(62) HT80鋼の被覆アーク溶接熱影響部のSR割れの破面

— 突合せ継手試験 —

(62) Fracture Surface of Reheat Cracking in HAZ of HT80 Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Reheat Cracking Test by Butt Joint —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 HT80 (板厚25㎜).

溶接材料 (Welding material)：高張力鋼用被覆アーク溶接棒D8016(径 4，5 ㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
母　　材	0.11	0.26	0.85	0.015	0.009	0.24	0.80	0.58	0.48	0.06
溶着金属(分析例)	0.06	0.49	1.38	0.010	0.006	—	2.52	0.20	0.46	—

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材	87.3	82.5	24	24.2 at 0℃
溶着金属(測定例)	86.7	79.7	23	9.4 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)

溶接棒の乾燥条件	予熱·層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
350℃×1 hr	150	24～26	4 φ：170 5 φ：220	150	5 層 10 パス

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：突合せ継手作成 (試験ビード溶接→拘束ビード溶接)

→溶接後熱処理→磁気探傷[1]

試験片形状 (Specimen configuration)
試験条件 (Test condition)：600℃×1 hr 炉冷 } 文献(1)参照

試験結果 (Test result)：拘束パス数10で，われ率68%(試験ビード長に対する割れ長さの割合)。

(1) 金沢ら：溶学誌，Vol. 44(1975)，No.10，P.13

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

SR 割れ感受性は，高張力鋼のなかでは強度が高い鋼材ほど高くなる．ここに示した SR 割れは HT80 の溶接継手での例である．

Fig.1 は，突合せ試験片の試験ビードの余盛を除去した後のボンド部に沿った割れをカラー·チェック (Color check) で現出させたものである．きわめて明瞭な割れである．

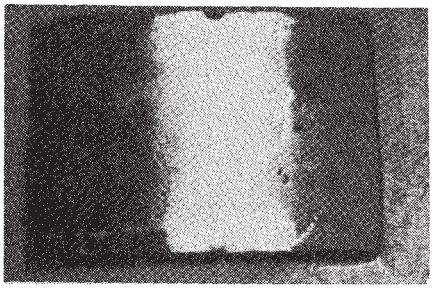


Fig. 1　染色浸透検査結果

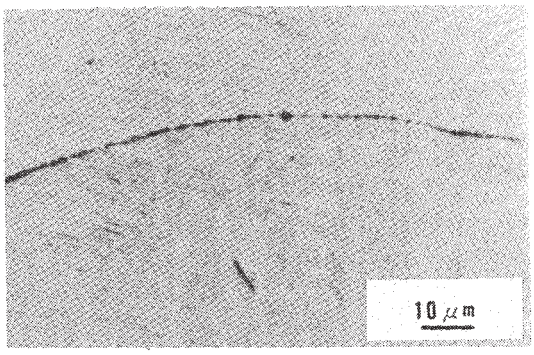


Fig. 4　ＳＲ割れ先端のミクロ組織

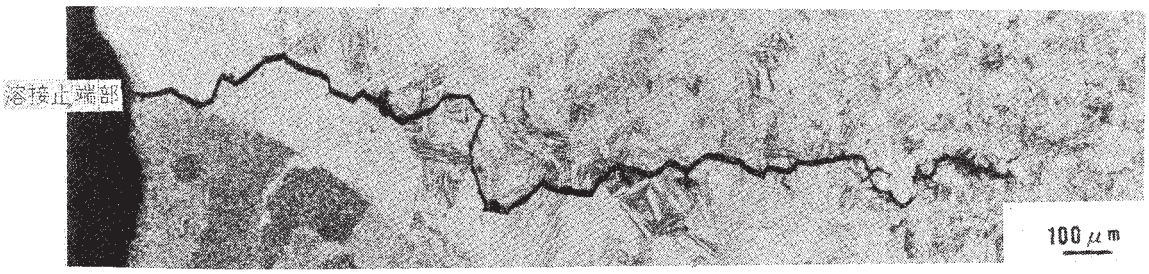


Fig. 2　ＳＲ割れのミクロ組織

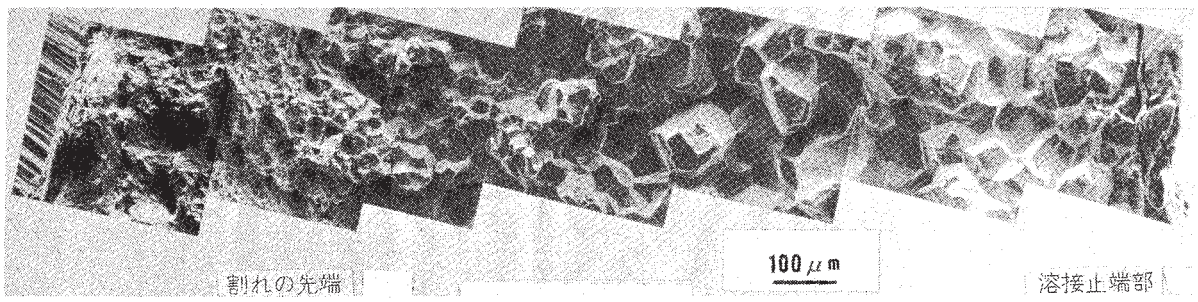


Fig. 3　Fig. 2に示したＳＲ割れのミクロ破面

Fig.2 は，試験片断面部での割れの形態を示すもので，ビードの止端部から，熱影響部の旧オーステナイト粒界に沿った典形的な粒界割れである．割れは粗粒部を伝ぱして，細粒部で停止している．ミクロ組織は下部ベイナイトである．

Fig.3 は，Fig.2 の破面で，粗粒部を伝ぱし細粒部で停止している様子が破面からもわかる．全体が典形的な粒界破面である．

Fig.4 は，割れ先端部のミクロ組織である．付加応力方向に直角な粒界上に空洞が多数生成し，それらが連なって割れの前駆段階を形成していることがわかる．

(63) HT80鋼の電子ビーム溶接熱影響部のSR割れの破面

— 電子ビーム溶接試験 —

(63) Fracture Surface of Reheat Cracking in HAZ of HT80 Steel by Electron Beam Welding

— Electron Beam Welding Test —

材 料 (Material)

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

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

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	V
母　　材	0.16	0.10	0.62	0.010	0.006	0.21	0.95	0.48	0.03

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材	87.2	81.4	23.0	23.7 at −40℃

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：横向き電子ビーム溶接 (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 (㎜/min)
50	300	0.8	600

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：電子ビーム溶接試験

試験片形状 (Specimen configuration)：300㎜長×80㎜幅×50㎜厚

試験条件 (Test condition)：600℃×9hrs 炉冷

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に電子ビーム溶接ボンド部に発生した SR 割れのミクロ組織を示す. HT80 は SR 割れ感受性の高い鋼種として知られており, 特に外的拘束を与えなくとも, 溶接時の残留応力が存在する状況で応力除去焼なましを行なうことにより, このような割れが発生する. 溶接ボンド部粗粒域の旧オーステナイト粒界を伝ぱした割れであり, 電子ビーム溶接部は溶接ボンド部が板厚方向に一直線であるため, 板厚を貫通した割れとなる.

Fig.2, Fig.3 は上述の SR 割れ破面であり, 結晶粒の変形をほとんど伴わない粒界破面となっている. ただし破面上に, わずかに塑性変形の跡が見られる.

電子ビーム溶接法は従来のアーク溶接法に比べて溶接入熱量が小さいため, 溶接ボンド部粗粒域の旧オーステナイト粒径が小さい. したがって SR 割れ破面の粒径も約 50μm であり, 従来のアーク溶接法 (約100～150μm) の場合に比べて小さい.

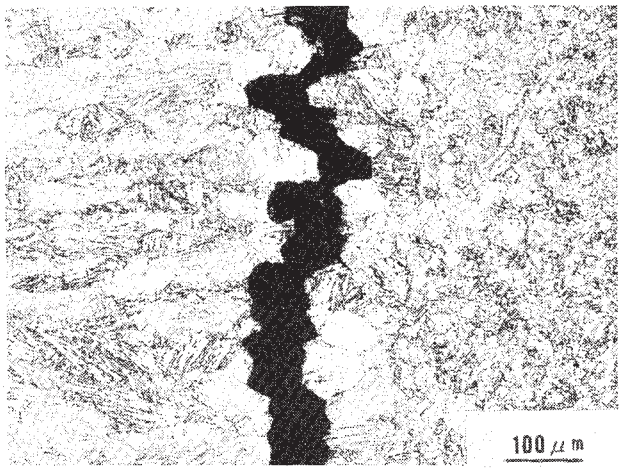


Fig. 1　電子ビーム溶接ボンド部に発生したＳＲ割れのミクロ組織

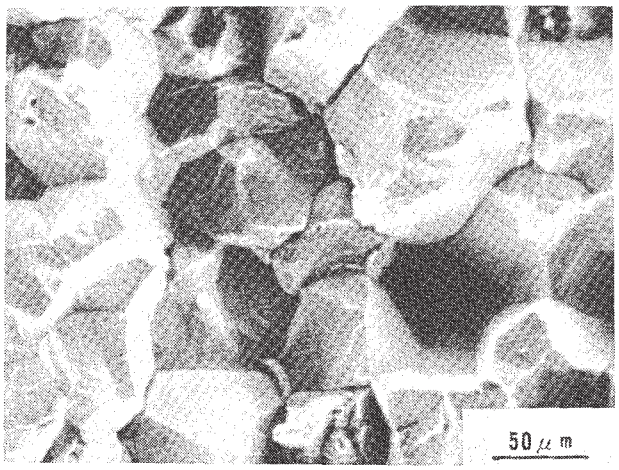


Fig. 2　電子ビーム溶接ボンド部に発生したＳＲ割れのミクロ破面

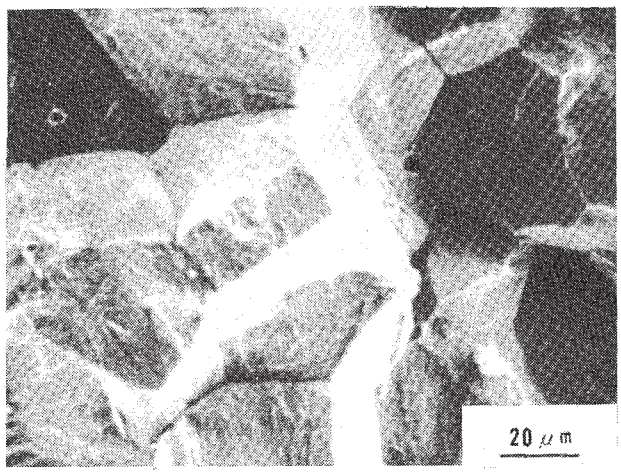


Fig. 3　Fig. 2 の左部の拡大ミクロ破面

(64) 圧力容器用低合金鋼の被覆アーク溶接熱影響部のSR割れの破面

— 円筒形拘束割れ試験 —

(64) Fracture Surface of Reheat Cracking in HAZ of Mn-Cr-Mo-V Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Cylinder Type Restraint Cracking Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：圧力容器用 Mn-Cr-Mo-V 鋼材 BS1501－271B (板厚100 mm).

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
母　　材	0.17	0.20	1.29	0.012	0.006	0.55	0.56	0.23	0.048
溶 着 金 属	0.07	0.54	1.24	0.012	0.006	0.38	—	0.54	—

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 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (mm/min)	積層方法
V 形	350℃×1hr	250℃	24 V	140	100	1層1パス

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：円筒形拘束割れ試験

試験片形状 (Specimen configuration)：図1参照

試験条件 (Test condition)：600℃×1hr

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に円筒形拘束 SR 割れ試験方法を示す. 割れは熱影響部粗粒域に切欠きを導入した試験片を 600℃で 1 hr 加熱した後に発生したもので, Fig.2 に撮影個所を示す. Fig.3～5 から明らかなように, 破面は SR 割れに特有な粒界破面を呈している.

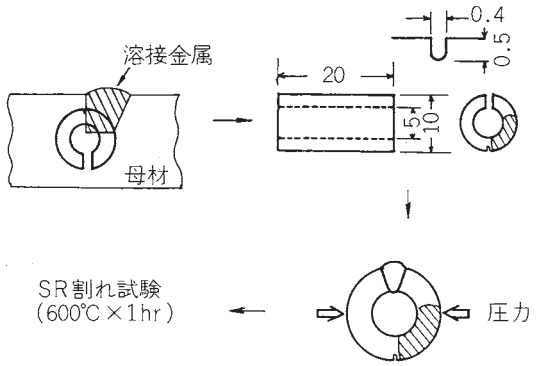


Fig. 1　円筒形拘束割れ試験

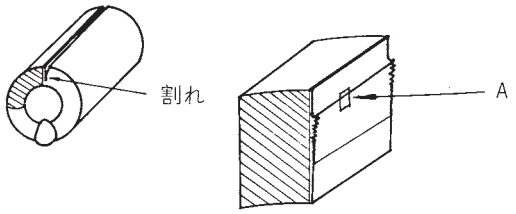


Fig. 2　撮影個所（A部）

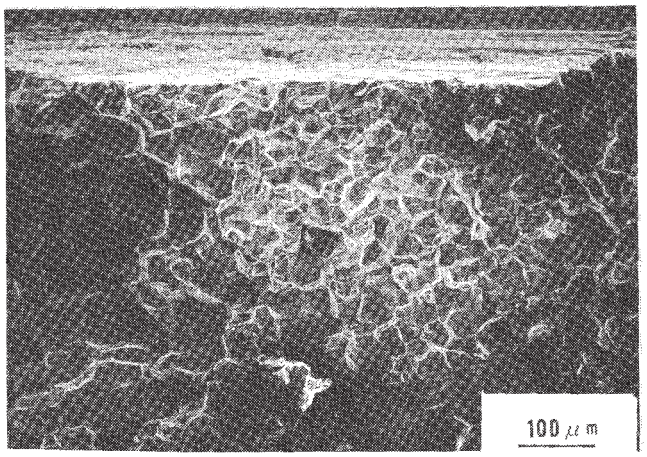


Fig. 3　マクロ破面

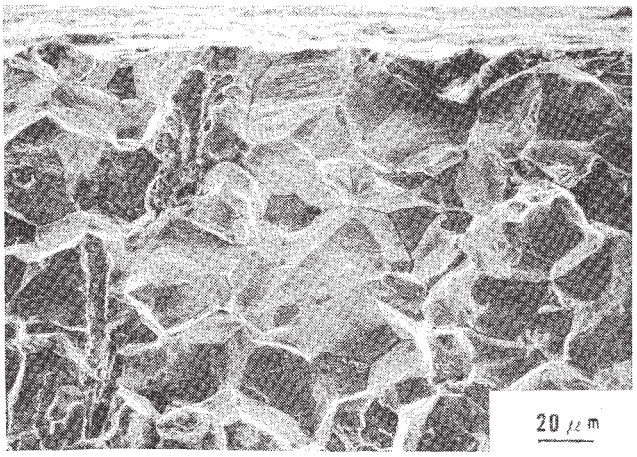


Fig. 4　Fig. 3 中央部のミクロ破面

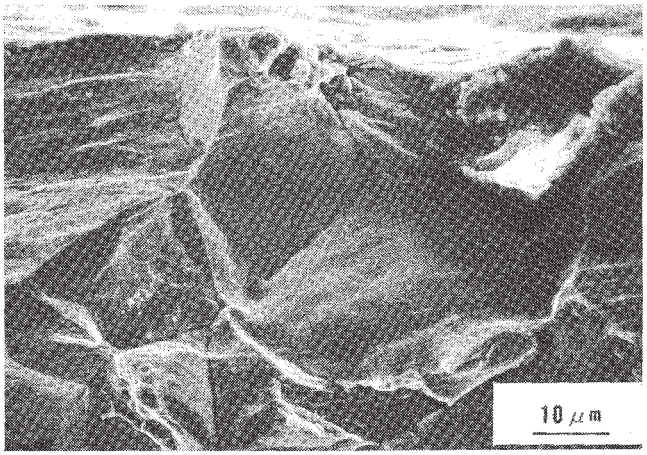


Fig. 5　Fig. 4 上部のミクロ破面

(65) 1Cr－0.5Mo鋼の被覆アーク溶接熱影響部のSR割れの破面

— 斜めy形自拘束割れ試験片によるSR割れ試験 —

(65) Fracture Surface of Reheat Cracking in HAZ of 1Cr-0.5Mo Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Reheat Cracking Test by Self-Restraint Test Specimen with y-Groove —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：圧力容器用1Cr-0.5Mo鋼材 ASTM A387 Grade 12 Class 2 (板厚70㎜).

溶接材料 (Welding material)：Cr-Mo鋼被覆アーク溶接棒 DT2316 (径4㎜).

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 (分析例)	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/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材(測定例)	50	32	15 at 15℃

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 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
y　形	350℃×1hr	270	25	170	150	1層1パス

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：斜めy形自拘束試験片によるSR割れ試験

試験片形状 (Specimen configuration)：200㎜長×150㎜幅×20㎜厚

試験条件 (Test condition)：600℃へ約3 hrsで加熱，600℃に到達後直ちに炉冷

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

前記の溶接条件で試験ビードをおいたFig.1の試験片を約3 hrsで600℃に加熱し，600℃に達すると同時に炉冷した．SR割れはFig.2に示すように，ルート部の溶融境界線に近接したHAZに発生し，ビード表面側へと進展している．Fig.3はFig.2のAA′BB′領域について，ルート部からビード表面側へかけて連続的に破面を観察した結果である．Fig.3にみるように破面はほぼ全面にわたって粒界破壊の様相を呈しており，SR割れの明確な特徴が認められる．また，破面が粗大な粒界破面より構成されていることから，SR割れがHAZの粗粒域の粒界で発生し，粗大粒界を伝ぱしたことは明らかである．Fig.4は上記のSR割れ破面を拡大したものである．空気中で応力除去焼なましの加熱過程に相当する後熱処理を行なったため，破面はほぼ全面酸化皮膜でおおわれている．Fig.5は酸化皮膜の拡大組織写真である．

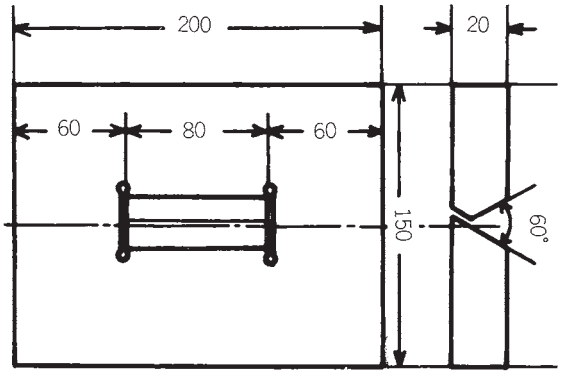


Fig. 1　y形ＳＲ割れ試験片の形状，寸法
（ルートギャップ；２㎜）

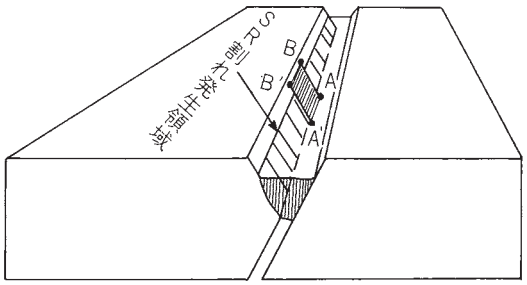


Fig. 2　ＳＲ割れ発生領域の模式図，割れ破面観察領域；AA′B′B領域(試験片長手方向中央部)

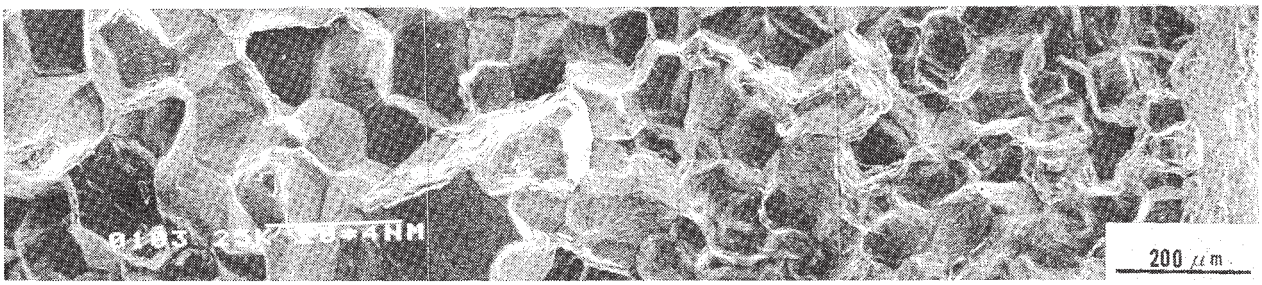


Fig. 3　ルート部（AA′側）からビード表面側（BB′側）へかけての割れ破面　ルート部（Ａ－Ａ′側）

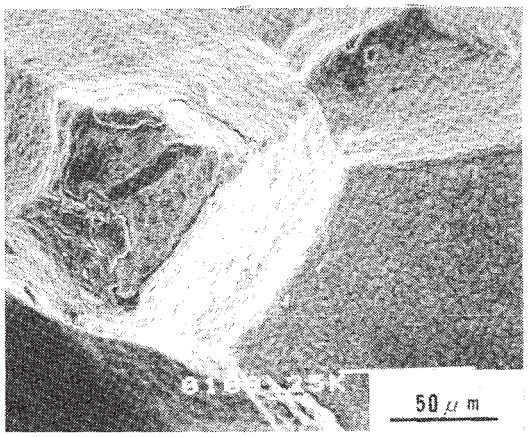


Fig. 4　割れのミクロ破面

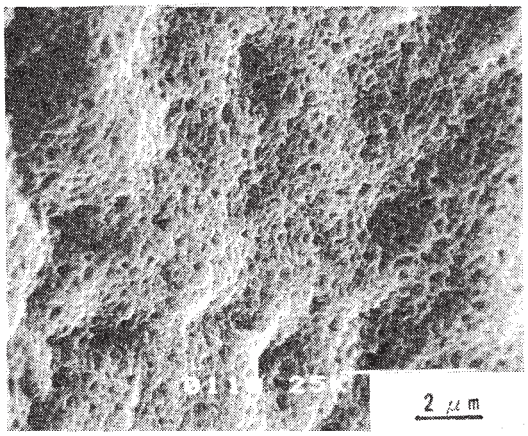


Fig. 5　割れのミクロ破面

(66) 2¼Cr－1Mo鋼の被覆アーク溶接熱影響部のSR割れの破面

— 斜め y 形自拘束割れ試験片によるＳＲ割れ試験 —

(66) Fracture Surface of Reheat Cracking in HAZ of 2 1/4 Cr-1Mo Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Reheat Cracking Test by Self-Restraint Test Specimen with y-Groove —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：圧力容器用 2 ¼ Cr-1Mo 鋼材 ASTM A387 Grade 22 (板厚50㎜).

溶接材料 (Welding material)：Cr-Mo 鋼被覆アーク溶接棒 DT2416 (径4.0㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
母　　材	0.13	0.16	0.56	——	——	0.09	2.4	1.06
溶着金属(分析例)	0.07	0.40	0.70	0.012	0.006	——	2.3	1.02

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点(0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)	熱処理
母　　材(測定値)	66	55	28	5.6 at 0℃	—
溶着金属(測定値)	59	53	17	— at —℃	690℃×1 hr のSR

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 (℃)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
y　形	350℃×1 hr	250～300	170	150	1層1パス

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：斜め y 形自拘束試験片による SR 割れ試験

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

試験条件 (Test condition)：700℃×10hrs 炉冷

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は試験片作成に用いた斜め y 形溶接割れ試験片の形状を示す．溶接時には低温割れ発生防止のため，十分予熱を行ない，溶接後は予熱温度を保持して，連続的に応力除去焼鈍を行なった．その後，拘束溶接を除去して，裏面より，溶接線を中心に曲げて，Fig.2 に示すマクロ破面を有する試験片を作成した．Fig.3 にマクロ破面のスケッチ図を示す．マクロ破面には溶接後熱処理による酸化スケールが認められ，その表面は比較的凹凸が多く見られる．Fig.4，5 と 6 は割れ破面のＡ部を拡大したミクロ破面である．破面は旧オーステナイト粒界に沿って発生した粒界破面である．

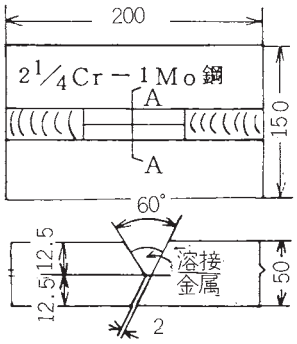


Fig. 1　試験片形状

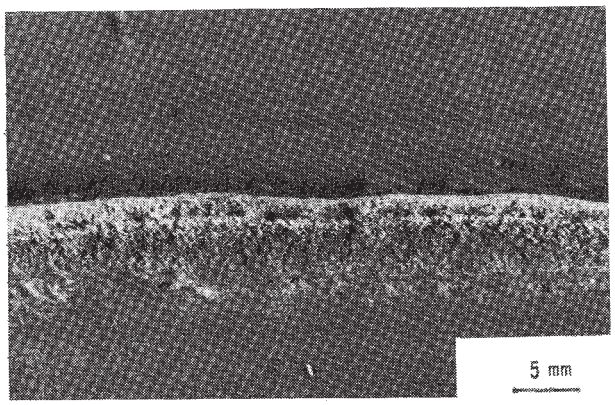


Fig. 2　マクロ破面

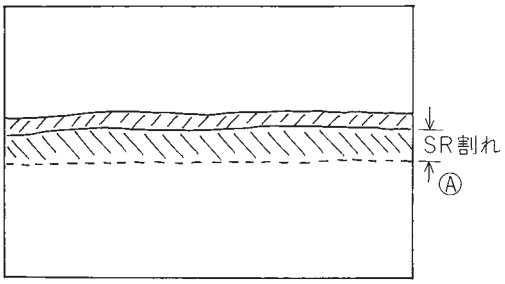


Fig. 3　Fig. 2のマクロ破面のスケッチ

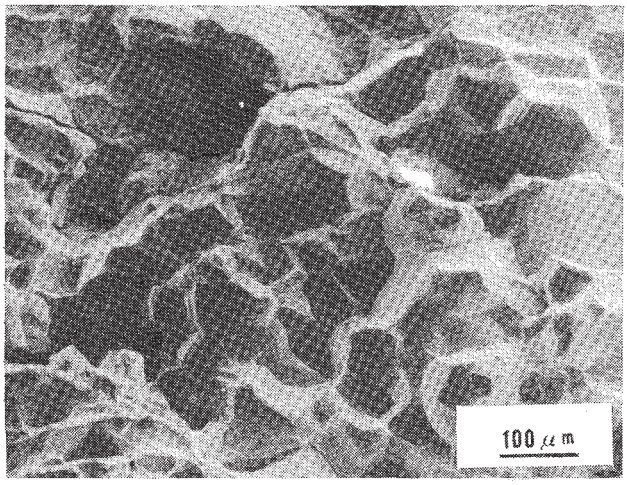


Fig. 4　Fig. 3Ⓐ部のミクロ破面

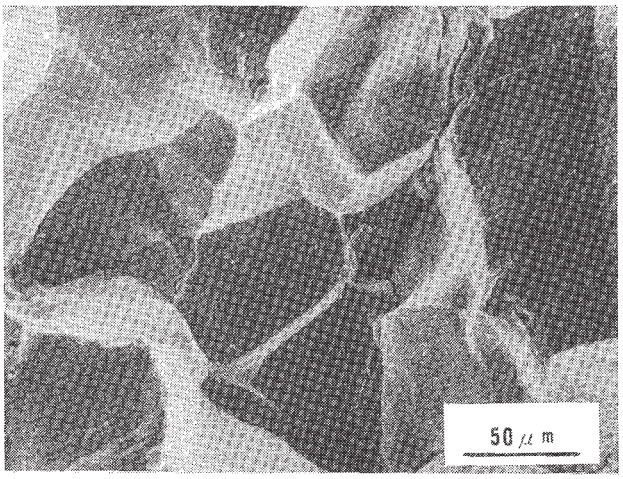


Fig. 5　Fig. 3Ⓐ部のミクロ破面

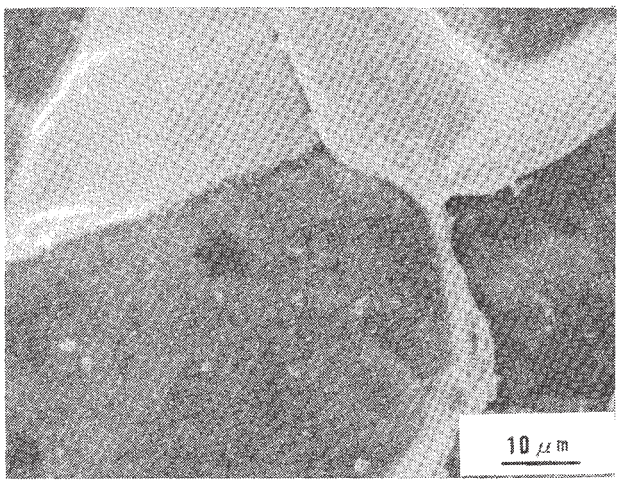


Fig. 6　Fig. 5の中央部の拡大

(67) 2¼Cr－1Mo鋼のエレクトロスラグ溶接金属のSR割れの破面

— 斜めｙ形自拘束割れ試験片によるＳＲ割れ試験 —

(67) Fracture Surface of Reheat Cracking in Electroslag Weld Metal of 2 1/4 Cr-1Mo Steel

— Reheat Cracking Test by Self-Restraint Test Specimen —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：圧力容器用 2 ¼ Cr-1Mo 鋼材 ASTM A387 Grade 22 (板厚65㎜).

溶接材料 (Welding material)：ワイヤ：2 ¼ Cr-1Mo 系ワイヤ (径3.2㎜).

フラックス：カルシウム硅酸塩系 (IIW)

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

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
母　　材	0.12	0.21	0.46	0.013	0.004	2.37	1.03
溶着金属	0.12	0.26	0.80	0.007	0.006	2.38	1.03

溶　接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：エレクトロスラグ溶接 (Electroslag welding)

溶接条件 (Welding condition)

電　流　(A)	電　圧　(V)	上　進　速　度 (㎜/min)
530	45	15

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：エレクトロスラグ溶接金属から切り出した斜めｙ形自拘束割れ試験片による SR 割れ試験

試験溶接 (Test welding)：Cr-Mo 鋼被覆アーク溶接棒 DT2416 (入熱18kJ／㎝, 予熱温度200～250℃, 後熱温度300℃)

試験条件 (Test condition)：625℃へ110℃／hr で加熱し, 4 hrs 保持後炉冷

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Cr-Mo 鋼に靱性向上を目的として微量元素を加えることによる SR 割れ感受性への影響を調査した. SR 割れ試験には, エレクトロスラグ溶接金属に他のインターナルが溶接されたあとの応力除去熱処理を想定し, Fig.1 に示す斜めｙ開先再熱割れ試験片を用いた.

この試験において, 試験片ルート部近傍に発生した割れ位置のスケッチを Fig.2 に示す. この割れはよく知られているように粒界で発生している (Fig.3). この SR 割れを防止するには, インターナル取付時のすみ肉溶接の止端部形状をなめらかにするのが有効である.

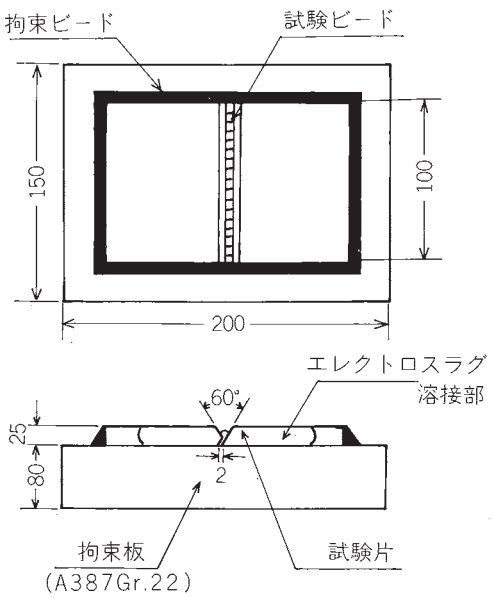


Fig. 1　ＳＲ割れ試験法

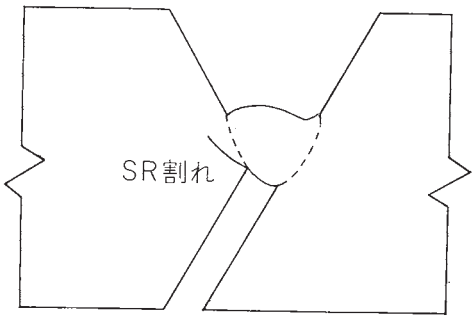
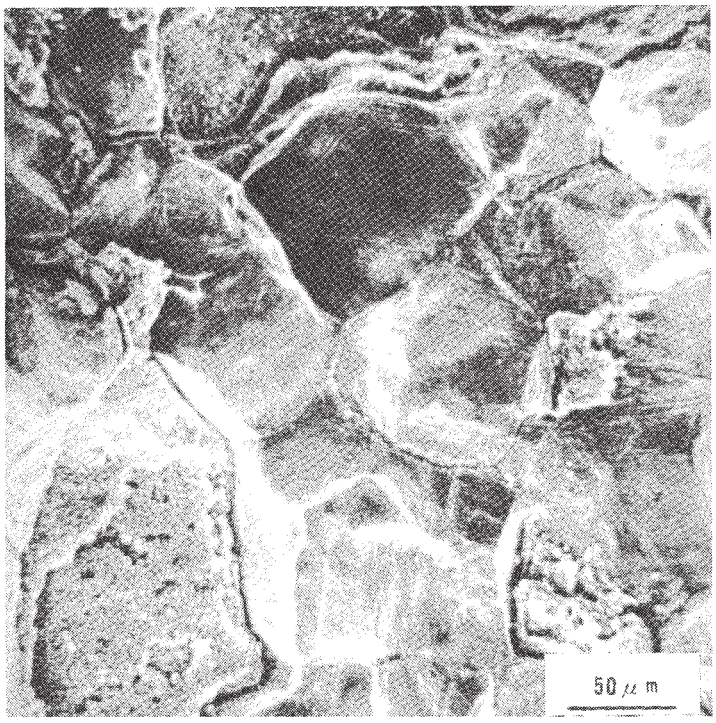
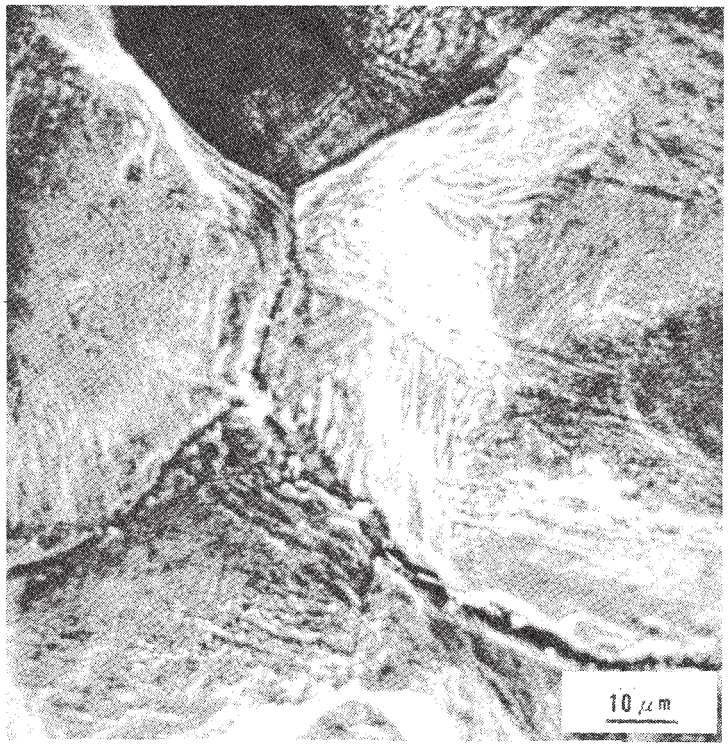


Fig. 2　ＳＲ割れの発生位置



(a)　一般例



(b)　(a)の中央部の拡大

Fig. 3　ＳＲ割れのミクロ破面

(68) 2¼Cr－1Mo鋼のTIG溶接金属のSR割れの破面

— リングはめ込み式割れ試験 —

(68) Fracture Surface of Reheat Cracking in Weld Metal of 2 1/4 Cr-1Mo Steel by TIG Arc Welding

— Ring Type Restraint Weld Cracking Test —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：圧力容器用 2 ¼ Cr-1Mo 鋼材 ASTM A387 Grade22（板厚25mm）.

溶接材料 (Welding material)：2 ¼ Cr-1Mo 鋼用ワイヤ（径2.4mm）.

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

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
母　　材	0.15	0.19	0.55	0.01	0.006	2.42	1.01
溶着金属(分析例)	0.08	0.32	0.71	—	—	2.26	1.04

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm²)	降伏点(0.2%耐力) (kgf/mm²)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)	熱処理
母　　材(測定値)	66	55	28	5.6 at 0℃	—
溶着金属(測定値)	67	53	25	29 at 20℃	690℃×1 hr のSR

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	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
Fig.1参照	250	10～11	150	100	1層1パス

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：リングはめ込み式割れ試験

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

試験条件 (Test condition)：625℃×5hrs 炉冷

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は試験片作成に用いたリングはめ込み式割れ試験の形状を示す．溶接は TIG 溶接を用いて，内外の溶接を同時に行ない，溶接後応力除去焼鈍を行なった。溶接部断面のマクロ組織を Fig.2 に，またミクロ組織を Fig.3 に示す．割れは切欠き部より発生して溶接金属を進展しており，大部分は粒界に沿った割れである．Fig.4 は強制的に破断して得られたマクロ破面を示し，そのスケッチ図を Fig.5 に示す．マクロ破面の表面には，溶接後熱処理による酸化スケールが付着し，凹凸も見られる．Fig.5 のスケッチ図のA部を拡大したミクロ破面を Fig.6 に示し，これをさらに拡大したものが Fig.7 である．ミクロ破面は粒界破面が見られるが，酸化が著しいため詳細な観察は困難である．

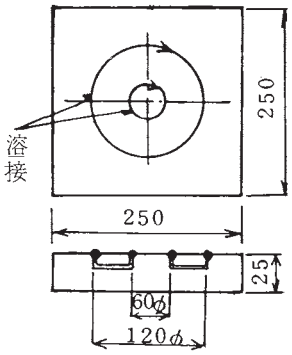


Fig. 1　試験片形状

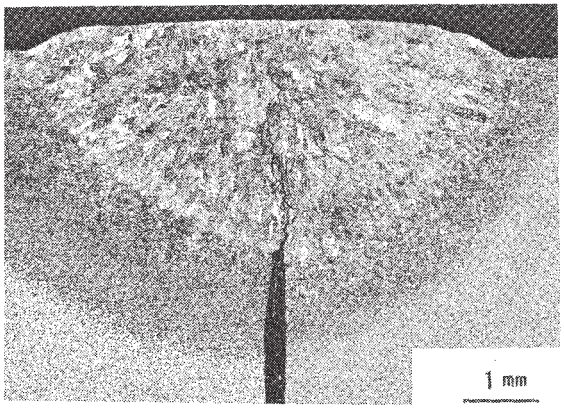


Fig. 2　マクロ組織

Fig. 3　ミクロ組織

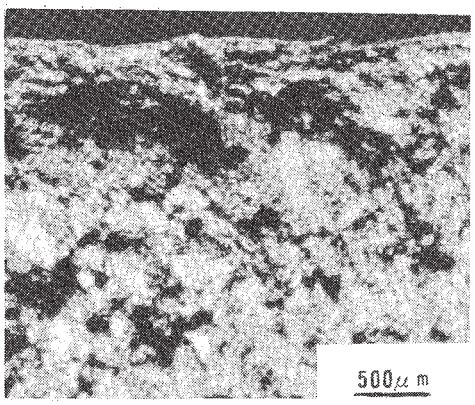


Fig. 4　マクロ破面

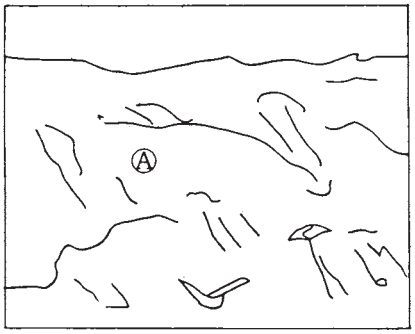


Fig. 5　マクロ破面のスケッチ

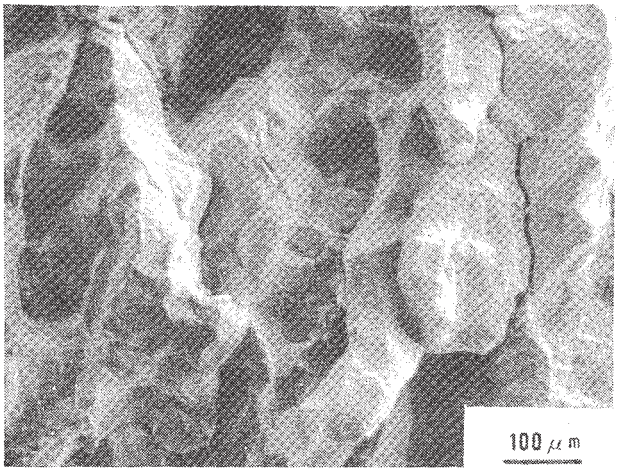


Fig. 6　Fig. 5 Ⓐ部のミクロ破面

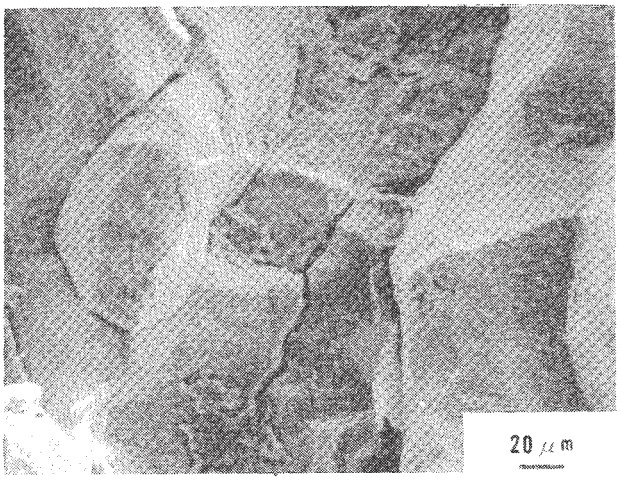


Fig. 7　Fig. 6 の中央部の拡大

(69) 圧力容器用低合金鋼の肉盛溶接部のアンダークラッド・クラッキングの破面

— MRT 試験 —

(69) Fracture Surface of Underclad Cracking of A508 Class 2 Steel

— Mitsubishi Restraint Cracking Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：圧力容器用 Mn-Mo-Ni 鋼材 ASTM A508 Class 2 (板厚 50mm).

溶接材料 (Welding material)：ステンレス鋼帯状電極肉盛材料 YB304L-F (50mm 幅×0.4mm厚).

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
母　　材	0.19	0.27	0.69	0.008	0.008	0.85	0.45	0.66	<0.005
溶着金属(分析例)	0.038	0.55	1.73	0.023	0.011	9.96	20.02	—	—

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm²)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材(規　格)	48.5～65.5	≧25	≧20	— at —℃
溶着金属(測定例)	57	—	42	8.8 at 20℃

溶 接 (Welding)

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

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	フラックスの乾燥条件	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (mm/min)	入熱 (kJ/cm)
Fig.1参照	300℃×1 hr	150～200	28～30	800～850	約 160	約 90

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：MRT 試験

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

試験条件 (Test condition)：615℃×24hrs 炉冷

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に試験片作成に用いた MRT 試験の要領を示す．帯状電極サブマージアーク溶接で①を肉盛後，通常のサブマージアーク溶接で②を溶接し，最後に③を帯状電極サブマージアーク溶接した後，応力除去焼鈍を実施した．Fig.2 は割れの発生状況を示したもので，表面から，肉盛溶接金属を削除し，母材の熱影響部を検査した．割れは

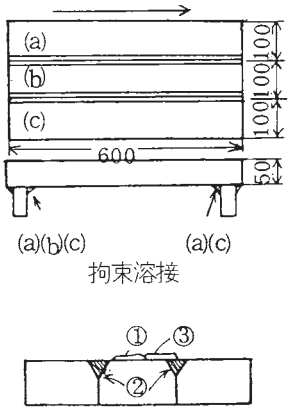


Fig. 1　ＭＲＴ試験片

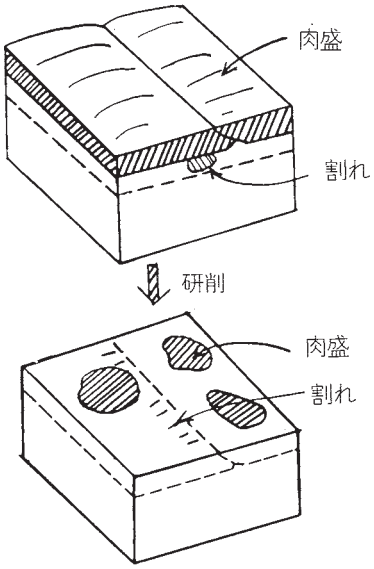


Fig. 2　割れの発生位置

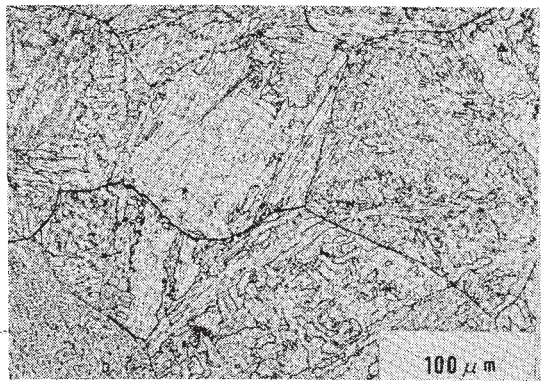


Fig. 3　ミクロ写真

1パスと2パス溶接ビードの熱影響部の重なり部に生じ，そのミクロ組織はFig.3の通りで，大部分が粒界割れであることを示している．Fig.4は強制破断して得たマクロ破面を示す．Fig.5のスケッチ図で，斜線部が割れが発生した場所で，その他は強制破断面である．マクロ破面は金属光沢を有しており，比較的粗い．Fig.6，7と8は割れ破面の1部（A）を拡大したミクロ破面である．破面は旧オーステナイト粒界に沿った粒界破面である．

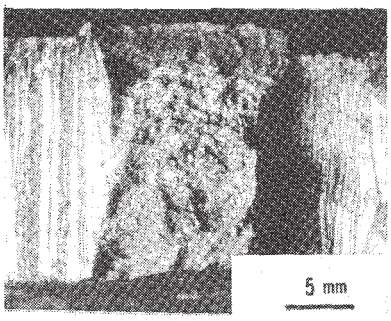


Fig. 4　マクロ破面

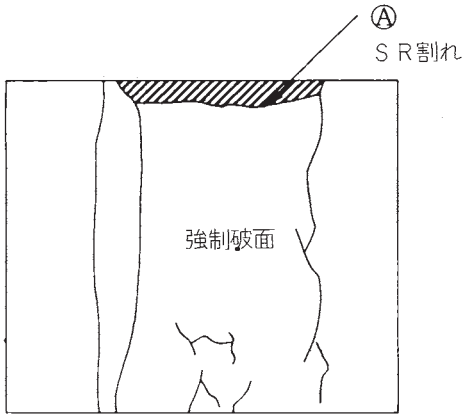


Fig. 5　マクロ破面のスケッチ

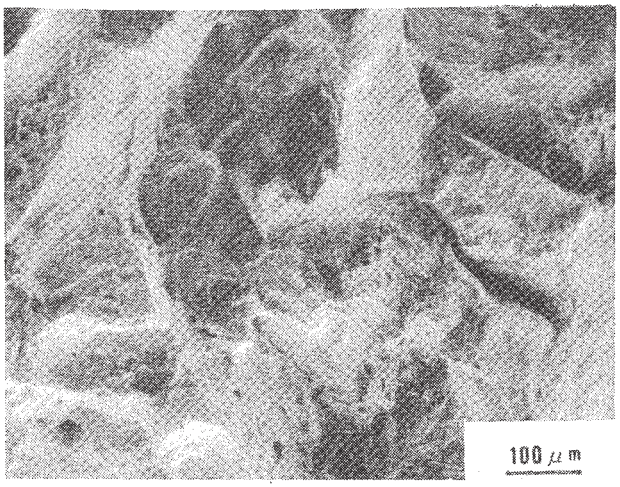


Fig. 6　ミクロ破面（Ａ部）

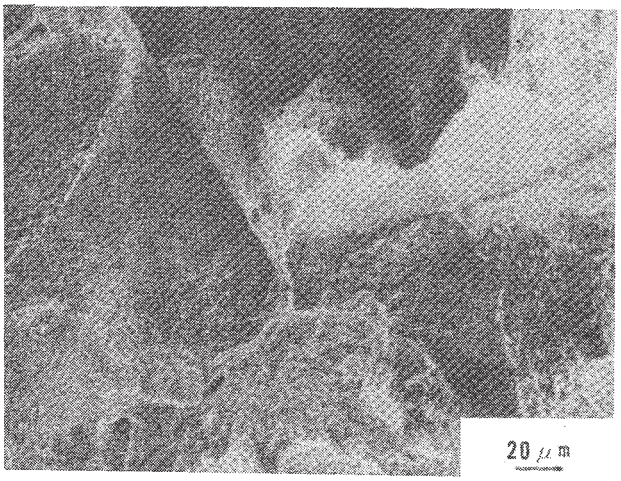


Fig. 7　ミクロ破面（Fig. 6 の拡大破面，Ａ部）

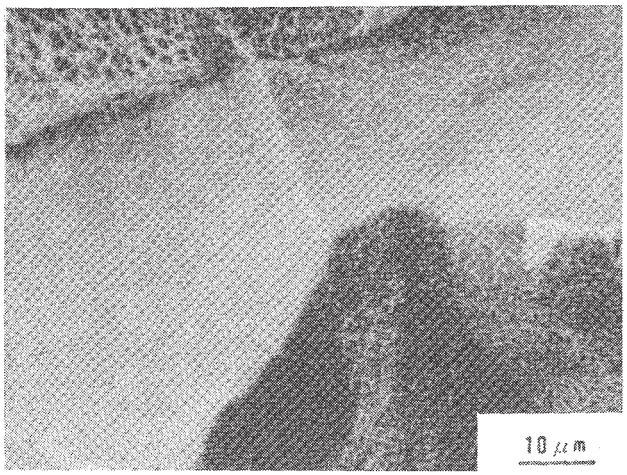


Fig. 8　ミクロ破面（Fig. 7 の拡大破面，Ａ部）

(70) HT100鋼の肉盛溶接部のアンダークラッド・クラッキングの破面

— 肉盛溶接試験 —

(70) Fracture Surface of Underclad Cracking of HT100 Steel

— Overlay Welding Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 HT100 (板厚60㎜).

溶接材料 (Welding material)：ステンレス鋼帯状電極肉盛材料 KWB－309L (75㎜幅×0.4㎜厚)

フラックス：KFS-150, 弗化物・塩基性系 (IIW)

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

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	B
母　　材	0.15	0.25	0.50	0.006	0.005	0.51	1.48	0.60	0.58	0.049	0.054	0.0012
溶 着 金 属	0.03	0.54	1.68	0.020	0.002	—	9.8	19.7	—	—	—	—

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材	105	99	20	16.1 at 25℃

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：エレクトロスラグ肉盛溶接 (Electroslag overlay welding)

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	フラックスの乾燥条件	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
平 板 上	300℃×1 hr	150	28	1250	14	1層4パス

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：肉盛溶接試験

試験片形状 (Specimen configuration)：500㎜長×450㎜幅×60㎜厚

試験条件 (Test condition)：615℃×45hrs

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

原子炉反応容器や化学反応容器の内面には耐食性を確保するために, Type308, Type347 などのステンレス鋼が内張りされる. 内張りの方法としてはステンレス帯状電極を用いた肉盛溶接 (サブマージアーク溶接, 水平エレクトロスラグ溶接) が主流

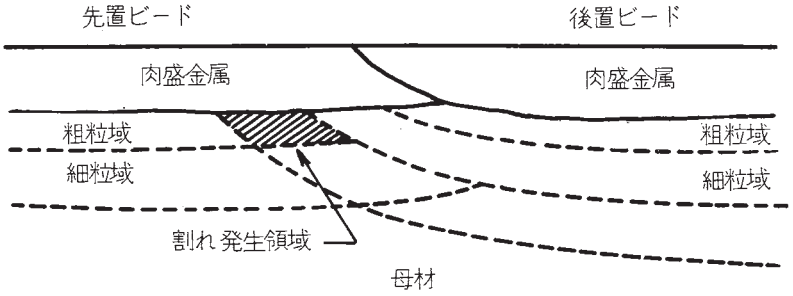


Fig. 1　アンダークラッド・クラッキングの発生位置

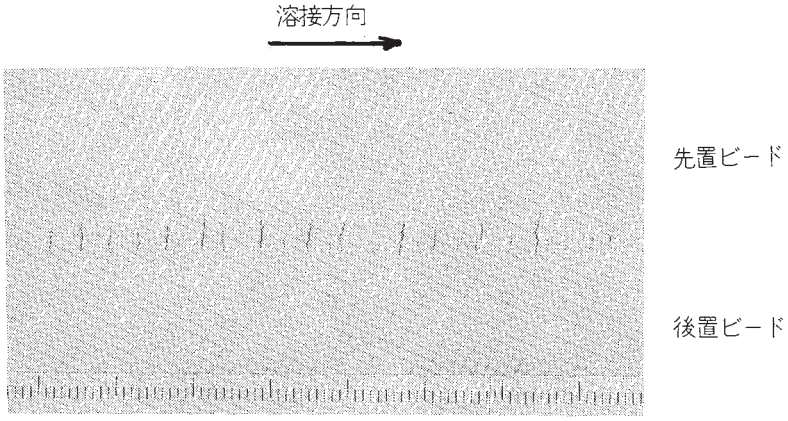
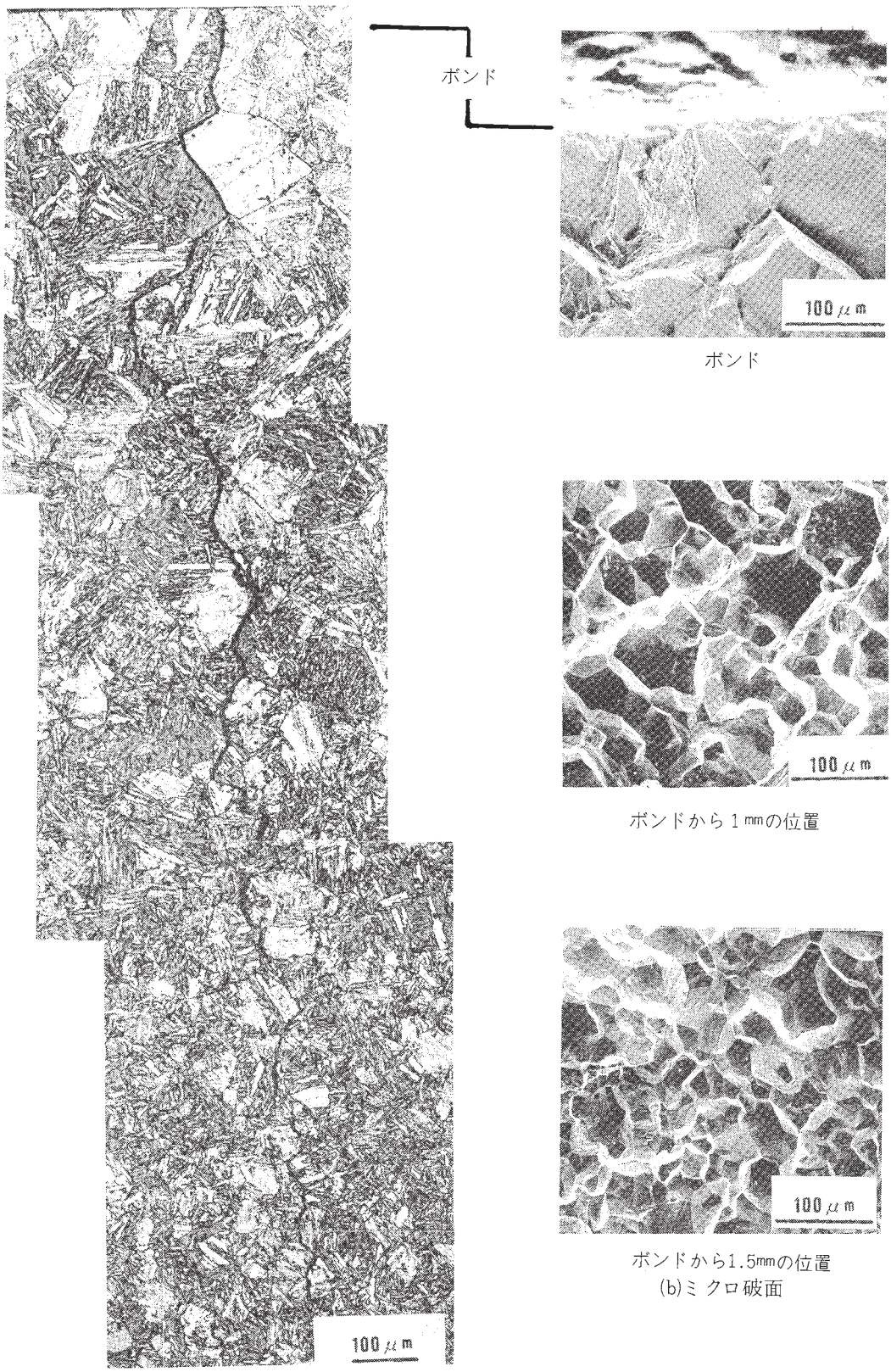


Fig. 2　アンダークラッド・クラッキングの磁粉探傷試験結果

となっている．このような肉盛溶接部は溶接後600℃程度のSRが施されるが，鋼種によってはビード重ね部近傍のHAZにSR後に微小割れ（アンダークラッド・クラッキング，以下UCC）が検出されることがある．

Fig.1はUCCの発生位置を示したものであり，その位置は先置ビードにより結晶粒が粗大化したHAZのうち後置隣接ビードによってAc_1直下に再加熱された領域である．UCCは一般にAEC（U.S. Atomic Energy Commission）のRegulatory Guideにあるごとく，SR後に肉盛金属のみを研磨除去し割れを研磨表面に露出させて液体浸透試験あるいは磁粉探傷試験によって検出する．Fig.2はその一例であるが，割れは溶接方向に対して垂直に伝ぱしており，クラッド直下での割れ長さは長いもので10㎜程度であり，割れ深さは3㎜程度，開口幅はほとんど0である．Fig.3(a)はUCCの断面形状を示したものであり，またFig.3(b)はその破面をボンドからの距離とともに示したものである．割れは典形的な粒界破面を呈している．UCCの割れ感受性は母材のSR割れ感受性係数：$\triangle G=[Cr]+3.3[Mo]+8.1[V]-2$，およびHAZの結晶粒径と密接な関係があり，またSR前には上述したUCC発生位置に高い残留応力が存在していることなどから，UCCはSR割れの一種であると考えられる．



(a) ミクロ組織

Fig. 3 アンダークラッド・クラッキングのミクロ組織及びミクロ破面

I．5　その他の割れ (Other Cracks)

概説 (Outline)

高温割れ，低温割れ，ラメラテア，SR 割れ以外の割れとしては，液体金属の脆化割れ，硬化肉盛部の割れ，焼割れなどがあげられる．

まず液体金属脆化割れは例えば，SUS304，316 などのオーステナイト系ステンレス鋼において，Cu による液体金属脆化割れが発生することが明らかにされている[1]．この種の割れは明確な結晶粒界割れであり[1]，粒径が大きくなるほど割れ感受性の高まることが報告されている[2]．液体金属脆化の生ずる原因は，液体原子が固体原子間の結合力を低下させるためであると考えられている[3]．

Fig.1[4]は Zn メッキ軟鋼ボルトを SUS304 に溶接したときに発生した，Zn による液体金属脆化割れの模式図である．ボルト頭部のすみ肉溶接時に，溶融した Zn により SUS304 に割れが発生している．

Fig.2[4]は染色浸透探傷検査の結果で，表面側には割れは認められないが，裏面側ではマク

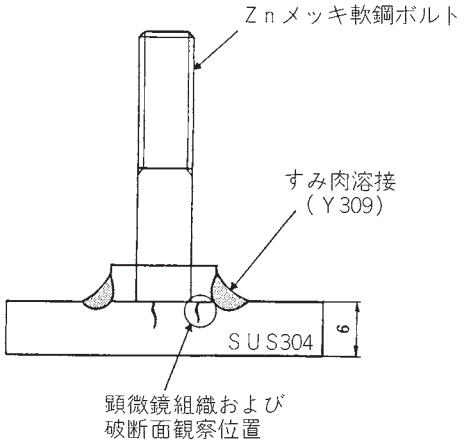
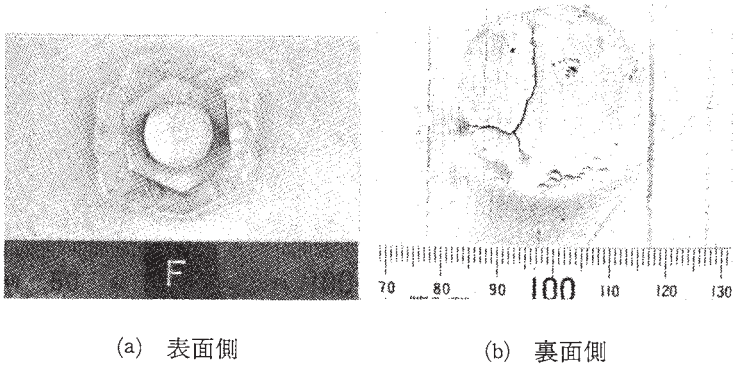


Fig.1　Zn による SUS304 の液体金属脆化割れの模式図



(a)　表面側　　(b)　裏面側

Fig.2　染色浸透試験結果

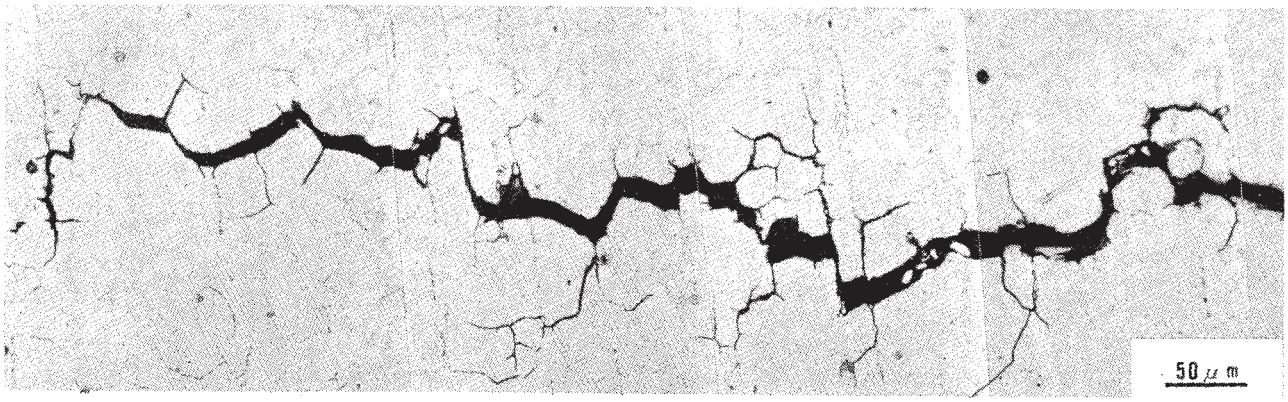


Fig.3　Zn による SUS304 の液体金属脆化割れのミクロ組織

ロ的な割れが観察される．

Fig.3[4]はZnによる液体金属脆化割れのミクロ組織である．割れが結晶粒界において発生していることがうかがえる．Fig.4[4]は割れのミクロ破面で，明瞭な粒界割れの破面を呈している．

Fig.5[4]は割れの生じた粒界についてZnの面分析を行なった結果で，ZnがSUS304の粒界に浸透した状況が明確に示されている．

硬化肉盛部の割れは，予熱あるいは後熱処理条件，溶接施工法などが不適切な場合に発生する割れで，溶接後の冷却過程で生ずる収縮応力を充分に緩和できない場合に発生するものと考えられる．この種の割れは結晶粒界に主に発生するが，粒内においても生ずることがある．

焼割れも硬化肉盛部の割れと同様な機構で発生するものと考えられる．本来焼割れは高炭素鋼などを焼入れしたときに，マルテンサイト変態による材料の硬化，変態応力，さらには焼入れにともなう熱応力に起因して生ずる割れである．高炭素鋼，工具鋼など自硬性の強い材料を急熱急冷を受けるような溶接条件で溶接すると同様な機構で割れが発生することがある．割れは主として粒界で発生するが，粒内で生ずる場合もある．

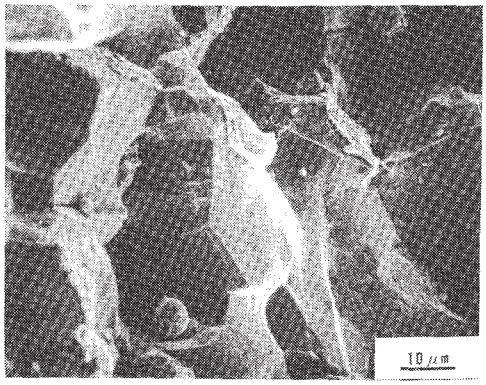
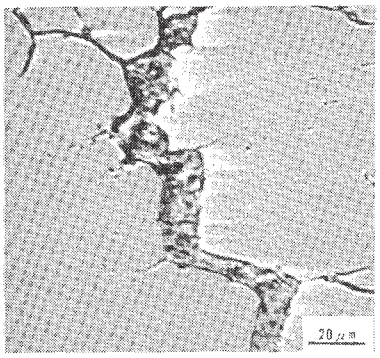
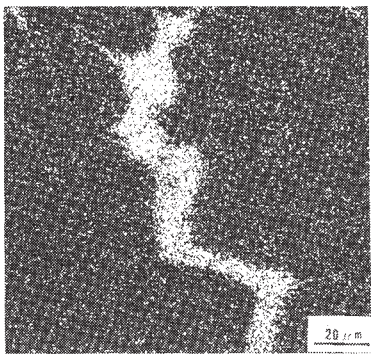


Fig.4　ZnによるSUS304の液体金属脆化割れのミクロ破面



(a) 2次電子線像



(b) Znの特性X線像

Fig.5　X線マイクロアナライザーによる液体金属脆化割れ部の面分析結果

参考文献

1）W. F. Savage, E. F. Nippes and M. C. Mushala：Weld. J., Vol.57（1978），No.8, 237s.

2）C. L. Briant and S. K. Banerji：Inter. Metals Review, Review232（1978），No.4, p. 164.

3）大槻，水野；溶接冶金研究委員会資料，WM-841-81（1981）.

4）簑田，川嶋，富沢，園家；石川島播磨技報，Vol.21（1981），No.3, p. 1.

(71) 鋳鉄上に純鉄系の被覆アーク溶接棒で単相ビードをおいた場合に発生した割れの破面

— ビード・オン・プレート試験 —

(71) Fracture Surface of Cracking in Weld Metal Deposited on Cast Iron by Pure Iron-Type Covered Electrode

— Bead-on-plate Test —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：FC-20 (板厚40㎜).

溶接材料 (Welding material)：鋳鉄用被覆アーク溶接棒 DFC Fe (径4.0㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S
溶　着　金　属	0.04	0.43	0.44	0.007	0.007

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　　材(規格値)	≧17	—	—
溶着金属	50	44	33

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)

溶接棒の乾燥条件	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	積層方法
350℃×1 hr	室　温	22～24	140	1層1パス

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：ビード・オン・プレート試験

試験条件 (Test condition)：溶接のまま

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 にビードに直角に発生した割れの全体を示す. 写真上部は溶接金属, 下部でやや黒みをおびている部分が母材である.

Fig.2 は Fig.1 の②に見られた粒界破面を, また Fig.3 には③に見られた柱状晶粒界に沿った粒界破面を示す.

Fig.4 は Fig.1 の④に示すボンド部の破面を示す.

Fig.5 は Fig.1 中の⑤のミクロ破面で, 擬へき開破面である.

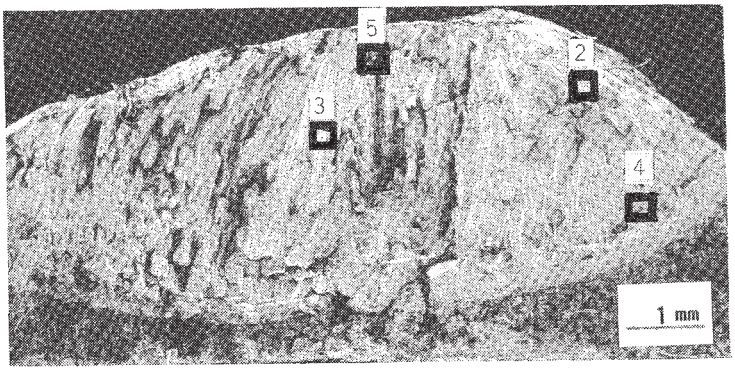


Fig. 1　マクロ破面

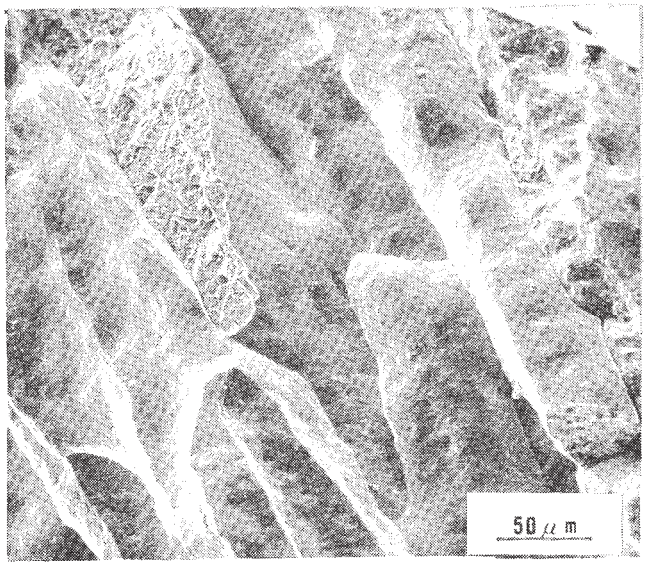


Fig. 2　Fig. 1の2のミクロ破面

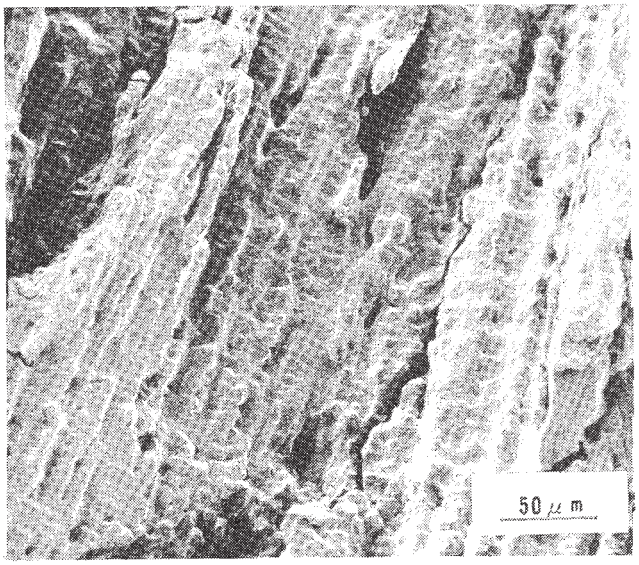


Fig. 3　Fig. 1の3のミクロ破面

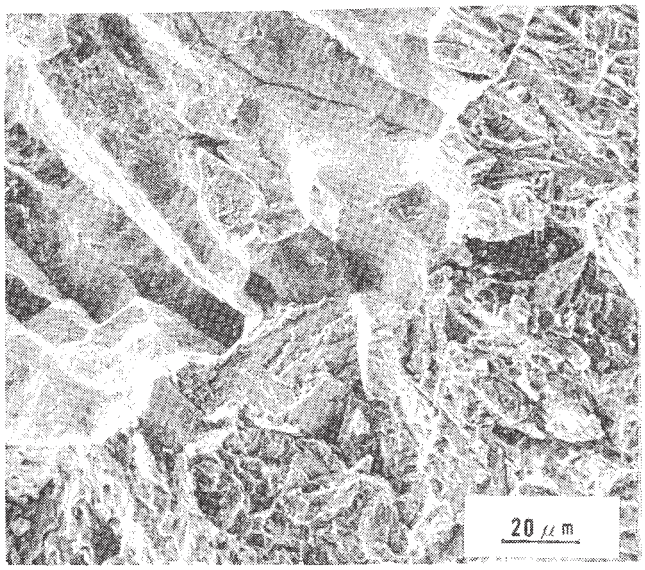


Fig. 4　Fig. 1の4のミクロ破面

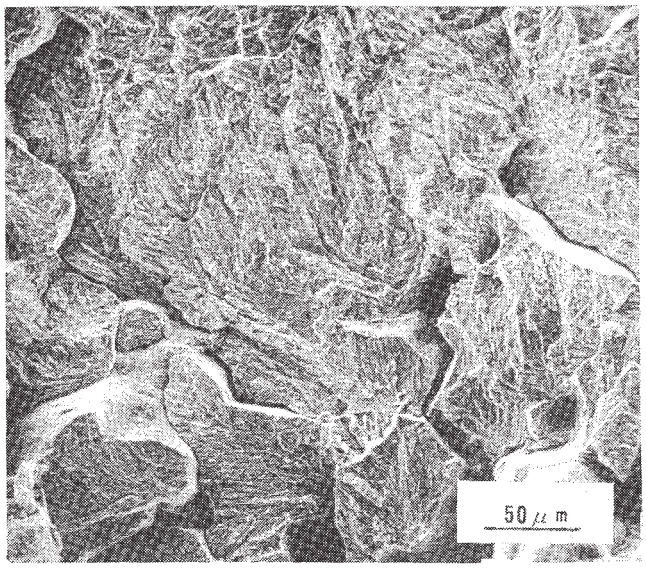


Fig. 5　Fig. 1の5のミクロ破面

(72) 被覆アーク溶接による13Mn系硬化肉盛部の1層目に発生した割れの破面

— 硬化肉盛溶接試験 —

(72) Fracture Surface of Cracking in First Layer of 13Mn Hardfacing Deposited Metal by Shielded Metal-Arc Welding

— Hardfacing Test —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：一般構造用圧延鋼材 SS41 (板厚25㎜).

溶接材料 (Welding material)：硬化肉盛用被覆アーク溶接棒 DFMA (径 5 ㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材	0.12	0.01	0.85	0.015	0.013
溶　着　金　属	0.82	0.39	13.88	0.010	0.005

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　　材	46.3	38.5	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	溶接棒の乾燥条件	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
平　　板	200℃×1 hr	<100	24～28	200～230	150～200	4 層 12 パス

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：硬化肉盛溶接試験

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

この割れは，13Mn 系の被覆アーク溶接棒で，炭素鋼の上に直接肉盛を行なった場合に，1 層目に発生するはく離割れである．13Mn 系の溶着金属は，オーステナイトであるが，1 層目は母材の希釈を受けて，脆弱なマルテンサイトになりやすい．マルテンサイトが生成されると，積層数が増加するにしたがって収縮応力に耐えることができず，はく離が起る．

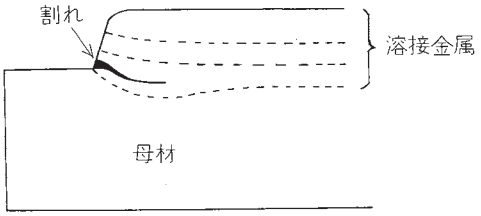


Fig. 1　割れの発生状況

Fig. 2　マクロ破面

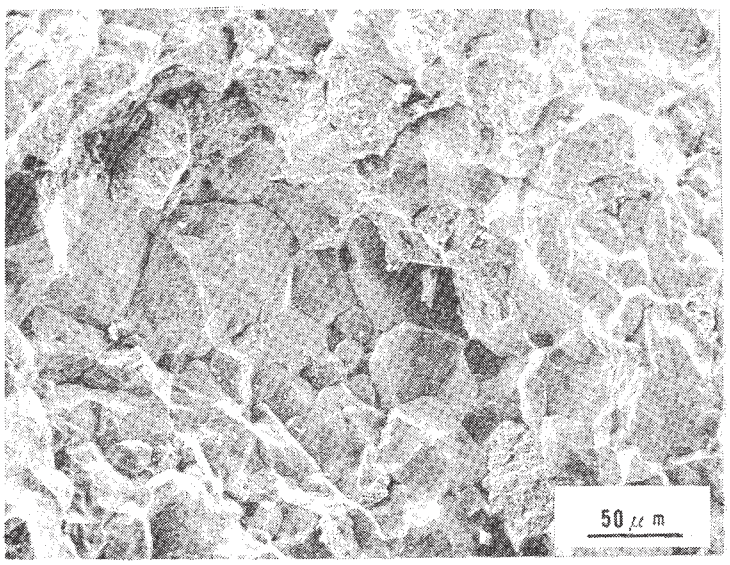


Fig. 3　ミクロ破面

Fig.1 は割れ発生場所のスケッチで，Fig.2 は，割れのマクロ破面である．Fig.3, 4，5 は，それを拡大したミクロ破面で，Fig.3 は粒界破面を示しており，Fig.4，5 は水素擬へき開破面のような破面を示している．破面上にはこの 2 種類の破面が混在している．

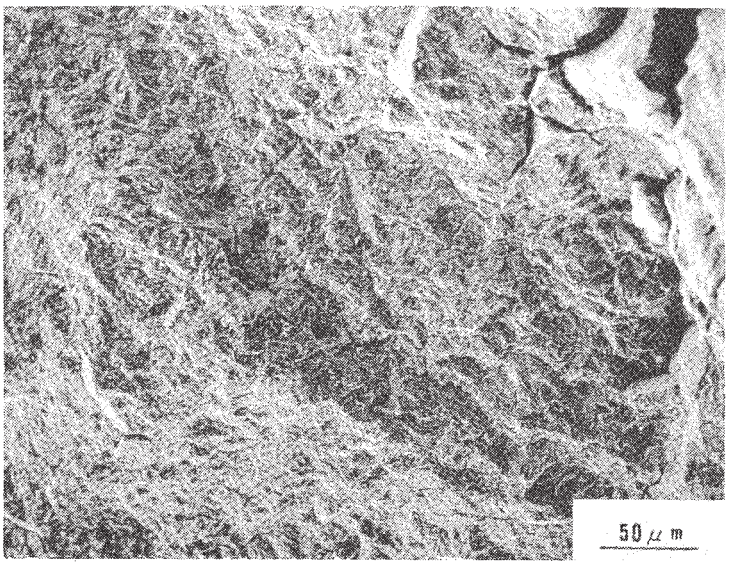


Fig. 4　ミクロ破面

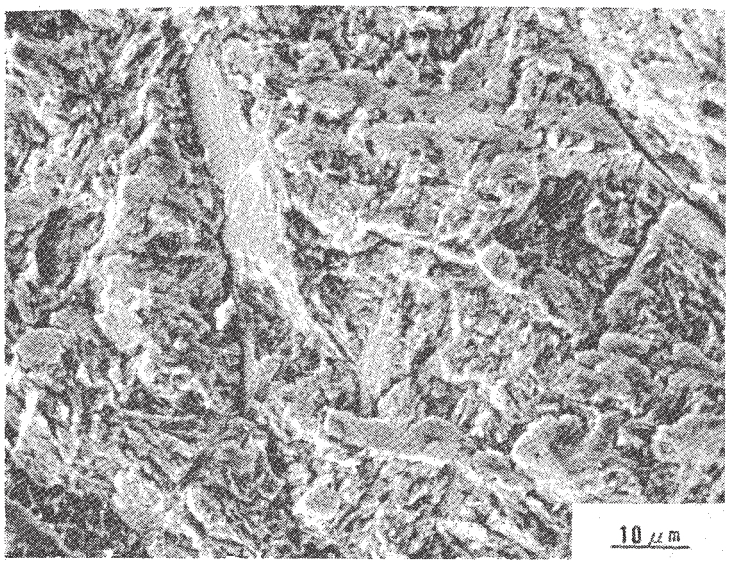


Fig. 5　ミクロ破面

(73) サブマージアーク溶接によるCr－Mo系硬化肉盛部に発生した横割れの破面

— 硬化肉盛溶接試験 —

(73) Fracture Surface of Cracking in Cr-Mo Hardfacing Deposited Metal by Submerged-Arc Welding

— Hardfacing Test —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：一般構造用圧延鋼材 SS41

溶接材料 (Welding material)：ワイヤ：Cr-Mo 系硬化肉盛用(径3.2㎜).

フラックス：塩基性

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

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
母　材	0.12	0.01	0.93	0.011	0.010	—	—
溶着金属	0.38	0.63	1.91	0.015	0.010	6.96	4.39

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　材	45.8	38.0	27

溶　接 (Welding)

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

溶接条件 (Welding condition)

フラックスの乾燥条件	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
250℃×1 hr	150	29～31	430～470	300～350	3層30パス

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：硬化肉盛溶接試験

試験条件 (Test condition)：溶接後48hrs にて断面観察

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

硬化肉盛溶接は，溶着金属の硬さが高く，一般に極めて割れやすい．特に硬さがビッカース硬さ(Hv)で400を越える溶着金属では，適正な施工条件を選択し，十分な管理を行なわないと割れのない溶着金属を得ることは難しい．Fig.1 は Hv600級のサブマージアーク溶接肉盛部に発生した割れのマクロ破面で，Fig.2 はそのスケッチである．割れはビードに直角方向（横割れ）に発生するもので，ビード表面に表われるものは少なく，ビード表面下0.5～1㎜程度の所から発生しているものが多い．この割れは予熱不足により発生するもので，十分な予熱により防止できる．

Fig.3 は割れ開口部近傍のミクロ破面であり，粒界が一部に認められ，全体はいわゆる擬へき開破面を呈している．

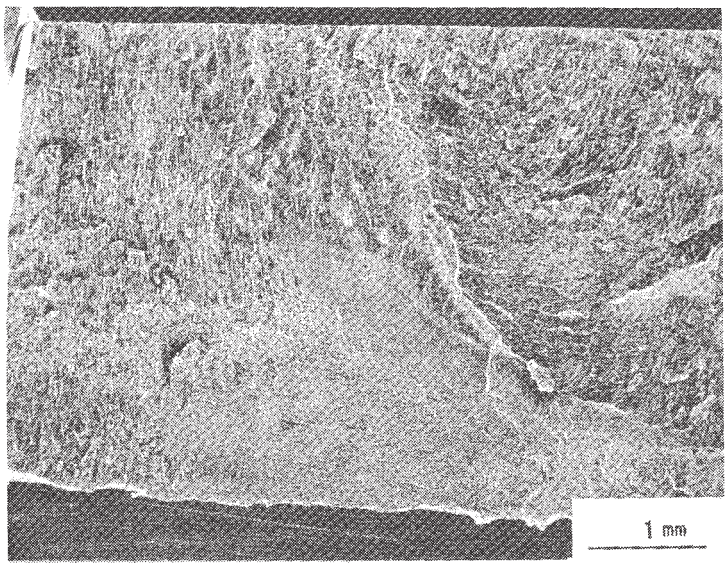


Fig. 1　マクロ破面

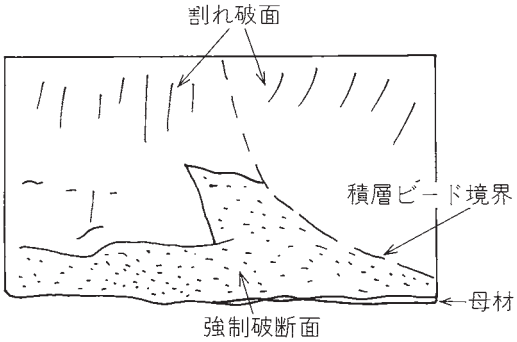


Fig. 2　Fig. 1のスケッチ

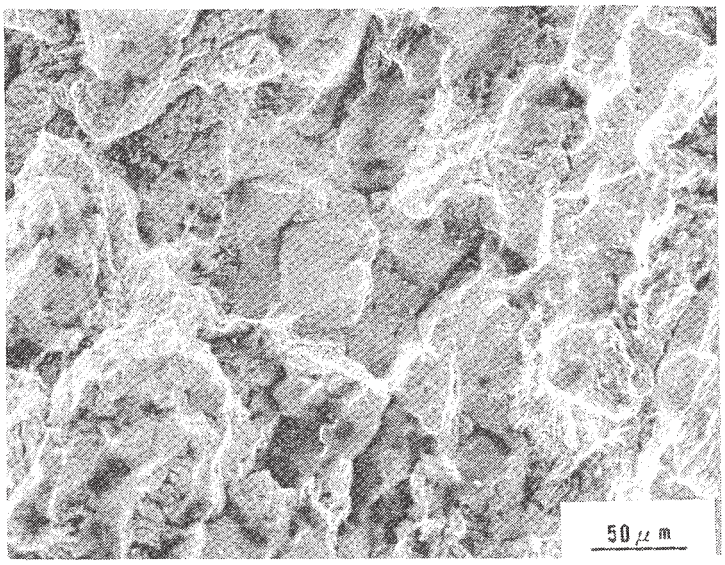


Fig. 3　ミクロ破面

(74) 被覆アーク溶接による30Cr鋳鉄系硬化肉盛部に発生した割れの破面

— 硬化肉盛溶接試験 —

(74) Fracture Surface of Cracking in 30%Cr Hardfacing Deposited Metal by Shielded Metal-Arc Welding

— Hardfacing Test —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：一般構造用圧延鋼材 SS41 (板厚25㎜).

溶接材料 (Welding material)：30Cr 鋳鉄系硬化肉盛用被覆アーク溶接棒 DFCrA (径 5 ㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Co
母　材	0.12	0.01	0.85	0.015	0.013	—	—
溶着金属	3.98	1.88	1.41	0.017	0.007	29.16	2.88

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　材	46.3	38.5	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	溶接棒の乾燥条件	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
平　板	350℃×1 hr	250～300	26～30	150～180	150～200	3 層 15 パス

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：硬化肉盛溶接試験

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

30%Cr 鋳鉄系の肉盛溶着金属は極めて割れやすい．組織的には，マルテンサイトを含み，高 Cr 鋳鉄の地に，Cr 炭化物が多量に析出したものである．

Fig.1 は，軟鋼上に肉盛を行なった表面の割れ発生状態のスケッチであり，割れは縦横に多数発生している．Fig.2 はマクロ破面を示す．Fig.3，4 はミクロ破面である．柱状晶の結晶粒界より破断しているのがみられる．

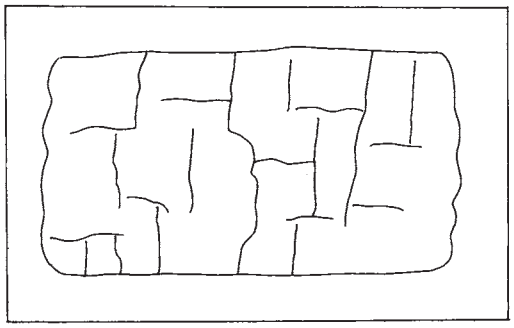


Fig. 1　割れの発生状況

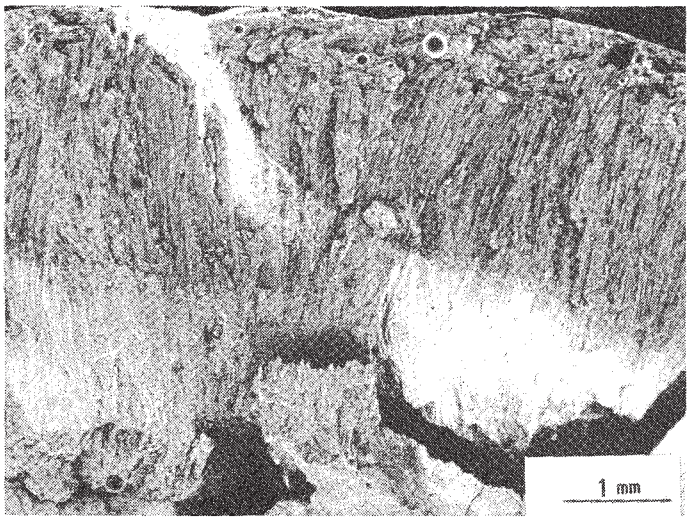


Fig. 2　マクロ破面

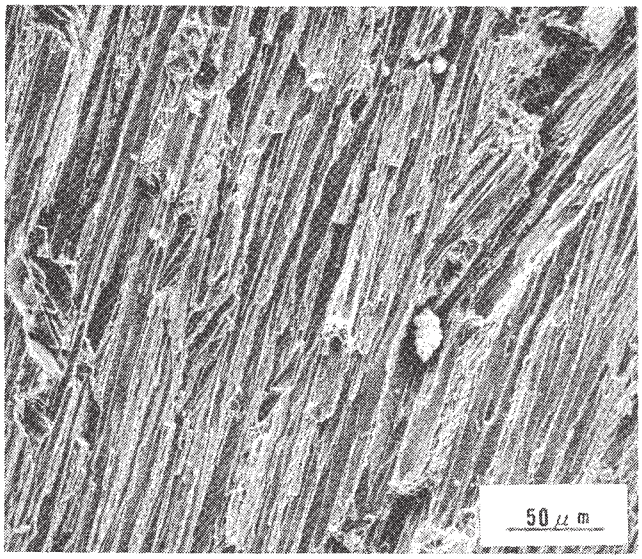


Fig. 3　ミクロ破面

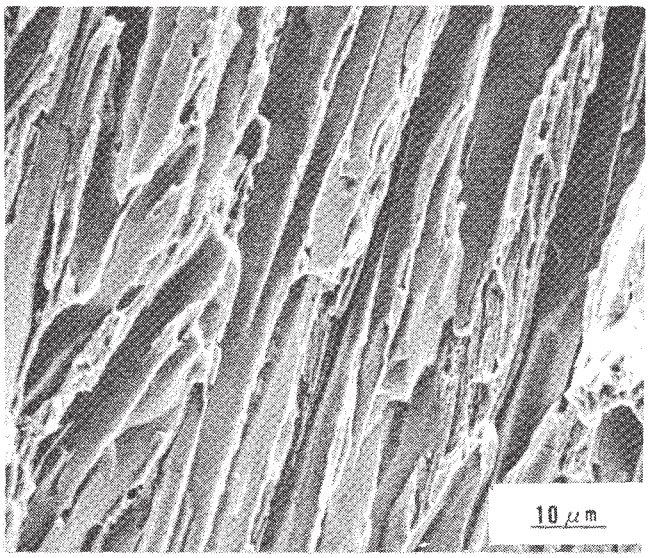


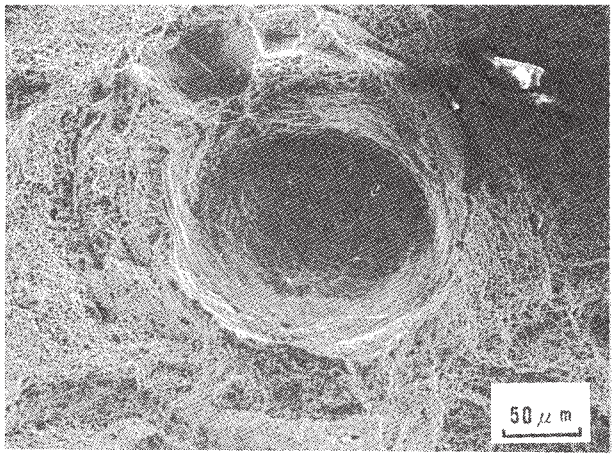
Fig. 4　Fig. 3の中央部の拡大

I．6　ブローホール，スラグ巻込みなど (Blowholes, Slag Inclusions and Others)

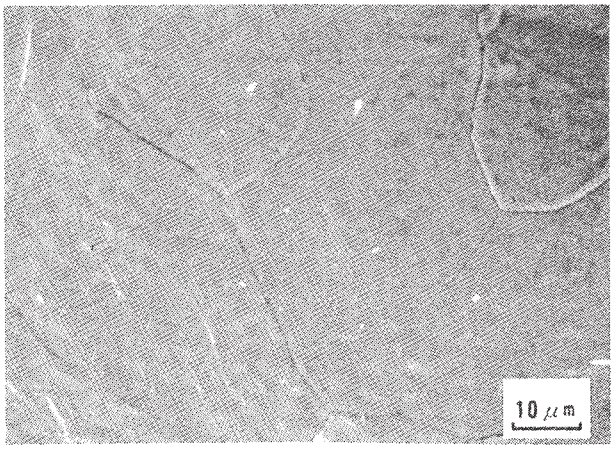
概説 (Outline)

溶接部の構造上の欠陥として溶接割れ以外に，ブローホール(Blowhole)，ウォームホール (Wormhole)，融合不良，溶込み不足，スラグ巻込み，アンダカット (Undercut) なども溶接部の破壊の起点となり得るため，ミクロ破面におけるこれらの様相をも把握しておくことが望ましい．

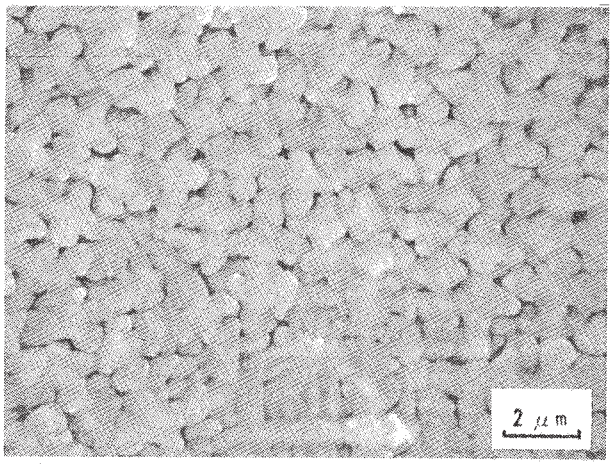
ブローホールは凝固界面付近におけるガス成分の溶解度の減少などにより発生するため，ブローホールの内面は高温時で生成したことを示すなめらかさをもっている．なお鋳鋼や鋳鉄においては内面の様相はガス成分の影響を受けることが示されている[1,2]．たとえばCOガスが原因であるときは内面は平滑であり，窒素ガスが原因であるときは比較的凹凸が見られ，また水素ガスが原因である場合はしわ状の凹凸がわずかに見られる．溶接部ではこのような検討はとくにされていないようであるが，同様の傾向が見られるものと考えられる．溶接部に見られたブローホールの例を Fig.1 に示す．Fig.1 (a)は50キロ級高張力鋼の被覆アーク溶接金属に見られたブローホール，Fig.1 (b)はその内面を拡大したもの，Fig.1 (c)は高炭素鋼の電子ビーム溶接金属に見られたブローホールの内面である．Fig.1 (c)では(b)に比してセル状樹枝状晶がきわめて顕著に見られるが，このような内面の違いは材料の違いによるものか，溶接方法あるいはそれに伴うガス成分の違いによるものか現在明らかでない．ウォームホールもその形態の違いを除けば，内面の様相はブローホールと同一と考



(a)　HT50の被覆アーク溶接金属に発生したブローホール（周囲は強制破断によるディンプル）



(b)　(a)の中央部の拡大



(c)　高炭素鋼の電子ビーム溶接金属で発生したブローホールの内面

Fig.1　ブローホールの例

えられる．

融合不良は溶接境界面が十分に溶け合っていない部分であり，言いかえれば，鋳造時に溶融金属が金型に接触しても合体はしないという状況に似ている．Fig.2 は融合不良の母材側の様相の例を示したものであり，母材開先面そのままの無特徴な平坦さと共に，高温にさらされたことを示すなめらかさも見られる．また高温に加熱されたために結晶粒界のくぼみが見られることもある．融合不良の溶接金属側ではセル状樹枝状晶の凹凸が見られることもある．

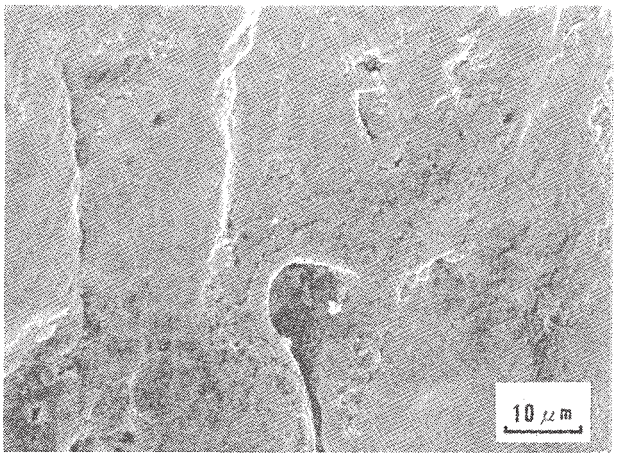


Fig.2　融合不良の母材側の例（9％Ni 鋼）

溶込み不足は高温にさらされた部分では融合不良の母材側に類似した様相を示し，高温にさらされていない部分では母材の開先面そのものが見られるようである．

スラグ巻込みは，スラグが非電導性であるために，SEM 観察では入射電子がチャージされ（チャージ・アップ現象）光り輝いていることが多い．この例は Fig.1 (a)の右上方部に見られる．

アンダカットは母材の溶融した部分に溶融金属が十分に埋まらないためにできるものであるため，その表面には高温にさらされたことを明瞭に物語るなめらかさや，結晶粒界のくぼみが見られ，またスラグも見られることがある．一例を Fig.3 に示す．

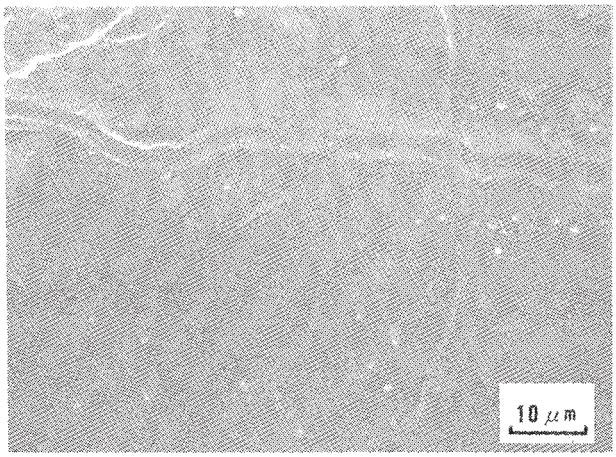


Fig.3　疲労破壊の起点となったアンダカット（HT50の CO_2 アーク溶接部）

参考文献

1）喜多：鋳物，Vol.47 (1975)，No.7，P.469.

2）喜多，他：鋳物，Vol.49 (1977)，No.6，P.329.

(75) SS41鋼の被覆アーク溶接時に発生したブローホール

(75) Blowhole in Shielded Metal-Arc Welding of SS41 Steel

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：一般構造用圧延鋼材 SS41 (板厚19㎜).

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

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材	0.18	0.06	0.92	0.021	0.028
溶 着 金 属	0.06	0.88	0.43	0.015	0.011

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　材(規格値)	41.0～52.0	≧24.0	—	— at —℃
溶着金属(測定例)	55.0	48.0	33	22 at 0℃

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 (㎜／min)	積層方法
Y　形	23	150	150	1層3パス

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は溶接部横断面のマクロ組織を示したもので，溶接金属内にブローホール (Blowhole) が発生している. Fig.2 はブローホール内面を低倍率で拡大して示したもので，Fig.3 はそれをさらに拡大したものである. ブローホール内部は比較的無特徴で滑らかであり，粒界と思われるくぼみとセル状樹枝状晶の突起状のものが観察される. 一般に，炭素鋼の被覆アーク溶接金属中のブローホール内面は比較的無特徴で，セル状樹枝状模様はあまり明確には見られないようである.

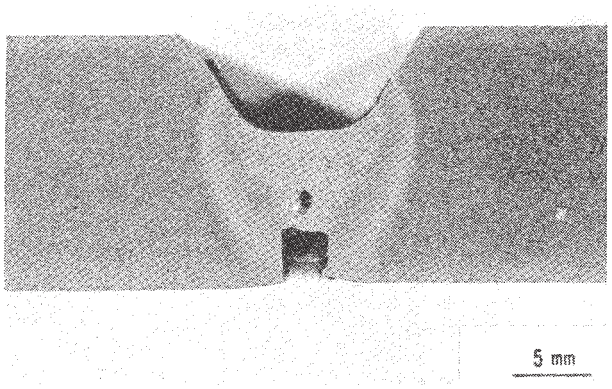


Fig. 1　溶接部横断面のマクロ組織

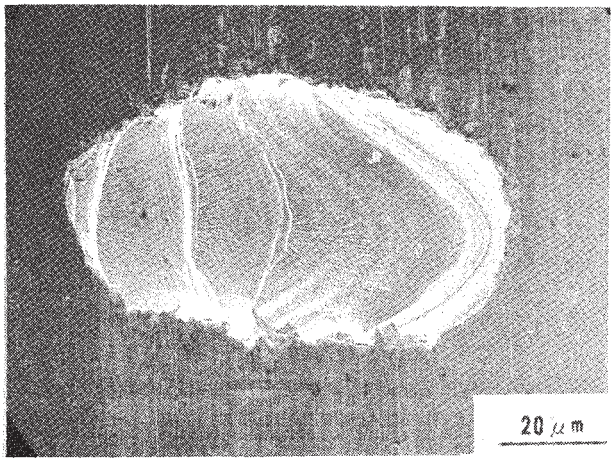


Fig. 2　低倍率で拡大したブローホールの様相

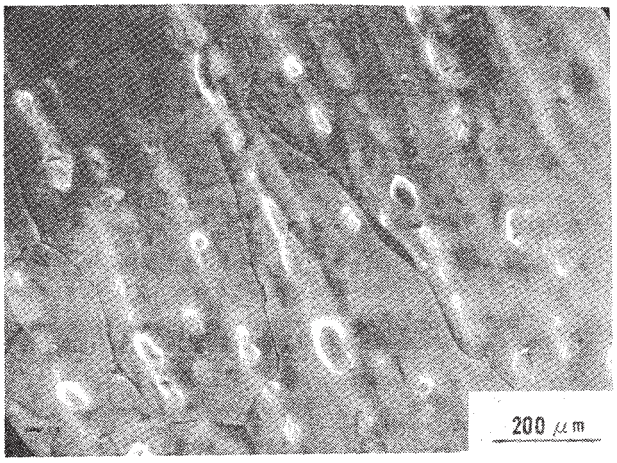


Fig. 3　高倍率で拡大したブローホール
内面の様相

(76) SM41鋼の被覆アーク溶接時に発生したブローホール

(76) Blowhole in Shielded Metal-Arc Welding of SM41 Steel

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 SM41 (板厚12㎜).

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

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材(分析例)	0.22	0.40	0.71	0.023	0.018
溶着金属(分析例)	0.08	0.44	0.97	0.013	0.009

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点(0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)	備　考
母　　材(測定例)	45	27	32	— at —℃	—
溶着金属(測定例)	55	48	33	22 at 20℃	溶接のまま

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	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	積層方法
すみ肉	なし	25～27	120～140	2層4パス

試　験 (Test)

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

試験条件 (Test condition)：非破壊検査後，欠陥部を強制破断させた.

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 (a)に試験片形状と溶接の積層方法を示す. 溶接は母材の表面に錆, 不純物や水分の多い状態で行ない，ブローホール (Blowhole) を発生させやすくした. 溶接後, 試験片を Fig.1 (b)のように強制破断させた. ブローホールの発生位置は Fig.1 に示してあるが，そのときのマクロ破面を Fig.2 に示す. Fig.2 のスケッチを Fig.3 に示す. Fig.3 では A 部にブローホールが発生しており，実際のマクロ破面ではブローホール部は銀色の金属光沢を示している. このブローホール内面を低倍率で拡大したものを Fig.4 に示す. Fig.5 は高倍率に拡大した例であり，さらに Fig.6 は Fig.5 の中央部を拡大したものである. 全体として表面が滑らかであり，また丸みを帯びた微小な突起がセル状樹枝状晶の方向に並んでいるのが見られる.

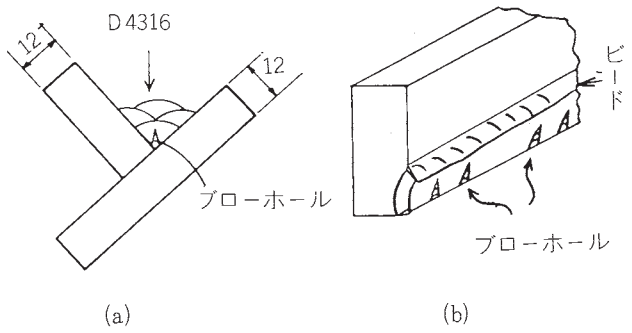


Fig. 1　試験片形状と強制破断面に見られるブローホールの発生位置

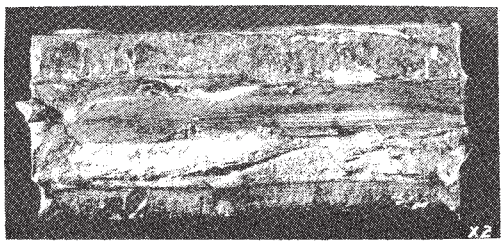


Fig. 2　強制破断面

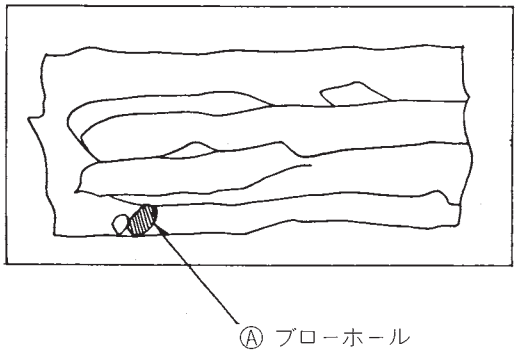


Fig. 3　Fig. 2のスケッチ図

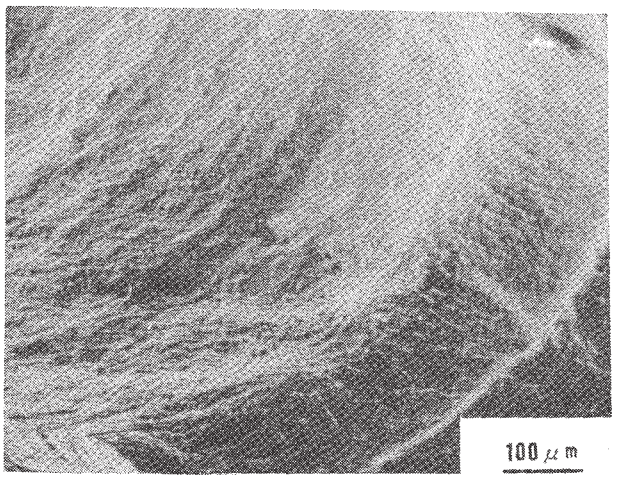


Fig. 4　Fig. 3のA部を低倍率で拡大したミクロ的様相

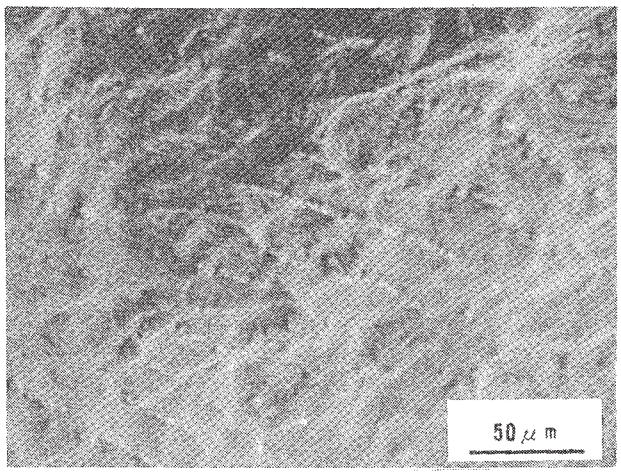


Fig. 5　Fig. 4の高倍率観察の例

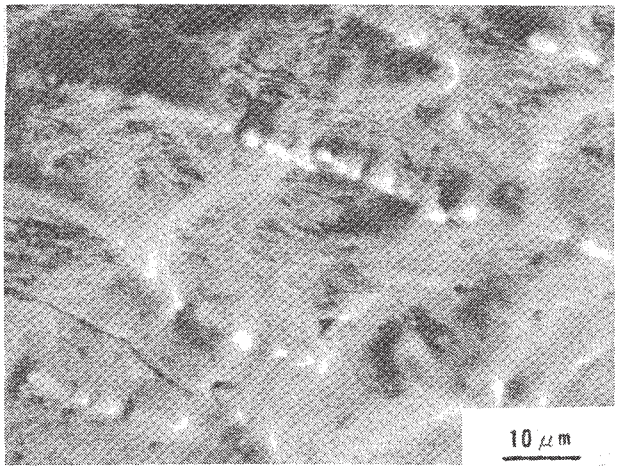


Fig. 6　Fig. 5の中央部の拡大

(77) 軟鋼の電子ビーム溶接時に発生したブローホール

(77) Blowhole in Electron Beam Welding of Mild Steel

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：一般構造用圧延鋼材 (板厚20㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S	O	N
母　材	0.17	0.02	0.40	0.004	0.002	0.0312	0.0075

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 (㎜/min)	真空度 (Torr.)
150	30	0.6	300	$\leqq 4\times10^{-4}$

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は溶接部側面からのX線透過写真であり，多数のブローホール(Blowhole)の発生が認められる．中にはウォームホール (Wormhole) 状のものも見られる．Fig.2 は溶接部横断面マクロ組織を示したものであり，多くのブローホールが見られる．Fig. 3 はブローホールを低倍率で拡大した観察例であり，Fig.4 はかなり高倍率で観察した例である．被覆アーク溶接時に見られるブローホールに比して，セル状樹枝状晶の突起が非常に明瞭に認められ，このような様相はむしろクレータ割れなどの凝固割れに類似している．

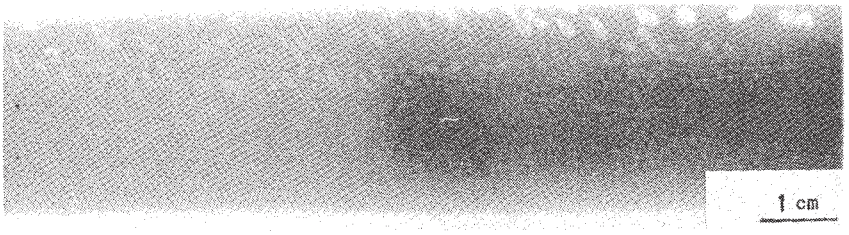


Fig. 1　ＥＢ溶接部Ｘ線透過写真

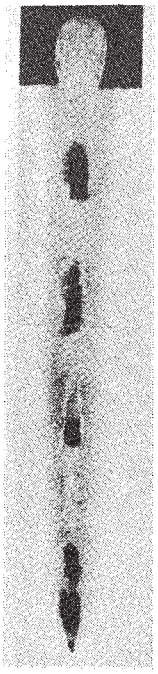


Fig. 2　溶接部横断面マクロ

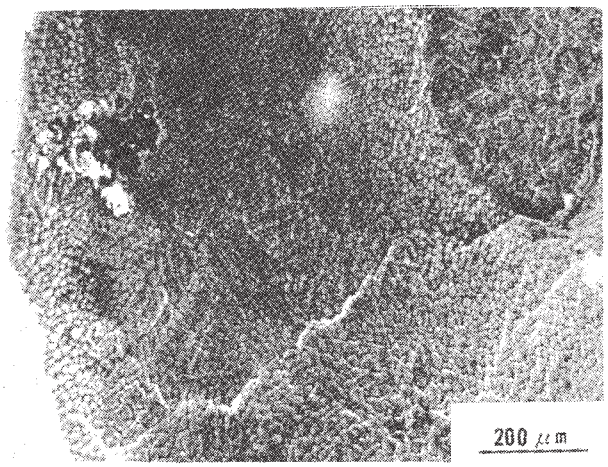


Fig. 3　ブローホール内面状況

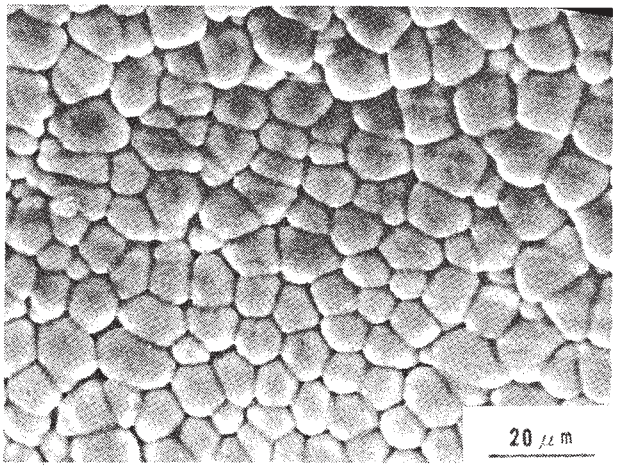


Fig. 4　ブローホール内面拡大状況

(78) SM41鋼とニッケルクロムモリブデン鋼の異材継手のMIG溶接時に発生したブローホール

(78) Blowhole in MIG-Arc Welding of Dissimilar Joint of SM41 Steel and Ni-Cr-Mo Steel

材　料（Material）

母　　材（Base metal）：溶接構造用圧延鋼材 SM41（板厚16㎜），
ニッケルクロムモリブデン鋼鋼材 SNCM 5（板厚30㎜）.

溶接材料（Welding material）：MIG 溶接用軟鋼ワイヤ AWS E75S-G（径1.6㎜）.

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
母材(SM41)(分析例)	0.22	0.40	0.71	0.023	0.018	——	——	——
母材(SNCM5)(規格値)	0.25 ～0.35	0.15 ～0.35	0.35 ～0.60	≦0.030	≦0.030	2.50 ～3.50	2.50 ～3.50	0.50 ～0.70
溶着金属(分析例)	0.07	0.62	1.21	——	——	——	——	——

機械的性質（Mechanical property）

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点(0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)	備　考
母材(SM 41)(測定例)	45	27	32	− at − ℃	−
溶着金属(測定例)	53	44	30	15 at −20℃	620℃×1 hr のSR

溶　接（Welding）

溶接方法（Welding method）：MIG 溶接（MIG-arc welding）

溶接条件（Welding condition）

開先形状	予熱・層間温度（℃）	アーク電圧（V）	溶接電流（A）	溶接速度（㎜/min）	積層方法	シールドガス
レ　　形	200	27	300	250～300	5層8パス	Ar+2%O_2

試　験（Test）

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

試験条件（Test condition）：溶接後非破壊試験を行ない，欠陥部を強制破断させた.

破面の解説（Fracture Surface Analysis）

Fig.1 に溶接継手の形状を，Fig.2 に溶接部の横断面マクロ組織を示す．溶接継手の非破壊検査を行なった後，欠陥の存在する位置を強制破断させた．Fig.3 はそのマクロ破面を示したものであり，ブローホール(Blowhole)が存在していた．このブローホールは MIG 溶接時のシールド不足によって生成したものである。ブローホールは金属光沢を示していた．このブローホールを低倍率で拡大した例を Fig.4 に示す．Fig.5 は Fig.4 のほぼ中央部を拡大したものであり，Fig.6 は Fig.5 のほぼ中央部を拡大したものである．このようにブローホールの内面は比較的平滑で滑らかさをもっており，またセル状樹枝状晶の突起と共に，粒界と思われるくぼみも見られる．

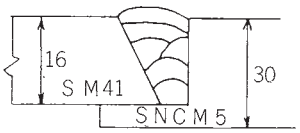


Fig. 1　溶接継手の形状

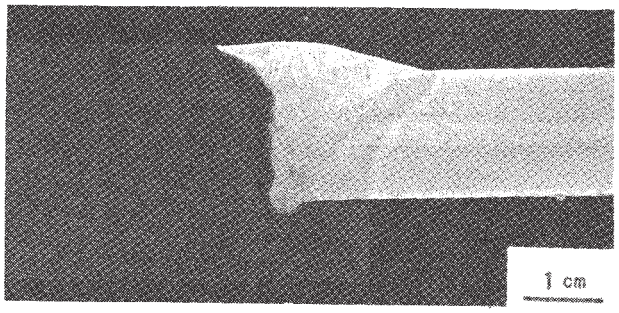


Fig. 2　横接部の横断面マクロ組織

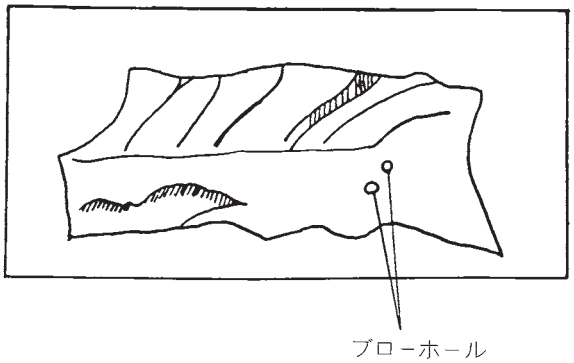


Fig. 3　強制破断面のスケッチ

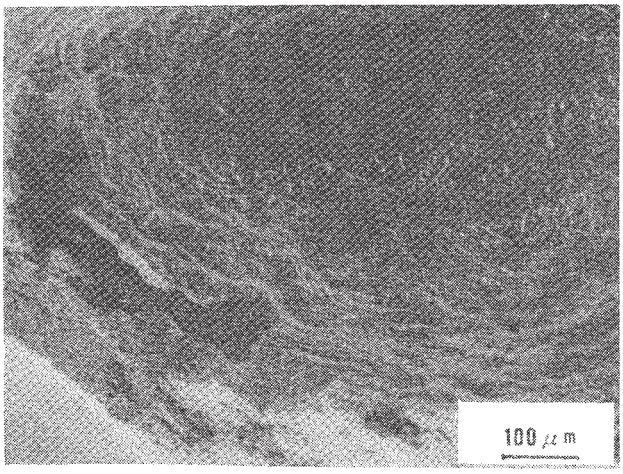


Fig. 4　低倍率で拡大したミクロ的様相

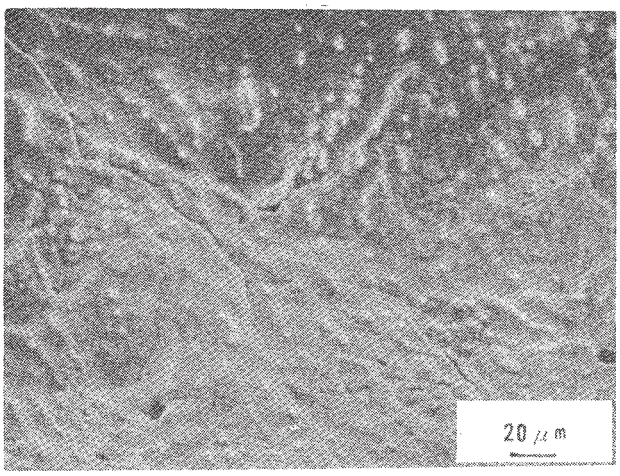


Fig. 5　Fig. 4 のほぼ中央の拡大

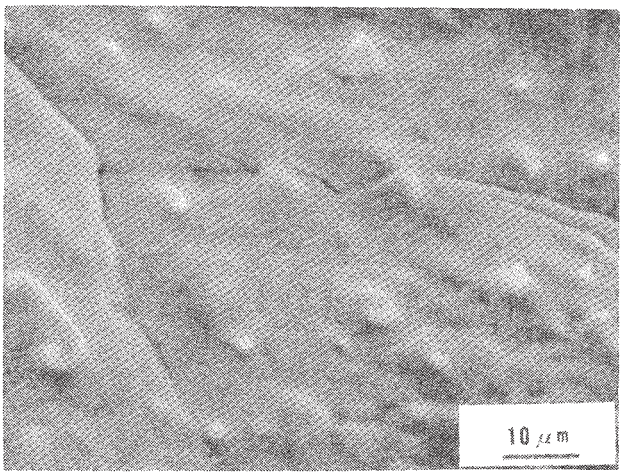


Fig. 6　Fig. 5 のほぼ中央の拡大

(79) 軟鋼管のサブマージアーク溶接時に発生したウォームホール

(79) Wormhole in Submerged-Arc Welding of Mild Steel Pipe

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：配管用アーク溶接炭素鋼鋼管 STPY41 (板厚9.5㎜).

溶接材料 (Welding material)：ワイヤ：鋼サブマージアーク溶接材料 YSW11(径4㎜),

フラックス：マンガン硅酸塩系 (IIW).

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材(規格値)	—	—	—	≦0.050	≦0.050
溶着金属(分析例)	0.07	0.01	0.68	—	—

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　　材(規格値)	≧41	≧23	≧18

溶　接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：2電極サブマージアーク溶接 (Tandem submerged-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	フラックスの乾燥条件	予熱温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
Y　　形	350℃×1hr	室　　温	L：34 T：42	L：900 T：720	1,400	1層1パス

(L：第1電極, T：第2電極)

試　験 (Test)

試験片形状 (Specimen configuration)：1,000㎜長×150㎜幅×9.5㎜厚

試験条件 (Test condition)：ルート面にFeスケールをはさみ込むことによりウォームホールを発生させた.

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 に開先形状を示すが, ルート面にFeの酸化物からなるスケールをはさみ込んで溶接することにより, 多数のウォームホール (Wormhole) が発生した. Fig.2 はウォームホールの発生状況を示したもので, ウォームホールはルート側を起点として, 溶接方向に少し傾いていた. これは柱状晶の方向性のためであろう. ウォームホールの長さは1～10㎜であり, 直径は1㎜以下であった. ウォームホールを低倍率で拡大した観察例を Fig.3 に示す. Fig.4 は Fig.3 を拡大したものであり, さらに Fig.5 は Fig.4 を拡大したものである. ウォームホールの内面は滑らかであるが, セル状樹枝状晶の方向性と突起が顕著に見られる. また Fig.5 では球状の介在物や粒界と思われるくぼみも明瞭に認められる. X線マイクロアナライザーによる分析結果では, 球状の介在物は Fe−Si−Mn−S(−O)系の複合の酸・硫化物である.

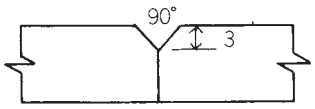


Fig. 1　開先形状

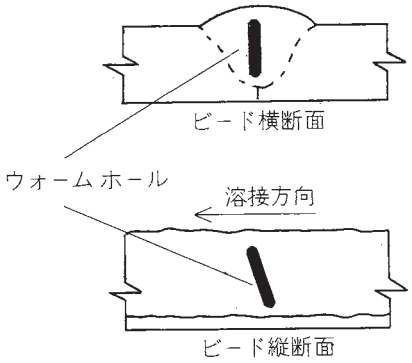


Fig. 2　ウォームホールの発生

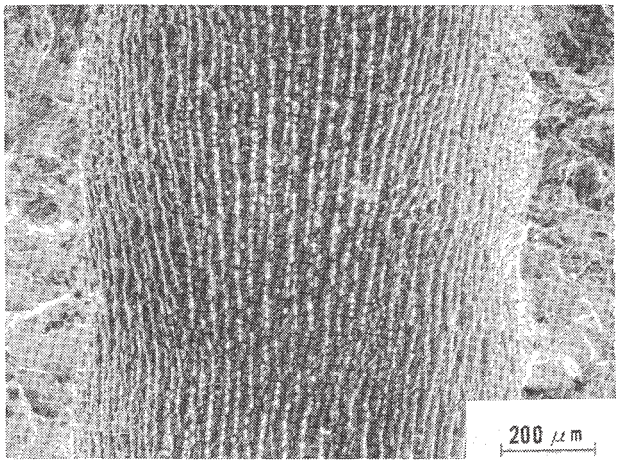


Fig. 3　低倍率で拡大したミクロ的様相

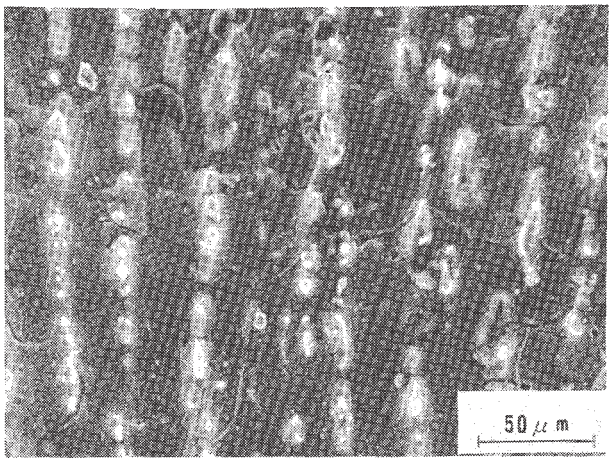


Fig. 4　Fig. 3 の拡大

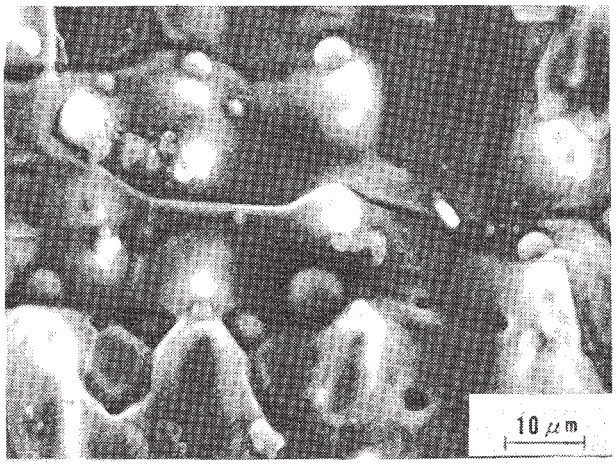


Fig. 5　Fig. 4 の拡大

(80) SS41鋼の被覆アーク溶接時に発生した融合不良

(80) Lack of Fusion in Shielded Metal-Arc Welding of SS41 Steel

材　料（Material）

母　　材（Base metal）：一般構造用圧延鋼材 SS41（板厚19㎜）.

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

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材	0.18	0.06	0.92	0.021	0.028
溶　着　金　属	0.06	0.88	0.43	0.015	0.011

機械的性質（Mechanical property）

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点（0.2%耐力）(kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材(規格値)	41.0～52.0	≧24.0	－	－ at －℃
溶着金属(測定例)	55.0	48.0	33	22 at 0℃

溶　接（Welding）

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

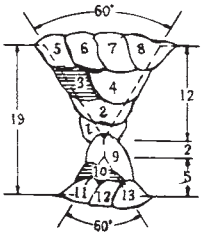
溶接条件（Welding condition）

開先形状	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜／min)	積層方法
X　形	30	120～170	170	7層13パス

破面の解説（Fracture Surface Analysis）

表1は積層方法と各パスの溶接条件を示したものである．**Fig.1**は溶接部の横断面を示したもので，四角で囲った枠内に融合不良が発生している．Fig.1と表1を対応させることにより，溶接電流の小さい場合に融合不良の発生していることがわかる．**Fig.2**および**3**は高倍率で拡大した観察例を示したものである．比較的平坦な面と，微細なセル状樹枝状晶的な凹凸が見られる．

Table1　溶接条件

開先形状および積層法	パス No.	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)
	1	170	30	17
	2	〃	〃	〃
	3	120	〃	18
	4	170	〃	17
	5～8	140～170	〃	〃
	9	170	〃	〃
	10	120	〃	18
	11～13	140～170	〃	17

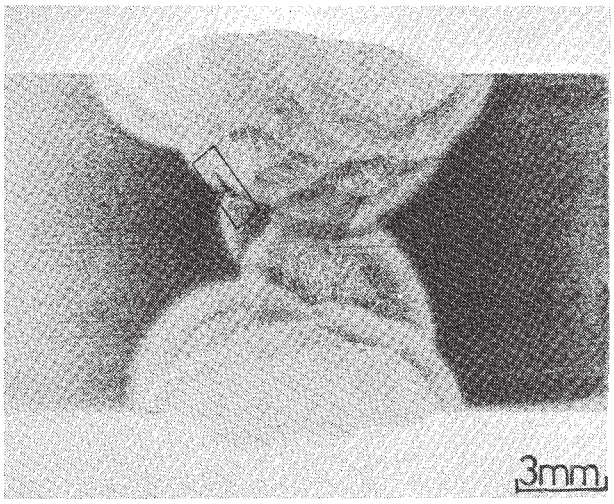


Fig. 1　溶接部横断面マクロ組織

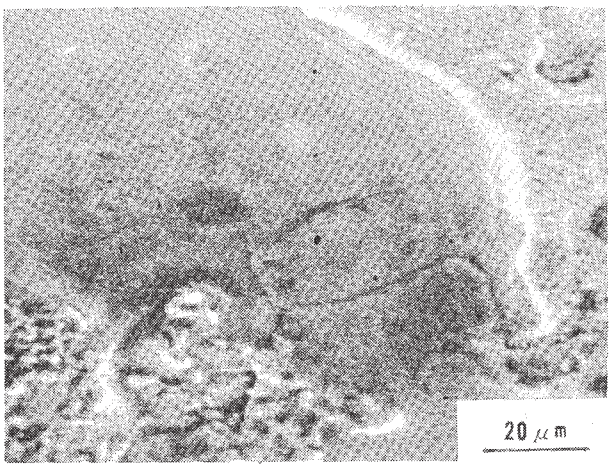


Fig. 2　融合不良部破面

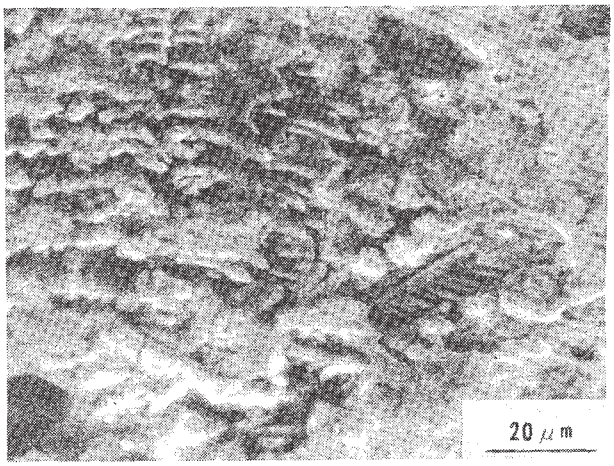


Fig. 3　融合不良部破面

(81) SM41鋼の被覆アーク溶接時に発生したスラグ巻込み

(81) Slag Inclusion in Shielded Metal-Arc Welding of SM41 Steel

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 SM41 (板厚12㎜).

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

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材(分析例)	0.22	0.40	0.71	0.023	0.018
溶着金属(分析例)	0.08	0.44	0.97	0.013	0.009

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材(測定例)	45	27	32	− at −℃
溶着金属(測定例)	55	48	33	22 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	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	積層方法
すみ肉	なし	25〜27	120〜140	2層4パス

試　験 (Test)

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

試験条件 (Test condition)：非破壊検査を行ない，欠陥部を強制破断させた.

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は試験片形状と溶接の積層方法を示したものであり，前層の残留スラグ (Slag) がそのまま次層の溶接金属に残存してスラグ巻込みとなった．溶接後の強制破断面を Fig.2 に，またそのスケッチ図を Fig.3 に示す．黒い帯状の部分Aがスラグ巻込みである．スラグを除去した面を低倍率で拡大した観察例を Fig.4 に示す．なお Fig.4 の右端は強制破断面である．Fig.5 は Fig.4 の中央部を拡大したものであり，また Fig.6 は Fig.5 の中央部を拡大したものである．全体的に見て，表面は平坦であると共に滑らかさを示しており，これは表面がかなりの高温度にさらされたためと思われる．なお Fig.6 では微小な樹枝状晶的な突起が見られる．

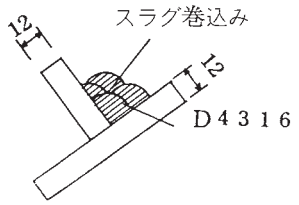


Fig. 1　試験片形状とスラグ巻込みの位置

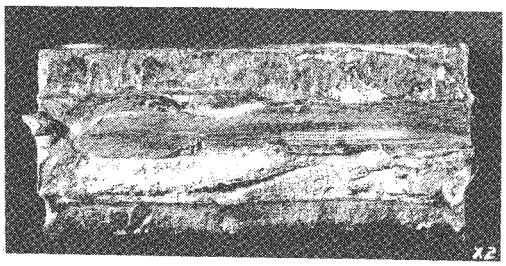


Fig. 2　強制破断面

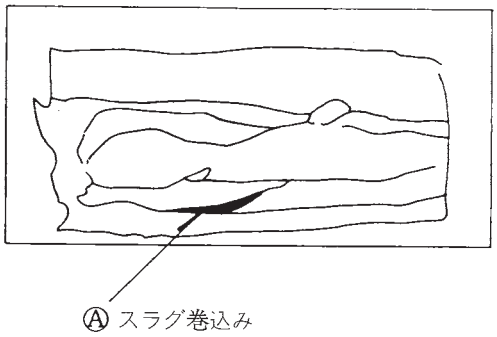


Fig. 3　Fig. 2のスケッチ図

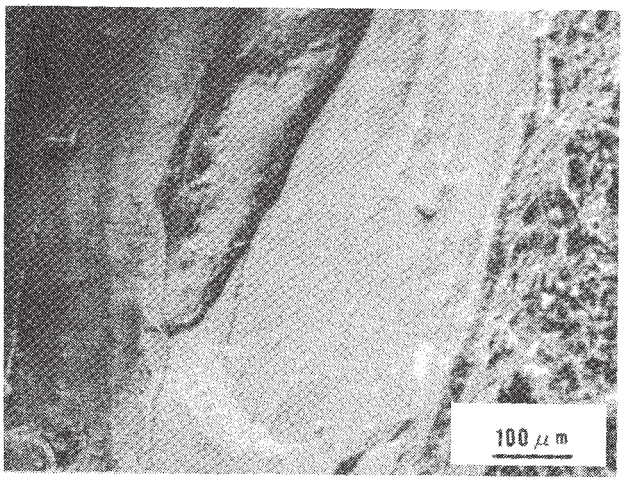


Fig. 4　Fig. 3のA部を低倍率で拡大したミクロ的様相

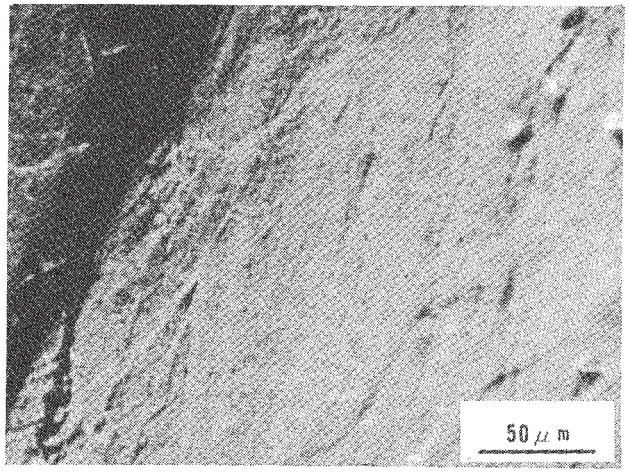


Fig. 5　Fig. 4の中央部の拡大

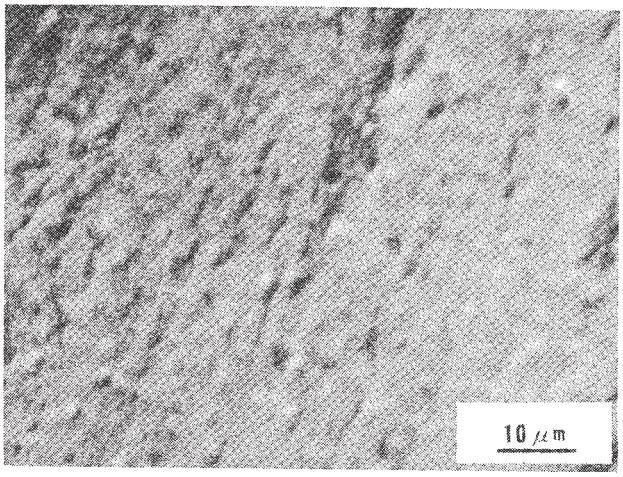


Fig. 6　Fig. 5の中央部の拡大

(82) HT50鋼のサブマージアーク溶接時に発生したスラグ巻込み

(82) Slag Inclusion in Submerged-Arc Welding of HT50 Steel

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 SM50A (板厚10㎜).

溶接材料 (Welding material)：ワイヤ：鋼サブマージアーク溶接材料 YSW11(径 4 ㎜).

フラックス：マンガン硅酸塩系 (IIW).

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材(規格値)	≦0.20	≦0.55	≦1.50	≦0.040	≦0.040
溶着金属(分析例)	0.07	0.01	0.68	—	—

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　　材(規格値)	50～62	≧33	≧17

溶　接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：2 電極サブマージアーク溶接(Tandem submerged-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	フラックスの乾燥条件	予熱温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法	ルートギャップ
Y　形	350℃ ×1 hr	室　温	L:34 T:42	L:900 T:720	1,350	1 層 1 パス	3 ㎜

(L：第 1 電極，T：第 2 電極)

試　験 (Test)

試験片形状 (Specimen configuration)：600㎜長×200㎜幅×10㎜厚

試験条件 (Test condition)：ルート間隔をあけることにより，大きなスラグ巻込みが断続的に発生するようにした.

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は開先形状を示したものであり，銅の裏当を用いた．使用するフラックスの粉体物性や高温物性が不適当であると，ルート間隔が広い時には，Fig.2 に示すように大きなスラグ巻込みが発生する.

スラグを除去した面を低倍率で拡大した観察例を Fig.3 に示す．Fig.4 は Fig.3 を拡大したものであり，また Fig.5 は Fig.4 の左上部付近を拡大したものである．全体的に見て，表面は平坦であるが，模様も少し見られる．また介在物は見られない.

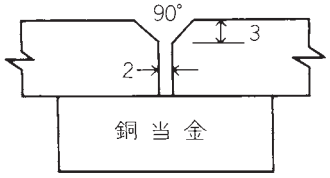


Fig. 1　開先形状

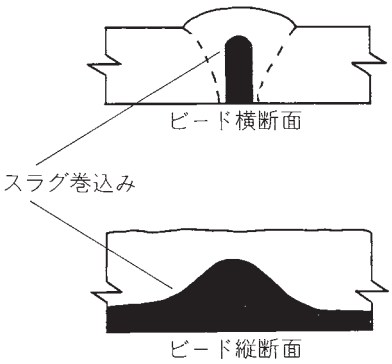


Fig. 2　スラグ巻込みの発生状況

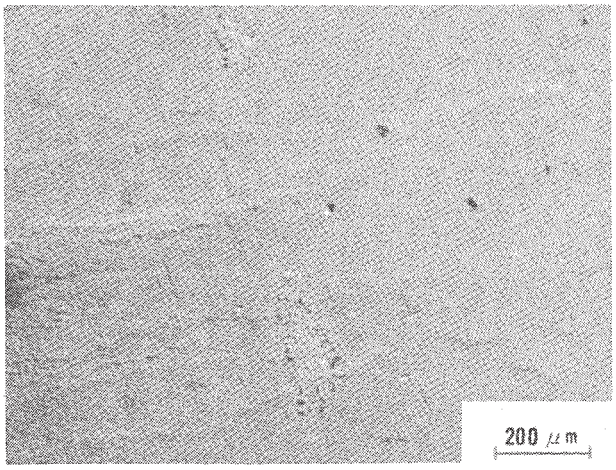


Fig. 3　低倍率で拡大したスラグ巻込み面のミクロ的様相

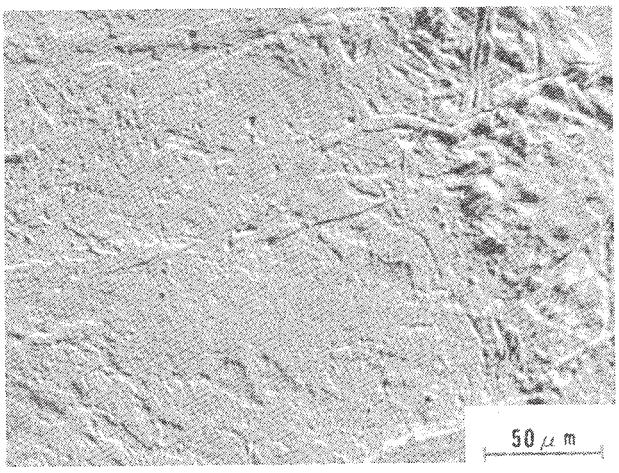


Fig. 4　Fig. 3 の拡大

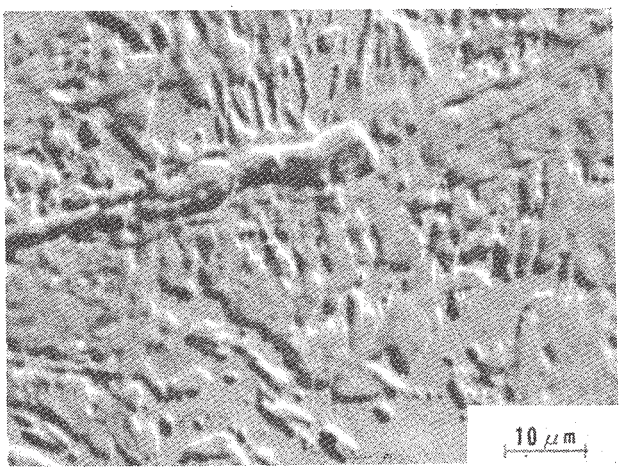


Fig. 5　Fig. 4 の左上部付近の拡大

II. 溶接継手における破壊および腐食

Failures in Welded Joints

II．1　静的破壊（Fractures in Static Tests）

概説（Outline）

本項には静的荷重（通常の引張試験程度のゆっくりした速度で加わる荷重や定荷重）により，室温又は高温で破断した溶接継手，溶着金属，母材あるいは再現熱影響部などの試験片の破面写真が集録されている．

一般に構造物の静的荷重による破壊事例は，衝突や繰返しなどの動的荷重によるそれに比べて少なく，静的破壊のフラクトグラフイ（Fractography）に関する知見は，母材の引張りや曲げなどの静的試験から得られたものが多いが，溶接部の静的破壊のフラクトグラフィに関する普遍的な説明はまだなされていない．これは溶接部のフラクトグラフィ的研究が数少ない上に，溶接部が一度溶融し凝固した溶接金属及び溶接熱により溶融点直下から母材の変態温度近傍までの種々の温度に急熱・急冷されて材質が複雑に変化している熱影響部から形成され，材質がほぼ一様な母材に比べてその破壊型式がかなり複雑であるためと考えられる．

ここでは本項に集録されている溶接部の静的破面に対する理解を助けるための基礎的知識として，一般によく知られている母材の引張試験における破壊ならびに高温破壊における破面の特徴について概説する．

(1)　引張試験破面のマクロ的及びミクロ的特徴[1)2)]

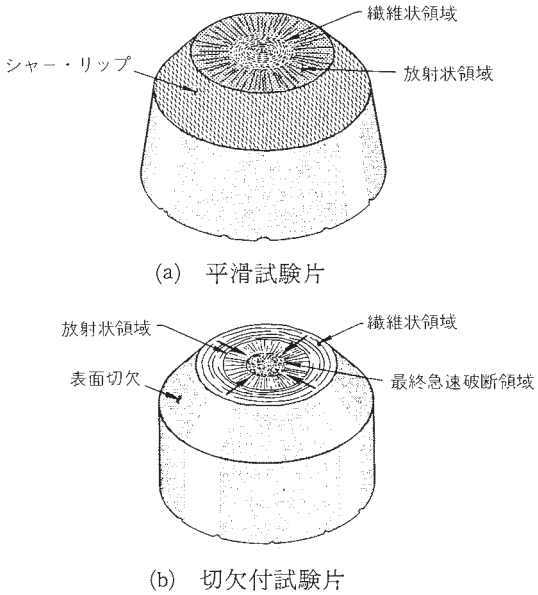


Fig.1　丸棒試験片の引張破面のマクロ的特徴（Metals Handbook）[3)]

Fig.1 (a)[3)]は平滑丸棒試験片でよく見られるいわゆるカップ・アンド・コーン（Cup and cone）型破面のマクロ的特徴を図示したもので，破面中央から外側へ向って繊維状（Fibrous）領域，放射状（Radial）領域及びシャー・リップ（Shear lip）が存在する．繊維状領域は割れが発生してゆっくりと延性的に伝ぱした領域で，割れがジグザグに伝ぱしたためにできた細かい凹凸があり，同心円状の縞模様を形成している．この領域はミクロ的には微小空洞の合体による等軸ディンプル（Equiaxed dimple）である．その外周の放射状領域は割れが急速に伝ぱした領域で，割れが同一平面上にないため割れの伝ぱ方向に沿った段ができて，それが放射状の模様を形成したものである．ミクロ的には材料の熱処理条件や試験温度によって擬へき開又は粒界ディンプル又は両者の混在した破壊様相となる．最も外周にあるシャー・リップは破壊の最終段階であるせん断破壊部分で，ミクロ的には伸長型ディンプル（Elongated dimple）である．以上のマクロ的な三種類の領域の破面に占める割合

は，材質，熱処理条件，使用温度，表面仕上げ，切欠きの有無などにより微妙に変化する．例えば延性材料の引張試験では放射状破面は現われないことも多い．又 Ni-Cr-Mo 鋼で試験温度を変えて引張試験を行なうと，試験温度が低下するにつれて繊維状領域及びシャー・リップは減少し放射状領域は増大する[4]．

Fig.1 (b)[3]は切欠付丸棒試験片の引張り破面のマクロ的特徴を図示したもので，割れは切欠底部から発生し，最も外周に繊維状領域が，その内周に放射状領域が形成される．中央部は急速破断を起した部分でこの場合はシャー・リップは存在しない．

Fig.2 (a)(b)[3]は板状試験片の引張り破面を示したもので丸棒試験片と同様の破面形態を示すが，放射状模様がシェブロン（山形，Chevron）模様を形成し，山の頂点が割れが伝ぱしてきた方向を指しているのが特徴的である．

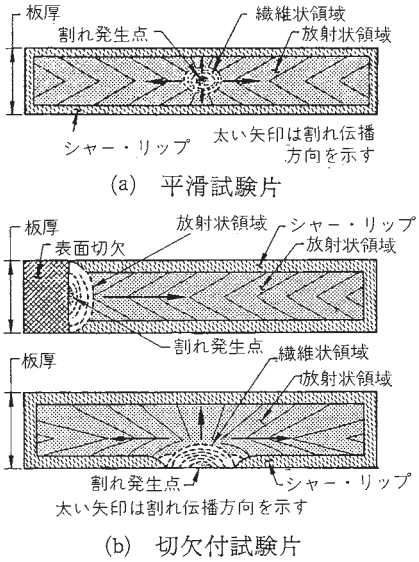


Fig.2 板状試験片の引張破面のマクロ的特徴 (Metals Handbook)[3]

なお丸棒試験片の引張破壊ではカップ・アンド・コーン型とは破壊形態が異なる異形カップ・アンド・コーン型破面が現われることがある．これらは材料の加工方向と試験片の軸方向が一致する場合に現われ，縦割れ（軸方向割れ）を伴っているのが共通的な特徴である．

(2) 高温破壊のミクロ的特徴[1]

高温になると材料の変形の時間的依存性すなわちクリープ（Creep）が著しくなり，それにつれて粒界におけるすべりが起りやすくなるので破壊は粒内型から粒界型に移行する．破壊が高応力下で起る場合は破面は脆性的な粒界破壊となり，鋭いくさび形空洞（粒界すべりにより粒界の三重点などに生じた応力集中により形成されたものでW型空洞と呼ぶ）がみられる．一方低応力下の破壊の場合は粒界面にディンプル状の模様がみられる延性的な粒界破壊となる．この場合は粒界の析出粒子などの位置に粒界すべりにより小空洞が形成され，これに原子空孔が集って成長し破壊したものとされている．

参考文献

1）小寺沢良一編著：フラクトグラフィとその応用，日刊工業新聞社，pp. 57～59.

2）小林卓也，井上　肇，林　慎也：圧力技術，Vol. 12(1974)，No. 5，pp. 225～231.

3）ASM：Metals Handbook，Vol. 9 (8th edition)，p. 27，29，38.

4）吉田　享：金属材料，Vol. 14(1974)，No.12，pp. 10～11.

(83) HT50鋼の板厚方向引張破面

— 引張試験 —

(83) Fracture Surface of HT50 Steel in Through-Thickness Tension Test

— Tension Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 SM50B (板厚50㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材	0.17	0.44	1.42	0.017	0.015

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸 び (%)
母　　材	54.4	34.7	35

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：金属材料引張試験方法　JIS Z2241

試験片形状 (Specimen configuration)：金属材料引張試験片　JIS Z2201　4号試験片

試験条件 (Test condition)：室温

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

板厚方向の引張試験において，伸び約20%，絞り約50%を示す試験材の中で，伸び4%，絞り17%と非常に小さい値を示した試験片の破面を観察した.

Fig.1 はマクロ破面を示したもので，局部収縮することなく，引張軸にほぼ垂直に破断しており，内部に階段状の破面が観察される．マクロ破面のスケッチを Fig.2 に示す．A部はB部よりも平滑である.

A部およびB部を拡大したものをそれぞれ Fig.3 および Fig.4 に示す．破面には圧延方向に引伸ばされた介在物があり，これが破断を容易にしたことがわかる．A部お

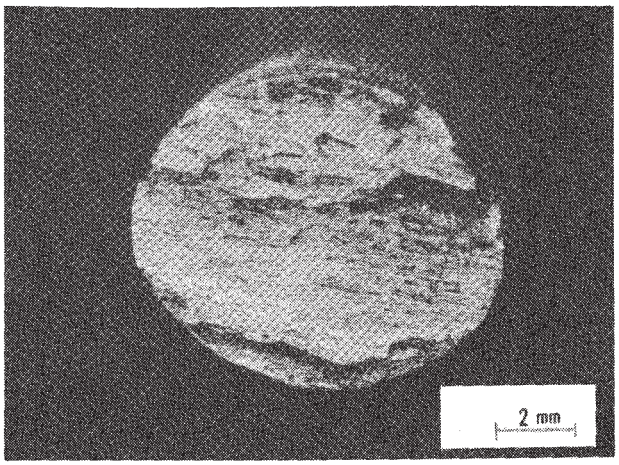
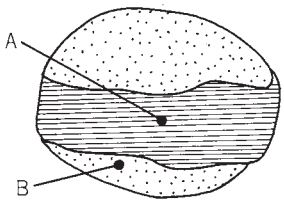


Fig. 1　引張試験片マクロ破面



観察配置：AおよびB

Fig. 2　マクロ破面スケッチ

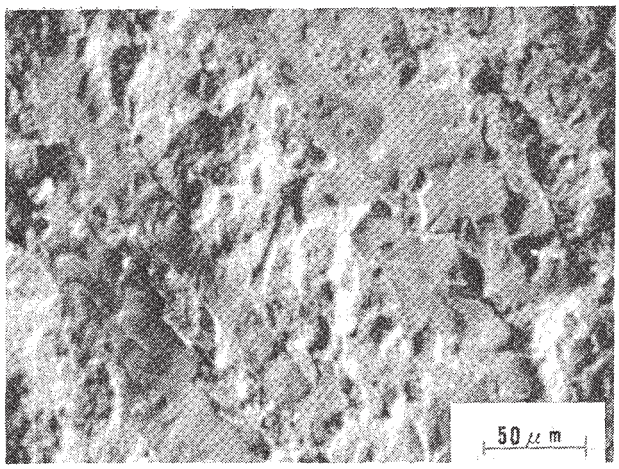


Fig. 3.　A部のミクロ破面

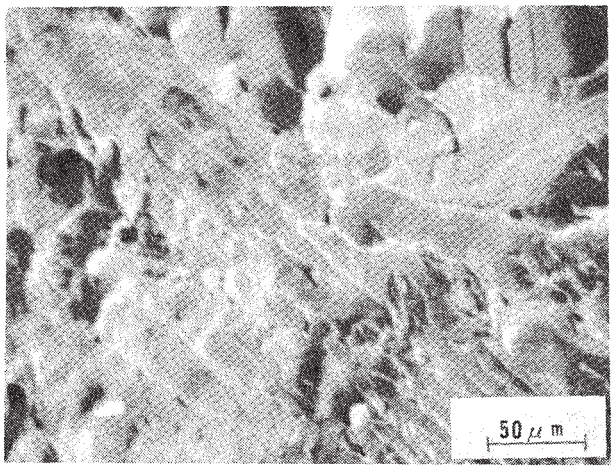


Fig. 4　B部のミクロ破面

よびB部のMn，Sの特性X線像をそれぞれFig.5，Fig.6およびFig.7，Fig.8に示す．これより圧延方向に引伸ばされた介在物はMnSであることがわかる．

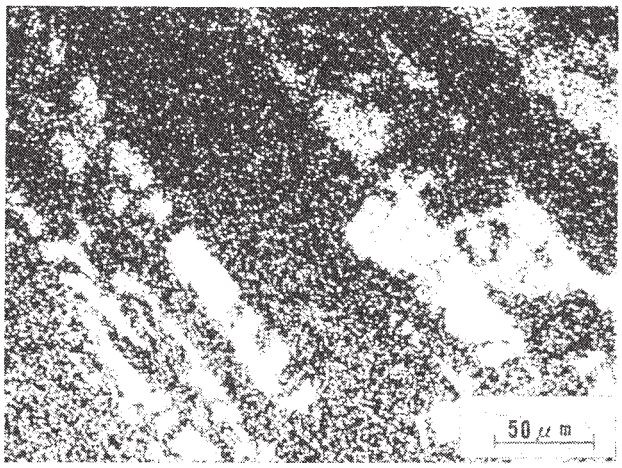


Fig. 5　A部のMn特性X線像

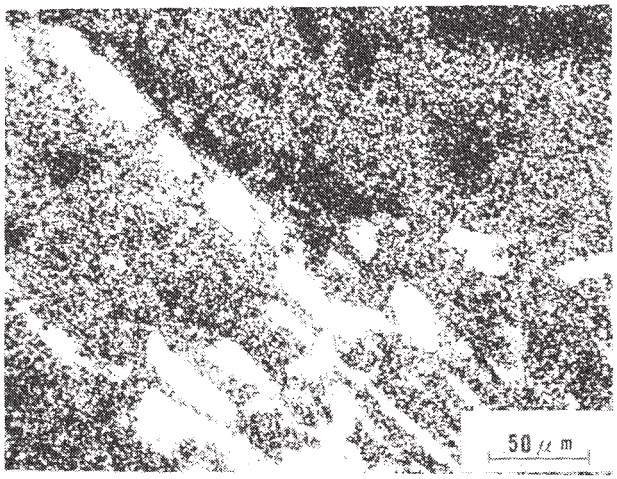


Fig. 6　B部のMn特性X線像

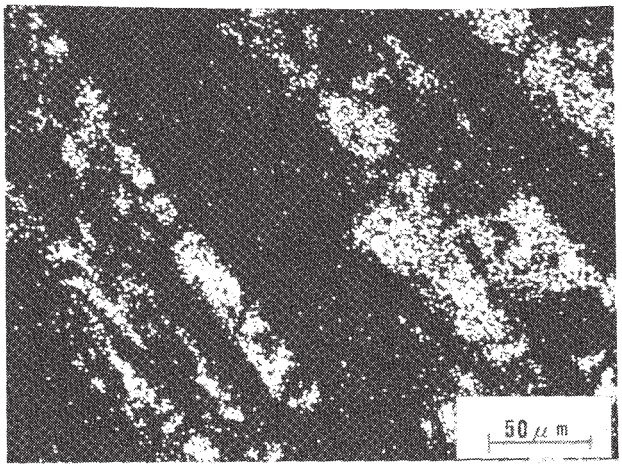


Fig. 7　A部のS特性X線像

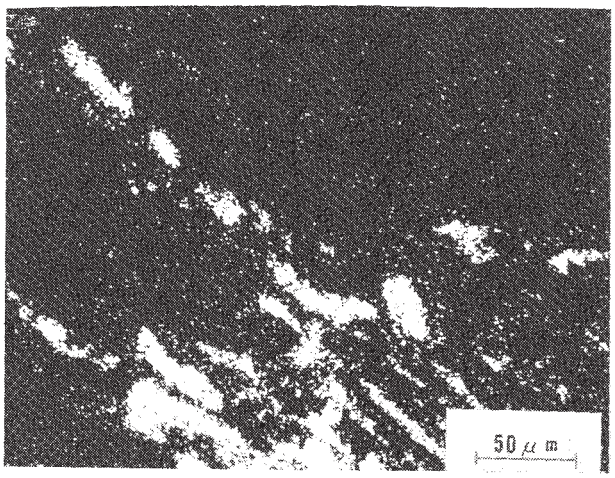


Fig. 8　B部のS特性X線像

(84) 低硫HT50鋼の板厚方向引張破面

— 引張試験 —

(84) Fracture Surface of Desulphurized HT50 Steel in Through-Thickness Tension Tests

— Tension Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 SM50 (板厚50㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材	0.14	0.46	1.45	0.010	0.005

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材	55	40	35	23 at −20℃

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：板厚方向引張試験

試験片形状 (Specimen configuration)：70㎜長×10㎜径

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

低硫 (S＝0.005%) HT50を用いて板厚方向引張試験を行ない，その絞り値 (以下 φ_Z) を元の鋼塊位置に対応させて図示すると，Fig.1 のようになる．鋼塊位置の幅方向に変動が大きくて端ほど高く，中央部になるにつれて低下する．またその破面形態を肉眼にて分類すると Fig.2 のように，L方向と同じようなカップ・アンド・コーン (Cup and cone) タイプ (Type A)，ボイド (Void) 状破面 (Type B)，ステップライク (Step-like) 破面 (Type C) に分類される．これらの破面を拡大したのが Fig.3 であり，Type B ではそのボイド部底に Al_2O_3 系介在物が認められ，その回りに擬脆性破面が認められる．また Type C では層状の MnS 系介在物が認められ，その間は延性破面である．この破面形態分類を鋼塊位置に対応させると端部では Type A，中央部ボトム (Bottom) では Type B，トップ (Top) 部では Type C となる．

またこれらの破面の介在物面積およびその回りの擬脆性破面の面積の合計の全面積

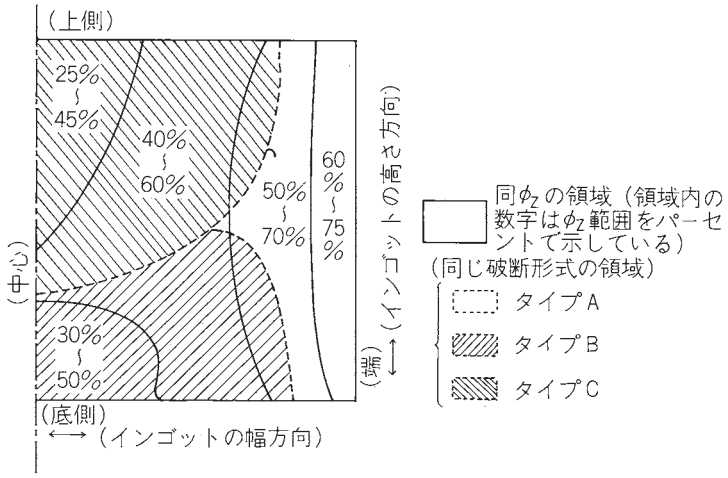
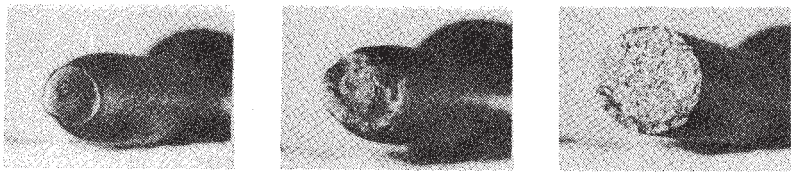


Fig. 1　鋼塊各部に対応する位置から採取された鋼板のϕ_Z及び破壊形式の分布の一例



Type A　　Type B　　type C

Fig. 2　板厚方向引張試験における破壊形式の分類

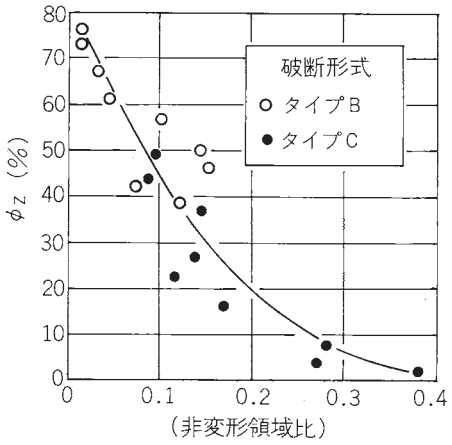
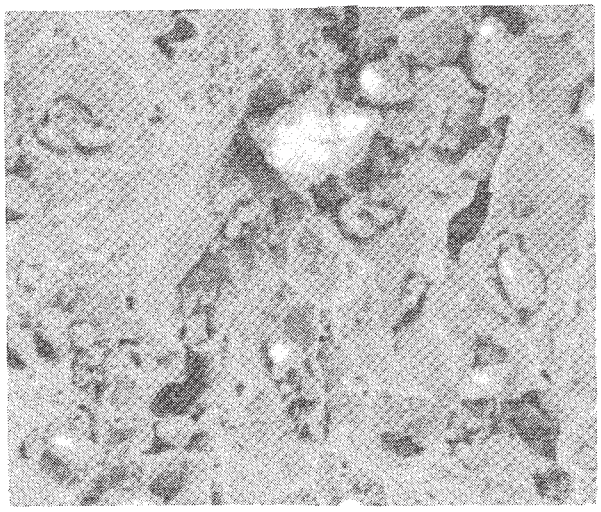


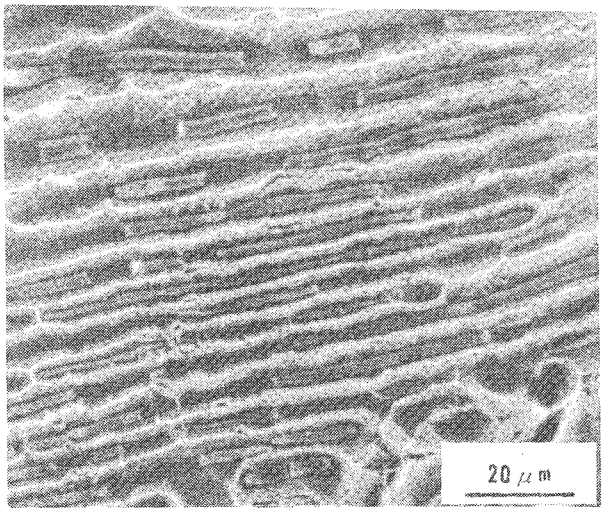
Fig. 4　ϕ_Zと〝非変形面積比〟(試験片の初期断面積に対する介在物及び低延性域を含む面積の比）の関係

に対する割合と φ_Z の関係を求めると Fig.4 のようになり，これらの面積率が φ_Z の低下要因となる．

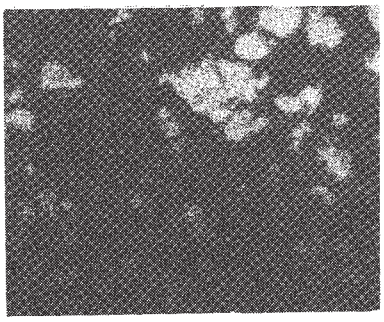
参考文献；IIW Doc，IX－837－74.



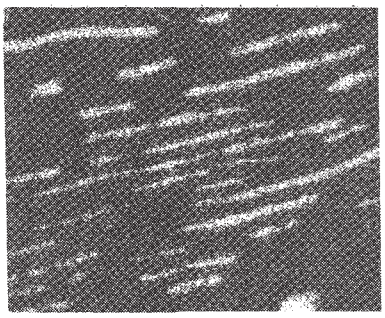
type B



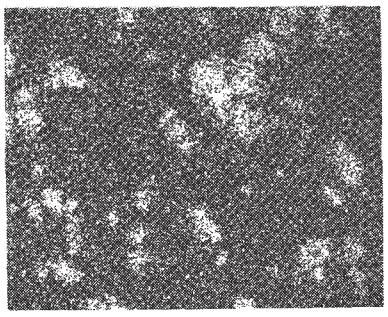
type C



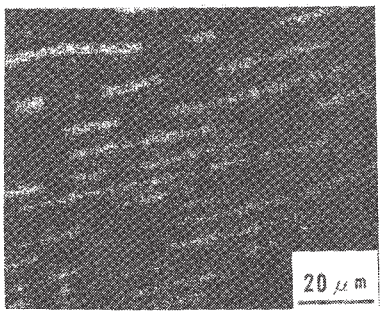
Al 特性
X 線像



Mn 特性
X 線像



O 特性
X 線像



S 特性
X 線像

type B

type C

Fig. 3 タイプB及びタイプCのミクロ破面と介在物の同定

(85) P添加40キロ級鋼の点溶接継手の引張破面

— 引張試験 —

(85) Tensile Fracture Surface of Resistance Spot Welded Joint in 40kgf／mm² Class Rephosphorized Steel Sheet

— Tension Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：P添加40キロ級鋼 (板厚0.8mm).

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

	C	Si	Mn	P	S
母　　材	0.058	0.06	0.25	0.062	0.006

機械的性質 (Mechanical property)

	引 張 強 さ (kgf/mm²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm²)	伸 び (%)	$\bar{r}$
母　　材	44.1	26.5	40.1	1.84

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：抵抗スポット溶接 (Resistance spot welding)

溶接条件 (Welding condition)

溶 接 電 流 (A)	通 電 時 間 (cycle)	電極加圧力 (kgf)	電極先端径 (mm)	保 持 時 間 (cycle)
7,800	8	270	5.4	50

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：点溶接継手の引張試験方法　JIS Z3137

試験片形状 (Specimen configuration)：JIS Z3137 試験片

試験条件 (Test condition)：塗油材を溶接．溶接後 5 min 以内に試験

試験結果 (Test result)：引張強さ　350kgf／点

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は破断部の外観でありA部は鋼材の表面，B部はコロナ・ボンド (Corona bond) 部，C部は溶融ナゲット (Nugget) 部，D部は破断後のプラグ (Plug) に相当する．Fig.2 は Fig.1 のB部を拡大したものであり，細かいディンプル (Dimple) から成っている．この部分は 2 枚の鋼板の表面同士が高温圧接した領域であり，かつ大きな塑性流動は生じていないためディンプル底部の介在物は鋼板表面にもともと存在していた酸化物であると考えられる．Fig.3 および Fig.4 はそれぞれ Fig.1 のC部のうち破断開始側および破断終了側に対応する部分を拡大したものである．いずれにおいてもへき開的な破面となっているが，リバー・パターン (River pattern) などは明瞭ではない．

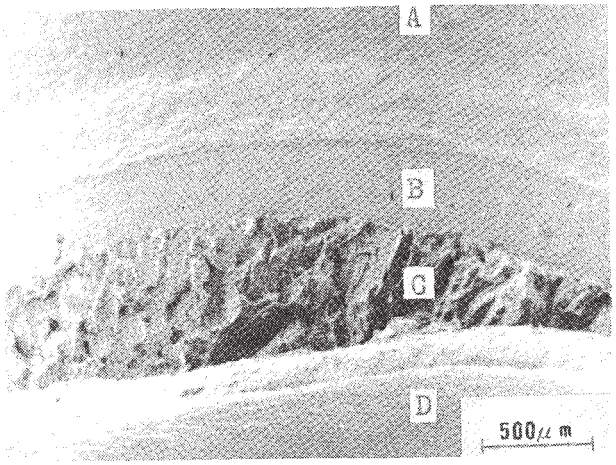


Fig. 1　破断部のマクロ破面

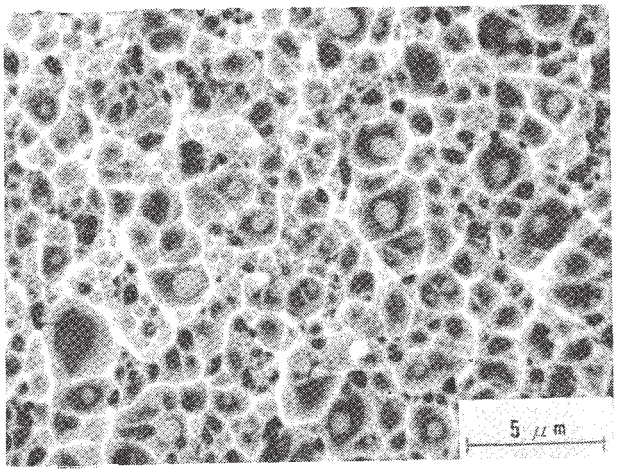


Fig. 2　Fig. 1のB部を拡大したミクロ破面

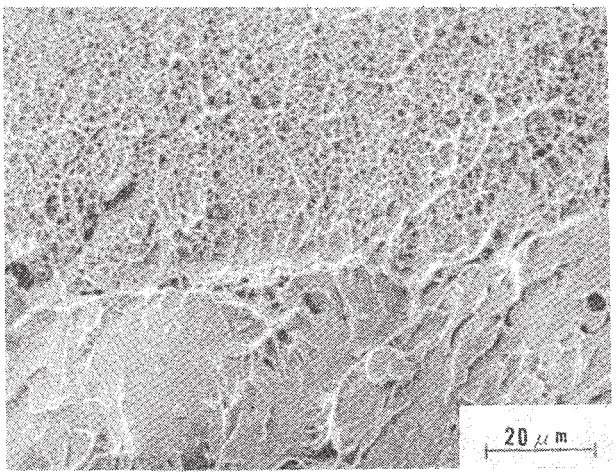


Fig. 3　Fig. 1のC部の破断開始部（B部に接している）を拡大したミクロ破面

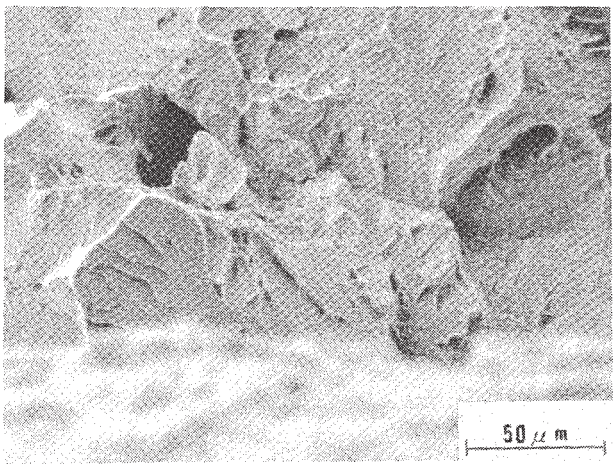


Fig. 4　Fig. 1のC部の破断終了部（D部に接している）を拡大したミクロ破面

(86) HT50鋼の溶接継手引張試験における止端割れの破面

— 引張試験 —

(86) Fracture Surface of Toe Crack in Tension Test for HT50 Steel Welded Joint

— Tension Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：ASTM A588 (構造用低合金高張力鋼) (板厚25mm).

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	Cu	Ni	Cr	V
母　　材	0.18	0.26	1.13	0.015	0.006	0.30	0.12	0.51	0.03
溶 着 金 属	0.07	0.48	0.78	0.014	0.004	0.49	0.52	0.53	0.02

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/mm²)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/mm²)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材	54.7	35.2	27	20 at −30℃

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・層間温度 (℃)	積層方法	入熱 (kJ/cm)
45° K 形	100	11 層 13 パス	20～30

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：突合せ溶接継手引張試験

試験結果 (Test result)：異常破断

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

溶接継手引張試験を行なった時，異常な破断状況を示し，その破断面も異常であった．破断部は溶接止端部であり，破面は止端割れの様相であった．この状況のスケッチを Fig.1 に示す．

この破面の様相を Fig.2 に示す．この写真の最上部に上下方向に白い縞の見える板表面があり，その下側に延性破断面が見られる．そのさらに下側にロック・キャンディ (Rock candy) 状の破面，つづいて割れの進展した状況が見られる．写真最下端に色調が急に変化しているのが見られるが，これが割れの先端であった．Fig.3 は止端部をやや拡大して示したものであり，延性破壊したシャー・リップ (Shear lip) 部と低温

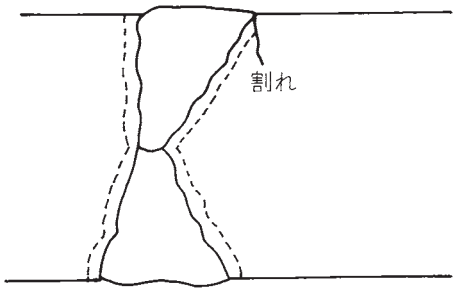


Fig. 1　割れの発生位置

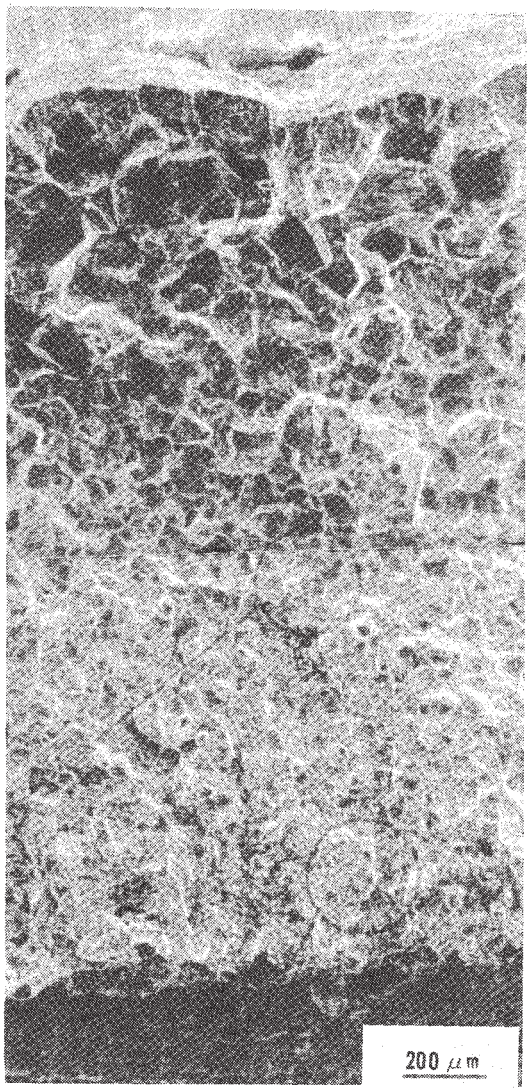


Fig. 2　割れのミクロ破面

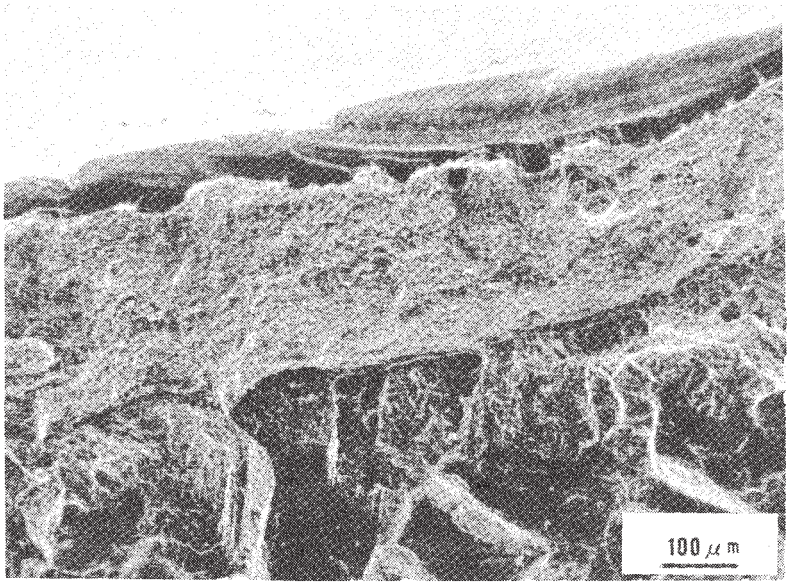


Fig. 3　止端部を拡大したミクロ破面。シャー・リップが認められる

割れとの境界を明瞭に見ることができる．Fig.4 にシャー・リップ部を，Fig.5 にロック・キャンディ部を，Fig.6 に割れの進展部をそれぞれ拡大して示した．

この止端割れは，表面より板中央部側の HAZ 粗大粒域において 3 軸応力条件のきびしく，かつ水素存在のもとに発生し，その後，応力の方向に制御され，HAZ 細粒域，母材の方へと進展した．しかし，板表面はつながったままであったが，ついに耐えられず延性破壊（Fig.4）したものと考えられる．

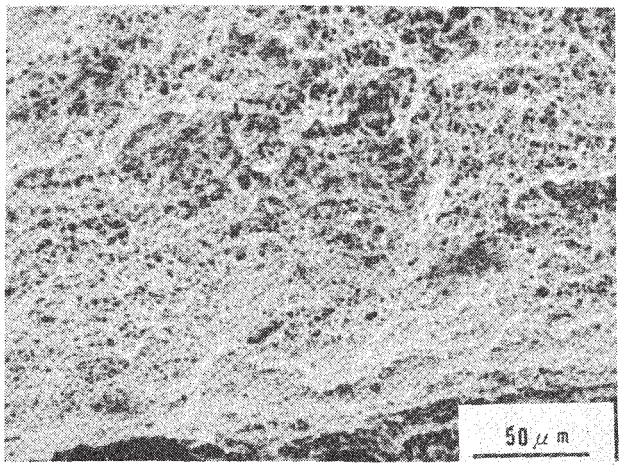


Fig. 4　シャー・リップを拡大したミクロ破面

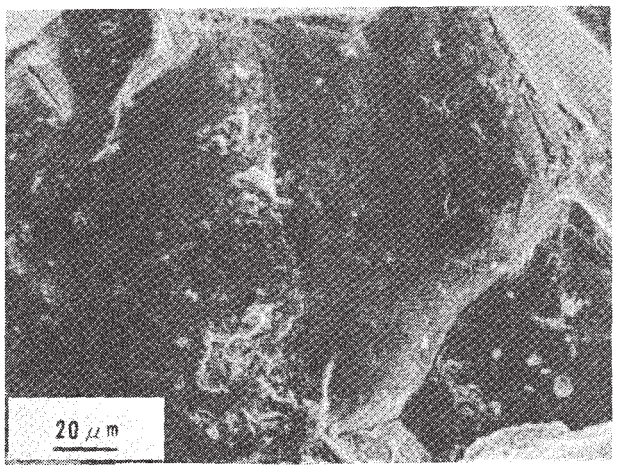


Fig. 5　ロック・キャンディ部を拡大したミクロ破面

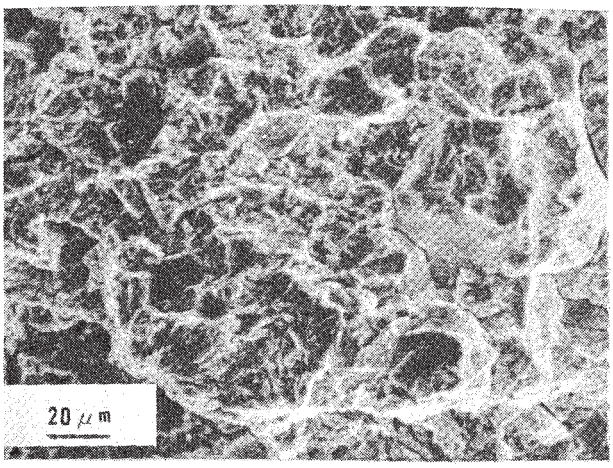


Fig. 6　割れの先端部を拡大したミクロ破面

(87) 伸び異常低下を示したHT50鋼サブマージアーク溶接金属の引張破面

— 引張試験 —

(87) Fracture Surface of HT50 Submerged-Arc Weld Metal Revealed Abnormal Reduction of Elongation in Tension Test

— Tension Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 SM50 (板厚35㎜).

溶接材料 (Welding material)：カルシウム硅酸塩系 (IIW) ＋鉄粉型焼成フラックス

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/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)
母　　材 (規格値)	50～62	≧32

溶 接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：フラックス・銅バッキング片面サブマージアーク溶接 (Submerbed-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

積層方法	入熱
1 層 1 パス	230 kJ/cm

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：溶着金属の引張試験方法 JIS Z3111

試験片形状 (Specimen configuration)：JIS Z3111　A 1 号試験片

試験条件 (Test condition)：室温

試験結果 (Test result)：異常破断

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

フラックス・銅バッキング (Flux and copper backing) 片面サブマージアーク溶接にて得られた溶接金属より採取した引張試験片に伸びの異常低下が発生した．この異常低下は拘束の強い溶接条件で，しかも溶接後数日経過した溶接金属から採取した試験片で発生した．

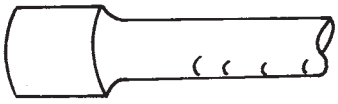


Fig. 1　異常破断を起した試験片の外観
表面に小さな割れが生じている

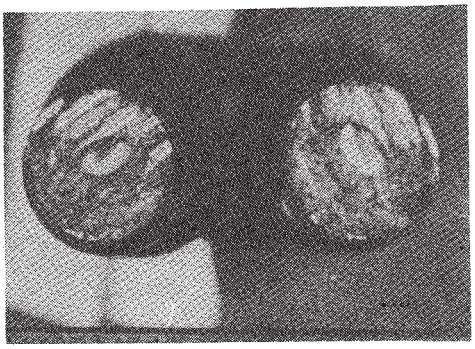


Fig. 2　マクロ破面

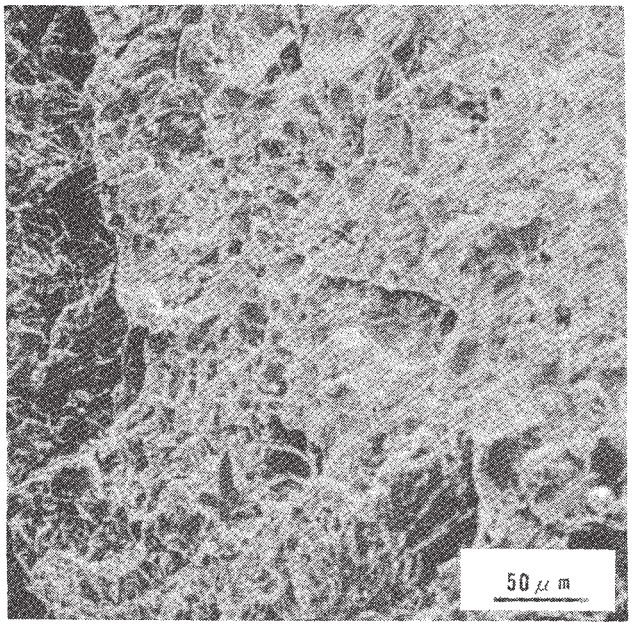


Fig. 3　銀点のミクロ破面

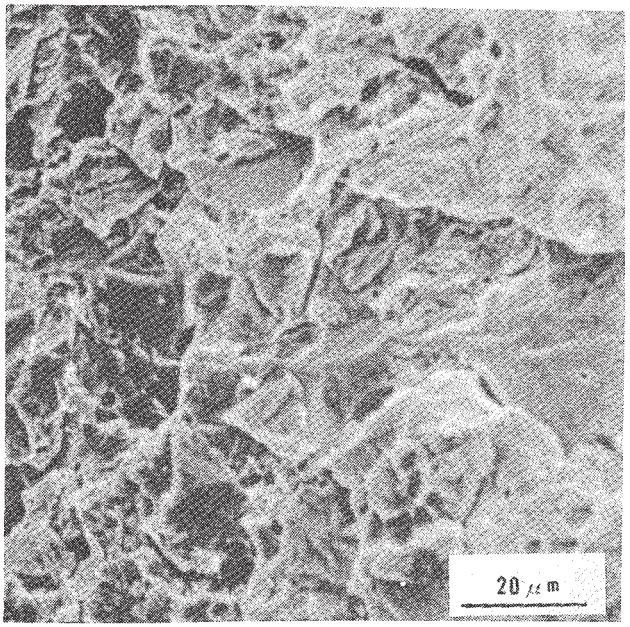


Fig. 4　Fig. 3の中央部の拡大

Fig.1 に示すように，試験片の絞りはほとんどみられず，ほぼ原寸のまま破断した．そのミクロ破面を Fig.2 に示す．この破面には円形あるいはだ円形の銀点が存在する．銀点内は，Fig.3 および Fig.4 に示すように，水素脆化特有の擬へき開破面であった．銀点の外は Fig.5 および Fig.6 に示すような通常の延性破壊に見られるディンプル（Dimple）破面であった．

以上の結果から，この引張試験片の伸びの異常低下は，水素に起因することが明らかとなった．

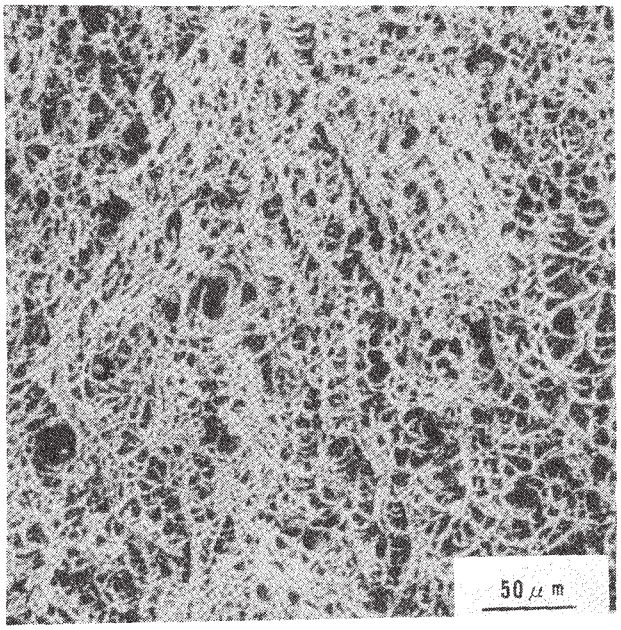


Fig. 5　銀点以外の部分のミクロ破面

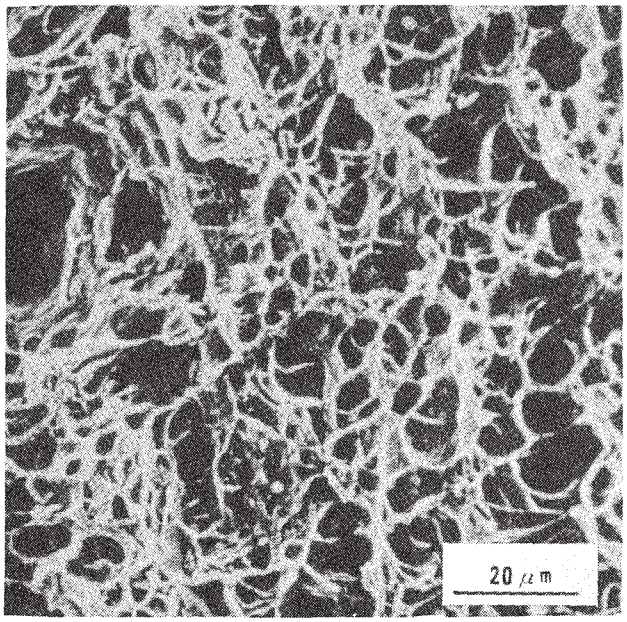


Fig. 6　Fig. 5 の中央部の拡大

(88) HT60鋼の溶接継手引張試験において溶接欠陥および水素割れから発生した脆性破壊の破面

— 引張試験 —

(88) Brittle Fracture Surface Initiated from Slag Inclusion and Hydrogen Induced Cracking in Tension Test for HT60 Steel Welded Joint

— Tension Test —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：溶接構造用圧延鋼材 SM58Q 相当（板厚25㎜）.

溶接材料 (Welding material)：ワイヤ：不明（径3.2㎜）

フラックス：塩基性溶融型

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al
母　　材	0.14	0.25	1.40	0.015	0.005	0.20	0.05	0.10	0.03	0.03
溶　着　金　属	0.09	0.26	1.50	0.014	0.005	0.15	0.06	0.05	0.02	0.018

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　　材	66	55	30	25.5 at −20℃
溶　着　金　属	67	59	28	27.0 at −20℃

溶　接 (Welding)

溶接方法 (Welding method)：横向サブマージアーク溶接 (submerged-arc welding)

溶接条件 (Welding condition)

開先形状	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法
X　形	室　温	25	500	400	5層13パス

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：突合せ溶接継手の引張試験方法　JIS Z3121

試験片形状 (Specimen configuration)：JIS Z3121　1号試験片

試験条件 (Test condition)：室温（5℃）

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 のごとく溶接欠陥が内在する溶接継手を冬期（5℃）引張試験中，最大荷重に至る前に破壊した．その破面は Fig.2 に示すごとく，線状のスラグ(Slag)巻込みと水素割れが脆性破壊のスタートとなっており，この部分は明らかに脆性破壊部とは異なった破面を呈していた．

Fig.3，4 が破壊起点近傍の破面であり，水素の擬へき開破面が巻込みスラグを中心に両側に約 3 ～ 4 ㎜幅で認められた．Fig.5 (a)が脆性破壊伝ぱ部，5 (b)が脆性破壊から延性破壊に遷移する領域のへき開とディンプル (Dimple) の混合破面である．破壊は

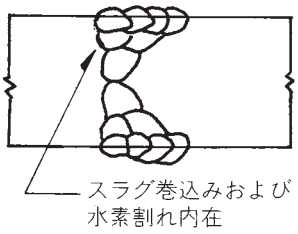


Fig. 1　スラグ巻込みおよび水素割れの発生位置

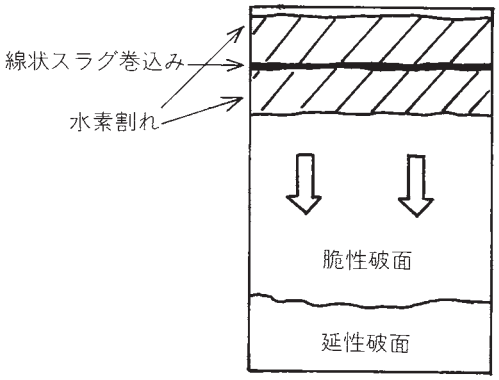
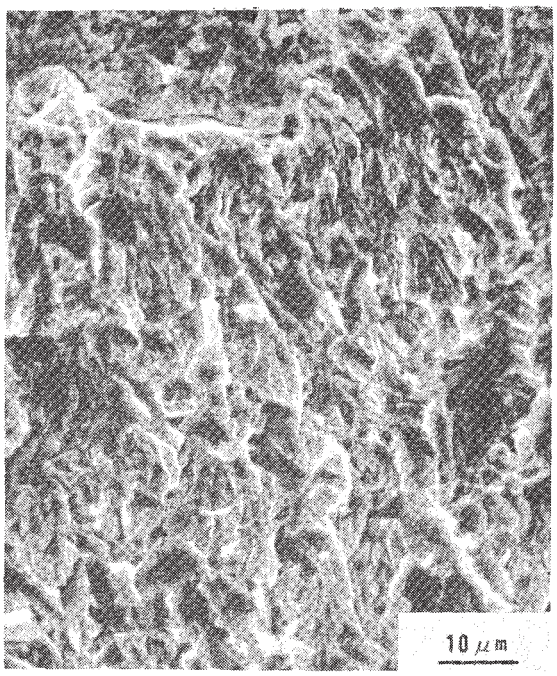


Fig. 2　マクロ破面のスケッチ

(b)　(a)の中央部左の拡大。スラグ巻込みと水素脆化による擬へき開破面

a）脆性破壊の起点のミクロ破面

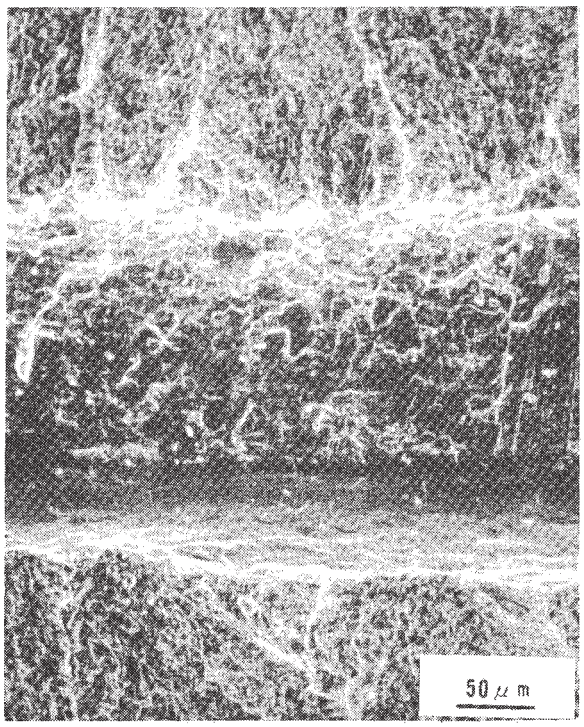


(c)水素擬へき開破面

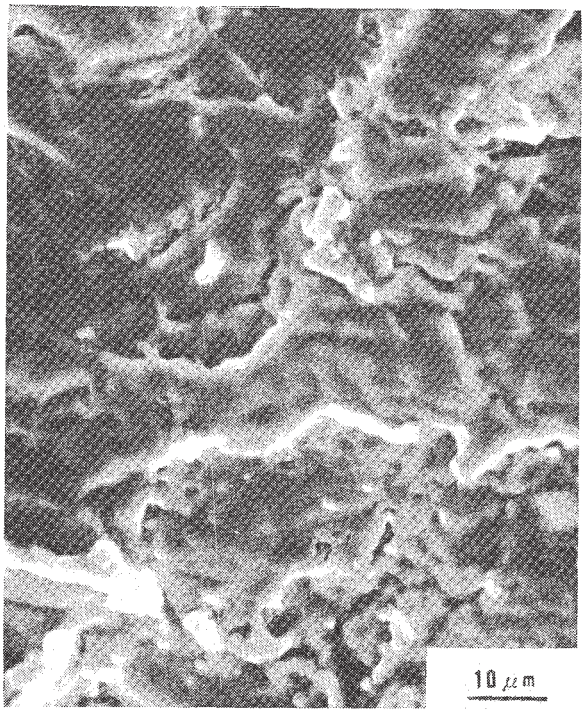
Fig. 3　サブマージアーク溶接継手試験片に生じた脆性破壊の起点部のミクロ破面

ボンド (Bond) に沿って伝ぱしていたが，このボンド部のシャルピー吸収エネルギーは $vE_{-20} \geqq 20$kgf・m であり脆性破壊に至った理由は明らかでない．

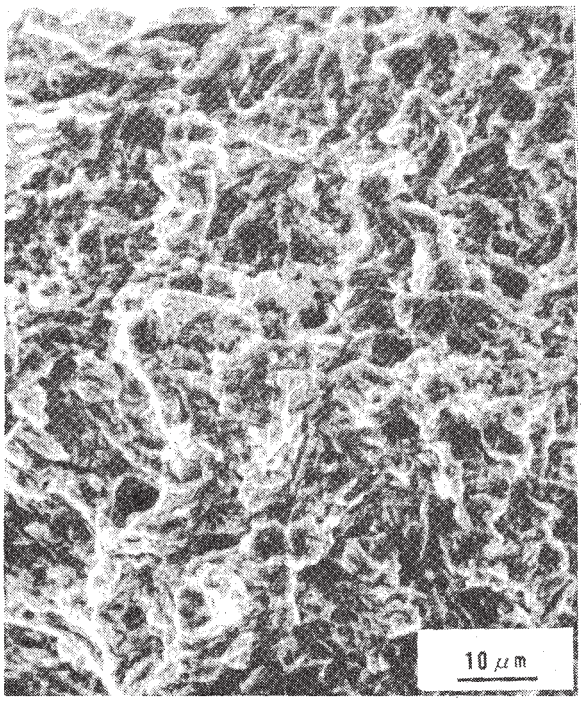
なお，Fig.3 (C)や 4 (C)の水素擬へき開破面と Fig.5 (a)のへき開破面の区別は，破面単位が前者の場合ラス粒界に沿うため非常に細かいことから決定できる．



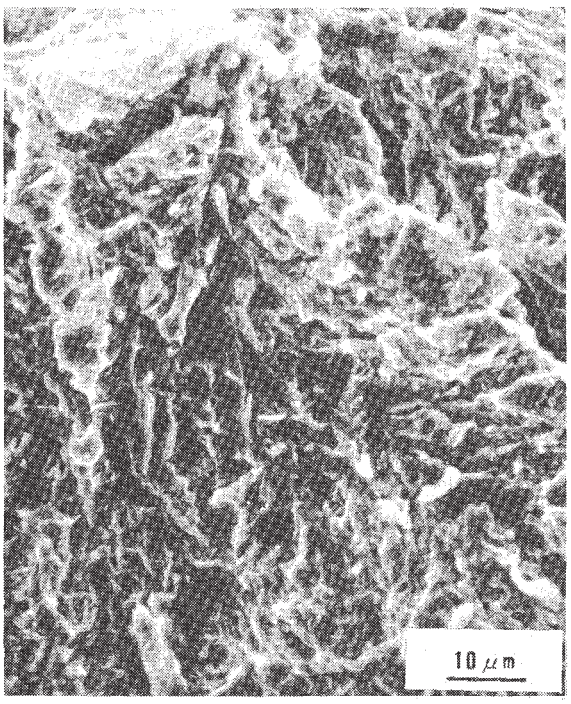
(a)脆性破壊の起点のミクロ破面



(b) スラグ巻込み

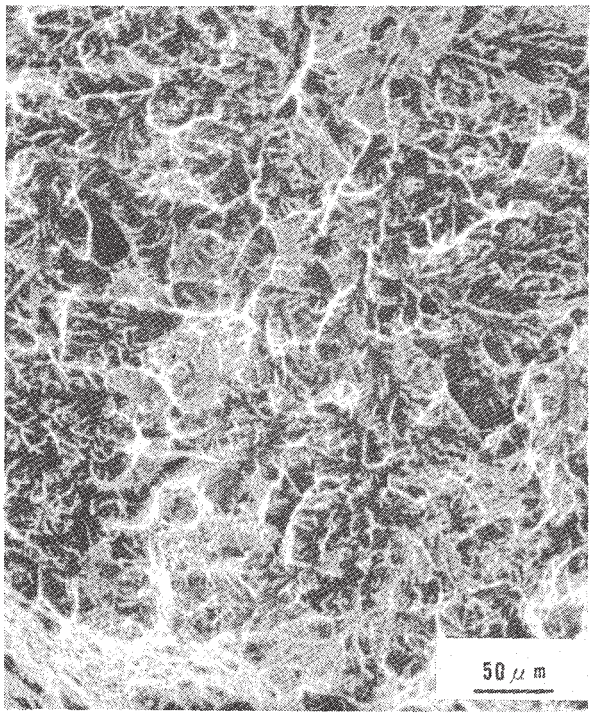


(c)

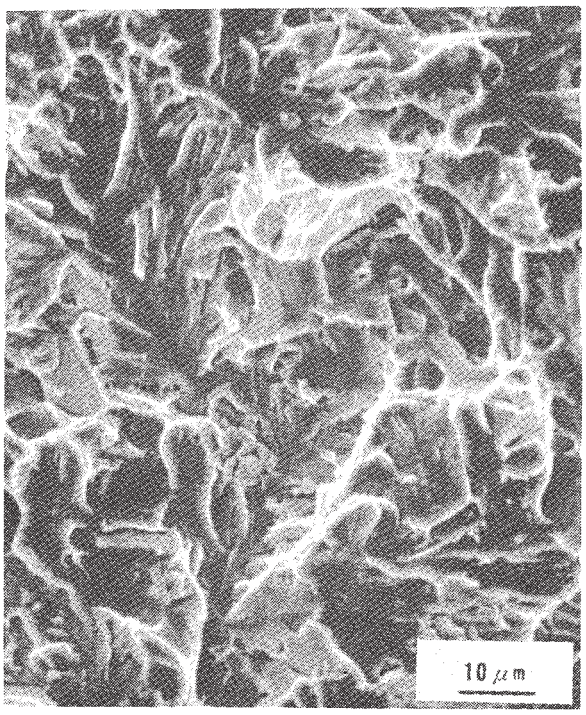


(d)

Fig. 4 スラグ巻込みと水素脆化による擬へき開破面

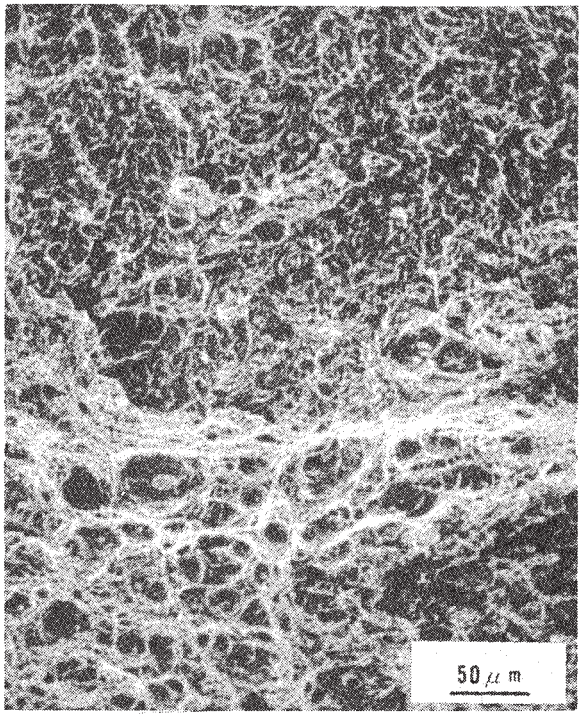


低倍率



高倍率

a）へき開破面



b）延性破面

Fig. 5　へき開破面および延性破面

(89) オーステナイト系ステンレス鋼用被覆アーク溶接棒の全溶着金属の引張破面

— 引張試験 —

(89) Tensile Fracture Surface of Deposited Metal of Austenitic Stainless Steel by Shielded Metal-Arc Welding

— Tension Test —

材 料 (Material)

母　　材 (Base metal)：一般構造用圧延鋼材 SS41 (板厚19㎜).

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D308 (径4㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
母　材(規格値)	—	—	—	≦0.050	≦0.050	—	—
溶 着 金 属	0.06	0.28	1.68	0.022	0.003	9.86	20.41

機械的性質 (Mechanical property)

	引張強さ (kgf/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　材(規格値)	41～52	≧24	≧21
溶 着 金 属	58.3	40.6	50

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・フラックスの乾燥条件	予熱・層間温度 (℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	積層方法
V　形	200℃×1 hr	≦150℃	22～24	140	8層16パス

試 験 (Test)

試験方法 (Test method)：溶着金属の引張試験　JIS Z3111

試験片形状 (Specimen configuration)：JIS Z3111　A 1号

試験条件 (Test condition)：室温

試験結果 (Test result)：引張強さ58.3kgf／㎟

破面の解説 (Fracture Surface Analysis)

Fig.1 は全溶着金属の引張試験後の外観 (スケッチ) であるが，いわゆるカップ・アンド・コーン (Cup and cone) の形状を呈している．Fig.2 はこの破面のマクロ組織を示したものである．底部Ⓐは光沢がなく，Ⓐ－Ⓑ方向に筋状の模様が見られ，この方向は凝固方向と一致している．また領域Ⓐはだ円状を呈し，短軸方向が凝固方向と一致している．一方領域Ⓑは引張方向に対し45°方向の破面で，金属光沢を呈している．Fig.2 のⒶを拡大したのが Fig.3 である．延性破壊の特徴であるディンプル (Dimple) 破壊を示し，ディンプルの大きさは微細である．Fig.4 は Fig.3 のⒸ部を拡大したもので，明瞭な等軸ディンプルであることが分かる．大部分の各ディンプルの底部に球状の介在物が認められる．

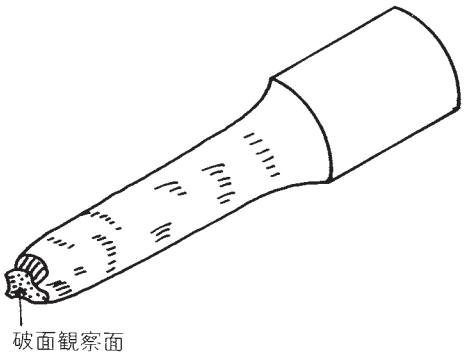


Fig. 1　破断した引張試験片の外観

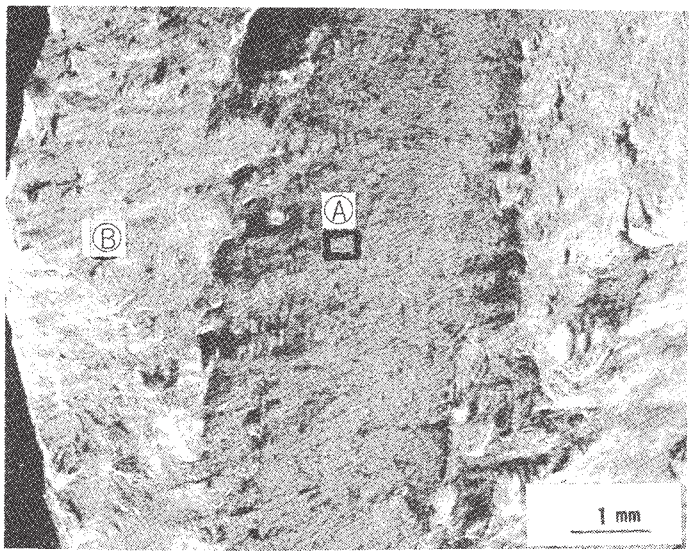


Fig. 2　マクロ破面

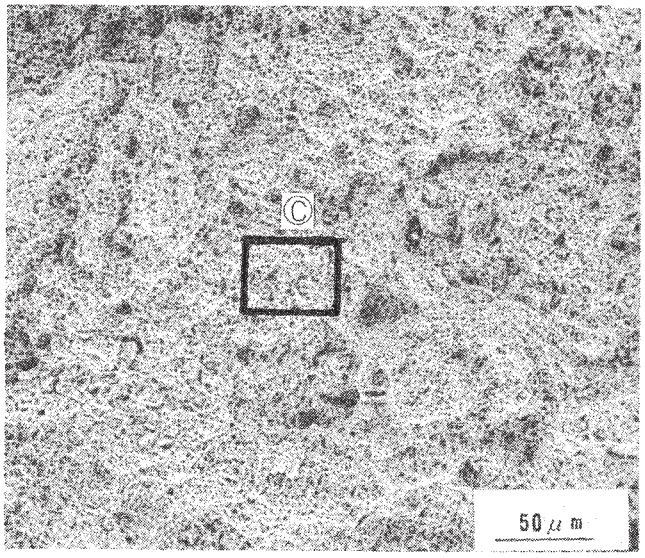


Fig. 3　Fig. 2のⒶ部を拡大したミクロ破面

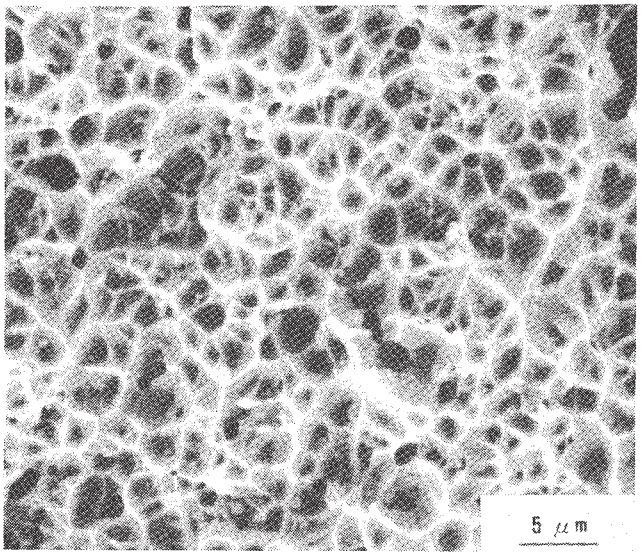


Fig. 4　Fig. 3のⒸ部を拡大したミクロ破面

(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S 35C

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 (℃)	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)：200㎜長×8㎜幅×5㎜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℃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) をもつへ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℃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．

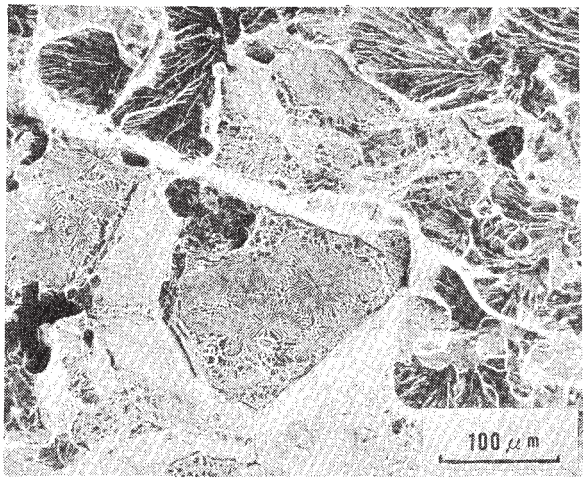


Fig. 1　低倍率のミクロ破面

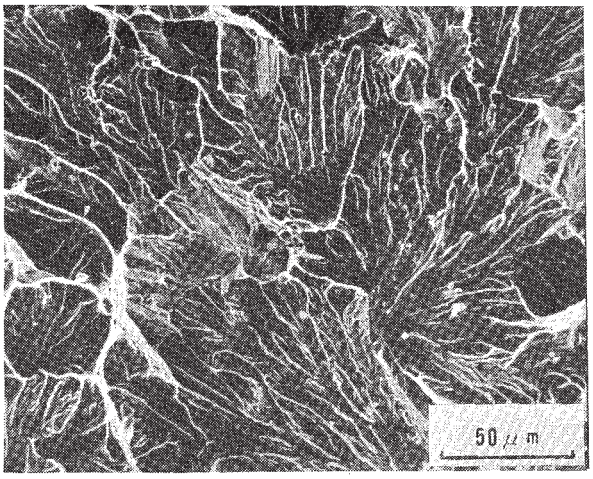


Fig. 2　粒内破壊部の拡大

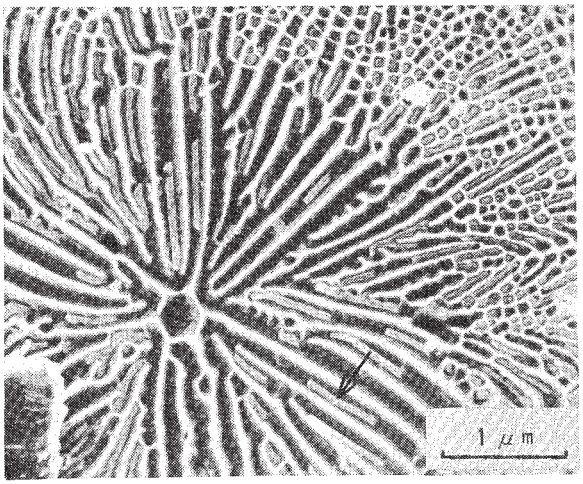


Fig. 3　菊の花状の破面

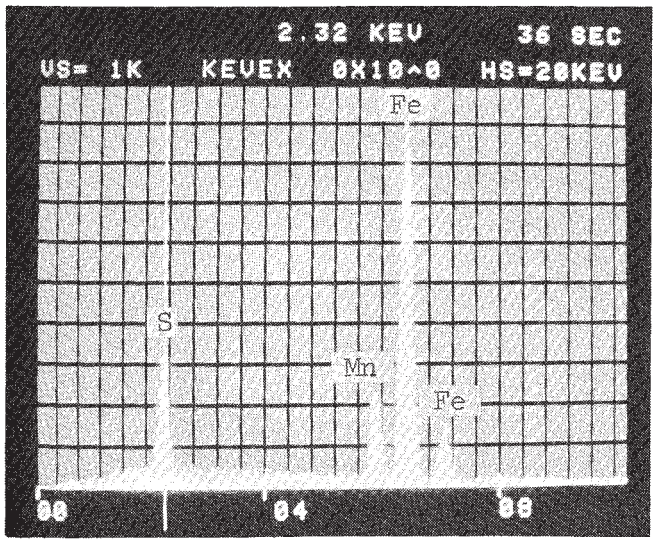


Fig. 4　Fig. 3 の矢印部の分析結果

(91) 2¼Cr－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σ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 ¼ Cr-1Mo Steel

— Side Bend Test —

材　料 (Material)

母　　材 (Base metal)：圧力容器用2¼ Cr-1Mo 鋼材 ASTM A387 Grade 22 class 2 (板厚25㎜).

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5.0㎜).

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

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
母　　材 (規格値)	≦0.15	≦0.50	0.30 ～0.60	≦0.035	≦0.035	——	2.00 ～2.50	0.90 ～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/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	伸び (%)
母　　材(規格値)	52.7～70.3	≧31.6	≧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(℃)	アーク電圧 (V)	溶接電流 (A)	溶接速度 (㎜/min)	積層方法	後熱処理
肉　盛	200℃ ×1 hr	100～150	22～24	170	180	3層	710℃ ×20 hrs

試　験 (Test)

試験方法 (Test method)：側曲げ試験

試験片形状 (Specimen configuration)：500㎜長×12.7㎜幅×3.2㎜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．概して平担な破面であり，Fig.2 Ⓐから Ⓑ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Ⓒを拡大したもので，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Ⓓ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で，所々に微小な二次割れが存在する．

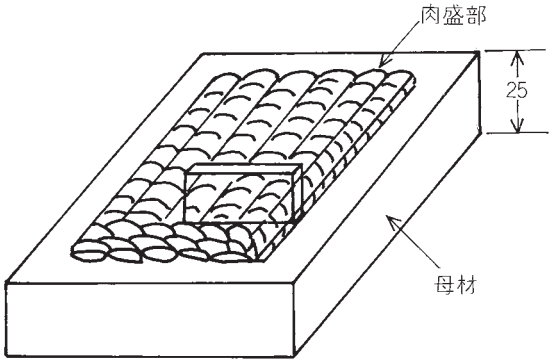


Fig. 1　試験片の採取位置

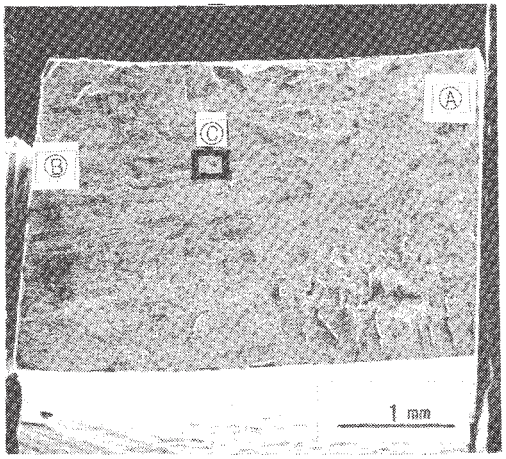


Fig. 2　肉盛溶接金属部のマクロ破面

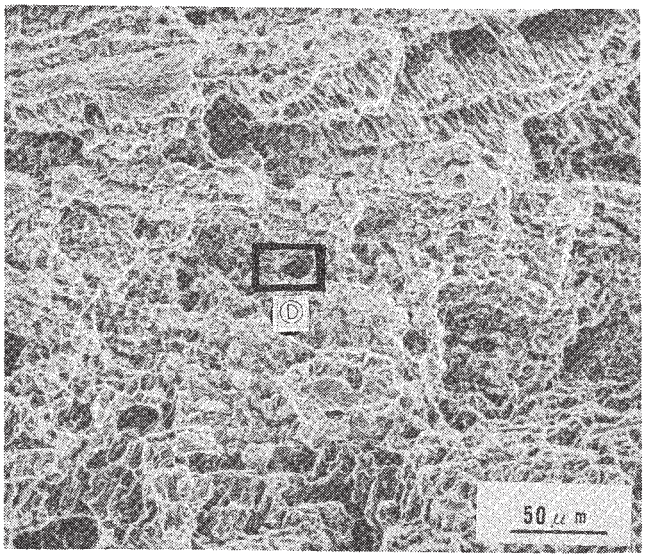


Fig. 3　Fig. 2 のⒸ部を拡大したミクロ破面

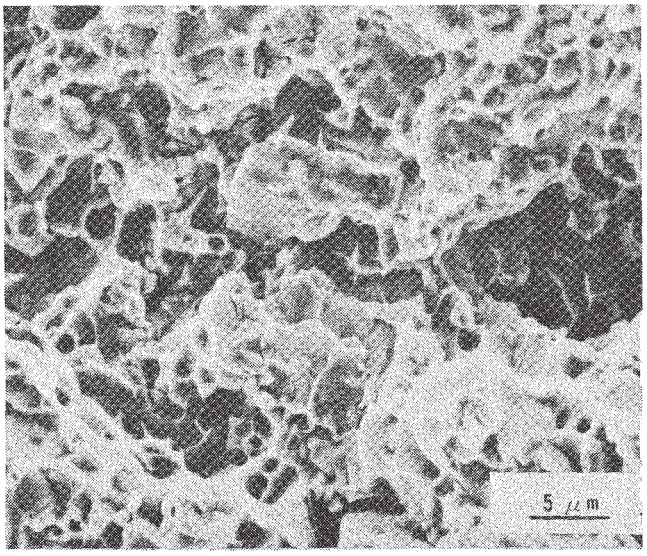


Fig. 4　Fig. 3 のⒹ部を拡大したミクロ破面

(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_{SR}
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/mm²)	降伏点(0.2%耐力) (kgf/mm²)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (kgf・m)	vTrs (℃)
SM 58 Q	64.3	55.0	30	28.5 at −20℃	−80
HT 80	85.7	80.9	25	22.7 at −20℃	−101
HT 100	104	99.6	24	12.6 at −40℃	−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15.3kg f／mm² (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℃，800℃から500℃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15.3kg f／mm²を与えた状態で100℃／hr の速度で加熱したあと600℃に試験片が破断するまで保持した．試験は真空 (10^{-4}torr) 中で行ない，割れの発生伝ぱ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℃付近の昇温過程から，切欠底近傍の γ 粒界に発生し，585℃で破断した．

Fig.4～6 が各鋼についての破面写真であり，P_{SR}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-

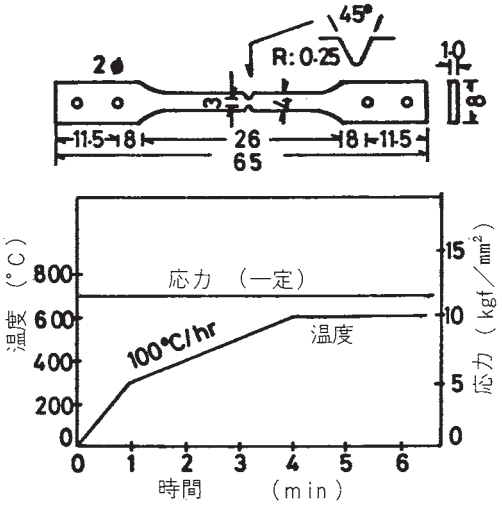


Fig. 1　再現熱影響部試験片の粒界破壊強度の測定方法

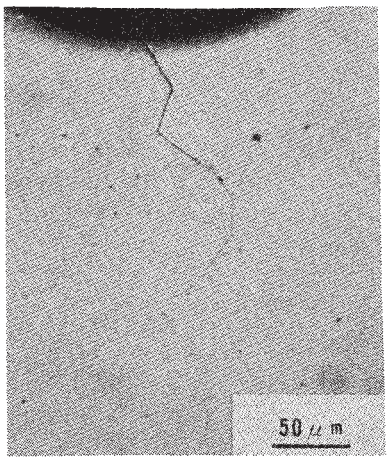


Fig. 2　HT100再現熱影響部の高温ミクロ組織（σ_a＝15.3kgf／mm², 580℃）

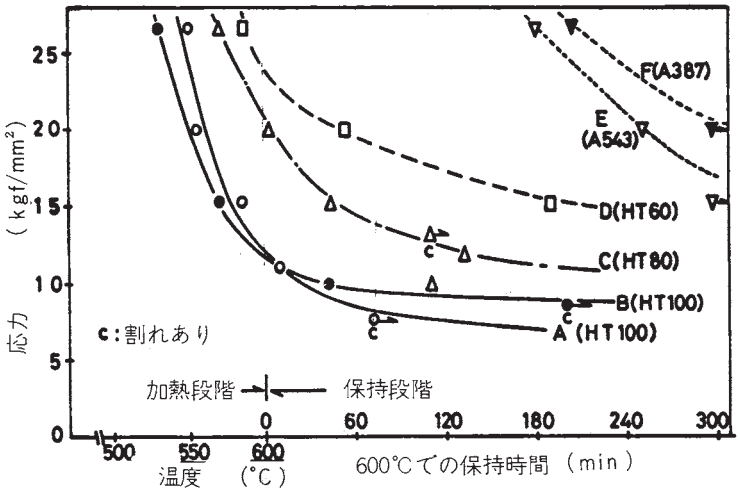
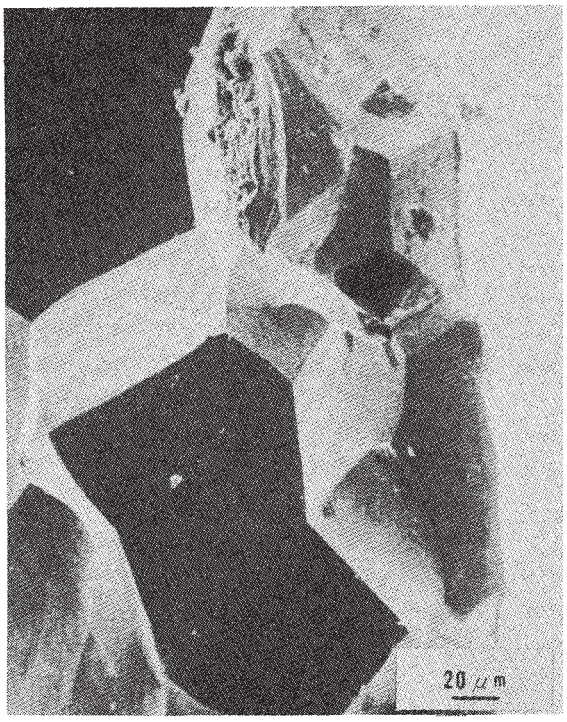
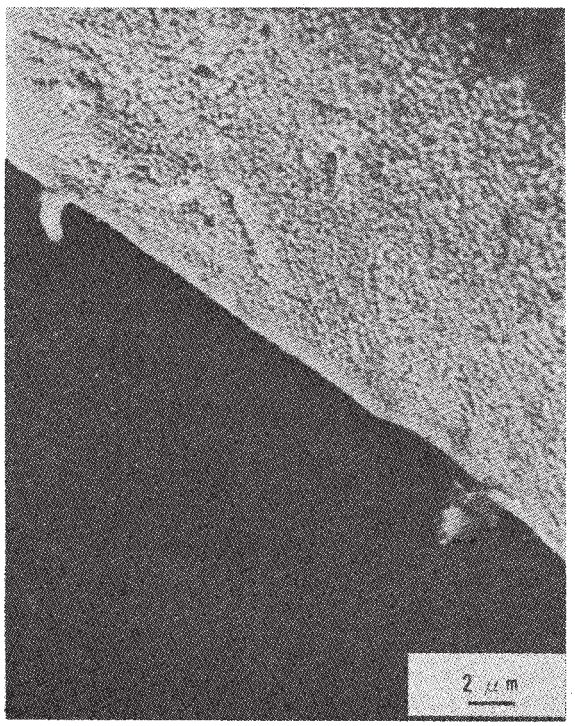


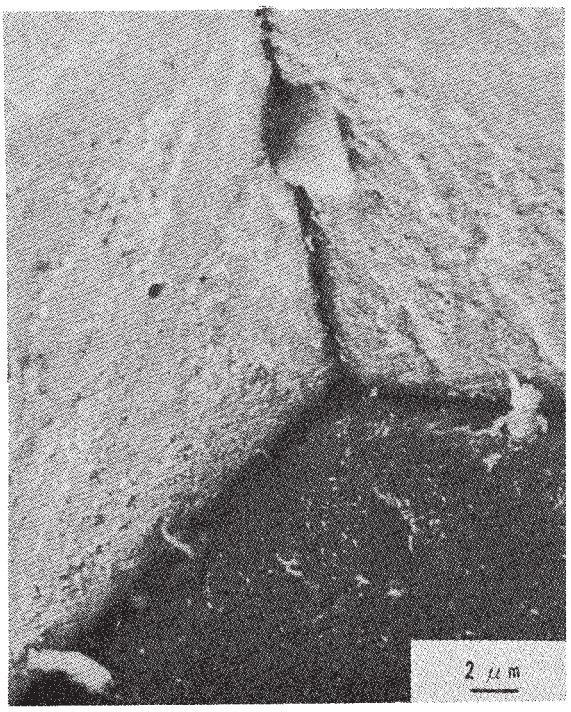
Fig. 3　再現熱影響部の破壊強度（ピーク温度1300℃，保持時間10sec）

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．



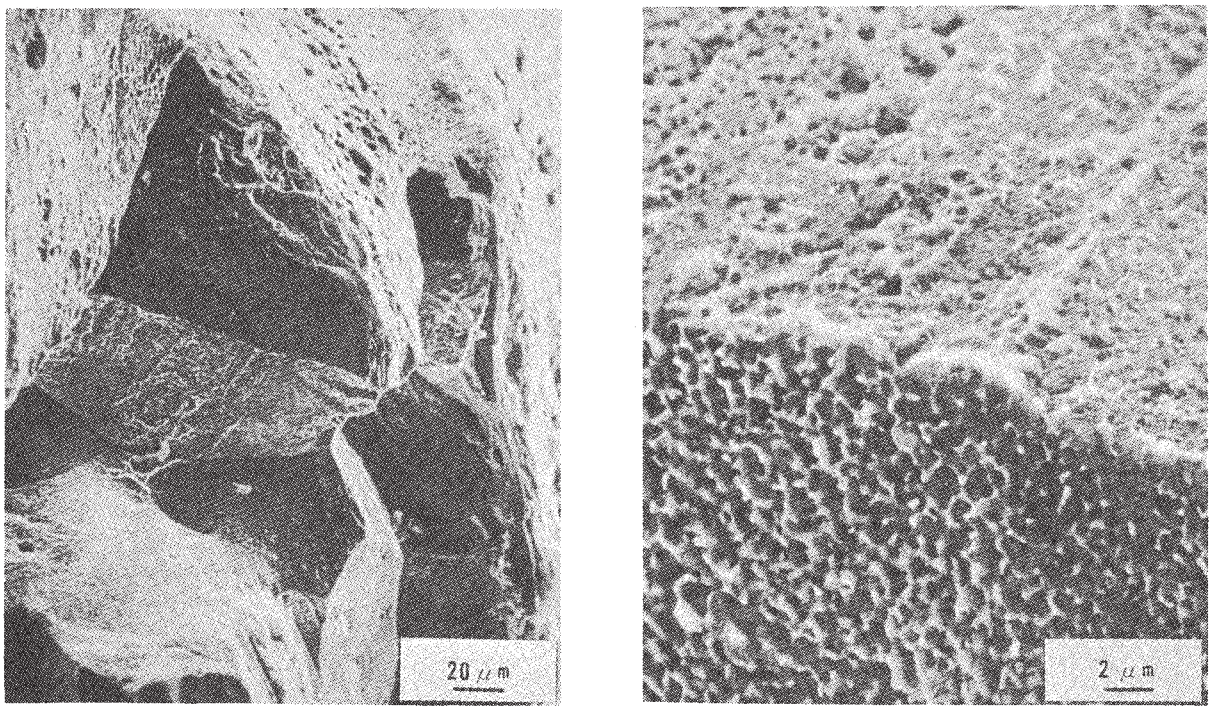


a）切欠底部

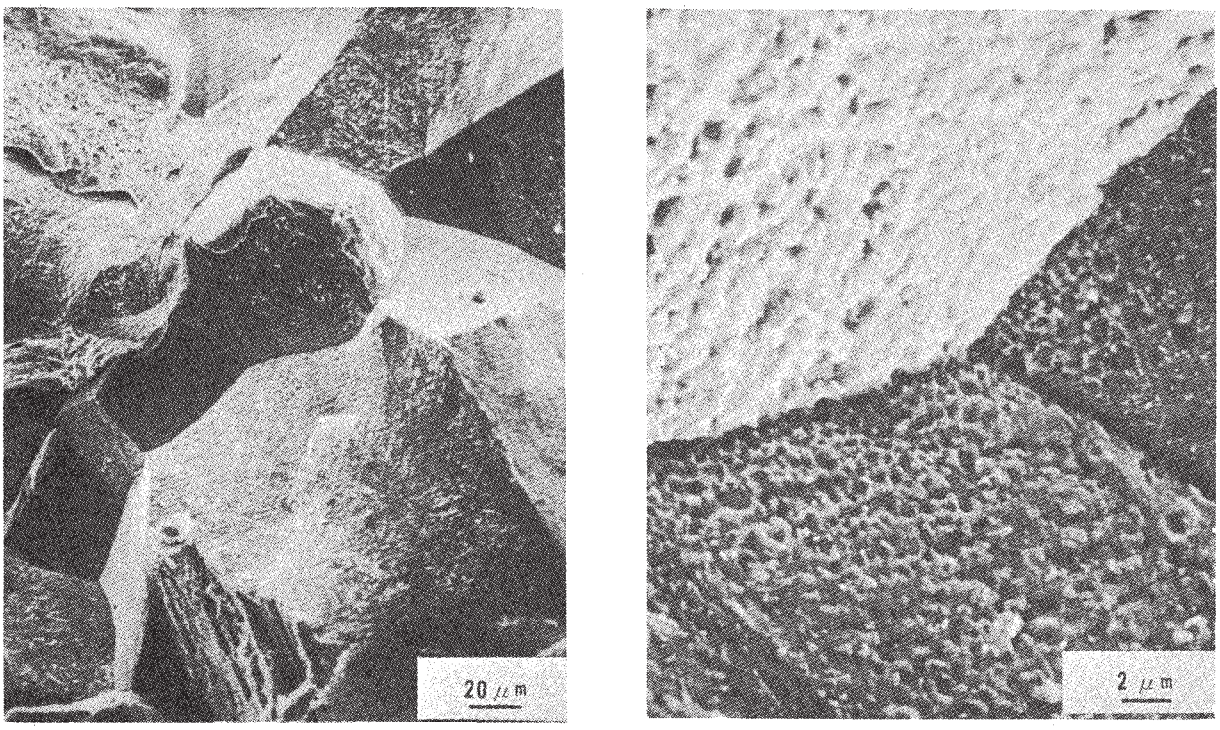


b）試験片中央部

Fig. 4　ＨＴ100の再現ＳＲ割れのミクロ破面

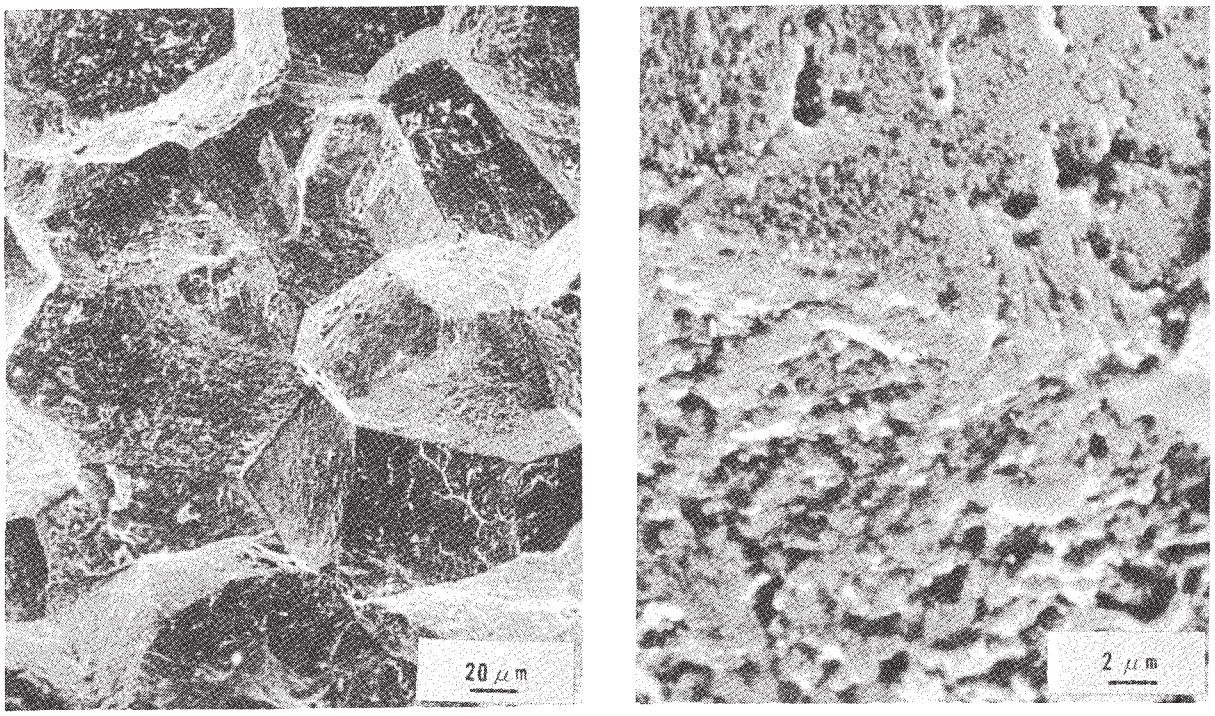


a）切欠底部

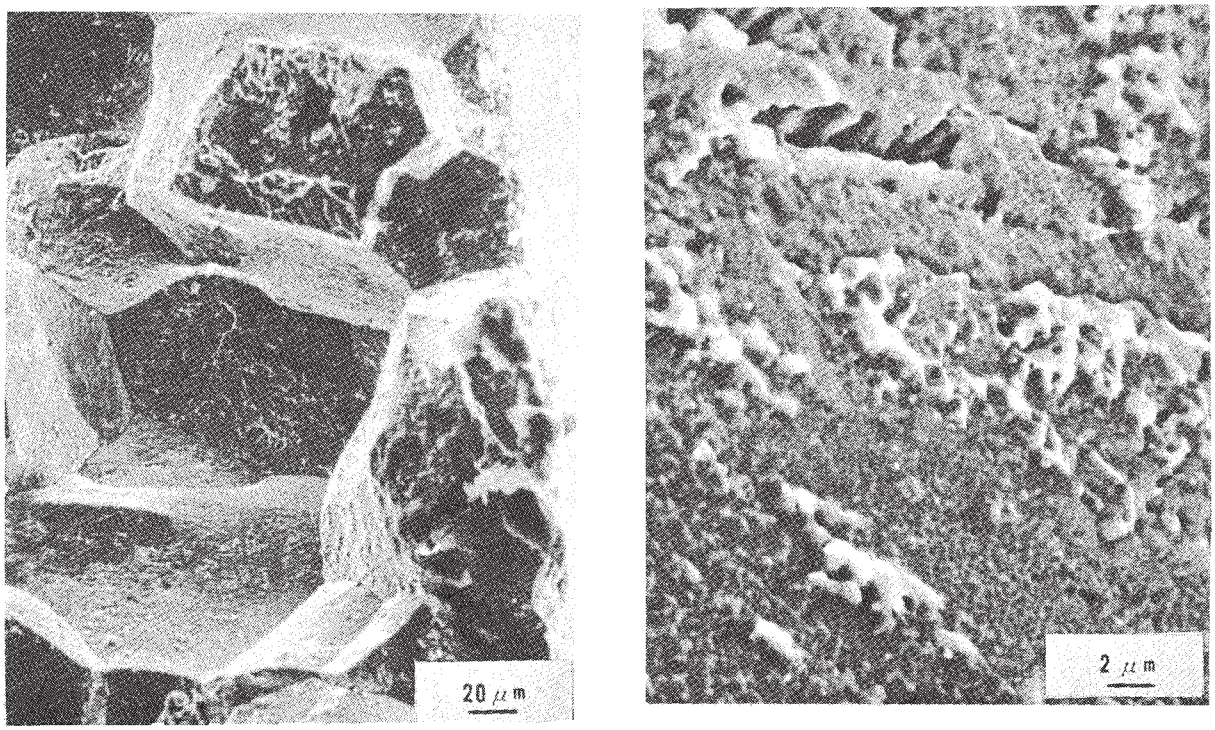


b）試験片中央部

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5㎜，平行部の長さ20㎜

試験条件 (Test condition)：試験温度600℃，負荷応力10kg f／㎟

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．

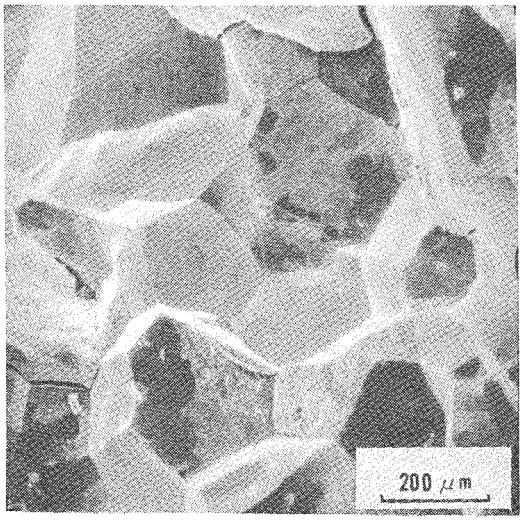


Fig. 1　ＨＴ80－Ａのミクロ破面

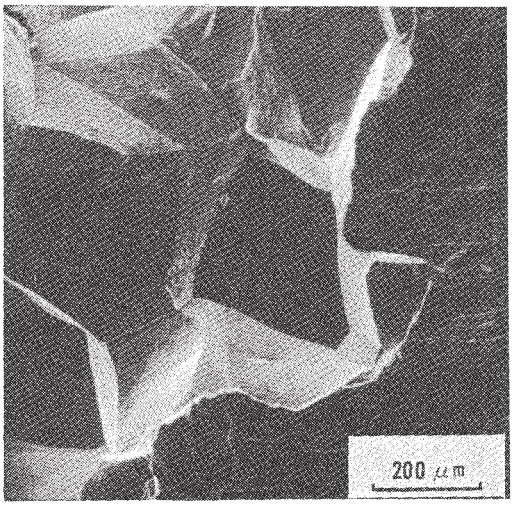


Fig. 2　ＨＴ80－Ｂのミクロ破面

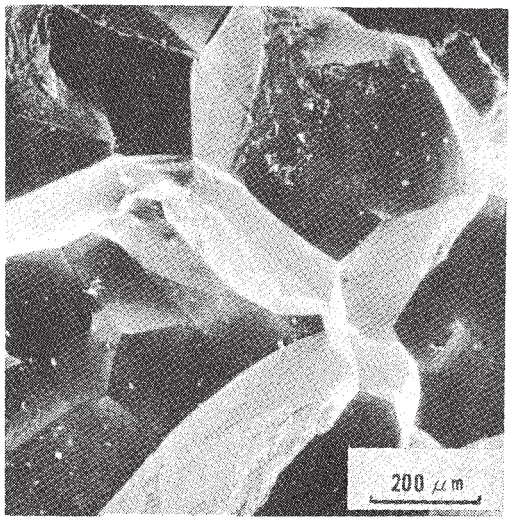


Fig. 3　ＨＴ80－Ａの真空溶解後のミクロ破面

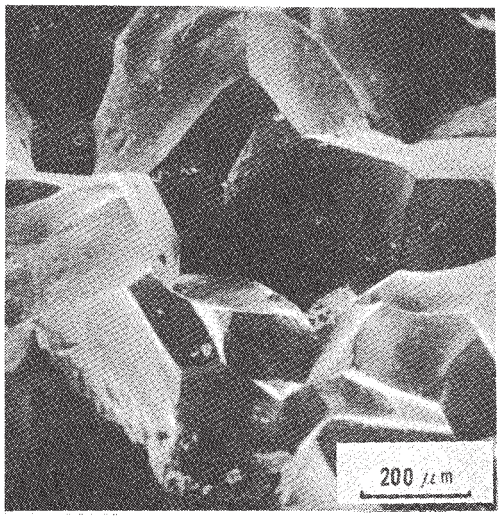


Fig. 4　ＨＴ80－Ｂの真空溶解後のミクロ破面

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

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/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	シャルピー吸収エネルギー (kgf·m)
母　材	50	32	15 at 15℃

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℃へ約5 secで急熱後400℃から600℃へ直線的に1 hrで加熱し，600℃に到達後直ちに空冷.

負荷応力：4および9 kg f／㎟

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℃，800℃から500℃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9 kg f／㎟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9 kg f／㎟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4 kg f／㎟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．

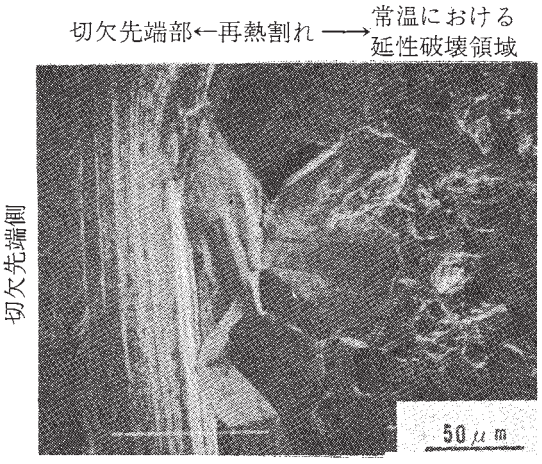


Fig. 1　切欠先端部のミクロ破面に認められた粒界ファセット（負荷応力；9 kgf／mm²）

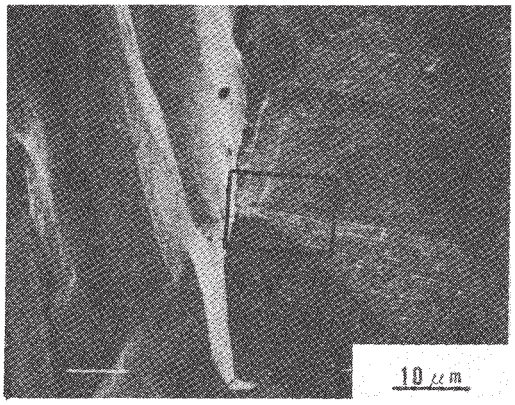


Fig. 2　Fig. 1の中央部を拡大したミクロ破面

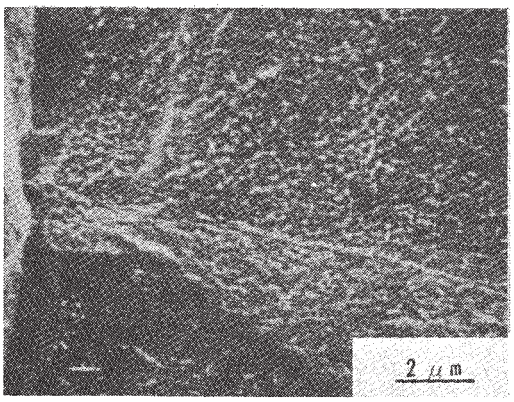


Fig. 3　Fig. 2中の枠内を拡大したミクロ破面

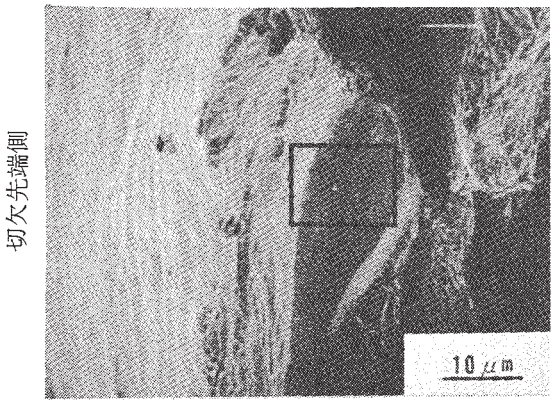


Fig. 4　切欠先端部のミクロ破面に認められた粒界ファセット（負荷応力；4 kgf／mm²）

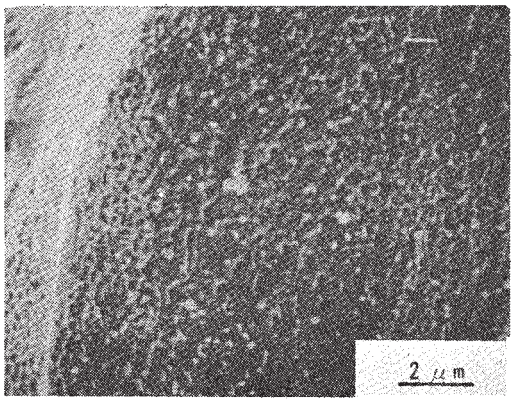


Fig. 5　Fig. 4中の枠内を拡大したミクロ破面

(95) SR割れ再現試験における2¼Cr－1Mo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 2¼ Cr-1Mo 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50㎜).

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/㎟)	降伏点 (0.2%耐力) (kgf/㎟)	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℃
母　材　I	65.1	55.1	20.0	14.2 at 0℃

溶 接 (Welding)

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

条件 (Condition)：1250℃で1 min保持後，800～500℃間を8 sec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5㎜ (切欠部径3㎜)，ゲージ長15㎜.

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

負荷応力：50kg f／㎟.

試験結果 (Test result)：材料Eは590℃，材料Iは517℃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(2¼ Cr-1Mo)，Fig.5～Fig.8はI鋼(2¼ Cr-1Mo-¼ 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) 粒界を伝ぱしたものであり，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

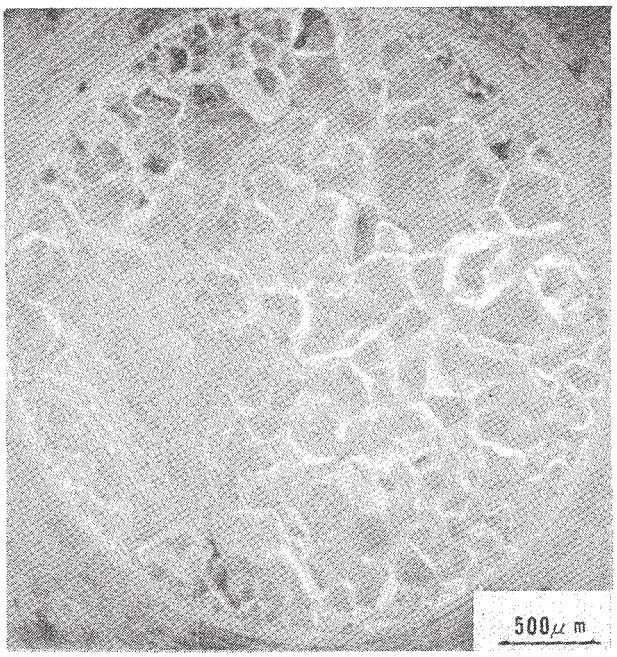


Fig. 1　昇温破断試験において発生したＳＲ割れのマクロ破面　（Ｅ鋼：２¼Ｃｒ－１Ｍｏ）

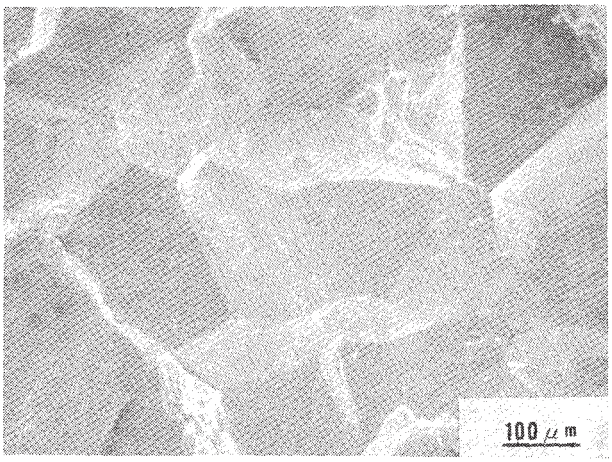


Fig. 2　昇温破断試験において発生したＳＲ割れのミクロ破面（Ｅ鋼：２¼Ｃｒ－１Ｍｏ）

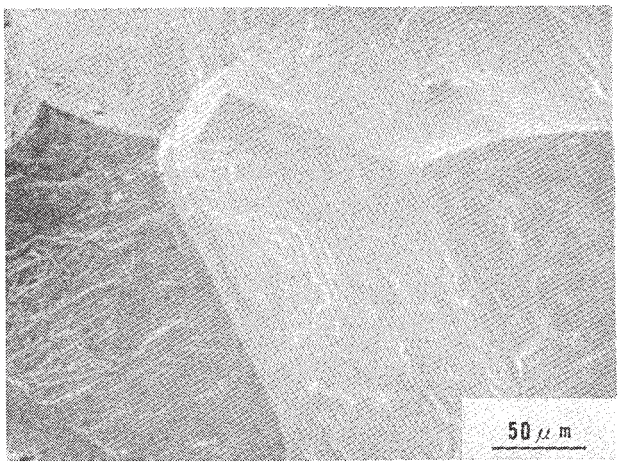


Fig. 3　Fig. 2の中央部の拡大

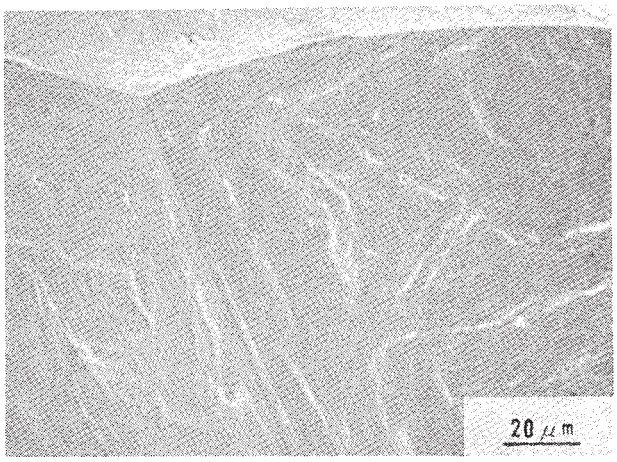


Fig. 4　Fig. 3の右端部の拡大

変形を伴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℃，I鋼が517℃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，その原因はVの添加にあると考えられる．

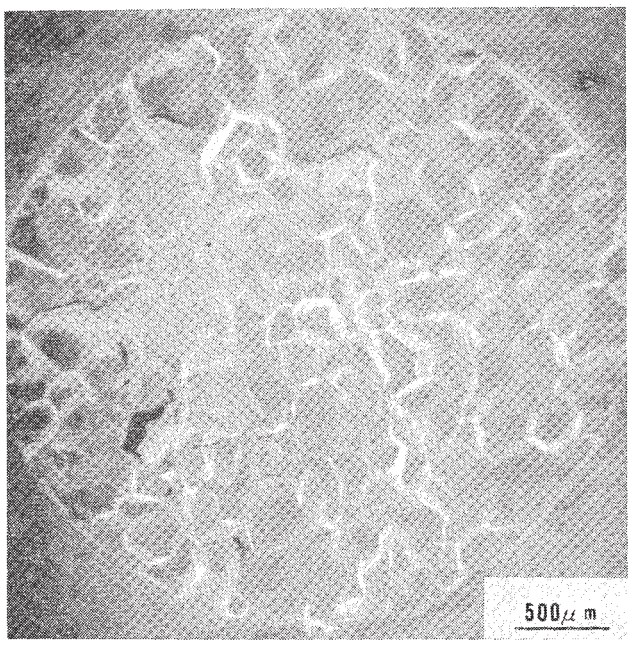


Fig. 5　昇温破断試験において発生したＳＲ割れのマクロ破面（Ｉ鋼：２¼Cr－１Mo－¼Ｖ）

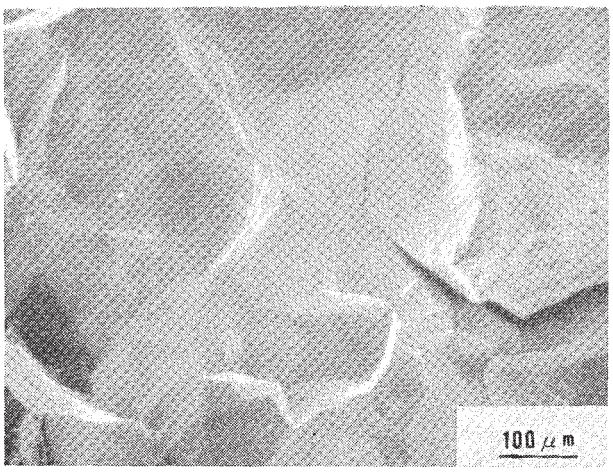


Fig. 6　昇温破断試験において発生したＳＲ割れのミクロ破面（Ｉ鋼：２¼Cr－１Mo－¼Ｖ）

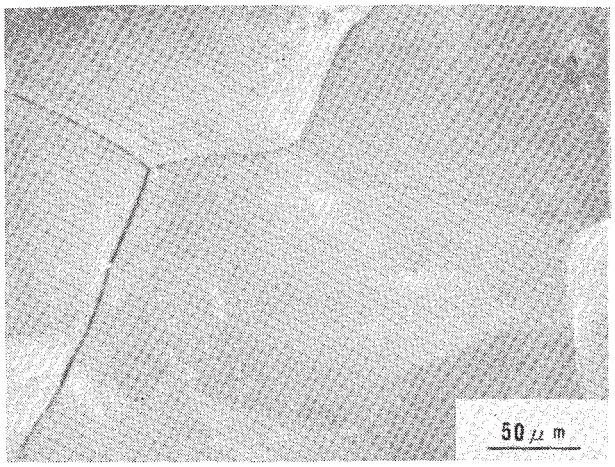


Fig. 7　昇温破断試験において発生したＳＲ割れ破面（Ｉ鋼：２¼Cr－１Mo－¼Ｖ）

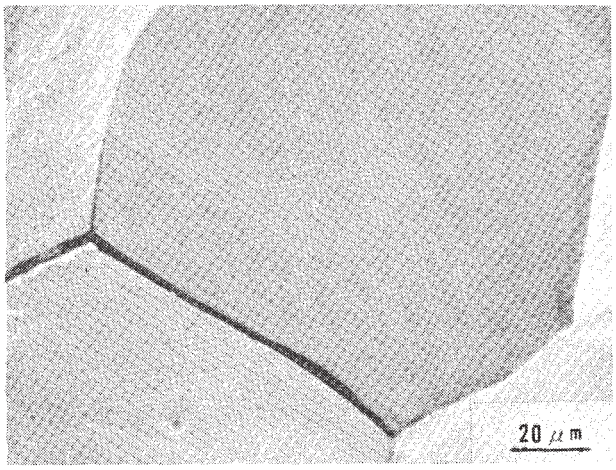


Fig. 8　昇温破断試験において発生したＳＲ割れ破面（Ｉ鋼：２¼Cr－１Mo－¼Ｖ）