実 用 講 座

溶込み形状はどのようにして制御するか？*

How to Control Weld Penetration and Bead*

岡 田 明**

by Akira Okada**

キーワード：アーク溶接，溶込み形状，ビード形成，制御，溶接条件，溶融池現象

1. は じ め に

アーク溶接における溶込み形状の制御は，溶込み深さ，ビード幅（溶融幅），余盛り高さ（溶着金属量）の三つが基本量となり，これらの相互関係から表ビード形状や裏波ビード形状が支配されると考えてよい。ここでは溶接諸条件によりこれらの制御を実施する際に必要とする最小限の基本的知識と実用的な方法，留意点などを明らかにする。

2. 溶込み深さ，ビード幅，溶着金属量の制御

1) アーク溶接における入熱及び溶融特性

アークで発生する熱量 (J/s) はアーク電圧 $E(V)$ と溶接電流 $I(A)$ の積で与えられるが，アーク電圧と概略比例関係にあるアーク長を長くするとアーク柱の部分から大気へ熱放散する割合が増加し，その分母材や溶接棒（ワイヤ）の溶融には役立たない。溶接アークの特徴として，細い棒状の電極先端からアークが母材に向かって広がって発生するので，この電流の電磁力の作用で母材に向かう気流（プラズマ気流）が発生する¹⁾。この気流が母材の溶融金属を押し下げたりあるいは表面流れを生じさせ，溶込みやビード形成に大きな影響を与える。また溶融池の溶融金属の表面張力差に起因した対流が発生し，これが溶込み形状を変える場合もある²⁾。このような入熱形態の特徴にともないアーク溶接の溶込み断面形

状は図1のように大別される²⁾。溶融池の挙動はきわめて複雑であるが，最近コンピュータを利用した溶融池モデルの数値解析⁷⁻¹⁰⁾や溶融池現象とその制御^{5,18-20)}に関する研究が盛んに行われている。

2) 溶込み形状の基本量を支配する溶接条件因子とその主原因

実用的な制御の観点から，種々の溶接条件因子が溶込み形状にどのように影響を与えるかのめやすを表1に示す。めやすとしては溶接条件因子の値を増加させたときにプラス（増加する）側に作用するものを⊕，マイナス（減少する）側に作用するものを⊖，あまり変化しないものを⓪で表している。また溶接条件因子の値の増加によって溶込み形状が変化する主な原因を右端に示した。

溶接諸条件のそれぞれの値は溶接法・開先形状や相互の条件関係に応じて使用可能な範囲（溶接条件範囲）があり，特にアーク電圧やワイヤ径は使用する溶接電流に対して適正範囲がある^{3,4)}ので注意が必要である。

トーチ角度については，一般に溶込みが浅く溶融金属がスラグで覆われる被覆アーク溶接やフラック

図1 固定ティグアークによる溶込みの三形状

*原稿受付 平成2年7月11日

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

表1 溶込み形状に影響を与える溶接諸条件
(各条件の値を増加させたとき、増加する⊕、減少する⊖、変化しない◎)

溶接諸条件	溶込み深さ	ビード幅	溶着金属量	主な原因
溶接電流	⊕	⊕	⊕	入熱量増、プラズマ気流強
アーク電圧 (アーク長)	⊖ ^{*1}	⊕	◎ ^{*1}	入熱分散、プラズマ気流の影響弱
溶接速度	⊖ ^{*2}	⊖	⊖	単位溶接長当りの入熱・溶着金属量減
ワイヤ径	⊖	⊕	⊖	プラズマ気流弱、溶滴移行形態変
トーチ角度				
前進角	⊖	⊕	◎	溶融金属やスラグが先行
後退角	⊕	⊖	◎	溶融金属やスラグが後退
母材の傾斜				
上り坂	⊕	⊖	◎	溶融金属やスラグが後退
下り坂	⊖	⊕	◎	溶融金属やスラグが先行

*¹シールドガスやフラックスの種類で同一アーク長でもアーク電圧が増加する場合は溶込みや溶着金属量はプラス。

*²溶接速度を増加するとアーク直下の溶融金属やスラグは後退し、条件によってはある速度範囲で溶込みはプラスに作用する場合もある。

ス入りワイヤによるアーク溶接などは後退角が用いられ、一方ソリッドワイヤによるガスシールドメタルアーク溶接では普通前進角が用いられる。母材の傾斜は特に管の円周溶接などでこの影響が顕著に現れる。

このほか、パルス電流を使用しピークとボトムの電流の差を大きくすることによって平均入熱量が同一でもプラズマ気流を強くしたり、パルス間隔を変えることによって平均入熱量を変えたりして、溶込みの制御に利用する。またウィービング操作を行い開先内の溶融領域を広くしたりすることがなされる^{3,4)}。

3) 溶込み形状の制御についての留意点

先にも述べたように、溶込みやビード形成は溶融池に作用する種々の外力の相互作用によって決まるもので、現状では溶込み深さやビード幅と溶接条件因子との間の関係を簡明に表す数式はない。ただし、溶接方法や開先形状などの適用範囲を限定したときの実験式は実用上きわめて有効で、その一例として少し古くなるがサブマージアーク溶接（平板上ビード）の場合のジャクソンの式というのがある。これ

図2 サブマージアーク溶接における溶込み深さの実験式

は $P = K \cdot \sqrt[3]{I^4 / v \cdot V_a^2}$ であたえられ、溶込み深さ $P(\text{mm})$ に影響を与える因子は溶接電流 $I(\text{A})$ 、アーク電圧 $V_a(\text{V})$ 、溶接速度 $v(\text{cm/min})$ のほか K は使用するフラックスの種類によって決まる定数である。図2¹⁾はこの関係の一例を示す。

複数の条件因子を同時に変化させると、それぞれの影響力の違いやその相互作用で表1からは予測がつかない場合もある。例えば溶接電流 I を増加させると同時に溶接速度 v を I/v が一定になるように増加させると、単位溶接長当りの入熱量は同一であるが、溶接速度の増加によってアーク直下の溶融金属が後方に移動しアーク熱が直接末溶融部に与えられ溶込みは増加し、ビード幅に比し溶込みの深い形状となる。

溶込み形状を制御する場合、表1の溶接条件因子を単独に変化させてもよいが、より効果的な制御をするためにはこれらの因子を総合的に変化させた方が合理的な場合が多い^{2,20)}。

3. 表ビード形状の制御

1) ビード表面形状の基礎知識

アーク溶接におけるビードの表面形状は溶融池の溶融金属に作用する重力とそれをささえる表面張力とのつり合いで概略きまってしまう¹¹⁾。特に立向き溶接の場合やプラズマ気流の影響が強い場合以外では、溶接方向と直角な断面の二次元面での釣合で予測することができる¹²⁾。即ち溶融金属の重力や表面

張力は溶融金属の物理定数とこの面上での寸法によって決まり、例えば平板上ビードの余盛りの形状はビード幅と余盛り高さ（あるいは余盛り断面積）及び溶融金属に作用する重力と表面張力の影響を表す毛細管定数 $\sqrt{2\sigma/\rho g}$ (σ : 溶融金属の表面張力, ρ : 密度, g : 重力加速度で、例えば鋼板の場合として $\sigma=1000$ dyne/cm, $\rho=7$ g/cm とすると、この値は約 5.5 mm となる) がわかれば、決定できる。

図3はビードの接触角 θ が 90° (オーバーラップ発生限界) になる余盛り形状のときのビード幅と余盛り高さとの関係の計算曲線と、被覆アーク溶接についての実験結果をプロットしたもので、これらはほぼ一致する¹²⁾。即ち余盛り形状を制御するにはビード幅と溶着金属量を制御すればよく、例えばビードの接触角 θ を小さくするには溶着金属量に対してビード幅を大きくすればよい。

2) すみ肉溶接における表面形状

すみ肉溶接においても同様に溶接線に直角な断面での溶融幅(脚長)と溶着金属量(溶着断面積)と毛細管定数でその形状が決まり、図4は等脚長の水平すみ肉溶接におけるオーバーラップ及びアンダカット

図3 平板上ビードでのオーバーラップ限界($\theta=90^\circ$)におけるビード幅と余盛り高さとの関係

図4 等脚長水平すみ肉溶接における溶融池表面形状(二次元モデル)

トの発生限界を計算した結果である¹³⁾。すみ肉溶接におけるビード表面はできるだけ平坦であるのが望ましいが、図中に示されているようにオーバーラップ限界線より溶着断面積が多くなると、水平板面にオーバーラップ(接触角 $>90^\circ$)になりまたアンダカット限界線より溶着断面積が小さくなると垂直板側にアンダカットが生ずる。ハッチした部分が一応正常ビードとなるが、この領域内で表面形状から実際に推奨される脚長としては $1.5 * \sqrt{2\sigma/\rho g}$ 以下にする必要があると結論されている¹³⁾。即ち鋼板のすみ肉溶接でストレート運棒では脚長を $1.5 * 5.5=8$ mm 以下にしないと平坦な表面形状が得られない。もし一層でこれ以上の脚長で適正なビード表面形状を形成するためにはウィーピング溶接などの適用が考えられる。

以上のように表面形状を支配する主因子は溶着金属量と脚長であるが、その他溶接棒のねらい位置は適正領域の裕度に影響を及ぼし、普通すみ肉継ぎ手の底部から水平板側に1-2 mm ずらした位置までの範囲内が使われる⁴⁾。

4. 裏波ビード形成の制御

板の片側からアーク溶接をし、その裏側に裏波ビードを形成するいわゆる裏波溶接(片面溶接)においては、板の裏面まで確実に溶融させかつ、溶落ちが起こらない程度にとどめる必要があり、適正条件範囲の裕度が比較的小さい。ここでは大別して溶落ちを防止するための裏当てを用いない TIG アーク溶接などによる薄板や小径管の裏波溶接と裏あてを使用する比較的大電流の厚板の裏波溶接とに分けて述べる。

1) 薄板や薄肉管の裏波ビード形成

裏波ビードの表面形状は、表ビードの場合と同様溶接線に直角な面での溶融金属の重力と表面張力とのバランスで概略定まり^{14,15)}、板厚が厚くなり溶融金属の重量が増加するとその表面張力だけでは溶融金属を保持できなくなり、溶落ちを起こす。このため厚板では裏当てを用いるのが普通である。図5は鋼板の溶接における板厚と許容裏波ビード幅との関係¹⁴⁾を示したものである。与えられた板厚に対して裏波ビードの形状を支配する主因子は表及び裏波ビード幅である。

図6は実用的見地から薄鋼板の平板上ビード溶接における溶接条件と溶落ちが起こる最大板厚との実験結果¹⁶⁾を示したもので、与えられた板厚に対して

図5 許容裏ビード幅と板厚との関係

図6 薄鋼板の平板上ビード溶接での溶落ちが起る最大板厚と溶接条件との関係の実験結果

板の裏面まで溶融させるに必要な溶接条件の大きな目安となる。

ここでアーク電圧 E は使用する電流での適正值を使用するものとし、かつ交流 (AC) の場合は交流電流計の読み (実効値) に 0.9 を掛けた値を電流値 I とする。板の裏面がわずかでも溶融する板厚と溶落ちが起る板厚とは当然異なるが、被覆アーク溶接や CO_2 短絡アーク溶接では、この差が比較的小さく、このことはルート間隔がゼロの場合には連続して安定な裏波ビードを形成することは難しいことを意味する。そこでルート間隔を 1~2 mm 程度あげアークや溶融金属を板の裏側へ積極的に与えて裏波ビードを形成するいわゆる対流形²⁾の方式をとる。

一方 TIG アーク溶接の場合はルート間隔ゼロで十分に安定な裏波ビードが形成できる。

2) 厚板の裏波ビード形成

厚板の裏波溶接にはサブマージアーク溶接が広く

図7 裏波ビードを形成するための継手容量

図8 各板厚・開先形状での片面サブマージアーク溶接における適正な裏波ビードを形成するための溶接電流と継手容量 ($W=15 \text{ mm}$) との関係

採用され、このときの裏当てはフラックスや銅裏当てあるいはこの併用方式が使われる。板厚は 2~3 電極を用いて一層で 38 mm 程度まで片面溶接がなされる^{3,4)}。ここで与えられた板厚と各種開先形状 (開先角度, ルート間隔, ルート面高さなど) に対して裏波ビードを形成する第一層目の溶接条件をどのように決めたらよいであろう。厳密にむずかしい問題であるが近似的には予想できる。いま、開先形状によってアークの広がり (ビード幅) や溶融金属の流れの挙動が大きく変化しない範囲 (入熱形態が大きく変化しない範囲) での適用を考えると、図 7 のように溶接線を中心として平均的な溶融幅 W の範囲に存在する母材の断面積 (これを裏波ビード形成に対する継手容量と呼ぶ) が一定であれば開先条件の如何に関わらず、一定の溶接条件 (ある入熱形態での一定の入熱量) で適正な裏波ビードが形成されるはずである¹⁷⁾。

いま比較的大電流のサブマージアーク溶接の場合を例にとると、安定な裏波ビードが形成されている

ときには、裏波ビード幅は表ビード幅とあまり変わらず板厚にもよるが12~18 mm程度である。そこで平均的な溶融幅 W として15 mmをとり、この間の母材の断面積をサブマージアーク溶接の場合の裏波ビードに対する継手容量とする。図8は鋼板の主な片面溶接法におけるI, V及びX開先形状に対して適正な裏波ビードが形成される一層目の溶接電流とこの継手容量との関係¹⁷⁾を示したものである。ここでアーク電圧は溶接電流に対して適正値に保ち、溶接速度は普通使用される30~50 cm/min程度の範囲内に限定している。

5. お わ り に

溶込み形状の制御は、与えられた母材の材質・寸法および溶接方法などに対して、それぞれの特質を活かして合理的に行うことが必要である。ここでは総括的に述べたが実施する際の個々のデータや工学的な背景の詳細などは参考文献を参照されたい。このほか重要なテーマとして自動制御法があるが、現状では溶込み形状の検出方法が主役であり、制御についてはここで記述した溶込みの基本量の制御が主に適用される。

参 考 文 献

＜溶込み・ビード形成の制御全般＞

- 1) 安藤, 長谷川: 溶接アーク現象, 産報(1967)
- 2) 荒田, 西口: 溶接法の基礎 (溶接全書2), 産報出版(1979)
- 3) 益本, 岡田: 半自動・自動アーク溶接 (溶接全書7), 産報出版(1978)
- 4) 溶接学会編: 溶接便覧 (このうち特にII章1~5まで), 丸善(1977)
- 5) 全国大会シンポジウム: 溶融地現象とその制御, 本会論文集, 4-1(1986), 230-278

- 6) 石崎, 神戸: アーク溶接における溶込み生成機構, IIW-II, SG212 資料(1965)

＜溶融池モデルの数値解析＞

- 7) 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, 本会論文集, 4-4(1986), 673-677
- 8) 松縄, 横谷, 浅古: 静止アーク溶接における溶融池内の対流と溶込み形状, 本会論文集, 6-4(1988), 455-462
- 9) 牛尾: 溶融池内対流現象と数値解析モデル I, 本会学会誌, 59-3(1990), 173-177
- 10) 牛尾: 溶融池内対流現象と数値解析モデル II, 本会学会誌, 59-4(1990), 253-258

＜ビード表面形状＞

- 11) 石崎: アーク溶接現象に関する界面張力理論 (第6章), 溶接学会誌, 33-2(1964), 125-131
- 12) 西口, 黄地, 松井: 肉盛及び隅肉溶接現象に関する基礎的研究 (第1報), 溶接学会誌, 45-1(1976), 82-87
- 13) 西口, 黄地, 松井: 肉盛及び隅肉溶接現象に関する基礎的研究 (第2報), 溶接学会誌, 45-2(1976), 143-149

＜裏波ビード形成＞

- 14) 西口, 田代, 小西: 薄板のプラズマ溶接, 溶接学会講演概要, 7(1970)91
- 15) 西口, 黄地, 田中, 石橋: アーク溶接の溶融池現象に関する界面張力論的解析 (第3報), 本会論文集, 2-2(1984), 201-207
- 16) 稲垣, 岡田, 藤田, 森田: 薄鋼板のアーク溶接時の溶落ちについて, 溶接学会講演概要, 1(1967)127
- 17) 岡田: 片面溶接における最適溶接条件の選定方法, 溶接アーク物理研究委員会資料, 79-423(1979)

＜溶込み・ビード形成の自動制御＞

- 18) 溶接学会溶接法研究委員会編: アーク溶接におけるセンシングと制御, 黒木出版(1990)
- 19) 大嶋: アーク溶接溶融池現象の検出と制御, 本会誌, 58-4(1989), 260-265
- 20) 杉谷, 勘定, 西: 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, 本会論文集, 7-1(1989), 15-26