アーク溶接電源

—溶接アーク現象の制御と

その進歩—*

山 本 英 幸**

Arc Welding Phenomena and Welding Power Sources*

by Hideyuki YAMAMOTO**

キーワード：アーク溶接電源，自動化，制御方式，インバータ電源，ショールドアーク溶接，パルス溶接，電流波形制御，アーク長安定化，適用制御，ファジイ制御

1. はじめに

アーク溶接法は，その原型である炭素電極アーク溶接法が1880年初頭に提案されて以来，今日まで100年を超える長い歴史を経て，基本原理は不変にもかかわらず，現代でもなお金属の溶接においてその主流を占めている。その間，戦前から戦後復興期の困難な時期に成された先駆者の研究と開発，その後の実用化のための莫大な経験の蓄積と研究成果に支えられてアーク溶接法は発展を遂げてきた。¹⁾

現在，実用されているアーク溶接法の種類はきわめて多く，シールド材料別，電極材料別，アーク形態別，など分類法も多いが，全体を網羅した分類として図1が一般的である。²⁾

これらすべてのアーク溶接法に共通してアーク熱源そのものに電力を供給し，溶接品質をきめる極めて重要な役割を果たす構成要素の1つであるアーク溶接電源は，上記の多くの溶接方法の開発につれて進歩発展してきた。

大正の末から始まった我が国のアーク溶接電源の研究は，当然のことながら，最初は当時の溶接技術先進国であったヨーロッパ各国の技術の移入からはじまった。その後，独自の被覆アーク溶接棒の研究とともに，欧米の直流電源中心と異なり，交流溶接電源を主流として国産が進んだ。当時の電気技術のレベルや価格の問題などにその理由があったが，結果的には，交流アーク現象の安定化のための研究開発が進み，同時に交流溶接電源の独自の進歩をもたらした。³⁾

戦後の復興期から高度成長期にかけて，造船の溶接において，米国から技術導入された後，我が国独特の技術である片面多電極高能率溶接として発展したサブマージアーク溶接法の電源としても大容量の交流電源が多用された。^{4),5)}

また，その後，自動車，建築関連産業を中心に進められた溶接の半自動化，自動化の推進のなかで，ガスシールドアーク溶接の普及が進んだが⁶⁾，ここでも，炭酸ガス/マグ溶接での複雑な溶接アーク現象の研究とともに，インバータ制御電源の開発が促進された。このように，溶接電源の進歩発展は，アーク溶接現象の解明の歴史と深い関わりがある。

一方，アーク溶接機器の進展は機械化，自動化の歴史でもある。溶接棒を手にとって行う手動溶接は簡便であるが作業者の負担が大きく，高品質化，高能率化，省人化のための機械化自動化の努力が間断なく進められ，今日のロボット時代に達したといえる。⁷⁾

この一世紀を超える長いアーク溶接の発展史の中で，膨大な研究成果が残されているが，ここでは，上記の観点から，とりわけ溶接の自動化が進展したここ10数年に絞って，我が国の溶接電源の進歩を，関連する溶接アーク現象の最近の研究とあわせてレビューすることにしたい。

2. アーク溶接電源の種類と基本構成

現在一般に市販されているアーク溶接機といえば，(1) アークに電力を供給する電源部，(2) アークを大気から遮蔽するためのシールド材（ガスやフラックスなど）の供給部，および，(3) ワイヤなどの電極材料の供給部，が通常一体化されており，さらには，(4) 溶接線にそってアーク等を移動させる台車，あるいは最近ではロボットまで含まれることが多い。これらの構成要素はアーク溶接を行うう

*原稿受付 平成9年10月1日

**正 員 (株)ダイヘン Member, Daihen Co. Ltd.

図1 アーク溶接法の分類

図2 アーク溶接電源の種類

えていずれも必要不可欠な要素であるが、本報告で“アーク溶接電源”と呼ぶ場合は、上記の(1)の部分構成する電源主回路とその制御部に限定している。

このアーク溶接電源は、大別して、商用交流入力／回転機の別、交流／直流／パルス出力の別、定電圧／定電流特性の外部特性別、出力制御方式別、制御素子別、など種々の観点から分類されている。

(1)産業機器として他に類がすくない露出した電気回路の一部を直接熱源として利用する。従って安全のため、出力部は入力側の高電圧から電氣的に絶縁されアークを含む二次側回路は接地されていなければならない。このため溶接用電源には必ず絶縁変圧器が含まれ、しかも無負荷時の電圧に制限がある。

(2)溶接中のアークが電気回路の負荷を構成しているため、短絡とアークの繰り返しによる0Vから数10Vの急激な電圧変化と、0Aから数100Aまでの大幅な電流変化が生じる極めて特殊な負荷をもつ電源といえる。このため、溶接法に応じて静的な電流電圧の外部出力特性の設定とともに、動的な過渡特性の選択が重要である。

(3)一般に溶接電源から遠く離れた個所でアークを発生させることが多く、電源の出力を容易に、かつ広範囲に遠隔調整できる、あるいは外部制御装置から制御が可能である。図3に各種アーク溶接電源の回路構成と出力特性の一覧をしめす。

上記の(1)(2)の基本要件を満足する簡便で典型的な電源として可動鉄心型の漏洩変圧器のみで構成されている交流溶接電源(垂下特性)がある。この場合、さらに可動鉄心をモータ駆動にすれば(3)の要件も満たせる。しかし後述するようにティグ用交流電源では、再点弧性、即応性、極性比率の積極的な調整のため、サイリスタと組み合わせたりリアクトル式が開発され⁹⁾、最近ではインバータ式が多く使用されている。

一方、直流溶接電源の基本的構成は、絶縁変圧器の二次側の整流器と適正な過渡特性を与える直流リアクトルからなっている。この方式の定電圧特性の電源は比較的小容量の半自動溶接に現在も使用されている。この場合の出力調整は、変圧器の一次側、または、二次側の巻き線数を機械的に選択するので、タップ式、あるいは、スライドトランス式とよばれている。

一次側の電圧変動や負荷変動に対する出力の安定化のため、フィードホワード型、フィードバック型の各種制御方式が開発されている。^{9),10)}その主回路を構成する制御素子として、1960年代には磁気増幅器が、70年代に入ってサイリスタによる点弧位相制御式が実用された。

1978年、トランジスタをパワ増幅器とするアナログ制御式の電源が英国、日本で相次いで開発された。^{11),12)}この電源は、高速、高精度でかつ、図4に示すように外部出力特性が自由に選択できること、直流リアクトルを電子回路で置

	出力制御式	回路構成	出力特性				特長
			交流	直流	c c	c p	
1	可動鉄心式		○	○	○		・ 最も簡単 ・ 直流の場合は、二次側に整流器を追加する。
2	タップ切替式			○		○	・ 定電圧特性で使われる。
3	スライドトランス式			○		○	・ 定電圧特性で使われる。
4	磁気増幅器式			○	○		(現在はほとんど実用されていない)
5	リアクトル式		○		○		・ 大電流用
6	サイリスタ制御式		○	○	○	○	・ 三相入力の場合直流のみ ・ 単相入力の場合交直両用回路方式が多い
7	トランジスタチョップパ制御式			○	○	○	・ パルス出力に実用
8	トランジスタインバータ制御式		○	○	○	○	・ 変圧器は小型軽量 ・ 交流出力の場合は二次側にトランジスタを追加する。
9	トランジスタアナログ制御式			○	○	○	・ 高速制御、精密制御が可能 ・ 大電力トランジスタが必要 ・ リアクトル不要

CC：定電流（垂下）特性 Cp：定電圧特性

図3 アーク溶接電源の制御方式と特性

図4 電源の外部出力特性

換えられ動特性が任意に設定できるなど、当時としては画期的なものであり、それまで実験的検証が困難であった溶接現象の研究解明に著しく貢献したが、電力損失が大きく、高価なため、実用電源としては普及しなかった。

1980年代には、パワートランジスタを電力損失の少ないスイッチング素子として用い、二次側にチョップパ回路を持つパルス電源が実用化された。¹³⁾

85年頃から一次側にトランジスタインバータ回路を持つ各種方式の電源が我が国を中心に数多く開発され、性能、機能が飛躍的に進歩した。このインバータ式電源については後に詳述する。

3. アーク溶接の自動化の推移と溶接電源の量的変遷

アーク溶接の適用される材料は圧倒的に鉄鋼材料である。その鉄鋼の消耗電極溶接材料（被覆棒、ワイヤ、フ

ラックス)の我が国の生産量¹⁴⁾は、図5に示すように、ガスシールドワイヤが年々増加し、その推移からみた自動化率(厳密にはワイヤ化率)は1985年に50%を超え現在70%に達している。この値は、欧米の比率をこえており、我が国のアーク溶接の半自動化率、自動化率が世界的にみて高い水準にあることを示している。

一方、アーク溶接電源の全国生産台数の推移を通産統計¹⁵⁾から調べて図6に示す。

図7(a)は被覆アーク溶接棒の年間生産量と交流電源と回転式(エンジンウェルダ)の稼動推定台数(8ヶ年移動累計)、図7(b)はガスシールドアーク溶接用ワイヤ生産量と標準自動電源の稼動推定台数との関係を示すので、其々極めて高い相関性がある。

つまり我が国では、被覆棒による“手動溶接”にはほと

んど交流電源が使用されてきたが1974年をピークにその使用量が年々減少している。一方、ガスシールド溶接用のワイヤ電極による“半自動、自動溶接”には標準自動と呼ばれている定電圧特性の直流電源が使用され、現在最も多く使用されていることを示している。なお、図6で直流電源と分類されている中には、1985年以降に急増したプラズマ切断用電源がほぼ半数近く含まれているが、他はほとんどティグ溶接用の定電流特性の直流電源である。

以上のデータから戦後50年間の溶接電源の歴史を大きく3段階に分けると、1975年までの高度成長期の交流溶接電源中心の時代、その後の低成長期と呼ばれた1985年までの各種半自動溶接用の直流電源の時代、そして、現在にいたるインバータ制御の各種方式の自動溶接電源の時代に区分される。

図5 アーク溶接材料の生産量推移

溶接電源の生産推移

図6 アーク溶接電源の生産量推移

図 7 (a) SMA 溶接棒生産量と「交流アーク溶接機+エンジンウェルダ」稼働台数

図 7 (b) ガスシールドアーク溶接ワイヤの生産量と標準自動アーク溶接機稼働台数

4. 主なアーク溶接法における溶接電源の制御方式の推移

4.1 被覆アーク溶接

被覆アーク溶接用電源として、わが国でかつて交流溶接電源の電気特性、再点弧特性、電撃防止回路などの詳しい検討がなされ、^{3),4)}現在も、可動鉄心形の漏洩変圧器型が広く実用されている。近年、従来の自然空冷方式に加えて小型軽量化された強制空冷方式も開発されている。

一次電源のない工事現場用の溶接電源としてエンジン発電機式、バッテリー式がある。⁸⁾

欧米では、もともと被覆アーク溶接に直流溶接電源が使用されてきたが、最近になってのちに詳しく述べるインバート式の極めて軽い可搬用の直流電源が急増している。

4.2 サブマージアーク溶接

現在もわが国では 1000A クラスの大出力の可動鉄心形交流溶接電源が多く用いられている。とくに高能率多電極溶接のためにアーク間の電磁気相互作用と高速ビード整形のための交流結線方法がさかんに研究された。^{16),17)}

1975 年、溶接品質の安定化のために遠隔操作の容易な定電流特性の交流電源⁸⁾が初めて開発され片面溶接装置などに採用された。¹⁸⁾最近になってサイリスタによる点弧位相制御方式の 2000A 定電流特性電源も実現している。¹⁸⁾比較的細径ワイヤを用いるサブマージアーク溶接には定電圧特性の直流電源も用いられる。

4.3 ガスシールドアーク溶接

炭酸ガス/マグ溶接、ミグ溶接などの消耗電極式には一般的には定電圧特性の直流電源が用いられているが、

わが国でこの10年間に最も変革が大きかった電源であり現在では極めて多様化している。^{19),20)}

電源主回路の制御方式の変遷をみると、1980年代に磁気増幅器からサイリスタによる点弧位相制御にかわり、さらに1980年始めからパワートランジスタによる二次側チョッパ制御、続いて一次側インバータ制御が実用され始めた。とくに短絡アーク溶接やパルス溶接用の電源はインバータ制御方式の開発と普及により画期的な改善が進んだ。また従来はアークの再点弧の問題で実用が困難であった交流電源についても二次側インバータ制御により実現し新たな溶接プロセスの可能性を拡大している。

なお、比較的小電流用には現在でもタップチェンジャーとよばれる変圧器の巻き数を機械的に切り替える整流式の直流電源もなお世界中で広く使用されている。ティグ溶接やプラズマ溶接などの非消耗電極式ガスシールドアーク溶接には、定電流特性の直流、交流およびパルス電源が使用されている。歴史的にみた制御方式の変遷は消耗電極式とほぼ同じであるが、出力電流の精度要求が高いためインバータ化がすすんでいる。図8は、我国のガスシールドアーク溶接に使用されている溶接電源の出力制御方式の変遷と普及状況をまとめたものである²¹⁾

5. インバータ制御アーク溶接電源の技術動向

図9は、各種アーク溶接電源に採用されている最近のインバータ制御電源の回路構成例と特徴を示す。^{20),22)} いずれの場合も、交流入力是一次側整流器で一たん直流化された後、PWM (pulse width modulation) 形あるいは共振形などの各種インバータ方式により10~100KHzの範囲の高周波交流に変換される。高周波トランスで絶縁降圧された後、二次側整流器、直流リアクトルを介して直流出力される。2次側の電圧、または、電流情報をフィードバック制御することにより、外部特性(静特性)は、定電圧特性から定電流特性まで容易に設定できる。インバータ制御電源の最大の特徴は、従来のサイリスタ制御電源に比べて数百倍の高速制御が可能であり、電源出力の応答速度は最近では1000A/msまで高められている。このため、複雑なアーク溶接現象に追従して溶接の安定化、高品質化が可能となる。

図10は、インバータ制御溶接電源に使用されている出力制御素子の性能を比較したものである。²¹⁾サイリスタは比較的大容量への適用が可能であるが、スイッチング速度が遅く、現在ではほとんど使用されていない。BJT (Bipolar Junction Transistor) は、これまで広く採用されてきたが、主トランジスタの駆動方式が電流駆動であるために駆動回路の容量が大きくなる短所がある。MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) は高速制御性に優れているが大容量化が困

図8 日本におけるガスシールドアーク溶接電源の出力制御方式の変遷

回路方式	特長
1石フォワード方式 	・小出力に適す ・回路が簡単
2石フォワード方式 	・中出力に適す ・制御が安定
ハーフブリッジ方式 	・中出力に適す ・スイッチング素子が1対でよい
フルブリッジ方式 	・大出力に適す
共振型フルブリッジ方式 	・共振回路Lr, Crにより、スイッチング損失が小さい。 ・動作周波数を高くできる ・小型軽量化できる ・動作周波数を上げると直流リアクトルが不要になる。

図9 インバータ式溶接電源の回路方式

難であり、小容量の小型軽量電源に主として採用されている。最近登場した IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) は、BJT と MOSFET の長所を兼ね備えており、インバータ制御素子の主流となりつつある。

図 11 は市販されているアーク溶接電源の質量を比較したもので、サイリスタ式に比べてインバータ式は変圧器や直流リアクトルを軽量化できるため、全体として 1/2 以下に軽量化されている。最近では、200A で 10kg 以下の被覆溶接用直流電源も市販されている。

図 12 は、溶接電源の制御回路の主要な部品及び制御方式の変遷を示したものである。²¹⁾出力制御回路は、サイリスタ制御からインバータ制御へと移行しているが、それにともない制御回路の主要部品は、IC、マイコンへと移行している。さらに最近では、より高性能なマイコンの採用や制御回路の信頼性を高めるために ASIC が採用されている。制御方式では、アナログフィードバック制御からマイコンによるデジタル制御へと移行しつつあ

る。これは、アーク溶接現象のような変動の大きい情報を統計的に取り扱うためにファジィ制御のような新しい制御理論が採用されるようになり、それを実現するためにはマイコンによるデジタル制御が必須になりつつあるためである。

図 13 は、現在までのインバータ制御電源の各種アーク溶接法への適用状況についてまとめたものである。²¹⁾交流、直流及び交流と直流の併用に分類し、さらに純直流と低周波、中周波、高周波の各パルスを重ねた直流に分類している。

交流 GMA 溶接や交流と直流とを交互に繰り返す AC/DC 切り替え GTA 溶接などが一部で実用化されており、また炭酸ガスアーク溶接においても新しい波形制御法が開発されている。

6. 溶接電源による溶接アーク現象の制御

ここまで溶接電源のハードウェアの進展をみてきたが、溶接アーク現象の制御からみた溶接電源の役割は、その高速応答性、精密安定性、広範囲適応性の向上につける。この章では、今後ともアーク溶接の自動化の中心として広く使用されるであろうガスシールドアーク溶接にしぼって、最近の研究成果と適応事例について紹介する。

6.1 溶接電源と溶接アーク現象との関わり

溶接アーク現象に関する研究は極めて多く、詳細はこ

項目 \ 素子	サイリスタ	BJT	MOSFET	IGBT
シンボル				
電流量	400A	600A	100A	600A
耐電圧	2500V	1200V	500V	1200V
スイッチング速度	20μs	5μs	0.3μs	1μs
ドライブの容易さ	点弧同期	電流駆動	電圧駆動	電圧駆動

A：たいへん優れている B：優れている C：劣っている

図 10 インバータ制御溶接電源の出力制御素子の比較

図 11 各種ガスシールドアーク溶接電源の質量の比較

図 12 制御回路用主要部品の変遷

電流制御	プロセス	MMA	GTA	GMA		
				CO2	MAG	MIG
D C	A C	◎	◎	○	○	○
	直流	◎	◎	◎	◎	◎
	低周波パルス	—	◎	—	◎	○
	中周波パルス	◎	◎	○	◎	◎
	高周波パルス	—	○	—	—	—
AC-DC ハイブリッド		—	○	—	—	○

◎：広く実用化 ○：研究報告、一部で実用化 —：研究報告なし

図 13 インバータ制御電源の適用状況

れまでにまとめられた解説書^{23),24),25)}に委ねるとして、ここでは、これまでの研究成果から、溶接アーク現象のなかで直接的に電源の特性と関わる現象として考えられている項目を列挙すると、

- (1) 極点挙動をふくむアーク放電現象、
 - (2) 電極の消耗と移行現象、
 - (3) 凝固後のビード形成を含む溶融池現象
- に大別される。

上記に関する個々の現象の生じる動作周波数、あるいは時定数に相当する動作時間を概略範囲で示すと図14が得られ、1sから0.01msまでその範囲は極めて広い。図中には、前章までに見てきた各種溶接電源の制御可能な周波数範囲を対照して示している。(この図は1989年に本誌でまとめたもの²²⁾を今回少し修正した)両者の比較から、電源の即応性の向上により、直接的に制御できる現象の対象範囲が拡大できることを示している。今後、アーク現象の解明が進めばさらに制御対象が広まることが期待されるが、以下に、最近の特徴的な成果をまとめる。

6.2 ショートアーク溶接における電流波形制御

我が国で特に発達した炭酸ガスアーク溶接法は、廉価なガスが使えることが特長であるが、CO₂アーク特有の溶滴の反発移行のため、スパッタの発生が避けられない。これを防止する手段として、定電圧特性の電源によるショートアーク(短絡移行)溶接法が実用されているが、使用する電源の動特性(アークを含む回路インダクタンスに強く関係する。)によりスパッタ発生量や、短絡周期の安定性が著しく影響されることが知られている。この現象については、古くは、高速度写真によるスパッタの発生形態の分類²³⁾、溶滴の橋絡移行条件やアーク時と短絡時の電極溶融エネルギーの推定²⁶⁾、短絡時の電磁ピンチ力を考慮した数値計算モデル^{27),28)}などの現象解析とともに、80年以降は、高速応答の電源による種々の電流波形制御法が提案された。^{29),30),31),32)}

図15は、最近の波形制御法を模式的に示したものである

図14 アーク溶接現象と溶接電源の出力制御方式

る。³³⁾ワイヤ先端の溶滴と溶融池との短絡が発生したことを検出し、溶接電流を急速に減少させ低い電流値に保持することで、溶滴と溶融池との接触状態を確実にする。その後電流値を増加させることでピンチ力を働かせて、溶滴の移行を促進させる。そして溶滴がくびれ状態になったことを検出し、再び電流値を急減させ再アーク発生時の電流値を低くすることで、スパッタの発生を抑制している。アークが発生すると、溶接電源の外部特性を上昇特性等に切り替え最適値に制御することで、アーク熱による溶滴形成を円滑にするとともに短絡周期の安定化を図っている。

この事例は、電源特性により溶滴移行現象を巧みに制御できた例であり、実用上も、炭酸ガスアーク溶接でのスパッタ発生量を著しく低減させる効果があった。

6.3 パルス電源によるマグ/ミグ溶接法

20%以下のCO₂や5%以下のO₂とArとを混合したシールドガスを用いる鉄鋼のマグ溶接や、純Arのアルミ合金のミグ溶接などでは、通常の定電圧電源をもちいた場合、図16に示す臨界電流以下の電流域ではグロービュール移行と呼ばれる大粒の溶滴移行になる。このとき、臨界電流以上のパルス電流を極く短時間(1-2ms程度)加えると電磁ピンチ力によりスプレー移行に変わる。この方法は、すでに1962年には提案されていたが³⁴⁾、1978年以降、トランジスタ制御電源の実用化とともに、図17に例を示すような1パルス1溶滴移行の限界条件^{35),36)}、アーク長の安定化制御法^{37),38)}などの基礎研究が進んだ。当時の本誌にパルス溶接の状況が良くまとめられている。^{34),39)}その後、ガス組成、ワイヤ組成の詳しい検討がなされ、自動車関連のロボット溶接ラインを中心に適用がすすんだ。⁷⁾

最近の高速インバータ制御のパルス電源では、マイクロプロセッサによるデジタル制御の採用により図18に示すような電流波形のパラメータを、精密にかつ高速で制御して出力できるため、ワイヤの種類、シールドガスの種類だけでなく、母材の違い、ワイヤ送給速度に連動して最適値に設定され、50A以下の小電流域までスパッタのほとんどない安定した溶接が可能となってい

図15 ショートアーク溶接の電流波形制御の一例

図 16 マグ溶接の移行形態に及ぼす電流と電圧の影響

図 17 ウェーブパルス溶接法の原理

る。⁴⁰⁾

また、電極ワイヤ溶融に寄与するパルス波形の影響が詳しく検討され、ワイヤの突き出し長が変化した場合に見かけのアーク長を一定に維持するために、溶接電流域に適した傾きの異なる外部特性を設定する方法が開発された。⁴¹⁾

また、これまで原理上困難と考えられていた CO_2 ガス中のパルス溶接の検討も始められている。^{42),43)}

一方、1990 年のはじめごろから、溶滴のパルス移行に

図 18 電流波形のパラメータ制御

関する 50-数 100Hz の中周波域に重ねて 1-数 10Hz の低周波でパルス条件を切り替える低周波パルス重畳法が開発された。⁴⁴⁾この方法では、パルス電流とパルス時間の組み合わせを変えて、アーク長と入熱を周期変化させることで溶融池を攪拌し、図 19 に示すようなブローホールの低減や、⁴⁵⁾図 20 に示す結晶粒微細化により凝固割れの抑制効果が認められる。⁴⁶⁾なお、上記の効果の著しい周波数は、材料や溶融池の大きさに依存することから、池の固有振動に同期しているものと考えられている。

図 21 にここ数年間に開発された各種パルスミグ溶接を列挙する。最近の特長は、パルス電流波形を任意に広範囲に制御することで、溶接性能の向上や、いままで困難であった薄板や継手まで適用範囲を拡大していることである。

交流ミグパルス溶接法は、^{47),48),49)}パルス電流期間の前後を電極プラス（通常のミグ溶接の極性）にし、ベース電流の一定期間を電極マイナスに反転させるパルス溶接法の変形である。この方法は、電極マイナスでワイヤ比溶融量が増加する良く知られた溶接現象を積極的に利用し、極性比率を変化させることで、母材の溶込みと余盛り量の比を調整するものである。図 22 は、交流期間比率によるビード形状の変化を示したものである。このほか上記の交流パルス電流と通常の直流パルス電流とを交互に切替える複合形のパルスミグ溶接も提案されている。⁵⁰⁾

6.4 ティグ溶接における電源の各種波形制御法

直流電源によるティグ溶接では、1A から 500A までの

図 19 低周波パルスミグ溶接法によるブローホールの低減

図 22 EN 比率によるビード形状の変化

図 20 低周波パルスミグ溶接法におけるマイクロ組織

溶接法	溶接電流波形	特長
通常の パルス溶接		・2mm以上の板厚において、 高速で高品質な溶接ができる
ウェーブ パルス溶接		・美しいウロコ状のビード外観 が得られる ・ブローホールなどの内部欠陥 の低減効果がある
サイクル パルス溶接		・美しいウロコ状のビード外観 が得られる ・1mmまでの薄板の溶接が 容易にできる
交流 パルス溶接		・1mmまでの薄板の溶接が 容易にできる ・ギャップの状態に応じて入熱 を変えることができる

図 21 各種パルス溶接法の比較

ルス波形が提案され、熔融池に対するアーク力の影響や、溶込み特性などが詳しく研究されている。^{51),52),53)}

ティグ溶接の高効率化のため、ホットワイヤの併用が薦められ、アークとの相互作用の制御のためパルス加熱電源の開発と実用化がすすんでいる。^{54),55),56)}

ティグ溶接の自動化、ロボット化で問題となる高周波ノイズ対策として、インバータ制御の高速応答性を活用して、新しいアークスタート方式が開発されている。⁵⁷⁾図23に従来の高周波重畳方式と比べた特徴を比較する。

アルミニウム合金などのティグ溶接用の交流電源にも交流波形を任意に制御できるインバータ電源が実用されてから以下のような利点が発揮されている。^{58),59),60),61),62)}

- (1) アーク再点弧用高周波火花放電が不要
- 極性切替え時の電流反転速度を一定以上に速くするとアークの再点弧用高周波火花放電の併用は不要となることから放電現象から確認されている。従来、高周波火花放電は電波障害や周辺機器の誤動作を引き起こす雑音源となるため、最近のロボットなどに代表される電子機器との組合わせに問題があったが、この点に関しても改善された。

- (2) 母材の溶込み制御が可能
- アルミニウムとその合金の交流ティグアーク溶接では溶接電流の棒プラス時(DCEP)、棒マイナス時(DCEN)各々の時間比率により、溶込み深さ、ビード幅、クリーニング幅が変わることはよく知られている。また、図24

広範囲の出力安定化が図られ、数1000Hzまでの各種パ

	高周波重畳 スタート方式	直流高電圧印加 スタート方式	リフト スタート方式
原 理
延長ケーブル時の スタート性	△	○	○
ノイズ	×	○	◎
スタート時電極 消耗	○	○	○
作業性	○	○	△
安全性	○～△	△	○
経済性	◎	△	○

図 23 ティグ溶接におけるアークスタート方式の比較

(a) インバータ制御 (矩形波) (b) サイリスタ制御 (サイン波)

図 24 アルミニウム交流ティグ溶接における制御方式と溶け込み深さ

に示すように交流の波形により溶込みが変化する。⁵⁸⁾目的により図 25 に示すように、平衡矩形波形、非平衡矩形波形及びサイン波形の 3 種類が使い分けられている。

(3) 電極消耗の低減⁶³⁾

交流ティグアーク溶接では、棒プラスの極性時に電極が加熱されるため、図 26 に示すように EP 比率が高いほど電極消耗量が多く電極先端が丸くなる。EN 比率を高く設定できれば、尖らせた状態で長時間使用できるのでアークの指向性がよく、自動溶接などに最適である。最近では、さらに、交流と直流を低周波で切替える電流波形も提案されて、作業性の改善を図っている。⁶⁴⁾

6.4 アーク長の安定化制御と電源特性

ガスシールドアーク溶接では、アーク長は直接溶接結果に関連する重要な制御パラメータである。アーク長が例えば数 mm 変わると、溶け込みや裏波、ビード幅が大幅に変化し、スパッタの発生量、プロホルの発生量などにも影響することが多くの実験、経験で良く知られている。

非消耗電極式では、このアーク長は電極先端と溶融池

電流波形	溶接性の特長
$I_{EN} = I_{EP}$ EN, EP 時の電流ピーク値が等しい。	<ul style="list-style-type: none">●最も一般的な電流波形であり、矩形波であるために極性反転時の高周波の重畳は不要。●薄板から厚板まで幅広い範囲での溶接が可能。
$I_{EN} \neq I_{EP}$ EP 時の電流ピーク値の方が高い。	<ul style="list-style-type: none">●集中したアークとなり、薄板隅肉溶接などに有効である。●EN 比率が高くなるために電極の消耗量が少なく経済的である。
$I_{EN} = I_{EP}$	<ul style="list-style-type: none">●アーク音が低く、作業性が良好である。●アークに広がりがあり、薄板の突合せ溶接に有効である。●極性反転時の電流の立ち上がりが素早く、高周波不要。

図 25 インバータ制御における各種溶接電流波形とその特徴

表面との幾何的寸法で決まり、定電流特性の電源を用いていれば、アーク長を変化させても電流は変わらない。

消耗電極式ガスシールドアーク溶接では、電極ワイヤの送給速度と溶融速度のバランスでアーク長が決まるため、電源の静的、動的特性の選択が重要となる。従来から、電極ワイヤの送給が定速度に制御されている場合には定電圧特性の電源が組み合わせて使用され、“電源のアーク長自己制御作用”によりアーク長の安定化が図られてきた。²³⁾

しかし、近年溶接の自動化が進み、より正確で安定なアーク長の自動制御が要求され、また、ロボット溶接におけるアークセンサの適用拡大のため、アーク長の挙動の理論解析が進んだ。⁶⁵⁾ワイヤ送給とアーク負荷と溶接電源を含む溶接システムの等価電気回路は、例えば図 27 で示される。²⁵⁾

図 26 交流ティグにおける極性と電極消耗

ここに、電源の無負荷電圧、電源の内部および溶接ケーブルを含む抵抗 R 、インダクタンス L 、アーク電圧 V_a 、ワイヤ突き出し部の降下電圧 V_w 、アーク長 L_a 、突き出し長 L_w 、電流 I とすると、

$$E_0 = RI + \frac{LdI}{dt} + V_a + V_w$$

ワイヤに電流を通電するトーチ内のチップと母材表面まで距離を L_t とすると

$$L_t = L_a + L_w$$

いま、 L_t が一定のとき、ワイヤの送給速度 V_f 、溶融速度 V_m とすると、

$$\frac{dL_a}{dt} = -\frac{dL_w}{dt} = V_m - V_f$$

アーク長は、基本的には上記3式で定まるが、 V_a 、 V_w 、 V_m がそれぞれ L_a 、 I 、 L_w などの関数であり、種々のモデルが提案されている。^{66),67)}

図 28 は、外部特性の傾きとアーク電圧の挙動について数値シミュレーションした例で、垂下特性ではアーク長の変化が多く、逆に大きな上昇特性ではアーク長は振動し安定しないことが示されている。図 29 は、トーチを開先内で強制振動させたときのアーク電圧、電流の変化を計算したもので、電源のインダクタンスによって8の字の方向が変わることが示され、実験的にも確かめられている。⁶⁸⁾ 図 30 は、非線形特性の電源を短絡移行アーク溶接に適用した時の解析事例を示す。⁶⁹⁾

このように、溶接アークシステムの解析モデルの精度が高められているが、現在のところ定常状態時に限られており、今後、過渡特性やパルス溶接などへの適用が期待される。

図 27 アーク溶接システムの等価電気回路

図 28 数値シミュレーション結果

7. 適応制御による溶接電源の知能化

図 31 は、1993 年ごろから製品化されているファジィ制御溶接電源による出力自動制御の概念をまとめたものである。熟練作業者は、溶接を行ないながらアーク長や突出し長さなどの変動を観察し、アーク状態や溶接品質が良好になるように溶接電源の出力（出力電圧やワイヤ送給速度）を調整している。このような熟練作業者のノウハウをファジィ理論の適用等により溶接電源に取り込むことで、出力の適応制御を行うことができる。

図 32 は、突出し長さが変化しても溶込み深さが一定になるようにファジィ制御した例を示す。従来の溶接電源では、突出し長さが長くなると溶接電流が減少するため溶込み深さは浅くなる。これに対して、ファジィ制御溶接電源では、突出し長さの変化をファジィ推論によって

図 29 溶接電流，トーチ電圧波形のシミュレーション

検出し，どの突出し長さでも溶込み深さが一定になるように，ワイヤ送給速度を自動的に変化させている。⁷⁰⁾

また，突出し長さが変化したり，電源の二次ケーブル長が変わっても，アーク状態が常に良好になるように溶接電源の出力電圧を自動調整することが出来る。^{71),72)}

図 33 は，これまで実用化されているファジィ制御電源における制御パラメータとその効果についてまとめたものであるが，今後は制御する目的とそれに適した制御パラメータの選定がますます重要になっていくものと考えられる。

アルミ合金のミグ溶接や，鉄鋼のマグパルス溶接では，溶接品質を確保し，かつスパッタの発生量を出来るだけ少なくするため，見かけのアーク長はわずかな微小短絡のおこる限られた条件範囲で実用されることが多い。このような場合，一般のアーク溶接におけるアーク電圧に換えて，微小短絡回数が最適の範囲に収まるように電源の出力電圧制御を行うことで見かけのアーク長を制御することが出来る。ファジィ制御ミグ溶接電源における制御アルゴリズムを図 34 に示す。ファジィコントローラはマイクロプロセッサによりソフトウェア的に構成されている。図 35 はアルミミグ溶接における短絡回数制御の効果を示したもので，良好なビード外観が得られている。⁷³⁾

8. ま と め

アーク溶接電源の制御技術の進歩により高速で精密な

(a) 位相平面上の動作点

(b) 電流および電圧の時間応答

図 30 非線形特性の電源を用いたときの溶接実験結果

図 31 ファジィ制御による出力自動制御の概念

出力制御が可能となり，溶接アーク現象の解析と溶接プ

図 32 ファジィ制御による溶込み深さの安定

溶接法	検 出 量	制 御 項 目	効 果
ミグ溶接	微小短絡の回数	溶接電源の出力電圧	出力電圧の自動設定
炭酸ガス／ マグ溶接	短絡時間率	溶接電源の出力電圧	出力電圧の自動設定
炭酸ガス／ マグ溶接	溶接電流の変化	ワイヤ送給速度	溶込み深さの安定化
炭酸ガス／ マグ溶接	短絡時間とアーク 時間の標準偏差	溶接電源の出力電圧	出力電圧の自動設定

図 33 実用化されているファジィ制御電源

ロセスの高品質化と安定化が図られるとともに、ファジィ理論等の適用により従来作業者の経験と感性に頼ってきた溶接条件の設定や適応制御機能が、電源の中に一部取り入れられるようになった。今後ますます進むであろう現場作業者の不足に対応して、電源の脱技能化が求められている。

一方、今後の自動化・ロボット化を進める上での溶接電源の課題としては、

- (1) 自動化に適した溶接プロセスに適合する高品位電源の開発
- (2) アークセンサを含む溶接システムでの最適な電源特性の研究
- (3) 作業環境(電波ノイズ、音、ヒューム、重さ、)を配慮した電源開発

などが挙げられているが、同時に、電源の新しい役割として、データベース、学習機能、条件管理など電子情報処理とつながる知能化対応電源の開発が期待されている。

参 考 文 献

1) 溶接五十年史：産報 (1962)

2) 溶接学会編：溶接・接合便覧，丸善 (1990)，191，273

3) 安藤：交流アーク溶接機，電気書院 (1952)

4) 安藤，西口：アーク溶接機器，産報 (1974)

5) 長谷川，吉田，大庭：自動アーク溶接，産報 (1966)

6) 安藤，清原：新版電気溶接機器，産報 (1967)

7) 溶接学会溶接法研究委員会編：アーク溶接の自動化技術 (1995)

8) 岡田：最近のアーク溶接用電源，溶接学会誌，47-5 (1978)

9) 山本，長坂：溶接電源の効果的選択，溶接技術，33-2 (1985)

10) 奥，小林：半自動アーク溶接機の進歩，溶接技術，26-5 (1978)

11) 山手：アナログ・トランジスタ式溶接電源について，溶接技術，25-8 (1977)

12) 岡田，後藤，山手：アナログ・トランジスタ制御直流溶接電源について，本会講概，第20集 (1977)

13) 殖栗：トランジスタ・パルス制御によるノンスパック・マグ溶接法，溶接アーク物理研究委員会，80-446 (1980)

14) 日本溶接棒工業会，1996 統計

15) 通産省：機械統計月報，通商産業調査会

図 34 ファジィ制御ミグ溶接電源におけるアルゴリズム

図 35 アルミミグ溶接における短絡回数制御の効果

- 16) 山本：サブマージアーク・エレクトロスラグ/エレクトロガス溶接，溶接技術，34-4 (1986)
- 17) 野村，杉谷，辻：サブマージアーク溶接の溶融池現象-X線透過による観察，溶接学会誌，51-9 (1982)
- 18) 山本他：全自動サブマージアーク溶接機の開発，溶接法研究委員会，SW-2389-95 (1995)
- 19) 古谷，小山，岡崎：ガスシールドアーク溶接，溶接技術，34-4 (1986)
- 20) 坂部他：インバータ制御アーク溶接機，溶接学会誌，55-7 (1986)
- 21) 山本：最近の溶接電源による溶接プロセスの安定化と高品質化，溶接学会誌，64-6 (1995)
- 22) 山本：インバータ制御によるアーク溶接機の進歩と自動化への適応，溶接学会誌，58-4 (1989)
- 23) 安藤，長谷川：溶接アーク現象，産報 (1967)
- 24) ランカスター：溶接アークの物理，溶接学会アーク物理研究委員会編 (1990)
- 25) 溶接学会アーク物理研究委員会編：溶接プロセスの物理，(1996)
- 26) 清原，岡田，山本：短絡アーク溶接における溶滴移行の安定性と新しい制御法について，溶接アーク物理研究委員会，73-205 (1973)
- 27) 丸尾，平田，後藤：懸垂液滴の橋絡移行現象と電磁ピンチ力の効果，溶接学会論文集，10-2 (1992)
- 28) Maruo, H. and Hirata, Y.: Bridging Transfer Phenomena of Conductive Pendent Drop, IIW Document No. 212-833-93, 1993
- 29) 西田：波形制御によるスパッタ低減について，本会講概，第45集 (1989)
- 30) 三田：CO₂アーク溶接の波形制御方法の検討，溶接学会論文集，16-2 (1988)
- 31) 小笠原他：短絡移行制御における電流波形制御，神戸製鋼技報，35-3
- 32) E. K. Stava: A New Low-Spatter Arc Welding Machine, Welding Journal 72-1 (1993)
- 33) 山本他：ファジィ制御 CO₂/MAG 溶接機の溶接特性について，溶接法研究委員会，SW-2265-93 (1993)
- 34) 松縄，山本，平本：パルスアーク溶接法，溶接学会誌，53-6 (1984)
- 35) 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及ぼす電流波形の効果，溶接学会論文集，2-1 (1984)
- 36) 岡田他：トランジスタ制御 MAG パルス溶接諸現象の検討，アーク物理研究委員会，81-467 (1981)
- 37) 山本，原田：最近の CO₂/MAG 半自動溶接機について，溶接技術，29-7 (1981)
- 38) 大島他：周期的に変化する非線型特性の電源による強制溶滴移行アークの研究，溶接学会誌，50-8 (1981)
- 39) 溶接学会編：パルスアーク溶接，溶接アーク物理研究委員会 (1986)
- 40) 山本他：パルスマグ溶接の安定化制御法の研究，アーク物理研究委員会，96-965 (1996)
- 41) 中俣，上園，全：ディジタル制御パルスマグ溶接機における安定化技術と溶接性能の向上，溶接技術，44-10 (1996)
- 42) 松田他：GMA および CO₂ パルス溶接の溶滴移行現象の観察，アーク物理研究委員会，83-546 (1983)
- 43) 王，井原，印南：新 CO₂ 溶接法 PC プロセス法の開発，溶接技術，44-10 (1996)
- 44) 山本他：Al およびその合金の低周波パルスミグ溶接法の開発，溶接学会論文集，10-2 (1992)
- 45) 山本他：低周波パルスミグ溶接法による AL およびその合金の溶接部に発生する気孔の抑制効果，溶接学会論文集，12-1 (1994)
- 46) 山本他：低周波パルスミグ溶接法による AL 合金溶接金属の結晶粒微細化と凝固割れ感受性の改善，溶接学会論文集，10-4 (1992)
- 47) 藤田，都島，岩見：大電流 AC-MIG 溶接法，アーク物理研究委員会，85-606 (1985)
- 48) 丸山，岡田，本間：極性比率 GMA 溶接電源について，アーク物理研究委員会，88-687 (1988)
- 49) 西田，谷本，美濃：交流パルス溶接法の開発，アーク物理研究委員会，88-689 (1988)
- 50) 三田，鹿島，品田：交流ミグ溶接の基礎検討，溶接法研究委員会，SW-2127-91 (1991)
- 51) 岡田，山本，西川：TIG パルスアークの圧力測定，アーク物理研究委員会，78-382 (1978)
- 52) 後藤他：高周波直流 TIG 溶接法の諸特性，本会講概，第17集 (1975)
- 53) 暮石：低周波パルス TIG 溶接法の溶接諸条件の熱伝導解析による考察，溶接学会誌，48-12 (1979)
- 54) 河原，田桑：ナローギャップ HST 溶接法，溶接学会編，黒木出版 (1984)
- 55) 小倉他：2 電極スイッチングアーク溶接法に関する研究，溶接学会誌，49-4 (1980)
- 56) 堀他：ホットワイヤ TIG 溶接でワイヤとアークの電極が異極性のときのアークの乱れ防止，アーク物理研究委員会，93-865 (1993)
- 57) 萩原：高周波レス TIG 溶接機の開発，溶接法研究委員会，SW-2280-94 (1994)
- 58) 岡田他：サイリスタ制御式交流電源によるアルミニウム合金のティグ溶接における極性効果の検討，軽金属溶接，16-12 (1978)
- 59) 丸尾，平田，牧野：アルミニウム合金の交流 TIG 溶接の及ぼす電流波形の影響，アーク物理研究委員会，86-612 (1986)
- 60) 神戸，藤山，市村：交流矩形波プラズマ電源の開発とアルミ溶接性の検討，アーク物理研究委員会，87-661 n (1987)
- 61) 三田，鹿島，山中：アルミニウム合金の矩形波交流 TIG 溶接，アーク物理研究委員会，89-714 (1989)
- 62) 三宅，小倉，品田：アルミニウム薄板の反転方形波ティグ溶接におけるアーク安定性およびビード形状に及ぼす電流波形の影響，軽金属溶接，23-10 (1985)
- 63) 山本他：矩形波交流 GTA 溶接における電極消耗の検討，軽金属溶接，28-4 (1990)
- 64) 山本他：AC/DC 切替 GTA 溶接法の開発とその効果，軽金属溶接，30-3 (1992)
- 65) 溶接学会編：アーク溶接におけるセンシングと制御，溶接法研究委員会 (1990)
- 66) Halmöy: Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and effective anode Melting potential, Int'l Conf. Arc Physics Weld Pool Behavior, (1979)
- 67) M. Ushio, W. Mao: Modeling and Characteristics of the Thought-the-arc Sensor Trans. JWRI Vol. 23 No. 1 (1994)
- 68) 村上，久貝，山本：溶接アーク長の動的解析とアークセンシングへの応用，溶接法ガイドブック 2「アーク溶接のセンシングと制御」，溶接法研究委員会 (1990)
- 69) 大嶋，阿部，窪田：周期的に変化する非線型特性の電源による強制溶滴移行の安定性，溶接学会誌，51-2 (1982)
- 70) 西田，河合，浜本：“ファジィ制御 CO₂ 溶接法”，溶接法研究委員会，SW-2260-93 (1993)
- 71) 山本他：ファジィ制御 CO₂/MAG 溶接機の溶接特性について，溶接法研究委員会，SW-2265-93 (1993)
- 72) 三田，田上，鹿島：“ファジィ制御によるアーク電圧自動設定方法の検討”，アーク物理研究委員会，93-849 (1993)
- 73) 山本他：“アルミニウムミグ溶接へのファジィ制御の適用”，溶接法研究委員会，SW-2183-92 (1992)