

## 欠陥を有する溶接継ぎ手の疲労破壊試験結果

屋外貯蔵タンクの底板の溶接継ぎ手を想定して製作した、内部及び表面欠陥を有する溶接継ぎ手の試験体について、4点曲げ疲労試験及び引張圧縮疲労試験を実施した。疲労試験の実施前後に放射線透過試験（以下 RT）を実施し、試験結果の比較を行った。

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

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

以下に実施内容を示す。

## 1. 試験片

裏当て付突合せ溶接継手

寸法：500mm×100mm

材質及び板厚：SS400×12mm, SS400×20mm

欠陥の種類：無欠陥を含む7種類（表1参照）

表1 試験体内訳

欠陥の種類（略号）	板厚	A : 12mm	B : 20mm
		(試験体番号)	(試験体番号)
ブローホール (BH)		3体 (1~3)	3体 (1~3)
初層溶け込み不良 (IP)		3体 (1~3)	3体 (1~3)
初層割れ (CLR)		3体 (1~3)	3体 (1~3)
最終層割れ (CLF)		3体 (1~3)	2体 (1~2)
アンダーカット (UC)		3体 (1~3)	3体 (1~3)
融合不良 (LF)		—	3体 (1~3)
無欠陥 (ND)		3体 (1~3)	3体 (1~3)

※試験体番号1及び2は4点曲げ疲労試験を実施。3は引張圧縮疲労試験を実施。

## 2. ひずみゲージ

型番：FLA-5-11-3LJCT

貼付け位置（図1参照）：①裏当て金中心部

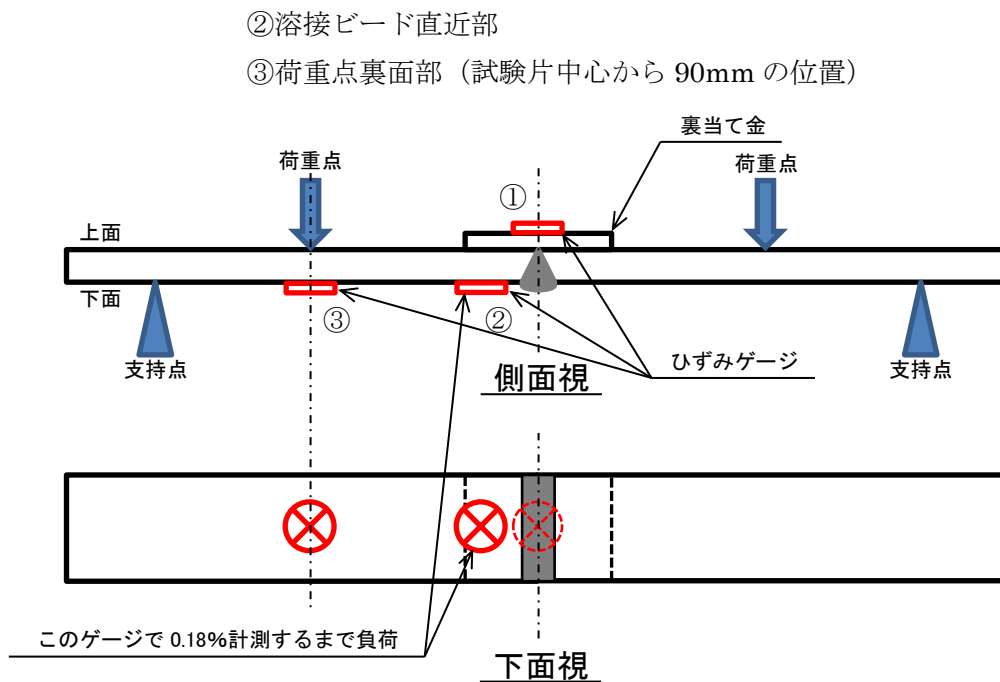


図1 ひずみゲージ貼り付け位置

### 3. 試験条件

#### (1) 4点曲げ疲労試験

試験機：島津製作所製 油圧サーボ式疲労試験機（容量 50kN）

スパン（支持間距離）：上 180mm、下 460mm

制御方法：ストローク制御

繰返し速度：0.5Hz

最大繰返し数：1,000 サイクル

リミッター：初期荷重より 25%低下時

ストローク条件：溶接ビード直近部（②）のひずみが 0.18%となるまで静的に負荷し、その時のストロークで疲労試験を実施した。

#### (2) 引張疲労試験

試験機：島津製作所製 油圧サーボ式疲労試験機（容量 750kN）

制御方法：ストローク制御

繰返し速度：0.5Hz

最大繰返し数：1,000 サイクル

リミッター：初期荷重より 25%低下時

ストローク条件：溶接ビード直近部（②）のひずみが±0.18%となるまで静的に負荷し、その時のストロークで疲労試験を実施。一部の試験片では引張圧縮それぞれで降伏が起きた時のストロークで疲労試験を実施した。ひずみが 0.18%となる前に降伏が発生した試験片においては、降伏が発生したときのストロークで疲労試験を実施した。

#### 4. 試験結果

##### (1) 4点曲げ疲労試験

各試験体について4点曲げ疲労試験を実施し、疲労試験前と疲労試験後の放射線透過試験(RT)の結果を比較し、欠陥の進展状況を確認した結果を表2に示す。

表2 4点曲げ疲労試験結果

板厚	欠陥種類 (探傷の可否)	番号	スローク量 (mm)	繰返し数 (回)	RTによる 確認結果	備考	
A 12mm	BH (可)	1	5.7	1,000	進展なし	BH0.5~1.0φ 散在	
		2	5.6	1,000	進展なし	BH0.5~1.0φ 散在	
	IP (否)	1	5.9	1,000	進展なし	IP83mm	
		2	5.9	1,000	進展なし	IP37mm	
	CLR (可)	1	5.7	1,000	進展なし	C3mm	
		2	6.0	1,000	進展なし	C3~7mmLF 混在	
	CLF (可)	1	5.4	1,000	進展なし	C2~20mm	
		2	5.3	1,000	進展なし	C2~20mm 散在	
	UC (可)	1	5.6	1,000	進展なし	UC 全線	
		2	5.5	1,000	進展なし	UC 全線	
	ND (-)	1	5.1	1,000	進展なし		
		2	5.6	1,000	進展なし		
	B 20mm	BH (可)	1	3.9	1,000	進展なし	BH0.5~2.5φ 散在
			2	3.7	1,000	進展なし	BH0.5~2.0φ 散在
IP (否)		1	4.1	1,000	進展なし	IP 全線	
		2	4.2	1,000	進展なし	IP55mm,21mm	
CLR (可)		1	3.8	1,000	進展なし	C2~6mm 点在	
		2	3.8	1,000	進展なし	C3~6mm 点在	
CLF (可)		1	3.9	1,000	進展なし	C1~25mm 散在	
		2	4.0	1,000	進展なし	C1~25mm 散在	
UC (可)		1	4.1	1,000	進展なし	UC 全線	
		2	4.0	1,000	進展なし	UC 全線	
LF (可)		1	4.0	1,000	進展なし	LF78mm	
		2	4.0	1,000	進展なし	LF65mm	
ND (-)		1	3.7	1,000	進展なし		
		2	3.9	1,000	進展なし		

注：欠陥種類欄の()内は、本検討会で検証しているフェーズドアレイ探傷機による探傷の可否を示す。

(2) 引張圧縮疲労試験

各試験体について引張圧縮疲労試験を実施し、疲労試験前と疲労試験後の放射線透過試験 (RT) の結果を比較し、欠陥の進展状況を確認した結果を表 3 に示す。

表 3 引張圧縮疲労試験結果

板厚	欠陥種類	番号	ストローク条件	ストローク量 (mm)	繰返し数 (回)	RT による確認結果	備考
A 12mm	BH	3	±0.18%	—	—	—	圧縮時に座屈※ <sup>1</sup>
	IP	3	降伏時	1.3	1,000	進展なし	IP32mm
	CLR	3	降伏時	1.1	1,000	進展なし	C3~7mm 散在
	CLF	3	降伏時	1.3	1,000	進展なし	C2~20mm 散在
	UC	3	±0.18%	—	—	—	圧縮時に座屈※ <sup>2</sup>
	ND	3	降伏時	1.4	1,000	進展なし	
B 20mm	BH	3	±0.18%	2.5	1,000	進展なし	BH 密材
	IP	3	±0.18%	—	—	—	母材伸び※ <sup>3</sup>
	CLR	3	±0.18%	—	—	—	圧縮時に座屈※ <sup>4</sup>
	CLF						試験体なし
	UC	3	±0.18%	2.5	1,000	進展なし	UC 全線
	LF	3	±0.18%	4.5	235	—	破断※ <sup>5</sup>
	ND	3	±0.18%	3.3	357	—	破断※ <sup>6</sup>

※1 ストローク量を決定する段階において負荷をかけ圧縮していたところ、ビード直近のひずみが減少し、裏当て金のひずみが増大したことから、裏当て金の変形→座屈と判断したものの。

※2 ストローク量を決定する段階において負荷をかけ圧縮していたところ、面外変形したものの。試験開始前から溶接部に少し変形があり、座屈しやすくなっていたと考えられる。

※3 ストローク量を決定する段階において変位量約 6mm まで引張ったところ、ビード直近のひずみは増加しなかったものの、母材部のひずみが増加したものの。

※4 ストローク量を決定する段階において圧縮時に座屈したものの。ひずみ約 0.15%で降伏開始。

※5 ひずみ±0.18%で疲労試験を開始したところ、235回で溶接部(溶着金属と母材の境界付近)から破断したものの。ただし破断部は溶接欠陥が存在しない部位であった。



B-LF-3 破断状況(1)

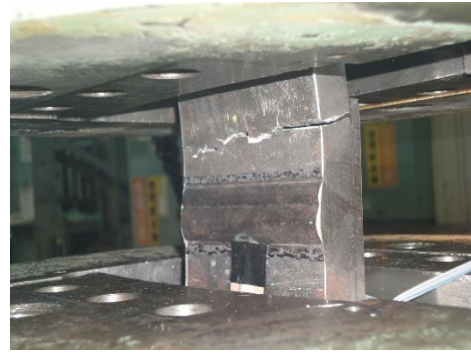


B-LF-3 破断状況(2)

※6 ひずみ±0.18%で疲労試験を開始したところ、357回で母材部が破断したもの。



B-ND-3 破断状況(1)



B-ND-3 破断状況(2)

## 5. 断面観察

欠陥の種類ごとに試験片1体を選定し、欠陥が存在すると思われる部位を切断または破断し、当該部分の観察により欠陥の伸展の有無について観察を行った結果を表4、写真を表5に示す。

表4 破面観察結果

板厚	欠陥種類	番号	観察面	観察方法	観察結果	備考
B	BH	1	①開孔部表面 ②鏡面加工※7	①光学顕微鏡 ②光学顕微鏡	①進展なし ②進展なし	BH 最大 2.5φ
A	IP	1	鏡面加工※7	光学顕微鏡	進展なし	IP 最大 104mm
A	CLR	2	破断部※8	電子顕微鏡	進展なし	C 最大 7mm
A	CLF	2	破断部※8	電子顕微鏡	進展なし	C 最大 20mm
A	UC	1	①表面 ②破断部※8	①光学顕微鏡 ②電子顕微鏡	①進展なし ②進展なし	全線アンダーカット
B	LF	1	鏡面加工※7	光学顕微鏡	進展なし	LF 最大 100mm

※7 バンドソーを用いて切断後、切断面を鏡面加工し観察した。

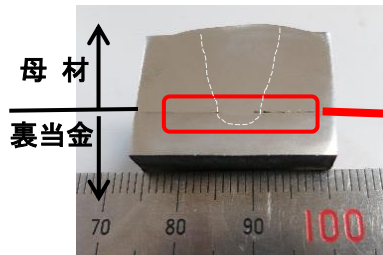
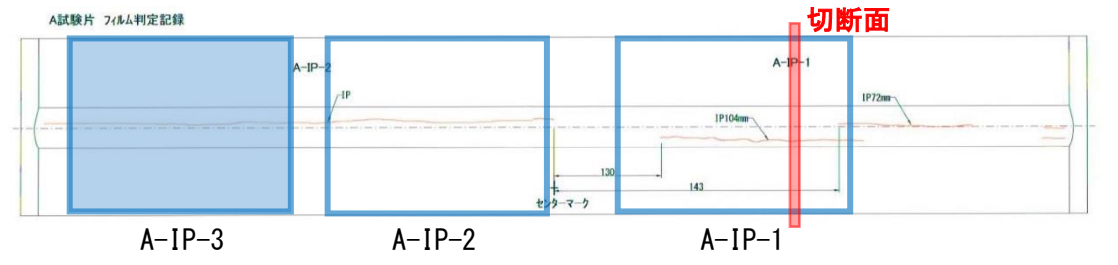
※8 液体窒素を用いて冷却後に破断し、破断面を観察した。

表5 破面観察写真





## 2. IP (初層溶け込み不良)

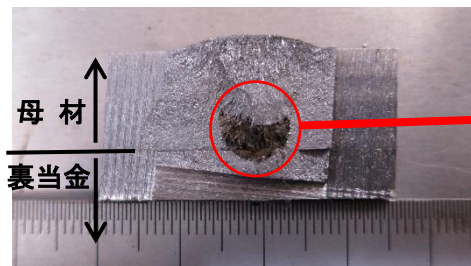
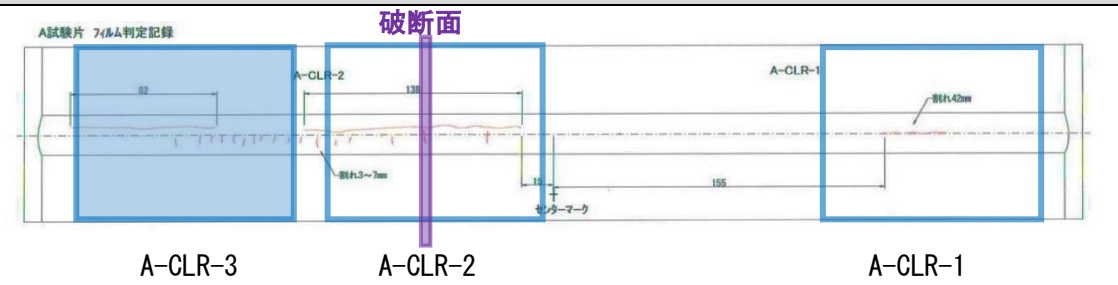


切断面

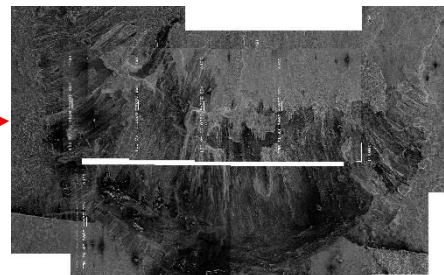


拡大写真

## 3. CLR (初層割れ)

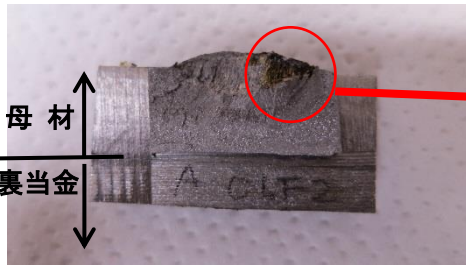
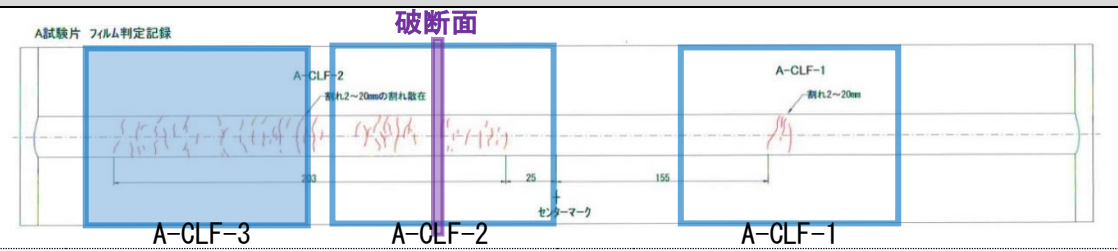


破断面

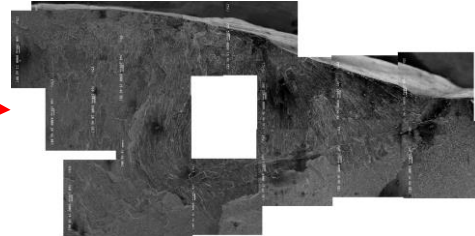


拡大写真

#### 4. CLF (最終層割れ)

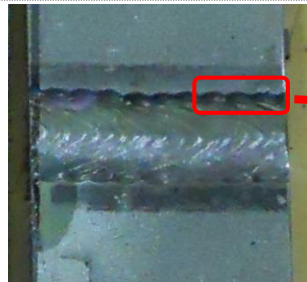
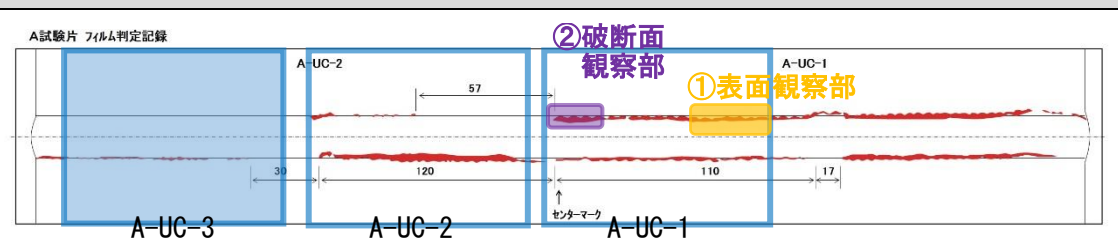


破断面

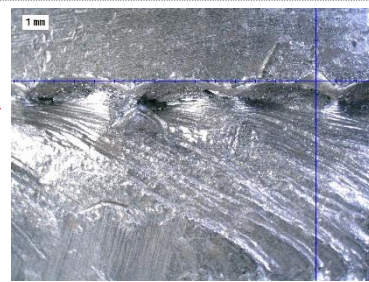


拡大写真

#### 5. UC (アンダーカット)



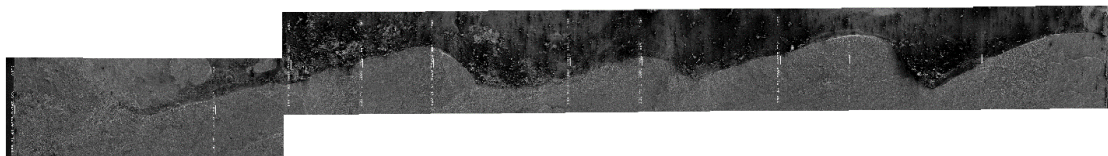
①アンダーカット表面



①拡大写真



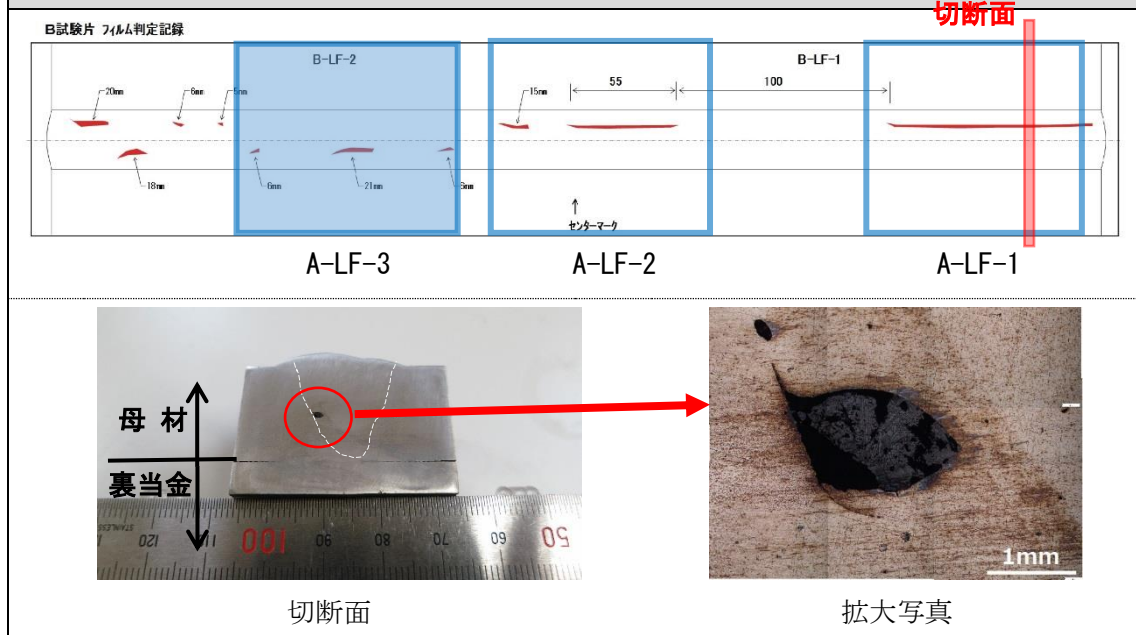
②破断面



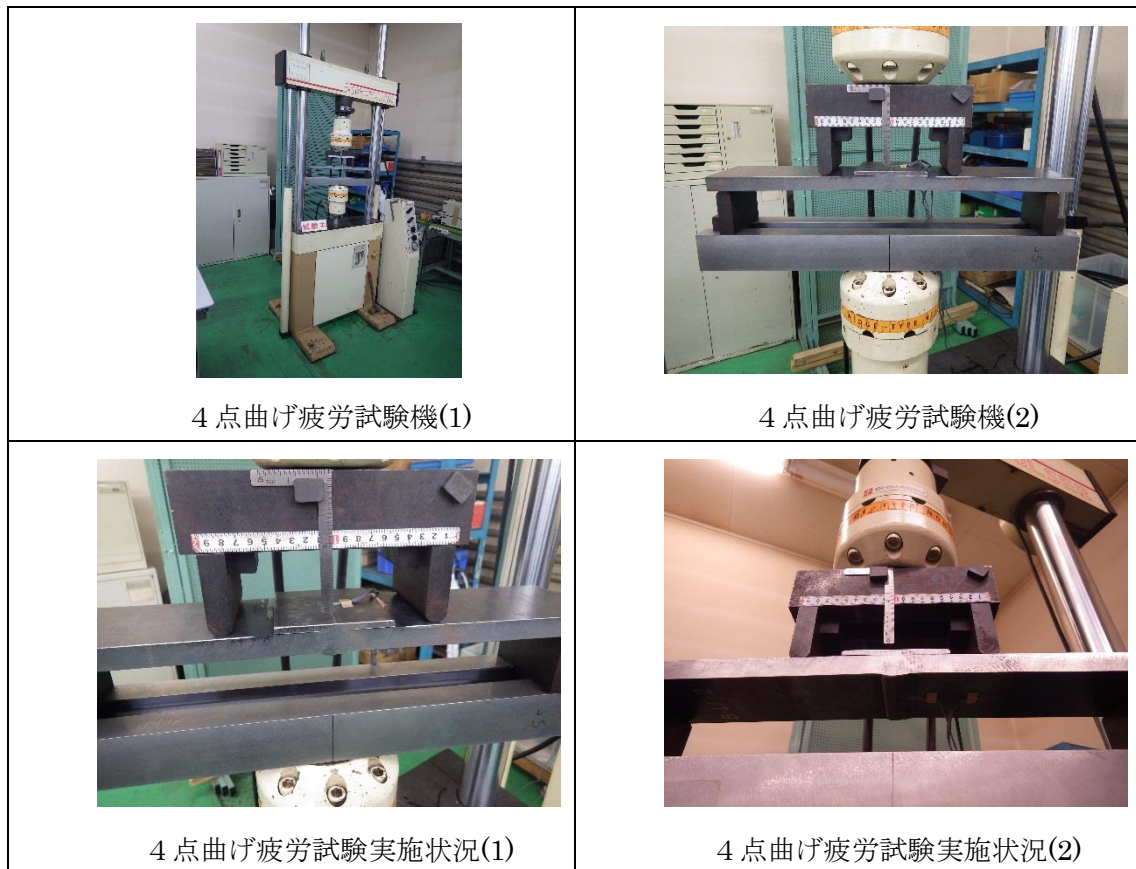
②拡大写真



## 6. LF (融合不良)



## 6. 疲労試験実施状況





引張疲労試験機(1)



引張疲労試験機(2)



引張圧縮疲労試験実施状況(1)



引張圧縮疲労試験実施状況(2)

### 7. 破面観察実施状況



試験片の切断(1)



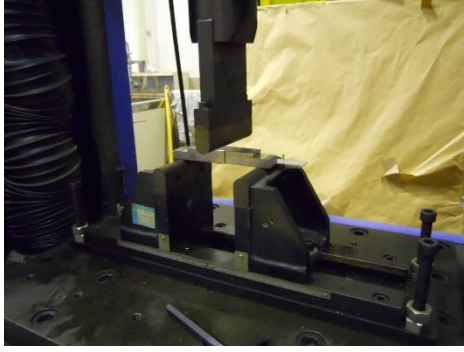
試験片の切断(2)



試験片切断状況



液体窒素による試験片の冷却



冷却試験片の破断



破断直後

### 放射線透過試験結果

試験体	欠陥	疲労試験実施前	疲労試験実施後
A-BH-1	BH		<p>変化を認めず</p>
A-BH-2	BH		<p>変化を認めず</p>
A-BH-3	BH		<p>変化を認めず</p>
A-IP-1	IP		<p>変化を認めず</p>
A-IP-2	IP		<p>変化を認めず</p>
A-IP-3	IP		<p>変化を認めず</p>
A-CLR-1	CLR		<p>変化を認めず</p>
A-CLR-2	CLR(LF)		<p>変化を認めず</p>



試験体	欠陥	疲労試験実施前	疲労試験実施後
A-CLR-3	CLR(LF)		<p>変化を認めず</p>
A-CLF-1	CLF		<p>変化を認めず</p>
A-CLF-2	CLF		<p>変化を認めず</p>
A-CLF-3	CLF		<p>変化を認めず</p>
A-UC-1	UC		<p>変化を認めず</p>
A-UC-2	UC		<p>変化を認めず</p>
A-UC-3	UC		<p>変化を認めず</p>
A-ND-1	ND		<p>変化を認めず</p>

試験体	欠陥	疲労試験実施前	疲労試験実施後
A-ND-2	ND		変化を認めず 
A-ND-3	ND		変化を認めず 
B-BH-1	BH	16 * 58 * 26 	16 * 58 * 26 変化を認めず 
B-BH-2	BH	43 * 30 * 6 * 21 	43 * 30 * 6 * 21 変化を認めず 
B-BH-3	BH		変化を認めず 
B-IP-1	IP		変化を認めず 
B-IP-2	IP	55 * 16 * 21 	55 * 16 * 21 変化を認めず 
B-IP-3	IP		変化を認めず 



試験体	欠陥	疲労試験実施前	疲労試験実施後
B-CLR-1	CLR(LF)		
B-CLR-2	CLR		
B-CLR-3	CLR		
B-CCF-1	CCF		
B-CCF-2	CCF		
B-UC-1	UC		
B-UC-2	UC		
B-UC-3	UC		

試験体	欠陥	疲労試験実施前	疲労試験実施後
B-LF-1	LF		
B-LF-2	LF		
B-LF-3	LF		
B-ND-1	ND		
B-ND-2	ND		
B-ND-3	ND		