OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	炭酸ガスアーク溶接における周期的Ar添加によるアーク雰囲気ガス組成変化を用いた溶滴移行制御に関する研究
Author(s)	藤原, 康平
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105449
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

炭酸ガスアーク溶接における
周期的 Ar 添加によるアーク雰囲気ガス組成変化を用いた
溶滴移行制御に関する研究

藤原　康平

2025 年 12 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第 1 章　緒論 3
1.1　生産プロセスと溶接・接合技術 3
1.2　溶接・接合技術の変遷と近年の研究動向 6
1.3　ガスメタルアーク溶接について 7
1.3.1　ガスメタルアーク溶接の溶滴移行現象について 9
1.3.2　溶滴移行制御技術によるガスメタルアーク溶接の低スパッタ化 12
1.3.3　ガスメタルアーク溶接における現状の課題 15
1.3.4　新たな低スパッタガスメタルアーク溶接の開発：炭酸ガスアーク溶接における周期的 Ar 添加によるアーク雰囲気ガス組成変化を用いた溶滴移行制御について 15
1.4　研究目的・研究方針 19
1.5　本論文の構成 19
参考文献 22

第 2 章　周期的 Ar 添加による炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行制御 27
2.1　緒言 27
2.2　実験方法 27
2.3　ガス流の可視化観察 30
2.4　溶滴移行現象と電流電圧波形 37
2.5　結言 41
参考文献 42

第 3 章　Ar 添加条件と溶滴移行が同期する範囲の検討 43
3.1　緒言 43
3.2　実験方法 43
3.3　Ar 添加周波数，平均流量，電磁弁開時間が溶滴移行に与える影響と同期条件 44
3.3.1　電磁弁開時間と溶滴離脱の動作時間 48
3.3.2　Ar 添加周波数と Ar 流量を考慮した溶滴移行分布の整理 50
3.3.3　溶滴移行同期のための Ar 添加条件 52
3.3.4　溶滴移行制御のための Ar 添加条件のモデル化 53
3.4　電流およびワイヤ送給速度，ワイヤ径が溶滴移行に与える影響 56
3.5　結言 64
参考文献 65

第 4 章　溶滴離脱の支配因子に関する検討とメカニズムの解明 66
4.1　緒言 66
4.2　実験方法 66
4.3　電流変化が溶滴移行に与える影響 67
4.4　アーク雰囲気変化が溶滴移行に与える影響 69
4.5　分光観察によるアーク雰囲気変化の観察 72
4.6　パルスガスマグ溶接における溶滴移行現象と支配因子の総括 76
4.7　結言 81
参考文献 82

第 5 章　パルスガスマグ溶接の効果と実用化に向けた検討 84
5.1　緒言 84
5.2　スパッタおよびヒューム発生量 84
5.3　溶込み形状 88
5.4　ブローホールの発生と原因の考察 89
5.5　溶接金属の機械的性質 90
5.6　パルスガスマグ溶接法の評価と今後の展望 97
5.7　結言 100
参考文献 101

第 6 章　結論 102

付録 106
付録 1　パルスガスマグ溶接における大気巻き込みの可能性について 106
付録 2　実用化に向けた装置開発 108
参考文献 115

謝辞 116

本論文に関する著者の発表論文 117
査読付き論文 117
解説記事 117
翻訳論文 117
国際会議　口頭発表 118
国内学会等における発表 118
受賞 119

第1章　緒論

1.1 生産プロセスと溶接・接合技術

製造業における生産プロセスは製品が出来上がるまでの過程をまとめた呼称であり，原料・部品などの材料を最終製品に変換するための一連の手順を指す．製造業においてはこの手順をいかに効率化・最適化するかが企業の競争力を根幹づけるものである．特に重要な要素として，QCD という考え方がある．Q は Quality（品質）を指し，顧客の求める商品の品質を保つことは会社の信用・信頼そのものであり，最も重要な要素とされることが多い．C は Cost（コスト）を指し，生産に使われた金額つまりは会社の資産・利益を示す．D は Delivery（納期）を指し，これもまた会社の信用を得るための要素である．ただし，品質を向上させるためにはコストと時間が必要であるが，一方でコストと時間を削減しないと会社の利益にならない，というようにこれらの 3 要素はそれぞれの要素が関係しあっており，企業における競争力を維持向上させるためには，これらのバランスをとりつつ改善していくことが肝要である．また近年では QCD に Safety（安全）や Service（顧客対応），Environment（環境）といった要素が付け加えられることもあり，自社が生産プロセスの何に注力するのかという観点から多様化している[1]．さらに国連により制定されている SDGs（Sustainable Development Goals 持続可能な開発目標，Fig. 1.1）に基づいた活動が社会から求められるようになっており[2]，特に製造業は環境負荷を多く占めること，労働者人口の多く占めること，技術革新の推進力となりやすいことなど多くの理由から着目されている．つまりは，企業個々における競争力強化のためだけでなく，製造業全体が革新的に成長できる活動や研究開発を進めることが社会から求められているというのが現状である．



Fig. 1.1 SDGs development goals required in the manufacturing industry [2]

生産プロセスを大きく分類すると，その分類方法はさまざまであるが，概ね，設計，原材料調達，加工，組み立て，検査・品質管理，保管，包装・出荷となる．このうち加工，組み立てに大きく関わる重要な技術として，溶接・接合技術が挙げられる．Fig. 1.2 は経済産業省が示した製造業者における主力商品の製造に当たって重要となる作業と 5 年後の見通しをアンケート調査した結果である[3]．このう

ち溶接を含む項目は 3 番目に多く，全体の 3 割が重要であると回答している．特に 5 年後の見通しとして「今まで通り熟練技能が必要」と回答した割合が約 70%と非常に高い一方で,「機械に代替される」が 10%程度とあまり期待されていないことから，完全機械化の難しい高度な技能を要する技術であることが伺える. 一方で国土交通省の調査によると建設業において就業者数は減り続けており (Fig. 1.3)，特に技能者の減少は顕著である. さらに Fig. 1.4 は産業界における年齢層別就業者の推移を示しているが，55 歳以上が占める割合が徐々に増加して 3 割を優に超えており，反対に 29 歳以下は減少し平成 22 年頃から現時点まで 1 割程度とかなり低い値を保っている. つまりは技能者の絶対数は減少しつつ，さらに技能を継承されるべき若年層の数も減っているのが現状であり，これが溶接業界のみならず，産業界が抱えている喫緊の課題と言える.

これらの背景に対し，省人化，脱技能化を図るべく，溶接・接合技術の高能率化に対してこれまで様々な研究開発が行われてきた．人的要因に対しては，近年ではロボットに AI を搭載した自動溶接技術開発や，デジタル機器を駆使した溶接技能教育技術開発の成長が著しい．また，これらデジタル技術は溶接電源をはじめとした溶接機器開発の発展にも多大な影響を及ぼしている．高速度カメラをはじめとした各種センサ類の開発や，高性能 PC の一般化による数値シミュレーション技術の発展により，様々な溶接物理現象が目覚ましい速度で解明されており，それらの物理現象を応用した新たな溶接技術の開発が日々進んでいる．これらは元をたどると上記の QCD 改善を目的としたものであり，まさに高品質な製品を安く早く生産するためのプロセス開発の一つと言える.

図 221-8　主力製品の製造に当たって重要となる作業と５年後の見通し

主力製品の製造にあたって重要な作業内容	主力製品の製造にあたって重要な作業計	5年後の見通し						
		今までどおり熟練技能が必要	技能習得期間が短くなる	機械に代替される	工程自体がなくなる	外注化される	海外調達に変わる	無回答
製罐・溶接・板金	**29.8**	69.8	14.3	10.5	0.1	3.2	0.9	1.2
プレス加工	**21.6**	53.1	23.2	15.0	0.4	4.3	2.0	2.2
鋳造・ダイキャスト	**6.0**	63.4	12.3	7.9	1.3	7.0	6.2	1.8
鍛造	**4.7**	64.6	19.7	6.7	1.1	3.9	2.8	1.1
圧延・伸線・引き抜き	**2.7**	69.9	9.7	12.6	1.0	4.9	1.0	1.0
切削	**35.2**	53.3	22.3	18.2	0.1	2.9	1.8	1.4
研磨	**21.8**	63.7	16.3	15.0	-	2.2	0.6	2.2
熱処理	**8.6**	59.6	16.7	10.8	1.2	7.7	0.9	3.1
メッキ	**5.3**	51.5	18.0	10.0	1.0	15.5	2.5	1.5
表面処理	**8.4**	54.4	18.9	15.1	0.3	7.5	1.6	2.2
塗装	**15.3**	62.0	16.5	11.1	0.3	7.8	0.7	1.6
射出成型・圧縮成型・押出成型	**13.5**	56.1	24.9	12.4	1.2	2.0	2.7	0.8
半田付け	**9.1**	62.4	14.9	15.7	0.9	3.8	0.6	1.7
機械組立・仕上げ	**33.1**	65.4	21.8	5.8	0.7	3.1	1.1	2.0
電気・電子組立	**25.2**	57.2	24.1	9.9	0.8	4.1	1.7	2.2
測定・検査	**37.6**	51.3	23.8	17.1	0.4	0.6	0.6	6.3

資料：JILPT「デジタル技術の進展に対応したものづくり人材の確保・育成に関する調査」

Fig. 1.2 Results of a survey on important tasks for manufacturing main products (ministry of economy, trade and industry) [3]

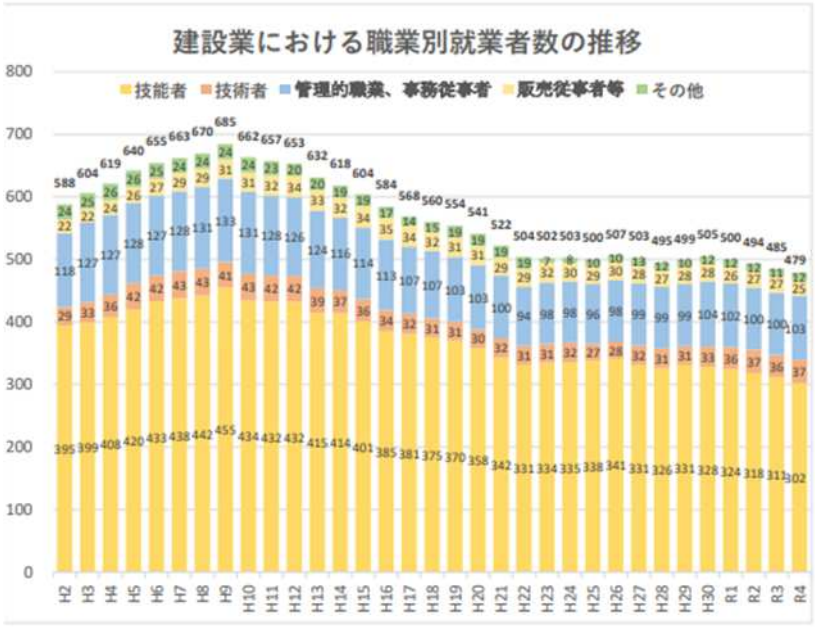


Fig. 1.3 Trends in the number of workers by occupation in the construction industry (ministry of land, infrastructure, transport and tourism) [4]

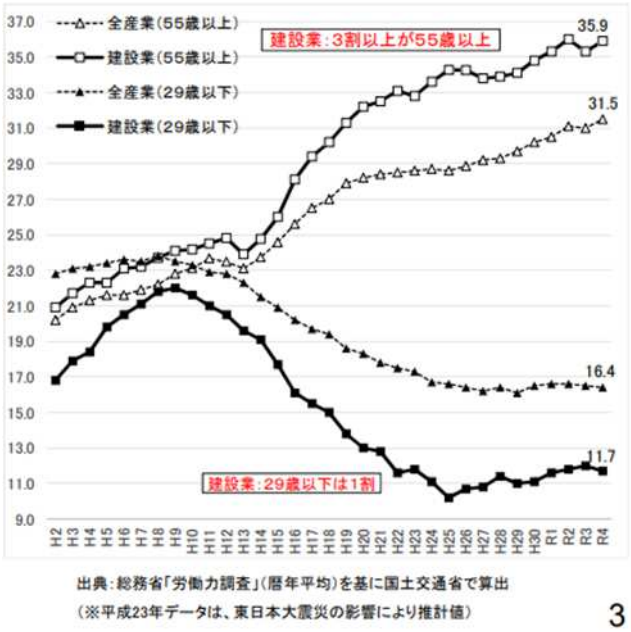


Fig. 1.4 Trends in the number of workers by age group in industries (ministry of land, infrastructure, transport and tourism) [4]

1.2 溶接・接合技術の変遷と近年の研究動向

溶接・接合技術は社会インフラをはじめとする大型構造物をはじめ，造船分野や自動車業界，さらには小型電子部品といった，産業界全体において欠かすことのできない技術である．溶接は接合機構面から「融接」,「圧接」,「ろう接」に細分されるが，ここでは融接について論じる．融接は被溶接材（母材）の接合部を加熱，溶融して，母材の溶融金属あるいは母材と溶加材を融合させた溶融金属を生成し，それらの溶融金属を凝固させることによって接合する方法である[5]．一般的に融接は連続的に一体化された継手部を形成できるため，継手効率が高く，継手構造を簡素化できるというメリットを持つ．これらは特に鋼構造物の継手として主流であったリベット接合やボルト接合に対する革新的な技術となった．

ここからは国内におけるアーク溶接技術の変遷について述べる．大正・昭和初期，このころは被覆アーク溶接が主流であり，当時の溶接技術先進国であったヨーロッパ各国の技術移入から始まり[6]，船舶や橋梁へと採用され始めた[7]．その後は日本独自の被覆アーク溶接棒の研究が進み，また同時に交流溶接電源の研究開発が進められた．なお欧米では直流電源が主流であったが，当時の日本の電気技術のレベルや価格の問題から交流にせざるを得なかったという事情によるものであり，結果として交流アーク現象の安定化に向けた研究開発が進み，交流溶接電源の独自の進歩をもたらした[8]．戦後の復興期から高度成長期にかけて，造船の溶接技術として米国からサブマージアーク溶接法の技術が導入されたが，日本独自の片面多電極高能率溶接の電源としても大容量の交流電源が多用された[9, 10]．1950 年代には Ar ガスの普及と共にティグ溶接も国内で本格的に実用化され始め，アルミやチタン，ステンレス等の溶接に使用されたとされる[11]．またその後，自動車や建築関連産業を中心に進められた溶接の半自動化や自動化の推進により，ガスメタルアーク溶接（GMAW）の普及が進んだ．さらにはデジタル技術の進歩により高速度カメラを用いて炭酸ガスアーク溶接およびミグ・マグ溶接における複雑なアーク・溶滴移行現象が観察できるようになり，GMAW の現象理解がより加速されるとともにインバータ制御電源の開発が促進された．そして現代では高品質化や高能率化，省人化を狙ったロボット等による自動溶接の技術が進んでおり，さらにはレーザ溶接やプラズマ溶接と組み合わせたハイブリッド溶接など多熱源を複合させたプロセスまでもが開発されている．

GMAW について詳細は後述するが，近年の溶接・接合技術に関する動向として金属 AM（Additive Manufacturing）業界の動きについて述べておく必要がある．そのうち WAAM 方式（Wire Arc Additive Manufacturing）と呼ばれる技術については，まさに GMAW を転用した技術と言え，繰り返しビードオン溶接をするように溶接金属を積み上げていくことで造形するという技術である．発想自体は 1920 年代にすでに考案されており，その時のイメージ図は既に現代のものとほぼ同じであるが[12]，当時の溶接機と溶接技術では入熱量や溶融量のコントロールが難しく，技術として確立はできなかったとされている．その後しばらく月日が経ち，1990 年代にロボットアームと溶接電源を組み合わせた技術が実用化されると，WAAM 方式に関する研究が盛んに行われるようになった．特に Fronius 社の CMT（Cold Metal Transfer）が開発された後（詳細は後述）は，低入熱・低スパッタでの溶接が可能になり，より WAAM 方式の研究開発が加速された．WAAM に限らず AM 技術全般に言えることだが，従来の切削加工などとは異なり製造物の形状に制限が少なく，複雑形状や中空・肉抜き形状も容易に作製できる点が最大のメリットであり，部品点数の削減や軽量化，小型化が容易になる．例えば航空機の部

品やエンジン回りの部品，熱交換機などは今後，現状に取って代わる技術となりうると考えられる．また，WAAM 方式は GMAW の研究開発を上手く転用できる部分が多く，数値シミュレーションモデルを転用することにより積層のシミュレーションを可能にした事例もある[13]．海外と比較すると日本は AM 技術開発が遅れていると言われているが，かつて日本のアーク溶接技術がそうであったように，今後益々発展する分野だと予想している．

また，前章で述べたように溶接技能者の減少は喫緊の課題とされており，より早く溶接技能者を育て上げる，あるいはそもそも溶接自体に興味を持ってもらうために，デジタル技術を活用した溶接技能教育システムの開発が近年成長著しい．仮想空間で溶接の技術習得を行う VR・AR トレーニングシステムは国内外数社から既に市販されており[14-16]，一般企業や公的教育機関（ポリテクセンターなど），さらには工業高校等で導入実績がある．これら仮想空間での訓練技術は，アークや溶融池，ビードのでき方などが現実とはまだやや差異があるものの，実際にはアークを出さないため安全面や教育場所を選ばない，若者が興味を持ちやすいという点で優れた教育ツールである．一方，より実践を見据えた技術として AR グラスを用いて GMAW の突出し長さを管理するもの[17]や，溶接保護面にカメラと HMD（ヘッドマウントディスプレイ）を仕込んだデジタル溶接マスク（Fig. 1.5）[18]といった，実際にアークを出す溶接技能訓練をサポートするシステムも開発されている．



Fig. 1.5 3D digital welding mask [18]

1.3 ガスメタルアーク溶接について

ガスメタルアーク溶接（GMAW）は，電極ワイヤ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，被覆アーク溶接のような棒継ぎの必要が無く連続的に溶接作業が可能であることや，溶着速度が速く高能率な溶接が可能であること，自動化にも適した溶接法である[5]．前章で述べたように半世紀近く前に実用化された技術ではあるが，現状産業界においては最も主力の溶接プロ

セスであるといえる．

GMAW の中でもシールドガスに 100%CO_2 を用いた炭酸ガスアーク溶接は，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，とりわけ造船や橋梁，建築鉄骨のような厚板の鋼材を扱う産業などに多く用いられる．一方，大粒かつ大量のスパッタが発生するというデメリットがあり，火災・火傷など安全上の懸念のみならず，溶接ビード付近に強固に付着するため溶接後の仕上げ工程が増加するといった課題も持ち合わせている[11]．また，溶接材料に対する市場ニーズの調査によると，最も高いニーズはスパッタの低減という結果も得られている[19]．

炭酸ガスアーク溶接に対し，シールドガスに Ar などの不活性ガスあるいは混合ガス（国内では Ar-20%CO_2 が主流であるが，欧米では多様な Ar をベースとした多様なガス種が用いられる[20]）を用いたミグ・マグ溶接では，中・高電流域においてスパッタの発生を大幅に抑制することが可能であり，例えば自動車産業など溶接の自動化率が高い箇所への適用がすでに実用化されている[21]．一方，Ar は日本国内においては比較的高価なガスであるため[22]ランニングコストが高いことや，CO_2 に比べると耐風性が低くブローホール・ピットなどの溶接欠陥が生じやすいこと[23]，溶込み形状が中央のみが極端に深くなるいわゆるフィンガー状の溶込み形状になるなどのデメリットを有する（Fig. 1.6）[24]．

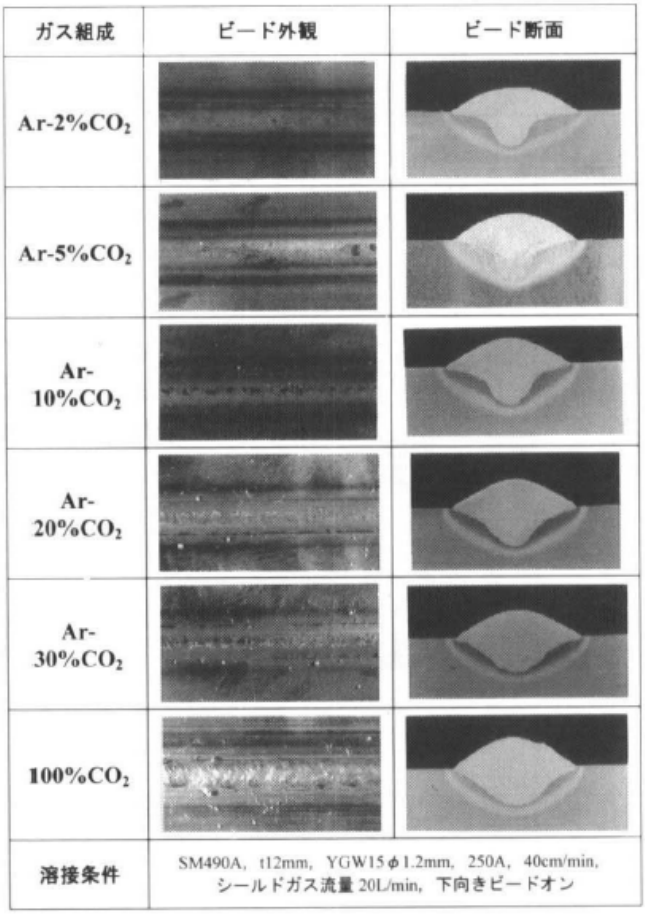


Fig. 1.6 Effect of shielding gas composition on penetration shape [24]

これらの理由から炭酸ガスアーク溶接およびミグ・マグ溶接は一長一短があり，事業者はそれぞれの

メリット・デメリットを天秤にかけてどちらを採択するかを決定する必要があった．しかし近年では，これらのブレイクスルーとして GMAW の原理現象に基づいた低スパッタ技術が多数開発されている．

1.3.1　ガスメタルアーク溶接の溶滴移行現象について

GMAW は上記で述べた通りワイヤ電極が溶融し，母材へと移行する溶滴移行現象を伴うことで溶着金属を形成する．この溶滴移行現象は，溶接条件やシールドガスなどによって溶滴の大きさや移行周波数など様々な特性が変化し，溶接の安定性や品質，スパッタの発生などに密接に関わっている重要な現象である．

IIW（国際溶接学会）において，溶滴移行形態はその外観的な特徴から Fig. 1.7 のように分類されている[25, 26]．このうち自由移行に着目すると，グロビュール移行とスプレー移行に大別され，これらは炭酸ガスアーク溶接およびミグ・マグ溶接において見られる代表的な溶滴移行形態である．グロビュール移行は溶滴サイズがワイヤ径よりも大きなものと定義されており，電極先端に生じた比較的大粒の溶滴が落下するような溶滴移行形態である．そのうち特に反発移行では溶滴がなかなか離脱することができず，不規則的に挙動を乱しながら移行することで大粒スパッタ発生の主原因となりうる[27, 28]．一方，スプレー移行は溶滴サイズがワイヤ径よりも小さなものと定義されており，比較的溶滴がスムーズに母材へと移行するため安定性やスパッタの観点からは望ましい溶滴移行形態と言える．

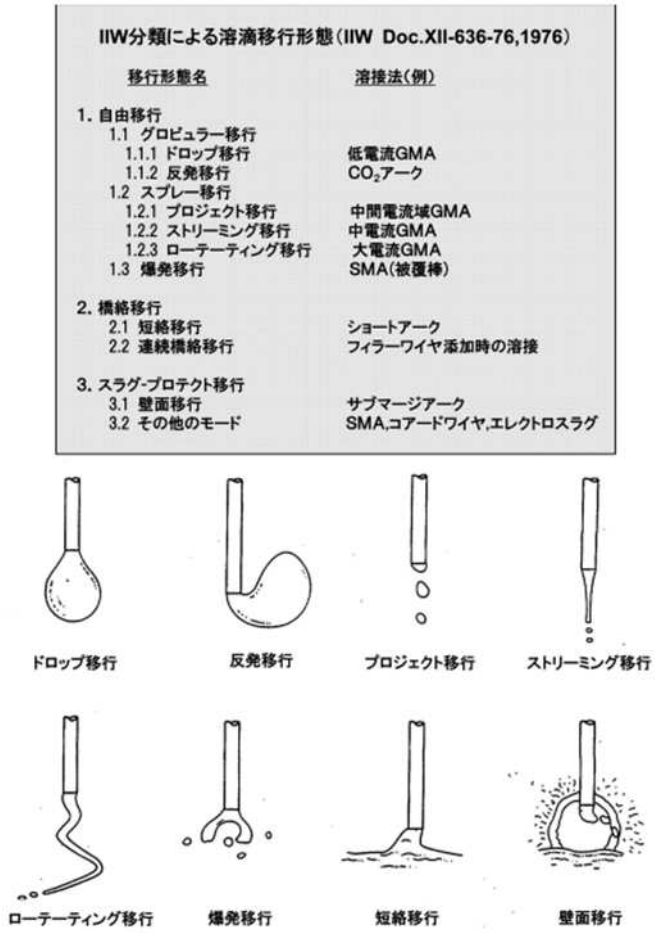


Fig. 1.7 Classification of metal transfer modes [25, 26]

より詳細な溶滴移行現象の理解のため，半世紀以上も前から高速度カメラを用いて溶滴のサイズや移行周波数について実験観察が行われてきた[29-31]．その頃よりグロビュール移行とスプレー移行に着目した研究が多くなされており，電流，ワイヤ径，突出し長さ，シールドガス組成など，様々なパラメータが溶滴移行へ及ぼす影響が報告されている[32-35]．Fig. 1.8 はシールドガス組成の CO_2 または O_2 添加量が溶滴移行に及ぼす影響について調査された結果である[21, 36]．ミグ・マグ溶接に当たる CO_2 または O_2 添加量の低い領域においては約 230A を境にグロビュール移行（図中ではグロビュール移行）からスプレー移行へと変化するが，CO_2 または O_2 添加量が 30%を超えると電流によらずスプレー化しなくなる．そのためシールドガスが 100%CO_2 である炭酸ガスアーク溶接では，電流を増加させてもスプレー移行になることはなく，グロビュール移行のままとなる．また Fig. 1.9 にシールドガス組成および溶滴移行形態によるスパッタ発生量を示すが，スプレー移行からグロビュール移行になることでスパッタ発生量が明確に増加することが分かる[37]．

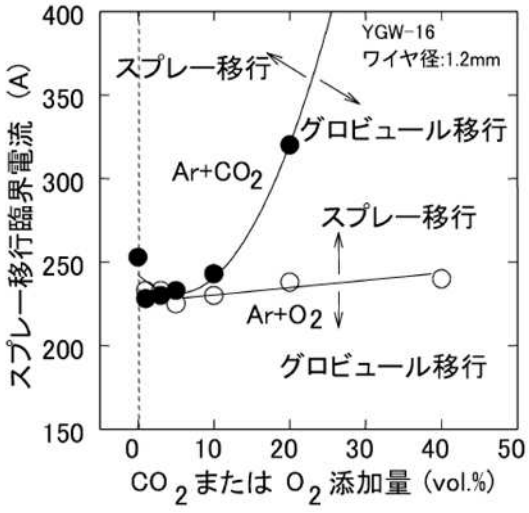


Fig. 1.8 Effect of shielding gas on spray transfer critical current [21, 36]

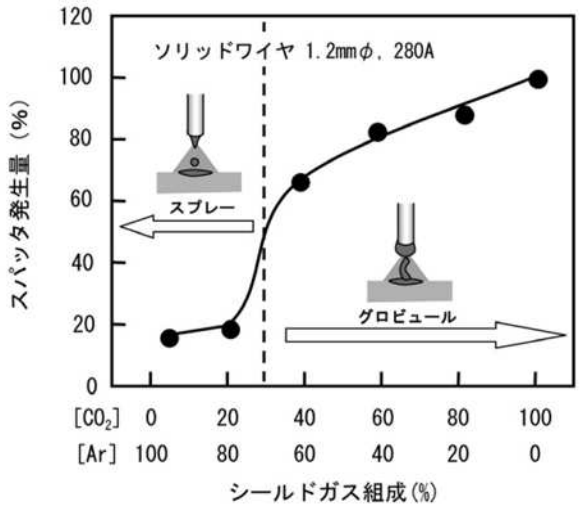


Fig. 1.9 Effect of shielding gas composition on spatter generation (relative value with spatter generation in 100% CO_2 as 100%) [37]

特にスパッタ発生量の多い炭酸ガスアーク溶接において，スパッタ発生現象は多くの研究者によりその機構やメカニズムについて報告されている[28, 38-41]．とりわけ，グロビュール移行領域におけるスパッタ発生形態について，山崎により次のように分類される[42, 43]．①「溶融池あるいは溶滴からの気泡の放出に伴って生じた柱状隆起から発生するスパッタ」，②「溶滴離脱後にワイヤ側に残留する融液を飛散させることにより発生するスパッタ」，③「短絡後の再アーク時に発生するスパッタ」，④「溶滴がアーク力によって押し上げられながら離脱して発生するスパッタ」，⑤「離脱後の溶滴とワイヤ間にアークが点弧して発生するスパッタ」の，5 種に分類されている．このうち，Fig. 1.10 に示す④「溶滴がアーク力によって押し上げられながら離脱して発生するスパッタ」はグロビュール移行領域における最も典型的なスパッタ発生形態であり，大きく成長した溶滴がアーク力によって斜め上方に押し上げられながら離脱し，その溶滴自体が回転を伴いながら飛散することにより，大粒スパッタを発生させるものである．この発生形態によるスパッタは溶滴そのものが飛散することで特に粒が大きく，

溶接ビード付近に強固に付着することから除去が困難であるため，特に問題とされる場合が多い．よって後述する低スパッタ技術は，いかにしてこの発生形態のスパッタを溶滴移行制御によって減少させるかに注力される場合がほとんどである．

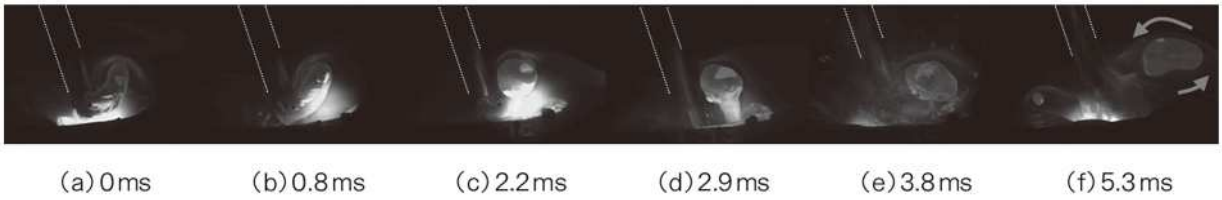
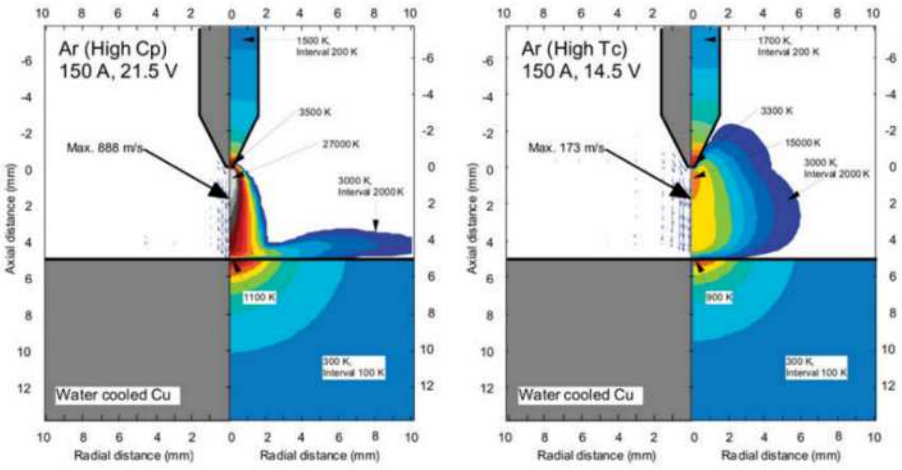


Fig. 1.10 Spatter generated by droplet ejection due to strong arc force [42].

シールドガスが 100%CO_2 の場合，熱的ピンチ効果により緊縮したアークが溶滴下端から発生することで，強いアーク力により溶滴が持ち上げられる形となり溶滴が大きく成長し，やがて不安定・不規則に離脱する．一方，シールドガスに 70%以上の Ar が含まれる場合には，アークは溶滴全体を包み込むようにフレア状に広がるため，溶滴に働くアーク力は分散する．加えて電磁ピンチ力およびプラズマ気流が溶滴離脱に有効に作用することで，小粒の溶滴あるいは液柱状のワイヤ先端がスムーズに母材へと移行する．これらはシールドガスの物性値による作用によるものとされており，田中らの研究では特にガスの比熱の影響が大きいとされている（Fig. 1.11）[44].



(a) (b)

Fig. 1.11 Investigation of Thermal Pinch Effect Using a Simplified Model
(a) When only specific heat is high, (b) When only thermal conductivity is high [44]

1.3.2 溶滴移行制御技術によるガスメタルアーク溶接の低スパッタ化

GMAW における溶滴移行現象が徐々に解明され，さらに電子制御技術の飛躍的な向上による溶接電源

および周辺装置のデジタル化も相まって，現象をうまく利用した溶滴移行制御技術が数々生み出されてきた．そのうち最も多く実用化例のある溶滴移行制御技術として，電流波形制御を用いたパルスマグ溶接が挙げられる[45-53]．その名の通りパルス状に電流値を上下させる手法で（Fig. 1.12）[26]，臨界電流以上まで電流を増加させるピーク期間と，数十 A まで電流を減少させるベース期間を設けることで意図的に溶滴を生成・離脱させ，スパッタの発生を極少量に抑えることが可能な技術である[54, 55]．また炭酸ガスアーク溶接を対象としたものでは，短絡移行の電流域においてワイヤ先端のくびれを検出し電流を急峻に低下させ，アーク再点弧時に発生するスパッタを低減するもの[56-59]や，中・高電流域において 2 回の重畳電流を与えることにより，溶滴と溶融池の微小短絡を抑制することでグロビュール移行においても低スパッタ化を実現したもの[27]等がある．

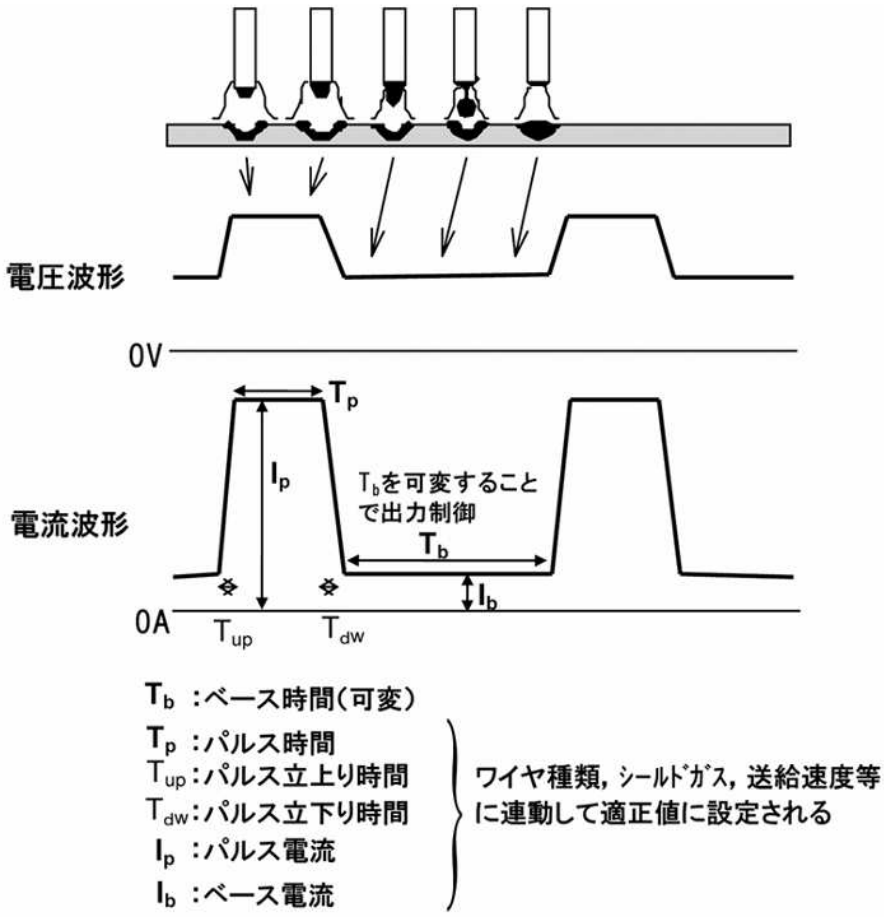


Fig. 1.12 Current waveform control in MAG welding [26]

また近年ではパルス電流波形制御とワイヤ送給制御を組み合わせた手法も多くみられる．CMT（Cold Metal Transfer）法[60, 61]は，短絡を検知すると電流を低下させると同時にワイヤを逆送給し，物理的にワイヤ先端を引き上げることで，アーク再点弧時のスパッタ発生をかなり低減することができることに加え，薄板溶接や WAAM において入熱をコントロールする目的でも利用されている．炭酸ガスアーク溶接のグロビュール移行となる電流域においても，成長した溶滴を振り落とすようにワイヤを逆送給することで溶滴移行をコントロールする，短絡移行を前提としないワイヤ送給制御が開発され

ている（Fig. 1.13）[62, 63]．他にも REM 元素を含む特殊なワイヤを用いて DCEN で溶接する手法（Fig. 1.14）[64]や低スパッタを謳ったフラックス入りワイヤの開発等，溶材メーカ各社から様々な溶接ワイヤが開発されている．

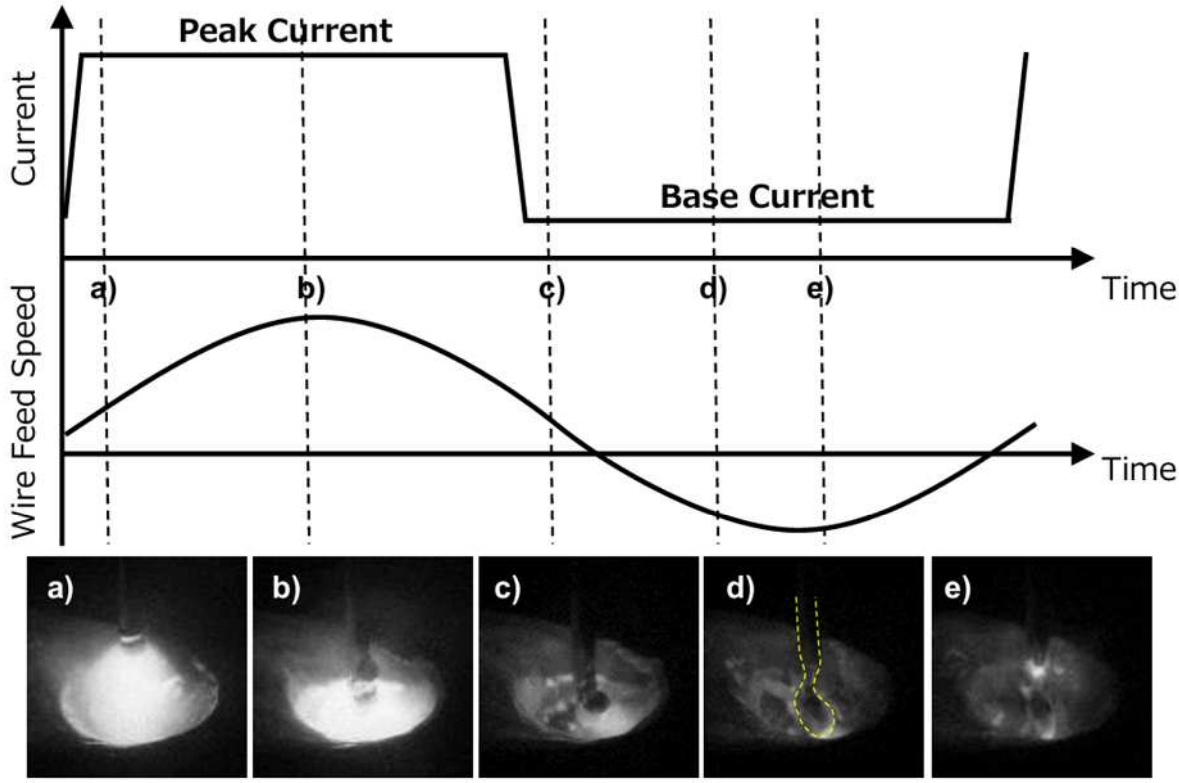


Fig. 1.13 Metal transfer control method utilizing inertia through wire feeding control [62]

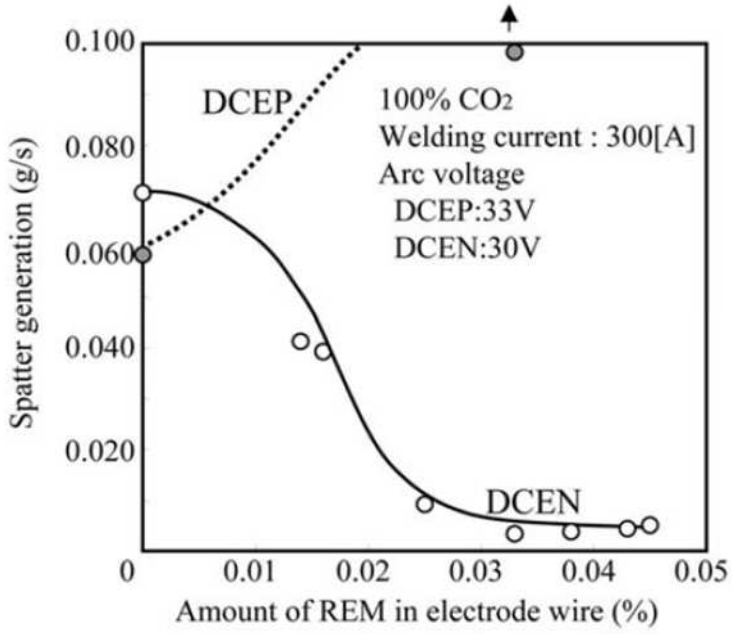


Fig. 1.14 Relationship between REM addition amount in wire and spatter generation [64]

1.3.3　ガスメタルアーク溶接における現状の課題

ここまで，近年における GMAW 技術の発展と実用化事例について述べた．一方で，これらの技術は溶接ロボットと合わせて使用することを前提としている場合が多く，いずれも溶接電源・ワイヤ送給装置をはじめとする設備コストが高価である場合や，あるいは特殊な溶接材料および高価なガスを使用する必要があることからランニングコストが高くなる，といったように経済的なハードルが企業への導入を遅れさせる原因となっている．前述のように QCD 改善の考え方から，比較的大企業や自動車部品等のある程度決まった形状の部品を製作している業界ではロボットによる自動溶接設備に合わせて導入されるケースが多いものの，中小企業においてはこの経済的ハードルを越えることが難しい．また，橋梁・造船といった自動化の難しい業界もあり，まだまだ従来通り人間の手で溶接している場面も多いのが現状である．そこで，既存設備に安価に後付けできるかつランニングコストの増加を抑えつつ，半自動設備でも使用できる低スパッタ技術が望まれているのが現状である．

1.3.4　新たな低スパッタガスメタルアーク溶接の開発：炭酸ガスアーク溶接における周期的 Ar 添加によるアーク雰囲気ガス組成変化を用いた溶滴移行制御について

前節に述べた GMAW の課題をまとめると，以下の特徴をもつ新たな溶接法が望まれていると考える．

① 炭酸ガスアーク溶接をベースとする
② スパッタの発生を抑制する
③ 厚板の溶接を前提とした高電流域をターゲットとする
④ 大規模な設備投資を必要としない
⑤ ロボットによる溶接に限定しない（人の手による溶接に使用できる）
⑥ ランニングコストの増加を最低限に抑える
⑦ 溶込み形状や機械的性質に悪影響を及ぼさない

炭酸ガスアーク溶接はシールドガスに用いる炭酸ガスの安さから日本国内で広く用いられており，その中でも多量の溶着量を要する厚板の溶接では，溶滴移行形態がグロビュール移行となる電流域を用いることから，大粒かつ大量のスパッタが発生することが喫緊の課題である．また，中小企業や不定形のワークを扱うようなロボット化が困難な業界では，人の手による溶接に利用できること，なおかつ大規模な設備投資を要しないことが求められている．さらには，高価なシールドガス使用によるランニングコスト増加を抑えること，溶接欠陥の生じやすい溶込み形状（フィンガー状）とならないこと，従来溶接法よりも機械的性質が悪化しないこと，といった実用上の課題に対しても満足する必要があると考える．

これらの課題に対して，ブレイクスルーとなる新たな溶接法を開発する．前述したように，シールドガスはアーク形状や溶滴移行形態に大きく影響する要因である．シールドガスはアーク中の雰囲気ガス組成を決定し，溶接中は一定のままであることが従来 GMAW の常識であるが，本研究では溶接中にアーク雰囲気ガス組成を高速度で動的に変化させることによって，アーク溶接現象および溶滴移行現象をコントロールすることができないかという着想から取り組んだ．このガス組成制御をうまく活用できれば，ガスの供給システムを変えるだけの簡便な手段で，課題解決につながる可能性が出てくる．

先行研究として，シールドガスの種類や混合率などを適正化する検討はこれまでもあるが[24, 65]，溶接中にガス組成を変化させて溶接現象を制御する試みはほとんどない．小原らによる溶接金属の低酸素化を目的として 100%Ar 雰囲気中での GMAW において，アーク放電の安定化を図るために微量の Ar+CO_2 混合ガスを周期的に吹き込むもの[66]や，中村らによる超狭開先での溶接においてアーク発生位置を上下させる目的で，Ar-2%O_2 混合ガスを用いたシールドガス中に CO_2 を吹き込み，ガス組成を 2.5Hz の周期で変化させるもの（Fig. 1.15）[67]はあるが，いずれも溶滴移行現象のコントロールを意図したものではない．

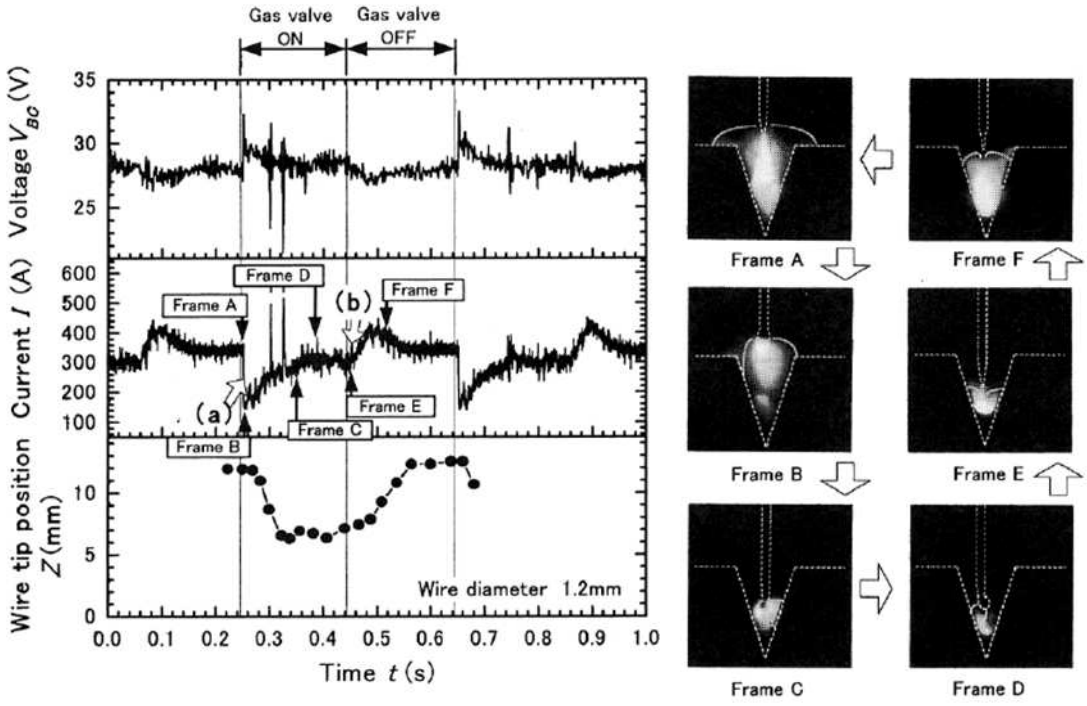


Fig. 1.15 Ultra-narrow gap welding aiming for arc length changes by gas composition variation [67]

これに対して，本研究では 2 種類のガスを二重ノズルを用いて別経路で添加し，比較的早い周期でのアーク形態変化による溶滴移行制御を目的とした新たな溶接法を考案した[68, 69]．以降はパルスガスマグ溶接と呼称し，その概要について以下に示す．パルスガスマグ溶接では，Fig. 1.16 [70]に示すように溶滴を成長させるための CO_2 アーク期間と溶滴を離脱させるための Ar アーク期間を炭酸ガスアーク溶接の自然溶滴離脱周期[27]よりも早い周期で繰り返すことで溶滴移行制御を行う．一連のアーク変化及び溶滴移行の様子ならびに電流電圧波形を Fig. 1.17 に示す[70]．いわゆるパルス電源を用いず，

直流の定電圧特性電源を用いているにも関わらず，電流電圧波形はアーク周辺の雰囲気変化に起因してパルス状に上下する．この時，電流上昇は電磁ピンチ力の増加を生じさせることで溶滴を離脱させる駆動力となり，さらにはアーク雰囲気変化によるアーク形状変化をきっかけとして，溶滴はワイヤ先端から離脱する．これ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るため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 の使用量は極めて少量であり，一般的な Ar-20%CO_2 混合ガスによるマグ溶接と比較するとそのガスコストは大幅に抑えられる．また，一般的な定電圧特性電源で適用可能であることから導入の際は Ar の供給経路を追加するのみであり，設備コストは最小限に抑えられる．さらには自動（ロボット）・半自動を問わず，従来通り人間の手による溶接においても適用できる手法である．

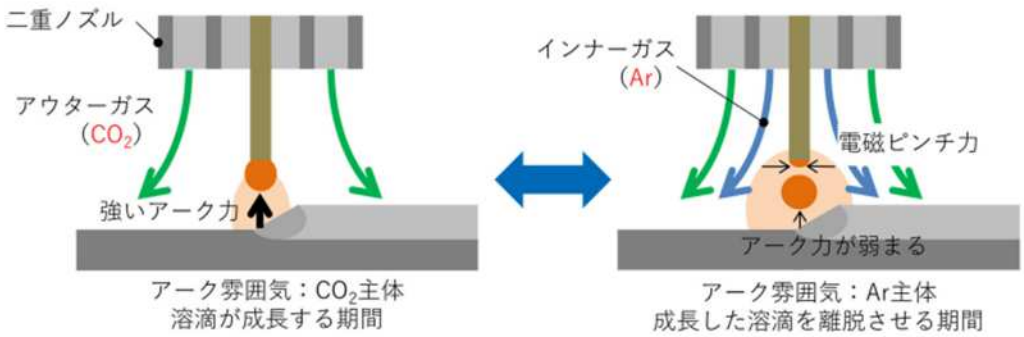


Fig. 1.16 Schematic diagram of pulsed gas MAG welding method [70]

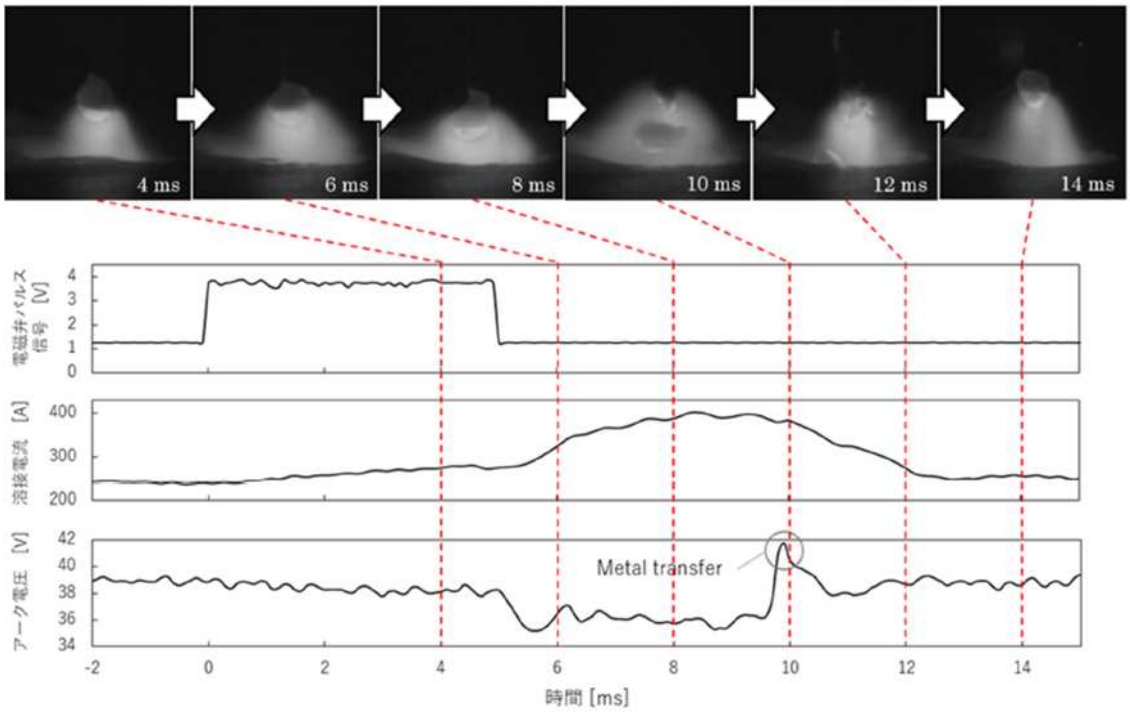


Fig. 1.17 Droplet transfer, solenoid valve pulse signal for Ar addition, and current/voltage waveforms in pulsed gas MAG welding method [70]

パルスガスマグ溶接は，溶接中にアーク雰囲気ガス組成を高速度で動的に変化させることで溶滴移行を制御するというこれまでにない革新的な溶接技術であるが，未解明な部分が多く，複数の課題が存在する．

第一に，ガス条件および溶接条件の体系的な整理である．パルスガスマグ溶接は 2 種類のガスを動的に切り替える特性上，溶接条件のパラメータが多岐にわたるため，その系統的な模索と最適化が不可欠である．前述したように，ガスメタルアーク溶接においてシールドガスがアークプラズマに与える影響は大きく，特にマグ溶接においては Ar 中の CO_2（あるいは O_2）濃度に応じて溶滴移行形態およびスパッタ量が変化することが知られている[21, 36, 37]．例えば Kim らは，シールドガス組成が GMAW におけるアークの物理的特性，溶滴移行形態，溶滴移行周波数，およびスパッタ発生に与える影響について詳細に検討し，その結果，CO_2 では比較的大きな溶滴が低周波数で移行し，多量のスパッタを伴うグロビュラー移行が優勢である一方，Ar 主体のシールドガスではより小さな溶滴が高周波数で移行し，スパッタが大幅に抑制されるスプレー移行が促進されることを明らかにした[34]．しかしながら，これらの検討はシールドガス組成が一定であることを前提としており，ガス組成が時空間的に変化するパルスガスマグ溶接のような特殊なプロセスにおける溶滴移行現象については，従来の知見だけではその挙動を整理することが困難である．特にパルスガスマグ溶接では，インナーガスの Ar がパルス状に添加されるため，単純なガスの混合比での議論は不可能であり，そのガス添加条件パラメータは流量のみならず周波数や Duty（本論文では電磁弁開時間と定義）と非常に多い．さらにそこに溶接電流やワイヤ径などの影響も加わることで，マグ溶接のような溶滴移行のスプレー化（臨界電流の存在）[21, 36]，溶滴移行周波数の変化[27, 71-73]など，現象は高度に複雑化する可能性がある．よって，現象の理解のためには，まずはそれぞれのパラメータが溶滴移行に与える影響をまとめた体系的な整理が必要であると考える．

第二に，パルスガスマグ溶接における溶滴移行制御メカニズムの解明である．2 種類のガスによる流れ場，アークプラズマ，溶滴移行現象が時々刻々と時空間的に変化し，相互に作用し合うため，その物理現象は極めて複雑であり，詳細な解明が求められる．前述のマグ溶接における活性ガス濃度による溶滴移行形態の変化は，ガスの比熱に起因してアーク形状が緊縮すること[44]，またアークプラズマ内の電流経路が変化すること[74-77]によって，溶滴に作用する駆動力のバランスが変化するためであるとされている．例えば，荻野らは数値シミュレーションにより，GMAW におけるアークプラズマと溶滴移行を考慮した 3 次元モデルを確立し，表面張力や電磁力といった駆動力が溶滴に及ぼす影響を明らかにしている[77]．また，茂田らおよび辻村らは，ミグ・マグ溶接の分光観察を通じて，アークプラズマ内における Ar および Fe の発光挙動から，主たる電流経路がアーク外縁部に集中することでアーク力が低下し，スプレー移行が生じることを明らかにしている[74, 75]．しかしながら，これらの先行研究はシールドガス組成が一定であることを前提としており，溶接中にアークプラズマ雰囲気が時空間的に変化する状態における種々の物理現象，特にその挙動や駆動力のバランスについては未解明な点が多い．パルスガスマグ溶接では，ガス組成が周期的に変化するため，アークプラズマ雰囲気が時空間的に大きく変動する．このため，従来の炭酸ガスアーク溶接や混合ガスマグ溶接で得られた知見がそのまま適用できるとは限らない．特に，CO_2 アーク期間と Ar アーク期間の繰り返しによって生じる電流およびアーク形状の変化は，ガスメタルアーク溶接の溶滴移行において重要な駆動力である電磁ピンチ力やアーク力に影響を及ぼす可能性が極めて高く，その詳細な挙動と駆動力のバランスを明らかにすることは，溶滴移行現象の理解を深める上で不可欠である．

以上のように，パルスガスマグ溶接の確立には，多岐にわたるパラメータの体系的な整理と，動的なアーク現象に基づく溶滴移行メカニズムの解明が不可欠である．これらの課題を解決し，物理的根拠に基づいた制御指針を明確にすることが，本技術を新たな溶接プロセスとして実現するための基盤となる．

1.4 研究目的・研究方針

本研究の目的は，GMAW における新たな低スパッタ溶接技術であるパルスガスマグ溶接法の開発，およびその溶滴移行制御メカニズムの物理現象解明である．具体的には，アーク雰囲気ガス組成の動的な変化が溶滴移行に及ぼす影響を詳細に分析し，スパッタ発生を抑制しつつ安定した溶滴移行を実現する条件を確立する．

本研究は，学術的および工学的に以下の多大な意義を有する．学術的意義として，本研究は，アーク雰囲気ガス組成の動的な変化が溶滴移行に与える影響という，これまで探求されてこなかった極めて重要な領域に焦点を当てることで，溶接物理における新たな知見を体系的に提供する．具体的には，Ar 添加条件をはじめとした種々の溶接パラメータを変化させた溶接現象の実験観察を通じて溶滴移行制御が可能な条件範囲を検討し，ガス流の可視化，複数の溶接電源特性の検討，アークプラズマの分光観察といった多角的な実験的検討から，アーク雰囲気変化が溶滴移行現象に及ぼすメカニズムを明らかにする．これにより，従来の GMAW にはない新たな溶滴移行メカニズムを提示し，溶接現象の理解を深化させる．また，溶接中にガス組成が動的に変化する環境下でのアークプラズマの非定常挙動を詳細に解析することは，従来溶接法では得られない新たな知見を提供し，アークプラズマ物理学の発展に大きく貢献できるものと考える．

また工学的意義としては，本研究で開発されるパルスガスマグ溶接法が，革新的な低スパッタ溶接技術として確立される点が挙げられる．これにより，スパッタ発生を大幅に抑制し，溶接後の後処理工程の削減による生産性向上とコスト削減を実現する．加えて，近年価格が高騰し続けている Ar ガスの使用量を抑制することでガスコストの低減にも貢献し，大掛かりな設備投資を必要としない溶接プロセスとして開発されることで，日本の産業を支える中小企業においても導入しやすい技術となる．

以上の学術的および工学的意義を踏まえ，本研究は，パルスガスマグ溶接という革新的な技術の物理現象を深く解明し，その実用化に向けた基盤を確立することで，溶接科学の発展と産業界への貢献を目指すものである．

1.5 本論文の構成

Fig. 1.18 に本論文の構成を図示する．本論文は全 6 章で構成される．

第 1 章「緒論」では，生産プロセス分野における社会的背景および産業界における溶接・接合技術の立ち位置について概説する．次に，GMAW の概要とその主体的な物理現象である溶滴移行現象について示し，応用・実例化技術として種々の溶滴移行制御技術について整理する．最後に，GMAW における現状の課題を精査し，低スパッタ・低ガスコスト・低設備コストをコンセプトとした新たな溶接法の

重要性から，パルスガスマグ溶接の開発について研究する方針を示した．

第 2 章「周期的 Ar 添加による炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行制御」では，高速度カメラによるガス流および溶滴移行現象の観察結果，また溶接中の電流電圧波形の結果から，本溶接法における基本的な物理現象について示し，アーク雰囲気変化による溶滴移行現象について考察する．

第 3 章「Ar 添加条件と溶滴移行が同期する範囲の検討」では，パルスガスマグ溶接法において 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する．

第 4 章「溶滴離脱の支配因子に関する検討とメカニズムの解明」では，パルスガスマグ溶接法において電流変化とアーク形状変化のどちらが溶滴離脱に支配的な因子であるかを実験的に調査し，その物理現象について考察し，メカニズムを解明する．

第 5 章「パルスガスマグ溶接の効果と実用化に向けた検討」では，パルスガスマグ溶接のスパッタ低減効果，ガスコスト低減効果などの様々な効果について，実用的な観点から調査および評価する．

第 6 章「結論」では，本研究で得られた結果を総括する．

第 1 章　緒論

- 生産プロセスと溶接・接合技術，溶接・接合技術の変遷と近年の研究動向
- ガスメタルアーク溶接（GMAW）および GMAW の溶滴移行現象について
- 溶滴移行制御技術による GMAW の低スパッタ化
- GMAW における現状の課題
- 研究目的・研究方針

第 2 章　周期的 Ar 添加による炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行制御

- パルスガスマグ溶接の基本原理
- 実験装置およびパルスガスマグ溶接トーチについて
- ガス流の可視化観察
- 溶滴移行現象と電流電圧波形

第 3 章　Ar 添加条件と溶滴移行が同期する範囲の検討

- Ar 添加周波数，平均流量，電磁弁開時間が溶滴移行に与える影響と同期条件
- 電磁弁開時間と溶滴離脱の動作時間
- Ar 添加周波数と Ar 流量を考慮した溶滴移行分布の整理
- 溶滴移行同期のための Ar 添加条件
- 電流およびワイヤ送給速度，ワイヤ径が溶滴移行に与える影響

第 4 章　溶滴離脱の支配因子に関する検討とメカニズムの解明

- 電流変化が溶滴移行に与える影響
- アーク雰囲気変化が溶滴移行に与える影響
- 分光観察によるアーク雰囲気変化の観察
- パルスガスマグ溶接における溶滴移行現象と支配因子の総括

第 5 章　パルスガスマグ溶接の効果と実用化に向けた検討

- スパッタおよびヒューム発生量，溶込み形状の評価
- 溶接金属の機械的性質と化学成分
- パルスガスマグ溶接法の評価と今後の展望

第 6 章　結論

Fig. 1.18 Flow chart of this study

参考文献

[1] カイゼンナビ(経済産業省認定), https://kaizen-navi.biz/, (accessed 2024-07-23).

[2] UNITED NATIONS: Sustainable Development Goals, https://www.un.org/sustainabledevelopment/, (accessed 2024-07-23).

[3] 経済産業省: 2020 年版ものづくり白書, https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/index_mono.html, (accessed 2024-07-23).

[4] 国土交通省: 建設業を巡る現状と課題, https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001610913.pdf, (accessed 2024-07-23).

[5] 溶接学会・日本溶接協会編: 溶接・接合技術総論, 三報出版, (2015), 第 1 章.

[6] 山本英幸: アーク溶接電源－溶接アーク現象の制御とその進歩－, 溶接学会誌, Vol.66, (1997), No.8, 49-63.

[7] 中西保正: 溶接技術者から見た日本の大型構造物の歴史, 溶接学会誌, Vol.74, (2005), No.6, 5-30.

[8] 安藤弘平: 交流アーク熔接機, 電気書院, (1952).

[9] 安藤弘平, 西口公之: アーク溶接機器, 産報, (1974).

[10] 吉田俊夫, 大庭浩, 長谷川光雄: 自動アーク溶接, 産報, (1956).

[11] 日本溶接協会: アーク溶接技術発展の系統化調査, https://www-it.jwes.or.jp/kahaku/index.jsp, (accessed 2024-07-23).

[12] 木寺正晃: 溶接電源の新しい展開～積層造形（WAAM 方式）について, 一般社団法人溶接協会溶接情報センターWE-COM マガジン, Vol.39, (2021).

[13] GMAW 溶融池モデルを活用したワイヤーアーク金属積層造形シミュレーション, 溶接学会誌, Vol.90, (2021), No.2, 10-13.

[14] LINCOLN ELECTRIC; VRTEX, https://lincolnelectric.co.jp/products/lec016, (accessed 2024-07-24).

[15] コベルコ溶接テクノ株式会社: ナップ溶接トレーニング, https://www.kobelco-kwts.co.jp/nup-welding/, (accessed 2024-07-24).

[16] Seabery; SOLDAMATIC, https://usersarea.soldamatic.com/ja/welding-with-soldamatic/, (accessed 2024-07-24).

[17] 山本光学; 溶接伝承マスター, https://yk-yamamoto.co.jp/product/detail/787/, (accessed 2024-07-24).

[18] 津山忠久, 北川悟, 林篤史, 金平徳之: 超広視野可視化技術を備えた 3D デジタル溶接マスクを用いた溶接技能教育, 溶接学会誌, Vol.92, (2023), No.1, 22-26.

[19] 黒川剛志: マグ溶接フラックス入りワイヤの開発と発展, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, Vol.50, (2000), No.3.

[20] W.Lucas: Welding & Fabrication, (June-1992), 218.

[21] 池上祐一，宮内秀樹，山本信也，内原正人：シールドガスによるスパッタ低減について，溶接学会誌, Vol.75, (2006), No.7, 570-574.

[22] 経済産業省：生産動態統計, https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/index.html, (accessed 2024-01-24).

[23] 竹内宥公，洞田亮: 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, Vol.51, (1980), No.1, 34-42.

[24] 佐藤豊幸：溶接品質および作業性に及ぼすシールドガスの影響，溶接学会誌, Vol.69, (2000), No.8, 645-648.

[25] W. E. W Ruckdeschel: Classification of metal transfer, IIW Doc. XII-636-76, (1976).

[26] 平田好則：ミグ/マグ溶接，溶接学会誌, Vol.77, (2008), No.4, 296-303.

[27] 佐藤英一，山崎圭：炭酸ガスアーク溶接のグロビュール移行制御，溶接学会誌, Vol.84, (2015), No.4, 19-23.

[28] 安藤弘平，長谷川光雄：溶接アーク現象≪増補版≫，三報出版, 6 版, (1976).

[29] H. C. Ludwig: Metal transfer characteristics in gas-shielded arc welding, Welding Journal, Vol. 36, (1957), 23-26.

[30] J. C. Needham, C. J. Cooksey and D. R. Milner: Metal transfer in inert-gas shielded-arc welding, British Welding Journal, Vol. 7, (1960), 101-114.

[31] S. Liu and T. A. Siewert: Metal transfer in gas metal arc welding: droplet rate, Welding Journal, Vol. 68, (1989), 52-58.

[32] A. Lesnewich: Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding part II - control of metal transfer, Welding Journal, Vol. 37, (1958), 418-425.

[33] S. Rhee and E. Kannatey-Asibu, Jr.: Observation of metal transfer during gas metal arc welding, Welding Journal, Vol. 71, (1992), 381-386.

[34] Y-S. Kim and T. W. Eagar: Analysis of metal transfer in gas metal arc welding, Welding Journal, Vol. 72, (1993), 269-278.

[35] L. A. Jones, T. W. Eagar and J. H. Lang: Images of a steel electrode in Ar-2%O_2 shielding during constant current gas metal arc welding, Welding Journal, Vol. 77, (1998), 135-141.

[36] 内原，宮内，中田：パルスマグ溶接性に及ぼすシールドガス組成の影響，第 127 回溶接アーク物理研究委員会資料, (1997).

[37] 橋本哲哉，森本朋和：ガスシールドアーク溶接材料における低スパッタ化，溶接学会誌, Vol.75, (2006), No.7, 560-564.

[38] 安藤弘平，山本利雄，西川淳：炭酸ガス・アーク溶接のアーク現象について，溶接学会誌, Vol.30, (1961), No.9, 710.

[39] 安藤弘平，山本利雄：炭酸ガスアーク溶接におけるスパッター について（第 2 報），溶接学会誌,

Vol.31, (1962), 219.

[40] 菅哲男, 小林実:炭酸ガスアーク溶接用フラックス入りワイヤの溶滴移行現象, 溶接学会論文集, Vol.3, (1985), No.2, 269-276.

[41] 荒井敏夫, 六条正治, 山田忠昭, 菅哲男: 炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの発生, 溶接学会論文集, Vol.1, (1983), No.2, 279-284.

[42] 山崎圭: グロビュール移行制御による炭酸ガスアーク溶接のスパッタおよびヒューム低減に関する研究, 博士論文, 2011.

[43] 溶接学会溶接法研究委員会: 新溶接アーク現象, 産報出版, 第 1 版(2021).

[44] 田中学, 田代真一: 溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察, 溶接学会論文集, Vol.25, (2007), No.2, 336-342.

[45] 松縄朗, 山本英幸, 平本誠剛: パルスアーク溶接法, 溶接学会誌, Vol.53, (1984), No.6, 20-58.

[46] 上山智之, 恵良哲生: 電流波形制御によるガスシールドアークプロセスの進化, 溶接学会誌, Vol.81, (2012), No.1, 5-15.

[47] J. C. Needham: Control of transfer in aluminium consumable electrode welding, Physics of the welding arc Asymposium, London, (October-1962), 114-122.

[48] J. C. Needham: Pulse controlled consumable electrode welding arcs, British Welding Journal, Vol. 12, (1965), No.4, 191-197.

[49] P. Boughton and J. A. Lucey: The used of pulsed current to control metal transfer in welding, British Welding Journal, Vol. 12, (1965), No. 4, 159-166.

[50] S. A. Agnew and E. H. Daggett: Introduction to Pulsed-Spray Arc Welding, Welding Journal, Vol.45, (1966), No.4, 284-289.

[51] G. R. Salter and M. H. Scott: Pulsed Gas Metal Arc Welding Titanium, Welding Journal, Vol. 46, (1967), No.11, 154-167.

[52] F. Rienks and R. C. Ashauer: Development and evaluation of a modulated power control for fusion welding, Welding Journal, Vol. 50, (1971), No. 5, 222-230.

[53] M. Boria et al.: The effect of pulsed gas metal arc welding parameters on weld cooling rates, Welding Journal, Vol. 50, (1971), No. 11, 474-479.

[54] 平田好則: パルスアーク溶接, 溶接学会誌, Vol.71, (2002), No.5, 115-130.

[55] 三田常夫: パルス MAG 溶接, 溶接学会誌, Vol.67, (1998), No.4, 316-320.

[56] S. F. Goeche: Enegiereduziertes Lichtbogen-Fuegeverfahren fuer waermeempfindliche Wekstoffe, DVS-BERICHETE 237, (2005), 44-48.

[57] T. Ogasawara et al.: A Power Source of Gas Shielded Arc Welding with New Current Waveforms, Welding Journal, Vol. 66, (1987), No. 3, 57-63.

[58] E. K. Stava: A new low spatter arc welding machine, Welding Journal, Vol. 72, (1993), No. 1, 25-29.

[59] 西村仁志: アーク溶接機およびアーク溶接ロボットの技術動向, 電気製鋼, Vol.78, (2007), No.2, 159-166.

[60] K. Himmelbauer: The CMT process -A revolution in welding technology, IIW Doc XII-1845-05, (2005), 20-27.

[61] C. G. Pickin and K. Young: Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminum alloy, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.11, (2006), No.5, 583-585.

[62] 北村佳昭, 山崎圭, 中司昇吾, 小川亮, 井上芳英, 橋本裕志: 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, Vol.111, (2022-9), 282-283.

[63] 北村佳昭, 山崎圭, 中司昇吾, 小川亮, 井上芳英, 橋本祐志: 短絡移行を前提としないワイヤ送給制御プロセス AXELARC の開発, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, Vol.72, (2023), No.1, 2-8.

[64] 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則: 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, Vol.26, (2008), No.1, 37-41.

[65] 池上祐一, 宮内秀樹, 山本信也, 内原正人: シールドガスによるアーク溶接の溶接品質・溶接部性能の改善, 溶接学会誌, Vol.79, (2010), No.6, 34-39.

[66] 小原 昌弘, 原田 雄也, 本山 輝明: 局所パルスガス添加による極低酸素 GMA 溶接の安定化, 溶接学会全国大会講演概要, (2015-4), 10-11.

[67] 中村 照美, 平岡 和雄, 高橋 誠, 佐々木 智章: シールドガス組成制御による GMA 溶接プロセスの開発—超狭開先 GMA 溶接プロセスの開発(第 3 報)—, 溶接学会論文集, Vol.20, (2002), No.2, 237-245.

[68] 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, 溶接学会論文集, Vol.38, (2020), No.4, 363-378.

[69] 藤原康平, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英: 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, 溶接学会論文集, Vol.38, (2020), No.4, 379-391.

[70] 藤原康平: 周期的アーク周辺ガス雰囲気変化を用いた溶滴移行制御法, 一般社団法人溶接協会溶接情報センターWE-COM マガジン, Vol.51, (2024).

[71] 荻野陽輔: 溶滴移行を伴う溶接アーク現象の数値シミュレーション, 溶接学会誌, Vol.84, (2015), No.4, 251-254.

[72] 荻野陽輔: ガスメタルアーク溶接の溶融池モデルならびに熱源モデルの開発, 溶接学会誌, Vol.86, (2017), No.1, 32-37.

[73] 荻野陽輔: ガスメタルアーク溶接におけるアークプラズマおよび溶滴移行現象, 溶接学会誌, Vol.92, (2023), No.4, 236-245.

[74] 茂田正哉, 中西省太, 田中学, MURPHY Anthony B.: 画像分光法によるガスメタルアーク溶接における動的プラズマ挙動の解析, 溶接学会論文集, Vol.33, (2015), No.2, 118-125.

[75] 辻村吉寛, 田中学: ミグ溶接の溶滴移行現象を伴うアークプラズマ状態の挙動解析, 溶接学会論文

集, Vol.30, (2012), No.4, 288-297.

[76] Y. Ogino, S. Asai and Y. Hirata: Visualization of arc plasma and molten wire behavior in CO_2 arc welding process by three-dimensional numerical simulation, Welding in the World, 64(2020), 1789-1797.

[77] 荻野陽輔, 平田好則: 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, Vol.33, (2015), No.1, 1-12.

第2章　周期的 Ar 添加による炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行制御

2.1 緒言

パルスガスマグ溶接は炭酸ガスアーク溶接中に Ar を添加し，アーク雰囲気を変化させることにより溶滴移行を制御する．そのため Ar を適切にアーク周辺へと輸送することか肝要であるが，シールドガス流が二重かつインナーガスはパルス添加という特殊な添加条件であることから，どのように 2 種のガスが輸送されているのかを把握する必要がある．また，そのガス輸送に併せてアークや溶滴移行がどのような挙動を示すかを観察することで，本溶接法の物理現象を解明するための手がかりとなると考えた．

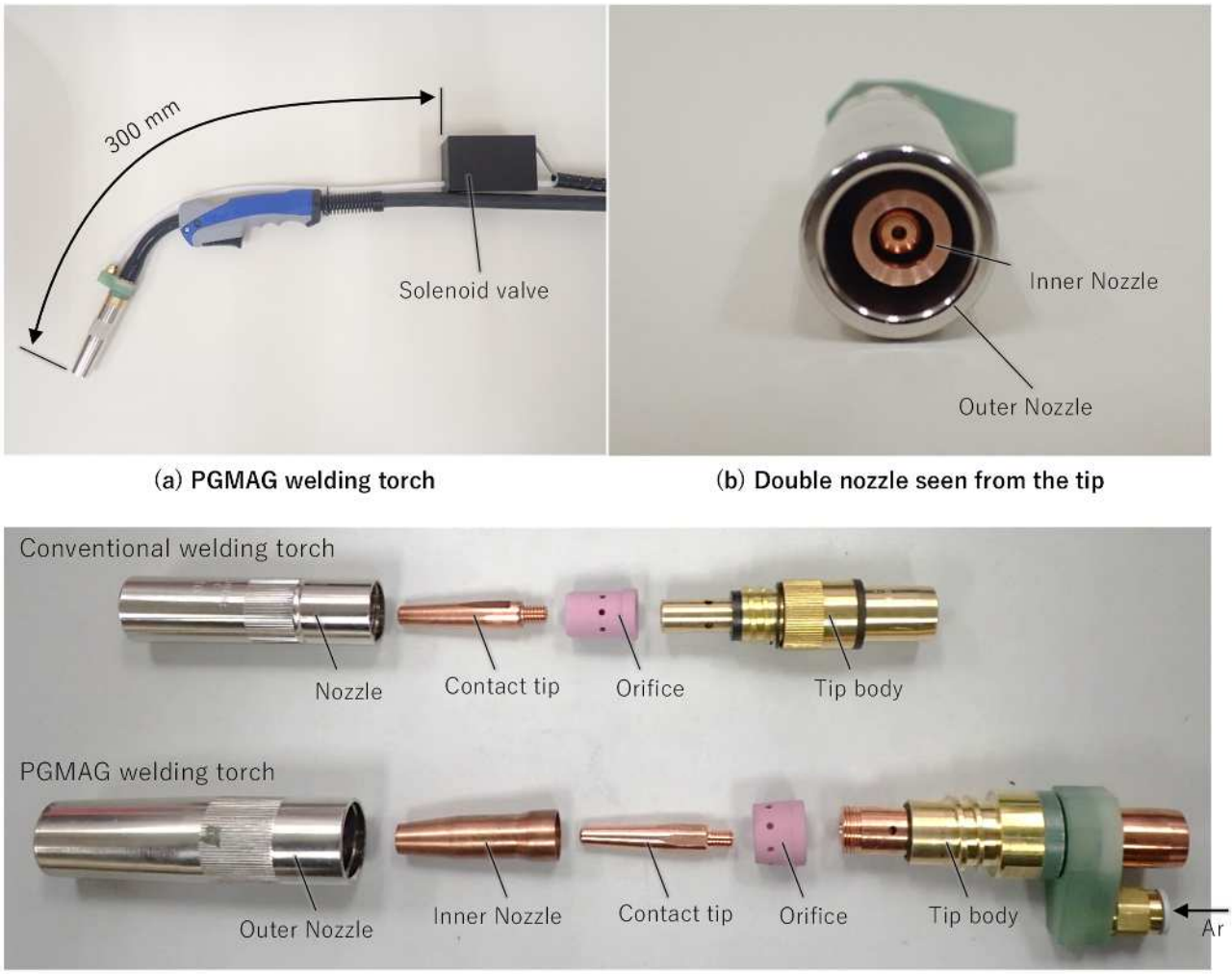
本章では，高速度カメラによるガス流および溶滴移行現象の観察結果，また溶接中の電流電圧波形の結果から，本溶接法における基本的な物理現象について示し，アーク雰囲気変化による溶滴移行現象について基礎的な考察する．

2.2 実験方法

実験に用いたパルスガスマグ溶接（PGMAG）トーチを Fig. 2.1 に示す．溶接トーチは通常の半自動溶接用トーチの内側にノズルを取り付けた二重ノズル構造となっており，それぞれアウターノズルからは CO_2 を定常で流し，インナーノズルからは Ar をパルス添加する．CO_2 はワイヤ送給装置よりトーチケーブル内を通って供給され，Ar はチップボディ根元にあるワンタッチ継手から供給される構造である．二重ノズルの寸法は Fig. 2.2 に示す通りであり，アウターノズル内径は 16 mm，インナーノズル内径は 9 mm である．それぞれのガスの添加条件を Table 2.1 に示す．Ar はトーチの持ち手付近（電磁弁出口からノズル出口までの Ar 供給経路は 300 mm）に取り付けた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．小さな溶滴をスムーズに移行させる狙いから，周波数は炭酸ガスシールドアーク溶接の溶滴離脱周波数[1]よりも十分早い 50 Hz に設定した．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 Fig. 2.3 の例に示すように設定した．なおこの矩形波信号が 5 V の時に電磁弁が開き，0 V のとき電磁弁は閉じられる．また，Ar の平均流量および CO_2 の流量は azbil 製デジタルマスフローコントローラ[2]により設定した．ガス流の観察はシュリーレン装置（カトウ光研，システムシュリーレン SS100[3]）により高速度カメラ（2000 fps）を用いて観察し，電磁弁パルス信号と同期させて記録した．なおガス流の可視化実験はアークを発生させずに観察した．

溶接実験において，溶接電源はデジタル制御インバータ電源（DAIHEN，デジタルオート DM500[4]）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（神戸製鋼所, MG-50[5]）を用いた．溶接電流（平均），ワイヤ送給速度，アーク電圧（平均），溶接速度は Table 2.2 に示す条件で実験を行った．コンタクトチップ－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．溶滴移行は溶接中のアーク近傍を高速度カメラ NAC 製 MEMRECAM GX-1F[6]（1000 fps）で撮影して観察した．撮影のセッティングについて Fig. 2.4 に模式図を示す．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 CO_2 と Ar の二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」はいずれも Ar 添加条件のことを指す.



(a) PGMAG welding torch

(b) Double nozzle seen from the tip

(c) Comparison of the configurations of a conventional welding torch and a PGMAG welding torch

Fig. 2.1 Welding torch for PGMAG welding

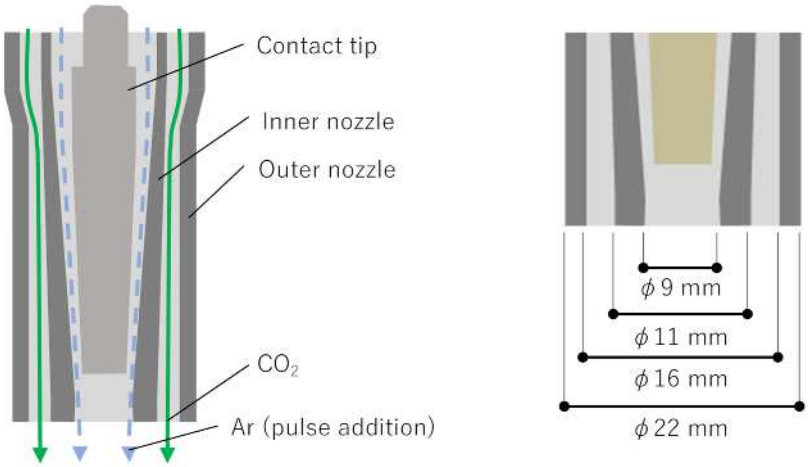


Fig. 2.2 Outline of double nozzle

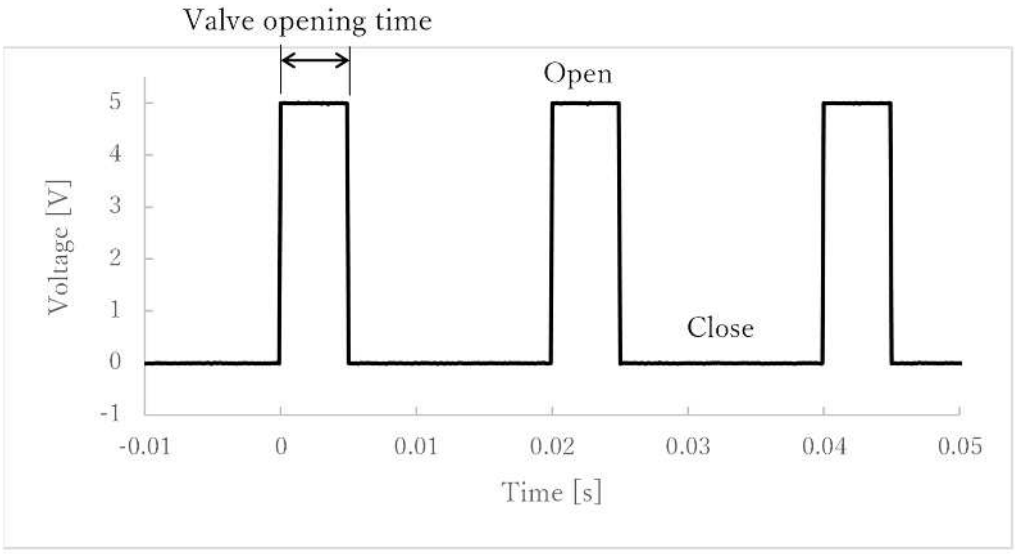


Fig. 2.3 Square wave signal output from a pulse generator

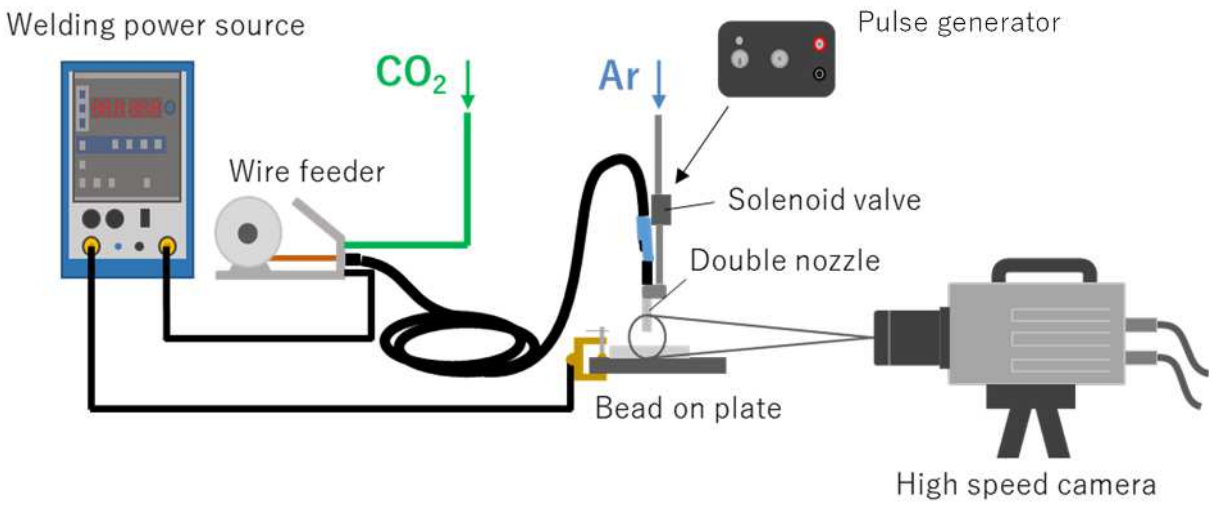


Fig. 2.4 Schematic diagram of the setup for high-speed observation of metal transfer

Table 2.1 Gas conditions

Ar	Frequency f	50 Hz
	Flow rate (average) $Q_{ave.}$	4 L/min
	Valve opening time t	5 ms
CO_2	Flow rate Q	25 L/min

Table 2.2 Welding conditions

Wire	JIS Z 3312 YGW11 ϕ1.2 mm
Base metal	SS400
Welding current	280 A
Wire feeding speed	11.9 m/min
Arc voltage	36 V
Welding speed	30 cm/min
Wire extension	25 mm

2.3 ガス流の可視化観察

本プロセスは二重ノズルを用いるかつインナーガスはパルス状に添加することから，ガス流の様子を可視化し確認しておく必要がある．そこで，シュリーレン法を用いてノズル先端付近におけるガス流を可視化した．まずは比較対象として，通常の半自動溶接トーチにおいて CO_2 および Ar-20%CO_2 におけるガス流の可視化結果を Fig. 2.5 に示す．ガス流量はともに 25 L/min である．Fig. 2.5 より，CO_2 および Ar-20%CO_2 は一定の安定した流れとなっており，ワイヤ先端および溶接部付近が大気より保護されていることが分かる．なお同流量にも関わらず Fig. 2.5(b) Ar-20%CO_2 は比較的陰影が薄いが，これはシュリーレ

ン法によるガス流可視化の原理として周囲の大気との密度差を観察していることから，CO_2 に比べて大気との密度差が比較的小さい Ar が多く含まれている Ar-20%CO_2 では陰影が薄く映るためである．

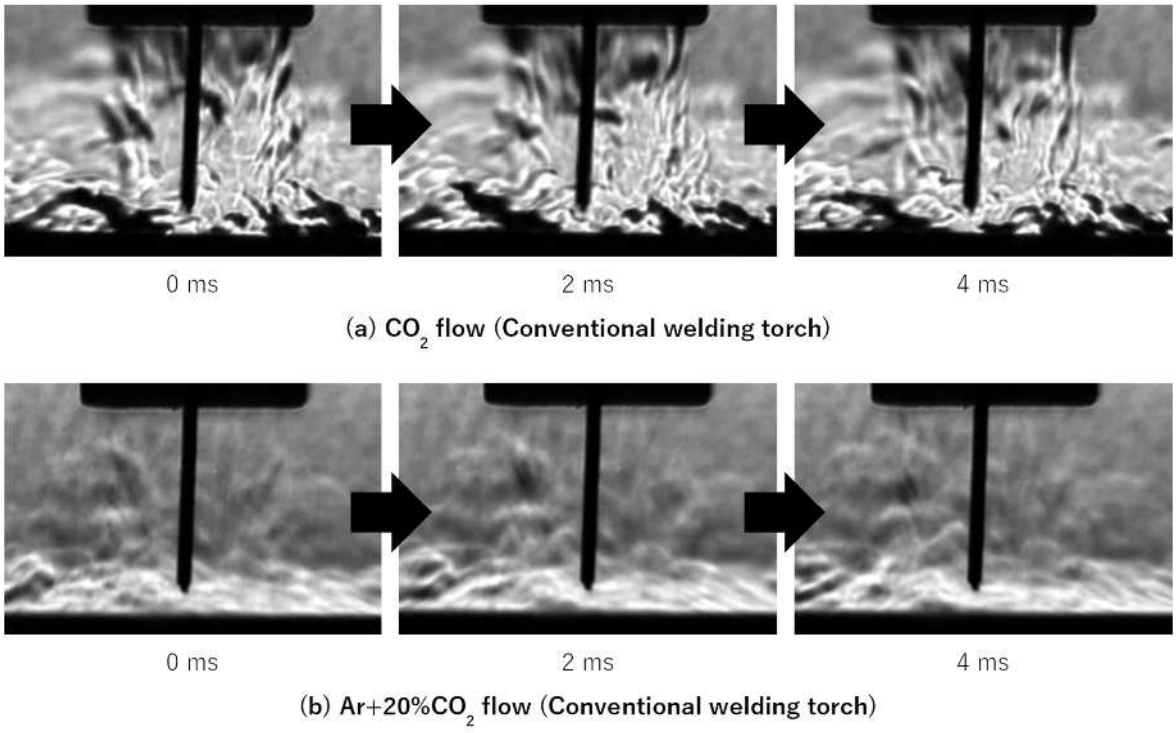


Fig. 2.5 Visualization results of shielding gas flow with conventional welding torch

一方，パルスガスマグ溶接トーチにおいて，2 種のガスがどのように噴出しているのかを観察した．Fig. 2.6 に(a)電磁弁パルス信号，(b)Ar のみを添加した場合の可視化したガス流，(c)アウターガスである CO_2 を定常で流し，そこに Ar を添加した場合の可視化したガス流を示す．なお図中における時刻は(a)電磁弁パルス信号と同期している．

まず Ar のみを添加した Fig. 2.5(b)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 は電磁弁閉時間中に圧力が高まり，さらにガス経路内圧力（ボンベ圧力 0.3 MPa）から大気圧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，やがてワイヤ先端付近まで到達する．Ar 塊の周縁部に生じる渦輪は，気体の粘性によるものである．ノズル先端を通過する Ar は粘性のためにノズルの縁に引っ張られ，ノズル先端付近を通過する Ar とその中心部を通過する Ar の間に流速のずれが生じる．この流速のずれは気流が回転する効果を生み出し，渦輪を発生させる[7]．また，渦輪により周囲の気体を巻き込みつつ，Ar 流の塊は下降とともに徐々に半径方向へと膨らんでいく．この Ar 流の塊の外周径（インナーノズル内径に対する拡大率）と，Ar 流の塊先端からノズル先端間の距離を 0.5 ms 毎に計測した結果を Fig. 2.7 に示す．Fig. 2.7 より，アーク周辺であるノズル先端から 15-20 mm では，Ar 塊がインナーノズル径の約 1.5 倍程度まで膨らむことが分かった．やがて母材にぶつかった 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．

Fig. 2.5(a)(b)を用いて電磁弁開信号とノズル先端からの Ar 噴出の時間的ズレを測定したところ 0.5 ms であった．用いた電磁弁の仕様として電磁弁開信号から電磁弁が開くまでに 0.5 ms の応答時間があることを考慮すると，電磁弁開とほぼ同時にノズル先端から Ar が噴出していることが分かった．このことから流路全体が Ar で満たされており，電磁弁開とともにところてん式に押し出されてノズル先端から Ar が噴出すると考えられる．しかし実際の Ar は圧縮性流体であるため，流路が長すぎる場合は電磁弁パルス信号と Ar 添加の応答性は悪くなる．そこで，Fig. 2.8 に Ar 供給経路長さを標準の 300 mm から徐々に長くして電磁弁開信号の立ち上がり（図中 0 ms）から Ar が噴出するまでの時間を観察した結果を示す．ノズル先端より渦輪を伴った Ar 流が観察された瞬間を比較すると，Ar 供給経路長さ 300 mm で 0.5 ms，450 mm で 1.0 ms，600 mm で 1.0~1.5 ms となった．以上より，できる限り電磁弁以降の Ar 供給経路を短くすることで，電磁弁パルス信号と Ar 添加の応答性は良くなるといえる．

Fig. 2.5(c)はアウターノズルに CO_2 を流しながら，インナーノズルに Ar をパルス添加した場合の観察結果である．実際の溶接中のガス流を想定して CO_2 と Ar を同時に流した検討だが，CO_2 が無い場合と同じように Ar は噴出した瞬間から膨らみ，またその時アウターガスの CO_2 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が生じていることが分かる．これはアウターガス（CO_2）とインナーガス（Ar）の流速差によって生じるものと考えられる．このように，Fig. 2.5 の通常溶接トーチの結果と比較すると，Ar の添加と共に時々刻々とガス流全体の流れが変化している様子が見られた．特にくびれ状の流れは大気を巻き込み溶接金属に悪影響を及ぼすことが懸念されるが，これに関しては 5 章に後述する．

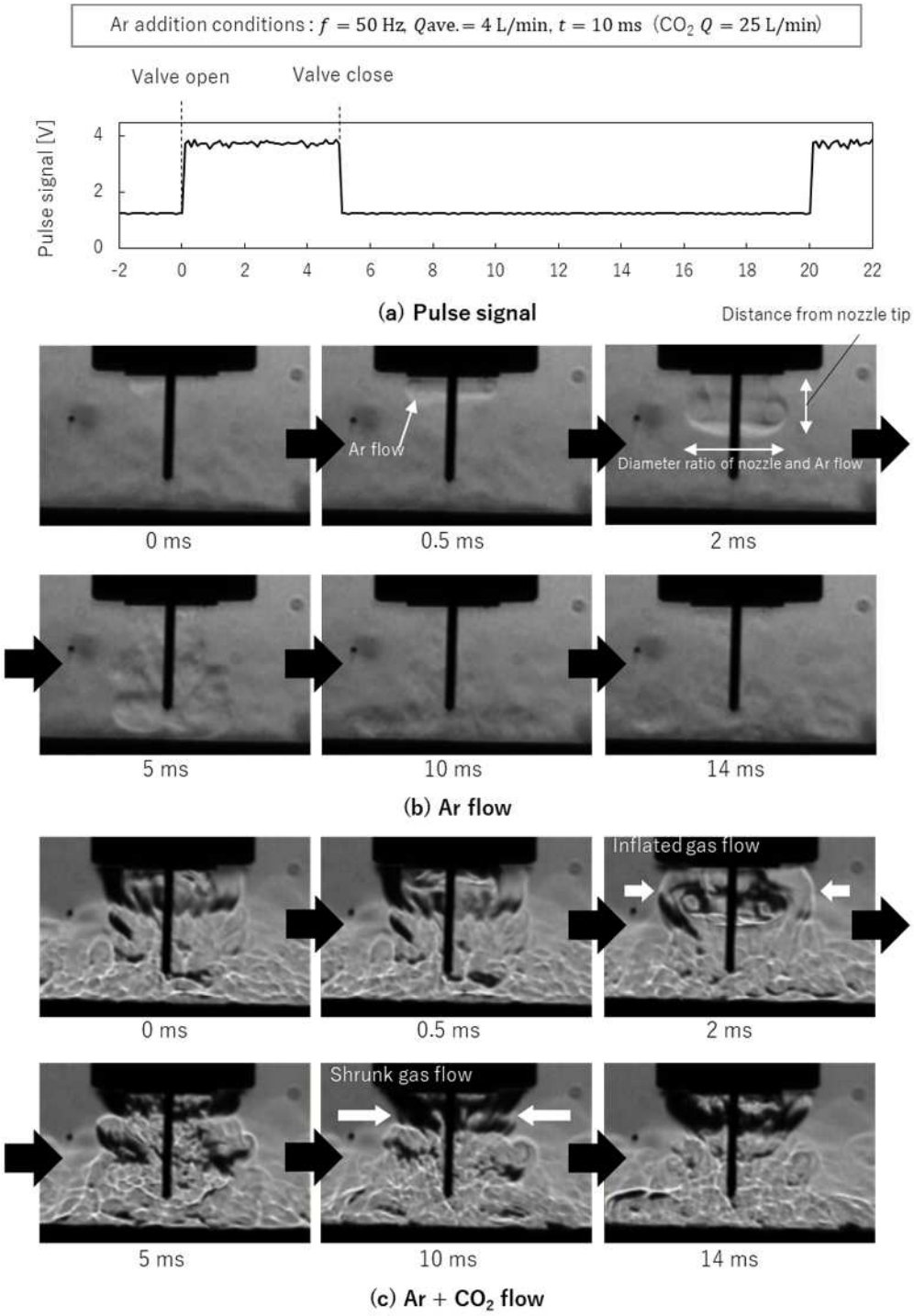


Fig. 2.6 Example of pulse signal of solenoid valve opening time, and photos of visualized Ar flow by Schlieren method

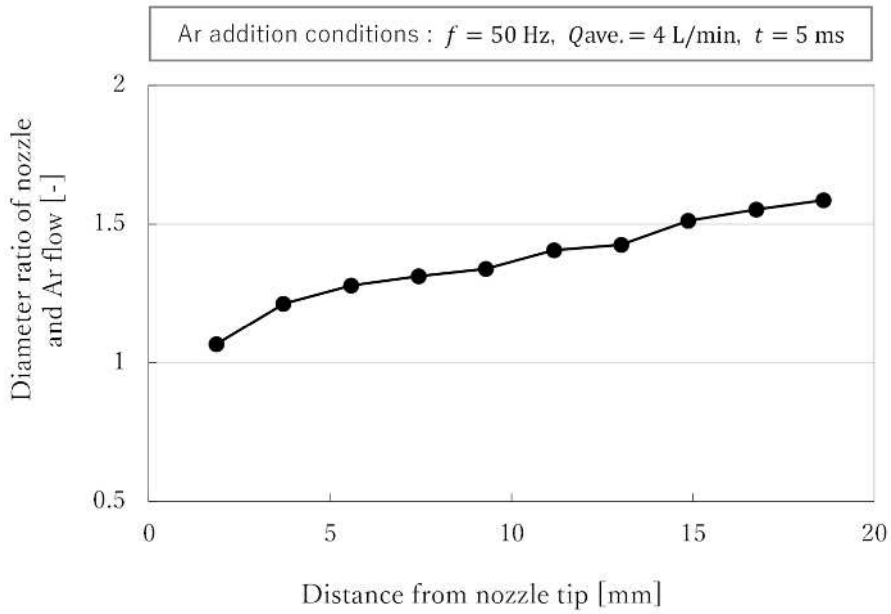


Fig. 2.7 Variations in diameter with descending distance of Ar flow

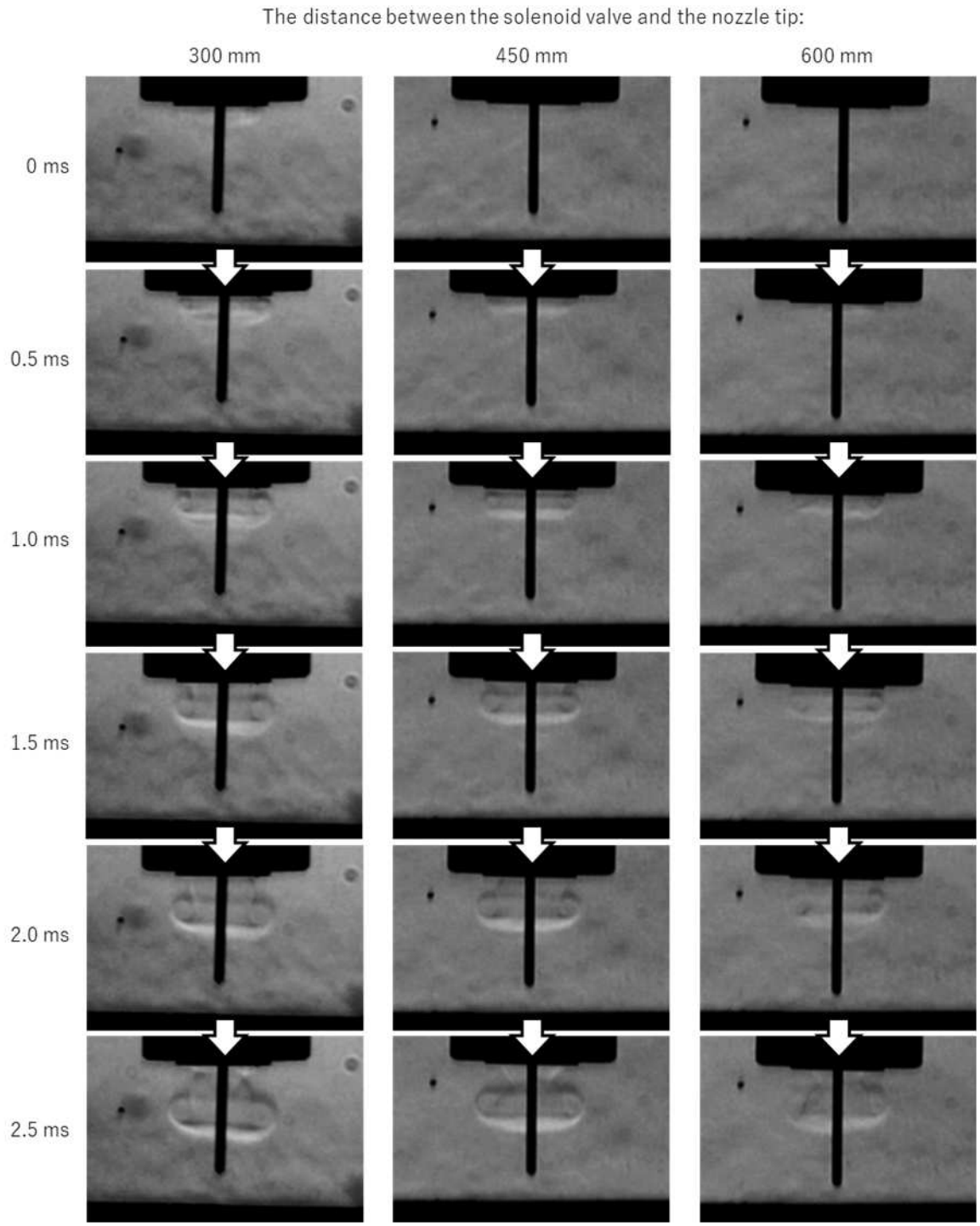


Fig. 2.8 Response of Ar jetting depending on the distance between the solenoid valve and the nozzle tip

次に，シュリーレン法によるガス流の観察結果を用いて Ar 流の下降速度を測定した．Fig. 2.9 に Ar のみを流した場合において，ノズル先端から Ar 流の先端までの距離を高速度動画のコマ毎に測定し，区間ごとの速度として整理した結果 (3 パルス分) を示す．なお Ar 流の先端は画像中の陰影を目視で確認し，Fig. 2.10 の長さをノズル先端から Ar 流の先端までの距離として計測した．また，CO_2 同時添加中の測定結果，およびピーク流量とノズル径から計算した Ar の初速理論値 3.8 m/s の線を併せて示す．なお，ピー

ク流量Qpは以下で導出される式(2.3)を用いて算出した．

ピーク流量Qpは Ar 添加条件を理想矩形波と仮定し，平均流量Qave.，パルスのデューティ比D（矩形波信号の 1 周期当たりの ON 時間比）とすると，以下の式(2.1)となる．

$$Q\mathrm{p} = \frac{Q\mathrm{ave.}}{D} \tag{2.1}$$

デューティ比Dは周波数fと電磁弁開時間tの積であらわすことができるため

$$D = f \times t \tag{2.2}$$

となり，式(2.1)に式(2.2)を代入すると，ピーク流量 Qp は式(2.3)で表される．

$$Q\mathrm{p} = \frac{Q\mathrm{ave.}}{f} \times \frac{1}{t} \tag{2.3}$$

Fig. 2.9 より，流速の測定値はバラツキが大きいものの，概ね初速理論値 3.8 m/s から極端に減衰することなくアーク付近まで到達していることが分かる．CO_2 同時添加中の測定結果においても流速の極端な減衰は見られず，CO_2 の流れがアーク付近への Ar 到達を阻むような影響はなく，Ar 流速を減衰させるような影響はないことが分かった．また，ノズル先端から 5 mm 付近の噴出した直後では流速が速く初速理論値を超えているが，これは電磁弁閉時間中に流路内で高まった圧力が一気に解放されたためと考えられる．

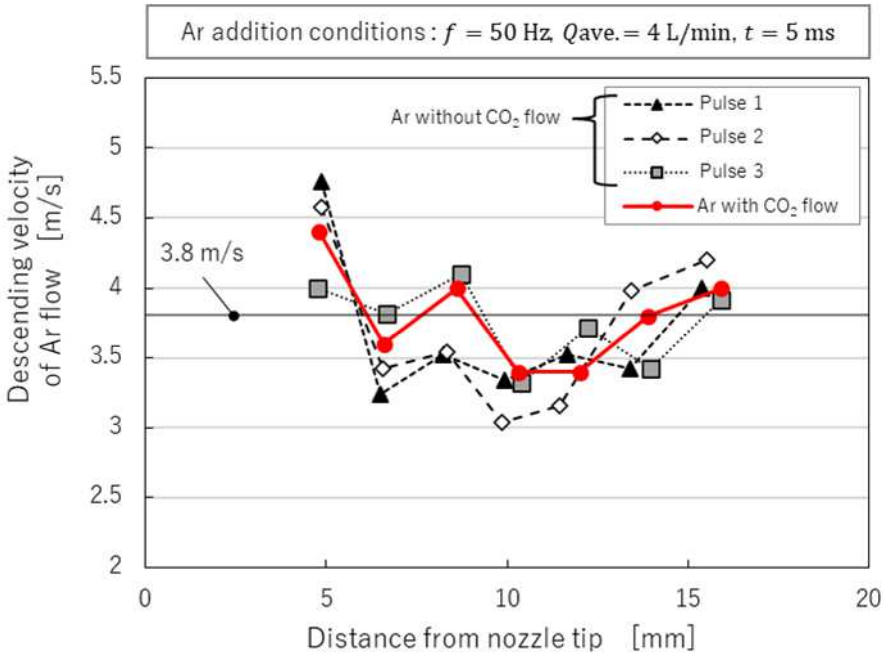


Fig. 2.9 Variations in descending velocity of Ar flow

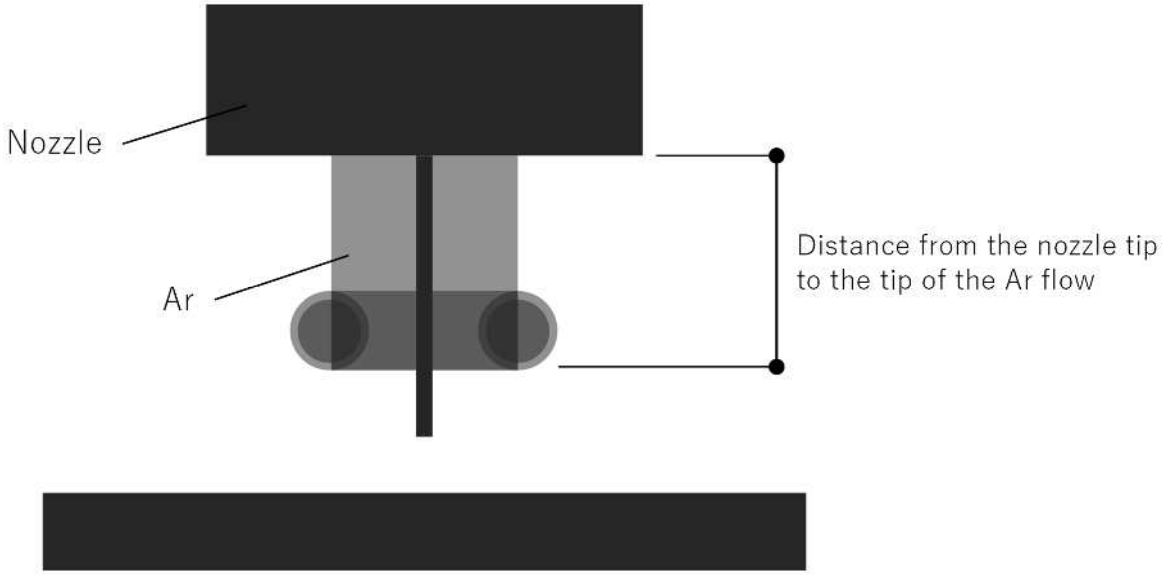


Fig. 2.10 Definition of the distance from the nozzle tip to the tip of the Ar flow

これらのシュリーレンによるガス流の観察は，前述のとおりアークを発生させずに検討した．実際の溶接中ではアークおよび溶融池付近が高温になり，またプラズマ気流等の影響もあるため Fig. 2.6 と全く同じ Ar の流れとはならないことが予想される．田中らのティグ溶接におけるアークを発生させた状態でのシュリーレン法によるシールドガス流の観察結果によると，電極先端から斜め下方に向かって流れ場の異なる範囲が存在するとされる[8]．この範囲はプラズマ気流による高速の流れ場になっていることが推測されており，アーク発生の有無で電極付近のガス流の変化があることは予想される．一方，電極上方やノズル出口付近においてはアークの発生の有無による差異はほとんど見られないことから，電極先端付近までの Ar 流は概ね同様の挙動を示すことが推測される．パルスガスマグ溶接においてはアークプラズマ内に Ar が入り込むことで溶滴移行制御を行うことが肝要であるが，その視点から考えると，Ar プラズマの発光を分光観察結果により観察することで，アーク形状および溶滴移行挙動が変化する程度の Ar がアークプラズマ内に混入できる流れ場となっていることが間接的に示すことができると考える．検証の詳細については 4 章に後述する．

2.4 溶滴移行現象と電流電圧波形

次に，本節ではパルスガスマグ溶接における溶接現象および電流電圧波形について説明する．Fig. 2.11 に本溶接法のアーク外観および溶滴移行を高速度カメラで撮影したスナップショットを示す．また，Fig. 2.12 にこの時の電磁弁パルス信号および電流電圧波形を示す．なお電磁弁パルス信号の立ち上がり時を 0 ms とし，Fig. 2.6 のガス流可視化結果と時間を揃えて整理した．また，アーク外観の評価は一般的に炭酸ガスアーク溶接で見られるような緊縮したアーク形状を「緊縮型」，混合ガスマグ溶接やミグ溶接で見られるような下部が広がったアーク形状を「フレア型」と呼称する．それぞれのアーク形状の例を Fig. 2.13 に示す．

Fig. 2.11 より，4〜5 ms にかけてアーク形態が緊縮型からフレア型に変化していることが分かる．Fig. 2.6 のガス流可視化結果と見比べると，5 ms で Ar がワイヤ先端部付近に到達していることから，アーク雰囲気が CO_2 主体から Ar 主体に切り替わったことが推察される．その後はフレア型アークを保ったまま 10~11 ms で溶滴が離脱し，11〜13 ms にかけて再度緊縮型アークに戻ったことから CO_2 主体の雰囲気に戻ったと考えられる．アーク形状変化時の模式図を Fig. 2.14 に示す．アーク形状と溶滴離脱の一連の挙動は次のように考えられる．CO_2 主体期間では溶滴下から発生する緊縮型アークの強いアーク力により溶滴は離脱することは難しく，時間経過とともに徐々に成長する．その後ある程度溶滴が成長したタイミングで Ar 主体期間の溶滴を包み込むようなフレア型アークに急変することで，溶滴はアーク力による支えを急激に失い，ワイヤ端から垂下しはじめてくびれが生成されることで溶滴が離脱する．その後は再度 CO_2 主体期間の緊縮型アークに戻り，次の溶滴が成長を始める．この一連のサイクルを繰り返すことによって溶滴移行は制御される．これらの緊縮型およびフレア型のアーク形状変化は，溶滴に働くアーク力だけでなく電磁ピンチ力などの駆動力を変化させていると考えられ，またそれらはアークプラズマ内における電流経路変化によるものである可能性が高い[9]．この電流経路についての考察は 4 章に後述する．

一方 Fig. 2.12 に着目すると，定電圧特性電源を使用しているにも関わらず電流電圧波形はパルス状に変化した．まず電圧波形に着目すると，5 ms 付近で急激に電圧が低下し 10 ms 付近まで 3~4 V 程度ほど電圧は低下した状態が保たれた．溶滴離脱と同時に棘状に電圧が急上昇した 10 ms 以降は元の 39 V 付近まで電圧は戻った．この電圧低下はアークプラズマを形成するガス雰囲気が CO_2 から Ar に変化したことにより電位傾度変化が生じたためと考えられる．Ar は単原子分子であるためアークプラズマ内での解離がなく電位傾度が比較的小さいのに対し，CO_2 は多原子原子であるためアークプラズマ内で解離・再結合が多く生じ，吸熱反応および熱的ピンチ効果が生じることで結果として電位傾度が比較的大きくなる[10]．よって電位傾度の高い CO_2 から電位傾度の低い Ar に雰囲気が急変化したことで，電圧は急低下した．小原らによると，電位傾度変化が及ぼす電圧の変化は，定電圧特性電源の外部特性に応じた電流の変化を生じさせることが示されている[11]．Fig. 2.15 のイメージ図に示すとおり，CO_2 および Ar について同一のアーク長を持つそれぞれのアーク特性曲線があり，これらの曲線と電源の外部特性の交点（動作点）が移動することで電流電圧変化が生じるものと考えられる．よって，アーク雰囲気が CO_2 主体から Ar 主体に変化することで動作点が移動し，電圧の低下と電流の大きな上昇が生じる．この電流上昇は電磁ピンチ力を上昇させ，溶滴の離脱に有効に作用しているものと思われる．

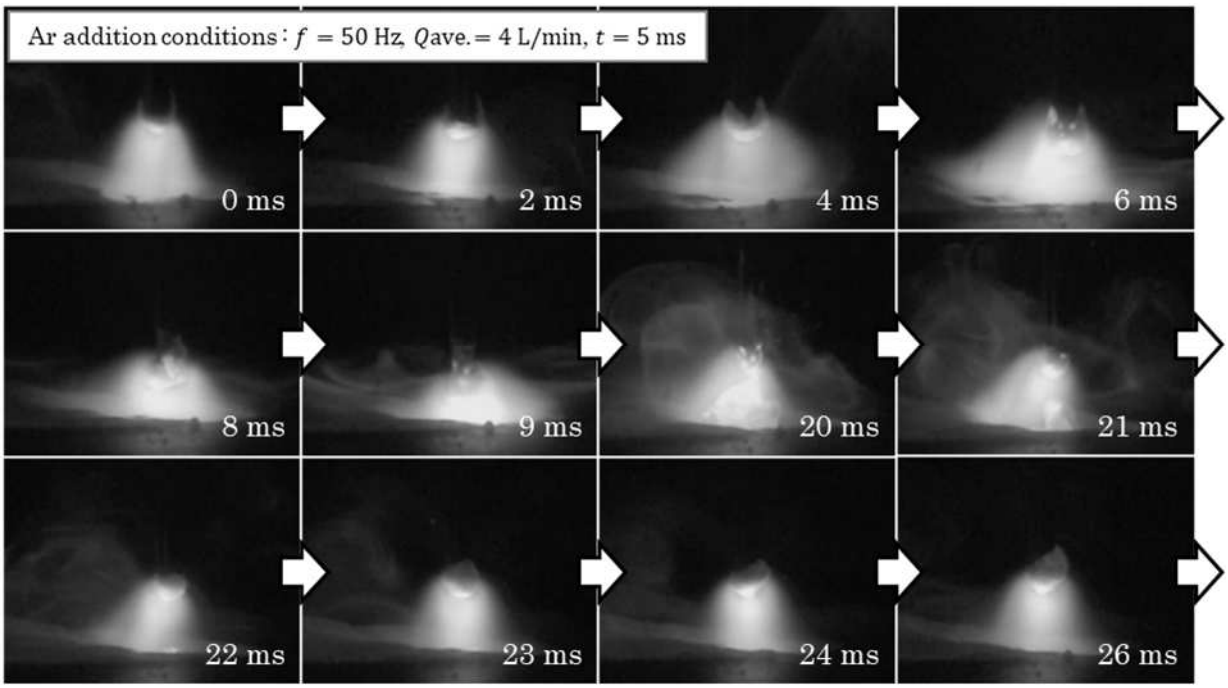


Fig. 2.11 An example of arc shape variation in different arc atmospheres

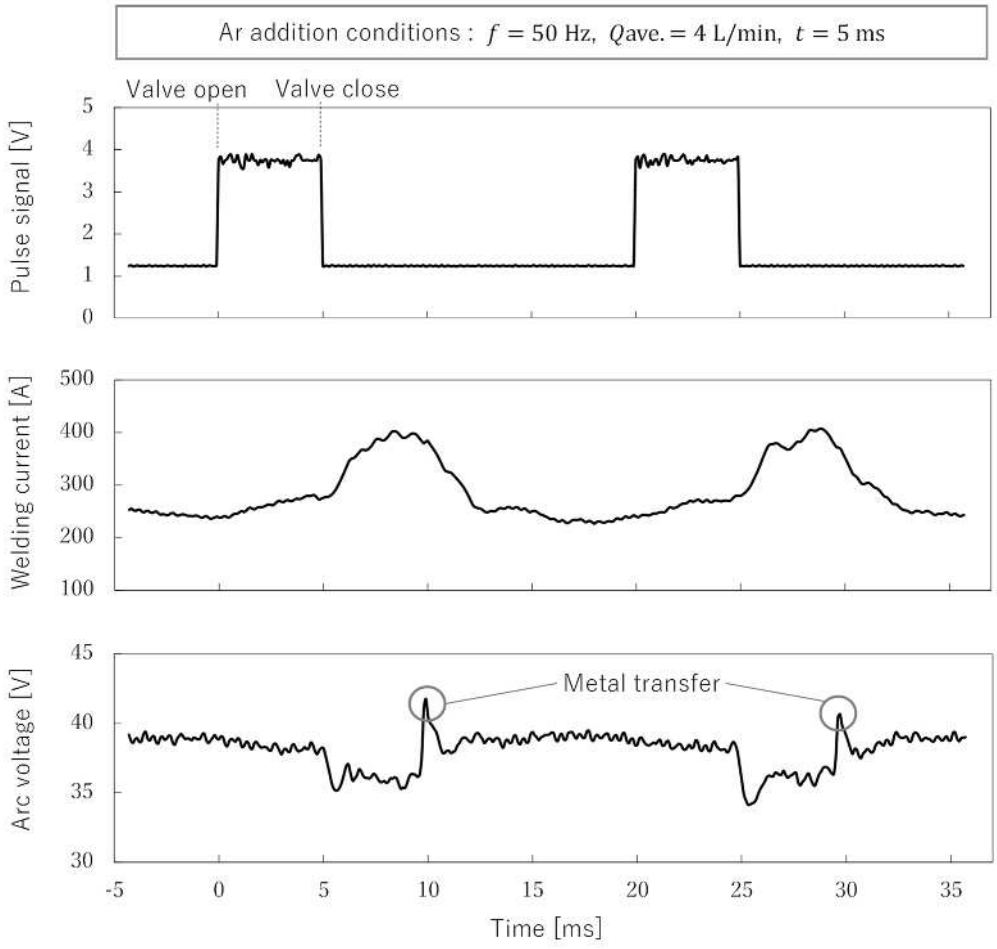
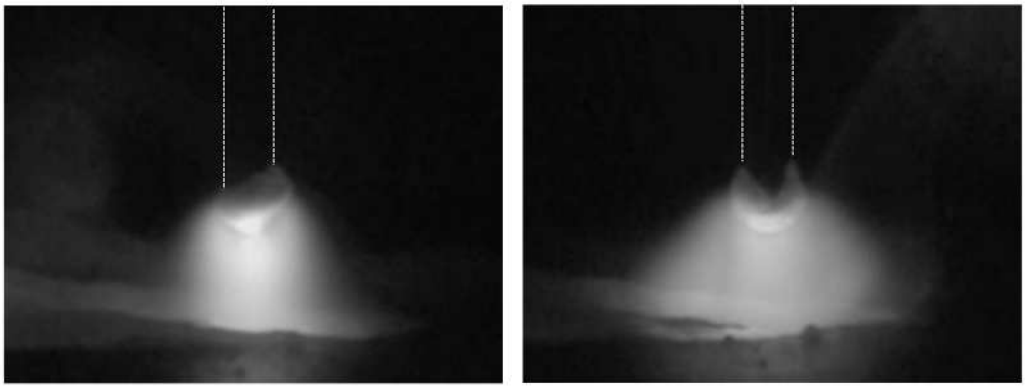
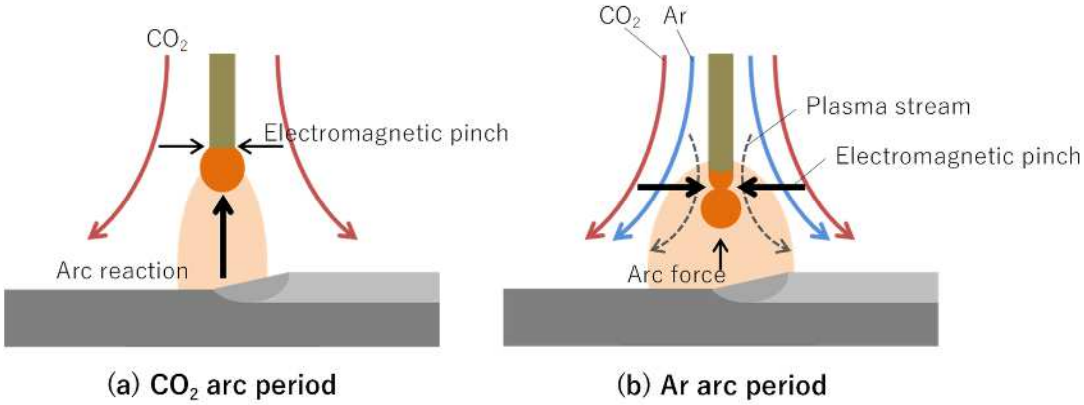


Fig. 2.12 Pulse signal, current and voltage waveforms



(a) Pinched arc (b) Flared arc

Fig. 2.13 Change of arc shape by adding Ar gas



(a) CO_2 arc period (b) Ar arc period

Fig. 2.14 Schematic illustrations of metal transfer and gas flow

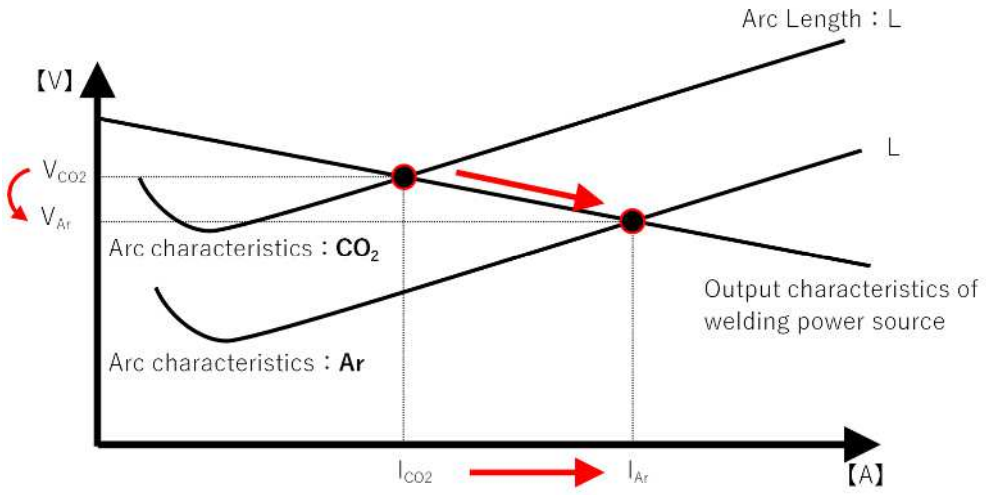


Fig. 2.15 Output characteristics and operating point of a constant voltage power source.

2.5 結言

本章では，高速度カメラによるガス流および溶滴移行現象の観察結果，また溶接中の電流電圧波形の結果から，本溶接法における基本的な物理現象について示し，アーク雰囲気変化による溶滴移行現象について考察した．以下に得られた結果を示す．

- ガス可視化結果より，Ar 流は渦輪を形成しつつ塊状にワイヤ先端付近に到達する．その時，Ar 流の塊は概ね初速を保ったまま，半径方向にインナーノズル内径の 1.5 倍程度に膨らむ．
- Ar 供給経路長さを標準の 300 mm としたとき，電磁弁開信号に対してほぼ遅延なく Ar はノズル先端から供給される．なお Ar 供給経路長さが長くなると徐々に応答が悪くなるため，可能な限り Ar 供給経路長さは短い方が好ましい．
- ガス可視化結果より，アウターガス（CO_2）とインナーガス（Ar）の流速差によって CO_2 流にくびれ状の流れが形成される．
- 高速度カメラによる溶滴移行現象の観察結果より，CO_2 主体の緊縮型アークから Ar 主体のフレア型アークに急変することで，溶滴はアーク力から解放されて垂下し，離脱すると考えられる．
- 電流電圧波形より，急激な電位傾度変化による電圧低下および電流上昇が生じ，電磁ピンチ力が急増することで溶滴離脱を促進させていることが示唆された．

参考文献

[1] 佐藤英市, 山崎圭: 炭酸ガスアーク溶接のグロビュール移行制御, 溶接学会誌, Vol.84, (2015), No.4, 239-243.

[2] azbil: デジタルマスフローコントローラ 形 MQV, https://aa-industrial.azbil.com/ja/products/flow-sensor/mass-flow-controller/mqv, (accessed 2025-08-10)

[3] KATO KOKEN: システムシュリーレン SS series, https://www.kk-co.jp/products/schlierens/, (accessed 2025-08-10)

[4] ダイヘン: デジタルオート DM500, https://www.daihen.co.jp/products/welder/co2_mag/dm500.html, (accessed 2025-08-10)

[5] 神戸製鋼所: New FAMILIARC MG-50, https://www.kobelco.co.jp/products/download/welding/mg-50.html, (accessed 2025-08-10)

[6] NAC: HIGH SPEED CAMERA MEMRECAM GX-1F, https://www.nacinc.jp/analysis/high-speed-camera/memrecam-gx1/, (accessed 2025-08-10)

[7] 石原諭, 佐藤光, 三宅明, 松川敦子: 空気砲の物理, 物理教育, Vol.56, (2008), No.3, 188-192.

[8] 田中学, 山田哲生, 茂田正哉, 古免久弥, 深堀貢, 斉藤直子: 重ねすみ肉アーク溶接におけるガスシールド性に関する実験的検討, 溶接学会論文集, Vol.39, (2021), No.1, 51-63.

[9] 荻野陽輔, 平田好則: 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, Vol.33, (2015), No.1, 1-12.

[10] 佐藤豊幸, 総説　シールドガス, 溶接学会誌, Vol.77, (2008), No.2, 146-150.

[11] 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 溶接に関する研究－,溶接学会論文集, Vol.38, (2020), No.4, 363-378.

[12] 溶接学会・日本溶接協会編: 溶接・接合技術総論, 三報出版, (2015), 第 1 章.

第3章　Ar 添加条件と溶滴移行が同期する範囲の検討

3.1 緒言

本溶接法は炭酸ガスアーク溶接中に Ar を添加することで溶滴移行制御を行う．よって Ar 添加条件（流量，周波数，電磁弁開時間（1 周期あたりの Ar 供給時間））の設定は肝要であるが，それら諸条件がアークの挙動および溶滴移行現象に及ぼす影響はわかっておらず，また最適条件は把握されていない．そこで本章では，Ar 添加条件や溶接条件を変化させて溶接現象を観察し，溶滴移行制御が可能な Ar 添加条件範囲を明らかにした．

3.2 実験方法

本実験における Ar および CO_2 の添加条件範囲を Table 3.1 に示す．CO_2 は 25 L/min 固定条件とし，Ar の周波数，平均流量，電磁弁開時間をそれぞれ変化させて実験した．また溶接条件を Table 3.2 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 ϕ1.2 および 1.4 mm の軟鋼ソリッドワイヤ JIS Z 3312 YGW11 を用いた．コンタクトチップ－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．溶接電流（平均），ワイヤ送給速度，アーク電圧（平均）は適宜実験内容に応じて変化させた．なお前述の通り電流電圧波形はアーク雰囲気変化に伴いパルス状に変化することから，溶接条件はワイヤ送給速度を基準とした条件であり，文中に表記する電流および電圧は平均値を示す．溶滴移行は溶接中のアーク近傍を高速度カメラ（1000 fps）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．

Table 3.1 Gas conditions

Ar	Frequency f	20 ~ 100 Hz
	Flow rate (average) $Q_{\mathrm{ave.}}$	1～8 L/min
	Valve opening time t	2～10 ms
CO_2	Flow rate Q	25 L/min

Table 3.2 Welding conditions

Outer nozzle	Outer diameter: 22 mm Inner diameter: 16 mm
Inner nozzle	Outer diameter: 11 mm Inner diameter: 9 mm
Wire	JIS Z 3312 YGW11 ϕ1.2, 1.4 mm
Base metal	SS400
Welding current	ϕ1.2: 235 ~ 325 A ϕ1.4: 280 ~ 350 A
Wire feeding speed	ϕ1.2: 9.0 ~ 14.5 m/min ϕ1.4: 7.1 ~ 9.8 m/min
Arc voltage	28 ~ 42 V
Welding speed	30 cm/min
CTWD	25 mm

3.3 Ar 添加周波数，平均流量，電磁弁開時間が溶滴移行に与える影響と同期条件

まずはワイヤ径 1.2 mm，ワイヤ送給速度 11.9 m/min の固定条件において，Ar 添加条件が変化した場合の溶滴移行の挙動について調査する．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．また，それぞれの溶滴移行について高速度カメラの写真を Fig. 3.1，Fig. 3.2，Fig. 3.3，Fig. 3.4 に示す．

「非同期」は全体を通して Ar 添加によるアーク形状の変化およびそれに伴う溶滴の離脱が見られず，一般的な炭酸ガスアーク溶接のような反発移行を示しているものを分類した．Fig. 3.1 に示すように，アーク形状は常に緊縮型となり，Ar 添加条件 50 Hz（周期は 20 ms）に対して溶滴移行周期 30 ms 程度と，全く同期しているとは言えない状態である．

「準同期」は Ar 添加 1〜2 回に 1 回不規則に溶滴が移行するものを分類した．Fig. 3.2 に示すように，0 ms の緊縮型アークから 2 ms のフレア型アークへの変化が見られ，溶滴は 10 ms にかけてワイヤ先端から垂下するが離脱には至らない．14 ms から再度緊縮型アークに変化し溶滴は持ち上げられ，（アーク長が短いためアーク形状は判断しにくいが）Ar 添加周期から推測するに 2 パルス目の Ar が到達したと思われる 25 ms 付近から再び溶滴が垂下し，離脱に至る．このように Ar 添加の影響によりアーク形状および溶滴の挙動が変化しているが，規則的にいわゆる 1 パルス 1 ドロップに至っていない状態である．

「同期」は Ar 添加 1 回に溶滴が 1 回規則的に移行するものを分類した．Fig. 3.3 に示すように，0 ms の緊縮型アークから 4 ms のフレア型アークへの変化が見られ，溶滴は垂下しはじめて 9~10 ms 付近で離脱に至る．その後 21~23 ms にかけて再度緊縮型アークに変化し，次のサイクルがはじまる．このようにいわゆる 1 パルス 1 ドロップが達成された状態である．よって基本的には「同期」の条件を理想と

し，以降で議論するものとする．

「余剰溶滴」は 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分類した．Fig. 3.4 に示すように，基本的には「同期」と同じように緊縮型アークから 6 ms のフレア型アークへの変化が見られ，溶滴が離脱後に 16 ms 付近から再度緊縮型アークに戻る規則的な溶滴移行を示す．しかし，6~15 ms のフレア型アーク期間において，成長した溶滴の離脱後にストリーミング移行およびプロジェクト移行のように小滴の溶滴がさらに移行している状態である．

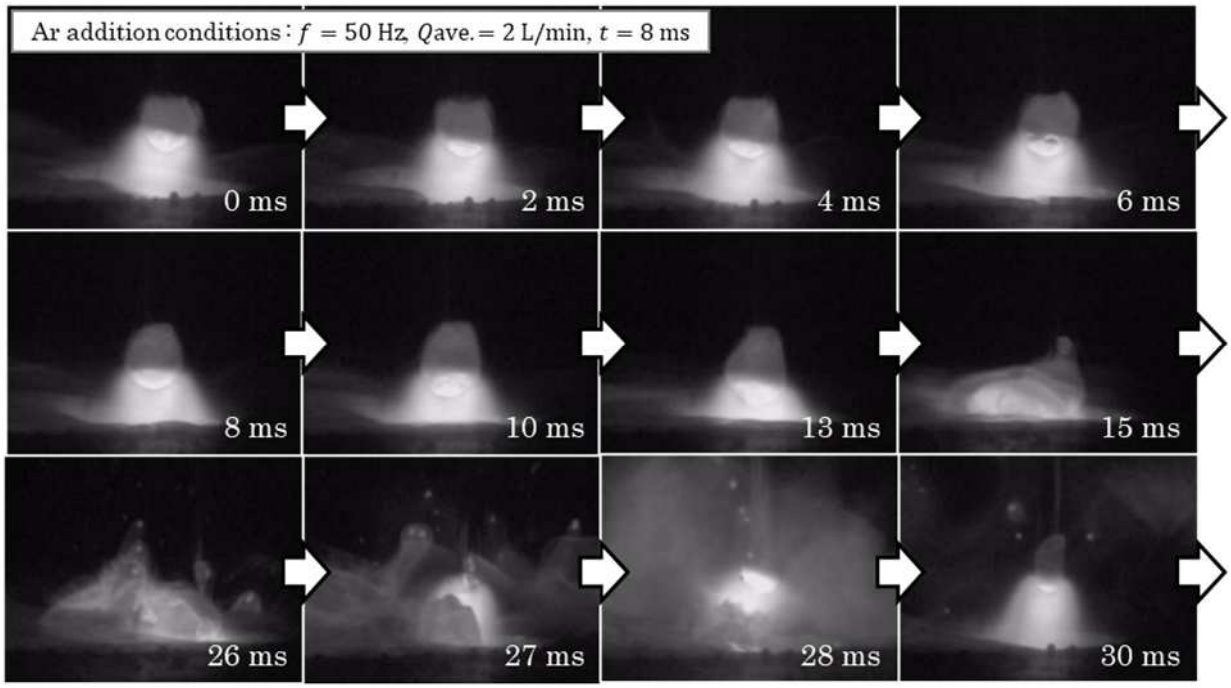


Fig. 3.1 High-speed camera images of "un-synchronous" metal transfer

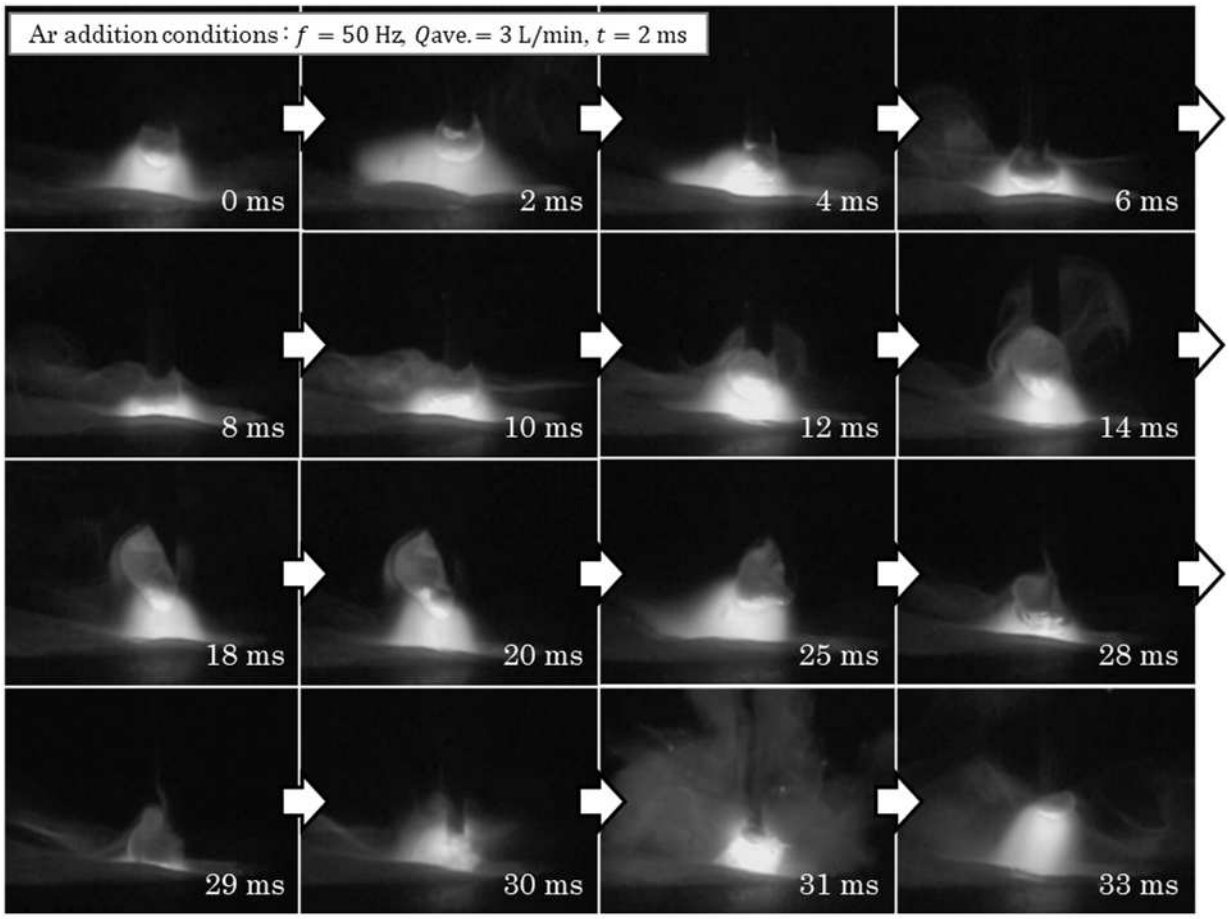


Fig. 3.2 High-speed camera images of "semi-synchronous" metal transfer

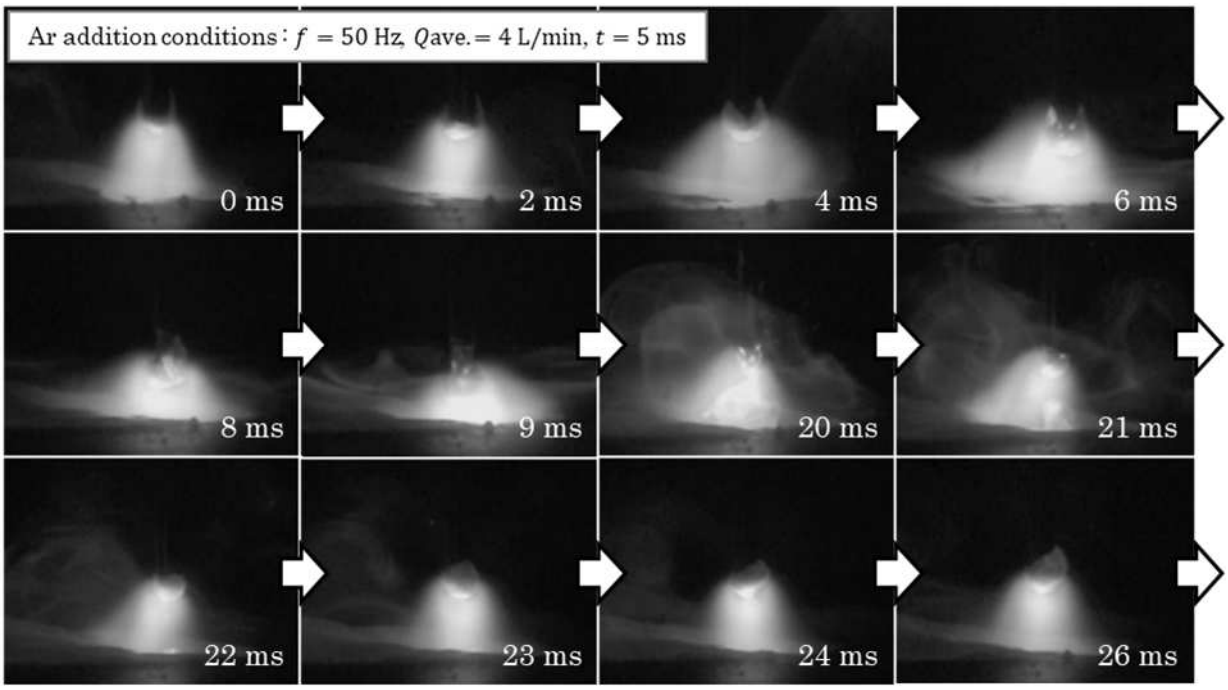


Fig. 3.3 High-speed camera images of "synchronous" metal transfer

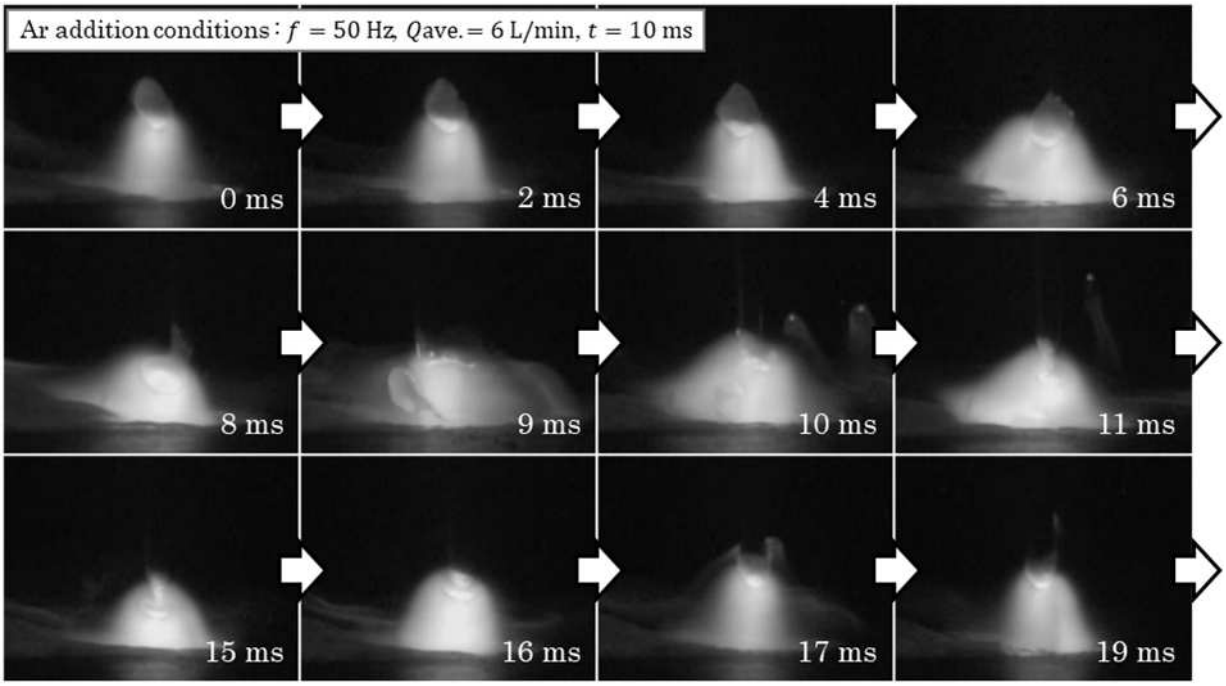


Fig. 3.4 High-speed camera images of "excess drops" metal transfer

周波数 35，50，65 Hz において平均流量，電磁弁開時間の影響を調査した結果を Fig. 3.5 に示す．なおこれらの周波数選定は，溶滴移行制御のためには炭酸ガスアーク溶接の溶滴離脱周波数[1]（約 300 A において 30 Hz 程度）よりも早くする必要があると考え，30 Hz 以上を基準として選定した．図中において非同期を×，準同期を■，同期を○，余剰溶滴を▲で示す．まず，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ぼ準同期と判定され，溶滴移行制御のためには 4 ms 以上添加する必要がある．なお，電磁弁開時間 3 ms ではまれに同期する時間が現れる結果もあったが，溶接中の大半の時間が 2 パルスに 1 回あるいは 1 パルス目の後の緊縮型アーク期間に不規則に溶滴移行していたため，準同期と判定した．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（同期限界平均流量）が増加した．

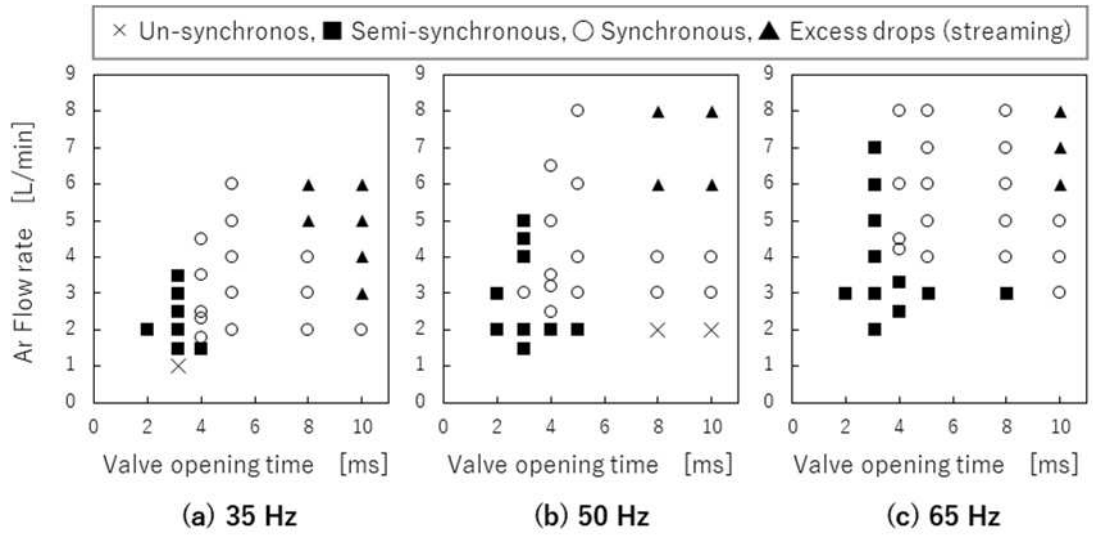


Fig. 3.5 Classification of metal transfer phenomena for Ar addition conditions

Fig. 3.5 より平均流量, 周波数, 電磁弁開時間の 3 つのパラメータを変化させた実験結果が得られたが，以降ではこれらのパラメータが溶滴移行におよぼす影響を整理し，Ar 添加に溶滴移行が同期するか否かを決定付ける要因について考察する．

3.3.1　電磁弁開時間と溶滴離脱の動作時間

電磁弁開時間は 1 周期あたりに Ar を噴出する時間を決定するパラメータであり，アーク形態がフレア型に変化する期間（以下 Ar 主体のアーク期間）に大きく影響を与えると考えられる．Fig. 3.5 より，電磁弁開時間 3 ms 以下の条件では平均流量の多少に関わらず Ar 添加に溶滴移行が同期しなかったことか

ら，溶滴を移行させるためには Ar 主体のアーク期間をある一定以上に保つ必要があることは容易に想像がつく．すなわち，Ar 主体のアーク期間と溶滴離脱に必要な最小時間の関係を把握することが，溶滴移行同期条件の把握に必要となると考える．

そこで，まず Ar 主体のアーク期間について考える．電磁弁開時間に対し，実際にどの程度 Ar 主体の高濃度期間が得られたのかを推定するために，ガス組成変化に伴う電圧の最大変化幅の中央値以下の電圧区間幅（低電圧になっている時間幅）を電圧波形から測定し，これを「Ar 主体のアーク期間」と定義した．電磁弁の開閉によりパルス状に供給された Ar の到達および放散に伴って電圧は急減・急増するため，低電圧状態が保持される期間が高濃度の Ar 雰囲気期間に相当すると考えられる．そこで，周波数 50 Hz において平均流量および電磁弁開時間変化時における Ar 主体のアーク期間を測定し，式(2.3)より算出したピーク流量ごとに整理した結果を Fig. 3.6 に示す．

Fig. 3.6 より，電磁弁開時間 3〜5 ms の結果に着目すると，電磁弁開時間に対して約 0.5 ms 長く低電圧時間が保たれている．これは電磁弁の応答時間が電磁弁開時間の設定値プラス 0.5 ms であることを加味すると，Ar 主体のアーク期間は実際の電磁弁開時間とほぼ一致していると言える．一方電磁弁開時間 8, 10 ms では, Ar 主体のアーク期間は電磁弁開時間の設定値には達していない. これは電磁弁開時間 8, 10 ms はピーク流量が比較的少ない（20 L/min 以下）条件のためであるが，考えられる理由については 3.3.4 節に後述する．

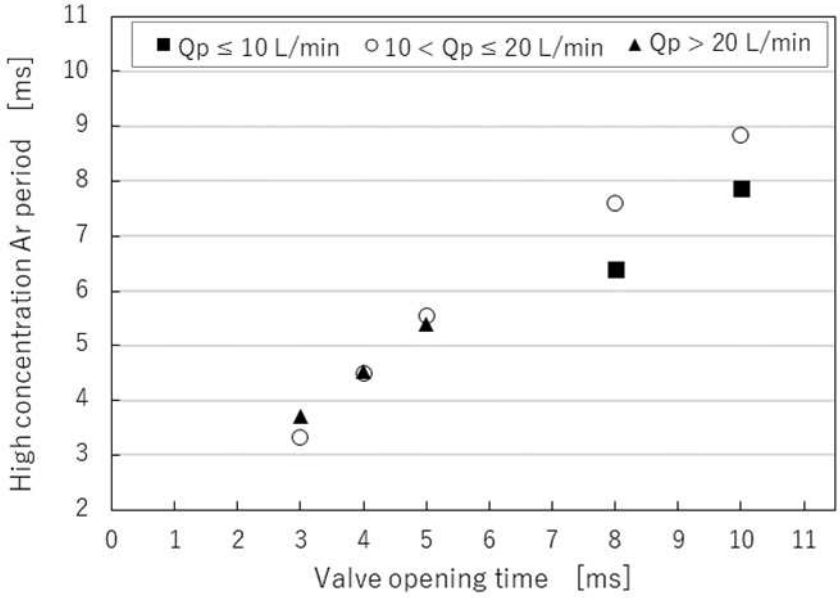
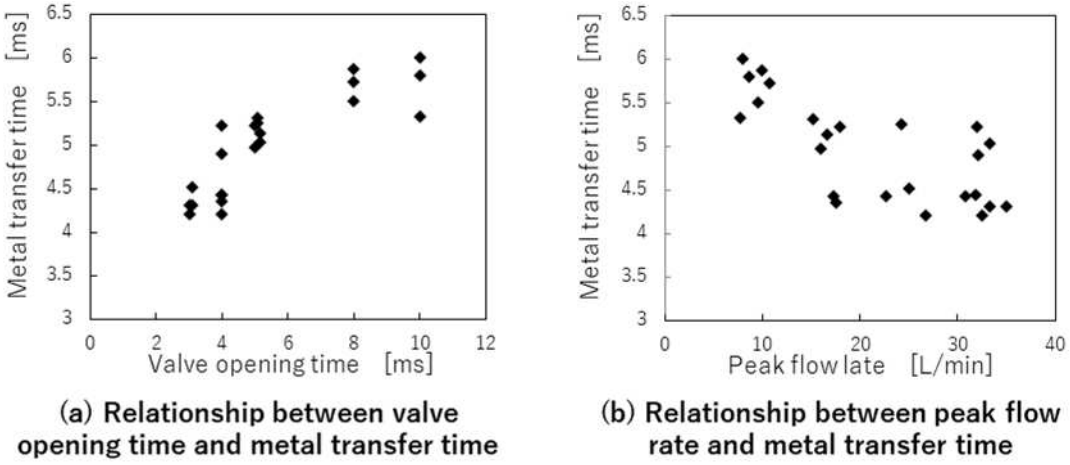


Fig. 3.6 Variations in low voltage period with valve opening time

次に溶滴離脱に必要な時間について考える．Fig. 3.7(a)に Ar 添加に溶滴移行が同期する条件（Fig. 3.5 における同期（〇）の条件）において，電圧波形より Ar がアーク部に到達したと思われる電圧低下から溶滴移行までの時間（以下，溶滴移行時間）を計測した結果を示す．なお，電磁弁開時間 3 ms の判定はほとんどの条件で「準同期」だが，サンプル数確保のため一時的に同期した範囲の結果から計測を行った．Fig. 3.7(a)より，電磁弁開時間が短くなるほど溶滴移行時間は短くなる傾向があることが分かった．電磁弁開時間は式(2.3)より，平均流量および周波数が一定の場合，ピーク流量と反比例の関係がある．

そこで，Fig. 3.7(a)を溶滴移行時間とピーク流量の関係に整理し直した結果を Fig. 3.7(b)に示す．Fig. 3.7(b)より，ピーク流量の増加に伴い溶滴移行時間は短くなる傾向が見られ，下限値に着目するとピーク流量 18 L/min あたりから約 4.2 ms 以下には下がらないように見える．この 4.2 ms は今回の実験範囲における溶滴離脱のための最小動作時間と考えられ，定性的には次のように理解できる．アーク形態がフレア型に変化したことによりアーク力から解放された溶滴は，重力や上昇した電流による電磁ピンチ力により離脱に向けた動作を開始するが，溶滴がワイヤ先端から垂下するまでにはある程度の時間を要する．この時間は溶滴が移行するためには物理的に最低限必要な時間であるため，この時間よりは短くならないと考えられる．



(a) Relationship between valve opening time and metal transfer time

(b) Relationship between peak flow rate and metal transfer time

Fig. 3.7 Variations in metal transfer time with valve opening time and peak flow rate

以上より，Fig. 3.5 において電磁弁開時間 3 ms 未満では Ar 添加に溶滴移行が同期しなかった原因は次のように考察される．電圧が低下しアーク形態が変化する Ar 主体のアーク期間，つまり Ar 主体のアーク期間はピーク流量により変化するが，最大でも電磁弁開時間の設定値プラス 0.5 ms となる．一方溶滴移行時間もピーク流量の増加とともに短くなるが，下限値である 4.2 ms よりも短くなることはできない．そのため電磁弁開時間 3 ms では溶滴移行が完了するよりも早く Ar 主体のアーク期間が終了してしまうため，溶滴は再度緊縮したアークによるアーク力によって持ち上げられ溶滴は移行することが難しいと考えられる．なお，電流やワイヤ径が変化した場合はその限りではなく，溶滴にかかる駆動力のバランスが変化することで上記の溶滴移行に必要な時間の下限値も変化することが予測される．

3.3.2 Ar 添加周波数と Ar 流量を考慮した溶滴移行分布の整理

Fig. 3.5 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の最低値は 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，周波数によって変化した．そこで，周波数を変化させると同期に必要な平均流量の最低値が変化する理由について考察する．

Fig. 3.8 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．平均流量が一定の場合，Ar を添加する頻度が低い低周波数ほど 1 度に添加する Ar の量が多くなる．この 1 度に添加される Ar の量を，1 パルス毎の Ar 体積と定義する．1 パルス毎の Ar 体積は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 パルス毎の 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 パルス毎の Ar 体積を確保するために必要な平均流量が少なくなる．

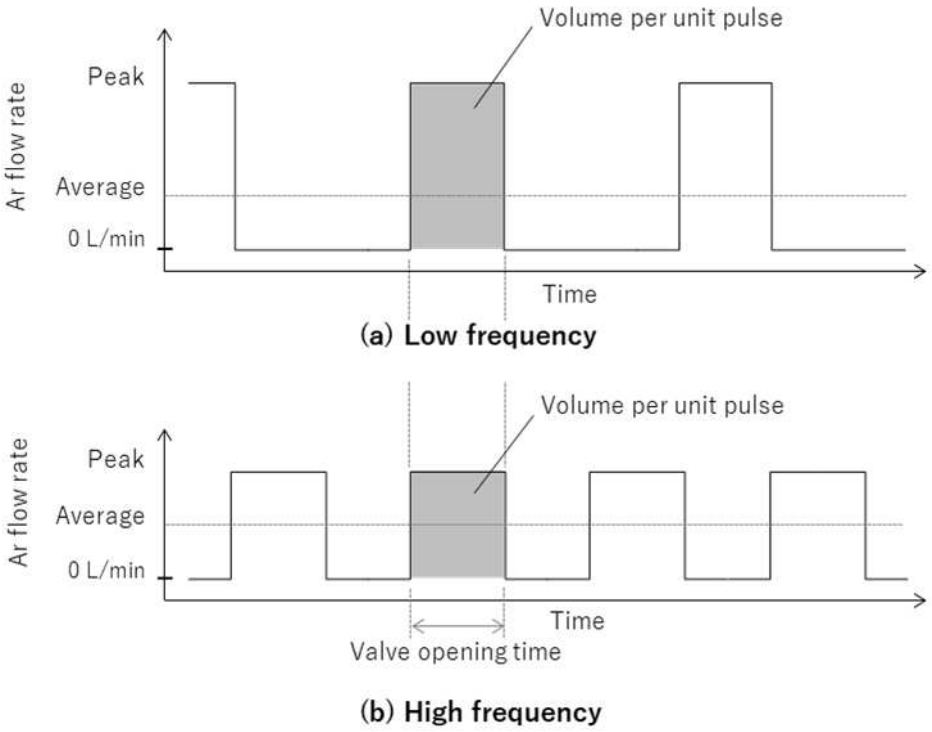


Fig. 3.8 Waveform illustrations of Ar addition at low and high frequencies

これを踏まえ, Fig. 3.9 に実験結果を電磁弁開時間と 1 パルス毎の Ar 体積で整理し直した結果を示す．Fig. 3.5 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, Fig. 3.9 では周波数によらず同期するために必要な 1 パルス毎の Ar 体積は約 1 mL の一定値に揃う結果となった．このことから，35～65 Hz において CO_2 主体の緊縮型アークから Ar 主体のフレア型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．ただし，溶接条件やノズル径などを変化させた場合にはその限りではないが，根本的な考え方は同様である．以上より本実験条件範囲では，同期のために必要な Ar 添加条件は平均流量ではなく 1 パルス毎の Ar 体積により決定し，その下限値は約 1 mL であることが分かった．

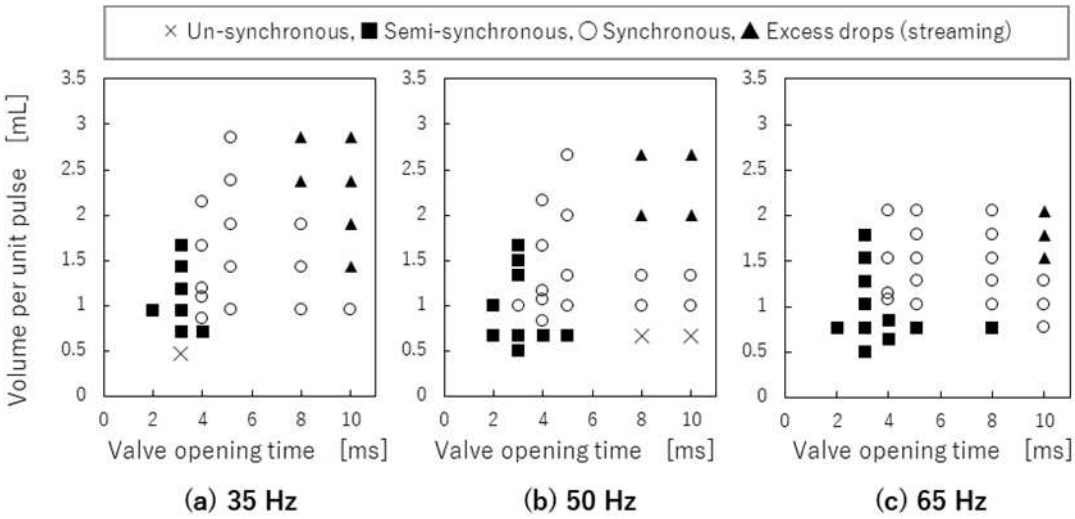


Fig. 3.9 Classification of metal transfer phenomena for Ar volume per unit pulse

3.3.3 溶滴移行同期のための Ar 添加条件

1 パルス毎の Ar 体積は Fig. 3.8 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 パルス毎の 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．しかし，現実的には 3.3.1 節で示したとおり溶滴離脱に必要な時間には下限値があり，また Ar 主体のアーク期間も電磁弁開時間に応じて短くなることで電磁弁開時間 3 ms 以下の条件では同期しなかったことから，両者の値は同期する条件範囲が存在すると考えられる．そこで，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 パルス毎の Ar 体積が約 1 mL 以上で同期する理由について考察する．

Fig. 3.10 にの各周波数における実験結果を電磁弁開時間とピーク流量で整理し直した結果を示す．また，1 パルス毎の Ar 体積 1 mL に該当する線を合わせて示す．Fig. 3.10 より，概ね 1 パルス毎の Ar 体積が 1 mL の線に沿って，同期プロット下限が分布している．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．これは前述したように溶滴移行に必要な時間の下限値に対して Ar 主体のアーク期間が不足することが原因である．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 パルス毎の Ar 体積が約 1 mL 以上になるとき，溶滴移行は同期する．また，1 パルス毎の 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がわかった．

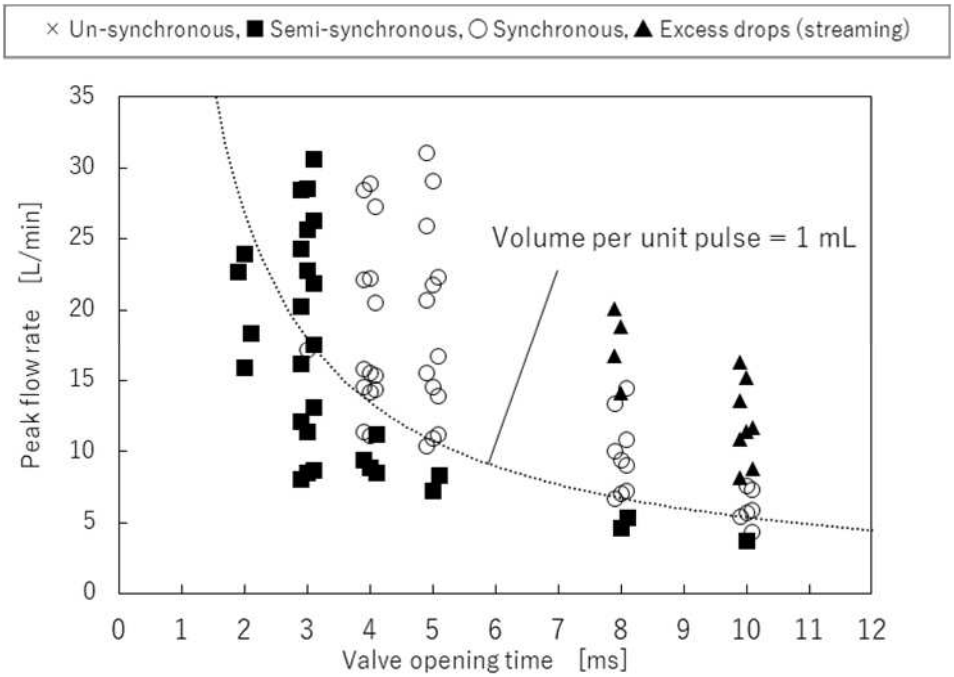


Fig. 3.10 Classification of metal transfer phenomena for Ar peak flow rate

3.3.4　溶滴移行制御のための Ar 添加条件のモデル化

前述の通り 1 パルス毎の Ar 体積を約 1 mL 以上に設定することが本実験条件における同期限界条件として得られた一方，3.3.1 節に示したように Ar 塊がアークを覆っている時間にも同期限界条件が存在した．つまり溶滴移行の同期を決定づける要因は，Ar 体積と Ar 塊がアークを覆っている時間の両方を考慮する必要があると言える．そこで，Fig. 3.11 のような円柱状のモデルを考えることで，これら二つの要因と同期限界条件および余剰溶滴限界条件との関連性を考察する．

Ar 円柱モデルの体積を 1 パルス毎の Ar 体積q，断面積はノズル出口断面積Sとし，円柱の高さLはこれらの値から算出した．なお，アウターガス（CO_2）の影響は考えず，Ar 円柱モデルの内部は Ar で満たされたままの状態と仮定する．

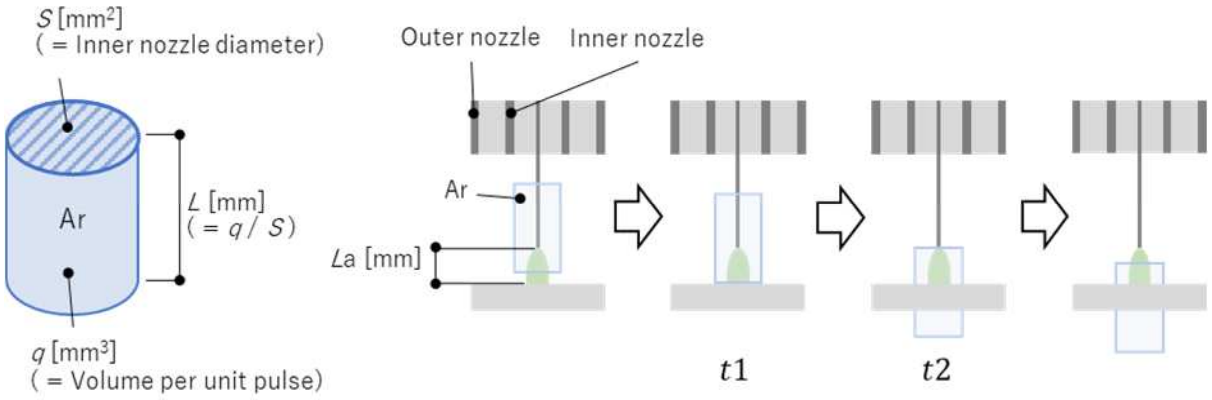


Fig. 3.11 Schematic illustrations of cylindrical Ar gas addition model

Fig. 3.11 より，Ar 円柱モデルの先端が鋼板に到達した時間を$t1$，Ar 円柱モデル後端がアーク上端に到達した時間を$t2$とする．ここで，アーク雰囲気が高濃度 Ar となる期間の指標として，$t2-t1$の時間を，アーク長全体を Ar が覆っている時間tc（Ar アークになっている時間と想定）と定義する．Ar 円柱モデル高さをL，アーク長をLa，Ar 円柱モデルの移動速度をvとすると，tcは式(3.1)であらわされる．

$$tc = \frac{L - La}{v} \tag{3.1}$$

Ar 円柱モデル高さLは 1 パルス毎の Ar 体積qをノズル出口面積Sで除したものであり，1 パルス毎の Ar 体積はピーク流量Qpと電磁弁開時間tの積である．よって Ar 円柱モデル高さLは式(3.2)となる．なお，電磁弁の応答時間trを考慮し，電磁弁開時間tに加えた．

$$L = \frac{Qp \times (t + tr)}{S} \tag{3.2}$$

Ar 円柱モデルの移動速度vはピーク流量Qpをノズル出口面積Sで除したものであることから，式(3.1)は式(3.3)のように書き換えることが出来る．

$$tc = (t + tr) - \frac{La \times S}{Qp} \tag{3.3}$$

式(3.3)をピーク流量Qpについて解くと

$$Qp = \frac{La \times S}{(t + tr) - tc} \tag{3.4}$$

となり，Ar 円柱モデルよりピーク流量と電磁弁開時間の関係式が得られた．そこで，Fig. 3.10 のピーク流量と電磁弁開時間で示した実験結果のグラフに，式(3.4)を用いて同期限界条件および余剰溶滴限界条件を表し，溶滴移行形態（非同期または準同期，同期，余剰溶滴）の範囲を図示する．式(3.4)の定数Laは，溶接中のアーク長を計測した結果より，$La = 3.5$ mmとした．また，定数Sは，本実験で使用したノズル内径 9 mm でノズル出口断面積計算すると 63.6 mm^2 となる．しかし，実際の Ar 流は Fig.6 に示したとおりアーク周辺で直径が約 1.5 倍に拡大することから，内径 9 mm を 1.5 倍した断面積$S = 143$ mm^{2}とした．定数trは電磁弁の仕様より，0.5 ms とした．以上の定数を式(3.4)に代入し，Fig. 3.10 の実験結果と一致するよう同期限界条件および余剰溶滴限界条件を求めると Fig. 3.12 のようになり，またその時の tc はそれぞれ tc=2.5 ms，6.5 ms であった．同期限界条件に着目すると，Fig. 3.10 の 1 mL 曲線よりも

同期・非同期限界を正確に表現できており，これが Ar 塊がアークを覆っている時間を考慮した効果と考えられる．

以上より，1 パルス毎の Ar 体積は Ar 円柱がアーク長全体を覆っている時間，すなわち Ar 主体のアーク期間を決定していると考えられる．Fig. 3.12 より同期限界条件以上の範囲では 1 パルス毎の Ar 体積が概ね 1 mL 以上となり，Ar 主体のアーク期間を表すtcの時間が溶滴移行に必要十分な条件のため，Ar 添加に溶滴移行が同期すると考えられる．また，余剰溶滴の範囲は余剰溶滴限界条件である$tc = 6.5$ ms以上，つまり Ar 主体のアーク期間が比較的長い条件であり，成長した溶滴が約 4.2 ms 程度の時間をかけて移行した後さらに約 2 ms 程度以上の時間 Ar 主体のアーク期間が保持されることで，余剰溶滴が生じると考えられる．

一方，今回の実験結果では前述のとおり，Ar アークに変化後約 4.2 ms 以上の時間をかけて溶滴移行が生じるため，$tc = 2.5$ msよりも長い時間 Ar 主体のアーク期間が維持されていることは明確である．この実験結果とtcの不一致は，本モデルではアーク長全体が完全に Ar で覆われている時間をtcとしていることが原因と考えられる．実際の現象では Ar 流の塊が一部でもアーク付近に到達した時点でプラズマ気流によってアーク内部に Ar が取り込まれ，その時の Ar 濃度に応じて CO_2 主体の緊縮型アークから Ar 主体のフレア型アークに連続的に変化すると推測される．また，Ar 濃度の低下に伴って徐々にフレア型アークから緊縮型アークに戻っていることが観察結果および電圧変化から分かる．加えて実際には母材表面にぶつかり，アーク近傍で Ar が滞留する時間も少なからずあると思われる．この推移時間および Ar 濃度変化を本モデルのtcは含んでいないことが差異の原因と考えられるが，本モデルにおける tc の考え方は本質的な理解に重要なファクターであることが示された．なお小原らによりアーク長と電圧からフレア型アークに変化時は Ar 濃度が約 90%以上の高濃度 Ar 雰囲気になるとされており[2]，比較的明確に CO_2 および Ar 主体雰囲気が切り替わることが推定されている．

以上のように Ar パルス添加によるガス置換の現象を簡単な流速・形状一定の円柱状ガス塊にモデル化することで，非同期（準同期），同期および余剰溶滴が電磁弁開時間とピーク流量から予測することができる式(3.4)および Fig. 3.12 が得られた．

最後に，Fig. 3.6 においてバルブ開時間 8 および 10 ms において低電圧時間がバルブ開時間よりも短くなった理由については，本モデルにより容易に説明できる．すなわち，Qpが小さい条件においては Ar 柱の体積が小さい，すなわち高さが小さく平べったい Ar 柱がアークを通過することになるためアークを覆う時間は短くなり，結果電磁弁開時間よりも低電圧時間が短くなったと理解できる．

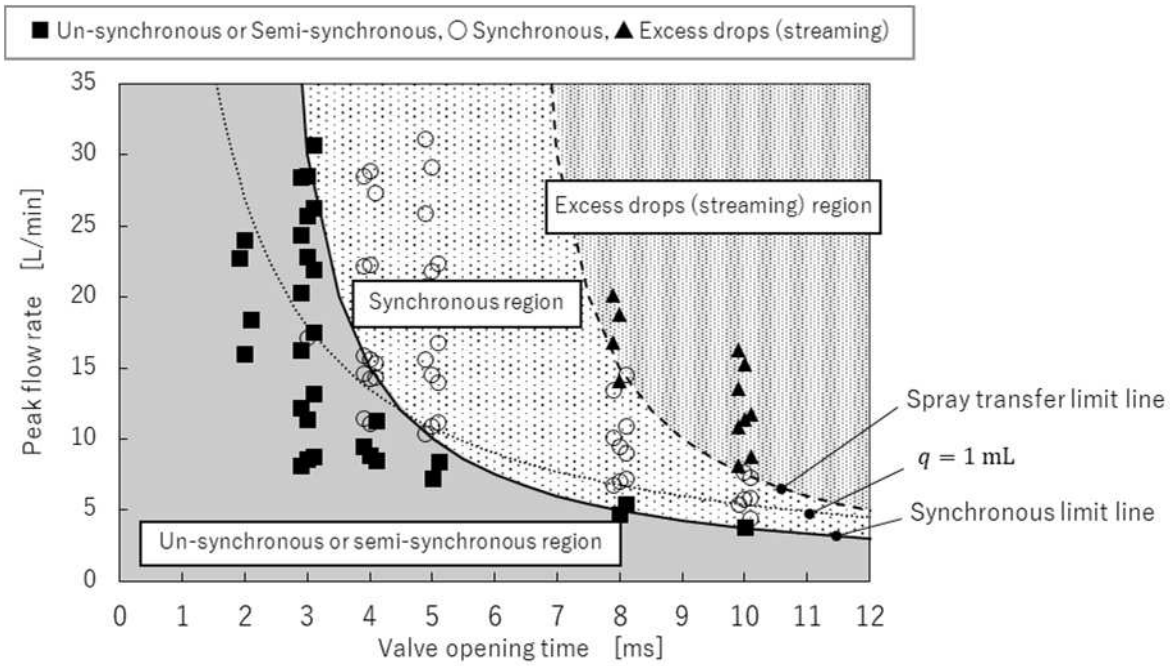


Fig. 3.12 Comparison of experimental and calculated results in classification of metal transfer phenomena

3.4 電流およびワイヤ送給速度，ワイヤ径が溶滴移行に与える影響

前章において，ワイヤ送給速度（設定電流）一定条件における Ar 添加条件の各パラメータが溶滴移行に与える影響が把握された．本章では電流およびワイヤ送給速度ならびにワイヤ径変化時の溶滴移行形態を調査した．

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．なお，評価の判定基準は 3.3 節に前述した基準に従うものとする．

まず ϕ1.2 mm ワイヤにおいて，溶接電流（平均）を 235~325 A に変化させて実験した結果を Fig. 3.13 に示す．なお一般的に GMA 溶接において溶接電流の上昇はワイヤ送給速度の上昇を伴う（CTWD 一定）ことから，横軸は設定したワイヤ送給速度で整理した．Fig. 3.13 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 付近の比較的低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は，一般的に知られているミグ・マグ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 添加を待って溶滴が移行する，いわゆる 2 パルス 1 ドロップとなる現象が部分的に散見

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．

溶接電流 280 A（ワイヤ送給速度 11.9 m/min）の条件について，溶滴移行形態がそれぞれ余剰溶滴，同期，準同期となる周波数 35，50，65 Hz における離脱時の溶滴体積を高速度カメラの動画から計測した．溶滴は Fig. 3.14 のように動画から X，Y をそれぞれ求め，楕円回転体として体積および球相当径を求めた．Fig. 3.15 にそれぞれの条件における溶滴体積の計測結果（12 周期分）を示す．Fig. 3.15 より，周波数の増加に伴い溶滴体積も減少していることが分かる．これはワイヤ送給体積が一定条件のため，周波数が高いほどより高頻度で溶滴が離脱されるためである．エラーバーに着目すると，同期となる 50 Hz ではかなり溶滴体積のばらつきが小さいことから溶滴移行が安定しており，一方余剰溶滴，準同期となる 35, 65 Hz では溶滴体積にかなり大きなばらつきがあることがわかる．これは余剰溶滴（35 Hz）の場合は過大となった溶滴が離脱したり，一部プロジェクト移行のような小さな溶滴が移行したりすることで，大小の溶滴が移行したためである．また準同期（65 Hz）の場合はいわゆる 2 パルス 1 ドロップの状態と 1 パルス 1 ドロップの状態が不規則に繰り返されることで，離脱する溶滴サイズが安定しないためである．以上のように，ワイヤ送給速度に対して適切な Ar 添加周波数を選定することで，一定体積の溶滴を安定的に離脱させることができるといえる．

そこで，Fig. 3.13 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(3.5)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．

$$v_f \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \pi \div f = V \tag{3.5}$$

ワイヤ送給速度 11.9 m/min，ワイヤ径ϕ1.2 mm，周波数 50 Hz から溶滴体積を計算すると 4.5 mm^3 となる．式(3.5)を用いて溶滴体積 4.5 mm^3 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，Fig. 3.13 上に破線で示す．溶滴体積 4.5 mm^3 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 mm^{3}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 mm^3 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，ϕ1.2 mm ワイヤにおいては 4.5 mm^3 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．

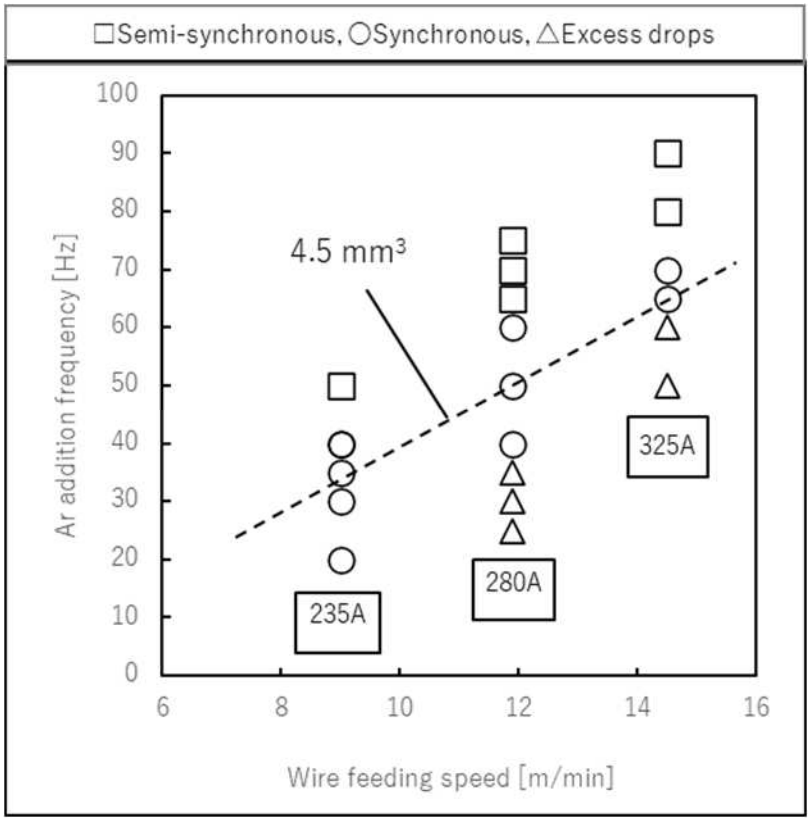


Fig. 3.13 Distribution of metal transfer in 1.2mm wire

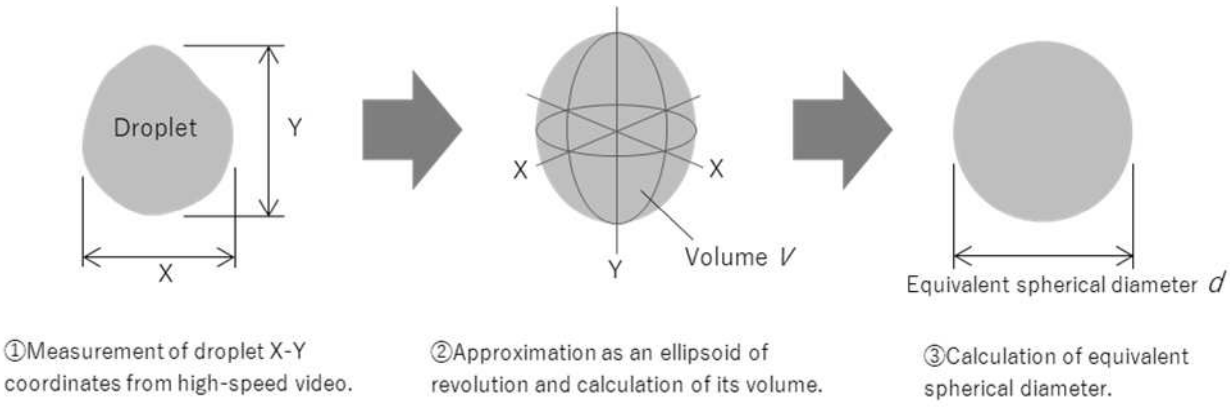


Fig. 3.14 Droplet volume and sphere equivalent diameter measurement method

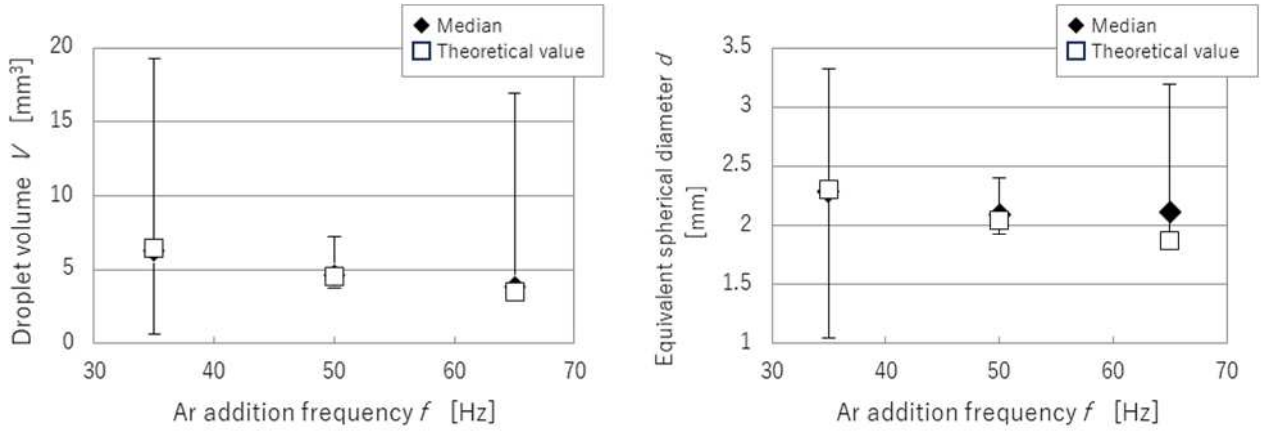


Fig. 3.15 Measurement results of droplet volume and sphere equivalent diameter (12 cycles)

一方，Fig. 3.16 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．Fig. 3.16 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 Fig. 3.13 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，Fig. 3.13 の結果とは対照的に，Fig. 3.16 においては低電流側である 280A 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の溶滴が生じづらいため，余剰溶滴の範囲が Fig. 3.13 の ϕ1.2 mm ワイヤの時よりも狭くなっていると推察する．

また，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．そこで，前述した溶滴体積 4.5 mm^3 線を Fig. 3.16 にも併せて示す．Fig. 3.16 より，4.5 mm^3 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，Fig. 3.13 と Fig. 3.16 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が離脱するために適した溶滴体積が変化することが示唆された．また，ϕ1.2 mm の結果と比較して ϕ1.4 mm の方が同期範囲が比較的広いことからも，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．

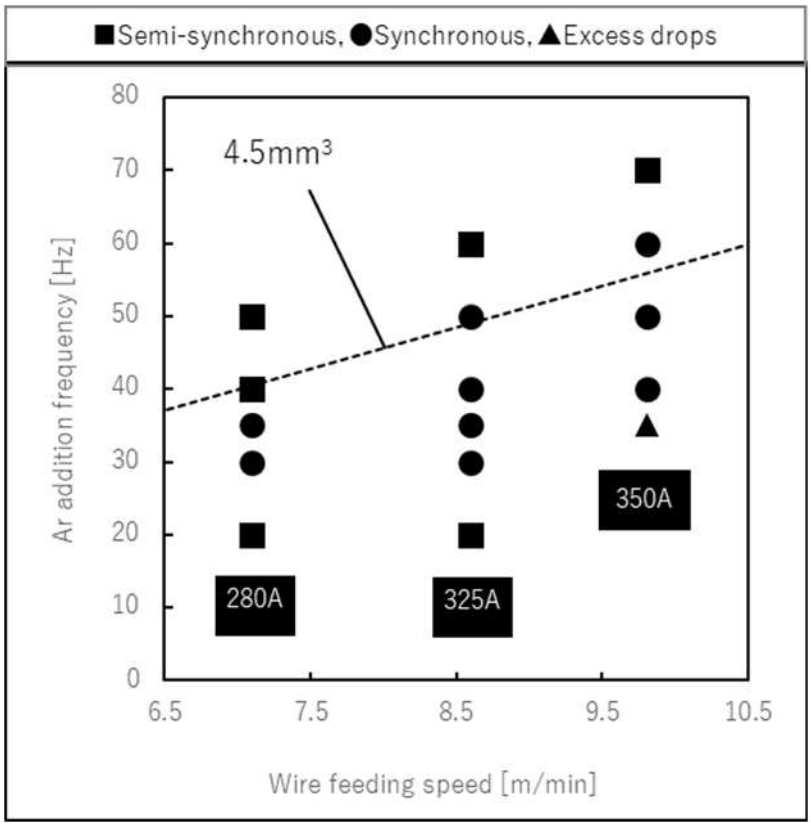


Fig. 3.16 Distribution of metal transfer in 1.4mm wire

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[3]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[4]．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[5]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．

Fig. 3.17 は，Fig. 3.13 および Fig. 3.16 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(3.5)を用いて算出した．

Fig. 3.17 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/mm^2 以下に分布していることが分かる．一方ϕ1.2 mm ワイヤは 325 A において約 290 A/mm^2 と，同電流値のϕ1.4 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.

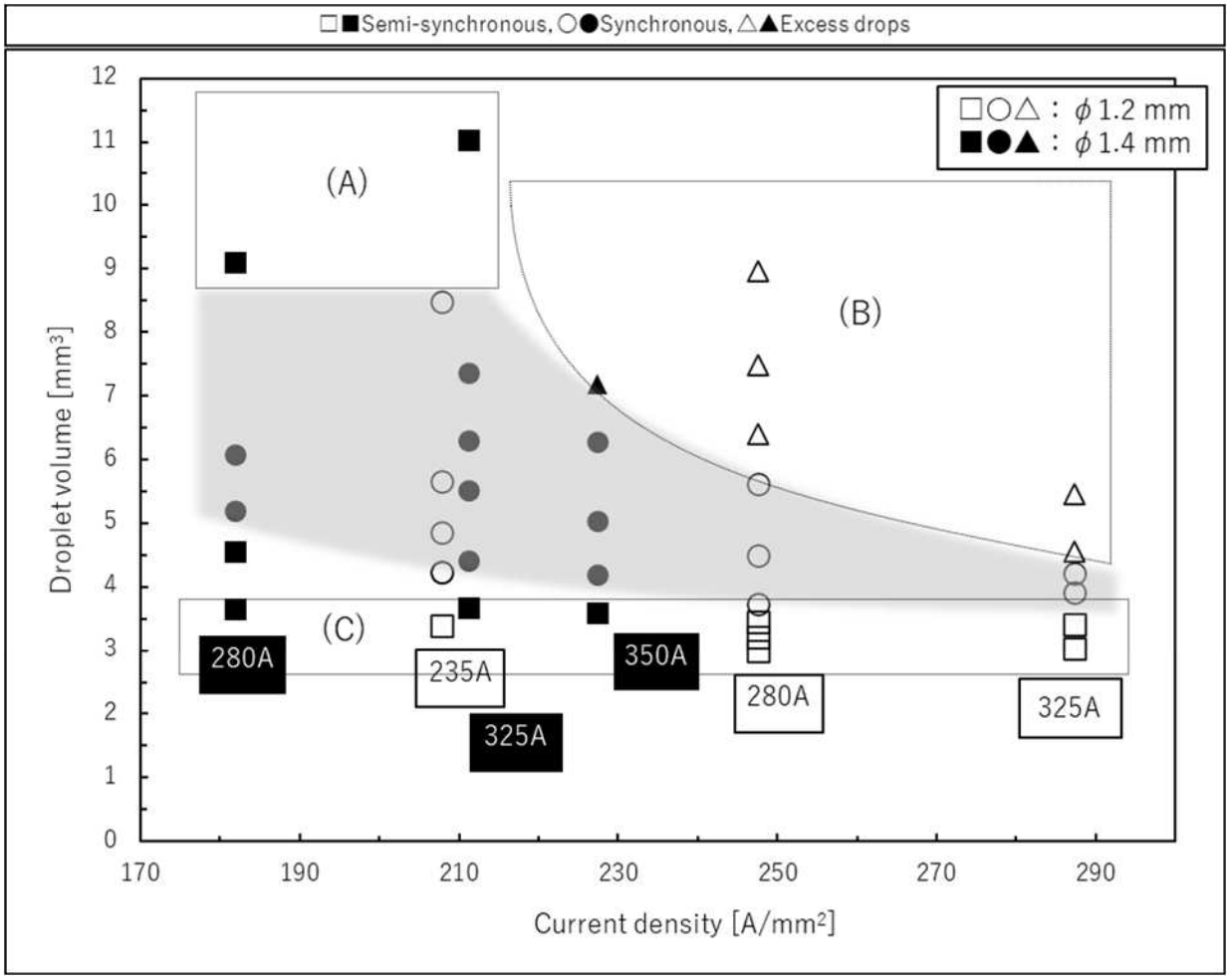


Fig. 3.17 Distribution of metal transfer for each wire diameter (1.2 and 1.4 mm), organized by current density and droplet volume

次に Fig. 3.17 における(A)~(C)の範囲の溶滴移行形態について考察する．Fig. 3.17(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．Fig. 3.18 および Fig. 3.19 にこの範囲で観察された溶滴移行の様子を模式図および高速度カメラの画像としてそれぞれ示す．この範囲は Ar の添加周波数が低いため CO_2 主体のアーク期間に成長した溶滴は Ar の到達を待てず，過大となった溶滴はワイヤ先端に保持されることができなくなり，CO_2 主体のアーク期間の間に離脱してしまう．その後 Ar が添加され Ar 主体のアークとなるが，まだ次の溶滴が成長しておらずこの期間には溶滴移行は生じない．そのためおおよその溶滴移行サイクルがいわゆる 1.5 パルス 1 ドロップ程度になってしまい，準同期となる.

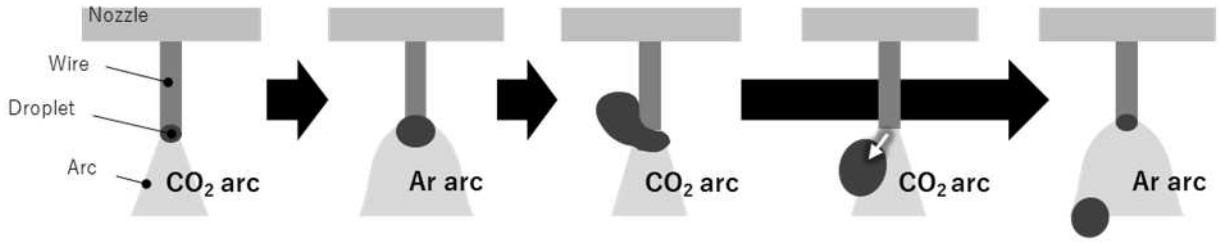


Fig. 3.18 Schematic diagram of metal transfer in Fig. 3.17(A)

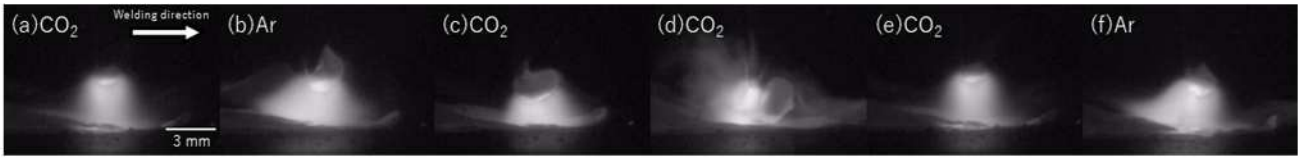


Fig. 3.19 Photographs of metal transfer in the area of Fig. 3.17(A)

Fig. 3.17(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．Fig. 3.20 および Fig. 3.21 にこの範囲で観察された溶滴移行の様子を模式図および高速度カメラの画像としてそれぞれ示す．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 290 A/mm^2 付近では約 5 mm^3 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/mm^2 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．通常のマグ溶接（Ar-20%CO_2）においても ϕ1.2 mm ワイヤにおける臨界電流密度は 220~250 A/mm^2（250~280 A 相当）となるため[6]，おおよそ同じ値となる．

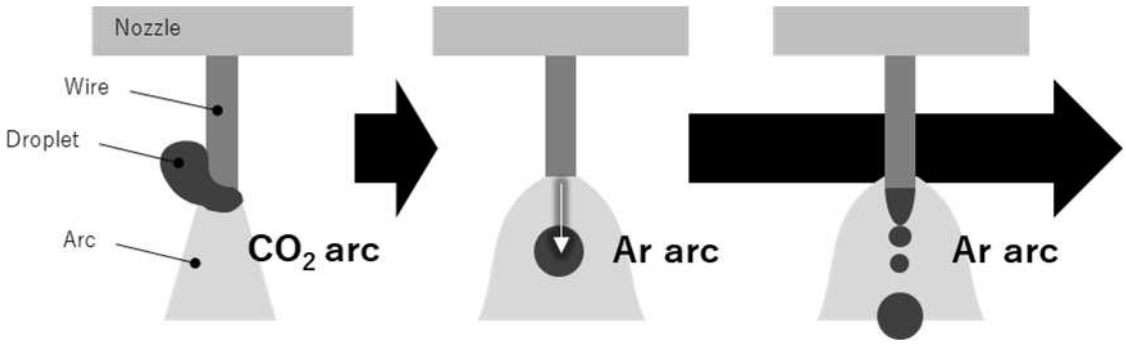


Fig. 3.20 Schematic diagram of metal transfer in Fig. 3.17(B)

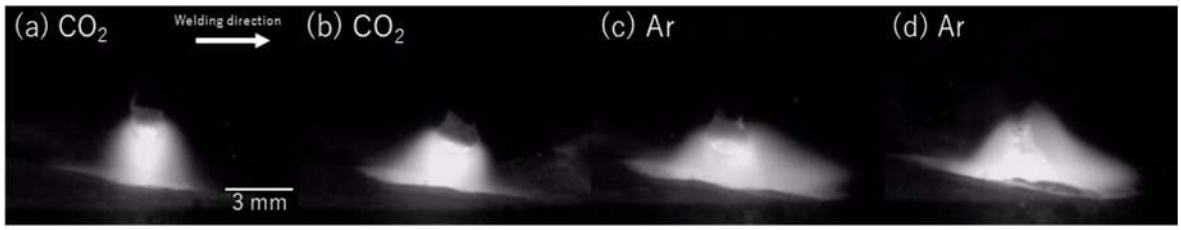


Fig. 3.21 Photographs of metal transfer in the area of Fig. 3.17(B)

Fig. 3.17(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．Fig. 3.22 および Fig. 3.23 にこの範囲で観察された溶滴移行の様子を模式図および高速度カメラの画像としてそれぞれ示す．Fig. 3.23 より，(a)CO_2 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)CO_2 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．

Fig. 3.17(C)の分布範囲は溶滴体積約 4 mm^3 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，小さなの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マグ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ため表面張力が大きく，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，Fig. 3.17 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．これは上記で議論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，3.3 節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変化させると Ar 主体のアーク期間の時間比率が高まるため，より小滴の溶滴においても 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．より小滴の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．

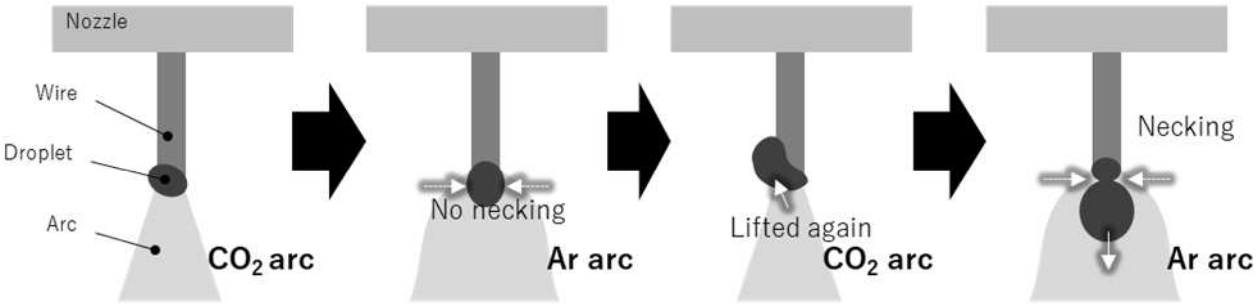


Fig. 3.22 Schematic diagram of metal transfer in Fig. 3.17(C)

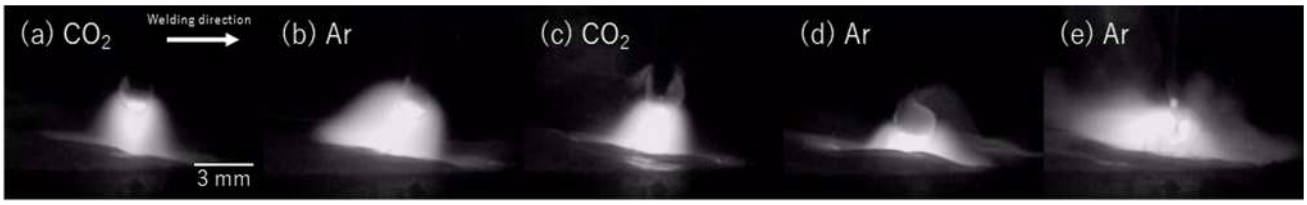


Fig. 3.23 Photographs of metal transfer in the area of Fig. 3.17(C)

3.5 結言

本章では，パルスガスマグ溶接法において Ar の添加条件を変化させ，溶接現象を観察することで溶滴移行制御が可能な条件範囲を調査した．また，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．

- 溶接電流 280 A 固定の条件下において，電磁弁開時間 4 ms 以上，概ね 1 パルス毎の Ar 体積 1 mL 以上で Ar 添加に溶滴移行が同期する．
- Ar 添加に溶滴移行が同期するためには，電磁弁開時間やピーク流量に応じて変化する溶滴移行時間（溶接離脱までの動作時間）と同じかまたはそれ以上に長くフレア型アークを保持する必要があると考えられる．
- Ar を円柱状のモデルと仮定することで，電磁弁開時間とピーク流量から溶滴移行形態（非同期（準同期），同期および余剰溶滴）を予測することができる．
- パルスガスマグ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約 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．

参考文献

[1] 佐藤英市，山崎圭: 炭酸ガスアーク溶接のグロビュール移行制御，溶接学会誌, Vol.84, (2015), No.4, 239-243.

[2] 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 溶接に関する研究－,溶接学会論文集, Vol.38, (2020), No.4, 363-378.

[3] 荻野陽輔，平田好則: 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, Vol.33, (2015), No.1, 1-12.

[4] 溶接学会溶接法研究委員会: 新溶接アーク現象，産報出版，第 1 版(2021).

[5] 平田好則: ミグ／マグ溶接，溶接学会誌, Vol.77, (2008), No.4, 32-39.

[6] 池上祐一，宮内秀樹，山本信也，内原正人: シールドガスによるスパッタ低減について，溶接学会誌, Vol.75, (2006), No.7, 570-574.

第4章　溶滴離脱の支配因子に関する検討とメカニズムの解明

4.1 緒言

ここまでの検討において，パルスガスマグ溶接において溶滴移行制御を行うための溶接条件に対する Ar 添加条件は実験的に解明された．しかし炭酸ガスアーク溶接中にアーク雰囲気が周期的に急変するという特異の状況から，その物理現象についてはまだ解明されていないことが多い．前述したようにパルスガスマグ溶接の原理として，溶滴の離脱には Ar 主体のアーク期間における電流上昇と，アーク形状が変化することによるアーク力および電磁ピンチ力変化が主な駆動力となり，溶滴移行が制御されると考えられている．しかし，それらの駆動力が同時かつ総合的に生じることで溶滴は離脱する，と実験結果から考察されているのが現状であり，それぞれ個々の物理現象に切り分けた検討は未だされていない．また従来の炭酸ガスアーク溶接やミグ・マグ溶接法においてもこれらの現象に対して個々に着目した溶滴移行制御プロセス開発および物理現象の議論はなされているが，これらを同時に活用した事例はほとんどない．そこで，本章ではパルスガスマグ溶接においてこれらの電流変化とアーク形状変化のどちらが溶滴離脱に支配的な因子であるかを実験的に調査し，その物理現象について考察した．

4.2 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 CO_2（25 L/min）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．ガスの添加条件は Table 4.1 に示すように，Ar の添加周波数 50 Hz，平均流量 4 L/min，電磁弁開時間 5 ms および CO_2 流量 25 L/min の固定条件とした．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，周波数および電磁弁開時間を設定した．また，Ar および CO_2 の平均流量はマスフローメータにより設定した．溶滴移行は溶接中のアーク近傍を高速度カメラ（1000 fps）で撮影して観察した．高速度カメラの撮影と同期させ，溶接電流およびアーク電圧波形を記録した．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．アーク電圧は溶滴移行が観察できるように CO_2 主体の緊縮型アーク期間にてアーク長 3 mm 程度になるよう設定した．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）に溶接速度は 30 cm/min で下向ビードオンプレート溶接を行った．

本研究ではパルスガスマグ溶接における電流変化およびアーク雰囲気変化の影響をそれぞれ独立して観察するため，電源特性およびシールドガス条件をパラメータとして，Table 4.2 に示す溶接条件でそれぞれ実験を行った．①パルスガスマグ溶接の溶接条件を基準とし，②4.3 節の電流上昇が溶滴移行に与える影響の調査では定電圧特性のデジタル制御インバータ電源（パルスモード）を使用し，シールドガスは CO_2 のみを用いてガス組成変化の無い条件で実験した．また③4.4 節のアーク雰囲気変化のみが溶滴移行現象に及ぼす影響の調査では定電流特性のデジタル制御インバータ電源を用いて，パルスガスマグ溶接と同様のガス組成変化を与えるため CO_2 および Ar を用いて実験した．ワイヤ送給速度は 1 周期（1/50 Hz ＝20 ms）あたりの溶滴体積を揃えるため，11.9 m/min 固定条件として実験した．詳細は後述するが，それぞれ得られた電流波形および電圧波形（1 周期分）を合わせて示す．

Table 4.1 Shielding gas conditions

Ar	Frequency f	50 Hz
	Flow rate (average) $Q_{ave.}$	4 L/min
	Valve opening time t	5 ms
CO_2	Flow rate Q	25 L/min

Table 4.2 Welding conditions

	①PGMAG	②Pulsed current + CO_2 (Chapter 4.3)	③Const. current + PGMAG (Chapter 4.4)
Power source	Constant voltage characteristic	Constant voltage characteristic (Pulse mode)	Constant current characteristic
Shielding gas	CO_2 + Pulsed Ar	CO_2	CO_2 + pulsed Ar
Wire feeding speed	11.9 m/min	11.9 m/min	11.9 m/min
Current waveform	The current increases synchronously with the Ar addition.	Simulates PGMAG current changes.	Almost constant current regardless of Ar addition.

4.3 電流変化が溶滴移行に与える影響

まず，パルスガスマグ溶接においてアーク雰囲気変化時に生じる電流上昇が溶滴移行に及ぼす影響を調査した．この電流上昇は Ar の添加に伴ってパルス状に生じることから，周期的な電磁ピンチ力の増加を及ぼすことで溶滴移行を促している可能性がある．そこで，電流上昇のみが溶滴移行に与える影響を調査するため，波形制御可能なパルス電源を用いて Table 4.2①のパルスガスマグ溶接における電流波形を模擬し，CO_2 のみを用いた炭酸ガスアーク溶接（通常ノズル）のグロビュール移行となる電流域にて検証した．

Fig. 4.1，Fig. 4.2 に電流波形を模擬した炭酸ガスアーク溶接の電流波形，電圧波形および溶滴移行を示す．パルス電流はピーク電流が約 400 A，パルス幅が約 6 ms となるように模擬した．なお，ベース電流がワイヤ送給速度（11.9 m/min）を保つために実際のパルスガスマグ溶接よりもやや高い値となったが，溶滴挙動自体は同じようにふるまうため現象の観察には問題ないと考える．2〜7 ms にかけて電流が上昇するが，その時溶滴は Fig. 4.2 の 7 ms に示すように持ち上げられるような挙動を示す．この挙動は電流上昇によりアーク力がより強くなることで溶滴が持ち上げられるためと考えられる．また同時に電磁ピンチ力も増加していると思われるが，溶滴にくびれが生じていないため離脱に有効に作用することができず，電磁ピンチ力よりもアーク力がおよぼす影響が大きいと考えられる．その後 7〜10 ms にかけて電流が下降することでアーク力は弱まり，さらに時間経過による溶滴体積の増加も伴って溶滴は 16 ms 付近から垂下しはじめる．そして次の電流上昇に差し掛かった 22 ms で溶滴にくびれが生じ，電流上昇

による強い電磁ピンチ力とアーク力が生じることによって爆発的にスパッタが飛散しながら 25 ms 付近で離脱する．なお，この溶滴移行は必ずしも 2 パルスに 1 回生じるわけではなくその頻度は全体の 6 割程度で，残りの 4 割程度は 1 パルス目の電流上昇時あるいは 2 パルス目のベース電流の時など不規則に生じるため，いわゆる規則的な 2 パルス 1 ドロップとなっているわけではない（詳細は Fig. 4.5②に後述）．

以上のように本実験条件においては，炭酸ガスアーク溶接にパルスガスマグ溶接の電流波形を模擬しただけでは周期的に安定した溶滴移行を得ることはできないことが分かった．電流上昇は電磁ピンチ力の増加による溶滴離脱を促進させる働きがある一方，アーク力の増加も伴ってしまうことでむしろ溶滴の離脱を妨げるように働く場合もあり，よって不規則な溶滴移行となってしまうと考えられる．

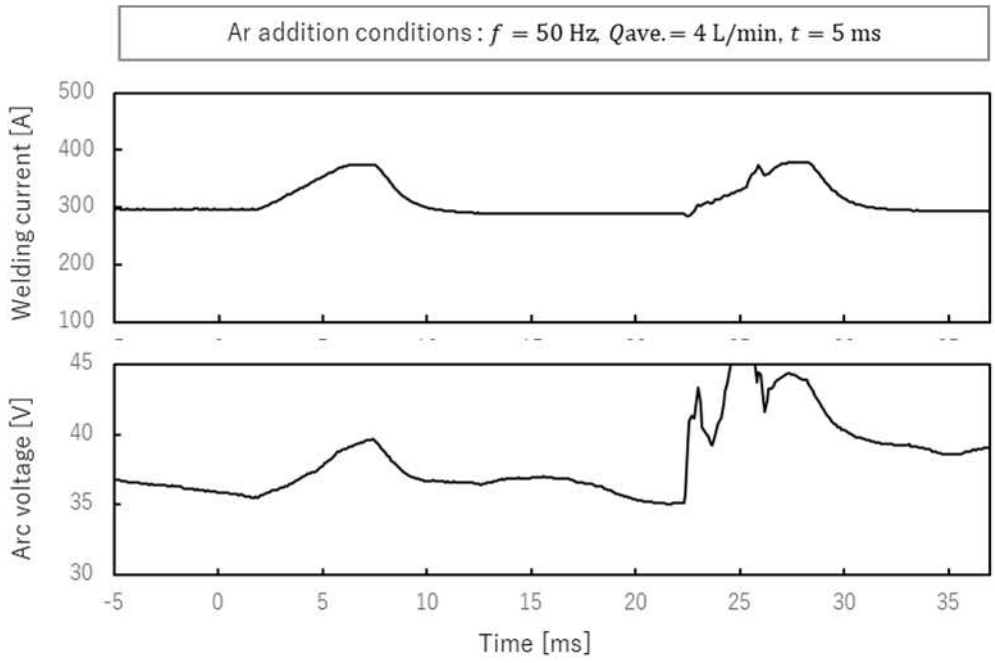


Fig. 4.1 Welding current and Arc voltage waveforms of CO_2 welding simulating PGMAG

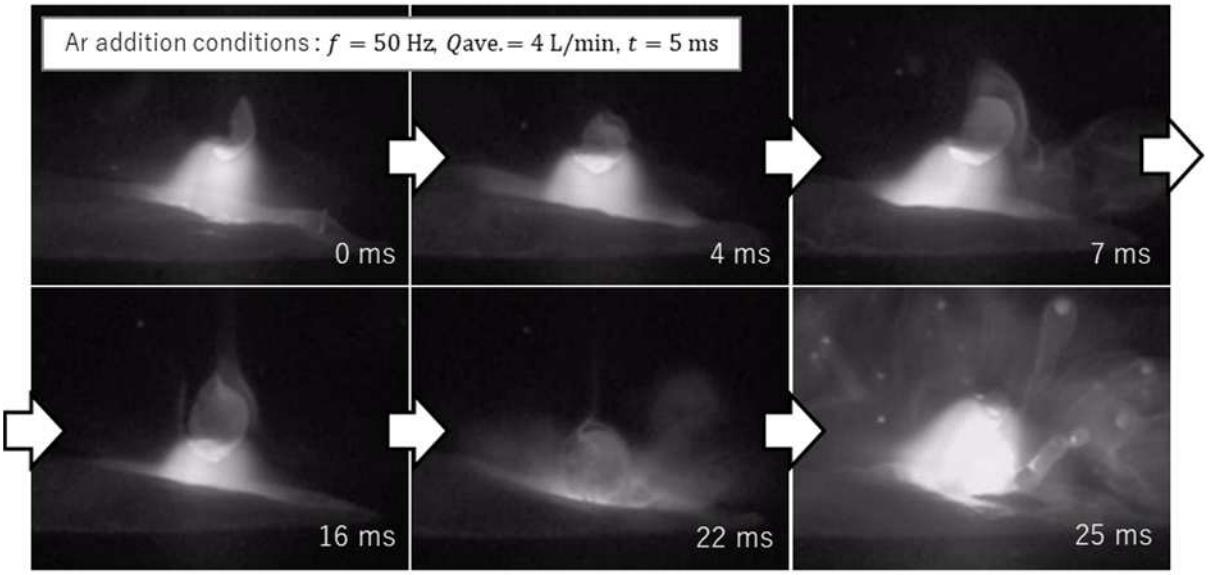


Fig. 4.2 Metal transfer of CO_2 welding using a pulsed power source

4.4 アーク雰囲気変化が溶滴移行に与える影響

次に，電流変化を生じさせずにアーク雰囲気変化が溶滴移行現象に及ぼす影響を調査するために，定電流特性電源を用いてパルスガスマグ溶接を実施した．Fig. 4.3，Fig. 4.4 に定電流特性電源における本手法の電流波形，電圧波形および溶滴移行を示す．また，2 章で述べた通りパルスガスマグ溶接においてアーク雰囲気が CO_2 主体から Ar 主体となることで電圧の低下が生じるが，この電圧低下が生じている期間を Ar 主体のアーク期間，それ以外の期間を CO_2 主体のアーク期間として以下論じるものとする．

Fig. 4.3，Fig. 4.4 より，4 ms から 6 ms にかけて CO_2 主体のアーク期間から Ar 主体のアーク期間に切り替わるが，この切り替わった瞬間はアーク長の変化はほとんど見られない．またアーク期間の切り替わりにより溶滴に働くアーク力の低下が生じることで 8 ms 付近で溶滴が垂下しはじめ，10 ms でくびれが生じ，その後 12 ms で離脱する．その後は 12 ms 以降で再び CO_2 主体のアーク期間に戻り，次の溶滴が成長し始める．このように定電流特性電源を用いた場合においても定電圧特性電源を用いた場合と同じ溶滴移行現象が見られ，アーク雰囲気変化に溶滴移行が同期していることが分かる．また電流電圧波形に着目すると，定電流特性電源の特性により，周期的なアーク雰囲気変化が生じても電流はほとんど変化しないことが分かる．一方，電圧は Fig. 2.13 の定電圧特性電源ではアーク雰囲気変化により 4 V 程度変動したのに対し，Fig. 4.3 では 10 V 程度と変化量が大きい．この電圧変化はアーク長がほとんど一定の状態で電位傾度が変化するため生じるものであるが，電圧変化量の差に関しては，定電流特性電源は電流変化を小さくするために電源の外部特性が垂下度（電流変化に対する電圧変化）の大きな設計となっているため，垂下度の小さな定電圧特性の電源と比べて電圧変動が大きくなったと考えられる．

以上より，アーク雰囲気変化が生じさせる電流上昇による電磁ピンチ力の増加が無く，一定電流の場合においても Ar 添加に溶滴移行が同期した．アーク雰囲気変化によりアーク形状が変化し，アーク力が急低下することで溶滴は垂下を開始し，くびれを生成するきっかけが与えられる．よって電流一定においても溶滴離脱が促されることで溶滴移行制御が成されていると考えられる．

なお，本研究において Ar 添加に溶滴移行が同期する（いわゆる 1 パルス 1 ドロップ）ことは，毎周期 Ar 主体のアーク期間中に溶滴離脱することを前提としている[1]．Table 4.2①②③に示した条件において任意の 1 秒間（50 周期分）の溶滴離脱タイミングの集計結果を Fig. 4.5 に示す．前回の溶滴移行から 1 パルス目の Ar 主体のアーク期間（②ではピーク電流期間）に溶滴離脱したもの（つまり同期）を 1st Ar，2 パルス目の CO_2 主体のアーク期間（②ではベース電流期間）に溶滴離脱したものを 2nd CO_2，2 パルス目の Ar 主体のアーク期間（②ではピーク電流期間）に溶滴離脱したものを 2nd Ar として集計した．それぞれの溶滴離脱タイミングについては Fig. 4.6 に模式図で示す．なお集計した 1 秒間の溶滴移行回数はそれぞれ①50 回，②26 回，③45 回であり，図中にはそれぞれの期間での溶滴離脱頻度を百分率で表記した．①パルスガスマグ溶接ではほぼ完全に同期して毎周期 Ar 主体のアーク期間で溶滴離脱しているのに対し，③アーク雰囲気変化のみでは 80%まで同期の頻度が下がっている．この差は Ar 主体のアーク期間における電流上昇の有無によるものと考えることができ，また 4.3 節の電流波形を模擬した実験結果および Fig. 4.5②で 23%程度しか同期（1 パルス目のピーク電流期間に溶滴離脱）しないことを合わせて考えると，電流上昇が溶滴にもたらす効果は溶滴離脱に必須の条件ではないが，補助的には有効に作用していることが示唆された．

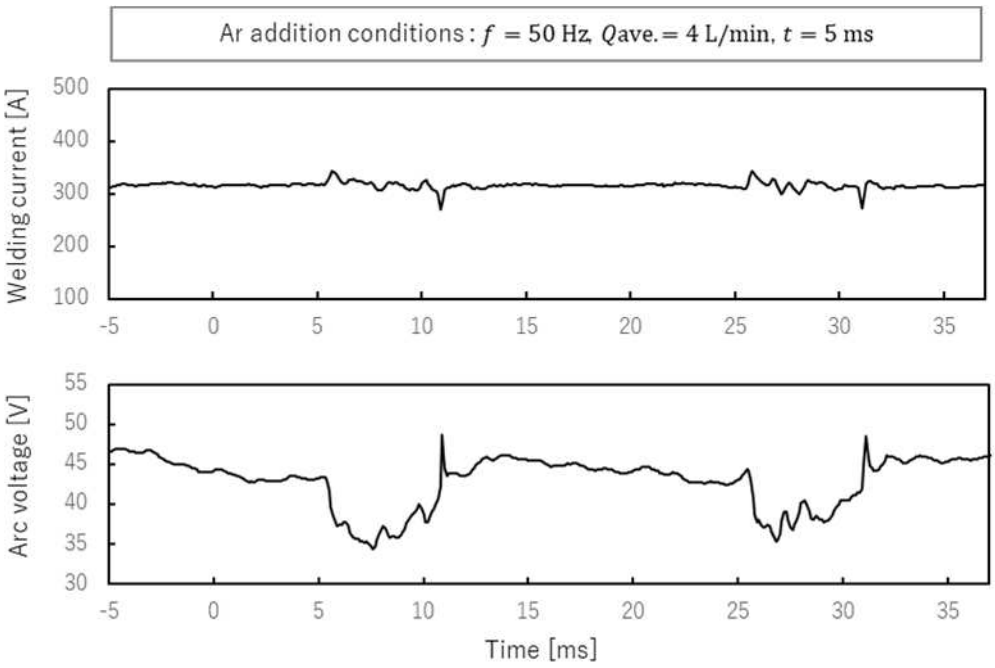


Fig. 4.3 Welding current and Arc voltage waveforms of PGMAG using constant current characteristic power source

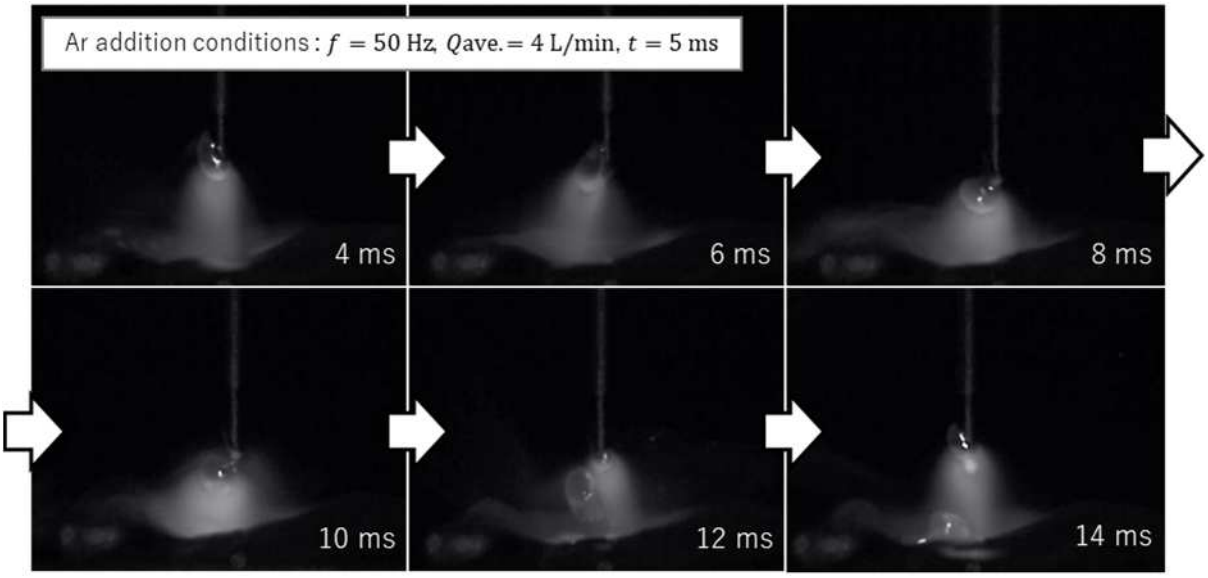


Fig. 4.4 Metal transfer of PGMAG using constant current characteristic power source

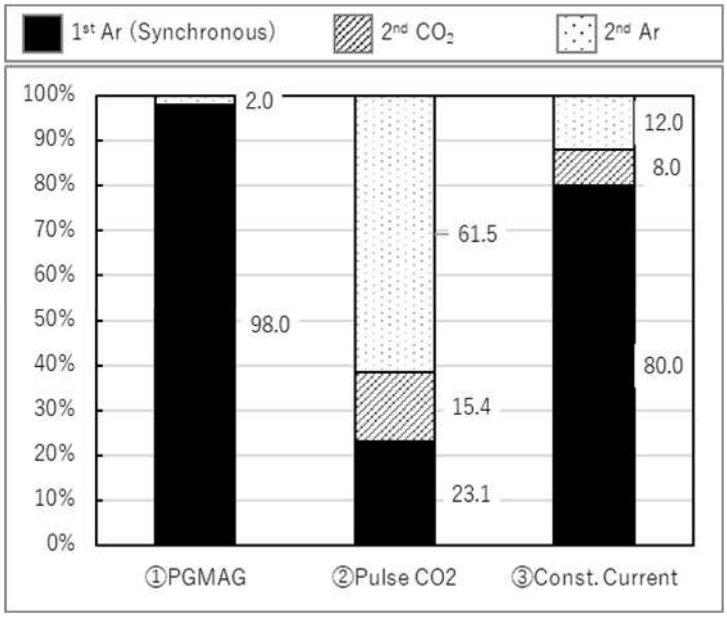


Fig. 4.5 Results of counting droplet release timing (50 cycles)

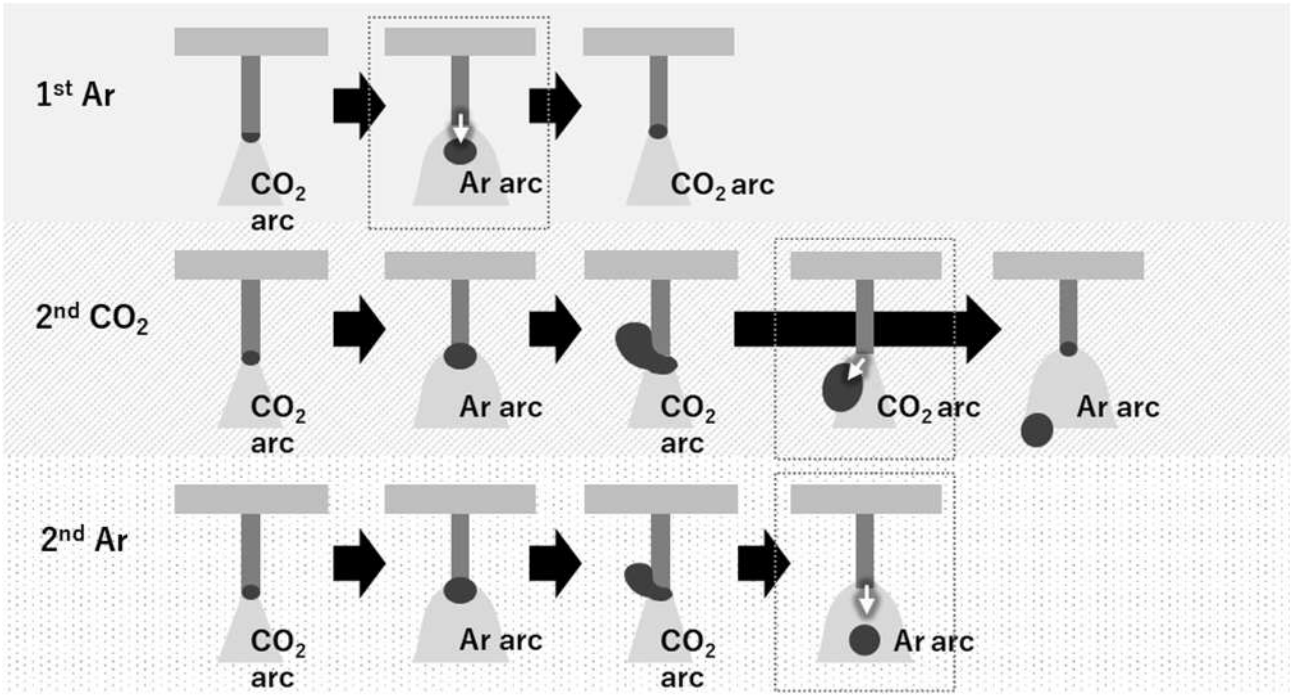


Fig. 4.6 Schematic diagram of droplet release timing

以上よりパルスガスマグ溶接において，電流変化が生じなくても，アーク雰囲気変化に伴うアーク力の減少が溶滴離脱を促し，溶滴移行制御を可能としていることが明らかとなった．なお，3 章に示した通り溶接電流（電流密度）および溶滴体積（Ar 添加周波数）の設定によっては電磁ピンチ力やアーク力等の駆動力のバランスが変化することが考えられ，アーク雰囲気変化による 1 パルス 1 ドロップの精度への影響は出うる．一方，後述するように炭酸ガスアーク溶接において電流波形制御のみでの 1 パルス 1 ドロップの実現は極めて困難であるため，溶滴離脱への影響としてアーク雰囲気変化が支配的であるという結論は揺るがないものと考えられる．

4.5 分光観察によるアーク雰囲気変化の観察

アーク雰囲気変化が溶滴移行現象に及ぼす影響について，溶滴に働く駆動力の観点から考察する．本プロセスにおいては CO_2 主体のアーク期間では緊縮型のアーク形状，Ar 主体のアーク期間ではフレア型のアーク形状を示す．このアーク雰囲気変化によるアーク形状変化とアークプラズマにおける電流経路の変化は深く関係しているとされ[2]，電流経路の変化はアークプラズマに接する溶滴に働く力の大きさ，あるいは分布の変化を生むことで，溶滴内の対流およびその変形挙動に変化をもたらしていると考えられる．

茂田らおよび辻村らは，ミグ・マグ溶接における分光観察により，アークプラズマ内における Ar および Fe の発光を観察することで，主たる電流経路がアーク外縁部に集中することでアーク力が低下し，スプレー移行が生じると考察している[2, 3]．そこで，本プロセスにおけるアーク雰囲気変化およびアーク形状変化を分光観察することで，電流経路と溶滴に働く駆動力の変化を考察した．

Ar，Fe の発光をそれぞれ分光観察するため，Ar は 696 nm（半値幅 1.6 nm），Fe は 492 nm（半値幅 1.5 nm）のバンドパスフィルタを用いた．なおこれらのバンドパスフィルタは GMAW におけるアークプラズマの分光放射特性に基づき，過去研究にて実績のある波長および半値幅を有したものを選定した[4-6]．まずは炭酸ガスアーク溶接およびマグ溶接（Ar-20%CO_2）の分光観察結果を Fig. 4.7 および Fig. 4.8 に示す．炭酸ガスアーク溶接およびマグ溶接はワイヤ送給速度 11.9 m/min に合わせて実験した．なおこれらの各バンドパスフィルタにおける分光観察は同時撮影ではないため，それぞれ似た現象のタイミングのスナップショットを示したものである．

Fig. 4.7(b)では，既往研究[7, 8]より報告されている炭酸ガスアーク溶接のグロビュール移行における緊縮型アークと同形状の Fe プラズマの発光が観察された．グロビュール移行時は溶滴下部におけるメタルプラズマ域に電流経路が集中することで強いアーク力が溶滴離脱を妨げるとされているが[2]，本観察結果も同様に溶滴直下に集中した Fe プラズマの発光が観察された．一方 Fig. 4.7(a)では，Fig. 4.7(b)の Fe プラズマの発光箇所とほとんど同形状の極めて弱い発光が観察された．炭酸ガスアーク溶接ではシールドガスに Ar を含まないため，発光のほとんどは連続スペクトルであると推定される．一方 Fig. 4.8(a)では，マグ溶接のプロジェクト移行において，二重の濃淡を持つ Ar プラズマの発光が観察された．アーク外縁部は強く発光しているのに対し，ワイヤおよび溶滴下部の中央付近では比較的発光が弱い．また Fig. 4.8(b)では Fe プラズマの発光がワイヤおよび溶滴下部に見られ，Fig. 4.8(a)と重ね合わせてみるとアーク中央付近が発光しているように見える．これはワイヤ直下に低温の金属蒸気が集中して存在するためであり，逆にアーク外縁部に高温の Ar プラズマが分布しているためと思われる[2]．以上のように炭酸ガスアーク溶接およびマグ溶接の分光観察結果において従来の知見と同傾向を示す結果が得られた．

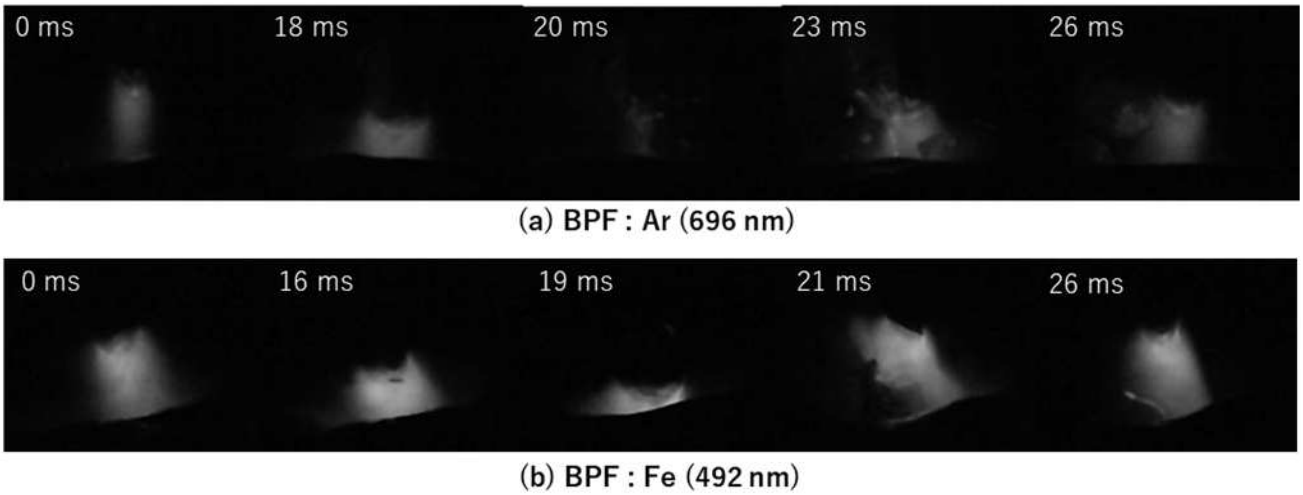


Fig. 4.7 Spectroscopic observation of metal transfer and arc shape change in CO_2

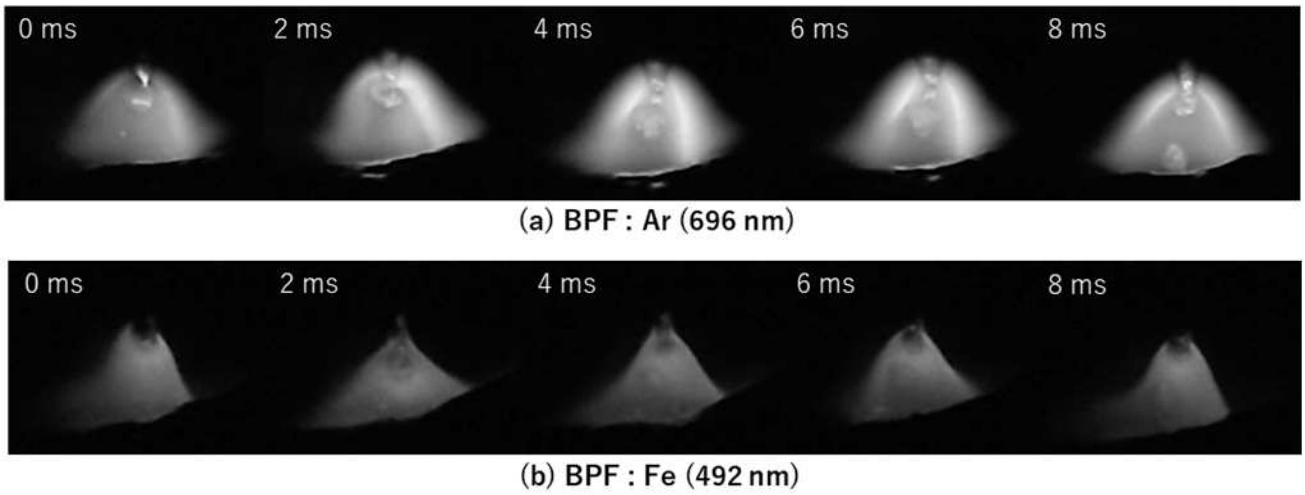


Fig. 4.8 Spectroscopic observation of metal transfer and arc shape change in MAG

以上の結果を踏まえ，パルスガスマグ溶接におけるアークプラズマの分光観察を行った．分光観察結果を Fig. 4.9 に示す．Ar 添加条件および溶接条件は Table 4.1，Table 4.2①の条件で実験した．Fig. 4.9(a)および(b)の(1)(5)は電圧およびアーク形状から CO_2 主体のアーク期間と思われるが，溶滴直下において Fig. 4.9(a)では弱い発光，Fig. 4.9(b)では強い発光が見られた．なおこの Fig. 4.9(a)の弱い発光は，Fig. 4.9(b)の発光とほぼ同形状であること，このタイミングでは Ar は添加されていないこと，時間経過により発光が弱まっていかなかったこと（Ar が残留しているとすれば時間経過で徐々に薄まるはずであるがそうは見えない），および Fig. 4.7 の炭酸ガスアーク溶接における 0，26 ms の結果と同形状であることから，連続スペクトルの可能性が高いと思われる．Fig. 4.9(b)(1)(5)より，炭酸ガスアーク溶接における分光結果と同傾向で溶滴直下に Fe プラズマの範囲があり，この範囲は CO_2 濃度が高い状態においては高温となる傾向があるとされている[2]．よってこの溶滴直下に電流経路が集中していると考えられ，アーク力は分散することなく垂直方向に溶滴と溶融池に作用し，その結果溶滴を支える方向に作用することで溶滴の垂下・離脱を阻害する駆動力となっていると考察される．

一方，Fig. 4.9(a)および(b)の(2)(3)は電圧およびアーク形状から Ar 主体のアーク期間と思われ，CO_2 主体のアーク期間からの明瞭な発光分布の変化が見られた．Fig. 4.9(a)ではアーク外縁部が強く発光しており，Fig. 4.9(b)では CO_2 主体のアーク期間とあまり変わらず溶滴直下部分のみが発光しているように見える．アーク周辺の雰囲気に Ar が到達することによって，アーク外縁部に Ar プラズマの分布が現れる．Fe プラズマの分布は CO_2 主体のアーク期間から変わらず溶滴直下に分布する．この状態は，Fig. 4.8 に示したマグ溶接の見え方および前述したミグ・マグ溶接における分光観察結果と酷似していることから，アーク中心付近のメタルプラズマ域における温度が約 6500~8000 K に対して Ar プラズマ域における温度が 12000~15000 K となり，それに伴って Ar プラズマ域の電子密度が方が倍程度となっていることが推測される[2, 3, 9]．プラズマにおける電子密度と電気伝導率は密接な関係にあることから，アークプラズマ内の CO_2 濃度の低下は Ar プラズマ域への電流経路の変化を生じさせ，アーク外縁部に主たる電流経路が存在する状態になっていると考えられる．よって，Fig. 4.10 のアークプラズマの分布イメージ図に示すように，電流経路は(a)CO_2 主体のアーク期間で溶滴直下に集中している状態から，(b)Ar 主体のアーク期間ではアーク外縁部に瞬時に切り替わる．そのため溶滴に働く垂直方向のアーク力は急激に弱まり，

垂下することで離脱が可能になることが推測される．また，荻野らによる GMA 溶滴移行現象のシミュレーションにおいて，アーク外縁部への電流経路の変化は，溶滴上方に電磁力が作用しやすくなることで溶滴を下方へと移動させる力を大きくすることが考察されている[9]．よって Fig. 4.11 に示すように，溶滴の斜め側方に位置する電流経路は電磁ピンチ力を溶滴離脱に対してより有効的に働きやすい状態としており，溶滴離脱を促進させる要素になると考えられる．

以上より，アーク雰囲気変化による溶滴離脱の促進は，電流経路が急激に変化することによる影響が大きいことが分光結果より考察された．パルスガスマグ溶接では，電流経路が溶滴直下とアーク外縁部に交互に変化し，溶滴に作用するアーク力が増減することで溶滴離脱が促進され，Ar 添加と溶滴移行が同期すると考えられる．また Fig. 4.5 において一定電流では 1 パルス 1 ドロップの精度が若干低下したことから，電流変化によるアーク力変化と電磁ピンチ力変化は補助的に溶滴離脱を助長していることが考察された．

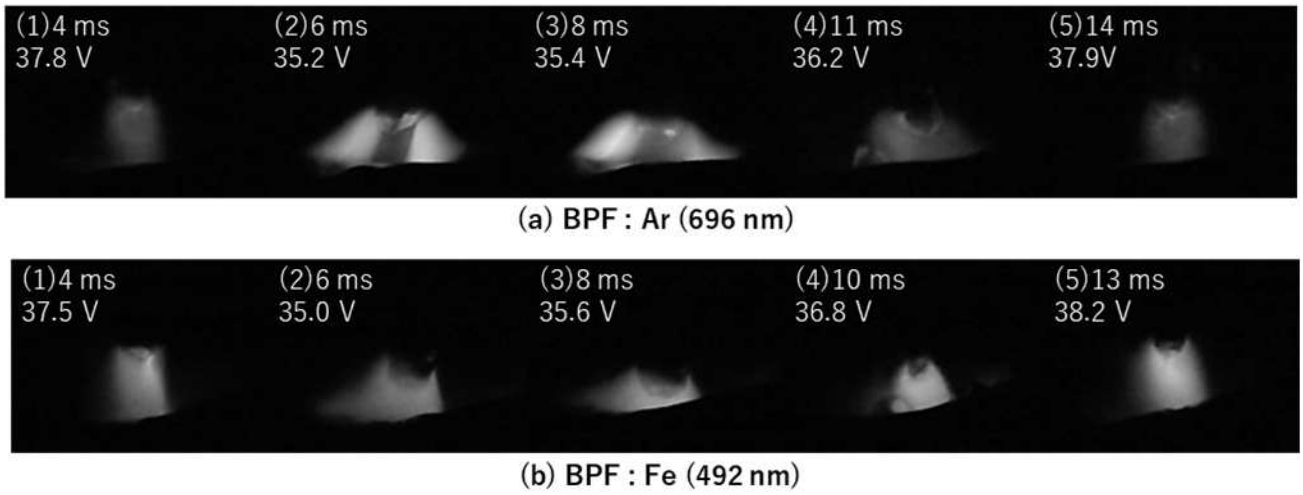


Fig. 4.9 Spectroscopic observation of metal transfer and arc shape change in PGMAG

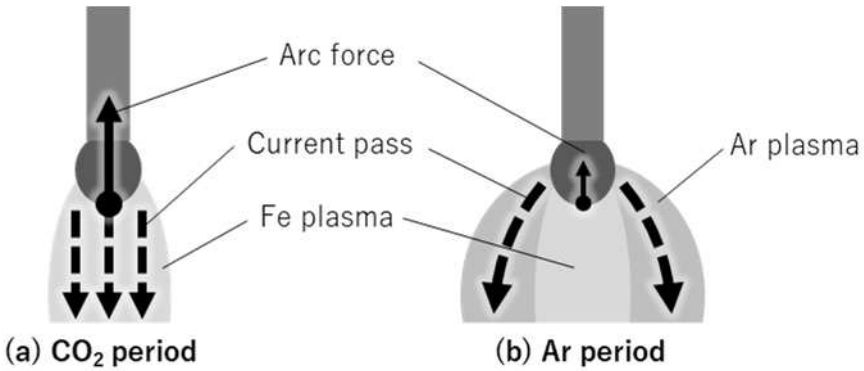


Fig. 4.10 Schematic illustrations of metal transfer and arc shape change in PGMAG observed by spectroscopic observation

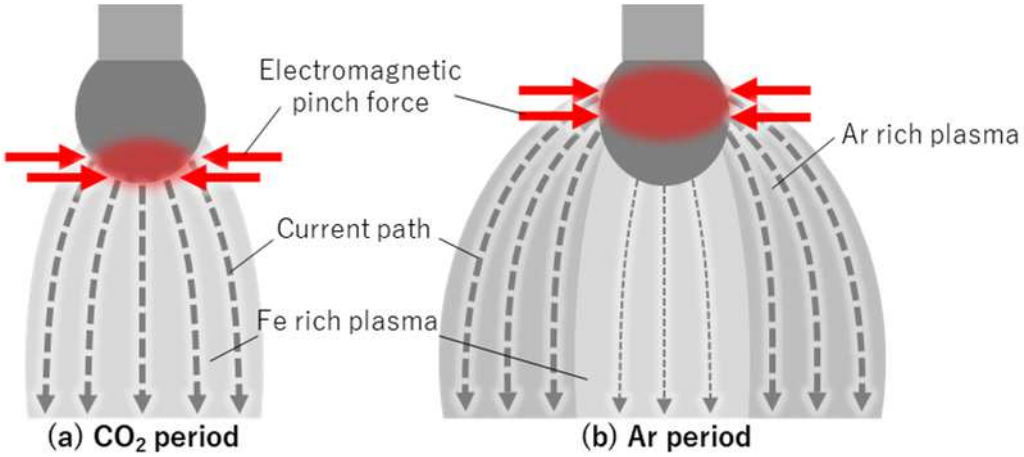


Fig. 4.11 Differences in current path and location of electromagnetic pinch force depending on arc shape

4.6 パルスガスマグ溶接における溶滴移行現象と支配因子の総括

ここまで，パルスガスマグ溶接における溶接現象について，種々の実験的検討を行った．本節では，これらの結果を総括し，Ar 添加と溶滴移行を同期させるための条件および物理現象についてまとめ，それらのメカニズムについて考察する．

まず，緊縮型およびフレア型アークの状態における種々の状況および溶滴に作用する駆動力について解明および考察された内容をまとめる．Fig. 4.12 にそれらをまとめた図を示す．図中におけるアーク雰囲気は CO_2 および Ar いずれかの主体的な雰囲気を示す．また電流と電圧およびそれらの波形については相対的な高・低を示す．

まず，アーク雰囲気が CO_2 主体の状態から Ar 主体の状態になると，電流が高く，電圧が低くなる．これは 2.4 節で述べたように，アークプラズマを形成するガス雰囲気が CO_2 から Ar に変化したことにより電位傾度が低下すること，そして定電圧特性電源の外部特性により電圧低下は大きな電流上昇を生じさせるためである．この電流上昇は溶滴に作用する電磁ピンチ力を増強させ，溶滴離脱に有効作用すると考えられる．しかし，4.4 節の実験および考察において，この電流上昇による電磁ピンチ力の増加は，溶滴離脱因子として支配的ではないことが実験的に示された．このメカニズムについて考察する．従来知見より，炭酸ガスアーク溶接におけるグロビュール移行領域において，電流波形制御のみによる溶滴移行制御は容易ではなく，2 パルス 1 ドロップとして緻密な電流波形制御を要する[10]ため適用は限定的である．このことに鑑みると，電流の増減のみでの安定的な 1 パルス 1 ドロップ移行の実現は難しいことが理解できる．電流波形制御では，電流の増減により溶滴に作用する電磁ピンチ力およびアーク力を増減させ，溶滴の離脱を促すというのがその原理である．しかし CO_2 による緊縮型アークが保たれている以上，電流を増加させると電磁ピンチ力と共にアーク力も増加してしまい，強力なアーク力に打ち勝つだけの電磁ピンチ力を作用させることは困難である．さらにはアーク力によって持ち上げられた溶滴は，ワイヤにまとわりつくように持ち上げられている状態となりやすく，離脱の準備に必要な垂下・くびれ生成が不十分であることから，溶滴の形状および状態としても安定的な離脱に至らせることは難しい．以上のメカニ

ズムによって電流上昇による電磁ピンチ力の増加は溶滴離脱の支配的因子とはならないが，一方で溶滴離脱を有効的に補助しており，Fig. 4.5 に示した通り溶滴移行制御（1 パルス 1 ドロップ）の成功率を高める重要な因子であるといえる．

次に，アーク雰囲気変化はアーク形状の変化にも作用する．アーク形状はアーク雰囲気が CO_2 主体の状態では緊縮型，Ar 主体の状態ではフレア型となる．4.4 節の実験および考察において，このアーク雰囲気変化によるアーク形状は，溶滴離脱の支配的因子であることが実験的に示された．このメカニズムについて考察する．緊縮型およびフレア型のアーク形状の違いは，主たる電流経路の違いを意味する．炭酸ガスアーク溶接およびマグ溶接における既往研究にて示されているとおり[2, 3]，緊縮型アークでは溶滴直下の Fe リッチプラズマ内，フレア型アークではアーク外縁部の Ar プラズマ内に主たる電流経路があるとされる．これらの考え方は，4.5 節の分光観察結果よりパルスガスマグ溶接においても同様であることが示された．よって CO_2 主体の状態では溶滴直下に位置する電流経路により，溶滴に作用するアーク力は強くなることでワイヤ先端への垂下が阻害され，溶滴は成長する．一方，Ar 主体の状態では溶滴直下に電流経路はほとんどなく，溶滴にかかるアーク力は弱くなり，溶滴は垂下・離脱する．加えて，電流経路の変化は溶滴への電磁ピンチ力の作用する位置についても変化させることが荻野らにより示されている[9]．電流経路が溶滴直下に集中している場合，電磁ピンチ力は溶滴下部に集中して作用するため，溶滴の離脱には有効作用せず，やや阻害する方向に作用する．一方，電流経路が溶滴側面に位置する場合，電磁ピンチ力は溶滴側面から締め付けるように作用するため，溶滴のくびれ生成に有効作用し離脱を助長する．さらに佐藤によると，アーク広がり角が大きくなると電流経路がワイヤの径方向へと偏向していくことで溶滴の伸長を促すことが実験および理論解析によって示されている[11]．これは溶滴近傍におけるアークプラズマの体積が増加することによりアークプラズマ内に流入する溶接電流の分流量が増加するためとされており，パルスガスマグ溶接においてもアーク形状が緊縮型からフレア型に急変しアークプラズマ範囲が溶滴側面まで拡大することで，電流経路がアーク外縁部へと変化していると考えられる．この溶滴伸長効果により，溶滴はフレア型アーク時に十分にワイヤ先端に垂下・くびれ生成することが可能となり，離脱にいたることができる．以上より，アーク雰囲気変化によるアーク形状の変化は，電流経路を変化させることによって溶滴に作用するアーク力および電磁ピンチ力のかかり方を変化させ，溶滴の伸長を促すことで溶滴移行制御を実現していることが解明された．

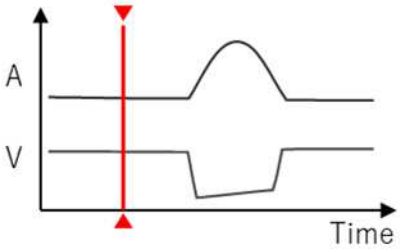
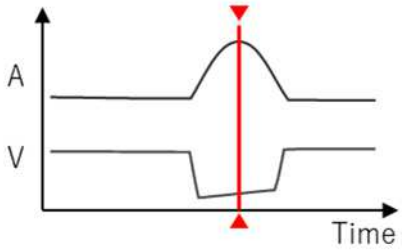
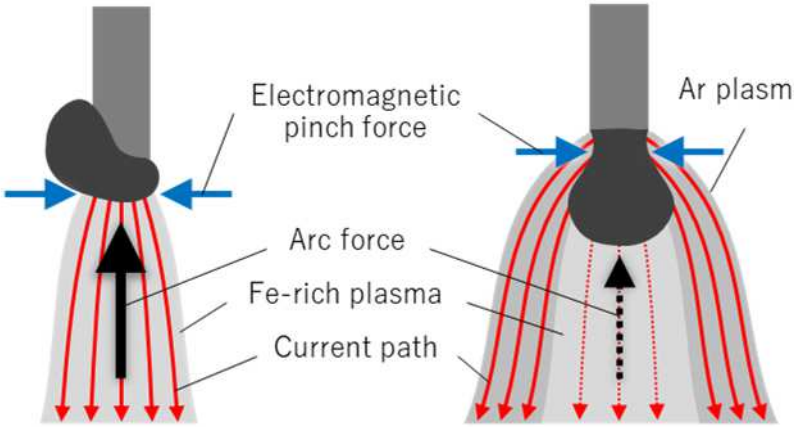
Arc atmosphere	CO_2	Ar
Current	Low	High
Voltage	High	Low
Waveform		
Arc shape	Pinched	Flared
Current path	Below the droplet	Outer edge of the arc
Arc force acting on the droplet	Strong	Weak
Electromagnetic pinch force	Less effective in promoting droplet detachment.	Acting slightly above the droplet, it effectively promotes droplet detachment.
Droplet	Grow	Detached
Schematic illustration		

Fig. 4.12 Summary of conditions during each arc shape period and comparison of driving forces acting on the droplet.

次に，Ar 添加条件および溶接条件によって溶滴移行がどのような挙動を示すかについて解明された内容をまとめて述べ，そのメカニズムについて考察する．Fig. 4.13 にアーク雰囲気変化と溶滴の挙動の一連のサイクルの模式図を示す．図中の①～⑥はアーク形状および溶滴の時系列を示し，点線で示した列は 3.3 節で定義した「同期」におけるサイクルである．また，「同期」の条件から各タイミングにおいて「非同期」，「準同期」，「余剰溶滴」に分岐する場合は，点線外の図中右方向に溶滴の挙動が進行するものとして示した．なお，図中のアークの色について，緑色が CO_2 主体のアーク期間で緊縮型のアーク形状，青色が Ar 主体のアーク期間でフレア型のアーク形状を示す．

Fig. 4.13 において，まず「同期」となる場合について解説する．①～②においてアーク雰囲気は CO_2 が主体となり，アーク形状は緊縮型を示す．緊縮型アークでは電流経路が溶滴直下に集中し，溶滴は強いアーク力を受けることで溶滴にまとわりつくように持ち上げられ，徐々に成長する．③でアーク雰囲気が Ar 主体へ変化し，アーク形状もフレア型に変化する．この時，主たる電流経路は溶滴直下からアーク外縁部へと移動し，溶滴側方から電流が多く流れる．④～⑤においてフレア型アークが保たれることで溶滴は強いアーク力から解放され，伸長されることで垂下，くびれの生成に至る．またこの時，電位傾度の低下に起因した電流上昇も生じており，溶滴側方から強く電磁ピンチ力が作用することで，ワイヤ先端から離脱する．その後⑥で再度 CO_2 主体のアーク期間へと戻り，再度アーク力によって持ち上げられた溶滴が成長を始めることで，次のサイクルの①へと溶滴挙動が戻る．これらの一連のサイクルにおいて，「非同期」，「準同期」，「余剰溶滴」に分岐するタイミングは以下の 3 種類に分類できる．

1 つ目は，②のタイミングにおいて，アーク形状がフレア型アークに変化できない場合である．Fig. 3.9 および Fig. 3.10 で示した，ピーク流量が少ない場合や 1 パルス毎の Ar 体積が約 1 mL 未満の場合は「非同期」あるいは「準同期」に分岐する．この分岐のメカニズムは以下である．周囲の CO_2 に対して Ar の量が不足することで，アーク形状変化を生じることができない，あるいはかなり微小な変化しか生じていない状態となり，溶滴の離脱に影響を与えるほどの駆動力を生じることができない．よってアーク形状はほとんど変化することなく，緊縮型アークが保たれたままの状態であるため，一般的な炭酸ガスアーク溶接のような反発移行となる．また微量の Ar がアーク付近へ到達することで電圧が低下し電流がやや上昇する場合があるが，そのとき溶滴は緊縮型アークのアーク力によって持ち上げられている状態で垂下・くびれ生成されていないため電磁ピンチ力を有効的に作用させることができず，溶滴は離脱に至らない．以上のメカニズムにより，結果的に「非同期」あるいは「準同期」となる．また，Fig. 3.17 に示したように，電流密度が 220 A/mm^2 と低く，かつ溶滴体積が 9 mm^3 と大きい場合についてもこの状態へと分岐する．これは単純にワイヤの成長に対してフレア型アークへの変化が遅く，アーク形状変化を待ちきれずに溶滴が離脱するためである．

2 つ目は，③のタイミングにおいて，溶滴の大きさに対してフレア型アークの保持時間が不足する場合である．Fig. 3.10 および Fig. 3.17 で示した，電磁弁開時間が 3 ms 未満である場合，あるいは溶滴体積が 4 mm^3 未満である場合は「準同期」に分岐する．この分岐のメカニズムは以下である．フレア型アークへのアーク形状変化により電流経路がアーク外縁部へと変化し，溶滴は伸長され始めるが，Fig. 3.7 の実験結果より溶滴は離脱に至るまでに 4.2 ms 以上の動作時間を要する．これは緊縮型アークのアーク力によって持ち上げられた溶滴が垂下・くびれ生成するまでに要する時間を意味するが，それよりも早く緊縮型アークへと変化してしまうことで再度溶滴は持ち上げられ，離脱できないことで「準同期」となる．また，溶滴体積が約 4 mm^3 未満の場合はより自重が小さく，加えて溶滴体積（溶滴径）の小ささからワイヤとの表面張力が相対的に大きく，垂下・くびれ生成に至るまでの動作時間が長くなる．よって溶滴にくびれが生成される前に緊縮型アークへと変化してしまうことで再度溶滴は持ち上げられ，離脱できないことで「準同期」となる．なお，この次のサイクルでは十分に溶滴が成長できている場合がほとんどであり，その場合は「同期」と同じ挙動となるか，あるいは②で緊縮型アーク中に溶滴が離脱するほうに分岐する．

3 つ目は，⑤のタイミングにおいて，成長した溶滴が離脱後もフレア型アークが保たれる場合である．Fig. 3.10 および Fig. 3.17 で示した，ピーク流量が多く電磁弁開時間が長い場合，さらに電流密度が高く，

溶滴体積が大きい場合に「余剰溶滴」に分岐する．この分岐のメカニズムは以下である．ピーク流量および電磁弁開時間の値が大きくなると Ar の供給量が多く，またその時間も長くなることで，溶滴離脱後もフレア型アークが長時間保たれる．そのためフレア型アークによって溶滴が伸長する時間も長くなり，結果として成長した溶滴が離脱した後もスプレー移行が生じやすい状態が長時間保たれる．加えて，電流密度が高い場合は溶滴に作用する電磁ピンチ力およびプラズマ気流による剪断力も大きくなり，溶滴移行はよりスプレー化しやすい状態となる．さらには溶滴体積が大きい場合は溶融するワイヤ量が多く，離脱後の小滴の溶滴移行を助長する．これらによって成長した溶滴が離脱後にプロジェクト移行あるいはストリーミング移行を伴うことで「余剰溶滴」となる．

以上，3 つの分岐における条件をクリアした場合，溶滴移行は「同期」となり制御された 1 パルス 1 ドロップとなりうる．パルスガスマグ溶接の溶滴移行現象は，CO_2 および Ar にアーク雰囲気を変化させることによって溶滴移行制御を行う特性上，従来における炭酸ガスアーク溶接とミグ・マグ溶接を時空間的に交互に繰り返すような複雑な現象である．しかしその溶滴移行メカニズムは，それぞれ緊縮型（炭酸ガスアーク溶接），フレア型（ミグ・マグ溶接）のアーク形状に着目した物理現象に当てはめて考えることで，溶滴あるいはアークプラズマに生じる現象および駆動力とそのメカニズムを理解することができることが示された．一方で，それらのアーク形状を切り替えるタイミングについては，溶滴体積（成長速度）に起因する溶滴垂下の動作時間とのバランスが肝要であり，これがパルスガスマグ溶接の溶滴移行において 1 パルス 1 ドロップを実現するための重要な点であるといえる．

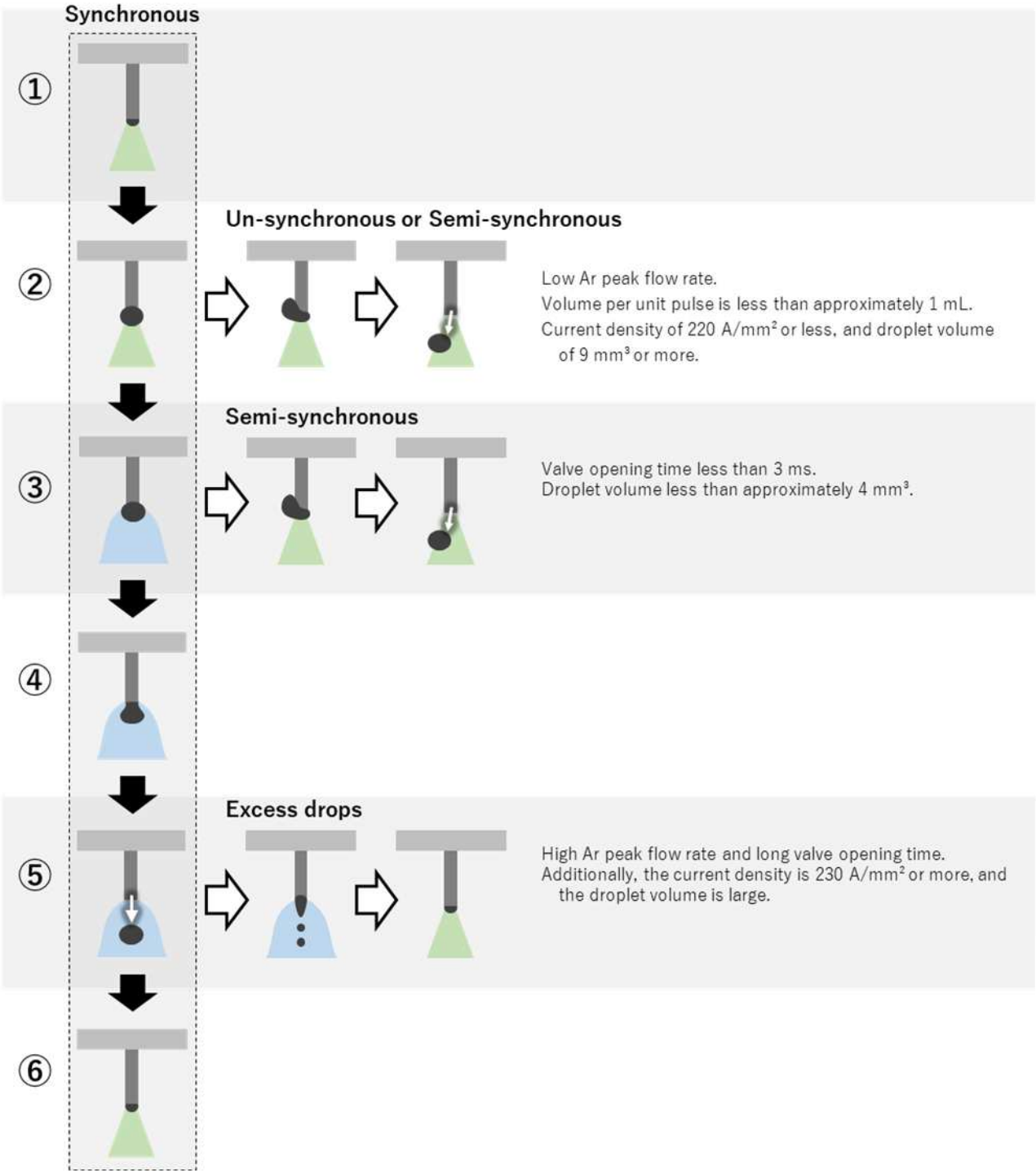


Fig. 4.13 Schematic diagram illustrating a series of cycles of arc atmosphere variation and droplet behavior.

4.7 結言

本章では，パルスガスマグ溶接法において電流変化とアーク形状変化のどちらが溶滴離脱に支配的な因子であるかを実験的に調査し，その物理現象について考察した．以下に得られた結果をまとめる．

・　炭酸ガスアーク溶接における定電圧特性パルス電源を用いた検討より，周期的な電流上昇のみでは

規則的な溶滴離脱に至らなかった.

- パルスガスマグ溶接における定電流特性電源を用いた検討より，周期的なアーク雰囲気変化のみで規則的な溶滴離脱が得られた.
- 本実験条件においては電流変化よりもアーク形状変化の方が溶滴離脱に支配的な因子であることが示された．なお，電流変化は補助的には溶滴離脱に有効に作用しており，1 パルス 1 ドロップの精度を高める効果はある.
- 分光観察より，CO_2 主体のアーク期間では Ar プラズマの発光は見られず，溶滴直下で Fe プラズマの発光が観察された. 一方, Ar 主体のアーク期間では, アーク外縁部で急激に Ar プラズマが発光し，溶滴直下のアーク中央部では Fe プラズマが発光した.
- Ar によるアーク外縁部への電流経路の変化は急激な溶滴に働くアーク力の低下を及ぼし，さらに溶滴の斜め側方に電流経路が変化し電磁ピンチ力が溶滴離脱に有効に働くことで，溶滴の離脱を促していると考えられる.

参考文献

[1] 藤原康平, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英: 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, 溶接学会論文集, Vol.38, (2020), No.4, 379-391.

[2] 茂田正哉, 中西省太, 田中学, MURPHY Anthony B.: 画像分光法によるガスメタルアーク溶接における動的プラズマ挙動の解析, 溶接学会論文集, Vol.33, (2015), No.2, 118-125.

[3] 辻村吉寛, 田中学: ミグ溶接の溶滴移行現象を伴うアークプラズマ状態の挙動解析, 溶接学会論文集, Vol.30, (2012), No.4, 288-297.

[4] 野村和史, 白井健太郎, 貴志崇, 平田好則: 2 電極 TIG アークの温度計測に関する研究, 溶接学会論文集, Vol.31, (2013), No.2, 133-140.

[5] 片岡耕太朗, 野村和史, 三村晃平, 平田好則: 三次元発光分光法を用いたミグ溶接におけるアルゴン・金属蒸気の挙動計測, 溶接学会論文集, Vol.33, (2015), No.3, 233-241.

[6] 戸田要, 吉井嘉一郎, 三村晃平, 野村和史, 平田好則, 浅井知: 三次元発光分光法を用いたミグアークプラズマの温度・金属蒸気濃度計測, 溶接学会論文集, Vol.36, (2018), No.1, 39-48.

[7] 浅井知, 田中学, 山根敏, 宮坂史和, 茂田正哉, 野村和史, 荻野陽輔: 溶接・接合工学の最近の動向 溶接法研究委員会, 溶接学会誌, 89, 5, (2020) 38 - 51.

[8] Y. Ogino, S. Asai and Y. Hirata: Visualization of arc plasma and molten wire behavior in CO_2 arc welding process by three-dimensional numerical simulation, Welding in the World, 64(2020), 1789-1797.

[9] 荻野陽輔, 平田好則: 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, Vol.33, (2015), No.1, 1-12.

[10] 佐藤英市, 山崎圭: 炭酸ガスアーク溶接のグロビュール移行制御, 溶接学会誌, Vol.84, (2015), No.4, 239-243.

[11] 佐藤祐理子: ガスメタルアーク溶接におけるワイヤ軸方向の伸長を伴う溶滴移行形態遷移のメカニズム解明, 博士論文, 2025.

第5章　パルスガスマグ溶接の効果と実用化に向けた検討

5.1 緒言

ここまで，パルスガスマグ溶接の原理や種々の条件の最適化が検討され，溶接物理現象のメカニズムについて解明された．一方，定量的なスパッタ量評価や溶接金属における機械的性質など，実用化に向けて明らかにする必要がある．そこで本章では，パルスガスマグ溶接のスパッタ低減効果，ガスコスト低減効果，機械的性質および化学成分について，実用的な観点から調査および評価した．また溶接工および溶接管理技術者に対してデモンストレーションを行い，所感および評価を得た．

5.2 スパッタおよびヒューム発生量

これまで述べたとおり，パルスガスマグ溶接は周期的ガス組成変化による溶滴移行制御によって，炭酸ガスアーク溶接の反発移行に由来して生じるスパッタが劇的に減少する．Fig. 5.1 に炭酸ガスアーク溶接およびパルスガスマグ溶接の溶接中の写真を示すが，明らかに周囲に飛散するスパッタが減少しているのが分かる．また，画像中の白飛びしている範囲がパルスガスマグ溶接の方が比較的狭い．これはアーク光が周囲のヒュームに乱反射しているものと推測され，間接的にヒューム量が減少している可能性が示唆された．これはパルスガスマグ溶接では炭酸ガスアーク溶接の反発移行と比較して溶滴移行の頻度が高いことから，溶滴の加熱時間に起因して発生するヒュームが少ないためと考察される[1-3]．Fig. 5.2 に炭酸ガスアーク溶接およびパルスガスマグ溶接の溶滴一つあたりの加熱時間（溶滴移行周期）の集計結果を示す．Fig. 5.2 より，炭酸ガスアーク溶接と比較してパルスガスマグ溶接では溶滴一つあたりの加熱時間が約半分まで低減しており，溶滴が過度に加熱される前に溶融池へと移行することでヒューム量が減少していると考えられる．

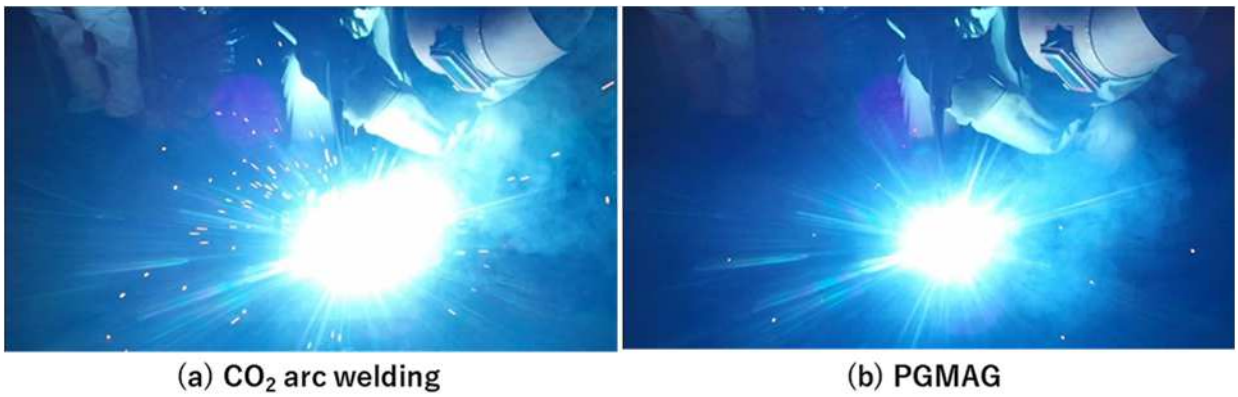


Fig. 5.1 Photos of each welding process

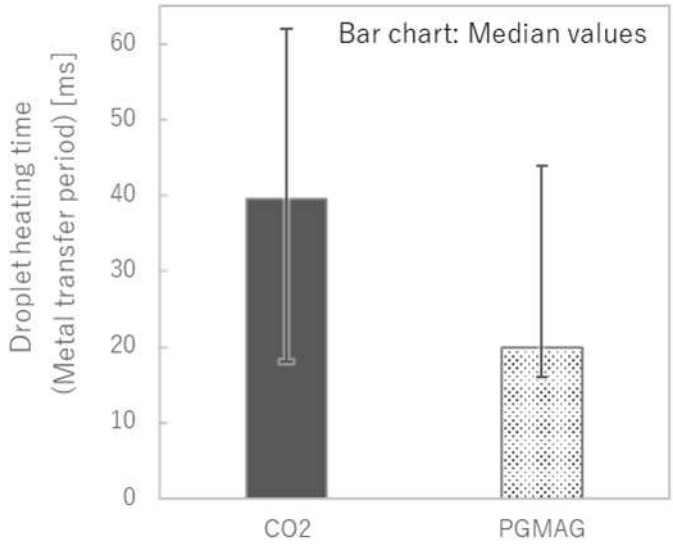


Fig. 5.2 Measurement results of heating time per droplet

次に，スパッタの発生量を定量的に評価した．鋼板および溶接トーチ全体を Fig. 5.3 に示す銅製の箱で囲んで溶接した．鋼板は黒皮を除去せずに溶接した．溶接は 30 s 行った．周囲に飛散したスパッタおよびノズルに付着したスパッタ（溶接前後で重量差を測定）の重量を計測し，飛散スパッタと定義した．鋼板に付着したスパッタは Fig. 5.4 に示すように画像計測により半楕円球と仮定して重量に換算し，付着スパッタと定義した．Fig. 5.5 にそれぞれの溶接後のビード外観を((c)パルスガスマグ溶接は同期の条件)，Fig. 5.6 にパルスガスマグ溶接のスパッタ発生量を他溶接法と比較した結果を示す．なお飛散スパッタおよび付着スパッタは溶接時間で割り，単位時間当たりのスパッタ発生量[mg/s]として整理した．

Fig. 5.6 より，炭酸ガスアーク溶接と比較してパルスガスマグ溶接は同期・余剰溶滴条件ともにスパッタ発生量が減少している．特にパルスガスマグ溶接の同期条件においては炭酸ガスアーク溶接の 1/3 程度のスパッタ発生量であり，混合ガスマグ溶接とほぼ同量まで低スパッタ化されている．Fig. 5.5 のビード外観からも，パルスガスマグ溶接のビード付近に付着したスパッタ量はマグ溶接と同等かより少なく見え，大きさも一部を除きほとんどが小粒であることがわかる．なお，余剰溶滴条件では同期条件と比較するとスパッタ量が増加しているが，これは成長した溶滴が離脱したのちに生じるスプレー移行の溶滴が，再度 CO_2 による緊縮型アークに戻った際のアーク力を受けることで飛散したものと考えられる．

また，ガスコストの観点から Ar 使用量を比較すると，パルスガスマグ溶接は Ar 流量 4 L/min に対し，混合ガスマグ溶接はシールドガス流量 25 L/min のうち 20 L/min 分が Ar である．よってパルスガスマグ溶接は混合ガスマグ溶接の 1/5 の Ar コストで同程度の低スパッタ性能が得られることになる．なお，全条件において付着スパッタがかなり少ないが，これは画像計測から重量換算する際の誤差を考慮してなるべくスパッタが付着しにくいように，黒皮を除去せずに溶接したためである．



Fig. 5.3 Copper box for collecting spatter

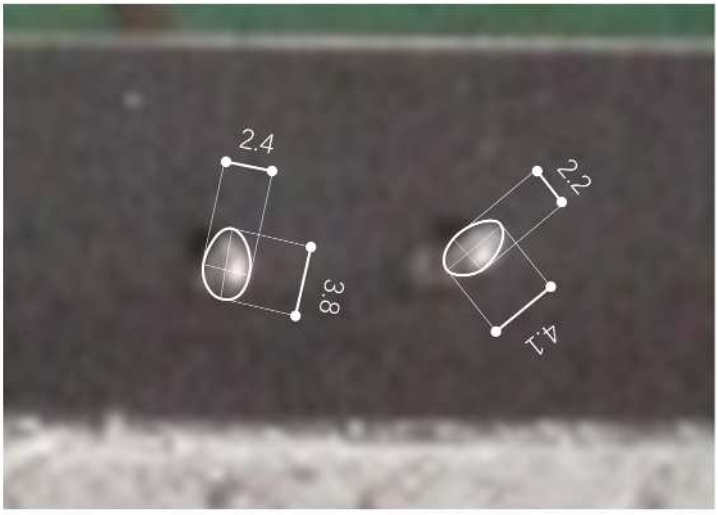
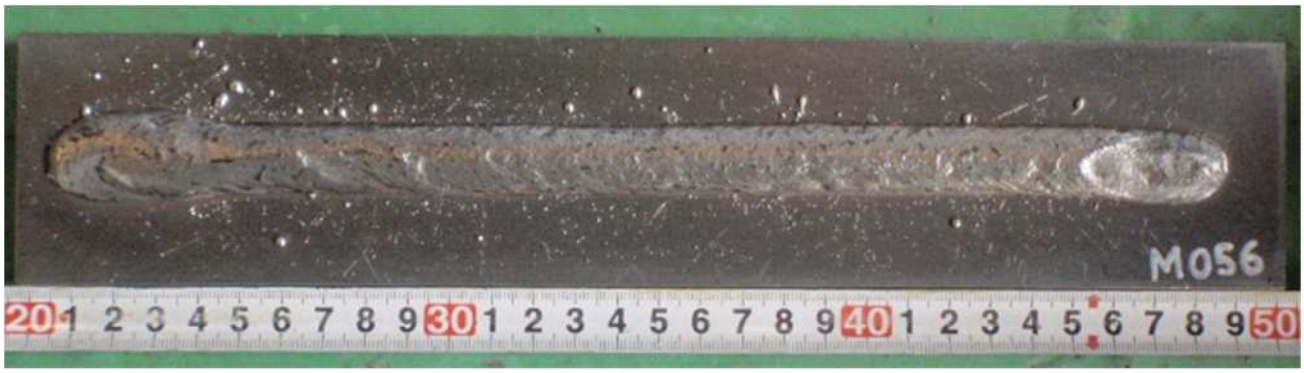


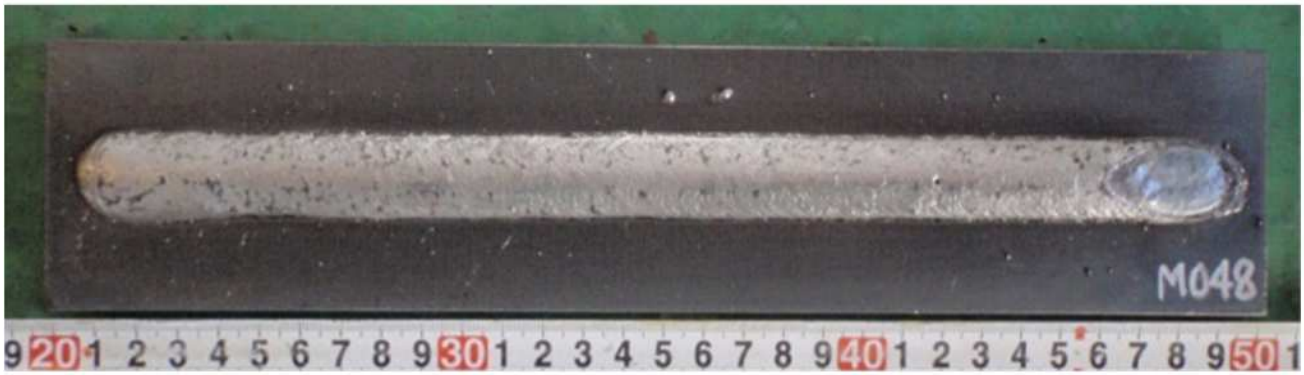
Fig. 5.4 Example of image measurement of spatter adhering to base metal



(a) CO_2 arc welding



(b) MAG welding (Ar+20%CO_2)



(c) PGMAG welding (synchronous)

Fig. 5.5 Bead appearance for each welding process

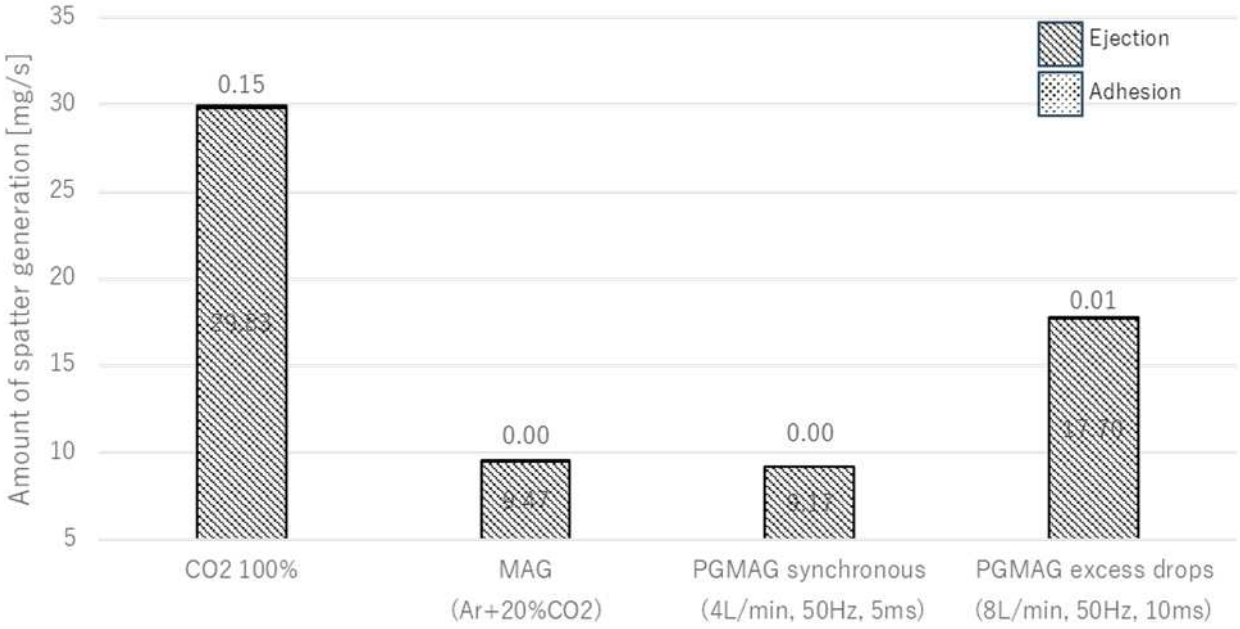


Fig. 5.6 Measurement results of spatter generation amount

5.3 溶込み形状

Fig. 5.7にパルスガスマグ溶接でビードオン溶接したビード外観およびマクロ断面を示す．なお，周波数を変化させることで非同期（または準同期），同期および余剰溶滴の条件におけるビード外観およびマクロ断面を観察した．比較のため，炭酸ガスアーク溶接（100%CO_2）および混合ガス（Ar-20%CO_2）によるマグ溶接の結果もあわせて示す．ビード外観より，非同期，準同期では大粒かつ大量のスパッタが母材に付着しており，付着数は炭酸ガスアーク溶接と同程度に見える．非同期，準同期は溶滴移行がAr添加に同期しない条件のため，大きく成長した溶滴が飛散したことにより大粒のスパッタが大量に発生したと思われる．一方，同期，余剰溶滴では一部大粒のスパッタが付着している条件もあるが，付着数は減少し，混合ガスによるマグ溶接の結果と比較すると同数以下に減っているように見える．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程度だった．溶込み形状は野々村らが提唱する評価指標P_f [4]を用いて定量評価し，評価結果をFig. 5.7のマクロ断面に併せて示す．P_fの値が大きいほどなべ底状の形状に近く，小さいほどフィンガー状に近いことを示す．炭酸ガスアーク溶接で$P_f = 2.77$，マグ溶接で$P_f = 0.12$に対し，本溶接法で得られた溶込みは$P_f = 2.5$~3.3程度であった．このことから本溶接法で得られる溶込み形状はマグ溶接ほど極端なフィンガー状にならず，炭酸ガスアーク溶接のなべ底状に近い形状になるといえる．また，50 Hz，3 L/min，2 msのように一部の条件ではブローホールおよびピットが確認された．

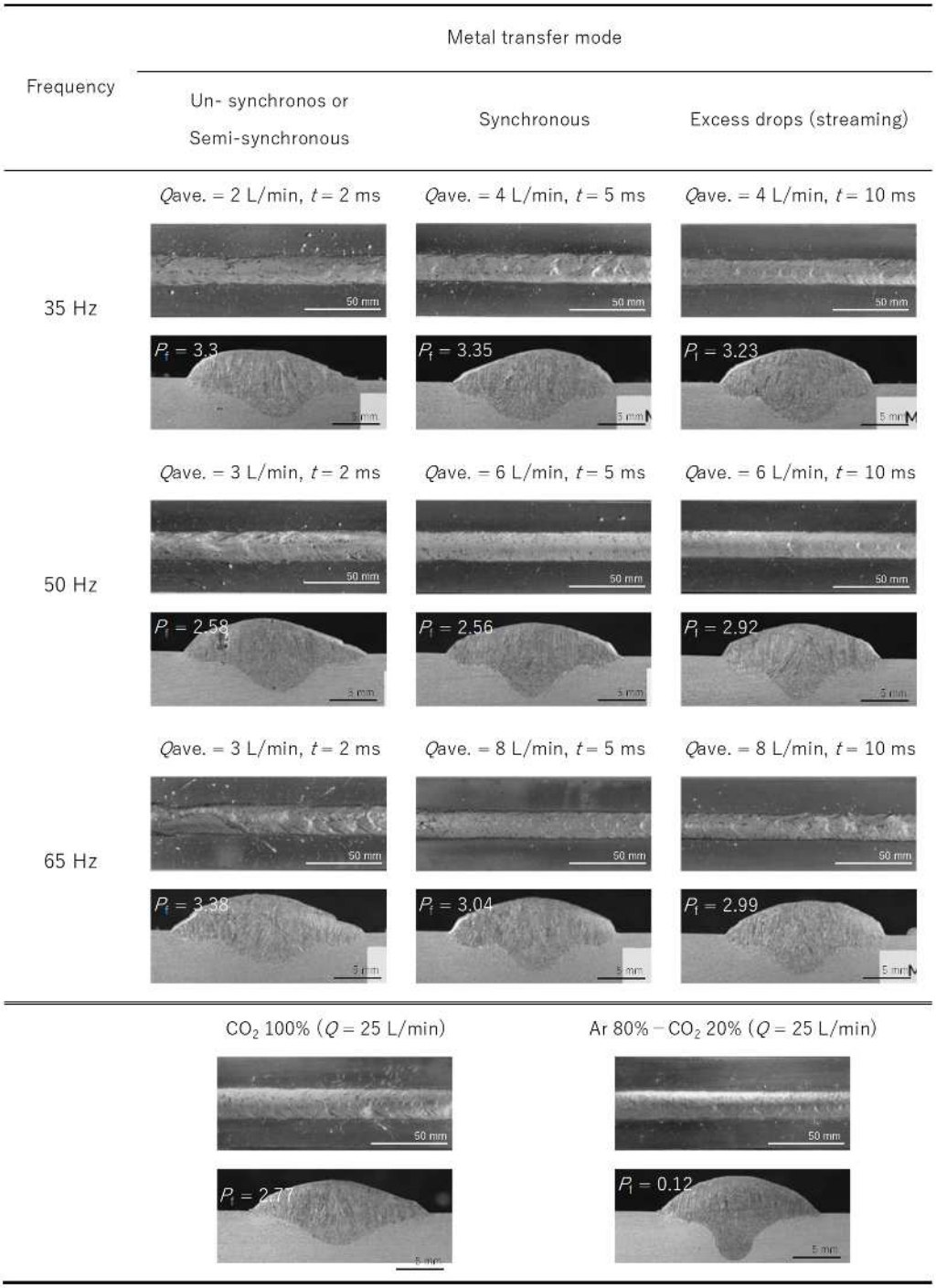


Fig. 5.7 Bead appearance and penetration shape

5.4 ブローホールの発生と原因の考察

Fig. 5.7 で見られたように，一部の Ar 添加条件ではブローホール（BH）およびピットが生じた．アウターガスである CO_2 の流量は 25 L/min と十分であり，無風の室内にて実験を行ったため単なるシールド不足が原因とは考えづらい．そこで，アウターガス（CO_2）よりも速い流速でパルス添加されるインナーガス（Ar）が原因ではないかと考えた．Fig. 5.8 は Fig. 3.5 を電磁弁開時間と Ar 流速で整理し直し，ブ

ローホールおよびピットが発生した条件を追記した結果である．なお，Ar 流速はピーク流量とインナーノズル径から算出した計算値である．Fig. 5.8 より，BH が生じたのはいずれも Ar 流速 8 m/s 付近の条件であることが分かる．CO_2 の流速はアウターノズル内径から計算すると流量 25 L/min のとき流速 2.8 m/s であり，BH が生じた条件の Ar 流速（約 8 m/s）と比較すると流速差はおよそ 1/3 と大きい．また，2.3 節に示したように Ar と CO_2 の流速差によって，シールドガス流にくびれ状の流れが生じる．このくびれは流速の速い Ar と流速の遅い CO_2 との圧力差によって生じるため，流速差が大きいほどくびれも大きくなると考えられる．以上より，Ar の流速が速い条件ではシールドガス流にくびれが生じ，シールドガス内に大気が取り込まれて BH の発生原因になったと考えられる．本実験の範囲では流速差が約 5 m/s 以上になると BH が発生する可能性が高い．

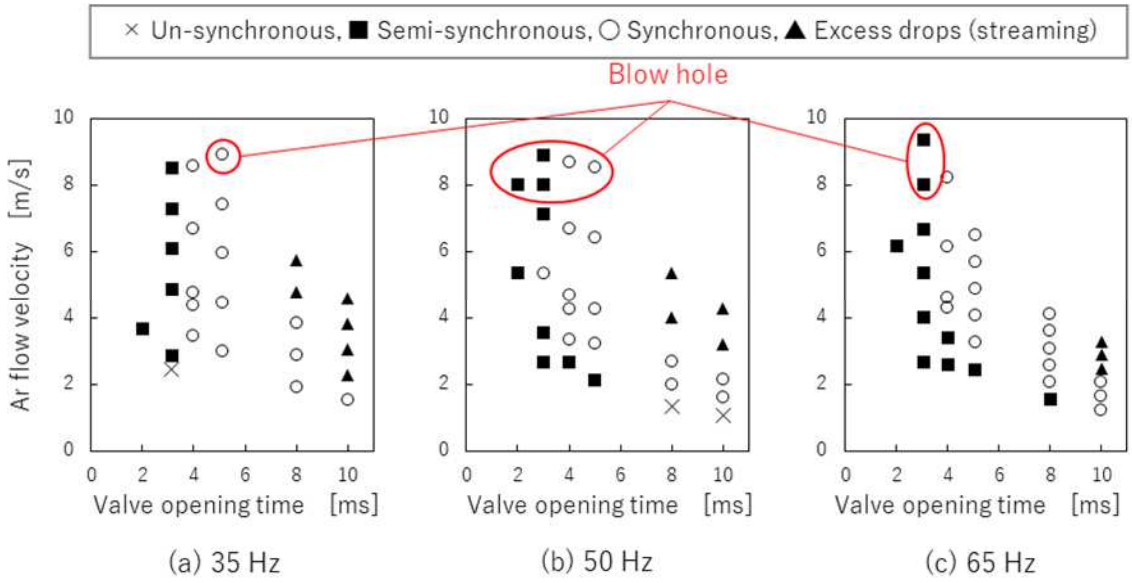


Fig. 5.8 Relationship between Ar flow velocity and blowhole generation

5.5 溶接金属の機械的性質

パルスガスマグ溶接は炭酸ガスアーク溶接中に少量の Ar を添加するというプロセスであることから，得られる溶接金属の機械的性質および化学成分について不明である．また，市販されている JIS 規格の溶接ワイヤにおいて，使用条件としてシールドガスに 100%CO_2 を用いるか，Ar-CO_2 混合ガスを用いるかで明確に用途が分けられている．そこで，各ワイヤ種における溶接金属の機械的性質および化学成分について検討した．

試験体形状は Fig. 5.9 に示す通り JIS Z 3111[5]に準じた形状とし，板厚 25 mm の V 開先を溶接金属で埋めるような形状とした．鋼材の材質は SM490A とした．溶接材料は JIS Z 3312[6] YGW11（神戸製鋼所，MG-50），YGW18（神戸製鋼所，MG-56），YGW15（キスウェル，ZO-27）の 3 種を選定した．ワイヤ種の選定理由は実際に一般構造物や建築分野等で多用される鋼種・シールドガスを考慮したものであり，490 N/mm²級鋼用としてそれぞれ 100%CO_2 および Ar-CO_2 混合ガス用ワイヤでの検討（YGW11,

YGW15)，さらに強度の高い 540 N/mm²級鋼用として 100%CO_2用ワイヤ（YGW18）を選定した．溶接条件はワイヤ送給速度 12.39 m/min を基準とし，ワイヤ種により多少変化するがおおよそ溶接電流 290~310 A，アーク電圧 35~37 V で溶接し，入熱は各パスで 30 kJ/cm 未満とした．パス間温度は 210°C 以下で溶接した．予熱は行わずに室温で溶接した．積層は Fig. 5.10 にマクロ試験結果と共に示すとおりで，6 層 12 パスで溶接した．比較検討のため，それぞれパルスガスマグ溶接に加え炭酸ガスアーク溶接（100%CO_2），マグ溶接（Ar-20%CO_2）でも同条件にて検討した．機械試験項目は丸棒引張り試験（JIS Z 3111 A1 号[5]），シャルピー衝撃試験（JIS Z 2242 10 mm V ノッチ[7]）とし，それぞれ DEPO の中心を対象とした．また化学成分分析についても DEPO 中心部を対象とし，C，Si，Mn，P，S の 5 元素に加え，Ti，O，Cu，Mo，N も対象とした．各試験片の採取位置については Fig. 5.11 に詳細を示す．

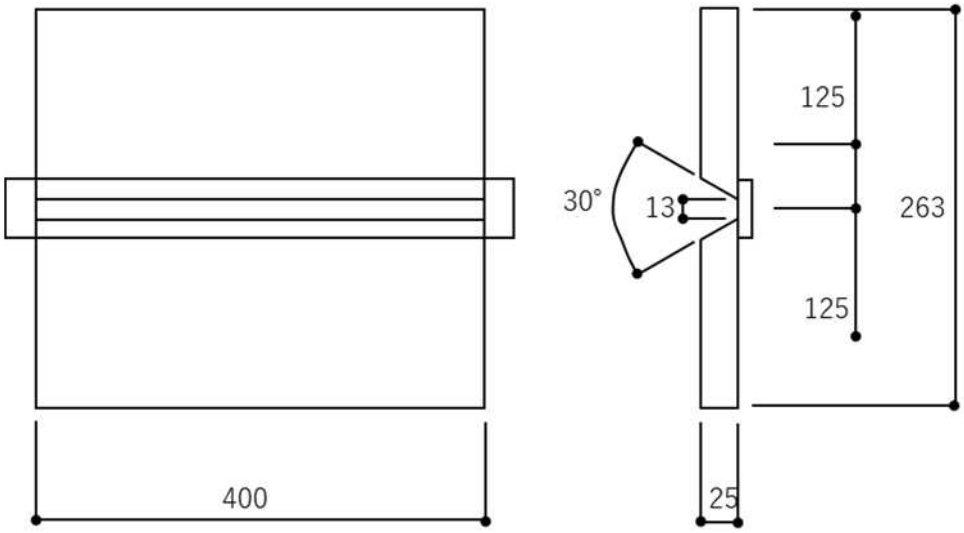
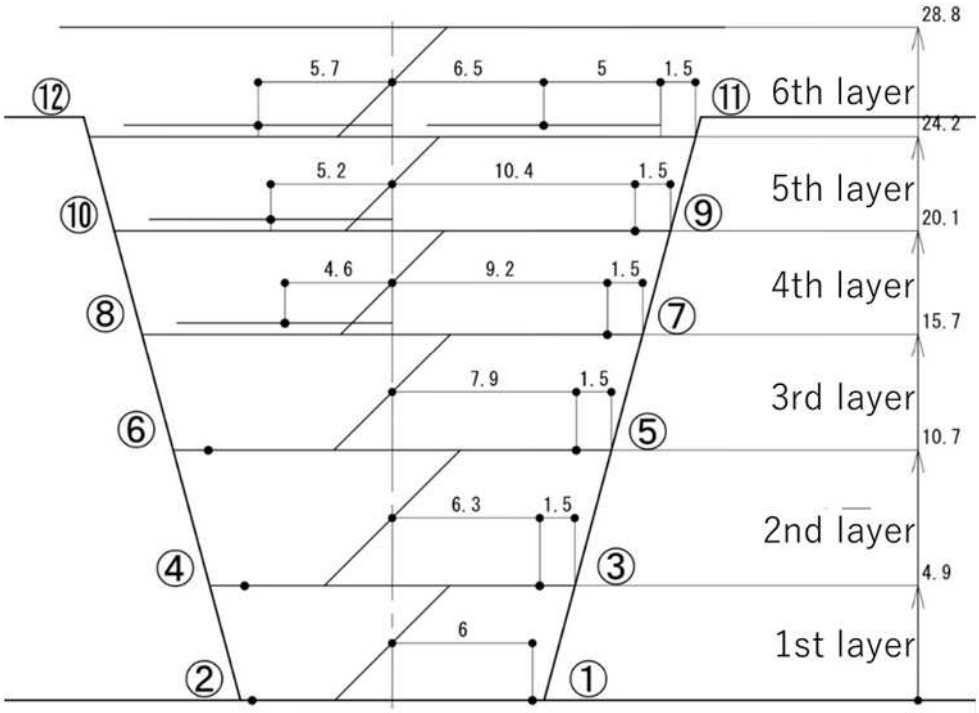


Fig. 5.9 Specimen geometry (JIS Z 3111[5])



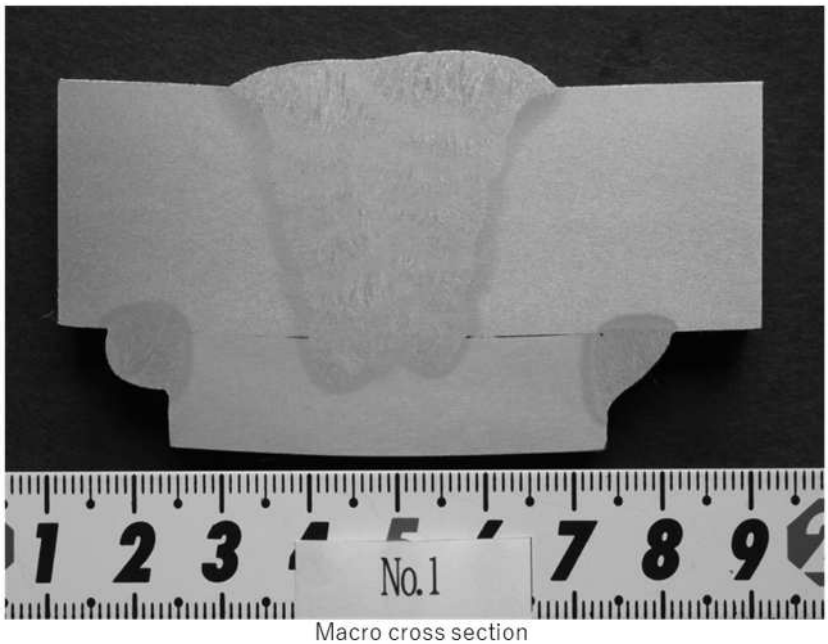


Fig. 5.10 Welding pass sequence of the multi-pass weld

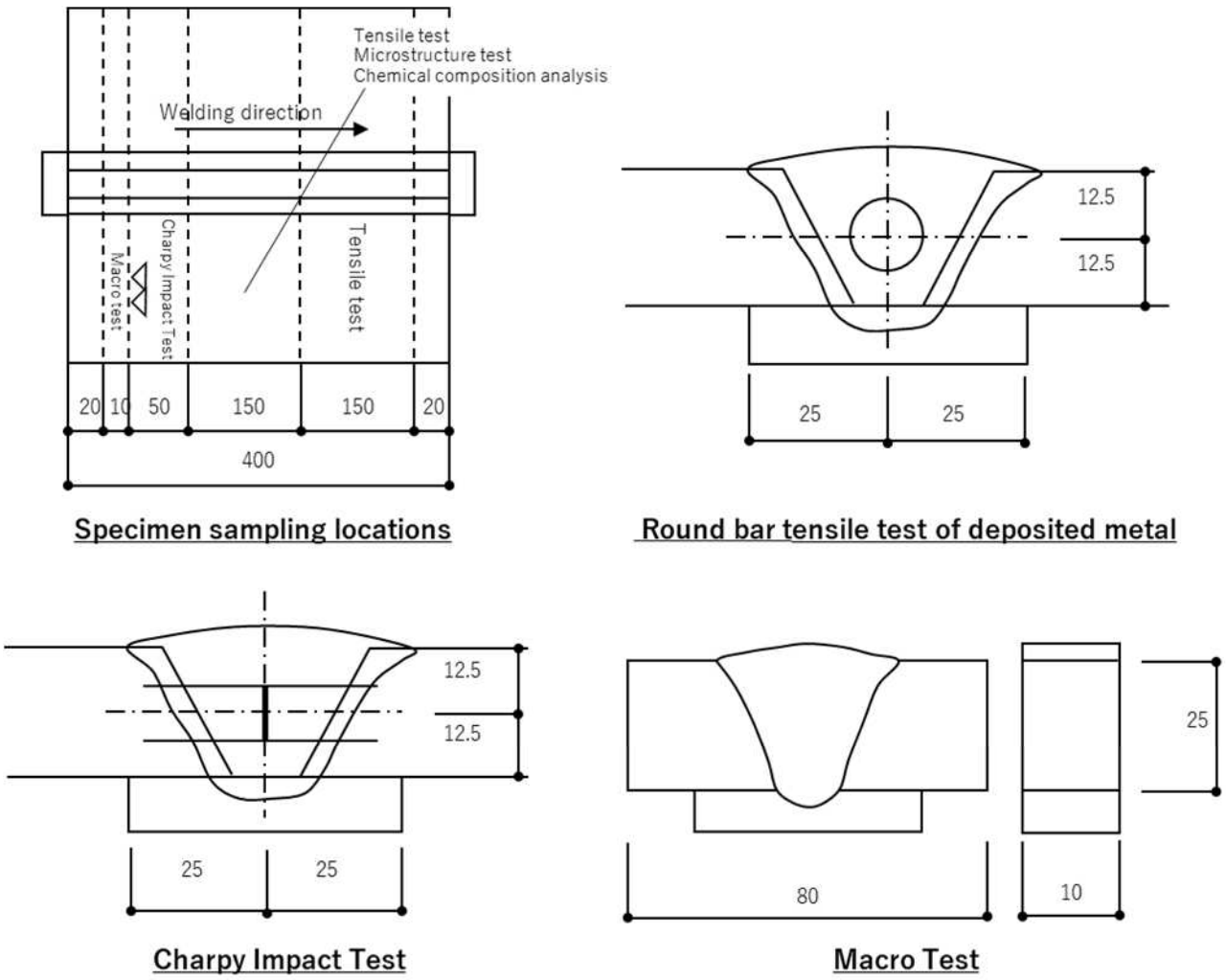


Fig. 5.11 Specimen sampling location for each test

まず，YGW11 の試験結果について Fig. 5.12 および Fig. 5.13 に示す．YGW11 は JIS 規格としては 100%CO_2（以下 CO_2）用であるが，比較検討のためマグ溶接（Ar-20%CO_2，以下マグ溶接）も行った．Fig. 5.12 より，本来の用途である CO_2 に対してマグ溶接およびパルスガスマグ溶接が耐力・引張強さが勝る結果となった．また Fig. 5.13 の化学成分分析結果を見ると，CO_2 と比較してマグ溶接およびパルスガスマグ溶接では Si，Mn，Ti 量が多く，O 量が少ないことが分かる．これらの結果から，マグ溶接およびパルスガスマグ溶接では CO_2 と比較してシールドガス中の O 量が相対的に低下し，溶融池内に固溶される O 量が低下したことで Si，Mn などの脱酸元素の歩留まりが良くなり，耐力および引張強さが増加したと考えられる．また，YGW18 の試験結果を Fig. 5.14 および Fig. 5.15 に示すが，こちらも同様に耐力･引張強さともにパルスガスマグ溶接がやや良好な結果を示した. 一方, YGW15 の試験結果を Fig. 5.16 および Fig. 5.17 に示すが，こちらは本来の用途であるマグ溶接に対してパルスガスマグ溶接は耐力・引張強さともに劣る結果となった．これは，マグ溶接用のワイヤでは CO_2 用のワイヤに比べてシールドガス中の O 量を少なく想定して作られており，Si，Mn などの脱酸元素含有量が元々少ないためである．パルスガスマグ溶接は炭酸ガスアーク溶接中に少量の Ar を添加するため，マグ溶接と比較して溶滴やアークが CO_2（O）にさらされる時間が長く溶融池内の O 量が増加し，より多くの脱酸元素がスラグとして排

出されたため，結果として耐力・引張強さが低下したと考えられる．

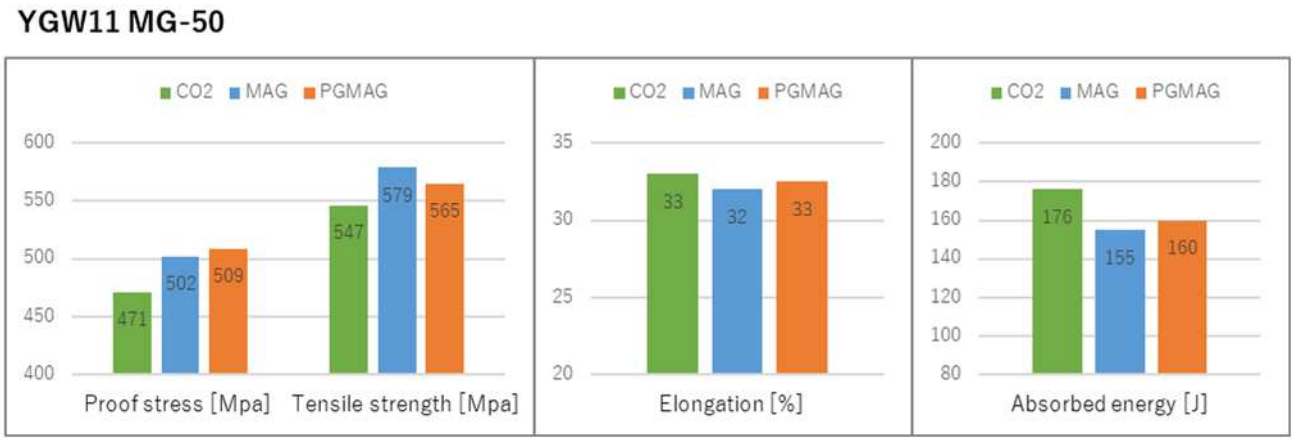


Fig. 5.12 Mechanical properties of weld metal in YGW11

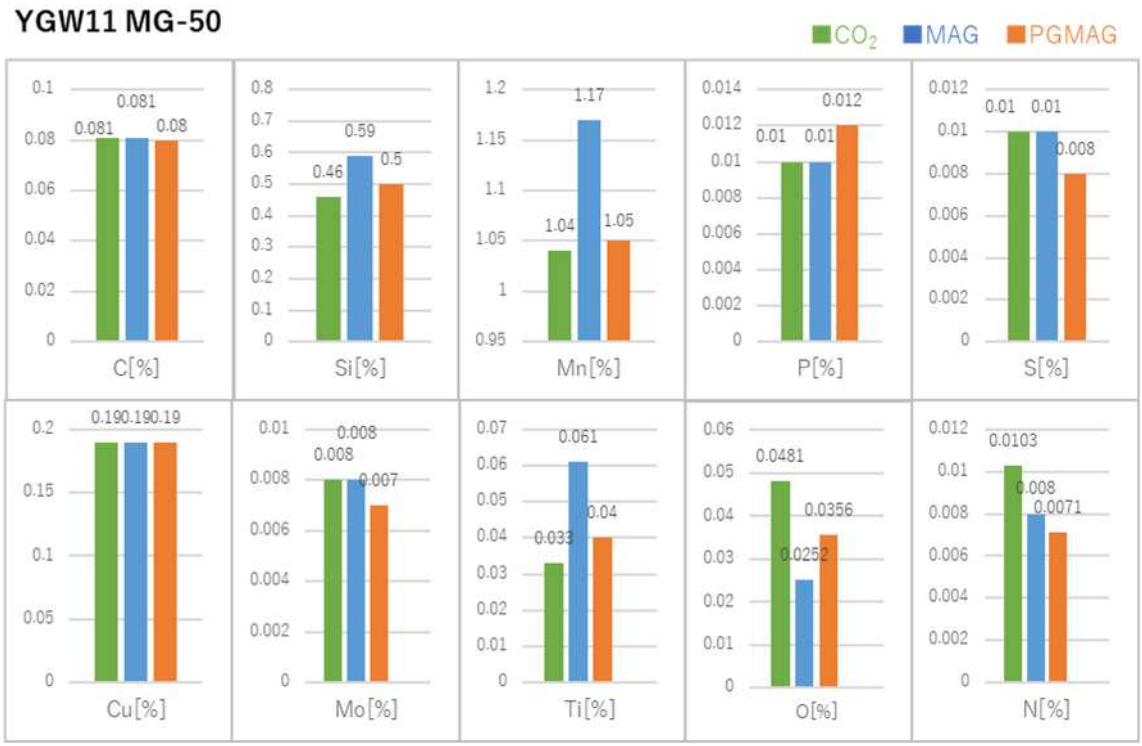


Fig. 5.13 Results of chemical composition analysis of weld metal in YGW11

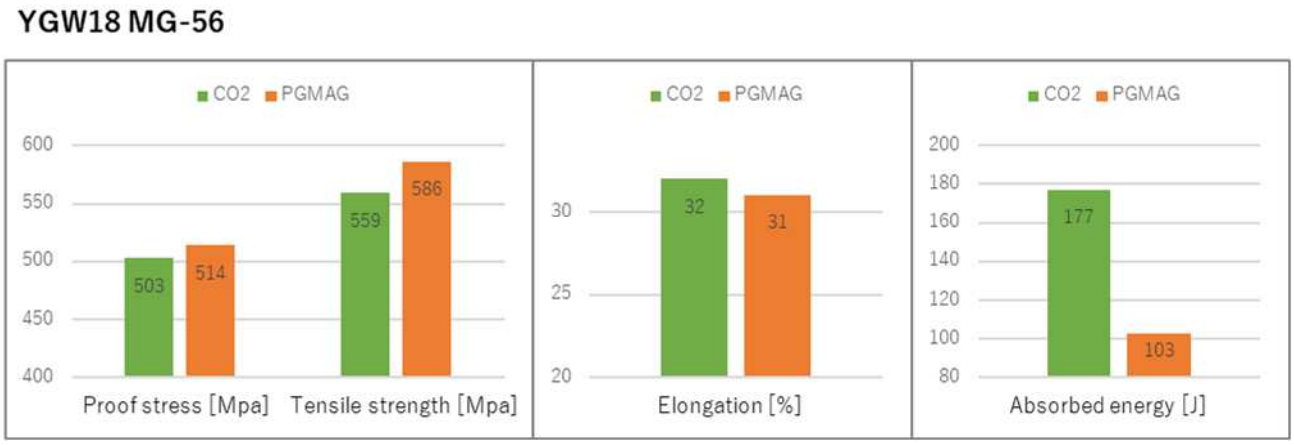


Fig. 5.14 Mechanical properties of weld metal in YGW18



Fig. 5.15 Results of chemical composition analysis of weld metal in YGW18

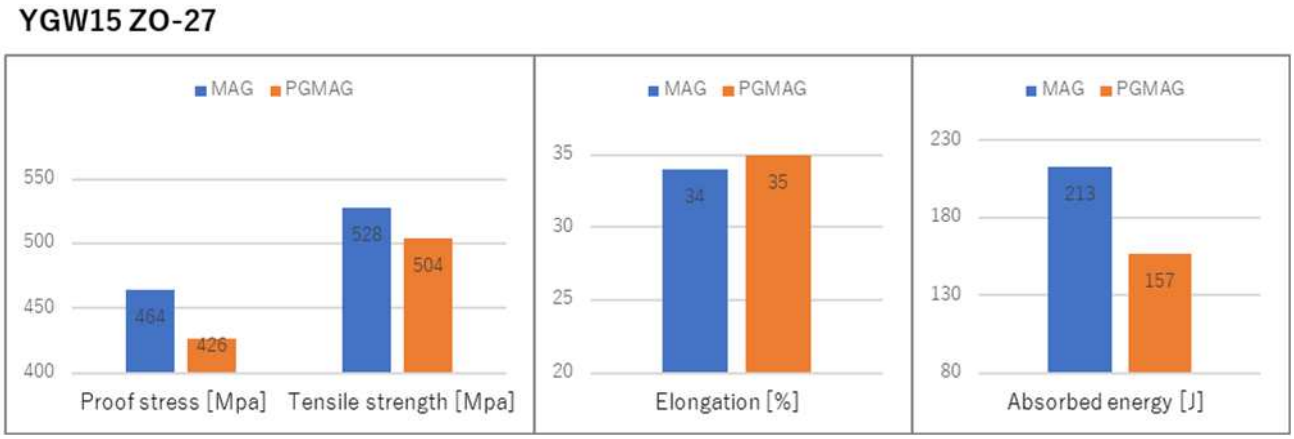


Fig. 5.16 Mechanical properties of weld metal in YGW15

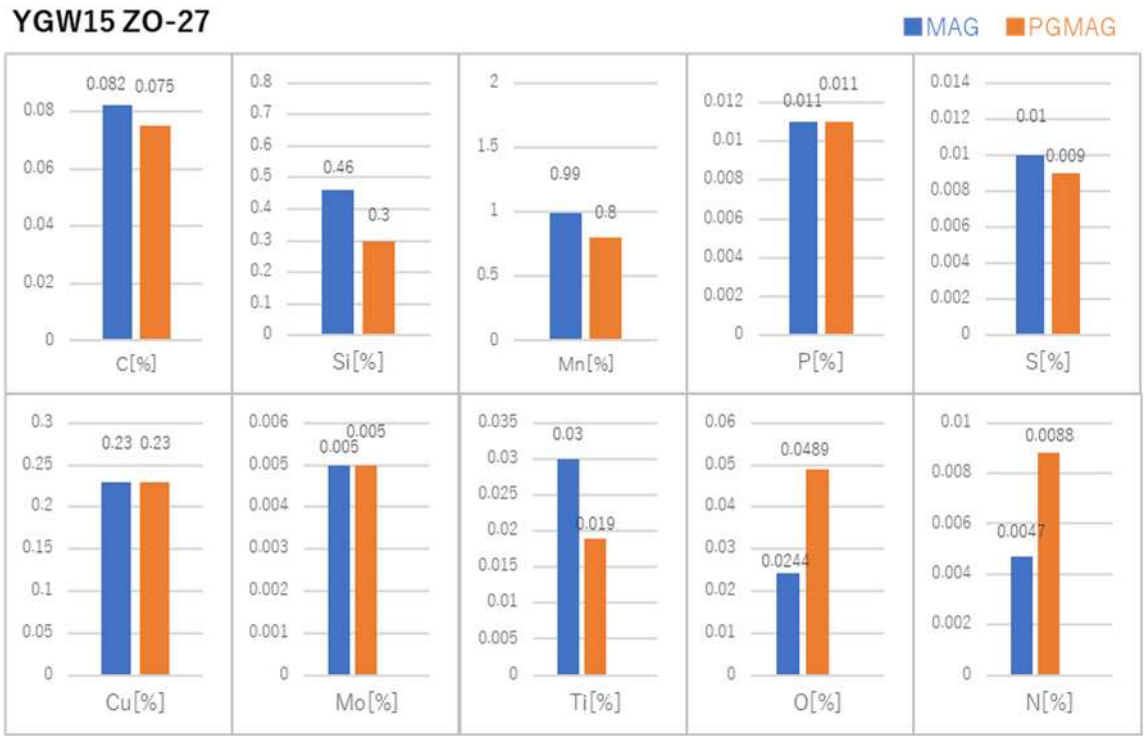


Fig. 5.17 Results of chemical composition analysis of weld metal in YGW15

Fig. 5.12，Fig. 5.14，Fig. 5.16 の各ワイヤの試験結果より，吸収エネルギーの結果についていずれもパルスガスマグ溶接が劣る結果となった．Fig. 5.13，Fig. 5.15，Fig. 5.17 の成分分析結果よりパルスガスマグ溶接では N 量が比較的多いことが原因と考えられる．N 量の増加は 5.4 節でも述べたとおり CO_2 と Ar の流速差によりシールドガス流にくびれ状の流れができることで，大気を巻き込んでいる可能性がある．そこで，付録 1 にて溝状のノッチ上を溶接することで溝内を溶接金属で埋める V 溝試験を行い，溶接金属内の N 量を分析することで，パルスガスマグ溶接における大気巻き込みについて追加検討した．その結果，N 量は全体としておおよそ 50~60 ppm 程度に抑えられたことから，今回の条件設定（CO_2 および Ar の流速）ではパルスガスマグ溶接による大気巻き込みの可能性は低いことが結論付けられた．なお，

Fig. 5.13，Fig. 5.15，Fig. 5.17 にて N 量が多くなった原因としては，実験時に Ar 流路内に大気（N_2）が残存していたことが原因と考えられ，CO_2 と Ar の流速差による大気巻き込みの可能性は極めて低いと考えられる（詳細は付録 1 参照）.

以上，機械的性質および化学成分の検討結果を示したが，パルスガスマグ溶接においてどのワイヤを使用すべきかという観点から考察する．JIS Z 3312[6]の各ワイヤにおける規格を参照し，今回の試験結果と見比べると，YGW11，YGW18，YGW15 のすべてのワイヤにおいてパルスガスマグ溶接は機械的性質の規格を満たしており，今回の実験条件においてはいずれのワイヤにおいてもパルスガスマグ溶接が適用可能という結果となった．無論，機械的性質は母材材質，溶接条件，母材希釈など様々な要因により変化するため実施工前には施工試験などが当然必要であるが，パルスガスマグ溶接はそのプロセス原理上，炭酸ガスアーク溶接よりも悪化することは考えづらい.

5.6 パルスガスマグ溶接法の評価と今後の展望

パルスガスマグ溶接の実用化に向け，川田工業㈱内および他社において技術説明やデモを行った．対象者は溶接工および溶接管理技術者とし，工場や現場ベースにおける視点から様々な意見や評価を得た．デモ中の様子を Fig. 5.18 に示す.



Fig. 5.18 Photograph of pulse gas MAG welding demonstration

1 章で述べた通り，パルスガスマグ溶接は産業ロボットへの取り付けはもちろんのこと，半自動溶接においても適用できる点が大きな利点である．そこで，普段半自動溶接を行っている溶接工にパルスガスマグ溶接を使用してもらい，以下の評価を得た.

まず，ポジティブな感想を以下に列挙する．アークの見え方が普段使っている炭酸ガスアーク溶接と大差がなく使いやすい（混合ガスマグ溶接のようなアークの広がりがない）．溶接中にスパッタが減っていることがわかる．開先周辺，溶融池が見えやすい．炭酸ガスアーク溶接よりもアークが安定している．溶滴が過大にならず，スムーズに落ちているのがわかる．融合不良や溶込み不足が生じているかもしれないという不安はない．トーチ重量や Ar 供給ホースは気にならない．

一方，ネガティブな感想を以下に列挙する．炭酸ガスアーク溶接および混合ガスマグ溶接のどちらでもないアーク・溶融池の見た目であるため慣れが必要．炭酸ガスアーク溶接よりもアークが若干大きく見え，電流電圧が強く感じるため，普段よりもウィービング動作を早くしてしまう．ワイヤ突出し長さを長くするとスパッタが増加する．

以上の溶接工の意見を踏まえ，パルスガスマグ溶接の物理現象と紐づけて考察しつつ実用化の面から分析する．

まず，スパッタの発生量について溶接後のビード周辺や，溶接中の遮光面越しで観察したところ，炭酸ガスアーク溶接と比較して明確に減少しているという感想がほとんどであった．アークが安定していると表現されることもあり，総じてパルスガスマグ溶接の Ar 添加による溶滴移行制御がうまく行われてる手ごたえが感じられるようであった．溶接工の中には溶接中の溶滴移行が見えるという者もおり，炭酸ガスアーク溶接と比べて明らかに溶滴の移行頻度が高く規則的であると，その原理にかなった現象を体感していた．

また，開先周辺や溶融池が見えやすいという意見があった．これはスパッタが減少しているためだけでなく，5.2 節で述べた通り，ヒュームの発生量が抑えられているためと推察される．普段見慣れた炭酸ガスアーク溶接や FCW を用いた溶接は，長時間溶滴が加熱されることやアーク熱により溶解・蒸発したフラックスを原因として発生するヒューム量が多く，それらと比較するとパルスガスマグ溶接はヒューム量が少ないと考えられる．また 2.3 節に示した可視化したガス流より，パルスガスマグ溶接ではパルス添加される比較的流速の速い Ar により，アークおよび溶滴周辺で発生したヒュームが周囲へと排出される速度が速いことで，溶融池周辺がクリアに見えている可能性がある．

アークや溶融池の見え方についての意見が多くあったが，その中でもアークの見え方が普段と大差がないという意見と，ややアークが強く・大きく見えるという相反した意見があるのが興味深い．パルスガスマグ溶接はその原理上，いわば炭酸ガスアーク溶接と混合ガスマグ溶接を高速で切り替えながら溶接しているため，溶接工の着目の仕方で感想が変わると思われる．これはどちらが優れた溶接士であるかというものではなく，普段溶接している対象によって，より溶接欠陥を出さないように着目しているところが異なるためと考える．例えば，ソリッドワイヤによる炭酸ガスアーク溶接で建築鉄骨の溶接に携わっている者は特にアークが強く見えるという感覚を抱いており，これは比較的 UT 検査の厳しい業界であること，溶融池の垂れやすい横向き姿勢の溶接が多いことなどから，アークの強弱に特に敏感である可能性が高い．一方，FCW による炭酸ガスアーク溶接を多用する橋梁業界や，極めて板厚の厚い溶接の多い建設機械業界の者はあまり普段と差が無いと感じており，これは隅肉溶接や下向き多層盛り溶接が主であるためアークよりも溶融池の出来方を重視しているためと考えられる．また，ワイヤ突出し長さが長くなるとスパッタが増加するという意見があるが，これはインナーノズルから噴出した Ar がアークまでの距離が長くなることで，十分に溶滴離脱のための Ar 主体アークになっていない（溶滴離脱の駆動力が足りない）状態になっていることが推察される．一般的にはワイヤ突出し長さ 20~25 mm 程度が推奨されて

おり，前章までに示したパルスガスマグ溶接の実験結果は当然この範囲内でのものである．しかし，実際の溶接工による溶接を見ると場合によっては 30~40 mm 程度のワイヤ突出し長さになっていることが散見された．これはシールド不良による溶接結果が生じるリスクはあるものの，溶融池をより観察して溶接欠陥をため防ぐためにノズルを意図的に遠ざけている．

以上，溶接工の評価として，パルスガスマグ溶接の使用には多少の慣れが必要であり，アークの見え方やワイヤ突出し長さを意識する必要があるものの，スパッタ量が減り，開先・溶融池周辺は見えやすく，アークも安定していることから，全体としては好評であった．

工場および現場における溶接施工管理者，溶接機器を取り扱う商社に対しても技術説明を行った．以下に感想や評価を列挙する．

現状炭酸ガスアーク溶接でスパッタに困っているところは多くあるため需要は大きい．メリットであるスパッタ低減について，スパッタ除去工程の費用効果は算出しづらい．混合ガスマグ溶接から置き換えた際のガスコスト低減を売りにするべきである一方，大きな工場は Ar を大量購入しているので単価が安くコストメリットが出づらい．工場内配管として CO_2 と Ar の 2 系統があるところは多くない．機械的性質について，ベースが炭酸ガスアーク溶接のため問題なく使用できる可能性が高い．

管理者および経営者目線での意見について，以下に評価と課題を示す．まず，国内では炭酸ガスアーク溶接を使用している業界は広く，それらの目下の課題としてスパッタが占める割合が大きいことが改めて分かった．スパッタ低減を目的として混合ガスマグ溶接を導入した，あるいは導入を検討した企業は多くあり，やはりその際に引き合いに出されるのは Ar によるガスコストアップである．パルスガスマグ溶接はそれらのニーズに上手くはまる技術であるとの評価が多くあった．また機械的性質について，新しい溶接法であるがゆえに導入前の施工試験等は必須であるが，パルスガスマグ溶接はその原理上悪くなっても炭酸ガスアーク溶接であるというリスクの低さや，業界によっては自社基準さえ満たせば使用可能であるという事情から導入のハードルは高くなく，評価は高かった．

一方，パルスガスマグ溶接導入に対する経済効果の評価について，スパッタ除去工程の費用効果は算出しづらいという意見が挙げられた．一般的にビード周辺に付着したスパッタは溶接後にグラインダ等で除去されるが，スパッタの有無に限らずビード仕上げ作業がある場合が多く，管理者目線での定量評価が難しいのが現状である．明確にコストメリットを算出するためには Ar 使用量の低減によるガスコスト低減が最も費用効果が分かりやすい．Ar に限らず近年では徐々にガスの価格も上昇しているため，現状混合ガスマグ溶接で 80% Ar のところを，20% Ar にできるとなればかなりの費用効果が見込まれる．特に溶接用ガスをボンベ購入している企業では CO_2 と Ar の価格差が大きく，パルスガスマグ溶接導入のメリットは大きくなる．課題としては規模の大きい工場では大量購入することから Ar の単価が安いこと，工場内配管として CO_2 と Ar-20%CO_2 はあるが Ar はない（ところが多い）ことが挙げられる．この課題に対してはインナーガスを Ar-20%CO_2 とし，さらに Ar 使用量を減らしつつ工場内配管の問題も解決することを検討している．Fig. 5.19 はインナーガス Ar-20%CO_2 として試したパルスガスマグ溶接の実験結果であるが，同期に必要なインナーガス流量はやや増加するものの，十分に広い同期範囲が存在し，実用上の条件として検討の余地がある．

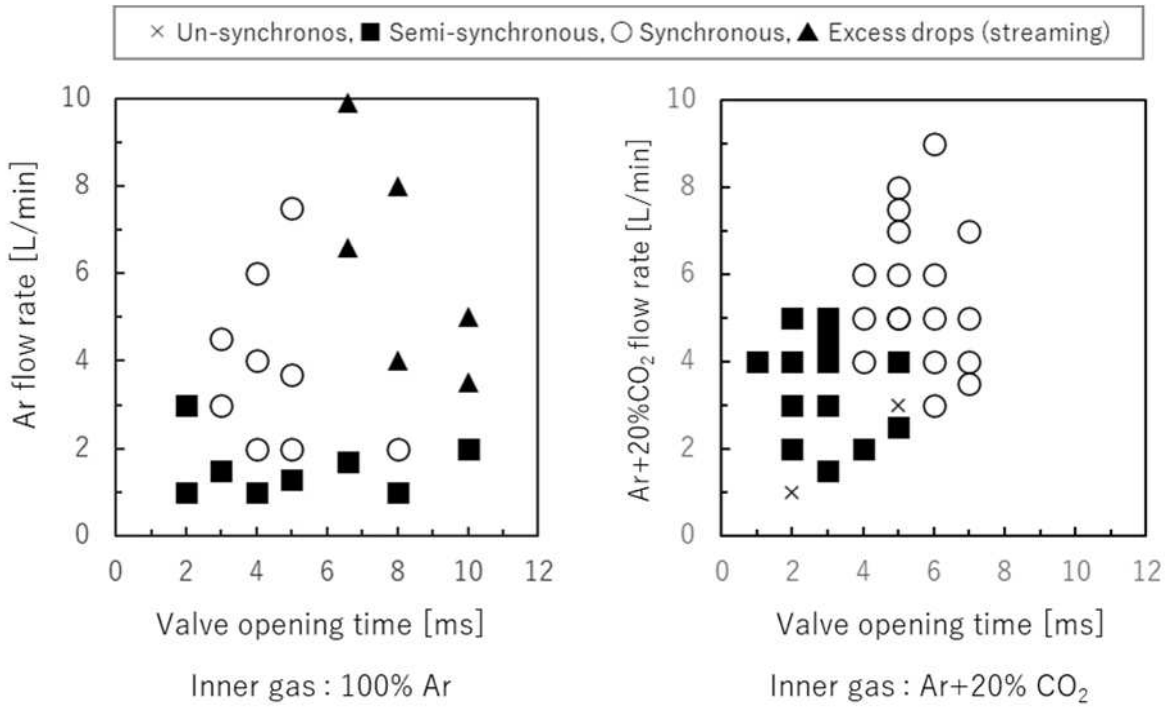


Fig. 5.19 Experimental results of pulse gas MAG welding using Ar-20%CO_2 as shielding gas (280 A)

5.7 結言

本章では，パルスガスマグ溶接のスパッタ低減効果およびガスコスト低減効果など様々な効果について，実用的な観点から調査および評価した．また溶接工および溶接管理技術者に対してデモンストレーションを行い，所感および評価を得た．以下に得られた結果をまとめる．

- パルスガスマグ溶接は炭酸ガスアーク溶接と比較してヒューム量の低減効果が見られた．これは規則的な溶滴移行による溶滴の加熱時間の低減によるものであると考察された．
- パルスガスマグ溶接は混合ガスマグ溶接（Ar-20%CO_2）と同量以下，および炭酸ガスアーク溶接の 1/3 程度のスパッタ低減効果がある．
- パルスガスマグ溶接は混合ガスマグ溶接（Ar-20%CO_2）と比較して Ar 使用量を 1/5 以下に抑えることができる．
- パルスガスマグ溶接の溶込み形状は極端なフィンガー状とならず，融合不良の生じにくい良好な溶込み形状となる．
- アウターガス（CO_2）とインナーガス（Ar）の流速差が約 5 m/s 以上になると BH が発生する可能性が高い．これは流速差によるくびれ状の流れ場の生成によるもので，大気を巻き込む可能性が高くなるためと考えられる．
- パルスガスマグ溶接の溶接金属における機械的性質は，以下の特徴を示す．
  - YGW11，YGW18：炭酸ガスアーク溶接よりも耐力・引張強さが勝る．

- YGW15：混合ガスマグ溶接よりも耐力・引張強さがやや劣る.
- 吸収エネルギー：全ワイヤ種において炭酸ガスアーク溶接および混合ガスマグ溶接にやや劣ったが，JIS 規格は満足した．原因はホース内に残存した空気（N_2）の可能性が高いため，改善の余地が大いにある.

- 炭酸ガスアーク溶接用ワイヤおよび混合ガスマグ溶接用ワイヤのいずれの JIS 規格についても満足した.
- パルスガスマグ溶接における溶接工および溶接監理技術者の評価は，アークの見え方やワイヤ突出し長さなど多少の慣れが必要であるものの，スパッタ量が減り，開先・溶融池周辺は見えやすく，アークも安定していることから，全体としては好評であった.
- 工場内配管等の既存の設備との連携は考慮する必要はあるものの，Ar 使用量の低減によるガスコスト低減効果はかなり大きく，多大なニーズがあることが示された.

参考文献

[1] 佐藤英一，山崎圭: 炭酸ガスアーク溶接のグロビュール移行制御，溶接学会誌, Vol.84, (2015), No.4, 19-23.

[2] 山崎圭，鈴木啓一，輿石房樹: 炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタおよびヒューム低減プロセスの開発，溶接学会全国大会概要, Vol.82, p.42-43, 2008.

[3] 山崎圭，山本恵理，鈴木啓一，輿石房樹，和木謙治，田代真一，田中学，中田一博: 赤外線二色放射測温法による GMA 溶接の溶滴温度測定，溶接学会論文集, Vol.26, No.3(2008), p.214-219.

[4] 野々村将一，兵間賢吾，小林和行，山岡弘人，宮坂史和: パルス電流波形による溶込み形状の制御，溶接学会論文集, Vol.33, (2015), No.1, 82-88.

[5] JIS Z 3111: 2005，溶着金属の引張及び衝撃試験方法，日本規格協会.

[6] JIS Z 3312: 2009，軟鋼，高張力鋼及び低温用鋼用の マグ溶接及びミグ溶接ソリッドワイヤ，日本規格協会.

[7] JIS Z 2242: 2018，金属材料のシャルピー衝撃試験方法，日本規格協会.

第6章　結論

本研究は, GMAW において新たな低スパッタ溶接技術の開発およびその物理現象の解明を目的とした. この目的を達成する手法として，溶接中にアーク雰囲気ガス組成を高速度で動的に変化させることによって，アーク溶接現象および溶滴移行現象をコントロールする「パルスガスマグ溶接法」を考案した. パルスガスマグ溶接法は 2 つのガスを扱うことにより多数のパラメータを持つため，それらの条件の模索および最適化を行った. またガス流の可視化や複数の溶接電源特性の検討，アークプラズマの分光観察など, 様々な実験的検討からアーク雰囲気変化が溶滴移行現象に及ぼす影響を調査し，その物理現象について解明した．本章では，本研究で得られた結果を総括する.

第 1 章「緒論」では，生産プロセス分野における社会的背景を分析し，産業界における溶接・接合技術の立ち位置について概説した. 現状産業界においては最も主力の溶接プロセスである GMAW の概要とその主体的な物理現象である溶滴移行現象について示し，応用・実例化技術として種々の溶滴移行制御技術について整理した．GMAW における現状の課題を精査した結果，低スパッタ・低ガスコスト・低設備コストをコンセプトとした新たな溶接法の重要性を見出し，パルスガスマグ溶接の開発について研究する方針を示した.

第 2 章「周期的 Ar 添加による炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行制御」では，高速度カメラによるガス流および溶滴移行現象の観察結果, また溶接中の電流電圧波形の結果から, 本溶接法における基本的な物理現象について示し，アーク雰囲気変化による溶滴移行現象について考察した．第 2 章で得られた知見を以下に示す.

- ガス可視化結果より，Ar 流は渦輪を形成しつつ塊状にワイヤ先端付近に到達する．その時，Ar 流の塊は概ね初速を保ったまま，半径方向にインナーノズル内径の 1.5 倍程度に膨らむ.
- Ar 供給経路長さを標準の 300 mm としたとき，電磁弁開信号に対してほぼ遅延なく Ar はノズル先端から供給される．なお Ar 供給経路長さが長くなると徐々に応答が悪くなるため，可能な限り Ar 供給経路長さは短い方が好ましい.
- ガス可視化結果より，アウターガス（CO_2）とインナーガス（Ar）の流速差によって CO_2 流にくびれ状の流れが形成される.
- 高速度カメラによる溶滴移行現象の観察結果より，CO_2 主体の緊縮型アークから Ar 主体のフレア型アークに急変することで，溶滴はアーク力から解放されて垂下し，離脱すると考えられる.
- 電流電圧波形より，急激な電位傾度変化による電圧低下および電流上昇が生じ，電磁ピンチ力が急増することで溶滴離脱を促進させていることが示唆された.

第 3 章「Ar 添加条件と溶滴移行が同期する範囲の検討」では，パルスガスマグ溶接法において Ar の添加条件を変化させ，溶接現象を観察することで溶滴移行制御が可能な条件範囲を調査した．また，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．第 3 章で得られた知見を以下に示す.

- 溶接電流 280 A 固定の条件下において，電磁弁開時間 4 ms 以上，概ね 1 パルス毎の Ar 体積 1 mL 以上で Ar 添加に溶滴移行が同期する.

- Ar 添加に溶滴移行が同期するためには，電磁弁開時間やピーク流量に応じて変化する溶滴移行時間（溶接離脱までの動作時間）と同じかまたはそれ以上に長くフレア型アークを保持する必要があると考えられる．
- Ar を円柱状のモデルと仮定することで，電磁弁開時間とピーク流量から溶滴移行形態（非同期（準同期），同期および余剰溶滴）を予測することができる．
- パルスガスマグ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約 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．

第 4 章「溶滴離脱の支配因子に関する検討とメカニズムの解明」では，パルスガスマグ溶接法において電流変化とアーク形状変化のどちらが溶滴離脱に支配的な因子であるかを実験的に調査し，その物理現象について考察した．第 4 章で得られた知見を以下に示す．

- 炭酸ガスアーク溶接における定電圧特性パルス電源を用いた検討より，周期的な電流上昇のみでは規則的な溶滴離脱に至らなかった．
- パルスガスマグ溶接における定電流特性電源を用いた検討より，周期的なアーク雰囲気変化のみで規則的な溶滴離脱が得られた．
- 本実験条件においては電流変化よりもアーク形状変化の方が溶滴離脱に支配的な因子であることが示された．なお，電流変化は補助的には溶滴離脱に有効に作用しており，1 パルス 1 ドロップの精度を高める効果はある．
- 分光観察より，CO_2 主体のアーク期間では Ar プラズマの発光は見られず，溶滴直下で Fe プラズマの発光が観察された．一方，Ar 主体のアーク期間では，アーク外縁部で急激に Ar プラズマが発光し，溶滴直下のアーク中央部では Fe プラズマが発光した．
- Ar によるアーク外縁部への電流経路の変化は急激な溶滴に働くアーク力の低下を及ぼし，さらに溶滴の斜め側方に電流経路が変化し電磁ピンチ力が溶滴離脱に有効に働くことで，溶滴の伸長効果も得られ，溶滴の離脱を促していると考えられる．

第 5 章「パルスガスマグ溶接の効果と実用化に向けた検討」では，パルスガスマグ溶接の様々な効果について，実用的な観点から調査および評価した．第 5 章で得られた知見を以下に示す．

- パルスガスマグ溶接は炭酸ガスアーク溶接と比較してヒューム量の低減効果が見られた．これは規則的な溶滴移行による溶滴の加熱時間の低減によるものであると考察された．
- パルスガスマグ溶接は混合ガスマグ溶接（Ar-20%CO_2）と同量以下，および炭酸ガスアーク溶接の 1/3 程度のスパッタ低減効果がある．

- パルスガスマグ溶接は混合ガスマグ溶接（Ar-20%CO_2）と比較して Ar 使用量を 1/5 以下に抑えることができる．
- パルスガスマグ溶接の溶込み形状は極端なフィンガー状とならず，融合不良の生じにくい良好な溶込み形状となる．
- アウターガス（CO_2）とインナーガス（Ar）の流速差が約 5 m/s 以上になると BH が発生する可能性が高い．これは流速差によるくびれ状の流れ場の生成によるもので，大気を巻き込む可能性が高くなるためと考えられる．
- パルスガスマグ溶接の溶接金属における機械的性質は，以下の特徴を示す．
  - YGW11，YGW18：炭酸ガスアーク溶接よりも耐力・引張強さが勝る．
  - YGW15：混合ガスマグ溶接よりも耐力・引張強さがやや劣る．
  - 吸収エネルギー：全ワイヤ種において炭酸ガスアーク溶接および混合ガスマグ溶接にやや劣ったが，JIS 規格は満足した．原因はホース内に残存した空気（N_2）の可能性が高いため，改善の余地が大いにある．
  - 炭酸ガスアーク溶接用ワイヤおよび混合ガスマグ溶接用ワイヤのいずれの JIS 規格についても満足した．
- パルスガスマグ溶接における溶接工および溶接監理技術者の評価は，アークの見え方やワイヤ突出し長さなど多少の慣れが必要であるものの，スパッタ量が減り，開先・溶融池周辺は見えやすく，アークも安定していることから，全体としては好評であった．
- 工場内配管等の既存の設備との連携は考慮する必要はあるものの，Ar 使用量の低減によるガスコスト低減効果はかなり大きく，多大なニーズがあることが示された．

本研究は，製造業が直面する QCD（品質，コスト，納期）の最適化，SDGs への貢献，そして溶接技能者不足という喫緊の課題に対し，GMAW における新たな低スパッタ溶接技術の開発とその物理現象の解明を目的とした．この目的を達成するため，溶接中にアーク雰囲気ガス組成を高速度で動的に変化させることで溶滴移行を制御する「パルスガスマグ溶接法」を考案した．学術的には，本研究は，溶接中にアーク雰囲気ガス組成が動的に変化するという，これまでにない条件下での溶滴移行現象に深く焦点を当て，その複雑な物理現象の解明に挑んだ．ガス流の可視化，複数の溶接電源特性の検討，そしてアークプラズマの分光観察といった多角的な実験的アプローチを通じて，アーク形状変化が溶滴離脱に支配的な因子であるという，パルスガスマグ溶接における溶滴移行制御の根源的なメカニズムを詳細に解明した．このメカニズム解明は，従来の GMAW における溶滴移行現象の理解を大きく深化させるとともに，アーク雰囲気の動的制御が溶滴離脱に及ぼす影響に関する新たな知見を溶接物理学にもたらした．特に，非定常なガス組成変化がアークプラズマの挙動や電磁ピンチ力，アーク力といった物理量に与える影響を詳細に解析したことは，アークプラズマ物理学の発展にも大きく貢献するものである．工学的側面では，本溶接法がスパッタの大幅な低減，高価な Ar ガス使用量の抑制によるガスコストの低減，良好な溶込み形状，JIS 規格を満足する機械的性質，そして溶接作業者からの高い評価を達成することを示した．これらの成果は，既存設備への安価な後付けが可能であり，大規模な設備投資を必要とせず，かつランニングコストの増加を最低限に抑えることで，特に日本の産業を支える中小企業や自動化が困難な現場においても導入しやすい革新的な低スパッタ溶接プロセスとして確立される可能性を提示するものである．

本研究で得られた知見は，生産性向上とコスト削減に貢献し，次世代の溶接技術開発を大きく推進するとともに，持続可能な社会の実現に向けた製造業の発展に寄与するものと期待される．

付録

付録 1　パルスガスマグ溶接における大気巻き込みの可能性について

5.5 節におけるパルスガスマグ溶接（PGMAG）の溶接金属における機械的性質調査および化学成分分析結果において，各ワイヤの試験結果より，吸収エネルギーの結果についていずれも PGMAG が劣る結果となった．成分分析結果より PGMAG では N 量が比較的多いことが原因と考えられる．N 量の増加は 5.4 節でも述べたとおり CO_2 と Ar の流速差により大気を巻き込んでいる可能性が考えられる．そこで，Fig. A.1 に示す溝状のノッチ上を溶接することで溝内を溶接金属で埋める V 溝試験を行い，溶接金属内の N 量を分析することで，PGMAG における大気巻き込みについて追加検討した．

Fig. A.2 に V 溝試験の N 量分析結果を示す．図中において CO_2，PGMAG はそれぞれ炭酸ガスアーク溶接，パルスガスマグ溶接を示し，アンダーバー以降の数値は CO_2 流量を示す．なお試験はより大気巻き込みの可能性を検討するため，アウターガスである CO_2 流量を減らしながら実験した．また比較検討のため 100%CO_2 についても同様に実験した．Fig. A.2 より，CO_2 流量の減少に伴い若干の N 量増加は見られるものの，全体としておおよそ 50~60 ppm 程度に抑えられたことから，PGMAG による大気巻き込みの可能性は低いと考えられる．

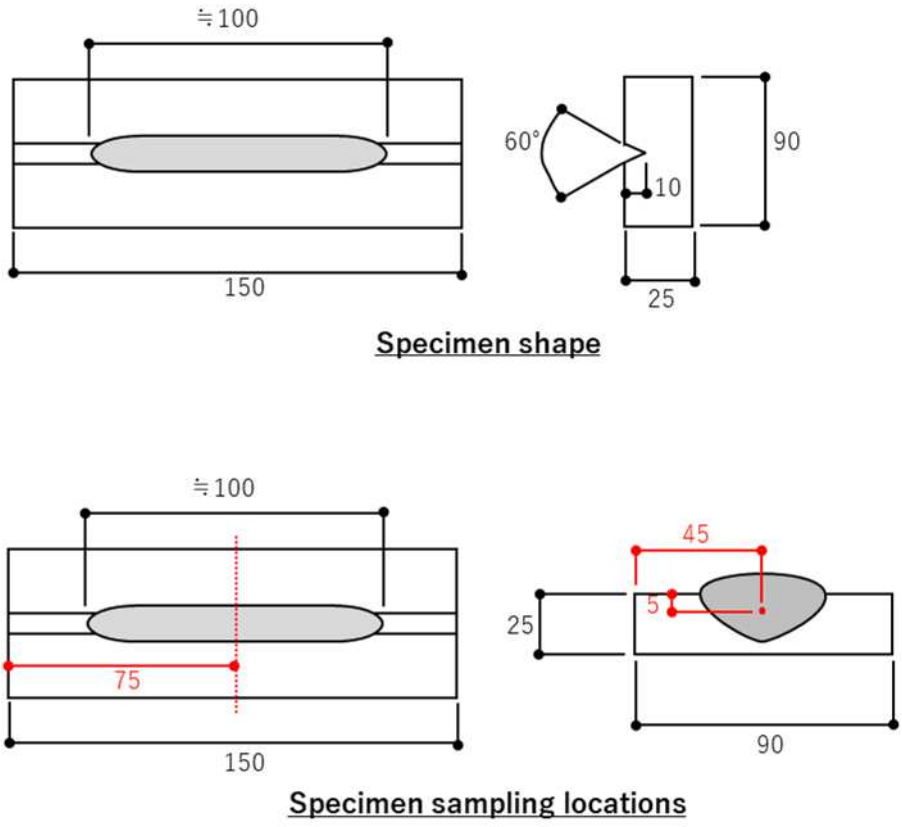


Fig. A.1 Specimen shape and test piece sampling position for v-groove test

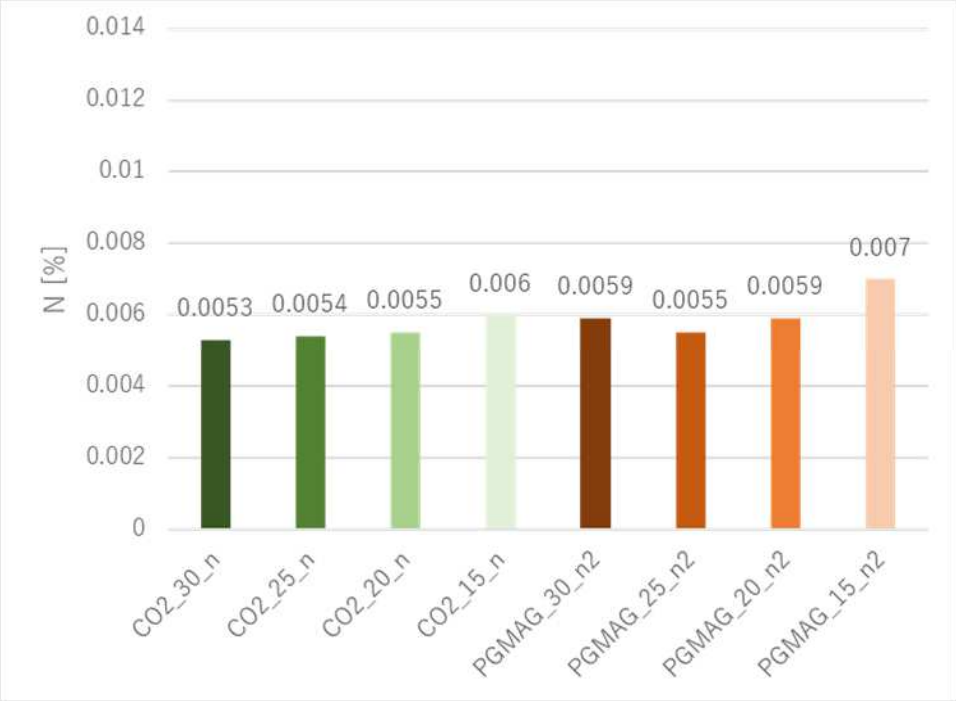


Fig. A.2 N content analysis results of v-groove test

これらの結果から，Fig. 5-13，Fig. 5-15，Fig. 5-17 に示した成分分析結果において N 量の増加が見られた原因について，以下のことが考えられる．各ワイヤおよび各溶接法における実験はそれぞれの試験体について順に溶接を行ったが，CO_2，MAG，PGMAG と溶接方法を変える際には逐一 Ar の供給経路であるテフロンチューブを外して実験準備を行った．そのため PGMAG を行う際にはマスフローコントローラからトーチ間の Ar 流路内に空気が残存し，その結果 PGMAG 溶接中に Ar に交じって空気が排出，アーク近傍に移送されたと考えられる．PGMAG では Ar をパルス添加するため電磁弁によりせき止められつつ Ar が排出されるため，空気（N_2）は ppm オーダーでは長時間流路内に残存すると考えられる．そこで，Ar 供給経路 ϕ 4 mm × 15 m，Ar 平均流量 4 L/min とし，Fig. A.3 のように流路内に残存した Ar と空気が均一に混ざり合いながら電磁弁にせき止められつつ排出されたとして N_2 の残留濃度を概算した結果を Fig. A.4 に示す．JIS K 1105 高圧ガス容器に充填した工業用のアルゴン（液化アルゴン及び圧縮アルゴン）についての規定[1]では，アルゴンガス中の窒素量は 1 級で 7 ppm 以下とされていることから，窒素量 7 ppm 以下で空気残留の影響が無くなるとすると，Fig. A.4 より約 27 s 程度かかることが分かる．このことから，実際には Ar 内の空気の拡散は均一ではないと思われるが，少なくとも溶接開始から 27 s 程度の間は Ar 経路内に空気が残存していた可能性が大いに考えられる．

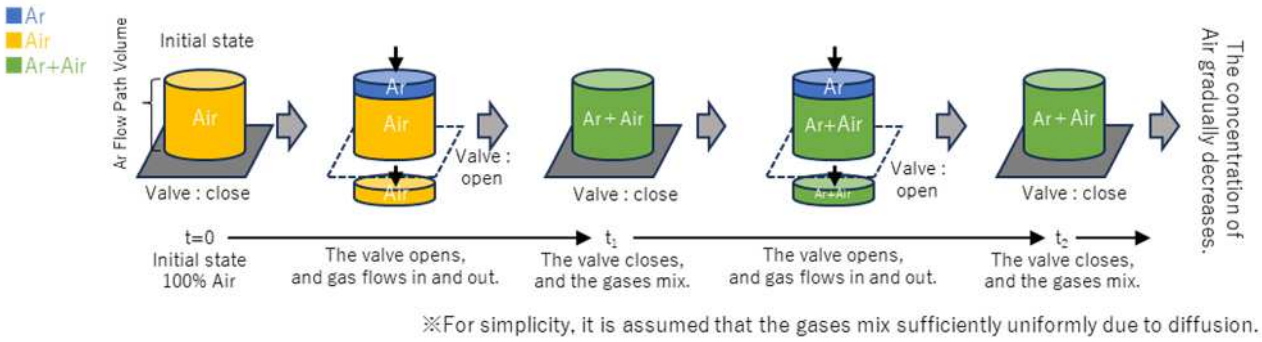


Fig. A.3 Schematic diagrams of gas remaining in the flow path

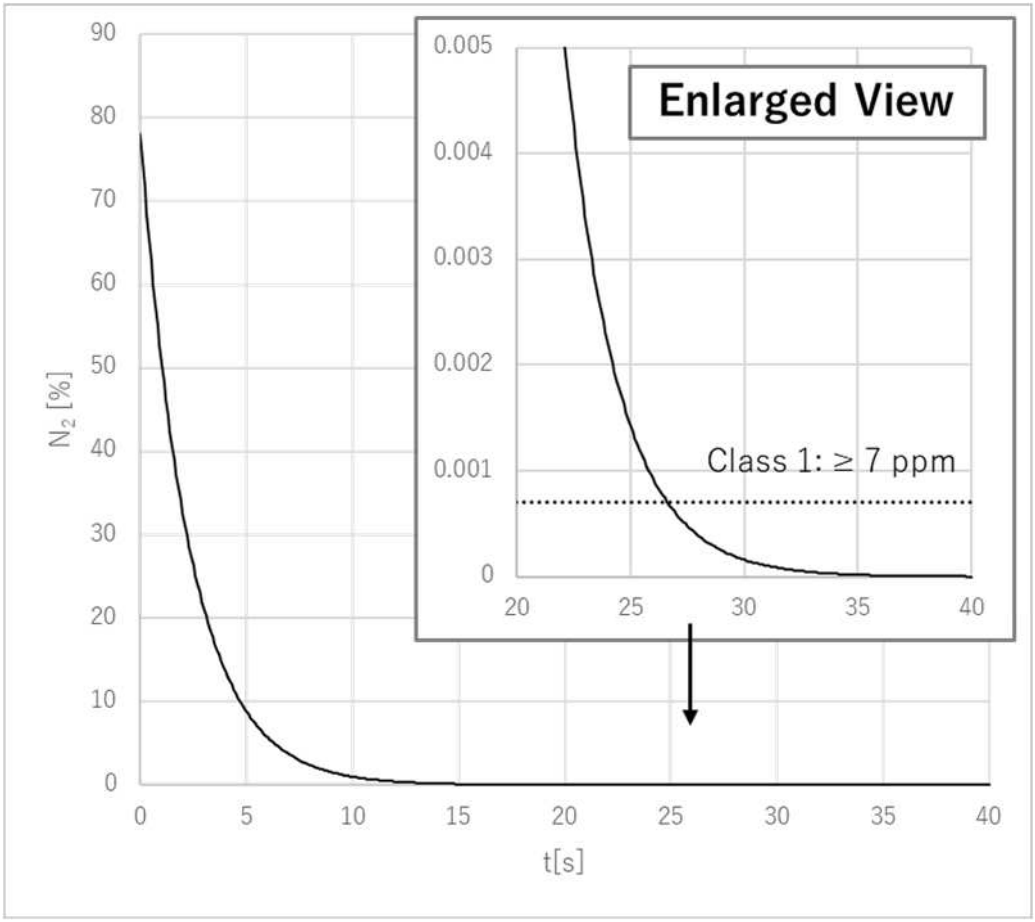


Fig. A.4 Estimated residual nitrogen concentration considering blockage by solenoid valve

付録 2　実用化に向けた装置開発

実用化に向け，パルスガスマグ溶接の専用トーチおよび電磁弁動作用の機器を開発した．まず，2 章で述べた通り電磁弁はノズル先端から 300 mm 以内に取り付けることで，電磁弁開信号の立ち上がりからほとんど遅延なく Ar を添加することができる．そこで，電磁弁をできる限りトーチ付近に設置するため，

電磁弁を内蔵した溶接トーチの開発について検討した．電磁弁はトーチのグリップ部後方に設置し，グリップ内部に設置する方針を考えた．グリップ部の試作は 3DCAD により設計を行い，樹脂製 3D プリンタで製作することとした．

Fig. A.5 に試作グリップ①の 3D 図面を示す．グリップは市販品のものを参考に左右 2 分割構造とし，電磁弁を手で握った小指が干渉しないところに設置できるよう設計した．また，配電ケーブル上部に Ar 供給ホースを通す形状とし，両者の間にはリブを設けて溶接中の配電ケーブルの発熱でホースが溶けないような構造とした．樹脂製 3D プリンタで製作した試作グリップ①を Fig. A.6 に示す．試作グリップ①を川田工業㈱四国工場の溶接工に使用してもらったところ，「グリップの太さはそこまで感じない」，「大きく，重く感じる」，「出っ張りが小指と干渉する場合があり邪魔である」と大別して 3 つの感想が得られた．まず良好な点として，グリップの太さが Ar 供給ホースを内蔵したことで若干太くなったがこれは気にならないとのことだった．一方，改善点として重量とグリップ右側突出部の 2 点が挙げられた．まず重量について，試作グリップ①の重量を計測したところ 284 g であり，市販品（DAIHEN 製，TOKIN 製）の重量 90 ~100 g の 3 倍近い重量であった．さらにグリップ本体の重心位置を測定すると，Fig. A.7 に示すように市販品よりもかなり後方に重心が位置しており，より重量を感じやすい形状になっていると考えられる．また，グリップ右側突出部はグリップ内でのホースの取り回しが右側を通しているためであり，右手でグリップを握った際に小指とやや干渉する位置に樹脂の突出部が位置していた．

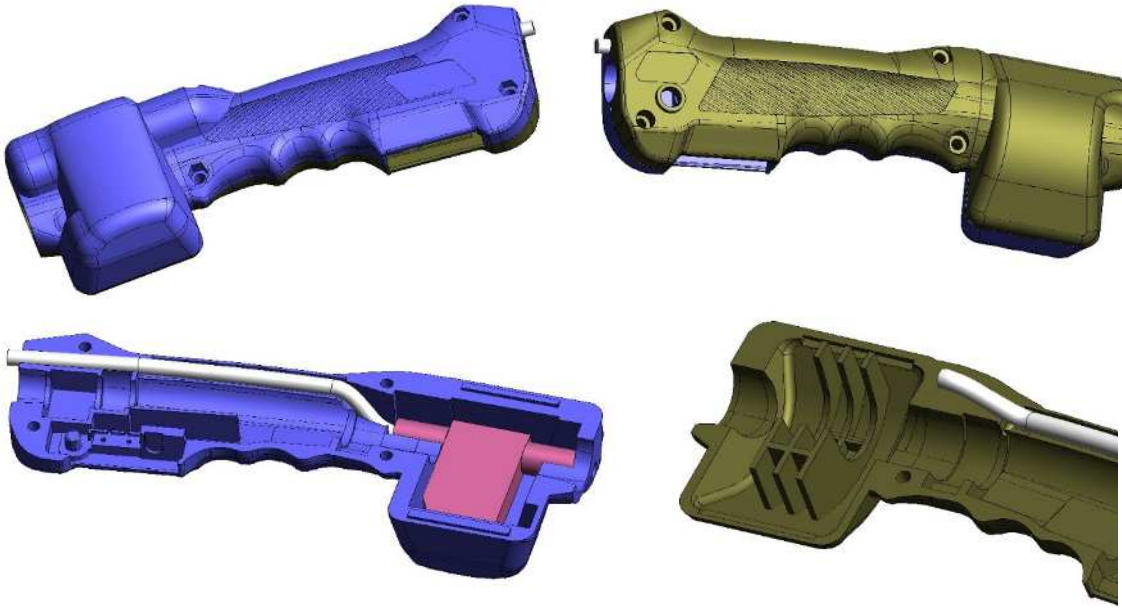


Fig. A.5 3D drawing of prototype grip ①



Fig. A.6 Prototype grip ① manufactured with a resin 3D printer

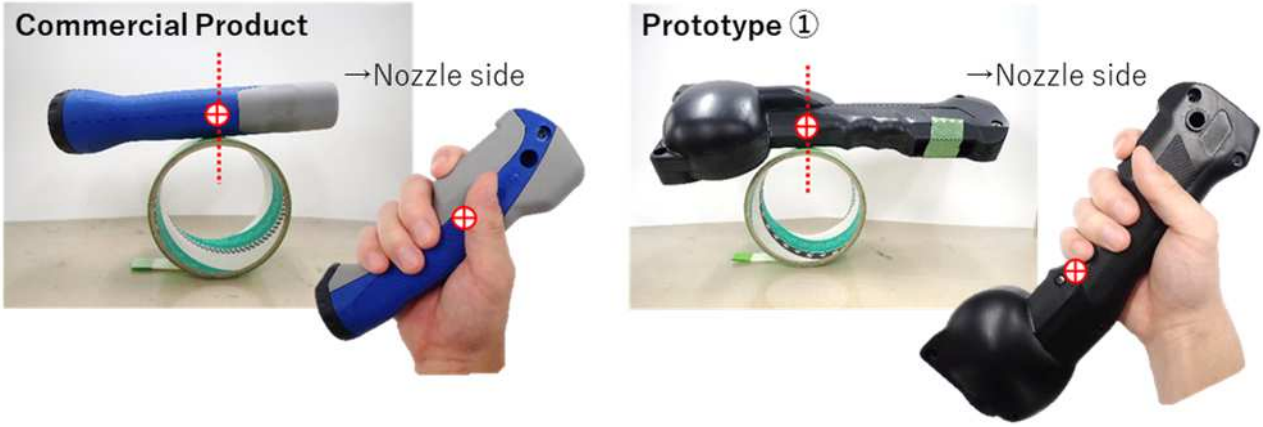


Fig. A.7 Comparison of center of gravity positions of the grip body

上記の改善点を踏まえ，試作グリップ②を設計した．Fig. A.8 に試作グリップ②の 3D 図面を示す．基本的な構造は試作グリップ①と同じコンセプトであるが，できる限りグリップ内外部の肉厚をそぎ落として軽量化を試みた．特に電磁弁内蔵部の丸みを帯びた形状を見直すことで，かなりの重量減となった．またグリップ内でのホースの取り回しを左側に位置させ，右手との干渉が無い形状にした．樹脂製 3D プリンタで製作した試作グリップ②を Fig. A.9 に示す．課題であった重量は 173 g まで軽量化することができ，グリップ右後方付近の突出部もなくして小指との干渉も改善された．しかし，再度川田工業㈱四国工場の溶接工に使用してもらったところ，まだ重量が重く感じるという感想であった．この原因として，試作グリップ①②に共通してであるが，グリップ全長が長くなったことによってトーチケーブルの重さ（モーメント）が作業者の腕にかかりやすくなり，結果重く感じてしまうということが考えられる．加えて 500 A トーチとして設計したためトーチケーブルも比較的太く重く，より重量感を感じやすい可能性がある．

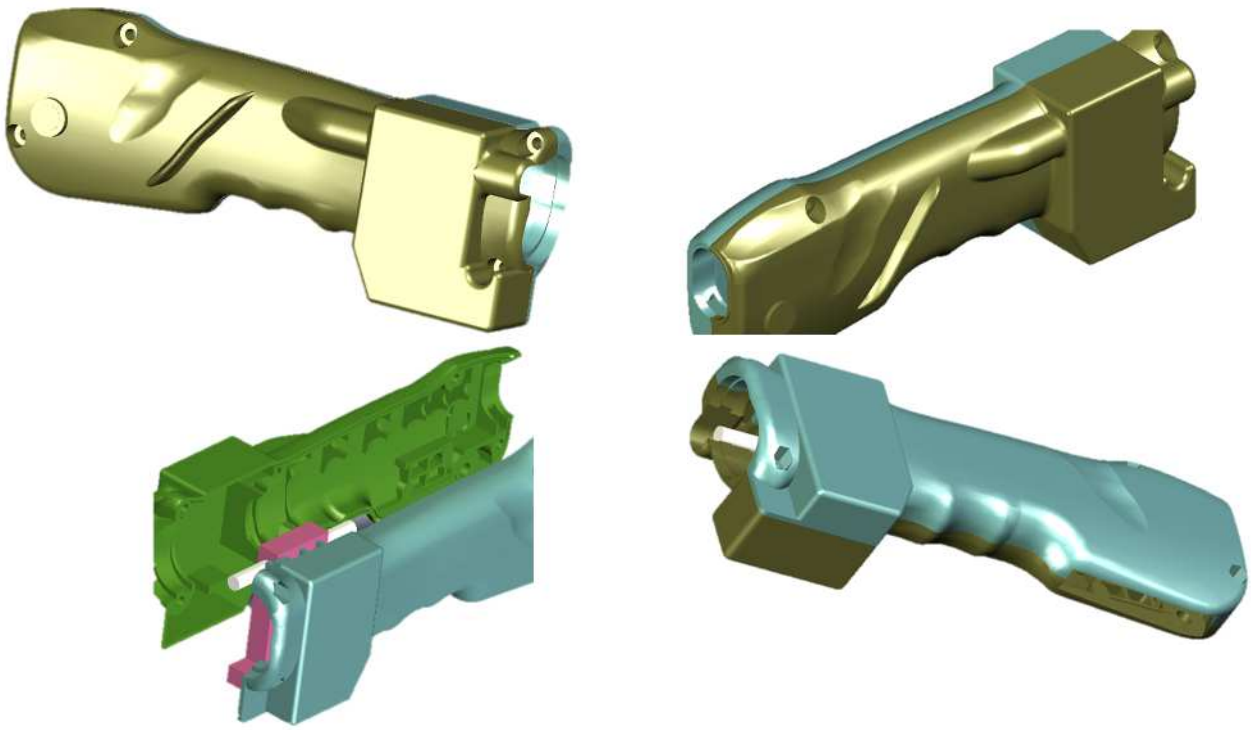


Fig. A.8 3D drawing of prototype grip ②

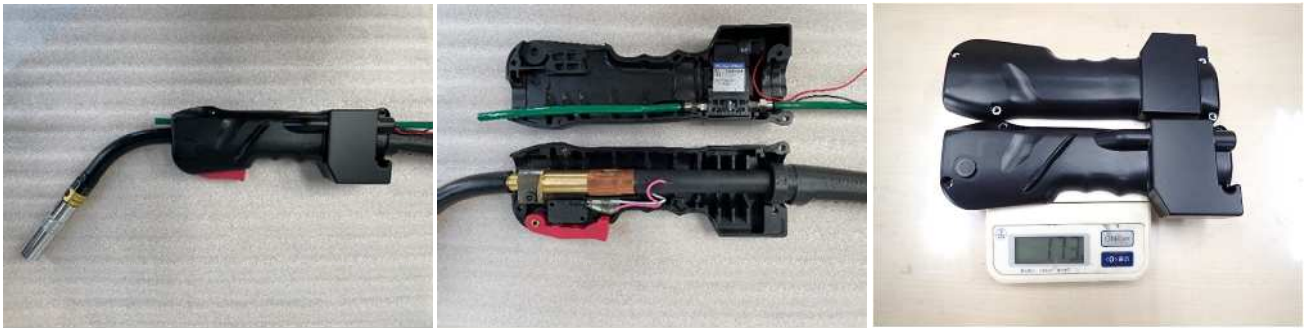


Fig. A.9 Prototype grip ② manufactured with a resin 3D printer

これらの検討の結果，グリップ部を延長すると全体として重さを感じやすくなるため，グリップへの電磁弁の内臓は取りやめることとした．最終的なトーチの構成を Fig. A.10 に示す．電磁弁は保護ケースに入れてグリップ後方のトーチケーブルに装着するものとし，電磁弁から伸びた Ar 供給ホースはグリップと共に直接握りこむ，非常にシンプルな構成となった．この構成はグリップ部の交換も不要のため導入の際のトーチメーカを選ばず後付けが簡易であること，利き手によらず使用できること，電磁弁が寿命等で破損した際には取り換えが容易でありメンテナンス性にも優れることなど，様々な利点を有する．ホースは完全に露出しているため溶接作業の熱・摩擦に耐久性を持つテフロンを適用することとした．テフロンは融点が約 327 °C，連続使用温度約 260 °Cであり，融点を超えた場合にもすぐには溶解しないという優れた耐熱性を有し，さらには耐摩耗性にも優れる．こちらについても川田工業㈱四国工場の溶接工に使用してもらったところ，普段通りの溶接トーチと変わらず使用できる，と最も好評であった．露出した Ar 供給ホースが溶接作業の邪魔となるか懸念があったが，皮手袋を着用した状態でトーチと一緒に握りこ

むと意外にも違和感なく使用することができた.



Fig. A.10 Final PGMAG torch configuration

続いて，電磁弁動作用の機器開発を行った．実験は市販のパルスジェネレータと電磁弁ドライバで電磁弁を動作させて行った．実験では Ar 添加条件における溶滴移行を調査するため，Ar 添加周波数や電磁弁開時間，すなわち電磁弁に与える矩形波信号を種々変化させて実験した．しかし 3 章における実験結果より，Ar 添加条件は Ar 添加周波数 35~65 Hz，電磁弁開時間 5 ms であればいずれの溶接電流範囲も網羅して同期できることから，電磁弁に与える矩形波信号は数条件あれば良いことが分かった．そこで，パルスジェネレータと電磁弁ドライバを一体化して矩形波信号は数条件に絞った，実用化に向けた機器の開発を行った．以降はこの機器をパルス BOX と呼称する．

まずはパルス BOX を自作した．回路図を Fig. A.11 に示す．電源は一般的なコンセント（AC100V）から供給させるものとした．電磁弁は 24 V で動作するため回路内に AC-DC コンバータを導入した．また，DC-DC コンバータを取り付け，24 V からさらにマイコン動作用に 5 V に変換する回路を組み込んだ．マイコンは市販の Arduino uno R3 を用いた．本体にはトグルスイッチを複数取り付け，電源，電磁弁に送る矩形波信号の選択，ガスチェックのための手動オンオフ切り替え機能を割り当てた．液晶ディスプレイユニットも取り付け，現在出力している矩形波信号の条件（周波数，電磁弁開時間）を表示できる機能を持たせた．アークのオンオフを検知して自動で矩形波信号発信のオンオフを連動させるため，市販の電流クランプセンサを外部接続して溶接電流を検知できるようにした．また，この電流クランプセンサからの信号により現在の溶接電流値を読み取り，溶接電流の値に対応した矩形波信号が自動で選択できる機能も搭載した．作成したパルス BOX の外観を Fig. A.12 に示す．

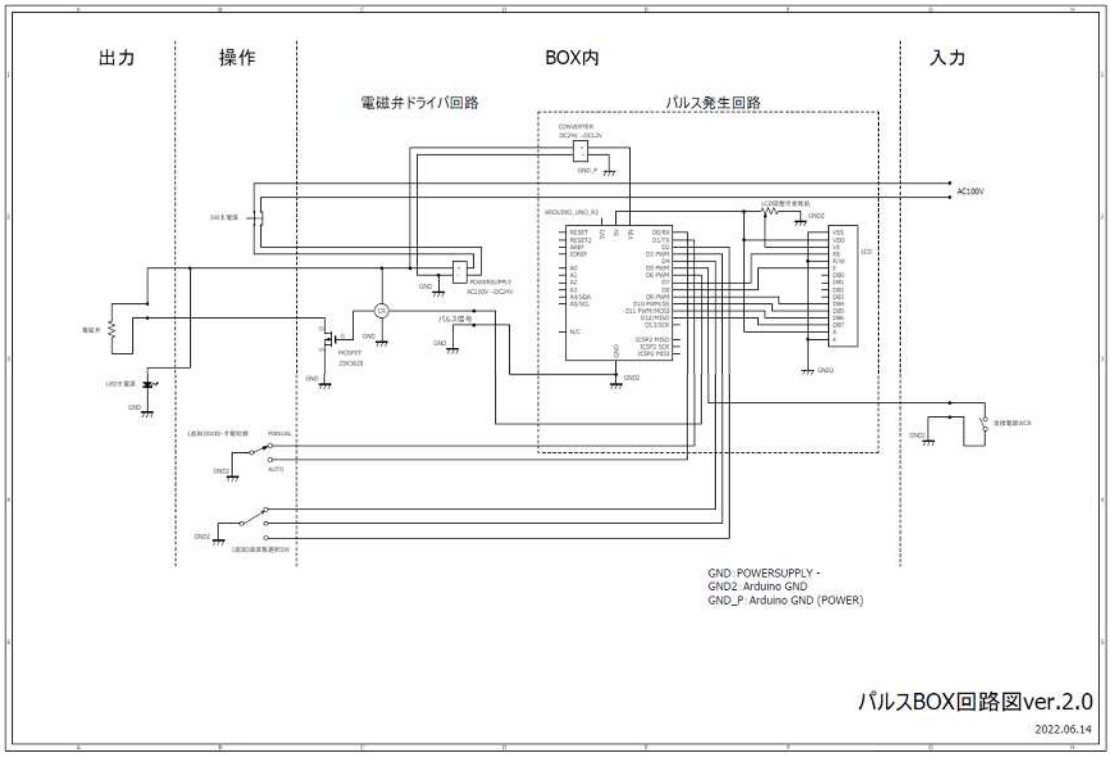


Fig. A.11 Circuit diagram of the self-made pulse BOX



Fig. A.12 Self-made pulse BOX

Fig. A.12 の自作したパルス BOX は社内外における PGMAG のテストおよびデモには十分な性能を有した．一方，溶接電流のみを参照して矩形波信号を自動選択しているためワイヤ径の変更に対応できない点，市販のクランプセンサを用意する必要がある点，クランプセンサの機種により読み取った電流値の補正値が変わる点など，使用してみた上での細かい不足点が少なからず判明した．また，市販化考えた際にマイコンの Arduino は信頼性・安定性の面などから商用利用に向かず，またパルス BOX 自体を生産面および法的面から製造出荷できる体制とすべく，外注して製品版の検討を行った．

製品版のパルス BOX を Fig. A.13 に示す．製品版の設計および製作においては自作したパルス BOX の機能の大部分をそのまま踏襲した．改善および変更点として，電流クランプセンサは市販品よりも安易なものを選択し，コストを抑えるとともに別途用意したクランプセンサとの補正値問題を解決した．また，ワイヤ径選択スイッチを取り付け，3 章の検討より解明されたワイヤ径（φ1.2，1.4 mm）による同期範囲の変化に対応した適切な Ar 添加条件が自動選択されるようにした．さらには電磁弁の使用寿命にも考慮し，電磁弁を取り付けてからカタログ寿命に達した時点でアラートを表示させる機能も追加したことで，電磁弁破損による溶接中のアクシデントを未然に防ぐことができる．最も大きな改善点として，PC との接続機能を追加した．Windows PC で動作する PC アプリを作成し，パルス BOX 本体に設けた USB 端子と接続できるようにした．PC アプリの UI 画面を Fig. A.14 に示す．PC アプリ上ではパルス BOX が取得した溶接電流値や現在出力している矩形波の周波数，電磁弁開時間（アプリ上では ON 時間），電磁弁使用時間が確認できる．また，矩形波信号の条件として 10 個のデータセットを保存できるようにし，Ar 添加条件の細かなカスタマイズを可能とした．この機能により，例えばワイヤ種によって溶接条件を細分化して使用しているような場合でも，ワイヤ種毎に任意の溶接電流（1 A 刻み）により Ar 添加条件を設定できる．なおこの条件のカスタマイズ機能はパスワードによるログインを必要とする仕様とし，管理者のみが設定変更できるようにすることも可能である．



Fig. A.13 Commercial version of the pulse BOX



Fig. A.14 UI screen of the PC application

参考文献

[1] JIS K 1105: 2017，アルゴン，日本規格協会.

謝辞

本学位論文は，著者が川田工業株式会社および大阪大学大学院において行った研究成果をまとめたものであり，多くの方々からの多大なご支援とご指導により完成に至りました．ここに謹んで謝意を表します．

本学位論文の主査である大阪大学大学院工学研究科准教授 荻野陽輔 博士には，終始一貫して懇切なるご指導とご教示を賜り，本研究を遂行することができました．著者は入学以前より複数の共同研究において幾度となく有益なご教示を賜り，入学後もより一層深くご討論いただき，多大なるご指導を賜りました．ここに謹んで深甚なる謝意を表します．

大阪大学大学院工学研究科教授 佐野智一 博士には，本学位論文に対するご指導ご鞭撻に加え，社会人ドクターとして温かくお迎えいただき，多大なるご配慮を賜りましたこと，深く感謝の意を表します．

大阪大学接合科学研究所教授 田中学 博士，および大阪大学大学院工学研究科教授 神原淳 博士には，本論文をまとめるにあたり，大変有益なご教示とご鞭撻を賜りました．特に田中先生には，学会や委員会などの場においても深くディスカッションさせていただき，格別なるご指導とご鞭撻を賜りました．ここに謹んで深甚なる謝意を表します．

川田工業株式会社橋梁事業部生産統括部顧問ならびに愛媛大学客員教授 小原昌弘 博士，および愛媛大学大学院理工学研究科准教授 水口隆 博士には，本研究の進捗および成果に関するディスカッションにおいて，日頃より多大なるご指導ご鞭撻を賜りました．特に小原先生には，「パルスガスマグ溶接」の根幹となる原理の着想に至る上で多大な貢献をされ，本研究の礎を築いていただきました．先生に本研究を託していただき，研究を通して一個人としても成長できましたこと，心より感謝申し上げます．

川田工業株式会社橋梁事業部生産統括部生産開発室長 津山忠久 博士には，入学につながる共同研究テーマの運営，研究の遂行，そして日々の研究活動において，終始懇切なご指導を賜りました．ここに深く感謝し，厚く御礼申し上げます．また，同社橋梁事業部生産統括部長 北村 正見 氏，同社橋梁事業部生産統括部顧問 辻 巧 氏をはじめとする同社内の皆様方には，本研究の遂行に際し，多大なるご理解とご協力を賜りましたこと，深く感謝し御礼申し上げます．

神戸製鋼所 井上芳英 氏，同社 迎井直樹 博士をはじめとする皆様方には，本研究において極めて重要な溶接トーチをご提供いただきましたこと，心より感謝の意を表します．

大阪大学大学院工学研究科准教授 野村和史 博士には，アークプラズマの分光観察のための実験装置を貸与いただきました．多大なる実験技術支援に感謝申し上げます．

最後に，著者が社会人として川田工業株式会社に勤務する傍ら，博士課程への入学を快く承諾し，常に温かく見守り，支え続けてくれた良き理解者である妻および両親に，心からの敬意と感謝を捧げます．

本論文に関する著者の発表論文

査読付き論文

1) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; 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, 第 38 巻, 第 4 号, p.379-391. (2020), https://doi.org/10.2207/qjjws.38.379
2) 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, 溶接学会論文集, 第 38 巻, 第 4 号, p.363-378. (2020), https://doi.org/10.2207/qjjws.38.363
3) **Kohei Fujiwara**, Tadahisa Tsuyama, Masahiro Ohara, Takashi Mizuguchi, Naoki Mukai and Yoshihide Inoue; Influence of welding current on metal transfer modes in Pulsed Gas MAG welding, 溶接学会論文集, 第 41 巻, 第 2 号, p.6-10. (2023), https://doi.org/10.2207/qjjws.41.6s
4) **藤原康平**, 津山忠久, 荻野陽輔, 小原昌弘, 水口隆; 周期的 Ar ガス添加による炭酸ガスシールド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, 第 43 巻, 第 2 号, p.87-94. (2025), https://doi.org/10.2207/qjjws.43.87
5) **藤原康平**, 津山忠久, 荻野陽輔, 野村和史, 小原昌弘, 水口隆; 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滴離脱の支配因子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, 第 43 巻, 第 2 号, p.94-104. (2025), https://doi.org/10.2207/qjjws.43.95

解説記事

1) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; パルスガス Ar 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, 溶接技術, Vol.68, p.60-65. (2020)
2) **藤原康平**, 津山忠久; パルスガスマグ溶接法の開発, 川田技報, Vol.40, p.6-1-6-6. (2021)
3) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; ガス組成変化を用いた新しい溶滴移行制御技術について －パルスガス MAG 溶接法－, スマートプロセス学会誌, 第 11 巻, 第 3 号, p.87-94. (2022), https://doi.org/10.7791/jspmee.11.87

翻訳論文

1) **Kohei Fujiwara**, Tadahisa Tsuyama, Masahiro Ohara, Takashi Mizuguchi, Naoki Mukai and Yoshihide Inoue; Experimental study on the metal transfer control by using pulsed Ar addition in CO_2 arc welding process: studies on pulsed gas MAG welding, Welding International, Volume 34, p.297-313. (2020), https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1936924

国際会議　口頭発表

1) **Kohei Fujiwara**, Tadahisa Tsuyama, Masahiro Ohara, Takashi Mizuguchi, Naoki Mukai and Yoshihide Inoue; A Study on the Influence of Welding Current on Metal Transfer Modes in 'Pulsed Gas MAG' Welding, Visual-JW2022 & DEJI^{2}MA-2, October 2022.
2) **Kohei Fujiwara**, Tadahisa Tsuyama, Masahiro Ohara and Takashi Mizuguchi; Development of Low Spatter MAG Welding Process using Periodically Changing Gas Composition, IIW Doc. XII-2620-2023, 76th IIW Annual Assembly, Commission XII, Singapore, July 2023.
3) **Kohei Fujiwara**, Tadahisa Tsuyama, Yosuke Ogino, Masahiro Ohara and Takashi Mizuguchi; A study on the influence of welding current on metal transfer control in 'Pulsed Gas MAG' welding, IIW Doc. XII-2664-2024, 77th IIW Annual Assembly, Commission XII, Greece, July 2024.
4) **Kohei Fujiwara**, Tadahisa Tsuyama, Yosuke Ogino, Kazufumi Nomura, Masahiro Ohara and Takashi Mizuguchi; Experimental study on the driving force for metal transfer control in 'Pulsed Gas MAG' welding, IIW Doc. Doc. XII-2785-2025, 78th IIW Annual Assembly, Commission XII, Itary, Jun 2025.

国内学会等における発表

1) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; 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 ガス添加条件の影響－, 溶接学会春季全国大会, コロナ渦により中止, 2020 年 4 月
2) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; 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 ガス添加条件の影響－, 溶接学会春季全国大会, オンライン, 2020 年 9 月
3) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; 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, オンライン, 2020 年 9 月
4) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; パルスガス MAG 溶接法の開発－溶滴移行制御のための Ar ガス添加条件の実験的検討－, 第 253 回溶接法研究委員会, オンライン, 2021 年 1 月
5) **藤原康平**, 津山忠久, 荻野陽輔, 小原昌弘; パルスガス MAG 溶接法の開発　第 3 報－アーク雰囲気のガス組成変化による溶滴移行シミュレーション－, 溶接学会春季全国大会, オンライン, 2022 年 4 月
6) 水口隆, 門脇祥, 坂田健太郎, 津山忠久, **藤原康平**, 小原昌弘; パルスガス MAG 溶接法の開発 第 4 報－溶滴移行形態に与える Ar-CO_2 混合パルスガス組成の影響－, 溶接学会秋季全国大会, 島根, 2022 年 9 月
7) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆; 低ガスコスト・低スパッタ新溶接法「パルスガス MAG 溶接法」の開発, 第 28 回溶接学会四国支部公演大会, 愛媛, 2023 年 3 月
8) **藤原康平**, 津山忠久, 小原昌弘, 水口隆, 迎井直樹, 井上芳英; ガス組成変化を用いた溶滴移行制御

法－パルスガス MAG 溶接法－，溶接学会秋季全国大会 フォーラム「新溶接アーク現象のその先へ」，富山, 2023 年 9 月

9) **藤原康平**，津山忠久，荻野陽輔，小原昌弘，水口隆；ガス組成変化を用いた溶滴移行制御に及ぼす溶接電流とワイヤ送給速度の影響，第 265 回溶接法研究委員会，東京, 2024 年 5 月

10) **藤原康平**，津山忠久，荻野陽輔，小原昌弘，水口隆；パルスガス MAG 溶接法の開発　第 5 報－ワイヤ径に応じた溶接条件の検討－，溶接学会秋季全国大会，北海道, 2024 年 9 月

11) **藤原康平**，津山忠久，荻野陽輔，野村和史，小原昌弘，水口隆；パルスガス MAG 溶接における溶滴離脱の支配因子に関する実験的研究，第 270 回溶接法研究委員会，大阪, 2025 年 8 月

12) 三田村英，佐野智一，荻野陽輔，津山忠久，**藤原康平**；数値シミュレーションを用いた周期的アルゴン添加による炭酸ガスアーク溶接における溶滴移行制御の現象解明，溶接学会秋季全国大会，新潟，2025 年 9 月

受賞

1) 2020 年度　溶接アーク物理研究賞，（一社）溶接学会溶接法研究委員会，2021 年 8 月

2) 2024 年度　溶接学会優秀研究発表賞，（一社）溶接学会，2025 年 4 月

3) 2024 年度　溶接物理・技術奨励賞，（一社）溶接学会溶接法研究委員会，2025 年 8 月