ガスメタルアーク溶接における溶滴温度を決定する支配的因子の特定*

辰巳 和也**, 田中 慶吾***, 古免 久弥****, 田中 学****,
野元 将志*****, 渡邊 耕太郎*****, 加茂 孝浩*****

Identification of dominant factors determining droplet temperature in gas metal arc welding*

by TATSUMI Kazuya**, TANAKA Keigo***, KOMEN Hisaya****, TANAKA Manabu****,
NOMOTO Masashi*****, WATANABE Kotaro***** and KAMO Takahiro*****

In this study, to identify dominant factors of droplet temperature in a gas metal arc welding, the effects polarity on droplet temperature were investigated. In particular, the droplet temperature, the wire heat input and the wire melting rate with electrode positive (EP) polarity and electrode negative (EN) polarity using 100% Ar gas and 100% CO₂ gas were measured. As a result, the droplet temperature with EP polarity was higher than EN polarity's one using 100% Ar gas within the range of 130 A to 230 A. This result showed the reverse tendency compared with the case of 100% CO₂. Moreover, the wire heat input and the wire melting rate with EN polarity were larger than EP polarity's ones regardless of the shielding gas type. The simplified calculation suggested that this was because the ion current ratio was about 80% or more. Besides, especially with EP polarity, the wire melting rate using 100% CO₂ was larger than 100% Ar's one. It was suggested that this was because the wire melting rate was made a difference by the wire preheating effect depend on the droplet frequency determined by the specific heat of the shielding gas. These results identified the dominant factors of droplet temperature as the welding current, the ion current ratio and the specific heat of the shielding gas.

Key Words: Gas metal arc welding, Polarity, Droplet temperature, Calorimeter, Heat input, Ion current ratio, Wire melting rate, Droplet frequency

1. 緒 言

ガスメタルアーク溶接において電極ワイヤはアークプラズマの熱によって溶融し、ほとんどの場合「溶滴」と呼ばれる球状の溶融金属となって溶融池へ移行する。溶滴は溶融した母材とともに溶接部を形成する役割だけでなく、アークプラズマから電極ワイヤに輸送された熱量を最終的に溶融池まで輸送する役割をも果たしている。これまでの研究により、アークプラズマから母材への熱輸送機構がほとんど解明されてきた¹⁻⁴⁾だけでなく、それらの知見を応用した溶込み形状の予測システムの開発^{5,6)}が試みられてきた。一方、溶滴が輸送する熱量、つまり溶滴温度は溶融池の温度場を変化させるため、溶込み形状に影響を与えることが知られている⁷⁻¹⁵⁾。したがって、溶込み形状の予測システムを

実用化するためには溶滴温度を制御することが必要不可欠であるといえる。

溶滴温度の制御を実現するために、我々は第一段階として溶滴温度の支配的な決定因子を特定する必要がある。ガスメタルアーク溶接における溶滴温度はワイヤ材の種類、ワイヤ送給速度、極性、溶接電流値、ワイヤ突出し長さ、シールドガスの種類などの様々な溶接条件が複雑に影響しあって決定していると考えられる。先行研究によってワイヤ材の種類、ワイヤ突出し長さ、溶接電流値、アルゴンガスに対する炭酸ガスの混合比率などの溶接条件と溶滴温度の関係は明らかにされてきた¹⁶⁻²⁰⁾。しかしながら、想定されるすべての溶接条件と溶滴温度の関係を調査することは時間的・経済的に多くのコストがかかるため困難であり、溶滴温度の支配的な決定因子の特定には至っていないのが現状である。そのため、これまでの研究のように系統的に各溶接条件が溶滴温度に与える影響を調査するだけではなく、さらに各溶接条件が溶滴温度を決定する物理的なメカニズムを明らかにすることで、最終的に溶滴温度の支配的な決定因子の特定を実現することが求められている。

他方、近年では交流やDCEN (Direct Current Electrode Negative) 極性でのガスメタルアーク溶接が一部実用化され、研究対象となっている^{21,22)}。特に、交流ガスメタルアーク溶接の低入熱・耐ギャップ性の高さなどの特徴はEN (Electrode Negative) 極性での溶滴温度がEP (Electrode Positive) 極性の

*受付日 2021年5月7日 受理日 2021年7月28日

**正 員 大阪大学 接合科学研究所 (現在 株式会社三宅製作所) Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University (Present Address: MIYAKE INDUSTRIES CO., LTD.)

***正 員 大阪大学 接合科学研究所 (現在 地方独立行政法人大阪産業技術研究所 和泉センター) Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University (Present Address: Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology, Izumi Center)

****正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

*****特別員 日本製鉄株式会社 Member, Nippon Steel Co., Ltd.

場合よりも低いことに起因する^{23,24)}。そのため、極性が溶滴温度に与える影響の解明が求められている。しかしながら、従来からガスマetalアーク溶接はEP極性での使用が主流であったことから極性が溶滴温度に与える影響に関する研究は少なく、未だその関係性は明らかにされていない。したがって極性と溶滴温度の関係について改めて調査し、極性が溶滴温度に影響を与えるメカニズムの確証となる実験データを得ることは交流や直流正極性でのガスマetalアーク溶接法の更なる機能向上のために必要不可欠である。

そこで本研究では、極性が溶滴温度に与える影響を調査し、さらにその物理的なメカニズムを明らかにすることで溶滴温度の支配的な決定因子を特定することを目的とした。具体的には、溶滴温度の計測結果を溶滴温度の決定要素と考えられる「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」と「単位時間あたりに溶融するワイヤの質量（以下、ワイヤ溶融率と記述）」に細分化したうえで、極性がそれぞれの要素に与える影響を調査し比較することで、最終的に極性が溶滴温度に与える影響のメカニズムの解明を試みた。本研究では、得られる知見を汎用性の高いものにするため、ワイヤには軟鋼、シールドガスには100%アルゴンガスおよび100%炭酸ガスを使用したガスマetalアーク溶接を研究対象とする。

2. 実験方法

Fig.1に本研究で使用した実験装置の概略図を示す。この実験装置はデジタルインバータ制御式自動溶接機、溶接トーチ、母材（水冷銅、50mm×50mm×45mm thick）、バークライト板、銅カップ、断熱容器、銅カップと断熱容器の間を満たしている水、K型熱電対、データロガー、攪拌子、磁気スターラーによって構成されている。本実験では溶接終

了後に溶接機に表示される、溶接中の平均電流値を読み取り、溶接電流値として記録した。

Fig.2に本研究で使用した実験器具の一部の写真を示す。Fig.2(a)は銅カップ、Fig.2(b)は断熱容器、Fig.2(c)は銅カップと断熱容器とバークライト板を実験で使用するために組み合わせた状態の写真をそれぞれ示している。

溶接トーチは水平に設置され、落下後の溶滴がアークの放射熱によって再加熱されないようにするため、銅カップ底面との距離が約200mmとなるように設置された²⁵⁾。母材は水冷銅であり、溶滴が母材を伝うように落下することを防ぐためトーチに対して30°傾けて設置された。また、アークの放射熱によって断熱容器内の水が温められないようにバークライト板は断熱容器上に設置された。断熱容器内の水はスターラーによって回転する攪拌子によって常に攪拌されており、その温度はほとんど均一にされている。この時の攪拌速度は 250min^{-1} に設定された²⁶⁾。なお本実験では、溶滴落下中の熱損失は考慮していない。

装置上方においてアーク放電を行うことで形成する溶滴は、断熱容器の中に設置した銅カップ内に落下することで溶滴の保有熱量を銅カップへ伝える。その後、溶滴から銅カップへ伝えられる熱量は銅カップと断熱容器の間を満たしている水へと伝わる。実験前と実験後の水温はデータロガーに接続された熱電対によって計測される。実験後に銅カップ内に落下した溶滴の質量ははかりを用いて計測される。本研究では溶滴落下中の、酸化による溶滴の質量増加の影響は無視した。実験後の溶滴温度と銅カップの温度お

Fig.1 Schematic illustration of the experimental setup

Fig.2 Photographs of experimental equipment

Table 1 Welding conditions

Wire feed rate	3.0~16.6 m·min ⁻¹
Arc voltage	35.0 V
Contact tip to workpiece distance	25 mm
Wire	JIS Z3312 YGW11, Ø1.2 mm
Shielding gas	100% Ar, 100% CO ₂
Gas flow rate	20 L·min ⁻¹
Polarity	DCEP, DCEN

Table 2 Iron physical property values¹⁶⁾

Melting temperature	1811 K
Specific heat (under melting temperature)	$0.714 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Specific heat (over melting temperature)	$0.924 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Latent heat	$247.09 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

(a) 100% Ar

(b) 100% CO₂

Fig. 3 Experimental results of droplet temperature

よび水温は等しくなるため、計測された水温および溶滴の質量の計測値を式 (1) に代入することで溶滴温度を求めることができる²⁷⁾。

$$m_d [C_{pl}(T_l - T_m) + \Delta H_m + C_{ps}(T_m - T_h)] = m_w [C_{pw}(T_h - T_0)] + m_c [C_{pc}(T_h - T_0)] \quad (1)$$

ここで、 m_d は採集された溶滴の質量、 m_w は実験で使った水の質量、 m_c は銅カップの質量、 C_{pl} は融点以上での鉄の定圧比熱、 C_{ps} は融点以下での鉄の定圧比熱、 C_{pw} は水の定圧比熱、 C_{pc} は銅の定圧比熱、 T_l は溶滴温度、 T_m は鉄の融点、 T_h は実験後の水温、 T_0 は実験前の水温、 ΔH_m は鉄の溶融潜熱をそれぞれ表している。水の定圧比熱は $4.22 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、銅の定圧比熱は $0.386 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ とし、それぞれの定圧比熱は温度に依存しないとす²⁷⁾。Table 1 に溶接条件を示す。Table 2 に溶滴温度の算出に使用した鉄の各物性値を示す。

3. 実験結果

Fig. 3(a) にシールドガスとしてアルゴンガスを使用したガスメタルアーク溶接における溶滴温度の計測結果を示す。横軸は溶接中の平均電流値を示している。赤色かつ三角形で示すデータは DCEP 極性での計測値であり、青色かつ丸で示すデータは DCEN 極性での計測値である。DCEP 極性での結果をみると、約 130 A から 260 A の電流域において溶滴

温度は電流値の増大に伴って約 2200 K から 3000 K まで増大するという傾向を示した。また DCEN 極性での結果についても、約 100 A から 230 A までの電流域において、溶滴温度は電流値の増大に伴って約 1900 K から 2300 K まで増大する傾向が確認された。加えて、シールドガスとしてアルゴンガスを用いた場合、約 130 A から 230 A の電流域において溶滴温度は DCEP 極性の場合の方が DCEN 極性の場合よりも高くなる傾向が確認された。このとき、例えば約 130 A においては約 200 K、約 210 A においては約 300 K 高くなっていた。

Fig. 3(b) にシールドガスとして炭酸ガスを使用したガスメタルアーク溶接における溶滴温度の計測結果を示す。横軸は溶接中の平均電流値を示している。赤色かつ三角形で示すデータは DCEP 極性での計測値であり、青色かつ丸で示すデータは DCEN 極性での計測値である。DCEP 極性での結果をみると、約 160 A から 300 A の電流域において溶滴温度は電流値の増大に伴って約 1800 K から 2100 K まで増大する傾向を示した。また DCEN 極性での結果をみると、DCEP 極性と同様に約 120 A から 300 A の電流域において溶滴温度は電流値の増大に伴って約 1900 K から 2400 K まで増大する傾向を示した。加えて、シールドガスとして炭酸ガスを用いた場合、約 160 A から 300 A の電流域において溶滴温度は DCEN 極性の場合の方が DCEP 極性の場合よりも高くなり、シールドガスにアルゴンガスを用いた場合と逆の傾向を示すことが確認された。このとき、例えば約 170 A においては約 200 K、約 280 A においては約 100 K 高くなっていた。

4. 考 察

4.1 溶滴温度の決定要素について

単位質量当たりの溶滴の保有熱量を H とすると、溶滴の温度 T_l は溶滴の保有熱量を示す式 (1) の左辺を基に次式のように示される。

$$T_l = T_m + \frac{H - C_{ps}(T_m - T_h) - \Delta H_m}{C_{pl}} \quad (2)$$

つまり、溶滴温度は単位質量当たりの溶滴の保有熱量、定圧比熱、溶融潜熱によって決定する。他方、単位質量当たりの溶滴の保有熱量とワイヤ溶融速度の関係は次式 (3) で与えられることが知られている²⁸⁾。

$$v_m = \frac{1}{\rho H} (\Phi j + R_0 l j^2) \quad (3)$$

ここで v_m はワイヤ溶融速度、 ρ はワイヤの密度、 Φ はアークプラズマからワイヤへの入熱の等価電圧、 j は電流密度、 R_0 はワイヤの抵抗率、 l はワイヤ突出し長さをそれぞれ表している。右辺括弧内の第一項はアークプラズマからワイヤへの入熱量を表しており、第二項はワイヤの抵抗発熱量を表している。本研究においてワイヤの断面積は一定であることから、次式のように書き換えることができる。

$$H = \frac{1}{M} (\Phi I + R l I^2) \quad (4)$$

ここで M はワイヤ溶融率、 I は溶接電流値、 R は単位長さ当たりのワイヤの抵抗値をそれぞれ表している。この式から、溶滴温度は「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」と「ワイヤ溶融率」によって決定することがわかった。

4.2 単位時間当たりのワイヤへの入熱量について

4.2.1 極性及びシールドガス種が与える影響

本研究では単位時間当たりのワイヤへの入熱量 [W] は溶滴の保有熱量 [$J \cdot kg^{-1}$] にワイヤ溶融率 [$kg \cdot s^{-1}$] をかけること

で求めた。溶滴の保有熱量 H は式 (1) を参考にした次のような式 (5) によって求められる。

$$H = \frac{m_w [C_{pw}(T_h - T_0)] + m_c [C_{pc}(T_h - T_0)]}{m_d} \quad (5)$$

一方、本研究で使用した溶接電源は定電圧特性であり「電源の自己制御作用」がはたらくため、平均のワイヤ溶融速度はワイヤ送給速度と等しいといえる。したがって、ワイヤ溶融率は溶滴温度の計測実験を行ったときのワイヤ送給速度にワイヤ断面積とワイヤの密度をかけることで算出する。使用したワイヤの成分はほとんど鉄であることから、ここでは鉄の密度をワイヤの密度として用いる。

Fig. 4(a) にシールドガスとしてアルゴンガスを使用したガスマタルアーク溶接における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」の算出結果を示す。横軸は溶接中の平均電流値を示している。赤色かつ三角形で示すデータはDCEP極性での算出値であり、青色かつ丸で示すデータはDCEN極性での算出値である。DCEP極性での結果をみると、約130 Aから270 Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は電流値の増加に伴って約1000 Wから3000 Wまで増加することが示された。DCEN極性での結果をみると、約90 Aから230 Aの電流域において単位時間当たりのワイヤの入熱量は電流値の増加に伴って約1200 Wから3300 Wまで増加することが示された。このように、シールドガスとしてアルゴンガスを用いた場合、約130 Aから230 Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも大きくなる傾向が確認された。このとき、例えば約130 Aにおいては約500 W、約210 Aにおいては約700 W大きくなっていた。第3章で述べたように、シールドガスにアルゴンガスを使用した場合、約130 Aから230 Aの電流域において溶滴温度はDCEP極性の方がDCEN極性の場合よりも大きくなる傾向が確認された。したがって、極性が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響は極性が溶滴温度に与える影響と逆の傾向を示すことが確認された。

Fig. 4(b) にシールドガスとして炭酸ガスを使用したガスメ

(a) 100% Ar

(b) 100% CO₂

Fig. 4 Experimental results of heat input to wire

タルアーク溶接におけるワイヤへの入熱量の算出結果を示す。横軸は溶接中の平均電流値を示している。赤色かつ三角形で示すデータはDCEP極性での算出値であり、青色かつ丸で示すデータはDCEN極性での算出値である。DCEP極性での結果をみると、約160Aから300Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は電流値の増加に伴って約1500Wから3000Wまで増加することが示された。DCEN極性での結果をみると、約120Aから300Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は電流値の増加に伴って約1500Wから4000Wまで増加することが示された。このように、シールドガスとして炭酸ガスを用いた場合、約160Aから300Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも大きくなる傾向が確認された。このとき、例えば約160Aにおいては約500W、約300Aにおいては約1000W大きくなっていた。第3章で述べたように、シールドガスに炭酸ガスを使用した場合、約160Aから300Aの電流域において溶滴温度はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも高くなる傾向が確認された。したがって、極性が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響は極性が溶滴温度に与える影響と同様の傾向を示すことが確認された。

加えて、Fig. 4のそれぞれの結果の内DCEN極性での算出値をシールドガス種によって比較すると、どちらの結果も約130Aから230Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は約1500Wから3000Wを示し、シールドガス種による差は小さく、どちらもこの入熱量はDCEP極性に比べて高い傾向にあった。またDCEP極性での算出値をシールドガス種によって比較すると、どちらの結果も約160Aから270Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は約1500Wから3000Wを示し、200A以下では差は小さいものの、全体としてシールドガスにアルゴンガスを用いた方が炭酸ガスを用いるよりもこの入熱量は高い傾向にあった。

4.2.2 単位時間当たりのワイヤへの入熱量の概算

前節で述べたように、「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はシールドガスの種類にかかわらずDCEN極性の方がDCEP極性の場合を上回ることが確認された。このような傾向となる原因を調査するために、両極性における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」を概算し、比較する。このとき、ワイヤの抵抗発熱量は極性の影響がほとんどないと考えられるため、考慮しないこととした。ガスメタルアーク溶接中の陽極における単位面積当たりのエネルギーバランスは次の式(6)のように示される²⁹⁾。

$$q_A = j \left(\frac{5}{2} \frac{k_B T_{\text{arc}}}{e} + V_A + \frac{\varphi_A}{e} \right) + |\kappa \nabla T_{\text{arc}}| + U_{\text{arc}} - U_A \quad (6)$$

ここで q_A は陽極における単位面積当たりの入熱量、 k_B はボ

ルツマン定数、 T_{arc} はアークプラズマの温度、 e は電荷素量、 V_A は陽極降下電圧、 φ_A は陽極材料の仕事関数、 κ は熱伝導率、 U_{arc} はアークプラズマからの放射エネルギー、 U_A はワイヤからの放射エネルギーをそれぞれ表している。式(6)の右辺第一項は電子による陽極発熱を意味している。このとき、括弧内の第一項は電子のエンタルピーの等価電圧を表している。一方、陰極における単位面積当たりのエネルギーバランスは式(7)のように示される²⁹⁾。

$$q_K = j_i \left(\frac{3}{2} \frac{k_B T_{\text{arc}}}{e} + V_K + \frac{\varepsilon_i - \varphi_K}{e} \right) - j_e \frac{\varphi_K}{e} + |\kappa \nabla T_{\text{arc}}| + U_{\text{arc}} - U_K \quad (7)$$

ここで q_K は陰極における単位面積当たりの入熱量、 j_i はイオン電流密度、 V_K は陰極降下電圧、 ε_i はワイヤ先端近傍のガスの電離エネルギー、 φ_K は陰極材料の仕事関数、 j_e は電子電流密度、 U_K は陰極からの放射エネルギーをそれぞれ表している。式(7)において、右辺第一項は陽イオンによる陰極加熱を意味している。このとき、括弧内の第一項は陽イオンの運動エネルギーの等価電圧を表している。また式(7)の右辺第二項は電子放出による陰極の冷却を意味している。本研究では極性によって熱伝導および放射による熱流束はほとんど変わらないとみなし、DCEP極性の場合には陽極発熱のみを、DCEN極性の場合には陰極発熱と電子放出による冷却効果を概算し比較することとする。このとき、すべてのエネルギーはワイヤ先端の断面でのみ授受されると仮定すると、式(8)のような関係が成り立つ。

$$I = j \cdot A \quad (8)$$

ここで A はワイヤの断面積を表している。したがって、DCEP極性における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は式(9)によって求められる。

$$Q_A = I \left(\frac{5}{2} \frac{k_B T_{\text{arc}}}{e} + V_A + \frac{\varphi_A}{e} \right) \quad (9)$$

ここで Q_A はDCEP極性における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」を表している。DCEN極性における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は式(10)によって求められる。

$$Q_K = I_i \left(\frac{3}{2} \frac{k_B T_{\text{arc}}}{e} + V_K + \frac{\varepsilon_i - \varphi_K}{e} \right) - I_e \frac{\varphi_K}{e} \quad (10)$$

ここで Q_K はDCEN極性における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」を、 I_i はイオン電流値、 I_e は電子電流値をそれぞれ表している。このとき、イオン電流値と電子電流値は式(11)と式(12)のように求められる。

$$I_i = I \cdot \tau_i \quad (11)$$

$$I_e = I - I_i \quad (12)$$

ここで、 r_i は全電流値に対するイオン電流値の割合、つまりイオン電流率を表している。イオン電流率は式 (13) のように表される。

$$r_i = \frac{I_i}{I_i + I_e} \quad (13)$$

したがって、DCEN 極性における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」は式 (14) のように求められる。

$$Q_K = I \left[r_i \left(\frac{3 k_B T_{\text{arc}}}{2e} + V_K + \frac{\varepsilon_i}{e} \right) - \frac{\varphi_K}{e} \right] \quad (14)$$

本研究においてイオン電流率は計算パラメータとし、任意に決定される。金丸らの報告によると、ミグ溶接におけるイオン電流率は熔融池の表面温度によって約 40% から 90% にもなる³⁰⁾。そこで本研究では、イオン電流率は 50%、80% のいずれかであるとして概算を行う。Table 3 に概算条件を示す。

概算対象はシールドガスとしてアルゴンガスもしくは炭酸ガスを使用したガスマタルアーク溶接中のワイヤへの単位時間当たりの入熱量とする。概算仮定としてワイヤ先端付近のアークプラズマは鉄原子のみによって構成されているとする^{31, 32)}。さらに、ワイヤ先端部付近のアークプラズマ温度および降下電圧は溶接電流値の影響を受けないものとする。

Fig. 5(a) にイオン電流率を 50% とした場合における「単

位時間当たりのワイヤへの入熱量」の概算結果を示す。横軸は電流値を示している。赤色の結果はDCEP極性の結果を、青色の結果はDCEN極性の結果を示している。また、実線の結果はシールドガスにアルゴンガスを用いた場合の結果を、破線の結果は炭酸ガスを用いた場合の結果を示している。DCEP極性での各概算結果をシールドガス種によって比較すると、50 A から 350 A の電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はシールドガスにアルゴンガスを用いた場合の方が炭酸ガスを用いた場合に比べて 143 W から 998 W 大きくなる傾向を示す。この理由はシールドガスに炭酸ガスを用いた場合はアルゴンガスを用いた場合に比べて陽極降下電圧や陽極材料のポテンシャルエネルギーが小さいことなどと考えられる。DCEN極性での概算結果をシールドガス種によって比較すると、50 A から 350 A の電流域においてワイヤへの入熱量はシールドガスに炭酸ガスを用いた場合の方がアルゴンガスを用いた場合に比べて 53 W から 368 W 大きくなる傾向を示す。これらの結果からアルゴンガスと炭酸ガスを用いた場合のワイヤへの入熱量の差はDCEP極性のときよりも小さくなることがわかった。この理由は、本研究で使用した陽極降下電圧のシールドガス種による差は 2.1 eV であるのに対し、陰極降下電圧のシールドガス種による差は 0.6 eV と比較的小さいからだといえる。実験算出結果をみても DCEP 極性の結果はシールドガス種によって差異が確認されたが、DCEN 極性の結果はシールドガス種によって差異がほとんどないことが確認された。したがって、上述の議論は実際の現象に対しても妥当であるといえる。また、シールドガス種にかかわらず「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はDCEP極性の場合の方がDCEN極性の場合に比べて大きいことが示される。その差は、シールドガスにアルゴンガスを用いた場合では 325 W から 2277 W、炭酸ガスを用いた場合では 130 W から 912 W である。前項で述べたように、実験結果から算出された「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はDCEN極性の場合の方がDCEP極性の場合に比べて大きい。したがって、イオン電流

Table 3 Simplified calculation conditions

Welding current; I	50 ~ 350 A
Ion current ratio; r_i	50, 80 %
Arc temperature near wire tip ^{31, 32)} ; T_{arc}	8000 K
Anode fall voltage ³³⁾ ; V_A	(100 % Ar) 7.0 V (100 % CO ₂) 4.9 V
Cathode fall voltage ³³⁾ ; V_K	(100 % Ar) 13.9 V (100 % CO ₂) 14.5 V
Work function ³⁴⁾ ; φ	(100 % Ar) Fe 4.6 eV (100 % CO ₂) FeO 3.85 eV
Ionization energy ³⁴⁾ ; ε_i	Fe 7.9 eV

Fig. 5 Calculation results of heat input to wire

率を50%とした場合の「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」の概算結果は実験・算出結果とは異なる傾向を示すことがわかった。

Fig. 5(b) にイオン電流率を80%とした場合における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」の概算結果を示す。横軸は電流値を示している。赤色の結果はDCEP極性の結果を、青色の結果はDCEN極性の結果を示している。また、実線の結果はシールドガスにアルゴンガスを用いた場合の結果を、破線の結果は炭酸ガスを用いた場合の結果を示している。その結果、シールドガスの種類にかかわらず「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合に比べて大きいことが示され、実験・算出結果と傾向が一致した。その差は、シールドガスにアルゴンガスを用いた場合では17Wから120W、炭酸ガスを用いた場合では221Wから1548Wである。この理由は、イオン電流率が増加したことで陰極発熱量が増加し、加えて電子電流率の低下に起因して電子放出による冷却効果が小さくなることでDCEN極性における「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」が増加したからである。

以上のことから、DCEN極性でのガスメタルアーク溶接におけるワイヤ先端付近のイオン電流率は約80%以上であれば、実験計測結果の傾向と一致することがわかった。したがって、DCEN極性の場合の「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」がDCEP極性の場合を上回る理由はDCEN極性においてイオン電流率が約80%以上となるためだと考えられた。

4.3 極性およびシールドガス種がワイヤ溶融率に与える影響

Fig. 6(a) にシールドガスにアルゴンガスを用いた場合の「ワイヤ溶融率」の算出結果を示す。横軸は平均電流値を示している。赤色かつ三角形で示す算出値はDCEP極性での算出値であり、青色かつ丸で示すデータはDCEN極性での算出値である。DCEP極性での結果をみると、約130Aから

270Aの電流域において「ワイヤ溶融率」は電流値の増加に伴って約 $0.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ から $1.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ まで増加することが示された。DCEN極性での結果をみると、約90Aから230Aの電流域において「ワイヤ溶融率」は電流値の増加に伴って約 $0.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ から $1.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ まで増加することが示された。このように、シールドガスとしてアルゴンガスを用いた場合、約130Aから230Aの電流域において「ワイヤ溶融率」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも高くなる傾向が確認され、極性が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響と傾向が一致した。このとき、約130Aにおいては約 $0.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、約210Aにおいては約 $0.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 高くなっていた。

Fig. 6(b) にシールドガスに炭酸ガスを用いた場合の「ワイヤ溶融率」の算出結果を示す。横軸は平均電流値を示している。赤色かつ三角形で示すデータはDCEP極性での算出結果であり、青色かつ丸で示すデータはDCEN極性での算出結果である。DCEP極性での結果をみると、約160Aから300Aの電流域において「ワイヤ溶融率」は電流値の増加に伴って約 $1.2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ から $1.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ まで増加することが示された。DCEN極性での結果をみると、約120Aから300Aの電流域において「ワイヤ溶融率」は電流値の増加に伴って約 $1.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ から $2.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ まで増加することが示された。このように、シールドガスとして炭酸ガスを用いた場合においても、約160Aから300Aの電流域において「ワイヤ溶融率」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも高くなる傾向が確認され、極性が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響と傾向が一致した。このとき、例えば約170Aにおいては約 $0.1 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、約300Aにおいては約 $0.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 高くなっていた。

Fig. 6のそれぞれの結果の内DCEN極性での算出値を比較すると、約130Aから230Aの電流域において「ワイヤ溶融率」は約 $1.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ から $1.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ であり、実験・算出値が平均電流値の増加に対して示す傾向はほとんど同様

Fig. 6 Experimental results of wire melting rate

であった。この傾向はシールドガス種が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響の傾向と一致した。一方で、DCEP極性での算出値を比較すると、約160Aから270Aの電流域において「ワイヤ溶融率」はシールドガスに炭酸ガスを用いた場合の方がアルゴンガスを用いた場合に比べて高い傾向が確認された。このとき、例えば約180Aにおいて約 $0.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 高くなっていた。この傾向はシールドガス種が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響の傾向と逆であった。この原因はシールドガス種によって溶滴移行周波数が異なるからだと考えられる。Fig. 7に溶滴移行周波数が溶滴温度に与える影響の概略図を示す。

田中らの報告によると、シールドガスにアルゴンガスを使用した場合では約240Aから300Aの電流域において溶滴移行周波数は約200Hzから400Hzとなる³⁵⁾。そのため、溶滴が保有する熱量をワイヤ未溶融部へとほとんど伝えることなくワイヤ端を離脱してしまうと考えられる。一方、シールドガスに炭酸ガスを使用した場合では同様の電流域における周波数は50Hzにも満たず、溶滴からワイヤ未溶融部への熱伝導によってワイヤの予熱効果が大きいと考えられる³⁵⁾。アルゴンガスの比熱は炭酸ガスに比べて小さい。このとき、アルゴンガスを用いた場合の方が炭酸ガスを用いた場合に比べて熱的ピンチ効果が小さくなる。結果的に、アルゴンガスを用いた場合の方が炭酸ガスを用いた場合に比べて電磁ピンチ効果が大きくなり、溶滴移行周波数は高くなると考えられる。このようなメカニズムに従い、シールドガスに炭酸ガスを使用した場合の方がアルゴンガスを使用した場合に比べて「ワイヤ溶融率」は高くなったと推察できる。

4.4 極性が溶滴温度に与える影響のメカニズムと溶滴温度の支配的な決定因子の特定

Table 4に本研究で調査した「単位時間当たりの入熱量」、「ワイヤ溶融率」、溶滴温度のそれぞれの実験結果のまとめを示す。これらの結果に対して前述のような考察を行うことで、極性が溶滴温度に与える影響のメカニズムは次のようであることが明らかとなった。溶接電流値、イオン電流率が支配的因子となって決定された「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」を与えられたワイヤは、溶滴移行周波数が支配的因子となるワイヤ予熱効果によって決定する「ワイヤ溶融率」に応じて溶融する。より大きい入熱を与えられた溶滴の温度は高く、その一方でワイヤの溶融体積がより大きいほど溶滴温度は低くなる。このようなメカニズムに従い、極性によって溶滴温度が変化することが明らかとなった。

最後に、このメカニズムに関連する要素の決定因子を突き止めることで溶滴温度の支配的な決定因子を特定した。以下に本研究で特定された溶滴温度の支配的な決定因子を示す。

- ①溶接電流値
- ②ワイヤ端近傍のイオン電流率
- ③シールドガスの比熱

5. 結 言

本研究では、ガスマタルアーク溶接における溶滴温度の制御指針を得るため、特に極性が溶滴温度に与える影響およびそのメカニズムを解明したうえで、溶滴温度の支配的

Fig. 7 Schematic illustration of the effect droplet frequency on droplet temperature

Table 4 Summary of experimental results

Shielding gas	Polarity	Heat input to wire [W]	Melting wire weight [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]	Droplet temperature [K]
100% Ar	DCEP	Middle	Low	High
	DCEN	High	High	Middle
100% CO ₂	DCEP	Low	Middle	Low
	DCEN	High	High	Middle

Each "High", "Middle" and "Low" represents the combination of shielding gas and polarity that indicates the highest, middle and lowest in each measurement or calculation result

な決定因子を特定することを目的とした。溶滴温度の実験計測結果をもとに、極性が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」や「ワイヤ溶融率」に与える影響を算出し、得られた結果に対して考察を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

1. 極性が溶滴温度に与える影響を調査した結果、シールドガスとしてアルゴンガスを用いた場合、約130Aから230Aの電流域において溶滴温度はDCEP極性の方がDCEN極性の場合よりも高くなる傾向が確認された。また、シールドガスとして炭酸ガスを用いた場合、約160Aから300Aの電流域において溶滴温度はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも高くなり、シールドガスにアルゴンガスを用いた場合と逆の傾向を示すことが確認された。

2. 極性が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響を調査した結果、シールドガスとしてアルゴンガスを用いた場合、約130Aから230Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも大きくなる傾向が確認された。また、シールドガスとして炭酸ガスを用いた場合、約160Aから300Aの電流域において「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも大きくなる傾向が確認された。

3. 「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」を概算することで、DCEN極性の場合の「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」がDCEP極性の場合を上回る理由は、DCEN極性において全電流に対するイオン電流率が約80%以上となるためであると考えられた。

4. 極性が「ワイヤ溶融率」に与える影響を調査した結果、シールドガスとしてアルゴンガスを用いた場合、約130Aから230Aの電流域において「ワイヤ溶融率」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも高くなる傾向が確認され、極性が単位時間当たりのワイヤへの入熱量に与える影響と傾向が一致した。また、シールドガスとして炭酸ガスを用いた場合においても、約160Aから300Aの電流域において「ワイヤ溶融率」はDCEN極性の方がDCEP極性の場合よりも高くなる傾向が確認され、極性が単位時間当たりのワイヤへの入熱量に与える影響と傾向が一致した。しかしながら、特にDCEP極性での算出値を比較すると、約160Aから270Aの電流域において「ワイヤ溶融率」はシールドガスに炭酸ガスを用いた場合の方がアルゴンガスを用いた場合に比べて高い傾向が確認された。この傾向はシールドガス種が「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」に与える影響の傾向と逆であった。

5. 極性が溶滴温度に与える影響のメカニズムは次のようであることが明らかとなった。溶接電流値、イオン電流率が支配的因子となって決定された「単位時間当たりのワイヤへの入熱量」を与えられたワイヤは、溶滴移行周波数が支配的因子となるワイヤ予熱効果によって決定する「ワイヤ溶融率」に応じて溶融する。より大きい熱量を与えられ

た溶滴の温度は高く、その一方でワイヤの溶融体積がより大きいほど溶滴温度は低くなる。このようなメカニズムに従い、極性によって溶滴温度が変化する。このメカニズムに関連する要素の決定因子を突き止めることで、溶接電流値、ワイヤ端付近のイオン電流率、シールドガスの比熱が溶滴温度の支配的な決定因子であることを特定した。

参考文献

- 1) S. Asai, M. Tanaka, S. Yamane, F. Miyasaka, M. Shigeta, K. Nomura and Y. Ogino: Recent Progresses of Welding and Joining Engineering, Journal of The Japan Welding Society, 89-5 (2020), 38-51. (in Japanese)
- 2) M. Shigeta and M. Tanaka: Diagnostics and Numerical Analyses for Thermal and Flow Phenomena in Arc Welding, The Journal of The International Electrical Engineers of Japan, 140-6 (2020), 350-353. (in Japanese)
- 3) M. Shigeta and M. Tanaka: Visualization of electromagnetic-thermal-fluid phenomena in arc welding, Japanese Journal of Applied Physics, 59 (2019), SA0805 (12 pages).
- 4) K. Tanaka, M. Shigeta, H. Komen and M. Tanaka: Electrode contamination caused by metal vapor transport during tungsten inert gas welding, Science and Technology of Welding and Joining, 26-3 (2021), 258-263.
- 5) Y. Abe, T. Fujimoto, M. Nakatani, M. Shigeta and M. Tanaka: Development of a Welding Condition Optimization Program for Narrow Gap SAW, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 38-2 (2020), 98s-102s.
- 6) Y. Abe, T. Fujimoto, M. Nakatani, M. Shigeta and M. Tanaka: Study on Proper Welding Condition for Ultra- Narrow Gap Submerged Arc Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 39-1 (2021), 64-74. (in Japanese)
- 7) Y. Tsujimura and M. Tanaka: Numerical Simulation of heat source property with metal vapor behavior in GMA Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 30-1 (2012), 68-76. (in Japanese)
- 8) M. Seto, A. Aoki, M. Tanaka, S. Tashiro and T. Era: Study on new GMA welding process with duplex current feeding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 34-2 (2016), 150-157. (in Japanese)
- 9) A. Aoki, S. Tashiro, H. Kurokawa and M. Tanaka: Application of Duplex Current Feeding Metal Inert Gas Welding to Overlay Welding Using Nickel Based Alloy Welding, Journal of Smart Processing, 9-3 (2020), 140-147. (in Japanese)
- 10) S. Tashiro, M. Seto, A. Aoki and M. Tanaka: Numerical simulation of new welding process with duplex current feeding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 34-4 (2016), 223-230. (in Japanese)
- 11) M. Seto, A. Aoki, S. Tashiro and M. Tanaka: Comparison of Wettability of Beads in MIG Welding Process with Duplex Current Feeding and Conventional MIG Welding Process, Journal of Smart Processing, 6-1 (2017), 28-32. (in Japanese)
- 12) S. Tashiro, M. Tanaka, M. Seto and A. Aoki: Numerical Analysis on Influence of Electrical Conductivity of Wire on Droplet Temperature in Duplex Current Feeding MIG Welding, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 35-2 (2017), 51s-55s.
- 13) S. Tashiro, A. Aoki, H. Kurokawa and M. Tanaka: Numerical Prediction of Feasibility to Lower Droplet Temperature in Duplex Current Feeding MIG Welding Process, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 38-2 (2020), 44s-48s.
- 14) A. Aoki, S. Tashiro, H. Kurokawa and M. Tanaka: Influence of Current Feeding Position of Duplex Current Feeding MIG Welding on Droplet Heat Quantity, Materials, 12-21 (2019), 3590 (16 pages).
- 15) A. Aoki, S. Tashiro, H. Kurokawa and M. Tanaka: Development of

- novel MIG welding process with duplex current feeding, *Journal of Manufacturing Processes*, 47 (2019), 74-82.
- 16) M. Ozawa and T. Morita: The Measurement of Heat Quantity in Melted Metals, *Journal of The Japan Welding Society*, 32-2 (1963), 130-137. (in Japanese)
- 17) K. Yamazaki, E. Yamamoto, K. Suzuki, F. Koshiishi, K. Waki, S. Tashiro, M. Tanaka and K. Nakata: The Measurement of Metal Droplet Temperature in GMA Welding by Infrared Two-Color Pyrometry, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 26-3 (2008), 214-219. (in Japanese)
- 18) E. J. Soderstrom, K. M. Scott and P. F. Mendez: Calorimetric measurement of droplet temperature in GMAW, *Welding Journal*, 90-4 (2011), 1s-8s.
- 19) C. McIntosh, J. Chapuis and P. F. Mendez: Effect of Ar-CO₂ gas blends on droplet temperature in GMAW, *Welding Journal*, 95-8 (2016), 273s-279s.
- 20) S. B. Mamat, T. Methong, S. Tashiro and M. Tanaka: Droplet temperature measurement in metal inert gas welding process by using two color temperature measurement method, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 35-2 (2017), 160s-164s.
- 21) T. Kataoka, R. Ikeda, M. Ono, K. Yasuda and Y. Hirata: Effect of REM Addition of Wire on CO₂ Gas Shielded Arc Welding, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 26-1 (2008), 37-41. (in Japanese)
- 22) T. Ueyama: Welding Power Sources, *Journal of The Japan Welding Society*, 77-2 (2008), 129-134. (in Japanese)
- 23) H. Tong, T. Ueyama and M. Ushio: Study on Phenomena of Wire Melting and Bead Formation in AC Pulsed MIG Welding, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 22-3 (2004), 389-397. (in Japanese)
- 24) H. Tong, K. Nakata, M. Tanaka, T. Mita and M. Ushio: Mechanism of Fume Reduction in Welding Al-Mg Alloys Using AC Pulsed MIG Process, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 22-3 (2004), 375-388. (in Japanese)
- 25) H. Maruo, Y. Hirata and Y. Noda: Heat Contents and Temperature of Metal Droplets in Pulsed MIG Welding, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 2-4 (1984), 573-578. (in Japanese)
- 26) A. Aoki, S. Tashiro, H. Kurokawa and M. Tanaka: Influence of Welding Materials of Duplex Current Feeding MIG Welding, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 38-2 (2020), 16s-20s.
- 27) E. Soderstrom: Gas metal arc-welding electrode heat-and-mass transfer mechanisms, Doctoral Thesis, Colorado School of Mines (2009).
- 28) E. Halmøy: Wire melting rate, droplet temperature and effective anode melting potential, *Proceedings of The International Conference on Arc Physics and Weld Pool Behavior* (1979).
- 29) 溶接アーク物理研究委員会: 溶接プロセスの物理, 黒木出版 (1996).
- 30) S. Kanemaru, T. Sasaki, T. Sato, H. Mishima, S. Tashiro and M. Tanaka: 3D Numerical Analysis Model for TIG-MIG Hybrid Welding Process, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 30-4 (2012), 306-312. (in Japanese)
- 31) Y. Tsujimura and M. Tanaka: Analysis of Behavior of Arc Plasma Conditions in MIG Welding with Metal Transfer -Visualization of Phenomena of Welding Arc by Imaging Spectroscopy-, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 30-4 (2012), 288-297. (in Japanese)
- 32) T. Methong, M. Shigeta, M. Tanaka, R. Ikeda, M. Matsushita and T. Kataoka: Diagnostic of heat source characteristics in gas metal arc welding using CO₂ shielding gas, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 35-2 (2017), 103s-107s.
- 33) R. Hajosy and I. Morva: Cathode and anode falls of arcs with fusible electrodes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27 (1994), 2095-2101.
- 34) M. Tanaka: Physics of Welding Arcs, *Journal of The Japan Welding Society*, 87-8 (2018), 555-574. (in Japanese)
- 35) M. Tanaka, T. Methong, H. Komen, M. Shigeta, T. Kataoka, M. Matsushita and S. Kozuki: Effect of shielding gas composition on gas metal arc welding phenomena using rare earth metal added wire, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 38-4 (2020), 438-447. (in Japanese)
- ~~~~~