ノン・ガスシールド・アーク溶接における ビード形成現象*

西口公之** 黄地尚義** 平岡和雄***

Bead Formation in Non Shielded Arc Welding*

by Kimiyuki Nishiguchi**, Takayoshi Ohji** and Kazuo Hiraoka***

In the first part of this paper, the fundamental characteristics of arc behavior and bead formation were made clear in non gas-shielded arc welding using flux cored wire.

Non gas-shielded arc welding is characterized by the following two properties in comparison with the other arc welding using solid wire.

- (1) The digging action by arc force on molten pool is very weak.
- (2) The arc is soft and formed in accordance with the surface shapes of mother plate or molten pool.

As a result of above mentioned property (1), the penetration in this method comes to be shallow one with wide bead-width, especially at low welding speed in which molten pool volume increases just under the arc.

The arc behavior such as property (2) is clearly observed at high speed V-groove welding where the arc is formed separately on the both faces of groove.

Such a separation of heat source strongly depends on arc voltage and groove angle and influences the bead formation and results in the lack of fusion at groove-bottom in the extreme case of high welding speed.

In the second, a study was made on the melting phenomena and bead formation in horizontal fillet welding on the basis of above mentioned characteristics.

The bead formation in high speed horizontal fillet welding is similar to that in downward V-groove welding, at low speed range, the effect of gravitational force on bead formation, however, appears remarkably as follows:

- (1) The leg-length on vertical plate is considerably greater than that on horizontal plate, because the metal-flow in the direction of the vertical plate by plasma stream comes to be strong with hanging of molten pool and contributes to the melting process.
- (2) Because of weak arc force in the present process, the bead surface shape is quantitatively close to the result of surface tensional analysis under gravity assuming two dimensional molten pool. Therefore, if the leg-lengths and the quantity of deposit metal are given, bead shape in horizontal fillet weld might be derived from the two dimensional analysis used in this study.

緒 言

ノン・ガスシールド・アーク溶接に関しては、主として溶接部の機械的性質を中心として研究が進められている¹⁾。本溶接法においては、フープにフラックスを巻き込んだワイヤを使用する関係上、アークの発生形態およびこれに伴って溶融池に作用するアーク力などが通常のソリッド・ワイヤを使用する場合とかなり異なり、したがってビード形成現象にもその特徴が現われるものと予想される。

そこで筆者らはこの点に注目し、まずビード・オン・プレートおよびV開先内溶接の場合を中心にノン・ガスシールド・アーク溶接におけるビード形成に関する基礎的な事項を明らかにし、ついでこれらの結果をもとに、本法を水平隅肉に適用した場合の溶接現象を究明することとした。以下にその要点を報告する。

I. 実験方法

本研究においては電圧制御方式のノン・ガスシールド・アーク溶接装置を使用し、とくにことわらない限り直流逆極性を採用している。また溶接用ワイヤとしてはワイヤ径・断面形状などの異なる数種類のものについて予備的に検討を加えたが、定性的にはこれらの間

* 原稿受付 昭和50年6月3日 (昭和48年度秋季全国大会にて発表)

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka Univ.

*** 正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals.

に顕著な差異が認められなかったもので、ここでは 3.2 mmφ のワイヤ (OW-56A; 神鋼製) を選定・使用することとした。

Table 1 Welding conditions used in this experiment.

Arc Current I (A)	200	300	400	500
Arc Voltage V (V)	25~25.5	26.5~27	29~30	32~33

Flux cored wire: 3.2mmφ (OW-56A)

Wire extension; 60mm

Arc length; 3mm

Table 1 は本実験における溶接条件であり、とくにことわらない限り アーク長 (ワイヤ先端と母板間距離) は電流値にかかわらず 約 3 mm, 突出し長は 60 mm 一定としている。また 溶接試片としては板厚 12 mm または 20 mm の軟鋼 (SS41) 材を使用している。

II. 入熱形態の特徴

ここではノン・ガスシールド・アーク溶接におけるアークの発生形態と母板の溶込み形状の特徴を他の溶接法における場合と比較しながら検討する。

II-1 アーク発生形態

Photo. 1 はアーク発生形態の特徴をワイヤ端部の溶融状況に注目して示したものである。(a) はビード・オン・プレート溶接で、45° 後退角をとった場合のアーク形態であり、ワイヤ端面が母板面と平行に溶融するいわゆる「ならい」の現象が生じているのがわかる。(b)、(c) はいずれも V 開先内 (図中 θ は開先角度) におけるアークの発生状況である。すなわち、低速側 (b) ではアーク直下の開先内に溶融金属が十分に存在しているため、ワイヤ端面は (a) の場合と同様に溶融池表面にならうのに対し、高速側 (c) ではアーク直下に溶融金属がほとんど存在しない関係上、ワイヤ端部は開先面になっている。

このように、ノン・ガスシールド・アークにおいてはアークの集中性が乏しく、ならいの現象が顕著に認められるわけで、これは帯状電極の場合と同様²⁾ワイヤ端においてアークが分散した状態で発生していることによる

Photo. 1 Arc appearances in non shielded arc welding. ($I=300A$, 3.2mmφ, θ ; groove angle)

ものと考えられる。

II-2 母板溶込み形状の特徴

Fig. 1 はノン・ガスシールド・アークによる母板溶融の特徴を溶込み深さで代表させ、これを他の溶接法と比較して示したものである。(a) は CO_2 溶接の場合との比較であって、ノン・ガスシールド・アーク溶接においては溶込みは全般的に浅く、とくに低速域で顕著である。この様相は(b)にみるようにアークの集中度が弱いとされている被覆溶接 (D4313, 同一径, 同一電流) に比べても明確に現われており、ノン・ガスシールド・アーク溶接は浅溶込みが特徴であると判定される。このような特徴は上に挙げたアークの分散効果が有力に働く結果、アーク力による溶融池の掘り下げ作用が微弱となることに起因するものとして理解できる。

III. ビード形成現象

前項で述べたように、ノン・ガスシールド・アーク溶接においてはアークのならい性が顕著で、浅溶込みとなる特徴があり、しかも比較的巾広の安定したビードを得やすい。このようなビード形成の特徴から、本溶接法は肉盛あるいは隅肉溶接などいわゆる盛金的な溶接には適していると判断されるが、突合せ開先内の初層溶接などにおいては逆に溶込み確保の点で問題となると考えられる。そこで、まずビード・オン・プレート溶接および V 開先内の初層溶接を中心にそのビード形成現象を追求する。

Fig. 1 Comparison of penetration depths in non shielded arc welding and the other welding methods.

Ⅲ-1 ビード・オン・プレート溶接におけるビード形成の特徴とその類別

Fig. 2 はビード・オン・プレート溶接における溶込み形状の溶接速度に対する変遷の代表例であり, 溶融池現象の特徴から, ビード形成は図示の3形態に類別される。

Fig. 2 Change of penetration shape with welding speed in non shielded arc welding.

ビード巾および溶込み深さが不連続的に変化する遷移域 (溶接速度 $v=30$ cm/min 近傍) よりも低速側のA領域では 溶接速度が大いに遅いにもかかわらず, 溶込み深さが極端に浅くて巾の広い 扁平な溶込み形状となる。このA領域においては, Fig. 3 (a) に図解するように アーク直下部にも溶融金属が十分に存在していて, このアーク直下部から矢印のように比較的均一な放射状の溶融金属流が生じているのが観察される。アークによる入熱はこの湯流れによって溶融池周辺部に運ばれ, 母板表面がこの輸送熱のために積極的に溶融・開拓される結果, 上記のように特異な溶込みを形成するものと理解される。なお (a) 図の縦断面模式図にみるように, 上記の湯流れ現象に起因して アークから離れた溶融池の前方部に浅い棚状の溶込みが形成されており, この特徴はビード形態区分に際して チェック・ポイントとしての役割を果たす。

つぎに Fig. 2 の遷移域より高速側のB領域では, Fig. 3 (b)にみるように 溶融池前方部にはガウジング壁が露出し始めていて, (a)図にみた棚状の溶込み部は消失するものの, 溶融池側後方に向う溶

Fig. 3 Three types of molten pool phenomena in non shielded arc welding.

融金属流は活ぱつである。この湯流れによる二次溶融作用のため, 溶融巾はアーク直下よりかなり後方で最大となるのがこの領域におけるビード形成の特徴である。

さらに高速側のC領域はアンダー・カットの形成され

る領域であり, Fig. 3 (c) のように溶融金属がクレータの後方部へ押し付けられた状況にあって ビード周辺部への溶融金属の供給は困難となり, アークによるガウジング側壁をほぼそのまま留めたアンダー・カット・ビードとなる。

Fig. 4 Critical conditions of molten pool phenomena.

Fig. 4 は上記 A, B, C の形成条件域を電流・溶接速度の関係でまとめたものである。(a) は低速側の A, B 域を, (b) は高速側 B, C 域ならびにより高速域で現われるハンピング・ビードの発生限界を示している。(a)において, 電流の増加につれてアーク力は増すことになるが, 溶着量も増し, これが溶融池の重力ヘッドの増大に寄与するため, 結果として高電流域でのA領域の拡大をみたものと理解される。この事実は 溶着量の制御によって溶融池現象すなわち溶込み形状の調整が可能なることを示唆している。これに関連して, Fig. 5 は電流および溶接速度を一定に保ち, ワイヤ突出し長のみを変化させて 溶込み形状の変遷を調べた例である, 図にみるように, 溶着量の増加 (突出し長が大) につれて 溶込み形状は扁平となり, 初めB領域の形状をとっていたものがA領域のそれに遷移している。(ただし, この実験は交流 60 Hz にて行なっている)。

Fig. 5 Change of penetration shape with increase in deposit metal.

なお、Fig. 4 (b) に示したアンダー・カットあるいはハンピング・ビードで代表される高速限界も電流の増加とともに単調に上昇しており、これは手溶接などの場合とは逆の特性になっている。この特徴は溶込みをそれほど問題としない高速の大電流溶接を考える上で注目される。

Ⅲ-2. V開先内におけるビード形成現象

Fig. 6 は 90° V開先内における溶込み形状の溶接速度に対する変遷と、その特徴を示したものである。この場合にも Fig. 2 のビード・オン・プレートにおけると同様、脚長および溶込み深さが不連続的に変化する遷移域が認められ、その低速側 A' 領域では溶接速度の低減につれて急激に溶込み深さが減少する。すなわち A' 領域は溶接機構上 Fig. 2 の A 領域にほぼ対応しており、アーク直下に溶融金属が十分に存在しているために開先底部の溶込み確保が難しく、底部融合不良となりやすい。このような不都合は溶融池高さの大となる（入熱位置の高い）開先角度の小さい場合ほど顕著となる。なおこの低速側の底部融合不良は母板への入熱に比べて、溶着量を相対的に減少させるような工夫をすれば抑制し得るものと考えられる。

Fig. 6 Change of penetration shape with welding speed in V-groove welding. (groove angle $\theta = 90^\circ$)

高速側の C' 領域も Fig. 2 の C 領域の場合と同様で、ビード周辺部における二次溶融作用の消滅によってアンダー・カットが形成される。ただビード・オン・プレートの場合と異なるのは領域 B' および C' において Photo. 1 (c) に示した開先両面に対するワイヤ端ののらない現象が発生することである。この現象に伴って入熱の重心位置は開先の両面に分離することになり、溶融池形状はあたかも母板開先部の両斜面上におかれたビードが合体したようなハート形を呈する。

Fig. 7 は上記の入熱重心位置の分離現象について整理したものである。すなわち (a) は開先角が与えられ

Fig. 7 Separation of heat source in high speed V-groove welding.

れば電流および溶接速度にほぼ無関係に入熱位置が定まることを示している。この場合の入熱重心位置は図中に模式的に示すように、ハート形クレータの最先端位置と最大溶込み深さの位置とから推定している。(b) は開先角を変化させた場合の入熱重心位置であり、これらの測定値から、アークは母板面との幾何学的最短距離に形成されるものとみなしてよいことがわかる（ただしアーク長；3 mm）。このように、ノン・ガスシールド・アーク溶接の中・高速域（B'、C' 領域）においては入熱の重心位置がアーク長と開先角によってほぼ一義的に定まる特性を有している。このため、C' 領域の高速側では Photo. 2 に示すような高速側の底部融合不良 (a) を、さらに著しい場合には分離ビード (b) を形成する。

Photo. 2 Lack of fusion (a) and separated bead (b) due to the separation of heat source.

以上を要約すると、ノン・ガスシールド・アークによる下向溶接においては基本的には浅い扁平な溶込み形状になりやすく、またアークののらない性が顕著なため V開先内の初層溶接などにおいては開先底部の溶込み確保が問題となる。とくに高速側においては、開先角およびアーク長の選定が重要となる。

IV. 水平隅肉溶接現象

ここではノン・ガスシールド・アークによる水平隅肉溶接の溶込み生成現象を重力の影響に注目して検討するとともに、いま一つの重要な問題点であるビード表面形状について 界面張力論的立場^{3,4)}から論考を進める。

IV-1 溶込み生成現象の特徴

Fig. 8 はノン・ガスシールド・アークを水平隅肉溶接に適用した場合の脚長の変遷を前項に挙げた下向の90° V グループ溶接の場合(一点鎖線)と対比して示した例である。水平隅肉溶接では 低速側のA''領域で重力の影響が顕著であって、垂直板側の脚長が水平板側のそれに比べてかなり大きい。また、溶込みについても非対称性が現われており、垂直板側で周辺溶込みの著しい水平隅肉溶接独特の溶込形状を呈している。これに対し、高速側のB''およびC''領域では下向きの場合(Fig. 6のB', C')とさほど異ならず、また溶融池形状もFig. 7(a)に似たハート形を示す。なお、ここでは垂直板側にアンダー・カットを発生する条件域をC''領域と規定している。

Fig. 8 Change of leg-lengths L_1, L_2 with welding speed in horizontal fillet welding.

Fig. 9 はA''領域における溶込みの非対称性に着目し、その生成過程を追跡したものである。図にみるように、ワイヤ(アーク)直下の(a)断面までにおいてすでに脚長に差を生じ、溶込みの非対称が現われ始めている。(b)断面部においては 水平板側は凝固を開始しているが、垂直板側はなお活発に溶融・開拓が進められており、これは(c)断面に至って初めて凝固を開始するようになる。このように 水平隅肉溶接の低速域においては、水平板側で二次溶融作用が弱く、逆に垂直板側で顕著となることがわかる。

Fig. 9 Melting process at low speed in horizontal fillet welding.

Fig. 10 Effect of metal flow on the bead formation in low speed horizontal fillet welding.

Fig. 10 (a) はA''領域における溶融池現象を模式的に示したものである。本実験においては、図示のようにワイヤは 溶接線に垂直な面内ではほぼ45°傾斜させており、この配置は両側板面に対しては下向90° V グループ溶接の場合と相対的に同じである。このような条件下では、溶融金属は重力の影響を受けて水平板側に垂れ下り、アークは図にみるように、この垂れ下った溶融池にならった形で発生する。このため溶融金属はプラズマ気流によって垂直板側へ吹き流され、矢印で示す溶融金属流による垂直板側での二次溶融作用が活発となる。これが溶込み形状の非対称を形成する主因と判断される。(b)はこの論考を吟味するために行なった実験であり、平板において ワイヤを溶接線に垂直な面内で $\phi = 45^\circ$ に傾けてビード・オン・プレート溶接した場合のビード断面を示すものである。図にみるようにOPに比べてOP'が

はるかに大であって、プラズマ気流によって右方に吹き流された熔融金属が OP' 側のビード周辺部を積極的に溶融・開拓している様相が理解できる。

上の結果から、ワイヤの傾き角 ϕ を増してプラズマ気流の吹き上げ効果を抑制すれば、Fig. 8 にみた脚長の非対称性は解消できるはずである。Fig. 10 (c) はこれを実証した例である。

Fig. 11 Classification of bead shape in horizontal fillet welding.

Fig. 11 はビード表面形状をアンダー・カットおよびオーバー・ラップの発生限界をもとに類別したものである。水平隅肉溶接におけるアンダー・カットには低速側で発生するアンダー・カット I と高速側で生ずるアンダー・カット II とがある。これらのうち、タイプ II はビード・オン・プレートおよび V 開先内溶接における C および C' 領域でみられたものと機構的には類似である。Fig. 12 はこれら高速側でのアンダー・カット発生限界をまとめたもので、隅肉溶接では ビード・オン・プレ

Fig. 12 Comparison of critical conditions of undercut at high speed side in bead on plate and fillet welds.

ートの場合よりも発生しやすくなっている。これは V 開先内では入熱の重心位置が溶接速度、電流などの溶接条件によって Fig. 7 にみたように固定される結果、溶融巾に対し相対的に熔融金属量が不足するためと考えられる。なお 水平隅肉溶接では垂直板側のアンダー・カットの発生でもってその限界としているため、下向の V 開先内溶接の場合よりも低速側でアンダー・カットの発生をみるのは当然ともいえるが、重力の影響はあまり顕著ではないことがわかる。

他方 低速側で発生するアンダー・カット I は上記の場合と異なり、重力の影響が著しく、これはまた オーバー・ラップについても同様である。

IV-2 ビード表面形状についての予備的検討

上に指摘したように、水平隅肉溶接の低速側では 重力の影響を顕著に反映した特有のビード表面形状を示す。Fig. 13 は 簡単のため 二次元の溶融池モデルを

Fig. 13 Comparison of experimental and calculated value on h_{cr} , where h_{cr} was defined as the height of point of inflection C under the overlap critical condition ($\beta=90^\circ$).

想定し、界面張力論的立場から低速側のビード表面形状を検討したものである。すなわち、溶融池は溶接線方向に十分長く、かつ溶融池に作用する力は重力、表面張力および外圧のみとし、また表面張力および外圧は溶融池全表面において一定とする。さらに 溶融池表面と母板との接点 [(a) 図の A, B 点] における界面張力論的釣合いが保たれている上に、母板側では液面の凹みを上廻る十分な溶込みが確保されているものとしている。このような仮定のもとでは、(a) 図のビード表面における変曲点 C を基準にすると、図中に定義したアンダー・カットおよびオーバー・ラップの発生限界高さ $|h_{cr}|$ は $\sqrt{2\sigma \cdot \cos \gamma / \rho g}$ で与えられる (σ : 表面張力, ρ : 溶融金属の密度, g : 重力の加速度)。

(b) 図の点は 上記の観点からオーバー・ラップ発生限界近傍にあるビードを任意に取り出して、これらのビード断面における変曲点 C の高さとその勾配を測定し、これらを縦軸に、横軸には垂直板側の脚長 L_1 をとってプロットしたものである。図中の破線はビード・オン・プレートでのオーバー・ラップ発生限界余盛高さ $\sqrt{2\sigma / \rho g}$

と上記の実測勾配 γ とを用いて, 上式の $|h_{cr}|$ を算出したものであり, これは実験結果とほぼ一致している。この事実は低速域でのビード表面形状が二次元的な界面張力論的釣合いによって比較的良好に説明できることを示しており, 脚長および溶着量が与えられれば ビード表面形状はほぼ一義的に定まることを意味している。

Fig. 14 Critical conditions of undercut and overlap of horizontal fillet weld with equi-leg-length, calculated by the two dimensional model of molten pool.

Fig. 14 は 上述の二次元モデルを用い, 等脚長の条件のもとに計算によってアンダー・カットおよびオーバー・ラップ限界を求めて, ビード表面形状を類別したものである*. すなわち, 曲線④より溶着量が大なる領域では水平板側にオーバー・ラップが, 曲線⑤より溶着量の小さな領域では垂直板側にアンダー・カットが発生する。したがって, いわゆる正常ビードの形成域は両曲線④, ⑤に囲まれた斜線部にあるわけで, これは図中に点線で示した $C_0 = 1/2 \cdot L_1^2 (L_1 = L_2)$ の近傍で, しかも両脚長が $\sqrt{2\sigma/\rho g}$ の 1.9 倍以下に当たっている。なお曲線③は脚長比 (L_1/L_2) が変化した場合のハンギング限界 すなわち正常ビードの得られる最大脚長値 L_1 を示したもので, 脚長比の減少につれて垂直板側の最大脚長は増すものの, ついには飽和する。この限界値は図において一点鎖線で示すように $\sqrt{2\sigma/\rho g}$ の 2 倍と算出される。換言すれば, この値以上の脚長値 L_1 をもつ正常

ビードは存在し得ないわけである。

以上, 水平隅肉溶接におけるビード表面形状に関して検討を進めてきたが, 二次元モデルによる解析ならびにそれらの実験的検討に関しては次報で詳細に述べる予定である。

V. 結 論

本報においては, ノン・ガスシールド・アーク溶接におけるビード形成現象の特徴を明らかにするとともに, その検討結果をもとに 水平隅肉溶接における溶込みおよびビードの表面形状などについて論考を進めた。得られた結果の要点をまとめると次のようである。

(1) ノン・ガスシールド・アーク溶接においては, アークの硬直性が乏しく, 溶融池の掘り下げ作用が弱い。このため 他の溶接法に比べて, 溶込みが浅く, 比較的中広の安定したビードが得やすい。

(2) ノン・ガスシールド・アーク溶接におけるビード形成現象は 3 つの形態に類別することができるが, とくに低速側の領域では, 溶接速度が遅いにもかかわらず溶込みが極端に浅くなる。これはアーク直下に溶融金属が十分存在するため アーク直下から溶融池周辺部へ向う放射状の溶融金属流によってアーク入熱が分散されるためである。

(3) V 開先内における高速側 B', C' 領域では アークのなれない現象によって 入熱の重心位置が開先両面へ分離する。このため高速側では開先角度, アーク電圧の選定およびネライ位置の設定が重要となる。

(4) 水平隅肉溶接における溶込み生成過程は とくに低速側で重力の影響が顕著となり, 垂直板側に比べ水平板側では脚長および溶込みが著しく少なくなる。これはアーク直下の溶融池が重力の作用で非対称となる結果, プラズマ気流による垂直板側への溶融金属流が活発となるためである。

(5) 水平隅肉溶接における低速側のビード表面形状はここで用いた溶融池の二次元モデルによる界面張力論的釣合いで定性的に説明し得る。

参 考 文 献

- 森垣, 松本他: “ノン・ガスアーク溶接の直流化に関する研究 (第 1 ~ 4 報)”, 溶接学会全国大会講演概要 (第 9 集), (1971), 265 ~ 272.
- 木谷, 豊岡: “帯状電極によるサブマージ・アーク肉盛溶接”, 本誌, 37, (1968), No. 12, 1301 ~ 1315.
- 坪井, 坂本, 美浦: “サブマージ・アーク水平隅肉溶接のビード形状について”, 本誌, 41, (1972), No. 6, 700 ~ 708.
- 石崎, 熊谷, 牧野: “アーク溶接現象に関する界面張力理論 (第 8 章)”, 本誌, 34, (1965), No. 2, 137 ~ 145.

* ビード表面形状に関する二次元モデルによる計算結果の詳細については次報にて述べる予定である。