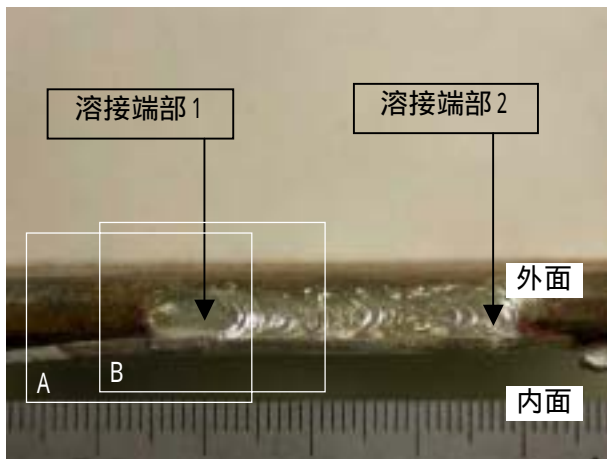
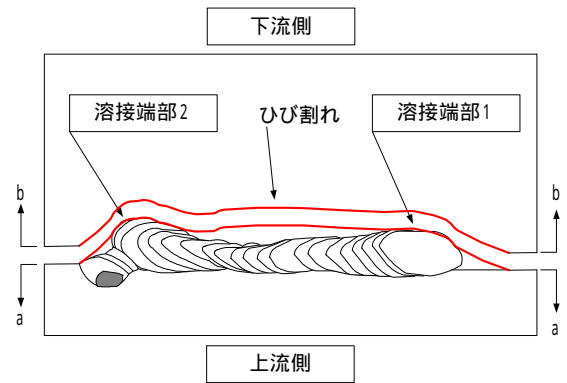
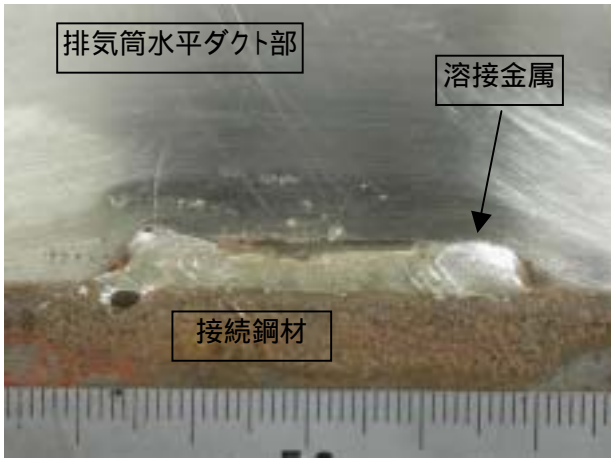
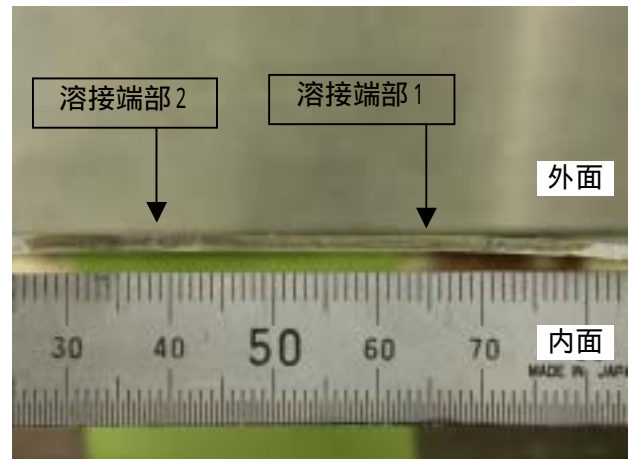


ひび割れ の詳細調査結果

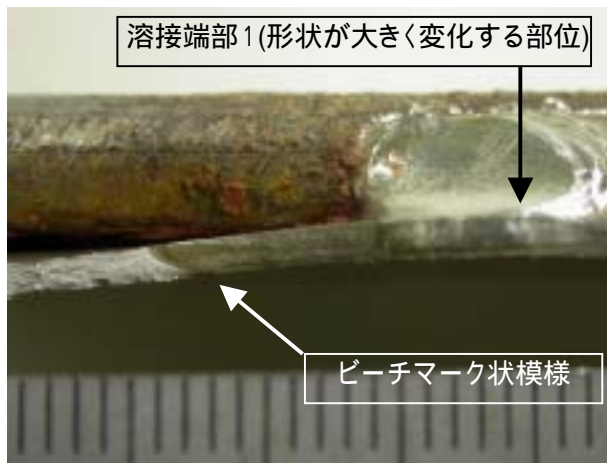
詳細破面マクロ観察(ひび割れ)



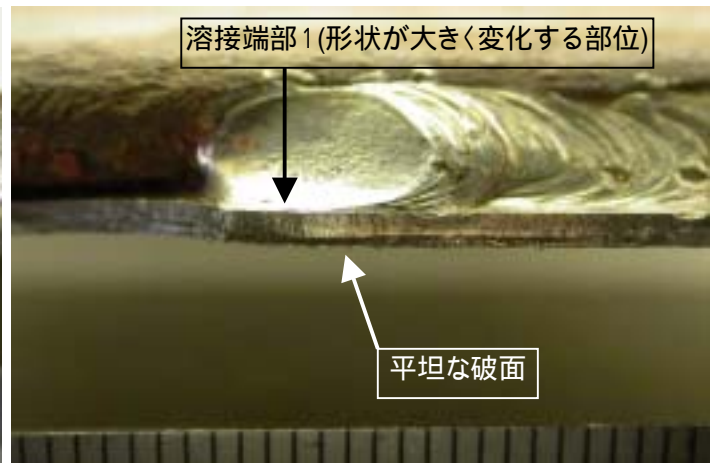
a - a 矢視 (上流側)



b - b 矢視 (下流側)



A部拡大

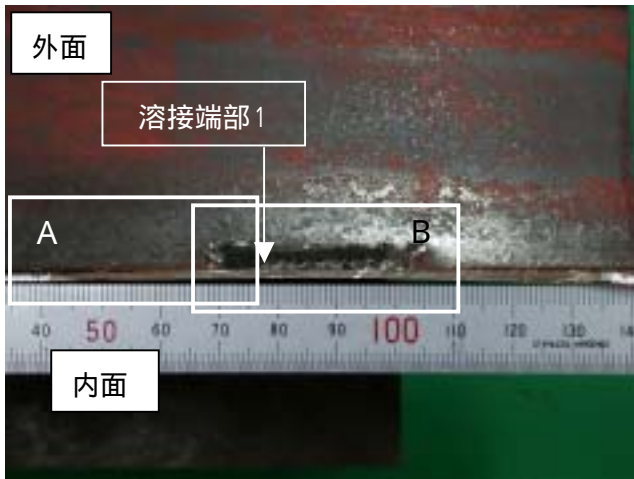
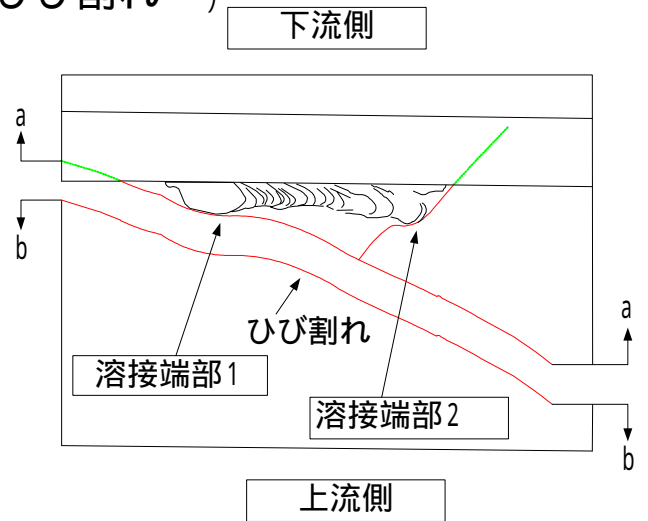
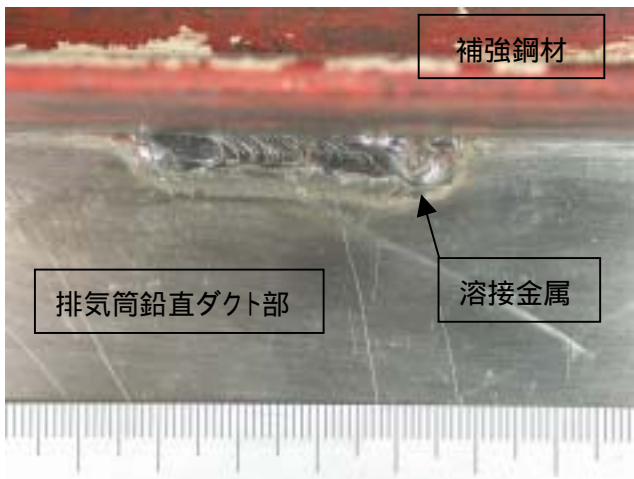


B部拡大

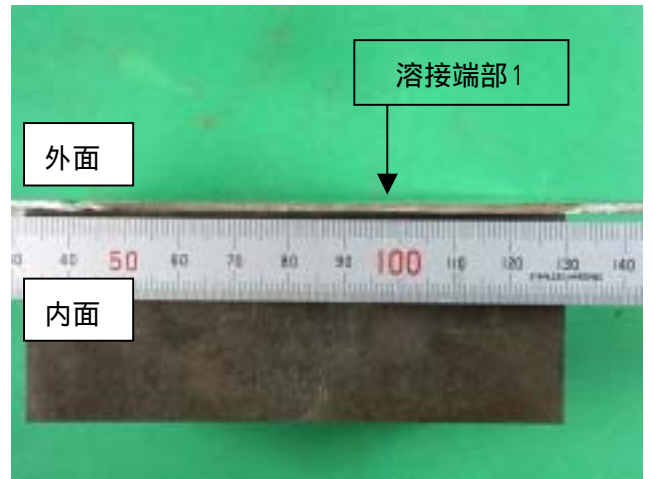
【観察結果】

・溶接端部の外表面にひび割れの起点となりうる形状変化が認められた。

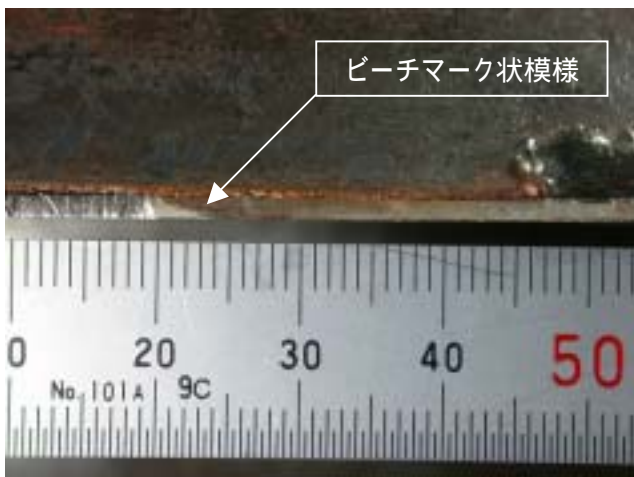
ひび割れ の詳細調査結果 詳細破面マクロ観察(ひび割れ)



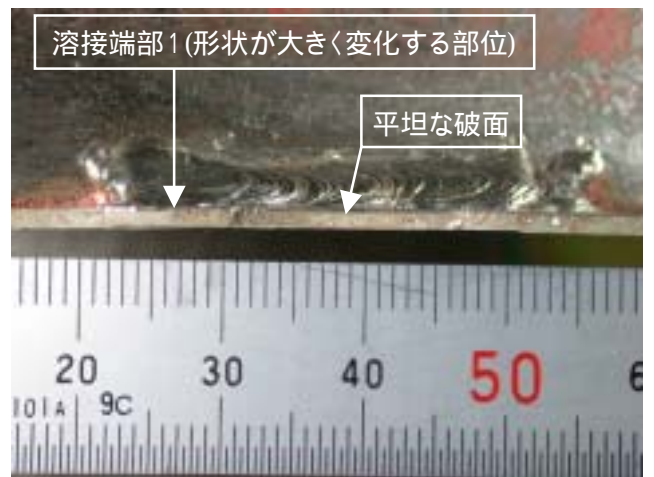
a - a 矢視 (下流側)



b - b 矢視 (上流側)



A部拡大



B部拡大

【観察結果】

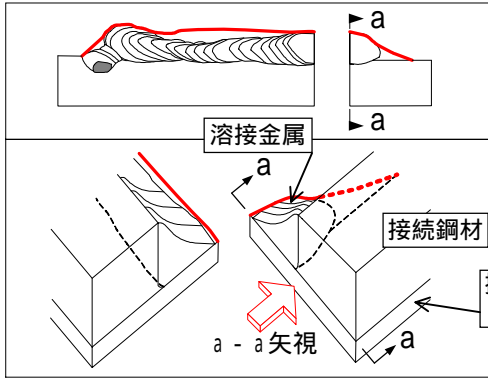
・溶接端部の外表面にひび割れの起点となりうる形状変化が認められた。

ひび割れ の詳細調査結果
断面マイクロ観察 (ひび割れ)

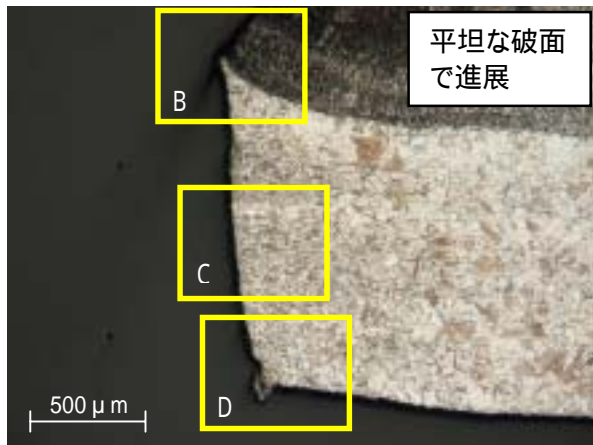
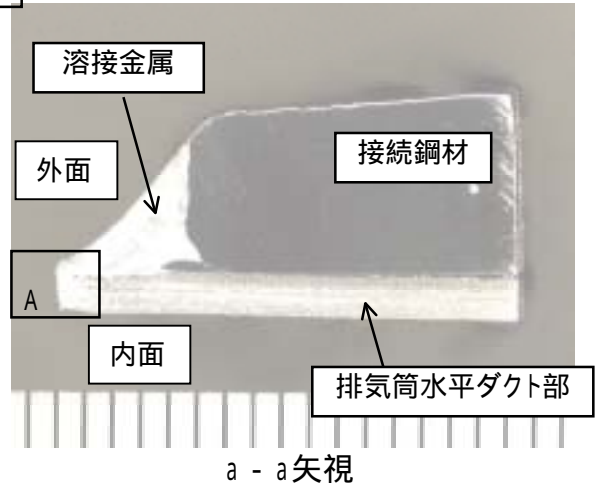
排気筒水平ダクト部



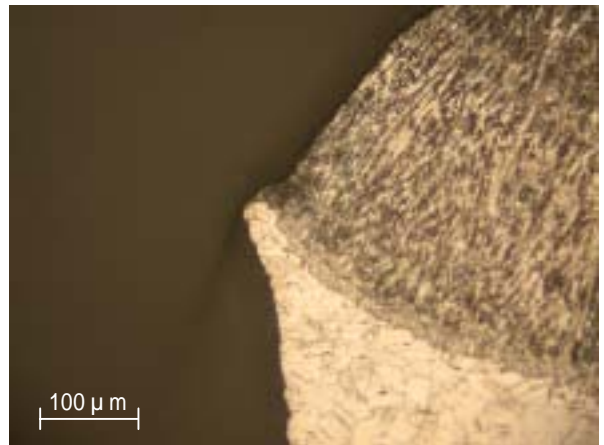
溶接金属



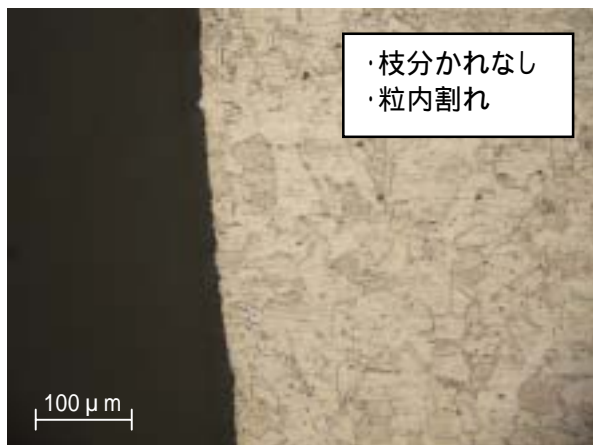
ひび割れ 断面マイクロ観察位置



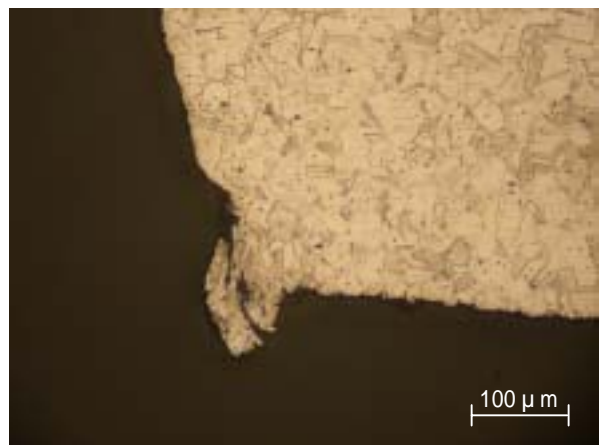
A 部



B 部



C 部

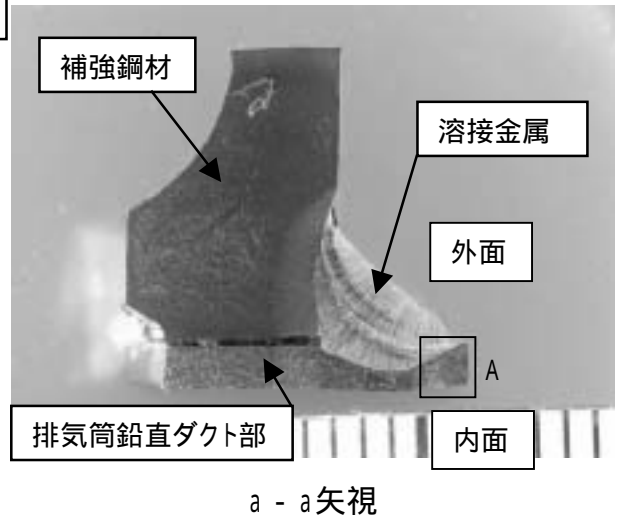
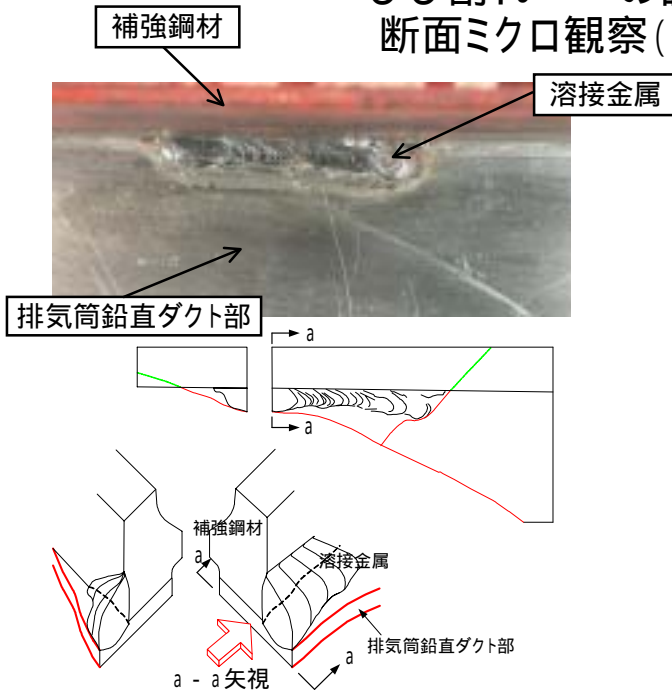


D 部

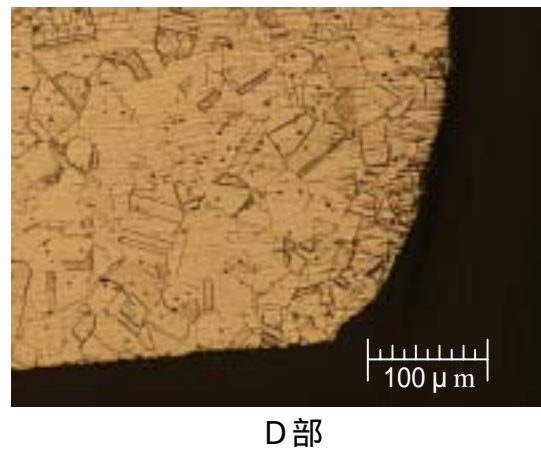
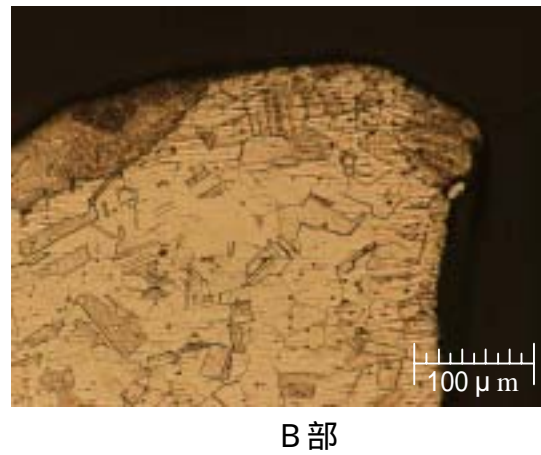
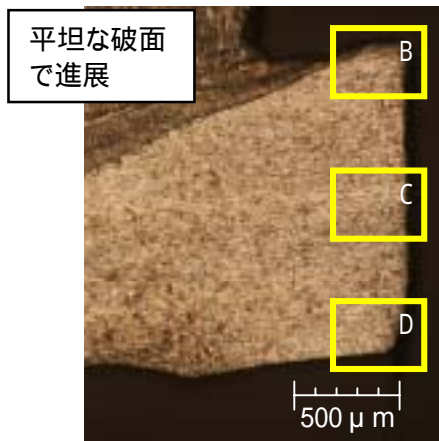
【観察結果】

- ・ひび割れは、平坦な破面で進展していた。
- ・ひび割れは、枝分かれしていない。
- ・ひび割れは、粒内割れである。
- ・ひび割れ近傍には、材料欠陥等の異常は認められなかった。

ひび割れ の詳細調査結果 断面マイクロ観察(ひび割れ)



ひび割れ 断面マイクロ観察位置

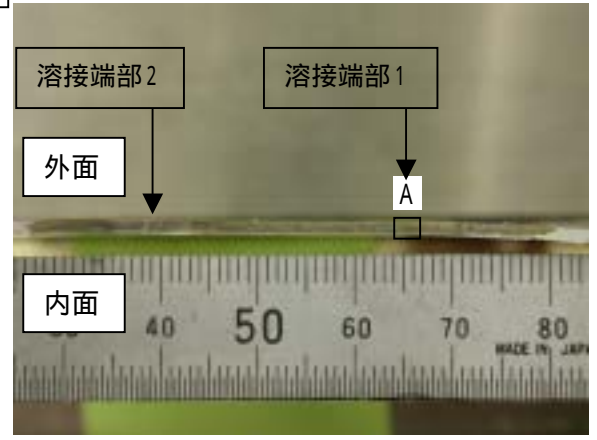
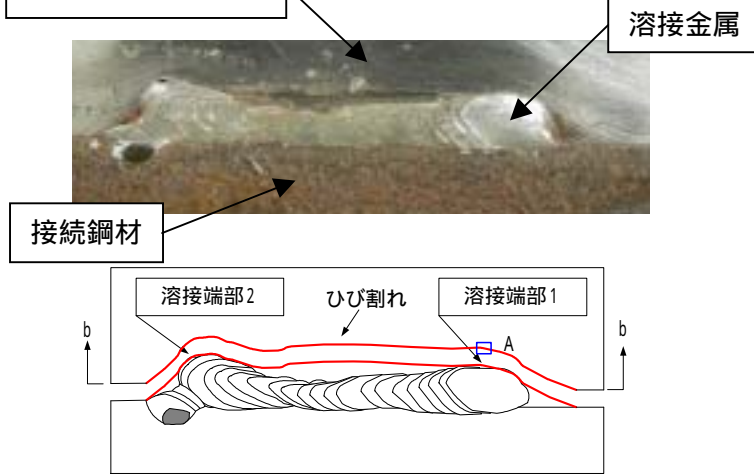


【観察結果】

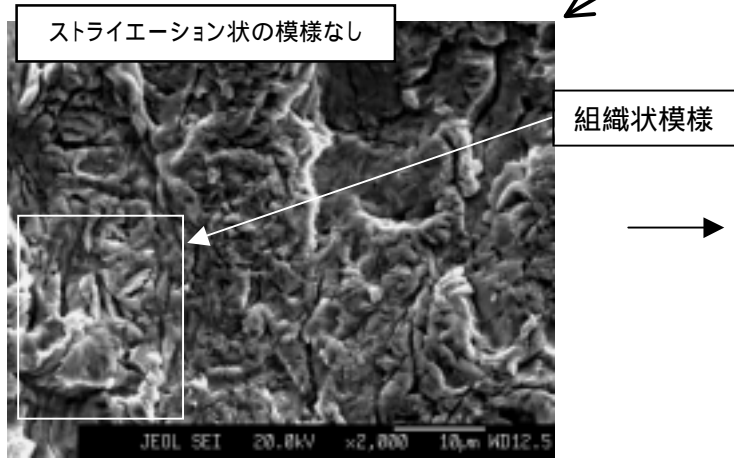
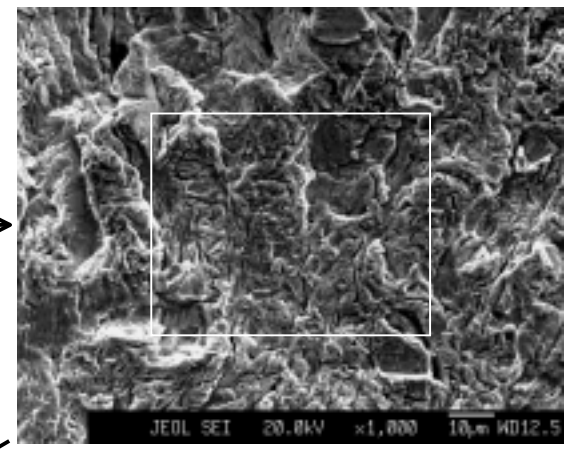
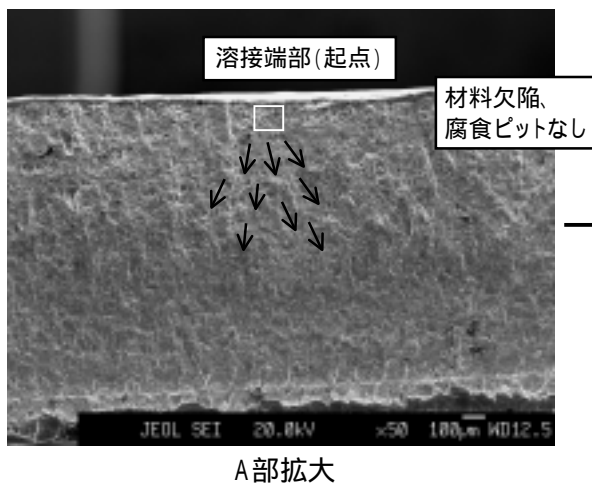
- ・ひび割れは、平坦な破面で進展していた。
- ・ひび割れは、枝分かれしていない。
- ・ひび割れは、粒内割れである。
- ・ひび割れ近傍には、材料欠陥等の異常は認められなかった。

ひび割れ の詳細調査結果

排気筒水平ダクト部 破面SEM観察(ひび割れ の溶接端部)



b - b 矢視

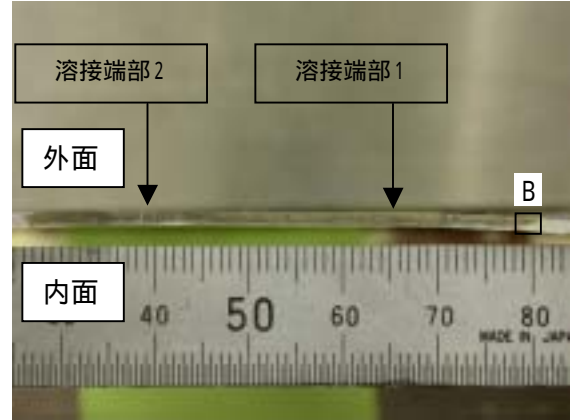
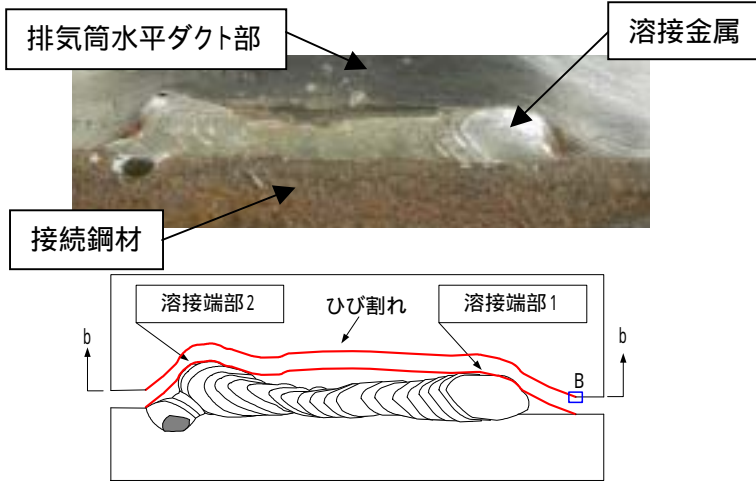


→ : 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す

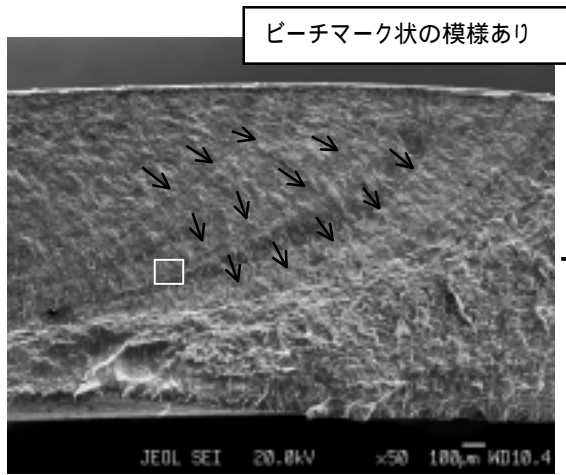
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・溶接端部の外表面において、材料欠陥、腐食ピット等は認められなかった。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の先端近傍部)

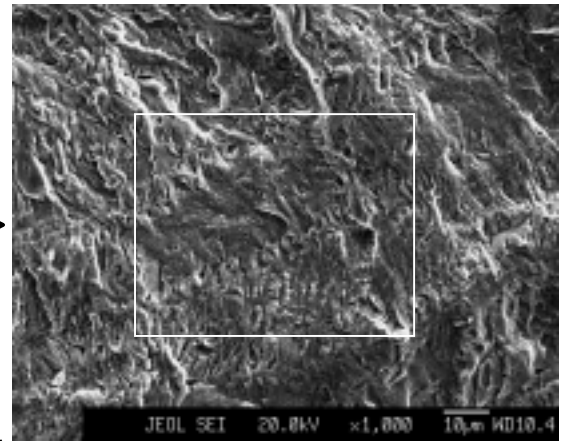


b - b 矢視

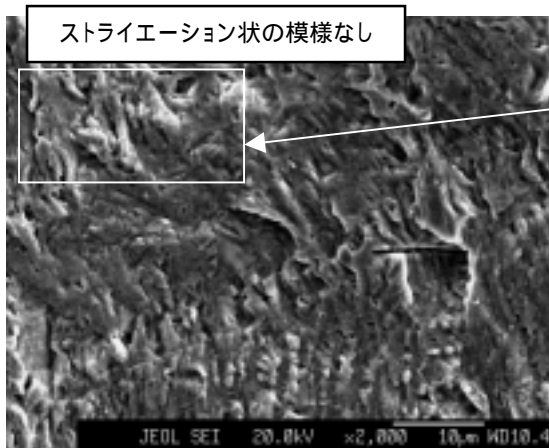


B部拡大

拡大



拡大

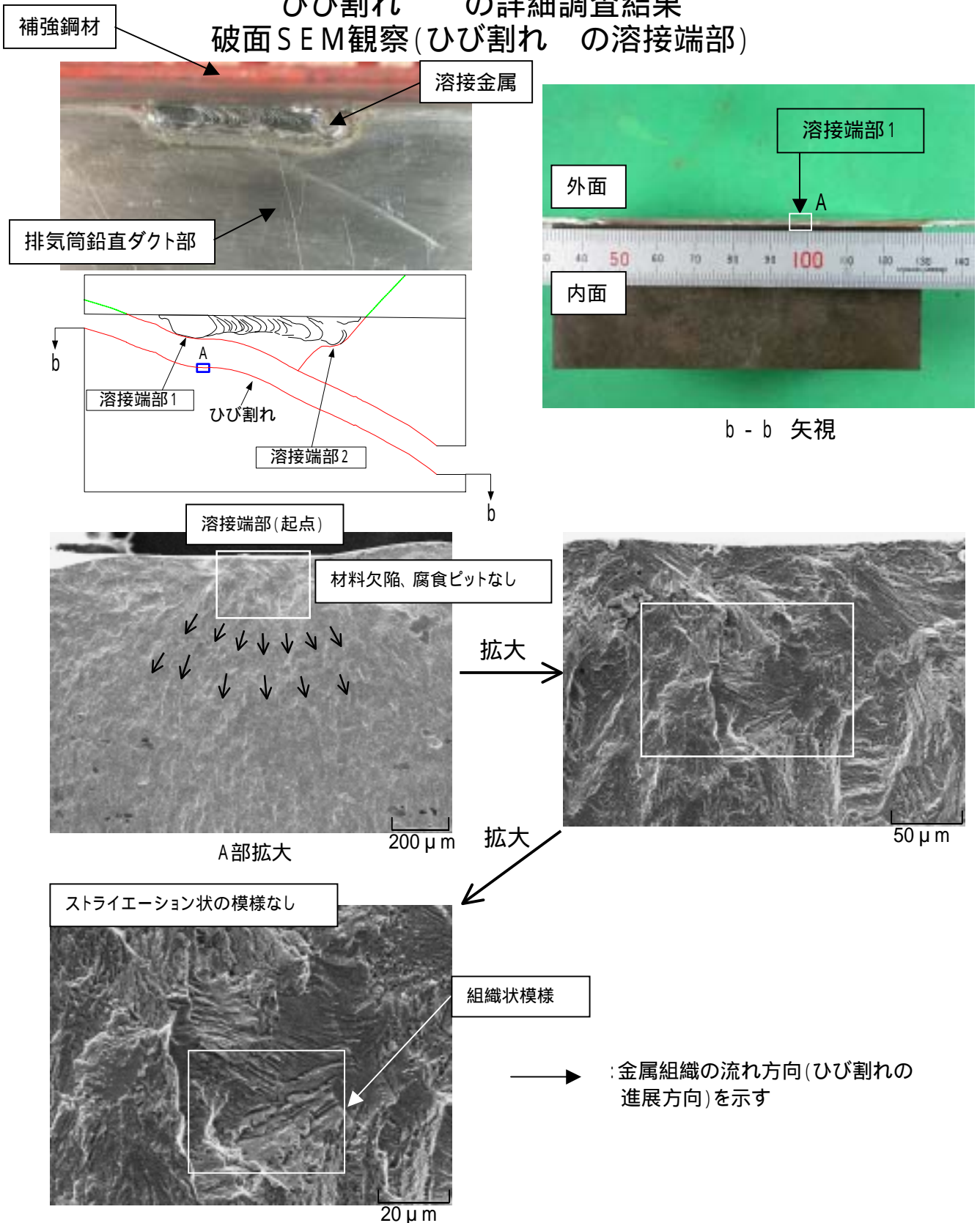


→ : 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す

【観察結果】

- ・ひび割れの先端近傍部では、外面側からのひび割れ進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

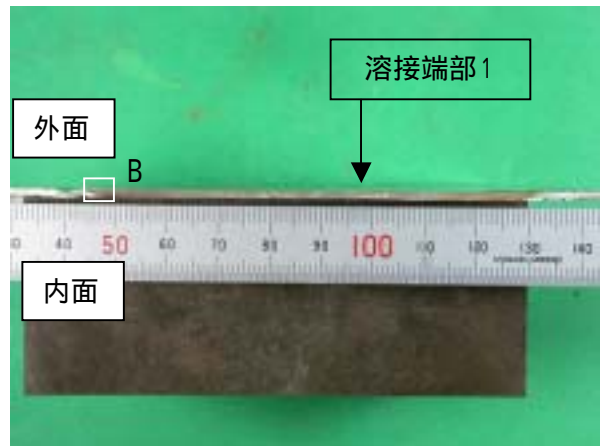
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の溶接端部)



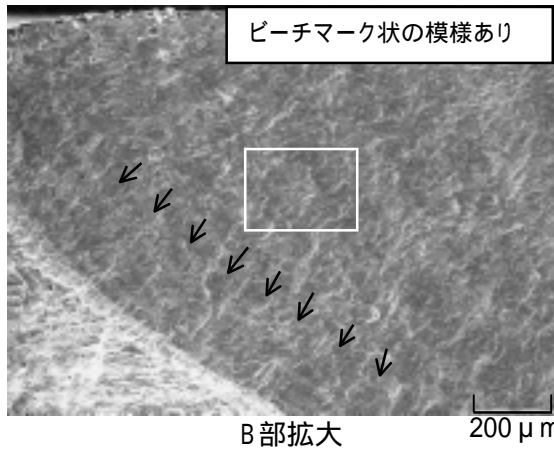
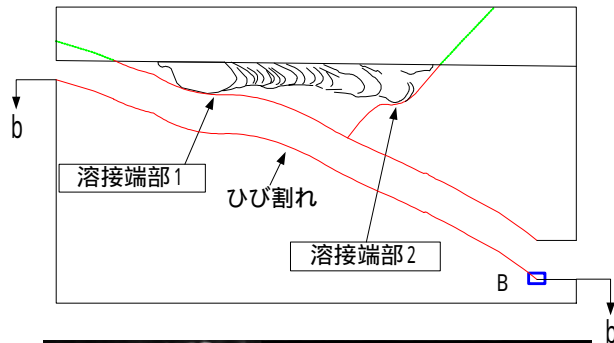
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・溶接端部の外表面において、材料欠陥、腐食ピット等は認められなかった。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

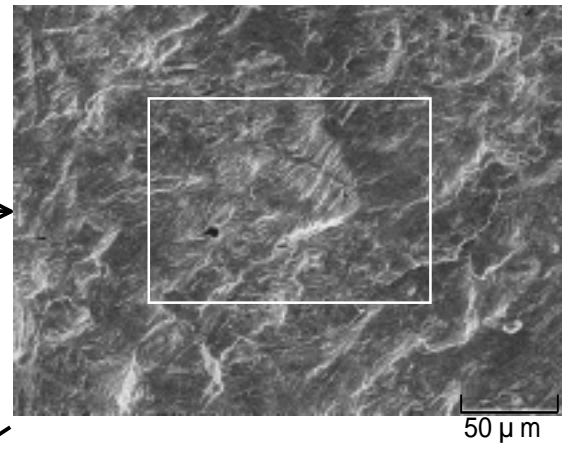
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の先端近傍部)



b - b 矢視



拡大



拡大

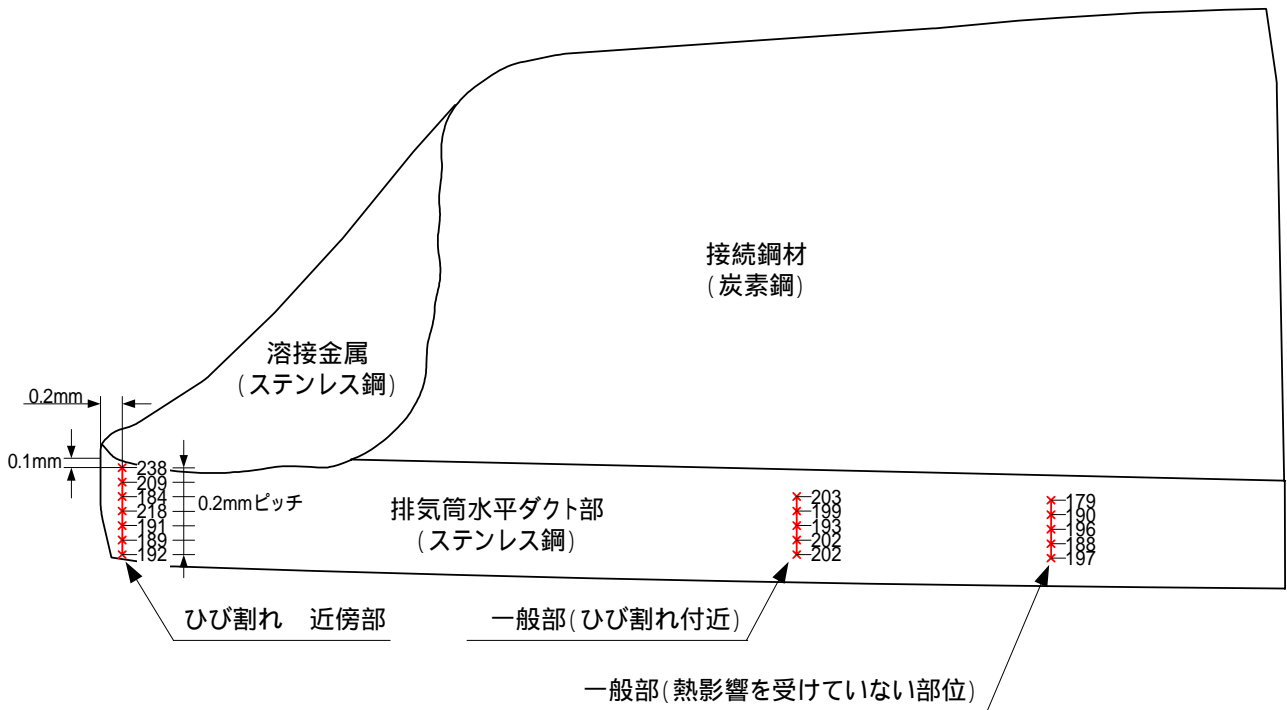


→ : 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す

【観察結果】

- ・ひび割れの先端近傍部では、外面側からのき裂進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れ の詳細調査結果 硬度測定(ひび割れ)

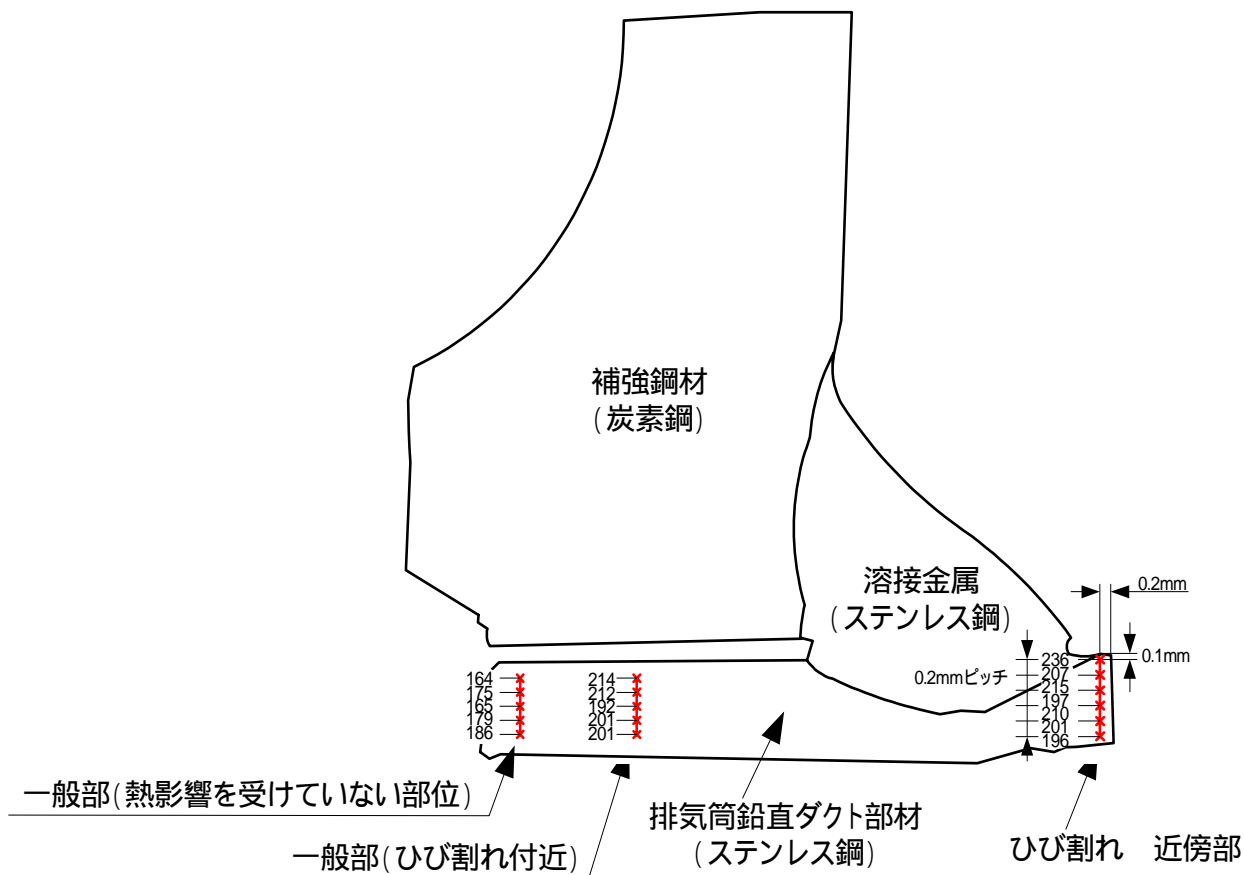


		硬度(ピッカース換算)	
		平均	最高
測定値	ひび割れ 近傍部	203	238
	一般部(ひび割れ付近)	200	203
	一般部(熱影響を受けていない部位)	190	197
参考	ステンレス鋼 SUS304 規格値	-	200

【測定結果】

- ・ひび割れ付近は熱影響を受けていない一般部に比べて硬度が高い。
- ・ひび割れ近傍部は外表面付近が最も硬度が高い。

ひび割れ の詳細調査結果 硬度測定(ひび割れ)



		硬度(ピッカース換算)	
		平均	最高
測定値	ひび割れ 近傍部	209	236
	一般部(ひび割れ付近)	204	214
	一般部(熱影響を受けていない部位)	174	186
参考	ステンレス鋼 SUS304 規格値	-	200

【測定結果】

- ・ひび割れ付近は熱影響を受けていない一般部に比べて硬度が高い。
- ・ひび割れ近傍部は外表面付近が最も硬度が高い。

ひび割れ の詳細調査結果 EPMAによる分析(ひび割れ 、 の破面元素分析)

[単位:重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
ひび割れ	0.20	3.04	2.14	0.53	0.75	0.72	2.15	90.47
ひび割れ	0.28	3.16	1.59	0.16	0.48	0.56	1.89	91.88

(参考)

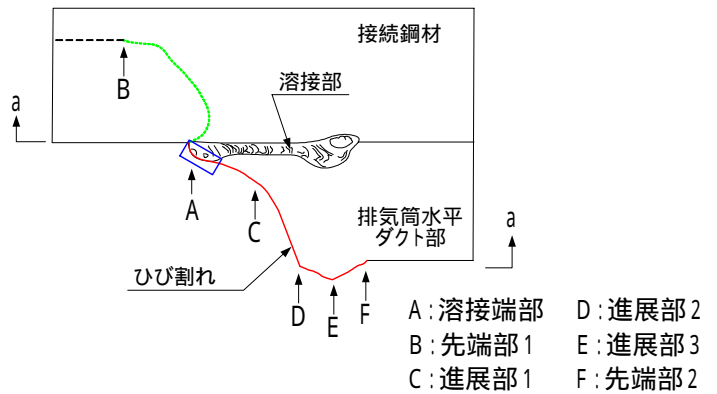
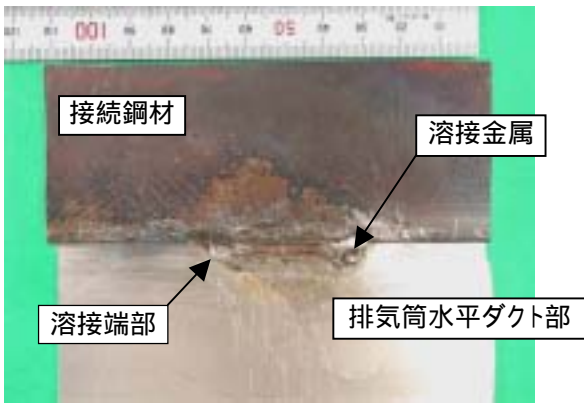
[単位:重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
一般部 (ステンレス鋼)	0.21	2.04	1.37	0.07	0.64	0.63	1.37	93.69

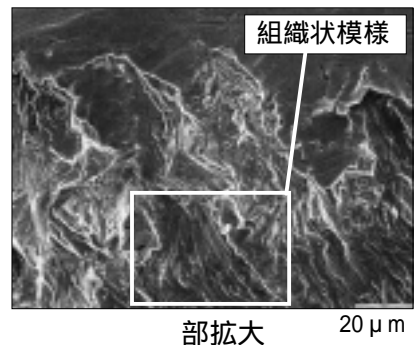
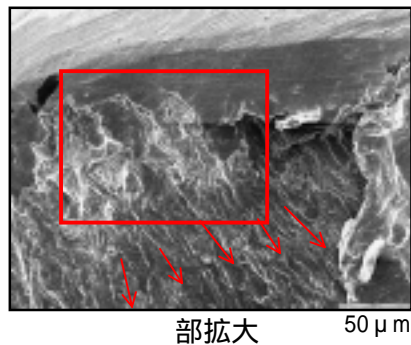
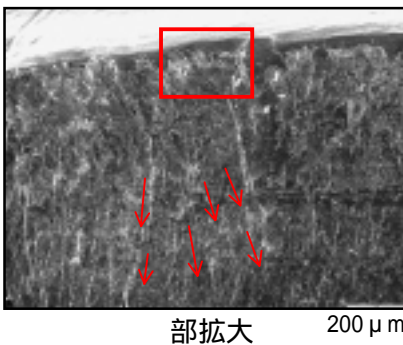
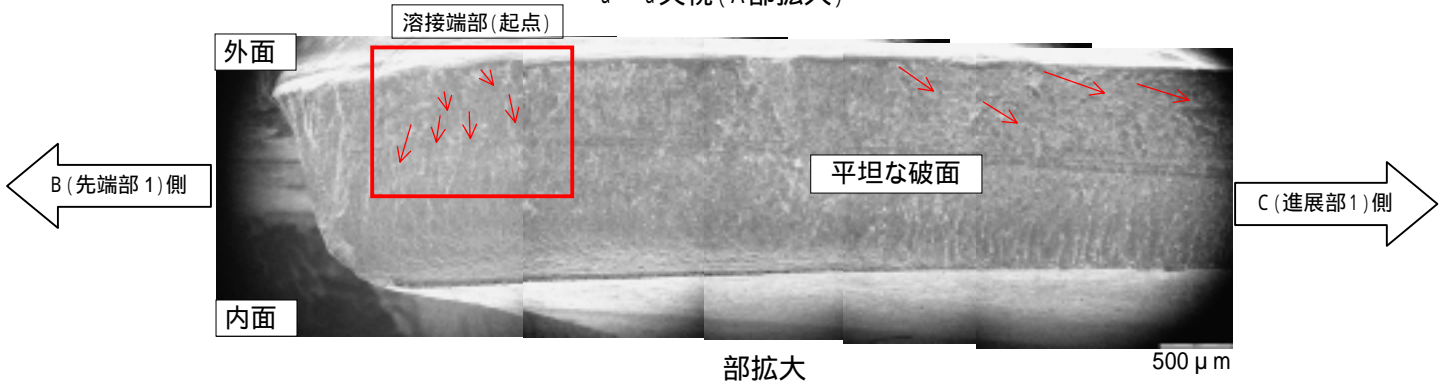
【分析結果】

ひび割れ 、 破面の元素分析を行った結果、鉄鋼材料に有害な不純物は一般部とほぼ同等であることが確認された。

ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ 溶接端部)



a - a 矢視 (A部拡大)



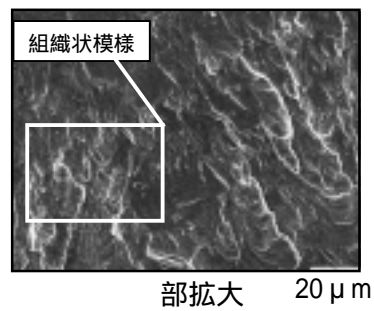
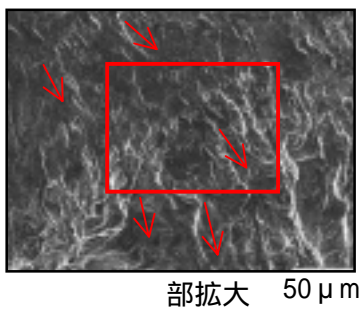
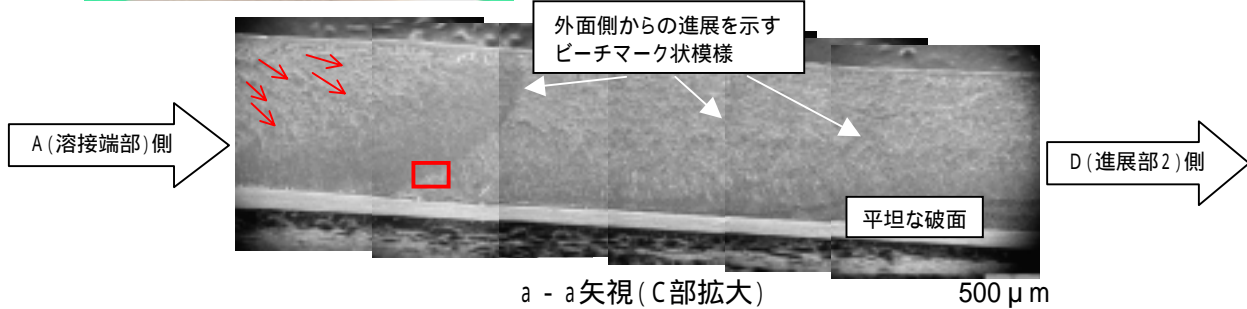
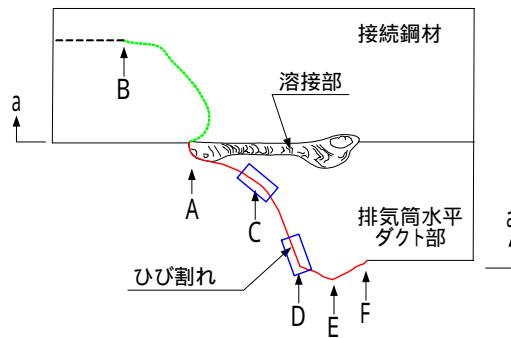
→ : 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す。

【観察結果】

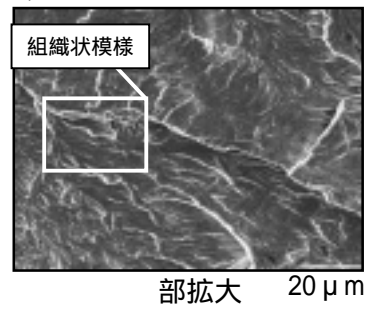
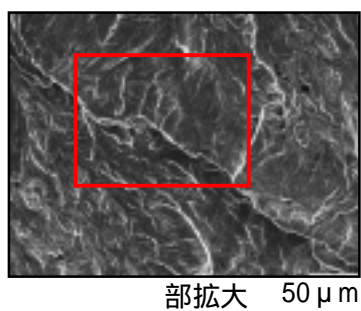
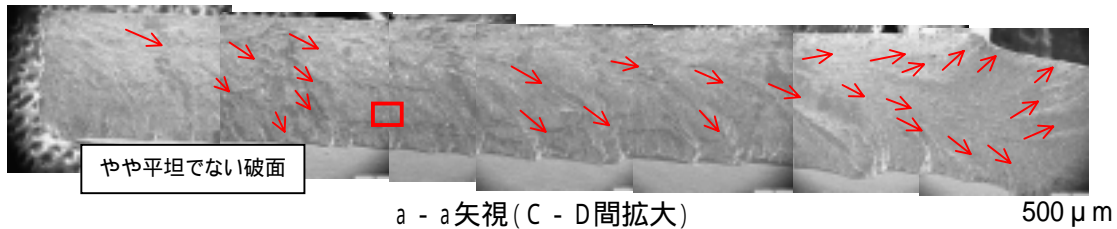
- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側からの進展を示す金属組織の流れが観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の様子は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れの詳細調査結果

破面SEM観察(ひび割れ 進展部(その1))



拡大 →



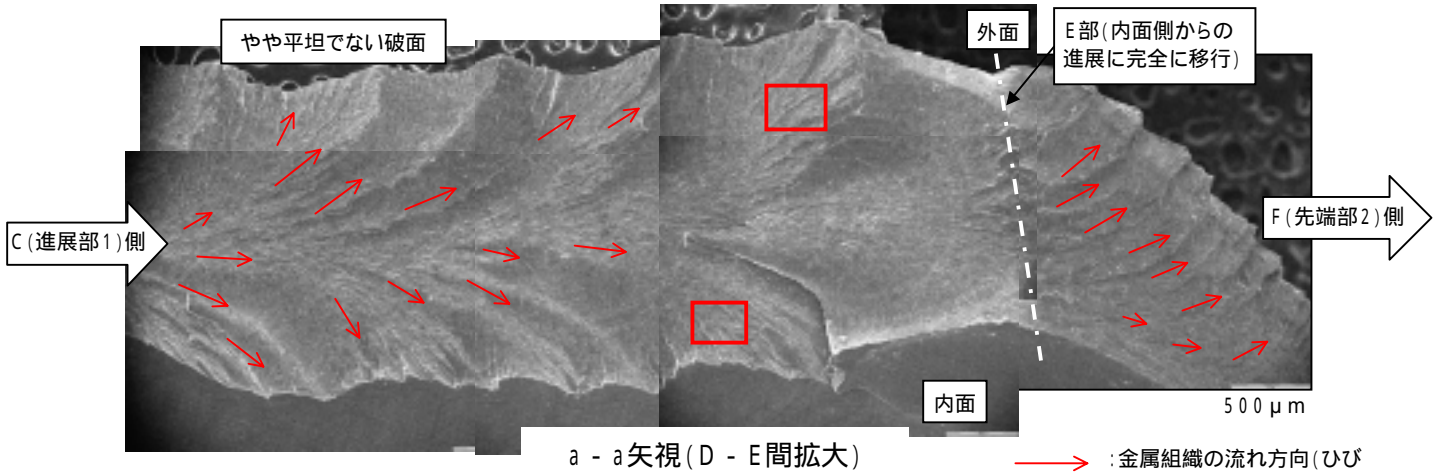
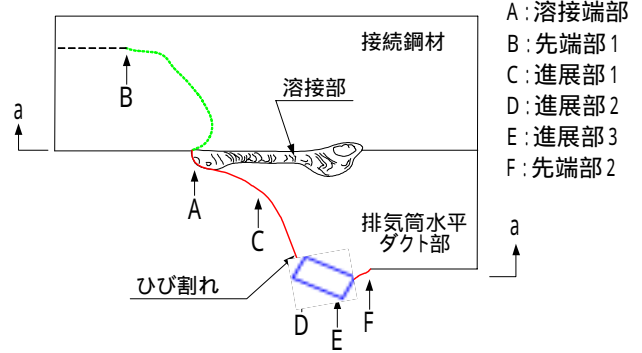
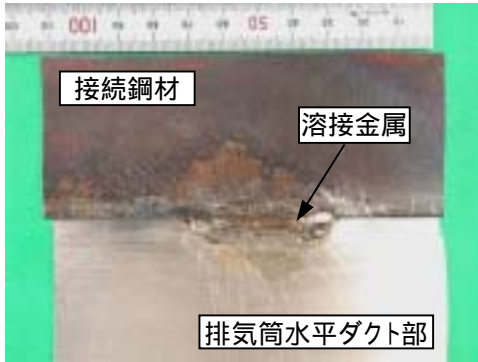
拡大 →

→ : 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す

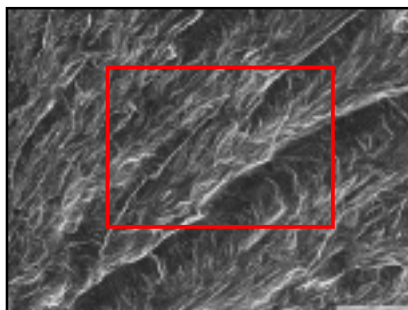
【観察結果】

進展部1 (C部) は平坦な破面であり、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
 進展部 (C - D間) では、ひび割れが外面側から進展後、外面および内面側からの進展が競合する部位に移行している。
 ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に移行する部位 (C - D間) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。
 いずれの破面も粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

ひび割れの詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ 進展部(その2))

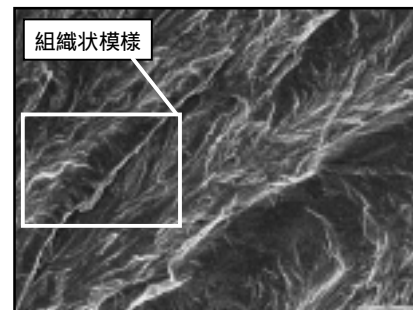


→ : 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す

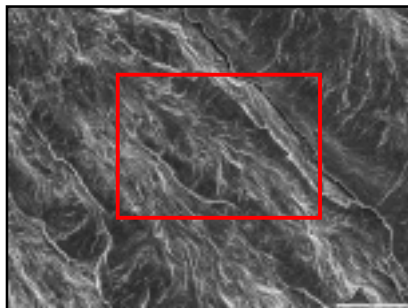


部拡大 50 μm

拡大 →

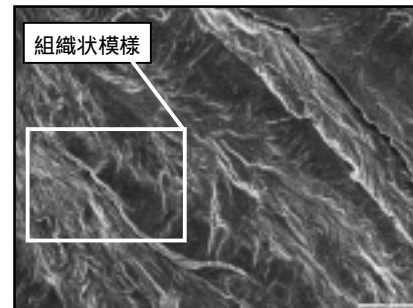


部拡大 20 μm



部拡大 50 μm

拡大 →

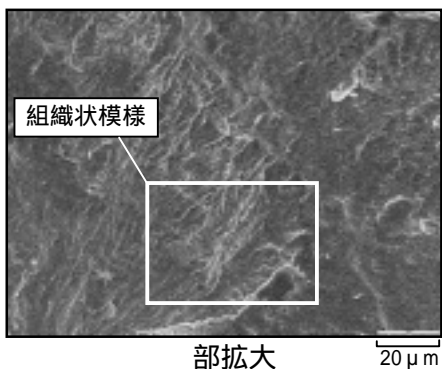
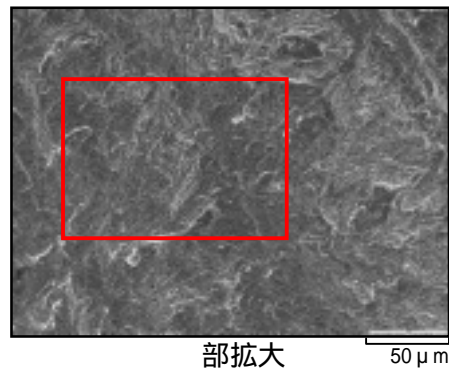
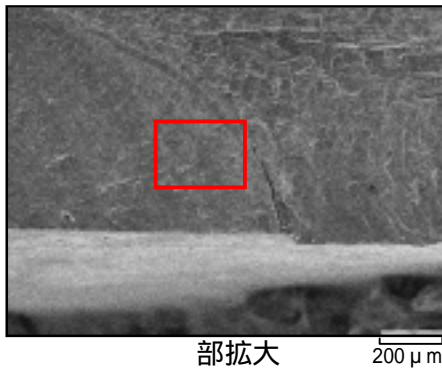
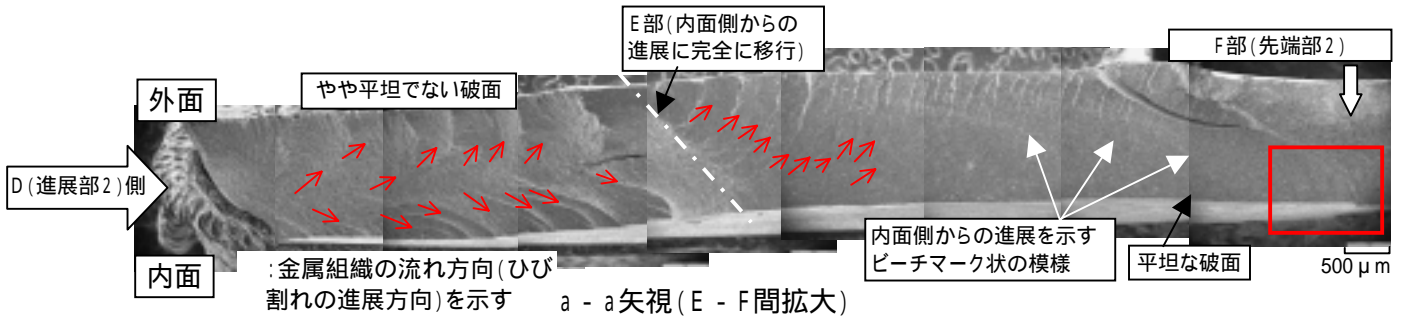
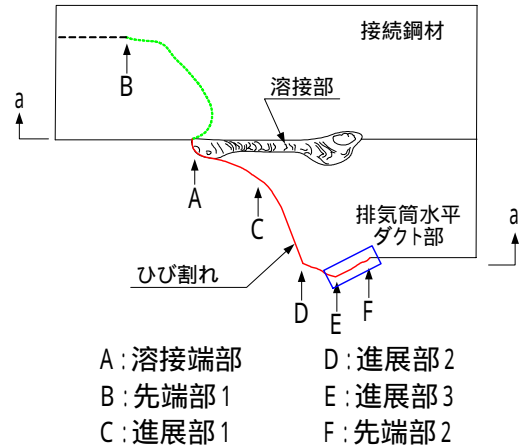
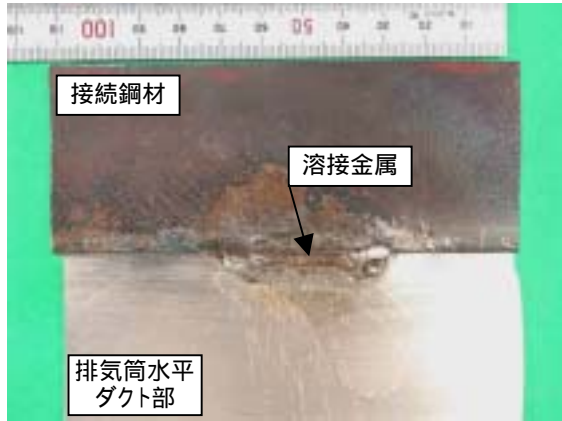


部拡大 20 μm

【観察結果】

外面側からの進展と内面側からの進展が競合している部位(D - E間)が観察された。
 右端(F部側:先端部2)に向かって、内面側からの進展に完全に移行する部位が観察された。
 ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に完全に移行する部位(D - E間)に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面(ファクトリーーフ状の破面)が観察された。
 破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

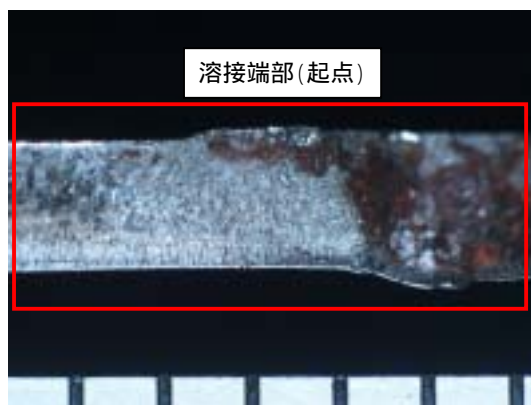
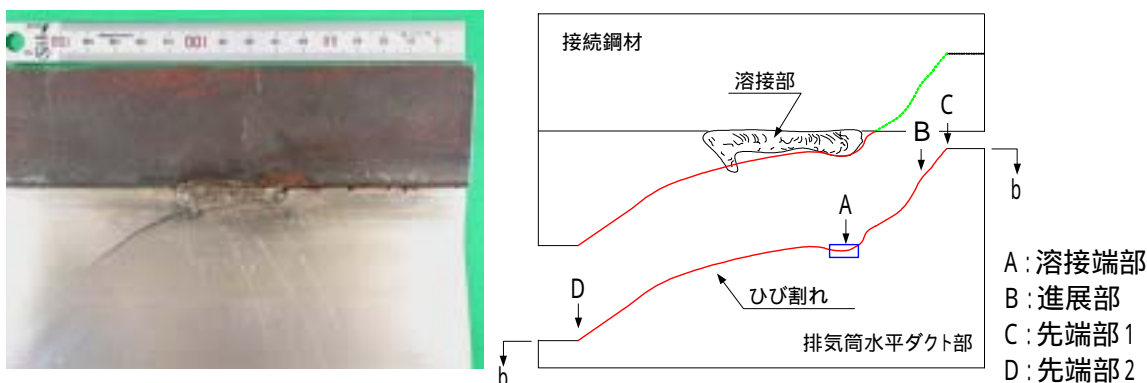
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の先端部)



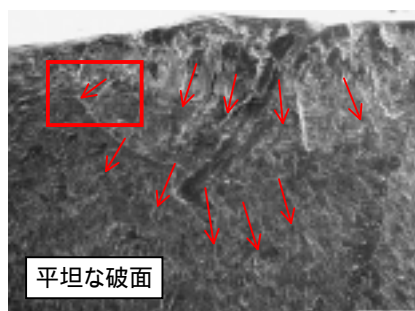
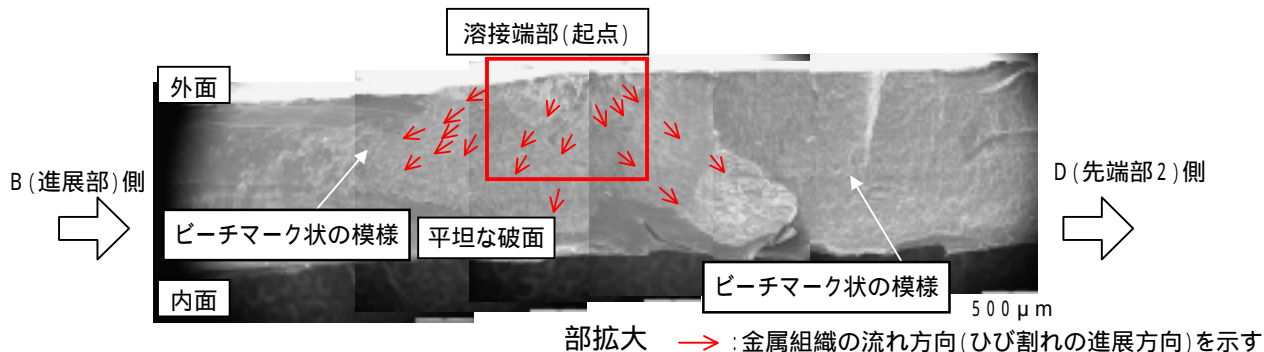
【観察結果】

内外面への進展が競合している部位(D - E間)から内面側からの進展に完全に移行していた。
ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に完全に移行する部位(D - E間)に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。
先端部2(F部)周辺は平坦な破面であり、内面側からの進展を示すピーチマーク状の模様が観察された。
破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労に特有の組織状模様が観察された。

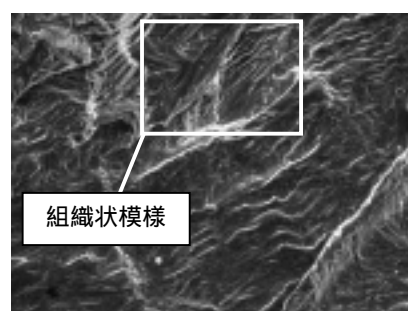
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の溶接端部)



b - b 矢視 (A部拡大)



部拡大 200 μm

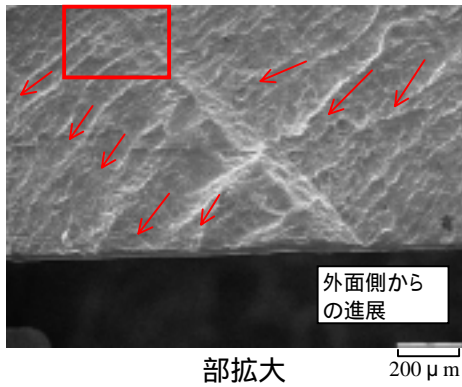
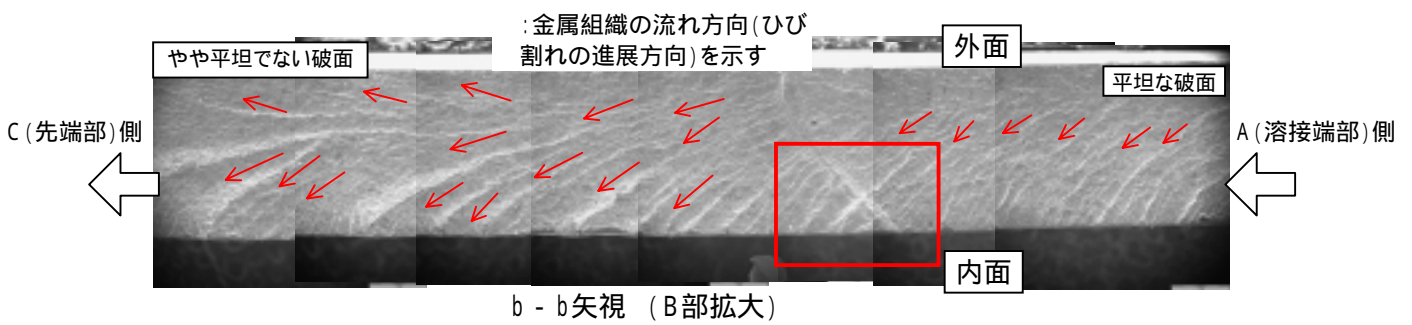
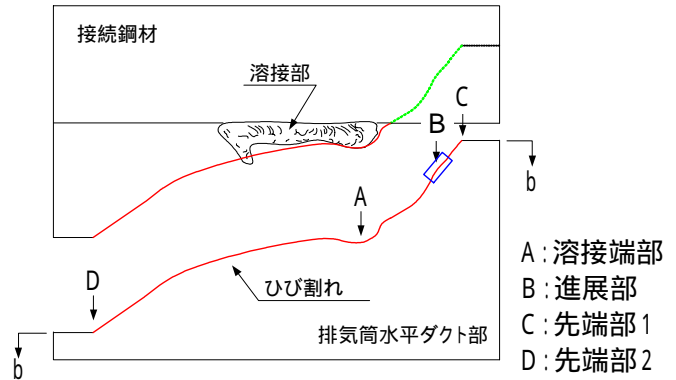
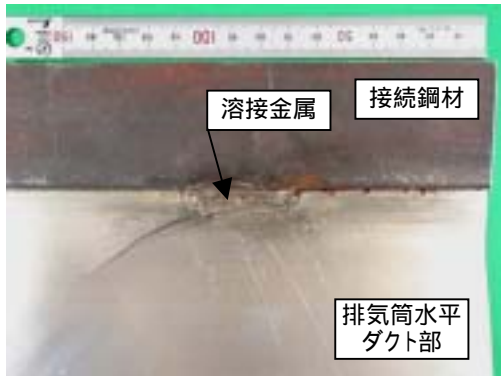


部拡大 20 μm

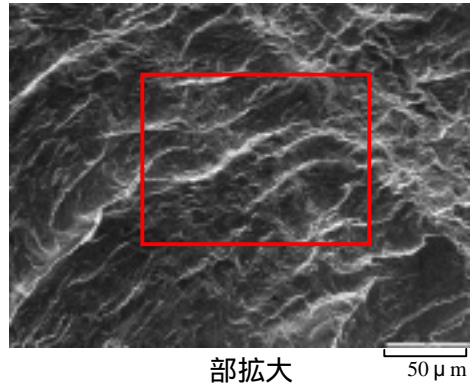
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側から内面側への進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の模様は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

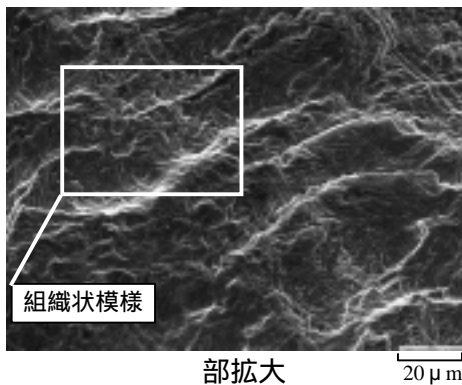
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の進展部)



拡大 →



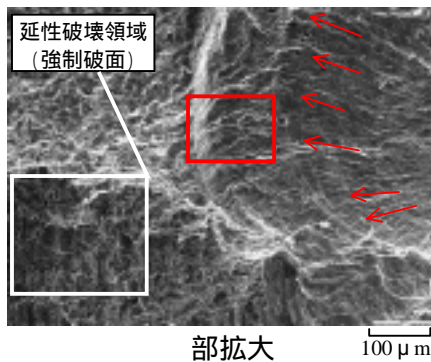
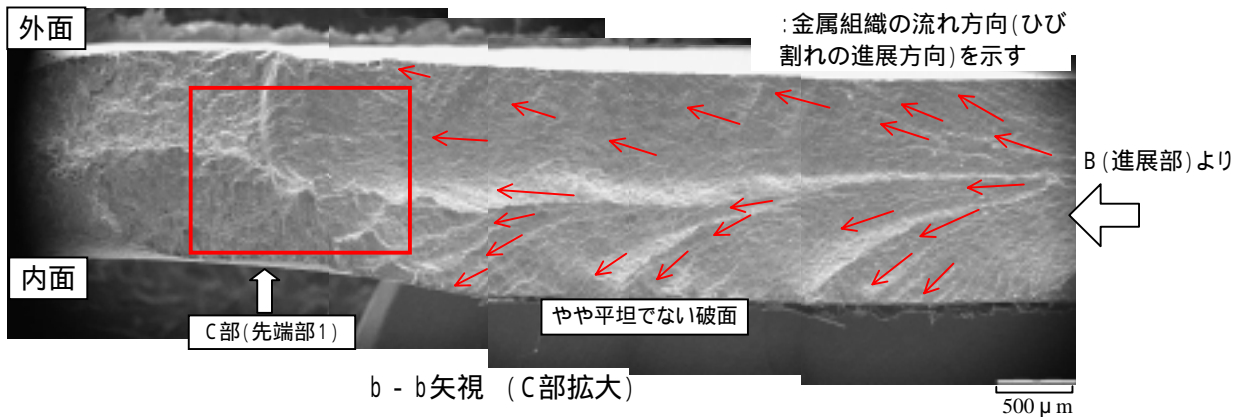
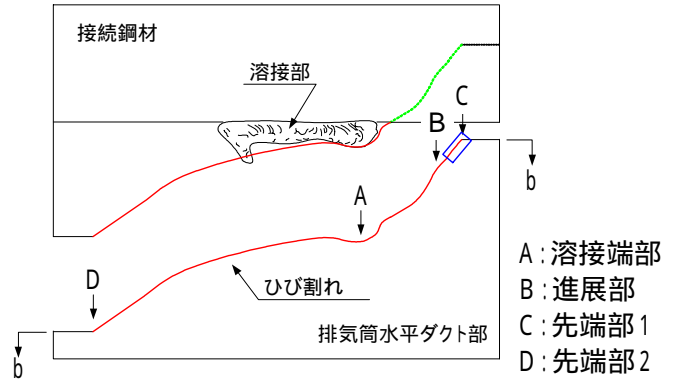
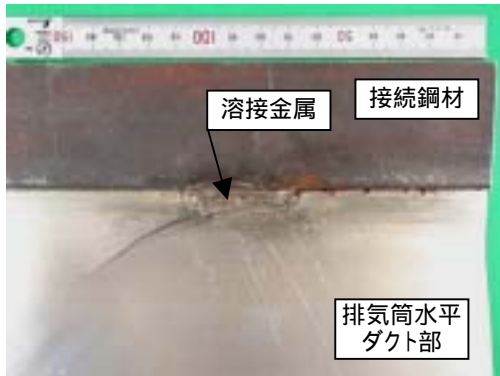
拡大 ↙



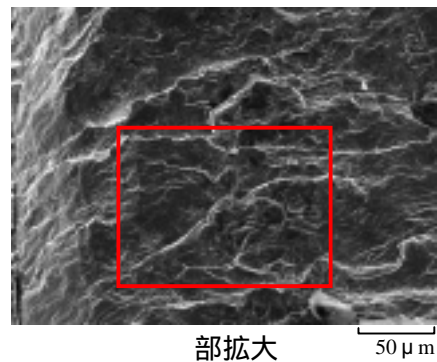
【観察結果】

外面側からの進展と内面側からの進展が競合している部位(B部:進展部)が観察された。ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に移行する部位(B部:進展部)に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

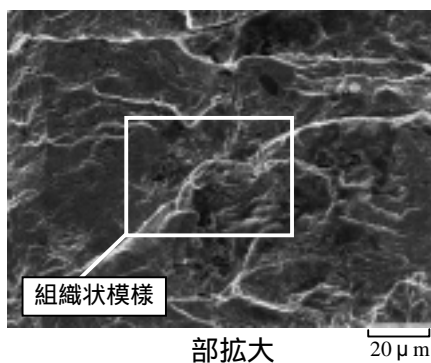
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の先端部)



拡大 →



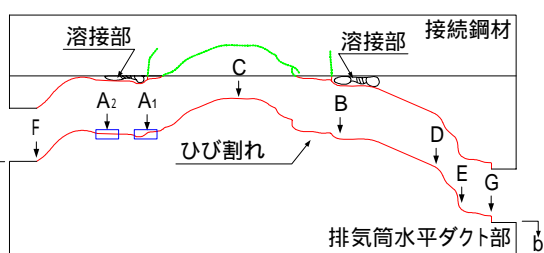
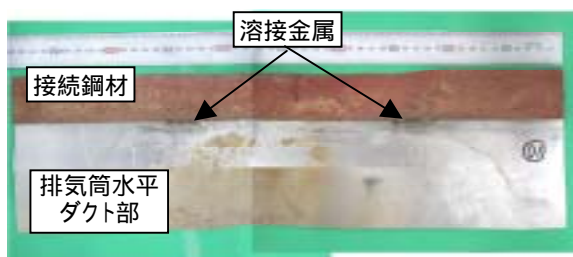
拡大 ↙



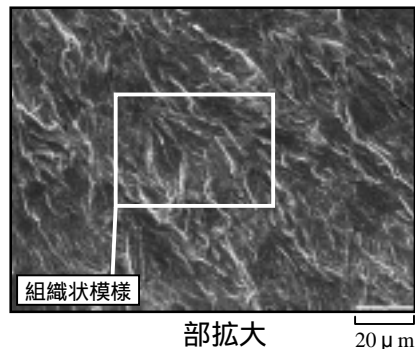
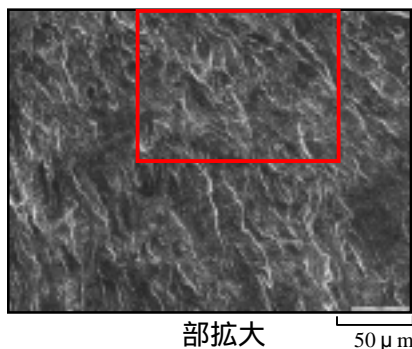
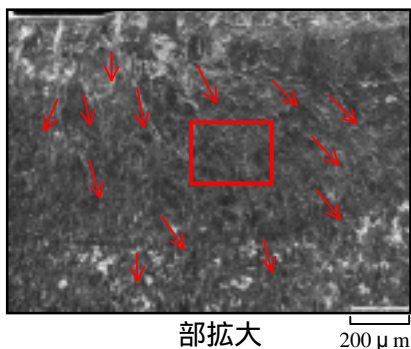
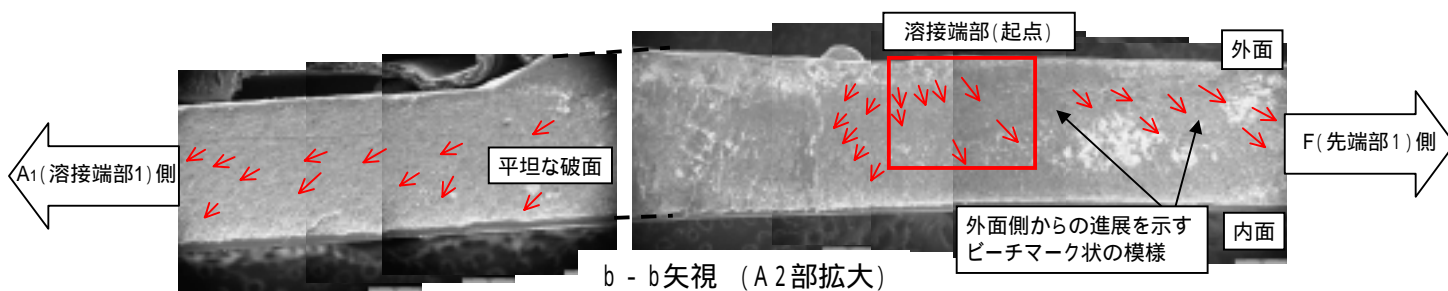
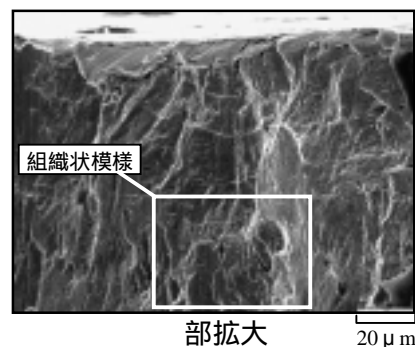
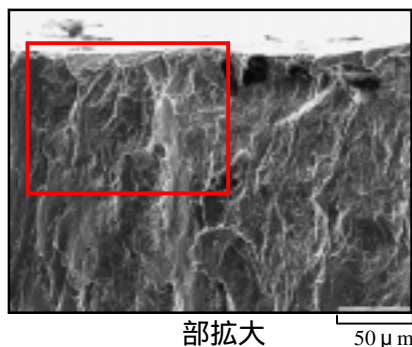
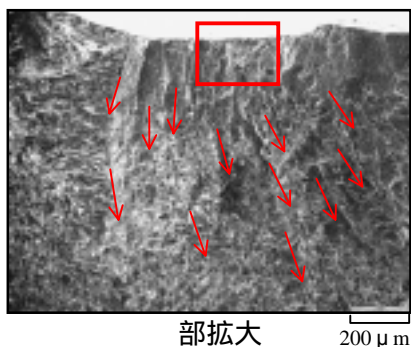
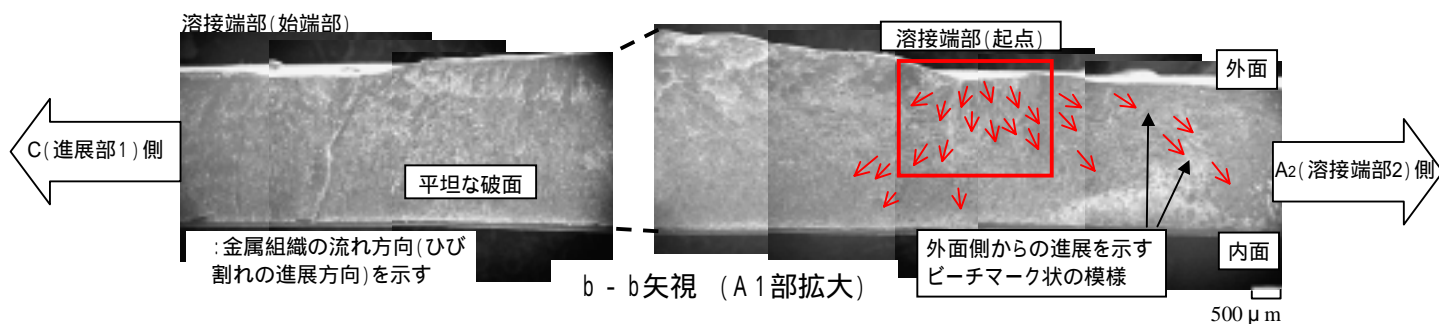
【観察結果】

先端部1 (C部) は、外面側からの進展と内面側からの進展が競合する破面が観察された。ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に移行する部位 (C部: 先端部1) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面(ファクトリールーフ状の破面) が観察された。破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有な組織状模様が観察された。

ひび割れの詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れの溶接端部(その1))



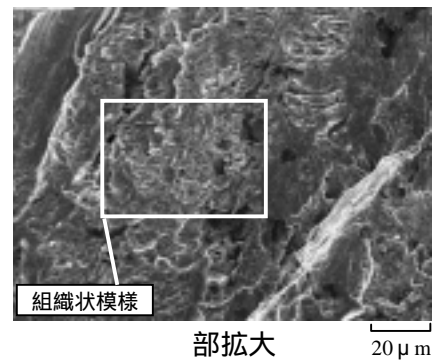
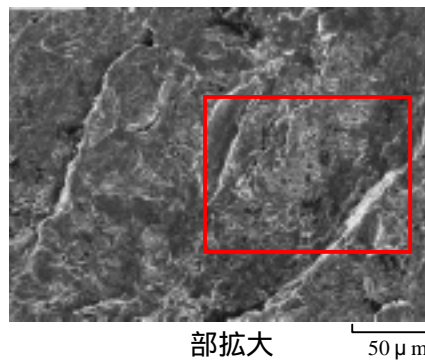
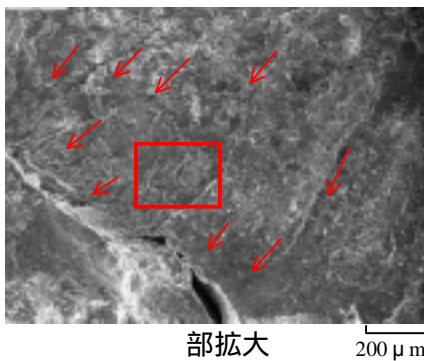
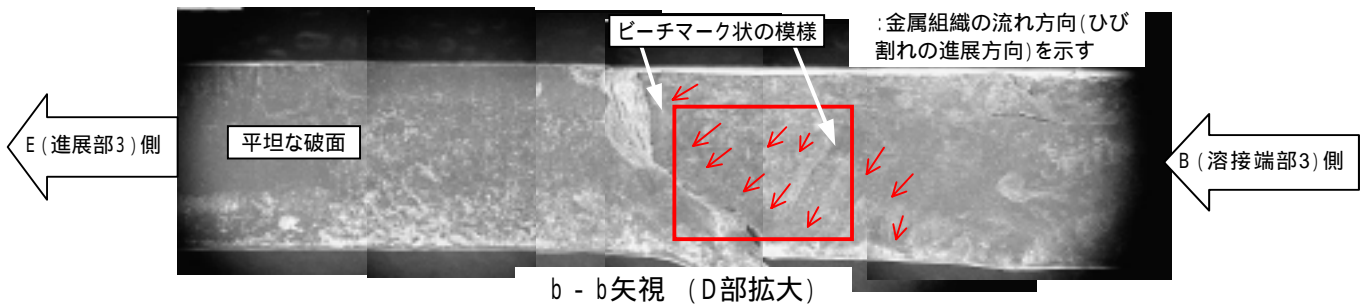
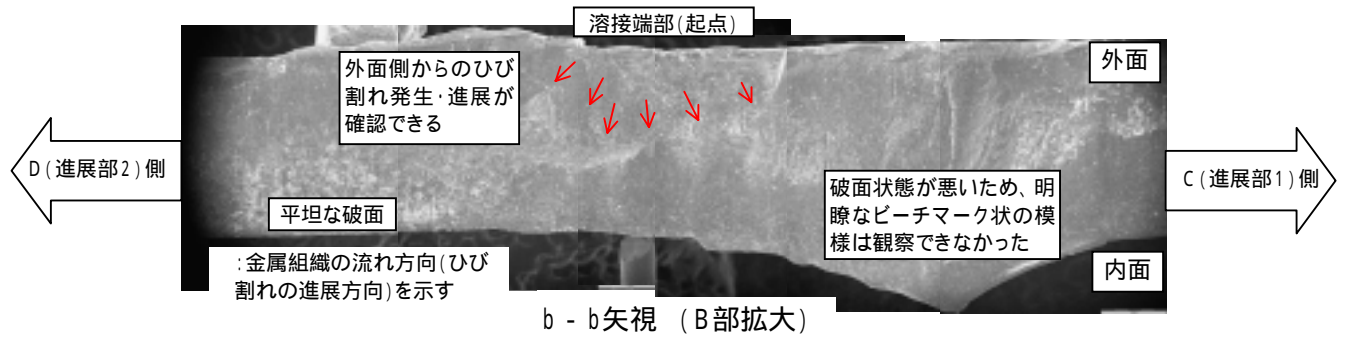
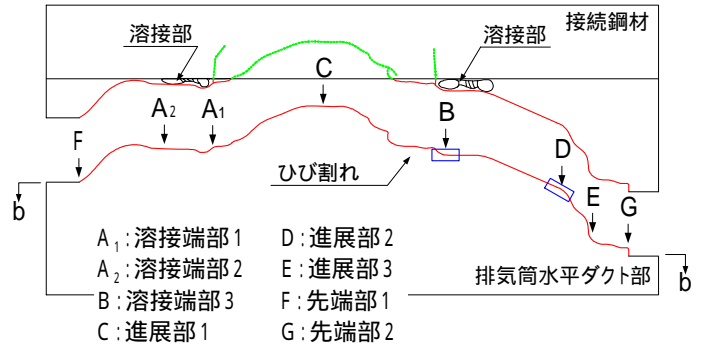
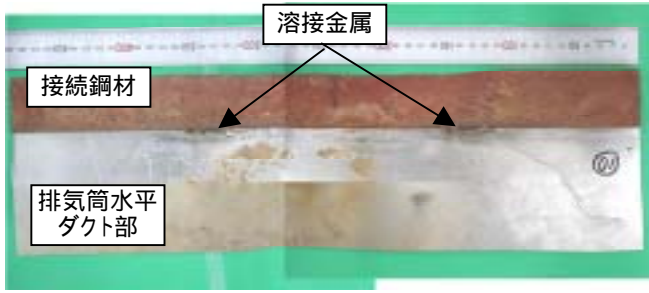
- A₁: 溶接端部1
- A₂: 溶接端部2
- B: 溶接端部3
- C: 進展部1
- D: 進展部2
- E: 進展部3
- F: 先端部1
- G: 先端部2



【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の模様は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

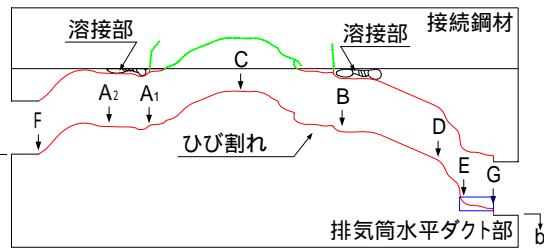
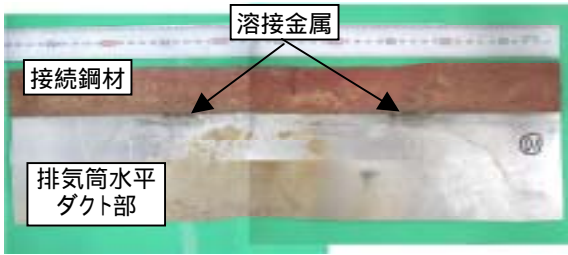
ひび割れ 破面SEM観察(ひび割れ) の詳細調査結果 の溶接端部(その2), 進展部)



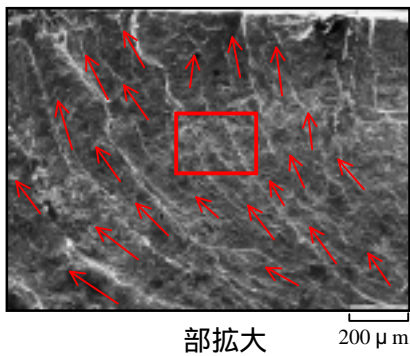
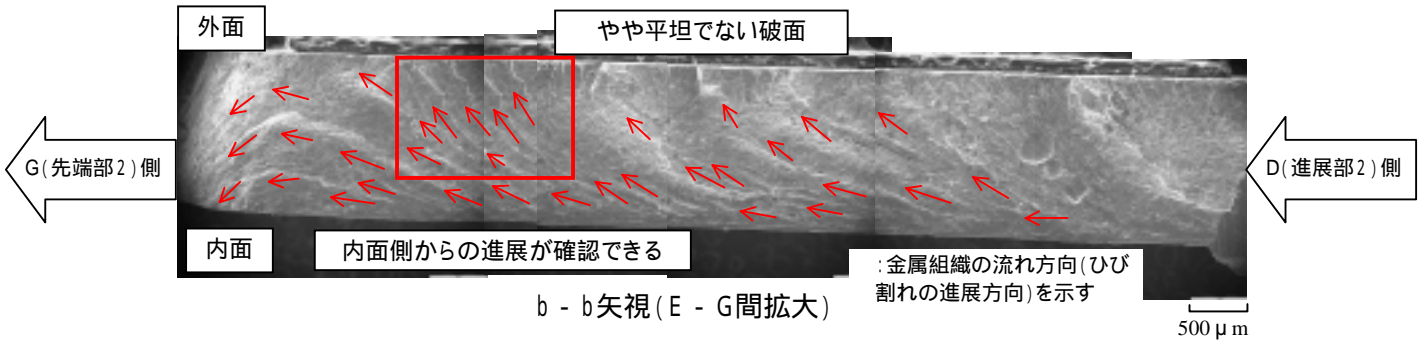
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・破面状態が悪かったため、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様は観察できなかった。しかしながら、破面で観察される金属組織の流れより、外面側からの進展と判断される。
- ・溶接端部からの進展は、進展部2(D部)で観察されるビーチマーク状の模様より、外面側からの進展と判断される。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

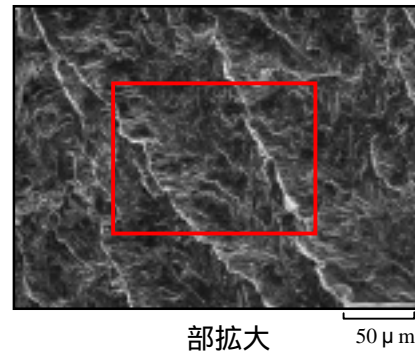
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の進展部(その2))



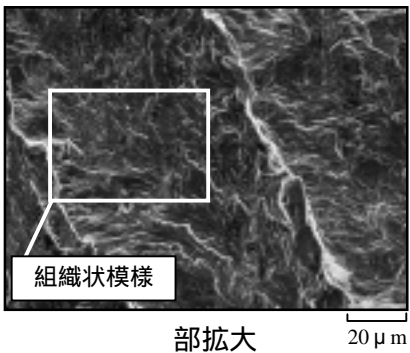
- A₁: 溶接端部1
- A₂: 溶接端部2
- B: 溶接端部3
- C: 進展部1
- D: 進展部2
- E: 進展部3
- F: 先端部1
- G: 先端部2



部拡大 200 μm



部拡大 50 μm



部拡大 20 μm

拡大 →

← 拡大

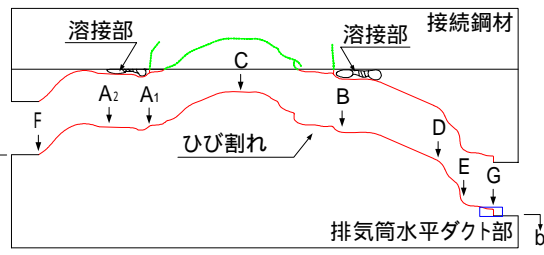
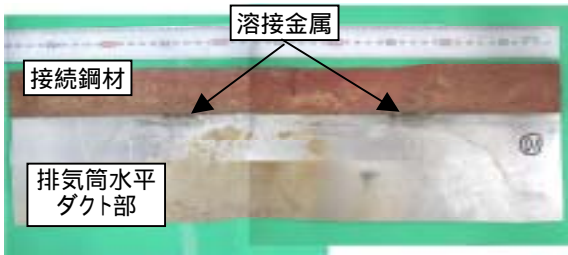
【観察結果】

ひび割れの進展方向は、進展部2 (D部) からの途中で外面側から内面側からの進展に完全に移行しており、進展部3 (E部) では全て内面側からの進展である。

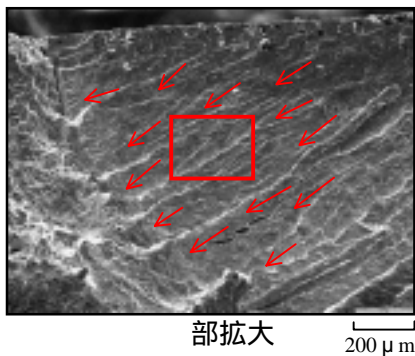
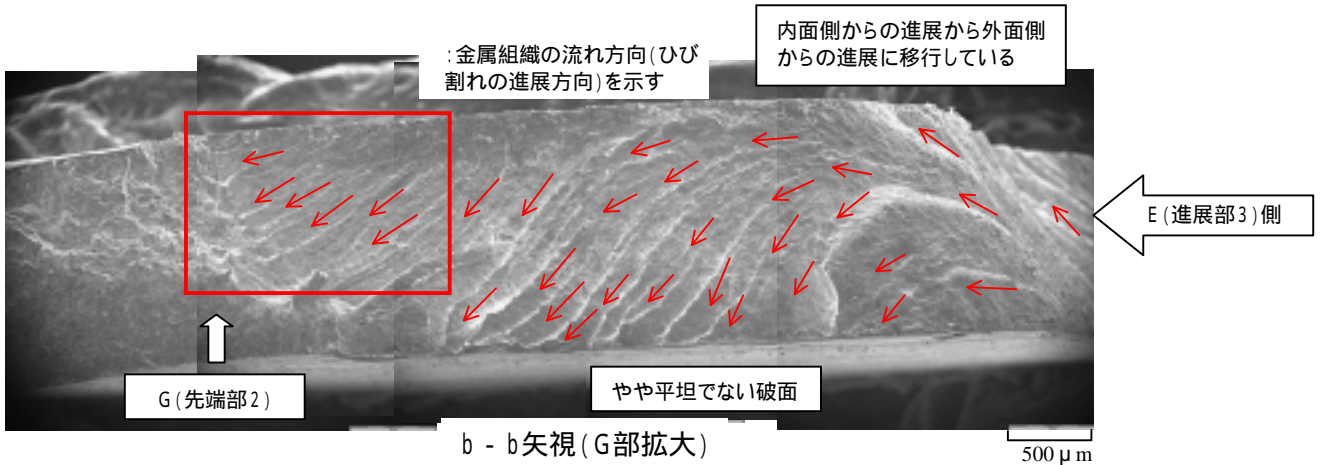
ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に完全に移行する部位 (E部: 進展部3) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面 (ファクトリールーフ状の破面) が観察された。

破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

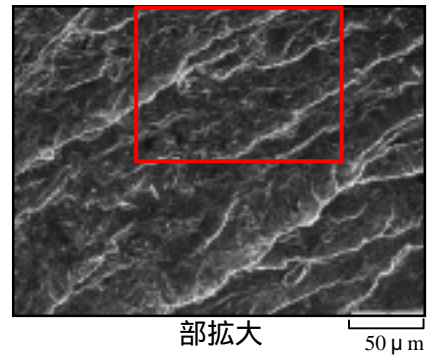
ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の先端部)



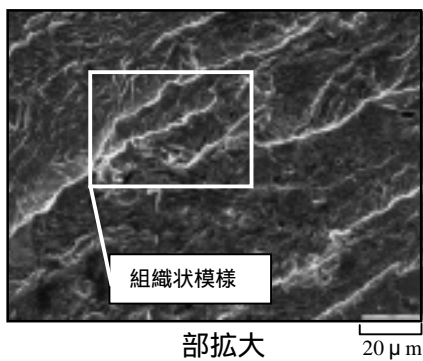
- A₁: 溶接端部1
- A₂: 溶接端部2
- B: 溶接端部3
- C: 進展部1
- D: 進展部2
- E: 進展部3
- F: 先端部1
- G: 先端部2



拡大 →



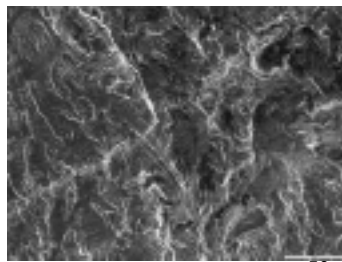
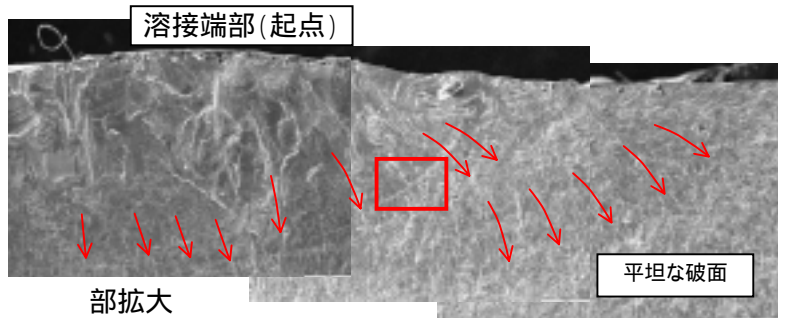
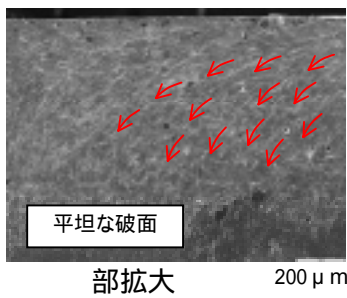
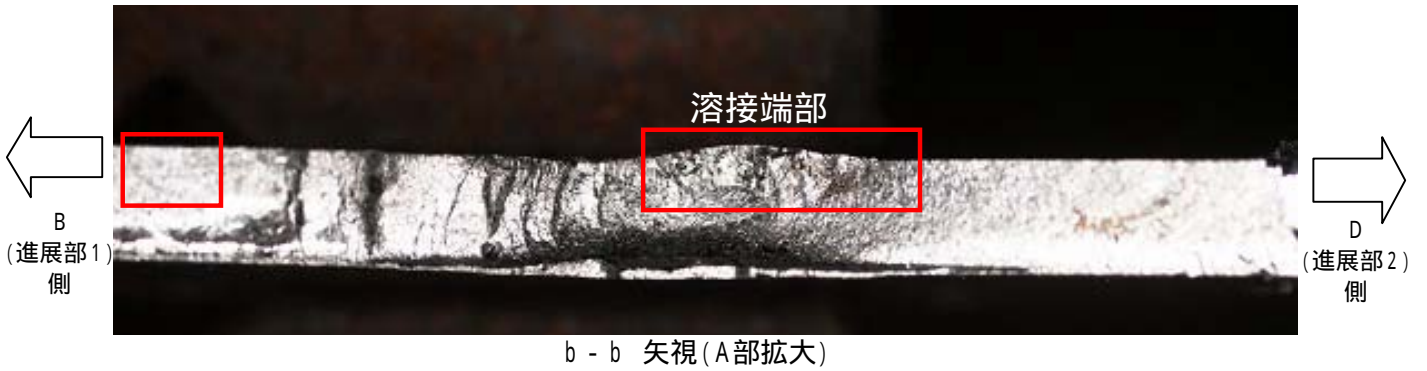
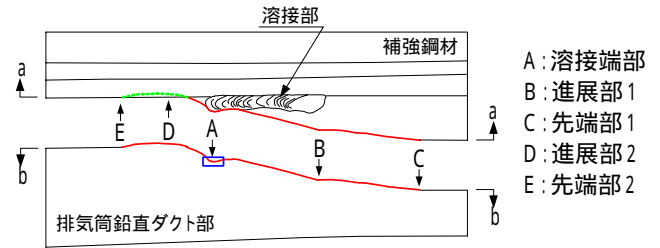
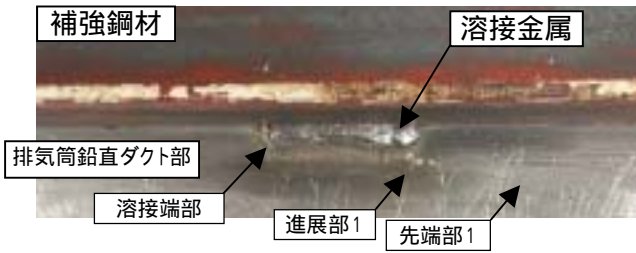
← 拡大



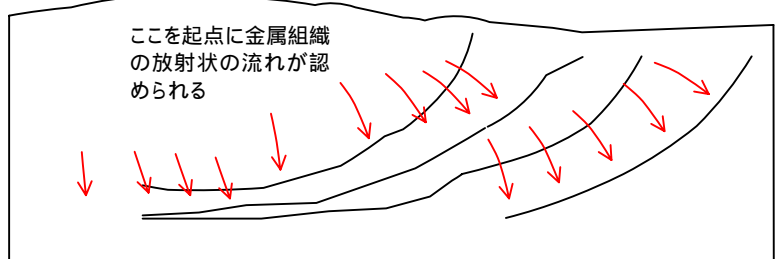
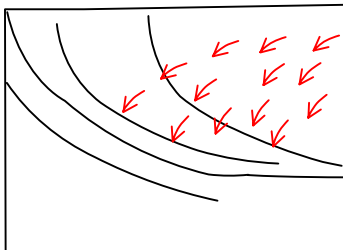
【観察結果】

- 進展部3 (E部) から先端部2 (G部) にかけて、内面側からの進展から外面側からの進展に移行している。
- 先端部2 (G部) は、外面側からの進展が観察された。
- ひび割れ貫通部後の進展では、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。
- 破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の溶接端部)



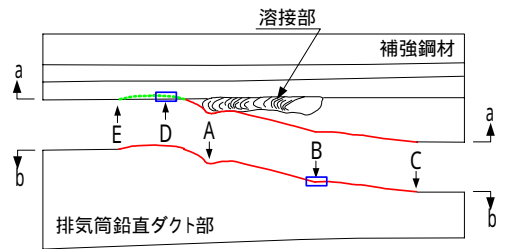
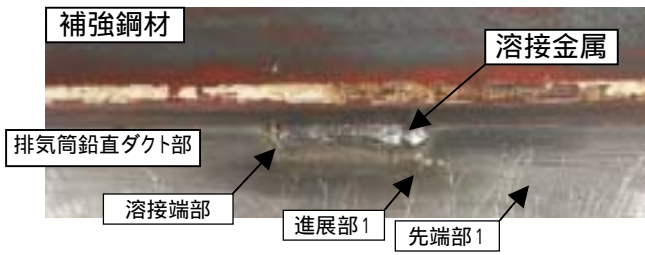
: 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す。



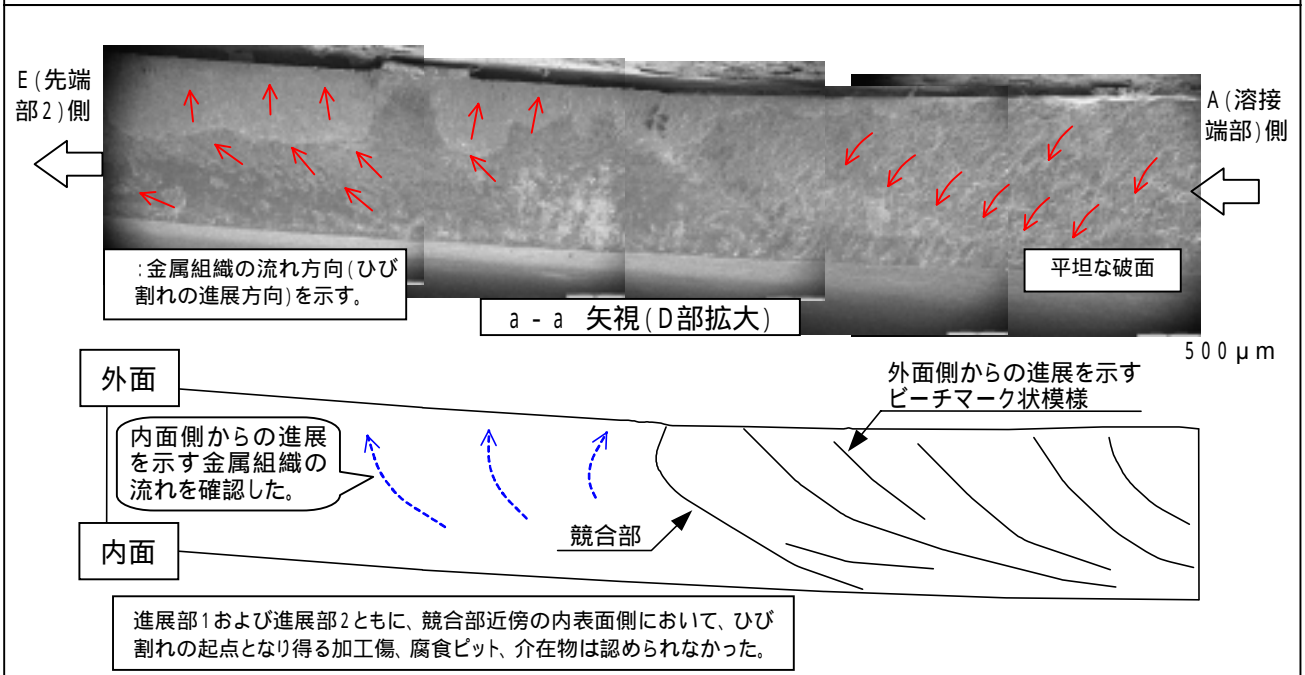
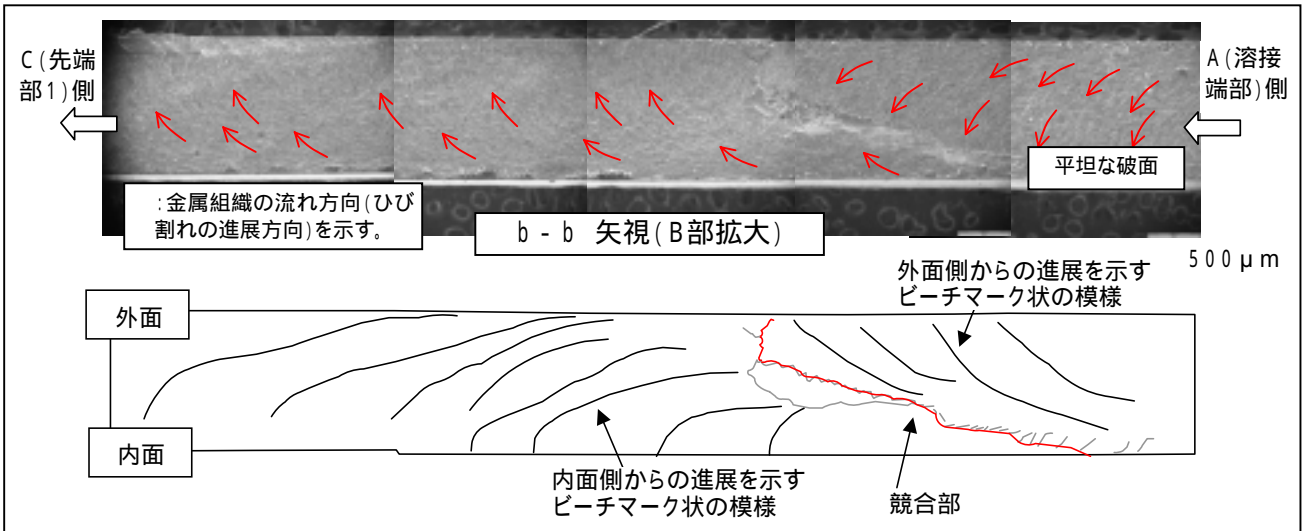
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側からの進展を示すピーチマーク状の様子が溶接端部の両側に認められた。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の様子は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ の進展部)



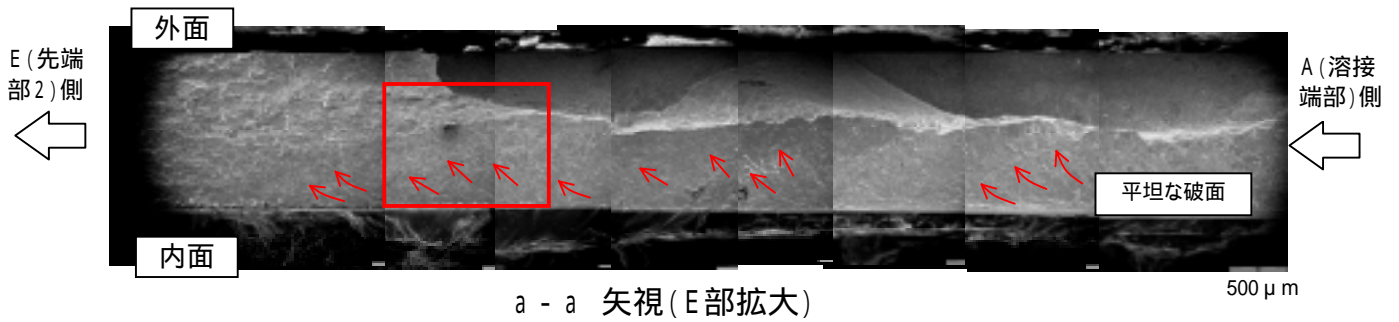
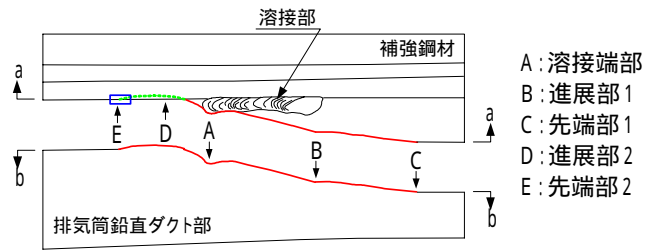
- A: 溶接端部
- B: 進展部1
- C: 先端部1
- D: 進展部2
- E: 先端部2



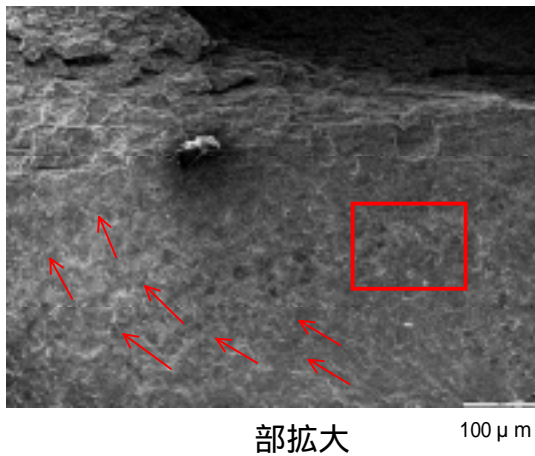
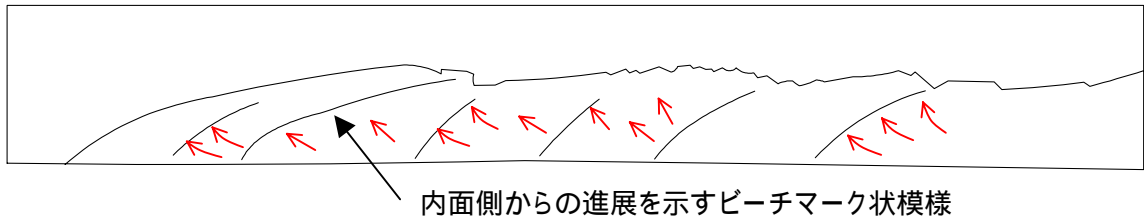
【観察結果】

進展部1, 2 (B, D部)では、外面側および内面側からの進展が競合していた。
 進展部1 (B部)では、内面側からの進展を示すビーチマーク状の模様は、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様には侵入していない。(外面側からの進展が先行していたことを示す。)
 進展部2 (D部)では、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様は、競合部でも途切れていない。(外面側からの進展が先行していたことを示す。)
 先端部1, 2 (C, E部)で観察された内面側からの進展は、外面側からの進展に引き続いて生じたものである。
 破面は平坦であった。

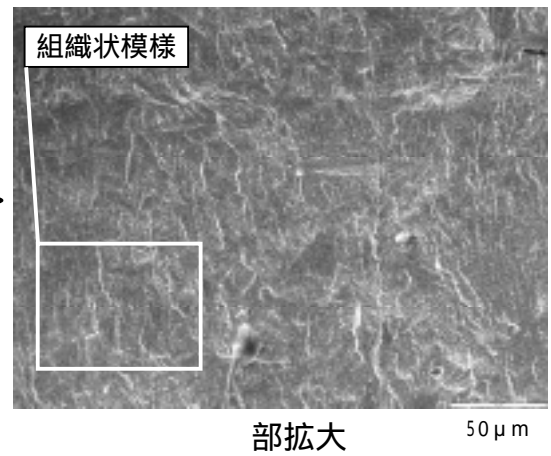
ひび割れの詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れの先端部)



→ : 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す。



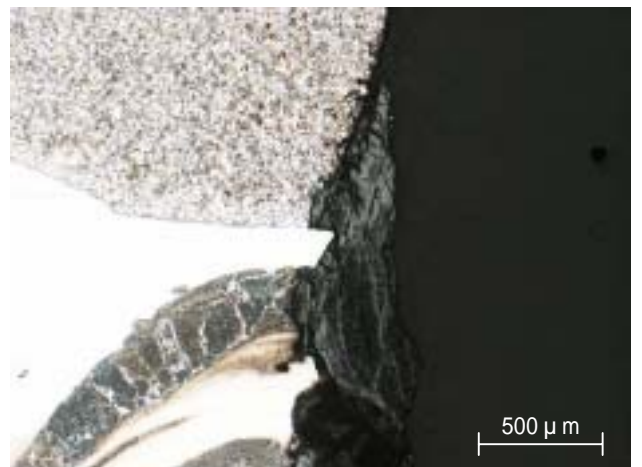
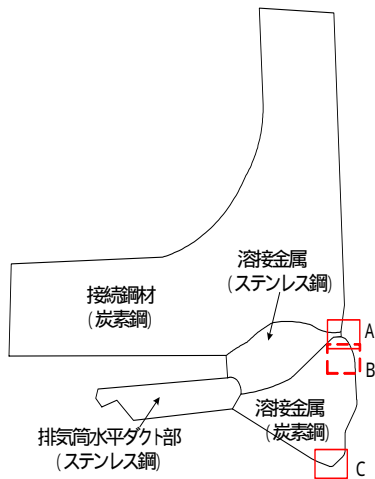
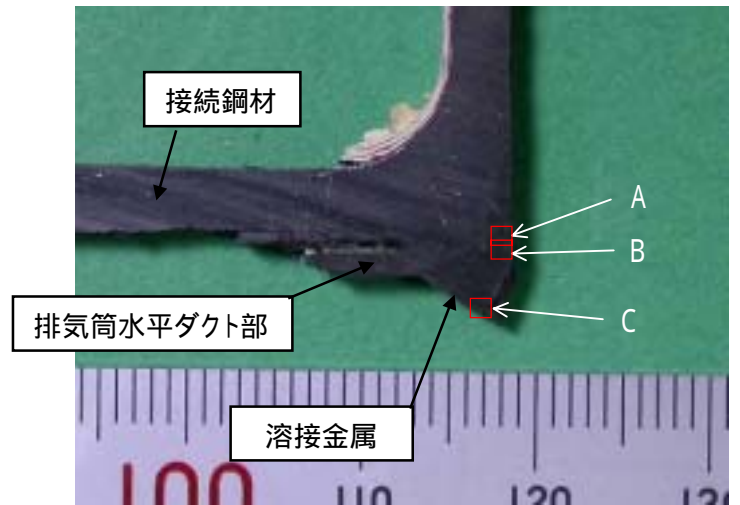
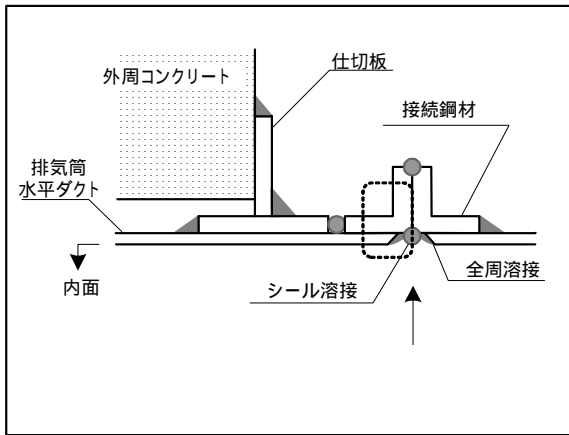
拡大 →



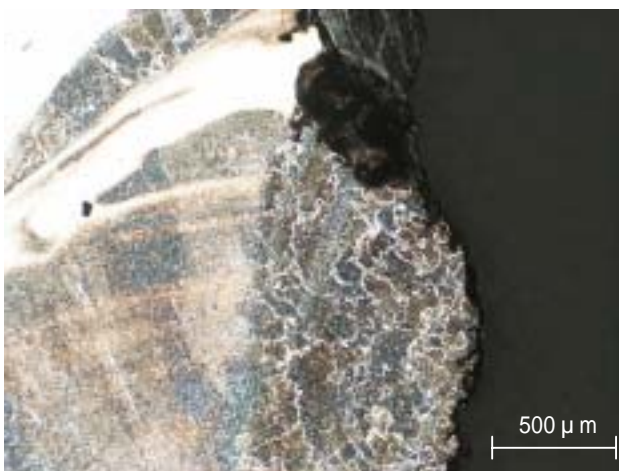
【観察結果】

先端部2 (E部) は、内面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
 先端部2 (E部) は、内面側が大きい半楕円形状の破面が観察された。
 内面側からの進展を示す金属組織の流れが観察された。
 破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
 破面は平坦であった。

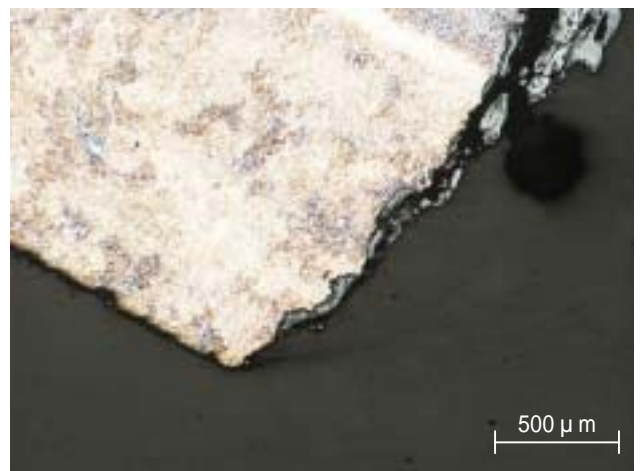
ひび割れ の詳細調査結果 断面マイクロ観察



A部



B部

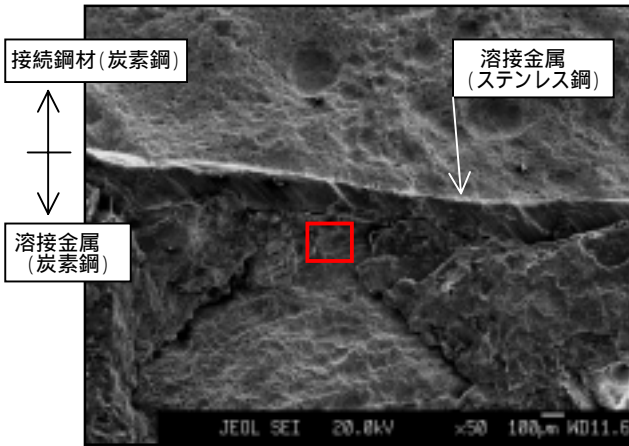
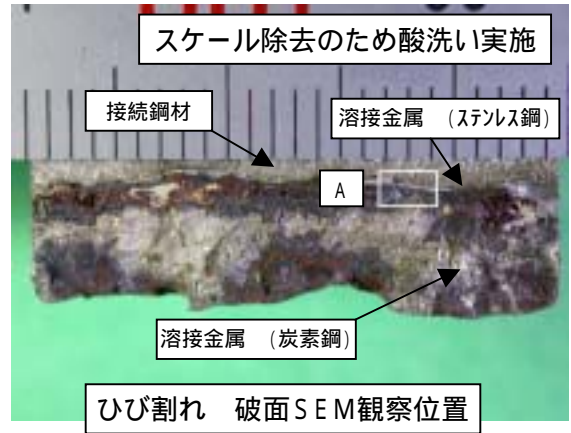
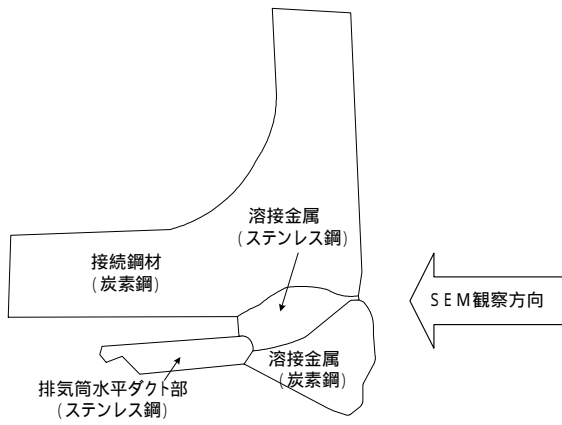


C部

【観察結果】

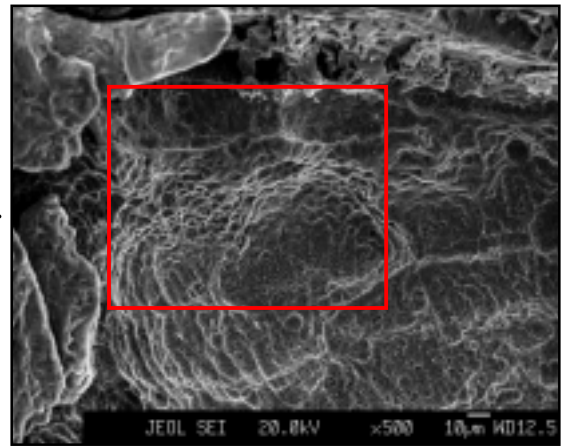
・ひび割れ の断面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が不規則に認められる。

ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(接続鋼材側)

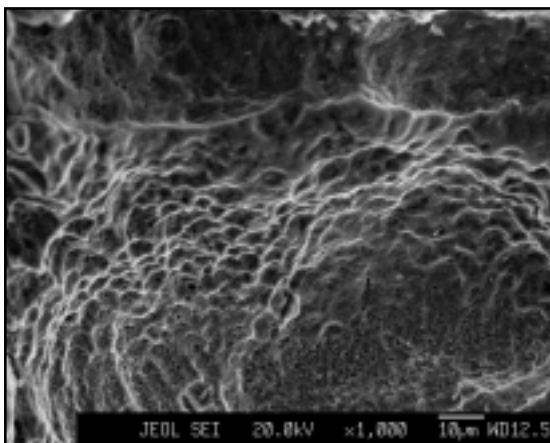


A部拡大

拡大



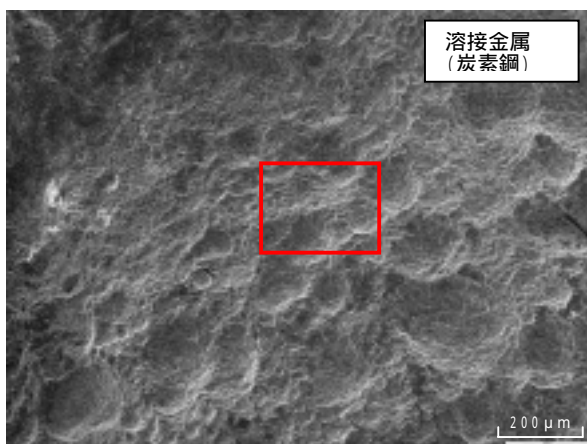
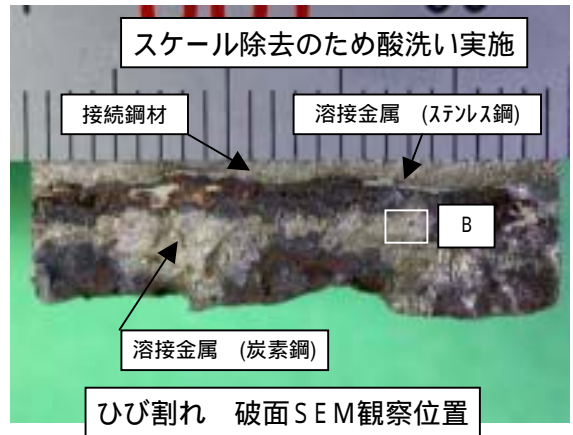
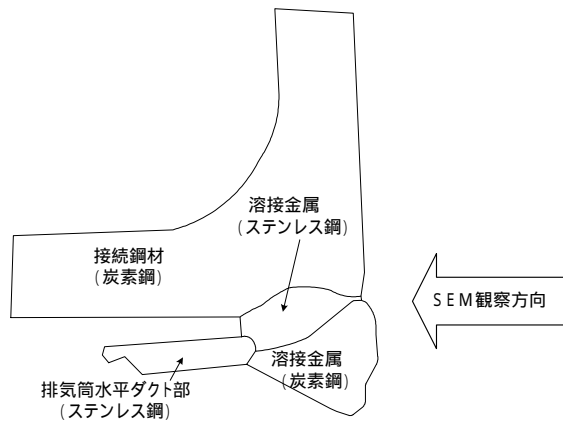
拡大



【観察結果】

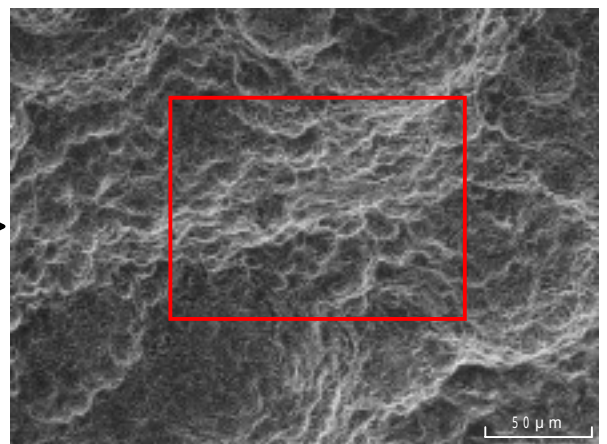
・ひび割れ 破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

ひび割れ の詳細調査結果 破面SEM観察(中央部)

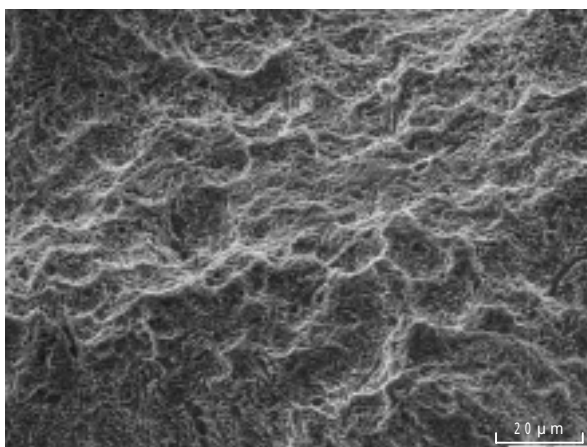


B部拡大

拡大



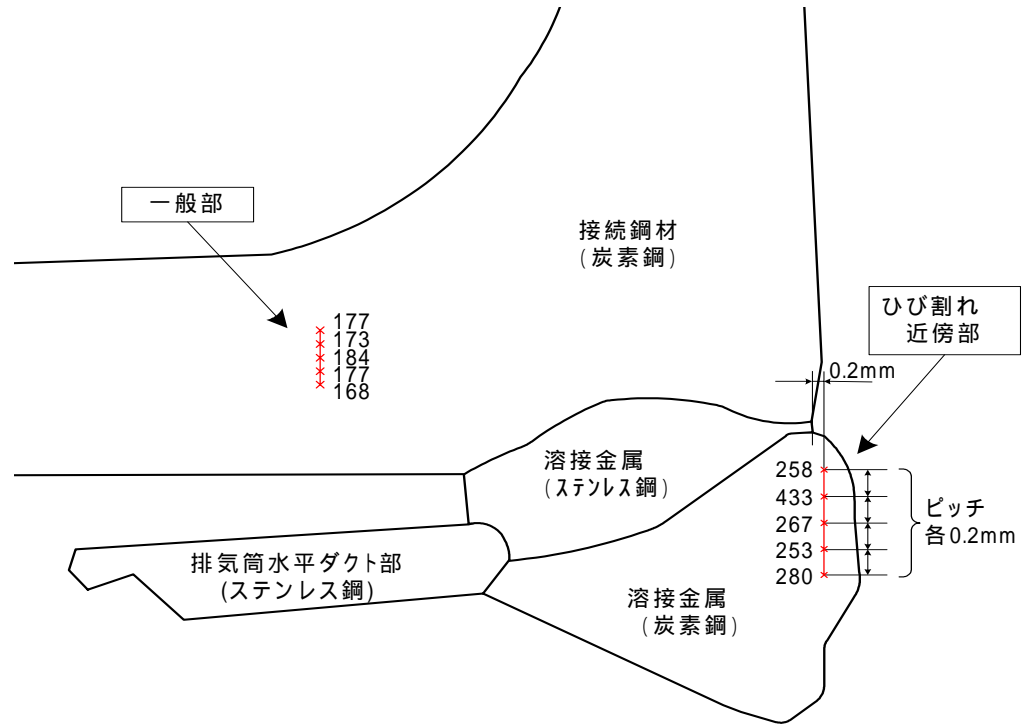
拡大



【観察結果】

・ひび割れ 破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

ひび割れ の詳細調査結果 硬度測定



		硬度(ピッカース換算)	
		平均	最高
測定値	ひび割れ 近傍部	約 300	433
	一般部	約 180	185

炭素鋼(SS41)の硬さ規格値はなし。

【測定結果】

・ひび割れ 近傍の溶接金属部の硬度を測定した結果、硬化した部位が認められた。

ひび割れ の詳細調査結果 EPMAによる分析(ひび割れ の破面元素分析)

[単位:重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
ひび割れ	0.30	2.09	1.12	0.38	0.42	0.31	1.13	94.24

(参考)

[単位:重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
一般部 (炭素鋼)	0.08	2.16	1.62	0	0.75	0.50	1.31	93.58

【分析結果】

・ひび割れ 破面の元素分析を行った結果、鉄鋼材料に有害な不純物は一般部とほぼ同等であることが確認された。

ひび割れ、および のやや平坦でない破面が形成された推定メカニズム

1. ひび割れの進展モード

	ひび割れの状態	外力の状況	主応力ひび割れ進展状況
貫通前			
貫通後の長いひび割れ			

2. 各モードの進展挙動

モード I 型
 ひび割れ先端には、ひび割れに垂直な主応力が作用するので、ひび割れは主応力に垂直方向に進み、平坦な破面になる。

モード II 型
 ひび割れ先端にはひび割れに45°の主応力が作用するので、ひび割れの面外に斜めに進む傾向が生じる。

モード I + II 型
 元のひび割れに対して斜めの面が組み合わさったような破面（ファクトリーループ）で進展する。このとき、破面上のスジはひび割れの進展方向を示す。

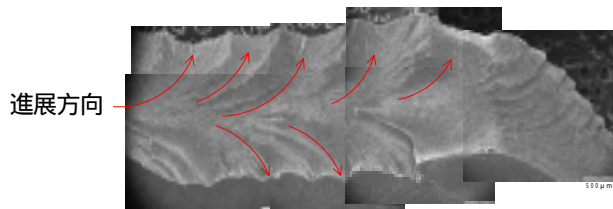
(参考文献)
 モード I + II の複合破面



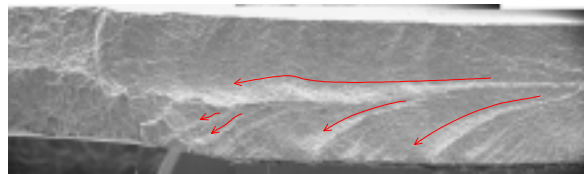
MIXED MODE (I+II) FATIGUE THRESHOLDS IN A FORGING STEEL
 J. B. Yeh and E. J. McLean
 Department of Metallurgical Process Engineering, University of Sydney, Australia
 Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol. 13, No. 5, pp. 209-216, 1989

3. ひび割れ、および のやや平坦でない破面

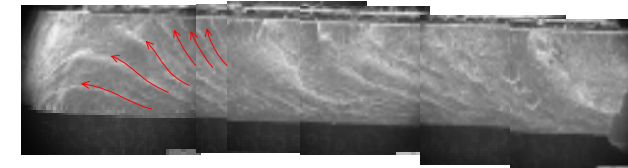
ひび割れ、および の長さが大きくなった領域で、破面にスジ状の模様が観察される。以下の外観写真から判るように、凹凸を有し、文献ほど明確でないがファクトリーループ状の破面を呈しており、モード I にモード II が重畳したことを示唆している。なお、場所により模様の形や明瞭度が異なるが、これはモード I に対するモード II の寄与度が場所により異なるものと考えられる。



ひび割れ



ひび割れ



ひび割れ