

(121) S35C 鋼の高周波焼入れ領域近傍での疲労破面

— 四点曲げ疲労き裂伝ば試験 —

(121) Fatigue Fracture Surface near the Induction Hardening Region of S35C Steel

— Four Point Bending Fatigue Crack Propagation Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 機械構造用炭素鋼鋼材 S35C (板厚 28mm).

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

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
母 材	0.37	0.26	0.67	0.018	0.010	0.16	0.07	0.12

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	54.1	23.0	34.0

熱処理 : 高周波焼入れ

プレート電圧 (kV)	プレート電流 (A)	グリッド電流 (A)	加熱時間 (Sec)
7	4	0.85	4.0~5.0

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 四点曲げ疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 350mm 長×50mm 幅×8mm 厚

試験条件 (Test condition) : 繰返し応力範囲 14.8kgf/mm², 応力比 0.022

試験結果 (Test result) : 疲労き裂け硬化領域に沿うように湾曲しながら伝ばした.

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に試験片形状を示す. 試験片中央部に高周波焼入れにより硬化領域を作成した. 硬化領域は外応力軸に垂直な方向に対して 20 度傾斜させた. Fig.2 に試験片表面での伝ば経路を示す. 疲労き裂け初期切欠きから発生し, 外応力軸に垂直な方向に直線的に伝ばした後,硬化域に沿うように湾曲しながら伝ばしている. Fig.3 はき裂が直線的に伝ばした Fig.2 の A 点での破面で, わずかに二次割れが認められるが, 破面は比較的平坦である. (以下の図中の太い黒矢印は巨視的なき裂伝ば方向を示す.) Fig.4 はき裂が傾斜しながら伝ばした Fig.2 中の C 点での破面で, 大きな二次割れが多数あり, 破面はゴツゴツしている. Fig.5 および Fig.6 は Fig.2 の A 点でのストライエーション (Striation)

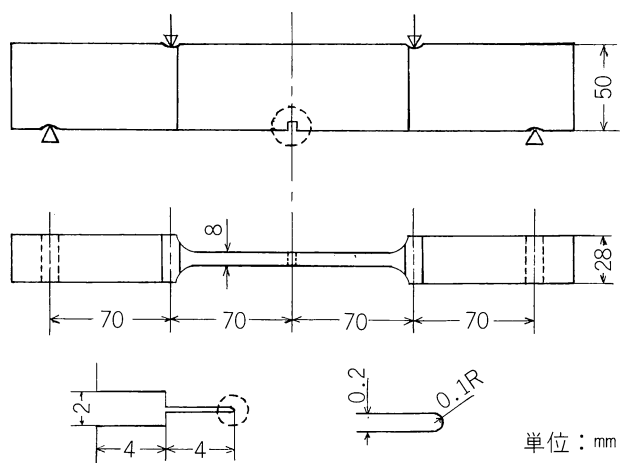


Fig.1 試験片形状

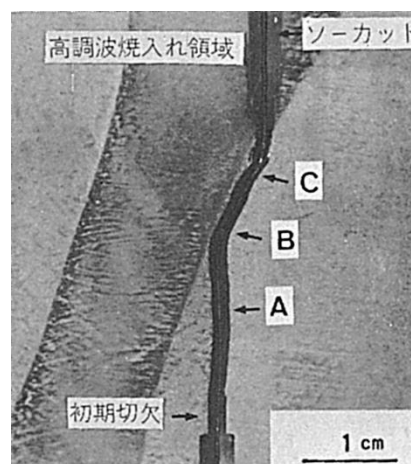


Fig.2 試験片表面での疲労き裂のマクロ写真

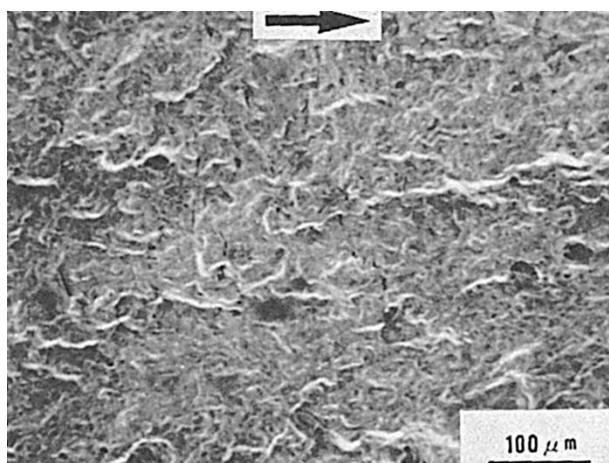


Fig.3 Fig.2 の A 点でのマイクロ破面

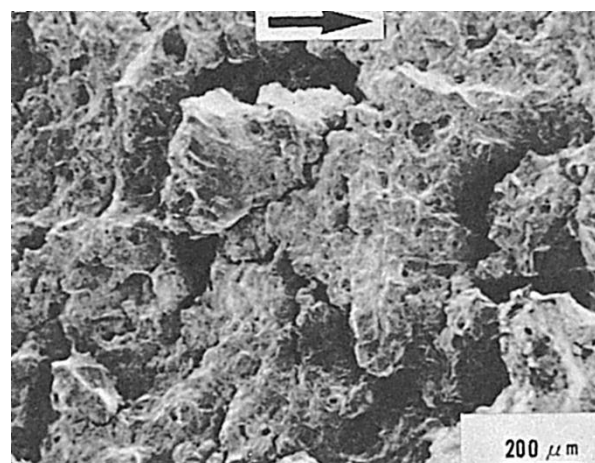


Fig.4 Fig.2 の C 点でのマイクロ破面

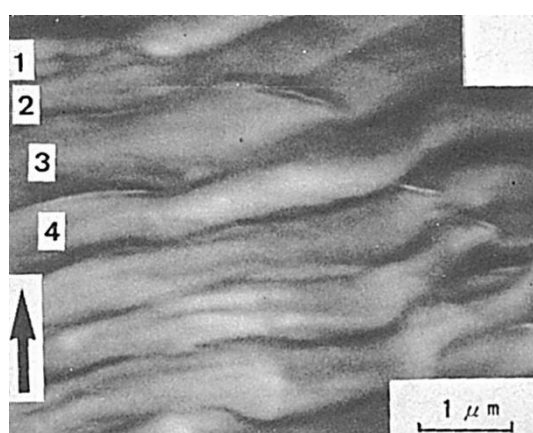


Fig.5 Fig.3 の中央部を拡大したマイクロ破面

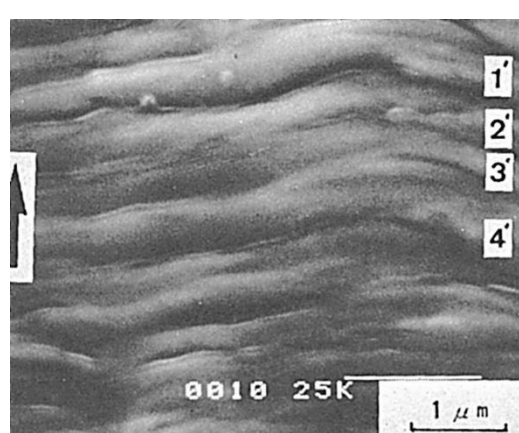


Fig.6 Fig.3 のマッピング破面

の拡大マッチング写真である。この付近はこういった明瞭なストライエーションが多数認められた。Fig.7 および Fig.8 は Fig.2 の B 点でのストライエーションのマッチング写真である。Fig.8 中の二次割れは Fig.7 中には認められない。このことからストライエーションが形成された後に、片側の破面のみに二次割れが発生したことがわかる。Fig.9 および Fig.10 は、Fig.7, Fig.8 と同じく Fig.2 の B 点でのストライエーションのマッチング写真である。ストライエーションの谷の位置に注目すると、Fig.9 の場合には伝ば方向に対して手前側に、Fig.10 の場合には伝ば方向側に谷の位置がずれているように見える。A 点および B 点付近のストライエーションの形状の相違を、立体的にマッチングして検討した結果を Fig.11 および Fig.12 に示す。き裂が直線的に伝ばした領域(A 点)ではストライエーションの山と山、谷と谷とがほぼ対称に形成されている。しかし、傾斜しながら伝ばした領域(B 点)では両破面でのストライエーションの谷の位置がずれており、これは硬化域が存在するため、硬化域側へのすべりが相対的に抑制されたためであろうと考えられる。

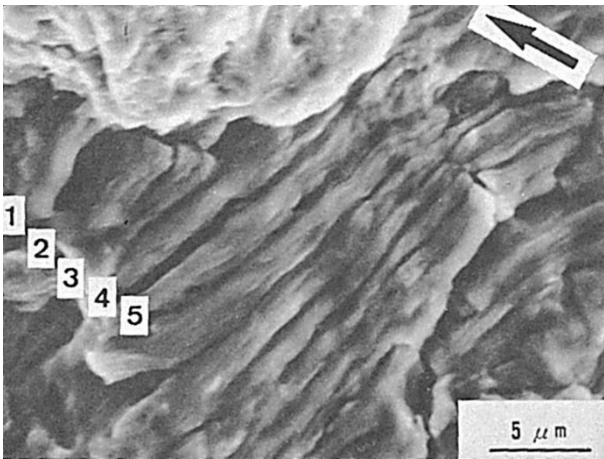


Fig.7 Fig.2 B 点での拡大マイクロ破面
($\Delta K=199.0\text{kgf/mm}^{3/2}$)

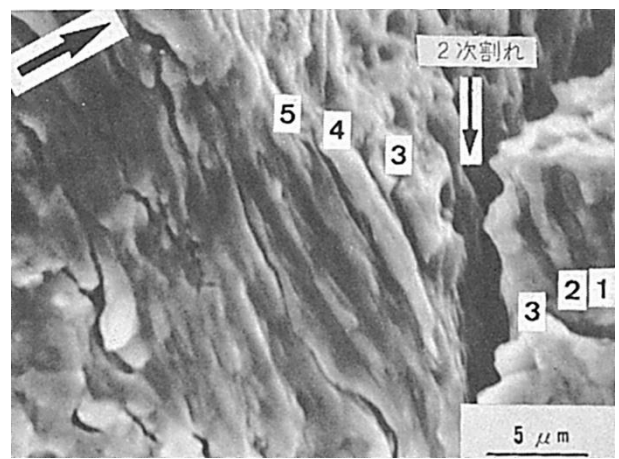


Fig.8 Fig.7 とのマッチング破面

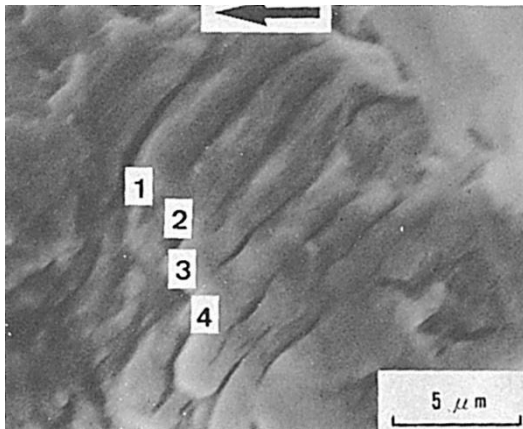


Fig.9 Fig.2 B 点での拡大マイクロ破面

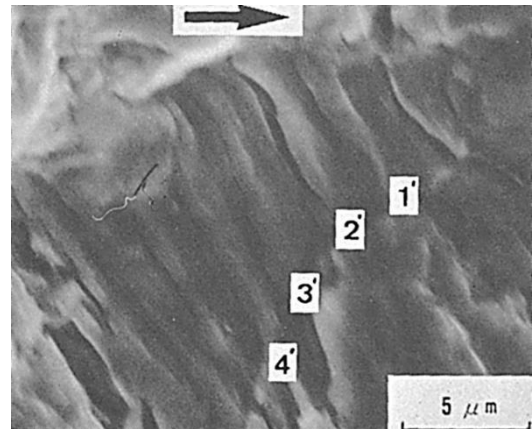


Fig.10 Fig.9 とのマッチング破面

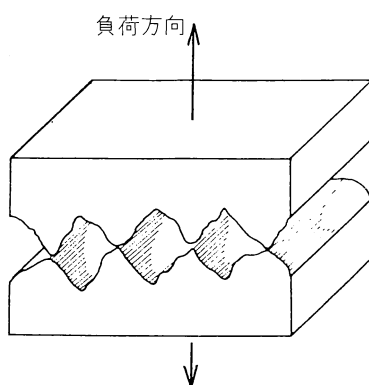


Fig.11 Fig.2 A 点でのストライエーション形状

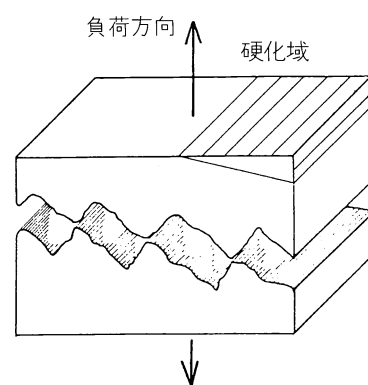


Fig.12 Fig.2 B 点でのストライエーション形状

(122) SM41 鋼と HT80 鋼との電子ビーム異材溶接部での疲労破面

— 四点曲げ疲労き裂伝ば試験 —

(122) Fatigue Fracture Surface in Electron Beam Weldment of SM41-HT80 Steels

— Four Point Bending Fatigue Crack Propagation Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM41, HT80 (板厚 35mm).

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

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Al
SM41	0.22	0.04	0.93	0.024	0.017	—	—	—	—	—	—	—
HT80	0.11	0.30	0.81	0.010	0.004	0.19	1.10	0.51	0.47	0.003	0.0015	0.062

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
SM41	44.9	33.4	44.3
HT80	84.5	78.2	28.5

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : 電子ビーム溶接 (Electron beam welding)

溶接条件 (Welding condition)

加 速 電 圧 (kV)	ビ ー ム 電 流 (mA)	a _b 値	溶 接 速 度 (mm/min)	後熱処理
100	300	1.4	400	600°C×3hrs, 炉冷

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 四点曲げ疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 350mm 長×50mm 幅×20mm 厚

試験条件 (Test condition) : 繰返し応力範囲 10.1kgf/mm², 応力比 0.04

試験結果 (Test result) : 電子ビーム溶接部を横切る際, 伝ば速度が低下した.

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に試験片形状を示す. 初期切欠きは, 疲労き裂が SM41 鋼から発生し, 電子ビーム溶接部を垂直に横切り, HT80 鋼に向って伝ばするように SM41 鋼側に設けた. Fig.2 に巨視的な破面状況および試験片表面状況を示す. 疲労破面は中央部の電子ビーム溶接部を除いて非常に平坦である. また, 疲労き裂は, 溶接部をほぼ垂直に横切っている. Fig.3 は SM41 鋼母材部での破面で多くのストライエーション (Striation) が認められる.

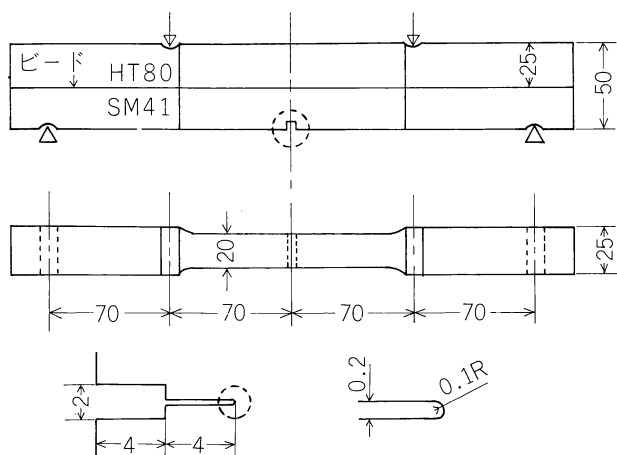


Fig.1 試験片形状

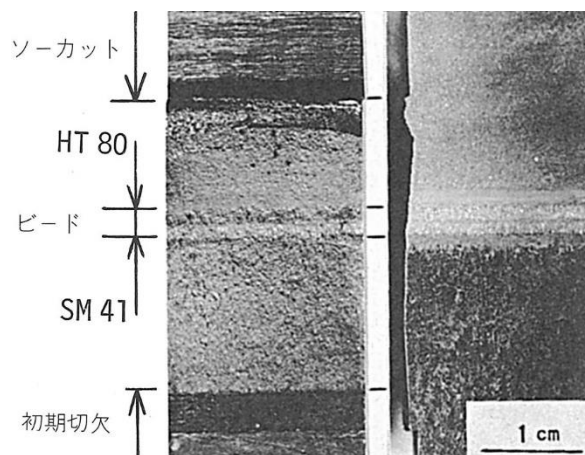


Fig.2 マクロ破面 (左) と試験片表面 (右)

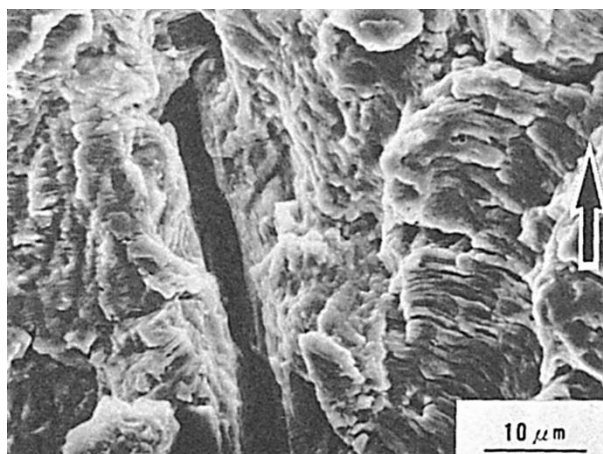


Fig.3 初期切欠きから 13mm の位置 (SM41, 母材) でのマイクロ破面 ($\Delta K=106.0\text{kgf/mm}^{3/2}$)

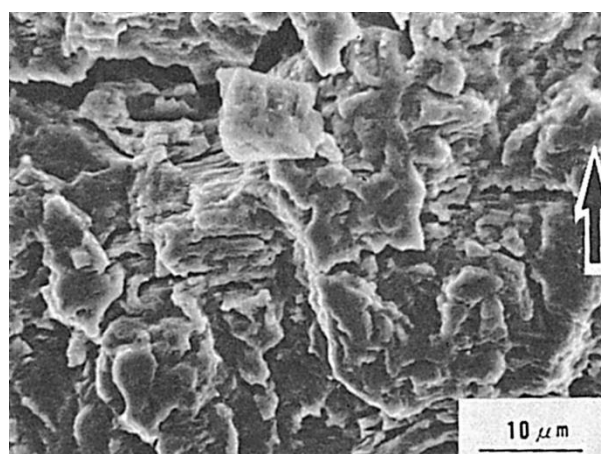


Fig.4 初期切欠きから 15mm の位置 (SM41, HAZ) でのマイクロ破面 ($\Delta K=119.0\text{kgf/mm}^{3/2}$)

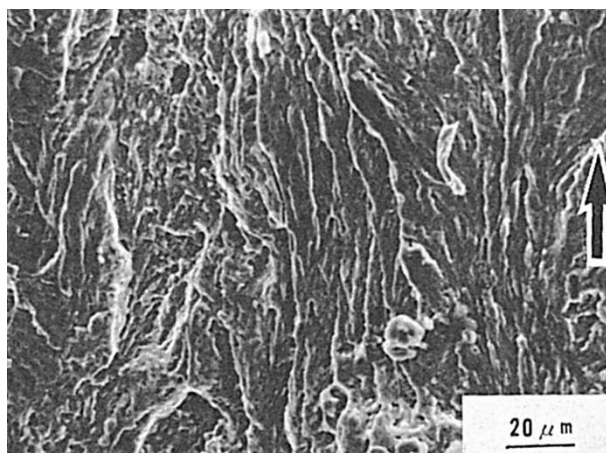


Fig.5 初期切欠きから 16mm の位置 (融合線付近) でのマイクロ破面 ($\Delta K=125.6\text{kgf/mm}^{3/2}$)

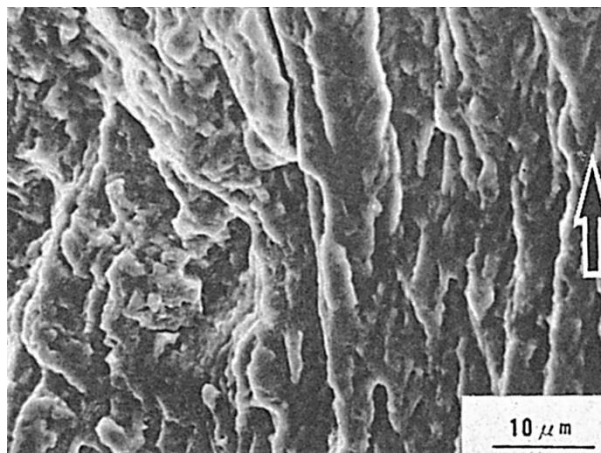


Fig.6 Fig.5 の中央部を拡大したマイクロ破面

(以下の図で、黒矢印は巨視的伝ば方向を示す.) 中央部の割れは、長さ約 $660\mu\sim 200\mu$ で、約 $100\mu\sim 400\mu$ 間隔に圧延方向に対し規則的に見られたもので、圧延時の層状の欠陥であろうと思われる。Fig.4 は SM41 鋼の HAZ での破面で、Fig.3 と同様に多くのストライエーションがみられ母材部と顕著な相違は認められない。Fig.5 は SM41 鋼側の溶融線付近の溶接金属部で、Fig.6 はその拡大写真である。SM41 鋼の母材とは破面の様相は一変し、明瞭なストライエーションはほとんどみられなくなる。Fig.7 は溶接ビート中央部（柱状晶組織の会合部）の破面で、Fig.8 はその拡大写真である。Fig.6 と同様な破面とともに、伝ば方向に垂直な規則的な割れが比較的多数認められる。Fig.9 は HT80 鋼側の溶融線付近の溶接金属部で、Fig.10 はその拡大写真である。Fig.5 と同様な破面が再び多数認められるようになるとともに、Fig.8 のような規則的な割れは溶接ビート中央部 (Fig.7) に比べ少なくなる。溶接金属の組織はマルテンサイトであり、溶融線付近での結晶粒の幅は $20\mu\sim 100\mu$ 、長さは $50\mu\sim 200\mu$ 程度である。このことから、Fig.5 や Fig.9 の破面はマルテンサイト粒界もしくはマルテンサイト・ラスに沿った破面であろうと考えられる。また Fig.10 にはマルテンサイト・ラスに垂直な小さなすじが多数認められるが、これらはすべりの痕跡と考えられる。また、Fig.8 のような規則的な割れは、マルテンサイトラスの厚さが $1\mu\sim 2\mu$ 程度であることから、マルテンサイト・ラスを横切った際に生じたマルテンサイト・ラスのはく離による割れの可能性があり、ストライエーションであるとは断言できない。Fig.11 は HT80 鋼の HAZ、Fig.12 は HT80 鋼母材部での破面で、多くのストライエーションがいずれの破面にも認められ、M41 鋼と同様、HT80 鋼においても HAZ と母材部で破面の顕著な相違は認められない。

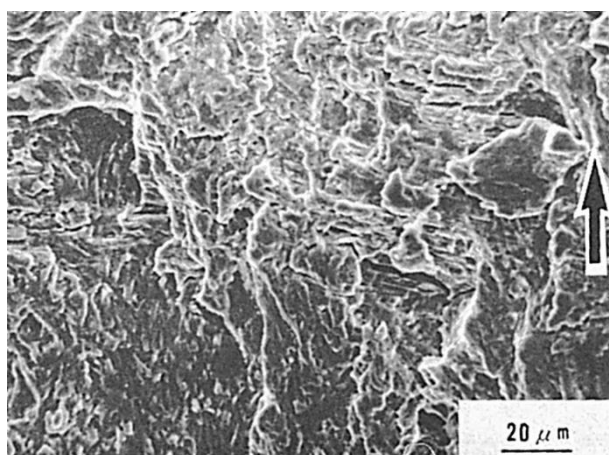


Fig.7 初期切欠きから 17mm の位置 (ビート中心付近) でのマイクロ破面 ($\Delta K=134.0\text{kgf/mm}^{3/2}$)

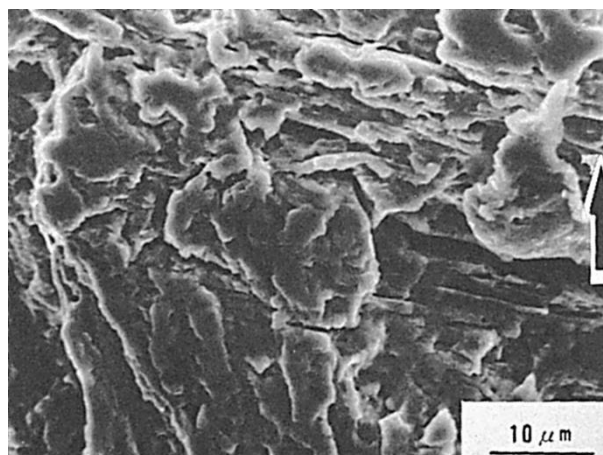


Fig.8 Fig.7 の中央部を拡大したマイクロ破面

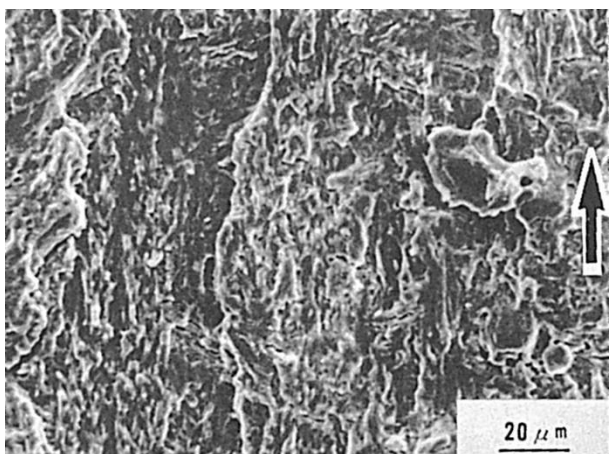


Fig.9 初期切欠きから 18mm の位置 (融合線付近) でのマイクロ破面 ($\Delta K=141.0\text{kgf/mm}^{3/2}$)

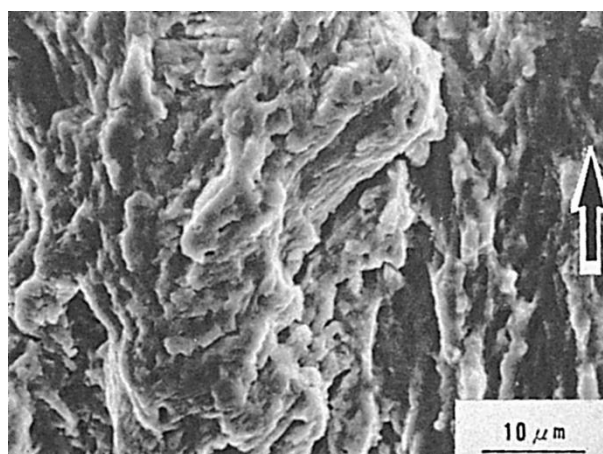


Fig.10 Fig.9 の左部を拡大したマイクロ破面

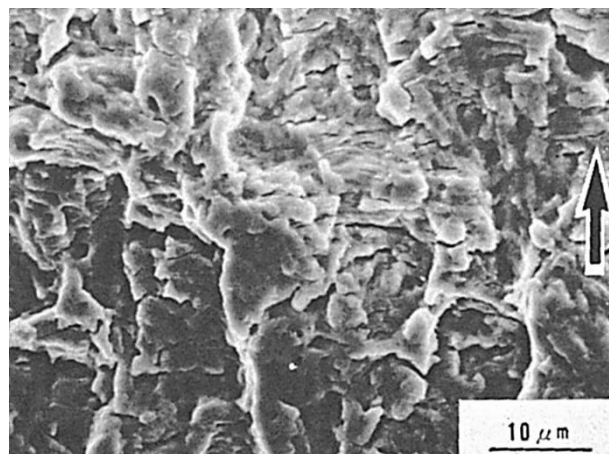


Fig.11 初期切欠きから 19mm の位置 (HT80, HAZ) でのマイクロ破面 ($\Delta K=151.0\text{kgf/mm}^{3/2}$)

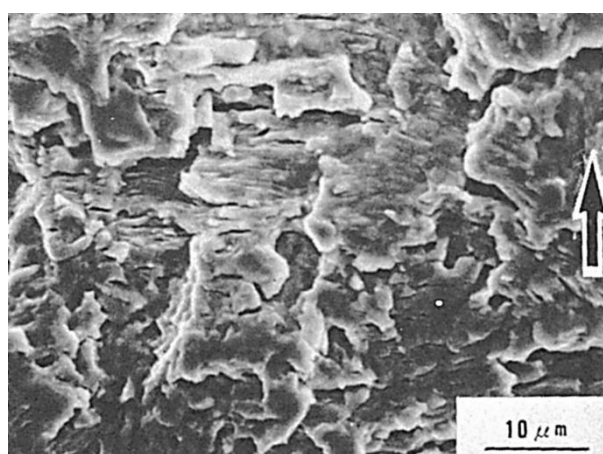


Fig.12 初期切欠きから 21mm の位置 (HT80, 母材) でのマイクロ破面 ($\Delta K=174.0\text{kgf/mm}^{3/2}$)

(123) 軟鋼の管円周継手の繰返し载荷試験時に止端部に発生した疲労破面

— 繰返し载荷試験 —

(123) Fatigue Fracture Surface at the Toe of Girth Welded Joint of STPY41 Steel Pipe by Shielded Metal-Arc Welding

— Cyclic Loading Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 配管用アーク溶接炭素鋼鋼管 STPY41 (板厚 15.9mm).

溶接材料 (Welding material) : 軟鋼用被覆アーク溶接棒 D4316 (径 3.2, 4.0mm)

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

	C	Si	Mn	P	S
母 材	0.14	0.21	0.53	0.017	0.020
溶 着 金 属 (分析例)	0.08	0.64	0.86	0.012	0.010

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	45.5	31.3	30
溶 着 金 属 (測定例)	56	47	31

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
V 形	350°C × 1hr	≤150	20~24	100~170	70~120	7層7パス

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 繰返し载荷試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 600mm 外径 × 15.9mm 厚の管円周継手

試験条件 (Test condition) : 最大荷重 660ton, 最小荷重 220ton の繰返し戴荷, 繰返し数 3000 回

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に疲労き裂の発生状況を示す. 疲労き裂は管外面止端部から発生し, 深さ 3mm 程度で停止していた. Fig.2 にき裂発生点近傍の低倍ミクロ破面を示す. 破面は全般に擬へき開破面的であるが, 部分的には Fig.3 や Fig.4 に示されるようなストライエーション (Striation) 状模様やラブ・マーク (Rub mark) が観察される.

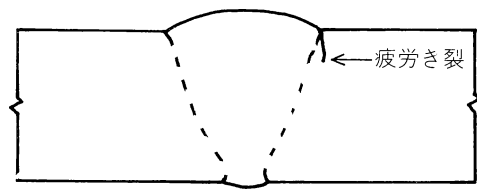


Fig.1 き裂の発生状況

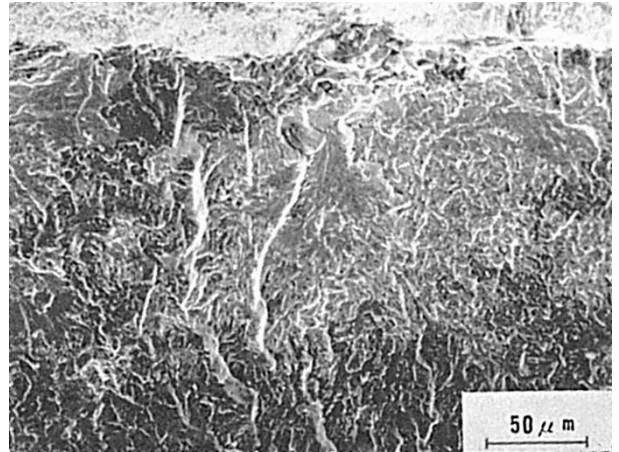


Fig.2 き裂発生点近傍のマイクロ破面

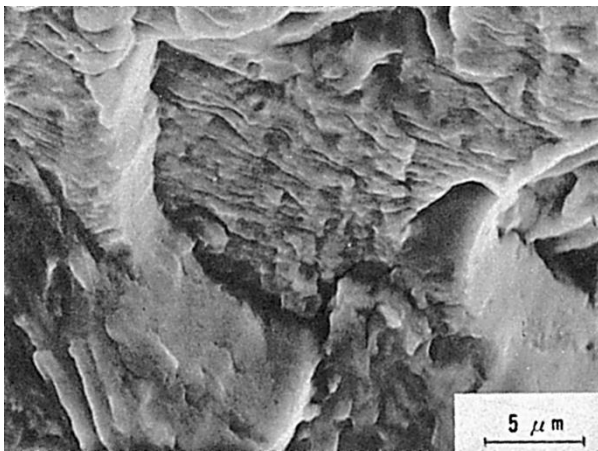


Fig.3 き裂発生点近傍のマイクロ破面

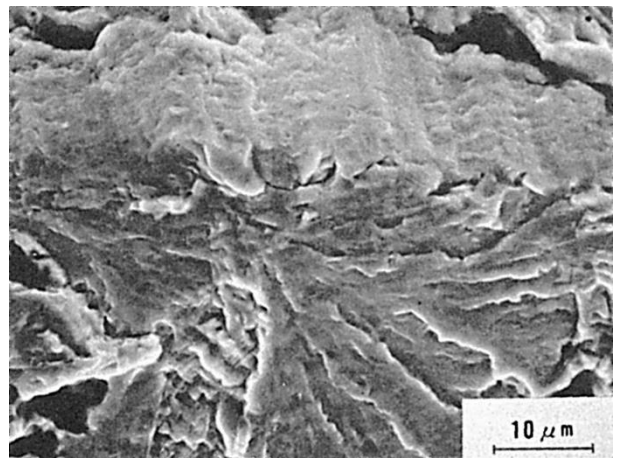


Fig.4 き裂中央部のマイクロ破面

(124) 圧力容器用炭素鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の疲労破面

— 疲労き裂伝ば試験 —

(124) Fatigue Fracture Surface in Weld Metal of SB42 Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Fatigue Crack Growth Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : ボイラ用及び圧力容器用炭素鋼 SB42 (板厚 12mm).

溶接材料 (Welding material) : 軟鋼用被覆アーク溶接棒 D4316 (径 4, 5mm)

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

	C	Si	Mn	P	S
母 材	0.17	0.22	0.64	0.017	0.017

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	44	27	27

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	アーク電圧 (V)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	積 層 方 法	応力除去焼鈍
V 形	24	170~230	300	6 層	600℃×3hrs

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 中央切欠付板試験片 (200mm 長×100mm
幅×4mm 厚)

試験条件 (Test condition) : 荷重制御試験, 周波数約 145Hz

試験結果 (Test result) : $\Delta K_{th} = 16.9 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $da/dN = 7.62 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.62}$

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

溶接金属中をき裂が伝ばするように切欠きを付けた中央切欠付き板試験片に対して疲労き裂伝ば試験を行ない, その際得られた破面の二段レプリカを TEM により観察した結果を Fig.1~6 に示す. このうち Fig.1 は, き裂伝ば速度の下限界値に対する応力拡大係数幅 ΔK_{th} の近傍における破面形態を示したもので, 樹枝状晶の一部と思われる

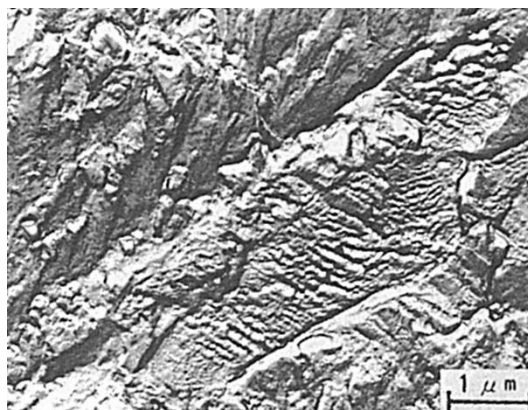


Fig.1 $da/dN=1.75 \times 10^{-7}$ mm/cycle,
 $\Delta K=17.3 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

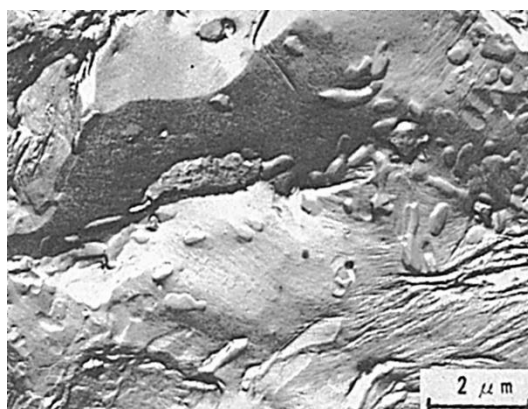


Fig.2 $da/dN=3.67 \times 10^{-6}$ mm/cycle,
 $\Delta K=38.5 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

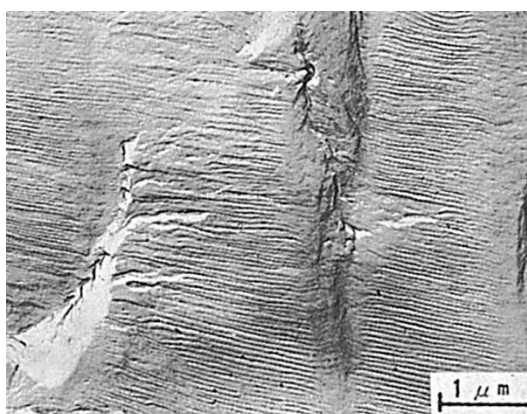


Fig.3 $da/dN=3.94 \times 10^{-5}$ mm/cycle,
 $\Delta K=62.0 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

微視的組織を反映した形態が支配的となっている。Fig.2 は、ファセット (Facet) 上に微細なすべり線や炭化物を包含した粒界ファセットを示したもので、粒界ファセットの大きさは母材の粒径 (23~26 μm) に比べてかなり小さいことから、この種の形態は溶接金属中に形成された柱状結晶粒の界面をき裂が伝はしたために、出現したものと推察される。なお、このような粒界割れは、伝ば速度 da/dN が $5 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$ の範囲、あるいは応力拡大係数幅 ΔK が $20 \sim 50 \text{kgf/mm}^{3/2}$ の範囲に限って出現し、その際の粒界ファセットの破面率は $da/dN \doteq 3 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ あるいは $\Delta K \doteq 35 \text{kgf/mm}^{3/2}$ 付近で最大となる。き裂伝ば速度が $1 \times 10^{-5} \text{mm/cycle}$ 以上になると Fig.3 や 4 に見られるような明瞭なストライエーション (Striation) が支配的となる。き裂伝ば速度が 10^{-4}mm/cycle のオーダーに達すると、Fig.5 や 6 に見られるようにストライエーション中に介在物を起点としたディンプル (Dimple) が出現するようになり、その出現割合はき裂伝ば速度あるいは ΔK の増加につれて若干増大する傾向が認められる。なお、ディンプル中の介在物について XMA による分析を行なった結果、Mn-Si 系の介在物であることが判明した。本試験片で得られたストライエーション間隔を一定の ΔK について整理した結果、ストライエーション間隔の平均値 S_m (単位: mm) と ΔK (単位: $\text{kgf/mm}^{3/2}$) とは次のような関係が存在した。この場合、応力比 R は 0 である。

$$S_m = 2.64 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.02}$$

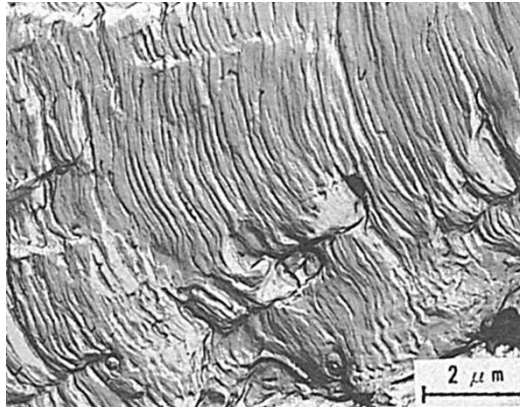


Fig.4 $da/dN=1.10 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=99.2\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$, $R=0$

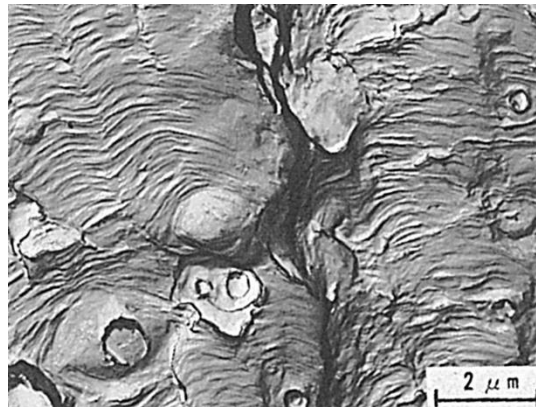


Fig.5 $da/dN=2.23 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=121.9\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$, $R=0$

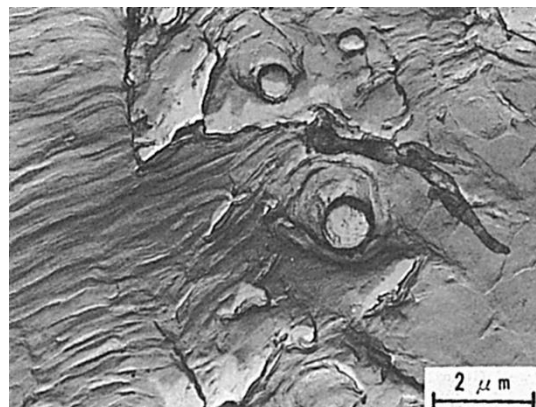


Fig.6 $da/dN=3.98 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=139.8\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$, $R=0$

(125) 圧力容器用炭素鋼の溶接継手を直角に横切って伝ばした 疲労き裂の破面

— 疲労き裂伝ば試験 —

(125) Fracture Surface of Fatigue Crack Propagating Perpendicularly to Welded Joint of SB42 Steel

— Fatigue Crack Growth Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : ボイラ及び圧力容器用炭素鋼 SB42 (板厚 12mm).

溶接材料 (Welding material) : 軟鋼用被覆アーク溶接棒 D4316 (径 4, 5mm)

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

	C	Si	Mn	P	S
母 材	0.17	0.22	0.64	0.017	0.017

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	44	27	27

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	ア ー ク 電 圧 (V)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	積 層 方 法
V 形	24	170~230	300	6 層

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : コンパクト試験片 (CT 試験片)

試験条件 (Test condition) : 荷重制御試験, 周波数 10Hz

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

突合せ溶接を行なった SB42 の溶接金属を直角にき裂が横切るように切欠きを付けたコンパクト試験片 (Fig.1) を用いて, 疲労き裂伝ば試験を実施した後, 溶接金属および HAZ の破面形態を TEM を用いて調べた. その結果, 切欠きからき裂が母材および最初の HAZ を通過して溶接金属に達するまでの破面形態は, すべり面分離によって作られたストライエーション (Striation) あるいはストライエーション状模様が支配的となっている. なお, 溶接金属中では Fig.2 に示すように明瞭なストライエーションと若干の Mn-Si 系介在物が認められた. しかし, き裂が溶接金属から熱影響部へ達した領域では, Fig.3 に見られるようなへき開か一部で出現した. また, Fig.3 の近傍からは Fig.4 に見られるようにディンプル (Dimple) とストライエーションとが混在している形態が多く認められた.

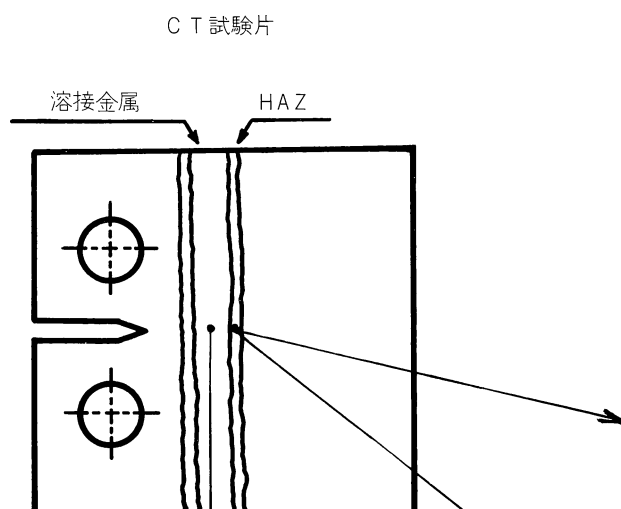


Fig.1 試験片形状

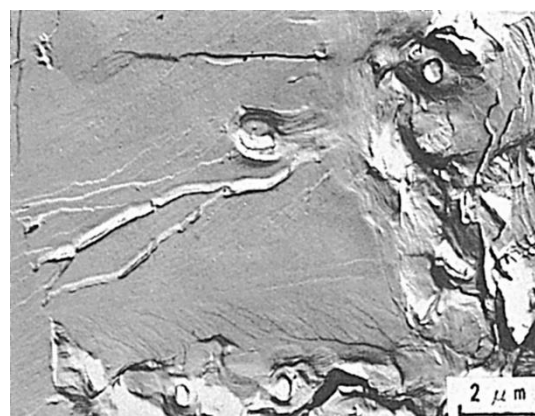


Fig.3 $da/dN = 1.03 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$,
 $\Delta K = 73.7 \text{kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.05$

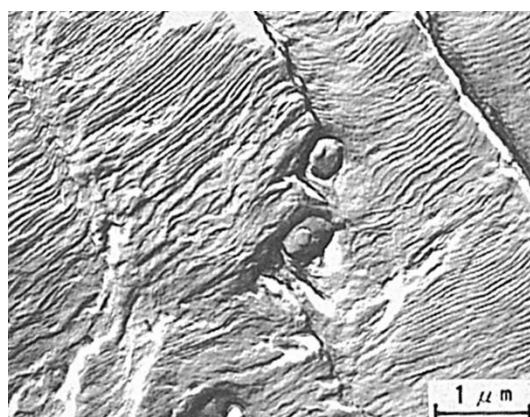


Fig.2 $da/dN = 5.58 \times 10^{-5} \text{mm/cycle}$,
 $\Delta K = 68.0 \text{kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.05$

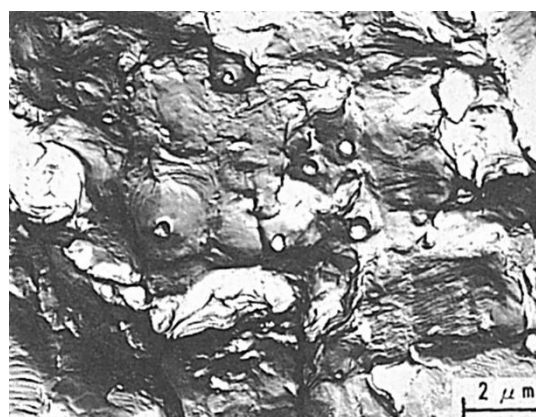


Fig.4 $da/dN = 1.03 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$,
 $\Delta K = 73.7 \text{kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.05$

(126) HT50 鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の疲労破面

— 疲労き裂伝ば試験 —

(126) Fatigue Fracture Surface in Weld Metal of HT50 Steel
by Shielded Metal-Arc Welding

— Fatigue Crack Growth Test —

材 料 (Material)

母 材(Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM50A (板厚 16mm).

溶接材料 (Welding material) : 高張力鋼用被覆アーク溶接棒 D5016 (径 4, 5, 6mm).

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

	C	Si	Mn	P	S
母 材	0.16	0.23	1.10	0.023	0.006

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	56	42	22

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	ア ー ク 電 圧 (V)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	積 層 方 法
X 形	35	180~290	250	6 層

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : コンパクト試験片 (CT 試験片)

試験条件 (Test condition) : 荷重制御試験, 周波数 10Hz

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

溶接金属中をき裂が伝ばするように切欠きを付けた幅 100mm, 板厚 14mm のコンパクト試験片を用いて疲労き裂伝ば試験を実施した後, TEM により破面観察を行なった. その結果, き裂伝ば速度が $10^{-5} \sim 10^{-4}$ mm/cycle の範囲では, Fig.1~3 に示すようにストライエーション (Striation) が支配的であって, 他の破面形態はほとんど認められなかった. しかし, 10^{-3} mm/cycle の伝ば速度域では, Fig.4 にみられるようにストライエーション中の一部にディンプル (Dimple) が形成されている状態が認められた. なお, この試験片は強い圧縮の残留応力を有していたために, 応力除去焼鈍を行なった溶接試験片よりもかなり伝ば速度が低下する傾向が認められた. このため図中の ΔK の値は, 見掛けの値を示したものである.

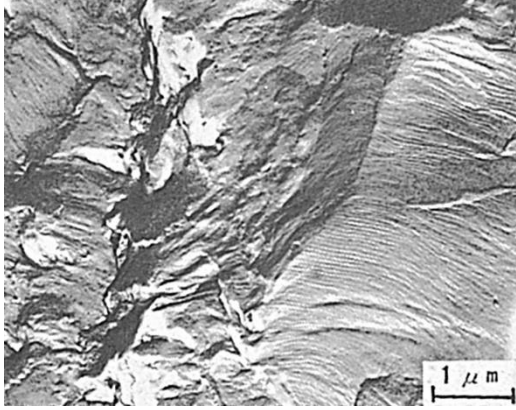


Fig.1 $da/dN=2.33 \times 10^{-5}$ mm/cycle,
 $\Delta K=130.1\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

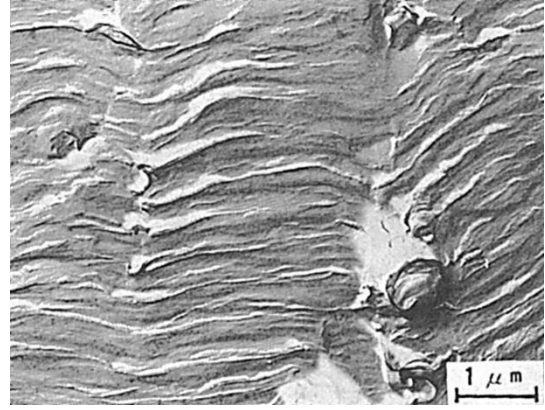


Fig.2 $da/dN=3.01 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=187.5\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

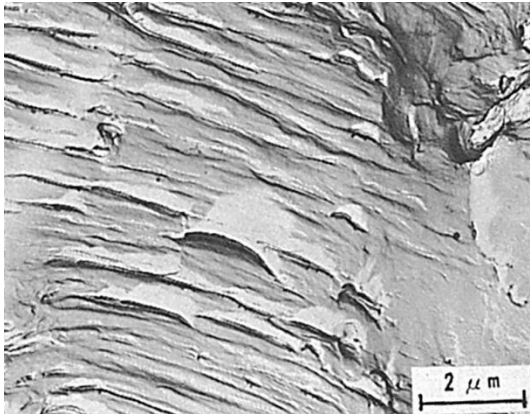


Fig.3 $da/dN=8.14 \times 10^{-4}$ m/cycle,
 $\Delta K=246.8\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

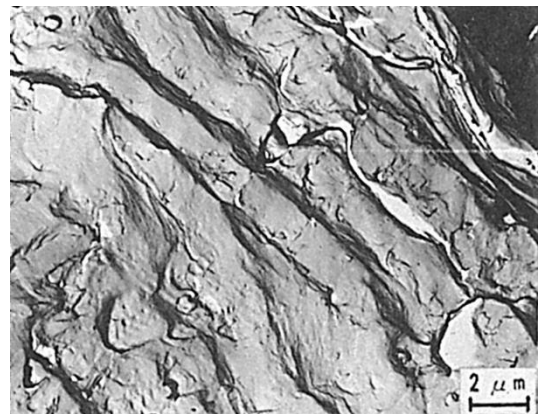


Fig.4 $da/dN=3.59 \times 10^{-3}$ mm/cycle,
 $\Delta K=319.4\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

(127) HT50 鋼の溶接継手を直角に横切って伝ばした疲労き裂の破面

— 疲労き裂伝ば試験 —

(127) Fracture Surface of Fatigue Crack Propagating Perpendicularly to Welded Joint of HT50 Steel

— Fatigue Crack Growth Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用鋼材 SM50A (板厚 16mm).

溶接材料 (Welding material) : 高張力鋼用被覆アーク溶接棒 D5016 (径 4, 5, 6mm).

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

	C	Si	Mn	P	S
母 材	0.16	0.23	1.10	0.023	0.006

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	56	42	22

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	ア ー ク 電 圧 (V)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	積 層 方 法
X 形	35	180~290	250	6 層

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : コンパクト試験片 (CT 試験片)

試験条件 (Test condition) : 荷重制御試験, 周波数 10Hz

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

溶接金属をき裂が直角に横切るようにしたコンパクト試験片を用いて疲労き裂伝ば試験を行ない, その後破面観察を行なった結果を Fig.1~4 に示す. このうち Fig.1 は, 伝ば速度が遅い母材の部分のミクロ破面を示したもので, このようなき裂伝ば速度域では, 巨視的なき裂伝ば方向 (矢印方向) に対して直角に破面がこすられた跡が多数認められる. Fig.2 は, 伝ば速度がやや速くなった場合の母材のミクロ破面を示したもので, 微細なストライエーション (Striation) が形成されている. Fig.3 は溶接金属中の破面形態を示したもので, 溶接金属の組織や機械的性質は母材とかなり異なるにもかかわらず, Fig.2 の母材の形態と同様, 明瞭なストライエーションが観察される. Fig.4 は, き裂が溶接金属中を完全に横切って再び母材を伝ばしたときの破面形態を示したもの

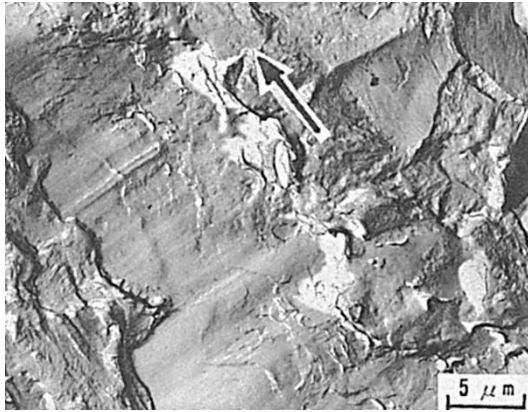


Fig.1 $da/dN=6.93 \times 10^{-6}$ mm/cycle,
 $\Delta K=128.3\text{Kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

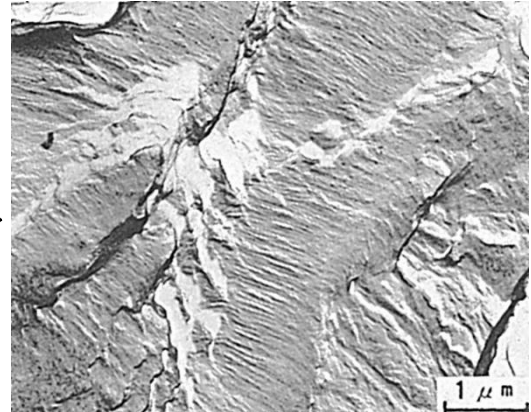


Fig.2 $da/dN=5.48 \times 10^{-5}$ mm/cycle,
 $\Delta K=152.6\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

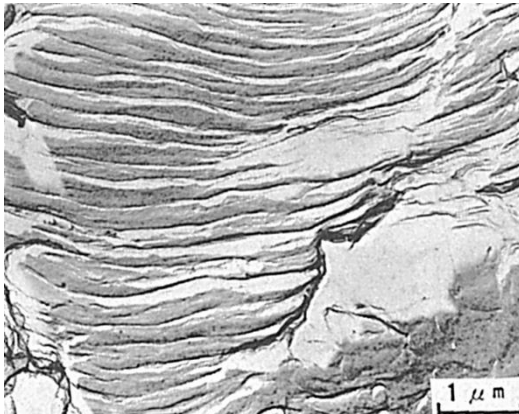
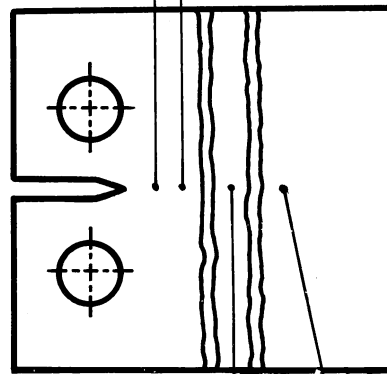


Fig.3 $da/dN=4.78 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=208.4\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

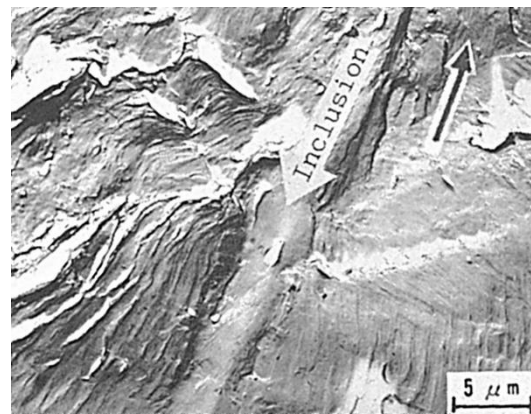


Fig.4 $da/dN=8.65 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=254.3\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

で、このような領域では圧延方向に長く伸びた介在物が顕著に出現するようになる。この場合ストライエーションは介在物の間に作られているが、ストライエーションの形成される方向は、巨視的き裂伝ぱ方向（矢印方向）とかなり異なっている場合が多い。なお、本試験片は圧縮残留応力を有していた。このため応力拡大係数幅 ΔK は、見掛けの値を示したものである。

(128) HT60 鋼の被覆アーク溶接における熱影響部の疲労破面

— 疲労き裂伝ば試験 —

(128) Fatigue Fracture Surface in HAZ of HT60 Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Fatigue Crack Growth Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM58Q (板厚 12mm).

溶接材料 (Welding material) : 高張力鋼用被覆アーク溶接棒 D5816 (径 4, 5mm)

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

	C	Si	Mn	P	S
母 材	0.15	0.46	1.47	0.015	0.005

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	63	53	29

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	予 熱 温 度 (°C)	アーク電圧 (V)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	積 層 方 法
V 形	60~80	24	160~230	300	6 層

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 中央切欠付板試験片

試験条件 (Test condition) : 荷重制鋼試験, 周波数約 145Hz

試験結果 (Test result) : $da/dN = 3.18 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.81}$

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

熱影響部 (HAZ) をき裂が伝ばするように, HAZ に切欠きを付けた厚さ 4mm の板試験片を用いて疲労き裂伝ば試験を行なった後, 得られた破面について TEM を用いて観察を行なった. その結果, 伝ば速度が 10^{-6} mm/cycle の領域では Fig.1 に見られるような粒界ファセット (Facet) 状模様とストライエーション (Striation) 状模様が支配的な形態となっている. 伝ば速度が 10^{-5} mm/cycle 以上では, Fig.2~4 に示すような明瞭なストライエーションが認められ, 他の破面形態はほとんど認められない. これらのストライエーションの間隔は, き裂伝ば速度あるいは応力拡大係数幅 ΔK の増加に伴い増大する傾向が認められるので ΔK との関係を求めた結果, ストライエーション間隔の平均値 S_m は ΔK との間に次式で示す関係にある.

$$S_m = 5.47 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.21}$$

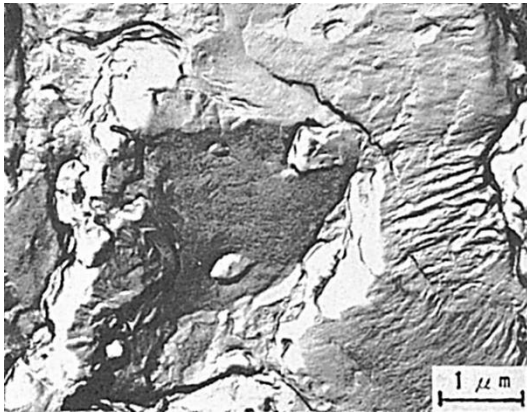


Fig.1 $da/dN=8.70 \times 10^{-6}$ mm/cycle,
 $\Delta K=35.6\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

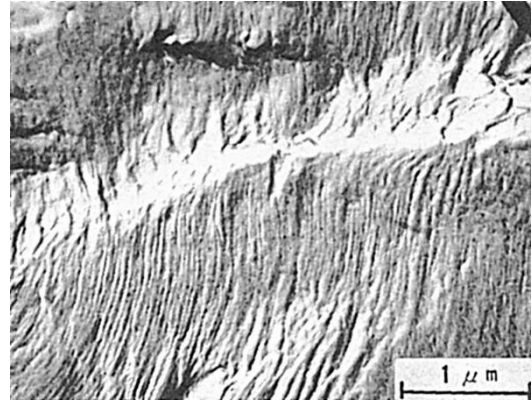


Fig.2 $da/dN=3.21 \times 10^{-5}$ mm/cycle,
 $\Delta K=58.7\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

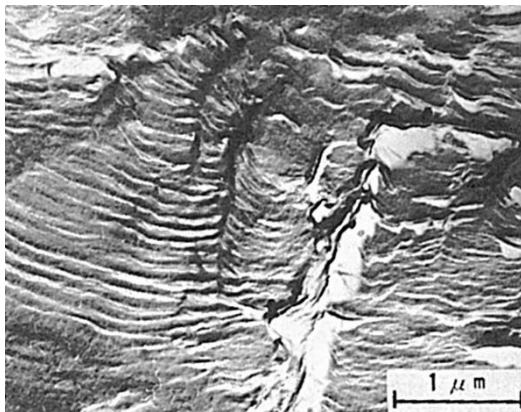


Fig.3 $da/dN=5.05 \times 10^{-5}$ mm/cycle,
 $\Delta K=69.7\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

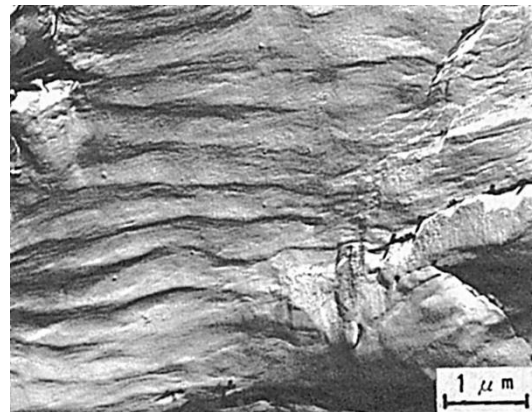


Fig.4 $da/dN=2.63 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=131.1\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

(129) HT60 鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の疲労破面

— 疲労き裂伝ば試験 —

(129) Fatigue Fracture Surface in Weld Metal of HT60 Steel
by Shielded Metal-Arc Welding

— Fatigue Crack Growth Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM58Q (板厚 12mm).

溶接材料 (Welding material) : 高張力鋼用被覆アーク溶接棒 D5816 (径 4, 5mm)

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

	C	Si	Mn	P	S
母 材	0.15	0.46	1.47	0.015	0.005

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	63	53	29

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	予 熱 温 度 (°C)	アーク電圧 (V)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	積 層 方 法
V 形	60~80	24	160~230	300	6 層

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 疲労き裂伝ば試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 中央切欠付板試験片

試験条件 (Test condition) : 荷重制鋼試験, 周波数約 145Hz

試験結果 (Test result) : $da/dN = 3.39 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.87}$

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

溶接金属をき裂が伝ばするように, 溶接金属中に切欠きを付けた厚さ 4mm, 幅 100mm の中央切欠付試験片を用いて疲労き裂伝ば試験を実施した後, 得られた破面について TEM による観察を行なった. その結果, 伝ば速度が 10^{-5} mm/cycle のオーダーでは Fig.1 および Fig.2 に示すように明瞭なストライエーション (Striation) が形成されていた. 伝ば速度が 10^{-4} mm/cycle のオーダーになると, Fig.3 に示すような明確なストライエーションも形成されてはいるが, 多くは Fig.4 に示すようにやや明瞭さを欠くストライエーションとディンプル (Dimple) とが混在している形態が支配的となる. しかし, ディンプルの占める破面率はそれ程多くはなく, 最大でも 20%程度である. 本観察で得られたストライエーション間隔の平均値 S_m と応力拡大係数幅 ΔK とは次式で示す関係が成立していた.

$$S_m = 2.11 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.44}$$

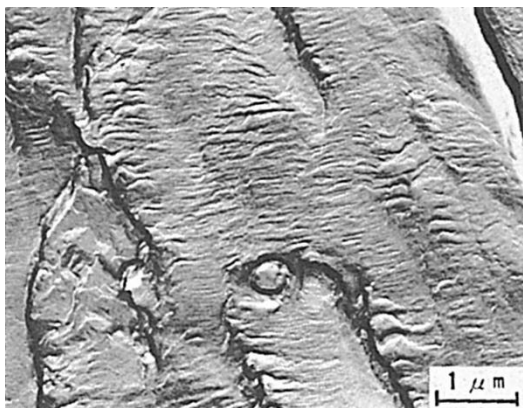


Fig.1 $da/dN=2.48 \times 10^{-5}$ mm/cycle,
 $\Delta K=52.3\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

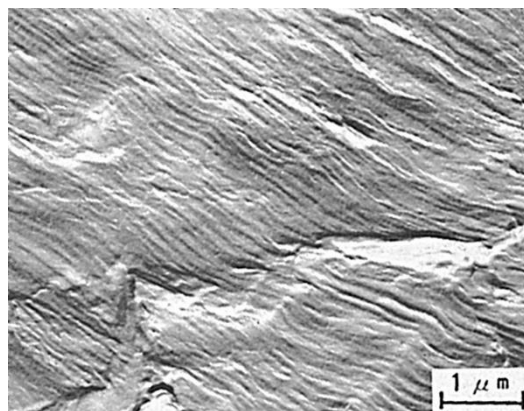


Fig.2 $da/dN=9.93 \times 10^{-5}$ mm/cycle,
 $\Delta K=89.8\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

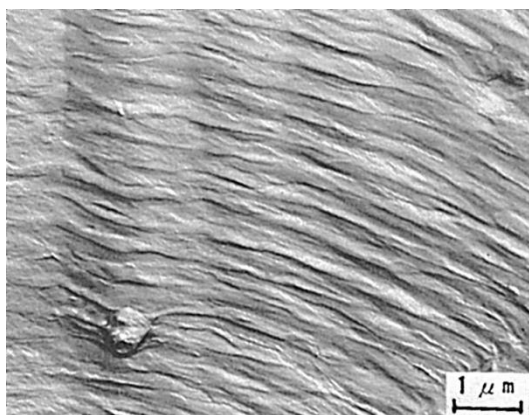


Fig.3 $da/dN=2.49 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=133.8\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

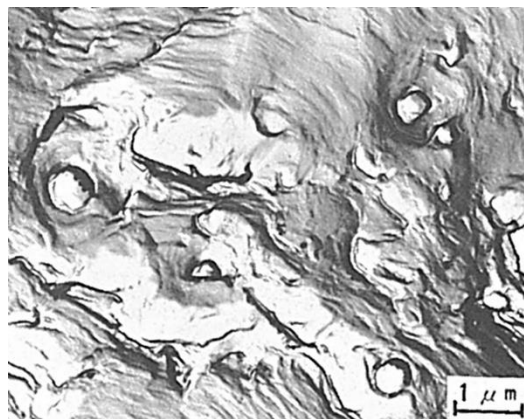


Fig.4 $da/dN=2.49 \times 10^{-4}$ mm/cycle,
 $\Delta K=133.8\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0$

(130) 圧力容器用低合金鋼のサブマージーク溶接における 熱影響部の疲労破面

— 疲労き裂伝ぱ試験 —

(130) Fatigue Fracture Surface in HAZ of ASTM A533B Steel by Submerged-Arc Welding

— Fatigue Crack Growth Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 圧力容器用 Mn-Mo-Ni 鋼材 ASTM A533B Cl. 1 (板厚 40mm).

溶接材料 (Welding material) : サブマージーク溶接材料 AWS F96-EG-G 相当
(ワイヤ径 4.8mm).

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
母 材	0.19	0.27	1.27	0.006	0.008	0.63	0.52

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²)	伸 び (%)
母 材	69.2	55.1	25.1
溶 着 金 属	62.9	57.7	71.7

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : サブマージーク溶接 (Submerged-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

開 先 形 状	予 熱 温 度 (°C)	アーク電圧 (V)	溶 接 電 流 (A)	溶 接 速 度 (mm/min)	積 層 方 法
X 形	152	27	630	300	14 パ ス

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 疲労き裂伝ぱ試験

試験片形状 (Specimen configuration) : コンパクト試験片 (CT 試験片)

試験条件 (Test condition) : 荷重制鋼試験, 周波数 10Hz

試験結果 (Test result) : $da/dN = 1.25 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.98}$

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

溶接部の板厚中心より熱影響部 (HAZ) をき裂が伝ぱするように HAZ に切欠きを付けた厚さ 12.5mm, 幅 51mm のコンパクト試験片を作製し, 疲労き裂伝ぱ試験を行なった. この場合開先形状を X 型としたために, き裂は熱影響部だけを通過するわけではなく, 試験片の板厚中央では熱影響部を, 表面付近では溶接金属を通過する状態となっていた. 試験後の破面の板厚中央について TEM による観察を行なった結果, き裂伝ぱ速度が 1×10^{-5} mm/cycle 以上では Fig.1~4 に示すようにストライエーション (Striation) が支配的となっており, 他の破面形態はほとんど形成されていない. これらのストライエーション間隔の平均値 S_m と応力拡大係数幅 ΔK との関係は, 次のように表示される.

$$S_m = 1.77 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.43}$$

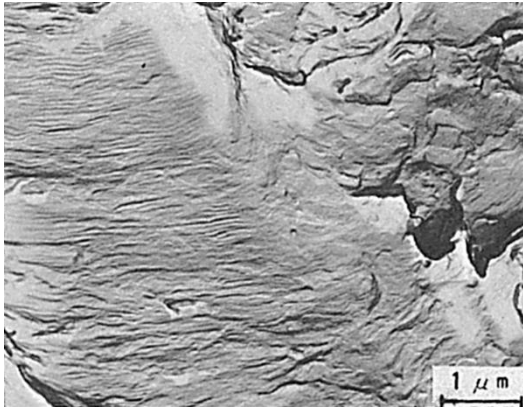


Fig.1 $da/dN=3.77 \times 10^{-5}$ mm/cycle
 $\Delta K=74.9\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

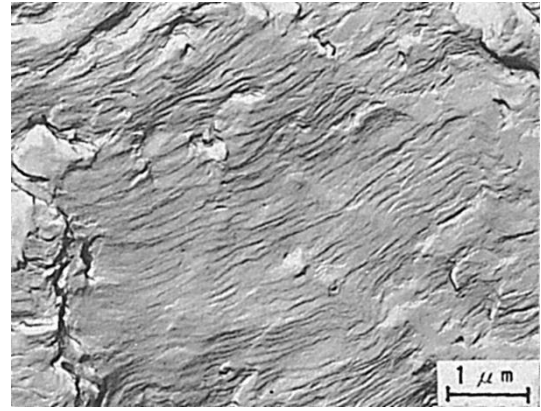


Fig.2 $da/dN=9.76 \times 10^{-5}$ mm/cycle
 $\Delta K=92.8\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

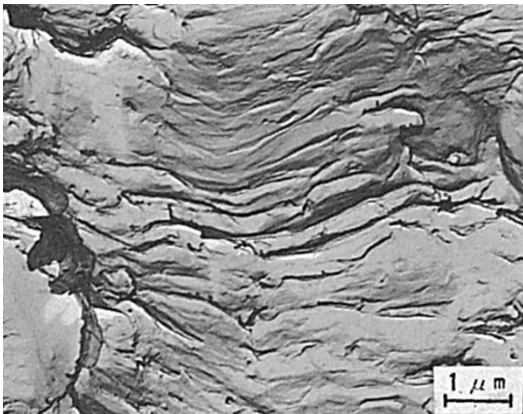


Fig.3 $da/dN=4.68 \times 10^{-4}$ mm/cycle
 $\Delta K=166.9\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$

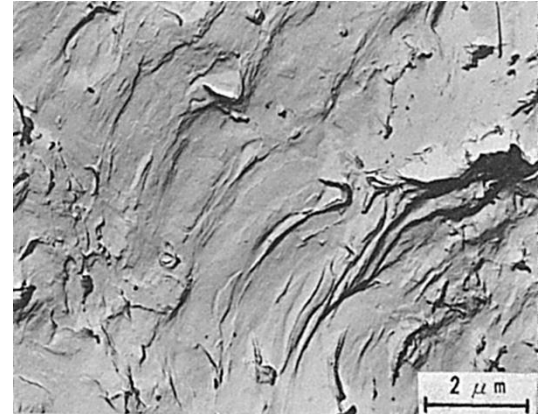


Fig.4 $da/dN=1.24 \times 10^{-3}$ mm/cycle
 $\Delta K=255.9\text{kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.05$