

UOE 大径鋼管製造への4電極サブマージーク溶接の適用

Application of 4-wire Submerged Arc Welding Method to Process of UOE Pipe

川 端 文 丸*
Fumimaru Kawabata

山 口 忠 政**
Tadamasa Yamaguchi

志 賀 厚***
Atsushi Shiga

美 浦 一 彦****
Kazuhiko Miura

上 垣 達 文*****
Tatsufumi Uegaki

小 西 博 典*****
Hironori Konishi

Synopsis:

In the process of UOE pipe making, welding process is usually the bottleneck. In these days when pipe thicker than one inch is often made, welding productivity per hour is relatively smaller than that of other up stream processes.

Considering this situation, a speed-up of submerged arc welding was planned, employing a 4-wire welding method, to raise the productivity. In completing the 4-wire welding method, efforts were made to investigate the electrode connection and the functions of each electrode in forming the bead shape. As a result, the welding speed increased by 30 percent compared with the conventional 3-wire welding method, with an added merit of the slag inclusion reduction by optimization of the current condition.

1. 緒 言

UOE 大径鋼管の製造工程は成型、溶接、精整、検査と多種多様であるが、その中で溶接工程はラインの生産能力、製品の品質あるいは歩留り等を左右する極めて重要な工程である。当社はこの溶接工程に他社に先がけてサブマージークの3電極溶接を採用し、高能率な溶接を行ってきた。

しかし、最近大径鋼管の需要はさらに増加する傾向を示しており一層の能力向上が必要となってきた。そこで溶接工程の能力をさらに向上させる方法として4電極溶接の導入により溶接速度を引き上げることが検討した。

4電極溶接を板厚6.35mm (0.25インチ) から38.0mm (1.50インチ) までの広範囲の溶接に実用するには、各電極の作用機能を明確にし、供給する電流の位相や電流値、電流比等を適正に選択する必要がある。

本稿は4電極溶接を実用するまでの検討結果および実用化後の成果を報告するものである。

2. 結線方式の選択条件の検討

多電極溶接においては電流、電圧等の条件が同一でも各極の電流位相によってビード形状が大きく変わることが知られている¹⁻⁵⁾。4電極溶接の電流位相の選び方は電源が3相交流のため30°きざみ

* 千葉製鉄所熱間圧延部熱延技術室
*** 技術研究所第2研究部溶接研究室主任研究員 (課長)
***** 千葉製鉄所熱間圧延部熱延技術室
〔昭和57年6月25日原稿受付〕

** 技術研究所第2研究部溶接研究室主任研究員 (掛長)
**** 千葉製鉄所熱間圧延部熱延技術室主任 (課長)
***** 千葉製鉄所熱間圧延部造管課課長

で選択でき、その種類は1000通りを超える。この中から最適結線を選択する必要がある。

これまで3電極溶接方法を確立するに当って、3極目のアークが電磁力によって偏向される方向と偏向の強さがアンダーカットの発生状況に大きく関係する²⁾ことを把握している。

そこで今回4電極溶接方法を検討するに当っても、各電極の状態を単純化したモデルにより最後極(第4電極)に作用する電磁力の状態を算出し、その中で代表的な位相を選び溶接結果との関係を調べた。

2・1 各結線方式における第4電極の電磁力の計算

4電極溶接において各電極の電流が作る磁界によって生じる電磁力の大きさは、電流の位相、電流値、電極配列、間隔により変化し、第4電極アークの軸方向の中点に働く溶接方向(x)の電磁力 F_{x4} (実効値)はFig. 1に示すモデルに次の3つの仮定を設けると(1)式で表わされる³⁾。

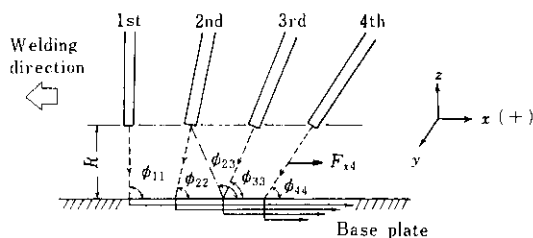


Fig. 1 Schematic model used for calculation of electromagnetic force

- (1) アーク電流は電極延長線上を流れる。
- (2) 母板表面とワイヤ溶融端の距離 R は一定($\approx 10^{-2}\text{m}$)である。
- (3) アース電流は溶接線上を後方(x 方向)へ流れる。

$$F_{x4} = \frac{\mu_0 I_4}{2\pi R} \left\{ \sum_{j=4}^4 I_j \cot \frac{\phi_{4j} - \phi_{jj}}{2} \sin \phi_{4j} \sin \phi_{44} \cos \theta_{4j} - \sum_{j=1}^4 I_j (1 + \cos \phi_{4j}) \cos \theta_{4j} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

j : 電極の番号

I : 実効電流

θ_{4j} : 第4電極電流と第 j 電極電流の位相差

ϕ : Fig. 1に示す電極傾度

R : 母板表面とワイヤ溶融端の距離

μ_0 : 真空中透磁率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$)

F_{x4} が負値のとき電磁力は溶接進行方向に働いている。

(1)式より実用化の容易な結線についてTable 1に示す溶接条件における F_{x4} を計算した。その中でTable 2に示すように F_{x4} の値が広範囲にわたるようにして22種類の結線を選んだ。

2・2 溶接欠陥に及ぼす結線方式の影響

第4電極アークに作用する電磁力 F_{x4} の値から選択した22種類の結線につき代表的な溶接欠陥であるアンダーカットの発生状況を調査した。

溶接は、Table 1に示す条件を用い溶接速度を220cm/min, 240cm/min, 260cm/minと3段階に変え、フラックスとしてTable 3に示す焼成型フラックスAと現在当工場で用いている溶融型フラッ

Table 1 Welding condition and wire arrangement used

E-No.	I (A)	E (V)	e (mm)	ϕ (deg.)	l (mm)
1	1150	38	25	0	13
2	1050	42	25	15	13
3	900	42	30	30	
4	800	42	35	45	13

E-No.: Electrode number

I : Current

E : Voltage

e : Wire extension

ϕ : Wire inclination

l : Wire spacing

Table 2 Phasing sequences and electromagnetic force acting on the fourth arc

No.	θ_2^* (deg.)	θ_3^* (deg.)	θ_4^* (deg.)	F_{x4} (N/m)
1	-90	90	0	-43.0
2	-90	90	-30	-39.3
3	-120	90	0	-29.8
4	-90	120	0	-29.7
5	-90	120	30	-26.1
6	120	90	-30	-26.0
7	-90	150	-30	-25.9
8	-90	120	-60	-25.6
9	-90	180	0	-16.4
10	-120	120	0	-16.4
11	-120	120	30	-16.4
12	-120	120	-60	-15.8
13	-90	90	-90	-15.3
14	-120	0	-120	-14.9
15	-120	150	-30	-12.7
16	-90	150	30	-12.7
17	-120	90	-90	-11.8
18	-90	150	60	-6.3
19	-120	150	30	-3.0
20	-120	150	60	-2.7
21	-90	180	90	11.1
22	-120	0	1180	25.5

* θ_2 , θ_3 , and θ_4 indicate phase angle between the first and other three electrode current

クスFの2種類を用いた。アンダーカット発生率(UC)は次の(2)式で定義した。

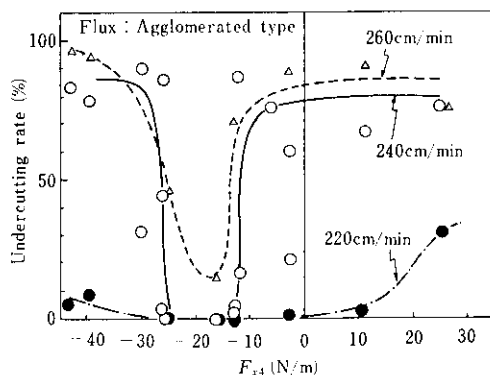
$$UC = \frac{\Sigma l_c}{2 \cdot L} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

L : 溶接した長さ

Σl_c : 発生したアンダーカット長さの総和

Fig. 2 は3水準の速度について焼成型フラックスAを用いた場合の各種結線すなわち F_{x4} とアンダーカット発生率の関係である。アンダーカットの発生は溶接速度が220cm/minと速くないときは F_{x4} の影響をあまり受けないが速度が速くなるにつれ顕著な影響を受け、 $-25 < F_{x4} < -15$ (N/m) の範囲にある時、すなわち溶接進行方向にある適正な範囲でアークが偏向されるとき減少している。このような最後極アークが溶接進行方向に適当に偏向されたときアンダーカットが抑制される現象は3電極法でも経験している^{2,4)}。

Fig. 3 は同様の評価を溶融型フラックスFを用いて行った結果である。溶融型フラックスの場合は焼成型に比しアンダーカット発生に対する結線の影響は小さい。しかし、 F_{x4} が溶接進行方向に過大 ($F_{x4} < -25$) の場合、溶融金属が不規則に広げられ蛇行ビードになる。逆に F_{x4} が溶接進行方向とは逆の方向に過大 ($F_{x4} > 15$) の場合、溶融金属の後方への流れを阻止する力がなくなり凸

**Fig. 2** Effect of electromagnetic force acting on the fourth arc (F_{x4}) on undercutting rate**Table 3** Chemical composition of fluxes used

Flux	Chemical composition (wt%)							
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	CaF ₂	ZrO ₂
A	28	11	13	8	5	13	14	—
F	35	10	5	5	21	6	10	6

A : Agglomerated type

F : Fused type

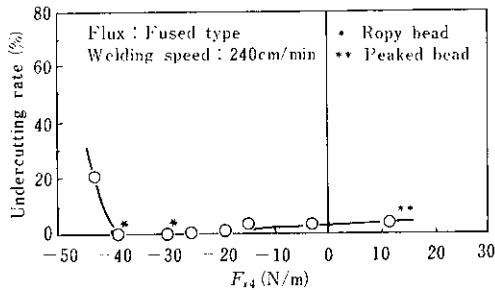


Fig. 3 Effect of electromagnetic force acting on the fourth arc (F_{x4}) on undercutting rate

ビードになる。このようなアンダーカット以外のビード外観の面からやはり適正な F_{x4} は $-25 < F_{x4} < -15$ である。

以上の結果、適正結線はどのようなタイプのフラックスでも $-25 < F_{x4} < -15$ の範囲から選択すればよい。

3. 各電極の作用機能

4電極法を実用化するためには、対象とする種類の板厚に対し所定の溶込み深さと溶着量を与え、かつ、内部および表面に欠陥が発生しない溶接条件を決定する必要がある。そのためには、高速溶接時におけるビード形成に対しての各電極の機能を十分に把握することが必要である。そこで種々の溶接速度において4電極溶接時のビード形成過程を調べ、各電極の機能を考察した。

3.1 実験方法

Table 4に示す開先を加工した鋼板にTable 1に示す条件を基本とし通常のように第1電極から第4電極まで同時にアークを点弧するのでなく、第

1電極から時間を置きながら順次アークを点弧してゆき各部所から横断面マクロ試験片を採取して4電極溶接のビード形成過程を調べた。

溶接速度は85cm/min、120cm/min、220cm/minの3段階で、結線方式は F_{x4} 値がほぼ -15 N/mとなるFig. 4に示す結線を用いた。また、フラックスは熔融型フラックスFを、ワイヤーはすべて4.0mmφのものを用いた。

Fig. 5は横断面マクロ試験片から測定した各電極を点弧した時の溶込み深さ(P)とビード幅(W)を、またFig. 6はそれらを最終的に得られた溶込み深さ(P)とビード幅(W)に対して示したものである。またPhoto. 1は溶接速度220cm/minのときの各部分の横断面である。

3.2 各電極の機能

(1) 第1電極の機能

Fig. 6に示すように最終的な溶込み深さの60~90%が第1電極によって形成されており、溶接速度が低速になるほどその割合が増加している。いっぽう、ビード幅の方は20~40%しか形成されておらず、第1電極のみではPhoto. 1に示すようにビードはほとんど形成されていない。したがって、第1電極の機能はドリリング作用¹⁾である。

(2) 第2電極の機能

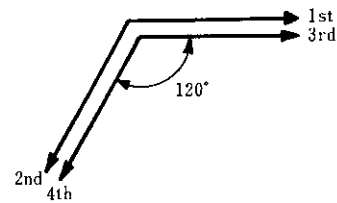


Fig. 4 Selected phase shift of each electrode's current (optimum connection)

Table 4 Configuration of V-groove and welding speed used

220cm/min	120cm/min	85cm/min

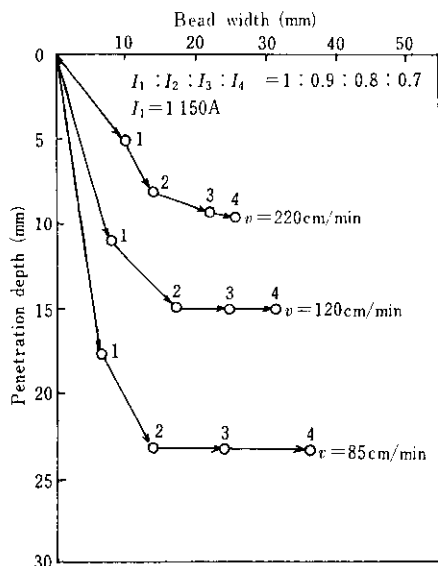
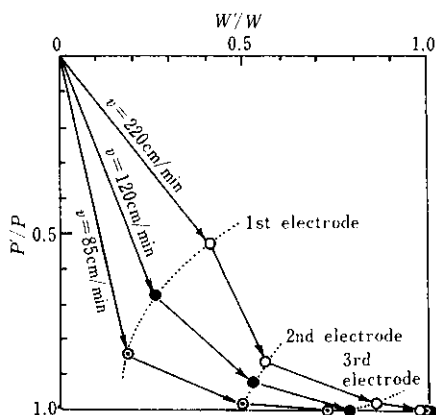


Fig. 5 Contribution of each electrode arc to penetration depth and bead width
Figures show the electrode numbers



W, P: Final bead width and penetration depth
W', P': Bead width and penetration depth after each pass

Fig. 6 Contribution ratio of each electrode arc to final bead shape

Fig. 6に示すように第2電極までで最終的な溶込み深さの85%以上が形成されているのに対し、ビード幅の方は50~60%にとどまっている。断面形状もPhoto. 1に示すように底部にはスラグ巻込みがあり、両端にはアンダーカットが全面的に発生しており、正常なビードはまだ形成されていない。これらから第2電極の機能もドリリング作用が主であるといえる。

(3) 第3電極の機能

Photo. 1の断面形状をみると、第3電極の追加により溶込み深さはわずかに増加しているだけであるが、底部の曲率が大きくなるとともにビード幅も広げられ、一応滑らかな余盛も形成されている。このような形状の変化から、第3電極は第1、第2電極から流れてくる溶鋼を押し止め幅方向へ押しやって¹⁾ビード幅を広げながらその溶鋼を通じて熱伝導的に溶融池を拡大しているものと思われる。第3電極のこのような作用はビードの形状を決定する基本となると共に、スラグ巻込み等の内部欠陥を防止する重要なものである。

(4) 第4電極の機能

第4電極は溶込み深さや底部の形状の変化にはほとんど関与せず、ビード幅をさらに拡大し表面形状を平滑にしている。したがって、第4電極の作用は第3電極の溶鋼の後方への流れを止めて幅方向へ押しやる作用をさらに進めて、最終的に表面形状を整え、アンダーカットなどの表面欠陥を防止することである。

4電極溶接で溶接速度を大きく向上できるのは3電極溶接では第3電極に内部欠陥の防止と表面形状を整える二つの機能を持たせなければならぬのに対し、4電極溶接では第3電極に内部欠陥の防止を、第4電極に表面形状の精整をと、それ

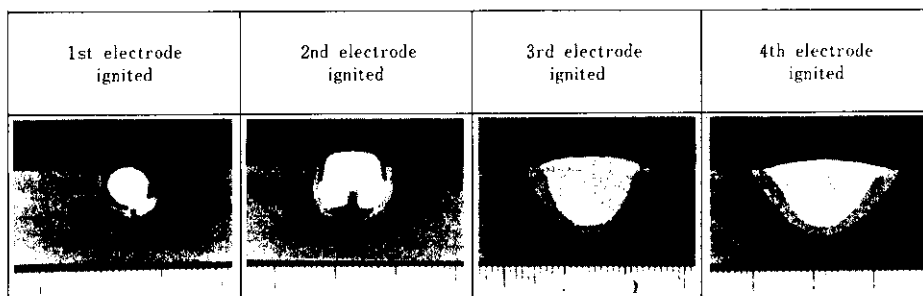


Photo. 1 Cross sectional change of weld bead at welding speed of 220 cm/min

ぞれ機能を分担できるためである。

4. 実生産ラインへの適用

実際のパイプを溶接する場合には、十分な溶込み深さと適正な溶着量が得られることと、アンダーカットやスラグ巻込みのような溶接欠陥が発生しないことが要求される。溶込み深さと溶着量は、3電極溶接の条件設定を延長してトータル電流と溶接入熱を考慮することにより比較的容易に設定できる。

溶接欠陥のうちアンダーカットは前述のように適正な結線を選択することで対処できる。

4.1 スラグ巻込みの防止

スラグ巻込みはPhoto. 2で見られるように溶込み底部に溶融スラグが付着し、浮上しないで残留したものである。この付着したスラグを浮上させるには第3、第4電極の機能をうまく使う必要がある。第4電極は溶込み底部までの影響力はほとんどないため、補助的役割と考えるべきで、実質的には第3電極が主体となる。

Table 5は実際のパイプの溶接において第3電極の電流を変えることによってスラグ巻込み発生率が大きく変わった例である。このように第3電極の電流を適当に選択し、溶融池底部を熱伝導で少し溶融すると共に溶鋼を攪拌して溶融池底部に付



Photo. 2 Typical view of slag inclusion in external weld bead

Table 5 An example of reduction of slag inclusion by changing electrode current ratio

Condition-1	Condition-2
18.2%	2.0%

Condition-1: $I_1 : I_2 : I_3 : I_4 = 1 : 0.86 : 0.6 : 0.55$

Condition-2: $I_1 : I_2 : I_3 : I_4 = 1 : 0.82 : 0.7 : 0.55$

着したスラグを浮上させることによりスラグ巻込みは大幅に減少できる。Fig. 7はこのような状態における溶込みの状況を示したものでスラグ巻込みが大幅に低減したときの第3電極の溶込みへの寄与率 ΔP_3 は15%となっている。したがって、このような溶込み状態となるような電流比が良くこれを得るためには第3電極電流を第1電極電流の65~75%にすればよいと考えられる。

Photo. 3は従来の3電極法と現状で最適と考えられる条件での4電極法のビード断面形状を比較したものであるが、4電極法の溶込み底部は曲率が大きくスラグ巻込みが発生しにくい形状となっている。

4.2 溶接速度の向上

Fig. 8はUO工場で実用中の4電極溶接の溶接速度を従来の3電極溶接のそれと比較して示したものである。

4電極溶接にすることによって溶接速度が肉厚1.0インチ以上のパイプでは50%、1.0インチ~0.5インチのパイプではほぼ30%、0.5インチ以下のパイプでは20%向上している。このような速度の増加に対してもアンダーカットの発生は増加することなく、スラグ巻込みは第3電極に防止機能をもたせることにより半減させることができた。

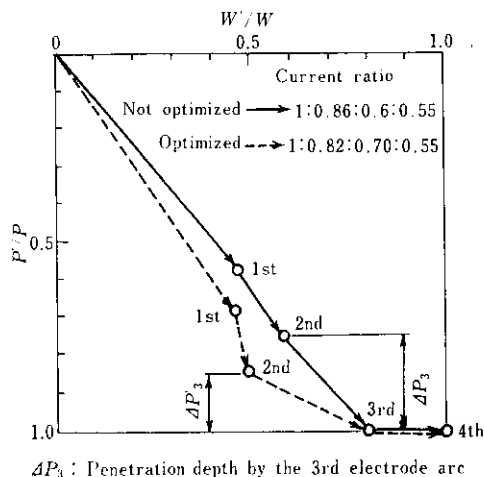


Fig. 7 Penetration depth and bead width by the conditions shown in Table 5

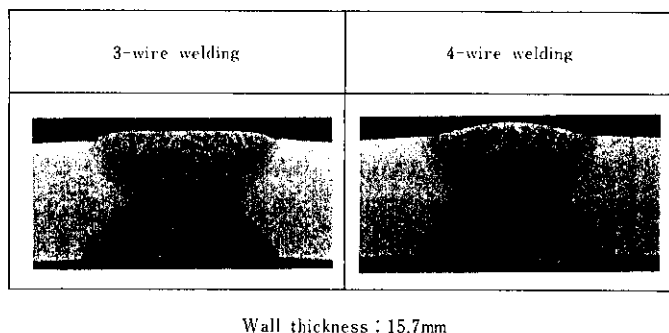


Photo. 3 Comparison of cross sectional view of weld bead by 4-wire welding with 3-wire welding under appropriate welding conditions

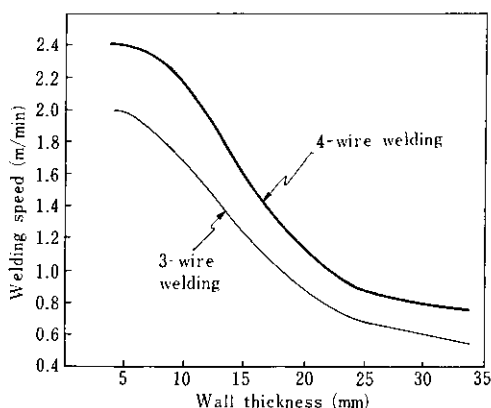


Fig. 8 Comparison of the welding speed between 4-wire welding and 3-wire welding

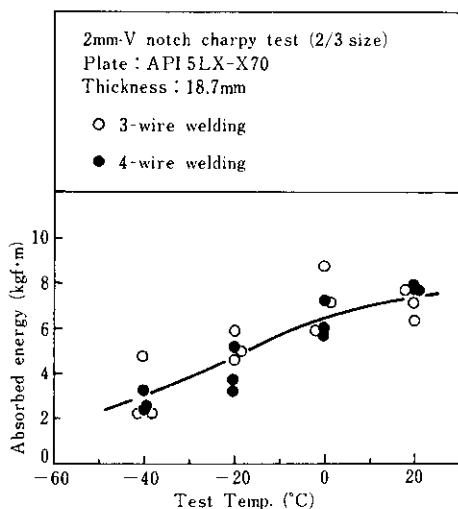


Fig. 9 Toughness of deposited metal welded by 3-wire welding and 4-wire welding

4.3 溶接金属の性能

Fig. 9は厚さ18.7mm、グレードX70の工程鋼管において3電極法と4電極法の溶接金属のシャルピー衝撃値を比較したものである。

溶接条件はTable 6に示すように大きく異なっているが、溶接入熱はほとんど変わらず、シャルピー衝撃値にも有意な差は認められない。しかし、4電極溶接は溶接速度が速くなっているのと溶融池が長くなっているためか、溶接金属中の窒素が少し増加する場合もあり、溶接するパイプの成分

Table 6 Standard external welding conditions for 18.7mm thick pipe

Welding	E-No.	I (A)	E (V)	v (m/min)
3-wire	1	1100	35	1.3
	2	830	44	
	3	690	44	
4-wire	1	1170	35	1.7
	2	900	40	
	3	760	40	
	4	600	40	

によっては窒素増加の影響を検討する必要があるだろう。

5. 結 論

4電極サブマージアーク溶接法を実用化し、実

ラインに適用した結果、次の成果が得られた。

- (1) 4電極溶接にすることによって3電極溶接に比し溶接速度が板厚に応じて20～50%向上する。向上率は厚肉の場合ほど大きい。
- (2) 4電極溶接にすることによって溶接速度を増加しても、アンダーカットは増加することなく、スラグ巻込みはほぼ半減する。また、溶接金属のじん性はほとんど変わらない。

また、この方式では下記の結線方式、電流条件を適正とし、各電極の機能は(3)のとおりであった。

- (1) 4電極溶接における結線は第4電極のアークに作用する電磁力 F_{x4} が $-25 < F_{x4} < -15$ (N/m) になるようなものを選ぶ必要がある。
- (2) 4電極法における第3電極の電流比は、スラグ巻込み防止のために、極めて重要で、第1電極電流の65～75%に設定すればよい。
- (3) 4電極溶接において、第1電極、第2電極は母材の堀削機能を、第3電極は溶込み形状の精整および表面形状の精整機能を、第4電極はビード表面の平滑化の機能を有する。

参 考 文 献

- 1) 坪井、赤秀他：“三電極高速サブマージアーク溶接法について”，溶接学会第49回溶接法委員会資料，(1974)
- 2) 赤秀，阿草他：“鋼管の三電極サブマージアーク溶接における結線方式と溶接欠陥の関係”，溶接学会第67回溶接法委員会資料，(1978)
- 3) H. Nomura *et al.* : “The effect of Transformes Phasing on Weld Bead Formation in Multi Electrode Submerged Arc Welding”, IIW XII-A-166 (1979)
- 4) U. Dilthy *et al.* : “Using the four wire electrode submerged arc welding process for the production of longitudinally welded pipes”, Welding Institute 2nd International conference on pipe welding, (1979)
- 5) C. Düren *et al.* : Welding and Metal Fabrication, (1981), 205