

タンデムパルス GMA 溶接による薄鋼板の 高速溶接ビード形成に及ぼす溶接電流の影響*

上山 智之**, 大縄登史男**, 田中 学***, 中田 一博***

Effect of Welding Current on High Speed Welding Bead Formation in Tandem Pulsed GMA Welding Process*

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

In tandem pulsed GMA welding the stabilization of accumulated molten metal between the leading arc and the trailing arc, the presence of enough molten metal below the trailing arc, and the reduced velocity of molten metal flow towards the rear part of the weld pool are essential to improve the maximum welding speed. These conditions can be attained by adjusting the ratio of the leading arc current to the trailing arc current. A maximum welding speed as high as 4 to 4.5 m/min is achieved by setting the current ratio to a value ranging from 0.31 to 0.5, which corresponds to an reduction in average velocity of molten metal flow at locations 4 to 7 mm behind the trailing arc.

Key Words: Tandem pulsed GMA welding, High speed welding, Steel sheet welding, Molten metal flow, Leading arc, Trailing arc

1. 緒 言

タンデムパルス GMA 溶接法は高速溶接であってもハンピング・アンダカットの無い良好なビード形成が得られ、溶接速度を飛躍的に向上させる GMA 溶接法として期待できる。

前報¹⁾ではタンデムパルス GMA 溶接による薄鋼板の高速溶接性能に及ぼす 2 ワイヤ間角度及び距離の影響について調査し、追従ワイヤに前進角を設け、先行及び追従ワイヤにおける 2 ワイヤ間距離が適正範囲であるときに正常ビード形成となる限界溶接速度が向上することを示した。また、ハンピングやアンダカットの高速溶接時における欠陥は、2 ワイヤ間で形成した溶融金属の湯溜まりにおける不安定挙動とそれによる溶融池後方への不規則な溶融金属の流れに起因し、この流れは先行及び追従それぞれのアークが溶融金属に作用する力の釣り合いによって影響される。さらに、溶け込み面における溶融金属の充填作用も高速溶接時の正常ビード形成に影響することを明らかにした。

これらの知見に基づけば、アーク力やワイヤ溶融量に直接影響を及ぼす先行及び追従ワイヤにおけるそれぞれの溶接電流配分はタンデムパルス GMA 溶接の高速溶接性能の更なる向上を図る上で重要な影響因子であると考えられる。また、既に著者らの一部は先行ワイヤに通電する溶接電流値を固定しておき追従ワイヤに通電する溶接電流値を変化させて正常ビードが得られる最速の溶接速度について報告²⁾

している。しかし、先行及び追従ワイヤそれぞれに配分される溶接電流が高速性能にどのような影響を及ぼしていたかについてその詳細な検討は行っていない。

そこで、本報告ではタンデムパルス GMA 溶接における先行及び追従ワイヤの溶接電流が高速溶接時のビード形成に及ぼす影響について調査し、限界溶接速度向上のための溶接電流配分を明らかにする。さらに、溶融池後方における溶融金属の流れについてその流速を測定する試みを行い、高速溶接ビード形成との関係についても検討する。

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 3.2 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 YGW 15 相当) を用いた。また、シールドガスには 80%Ar + 20%CO₂ を用い、ガス流量 50 L/min をシールド条件とした。

2.2 実験方法

2.2.1 ビード溶接試験

タンデムパルス GMA 溶接はチップ・母材間距離は 20 mm に設定して下向きビード溶接にて行い、アンダカットあるいはハンピング現象の発生しない正常ビードが得られる限界溶接速度で評価した。

溶接トーチの構成は Fig. 1 に示すように、2 ワイヤ角度 18° 及び 2 ワイヤ間距離 9 mm に設定した。なお、タンデムパルス溶接ロボットシステムにおける各構成装置の詳細については前報と同様であるので説明を省略する。

*原稿受付 平成17年2月9日

平成17年1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

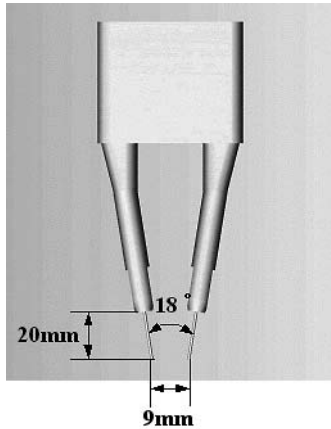


Fig. 1 Tandem pulsed GMA welding torch configuration

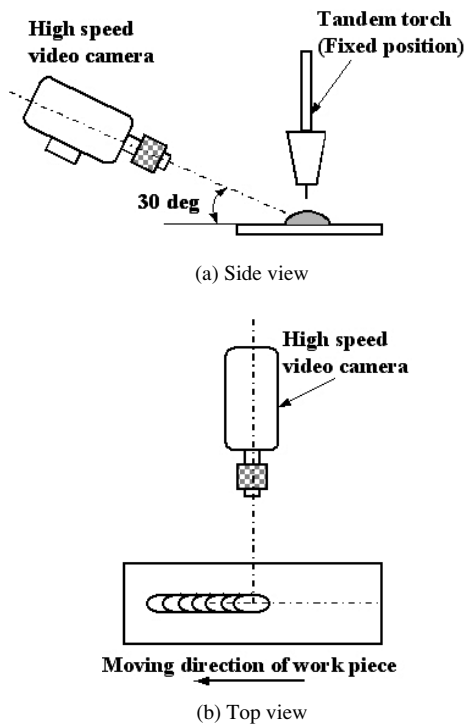


Fig. 2 Experimental set-up of high speed video camera for observation of weld pool behavior

先行及び追従ワイヤの溶接条件設定は、前報と同様に、溶接速度によらず単位溶接長当たりのワイヤ送給量が一定となるように先行ワイヤの送給速度 W_{f_l} (m/min) と追従ワイヤの送給速度 W_{f_r} (m/min) の和を溶接速度 v (m/min) で除した値が5となる条件とした。これによって、1~5 m/min の溶接速度設定範囲で単位長さ当たりの溶着金属量を一定にした溶接が可能となる。さらに、先行及び追従ワイヤに通電する溶接電流配分は、ワイヤ送給速度比 (W_{f_r}/W_{f_l}) を0.2~1.33まで数段階に設定し、それぞれのワイヤに通電された溶接電流を実測した値によって先行及び追従ワイヤにおけるそれぞれの溶接電流比 (追従電流 I_r /先行電流 I_l) を算出し、以後に述べる検討を行った。

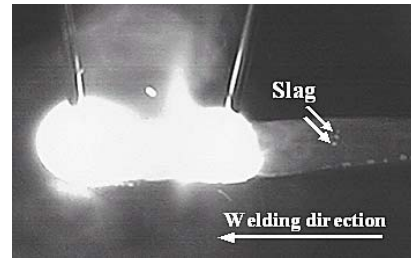


Fig. 3 Example of reference point by floating slag

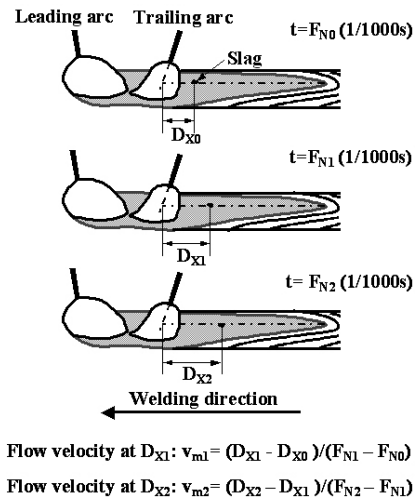


Fig. 4 Measurement method of molten metal flow velocity in weld pool

アーク電圧設定はパルスプレーアークに短絡が数回/秒混在する程度のアーク長が得られるように出力電圧調整して行った。なお、前報同様に先行・追従ワイヤに通電される溶接電流のパルスタイミング制御は先行・追従ワイヤへ通電する溶接電流配分を広範に設定するために実施していない。ただし、本実験では数十msに及ぶ長期アーク切れが発生しない限りビード形成には影響しないことを確認している。また、本試験溶接においてはビード形成に影響を及ぼすような長期アーク切れの発生頻度は10回の試験溶接に対して1回程度であり、このようなアーク切れが発生した場合の試験溶接はこれを除外している。

2.2.2 溶融池挙動観察及び湯流れ速度測定方法

高速溶接時における溶融池挙動を調査するため、957nmの干渉フィルター及びデジタルハイスピードビデオ装置を用いて高速度撮影(1000コマ/秒)を行った。Fig. 2は高速度ビデオ撮影のためのカメラ配置を示したものである。同図に示すように上方30°の角度で溶接進行方向に対して直角方向で撮影を行った。

撮影によって得られた高速度ビデオ映像から溶融池表面にFig. 3に示すように浮遊するスラッグの移動速度から溶融池中央線における追従アーク後方の湯流れ速度を実測した。

Fig. 4は湯流れ速度の測定方法を示したものである。溶融池後方には溶融池表面上にスラッグが浮遊している。したが

って、同図に示すようにこの浮遊スラグの一つを標点に定めた撮影コマ F_{N0} から、追従ワイヤ後方からの距離 D_{x0} (mm) を測定する。そして、高速度ビデオ映像を1コマ (1/1000s) ずつ正転してスラグの移動点 (D_{x0} , D_{x1} , D_{x2}) を測定する。1コマずつ正転したときのコマ送り数 (F_{N0} , F_{N1} , F_{N2}) は1/1000s 単位の時間として換算できるので、次式によって、追従アーク後方のスラグ移動点における移動速度が算出できる。

$$\text{位置 } D_{x1} \text{ における移動速度: } v_{m1} = (D_{x1} - D_{x0}) / (F_{N1} - F_{N0}) \quad (1)$$

この移動速度を追従ワイヤから後方へ離れた地点の湯流れ速度 v_m とした。なお、本実験では溶接速度を4 m/min とし、各 I_T/I_L における溶融池挙動を撮影し湯流れ速度を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 高速溶接ビード形成現象に対する溶接電流比の影響

Fig. 5 は先行及び追従ワイヤの送給速度比 (Wf_T/Wf_L) を0.2~1.33まで設定して得られた溶接電流比 (I_T/I_L) が限界

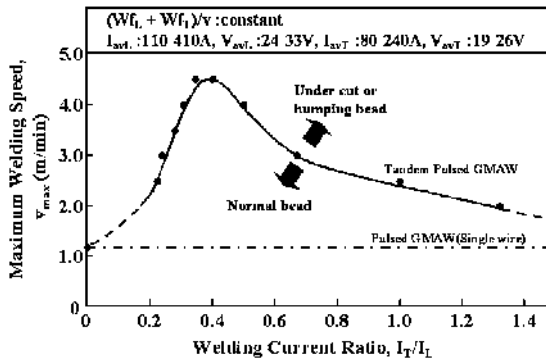


Fig. 5 Effect of welding current ratio on maximum welding speed

溶接速度に及ぼす影響について調べたものである。本実験の溶接条件設定限界であった $I_T/I_L=0.22$ ($Wf_T/Wf_L=0.2$) では2.5 m/min の限界溶接速度しか得られないが、 I_T/I_L の増加にともなって限界溶接速度は増加し、 $I_T/I_L=0.31\sim0.5$ ($Wf_T/Wf_L=0.3\sim0.5$) において4.0 m/min 以上の限界溶接速度が得られた。また、 $I_T/I_L=0.35\sim0.4$ において最高4.5 m/min までの限界溶接速度が得られ、先行及び追従ワイヤへの溶接電流を適正比に設定することによって、前報で得られた $I_T/I_L=1$ の場合の限界溶接速度 (3 m/min) よりもさらに、130~150% の溶接速度向上が認められた。同図の一点破線にはシングルワイヤのパルス GMA 溶接の限界溶接速度 (1.2 m/min) を示すが、 $I_T/I_L=0.35\sim0.4$ に設定したタンデムパルス GMA 溶接は275% の溶接速度向上が認められたことになる。

なお、 $I_T/I_L=0.4$ を越えると限界溶接速度は減少し、 $I_T/I_L=1.32$ ($Wf_T/Wf_L=1.33$) では2 m/min までの限界溶接速度しか得られない。

したがって、本実験範囲では限界溶接速度が4 m/min 以上となる溶接電流比の適正範囲が $I_T/I_L=0.31\sim0.5$ で存在し、この適正範囲を外れた溶接電流比では溶接速度の向上が期待できない。以上の結果は、二電極サブマージアーク溶接による高速溶接において溶接電流比が最適値から逸脱すると高速溶接が得られないとする野村らの研究報告³⁾と一致する。

次に、高速度ビデオ撮影によって各溶接電流比における溶融池挙動を調査し、高速溶接におけるビード形成機構について検討した。

Fig. 6 は溶接速度4 m/min にてビード溶接した場合の溶融池挙動を $I_T/I_L=0.22, 0.31, 0.5$ 及び1.32 について観察した結果である。

$I_T/I_L=0.22$ では、先行側の溶接電流 ($I_L: 410$ A) が高く、追従側の溶接電流 ($I_T: 90$ A) が低くなる結果、4 m/min の高速溶接では先行アークによる強力なアーク力によって形

$I_{avL}:110-430A, V_{avL}:24-33V, I_{avT}:80-430A, V_{avT}:19-26V, \text{Welding speed}:4m/min$					
I_T/I_L	A	B	C	D	E
0.22	Welding direction Humping t=0s	t=0.10s	t=0.21s	Humping t=0.31s	Humping t=0.40s
	t=0s	t=0.11s	t=0.19s	t=0.30s	t=0.41s
	t=0s	t=0.11s	t=0.19s	t=0.31s	t=0.39s
	Humping t=0s	Humping t=0.10s	Humping t=0.20s	Humping t=0.31s	Humping t=0.41s
	t=0s	t=0.10s	t=0.20s	t=0.31s	t=0.41s

Fig. 6 Effect of welding current ratio on weld pool formation

成された固体露出面が溶け込み部全面に現れ、先行アーク直下では、ワイヤから移行する溶融金属および母材溶融金属がビード中央部に集中して後方へ向かって流れ出しハンピングビードが発生している様子が観察される。この流れは、上記の固体露出面周辺部では温度が低くぬれ性が無くなった結果、溶融金属がそこへ流入し難くなってビード中央部に集中したものと考えられる⁵⁾。そして、このようなハンピングビードが発生する要因としては、追従アークの溶接電流が低かったため、溶融金属の流れを追従アークのアーク力で抑制することができなかったことが考えられた。これに加えて追従ワイヤから移行する溶融金属量も不十分であったために固体露出面を充填できなかったことも一因していると考えられた。

また、 $I_T/I_L=1.32$ では、先行側の溶接電流 ($I_L: 220\text{ A}$) よりも追従側の溶接電流 ($I_T: 290\text{ A}$) が高くなるために、先行アークによって後方へ移動しようとする溶融金属を追従アークが強力に押し返す結果、2ワイヤ間における湯溜まりが乱れる。さらに、追従アーク後方にはアーク力による溶融金属の掘り下げ作用によって、頻繁に固体露出面が溶け込み面に出現し、ハンピングビードが発生する。

一方、良好なビードが得られた $I_T/I_L=0.31$ ($I_L: 385\text{ A}$, $I_T: 120\text{ A}$) 及び 0.5 ($I_L: 340\text{ A}$, $I_T: 170\text{ A}$) の場合には、2ワイヤ間で形成される湯溜まりはほぼ母材表面高さで安定した状態で高速溶接が進行している。このことは、先行アークによって後方へ移動しようとする溶融金属の流れを追従アークのアーク力が緩和するとともに追従ワイヤから移行する溶融金属によって2ワイヤ間には常に溶融金属が充填されているからと考えられた。しかも、追従アーク後方にはそのアーク力による固体露出面はほとんど出現していなかった。

なお、上記の適正な溶接電流比における先行アーク及び追従アークのパルス周波数はそれぞれ、 $300\sim 350\text{ Hz}$ 及び $100\sim 140\text{ Hz}$ であるがこのような周波数範囲では1パルス周期がビード形成に直接影響を及ぼすような溶融池挙動は観察されなかった。

以上のことから、タンデムパルス GMA 溶接による高速溶接で正常ビードが形成されるためには、以下の3要件を同時に満足する先行及び追従アークの溶接電流比 I_T/I_L が成立している場合と考えられる。

- ① 先行アークによって後方移動する溶融金属の流れを追従アークのアーク力が緩和する。
- ② 先行アークのアーク力で発生する固体露出面を追従アークのワイヤ溶融によって充填し、常に2ワイヤ間には安定した溶融金属の湯溜まりが形成されている。
- ③ 追従アーク自身のアーク力で固体露出面を発生させない。

Fig. 7 に溶接速度が 4 m/min の場合におけるビード外観及び溶け込み形状を示す。 $I_T/I_L=0.31$ 及び $I_T/I_L=0.5$ では良好なビード外観及び溶け込み形状が得られている。しかし、

$I_{avL}:110-430\text{ A}$, $V_{avL}:24-33\text{ V}$, $I_{avT}:80-430\text{ A}$, $V_{avT}:19-26\text{ V}$, Welding speed: 4 m/min		
I_T/I_L	Bead appearance	Cross-section
Pulsed GMAW Leading angle (Single wire)		
0.22		
0.31		
0.5		
1.32		
Pulsed GMAW Trailing angle (Single wire)		

Fig. 7 Comparison of bead appearance and cross-section among welding current ratios

$I_T/I_L=0.22$ 及び $I_T/I_L=1.32$ ではハンピングビードとなった。しかも、これらのハンピングビード外観を観察すると、後退角の先行アークが高電流となる $I_T/I_L=0.22$ では後退角によるシングルワイヤのパルス GMA 溶接に類似したハンピングビード外観を示している。また、同図に示すように前進角の追従アークが高電流となる $I_T/I_L=1.32$ では前進角によるシングルワイヤのパルス GMA 溶接と類似したハンピングビード外観を示している。

3.2 タンデムパルス GMA 溶接における湯流れ現象の検討

一般に溶融池の温度は前半部ほど高く、後半部では低く、高電流・高速溶接になるほどその温度差が大きくなる。このため、溶融池表面にはその温度差に基づく表面張力の差が生じ、溶融池前方部の溶融金属はこの表面張力差による流れのために後方へ運ばれる^{4,5)}。また、高電流アークのアーク力によってアーク直下の母材溶融池は掘り下げられ、溶け込み面の側壁に薄い溶融層のみをとどめたガウジング状態が拡大し、溶融金属が後方へ強力に押しやられアーク直下後方では固体露出面が出現する^{6,7)}。そして、これらを契機として高電流・高速溶接のシングルワイヤ GMA 溶接ではハンピングやアンダカットなどの不整ビード生成原因になることが知られている。

タンデムパルス GMA 溶接による高速溶接では溶融池後

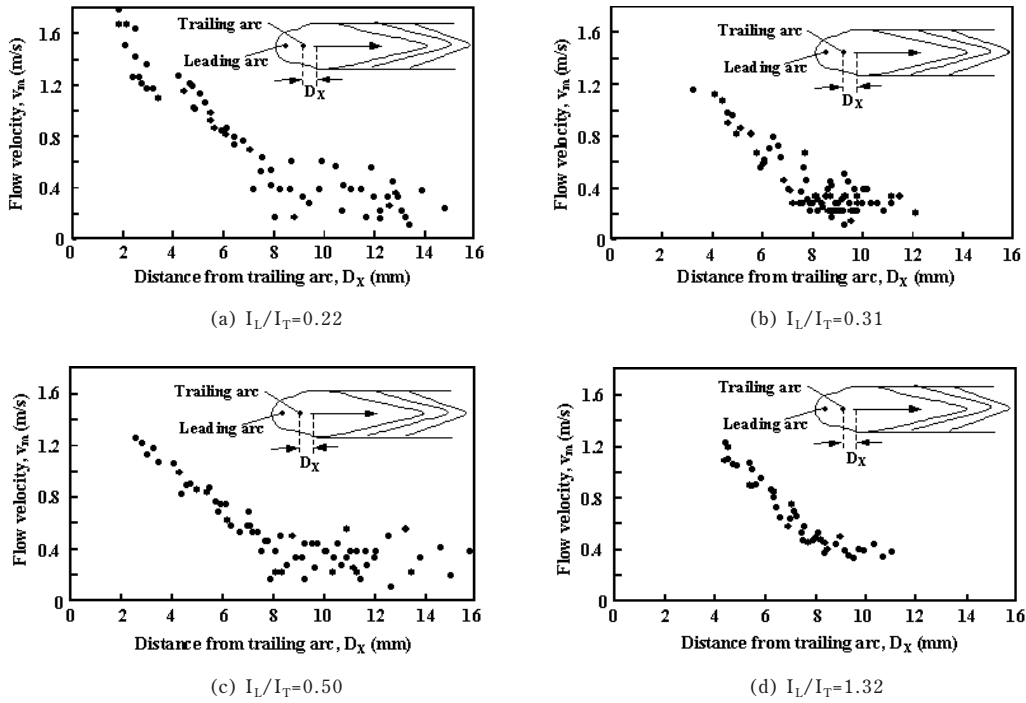


Fig. 8 Distribution of molten metal flow velocity in weld pool

方への溶融金属の流れがビード形成に大きく影響すると考えられ、この流れを緩和するための2ワイヤ溶接電流比の適正範囲が存在することを3.1に示した。

そこで、溶融池中央線における追従アーク後方の湯流れ速度とビード形成現象の関係について検討した。

Fig. 8はそれぞれ、 $I_L/I_T=0.22$, 0.31 , 0.5 及び 1.32 について溶融池表面の湯流れ速度を実測した結果である。いずれも追従アークより約4mm以内では1m/sを超える湯流れ速度を示し、追従アークから後方へ離れるにしたがって湯流れ速度は減少した。そして、追従アークから約8~14mm離れた位置では湯流れ速度の減少度合いは少なくなりバラツキながらも0.2~0.4mm/sの範囲で湯流れ速度の変化は認められなくなった。ここで、各溶接電流比における追従アーク後方からの距離4~7mmの位置(先行・追従アークによって掘り下げられた溶融金属が母材表面に現れる位置に相当)での湯流れ速度について注目すると、正常ビードを形成した $I_L/I_T=0.31$ 及び 0.5 ではそれぞれ、 $0.55\sim 1.12$ m/s及び $0.53\sim 1.06$ m/sの湯流れ速度であり、ハンピングビードとなった $I_L/I_T=0.22$ 及び 1.32 はそれぞれ、 $0.76\sim 1.27$ m/s及び $0.65\sim 1.23$ m/sの湯流れ速度を示し、正常ビードを形成した溶接電流比の方がハンピングビードを形成した場合に比べて約0.2m/s程度湯流れ速度が遅い。

Fig. 9は追従アーク後方からの距離4~7mmの位置において測定した湯流れ速度の全データの平均値を溶接電流比の関係で示したものである。湯流れ速度の平均値は $I_L/I_T=0.22$ で0.98m/sと最も高く I_L/I_T の増加とともに減少し $I_L/I_T=0.4$ において0.62m/sの最低値を示した。さらに、 I_L/I_T が増加すると湯流れ速度の平均値は増加し、 $I_L/I_T=1.32$ では

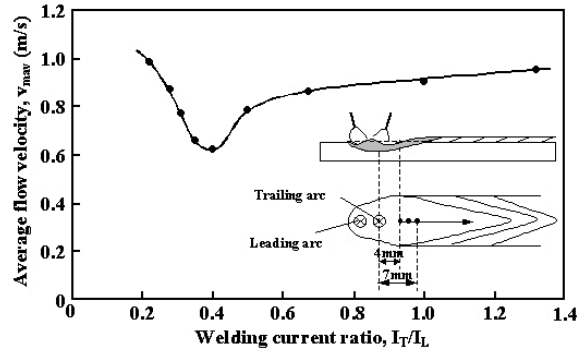


Fig. 9 Effect of welding current ratio on molten metal flow velocity at locations 4 to 7 mm behind trailing arc

0.95 m/s まで平均値が増加した。また、正常ビードを形成した適正範囲の溶接電流比では湯流れ速度の平均値は0.62~0.78 m/sでありハンピングビードを形成した溶接電流比の湯流れ速度の平均値は0.86~0.98 m/sであった。

以上の傾向は溶接電流比と限界溶接速度の関係を示したFig. 5の結果とも良い対応を示しており、追従アーク後方の湯流れ速度が高速溶接におけるビード形成、とくにハンピング発生のない正常ビード形成に影響を及ぼすことが確認できた。

4. 結 言

本研究では、タンデムパルス GMA 溶接法を適用し、ビード形成に及ぼす溶接電流比の影響について調査し、高速溶接であっても正常ビードを得るための基本要件について

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) 先行ワイヤと追従ワイヤの溶接電流比 I_T/I_L は限界溶接速度の向上に大きく影響する。すなわち、高速溶接で正常ビードを得るための適正な溶接電流比の範囲が存在し、この範囲を外れた場合には溶接速度の向上は期待できない。本実験では $I_T/I_L=0.31\sim 0.5$ において $4\sim 4.5$ m/min までの限界溶接速度が得られ、シングルワイヤのパルス GMA 溶接 (限界溶接速度: 1.2m/min) に比べて最大 275% までの溶接速度向上が認められた。
- (2) 上記の適正な溶接電流比の範囲は、溶融池後方へ移動する溶融金属の流れの緩和、2 ワイヤ間で形成される湯溜まりの安定化及び追従アーク自身で固体露出面を発生させないことの三要件が成立していることが考えられた。
- (3) 追従アーク後方 $4\sim 7$ mm での溶融池表面の湯流れ速度分布は、正常ビードを形成した溶接電流比の方がハンピングビードを形成した場合に比べて約 0.2 m/s 程度湯流れ速度が遅い。また、先行ワイヤと追従ワイヤの溶接電流比 I_T/I_L と追従アーク後方 $4\sim 7$ mm での平均

湯流れ速度の関係は、溶接電流比 I_T/I_L と限界溶接速度との関係と良い対応を示した。

参 考 文 献

- 1) 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).
- 2) T. Ohnawa, T. Uezono, T. Ueyama, K. Nakata and M. Ushio : High-speed welding of steel sheet by tandem pulsed gas metal arc welding system, IIW Doc. XII-1752-03 (2003) 46-55.
- 3) H. Nomura, Y. Sugitani and M. Tuji : Behavior of molten pool in submerged arc welding, Journal of Japan Welding Society, Vol. 51(1982) No. 9, 43-51.
- 4) B. Bradstreet : Effect of Surface Tension and Metal Flow on Weld Bead Formation, Welding Journal, Vol. 47 (1968) No. 7, 314s-322s.
- 5) K. Ando, J. Nishikawa and M. Inoue : Phenomena of the molten pool at high current and high speed MIG welding, Journal of Japan Welding Society, Vol. 40 (1971) No. 4, 51-55.
- 6) W. Savage, F. Nippes and K. Agusa : Effect of arc force on defect formation in GTA welding, Welding Journal, Vol. 58 (1979) No. 7, 212s-224s.
- 7) 西口, 黄地, 高 : 高速不安定ビード形成現象に関する研究, 溶接アーク物理研究委員会資料, 74-252 (1974).