

パルス電流波形による溶込み形状の制御

Control of the Penetration Shape by Pulsed Current Waveform

野々村 将 一	技術開発本部生産技術センター溶接技術部
兵 間 賢 吾	技術開発本部生産技術センター溶接技術部
小 林 和 行	技術開発本部生産技術センター溶接技術部
山 岡 弘 人	技術開発本部生産技術センター溶接技術部 部長 博士(工学)
宮 坂 史 和	大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻 准教授

電流パルス波形で溶込み形状を制御することを目的とし、アーク現象と溶込み形状の関係を検証した。その結果、溶込み形状への寄与度の高い因子が溶滴移行形態であることが明らかとなった。これにより、溶込み形状を制御できる見込みを得た。さらに、溶込み形状を定量化する手法を開発し、パルス波形、溶滴移行形態、溶込み形状の関係を導出することでアークプロセスの体系化を試みた。また、溶滴移行形態の変化を熱源形状の変化として模擬した簡易モデルの開発、検証を行い、本モデルの成立性を確認できた。

Conventional selection of welding conditions has a high dependence over the experience of the welder. Since the effect of process parameter on the penetration has not been grasped quantitatively when the target groove configuration and a welding position change, selection of welding conditions has to be performed each time. Moreover, there is the necessity of cutting and observing a cross-section in the penetration shape check to select optimal conditions, and it requires much time. Therefore, the demand to predicting and controlling penetration shape is increasing. In this research, the relation of an output waveform formation parameter, arc phenomena, and penetration shape is estimated for the controlling of the penetration shape change by a current pulse waveform. As a result, it becomes clear that a large factor in the penetration shape change is a Droplet Transfer Mode. Then, the possibility of penetration shape control is found. Moreover, the above-mentioned relation is incorporated into the conventional penetration shape simulation model and the validity of a simple heat source model which imitates change of the Droplet Transfer Mode as change of heat source configuration is evaluated.

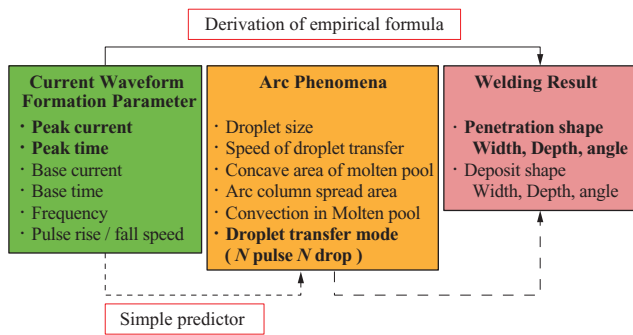
1. 緒 言

従来、溶接条件の選定においては、経験に対する依存度が高く、溶接プロセスが定量的に把握されていないため、対象となる開先形状や溶接姿勢が変化する毎に、条件選定を行っているのが実状である。また、最適条件選定手法の一つである溶込み形状確認には、溶接部を切断し断面を観察する必要があり、多くの時間を要する。そのため、溶込み形状を予測、制御することに対する要望はとても高い。デジタルインバータ制御電源の普及により、ユーザーが容易に任意のパルス波形を作り込むことが可能となったが、ユーザーが所望するビード形状、溶込み形状を得るために、パルス波形における個々の電流波形形成パラメータをどのように選定すればよいかは明確化されていない。本来、ビード形状や溶込み形状といった溶接プロセスの下流に分類される溶接結果は、アーク挙動・溶滴移行現象によってもたらされるものであり、パルス波形は、アーク挙動を制御するためのツールに過ぎない。つまり、ビード形

状、溶込み形状の制御にはアーク挙動・溶滴移行現象の制御が不可欠と言える。

パルス溶接に関しては、パルスピーク電流を臨界電流以上とすることにより、低電流域においても安定したスプレー移行を可能とする利点があることは一般に知られるところであるが^{(1) (2)}、パルス波形を形成する個々の因子が、アーク挙動・溶滴移行現象にどのように作用し、その結果、溶込み形状にどのように影響を及ぼしているかの知見は少ない。

そこで本研究では、溶接プロセスモデルの開発・評価を行うとともに、適用の多い GMAW に関して、デジタルインバータ制御電源を使用し、**第 1 図**に示すように、電流波形形成パラメータ、アーク現象、溶込み形状の一連のアークプロセスにおいて相互に関連があると思われる、ピーク電流、ピーク時間、溶滴移行形態および溶込み形状の関係を明確にすることを目的とする。また、これより得られた知見を用いて、従来の溶接プロセスモデルに対し、新たな熱源モデルを提案することを目的とする。



第1図 一連のアークプロセス概念図
Fig. 1 Grasp key map of arc process

2. 試験方法

2.1 実験装置と溶接条件

溶接電源はデジタルインバータ制御直流電源である。実験では溶接電源の外部特性を定電圧特性とし、パルス電流には台形波を適用した。第2図にパルス波形条件を定義する。パルス溶接の平均電流 I_{av} とパルス周波数 f は、次式で示される。

$$I_{av} = \{I_p \cdot T_p + I_b \cdot T_b + (I_p - I_b) \cdot T_r / 2 + (I_p - I_b) \cdot T_d / 2\} / T \quad \dots\dots (1)$$

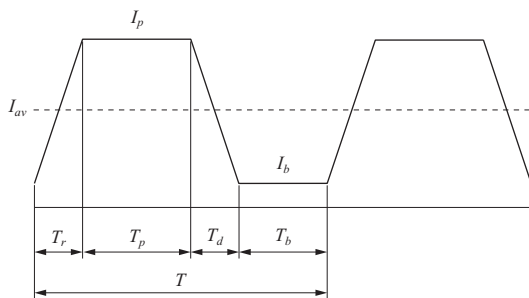
$$f = 1 / T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 I_p : ピーク電流値、 I_b : ベース電流値、 T_p : ピーク電流時間、 T_b : ベース電流時間、 T_r : 電流立ち上がり時間、 T_d : 電流立ち下がり時間、 T : パルス周期である。

極性は DCEP とし、シールドガスに Ar80% + CO₂20% 混合ガスを用いた。実験では平均電流 I_{av} を変えずに I_p 、 T_p 、 f を変えてビードオン溶接を行い、溶滴移行とビード形状への影響を検証した。なお、 f は 60 ~ 300 Hz の範囲を選んだ。使用鋼種は板厚 19 mm の軟鋼板 (SM490) で、溶接材料はワイヤ径 1.2 mm の軟鋼用ワイヤ (JIS Z 3312 : G49AP3M16) である。

2.2 溶滴移行現象の観察

ワイヤ先端での溶滴の成長、離脱および移行状況の観察



第2図 パルス電流波形
Fig. 2 Pulse current waveform

は、高速度カメラを用いた動画撮影により実施した。

撮影は、溶接試験片を台車で移動し、アーク点から溶接線と直角方向となる斜め上方の位置から行った。

撮影状況を第3図に示す。

2.3 溶込み形状評価指標の作成

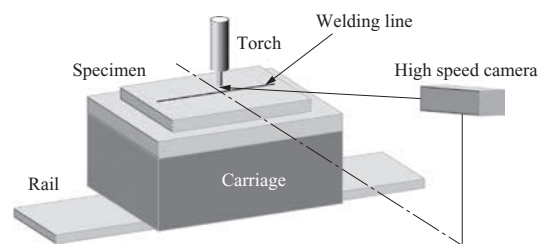
従来の溶込み形状評価は、目視での断面マクロ観察が主流であったが、経験差による評価のばらつきや、主観によっても評価に差が生じていた。

そこで本研究では、溶込み形状の評価にあたり、定量評価可能な溶込み形状評価指標 P_f を作成し、用いた。

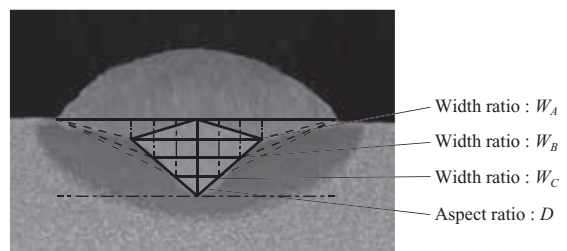
断面マクロ観察により、溶込み形状を計測し、算出した幅比 W_A (ビード幅/溶込み深さの 1/4 での溶込み幅)、 W_B (同 1/2 での溶込み幅)、 W_C (同 3/4 での溶込み幅) 及びアスペクト比 D (溶込み深さの 1/4 での溶込み幅/溶込み深さ) の 4 つの特徴量 (第4図) を独立変数とし、多変量解析を実施した。従属変数には、第1表に従い、目視での断面マクロ観察によってフィンガー形状から鍋底形状までを 1 ~ 5 点で評価した値を用いた。多変量解析により作成した溶込み形状評価指標 P_f を (3) 式に示す。

本指標 P_f を用いて求めた溶込み形状評価点数と目視による溶込み形状評価点数を比較した結果の一例を第2表に示す。

$$P_f = -1.47W_A - 0.73W_B + 0.1W_C + 0.21D + 5.44 \quad \dots\dots\dots (3)$$



第3図 高速度カメラ撮影状況
Fig. 3 Recording condition of high speed camera



第4図 溶込み形状評価モデル
Fig. 4 Penetration valuation modeling

第1表 目視評価基準
Table 1 Evaluation standard

Visual evaluation value	Penetration shape
5	
4	
3	
2	
1	

第2表 溶込み形状評価指標と目視評価の比較
Table 2 Comparison between visual evaluation and penetration shape evaluation value

Cross-sectional bead shape			
Average visual evaluation value (Number of trials : 4)	2	3	4
Penetration shape evaluation index	1.96	2.78	3.87

3. 実験結果

代表的な溶接電流波形と溶滴移行挙動の状態変化を観察した結果を第5図に示す。

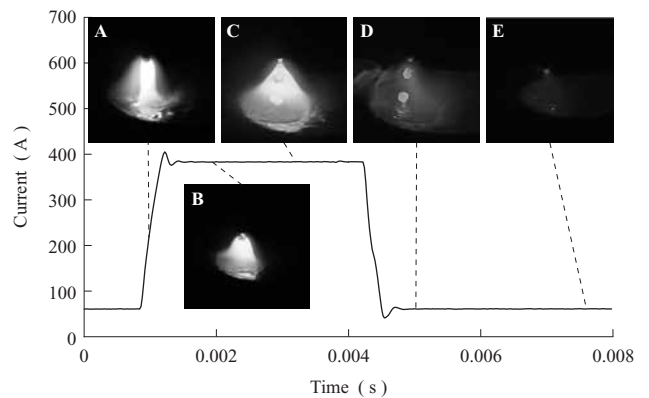
ピーク立ち上がり時から生成される懸垂溶滴は、ピーク時間中に移行していることが観察された。ベース時間では慣性力で落下しているように見受けられる。

電流波形形成パラメータ（ピーク電流値、ピーク時間）と溶込み形状、溶滴移行形態の関係を第6図に示す。また本試験において最も溶込み形状に差異が見られた2条件での溶込み形状を第7図に示す。溶込み形状は1パルス2ドロップにて最もフィンガー形状となり、Nパルス1ドロップにて最も鍋底形状に近くなること分かる。

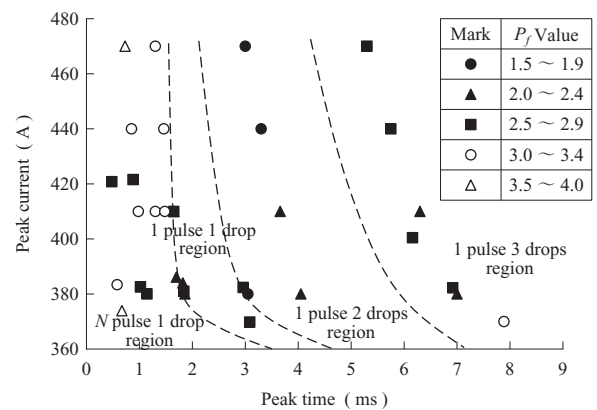
溶滴の挙動が、溶込み形状を決定する重要な因子であることがこの結果から明らかとなった。

このことは、溶滴の挙動を制御することで、溶込み形状を制御できる可能性を示唆している。

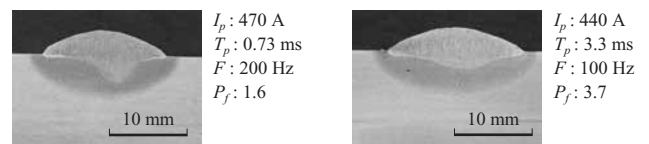
また、溶込み形状と溶滴サイズについて第8図に示す。フィンガー状の溶込みは溶滴サイズが1.5 mm程度なの



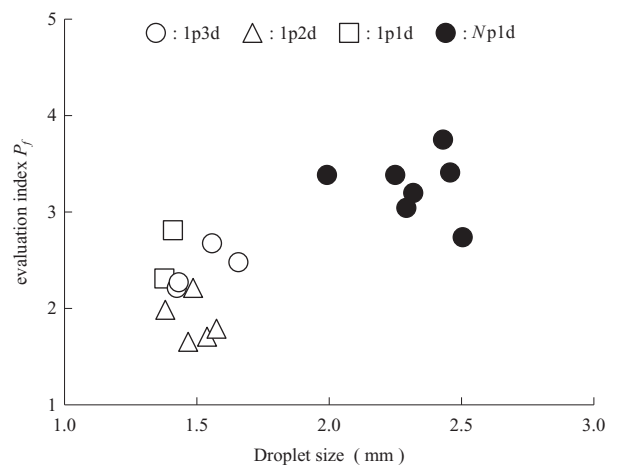
第5図 パルス形状と溶滴移行の様子
Fig. 5 Pulse shape and droplet transfer state



第6図 ピーク時間、ピーク電流、溶込み形状の関係
Fig. 6 Relation between peak time and peak current and penetration shape



第7図 パルスによる同溶接電流値 (200 A) での溶込み形状の差異
Fig. 7 Difference in penetration shape of pulse shape in same welding current (200 A)



第8図 溶滴移行形態による溶滴サイズの差異
Fig. 8 Difference in droplet transfer form of pulse shape

に対し、鍋底状の溶込みは N パルス 1 ドロップに多く見受けられ、溶滴サイズが 2~2.5 mm 程度と大きいことがわかった。なお、溶滴サイズは高速度カメラ動画から溶滴直径のピクセル数を計測し、同じ動画上に撮像されており、かつ、寸法が既知である溶接ワイヤ (ϕ 1.2 mm) のピクセル数から算出した。

4. 溶込み形状予測シミュレーション (3)~(9)

4.1 モデルの仮定と基礎式

本報告で用いるモデルは、非定常状態の溶接現象を対象とするため、以下に示す三次元非定常熱伝導方程式 (4) と、溶融池表面の表面張力と重力のエネルギーバランスによる表面形状方程式 (5) を、差分法を利用して解いている。具体的には、差分の時間刻みの各ステップにおいて、(4) 式により溶融境界を求め、それを元に (5) 式によって、溶融形状変化を求めている。つまり本モデルでは、時間の進行と共に変化する溶融プールの表面に入熱を行っている。計算に用いた主な仮定は以下の通りである。

- (1) 溶融池内においても熱の流れは、熱伝導方程式に従うものとする。
- (2) 表面張力および溶融金属の密度は一定であるとする。
- (3) 溶融池に作用する力は、アーク圧力、重力、表面張力のみとする。
- (4) 投入した入熱はすべて母材または溶加材のみに供給される。また、一旦溶加材に供給された入熱は母材の溶融現象に影響を及ぼさないとする。

非定常熱伝導方程式

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \dots\dots (4)$$

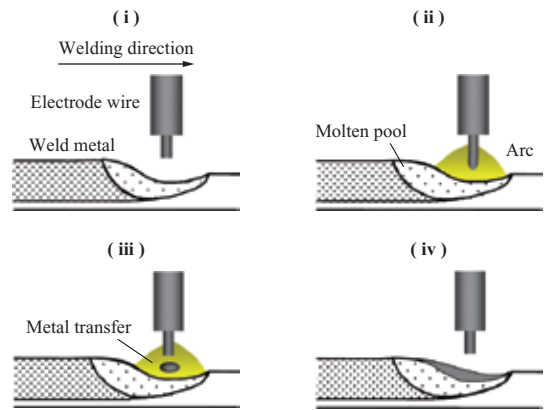
ρ : 密度, H : エンタルピ, K : 熱伝導率,
 T : 温度

表面形状方程式

$$\sigma \left[\frac{(1 + \xi_x^2) \xi_{xx} + (1 + \xi_y^2) \xi_{yy} - 2 \xi_x \xi_y \xi_{xy}}{(1 + \xi_x^2 + \xi_y^2)^{3/2}} \right] = \sigma g x \alpha + \sigma g y \beta + \sigma g z \gamma - \lambda \quad \dots\dots (5)$$

σ : 表面張力, ξ : 表面変位, ρ : 密度,
 g : 重力加速度, λ : ラグランジュ乗数,
 (α, β, γ) : 重力加速度の単位方向ベクトル

本計算モデルの計算の流れを以下に説明する。第 9 図



第 9 図 GMAW プロセス
 Fig. 9 Process of GMAW

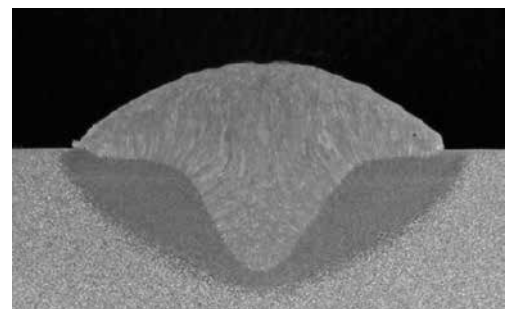
は、溶接線上における縦断面であり、微小時間ステップ間での計算手順を示している。

- (i) トーチ (電極ワイヤ) をある位置に固定する。
- (ii) 非定常熱伝導計算モデルにより、母材をアークで加熱し、その温度場の計算を行う。
- (iii) その微小時間ステップ間で溶融するワイヤ量を母材に投与する。
- (iv) その後、溶融池形状計算モデルを用いて表面ビード形状を計算する。

というものである。ここまで計算が行われると、新たな格子位置にトーチを移動し、同様の方法で目的の位置まで計算が繰り返される。

4.2 溶滴を考慮した熱源モデルの開発

本計算モデルは、これまで溶融池表面に熱源を設定していた。しかし一般の GMAW でみられるようなフィンガー溶込み (第 10 図) を再現することが難しかった。この様にフィンガー溶込みを再現できない理由として考えられることとしては、第一に溶融池内の対流現象を考慮に入れていないことが挙げられる。GMAW においては、ワイヤから供給される溶滴が対流の主たる駆動力であると仮定して GMAW の熱源を以下の様にモデル化した。



第 10 図 フィンガー状の溶込み
 Fig. 10 Finger type penetration

(1) 入熱をアークからの表面分布熱源と溶滴が持ち込む線状分布熱源に分ける。

(2) 板厚方向への線状分布熱源は溶融池表面から溶融池底部まで均一に分散されるものと仮定する。

計算の進行とともに線状分布熱源が、どの様に変化していくかを第 11 図を用いて説明する。

(a) 溶接開始時：溶融池が形成されていないため表面分布熱源の中心に点状熱源として投入される。

(b)→(c) 溶融池の形成とともに線状分布熱源の長さが長くなっていく。

4.3 シミュレーション結果

第 12 図に本溶接プロセスを用いた溶込み形状の予測結果を示す。左図が線状熱源無し、右図が線状熱源有りの結果である。

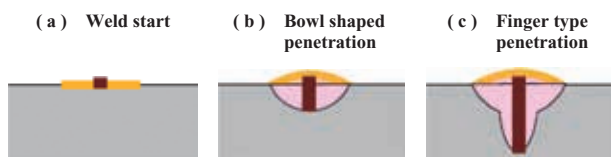
図から分かるように、板厚方向への線状熱源を考慮に入れることにより、フィンガー状の溶込み形状を再現することが可能となった。これは溶込み形状の形成は溶滴エネルギーの寄与度が高いことを示唆している。

5. 考 察

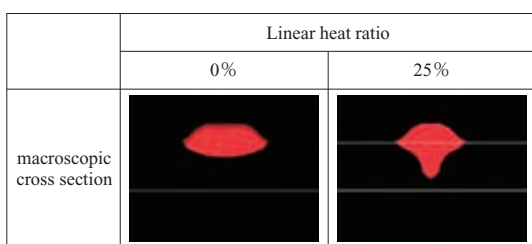
5.1 溶込み形状予測指標の作成

5.1.1 電流波形形成パラメータと溶滴移行形態

高速度カメラの動画上から、ワイヤの溶融および溶滴の離脱がピーク電流時に発生していることが見受けられた。そこで、ピーク電流時に溶融するワイヤ量に対してはたらく電磁ピンチ力に着目し、簡易的に溶滴移行形態を予測できる指標を作成した。



第 11 図 熱源形状の変化
Fig. 11 Change of heat source shape



第 12 図 線状熱源有無による溶込み形状の比較
Fig. 12 Comparison of penetration shape with or without linear heat source

高速度カメラ動画より、ピーク時間中のワイヤ溶融量 M_p (m^3) はピーク電流中に送給されたワイヤ体積と定義した。

$$M_p = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{V_f}{60} \cdot T_p \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 d ：ワイヤ径 (m)、 V_f ：ワイヤ送給速度 (m/min)、 T_p ：ピーク時間 (s) である。また、離脱前の溶滴の内部圧力 P_p (Pa) は (7) 式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$P_p = P_0 + \frac{\gamma}{R} + \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi^2 R^2} \cong \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi^2 R^2} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 P_0 ：雰囲気圧力 (Pa)、 γ ：液体の表面張力 (N/m)、 R ：液柱の曲率半径 (m)、 μ_0 ：真空の透磁率 (N/A^2)、 I_p ：ピーク電流 (A) である。なお、右辺の左項から雰囲気圧力、表面張力による圧力、電磁圧力を示す。このとき、ピーク電流時のワイヤ端には電流が集中しているため、溶滴離脱には電磁ピンチ力が支配的であるとして整理した。これにより、ピーク電流時で溶融する溶滴に対して、電磁ピンチ力が行う仕事量 W_p は、(8) 式で与えられる。

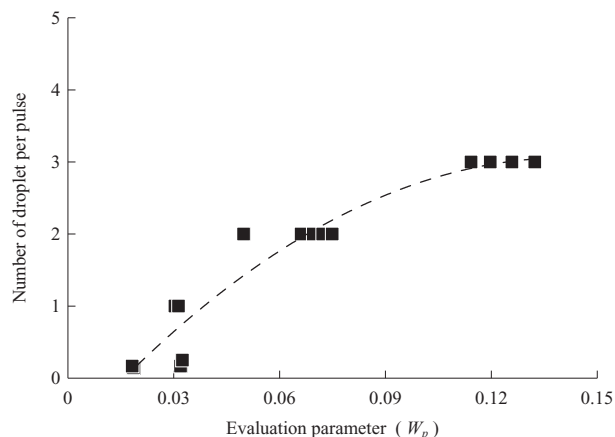
$$W_p = M_p \times P_p$$

$$= \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{V_f}{60} \cdot T_p \times \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi^2 R^2} = AI_p^2 d^2 V_f T_p \dots (8)$$

$$A = \frac{\mu_0}{960\pi R^2}$$

以上より、溶滴移行形態を予測する指標として移行形態評価パラメータ $W_p (=AI_p^2 d^2 V_f T_p)$ を採用した。

第 13 図に、 W_p と 1 パルス当たりのドロップ数の関係を示す。本結果は、 W_p とドロップ数に深い相関があることを裏付けている。このことから、 W_p を用いることで簡



第 13 図 W_p と 1 パルス当たりの溶滴落下数の関係
Fig. 13 Relationship between W_p and the number of droplet per pulse

易的に1パルス当たりのドロップ数を予測できると考えられる。

5.1.2 溶滴移行形態と溶込み形状

1パルス当たりのドロップ数と溶込み形状評価指標 P_f の関係を第14図に示す。1パルス2ドロップ領域が他の溶滴移行形態と比較し最も P_f の数値が小さい、つまりフィンガー形状となることが分かった。一方、 N パルス1ドロップとなる領域では、 P_f が大きくなる（鍋底形状となる）ことが分かった。

これは、溶滴サイズが大きい場合、溶融池への入熱の拡散領域が広いため、溶込みは幅方向へ広がり、結果鍋底状となるものと推察される。

よって、溶込み形状の制御には溶滴サイズを制御する必要があると考えられ、 N パルス1ドロップとなるよう電流波形形成パラメータを調整することが効果的と考えられる。

5.1.3 溶込み形状予測実験式の導出

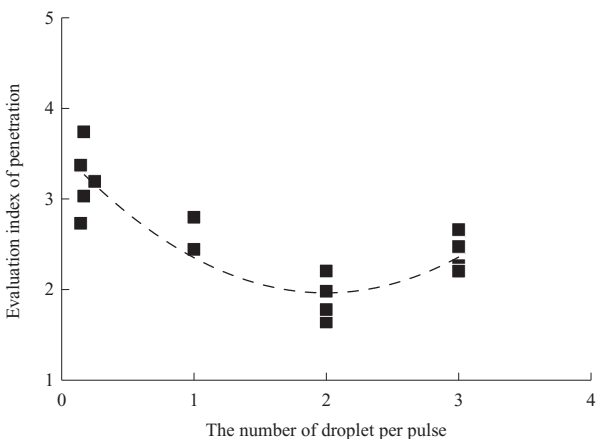
移行形態評価パラメータ W_p と1パルス当たりのドロップ数（アーク現象）、 P_f （溶込み形状評価指標）の関係から実験式が導き出された（第15図）。これらの式を重畳することで、電流波形形成パラメータと溶込み形状評価指標の近似理論値を導出した（(9)式）。アークを出さずともパルス条件から溶込み形状を予測する指標となると期待できる。

$$P_f = -3854.7W_p^3 + 1141W_p^2 - 102.1W_p + 4.8307 \dots \dots \dots (9)$$

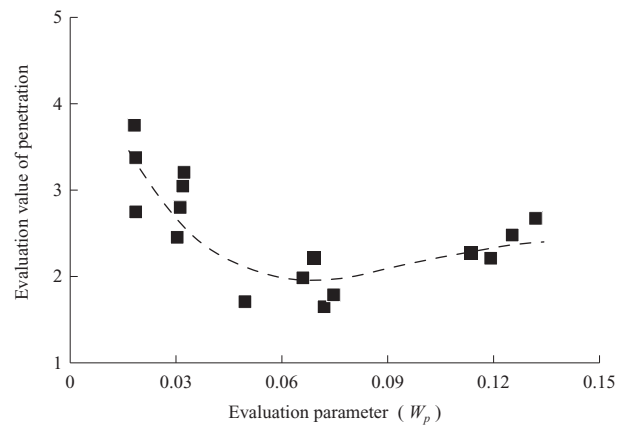
5.2 溶込み形状予測シミュレーション

5.2.1 熱効率と溶込み形状の関係

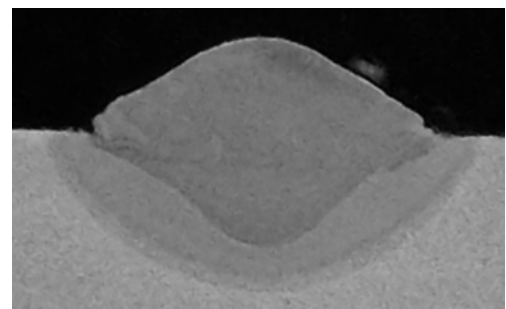
第17図は、第16図の溶接条件に合わせ熱効率と熱源



第14図 1パルス当たりの溶滴落下数と P_f の関係
Fig. 14 Relationship between the number of droplet per pulse and P_f



第15図 W_p と P_f の関係
Fig. 15 Relationship between W_p and P_f



($I = 200$ A, $V = 27.3$ V, $v = 70$ cm/min, $WFS = 6$ m/min)

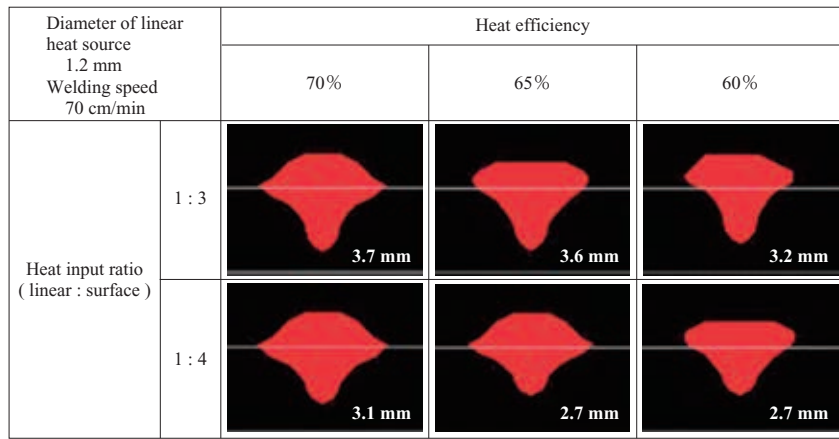
第16図 溶接試験結果
Fig. 16 Experimental result

比率を変化させて計算した計算結果であり、図中の数字は溶込み深さを表す。熱効率と熱源比率を変化させて計算した。この図を見ると、熱効率が変化しても溶込み深さにはそれほど影響が出ていないことがわかる。また熱源比率を変化させた場合には、フィンガー溶込み先端の幅はそれほど変化しないが、深さが大きく変化している。

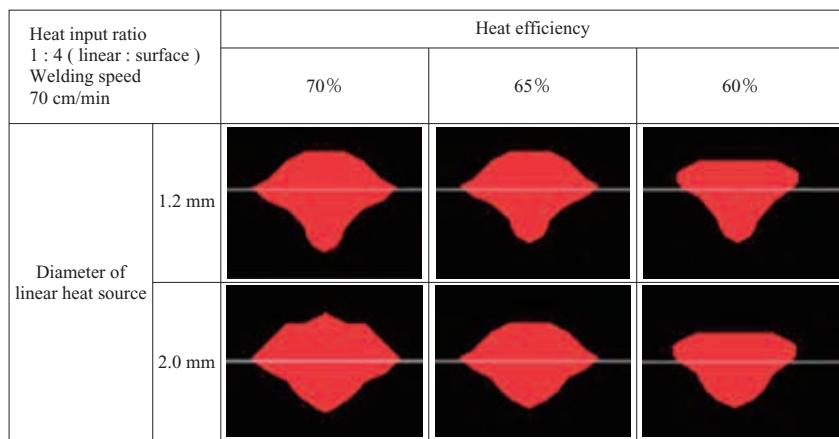
5.2.2 溶滴サイズと溶込み形状の関係

前項にて、溶滴サイズが大きい方が鍋底状の溶込みとなる結果を述べたが、板厚方向への線状熱源直径を溶滴サイズとみなし、溶滴サイズが2.0mmの場合の溶込み形状のシミュレーションを実施した。第18図に、第17図と入熱量は同じであるが線状分布熱源の熱源直径を1.2mmから2.0mmに変更した場合の計算結果を示す。

この図から第17図と入熱量が同じであるにもかかわらず、溶込み形状が鍋底形状に大きく近づいたことがわかる。これは入熱量が溶融池内に分散して投入されたことが原因であり、溶滴の挙動によって溶込み形状が大きく変化することを示唆している。本結果は実験結果とも符号している。また溶融断面積も変化しており、単純に熱効率だけ



第 17 図 溶込みに及ぼす線状熱源の影響
Fig. 17 Effect of line heat rate of penetration



第 18 図 溶込みに及ぼす線状熱源径の影響
Fig. 18 Effect of line heat diameter on penetration

で溶融量を評価することが難しいことがわかる。このような変動は、溶滴の移行現象に大きく依存していると考えられ、今後はパルス条件やワイヤ径等が溶込みに与える影響を調査していく必要がある。

6. 結 言

一連のアークプロセスの把握と最適波形の提案が可能な指標の明示を目的とし、電流波形形成パラメータ、溶滴移行現象、溶込み形状の関係を調査した。また、熱源近傍のみを詳細に計算し、溶滴を模擬した板厚方向への線状分布熱源を考慮した溶接プロセスモデルの開発・評価を行った。

- (1) 従来、主観による評価が主流であった溶込み形状評価を定量化可能で、目視での評価結果と精度良く対応させる指標 P_f を作成した。
- (2) 溶込み形状に最も寄与度の高い因子が溶滴移行形

態であることが明らかになった。1 パルス 2 ドロップで最もフィンガー形状となり、 N パルス 1 ドロップで最も鍋底形状となることが分かった。

- (3) ピーク電流時でのワイヤの溶融量と溶滴離脱にかかる力（電磁ピンチ力）に着目した。出力波形形成パラメータから溶滴移行形態を予測する指標 $W_p (= AI_p^2 d^2 V_f T_p)$ を作成した。
- (4) 電流波形形成パラメータから溶込み形状評価点数を予測する実験式を導出した。
- (5) 従来の計算モデルでは再現が難しかったフィンガー形状の溶込みの再現を可能とした。
- (6) 溶滴サイズが 1.5 mm 程度ではフィンガー形状となり、2.0 ~ 2.5 mm では鍋底形状となる傾向が見受けられた。本傾向はシミュレーションにおいて板厚への線状分布熱源直径を 1.2 mm から 2.0 mm に変化させた場合も同様に見受けられた。

— 謝 辞 —

本研究の遂行に当たっては、技術開発本部生産技術センター溶接技術部 内田雄太氏から多くのご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) K. Hyoma, S. Nonomura, et al. : Preprints of the National Meeting of JWS No. 93 (2013. 11) pp. 116 - 117
 - (2) T. Okuno, T. Haga, et al. : The Method of Multivariate Statistics < Revised Edition > (1981) pp. 25 - 155
 - (3) J. F. Lancaster : The Physics of Welding (1990. 11) pp. 290 - 291
 - (4) Y. Hirata : Gas shielded Metal Arc Welding Journal of the Japan Welding Society Vol. 77 No. 4 (2008. 10) pp. 32 - 39
 - (5) H. Maruo, Y. Hirata and T. Noda : Effects of Welding Current Waveform on Metal Transfer and Bead Formation in Pulsed MIG Welding Quarterly Journal of the Japan Welding Society Vol. 2 No. 1 (1984. 6) pp. 12 - 18
 - (6) P. K. Palani and N. Murugan : Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding Journal of Materials Processing Technology 172 (2006. 2) pp. 1 - 10
 - (7) F. Miyasaka, Y. Yamane and T. Ohji : Development of circumferential TIG welding process model: a simulation model for welding of pipe and plate Science Technology of Welding and Joining Vol. 10 No. 5 (2005. 9) pp. 521 - 527
 - (8) T. Yamamoto, T. Ohji, F. Miyasaka and Y. Tsuji : 2Mathematical modeling of metal active gas arc welding Science Technology of Welding and Joining Vol. 7 No. 4 (2002. 7) pp. 260 - 264
 - (9) T. Ohji, Y. Tsuji, F. Miyasaka and T. Yamamoto : Mathematical Modeling of Metal Active Gas (MAG) Arc Welding Journal of Material Science and Technology Vol. 17 No. 1 (2001. 1) pp. 167 - 168
 - (10) S. Nonomura, K. Hyoma, et al. : Preprints of the National Meeting of JWS No. 93 (2013. 11) pp. 114 - 115
- (溶接学会論文集 第 33 卷 (2015) 第 1 号より転載)