特集

アーク溶接の最新技術 — 溶接機器・溶接材料・シールドガスからのアプローチ —

アーク溶接の最新技術*

廣 田 幸 伯**

New Technology of the Arc Welding*

by HIROTA Yukinori**

キーワード アーク溶接, デジタル制御, 融合, モニタリング, 低スパッタ, 高速溶接, ACMIG

1. アーク溶接機器の最新技術

弊社アーク溶接機の歴史は1950年代に第1号機を発売させていただき50年以上が経過したり、1957年可動鉄芯トランス方式の交流アーク溶接機が初めて登場し、1970年代に可飽和トランス方式やスライドトランス方式の溶接トランスを搭載したアーク溶接機、続いてサイリスタ制御のアーク溶接機と様々な出力制御方式のアーク溶接機が登場してきた。1980年代にはマイコンを搭載したトランジスタによるインバータ式アーク溶接機が登場し、初めてアーク溶接ロボットが登場したのもこの時期である。

マイコン搭載当初は、動作シーケンスのみデジタル制御であったが、現在では出力波形制御・高速フィードバックさらにはエンコーダ搭載モータによるワイヤ送給制御や溶接条件設定の全領域でデジタル制御するフルデジタル溶接機が主流となっている。

溶接電源のインバータ周波数は、1次側インバータ周波数で最高100kHzとなり1秒間に10万回すなわち10μsに1回制御可能な超高速出力制御となっている。インバータ周波数の高周波化にともない溶接電源のトランスも小形・軽量化し、商用周波数50/60Hzの交流電源を溶接出力に変換する交流アーク溶接機と比較すると質量で約1/3（500A定格出力機 弊社製品比）となっている。また、インバータ周波数の高周波化と、高速デジタル制御回路を搭載し、弊社独自の3-state インバータ制御によるセミソフトスイッチング技術により溶接電源の力率も95%を超える値を達成しており、省エネ・高効率となっていることも特徴といえる（図1）。

溶接機の操作は、溶接電流ボリューム・溶接電圧ボリウ

ムにより出力調整が可能な遠隔調整装置（リモコン）が進化し、デジタルコントローラ（図2）で行うことができるようになり、溶接条件設定や溶接電流・溶接電圧の調整が可能であることに加え、設定がデジタル表示されるため溶接出力の再現性が確保できる。また、溶接条件を記憶させ、必要な際に再生する記憶・再生機能や、さらには波形パラメータやワイヤ送給量を微調整することも可能となっている。

図1 最新型フルデジタル溶接機 500GZ4

図2 デジタルコントローラ

*原稿受付 平成22年7月26日
**正 員 パナソニック溶接システム(株) Member, Panasonic Welding Systems Co., Ltd.

アーク溶接ロボットは、アーク溶接機とアーク溶接ロボットを「接続」あるいは「通信」で接続していた従来型から更に進化してきている。アーク溶接機とアーク溶接ロボットをともに開生産販売する弊社が「融合」というコンセプトで開発した、ひとつの頭脳（CPU）でロボットアーム動作からロボットコントローラに内蔵されたアーク溶接機出力制御まですべてをこなす溶接電源融合型のアーク溶接ロボット「TAWERS (The Arc Welding Robot System)」(図3)が2004年に登場し²⁾、特にここ5～6年でCO₂/MAG仕様からTIG, MIG, ACパルス、さらにはHEAT工法³⁾等さらなる進化を遂げてきた。この溶接電源はロボットメインCPUと溶接制御カードでダイレクトにバス接続され、従来比250倍速の高速データ通信となり、また溶接電源は前述のとおりインバータ周波数100kHzの超高速で出力制御し、DSP (Disital Signal Processor) による可変形電子リアクトルで緻密な溶接波形制御をフルソフトウェアで実現している。

前記「融合」によりアークセンサやアークモニタといった溶接の付加機能が容易に実現できる。従来アークセンサやアークモニタの機能は、溶接の様々な情報をハードウェア追加によりロボットが直接計測していた。ロボットと電源の融合により、溶接の情報は全てロボットの

図3 溶接電源融合型ロボット TAWERS

図4 プルフィーダとワイヤブースター

内部に存在するため、ハードウェアの追加無しにソフトウェアの追加、あるいは変更により情報の処理を変えるだけでアークセンサやアークモニタ機能が実現可能となったことも大きな特徴といえる⁴⁾。

「融合」による新機能の1つに「リフトアップ機能」があり、溶接開始時と終了時に効果を発揮する。溶接開始時は、送給される溶接ワイヤがワークにタッチした瞬間、ロボットアームをリフトアップさせ強制的に空間GAPを設け、確実に良好なアークイグニッションを実現する。溶接終了時もロボットアームをリフトアップさせワイヤが溶融プールに接触したまま終了することなく、溶接システムの生産性に大きな効果を発揮する。

「モニタリング機能」も搭載しており、ロボット操作を行うティーチペンダント画面内に溶接電流と電圧以外にも短絡周波数やパルス周波数、ワイヤ送給量やワイヤ送給モータ電流値等の数多くの溶接情報を各教示点のタイミングと合わせてグラフ表示され、ビジュアルに溶接状態を確認できる。また、溶接状況を文字データで蓄積する「ログ機能」は、日時、プログラム名、教示点名と合わせて前記溶接情報がデータファイル化され、このファイルはCSV形式で、LANやPCカードによりこれらの情報を取り出し、表計算ソフトにより様々なデータ処理が可能となっている。

最近では溶接ワイヤの送給性能をさらに向上させる周辺機器も登場している。ACサーボモータを使用したプルフィーダやワイヤ送給負荷を低減するワイヤブースターである(図4)。プルフィーダは溶接トーチ先端近傍に設置されているため、モータからトーチ先端までの距離が短く溶接ワイヤの高精度送給制御が可能となる。プルフィーダが溶接トーチ先端に配置されるため溶接ワイヤのスプールもしくはバック巻き部からの距離が長くなり

図5 SP-MAG 制御

図6 スパッタ発生量比較

溶接法	SP-MAG			Normal-Pulse			HD-Pulse		
	短絡領域 0~200A	グロービュール領域 200~280A	スプレー領域 280~	短絡領域 0~200A	グロービュール領域 200~280A	スプレー領域 280~	短絡領域 0~200A	グロービュール領域 200~280A	スプレー領域 280~
溶接速度	○	○	△	○	○	○	○	○	○
スパッタ	○	△	○	○	○	○	○	○	○
溶込み形状	○	○	△	○	△	△	○	○	○
アンダーカット	○	○	△	○	△	△	○	○	○
母材入熱	○	○	△	△	△	△	○	○	○
前GAP性	○	○	△	△	△	△	○	○	○
コメント	短絡移行領域で効果絶大			低中速度で低スパッタ溶接			高電流域で効果絶大		
総合評価	○	○	△	△	△	△	○	○	○

図7 HD-PULSE 溶接法

図8 スパッタ発生量比較

図9 MTS 制御法

送給負荷が大きくなりプルフィーダへの負荷が大きくなる。そのため溶接ワイヤの巻き部近傍にさらなるモータ（ワイヤプースター）を配置し一定トルクにて押し出す補助的な役割を担っている。これらにより、ワイヤ送給負荷が低減でき、軟鋼系ワイヤのみならずアルミニウムワイヤでも座屈することなく安定かつ高精度なワイヤ送給を実現できるようになった。このことも溶接の安定性向上に大きく寄与していると考えられる。

2. アーク溶接制御の最新技術

2.1 低電流短絡移行領域（SP-MAG 溶接法）

本短絡溶接法はスパッタの大幅低減と低入熱安定溶接を実現している⁵⁾。低電流短絡移行領域は弊社独自の SP-MAG 溶接法と2次スイッチング制御により溶滴の短絡開始と終了直前を瞬時に検知し（図5）、ヒューズ効果に

よるスパッタ発生量を従来比約1/5~1/10にまで大幅低減しています。また、溶滴の短絡開放直後に電流を重畳し、ワイヤ先端溶融の促進で短絡周期を早めることが可能となる。このため低入熱溶接となり、薄板GAP溶接の適用裕度も広がっている。

2.2 中電流グロービュール移行領域 MAG 溶接法（HD-PULSE 溶接法）

中電流グロービュール移行領域から高電流スプレー移行領域でパルス溶接をスプレー移行の溶接をした場合、スパッタは低減できるが母材への入熱が大きくなり、薄板やGAPを伴う溶接の場合、溶け落ちが発生する。また、高速溶接を行うとハンピングやアンダーカットといった問題が発生するため溶接電圧を低く設定し溶接を行うことが多い。その際、短絡回数が増加し、パルスピーク電流時に短絡状態になると大量のスパッタが発生する。従来の弊社特許技術 Dip-Pulse 溶接法からさらに発展し、パルス印加後短絡状態になると前述の SP-MAG 溶接法により短絡開放時に電流を低減することで大幅なスパッタ発生量の低減を実現している^{5,6)}。この溶接法を弊社で

図10 MTS-CO₂ スパッタ発生量と粒径比較 図11 MTS-CO₂ 溶接施工結果

は、Hyperdip-Pulse (HD-Pulse) 溶接法と呼んでいる (図7)。本溶接法よりスパッタ発生量はワイヤ送給量 9m/min の領域で、従来比約 1/4 にまで低減し、アンダーカットに対しても効果を発揮し良好な溶接ビードを実現している (図8)。

2.3 中電流グロービュール移行領域 CO₂ 溶接 (MTS-CO₂ 溶接法)

CO₂ 溶接のグロービュール移行領域の電流値以上では、短絡回数自体が少ないため、SP-MAG 溶接法の短絡制御はその効果が十分発揮できない。また、短絡が発生しなくともアーク期間中にもスパッタが多く発生する。そこで、各種混合ガスなどによるスパッタ低減やワイヤの特殊成分によるスパッタ低減とは異なり、一般的な軟鋼ソリッドワイヤを使用し、かつガスは 100%CO₂ で高電流・高速溶接時のスパッタを最小限とする制御方法が、溶滴移行安定化制御 (Metal Transfer Stabilization Control: MTS 制御) である⁹⁾。アーク期間中の出力波形に脈動波形を重ねさせることでワイヤ先端の溶滴に加わるアーク反力をコントロールしている (図9)。このことによりワイヤ先端の溶滴は一定周期での上下動を繰り返し、周期的な挙動となり、溶滴の成長を抑制し、短いアーク長での長時間短絡を抑制するとともに、アーク反力による溶滴の飛散を抑えることが可能となった。図10に示すように、CO₂ 溶接での高電流・高速溶接時のスパッタ発生量を 350 A 領域で従来のフルデジタル溶接機比約 2/5 と大幅に削減した。

アーク期間中に大きく成長した溶滴は、同じアーク長でも小さな溶滴と比較して短絡しやすいばかりではなく、短絡した場合、大粒で多量のスパッタとなって爆発

図12 TAWERS TIG トーチ形状

板厚 t 1.5・t 1.5 SUS304 重ね継手
溶接速度 80cm/min 溶接電流 280A

図13 TAWERS TIG ビード形状

図14 TAWERS ACMIG

的に飛散する。また、短絡しない場合でも、ワイヤから離脱した溶滴が溶融プールの外に飛散した場合にはスパッタとして母材に付着し、溶滴が大きいのが故に付着したスパッタは除去し難い。

MTS 制御を用いた CO₂ 溶接では、ワイヤから小粒の溶滴径で離脱させることが可能となった。大粒のスパッタほど MTS 制御によるスパッタ低減効果が大きいことが分かる (図10・11)。

2.4 高速 TIG 溶接

TAWERS TIG タイプでは、トーチ先端でのフィラーワイヤ加熱効果により、完全スパッタレスで高品位溶接な高速 TIG 溶接が可能となった (図12)。フィラーワイヤは、AC サーボモータにより高精度送給し、アーク分流作用とアークからの熱伝導によるワイヤ加熱効果により溶着効率が向上し、高速 TIG 溶接が実現できる (図13)。アークスタートは、「TAWERS」の前記リフトアップ機能を用いたタッチセンシングスタートを採用することで高周波ノイズフリーを実現し、「TAWERS」融合機

図15 TAWERS ACMIG 出力波形

図16 TAWERS ACMIG ビード形状

能による AVC 制御で電極-母材間距離を一定に保つことができ、ワーク歪あるいは複雑形状のワークにも高品位溶接が可能となった。また、従来の TIG フィラーシステムと比較しても溶接条件設定が容易な点も大きな特徴の 1 つとなっている。

2.5 アルミ MIG 溶接

TAWERS MIG タイプでは、AC サーボモータによるプルユニットとワイヤプースターによる高精度ワイヤ送給によりアルミニウムを高品質に溶接することができる

(図4)。「TAWERS」の高速応答、高速波形制御と安定したワイヤ送給により毎分 3m の高速溶接を実現し、またローパルスモードでは低入熱溶接が可能であり、ロボットのウィービング動作に同期した出力制御により板厚が異なる溶接にも「TAWERS」融合機能が効果を発揮している。前記リフトアップ機能により従来はアークスタートが困難であったアルミニウムでも良好なアークスタートを実現できる。また、外付の AC ユニットの接続することで交流 MIG 溶接を行うこともできるようになり、薄板アルミニウムに対してもまた GAP があるワークに対しても、ワイヤがマイナスとなる EN 比率を調整することで溶け落ちなく容易に施工することができるようになった(図15・16)。

3. 今後の方向性

電子デバイスやパワートランジスタの発展に伴い、溶接機やアーク溶接ロボットも進化を遂げ、アーク溶接を高精度に制御することが可能となってきた。

しかし、アーク溶接には、消耗電極式・非消耗電極式を含め、溶接材料や溶接ワイヤ・シールドガスなど種々多彩な溶接条件が存在する。さらには溶接ワーク形状や継手形状も種々多彩であり無限の組み合わせが考えられる。実用上これらに裕度を持って適用することが要求されていることが現実である。これら多岐にわたる複雑な溶接条件に対応でき、かつ簡単操作で効率的に作業していただける溶接機器開発を今後も継続して取り組んでいく必要があると考える。

参考文献

- 1) 廣田：「アーク溶接はどこまで進むか」，溶接学会全国大会講演概要，Vol.79 (2006)，P. F-3.
- 2) 向井：「スパッタ低減の取り組み」，溶接技術，Vol.52 (2004) 12月号.
- 3) 藤原：「HEAT 工法」，溶接技術，Vol.56 (2008) 10月号，P.87-92.
- 4) IWAKI：「Application of Arc Sensor to Robotic Seam Tracking」，Welding Guide Book II, P.II-80-84.
- 5) 藤原：「最近の低スパッタ溶接プロセス」，2009年1月 Vol.57 溶接技術，P.86-92.
- 6) 川本：「TAWERS のアーク溶接制御」，溶接技術，Vol.53 (2005) 12月号.