- て, 鈎物, 44-8 (1972), 666-673
- 6) M. J. Bibby, G. Burbidge and J. A. Goldak; Gases Evolved from Electron Beam Welds in Plain Carbon Steels, Weld. J. 51-12 (1972), 844-847
- 7) 渡辺, 志田, 鈴木, 岡村; 電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に

関する研究 (第1報), 本誌, 43-7 (1974), 678-683

- 8) 安藤, 大久保; 50 kgf/mm² 級球状黒鉛鋼鉄の電子ビーム溶接 (主として溶接部の組織観察), 溶接学会全国大会講演概要, 第26集 (1980), 294-295, 第31回電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-240-80(1980)

配管の高速自動溶接に関する研究 (第1報)*

—溶 接 施 工—

常富 栄一**, 馬田 豊昭**, 齊藤 契彦雄**, 桜井 英夫**, 齊藤 達郎***

Study on High Speed Automatic Welding of Piping (Report 1)*

—Welding Procedure—

by Eiichi Tsunetomi**, Toyooki Bada** Kesao Saito**, Hideo Sakurai** and Tatsuro Saito***

Pipeline installation requires the use of a welding method presenting high pipe-laying efficiency and therefore high welding speed.

The present report describes the development of welding procedure by the automatic one side downhill welding method using high-current-density GMAW with regard to the girth welding of pipe. In this method, the groove root is made tight and non-gapped, and welding is performed in the narrow gap with little deposit metal, in order to shorten the pipe alignment and welding time. An appropriate procedure for this method was established by developing the downhill welding which uses copper backing on the pipe inside and small diameter solid wire on the pipe outside. When the standard welding conditions are deviated from, the welding arc will touch the copper backing sometimes causing the copper to deposit on the root bead. This deposition of copper on root beads causes not only cracking of beads, but decreasing pipe-laying efficiency due to consumption of copper backing. As a result of various researches, this problem was resolved by preparing another groove on the pipe inside in addition to the groove on the pipe outside. The use of the improved shape of groove expanded the zone of appropriate welding conditions for root pass toward the high-speed welding side. The built-up sequence was divided basically into three kinds of passes, the root pass, intermediate pass and cap pass, and each pass was expressed graphically to facilitate the selection of welding conditions for assuring no welding defects and high welding efficiency.

This welding method was applied into a welding system with the development in computer control technique and with the development in internal clamp.

1. 緒 言

近年, 溶接自動化の傾向はエレクトロニクス技術の発展普及と共にあらゆる分野におよび, スポット溶接をはじめアーク溶接もロボット化する時代に入ろうとしている。しかし, リアルタイム・フィードバック機能を備えた人工知能型アーク溶接機の完成期には至っていない。

一方, 海底エネルギー資源の開発に欠くことができない海底パイプラインの建設は, 世界各地で, ますます積極的に進められている。

海底パイプラインの敷設作業は敷設船上に配置された複数の作業ステージにおいて, 溶接, NDI, 塗覆装に至る一連のパイプ接続作業を, 連続して行いながら間歇的にパイプを海底へ敷設していく方法が採られている。膨大な経費を要する船団の移動効果を上げるには, 接合作業を速めるしかなく, 中でも溶接作業速度の向上がポイントとなっている。この溶接は固定管の突合せ溶接で, かつ全姿勢裏波溶接であり, しかも高品質を要求される

*原稿受付 昭和57年2月12日 (昭和54年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 新日本製鉄(株)製品技術研究所 Member, Nippon Steel Co. Products Research & Development Lab.

***正 員 新日本製鉄(株)相模技術センター Member, Nippon Steel Co. Sagami Engineering Center

ので、技術的には最も難しい溶接施工の一つと言われている。したがって手溶接で対処する場合には、高度な技量と長期間の連続作業に耐えうる体力を持った溶接士が多数必要である。これらを確保することが困難であるため、高能率化を目ざした自動溶接装置の開発が世界各国¹⁻⁵⁾で進められてきた。中でも米国 CRC 社が開発した、Automatic Pipe Welding System⁶⁾は最も高能率で、かつ使用実績も多いものである。

このような背景下で、著者らはマイクロコンピュータコントロールによる自動溶接技術の開発に取り組み、海底配管用高速自動溶接施工法について検討した。本報ではコンピュータプログラムに入力する溶接条件決定のソフトを作成するため、溶接作業時間のパイプ芯出し時間とアークタイムの短縮を目標に、パイプ円周溶接についての適正施工法を検討し、その結果を海底配管工事へ適用し、実効のあることを確認したので報告する。なお高速自動溶接装置については次報で行う予定である。

2. 実験方法

溶接実験方法は Fig. 1 の固定架台 ① に設置された固定鋼管 ② の端面に所定の開先取りをした一つの鋼管リング ⑤ の端部を仮止めし、さらにもう一方のリング ⑤ を取り付けて開先合せを行い、インターナルクランプ④による拡管後、溶接機 ③ によってガスメタルアークの下進溶接を行った。

①supporting stand ④internal clamp
②supporting pipe ⑤test pipe
③welding machine

Fig. 1 Experiment apparatus.

インターナルクランプには芯出し用クランプシューに裏当の銅リングをはめこんであり、クランプと同時に裏当ができるようになっている。供試鋼管およびワイヤの化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。ワイヤ成分の C 量は凝固割れ対策上溶接金属 C 量 $>0.12\%$ ⁷⁾ になることが望ましい。ワイヤ径は 0.9 mmφ と 1.2 mmφ を検

Table 1 Tested materials.

tested materials	material dimensions (mm)	chemical compositions (%)					mechanical properties		
		C	Si	Mn	P	S	σ_B (kg/mm ²)	σ_y (kg/mm ²)	EI (%)
pipe	API 5LX-X52 609φ+15.9	0.11	0.23	1.30	0.018	0.010	55.3	44.7	36
wire	0.9 φ	0.12	0.96	1.60	0.009	0.004	56.2	46.5	29.3
shielding gas	CO ₂ , CO ₂ +40%Ar flow rate 30 l/min								

* all deposited metal

討したが、スパッタ発生量とアークの安定度から 0.9 mmφ を使用することにした。この細径ワイヤは高電流密度の溶接によって buried arc で適正電圧 25~26 V となり高溶着量 (約 100 g/min) を得ることができる。

3. 溶接施工の考え方と条件の検討

パイプラインの工事では設備コストが高いことから、溶接能率を上げるため溶接速度が早く、継手作成効率がよく、しかも芯出し、ビード継ぎ処理等の時間が短いことが望まれる。また省熟練化に対して、平易に溶接するためには適正溶接条件に巾をもたせた融通性のある溶接条件の選定、あるいは省人のためのコンピュータ制御につなげるため全層を積層するうえで各層の溶接条件の多様化が必要である。これらの要求に応じてさらに継手品質を満足する溶接施工法を確立することが必要となる。Fig. 2 はこのような溶接の高能率化、省人化のための溶接条件組合せの多様化という技術目標に対する技術課題とその対応技術、それによって派生する問題点との関係について示したものである。これらの問題点はガスメタルアーク溶接の狭開先の片面溶接を高速で下進で行うと Table 2 に示すようになることがわかった。この問題を解決するためシールドガス、開先形状、溶接条件について検討した。

Fig. 2 Technology assessment.

Table 2 Welding defects and their causes in high speed down hill welding.

defects	causes	factors	range
1) blow hole	fast welding speed	• composition of shield gas flow rate • wire compositions • welding conditions	II
2) hot cracking	solidification crack due to narrow gap	• shape of groove • wire compositions • welding conditions (shape of bead)	III
3) root crack due to copper deposit	copper deposit and penetration to root pass bead	• shape of groove • welding conditions • composition of shielding gas • backing material	II
4) lack of penetration	running forward of molten metal because of non gap welding	• shape of groove • welding condition of root pass	I
5) lack of fusion	because of narrow gap	• groove angle • wire compositions • number of passes • welding conditions • seam tracking	III

3.1 シールドガス

シールドガスはその組成によりブローホール, 作業性, ビード形状に大きく作用する。CO₂ と Ar の混合気体でパイプの下進溶接を行うと CO₂ 濃度が高いほどブローホールは発生しにくく, Ar 量が増すに従いブローホールは発生しやすくなる。この傾向は特に上向位置で大きく, また溶接速度が速くなると著しい。しかし作業性とビードの形成傾向は Ar が入ると溶融金属の上向位置での垂れ下がりが少なくなり良好となる。一方後述のスプレッド工法を考慮すると, 初層は最も速い溶接速度と健全な裏波ビードが要求されるので上に述べた傾向からシールドガスとしては, CO₂ 100% を採用した。中間層も同様に CO₂ 100% とし, 最終層は良好なビード形成を主体と考えシールドガス組成を CO₂+40% Ar とした。なおガス流量は全層について 25~30 l/min である。

3.2 開先形状と裏波溶接

開先形状はパイプの芯出し作業と溶接施工条件の設定に大きく影響する。芯出し時間を短くするにはルートフェイスをもち, ノンギャップの開先が望ましい。この点から溶着能率のよい狭開先をめざして Fig. 3 に示す開先形状を設定した。開先初段角度とルートフェイスの厚さは, その取り方により裏波ビードが得られなかったり, 裏当の銅板を溶融して高温われを生ずる等, 裏波ビードの形成に大きく影響する。2 段目の角度は主に開先を埋める溶着金属量を決めるものである。溶接金属の高温われ防止と開先加工精度の観点から決めた。

3.2.1 初層の溶接条件

初層の溶接は溶接電流が高くなりすぎると銅裏当の

Sectional area of groove: 78.9mm²
Root bead reinforcement
+ sectional area of groove
+ reinforcement of final pass
Calculated deposit metal: 90.9mm²
Calculated deposit metal: 7.2g/cm

Fig. 3 Basic shape of groove.

Cu が溶着したり, 高温われを生じたりする。また電流が低すぎると溶込不足を生じ裏波ビードが得られない。またアーク電圧の適正範囲は溶接速度 70 cm/min. で溶接電流 250 A の場合 24 V 以下ではアーク電圧が低すぎて溶接不能となり, 27 V 以上では高温われの発生がみられる。この適正電圧は溶接電流とのかねあいで若干移動するが高速の下進溶接では適正範囲の狭いことがわかった。Fig. 4 は溶接欠陥と溶接電流, 溶接速度の関係を示したものである。ビード 1 cm あたりの溶着金属重量を縦軸, 溶接電流 (ワイヤ送給量) を横軸とし, 各溶接速度について, 12 時位置から 6 時位置まで通して溶接したときの裏波ビードの得られる適正領域を示している。しかしながらこの適正条件範囲はやや狭く, 標準溶接条件を外れた場合, 溶接アークが銅裏当にあたり, 裏波ビードに Cu の溶着を生じることがある。この銅裏当の溶着を防止することができれば溶接適正領域が拡大されるのでこれの防止法について検討を行った。

Fig. 4 Evaluation of root bead in several welding conditions by conventional groove.

3.2.2 Cu の溶着ビード

まず, Cu の溶着したビードの状況を調査した。Cu の溶着したビードの一例を Fig. 5(a) に示す。Cu の溶着

Fig. 5 Copper contamination and cracks and prevention of them by improved groove.

したビードは Cu の溶着量がわずかであっても、いずれも小さな割れがみられた。一方 Cu の溶着していないビードに割れはなかった。割れ近傍のかたさをヴィッカースかたさの荷重 1 kg で測定したところ HV_1 : 350~450 と異常に硬化していた。Cu の溶着していないビード断面のかたさは HV_1 : 220~250 であった。また割れ近傍の成分元素を EPMA Fig. 6 によって調査したところ Cu の含有量が多く、割れに Cu が起因していることが明らかとなった。このことは鋼材の性質によらず Cu の影響として Cu の析出による硬化、あるいは Cu 含有量の多い鋼では赤熱脆性を生じることが知られている⁸⁾ ことに関連しているものと思われる。したがって Cu の裏波ビードへの溶着は単に溶接適正領域を狭めるだけでなく溶接金属の硬度を高め、割れを誘起するなど溶接品質の上からも好ましくないものであることがわかった。

Fig. 6 Analysis curve at weld cracking location by EPMA.

3.2.3 内面開先による Cu 溶着防止

Cu の溶着防止法として裏当の材質・性状面からアークが直接銅裏当にあたるのを避けるため、裏波ビードと銅裏当の間にスラグ層を生成させるなど、種々の試みをした。それらを Table 3 に示す。しかしこれらはすべて Cu の溶着防止効果について十分に満足するものでなかった。そこでアークが銅裏当にとどかないで裏波ビードを得ることができれば、Cu の溶着は生じないと推察できるのでこの点に関し、以下に示す方法で検討した。

Table 3 Example of prevention of copper contamination in root pass.

Subject	Application	Evaluation (No of repetition)
Formation of slag layer	Glass tape	unfit
	Flux cored wire	unsuitable
Setting of non-fusion layer	Silica tape	suitable (1)
	Tungsten thermal spraying	unsuitable
Setting of heat resisting layer	Al ₂ O ₃ thermal spraying	suitable (10~15)
	MgO	" (3~5)
	TiO ₂	" (1~3)
	SiO ₂	unfit
Improvement of surface state	chrome plating	unsuitable
Increase of surface hardness	Beryllium copper	"
Setting of high heat transfer layer	Silver plating	"
	Silver solder coating	"

すなわち開先形状として、パイプ外面開先の他にルート面を挟んで銅裏当側のパイプの内面に V 開先を設け、ルート直下の銅裏当にあたるアークを弱めることを試み、この V 開先の深さと角度を変え適正域を調べた。まず、開先深さが 1 mm 以下では Cu の溶着が起り、また 4 mm 以上になると溶接金属が銅裏当にまでとどかず、内面開先が残る良好な裏波ビードが得られない。また開先角度が大きすぎると同様に内面開先に未溶融部が残る。このような結果から開先形状は Fig. 7 のように決定した。すなわち内面開先深さ 2 mm、ベベル角 22.5° とし、さらに初層溶接アークの安定化のため、外面開先を U 型とした。Fig. 8 はこのような開先形状を用いて

Fig. 7 Improved shape of groove.

Fig. 8 Evaluation of root bead in several welding conditions by improved groove.

Fig. 4 と同様に裏波ビードの得られる適正域を求めたものである。溶接速度に対して、溶接電流が高くなると、溶着高さが高くなりすぎ熔融金属の先行が起る。しかしこのような高電流、高溶接速度領域においても Cu の溶着による不良域は現われなかった。この裏波ビードの状況を Fig. 5(b) に示す。

さらに本開先で裏波ビードの形成状況を調査するため銅裏当のかわりに石英ガラスをあてて溶接を行い溶接時のアークならびに熔融金属の挙動を直接観察した (Fig. 9)。旧開先では標準溶接条件を外れて溶接電流が高くなるとルート面を突抜けたアークは直接石英ガラスにまで到達しており、銅裏当による Cu の溶着状況を想定することができる。一方改良した本開先では熔融金属は内面開先に沿ってアークより先行し、ルート面を突抜けた溶接アークは直接裏当材にあたらないことがわかった。その機構は銅裏当にアークが届く距離が長くなり、かつ内面 V 開先内でアークが吸収されてしまうことによると考えられる。本開先では旧開先にくらべて裏波適正領域がとくに高速側に広いのが特長である。実管を用いて 50~210 cm/min. の溶接速度で裏波溶接を行ったが、いずれも銅裏当の溶着はなく、しかもビード巾のそろった良好な裏波ビード形状が得られた。また銅裏当の損傷もなく、銅裏当の交換回数が少なくなるので現場溶接作業上のメリットも大きい。

Fig. 9 Observation of root pass welding through quartz glass.

また、本法では比較的高電流が使用できるためこの裏波溶接ビードの溶着量は大きく、ビード高さが約 5 mm になるのが特長である。したがって第 1 溶接ステージではこの裏波溶接のみで、パイプは第 2 溶接ステージへ送ることができる。このことは現在第 1 溶接ステージの作業時間がパイプライン敷設作業のサイクルタイムに対して最もクリティカルであるので、高能率化にとって極めて有利な点の一つとなった。

3.3 中間層・仕上層の溶接条件の選定

パイプラインの溶接では複数の溶接ステージが同時に、決められたパスのみを溶接するスプレッド工法で行われるので、各々の溶接ステージの溶接時間を同一化し、バランスをとることが必要となる。したがってパイプの管径、肉厚の変化によってそれぞれの溶接ステージに応じたパス数が割り振られるので、コンピュータによる溶接制御を考えると全体のバランスを考慮して個々のパスの溶接条件が任意に選定できると都合よい。このため、溶接欠陥を生じない、全てのパスの溶接条件を、前記の裏波溶接に引きつづいて検討した。

3.3.1 中間層の溶接条件

中間層の溶接条件は融合不良や高温われを生じないことが必要である。高温われについては開先巾の狭い 2 層目の溶接で割れが発生しなければ、それ以後の層の溶接においては U 開先の上方の溶接となり、ビード巾が広くなるので割れの心配はない。したがって中間層を代表する溶接条件として 2 層目を検討した。Fig. 10 は熔融金属の先行による融合不良や高温われを生じる領域と溶接電流に対して溶接速度が速すぎてアークが不安定となる領域を示したものである。適正条件は破線の扇形に囲まれる領域で示されるが、この適正領域は溶接速度が速くなると狭くなるのが特長的である。したがって中間層の溶接条件としてはこの適正領域内における任意の溶接速度と溶接電流の値を選定すればよい。

Fig. 10 Evaluation of intermediate pass in several welding conditions.

3.3.2 仕上層の溶接条件

仕上層は表面から 0~2 mm 開先壁を残した状態で溶接するのが最もよいビード外観を得たので、この開先形状で溶接条件を検討した結果を Fig. 11 に示す。一定溶

Fig. 11 Evaluation of cap pass in several welding conditions.

接速度において溶接電流すなわち単位ビード長あたりの溶着量がある量を越えると溶融金属の先行が始まり、さらに溶着量が増すと溶融金属が垂れ落ちる。Fig. 11 の⑥の領域は12時位置から4時位置にいたる各溶接速度における垂れ落ちる限界の溶着量を示している。たとえば溶接速度 60 cm/min についてみると、溶接電流 210 A では良好(図中○)で、220 A では溶融金属の先行(図中△)がみられ、230 A になると溶融金属が離脱し(図中▲)してしまう。このように各溶接速度において溶融金属の先行が始まる境界を求めると、Fig. 10 のアークが不安定となる境界線とほぼ平行の線で挟まれる適正領域⑥が存在した。そして4時位置から上向姿勢となるところでは溶融金属の先行よりも垂れ下がる傾向とな

Table 4 Example of adopted welding conditions for build-up passes.

position welding condition	mark	12:00 ~ 3:30			3:30 ~ 5:00			5:00 ~ 6:00		
		V (cm/min)	I (A)	G (g/cm)	V (cm/min)	I (A)	G (g/cm)	V (cm/min)	I (A)	G (g/cm)
A	1	100	270	0.98	100	270	0.98	90	245	0.98
	2	60	220	1.32	60	220	1.32	60	220	1.32
	3	55	205	1.35	55	205	1.35	55	205	1.35
	4	60	220	1.32	60	220	1.32	60	220	1.32
	5	50	185	1.33	50	185	1.33	45	170	1.33
B	1	120	290	0.88	120	290	0.88	110	265	0.88
	2	65	245	1.35	60	225	1.35	50	190	1.35
	3	60	210	1.26	60	210	1.26	60	210	1.26
	4	60	210	1.26	60	210	1.26	60	210	1.26
	5	40	170	1.55	40	170	1.55	40	170	1.55
C	1	85	255	1.08	80	240	1.08	80	240	1.08
	2	70	250	1.28	60	215	1.28	55	195	1.28
	3	55	200	1.31	55	200	1.31	55	200	1.31
	4	55	205	1.35	50	190	1.35	50	190	1.35
	5	60	210	1.28	55	195	1.28	50	180	1.28
D	1	110	290	0.96				110	290	0.96
	2	55	210	1.37				65	215	1.20
	3	55	210	1.37				65	215	1.20
	4	55	200	1.31				60	200	1.21
	5	50	180	1.29				35	170	1.73

るが4時位置から6時位置における適正領域⑥をみいだした。さらに溶着量が増えると溶接姿勢に関係なく融合不良や高温われを生ずる領域⑩のあることがわかった。

3.3.4 全層の積層溶接条件

全層の積層溶接条件は固定して考える必要はなく、前記の Fig. 8, 10, 11 に示された適正領域条件を任意に組合せて、パス数に応じて溶着量の配分を行い、全量として開先を満し、かつ余盛を与えるものであればよい。Table 4 はこのようにして条件を組合せて得た5層仕上げとする積層条件の例である。記号 A, B, C は12時から6時を3区分に分けて、各区域における溶接速度を決め、溶着量が等しくなるように換算して溶接電流を定めたもので層別に溶着量配分の異なるものである。D は12時から6時を2段階に分けて決めたもので上向位置で4層目までの溶着量を減らして開先壁を残し、仕上層で開先壁に溶融金属をブリッジさせ平滑になるようにしたものである。これらの条件についての断面マクロの例を Fig. 12 に示す。この適正領域内における任意の溶接速度(すなわち溶接時間)の選択による溶接条件の設定によって、スプレッド工法で行われる各々の溶接ステージの溶接時間は任意の板厚・管径のもとで同一化することができる。

Fig. 12 Etched section for macrostructure observation.

3.3.5 オシレート法

パイプの下進溶接ではトーチを振ってアークを揺動することは、① 溶接金属の溶込形状を改善して耐われ性を良好にし、② 開先巾の変動に対してアークの追従性を良好にして融合不良を防止し、③ ビードの形状を平

滑にし積層しやすくするなどの利点がある。オシレートの中は開先巾に対して狭ますぎると開先壁に融合不良を発生させ、広すぎると開先壁をアークが伝わって燃え上げるバーンバックを起す。このような観点から実験した結果、オシレートの中はワイヤの先端が開先壁から 0.5 mm 点になるように選定するのが良好であった。オシレートの回数は溶接速度とのかねあいからピッチ巾(溶接速度/オシレート回数)で決めるのが適当である。このピッチ巾は狭ますぎると立向位置から上向位置にかけて溶融金属が中央に集りやすくなって融合不良を発生しやすく、広すぎるとピッチ間で開先壁を十分に溶かすことができなくなって、未溶融部が残る。この傾向はいずれの層でも同じで、層別にピッチ巾をみると中間層、仕上層、初層という順に狭くするのがよい。初層の裏波溶接では 2.8 mm/N、中間層の2~4層では 4.0 mm/N、仕上層では 3.5 mm/N が適当であった。

3.3.6 ビード継ぎ

ビードの始末端処理の所要時間を省略するため、12時位置の溶接スタート部と6時位置の終端部について検討することとし、まず始端部についてはソフトアークスタート制御を行った。すなわち初層の溶込不足をおぎなうためにあらかじめスタート部をグラインダー研削しておき溶接走行台車を走行させながら、低速度でワイヤを送給し、アークがスタートするとともにワイヤ送給速度をあらかじめ設定された勾配で徐々に定常速度になるまで制御する。そしてこの間、単位溶接長あたりの溶着量を減じ、かつ溶込みを得るため、台車走行速度は定常速度より速い速度で走行する。またビードの重ね合せ部は初層から順次、周方向にずらしてビードを形成した。このようにして2層目以降はグラインダー研削なしで融合不良の問題は生じなかった。

つぎに6時位置のビード継ぎは、左右振分けの下進溶接によるクレータとクレータを重ね合わせることで欠陥のないビード継ぎ部をつくることができた。クレータフィラは仕上層のほかは入れない方がよく、クレータフィラを入れると初層は裏波ビードが連なだけでなく、中間層の2~4層はビードが凸になる。仕上層のクレータフィラ

の条件は2段階で溶接電流、アーク電圧、クレータフィラ時間を制御する処理方法が良好であった。

これらの方法により、グラインダー等の処理をしないで始末端の適正ビードを得ることができ、溶接作業の省人化と高能率化が達成できた。

4. 結 言

海底配管の高速自動溶接システムの開発を目的に溶接動作をシーケンス制御するマイクロコンピュータによるプログラムコントロール自動溶接装置を用いて、その溶接施工法について検討した。結果を要約すると次のようである。

- 1) 海底配管の高速溶接施工法をノンギャップの狭開先片面下進溶接で確立し、能率、品質とも満足した。
- 2) 溶接欠陥のない適正溶接領域を積層別にマップ化し、このマップによる積層別の適正溶接条件算出法は任意の板厚・管径の鋼管のスプレッド工法での溶接条件設定を可能にした。
- 3) 第1ステージの初層溶接の適正溶接条件範囲を広げるため、二重開先の開先形状を開発した。

参 考 文 献

- 1) A. G. Barkow: Recent advances in the field of automatic welding of pipeline girth welds in the USA: pipe welding conference, 10~13 Nov., (1969), 11-20
- 2) F. G. Danhier et al: Automatic orbital welding on pipework and pipelines, *ibid* 26-29
- 3) Narita et al. "Mechanical Welding System and Joint Properties for Offshore Pipeline Laying" I. I. W. Doc. XI-320-76
- 4) E. A. Minkiewicz: French group develops new field automatic welding unit: Pipe line industry Oct. (1979) 47~52
- 5) H. C. Cotton: Automatic welding of transmission-pipelines: Pipe line contraction association, 9th Annual convention, Oct. 1975
- 6) R. L. Jones et al: Automatic welding of Marine Pipe line on the Semac I Lay Barge: Weld. J. 57-9, (1978) 15-21
- 7) S. Ohsita: Solidification Cracking in Welding of Very-Low Carbon Steel, 63rd Annual AWS Convention April, 1982
- 8) 日本学術振興会製鋼第19委員会編: 鉄鋼と合金元素(上) 誠文堂新光社 p. 347~390