

## (90) 部分溶融域にまで加熱された中炭素鋼の曲げ破面

## — 三点曲げ試験 —

(90) Bending Fracture Surface of Medium Carbon Steel Reheated up to Partially Melted Region

## — Three Points Bending Test —

## 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : 機械構造用炭素鋼鋼材 S35C

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Total Al	Ca
母材	0.35	0.27	0.72	0.016	0.024	0.05	0.18	0.02	0.13	0.016	0.0002

## 溶接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : 再現熱サイクル (Synthetic weld thermal cycle)

熱サイクル条件 (Thermal cycle condition)

最高加熱温度 (°C)	保持時間 (s)	冷却条件
1,420	5	空冷

## 試験 (Test)

試験方法 (Test method) : 三点曲げ試験 (180°曲げ)

試験片形状 (Specimen configuration) : 200mm 長 × 8mm 幅 × 5mm 厚

## 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

上記の加熱条件により試験片は三点曲げにおいて破断した。(なお最高加熱度が1370°Cの場合には破断しなかった。) Fig.1 は低倍率のミクロ破面を示したものであり, 粒内破壊が多く見られるが, 菊の花状模様をもつ粒界破面も一部に見られる。Fig.2 は粒内破壊部を拡大したもので, 明確なリバー・パターン (River pattern) をもつべき開破面が見られる。Fig.3 は菊の花状の破面を拡大したものであり, 介在物とマトリックス (Matrix) が共晶として交互に並ぶことにより菊の花状模様を形成していることがわかる。Fig.4 は Fig.3 の矢印部の介在物を分析した結果を示したものであり, これより介在物は硫化物と判断される。1420°Cへの加熱によって硫化物がマトリックスと共晶融解を起こし, ついで冷却に際して共晶凝固することにより菊の花状模様を形成したものと考えられる。

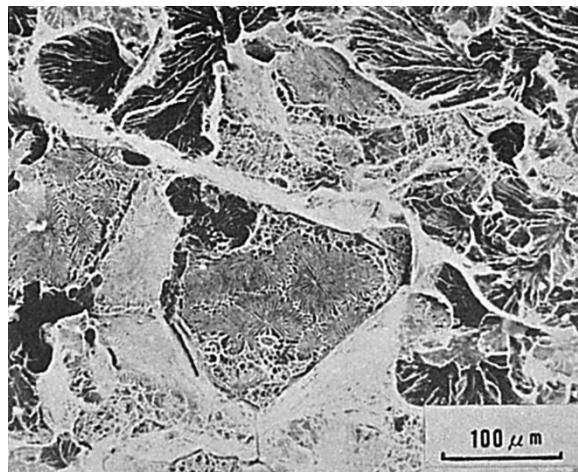


Fig.1 低倍率のミクロ破面

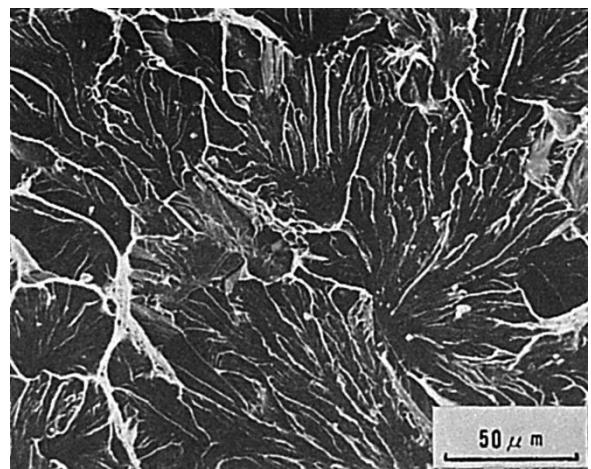


Fig.2 粒内破壊部の拡大

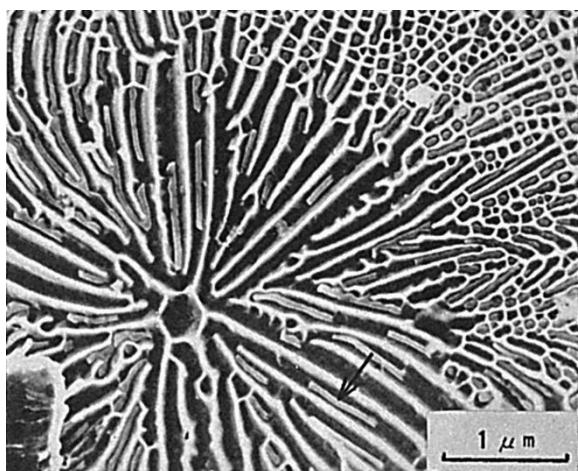


Fig.3 菊の花状の破面

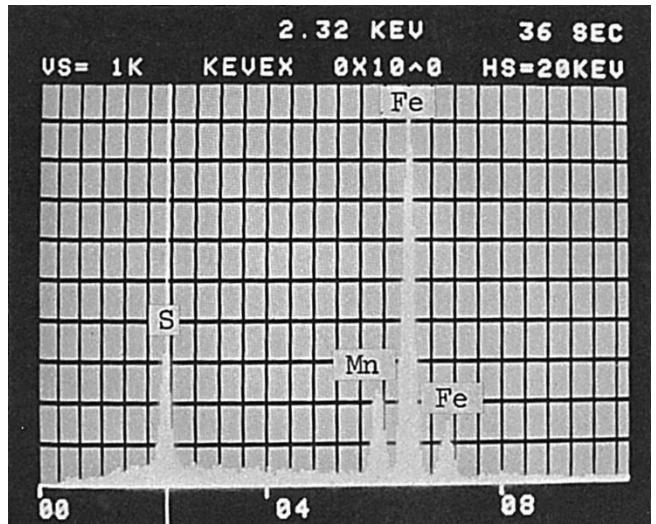


Fig.4 Fig.3 の矢印部の分析結果

(91)  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼に肉盛したオーステナイト系ステンレス鋼  
溶接金属の PWHT 後の  $\sigma$  脆化による曲げ破面

— 側曲げ試験 —

(91) Bending Fracture Surface after PWHT of Overlaid Austenitic  
Stainless Steel Weld in  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo Steel

— Side Bend Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 圧力容器用  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼材 ASTM A387 Grade 22  
class 2 (板厚 25mm).

溶接材料 (Welding material) : オーステナイト系ステンレス鋼用被覆アーク溶接棒  
D309 (径 5.0mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
母 材(規格値)	$\leq 0.15$	$\leq 0.50$	0.30 $\sim 0.60$	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$	—	2.00 $\sim 2.50$	0.90 $\sim 1.10$
溶接金属(分析例)	0.06	0.36	2.29	0.016	0.004	12.90	22.75	—

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	降伏点(0.2%耐力) (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)
母 材 (規格値)	52.7~70.3	$\geq 31.6$	$\geq 18$
溶 着 金 属 (測定例)	57.2	46.0	42

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : 被覆アーク溶接 (Shielded metal-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	溶接棒の 乾燥条件	予熱・層間 温度 (°C)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (mm/min)	積層方法	後熱処理
肉 盛	200°C $\times 1hr$	100~150	22~24	170	180	3 層	710°C $\times 20hrs$

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 側曲げ試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 500mm 長  $\times$  12.7mm 幅  $\times$  3.2mm 厚

試験条件 (Test condition) : 室温

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 の肉盛溶接部から小型側曲げ試験片を採取し、側曲げ試験を行なった。Fig.2 は肉盛溶接金属部の破断面を示したものである。概して平坦な破面であり、Fig.2(A)から(B)にかけて、凝固組織に関連していると思われる筋状の模様が見られる。Fig.3 はこの筋状の部分(C)を拡大したので、微小単位毎に平滑な面とそれを囲んでディンプル (Dimple) 状の破面が存在し、その微小単位の並び方は筋状の模様の方向と一致している。Fig.3 の(D)の部分を拡大したのが Fig.4 である。平滑な面を含むディンプル状破面や、所々に微小な二次割れが存在する。

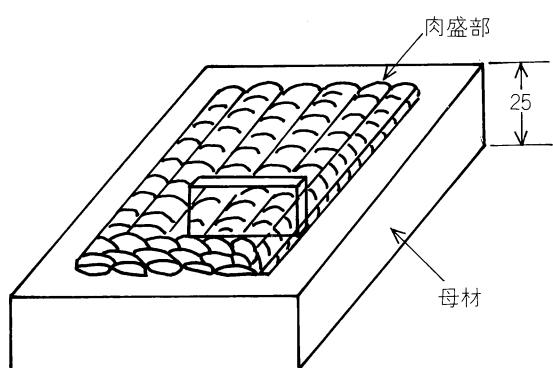


Fig.1 試験片の採取位置

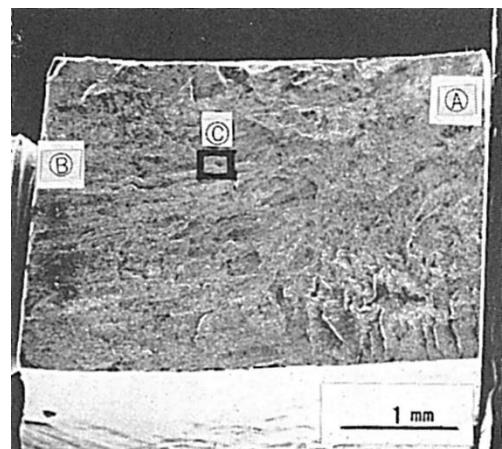


Fig.2 肉盛溶接金属部のマクロ破面

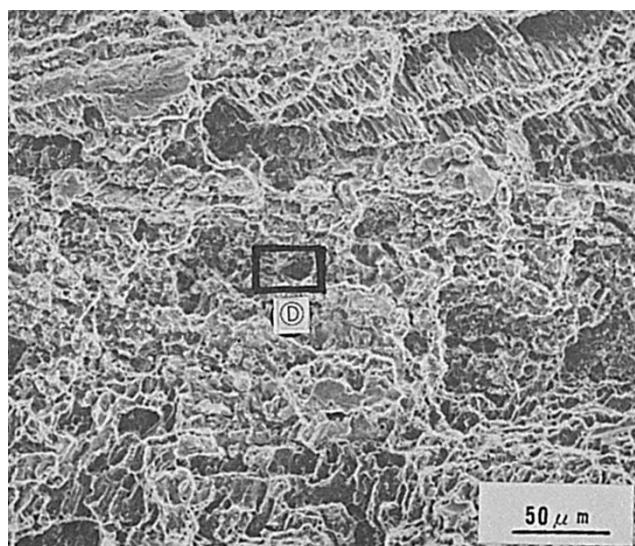


Fig.3 Fig.2 の(④)部を拡大したミクロ破面

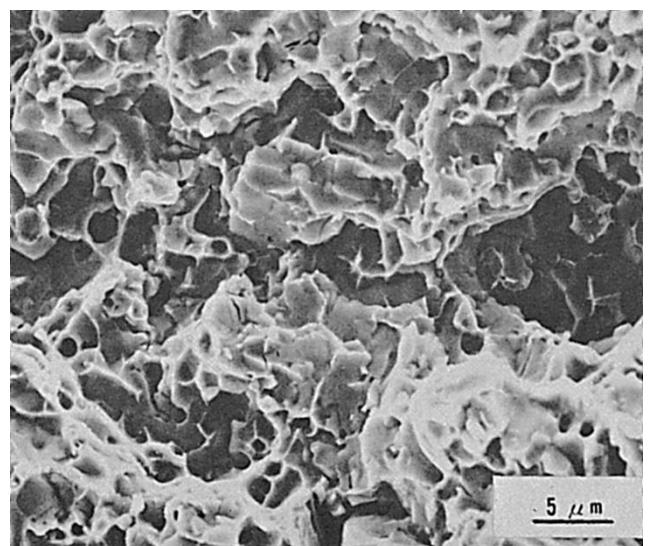


Fig.4 Fig.3 の(④)部を拡大したミクロ破面

## (92) SR 割れ再現試験における HT60、HT80 及び HT100 鋼の破面

— 定荷重試験装置による SR 割れ試験 —

(92) Fracture Surface of Simulated Reheat Cracking  
in HT60, HT80 and HT100 Steels

— Reheat Cracking Test by Constant Load Test Apparatus —

## 材 料 (Material)

母材 (Base metal) :

溶接構造用圧延鋼材 SM58Q (板厚 40mm).
溶接構造用圧延鋼材 HT80 (板厚 50mm).
溶接構造用圧延鋼材 HT100 (板厚 50mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	B	Al	As*	Sn*	Sb*	P <sub>SR</sub>
SM 58 Q	0.11	0.32	1.20	0.009	0.003	0.50	—	0.21	—	0.053	—	0.065	20	10	50	-1.05
HT 80	0.11	0.24	0.93	0.015	0.005	0.03	0.25	0.61	0.44	0.026	0.0008	0.075	20	20	10	0
HT 100	0.15	0.25	0.49	0.005	0.005	1.48	0.62	0.56	0.50	0.049	0.0018	0.059	20	20	10	0.79

※ppm

## 機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)	vTrs (°C)
SM 58 Q	64.3	55.0	30	28.5 at -20°C	-80
HT 80	85.7	80.9	25	22.7 at -20°C	-101
HT100	104	99.6	24	12.6 at -40°C	-58

## 試験 (Test)

試験方法 (Test method) : 定荷重試験装置による SR 割れ試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 切欠付平板試験片 (Fig.1 参照)

試験条件 (Test condition) : 負荷応力 15.3kgf/mm<sup>2</sup> (Fig.1 参照)

試験結果 (Test result) : Fig.3 参照

## 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に示すごとく、溶接熱サイクル (最高加熱温度 : 1300°C, 800°C から 500°C までの冷却時間 : 10sec) を付与した HT100, 80 および 60 鋼から切欠付試験片を採取し、負荷応力 15.3kgf/mm<sup>2</sup> を与えた状態で 100°C/hr の速度で加熱したあと 600°C に試験片が破断するまで保持した。試験は真空 (10<sup>-4</sup> torr) 中で行ない、割れの発生伝ばを高温顕微鏡で観察した。HT100 での 1 例を Fig.2 に示す。割れは 580°C 付近の昇温過程から、切欠底近傍の  $\gamma$  粒界に発生し、585°C で破断した。

Fig.4~6 が各鋼についての破面写真であり、P<sub>SR</sub> 値の高い HT100, 80 ほど粒界への歪集中が少ない段階で破断に至っている。粒界破面からもこの空洞合体 (Void coales-

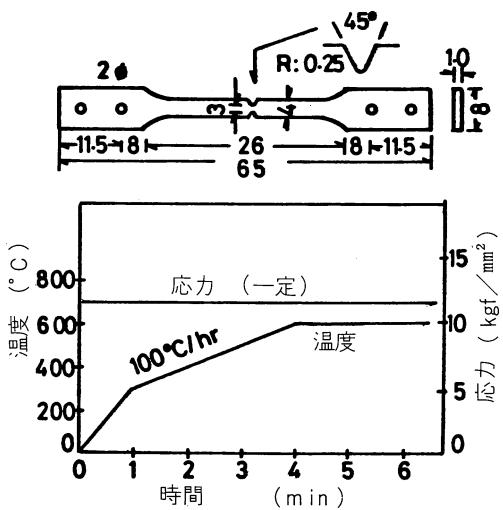


Fig.1 再現熱影響部試験片の粒界破壊強度の測定方法

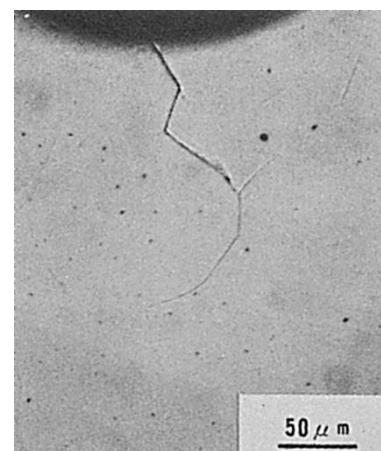


Fig.2 HT100 再現熱影響部の高温ミクロ組織 ( $\sigma_a = 15.3 \text{ kgf/mm}^2$ , 580°C)

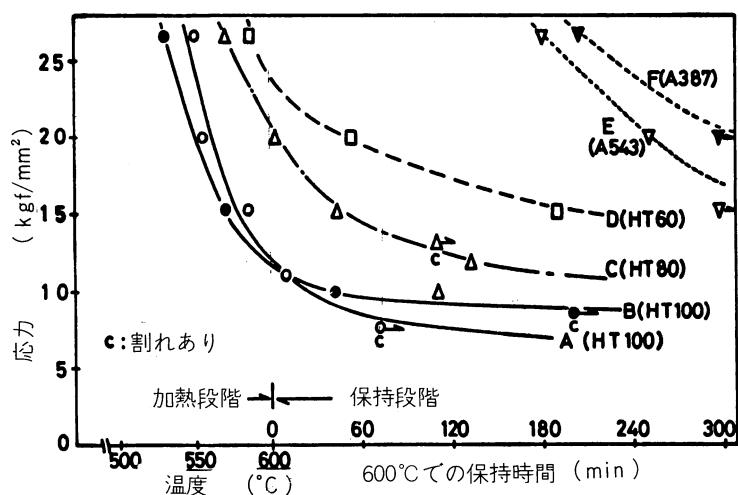
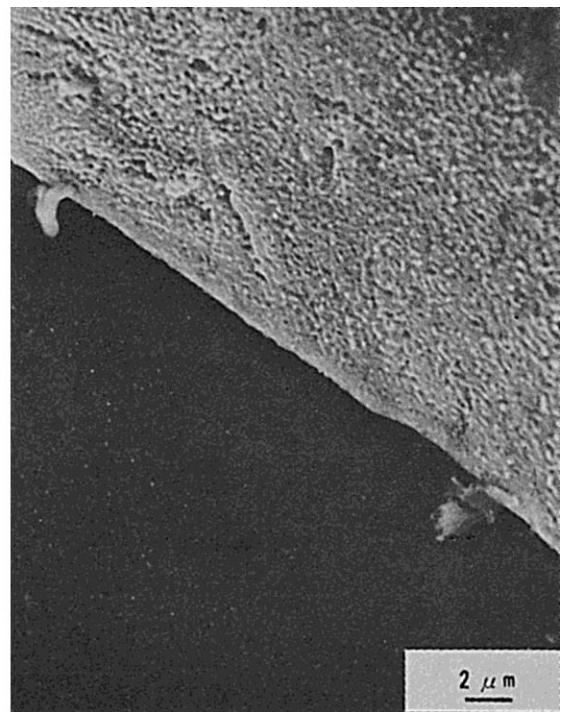
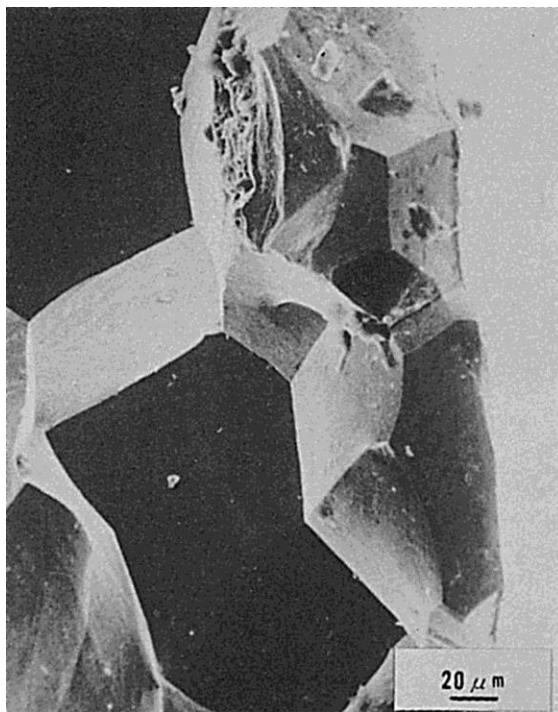


Fig.3 再現熱影響部の破壊強度  
(ピーク温度 1300°C, 保持時間 10sec)

cence) の量が多いほど SR 割れ感受性が低いことがうかがえる. Fig.3 にこれらの鋼板の粒界破断強度曲線を示す.

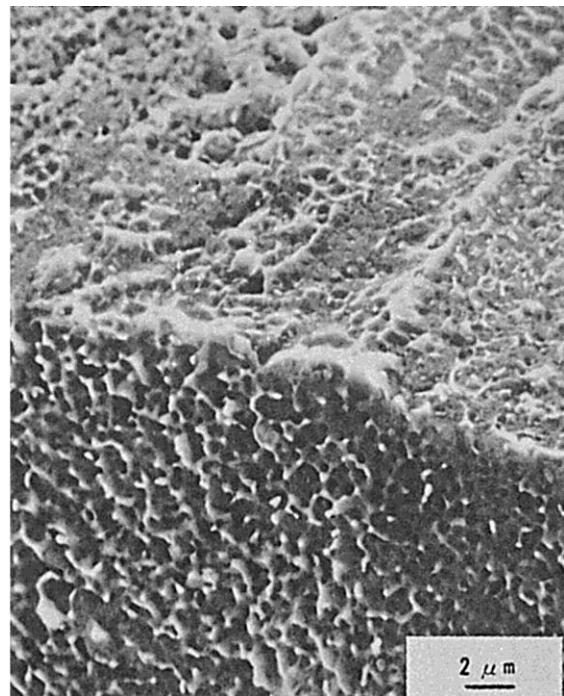
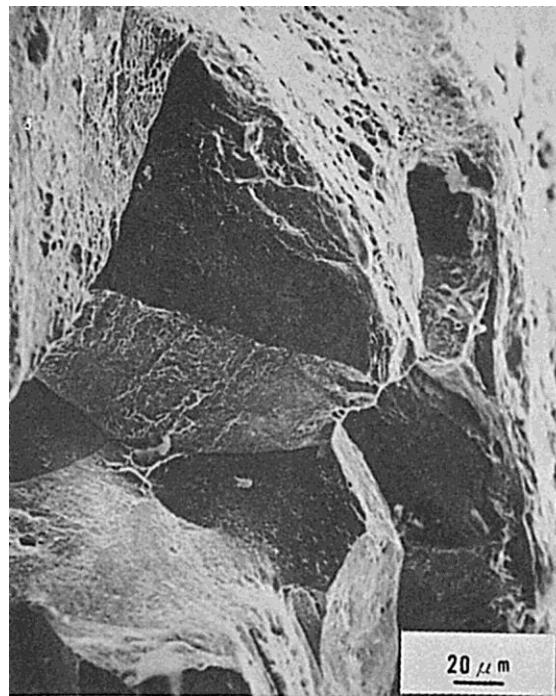


a) 切欠底部

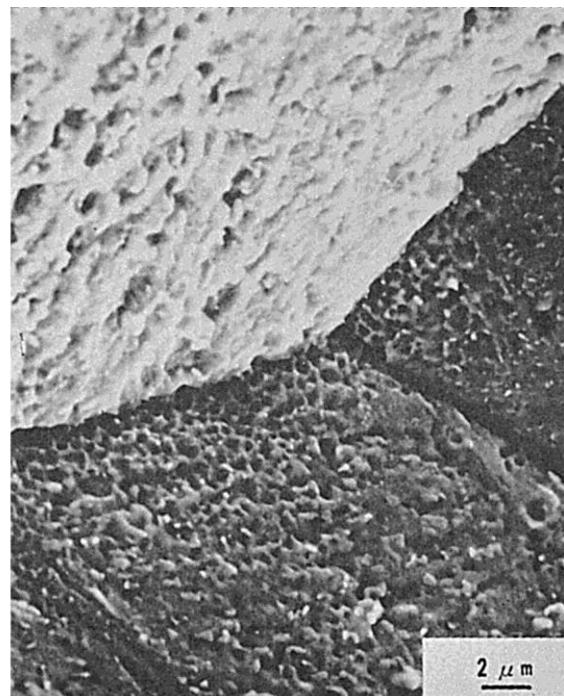
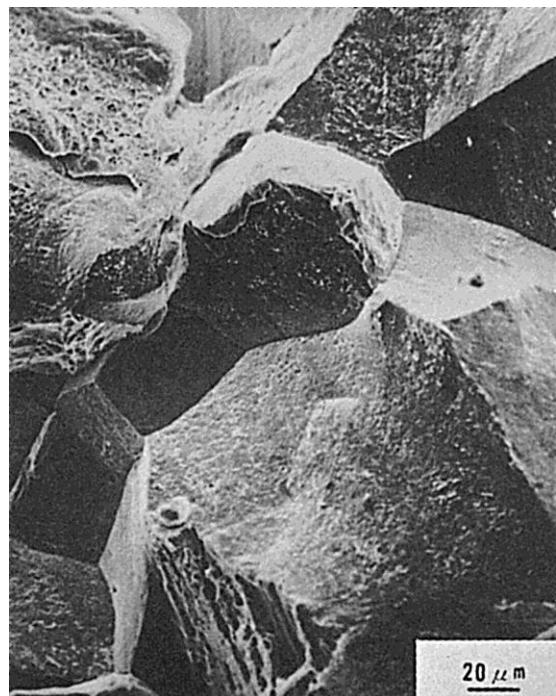


b) 試験片中央部

Fig.4 HT100 の再現 SR 割れのミクロ破面

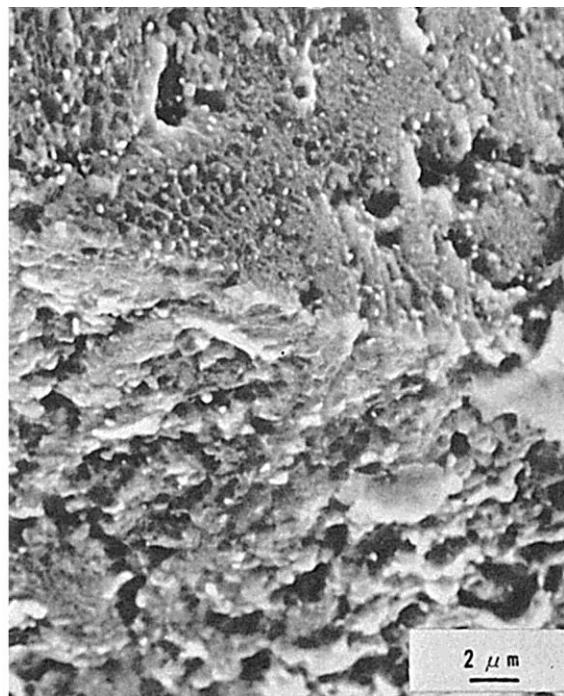
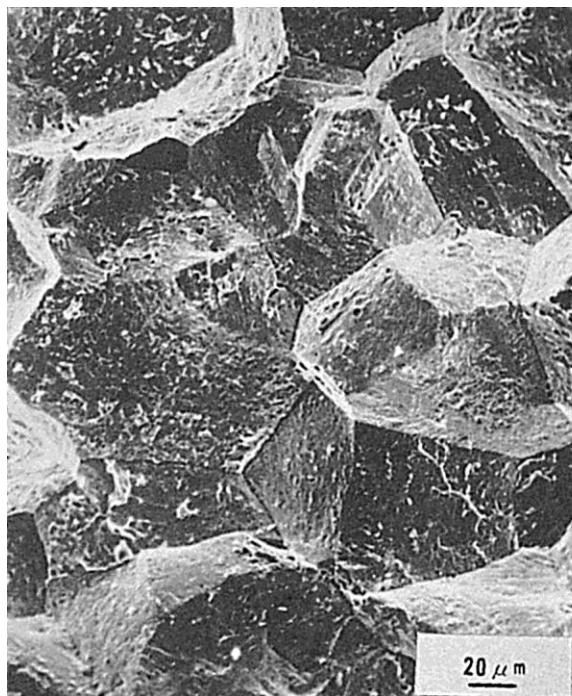


a) 切欠底部

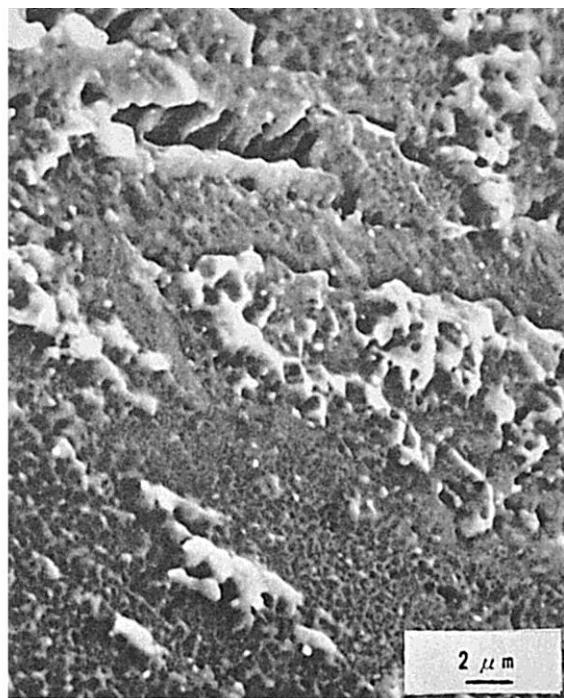
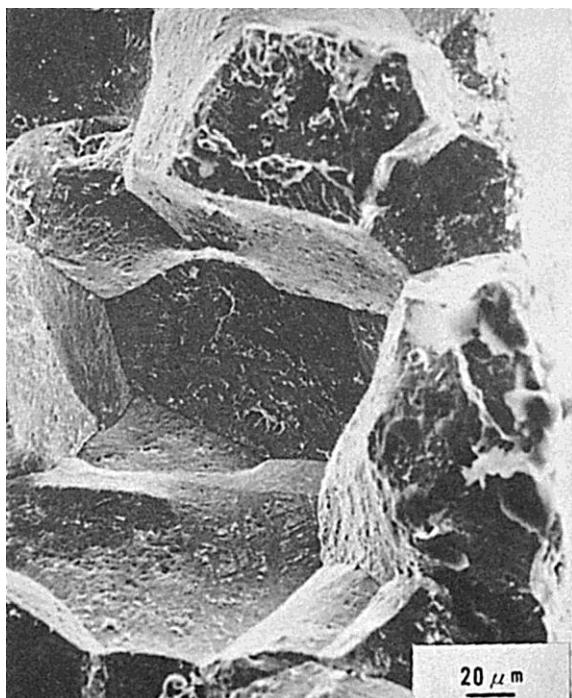


b) 試験片中央部

Fig.5 HT80 の再現 SR 割れのミクロ破面



a) 切欠底部



b) 試験片中央部

Fig.6 HT60 の再現 SR 割れのミクロ破面

## (93) SR 割れ再現試験における HT80 鋼の破面

— 定荷重試験装置による SR 割れ試験 —

(93) Fracture Surface of Simulated Reheat Cracking in HT80 Steel

— Reheat Cracking Test by Constant Load Test Apparatus —

## 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 HT80

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	N	O	Sb
HT80-A	0.11	0.24	0.84	0.011	0.008	0.17	0.026	0.77	0.39	0.039	0.0015	0.0081	0.0030	0.0035
HT80-B	0.13	0.26	0.93	0.014	0.009	0.29	0.024	0.86	0.45	0.042	0.0013	0.0044	0.0033	0.0047

## 試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 応力破断試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 平行部の径 5mm, 平行部の長さ 20mm

試験条件 (Test condition) : 試験温度 600°C, 負荷応力 10kgf/mm<sup>2</sup>

## 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

HT80-A および HT80-B の破面をそれぞれ Fig.1 および Fig.2 に示す。両鋼材の SR 割れ感受性指数  $P_{SR}$  はそれぞれ 0.15 および 0.52 であり, HT80-B の方がやや高い SR 割れ感受性をもっている。しかしながら破面はいずれも明瞭な粒界破壊となっている。

つぎに Fig.3 および Fig.4 はそれぞれ HT80-A および B を真空溶解を行なった場合の破面を示したものである。真空溶解を行なうことにより N, O, および Sb が減少し, そのため破断時間は増大した。この場合も破面は明瞭な粒界破壊になっている。

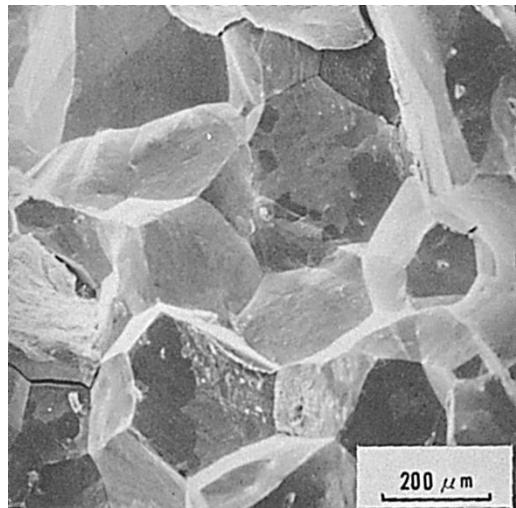


Fig.1 HT80-A のミクロ破面

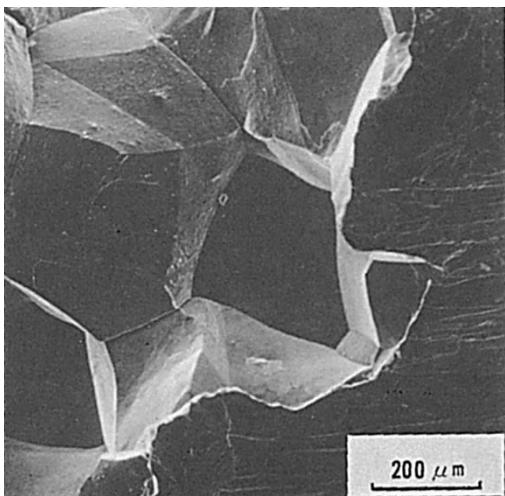


Fig.2 HT80-B のミクロ破面

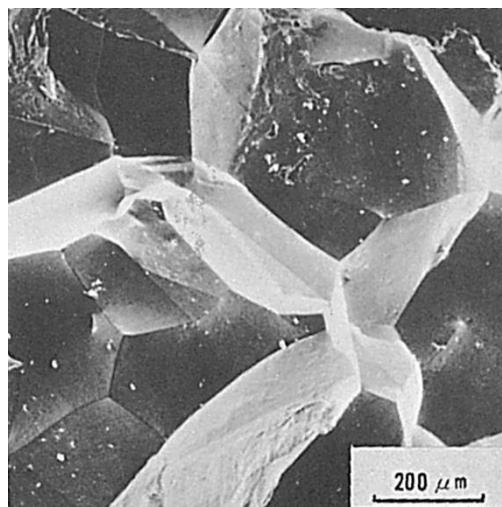


Fig.3 HT80-A の真空溶解後のミクロ破面

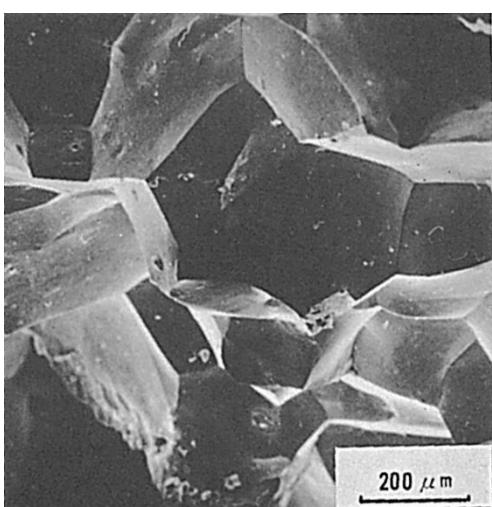


Fig.4 HT80-B の真空溶解後のミクロ破面

## (94) SR 割れ再現試験における 1Cr-0.5Mo 鋼の破面

— 定荷重試験装置による SR 割れ試験 —

(94) Fracture Surface of Simulated Reheat Cracking in 1Cr-0.5Mo Steel

— Reheat Cracking Test by Constant Load Test Apparatus —

## 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : 壓力容器用 1Cr-0.5Mo 鋼材 ASTM A 387 Grade 12 Class 2  
(板厚 70mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sb	As	Sn	V	Al
母材	0.16	0.25	0.61	0.010	0.007	0.14	1.03	0.51	0.15	0.005	0.004	0.004	0.003	0.004

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	降伏点(0.2%耐力) (kgf/mm <sup>2</sup> )	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母材	50	32	15 at 15°C

## 試験 (Test)

試験方法 (Test method) : 定荷重試験装置による SR 割れ試験

試験片形状 (Specimen configuration) : Fig.1 参照.

試験条件 (Test condition) : 400°Cへ約 5sec で急熱後 400°Cから 600°Cへ直線的に 1hr  
で加熱し, 600°Cに到達後直ちに空冷.

負荷応力 : 4 および 9kgf/mm<sup>2</sup>

## 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

HAZ の粗粒域の熱サイクル (ピーク温度 : 1350°C, 800°Cから 500°Cまでの冷却時間 : 10sec) を付与した切欠付試験片 (形状係数 : 6.1) を定荷重試験装置に装着後 4 及び 9kgf/mm<sup>2</sup> の応力 (切欠部断面の平均応力) を負荷し, 前記の試験条件で SR 割れ試験を行なった. その後常温において切欠部で試験片を破壊し, 切欠先端部全面に渡って走査形電子顕微鏡観察を行なった. Fig.1 は 9kgf/mm<sup>2</sup> の負荷応力で SR 割れ試験を行なった結果で, Fig.1 中央部に明りょうな粒界割れ破面が認められる. Fig.2 は Fig.1 の拡大組織写真で粒界面に巨視的な凹凸がみられる. Fig.3 は Fig.2 の枠内をさらに拡大した組織写真である. Fig.3 にみるように, 微小な粒界ディンプル (Grain boundary dimple) をともなった破面も形成されているが, ほとんどがほぼ平坦な粒界破面となっている. また Fig.3 の左端には二次割れも観察される. Fig.4 は負荷応力 4kgf/mm<sup>2</sup> で SR 割れ試験を行なった結果得られた粒界ファセット (Grain boundary facet) の組織写真である. Fig.4 の中央部上下方向に粒界ファセットが認められる. Fig.5 は Fig.4 の枠内の拡大組織写真である. Fig.5 より明らかなように, 写真の左端部には粒界ディンプル破面も一部観察されるが, 大部分はほぼ平坦な粒界破面で SR 割れ破面が占められている.

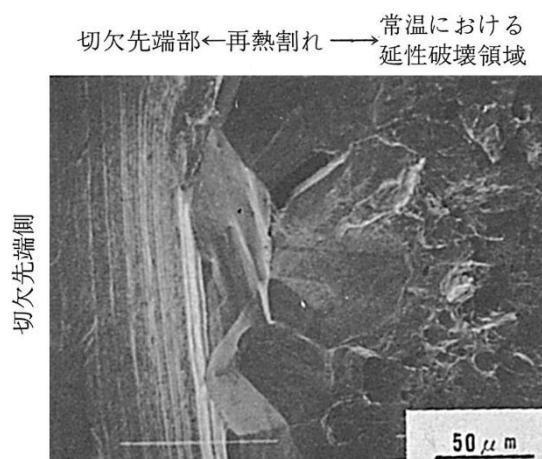


Fig.1 切欠先端部のミクロ破面に認められた粒界ファセット (負荷応力 ; 9kgf/mm<sup>2</sup>)

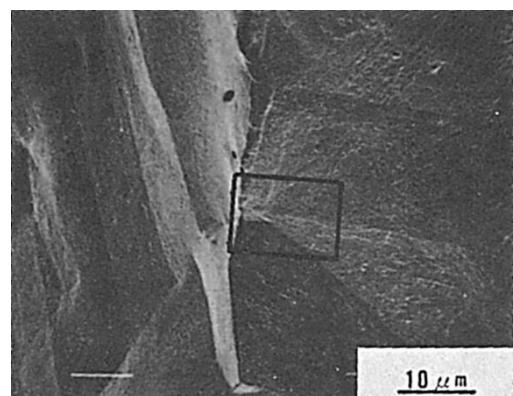


Fig.2 Fig.1 の中央部を拡大したミクロ破面

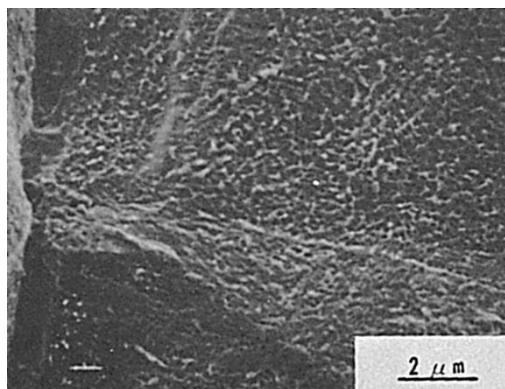


Fig.3 Fig.2 中の枠内を拡大したミクロ破面

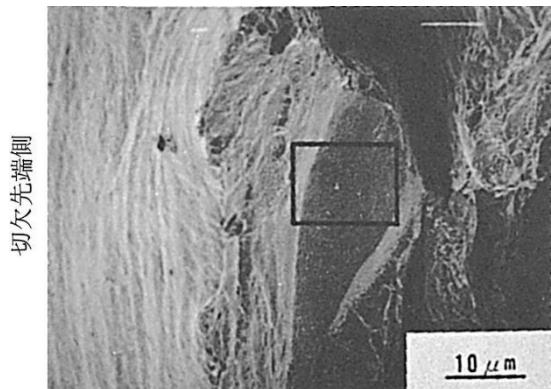


Fig.4 切欠先端部のミクロ破面に認められた粒界ファセット (負荷応力 ; 4kgf/mm<sup>2</sup>)

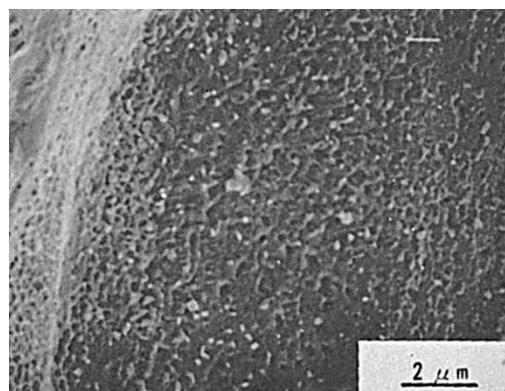


Fig.5 Fig.4 中の枠内を拡大したミクロ破面

(95) SR 割れ再現試験における  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼熱影響部の破面

— 定荷重試験装置による SR 割れ試験 —

(95) Fracture Surface of Simulated Reheat Cracking in  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  Steel

— Reheat Cracking Test by Constant Load Test Apparatus —

## 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼材  
SCMV4NT (板厚 50mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Sol.Al	V
母材 E	0.13	0.12	0.48	0.009	0.008	2.38	1.04	0.012	—
母材 I	0.13	0.13	0.51	0.010	0.006	2.30	1.05	0.010	0.26

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	降伏点(0.2%耐力) (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母材 E	60.0	46.4	21.0	19.8 at 0°C
母材 I	65.1	55.1	20.0	14.2 at 0°C

## 溶接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : 再現熱サイクル (Synthetic weld thermal cycle)

条件 (Condition) : 1250°Cで 1min 保持後, 800~500°C間を 8sec で冷却.

## 試験 (Test)

試験方法 (Test method) : 定荷重試験装置による SR 割れ試験.

試験片形状 (Specimen configuration) 径 5mm (切欠部径 3mm), ゲージ長 15mm.

試験条件 (Test condition) : 300°Cから 650°Cまでを 200°C/hr にて加熱.

負荷応力 : 50kgf/mm<sup>2</sup>.

試験結果 (Test result) : 材料 E は 590°C, 材料 I は 517°Cにて昇温途中で破断.

## 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

再現熱影響部の円周切欠付試験片による昇温破断試験において発生した SR 割れ破面を Fig.1~Fig.8 に示す. Fig.1~Fig.4 は E 鋼 ( $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ ), Fig.5~Fig.8 は I 鋼 ( $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ ) に関するものである.

破面はすべて旧オーステナイト (Prior austenite) 粒界を伝ばしたものであり, 典型的な SR 割れ破面である. ただし E 鋼と I 鋼では粒界破面上の様相が若干異なっており, E 鋼では粒界破面上に塑性変形の跡が見られるのに対し, I 鋼はほとんど塑性変形を伴

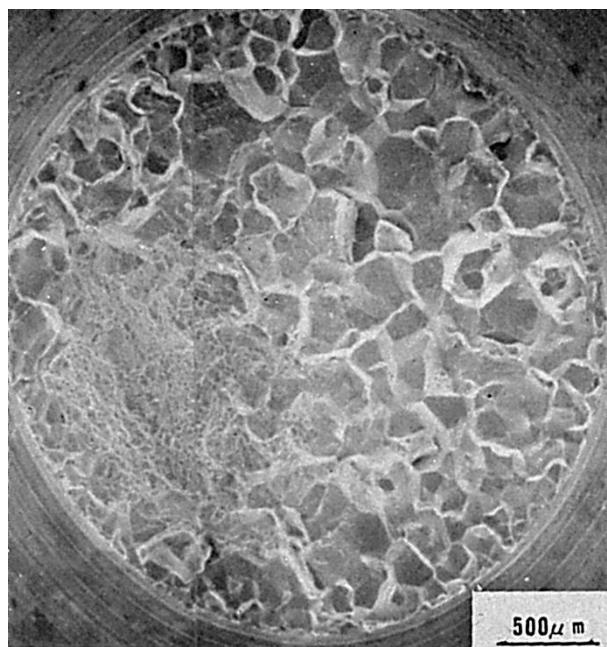


Fig.1 昇温破断試験において発生した SR 割れのマクロ  
破面 (E 鋼 : 2 1/4Cr-1Mo)

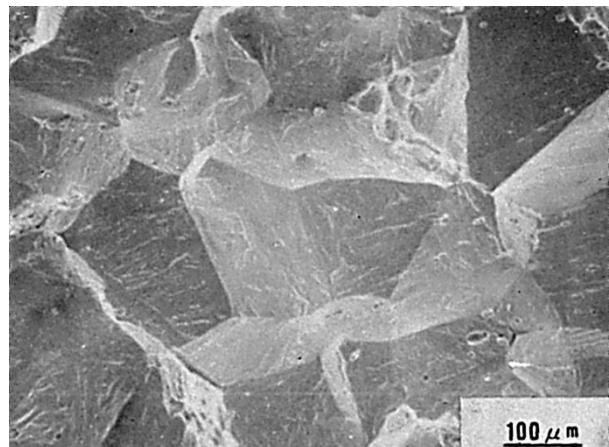


Fig.2 昇温破断試験において発生した SR 割れのミクロ  
破面 (E 鋼 : 2 1/4Cr-1Mo)

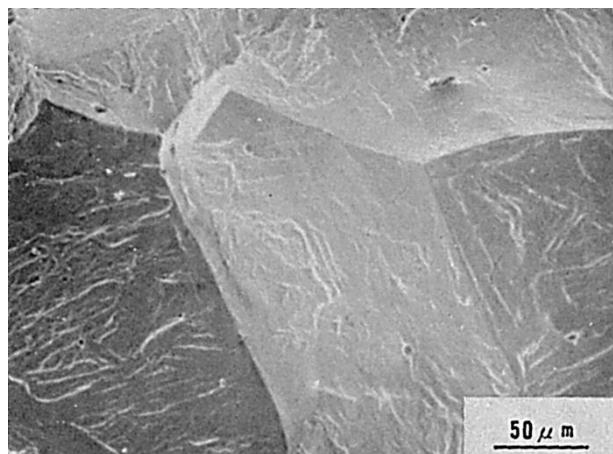


Fig.3 Fig.2 の中央部の拡大

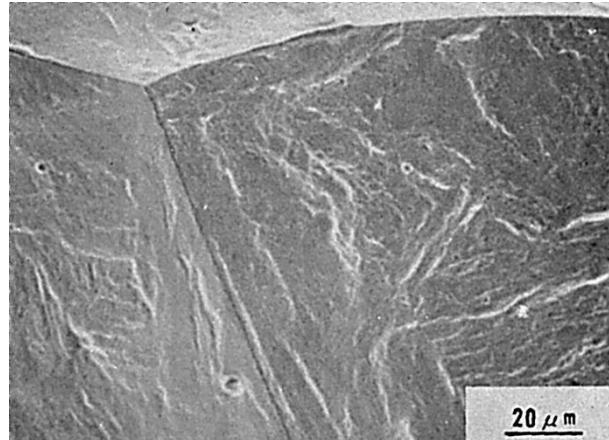


Fig.4 Fig.3 の右端部の拡大

わない粒界すべり破面となっている。また破断温度は E 鋼が 590°C, I 鋼が 517°C であり、これらの結果から I 鋼は E 鋼よりも SR 割れ感受性が高く、その原因是 V の添加にあると考えられる。

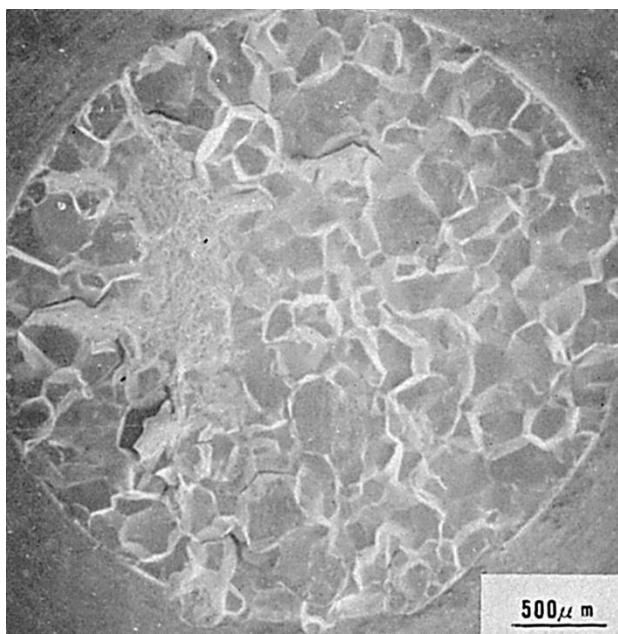


Fig.5 昇温破断試験において発生した SR 割れのマクロ  
破面 (I 鋼 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V)

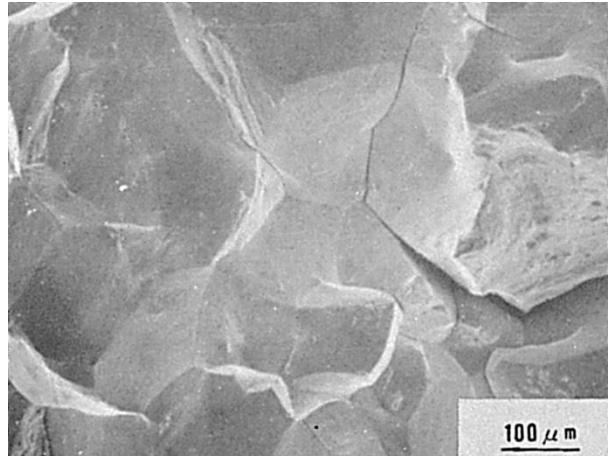


Fig.6 昇温破断試験において発生した SR 割れのミクロ  
破面 (I 鋼 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V)

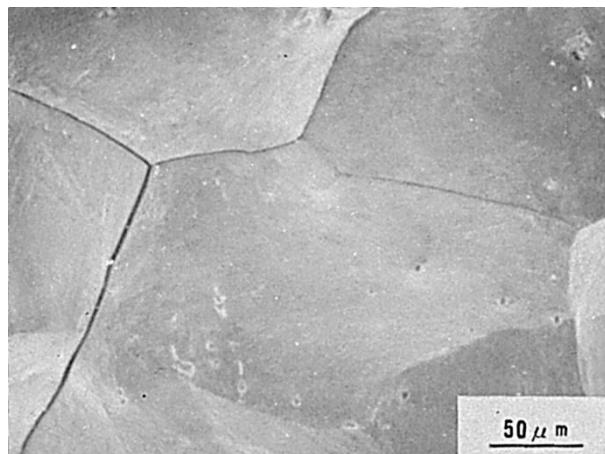


Fig.7 昇温破断試験において発生した SR 割れ破面  
(I 鋼 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V)

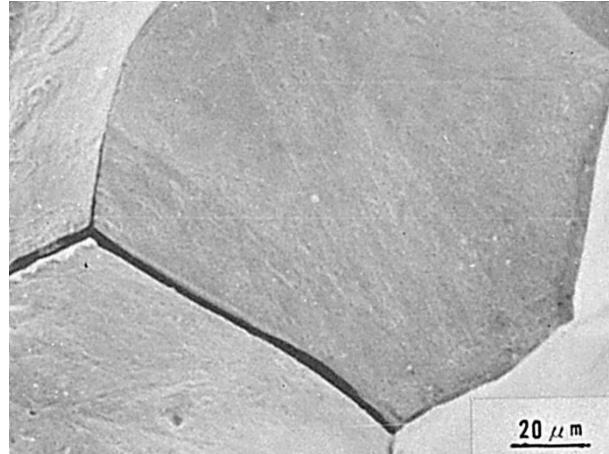


Fig.8 昇温破断試験において発生した SR 割れ破面  
(I 鋼 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V)

## (96) SR 割れ再現試験における圧力容器用低合金鋼の破面 (その 1)

— 定荷重試験装置による SR 割れ試験 —

(96) Fracture Surface of Simulated Reheat Cracking in ASTM A508 Cl.2 Steel (I)

— Reheat Cracking Test by Constant Load Test Apparatus —

## 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : 圧力容器用 1Mn-0.5Mo-0.5Ni 鍛鋼材 ASTM A508 Class 2  
(板厚 210mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sb	As	Sn	V	Al
母材	0.20	0.31	0.94	0.004	0.006	0.07	0.40	0.61	0.88	0.0021	0.008	0.010	<0.01	0.023

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母材	61	45	27	13.6 at 0°C

## 試験 (Test)

試験方法 (Test method) : 定荷重試験装置による SR 割れ試験

試験片形状 (Specimen configuration) : Fig.1 参照.

試験条件 (Test condition) : 400°Cへ約 5sec で急熱後 400°Cから 600°Cへ直線的に 2hrs で加熱し, 600°Cに到達後直ちに空冷. 負荷応力: 7.5kgf/mm<sup>2</sup>.

## 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

HAZ の粗粒域の熱サイクル (ピーク温度: 1350°C, 800°Cから 500°Cまでの冷却速度: 10sec) を付与した切欠付試験片 (形状係数: 6.1) を定荷重試験装置に装着後 7.5kgf/mm<sup>2</sup> の応力 (切欠部断面の平均応力) を負荷し, 前記の試験条件で SR 割れ試験を行なった. その後常温において切欠部で試験片を破壊し, Fig.2 に示すように切欠先端部全面に渡って走査形電子顕微鏡観察を行なった. Fig.3 は切欠先端部に認められた粒界ファセット (Grain boundary facet) の一例で, 中央部が後熱処理温度である 600°Cへ加熱中に発生した SR 割れである. 周辺部では常温で試験片を破壊する時形成された延性破面組織が認められる. Fig.3 の拡大写真が Fig.4 である. Fig.4 ではきわめて微細なディンプル (dimple) 状の破面組織 (A 領域の組織) とそれに比較し粗大なディンプル状の破面組織 (B 領域の組織) が認められる. Fig.5 は Fig.4 中の A 領域の拡大写真であり, 典形的な粒界ディンプル状組織がみられ, ディンプル内には微小な粒子が認められる場合が多い. したがって, このような領域は, 粒界面上の微小粒子と素地との界面ではく離が生じ, 形成された微小空洞が連結して粒界破壊が生じた領域と考えられる. Fig.6 は Fig.4 中の B 領域の拡大写真である. Fig.5 のディンプル径よりも粗大なディンプル径となつており, Fig.4 からも明らかのように, かなり粒内に入りこんだ位置で延性破壊した形跡が認められることから, 常温で試験片を破壊する時に形成された可能性が高いものと考えられる.

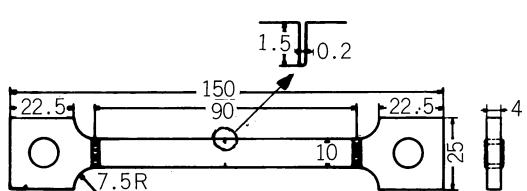


Fig.1 定荷重引張試験片の形状, 寸法

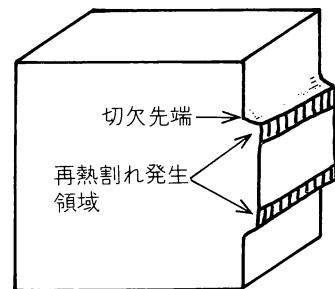


Fig.2 再熱割れ発生領域の模式図  
(斜線部全域にわたって破面観察を実施)

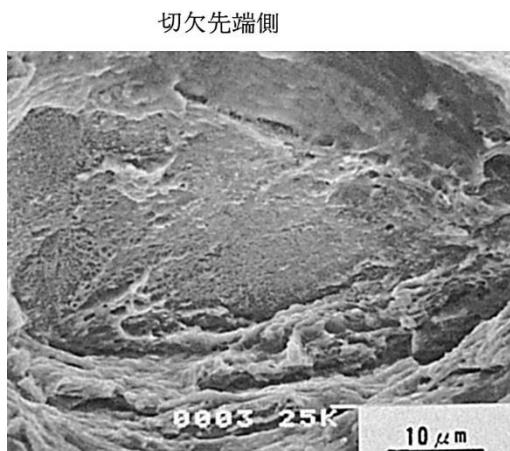


Fig.3 切欠先端部のミクロ破面に認められた  
粒界ファセット

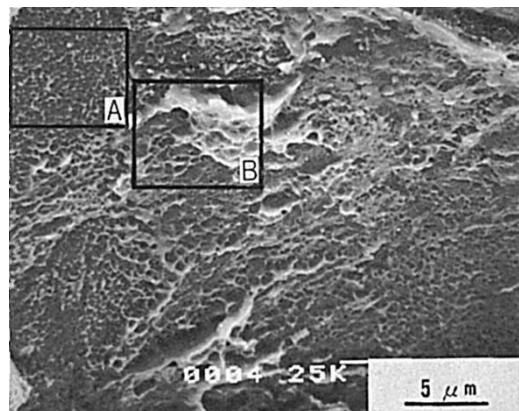


Fig.4 Fig.3 の中央部を拡大したミクロ破面

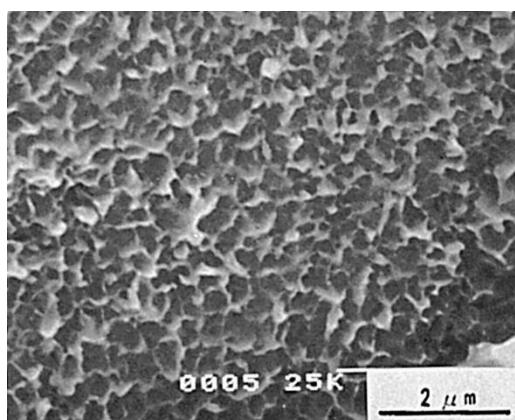


Fig.5 Fig.4 中の A 領域を拡大したミクロ破面

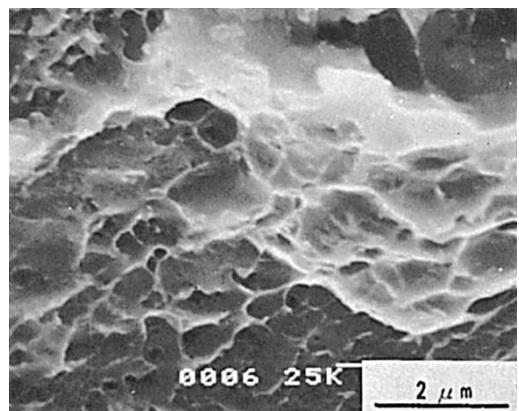


Fig.6 Fig.4 中の B 領域を拡大したミクロ破面

## (97) SR 割れ再現試験における圧力容器用低合金鋼の破面 (その 2)

— 定荷重試験装置による SR 割れ試験 —

(97) Fracture Surface of Simulated Reheat Cracking in ASTM A508 Cl.3 Steel (II)

— Reheat Cracking Test by Constant Load Test Apparatus —

## 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : 圧力容器用 1Mn-0.5Mo-0.5Ni 鍛鋼材 ASTM A508 Class 3  
(板厚 130mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cv	Mo	Ni	Sb	As	Sn	V	Al
母材	0.21	0.28	1.38	0.009	<0.003	0.07	0.23	0.53	0.63	0.0019	0.006	0.009	<0.01	0.024

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母材	67.7	52.7	23.3	24 at 0°C

## 試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 定荷重試験装置による SR 割れ試験

試験片形状 (Specimen configuration) : Fig.1 参照

試験条件 (Test condition) : 400°Cへ約 5sec で急熱後 400°Cから 600°Cへ直線的に 1hr  
で加熱し, 600°Cに到達後直ちに空冷.

負荷応力 : 10.5kgf/mm<sup>2</sup>.

## 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

HAZ の粗粒域の熱サイクル (ピーク温度 ; 1350°C, 800°Cから 500°Cまでの冷却時間 ; 10sec) を付与した切欠付試験片 (形状係数 ; 6.1) を定荷重装置に装着後 10.5kgf/mm<sup>2</sup> の応力 (切欠部断面の平均応力) を負荷し, 前記の試験条件で SR 割れ試験を行なった. その後常温において切欠部で試験片を破壊し, 切欠先端部全面に渡って走査形電子顕微鏡観察を行なった. Fig.1 に切欠先端部に発生した SR 割れのミクロ破面を示す. Fig.1 の中央部に認められる粒界ファセット (Grain boundary facet) が SR 割れで, 粒界ファセットの上端側は切欠先端部であり, 下端側は常温において延性破壊した領域である. Fig.2 は Fig.1 の拡大写真で, きわめて平坦な粒界破面が観察される. また粒界の稜線が明りよう認められる. Fig.3 は Fig.2 の枠内の拡大写真で, 粒界ディンプル (Grain boundary dimple) はみられず, 微小な凹凸をともなった平坦な破面となっている. また粒界破面上には微細な粒子が認められる. 微細な粒子についてでは元素分析などの解析を加えていないので詳細な事項は不明である.

切欠先端側

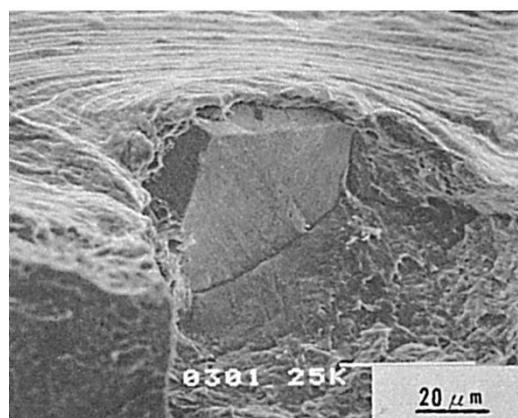


Fig.1 切欠先端部のミクロ破面に認められた粒界ファセット

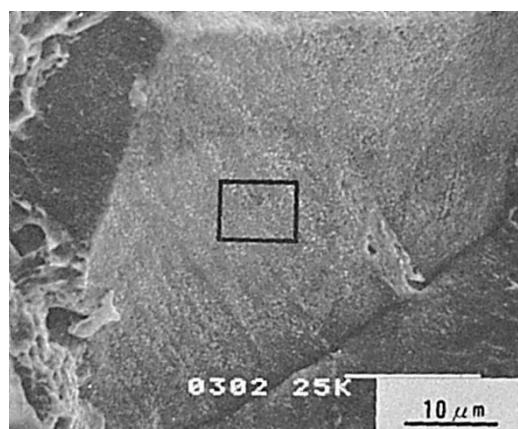


Fig.2 Fig.1 の中央部を拡大したミクロ破面

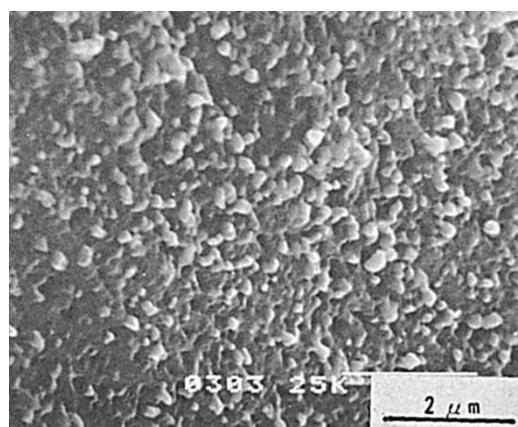


Fig.3 Fig.2 の中の枠内を拡大したミクロ破面

## (98) 1350°Cにおけるオーステナイト系ステンレス鋼熱影響部の引張破面

### — 高温延性試験 —

(98) Fracture Surface of HAZ of Austenitic Stainless Steel Ruptured at 1350°C

### — Hot Ductility Test —

#### 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : 熱間圧延オーステナイト系ステンレス鋼板 SUS304  
(板厚 20mm).

溶接材料 (Welding material) : オーステナイト系ステンレス鋼被覆アーク溶接棒 D309  
(径 4mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
母材	0.076	0.79	1.54	0.030	0.010	18.41	8.80
溶着金属	0.08	0.43	1.64	0.022	0.008	24.05	12.68

#### 溶接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : 被覆アーク溶接 (Shielded metal-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	溶接棒の乾燥条件	アーク電圧(V)	溶接電流(A)	溶接速度(mm/min)	積層方法
V形	150°C × 1hr	24	120	100	3層3パス

#### 試験 (Test)

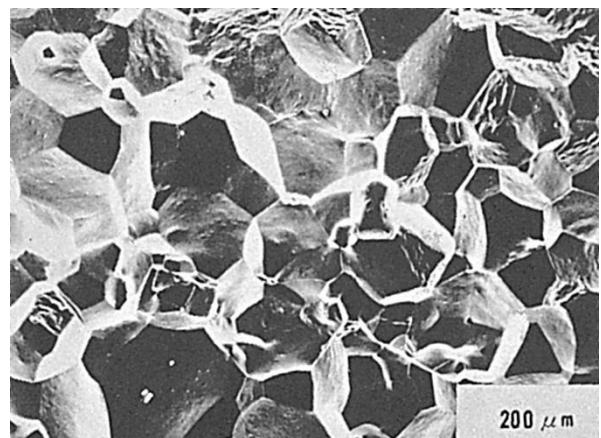
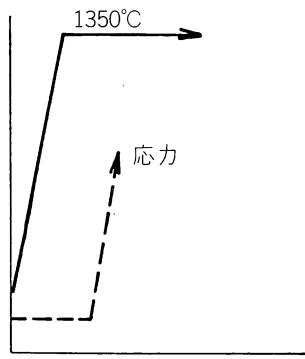
試験方法 (Test method) : 高温延性試験.

試験片形状 (Specimen configuration) : Fig.1 参照.

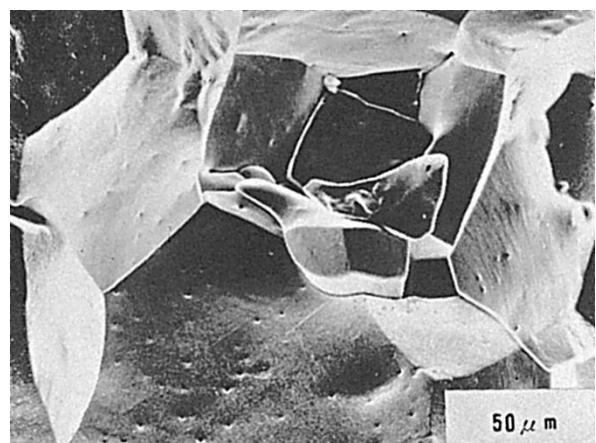
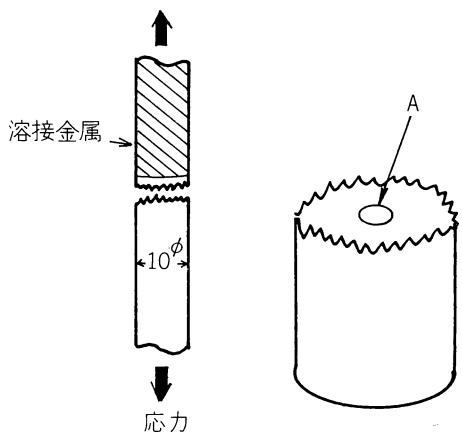
試験条件 (Test condition) : Fig.1 参照.

#### 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

本破面は Fig.1 に示すごとく、溶接部を含むオーステナイト系ステンレス鋼丸棒 (径 10mm) を 1350°C に加熱保持後強制引張破断させた際発生したもので、溶接熱影響部粗粒域で破断している。破面は Fig.2 に示すように粒界脆性破面を示し、粒界に沿って分離破壊したことを物語っている。



(a)



(b)

Fig.1 高温延性試験方法とミクロ破面撮影位置 (A部)

Fig.2 1350°Cに加熱保持後破断したオーステナイト系  
ステンレス鋼熱影響部のミクロ破面

**(99) 1350°CにおけるNb入りオーステナイト系ステンレス鋼  
熱影響部の引張破面**

— 高温延性試験 —

(99) Fracture Surface of HAZ of Austenitic Stainless Steel  
Containing Nb Ruptured at 1350°C

— Hot Ductility Test —

**材 料 (Material)**

母材 (Base metal) : 熱間圧延オーステナイト系ステンレス鋼板 SUS347  
(板厚 20mm).

溶接材料 (Welding material) : オーステナイト系ステンレス鋼被覆アーク溶接棒  
D347 (径 4mm).

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb
母材	0.060	0.53	1.30	0.017	0.012	18.70	9.12	0.97
溶着金属	0.05	0.56	1.30	0.018	0.012	19.57	9.82	0.84

**溶接 (Welding)**

溶接方法 (Welding method) : 被覆アーク溶接 (Shielded metal-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	溶接棒の乾燥条件	アーク電圧(V)	溶接電流(A)	溶接速度(mm/min)	積層方法
V形	150°C × 1hr	24	120	100	3層3パス

**試験 (Test)**

試験方法 (Test method) : 高温延性試験.

試験片形状 (Specimen configuration) : Fig.1 参照.

試験条件 (Test condition) : Fig.1 参照.

**破面の解説 (Fracture Surface Analysis)**

本破面は Fig.1 に示すごとく、溶接部を含む Nb入りオーステナイト系ステンレス鋼丸棒 (径 10mm) を 1350°C に加熱保持後強制引張破断させた際発生したもので、溶接熱影響部で破断している。破面は Fig.2 に示すように粒界破壊を示しているが、Nbを含有しているため結晶粒は微細であり、結晶粒の表面は溶融してなめらかな様相を呈している。

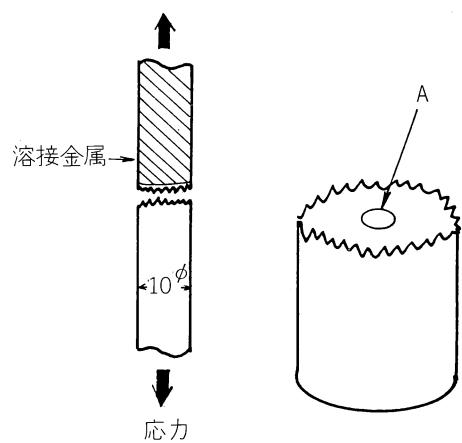
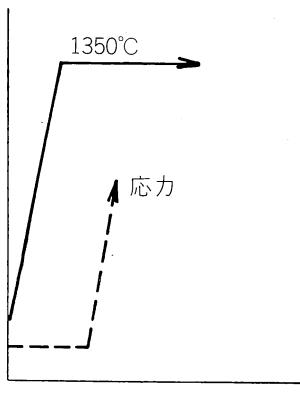
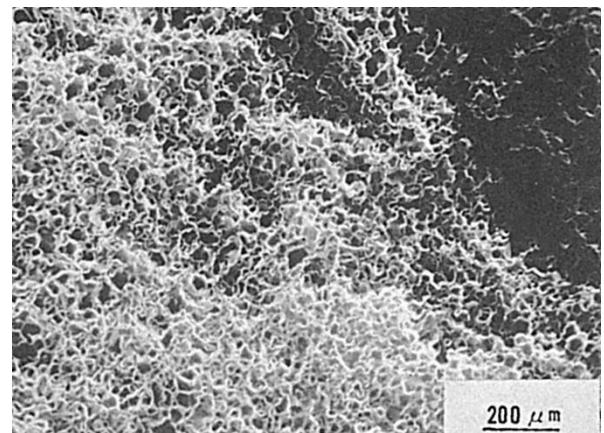
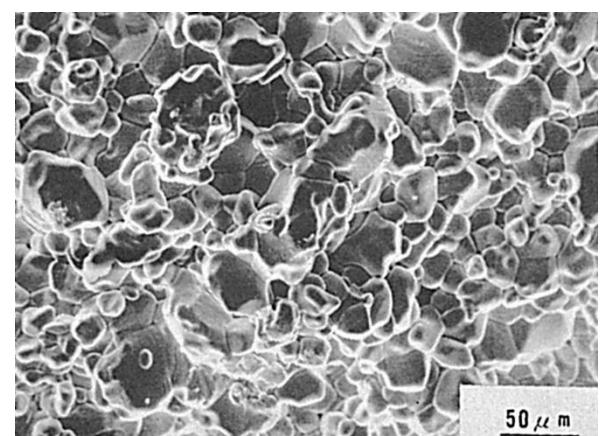


Fig.1 高温延性試験方法とミクロ破面撮影位置 (A 部)



(a)



(b)

Fig.2 1350°Cに加熱保持後破断した Nb入りオーステナイト系ステンレス鋼熱影響部のミクロ破面

## (100) 高温延性試験における完全オーステナイト系ステンレス鋼の破面

— 溶接熱サイクル再現試験 —

(100) Fracture Surface of Fully Austenitic Stainless Steel in Hot Ductility Test

— Gleeble Test —

### 材 料 (Material)

母材 (Base metal) : オーステナイト系ステンレス鋼棒 SUS310 (径 8mm)

化学組成 (重量%) (Chemical composition) (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
母材	0.12	1.01	1.42	0.025	0.007	24.82	20.18

### 試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 溶接熱サイクル再現試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 70mm 長 × 8mm 径, 両端 10mm ネジ付

試験条件 (Test condition) : 加熱速度 180°C/sec, NST (1300°C) における保持時間 3sec,  
冷却速度 80°C/sec, Ar 雰囲気中において加熱および冷却  
途上の種々の温度で引張破断 (引張速度 33mm/sec)

### 破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は供試したオーステナイト系ステンレス鋼の高温延性特性図 (絞り・温度線図)  
であり, Fig.2 から 6 には加熱途上の 1000°C, 1150°C, 1200°C, 1275°C (NDT) および

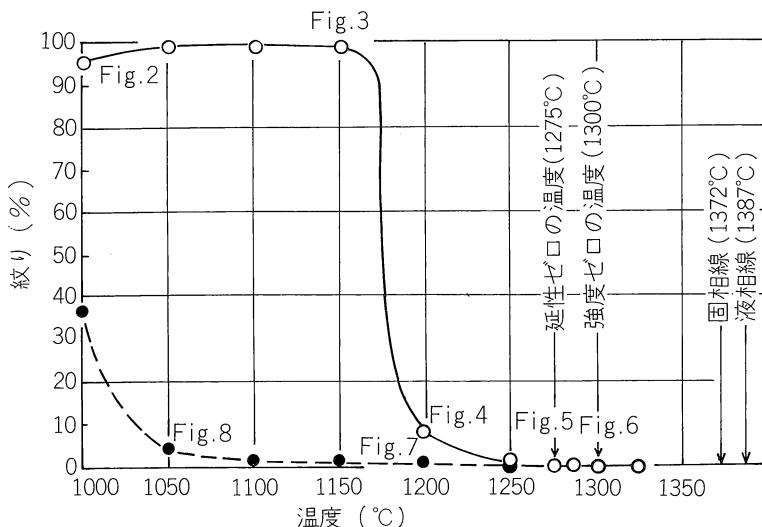
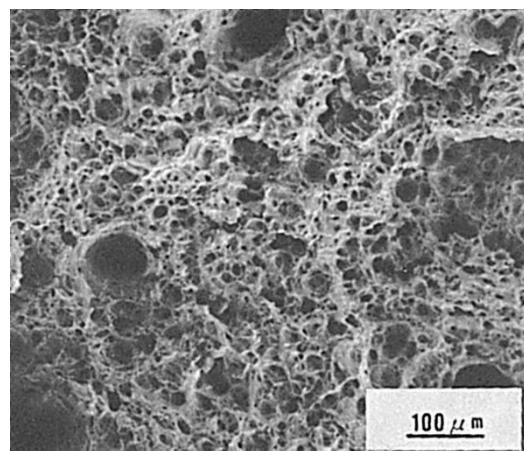
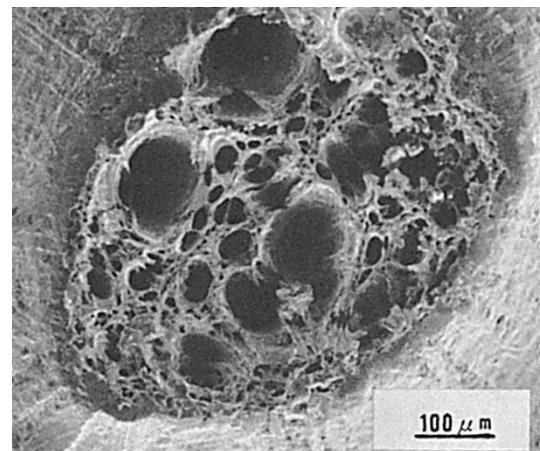


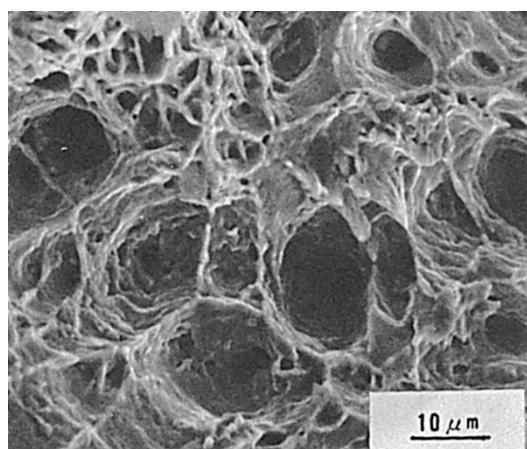
Fig.1 最高温度 1300°C (NST: 強度ゼロの温度) の熱サイクルにおける  
オーステナイト系ステンレス鋼の高温延性特性



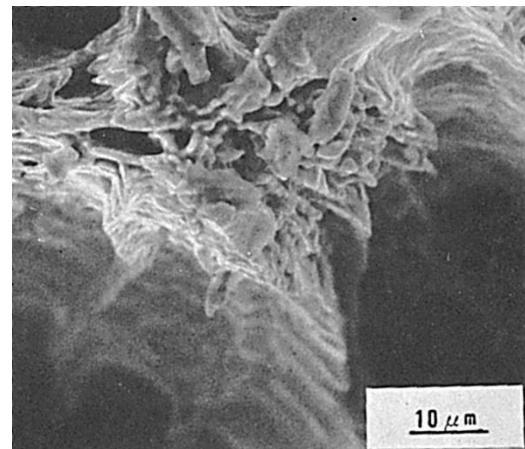
(a)



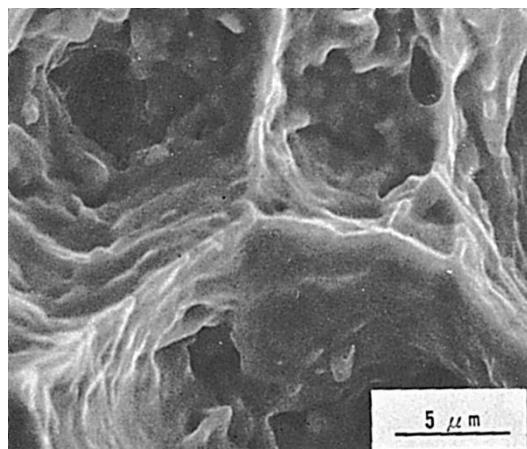
(a)



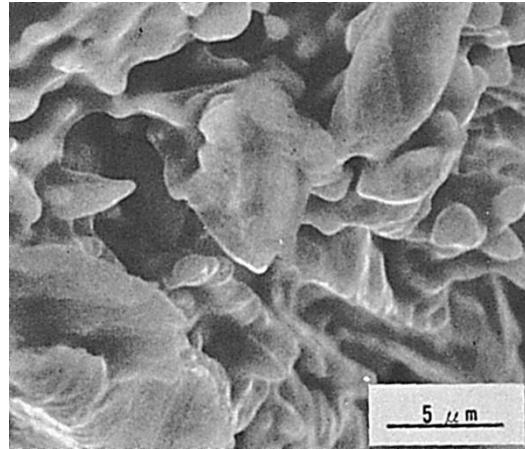
(b) (a)の拡大



(b) (a)の拡大



(c) (b)のほぼ中央の拡大



(c) (b)の中央や右上部の拡大

Fig.2 加熱途上 1000°C破断のミクロ破面

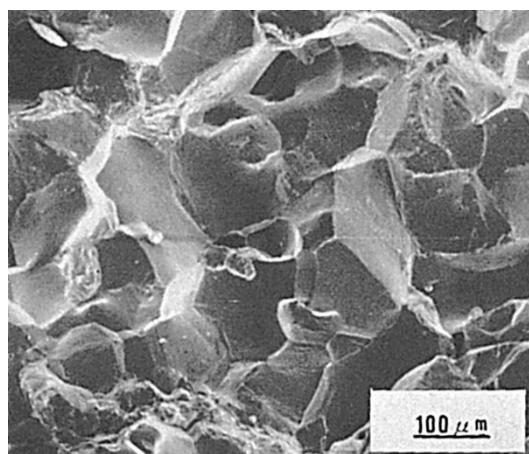
Fig.3 加熱途上 1150°C破断のミクロ破面

1300°C (T<sub>max</sub>, NST: 強度ゼロの温度) の破断面の状況を, また Fig.7 および 8 には T<sub>max</sub> からの冷却途上, 1200°C および 1050°C における破断面の状況を示した.

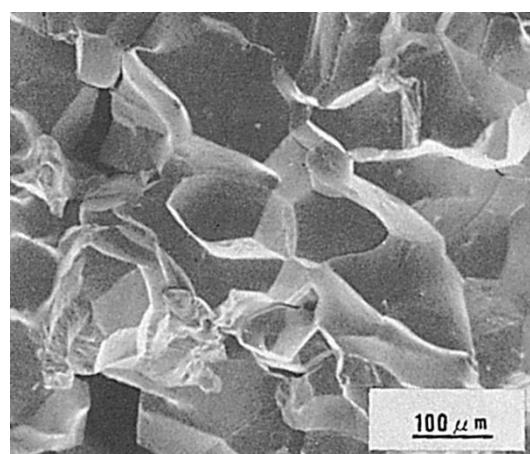
加熱途上において, 1150°Cまでの高延性域では, Fig.2 および 3 に見られるように, 等軸ディンプル (Equiaxed dimple) 型の粒内破断である. 延性が急激に低下した 1200°C (Fig.4) 以上の低延性域では, 破断形態は結晶粒界型に変化している. また 1200°C から高温において破断した試料の結晶粒界を観察すると, 破断温度が高温になるにしたがい, 結晶粒の変形が少なくなると共に, 粒界液膜厚が増加し, NST (1300°C) になると, 結晶粒全体が数%の液膜におおわれる<sup>1)</sup> 状態が見られる (Fig.4(c), Fig.5(c), Fig.6(c)).

冷却途上の脆性温度範囲内にある 1200°C (Fig.7) では, いまだ粒界型破断であり, 一部の粒界には残存液膜の凝固膜が観察される (Fig.7(c)). 脆性温度範囲の下限である 1050°C (Fig.8) においても, 粒界型破断ではあるが, 結晶粒の一部は変形しており, 粒界強度が粒内強度より高くなり始めていることがうかがえる.

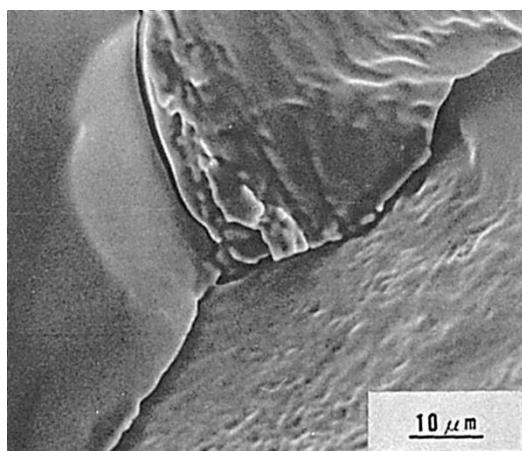
1) B. Weiss et al, Weld. J., Oct. 1970 p471S-487S



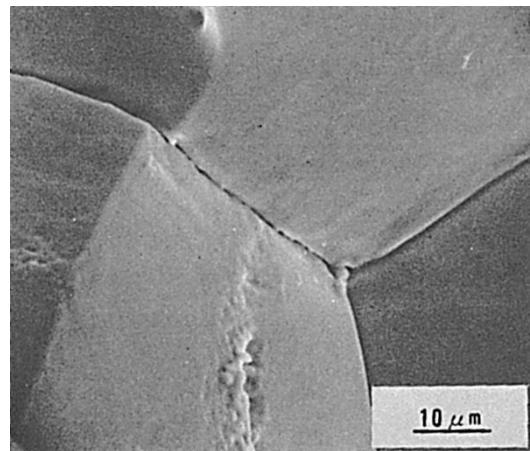
(a)



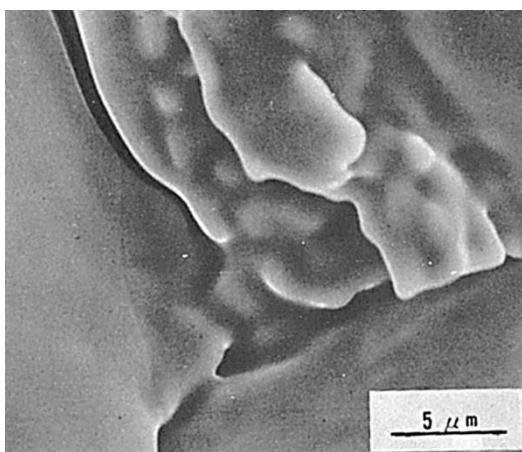
(a)



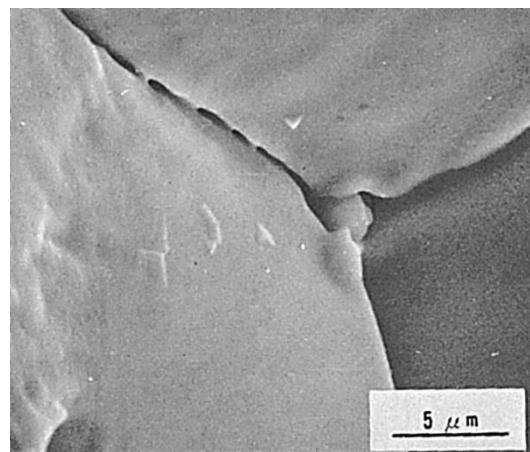
(b) (a)の拡大



(b) (a)の拡大



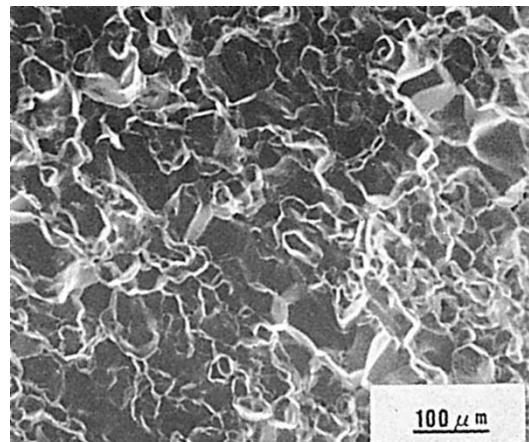
(c) (b)の中央部の拡大



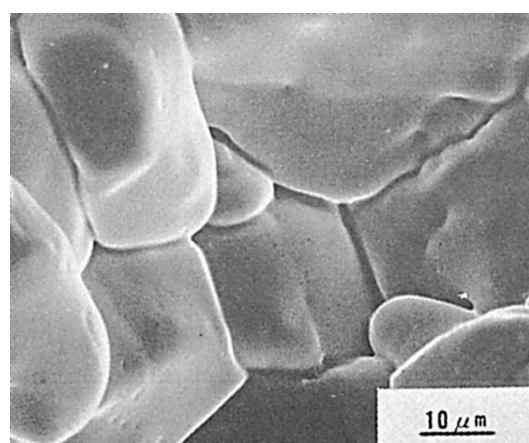
(c) (b)の中央部の拡大

Fig.4 加熱途上 1200°C 破断のミクロ破面

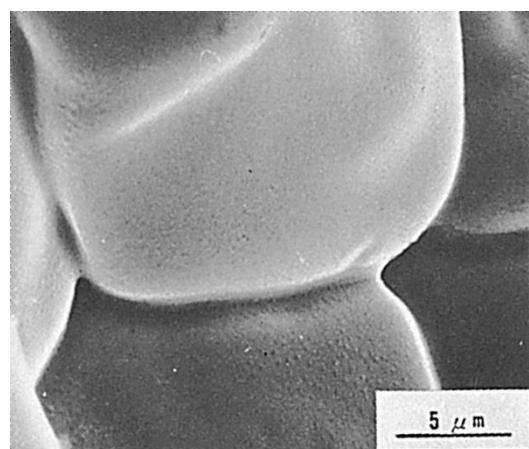
Fig.5 加熱途上 1275°C (NDT: 延性ゼロの温度)  
破断のミクロ破面



(a)

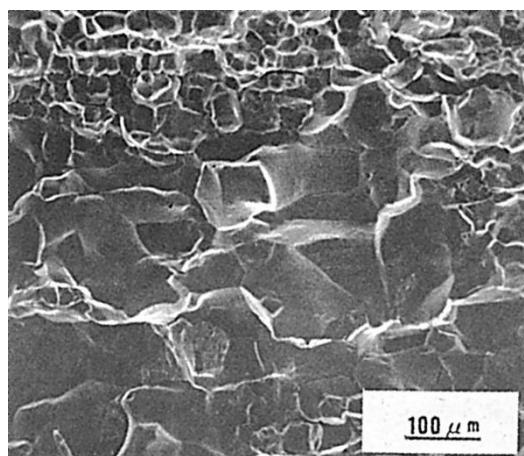


(b) (a)の拡大

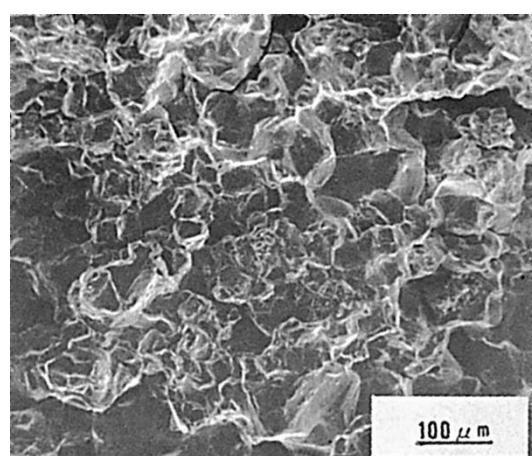


(c) (b)の左部の拡大

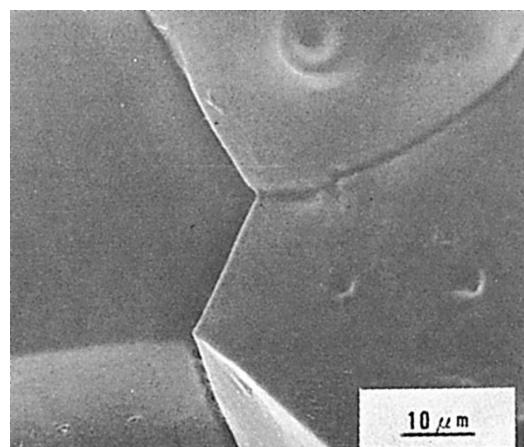
Fig.6 加熱途上 1300°C (NST: 強度ゼロの温度)  
破断のミクロ破面



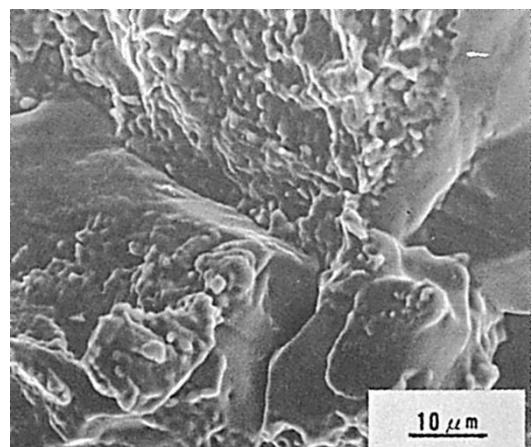
(a)



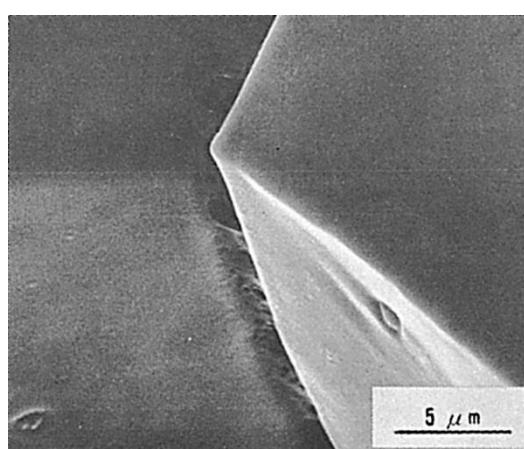
(a)



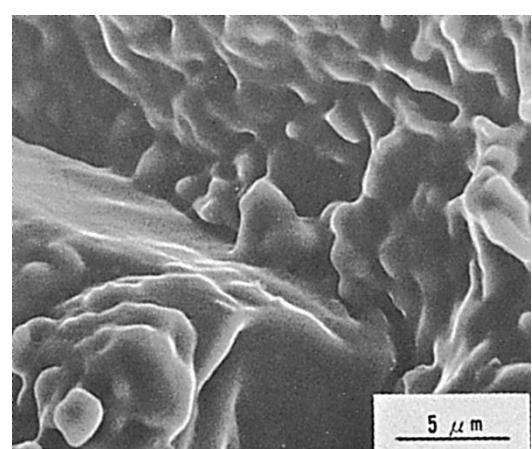
(b) (a)の拡大



(b) (a)の拡大



(c) (b)の下部の拡大



(c) (b)の中央部の拡大

Fig.7 冷却途上 1200°C 破断のミクロ破面

Fig.8 冷却途上 1050°C 破断のミクロ破面