バイオメディカル用マルチスペクトルカメラの溶接現象 二色温度計測への応用*

野村 和史**, 奥田 博之***, 佐野 智一**

Application of multi-spectral camera for biomedical use to two-color temperature measurement in welding phenomena*

by NOMURA Kazufumi**, OKUDA Hiroyuki***, SANO Tomokazu*

This study tested a two-color temperature measurement method using a multi-spectral camera designed for biomedical use. We selected the images of 735 nm and 930 nm as wavelengths. Two calibrations were performed before using them for temperature conversion. One was sensitivity calibration between wavelengths, which was conducted by heating the steel surface coated with blackbody spray from the opposite surface and comparing it with the temperature measured by thermography. Another calibration was a pixel shift that took into account the array of elements. This is a correction peculiar to a multi-spectral camera, and it was possible to eliminate a steep temperature error at the end of the temperature discontinuity. In this report, the electrode temperature of the gas tungsten arc was reported as an application example.

Key Words: Two-color temperature measurement, Multi-spectral camera, Electrode temperature, Homography, Thermography, Blackbody spray, Pixel-shift

1. 緒 言

溶接プロセスの可視化、計測、監視は様々な目的で行われており、視覚センサやレーザセンサ、赤外線カメラ、超音波、X線、アコースティックエミッション等様々なセンサを用いた技術が開発されている¹⁻⁵⁾。視覚センサはいわゆるカメラを用いたものであり、笠野ら⁶⁾の溶融池の観察からブローホール発生を検知を行うものや、Nomuraら⁷⁾の機械学習との組み合わせで溶込みを推定するものなど、比較的報告が多い⁸⁻¹¹⁾。これらは外観とその解析により目的を達成しようとするものであるが、一方で物理量として温度を計測することの要求は比較的高い。熱電対のような接触式でなく、非接触での温度計測が求められる場合は放射測温法が用いられる。サーモグラフィは赤外線での放射測温であり、溶接プロセスに対する適用例は最近でも多く報告されている。Frappierら¹²⁾はCMT-MIG溶接に対し側面から温度計測を行い、冷却速度を計測し、硬さとの比較を行っている。この際、黒体塗料を塗布し鋼材の放射率を一定とした。さらにあらかじめ熱電対により計測を行った放射率を用いて抵抗スポット溶接の温度計測も行っている。野村ら¹³⁾はTIG溶接の溶込み深さを実際の温度計測と熱伝導シミュレーションにより推定するため、溶接中の鋼材の表面と裏面の温度をサーモグラフィにより計測した。ここでも黒体塗料

を用い、放射率は一定として計測を行っている。Huangら¹⁴⁾はAl合金やMg合金などの反射率の高い材料で影響が大きくなるアーク光の反射の影響を小さくする計測手法を示し、ハイブリッド溶接中の温度計測を行っている。この際、計測に用いる放射率は熱電対を用いて校正を行っている。Yangら¹⁵⁾はMAG溶接による積層造形中の温度計測を行い、各層の最高温度や冷却速度などを計測し、層間冷却時間が積層品質に及ぼす影響を考察している。計測に用いる放射率はあらかじめ積層を行ったものをTIG溶接で加熱し熱電対と比較した放射率を用いて一定の値としている。このように放射測温法での計測の際は放射率の設定が必要となり、熱電対と組み合わせや黒体塗料により放射率を設定するが、対象の表面性状や温度依存性など、放射率の決定は一般的には非常に困難であるといえる。

そこで、放射率を無視して温度計測を行うことが可能な計測手法として二色放射測温法がある¹⁶⁻²⁰⁾。平田ら¹⁶⁾は590.2 nmと689 nmの二つの波長を用いてMAG溶接の短絡時の溶滴温度の計測を行った。温度分布の計測を行うとともに、アーク電流値が一定の場合通電時間が長いほど溶滴温度が高くなり、アーク通電時間を一定すると電流値が大きくなるほど溶滴温度が高くなることを報告している。Yamazakiら¹⁷⁾は950 nmと980 nmの二つの波長を用いてTIG溶接及びMAG溶接、CO₂アーク溶接における溶融池の表面温度分布を測定している。TIG溶接ではアーク消弧直後の温度計測を行い、シールドガス及び母材硫黄含有量による溶融池温度分布の違いを示している。MAG溶接、CO₂アーク溶接でもアーク消弧直後の溶融池温度の計測を行いシールドガスが

*受付日 2021年7月1日 受理日 2021年9月15日

**正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Univ.

***学生員 大阪大学大学院工学研究科 Student member, Graduate School of Engineering, Osaka Univ.

溶融池温度分布に及ぼす影響を明らかにしている。同手法は溶滴温度の計測にも応用されている¹⁸⁾。Mamat ら¹⁹⁾は分光放射輝度を三原色に分け、その内の二色帯の比を用いて MIG 溶接の溶滴温度計測を行っている。グローブジャー以降では溶滴の上部と下部で温度差が見られるがスプレー移行では上部と下部の温度差が小さく均一な温度分布になることを示している。このように二色放射测温法は多くの報告があるが、二波長の情報をどのように同時取得するかは用いる機器により様々であり、中には高価な光学系を用いるものも少なくない。

一方、近年、医療や農業の分野でマルチスペクトルカメラが利用されるようになってきている²⁰⁾。マルチスペクトルカメラは一度の計測で多波長情報が同時に得られるカメラであり、比較的安価簡便に多波長情報を分離して得ることができ、例えば植生測定に有効ないくつかの波長のみを同時に取得することにより農地のリモートセンシングに活用されている。医療用では、酸素飽和度や総ヘモグロビンなど組織の健康状態をモニタリングするのにマルチスペクトルカメラが有効となる。例えば次の4波長——735nm：デオキシヘモグロビン、800nm：総ヘモグロビン、865nm：オキシヘモグロビン、930nm：脂質——を同時に計測するものがある。本研究ではこのバイオメディカル用マルチスペクトルカメラによる多波長の同時計測性に着目した。マルチスペクトルカメラは特定の多波長で見ることで情報の多角化を図ることが目的であり、各波長の情報を比較して温度を算出する、といったような定量的な計測用途には設計されていないが、原理的には二色放射测温法への転用が可能であると考えられる。そこで本研究では、TIG アークの電極温度を主に対象として、溶接プロセスで見られるような二色放射計測へマルチスペクトルカメラの転用を試みた。

2. 二色温度計測の基本原理とマルチスペクトルカメラによる多色情報の取得

二色放射测温法は、計測対象の放射率が未知の場合でも狭い波長帯域で放射率が一定とみなせる場合異なる二波長

の分光放射輝度の比から温度を求める手法である²¹⁾。簡単にその原理を説明する。分光放射輝度 L [$\text{Wm}^{-3}\text{sr}^{-1}$] と温度 T [K]、波長 λ [m] および放射率 ε との関係はプランクの放射則で表されるが、異なる波長 λ_1 , λ_2 の分光放射輝度の比をとると、

$$\frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \frac{1 - \exp(c_b/\lambda_2 T)}{1 - \exp(c_b/\lambda_1 T)} \quad (1)$$

となる。 c_b は定数で 0.014388 [mK] である。ここでウィーンの近似式を適用し、この異なる二波長間では放射率が一定であると近似すると、

$$\frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \frac{\exp(c_b/\lambda_2 T)}{\exp(c_b/\lambda_1 T)} \quad (2)$$

となる。温度 T について変換すると、

$$T = \frac{c_b(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2 \ln(L(\lambda_1, T) \lambda_1^5 / L(\lambda_2, T) \lambda_2^5)} \quad (3)$$

となり、異なる二波長の輝度比から温度が算出できる。

本研究では異なる二波長の情報をマルチスペクトルカメラより取得することで温度算出を試みる。本研究で用いたマルチスペクトルカメラの機構とその外観を Fig. 1 に示す。同図 (a) はカメラの撮像素子配置イメージを示している。縦横 $V \times H$ のピクセル上に A, B, C, D, 4 種の波長に対応した素子が交互に並んでいる。撮像後ソフトウェア上で素子情報の並び替えが行われ、出力上は同図 (b) のような4分割したイメージが得られる。したがって、一度の撮影で4波長の面情報を同時に取得することができる。本装置は、緒言に示したように A : 735nm, B : 800nm, C : 865nm, D : 930nm の4波長を 12bit で取得するものであり、各波長の半値幅はおよそ 4nm である。素子サイズは 1024×1024 、すなわち最終的に得られる各波長のイメージは 512×512 である。装置の外観を同図 (c) に示すが、本体そのものは非常に小さい。本実験では写真に示すようにマクロレンズおよび ND フィルタを用いた。波長での分割は光路の終端部であるためレンズなどの光学系は共通であり設置性が良い。Fig. 2

Fig. 1 Structure and appearance of the multi-spectral camera

Fig. 2 Example of measured image of tungsten electrode by multi-spectral camera

Fig. 3 Relationship between brightness ratio and temperature (735 nm-930 nm)

はマルチスペクトルカメラによる計測例で、TIG アーク消弧後の電極である。画面が4分割され、左上から右下にかけて順に波長情報が並ぶ。以降ではこうした視覚情報から温度といった物理情報への変換を行う。

本研究では、4種の波長のうち735nmと930nmの組み合わせを用いた。式(3)から算出した、この2波長を用いた場合の温度と輝度比の関係をFig. 3に示す。二色温度計測法では、選択波長間隔が短いと十分な強度比が得られず、安定的な計測を行うことが難しくなる。一方であまり離れた波長を用いるとその波長間で放射率が一定であるという仮定を適用しにくくなる。本研究では、先行研究にて200nm離れた波長間で同一放射率を用いた温度計測報告がある²²⁾ことを鑑み、上述の2波長による組み合わせを採用した。

3. 計測手法の構築と計測例

3.1 校正係数の算出

理論的には式(3)およびFig. 3の関係から温度を求めることが可能であるが、撮像素子の感度は一般に波長依存性が

Fig. 4 Experimental setup for calibration coefficient measurement of multi-spectral camera

あるため、波長間での感度校正が必要である。また実験上は光学系の影響も受けることから、何らかの方法での校正が必要となる。すなわち、735nmで得た輝度を1とした場合、930nmで得た輝度を校正するための係数 c を求める必要がある。

本研究では既知温度を計測し、算出結果がその温度を出力するように校正係数を調整する方法を選択した。既知温度の計測には、Fig. 4に示すように黒体スプレーを塗布した母材面をサーモグラフィにて計測することとした。また計測面の裏面側にTIGアークを発生させ適当な高温場を持たせた。温度場の比較のためには、各カメラが捉える計測位置を合わせる必要があるが、各カメラの画像は異なる画角や大きさとなっており、そのままでは比較することができない。そこでホモグラフィ¹³⁾を適用し比較できる画像に揃えた。

実験条件は次のとおりである。サーモグラフィは計測波長域が7.5～13 μm で1773 Kまで計測可能である。母材は板厚4mmのSUS304とし、黒体スプレーは耐熱温度1773 K、その放射率はサーモグラフィの計測波長域ではほぼ一定値0.94である。TIGアークは60 A、アーク長5mmで点弧し、およそ20秒間、母材を加熱した。各カメラによるある瞬間の計測結果に対し、ホモグラフィを適用した結果をFig. 5に示す。(a)は放射率0.94を採用したサーモグラフィによる温度分布、(b)はマルチスペクトルカメラによる温度分布であり、両者の温度が等しくなるよう校正係数 c として3.42を適用した結果である。この校正係数の決め方をFig. 6に示す。Fig. 5に示すような任意の3点を選択し、校正係数を変化させるとマルチスペクトルカメラにて計算される温度は変化する。サーモグラフィによる温度を真としたとき、各点での誤差の和が最も小さくなる係数を本計測での校正係数とした。

なおFig. 5 (b)に示すように、マルチスペクトルカメラによる温度換算では、低温部分においてサーモグラフィと一致せず、発散していることがわかる。これは、低温部では

Fig. 5 Temperature distribution and temperature measurement points after homographic image process

Fig. 6 Relationship between the calibration coefficient and the temperature deviation

Fig. 7 Influence of discrete value in measurement on the intensity ratio shown in Fig. 3

Fig. 8 Concept of pixel shift method to correct the pixel deviation

輝度がほとんどないにも関わらず輝度比を用いた計算をするために生じる。そこで本計測においては、計測した結果輝度が小さい点——具体的には 12 bit 最大値の 1% 以下の輝度となる点——では温度計算をしないこととした。これは 2000 K、930 nm での輝度を 12 bit 最大値の 4096 にあてがった場合、約 1273 K (1000 °C) 以下を対象としないことに相当する。この輝度設定を用いて、計測時を模した整数のみの離散値により輝度比を計算したのが Fig. 7 である。Fig. 3 で示した連続値による理想的な輝度比に対し、整数でのみ輝度比をとった場合のずれが低温部、特に 1273 K 以下では大きくなることが示されている。実際には用いる波長間で

の感度補正や、露光時間・絞りを調整することによる計測発光輝度の最大値調整が入るため、低温部側の限度はこの限りではないが、上記の評価を元に本計測では 1273 K を閾値とし低温部表記は避けることとした。

3.2 ピクセルシフトによる位置ずれ補正

マルチスペクトルカメラを用いて各波長の輝度比を検出する際は、各画素で検出された輝度を組み合わせることになるが、分割画像の同一点で輝度比をとるとカメラの 1 画素分、実体がずれる。例えば、Fig. 1 (b) に示す A_k と D_k の輝度比を取る場合、実際には各画素は Fig. 1 (a) に示す配

Fig. 9 Temperature measurement result of tungsten electrode of TIG arc just after the arc extinction and the effect of pixel shift

列であるため、実空間上では縦横1画素分異なる位置を比較参照していることになる。比較的温度変化が緩く様な表面性状の場合は輝度がそれほど大きく変化しないため位置ずれの影響はほとんどないが、画像内に電極の縁などの不連続な部分が写る場合はその境界部で温度が正確に計測されないと考えられる。

そこで、Fig. 8に示すようなピクセルシフトにより、計測後に画像編集を行い位置ずれ影響を補正することとした。初めに、撮影した画像を波長ごとに切り取り、切り取った画像を2倍に拡大する。ここで、 A_{k1} や A_{n1} は元の A_k や A_n に相当する。画像拡大により、例えば A_{k1} と A_{n1} の間に A_{k4} という輝度が得られるが、これはバイリニア補間で求める。 A_{k4} の位置は元の素子の位置と比較すると D_k の位置に相当するため A_{k4} と D_k から輝度比を計算することで位置ずれが補正できる。次節より示す結果では、このピクセルシフトの影響も合わせて記載することとした。

3.3 適用例：TIG アークの電極温度

Fig. 9は水冷銅板上のTIGアーク消弧直後の電極温度を計測した結果である。点弧時のアーク条件は、電流200 A、アーク長5 mm、突き出し長さ10 mm、電極は2%ランタナ入りタングステン電極 ϕ 3.2 mmで、点弧時間30秒後、消弧直後およそ1 ms後に露光時間200 μ sで撮影した結果である。同図(a)は計測した4波長分の結果のうち735 nmと930 nmを

拡大表記したものである。電極先端部の高温部がまだ発光している様が見てとれる。輝度比をとり温度に換算した結果が(b)(c)であるが、(b)はピクセルシフトを行わなかったもの、(c)は行ったものである。(b)では、赤矢印で示すように電極の右縁に沿って不自然な高温部が見られるが、ピクセルシフトを行った(c)ではこれが改善されていることがわかる。両図中で白線で示した水平線上での温度を(d)に示すが、右端部においてピクセルシフトの効果が如実に表れている一方、温度がほぼ連続する部分ではあまり影響のないことも示されている。また、電極先端からの温度分布をピクセルシフトを適用した結果に限り、同種の計測を行ったHaidarらの結果²³⁾と比較した。Fig. 9(e)がその結果であるが、電極先端の高温部での温度に大きな差がある。図(a)に示す計測結果のうち、温度計算に用いたの735 nmの画像ではまだプラズマの発光が残っているように見える。電極温度計測の際、電流低下を元に計測を行ったがアークが消弧しきっていないタイミングであったことが考えられる。Fig. 10は冷却銅板上の静止TIGアーク(150 A、アーク長5 mm)に対し、分光器を用いて700~820 nmの波長域での分光結果を示したものであるが、735~740 nm付近にAr Iの線スペクトルが見られ、これが電極温度計算に対して外乱となったと考えられる。同様に800 nm付近にも線スペクトルがあるため、800 nmの画像においても発光が見られている。一方、電極先端から2, 3 mm以上の領域では同等の温度が計測され

Fig. 10 Spectral intensity distribution of TIG arc (150 A, arc length 5 mm, on the water cooled copper plate)

ており、プラズマ発光の影響を受けない領域であれば比較的妥当な温度が計測されと言えるが、先行研究よりも低めの温度が算出され、高温ほどその傾向が強いようにも見える。この原因は次節にて考察する。

4. 考 察

先述したように二色放射测温法では、用いる二波長の放射率が等しいと置く大きな仮定を含むため、なるべく近い波長を用いる方が良いが、近い波長の組み合わせでは十分な強度比が得にくいといった計測上の問題もある。先行研究にて200nm離れた波長間で同一放射率を用いた温度計測報告がある²²⁾ことを理由に、本研究でも取得できる波長情報のうち、最も離れた735nmと930nmの組み合わせを用いたが、この先行研究は対象が鉄であり、本研究での計測事例はタングステンであるという違いがある。分光放射率は波長と温度依存性があり、加えて材料の種類によっても異なる。タングステンの分光放射率は文献²⁴⁾に示されているが、今回選択した波長の組み合わせでは実際には放射率は一定ではなく、2000Kにおいて735nmでは約0.43、930nmでは約0.39と0.04ほどの差がある。3000Kにおいては、0.41と0.37となっており、1000Kの温度変化ではそれぞれ約0.02変化しているもののそもそもの波長の差の方が大きい。この波長の比は、2000K、3000Kで計算するといずれも約0.9となるが二色测温法では1として温度を算出していることになる。この影響を次のように評価した。式(4)は式(3)の分母に $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ を再度示したものである。

$$T = \frac{c_b(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{1}{\ln \left(\frac{\varepsilon_1 L(\lambda_1, T)}{\varepsilon_2 L(\lambda_2, T)} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right)} \quad (4)$$

$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ が1の場合と0.9の場合の強度比に対する対応温度の違いを示したのがFig. 11である。これによると、例えば強度比2.5が得られ青線から1962Kだと判断しても、正しく

Fig. 11 Influence of emissivity ratio on calculated temperature in two-color temperature measurement method

Fig. 12 Moire in 800 nm image

は約2066Kであり、温度を104K低く見積もってしまうことを示している。この差(=緑プロット)は高温ほど顕著となる。実際の計測では、ここに波長間の校正係数がかかるため、例えば2000K付近で温度校正をかけるとこの差も内包したまま温度が合うように校正係数が計算される。したがって、2000Kでは見かけ上正しい温度が算出されるが、高温に行くほど温度がずれてしまうと考えられる。Fig. 9の計測結果では、プラズマ発光の影響も間違いなくあると考えられるが、先行研究よりも温度が低く算出される、高温ほどずれるといった傾向があるのは、このことも関係していると考えられる。

上記の点を考慮すると、やはりなるべく近い波長を使うことが求められる。マルチスペクトルカメラの特徴として4種の波長を同時に取得できるという点があるため、二色放射测温は各波長の組み合わせが可能であり、より近い波長の組み合わせ、例えば800nmと930nmといった組み合わせも可能である。本研究でその組み合わせを使わなかった理由は、強度比が取り難いという点もあるが、実際にはモアレの影響がある。Fig. 12はFig. 9とは異なるタイミングの800nmの画像であるが、干渉縞が写っているのがわかる。本研究で用いたカメラの場合、800nmの画像においてこの干渉縞が比較的是っきり写り込んだため、800nmの画像は

用いなかった。有効な画像として用いるには、画像上で何らかの補正を行うことが必要と考えられる。

5. 結 論

本研究ではバイオメディカル用として設計されたマルチスペクトルカメラを用いた二色放射測温法を試行した。波長としては735nmと930nmの画像を利用した。温度計測に利用するにあたり、2つの較正を行った。1つは波長間の感度較正で、これは黒体スプレーを塗布した鋼材面を裏面から熱し、サーモグラフィで計測した温度と比較することで実施した。その際、ホモグラフィを用いることにより画角やサイズを合わせ込んだ。もう1つの較正は、素子の配列を考慮したピクセルシフトである。これはマルチスペクトルカメラ特有の補正であり、これにより温度不連続部の端部での急峻な温度エラーを排除することができた。本報では、適用例としてTIGアークの消弧後の電極温度分布測定例を示した。先行研究の結果と比較すると、一部発光が残った影響で電極先端から2, 3mm以上の部分では妥当な結果が得られた。また、低めの温度が計測され、高温側ほどその傾向が強かったが、これはタングステン電極において735nmと930nmの放射率を一定と見做したことにより生じた誤差と考えられる。本手法は他への応用ももちろん可能であり温度という物理量が気軽に取得できるツールではあるが、対象とする材料、選択する波長の組み合わせ、対象とする温度と較正を行ったときの温度との差、などを明確にした上で適用すべきと考える。

参 考 文 献

- 1) 浅井 知, 宮坂 史和, 野村 和史, 荻野 陽輔, 田中 学, 茂田 正哉, 山根 敏: 第II部 溶接・接合工学の最近の動向, I, 溶接法研究委員会, 溶接学会誌, 89巻, 5号, (2020), pp. 38-51.
- 2) 浅井 知, “アーク溶接プロセスのインプロセスモニタリング”, 溶接学会誌, 第88巻, 第8号 (2019), pp. 597-608
- 3) 山根敏, “革新施工・維持管理システム開発への道しるべ-アークセンサ-”, 溶接学会誌, 第85巻, 第8号 (2016), pp. 729-735
- 4) 河原守, 滝賢一, “解析形状検出による溶接線ならい制御”, 計測自動制御学会論文集, 第15巻, 第4号 (1979), pp. 492-497
- 5) 村尾増昭, 榎原誠, “レーザ溶接状態インプロセス評価技術の開発”, デンソーテクニカルレビュー, 第11巻, 第2号 (2006), pp. 94-102
- 6) 笠野和輝, 荻野陽輔, 福本智, 浅井知, 佐野智一, “ブローホール発生に伴う溶接現象の観察とその発生見地に向けた検証-画像センシングによるインプロセス溶接モニタリング技術の開発-”, 溶接学会論文集, 第38巻, 第3号 (2020), pp. 173-182
- 7) K. Nomura, K. Fukushima, T. Matsumura and S. Asai, “Burn-through prediction and weld depth estimation by deep learning model monitoring the molten pool in gas metal arc welding with gap fluctuation”, Journal of Manufacturing Processes, Vol.61 (2021), pp. 590-600
- 8) 新田誠也, 荻野陽輔, 浅井知, “画像センシングによる薄板重ねすみ肉溶接のインプロセス品質モニタリング”, 溶接学会論文集, 第38巻, 第2号 (2020), pp. 114-124
- 9) 山崎洋輔, 阿部洋平, 日置幸男, 中谷光良, 北側彰一, 中田一博, “狭開先レーザ溶接のための開先認識システムの開発”, 溶接学会論文集, 第32巻, 第3号 (2014), pp. 122-129
- 10) S. W. J. Shao, Y. Huang, Y. Zhang, “A novel weld seam detection method for space weld seam of narrow butt joint in laser welding”, Optics and Laser Technology, Vol. 99 (2018), pp. 39-51
- 11) B. Zhang, Y. Shi, S. Gu, “Narrow-seam identification and deviation detection in keyhole deep penetration TIG welding”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.101 (2019), pp. 2051-2064
- 12) R. Frappier, A. Benoit, P. Paillard, T. Baudin, R. Le Gall and T. Dupuy, “Quantitative infrared analysis of welding processes: temperature measurement during RSW and CMT-MIG welding”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 19, No. 1 (2014), pp. 38-43
- 13) 野村和史, 山下隼, 井村文哉, 浅井知, “アーク溶接における表面温度情報を用いた溶込み深さの推定”, 溶接学会論文集, 第36巻, 第4号 (2018), pp. 264-273
- 14) R.S. Huang, L.M. Liu and G. Song, “Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process”, Materials Science and Engineering A, Vol. 447 (2007), pp. 239-243
- 15) D. Yang, G. Wang and G. Zhang, “Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 244 (2017), pp. 215-224
- 16) 平田好則, 恩田雅彦, 永木勇人, 黄地尚義, “GMA 溶接における溶滴の温度計測”, 高温学会誌, 第30巻, 第3号 (2004), pp. 140 - 147
- 17) K. Yamazaki, E. Yamamoto, F. Suzuki, F. Koshiishi, S. Tashiro, M. Tanaka and K. Nakata, “Measurement of surface temperature of weld pools by infrared two colour pyrometry”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 15, No. 1 (2010), pp. 40-47
- 18) 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-colour pyrometry”, Welding International, Vol. 24, No. 2 (2010), pp. 81-87
- 19) S. B. Mamat, S. Tashiro, M. Tanaka and M. Yusoff, “Study 315 on factors affecting the droplet temperature in plasma MIG welding process”, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 51 (2018), pp. 1-23
- 20) 富永昌治: 映像情報メディア学会誌, 68, 4 (2014) 271-272
- 21) 溶接学会 溶接法研究委員会 編: 新溶接アーク現象, 産報出版 (2021)
- 22) H. Schopp, A. Sperl, R. Kozakov, G. Gott, D. Uhrlandt and G. Wilhelm, “Temperature and emissivity determination of liquid steel S235”, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 45, No. 235203(2012)
- 23) J. Haidar, 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
- 24) P. Flesch: Light and Light Sources – High-Intensity Discharge Lamps, Springer, (2006) 97