

回転軸の炭酸ガス溶接

CO₂ Gas Arc Welding of Rotating Shaft with Arms

高橋 岑 夫* 内 田 雅 雄* 関 口 正 樹*
Mineo Takahashi Masao Uchida Masaki Sekiguchi

内 容 梗 概

近年炭酸ガス溶接が実用化されつつあり、それに使用する溶接機として日立製作所においても、ハイアーク溶接機を製作発売している。溶接棒としては国内でも各種心線が開発、売出されている。しかしながら現在低炭素鋼に應用された資料はあるが、高炭素鋼に対する資料は少ない。そこで今回高炭素鋼回転軸にアームを取り付ける作業につき実験を行ない検討の結果、手溶接と同程度の性能を得ることができるとともに、大幅なコストダウンが可能になった。本文はこれら一連の実験結果について報告するものである。

1. 緒 言

回転機械の中には、回転軸に放射状のアームを取り付け、そのアームによりトルクを伝えるものが多い。これら回転軸は一般に炭素含有量が高く、アーム取付部にも強度が要求されるとともに、シャフトの熱容量も大きく拘束も大なので、従来は予熱後低水素系の溶接棒により溶接されていた。

しかし、今回日立製作所において、ハイアーク溶接機が製作発売されたので、これを応用することになったが、

- (1) 溶接施工法が異なる。
- (2) 被包ガスに炭酸ガスを使用しているが、ハイアーク心線の被覆系統がチタニヤ形である。
- (3) 溶接速度が大で、一回の溶着量が大きい。

などのため、溶接欠陥、き裂感度、機械的強度など種々の問題が残っている。これらを種々検討の結果、適当な作業条件を選べば、手溶接によるものとあまり変わらぬ性能が保証でき、かなり大幅なコストダウンが可能になったので、その結果について報告する。

2. 供 試 機 材

2.1 供 試 機 械

試験に使用した溶接装置および溶接機の仕様を第1表に示す。

2.2 試験片形状および供試材料

2.2.1 試験片形状

試験に使用した試験片の形状を第1図に示す。

2.2.2 供 試 材 料

供試材料の仕様は第2表に示すとおりである。なおこれらの材料は試験を行なう前にショットブラストをかけ、表面を清浄にした。

2.3 使用溶接棒および炭酸ガス

溶接棒としては国産心線3種を選び試験を行なった。心線の断面形状、フラックスはそれぞれ異なったもので、それらをA、B、Cの符号で示す。なお径は3.2φであり、その化学成分および機械的性質は第3表(a)、(b)に示すとおりである。

炭酸ガスには溶接用第2種を使用した。この露点は-47℃のものである。

3. 施工法についての検討

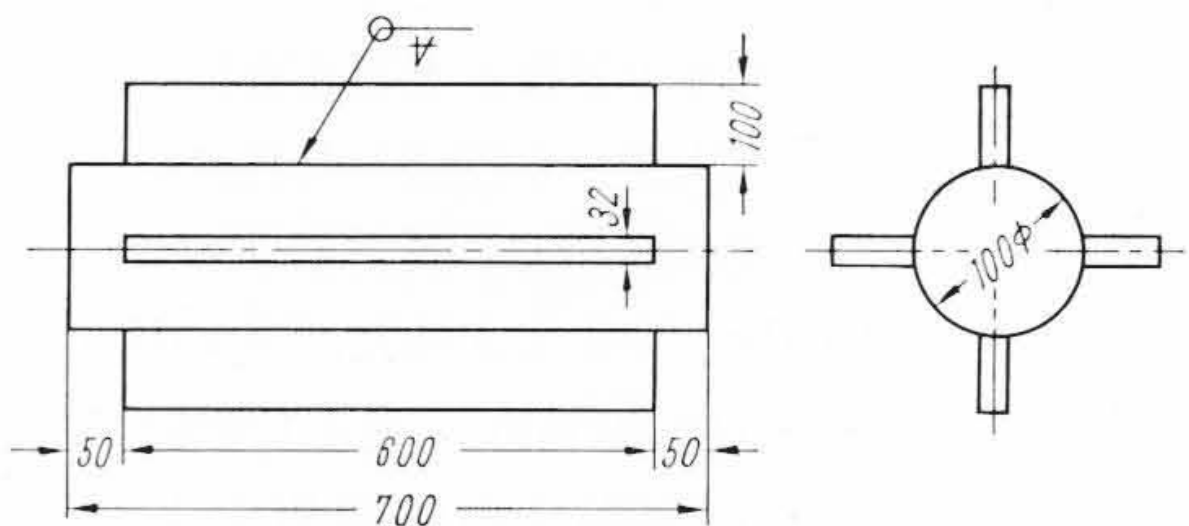
3.1 開先角度の検討

開先には不溶着部を残す第2図のようなものを採用し、開先角度のみを変えて溶接したマクロ写真を第3図に示す。溶接条件は次のとおり、

* 日立製作所 亀戸工場

第1表 使用機械仕様

使用溶接装置	製 造 者 形 式	株式会社日立製作所 T-D 2形ハイアーク
	溶接電源 { 種 類 特 性	ACまたはDCアーク溶接機 垂下特性
ワイヤ供給速度 送給モータ速度制御方式	溶 接 電 流	350~500A
	溶 接 ト ー チ	1.5~3.5 m/min アーク電圧制御方式 空冷式 500A
	製 造 者 形 式	株式会社日立製作所 DL-FC
	定 格 二 次 電 流	500A
使用溶接機	定 格 一 次 電 圧	200V
	定 格 一 次 入 力	35 kVA
	最 高 二 次 無 負 荷 電 圧	70V
	定 格 負 荷 電 圧	45V
	定 格 使 用 率	70%



第1図 試験片形状

第2表 試験母材

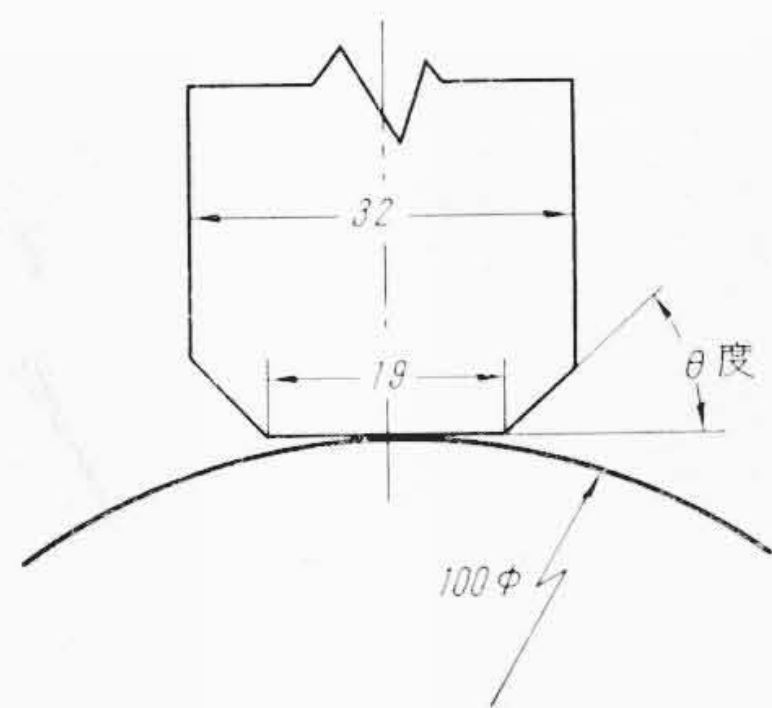
JIS規格	寸 法 (mm)	化 学 成 分 (%)						使用目的
		C	Si	Mn	P	S	Cu	
SS-41	t=32	0.156	0.056	0.54	0.020	0.026	0.12	アーム
S35C	100φ	0.341	0.283	0.57	0.022	0.030	0.19	シャフト

第3表(a) 被覆溶接棒諸元

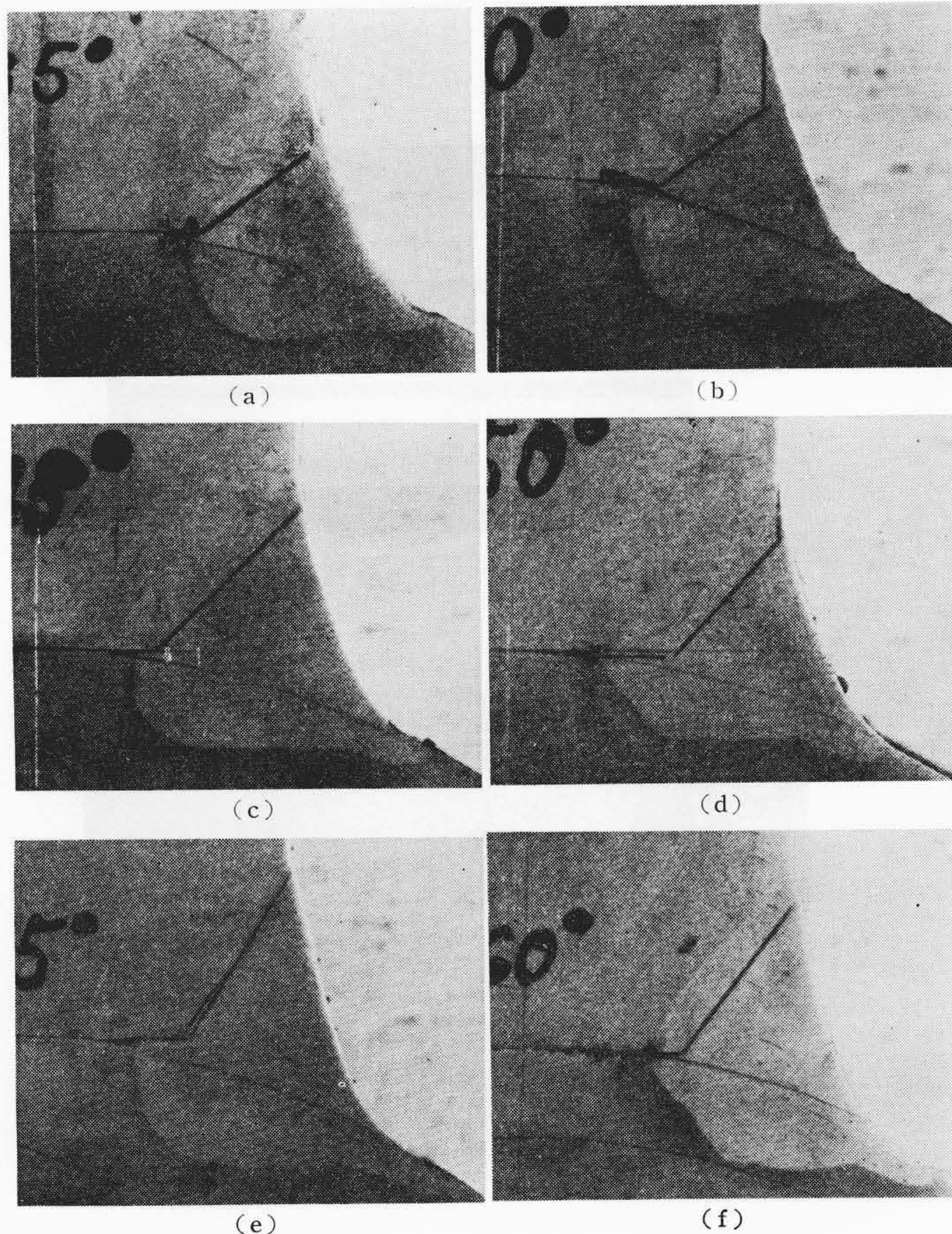
JIS規格	寸 法 (mm)	機 械 的 性 質			化 学 成 分 (%)					
		降伏点 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu
D4303 手溶接棒	5φ×400	42.8	49.5	29	0.08	0.13	0.45	0.016	0.016	0.09
D4302 手溶接棒	5φ×400	45.6	54.2	34	0.08	0.56	1.18	0.010	0.011	0.13

第3表(b) ハイアーク用心線諸元

ハイアーク用心線	寸 法 (mm)	機 械 的 性 質			化 学 成 分 (%)					
		降伏点 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu
A社	3.2φ	48.3	54.9	31.3	0.07	0.40	0.78	0.014	0.020	—
B社	3.2φ	41.5	48.0	28	0.06	0.38	0.81	0.013	0.023	0.11
C社	3.2φ	45.2	50.9	29	0.07	0.26	0.57	0.018	0.019	0.07



第2図 開先形状

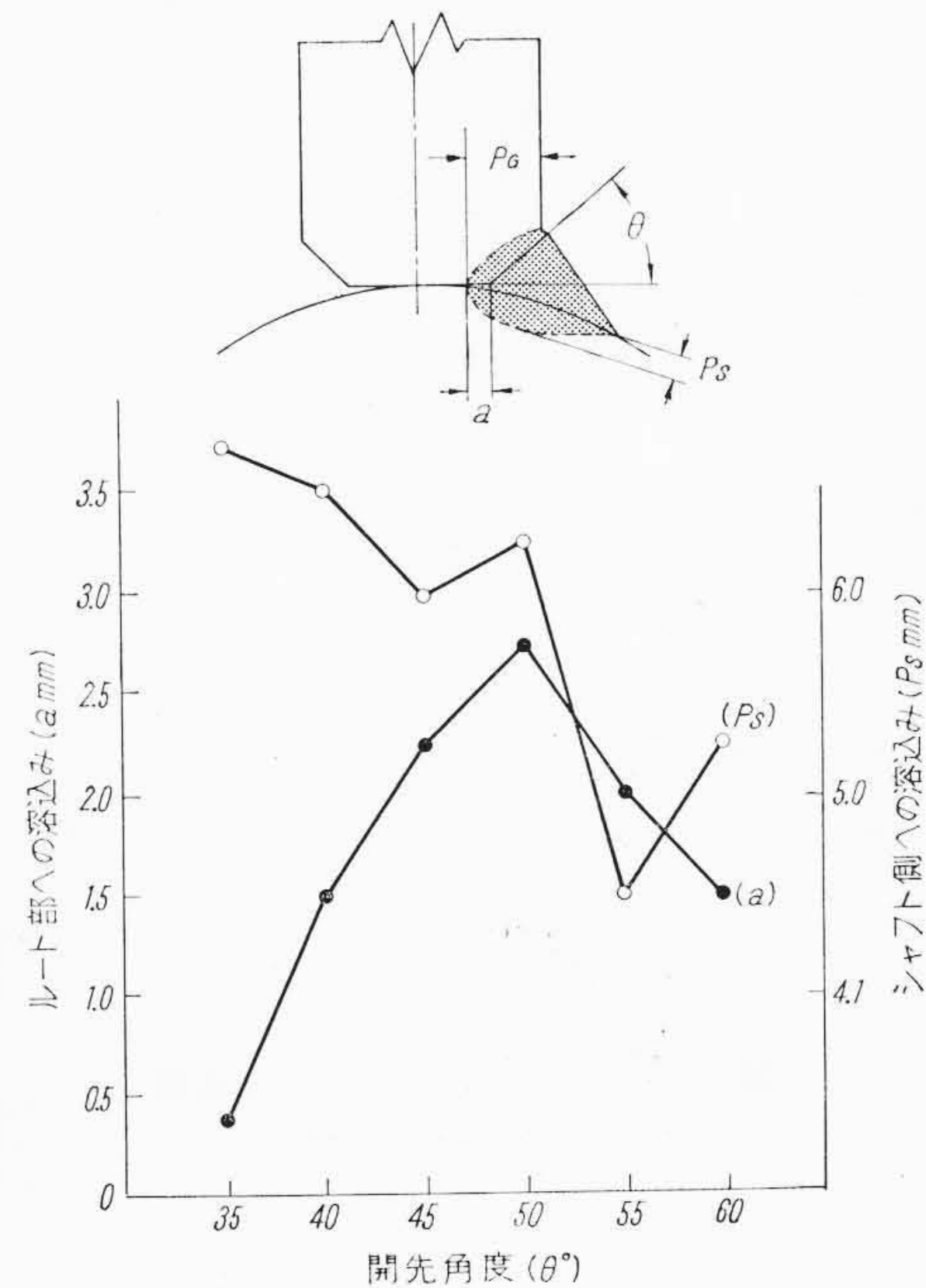


第3図 開先角度 θ の変化が溶け込みに与える影響

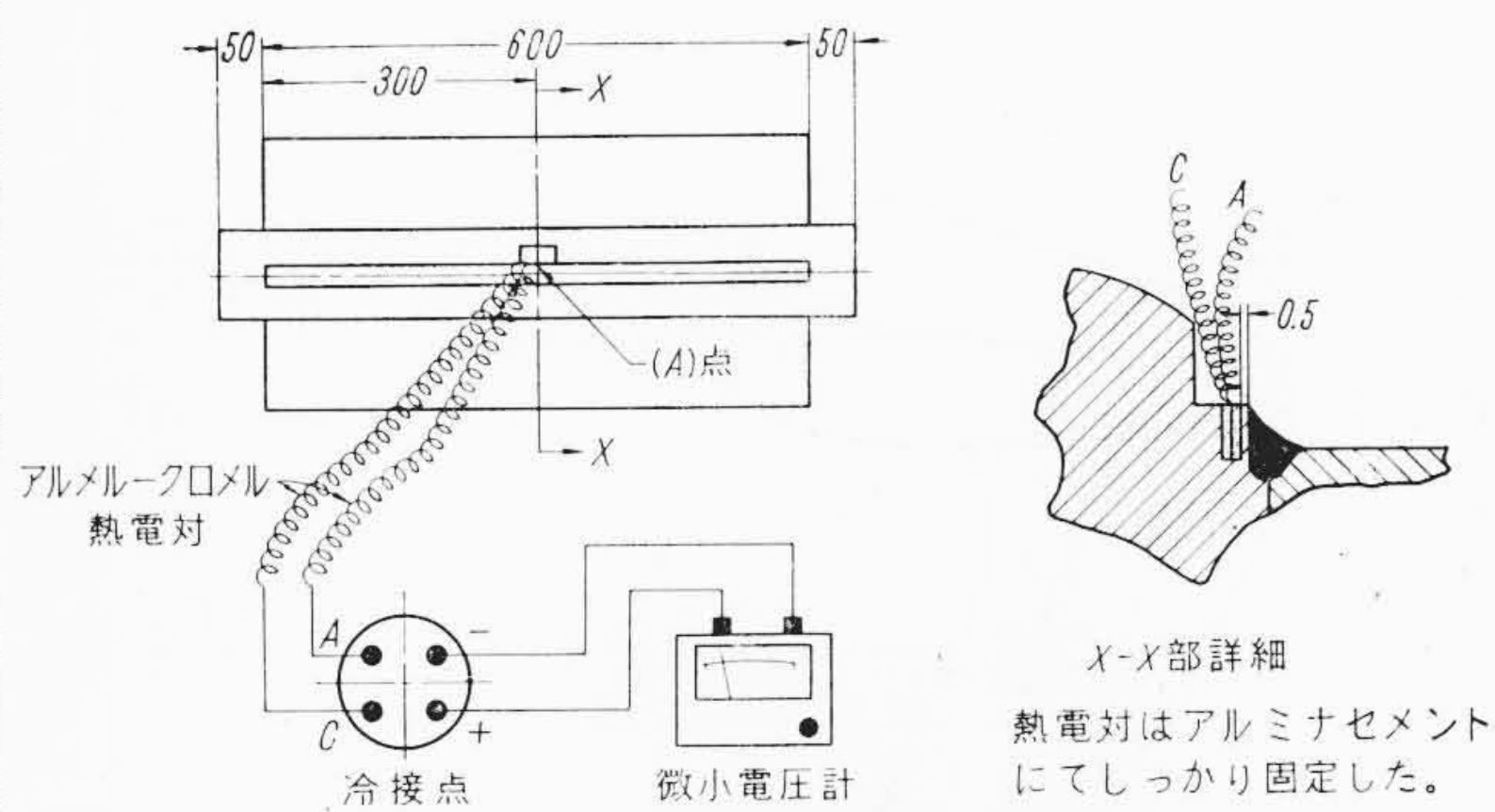
溶 接 電 源	直流 逆極性
溶 接 電 流	420 A
負 荷 電 圧	27 V
溶 接 速 度	300 mm/min
使 用 心 線	A 社
炭酸ガス流量	20 l/min
溶 接 姿 勢	下 向

各角度における溶け込みの測定値を第4図に示す。

第3図および第4図より明らかなように $\theta=50$ 度の場合が最も a の値が大きく、またアーム側シャフト側とも平均に溶け込んでいた。 $\theta=35, 40$ 度の場合には P_s が大きい、これは開先部が狭いため心線が思う場所に行かず、シャフト側にかたよって溶け込んでいたが、これでは比較的多く含まれているシャフト側の炭素が溶着部に移行する割合が大きくなるため、溶着部が硬化する恐れがある。また、 $\theta=55, 60$ 度では作業性は良好であるが、溶着量が増加するためコストの面で不経済である。よってアーム側シャフト側への平均な溶け込み、作業性を考慮して $\theta=50$ 度を採用することに決定し、溶接を行なった。



第4図 開先角度による溶込み量の変化



第5図 熱影響部温度測定要領

3.2 溶接条件の決定

作業性の関係より第4表のような溶接条件を定めた。この条件によると上記開先によればほとんど同じ8mmの脚長が得られる。なお層間温度は予熱温度と同じ温度におさえた。

3.3 熱影響部の温度測定結果と材料 CCT 曲線との関係

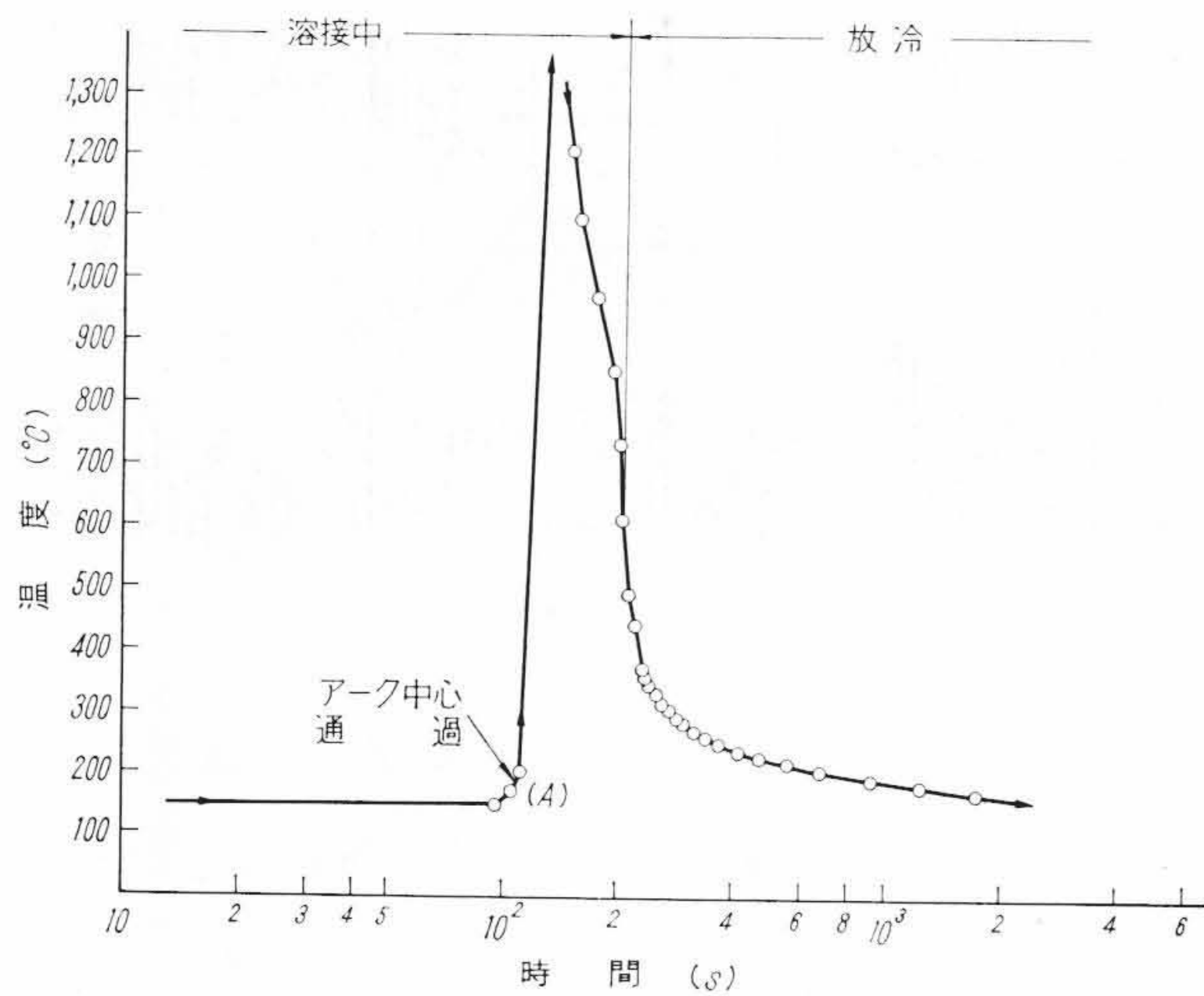
シャフト材の炭素含有量が高いので、熱影響部の冷却速度が問題になるため、熱電対によりこれを測定した。その測定方法を第5図に、その測定結果の一例を第6図に示す。これら溶接条件は前項のとおりで、1層だけ溶接した結果である。

この結果を分析するとシャフトの熱容量がこの程度の場合溶接ビードがある点(A)を通過するまで温度は上昇せず、(A)点通過後急激に温度が上昇し、のちは半無限固体の熱伝導として考えてよいことがわかる。

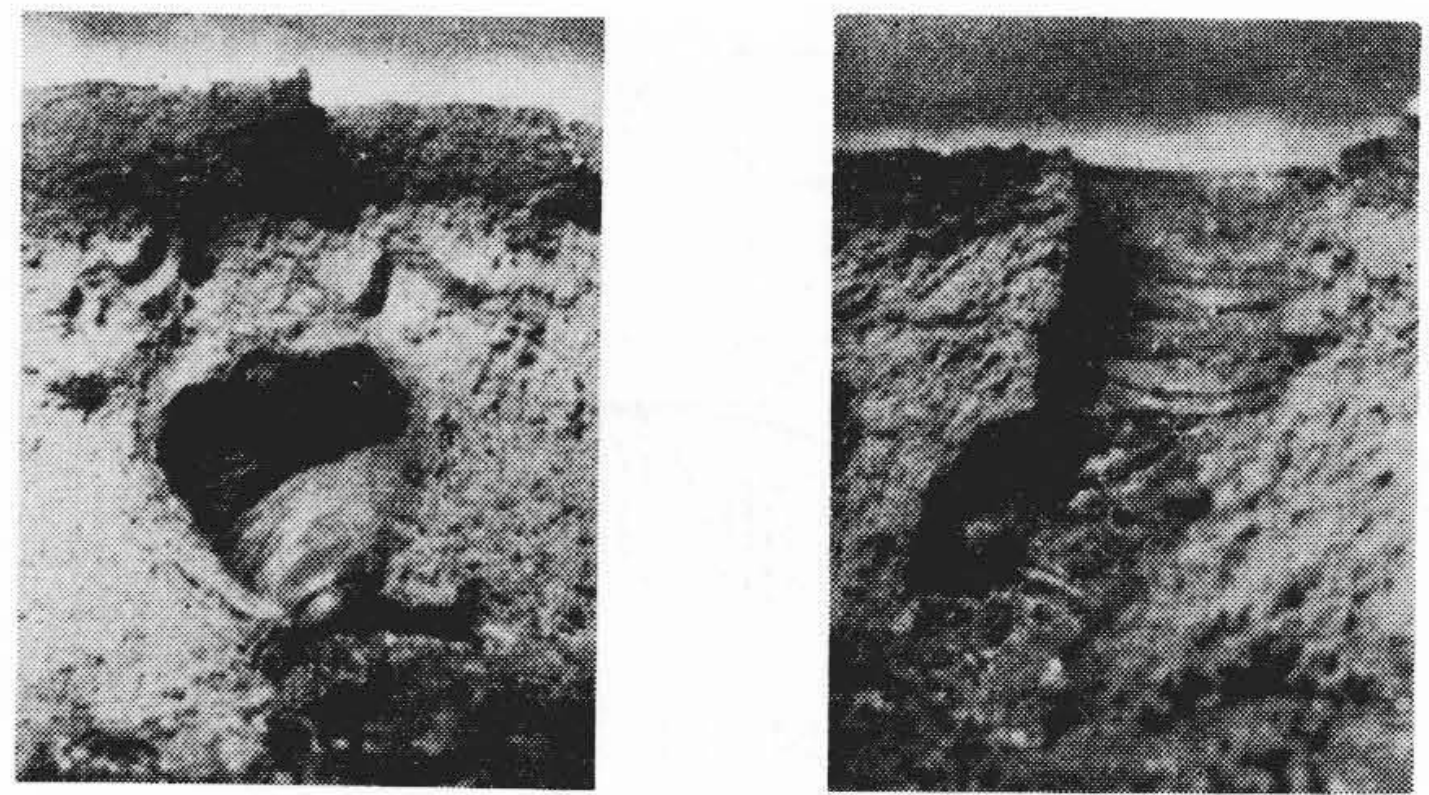
第7図にシャフト材の CCT 曲線を示す。第7図にはいっている X, Y, Z 曲線は実測した温度の測定結果であり、ハイアーク溶接に

第4表 溶 接 条 件

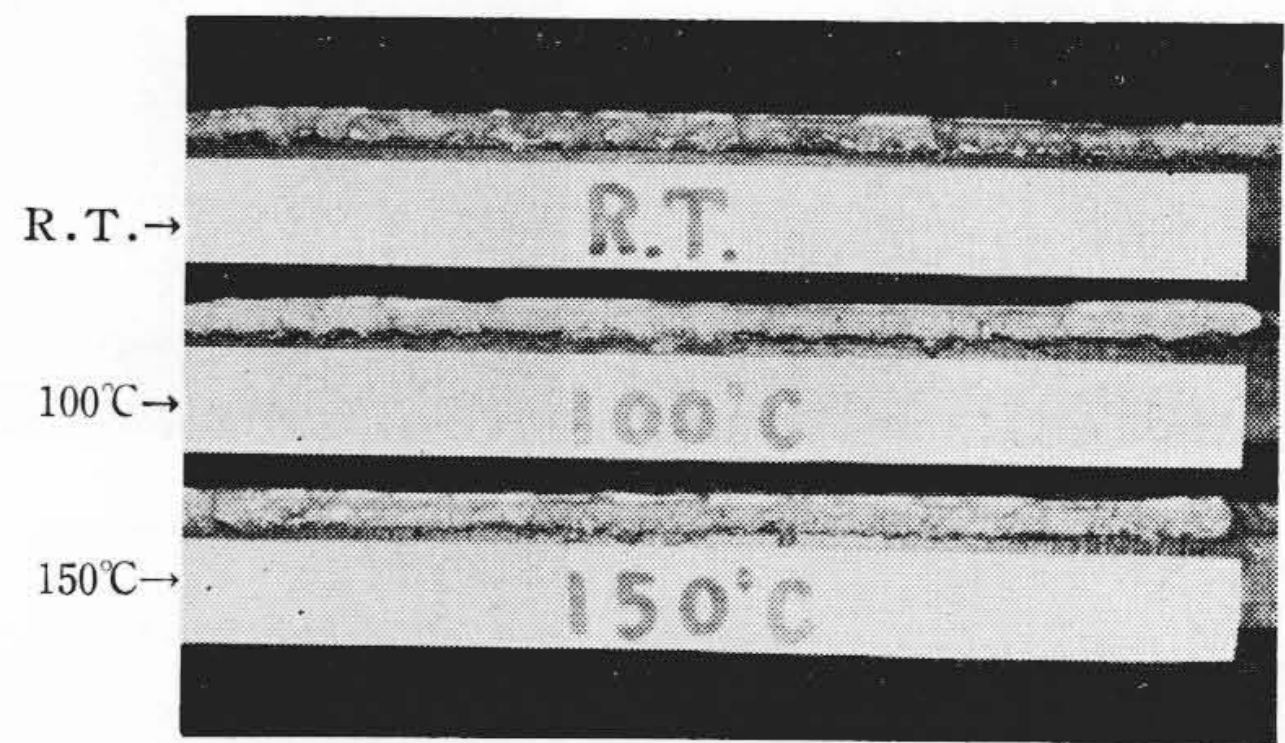
項 目	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)
溶接棒			
D4302 (手溶接用)	300	30	100
D4303 (手溶接用)	250	30	150
A社(ハイアーク用)	420	28	300
B社(ハイアーク用)	420	27	300
C社(ハイアーク用)	420	30	300



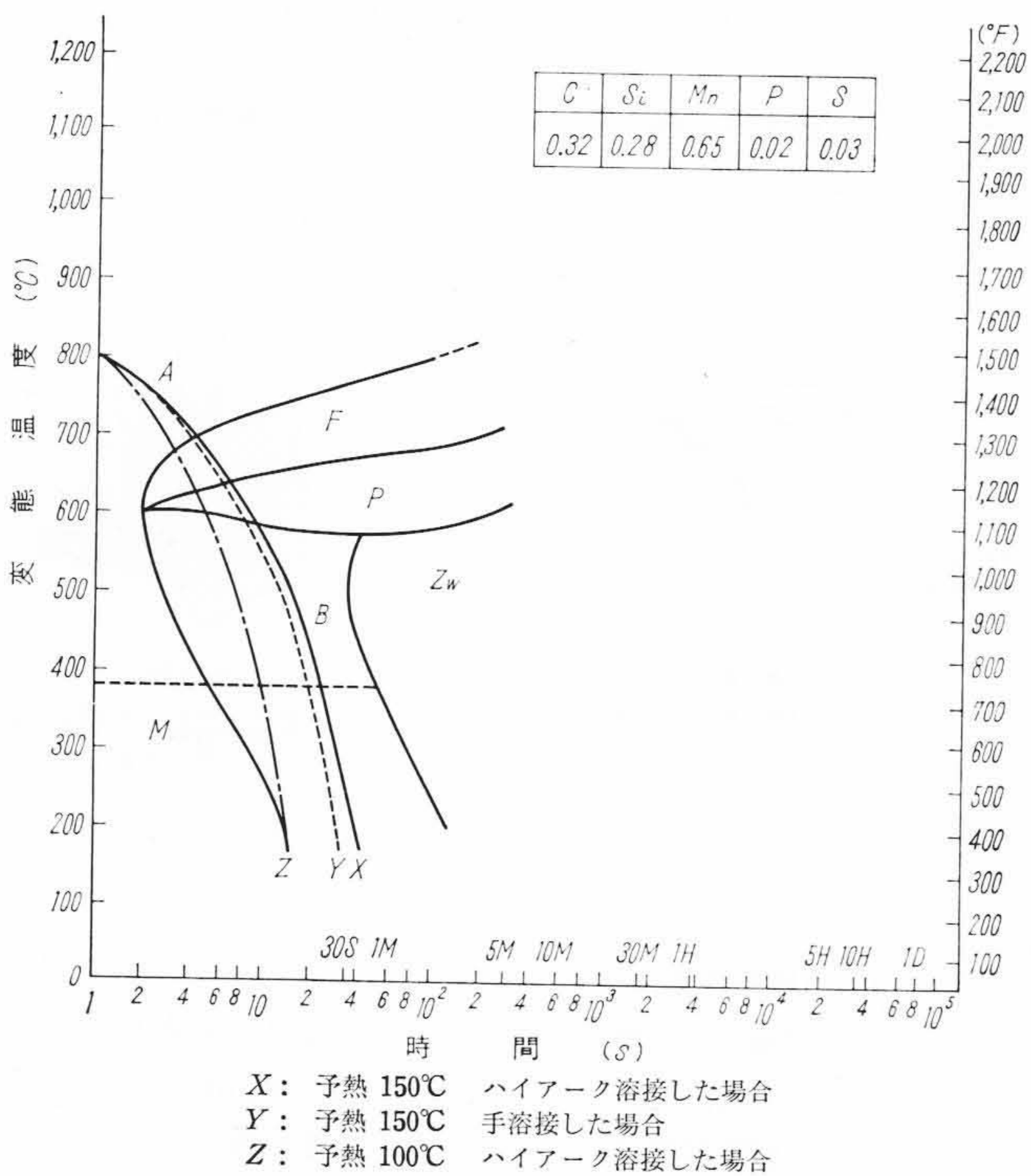
第 6 図 シャフトの加熱冷却曲線
(ハイアーク溶接, 予熱 150°C)



Blow Hole Pit
第 8 図 ブローホールおよびピット



第 9 図 母材の予熱温度と溶着部の破面状況



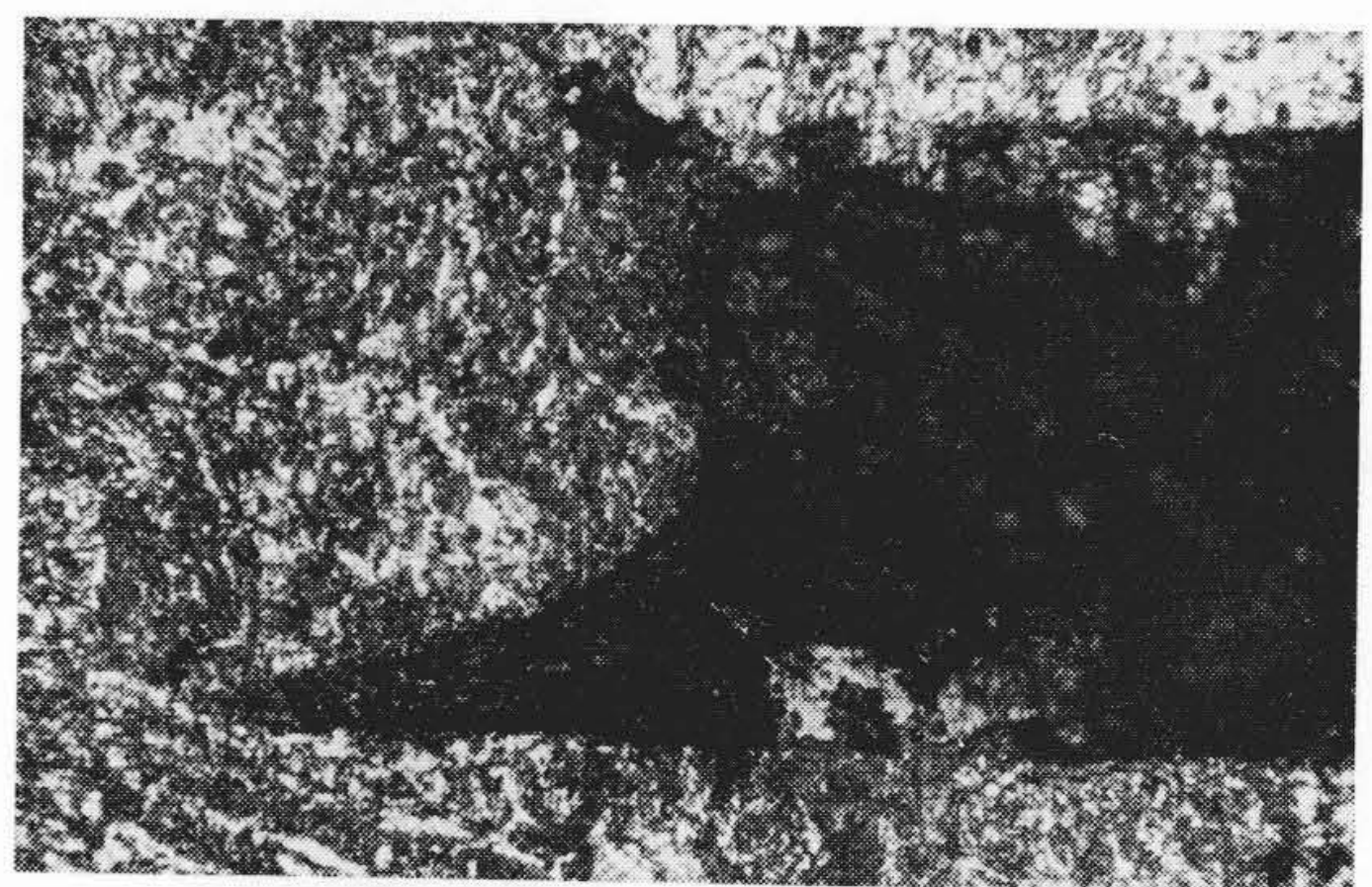
第 7 図 試片一層目溶接後(A)点の連続冷却変態図

においては 120°C 以上の予熱温度ならばマルテンサイトは出ず、フェライト、パーライトと一部ベイナイトの混合組織となり、強度上問題ないと考えられる。なお手溶接とハイアーク溶接では前記溶接条件では熱影響部の冷却速度はあまり差のないことがわかる。

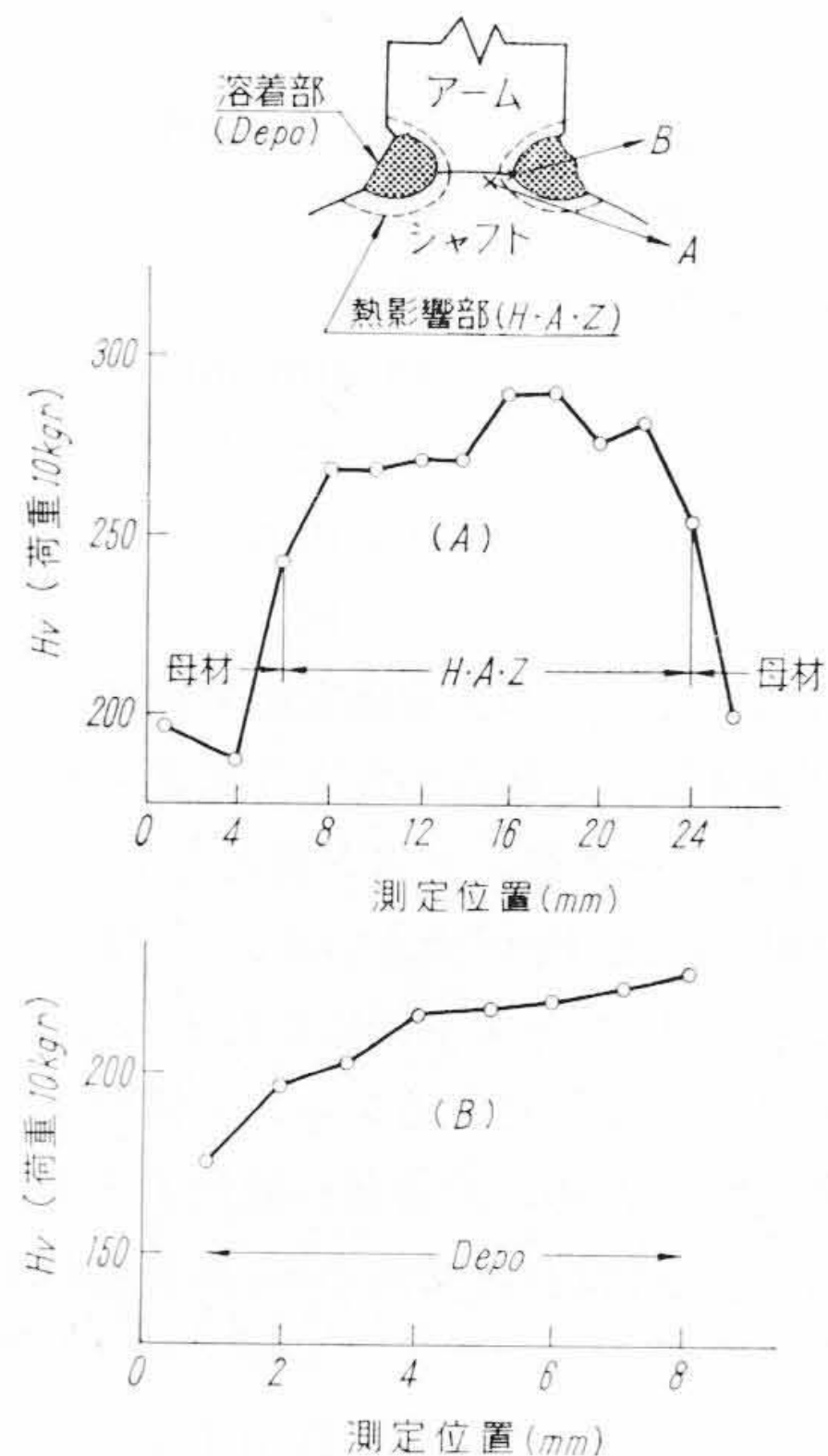
3.4 ブローホールおよびピット

ハイアーク溶接用心線はさびに対する感度が手溶接棒に比較して高いため、溶接を施工する際には十分注意しなければならない。

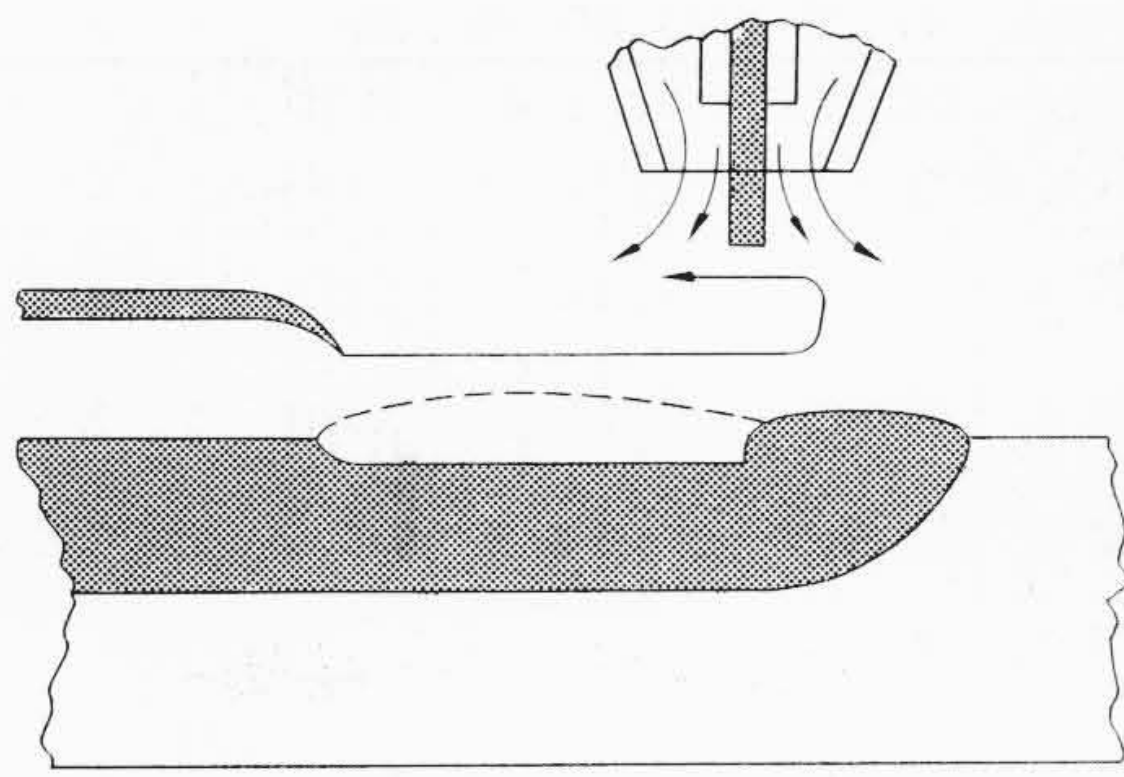
ハイアーク溶接を施工した場合にみられるブローホールは普通手溶接に見られるものより相当大きなもので、ピット（表面気孔）として外部に現われることが多い。この種のピットは溶接中発生したガスが金属の凝固する前に内部から大きなガス泡として放出されるので、溶接中においても観察できる。第 8 図は溶着金属の破面に現われたブローホールとピットの代表例である。第 8 図においてもわかるようにこれらブローホールは母材表面部を起点としている。したがってブローホールの成因であるガスは軸表面において生成されたものであると考えられる。



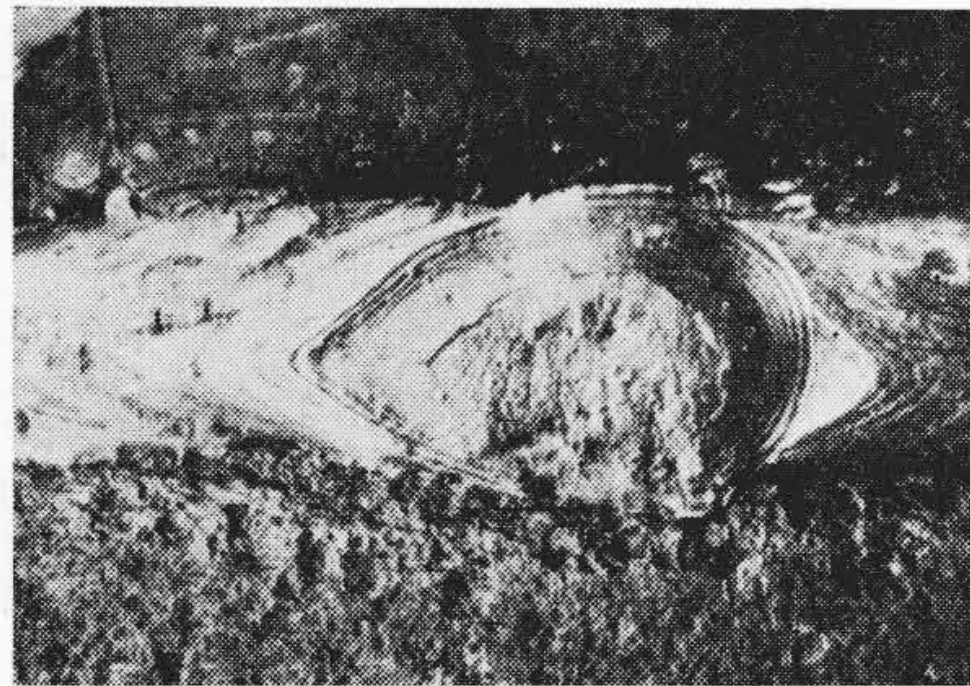
第 10 図 一層目のみハイアーク溶接した開先底部状況



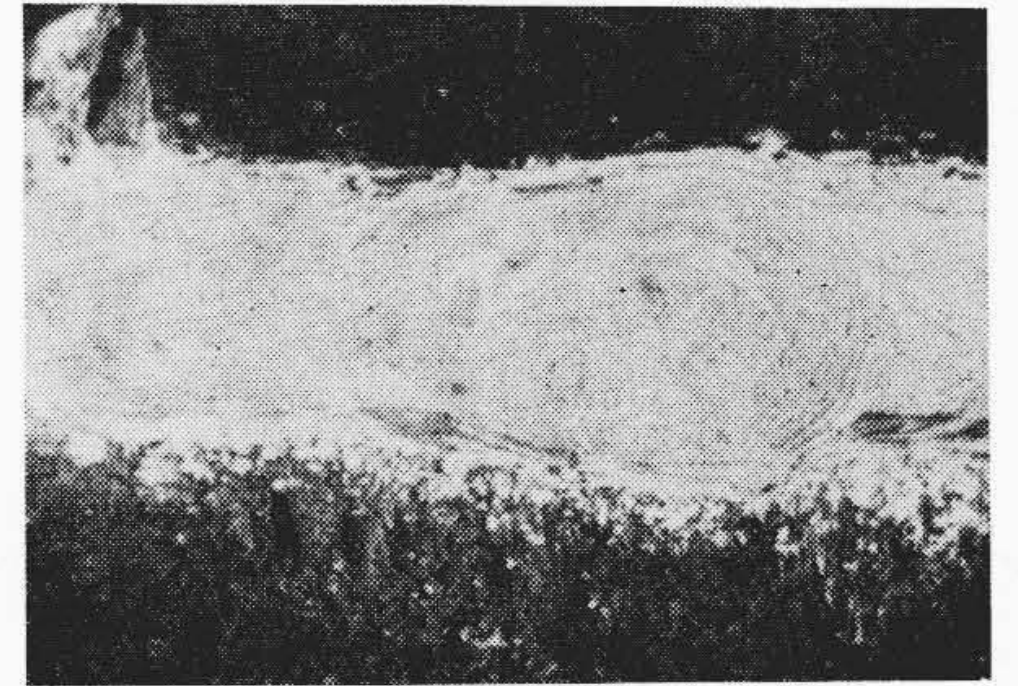
第 11 図 一層のみハイアーク溶接した場合の硬度測定結果



第 12 図 クレータ処理要領

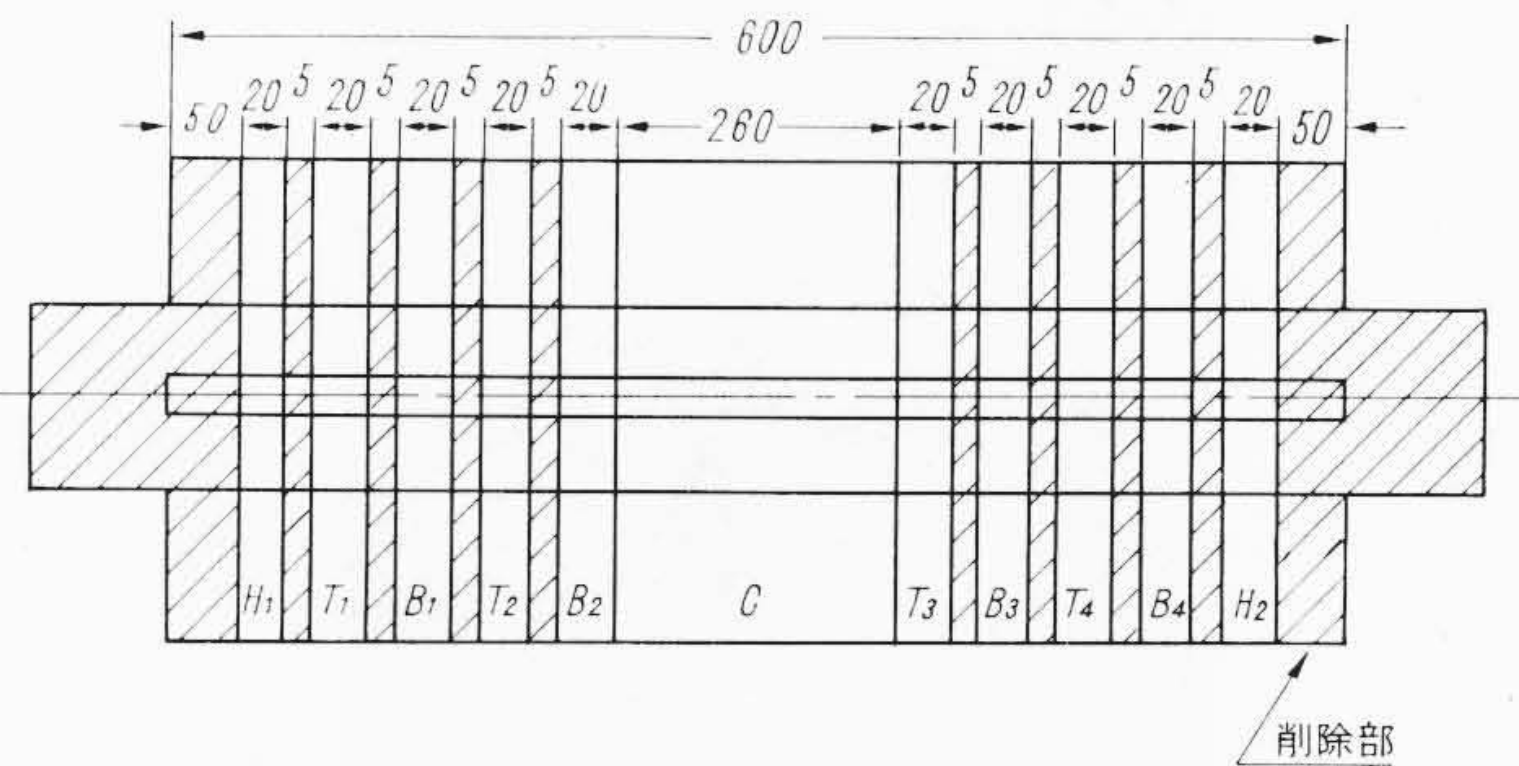
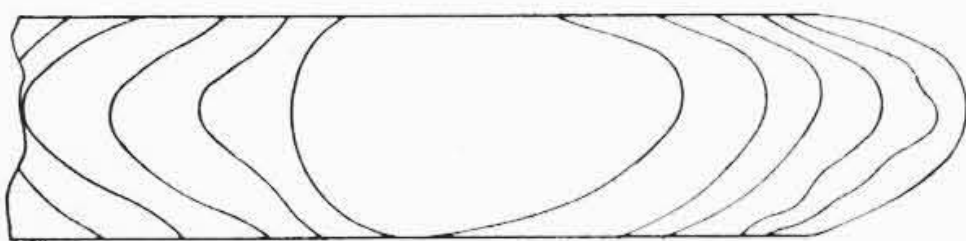


(a) 溶接のまま



(b) カラーチェックしたもの

第 13 図 クレータ処理を行なったもの



B: 曲 げ 試 験 H: 硬 度, マクロおよびミクロ試験
C: 衝 撃 試 験 T: 引 張 試 験

第 14 図 試 験 片 採 取 要 領

しかし母材を予熱することによって、この種のブローホールの生成はある程度防止できることがわかった。第 9 図に母材の予熱温度と溶着部の破断状態を示す。

また不溶着部がない開先条件を選んだところこの種のブローホールは全く見られなかった。これらを検討するとブローホールの原因としては被包炭酸ガスと作業上母材表面に残る水分によるものと考えられる。また 1 層目のみ溶接した場合の溶着部および熱影響部の硬度とき裂の状態を調査した結果第 10, 11 図のようになった。

き裂は全く見られなかった。

欠陥および硬度の検討結果より予熱温度は 150℃ 以上と定めた。

3.5 溶接部の外観およびクレータ処理法

ハイアーク溶接を行なった場合には溶接開始から終了まで 1 本のビードが置かれており、溶接速度の高いことはいうまでもないが、棒継ぎに要する時間の節約による作業の能率化と棒継ぎ個所における欠陥発生の防止にも有効である。しかし心線の径に比べ高電流を使用するため電流密度が高くなりどうしてもクレータが大きくなり過ぎるきらいがあり、今回のように母材の炭素含有量が高く、しかも拘束されている場合にはクレータ割れを生ずる危険がある。これを防止するため第 12 図に示すようにクレータをビード中に形成する処理法を採用した。その結果第 13 図(b)に示す酸洗い後のカラーチェックにてわかるようにクレータ割れは完全に防止することができる。

4. 機械的試験結果

4.1 試験片採取要領

試験片の採取は第 14 図のごとく行なった。

4.2 溶着部のマクロ試験および溶込み量測定結果

開先内における溶着金属の溶込み量を測定した結果第 5 表のとおりであった。

第 5 表 溶 け 込 み 量 測 定 結 果

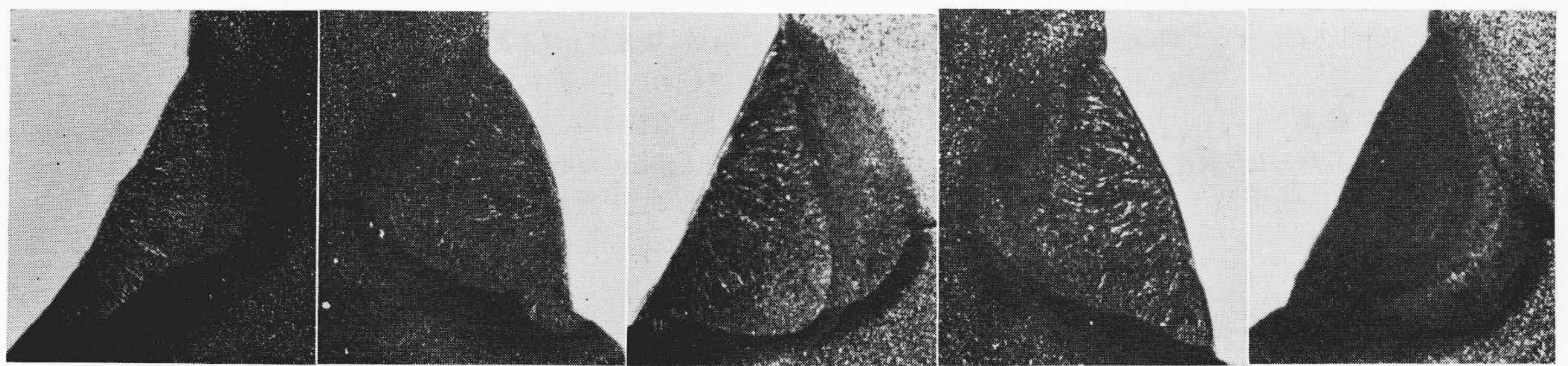
溶接棒	項目	平 均 (mm)	標準偏差 (σ)
D4302(手) + D4303(手)	P_G	9.75	0.43
	P_S	2.27	0.41
D4302(手) + B社(ハイアーク)	P_G	10.31	0.61
	P_S	2.54	0.54
A社(ハイアーク)	P_G	11.50	0.43
	P_S	2.84	0.54
B社(ハイアーク)	P_G	11.13	0.66
	P_S	3.65	0.76
C社(ハイアーク)	P_G	10.25	0.97
	P_S	3.35	0.79

りであった。またマクロ断面写真を第 15 図に示す。

第 5 表、第 15 図より明らかなように開先底部への溶込み不足は全く見られなかった。溶接部の強度と溶接割れの観点から考えると軸側へは適度に、ルート部へは多く溶込むものが理想的であるといえる。

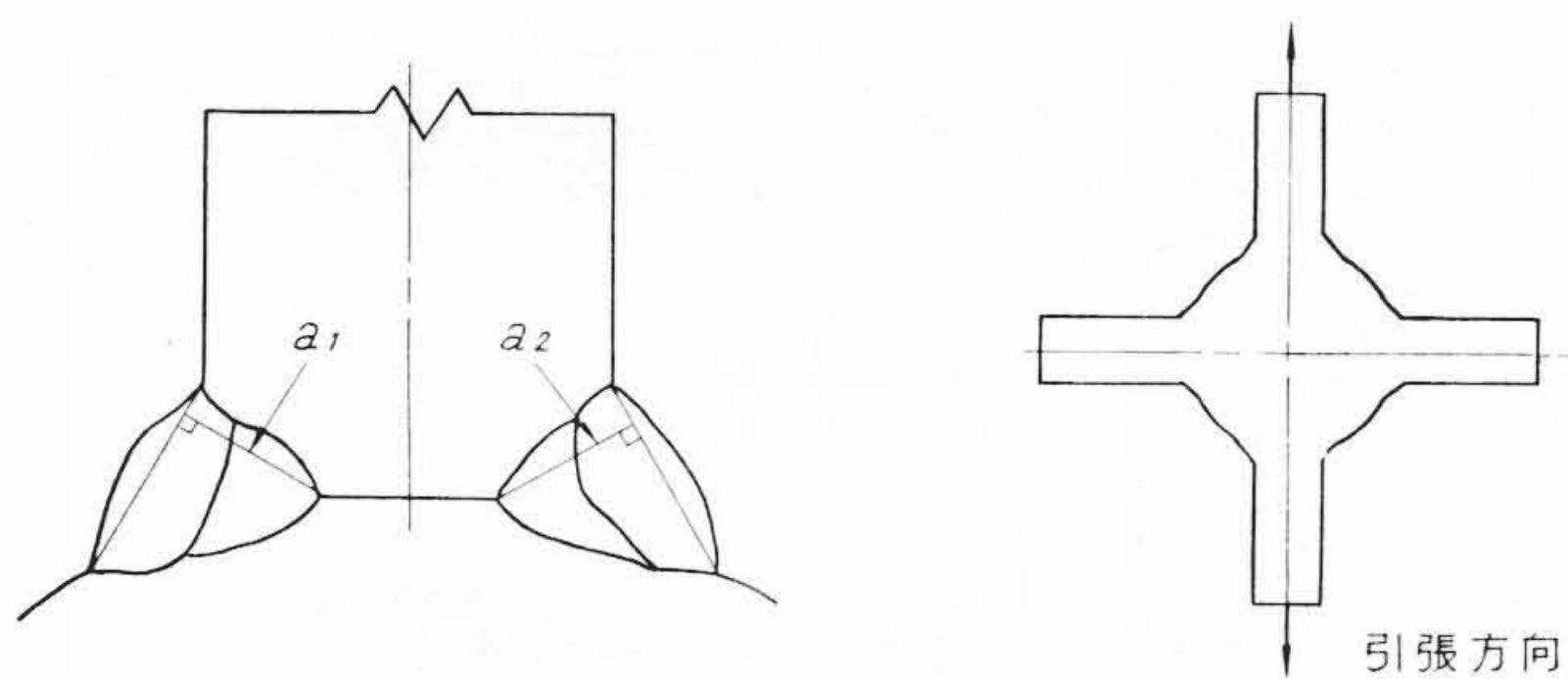
4.3 引張試験結果

溶接部の引張試験は第 14 図に示す要領で採取した試験片を第 16 図(a)に示すように実際のど厚を測定したのち同図(b)の方法で引



(a) { D4302(手)
+
D4303(手) (b) { D4302(手)
+
B社(ハイアーク) (c) A 社
(ハイアーク) (d) B 社
(ハイアーク) (e) C 社
(ハイアーク)

第 15 図 マ ク ロ 写 真



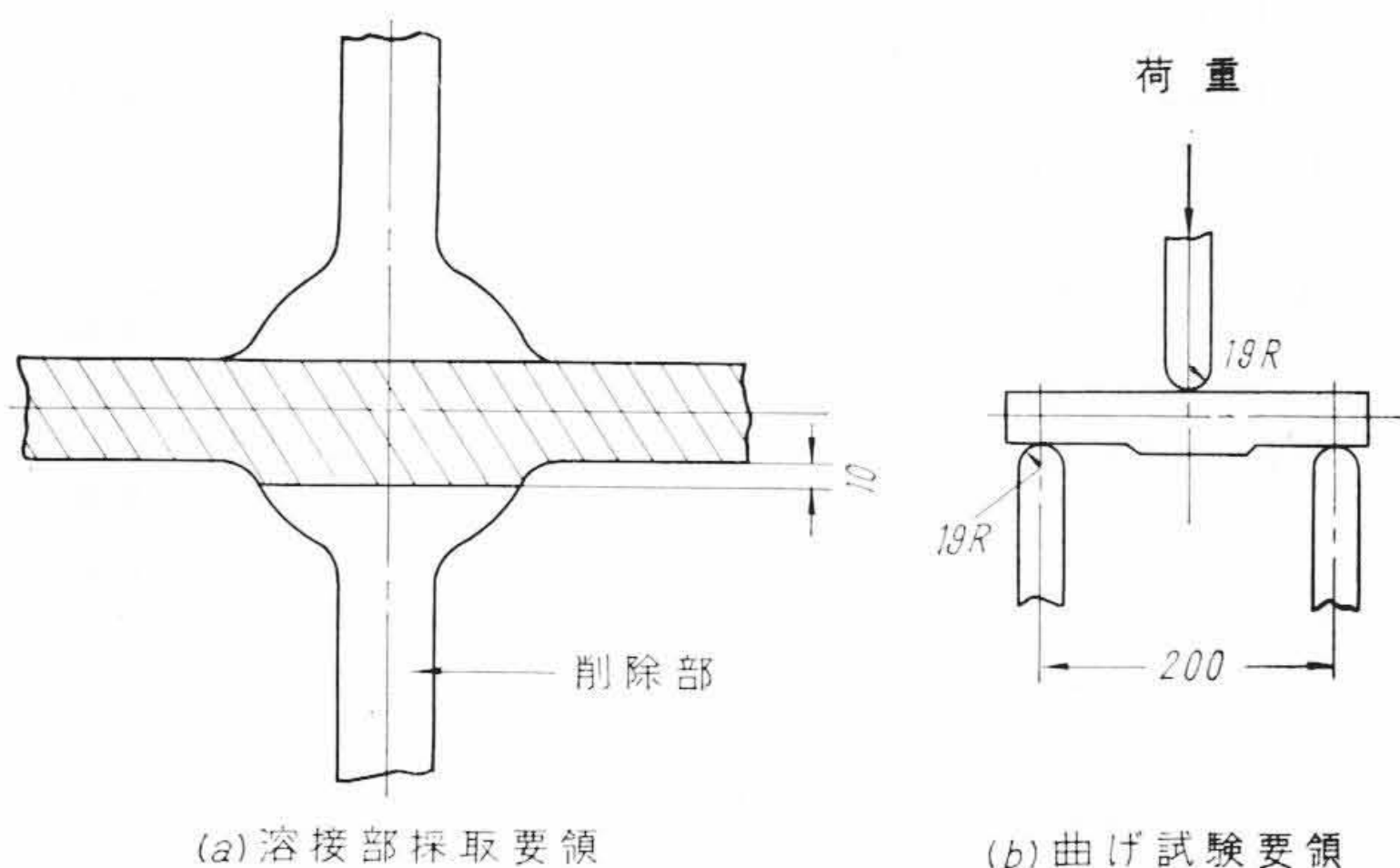
(a) のど厚測定要領

(b) 引張試験要領

第 16 図 引張試験片の形状と試験要領



第 17 図 引張破断面



(a) 溶接部採取要領

(b) 曲げ試験要領

第 18 図 曲げ試験片の形状と試験要領

張試験を行ない、最大引張荷重を求めた。

試験結果は第 6 表に示すとおりである。試験片の破断はすべて最大荷重に達したときまず開先底部のノッチ部に割れを生じ、抗張力が低くて熱影響を受けたアーム部に進展している。これよりシャフト側には全くき裂のないことがわかった。引張破断面はその代表例を第 17 図に示すように、すべて銀白色に輝くせん断破面を呈していた。

4.4 曲げ試験結果

第 14 図の要領で採取した試験片を第 18 図に示す寸法に機械加工をして曲げ試験に供した。

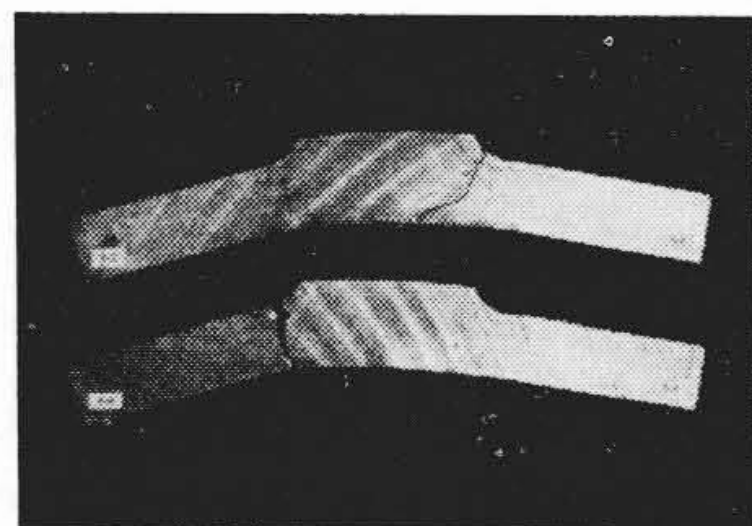
試験結果は単位溶接ビード当たりの最大荷重にて求め、これを第 7 表に示す。

試験片の破断は第 19 図に示すとおりである。最大曲げ荷重の最も大きかったもの、換言すれば曲げに対する靱性の最も大きいものは、引張試験の場合と同様に低水素系溶接棒を用いて 1 層目を手溶接し、2 層目にハイアーク溶接を行なったものであった。しかしハ

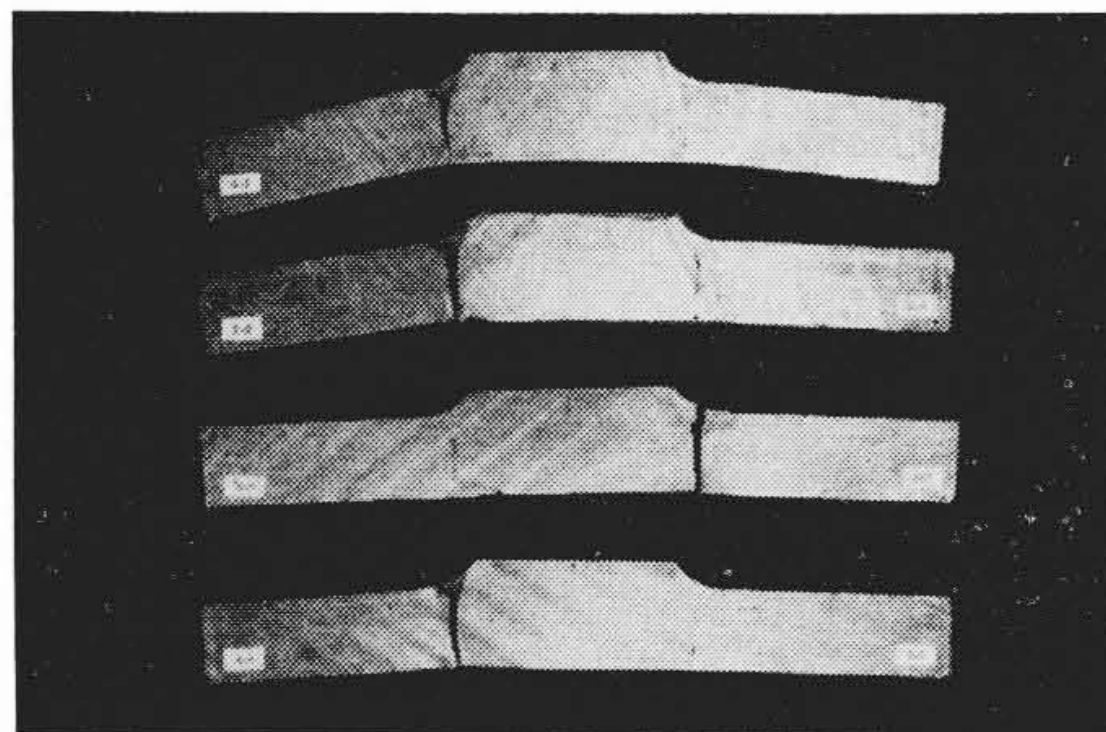
溶接棒	D4302(手) + D4303(手)	D4302(手) + B社(ハイアーク)	A 社 (ハイアーク)	B 社 (ハイアーク)	C 社 (ハイアーク)
項 目					
単位溶接ビード 当たり最大荷重 (t)	24.5	24.3	20.5	22.1	20.1
引張強さ平均値 (kg/mm ²)	57.5	60.0	54.9	52.1	57.9
標準偏差(σ)	1.28	1.94	2.89	3.69	3.33

単位 ビード長： 17 mm

溶 接 棒	試 片 No.	単位ビード長(20mm)当たりの最大曲げ 荷重(kg)		
項 目		1	2	平 均
D4302(手)+D4303(手)		10,400	10,880	10,620
D4302(手)+B社(ハイアーク)		12,000	10,660	11,310
A社(ハイアーク)		10,500	8,740	9,620
B社(ハイアーク)		10,480	9,840	10,160
C社(ハイアーク)		8,900	8,840	8,870



第 19 図 曲げ試験片破断状況



第 20 図 開先の選定を誤った場合の曲げ試験片破断状況

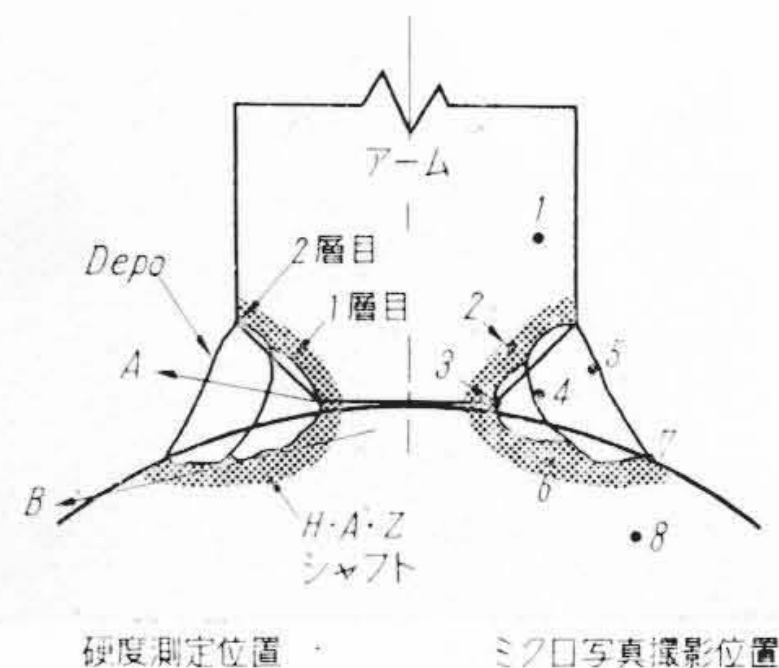
イアーク溶接のみによる 2 層盛りを行なったものでも比較的アークの安定していた B 社のものが、手溶接のみによる試片とほぼ同程度の強度を示していた。このことからアークの安定した心線を用いれば溶け込みは均一になり、手溶接の強度に十分匹敵する値が得られるということがわかる。しかし開先角度の選定を誤り、溶け込みが非常に少なかった場合に、またかたよって溶け込んだ場合には第 20 図に示すようにアーム部がほとんど曲らず破断してしまう。よってハイアーク溶接を施行する場合、開先の検討は慎重に行なわなければならない。

4.5 硬度およびマイクロ試験

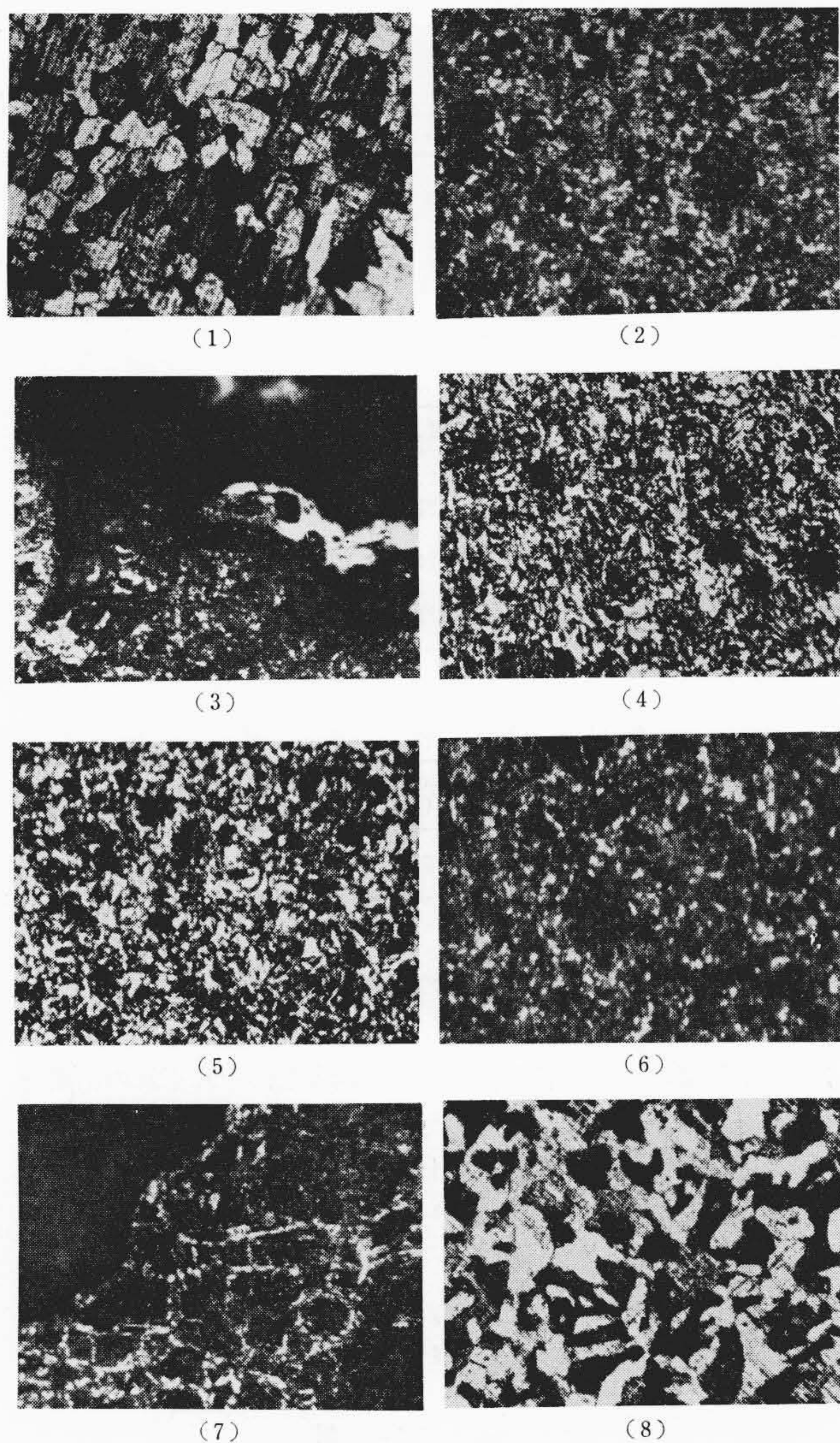
今回の試験片のように比較的炭素含有量の高い焼入硬化性の鋼材を溶接した場合には、熱影響部の硬度を測定し、低温割れなどの欠陥発生を推測する必要がある。

第 21 図は溶接部のかたさ測定位置を示す。

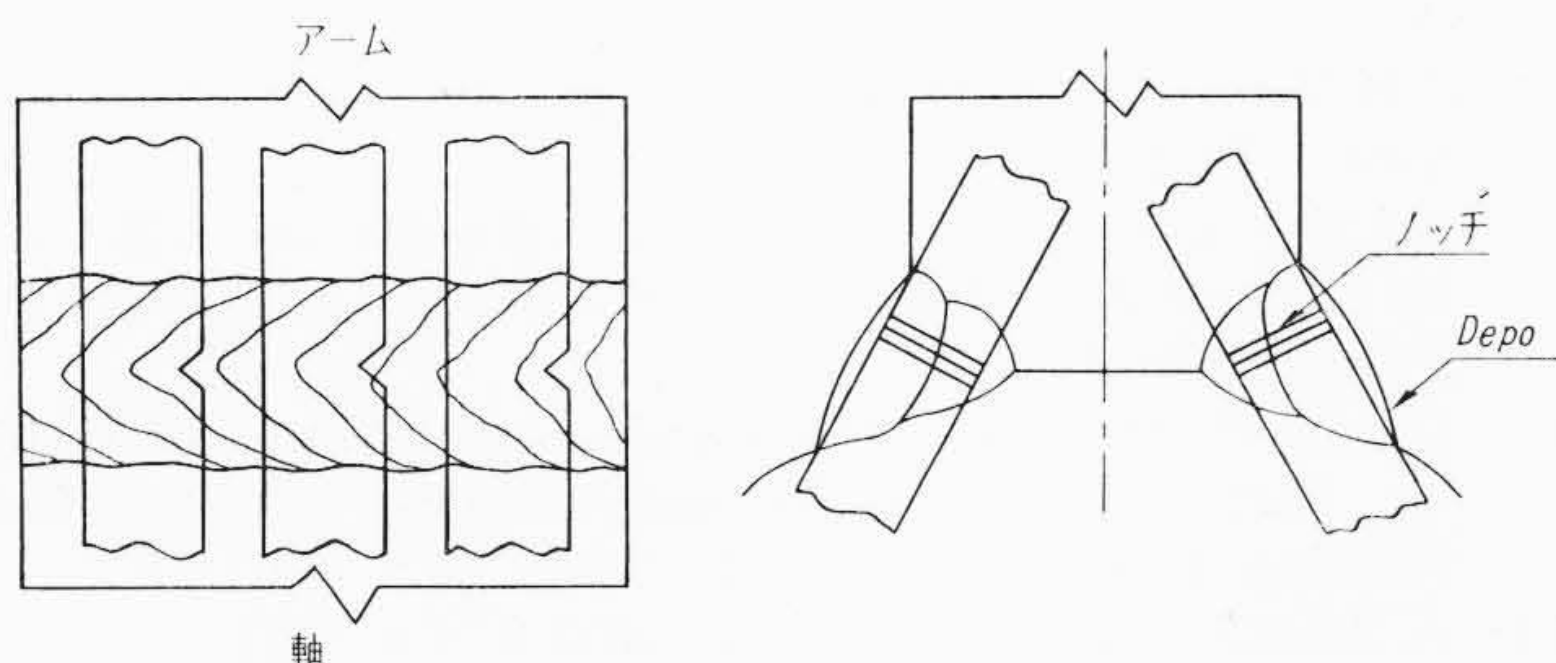
測定線 A は溶着金属の硬度分布を求めるもので、測定線 B は



第 21 図 硬度測定位置および
マイクロ写真撮影位置



第 22 図 ハイアーク溶接を行なった場合のミクロ写真



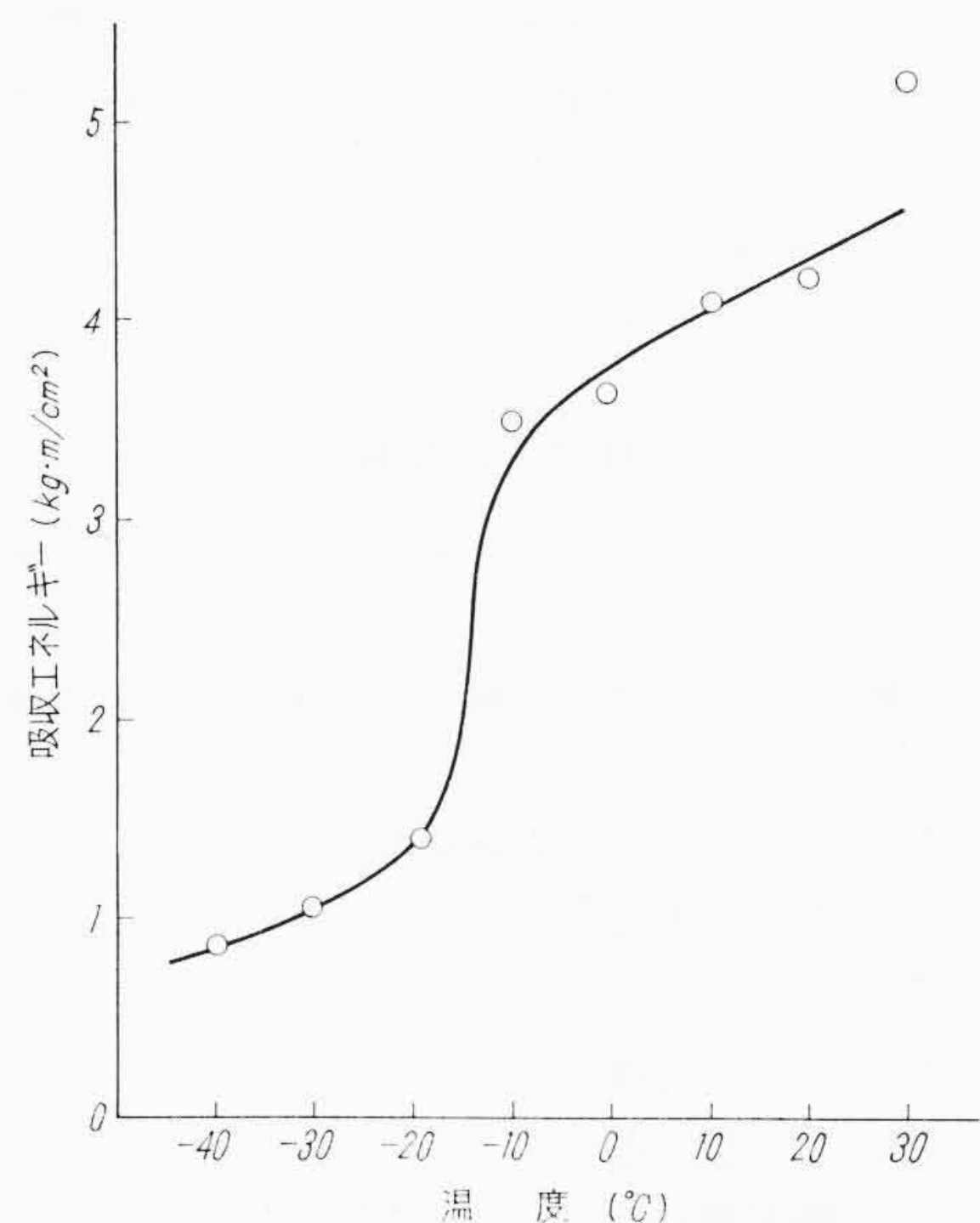
第 23 図 衝撃試験片採取要領

シャフト側の最も硬化しやすい熱影響部の最高かたさを求めるものである。

まず測定線 A に関する試験結果より溶着部のかたさは手溶接のみによるほうがハイアーク溶接を行なったものよりもいくぶん低い。これは溶接速度が遅いためであると思われるが、2 層ともハイアーク溶接を行なったものでも大差なく約 $Hv=170\sim226$ 、また最も硬化しやすい軸側の熱影響部も $Hv=195\sim264$ であった。これよりビード下き裂などの欠陥が発生することはほとんどないものと思われる。

第 22 図はハイアーク溶接を行なった溶着部およびその熱影響部のミクロ写真を示す。

写真より明らかなように開先底部は健全であり、マルテンサイトの生成は見られなかった。



第 24 図 ハイアーク溶接による溶着部の遷移曲線 (2 層盛りの場合)

第 8 表 衝 撃 試 験 結 果

溶接棒	D4302(手) + D4303(手)	D4302(手) + B社(ハイアーク)	A 社 (ハイアーク)	B 社 (ハイアーク)	C 社 (ハイアーク)
項 目					
吸収エネルギー 平均値 (kgm/cm ²)	10.13	4.46	4.51	3.63	4.87
標準偏差(σ)	2.18	1.22	0.26	0.66	0.86

室温 (18°C)

第 9 表 溶着部の化学分析結果

溶接棒	成 分 (%)	C	Si	Mn	Ceq
D4302(手) + D4303(手)		0.131	0.13	0.42	0.206
D4302(手) + B社(ハイアーク)		0.118	0.22	0.70	0.244
A社(ハイアーク)		0.100	0.15	0.62	0.210
B社(ハイアーク)		0.170	0.35	0.59	0.283
C社(ハイアーク)		0.180	0.39	0.79	0.328

4.6 衝 撃 試 験

今回の試片のように母材の炭素含有量が比較的高い場合には溶着部の母材による成分の影響がかなり大きい。またハイアーク溶接を行なった場合には単位時間当たりの溶着量が手溶接に比較してはるかに大きいため溶着部の組織が粗大化しもろくなる傾向がある。第 23 図は第 14 図の位置から採取した V ノッチシャルピー衝撃試験片の切断要領を示したものである。

第 8 表の結果よりわかるように溶着部の衝撃値は手溶接の場合にくらべハイアーク溶接を行なった場合にはかなり低下していることがわかる、そのため低温における衝撃値を調査したところ、第 24 図のようになった。

せん移曲線より明かなように 0°C における値も $4.2 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 程度あるので特に問題はないものと思われる。しかし製品の使用温度が -10°C 以下のときにはこの種の溶接にハイアークを使用するのは問題がある。

4.7 溶着部の化学成分

第 3 表に示す溶接棒と第 2 表の母材特にシャフト材の化学成分に大差があるので実際施行における溶着部の化学成分は溶込み率によって変化してくる。第 9 表に溶着部中央の化学成分を示す。

化学成分分析の結果溶着金属の母材による成分的影響はかなり明白に現われている中でも炭素量の増加は著しい。Ceqは手溶接に比較してハイアーク溶接を用いたほうがかなり高い値を示しているが炭素含有量の高い軸側の溶け込みが多いため、作業を行なう場合注意しなければならない点であろう。

5. 経済性の検討

最後にハイアーク溶接を適用した場合の経済性の検討を行なえば次のようになる。

原価比較は第 25 図に示す回転軸について行なった。その結果を第 10 表に示す。

ただし原価算定式として次のものを用いた。

$$A=W+M+T+\alpha$$

A：溶 接 費

W：電 力 費

T：工 数 費

α ：機械償却費

第 10 表 よりわかるように ハイアーク溶接を使用した場合には約 25.3% の工数低減が図れることがわかる。しかしハイアーク溶接を施行した場合、全費用のうち溶接棒代が約 36% を占めているということは今後この溶接法の発展に残された大きな問題であろう。

6. 総 括

以上試験結果を総括すると次のようになる。

まず施行法に関しては

- (1) 開先角度は 50 度が適当である。
- (2) 予熱は 150℃ 以上必要である。
- (3) クレータ処理には特別な作業が必要である。

次に強度に関しては

- (1) 衝撃値を除きハイアークと手溶接はほとんど同程度の性能を有する。
- (2) 衝撃値は適用製品の使用温度を検討すること、熱処理を行なうことおよび開先管理の徹底により、これを強化することが可能である。

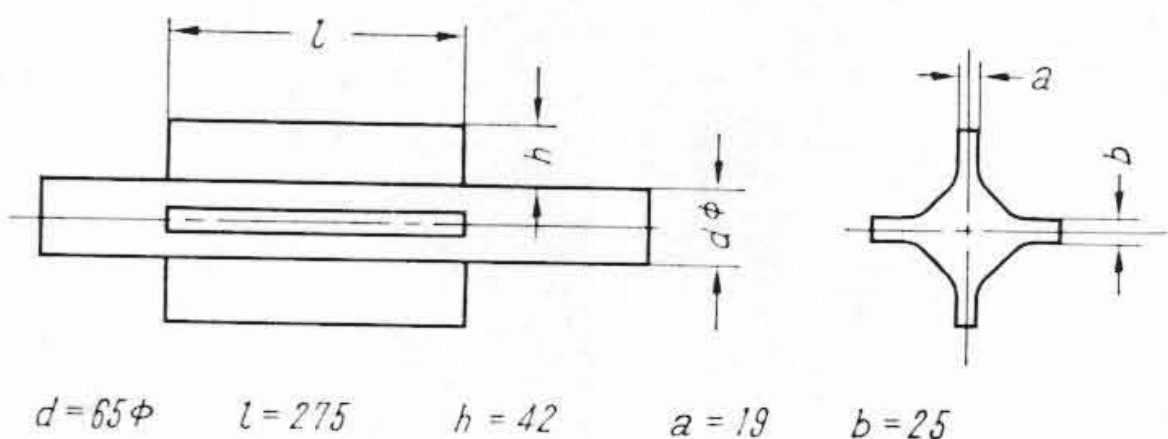
以上のことより今回の試験片、すなわち回転軸のアームの溶接にハイアークを適用してもさしつかえないことがわかった。またその溶接条件は第 11 表のとおりである。なお溶接棒メーカーによるハイアーク用心線の性能の差は現在のところほとんどみられない。

7. 結 言

以上の試験はハイアーク溶接機の実用化と、従来被覆アーク溶接棒による手溶接法を慣用している現場施行の能率化による費用低減を意図し、その適用性を検討したものである。

試験時の溶接施行は次の 3 通りで行なった。

- (1) 2 層とも手溶接



第 25 図 回 転 軸 寸 法

第 10 表 回転軸 1 本を溶接するに要する費用

溶接法	項目	溶接棒代 (円)	溶接時間 (分)	電力費 (円)	材料費 (円)	工数費 (円)	償却費 (円)	総溶接費 (円)
2 層とも手溶接		130.6	129.2	27.4	130.6	1,035.0	16.8	1,209.8
1 層目手溶接 2 層目ハイアーク		228.1	95.6	24.3	240.4	765.5	26.1	1,056.3
2 層ともハイアーク		325.6	62.0	21.2	351.2	496.0	35.3	903.7

第 11 表 溶 接 条 件

開先角度 (度)	予熱温度 (℃)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	溶接姿勢
50±3	170±20	420±10	27±2	300	下向き

- (2) 手溶接とハイアーク溶接の組み合わせ

- (3) 2 層ともハイアーク溶接

これら溶接部の性能を各種試験により調査し、それぞれの結果を比較したところ、適当な溶接条件を選定してやればハイアーク溶接のみで 2 層盛ったものも手溶接に十分匹敵する強度を得ることができ、しかも大幅な工数低減が可能となることがわかった。

最後に本実験を行なうに当たり、終始ご指導、ご協力いただいた八幡溶接棒株式会社研究部松尾氏ならびに日立研究所八重樫氏および関係者各位に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) Henri P. Granjon: Studies on Cracking of and Transformation in Steel During Welding: W. J, 1S~11S(1962-1)
- (2) C. B. Voldrich: Cold Cracking in the Heat Affected Zone: W. J, (1957-5)
- (3) 益本功: CO₂-O₂ アーク溶接による溶融鋼における諸反応 (第 2 報), 炭素, 珪素およびマンガンの酸化反応 溶接学会誌 26~35 (1960-6)
- (4) Donald E. Babcock: The Fundamental Nature of Welding, Part V, —The Physical Chemistry of the Arc Welding Process—: W. J, 189S~197S (1941-4)
- (5) A. Schack: 応用伝熱工学 13 (1953-8 コロナ社)
- (6) 大和久雄: S 曲線 65~75, 94~97, 135 (昭 31-8)
- (7) N. Davis and R. T. Telford: The New Manual Metal-Arc Welding-Process, W. J, (1957-5)
- (8) 鈴木春義: 最新溶接ハンドブック: 142
- (9) 溶接学会編: 溶接便覧: 35~36, 56~72 (昭 36-12 丸善)