

溶接パラメータと溶込制御

NKK エンジニアリング研究所

杉谷 祐司

Welding Parameters and Penetration Control

by Yuji Sugitani Tsu Labs., Engineering Research Center, NKK

溶接中の開先形状変動が前提となる構造物の溶接ロボットには、適応制御を具備した知能化が必要となる。適応制御は表1に示すように、

- (1) 開先形状および溶融池現象をセンシングし、
- (2) センシング結果に基づいて溶込形状やビード形状が目的値となるように溶接パラメータを制御する。

操作対象となる溶接パラメータとしては溶接電流、ワイヤ送給速度、溶接トーチ電圧、溶接速度の4パラメータがある。

本報では、これらのパラメータをどのように制御すれば効果的に溶込形状が制御できるのかを検討する。まず溶込形成の物理的要因を把握する。次に関連の研究例を紹介する。

1. アーク溶接における溶込形成の物理的要因

図1は開先内における溶融池断面形状と溶込形状、および溶融池断面に作用する各種力の平衡関係を示す。すなわち、

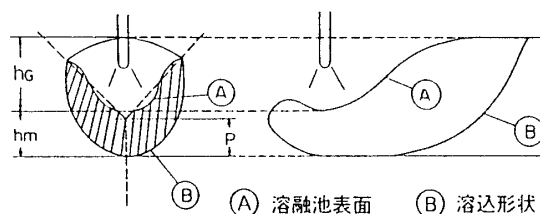
- (1) 溶融池表面形状①は、アーク力（プラズマ気流を含む）とその分布、溶融金属の重力ヘッド h_g 、表面張力 γ_s 、および開先形状により与えられる。
- (2) 溶込形状②は、溶融池表面のアーク熱とその分布（溶接入熱 Q ）による熱伝達（熱伝導と対流）により与えられる。

溶込形状のインプロセスセンシングは困難である。従って現状では、表1のように開先形状と溶融池現象を部分的にセンシングし、得られた情報より溶込形状を実験的に推定し、アーク圧力、溶着量、表面張力、入熱などの相互関係を考慮して溶接パラメータを制御する研究がなされている。

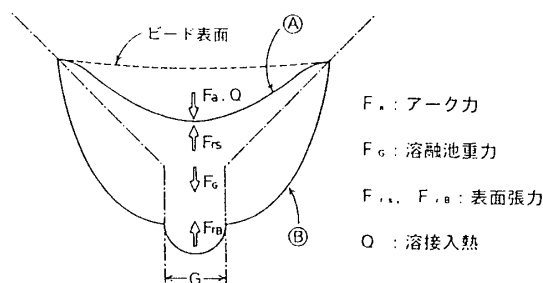
溶接学会全国大会講演概要 第57集('95-10)

表1 溶込制御の概念

センシング	開先形状（仮付ビード含む）
	溶融池現象（表面形状）
溶接パラメータ制御	アーク圧力（溶接電流）
	溶着量（ワイヤ送給量、溶接速度）
	入熱（溶接入熱、アーク入熱）
	表面張力（入熱）



(a) 溶融池形状の定義



(b) 溶込形成の物理的要因

図1 溶融池の断面形状とそれに作用する力

2. 溶込・裏ビード制御の実例

【実例1：対流型片面ウィービング式GMAWにおける裏ビードとビード高さの制御】

〔制御パラメータ：溶接速度〕

比較的広いルートギャップを有するV開先に裏当材を用い、ウィービング式GMAWにより行う片面溶接法は造船や橋梁などの板継に広く用いられている。この場合アーク直下に適当な量の溶融金属層を形成しながら行ういわゆる対流型片面溶接法が採用される。開先のギャップが広がるにつれて、図2に示すようにビード高さ h_F が減少すると共にアーク位置が溶融池の先端側へと移行して行き、遂にはアークが溶融池より先行して溶落状態となる。アークセンサによるトーチ高さ制御を行うと、ビード高さの変化とトーチ高さの変化は比例的である。すなわちこの場合、アーク直下の溶鋼の重力ヘッドとアーク圧力はほぼ平衡関係にある。そこで(1)ルートギャップの変化を検出してビード高さが一定となるように溶接速度を制御する。または(2)トーチ高さが一定となるように溶接速度を制御すると広範なルートギャップ変化に対して安定な片面溶接が行える¹⁾。

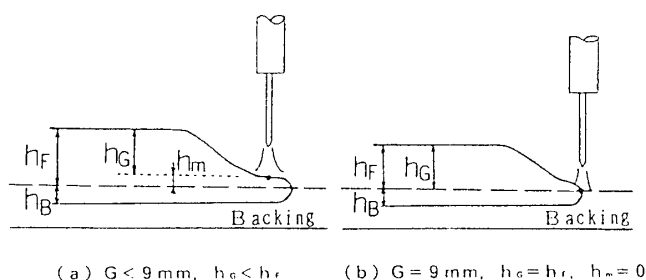


図2 対流型片面溶接におけるアーク位置および力の平衡関係 (h_c ：一定)

【実例2：キーホール型片面SAWにおける裏ビード制御とビード高さの制御】

〔制御パラメータ：溶接電流、ワイヤ送給速度、添加ワイヤ送給速度〕

造船の大板板継に用いられている多電極SAWによる片面溶接法では先行電極アークによりキーホールが形成されている。キーホールから裏面に貫通するアークの光量もしくは電位を検出するとこれらの値はいずれも裏ビード幅と対応関係にあり、実験によって最適値を求めることができる。そこでこれらの検出値が最適値と一致するように溶接電流を制御すると、開先形状(仮付ビード形状含む)に関係なく一定な裏ビード幅に制御される²⁾。この場合、溶接ワイヤ送給速度も溶接トーチ電圧が一定となるように制御されている。この制御方法では開先断面積が増加すると溶接電流、ワイヤ送給速度が減少するのでビード高さが減少する。ところが先行の溶接電流とビード高さには、図3に示すように直線的な関係のあることを利用して、所望のビード高さに対応する基準溶接電流を実験で求め、先行の溶接電流がこの基準値となるように溶接電極とは別体の添加ワイヤの送給速度を制御する²⁾。つまり、裏ビード制御のための溶接電流(およびワイヤ送給速度)の制御とビード高さ制御のための添加ワイヤ送給速度制御を同時に行う。結果としては溶接電流、溶接トーチ電圧、ワイヤ送給速度、溶接速度の4パラメータは全て一定となり、添加ワイヤによる溶着量のみが制御されて裏ビードとビード高さが制御される。

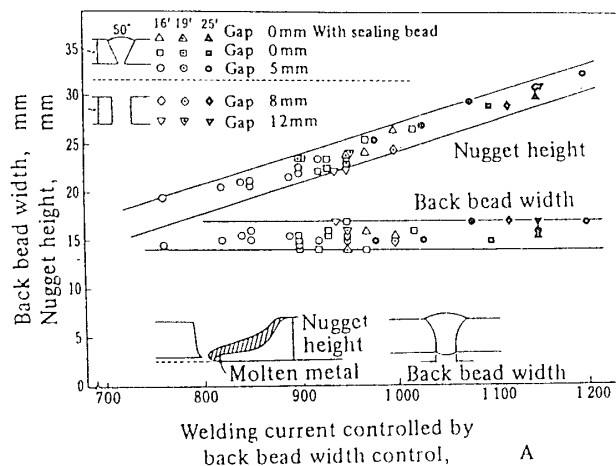


図3 裏ビード制御による溶接電流とビード高さの関係

【実例3：両面GMAWにおける溶込深さとビード高さの制御】

〔制御パラメータ：溶接電流、溶接トーチ電圧、ワイヤ送給速度、溶接速度〕

裏当のないX開先におけるGMAWの溶込深さを効率的に制御する方法を検討した。溶接速度のみを制御する方法では、溶接入熱の変化と（溶着断面積の変化による）熱源高さの変化が相殺関係となるため溶込深さは殆ど変化しない。一方溶接電流のみを制御する方法では溶接入熱の変化と熱源位置の変化が溶込深さに対して助長的作用に作用するので溶接速度よりは効果的である。しかしながらこの場合でも溶接入熱の変化の多くが溶着断面積の変化に消費され、溶込深さに対する溶接電流の寄与率は実用上満足なものとは言えない。ところが、溶接電流の変化と共にビード高さが一定となるように溶接速度を制御すると溶込深さは効率的に制御できる。両方式の溶接電流による溶込深さへの寄与は図4に示すように顕著である。溶込深さの変化は溶接速度一定の場合0.7mm/140A、溶接速度を併用制御の場合3.5mm/140Aとなっている。つまり溶込深さを効果的に制御するには、溶接電流と共にこの時のワイヤ送給速度を考慮してビード高さが一定となるように溶接速度を併用制御する方法が有効である³⁾。この場合、アーク長とワイヤ突出長は一定とし、図5に示す関係式を用いてワイヤ送給速度と溶接トーチ電圧（アーク電圧およびワイヤ突出部の電圧）が算出され、アークセンサによるトーチ高さ制御の併用により、アーク電圧とワイヤ突出長が一定制御される。ルートギャップの検出は、溶接トーチ前方に設置したCCDカメラで開先上方より撮影し、画像処理により求める。ルートギャップの検出値と4パラメータの制御結果を図6に示す⁴⁾。

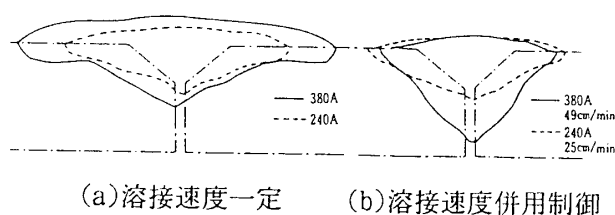


図4 溶込深さに及ぼす溶接電流の影響

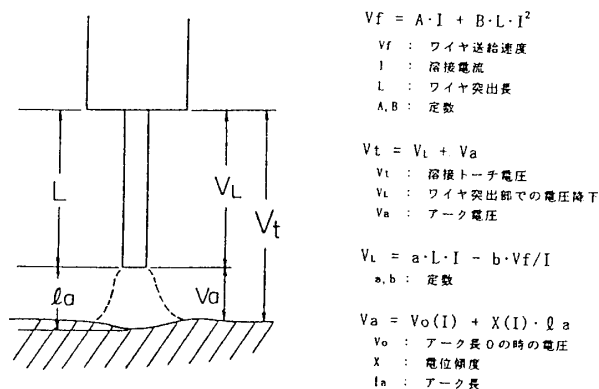


図5 パラメータの定義と関係式

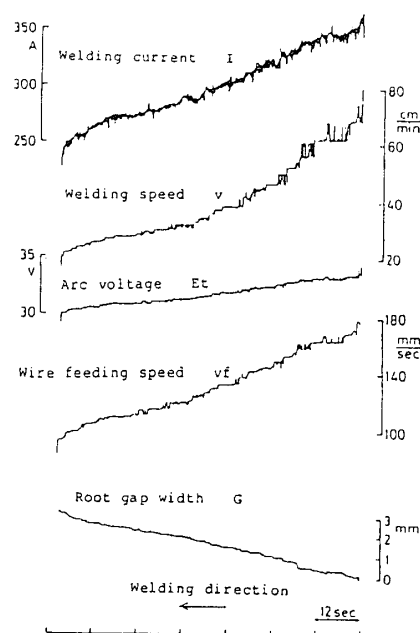


図6 ルートギャップ幅の検出値と溶接パラメータの制御結果

【実例4：キーホール型片面GMAWにおける裏ビードとビード高さの制御】

〔制御パラメータ：ワイヤ送給速度（突出長）、溶接トーチ電圧〕

若干のルートフェースを持つV開先継手の裏面に裏当材を設け高速回転GMA溶接を行うと図7に示すように安定なキーホール（直径約4mm）が形成され良好な片面溶接が行える（溶接電流400A）。しかしながら開先のルートギャップやルートフェースの変化により開先断面積が増加するとビード高さが減少し、キーホールの長さが拡大して裏当材が溶削されるようになり溶落現象を起こす。

そこで開先断面積の増加をルートギャップの増加に代表させ、従来の知見<実例1～3>と同様にビード高さ一定となるように溶着量を制御することを前提として、表2に示すような4パターンの溶接パラメータ制御の方法を実験で比較した。パターンⅠは<実例1>と同じ溶接速度制御のみによる方法、パターンⅡは<実例3>に従って溶接電流、ワイヤ送給速度、溶接トーチ電圧、溶接速度の4パラメータを減少させる方法である。ところが、これらⅠ、Ⅱの方法では何れも溶接入熱、アーク入熱が激増するためにキーホール長さが拡大して、ルートギャップ1mmを超えると裏ビード形状が不良となり、ルートギャップ2mmで溶落状態となり溶接続行不能となる。キーホールの長さは図7のO点でのアーク圧力、重力ヘッド、表面張力の釣り合いで決まる。入熱の増加により溶融池O点の温度が上昇し、この部分の表面張力が減少したことによると考えられる。つまり、パターンⅠ、Ⅱはキーホールの形成されない対流型（又は熱伝導型）の溶融池形状には通用するが、キーホール型の溶融池には不適である。

そこで、入熱を制御する方法を試みた。パターンⅢは溶接入熱（アーク発熱と突出部の抵抗発熱の和）を一定化したものでありアーク入熱は微減して行く。パターンⅣはアーク入熱一定とし溶接入熱は微増となる。結果は、Ⅲではキーホール長さが減少して行きルートギャップ1mm付近で消失して裏ビードが形成されなくなる。Ⅳはルートギャップ4mmまで一定のキーホール形状、裏ビード形状が維持できる。この場合制御パラメータはワイヤ送給速度、ワイヤ突出長、溶接トーチ電圧である。またⅠ～Ⅳ全ての方法においてアーク

センサによるトーチ高さ制御の併用も不可欠である。パターンⅣの方法は<実例2>の方法と類似であるがアーク入熱一定化の方法が異なる。キーホール型溶融池ではアーク直下の溶融池温度がアーク入熱に依存し、ワイヤの発熱分にはあまり影響されていないと考えられる。本法のインプロセス制御は、図7の原理図で示すように回転アークの後方の電圧（すなわちアーク長）が一定となるようにパターンⅣの方法でパラメータを制御することで行え、良好な結果が得られている⁵⁾。

参考文献

- 1) 野村、杉谷、玉置：ポータブル多層突合せアーク溶接ロボット，第112回溶接法研究委員会(SW-1772-87)，1987
- 2) 野村、佐藤、佐藤：片面サブマージアーク溶接のインプロセス制御，NKK技報 No.112，1986
- 3) 杉谷、西：溶込み深さの最適制御方法に関する基礎的検討，溶接学会論文集，7-1(1989)，15-21
- 4) 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，溶接学会論文集，7-1(1989)，21-26
- 5) 杉谷、毛：アークセンサによる片面溶接のビード高さや裏ビード形状の同時自動制御，溶接学会論文集，12-4(1994)，468-476

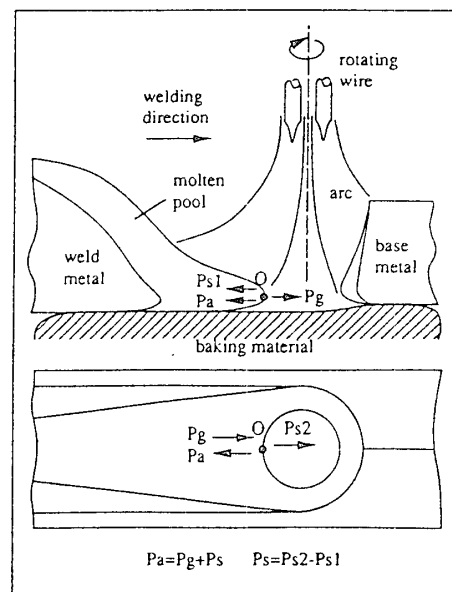


図7 キーホール型裏ビード形成機構のモデル

表2 溶着量制御におけるパラメータの制御方法
(ルートギャップ増加の場合)

パターン	制御パラメータ						溶接入熱	アーク入熱	アーク力	溶着量
	I a	V f	V t	V w	L					
Ⅰ	-	-	-	○↓	-		激 増	激 増	一 定	ビード高さ一定
Ⅱ	○↓	○↓	○↓	○↓	-		激 増	激 増	減 少	ビード高さ一定
Ⅲ	○↓	-	○↑	○↓	○↑		一 定	微 減	減 少	ビード高さ一定
Ⅳ	-	○↑	○↑	-	○↑		微 増	一 定	一 定	ビード高さ一定

[1] ○ 制御パラメータ；↑増加；↓減少

[2] 溶接入熱とアーク入熱はそれぞれトーチ電圧Vtとアーク電圧Vaにより計算する。

[3] ルートギャップゼロ時の各溶接パラメータを基準値とする。

[4] アーク長（計算値）は一定とする。