

鉄鋼の各種溶接割れの研究

—— 割れに対するSEMおよび塑性域再結晶法による破
面解析、ならびに、割れ検出に対するAE法の適用 ——

機械金属室 比嘉眞嗣

1. 緒 言

溶接割れをその発生時期により分類すると、比較的高温で発生する高温割れ (hot cracking) と比較的低温まで冷却したのちに発生するいわゆる低温割れ (cold cracking) とに大別される。本研究はHT50~60級の高張力鋼を対象に、割れ試験を実施し、その割れ形態について調べたものである。観察手段として、割れ部のマイクロ観察、破断部のSEM観察を行い、さらに、近年、亀裂近傍の塑性ひずみの分布を再結晶法で測定する手法が報告されていることより、溶接割れの観察にこの手法を取り入れ、その観察手段としての効果を検討した。というのは、実際の事故品においては、破面の酸化等のためSEMによる破面解析が不可能な場合がままあり、割れ解析に不十分な面もある。従って今回溶接割れに再結晶法を適用し、割れ形態の識別および割れ発生時の応力の推定等の可能性を検討した。以下に今回実施した割れ試験法を記す。また、AEの溶接割れへの適用として、低温割れの一部においてAE測定器をセットして、AE発生の状況も調べたのであわせて報告する。

○高温割れ

Trans・Varestraint 割れ試験

Bead on plate 割れ試験

なし型ビード割れ

○低温割れ

Y開先 TRC 試験

非拘束 T型すみ肉溶接割れ試験

可変拘束 T型すみ肉溶接割れ試験

多層溶接時の変形割れ試験

○再熱割れ

Y開先拘束割れ試験片の応力除去焼鈍

○その他の割れ

シャルピー衝撃試験

2. 実験目的

高張力鋼において、各種溶接割れ試験を実施しその割れ挙動を調べることにより、実際の構造物における溶接割れに対して、その発生原因等の探究に資することを目的とする。かつ再結晶法を溶接割れに適用し、その効果を検討する。

3. 実験方法

各割れ試験方法に従い割れ試験を実施し、溶接割れを発生させ以下の方法でもって観察した。

1) ミクロ観察

割れ試験にて作成した試験体を研磨後、過飽和ピクリン酸溶液、または、ナイトール5%溶液にて割れ部をエッチング後顕微鏡観察し、割れの発生位置、形態および進展等について調べた。

2) SEM観察

各割れ破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察し、その破面形態を調べた。

3) 塑性域再結晶による観察

各試験片をアルゴン雰囲気電気炉内に700℃にて3hr保持し再結晶処理を行ないただちに試験片を水冷し、研磨後5%ナイトールにてエッチングを行ない、顕微鏡観察し、割れ近傍の再結晶域の生成状況を調べた。

4) AE測定 (アコースティックエミッション)

溶接終了後1分以内にスラグを除去後AE測定を行ないその発生状況を調べた。

4. 実験結果

4・1 高温割れ

4・1・1 Trans. Vareststraint 割れ試験

溶接条件を表1に示す。試料数として3体作成し各観察に振り分けた。供試体の化学成分値は表2のとおりである。かつ試験状況を写真1に示す。

表1 溶接条件

材 質	SM 50 A
試験片寸法	長さ×幅×板厚 (350 mm × 150 × 12)
溶接方法	TIG (Ar 100%)
溶接条件	溶接電流 溶接電圧 溶接速度 Ar流量 150 A 13 V 150 mm/min 15 l/min
Bending条件	付加ひずみ 4%

表2 供試体の化学成分

化学成分 (%) 材質	C	Si	Mn	P	S
SM 50 A	0.14	0.33	1.37	0.022	0.016



写真1 Trans Vareststraint 試験機

<実験結果>

割れ発生状況を写真2～3に示す。割れは凝固方向に沿って数個発生しており、最大応力のかかるビード中央部に大きな割れが生じていることがわかる。また、割れは同一リップル内において発生していることも観察される。再結晶処理を施したのを写真4に示す。付加ひずみを4%と大きくとったため、その曲げによる塑性変形のためビード全

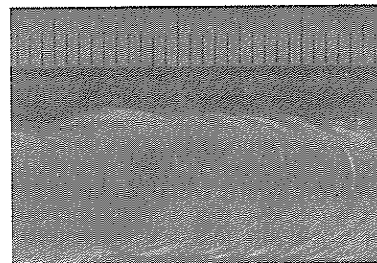


写真2 割れ発生状況

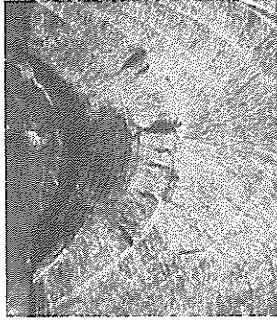


写真3 割れ部マクロ

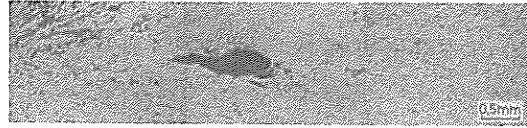


写真4 割れ周辺再結晶状況

面にわたって再結晶域が生じた。しかし、高温側付近には、再結晶を生じてない域もあり、高温のため塑性変形が緩和されたと思われる域もみられる。次に割れ断面をSEMにて観察した結果を写真5に示す。全般的になめらかな破面を呈し、溶融状態であったことが推察されるセル状樹枝模様を呈して

おり、高温側が特徴的であり、低温側にいくに従い不明瞭となっている。

4・1・2 Bead on Plate 割れ試験

供試体はS55CとSM50Bの2種を用いた。溶接条件は表3のとおりで、化学成分値を表4に示す。実験状況は写真6のとおりである。

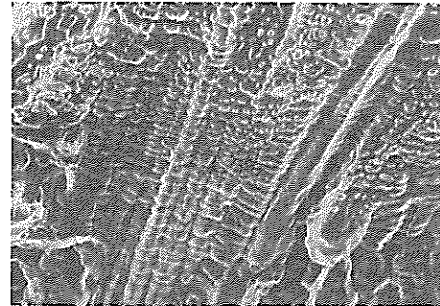
表3 溶接条件

材 質	S55C	SM50B
試験片寸法	長さ×幅×板厚 150×50×3 (S55C) 100×50×3 (SM50B)	
溶接方法	TIG溶接 (Ar100%)	
溶接条件	溶接電流	溶接電圧
	140 A	13 V
	溶接速度	Ar流量
	150 mm/min	15 l/min

表4 供試体の化学成分

化学成分 (%)	C	Si	Mn	P	S
S55C	0.52	0.23	0.67	0.017	0.033
SM50B	0.15	0.45	1.27	0.018	0.015

〔高温側〕



〔低温側〕

(×300)

写真5 SEM写真

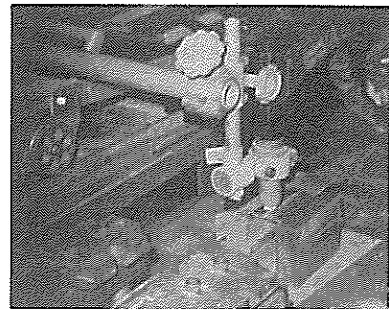


写真6 Bead on Plate 割れ試験状況

<実験結果>

割れ発生状況を写真7～8に示す。割れはビード中央部に発生し溶接方向に向け進展していることがわかる。割れ先端部より両者とも中央部のデンドライトが会合している付近で割れが発生していることがわかる。再結晶処理を施したのを写真9 10に示す、予想として割れ先端部において割れが停止するとき残留ひずみを生じ塑性域を形成するのではと考えられたが、写真にみるようにそのような形態はみられなかった。次にSEMの結果を写真11、12に示す。Varestraint試験片と同様に高温割れ特有のセル状樹枝状を呈すなめらかな破

断面が観察された。

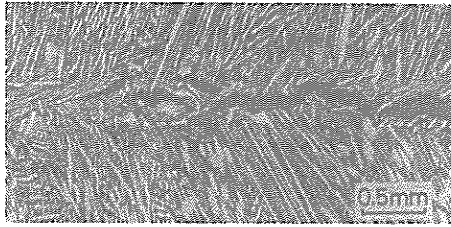


写真7 割れ先端部 (S55C)

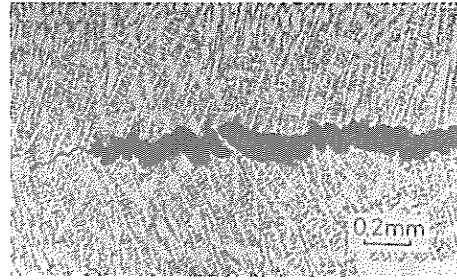


写真8 割れ先端部 (SM50B)

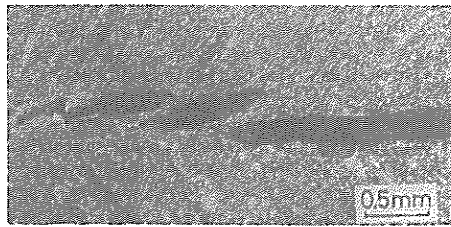


写真9 再結晶処理後 (S55C)

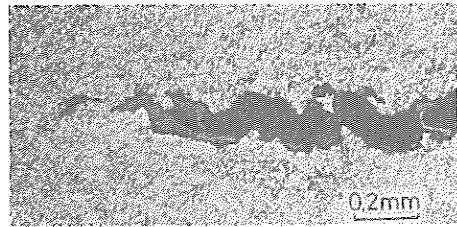


写真10 再結晶処理後 (SM50B)

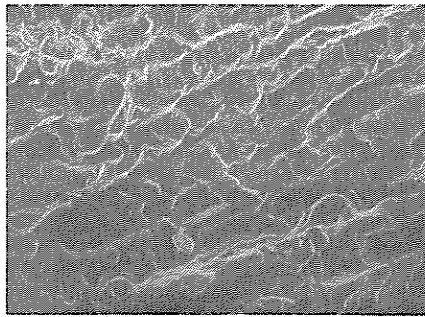


写真11 SEM写真 (S55C)

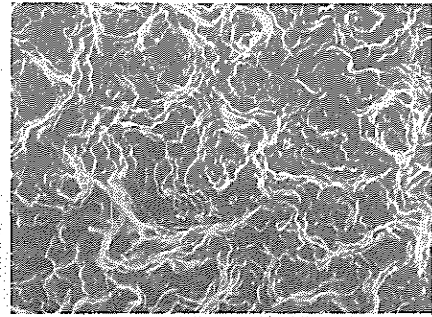


写真12 SEM写真 (SM50B)

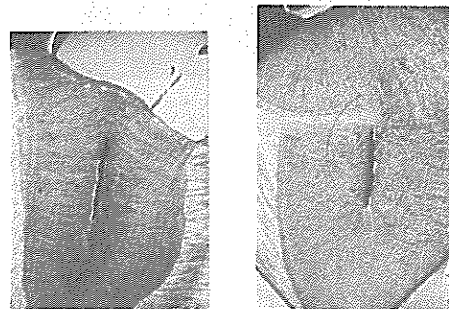
4・1・3 なし型ビード割れ

溶接条件を表5に示す。試験体は炭酸ガスアーク溶接と、タンデムサブマージアーク溶接で溶接したものである。

<実験結果>

割れ発生状況を写真13に示す。両者とも同様に溶接金属中央部に発生していることがわかる。

割れの形状は、ビード表面側の割れ先端は鋭く、ルート側は丸みを帯びている。次に再結晶処理を

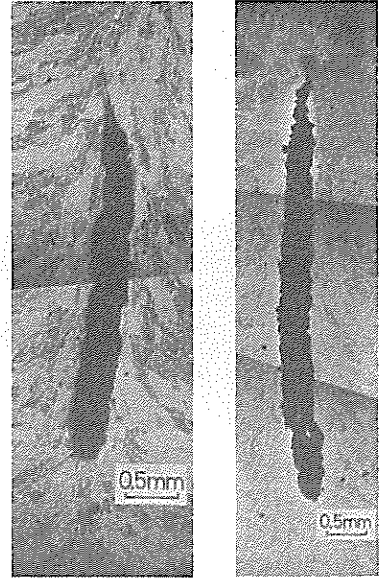


(炭酸ガス) (サブマージマーク)
写真13 なし型ビード割れ発生状況

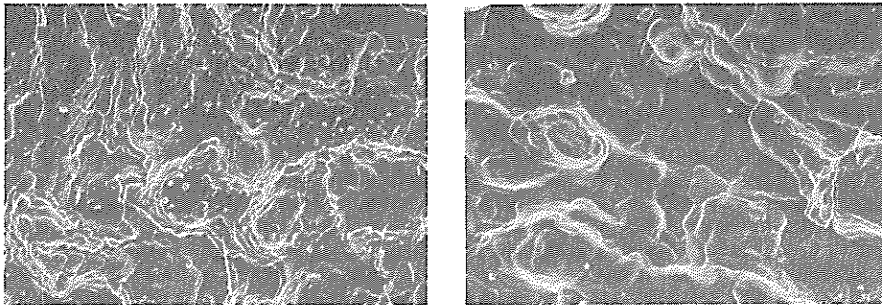
施した結果を写真14に示す。炭酸ガスアークの場合は再結晶域はみられないが、サブマージアークの場合は割れ周辺に再結晶域がみられ、ビード表面側の結晶粒は単一結晶であるが、中央部、ルート側は結晶粒に変化がみられた。つまり、割れの位置により塑性変形の程度がかわっていることを示唆している。次にSEMの結果を写真15に示す。酸化のため明瞭な破面でないが全般的にセル状樹枝状模様を呈しており、高温割れだということがわかる。

表5 溶接条件

材 質	SM 50 A 板厚 28 mm	
溶接方法	すみ肉 炭酸ガスアーク溶接	すみ肉 タンデムサブ マージアーク溶接
溶接条件	溶接電流	420 A 溶接電流 900 A (L) 600 A (T)
	溶接電圧	30 V 溶接電圧 28 V (L) 35 V (T)
	溶接棒 MGS-638 1.6φ	極間距離 50 mm
	シールドガス (80% Ar + 20% Co ₂)	溶接棒 US-49 4.8φ
		フラックス MF-38 A



(炭酸ガス) (サブマージ)
写真14 再結晶後



(炭酸ガス) (サブマージ)
写真15 SEM写真

4・2 低温割れ

4・2・1 TRC試験

実験は20 t型TRC試験機を利用し行った。試験形状を図1に、溶接条件等を表6に、供試体の化学分析値を表7に示す。なおサンプルは負荷条件を三段階にわけた試料を用いた。

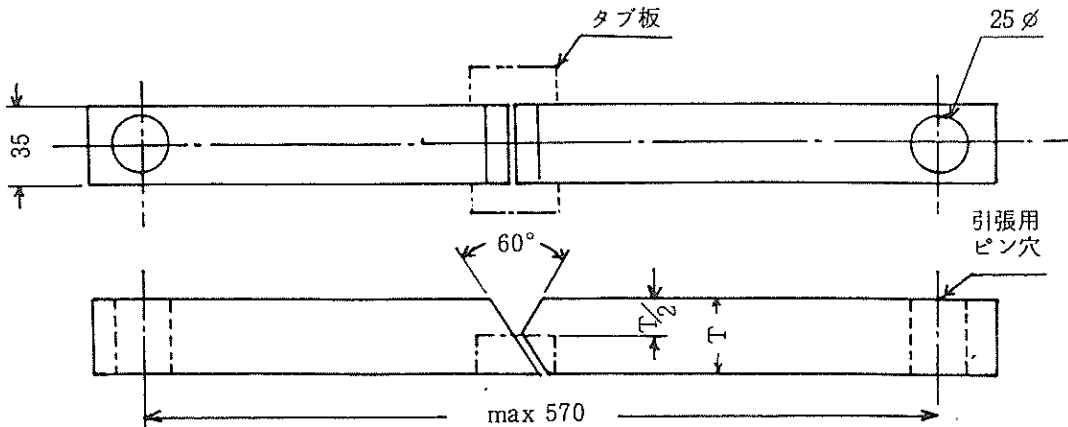


図1 TRC試験片形状

表6 溶接条件

材 質	SM58Q		
試 験 片	斜めY型TRC試験片 板厚 31 mm		
溶 接 方 法	被覆アーク溶接 D5816 4φ (350℃ 1 hr 乾燥)		
溶 接 条 件	溶接電流 170 A	溶接電圧 25 V	溶接速度 150 mm/min
採 取 試 料	試 料 No.	負荷条件 (kg/mm ²)	破断時間
	No. 1	96	2~3 sec
	No. 2	72	70 min
	No. 3	54	119 min

表7 供試体の機械的性質と化学成分

材質	機 械 的 性 質			化 学 成 分 (%)									
	Y.P	T.S	伸び	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	V	Ni
SM58Q	56	66	44	0.14	0.22	1.30	0.022	0.004	-	-	0.07	0.04	0.17

<実験結果>

割れ発生状況を写真16に示す。応力の高い場合は、ルート部からただちに溶接金属内に割れが進展しすぐ破断に達しているが応力を低くするにつれ、ルート部より発生した割れは、HAZの粗粒域を進展して、断面積が減少して後、溶接金属に進展することがわかる。従って低応力ほどHAZ部の割れが長くなっている。次に再結晶を施した結果を写真17に示す。これよりみるに、HAZ部での割れ付近は再結晶域は小さく、溶接金属に達するあたりから徐々に増大していることがわかる、それら塑性域範囲および粒径の測定結果を図2に示す(各測定値は破断面の左右の平均である)。図よりわかるようにHAZ部での再結晶域は200μ程度であるが溶接金属内にかかるあたりより増大し、500μ以上の大きさとなっている。また、粒径は図3に示すようにHAZ部においては30~

40 μ と変化はないが溶接金属部では10 μ から30 μ と割れから遠ざかるにつれ大きくなっている。SEMの結果からも再結晶域の変化と対応し(写真18)破面形態が場所により変化していることが確認される。応力の高いNo 1の場合は全面せん断型ディンプル形状を示しておりNo 2、No 3ではH A Z部では水素凝へき開破面や粒界破面を呈している。

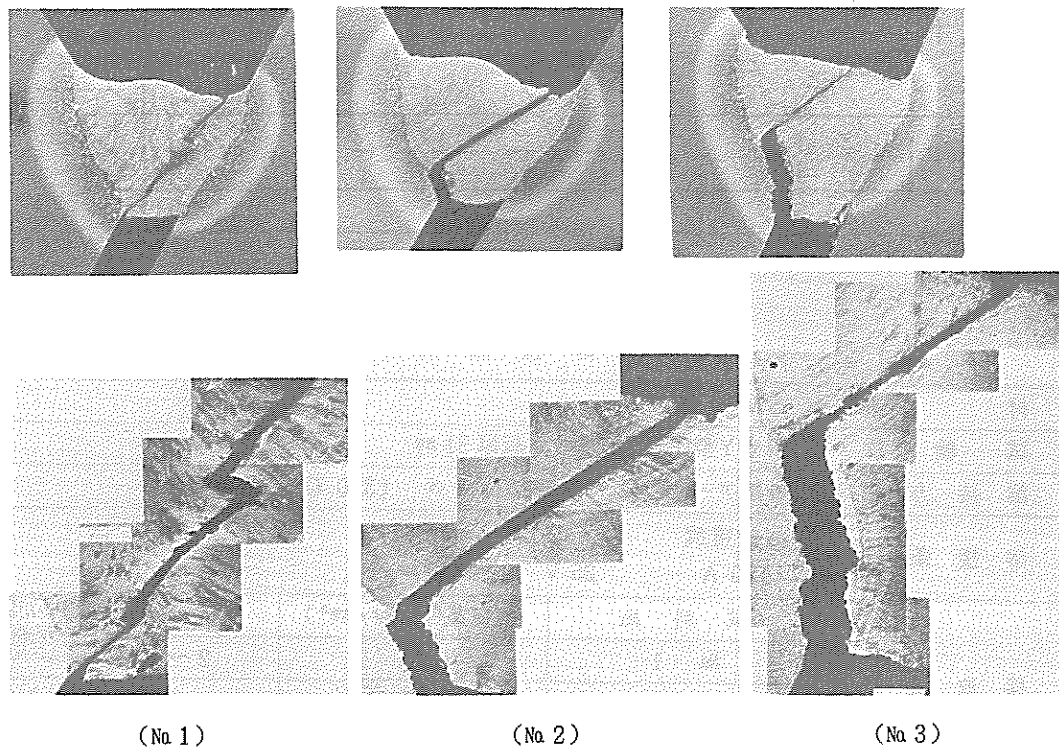


写真16 TRC試験結果ビード断面

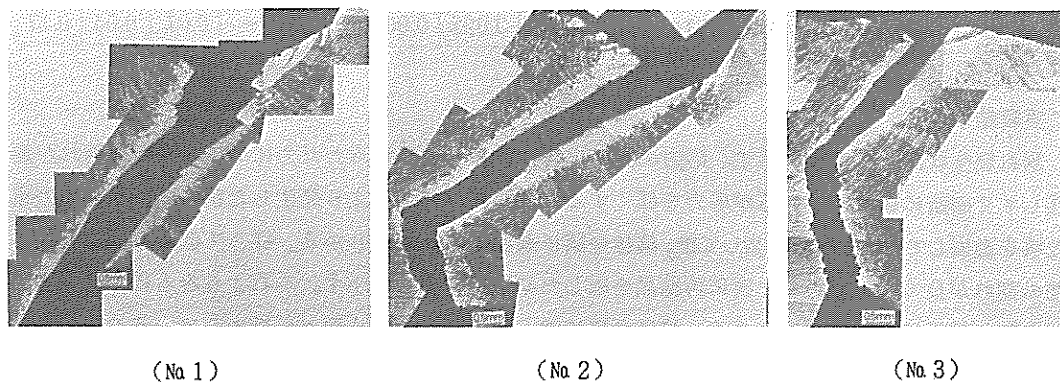


写真17 TRC試験、再結晶後

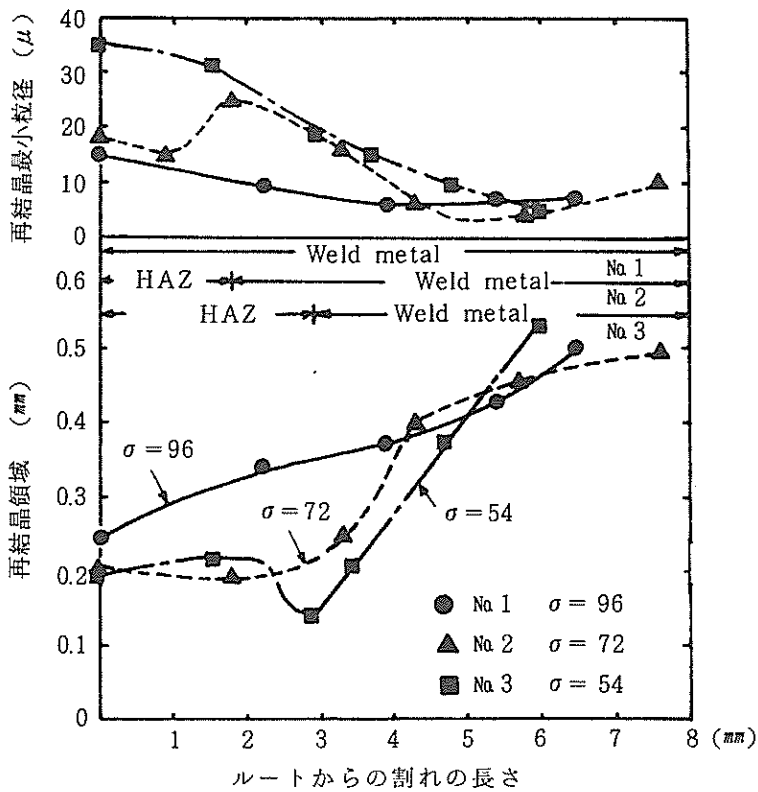


図2 ルート割れに沿った再結晶域および割れに接した部分の再結晶粒径の変化

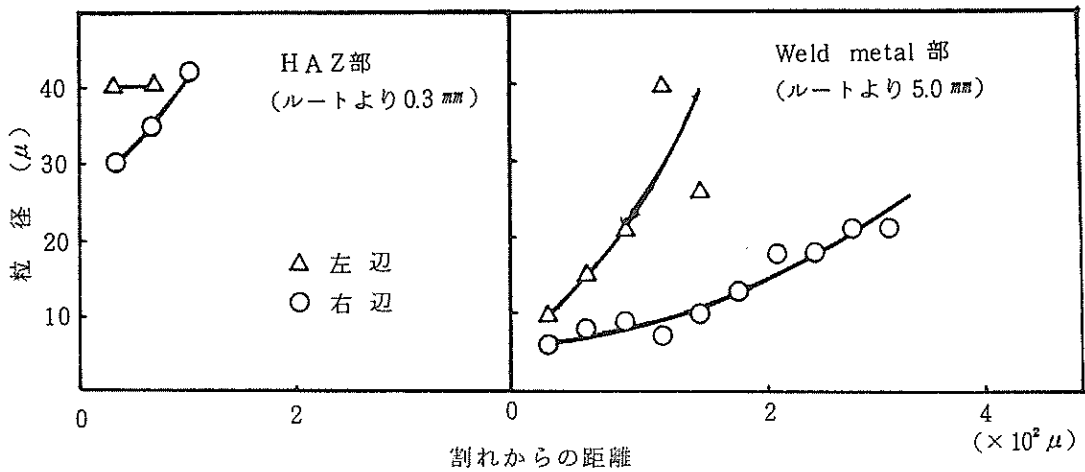
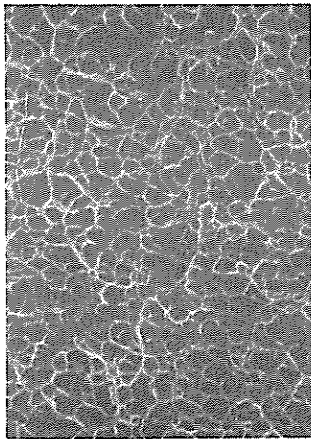
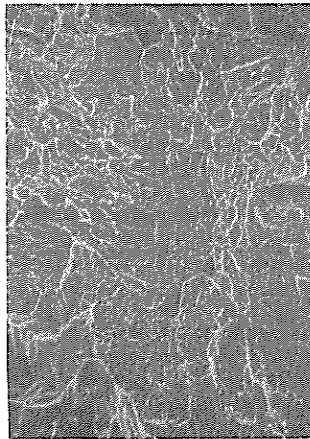


図3 再結晶域内の粒度分布 (No. 3)



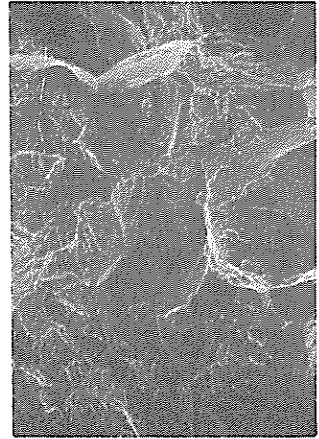
(No. 1)

(×2000)



(No. 2)

(×1000)



(No. 3)

(×500)

写真18 TRC試験、SEM写真

4・2・2 非拘束T型すみ肉溶接割れ試験

ヒールクラック再現割れ試験法である非拘束のT型すみ肉溶接を行い試験試料を作成した。試験板は図4に示すとおりで、溶接条件は表8のとおりである。また、供試体の化学成分は表9である。また、試験板板厚の影響をみるためフランジ側の板厚を変えて行なった、試験片採取は溶接終了後17 hr 以上放置してのち行った。

<実験結果>

溶接断面のマクロ写真を写真19に示す(a)が板厚12mm(b)が22mmである。(a)では割れは発生せず(b)で発生した。その拡大を写真20に示す。割れはフランジ部のHAZの粗粒域において発生している。

表8 溶接条件

材 質	SM 50 A				
溶接方法	水平すみ肉被覆アーク溶接 D 5016 4φ (350℃ 1hr 乾燥)				
溶接条件	溶接電流	溶接電圧	溶接速度	脚 長	ルートギャップ
	170 A	25 V	約 150 mm/min	6 mm	0.6 mm

表9 供試体の化学成分

材質	分析値(%)	板 厚	C	Si	Mn	P	S
SM 50 A		12	0.14	0.33	1.37	0.022	0.016
SM 50 A		22	0.15	0.33	1.35	0.024	0.004

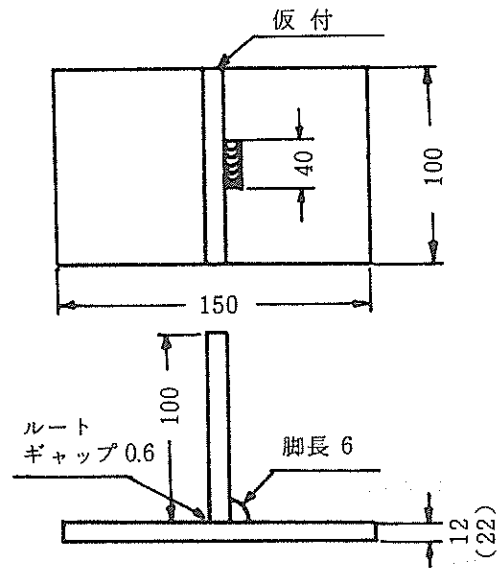


図4 非拘束T型すみ肉溶接割れ試験片形状

角変形も(a) 1.2度、(b) 1.7度と若干差がある。次に再結晶処理後の断面を写真21に示す。これよりみると溶接金属内においても再結晶域が生じており冷却過程における収縮変形等により溶接内部に塑性変形を生じていることがわかる。また、割れ付近に注目するとルート部においては塑性域が生成していることがわかるが中央部においては塑性変形を伴わない割れが進展していることが観察される。

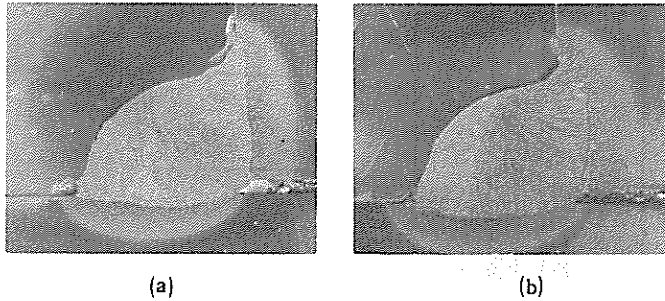


写真19 ビード断面



写真20 (b)割れ部拡大

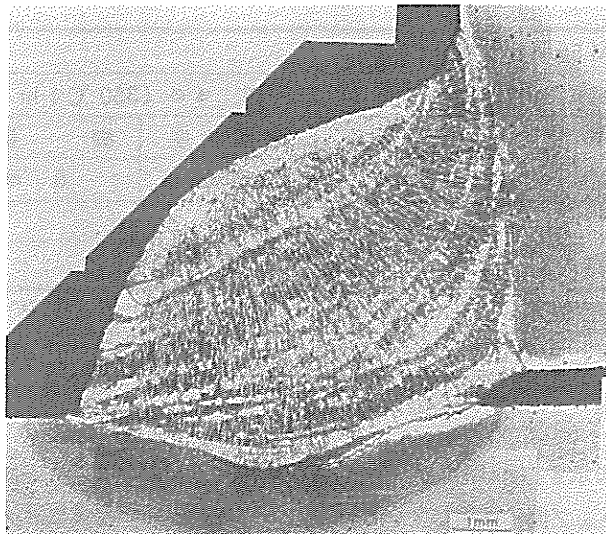


写真21 (b)再結晶後

4・2・3 可変拘束T型すみ肉溶接割れ試験

すみ肉溶接部の拘束度を変えその割れ形態等の違いを検討するため可変拘束型のすみ肉溶接割れ試験を行った。試験体形状は図5に示すように小型タイプを採用し、拘束度はスリット長を20mm、80mmの2段階とした。かつ、AE測定も行った。溶接条件を表10に、供試材の化学成分を表11に示す。

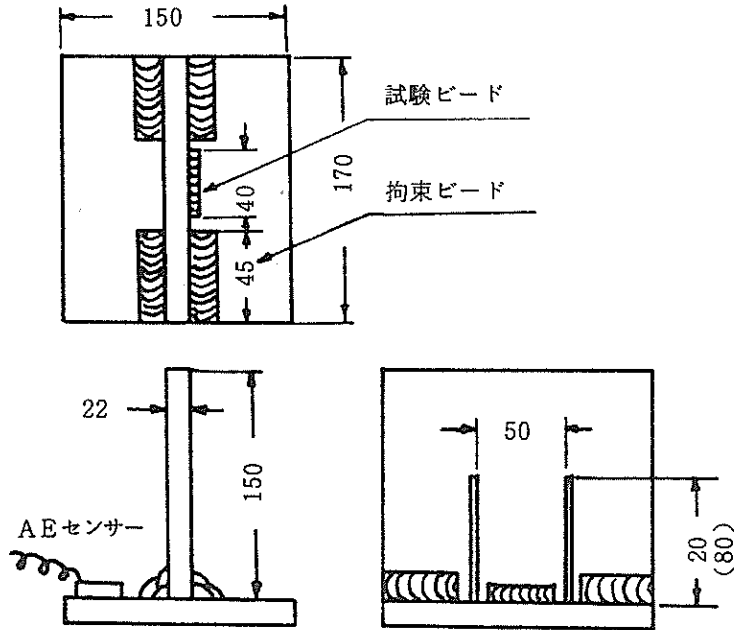


図5 可変拘束T型すみ肉溶接割れ試験片形状

表10 溶接条件

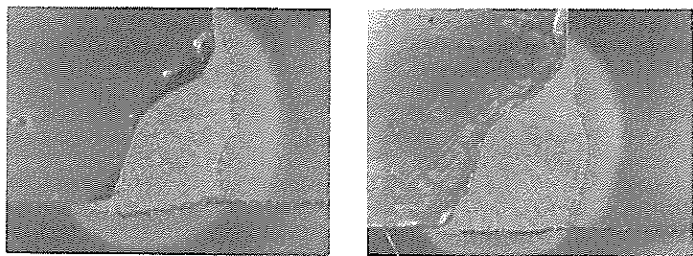
材 質	SM 50 A 板厚 22 mm				
溶接方法	垂直すみ肉被覆アーク溶接 D 5016 4φ (350℃ 1 hr 乾燥)				
溶接条件	溶接電流	溶接電圧	溶接速度	脚 長	ルートギャップ
	170 A	25 V	約 150 mm/min	6 mm	0 mm

表11 供試体の化学成分

材質	成分(%)	C	Si	Mn	P	S
SM 50 A		0.15	0.33	1.35	0.024	0.004

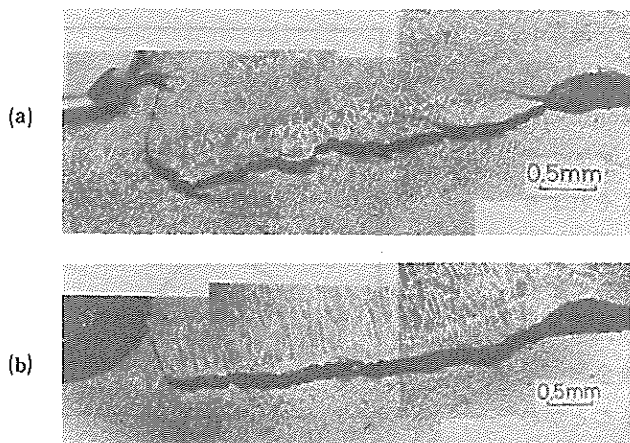
<実験結果>

溶接断面を写真22に示す。(a)が拘束大(b)が拘束小である。非拘束の場合と同様に割れはフランジ側だけに生じておりウェブ側には生じていない。その割れの拡大を写真23に示す。これよりわかるように拘束度の差により割れ形態にも違いがあることがわかる。拘束が大きい場合は同一の割れ形態ではなく、3種の割れが混在しているが、拘束小の場合は、連続的な割れでルートからビード



(a) (b)

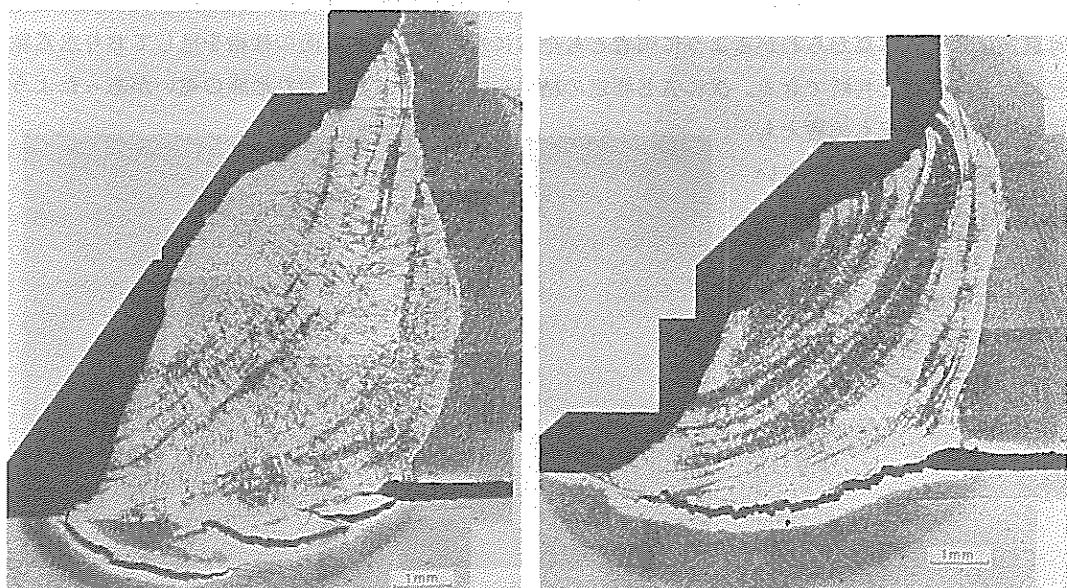
写真 22 溶接断面



(a)

(b)

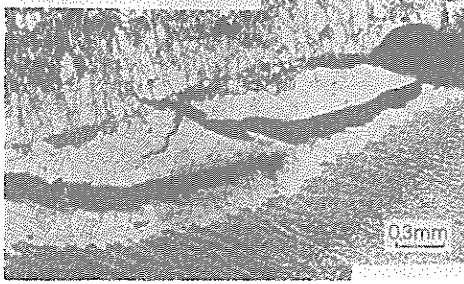
写真 23 割れ部拡大



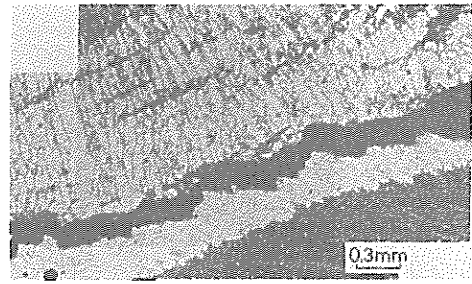
(a)

(b)

写真 24 再結晶処理後



(a)



(b)

写真25 割れ部拡大

上端までスムーズに割れが進展していることがわかる。また(b)の場合はH A Zの粗粒域をBondに沿って割れているのに対して(a)の場合はBond付近ではなくそれより離れたビード下割れ的な形態である。次に再結晶処理を施した結果を写真24、25に示す。非拘束の場合と同様に両者とも溶接金属全面に塑性域が生成していることがわかる。割れ部に注目すると(a)、(b)とも割れの周辺にはほぼ同じ程度の塑

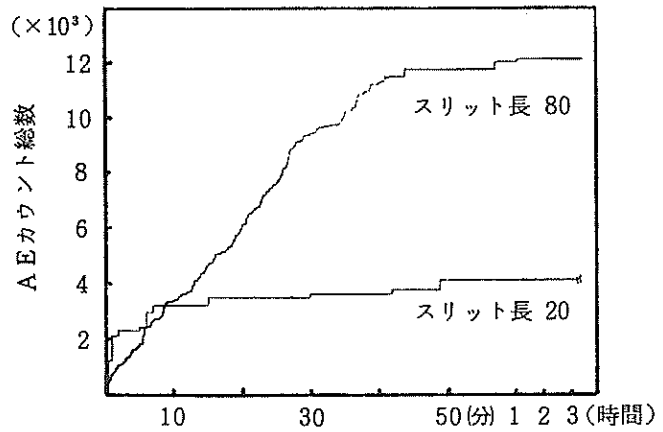
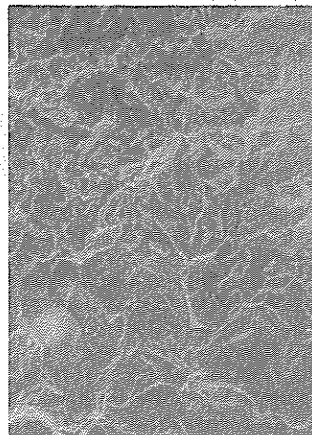


図6 AEカウント総数の変化

性域を生成し割れの位置によらずほぼ一定の幅であり、粒径の変化等もない。次にSEMの結果を写真26に示す。写真からわかるように両者とも全体に水素凝へき開破面の様相を呈しており水素脆化による割れだと判断できる。次にAE測定の結果を図6に示すが、割れ形態の違いがあったようにAE発生状況も両者とも相違がある。拘束度が小さい場合は小さいAEが連続的に発生し、拘束度が大きい場合は大きなAE発生が段階的に生じていることがわかる。



(a) (×1000)



(b) (×1000)

写真26 SEM写真

4・2・4 多層溶接時の変形割れ試験

厚板のレ型開先の多層盛りにおいて、その拘束度が弱い場合そのルート部において溶接変形による割れが発生することが報告されている。今回その割れ挙動を調べるため拘束をせず多層溶接してその割れ発生状況を調べた。試験片形状を図7に示す。割れ発生時期等を調べるため1パス毎にAE発生を測定しかつ次のパスまでの時間を30分と一定にして行った。なお予備試験にて乾燥棒にては割れ発生がみられなかったため棒を乾燥せずに行った。および各パス毎にその角変形量も測定した。溶接条件を表12に化学成分を表13に示す。なお試験片加工は溶接終了後24hr経過後行なった。

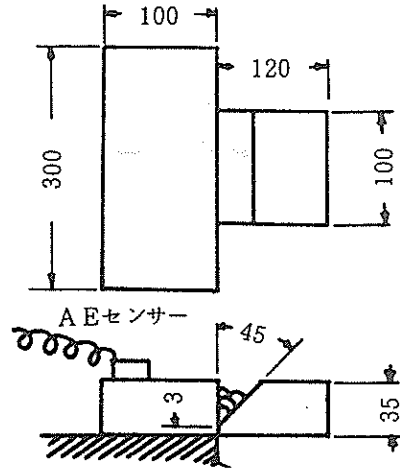


図7 多層盛溶接割れ試験片形状

表12 溶接条件

材 質	SM 50 A 板厚 35 mm		
溶接方法	被覆アーク溶接 D 5016 4φ、5φ (乾燥せず) (2層目まで4φ、使用)		
溶接条件	溶接電流	溶接電圧	溶接速度 120 ~ 150 mm/min
	170 A (4φ) 220 A (5φ)	25 V (4φ) 28 V (5φ)	
層 数	17パス		
冷却時間	30分		

表13 供試体の化学成分

材質	成分(%)	C	Si	Mn	P	S
SM 50 A		0.13	0.38	1.44	0.027	0.009

<実験結果>

溶接断面を写真27に示す。割れは固定端のルート側のBond部において発生しており割れ長さとしては第一層目の溶接域のみでおよそ2mm程度であり、変形する側のルート部には発生していない。次に再結晶処理を施した結果を写真28に示す。再結晶域は割れの両側に生成しており先端まで平均した幅で生成していることがわかる。また可動片の第6、第9および第13パスの下側のHAZ部においてラメラティアらしき割れも観察されたがそこにおいては割れに接しては再結晶域はみられなかった。(写真29)次に角変形の結果を図8に示す。これからみると約6パスまでは直線的に一定の角変形をしているがそれ以降はさほど変形せず10パス以降は特にそれほど変形はきたさないことがわかる次に各パス毎のAE発生状況を図9に示す。これからみると4パス目のときに異常な発生をきたしそれ以外はほとんど差がないことより4パス目終了後に割れが大きく進展したのではないか

と考えられる。

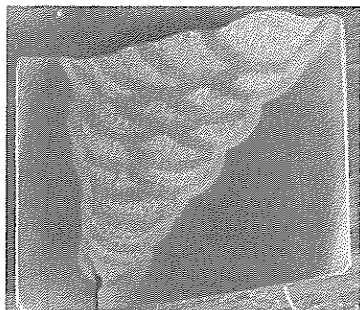


写真 27 溶接断面及び割れ部

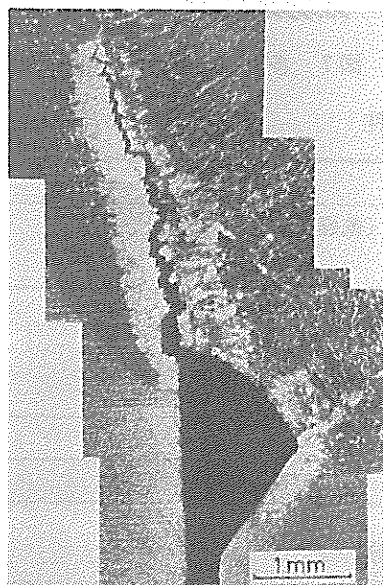
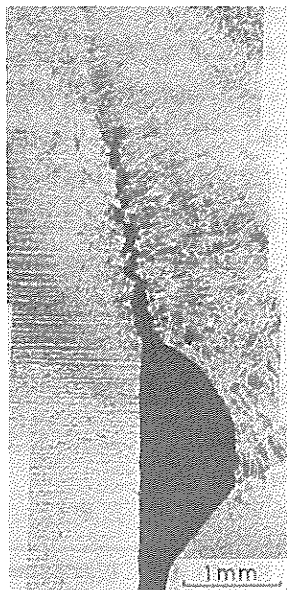


写真 28 再結晶後

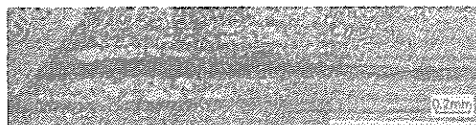


写真 29 ラメラティヤ付近

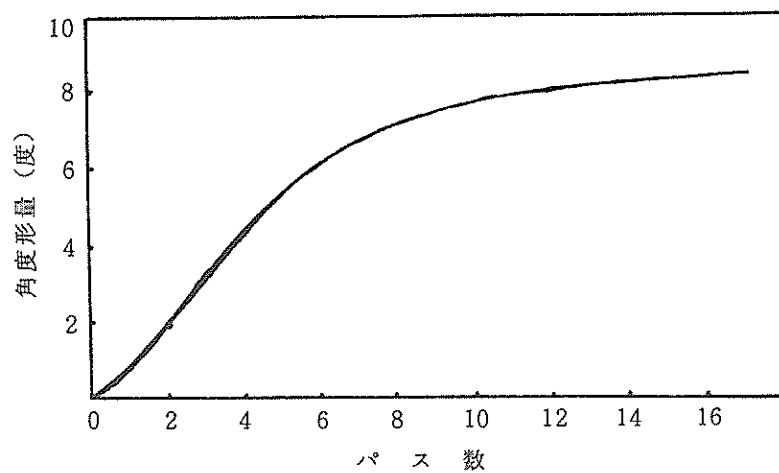


図 8 各パス毎の角変形

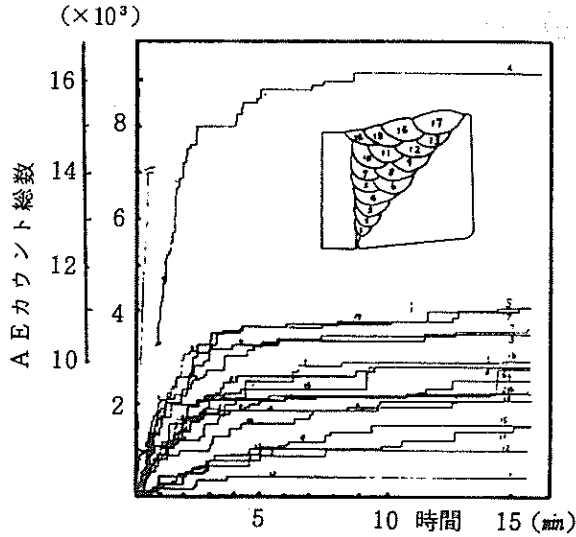


図9 各パス毎のA Eカウン ト総数の変化

4・3 再熱割れ

溶接中に割れが発生せず溶接終了後応力除去焼鈍によって発生する再熱割れ(SR割れ)がある。今回鉄研式斜めY型割れ試験を使い、焼鈍を行いSR割れを作成した。その溶接条件及びSR条件を表14に、供試体の化学成分値を表15に示す。

表14 溶接条件

材 質	HT 80 板厚 34 mm		
試 験 片	鉄研式斜めY型割れ試験片 (スリット加工)		
溶接方法	被覆アーク溶接 D 8016 4φ (350℃ 1hr乾燥) 試験体: 150℃予熱		
溶接条件	溶接電流 170 A	溶接電圧 25 V	溶接速度 150 mm/min
S R 条件	加熱速度 150℃/hr	保持温度 600℃ 1hr	

表15 供試体の化学成分

成分(%) 材質	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	B	Ni	V	ΔG^*	P_{SR}^*
HT 80	0.094	0.28	0.85	0.013	0.004	0.75	0.24	0.42	0.001	0.05	0.04	0.46	0.23

$$*) \Delta G = Cr + 3.3 Mo + 8.1 V - 2$$

$$P_{SR} = Cr + Cu + 2 Mo + 10 V + 7 Nb + 5 Ti - 2$$

<実験結果>

割れ発生状況を写真30に示す。割れはHAZの粗粒域において発生しており、形態としては連続的な割れでなくところどころ微細な横われを伴いノコ歯状である。再結晶処理の結果は写真31のとおりでありこの場合も割れ周辺に再結晶域を生じており塑性変形を伴っていることがわかる。塑性域としては250μと割れの位置に関係なくほぼ一定で粒径も32μ相当であり粒径の変化もない。次に割れ破面のSEMの結果を写真32に示す600℃1hrの熱処理及び炉冷のため酸化が著しく不明瞭であるが粒界割れの形態を示していることが観察される。

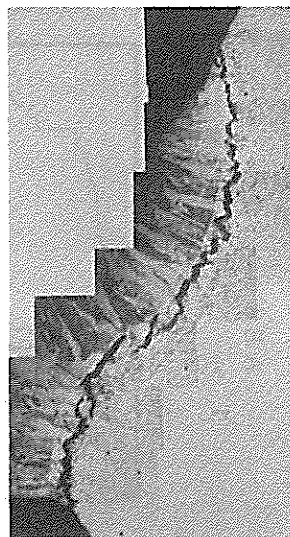
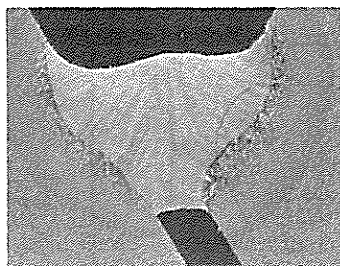


写真30 溶接断面及び割れ部

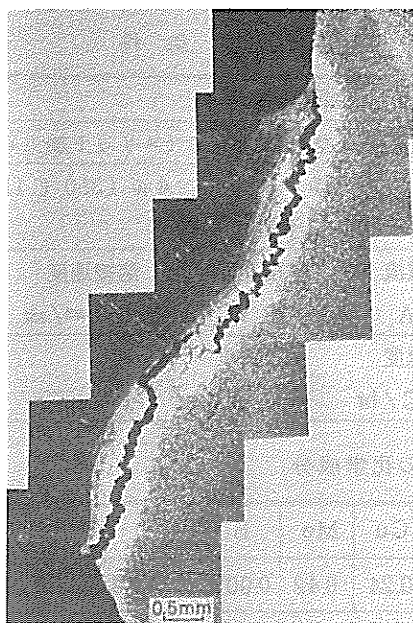


写真31 再結晶処理後

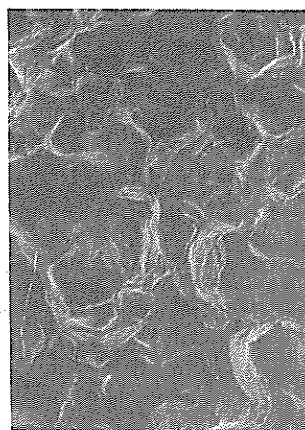


写真32 SEM写真

4・4 シャルピー衝撃試験

試験片は溶接片のBond部にノッチをいれたものと母材のままの二者を用いて行った。試験温度として -80°C 、 -50°C 、 -30°C 、室温(15°C)の4段階で行なった。この試験は破断後、再結晶処理を施し、その塑性域生成状況を調べるために行なったものである。使用した材質はHT80材でその化学分析値を表16に示す。

表16 化学組成

材質 \ 化学成分 (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
HT 80 (母材)	0.13	0.27	0.90	0.007	0.011	0.86	0.49	0.33
" (溶接金属)	0.07	0.63	1.45	0.009	0.006	1.81	0.26	0.44

<実験結果>

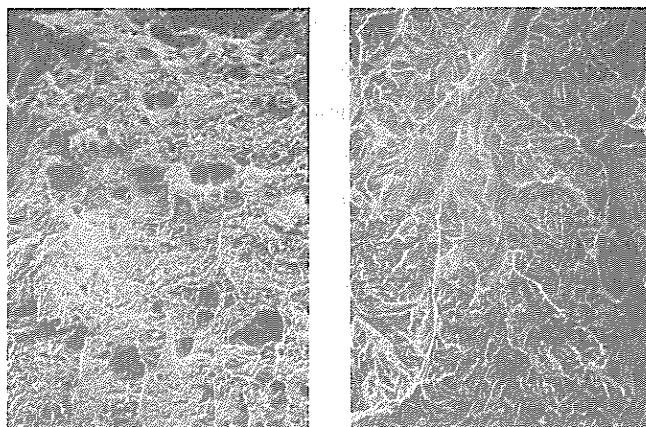
試験結果を図10に示す。左のほうは溶接片で右が母材のままである。みてもわかるように溶接片の場合は低温での靱性の低下が著しく、塑性域の生成にも変化がみられるが、母材片は低温でも衝撃値にあまり低下がみられず塑性域生成も変化がない。溶接片の場合は塑性域の生成の仕方が、溶接金属のほうにあまり発生せず、母材側のほうに大きく生成していることがわかる。

SEM観察の結果も写真33に示すように溶接片のM1～M3までは脆性破面を呈しているが、母材側は-80℃でもディンプル破面を示している。

試験温度	衝撃値	試験温度	衝撃値
-78.2℃ (M1)	22.4	-78.2℃ (B1)	203.9
-48.9℃ (M2)	4.7	-48.6℃ (B2)	21.3
-29.6℃ (M3)	9.8	-29.6℃ (B3)	21.9
+15.6℃ (M4)	20.9	+15.6℃ (B4)	23.6

(溶接物) (母材)

図10 シャルピー衝撃試験結果



(×500) (×200)
母材 (-80℃) 溶接物 (-80℃)

写真33 SEM写真

5 まとめ

溶接物の各種割れ試験を実施し、その割れ形態について調べた結果次のことが言えよう。

1) 溶接割れのうち高温割れにおいては、そのフラクトグラフィー的特徴は全体的になめらかな破面を呈し、溶融状態であったろうと推定される樹枝状模様を呈することがわかった。かつ、その再結晶処理の結果はBead on plate割れをみた場合に割れ近傍に塑性域が生じないことがわかった。

2) 低温割れにおいては、大部分水素の影響が大きくその破面は粒界割れ等を含むへき開破面になる。かつ再結晶法にても脆性破面を呈する側の塑性域は結晶粒が大きく、割れからの距離にも変化がないことがわかった。かつ、塑性域も一定の幅を有することがわかった。また、低温割れ等にAEを利用することにより、その発生時期、割れの挙動等も推察出来ることがわかった。

3) 従って溶接割れの解析に再結晶法を利用し、その再結晶域、及び結晶粒径等を測定することにより、破壊形態等の識別が可能であることがわかった。

謝 辞

本研究の実施にあたり、適切な御助言、御指導を賜りました。大阪大学溶接工学研究所、松田福久博士、中川博二博士、岡氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 仙田、松田、高野他3人 Trans Varesstraint 試験法による溶接金属の凝固割れ感受性の研究
溶接学会誌 Vol 41 (1972) No 6 P 709 ~ 723
- 2) 田仲、北田 すみ肉溶接割れに関する研究
溶接学会誌 Vol 41 (1972) No 8 P 915 ~ 924
- 3) 坪井、西馬 可変拘束度すみ肉溶接割れ試験について
溶接学会誌 Vol 43 (1975) No 10 P 1038 ~ 1046
- 4) 安藤、仲田他 回転変形による高温割れの発生進展機構と高温割れ感受性の評価方法
溶接学会誌 Vol 42 (1973) No 9 P 879 ~ 889
- 5) 森、益本 梨型溶け込みビード形成の研究
溶接学会誌 Vol 48 (1979) No 12 P 1041 ~ 1047
- 6) 森、益本 梨型溶け込みビード割れの研究
溶接学会誌 Vol 49 (1980) No 1 P 19 ~ 23
- 7) 明石、夏目 溶接継手の曲げ拘束について
溶接学会誌 Vol 43 (1974) No 6 P 611 ~ 618
- 8) 上田、西村、飯山、千葉 かど継手部のラメラティアおよびルート割れ発生、伝播挙動
溶接学会誌 Vol 49 (1980) No 9 P 621 ~ 627
- 9) 尾上 外 アコースティックエミッションの基礎と応用 コロナ社
- 10) 長田、瀬尾、正木 再結晶を用いた塑性ひずみ測定法
第12回応力ひずみ測定シンポジウム講演集

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。