

# タンデムパルスGMA溶接におけるアーク切れ防止対策とアーク長安定化制御の検討\*

—タンデムパルスGMA溶接のアーク安定化に関する研究(第2報)—

上山 智之\*\*, 大縄登史男\*\*, 上園 敏郎\*\*, 田中 学\*\*\*, 牛尾 誠夫\*\*\*, 中田 一博\*\*\*

## Solution to Problem of Arc Interruption and Stable Arc Length Control in Tandem Pulsed GMA Welding\*

—Study of Arc Stability in Tandem Pulsed GMA Welding (Report 2)—

by UEYAMA Tomoyuki\*\*, OHNAWA Toshio\*\*, UEZONO Toshiro\*\*, TANAKA Manabu\*\*\*,  
USHIO Masao\*\*\* and NAKATA Kazuhiro\*\*\*

In tandem pulsed GMA welding, it is most important issue to prevent arc interruption caused by electromagnetic interference between the two arcs. Pulse timing control can reduce arc interference in tandem pulsed GMA welding. One effective way is to delay the pulse end timing of trailing arc by 0.4-0.5 ms from that of leading arc. In addition, arc length control is assured by pulse frequency modulation (PFM) for the leading wire and pulse peak modulation (PPM) for the trailing wire with the pulse timing synchronized with the leading pulse. Consequently, leading and trailing arcs are maintained stable without arc interruption and a stable arc length control is established, which is hardly affected by fluctuations of wire feed rate and extension length.

**Key Words:** Tandem GMA welding, Pulse timing control, Arc interruption, Arc length control, Metal transfer

### 1. 緒 言

タンデムパルスGMA溶接では近接して2つのアークを発生させるため、両アークが形成する磁場の作用によりアーク干渉を引き起こし、最悪の場合にはアーク切れが発生する。前報<sup>1)</sup>では、ワイヤ間距離とAr+CO<sub>2</sub>シールドガス混合比がアーク電圧の異常上昇とそれによるアーク切れ頻度に及ぼす影響について調査した結果、ワイヤ間距離が10mm前後でCO<sub>2</sub>混合比率が10%を越える条件下で、一方のアークがパルスピーク電流であり、他方のアークがベース電流である逆位相時においてそれらが多発することを示した。したがって、このような問題を回避するためにはワイヤ間距離を5mm程度まで短くするか、CO<sub>2</sub>混合比率を5%以下にしたAr+CO<sub>2</sub>シールドガスを適用することが考えられる<sup>1)</sup>。

一方、著者らは薄鋼板高速溶接のビード形成に及ぼす2本のワイヤ配置の影響について検討した結果<sup>2)</sup>、シールドガスとして80%Ar+20%CO<sub>2</sub>混合ガスを用い、ワイヤ間距離が9~12mmのときに高速溶接性能が最も向上することを明らかにしており、ワイヤ間距離が5mmでは良好な高速溶接性能を引き出すことができない。さらに、CO<sub>2</sub>混合比率を低

くすると溶け込みが浅くなり、高速溶接時には溶け込み不良の問題が顕在化することがある。また、実用面ではシールドガスのコスト上昇にもなる。したがって、ワイヤ間距離が10mm前後であり、20%以上のCO<sub>2</sub>混合比率のシールドガスを適用してもアーク切れのない溶接を実現できる手段が要求される。

さらに、タンデムパルスGMA溶接では先行および追従ワイヤに通電されるパルスタイミング制御がアーク安定化において重要であることは報告<sup>3-5)</sup>されているが、パルスタイミング制御を行いながらワイヤ送給変動や突き出し長の変化などの外乱に対するアーク長制御についてはこれまでに詳細な検討を行った報告は無い。

そこで、本研究では、タンデムパルスGMA溶接のアーク安定化を目的として、アーク電圧の異常上昇やアーク切れを防止する方法およびワイヤ送給変動や突き出し長変化等の外乱が発生した場合でも安定したアーク長を維持する方法について検討を行った。検討に当たっては、ベース電流出力値を高く設定することによって、引き寄せ力によるアークの移動量抑制が期待できるので、アーク切れ発生頻度に及ぼすベース電流の影響を調査した。また、先行及び追従ワイヤに通電するパルスタイミング制御がアーク切れ発生頻度に及ぼす影響についても検討した。そして、これらの知見からアーク切れを防止するとともにアーク長の安定機能を達成するタンデムパルスGMA溶接のアーク安定化制御法を考案した。

\*原稿受付 平成17年7月5日 平成13年度秋季全国大会で発表、平成13年8月溶接アーク物理研究委員会で発表

\*\*正 員 株ダイヘン Member, DAIHEN Corporation

\*\*\*正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University

## 2. タンデムパルス GMA 溶接電源の構成

Fig. 1 はタンデムパルス溶接電源の構成を示したものである。先行ワイヤ側の溶接電源は、三相交流を整流回路で直流化し高速にスイッチング可能なスイッチ素子にて高周波交流を作り出してトランスの一次側への入力とし、トランスの二次側出力に配置された整流回路であらためて直流化するインバータ制御式溶接電源である。溶接中は電流指令値  $I_{Lset}$  と電流検出器の出力  $i_L$  が等しくなるように一次側のスイッチング時間の制御を行うことで高速に所望の電流を得ることができる。

また、電圧を電圧検出器から検出し電圧設定との電圧誤差量を求め、パルス周波数制御部にてパルス周波数に変換するパルス周波数変調方式 (Pulse Frequency Modulation, P. F. M.)<sup>9)</sup>によって溶接中のアーク長制御を行っている。すなわち、アーク電圧が高い(アーク長が長い)場合にはパルス周波数を低くし、アーク電圧が低い(アーク長が短い)場合には周波数を高くする。周波数を増減することでワイヤの溶融速度を制御し、アーク長を一定に保つ。一般的に平均アーク電圧とアーク長は比例の関係にあるため、この電圧フィードバック制御は、アーク長の制御を行っていることになる。

電流波形制御部では、パルスタイミング指令によって先行ワイヤに通電するパルスピーク電流と追従ワイヤに通電するパルスピーク電流の位相制御信号を出力し、追従ワイ

ヤ側の溶接電源の電流波形制御部へ入力され4章で述べるパルス溶接電流の同期制御を行う。

追従ワイヤ側の電源は、一次側の回路構成は先行ワイヤ側の電源と同じであるが、電流波形制御部ではピーク電流とベース電流で異なる制御を行う。すなわち、先行側溶接電源からの位相制御信号によって定められた所定の時間だけピーク電流とベース電流の選択を行う。ピーク電流期間はインバータ制御周期と同期して外部特性制御部に現在の電流値を入力し、予め格納されている電流電圧のデータを参照してこれに出力電圧設定を加算した値をピーク期間の出力電圧値として出力する。そして、ピーク期間の出力電圧値とトランスの二次側出力電圧を監視する補助巻線の電圧値が等しくなるようにスイッチング時間の制御を行う。これによって、任意の外部特性を作り出す制御を行う<sup>7, 8)</sup>。本実験ではピーク電流期間の外部特性を  $-10V/100A$  とし、アーク長変動に伴う電圧変化に対応して適切なアーク長制御が行える電流変化量が得られるようにした。またベース期間は定められた電流指令値  $I_{Tset}$  と電流検出器の出力  $i_T$  が等しくなるように一次側のスイッチング時間の制御を行い、電流指令値  $I_{Tset}$  はベース電流  $I_B$  を用いた。

これによって、追従アークは先行アークのパルス電流と同期を確保しながら、ワイヤ送給速度変動や突き出し長変化等の外乱が自身のアークに発生しても、パルスピーク電流を変調 (Pulse Peak Moderation, 以下、P. P. M. という) させることでアーク長を制御することが可能となる<sup>9, 10)</sup>。

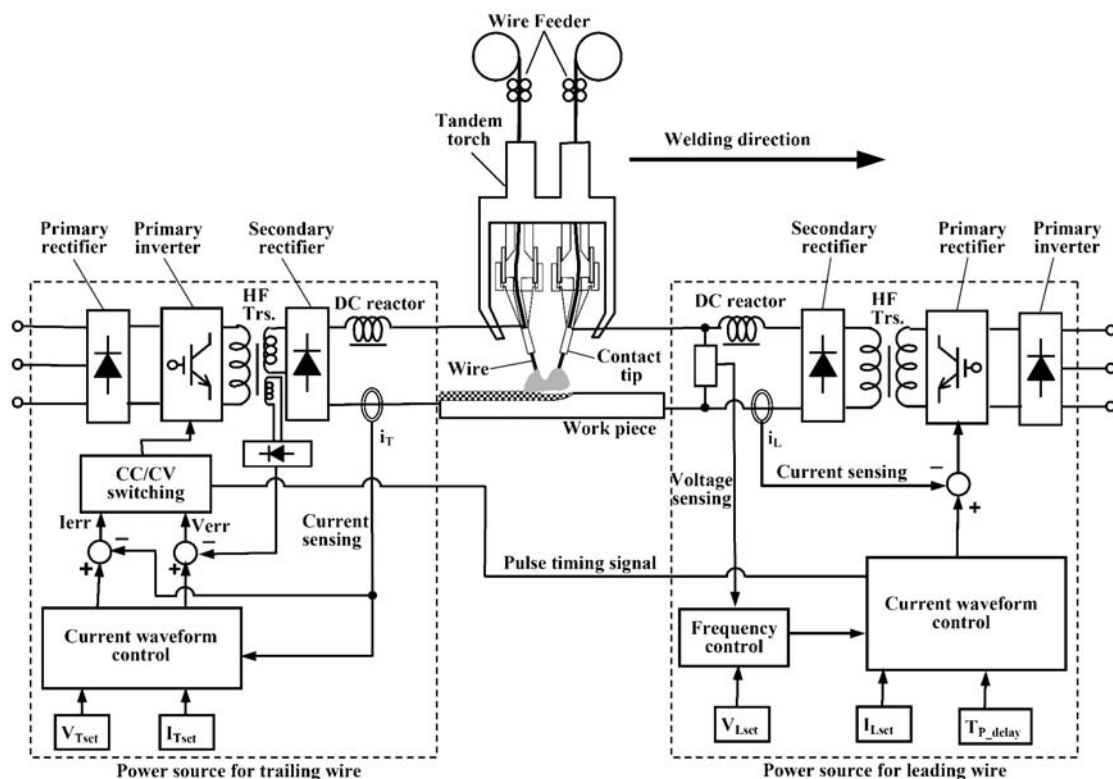


Fig. 1 Schematic diagram of tandem pulsed GMA welding power sources

### 3. 使用材料及び実験方法

#### 3.1 使用材料

本実験では、溶接母材として板厚 3.2 mm × 幅 65 mm × 長 450 mm の軟鋼板 (JIS SPCC 材) 及び溶接ワイヤとしてワイヤ径 1.2 mm の市販ソリッドワイヤ (JIS YGW15 相当) を用いた。また、シールドガスにはブリックスの 80%Ar+20%CO<sub>2</sub> 混合ガスを用いてアーク切れに及ぼす影響を検討した。また、ガス流量 50L/min をシールド条件とした。

#### 3.2 実験方法

Fig. 2 および Table 1 はそれぞれ本実験で検討するパルス電流波形図とパルス電流波形条件を示したものである。試験溶接は Table 2 に示す溶接条件にてビード溶接を行い、1

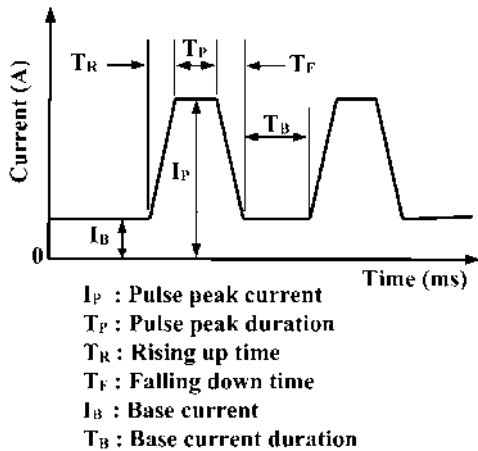


Fig. 2 Definition of pulsed current waveform parameter

Table 1 Pulse waveform conditions

Pulse waveform conditions of leading arc	
Pulse peak current (A):	450
Pulse peak duration (ms):	1.5
Rising up time (ms):	0.4
Falling down time (ms):	1.1
Base current (A):	45
Pulse waveform conditions of trailing arc	
Pulse peak current (A):	450
Pulse peak duration (ms):	1.5
Rising up time (ms):	0.4
Falling down time (ms):	1.1
Base current (A):	45, 60, 80, 100 and 120

Table 2 Experimental welding conditions

Wire feed rate (mm/s) :	83.3 (5 m/min)
Average welding current:	145-150 A
Welding speed (mm/s) :	33.3 (2 m/min)
Inter-wire distance (mm) :	10
Tip to base metal distance (mm) :	20
Shielding gas :	80%Ar+20% CO <sub>2</sub> and 75%Ar+25%CO <sub>2</sub>
Gas flow late (m <sup>3</sup> /min) :	8.33 × 10 <sup>-4</sup> (50 l/min)

ビード溶接時間 9 秒として、溶接開始および終了のそれぞれ 1 秒間を除外した 7 秒間分の溶接電流及びアーク電圧波形データを波形記録計によって記録し、パーソナルコンピュータに入力して解析を行った。そして、アーク干渉によって生じたアーク電圧の跳ね上がり回数やアーク切れ回数を統計処理した。なお、アーク電圧の異常上昇のカウント方法は前報と同様であるので説明を省略する。

アーク干渉、アーク切れ及び溶滴移行の検討には、撮影速度 8000 コマ/s のデジタルハイスピードビデオカメラを用い、溶接アークと同じ高さレベルで X テーブルアークチューエータを挟んで両側に高速度ビデオカメラとキセノンバックライトをそれぞれ配置し、溶接線直角方向から観察した。なお、撮影に当たっては高速度ビデオカメラの撮影画像と溶接電流及びアーク電圧波形を同期させた。

#### 4. ベース電流によるアーク切れ防止策の検討

Fig. 3 は先行アークのパルスピーク電流値 (450 A)、パルス幅 (1.5 ms) 及びベース電流値 (45A) を固定しておき、追従アークのベース電流値を 45~120 A まで増加させたときの追従アークにおける電圧異常上昇回数及びアーク切れ回数の関係を示したものである。

追従アークのアーク電圧異常上昇回数およびアーク切れ回数は、すべて先行アークがパルスピーク電流期間でかつ追従アークがベース電流期間の場合に発生し、ベース電流を増加させることによって減少する。本実験の結果ではベース電流を 100 A 以上に設定すればアーク電圧の異常上昇およびアーク切れを防止できることがわかった。また、追従アークの移動量  $l_T$  は次式で表すことができるので、

$$l_T = \frac{I_L L_T^2}{2I_T D_E} \quad (1)$$

先行アークがパルスピーク電流  $I_L=450A$ 、追従アークがベース電流  $I_T=45\sim 120A$  となる逆位相時において、ワイヤ

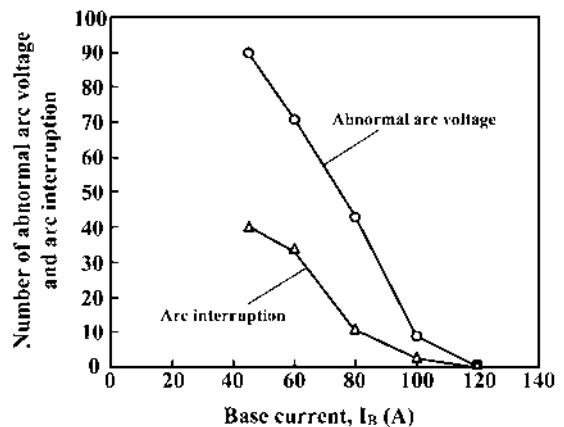


Fig. 3 Effect of base current on occurrences of abnormal arc voltage and arc interruption

間距離  $D_E$  が 10 mm 及び追従アーク長  $L_T$  が 5 mm であるとき、各ベース電流値における追従アークの移動量の計算値  $l_T$  は Table 3 のようになる。すなわち、ベース電流の増加とともに追従アークの移動量は減少して 120A ではその移動量が 3.9 mm であり、アークプラズマの伸長が小さくなる結果、追従アークの電圧異常上昇が起こり難くなりアーク切れの発生も無くなると考えられた。

Fig. 4 に追従アークのベース電流を 120A に設定した場合のアーク現象観察結果を示す。コマ a に示すように先行ワイヤにはパルスピーク電流が通電されているにも関わらず、追従アークの引き寄せは認められるがその程度は小さく、アーク電圧の異常上昇も発生していない。また、追従ワイヤは溶滴の下部より明るいアークプラズマが発生し、ワイヤ径よりも大きな溶滴を先端に形成しているのが観察される。したがって、ベース電流が高ければアーク切れは防止できることがわかる。しかし、追従ワイヤへ通電するベース電流を 120A まで増加させると、平均溶接電流が一定であるためパルス周波数が減少してベース期間が長くなる。そのため、ベース期間中にワイヤ先端が溶融して大きな溶滴が形成される。この状態から追従ワイヤにパルスピーク電

流が通電されても、コマ b に示すようにアークは肥大した溶滴よりも上方に燃え上がることができず、ピンチ力が溶滴離脱に有効に働かないため、1 パルス 1 溶滴移行が困難となる。その結果、コマ c~d に示すように大きくなった溶滴の先端は溶融池に接触して微小短絡が発生したり、コマ e~f に示すようにパルスピーク電流が通電されると反発移行のように溶滴が押し上げられてワイヤ軸方向から逸脱したところで離脱し、溶滴が溶融池へ移行することなく大粒のスパッタとして飛散する。

以上の結果から、ベース電流を増加させることによって、アーク干渉抑制には効果を発揮するが、溶滴移行が 1 パルス 1 溶滴移行とはなり得ないため、パルスアークの効果を有効に発揮しているとは言い難い。

### 5. パルスタイミング制御によるアーク切れ防止策の検討

#### 5.1 アーク干渉に及ぼすパルスタイミング制御の影響

パルスタイミング制御無しによる溶接では、アーク電圧の異常上昇とそれによるアーク切れは、両ワイヤに通電されるパルス溶接電流が逆位相となる場合で頻発する。一方、両ワイヤに通電されるパルスピーク電流が同時に出力される（以下、同位相という）場合においては、アーク電圧の異常上昇とそれによるアーク切れの発生頻度が少ないことを前報にて確認している。

そこで、同位相のパルスタイミング制御におけるアーク電圧の異常上昇およびアーク切れ発生回数を調査した。なお、両ワイヤに通電されるパルス電流波形条件は Table 1 に示すとおりで、追従アークのベース電流は 45A とした。

Table 3 Calculated displacement of trailing arc

Base current (A)	Displacement, $l_T$ (mm)
45	9.88
60	9.38
80	7.03
100	5.63
120	3.90

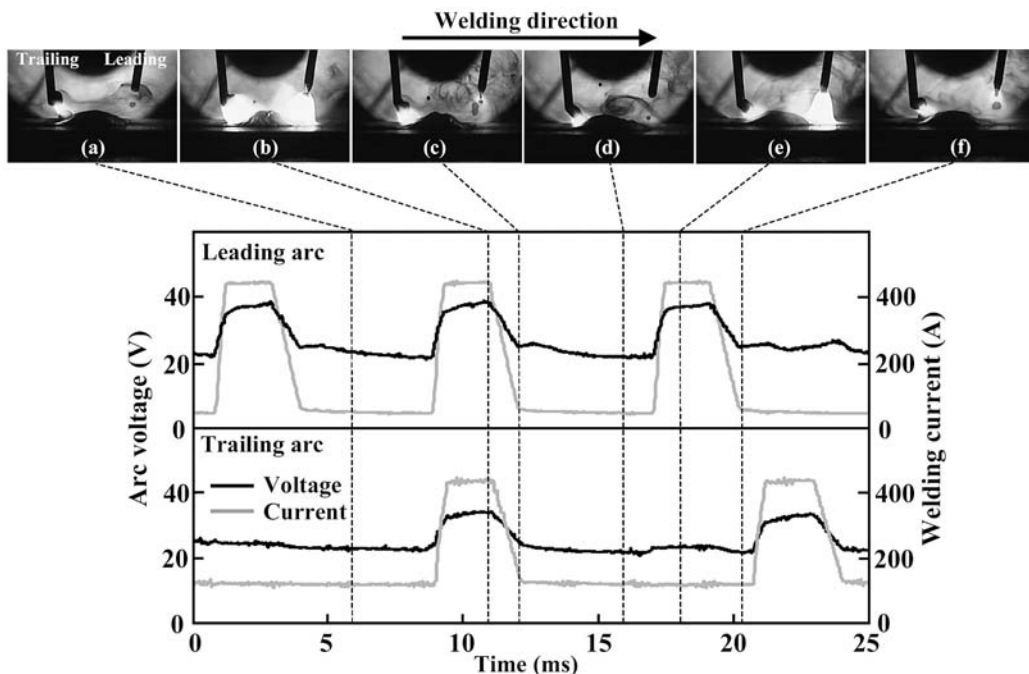
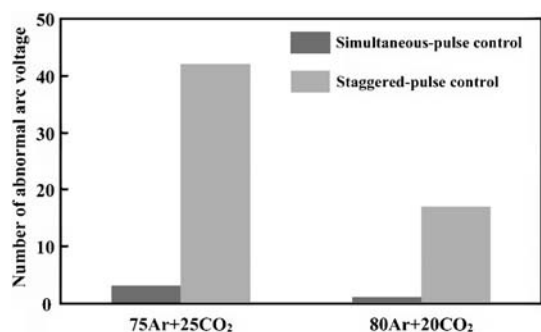
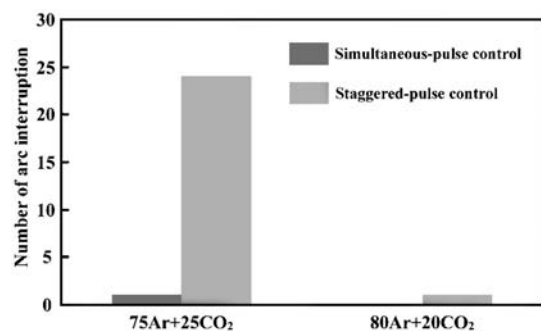


Fig. 4 Metal transfer of trailing arc at 120 A of base current



(a) Abnormal arc voltage



(b) Arc interruption

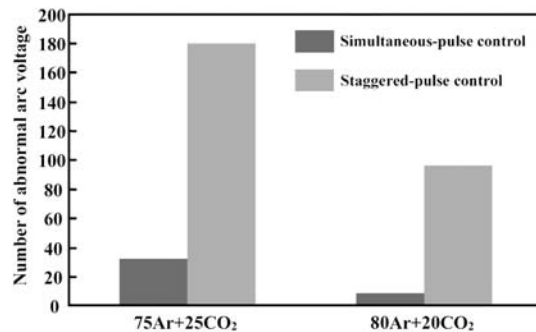
Fig. 5 Occurrences of abnormal arc voltage and arc interruption on leading arc

Fig. 5 はワイヤ間距離が 10 mm で CO<sub>2</sub> 混合比率 20% および 25% の Ar+CO<sub>2</sub> シールドガス雰囲気における先行アークの電圧異常上昇およびアーク切れ発生回数をパルスタイミング制御が同位相と逆位相と比較したものである。先行アークの電圧異常上昇は同位相のパルスタイミング制御を適用することで 75%Ar+25%CO<sub>2</sub> で 3 回, 80%Ar+20%CO<sub>2</sub> では 1 回であり, アーク切れは 75%Ar+25%CO<sub>2</sub> で 1 回, 80%Ar+20%CO<sub>2</sub> ではゼロにすることができた。

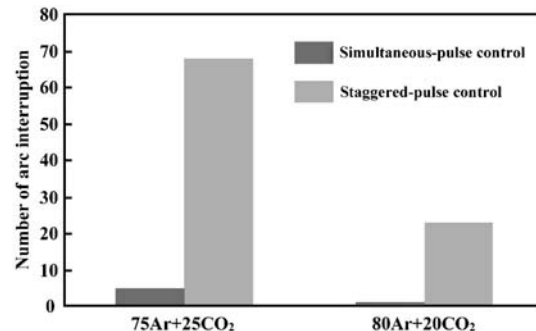
Fig. 6 はワイヤ間距離が 10 mm で CO<sub>2</sub> 混合比率 20% および 25% の Ar+CO<sub>2</sub> シールドガス雰囲気における追従アークの電圧異常上昇およびアーク切れ発生回数をパルスタイミング制御が同位相と逆位相と比較したものである。同位相の場合, アーク電圧異常上昇回数は逆位相と比較して大幅に減少し, 同位相のパルスタイミング制御によるアーク電圧異常上昇とアーク切れ発生の減少に著しい効果があることが明らかとなった。

しかし, 追従アークでは依然としてアーク電圧の異常上昇およびアーク切れは発生しており, パルスタイミング制御を同位相にするだけで完全に防止できたとはいえない。

Fig. 7 は同位相のパルスタイミング制御におけるアーク切れ発生時のアーク現象観察結果を示したものである。コマ a は両ワイヤへ通電されたパルスピーク電流期間終了直前のアーク状態を示したものである。両アークは相互の電磁力の影響を受けて引き寄せ合い, ワイヤ軸の延長より内側へ偏向しているが, パルスピーク電流による強い硬直性が



(a) Abnormal arc voltage



(b) Arc interruption

Fig. 6 Occurrences of abnormal arc voltage and arc interruption on trailing arc

作用していると考えられ, その偏向程度は小さい。パルスピーク電流からベース電流へ立ち下った直後では, コマ b に示すように両ワイヤには低電流のベース電流が同時に通電される結果, 相互の電磁力の影響によるアークの引き寄せの程度も同時に小さくなっていると考えられ, 双方のアークはコマ a と比べてほぼ同程度の偏向を示している。しかし, コマ c~d に示すように追従アークのアークルートは先行アーク側へ移動し, アーク電圧が上昇する。そして, コマ e に示すように先行アークがパルスピーク電流期間を迎えると追従アークは急速に吹かれてアーク電圧が急上昇する。一方, 追従ワイヤへも先行のワイヤと同時にパルスピーク電流を通電するが, 既にアーク電圧が上昇していたために溶接電源の出力が不足し, パルスピーク電流を出力できず, コマ f に示すようにアーク電圧だけが上昇し, ついには無負荷電圧を超えてアーク切れが生じている。

また, アーク切れの発生には至らなかったが, 追従アークの電圧異常上昇が発生した場合についてアーク現象を観察したところ, そのほとんどの場合, 電圧異常上昇が発生する直前では, Fig. 8 (a) に示すように追従アークのアークルートが, ワイヤ間に盛り上がり形成された湯溜まりの傾斜面に乗り上げた状態になっていることがわかった。

すなわち, 追従アークは湯溜まりとの位置関係において, Fig. 8 (a) に示すように, ワイヤ軸直下溶融池とワイヤ先端の距離  $L_{T1}$  よりも湯溜まりの傾斜面とワイヤ先端との距離  $L_{T2}$  の方が短い場合には, アークルートは湯溜まり傾斜面に

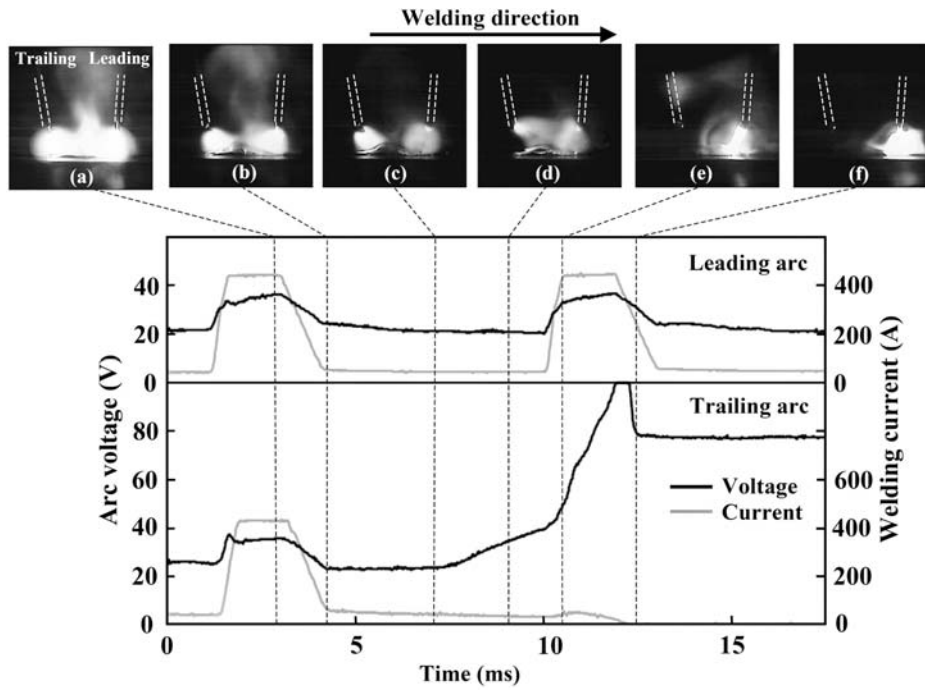


Fig. 7 Occurrences of abnormal arc voltage and arc interruption by simultaneous pulse timing control

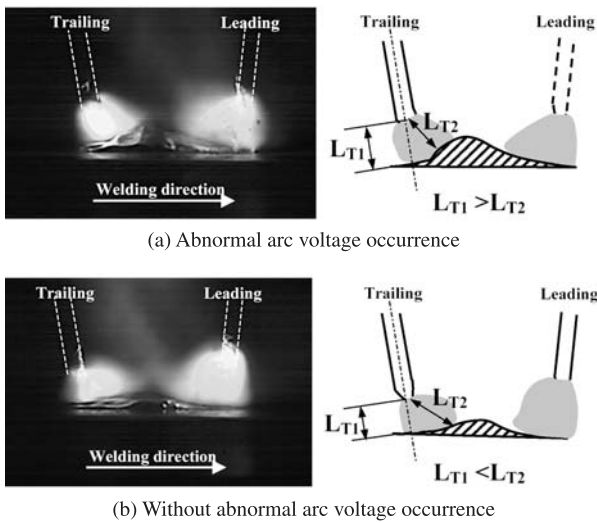


Fig. 8 Trailing arc on the bulged molten metal just before abnormal arc voltage occurrence

形成しやすくなる。そして、先行アーク側に近づく結果、先行アーク電流がベース電流であっても追従アークのアークルートが引き寄せられ易くなるものと考えられる。一方、Fig. 8 (b) に示すように、湯溜まりの盛り上がり小さい場合や盛り上がり先行アーク寄り追従アークから遠ざかっている場合には、ワイヤ軸直下溶融池とワイヤ先端の距離  $L_{T1}$  が湯溜まりの傾斜面とワイヤ先端との距離  $L_{T2}$  よりも短くなるので、追従アークのアークルートはワイヤ直下の溶融池に落ちつきやすくなる。このため、先行アーク側へ近づくこともないので追従アークのアークルートが引き寄せられ難くなり、アーク電圧の異常上昇が発生しないと考

えられる。

### 5.2 アーク切れ防止策の検討

全らは、アルミニウム合金の交流パルス MIG 溶接において極性が EN から EP へ反転時に再点弧が成功してもその後のベース電流期間で陰極点がアーク直下の溶融池より遠くなる結果アーク電圧が異常上昇しアーク切れが発生する問題について、異常なアーク電圧の上昇率を監視してアーク切れを事前に検出し、強制的に次のパルスピーク電流を早く出力させることで陰極点を溶融池近傍に戻させ、正常ベース期間中のアーク切れを事前に防止することを提案している<sup>11)</sup>。

この知見に基づけば、ベース期間中の追従アーク電圧のアーク電圧上昇率を監視して強制的に次周期のパルスを早期に出力させればアーク切れ回避の可能性が考えられる。しかし、この手法では両ワイヤに通電するパルス電流の位相制御を基本とした場合には、一時的にタイミング制御を停止させるなどの処置が必要となり、異常なアーク電圧上昇が毎周期のベース電流期間で連続的に発生した場合にはパルスタイミング制御が破綻することが危惧される。

そこで、本研究では Fig. 9 に示すように先行ワイヤに通電されるパルスピーク電流開始に対して追従ワイヤに通電するパルスピーク電流開始を遅延させ、両ワイヤに通電するパルスピーク電流の位相を若干ずらしたパルスタイミング制御を考案し<sup>12)</sup>、パルスピーク電流による高電流アークの硬直性<sup>13)</sup>を利用して追従アークの陰極点をアーク直下の溶融池近傍に引き戻す効果<sup>11)</sup>をねらってアーク電圧異常上昇およびアーク切れの防止を試みた。

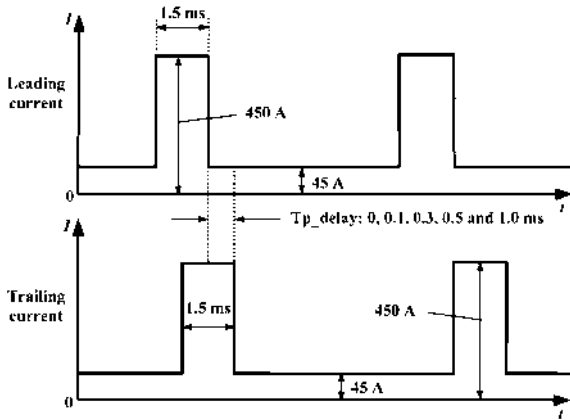


Fig. 9 Pulse timing control with 0.5 ms-delayed pulse peak current for trailing arc

Fig. 10 に 75%Ar+25CO<sub>2</sub> シールドガス雰囲気下で追従アークにおけるアーク電圧異常上昇およびアーク切れ発生頻度に及ぼすパルスピーク電流終了の遅れ時間  $T_{p\_delay}$  の影響を示す。  $T_{p\_delay}$  が 0 ms では、40 回のアーク電圧異常上昇が発生し、アーク切れに至った回数は 16 回であった。  $T_{p\_delay}$  を 0.3 ms にすれば、アーク電圧異常上昇発生回数は三分の一以下に減少し、アーク切れ回数も五分の一以下に減少している。  $T_{p\_delay}$  が 0.4~0.5 ms では、アーク電圧異常上昇は 3 回以下となり、アーク切れの発生はゼロとなった。  $T_{p\_delay}$  が 0.6 ms 以上になると、アーク電圧異常上昇及びアーク切れ回数は増加するが 0.8 ms までは  $T_{p\_delay}$  を設けなかった同位相よりもアーク電圧異常上昇及びアーク切れ回数とも少ない。しかし、  $T_{p\_delay}$  が 1.0 ms では、追従アークがパルスピーク電流期間を迎えるまでにパルスピーク電流が通電された先行アークの影響を受け易くなると考えられ、追従アークの電圧異常上昇およびアーク切れ回数は  $T_{p\_delay}$  を設けなかった同位相よりも大幅に多くなり、逆効果となる。

先行アークにおけるアーク電圧異常上昇およびアーク切れ発生に及ぼす  $T_{p\_delay}$  の影響を Fig. 11 に示す。  $T_{p\_delay}$  量とアーク電圧異常上昇およびアーク切れ発生回数の関係は、追従アークの場合と同様の関係を示したが、それらの発生レベルは非常に少なく、  $T_{p\_delay}$  が 0.3~0.8 ms の範囲ではアーク切れの発生は全く認められなかった。

Fig. 12 は  $T_{p\_delay}$  を 0.5 ms に設定したパルスタイミング制御によるアーク現象観察結果を示したものである。コマ a~b に示すように、先行ワイヤにパルスピーク電流が出力されるとベース電流期間の追従アークにおいてアークルートが先行アーク側へ引き寄せられている状況が観察される。しかし、0.5 ms 後には追従アークにパルスピーク電流が出力されることによって、コマ c に示すように追従ワイヤ軸の延長上にアークルートが戻される。ただし、両アークにはパルスピーク電流が出力されているので、相互の引力により両アークのアークルートはわずかにワイヤ軸の延長上

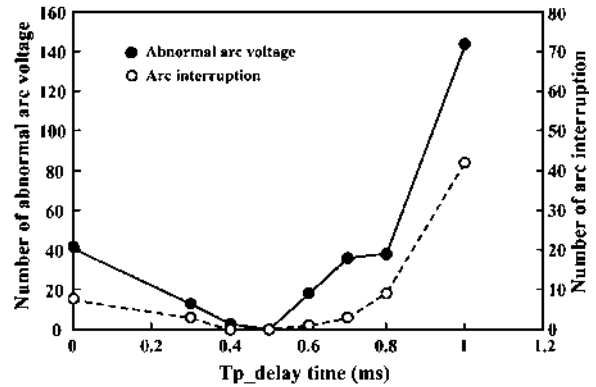


Fig. 10 Effect of  $T_{p\_delay}$  time on occurrences of abnormal arc voltage and arc interruption in trailing arc

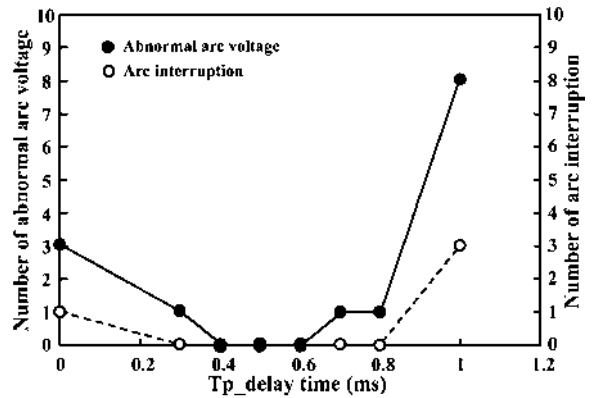


Fig. 11 Effect of  $T_{p\_delay}$  time on occurrences of abnormal arc voltage and arc interruption in leading arc

よりも内側に寄っている。この状態から、先行アークがベース電流へ立ち下るとコマ d~e に示すように追従アークは自身の硬直性によって引き寄せられて、そのアークルートは追従ワイヤ軸線直下の熔融池に復帰し、コマ f~g に示すように追従アークがベース電流期間を迎えてもアークルートはほとんど移動することなくワイヤ軸線直下の熔融池上に落ち着いている。

さらに、コマ d~e の区間では先行アークがベース電流に立ち下ることで先行アークのアーク圧力のみが解放され、湯溜まりが先行アーク側寄りに形成されやすくなる結果、追従アークのアークルートが湯溜まりの傾斜面に乗り上げることも起こりにくい。したがって、コマ f~g に示すように追従アークがベース電流期間を迎えても陰極点は先行アーク側へほとんど移動することなくアークルートを形成し、次周期のパルスピーク電流期間を迎えるまで安定したアークを維持している。

一方、先行アークは追従アークよりも先にベース電流期間を迎えるが、コマ d に示すように先行アークはベース電流への立ち下り途中の電流（約 250A）が出力された状態であり、追従アークがパルスピーク電流であっても追従アーク

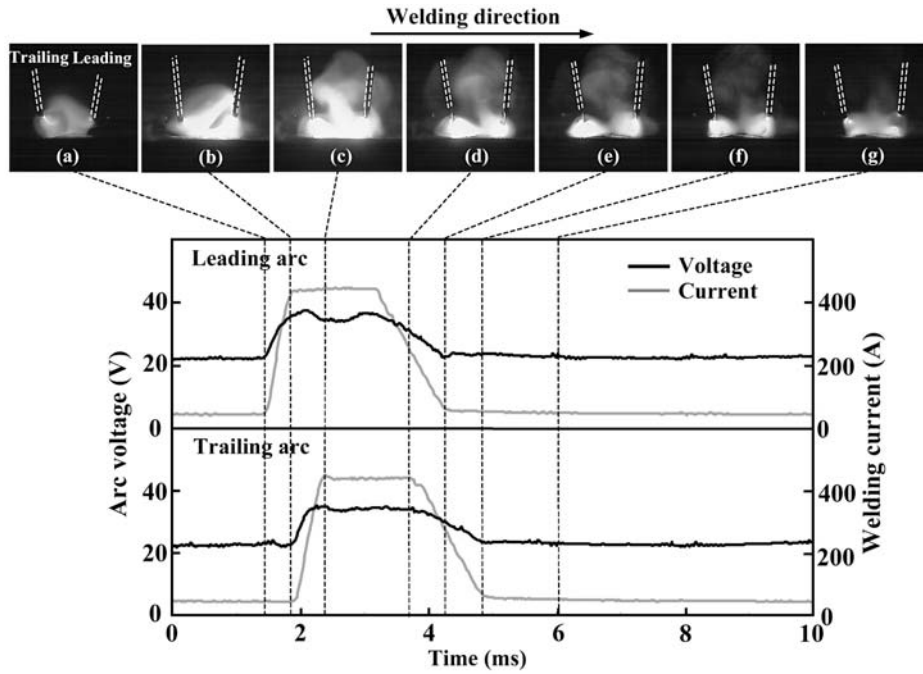


Fig. 12 Arc phenomena in pulse timing control with 0.5 ms-delayed pulse peak current for trailing arc

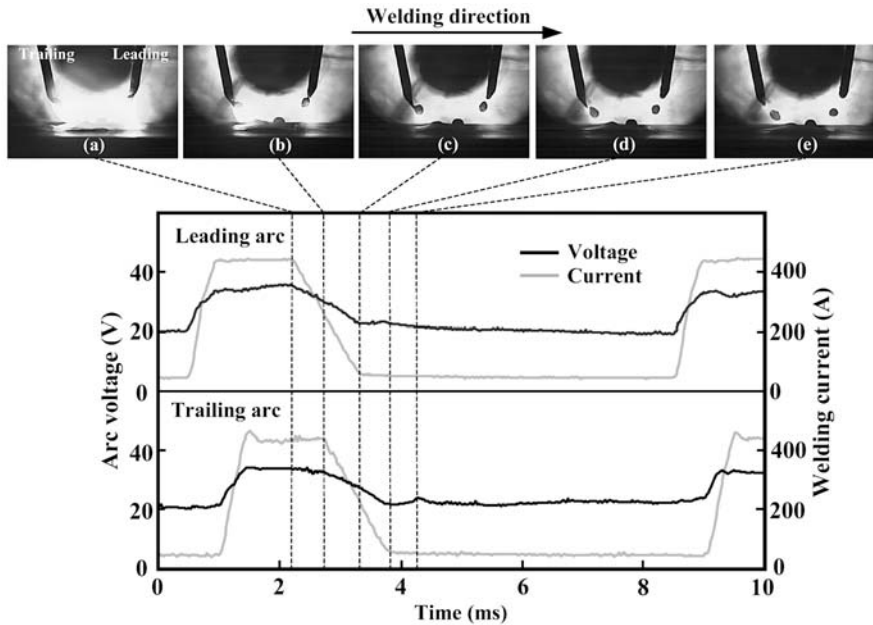


Fig. 13 Metal transfer in pulse timing control with 0.5 ms-delayed pulse peak current for trailing arc

ク側へ引き寄せの影響は受け難い。また、先行アークがベース電流まで下がりきった時点では、コマ e に示すように追従アークは既にベース電流への立ち下り期間の途中であり、同様に引き寄せの影響は受け難い。したがって、 $T_{p\_delay}$  を設定したパルスタイミング制御では先行アークにおいても電圧異常上昇およびアーク切れの発生は起こり難い。

Fig. 13 に溶滴移行現象の観察結果を示す。先行および追従ワイヤは 1 パルス 1 溶滴移行の安定した溶滴移行を示し

た。また、両ワイヤにパルスピークが同時に通電されるとアークが相互に引き寄せられ、移行する溶滴もその影響を受ける。しかし、溶滴離脱がパルスピーク電流期間の終了後のタイミングとなるようにパルス電流波形条件を最適化することによって、ワイヤ軸から大きく逸脱して溶滴移行することもなくスパッタの発生も起こり難い。

Fig. 14 は  $T_{p\_delay}$  が 0 ms と 0.5 ms の場合のビード外観を比較して示す。  $T_{p\_delay}$  が 0 ms の場合、アンダカットやハンピングビードには至らないが、アーク切れが発生するこ



とによって溶融池が乱れたとされるビード表面の乱れが生じている。これに対し、 $T_{p\_delay}$  が 0.5 ms の場合は、ビード表面がなめらかで非常にきれいなビード外観を示している。

### 6. アーク長安定化制御法の検討

タンデムパルス GMA 溶接では、それぞれ独立して 2 ワイヤが送給されてアークを出力する。このため、ワイヤ送給変動や突き出し長の変化等の外乱もそれぞれ個別に発生することも考えられる。

一方、近接する 2 ワイヤ間のアーク干渉とそれによるアーク切れを防止するため、5.2 項で述べたように両ワイヤに通電するパルス電流において、先行アークのパルスピーク電流通電タイミングに対して追従アークのパルスピーク電

流通電タイミングを 0.5 ms の遅れを設けた新しいパルスタイミング制御法を考案した。しかし、このタイミング制御を維持しながらそれぞれのワイヤにおけるアーク長は独立して制御する必要がある。そこで、2 章で述べたように先行アークのアーク長制御は P. F. M. 方式、追従アークのアーク長制御は P. P. M. 方式とすることによって、パルスタイミング制御と先行及び追従アークのそれぞれ独立したアーク長制御の両立を試みた。その有効性の確認については、ワイヤ送給モータの性能によっては数%の送給変動が 0.5 Hz 以下の長い周期で発生する場合もあり、これを想定して、以下の実験を行った。まず、先行及び追従ワイヤの送給速度をそれぞれ 5 m/min に設定する。次に、いずれかのワイヤ送給ユニットに設定ワイヤ送給速度に対して  $\pm 10\%$  の変動幅で送給速度指令を周波数 1 Hz のサイン波状に与える。そして、追従アーク長変動をハイスピードビデオ撮影 (1000 コマ/s) によって観察した。

Fig. 15 はその結果をワイヤ先端・母材間距離と時間の関係で示したものである。なお、送給変動を与えない場合のワイヤ先端・母材間距離は 4 mm となるよう設定した。

先行ワイヤ送給指令に変動信号を与えたとき、先行アークのアーク長制御は P. F. M.、追従アークはパルスタイミング制御のみ行ってアーク長制御を実施しなかった場合は、先行アークのパルス周波数変調の影響を受けて追従ワイヤのワイヤ先端・母材間距離が 2 mm の低位となり  $\pm 1$  mm 程度のアーク長変動が生じた。一方、パルスタイミング制御とアーク長制御を両立させた場合には追従ワイヤのワイヤ先端・母材間距離はほとんど変動することなく予め設定したワイヤ先端・母材間距離を維持している。

追従ワイヤ送給指令に変動信号を与えたとき、先行アーク

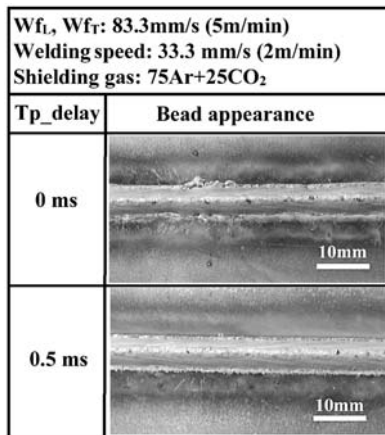
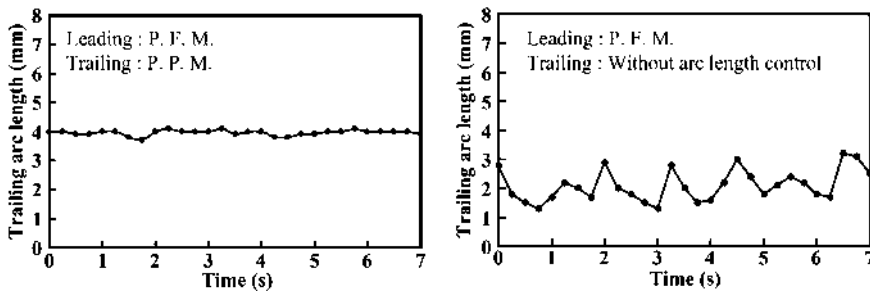
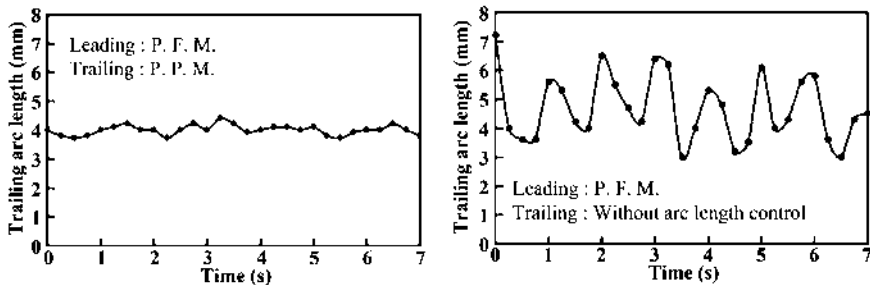


Fig. 14 Comparison of bead appearance between  $T_{p\_delay}=0$  ms and 0.5 ms



(a) Fluctuation of leading wire feed rate



(b) Fluctuation of trailing wire feed rate

Fig. 15 Comparison of arc length fluctuation between P. P. M. control and without control at trailing arc

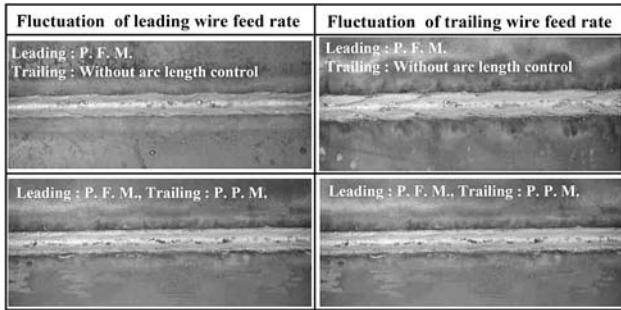


Fig. 16 Comparison of bead appearance between P. P. M. control and without control at trailing arc

クのアーク長制御は P. F. M., 追従アークはパルスタイミング制御のみ行ってアーク長制御を実施しなかった場合は, 追従アークは送給変動に対してアーク長を補償する制御が無いので, ワイヤ送給変動に対応してワイヤ先端・母材間距離が大きく変動する。一方, パルスタイミング制御とアーク長制御を両立させた場合には追従アークは送給変動に対してパルスピーク電流が $-10V/100A$ の勾配をもった外部特性曲線上で変化し, これによってアーク長が補償されるので, 追従ワイヤのワイヤ先端・母材間距離はほとんど変動することなく予め設定したワイヤ先端・母材間距離を維持している。

Fig. 16はFig. 15の試験溶接で得られたビード外観を示したものである。先行アークのアーク長制御は P. F. M., 追従アークはパルスタイミング制御のみ行ってアーク長制御を実施しなかった場合は, 先行及び追従ワイヤのいずれの送給変動に対しても波打ったビード外観であるのに対し, パルスタイミング制御とアーク長制御を両立させた場合にはアーク長変動が起こらないのでビード幅がほぼ均一にそろったビード外観を示す。

## 7. 結 言

本研究ではタンデムパルス GMA 溶接におけるアーク切れ発生の防止とアーク長安定化のための制御方法について検討した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 追従ワイヤに通電するベース電流値を増加させるとアーク電圧の異常上昇およびアーク切れの発生頻度は減少し, ベース電流値を 120A にすればこれらの問題は回避できた。しかし, 120A のベース電流設定値ではパルスに同期した 1 パルス 1 溶滴移行が困難となり, スパッタ発生の要因となる。
- (2) 先行及び追従ワイヤにパルスピーク電流を同時に通電する同位相のパルスタイミング制御では, アーク電圧異常上昇およびアーク切れ発生回数を低減する効果があったが追従アークにおいてそれらの発生を完全に防止することはできなかった。

- (3) 先行ワイヤへのパルスピーク電流通電開始に対して追従ワイヤへのパルスピーク電流通電をわずかに遅らせたパルスタイミング制御において, 追従アークにおけるパルスピーク電流終了の遅れ時間  $T_{p\_delay}$  が  $0.4\sim 0.5\text{ ms}$  の範囲で先行および追従アークにおけるアーク切れは防止できた。また, 1 パルス 1 溶滴の安定した溶滴移行も実現できた。
- (4) 先行アークのアーク長制御は P. F. M. 方式, 追従アークのアーク長制御は P. P. M. 方式とすることによってパルスタイミング制御と先行及び追従アークがそれぞれ独立したアーク長制御を両立する手法を考案し, その有効性を確認できた。

## 参 考 文 献

- 1) T. Ueyama, T. Ohnawa, M. Tanaka and K. Nakata: Occurrence of arc interference and interruption in tandem pulsed GMA welding, Quarterly Journal of Japan Welding Society (To be published).
- 2) T. Ueyama, T. Ohnawa, M. Tanaka and K. Nakata: Effect of torch configuration on high speed welding bead formation in tandem pulsed GMA welding process, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 23 (2005) No. 3 (To be published).
- 3) D. Rehfeldt and T. Polte : Investigation on metal transfer in pulsed tandem MAG welding, IIW Doc. 212-967-00 (2000) 63.
- 4) U. Dilthey, U. Reising, H. Bachem and J. Gollnick: Two-wire process for higher deposition rate and higher welding speed, IIW Doc. XII-1549-98 (1998) 129-145.
- 5) K. Michie, S. Backman and T. Ogunibiyi: Twin-wire GMAW: process, characteristics and applications, Welding Journal, Vol. 78 (1999) No. 5, 31-34.
- 6) A. Matsunawa, H. Yamamoto and S. Hiramoto: Pulsed Arc Welding, Journal of The Japan Welding Society, Vol. 53 (1984) No. 6, 20-58 (in Japanese).
- 7) K. Oshima, M. Abe, T. Kubota and T. Okada: Improvement of Stability and Self-Regulation of Welding Arc by Power Source with Nonlinear Characteristic, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 50 (1981) No. 10, 19-25.
- 8) H. Yamamoto, A. Nitta, T. Nakamata and T. Uezono: Automatic Setting of Welding Conditions by Fuzzy Controlled CO<sub>2</sub>/MAG Welding Machine, Welding Guide Book III Automation Technology of Arc Welding, Technical Commission on Welding Processes Japan Welding Society, (1995).
- 9) T. Ohnawa and T. Uezono: Method for controlling multiple electrode pulse arc welding process and welding equipment, Japan Patent, JP2001 64224.
- 10) T. Ohnawa, T. Uezono, T. Ueyama, K. Yamazaki, K. Nakata and M. Ushio: High-Speed Welding of Steel Sheets by the Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding System, IIW Doc. XII-1752-03 (2003) 46-55.
- 11) H. Tong and T. Ueyama: Solutions to Problems of Tiny Spatter and Arc Interruption in AC Pulsed MIG Arc Welding, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 22 (2004) No.2, 240-247.
- 12) T. Ohnawa and T. Uezono: Method for controlling multiple electrode pulse arc welding process and welding equipment, Japan Patent, JP2002 263841.
- 13) M. Boulos, P. Fauchais and E. Pfender: THERMAL PLASMAS Fundamentals and Applications Volume 1, Plenum Press, (1994) 16-17.