

# 溶接構造物の破壊におよぼす応力除去の影響

安 藤 良 夫

## 1. ま え が き

船舶、橋梁、ベンストック、ガスホルダー、ボイラその他の構造物が従来の鉄構造から溶接構造となつて、軽量で強度が高く、しかも水密油密気密性の高いものが造られるようになった。ところが何らかの悪条件が重なつて破壊するときには、鉄構造では鉄列の所で止つてしまふような場合でも、溶接構造では破壊が伝播して大きな事故となる場合がありうる事がわかつた。

第 2 次大戦中米国で急造された商船は Liberty 船をはじめとして約 5,000 隻に及ぶが、1946 年 4 月までに約 1,000 隻の船が大なり小なりの損傷を生じた。ひどい例では 10 隻のタンカーと 3 隻の Liberty 船は破壊が伝播して完全に真二つに割れた<sup>(1)</sup>。これら溶接船の破壊様式は鉄接船とはまったく異なり、これから切欠脆性が大きな研究問題として取り上げられるようになった。切欠脆性を考慮するようになった比較的新しいスーパータンカー Worldconcord (38,000 DWT) が第 1 図に示すよ



第 1 図 大西洋で真二つに折れたスーパータンカー Worldconcord

うに 1954 年大西洋で折損した例もあり、船舶以外にも Fawley の石油タンクのように完全に破壊した例もある<sup>(2)</sup>。日本では戦後溶接性の良い鋼材の発達、溶接構造物の設計技術の進歩、溶接施工法の向上のために各方面が協力して研究努力した結果、幸いにも大きな脆性破壊事故を起していない。

脆性破壊は材質が大いに影響するが、同じ材質でも温度が低いほど、切欠半径が小さいほど、荷重速度が大きいほど、応力状態が多軸であるほど発生しやすい。

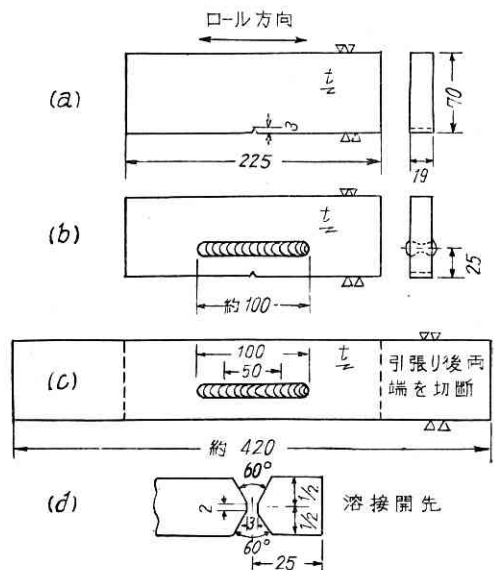
溶接構造物は一般に残留応力を有しており、溶接線付近ではその方向の残留応力が板の降伏点に達しているのが普通である。したがつてその値は構造物の設計応力よりも遙かに高く、いやな感じを与えるが、延性破壊をする場合には残留応力の影響は実質的には皆無といつてもよい。応力腐食や変形が重要な構造物では応力除去を行うが、延性破壊の恐れだけで焼鈍その他の応力除去を要求するのはまったく意味がない。ところが脆性破壊では、破壊に要するエネルギーが小さいので、溶接残留応力として蓄えられた弾性エネルギーが大きな影響を与えることが考えられ、各種の応力除去法を行なつた試験片について静的曲げ試験を行い、その影響を実験的に求めた<sup>(3)(4)</sup>。

## 2. 使用材料、試験片形状および試験方法

実験に使用した鋼材は板厚 20mm の日本鋼管製キルド鋼 NK と八幡製鉄製 AB 規格セミキルド鋼 YS で、その化学成分と機械的性質を第 1 表に示す。材料の都合

第 1 表 使用鋼材の化学成分と機械的性質

記号	化学成分〔成品分析%〕					降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張り強さ kg/mm <sup>2</sup>	伸び %
	C	Mn	Si	P	S			
NK	.15	.80	.21	.018	.040	32.0	49.0	25.0
YS	.16	.83	.09	.019	.023	27.5	46.3	30.0



第 2 図 試験片形状

で、機械的引張りによる応力除去の試験はNKを用い、応力焼鈍、ピーニング、低温応力除去の試験はYSを用いて行った。

試験片の形状は静的曲げ試験 (Van der Veen test) に準じ、溶接を行わない試験片は第2図 (a) に示すように標準の形状とした。溶接を行うものは第2図 (b)、(c) に示すように、試験片の片側より 25mm の線を中心とし、第2図 (d) に示すような長さ約 100mm のX型開先をとって両面より交互に溶接を行った。使用した溶接棒は直径 5mm の低水素系 LB-26 (神戸製鋼製) で、溶接と試験片加工はNKについては石川島造船所、YSについては三菱長崎造船所により施工された。第2表に溶接条件を示す。

第2表 溶接条件

使用材料	N K	Y S
施工工場	石川島重工 第二工場	三菱造船 長崎造船所
溶接機	KO-500 交流溶 接機 (大阪変圧 器製)	500A 交流溶接 機 (日立製作所製)
開路電圧 (V)	75	95
アーク電圧 (V)	30-33	—
湿度 (%)	79	52
温度 (°C)	20	20
層数	8	6
溶接電流 (A)	200-250	195-240
溶接速度(mm/min)	150-240	150-200

機械的引張りにより応力除去を行う試験片は第2図 (c) のように長さの長いものについて室温で引張り、荷重を加えた後に長さを標準の 225mm に切断し、その後で切欠をプレスした。引張りの程度は次の3段階変化させ、溶接のままの試験片と比較した。

(1) 公称応力 25kg/mm<sup>2</sup> の荷重を加えたもの。溶接の近傍、ほぼ試験片の幅の中央で長さ方向の伸びを計測したが、ゲージ長 100mm に対しても、50mm に対しても永久歪は生じていなかった。

(2) 引張り試験機を目盛をみて、荷重が降伏点に達した直後に荷重を除いた。この際の公称応力は 32~33 kg/mm<sup>2</sup> で、材料の降伏点 32kg/mm<sup>2</sup> にほぼ等しく、100mm のゲージ長に対する永久歪は 0.05~0.15% であった。

(3) 100mm のゲージ長に対する永久歪が 2.5% になるように荷重を加えたもので、公称応力は約 37kg/mm<sup>2</sup> であった。

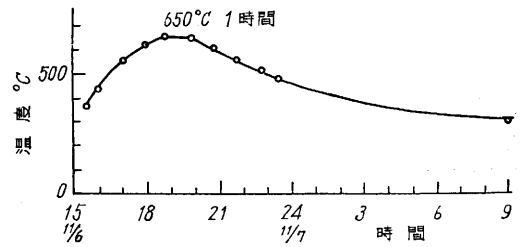
切欠は 1% Cr 鋼の刃を室温において荷重約 10t でプレスしたもので、切欠半径=0、角度は 45° である。熱影響を避けるために、影響がまったくないと考えられるごく一部を除き、試験片の加工は大部分機械切削と鋸切断によった。また時効の影響を避けるために、引張り、プレスなどの予備操作を行ってから 2 時間以内に破壊試

験を行った。

焼鈍の影響を求めるために次の試験片を準備した。

- 1) 圧延のままの母材試験片
- 2) 応力焼鈍した母材試験片
- 3) 溶接のままの試験片
- 4) 応力焼鈍した溶接試験片
- 5) 溶接のままの全溶着金属Vシャルピー試験片
- 6) 応力焼鈍した全溶着金属Vシャルピー試験片

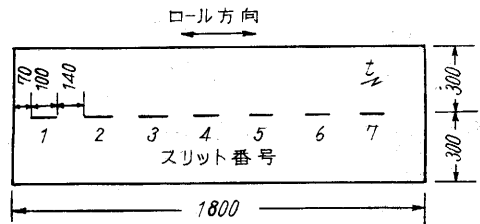
このうち 2), 4), 6) は 650°C 1 時間の応力焼鈍を行ったが、計測温度を第3図に示す。



第3図 応力焼鈍時の温度計測結果

ピーニングの影響を求める試験片は6層溶接の第3、4層のみ溶接後ただちにピーニングを行った。最終層ピーニングは脆性破壊に悪影響があるため実施しなかった<sup>(5)</sup>。ハンマータガネ尖端形状は長さ 5/8 in., 半径 3/32 in. で、軸の方向が打撃方向に垂直な半円柱である。ハンマーのストロークは 78mm, 打撃数は 3,500 回/分であった。

低温応力除去した溶接試験片は、第4図に示すように



第4図 低温応力除去試験板

1,800×600×20mm の板に 7 個の溶接開先をとった後、各層ごとにスリット番号順に溶接を行い、低温応力除去後規定寸法〔第2図 (b)〕に仕上げた。低温応力除去条件は Linde の標準に従い、第3表に示すものを用いた。

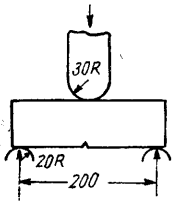
第3表 低温応力除去条件

機 械	CMA 37 J	Linde Co.
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 圧力		6.8 lb/in <sup>2</sup>
O <sub>2</sub> 圧力		10.0 lb/in <sup>2</sup>
加熱温度		180°C
加熱速度		16.3 in/min
母材温度		10°C

加熱温度はテンピルスティックおよび表面温度計で測定した。

同一条件の試験片は原則として 15 本ずつ作製した。

破壊試験の要領は Van der Veen 試験とまったく同様で、試験片を 10 分間以上所定温度（低温では実験温度 $-1^{\circ}\text{C}$ ）に保った後に、第 5 図のように支点間隔 200



第 5 図 静的曲げ試験法

mm の両支点で支え、中央に荷重を加えて曲げ破壊させた。所定温度を得るには  $-70^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$  はドライアイスとエチルアルコールにより、それより高い温度は水による。荷重速度は大体  $20\text{mm}/\text{min}$  を保つようにし、曲げ試験中は荷重-撓み曲線を自動的に記録した。シャルピー試験では試験片を所定温度に 5 分以上保った後取り出し、5 秒内に破断した。

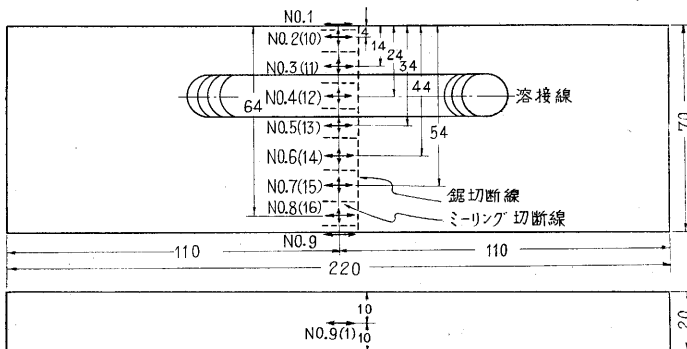
mm の両支点で支え、中央に荷重を加えて曲げ破壊させた。所定温度を得るには  $-70^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$  はドライアイスとエチルアルコールにより、それより高い温度は水による。荷重速度は大体  $20\text{mm}/\text{min}$  を保つようにし、曲げ試験中は荷重-撓み曲線を自動的に記録した。シャルピー試験では試験片を所定温度に 5 分以上保った後取り出し、5 秒内に破断した。

### 3. 溶接残留応力の計測

溶接した試験片については、溶接したまま、応力除去したもの各種各 1 枚について残留応力の計測を行ったが、これは運輸技術研究所溶接部飯田国広技官の好意により、同氏が計測を担当実施された。

測定の要領は第 6 図のように試験片の表、裏および側面に抵抗線歪ゲージを貼付し、試験片中央を鋸で切断した後、貼付ゲージ側面に沿ってミーリングで約  $25\text{mm}$  スリットを入れ、各段階での歪変化を測定し、残留応力を計算した。貼付ゲージは No. 2~8, 10~16 に対しては SK-44（二軸ロゼット，ペークライトベース，G. L. = 4 または 5 mm），No. 1 と 9 に対しては KB-9（単軸，

→ SK-44 貼付  
→ KB-9 貼付



第 6 図 抵抗線歪ゲージ貼付位置

ペークライトベース，G. L. = 4mm）を接着剤 DC-7 を用い、 $40^{\circ}\text{C}$  で貼付した。ゲージ，接着剤，計測器はすべて共和無線製である。

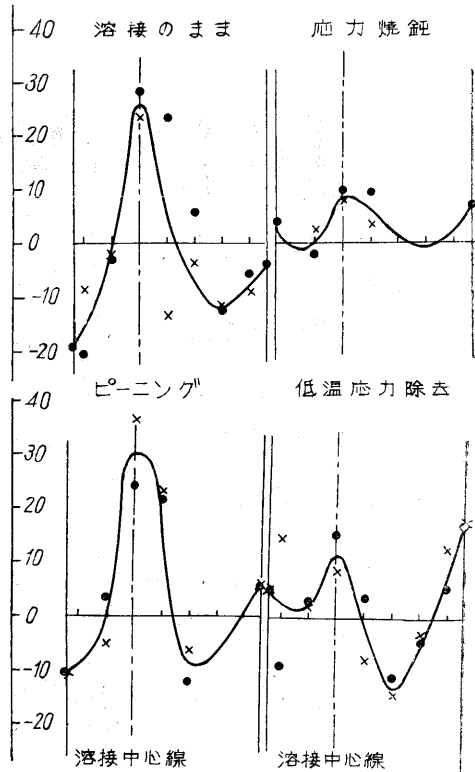
残留応力の計測に当って、溶接線方向を L，板幅方向を T の記号であらわし，計測した歪変化を  $\varepsilon_i$  ( $i=L,$

T),  $\varepsilon_j$  ( $j=T, L$ ) とし，残留応力  $\sigma_i$  は

$$\sigma_i = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_i + \nu\varepsilon_j)$$

によって計算した。ここで  $E$  = ヤング率 =  $21,000\text{kg}/\text{mm}^2$ ， $\nu$  = ポアソン比 = 0.3 とした。

鋼材 Y S を使用した試験片についての  $\sigma_L$  の計測例を第 7 図に示す。  $\sigma_T$  は各試験片とも大体同じような傾向



第 7 図 縦方向残留応力分布 (単位は  $\text{kg}/\text{mm}^2$ ，+ は引張り，- は圧縮)

を示していた。溶着金属中央における  $\sigma_L$  の平均値を他の結果とともに第 4, 5 表に示してある。

### 4. 破壊試験結果と考察

#### (1) 機械的引張りによる応力除去試験片

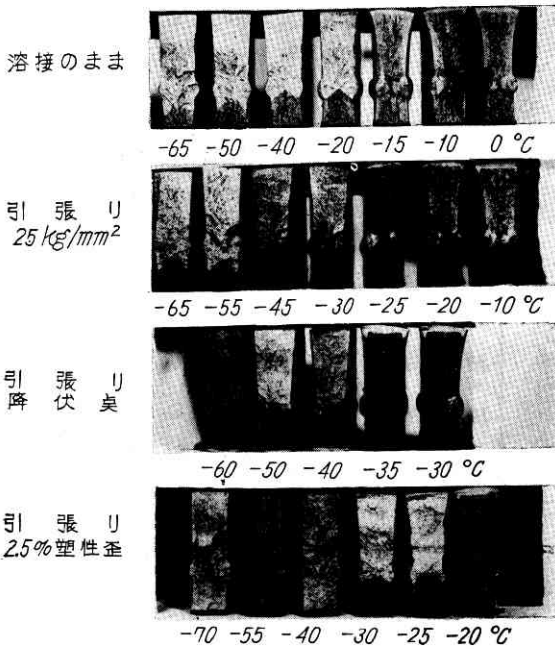
鋼材 NK の母材試験の結果、破面遷移温度  $T_{II}$  (切欠底部より測った剪断亀裂の深さが  $32\text{mm}$  となる温度) も延性遷移温度  $T_I$  (最大荷重時の撓みが  $6\text{mm}$  となる温度) もいづれも  $-53^{\circ}\text{C}$  であった。

溶接した 4 種の試験片について、それぞれ温度を変化して破壊試験を行ったところ、破面は第 8 図に、剪断亀裂の深さは第 9 図に示すように変化した。  $-53^{\circ}\text{C}$  よりもかなり高い温度でも脆性亀裂が発生しており、発生部は溶着金属である。各種試験片の破面遷移温度  $T_{II}$  と

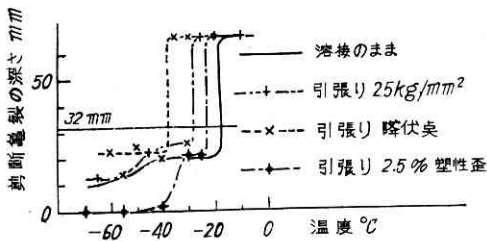
残留応力の裏表平均値を第4表に示す。

第4表 破面遷移温度と残留応力(鋼材NK)

試験片種類	$T_{II}$ °C	$\sigma_L$ kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_T$ kg/mm <sup>2</sup>
溶接のまま	-18	42.8	7.1
引張り(25kg/mm <sup>2</sup> )	-28	29.4	-4.6
”(降伏点)	-38	19.9	-0.5
”(永久歪2.5%)	-23	16.4	-4.7



第8図 溶接試験片の破面写真(鋼材NK)



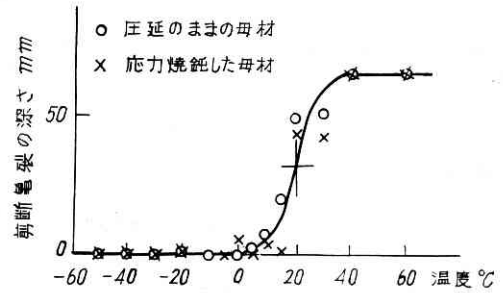
第9図 溶接試験片の剪断亀裂の深さ(鋼材NK)

溶接したままの試験片はきわめて大きな残留応力(42.8kg/mm<sup>2</sup>)を有しているが、溶着金属の降伏点は通常この程度で常識的な値である。25kg/mm<sup>2</sup>の応力を加えたものは13kg/mm<sup>2</sup>程度残留応力が下がっており、遷移温度も溶接のままに比して10°C低くなっている。降伏点まで引張ったものは溶接のままに比して残留応力は23kg/mm<sup>2</sup>程度下がっており、遷移温度も20°C低くなっている。ところが2.5%の永久歪を与えたものは

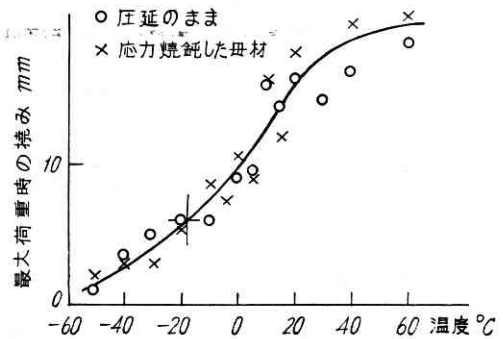
残留応力は26kg/mm<sup>2</sup>も減っているのに、遷移は溶接温度のままに比べて僅か5°Cしか低下していない。これは残留応力除去によって相当遷移温度が下がるが、それと同時に塑性歪の増加のために遷移温度が上昇するので(6)(7)その効果が相殺されたためと考えられる。

(2) 応力焼鈍、ピーニング、低温応力除去した試験片

鋼材YSの圧延のままと応力焼鈍処理した母材試験片の破断結果をまとめると、剪断亀裂の深さは第10図、最大荷重時の撓みについては第11図のようになり、この熱処理によって母材の切欠靱性は不変で、 $T_{II}=20^{\circ}\text{C}$



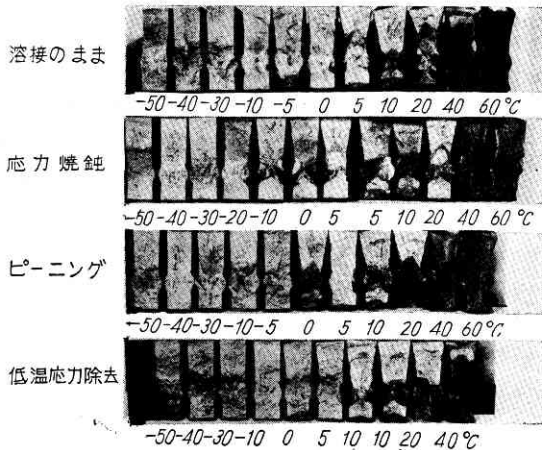
第10図 溶接しない試験片の剪断亀裂の深さ(鋼材YS)



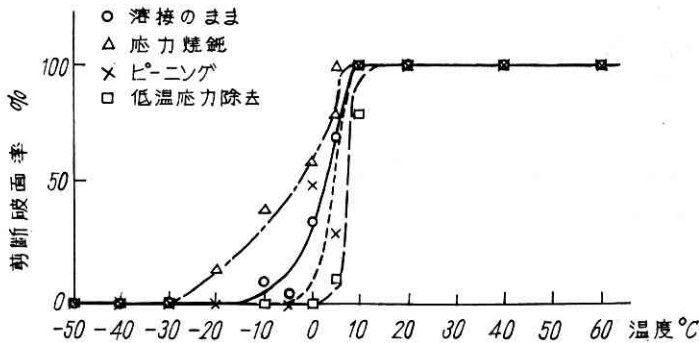
第11図 溶接しない試験片の最大荷重時の撓み(鋼材YS)

$T_I = -18^{\circ}\text{C}$ が得られた。鋼材NKの場合はきわめて切欠靱性の高い鋼板( $T_{II}=T_I=-53^{\circ}\text{C}$ )に、それより靱性の低い溶着金属を盛ったが、同じ溶接棒でも鋼材YSの場合は板の方が靱性が低い。したがってある温度範囲では板についた切欠底部から発生した脆性亀裂が溶接部で停止した。

$-30^{\circ}\text{C}$ 以下の低温で曲げ破壊させると、母材部から発生した脆性亀裂は溶接部を貫通して試験片の他端まで伝播する。また40°C以上の高温では切欠底部より剪断亀裂が入り、溶接部も剪断破壊する。破面の遷移状況は第12図の写真で良く観察できる。



第 12 図 溶接試験片の写真 (鋼材 Y S)



第 13 図 溶着金属の剪断破面率

各種溶接試験片の溶接部の比較を行うために、溶着金属の剪断破面率を調べると第 13 図のようになる。-20 ~ +20°C の温度範囲では母材部で脆性亀裂が発生し、これが溶着部まで達すると 10°C 以上では溶着金属によって脆性亀裂は一旦停止して剪断亀裂となり、溶着部の破面は 100% 剪断破面を呈する。-20 ~ +5°C の範囲では溶着金属の剪断破面率は種々変化するが、それが 50% となる温度を  $T_{rs\cdot depo}$  と定義すると第 6 表のようになる。

第 5 表 各種溶接試験片の比較 (鋼材 Y S)

試験片種類	$T_{rs\cdot depo}$ °C	逆切欠試験片の溶着部剪断破面率 (%)		$\sigma_L$ kg/mm <sup>2</sup>
		-5°C	+5°C	
溶接のまま	5	40	100	25.9
応力焼鈍	-8	70	100	8.9
ピーニング	8	50	100	30.4
低温応力除去	15	10	40	11.9

脆性亀裂の速度を大きくするために、普通の溶接試験片とは逆に、溶接から遠い側に切欠をプレスした試験片を各 2 枚用意し、-5°C と +5°C において破壊試験を行い、溶着金属の剪断破面率を求めると第 4 表のようになる。このほか亀裂が溶着金属を通過する際の吸収エネルギー

を比較しても、溶着金属の剪断破面率の高い場合は吸収エネルギーが大きいことがわかる。

溶着金属の熱処理が応力を除去するほかに、切欠靱性を向上させる影響があるかを見るために、全溶着金属の溶接のままと応力焼鈍したもから標準 V シャルピー試験片をとって比較した。シャルピー試験片は小型 (55 × 10 × 10mm) であるから、溶接のままでも残留応力は除去されていると考えられ、熱処理の影響のみが現われるはずである。衝撃値、剪断破面率、断面収縮率はそれぞれ第 14~16 図に示す通りで、これらの曲線より次に定義する各遷移温度を求めると第 6 表に示すようになる。

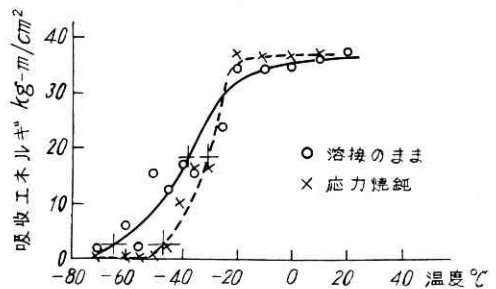
$T_{rE}$ : エネルギー遷移温度. 吸収エネルギーが最大値の 1/2 に等しい温度

$T_{rS}$ : 剪断破面率遷移温度. 剪断破面と脆性破面がそれぞれ 50% ずつになる温度

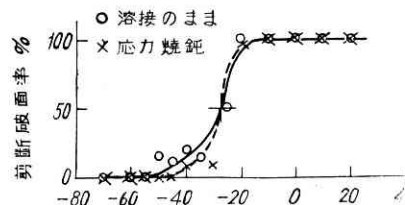
$T_{r15}$ : 吸収エネルギーが 15ft-lb (2.6 kg-m/cm<sup>2</sup>) になる温度

$T_{r\phi}$ : 断面の切欠と平行な幅の減少率が 4% となる温度

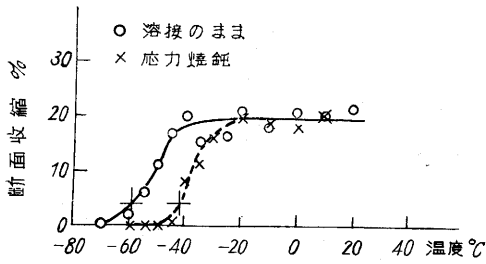
これらのうち、一般に  $T_{rE}$  と  $T_{rS}$  は破面遷移をあらわし、 $T_{r15}$  と  $T_{r\phi}$  は延性遷移をあらわすものといわれ、それぞれ近い傾向を示すものである。0°C における衝撃値は普通の溶接性が良い板で 6kg-m/cm<sup>2</sup> 以上が要求される程度であるから、この溶着金属はきわめて靱性に富んでいることがわかる。



第 14 図 全溶着金属 V シャルピー試験における吸収エネルギー



第 15 図 全溶着金属 V シャルピー試験における剪断破面率



第16図 全溶着金属Vシャルピー試験における断面収縮率

第6表 全溶着金属Vシャルピー試験結果の比較

試験片種類	$T_{rE}$ °C	$T_{rS}$ °C	$T_{r15}$ °C	$T_{r\phi}$ °C	0°Cの衝撃値 kg-m/cm <sup>2</sup>
溶接のまま	-38	-28	-65	-59	35.5
応力焼鈍熱処理	-31	-28	-47	-42	37.0

これらの結果より溶接のままと応力焼鈍熱処理したものの差異はあまり大きくないが、どちらかといえばむしろ溶接のままの方が良く、650°C 1時間の熱処理だけでは溶着金属の切欠靱性は向上しないことがわかる。

以上の諸結果より、応力焼鈍した溶接試験片が溶接のままのものよりも切欠靱性が高いのは、応力焼鈍熱処理によって母材は変化しないし、溶着金属の切欠靱性も向上しないから、溶接部の残留応力が除去された影響があらわれたものと考えられる。

ピーニングした溶接試験片は第13図、第4表の結果から判定して溶接のままと大差ない。これは最終層ピーニングを行っていないために、残留応力がほとんど除去されていないことによると思われる。

低温応力除去した溶接試験片は溶接のままに比して幾分切欠靱性が劣るという結果を示した。残留応力は相当に除去されており、加熱温度は180°Cであるから析出による脆化は考えられず、溶着金属が塑性変形を受けたことによる靱性低下のためと考えられる<sup>(6)(7)</sup>。残留応力の除去だけを考えると引張りすぎの方が効果があり、そのためLindeの条件そのままでは塑性変形が大きすぎ、切欠靱性を低下させるが、低温応力除去をあまり塑性変形を与えずに、応力が比較的大きくとれる条件に改めれば、溶接のままよりも遙かに靱性が高く、焼鈍したものに近づくことが考えられ、現在引続き研究中で、これまでのところこれを立証する実験結果が出ている。

## 5. 結 論

脆性破壊に対して各種応力除去法は次のような影響を示した。

- (1) 機械的引張りによる応力除去は荷重が適当なときは切欠靱性を向上させる。この実験では公称応力が母材の降伏点のときに最も良く、弾性的な25kg/mm<sup>2</sup>の応力を加えたときにこれに次いだ。2.5%の塑性

変形を与えたものは残留応力除去は大幅にできるが、塑性変形のための靱性低下によって効果が相殺される。

- (2) 応力焼鈍を行うと溶接のままに比して切欠靱性がかなり向上する。これは熱処理は母材の切欠靱性を変化させないし、溶着金属の切欠靱性も向上させないから、溶接部の残留応力が除去された影響と考えられる。
- (3) 中間層ピーニングは切欠靱性にはほとんど影響を与えない。残留応力もこれによっては除去されない。
- (4) Lindeの条件そのままの低温応力除去は切欠靱性を低下させる。これは溶接部に塑性変形を与えすぎため、できるだけ塑性変形を与えないで応力を除去する条件を求めれば、溶接のままよりかなり靱性を高めることができると思われる。

延性破壊に対しては、本文で詳述しなかったが、破壊までの吸収エネルギーがきわめて大きいため、残留応力の影響はほとんどない。

またこの研究により、きわめて切欠靱性の大きな溶着金属のできるような溶接継手を造れば、場合によっては脆性亀裂を停止させることが可能であることがわかったので、この方面についても別に研究を続けている。

## あ と が き

本研究を行うに当たり、ご指導をいただいた工学部木原教授、残留応力計測を担当された運輸技術研究所溶接部飯田国広技官、試験片製作にご協力をいただいた三菱造船長崎造船所、石川島重工第二工場に深く感謝する。また実験遂行に協力された当所藤村理人、飛田正蔵、長谷川功三の諸君の努力に対し感謝する次第である。

(1958. 1. 20)

## 文 献

- (1) Williams, M. L. and Ellinger, G. A. ; The Welding Journal, Vol. 18, No. 10, (1953)
- (2) Williams, M. L., and Ellinger G. A. ; British Welding Journal, Vol 2, No. 6, (1955)
- (3) 木原博, 安藤良夫; 造船協会論文集 No. 100 (1957)
- (4) 木原博, 安藤良夫; 造船協会論文集 No. 102 (未刊)
- (5) Pellini W. S. and E. W. Eschbacher; The Welding Journal, Vol. 19, No. 2, (1954)
- (6) 木原博, 安藤良夫, 外; 造船協会論文集 No. 95 (1954)
- (7) 安藤良夫, 山口勇男, 飯田国広, 今井保穂; 生研報告 Vol. 4 No. 7 (1955)