デジタル制御アーク溶接機に期待するもの*

平田 好則**

Innovation of Welding Related Manufacturing System by Using Fully Digital-Controlled Arc Welding Machine*

by HIRATA Yoshinori*

キーワード

デジタル制御アーク溶接機, ガスメタルアーク溶接, DSP, ワイヤ送給, 品質管理, モデリングとシミュレーション, 溶滴移行, 溶融池, 溶込み, IT

1. はじめに

アーク溶接電源のトランジスタ化は、1970年代中頃に英国のTWIにおいて初めて行われ、その後、ドイツなどのヨーロッパの国々、日本、アメリカなどにおいても実用化に向けた開発研究が行われた。とりわけ、日本ではチョッパー式のトランジスタ溶接電源がマグ溶接用として1980年にいち早く商品化され、引き続いてインバータ制御電源が登場した。これには、国内の電機メーカーが通信・電力などの市場規模の大きい半導体製品の開発を活発に進めていたため、性能の良いパワートランジスタ素子を比較的安価に入手できたことと、同時に、自動車や重工など溶接による組立て生産分野において、溶接プロセスの自動化・ロボット化へのニーズが高まりつつあったことが背景にある。

筆者らは1978年頃から、シリーズレギュレータ式のいわゆるアナログトランジスタ電源を用いて、ミグ・マグ溶接やティグ溶接におけるパルスアーク溶接現象を主として実験的に調べてきた^{1, 2)}。電流波形を自由に変えることができるので、パルスピーク電流値やパルス周波数を変えて、溶滴移行現象や溶融池の振動現象を高速度カメラで撮影し、解析した。なかでも、現在広く活用されている1パルス1ドロップ移行に関連して、筆者らは溶滴がワイヤ端を離脱する時間がパルスピーク電流値によって決定されることを明らかにしたが³⁾、ほぼ同時に、国内溶接機メーカー各社もその現象を確認するとともにスパッタ低減効果が大いことを明らかにし^{4, 5)}、パルスアーク溶接法とともにトランジスタ電源そしてインバータ電源が一気に普及した。その後、パワートランジスタやMOSFET, IGBTなどの電流制御素子とインバータ回路

の性能が向上し、高速・高精度の電流・電圧波形制御を行えるようになった。そして、国内外で数年前からデジタル制御アーク溶接機の商品化開発が進められ、次世代アーク溶接機として注目を浴びているが、実施工においてもその効果が明らかにされている⁶⁾。

このように筆者らが溶接現象や溶接機に関わってきた経緯を踏まえて、今回、編集委員会から本稿の依頼があったので、調査や論点の整理が十分ではないが、「デジタル制御アーク溶接機に期待すること」について、筆者の思いつくところを述べることにする。

2. デジタル制御アーク溶接機とは？

マグ溶接などのGMA（ガスメタルアーク）溶接では、溶接ワイヤが電極となる。電極である溶接ワイヤはアーク熱により溶融し、溶滴を形成して母材へ移行するので、アーク長やアーク発生位置が断続的に変化する。従って、ガスメタルアークはティグアークに比べると時間的・空間的に変動する熱源であり、移行現象の安定性は溶接品質と作業性に直結している。このため、世界各地の溶接機メーカーをはじめ、溶材メーカーやガスメーカー、大学・研究所などが、電源性能ならびにシールドガス組成、ワイヤ化学成分に注目して、生産性や品質の改善に寄与する溶接法を開発してきた。これらは、メーカーによってそれぞれ独自の名称をつけられ、その特長をアピールしながら、市場に投入され、製品や継手の種類、施工現場のニーズに応じて、その役割を果たしてきている。図1はこれまでに開発されたガスメタルアーク溶接法のいくつかを電流・電圧条件上にプロットしたものである。これらプロセスのキャッチフレーズは、溶滴移行・アークの安定化、アークの指向性向上、溶着量の増大、溶込み深さの増大、溶込み形状・余盛形状の改善など多岐にわたっており、実際の施工現場に導入したときに、具体的にどのような効果が発揮されたのか明らかでない。これには、

*原稿受付 平成17年9月20日

**正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Osaka University, Graduate School of Engineering

図1 さまざまなガスメタルアーク溶接法の電流・電圧の適用範囲

図2 デジタル制御アーク溶接機の構成

溶接機に付随する溶接プロセスを売るための商品戦略もあるが、本質的には溶滴移行などの溶接現象が定性的な理解にとどまっていることが最も大きな要因と考えている。

さて、次世代溶接機とされるデジタル制御アーク溶接機の動作原理について触れる。大きな特徴としては、図2⁷⁾に示すように電源出力の制御にDSP (Digital Signal Processor) が使用されるようになり、電力制御を行うインバータ部への指示が、DA変換を介さず、コンピュータから直接に行え、より高速動作が可能になったこと、そして、ワイヤ送給量をロータリーエンコーダなどで確実にセンシングしながら、コンピュータでデジタル制御できるので、信頼性のある安定なワイヤ送給が行えることである⁸⁻¹⁰⁾。また、たとえ、溶接中にワイヤ送給が変化しても電源が適切に対応し、安定なアークを維持する。したがって、ワイヤ送給に伴うさまざまな問題…たとえば、施工中の溶接箇所の変位や溶接姿勢の変化に伴って、ワイヤコンジットの曲率半径が変動し、送給抵抗が変化することで、アークが不安定になること。同一仕様の溶接機で、同一の溶接条件に設定していても、ワイヤコンジット長さによって、アークの安定性や溶接特性が異なったりする。…などがかなり解消される。これは、実験室においては十分把握できない問題であり、さまざまな環境で長時間溶接機が使用される実施工においては、品質管理上、かなり効果を発揮すると思われ、手直し量なども大幅に減少するものと期待できる。

図3 短絡移行プロセスの3次元シミュレーション
(軟鋼ワイヤ: 1.2mm 径, 溶滴サイズ: 2.3mm, 短絡電流: 接触1ms後に400A)

3. 溶接現象の制御への期待

デジタル制御アーク溶接機は、溶接電流・電圧を供給する電源性能が向上し、これまで以上にきめ細かい制御を可能にするだけでなく、ミグ・マグ溶接の信頼性のネックとなっていたワイヤ送給もデジタル化しているため、ハードとしてのポテンシャルが高い。すなわち、高品質溶接法とされるティグ溶接並みの安定なアークを発生しながら、高い溶着金属量を確保できる高能率・高品質溶接法になりうる。

しかしながら、ティグアークに匹敵する安定性を確保するためには、用途に応じて電流・電圧・ワイヤ送給の組み合わせを最適にするようなソフト面の整備を行う必要がある。すなわち、高温・高輝度の溶接部に生じている現象を定量的に理解し、デジタル制御の変数と結びつけなければならない。周知の通り、ここ数年の間に、コンピュータの性能が格段に向上し、複雑な溶接現象をモデル化し、シミュレーションできる環境が整ってきた。ここではモデル計算を通して得られた知見に基づいて、溶接現象制御への期待を述べることにする。

日本・欧米のいずれの溶接機メーカーも、これまで10年以上にわたって電流波形だけを調節することによって、短絡移行モードでのスパッタがなく安定な溶接を可能にする方策を検討してきたが、実施工においては適用範囲が限定されるなど、必ずしも満足した結果が得られていなかったと思われる。アルミのミグ溶接において、ドイツのDr. Huismannにより開発されたワイヤ送給の方向と速度を時間的に変化させるCSC法¹¹⁾がひとつのきっかけとなり、電流波形とワイヤ送給を同時に制御するアイデアが定着し、溶接現象の制御対象やその裕度が広がったが、やはり、これにはデジタル制御方式が威力を発揮する。

図3は3次元モデルにより計算した短絡移行時の溶滴の挙動である¹²⁾。ワイヤ端の溶滴は表面張力と電磁ピンチ力を駆動力にして溶融池に移行する。短絡時の電流が大きいと、図のようにブリッジが破断する寸前にくぼみが形成され、これが溶融金属の振動を誘起する。このブリッジが破断する時間は、短絡周期(周波数)を決定し、適用できる電流範囲を規定する。図4はワイヤ端の溶滴サイズとブリッジの破断時間の関係を表している¹³⁾。溶滴が大きくなると、破断時間が長くなるが、短絡電流が大

図4 短絡移行時のブリッジ破断時間と溶滴サイズの関係（軟鋼ワイヤ：1.2mm 径）

図5 溶融池振動の3次元シミュレーション
（ステンレス鋼，楕円形プール：長さ15mm，幅6.5mm，深さ3mm）

きくすることで、電磁ピンチ力を利用して、短くすることができる。溶滴はプールと接触する前にアーク熱によって形成されるので、アーク発生中の電流を制御することで、溶滴サイズを調節できる。したがって、原理的には電流波形を操作するだけでも、スムーズな移行を実現できるはずである。デジタル制御アーク溶接機では、さらに、溶滴がプールに接触したときに、ワイヤ送給を反転させ、ワイヤを引き上げて機械的にブリッジを破断させることもできるので、制御裕度が拡大し、これまでよりもかなり安定な短絡溶接…短絡移行を周期的に繰り返すだけでなく、たとえば、短絡移行と1パルス1溶滴移行を組み合わせたものも含めて…が実現できると期待しており、商品化されているものもある¹⁰⁾。

しかしながら、アイデアを実用に耐えうるプロセスとして、より確実に実現しようとする、より高度な溶接現象のシミュレーションが必要となる。上述した計算結果はプール表面が水平と仮定したもので、実際の溶融池はピンチ力やアーク圧力などを駆動力として流動しており、この影響を無視できない。図5は溶融池表面にアーク圧力がパルス的に作用したときに誘起される振動をシミュレーションした例である¹⁵⁾。静止していたプールに圧力が作用すると、振動モード・周波数は、溶融池の形状、幅・長さ、アーク圧力が加わる位置に依存して異なる。短絡移行の場合、溶滴とプールの接触のタイミングが重要であり、メカニズムを明らかにするには、プール振動の影響も考慮したシミュレーションをする必要がある。

図6はアルゴンガスシールドのミグアークモデルによる計算結果である¹⁶⁾。電流値が低い場合、グロービュラー移行となり、溶滴移行に伴ってアークプラズマの形状や大きさが変化することが分かる。一方、電流値を高くすると、ワイヤ先端が引き延ばされた形のスプレー移行となり、溶滴移行に伴うアークプラズマの変動も小さいこと

が分かる。このワイヤ端の溶融金属の形状や離脱する溶滴の大きさは、液体金属の流動性だけに注目すると、溶融金属の粘性や表面張力が大きく支配するが、より深く考えると、ワイヤはアークによって溶かされ、離脱力となる電磁力は電流経路が支配するので、プラズマガスの熱伝導率や導電率などが大きく影響することになり、シールドガスの種類によってワイヤ溶滴や移行状態を変えることができる。このように、溶滴移行に伴うGMAアークの形状変化、すなわち、母材にとっての熱源の大きさや入熱量、アーク圧力なども予測できるようになってきた。図7はティグ溶接における溶融池内の流速・温度分布の計算例を示す¹⁷⁾。この計算では溶融池表面は平坦であると仮定しており、アーク圧力や溶滴移行によるプールの凹みや振動などを考慮していない。基本的には、溶融池表面から流入する入熱分布を与えると、溶込み形状や温度分布などを予測することができるので、溶滴移行を伴うガスメタルアーク溶接にも適用できる。筆者らは、現在、溶融池表面の変形も含めたモデルの構築を進めており、次の段階としてアーク挙動や溶滴移行も組み合わせたシミュレーションが可能になると考えている。したがって、コンピュータあるいはマイクロプロセッサのなかに溶接現象をデジタル化することができるわけで、将来、ソフトウェアの整備とマイクロプロセッサの高性能化が進展すると、バーチャルな溶接現象を現出することも可能になる。デジタル制御アーク溶接機においては、マイクロプロセッサが電流・電圧・ワイヤ送給を制御しており、シミュレーションと実際の溶接状況を併用することで、安定で欠陥のない高品質な溶接部を確保することができるように考えると考えられる。

また、ハード面から見たデジタル制御アーク溶接機の進化の方向として、電流・電圧・ワイヤ送給に加えて、溶接トーチに注目し、ワイヤ送給、シールドガス供給、

(a) 100A

(b) 250A

図6 溶滴移行を伴うミグアークプラズマのシミュレーション (軟鋼ワイヤ1.2mm 径)

図7 ティグ溶接における溶融池対流の3次元シミュレーション (電流 150A, アーク長 3mm, 溶接速度 5mm/s, ステンレス鋼, 硫黄含有量 250ppm)

アーク発生という機能に加えて、センシング機能を持たせることが考えられる。すなわち、実際の溶接状況を実に捉えるためには、溶接電圧だけでは情報量が足りないと考えられ、それを補完する物理量を確実にセンシ

グする必要がある。CCD カメラやセンサーなど周辺デバイスの性能が急速に向上しており、汎用溶接機による溶込み形状や余盛形状のインプロセス制御も夢ではなくなる。

4. おわりに

いまや、携帯電話などITが普段の生活の中にさまざまな形で利用されており、製造各分野のシステムにおいても、効率化や品質管理を目的にIT化へのニーズは大きく、工場規模に応じた取組みがなされている。すなわち、専用のコンピュータを使用しなくても、携帯電話で施工データ管理をしたり、ひとつの施工現場から他の現場へ溶接条件を転送し、同時に溶接機にインストールすることなどが検討されている。デジタル制御アーク溶接機は、マイクロプロセッサを頭脳としているので、汎用溶接機として広範囲に活用されるようになると、インタフェースやソフト面の整備も進み、家電製品と同じような使い勝手となり、工場規模の小さいところでも製造管理や省エネなどさまざまな効果を生み出すと考えられる。しかしながら、本来の溶接機の使命である溶接品質を確保し、生産効率を高めるためには、さらなる溶接現象の究明が必要であると考えている。

参考文献

- 1) 丸尾, 平田, 野田: パルス MIG 溶接における溶滴移行とビード形成におよぼす電流波形の効果, 溶接学会論文集, Vol. 2 (1984) No. 1.
- 2) 丸尾, 平田: パルス TIG 溶接におけるビード形成現象, 溶接学会論文集 Vol. 3 (1985) No. 2.
- 3) 丸尾, 平田: 電流制御アーク溶接に関する研究, 溶接アーク物理委 80-436 (1980).
- 4) 岡田, 山本, 西川: MIG パルスアークにおける溶滴のスプレー化条件, 溶接アーク物理委 80-437 (1980).
- 5) 植栗, 田畑, 小村, 平本, 島田, 水野, 鶴飼: トランジスタパルス制御によるノンスパッタマグ溶接法, 溶接アーク物理委 80-446 (1980).
- 6) 中野, 松田: アーク溶接のスパッタレスと高品質溶接への取り組み, 溶接技術 Vol. 53 (2005) No. 8.
- 7) 三田: わが社のイナートガスアーク溶接機の現状と将来展望, 軽金属溶接 Vol. 43 (2005) No. 4.
- 8) 濱本, 川本, 米森, 印南: デジタルアーク溶接機の開発, 溶接法ガイドブック 5 「溶接プロセスの高効率化」 (2004) II-99, 溶接学会溶接法研究委員会編.
- 9) 全, 上山, 原田: 最近のデジタル制御イナートガスアーク溶接機の進展, 軽金属溶接 Vol. 43 (2005) No. 4.
- 10) 古川: 欧州におけるイナートガスアーク溶接機, 軽金属溶接 Vol. 43 (2005) No. 4.
- 11) G. Huisman: Introduction of a new MIG process-Advantage and possibility, IIW Doc. 212-952-99 (1999).
- 12) Y. Hirata, N. Ando, T. Osamura, M. Onda and T. Ohji: 3D Numerical Model of Short-Circuiting Transfer Process in GMA Welding, Mathematical Modelling of Weld Phenomena Vol. 7 (2005).
- 13) 平田, 長村, 恩田, 安藤, 黄地: 短絡移行プロセスのモデル化, 溶接学会論文集 Vol. 22 (2004) No. 2.
- 14) K. Himmelbauer: The CMT-Process-A revolution in welding technology, IIW Doc. XII-1875-05 (2005).
- 15) Y. Hirata, S. Kunishige, M.J.M. Hermans, B.Y.B. Yudodibroto, T. Ohji, G. den Ouden and I. M. Richardson: 3D Numerical Model of Weld Pool Oscillation in GTA Welding, IIW Doc. 212-1042-03 (2003).
- 16) Y. Hirata, K. Ohnishi, K. Hiraiwa and T. Ohji: Numerical Model of Arc plasma with Metal Transfer in Argon Gas Shielded Metal Arc Welding, IIW Doc. 212-1076-05 (2005).
- 17) Y. Hirata, Y. Asai, K. Takenaka, S. Kunishige, S. Ohgaki, F. Miyasaka and T. Ohji: 3D-Numerical Model Predicting Penetration Shape in GTA Welding, Materials Science Forum, Vols. 426-432 (2003).

刊行案内

溶接法ガイドブック 5

溶接プロセスの高効率化

平成 15 年 6 月 30 日発行

(社) 溶接学会

溶接法研究委員会編

A4 版 401 頁

価格 8,000 円

<お問い合わせ先>

(社) 溶接学会

東京都千代田区神田佐久間町 1 の 11

Tel. 03-3253-0488 Fax. 03-3253-3059