

タンデムパルス GMA 溶接におけるアーク干渉とアーク切れ発生要因の検討*

—タンデムパルス GMA 溶接のアーク安定化に関する研究 (第1報)—

上山 智之**, 大縄登史男**, 田中 学***, 中田 一博***

Occurrence of Arc Interference and Interruption in Tandem Pulsed GMA Welding*

—Study of Arc Stability in Tandem Pulsed GMA Welding (Report 1)—

by UEYAMA Tomoyuki**, OHNAWA Toshio**, TANAKA Manabu*** and NAKATA Kazuhiro***

In the tandem pulsed GMA welding, the occurrence of arc interruption by the electromagnetic interference between the two adjacent arcs becomes a problem. In order to clarify this problem, effects of inter-wire distance and Ar+CO₂ gas mixture ratio on an abnormal arc voltage and arc interruption by the electromagnetic interference, are investigated. The abnormal arc voltage and the arc interruption frequently occur with pulse peak currents are supplied alternately to two wires. In addition, both phenomena occur in trailing arc which is located on molten pool at base current duration remarkably. There are most number of abnormal arc voltage and arc interruption times in trailing when the inter-distance is 10 mm because a displacement of trailing arc by the electromagnetic interference becomes the longest. Moreover, the CO₂ mixture ratio affects the occurrence of abnormal arc voltage and arc interruption. The abnormal arc voltage and arc interruption do not occur when CO₂ gas mixture ratio is equal to or less than 5%. However, number of abnormal arc voltage and arc interruption times increase rapidly with increasing CO₂ gas mixture ratio when CO₂ gas mixture ratio is over 10%.

Key Words: Tandem pulsed GMA welding, Arc stability, Arc interruption, Abnormal arc voltage, Electromagnetic interference, Arc phenomena

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す。両ワイヤが同一極性 (DCEP) の場合、アークが電極間で引き合うためにアーク発生状態が不安定となり、アーク切れの発生および溶滴移行の悪化によって多量のスパッタを発生させる。また、このアーク干渉に起因してアーク電圧も変動し、溶接電源のアーク長制御も不安定になる。当然、これらのことはビード形成にも悪影響を及ぼす。したがって、タンデム GMA 溶接法において、良好な溶接を行うためには、相互アーク干渉を抑制し、アーク長制御を安定に機能させ、良好な溶滴移行状態を維持させることが必要である。

タンデム GMA 溶接法にパルスアークを用いる場合、パルスピーク電流とベース電流の通電タイミングをワイヤ間で交互に行うことが良いと報告されている¹⁻⁵⁾。この理由としては、一方のワイヤにおけるアークがパルスピーク電流であるときに他方のワイヤのアークはベース電流となり、相互のアーク干渉の程度が小さく安定したアーク状態が得られるからとしている。しかし、いずれの報告においても

安定アークが得られるための条件として、タンデム溶接トーチにおける2本のワイヤ配置やシールドガス雰囲気の影響について言及されていない。

著者らは薄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、シールドガスとして80%Ar+20%CO₂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示した^{6,7)}。この場合、両ワイヤに通電する溶接電流のパルスタイミング制御を行わずに溶接を実施したが、先行アークあるいは追従アークにおいて瞬時アーク切れあるいは数十msに及ぶ長期アーク切れがしばしば起こることを確認している。一方、シールドガスに純Arを用いたアルミニウム合金のタンデムパルス MIG 溶接では、両ワイヤへ通電する溶接電流のパルスタイミング制御によらずアーク切れがほとんど発生しないことをも確認している⁸⁾。したがって、アーク切れの発生は両ワイヤへ通電する溶接電流のパルスタイミング制御のみならず、近接するワイヤ間距離やシールドガス雰囲気によっても影響されるとも考えられた。

そこで、本報告ではタンデムパルス GMA 溶接におけるアーク切れ発生を調査することを目的として、先行アーク及び追従アーク相互のアーク干渉およびアーク切れ発生に及ぼすワイヤ間距離およびシールドガス雰囲気の影響について明らかにした。

*原稿受付 平成17年5月18日

**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. 使用材料及び実験方法

2.1 使用材料

本実験では、溶接母材として板厚 3.2mm×幅 65mm×長 450mm の軟鋼板 (JIS SPCC 材) 及び溶接ワイヤとしてワイヤ径 1.2mm 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 Ar ガスを主成分として CO₂ を 2%, 5%, 10%, 15%, 20% 及び 25% の混合比に配合したプリミックスの Ar+CO₂ 混合ガスを用いてアーク切れに及ぼす影響を調査した。また、ガス流量 $8.3 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ (50 L/min) をシールド条件とした。

2.2 タンデムパルス GMA 溶接システムの構成

Fig. 1 はタンデムパルス溶接システムの構成を示したものである。本実験装置では、定格出力 500 A のデジタルインバータ制御式パルス GMA 溶接電源を 2 台用い、ワイヤ間距離を 5~20 mm の範囲で数段階に設定できる試作トーチ

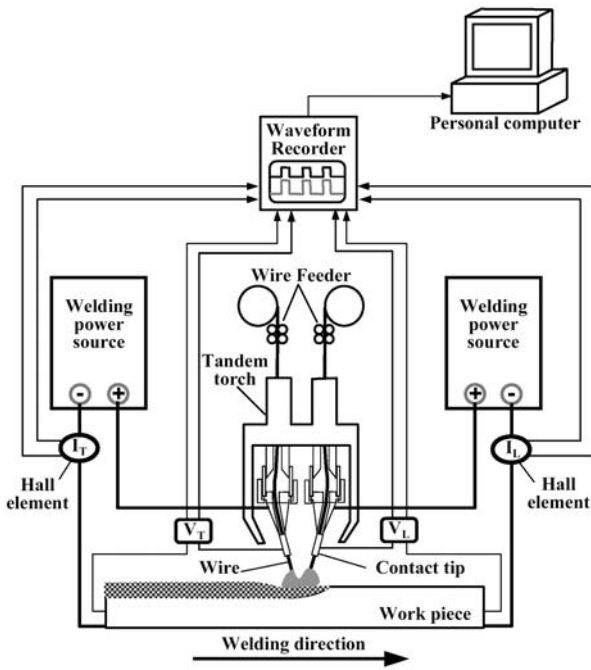


Fig. 1 Schematic diagram of tandem pulsed GMA welding system

にそれぞれの溶接電源が各給電チップに接続されている。ただし、本実験においては 2 台の溶接電源における相互のパルスタイミング制御は行っておらず、それぞれの溶接電源がパルス周波数変調方式 (Pulse Frequency Modulation, P.F.M.)⁸⁾によって独自にアーク長制御を行う方法を取っている。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。

2.3 溶接試験条件

Table 1 は本実験におけるタンデムパルス GMA 溶接のパルスパラメータおよび溶接条件を示したものである。チップ・母材間距離は 20 mm に設定し、先行および追従ワイヤへ通電する設定パルスパラメータおよびワイヤ送給速度はいずれも共通とした。また、アーク電圧設定はパルスプレーアークに短絡が数回/s 混在するアーク長が得られるようにした。溶接速度 33.3 mm/s (2 m/min) にて溶接長 300 mm (溶接時間: 9 秒) の下向きビード溶接を行った。なお、上記の設定において実測した先行及び追従アークの平均溶接電流、平均アーク電圧はシールドガス混合比によって Table 2 に示すようになる。

2.4 溶接電流およびアーク電圧波形解析方法

溶接電流及びアーク電圧波形の測定には、波形記録計 (HIOKI 製メモリハイコーダ 8841) を用いた。Fig. 1 に示す

Table 1 Experimental conditions

Pulse peak current, I_P (A)	: 450
Pulse peak duration, T_P (ms)	: 1.5
Base current, I_B (A)	: 45
Rising up time, T_R (ms)	: 0.4
Falling down time, T_F (ms)	: 1.1
Wire feed rate, W_f (mm/s)	: 83.3 (5m/min)
Welding speed, v (mm/s)	: 33.3 (2m/min)
Inter-wire distance, D_E (mm)	: 5, 10 and 20

Table 2 Average arc current and arc voltage

CO ₂ (A) mixture ratio (%)	Average leading arc current (A)	Average leading arc voltage (V)	Average trailing arc current (A)	Average trailing arc voltage (V)
2	153	23.0	150	22.5
5	150	23.0	145	23.0
10	145	25.0	140	24.0
15	145	25.5	140	26.5
20	145	26.5	143	27.0
25	147	28.0	140	29.0

ように、先行及び追従ワイヤにおける溶接電流はクランプメータを介して、アーク電圧はトーチ・母材間の電圧について測定している。溶接電流及びアーク電圧波形データの取り込みは1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秒間分を波形記録計で取り込んだ。そして、記録した波形データをパーソナルコンピュータに入力して解析を行い、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、アーク電圧の跳ね上がりのカウントに当たっては50Vを電圧跳ね上りのしきい値に設定した。理由は、安定して溶接を行っている場合のパルスピーク電流期間の電圧が40V前後で推移していること、および溶接電源の定格出力が500A/50Vであることから瞬間的には50Vまでしか制御できないため、50Vを超える電圧上昇値は溶接電源の制御によるものではないと判断できるためである。

2.5 高速度ビデオカメラ撮影によるアーク現象観察

アーク干渉及びアーク切れの調査にはデジタルハイスピードビデオカメラを用いた。タンデム溶接トーチは固定して溶接アークと同じ高さレベルで1軸のXテーブルアクチュエータによって溶接母材の移動を行い、高速度ビデオカメラは溶接線直角方向に配置した。アークプラズマの挙動を詳細に観察する目的からXeバックライト等の補助照明は用いずに、撮影速度8000コマ/sの撮影条件で観察した。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。

3. アーク干渉及びアーク切れに及ぼすワイヤ間距離の影響

3.1 異常なアーク電圧およびアーク切れ発生頻度に及ぼすワイヤ間距離の影響

Fig. 2は80%Ar+20%CO₂混合ガスシールド条件下でワイヤ間距離 D_E を5mm, 10mm及び20mmに設定して溶接速度33.3mm/s(2m/min), 先行及び追従ワイヤの送給比は1($W_{f1}=W_{f2}=83$ mm/s(5m/min))としてビード溶接した際に、追従アークのベース電圧が50V以上に異常上昇した回数を調べたものである。50V以上の電圧異常上昇回数はワイヤ間距離 $D_E=5$ mmでは先行および追従側ともに0回であったが、 $D_E=10$ mmでは先行側で38回、追従側で89回と急激に増加した。しかし、 $D_E=20$ mmになると先行側で0回、追従側で11回に減少した。

次に、アーク切れ発生回数に及ぼすワイヤ間距離の影響を調べたものをFig. 3に示す。アーク切れ発生回数は $D_E=5$ mmでは先行側及び追従側ともにアーク切れの発生は無かった。 $D_E=10$ mmになると先行側で5回、追従側で23回とアーク切れは増加するが、 $D_E=20$ mmでは先行側でア

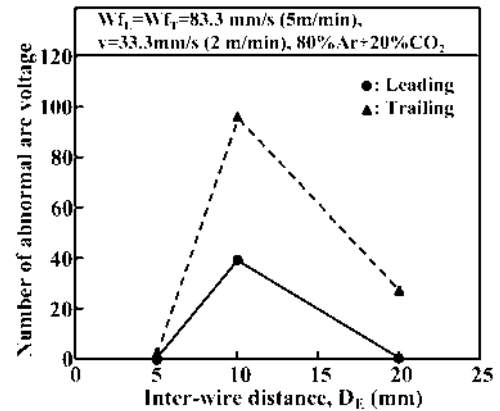


Fig. 2 Effect of inter-wire distance on abnormal arc voltage

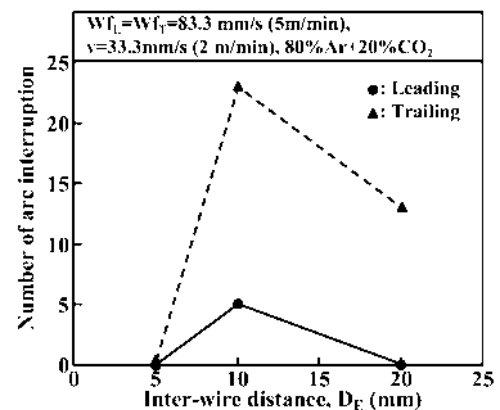


Fig. 3 Effect of inter-wire distance on arc interruption

ーク切れの発生は無く、追従側で13回にアーク切れ回数が減少し、Fig. 2と同様に電圧異常上昇回数の傾向と対応している。

Fig. 4は $D_E=10$ mmにおいて追従アークの電圧異常上昇が先行および追従ワイヤに通電される溶接電流の内、どの電流値で発生していたかを調べたものである。Fig. 4(a)に示すように電圧異常上昇のほとんどは追従アーク電流がベース電流期間 T_B に相当する45Aに集中している。しかも、追従アークの電圧異常上昇が起こった時の先行アーク電流はFig. 4(b)に示すようにパルスピーク電流期間 T_P に相当する450~475Aにおいて集中している。また、Fig. 4(b)では一部70~100Aでも10数回の電圧異常上昇が起こっている。これはFig. 4(c)で示すように、先行アークのパルスピーク電流がベース電流へ立ち下った期間 T_P の電流値を抽出していたものであることを確認した。

したがって、追従アークの電圧異常上昇は先行アークにおいてパルスピーク電流が出力され、追従アークがベース電流が出力された逆の位相(以下、逆位相という)となる場合において起こっていることが確認できた。また、先行アークにおける電圧異常上昇も先行アークがベース電流で追従アークがパルスピーク電流を出力した逆位相時に全て起こっていた。

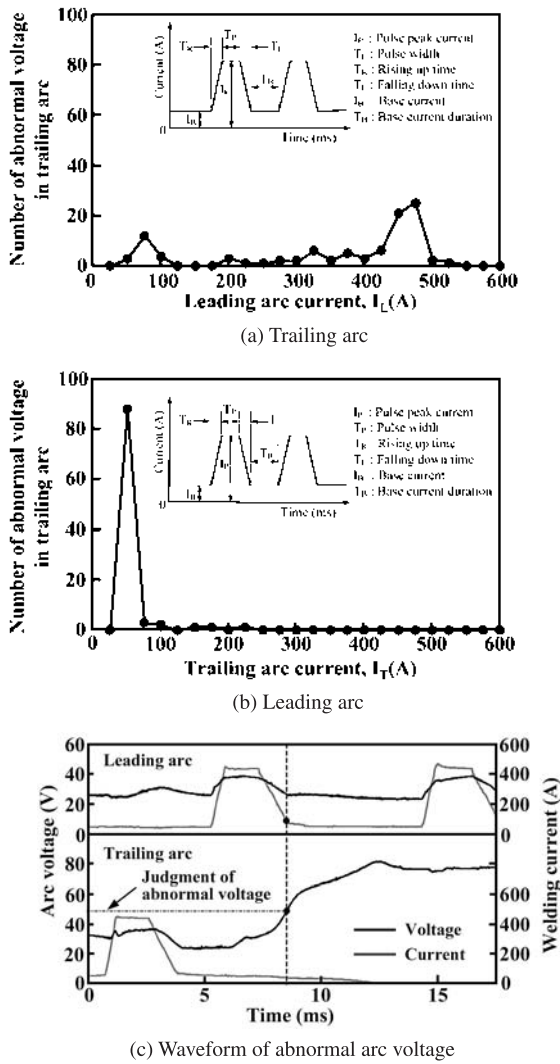


Fig. 4 Distributions of abnormal arc voltage

3.2 逆位相時における異常なアーク電圧およびアーク切れ発生現象

3.2.1 $D_E=5\text{ mm}$ の場合

$D_E=5\text{ mm}$ における逆位相時のアーク現象観察結果を Fig.5 に示す. 同図からワイヤ間距離が短いために先行および追従ワイヤは互いのアークに接触していることがわかる. このため, お互いのワイヤは一方がベース電流期間で他方がパルスピーク電流期間であっても常時電流パスが確保される.

しかも, コマ (b)~(c) に示すようにベース電流期間の追従アークは先行ワイヤにパルスピーク電流が通電されて引き寄せられているのが矢印に示すように観察されるが, 陰極点が追従ワイヤ直下の溶融池近傍から遠く離れて移動しないのでアーク電圧の異常上昇は発生せずアーク切れも起こらないと考えられる.

3.2.2 $D_E=10\text{ mm}$ の場合

Fig. 6 は $D_E=10\text{ mm}$ において逆位相時に発生した追従アークの電圧異常上昇観察結果を示したものである. 先行および追従ワイヤにベース電流が出力されている期間は, コマ (a) に示すように2本のワイヤ間でぼんやりと明るいアークプラズマがお互いに引き合っている状況が観察される. この状態から先行ワイヤにパルスピーク電流が出力され始めると, コマ (b) に示すように追従アークは, それまで追従ワイヤ直下の溶融池近傍に形成していたアークルートが先行側の溶融池近傍へ急速に移動するとともにアークプラズマは浮力, 電磁力および復元力が作用することによって弓なり状に曲がって伸び上がる. そして, 先行ワイヤにパルスピーク電流が出力されている間は, コマ (c) 矢印に示すよ

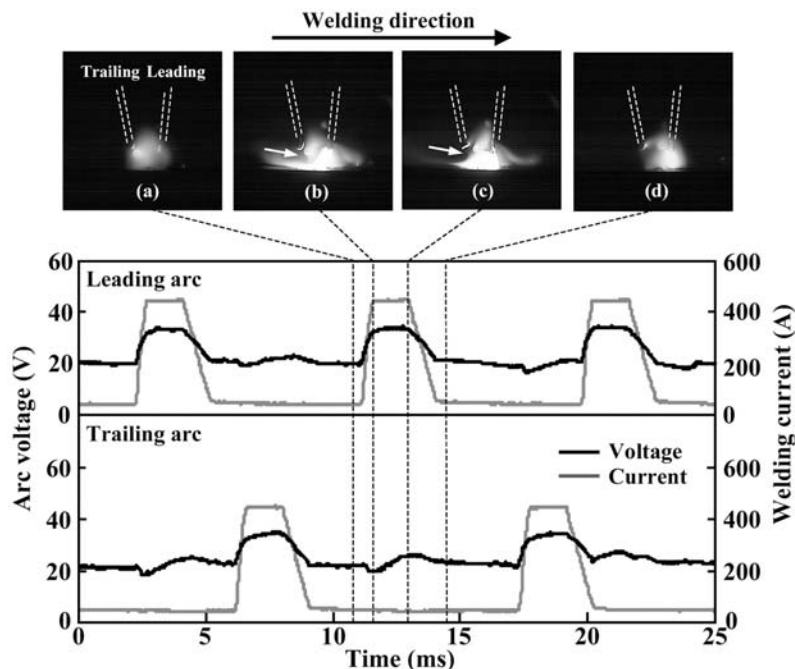


Fig. 5 Arc phenomenon in tandem pulsed GMA welding at 5 mm inter-wire distance

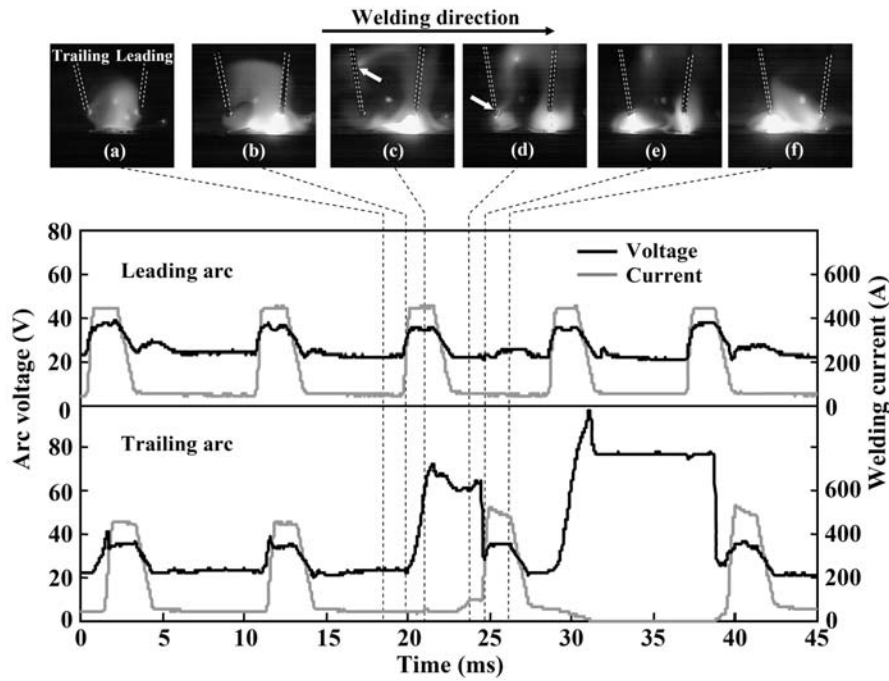


Fig. 6 Abnormal arc voltage occurring on trailing arc at 10mm inter-wire distance

うに追従ワイヤのアークプラズマはさらに弓なり状に伸長する。そして、陽極点もワイヤの上方へ引きずられるように移動し、アーク電圧が上昇する。しかし、追従ワイヤにパルスピーク電流が出力され始めるとコマ (d) 矢印に示すようにアークの硬直性が増す結果、陽極点がワイヤ先端に向かって下降する。このとき、陰極点群の一部は追従ワイヤ直下よりも離れたところに依然としてアークルートを形成していると考えられ、弓なり状のアークプラズマはさらに伸び一旦電圧上昇を招く。このため、溶接電源の出力負荷が大きくなり、追従アークにおけるパルスピーク電流の立ち上がりは一旦横ばいとなる。しかし、その直後には追従アークの陰極点が追従ワイヤ直下の溶融池近傍の母材表面に移動したと考えられ、コマ (e)~(f) に示すようにアーク電圧が急降下すると同時にパルスピーク電流が 500 A 程度まで再び立ち上がって先行アークによって吹かれた追従アークプラズマは硬直性のあるパルスアークに復帰する。このとき、先行アークは追従アークがパルスピーク電流を出力しているにもかかわらずアークルートごと追従ワイヤ側へ容易に吹かれることなく、先行ワイヤ直下の溶融池近傍の母材表面にとどまっている。したがって、先行アーク側ではベース電流期間中に追従アーク側がパルスピーク電流を出力してもアーク電圧の異常な上昇は起こっていない。

Fig. 7 は Fig. 6 に示したアーク現象に引き続いてアーク切れが発生したときの観察結果である。

コマ (a)~(c) までは Fig. 6 と同様の現象が起こり、パルスピーク電流が出力された先行アークによってベース電流期間中の追従アークは吹かれて弓なりのアークプラズマが形成されて伸び上がり電圧の異常上昇が生じる。そして、このような状態がさらに続いてついにはコマ (d) に示すよう

に追従側溶接電源の無負荷電圧 (80V) を越えてしまいアークが消弧する。このとき同図に示すように無負荷電圧を越えてもアーク電圧は 90V 近くまで上昇しているが、これは、溶接電源内部のリアクタのインダクタンスで誘起された電圧が発生し、溶接電源の出力電圧に重畳されていたためである。アーク切れ発生後は、コマ (e) に示すように先行ワイヤにおいて次周期のパルスピーク電流が出力されたことによって広がったアークが、追従ワイヤへ接触したことによって追従ワイヤと母材間での電流パスが確保されたと考えられ、コマ (f)~(g) に示すように追従アークが再点弧した。

なお、 $D_E=10\text{ mm}$ の場合に発生した先行あるいは追従アークのいずれかで発生したアーク切れは、アーク切れの起こっていない一方のアークにおいて次周期のパルスピーク電流が出力されアークプラズマが広がった際にアーク切れの起こった他方のアークを誘起させて再点弧する場合がほとんどであった。したがって、アーク切れは発生してもその期間は 10 ms までのものが多かった。

3.2.3 $D_E=20\text{ mm}$ の場合

Fig. 8 は $D_E=20\text{ mm}$ におけるアーク切れ発生時の観察結果を示したものである。この場合もコマ (a)~(c) 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たことによってベース電流期間中の追従アークが吹かれ、これを契機にアーク電圧の異常上昇が発生する。その後、コマ (d) に示すように追従ワイヤには次周期のパルスピーク電流が出力されようとするが、追従ワイヤ直下の溶融池近傍から遠く離れた陰極点に戻ってこなかったと考えられパルスピーク電流の立ち上がりと同時にアーク電圧もさらに上昇している。このため、溶接電源の出力負荷が大きくなり、コマ (e)

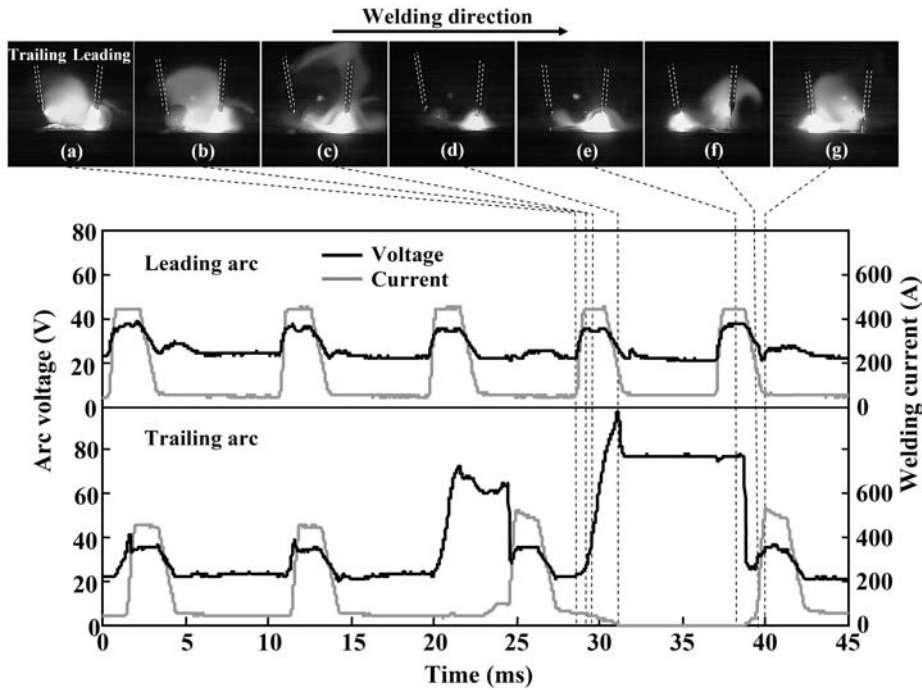


Fig. 7 Arc interruption and re-ignition on trailing arc at 10mm inter-wire distance

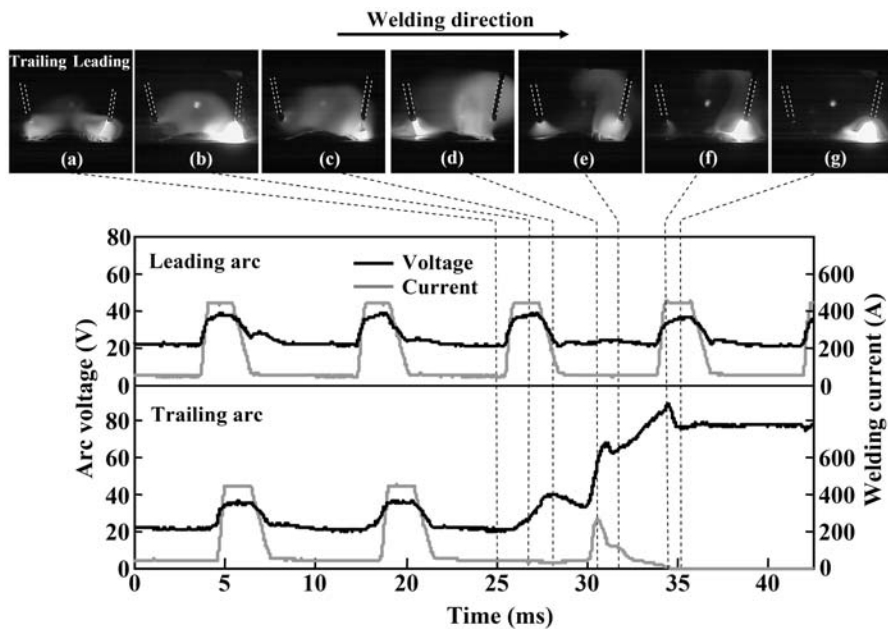


Fig. 8 Arc interruption occurring on trailing arc at 20mm inter-wire distance

～(f) に示すように立ち上がったパルスピーク電流は減少してアーク電圧のみ上昇し、ついにはコマ (g) に示すように追従側溶接電源の無負荷電圧 (80V) を越えてしまいアークが消弧する。

Fig. 9 は Fig. 8 において追従側でアーク切れが生じアーク再点弧したときの観察結果を示したものである。アーク切れ発生後は追従アークは復帰できず、先行アークが4周期分のパルスピーク電流を出力していた期間アークが切れた状態が続く。その後、コマ (a) とコマ (b) による先行アークの比較から追従ワイヤは母材溶融池に短絡して、短絡電流

によって発生した引き寄せ力によってベース電流期間中の先行アークが追従ワイヤ側へ引き寄せられている様子が観察された。短絡した追従ワイヤはコマ (c) に示すように再点弧しアーク復帰する。

以上のように、 $D_e=20\text{ mm}$ では追従アークが一旦アークが切れるとワイヤが母材溶融池に短絡するまでアーク復帰しない場合がほとんどであった。この理由としては、 D_e が長いためにパルスピーク電流が出力されて広がった先行アークが追従ワイヤに接触できず、アークを誘起させることが困難になったためと考えられる。

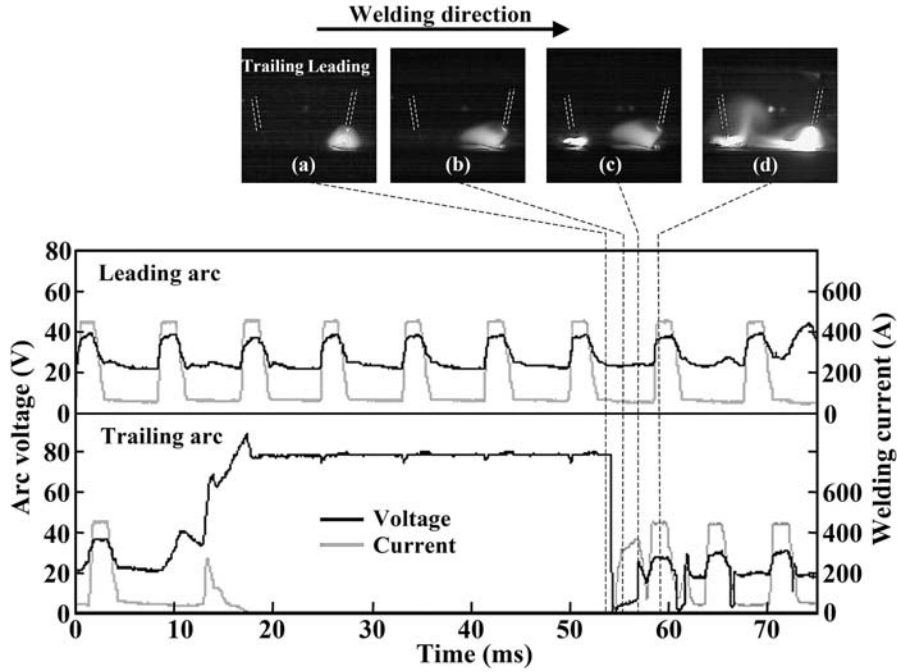


Fig. 9 Arc re-ignition on trailing arc at 20mm inter-wire distance

3.3 異常なアーク電圧上昇発生に関する考察

3.1 項の結果において先行アークおよび追従アークにおけるアーク電圧の異常上昇およびアーク切れ発生頻度はともに先行及び追従ワイヤに通電されるパルス電流が逆位相となり、ワイヤ間距離が 10mm においてが最も多くなることが確認できた。この理由について、2 本のワイヤ間に同一方向に通電された場合に作用する引力によって相互のアークが引き寄せられる距離を簡易なモデルを求めることにより考察した。

Fig. 10 は先行ワイヤにパルスピーク電流および追従ワイヤにベース電流が逆位相に通電された場合のタンデムアークにおける模式図を示したものである。この場合、先行および追従アークは相互の引き寄せ力によって実線で示したように内側へ移動する。このときの先行および追従アークの中心の移動距離をそれぞれ、 l_L および l_T とする。

いま、ワイヤ間距離を D_E 、先行ワイヤに通電される電流を I_L 、追従ワイヤに通電される電流を I_T とすると、追従側に誘起される磁束密度 B_T は簡単に次式で与えられる。

$$B_T = \frac{\mu_0 I_L}{2\pi D_E} \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空中の透磁率である。そして、追従アークがこの磁束密度 B_T によって受けるローレンツ力 F_{MT} は、

$$F_{MT} = J_T \times B_T \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 J_T は追従アークの電流密度である。アークを陽極 (ワイヤ) から陰極 (母材) に向けて流れる

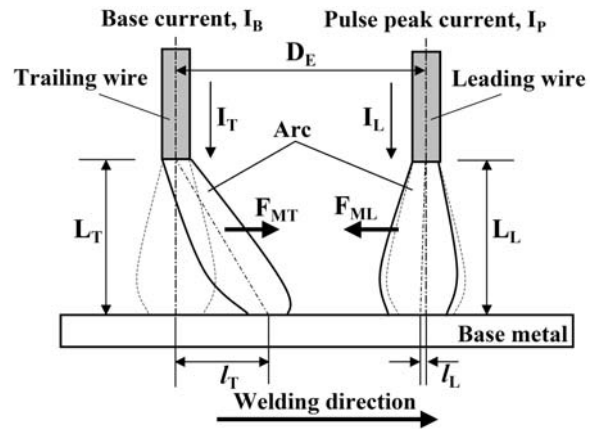


Fig. 10 Schematic illustration of electromagnetic force acted on arc

電磁流体であると考えたとき、平行電流間に作用する引力によってお互いのアークが引き寄せられる距離は、アーク軸方向への運動と引き寄せ力であるローレンツ力 F との合成ベクトルとして力学的バランスのみで簡単に表現できる。よって、追従アークの電磁流体の密度を ρ_T 、引き寄せ力方向の移動距離を l_T 、時間を t とするとこの運動方程式は次式で与えられる。

$$\rho_T \frac{d}{dt} \left(\frac{dl_T}{dt} \right) = F_{MT} \quad (3)$$

$$l_T = \frac{F_{MT}}{2\rho_T} t^2 + C_1 t + C_2 \quad (4)$$

ここで、 C_1 および C_2 定数である。 $t=0$ において $dl_T/dt=0$

および $l_T=0$ であるので C_1 および C_2 は 0 となり、(4) 式は

$$l_T = \frac{F_{MT}}{2\rho_T} t^2 \quad (5)$$

になる。いま、 t としてアーク電磁流体が、陽極（ワイヤ）から陰極（母材）まで到達するのに必要な時間を考えると

$$t = \frac{L_T}{u_T} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 L_T 追従アークのアーク長、 u_T は追従アークの電磁流体速度、すなわちプラズマ気流の速度である。(1)、(2) 及び (6) 式を (5) 式に代入すると、

$$l_T = \frac{\mu_0 j_T \cdot I_L}{4\rho_T \pi D_E} \left(\frac{L_T}{u_T} \right)^2 \quad (7)$$

となり、追従アークが引き寄せられる距離 l_T は (7) 式によって簡易的に導くことができる。

ところで、追従アーク中心部の圧力は次式で表すことができる¹⁰⁾。

$$P_T = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_T^2}{\pi r_T^2} \quad (8)$$

ここで、 r_T は追従アークの半径である。

このとき、ワイヤ先端近傍の圧力に比べ母材表面近傍の圧力が十分に低く、これが無視できるものとして、ワイヤ先端部の圧力が全て流れに変換されるものとする場合には、ベルヌーイの方程式より

$$P_T = \frac{\rho_T u_T^2}{2} \quad (9)$$

が得られる^{10), 11)}。そして、(8) 式を代入すると、

$$u_T^2 = \frac{2P_T}{\rho_T} = \frac{\mu_0 I_T^2}{2\pi^2 r_T^2 \rho_T} \quad (10)$$

ここで、 $j_T = \frac{I_T}{\pi r_T^2}$ であるから (10) 式は

$$u_T^2 = \frac{\mu_0 I_T \cdot j_T}{2\pi \rho_T} \quad (11)$$

となり、(11) 式を (7) 式に代入すると、

$$l_T = \frac{\mu_0 j_T I_L L_T^2}{4\pi \rho_T D_E} \cdot \frac{2\pi \rho_T}{\mu_0 I_T j_T} = \frac{I_L L_T^2}{2I_T D_E} \quad (12)$$

を導き出すことができ、 l_T は I_L 、 I_T 、 D_E および L_T だけで求めることができる。また、同様にして、先行アークの移動距離 l_L も次式のように I_L 、 I_T 、 D_E および L_L で表すことができる。

$$l_L = \frac{I_T L_L^2}{2I_L D_E} \quad (13)$$

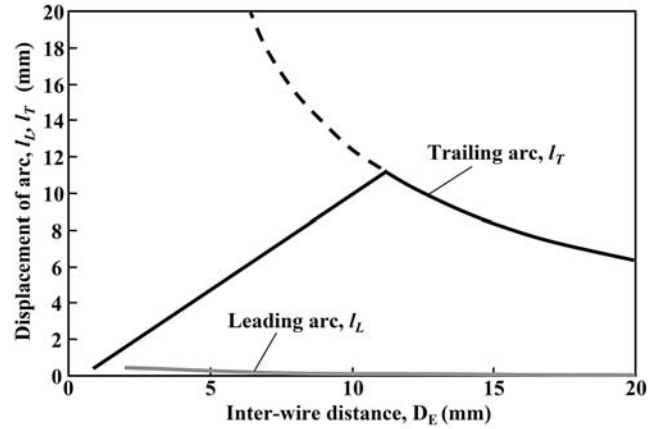


Fig. 11 Relationship between inter-wire distance and displacement of arc

いま、先行アークがパルスピーク電流 $I_L=450$ A、追従アークがベース電流 $I_T=45$ A となる逆位相時において、両者のアーク長 L_L および L_T が 5 mm であるとき、(12) 式からワイヤ間距離における引き寄せ力によって先行アークおよび追従アークが移動する距離の影響を求めると Fig. 11 に示すようになる。

追従アークの移動距離 l_T は、 D_E が 11 mm の時に 10.88 mm で最大値となり、実線の曲線に示すように 11 mm を越える場合には (12) 式に基づいて D_E の増加とともに減少する。しかし、 $D_E=11$ mm 以下では計算上、破線に示すように D_E が短くなるほど増加するが、実際には追従アークの移動距離が対向する先行アークを越えて移動することはありえず、先行アークのアークルートで会合した位置より移動しないとすれば D_E から先行アークの移動距離分 l_L を差し引いた値を追従アークの移動距離として見積もれば、図中の実線に示すように $D_E=11$ mm 以下では D_E が短距離になるほど移動距離は減少する結果が得られる。一方、先行アークの移動距離 l_L は D_E の増加とともに減少するが、その移動量は極めて小さい。

ただし、以上の結果はアークルートが自由に動きやすい仮定の下で成り立つものである。本実験で用いた薄板軟鋼板（SPCC 材）では母材表面の酸化皮膜が薄くアークルートを形成する陰極点は自由に動きやすいと考えられ、2本のワイヤに通電される電流間に作用する引力でアークルートは容易に移動するという推定にそう無理がないと考えられる。事実、Fig. 11 における結果は、Fig. 2 及び 3 に示したワイヤ間距離と追従アークの電圧異常上昇回数及びアーク切れ回数の関係と良い一致を示している。すなわち、追従アークの移動距離 l_T が長くなる $D_E=10$ mm においてアーク電圧異常上昇回数及びアーク切れ回数が最も多く、 $D_E=10$ mm より短い場合や長い場合ではこれらの回数は減少する。また、先行アークがベース電流で追従アークがパルスピーク電流になった場合でも D_E の変化に対する先行アークの移動距離 l_L の関係は Fig. 11 と全く同じになる。そし

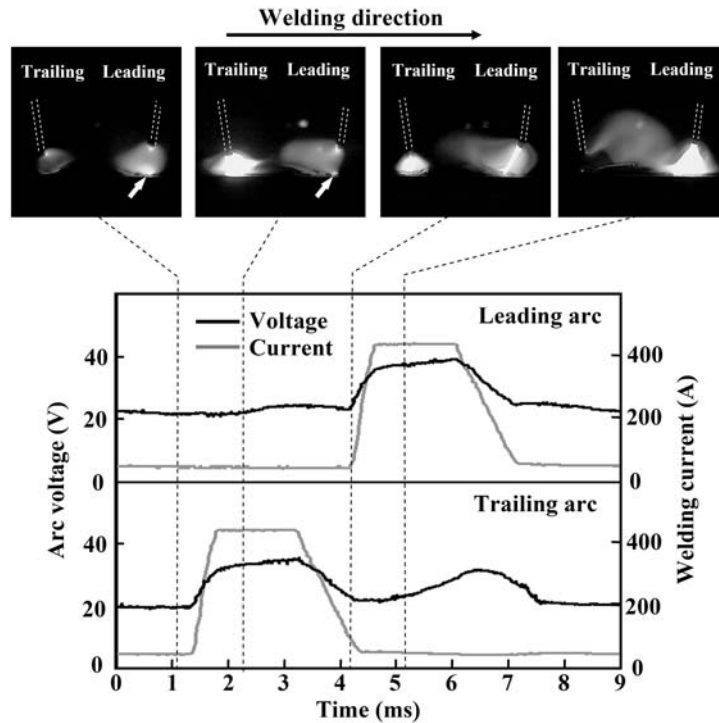


Fig. 12 Comparison of arc phenomena at base duration between leading and trailing

て、先行アークでは追従アークがベース電流である場合より電圧異常上昇及びアーク切れの発生頻度は少ないが、Fig. 2 および 3 に示したワイヤ間距離と先行アークの電圧異常上昇回数及びアーク切れ回数の関係は、ワイヤ間距離と先行アークの移動距離 l_e の関係と良い一致を示す。

したがって、先行ワイヤ及び追従ワイヤに通電されるパルス電流が逆位相である場合に、ワイヤ間距離 D_E が 10mm においてアーク電圧の異常上昇やアーク切れが最も多発する要因としては、ベース電流時のアークが引き寄せ力によって移動距離が最も長くなり、移動したアークプラズマはさらに電磁力や浮力の影響を受けやすくなって上方へ複雑に湾曲してアーク放電長がさらに伸び易くなるためと考えられた。一方、 D_E が 20mm ではその移動距離も短いため上記のようなアーク放電長が伸びることが起こり難く、アーク電圧の異常上昇やアーク切れやそれに伴うアーク切れの発生頻度が少ないと考えられた。さらに、 D_E が 5mm ではアークを移動させる引き寄せ力は強くなるものの相互のアークが会合する結果、移動距離が短くなってアーク放電長が伸びないこと及びアークルートを共有する電流パスが確保されるためにアーク電圧の異常上昇がほとんど発生しないと考えられた。

次に、追従アークの方が先行アークよりもアーク電圧の異常上昇及びアーク切れ発生回数が多いが、これは以下のように考えられる。

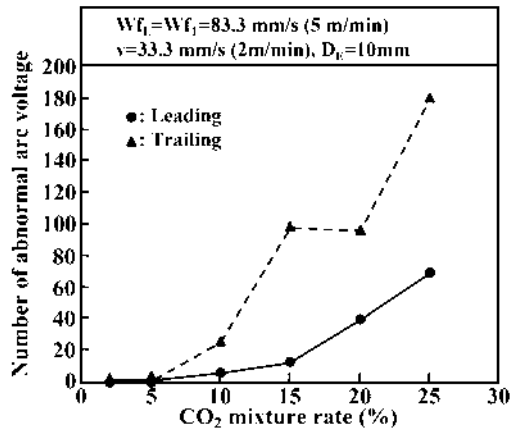
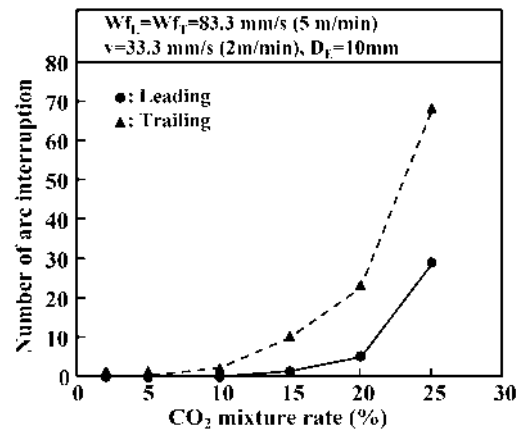
Fig. 12 は逆位相時のタンデムアーク発生状況を先行アークがベース電流の場合と追従アークがベース電流で比較したものである。ベース電流期間中の先行アークでは図中の

矢印に示したように溶融池近傍の母材表面に明るい陰極点が形成され、追従ワイヤにパルス電流が出力されても容易に陰極点が溶融池近傍から離れることなくアークルートを確保し、アークプラズマが容易に吹かれ難くなっている。このため、アークプラズマは伸長され難くアーク電圧の異常上昇は発生しにくい。

一方、追従アークがベース電流の場合は、3.2.2 項で述べたように先行アークがパルス電流を出力されると直ちに陰極点がアークルートごと追従ワイヤ直下の溶融池近傍から離れてしまい、追従側のアークプラズマは先行アーク側へ吹かれ易くなっている。このように追従アークの陰極点が容易に移動するのは、同アークの直下が常に清浄な溶融池表面にあり、陰極点を形成するための酸化物の存在が少ないためと考えられる。したがって、追従側のアークプラズマは伸長されやすくアーク電圧の異常上昇が起こりやすい。

4. アーク干渉及びアーク切れに及ぼすシールドガス組成の影響

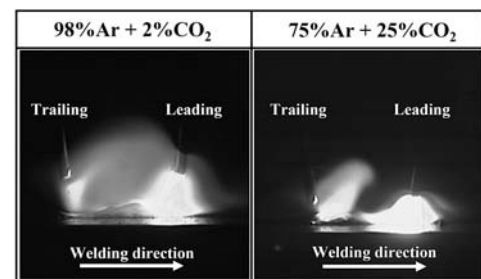
Fig. 13 は $D_E=10\text{mm}$ においてシールドガスの Ar+CO₂ 混合ガスの CO₂ ガス混合比を変化させた場合の電圧異常上昇回数を調べたものである。CO₂ ガス混合比が 5% 以下であれば先行及び追従アークともに電圧の異常上昇は発生しない。しかし、CO₂ ガス混合比が 10% 以上になると電圧の異常上昇回数は先行側で 5 回、追従側で 24 回となり、CO₂ ガス混合比の増加にともなって先行側および追従側でのアーク電圧の異常上昇回数は急増した。そして、本実験におけ

Fig. 13 Effect of CO₂ mixture ratio on abnormal arc voltageFig. 14 Effect of CO₂ mixture ratio on arc interruption

る最大の CO₂ ガス混合比 25% では先行側 68 回、追従側 117 回のアーク電圧の異常上昇が確認された。Fig. 14 はアーク切れ回数に及ぼす CO₂ ガス混合比の影響を調べたものである。アーク切れ発生回数も CO₂ 混合ガスの増加に伴って先行側及び追従側ともに増加し、その増加傾向は Fig. 13 の結果と同様であるが、CO₂ ガス混合比が 25% まで増加したときに CO₂ ガス混合比が 20% に比べて約 2 倍以上のアーク切れ回数に達している。

Fig. 15 は逆位相時のアーク状態を CO₂ ガス混合比が 2% と 25% で比較したものである。CO₂ 混合比が 2% では先行ワイヤからのアークプラズマが追従ワイヤに接触するほど広がっている。このため、追従側には先行アークプラズマによる電流パスが確保されたものと考えられ、追従アークは先行側へ引き寄せられるものの追従側のベース電圧に異常な電圧の異常上昇は認められない。一方、CO₂ 混合比 25% においては先行ワイヤにおけるアークプラズマにおける広がりはなく CO₂ ガス解離による冷却作用の結果アークが緊縮された状況が観察される。そして、追従アークは先行アークのパルス電流出力の影響を受けて引き寄せられるが、CO₂ 混合比が 2% のように先行アークが追従ワイヤに接触することもないので、CO₂ ガス混合比の増加によって高くなったアークの電位傾度¹⁰⁾によって、引き寄せられた追従アークの伸長がアーク電圧をより増加させ、追従側のベース電圧は異常に上昇すると考えられる。

3 章及び本章の実験結果及び考察から、ワイヤ間距離が 10 mm で 80%Ar+20%CO₂ 混合ガスシールド条件下では一方のアークがピーク電流を出力している期間に他方のアークがベース電流を出力している期間である逆位相のパルスタイミング制御ではアーク電圧の異常上昇やアーク切れが発生しやすいといえる。しかし、この事実は相互アーク干渉の抑制とそれによる溶滴移行の安定化の観点からパルス電流通電のタイミング制御をワイヤ間で交互に行うことが良いとする既報¹⁻³⁾とは矛盾する。したがって、これらの報告では 90% 以上の Ar をベースとした混合ガスをシールドガ

Fig. 15 Comparison of arc phenomena between 98Ar/2CO₂ and 75Ar/25CO₂

スとして使用していたこと^{2, 4)}や ワイヤ間距離が短く設定されたトーチを適用した^{1, 3, 5)}結果であり、逆位相であってもアーク電圧の異常上昇やそれによるアーク切れは起こりにくいと考えられる。

5. 結 言

タンデムパルス GMA 溶接における先行アーク及び追従アーク相互のアーク干渉およびアーク切れ発生に及ぼすワイヤ間距離およびシールドガス雰囲気の影響について検討した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) アーク電圧の異常上昇とそれに伴うアーク切れは、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発生した。その頻度は、追従アークがベース期間中の逆位相時で多かった。
- (2) 上記のアーク電圧の異常上昇およびアーク切れ発生頻度はワイヤ間距離が 10 mm であるときに最も多く、5 mm の場合にはそれらの発生は無く、20 mm では発生頻度が 10 mm に比べて少ない。この結果は 2 本のワイヤ間に作用する相互の引き寄せ力によって追従アークルートの移動距離を計算した結果と良い一致を示した。すなわち、本実験で設定した 2 本のワイヤに通

電するパルス電流波形条件では逆位相時においてワイヤ間距離が11mmの時に追従アークの移動距離が最長となる。

(3) 2本のワイヤ間に作用する相互の引き寄せ力によってアークの移動距離が長くなる結果、アークプラズマが浮力や磁界の影響を受けやすくなりアークプラズマがより伸長されてアーク電圧の異常上昇が起こりアーク切れを誘発すると考えられた。

(4) Ar+CO₂混合ガスのCO₂ガス混合比はアーク電圧の異常上昇およびアーク切れに大きな影響を及ぼす。すなわち、CO₂ガス混合比が5%以下であればアーク電圧の異常上昇およびアーク切れは発生しないが、CO₂ガス混合比が10%を越えるとそれらは急増する。

なお、今回はアーク干渉とアーク切れの発生要因について論じてきたが、アーク切れの防止策に関する検討結果については次報で詳細に取り扱う予定である。

参 考 文 献

- 1) U. Dilthey, U. Reisgen, H. Bachem and J. Gollnick: Two-wire process for higher deposition rate and higher welding speed, IIW Doc. XII-1549-98 (1998) 129-145.
- 2) S. Goecke, J. Hedegard, M. Lundin: Tandem MIG/MAG Welding, Svetsaren, Vol. 56 (2001) No. 2, 24-28.
- 3) D. Rehfeldt and T. Polte: Investigation on metal transfer in pulsed tandem MAG welding, IIW Doc. 212-967-00 (2002) 63.
- 4) J. Hedegard, E. Tolf, J. Andersson and M. Lundin: Aspects on tandem-MIG/MAG welding process, equipment and achievable results, SIMR-report IM-2003-704 (2003).
- 5) T. Morehead: Automatic multiwire GMAW multiples productivity, Welding Journal, Vol. 82 (2003) No. 6, 40-43.
- 6) 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.
- 7) T. Ueyama, T. Ohnawa, M. Tanaka and K. Nakata: Effect of welding current on high speed welding bead formation in tandem pulsed GMA welding process, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 23 (2005) No. 3.
- 8) 大縄, 上山, 上園: タンデムパルス溶接法-軟鋼とアルミニウムでのパルスタイミング制御法の比較-, 溶接アーク物理研究委員会資料, ア物-03-1216 (2003).
- 9) 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).
- 10) 安藤, 長谷川: アーク現象 (増補版), 産報出版 (1967).
- 11) 黄地: 溶接・接合プロセスの基礎, 産報出版 (1996).
- 12) J. F. Lancaster: The Physics of Welding, Pergamon Press (1984).

