

図 2 溶融池撮像のシャッタータイムと電流波形

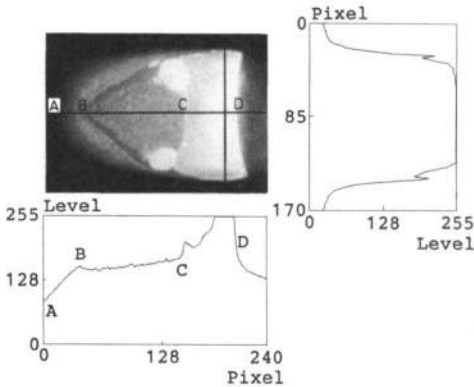


図 3 溶融池画像と中央 10 画素線の平均明るさ

池中央両側にスラグが浮遊している。スラグより前方では高温のプラズマ気流により池表面が吹かれ輝度は高く、池周辺では小スラグが後方へ向い、中央両側のスラグに集合している。スラグより後方では池表面の流れは後方より前方中央に流れるのが観測される。直線 AD 上の点 A~D は明るさの分布図のそれらに対応し、点 B は固液境界点に対応している。明るさの分布は温度分布に対応していると考えられる。図においてまず AB 間の固相では固液境界の点 B に近づくにつれて明るさは急激に上昇し、つぎに BC 間の池後半では明るさの変化は少なくなる。プラズマ気流の効果により CD 間の明るさは大きくなる。したがって点 B 近傍における明るさの特徴を活用して点 B 溶融池境界の明るさのレベルを求め、このレベル以上の明るさの部分を溶融池として各部の溶融池幅を求めることができる。

4. 溶融池観察と状態方程式

溶融池現象は電流波形およびアーク長などによって変化するが¹⁾、ここではパルス電流波形は Fig.2(a) のものを用いベース電流を制御する。アーク長は溶

融池表面から 5mm となるよう電流の大きさによってワイヤ送給速度を変化した。

まず定常状態における基礎実験を行った。電極ワイヤは軟鋼 DSIA 1.2mmφ、母板は SS41 の 3.2mm 厚を用い、酸素 2% アルゴン気中で実験を行った。パルス電流 I (平均値) と溶融池各部の幅 W₀~W₃、溶込み深さ D との関係を示す Fig.4 に示す。W₀, W₁, W₂ および W₃ はそれぞれ電極直下から 4.5, 6.0, 7.5 および 9.0mm 離れた位置での溶融池幅である。これらは定常状態における 300 個のサンプル値の画像処理によるものの平均値であり、溶込み深さ D については 20mm 間隔の 4 カ所の平均値を求めたものである。溶融池幅 W₀ は、おおむね電流に比例し、210A~230A において裏ビードが得られるが、約 215A 以上では電流の増加に対して幅は変化しなくなる。これは裏ビードが生じると入熱を増加しても池からの熱伝導は溶融池幅には依存しなくなり板厚および溶融池長さのみに依存するようになるからだと考えられる。また Fig.4 に示すように溶込み深さは板厚近傍になると電流変化に対し急激に変化する。

つぎに電流 I が 180A から 220A にステップ変化した場合の各部の幅 W₀~W₃ の過渡応答を求めた。その結果を Fig.5 に示す。この応答は一次遅れで近似されることを示している。各溶融池幅 W_i を状態変数とし、電流 I を入力変数とすると

$$\frac{dW_i}{dt} = -\lambda_i W_i + b_i I - C_i \quad (i=0\sim3) \quad (1)$$

の状態方程式を得る。電流の種々のステップ状の変化に対して W_i の応答を求めた結果、電流が 150A~230A の広い範囲に対して幅 W_i (i=0~3) の時定数 T_{c_i} (≡ 1/λ_i) は、それぞれ 0.4, 0.5, 0.7 および 0.9 秒であり、池後方の幅ほど応答は緩やかである。溶融池面積の時定数は 2.5 秒であり応答は緩慢であ

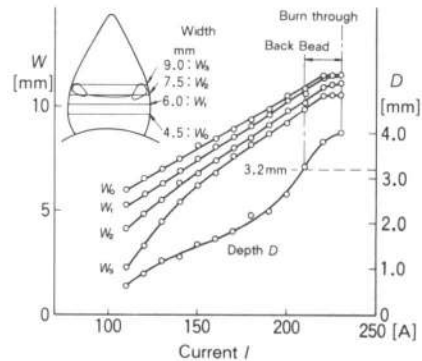


図 4 溶融池各部の幅、溶込み深さと電流の関係

および(6)式より

$$I(k) = a_0 e(k) + a_1 e(k-1) + a_2 e(k-2) - b_1 I(k-1) - b_2 I(k-2) - b_3 I(k-3) \quad (7)$$

を得る。偏差 $e(k)$, $e(k-1)$ およびそれまでの電流 $I(k-1)$ などを用いて電流が決定される。

なおパラメタ λ, b の推定誤差が存在しても、目標のステップ入力に対する定常偏差もステップ外乱に対する定常偏差も存在しないことが確かめられている。

5.2 裏ビード制御の実験

支持物への熱伝導が変化する場合について考察するために、Fig.8 に示すように 2 枚の銅板 (長さ 100mm × 幅 100mm × 厚さ 10mm) を母材の裏に接触した。銅板間のギャップは 10mm とし、ビードオンプレートにて溶接実験を行った。

まず電流を 220A 一定とした場合の各部の溶融池幅 W_1 の応答を Fig.8 に示す。銅板接触部においては幅 W_0 の変化は小さいが、幅 $W_1 \sim W_3$ は減少しており幅 W_1 で最大 12% 減少する。つぎに幅 W_1 を 11.5mm 一定制御した場合の各部の幅応答を、Fig.9 に示す。支持物の接触にかかわらず操作量の電流を

制御した場合には幅 W_0, W_2 の変化も小さい。

さらに Fig.8 および Fig.9 の符号(1)~(4)における溶込み形状をそれぞれ Fig.10 (1)~(4)に示す。一定電流の場合には裏板を持つ中央の部分(2)の深さは 2.7mm であり、裏ビードは得られない。これに対し、溶融池幅 W_1 一定制御の場合には裏板を持つ部分および持たない部分いずれにおいても深さ 3.8mm であり、溶接部分全体にわたり安定した裏ビードが得られた。

6. 開先変動に対する溶融池制御

Fig.11 に示すようにルートギャップの変動にかかわらずワイヤ溶着量と母板溶着量を制御して一定の溶融池形状 (溶込み深さ、溶融池幅) を得ることは冷却速度を一定とし溶接品質を高めるために必要である。ギャップの変動に適応してワイヤ溶着量と母板溶着量を制御するには、次の方法が考えられる。

- (1) ワイヤ突出し長と電流波形の制御
- (2) 交流パルス電流の極性比率制御
- (3) ショートアークのショート比率制御

ここでは(1)の方法について考察する。

6.1 ルートギャップの検出

Fig.1 のように CCD シャッターカメラ 1 は電極ワイヤ中心から 50mm の位置に溶接トーチに取り付けられ、2 個のライト (100W) はカメラの横方向の中心線上に位置している。カメラからのビデオ信号を、256 × 256 画素を持つ画像メモリに 256 レベルの濃淡画像として取り込む。SS41 軟鋼板 (3.2mm 厚) を用い I 開先を持つ画像の一例を Fig.12(a) に示す。(a) 図の直線 AB における明るさのレベルを Fig.

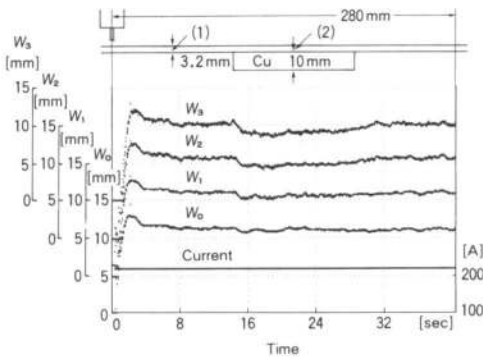


図 8 電流一定の場合の溶融池幅応答

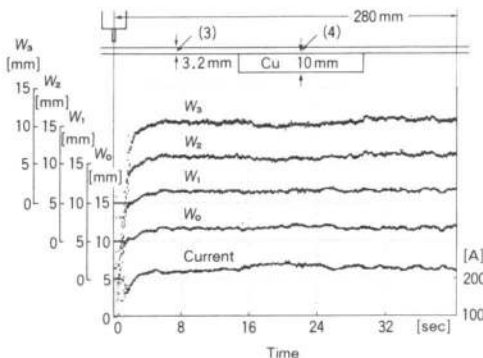


図 9 幅 W_1 を一定制御した場合の溶融池幅応答

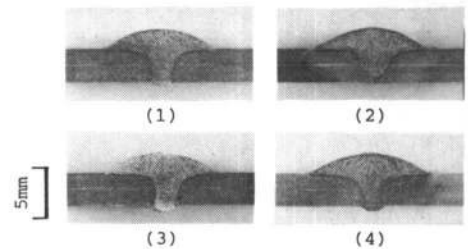


図 10 図 8 および 9 の(1)~(4)における溶込み形状

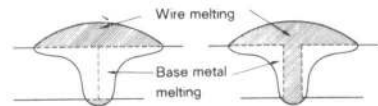


図 11 ワイヤ溶着量と母板溶着量

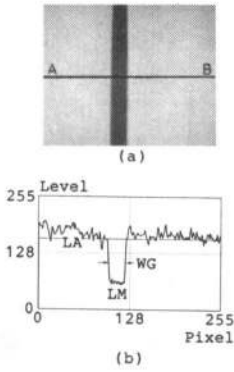


図12 I開先と周辺の画像

12(b)に示す。(b)図において直線 AB 上の明るさの平均値 LA と最低値 LM の中間の明るさ $(LA+LM)/2$ を持つ部分が開先に対応している。明るさの最低点は、開先部にあるので、この最低点から $(LA+LM)/2$ の明るさの部分までを検出することにより開先は精度よく求められる。種々の開先(0.2~3mm)において誤差は6%以内であった。

6.2 溶着量と母板溶融量の制御

ワイヤ突出し長を制御する方法では、開先に必要な溶着量を得るための突出し長(トーチ高さ)制御と、板厚に必要な一定溶融池幅および溶込み深さを得るための電流波形制御を同時に行う。電流波形は Fig.2(b)のものを用いた。基礎実験の結果、ワイヤ溶融速度 V_m は突出し長 L_e 、電流(平均値 I_a 、実効値 I_e) を用いて次のように表せる。

$$V_m = \alpha I_a + \beta I_e^2 L_e \quad (8)$$

ここに $\alpha = 0.23 \text{ mm} / \text{A} \cdot \text{s}$ 、 $\beta = 6.0 \times 10^{-5} / \text{A}^2 \cdot \text{s}$ まず開先 W_G を 0mm としトーチ高さ H を 15mm (アーク長 $\approx 5\text{mm}$ 、突出し長 $\approx 10\text{mm}$) とした場合の電流 I_a と溶融池幅 W の関係を Fig.13 に示す。電流 $I_a = 140\text{A}$ において安定な裏ビードが得られた。溶融池幅 W は 9.5mm であった。種々の開先に必要な溶着量増加分 ΔV を与えるための突出し長 L_e と電流 I_a の関係を Fig.14 の実線で示す。

つぎに開先がある場合には開先無しの場合に比べてワイヤ溶着量を増加しその分だけ母板溶融量を減少し、溶融池形状(深さ、幅、裏ビード)を一定に制御することが望ましい。開先 $W_G = 1.0\text{mm}$ において、Fig.14 の突出し長 L_e と電流 I_a の関係を維持して、溶接実験を行った結果、 $I_a = 132\text{A}$ 、 $L_e = 16.8\text{mm}$ において安定な裏ビードが得られ、溶融池幅は 9.4mm となり、 $W_G = 0\text{mm}$ の場合とほぼ同じ形状と

なった (Fig.13)。

以上の結果より開先変動に応じて Fig.14 の破線上の電流 I_a および突出し長 L_e を用いることにより、溶融池形状を制御することができる。

開先が 0.2mm から 1.0mm まで変動する場合の溶融池形状一定制御の実験を行った。その結果を、Fig. 15 に示す。図において溶融池幅はほぼ一定に保持されており、しかも安定な裏ビードが得られた。

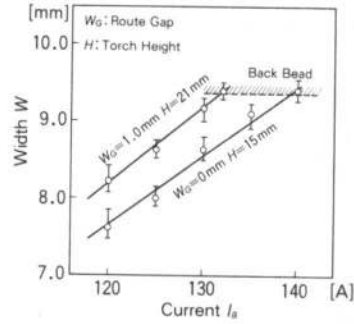


図13 溶融池幅と電流の関係

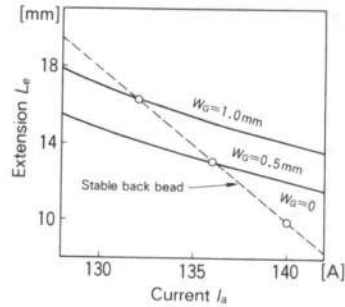


図14 開先幅と電流およびワイヤ突出し長さの関係

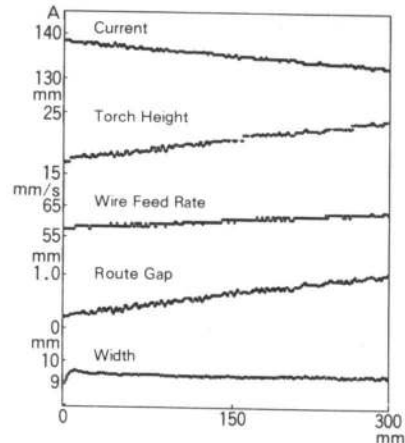


図15 開先幅が変動する場合の制御結果

