高周波パルスを用いた低スパッタ CO₂ アーク溶接技術の開発*

片岡 時彦**, 池田 倫正**, 安田 功一**, 平田 好則***

Development of Low Spatter CO₂ Arc Welding Process with High Frequency Pulse Current*

by KATAOKA Tokihiko**, IKEDA Rinsei**, YASUDA Koichi** and HIRATA Yoshinori***

In CO₂ arc welding of solid wire, metal transfer phenomena and spatter generation are investigated by with rectangular pulse current, and low spatter CO₂ arc welding process with high frequency pulse current is developed. The optimal conditions of high frequency pulse CO₂ arc welding are in the range of peak current : 450-550A and pulse frequency: 450-750Hz. These high frequency pulse currents have the effect of the droplet oscillation due to resonance between applied pulse frequency and the natural frequency of the droplet. The droplet is transferred consistently every 9-11 pulses and the average interval of metal transfer is about 16ms which is reduced to half than that of conventional CO₂ arc welding. This average droplet weight is 34mg, showing a large reduction in comparison with that of the conventional method. As a result, total spatter weight is reduced by 70% in comparison with the conventional method, and especially, large spatters more than 0.5mm in diameter are reduced from 1.5g/min to 0.2g/min.

Key Words: CO₂ gas shielded arc welding, spatter, welding wire, high frequency pulse current

1. 緒 言

ガスシールドアーク溶接に関しては、施工上必要とされるスパッタの低減およびアークの安定性向上を目的として数多くの研究がなされており、溶滴移行現象、スパッタ発生現象、溶接電流・電圧の過渡現象などの検討結果が主に報告されている¹⁾。その結果、スパッタ低減に有効な新しい溶接法もいくつか開発されており、その中でも Ar-20%CO₂ ガスとインバータ式パルス電源とを組み合わせたマグパルス溶接法はスパッタ発生を低減できる溶接法として高い評価を受けている。しかし、マグパルス溶接法を含めスパッタ低減に効果的とされる溶接法は Ar-CO₂ 混合ガスを使用するマグ溶接がベースとなっており、低スパッタ化のためにはより高価な Ar ガスを使用しなければならないのが現状である。一方、1953 年に開発された CO₂ アーク溶接法は²⁾、Ar ガスを使用しない低コストの溶接方法として現在では鋼構造物の製作において主要な溶接法となっているが、溶接作業性の向上あるいはスパッタ発生量の低減などについて多くの検討³⁻⁷⁾がなされてきたものの、マグ溶接と比較してスパッタの発生は依然として多いのが現状である。CO₂ アーク溶接におけるスパッタ低減技術の開発の要望に対して、マグパルス溶接法と同様にパルス電流を適用し 1 パルス 1 溶滴移行あるいは 2 パルス 1 溶滴移行により低スパッタ化

を図る検討⁸⁻¹⁰⁾がなされているが、広く実用化されるまでには至っていない。

そこで、本研究では、高周波のパルス電流に着目し、パルス条件が CO₂ アーク溶接における溶滴粒径、溶滴移行形態およびスパッタ発生量に及ぼす影響について検討し、高周波パルス電流適用によるスパッタ低減技術の確立に取り組んだ。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材料

Table 1 に供試溶接ワイヤの化学組成を示す。供試溶接ワイヤは、JIS Z 3312 において YGW11 に規定される線径 1.2 mm の市販溶接ワイヤを用いた。溶接用母材は研削処理により表面スケールを除去した SM490B 鋼板を用いた。

2.2 溶接条件

本研究では、市販のマグパルス溶接用電源に高周波パルス電流波形を制御するパルスパラメータ設定ユニットを取り付けて実施し、溶滴移行およびスパッタ発生量に及ぼす電流波形パラメータの影響を調査した。Table 2 に実験に用いたパルス溶接機の電源特性と設定可能な電流波形パラメータを示す。各波形パラメータは、ピーク電流値 (Ip) 250～600 A、ベース電流値 (Ib) 10～250 A、パルスピーク時間 (Tp) 0.4～40 ms、立上り時間 (Tup) および立下り時間 (Tdn)

*受付日 平成19年6月15日 受理日 平成19年9月25日 平成14年度春季全国大会で発表、平成14年11月 溶接アーク物理研究で発表

**正 員 JFE スチール (株) Member, JFE Steel Corp.

***正 員 大阪大学 Member, OSAKA University

Table 1 Chemical compositions of electrode wire used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Ti	K
0.044	0.76	1.67	0.01	0.006	0.22	0.0006

Table 2 Welding equipment and pulse parameter.

Power source	Inverter controlled	
Arc-length controlled	Constant voltage characteristic	
Pulse controlled	Constant current characteristic	
	Pulse parameter	Experimental range
	Peak current: I_p	250~600A
	Base current: I_b	10~250A
	Peak current duration: T_p	0.4~40ms
	Down-slope duration: T_{dn}	0.4~3.0ms
	Up-slope duration: T_{up}	0.4~3.0ms

Fig.1 Experimental apparatus for observation of arc phenomena.

0.4~3.0msの範囲で設定変更が可能である。CO₂アーク溶接の標準溶接条件は、平均溶接電流 300 A、平均アーク電圧 33 V、溶接速度 40 cm/min、突出し長さ 18 mm、ベース電流値 (I_b) 100 A、立上り時間 (T_{up}) および立下り時間 (T_{dn}) 0.4ms とした。

2.3 評価方法

幅 250 mm×長さ 600 mm×高さ 200 mm の銅製容器内で 1 分間のビードオンプレート溶接を行い、ノズルに付着したスパッタ量および容器内に飛散したスパッタ量をすべて測定することで、溶接時に発生する 1 分間当りのスパッタ量を評価した。さらに、アナライジングレコーダーを用いてアーク電圧を測定し 10 V 以下に電圧が低下した箇所を短絡移行、設定したアーク電圧より電圧が急上昇した箇所をグロービュール移行と判定することで溶滴移行間隔を測定し、これによって求められた平均移行間隔とワイヤ送給速度から移行溶滴の平均重量と溶滴径を算出した。

2.4 溶滴移行の観察

溶滴移行現象は Fig. 1 に示す高速度ビデオ観察によって解析し、CO₂アーク溶接に高周波パルス波形を適用した場合の溶滴形状、溶滴揺動および溶滴移行形態の変化を評価した。高速度ビデオの撮影速度は 6,000 コマ/秒、シャッター速度は 1/20,000 秒、レンズは F4-200 mm とし、960 nm バンドパスフィルタを用いた。

Fig.2 Current and voltage waveform in non-pulse welding. **Fig.3** Relationship between transfer droplet weight and pulse frequency.

3. 実験結果

3.1 CO₂アーク溶接における溶滴移行とスパッタの発生

ガスシールドアーク溶接におけるアーク現象はシールドガス組成によって大きく変化する。CO₂アーク溶接におけるグロービュール移行は、Ar-20%CO₂のスプレー移行に対して不安定とされている。グロービュール移行におけるスパッタの発生は、粗大な溶滴とその揺動が大きく関係し、短絡と再アーク、アーク力そのものによる溶滴の飛散が挙げられる。これらグロービュール移行におけるスパッタ発生の抑制には、溶滴の不安定な揺動の抑制が重要であると考えられる³⁻⁵⁾。

Fig. 2 に平均溶接電流 300 A、アーク電圧 33 V としたノンパルスでの CO₂アーク溶接における溶接電流とアーク電圧の波形を示す。アーク電圧の変動から判断できる溶滴の移行間隔は、29~48 ms と長くばらつきも大きい。ワイヤ溶融量(送給速度)と移行回数から算出される溶滴の平均重量は 59 mg、真球とした場合の直径は 2.4 mm でワイヤ径の 2 倍に相当する。

3.2 パルス CO₂アーク溶接における溶滴移行現象

CO₂アーク溶接におけるパルス電流と溶滴重量および溶

Fig.4 Current and voltage waveform in 50Hz pulse welding.

滴移行間隔について検討した。Fig. 3 にパルス周波数と平均溶滴重量の関係を示す。平均溶接電流 300 A, アーク電圧 33 V, ベース電流 (I_b) 100 A, 立上り時間 (T_{up}) および立下り時間 (T_{dn}) 0.4 ms とし, パルスピーク電流 (I_p) 350, 400, 450, 500, 550 A においてパルスピーク時間を変化させることでパルス周波数を 20~740 Hz に調整した。1 パルスあるいは 2 パルスで 1 溶滴移行が生じる周波数 40~100 Hz において溶滴重量は 41~52 mg に減少し, パルス周波数 40~55 Hz ではパルス電流に同期した 1 パルス 1 溶滴移行が得られた。パルス周波数 100~300 Hz の溶滴重量は 55~65 mg に増加したが, さらに高いパルス周波数とした 400~750 Hz の溶滴は再度微細化する傾向を示し, パルスピーク電流 450, 500, 550 A, パルス周波数 500~750 Hz における溶滴重量は 34~37 mg, パルス周波数 40~100 Hz の領域よりも溶滴重量は減少し, 球換算した直径は 2.0 mm であった。

Fig. 4 にパルス周波数 50 Hz における溶接電流とアーク電圧の波形を示す。ピーク電流 (I_p) は 450 A, ピーク期間 (T_p) は 11 ms, ベース電流 (I_b) 100 A とした。このパルス周波数 50 Hz においてパルス電流と溶滴移行が同期した 1 パルス 1 溶滴移行が観察された。マグ (Ar-20%CO₂) および MIG パルス溶接における 1 パルス 1 溶滴移行は, ピーク電流期間における溶滴の成長とくびれの形成, ベース電流期間における溶滴のワイヤ先端からの離脱と溶融プールへの移行が観察されている^{11, 12)}。これに対して CO₂ パルス溶接の 1 パルス 1 溶滴移行における溶滴移行は, ピーク電流期間前半の 2~6 ms の間に観察された。溶滴移行後のピーク電流後半の溶滴は成長とともに強いアーク力によってワイヤ上方へ押上げられ, アーク力が弱くなるベース電流期間の溶滴は下方へ伸びることでワイヤ間にくびれを形成し, このくびれに強い電磁ピンチ力が作用することで溶滴はワイヤ先端から離脱し溶融プールへと移行した。ベース電流期間のアーク長は短く短絡が生じやすい。また, 1 パルス 1 溶滴移行の乱れは粗大な溶滴をワイヤ先端に懸垂させることでさらに短絡が生じやすく, 短絡後の再アークによって多くのスパッタが飛散する現象が観察された。CO₂ パルス

Fig.5 Current and voltage waveform in 220Hz pulse welding.

Fig.6 Current and voltage waveform in 580Hz pulse welding.

溶接における 1 パルス 1 溶滴移行の安定化にはベース電流および期間の設定が重要と考えられる。また, パルス条件の設定 (ベース電流 120 A 以下) によってはベース期間にアーク切れが発生するとの指摘もある⁸⁾。

Fig. 5 にパルス周波数 220 Hz における溶接電流とアーク電圧の波形を示す。ピーク電流 (I_p) は 450 A, ピーク期間 (T_p) は 2.0 ms, ベース電流 (I_b) 100 A とした。パルス周波数 220 Hz における 1 秒間の溶滴移行回数は 31 回, 1 溶滴移行に要するパルス数は約 7 パルス, その範囲は 4 から 12 パルスと広く, 溶滴の移行周期は 18~55 ms と大きくばらついた。このパルス周波数 220 Hz においては, パルスを与えることで溶滴に不規則な揺動が生じ, 溶滴の移行を大きく乱す現象が観察された。

Fig. 6 に周波数 580 Hz における溶接電流とアーク電圧の波形測定結果を示す。ピーク電流 (I_p) は 450 A, ピーク期間 (T_p) は 0.6 ms, ベース電流 (I_b) 100 A とした。パルス周波数 580 Hz における 1 秒間の溶滴移行回数は 58 回, 1 溶滴移行に要するパルス数は約 10 パルス, 溶滴の平均移行間隔はノンパルス溶接の場合の 37 ms から 17 ms に短縮した。また, 溶滴移行間隔の範囲は 14~20 ms と非常に狭く規則的な溶滴移行であることが確認された。

Fig. 7 にパルス周波数 625 Hz における 1 溶滴の成長から離脱までの連続画像を示す。ピーク電流 (I_p) は 500 A, ピーク期間 (T_p) は 0.4 ms, ベース電流 (I_b) 100 A とした。溶滴移行直後の画像を 0 ms とし, 5.2 ms から 6.0 ms の画像は溶滴移行後 3 パルス目, 8.5 ms から 9.3 ms は 5 パルス目,

Fig.7 Example of droplet transfer behavior in 625Hz pulse welding.

12.3 ms から 13.0 ms は 8 パルス目, 15.0 ms と 15.5 ms は 10 パルス目である. ワイヤ先端の溶滴は時間の経過とともに成長し, パルスピーク期間の溶滴はアークによって上方に押し上げられ扁平化し, ベース期間の溶滴は下方に伸びることで中心が下方へ移動する現象が観察された. このベース期間に観察された溶滴中心の下方への移動は, 溶滴の小さい 4.7 ms および 8.0 ms においては小さく, その形状はほぼ真球である. これに対して, 溶滴がワイヤ径以上に成長した 11.8 ms の溶滴は縦方向に伸びた形状となっており, その中心は下方に大きく移動した. 溶滴とワイヤ間のくびれの形成はこの直後の 12.3 ms の画像に認められ, 溶滴離脱までに要する時間は約 3 ms であった. 1 パルス 1 溶滴移行における溶滴離脱までのピーク電流期間 2~6 ms (Fig. 4) ととも一致している. この高周波パルス溶接における溶滴移行の特徴として, パルスによる溶滴のワイヤ軸方向への振動(上下動)とその成長のなかで溶滴とワイヤ間にくびれを形成し離脱に至る現象が観察された. また, 溶滴移行間隔の短縮と規則性の向上, 溶滴の微細化と溶滴揺動の抑制が確認された. 溶滴の成長から移行に至る過程は a) 溶滴の成長, b) パルスによる溶滴の上下動とくびれの形成, c) 溶滴のくびれの成長, d) 溶滴の離脱に大別できる.

3.3 パルス CO₂ アーク溶接におけるスパッタ発生量

Fig. 8 に平均溶接電流 300 A, アーク電圧 33 V におけるパ

Fig.8 Relation between pulse frequency and amount of spatter.

ルス周波数とスパッタ発生量の関係を示す. スパッタ発生量はパルス周波数 20~25 Hz の領域では 2.3~3.2 g/min と多く, パルス周波数 50~100 Hz の領域および 400 Hz 以上の領域では 1.2 g/min 以下に低減しており, Fig. 3 のパルス周波数と平均溶滴重量との相関が認められる. 特に, ピーク電流 500 A, ベース電流 100 A, パルスの立上り時間 (Tup) 0.4 ms, 立下り時間 (Tdn) 0.4 ms, 周波数 625 Hz におけるスパッタ発生量は 0.7 g/min にまで低減した. Fig. 9 にノンパルス溶接および 625 Hz の高周波パルス溶接におけるスパッ

Fig.9 Comparison of spatter generation in non-pulse and high frequency pulse CO₂ welding.

Fig.10 Appearance of bead-on-plate welding.

タ粒度分布を示す。高周波パルス溶接のスパッタは小粒となり、粒径 0.5 mm 以下のスパッタ比率はノンパルス溶接の 52% から 78% に増加した。また、溶接ビード近傍への付着と除去が問題視される粒径 0.5 mm 超えのスパッタ発生量はノンパルス溶接の 1.5 g/min から 0.2 g/min に激減した。

3.4 低スパッタ CO₂ パルス溶接法の特徴

Fig. 10 に平均溶接電流 300 A、アーク電圧 33 V における従来のノンパルス溶接と高周波パルス (Ip 500 A, 625 Hz) 溶接の断面マクロ組織とビード外観を示す。電流のパルス化によって溶込み深さが 1.3 倍に増加した。一方、ビード近傍への大粒のスパッタ付着が減少しておりスパッタ除去作業の大幅低減が期待できる。

4. 考 察

高周波パルス溶接における溶滴の挙動について固有振動モデルを用いて考察する。CO₂ アーク溶接のグロービュール移行におけるスパッタ発生形態としては、①短絡と再アーク、②アーク力による溶滴の飛散等が挙げられるが、その発生は、溶滴がワイヤ端で成長する過程で、アーク点の変位するため溶滴が大きく揺動し溶滴移行が不規則になることに起因するとされている³⁻⁵⁾。したがって、スパッタの発生を減少させるためには、溶滴の不安定な揺動を抑制することが特に重要である。高周波パルス CO₂ アーク溶接では、

Fig.11 Mass-spring system equivalent to oscillation of pendent drop in axial direction.

Fig.12 Relation between volume and the calculated character frequency.

9～11 パルスで 1 溶滴が移行する形態が極めて安定であり、かつ、溶滴の大きさは小さくなることから、スパッタ発生量を大幅に低減できることを 3.2 項および 3.3 項で述べた。このスパッタ低減現象は Fig. 7 に示したパルスによる溶滴の強制的な振動によるくびれの形成に加えて、ピーク電流期間にくびれ部分に生じる強いピンチ力がワイヤ軸方向への規則的な溶滴移行を実現していることによると考えられる。

Fig. 3 に示したように、パルス電流を適用したときの溶滴重量が周波数依存性をもつことから、溶滴の大きさと固有振動数の関係を調べることにした。溶滴の振動現象を単純化するために、平田らにより解析されている手法¹³⁾を用いて、Fig. 11 に示すような質点振動系に置き換え、次式から固有振動数を求めることにした。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

ここで、 m は溶滴の等価質量 (kg)、 k は溶滴の等価バネ定数 (N/m) である。もとより、溶滴の大きさによって、ワイヤ端に懸垂する溶滴形状は異なり、表面張力による等価バネ定数は変化する。たとえば、溶融軟鋼の表面張力を 1.2 N/m とすると、溶滴体積が 5 mm³ の場合、等価バネ定数 k は約

16 (N/m) と計算される。したがって、熔融軟鋼の密度を $7.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とすると、溶滴質量は $3.8 \times 10^{-5} \text{ kg}$ となり、固有振動数 f は (1) 式から約 100 Hz となる。このようにして求めた懸垂溶滴の体積と固有振動数の関係を Fig. 12 に示す。溶滴の体積が大きくなるほど、固有振動数が低下することが分かる。Fig. 12 には懸垂溶滴を球換算したときの直径も併記しているが、溶滴直径が 1.2~1.5 mm での固有振動数は 300~600 Hz となっている。Fig. 3 に示すようにパルス周波数 300 Hz 超えにおける溶滴サイズは周波数の増加にともない小さくなっており、パルス電流による共振作用によって溶滴に振動が生じている可能性があると考えられる。

なお、Fig. 12 は単純化したモデルでの固有振動数の計算結果であり、実際には下向きの力に加えて上向きの力が加わり、さらには電磁ピンチ力も作用するため、今後、溶滴振動および溶滴離脱に関する詳細な検討が必要である。

5. 結 言

CO₂ アーク溶接において高周波パルス溶接電流による溶滴移行形態の安定化を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) パルス周波数が 300 Hz を超える領域では周波数の増加とともに溶滴は微細化する傾向を示し、ピーク電流 500 A、周波数 625 Hz での平均溶滴重量はノンパルスの 59 mg から 34 mg にまで減少した。
- (2) また、高周波パルス溶接法によって溶滴の微細化とともに移行間隔の規則性向上が認められた。
- (3) 高周波パルス溶接によって生じたスパッタ総発生量は、従来比で 70% 低減しており、ビード近傍への付着が懸念される粒径 0.5 mm 以上の大粒のスパッタは 13% に激減した。
- (4) 静止懸垂溶滴形状で近似したモデルにより得られた直径 1.2~1.5 mm での固有振動数は 300~600 Hz となり、

高周波パルス溶接における溶滴には共振によって溶滴振動が生じた可能性が考えられる。

参 考 文 献

- 1) 安藤弘平 長谷川光雄：溶接アーク現象 (1962), 産報.
- 2) 鈴木春義：炭酸ガスおよびノンガスアーク溶接 (1970), 産報.
- 3) H. Ando, T. Yamamoto: A Study of Spatter Generation in CO₂ Gas Shielded Arc Welding Method, Prep. Nat. Meet. JWS., 31-3 (1962), 218-219. (in Japanese)
- 4) T. Yamada, M. Rokujo: Spattering in CO₂ Arc Welding, : R&D KOBE STEEL ENGINEERING REPORT, 31-4 (1981), 69-72. (in Japanese)
- 5) T. Kataoka, R. Ikeda, K. Yasuda: Influence of Minor Elements in Electrode Wire on Spattering Phenomena in CO₂ Gas Shielded Arc Welding, Quar. J. JWS., 25-3 (2007), 410-415. (in Japanese)
- 6) T. Mita: Waveform Control Method in CO₂ Gas Shielded Arc Welding, Quar. J. JWS., 6-2 (1988), 209-213. (in Japanese)
- 7) T. Mita, A. Sakabe, T. Yokoo: Quantitative Estimation of Arc Stability on CO₂ Gas Shielded Arc Welding, Quar. J. JWS., 5-1 (1987), 75-80. (in Japanese)
- 8) T. Ito, F. Koshiishi, M. Sato, T. Suga, M. Ushio: A Study on Spatter Reduction in Pulsed CO₂ Gas Shielded Arc Welding, Quar. J. JWS., 15-3 (1997), 432-437. (in Japanese)
- 9) Y. Tabata, S. Ueguri, M. Mizuno: Non-Spatter CO₂ Arc Welder with a High-repetition-rate Pulsative Current Source, Prep. Nat. Meet. JWS., 53 (1993), 52-53. (in Japanese)
- 10) T. Innami, J. B. Wang, H. Ihara, K. Hamamoto, Y. Tanaka: Study on the CO₂ Gas Shielded Pulsed-Arc Welding Method, Prep. Nat. Meet. JWS., 61 (1997), 72-73. (in Japanese)
- 11) A. Matsunawa, H. Yamamoto, S. Hiramoto: Pulse Arc Welding, J. JWS., 53-6 (1984), 20-58. (in Japanese)
- 12) H. Maruo, Y. Hirata, Y. Noda: Hcat Contents and Temperature of Metal Droplets in Pulse MIG Welding, Quar. J. JWS., 2-4 (1984), 3-8. (in Japanese)
- 13) Y. Hirata, K. Tsujimura, T. Ohji, T. Kataoka, R. Ikeda: Modeling of Molten Drop Oscillation in Gas Shielded Metal Arc Welding, Quar. J. JWS., 25-3 (2007), 421-425. (in Japanese)