <input type="checkbox"/> Double Wall Exposure <input type="checkbox"/> Single wall Viewing <input type="checkbox"/> Double wall Viewing		
略図 SKETCH				
密度 FILM DENSITY MIN1.5 ~ MAX2.9		月/日 DATE 客先/CUSTOMER'S REPRESENTATIVE JIS Z3104 等級分類のみ	承認 APPROVED BY	月/日 DATE
			担当 CHECKED BY	月/日 DATE REVIEWED (L)-III
			担当 EXAMINED BY 品質管理部 No. INSPECTION SECT., QC DEPT.	月/日 DATE REVIEWED (L)-II

IHI 検査計測株式会社
IHI Inspection & Instrumentation Co.,Ltd.

IHI 檢査計測株式会社
IHI Inspection & Instrumentation Co.,Ltd.

検査記録番号 YKB-R-16397

磁 粉 探 傷 検 査 記 錄
MAGNETIC PARTICLE EXAMINATION RECORD

注文主 CUSTOMER

株式会社IHI技術開発本部 殿

工事番号 MANUFACTURER'S ORDER No.

50258VX-M360

工事名称 PROJECT/WORK NAME

溶接継手の非破壊検査

検査場所 LOCATION

IIC 横浜検査部

材 質 MATERIAL SPV450Q

使用機器 INSTRUMENT HANDY MAGNA A-2

対比試験片 REF.PIECE A1-30/100

磁化方法 MAG.METHOD 極間法

磁化間隔 MAG.SPACE 100mm

磁化時間 TIME 3~5sec.

検査時期 STAGE OF EXAMINATION

試験体切出し後

機器名 ARTICLE

部品名 PART 数量 QUANTITY

溶接試験体 1

適用規格 STANDARD

JIS Z 2320-1:2007

図面番号 DWG.No.

探傷部温度 TEMP. 25°C

表面状態 SURFACE CONDITION 溶接肌、グラインダー肌

磁化電流 CURRENT AC DC 2,600AT磁 粉 PARTICLE 乾式 蛍光LY-10 濡式 非蛍光

磁粉比重/濃度 DENSITY 2g/L

結果 JUDGEMENT RESULTS

 合格 ACCEPTABLE 不合格 UNACCEPTABLE

1. 探傷範囲：試験体の溶接線を探傷した。
2. 探傷結果：きず指示模様は検出されなかった。



試験体外面



試験体内面

担当課 INSPECTED : 横浜検査部 YOKOHAMA INSPECTION DEPT. 検査日 INSPECTED DATE: 2016年8月19日

株 式 会 社 I H I 検 査 計 測
IHI Inspection & Instrumentation Co.,Ltd.

No. A2-16-09025

定期検査成績書

品名 : 磁粉探傷装置 (YOKE)
 型式 : HANDY MAGNA A-2
 識別番号 : 09025

検査基準 : M13-15064 Rev.11
 実施年月日 : 2016/2/19
 実施場所 : IHI 横浜工場

検査結果 Results

A. 外観および機能検査 (オーバーホール ひ 施工する 施工しない)
 Visual Check Overhaul Req'd Not Req'd

手順 No.	検査項目 Check Items	方法 Tool	判定 Result		手順 No.	検査項目 Check Items	方法 Tool	判定 Result	
			良 Acc	否 Rej				良 Acc	否 Rej
1	識別 Identification	目視 Visually	□	□	6			□	□
2	本体 Main unit	目視 Visually	□	□	7			□	□
3	ユニバーサルヨーク Universal Yoke	手動 Manual	□	□	8			□	□
4	スイッチ Switch	手動 Manual	□	□	9			□	□
5	ケーブル Cable	目視 Visually	□	□	10			□	□

B. 性能検査 (測定者 *M. Nakamura* L-II)
 Performance Check Checked by

検査項目 Check Items	判定基準 Acceptance Criteria	判定 Result	
		Acceptable	Unacceptable
1 握力(ユニバーサルヨークなし) Lift Power Test (Without Universal Yoke)	5秒間保持 x 10回 Sustainable for 5 sec. x10	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
2 握力(ユニバーサルヨークあり) Lift Power Test (With Universal Yoke)	5秒間保持 x 10回 Sustainable for 5 sec. x10	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Weight ID.: No.3537 Lot-004

総合判定 Evaluation

合格 Acceptable

調整不要
without conditioning

調整要
with conditioning

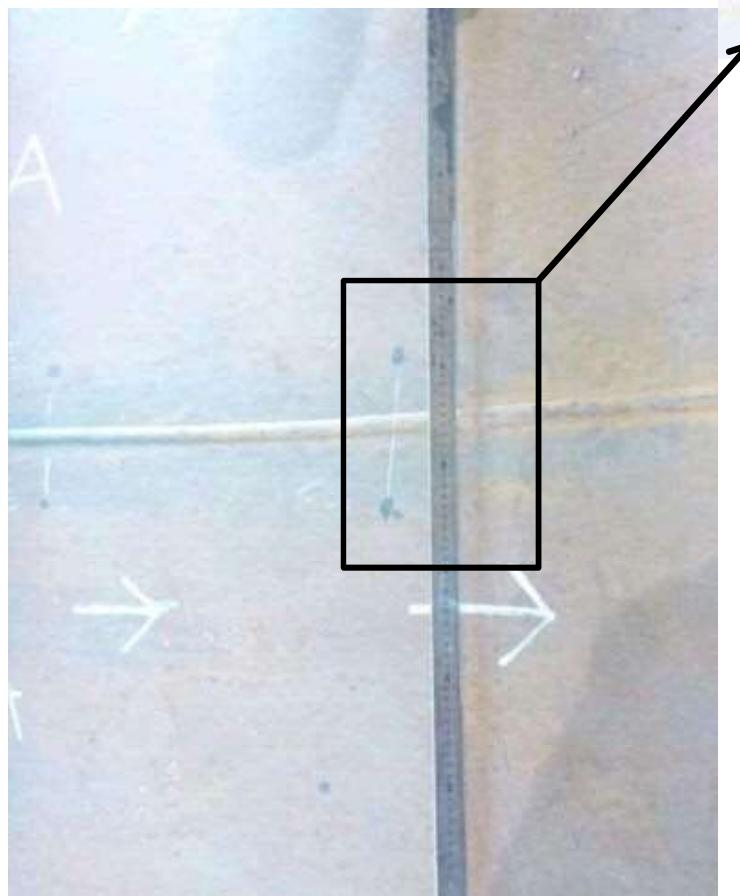
不合格 Unacceptable

備考

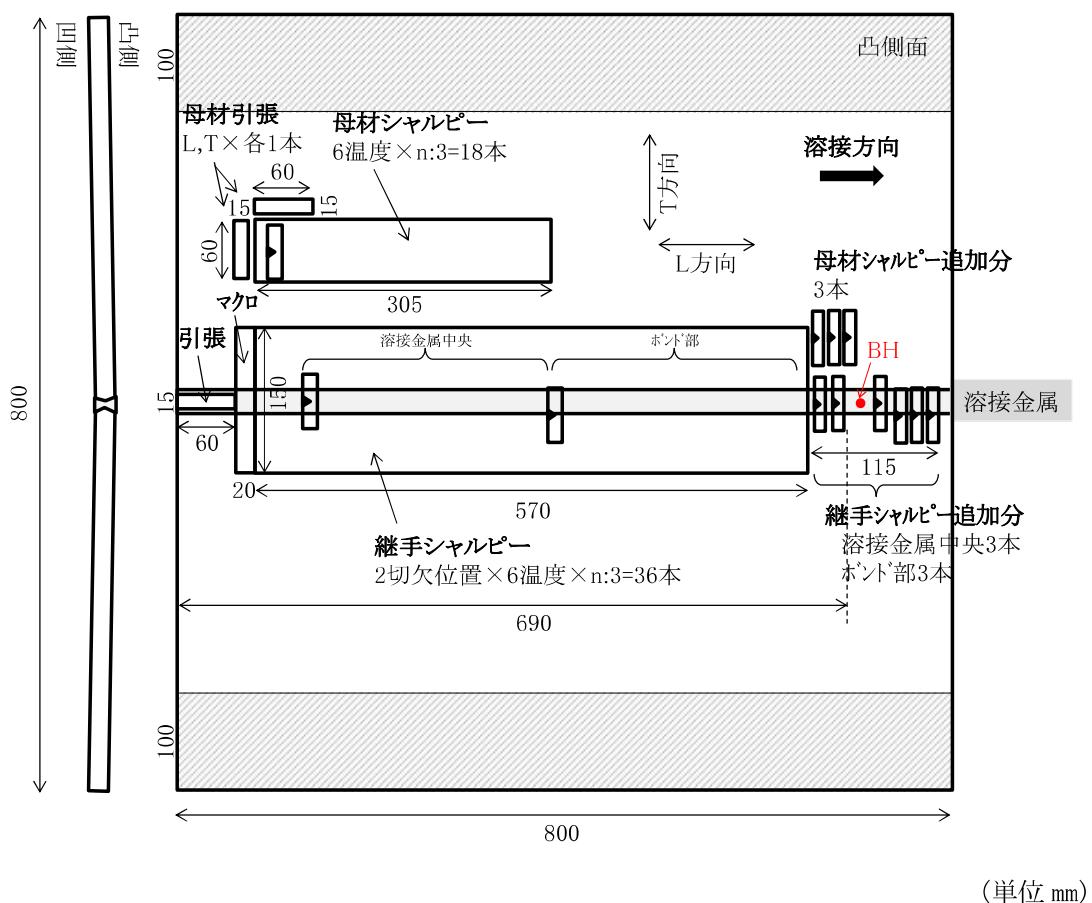
Expired Date : Feb. 18, 2017

Form-M13-15064-3-R1

✓ 1mの定規が溶接ビードに当たってしまう
⇒ 角変形がほとんどない



添付資料9 試験片採取要領（引張試験、硬さ試験、シャルピー衝撃試験）



(単位 mm)

図 a9-1 溶接継手からの試験片採取要領（市販材）

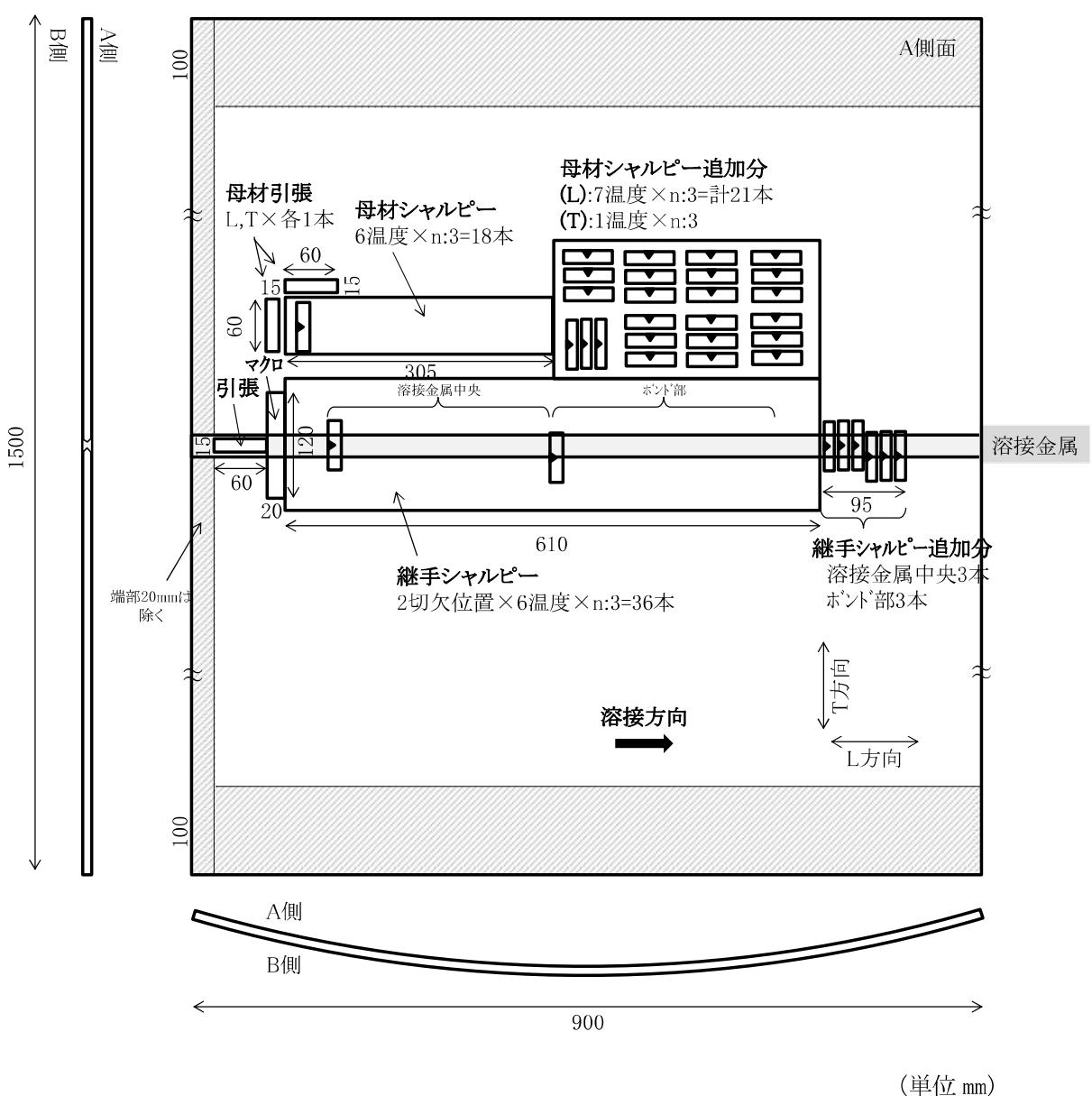


図 a9-2 溶接継手からの試験片採取要領 (解体材)

添付資料 10 引張試験記録詳細

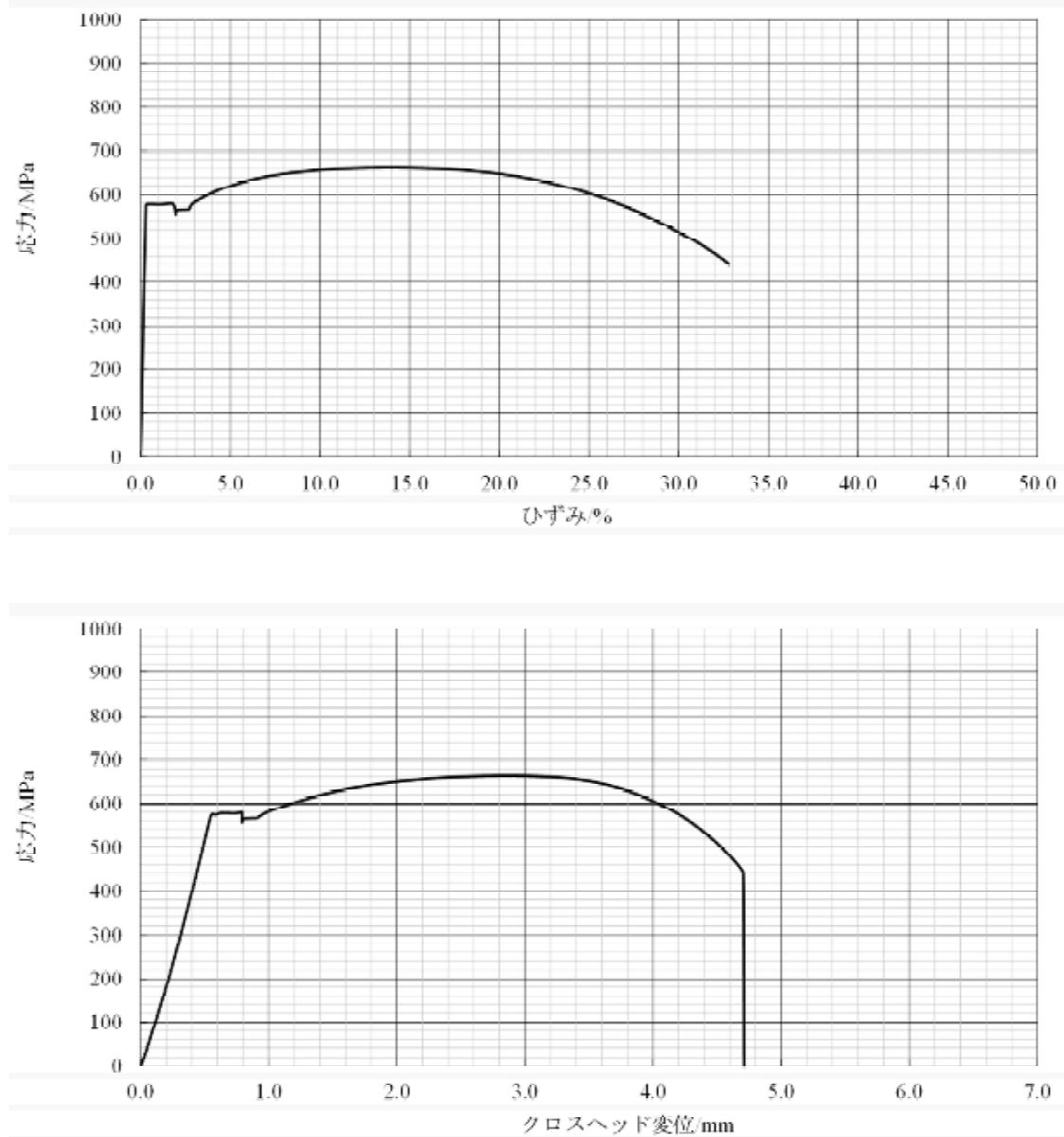


図 a10.1 引張試験 グラフ（市販材・溶接金属）（試験片符号：LSW）

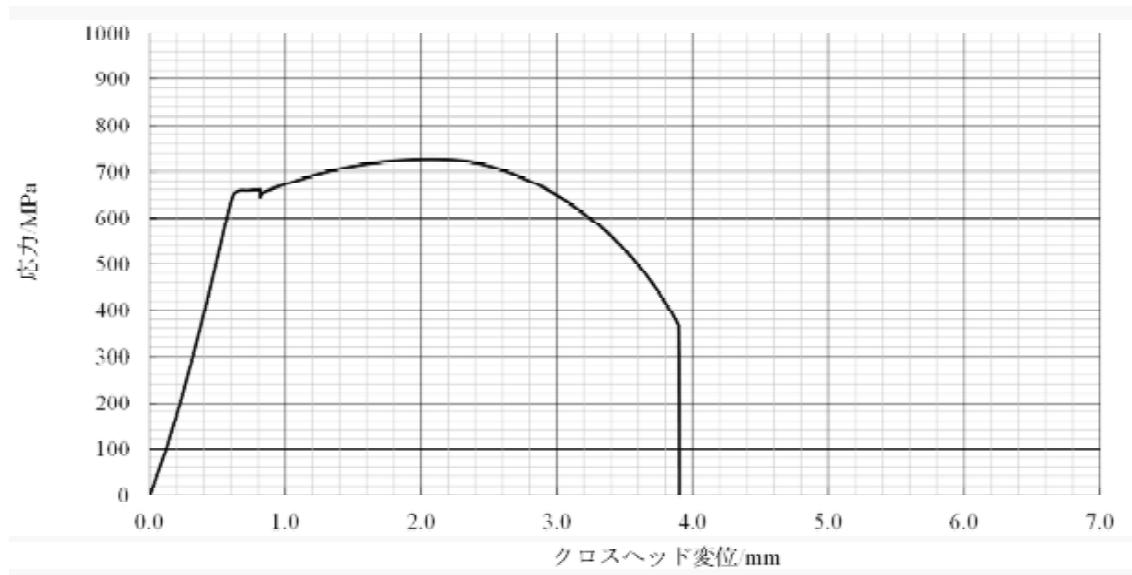
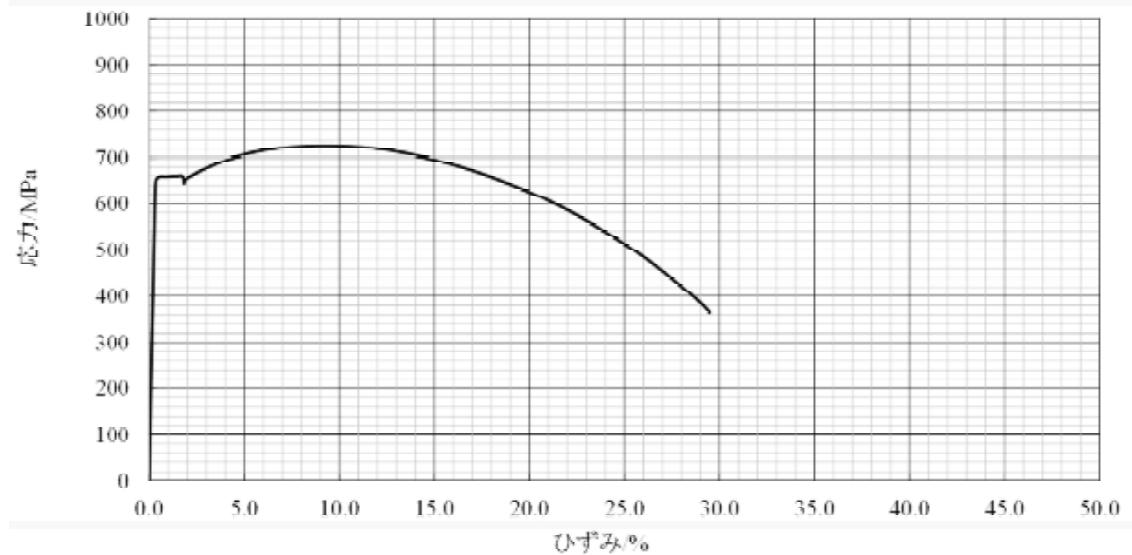


図 a10.2 引張試験 グラフ（市販材・母材 L 方向）（試験片符号：LSBL）

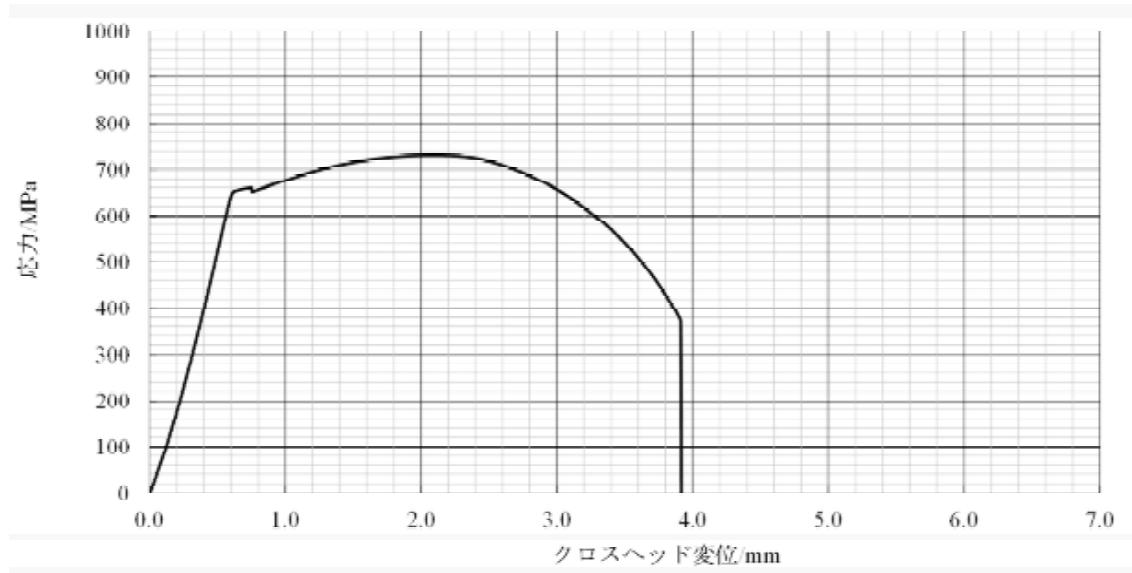
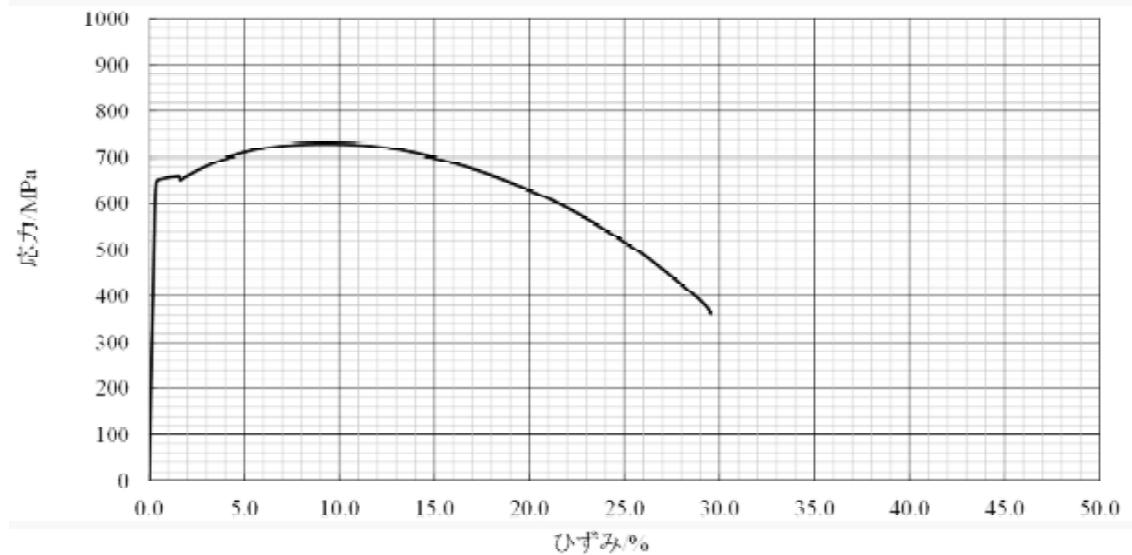


図 a10.3 引張試験 グラフ（市販材・母材T方向）（試験片符号：LSBT）

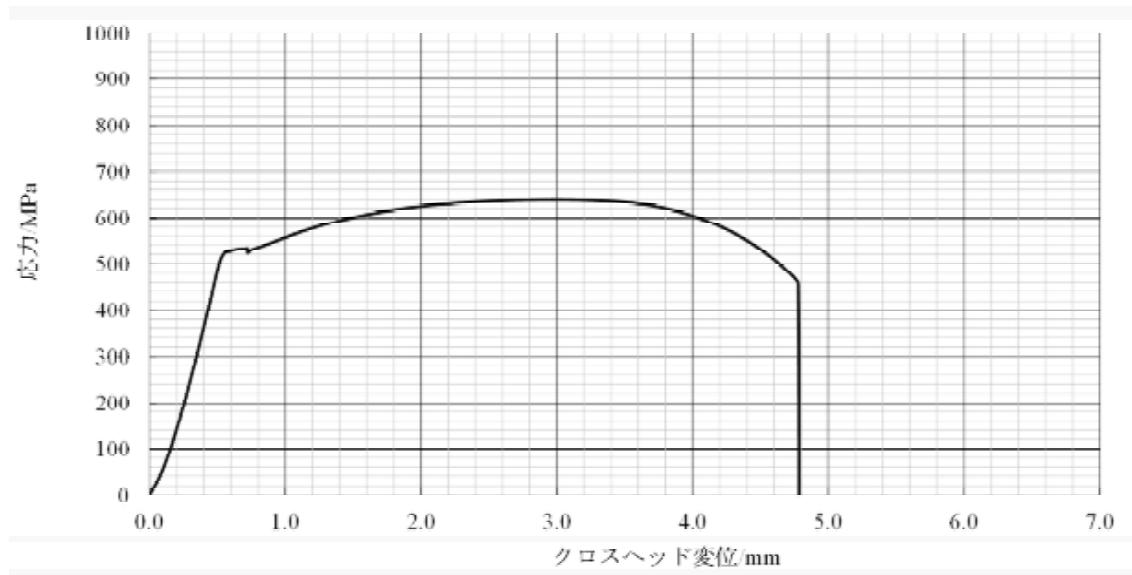
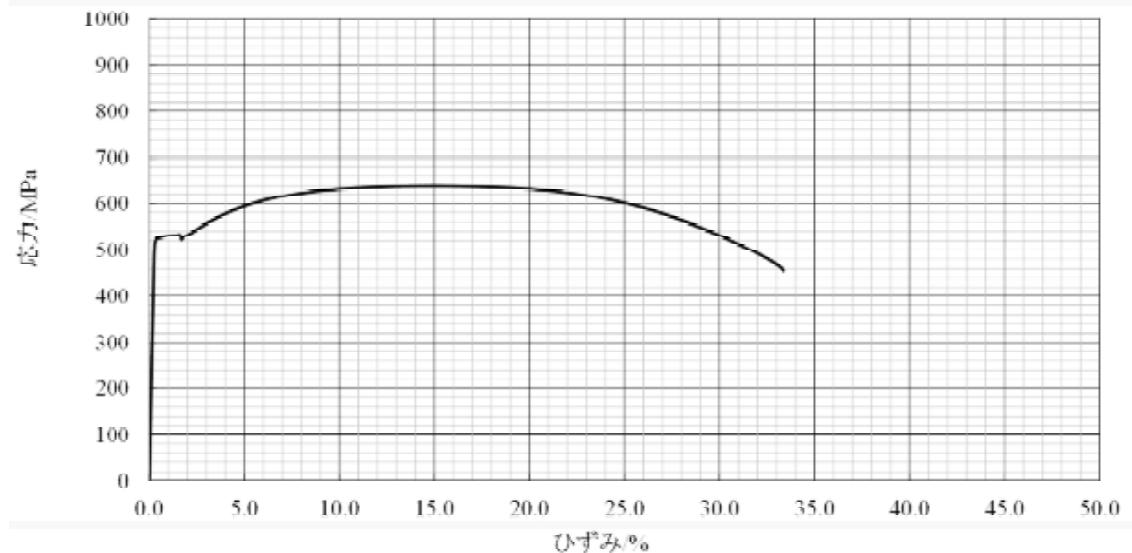


図 a10.4 引張試験 グラフ（解体材・溶接金属）（試験片符号：LKW）

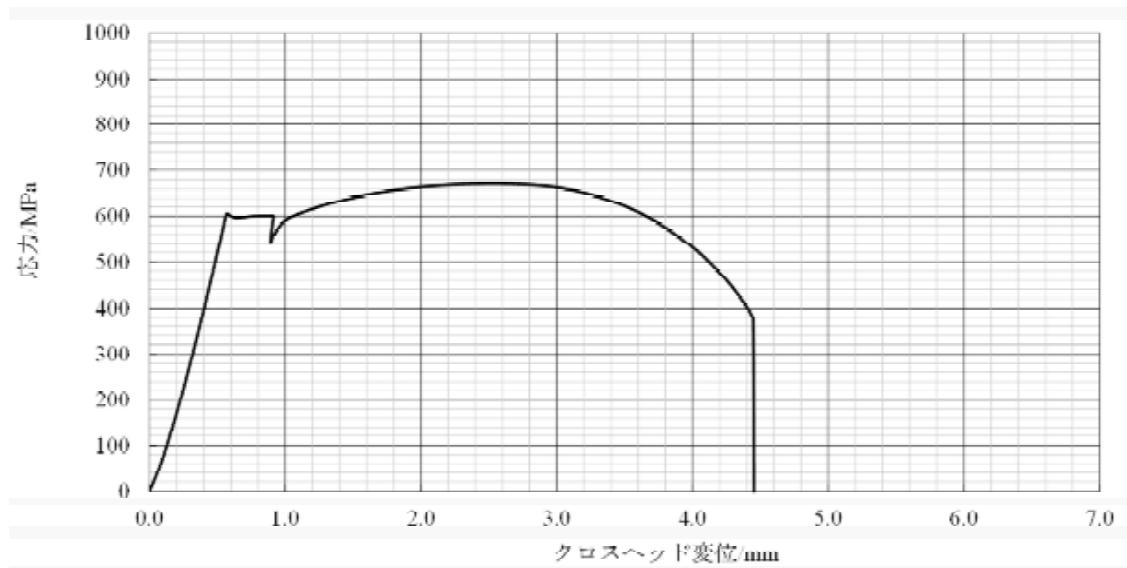
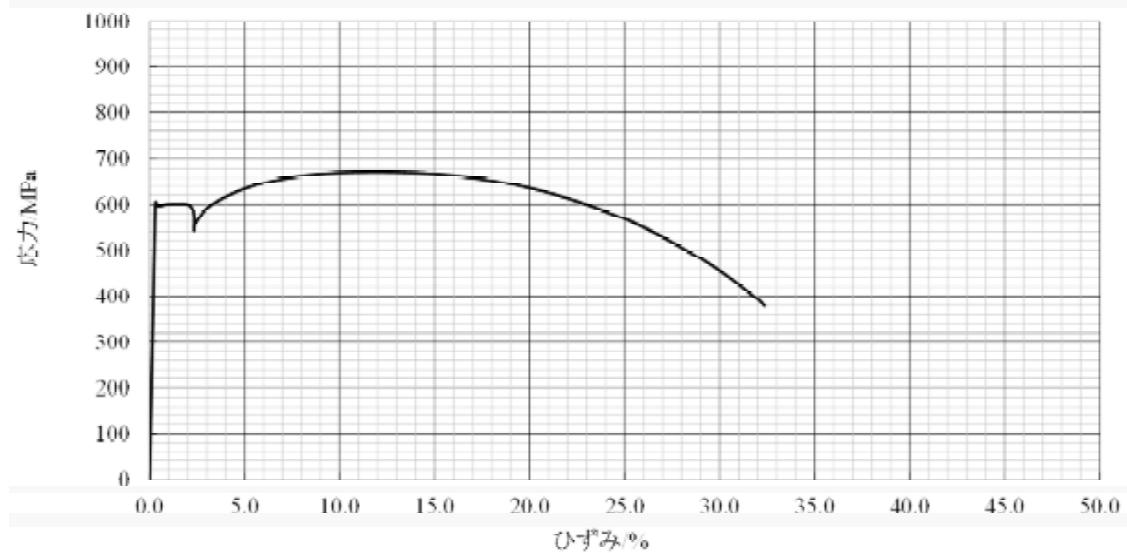


図 a10.5 引張試験 グラフ (解体材・母材 L 方向) (試験片符号 : LKBL)

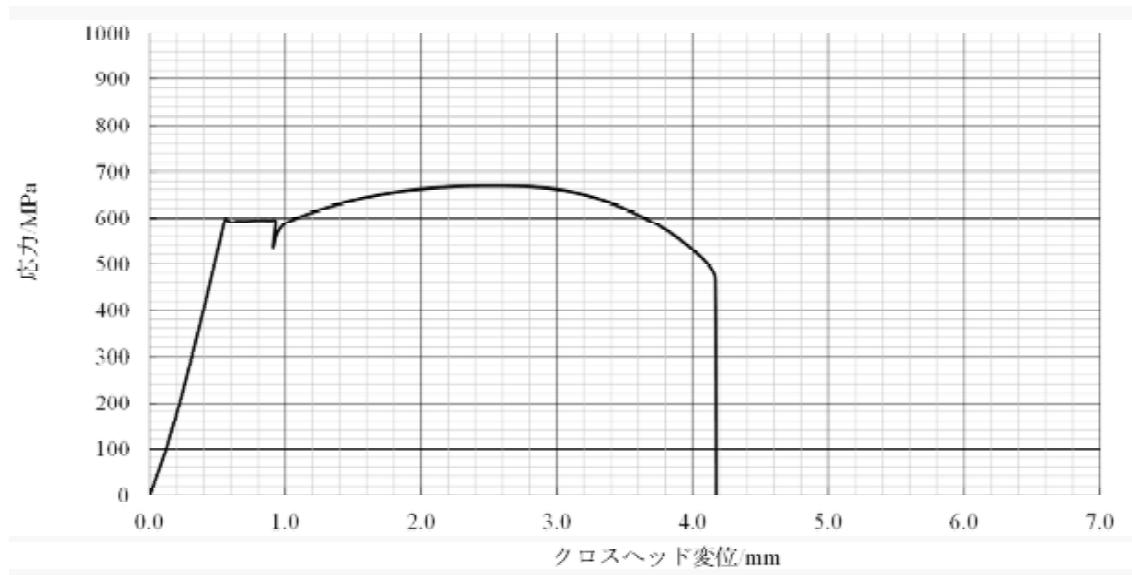
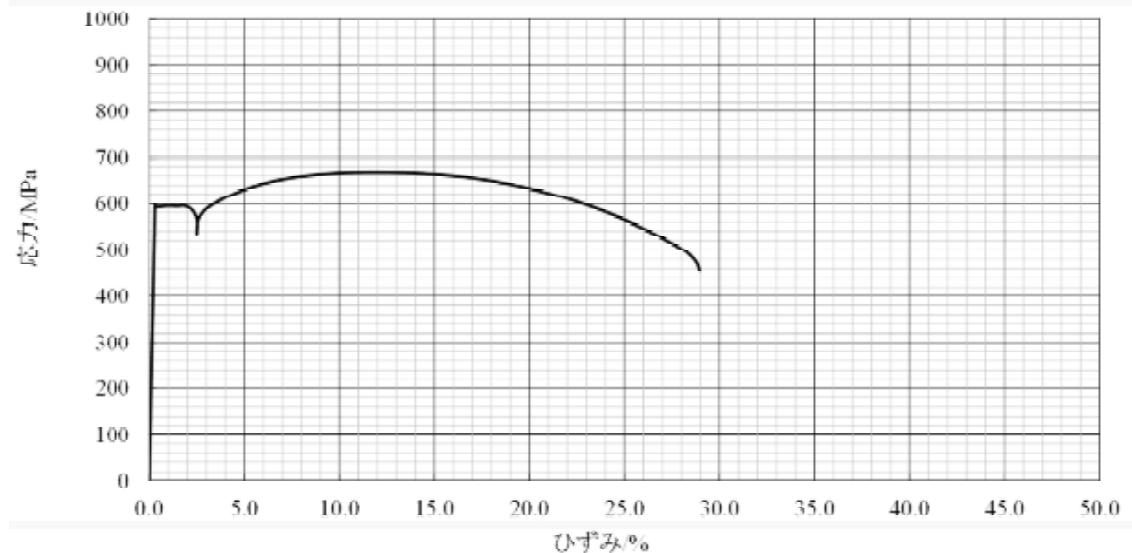
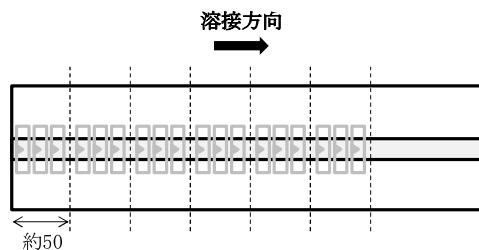


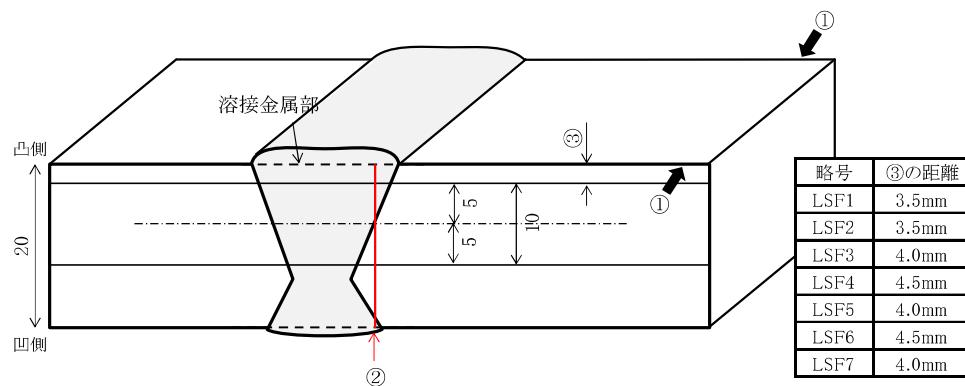
図 a10.6 引張試験 グラフ (解体材・母材T方向) (試験片符号 : LKBT)

添付資料 11 シャルピー衝撃試験片の加工要領及び寸法測定結果

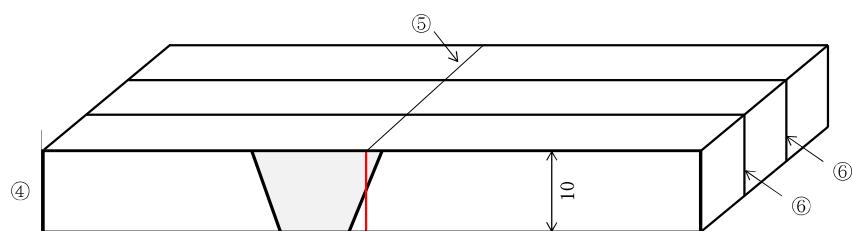
(1) 溶接継手素材をシャルピー3本毎のブロックに切断する。



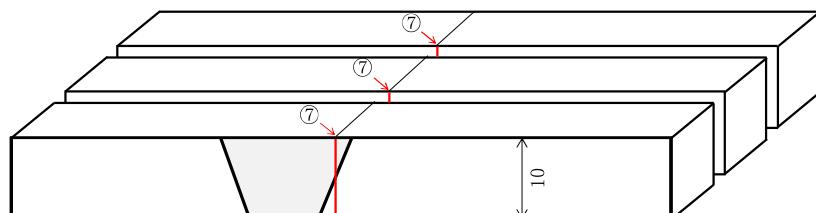
(2) 各ブロックに対して以下の手順で加工する。



- ① ブロックの表裏面をマクロ腐食する
- ② 表裏面それぞれで、全厚(余盛削除後)に対する垂直ボンド位置を決定する
- ③ 表裏面それぞれで、板厚方向の採取位置を決定する
(②のライン上で、シャルピー試験片厚に対して垂直ボンドとなる位置)



- ④ ③で決定した採取位置の表裏面の平均位置で板厚方向に切出す
- ⑤ ②で決定した表裏面のボンド位置を切出し材の上面で繋ぐ
- ⑥ シャルピー1本毎に切り分ける



- ⑦ ⑤の線を側面に投影してそれぞれの切欠位置とする

図 a11.1 市販材におけるシャルピー衝撃試験片の切欠位置ボンドの位置決め方法

表 a11.1 シャルピー衝撃試験片の寸法測定結果（市販材）

溶接継手区分	切欠位置	試験片記号	試験片寸法			溶接継手区分	切欠位置	試験片記号	試験片寸法			
			①幅mm	②高さmm	③ノッチ底				①幅mm	②高さmm	③ノッチ底	
市販材	母材	LSB1	1	9.981	8.027	合格	市販材	LSF1	1	10.007	8.026	合格
			2	9.987	8.025	合格			2	10.005	8.025	合格
			3	9.985	8.030	合格			3	10.006	8.026	合格
		LSB2	1	9.984	8.026	合格		LSF2	1	10.008	8.026	合格
			2	9.982	8.025	合格			2	10.007	8.027	合格
			3	9.986	8.029	合格			3	10.007	8.026	合格
		LSB3	1	9.984	8.023	合格		LSF3	1	10.007	8.026	合格
			2	9.988	8.025	合格			2	10.007	8.028	合格
			3	9.988	8.025	合格			3	10.008	8.026	合格
		LSB4	1	9.989	8.027	合格		LSF4	1	10.005	8.028	合格
			2	9.985	8.030	合格			2	10.007	8.026	合格
			3	9.983	8.029	合格			3	10.009	8.027	合格
		LSB5	1	9.985	8.028	合格		LSF5	1	10.007	8.029	合格
			2	9.982	8.026	合格			2	10.005	8.024	合格
			3	9.984	8.026	合格			3	10.007	8.026	合格
		LSB6	1	9.982	8.025	合格		LSF6	1	10.007	8.023	合格
			2	9.985	8.025	合格			2	10.007	8.026	合格
			3	9.985	8.027	合格			3	10.007	8.025	合格
		LSB7	1	9.983	8.020	合格		LSF7	1	9.990	8.024	合格
			2	9.985	8.018	合格			2	9.991	8.018	合格
			3	9.986	8.024	合格			3	9.990	8.022	合格
溶接金属中央	市販材	LSW1	1	10.009	8.028	合格		LSW1	1	10.009	8.030	合格
			2	10.009	8.030	合格			2	10.009	8.032	合格
			3	10.009	8.032	合格			3	10.009	8.032	合格
	市販材	LSW2	1	10.009	8.032	合格			1	10.006	8.033	合格
			2	10.006	8.033	合格			2	10.009	8.030	合格
			3	10.009	8.030	合格			3	10.009	8.032	合格
	市販材	LSW3	1	10.009	8.032	合格			1	10.008	8.031	合格
			2	10.008	8.031	合格			2	10.009	8.032	合格
			3	10.009	8.032	合格			3	10.007	8.031	合格
	市販材	LSW4	1	10.006	8.031	合格			1	10.009	8.032	合格
			2	10.009	8.032	合格			2	10.007	8.028	合格
			3	10.007	8.028	合格			3	10.007	8.028	合格
	市販材	LSW5	1	10.005	8.032	合格			1	10.009	8.031	合格
			2	10.009	8.031	合格			2	10.004	8.032	合格
			3	10.004	8.032	合格			3	10.004	8.032	合格
	市販材	LSW6	1	10.007	8.032	合格			1	10.006	8.028	合格
			2	10.006	8.028	合格			2	10.009	8.030	合格
			3	10.009	8.030	合格			3	9.997	8.021	合格
	市販材	LSW7	1	9.993	8.021	合格			2	9.997	8.021	合格
			3	9.999	8.024	合格			3	9.999	8.024	合格

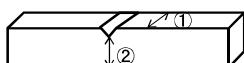
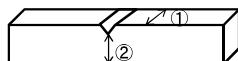


表 a11.2 シャルピー衝撃試験片の寸法測定結果（解体材）

溶接継手区分	切欠位置	試験片記号	試験片寸法			溶接継手区分	切欠位置	試験片記号	試験片寸法		
			①幅mm	②高さmm	③ノッチ底				①幅mm	②高さmm	③ノッチ底
母材(L)	LKBL1	1	10.001	8.021	合格	ボンド部	LKF1	1	10.001	8.027	合格
		2	10.000	8.022	合格			2	10.000	8.028	合格
		3	10.003	8.025	合格			3	10.003	8.026	合格
	LKBL2	1	10.001	8.020	合格		LKF2	1	10.001	8.027	合格
		2	10.002	8.021	合格			2	10.002	8.029	合格
		3	10.001	8.024	合格			3	10.001	8.026	合格
	LKBL3	1	10.000	8.026	合格		LKF3	1	10.000	8.027	合格
		2	10.001	8.019	合格			2	10.001	8.025	合格
		3	10.002	8.023	合格			3	10.002	8.026	合格
	LKBL4	1	10.001	8.027	合格		LKF4	1	10.001	8.027	合格
		2	10.004	8.029	合格			2	10.004	8.028	合格
		3	10.003	8.027	合格			3	10.003	8.029	合格
	LKBL5	1	10.004	8.021	合格		LKF5	1	10.004	8.027	合格
		2	10.001	8.020	合格			2	10.001	8.028	合格
		3	10.003	8.021	合格			3	10.003	8.025	合格
	LKBL6	1	10.000	8.026	合格		LKF6	1	10.000	8.027	合格
		2	10.003	8.020	合格			2	10.003	8.025	合格
		3	10.002	8.028	合格			3	10.002	8.024	合格
	LKBL7	1	10.002	8.026	合格		LKF7	1	9.996	8.021	合格
		2	10.005	8.029	合格			2	9.995	8.019	合格
		3	10.004	8.027	合格			3	9.994	8.025	合格
解体材	LKB1	1	9.984	8.024	合格	溶接金属中央	LKW1	1	10.002	8.028	合格
		2	9.985	8.025	合格			2	10.005	8.027	合格
		3	9.985	8.027	合格			3	10.004	8.029	合格
	LKB2	1	9.988	8.024	合格		LKW2	1	10.004	8.028	合格
		2	9.990	8.027	合格			2	10.005	8.025	合格
		3	9.985	8.026	合格			3	10.004	8.028	合格
	LKB3	1	9.985	8.027	合格		LKW3	1	10.006	8.028	合格
		2	9.983	8.025	合格			2	10.004	8.029	合格
		3	9.985	8.027	合格			3	10.005	8.028	合格
	LKB4	1	9.985	8.028	合格		LKW4	1	10.004	8.026	合格
		2	9.984	8.026	合格			2	10.002	8.028	合格
		3	9.985	8.027	合格			3	10.003	8.025	合格
	LKB5	1	9.988	8.025	合格		LKW5	1	10.003	8.029	合格
		2	9.989	8.026	合格			2	10.004	8.027	合格
		3	9.985	8.027	合格			3	10.005	8.028	合格
	LKB6	1	9.986	8.027	合格		LKW6	1	10.004	8.028	合格
		2	9.985	8.026	合格			2	10.003	8.025	合格
		3	9.988	8.027	合格			3	10.004	8.029	合格
	LKB7	1	9.985	8.023	合格		LKW7	1	9.997	8.024	合格
		2	9.989	8.028	合格			2	9.999	8.023	合格
		3	9.989	8.024	合格			3	9.995	8.020	合格



添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真

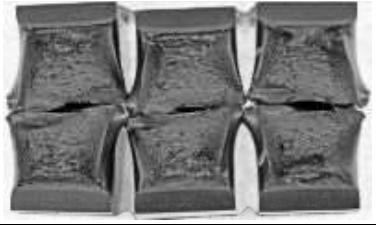
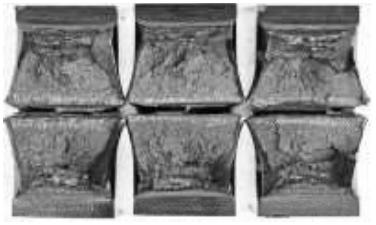
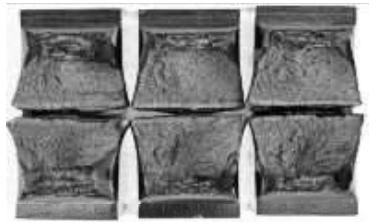
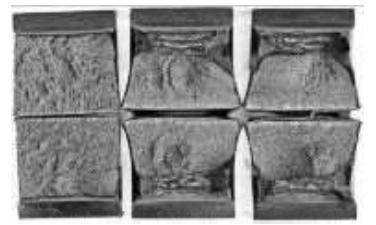
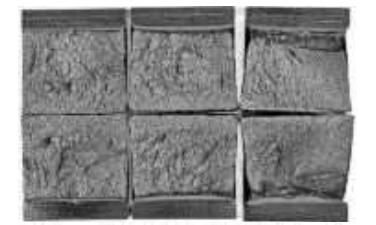
溶接継手 区分	切欠位置	試験温度	試験片 記号	破面写真 (左から 1, 2, 3 本目)
市販材	母材	20°C	LSB7	
		-10°C	LSB1	
		-40°C	LSB2	
		-60°C	LSB4	
		-70°C	LSB6	
		-80°C	LSB3	
		-100°C	LSB5	

図 a12.1 シャルピー衝撃試験後の破面写真 (市販材)

添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真

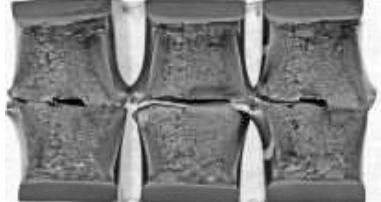
溶接継手区分	切欠位置 (採取方 向)	試験温度	試験片 記号	破面写真 (左から 1, 2, 3 本目)
市販材 ボンド部		60°C	LSF7	
		20°C	LSF6	
		-10°C	LSF1	
		-20°C	LSF5	
		-40°C	LSF2	
		-60°C	LSF3	
		-80°C	LSF4	

図 a12.2 シャルピー衝撃試験後の破面写真 (市販材)

添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真

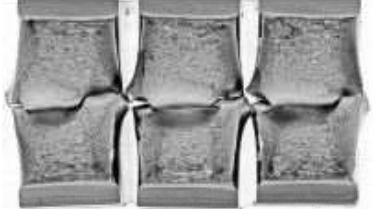
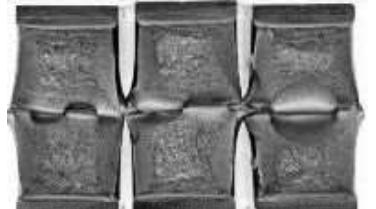
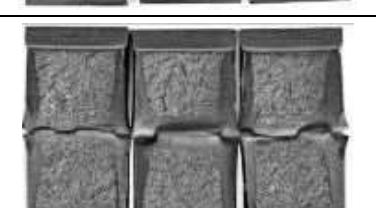
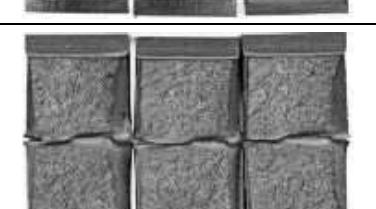
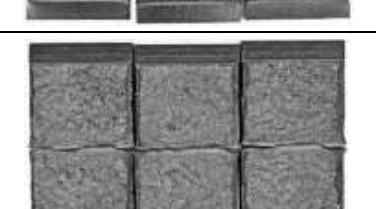
溶接継手区分	切欠位置 (採取方 向)	試験温度	試験片 記号	破面写真 (左から 1, 2, 3 本目)
市販材 溶接金属 中央		60°C	LSW7	
		20°C	LSW6	
		-10°C	LSW1	
		-20°C	LSW5	
		-40°C	LSW2	
		-60°C	LSW3	
		-80°C	LSW4	

図 a12.3 シャルピー衝撃試験後の破面写真 (市販材)

添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真

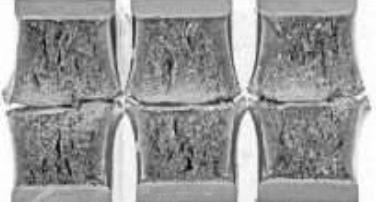
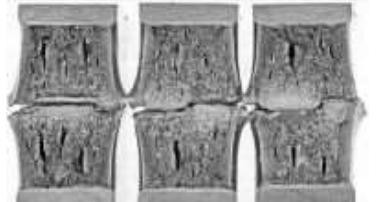
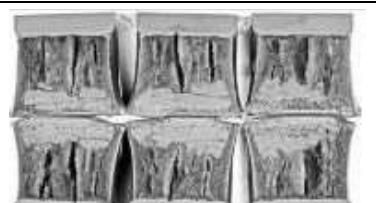
溶接継手区分	切欠位置 (採取方 向)	試験温度	試験片 記号	破面写真 (左から 1, 2, 3 本目)
解体材 母材 (L)	20°C	20°C	LKBL3	
			LKBL1	
			LKBL2	
	-50°C	-50°C	LKBL7	
			LKBL6	
	-80°C	-80°C	LKBL5	
			LKBL4	

図 a12.4 シャルピー衝撃試験後の破面写真 (解体材-母材 (L))

添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真

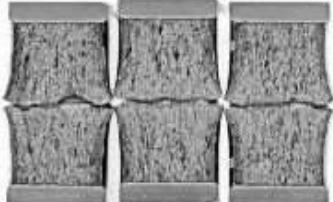
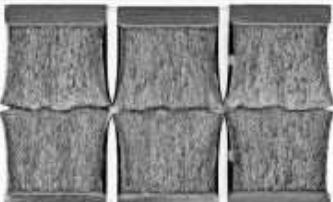
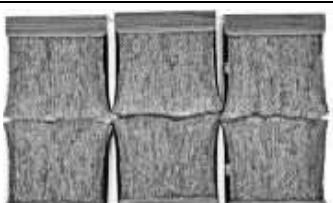
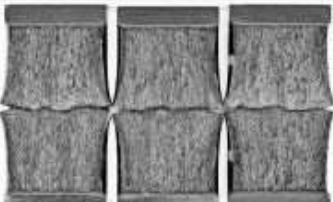
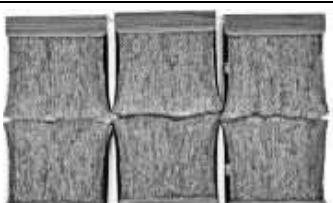
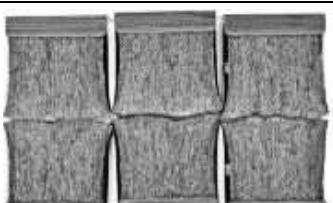
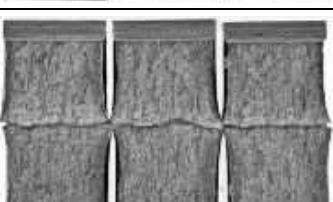
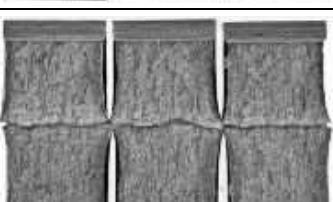
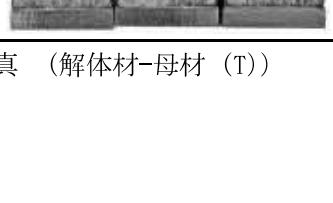
溶接継手区分	切欠位置 (採取方 向)	試験温度	試験片 記号	破面写真 (左から 1, 2, 3 本目)
解体材 母材 (T)	60°C	60°C	LKB7	
				
				
	20°C	20°C	LKB4	
				
	-10°C	-10°C	LKB1	
				
	-20°C	-20°C	LKB5	
				
	-30°C	-30°C	LKB6	
				
	-40°C	-40°C	LKB2	
				
	-60°C	-60°C	LKB3	
				

図 a12.5 シャルピー衝撃試験後の破面写真 (解体材-母材 (T))

添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真

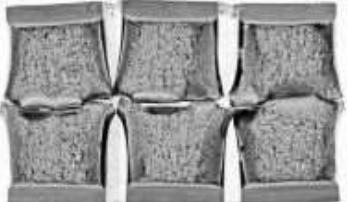
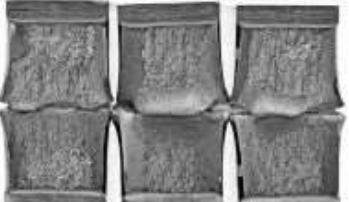
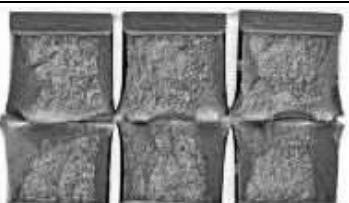
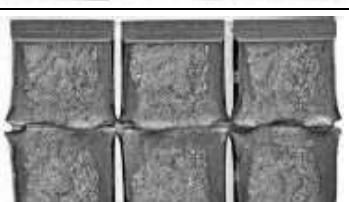
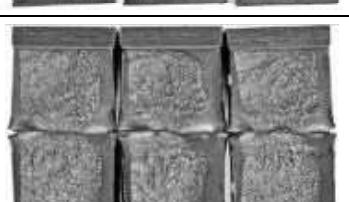
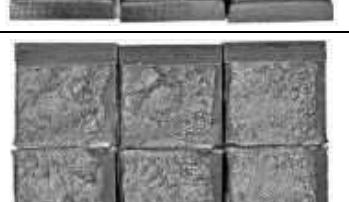
溶接継手区分	切欠位置 (採取方 向)	試験温度	試験片 記号	破面写真 (左から 1, 2, 3 本目)
解体材 ボンド部		60°C	LKF7	
		20°C	LKF6	
		-10°C	LKF1	
		-20°C	LKF5	
		-40°C	LKF2	
		-60°C	LKF3	
		-80°C	LKF4	

図 a12.6 シャルピー衝撃試験後の破面写真 (解体材-ボンド部)

添付資料 12 シャルピー衝撃試験後の破面写真

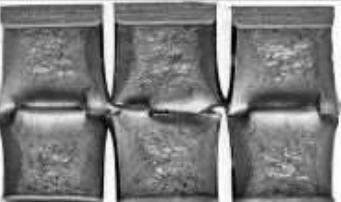
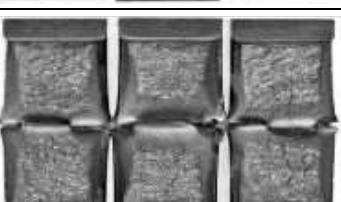
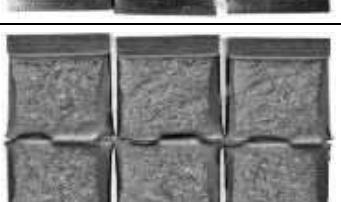
溶接継手区分	切欠位置 (採取方 向)	試験温度	試験片 記号	破面写真 (左から 1, 2, 3 本目)
解体材 溶接金属 中央		60°C	LKW7	
		20°C	LKW4	
		-10°C	LKW1	
		-20°C	LKW5	
		-30°C	LKW6	
		-40°C	LKW2	
		-60°C	LKW3	

図 a12.7 シャルピー衝撃試験後の破面写真 (解体材-溶接金属中央)

寸法検査成績表

添付資料 13 破壊非性試験片 検査成績書

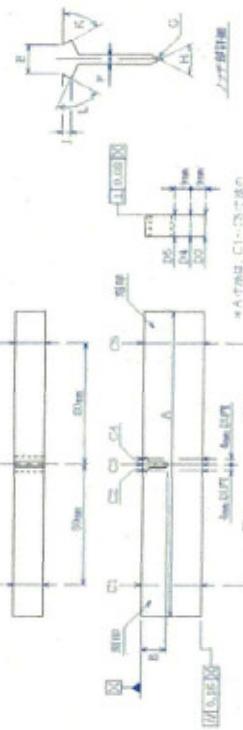
要領書No. QM-02 付表 1

株式会社キグチテクニクス
2016 年 9 月 20 日

No.

I/I

測定位置 公差 規格	A	B	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	E	F	G	H
CB-1	200.028	17.988	40.036	40.039	40.030	40.035	40.037	20.028	20.032	20.029	20.030	20.030	2.074	2.006	0.098	60° 23'
CB-2	200.028	17.984	40.033	40.037	40.037	40.034	40.037	20.033	20.033	20.031	20.032	20.031	2.093	2.001	0.100	59° 46'
CB-3	200.016	17.984	40.037	40.033	40.037	40.035	40.037	20.032	20.034	20.035	20.033	20.033	2.087	2.007	0.095	60° 36'
以下余白																
測定位置 公差 規格	J	K	L	平行度	直角度	外観										
CB-1	-	-	±2°	-	-	-										
CB-2	1.3	45°	90°	≤0.16	≤0.08	-										
CB-3	1.296	44° 59'	90° 01'	0.011	0.010	良好										
以下余白	1.294	44° 57'	89° 48'	0.012	0.009	良好										
CB-3	1.298	45° 06'	89° 58'	0.009	0.009	良好										



検査機器: 外側マイクロメータ(NI)「管理No.47186137」 测定距離(V): 管理No.1109, H規(1)

株式会社 IH
[REDACTED]

立法検査成績表

添付資料 13 破壊非性試験片 検査成績書

要領書No. QM-G2 付表 1
株式会社キダチニクス
2016年 9月 24日

No.		測定位置 A B B(裏) C1 C2 C3 C4 C5 D1 D2 D3 D4 D5 E F G											
依頼番号	-												
管理番号	164191												
品名	破壊非性試験片 (C材溶接部)												
画面番号	-												
材質	SPV450Q												
数量	3												
室温	23°C												
測定位置	A	B	B(裏)	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5
公差	-	-	-	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2	-
規格	2.00	18	18	40	40	40	40	40	20	20	20	20	2
識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	V	M	M	M	M	R≤0.1
CF-1	200.053	17.971	17.974	40.010	40.004	39.999	39.993	40.010	20.925	20.881	20.827	20.823	2.130
CF-2	200.024	17.983	17.997	40.005	40.000	39.994	39.996	40.001	20.923	20.887	20.894	20.866	2.154
CF-3	200.001	17.992	18.005	40.012	40.002	39.998	40.001	39.998	20.906	20.874	20.796	20.793	2.096
以下余白													
測定位置	H	J	K	L									
公差	-	-	-	±2°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
規格	60°	1.3	45°	90°	≤0.16	≤0.08	-	-	-	-	-	-	-
識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
CF-1	60° 24'	1.285	45° 07'	90° 00"	0.013	0.058	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
CF-2	60° 19'	1.281	45° 07'	90° 04"	0.020	0.046	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
CF-3	60° 25'	1.289	45° 11'	90° 00"	0.020	0.043	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好
以下余白													

寸法検査成績表

添付資料 13 破壊非性試験片 検査成績書

要領番号 No. QM-02 付表 1
株式会社イシダテクニクス

2016 年 10 月 22 日

No.	I/I	依頼番号	-	D1	D2	D3	D4	D5	E	F	G
		管理番号	165066								
		品名	破壊非性試験片 (C材溶接部)								
		図面番号	-								
		材質	SPV45/Q								
		数量	1								
		室温	24°C								
		測定位置	A	B	B(裏)	C1	C2	C3	C4	C5	
公差	-	-	-	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2	-
	規格	200	18	18	40	40	40	40	20	20	R≤0.1
識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	M	M	M	V
	CF-4	200.021	17.9477	17.9466	40.004	39.996	39.996	39.998	20.903	20.865	20.585
以下余白											
測定位置	I	J	K	L	平行度	直角度	外観				
	公差	-	-	-	±2°	-	-				
識別	規格	60°	1.3	45°	90°	≤0.16	≤0.08	-			
	検査機器	V	V	V	V	V	V	I			
CF-4		60° 16'	1.294	45° 17'	90° 21'	0.043	0.021	良好			
	以下余白										

寸法検査成績表

要領書No. QM-02 付表 1
株式会社オグチテクニクス
2016年 12月 10日

No.	J/T	依頼番号	寸法検査成績表											
		管理番号	165716											
		品名	破壊非性試験片											
		図面番号	-											
		材質	SPV450Q											
		数量	3											
		室温	24°C											
測定位置	A	B	B(裏)	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	
	-	-	-	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2	-	
規格	200	18	18	40	40	40	40	40	20	20	20	20	2	
	V	V	V	V	V	V	V	V	M	M	M	M	R≤0.1	
識別	CW-1	200.021	17.996	17.963	40.003	39.994	39.998	40.000	40.002	20.896	20.872	20.690	20.696	
	CW-2	200.020	17.989	17.997	39.997	39.989	39.987	39.991	39.995	20.902	20.866	20.686	20.677	
識別	CW-3	200.009	17.980	17.948	39.999	39.990	39.986	39.987	39.991	20.897	20.872	20.665	20.678	
	以下余白													
測定位置	H	J	K	L	平行度	直角度	外観							
	公差	-	-	±2°	-	-	-							
規格	60°	1.3	45°	90°	≤0.16	≤0.08	-							
	V	V	V	V	V	V	V							
識別	CW-1	60° 16'	1.285	45° 18'	90° 07'	0.017	0.069	良好						
	CW-2	60° 01'	1.285	45° 23'	90° 17'	0.038	0.064	良好						
識別	CW-3	60° 54'	1.290	45° 05'	90° 08'	0.033	0.096	良好						
	以下余白													

株式会社 IHI
御中

寸法検査成績表

要領書No. QM-02 付表1
株式会社ヨウヂテクニクス
2016年9月20日

No.	I/I	検査機器・外観・マイクロメータ(M1) 管理No.11091 検定記録No.11091														
測定位置	A	B	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	E	F	G	H
公差	-	-	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	-	-	-	-
規格	120	9	22	22	22	22	22	11	11	11	11	11	1	1	$R \leq 0.1$	60°
識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	M	M	M	M	M	V	V	V	V
MB-1	120.049	8.984	22.014	22.013	22.013	22.010	22.007	11.003	11.003	11.004	11.004	11.004	2.117	1.016	0.091	60° 43'
MB-2	120.024	8.983	22.017	22.017	22.012	22.016	22.012	11.003	11.003	11.004	11.004	11.004	2.080	1.007	0.093	59° 54'
MB-3	120.056	8.972	22.015	22.010	22.009	22.001	22.004	11.004	11.006	11.007	11.007	11.007	2.099	1.004	0.099	60° 10'
以下余白																
測定位置	J	K	L	平行度	直角度	外観										
公差	-	-	$\pm 2'$	-	-	-										
規格	1,3	45°	90°	≤ 0.08	≤ 0.04	-										
識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V				
MB-1	1.288	45° 06'	69° 39'	0.008	0.005	良好										
MB-2	1.295	45° 07'	90° 05'	0.009	0.006	良好										
MB-3	1.294	44° 47'	90° 12'	0.009	0.006	良好										
以下余白																

寸法検査成績表

要領書No. QM-02 付表 1
株式会社イシダテクニクス
2016年 9月 24日

No.

1/1

依頼番号		検査機器:外側マイクロメータ(M) 管型No.852448961 測定測微鏡(管通No.0419) 目視(D)											
管理番号	164191	A	B	B(底)	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4
品名	破壊非性試験片 (M材溶接部)	-	-	-	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1
図面番号	-	C	C	C	22	22	22	22	22	11	11	11	11
材質	SPV450Q	V	V	V	V	V	V	V	V	M	M	M	M
数量	3	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
室温	23°C	検査機器:外側マイクロメータ(M) 管型No.852448961 測定測微鏡(管通No.0419) 目視(D)											
測定位置	A	B	B(底)	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5
公差	-	-	-	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1
規格	120	9	9	22	22	22	22	22	11	11	11	11	11
種別 検査機器	V	V	V	V	V	V	V	V	M	M	M	M	M
MF-1	120.013	8.971	8.974	21.990	21.991	21.994	22.003	22.009	11.517	11.683	11.784	11.780	11.767
MF-2	120.010	8.981	8.982	21.999	21.995	21.996	21.991	22.001	11.529	11.717	11.707	11.704	11.702
MF-3	120.016	8.984	8.983	22.004	21.996	21.996	21.995	22.004	11.517	11.752	11.656	11.652	11.656
以下余白													
測定位置	H	J	K	L	平行度	直角度	外観						
公差	-	-	-	-	±2°	-	-						
規格	60°	1.3	45°	90°	≤0.08	≤0.04	-						
種別 検査機器	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
MF-1	60° 22'	1.286	45° 56'	90° 35'	0.020	0.011	良好						
MF-2	60° 30'	1.286	45° 28'	90° 35'	0.019	0.013	良好						
MF-3	59° 50'	1.284	45° 03'	90° 00'	0.021	0.016	良好						
以下余白													

株式会社 IHI
御中

添付資料 13 破壊靶性試験片 検査成績書

要請書No. QM-02 付表 1
株式会社キヤドテクニクス

2016年 12月 10日

寸法検査成績表

No.	I/I	寸法検査結果									
依頼番号	-										
管理番号	16577										
品名	破壊靶性試験片										
図面番号	-										
材質	SPV450Q										
数量	3										
室温	24°C										
測定位置	A	B	B(裏)	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3
公差	-	-	-	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1
規格	120	9	9	22	22	22	22	22	11	11	11
識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	V	M	M	M
MW-1	120.0609	8.961	8.978	21.986	21.977	21.979	21.981	21.992	11.416	11.693	11.777
MW-2	120.0044	8.944	8.985	21.998	21.994	21.997	21.994	21.998	11.471	11.726	11.746
MW-3	120.012	8.963	8.991	21.996	21.990	21.993	21.990	22.002	11.428	11.722	11.678
以下余白											
測定位置	H	J	K	L	平行度	直角度	外観				
公差	-	-	-	±2°	-	-	-				
規格	60°	1.3	45°	90°	≤0.08	≤0.04	-				
識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
MW-1	60° 47'	1.269	45° 30'	90° 25'	0.021	-0.078	良好				
MW-2	60° 53'	1.250	45° 12'	90° 09'	0.022	0.159	良好				
MW-3	60° 46'	1.270	45° 12'	90° 03'	0.011	0.086	良好				
以下余白											

添付資料 14 破壊非性試験片の切欠き導入位置

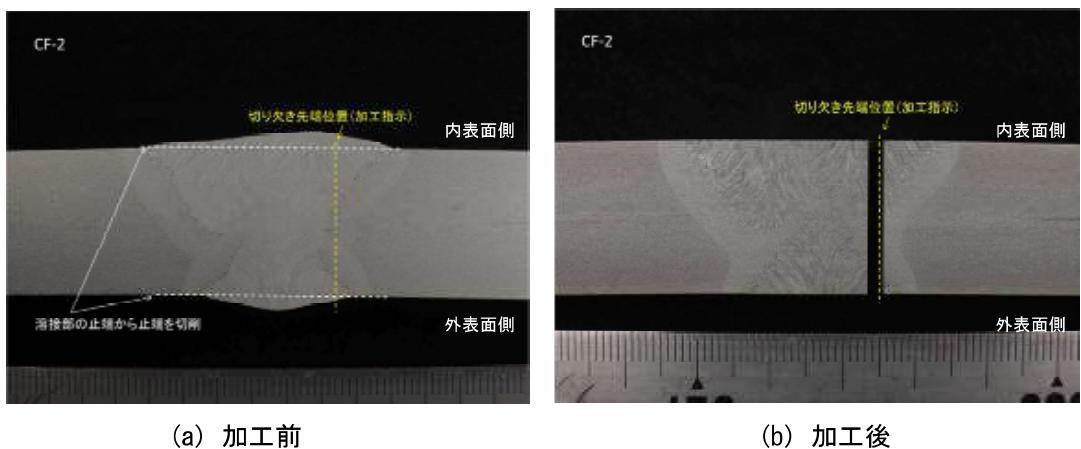


図 a14.1 ボンド部試験片 CF-2 の切欠き位置

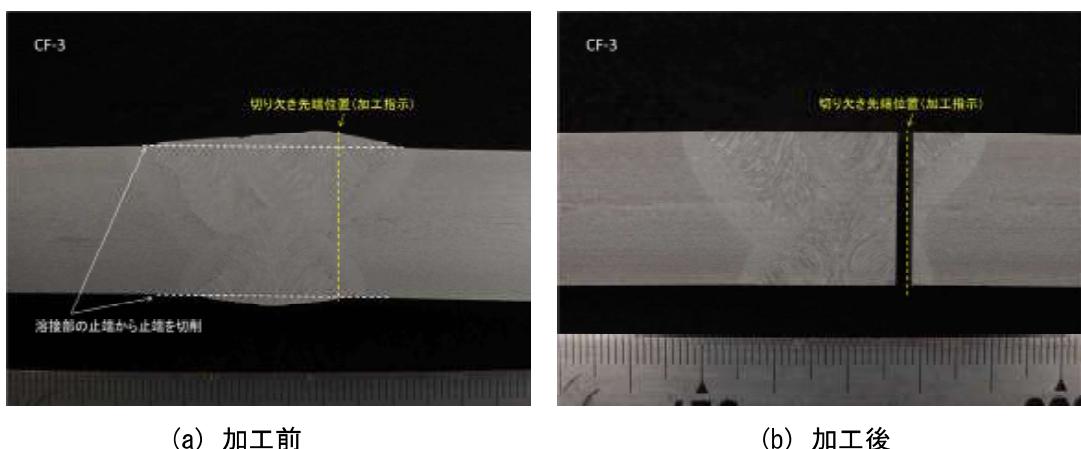


図 a14.2 ボンド部試験片 CF-3 の切欠き位置

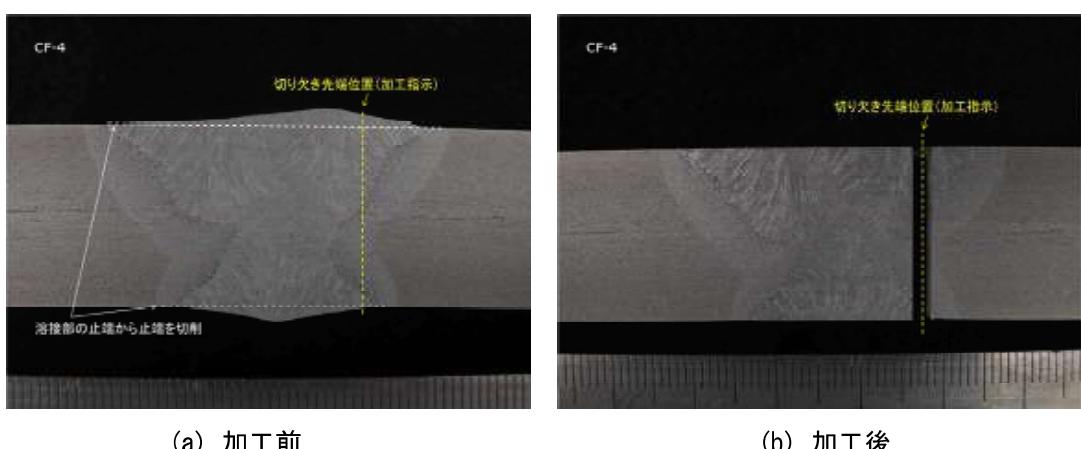


図 a14.3 ボンド部試験片 CF-4 の切欠き位置

添付資料 14 破壊非性試験片の切り欠き導入位置

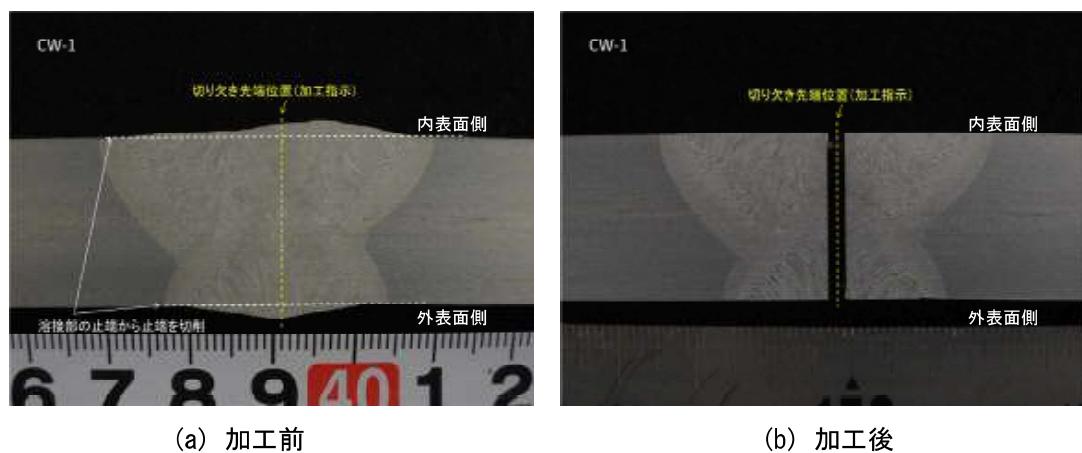


図 a14.4 溶接金属部試験片 CW-1 の切り欠き位置

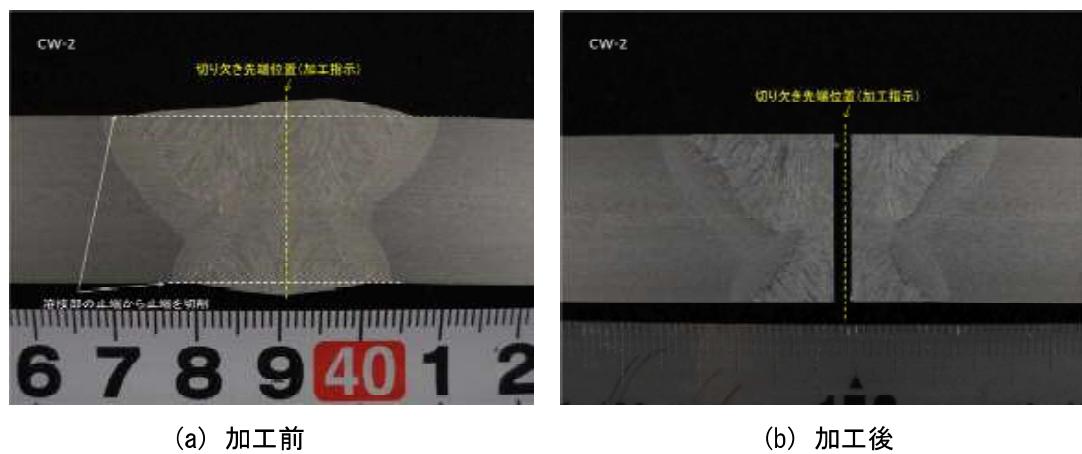


図 a14.5 溶接金属部試験片 CW-2 の切り欠き位置

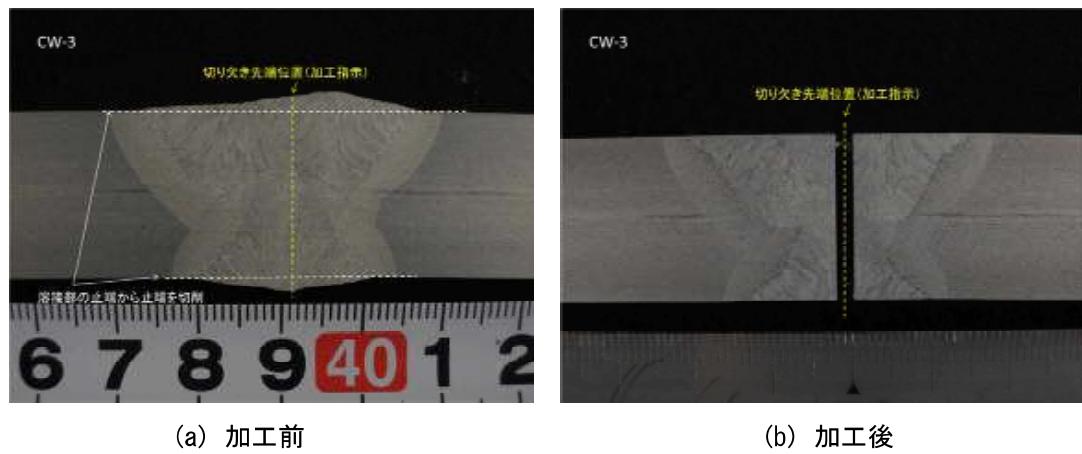


図 a14.6 溶接金属部試験片 CW-3 の切り欠き位置

添付資料 14 破壊非性試験片の切り欠き導入位置

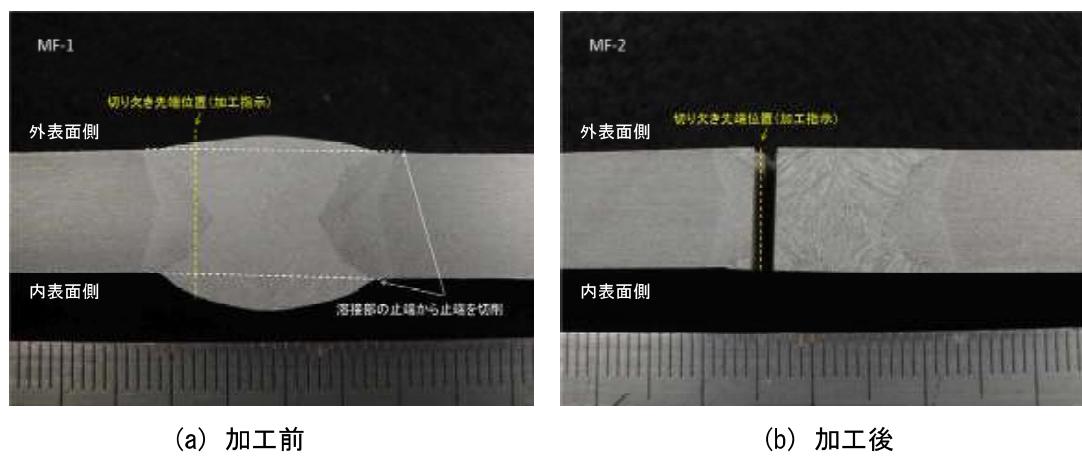


図 a14.7 ボンド部試験片 MF-1 の切り欠き位置

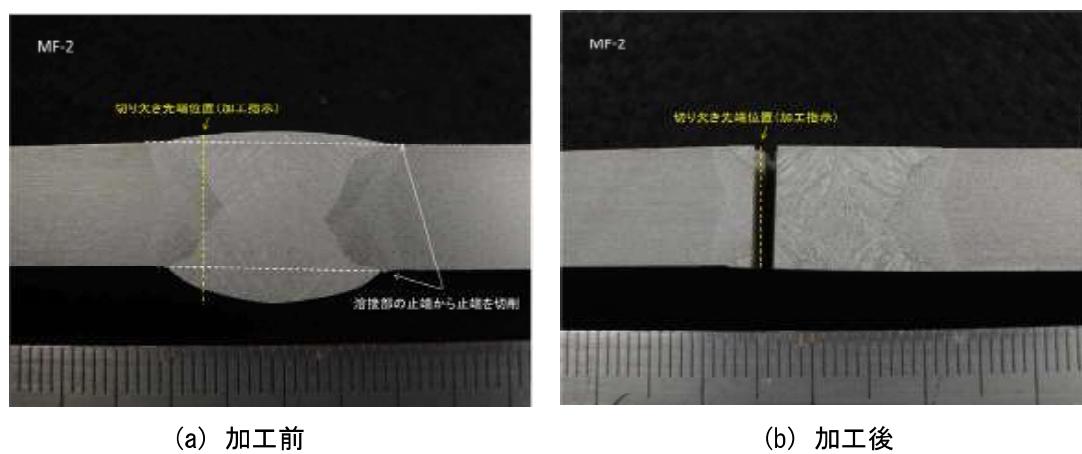


図 a14.8 ボンド部試験片 MF-2 の切り欠き位置

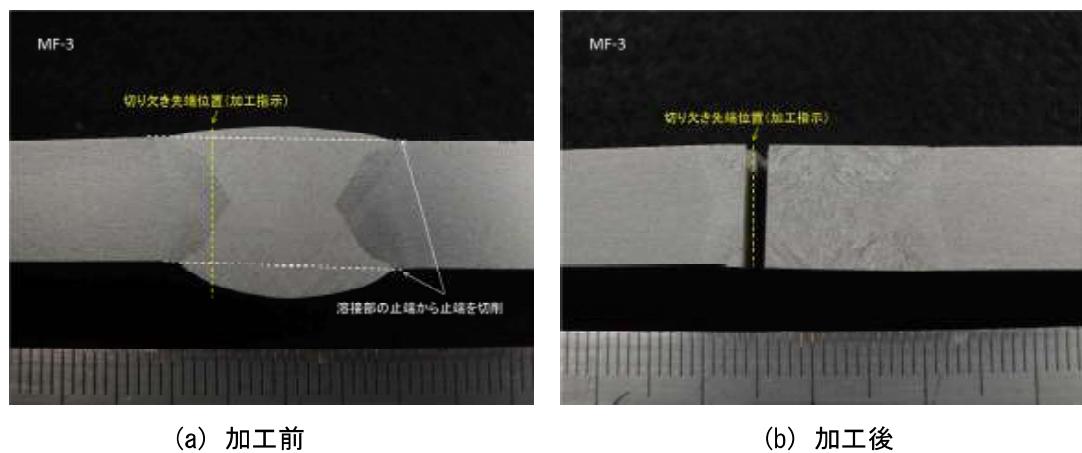


図 a14.9 ボンド部試験片 MF-3 の切り欠き位置

添付資料 14 破壊革性試験片の切りき導入位置

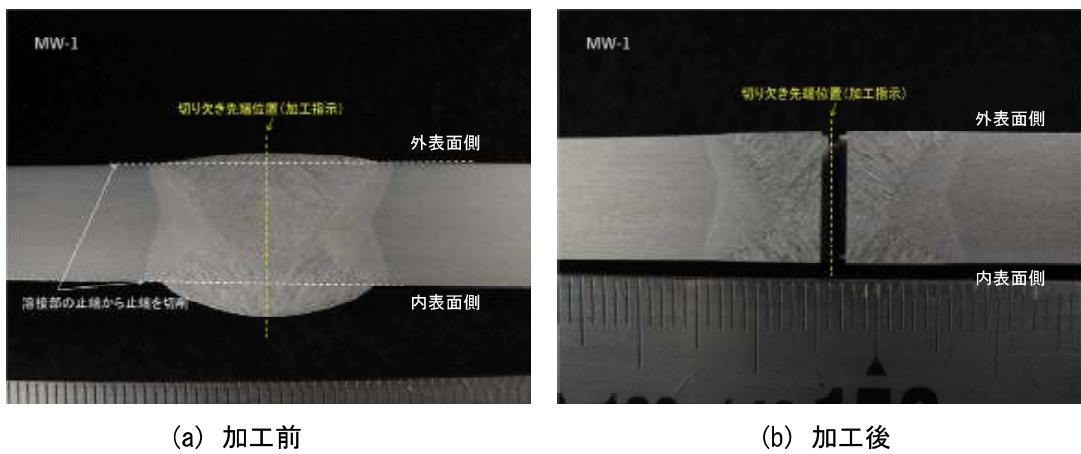


図 a14.10 溶接金属部試験片 MW-1 の切りき位置

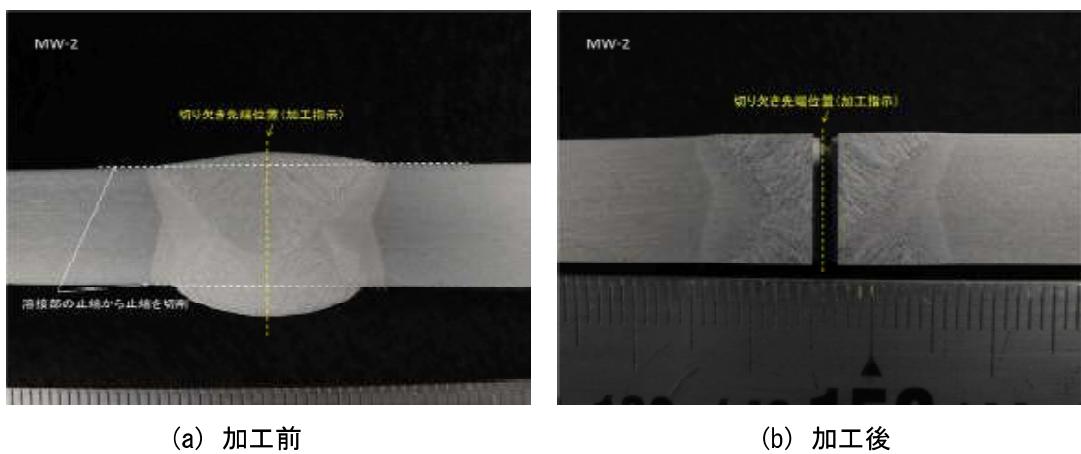


図 a14.11 溶接金属部試験片 MW-2 の切りき位置

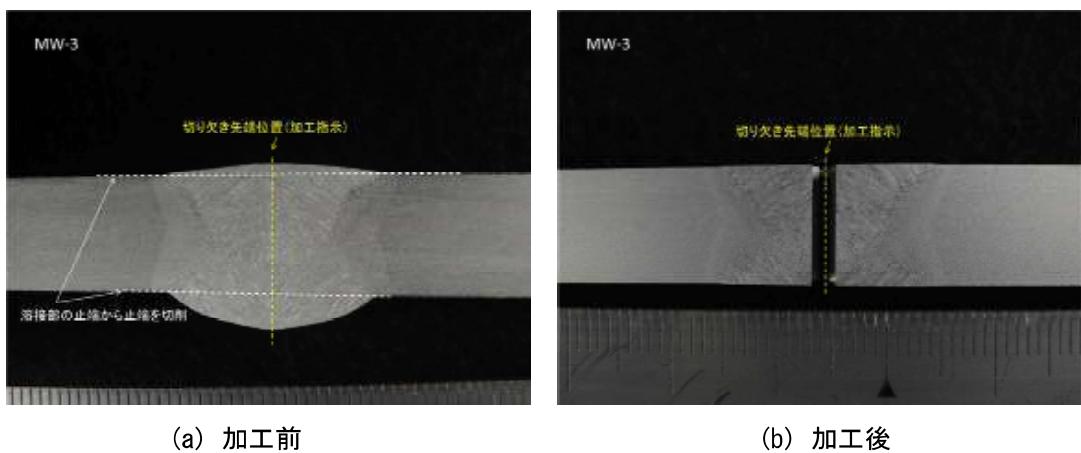


図 a14.12 溶接金属部試験片 MW-3 の切りき位置

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧

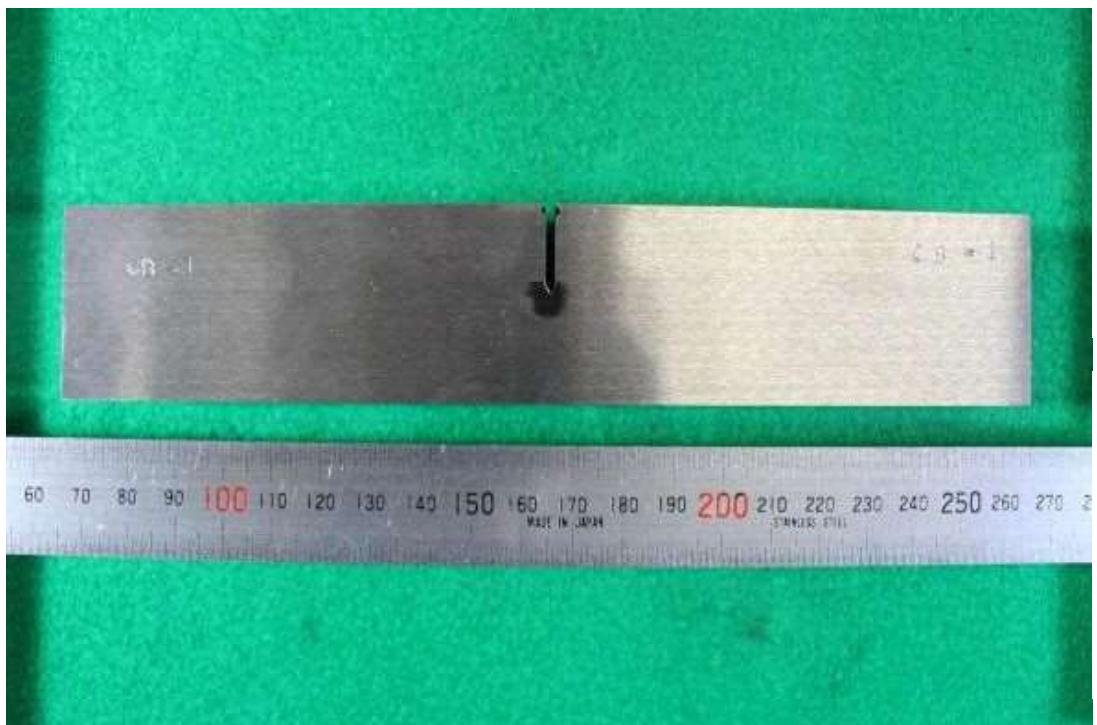


図 a15.1 市販材母材部試験片 CB-1



図 a15.2 市販材母材部試験片 CB-2

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧



図 a15.3 市販材母材部試験片 CB-3

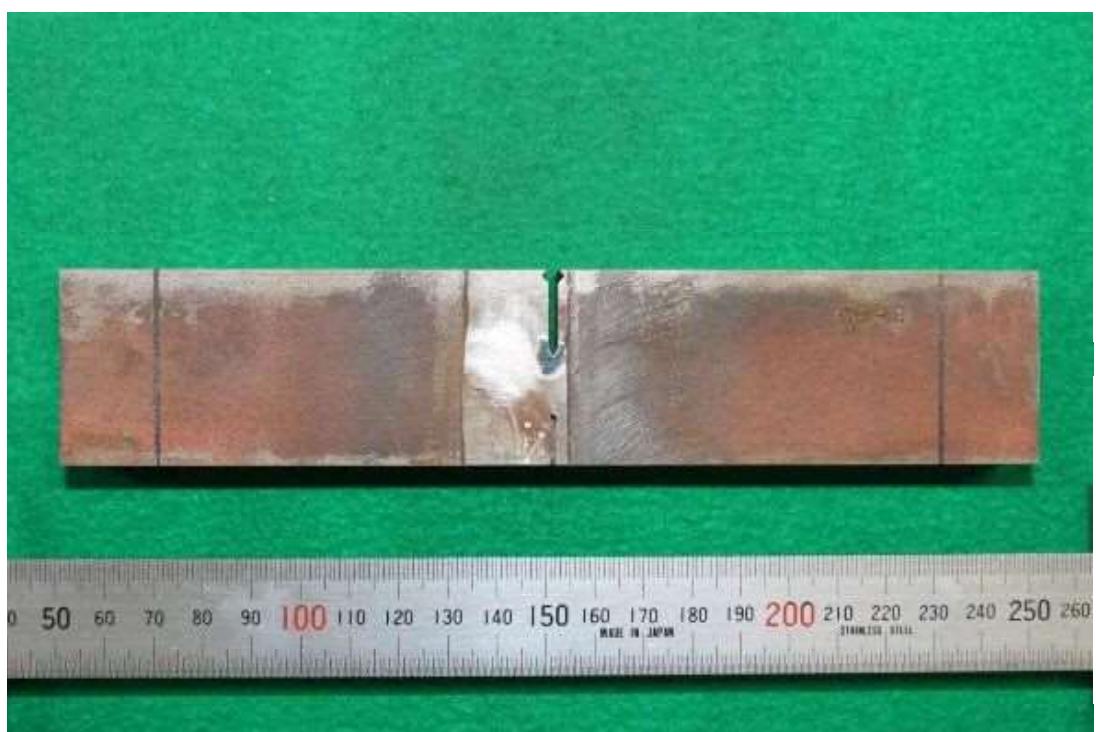


図 a15.4 市販材ボンド部試験片 CF-2

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧



図 a15.5 市販材ボンド部試験片 CF-3



図 a15.6 市販材ボンド部試験片 CF-4

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧



図 a15.7 市販材溶接金属部試験片 CW-1



図 a15.8 市販材溶接金属部試験片 CW-2

添付資料 15 作製した破壊革性試験片の外観一覧



図 a15.9 市販材溶接金属部試験片 CW-3



図 a15.10 解体材母材部試験片 MB-1

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧



図 a15.11 解体材母材部試験片 MB-2

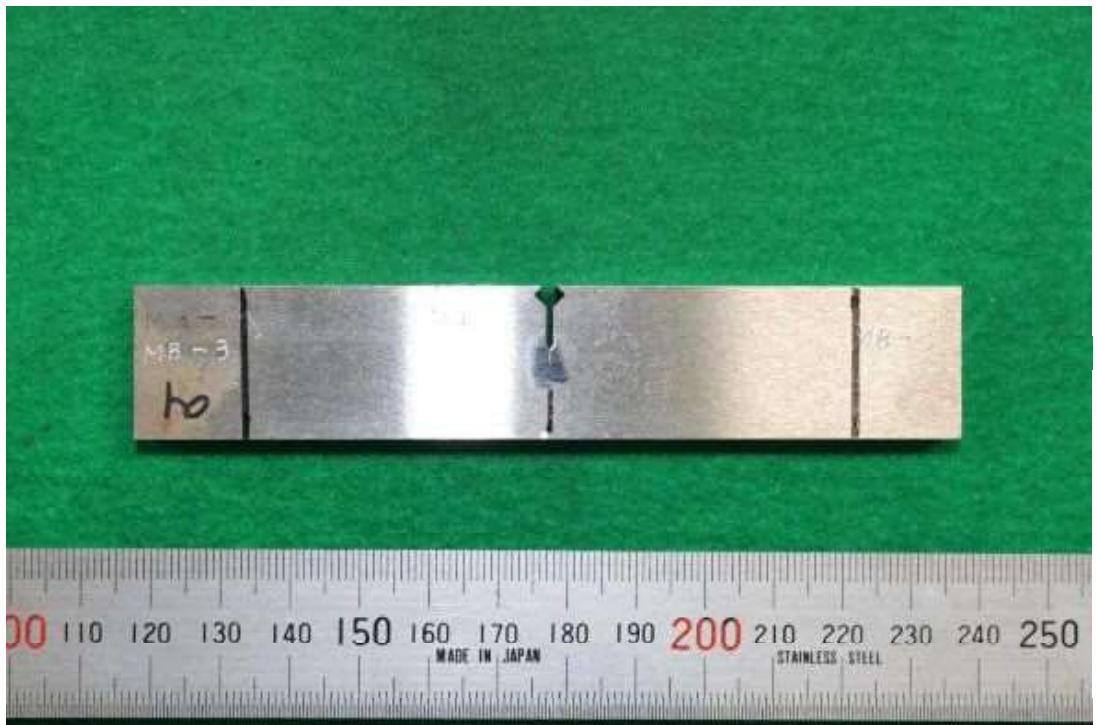


図 a15.12 解体材母材部試験片 MB-3

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧



図 a15.13 解体材ボンド部試験片 MF-1



図 a15.14 解体材ボンド部試験片 MF-2

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧

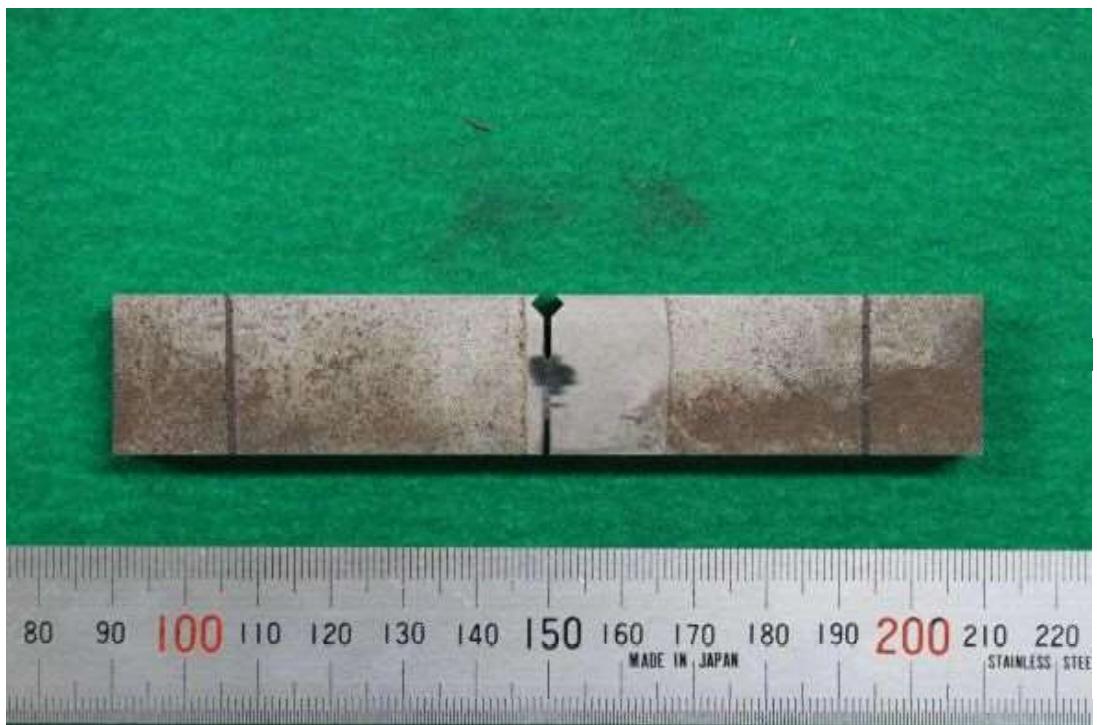


図 a15.15 解体材ボンド部試験片 MF-3

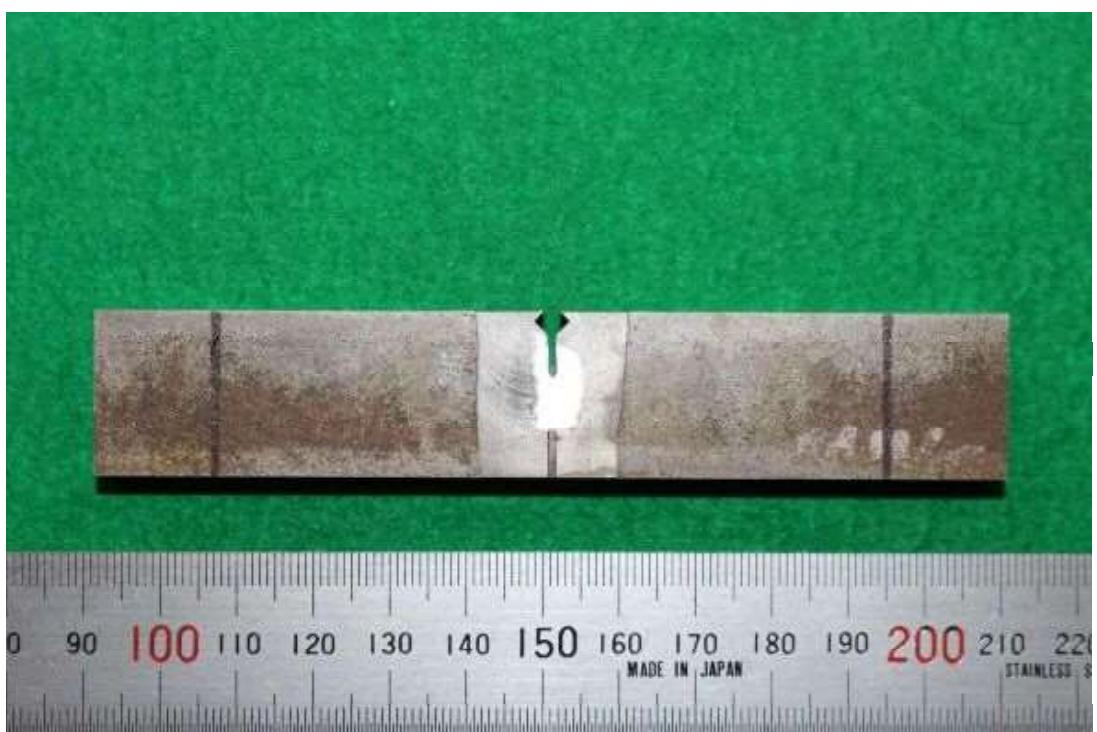


図 a15.16 解体材溶接金属部試験片 MW-1

添付資料 15 作製した破壊非性試験片の外観一覧

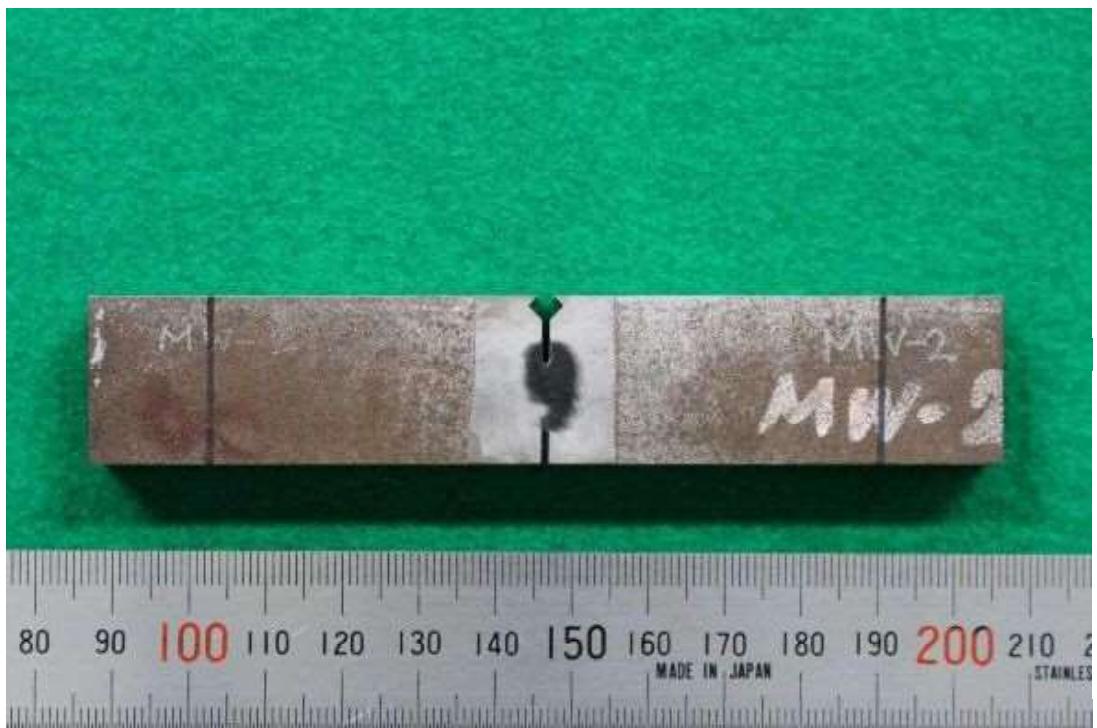


図 a15.17 解体材溶接金属部試験片 MW-2



図 a15.18 解体材溶接金属部試験片 MW-3

添付資料 16 ヤング率の温度依存性

a16.1 ヤング率の温度依存性

ヤング率には温度依存性があることが知られており、BS7910(2013)^[a1]では表 a16.1 に示す温度とヤング率の関係について記載がある。今年度の J_{IC} 破壊靱性試験の試験温度は-10°Cであったため、表 a16.1 中のフェライト鋼の値から内挿してヤング率を求めた。

表 a16.1 温度とヤング率の関係^[a1]

Temperature °C	Ferritic steels MPa	Austenitic steels MPa
-200	219 000	208 000
-150	215 000	205 000
-100	212 000	203 000
-75	210 000	201 000
-50	209 000	200 000
0	206 000	197 000
25	205 000	195 000
50	203 000	193 000
100	201 000	190 000
150	198 000	187 000
200	195 000	183 000
250	191 000	179 000
300	187 000	176 000
350	182 000	172 000
400	177 000	169 000
450	171 000	165 000
500	164 000	160 000
550	156 000	156 000
600	146 000	151 000
650	135 000	146 000

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

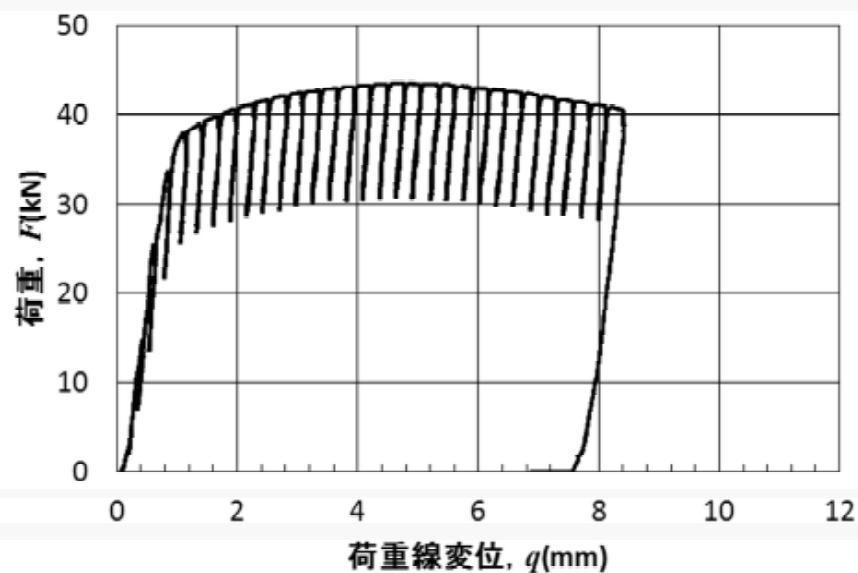


図 a17.1 市販材母材部試験片 CB-1 の荷重-荷重線変位関係

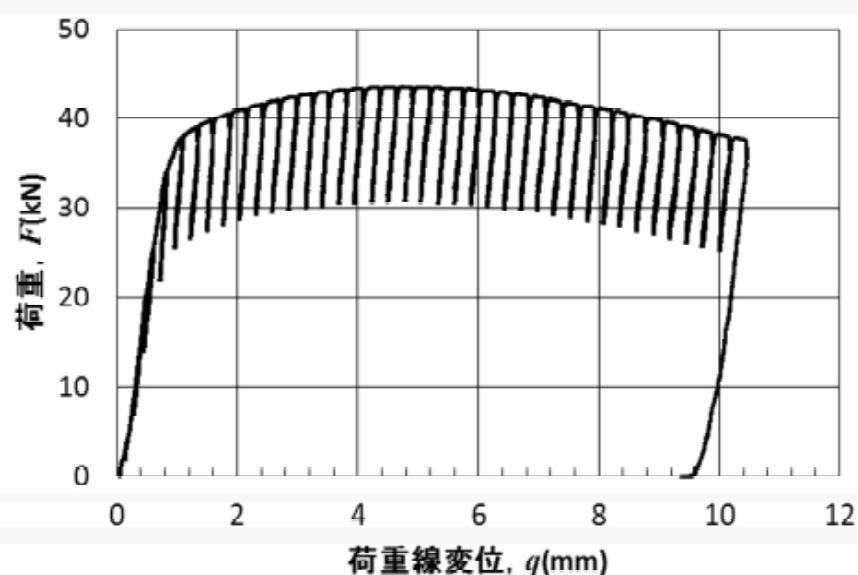


図 a17.2 市販材母材部試験片 CB-2 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

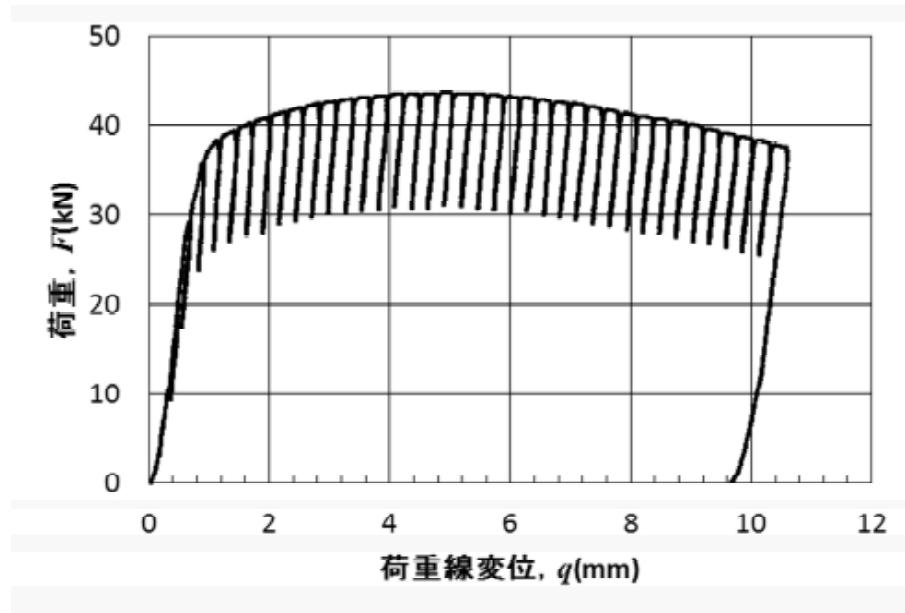


図 a17.3 市販材母材部試験片 CB-3 の荷重-荷重線変位関係

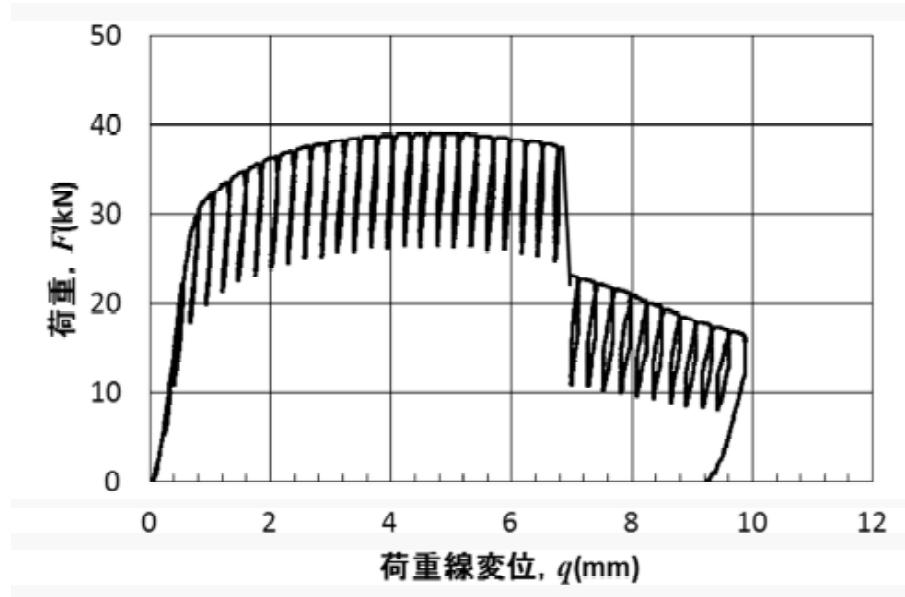


図 a17.4 市販材ボンド部試験片 CF-2 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

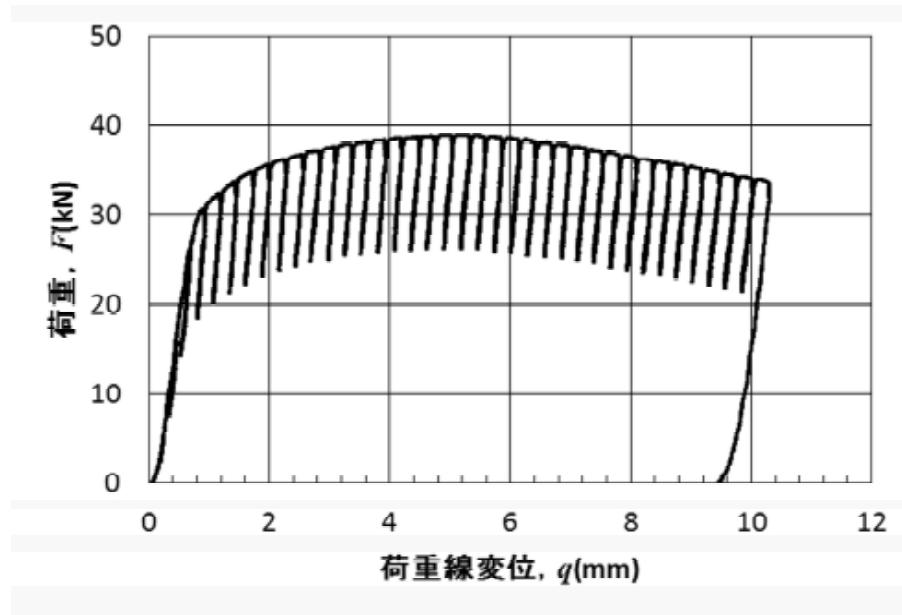


図 a17. 5 市販材ボンド部試験片 CF-3 の荷重-荷重線変位関係

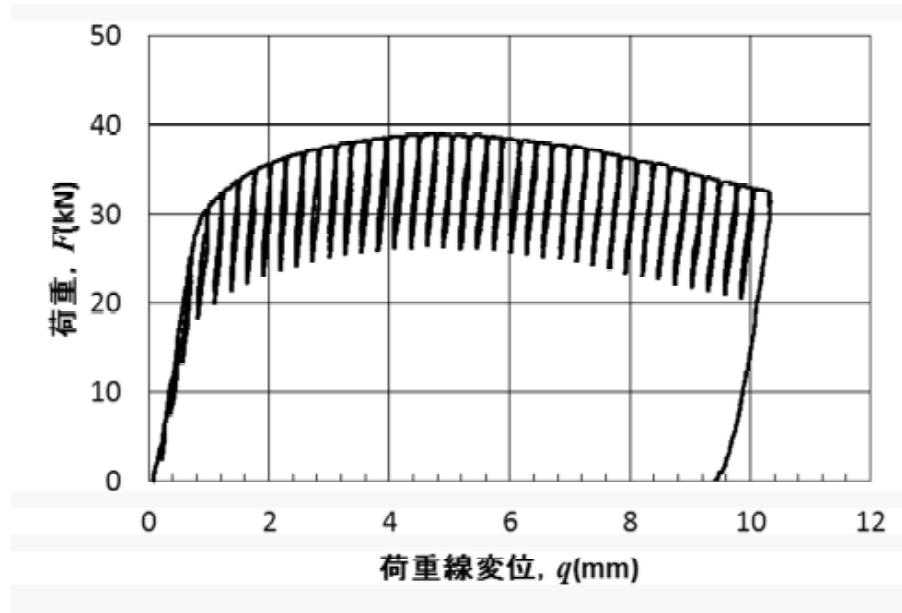


図 a17. 6 市販材ボンド部試験片 CF-4 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

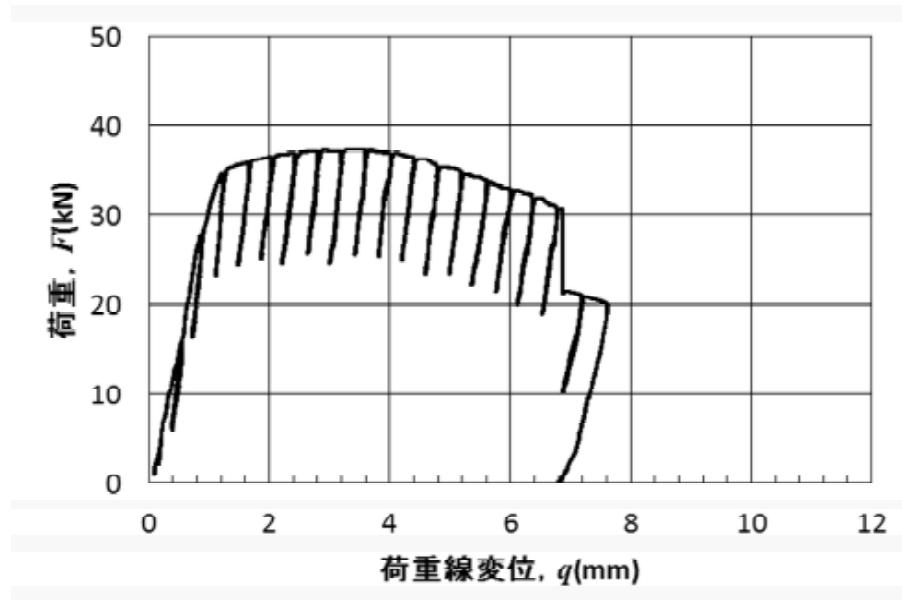


図 a17.7 市販材溶接金属部試験片 CW-1 の荷重-荷重線変位関係

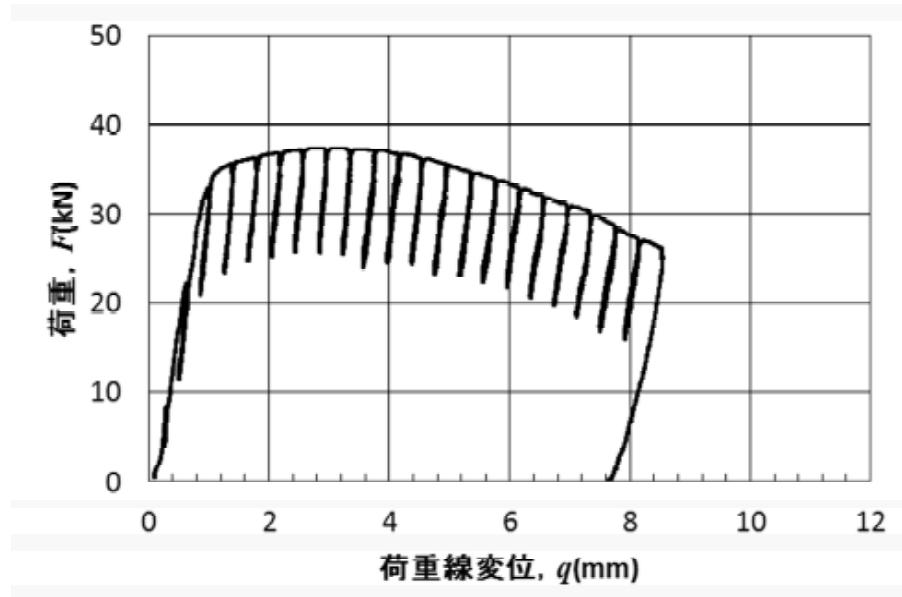


図 a17.8 市販材溶接金属部試験片 CW-2 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

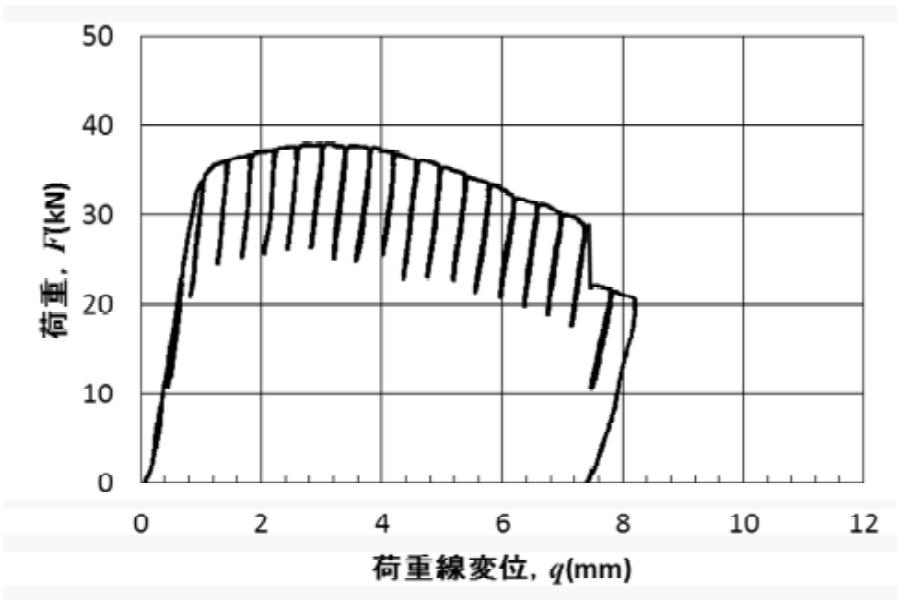


図 a17.9 市販材溶接金属部試験片 CW-3 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

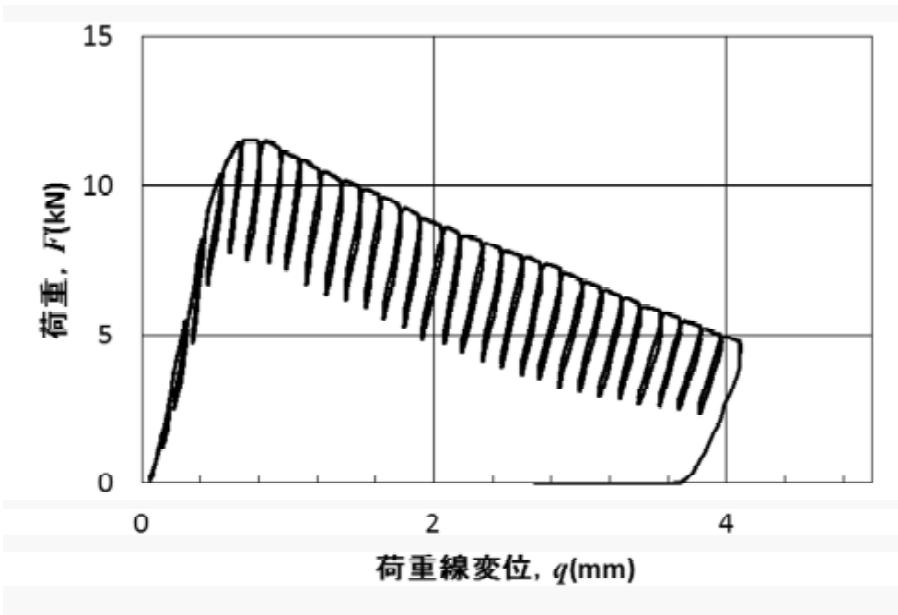


図 a17.10 解体材母材部試験片 MB-1 の荷重-荷重線変位関係

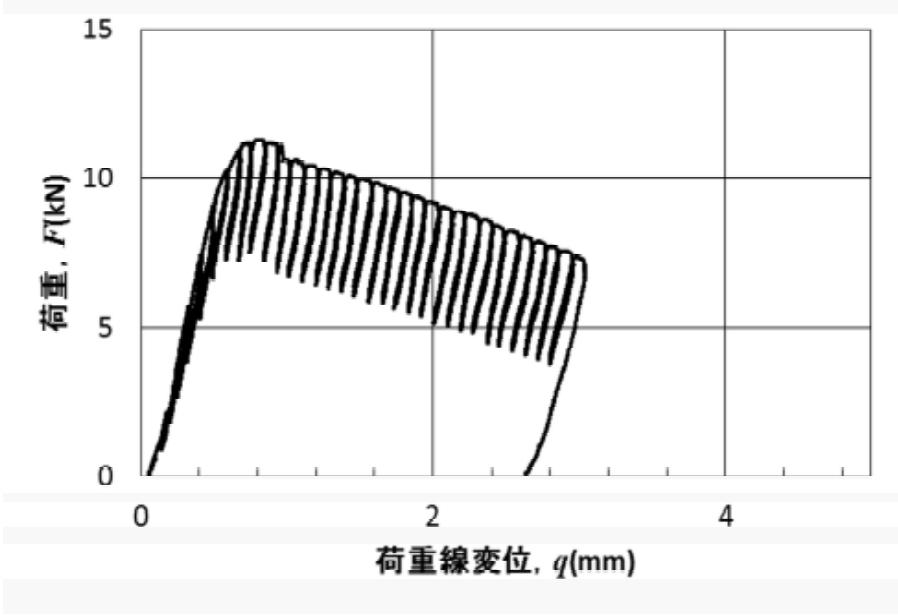


図 a17.11 解体材母材部試験片 MB-2 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

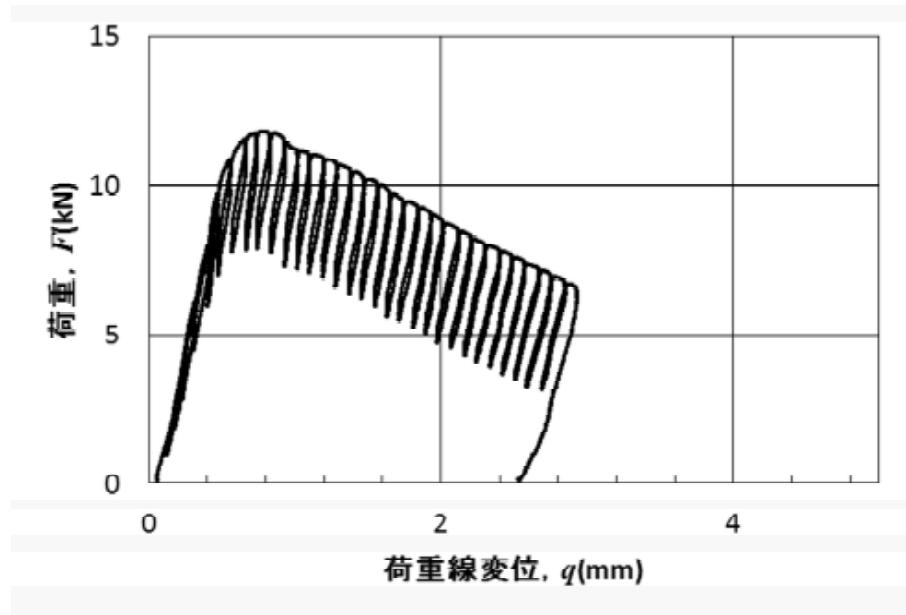


図 a17.12 解体材母材部試験片 MB-3 の荷重-荷重線変位関係

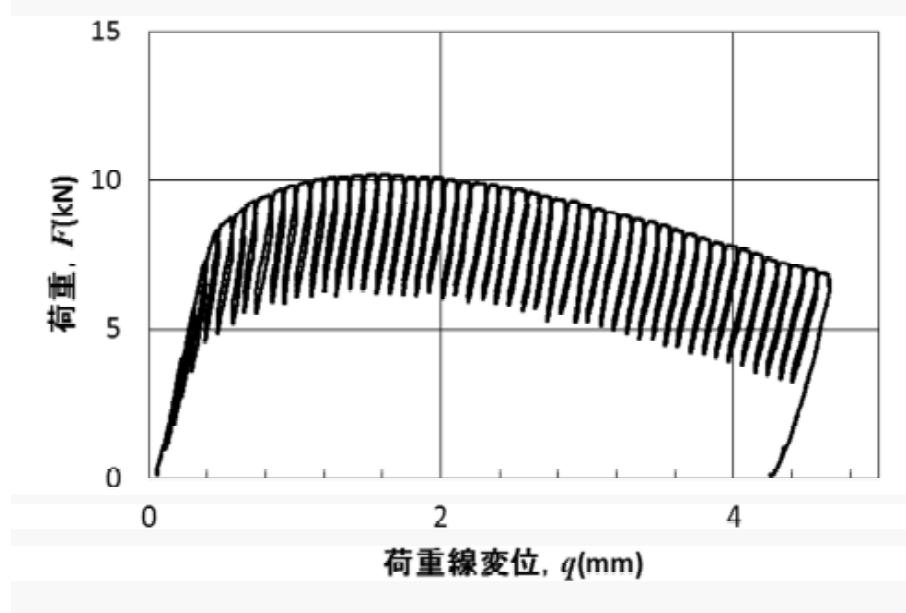


図 a17.13 解体材ボンド部試験片 MF-1 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

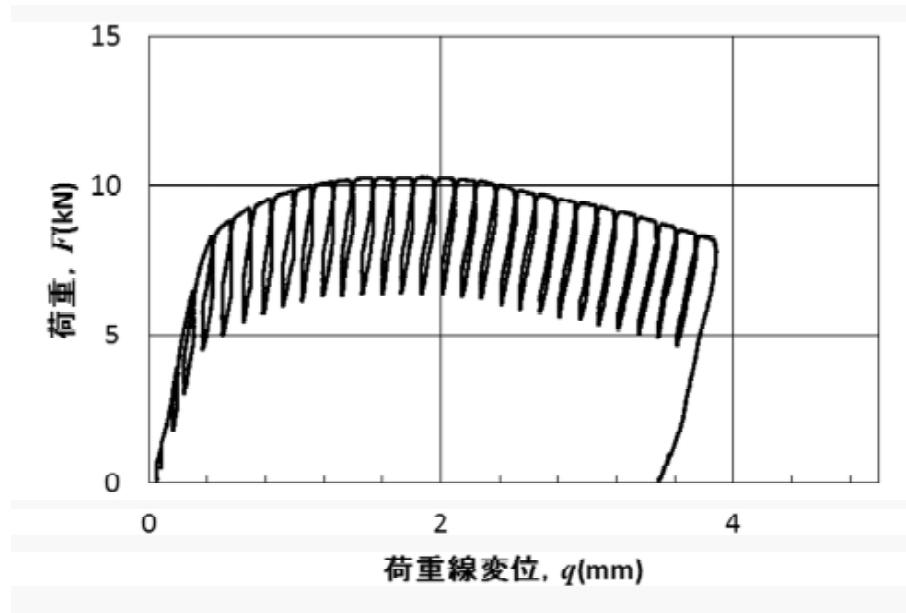


図 a17.14 解体材ボンド部試験片 MF-2 の荷重-荷重線変位関係

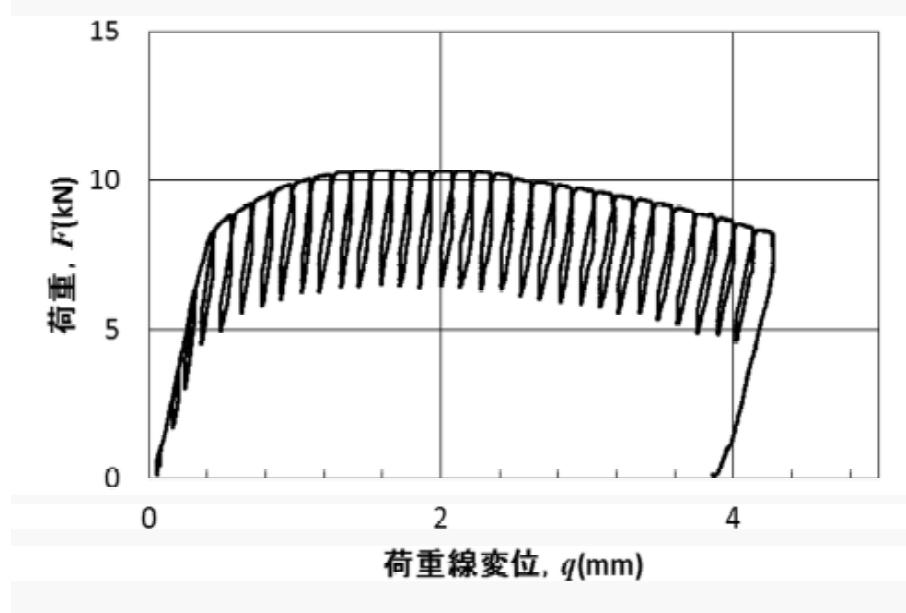


図 a17.15 解体材ボンド部試験片 MF-3 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

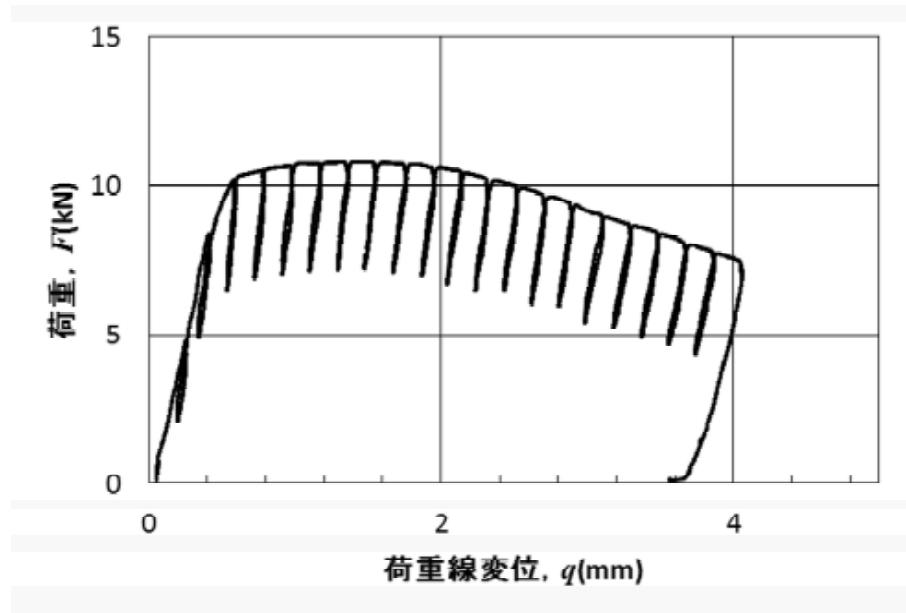


図 a17.16 解体材溶接金属部試験片 MW-1 の荷重-荷重線変位関係

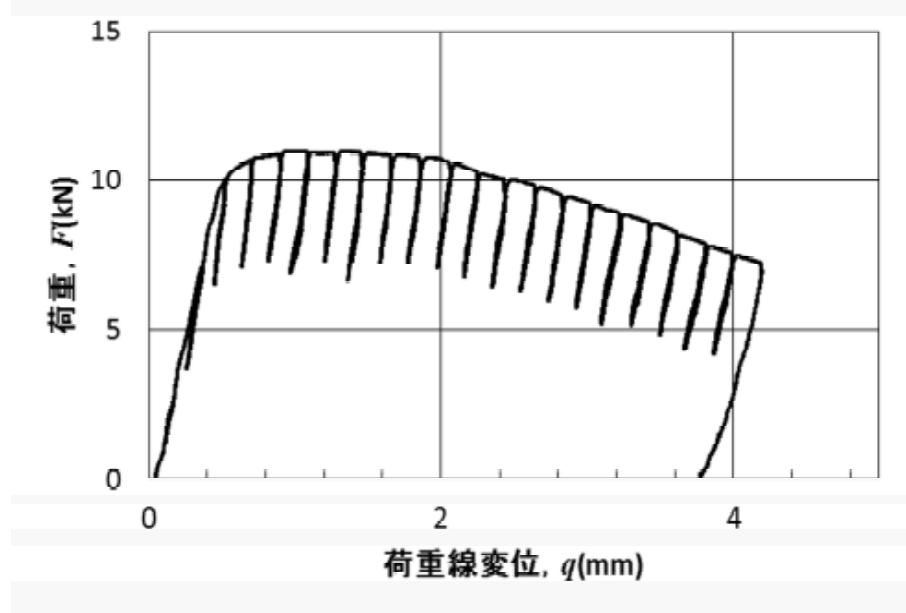


図 a17.17 解体材溶接金属部試験片 MW-2 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 17 荷重-荷重線変位関係一覧

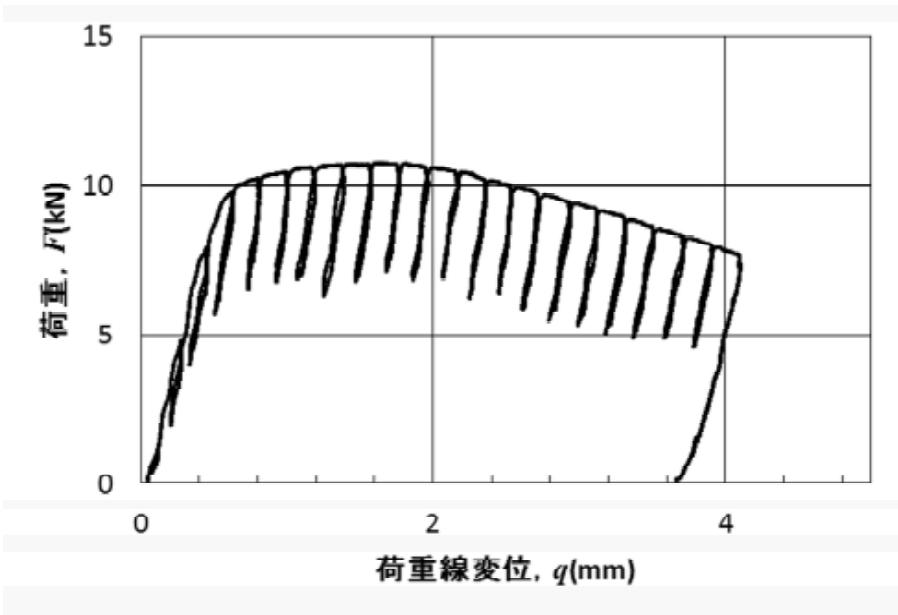


図 a17.18 解体材溶接金属部試験片 MW-3 の荷重-荷重線変位関係

添付資料 18 J-R カーブ一覧

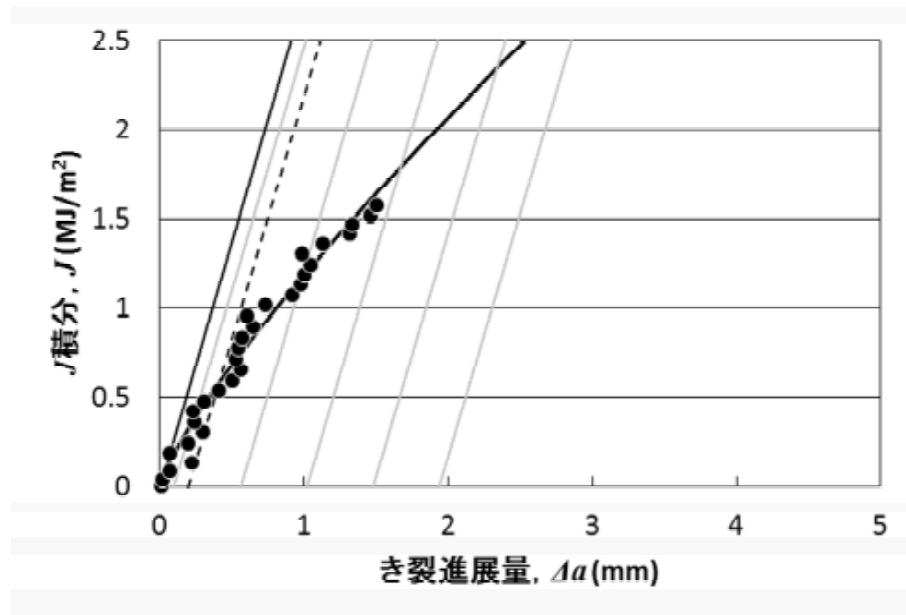


図 a18.1 市販材母材部試験片 CB-1 の J-R カーブ

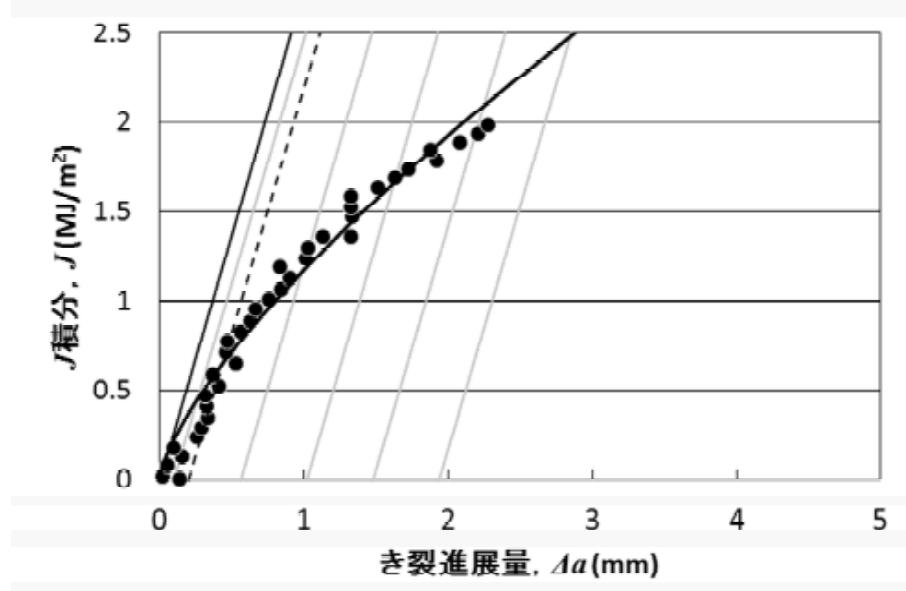


図 a18.2 市販材母材部試験片 CB-2 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

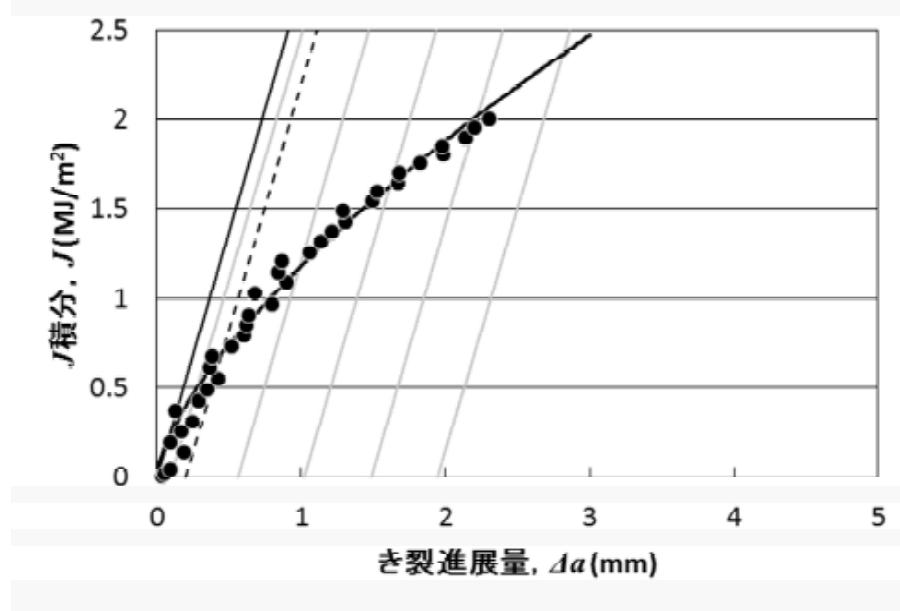


図 a18.3 市販材母材部試験片 CB-3 の J-R カーブ

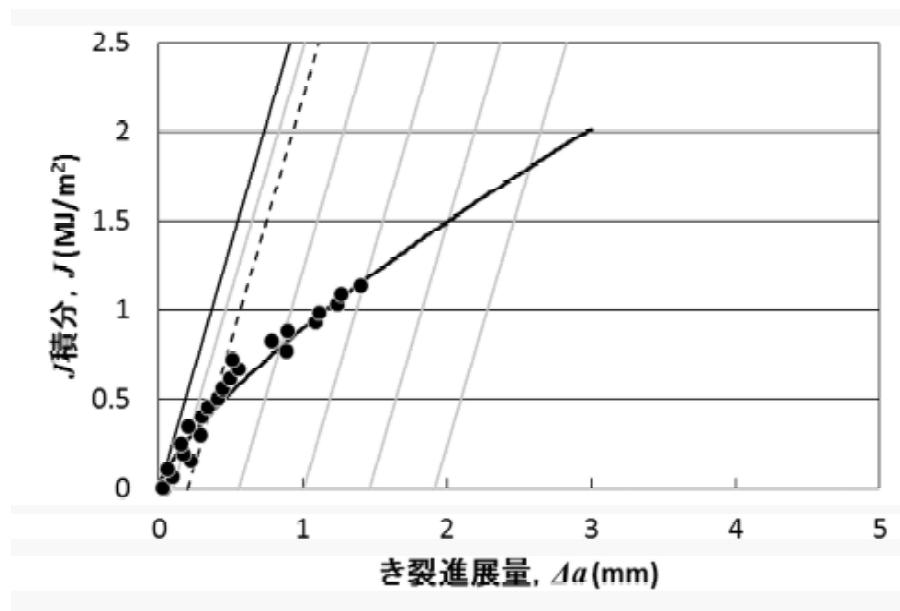


図 a18.4 市販材ボンド部試験片 OF-2 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

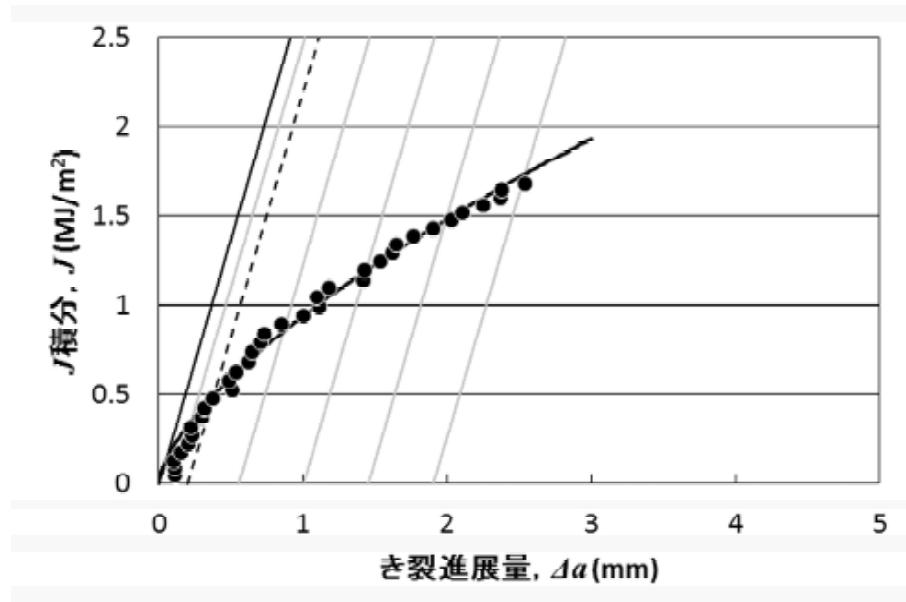


図 a18.5 市販材ボンド部試験片 CF-3 の J-R カーブ

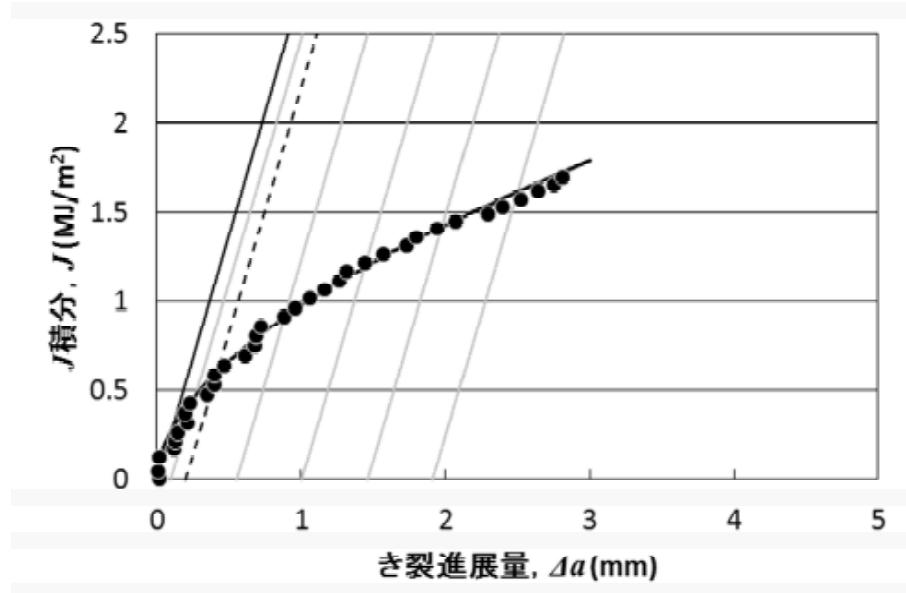


図 a18.6 市販材ボンド部試験片 CF-4 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

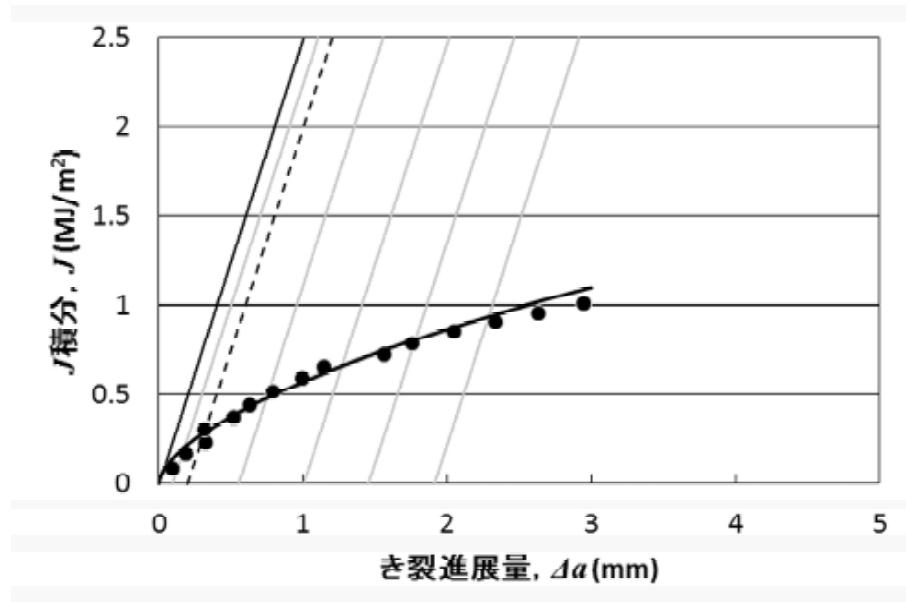


図 a18.7 市販材溶接金属部試験片 CW-1 の J-R カーブ

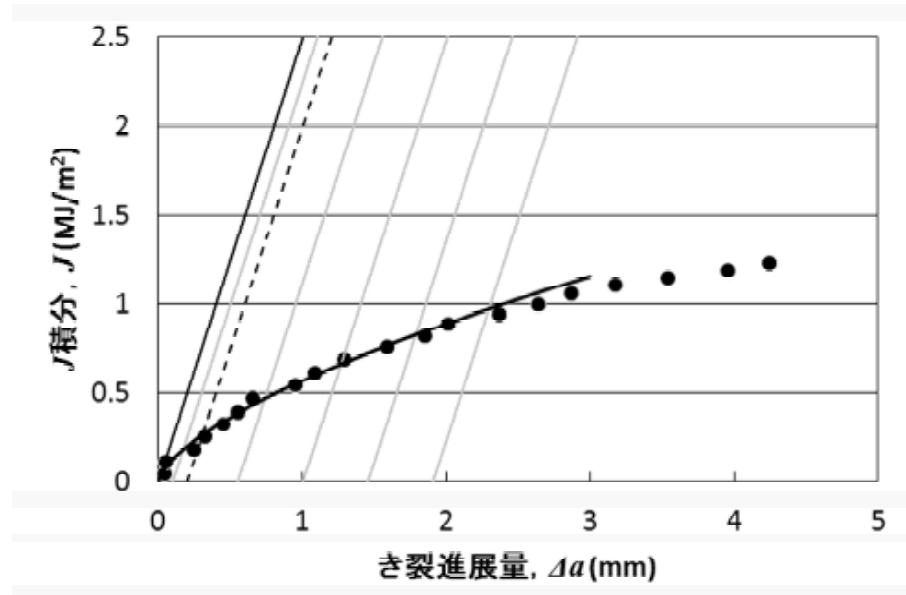


図 a18.8 市販材溶接金属部試験片 J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

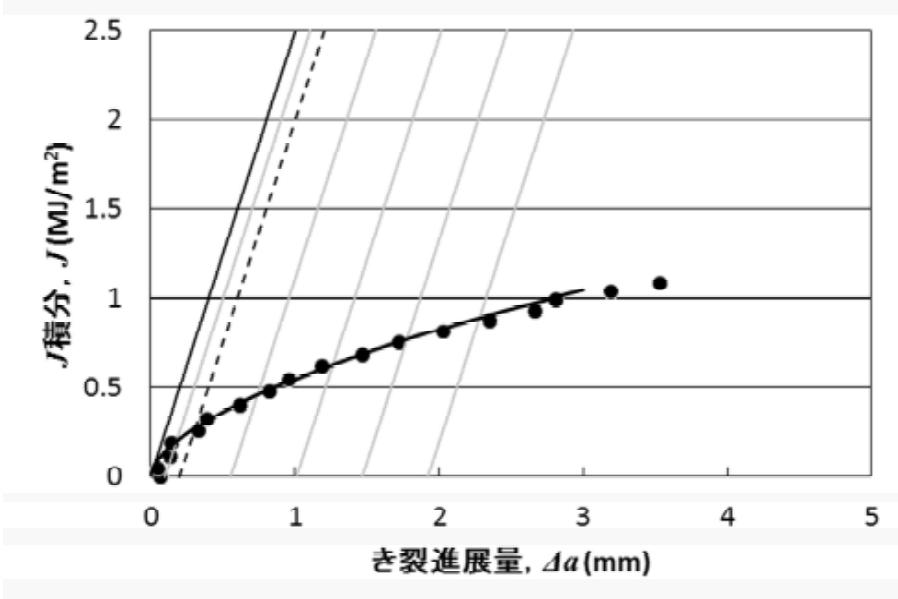


図 a18.9 市販材溶接金属部試験片 CW-3 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

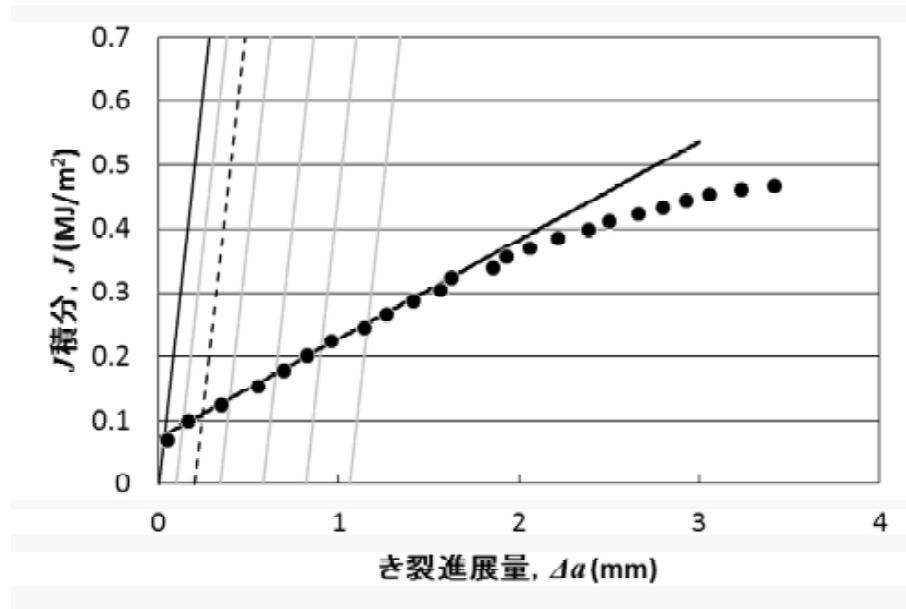


図 a18.10 解体材母材部試験片 MB-1 の J-R カーブ

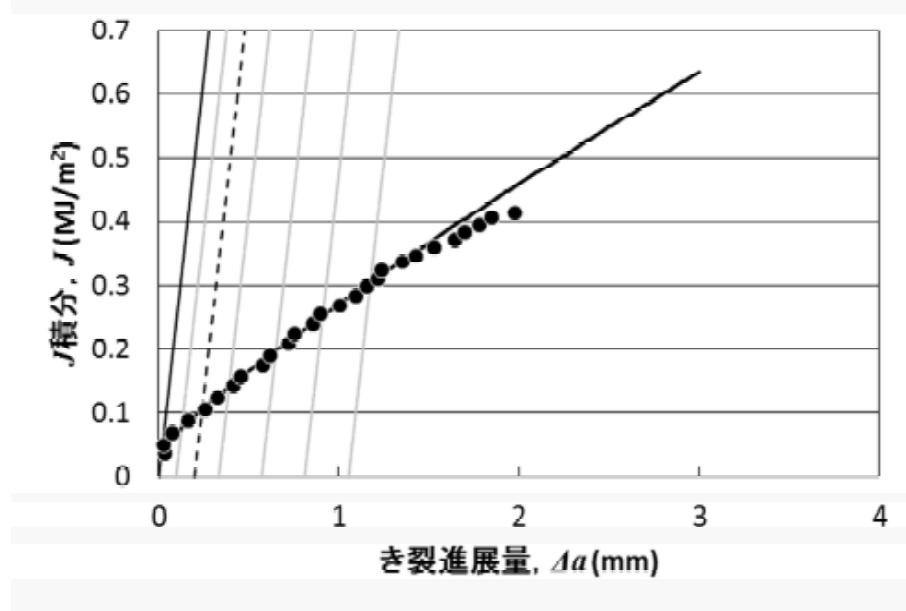


図 a18.11 解体材母材部試験片 MB-2 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

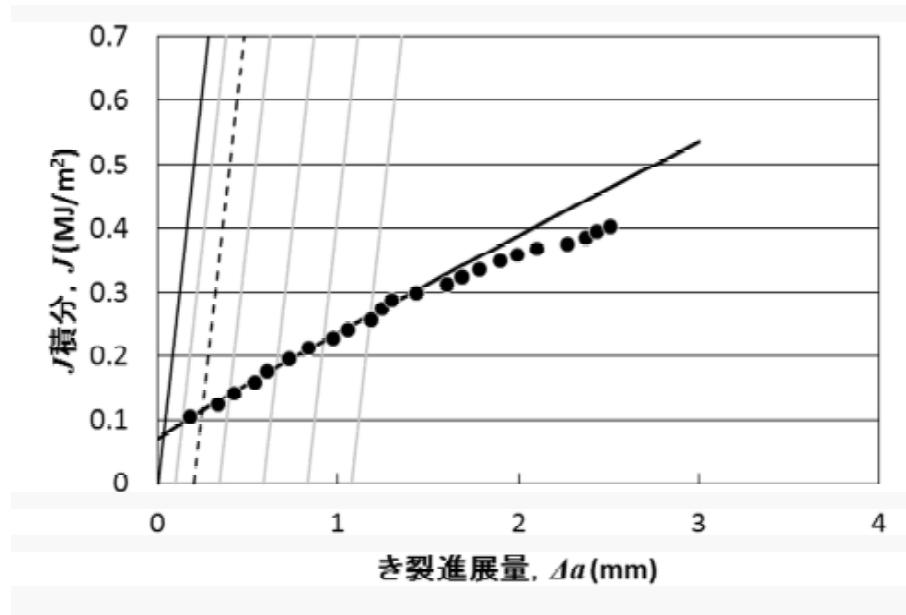


図 a18.12 解体材母材部試験片 MB-3 の J-R カーブ

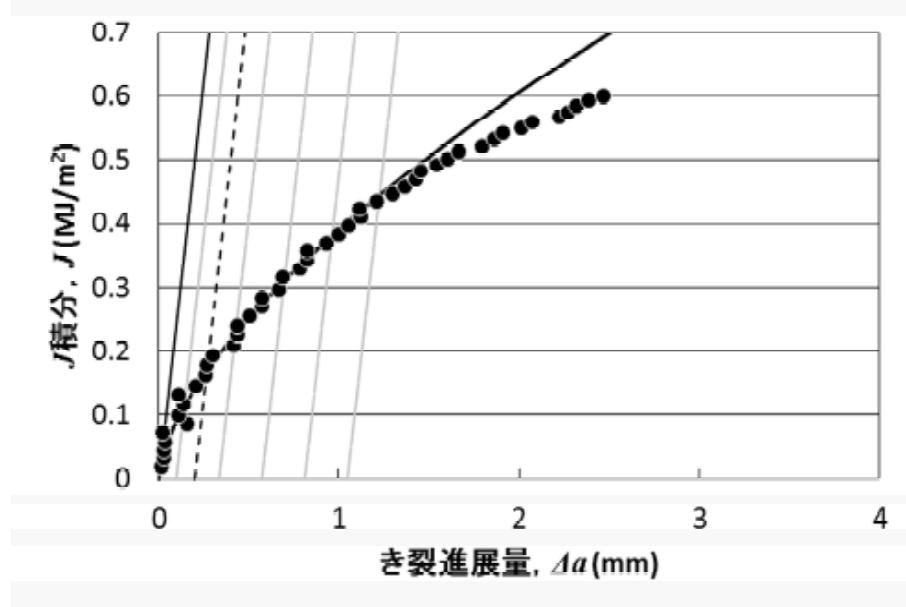


図 a18.13 解体材ボンド部試験片 MF-1 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

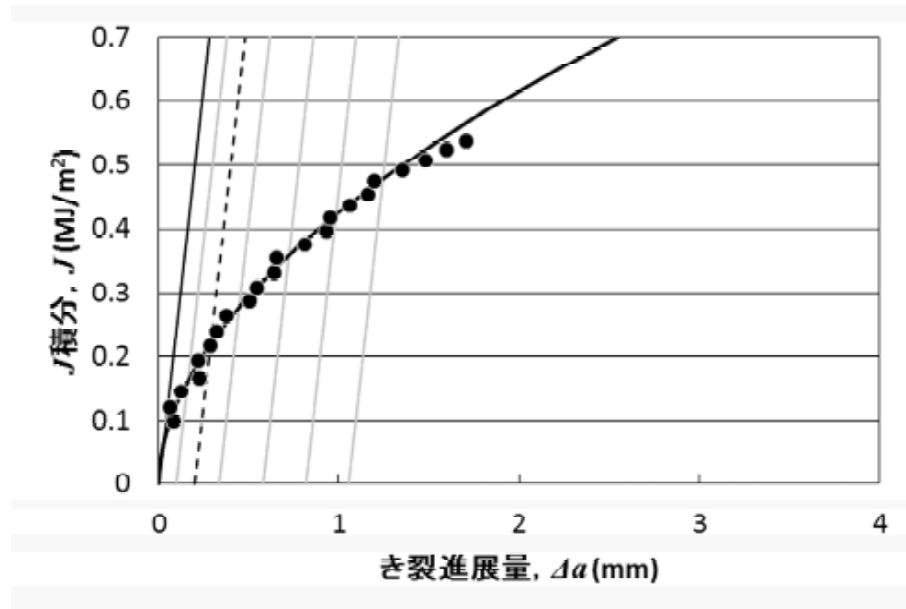


図 a18.14 解体材ボンド部試験片 MF-2 の J-R カーブ

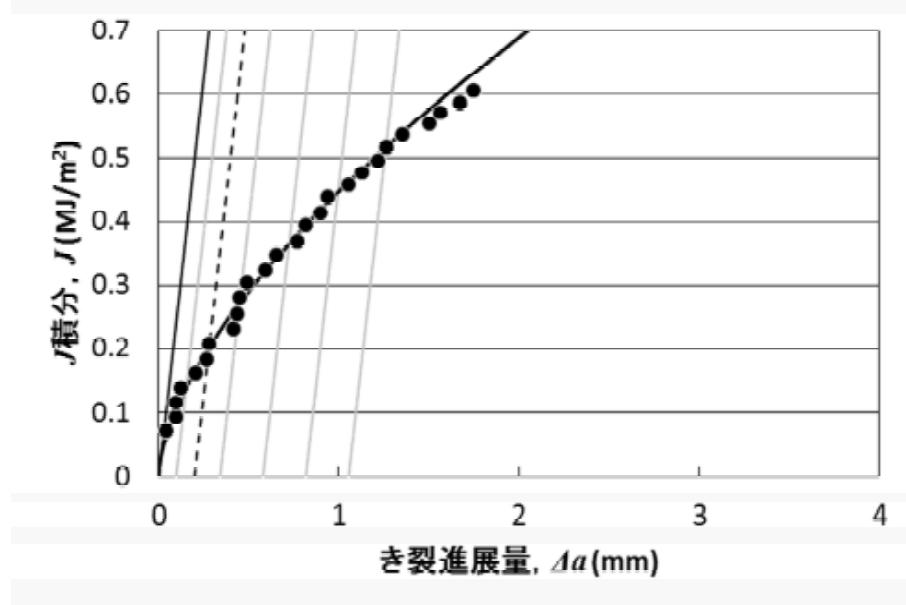


図 a18.15 解体材ボンド部試験片 MF-3 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

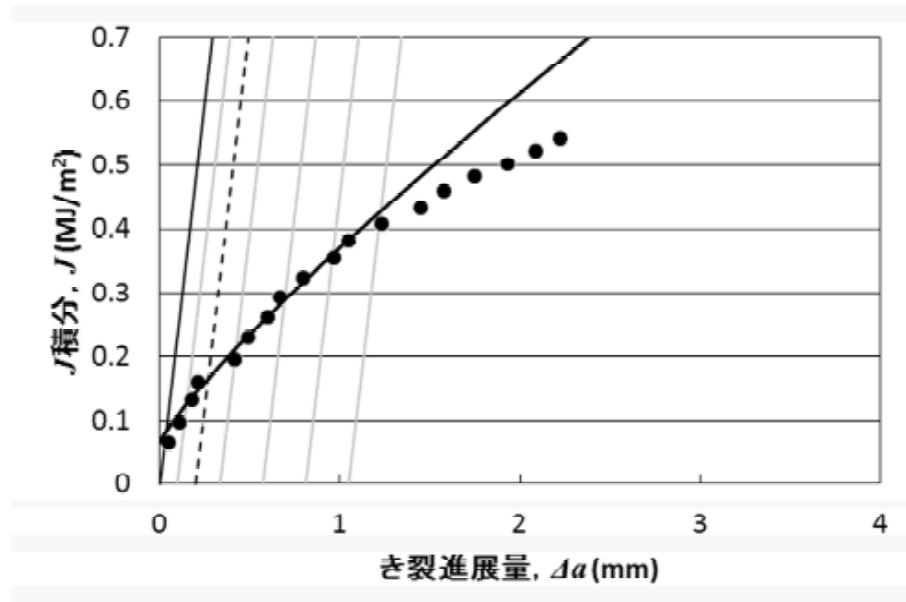


図 a18.16 解体材溶接金属部試験片 MW-1 の J-R カーブ

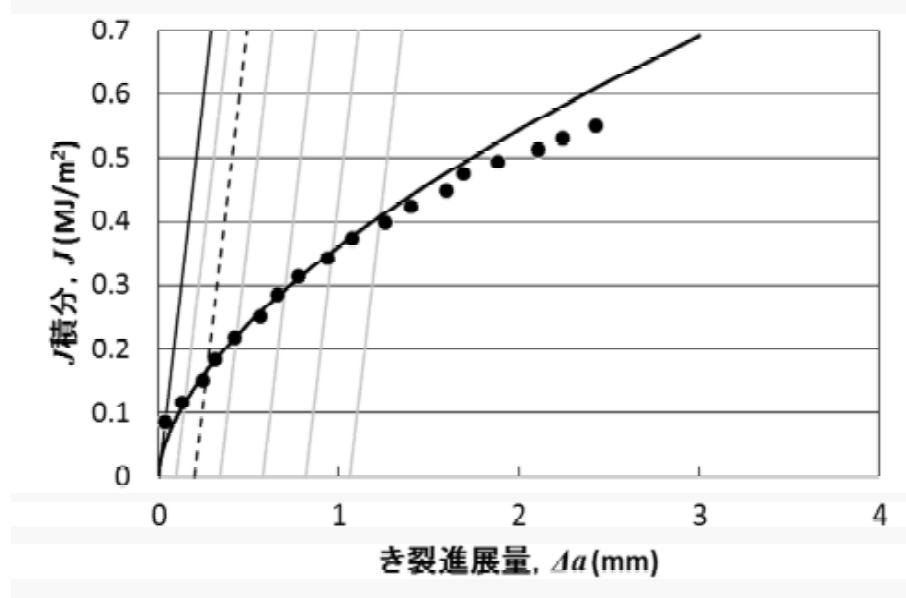


図 a18.17 解体材溶接金属部試験片 MW-2 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

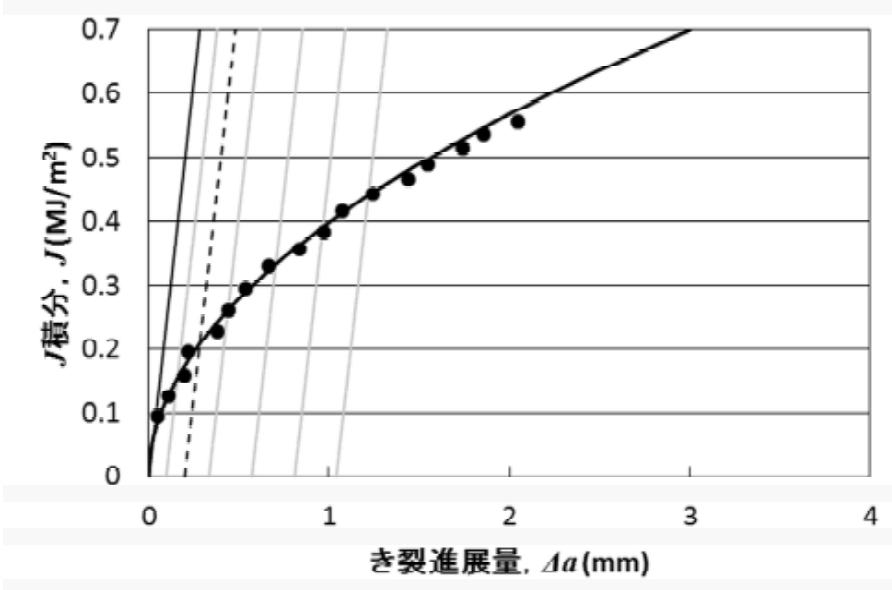


図 a18.18 解体材溶接金属部試験片 MW-3 の J-R カーブ

添付資料 18 J-R カーブ一覧

表 a18.1 式(6.13)中の変数一覧

試験片 No.	α	β	γ
CB-1	0.000	1.185	0.803
CB-2	0.000	1.173	0.715
CB-3	0.000	1.180	0.675
CF-2	0.000	0.896	0.739
CF-3	0.000	0.940	0.658
CF-4	0.000	0.974	0.553
CW-1	0.000	0.573	0.596
CW-2	0.000	0.570	0.644
CW-3	0.000	0.550	0.588
MB-1	0.072	0.155	0.998
MB-2	0.036	0.234	0.855
MB-3	0.071	0.165	0.942
MF-1	0.000	0.390	0.634
MF-2	0.000	0.426	0.532
MF-3	0.000	0.447	0.624
MW-1	0.065	0.306	0.850
MW-2	0.000	0.361	0.590
MW-3	0.000	0.397	0.515

添付資料 19 試験後の破面外観一覧



図 a19.1 市販材母材部試験片 CB-1 の破面外観



図 a19.2 市販材母材部試験片 CB-2 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧



図 a19.3 市販材母材部試験片 CB-3 の破面外観



図 a19.4 市販材ボンド部試験片 CF-2 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧



図 a19.5 市販材ボンド部試験片 CF-3 の破面外観



図 a19.6 市販材ボンド部試験片 CF-4 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧



図 a19.7 市販材溶接金属部試験片 CW-1 の破面外観



図 a19.8 市販材溶接金属部試験片 CW-2 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧



図 a19.9 市販材溶接金属部試験片 CW-3 の破面外観

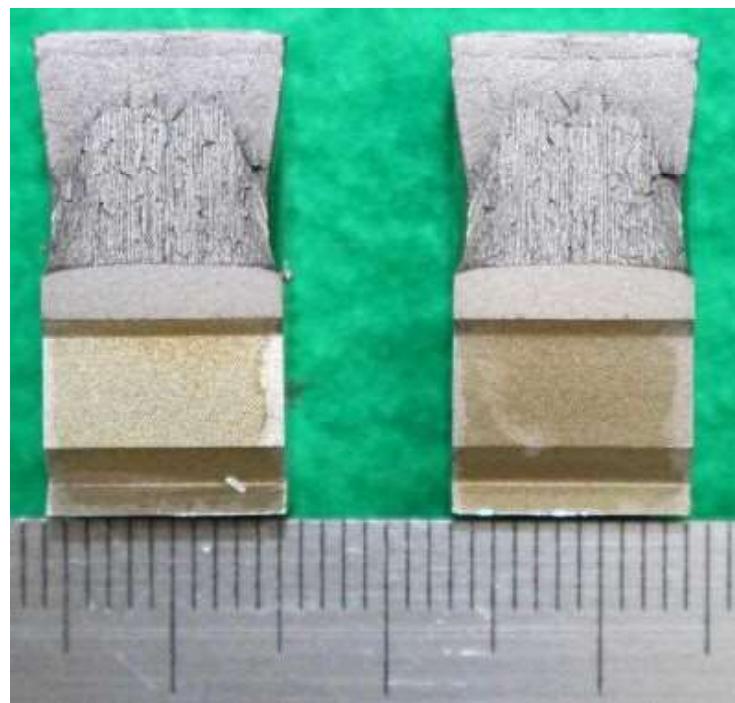


図 a19.10 解体材母材部試験片 MB-1 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧



図 a19.11 解体材母材部試験片 MB-2 の破面外観



図 a19.12 解体材母材部試験片 MB-3 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧



図 a19.13 解体材ボンド部試験片 MF-1 の破面外観

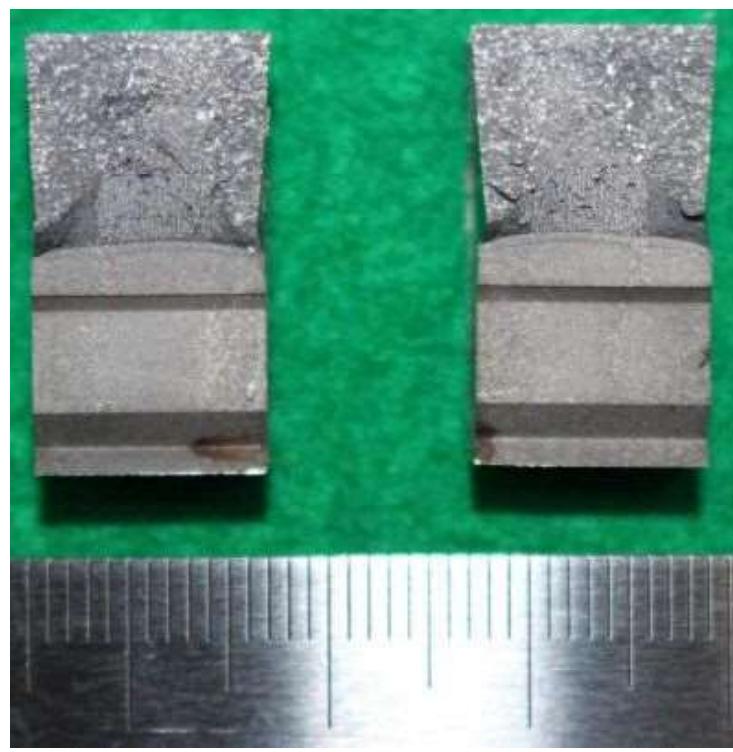


図 a19.14 解体材ボンド部試験片 MF-2 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧

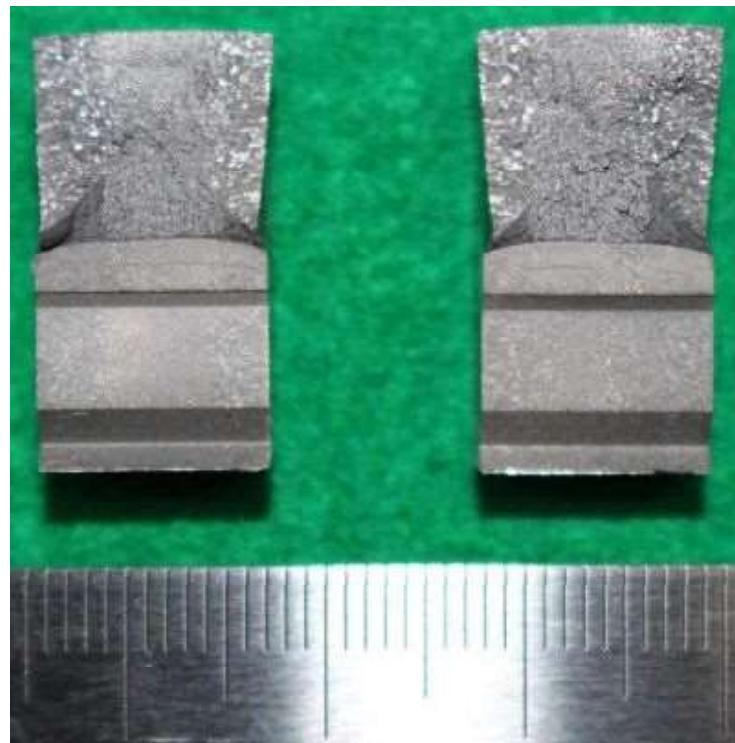


図 a19.15 解体材ボンド部試験片 MF-3 の破面外観



図 a19.16 解体材溶接金属部試験片 MW-1 の破面外観

添付資料 19 試験後の破面外観一覧

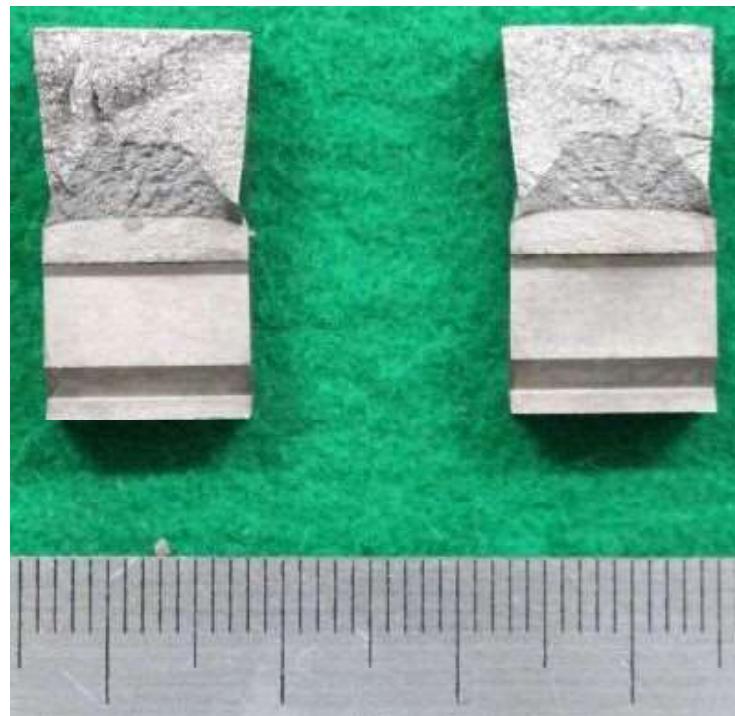


図 a19.17 解体材溶接金属部試験片 MW-2 の破面外観



図 a19.18 解体材溶接金属部試験片 MW-3 の破面外観

添付資料 20 疲労予き裂形状拡大写真一覧



図 a20.1 市販材母材部試験片 CB-1 の疲労予き裂形状



図 a20.2 市販材母材部試験片 CB-2 の疲労予き裂形状



図 a20.3 市販材母材部試験片 CB-3 の疲労予き裂形状



図 a20.4 市販材ボンド部試験片 CF-2 の疲労予き裂形状



図 a20.5 市販材ボンド部試験片 CF-3 の疲労予き裂形状

添付資料 20 疲労予き裂形状拡大写真一覧



図 a20. 6 市販材ボンド部試験片 CF-4 の疲労予き裂形状



図 a20. 7 市販材溶接金属部試験片 CW-1 の疲労予き裂形状



図 a20. 8 市販材溶接金属部試験片 CW-2 の疲労予き裂形状



図 a20. 9 市販材溶接金属部試験片 CW-3 の疲労予き裂形状



図 a20. 10 解体材母材部試験片 MB-1 の疲労予き裂形状

添付資料 20 疲労予き裂形状拡大写真一覧



図 a20.11 解体材母材部試験片 MB-2 の疲労予き裂形状



図 a20.12 解体材母材部試験片 MB-3 の疲労予き裂形状



図 a20.13 解体材ボンド部試験片 MF-1 の疲労予き裂形状



図 a20.14 解体材ボンド部試験片 MF-2 の疲労予き裂形状



図 a20.15 解体材ボンド部試験片 MF-3 の疲労予き裂形状

添付資料 20 疲労予き裂形状拡大写真一覧



図 a20.16 解体材溶接金属部試験片 MW-1 の疲労予き裂形状



図 a20.17 解体材溶接金属部試験片 MW-2 の疲労予き裂形状



図 a20.18 解体材溶接金属部試験片 MW-3 の疲労予き裂形状

添付資料 21 延性き裂先端トレース画像一覧

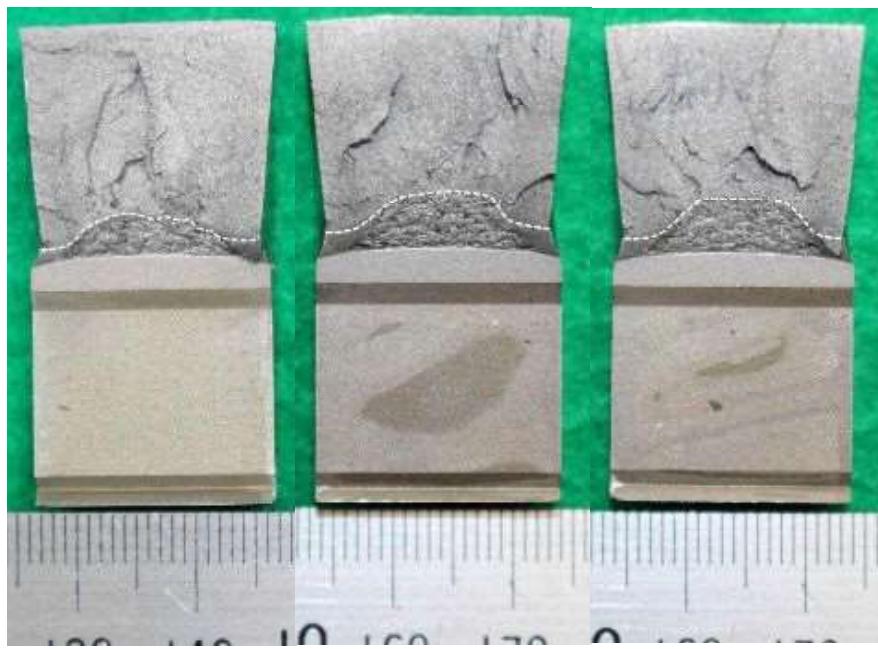


図 a21.1 市販材母材部試験片 CB 材の延性き裂先端トレース画像
(左から CB-1, CB-2, CB-3)

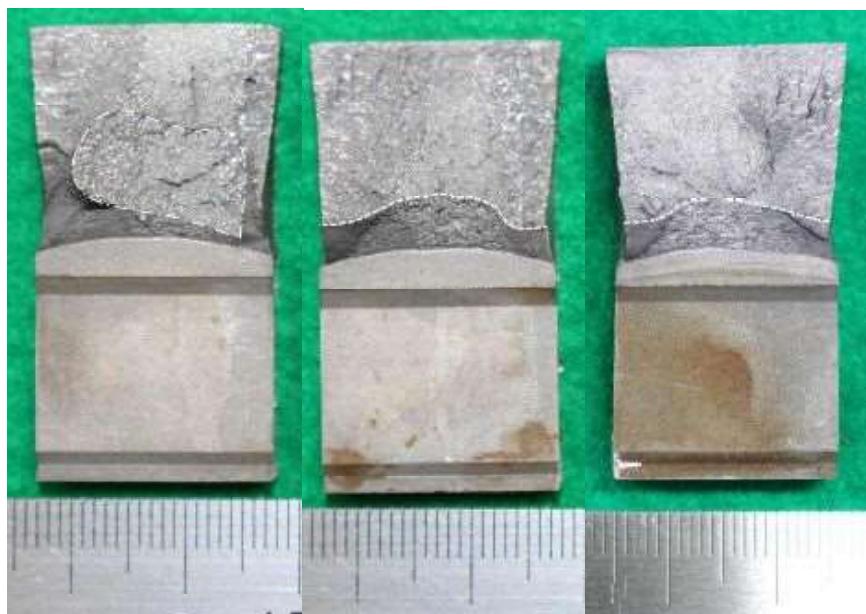


図 a21.2 市販材ボンド部試験片 CF 材の延性き裂先端トレース画像
(左から CF-2, CF-3, CF-4。CF-2 の破線は脆性破面を示す。)

添付資料 21 延性き裂先端トレース画像一覧

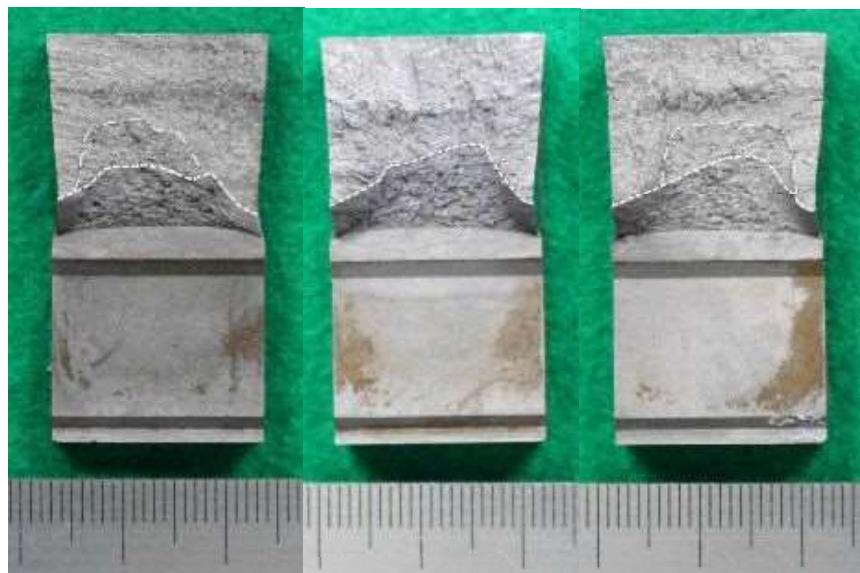


図 a21.3 市販材溶接金属部試験片 CW 材の延性き裂先端トレース画像
(左から CW-1, CW-2, CW-3。CW-1,3 の破線は脆性破面を示し点線は延性破面を示す。)



図 a21.4 解体材母材部試験片 MB 材の延性き裂先端トレース画像

添付資料 21 延性き裂先端トレース画像一覧

(左から MB-1, MB-2, MB-3)

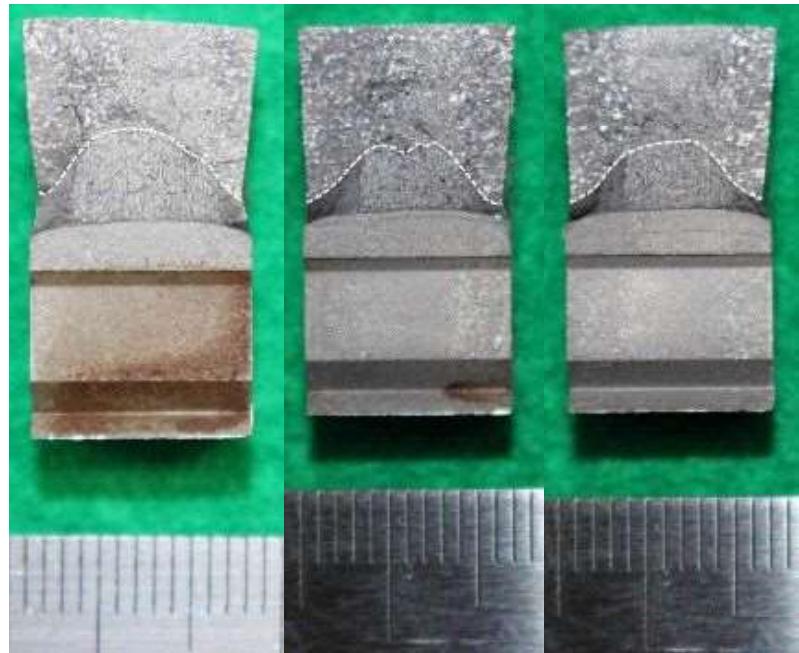


図 a21.5 解体材ボンド部試験片 MB 材の延性き裂先端トレース画像

(左から MF-1, MF-2, MF-3)

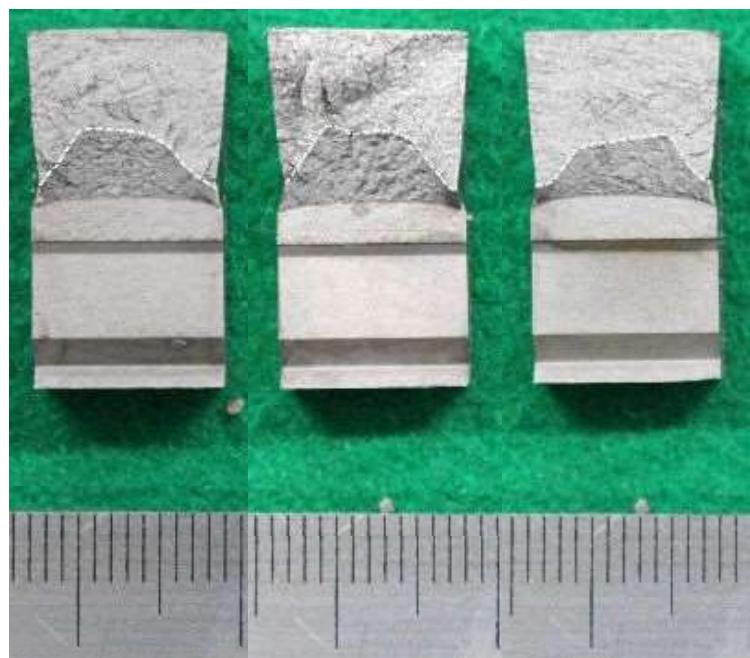


図 a21.6 解体材溶接金属部試験片 MB 材の延性き裂先端トレース画像

(左から MW-1, MW-2, MW-3)

添付資料 22 CTOD の板厚方向分布と各規格における CTOD の物理的意味

a22.1 CTOD の板厚方向分布

田川らは SM400B 材に室温で開口変形を与えた後に、その切断面を光学顕微鏡によって板厚方向の CTOD 分布を実測した^[a2]。図 a22.1(c)にその実測結果を示すが、板厚中心と表面近傍では 3 倍以上の差異が生じていることが確認された。図 a22.1(a)および(b)がそれぞれ板厚中心および表面近傍におけるき裂先端の切断面写真である。このことから、a22.2において種々の規格が板厚方向に分布している CTOD をどのように考慮しているか述べる。

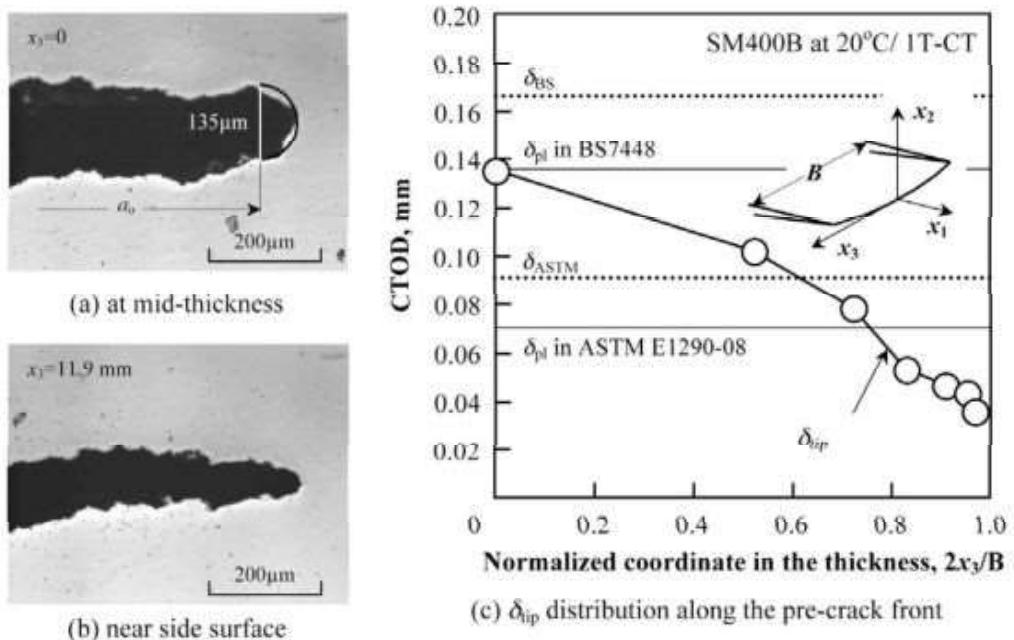


図 a22.1 CTOD の板厚方向分布^[a2]

a22.2 各規格における CTOD の物理的意味

CTOD を算出する手法には大別して以下の 2 つがある。

- (1) J 積分から換算して求める手法 : ASTM E1820^[a3], ASTM E1290^[a4]
- (2) 塑性ヒンジモデルに基く手法 : ISO12135(2002)^[a5], BS7448^[a6]

(1)の手法は試験で得られる荷重・荷重線変位曲線の面積を用いて得る J 積分から換算するために、得られる CTOD は板厚方向の平均値とみなすことができる。一方で、塑性ヒンジモデルは板厚中央の CTOD を求めるために作られているため、得られる CTOD は板厚中央の CTOD とみなすことができる。図 a22.1 が示すように、確かに(1)の手法に基く CTOD (図中の δ_{pl} in ASTM1290-08) は板厚平均値に近い値になっており、(2)の手法に基く CTOD (図中の δ_{pl} in BS7448) は板厚中央の値に近い値になっている。

上述したように規格によって得られる CTOD の物理的意味は異なっており、FAD 評価等に CTOD を用いる際はその事実を認識した上で適切に使用する必要があると考える。

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

a23.1 δ -R カーブ法の概要

ISO12135(2002)^[a5]には δ -R カーブ法による延性き裂進展開始時 CTOD, δ_{IC} を求める方法が記載されている。この手法は 3.6.3 で述べた J_{IC} を求める手法とほぼ同様であり、破壊革性値として J 積分ではなく CTOD を用いる手法であると理解してよい。以下に概要を述べる。

a23.1.1 延性き裂進展量 Δa の算出

6.6.3.1 と同様である。

a23.1.2 CTOD, δ の算出

除荷開始点における δ は、次式で表される。

$$\delta = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{\sigma B B_N W^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{\sigma - \nu^2}{R_{p0.2} E} \right] \delta = \frac{\partial(\Delta a) / \partial W - a_0 / V_p}{\partial(\Delta a) / \partial W} z \quad (a23.1)$$

ここで、 z は試験片表面からナイフエッジまでの距離であるが、今年度の試験では $z=0$ である。 V_p は図 a23.1 に示すように除荷時のクリップゲージ変位（開口変位）から弾性クリップゲージ変位を差し引いたものである。弾性係数（図 a23.1 中の c の傾き）は、F-V 関係における原点と弾性限界とを結ぶ線分の傾き（図 a23.1 中の OA）と等しい。 $g_1(a_0/W)$ は、 a_0/W に関する係数で、ISO12135(2002) Annex D^[a5] で与えられている。

a23.1.3 δ -R カーブの作成

作成方法は J-R カーブと同様であり、変更点を以下に述べる。図 a23.2 中の Δa_{max} は試験片の形状によって定まる変数であり、以下の式で表される。

$$\Delta a_{max} = \partial W - a_0 \quad (a23.2)$$

次に、図 a23.2 中の線分 a のことを construction line と言い、以下の式で表される。

$$\delta = R_m / R_{p0.2} \Delta a \quad (a23.3)$$

ここで、 R_m および $R_{p0.2}$ はそれぞれ試験温度における引張強さおよび 0.2% 耐力である。 R_m , $R_{p0.2}$, Δa の単位をそれぞれ [MPa], [MPa], [mm] とすると、式 (a23.3) から求められる δ の単位は [m] となる。 δ -R カーブは 1° ~ 4° の 4 つの領域中のプロットのみを用いて以下の式に最もフィットする曲線として定義される。

$$\delta = \alpha + \beta \Delta a^\gamma \quad (a23.4)$$

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

ここで、 α , β , γ は係数であり、 $\alpha\beta\gamma \geq 0$ かつ $0 \leq \gamma \leq i$ でなければならない。本実験では、最小二乗法により3つの係数を決定した。

a23. 1. 4 δ_{IC} の候補値 δ_i の算出

6. 6. 3. 4. 1 と同様である。

a23. 1. 5 δ_i の δ_{IC} 認定条件

6. 6. 3. 4. 2 と同様であるが、条件(1)～(8)の中で変更点があるものだけを以下に記す。

- (2) δ -R カーブ形状に関する条件：(J_{IC} の候補を算出した点における δ -R 曲線の接線の傾き)
 $\leq 0.935 R_m / R_{p0.2}$
- (3) 平面歪状態成立条件： $30\delta_i \leq a_0$
- (4) 平面歪状態成立条件： $30\delta_i \leq B$
- (5) 平面歪状態成立条件： $30\delta_i \leq W - a_0$

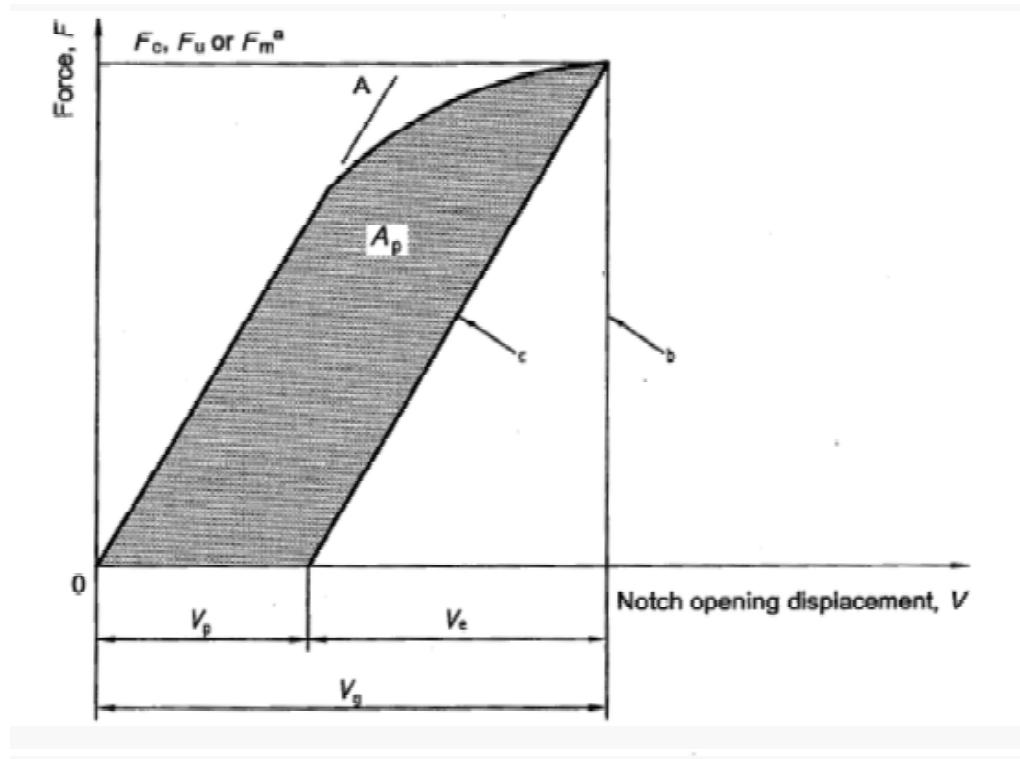


図 a23. 1 V_p の算出方法概念図^[a5]

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

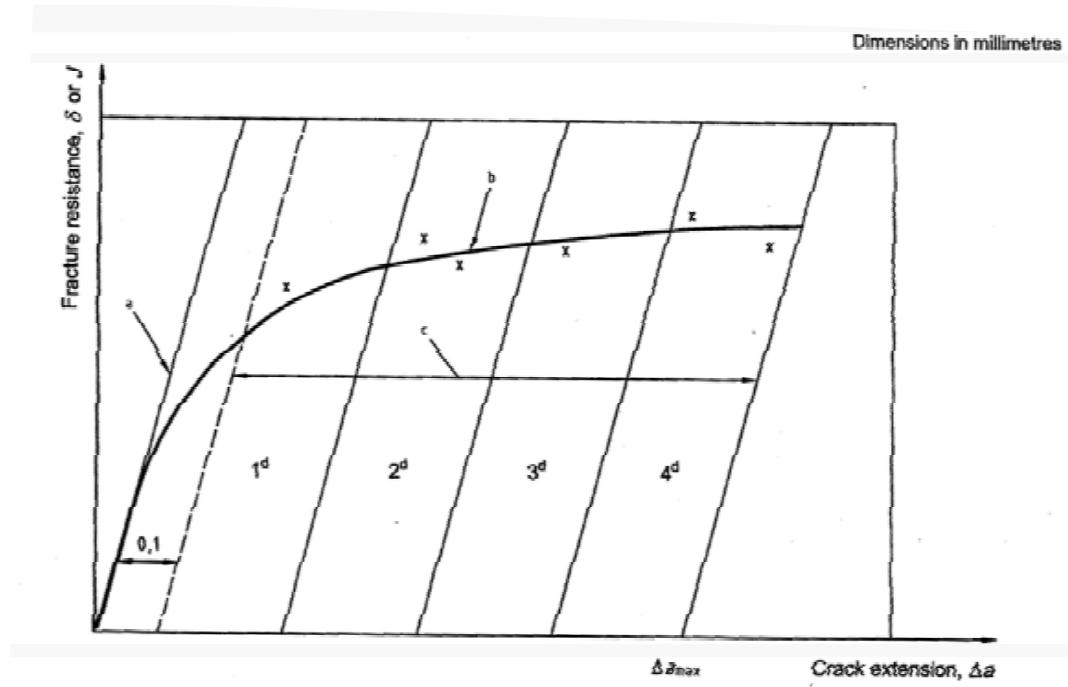


図 a23. 2 δ -R カーブの概念図^[a5]

a23. 2 δ_i の算出結果

市販材および解体材の母材部およびボンド部試験片について δ_i を算出した。 δ_i および δ_i の δ_{IC} 判定条件の判定結果一覧を表 a23. 1 に示す。また、各試験片の荷重-クリップゲージ変位関係 (F-V 関係) を図 a23. 3～図 a23. 14 に、 δ -R カーブを図 a23. 15～図 a23. 26 に示す。さらに、表 a23. 2 に各試験片の式 (a23. 4) 中の変数の値を示す。

得られた δ_{IC} は 3 つであり、そのうち最低値は解体材母材部試験片 MB-1, 3 の 0.099mm であった。この 0.099mm という CTOD 値は「LPG 貯槽指針 JGA 指-106-15」^[a7]において FAD 評価に用いるように規定されている HW490 の限界 CTOD 値 0.07mm より大きい。

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

表 a23.1 δ_i および δ_{IC} 判定結果一覧

切欠き位置	試験片No.	δ_{IC} 候補値 δ_i	条件(1)				判定条件				δ_{IC} mm	
			①	②	③	④	条件(2)	条件(3)	条件(4)	条件(5)	条件(6)	
市販材	母材部	CB-1 0.676	Valid	Invalid	Valid	Valid	Invalid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid
	ボンド部	CB-2 0.751	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid
	母材部	CB-3 0.798	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid
	ボンド部	CF-2 0.665	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Invalid
解体材	母材部	CF-3 0.714	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid
	ボンド部	CF-4 0.766	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Invalid
	母材部	MB-1 0.099	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	0.099
	ボンド部	MB-2 0.108	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Invalid
	母材部	MB-3 0.099	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	0.099
	ボンド部	MF-1 0.221	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	0.221
	母材部	MF-2 0.279	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Invalid
	ボンド部	MF-3 0.269	Valid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Invalid

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

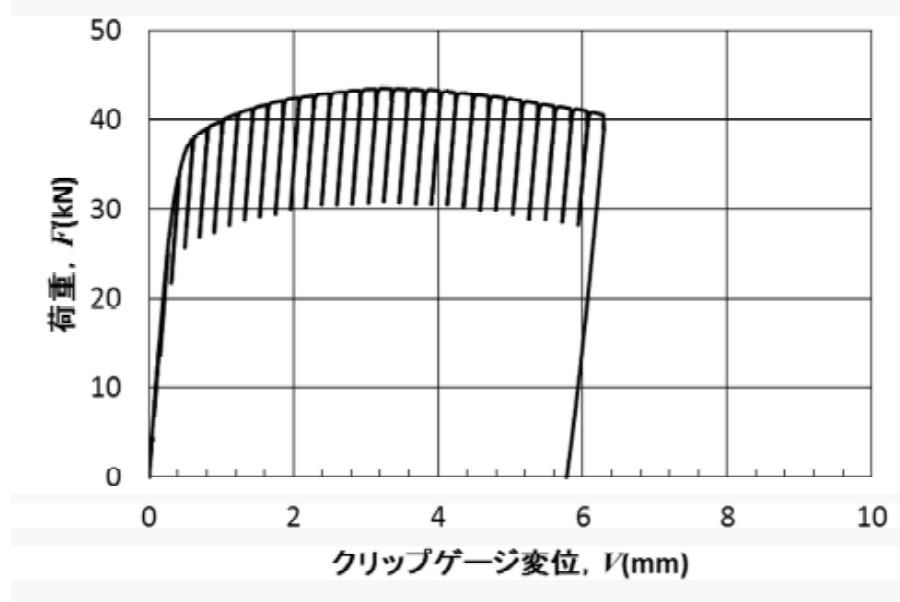


図 a23.3 市販材母材部試験片 CB-1 の荷重-クリップゲージ変位関係

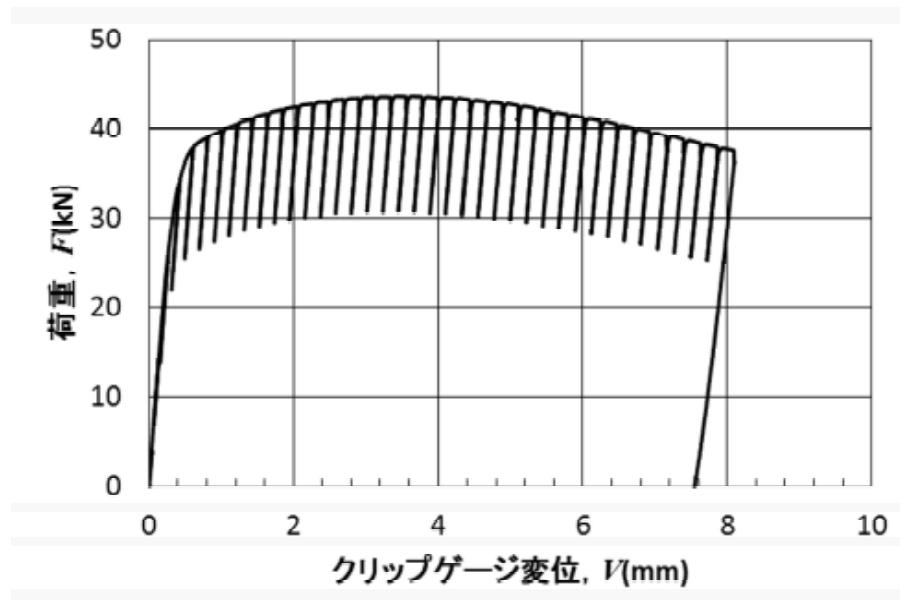


図 a23.4 市販材母材部試験片 CB-2 の荷重-クリップゲージ変位関係

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

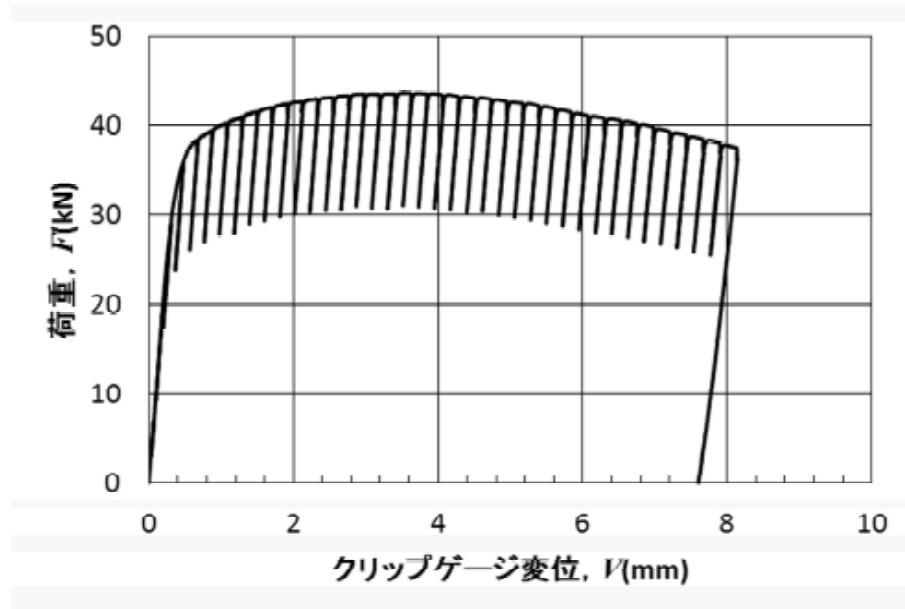


図 a23.5 市販材母材部試験片 CB-3 の荷重-クリップゲージ変位関係

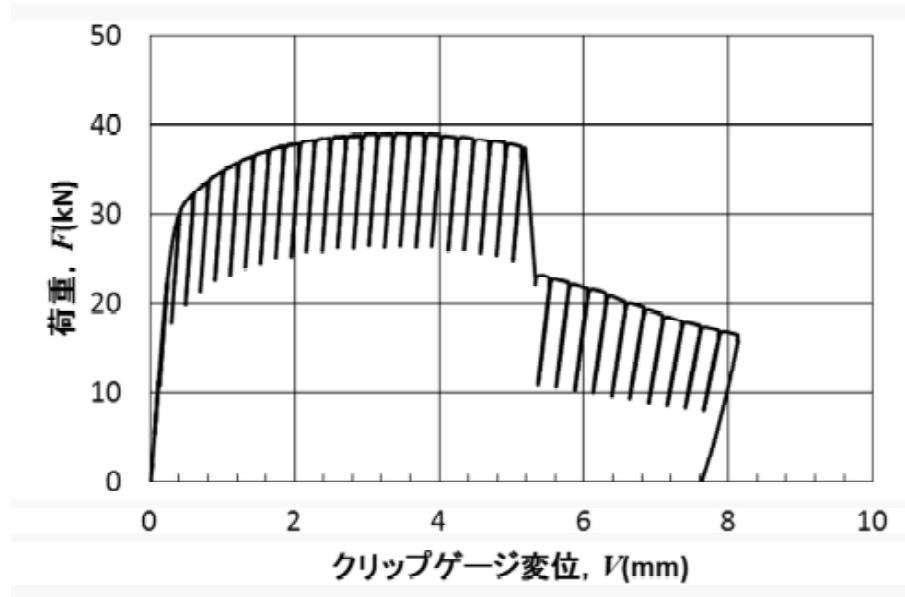


図 a23.6 市販材ボンド部試験片 CF-2 の荷重-クリップゲージ変位関係

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

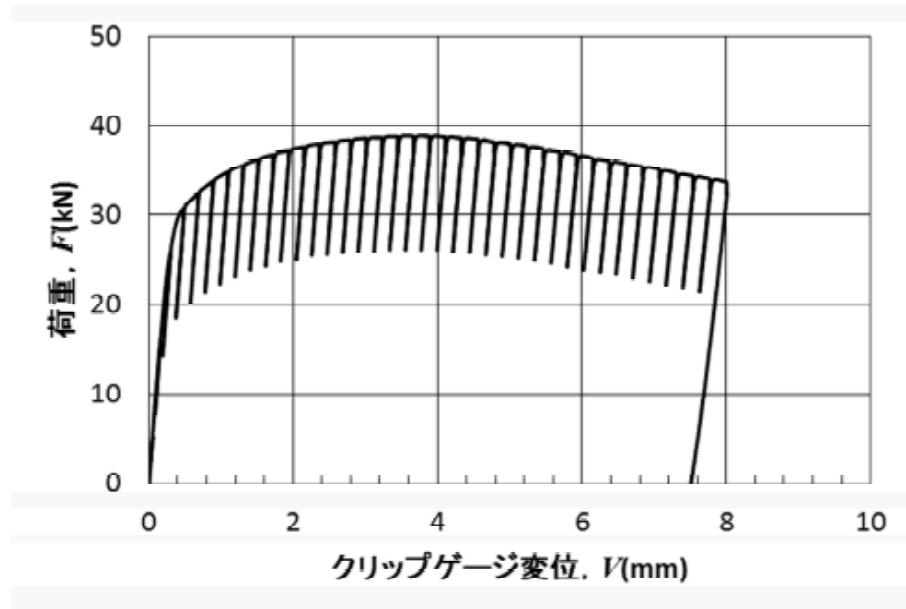


図 a23.7 市販材ボンド部試験片 CF-3 の荷重-クリップゲージ変位関係

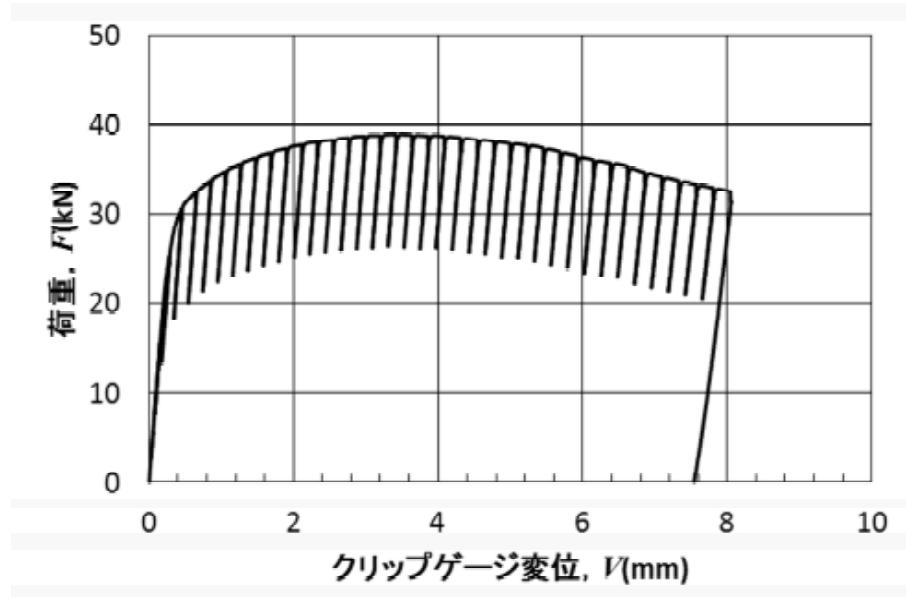
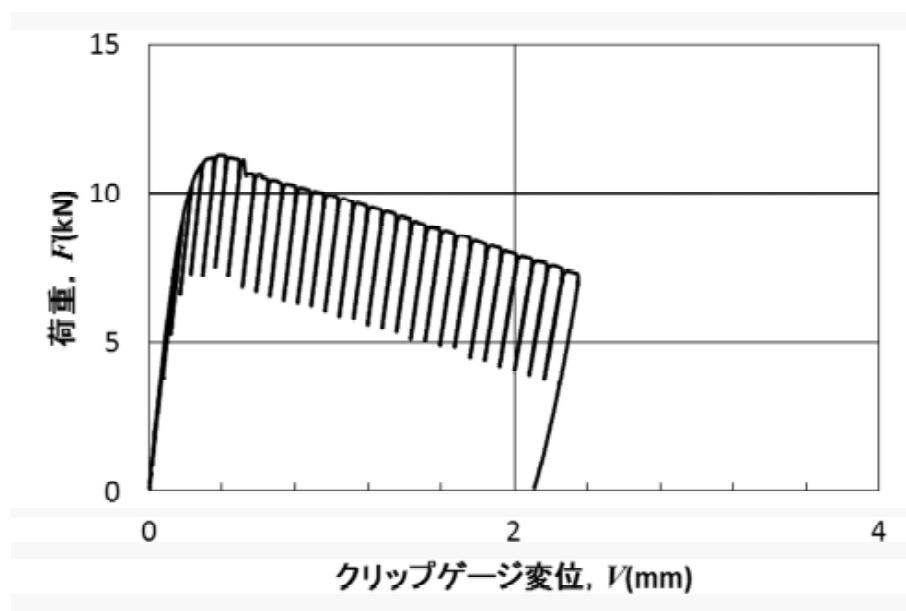
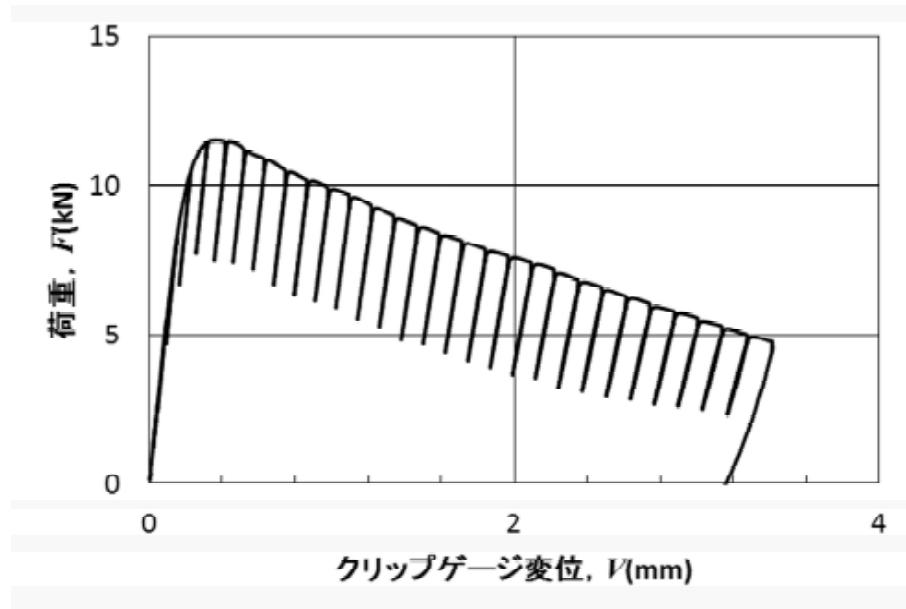


図 a23.8 市販材ボンド部試験片 CF-4 の荷重-クリップゲージ変位関係

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用



添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

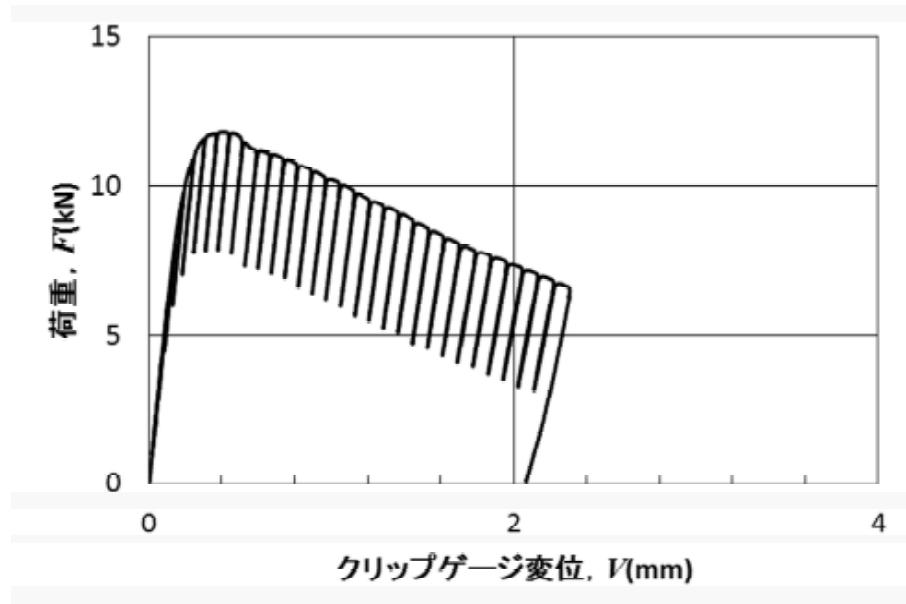


図 a23.11 解体材母材部試験片 MB-3 の荷重-クリップゲージ変位関係

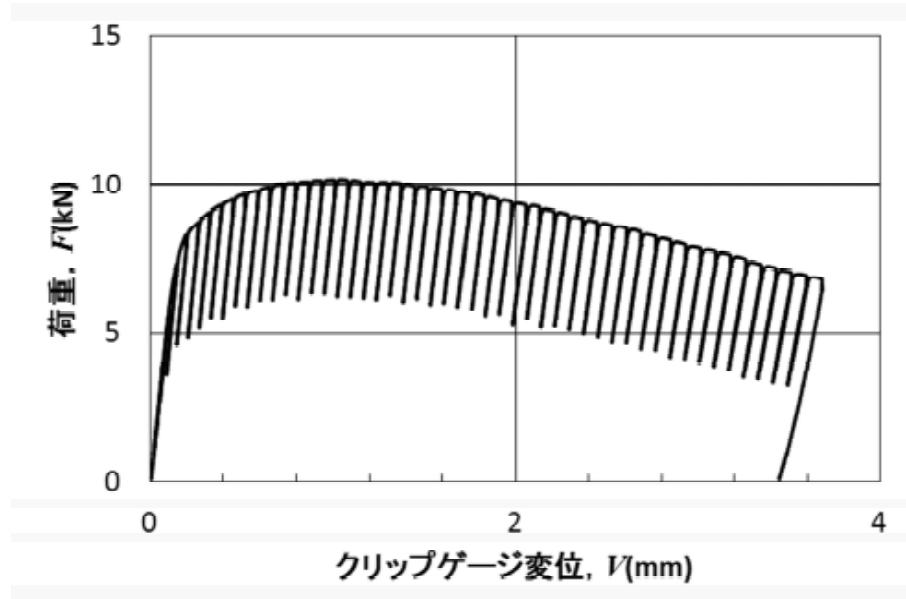


図 a23.12 解体材ボンド部試験片 MF-1 の荷重-クリップゲージ変位関係

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

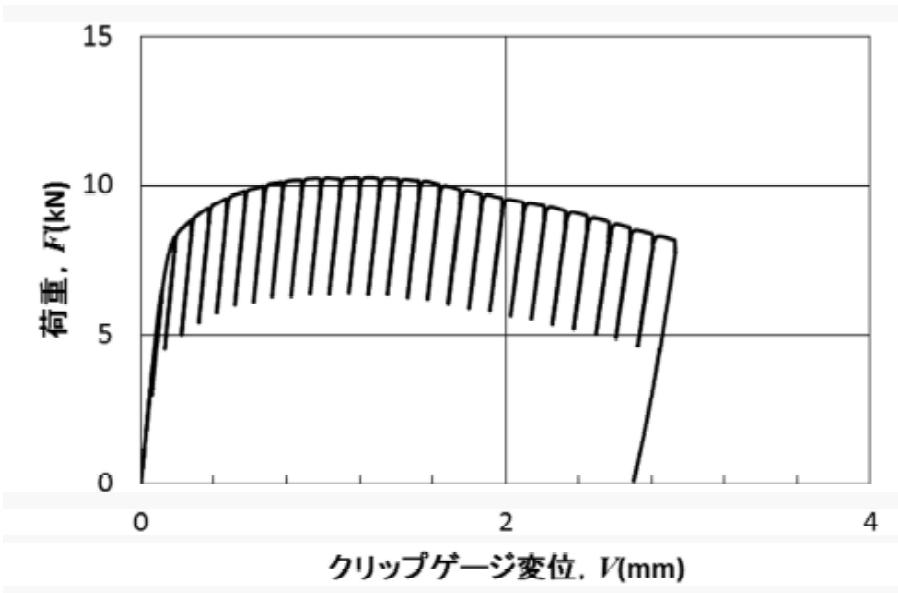


図 a23.13 解体材ボンド部試験片 MF-2 の荷重-クリップゲージ変位関係

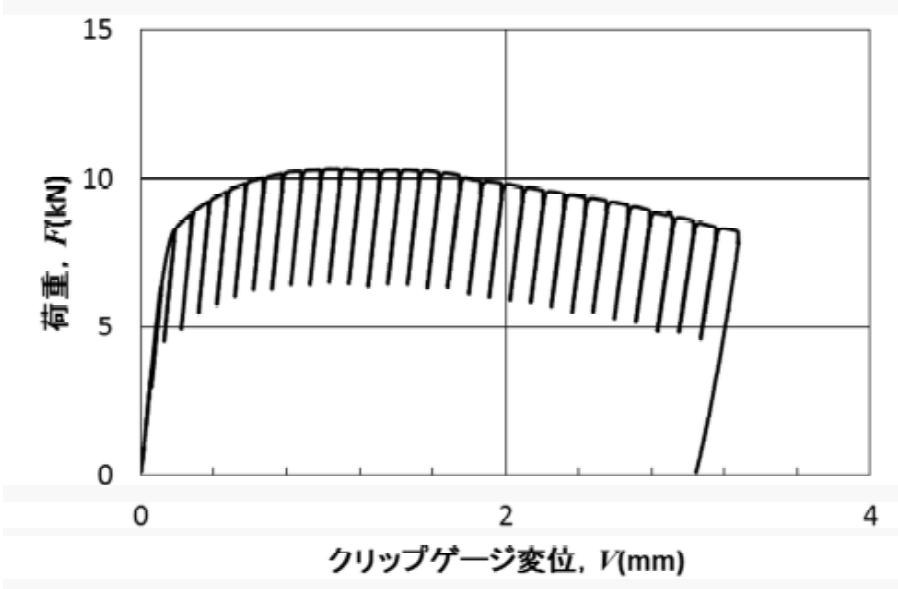


図 a23.14 解体材ボンド部試験片 MF-3 の荷重-クリップゲージ変位関係

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

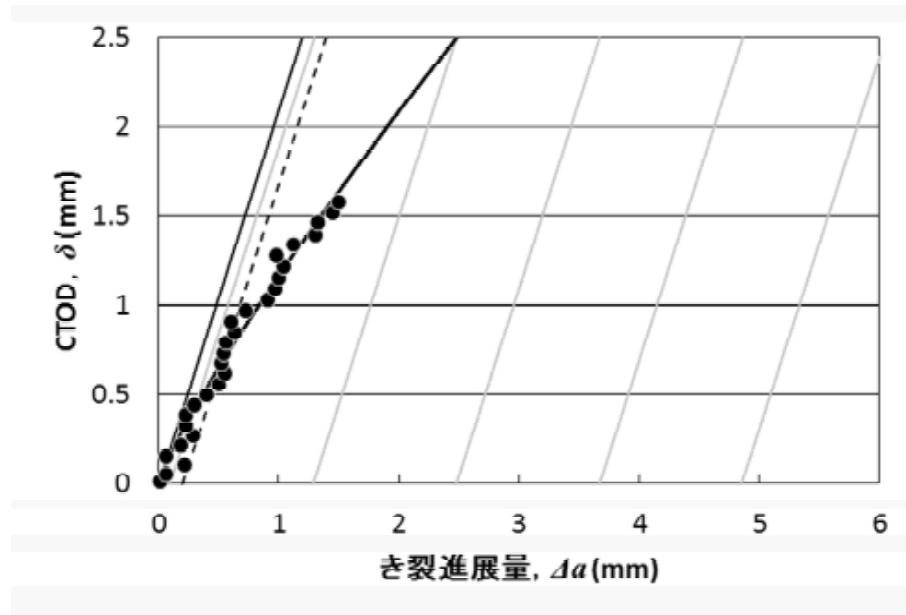


図 a23.15 市販材母材部試験片 CB-1 の δ -R カーブ

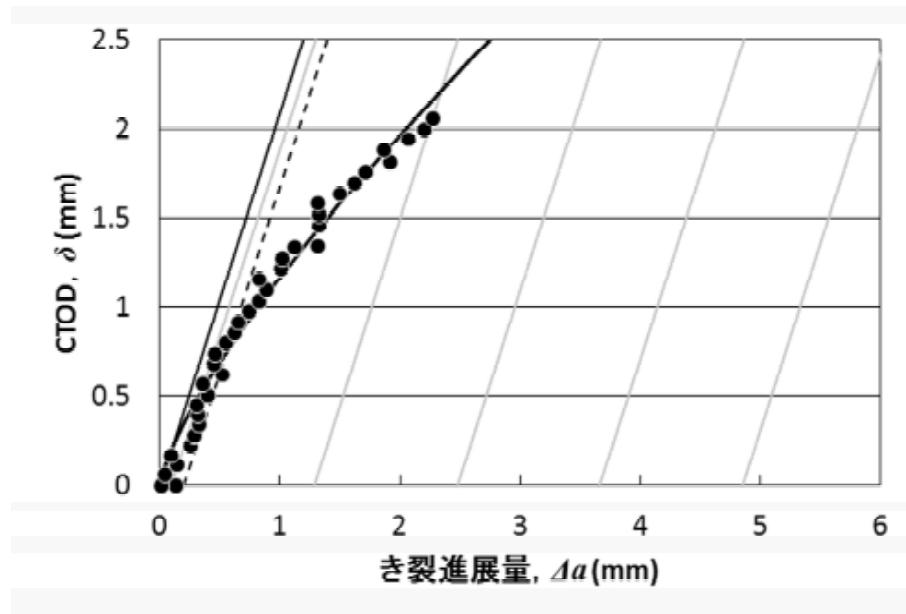


図 a23.16 市販材母材部試験片 CB-2 の δ -R カーブ

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

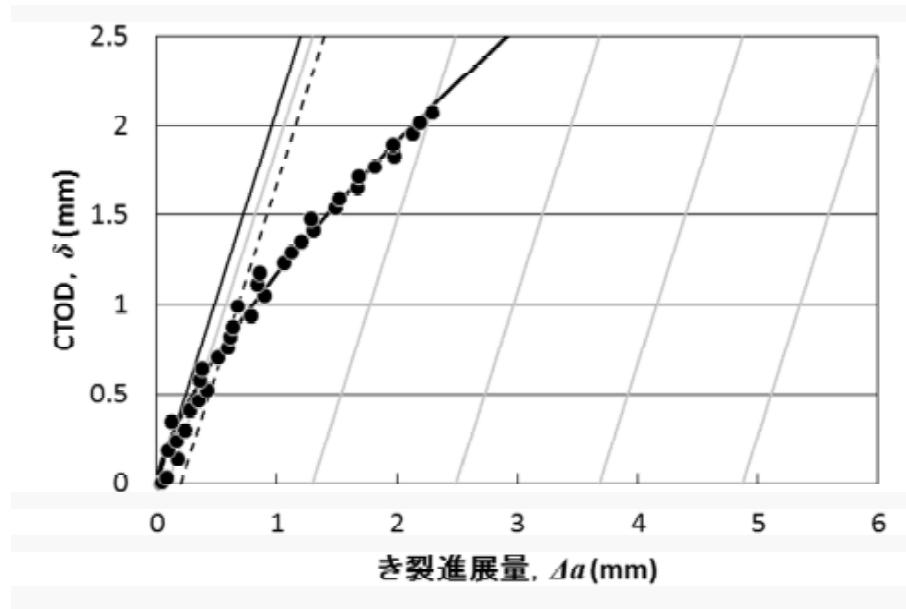


図 a23.17 市販材母材部試験片 CB-3 の δ -R カーブ

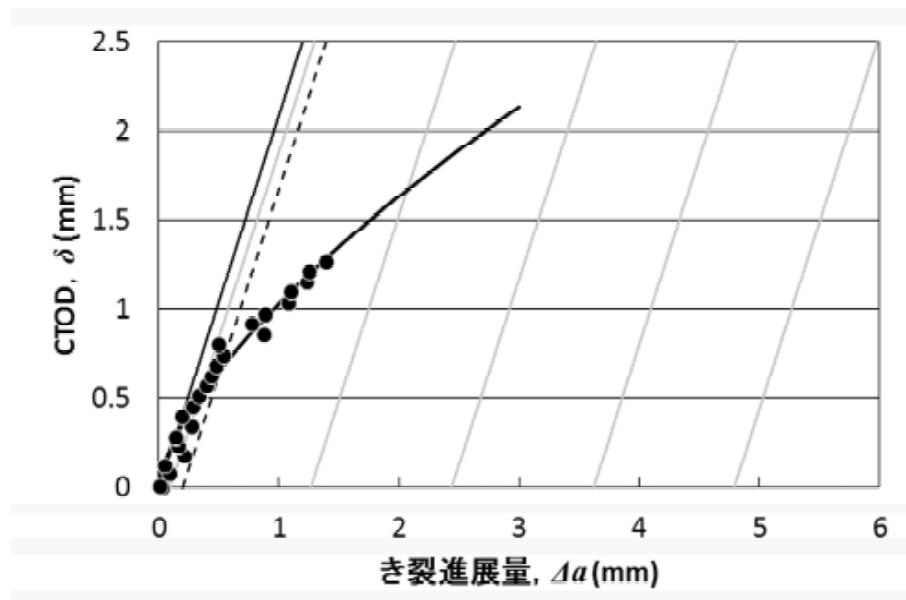


図 a23.18 市販材ボンド部試験片 CF-2 の δ -R カーブ

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

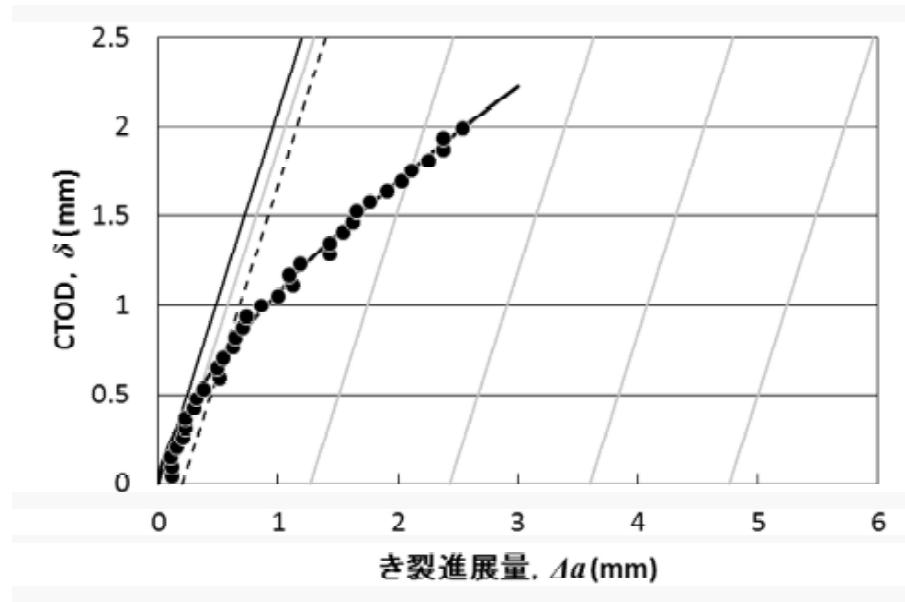


図 a23.19 市販材ボンド部試験片 CF-3 の δ -R カーブ

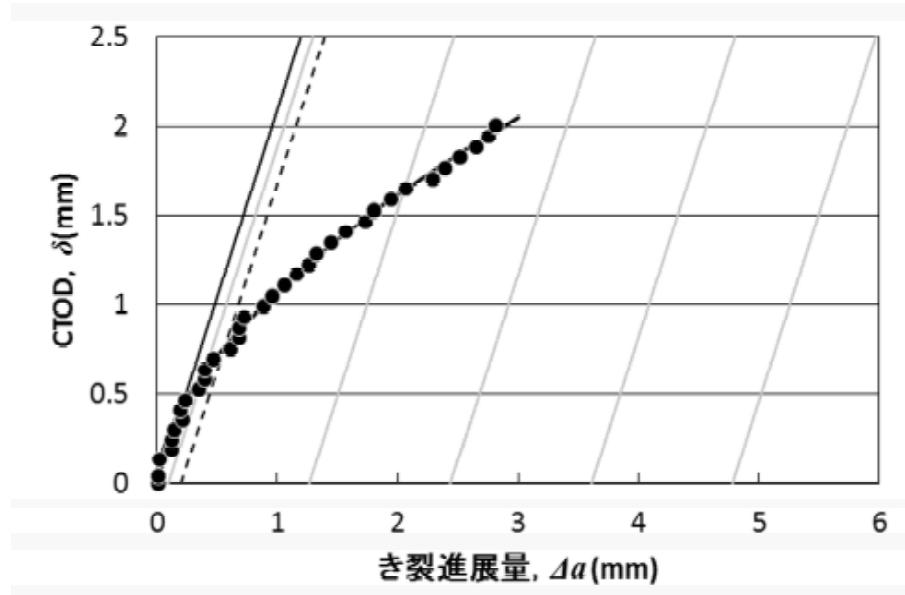


図 a23.20 市販材ボンド部試験片 CF-4 の δ -R カーブ

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

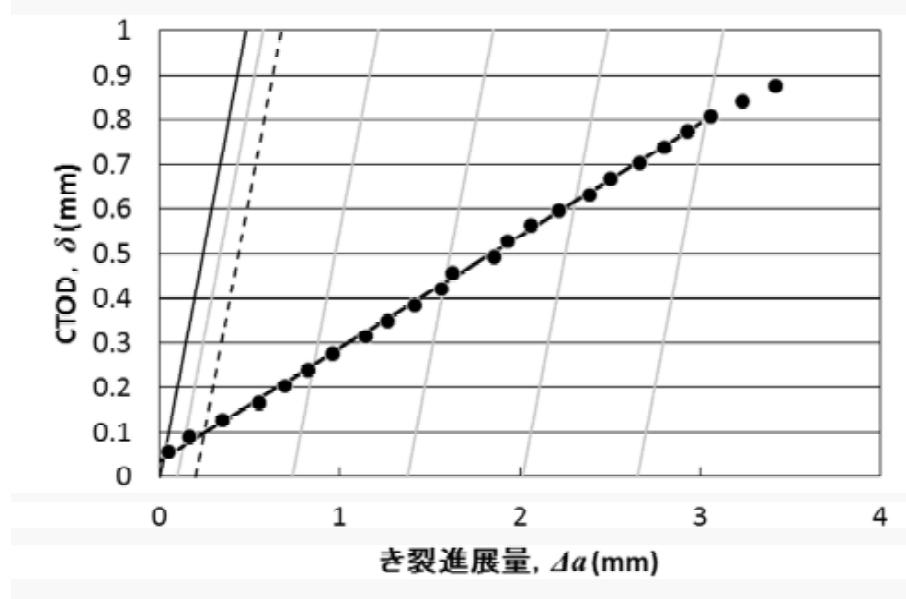


図 a23.21 解体材母材部試験片 MB-1 の δ -R カーブ

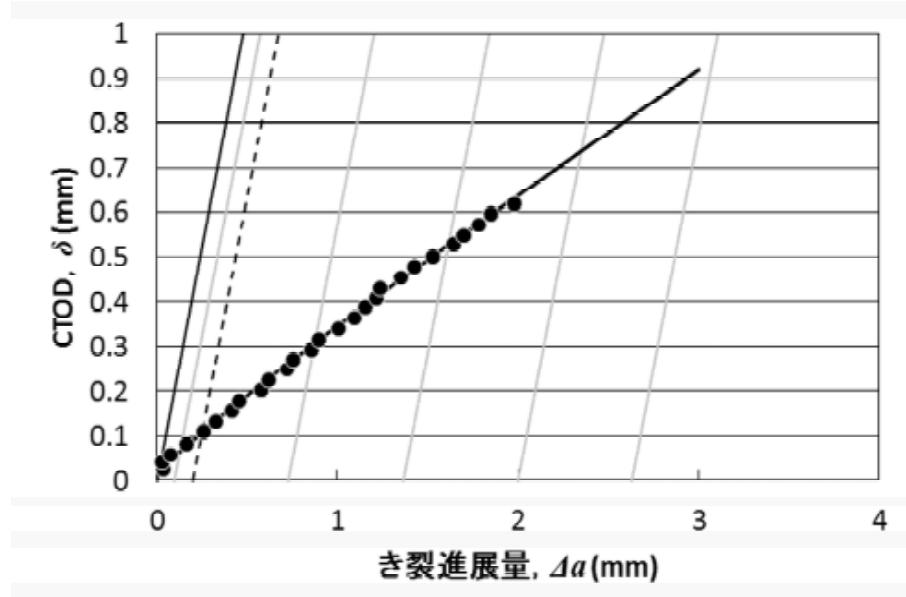


図 a23.22 解体材母材部試験片 MB-2 の δ -R カーブ

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

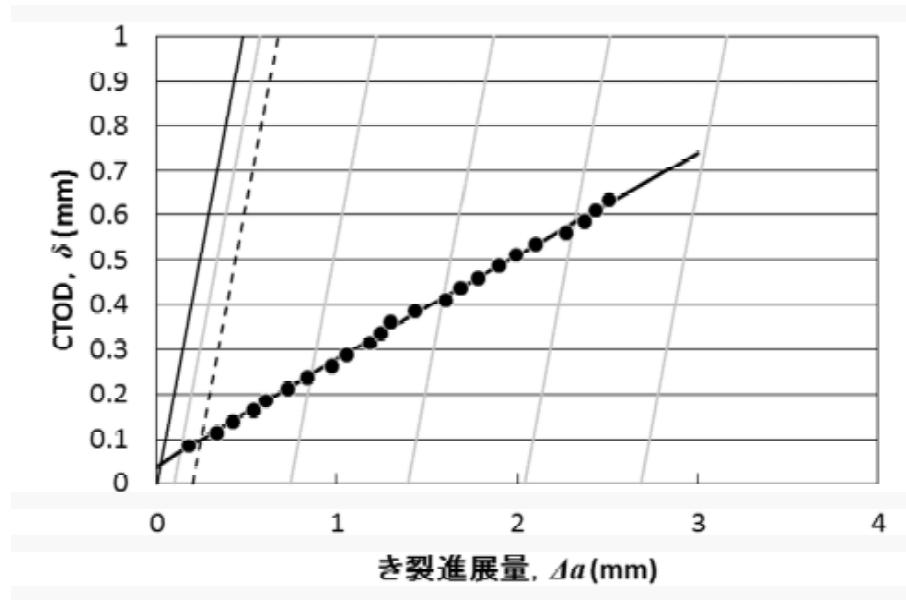


図 a23.23 解体材母材部試験片 MB-3 の δ -R カーブ

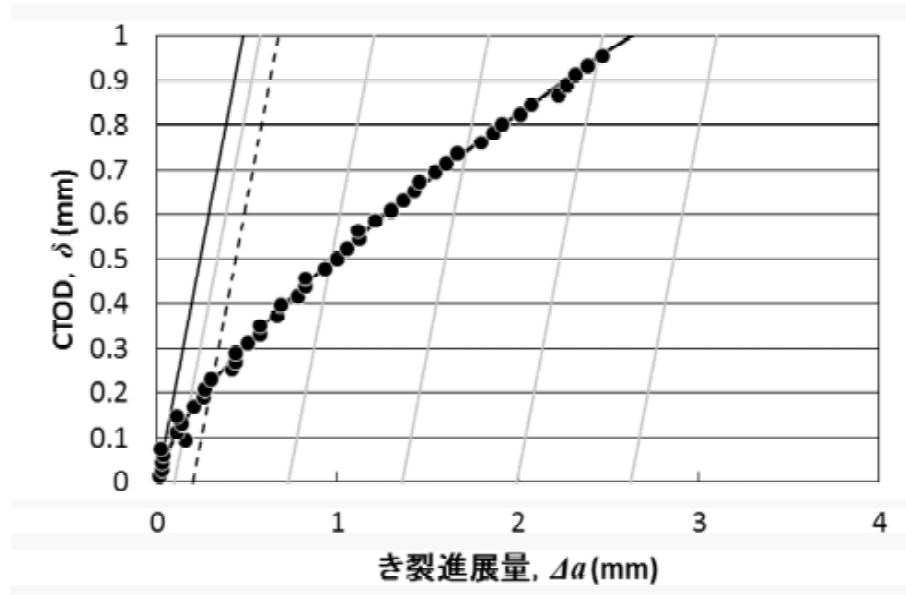


図 a23.24 解体材ボンド部試験片 MF-1 の δ -R カーブ

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

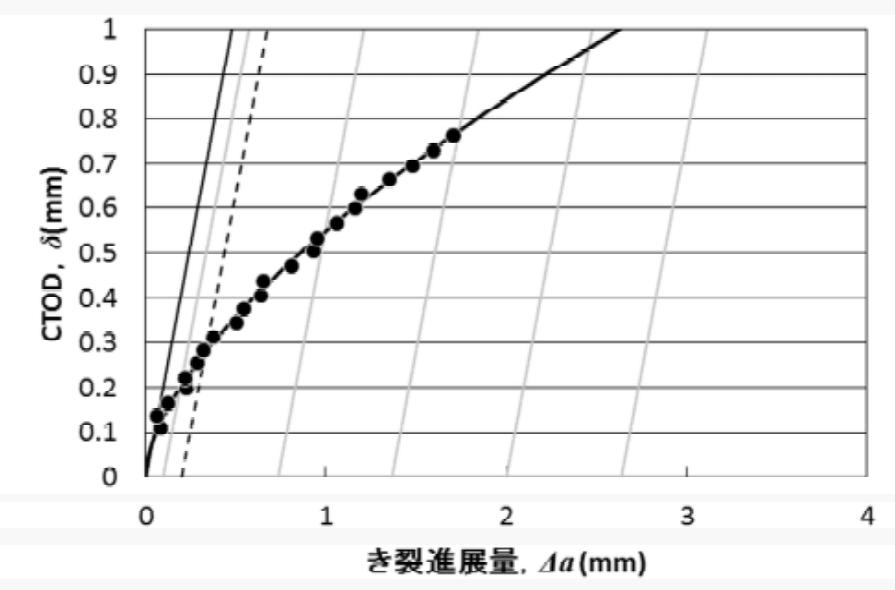


図 a23.25 解体材ボンド部試験片 MF-2 の δ -R カーブ

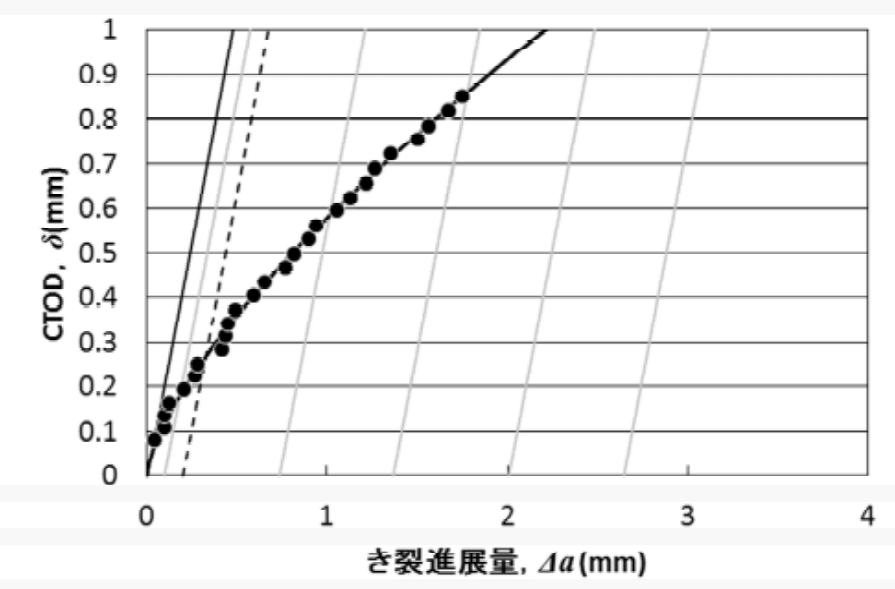


図 a23.26 解体材ボンド部試験片 MF-3 の δ -R カーブ

添付資料 23 δ -R カーブ法の概要と実験結果への適用

表 a23.2 式(a17.4)中の変数一覧

試験片 No.	α	β	γ
CB-1	0.000	1.165	0.840
CB-2	0.000	1.165	0.754
CB-3	0.000	1.172	0.709
CF-2	0.000	1.030	0.664
CF-3	0.000	1.074	0.664
CF-4	0.000	1.072	0.590
MB-1	0.037	0.252	1.000
MB-2	0.015	0.329	0.919
MB-3	0.037	0.242	0.972
MF-1	0.000	0.508	0.701
MF-2	0.006	0.544	0.626
MF-3	0.000	0.579	0.689

添付資料 24 破壊靱性値と板厚の関係

a24 破壊靱性値と板厚の関係

図 a24.1 に示すように、破壊靱性値は板厚に依存し、ある板厚のときに下限値に達する^[a8]。この下限値の破壊靱性値を平面歪破壊靱性値と呼ぶ。

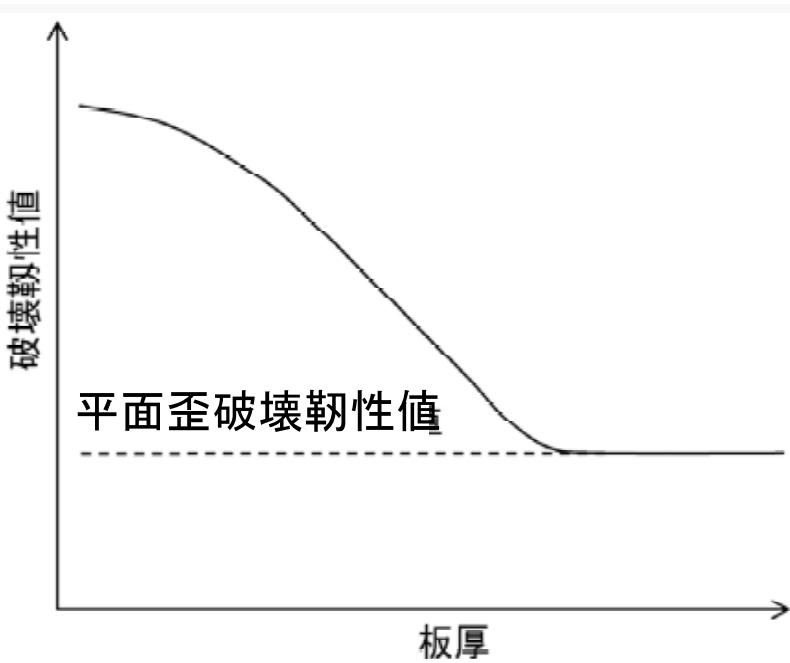


図 a24.1 破壊靱性値と板厚の関係

添付資料 25 J_{IC} と上部棚シャルピー吸収エネルギーの関係

a25 J_{IC} と上部棚シャルピー吸収エネルギーの関係

破壊靱性値 J_{IC} を簡易的に取得するための方法として、上部棚シャルピー吸収エネルギーから J_{IC} を推定する方法がある。上部棚シャルピー吸収エネルギーと J_{IC} の相関関係について調査した結果を以下に記載する。

鋼材のシャルピー吸収エネルギーは図 a25.1 のような遷移曲線となる。Wallin は、この上部棚シャルピー吸収エネルギー-CVN_{us} を用いて R 曲線の推定式を提案し、推定 R 曲線から得られる J_{IC} と CVN_{us} の相関関係を試験結果と比較した^[a9]。J-R 曲線の推定式および J_{IC} と CVN_{us} の相関式は以下の通りである。

$$J \approx J_{1mm} \Delta a^m \quad (\text{a25. 1})$$

$$J_{1mm} \approx \partial \text{CVN}_{us}^{1.28} \circ \left(-\frac{T - \hat{\delta}}{\hat{\delta}} \right) \quad (\text{a25. 2})$$

$$m \approx \partial \text{CVN}_{us}^{2.56} \circ \left(-\frac{T - \hat{\delta}}{\hat{\delta}} \right) - \frac{\sigma_Y}{\hat{\delta}} \quad (\text{a25. 3})$$

$$\frac{J_{IC}}{\hat{\delta} \sigma_f} \approx \left(\frac{J_{IC}}{J_{1mm}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (\text{a25. 4})$$

ここで、 J_{IC} 、 J_{1mm} および CVN_{us} の単位はそれぞれ [kJ/m^2]、[kJ/m^2] および [J] である。

図 a25.2 に J_{IC} と CVN_{us} の関係を示す。推定による J_{IC} と CVN_{us} の相関関係は試験結果をよく表現できていることが分かる。また、降伏応力 σ_Y が高い材料かつ上部棚シャルピー吸収エネルギーが低い領域ほど、 J_{IC} と CVN_{us} の関係は線形に近づく。

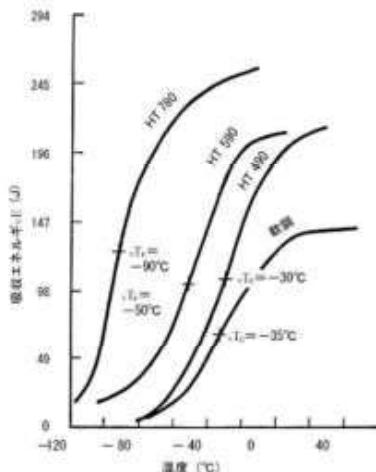


図 a25.1 鋼材における吸収エネルギー遷移曲線^[a10]

添付資料 25 J_{IC} と上部棚シャルピー吸収エネルギーの関係

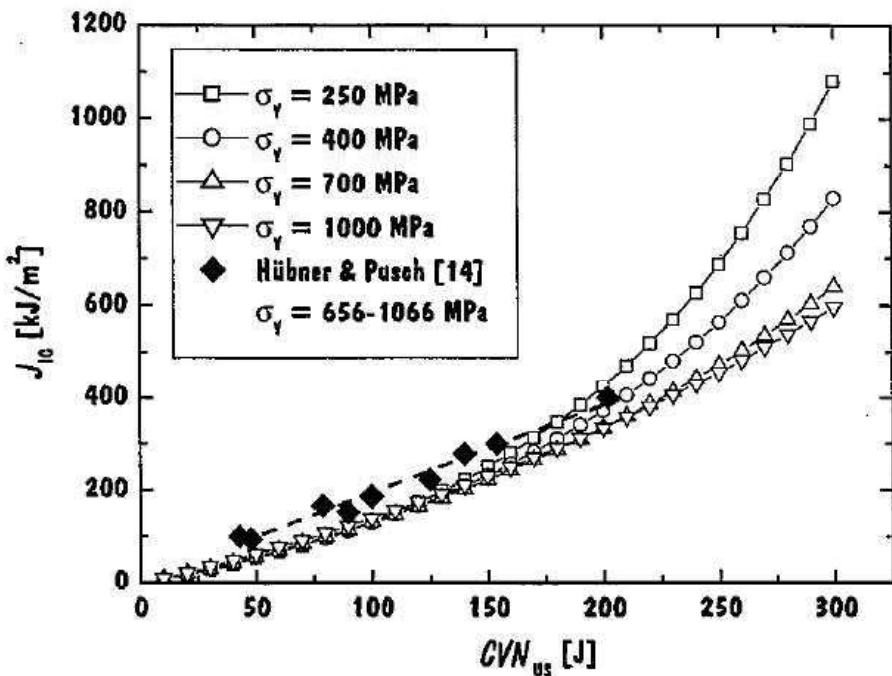


図 a25. 2 J_{IC} と CVN_{us} の関係^[a9]

また、破壊靱性値 K_{IC} と CVN_{us} の関係から J_{IC} を推定する方法も提案されている。Rolfie らは、 CVN_{us} から K_{IC} を推定する式として、次式を提案した^[a11]。

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y}\right)^2 \approx \frac{CVN_{us}}{\sigma_Y} - \text{constant} \quad (a25. 5)$$

上記推定式と、式(a25.5)の K_{IC} と J_{IC} の関係を用いると、式(a20.6)のような J_{IC} と CVN_{us} の関係式になる。

$$J_{IC} \approx \frac{K_{IC}^2}{E} = \frac{\sigma_Y^2(1-\nu^2)}{E} \quad (a25. 6)$$

$$J_{IC} \approx \frac{\sigma_Y^2(1-\nu^2)}{E} = \frac{CVN_{us}}{\sigma_Y} - \text{constant} \quad (a25. 7)$$

図 a25. 3 に K_{IC} と CVN_{us} の相関式から得た J_{IC} と CVN_{us} の関係を示す。

添付資料 25 J_{IC} と上部棚シャルピー吸収エネルギーの関係

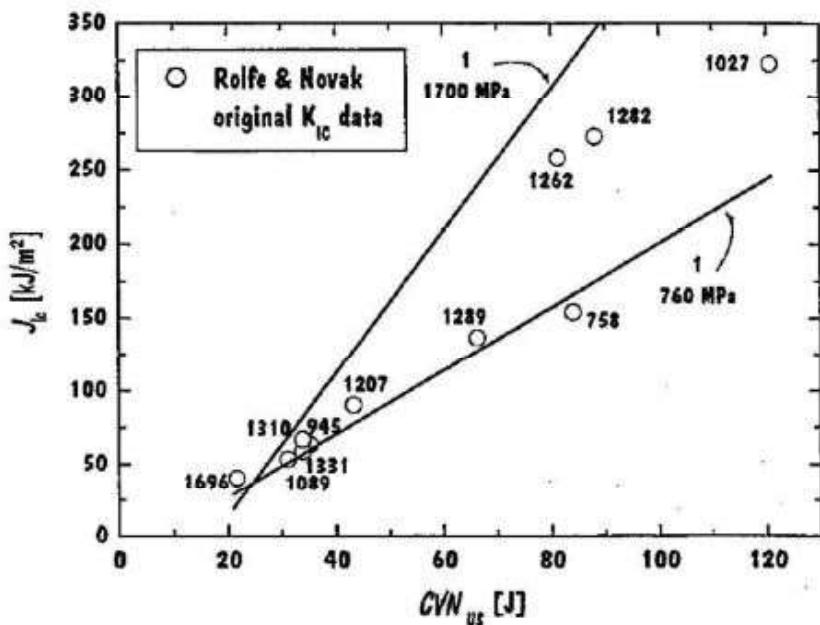


図 a25.3 K_{IC} と CVN_{us} の相関式から得た J_{IC} と CVN_{us} の関係^[a9]

a26 J_{IC} の定義

図 a26.1 の上に R カーブ（破壊力学パラメータに J 積分をとる際は JR カーブという）を示し、下に R カーブにおける予き裂の鈍化とき裂進展の推移を示す。き裂進展に伴うき裂先端形状および破壊挙動の変化を以下に順に示す。

- ① (負荷前) 鋭い疲労予き裂が存在する。
- ② (負荷開始) 疲労予き裂が鈍化し始め、鈍化分がき裂進展長さ Δa となる。このときの Δa と破壊力学パラメータ（例えば、J 積分）の関係を表すのが、式 (6.12) で表されるような construction line である。
- ③ (一定負荷経過後) き裂がある程度鈍化したところで、延性き裂（安定き裂）が進展し始める。

上記の③において延性き裂が 0.2mm 進展した点（疲労予き裂鈍化によるき裂進展長さは含めない）を工学的に延性き裂が開始したと判定し、その点における破壊靱性値を J_{IC} という。上述したように、疲労予き裂の鈍化を含めず、あくまで延性き裂のみが 0.2mm 進展した点を J_{IC} とするために、JR カーブ中の construction line の 0.2mm offset line と R カーブの交点によって J_{IC} が求まる。

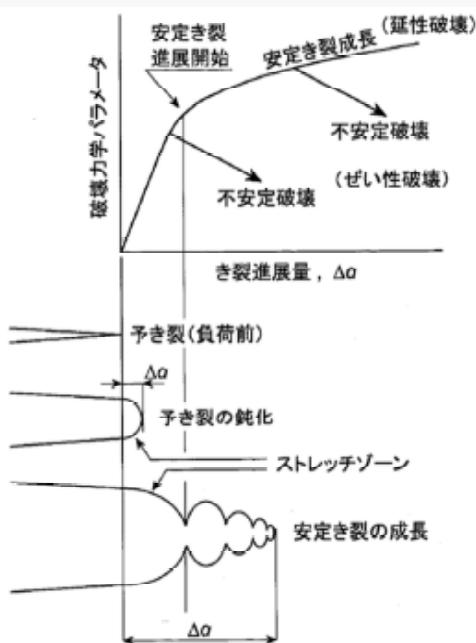


図 a26.1 R カーブ中の予き裂の鈍化とき裂進展^[a12]

添付資料 27 種々の CTOD とそれらの比較

a27 J_{IC} 試験から算出される CTOD の比較

本報において、以下の 2 つの延性き裂発生時の CTOD を算出した。

- ① J 換算 CTOD, $\delta_{conv.}$: 6.7 節で示したように、ASTM E1820(2013)^[a3]中の関係式を用いて J_q より換算して算出
 - ② $\delta\text{-R}$ カーブ法による CTOD, δ_i : 添付資料 23 で示したように、 $\delta\text{-R}$ カーブを作成し、0.2mm offset line と $\delta\text{-R}$ カーブの交点からを δ_i 算出
- 上記 2 つに加えて、下記の CTOD, δ_n を得ることもできる。
- ③ $\delta\text{-R}$ カーブにおいて、 $\delta_{conv.}$ 算出時と同じき裂進展長さの時の CTOD, δ_n : $\delta_{conv.}$ 算出時のき裂進展長さを JR カーブより求め、 $\delta\text{-R}$ カーブにおいてそのき裂進展長さ時の CTOD を算出

以上 3 つの CTOD の算出方法を図 a27.1 に示す。また、それら算出点の決定方法について表 a27.1 にまとめる。3 つの CTOD の算出結果を表 a27.2 にまとめて示す。

図 a27.2 に示すように $\delta_{conv.}$ と δ_n を比較すると、 δ_n の方が大きいことがわかる。表 a27.1 に示すように両者の違いは、前者が J 換算による板厚平均の CTOD を表しているのに対して後者は塑性ヒンジモデルによる板厚中央の CTOD を表していることである。添付資料 22 に示すように、CTOD は板厚中央に近づくほど大きくなる特徴を持つが、本結果もそれと一致する。

次に、図 a27.3 に示すように δ_i と δ_n を比較すると、 δ_i の方が大きいことがわかる。表 a27.1 に示すように両者の違いは、前者が $\delta\text{-R}$ カーブと 0.2mm offset line の交点より CTOD が算出されているのに対して後者は JR カーブと 0.2mm offset line の交点より CTOD が算出されていることである。本結果は、 $\delta\text{-R}$ カーブと 0.2mm offset line の交点の方が JR カーブと 0.2mm offset line の交点よりもき裂進展長さが長い側となる傾向があることを示唆している。

添付資料 27 種々の CTOD とそれらの比較

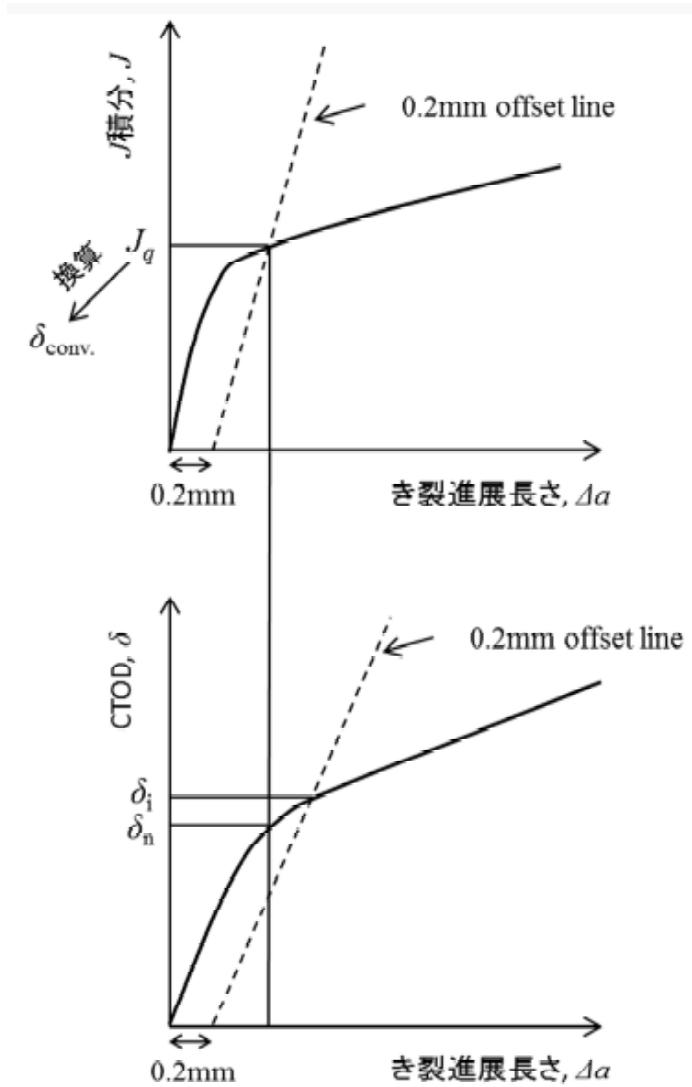


図 a27.1 種々の CTOD の算出方法

表 a27.1 CTOD の算出点の決定方法

CTOD の種類		算出点（算出時のき裂進展長さ）
$\delta_{\text{conv.}}$	板厚平均 (J換算)	J-R カーブと 0.2mm offset line の交点
δ_i	板厚中央 (塑性ヒンジモデル)	δ -R カーブと 0.2mm offset line の交点
δ_n	板厚中央 (塑性ヒンジモデル)	J-R カーブと 0.2mm offset line の交点

添付資料 27 種々の CTOD とそれらの比較

表 a27.2 種々の CTOD の算出結果

	切欠き位置	試験片 No.	$\delta_{\text{conv.}}$	δ_i	δ_n
			mm	mm	mm
市 販 材	母材部	CB-1	0.505	0.676	0.554
		CB-2	0.564	0.751	0.624
		CB-3	0.600	0.798	0.667
	ボンド部	CF-2	0.358	0.665	0.513
		CF-3	0.433	0.714	0.567
		CF-4	0.522	0.766	0.643
	溶接金属部	CW-1	0.279	-	-
		CW-2	0.257	-	-
		CW-3	0.268	-	-
解 体 材	母材部	MB-1	0.106	0.099	0.098
		MB-2	0.100	0.108	0.105
		MB-3	0.110	0.099	0.099
	ボンド部	MF-1	0.161	0.221	0.202
		MF-2	0.208	0.279	0.255
		MF-3	0.193	0.269	0.242
	溶接金属部	MW-1	0.171	-	-
		MW-2	0.173	-	-
		MW-3	0.216	-	-

添付資料 27 種々の CTOD とそれらの比較

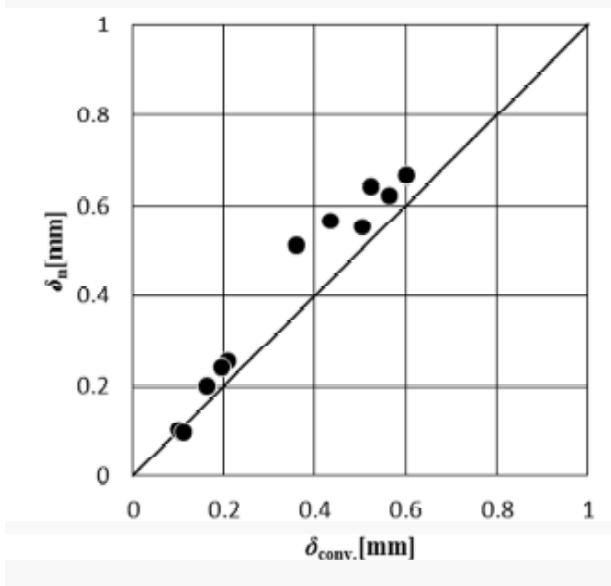


図 a27.2 $\delta_{\text{conv.}}$ と δ_n の比較

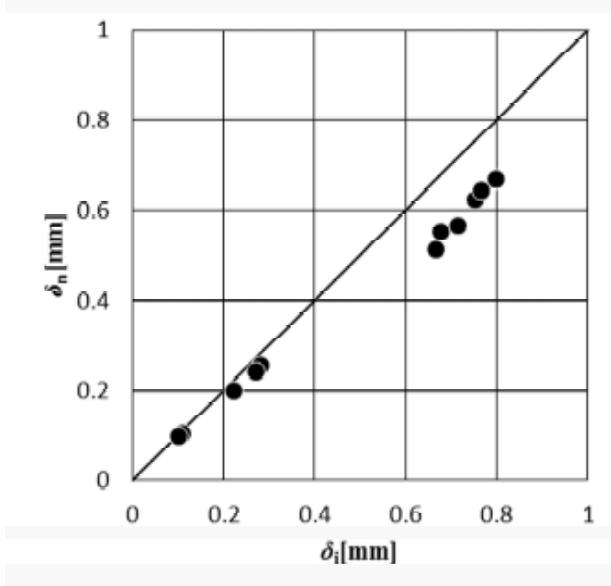


図 a27.3 δ_i と δ_n の比較

添付資料 28 疲労き裂進展特性に関する文献調査

a28.1 疲労き裂進展特性に関する文献調査

「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針（JGA 指-109-14）^[a13]」では、疲労割れ進展量評価を行う際の材料定数として、BS7910 (2013)^[a1]を参照している。BS7910 に記載される疲労割れ進展特性が SPV450 に適用しうるか確認を行った。

a28.1.1 BS7910 に記載される適用範囲の確認

BS7910 では、疲労き裂進展特性を表す材料特性の適用範囲を下記の通りとしている。

8.2.3.3 Recommended fatigue crack growth laws for steels in air

Values of the constants A and m in Equation 42, given in Table 10, should be used for:

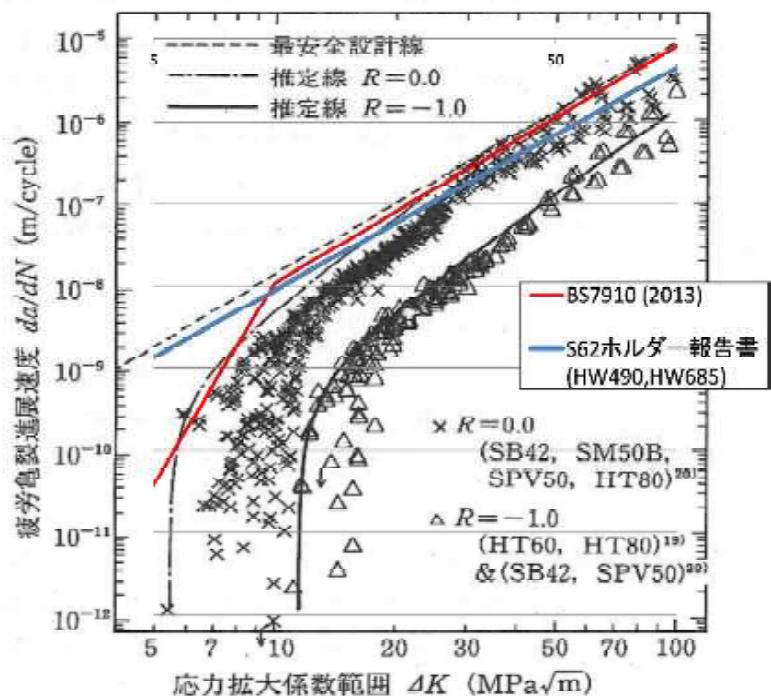
- steels (ferritic, austenitic or duplex ferritic-austenitic) with yield or 0.2% proof strengths $\leq 700 \text{ N/mm}^2$;
- operation in air or other non-aggressive environments at temperatures up to 100°C .

SPV450 ($6 \leq t \leq 50$) の降伏応力は 450 MPa であること、横置き型円筒貯槽の運用温度は 100°C に達しない事から、上記 BS7910 の条件を満たす。つまり、BS7910 に記載される疲労割れ進展特性は SPV450 に適用可能である。

a28.1.2 文献値との対比

BS7910 に記載される疲労き裂進展特性を、種々の材料を対象とした文献データ（鋼構造物の疲労設計指針・同解説、日本鋼構造協会^[a15]）と対比した結果を図 a28.1 に示す。図に示すように、疲労き裂進展速度は材料の強度レベルに依らず、概ね同一のバンドに収まっている。加えて、図に赤実線で示す BS7910 の評価線は、実験結果をほぼ包含している。これらのことから、BS7910 に記載される疲労割れ進展特性は SPV450 に適用可能である。

添付資料 28 疲労き裂進展特性に関する文献調査



- ・ R は試験中の応力比（最小応力／最大応力）を示す。
- ・ 青実線は他材料と対象とした既往報告書（参考資料[a14]）を引用したもの。）

図 28.1 疲労き裂進展特性の対比

材料規格の規定内容の変遷

項目	S40 S41 S42 S43 S44 S45 S46 S47 S48 S49	S50 S51 S52 S53 S54 S55 S56 S57 S58 S59	S60 S61 S62 S63 H1 H2 H3 H4 H5 H6 H7 H8 H9	H10 H11 H12 H13 H14 H15 H16 H17 H18 H19	H20 H21 H22 H23 H24 H25 H26 H27 H28	
JGA指針	1965 1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973 1974	1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984	1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994	1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004	2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014	2015 2016
球形ガスホルダー指針	S39 T-1鋼製球形ガスホルダー完成(高張力鋼)		制定 SPV46、HW45規定値(調質鋼) Ceq 0.44以下 Pcm 0.28以下*1 シャルビー規定値はJIS G3115、 リブライスは日本海事協会規格採用 *1: SPV46にはPcmの規定はないが WES3002を参考に設定	改訂 SPV46、HW45規定値(調質鋼) Ceq 0.44以下 Pcm 0.26以下(等級B相当) シャルビー規定値は各規格材料とほぼ同等であるが、 HW450の試験温度は最低使用温度(-10°C)とする HW450の13mm未満でもサクサクで試験を要求	改訂 SPV46、HW45規定値(調質鋼) Ceq 0.44以下 Pcm 0.26以下(等級B相当) シャルビー規定値は JIS G 3115と同等	改訂 SPV450規定値 Ceq 0.44以下 Pcm (0.28以下) HW450規定値 Pcm 0.26以下
LPG貯槽指針			制定 SPV46、HW45規定値(調質鋼) Ceq 0.44以下 Pcm 0.28以下*1 シャルビー規定値はJIS G3115。 ガバサイズは日本海事協会規格採用 *1: SPV46にはPcmの規定はないが WES3002を参考に設定	改訂 SPV46、HW45規定値(調質鋼) Ceq 0.44以下 Pcm 0.26以下(等級B相当) シャルビー規定値は各規格 材料とほぼ同等であるが、 HW450の試験温度は最低使用 温度(-10°C)とする HW450の13mm未満でも ガバサイズで試験を要求	改訂 SPV450規定値 Ceq 0.44以下 Pcm 0.26以下 シャルビー規定値は JIS G 3115と同等	改訂 SPV450規定値 Ceq 0.44以下 Pcm (0.28以下) HW450規定値 Pcm 0.26以下
高張力鋼の製鋼、規格の変遷	S32 国産HT-60鋼の開発、実用化 S34 国産HT-80鋼の開発、実用化 S35 WES3001-1960 高張力鋼板規格制定 S39 WES3001-1964 高張力鋼板規格改正		~この年代に韧性改善が進む~ ~CF鋼の実用化 ~溶銑予備処理(熱処理)によりS、Pの低減化 ~二次精錬技術進展(熱処理)によりC、S、Pの低減化	★JIS G 3115-1988改正 ★JIS G 3115-1990改正 ★WES3001-1990 高張力鋼板規格改正(SI単位の導入)	★WES3001-1990 高張力鋼板規格改正 ⇒ 热加工制御(TMPC)の製造法を導入 ⇒ TMPCで製造した場合のCeq規定値の設定 ⇒ CTOD理論に基づく韧性要求値の見直し	★JIS G 3115-2000改正 ★JIS G 3115-2005改正 ★JIS G 3115-2010改正 ★WES3001-2012(=1996版)
WES3001 HW450 衝撃試験規格値 (単位J)	6 ≤ 12mm 12 ≤ 13mm 13 ≤ 20mm 20 ≤ 32mm 32mm ≤ (50) 50 < 150mm	C P S	規程なし(シャルビー吸収エネルギー要求は不要としている…解説より) 同左 — 47.1以上 @+15°C 47.1以上 @-5°C 47.1以上 @-10°C	0.18以下 0.035以下 0.040以下	0.18以下 0.030以下 0.025以下	0.18以下 0.030以下 0.025以下
化学成分規格値	Ceq Pcm ≤ 50mm、等級A Pcm ≤ 50mm、等級B	0.44以下(非調質鋼は0.50以下) 規定なし 規定なし	規定なし 規定なし 規定なし	規定なし 規定なし 規定なし	規定なし 規定なし 規定なし	規定なし 規定なし 規定なし
JIS G 3115 SPV450 衝撃試験規格値 (単位J)	12mm < 3個平均値 個々の値 3 < 12mm 3個平均値 個々の値 C Si Mn P S Ceq Pcm 規定なし	47.1以上 @-10°C (50mm以下) 同左 27.5以上 @-10°C (50mm以下) 同左 47.1以上 @-10°C (5mm以上) 同左 27.5以上 @-10°C (5mm以上) 同左 0.18以下 0.15～0.75 1.60以下 0.035以下 0.040以下 0.44以下 規定なし 0.12～0.16 0.014～0.020 (≤0.025) 0.008～0.017 (≤0.020)	47.1以上 @-10°C (75mm以下) 同左 27.5以上 @-10°C (75mm以下) 同左 47.1以上 @-10°C (10 × 7.5) 39以上 同左 27.5以上 @-10°C (10 × 7.5) 23以上 同左 0.18以下 0.15～0.75 1.60以下 0.030以下 0.030以下 0.44以下 (0.28以下) ←協定値(以降同じ) 0.08～0.14 0.010～0.018 (≤0.020) 0.001～0.004 (≤0.004)	47.1以上 @-10°C (50mm以下) 同左 27.5以上 @-10°C (50mm以下) 同左 47.1以上 @-10°C (10 × 7.5) 39以上 同左 27.5以上 @-10°C (10 × 7.5) 23以上 同左 0.18以下 0.15～0.75 1.60以下 0.030以下 0.030以下 0.44以下 (0.28以下) 0.08～0.14 0.010～0.018 (≤0.020) 0.001～0.004 (≤0.004)	47.1以上 @-10°C (150mm以下) 同左 27.5以上 @-10°C (150mm以下) 同左 47.1以上 @-10°C (10 × 7.5) 39以上 同左 27.5以上 @-10°C (10 × 7.5) 23以上 同左 0.18以下 0.15～0.75 1.60以下 0.030以下 0.030以下 0.44以下 (0.28以下) 0.08～0.14 0.010～0.018 (≤0.020) 0.001～0.004 (≤0.004)	
SPV450 化学成分実績 板厚16～32mm ()はA社管理値	C P S Ceq Pcm 規定なし	0.12～0.16 0.014～0.020 (≤0.025) 0.008～0.017 (≤0.020) 0.36～0.42 0.22～0.26	~圧延時の熱処理方法見直しにより低C化 ~製鍛技術の進歩により低P化 ~製鍛技術の進歩により低S化 ~圧延時の熱処理方法見直しにより低C化 ~圧延時の熱処理方法見直しにより低C化	0.08～0.14 0.010～0.018 (≤0.020) 0.001～0.004 (≤0.004) 0.33～0.40 0.16～0.23	0.08～0.12 0.008～0.015 (≤0.020) 0.001～0.003 (≤0.003) 0.38～0.37 0.18～0.20	

(注)化学成分のうち、P、Sは溶接割れや韧性に悪影響を与えるため低減が必要、また、Cを含めて溶接割れに敏感となるため上限値を設定している

鉄と鋼
Vol.100
(2014)
No. 4
P457より

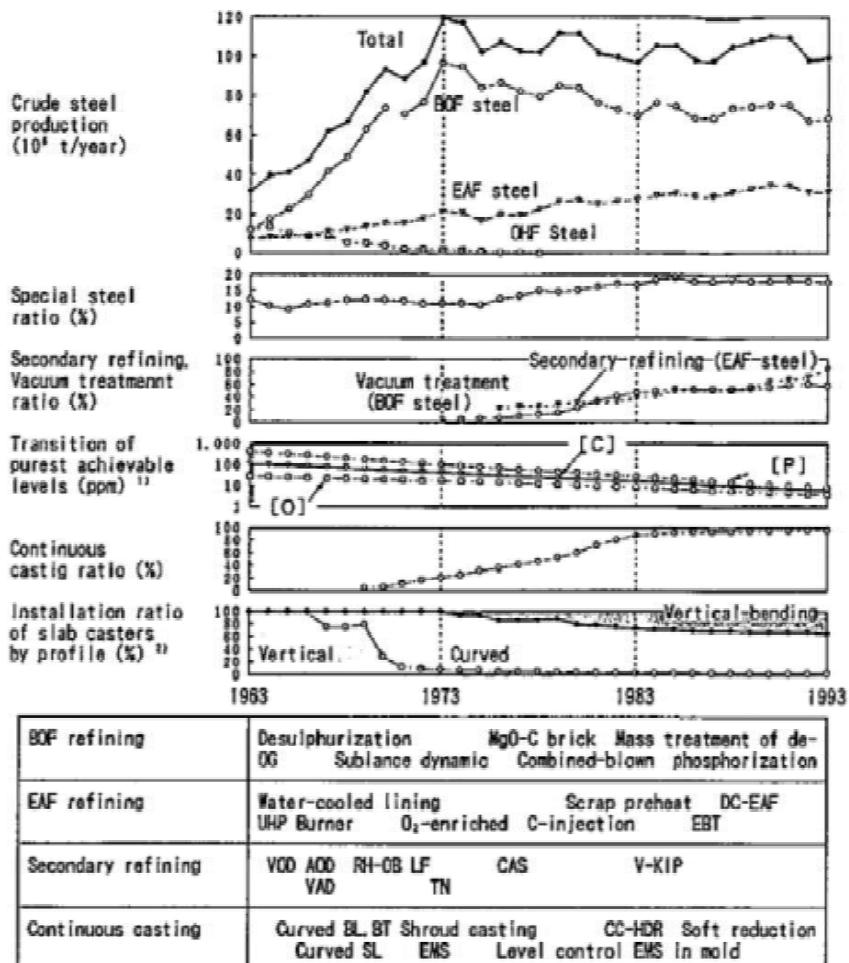


Fig. 1. Chronological changes in steelmaking process¹⁾.

限界硫黄低減量の推移

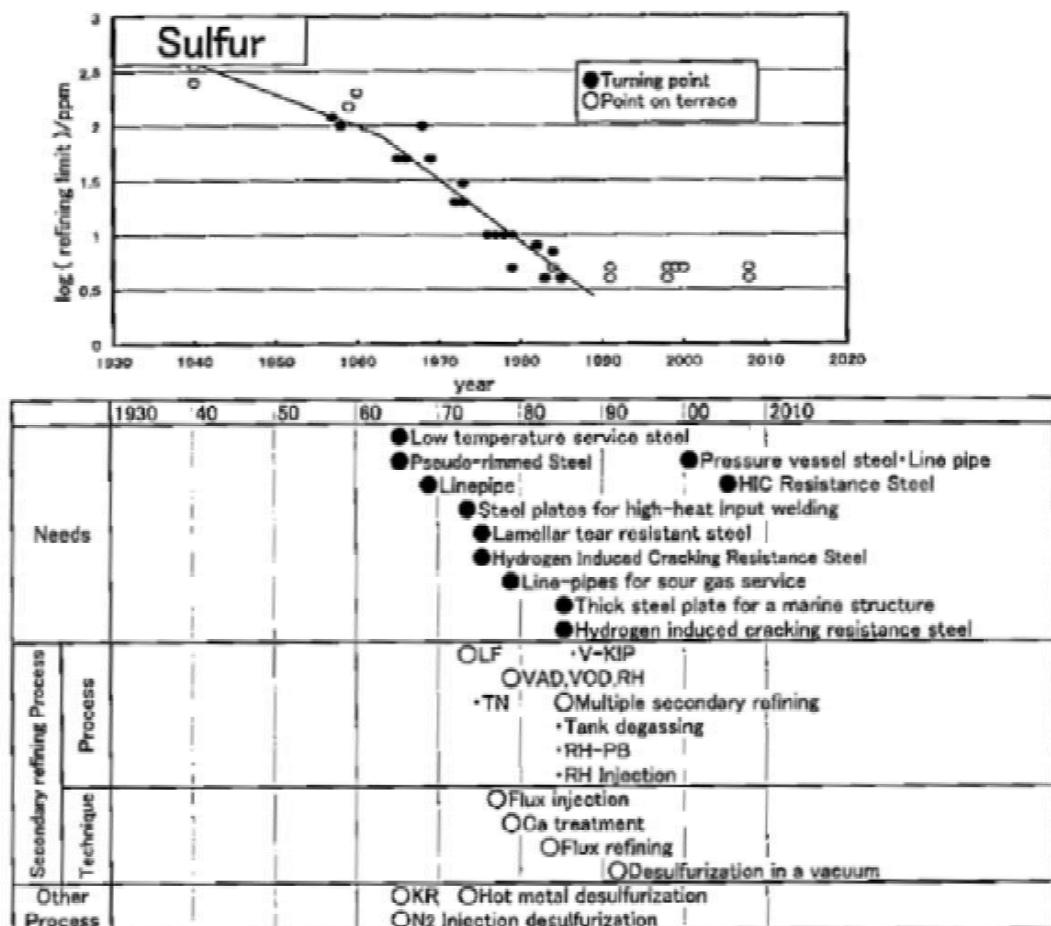


Fig. 9. Changes of sulfur refining limit in bulk steel and development of de-S technique in Japan⁵⁴⁾.

連続鋳造材生産割合の推移

鉄と鋼 Vol.100 (2014) No. 4 P473より

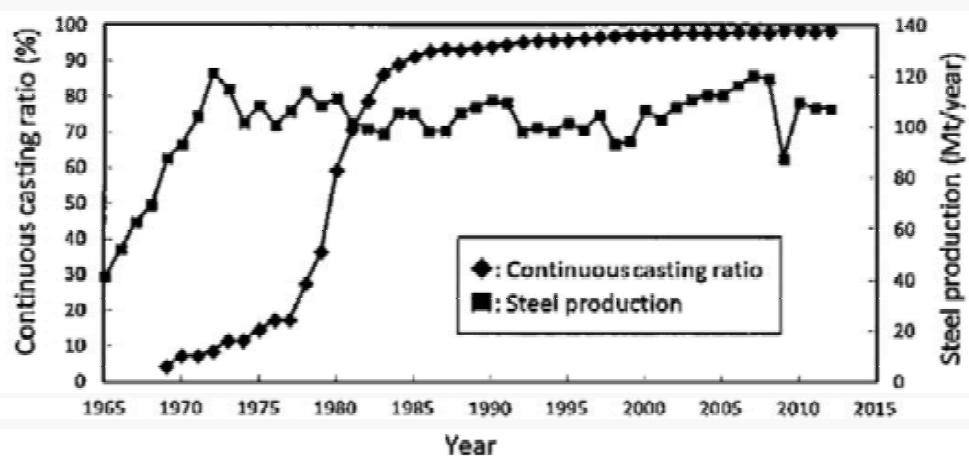


Fig. 3. Steel production and continuous casting ratio. (Drew based on data of "The Japan Iron and Steel Federation"¹⁴⁾)

厚鋼板の TMCP 技術の推移

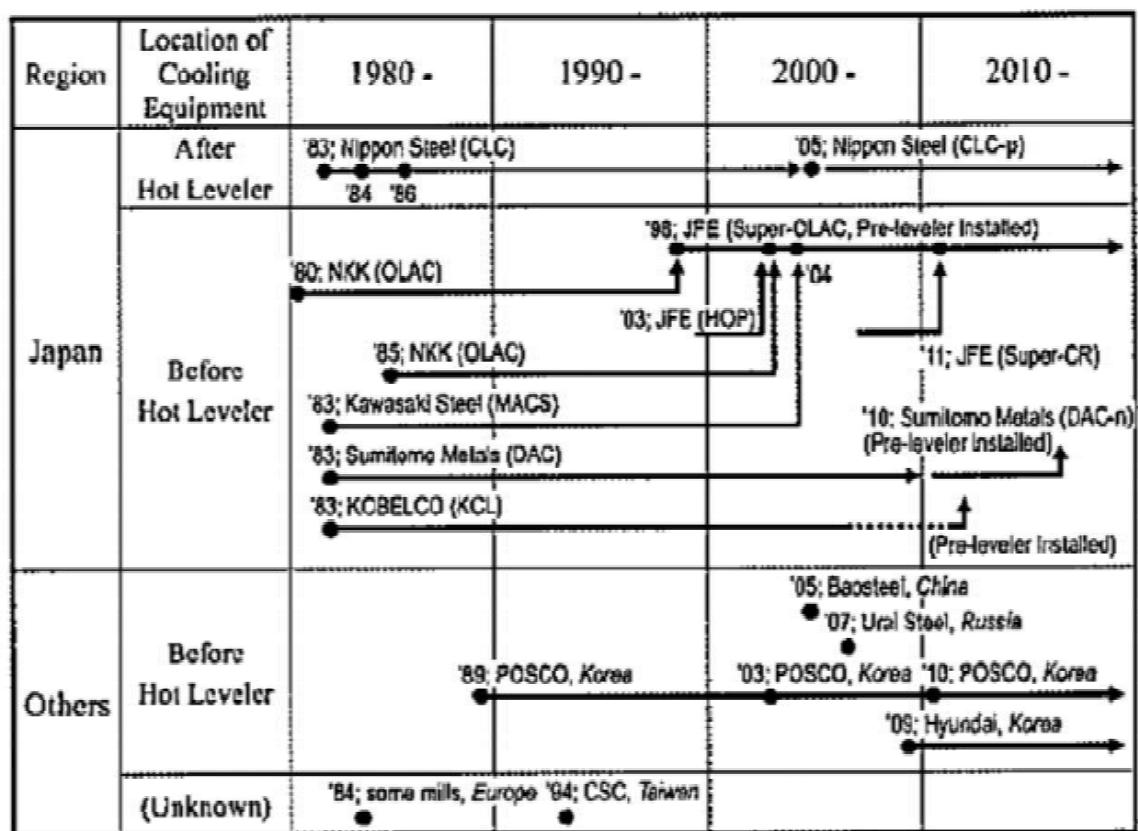


Fig. 21. History of development of TMCP equipment.

厚鋼板の熱処理技術

Process	As roll		TMCP		Heat treatment		
	CR	Acc	CR	Acc	Q ⁺ -Temper	Quench-Temper	
	(a) Rolling	(b) CR	(c) CR ACC	(d) Rolling L(Q ⁺) T	(e) RQ L(Q ⁺) T	(f) RQ T	←RQ-T 再加熱焼入れ-焼戻し
					TMCP+Offline Heat treatment		
	(g) 2 Step CR ACC	(h) CR DQ or ACC L(Q ⁺) T	(i) 2 Step ACC S-CR	(j) CR DL(DQ) or ACC T	(k) CR ACC HOP	(l) CR DQ T HOP	←DQ-T 直接焼入れ-焼戻し
Micro structure	[Soft] Ferrite + Hard Pearlite	Ferrite + Pearlite	Ferrite + Pearlite, Bainite	Ferrite + Tempered Martensite, Bainite	Bainite + M-A	Tempered Martensite, Bainite	
Strengthening Mechanism	(Ferrite) Refinement ↑ OR, Acc Nb,Ti add Transformation ↓ Alloy add. Solid Solution ↓ Alloy add. Precipitation ↓ Alloy add.(V,Nb,Cu etc.) O Increase Alloy add.(Cu,Ni,Gr,Mn,B etc.) Acc, Quench.						• RQ-T (従来方法) および • DQ-T は共に、 焼入焼戻し
TS	400~490MPa		500~550MPa (TMCP)		800MPa	800MPa (Low YR)	800MPa (High YR)
	600~800MPa (TMCP)						

Fig. 13. Effect of advanced manufacturing process on microstructure and strength of steel.

容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 現 行	容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 改訂案	備考
<p>3.3.3 疲労割れ余寿命評価</p> <p>(1) 疲労割れ余寿命評価に用いる手法としては、英國規格 BS 7910(2013)「Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures」*1 (以下、「BS 7910」という。) 又は同等の方法*2で行う。</p> <p>(2) BS 7910においては、FADにより余寿命が評価される*1。FADにおける縦軸は、作用状態と脆性破壊状態に対する比(靱性比)となっており、横軸は塑性崩壊に寄与する作用荷重と崩壊荷重の比(荷重比)となっている。進展評価後の欠陥寸法での計算を行い、その計算結果が破壊限界線の内側であれば、その欠陥は許容される。</p> <p>(3) 耐震性を要求される設備の場合、地震動が余寿命に影響を与える可能性があるときは、上記作用状態及び作用荷重は地震時を考慮したものとする。</p> <p>(4) 評価精度、簡便性、材料データ入手性の観点からオプション1、2、3の評価方法がある。オプション1評価で不合格になった場合にはオプション2評価を、オプション2評価で不合格になった場合にはオプション3評価を適用する。評価は2.4「評価のための検査」で実測された欠陥寸法を以下の基準*3で評価する。</p> <p>(a) オプション1評価</p> <p>オプション1は、応力-ひずみ関係を必要としない評価手法である。靱性比 K_r*4が、荷重比 L_r*5の関数 $f(L_r)$で表される破壊限界線の範囲内にある場合に、継続使用が可能である。以下の式は、不連続な降伏状態(リューダース帶)を示さない材料に用いることが出来る*6。</p> <p>(i) $L_r \leq 1$</p> $f(L_r) = (1 + \frac{1}{2} L_r^2)^{-1/2} \times \{0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)\}$ <p>(ii) $1 < L_r < L_{r,\max}$*7</p> $f(L_r) = f(1) \times L_r^{(N-1)/(2N)}$ <p>(iii) $L_r \geq L_{r,\max}$</p> $f(L_r) = 0$ <p>ここで、</p> $\mu = \min(0.001 \times E / \sigma_y, 0.6)$ $N = 0.3(1 - \sigma_y / \sigma_u)$ <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> E : ヤング率 σ_y : 降伏点 σ_u : 引張強さ <p>(b) オプション1 不合格時の対応</p> <ul style="list-style-type: none"> (i) 再定格を行う。 (ii) 補修(部分取替え、更新を含む)を行う。 (iii) 次回検査までの期間を短縮し、再評価する。 	<p>3.3.3 疲労割れ余寿命評価</p> <p>(1) 疲労割れ余寿命評価に用いる手法としては、英國規格 BS 7910(2013)「Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures」*1 (以下、「BS 7910」という。) 又は同等の方法*2で行う。</p> <p>(2) BS 7910においては、FADにより余寿命が評価される*1。FADにおける縦軸は、作用状態と脆性破壊状態に対する比(靱性比)となっており、横軸は塑性崩壊に寄与する作用荷重と崩壊荷重の比(荷重比)となっている。進展評価後の欠陥寸法での計算を行い、その計算結果が破壊限界線の内側であれば、その欠陥は許容される。</p> <p>(3) 耐震性を要求される設備の場合、地震動が余寿命に影響を与える可能性があるときは、上記作用状態及び作用荷重は地震時を考慮したものとする。</p> <p>(4) 評価精度、簡便性、材料データ入手性の観点からオプション1、2、3の評価方法がある。オプション1評価で不合格になった場合にはオプション2評価を、オプション2評価で不合格になった場合にはオプション3評価を適用する。評価は2.4「評価のための検査」で実測された欠陥寸法を以下の基準*3で評価する。</p> <p>(a) オプション1評価</p> <p>オプション1は、応力-ひずみ関係を必要としない評価手法である。靱性比 K_r*4が、荷重比 L_r*5の関数 $f(L_r)$で表される破壊限界線の範囲内にある場合に、継続使用が可能である。以下の式は、不連続な降伏状態(リューダース帶)を示さない材料に用いることが出来る*6。</p> <p>(i) $L_r \leq 1$</p> $f(L_r) = (1 + \frac{1}{2} L_r^2)^{-1/2} \times \{0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)\}$ <p>(ii) $1 < L_r < L_{r,\max}$*7</p> $f(L_r) = f(1) \times L_r^{(N-1)/(2N)}$ <p>(iii) $L_r \geq L_{r,\max}$</p> $f(L_r) = 0$ <p>ここで、</p> $\mu = \min(0.001 \times E / \sigma_y, 0.6)$ $N = 0.3(1 - \sigma_y / \sigma_u)$ <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> E : ヤング率(N/mm^2) σ_y : 降伏点(N/mm^2) σ_u : 引張強さ(N/mm^2) <p>(b) オプション1 不合格時の対応</p> <ul style="list-style-type: none"> (i) 再定格を行う。 (ii) 補修(部分取替え、更新を含む)を行う。 (iii) 次回検査までの期間を短縮し、再評価する。 	

容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 現 行	容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 改訂案	備考
<p>(iv) オプション2評価^{**8}を行う。 (v) 廃止する。</p> <p>(c) オプション2不合格時の対応 (i) 再定格を行う。 (ii) 補修（部分取替え、更新を含む）を行う。 (iii) 次回検査までの期間を短縮し、再評価する。 (iv) オプション3評価^{**8}を行う。 (v) 廃止する。</p>	<p>(iv) オプション2評価^{**8}を行う。 (v) 廃止する。</p> <p>(c) オプション2不合格時の対応 (i) 再定格を行う。 (ii) 補修（部分取替え、更新を含む）を行う。 (iii) 次回検査までの期間を短縮し、再評価する。 (iv) オプション3評価^{**8}を行う。 (v) 廃止する。</p>	

【解 説】

- * 1 付属書2に、評価手法と計算例を記載している。
- * 2 同等の評価手法として有限要素法(FEM)を用いた応力解析等がある。
- * 3 【出典：BS 7910】
- * 4 韧性比 K_r は、以下のいずれかの式により求められる。

$$K_r = \frac{K_l^P + K_l^S}{K_{mat}} + \rho$$

$$K_r = \frac{K_l^P + V K_l^S}{K_{mat}}$$

ここで、

- K_l^P : 1次応力に対する応力拡大係数 (BS 7910 Annex M参照)
- K_l^S : 2次応力に対する応力拡大係数 (BS 7910 Annex M参照)
- K_{mat} : 応力拡大係数で表される評価材料の破壊靱性値
- ρ 、 V : 1次応力と2次応力の相互作用を考慮するための塑性補正係数
(BS 7910 Annex R参照)

ここで、 K_{mat} は、以下のいずれかの式により求められる。

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{EJ_{mat}}{1-\nu^2}}$$

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{m\sigma_y \delta_{mat} E}{1-\nu^2}}$$

ここで、

$$0.3 < (\sigma_y / \sigma_u) < 0.98 の場合 \quad m = 1.517(\sigma_y / \sigma_u)^{-0.3188}$$

$$\text{それ以外の場合} \quad m = 1.5$$

$$\nu : ポアソン比 (鋼材の場合、0.3)$$

$$J_{mat} : J \text{積分による破壊靱性値}$$

$$\delta_{mat} : \text{限界C T O D値}$$

【解 説】

- * 1 付属書2に、評価手法と計算例を記載している。
- * 2 同等の評価手法として有限要素法(FEM)を用いた応力解析等がある。
- * 3 【出典：BS 7910】
- * 4 韧性比 K_r は、以下のいずれかの式により求められる。

$$K_r = \frac{K_l^P + K_l^S}{K_{mat}} + \rho$$

$$K_r = \frac{K_l^P + V K_l^S}{K_{mat}}$$

ここで、

- K_l^P : 1次応力に対する応力拡大係数 (BS 7910 Annex M参照) ($N/mm^{3/2}$)
- K_l^S : 2次応力に対する応力拡大係数 (BS 7910 Annex M参照) ($N/mm^{3/2}$)
- K_{mat} : 応力拡大係数で表される評価材料の破壊靱性値($N/mm^{3/2}$)
- ρ 、 V : 1次応力と2次応力の相互作用を考慮するための塑性補正係数
(BS 7910 Annex R参照)

ここで、 K_{mat} は、以下のいずれかの式により求められる。

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{EJ_{mat}}{1-\nu^2}}$$

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{m\sigma_y \delta_{mat} E}{1-\nu^2}}$$

ここで、

$$0.3 < (\sigma_y / \sigma_u) < 0.98 の場合 \quad m = 1.517(\sigma_y / \sigma_u)^{-0.3188}$$

$$\text{それ以外の場合} \quad m = 1.5$$

$$\nu : ポアソン比 (鋼材の場合、0.3)$$

$$J_{mat} : J \text{積分による破壊靱性値} (N/mm)$$

$$\delta_{mat} : \text{限界C T O D値} (mm)$$

・ J_{mat} (J 積分による破壊靱性値) を利用した K_{mat} の算出式は規定済

容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 追補改訂 新旧対照表（案）

容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 現 行	容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 改訂案	備考																																																																																																									
<p>限界CTOD値は、CTOD試験^{**1}を実施し、最も小さいCTOD値をδ_{mat}として採用するものとする。なお、試験体の繰り返し数が規定されていない場合は、「球形ガスホルダー技術基準調査報告書（昭和62年3月）（日本ガス協会）」に準じて3体とする。</p> <p>解表3-1に示す材料については、「球形ガスホルダー技術基準調査報告書」の数値を適用することができる。</p> <p style="text-align: center;">解表3-1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼種</th><th>溶接材料</th><th>溶接後熱処理の有無</th><th>溶接入熱(kJ/cm)</th><th>最低使用温度(℃)</th><th>L_{mat}(N/mm)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SPV450Q-SR</td><td>YS-M5</td><td>有</td><td>32</td><td>-10</td><td>105</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(LPG貯槽用材料特性(破壊靭性値)調査報告書(平成29年2月)(一社)日本ガス協会より)</p>	鋼種	溶接材料	溶接後熱処理の有無	溶接入熱(kJ/cm)	最低使用温度(℃)	L_{mat} (N/mm)	SPV450Q-SR	YS-M5	有	32	-10	105	<p>J積分による破壊靭性値は、J_{Ic}試験^{**1}を実施し、得られたJ_{Ic}をJ_{mat}として採用するものとする。解表3-1に示す材料については、「LPG貯槽用材料特性(破壊靭性値)調査報告書」の数値を適用することができる。</p> <p style="text-align: center;">解表3-1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼種</th><th>溶接材料</th><th>溶接後熱処理の有無</th><th>溶接入熱(kJ/cm)</th><th>最低使用温度(℃)</th><th>L_{mat}(N/mm)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SPV450Q-SR</td><td>YS-M5</td><td>有</td><td>32</td><td>-10</td><td>105</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(LPG貯槽用材料特性(破壊靭性値)調査報告書(平成29年2月)(一社)日本ガス協会より)</p> <p>限界CTOD値は、CTOD試験^{**2}を実施し、最も小さいCTOD値をδ_{mat}として採用するものとする。なお、試験体の繰り返し数が規定されていない場合は、「球形ガスホルダー技術基準調査報告書（昭和62年3月）（日本ガス協会）」に準じて3体とする。</p> <p>解表3-2に示す材料については、「球形ガスホルダー技術基準調査報告書」の数値を適用することができる。</p> <p style="text-align: center;">解表3-2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼種</th><th>溶接材料</th><th>継手の種類</th><th>溶接入熱(kJ/cm)</th><th>最低使用温度(℃)</th><th>$\min \delta_{mat}$(mm)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="8">HW685(HW70)</td><td rowspan="4">D8016</td><td rowspan="4">横継手</td><td rowspan="4">17</td><td>0</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-10</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-20</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-30</td><td>0.09</td></tr> <tr> <td rowspan="4">縦継手</td><td>45</td><td>0</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>45</td><td>-10</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>45</td><td>-20</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>35</td><td>-30</td><td>0.07</td></tr> <tr> <td rowspan="8">HW490(HW50)</td><td rowspan="4">D5816 0.75Ni系</td><td rowspan="4">横継手</td><td rowspan="4">17</td><td>0</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-10</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-20</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-30</td><td>0.10</td></tr> <tr> <td rowspan="4">縦継手</td><td>60</td><td>0</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>60</td><td>-10</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>45</td><td>-20</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>45</td><td>-30</td><td>0.08</td></tr> <tr> <td rowspan="8">HW490(HW50)</td><td rowspan="4">D5816 0.75Ni系</td><td rowspan="4">横継手</td><td rowspan="4">17</td><td>0</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-10</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-20</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>-30</td><td>0.10</td></tr> <tr> <td rowspan="4">縦継手</td><td>60</td><td>0</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>60</td><td>-10</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>45</td><td>-20</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>45</td><td>-30</td><td>0.08</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(球形ガスホルダー技術基準調査報告書(昭和62年3月)(社)日本ガス協会より)</p>	鋼種	溶接材料	溶接後熱処理の有無	溶接入熱(kJ/cm)	最低使用温度(℃)	L_{mat} (N/mm)	SPV450Q-SR	YS-M5	有	32	-10	105	鋼種	溶接材料	継手の種類	溶接入熱(kJ/cm)	最低使用温度(℃)	$\min \delta_{mat}$ (mm)	HW685(HW70)	D8016	横継手	17	0	0.15	-10	0.15	-20	0.15	-30	0.09	縦継手	45	0	0.12	45	-10	0.10	45	-20	0.07	35	-30	0.07	HW490(HW50)	D5816 0.75Ni系	横継手	17	0	0.15	-10	0.15	-20	0.15	-30	0.10	縦継手	60	0	0.11	60	-10	0.07	45	-20	0.10	45	-30	0.08	HW490(HW50)	D5816 0.75Ni系	横継手	17	0	0.15	-10	0.15	-20	0.15	-30	0.10	縦継手	60	0	0.11	60	-10	0.07	45	-20	0.10	45	-30	0.08	<ul style="list-style-type: none"> 限界CTOD値と同様にJ積分による破壊靭性値の解説を追記する。 限界CTODの場合と同様に <ul style="list-style-type: none"> ✓ J_{Ic}試験を実施し、得られたJ_{Ic}を採用 ✓ 解表3-1の値を採用のいずれも可能とする。 単位系をBS7910のJ_{mat}の基本単位とあわせる($0.105\text{MJ/m}^2=105\text{N/mm}$)
鋼種	溶接材料	溶接後熱処理の有無	溶接入熱(kJ/cm)	最低使用温度(℃)	L_{mat} (N/mm)																																																																																																						
SPV450Q-SR	YS-M5	有	32	-10	105																																																																																																						
鋼種	溶接材料	溶接後熱処理の有無	溶接入熱(kJ/cm)	最低使用温度(℃)	L_{mat} (N/mm)																																																																																																						
SPV450Q-SR	YS-M5	有	32	-10	105																																																																																																						
鋼種	溶接材料	継手の種類	溶接入熱(kJ/cm)	最低使用温度(℃)	$\min \delta_{mat}$ (mm)																																																																																																						
HW685(HW70)	D8016	横継手	17	0	0.15																																																																																																						
				-10	0.15																																																																																																						
				-20	0.15																																																																																																						
				-30	0.09																																																																																																						
	縦継手	45	0	0.12																																																																																																							
		45	-10	0.10																																																																																																							
		45	-20	0.07																																																																																																							
		35	-30	0.07																																																																																																							
HW490(HW50)	D5816 0.75Ni系	横継手	17	0	0.15																																																																																																						
				-10	0.15																																																																																																						
				-20	0.15																																																																																																						
				-30	0.10																																																																																																						
	縦継手	60	0	0.11																																																																																																							
		60	-10	0.07																																																																																																							
		45	-20	0.10																																																																																																							
		45	-30	0.08																																																																																																							
HW490(HW50)	D5816 0.75Ni系	横継手	17	0	0.15																																																																																																						
				-10	0.15																																																																																																						
				-20	0.15																																																																																																						
				-30	0.10																																																																																																						
	縦継手	60	0	0.11																																																																																																							
		60	-10	0.07																																																																																																							
		45	-20	0.10																																																																																																							
		45	-30	0.08																																																																																																							

容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 現 行	容器・配管の補修及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 改訂案	備考
<p>* 5 荷重比 L_t は、次式で定義される。</p> $L_t = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y}$ <p>ここで σ_{ref} は、適切な参考応力として設定するべきであり、その計算はBS 7910 Annex Pを参照すること。耐震性が要求される場合は、地震荷重を考慮した参考応力とする。</p> <p>* 6 不連続な降伏状態を示す材料の評価は、BS 7910 の7.3.3を参照。</p> <p>* 7 韌性比の軸(縦軸)と荷重比の軸(横軸)と評価線図で囲まれる領域に評価点があれば、その欠陥は許容される。外側にあれば、許容されない。$L_{t,max}$ は局部的な塑性崩壊を防ぐために導入されており、Cut-off線と呼ばれている。応力ひずみ曲線において、降伏現象に不連続性が出現する材料については、Cut-off線を $L_t = 1$ とする。欠陥寸法、応力、降伏点及び破壊韌性値等に適切な部分安全係数を導入することが望ましい(BS 7910 Annex K参照)。</p> <p>$L_{t,max}$ は次式によって定義される。</p> $L_{t,max} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y}$ <p>ここで、 σ_y : 降伏点(N/mm²) σ_u : 引張強さ(N/mm²)</p> <p>* 8 BS 7910の7.3.4、7.3.5を参照。</p> <p>【参考】</p> <p>** 1 CTOD試験の規格としては、以下の規格がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・英国規格 BS 7448(1991)「Part 1 Fracture mechanics toughness tests, Method for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of metallic materials」、BS 7448(1997)「Part2 Fracture mechanics toughness tests, Method for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials」 ・国際標準規格 ISO 12135(2002)「Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness」 ・アメリカ材料試験協会規格 ASTM E1820(2013)「Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness」 <p>** 2 CTOD試験の規格としては、以下の規格がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・英國規格 BS 7448(1991)「Part 1 Fracture mechanics toughness tests, Method for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of metallic materials」、BS 7448(1997)「Part2 Fracture mechanics toughness tests, Method for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials」 ・国際標準規格 ISO 12135(2002)「Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness」 ・アメリカ材料試験協会規格 ASTM E1290(2002)「Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement」 	<p>* 5 荷重比 L_t は、次式で定義される。</p> $L_t = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y}$ <p>ここで σ_{ref} は、適切な参考応力として設定するべきであり、その計算はBS 7910 Annex Pを参照すること。耐震性が要求される場合は、地震荷重を考慮した参考応力とする。</p> <p>* 6 不連続な降伏状態を示す材料の評価は、BS 7910 の7.3.3を参照。</p> <p>* 7 韌性比の軸(縦軸)と荷重比の軸(横軸)と評価線図で囲まれる領域に評価点があれば、その欠陥は許容される。外側にあれば、許容されない。$L_{t,max}$ は局部的な塑性崩壊を防ぐために導入されており、Cut-off線と呼ばれている。応力ひずみ曲線において、降伏現象に不連続性が出現する材料については、Cut-off線を $L_t = 1$ とする。欠陥寸法、応力、降伏点及び破壊韌性値等に適切な部分安全係数を導入することが望ましい(BS 7910 Annex K参照)。</p> <p>$L_{t,max}$ は次式によって定義される。</p> $L_{t,max} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y}$ <p>ここで、 σ_y : 降伏点(N/mm²) σ_u : 引張強さ(N/mm²)</p> <p>* 8 BS 7910の7.3.4、7.3.5を参照。</p> <p>【参考】</p> <p>** 1 J_{Ic}試験の規格としては、以下の規格がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国際標準規格 ISO 12135(2002)「Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness」 ・アメリカ材料試験協会規格 ASTM E1820(2013)「Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness」 <p>** 2 CTOD試験規格と同様に J_{Ic}試験規格を追記。</p>	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>付属書6. 疲労進展の可能性のあるきずの個別評価手法</p> <p>1. 適用</p> <p>本付属書は、「11.3.2 個別評価 (1)磁粉探傷試験による評価を行う場合」を適用する場合に、LPG貯槽の開放検査時に、磁粉探傷試験等で検出された内圧変動による疲労進展が懸念される溶接部のきずについて、LPG貯槽毎の個別評価を行うことによって開放検査周期を決定する手法について記すものである。^{*1}</p> <p>*1 「11.3.2 個別評価 (2)超音波探傷試験による評価を行う場合」を適用する場合の評価方法はJGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の3.3「疲労割れの評価方法」によること。</p> <p>2. 最大開放検査周期</p> <p>本付属書に示す個別評価を行った場合においても、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して最長の開放検査周期を定める。ただし、開放検査周期は15年を超えるものであってはならない。</p> <p>3. 個別評価の方法</p> <p>LPG貯槽の個別評価には、破壊評価線図（Failure Assessment Diagram、以下FADという。）を用いた手法を適用し、英國規格 BS 7910(2013)「Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures」（以下、「BS 7910」という。）又は同等の手法で行うこと。FADを用いた開放検査周期の検討手順を図1に示す。個別評価に用いる諸元は、表1に従って決定するものとする。</p>	<p>付属書6. 疲労進展の可能性のあるきずの個別評価手法</p> <p>1. 適用</p> <p>本付属書は、「11.3.2 個別評価 (1)磁粉探傷試験による評価を行う場合」を適用する場合に、LPG貯槽の開放検査時に、磁粉探傷試験等で検出された内圧変動による疲労進展が懸念される溶接部のきずについて、LPG貯槽毎の個別評価を行うことによって開放検査周期を決定する手法について記すものである。^{*1}</p> <p>*1 「11.3.2 個別評価 (2)超音波探傷試験による評価を行う場合」を適用する場合の評価方法はJGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の3.3「疲労割れの評価方法」によること。</p> <p>2. 最大開放検査周期</p> <p>本付属書に示す個別評価を行った場合においても、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して最長の開放検査周期を定める。ただし、開放検査周期は15年を超えるものであってはならない。</p> <p>3. 個別評価の方法</p> <p>LPG貯槽の個別評価には、破壊評価線図（Failure Assessment Diagram、以下FADという。）を用いた手法を適用し、英國規格 BS 7910(2013)「Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures」（以下、「BS 7910」という。）又は同等の手法で行うこと。FADを用いた開放検査周期の検討手順を図1に示す。個別評価に用いる諸元は、表1に従って決定するものとする。</p>	

LPG貯槽指針 現 行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<pre> graph TD START([START]) --> Pm["破壊評価応力の決定 (膜応力 P_m, 曲げ応力 σ_s)"] Pm --> C0["初期きず寸法の決定 長さ : 2c_0, 深さ : a_0"] C0 --> Kf["きずの疲労進展量評価 繰返し応力の決定 (ΔP_m, Δσ_s)"] Kf --> KfCalc["応力拡大係数範囲 (ΔK)の算出"] KfCalc --> Da["きず深さ増分(Δa)の算出"] Da --> Update["きず深さ・長さの更新 a(i)=a(i-1)+Δa c(i)=c(i-1)+Δc"] Update --> Lifespan["きずの余寿命評価 (オプション1、2、3荷重比 : L_f、韌性比 : K_f)"] Lifespan --> Check{きずは許容可能か?} Check -- YES --> End["きずの疲労進展寿命 (開放検査時期)の算定"] Check -- NO --> Lifespan </pre> <p>*オプション1評価で不合格になつた場合にはオプション2評価を、オプション2評価で不合格になつた場合にはオプション3評価を適用する。</p>	<pre> graph TD START([START]) --> Pm["破壊評価応力の決定 (膜応力 P_m, 曲げ応力 σ_s)"] Pm --> C0["初期きず寸法の決定 長さ : 2c_0, 深さ : a_0"] C0 --> Kf["きずの疲労進展量評価 繰返し応力の決定 (ΔP_m, Δσ_s)"] Kf --> KfCalc["応力拡大係数範囲 (ΔK)の算出"] KfCalc --> Da["きず深さ増分(Δa)の算出"] Da --> Update["きず深さ・長さの更新 a(i)=a(i-1)+Δa c(i)=c(i-1)+Δc"] Update --> Lifespan["きずの余寿命評価 (オプション1、2、3荷重比 : L_f、韌性比 : K_f)"] Lifespan --> Check{きずは許容可能か?} Check -- YES --> End["きずの疲労進展寿命 (開放検査時期)の算定"] Check -- NO --> Lifespan </pre> <p>*オプション1評価で不合格になつた場合にはオプション2評価を、オプション2評価で不合格になつた場合にはオプション3評価を適用する。</p>	

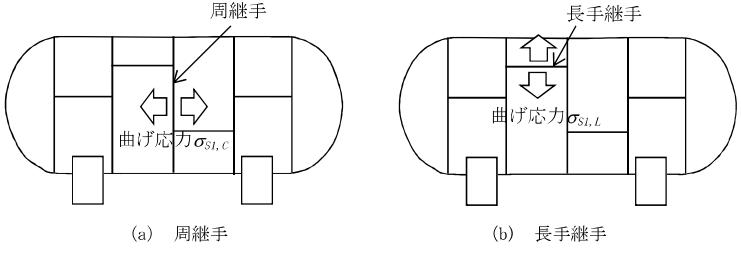
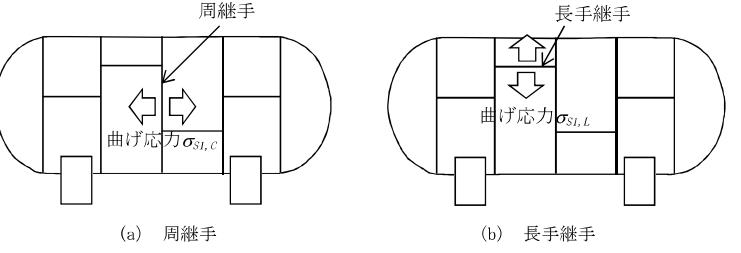
LPG貯槽指針 現行				LPG貯槽指針 改訂案				備考								
表1 LPG貯槽のきず評価におけるパラメーター一覧				表1 LPG貯槽のきず評価におけるパラメーター一覧												
材料物性		入力する値		材料物性		入力する値										
材料の降伏応力・引張強さ		規定最小値		材料の降伏応力・引張強さ		規定最小値										
割れの疲労進展特性を表す 材料定数	C	BS7910の8.2.3による値又は標準値(表2)		割れの疲労進展特性を表す 材料定数	C	BS7910の8.2.3による値又は標準値(表2)										
	m				m											
破壊靭性(限界 CTOD 値)		δ_{mat}	最低使用温度における実測3本の最低値又は参考値(表3)		δ_{mat}	最低使用温度における実測3本の最低値又は参考値(表3)										
LPG貯槽の最低使用温度			設置場所に応じた温度 ^{*1}		LPG貯槽の最低使用温度		設置場所に応じた温度 ^{*1}									
LPG貯蔵能力			運用上の最大値		LPG貯蔵能力		運用上の最大値									
操作条件・ 割れ寸法	LPG貯槽の運転条件	内圧	最高使用圧力(静液圧を含む。)		LPG貯槽の運転条件	内圧	最高使用圧力(静液圧を含む。)									
		内圧変動範囲	温度変化、液位変化、操作中等による圧力変動を加えた値			内圧変動範囲	温度変化、液位変化、操作中等による圧力変動を加えた値									
	板厚		必要最小厚さ		板厚		必要最小厚さ									
	角変形量(弦長スパン: 2L=1m)		当該LPG貯槽の実測値の最大値 ^{*2}		角変形量(弦長スパン: 2L=1m)		当該LPG貯槽の実測値の最大値 ^{*2}									
	きず寸法	長さ $2c_0$	本指針に則した直近2回のMT検査結果の最大寸法 ^{*2}		きず寸法	長さ $2c_0$	本指針に則した直近2回のMT検査結果の最大寸法 ^{*2}									
		深さ a_0				深さ a_0										
*1 設置場所に応じた温度とは、LPG貯槽の設置場所における日最低気温の月別平均値の最低値をいう。この場合、日最低気温の月別平均値の最低値が0°Cを上回る場合は0°Cとする。																
*2 角変形量及びきず寸法についての入力する値は、「11.3.2 個別評価 (2)超音波探傷試験による評価を行う場合」におけるJGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」付表2-1の入力する値と設定内容が異なるので注意すること。																
J 積分による破壊靭性値の記載を追加																
表2 きずの疲労進展特性を表す定数の標準値				表2 きずの疲労進展特性を表す定数の標準値												
鋼種	C値	m値	備考	鋼種	C値	m値	備考									
HW490	1.58×10^{-12}	2.7	$da/dN = C(\Delta K_a)^m$ $dc/dN = C(\Delta K_c)^m$ ここで、 a : きず深さ(mm) c : きず長さの半長(mm) N : 繰り返し数(cycle) ΔK : 応力拡大係数範囲(N/mm ^{3/2})	HW490	1.58×10^{-12}	2.7	$da/dN = C(\Delta K_a)^m$ $dc/dN = C(\Delta K_c)^m$ ここで、 a : きず深さ(mm) c : きず長さの半長(mm) N : 繰り返し数(cycle) ΔK : 応力拡大係数範囲(N/mm ^{3/2})									

LPG貯槽指針 現行						LPG貯槽指針 改訂案						備考														
表3 HW490 被覆アーク溶接で製作したLPG貯槽溶接部における限界CTOD値の参考値						表3 HW490 被覆アーク溶接で製作したLPG貯槽溶接部における限界CTOD値の参考値																				
鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)	溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(℃)	限界CTOD値 ¹ [δ _{mat} 値] (mm)	鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)	溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(℃)	限界CTOD値 ¹ [δ _{mat} 値] (mm)															
HW49 0	D5816 ² (0.7Ni系)	縦 継 手	60	無	0	0.11	D5816 ² (0.7Ni系)	縦 継 手	60	無	0	0.11	・表3と同様にJ積分による破壊靭性値の参考値（表4）を追記													
					-10	0.07					-10	0.07	・最大溶接入熱は、解体材の実績値を記載している。													
					-20	0.05					-20	0.05	・J積分による破壊靭性値は、全試験片で最低値である解体材母材の0.105 (MJ/m ²)を採用し、BS7910の単位系に合わせて105 (N/mm)とした。													
	D5816 ² (1.5Ni系)				-10	0.12	D5816 ² (1.5Ni系)				-10	0.12	・J積分による破壊靭性値は、全試験片で最低値である解体材母材の0.105 (MJ/m ²)を採用し、BS7910の単位系に合わせて105 (N/mm)とした。													
					-20	0.10					-20	0.10	・J積分による破壊靭性値は、全試験片で最低値である解体材母材の0.105 (MJ/m ²)を採用し、BS7910の単位系に合わせて105 (N/mm)とした。													
					-30	0.08					-30	0.08	・J積分による破壊靭性値は、全試験片で最低値である解体材母材の0.105 (MJ/m ²)を採用し、BS7910の単位系に合わせて105 (N/mm)とした。													
*1 限界CTOD値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。また、各温度の中間における限界CTOD値の標準値は、直線補間によって計算する。						*1 限界CTOD値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。また、各温度の中間における限界CTOD値の標準値は、直線補間によって計算する。																				
*2 被覆アーク溶接棒						*2 被覆アーク溶接棒																				
表4 SPV450Q-SR サブマージアーク溶接で製作した横置円筒形LPG貯槽溶接部におけるJ積分による破壊靭性値の参考値 ¹																										
鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)	溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(℃)	J積分による 破壊靭性値 ² [J _{mat} 値] (N/mm)																					
SPV45 0Q-SR	YS-M5 ³	32	有	-10	105																					
*1 LPG貯槽用材料特性（破壊靭性値）調査報告書（平成29年2月）（（一社）日本ガス協会）																										
*2 J積分による破壊靭性値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。																										
*3 サブマージアーク溶接ワイヤ																										
4. 横置円筒形LPG貯槽における開放検査周期の計算例																										
開放検査周期の計算例として、表4に示す横置円筒形LPG貯槽Aについて検討を行った結果を示す。本書では、通常時（最高使用圧力時）における検査時期を算定するとともに、検査時期到達時に地震が発生した場合について評価した。その計算条件を表5から表7に示す。なお、地震時の評価はレベル1地震と必要に応じてレベル2地震の評価が必要となるが、今回は地震力の大きいレベル2のみとした。																										
評価対象とする初期きずは、図2に示すような長手継手に平行なきずとする（最も厳しくなる条件とする）。なお、球形LPG貯槽の計算例は、JGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の付属書2「疲労割れの事例」を参考にすること。																										
開放検査周期の計算例として、表5に示す横置円筒形LPG貯槽Aについて検討を行った結果を示す。本書では、通常時（最高使用圧力時）における検査時期を算定するとともに、検査時期到達時に地震が発生した場合について評価した。その計算条件を表6から表8に示す。なお、地震時の評価はレベル1地震と必要に応じてレベル2地震の評価が必要となるが、今回は地震力の大きいレベル2のみとした。																										
評価対象とする初期きずは、図2に示すような長手継手に平行なきずとする（最も厳しくなる条件とする）。なお、球形LPG貯槽の計算例は、JGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の付属書2「疲労割れの事例」を参考にすること。																										

LPG貯槽指針 現行				LPG貯槽指針 改訂案				備考																																												
<u>表4</u> 横置円筒形LPG貯槽の諸元				<u>表5</u> 横置円筒形LPG貯槽の諸元																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">諸元</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>貯槽名称</td><td>横置円筒形LPG貯槽A</td></tr> <tr><td>LPGの種類</td><td>プロパン</td></tr> <tr><td>貯蔵能力 W(t)</td><td>20</td></tr> <tr><td>材料</td><td>HW490</td></tr> <tr><td>内径 D(m)</td><td>2.8</td></tr> <tr><td>最高使用圧力(静液圧を含む。) P_{max}(MPa)</td><td>1.77</td></tr> <tr><td>必要最小厚さ t(mm)</td><td>13.8</td></tr> <tr><td>最大角変形量 W₀ (mm/m)</td><td>15.0</td></tr> <tr><td>最低使用温度(℃)</td><td>-10</td></tr> <tr><td>限界CTOD値(標準値) δ_{max}(mm)</td><td>0.07*¹</td></tr> </tbody> </table>				諸元		貯槽名称	横置円筒形LPG貯槽A	LPGの種類	プロパン	貯蔵能力 W(t)	20	材料	HW490	内径 D(m)	2.8	最高使用圧力(静液圧を含む。) P _{max} (MPa)	1.77	必要最小厚さ t(mm)	13.8	最大角変形量 W ₀ (mm/m)	15.0	最低使用温度(℃)	-10	限界CTOD値(標準値) δ _{max} (mm)	0.07* ¹	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">諸元</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>貯槽名称</td><td>横置円筒形LPG貯槽A</td></tr> <tr><td>LPGの種類</td><td>プロパン</td></tr> <tr><td>貯蔵能力 W(t)</td><td>20</td></tr> <tr><td>材料</td><td>HW490</td></tr> <tr><td>内径 D(m)</td><td>2.8</td></tr> <tr><td>最高使用圧力(静液圧を含む。) P_{max}(MPa)</td><td>1.77</td></tr> <tr><td>必要最小厚さ t(mm)</td><td>13.8</td></tr> <tr><td>最大角変形量 W₀ (mm/m)</td><td>15.0</td></tr> <tr><td>最低使用温度(℃)</td><td>-10</td></tr> <tr><td>限界CTOD値(標準値) δ_{max}(mm)</td><td>0.07*¹</td></tr> </tbody> </table>				諸元		貯槽名称	横置円筒形LPG貯槽A	LPGの種類	プロパン	貯蔵能力 W(t)	20	材料	HW490	内径 D(m)	2.8	最高使用圧力(静液圧を含む。) P _{max} (MPa)	1.77	必要最小厚さ t(mm)	13.8	最大角変形量 W ₀ (mm/m)	15.0	最低使用温度(℃)	-10	限界CTOD値(標準値) δ _{max} (mm)	0.07* ¹	
諸元																																																				
貯槽名称	横置円筒形LPG貯槽A																																																			
LPGの種類	プロパン																																																			
貯蔵能力 W(t)	20																																																			
材料	HW490																																																			
内径 D(m)	2.8																																																			
最高使用圧力(静液圧を含む。) P _{max} (MPa)	1.77																																																			
必要最小厚さ t(mm)	13.8																																																			
最大角変形量 W ₀ (mm/m)	15.0																																																			
最低使用温度(℃)	-10																																																			
限界CTOD値(標準値) δ _{max} (mm)	0.07* ¹																																																			
諸元																																																				
貯槽名称	横置円筒形LPG貯槽A																																																			
LPGの種類	プロパン																																																			
貯蔵能力 W(t)	20																																																			
材料	HW490																																																			
内径 D(m)	2.8																																																			
最高使用圧力(静液圧を含む。) P _{max} (MPa)	1.77																																																			
必要最小厚さ t(mm)	13.8																																																			
最大角変形量 W ₀ (mm/m)	15.0																																																			
最低使用温度(℃)	-10																																																			
限界CTOD値(標準値) δ _{max} (mm)	0.07* ¹																																																			
* 1 : 限界CTOD値については、「日本ガス協会受託研究 LPG貯槽の開放検査周期に関する調査研究報告書(平成3年)」で示されているHW490のサブマージドアーク溶接継手の破壊非性試験結果を参考に、安全を見て0℃～-20℃の最低値0.075mmを丸めた0.07mmとした。				* 1 : 限界CTOD値については、「日本ガス協会受託研究 LPG貯槽の開放検査周期に関する調査研究報告書(平成3年)」で示されているHW490のサブマージドアーク溶接継手の破壊非性試験結果を参考に、安全を見て0℃～-20℃の最低値0.075mmを丸めた0.07mmとした。																																																
<u>表5</u> 検査周期の計算に用いたHW490の材料物性				<u>表6</u> 検査周期の計算に用いたHW490の材料物性																																																
<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">材料物性値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>ヤング率 E (N/mm²)</td><td>206,000</td></tr> <tr><td>ポアソン比 ν</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>規定最小降伏応力 σ_y (N/mm²)</td><td>490</td></tr> <tr><td>規定最小引張強さ σ_u (N/mm²)</td><td>610</td></tr> </tbody> </table>				材料物性値		ヤング率 E (N/mm ²)	206,000	ポアソン比 ν	0.3	規定最小降伏応力 σ _y (N/mm ²)	490	規定最小引張強さ σ _u (N/mm ²)	610	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">材料物性値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>ヤング率 E (N/mm²)</td><td>206,000</td></tr> <tr><td>ポアソン比 ν</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>規定最小降伏応力 σ_y (N/mm²)</td><td>490</td></tr> <tr><td>規定最小引張強さ σ_u (N/mm²)</td><td>610</td></tr> </tbody> </table>				材料物性値		ヤング率 E (N/mm ²)	206,000	ポアソン比 ν	0.3	規定最小降伏応力 σ _y (N/mm ²)	490	規定最小引張強さ σ _u (N/mm ²)	610																									
材料物性値																																																				
ヤング率 E (N/mm ²)	206,000																																																			
ポアソン比 ν	0.3																																																			
規定最小降伏応力 σ _y (N/mm ²)	490																																																			
規定最小引張強さ σ _u (N/mm ²)	610																																																			
材料物性値																																																				
ヤング率 E (N/mm ²)	206,000																																																			
ポアソン比 ν	0.3																																																			
規定最小降伏応力 σ _y (N/mm ²)	490																																																			
規定最小引張強さ σ _u (N/mm ²)	610																																																			
<u>表6</u> きずの疲労進展評価に用いた横置円筒形LPG貯槽Aの計算諸元				<u>表7</u> きずの疲労進展評価に用いた横置円筒形LPG貯槽Aの計算諸元																																																
<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">計算諸元</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)</td><td>1.182～1.77</td></tr> <tr><td>初期きず深さ a₀ (mm)</td><td>5.1</td></tr> <tr><td>初期きず長さ 2c₀ (mm)</td><td>21.3</td></tr> </tbody> </table>				計算諸元		最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)	1.182～1.77	初期きず深さ a ₀ (mm)	5.1	初期きず長さ 2c ₀ (mm)	21.3	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2">計算諸元</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)</td><td>1.182～1.77</td></tr> <tr><td>初期きず深さ a₀ (mm)</td><td>5.1</td></tr> <tr><td>初期きず長さ 2c₀ (mm)</td><td>21.3</td></tr> </tbody> </table>				計算諸元		最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)	1.182～1.77	初期きず深さ a ₀ (mm)	5.1	初期きず長さ 2c ₀ (mm)	21.3																													
計算諸元																																																				
最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)	1.182～1.77																																																			
初期きず深さ a ₀ (mm)	5.1																																																			
初期きず長さ 2c ₀ (mm)	21.3																																																			
計算諸元																																																				
最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)	1.182～1.77																																																			
初期きず深さ a ₀ (mm)	5.1																																																			
初期きず長さ 2c ₀ (mm)	21.3																																																			
<u>表7</u> 荷重ケース				<u>表8</u> 荷重ケース																																																
<table border="1"> <thead> <tr><th>条件</th><th>温度(℃)</th><th>破壊評価圧力 P_{max} (MPa)</th><th>限界CTOD値 δ_{max} (mm)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>通常時</td><td>-10</td><td>1.77(最高使用圧力)</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>レベル2地震時</td><td>-10</td><td>0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)</td><td>0.07</td></tr> </tbody> </table>				条件	温度(℃)	破壊評価圧力 P _{max} (MPa)	限界CTOD値 δ _{max} (mm)	通常時	-10	1.77(最高使用圧力)	0.07	レベル2地震時	-10	0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)	0.07	<table border="1"> <thead> <tr><th>条件</th><th>温度(℃)</th><th>破壊評価圧力 P_{max} (MPa)</th><th>限界CTOD値 δ_{max} (mm)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>通常時</td><td>-10</td><td>1.77(最高使用圧力)</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>レベル2地震時</td><td>-10</td><td>0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)</td><td>0.07</td></tr> </tbody> </table>				条件	温度(℃)	破壊評価圧力 P _{max} (MPa)	限界CTOD値 δ _{max} (mm)	通常時	-10	1.77(最高使用圧力)	0.07	レベル2地震時	-10	0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)	0.07																					
条件	温度(℃)	破壊評価圧力 P _{max} (MPa)	限界CTOD値 δ _{max} (mm)																																																	
通常時	-10	1.77(最高使用圧力)	0.07																																																	
レベル2地震時	-10	0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)	0.07																																																	
条件	温度(℃)	破壊評価圧力 P _{max} (MPa)	限界CTOD値 δ _{max} (mm)																																																	
通常時	-10	1.77(最高使用圧力)	0.07																																																	
レベル2地震時	-10	0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)	0.07																																																	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>図2 評価対象とした初期きず位置</p> <p>4.1 破壊評価応力の決定 4.1.1 1次応力の計算 横置円筒形LPG貯槽に作用する1次応力としては、内圧（静液圧を含む。）による膜応力（P_m）と溶接部の角変形によって生じる曲げ応力（σ_{S1}）が考えられる。</p> <p>(1) 内圧による膜応力（P_m） 横置円筒形LPG貯槽の場合、図3に示すように膜応力は方向により異なり、長手方向膜応力（P_{m1}）と周方向膜応力（P_{m2}）は次式で表される。</p> $P_{m1} = \frac{P_{max}D}{4t} \quad (4.1.1a)$ $P_{m2} = \frac{P_{max}D}{2t} \quad (4.1.1b)$ <p>ここで、 P_{max} : 最高使用圧力 (MPa) D : 内径 (mm) t : 必要最小厚さ (mm)</p> <p>図3 横置円筒形LPG貯槽に生じる内圧による膜応力</p>	<p>図2 評価対象とした初期きず位置</p> <p>4.1 破壊評価応力の決定 4.1.1 1次応力の計算 横置円筒形LPG貯槽に作用する1次応力としては、内圧（静液圧を含む。）による膜応力（P_m）と溶接部の角変形によって生じる曲げ応力（σ_{S1}）が考えられる。</p> <p>(1) 内圧による膜応力（P_m） 横置円筒形LPG貯槽の場合、図3に示すように膜応力は方向により異なり、長手方向膜応力（P_{m1}）と周方向膜応力（P_{m2}）は次式で表される。</p> $P_{m1} = \frac{P_{max}D}{4t} \quad (4.1.1a)$ $P_{m2} = \frac{P_{max}D}{2t} \quad (4.1.1b)$ <p>ここで、 P_{max} : 最高使用圧力 (MPa) D : 内径 (mm) t : 必要最小厚さ (mm)</p> <p>図3 横置円筒形LPG貯槽に生じる内圧による膜応力</p>	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>今回、図2に示すように長手継手に平行な割れを評価対象としているので、割れを開口させる方向である周方向膜応力 (P_{m2}) を内圧による膜応力として用いる。</p> <p>(i) 通常時</p> $P_m = P_{m2} = \frac{P_{max}D}{2t}$ $= 1796 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ <p>(ii) レベル2 地震時</p> $P_m = P_{m2} = \frac{P_{max}D}{2t}$ $= 24.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	<p>今回、図2に示すように長手継手に平行な割れを評価対象としているので、割れを開口させる方向である周方向膜応力 (P_{m2}) を内圧による膜応力として用いる。</p> <p>(i) 通常時</p> $P_m = P_{m2} = \frac{P_{max}D}{2t}$ $= 1796 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ <p>(ii) レベル2 地震時</p> $P_m = P_{m2} = \frac{P_{max}D}{2t}$ $= 24.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	
<p>(2) 角変形によって生じる曲げ応力 (σ_{Sl})</p> <p>横置円筒形LPG貯槽の場合、図4に示すように角変形によって生じる曲げ応力は、周継手と長手継手で生じ、それぞれ次式で表される。</p> <p>(a) 周継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{Sl,C}$)</p>	<p>(2) 角変形によって生じる曲げ応力 (σ_{Sl})</p> <p>横置円筒形LPG貯槽の場合、図4に示すように角変形によって生じる曲げ応力は、周継手と長手継手で生じ、それぞれ次式で表される。</p> <p>(a) 周継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{Sl,C}$)</p>	
$\sigma_{Sl,C} = \frac{6P_{ml}W_0K_v}{t} \quad (4.1.2)$ <p>ここで、</p> $K_v = \frac{1}{\cosh\alpha + \cos\beta} \left[\frac{\sinh\alpha}{\alpha} + \frac{\sin\beta}{\beta} \right] \quad (4.1.3)$ $\alpha^2 = m^2 + n^2 \quad (4.1.4)$ $\beta^2 = -m^2 + n^2 \quad (4.1.5)$ $m^2 = 12(1-v^2) \frac{P_m}{E} \left(\frac{L}{t} \right)^2 \quad (4.1.6)$ $n^2 = 2\sqrt{12(1-v^2)} \frac{L^2}{rt} \quad (4.1.7)$ <p>ただし、</p> <ul style="list-style-type: none"> E : ヤング率 (N/mm²) W₀ : 最大角変形量 (mm) v : ポアソン比 2L : 変形が生じている範囲の長さ (1mとする) (mm) r : 貯槽の半径 (mm) <p>なお、式(4.1.5)において $\beta^2 = -m^2 + n^2 < 0$ となる時は、</p> $(\beta')^2 = m^2 - n^2 \quad (4.1.8)$ <p>とおき、式(4.1.3)の β、$\cos\beta$、$\sin\beta$ を</p> $\beta = \beta' \quad (4.1.9)$ $\cos\beta = \cosh\beta' \quad (4.1.10)$	$\sigma_{Sl,C} = \frac{6P_{ml}W_0K_v}{t} \quad (4.1.2)$ <p>ここで、</p> $K_v = \frac{1}{\cosh\alpha + \cos\beta} \left[\frac{\sinh\alpha}{\alpha} + \frac{\sin\beta}{\beta} \right] \quad (4.1.3)$ $\alpha^2 = m^2 + n^2 \quad (4.1.4)$ $\beta^2 = -m^2 + n^2 \quad (4.1.5)$ $m^2 = 12(1-v^2) \frac{P_m}{E} \left(\frac{L}{t} \right)^2 \quad (4.1.6)$ $n^2 = 2\sqrt{12(1-v^2)} \frac{L^2}{rt} \quad (4.1.7)$ <p>ただし、</p> <ul style="list-style-type: none"> E : ヤング率 (N/mm²) W₀ : 最大角変形量 (mm) v : ポアソン比 2L : 変形が生じている範囲の長さ (1mとする) (mm) r : 貯槽の半径 (mm) <p>なお、式(4.1.5)において $\beta^2 = -m^2 + n^2 < 0$ となる時は、</p> $(\beta')^2 = m^2 - n^2 \quad (4.1.8)$ <p>とおき、式(4.1.3)の β、$\cos\beta$、$\sin\beta$ を</p> $\beta = \beta' \quad (4.1.9)$ $\cos\beta = \cosh\beta' \quad (4.1.10)$	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
$\sin \beta = \sinh \beta'$ (4.1.11) で置換することにより K_ψ を求める。 (b) 長手継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{S1,L}$) $\sigma_{S1,L} = \frac{6P_m W_0 K_m}{t} \quad (4.1.12)$ $K_m = \frac{\tanh m}{m} \cdot \frac{\tanh \frac{m}{2}}{\frac{m}{2}} \quad (4.1.13)$ $m^2 = 12(1-v^2) \frac{P_m}{E} \left(\frac{L}{t}\right)^2 \quad (4.1.14)$  <p>図 4 横置円筒形 LPG 貯槽に生じる角変形による曲げ応力</p>	$\sin \beta = \sinh \beta'$ (4.1.11) で置換することにより K_ψ を求める。 (b) 長手継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{S1,L}$) $\sigma_{S1,L} = \frac{6P_m W_0 K_m}{t} \quad (4.1.12)$ $K_m = \frac{\tanh m}{m} \cdot \frac{\tanh \frac{m}{2}}{\frac{m}{2}} \quad (4.1.13)$ $m^2 = 12(1-v^2) \frac{P_m}{E} \left(\frac{L}{t}\right)^2 \quad (4.1.14)$  <p>図 4 横置円筒形 LPG 貯槽に生じる角変形による曲げ応力</p>	
<p>今回、図 2 に示すように長手継手に平行なきずを評価対象としているので、長手継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{S1,L}$) を角変形によって生じる曲げ応力として用いる。</p> <p>(i) 通常時</p> $\sigma_{S1} = \sigma_{S1,L} = \frac{6P_m W_0 K_m}{t}$ $= 1765 (\text{N/mm}^2)$ <p>ここで、</p> $K_m = \frac{\tanh m}{m} \cdot \frac{\tanh \frac{m}{2}}{\frac{m}{2}}$ $= 0.15$ $m^2 = 12(1-v^2) \frac{P_m}{E} \left(\frac{L}{t}\right)^2$ $= 3.53$ <p>(ii) レベル 2 地震時</p> <p>式(4.1.12) から式(4.1.14) より、$\sigma_{S1} = 93.1 (\text{N/mm}^2)$</p>	<p>今回、図 2 に示すように長手継手に平行なきずを評価対象としているので、長手継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{S1,L}$) を角変形によって生じる曲げ応力として用いる。</p> <p>(i) 通常時</p> $\sigma_{S1} = \sigma_{S1,L} = \frac{6P_m W_0 K_m}{t}$ $= 1765 (\text{N/mm}^2)$ <p>ここで、</p> $K_m = \frac{\tanh m}{m} \cdot \frac{\tanh \frac{m}{2}}{\frac{m}{2}}$ $= 0.15$ $m^2 = 12(1-v^2) \frac{P_m}{E} \left(\frac{L}{t}\right)^2$ $= 3.53$ <p>(ii) レベル 2 地震時</p> <p>式(4.1.12) から式(4.1.14) より、$\sigma_{S1} = 93.1 (\text{N/mm}^2)$</p>	

LPG貯槽指針 現 行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>4. 1. 2 2次応力の計算</p> <p>横置円筒形LPG貯槽に作用する2次応力としては、構造的な不連続により生じる局部応力と溶接による残留応力が考えられる。</p> <p>(1) 構造的な不連続により生じる局部応力 (σ_{S2})</p> <p>構造的な不連続により生じる局部応力は、有限要素法等の構造解析により求めた値とするか、または、式(4.1.1)により得られた値の15%が曲げ応力成分として作用するものとする。</p> <p>本書では、後者の値を用いる。</p> <p>(i) 通常時 $\sigma_{S2} = P_m \times 0.15 = 26.9 \text{ (N/mm}^2\text{)}$</p> <p>(ii) レベル2地震時 $\sigma_{S2} = P_m \times 0.15 = 3.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$</p> <p>(2) 溶接残留応力 ($Q_m$)</p> <p>残留応力分布が不明確な場合の残留応力は断面一様分布とし、次の2式のうち小さい値を採用する。</p> <p>$Q_m = \sigma_y \quad (4.1.15a)$</p> <p>$Q_m = (1.4 - \sigma_{ref}/\sigma_f) \sigma_y \quad (4.1.15b)$</p> <p>(i) 通常時 $Q_m = \sigma_y$ $= 490 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ $Q_m = (1.4 - \sigma_{ref}/\sigma_f) \sigma_y$ $= 337.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ よって、$Q_m = 337.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ここで、 σ_{ref} : 参照応力であって、半梢円表面割れは次式で得られる値とする。 $\sigma_{ref} = \frac{P_b + (K_m - 1)P_m + 3P_ma'' + \sqrt{(P_b + (K_m - 1)P_m + 3P_ma'')^2 + 9P_m^2(1-a')^2}}{3(1-a')^2} \quad (4.1.16)$ $= 391.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ただし、 P_b : 境界力により発生する曲げ応力成分（通常時評価では「ゼロ」とし、地震時評価では地震時発生曲げ応力を用いる。） K_m : 角変形及び構造不連続により生ずる曲げ応力成分用のファクターで、次式によって計算する。 $K_m = 1 + (\sigma_{S1} + \sigma_{S2})/P_m \quad (4.1.17)$ $= 2.133$</p>	<p>4. 1. 2 2次応力の計算</p> <p>横置円筒形LPG貯槽に作用する2次応力としては、構造的な不連続により生じる局部応力と溶接による残留応力が考えられる。</p> <p>(1) 構造的な不連続により生じる局部応力 (σ_{S2})</p> <p>構造的な不連続により生じる局部応力は、有限要素法等の構造解析により求めた値とするか、または、式(4.1.1)により得られた値の15%が曲げ応力成分として作用するものとする。</p> <p>本書では、後者の値を用いる。</p> <p>(i) 通常時 $\sigma_{S2} = P_m \times 0.15 = 26.9 \text{ (N/mm}^2\text{)}$</p> <p>(ii) レベル2地震時 $\sigma_{S2} = P_m \times 0.15 = 3.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$</p> <p>(2) 溶接残留応力 ($Q_m$)</p> <p>残留応力分布が不明確な場合の残留応力は断面一様分布とし、次の2式のうち小さい値を採用する。</p> <p>$Q_m = \sigma_y \quad (4.1.15a)$</p> <p>$Q_m = (1.4 - \sigma_{ref}/\sigma_f) \sigma_y \quad (4.1.15b)$</p> <p>(i) 通常時 $Q_m = \sigma_y$ $= 490 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ $Q_m = (1.4 - \sigma_{ref}/\sigma_f) \sigma_y$ $= 337.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ よって、$Q_m = 337.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ここで、 σ_{ref} : 参照応力であって、半梢円表面割れは次式で得られる値とする。 $\sigma_{ref} = \frac{P_b + (K_m - 1)P_m + 3P_ma'' + \sqrt{(P_b + (K_m - 1)P_m + 3P_ma'')^2 + 9P_m^2(1-a')^2}}{3(1-a')^2} \quad (4.1.16)$ $= 391.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ただし、 P_b : 境界力により発生する曲げ応力成分（通常時評価では「ゼロ」とし、地震時評価では地震時発生曲げ応力を用いる。） K_m : 角変形及び構造不連続により生ずる曲げ応力成分用のファクターで、次式によって計算する。 $K_m = 1 + (\sigma_{S1} + \sigma_{S2})/P_m \quad (4.1.17)$ $= 2.133$</p>	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>ここで、</p> <p>σ_{S1} : 角変形により生ずる曲げ応力成分 (N/mm²)</p> <p>σ_{S2} : 構造不連続により生ずる曲げ応力成分 (N/mm²)</p> <p>P_m : 境界力により発生する膜応力成分 (N/mm²)</p> <p>a'' : 次のように求める。</p> $a'' = (a/t) / \{1 + (t/c)\} \quad \text{ただし, } W \geq 2(c+t)$ $a'' = (2a/t)(c/W) \quad \text{ただし, } W < 2(c+t)$ <p>$W \geq 2(c+t)$ のため、</p> $a'' = (a/t) / \{1 + (t/c)\}$ $= 0.161$ <p>ここで、</p> <p>a : きず深さ (mm)</p> <p>c : きず長さの半長 (mm)</p> <p>W : 板幅 (mm)</p> <p>σ_f : 流動応力であって、次の式で得られる値とする。</p> $\sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \quad (4.1.18)$ <p>$= 550(\text{N/mm}^2)$</p> <p>ここで、</p> <p>σ_y : 降伏応力(N/mm²)</p> <p>σ_u : 引張強さ(N/mm²)</p> <p>(ii) レベル2地震時</p> <p>式(4.1.15a)から式(4.1.18)より、$Q_m = 490(\text{N/mm}^2)$</p>	<p>ここで、</p> <p>σ_{S1} : 角変形により生ずる曲げ応力成分 (N/mm²)</p> <p>σ_{S2} : 構造不連続により生ずる曲げ応力成分 (N/mm²)</p> <p>P_m : 境界力により発生する膜応力成分 (N/mm²)</p> <p>a'' : 次のように求める。</p> $a'' = (a/t) / \{1 + (t/c)\} \quad \text{ただし, } W \geq 2(c+t)$ $a'' = (2a/t)(c/W) \quad \text{ただし, } W < 2(c+t)$ <p>$W \geq 2(c+t)$ のため、</p> $a'' = (a/t) / \{1 + (t/c)\}$ $= 0.161$ <p>ここで、</p> <p>a : きず深さ (mm)</p> <p>c : きず長さの半長 (mm)</p> <p>W : 板幅 (mm)</p> <p>σ_f : 流動応力であって、次の式で得られる値とする。</p> $\sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \quad (4.1.18)$ <p>$= 550(\text{N/mm}^2)$</p> <p>ここで、</p> <p>σ_y : 降伏応力(N/mm²)</p> <p>σ_u : 引張強さ(N/mm²)</p> <p>(ii) レベル2地震時</p> <p>式(4.1.15a)から式(4.1.18)より、$Q_m = 490(\text{N/mm}^2)$</p>	
<h4>4.1.3 地震時発生応力の算出</h4> <p>横置円筒形LPG貯槽に作用する地震時発生曲げ応力 (σ_{S3}) は、有限要素法等の構造解析等により求める。本書では、有限要素法で求めた値を用いる。</p> <p>レベル2地震時 $\sigma_{S3} = 85.5(\text{N/mm}^2)$</p> <p>4.2 きずの疲労進展解析</p> <p>まず、横置円筒形LPG貯槽における膜応力範囲 (ΔP_m) 及び曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_S$) を、式(4.1.1)、式(4.1.2)等を用いて最大圧力変動範囲 (ΔP) から求め、きずの疲労進展則が式(4.2.1)に示すParis則に従うとして、1サイクル毎にきずの疲労進展長さの計算を行う。</p> $\frac{da}{dN} = C(\Delta K_a)^m \quad \text{: きず底} \quad (4.2.1.a)$	<h4>4.1.3 地震時発生応力の算出</h4> <p>横置円筒形LPG貯槽に作用する地震時発生曲げ応力 (σ_{S3}) は、有限要素法等の構造解析等により求める。本書では、有限要素法で求めた値を用いる。</p> <p>レベル2地震時 $\sigma_{S3} = 85.5(\text{N/mm}^2)$</p> <p>4.2 きずの疲労進展解析</p> <p>まず、横置円筒形LPG貯槽における膜応力範囲 (ΔP_m) 及び曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_S$) を、式(4.1.1)、式(4.1.2)等を用いて最大圧力変動範囲 (ΔP) から求め、きずの疲労進展則が式(4.2.1)に示すParis則に従うとして、1サイクル毎にきずの疲労進展長さの計算を行う。</p> $\frac{da}{dN} = C(\Delta K_a)^m \quad \text{: きず底} \quad (4.2.1.a)$	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
$\frac{dc}{dN} = C(\Delta K_a)^m$: きず表面 <p>ここで、 $\frac{da}{dN}$: きず底における 1 サイクルあたりのきず進展量 $\frac{dc}{dN}$: きず表面における 1 サイクルあたりのきず進展量 ΔK_a : きず底における応力拡大係数範囲 ΔK_c : きず表面における応力拡大係数範囲 C, m : 定数</p> <p>4.1.1 (1) で述べたように膜応力範囲 (ΔP_m) もきず方向により異なり、長手方向膜応力範囲 (ΔP_{ml}) と周方向膜応力範囲 (ΔP_{m2}) はそれぞれ次式で表される。</p> $\Delta P_{ml} = \Delta P_{ml,max} - P_{ml,min} \quad (4.2.2a)$ $\Delta P_{m2} = \Delta P_{m2,max} - P_{m2,min} \quad (4.2.2b)$ <p>ここで、 $P_{ml,max}$: 長手方向最大膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1a) を用いて計算する) $P_{ml,min}$: 長手方向最小膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1a) を用いて計算する) $P_{m2,max}$: 周方向最大膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1b) を用いて計算する) $P_{m2,min}$: 周方向最小膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1b) を用いて計算する)</p> <p>今回、図 2 に示すように長手継手に平行なきずを評価対象としているので、きずを開口させる方向である周方向膜応力範囲 (ΔP_{m2}) を用いる。</p> $\Delta P_m = \Delta P_{m2} = \Delta P_{m2,max} - P_{m2,min} = 597 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ <p>また、曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_s$) についても 4.1.1 (2) で述べたように周継手と長手継手で異なり、周継手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_{sc}$) と長手継手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_{sl}$) はそれぞれ次式で表される。</p> $\Delta \sigma_{sc} = (\sigma_{s1,c,max} + \sigma_{s2,max}) - (\sigma_{s1,c,min} + \sigma_{s2,min}) \quad (4.2.3a)$ $\Delta \sigma_{sl} = (\sigma_{s1,l,max} + \sigma_{s2,max}) - (\sigma_{s1,l,min} + \sigma_{s2,min}) \quad (4.2.3b)$ <p>ここで、</p>	$\frac{dc}{dN} = C(\Delta K_c)^m$: きず表面 <p>ここで、 $\frac{da}{dN}$: きず底における 1 サイクルあたりのきず進展量 $\frac{dc}{dN}$: きず表面における 1 サイクルあたりのきず進展量 ΔK_a : きず底における応力拡大係数範囲 ΔK_c : きず表面における応力拡大係数範囲 C, m : 定数</p> <p>4.1.1 (1) で述べたように膜応力範囲 (ΔP_m) もきず方向により異なり、長手方向膜応力範囲 (ΔP_{ml}) と周方向膜応力範囲 (ΔP_{m2}) はそれぞれ次式で表される。</p> $\Delta P_{ml} = \Delta P_{ml,max} - P_{ml,min} \quad (4.2.2a)$ $\Delta P_{m2} = \Delta P_{m2,max} - P_{m2,min} \quad (4.2.2b)$ <p>ここで、 $P_{ml,max}$: 長手方向最大膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1a) を用いて計算する) $P_{ml,min}$: 長手方向最小膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1a) を用いて計算する) $P_{m2,max}$: 周方向最大膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1b) を用いて計算する) $P_{m2,min}$: 周方向最小膜応力 (N/mm²) (式 (4.1.1b) を用いて計算する)</p> <p>今回、図 2 に示すように長手継手に平行なきずを評価対象としているので、きずを開口させる方向である周方向膜応力範囲 (ΔP_{m2}) を用いる。</p> $\Delta P_m = \Delta P_{m2} = \Delta P_{m2,max} - P_{m2,min} = 597 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ <p>また、曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_s$) についても 4.1.1 (2) で述べたように周継手と長手継手で異なり、周継手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_{sc}$) と長手継手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_{sl}$) はそれぞれ次式で表される。</p> $\Delta \sigma_{sc} = (\sigma_{s1,c,max} + \sigma_{s2,max}) - (\sigma_{s1,c,min} + \sigma_{s2,min}) \quad (4.2.3a)$ $\Delta \sigma_{sl} = (\sigma_{s1,l,max} + \sigma_{s2,max}) - (\sigma_{s1,l,min} + \sigma_{s2,min}) \quad (4.2.3b)$ <p>ここで、</p>	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>$\sigma_{SL,C,max}$: 周縦手に作用する角変形による最大曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.2) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{SL,C,min}$: 周縦手に作用する角変形による最小曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.2) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{SL,L,max}$: 長手縦手に作用する角変形による最大曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.12) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{SL,L,min}$: 長手縦手に作用する角変形による最小曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.12) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{S2,max}$: 構造的な不連続により生じる最大局部応力 (N/mm²)</p> <p>$\sigma_{S2,min}$: 構造的な不連続により生じる最小局部応力 (N/mm²)</p>	<p>$\sigma_{SL,C,max}$: 周縦手に作用する角変形による最大曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.2) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{SL,C,min}$: 周縦手に作用する角変形による最小曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.2) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{SL,L,max}$: 長手縦手に作用する角変形による最大曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.12) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{SL,L,min}$: 長手縦手に作用する角変形による最小曲げ応力 (N/mm²) (式 (4.1.12) を用いて計算する)</p> <p>$\sigma_{S2,max}$: 構造的な不連続により生じる最大局部応力 (N/mm²)</p> <p>$\sigma_{S2,min}$: 構造的な不連続により生じる最小局部応力 (N/mm²)</p>	

今回、図2に示すように長手縦手に平行なきずを評価対象としているので、きずを開口させる方向である長手縦手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta\sigma_{SL}$) を用いる。

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_S = \Delta\sigma_{SL} &= (\sigma_{SL,L,max} + \sigma_{S2,max}) - (\sigma_{SL,L,min} + \sigma_{S2,min}) \\ &= 18.8 \text{ (N/mm}^2)\end{aligned}$$

4.3 FADを用いた許容きずの評価

前項で1サイクル毎に計算された疲労進展後のきずについて、BS7910のFADを用いた評価を行うことによって、きずが許容可能かどうかを判定する。なお、本評価においては、破壊評価圧力が作用した時に破壊が生じるものとする。

4.3.1 オプション1評価

通常時について、評価を行う。

(1) 韧性比 K_r の計算

韧性比 K_r は、破壊韧性値(K_{mat})に対する作用応力拡大係数 K_i^P および K_i^S から次式で定義される。

$$\begin{aligned}K_r &= \frac{K_i^P + K_i^S}{K_{mat}} + \rho \\ &= 0.806\end{aligned}\quad (4.3.1)$$

ここで、破壊韧性値 K_{mat} は、限界CTOD δ_{mat} を用いて次式で求める。

$$\begin{aligned}K_{mat} &= \sqrt{m\tau_y \delta_{mat} E / (1-v^2)} \\ &= 3,554 \text{ (N/mm}^{3/2})\end{aligned}\quad (4.3.2)$$

ここで、 $0.3 < \sigma_y / \sigma_u < 0.98$ なので、

$$\begin{aligned}m &= 1.517(\sigma_y / \sigma_u)^{-0.3188} \\ &= 1.627\end{aligned}$$

ここで、作用応力拡大係数 K_i^P および K_i^S は、

$$K_i^P : 1\text{次応力による応力拡大係数 } (= Y\sigma_P \sqrt{\pi a})$$

今回、図2に示すように長手縦手に平行なきずを評価対象としているので、きずを開口させる方向である長手縦手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta\sigma_{SL}$) を用いる。

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_S = \Delta\sigma_{SL} &= (\sigma_{SL,L,max} + \sigma_{S2,max}) - (\sigma_{SL,L,min} + \sigma_{S2,min}) \\ &= 18.8 \text{ (N/mm}^2)\end{aligned}$$

4.3 FADを用いた許容きずの評価

前項で1サイクル毎に計算された疲労進展後のきずについて、BS7910のFADを用いた評価を行うことによって、きずが許容可能かどうかを判定する。なお、本評価においては、破壊評価圧力が作用した時に破壊が生じるものとする。

4.3.1 オプション1評価

通常時について、評価を行う。

(1) 韧性比 K_r の計算

韧性比 K_r は、破壊韧性値(K_{mat})に対する作用応力拡大係数 K_i^P および K_i^S から次式で定義される。

$$\begin{aligned}K_r &= \frac{K_i^P + K_i^S}{K_{mat}} + \rho \\ &= 0.806\end{aligned}\quad (4.3.1)$$

ここで、破壊韧性値 K_{mat} は、限界CTOD δ_{mat} を用いて次式で求める。

$$\begin{aligned}K_{mat} &= \sqrt{m\tau_y \delta_{mat} E / (1-v^2)} \\ &= 3,554 \text{ (N/mm}^{3/2})\end{aligned}\quad (4.3.2)$$

ここで、 $0.3 < \sigma_y / \sigma_u < 0.98$ なので、

$$\begin{aligned}m &= 1.517(\sigma_y / \sigma_u)^{-0.3188} \\ &= 1.627\end{aligned}$$

ここで、作用応力拡大係数 K_i^P および K_i^S は、

$$K_i^P : 1\text{次応力による応力拡大係数 } (= Y\sigma_P \sqrt{\pi a})$$

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>K_l^S : 2次応力による応力拡大係数 ($= (Y\sigma)_s \sqrt{\pi a}$)</p> <p>それぞれの K 値の計算方法は、BS 7910 の Annex M を参照のこと。ただし、半梢円表面きずでは、きず前縁において K 値が変化し、通常の場合、K 値は最深部で最大値をとる。しかし、次のような要因により K の最大値の位置が変化するため、きず前縁の表面部についても K 値を計算する必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 初期きずの深さ a と半長 c のアスペクト比(a/c) ② 角変形等による曲げ応力成分 ③ 残留応力分布 <p>ρ : 1次応力と2次応力の相互作用を考慮にいれるための補正係数であって、次のように求める (BS 7910 の Annex R を参照のこと)。</p> $\begin{aligned} \rho &= \rho_1 & L_r &\leq 0.8 \\ \rho &= 4\rho_1(1.05 - L_r) & 0.8 < L_r < 1.05 \\ \rho &= 0 & L_r &\geq 1.05 \end{aligned} \quad (4.3.3)$ <p>ここで、</p> $K_l^S(L_r/K_r^P) < 5.2 \text{ のとき}$ $\rho_i = 0.1[K_l^S(L_r/K_r^P)]^{0.714} - 0.007[K_l^S(L_r/K_r^P)]^2 + 0.00003[K_l^S(L_r/K_r^P)]^3 \quad (4.3.4)$ $K_l^S(L_r/K_r^P) > 5.2 \text{ のとき}$ $\rho_i = 0.25 \quad (4.3.5)$ <p>(2) 荷重比 L_r の算定</p> <p>荷重比 L_r は、次式で定義される。</p> $L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (4.3.6)$ $= 0.799$ <p>ここで、</p> <p>σ_{ref} : 参照応力(N/mm²) σ_y : 降伏点(N/mm²)</p> <p>(3) きずの判定</p> <p>前節までの手順により求めた L_r 及び K_r を FAD 線図上にプロットし、評価きずが許容できるか否かを判定する。BS7910 のオプション 1 評価に用いる FAD は、次式で与えられている。</p> <p>$L_r \leq 1$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = (1 + (1/2)L_r^2)^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] \quad (4.3.7)$ <p>$1 < L_r < L_{r,max}$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = f(1)L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (4.3.8)$	<p>K_l^S : 2次応力による応力拡大係数 ($= (Y\sigma)_s \sqrt{\pi a}$)</p> <p>それぞれの K 値の計算方法は、BS 7910 の Annex M を参照のこと。ただし、半梢円表面きずでは、きず前縁において K 値が変化し、通常の場合、K 値は最深部で最大値をとる。しかし、次のような要因により K の最大値の位置が変化するため、きず前縁の表面部についても K 値を計算する必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 初期きずの深さ a と半長 c のアスペクト比(a/c) ② 角変形等による曲げ応力成分 ③ 残留応力分布 <p>ρ : 1次応力と2次応力の相互作用を考慮にいれるための補正係数であって、次のように求める (BS 7910 の Annex R を参照のこと)。</p> $\begin{aligned} \rho &= \rho_1 & L_r &\leq 0.8 \\ \rho &= 4\rho_1(1.05 - L_r) & 0.8 < L_r < 1.05 \\ \rho &= 0 & L_r &\geq 1.05 \end{aligned} \quad (4.3.3)$ <p>ここで、</p> $K_l^S(L_r/K_r^P) < 5.2 \text{ のとき}$ $\rho_i = 0.1[K_l^S(L_r/K_r^P)]^{0.714} - 0.007[K_l^S(L_r/K_r^P)]^2 + 0.00003[K_l^S(L_r/K_r^P)]^3 \quad (4.3.4)$ $K_l^S(L_r/K_r^P) > 5.2 \text{ のとき}$ $\rho_i = 0.25 \quad (4.3.5)$ <p>(2) 荷重比 L_r の算定</p> <p>荷重比 L_r は、次式で定義される。</p> $L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (4.3.6)$ $= 0.799$ <p>ここで、</p> <p>σ_{ref} : 参照応力(N/mm²) σ_y : 降伏点(N/mm²)</p> <p>(3) きずの判定</p> <p>前節までの手順により求めた L_r 及び K_r を FAD 線図上にプロットし、評価きずが許容できるか否かを判定する。BS7910 のオプション 1 評価に用いる FAD は、次式で与えられている。</p> <p>$L_r \leq 1$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = (1 + (1/2)L_r^2)^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] \quad (4.3.7)$ <p>$1 < L_r < L_{r,max}$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = f(1)L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (4.3.8)$	

LPG貯槽指針 現行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
<p>$L_r \geq L_{r,\max}$ のとき、 $K_r = f(L_r) = 0$ (4.3.9)</p> <p>ここで、 $\mu = \min(0.001(E/\sigma_y), 0.6)$ (4.3.10) $N = 0.3(1 - (\sigma_y/\sigma_u))$ (4.3.11)</p> <p>ここで、 $L_{r,\max}$ は FAD 線図の cut-off 線に相当し、評価を行う材料毎に決定され、次式で定義される。</p> $L_{r,\max} = (\sigma_y + \sigma_u)/2\sigma_y = 1.12$ <p>式(4.3.7)、式(4.3.8)及び式(4.3.9)のFADによって判断される限界きず寸法に至るときのサイクル数並びに疲労進展後のきず寸法を表8に示す。また、図5はきずの疲労進展に伴う荷重比・韌性比の変化をFAD上にプロットしたものである。</p>	<p>$L_r \geq L_{r,\max}$ のとき、 $K_r = f(L_r) = 0$ (4.3.9)</p> <p>ここで、 $\mu = \min(0.001(E/\sigma_y), 0.6)$ (4.3.10) $N = 0.3(1 - (\sigma_y/\sigma_u))$ (4.3.11)</p> <p>ここで、 $L_{r,\max}$ は FAD 線図の cut-off 線に相当し、評価を行う材料毎に決定され、次式で定義される。</p> $L_{r,\max} = (\sigma_y + \sigma_u)/2\sigma_y = 1.12$ <p>式(4.3.7)、式(4.3.8)及び式(4.3.9)のFADによって判断される限界きず寸法に至るときのサイクル数並びに疲労進展後のきず寸法を表9に示す。また、図5はきずの疲労進展に伴う荷重比・韌性比の変化をFAD上にプロットしたものである。</p>	

表8 疲労進展後のきずに対するFAD評価結果

	サイクル数 N(cycles)	きず深さ a (mm)	きず長さ 2c (mm)	検査周期 (1cycle/日)
通常時	7,656	5.15	21.36	21年

(4) 地震発生時の評価

検査時期 21 年到達時 (きず深さ 5.15mm、きず長さ 21.36mm) にレベル 2 地震が発生した場合について評価を行う。評価結果を、表9に示すとともに下記図5にプロットする。

表9 地震発生時の評価結果

	荷重比 L_r	韌性比 K_r
レベル 2 地震時	0.38	0.82

検査時期 21 年到達時に地震が発生しても評価上合格であるが、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して、次回開放検査時期は 15 年目とする。

表9 疲労進展後のきずに対するFAD評価結果

	サイクル数 N(cycles)	きず深さ a (mm)	きず長さ 2c (mm)	検査周期 (1cycle/日)
通常時	7,656	5.15	21.36	21年

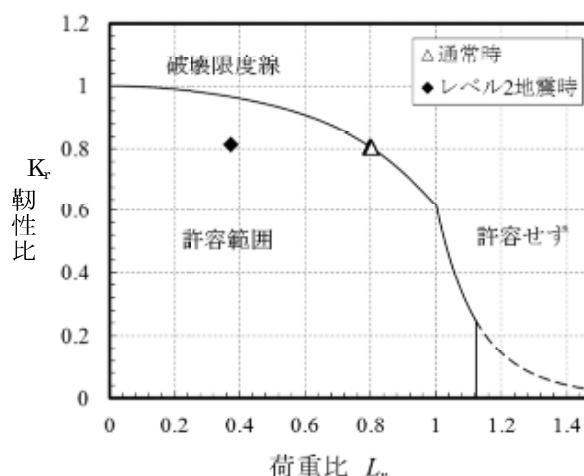
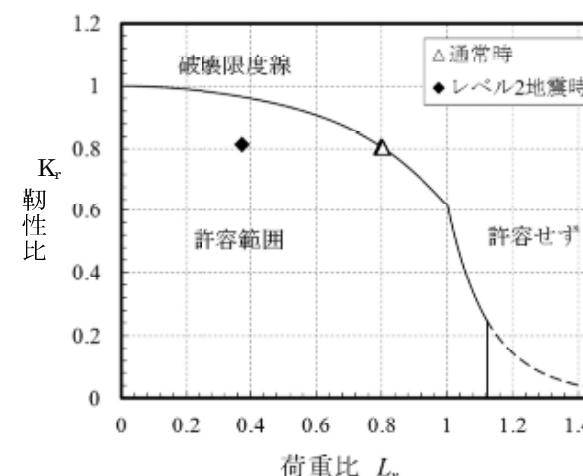
(4) 地震発生時の評価

検査時期 21 年到達時 (きず深さ 5.15mm、きず長さ 21.36mm) にレベル 2 地震が発生した場合について評価を行う。評価結果を、表10に示すとともに下記図5にプロットする。

表10 地震発生時の評価結果

	荷重比 L_r	韌性比 K_r
レベル 2 地震時	0.38	0.82

検査時期 21 年到達時に地震が発生しても評価上合格であるが、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して、次回開放検査時期は 15 年目とする。

LPG貯槽指針 現 行	LPG貯槽指針 改訂案	備考
 <p>備考 プロットはきず疲労進展に伴う韌性比・荷重比の変化を示す。 実線の内側にある間は、そのきずは許容される。</p> <p>図5 オプション1破壊評価線図</p>	 <p>備考 プロットはきず疲労進展に伴う韌性比・荷重比の変化を示す。 実線の内側にある間は、そのきずは許容される。</p> <p>図5 オプション1破壊評価線図</p>	

添付資料 33 添付資料中の参考文献

a33 添付資料中の参考文献

- [a1] BS7910:2013, “Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures” (2013).
- [a2] T. Tagawa, et al., “Comparison of CTOD standards: BS 7448–Part 1 and revised ASTM E1290”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, pp. 327–336 (2010).
- [a3] ASTM E 1820:2013 “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness” (2013).
- [a4] ASTM E 1290:2002 “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement” (2008).
- [a5] ISO 12135 : 2002, “Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness” (2002).
- [a6] BS 7448:Part 2:1997, “Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials(1997).
- [a7] 日本ガス協会 ガス工作物等技術基準調査委員会, “LPG 貯槽指針 JGA 指:106-15”, (2015).
- [a8] T. L. Anderson, “FRACTURE MECHANICS Fundamentals and Applications (Third Edition)”, CRC press, (2015).
- [a9] K. Wallin, “Low-cost J-R curve estimation based on CVN upper shelf energy”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 24, Issue 8, pp. 537-549, (2001).
- [a10] (社)日本溶接協会 HP 接合・溶接技術 Q&A1000,
http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0050010250, (2017年1月26日).
- [a11] S. T. Rolfe, et al., “Slow-bend K_{Ic} testing of medium-strength high-toughness steels”, *ASTM STP 463*, pp. 124-159, (1970).
- [a12] 日本材料学会著, “改訂 材料強度学” (2006).
- [a13] 日本ガス協会 ガス工作物等技術基準調査委員会, “容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針 JGA 指:109-14”, (2014).
- [a14] 日本ガス協会 球形ガスホルダー技術基準調査委員会, “球形ガスホルダー技術基準調査報告書”, (1987).
- [a15] 日本鋼構造協会, “鋼構造物の疲労設計指針・同解説”, (1993).