特集

溶接・接合における情報デジタル化の潮流

第Ⅳ部 企業における溶接・接合の情報デジタル化とその活用

デジタル化とビジュアル化の融合による次世代型アーク溶接電源*

恵良 哲生**, 上山 智之**

恵良 哲生

上山 智之

Arc Welding Power Source of Next Generation by uniting Digitalization and Visualization*
by ERA Tetsuo** and UHEYAMA Tomoyuki**

キーワード デジタル, ビジュアル, GMA溶接, シミュレーション, 熱源モデリング, アーク長制御

1. はじめに

1990年にデジタル化の先駆けとしてマイコン制御による高機能・高性能溶接電源が開発されて以来, 20世紀末には制御回路の大部分がデジタル化され, 最近では, 高速制御デバイスを用いた出力制御の高速・高精度化が積極的に行われている¹⁾. 時を同じくして, 高速通信デバイスや, 視認性に優れた表示デバイスが安価で入手できるようになり, 溶接ロボットのティーチペンダントにグラフィカルユーザインタフェースが採用されたのを始めとして, 溶接ラインの工程・品質管理のビジュアル化が進められている²⁾.

溶接プロセスのビジュアル化は, 複雑な溶接プロセスを直感的に捉え, 理解するために有効な手段であり, 今後の溶接機器の進歩に大きく寄与するものと思われる. 本稿では, アーク溶接電源のデジタル化と溶接プロセスのビジュアル化について論じ, これらの融合による溶接電源の今後について考える.

2. デジタル制御化による溶接性能の向上

アナログ制御時代のカスシールドアーク溶接電源の溶接性能は, ハードウェアに大きく依存していた. 出力電流領域によって溶滴の移行形態が変化するため, それに応じた最適な二次側のリアクトル値が異なることが最大の理由であり, 全電流域で最適な溶接特性を有する溶接電源の開発は極めて困難であった. Fig. 1 は, 個々の現象の動作周波数あるいは時定数に相当する時間の概略範囲と,

溶接機器の制御速度を比較したものである³⁾. 溶接電源はアークを安定化する役割を担っているが, アーク長制御はワイヤ溶融速度の制御と等価であり, アークの安定性を高めるためには, 溶滴移行の制御も必須である.

よって, 定電圧特性溶接電源の制御性能を向上させるためには, 従来のように出力電圧を制御して間接的に出力電流を制御するのではなく, 高速過渡応答で溶接電流を直接制御することが理想である. 現在では, 高速演算素子と大容量・高速スイッチング素子の出現によって溶接電源がデジタル化され, 10~100 μ s のオーダーで出力電流波形の細部まで直接制御できるようになっている. その結果, アーク現象と密接に関係する電流波形パラメータを直接制御することで, 全電流域で最適な電源特性を実現し, 溶接電源の性能は飛躍的に向上した. 更にアーク長制御には, 高速演算素子によるデジタルフィルタを採用し, 電圧情報に含まれる陰極点の挙動等による外乱電圧を排除して, 安定したアーク長制御を実現できるように

Fig. 1 溶接現象の動作時間と溶接機器の制御速度

*原稿受付 平成 19 年 11 月 30 日

**正 員 (株)ダイヘン Member, DAIHEN Corporation

した。

溶接電源の性能向上には、Fig.1 に示したハイスピードビデオ (以下、HSV) の撮影速度の高速化も大きく寄与している。最近のシミュレーション技術を用いたアーク物理現象の研究は目覚ましく進歩しているが、複雑・難解な現象が十分に解明されているとは言えなかった時代においても、アーク現象を直接視覚的に観測することによって種々なプロセスや応用技術が開発されてきており、アーク現象のビジュアル化は、溶接電源の性能向上により一層大きな役割を持つようになってきているとも言える。

3. 溶接プロセスのビジュアル化

3.1 ビジュアル化による施工・品質管理

溶接施工現場では、溶接中の電流・電圧挙動、ワイヤ送給速度および送給負荷変動等の溶接品質に係わる施工情報を、溶接ロボットのティーチペンダントやパーソナルコンピュータ (以下、PC) で、リアルタイムかつグラフィカルに表示する等のビジュアル化が推進されてきた。現在では、高速通信デバイスの発達により、溶接ラインで稼働しているロボットや溶接電源の通信ネットワークを構成することが可能である。これにより、ロボットを含む全溶接機器のモニタリング情報を集中管理することで、事務所に居ながらにして、溶接ラインの施工管理を行うことが可能となっている。Fig.2 に、その一例を示す。

リアルタイムで収拾した施工情報は、溶接条件の見直しが必要なラインを特定したり、溶接不良発生時の原因を特定することに利用したりする等、品質管理に役立てることができる。すなわち、溶接施工情報のビジュアル化は、施工・品質管理に大きく貢献することとなる。

3.2 アークプロセスシミュレーション

溶接品質の向上には、溶接プロセスに関するノウハウ・技術が不可欠である。しかし、21世紀に入って少子・高齢化が大きな社会問題となっており、ノウハウの継承や技術の伝承が緊急かつ重要な課題となっている。このような問題を解決するための有力なツールとして、アーク溶接プロセスシミュレーションが挙げられる。

Fig.2 溶接ライン集中管理システム

アーク溶接プロセスのシミュレーションは、応力／歪み解析やビード形状の予測等の分野で盛んに研究されており、既に市販ソフトウェアも多数存在している。欧州では主要な自動車の完成車メーカーでの適用事例が数多く紹介されており、生産技術の現場に広く浸透していることが伺える。国内の自動車／二輪車業界でも、ほぼ全ての主要メーカーにおいて導入実績があると言われている。更に厚板溶接の分野でも導入が進んでいるようであるが、国内の導入事例の紹介例は少なく、どの程度現場で実際に活用されているか推し量ることは難しい。

応力／歪み解析を行うためには入熱情報が必要であり、一般に、簡略化された熱源モデルが組み込まれていることが多い。しかし、簡略化されたモデルでは時々刻々に変化する非線形なアーク物理現象を十分に表現しきれないため、数値計算による結果(マクロ断面)と実験結果による結果を一致させるフィッティング作業工程を必要とし、解析効率の向上を妨げている。一方、溶接品質管理上、溶接結果であるマクロ断面の評価は極めて重要な事項であり、ビード形状・マクロ断面がフィッティング作業なしで精度良く予測できれば、応力／歪み解析の効率や精度が向上するばかりではなく、ノウハウの継承や技術の伝承問題の解決にも大きく貢献し、生産現場における品質管理の効率化を一層向上させることができる。

アーク溶接における熱源は、紛れもなくアークである。よって、精度の良いアーク溶接の熱源モデルを構築するには、アーク現象を精度良く表現する数値モデルを構築せねばならない。一般に、アーク現象のモデリングには、アークプラズマモデル、溶滴移行モデルおよび溶融池モデルの3モデルに分けて論じられることが多い^{3~7)}。いずれの研究も、アーク物理現象の理解を助けるために、数値計算結果をビジュアル化することで、研究結果をわかりやすく解説していることが特徴である。例えば、田中ら³⁾は、熱的ピンチ効果によるアークの緊縮メカニズムを、シールドガスの物性として比熱が最も寄与する因子であることを明らかにする過程で、仮想的な比熱や熱伝導率を与えたArガスを想定した数値計算を行い、その結果をビジュアル化することで、アークが緊縮する様子の違いを分かりやすく解説している。

国内におけるアーク物理現象に対する個々のモデル研究は目覚ましく進歩しているが、ビード形状を含めた実用レベルのアーク溶接プロセスの数値計算モデルを構築するためには、次の2つの課題を解決することが必要である。

- 1) 演算時間の短縮
- 2) 統一モデルの開発

オフラインでビード形状を予測することは、生産性を高めるためにも重要であるが、演算時間が短時間であればある程その効果が期待できる。著者らの知る国内の研究事例では、ワンパスのビード形状の予測でも最短で約1時間を要しているのが現状である。また、国内での研究では統一モデルの完成に至っていないようである。しかし国外に目を向けると、最近、H G Fan と R Kovacevic ら⁸⁾が、GMA 溶接における溶滴移行現象を統一モデルによって数値解析した事例が発表されている。筆者らも、最近

GMA 溶接における統一熱源モデルを開発しビード形状予測に適用したので、その結果について次項で報告する。

4. 統合化アークプロセスシミュレータ

4.1 モデル構成

前項で述べた3つのモデルを統合し、入熱演算精度の向上とビード形状の高速演算を実現した、統合化アークプロセスシミュレータのモデル構成図を Fig.3 に示す。本モデルは、熱源サブモデルとして前記の3モデルを1つに統合し、ビード形状や溶け込み形状を予測するモデルは、熱流サブモデルと自由表面サブモデルの2つから構成している。後述するように、熱源サブモデルでは、時々刻々変化する溶接電流およびアーク電圧に基づいた入熱計算を行い、熱流サブモデルでは入熱情報をもとに熱伝導方程式を解き、自由表面サブモデルでは熱源モデルで計算された溶接電流からアーク圧力を求め、表面張力や重力の影響を考慮しつつ、裏波を含めたビード表面形状の計算を行う。熱流モデルと自由表面サブモデルの間では、熱源サブモデルで算出した固層と液層の境界を示す溶融境界情報と、自由表面サブモデルが求めたビード形状に関する幾何学情報を相互に伝達しあうことで、ビード形状の数値計算を行う。熱流サブモデルと自由表面サブモデルについては、モデルを2次元近似して計算することで、さほど精度を落とすことなく、演算の高速化を図っている。例えば、Dual Core 2.0 MHz, 1 GB Memory を搭載した PC を用いた場合、約60~90秒で計算結果を得ることが可能である。

4.2 熱源サブモデルの高精度化

Fig.4 に、熱源サブモデルとその入出力パラメータの関係を示す。熱源サブモデルでは、後述する溶接電源波形制御情報を含め、11種類以上のカテゴリに及ぶ入力パラメータを与えることによって、瞬時電流値および電圧値をはじめとして、瞬時電力の値と離脱した溶滴が持つエンタルピーから求める入熱量、更には、アーク長情報から算出した熱分布パラメータを出力することが可能である。熱源サブモデルで計算された入熱情報は、時系列の入熱情報として出力することによって、先に述べた応

力／歪み解析ソフトウェアとリンクさせることもできる。

瞬時電流値の計算においては、溶接電源の波形制御情報に基づいて、インバータ制御溶接電源の2次側負荷特性を考慮することで、数値計算精度の向上を図っている。瞬時電圧 $U_{source}(t)$ は、Fig.5 に示すように、出力ケーブル部の電圧降下 U_{cable} 、チップ内給電部接触抵抗による電圧降下 U_{cont} 、ワイヤ突き出し部の電圧降下 U_{cat} 、陽極電圧降下 U_{an} 、アーク柱電圧降下 U_{col} 、陰極電圧降下 U_{cat} 、および2次側リアクトルによる電圧降下に分解して、それぞれの値を個別に理論計算した後、得られた個々の値を合計して瞬時電圧とする。瞬時電圧（アーク電圧）の値を計算することによって、溶接電源の出力側負荷についての計算精度も向上し、結果として瞬時電力の計算精度が向上する。これら各部位電圧の算出方法は、参考文献⁹⁾にその概要が示されているので、そちらを参照されたい。

以上のように数値計算される熱源モデルの特徴は、フィッティングパラメータを必要とせず、ワイヤ径やシールドガス組成等を変更しても、同じ計算精度で入熱計算を行うことができることである。更に、本熱源モデルには溶接電源の波形制御としてのアーク長制御情報も含まれているため、ワイヤ溶融モデルの導入により、設定電圧の変更や、ワイヤ突き出し長の変更に対応することも可能である。

4.3 ユーザインタフェース

本アークプロセスシミュレータには、ユーザインタフェースとしてグラフィカルユーザインタフェース（以下、GUI）を採用しており、複雑なマニュアルを熟読しなくても、各種入力パラメータを簡単に設定することができる。Table 1に、GUIにより設定可能なパラメータの一覧

INPUT	MODEL	OUTPUT
1. ケーブル		1. 電流 $I(t)$
2. 溶接ワイヤ, 母材		2. 電圧 $V(t)$
3. ワイヤ径		3. 電力 $\dot{P}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} U(\tau) I(\tau) d\tau$
4. シールドガス		4. 溶滴のエンタルピー H_d
5. 突き出し長さ		5. 入熱 $Q(P, H_d)$
6. ワイヤ送給速度		6. アーク長 l_a
7. 溶接プロセス種別		7. 熱分布パラメータ $r_f(l_{gap}, I)$
8. 直流プロセス電圧 (電流) 波形		8. 安定性 短絡, 燃え上がり
9. パルスプロセス電流波形		
10. 溶接電源の一元パラメータ情報		
11. 溶接電源のアーク長制御情報		

Fig.4 熱源モデルと入出力パラメータ

$$U_{source}(t) = U_{cable} + U_{cont} + U_{wire} + U_{an} + U_{col} + U_{cat} + L \frac{dI}{dt}$$

Fig.5 端子電圧を構成する各部電圧の定義

Fig.3 モデル構成概要

を示す。

Fig.6に、本シミュレータのパルス条件設定画面の一例を示す。母材、トーチ、継ぎ手情報等を3次元表示することで、溶接姿勢も簡単に設定することが可能となっている。Fig.7には、パルスマグ及びミグ溶接における瞬時電流値と電圧値の計算結果を波形として表示した例を示

Table 1 設定可能パラメーター一覧

溶接機器	電源種別、ワイヤ種別、ワイヤ径、突き出し長さ、シールドガス組成、ケーブル長/断面積、電圧検出位置（トーチ側/母材側）他	
母材	母材材質	
継ぎ手	突き合わせ/重ね/T隅、板厚1/板厚2、ギャップ長、目違い、ラップ長他	
姿勢	下進角、水平へ立て向き、前進/後退角、狙い角、狙い位置	
溶接条件	パルス	溶接電流/ワイヤ送給速度、電圧、溶接速度、パルスピーク電流、パルスベース電流、パルスピーク時間、パルス立ち上がり時間、パルス立ち下り時間、アーク特性
	パルスなし	溶接電流/ワイヤ送給速度、電圧、溶接速度

Fig.6 ユーザーインターフェース例

Fig.7 瞬時電流・瞬時電圧数値計算例

Fig.8 ビード形状の3D表示例

す。なお図中の●（下段電流波形上に付記した○で囲まれた中にある小さい黒点）は、溶滴がワイヤ端から離脱したタイミングを示している。パルス電流からベース電流への移行時に溶滴が離脱することを示しており、溶滴の1パルス1ドロップ移行が着実に実現されていることが分かる。Fig.8は、軟鋼のパルスマグ溶接におけるビード形状についての予測結果を3D表示したものである。この3D表示では、マウスの操作により視野角や表示倍率を簡単に変更することで、溶融池部を拡大したり、マクロ断面を詳細に観察したりすることができる。また2D表示も可能であり、その場合には、各断面サイズを画面中に直接表示することが可能である。

4.4 数値計算結果

4.4.1 入熱数値計算結果

軟鋼ソリッドワイヤ(JIS YGW15相当・ワイヤ径φ1.0 mm)を用いたパルスマグ溶接において、シールドガスを80% Ar + 20% CO₂、母材をSPCC材として、ワイヤ送給速度を6.0 m/min、溶接速度を60 cm/minに設定し、ワイヤの突き出し長を10mmから22mmまで、0.6mm/secの速度で変化させた場合について、実際の溶接実験で得られた溶接電流ならびにアーク電圧波形と数値計算で求めたそれらの結果を、Fig.9に比較して示す。溶接実験で得たアーク電圧波形には若干のノイズ成分が含まれているものの、両者の溶接電流およびアーク電圧波形は比較的よく一致している。

Fig.10に、Fig.9と同様にして求めた、ワイヤ突き出し長とパルス周波数の関係を示す。突き出し長が長くなるにつれてジュール発熱によるワイヤ溶融量が増加する。溶接電源はパルス周波数変調方式でアーク長制御を行っているため、パルス周波数は突き出し長の増加にともな

Fig.9 瞬時電流・瞬時電圧波形の比較例

って減少する。実際の溶接実験で得られたパルス周波数は、いずれの突き出し長においても、数値計算で求めたパルス周波数よりやや高い値を示すものの、その差は精々10%程度であり、良好な結果を示していると言える。

また Fig.11 には、同様に、突き出し長が変化する過程における平均電力の変化について比較した結果を示す。突き出し長が長くなるに従いパルス周波数が低下して、平均溶接電流は減少する。電力は、溶接電流とアーク電圧の積である。従って、一定に制御された平均アーク電圧と徐々に減少する平均溶接電流から、平均電力はやはり一定の傾きで減少することとなる。この様子も、10%以内の誤差で数値計算できている。

Fig.10 パルス周波数の比較

Fig.11 平均電力の比較

	Simulation Result	Exp. Result (1)	Exp. Result (2)	Exp. Result (3)
(a) 30cm/min				
(b) 40cm/min				
(c) 80cm/min				
(d) 90cm/min				

Fig.12 ビード形状の比較

4.4.2 ビード形状の予測結果

ワイヤ径 $\phi 1.6$ mm の A5356 ワイヤを用いた重ね継ぎ手のパルスミグ溶接において、シールドガスを100% Ar、母材を板厚 4.0 mm の A5052 材として、ワイヤ送給速度を 5.5 m/min 一定とし、溶接速度を 30~90cm/min の間で 4 種類変化させた場合について、実際の溶接実験から得たマクロ断面と数値計算で得たマクロ断面の計算結果を、Fig.12 に比較して示す。図中左から一列目が数値計算結果、2~4 列目が溶接実験の結果である。溶接速度の増加にともない溶着断面積が減少する様子や、入熱の減少によって溶け込みが浅くなる様子が、数値計算でも明瞭に表現されている。

5. おわりに

デジタル制御技術と高速大容量のスイッチング技術、HSV によるアーク現象のビジュアル化等がアーク溶接電源の性能向上に大きく貢献してきたが、溶接施工のプリプロセスをオフライン化して、より一層の生産性の向上を図るためには、溶接プロセスの数値計算技術とそれをビジュアル化する技術の適用が有望である。業界の高いニーズに応えるべく今後のアーク溶接電源の進むべき方向を考えると、更に高速・高精度で電源の出力制御を行うことの必要性・重要性を強く感じる。そのためには、アーク現象の理論的な解明をより一層推進し、それをもとにした新たな制御技術を発案しなければならない。また同時に、それを実現するための要素技術の進歩も不可欠である。アーク現象の理論的な解明には数値計算技術によるところも大きい。この分野の進歩は、研究機関に頼るところが極めて大きい。欧米諸国の技術開発の後塵を拝さないためにも、産学が連携した研究・開発を強力に推進しなければならないと思われる。

参考文献

- 1) 上山智之：溶接機器の進歩と新しい展開，第200回溶接法研究委員会資料 SW-3183-07
- 2) 恵良哲生，白濱和人：溶接ロボットによる施工・品質管理，溶接学会平成19年度春期全国大会講演概要，pp. “S-21”-“S-27”
- 3) 田中ら：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 p. 336-342
- 4) 平田ら：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, p. 224-232
- 5) 平田ら：溶滴振動現象のモデル解析，溶接学会論文集，Vol. 25 (2007), No. 3 p.421-425
- 6) F Miyasaka, et al : Application of a WMA Welding Process Model for Various Joints. IIW Docs No:XII-1903-06
- 7) 山崎ら：薄板高速MAG溶接プロセスモデルの開発，溶接学会論文集，Vol. 24 (2006) No. 4, p. 368-372
- 8) H G Fan and R Kovacevic : A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool, J. Phys, D: Appl. Phys. 37 (2004) 2531-2544
- 9) Dilthey et al : SOFTWARE PACKAGE SIMWELD FOR SIMULATION OF GAS-METAL-ARC-WELDING PROCESSES OF STEELS AND ALUMINIUM ALLOYS, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7