パルス MIG 溶接における溶滴移行と ビード形成に及ぼす電流波形の効果*

—パルスアーク溶接に関する研究 (第1報)—

丸尾 大**, 平田 好則**, 野田 純孝***

Effects of Welding Current Waveform on Metal Transfer and Bead Formation in Pulsed MIG Welding*

—Study on Pulsed Arc Welding (Report 1)—

by Hiroshi Maruo**, Yoshinori Hirata** and Yoshitaka Noda***

Pulsed MIG welding phenomena are studied fundamentally in order to make clear the effects of welding current, supplied from the transistor power source. Correlation between current waveform and metal droplet transfer is investigated with the optical metal droplet detector, which is consisted of He-Ne laser, optical lens and filters, and photo-transistor.

Results obtained are summarized as follows;

- (1) In pulsed MIG welding, it is found out that there exists critical frequency f_{cr} . At the frequency of f_{cr} , metal droplet transfers synchronously with respect to each pulse current.
- (2) In the frequencies lower than f_{cr} , if pulse peak current is set enough higher than the level for spray transfer, metal transfer mode becomes spray transfer mode in the duration of peak current.
- (3) In the frequencies higher than f_{cr} , if the average current level is lower than critical current, metal transfer is carried out in irregular drop transfer mode.
- (4) Critical pulse frequency f_{cr} , sustaining one pulse—one droplet transfer, varies with respect to the pulsive peak current level and the size of wire used.
- (5) In the case that average current is lower than critical current, metal transfer mode and bead formation mechanism vary in accordance with pulse frequency.
- (6) In extremely low pulse frequency range, pulsed MIG welding is effective to improve the shape of welds in a repeating sequence of melt and solidification of pool.
- (7) Even if the average current is kept constant, weld bead penetration becomes deeper as the level of peak current becomes higher.

1. 緒 言

軟鋼をはじめ各種材料の溶接において、アークの安定化、溶込形状の制御、スパッタの低減、凝固組織の微細化など溶接の安定化あるいは高品質化を目的として MIG/MAG, TIG, プラズマの各溶接法でパルスアーク法が実用化されている¹⁻⁶⁾。パルスアーク法では溶接電流を周期的に変化させることによって、ワイヤの溶融移行や溶融池の挙動を積極的に制御しようとしている。

大容量トランジスタが安価に入手できるようになると

ともに電流制御素子として溶接電源に使用されるようになった。トランジスタ制御によれば、パルス電流波形を容易に変えることができるからである。しかしながら、パルス条件には、パルス波形(矩形波、鋸歯状波など)、ピーク電流値、ベース電流値、パルス周波数など多くの因子がある。さらにワイヤあるいは母板の材質、シールドガスなどによってアークを含む溶接の現象が異なるため、その最適条件の選定は重要な課題である。

本研究は任意の電流波形を設定し得るアナログ式トランジスタ制御電源を用いて、電流波形がワイヤの溶融と移行並びに溶融池や溶接ビードの形態に及ぼす影響について基礎的に解明することを目的としている⁷⁾。

本報では新しく開発した溶滴検出方法⁸⁾を用いて、パルス MIG 溶接における溶滴移行の周波数特性を調べ、

*原稿受付 昭和58年9月1日(全国大会論文発表講演)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

*** 大阪大学大学院(現在ヤマハ発動機(株)) Graduate School, Osaka University (Present Address: Yamaha Motor Co. Ltd.)

移行形態とビード形成に及ぼすパルス電流波形の効果を検討している。

2. 実験方法

2.1 実験装置と溶接条件

溶接電源はアナログトランジスタ制御直流電源 (750 A-65 V) である。実験では定電流制御特性とし、主に矩形波パルス電流を適用した。Fig. 1 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。

$$I_{av} = (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b) / T \quad \cdots (1)$$

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

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 : パルス周期である。

MIG トーチ並びにワイヤ送給機構は市販のものを用いた。送給モータ (プリントモータ) 用電源にはコンプリメンタリ形電源を使用している。モータの回転数をフォトインタラプタにより検出し、送給速度を安定化している。ワイヤ送給は、適用するパルス周波数が 10 Hz 以上では定速送給とし、それより低い周波数では定速送給するとアーク長が変動し、溶接が不可能となるので Fig. 2 に示す方法によってワイヤをパルスの送給し、同時に溶接電流を制御する方式を採った。Fig. 3 はこの方式によるワイヤ送給速度と電流値の時間的変化を示す。

極性は DCEP とし、シールドガスに Ar あるいは Ar+CO₂ 混合ガスを用いた。実験では平均電流 I_{av} を一定として I_b , I_p および f を変えてビードオンプレート溶接を行い、溶滴移行とビード形状を調べた。なお、 f

は 0.2 Hz~1 kHz の範囲に選んだ。使用鋼種は板厚 3~12 mm の軟鋼板 (S S 41) で、ワイヤ径 1.2, 1.6 mm の軟鋼用ワイヤ (YCW-1, 2) を用いた。

2.2 溶滴移行現象の観察

溶滴移行を高速度写真撮影により直接観察する方法がしばしば用いられているが、パルス波形条件に応じて詳細に検討するにはリアルタイムで溶滴移行状況を把握することが必要である。

そこで Fig. 4 に示すような溶滴移行検出装置を開発した。MIG アークを He-Ne レーザ (6328 Å) の投光部と受光部の間に配置し、溶滴がこのレーザ光の光路を遮断するとき生じる受光部 (シリコンフォトトランジスタ) の出力変化を観測する。レーザ光束はレンズ ($f=250$ mm) により集光され、アーク中心部で直径 0.1 mm

Fig. 3 Oscillogram of wire feed rate and welding current in the case of the pulse frequency lower than 10 Hz.

Fig. 4 Arrangement of optical system for detecting metal transfer.

Fig. 1 Pulse current waveform.

Fig. 2 Control of wire feed rate and welding current.

Fig. 5 Photo-transistor output.

以下としている。レーザ光検出の際にノイズとなるアーク光はピンホール並びにフィルターを用いて制限した。Fig. 5 はアークを発生させずに直径 0.3 mm の金属線を移動させた場合の検出波形を示す。このように 0.3 mm 以上の物体の検出は十分可能である。

なお、ワイヤ先端での溶滴の成長、離脱あるいは移行の状況はキセノンランプの背光を用いて高速度撮影し、観察した。

3. 実験結果

3.1 溶滴移行現象

3.1.1 移行形態に及ぼすパルス周波数の影響

Fig. 6 は軟鋼用ワイヤ 1.2 mm 径に矩形波パルス電流 ($I_p=350$ A, $I_b=50$ A, $I_{av}=200$ A) を適用した場合の溶接電流波形とレーザ計測による溶滴移行検出波形を示す。20 Hz の場合、電流波形に同期してピーク電流通電時に一連の溶滴移行が起っている。このときの溶滴移行周波数は約 500 Hz でストリーミング移行となっている。パルス周波数を高くするに従い1パルス周期当りの溶滴移行回数は減少し、156 Hz では1波形で1溶滴移行となっている。さらに周波数が高くなると溶滴移行がパルス波形に同期しなくなり、500 Hz では数パルスで

Fig. 6 Oscillogram of welding current and photo-transistor output signal.

1 溶滴が移行するにすぎない。

Fig. 7(a)(b)(c) は、ピーク電流 $I_p=350$ A、ベース電流 $I_b=50$ A に設定し、平均電流 I_{av} をそれぞれ 100 A, 200 A, 250 A とした時の1パルス周期に検出される溶滴移行回数とパルス周波数との関係を示す。図から平均電流が高いほど1パルス1溶滴移行となるパルス周波数 f_{cr} が高くなることがわかる。図中の破線はそれぞれの電流においてワイヤ径程度の大きさの溶滴が規則正しく移行すると仮定して溶融速度から計算した溶滴移行回数である。破線より上の領域では、平均溶滴径がワイヤ径よりも小さく、移行形態としてはストリーミング移行あ

Fig. 7 Relation between pulse frequency and number of metal droplets transferred in each pulse cycle as to average current.

Fig. 8 Relation between pulse frequency and number of metal droplets transferred in each pulse cycle as to peak current value at the same average current.

るいはプロジェクト移行が支配的であると考えられることができる⁹⁾。すなわち平均電流がスプレー化臨界電流（軟鋼 1.2 mm 径の場合、約 230 A）以下の場合、 f_{cr} より低いパルス周波数を適用するとスプレー移行となり、高い周波数ではドロップ移行が支配的となる。一方、平均電流が臨界電流以上になると高周波数域においてもスプレー移行となる。従って移行形態に及ぼすパルス電流の効果は平均電流が臨界電流以下の場合に顕著になる。

次に平均電流 $I_{av}=100A$ 、ベース電流 $I_b=50A$ に設定し、ピーク電流値をパラメータとしてパルス周波数と移行回数の関係を調べた結果を Fig. 8 に示す。なお、破線の上側はスプレー移行が支配的な領域である。平均電流を一定としてもピーク電流値を高くすると f_{cr} は高周波側に移行する。またピーク電流値が臨界電流以下でも 1 パルス 1 溶滴移行が行なわれるが、移行形態はドロップ移行である。以上の結果、パルス電流を適用した時の溶滴移行現象は、1 パルス 1 溶滴移行となる同期限界周波数 f_{cr} により特徴づけられることがわかる^{7,8)}。Fig. 9 はベース電流を 50 A とし、ピーク電流値を変えて f_{cr} を調べた結果である。 f_{cr} は I_p とともに高くなることが分る。同じピーク電流値でも平均電流が高い場合、 f_{cr} は高くなっている。また同一電流でも太径ワイヤを使用すると f_{cr} が低下している。

3.1.2 1 パルス 1 溶滴移行^{2-4,7,8,10)}

Fig. 10 は 1 パルス 1 溶滴移行条件での溶滴の移行状況を示す。ピーク電流通電開始とともに溶滴は成長し (b~d)、通電終了直後にワイヤから離脱している (e)。

もとより溶滴の成長、離脱はワイヤ端における熔融金属の流れを伴った複雑な現象であるが、Fig. 11 に示

Fig. 9 Relation between peak current and pulse frequency for one pulse—one droplet transfer.

Mild steel 1.6 mm wire DCEP-Ar $I_{av}=100A$

Fig. 10 Typical frames picked up from high speed photography (3800 f/s) of one pulse—one droplet transfer.

す如くモデル化して考える。ワイヤ端の溶滴には重力 mg 、表面張力による付着力 S 、電磁ピンチ力 P などが働いている。ピンチ力は電流値 I 、ワイヤ径 d などによって変化し、

$$P = kI^2/d^2 \quad \dots\dots(3)$$

と表現することができる¹¹⁾。ただし、 k はアークの形状や電流分布によって変わる定数である。

1 パルス 1 溶滴移行条件下では 1 パルス周期に離脱に必要な質量分だけワイヤが溶融している。ピーク電流通電時において、ワイヤ端の熔融金属には強力なピンチ力

Fig. 11 Forces acting on the droplet during detachment.

Fig. 12 Relation between peak current and peak current duration on the condition of one pulse—one droplet transfer

P が作用し、その内圧が高まるとともに対流が起こる。そのため溶融金属は加速度的にくびれ、溶滴となって離脱すると考えることができる。従って(1)式の平均電流に対してピーク電流の占める割合が高い場合、1パルス1溶滴移行条件は(3)式からピーク電流値、ピーク電流時間及びワイヤ径によって影響されると考えられる。

Fig. 12 はレーザ計測によって得られた1パルス1溶滴移行条件のピーク電流値 I_p とピーク電流時間 t_p を整理したものである。図から1パルス1溶滴移行条件

は、ワイヤ径を定めると I_{av} や I_b によらず I_p と t_p ではほぼ一義的に決定されていることがわかる。 t_p はほぼ I_p^2 に反比例して短くなっている。使用ワイヤ径を太くすると、電流密度が低下するので、 t_p をより長く設定する必要がある。

3.2 ビード形成

Fig. 13 に $I_p=350$ A, $I_b=50$ A, $I_{av}=200$ A の矩形波パルス電流を用いたときのビード外觀と溶込み断面を示す。溶接速度はいずれも 30 cm/min である。Fig. 14 はパルス周波数によるビード形状の変化を示す。

数 Hz 以下の低周波数ではパルス周期が長くなるため、アーク発生個所では溶融、凝固をくり返すことが観察される。このとき溶込み形状は主としてピーク電流値と持続時間によって決定される。Fig. 13 及び14にみられるようにパルス周波数が低くなるとビード幅と溶込み深さが大きくなっている。ビード表面にはパルス電流に同期したリップルが観察され、余盛高さが低く止端部のなめらかなビードが得られる。パルス周波数が高くなると入熱の時間的变化に溶込み形状は追従しなくなる。しかしアーク力の時間的变化によって溶融金属は揺動する¹²⁾。10 Hz 前後で余盛高さが極端に高くなっている

$I_{av}=200$ A, $I_p=350-50$ A, Welding speed 30cm/min
DCEP Ar, Mild steel wire 1.2 mm, SS41 9mm t

Fig. 13 Typical appearances and cross sections of weld bead in pulsed MIG welding.

Fig. 14 Relation between pulse frequency and bead parameters.

Fig. 15 Typical appearances of weld bead in 50 Hz and 500 Hz pulsed MAG welding $I_{av}=100A$, $I_p=350A$, $I_b=50A$, Welding speed=80 cm/min, DCEP, Ar+20%CO₂, Mild steel wire 1.2 mm dia., SS41 9 mm t.

が、これは溶融池の共振現象により溶融金属が前後に激しく揺動した結果であると考えられる。Fig. 13, 14に示す溶接条件においては周波数が 20 Hz を超えるとビード外観には顕著な差異は認められない。さらにパルス周波数を高くすると溶込み深さが減少する。これは移行形態の違いによるものと考えられる。すなわち f_{cr} を超えるとドロップ移行が支配的となり、いわゆるアークによる掘り下げ作用が小さくなるためであると考えられる。

Fig. 15 は矩形波パルス電流 $I_p=350A$, $I_b=50A$, $I_{av}=100A$ で高速溶接したときのビード外観を示す。パルス周波数が 500 Hz の場合、溶滴移行頻度が少なく、ドロップ移行するため不連続ビードが形成されるようになる。

Fig. 16 Relation between peak current and penetration depth.

Fig. 16 は軟鋼 1.2 mm 径ワイヤの MAG 溶接でピーク電流値に対する溶込み深さの変化を平均電流 $I_{av}=100A$, 200 A, 250 A について調べた結果である。図からパルス MIG/MAG 溶接における溶込み深さは平均電流あるいはピーク電流が高いほど深くなることが分る。パルス周波数を 100 Hz としているので、 $I_{av}=200A$, 250 A ではパルス電流に同期したスプレー移行となり、ピーク電流値が大きくなるにつれて強いアーク力の作用で溶込みが深くなっている。このようにパルス MIG/MAG 溶接のビード形成は、パルス波形によって決まる溶滴の移行形態の影響をうける。

4. 結 言

軟鋼のパルス MIG/MAG 溶接における溶滴移行とビード形成に及ぼすパルス電流波形の効果についてアナログトランジスタ電源を用いて調べた。

得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) He-Ne レーザ、レンズ、光学フィルタ及びフォトセンサから成る装置を用いて MIG アーク中の溶滴移行頻度を実時間観測し、1 パルス 1 溶滴移行となる同期限界周波数 f_{cr} を見出した。

(2) ピーク電流値が臨界電流よりも高い場合、 f_{cr} より低いパルス周波数を適用するとパルス波形に同期したスプレー移行が起こる。

(3) 平均電流が臨界電流よりも低い場合、 f_{cr} よりも高いパルス周波数を適用するとドロップ移行となり、移行形態改善に対するパルス電流の効果はない。

(4) f_{cr} は平均電流またはピーク電流のいずれを高くしても高周波数側へ移行する。使用ワイヤ径を太くすると f_{cr} は低下する。

(5) 数 Hz 以下の周波数においてはパルス波形に同期

して母板は溶融, 凝固をくり返し, 比較的深い溶込みでビード幅の広い, 止端部のなめらかなビードが得られる。

(6) 平均電流が臨界電流より低い場合, パルス周波数が 20 Hz を超えると移行形態によりビード形成が変化する。 f_{cr} よりも高い周波数ではドロップ移行するため溶込みが浅くなり, 高速溶接を行なうと不連続ビードになる。

(7) 平均電流を一定としてもピーク電流値を高くすると溶込み深さが増大する。

最後に, 実験の遂行に当時大阪大学学生の網干威君(現日立造船勤務)並びに武市学君(現ダイハツ勤務)に協力頂いた。また本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって実施した。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) J. C. Needham and A. W. Carter; Material Transfer

Characteristics with Pulsed Current, Brit. Weld. J. May (1965), 229-241

- 2) 荒谷, 達磨; アルミニウム合金のパルス溶接に関する研究, 本誌50-2 (1981), 201-207
- 3) W. Shimada and J. Ukai; Effects of Pulsed Current Control on Welding Quality Improvement, IIW Doc. XII-B-11-81 (1981)
- 4) 岡田, 山本, 原田, 西川; トランジスタ電源による MAG パルス溶接法の研究, 第86回溶接法委資料 (1982)
- 5) P. Boughton; High Precision Pulsed TIG Welding, Proceeding of the Conference on Advances in Welding Processes (1970)
- 6) M. P. Sipkes; Pulsed—arc plasma for welding in position, IIW Doc. IV-158-74 (1974)
- 7) 丸尾, 平田; 電流制御アーク溶接に関する研究, 第78回溶接法委資料 (1980)
- 8) 丸尾, 平田, 武市; レーザ計測によるパルス MIG 溶接の移行現象について, 講演概要集, 30 (1982)
- 9) Classification of Metal Transfer on arc electric welding processes, IIW Doc. XII-636-76 (1976)
- 10) 大嶋, 安倍, 窪田; 周期的に変化する非線形特性の電源による強制溶滴移行の安定性, 本誌51-2 (1982), 175-181
- 11) 安藤, 長谷川; 溶接アーク現象, 産報
- 12) 丸尾, 平田, 草野, 岡野; パルス TIG 溶接における溶融池振動現象, 第67回溶接アーク物理委資料 (1982)

SUS 405 クラッド鋼の溶接性*

中西 睦夫**, 渡辺 征一**, 古澤 遵**

Weldability of Type 405 Stainless Clad Steel Plate*

by Mutsuo Nakanishi**, Seiichi Watanabe** and Jun Furusawa**

Type 405 stainless clad steel plate has been widely used as a corrosion resistant material, especially as a stress corrosion cracking resistant material. However, occurrence of transverse cracking due to hydrogen in the first layer welds of clad side and appearance of carburized layer in the heat affected zone of first layer welds of clad side are reported in the welds of this steel. Investigation has been made to clarify the effect of chemical composition of base metal and welding condition on these problems mentioned above.

Results show that the largest effect was obtained with the reduction of C content in base metal on the improvement of these problems. Therefore, the application of newly developed low-C, Al-B treated low alloy steel plates for base metal of Type 405 stainless clad steel plates is expected to be available.

1. 緒 言

石油化学工業などの圧力容器において耐食性を確保する目的で内面にステンレス鋼をクラッドした Mo 鋼あるいは Cr-Mo 鋼が広く用いられている。これらクラッド鋼板の一つに耐 SCC 性を考慮した SUS 405 (13 Cr-

Al) クラッド鋼があり, 石油精製プラントにおいては常圧蒸留装置や軽質油脱硫装置に多く用いられている。

しかし, SUS 405 クラッド鋼の溶接に関する課題として, 合せ材側初層溶接金属部で母材希釈による高硬化化に伴い横割れ(溶接低温割れ)が発生することが指摘されており¹⁻³⁾, 溶接材料による対策が示されている。さらに合せ材側初層溶接部と母材部との境界部に溶接後熱処理により侵炭層が生成するため, 曲げ延性の低下ある

*原稿受付 昭和58年8月5日(全国大会論文発表講演)

**正 員 住友金属工業(株) Member, Sumitomo Metal Industries Ltd.