アシストガスによる溶融池の加振とその固有振動数検出による溶接制御

Oscillation of Molten Pool by Pulsed Assist Gas Oscillating Method and Penetration Control Using Peculiar Frequency

鞠 建 斌*・長谷川 裕 之*・菅 泰 雄**

Ju JIANBIN, Hiroyuki HASEGAWA and Yasuo SUGA

(Received June 4, 2004)

In automatic butt welding of relatively thin plates, it is important to control welding conditions in order to obtain a sound full penetration weld. Recently, it was reported that there was an intimate relationship between the oscillation of the molten pool and penetration. Therefore, the oscillation phenomena of the weld molten pool were analyzed and the estimation of penetration by detecting frequency of the molten pool was attempted.

In this study, a new oscillating method, Pulsed Assist Gas (PAG) oscillating method is proposed. The natural frequency of molten pool was measured from the molten pool oscillation detected by arc sensor. A control system, which controlled welding current on the basis of oscillation frequency measured, was constructed. Main results obtained are summarized as follows:

- 1) In order to oscillate molten pool during TIG arc welding of thin steel plate, Pulsed Assist Gas (PAG) oscillating method was proposed and effectiveness of this method was confirmed.
- 2) The PAG oscillating method was superior to conventional pulsed current oscillating (PC) method in amplitude of oscillation and robustness of frequency measurement.
- 3) Applying PAG oscillating method and detecting oscillation of arc voltage, the peculiar frequency of the oscillation of molten pool could be detected.
- 4) A system to control weld penetration using the principle of detecting the peculiar frequency of the molten pool was constructed and the effectiveness of the system was demonstrated.

Key Words: TIG Welding, Penetration Control, Oscillation of Molten Pool, Monitoring, Pulsed Assist Gas, PAG Method

1. 緒言

薄板の突合せ溶接あるいは厚板の突合せ初層溶接では、安定した裏波ビードの形成が要求されることが多く、これを実現するためには開先精度および溶接条件を厳重に管理する必要がある。一方、近年、開先形状など継手の条件の変動に対応して溶接条件を最適に維持し、適正な溶込みの溶接継手を得るための適応的制御手法が提案され、実用されつつある。その手法の一つとして、溶接中に溶融池を加振し、その固有振動数から溶融池の溶込み状態を監視する方法が提案され研究されている¹⁻⁷⁾。すでに、著者らは、ティグ溶接における溶接電流にパルス電流を用いることによって溶融池を加振し、その固有振動数から溶込み状態を監視する手法について報告している⁷⁾。しかし、溶接条件パラ

メータとして最も重要な溶接電流を溶融池の加振に用いているため、電流の設定に対する選択肢が大幅に制限される、比較的小電流領域での加振が困難であるなどの問題が残されていた。

そこで、著者らは、溶接結果に大きな影響を与えず、比較的小電流領域の溶融池の加振が可能で、かつ加振力を任意に調整可能な方法として、パルスアシストガス加振法を提案する。これは、溶融池に向けて、その斜め上方に取り付けた小さなノズルからパルス状の不活性ガスを吹き付け、溶融池を加振する方法である。本研究では、薄鋼板のティグ溶接における安定した裏波溶接の自動化を図るために、パルスアシストガス加振法(以下PAG法と記す)を用いて溶融池を振動させ、その固有振動数を監視してリアルタイムで溶接溶込み制御を行うシステムを構築し、その有

*慶應義塾大学大学院 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

Graduate School of Keio University (3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan)

**慶應義塾大学理工学部 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

Faculty of Science and Technology, Keio University (3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan)

効性を検討した。

2. 溶融池の振動に関する基本原理

本研究は、薄銅板のティグ溶接における安定した突合せ裏波溶接の実現を目的としている。したがって、溶融池は母材の裏面まで達している完全溶込み状態を想定している。この完全溶込み状態における溶融池の固有振動数 f は、大阪大学の丸尾・平田らにより解析的に求められている。すなわち、流体の表面形状は重力と表面張力の作用のもとで平衡状態になるように移行するものとし、溶融金属が非圧縮性の完全流体と仮定して解析を行い、その固有振動数 f を与える式として次式を求めている⁸⁾。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(-gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3\right) \frac{\sinh(kh)}{\cosh(kh) - 1}} \quad (1)$$

ただし、 D ：溶融池の相当直径、 ρ ：溶融金属密度、 γ ：溶融池の表面張力、 h ：母材の板厚である。相当直径 D とは、溶融池を同体積の円柱と仮定したときの直径であり、本研究では溶接終了後、表裏のビード幅 W_s 、 W_b を測定することにより、次式を用いて求めている⁷⁾。

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{W_s^2 + W_s W_b + W_b^2}{3}} \quad (2)$$

ただし、 V ：溶融池の体積、 h ：母材の板厚である。

なお、この手法で求めた溶融池の相当直径 D に対応するビードの幅を、相当ビード幅 W_c と称することにする。また、 k は振動モードによって決まる定数である。

Fig. 1に、主たる振動モードの模式図とそのときの k の値を示す。第1のモードは、(a)に示すような定常振動の腹が1つからなる場合で、これを完全溶込み状態におけるモード1と称し、また、他方は(b)に示すように定常振動の腹が2つからなる場合で、これをモード2と称することにする。

上記(1)式によれば、母材の材質・板厚が同一であれば、溶融池の固有振動数 f はその直径 D によって一義的に定まることになる。すなわち、溶融池の固有振動数 f を捉える

Fig. 1 Oscillation mode of molten pool.

Fig. 2 Experimental setup.

ことができれば溶融池の相当直径(溶込み状態)を推定できる。なお、溶融池が裏面に達していない部分溶込み状態では溶融池の固有振動数が格段に高くなることが知られており、したがって完全溶込み状態が実現しているか否かについては振動数から容易に区別することができる³⁻⁷⁾。本研究では、以上の基本原理を応用して溶融池の溶込み状態を推定し、裏ビード幅の変動の少ない安定した裏波溶接を得るための制御システムを構築する。

3. システム構成と加振法

本研究に用いた機器の構成をFig. 2に示す。本システムは、直流溶接機、TIG溶接トーチ、2軸直行座標型駆動ステージ、ローパスフィルタ、直流増幅器、アシストガス調整用電磁弁、パーソナルコンピュータなどから構成されている。溶融池の振動は、アーク長の変動に伴うアーク電圧 V の変動として計測され、その信号はローパスフィルタ、A/Dコンバータを介してコンピュータに取り込まれる。得られた変動電圧データは、高速フーリエ変換(FFT)によって振動解析され、固有振動数 f が推定される。なお、固有振動数を求める一連の手法は、既報⁷⁾で述べた手法をそのまま用いているのでここでは省略する。また、得られた振動数から推定される溶込み状態に対応する最適な溶接電流の増減値 ΔI が推定され、電流調整器に出力される。なお、溶融池加振用アシストガスの調整用電磁弁の開閉はコンピュータの指令によって自動的に操作される。

溶融池の加振法の原理をFig. 3に略図で示す。図中、(a)は従来から用いられているパルス電流加振法であり、本研究では比較実験として用いた。

図中、(b)が本研究で提案したPAG加振法の概略図である。加振用アシストガスには、いずれもシールドガスと同じ純アルゴンを用いた。アシストガスはガスボンベ口を取

Fig. 3 Methods to oscillate molten pool.

り付けられた圧力調整器により0.49MPa (5kgf/cm²) まで減圧され、長さ2mのガスホース、電磁弁、長さ1mのビニールチューブを経て所定のノズルより噴出する。電磁弁はPCからの信号を受けてリレーにより任意に開閉し、プログラムでこれを制御できる。アシストガスノズルには、外径3mm、内径2mmの銅製のパイプの側壁に1.2mmの穴を設けたものを使用した。このノズルはシールドガスキャップ下でかつタングステン電極の後方に固定されている。

PAG加振法は、力が釣り合っている溶融池表面にパルス状のアシストガスを吹き付け、その動圧で力の均衡を崩し、溶融池振動を誘発するというものである。その加振過程は以下の様に考えられる。

- 1) 加振用アシストガスの電磁弁が閉じられている状態では、溶融池表面におけるアーク圧力、表面張力および重力の3つの力が釣り合い状態にある。
- 2) アシストガスの電磁弁が解放されると、弁の上流で0.49MPaに加圧されていたガスがノズルから流出し、これにより溶融池表面が加圧されて釣り合い状態が崩れ、溶融池振動が誘発される。
- 3) 電磁弁の解放後、アシストガスは定常流に移行する。この間、アシストガス圧力、アーク力、表面張力、重力による4つの力の釣り合い状態近傍の下に、溶融池は固有振動数で自由振動する。
- 4) 電磁弁が閉じられた後も弁とノズルの間に残存しているアシストガスが放出され、これは時間の経過と共に減少する。この間、溶融池振動は減衰する。

本手法は、溶接電流などの溶接条件を変えずに溶融池を加振できるという特徴を有しており、ガス圧力、電磁弁解放時間などを調整することにより加振条件を容易に変えることができる。

なお、Fig. 4に、溶融池の振動に対応するアーク電圧の変動データ取得から溶融池の固有振動数 f を求めるための処理の流れを示す。

Fig. 4 Flowchart for measuring natural frequency of molten pool oscillation.

Table 1 Welding conditions.

Common conditions	
Welding process	TIG
Arc length	1.5 mm
Welding speed, v	0.167 mm/s (10 mm/min)
Pulsed current (PC) oscillating method	
Welding current	
Peak current, I_p	150-240 A
Base current, I_b	60-100 A
Peak time, t_p	60 ms
Base time, t_b	340 ms
Shielding gas, Q_s	Ar, 0.167 l/s 10 l/min)
Pulsed assist gas (PAG) oscillating method	
Welding current, I	90-150 A
Assist gas, Q_{ag}	Ar, 0.0167-0.05 l/s (1-3 l/min)
Pressure of assist gas, P_{ag}	0.49 MPa (5kgf/cm ²)

4. 溶融池振動の検出と解析

母材として板厚2および3mmのステンレス鋼板 (SUS304) を用いて溶接実験を行い、溶融池の振動数と溶込みとの関係を実験的に確認した。本研究で用いた基本的な溶接条件をTable 1にまとめて示す。すなわち、溶接法はティグ溶接とし、シールドガスとして純アルゴンを用い、

Fig. 5 Oscillation of molten pool (Pulsed current oscillating method).

Fig. 6 Oscillation of molten pool (PAG oscillating method).

その流量は10l/minとした。また、溶接速度は1.67mm/s (10cm/min) とし、アーク長は1.5mmである。パルス電流加振法におけるパルス周期は400ms、ピーク電流期間 t_p は60ms、ベース電流期間 t_b は340msに設定した。電流については、ピーク電流 I_p 、ベース電流 I_b 共に、実験目的に応じて適宜変更した。

PAG加振法では、アシストガス用の圧力調整器を0.49MPaに、流量計の設定を3l/minとした(ただし、一部、1~3l/minの範囲で変更している)。溶接電流 I についても、実験の目的に応じて適宜変更した。

PAG加振法の効果を確認するために、従来のパルス電流加振法と本法の両加振法を用いて溶融池の振動実験を行った。Fig. 5およびFig. 6に、それぞれの加振法により得られた溶融池の振動に基づく電圧変動を示す。ここでは、溶融池の幅が6~6.5mm程度となるような比較的小入熱の条件を用いて溶接実験を行っている。なお、そのときに用いた溶接電流および得られた表ビードおよび裏ビードの幅(W_s , W_b)を図中に示してある。図より、ビード幅6.5mm程度の溶融池が形成される条件において、PAG加振法による溶融池の振動が従来法のそれに比べて明瞭に捕らえられていることが確認される。この振動波形より、アシストガス吹きつけ直後の初期の振動によって生じた電圧の変動幅は約0.7Vであることがわかる。これに対して、従来法

(a) $I=120A$, $Q_{ag}=1\text{ l/min}$

(b) $I=120A$, $Q_{ag}=3\text{ l/min}$

(c) $I=135A$, $Q_{ag}=3\text{ l/min}$

Fig. 7 Effect of flow rate of assist gas and welding current on oscillation of molten pool (PAG oscillating method).

を用いた場合、溶融池の振動が明瞭に検出されていない。また、既報⁷⁾によると幅8mm程度の比較的大きい溶融池において、初期電圧変動幅は0.3V程度であると報告されている。このことから、本手法を用いれば、比較的計測が困難な低電流領域における固有振動数の計測に対しても、十分な信号を検出し得ることが確認される。

Fig. 7は、PAG加振法を用いた場合の溶融池の振動状態に及ぼす溶接電流 I およびアシストガス流量 Q_{ag} の影響を調べた結果を示したものである。図中 (a) および (b) は、 I を120Aと固定し、 Q_{ag} を1および3l/minとした場合の電圧変動を示したもので、ガス流量の多い (b) の方が電圧変動幅が大きく、振動を明瞭に検出できていることがわかる。また、図 (b) と (c) は、 Q_{ag} を一定に保ち、 I を120Aおよび135Aとした場合の結果を示したもので、同一ガス流量であれば、電流の小さい(すなわち溶融池面積が小さい)方が電圧変動幅が大きいたことがわかる。これより、より大きい溶融池を振動するためには、ガス流量を増加する必要があることが好ましいことがわかる。

Fig. 8は、PAG加振法を用いた場合の溶融池の固有振動

Fig. 8 Oscillation frequency of molten pool as function of corrected bead width.

Fig. 9 Oscillation frequency of molten pool (SUS304, t: 2mm).

数 f と溶融池相当直径の関係を示したものである。図中、実験結果をプロットで示した。また参考のため、(1)式より計算によって求めた理論値を実線および破線で示してある。なお、理論計算に際しては、溶融状態のSUS304ステンレス鋼の表面張力 γ として1.2N/mを、密度 ρ として7000kg/m³を用いた。

図より、溶融池の固有振動数は相当直径 D の増大に伴って低下している。また、母材板厚 t が2mmから3mmに増加すると、振動数が低下する傾向が認められる。これらの実験結果は、式(1)による理論値と定性的に同一傾向を示しており、溶融池の固有振動数の監視により溶込み状態の推定が可能であることを示唆している。なお、以上の結果では、実験による振動数が理論値のそれに比べて若干低い値を示している。この理由としては種々の要因が考えられるが、基本的には理論解析が極めて単純なモデルによるものであるため、実際の振動数よりも高めの値が得られたものと考えている。詳細については、今後さらに検討する所存である。

Fig. 9は、パルス電流加振法およびPAG加振法を用いて振動実験を行った結果を比較したものである。図より、同

一の相当ビード幅(相当直径に対応)に対して、パルス電流加振法に比べてPAG加振法を用いた場合の方が高い固有振動数を示している。これには、いくつかの理由が考えられるが、主たる要因として下記の2点が考えられる。

- ① PAG加振法では溶融池表面に常温のガスを吹き付けるために、溶融池表面温度が低下し、溶融金属の表面張力が増加する。その結果、振動数が増加する。
- ② ガス吹き付け直後の表面温度の低下により溶融池の凝固が促進され、加振時の溶融池の直径が一時的に減少する。これにより、溶融池の振動数が増加する。

またFig. 9で見られるように、パルス電流加振法では相当直径が6.5mm以下の溶融池、つまり固有振動数が35Hz以上の溶融池において振動を検出できなかったが、PAG加振法では、相当直径が5.5mmでも検出が可能であった。本図およびFig. 6に示した振動波形より、PAG加振法を用いれば、より小さな溶融池に対してより明瞭な振動が誘発できることが分かる。これらはPAG加振法の実用に対する有効性を示している。

5. 溶込み制御

以上で述べた溶融池の振動検出法を用い、溶融池の振動を制御するための制御システムを構築した。溶融池の振動は、溶融池の溶込み、形状等に依存する固有のものであるから、その振動を検出し、これを制御すれば溶込みを制御できる。そこで、本研究では溶融池の振動数を制御量、溶接電流を操作量とした制御システムを構築し、その有効性を確認した。制御形式としては比例制御を用い、検出された振動数と目標振動数との偏差に比例した量を操作量として溶接電流値に加減した。

溶接には、母材として板厚 t が2および3mmの2種類のSUS304ステンレス鋼板を用い、自動裏波溶接実験を行った。溶融池の目標振動数は $t=2$ mmの場合40Hz、 $t=3$ mmの場合35Hzとした。したがって、目標相当ビード幅はいずれも約7mmである。比例ゲインは、いずれも-0.4A/Hzとした。制御周期は1sである。溶接開始直後は溶融池の状態が不安定なため、溶接開始後5s経過後に振動数の検出を開始し、12s経過後より制御を開始した。

Fig. 10は、 $t=2$ mmの場合で、目標振動数を40Hz、すなわち目標相当ビード幅を約7mmに設定して溶接制御実験を行った結果を示したもので、溶融池の振動数および溶接電流の変動経過を示している。本実験では本システムの制御性を確認するために、初期溶接電流を敢えて90Aに設定して過剰溶込みの状態から制御を開始させた。したがって、制御開始当初の溶融池の振動数は、約33Hzまで低下しているが、制御開始後約10sで振動数は目標値の40Hzに収束している。また、溶接電流は、約80Aに制御されていることが確認される。さらに、溶接終了後、表裏ビード幅を測定して相当ビード幅の変化を求めた。Fig. 11に、相当ビード幅と溶融池振動数の変動状況を示す。図より、ビード幅

Fig. 10 Oscillation frequency of molten pool and welding current in control experiment (PAG oscillating method, gain: -0.4 A/Hz , $t: 2\text{mm}$).

Fig. 11 Oscillation frequency of molten pool and corrected bead width in control experiment (PAG oscillating method, gain: -0.4 A/Hz , $t: 2\text{mm}$).

Fig. 12 Oscillation frequency of molten pool and welding current in control experiment (PAG oscillating method, gain: -0.4 A/Hz , $t: 3\text{mm}$).

Fig. 13 Oscillation frequency of molten pool and corrected bead width in control experiment (PAG oscillating method, gain: -0.4 A/Hz , $t: 3\text{mm}$).

Fig. 14 Appearance of weld beads (PAG oscillating method, gain: -0.4 A/Hz).

についても目標値の約7mmに制御されている。

Fig. 12およびFig. 13は、同様の溶接制御実験を厚さ3mmのステンレス鋼板を用いて行った場合の結果を示したものである。この場合は、目標振動数を35Hz、すなわち目標相当ビード幅を約7mmに設定している。本実験においてもシステムの制御性を確認するために、初期溶接電流を取えて130Aに設定して過剰溶込みの状態から制御を開始させた。したがって、制御開始当初の溶融池の振動数は、約27Hzまで低下しているが、制御開始後約10sで振動数は目標値の35Hzに収束している。また、溶接電流は、約114Aに制御されていることが確認される。一方、Fig. 13に示した相当ビード幅と溶融池振動数の変動状況より、ビード幅についても目標値の約7mmに制御されていることが確認される。以上の結果より、本システムの溶接溶込み制御に対する有効性が確認できる。

Fig. 14は、得られた溶接ビードの外観を示したもので、表ビードおよび裏ビードのいずれにおいても規則的なリップルを有する良好なビードが得られており、本制御システムの実用性が確認される。

6. 結言

本研究において得られた主な結果を以下にまとめる。

1. 溶融池表面にパルス状のアシストガスを吹き付けることによって溶融池に振動を誘発させることができる。また、提案したパルスアシストガス (PAG) 加振法では従来のパルス電流 (PC) 加振法に比べ、より固有振動数の高い小径の溶融池に対して適用が可能である。
2. PAG加振法を用いて溶融池を加振する場合、ガス流量等を調整することによって、その加振力を容易に変更できる。なお、溶融池の大きさ等に対応して適切なガス流量を選定することが望ましい。
3. 溶融池の固有振動数は、溶融池直径および母材板厚の増大に伴って減少する。
4. 溶接母材、溶接条件等が限定された状況の下では、溶融池の固有振動数から溶融池の相当直径の推定が可能である。
5. 構築した制御システムを用いてステンレス鋼板の裏波溶接制御実験を行い、溶込み制御に対する本システムの有効性を確認した。

引 用 文 献

- 1) 金子, 飯坂, 大嶋, 山根: MIG溶接溶融池のニューロ・フuzzy制御, 溶接学会論文集, **12-3** (1994) 374-378.
- 2) Y. Suga, T. Shimamura, S. Usui and K. Aoki: Measurement of Molten Pool Shape and Penetration Control Applying Neural Network in TIG Welding of Thin Steel Plates, *ISIJ Intn.*, **39-10** (1999) 1075-1080.
- 3) R. B. Madigan, R. J. Renwick, D. F. Farson and R. W. Richardson: Computer Based Control of Full Penetration GTA Welds Using Pool Oscillation Sensing, *Computer Technology in Welding*, **6** (1986) 165-174.
- 4) Y. H. Xiao and G. den: Ouden, Weld Pool Oscillation during GTA Welding of Mild Steel, *Welding Journal*, **8** (1993) 428-434.
- 5) A. J. R. Aendenroomer and G. den: Ouden, Weld Pool Oscillation as a Tool for Penetration Sensing during Pulsed GTA Welding, *Welding Journal*, **5** (1998) 181-187.
- 6) R. Kovacevic, Y. M. Zhang and S. Ruan: Monitoring of Weld Joint Penetration Based on Weld Pool Geometrical *Welding Journal*, **8** (1996) 317-329.
- 7) 菅 泰雄, 常盤琢也, 安田馨: パルスティグ溶接における溶融池固有振動数の検出および溶込形態の推定, 一溶融池の固有振動数検出による溶込みの推定と制御 (第1報) -, 溶接学会論文集, **19-1** (2001) 19-26.
- 8) H. Maruo and Y. Hirata: "Study on pulse TIG arc welding", *Techn. Rep. of Osaka University*, **37** (1987) 51-63.