

赤外線二色放射测温法による GMA 溶接の溶滴温度測定*

山崎 圭**, 山本 恵理**, 鈴木 啓一**, 輿石 房樹**, 和木 謙治***,
田代 真一****, 田中 学****, 中田 一博****

The Measurement of Metal Droplet Temperature in GMA Welding by Infrared Two-Color Pyrometry*

by YAMAZAKI Kei**, YAMAMOTO Eri**, SUZUKI Keiichi**, KOSHIISHI Fusaki**, WAKI Kenji***,
TASHIRO Shinichi****, TANAKA Manabu**** and NAKATA Kazuhiro****

The temperature of metal droplets is essential for clarifying the phenomenon of metal droplet transfer and the melting behavior of wire; also, it governs the emission of fumes. On the other hand, in-situ measurement of the temperature of a metal droplet formed at the tip of a wire during welding was difficult. Hence, this temperature was obtained in many experiences of measurements by such a way that several numbers of metal droplets were collected in a calorimeter to measure the amount of heat content of metal droplet and the heat was converted to temperature. With this way, however, the reliability of the measurement is not necessarily high because the heat loss of the metal droplet during the time when detaching from the wire tip and entering into the calorimeter has to be estimated properly. In this research, two-color pyrometry has been conducted to obtain the temperature of metal droplets, in which metal droplets have been photographed by high speed camera during arc welding, two wave lengths (950 and 980 nm) of light in the infrared range have been selected from the thermal radiation light emitted from the metal droplet at the instant of arc extinguishment by using an imaging spectroscopy, and the temperature has been obtained from the intensity ratio of the two waves of light. Consequently, in CO₂ arc welding, it has been revealed that the constricted arc causes high heat input density locally at the arc root portion of a metal droplet and thereby the arc root portion exhibits a higher temperature. By contrast, in MAG (80%Ar-20%CO₂) arc welding, it has been disclosed that because the arc covers metal droplets, the temperature distribution in a metal droplet is relatively uniform and the average temperature is lower than in CO₂ arc welding.

Key Words: Metal Droplet Temperature, Two-color Pyrometry, CO₂ Welding, MAG Welding, Pulsed MAG Welding, Fume emission, Metal droplet transfer

1. 緒 言

ガスシールドアーク溶接時に発生するヒュームを吸引することは、人体に有害であることが知られており、近年、特に労働衛生上の観点から議論の対象となっている。今後、これまで以上の低ヒューム溶接法および溶接材料の開発が望まれるであろう。一方、溶接ヒュームに関する研究は古くから行われており、例えば Heile らは、ヒューム発生メカニズムとして、溶滴表面における蒸気圧の高い金属およびその酸化物が蒸発し、これらが凝縮-酸化の過程を経てヒュームになると述べている¹⁾。また、菅らは、炭素鋼のアーク溶接過程について、CO₂アーク溶接用ソリッドワイヤ、CO₂アーク溶接用フラックス入りワイヤ等を用いて、ヒューム発生に及ぼす溶接条件およびワイヤ組成の影響につい

て調査すると同時に、ヒュームの供給源となる高温蒸気は、溶融池から発生しているものと比較して、より高温の溶滴を起源とするものが主であることを実験により明らかにしている^{2, 3)}。したがって、溶接中の溶滴温度は、ヒューム発生現象を支配する重要な因子であると言える。また、言うまでもなく、溶滴温度は溶接ワイヤの溶融現象にも大きく影響を及ぼすことから、溶滴移行メカニズムを解明する上でも重要な因子である。

しかし、溶接中にワイヤ先端に形成された溶滴の温度を直接計測することは困難であり、過去の計測例としては、溶滴をカロリメータに捕集し、得られた保有熱量から間接的に求めたものがほとんどである⁴⁻⁷⁾。しかし、前述の手法では、ワイヤから離脱した溶滴がカロリメータに入るまでの熱損失を適切に見積もる必要があり、信頼性の高い計測とは言えなかった。一方、平田らは、二色放射测温法により直接的に溶滴温度測定を試みている⁸⁾。しかし、その対象が MAG (Ar-20%CO₂) 溶接のみであること、更なる測定波長が 689 nm および 590.2 nm の可視光領域であることから、アークが消弧する短絡時のタイミングに合わせて測定したものであり、比較的低電流領域での測定に限られていた。

そこで、本研究では二色放射测温法において、950 nm および 980 nm の赤外領域を用いることにより、アーク光の影響を大幅に低下させると同時に、瞬間的に測定時の電流か

*受付日 平成20年5月1日 受理日 平成20年7月8日 平成19年度秋季全国大会で発表, 平成19年7月 IIW 2007 (クロアチア) で発表

**正 員 株神戸製鋼所 溶接カンパニー Member, KOBE STEEL, LTD. Welding Company

*** 大阪大学大学院生 (現在川崎重工業(株)) Graduate Student, Osaka University (Present Adress: Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

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

ら低電流(0~40 A)に切替える波形制御を実施することにより、高電流領域(CO₂溶接におけるグローブ移行、MAGおよびMAGパルス溶接におけるスプレー移行形態)での溶滴温度測定を試みた。

2. 赤外線二色放射测温法の原理

2.1 放射测温法の原理と問題点

物体はその温度に応じて電磁波の形でエネルギーを放出している。これを放射エネルギーと呼び、波長とともに連続的に変化するという特徴がある。放射エネルギーが温度とともに増加するという性質を利用して、放射エネルギーから物体の温度を測定する方法が放射测温法である。その強度と温度および波長との関係は、プランク(Planck)の放射則より次のように表すことができる⁹⁾。

$$I = \varepsilon \frac{2C_a}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(C_b/\lambda T) - 1} \dots \dots \dots (1)$$

I: 光の強度 (Wm⁻³sr⁻¹), ε: 放射率, λ: 波長 (m), T: 温度 (K),

C_a = 5.9548 × 10⁻¹⁷ (Wm³), C_b = 0.014388 (mK)

一般に用いられる放射测温法では、特定の波長もしくは波長帯域における放射エネルギーが計測対象の温度の関数となることを利用しており、原理的には放射率εと放射测温法で計測できる輝度温度がわかれば、補正により物体の温度を知ることができる。しかし、測定物質や表面状態によって放射率は大きく変動することが知られている。特に金属に関しては、表面状態や酸化の程度によっても放射率が変動する。したがって、高温金属の放射测温法では、放射率補正をいかに正確に行うかが重要となる。

2.2 二色放射测温法の原理

二色放射测温法は、放射率が未知の物体でも狭い波長帯域で分光放射率が一定とみなせる場合、異なる二波長の光を選択し、それぞれの放射強度の比から温度を求める方法である。すなわち、(1)式から各波長と光の強度を代入し、それらの比をとると、

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \frac{1 - \exp(C_b/\lambda_2 T)}{1 - \exp(C_b/\lambda_1 T)} \dots \dots \dots (2)$$

I₁, I₂: 光の強度 ε₁, ε₂: 放射率 λ₁, λ₂: 波長 (nm) となる。ここでウィーン(Wien)の近似式を適用し、また互いの放射率は等しいと近似すると、

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \frac{\exp(C_b/\lambda_2 T)}{\exp(C_b/\lambda_1 T)} \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。これを温度Tについて変換すると、

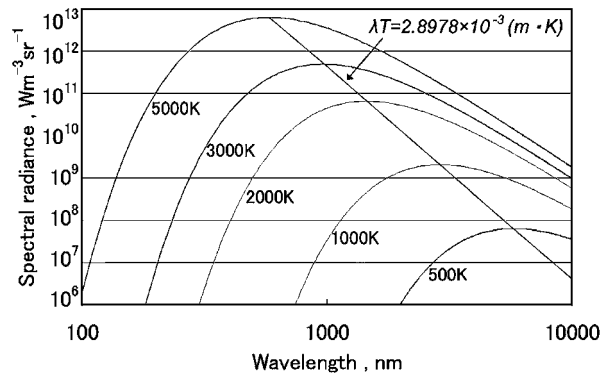


Fig. 1 Spectral radiance of black body

$$T = \frac{C_b(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{1}{\ln(I_1 \lambda_1^5 / I_2 \lambda_2^5)} \dots \dots \dots (4)$$

が得られ、異なる二波長の光強度比から温度が導出できる。

2.3 二色放射测温法へ及ぼす測定波長の影響

プランクの放射則より、放射エネルギーは波長によって変化することがわかる。完全黒体の分光放射強度、温度および分光放射波長との関係はFig. 1のように表される。また、放射強度が最大となる波長は、(5)式のようにウィーン(Wien)の変位則によっても求めることができる。

$$\lambda_m T = 2.8978 \times 10^{-3} (m \cdot K) \dots \dots \dots (5)$$

Fig. 1あるいは(5)式からわかるように、特定の温度では特定波長の光をピークに放射していることがわかる。一方、今回対象としている熔融金属は2000 K程度あるいはそれ以上であると推定される。その温度域では約1000 nmの波長域付近で放射エネルギーが最大となり、紫外域に入ると急激に放射エネルギーが減少する。測定時には熔融金属からの微弱な熱放射光を正確に測定できることが好ましい。したがって、本研究では測定波長として近赤外域の950 nmおよび980 nmを選定した。また、アーク溶接では、強烈なアーク光が周囲に放射されるのが特徴である。一方、アーク光からの放射光は、紫外域、特に200 nm~400 nm付近に集中し、逆に赤外域では微弱になっていることが知られている¹⁰⁾。今回の赤外線二色放射测温法で用いている950 nmおよび980 nmの波長は、アーク光からの影響が紫外域よりもはるかに少ない波長であると言える。

3. 赤外線二色放射测温法装置の試作

試作した二色放射测温装置の光学系の概略図をFig. 2に示す。対物レンズから入射した高温物体からの熱放射光を画像分光器(Photron, Multi-Spectral-Imager)によって2分割し、それぞれ異なる2つの波長の干渉フィルター(中心波長950 nm, 980 nm)を通過して、1つの高速度デジタ

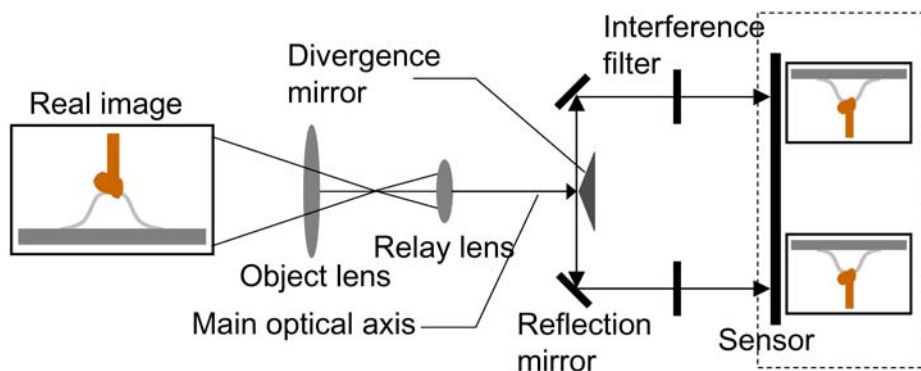


Fig. 2 Schematic illustration of high speed temperature measurement system by two-color pyrometry

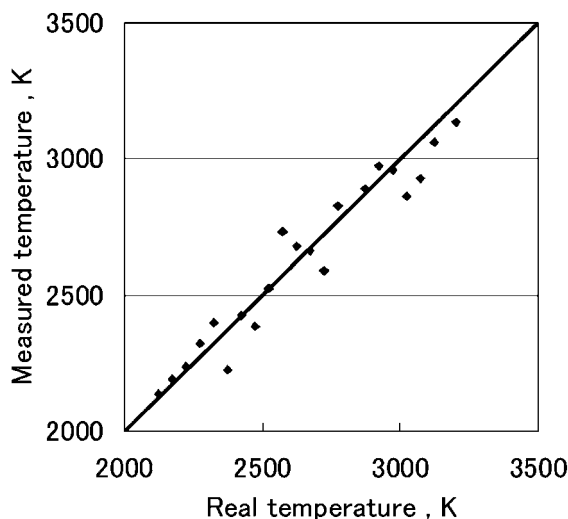


Fig. 3 Calibration line of temperature

ルカメラ (Photron, FASTCAM-512PCI) の素子表面で結像して録画される。高速度カメラで撮影された二波長の画像データは、画像解析ソフト (DITECT, Dipp-Macro) を用いて Microsoft Excel に写され、Excel 上で正確な位置合わせが行われた。画像データから得られた輝度比のデータを後述する標準温度実験からの計算式を用いることにより、セルごとに温度データとして導出した。

また、Fig. 2 に示した光学系は、特定の波長を選択するために干渉フィルターを用いる上、種々のレンズや分光装置などから構成されている。したがって、高温物体からの熱放射光は、カメラ素子の感度とフィルターやレンズ系の透過率により値が変化するため、あらかじめ温度がわかっている高温物体を対象に温度校正を行う必要がある。そこで、JCSS (計量法校正事業者登録制度, Japan Calibration Service System) 認定機関により校正されたタングステンランプの分光放射照度標準光源を用いて、今回の赤外線二色放射测温装置での光強度比と温度の関係を校正した。すなわち、分光放射照度標準光源の波長輝度分布よりタングステンランプの輝度温度 (本研究では、ランプ電流 5 A で 3203 K) がわかっているため、まず、市販の赤外線放射温度計 (ジャパンセンサー, FTZ6, 波長: 1350 nm, 測定範囲: 973 K ~ 4273 K) の測定放射率を輝度温度に合うように設定した。次に、タングステンランプを赤外線二色放射测温装置と市

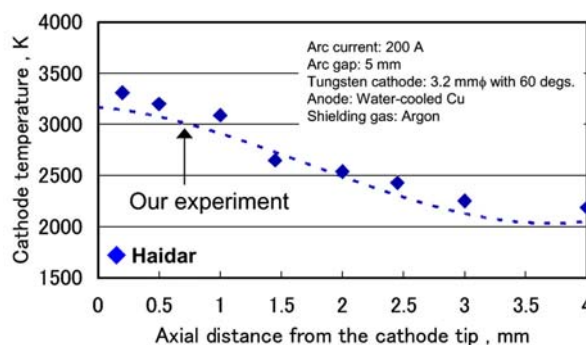


Fig. 4 Distribution of tungsten electrode surface temperature measured with high speed temperature measurement system by two-color pyrometry

販の赤外線放射温度計を用いて同時に測定した。以降、ランプの電流を下げながら逐次、同時観察することにより、赤外線二色放射测温装置の輝度比と市販赤外放射温度計の温度を比較し、輝度比と温度との校正曲線 (関数) を求めた。その結果を Fig. 3 に示す。横軸はタングステンランプを赤外線放射温度計によって求めた真温度であり、縦軸は今回試作した赤外線二色放射测温装置を用いて測定後、校正した温度である。

この赤外線二色放射测温装置の信頼性を評価するため、非溶極式 TIG アークにおけるタングステン電極の表面温度測定を試みた。TIG アークのタングステン電極については、古くから精度の高い温度測定結果が公表されており、また、ガスシールドアーク溶接法という範疇から大きく外れない。そこで、市販のインバータ制御 TIG 溶接機を用いて、アーク長 5 mm, アーク電流 200 A の条件でタングステン電極と水冷銅母板の間に Ar シールドガス雰囲気下で静止 TIG アークを発生させた。なお、タングステン電極として、直径 3.2 mm の 2%La₂O₃-W を選定し、先端角度を 60 度とした。定常状態 (アーク電流 200 A) から瞬時にアーク消弧 (電流 0 A) させ、それを赤外線二色放射测温装置により 500 コマ/秒の撮影速度で観察し、アーク消弧直後 (500 コマ/秒の撮影速度であるため最大で 2 ms 後) のタングステン電極表面画像の輝度比を上記の校正曲線を用いて温度に変換し、電極先端から上部にかけての温度分布を求めた。測定結果を Fig. 4 に示す。図中の波線が本研究によって得られた温度分布であるが、比較のため、Haidar らの実験値¹⁾を図中にプロ

ットで示した。Haidar らの実験値は、タングステン電極の放射強度より求めた測温結果であるが、電極を覆うアークプラズマからの輻射や電極表面で反射するアークプラズマからの輻射を考慮する等、アーク作動中のタングステン電極表面温度を非常に精緻に測定した実験結果であり、信頼性が高い。なお、上記実験条件（タングステン電極の直径および種類、電極先端角度、アーク電流、アーク長、シールドガス等）は、Haidar らの実験条件と同一である。本研究の赤外線二色放射測温装置による測定結果と Haidar らの測定結果は極めてよく一致しており、アーク消弧直後であれば、アーク作動中の電極温度場と大差ないことも示している。3000 K を超えた電極先端付近で約 100 K 程度の違いが見られることから、本研究における赤外線二色放射測温装置の実験誤差 ($\Delta T/T$) は、 $\pm 5\%$ 程度であると推定される。

4. 溶滴表面温度測定方法

実験装置の模式図を Fig. 5 に示す。任意波形をトランジスタ制御溶接電源に入力し、溶接電流として出力するシステムである。溶接電源の外部特性は定電流特性とし、電極の極性は逆極性すなわち直流棒プラス (DCEP) とした。また、溶接電源と独立したワイヤ送給装置により、ワイヤ送給速度をコントロールしている。溶接材料は JIS Z 3312 YGW12 に該当する 1.2 mm 径のソリッドワイヤを用い、シールドガスとして、100%CO₂ ガスあるいは MAG (Ar-

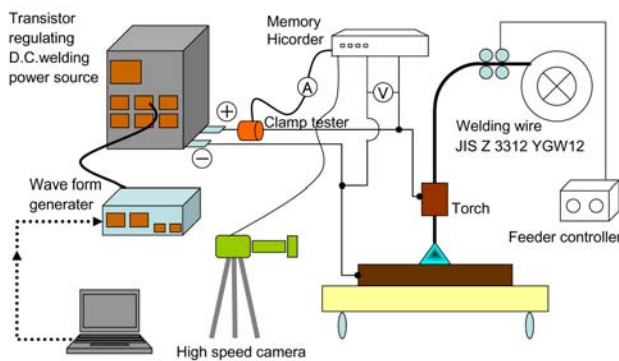


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

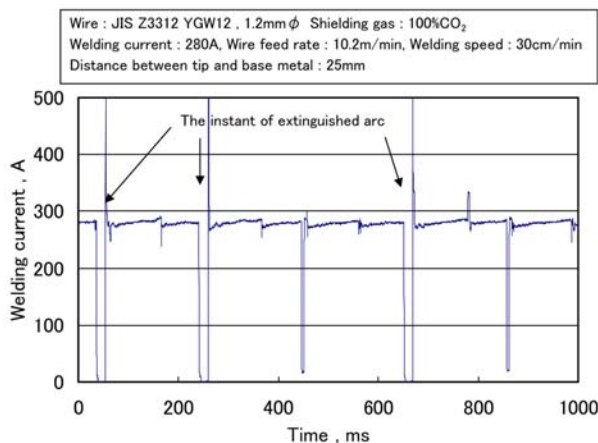


Fig. 6 Waveform of welding current (CO₂ welding, 280A)

20%CO₂) ガスを用いた。溶接用母材として SM490A 鋼板を用い、溶接速度は 30 cm/min, チップ-母材間距離は 25 mm とした。また、溶滴に対してアークルート部の面積が大きく、溶滴にアークが被っている場合、そのままでは正確な温度計測が困難であるため、5 Hz の周期で瞬間的に測定時の電流から低電流 (0~40 A) に切替える波形制御を実施し、アークが消弧した後の溶滴表面温度を測定した。用いた溶接電流波形の一例を Fig. 6 に示す。

5. 溶滴表面温度測定結果

5.1 CO₂ 溶接における溶滴の表面温度測定結果

CO₂ 溶接における溶滴表面温度測定結果の一例を Fig. 7 に示す。溶接電流 330 A, ワイヤ送給速度 12.5 m/min におけるアーク消弧後の溶滴画像 (950 nm の波長画像) と溶滴表面温度分布である。CO₂ 溶接ではアークが緊縮しているため、入熱密度が高くなり、溶滴下端のアークルート部に局所的高温部が存在する。その温度は 2900~3300 K であり、鉄の沸点に近い。一方、溶滴上方部は 2000~2400 K と溶滴下端部と比較して低く、わずか 2.0~2.5 mm の溶滴内部に 800~1000 K もの温度差が観察された。なお、Fig. 7 では、溶滴下方の溶滴が存在しない箇所にも高温部が測定されているが、これは溶滴からの放射光がアーク消弧後に残存したヒュームにより散乱された結果であると推定している。Fig. 7 の状態から 2 ms 後、ワイヤから離脱した溶滴の画像と温度分布を Fig. 8 に示す。アーク消弧直後に溶滴下部にあった高温領域が 2 ms 後には小さくなりながら、溶滴の左側に移動していく様子が観察された。更に時間を追い、2 ms ごとの溶滴表面温度分布を計測した結果を Fig. 9 に示

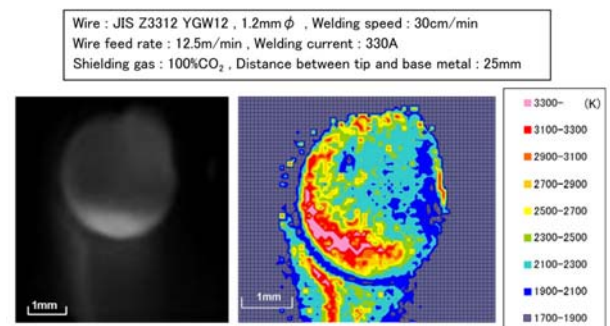


Fig. 7 Surface temperature distribution map of droplet at the moment of arc extinguishment in CO₂ welding

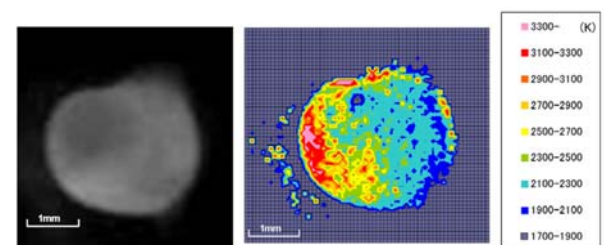


Fig. 8 Surface temperature distribution map of droplet at 2ms after arc extinguishment in CO₂ welding

す。時間が経過するに伴い、高温部は溶滴内の対流と回転惰性により、上方部へ移動する。更に時間が経過し 12 ms 後となると、溶滴表面温度は 2200~2600 K 程度の概ね様な温度分布に変化していく様子が観察された。

5.2 MAG (Ar-20%CO₂) 溶接における溶滴の表面温度測定結果

MAG 溶接における溶滴表面温度測定結果の一例を Fig. 10 に示す。溶接電流 280 A, ワイヤ送給速度 9.5 m/min におけるアーク消弧後の溶滴温度分布である。なお, Fig. 10 (a) および (b) は, 異なる溶滴である。CO₂ 溶接時の溶滴と比較し, 溶滴の大きさは小さく, スプレー移行形態を呈している。アークが溶滴全体を覆っているため, CO₂ 溶接のような溶滴の局所的な高温部は少なく, 2300 K 程度の比較的均一な温度分布を示していた。

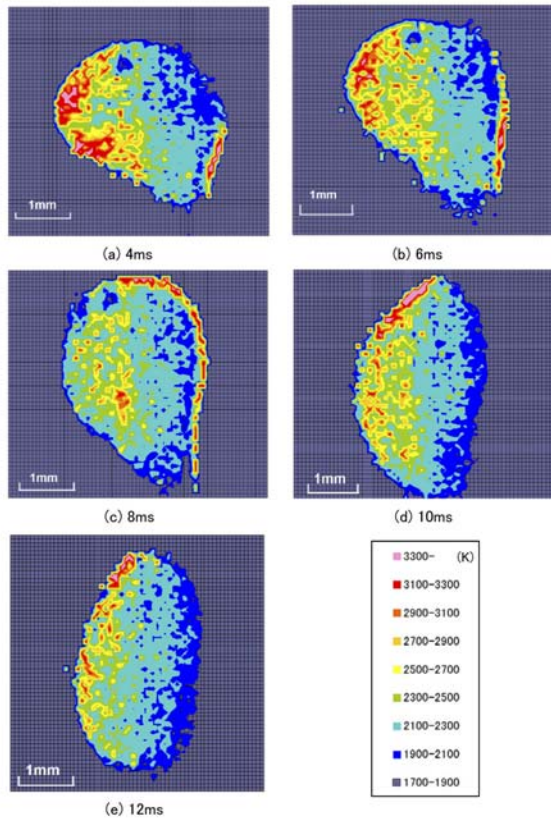


Fig. 9 Surface temperature variation over time in CO₂ welding

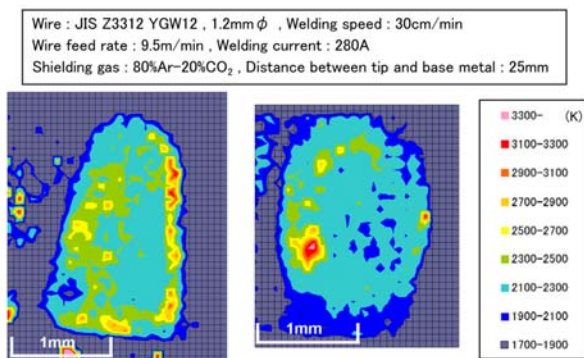


Fig. 10 Surface temperature distribution map of droplet at the moment of arc extinguishment in MAG welding

5.3 CO₂ および MAG 溶接の溶滴表面平均温度の比較

溶接電流 220~350 A の各電流条件 (非短絡移行) において, CO₂ および MAG 溶接における溶滴表面の平均温度を測定した。結果を Fig. 11 に示す。なお, Fig. 7 に代表されるように, 各々の溶滴表面温度分布は, 必ずしも均一ではないため, 各溶滴の平均表面温度を算出し, 更に, 各電流条件で 5~6 個の溶滴について平均化した値をプロットしている。CO₂ 溶接では, 溶滴成長過程における熱損失が存在するものの, 溶滴下端部の入熱密度が大きい上, ワイヤ先端部に溶滴が長期間存在するため, 溶滴の過熱が大きい。一方, MAG 溶接では, 溶滴への入熱密度が小さい。更に, 高電流条件では, そのピンチ力によりスプレー移行となり, 溶滴移行周波数が高くなるため, 溶滴の過熱は比較的小さくなる。結果として溶滴全体の平均温度は MAG 溶接と比較して CO₂ 溶接の方が高くなるものと考えられる。

また, MAG 溶接において, 溶滴表面温度は溶接電流の増加に伴い増加する傾向が得られた。これは電流の増加に伴うエネルギー密度の増加に起因するものとして理解できる。一方, CO₂ 溶接では 250 A における溶滴表面の平均温度が若干高くなる結果が得られた。これは溶滴形成時間の違いに起因するものと考えられる。すなわち, 非短絡のドロップ移行形態にて溶滴の温度を測定している関係上, 250 A 程

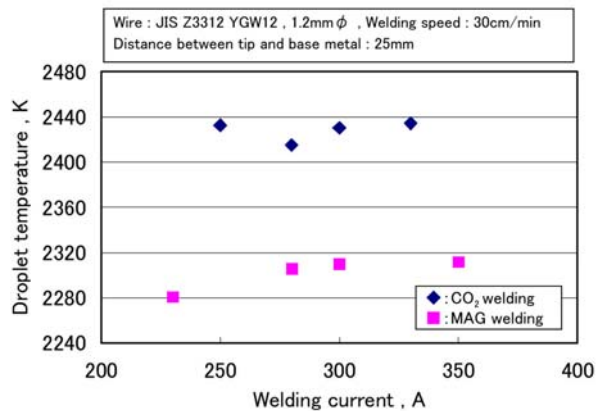


Fig. 11 Effect of welding current on average temperature of droplet surface

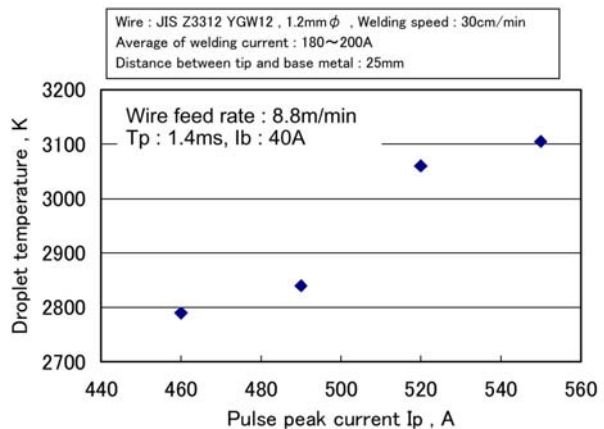


Fig. 12 Effect of pulse peak current on average temperature of droplet surface

度の電流値では、溶滴に作用するピンチ力が小さく、溶滴がワイヤ端に存在する時間が長くなり、溶滴の過熱量が高くなったものと推定している。

5.4 パルス MAG 溶接における溶滴の表面温度測定結果

パルス MAG 溶接における溶滴表面の平均温度に及ぼすパルスピーク電流の影響を Fig. 12 に示す。ワイヤ送給速度 8.8 m/min を固定し、平均溶接電流 180~200 A にて、概ね同一アーク長となるようにベース期間を調整している。なお、パルス幅 (T_p) を 1.4 ms, ベース電流 (I_b) を 40 A に固定し、1 パルス 1 溶滴移行形態にて溶滴表面温度を測定した。パルスピーク電流 (I_p) の増加に伴い、溶滴表面の平均温度に増加傾向が認められ、その温度は CO_2 溶接における局所的高温部と同等、かつ MAG 溶接におけるスプレー移行領域の溶滴温度と比較して高いことがわかる。

6. 結 論

本研究では、950 nm および 980 nm の赤外領域を用いた二色放射测温装置を試作し、本装置により CO_2 , MAG, MAG パルス溶接における溶滴の表面温度分布を測定した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 試作した二色放射测温装置を用いて TIG アークにおけるタングステン電極の表面温度を測定した結果、Haidar らの実験結果とよく一致し、3000 K 付近での誤差は ±5% 程度であった。
- 2) CO_2 溶接の高電流グローブラー移行領域では、アークが緊縮し入熱密度が高くなるため、溶滴下端のアークルート部において局所的高温部が存在する。その温度は 2900~3300 K であり、鉄の沸点に近い。一方、溶滴上部は 2000~2400 K と溶滴下端部と比較して低い。
- 3) MAG 溶接の高電流スプレー移行領域では、アークが溶滴全体を覆っているため、 CO_2 溶接のような溶滴の局所的高温部は少なく、2300 K 程度の比較的均一な表面温度分布を呈している。
- 4) CO_2 溶接では、溶滴下端部の入熱密度が大きい上、ワイヤ先端部に溶滴が長期間存在するため、溶滴の過熱が大きい。一方、MAG 溶接では、溶滴の入熱密度が小さい

上、高電流では、そのピンチ力によりスプレー移行となり、溶滴移行周波数が高くなるため、溶滴の過熱は比較的小さくなる。結果として高電流領域における溶滴表面の平均温度は MAG 溶接と比較して CO_2 溶接の方が高くなるものと考えられる。

- 5) パルス MAG 溶接では、パルスピーク電流の増加に伴い、溶滴表面温度の増加傾向が認められ、その温度は、MAG 溶接におけるスプレー移行領域の溶滴温度と比較して高い。

参 考 文 献

- 1) R. F. Heile, D. C. Hill: Particulate Fume Generation in Arc Welding Processes, *Welding Journal*, 54-7 (1975), 201s-210s.
- 2) T. Suga, M. Kobayashi: Fume Generation in CO_2 Arc Welding by solid wire, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2-2 (1984), 220-228. (in Japanese)
- 3) T. Suga, M. Kobayashi: Fume Generation in CO_2 Arc Welding by Flux-cored wire, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 3-2 (1985), 269-276. (in Japanese)
- 4) M. Ozawa, T. Morita: The Measurement of Heat Quantity in Melted Metals, *Journal of the Japan Welding Society*, 32-2 (1963), 130-137. (in Japanese)
- 5) K. Ando, K. Nishiguchi, K. Fukuda: Temperature Characteristics of the Droplet Detaching from the Wire Tip in MIG Welding, *Journal of the Japan Welding Society*, 36-10 (1967), 1117-1123. (in Japanese)
- 6) H. Maruo, Y. Hirata, 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)
- 7) H. Tong, K. Nakata, M. Tanaka, T. Mita, 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)
- 8) Y. Hirata, M. Onda, H. Nagaki, T. Ohji: In-Situ Measurement of Metal Drop Temperature in GMA Short-Circuiting Welding, *Journal of High Temperature Society*, 30-3 (2004), 140-147. (in Japanese)
- 9) T. Ohji, N. Yoshinaga, T. Shiwaku and A. Ohkubo: Temperature measurement by UV thermal radiation, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 12-3 (1994), 368-373. (in Japanese)
- 10) 溶接安全衛生マニュアル, 日本溶接協会安全衛生・環境委員会, 産報出版 (2002), 103-116. (in Japanese)
- 11) J. Haidar and A. J. D. Farmer: Surface temperature measurements for tungsten-based cathodes of high-current free-burning arcs, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 28 (1995), 2089-2094.