

(31) HT80 鋼の被覆アーク溶接部における低温割れ破面

— インプラント試験 —

(31) Fracture Surface of HAZ Cold Cracking for HT80 Steel
by Shielded Metal-Arc Welding

— Implant Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 HT80 (板厚 50mm).

溶接材料 (Welding material) : 高張力鋼用被覆アーク溶接棒 D8016 (径 4mm).

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

| | C | Si | Mn | P | S | Al | M. | Ni | Cr | Cu | V | B |
|---------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| 母 材 | 0.10 | 0.24 | 0.79 | 0.009 | 0.004 | 0.056 | 0.50 | 1.05 | 0.41 | 0.23 | 0.29 | 0.002 |
| 溶 着 金 属 | 0.07 | 0.63 | 1.45 | 0.009 | 0.006 | — | 0.44 | 1.81 | 0.26 | — | — | — |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|---------|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 | 88 | 83 | 41 | 25 at -10℃ |
| 溶 着 金 属 | 85 | 74 | 24 | 12 at -5℃ |

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 温 度 (℃) | アーク電圧 (V) | 溶 接 電 流 (A) | 溶 接 速 度 (mm/min) |
|---------------|--------------------|----------------|--------------|----------------|---------------------|
| ビードオン プレート | 受入れのまま | 室 温 | 25 | 180 | 150 |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : インプラント試験法 (Fig.1 参照)

試験片形状 (Specimen configuration) : インプラント試片 (Fig.1 参照)

試験条件 (Test condition) : 拡散性水素量 12.5ppm

試験結果 (Test result) : (a)負荷応力 80kgf/mm² のとき破断時間 2.2min(b)負荷応力 70kgf/mm² のとき破断時間 100min

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

インプラント試験は Fig.1 に示すごとく簡便な装置により行なった. 試片形状は Fig.1 に示すごとく寸法とし, 通常のインプラント試片のごとき円周切欠は付していない. 荷重負荷は試片のボンド部にての温度が 100℃になってから行なった.

Fig.2 は負荷応力 80kgf/mm² で 2.2min にて破断した試片のマクロ破面を示す. この

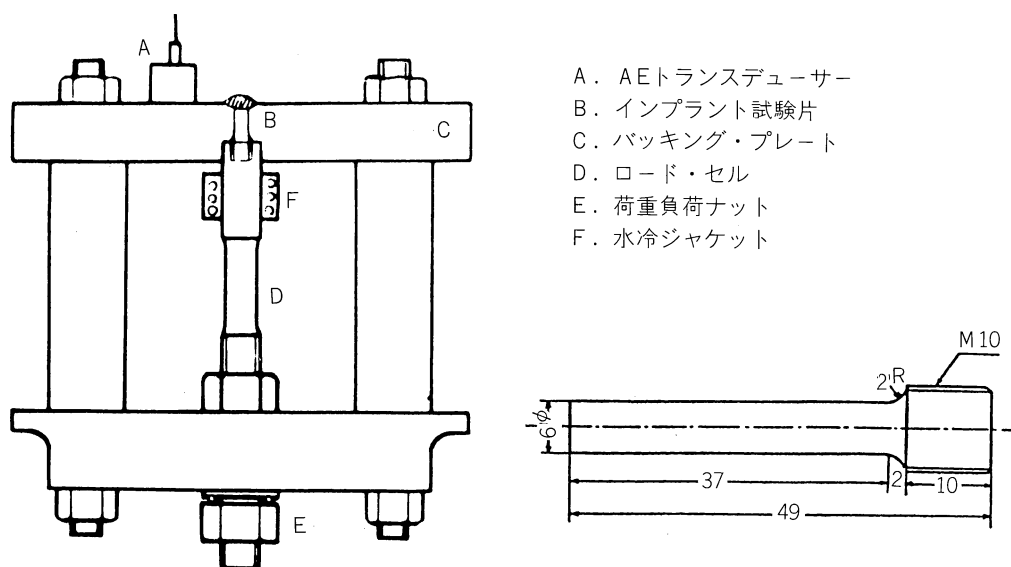


Fig.1 インプラント試験機および試験片形状

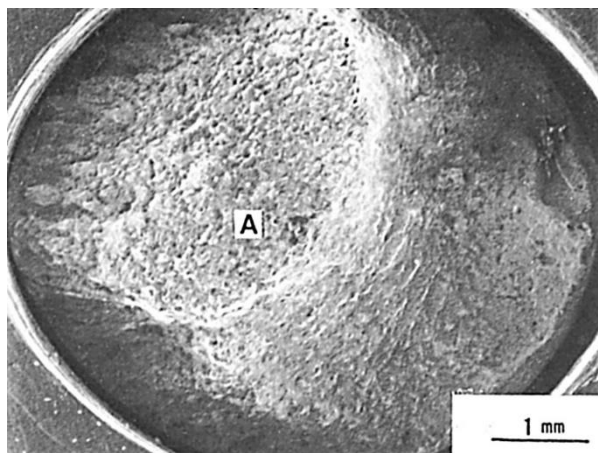


Fig.2 低温割れ破面（負荷応力 80kgf/mm^2 ，破断時間 2.2min ）

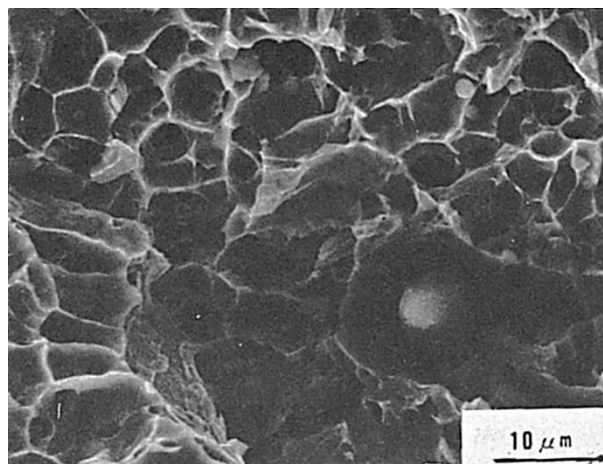


Fig.3 デンプル破面 (Fig.2 の A 部)

試片の遅れ破壊が生じる負荷応力範囲は引張強さ 88kgf/mm^2 から下部限界応力 65kgf/mm^2 であるが、負荷応力が高く、しかも破断時間が短かいため、遅れ割れ発生に対して水素の影響が少なく、巨視的にすべて延性破面であった。Fig.3 は Fig.2 の A 部を示し、急速破断にともなうディンプル (Dimple) 模様が認められた。

Fig.4 は負荷応力 70kgf/mm^2 で約 100min にて破断した試片のマクロ破面を示す。割れは試片の円周縁 A から生じており、その領域では Fig.5 および Fig.6 のに示すごとくマルテンサイトおよびベイナイト・ラスと関連した水素脆化擬へき開破面 (QC_{HE}) を示し、ラス境界にて二次割れが認められた。Fig.7 は Fig.4 の B の領域であり急速破断にともなうディンプル模様が認められた。

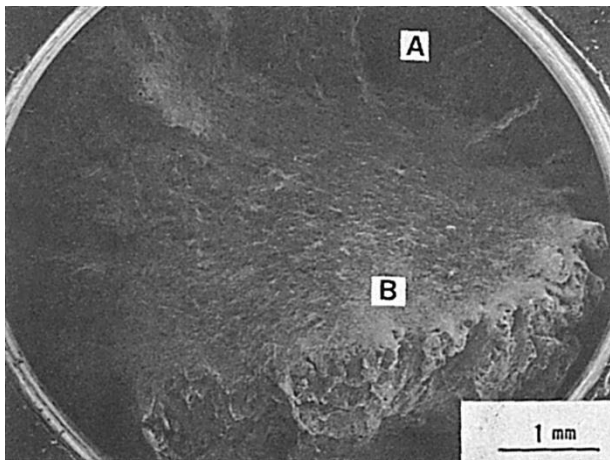


Fig.4 低温割れ破面（負荷応力 70kgf/mm^2 ，破断時間 100min）

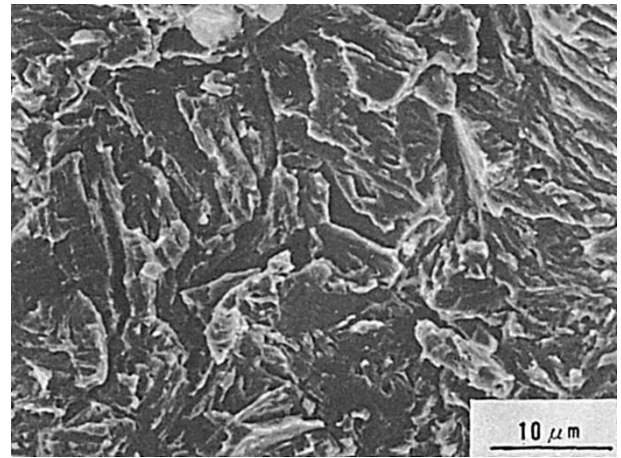


Fig.5 水素脆化擬へき開破面， QC_{HE} （Fig.4 の A 部）

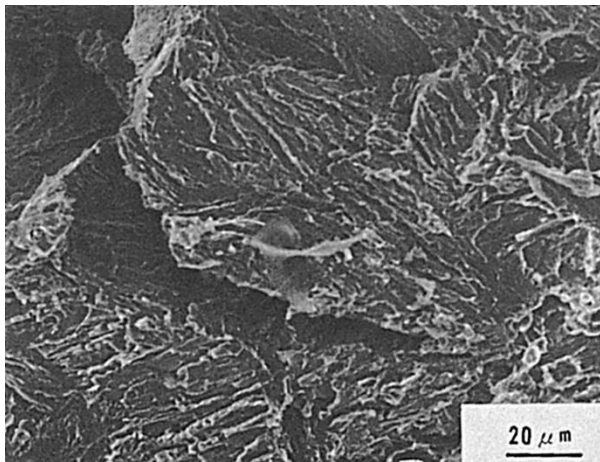


Fig.6 水素脆化擬へき開破面， QC_{HE} （Fig.4 の A 部）

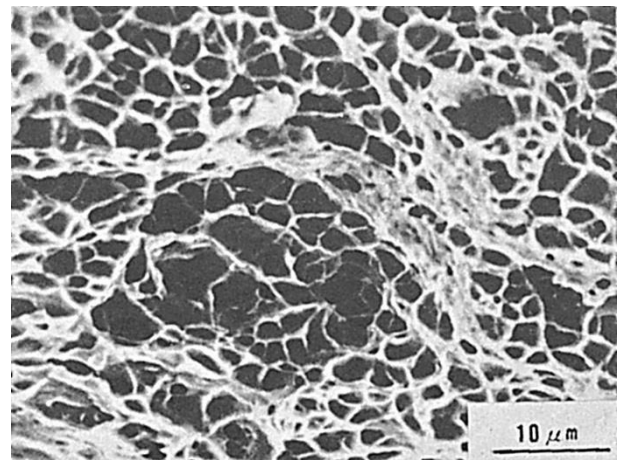


Fig.7 デンプル破面(Fig.4 の B 部)

(32) HT50 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面(その 1)

— 斜め Y 形溶接割れ試験 —

(32) Fracture Surface of Root Crack for HT50 Steel
by Shielded Metal-arc Welding (I)

— Oblique-Y Groove (Tekken-type) Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM50 (板厚 32mm).

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

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

| | C | Si | Mn | P | S |
|-----------|------|------|------|-------|-------|
| 母 材 | 0.19 | 0.44 | 1.41 | 0.027 | 0.015 |
| 溶着金属(分析例) | 0.04 | 0.49 | 1.05 | 0.010 | 0.008 |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|---------|--------------------------------|---------------------------------------|------------|-------------------------|
| 溶 着 金 属 | 54 | 46 | 33 | 21 at 20℃ |

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 | 予 熱 温 度 (℃) | アーク電圧 (V) | 溶 接 電 流 (A) | 溶 接 速 度 (mm/min) | 積 層 方 法 |
|---------|--------|----------------|--------------|----------------|---------------------|----------|
| y 形 | な し | 室 温 | 26 | 170 | 150 | 1 層 1 パス |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 斜め Y 形溶接割れ試験 (JIS Z3158)

試験片形状 (Specimen configuration) : JIS Z3158

試験条件 (Test condition) : 溶接後 48hrs にて, 断面試験

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は 50 キロ級高張力鋼の斜め Y 形溶接割れ試験で生じた低温割れの断面マクロ組織であり, 割れはルート部から発生すると同時に, 止端部からも発生し, 熱影響部に沿って進展していた. これを強制的に破断したマクロ破面を Fig.2 に示す. 又マクロ破面のスケッチを Fig.3 に示す. マクロ破面は比較的平坦で灰白色を呈していた.

Fig.3 のスケッチでルート部に近い破面 (A, B, C) を拡大したミクロ破面を Fig.4~7 に示す. Fig.4 は比較的低倍率で観察した結果であるが, それをさらに拡大して



Fig.1 破断経路

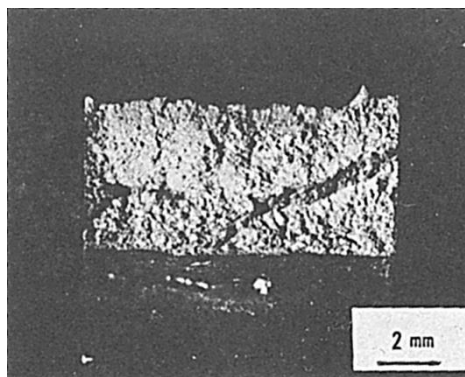


Fig.2 マクロ破面

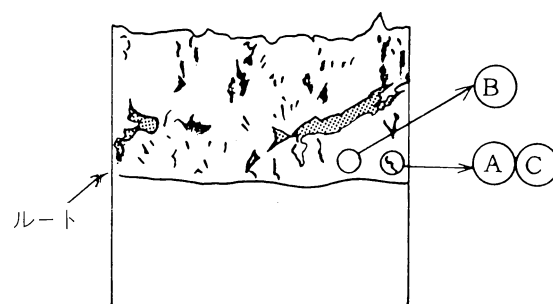


Fig.3 マクロ破面のスケッチ

観察すると Fig.5, 6 および 7 のごとくであった。Fig.5 および Fig.6 より、ミクロ破面のほとんどが粒内破面であり、一部に粒界破面も見られた。粒内割れは、水素脆化破面として、Fig.5 のように、水素擬へき開破面が見られた。

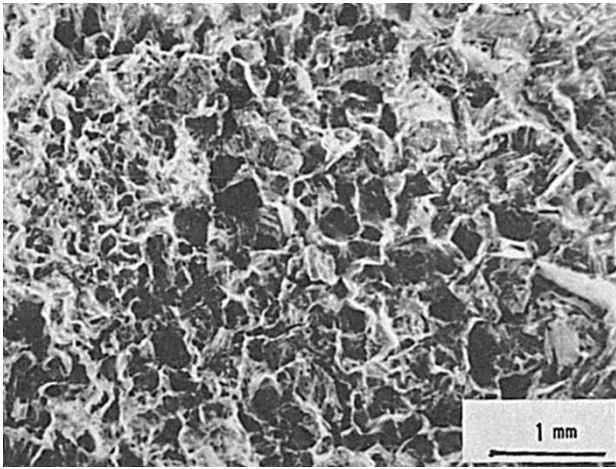


Fig.4 粒界破面 (Fig.3 のⒶ部)

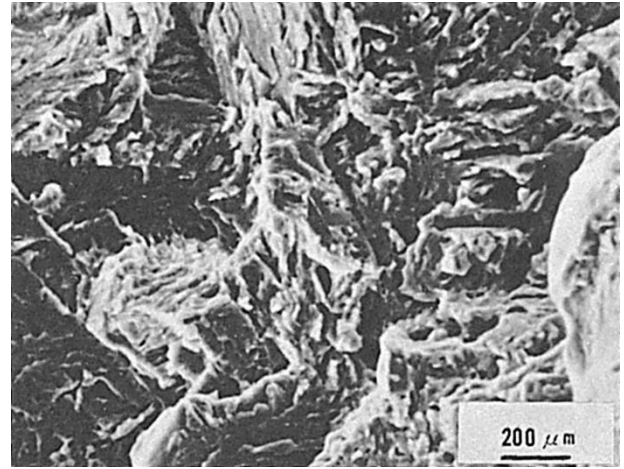


Fig.5 水素擬へき開破面 (Fig.3 のⒷ部)

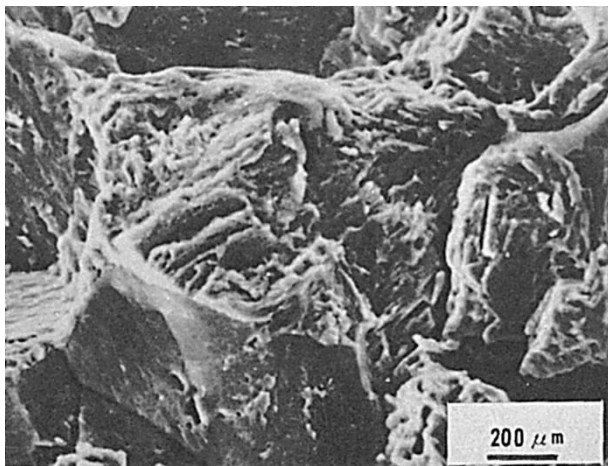


Fig.6 水素擬へき開破面および部分的に粒界破面が認められる (Fig.3 のⒸ部)

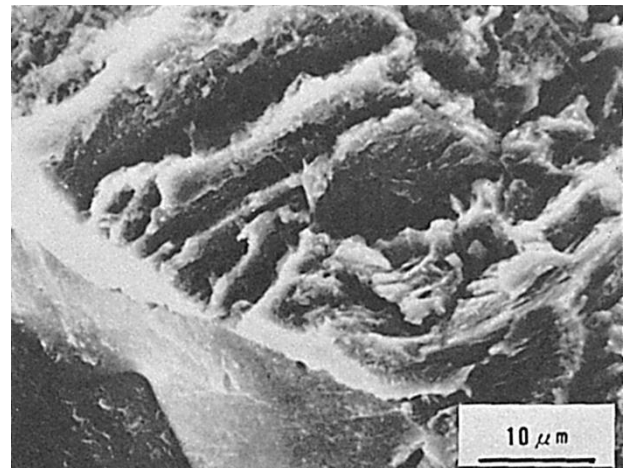


Fig.7 水素擬へき開破面 (Fig.6 の拡大)

(33) HT50 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面(その 2)

— 斜め Y 形溶接割れ試験 —

(33) Fracture Surface of Root Crack for HT50 Steel
by Shielded Metal-Arc Welding (II)

— Oblique-Y Groove (Tekken-Type) Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM50B (板厚 20mm).

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

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

| | C | Si | Mn | P | S |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 母 材 (規格値) | ≤0.18 | ≤0.55 | ≤1.50 | ≤0.04 | ≤0.04 |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|-----------|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 (規格値) | 50~62 | ≥32 | ≥21 | ≥2.8 at 0°C |

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 | 予熱温度 (°C) | アーク電圧 (V) | 溶接電流 (A) | 溶接速度 (mm/min) | 積層方法 |
|------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------------|-------|
| y 形 | 350°C×1hr | 室温 | 25 | 170 | 150 | 1層1パス |

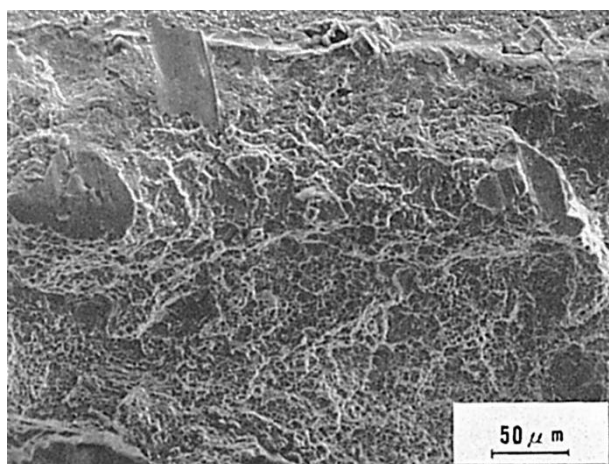
試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 斜め Y 形溶接割れ試験 (JIS Z3158)

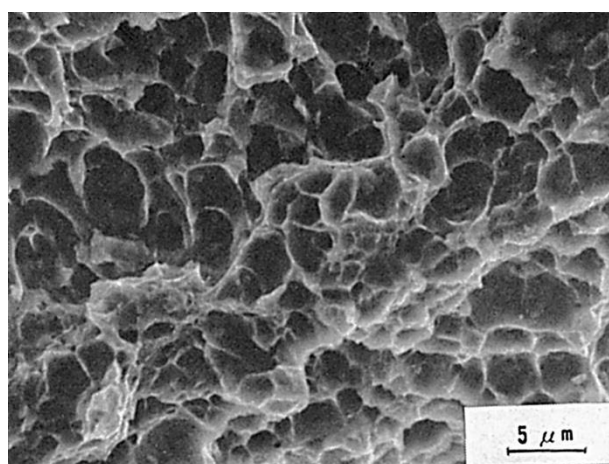
試験条件 (Test condition) : 拡散性水素量 H_{JIS}4.0ml/100g, 溶接後 48hrs にて断面検査

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

本試験での割れは斜め Y 形溶接割れの典型例で, 鈍角側のルート部より発生し, HAZ 部を数 mm 伝ばしていた. ルート部においては, Fig.1 にみられるように典型的なディンプル・パターン (Dimple pattern) を呈した. しかし, ルート部から 1mm 伝ばした部分では Fig.2 にみられるように二次割れを有する擬へき開破面で, 部分的に粒界破面が認められた. インプラント試験における低温割れにおいて, 高応力下での破面はディンプルを示すという報告があり, ルート割れ発生部にディンプルが生じたのは, 比較的大きな応力が作用していたためと考えられる.

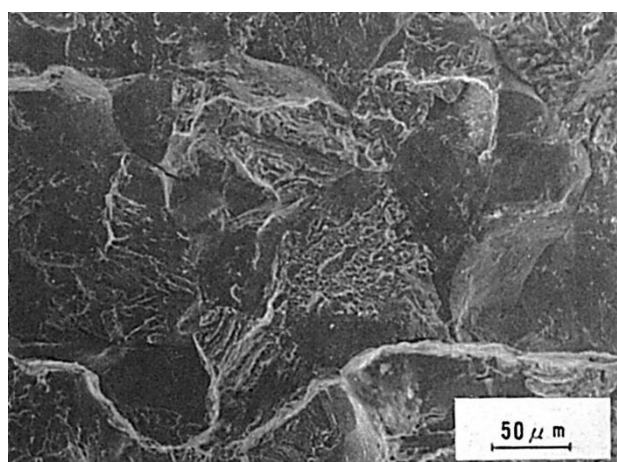


(a)低倍率

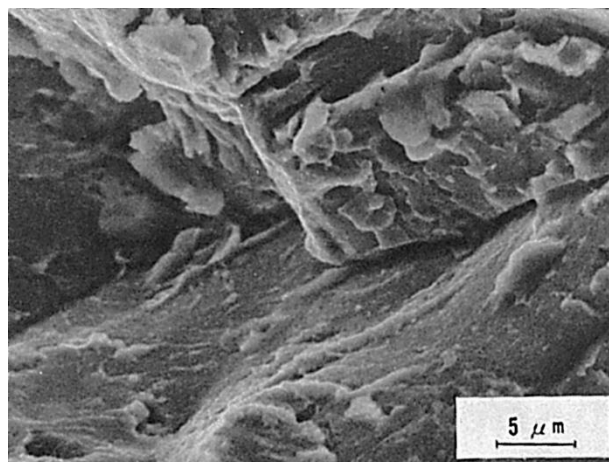


(b)高倍率

Fig.1 ルート部に生じた割れのマイクロ破面，ディンプル破面



(a)低倍率



(b)高倍率

Fig.2 ルート部から 1mm の位置での破面，擬へき開破面

(34) HT50 鋼の TIG 溶接金属におけるルート割れ破面

— H 型拘束割れ試験 —

(34) Fracture Surface of Root Crack in Weld Metal for HT50 Steel by TIG Arc Welding

— H-Slit Weld Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM50B

溶接材料 (Welding material) : 0.11%C-0.75%Si-1.35%Mn 系ワイヤ

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

| | C | Si | Mn | P | S |
|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 母 材 (規格値) | ≤0.18 | ≤0.55 | ≤1.50 | ≤0.040 | ≤0.040 |

機械的性質 (Mechanical property)

| | 引 張 強 さ (kgf/mm ²) | 降 伏 点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²) |
|-----------|-----------------------------------|--|
| 母 材 (規格値) | 50~62 | ≥32 |

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : TIG 溶接 (TIG arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

| 開 先 形 状 | 積 層 方 法 | シールドガス |
|---------|----------|-----------------------|
| レ 形 | 1 層 1 パス | Ar+2.5%H ₂ |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : H 型拘束割れ試験

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

H 型拘束割れ試験は Fig.1 に示す 45° レ型開先とし、溶加材を用いた TIG 溶接により 1 層 1 パス溶接を実施した。溶接金属は供試ワイヤの化学成分のため極めて高強度を有していた。雰囲気ガスは種々変化させたが、100%アルゴンとした場合、24hrs 経過した後に割れは溶接金属表面に認められた。一方、アルゴンガスに水素を混入させると、溶接金属中の水素量が増加し、割れは溶接金属表面の温度が 150℃になるまでにビート表面に開口して認められた。したがって、後者の割れは通常の低温割れが生じる温度域の高温側あるいはそれ以上の温度で生じたものと考えられる。Fig.2 はその割れのスケッチ図を示す。Fig.3 はその割れ破面を示す。割れは Fig.3 に示すごとく柱状晶の成長方向に関連しており、これを拡大すれば Fig.4 に示すごとくで、水素により生じた擬へき開破面である。また、その内部には一部分に粒界破面が認められた。なお、擬へき開破面の周辺はディンプル (Dimple) 破面であった。Fig.5 および Fig.6 は溶接ビート表面近傍で認められた破面形態を示し、ディンプル破面が支配的であるが、部分的に水素擬へき開破面も認められた。

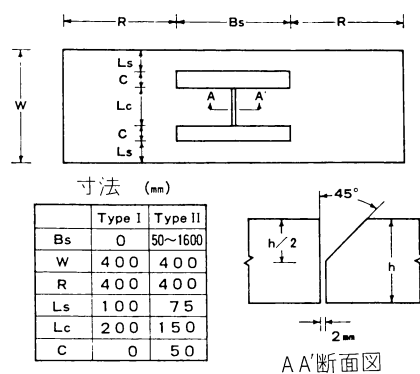


Fig.1 試片形状

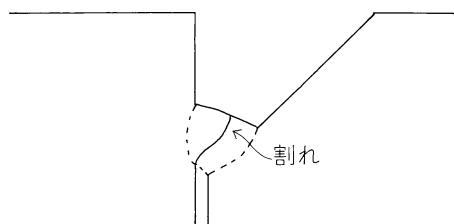


Fig.2 割れのスケッチ図

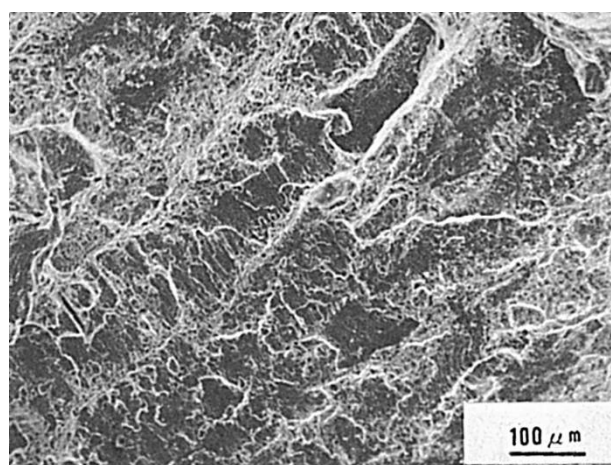


Fig.3 ルート割れのマイクロ破面

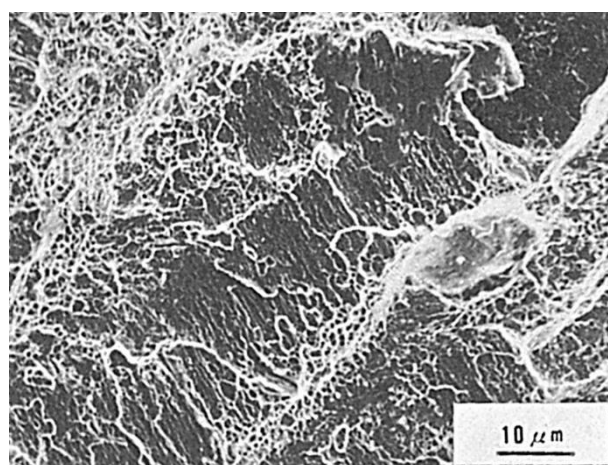


Fig.4 柱状晶の成長方向に沿う割れ破面
(Fig.3 の拡大)

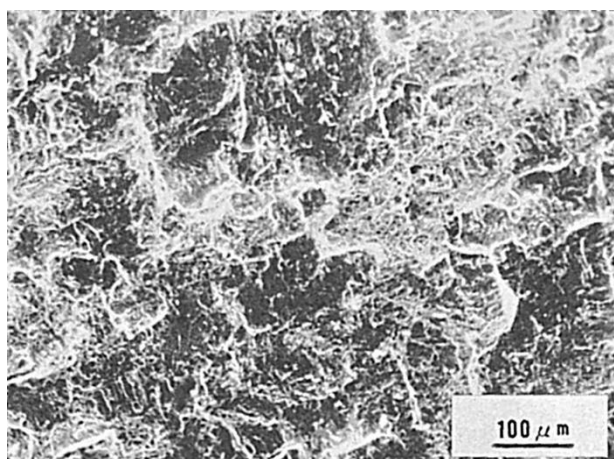


Fig.5 ビート表面近傍の割れ破面

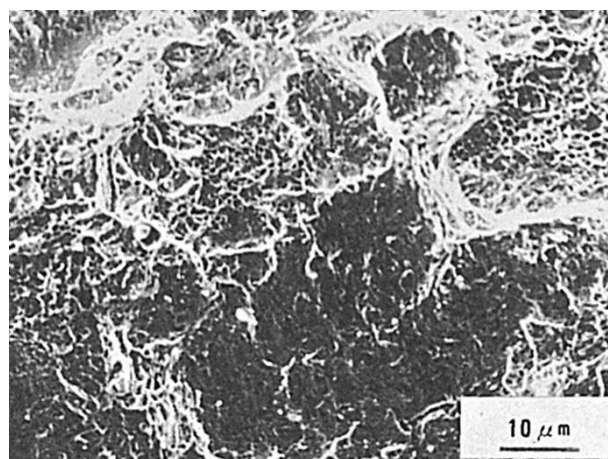


Fig.6 ディンプル破面と水素擬へき開破面
(Fig.5 の中央部の拡大)

(35) HT50 鋼の水中での被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面

— 斜め Y 形溶接割れ試験 —

(35) Fracture Surface of Root Crack in Underwater Weld of HT50 Steel

— Oblique-Y Groove (Tekken-Type) Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM50A (板厚 12mm).

溶接材料 (Welding material) : ライムチタニア系軟鋼用被覆アーク溶接棒

D4303 (径 4mm).

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

| | C | Si | Mn | P | S |
|-----------|------|------|------|-------|-------|
| 母 材 | 0.17 | 0.36 | 1.38 | 0.022 | 0.006 |
| 溶着金属(分析例) | 0.08 | 0.09 | 0.35 | 0.014 | 0.012 |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|-----------|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 | 57 | 39 | 25 | — at — °C |
| 溶着金属(規格値) | ≥43 | ≥35 | ≥22 | ≥2.8 at 0 °C |

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : グラビティ溶接 (Gravity 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) | 運 棒 比 | 水深 (cm) |
|---------|--------------------|--------------|----------------|---------------------|-------|---------|
| y 形 | 100°C | 34 | 200(DCSP) | 150 | 1 | 30(水道水) |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 斜め Y 形溶接割れ試験 (JIS Z3158)

試験片形状 (Specimen configuration) : JIS Z3158

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

この試片においてルート割れは熱影響部から発生、伝ばし、完全破断に至っていた。Fig.1 は低倍率で観察したルート付近の破面の一例を示し、その最下端付近がルート端である。破面に見られる横方向の筋模様は圧延組織の影響によるものである。Fig.2 は Fig.1 の中央部を拡大して示し、主として粒界破面と一部に水素擬へき開破面が見られた。また Fig.3 は Fig.1 のルート端の近傍を拡大して示した。破面は擬へき開状であるが、かなり大きな塑性変形を受けており、ディンプル・パターン (Dimple pattern) も認められた。Fig.4 および Fig.5 はルート部以外の破面の例を示す。Fig.4 では粒界破面と水素擬へき開破面が混在して見られた。Fig.5 では水素擬へき開破面が大きく広がっていた。

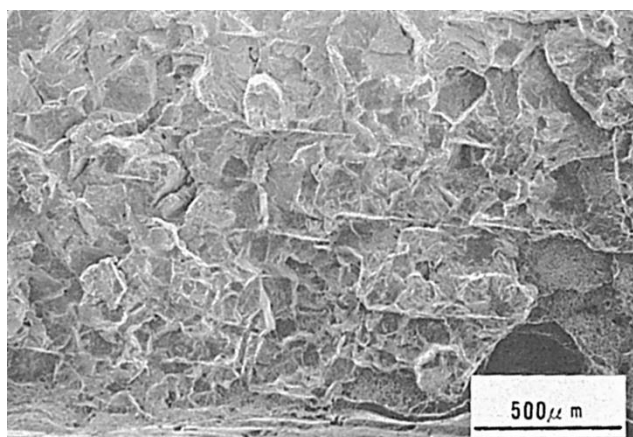


Fig.1 低倍率で観察したルート付近のマイクロ破面の一例

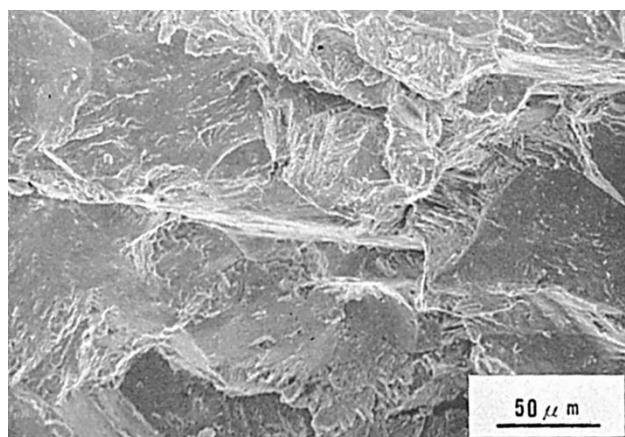


Fig.2 Fig.1 の中央部の拡大

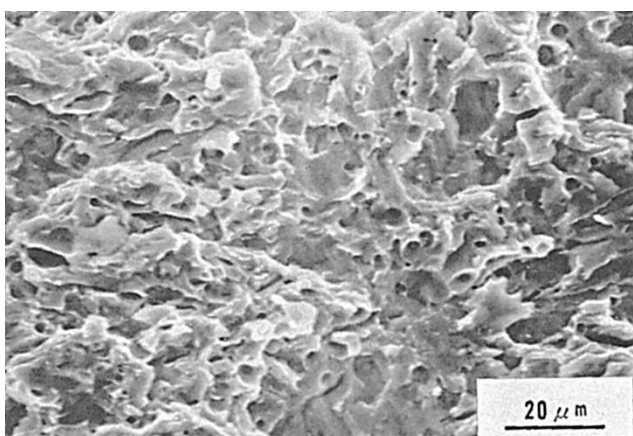


Fig.3 Fig.1 の左下部の拡大

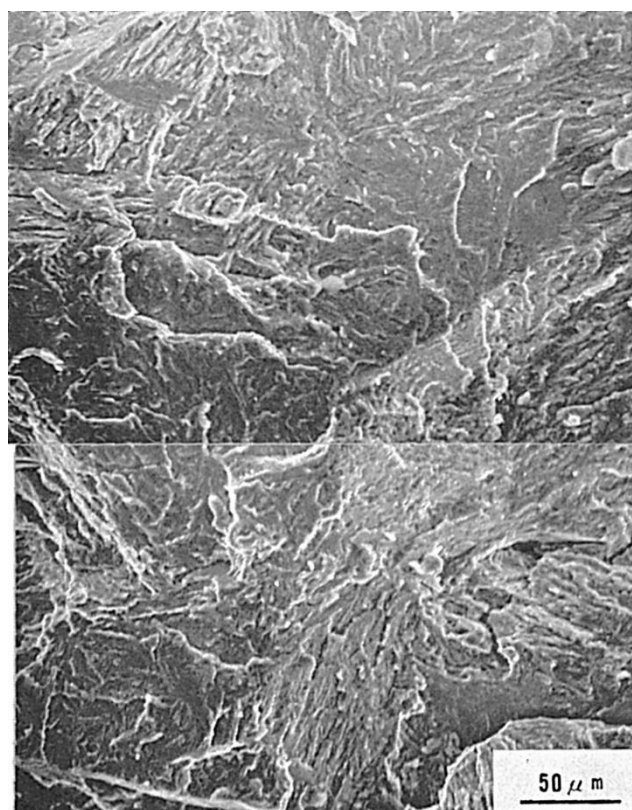


Fig.5 ルート部以外の破面の一例

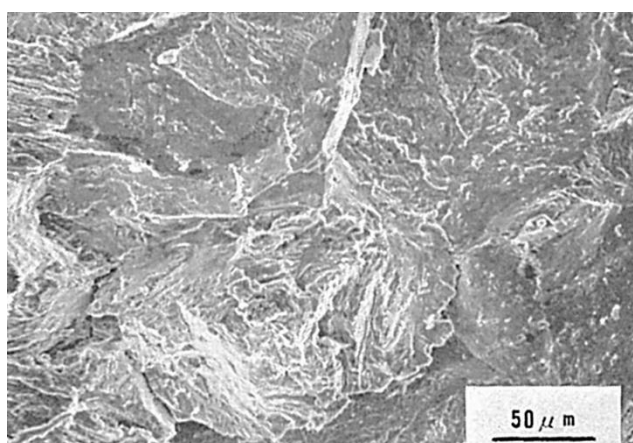


Fig.4 ルート部以外の破面の一例

(36) HT60 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面

— TRC 試験 —

(36) Fracture Surface of Root Crack for HT60 Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— TRC Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM58Q (板厚 32mm).

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

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

| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Mo | V |
|---------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 母 材 | 0.14 | 0.22 | 1.30 | 0.022 | 0.004 | 0.17 | 0.07 | 0.04 |
| 溶 着 金 属 (分析例) | 0.07 | 0.42 | 1.12 | — | — | 0.73 | 0.22 | — |

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 | 66 | 56 | 44 |
| 溶 着 金 属 (測定例) | 64 | 55 | 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 | 溶 接 棒 の 乾 燥 条 件 | 予 熱 温 度 (℃) | アーク電圧 (V) | 溶 接 電 流 (A) | 溶 接 速 度 (mm/min) |
|---------|--------------------|----------------|--------------|----------------|---------------------|
| Y 形 | 350℃×1hr | 室 温 | 25 | 170 | 150 |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : TRC 試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 試験片幅 35mm, (但し溶接時にはタブ板をつけた)

試験条件 (Test condition) : 負荷応力 54kgf/mm² および 72kgf/mm²

試験結果 (Test result) : 上記の試験条件にて破断時間はそれぞれ 119min および 70min

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

いずれの負荷応力においてもルート割れはまず HAZ において発生し, HAZ を伝ばした後, 溶接金属内に折れ曲っていた. HAZ を伝ばする長さは負荷応力の低い場合の方が長かった.

まず負荷応力 54kgf/mm² の場合の HAZ のルート割れの破面の例を Fig.1 および Fig.2

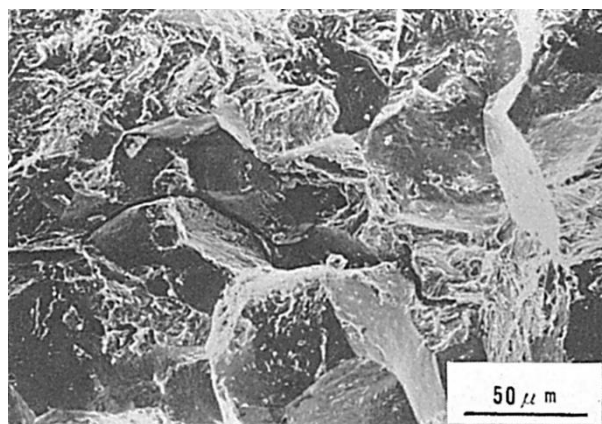


Fig.1 負荷応力 54kgf/mm² の場合の HAZ のルート割れの破面の例

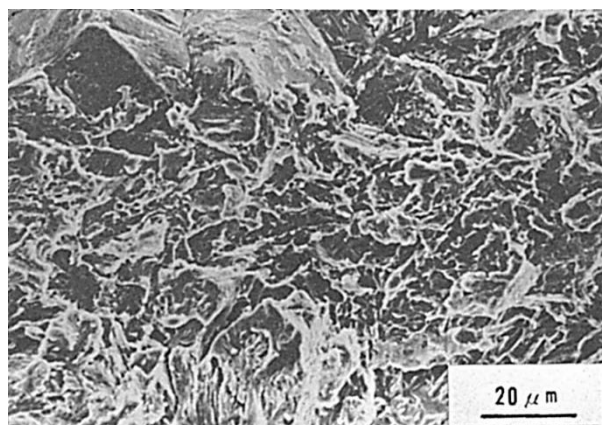


Fig.2 負荷応力 54kgf/mm² の場合の HAZ のルート割れの破面の例

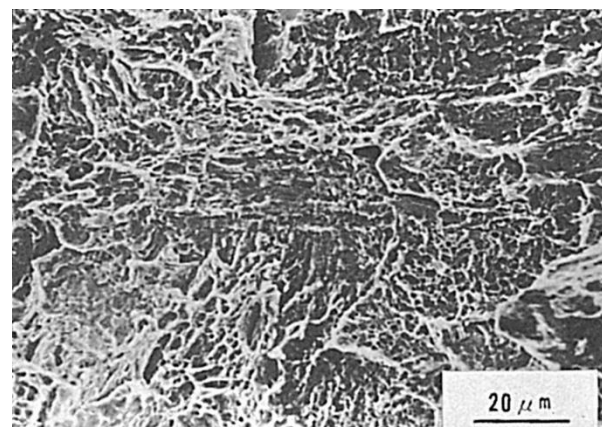


Fig.3 負荷応力 72kgf/mm² の場合の HAZ のルート割れの破面の例

に示す。破面はこのように粒界破壊および水素擬へき開破壊の混在からなっていた。一方、Fig.3は負荷応力 72kgf/mm^2 の場合の HAZ のルート割れ破面を示す。粒界破壊は見られず、破面は主として水素擬へき開的であるが、ディンプル（Dimple）も比較的多く混在していた。しかも水素擬へき開的な部分も Fig.2 に比して明らかに大きな塑性変形を受けていることがわかる。したがって同じような HAZ のルート割れであっても、粒界割れの有無、水素擬へき開破面の塑性変形の程度、およびディンプル量などに負荷応力の違いが反映している。

溶接金属内の破面としては、いずれも Fig.4 と Fig.5 に示すような等軸あるいはせん断形ディンプルが見られた。この場合、ビート表面付近になるほど、せん断形ディンプルが顕著であった。

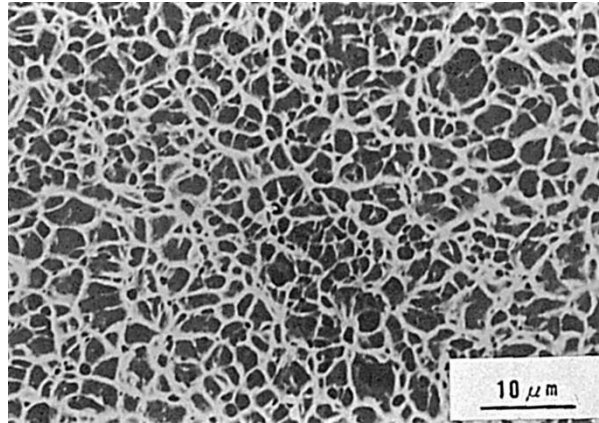


Fig.4 溶接金属の破面の例

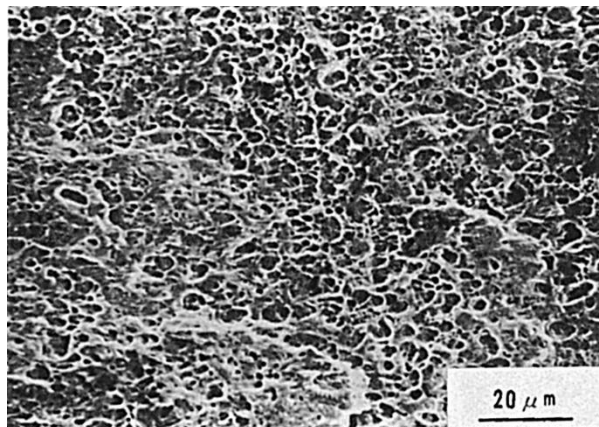


Fig.5 溶接金属の破面の例

(37) HT60 鋼の MAG 溶接部におけるルート割れ破面

— RRC 試験法 —

(37) Fracture Surface of Root Crack for HT60 Steel by MAG-Arc Welding

— Rigid Restraint Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM58Q (板厚 28mm).

溶接材料 (Welding material) : 炭酸ガスアーク溶接用鋼ワイヤ (HT60 用) (径 1.2mm).

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

| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 母 材 | 0.15 | 0.30 | 1.25 | 0.020 | 0.005 | 0.25 | 0.03 | 0.12 |
| 溶 着 金 属 | 0.08 | 0.76 | 1.22 | 0.014 | 0.005 | — | — | 0.40 |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|---------|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 | 69 | 59 | 27 | — at — °C |
| 溶 着 金 属 | 71 | 61 | 29 | 12 at 0 °C |

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : MAG 溶接 (MAG-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 | シールドガス |
|---------|--------------|--------------|-------------|------------------|----------|------------------------------|
| 45° レ 形 | 12 | 26 | 260 | 200 | 1 層 1 パス | 80%Ar+ 20%CO ₂ |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : RRC 試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 板厚 28mm, ルート・フェイス 14mm, ルート・ギャップ 2mm, 板巾 400mm

試験条件 (Test condition) : 予熱なし, 拘束度 2100kgf/mm・mm, 平均のど厚 7.4mm

試験結果 (Test result) : 溶接後 90min で拘束応力 55kgf/mm² に達し, その後低下し, 140min で溶接部破断

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

HT60 鋼を用い, CO₂ を含むアルゴン・ガス・シールドアーク溶接 (MAG 溶接) 部の低

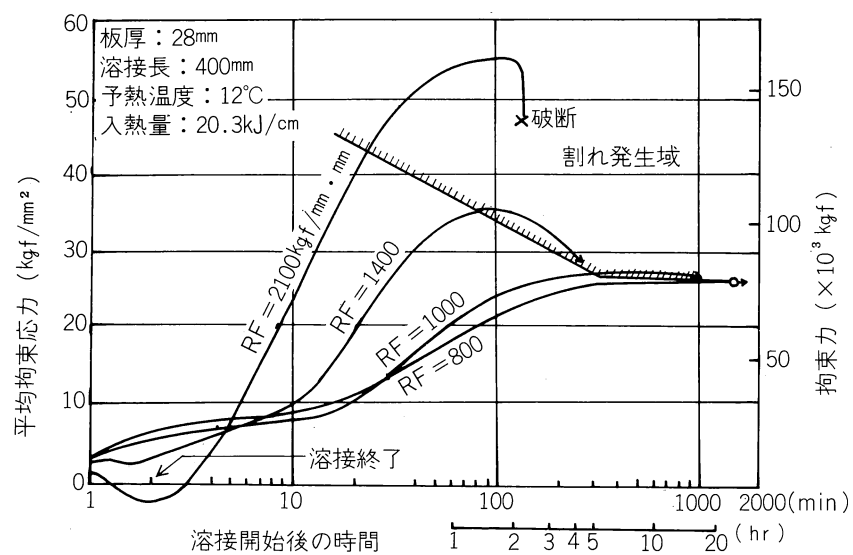


Fig.1 拘束応力の発生および割れ発生域

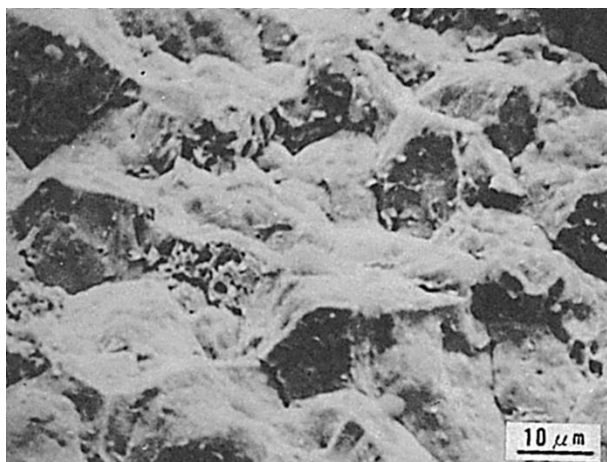


Fig.2 粒界破面 (ルート部近傍)

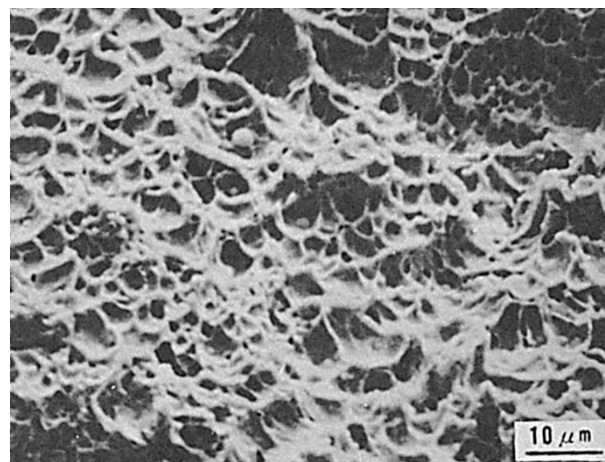


Fig.3 ディンプル破面

温割れを RRC 試験法で継手部の拘束度（RF）を変化させて検討した．供試材は板厚 28mm，溶接長 400mm である．

Fig.1 は拘束度を変化させた時の溶接開始後の経過時間と拘束応力の変化状況および割れの発生域を示す．拘束度が大きいと溶接部に発生する拘束応力も高くなる．拘束応力が最大に達した後，それが低下するのは溶接部に割れが発生したためである．この材料は拘束度 800kgf/mm・mm では割れなかった．観察した割れの破面は拘束度 2100kgf/mm・mm の場合で，溶接後約 2 hrs で溶接部が完全に破断したものである．試料は溶接線中央から約 50mm クレータ側の部分（Fig.2～Fig.5）と，クレータに隣接する部分（Fig.6, Fig.7）から採取した．

Fig.2 はルート部近傍の破面で粒界破壊であった．これは拡散性水素の影響を受けたものと考えられ，割れの起点と推定される．

Fig.3 は粒界破面から連なるディンプル（Dimple）の延性破面を示す．割れの進展に伴い溶接部の断面減少により拘束応力が上昇して破壊したものと考えられる．

Fig.4 はビート表面に近い位置で観察された破面でディンプルを含んだへき開破面を示す．これは割れが，さらに進み溶接部の拘束応力が高くなり，高速で割れが進んだためと推定される．

Fig.5 は比較的ルート部に近い所で観察された破面を示す．ディンプルを含んでいるが水素脆化を示す破面と考えられる．

Fig.6 は溶接線終端のクレータに隣接する溶接金属内でビート表面に近い部分の破面を示す．ディンプルが引伸されており，せん断破壊であった．これは母材開先の上下方向へのくい違いによるものと推定される．

Fig.7 は Fig.6 と同一試料で溶接断面中央部の破面で，へき開破壊を示す．

以上の観察のように HT60 鋼 MAG 溶接部の低温割れ破面内において種々の破壊形式が認められた．

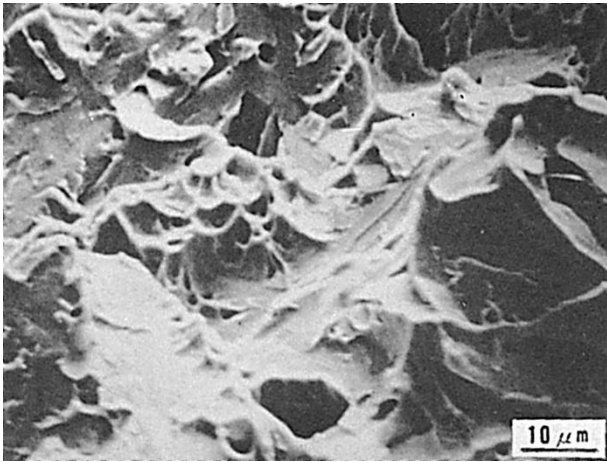


Fig.4 ディンプル破面を含むへき開破面
(ビート表面近傍)

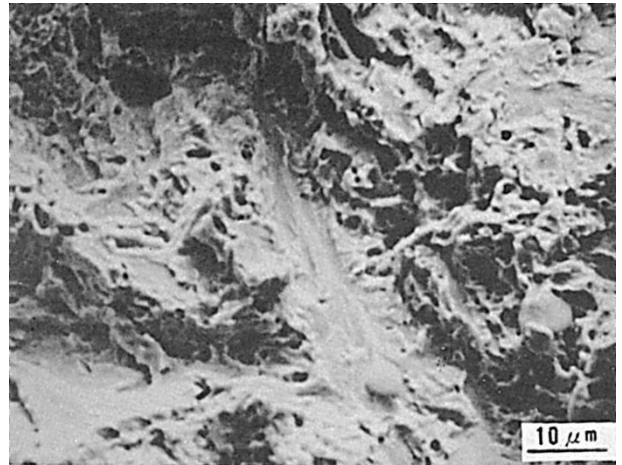


Fig.5 ディンプル破面を含む擬へき開破面

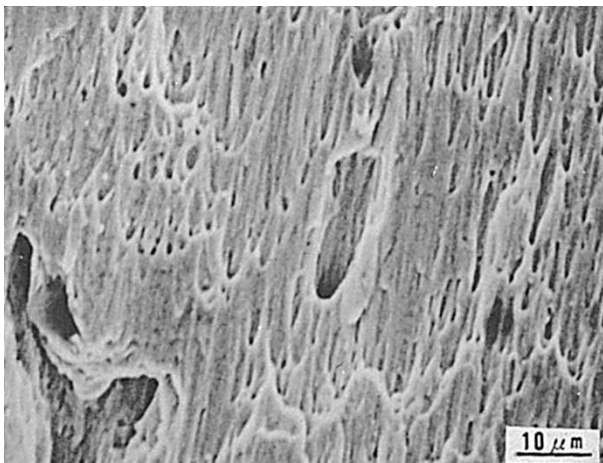


Fig.6 セン断形ディンプル破面 (ビート表面近傍)

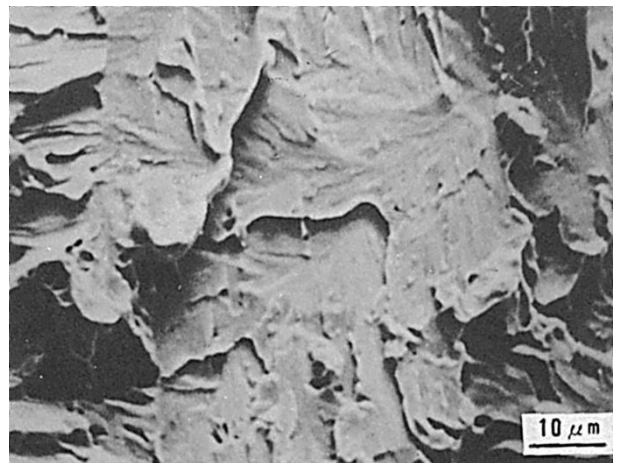


Fig.7 へき開破面 (溶接金属中央部)

(38) HT60 鋼の被覆アーク溶接金属におけるルート割れ破面

— LB-TRC 試験 —

(38) Fracture Surface of Root Crack in Weld Metal for HT60 Steel
by Shielded Metal-Arc Welding

— LB-TRC Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 SM58Q (板厚 35mm).

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

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

| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Mo | Cr | V |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|
| 母 材 | 0.13 | 0.34 | 1.33 | 0.019 | 0.008 | 0.02 | 0.021 | 0.02 | 0.04 |
| 溶 着 金 属 | 0.07 | 0.53 | 1.14 | 0.008 | 0.005 | 0.60 | 0.26 | — | — |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|-----------|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 | 67 | 59 | 26 | 21 at -5°C |
| 溶着金属(測定例) | 66 | 55 | 30 | 15 at -20°C |

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 温 度 (°C) | アーク電圧 (V) | 溶 接 電 流 (A) | 溶 接 速 度 (mm/min) |
|---------|--------------------|-----------------|--------------|----------------|---------------------|
| U 形 | 350°C×1hr | 室 温 | 25 | 170 | 150 |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : LB-TRC 試験

試験片形状 (Specimen configuration) : F. Matsuda, et al : Trans. JWRI, Vol.8 (1979), No.1,
p.113 参照

試験条件 (Test condition) : 溶接部が 150°Cに冷却した時, 一定荷重を溶接方向に負荷して破断させた.

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

本試験法は割れを溶接金属のみに発生させることが可能である. まず, Fig.1 および Fig.2 は負荷応力 76kgf/mm² および 102kgf/mm² にてのマクロ破面を示す. 負荷応力の低い場合, 破面は光沢をもつ垂直破断部が多く見られ, 溶接金属の柱状晶による方向性が認められた. Fig.3 はミクロ破面の一般例を示し, Fig.4 は Fig.3 の中央部を拡大して示した. 破面形態は水素擬へき開破面であるが, 比較的大きな塑性変形を受けており, またボイドも多く見られた. また Fig.5 は所々で見られた破面を示し, 中央付近を右上方向に伸びている比較的不特徴な破面は旧オーステナイト粒界に沿う粒界破面と思われる. Fig.6 は Fig.5 のほぼ中央部を拡大して示した.

垂直破断部以外では破面はせん断型ディンプル (Dimple) になっていた.

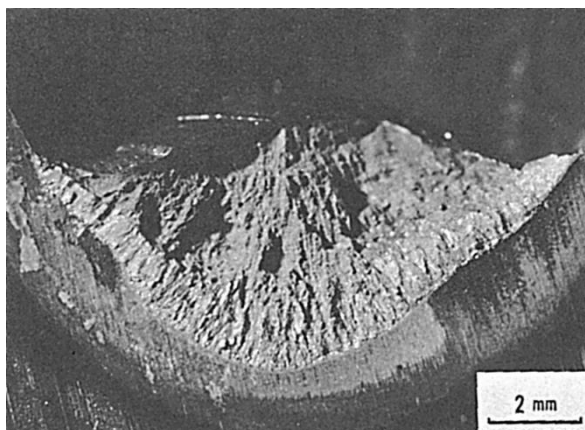


Fig.1 負荷応力 76kgf/mm² のときのマクロ破面

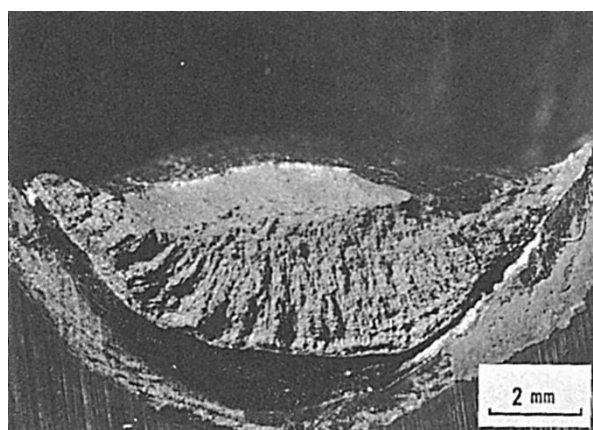


Fig.2 負荷応力 102kgf/mm² のときのマクロ破面

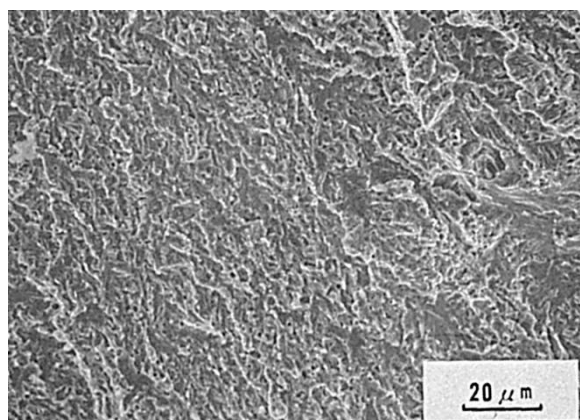


Fig.3 ミクロ破面の一般例

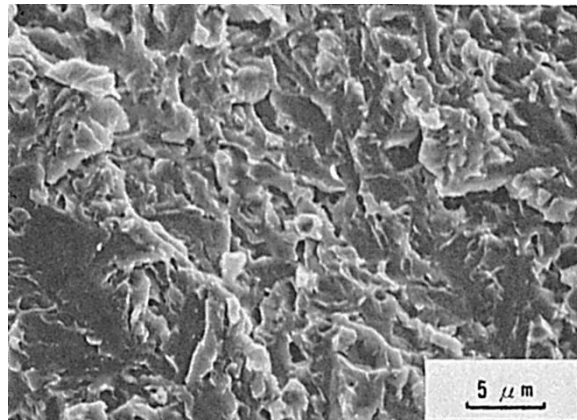


Fig.4 Fig.3 の中央部の拡大

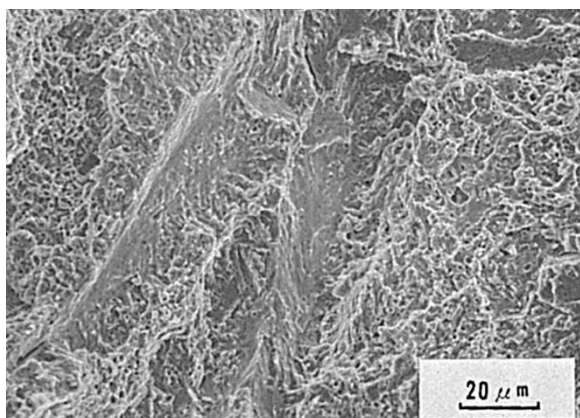


Fig.5 ミクロ破面の他の例

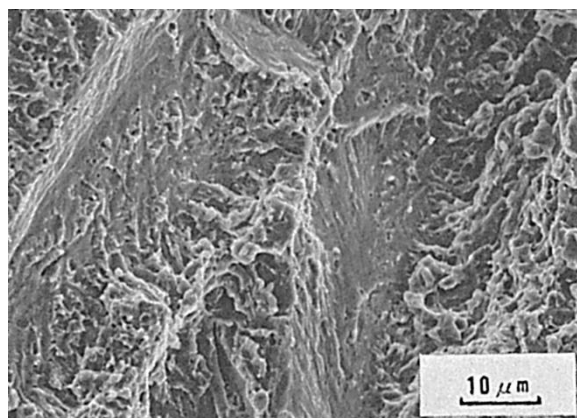


Fig.6 Fig.5 の中央部の拡大

(39) ラインパイプ用鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面

— 斜め Y 形溶接割れ試験 —

(39) Fracture Surface of Root Crack for Line Pipe Steel

by Shielded Metal-Arc Welding

— Oblique-Y Groove (Tekken-Type) Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : API 5LX X-70 用鋼板 (板厚 19mm).

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

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

| | C | Si | Mn | P | S | Nb | V | Ni | Mo |
|-----------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 母 材 | 0.12 | 0.27 | 1.54 | 0.019 | 0.002 | 0.025 | 0.067 | — | — |
| 溶着金属(分析例) | 0.07 | 0.52 | 1.16 | 0.010 | 0.006 | — | — | 0.63 | 0.26 |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|-----------|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 | 62.9 | 53.6 | 39 | 18.5 at 0°C |
| 溶着金属(測定例) | 66 | 55 | 30 | 15 at -20°C |

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 温 度 (°C) | アーク電圧 (V) | 溶 接 電 流 (A) | 溶 接 速 度 (mm/min) | 積 層 方 法 |
|---------|--------------------|-----------------|--------------|----------------|---------------------|----------|
| y 形 | 350°C×1hr | 室 温 | 25 | 170 | 150 | 1 層 1 パス |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 斜め Y 形溶接割れ試験 (JISZ3158)

試験片形状 (Specimen configuration) : JISZ3158

試験条件 (Test condition) : 溶接後 48hrs にて割れ検査

試験結果 (Test result) : ルート割れ率 90%

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

割れは Fig.1 に示すようにルート部から止端部に, ボンドに沿って貫通していた. Fig.2 はルート部近傍のミクロ破面を示すが, 粒界破面を呈しており, 二次割れが粒界に生じていた. Fig.3 は Fig.2 の中央部を拡大して示し, 粒界破面上には浅いディンプル(Dimple)が見られ, またストライエーション (Striation) 状模様も観察された.

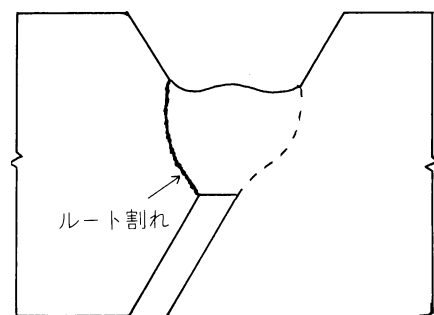


Fig.1 割れ発生状況

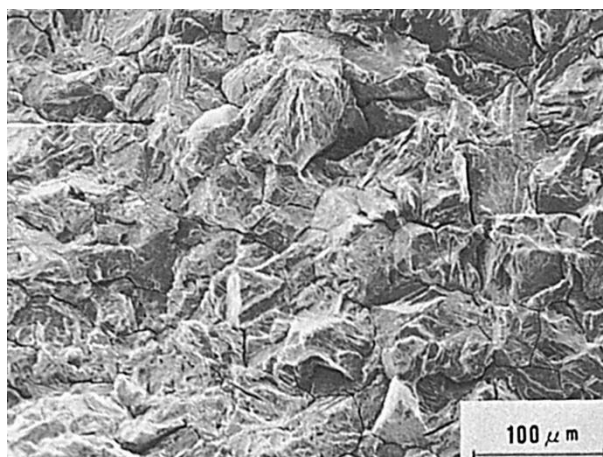


Fig.2 ルート部近傍のマイクロ破面

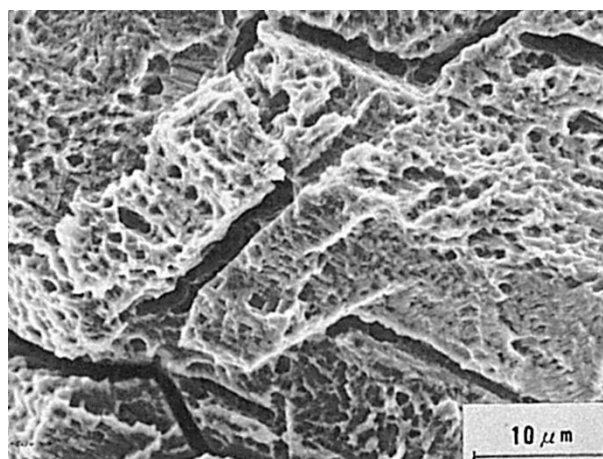


Fig.3 Fig.2 中央部の拡大写真

(40) 圧力容器用炭素鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面

— スタウト・スロット試験 —

(40) Fracture Surface of Root Crack for ASTM A537-Cl. 2 Steel
by Shielded Metal-Arc Welding

— Stout's Slot Weld Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 圧力容器用 C-Mn-Si 熱処理鋼板 ASTM A537-Class 2 (板厚
20mm に減厚)

溶接材料 (Welding material) : AWS E7010 (高セルローズ系被覆棒) (径 4mm).

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

| | C | Si | Mn | P | S |
|-----------|-------|-----------|-----------|--------|--------|
| 母 材 (規格値) | ≤0.24 | 0.13~0.55 | 0.70~1.35 | ≤0.035 | ≤0.040 |

機械的性質 (Mechanical property)

| | 引 張 強 さ (kgf/mm ²) | 降 伏 点 (0.2%耐力) (kgf/mm ²) |
|-----------|-----------------------------------|--|
| 母 材 (規格値) | 56.2~70.3 | ≥42.2 |

溶 接 (Welding)

溶接条件 (Welding condition)

| 開先形状 | 溶接棒の 乾燥条件 | 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 | 試験室温度 (°C) |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------------|----------|---------------|
| 2.4mm ギャ ップ I 形 | 室 温 | 75°C | 32 | 280 | 300 | 1 層 1 パス | 10 |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : } Welding J., Vol.55(1976), 89s~94s,
試験片形状 (Specimen configuration) : } Vol.59(1980), 76s~84s 参照
試験条件 (Test condition) : 48hrs 後, 断面検査

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

スロット試験はラインパイプのフィールド溶接性の実験室試験法として Stout により提案された。本試験では水素割れの試験法としての検討のため, 少し修正し, 2.4mm のスロットを機械加工で直接作製した。試験材厚みは 20mm と一定にした。

溶接終了後 48hrs で行なった断面検査で見つかった割れの例を Fig.1 にスケッチで示す。

Fig.2 は破面形態を示し, 粒界破面および粒内破面が混在していた。Fig.3 は Fig.2 の中央部を拡大して示すが, 部分的に粒界破面が認められ, 粒内破面は一定方向に二次割れを伴う, 水素擬へき開破面であった。

Fig.1 スロット試験において生じた割れの模式図

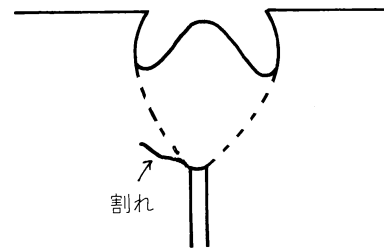


Fig.2 ルート割れ破面（粒界破面と水素擬へき開破面）

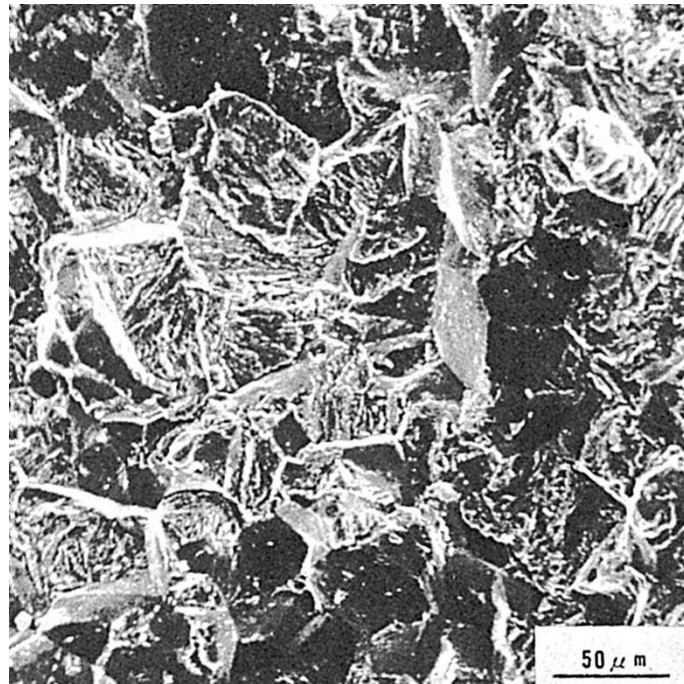
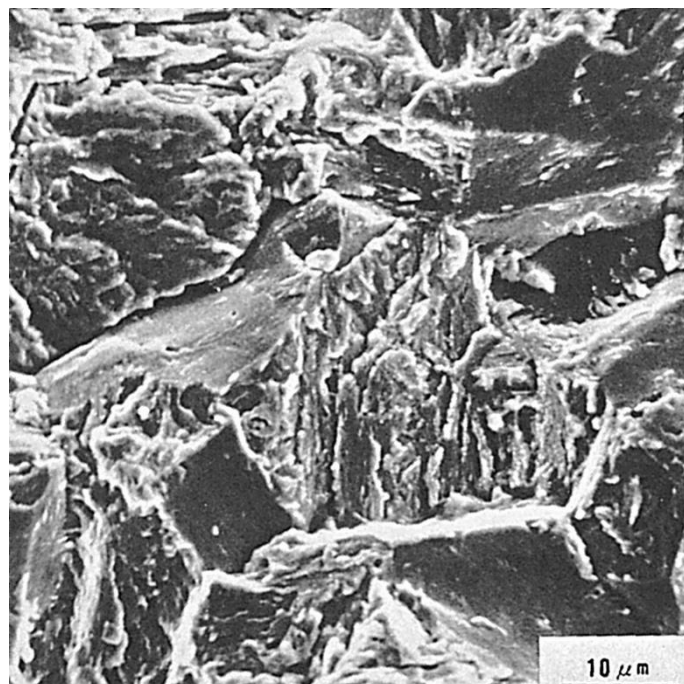


Fig.3 粒界破面と水素擬へき開破面 (Fig.2 の拡大)



(41) HT80 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面

— 斜め Y 形溶接割れ試験 —

(41) Fracture Surface of Root Crack for HT80 Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Oblique-Y Groove (Tekken-Type) Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 HT80 (板厚 30mm).

溶接材料 (Welding material) : 高張力鋼用被覆アーク溶接棒 D8016 (径 4mm).

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

| | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V | B | Pcm |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| 母材(分析例) | 0.11 | 0.30 | 0.89 | 0.008 | 0.008 | 0.26 | 0.97 | 0.46 | 0.46 | 0.03 | 0.0012 | 0.256 |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|-----|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 | 87.5 | 83.4 | 24.7 | 16.4 at -40℃ |

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 温 度 (℃) | アーク電圧 (V) | 溶 接 電 流 (A) | 溶 接 速 度 (mm/min) | 積 層 方 法 |
|---------|--------------------|----------------|--------------|----------------|---------------------|----------|
| y 形 | 350℃×1hr | 室 温 | 25 | 170 | 150 | 1 層 1 パス |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : 斜め Y 形溶接割れ試験 (JIS Z3158)

試験片形状 (Specimen configuration) : JIS Z3158

試験条件 (Test condition) : 拡散性水素量 H_{JIS} 1 ml/100g

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

本実験は斜め Y 形溶接割れ試験における割れ破面を観察するために実施した。供試材は溶接構造用圧延鋼材 HT80 であり、低水素系溶接棒 (JIS D8016) を用いて溶接した。

Fig.1 は割れ発生部のスケッチを示す。割れはルート部より発生し、HAZ 部を伝ばした後、最終的に溶接金属に入って停止していた。Fig.2 は割れ発生開始部 (ルート部) のミクロ破面を示す。割れは水素による擬へき開破面であり、粒界破面も現出していた。Fig.2 から Fig.5 は、割れが進展する順序に並べた。Fig.3 および Fig.4 も Fig.2 と同じく、典型的な高強度材の水素擬へき開破面を呈していた。一方、割れの停止する直前では、Fig.5 に示すようにディンプル破壊が支配的であった。

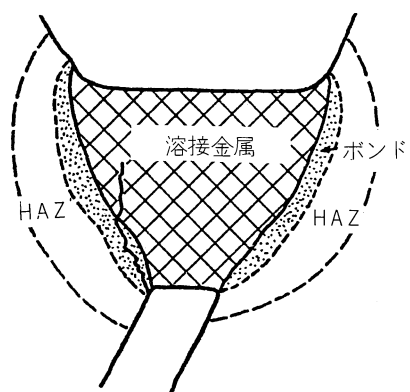


Fig.1 ルート割れ

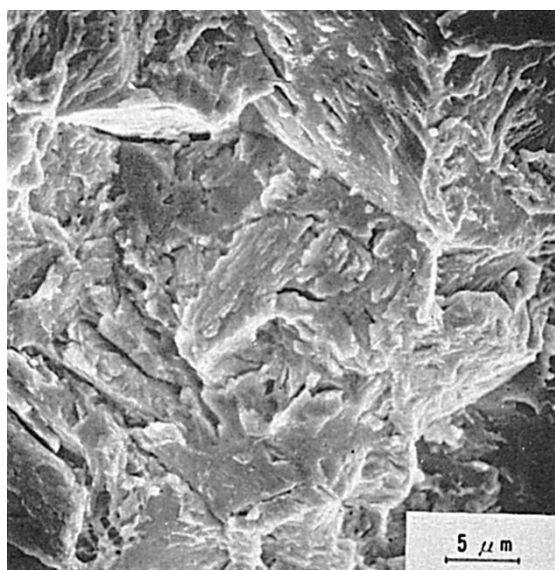


Fig.2 ルート部の破面（水素擬へき開破面）

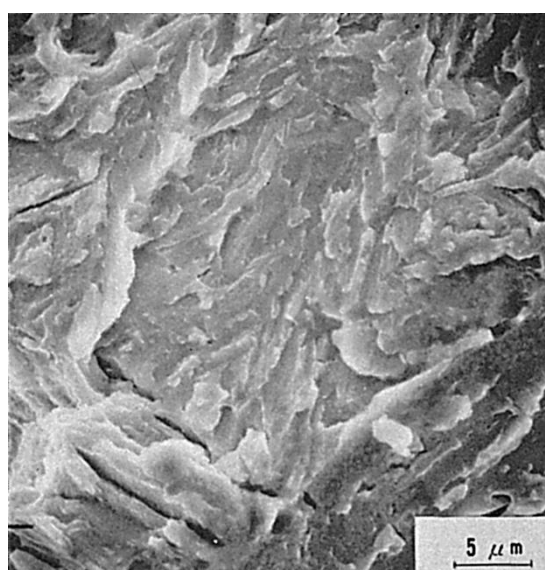


Fig.3 水素擬へき開破面

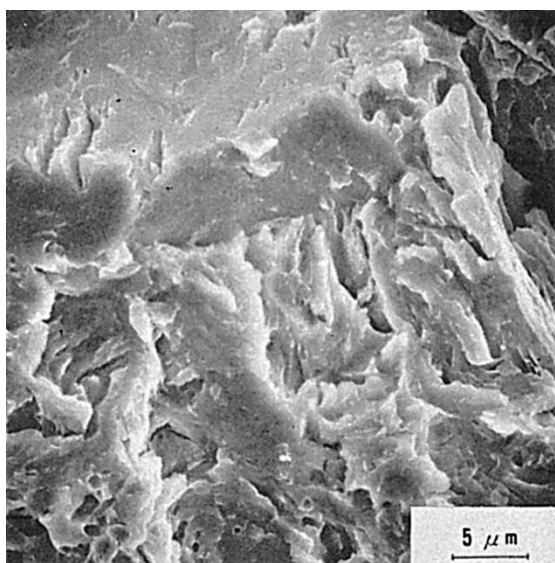


Fig.4 水素擬へき開破面

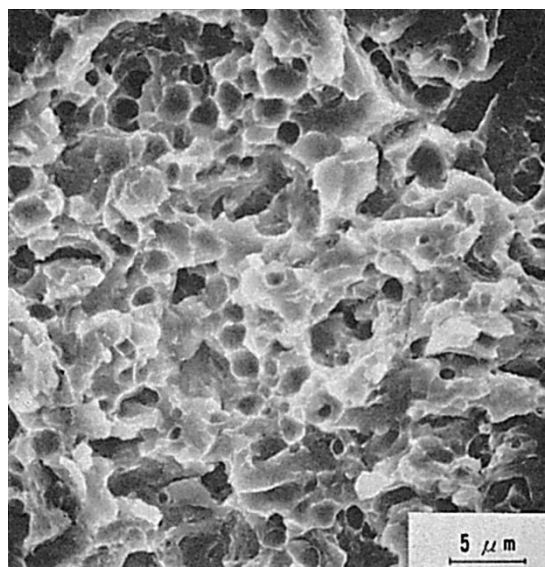


Fig.5 割れ停止部の破面（デンプル破面）

(42) HT80 鋼の炭酸ガスアーク溶接部におけるルート割れ破面

— スリット形割れ試験 —

(42) Fracture Surface of Root Crack for HT80 Steel by Carbon-Dioxide Arc Welding

— Slit Type Cracking Test —

材 料 (Material)

母 材 (Base metal) : 溶接構造用圧延鋼材 HT80 (板厚 36mm).

溶接材料 (Welding material) : 炭酸ガスアーク溶接用鋼ワイヤ (HT80 用) (径 1.2mm).

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

| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | Nb | B |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|--------|
| 母 材 | 0.13 | 0.35 | 1.33 | 0.017 | 0.007 | 0.04 | 0.04 | 0.51 | 0.03 | 0.0015 |
| 溶 着 金 属 | 0.07 | 0.60 | 1.34 | 0.005 | 0.009 | 2.42 | — | 0.42 | — | — |

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 (%) | シャルピー吸収エネルギー (kgf・m) |
|---------|--------------------------------|--|------------|-------------------------|
| 母 材 | 88 | 85 | 20 | — at —°C |
| 溶 着 金 属 | 84 | 82 | 23 | 12.5 at 0°C |

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method) : 炭酸ガスアーク溶接 (Carbon-dioxide 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 | シールドガス |
|------|--------------|--------------|-------------|------------------|-------|-------------------------------|
| レ 形 | 15 | 26 | 240 | 200 | 1層1パス | CO ₂ (20 l/min) |

試 験 (Test)

試験方法 (Test method) : スリット形割れ試験

試験片形状 (Specimen configuration) : 520mm 長×340 幅×36mm 厚, 溶接長 200mm

試験条件 (Test condition) : 拘束度 1700kgf/mm・mm, 予熱なし

試験結果 (Test result) : 100%断面割れ

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

低温割れは炭酸ガスアーク溶接法による HT80 の溶接長 200mm を有するスリット形割れ試験片を用いて, 予熱温度を変化させ, 検討した.

Fig.1 はその結果を示す. 割れは, y 開先では予熱温度 50°C, レ開先では 125°C より低くなると発生した.

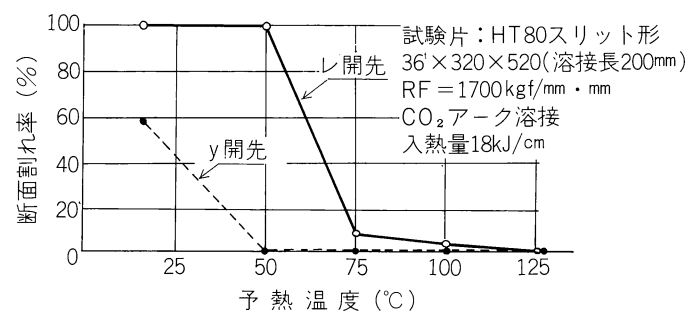


Fig.1 予熱温度と割れ率の関係

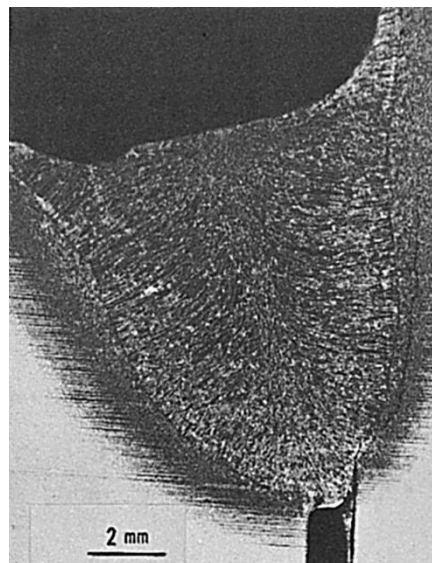


Fig.2 マクロ組織

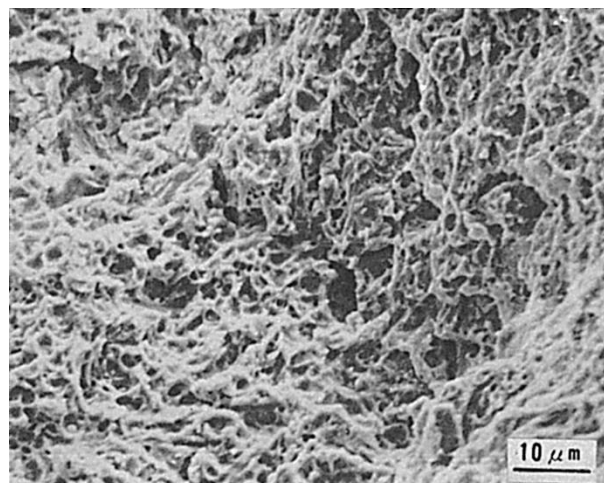


Fig.3 ディンプル破面

Fig.2 は予熱温度 50℃, レ開先の溶接断面のマクロ写真を示す. 溶接金属は炭酸ガスアーク溶接部特有の溶込みの深いなし形ビートを示し, 溶融境界から溶接金属中央部へ柱状晶の発達が見事に認められる. 割れはルートの切欠部より発生し, 母材熱影響部を進展していた. なお, 溶接金属内に高温割れは認められなかった.

Fig.3～Fig.6 は予熱なし (室温のまま), レ開先で観察された破面を示す.

Fig.3 はディンプル (Dimple) を伴った延性破壊であり, Fig.4 は擬へき開破壊で, Fig.5 は拡散性水素の影響を受け脆化し破壊した様相を示している. 観察された破面の大部分は Fig.3,4 および 5 の混在したものであった.

Fig.6 はルート近傍で観察された破面で, 明らかに粒界割れを示していた. また, その表面にディンプルと異なる脆化破面が認められる. 低温割れは粒内, 粒界を問わず進展することが知られているが, 粒界を経る割れは一般に拡散性水素が強く関与していると考えられている. ガス・シールド・アーク溶接法は水素源となる被覆剤がないため, 溶接金属内の拡散性水素は極めて少なく, 粒界割れを観察することはまれである.

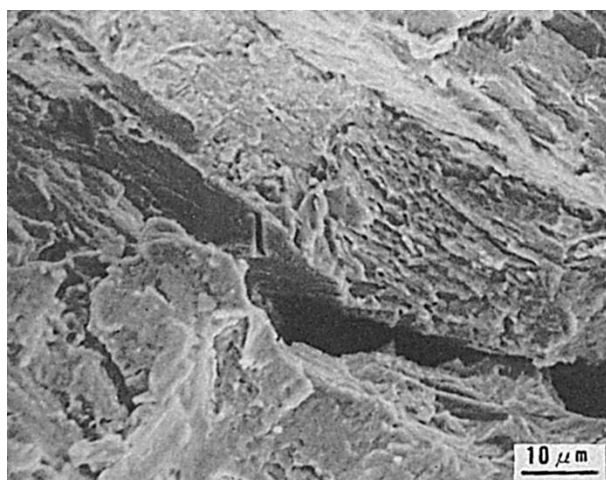


Fig.4 擬へき開破面

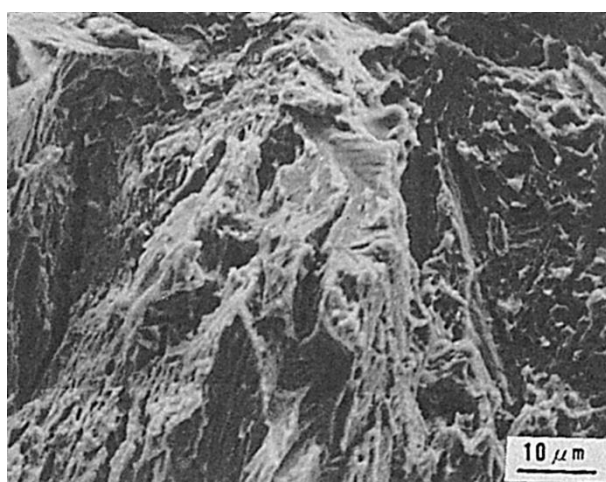


Fig.5 擬へき開破面

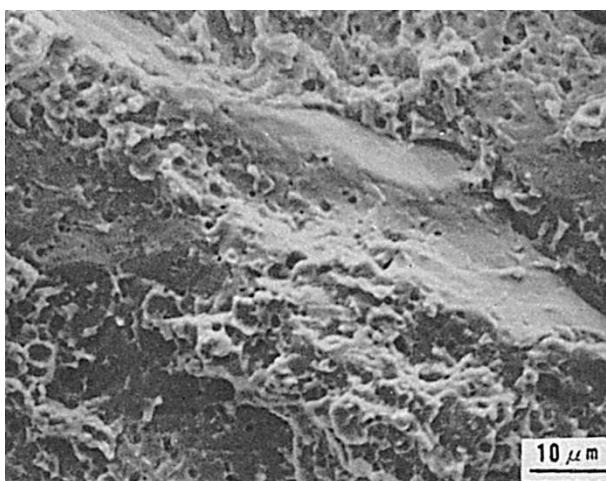


Fig.6 粒界破面（ルート部近傍）