

動的なシールドガス組成変化を用いた アーク溶接現象の制御とその応用

Controlling arc welding phenomena by dynamic modification of shielding gas composition

愛媛大学
Ehime University

客員教授

小原 昌弘
OHARA Masahiro



1. はじめに

「シールドガス組成を動的に変化させてアーク溶接現象を制御する」と言われてもピンとこない方が多いのではないだろうか。アーク溶接時に用いられるシールドガスは、その名の通り溶接金属を大気から遮蔽し、大気との反応を防ぐことを目的として使用されるもので、常識的には溶接中にガスの種類など変えるものではないからである。しかし、一方で、シールドガスとして用いられるガスそのものがプラズマ化してアークを形成することから、アーク溶接現象は用いられるガスの種類に強く影響を受け、炭酸ガスとアルゴン系のガスでは、アークの発生状況や溶接ワイヤの溶け方が大きく違うことは良く知られているところである。

筆者は、このガス組成がアーク溶接現象に大きく影響する点に着目して、シールドガスを単に大気を遮断するだけの目的ではなく、溶接中に必要なタイミングで必要な組成に変化させることによって、溶接現象をコントロールすることができないだろうかという観点からこれまで研究を進めてきた。その概略を紹介する。

2. シールドガスがアーク溶接現象に及ぼす影響

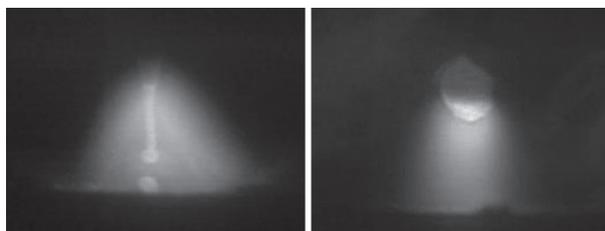
シールドガスとしては炭酸ガスとアルゴン系のガスが多く使われているが、まず初めに代表的なこの2種類のガスにおけるアーク溶接現象の違いを見ておこう。

図1はシールドガスがアルゴンガス主体 (Ar+10% CO₂) の場合と炭酸ガス (100% CO₂) の場合におけるアークの発生形態と溶接ワイヤの溶融状況について見たものである (比較のためにアーク長がほぼ一定となる様に溶接条件を設定したもの)。シールドガスが Ar+10%CO₂ の場合は、アークはワイヤ先端からフレア状に広がって発生し、ワイヤは細長い液柱状に溶融して先端で小さな液滴となり高速度で離脱していく (ストリーミング移行と呼ばれる) のに対して、100% CO₂ になると、ワイヤ先端に大きな溶滴が保持され、アークはその溶滴下面から母材に向けて広がらずに生じていることが判る。これ

は、単原子分子である Ar に対して CO₂ は多原子分子であり、プラズマの温度まで加熱されると CO₂ → CO+O, CO → C+O への乖離が生じ、その反応が吸熱反応であるため、熱ロスを最小限にしようとする熱的ピンチ効果が強く働くからである。その結果、緊縮したアークが最短距離で発生しようとして溶滴下面からアークが生じ、溶滴の離脱を妨げるようになる (反発移行と呼ばれる)。大きく成長した溶滴は、アークによって保持しきれなくなると不安定に離脱し、その一部が弾き飛ばされ、大粒のスパッタとなる。

一方、アルゴン主体の場合、アークの広がりに伴う上下部での電流密度差によって、アークの上下に圧力差が生じ、下向きにプラズマ気流が生じる。このプラズマ気流によって、溶融したワイヤは液柱状に引き伸ばされ、その先端で小滴となり高速で離脱する現象が起こる。高温の溶滴が溶接部中央に集中して投入される結果、溶け込み形状は中央部が深く、周辺部が浅くなるフィンガー状と呼ばれる形状になりやすい特徴があり、多層溶接では融合不良欠陥の発生に注意が必要となる。

以上のように、ガス固有の物性の違いから、シールドガス組成によってアーク溶接現象は強く影響を受けるのである。



(a) Ar+10% CO₂ (b) 100% CO₂
図1 シールドガスの種類によるアークの発生状況と溶接ワイヤの溶融状況の違い (溶接電流 280A, アーク長 4mm)

3. シールドガス組成の動的変化

一言で「動的にガス組成を変化させる」と言っても、どの程度の組成範囲を、どれ位の速さで変化させようのであろうか。Ar と CO₂ の混合比率を変化させた場合に

ついて調べた結果を図2に示す。この結果は、溶接トーチ先端のノズル部分を同心円状に二重にし、外側のノズルにCO₂ガスを通常の意味合いでのシールドガスとして流し、内側のノズルからミリ秒(ms)のオーダーでバルブ開閉が可能な高速電磁弁を介して図3のようにパルス状に純Arガスを噴射した場合のものである。また、図2に示したアーク雰囲気中のCO₂濃度は、事前に様々なCO₂濃度のArとCO₂の混合ガスで溶接を行ってCO₂濃度と電位傾度(アーク柱の電圧÷アーク長)の関係を求めておき、そのデータを基に、ガス組成変化を与えた溶接における時々刻々の電圧とアーク長の測定結果から推定したものである(詳細は文献1を参照されたし)。

図2の相対時間が7msのあたりを見るとArパルスガスの噴射によって100%CO₂からArガス主体のガス組成に1ms程度の短時間で急変していること、12ms周辺でパルスガス噴射が終わると約2msで元のCO₂雰囲気に戻っていることが判る。また、高Arガス濃度期間はバルブ開時間の5msとほぼ一致しており、ガス組成をほぼ矩形パルス状に変化させることが可能であることが判る。

このような高速で、かつ大幅なガス組成変化は、おそらく内ノズルから高速度で噴射されたパルス状のArガス(図3)が、そのまま塊となってCO₂雰囲気中を移動していき、アーク発生部に到達後、アーク柱部分を通過している間、ガス組成が大きく変化するというようなメカニズムによって達成されているものと考えている。

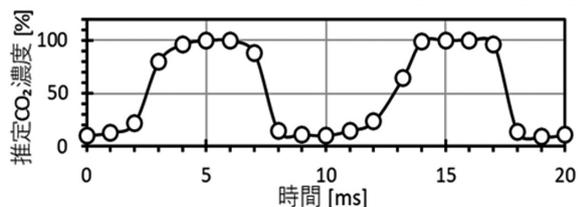


図2 Arパルスガス噴射によるアーク雰囲気ガス組成の変化 (CO₂シールドへのArガスの噴射条件: 周波数100Hz, デューティー比50%, 平均流量140mL/s)

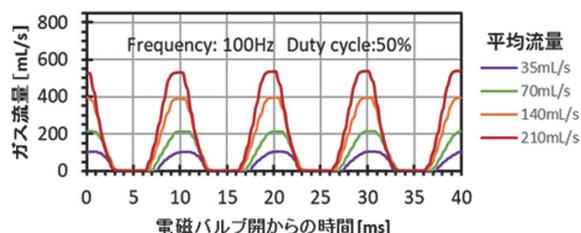


図3 高速電磁弁からのArガスの流量特性

4. アーク現象の変化ならびにその応答性

ガス組成をCO₂からAr主体へと周期的に大きく変化させた場合、図1の(a), (b)で見たようなそれぞれのアーク溶接状態に切り替わっていくのだろうか。アーク

現象がどのように応答して変化するのかについて次に見ていこう。

4.1 低周期でのアーク現象の応答

図4は低周期の1Hzで、ガス組成を変化させてアーク現象の応答性を観察した結果である。相対時間が約1400msまでがCO₂期間、そこから約1900msまでがAr期間に相当するが、上段の映像1のようにCO₂期間で緊縮していたアークはガス組成変化に対応してアーク長が変化しないまま10ms以下の短時間でアークの形状だけがフレア型に変化した後(映像2), 徐々にアーク長を伸ばし(映像3), 200ms程度の時間をかけて設定溶接条件に対応したAr主体の雰囲気での定常状態のアーク長へと変化している。相対時間が1900ms近辺の逆の組成変化では、同様にアーク長は変わらないまま短時間でアーク形態が緊縮型へと変化し(映像4→5), その後、100ms程度の時間をかけてCO₂での定常状態へと移行する。

アーク雰囲気中のガス組成が変化するとアーク柱の電位傾度が変わるため、同一溶接条件設定の下ではアーク長が変化し、新たなガス組成での定常状態のアークへと移行するはずであるが、アーク発生形態は、ガス組成変化に追隨して短時間で変化するものの、ワイヤの溶融を伴うアーク長変化については遅れが生じ、それぞれのガス組成において設定条件での定常アーク状態に変化するには、少なくとも合計で200ms+100msの時間が必要であることが判る。したがって、ガス組成の切り替えによって、それぞれの定常アーク状態を得るための繰り返し周波数は数Hzが限界となる。それを超える5Hzでの実験結果では、アーク長は変化しないまま、アーク発生形態のみが変化するようになることを確認している。

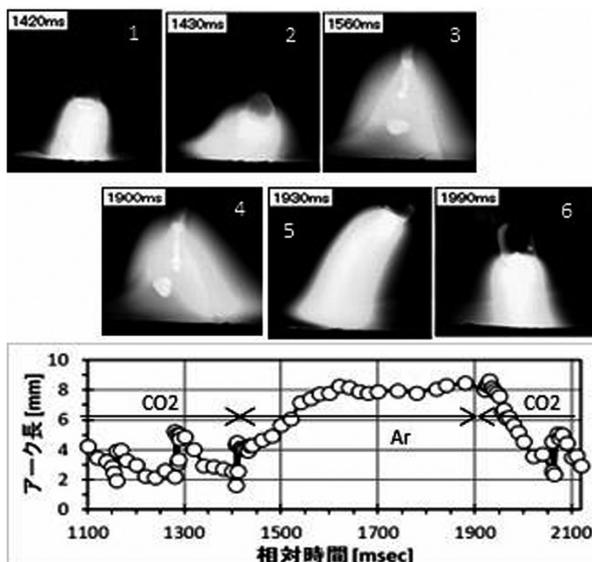


図4 1Hzのガス組成変化に対応したアーク長ならびにアーク現象の変化(デューティー比50%, Ar平均流量133mL/s)

4.2 アークの発生形態の変化

アーク長さ変化に比較してアーク発生形態はガス組成変化に良好に追従することが見て取れたが、さらに高周期の100Hzでの応答性について見てみよう。

図5は図2に示した100Hzのガス組成変化を与えた場合のアークの発生状況を観察したものである。相対時間が7ms時点で緊縮型であったアークはArガスが到着したと思われる8ms時点で既にフレア型に変化し始めており、11msでは、Ar濃度の上昇に伴いさらにアークは広がっていく。その後、5msのAr噴射時間(周波数が100Hz、デューティー比が50%)が終了しているとみられる14msになると13.2ms時点に比較してアークの緊縮が進んでいることから、ガス組成変化に対してアークは非常に応答性良くその発生形態を変えることが判る。

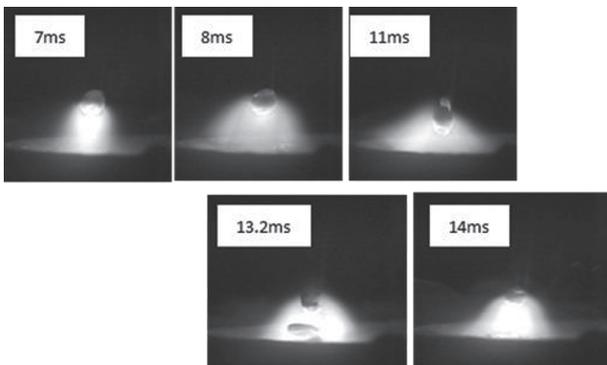


図5 100Hzのガス組成変化に対応したアーク発生形態の変化 (デューティー比50%, Ar平均流量140mL/s)

4.3 アーク発生形態変化にともなう溶滴離脱現象

このアーク発生形態の変化に付随して、興味深い溶滴離脱現象が見られる。図6に50Hzで観察された溶滴離脱現象を示す。相対時間が250ms時点では、典型的なCO₂雰囲気下での緊縮型のアーク発生形態で、ワイヤ先端には成長途上の溶滴があり、溶滴下面からそれを持ち上げる様にアークが発生している様子が見える。2ms後の252msになるとガス組成変化に対応してアーク発生形態がフレア型に変化し、さらに254msには溶滴下部でのアークの発生位置はさらに広がって溶滴全体を包み込むように変化している。このアーク発生形態の変化に触発されるように、257.6msになると、CO₂雰囲気時点でワイヤ端部に保持されていた溶滴がアーク柱内で静かに落下し始めている(ドロップ移行と呼ぶ)。これは、アーク発生形態の変化に伴う溶滴下面の電流密度の低下により、溶滴を保持していたアーク圧力が低下し、支えを失った溶滴が自重で垂下し始め、その結果生じたくびれ部に溶滴を引きちぎるように電磁ピンチ力が作用したためであると推測できる。

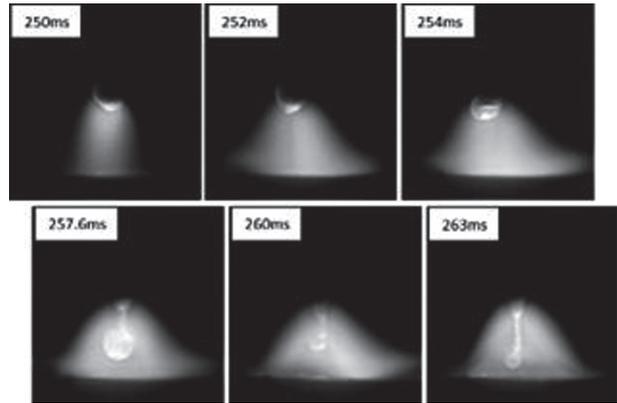


図6 50Hzのガス組成変化に対応した溶滴移行形態 (デューティー比50%, Ar平均流量140mL/s)

この現象は50Hzに限らず、他の周波数においても観察され(例えば図5の100Hzにおいて相対時間11msから13.2ms)、CO₂雰囲気からAr主体の雰囲気へと変化する時点で見られる現象である。また、この溶滴移行には、アークの発生形態の変化や溶滴の形状変化などに一定の時間が必要であるが、5ms程度のArガス期間があれば、完了する応答性の高い現象である。

ガス組成変化による溶滴離脱の後、図6の50Hzの場合には、残されたArガス期間においてストリーミング移行が継続するが、図5の100Hzの場合には、Arガス期間が5msであるため、溶滴離脱直後の相対時間が14msにおいてアークは緊縮し始めており、ストリーミング移行になることなくCO₂雰囲気での溶滴形成期間に移行する。つまり、5ms程度の適切なパルスガス時間(デューティー比)を選定してやれば、周波数に関係なく、CO₂の反発移行でもなくArのストリーミング移行でもない、ガス組成変化により離脱タイミングが制御されたドロップ移行とすることができるのである。

また、1パルスガスで1溶滴となることから、パルスガス周波数を変化させると、得られる溶滴径をコントロールすることができる。図7はArパルスガス噴射時間を5ms一定として(例えば50Hzではデューティー比を25%に設定)、周波数を変化させた時の溶滴径について調べたものである。比較の意味で図中の0Hzの位置にパルスガス噴射無しの炭酸ガスアーク溶接での結果も

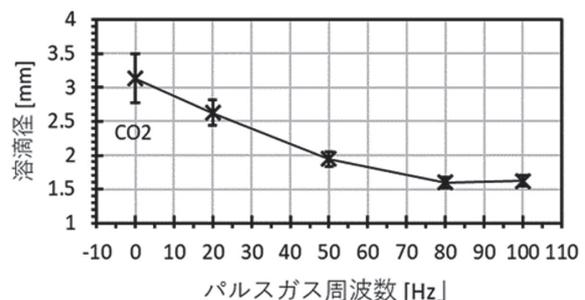


図7 1ガスパルス1溶滴の条件でのパルスガス周波数と溶滴径との関係 (Arパルス時間は5ms一定)

示しているが、炭酸ガス溶接時のように溶滴径が過大になることを防ぎつつ、パルスガス周波数によって溶滴径を選択することが可能であることが判る。

5. シールドガス組成の動的変化の応用例

冒頭で紹介したように炭酸ガス溶接では、熱的ピンチ効果により緊縮したアークが溶滴を持ち上げるように作用するため、ワイヤ先端から溶滴の離脱が困難になる。そのためワイヤ先端には溶滴が保持され、時間とともに大きく成長していき、アークによって保持できる限界に達すると不安定に離脱し（**図8映像1→2→3**）、大粒のスパッタとなる。熱容量の大きな大粒のスパッタは、鋼板に溶着しやすくグラインダによる除去作業が必要になることから、改善の要望が強い。

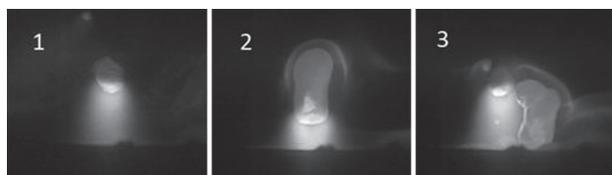


図8 炭酸ガスアーク溶接での不安定な溶滴離脱現象
映像1：溶滴形成初期 映像2：溶滴の肥大化
映像3：不安定な溶滴離脱

大粒のスパッタは**図8**で示したような現象で生じていることから、溶滴が過大成長する前の段階で、**4.3**で示したようにガス組成変化を与えて安定なドロップ移行に切り替えてやれば、スパッタ低減に有効であろうことが考えられる。**図9**に従来法（炭酸ガスアーク溶接、MAG溶接）と比較して、パルスガスによる動的ガス組成制御を行った場合のスパッタの発生状況について示す。ガス組成変化の周期は、炭酸ガス溶接での溶滴の過大成長・不安定離脱の周期である約10Hzよりも短い周期を選定し、また、CO₂雰囲気中へのArパルスガスの噴射時間は5ms一定として、ドロップ移行のみとなる条件とした。

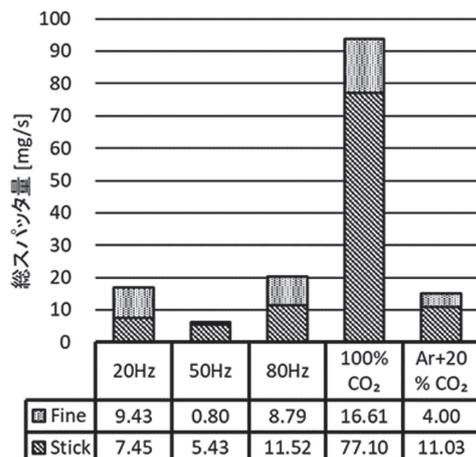


図9 各種溶接方法におけるスパッタ発生量の比較
Fine：微粉状、Stick：溶着状スパッタ
(溶接条件は、電流280A、アーク長4mmに設定)

従来の知見通り、炭酸ガスアーク溶接と比較してMAG溶接では、溶着する大粒のスパッタ量が圧倒的に少ない結果が得られているが、ガス組成変化を用いた溶滴移行制御を行えば、MAG溶接と同等以下のスパッタ量にまで低減できていることが判る。

また、従来のMAG溶接との比較において優位な点は、溶滴移行がMAG溶接特有のストリーミング移行ではなく、比較的溶滴径の大きなドロップ移行となるため、溶け込み形状がフィンガー状にはならず、炭酸ガスアーク溶接の溶け込み形状に近い形状が得られることである。また、コストの高いArガスの使用量は、一般的に適用されているMAG混合ガス比80% Ar + 20% CO₂と比較して、例えば**図9**で用いた50Hzのパルスガス条件(Arパルスガス時間5ms, 平均流量Ar70ml/s, CO₂300ml/s)で見積もると、19% Ar + 81% CO₂となり、圧倒的に少なくすることができる。

6. まとめ

シールドガスの組成を動的に、かつ高速度で変化させることによって、アーク溶接現象を制御しようという新しい試みについて紹介した。これまでの常識にとらわれず、新たな発想の下、最新の周辺技術をうまく用いれば、溶接技術はまだまだ進化し続けることができる。最新の溶接電源に代表されるように、溶接現象の可視化技術やシミュレーション技術、AIの適用化など、周辺技術の進歩は著しく、溶接技術開発のための新しい武器は日々、増え続けている。「常識の壁」を超える新しい観点からの研究開発に期待する。

参考文献

- 1) 小原昌弘, 水口隆, 宮田幹人, 津山忠久, 藤原康平:
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溶接の研究-, 溶接学会論文集 第38巻 第4号 p.363-378 (2020)