

特集：低スパッタマグ溶接～溶滴移行形態の新しい制御方法～

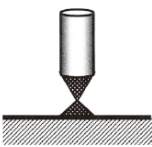
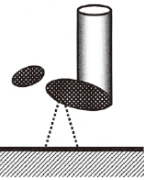
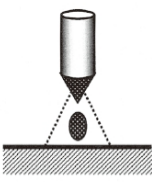
建築鉄骨向け低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法

株式会社神戸製鋼所
徐 培尔

1. はじめに

わが国の建築鉄骨分野では、ソリッドワイヤを用いた炭酸ガスアーク溶接法が主流となっており、近年、溶接現場の人手不足の深刻化により、建築鉄骨分野のロボット溶接による自動化需要が拡大している。

このソリッドワイヤを用いた炭酸ガスアーク溶接法では、溶接電流の増加に伴い、**図1**に示すように大粒の溶滴が不規則に移行するグロービュール移行形態となり、飛散スパッタが著しく増加する。そこで、当社は一定サイズの溶滴を規則正しく移行させるパルス電流波形制御技術を用いたREGARC™（従来法）を開発し、グロービュール移行領域でのスパッタの低減を実現している¹⁾²⁾。本稿では更なる低スパッタ化を図ったNew REGARC™（新制御法）について、スパッタ抑制のメカニズムとともに紹介する。

溶接法		小電流域	中電流域	大電流域
φ1.2・鋼ワイヤの場合		(≒100～180A)	(≒180～280A)	(≒280～350A)
マグ溶接	炭酸ガス：30%以上 (含100%炭酸ガス)	短絡移行 	グロービュール移行 (反発移行・ドロップ移行) 	
	炭酸ガス：25%以下		スプレー移行 	
ミグ溶接			臨界電流 →	

出典：新版改訂 溶接・接合技術入門 (2023) p24

図1 溶極式アーク溶接の溶滴移行形態

2. 低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法

従来法は、溶滴形成を担う1stパルスと溶滴離脱を担う2ndパルス電流を交互に出力し、グロービュール移行領域において、この2種類のパルスを1ユニットとして、1ユニットごとに溶滴を規則正しく移行させる。アーク長制御を1stパルスのベース期間の変化によって行っており、2ndパルス期間中に溶滴を離脱させることでスパッタの低減を実現している(図2)。具体的には、1stパルスで溶滴形成後に2ndパルスピーク電流によって、その溶滴上部にくびれを形成し、パルスの電流立下りスロープ期間中に溶滴を離脱させる。従って、離脱後の溶滴は静かに溶融池に吸収されると同時に、

ベース期間の低電流アークが溶滴からワイヤ先端に移動するため、ワイヤ側の残留融液を吹き飛ばすことが極めて少ない。溶滴形成・離脱過程の各タイミングにおいて、最適なパルス電流を出力することにより、一定サイズの溶滴を規則正しく移行させることができ、短絡及び反発移行を抑制することができる（図3）。

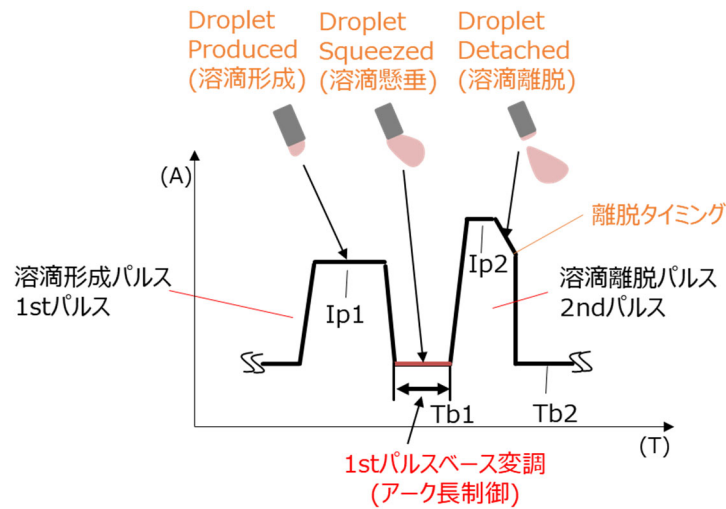


図2 従来法のパルス電流イメージ



図3 従来法の溶滴移行

3. 溶滴移行のメカニズム

さらに詳しく、パルス電流波形に同期した規則的なグロービュール移行について概説する³⁾。溶滴移行は、溶滴形成期間、懸垂期間、離脱期間の3つの過程を繰り返す（図4）。

図4(a)は溶滴離脱後に次の溶滴を形成する過程である。溶滴下端からは、アーク力が作用し、図中右上の方向に溶滴が押し上げられながら成長している。溶滴内には、その温度差や電磁力差に起因して下方から上方へ向かう対流が生じているように観察される。また、溶滴に作用する力としては、重力及び表面張力があり、更に下向きプラズマ気流によって生じる摩擦力が考えられる。溶滴上部には電磁ピンチ力が作用しており、この力の向きは、ワイヤ内部から溶滴・アーク柱へ流出する電流経路によって変化する。これら溶滴に作用する外力のワイヤ軸方向成分のバランスは、溶滴の形成及び離脱に大きな影響を与えるものと考えられる。Tp1初期段階ではワイヤ先端の溶融量が少なく、重

力が小さいため、アーク力による溶滴の押し上げ作用が優先的に作用する。また、ワイヤ内部に流れる電流 I_{p1} によって生じる電磁ピンチ力は、図に示す如く、常時、溶滴上部のくびれを形成させるように作用しているものと考えられるが、溶滴下方から上方への対流と溶滴を押し上げるアーク力がくびれの進展を抑制するように、溶滴上部に熔融金属を充填させるため、溶滴はくびれることなく成長する。

次に、(b) の T_{b1} においては、電流が I_{b1} に低減されるため、アーク力及び電磁ピンチ力が減少し、溶滴は自重により全体的に垂下形状に整形される。また、このときの溶滴内の対流は鎮まる傾向となる。

この状態に続く (c) の T_{p2} では、溶滴の自重に加え、溶滴の上部に電磁ピンチ力が急速に作用する。これに対して、 T_{b1} 期間が十分に確保された場合は、 T_{b1} 期間中に垂下状態で整形された適正サイズの溶滴下部から対流やアーク力がくびれ発生点まで到達するのにタイムラグが発生するため、電磁ピンチ力によるくびれの早期形成が可能になると考えられる。

一旦、くびれが形成されると、電流経路もくびれることから、電磁ピンチ力が増大していき、くびれが更に進展するが、この際に、 I_{p2} が維持されたままであると、強いアーク力によって、溶滴が大きく持ち上げられながら離脱することとなる。

したがって、くびれ形成後は、 I_{p2} からのスロープ期間によって電流を低下させ、溶滴の押し上げを抑制しながら、くびれを進展させることによって、変形の小さい溶滴を 2nd パルスの立下りスロープ期間中に静かに離脱させることが可能となる。

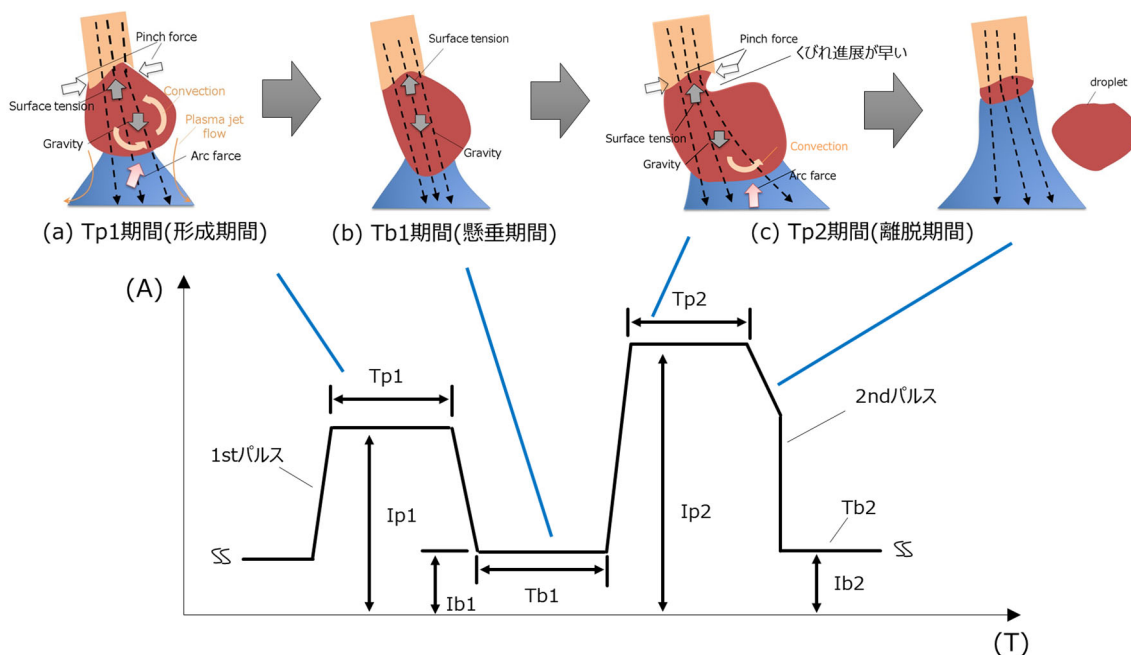


図 4 規則的な溶滴移行形態

一方、(b) T_{b1} 期間（懸垂期間）が不十分な場合、くびれの早期形成ができず、その後の溶滴離脱の安定性に悪影響を及ぼす（図 5）。すなわち、溶滴上部のくびれ形成や、安定な溶滴離脱を実現するためには、十分な T_{b1} ベース期間（懸垂期間）を確保し、その後のピーク期間 T_{p2} の開始直前に適正サイズの溶滴が自重によりワイヤ先端に懸垂整形されていることが重要となる。

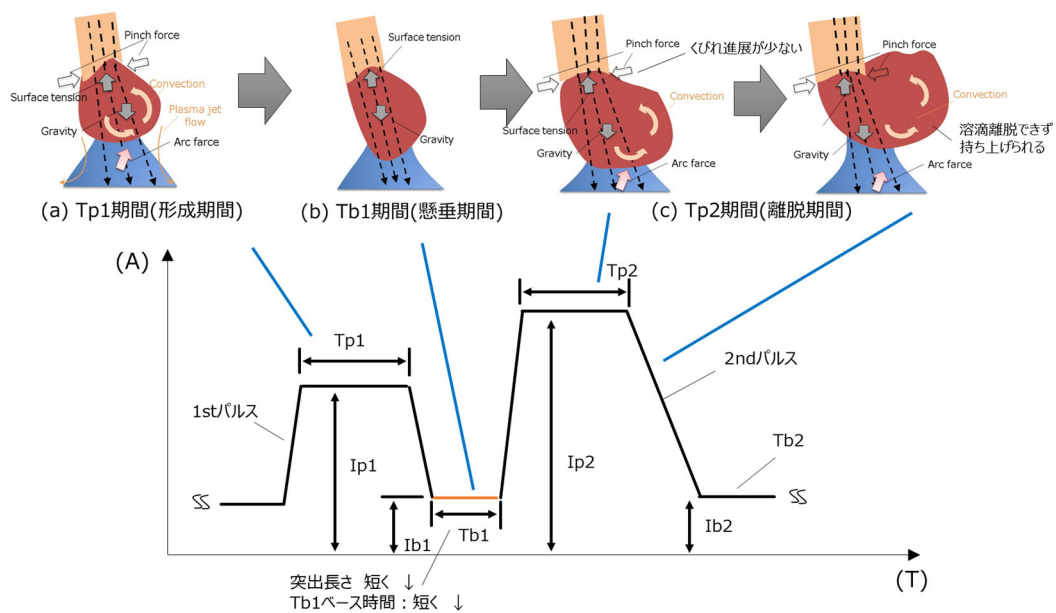


図5 不安定な溶滴移行形態

4. 従来法の課題

建築鉄骨分野に多用されるレ形開先の溶接継手では、継手品質を確保するためにウィービングを用いることが一般的である。特に高電流条件においては、開先内のウィービングに伴う突出し長さの変動によって、Tb1 期間（懸垂期間）を確保できなくなり、アーク反力を受けた溶滴が飛散スパッタとなる場合がある。

従来法を用いた溶接のスパッタ発生状況を高速度ビデオカメラ（HSV）にて示す（図 6）。ウィービングに伴い、アークが開先端部に接近する際に、溶滴移行が不安定となり、大粒スパッタが発生する様子が確認される。これらの飛散スパッタは反対側のダイアフラムに付着してしまうことが多い（図 7）。



図6 従来法のスパッタ発生状況

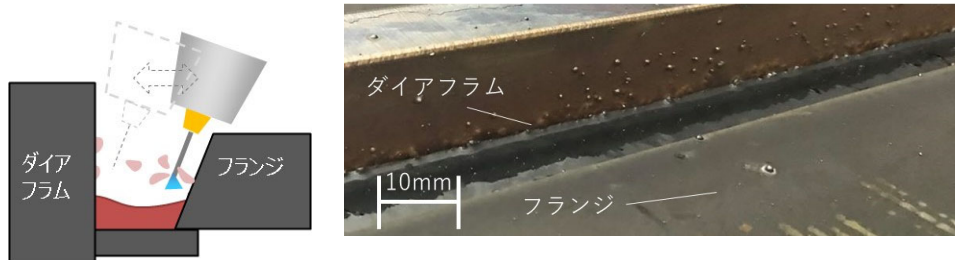


図7 ダイアフラムへのスパッタ付着状況

5. 新制御法の開発

5.1 新たな波形制御

前述のようにウィービングに伴い、アークが開先端部に接近する際、ワイヤ突出し長さが短くなり、ジュール発熱が不足するため、1stパルスのベース時間 ($Tb1$) が短くなる。そのため、十分な懸垂期間を確保できず、溶滴移行が不安定となり、大粒の飛散スパッタが発生するものと考えられる。

これを踏まえて、新たなアーク長制御法を採用した新制御法を開発した (図8)。従来法のベース変調によるアーク長制御にパルスピーク電流変調を加えたアーク長制御法である。アークが開先端部に接近する際、パルスピーク変調によるピーク電流が上昇し、ワイヤ突出長さが短くなることによるジュール発熱の不足を解消することにより、溶滴の懸垂時間 ($Tb1$) を十分に確保することが可能となった。そのため、適正なサイズの溶滴が懸垂整形され、溶滴上部のくびれ形成や溶滴離脱の安定性向上及びスパッタの低減を実現した。

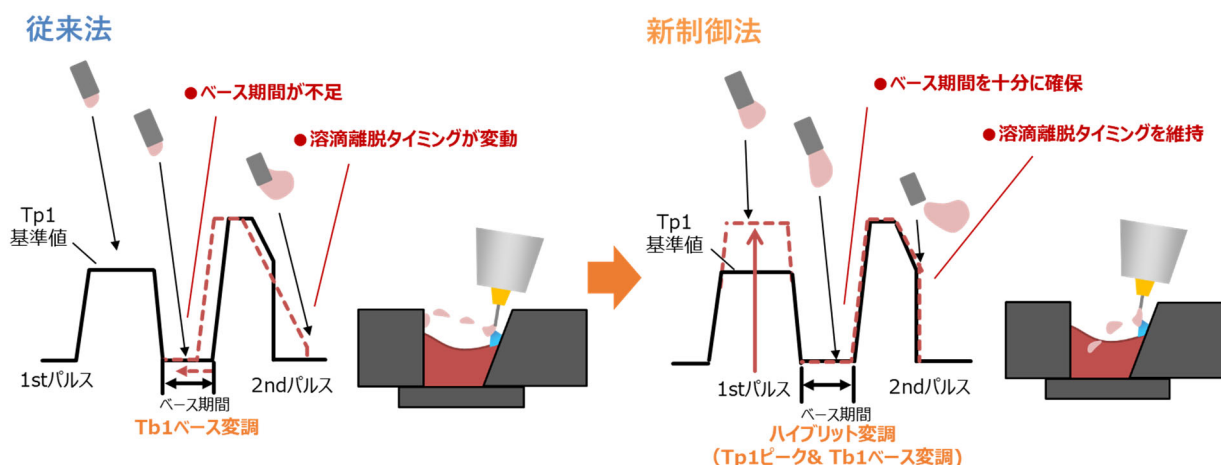


図8 パルス電流波形制御の模式図

新制御法を用いた溶接のスパッタ発生状況を高速度ビデオカメラ (HSV) にて示す。開先に接近した際にも十分な懸垂期間を確保できており、溶滴移行が安定している様子が観察される (図9)。

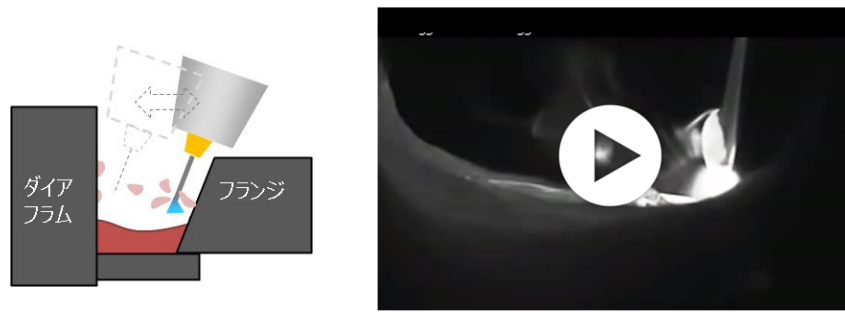


図9 新制御法のスパッタ発生状況

5.2 スパッタの低減効果

従来法と新制御法を用い、板厚 22mm の角形鋼管柱コラムコアにおけるスパッタ発生量の比較一例「定電圧 (CV) 溶接モードを 100%とした時のスパッタ発生比率」を示す (図 10)。

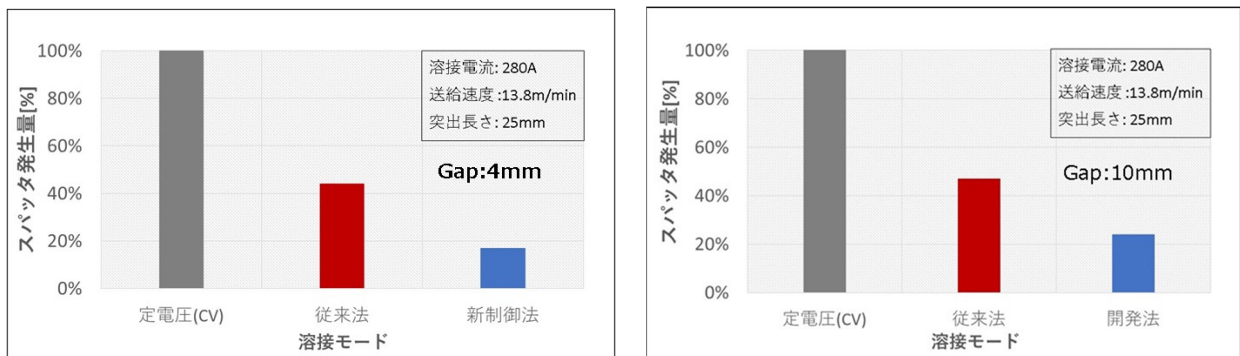


図 10 角形鋼管柱コラムコアの付着スパッタの比較

従来法に対して、新制御法ではスパッタ発生量を 50%以上低減できている。また、角形鋼管柱コラムコア (Gap7mm) の溶接部外観の一例を示す (図 11)。平行部および角部において、スパッタの低減効果が明確に認められる。

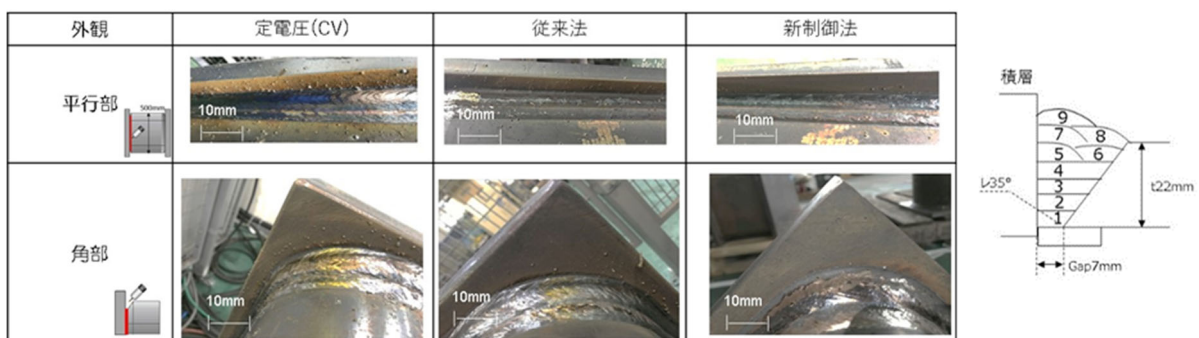


図 11 各溶接法のスパッタ付着状況 (Gap:7mm)

5.3 適用電流領域の拡大

新制御法は従来法のベース変調に加え、パルスピーク変調によるアーク長制御を採用することによって、十分な溶滴懸垂時間を確保でき、グローブ領域の高電流条件においても溶滴離脱の安定

性を向上させた⁴⁾。その結果、**図 12** のように従来の溶接電流 320A（ワイヤ送給速度 16.4m/min）から 340A（ワイヤ送給速度 18.0m/min）に適用電流領域の拡大が可能となり、建築鉄骨建造物の柱・梁接合部の高能率溶接に寄与することができる。

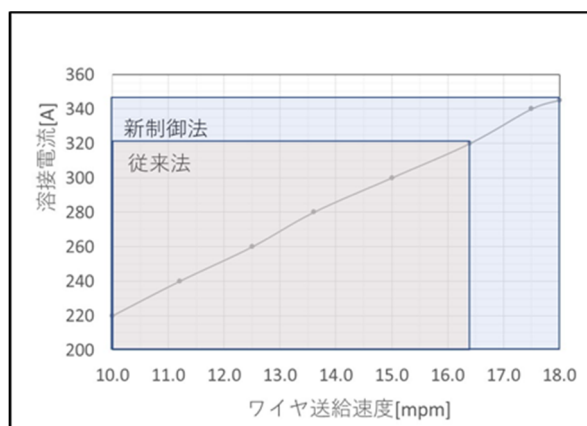


図 12 適用電流領域の比較

また、340A（ワイヤ送給速度 18m/min）領域における従来法と新制御法の溶滴成長の比較を**図 13**と**図 14**に示す。**図 13**の従来法では、離脱直前に溶滴の形成が不安定となるため、アーク直下の熔融池と短絡し、大粒のスパッタが発生する。一方、**図 14**の新開発法では、溶滴の形成と離脱が安定している様子が見られる。

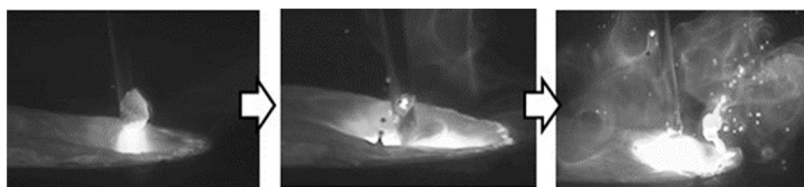


図 13 従来法の溶滴移行形態

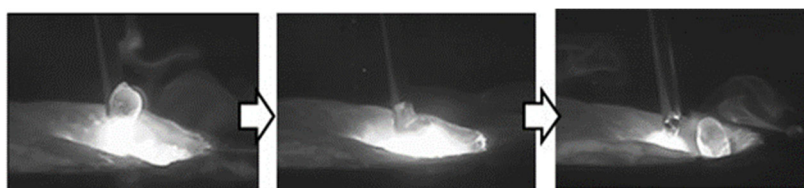


図 14 新制御法の溶滴移行形態

6. 専用溶接ワイヤの開発

適用可能な最大溶接電流領域が拡大するということは、適用可能な最大ワイヤ送給速度が増加することを意味する。そのため、溶接材料には安定したワイヤ送給性が求められる。

溶接トーチ内にワイヤ表面から発生する銅粉などが堆積し続けると、ワイヤ送給性やアーク安定性を阻害する。定期的な清掃や交換により、堆積物の影響は低減するが、ロボットシステムの連続運転性を考慮すると頻繁に清掃や交換を行うことは非効率的である。

新鉄骨溶接システムの新制御法専用ワイヤ FAMILIARC™ MG-56R (A) には、ワイヤ製造工程で特殊な表面処理が施されている。これにより、図 15 に示すとおり、高電流領域においても、既存のワイヤに比べて溶接トーチ内の堆積物が少なく抑えられるため、長時間の連続溶接に最適である⁵⁾。

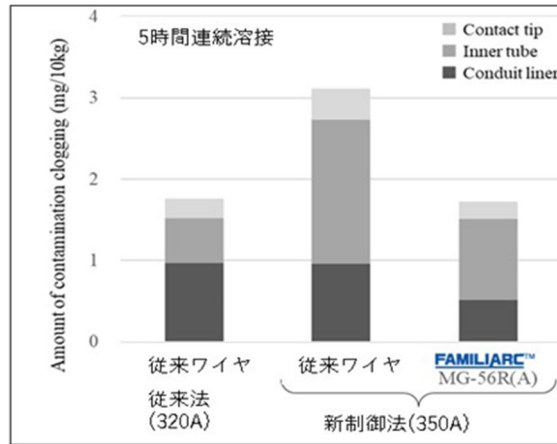


図 15 送給経路内の固形物詰まり量一例

7. 鉄骨溶接システムへの新制御法の適用効果

7.1 角形鋼管柱コラムコアの溶接施工条件開発

電流範囲を拡大した新制御法の活用により、周辺装置の見直しも含めた、新たな高能率溶接施工条件を開発した。従来通り 1 パス毎の入熱を 30kJ/cm 以下に制限し、従来と同等の溶接継手性能を維持しつつ、10%以上のサイクルタイム短縮を実現している。

一例として、角形鋼管柱 BCR 径口800mm、板厚 32mm、Gap7mm の 1 継手 (16pass) のサイクルタイム見積試算の比較を図 16 に示す。

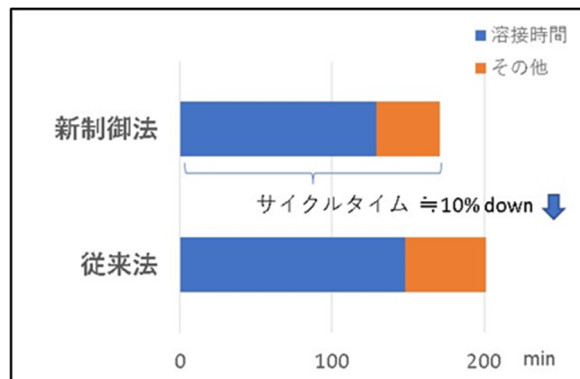


図 16 サイクルタイム見積試算比較

7.2 溶接継手性能

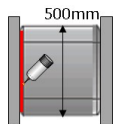
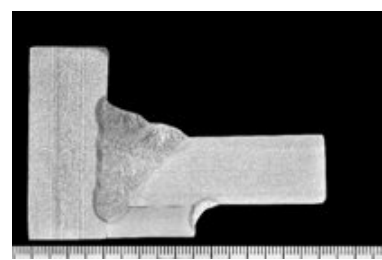
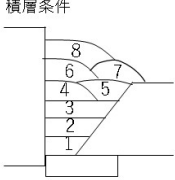
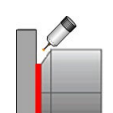

新たに開発した溶接施工条件を用いて、板厚 19mm の角形鋼管と通しダイアフラム継手を作製した。

溶接継手の全溶着金属の引張試験とシャルピー衝撃試験結果を表 1 に示す。また、断面マクロ写真を表 2 に示す。従来法と同等の機械的性質と、健全な溶込みが得られている。

表 1 溶接継手の機械的性能

	溶接金属の引張性能			溶接金属の衝撃性能
	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	0℃での吸収エネルギー (J)
新制御法	571	645	27	Avg.106

表 2 断面マクロ

	新開発法	Layer
平行部 		積層条件  1 st pass : C V welding 300 A, 13.8m/min 2 nd ~ 8 th pass: 280A, 13.6m/min Ext: 25mm
角部 		

8. 導入事例

新制御法を搭載した新型溶接電源“SENARC™RA500™、新型ロボット (ARCMANTM A60) 及び専用ワイヤ FAMILIARC™MG-56R (A) の組合せにより、新たな鉄骨溶接ロボットシステムが実用化された。このシステムは 2022 年 6 月に発売され、国内の多くの建築鉄骨ユーザーに導入されており、溶接現場の生産性向上、品質の安定化、作業性の向上に貢献している。一例として、「New REGARC™搭載鉄骨柱大組立溶接ロボットシステム」を紹介する (図 17)。詳しくは、以下の URL をご覧ください。

[新 鉄骨溶接ロボットシステム \(New REGARC™\) - YouTube](#)



図 17 New REGARC™ 搭載鉄骨柱大組立溶接ロボットシステム

9. おわりに

新波形制御プロセス New REGARC™の開発により、開先内における溶滴移行の更なる安定化とスパッタの低減を実現した。建築鉄骨現場の継手溶接の品質向上を実現する一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 山崎圭ほか、溶接技術, Vol.58 (2010), No.5, P80-84
- 2) 横田順弘ほか、R&D 神戸製鋼技報, Vol.63 (2013), No.1, P42-47
- 3) 佐藤英市ほか、溶接学会誌, Vol.84 (2015), No.4, P19-23
- 4) 藤本泰成ほか、ぼうだより技術がいど, Vol.513 (2022), No.4, P3-7
- 5) 戸川貴雄ほか、R&D 神戸製鋼技報, Vol.72 (2023), No.1, P27-32

<略歴>

徐 培 尔 (ジョー パイニ)

2008年 東京電機大学 理工学部 情報システム工学 卒業

2008年 TOTO株式会社 入社

2015年 株式会社 神戸製鋼所入社 溶接事業部門 技術センター

現在に至る