

論文・報告

パルスガスマグ溶接法の開発

Development of pulsed gas MAG welding process

藤原 康平 *1

FUJIWARA Kohei

津山 忠久 *2

TSUYAMA Tadahisa

炭酸ガスシールドアーク溶接法は産業界で広く使用されている一方で、中・高電流域で発生する反発移行は大量のスパッタを生成する。我々はこの弱点を克服する新たな方法として、CO₂シールドガス中にArを周期的に添加する「パルスガスマグ溶接法」を開発した。本報では、本溶接法におけるAr添加条件（周波数、平均Ar流量、Ar添加時間（電磁弁開時間））が溶滴移行に及ぼす影響を調査した。溶滴移行は35~65 Hzの任意の周波数においてAr添加と同期し、同期を達成するためのAr添加条件は電磁弁開時間4 ms以上、及び1パルスごとのAr体積約1 mL以上であることがわかった。スパッタ量はAr 80% - CO₂ 20%混合ガスを使用したマグ溶接法以下に低減され、炭酸ガスシールドアーク溶接法のようななべ底状に近い溶込み形状が得られた。

キーワード：炭酸ガスシールドアーク溶接法、マグ溶接法、溶滴移行制御、スパッタ、シールドガス

1. はじめに

シールドガスに100%CO₂を用いた炭酸ガスシールドアーク溶接法は、電極がアークを発生させると同時に自身が溶融して溶着金属を形成するため高能率な溶接作業が可能であることに加え、なべ底状の深い溶込みが得られることやガスコストが安価という多くのメリットを有し、産業界に広く用いられている。一方、スパッタの発生量が多いというデメリットがあり、これまで数々の溶接機器や溶接材料などの改良による低スパッタプロセスの開発が進められている。

ガスシールドアーク溶接法の低スパッタ化には、一般的にはArとCO₂の混合ガス（Ar 80% - CO₂ 20%）を用いたマグ溶接法が考えられる。マグ溶接法ではアーク形態が溶滴全体を包み込むようなフレア型のアークになることで、中・高電流領域では溶滴移行形態がプロジェクト移行、ストリーミング移行の所謂スプレー移行となり、ワイヤ先端に下垂する小さな溶滴が規則的に落下することで、これらが飛散し生じるスパッタ量を激減させることが出来る¹⁾。また、REM元素を含む特殊なワイヤを用いてDCENで溶接する手法²⁾や、パルス電流波形を用いた溶滴移行制御による低スパッタプロセスが実現されている³⁾⁻⁸⁾。このパルスマグ溶接法は、矩形形状の溶接電流波形を与え溶滴の形成および離脱に最適な電流を与えることで、溶滴移行が制御されスパッタの発生が激減する⁶⁾。混合ガスと組み合わせたパルスマグ溶接法も既に実用化されており、極めてスパッタ量の少ない溶接が可能になっている。

しかしながらこれらの技術は溶接電源をはじめとする比較的高価な設備を必要とすることから導入のハードルは低くない。また、マグ溶接法はシールドガスを混合ガ

スに変更するだけで手軽に低スパッタ化が可能である一方、Arの使用量が多いためガスコストがCO₂の約3倍（ボンベ比較）と非常に高いことや、ブローホールが発生しやすいデメリットがある⁹⁾。そこで、設備コストやガスコストを抑えつつ溶滴移行を制御できる新たなガスシールドアーク溶接法が望まれているのが現状である。

我々はこの課題を解決するための新たな手法として、Arを周期的に添加する手法を考案し「パルスガスマグ溶接法（Pulsed Gas MAG Welding Process）」と名付けた¹⁰⁾。具体的には、二重ノズルを用いて炭酸ガスシールドアーク溶接中に極少量のArをパルス状にアーク周辺へ添加することでアーク形態を周期的に変化させ、溶滴移行制御を行う溶接法である¹¹⁾⁻¹⁵⁾。本手法によりスパッタの発生原因である過大に成長した溶滴が強いアーク反力によって飛散することが防がれ、スパッタが激減する。Arの添加は溶滴離脱に必要な時のみにパルス添加するため、Arの使用量は最大でもAr : CO₂ = 2 : 8程度と少量であり、一般的なAr 80% - CO₂ 20%混合ガスによるマグ溶接法と比較するとAr使用量は大幅に抑えられる。また、本溶接法は一般的な定電圧特性電源で適用可能であるため、導入の際の設備コストは最小限に抑えられる。

本報では、「パルスガスマグ溶接法」の原理、Ar添加条件に対する溶接現象観察結果および溶滴移行が可能なAr添加条件範囲について調査した結果を報告する。

2. 本溶接法の原理および実験条件

(1) 本溶接法の原理

本溶接法は二重ノズルを使用し、アウターノズルからCO₂を定常的に流し、インナーノズルからArをパルス状にアーク周辺へ添加することで図1のようにCO₂アーク期間とArアーク期間を繰り返し、溶滴移

*1 川田工業㈱橋梁事業部四国工場生産開発課

*2 川田工業㈱橋梁事業部四国工場生産開発課 課長

行を制御する。CO₂は通常の炭酸ガスシールドアーク溶接法と同程度（25 L/min）を流し、Arは平均流量2～8 L/minを添加する。Arはパルス添加のため平均流量が少量でも瞬間的な最大流量（以下、ピーク流量）は4～35 L/minとなり、アーク周辺が高濃度のAr雰囲気になるためCO₂アークからArアークへと切り替えることが可能である。

本溶接法の原理について、実際の溶接中の電流・電圧波形およびアーク形状を例に解説する。図2にAr添加時（周波数50 Hz、平均流量4 L/min、電磁弁開時間5 ms）の電磁弁パルス信号および電流・電圧波形を、図3に電磁弁開信号から4～14 ms間のアーク形状を2 ms毎に撮影した結果を示す。図2より電流・電圧波形に着目すると、電磁弁開信号の立ち上がり（図中0 ms）とほぼ同時にノズルから噴出したArは5 ms後に溶滴周辺に到達し、CO₂雰囲気から高濃度のAr雰囲気へと変化することでCO₂アークからArアークへと切り替わり、電位傾度の低下による電圧低下が生じる。図3からも4～6 msにかけてアーク形態がCO₂アークの緊縮型からArアークのフレア型に切り替わっていることがわかる。そして電圧変化から若干遅れて電流が上昇する。その後、電磁弁開信号から10 ms後に溶滴が移行し電圧が大きく上昇、棘状の特徴的な波形が生じた。以上のように、Arアークへと変化することで溶滴はCO₂アークの強力なアーク反力から解放されるとともに、電流増加による電磁ピンチ力の増加およびプラズマ気流の摩擦力の作用がそれぞれ溶滴離脱に有効に働き、溶滴が速やかに離脱する。その後はワイヤ先端のガス雰囲気はCO₂主体となり、電流・電圧が元の値へと戻り緊縮型のCO₂アークへと再び変化する。以上の原理によりアーク形態を周期的に変化させ、溶滴移行制御を行う。

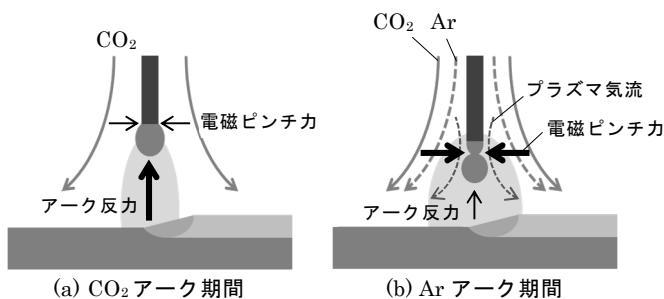


図1 各アーク期間における溶滴とガス流の概略図

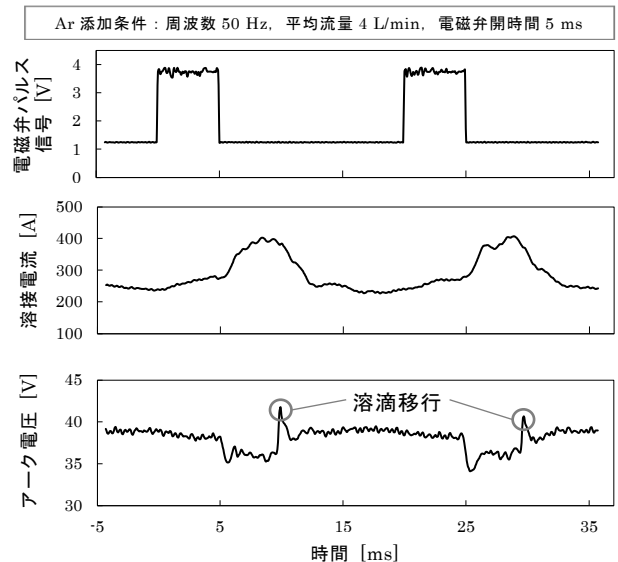


図2 電磁弁パルス信号および電流電圧波形

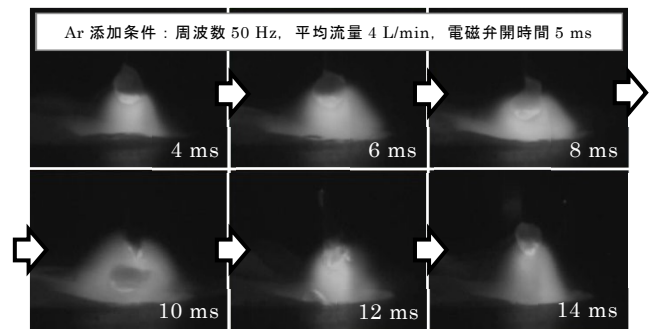


図3 Ar添加によるアーク形状変化

(2) 実験方法

実験に用いた溶接トーチには二重ノズルを取り付け、アウターノズルからCO₂を流し、インナーノズルからArを添加する。Arは電磁弁を介して添加した。電磁弁出口からノズル出口までのAr供給経路は300 mmとした。Ar添加条件は周波数30、50、65 Hz、平均流量1～8 L/min、電磁弁開時間2～10 msの3つのパラメータを変化させて実験を行った。CO₂の流量は25 L/minとした。溶接電源はデジタル制御インバータ電源を直流定電圧モードで用いた。溶接ワイヤはφ1.2 mmの軟鋼ソリッドワイヤ JIS Z 3312 YGW11を用いた。溶接条件は溶接電流310 A（ワイヤ送給速度11.9 m/min）、アーク電圧36 V、溶接速度30 cm/minの一定条件で実験を実施した。コンタクトチップー母材間距離は25 mmになるよう設定し、軟鋼（SS400）に下向きビードオンプレート溶接を実施した。

なお、本溶接法ではCO₂とArの二種類のガスを用いるが、以降に記載する「周波数」、「平均流量」および「電磁弁開時間」はいずれもAr添加条件のことを指す。

3. 実験結果および考察

(1) ガス流の可視化結果

シュリーレン法を用いて Ar がどのように噴出しているのかを観察した。図 4 に電磁弁パルス信号と可視化した Ar 流の一例（周波数 50 Hz, 平均流量 8 L/min, 電磁弁開時間 10 ms）を示す。また、アウターガスである CO₂ を定常で流し、そこに Ar を添加した時の様子（周波数 50 Hz, 平均流量 8 L/min, 電磁弁開時間 10 ms, CO₂ 流量 25 L/min）を図 5 に示す。なお、アークは発生させずに観察した。

図 4 において、ノズル先端から母材表面にかけて周囲と濃淡が異なる部分が可視化された Ar 流である。Ar は電磁弁開時間中に圧力が高まり、さらにガス経路内圧力 (0.3 MPa) から大気圧 (0.1 MPa) に開放されることでノズル先端から噴出した Ar の塊はインナーノズル径よりも大きく膨らみつつ、周縁部に渦輪を形成する。その後渦輪は徐々に崩れつつ Ar 塊は図中下方向へと進行し、やがてアーク発生相当位置まで到達する。やがて母材に衝突した Ar は垂直方向へと反射しその場で滞留しようとするが、後ろから進行してくる Ar に押し出されるように半径方向へと進行方向を変え、周囲へ拡散していく。その後電磁弁開時間が終了するとノズル先端からの Ar の供給が止み、Ar 流の後端が進行するとともに徐々に Ar は拡散していく。

実際の溶接中のガス流を想定し CO₂ を同時に流した図 5 では、図 4 と同じように Ar は噴出した瞬間から大きく膨らむが、このときアウターガスの CO₂ ごと外側に膨らむことが確認された。その後、膨らみが図中下方向に進んでいくと同時に、膨らみの上部にくびれ状の流れ（白矢印）が生じていることが分かる。これはアウターガス (CO₂) とインナーガス (Ar) の流速差により生じるものと考えられる。

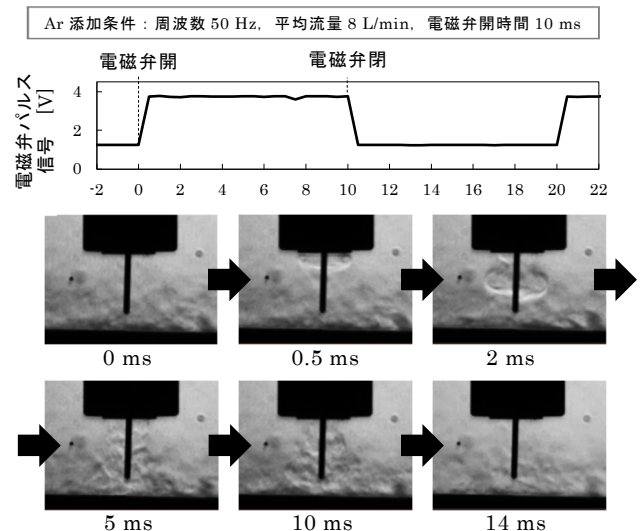


図 4 シュリーレン法による Ar 流可視化結果の一例

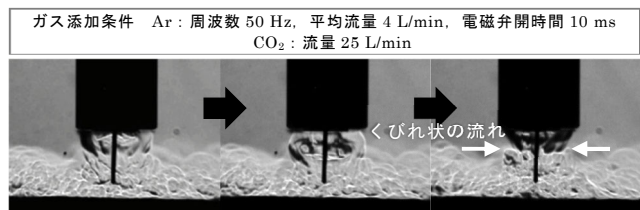


図 5 CO₂ 定常出力中における Ar 添加時のガス流

(2) Ar 添加条件と溶滴移行の関係

Ar 添加のパラメータとして、周波数、平均流量、電磁弁開時間を変化させて溶滴移行現象を調査した。Ar 添加に対する溶滴移行現象の評価は、Ar パルス添加に対してどの程度同期して溶滴が移行するかという観点から、「非同期」、「準同期」、「同期」および「余剰溶滴」の 4 種で評価した。評価の判定基準は以下のとおりである。Ar 添加に同期せず溶滴が移行するものを「非同期」、Ar 添加 1~3 回に 1 回溶滴が移行するものを「準同期」、Ar 添加 1 回に溶滴が 1 回移行するものを「同期」、Ar 添加 1 回に溶滴が 1 回移行するが、1 つ目の溶滴移行後も数個の細かい溶滴移行が生じるものを「余剰溶滴」とした。

図 6 に溶滴移行現象を分類した結果を周波数ごと

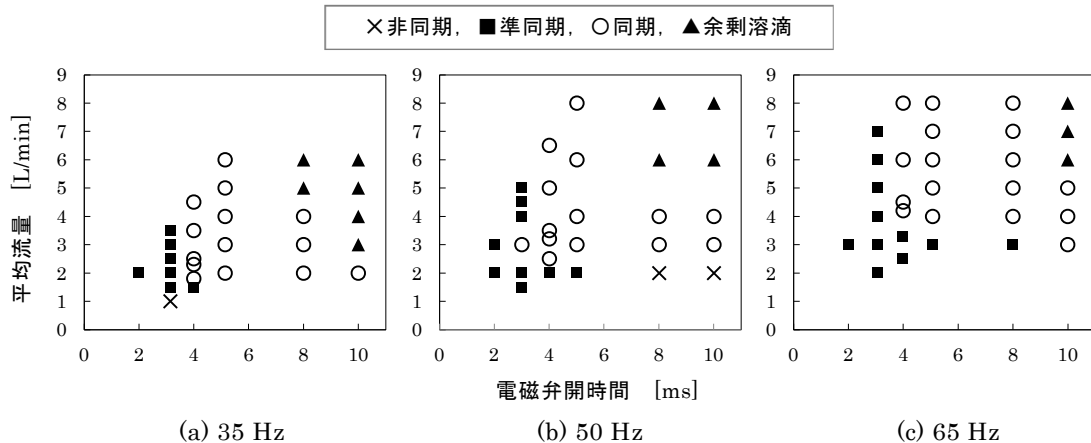


図 6 Ar 添加条件に対する溶滴移行形態の分類

に示す。非同期を×，準同期を■，同期を○，余剰溶滴を▲で示す。図6より，いずれの周波数でも同期する範囲が存在することから，35 Hz から 65 Hz では溶滴移行制御が可能である。電磁弁開時間が 3 ms 以下の条件ではいずれの周波数でもほとんど同期しないため，溶滴移行制御のためには 4 ms 以上 Ar を添加する必要がある。平均流量が多く，電磁弁開時間が長い条件では余剰溶滴になりやすいが，いずれの周波数でも電磁弁開時間 4，5 ms では平均流量が増加しても余剰溶滴にならず，溶滴移行は同期する。また，同期にはある程度以上の平均流量が必要であり，溶滴移行が同期するのに必要な平均流量の最低値に着目すると，35 Hz では 1.8~2 L/min，50 Hz では 2.5~3 L/min，65 Hz では 3~4 L/min と，周波数の増加に伴い平均流量の最低値が増加した。

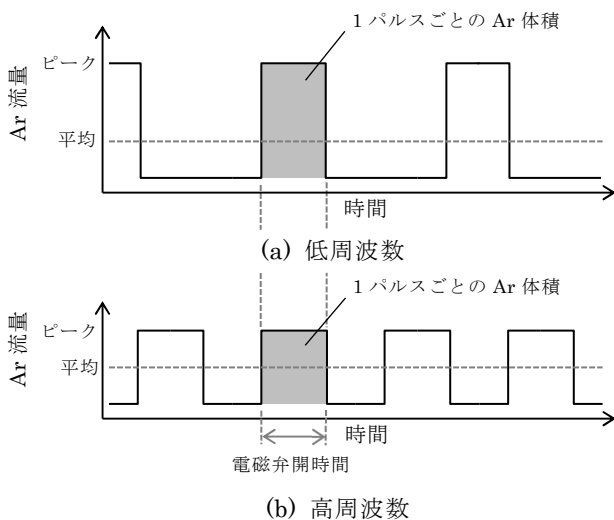


図7 低・高周波数で理想パルス状に添加される Ar の波形イメージ図

図6の実験結果より，Ar 添加に溶滴移行が同期するために必要な平均流量は周波数によって変化した。そこで，周波数を変化させると Ar 添加に溶滴移行が

いて考察する。図7に Ar の平均流量，電磁弁開時間は一定で，低周波数，高周波数で理想パルス状に添加される Ar の波形イメージ図を示す。図7より，流量が一定の場合，Ar を添加する頻度が低い低周波数ほど1回に添加する Ar の量が多くなる。この1回に添加される Ar の量を，1パルスごとの Ar 体積と定義する。1パルスごとの Ar 体積は図7に示すようにピーク流量と電磁弁開時間の積で表され，平均流量，電磁弁開時間一定条件ではピーク流量の多い低周波数ほど1パルスごとの Ar 体積は大きくなる。つまり周波数が低下すると，同量の1パルスごとの Ar 体積を確保するために必要な平均流量が少なくなる。そこで，実験結果を電磁弁開時間と1パルスごとの Ar 体積で整理し直したものを図8に示す。図6では周波数が高くなるとともに溶滴移行が同期するために必要な平均流量が増加したが，図8では周波数によらず同期するために必要な1パルスごとの Ar 体積は約 1 mL の一定値に揃う結果を得た。このことから，35~65 Hz では CO₂ アークから Ar アークに変化し溶滴を確実に毎パルス離脱させるには，1パルスあたり約 1 mL 以上の Ar を添加する必要があると言える。約 1 mL を下回る場合には添加される Ar が少なすぎるため，Ar アークの溶滴離脱効果を十分に得られないと考えられる。

今回の実験条件範囲では Ar 添加に溶滴移行が同期するためには，1パルスごとの Ar 体積約 1 mL 以上が必要であることを得た。しかし，1パルスごとの Ar 体積は，図7に示したように電磁弁開時間とピーク流量の積であり，例えば電磁弁開時間が極端に短い場合でも，1パルスごとの Ar 体積が 1 mL 以上になるようピーク流量を極めて多く設定すれば溶滴移行は同期する，ということになる。そこで，周波数，平均流量，電磁弁開時間からピーク流量を算出し，実験結果を電磁弁開時間とピーク流量で整理することで，1

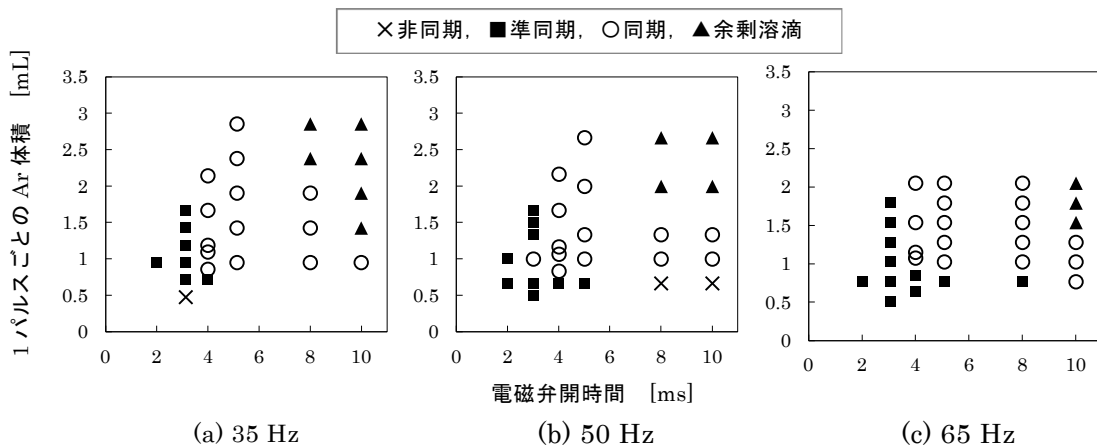


図8 1パルスごとの Ar 体積で整理した Ar 添加条件と溶滴移行形態

同期するために必要な平均流量も変化する理由につ

パルスあたりの Ar 体積が約 1 mL 以上で同期する理

由について考察する。

Ar 添加条件を図 7 のような理想矩形波と仮定すると、ピーク流量 Q_p は平均流量 $Q_{ave.}$ 、周波数 f 、電磁弁開時間 t により以下の式(1)で計算される。

$$Q_p = \frac{Q_{ave.}}{f} \times \frac{1}{t} \quad (1)$$

図 6 の各周波数における実験結果を、式(1)を用いて電磁弁開時間とピーク流量で整理し直したものを図 9 に示す。また、1 パルスごとの Ar 体積が 1 mL の線を合わせて示す。図 9 より、概ね 1 パルスごとの Ar 体積が 1 mL の線に沿って、同期、非同期のプロットが分布している。電磁弁開時間の長時間側(図中右側)に着目すると、電磁弁開時間が長くなるほどより少ないピーク流量で同期するが、余剰溶滴も生じやすくなり、同期するピーク流量の範囲は徐々に狭くなっていくことがわかる。一方、電磁弁開時間の短時間側(図中左側)では、電磁弁開時間が短くなるほど同期に必要なピーク流量は増加し、電磁弁開時間 3 ms 以下ではピーク流量をいくら増加させても同期しなくなる。以上より、Ar 添加に溶滴移行が同期する範囲は電磁弁開時間に応じてあるピーク流量が必要であり、その値は電磁弁開時間とピーク流量の積、つまり 1 パルスごとの Ar 体積が 1 mL 以上になるとき、溶滴移行は同期する。また、1 パルスごとの Ar 体積が 1 mL 以上の条件であっても、電磁弁開時間 3 ms 以下ではピーク流量によらず Ar 添加に溶滴移行が同期せず、電磁弁開時間 10 ms 以上では余剰溶滴にならずに同期するピーク流量の範囲は徐々に狭くなることわかった。

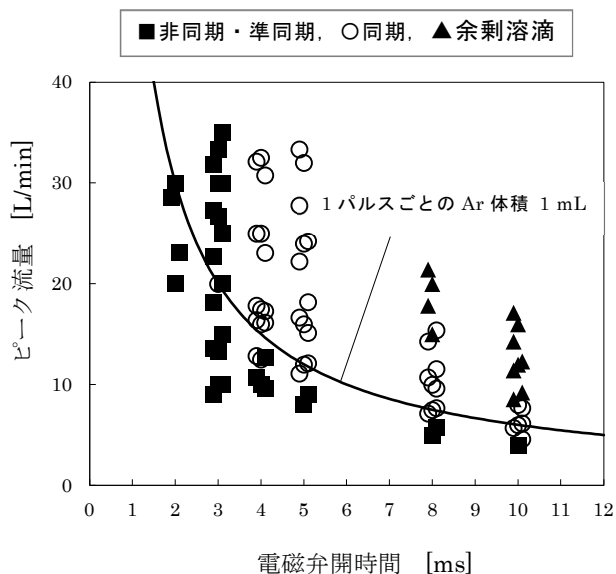


図 9 ピーク流量とパルス開時間で整理した 1 パルスごとの Ar 体積と溶滴移行の関係

(3) ビード外観および溶込み形状

Ar 添加条件を変化させ、ビード外観およびマクロ断面を観察した。図 10 に Ar 添加に溶滴移行が同期する条件(周波数 50 Hz, 平均流量 6 L/min, 電磁弁開時間 5 ms)のビード外観およびマクロ断面を示す。図 10 よりビード外観に着目すると、母材に付着したスパッタ量は少なく、粒の大きさも極めて小さい。ビード外観からも従来法である炭酸ガスシールドアーク溶接法よりも明らかにスパッタは減少しており、マグ溶接法と同量以下程度に減少している。溶込み深さは溶滴移行現象の違いによる差異は見られず、いずれも 4 mm 程度である。溶込み形状は周波数の増加、余剰溶滴の発生により若干フィンガー状に近づく傾向が見られるが、いずれもマグ溶接法ほど極端なフィンガー状にならず、図 10 のような炭酸ガスシールドアーク溶接法のなべ底状に近い形状が得られた。

Ar 添加条件：周波数 50 Hz, 平均流量 6 L/min, 電磁弁開時間 5 ms

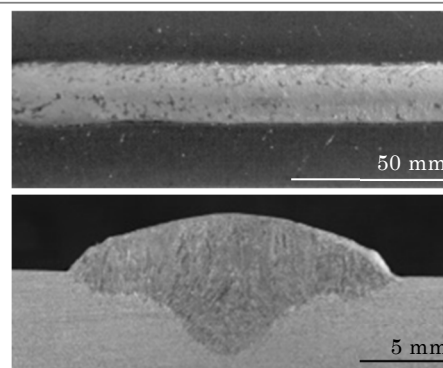


図 10 ビード外観および溶込み形状

(4) スパッタ発生量

図 11 に本溶接法(20~80 Hz)の同期条件におけるスパッタ発生状況について、炭酸ガスシールドアーク溶接法(図中 100% CO₂)およびマグ溶接法(図中 Ar + 20% CO₂)と比較した結果を示す。スパッタ発生量は、鋼板および溶接トーチ全体を銅製の捕集箱で囲み、すべてのスパッタを捕集して測定した。本溶接法では、マグ溶接法未満のスパッタ発生量となることが確認できた。特に、炭酸ガスシールドアーク溶接法に比較して鋼板付着スパッタが激減しており、CO₂ 雰囲気期間中にワイヤ先端に形成された溶滴を、Ar の添加によって適切な周期で過大成長する前に、安定的に離脱させた効果が出ているものと思われる。

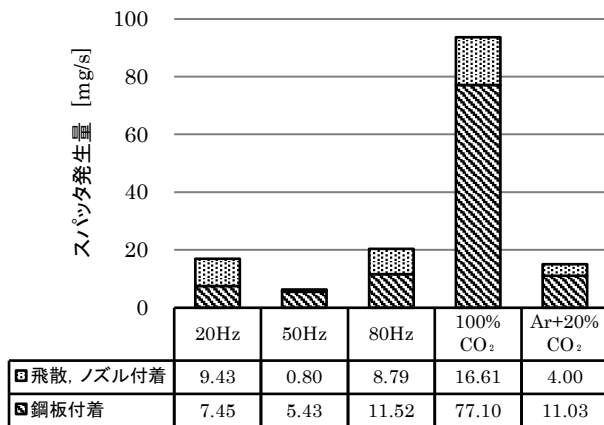


図 11 本溶接法および従来法におけるスパッタ発生量の比較

4. おわりに

炭酸ガスシールドアーク溶接法の低スパッタ化を達成するための新たな手法として、少量の Ar をパルス添加する「パルスガスマグ溶接法」について紹介し、Ar の添加に対する溶滴移行現象と溶滴移行制御のための Ar 添加条件範囲について報告した。以下に得られた結果をまとめる。

- 本溶接法における Ar 使用量は 2~8 L/min であり、マグ溶接法に比べて大幅に低減出来る
- Ar 添加周波数 35~65 Hz において、電磁弁開時間 4 ms 以上、1 パルスごとの Ar 体積約 1 mL 以上で Ar 添加に溶滴移行が同期する
- 本溶接法のスパッタ発生量はマグ溶接法未満に減少する
- 溶込み形状は炭酸ガスシールドアーク溶接法のなべ底状に近く、マグ溶接法のようなフィンガー状にはなりにくい

本研究の実施に際し、終始適切な助言を賜り、細部にわたるご指導を頂きました愛媛大学 小原教授、水口准教授に深く感謝の意を表します。また、二重ノズルをご提供頂きました(株)神戸製鋼所 迎井様、井上様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 池上, 宮内, 山本, 内原: シールドガスによるスパッタ低減について, 溶接学会誌, 第 75 巻, 第 7 号, pp.570-574, 2006.
- 2) 片岡, 池田, 小野, 安田, 平田: 炭酸ガスアーク現象に及ぼすワイヤの REM 添加の影響, 溶接学会論文集, 第 26 巻, 第 1 号, pp.37-41, 2008.
- 3) 上山, 恵良: 電流波形制御によるガスシールドアーク溶接プロセスの進化, 溶接学会誌, 第 81 巻, 第 1 号, pp.5-14, 2012.

- 4) 三田: CO₂ アーク溶接の波形制御方法の検討, 溶接学会論文集, 第 6 巻, 第 2 号, pp.209-214, 1988.
- 5) 恵良, 上山: 電流波形制御による GMA 溶接のスパッタ低減, 溶接学会誌, 第 75 巻, 第 7 号, pp.565-569, 2006.
- 6) 佐藤, 山崎: 炭酸ガスアーク溶接のグロービュール移行制御, 溶接学会誌, 第 84 巻, 第 4 号, pp.239-243, 2015.
- 7) 三田: パルスマグ溶接, 溶接学会誌, 第 67 巻, 第 4 号, pp.316-320, 1998.
- 8) 殖栗, 田畑, 岩田, 水野: パルス MAG 溶接におけるスパッタ発生現象, 溶接学会論文集, 第 4 巻, 第 4 号, p.684-690, 1986.
- 9) 竹内, 洞田: MAG 溶接の溶接作業性と継手性能に及ぼすシールドガス組成の影響, 電気製鋼, 第 51 巻, 第 1 号, pp.34-42, 1980.
- 10) 特許第 6711971 号.
- 11) 小原, 水口, 津山, 藤原: シールドガスの動的組成変化による GMA 溶接現象の制御とその応用, 溶接学会春季全国大会講演概要, 2020 年春季全国大会, pp.166-167, 2020.
- 12) 藤原, 津山, 小原, 水口, 迎井, 井上: パルスシールドガス MAG 溶接法の開発第 1 報—溶滴移行に及ぼす Ar ガス条件の影響—, 溶接学会春季全国大会講演概要, 2020 年春季全国大会, pp.168-169, 2020.
- 13) 藤原, 津山, 小原, 水口, 迎井, 井上: パルスシールドガス MAG 溶接法の開発第 2 報—シールドガス流と溶滴移行の観察—, 溶接学会春季全国大会講演概要, 2020 年春季全国大会, pp.170-171, 2020.
- 14) 山内, 西岡, 小原, 水口, 藤原, 津山: シールドガスの周期的変化を伴うアーク溶接における溶滴移行現象に及ぼす溶接条件の影響, 第 25 回溶接学会四国支部講演大会概要集, pp.11-12, 2020.
- 15) 藤原, 津山, 小原, 水口, 迎井, 井上: パルスシールドガス MAG 溶接法の開発, 第 25 回溶接学会四国支部講演大会概要集, pp.13-14, 2020.