

論文・報告

パルスガス MAG 溶接法の開発（第2報）

Development of pulsed gas MAG welding process (2nd Report)藤原 康平 ^{*1}
FUJIWARA Kohei津山 忠久 ^{*2}
TSUYAMA Tadahisa小原 昌弘 ^{*3}
OHARA Masahiro

シールドガスに 100%炭酸ガスを用いた MAG 溶接法は、その低いコストと高い溶着速度から産業界で広く用いられている一方で、スパッタ量が多いことがデメリットとして挙げられる。MAG 溶接の低スパッタ化には一般的にアルゴンを用いた混合ガス（80%Ar-20%CO₂）を用いるが、アルゴンの使用量が多いためガスコストが非常に高く、また溶込み形状がフィンガー状になりブローホールが発生しやすいという欠点がある。そこで、炭酸ガスを主たるシールドガスとし、少量のアルゴンを溶滴の周辺のみ周期的（パルス状）に添加し規則的な溶滴移行を促すことで、ガスコストを抑えつつ低スパッタ化を実現し、なおかつ良好な溶込み形状が得られるプロセスを開発した。本論文では、溶接法の概要と溶接電流・ワイヤ送給速度およびワイヤ径が周期的アーク雰囲気変化による溶滴移行制御に与える影響について報告する。

キーワード：炭酸ガスシールドアーク溶接法、MAG 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 を用いた炭酸ガスアーク溶接は、電極がアークを発生させると同時に自身が熔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であるといった多くのメリットを有し、産業界で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（例えば 80 % Ar-20 % CO₂）をシールドガスとした MAG（Metal Active Gas）溶接が用いられている¹⁾。また、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により極めてスパッタ量の少ない溶接が可能になっており^{2,7)}、近年ではワイヤ送給制御も組み合わせた手法も実用化されている^{8,9)}。炭酸ガスアーク溶接においても、特殊なパルス波形の適用による溶滴移行制御法をベースとして埋もれアークを応用する手法¹⁰⁾やワイヤ送給制御を組み合わせた手法^{11,12)}、また REM（Rare Earth Metal）元素を含む特殊なワイヤを用いて DCEN（棒マイナス）で溶接する手法¹³⁾など、低スパッタ化を目指したプロセス開発の報告は多岐にわたる。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や特殊な溶接材料を必要とすることから導入のハードルは低くない。また、MAG 溶接時の Ar と CO₂ の混合ガスのコストは

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¹⁴⁾。そこで、設備コストやガスコストを抑えつつ低スパッタ化が可能な新たなガスシールドアーク溶接法が望まれている。

炭酸ガスアーク溶接法におけるスパッタ発生主な原因は、溶滴下に発生する緊縮したアークによる強いアーク力が溶滴の離脱を妨げ、さらに離脱時に飛散するためである^{5,15)}。前述した低スパッタ化技術はこの溶滴に働くアーク力を溶滴離脱時に合わせて弱め、強いアーク力が生じないアーク形態にすることで低スパッタ化を実現しているものが多い。つまり炭酸ガスアーク溶接法の低スパッタ化を達成するために重要な点は、溶滴を大きく成長させず、ワイヤ径程度の大きさで周期的に離脱させることである。我々はこれを達成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 MAG 溶接(Pulsed Gas MAG Welding)」と名付けた。具体的には、二重ノズルを用いて炭酸ガス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ガス組成を周期的に変化させ、アーク形態変化を利用して溶滴移行制御を行う溶接法である¹⁶⁻¹⁸⁾。図 1 に溶滴移行の様子を、図 2 に本プロセスの模式図を示す。なお図 1 は Ar 添加用の電磁弁を ON にした瞬間を 0 ms とした。本プロセスは、二重ノズルを用いてアウターノズルから CO₂ を流し、インナーノズルから Ar を添加することで、溶滴を成長させるための CO₂ 主体のアーク期間（図 1 の 4, 12, 14 ms）と溶滴を離脱させるための Ar 主体のアーク期間（図 1 の 6, 8, 10 ms）を、炭酸ガ

*1 川田工業株式会社橋梁事業部生産統括部生産開発室

*2 川田工業株式会社橋梁事業部生産統括部生産開発室 室長

*3 川田工業株式会社橋梁事業部生産統括部 顧問

スアーク溶接の自然溶滴離脱周期よりも早い周期で繰り返すことで溶滴移行制御を行う。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力によって飛散することが防がれ、スパッタが減少する。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 80 % Ar - 20 % CO₂ 混合ガスによる MAG 溶接と比較するとガスコスト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点や、良好な溶込み形状が得られることが報告されている¹⁷⁾。

本プロセスにおけるこれまでの研究において、溶滴移行制御を可能にするための Ar 添加条件 (Ar 添加周波数、電磁弁開時間、Ar 添加流量) は実験的に解明され、第一報にて報告した¹⁹⁾。しかし既報においては、溶接電流およびワイヤ送給速度、あるいはワイヤ径が一定条件下における検討結果である。実施工においては、ワークの材質、板厚、溶接姿勢などの状況や環境に応じて適切な条件を選択して溶接する必要があるため、本プロセスの適用範囲を広げることを目的に、本研究では $\phi 1.2$ mm, $\phi 1.4$ mm のソリッドワイヤにて溶接電流 235~350 A (アーク雰囲気変化に伴う電位傾度変化によりパルス状に変動する¹⁷⁾ため、以降は平均値を溶接電流として表記

する)を対象とし、溶滴移行制御が可能な Ar 添加条件を実験的に調査した²⁰⁾。

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。用いた電磁弁は最高動作頻度が 400 Hz、オン・オフの応答時間はそれぞれ 0.5 ms および 1 ms、寿命は 10 億回の仕様のものである。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。それぞれのガスの添加条件を表 1 に示す。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 $\phi 1.2$, 1.4 mm の軟鋼ソリッドワイヤ JIS Z 3312 YGW11 を用いた。溶接電流、ワイヤ送給速度、アーク電圧、溶接速度は表 2 に示す条件で実験を行った。CTWD (コンタクトチップ先端-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行った。

Ar 添加条件が溶滴移行におよぼす影響を観察するため、Ar の周波数、電磁弁開時間、平均流量を変化させ、実験を行った。Ar の添加はパルス発振器から出力される矩形波信号により電磁弁の開閉を制御し、周波数、電磁弁開時間を設定した。また、Ar および CO₂ の平均流量はマスフローメータにより設定した。CO₂ の流量は 25 L/min 一定で実験した。溶滴移行は溶接中のアーク近傍を高速度カメラ (1 000 fps, 露光時間 50 μ s) で撮影して観察した。バンドパスフィルタは 960 nm (半値幅 10 nm) のものを用いた。高速度カメラの撮影と同期させ、電磁弁パルス信号、溶接電流、アーク電圧波形を記録した。

なお、本溶接法では CO₂ と Ar の 2 種類のガスを用いるが、以降に表記する「周波数」、「平均流量」および「電磁弁開時間」は表記の無い限りいずれも Ar 添加条件のことを指す。

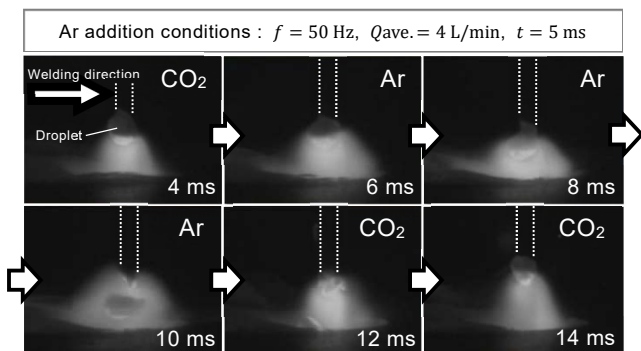


図1 高速度カメラで撮影した溶滴移行の様子

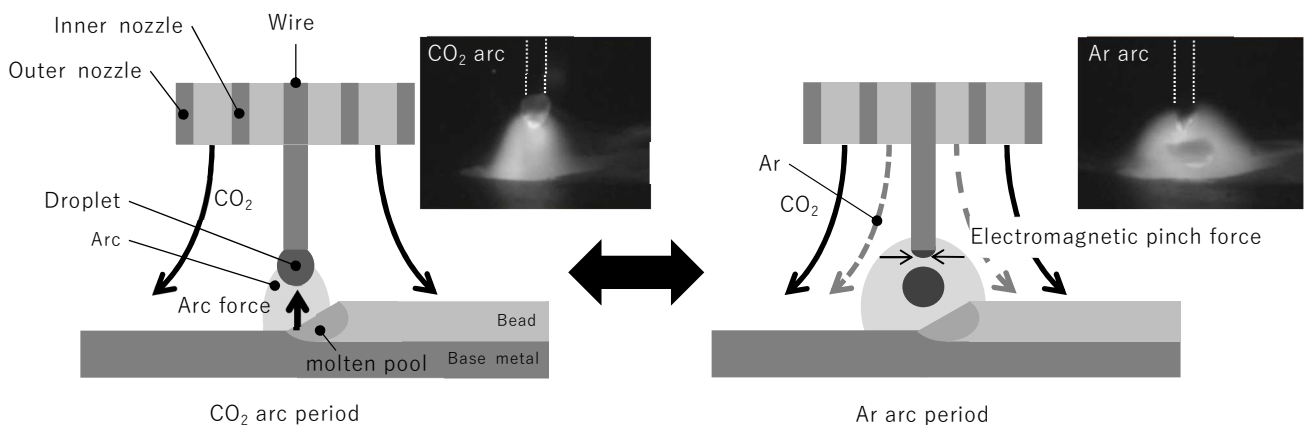


図2 溶滴移行およびガス流の模式図

表 1 ガス添加条件

| | | |
|-----------------|-----------------------------------|-------------|
| Ar | Frequency f | 20 ~ 100 Hz |
| | Flow rate (average) $Q_{ave.}$ | 4 L/min |
| | Valve opening time t | 5 ms |
| CO ₂ | Flow rate Q | 25 L/min |

表 2 溶接条件一覧

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Outer nozzle | Outer diameter: 22 mm |
| | Inner diameter: 16 mm |
| Inner nozzle | Outer diameter: 11 mm |
| | Inner diameter: 7 mm |
| Wire | JIS Z 3312 YGW11 ϕ 1.2, 1.4 mm |
| Base metal | SS400 |
| Welding current | ϕ 1.2: 235 ~ 325 A |
| | ϕ 1.4: 280 ~ 350 A |
| Wire feeding speed | ϕ 1.2: 9.0 ~ 14.5 m/min |
| | ϕ 1.4: 7.1 ~ 9.8 m/min |
| Arc voltage | 28 ~ 42 V |
| Welding speed | 5 mm/s (30 cm/min) |
| CTWD | 25 mm |

3. 実験結果と考察

Ar 添加のパラメータとして、平均流量、電磁弁開時間をそれぞれ 4 L/min, 5 ms で固定し、周波数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、「準同期」、「同期」および「余剰溶滴」の 3 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 1~3 回に 1 回不規則に溶滴が移行するものを「準同期」、Ar 添加 1 回に溶滴が 1 回規則的に移行するものを「同期」、Ar 添加 1 回に溶滴が 1 回規則的に移行するが、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。基本的に、いわゆる 1 パルス 1 ドロップとなる「同期」が本プロセスの目指す溶滴移行形態とし、議論するものとする。

まず ϕ 1.2 mm ワイヤにおいて、溶接電流を 235~325 A に変化させて実験した結果を図 3 に示す。なお横軸はそれぞれの溶接電流条件に対応したワイヤ送給速度 (235 A: 9 m/min, 280 A: 11.9 m/min, 325 A: 14.5 m/min) で整理した。図 3 より、同期範囲はある程度の範囲をもって分布しており、同期範囲を外れると準同期あるいは

余剰溶滴となることが分かる。235 A では 20~40 Hz, 280 A では 40~60 Hz 付近の比較的広範囲で同期するのに対し、325 A では 70 Hz 付近の比較的狭い範囲の周波数でないと同期できない。また、余剰溶滴範囲はワイヤ送給速度の上昇に応じて徐々に高周波数側にシフトする。なおこの余剰溶滴範囲の広がり、一般的に知られている MIG・MAG 溶接において高電流になるほどスプレー移行になりやすいのと同じ原理と考えられ、溶接電流の上昇に伴って電磁ピンチ力の働きが強まり、溶滴移行時に小粒の溶滴あるいは柱状の溶滴が生じやすくなるためと考えられる。一方、比較的周波数の高い範囲では準同期となる範囲が広く分布している。この範囲ではまだ溶滴が小さい状態で Ar 添加によるアーク雰囲気変化が生じており、その段階ではワイヤ端から溶滴は離脱できずに次の Ar 添加を待つて溶滴が移行する、いわゆる 2 パルス 1 ドロップとなる現象が散見された。

以上より、溶接電流（ワイヤ送給速度）の増加に伴い周波数を増加させる必要がある右肩上がりの同期範囲分布は、溶接電流およびワイヤ送給速度の増加に応じて早くなる溶滴の成長速度に合わせ、適切なタイミングで Ar を添加する必要があることを示していると考えられる。言い換えると、溶滴体積が過小であるタイミングで Ar が添加されたとしても、溶滴は離脱するための駆動力が足りず、同期できないと考えられる。すなわち、溶滴がワイヤ先端から離脱するために適した体積が存在することを示唆している。

そこで、図 3 において同期範囲分布の中央付近にある 280 A, 50 Hz を基準とし、この時の溶滴体積を算出する。溶滴体積の計算は、単位時間当たりのワイヤ送給体積を周波数で割ることで算出するものとし、以下の式(1)を用いた。なおワイヤ送給速度 v_f , ワイヤ径 d , Ar 添加周波数 f , 溶滴体積 V である。

$$v_f \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \pi \div f = V \quad \cdots \text{式(1)}$$

ワイヤ送給速度 11.9 m/min, ワイヤ径 ϕ 1.2 mm, 周波数 50 Hz から溶滴体積を計算すると 4.5 mm³ となる。式(1)を用いて溶滴体積 4.5 mm³ に相当するワイヤ送給速度と Ar 添加周波数の関係を求め、図 3 上に破線で示す。溶滴体積 4.5 mm³ 線は、高電流域ではやや同期範囲分布の下方に寄るものの、概ね分布の中央付近を通過している。よって同期条件の特徴を捉えた線と考えることができ、本実験条件においては溶滴体積が 4.5 mm³ 程度となるように条件を選択することで同期が得られることが示された。また実用上においても、この 4.5 mm³ 線を基準とすることで設定すべきワイヤ送給速度と周波数の関係が得られたことになる。以上より、 ϕ 1.2 mm ワイヤにおいては 4.5 mm³ 線付近を基準に同期範囲が分布し

ていることがわかり、このことからいわゆる 1 パルス 1 ドロップになるための溶滴体積の存在が示唆された。

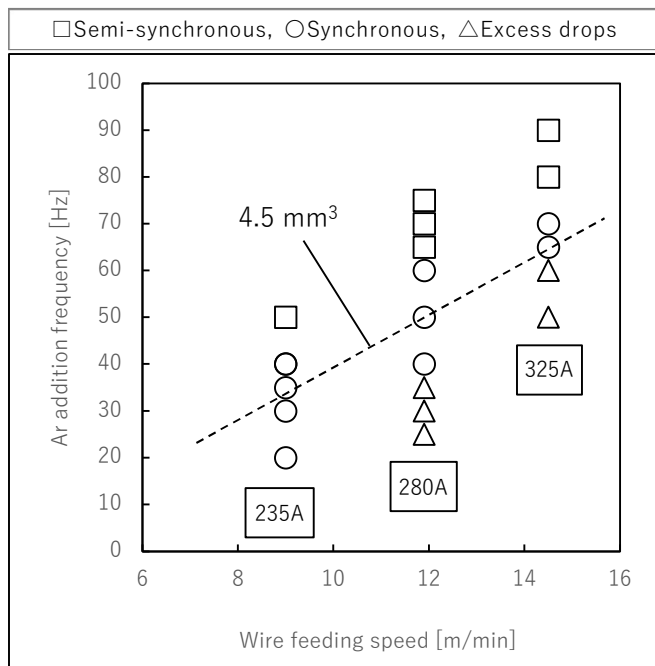


図3 φ1.2mm ワイヤにおける溶滴移行の分布
(Ar 添加条件：4L/min, 5 ms)

一方、図4に示すのはφ1.4 mm ワイヤにて溶接電流を280~350 Aに変化させて実験した結果である。図4より、同期範囲が比較的広く分布していることから、本プロセスはφ1.4 mm ワイヤにおいても溶滴移行制御が可能であることが示された。各溶滴移行の分布についてφ1.2 mm ワイヤの結果である図3と見比べると、それぞれの分布範囲の大小は異なるものの、同期範囲が右肩上がりに分布している傾向は同じであり、ワイヤ送給速度に対して周波数を適切に設定することで同期が得られることが分かる。一方、図3の結果とは対照的に、図4においては低電流側である280 Aの方が同期範囲が狭くなっている。これはφ1.2 mm ワイヤの時よりもワイヤ径に対して溶接電流が相対的に低いため電流密度が低下し、溶滴に働く電磁ピンチ力が小さくなり溶滴が離脱しにくいためと考えられる。同様の理由から小さな溶滴が生じづらいため、余剰溶滴の範囲が図3のφ1.2 mm ワイヤの時よりも狭くなっていると推察する。

φ1.4 mm ワイヤにおいても溶滴が離脱するために適した溶滴体積は存在すると考えられる。したがって、前述した溶滴体積4.5 mm³線を図4にも併せて示す。図4より、4.5 mm³線は325, 350 Aの条件においては同期範囲内を通過しているものの分布の中央付近を通っておらず、さらに280 Aにおいては準同期となっていることから、同期分布の特徴を捉えた線であるとは言い難い。以上のことから、図3と図4より両者の同期範囲は似た

傾向を示したものの、ワイヤ径が変化した場合には溶滴離脱に適した溶滴体積が変化することが示唆された。また、図3の結果と比較して同期範囲が比較的広いことから、ワイヤ径の変化は溶滴離脱に作用する駆動力に変化をもたらすことが示唆された。

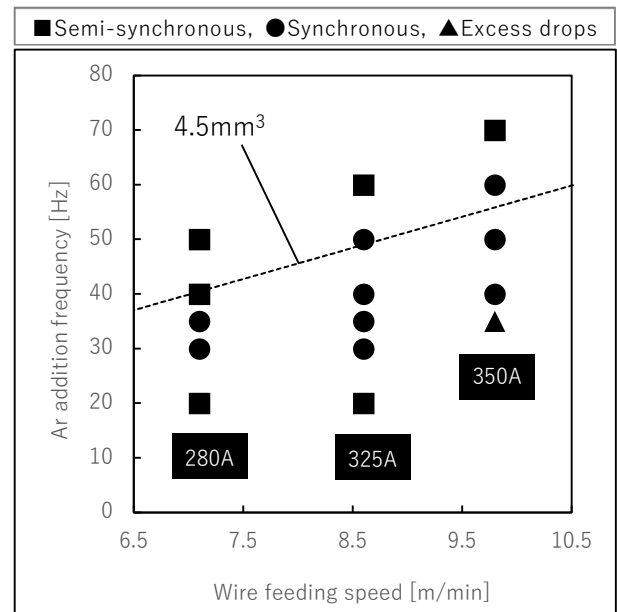


図4 φ1.4mm ワイヤにおける溶滴移行の分布
(Ar 添加条件：4L/min, 5 ms)

これらの結果から、溶接電流およびワイヤ径の変化が溶滴離脱のための駆動力に与える影響について考察する。溶滴に作用する力について、荻野ら²¹⁾は表面張力、電磁気力、アーク力、プラズマ気流によるせん断力の4種類に大きく分類して考察している。これらのうち電磁気力は、溶滴内を通り過ぎる電流により発生し、ワイヤ・溶滴を絞り込むように作用する駆動力とされている²²⁾。つまり、溶接電流およびワイヤ径の変化、すなわち電流密度の変化はこの溶滴に作用する電磁気力へ大きく影響を及ぼすことが推測される。また、表面張力による保持力と離脱方向に作用する溶滴の重量は、ワイヤ先端に形成される溶滴の大きさ（体積）に影響される²³⁾ことから、それらの代表値として溶滴体積を用いることが妥当であると思われる。そこで、各ワイヤ径の実験結果を電流密度および溶滴体積の観点から整理しなおして考察する。

図5は、図3および図4の結果を電流密度と溶滴体積で溶滴移行分布をまとめて示した結果である。なお電流密度は溶接電流とワイヤ径から算出した値であり、溶滴体積は式(1)を用いて算出した。

図5より各ワイヤ径のプロットを見比べると、φ1.4 mm ワイヤはφ1.2 mm ワイヤに比べ溶接電流は高いが、電流密度は低くなっており、約230 A/mm²以下に分布して

いることが分かる。一方 $\phi 1.2$ mm ワイヤは 325 A において約 290 A/mm^2 と、同電流値の $\phi 1.4$ mm ワイヤの約 1.4 倍ほど電流密度が高い。このように電流密度で整理することで、各ワイヤ径と溶接電流の実験結果を総合的に評価した。各ワイヤ径のプロット、特に同期範囲においては広い範囲で重なって分布していることから、Ar 添加に溶滴移行が同期するか否かは溶滴体積と電流密度に強く影響されると言える。同期範囲における溶滴体積の下限に着目すると、電流密度によらず、およそ 4 mm^3 強程度であることが読み取れる。このことから、前述した溶滴体積 4.5 mm^3 線は、本実験条件において同期するために必要な溶滴体積の下限付近であったことがこの図から示唆された。

次に図 5 における(A)~(C)の範囲の溶滴移行形態について考察する。図 5 (A)は比較的溶滴体積が大きいかつ低電流密度の範囲であり、溶滴移行は準同期を示す。この範囲で観察された溶滴移行の模式図を図 6 に、高速度カメラの画像を図 7 に示す。この範囲はワイヤ送給速度が遅いため溶滴の成長が遅く、かつ Ar 添加周波数が低い条件である。(a) CO_2 主体のアーク期間で溶滴が成長しはじめるが、(b) Ar 主体のアーク期間に切り替わったタイミングではまだ離脱に至る大きさまで溶滴が成長で

きていない。その後再度(c) CO_2 主体のアーク期間に戻り溶滴は徐々に大きく成長し、やがてその自重をアーク力や表面張力で支えきれなくなることで(d) CO_2 主体のアーク期間中に反発移行状にスパッタ発生を伴って溶滴が離脱してしまう。まもなく(e)Ar 主体のアーク期間に切り替わるが、成長した溶滴は直前に離脱しているためまだ次の溶滴が成長できていない。その後は再び(a) CO_2 主体のアーク期間に戻り、溶滴移行サイクルが繰り返される。なお、ここで解説した溶滴移行形態は必ずしも毎回ではなく、図中(c)から(d)で溶滴離脱しなかった場合、(e)の Ar 添加に合わせて溶滴移行が生じる場合も不規則に見られた。以上のように溶滴の成長速度とアーク変化のタイミングが適切でないため溶滴移行サイクルが乱れ、いわゆる 1 パルス 1 ドロップとならずに準同期となる。

図 5 (B)は比較的溶滴体積が大きいかつ高電流密度の範囲であり、溶滴移行は余剰溶滴を示す。この範囲で観察された溶滴移行の模式図を図 8 に、高速度カメラの画像を図 9 に示す。この範囲では CO_2 主体のアーク期間に成長した溶滴は Ar 主体のアークに変化することで溶滴は離脱するが、その後に小粒の溶滴あるいは柱状の溶滴が余分に移行する。これは高電流密度によるスプレー移行の生じやすさが顕著に表れた結果と考えられ、特に

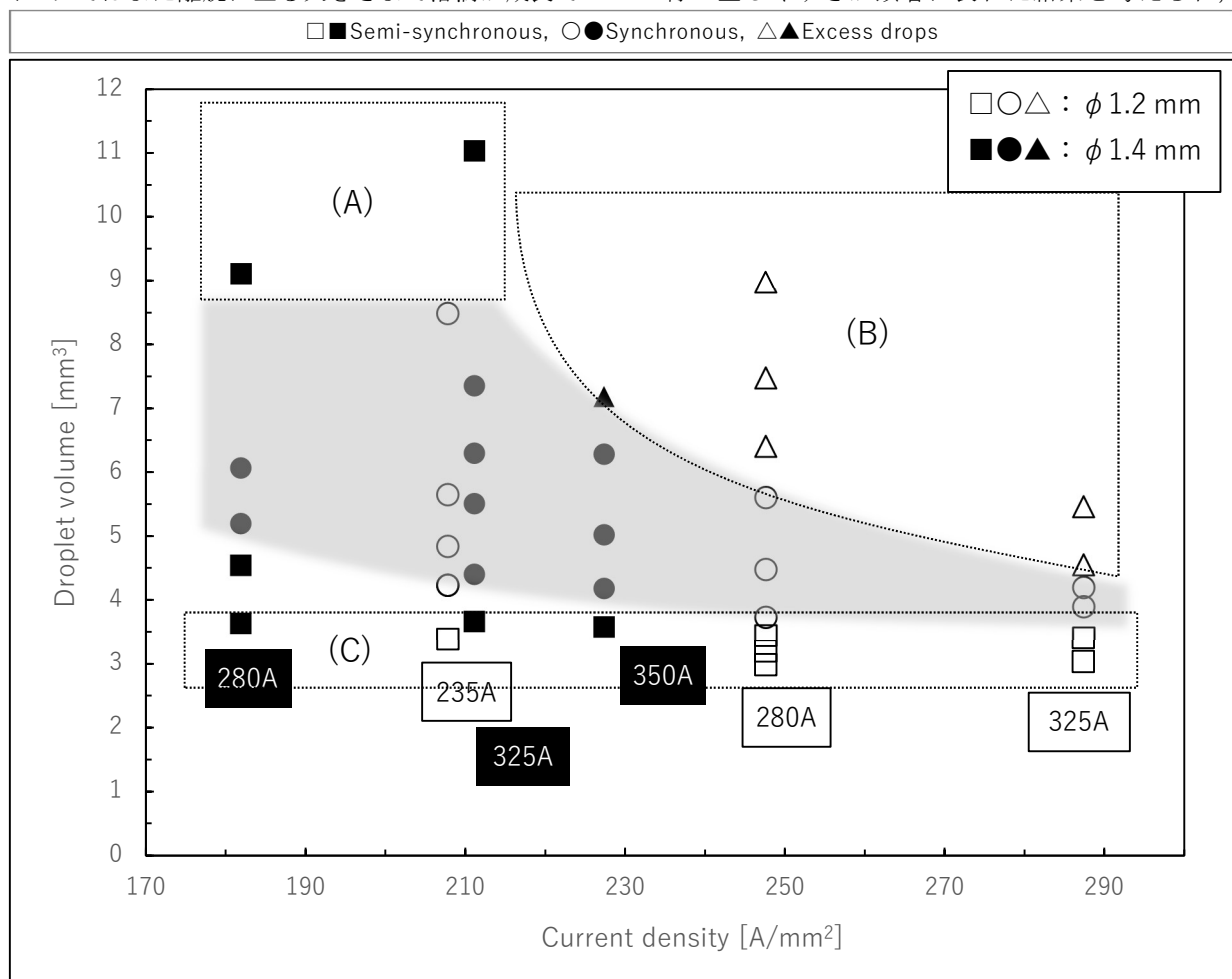


図 5 電流密度および溶滴体積で整理した $\phi 1.2$, 1.4 mm ワイヤにおける溶滴移行の分布

290 A/mm² 付近では約 5 mm³ 以上の溶滴体積になると余剰溶滴が生じる。なお余剰溶滴は約 230 A/mm² から生じ始めることから、本プロセスにおいてはこの付近の電流密度が臨界電流密度に相当すると考えられる。通常の MAG 溶接（80 % Ar–20 % CO₂）においても ϕ 1.2 mm ワイヤにおける臨界電流密度は 220~250 A/mm²（250~280 A 相当）となるため、およそ同じ値となる。

図 5 (C)は比較的溶滴体積が小さい範囲であり、溶滴移行は準同期を示す。この範囲で観察された溶滴移行の模式図を図 10 に、高速度カメラの画像を図 11 に示す。

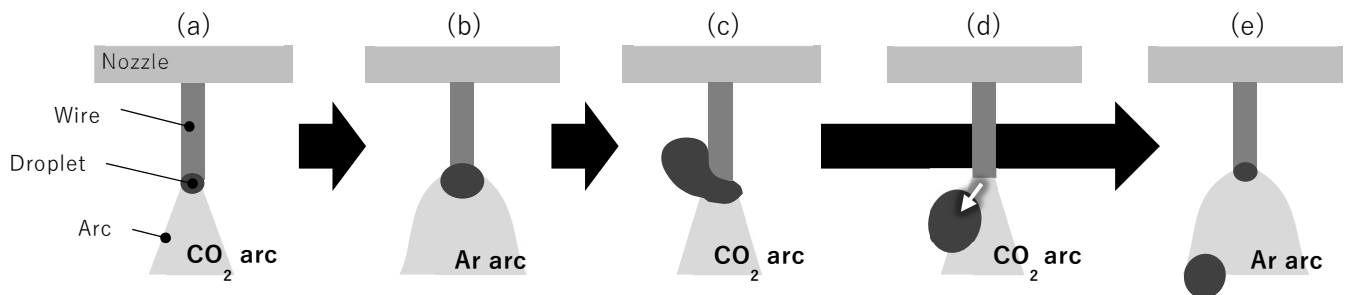


図 6 図 5(A)における溶滴移行の挙動

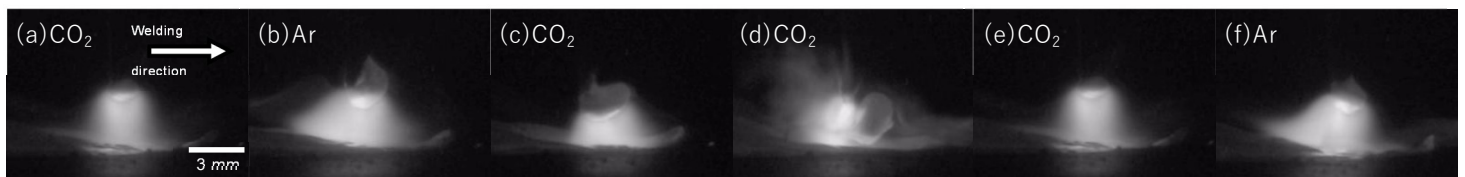


図 7 図 5(A)における溶滴移行の様子

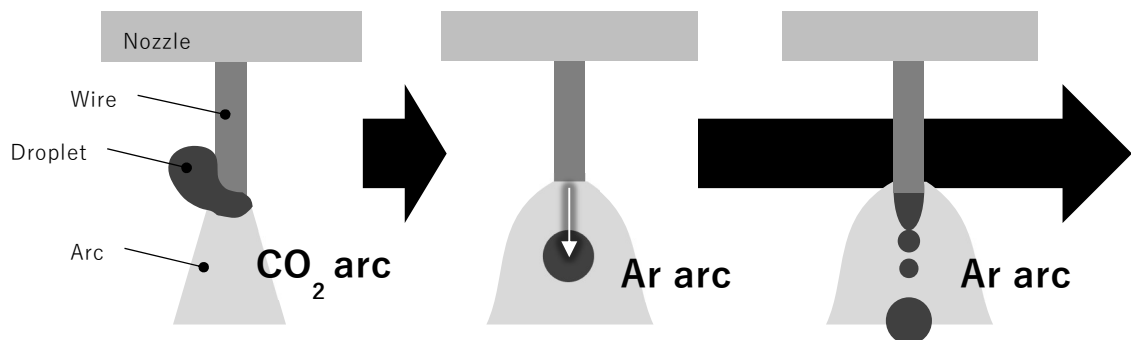


図 8 図 5(B)における溶滴移行の挙動

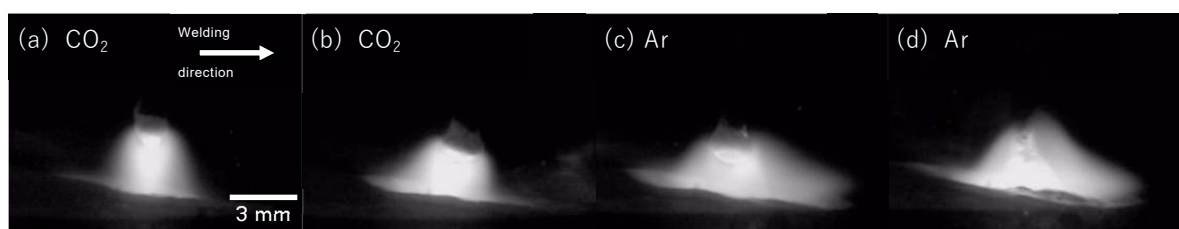


図 9 図 5(B)における溶滴移行の様子

図 11 より、(a)CO₂ 主体のアーク期間中に強いアーク力で持ち上げられた溶滴は、(b)Ar 主体のアーク期間でその支えを失い垂下しようとするが十分に垂下できず、離脱する前に再び(c)CO₂ 主体のアーク期間に戻り、強いアーク力が再度溶滴に作用することでワイヤにまとわりつくように持ち上げられてしまう。(d)(e)次の Ar 主体のアーク期間中には溶滴は十分成長しているため、垂下からくびれの生成が間に合うことで離脱に至る結果、いわゆる 2 パルス 1 ドロップとなる。

図 5 (C)の分布範囲は溶滴体積約 4 mm³ 以下の範囲に分布しており、言い換えれば広い電流密度範囲において

同期するための溶滴体積の下限値が約 4 mm^3 一定となっている。電流密度の低い 230 A/mm^2 以下の範囲では電磁ピンチ力の働きが弱く、小さな溶滴では離脱が困難であると考えられる。一方、 230 A/mm^2 以上の範囲では前述した臨界電流密度を超えた範囲であるため、電磁ピンチ力は比較的強い範囲であると考えられるが、それでも同期するための溶滴体積の下限値は 230 A/mm^2 以下の範囲と同じ約 4 mm^3 一定である。

これは周期的に CO_2 主体のアーク期間と Ar 主体のアーク期間を繰り返すパルスガス MAG 特有の現象と考えられる。電磁ピンチ力を溶滴離脱のために有効に作用させるためには、ワイヤ先端から溶滴が垂下する際にくびれを生成し、電流経路を集中させ電流密度を局所的に増加させる必要がある。しかし溶滴体積が小さい場合は、溶滴の曲率が大きい表面張力が大きく、加えて自重が小さいことが、垂下にかかる動作時間を長引かせるため、Ar 主体のアーク期間中にくびれを生成することが困難である。そのため電流密度が高い場合であっても電磁ピンチ力を溶滴離脱に有効に作用させることができない。よって、電流密度によらずある一定の溶滴体積以上でないと同期できないと考えられる。なお、図5より 180 A/mm^2 における同期のための溶滴体積下限値は 5 mm^3 となっている。これは上記で考察した条件範囲よりもさらに電流密度が低い範囲のため、電磁ピンチ力不足が顕著になり溶滴離脱に作用する駆動力が低下することで、さらに大きな溶滴体積が必要となった結果、その下限値が上昇したと考えられる。

今回の実験条件では電磁弁開時間を 5 ms 一定として実験したが、前報¹⁷⁾より電磁弁開時間を変化させることで溶滴移行形態は変化することが分かっている。電磁弁

開時間を長時間側に变化させると Ar 主体のアーク期間の時間比率が高まるため、より小さな溶滴においても Ar 主体のアーク期間の溶滴垂下およびくびれ生成が間に合い、同期のための最小溶滴体積は 4 mm^3 よりも小さくなる可能性がある。より小さな溶滴を高周波数で移行させることができれば、さらなるスパッタの低減に寄与する可能性があるため、今後の研究課題としたい。

4. おわりに

本研究では、パルスガス MAG 溶接法において Ar の添加条件を変化させ、ワイヤ径および溶接電流が溶滴移行に与える影響を調査した。以下に得られた結果をまとめる。

- パルスガス MAG 溶接の溶滴移行形態は、ワイヤ端での電流密度と溶滴体積（Ar 添加 1 周期あたりのワイヤ送給体積）で統一的に整理できた。
- 今回の溶接条件範囲では、Ar 添加に同期して溶滴離脱が完了するためには、広い電流密度範囲において最低 4 mm^3 程度の溶滴体積が必要であった。
- 電流密度が低すぎる場合（約 180 A/mm^2 ）、電磁ピンチ力が低下するため最小溶滴体積は増加する傾向がみられた。
- 一方、電流密度が高い場合、溶滴離脱後に余剰溶滴を生じさせやすくなるため、溶滴体積が大きい場合における同期条件範囲が狭くなった。
- ワイヤ径、溶接電流が異なる溶接条件においても Ar 添加条件を適正にすることで、1 パルス 1 ドロップの制御された溶滴移行とすることができた。

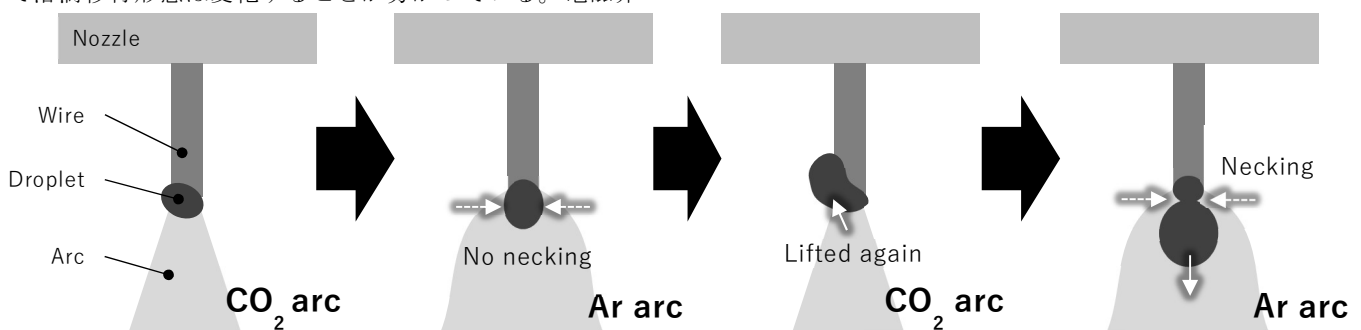


図 10 図 5(C)における溶滴移行の挙動

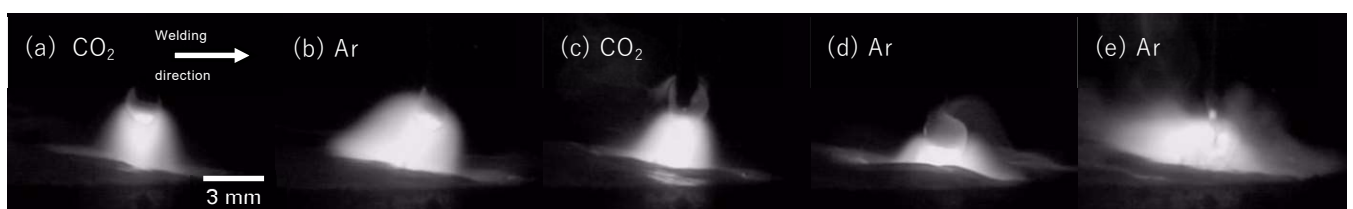


図 11 図 5(C)における溶滴移行の様子

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, 75-7, pp.570-574, 2006.
- 2) 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, 81-1, pp.5-15, 2012.
- 3) 三田: CO₂ アーク溶接の波形制御方法の検討-CO₂ アーク溶接のスパッタ低減に関する研究(第1報)-, 溶接学会論文集, 6-2, pp.209-214, 1988.
- 4) 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, 75-7, pp.565-569, 2006.
- 5) 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, 84-4, pp.239-243, 2015.
- 6) 三田: パルス MAG 溶接, 溶接学会誌, 67-4, pp.316-320, 1998.
- 7) 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, 4-4, pp.684-690, 1986.
- 8) K. Himmelbauer: The CMT process -A revolution in welding technology, IIW Doc XII-1845-05, pp.20-27, 2005.
- 9) C. G. Pickin, K. Young: Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminum alloy, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.11, No.5, pp.583-585, 2006.
- 10) 馬場, 古免, 五十嵐, 門田, 恵良, 寺崎, 田中: 太径 $\phi 1.6\text{mm}$ ワイヤを用いた高電流埋もれアーク溶接の電圧振幅制御による安定化, 溶接学会論文集, 39-1, pp.75-86, 2021.
- 11) 北村, 山崎, 中司, 小川, 井上, 橋本: 短絡移行を前提としないワイヤ送給制御プロセスの開発, 溶接学会全国大会講演概要, No.111, pp.282-283, 2022.
- 12) 北村, 山崎, 中司, 小川, 井上, 橋本: 短絡移行を前提としないワイヤ送給制御プロセス AXELARCTM の開発, 神戸製鋼技報, Vol.72, No.1, pp.2-8, 2023.
- 13) 片岡, 池田, 小野, 安田, 平井: 炭酸ガスアーク現象に及ぼすワイヤへの REM 添加の影響, 溶接学会論文集, 26-1, pp.37-41, 2008.
- 14) 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, 51-1, pp.34-42, 1980.
- 15) 安藤, 長谷川: 溶接アーク現象《増補版》, 産報出版, 6 版, 1976.
- 16) 小原, 水口, 宮田, 津山, 藤原: アーク雰囲気ガス組成の動的変化を用いた新しい溶滴移行制御方法について-パルスガス MAG 溶接に関する研究-, 溶接学会論文集, 38-4, pp.363-378, 2020.
- 17) 藤原, 津山, 小原, 水口, 向井, 井上: 周期的 Ar ガス添加による炭酸ガスシールドアーク溶接の溶滴移行制御に関する実験的研究-パルスガス MAG 溶接に関する研究-, 溶接学会論文集, 38-4, pp.379-391, 2020.
- 18) K. FUJIWARA, T. TSUYAMA, M. OHARA, T. MIZUGUCHI, N. MUKAI and Y. INOUE: Influence of welding current on metal transfer modes in Pulsed Gas MAG welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 41-2, pp.6-10, 2023.
- 19) 藤原, 津山: パルスガスマグ溶接法の開発, 川田技報 Vol.40, 2021.
- 20) 藤原, 津山, 荻野, 小原, 水口: 周期的 Ar ガス添加による炭酸ガスアーク溶接における溶接電流およびワイヤ径が溶滴移行に与える影響の実験的研究-パルスガス MAG 溶接に関する研究-, 溶接学会論文集, 43-2, pp.87-94, 2025.
- 21) 荻野, 平田: アークプラズマを考慮した GMA 溶滴移行現象のシミュレーション, 溶接学会論文集, 33-1, pp.1-12, 2015.
- 22) 溶接学会溶接法研究委員会: 溶接アーク現象, 産報出版.
- 23) 平田: ミグ/マグ溶接, 溶接学会誌, 77, No.4, pp.296-303, 2008.