溶込み深さの最適制御方法に関する基礎的検討*

杉谷 祐司**, 西 泰彦**

Fundamental Investigation of Optimum Penetration Control Method*

by Yuji Sugitani**, and Yasuhiko Nishi**

One of the important subject in the study of automatic arc welding is to establish control system of welding parameters for controlling bead shape, namely penetration depth, bead width and bead height, by detecting or predicting behavior of molten pool owing to change of groove shape.

This report describes the effect of welding parameters on the bead shape and the study of simultaneous control system of penetration depth and bead height in the variation of root gap in gas metal arc welding. From the fundamental investigation of optimum penetration control method, following results were obtained.

- 1) By the method of controlling additional filler wire feeding rate in order to maintain constant torch height during automatic current control (ACC), the penetration depth and the bead height can be controlled constant at the variation of root gap width in Y-groove.
- 2) The penetration depth can be effectively controlled by the welding current control which is correlated to the welding speed control in order to keep constant bead height.

Key Words: Penetration depth, Bead height, Root gap, Molten pool, Filler wire, Welding parameter control

1. 緒 言

溶接中の開先形状、開先線の変化が前提となる構造物の溶接ロボットには、センサーを具備した知能化が必要である。開先形状の変動による溶融池現象の変動を検出、もしくは予知して、ビード形状寸法、すなわち、溶込み深さ、ビード幅、ビード高さなどをリアルタイムに制御するための溶接パラメータの制御システムの確立は重要な課題である。溶接パラメータの制御システムを大別すると、

(1) 変動要因（開先形状）を溶接寸前に検出して、パラメータを制御する。

(2) 制御対象（溶融池現象）を直接的にインプロセスで検出して、ビード形状寸法が目的の方向に向かうように、パラメータを制御する。

の2方法となる¹⁾。(1)の方法では、開先形状に対する溶接パラメータのデータベースが必要である。(2)の方法では、制御対象をより直接に検出するためのセンサーの開発が急務であり、最近、ITV カメラや光検出デバイスなどの光学式センサーにより、溶融池の幅や面積、温度などを検出する研究²⁻⁸⁾が盛んに行われている。

制御対象を直接検出する方法が最適であることは言うまでもないが、溶込み形状など直接検出が不可能である場合も多く、溶融池の表面形状から推定するとか、(1)の開先形状検出と併用して制御する複合的方式が、実際には必要であると思われる。

本報では、一般的なY型開先の下向姿勢突合せ継手の初層溶接をガスシールドアーク溶接法で行う場合において、開先のルートギャップの変化に対して、溶込み深さとビード高さを一定に制御するために溶接パラメータを

どのような関係で制御すれば良いかの検討結果を示す。

2. 実験方法

溶接電源は、外部特性を定電圧特性から定電流特性までの任意の特性に調整できるアナログトランジスタ式直流溶接電源を用い、定電圧特性 (Fig. 1) にて実験を行った。

本実験に用いた溶接装置は、XYZ 3軸 (X: 左右ならい軸, Y: トーチ上下軸, Z: 走行軸) からなる。また、本実験では特に断りのない場合全て、開先状態の変化に対して溶接電流を所定の値に制御するため、設定値と実測値の偏差によりトーチ高さ (Y軸) を制御する ACC トーチ高さ制御 (Fig. 14 に制御ブロック図を示す) を行っている。この ACC トーチ高さ制御はチップ母材間距離の変動に伴い溶接電流が変化する定電圧電源の特性を利用し、トーチ高さを上下させることにより溶接電流を一定に制御するものである。

供試材には特に断らない限り SS41 軟鋼板を用いてお

Fig. 1 Output characteristic of power source (Constant potential characteristic)

*原稿受付 昭和63年7月13日 平成元年度春季全国大会で論文発表講演

**正 員 NKK (日本鋼管株式会社) Member, NKK Corporation

Fig. 2 Edge preparation

Table 1 Definition of parameters

Parameters	Definition
H	Bead height
Hr	Reinforcement height
B	Bead width
P	Penetration depth
G	Root gap width
Ex	Distance between tip and root

り, Fig 2(a)(b) に示す開先形状を用いた。また, 特に断らない限り溶接ワイヤは, 1.2mm ϕ ソリッドワイヤ (JIS Z 3312, YGW 11), シールドガスは Ar+20% CO₂ を用いた。

Table 1 に本論文に用いた各種パラメータの記号と定義を示す。

3. 実験結果

3.1 アーク溶接の溶込み形成に関する物理的因子

Fig. 3 は, 開先内におけるアーク溶接による溶融池形状と溶込み形状のモデルを示している。斜線で示すアーク直下の溶融池断面を考えると, 溶融池表面Aの形状は, アーク力, 溶鋼の重力 (重力ヘッド hg), 表面張力

Fig. 3 Model of molten pool

Fig. 4 Schematic diagram of the force balance in molten pool

で定まるとみなすことができ, 溶込み形状Bは, A面と与えられるアーク入熱による熱伝導及び対流によって定まる^{9,10}。Fig. 4 に溶融池に作用する各種力の平衡モデルを示す。このような観点に従って溶込み形状を考えると,

(1) 溶融池表面形状を与える, アーク力 (プラズマ気流を含む) とその分布, 溶鋼の量 (ワイヤの溶融速度及び溶接速度), 開先形状

(2) 溶込み形状を与える, 溶融池表面のアーク入熱と

(a) Arc Current Non-Control
($Ex=25\text{mm}$) (b) Arc Current Control
(300 A, 32 V)

Fig. 5 Effect of root gap width on bead shape parameters (In the case of I-groove)

その分布

などの主要因の影響を考慮して、溶接電流、溶接速度、ワイヤ送給速度などの溶接パラメータを制御する必要がある。

3.2 ルートギャップの変化とビード形状

3.2.1 I 開先の場合

一定の溶接条件において、開先のルートギャップが変化するときの溶込み深さの変化の状況は、開先形状によって異なる。Fig. 5(a) は、I 開先における実験結果で、ルートギャップをテーパ状に変化して調べたものである(板厚 25 mm, 1.2 mmφ 軟鋼ワイヤによる MAG 溶接, チップ・母材表面間距離: 25 mm 一定)。Fig. 5(b) は同じ方法で ACC (電流一定制御) によるトーチ高さ制御を行った場合である。ACC を行った(b)では、溶込み深さ P は直線的に変化している(3 mm のギャップ変化について約 4 mm)のに対し、トーチ高さを制御しない(a)では直線的な変化にならない。これは(a)では、ギャップの変化でアーク直下の溶融池面が変化するのに対応してワイヤ突出し長さ α とアーク長、溶接電流が変化するため、アーク入熱、アーク形態も変化していることが予想される。Fig. 6 は、Fig. 5(b) におけるビード断面形状で

Fig. 6 An example of the bead shape at the root gap difference (In the case of I-groove)

Fig. 7 Effect of root gap width on bead shape parameters (In the case of Y-groove)

ある。過大ギャップに於て、より深溶込み型の形状になっていることがわかる。

3.2.2 Y 開先の場合

Fig. 5 の結果より、溶込み深さの変化を正確に把握するためには、少なくともワイヤ突出し長さ、アーク長を一定にしておく必要がある。以後の実験では全て ACC トーチ高さ制御を行った。Fig. 7, Fig. 8 は、Y 開先でのルートギャップ変化の結果である。両図より明らかなように Y 開先でビードが開先内に形成される場合には、ビード断面形状はほぼ一定のままでギャップの変化に応じて上下する。また、Fig. 9 に示すようにこのときのチップの先端から溶込み底部までの距離 ($E_x + P$) もほぼ一定である。すなわち、このような場合には、溶込み深さ及びビード高さを、ACC 制御によるトーチ高さの変化で検知できることがわかる。

3.2.3 開先形状の相違による溶込み形状の変化について

上記 2 つの実験により開先形状 (開先角度、開先深さ) が溶込み形成現象に大きく影響することがわかる。この点について検討してみる。先ず Y 開先の場合では、ルートギャップの変化に対してビード断面形状も変化していないから、アーク直下における溶融池表面の形状も変化していないと考えられる。一方、I 開先の場合には、ルートギャップの変化に対してビード断面形状が深さ方向に変化していることから、Fig. 10 に示すように、溶融池面の形状が図の破線のように変化し、溶鋼の重力ヘッドが $h_{G2} > h_{G0}$ になっていると考えられる。アーク直下の溶融池面での力のつり合いは、アーク圧力 P_a 溶融池面の曲率を $1/R$ とすると、 $P_a = \rho g h_G + 2\sigma/R$ であるから、ギャップ過大の $G=2$ に於て Fig. 10 破線に示す溶融池面の曲率 $1/R$ が小さくなり表面張力による上向

Fig. 8 An example of the bead shape at the root gap difference (In the case of Y-groove)

Fig. 9 Distance between bottom of penetration and electrode tip

Fig. 10 Model of molten pool in the case of I-groove

Fig. 11 Effect of welding speed on bead shape

きの圧力が減少しているか、またはアークの分布形状が変化して P_a が増加していることなどが考えられる。尚、この場合でも、アーク入熱は同じでもから、アーク直下の溶鋼厚さ h_m は余り変化していないと考えられる。

3.3 溶接速度の影響

Fig. 11 は、Y 開先において溶接速度を 10~100 cm/min と変化させた時の溶込み深さ P、ビード高さ H、ビード幅 B 及びビードの全高 H+P の変化を示している。溶接電流は ACC 制御により一定に保たれている。溶込み深さ P は $v=25$ cm/min で最も深い。アークの観察によればこのあたりが露出面の発生境界になっている。ただし、一般に露出面が発生する点では溶込みは急変するので、図の最大溶込み位置が露出境界と考えることはできない。Fig. 12 は以前 SAW で行った実験結果で、X線透視観察の結果、露出面発生時に溶込みが急増することを確認している。最大溶込みが生ずる原因は溶接速度と、開先形状にて定まるビード高さとの相関性によると考えられる。Fig. 13 は、 $v=15$ cm/min と 25 cm/min

Fig. 12 Effect of welding speed on bead shape in SAW (By X-ray fluoroscopic observation)

Fig. 13 Comparison of bead shape in welding speed difference ($v=25$ cm/min and 15 cm/min)

min ビード断面形状を、ビード表面の高さを合わせて示したものである。溶接速度が変化しても、溶接電流は一定であるからアークによる溶融池表面の高さはビード表面からみて変化しないと考えられる。図から明らかに、 $v=15$ cm/min において、溶融池表面からの溶融幅は増加している。すなわち、単位断面あたりの入熱の増加により、アーク直下の溶鋼厚さは増加しているが、ビード高さの増加がそれより大きい開先ルートからみた溶込み深さが減少することを示している。

3.4 フィラーワイヤ添加による溶込み深さとビード高さの制御

3.2節 Fig. 7~9 で示したように、Y 開先の突合せ溶接では、ルートギャップの変化に対して、ビード断面形状は変化せず、ACC 制御によるトーチ高さの変化が溶込み深さの変化とほぼ等しい。そこで、Fig. 14 に示す制御方法を用いて、トーチ高さが常に一定となるように、フィラーワイヤを添加制御する実験を行った。フィラーワイヤの添加は、溶接入熱、アーク力を変えることなく、溶着金属量を調整できるので、開先内の溶接ビード高さと溶込み制御に有効な方法であることは、野村¹¹⁾による片面 SAW の実験により確かめられている。Fig. 15 実線は電極ワイヤと同じフィラーワイヤ (1.2 mmφ) の添加制御による結果で、トーチ高さ、ビード高さ、溶込み深さともルートギャップの変化に対してほぼ一定に制御されていることを示す。破線は、フィラーワイヤ添加制御しない場合の各値の変化を示している。すなわち、

Fig. 14 Block diagram of filler wire control

Fig. 17 Comparison of bead shape between filler wire control and non-control

Fig. 15 Control result of penetration depth and bead height by filler wire control

Fig. 18 Control result by filler wire control

フィラーワイヤの添加により、ビード高さが増加するが、その増加量と同程度に溶込み深さが減少している。Fig. 16 に、この場合のビード全高 ($H+P$) と、チップ・溶込み底間の距離 (E_x+P) を示しているが、フィラーワイヤの添加の有無によらずルートギャップの変化に対して一定である。Fig. 17 にビード断面形状の例を示す。破線は $G=0$ 、実線は $G \geq 2.5$ mm の場合を母材表面を同一にして重ねたものである。ワイヤ添加の(b)図、 $G=2.5$ mm において、フィラーワイヤの添加速度は、3.8 m/min (電極ワイヤの送給速度は 10.8 m/min) となっており、母材の溶着金属量は35%増加している。ビード全断面積は、 $G=0$ とほぼ同一であるから、母材の溶融断面積がこの分だけ減少していることがわかる。Fig. 18 にフィラーワイヤ添加時の制御波形を示す。

3.5 溶接電流と溶込み深さの関係

以上示したように、ACC 制御によるトーチ高さが常に一定となるようにフィラーワイヤの添加速度を制御する方法は、溶込み深さとビード高さを同時に制御するのにかなり有効な方法であることがわかった。しかしながら 3.2 節で示したように、この方法は、ルートギャップの変化に対してビード断面形状が変化しない場合に限られ、I 開先では成立しない。すなわち開先深さあるいは開先角度の影響を受けると思われる。そこで、より直接的に溶込み深さを支配する溶接電流の影響を調べた。

Fig. 16 Relation between root gap width and bead shape parameters

Fig. 19 Effect of welding current on bead shape
(In the case of constant welding speed)

Fig. 20 Effect of welding current on bead shape
(In the case of constant bead height control)

Fig. 19, 20 に Y 開先突合せ溶接 (開先深さは 3.5 mm) において溶接進行と共に溶接電流をステップ状 (0.6 秒ピッチ) に変化させた結果を示す。なお、溶接電流を変化するにあたっては、ワイヤ突出し長さとアーク長が一定となるようなデータベース¹²⁾を用いて、ワイヤ送給速度とトーチ・母材間電圧を制御している。また、母材は SUS 304、ワイヤはフラックス入りワイヤ (JIS Z 3323 YF 308 LC, ワイヤ径 1.6 mmφ)、シールドガスは 100%

Fig. 21 Comparison of bead shape with welding current change

CO₂ を用いている。

Fig. 19 は、溶接速度を一定として、溶接電流のみを変化した場合である。溶接電流の増加により、ビード幅 B、余盛高さ Hr、溶込み深さ P ともに増加するが、ワイヤ送給速度の増加により溶着量が増加するので、アーク入熱の増加は主としてビード幅の拡大に消費されており、電流変化に対する溶込み深さの変化は効率的に行われない。次に、溶接電流の変化に対して溶着断面積が一定となるように溶接速度を制御した結果を Fig. 20 に示す。図で明かなように溶込み深さは顕著に変化しており、一方、ビード幅と余盛高さはほぼ一定に保たれている。両図における I=240 A と 380 A のビード断面形状を Fig. 21 に示す。図より、溶接速度一定の場合と溶着断面積一定 (ビード高さ一定) の場合において、同一の電流変化量による溶込み深さ変化への寄与率の差が明らかに認められる。

4. 結 言

本研究は開先形状と溶接パラメータが溶込み深さとビード高さに及ぼす影響を検討した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 溶接電流が一定となるようにトーチ高さを制御 (ACC 制御) して、ルートギャップが変化する突合せ溶接における、溶込み深さとビード高さの変化を調べた。

(2) Y 開先で、ビードが常に開先内にある場合には、ルートギャップの変化に対して、ビード断面形状が変化しないことがある。すなわち、溶込み深さとビード高さの変化量は等しい。この時 ACC 制御によるトーチ高さの変化量も等しい。

(3) ルートギャップの変化に対して、ビード断面形状が変化するような開先形状、たとえば、I 開先では、上記(2)の関係は成立しない。

(4) 上記(3)の現象は、アーク直下の溶融池表面形状が変化して、溶融池表面の界面張力圧力と溶鋼の重力ヘッドが変化するため、と考えられる。

(5) 上記(2)の現象を利用して、ACC 制御によるトーチ高さが常に一定となるように、フィラーワイヤを添加制御することにより、溶込み深さとビード高さを一定に制御できることがわかった。この場合、フィラーワイヤの添加による溶着断面積の増加と母材の溶融面積の減少は、等しく、その結果ビード断面形状がほぼ一定に保たれる。

(6) フィラーワイヤ添加制御法は、Y 開先のように、ルートギャップの変化に対して、ビード断面形状が変化しない場合にのみ有効であり、I 開先など、ビード断面形状が変化する場合には適用できない。

(7) Y 開先溶接において、溶接速度を変化すると溶込み深さはある速度にて最大値を示す。これは、溶接速度変化による入熱の変化と開先角度で定まるビード高さの

変化との相関によって定まり、アーク直下の溶融池表面からの溶融幅に依存する。

(8) 溶接速度一定で溶接電流のみを変化すると、アーク入熱とアーク圧力の変化は主としてビード幅の変化に消費され、溶込みの変化には有効に寄与しないことがある。

(9) 溶接電流の変化と共に、溶着断面積が一定となるように溶接速度を制御する方法によれば、ビード幅、ビード高さはほとんど変化せず、アーク入熱、アーク圧力の変化が溶込み深さの変化に有効に作用する。

参考文献

- 1) 野村：アーク溶接におけるインプロセス制御の現状と問題点，溶接学会全国大会講演概要集，39 (1986)，3-5.
- 2) 森安，平本，大峯，柴田，黄地：赤外線放射計測による熱加工モニタリングの研究(第一法)ーアーク溶接部の温度計測の検討ー，溶接学会全国大会講演概要集，40 (1987)，248-249.
- 3) 小園，小倉，小沼：溶接部温度モニターによる裏波ビード幅の制御システムー溶接部の溶込み制御に関する研究(第4報)ー，溶接学会論文集，4-2 (1986)，336-340.
- 4) 西口，黄地ら：計算モデルによる溶接条件のオンライン最適
- 5) 谷岡，中野，手島，結城：TIG溶接の溶融池幅の計測とフィードバック制御，溶接学会全国大会講演概要集，36 (1985)，14-15.
- 6) H. Nomura: Arc Light Intensity Controls Current in SA Welding, Welding and Metal Fabrication, 48-7 (1980), 457-465.
- 7) 高橋，森沢，小出，根津：画像処理による溶接制御システムの開発，溶接学会全国大会講演概要集，39 (1986)，230-231.
- 8) 大嶋，森田，藤井，山本，窪田，：パルス MIG 溶接における溶融池の画像処理とデジタル制御，溶接学会論文集，5-3 (1987)，304-311.
- 9) 西口，黄地，吉田，白樫：アーク溶接における溶融池の非線形モデル，溶接学会論文集，4-4 (1986)，673-677.
- 10) E. Friedman: Analysis of Weld Puddle Distortion and its Effect on Penetration, Welding Journal, 57-6 (1978), 161S-166S.
- 11) 野村：アーク溶接用センサー及びセンサシステム，溶接技術，33-6 (1985)，39-43.
- 12) 杉谷，勘定，西：突合せ溶接における溶込み深さ及びビード高さ制御に関する研究，溶接学会全国大会講演概要集，41 (1987)，196-197.

多変数溶接パラメータ制御による溶込み深さとビード高さの同時制御*

杉谷 祐司**，勘定 義弘**，西 泰彦**

Simultaneous Control of Penetration Depth and Bead Height by Controlling Multiple Welding Parameters*

by Yuji Sugitani**, Yoshihiro Kanjo** and Yasuhiko Nishi**

One of the important subject in the study of automatic arc welding is to establish control system of welding parameters for controlling bead shape, namely penetration depth, bead width and bead height, by detecting or predicting behavior of molten pool owing to change of groove shape.

This report describes the study of simultaneous control system of penetration depth and bead height despite the variation of root gap in gas metal arc welding with X-groove. In this system, root gap width is detected by image processing with CCD (charge coupled device) camera, and welding current and welding speed are controlled in order to keep constant penetration depth and bead height. Furthermore in this system, wire feeding rate and terminal voltage are controlled by using equations proposed by Lesnewich and Halmöy so that both wire extension length and arc length can be kept constant during torch height control with ACC method. This control of both wire extension length and arc length is very effective to maintain stabilized welding arc.

From the result of an experiment with X-groove of SUS304 stainless steel, both penetration depth and bead height can be simultaneously controlled to be almost constant despite the variation from 0 to 3 mm of root gap width.

Key Words: Penetration depth, Bead height, Root gap, Welding parameter control, Image processing

1. 緒 言

溶接中の開先形状，開先線の変化が前提となる構造物

の溶接ロボットには，センサーを具備した知能化が必要である。開先形状の変動による溶融池現象の変動を検出，もしくは予知して，ビード形状寸法，すなわち，溶込み深さ，ビード幅，ビード高さなどをリアルタイムに制御するための溶接パラメータの制御システムの確立は重要な課題である。

ルートギャップ幅の変化する突合せ溶接における溶込

*原稿受付 昭和63年7月14日 平成元年度春季全国大会で論文発表講演

**正 員 NKK (日本鋼管株式会社) Member, NKK Corporation