論文および報告

アーク溶接現象に関する界面張力理論 (第10章)*

—アークの間接作用による溶込み—

石 崎 敬 三** 神 戸 良 雄**

Interfacial Tension Theory on the Phenomena of
Arc Welding (Chapter 10)*

—The Penetration by Indirect Heating of Arc—

By Keizo Ishizaki** Yoshio Kanbe**

Abstract

The authors investigated the change of penetration shape with time of wide range, and the influence of atmospheric condition and slag addition to the molten pool upon the penetration by fixed TIG arc hitting the mild steel plate.

After discussing the result obtained, we have come to the following conclusion.

- 1) The shape of penetration, in general, changes in the undermentioned series with the time lapse; a) central type b) peripheral type and c) simple type.

Such a change can be explained by the change of convectional mode in the molten metal corresponding to the distribution of arc current on the surface of the molten pool.

- 2) Conical or saucerpan-like penetration obtained in Nitrogen atmosphere seems to be a modified central type caused by the characteristic turbulent state of molten pool.
- 3) Deep penetration of simple type in the hydrogen rich atmosphere or under the very viscous slag such as silica shows the effect of concentrated arc.
- 4) If the molten metal is added to the molten pool, the central part of penetration surface is re-solidified leaving the peripheral penetration of ring-shape. This fact proves the existence of radial surface flow caused by the difference in surface tension.

10.1 ま え が き

第9章¹⁾で、軟鋼板上の固定 TIG トーチによる溶込み現象を観察した結果、母滴が溶込み面を覆ったままで生成する周辺溶込み型 (P型) および単純型 (S型) の溶込みと、母滴の中央部が深くくぼんだ時に生成する中央溶込み型 (C型) の溶込みを明瞭に区別することができた。

ここではC型の生成機構として、溶融金属が排除された溶込み面の底に対するアークの直接作用について詳述したが、P型の生成機構としてのべた表面張力差に基づく表面流については実証も考察も十分でないと思われる。

本章ではこの点に中心をおいて、一層広範な条件下で行なった溶込み実験の結果についてのべ、各種の溶込み

型相互の関係と、その生成機構について考察を加えることとし、次の各節に分けて論じる。

溶接条件による軟鋼溶込み形状の変化

- (1) 長時間アークが作用したときの溶込み形状の変化
- (2) アーク雰囲気の影響
- (3) 各種化合物および溶接棒スラグの影響

表面張力対流の実証

- (1) パラフィンと氷の溶融現象
- (2) 溶融金属を追加した場合の溶込み形状

溶込み生成機構

- (1) 単純型溶込み形態の細分
- (2) アークの作用位置による溶融金属内の対流の変化
- (3) アークの拡がりとプラズマジェット
- (4) 中心溶込みの成因

10.2 溶接条件による軟鋼
溶込み形状の変化

* 原稿受付 昭和40年8月6日 (昭和40年度溶接学会春季全国大会にて発表)

** 正 員 八幡溶接棒研究部 Member, Yawata Welding Electrode Co., Ltd.

(1) 長時間アークが作用したときの溶込み形状の変化

軟鋼に対する固定 TIG アークの作用について, 前章と同様の実験をさらに長時間にまで行なって見た。陰極はトリエード・タングステン電極, 径 $D=3.2\text{ mm}\phi$ で先端は一回毎にグラインダーでとがらした。アーク長さ $L=10\text{ mm}$, 電流は 200, 300 および 400 Amp である。Fig. 10.1 には断面を重ねて溶込みの成長を見易く示した。前章の実験では打撃法により溶込面を現出させアル

Fig. 10.1 Growth of penetration surface with time and current in Ar atmosphere

Fig. 10.2 Change of Penetration shape with time and current in Ar atmosphere

ギン印象材によりその中央縦断面を作成したが, この実験ではすべてマクロエッチ法を併用して断面形状を求めており一層正確である。また Fig. 10.2 には C: 中央溶込み深さ, P: 周辺溶込み深さ, $D/4$: 溶込み直径の $1/4$, 等の時間に対する変化を図示した。

200 Amp. の場合, 5 sec では P 型であるがそれ以後中央部が急激に深くなる。溶込み直径は 20 sec までは大きくなるがそれ以後はほとんど変わらないので, 溶込み断面形状は平底形から深い丸底形になってゆく。溶込みがある程度大きくなってからは, 溶融金属は完全に溶込み面を覆っている。

300 Amp. の場合, 短時間では C 型でその後 P 型になる。3 回の繰返し実験で 5, 10, 15, 20 sec と時間が長くなるにつれ C 型の出現頻度は $3/4$, $2/3$, $1/3$, 0 と減少した。20 sec 以後 P 型の形のままで周辺部の溶込みは深くなるが, 中央部との差がしだいに少くなり, 100 sec 以後は平底状の S 型になる。溶込み直径は 60 sec 以後は飽和する。肉眼観察では溶融池中央の深いピットはアーク発生後 3 sec で消失した。

400 Amp. では 30 sec まで C 型であるが周辺部の溶込み深さが急激に増して 30 sec で中央部と同じになり, これ以後は平底形の S 型に変化してゆく。溶込み直径は 30 sec 以後はあまり増加しない。中央部の溶込みは 5 sec でかなりの深さに成長し, 以後 10 sec でやや浅くなり, さらにその後時間の経過と共に再度深くなる。中央部で再凝固が起ることは, 溶融池中央の深いピットが 6 sec までは認められるが 10 sec 以後はなくなり, 溶融池表面の浅いくぼみだけになることと対応していると思われる。

すなわち, 300 および 400 Amp では溶込形状は最初 C 型でこれが P 型に変わり最後に S 型になるようである。また C 型の生成は母材露出面の生成に伴うことが確認された。

(2) アーク雰囲気の影響

Photo. 10.1 State of arc and molten metal in N_2 atmosphere
gas; 15 l/min D ; 3.2 mm ϕ
 I ; 400 Amp. T ; 20 sec.

N_2 雰囲気中でタングステンアークで加熱すると、Photo. 10.1 に示すように溶融池は激しく沸騰したように動揺し、このためか溶込み面は Ar の場合に比し大で、浅いすり鉢状または平底形の溶込みを示す。また溶込み角は小さい。(Fig. 10.3)

Fig. 10.3 Growth of Penetration with various time and current in N_2 atmosphere.

Ar 中に H_2 を約10%添加すると、アーク電圧は約10 V 増加する。アークそのものはややおとなしくなる程度であり変わらず、溶融池の表面はくぼむが露出面が発生するには至らない。(Fig. 10.4) 300 Ampでは5 secですでに Ar 中 40 sec に相当するような中央がわずかに高い平底形またはひずんだS型で、15 sec での溶込みははなはだ深い丸底形である。400 Amp 1 sec ではわずかに中央溶込みがあるC型であるが3 sec 以上ではひずんだS型となり15 sec でははっきりした型となる。

Fig. 10.4 Growth of penetration with various time and current in $(Ar+H_2)$ atmosphere.

かであるが、 N_2 を少量添加することで明らかに沸騰が発生し、浅いS型の溶込みが形成される。アーク長はいずれも10 mm であるが N_2 の添加によりアーク電圧は著しく高くなる。

Fig. 10.5 Comparison of penetration in gas mixture of various Ar and N_2 ratio.

Fig. 10.6 は N_2 中に H_2 を少量添加した場合の影響を調べたものである。 H_2 の添加により溶融池はややおとなしくなるようであるが沸騰現象が消失することはない。溶込み深さは水素の添加により深くなり、溶込み角度も大になるようである。

Fig. 10.6 Comparison of penetration in mixture gas of various H_2/N_2 ratio.

Photo. 10.2 State of arc and molten metal in $(90\%-Ar-10\%H_2)$ gas mixture
D ; 3.2 mmφ I ; 400 Amp.
T ; 10 sec.

(3) 各種化合物および溶接棒スラグの影響

各種化合物および Table 10.1 に示した成分の各種溶

Fig. 10.5 に溶融条件 400 Amp. 20 sec で Ar と N_2 の混合量を種々変えた場合の溶込み形状を示す。Ar のみでは溶融池表面の状態はきわめておとなしいが、 N_2 を添加すれば溶融池の沸騰が激しくなり、 N_2 を 27% 加えれば 100% N_2 中での状態とほとんど変わらない。また N_2 の添加量が多くなるにつれて溶込み幅がやや広くなり溶込み角度が小さくなるようである。Ar のみでは 400 Amp. 20 sec の条件ではC型、P型のいずれ

Table 10.1 Chemical analysis of various coated electrodes tested

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	CaF ₂
D 4301	28.3	20.1	6.2	11.9	22.7	4.9	1.4	—
D 4303	25.0	36.3	3.6	3.5	13.5	9.4	4.7	—
D 4411	24.8	16.1	10.8	16.3	12.7	0.6	3.3	—
D 4316	17.1	6.4	0.8	13.7	2.4	35.0	0.3	14.8
D 4320	41.7	1.5	7.4	20.3	21.8	0.5	1.7	—

接棒フラックスの影響を調査した。スラグをアーク直下に供給するには各原料を適量の硅酸ソーダで混和し板状にのびし乾燥した棒状の固形物をアークフレーム中に挿入した。その際アーク中心部のプラズマジェット流をできるだけ乱さないように注意して行なった。溶融条件は 400 Amp. 10 sec である。

Ar 中ではこの溶融条件では Fig. 10.1 に示すように中央に深い溶込みをもったC型の溶込みを生ずるが、これにスラグ、酸化物を添加するとこれとは異なった溶込みを生ずる。溶融池表面の状況は Ar のみの雰囲気では静かで動揺しないが、フラックスを添加すると特徴的な変化が生ずる。すなわち、

1. スラグとメタルが分離して中央部にメタルが露出する。溶融池表面はしずかである。(D 4316, Fe-Mn, Fe-Si)
2. 溶融池表面が沸騰状を呈する。(Fe₂O₃ イルミナイト, Cr₂O₃, D 4301, D 4320)
3. 高融点の盛り上ったスラグが溶融池周辺に生ずる。(SiO₂)
4. スラグとメタルの境界ははっきりしないが溶融池表面はしずかである。(D 4303, D 4311, TiO₂, CaCO₃, Al₂O₃, CaF₂)

それぞれの1例を Photo. 10.3~Photo. 10.6 に示す。

Photo. 10.3 State of arc, molten metal and molten slag in case of adding D4316 slag in Ar atmosphere
D ; 3,2 mmφ I ; 400 Amp.
T ; 10 sec.

Photo. 10.4 State of arc, molten metal and molten slag in case of adding Fe₂O₃ slag in Ar atmosphere
D ; 3,2 mmφ I ; 400 Amp.
T ; 10 sec.

Photo. 10.5 State of arc, molten metal and molten slag in case of adding SiO₂ slag in Ar atmosphere
D ; 3,2 mmφ I ; 400 Amp.
T ; 10 sec.

Photo. 10.6 State of arc, molten metal and molten slag in case of adding TiO₂ slag in Ar atmosphere
D ; 3,2 mmφ I ; 400 Amp.
T ; 10 sec.

溶込み形状を Table 10.2 のように分類し溶融池表面状況と対応させた結果を Table 10.3 に示す。Table 10.3 より溶融池表面状況と溶込形状との対応頻度を Table 10.4 に示す。

これより次のことが言える。

1. スラグが溶融池を半ば覆うときは溶込みはP型の中央部がくずれて中央部の盛り上りが減少したものであ

Table 10.2 Classification of penetration types obtained in this experiment

type	shape of penetration	remarks
P		typical peripheral penetration with shallow central bottom (high arc voltage in Ar)
P-1		peripheral penetration with flat bottom (Fe-Si)
P-2		deep peripheral penetration with small flat bottom (in Ar-H ₂ , 10 sec)
P-3		deep pot-like penetration (in Ar-H ₂ , 15 sec)
C		typical central penetration (in Ar)
C-1		central penetration with demolished shoulder (TiO ₂)
C-2		conical shape with deep central penetration (D4311)

Table 10.3 Shapes of penetration surface under various slags and oxides in reference to the state of molten pool.

State of molten pool ;

1. slag and metal separate each other, and base metal is exposed at the bottom of penetration,
2. molten metal is turbulent
3. periphery of molten pool is covered by viscous slag
4. slag seems to cover completely over the quiet molten metal

Melting condition ;

I ; 400 Amp., T ; 10 sec., Gas ; Ar 15 l/mn, D ; 3.2 mmφ

	shape of penetration surface	state of molten pool under arc	penetration type
D 4301		2	C-2
D 4303		4	P-1
D 4311		4	C-2
D 4316		1	P-1
D 4320		2	C-1
Fe-Si		1	P-1
Fe-Mn		1	P-1
Al ₂ O ₃		4	P-1
CaCO ₃		4	P-2
TiO ₂		4	C-1
Cr ₂ O ₃		2	C-2
Fe ₂ O ₃		2	C-1
iluminite		2	C-2
SiO ₂		3	P-3
CaF ₂		4	P-2
no flux			C

る。

2. 溶融池表面が沸騰状を呈するときは中央部の深いすり鉢状の溶込みを生ずる。

3. 融点の高いスラグが溶込み周辺に存在するときは

深い丸底形の溶込みを生ずる。

4. スラグ、母滴が一樣で溶融面の動揺がないときは溶込みはP型またはC型の変形であり、C型の肩部の溶れたものまたは中心部の深いすり鉢形か、P型がくずれ

Table 10.4 Correlation of penetration types and the state of molten pool under arc.

State of molten pool under arc	types of penetration surface	frequency
1	P-1	3
2	C-1	2
2	C-2	3
3	P-3	1
4	P-1	2
4	P-2	2
4	C-1	1
4	C-2	1

て中央部の盛り上がり減少したものまたは平底形の溶込みを生ずる。

スラグ添加により, このような溶込面に変化が生ずるのは 1) 露出面の消失 2) 溶融池の動揺 3) アークの発生位置の変化等が生じて溶融金属内の対流状況を変えるものと考えられる。スラグ, 各種化合物の効果は一般的に溶込みを平均化するとと言える。すなわち, スラグを用いなければ, 当然C型が生ずる条件にもかかわらず, スラグ添加により大部分の場合に溶融池表面に何ら

かの変化が生じ, 溶込みは多少の変動はあるが各種のS型または遷移型になるようである。

10.3 表面張力対流の実証

1) パラフィンと水の溶融現象

アークによる金属の溶融現象は金属表面に与えられる熱源としてのアーク電流の分布状態が不明なため解析がとくに難しい。金属以外の固体に一定の形状の熱源を接触させたとき, 固体はどのように溶解してゆくか。もし一般に熱源の形と溶込み形状の間に関係が得られたなら, 逆にアークによる溶込み形状からアークによる加熱状態を知ることができるであろう。

供試物質は氷およびパラフィンで直径 30 mm の円筒形のカンに満して凝固させ, 表面をナイフで平面に削った。熱源として電気ハンダゴテをこの上に垂下し, 銅のコテの先に 1) 先の尖った鉛筆サック 2) 直径 8 mm の黄銅棒 3 直径 14 mm のボルトの頭をそれぞれさしこんだ。

冷蔵庫中で約 -5°C に冷却した供試物体を取出し, 加熱体の先端を僅かに固体の表面に近づけると, 固体は

Photo. 10.7 Sectional and surface appearance of male mould (oiled clay) of the melting surface in ice and paraffin caused by contacting the various shape of heat source.

ただちに溶融しはじめる。その液に先端を接触させたまま、1~2mm 経過後容器をかえし、液体を流したあとその凹部に人肌で温めた油粘土を押しこんで型をとった。

Photo. 10.7 にはできた溶融面の粘土型の断面と表面(逆に凸面になっている)を加熱体と一緒に示した。氷でもパラフィンでも点熱源に近い鉛筆サックの場合は溶込み形状はこれまでのべた丸底の S 型と全く同じものができた。2) および 3) の円盤形の熱源の場合は浅い平底形の P 型に近い溶込み形状である。これらの特徴は数回の繰返し実験で確かめられた。

さらに供試物質の液体は透明で混入したごみにより対流の様子は明らかに認められたが、どの場合も表面流は外向きで底部で求心的環流となっていた。これらの溶込み形状はそのような対流の作用により十分説明されるようなものである。

表面流は勿論前章でのべたように加熱によって生じた表面張力差によることは明らかである。金属の溶融時にもこのような対流は起り得るであろう。

(2) 溶融金属を追加した場合の溶込み形状

固定 Tig アークで、300 A、20 sec 軟鋼を加熱すれば P 型、400 A、20 sec では C 型の溶込みとなることは Fig. 10.1 に示したが、アーク発生初期に少量の軟鋼心線をアーク中に挿入し溶融金属を溶融池内に追加するときわめて特異な溶込み形状が得られる。Photo. 10.8 は

Photo. 10.8 Shape of penetration in case of adding molten metal
D; 3.2 mmφ I; 400 Apm.
T; 10 sec.

その 1 例を断面と溶込み面で示したもので、金属の追加により一度できた中央部の溶込み面の上に凝固が起り周辺溶込みだけがリング状に残ったことを示している。すなわちアークの熱は垂直方向には伝わらない。

Fig. 10.7 は溶融金属を追加しない場合と、した場合の溶融金属の l 形状とその内部の対流の説明図であって、このような周辺部に局限されたドーナツ状の対流を考えなければ、P 型の溶込みおよびこれに溶融金属を

Fig. 10.7 Schematic diagram explaining the convectional current due to the shape of molten metal.

a) Penetration with fixed TIG arc.

b) Penetration in case of adding molten metal.

追加した場合の溶込み中央部の再凝固層 m' の成因を理解できないと思われる。この対流の方向は、起り得る表面張力差に基く放射状の表面流の方向と一致する。

10.4 溶込み生成機構

(1) 単純型溶込み形態の細分

この実験では単純型は単一のものではなく、数種あることがわかった。第 1 は N_2 ガス中の溶込みのように溶融池がはなはだしく動揺した場合に生ずるすり鉢形に似たものである。第 2 はやはり溶融金属が溶込み面を完全に覆ったまま長時間加熱した場合に生ずる平底形のもので、これは経過から明らかなように周辺溶込みが中心に近ずき中心部の山を失った状態である。第 3 は Ar 中 200 Amp の場合に認められたもので、溶融池が平坦で母材露出面がまったく現われないときに P 型でなく単純な深い丸底形の溶込みが生ずる。 H_2 ガス中 15 sec のときあるいは SiO_2 の下での溶込みもはなはだ深い丸底形である。このほかに一つの溶込み面で、一部は P 型で他は上のどれかの型であるようなひずんだ形のものもある。これはアークの偏りのために生じたと見られる。

生成機構からすれば、第 1 のものは母材露出面に伴なう C 型の中央溶込みが移動することにより生ずるもので、C' 型と名づける。前章では S 型をこれで説明したが今回第 3 のような動揺のない溶融池の下でも S 型が生成することが見出されたので C' 型を除いたものを S 型とすることにする。第 2 の型は P 型から第 3 の S 型に移行する途中であることは明かかこれを P-S 型とする。結局溶融金属で完全に覆われた場合間接作用により真の S 型と P-S 型、P 型の 3 種の溶込みが生ずることがわかった。

これらの差は当然溶融金属内の対流の状態によって生じたものに違いない。

(2) アークの作用位置による溶融金属内の対流の変化

金属の界面張力は温度の関数で、一般の液体と同じく

温度が高いほど小である。溶融池の表面は不断にアークにより熱を与えられるとともに、表面張力差による表面流によりその熱を運び去られ、一種の定常状態にあると思われるが、そのような溶融池表面上の界面張力 τ を溶融池中心からの距離の関数として $\tau(r)$ とする。

次に溶融池における最高温度の位置 A における界面張力を $\tau = \tau_A$ とする。溶込み周辺部では溶融池の温度は固体金属と共存する温度、すなわち、金属の凝固温度 $M.P.$ で $\tau = \tau_{M.P.}$ は一定値である。 $\tau_A < \tau_{M.P.}$ であるから、表面流は A 点を起点として周辺に向っているはずである。

任意の点 P における表面流の強さは、粘性抵抗が一定であれば、その位置における $d\tau/dx$ の大きさに比例する。もし最高点の位置が中心より偏っていれば、表面流の強さは周辺に対する最短距離の方向に最大で、それと反対の方向に最小となるであろう。

Photo. 10. 7 に示す実験では、表面張力差による表面流は熱源と溶込みの周辺との間の開放液面に生じている。この表面流に基づき対流はしたがって開放液面の範囲に局限され、溶込みもまた極限されるため上げ底形または平底形の溶込みとなると考えられる。

このことから類推されることは、TIG アークによる実験で周辺溶込みが得られるときに、熱源は溶込みの周囲に非常に近いということである。周辺溶込みの周辺が完全な円形でなく波うっており、溶込みの進行も一様でなくかいか葉を喰う有様に似て局部的な進行停止が繰り返されることも熱源が一様なものでなく、周辺に近い所に集中しており、これが終始移動していることを示している。アークの熱が全部周辺部に集中しているかについてはわからないが、少なくとも一部は周辺近くまで及んでいると思われる。

このような表面流は金属液体の粘性により、その下の液体分子の同じ方向への運動をひき起す。この運動は単なる平行運動ではあるまいと考えられる。何故ならば液体の表面を含む小区割を考えると、表面流による力はこの区割部分を廻転するように働くと思われるからである。このような動きにより加熱された表面の金属原子は隣接した原子の下に入りこみ、また低温の原子は表面に押し出されて、熱が拡散するとともに、全体の流れはより厚く成長するであろう。

もしアークにより与えられた熱がつねに表面からの熱伝導により伝えられる範囲に止まるならば、前節に示したような熱源の形による溶込み形状の差はなくつねに平底の溶込みが得られたはずである。点熱源の場合深い丸底の溶込みが得られるのは、熱源を起点とする放射状の表面流が隣接する比較的低温の液体層の下に入りこみ、

厚い対流に成長し、その方向も水平から下向きに変わって溶込みの底部に熱を伝えたためと考えられる。

もし溶融池の中心からの放射状の表面流が進むにしたがい新たに表面から与えられる熱により同じ方向に加速されるならば、その流れはマクロ的には水平方向を維持しながらしだいに厚くなり、最後に溶込みの周囲の固体につき当り、ここに上げ底形の周辺溶込みを作るであろう。平底形の溶込みはこのような拡がった熱源と集中した熱源の中間の場合に生ずると考えられる。

以上を仮説の形にまとめると次のようになる。

「アークの間接作用による溶込み形状の変化は、溶融池表面におけるアークの発生面すなわち熱源面の相対的大きさによって変化する溶融金属の対流の形による」

Fig. 10. 8 はアーク時間とともに変化する P , $P-S$, S 型等各種の溶込み形状の生成機構を上記の仮説によって説明する模式図である。2つの矢印の間の距離はアークの発生面の相対的な大きさを示している。始めアークがほとんど溶込みの全面を蔽うときには、対流は周辺部に集

Fig. 10. 8 Schematic diagram explaining the convective current and the shape of penetration in the course of arc time

中し孔の大きいドーナツ形となって P 型の溶込みを生ずる。もしアークの発生面が溶融池の成長とともに変化しないとすると、対流の形は中央の孔が小さい、太いドーナツ形となって、熱は溶込みの中心部にも及ぶようになり、平底の $P-S$ 型となり、最後には丸底の S 型となる。

対流そのものを実証し難いのでこの仮説を検討することは難しいが、実際の結果と対照すると次のことが言われる。

i) 写真で見られる明るく輝いて見えるアークの焰は必ずしもアーク電流の分布を示すものではないが、これとある関係にあると思われる。溶融池がはじめほとんどない場合でも、生長しきった時でも、この大きさはほとんど変わらないように見えることはこの仮説に有利である。

ii) アークが偏って見えるときは概してその下の溶込み面もひずんでいる。とくにスラグがアークの発生を妨害する 10.2 節 (2) (3) の場合にはアークの偏りが生じやすく、これに伴って各種の混合型の溶込みを生じた。

iii) 電流が小さいとき S 型になるのはアークのエネルギーが小さいためアークが広がることができないからであろう。

iv) アーク柱内の電位傾度を大きくする水素ガスの場合、溶込みが深いのはアークが中心に集中するためと思われる。

v) きわめて粘稠なスラグとなる SiO_2 の場合、深い S 型となるのもアークの発生が溶融池中央部に局限されるためと考えられる。

このような仮説は一応現象を説明するのに有効であると思われる。

(3) アークの拡がりとプラズマジェット

この実験では母材側はプラスで、陽極では陰極に見るような電流の集中は起らないと言われている²⁾。しかし金属蒸気が発生するときには金属原子は電離しやすいので、アークはこの付近に集中し、さらに蒸発を助けると言われており²⁾、少なくとも大部分の電流は溶融池表面を通ると考えられる。このことはアークのスタートから撮影した高速度映画からも想像され、溶込み角が大きい溶込み断面形状により裏づけられる。

溶融池の表面上でも電流密度は様でないと思われることは前述したが、ここでは様なものと考え、かなり成長した溶融池に向けてタングステン電極からアークが広がっているとする。このとき陰極付近の電流密度はアーク柱のそれよりも大であるから、陰極前面の電磁圧力はアーク柱中の電磁圧力よりも高くなり、陰極より溶融池に向けてガス気流が発生する。

Greene³⁾ は円錐状に広がったアーク柱の電流分布を一樣と仮定した場合のアーク柱内の圧力分布を計算し、プラズマ気流を計算に入れなくとも (すなわちガス、プラズマを動かさないとして)、溶融池がくぼむことを示した。そして溶融池上の電流密度が中心部に集中しておれば、電磁圧力による凹みも中心部に集中することが示されている。もしアーク柱が円柱状で陰極から溶融池に至るアーク柱内の電流密度が変わらないとすると、電磁圧

力により凹みも溶融池中心部に大きく現われるはずである。

プラズマ流は電磁圧力の場所による差によって生ずるから、アークが急に拡がり電流密度の変化が大きい場合に大である。さらにアーク柱円錐の周辺部に電流が集中していればプラズマ流は一層強力であると考えられる。アーク電流が溶融池周辺において集中しておれば、周辺溶込みを作り、プラズマ流は中央溶込みの成因であることはこれまで詳述したところで、したがって周辺溶込みと、中央溶込みは相伴なうものであると考えられる。

Ar 中ではアークの電位傾度が小さいことが、アークを拡がらせ特有の溶込みを作ると想像される。逆に電位傾度の大きい水素を混じた ($\text{Ar} + \text{H}_2$) ガス中の実験でこれを検討すれば、溶融池上のアーク焰は Ar 中のそれに比し著しく集中しており、溶融池はかなりくぼむが、母材露出面を出現させることはない。そして溶込みは丸底の S 型で、P または C 型は全く現われない。この場合アーク発生面は溶融池中心部に集中しており、溶融池のくぼみはプラズマでなく電磁圧力自体で生じたものと想像される。

次にプラズマによってできた母材露出面を、第 9 章 Fig. 9.2 に示したような “finger” 状に熔融する熱源について考察する。これまでは熱源としてアーク電流だけを考えていたが、その他にプラズマ流の運ぶ熱も当然ある筈である。

もしこの熱が電流のみによって与えられるものであれば、その電流は中心部に集中していたはずで、集中すればプラズマ流は弱くなるであろう。中央溶込みが成長しているとき、周辺溶込みも成長していることから見て、アーク電流の大部分は溶融池上に広がっており、そのために生じたプラズマ流の熱が中央溶込みを作るのではないかと考えられる。もちろん中央溶込みには前節で注意したように露出面の出現により求心的に生じる表面流による間接作用も関与している。

(4) 中央溶込みの成因

MIG 溶接における「きのこ状」または “finger” 状の溶込みは従来プラズマジェットにより加速された溶滴粒子が溶融池に高速で突入しその下を熔融するために起ると説明されており、溶滴が関与しない TIG 溶接によっても起り得ることは知られていないようである。後者がある以上溶滴ではなく、これを加速する力すなわちプラズマジェットに注目すべきである。

溶接棒で溶接する場合、棒からのガスの発生が著しく、溶融池の表面がくぼんで見えるものは吹つけが強いと言われ、このときは概して溶込みが深いことから、従来は溶融池のくぼみと溶込み深さに直接関係があるよう

に考えられていた³⁾。しかし固定 TIG アークによる実験では、溶融池がくぼんでいるとき、その下の溶込みはかえって浅いことが見出された。深い中央溶込みはくぼみがピット状に深くなり、その底に母材が露出するときに始めて生ずるものである。一般の溶接の場合にはアークの直下に母材露出面が出現するか否かに注目すべきである。

アーク発生初期に見られる母材露出面の出現と、これに伴う C 型の溶込み面の生成の原因としては、第 9 章でのべた Doan の実験に対する説明が適用できるであろう。

すなわち溶込み深さが浅いとき溶込み底面に対する溶融金属の粘性抵抗のため求心的な底層流が妨げられ、プラズマジェットの圧力と相まって溶融金属の中央部を強くくぼませ母材露出面を作るのである。この粘性抵抗は溶込みが深くなるにつれ急激に減少し、低電流 (300 Amp.) では比較的短時間で露出面は消失する、しかし大電流 (400 A.) のときはプラズマジェットが強いので、それだけで露出面を作るに十分である。そして溶込み面が一層深くなり溶融金属内の静圧力が大きくなって始めて露出面が閉じられるものであろう。

10.5 ま と め

前章に引続き固定 TIG アークを用いて各種溶接条件

の下で基本的な溶込み形成現象につき検討した結果次のような結論が得られた。

1. 溶込み形状は時間の経過にしたがって、a) 中央溶込型、b) 周辺溶込型、c) 単純溶込型の順に変化する。

このような変化は溶融池表面におけるアーク電流分布に対応して生ずる溶融池内の対流の状態により説明できる。

2. 窒素雰囲気中におけるすり鉢状、なべ底状の溶込みは溶融池が動揺することにより得られる。

3. 水素の多い雰囲気または SiO_2 のような粘稠なスラグ下での単純型の深い溶込みは溶接アークが集中することにより生ずる。

4. 溶融池にメタルを添加した場合、溶込面の中央部分は再凝固しリング状の周辺溶込みを生ず。これは表面張力差に基づく放射状の表面流の存在を示している。

参 考 文 献

- 1) 石崎敬三 “アーク溶接現象に関する界面張力理論—第 9 章” 溶接学会誌, 34 (1960) No. 2 146 s-153 s.
- 2) 安藤弘平, 長谷川光雄 “溶接アーク現象” 産業図書, p. 40.
- 3) 同 上 p. 166.
- 4) 同 上 p. 172.

次 号 予 告

講 義

アークプラズマへの供給エネルギー 西 口 公 之

資 料

オートメーションと抵抗溶接 中 村 孝 (訳)

米国における溶接構造物の発達 伊 藤 悌 二 (訳)

論文および報告

軟鋼溶接金属の窒素含量および気孔 桑 名 武

アーク溶接継手の収縮過程に関する研究 (第 1 報) 佐 藤 邦 彦

チタンおよびチタン合金の溶接部に及ぼす超音波振動 杉 田 屋 卓

自己負帰還 自己飽和形 3 相整流器式直流アーク溶接 安 藤 弘 平

溶接金属の機械的性質に及ぼす電極鋼線銅メッキの影響 益 本 功

I.I.W. 資 料

1% Cr-Mo 鋼の十字形試験 小 林 卓 也 (訳)

超高温高压蒸気管系に用いる溶接性良好な
オーステナイト系ボロン鋼 木 俣 登 (訳)

文 献 紹 介