傾斜ティグアークプラズマを対象とした画像分光法における 非対称 Abel 逆変換処理*

山下 悠登**, 茂田 正哉***, 古免 久弥****, 田中 学****

Asymmetric Abel Inversion in Imaging Spectroscopy for Tilted TIG Arc Plasma*

by Yuto Yamashita **, Masaya Shigeta ***, Hisaya Komen **** and Manabu Tanaka ****

An asymmetric Abel inversion processing system was developed to establish a method for diagnosing arc plasma that has an elliptical cross section and is a non-axisymmetric in the direction perpendicular to the observation direction during an arc welding process. This method was applied to an arc plasma in a tilted tungsten inert gas (TIG) welding process. As a result, when this method was applied to the non-axisymmetric intensity distribution due to integration, it was confirmed that the relative error near the central axis and the edge was large regardless of the difference in the cross-sectional shape. In addition, after applying this method to the tilted TIG arc plasma, it was shown that an error of about 350 K occurred in the temperature distribution when emission intensity distribution was converted to the temperature distribution by the Fowler-Milne method. Furthermore, the temperature distribution of the arc plasma obtained in this study was slightly wider than the previous study, while the high-temperature area where the temperature was higher than 14000 K showed a good agreement with the previous study. Therefore, it was concluded that, by applying this method to the tilted TIG arc plasma, the equivalent result to the three-dimensional emission spectroscopy could be obtained by photographing a tilted arc plasma from two directions.

Key Words: Tilted TIG Arc Plasma, Imaging Spectroscopy, Asymmetric Abel Inversion, Elliptical Cross Section, Fowler-Milne Method

1. 緒 言

現在、産業界において接合技術は必要不可欠な技術となっている。中でも、アークプラズマを熱源とするアーク溶接は古くから産業を支えてきた代表的な接合技術であり、鋼橋や船舶の製造などに広く用いられている。これまでは熟練した技術者がそのノウハウを用いてこれまで施工してきたが、近年では生産工程の自動化に伴い、産業用ロボットを用いた溶接の自動化が盛んに取り組まれている。この溶接工程を効率的に自動化し、均一で高い品質の溶接部を得るためには、制御対象である溶接現象を定性的だけでなく定量的に解析し、アークプラズマの熱源特性を理解する必要がある。しかしながら、アーク溶接では金属蒸気の混入や溶滴の移行によって、アークプラズマの熱源特性は複雑になることが知られている¹⁾。プラズマ状態の診断において、アークプラズマに攪乱を与えない非接触式の分光分析法は有効であることが知られており、アーク溶接プロセスを対

象とした多くの計測がなされてきた。平岡ら²⁾はアルゴン原子およびアルゴンイオンの線スペクトルを対象とした分光計測により、ティグ溶接中のアルゴンアークプラズマにおける陰極先端直下1 mmでの温度分布の算出を行っている。また茂田ら³⁾は3組の分光器と高速度カメラを用いた画像分光法により、ガスメタルアーク溶接における温度分布や鉄蒸気分布から電気伝導度分布や電子密度分布を算出し、スプレー移行形態のメカニズムについて示唆している。このように分光分析法によって溶接アークプラズマの理解は進んでいるものの、これらの手法ではアークプラズマを円筒座標系二次元軸対称と仮定してAbel逆変換処理を施すことで、線スペクトルの積分強度をアークプラズマの中心断面における強度に変換している。したがって、この手法が適用できる範囲はアークプラズマ形状が軸対称とみなせるような垂直ティグアークプラズマ⁴⁻⁹⁾やミグアークプラズマ¹⁰⁻¹⁴⁾、およびごく一部の炭酸ガスアークプラズマ¹⁵⁻¹⁷⁾に限られてきた。

他方、実施工におけるアークプラズマは電極の傾斜や開先加工によって非軸対称性や円形以外の断面形状となり得る。このようなアークプラズマを診断する手法として、三次元発光分光法が考案されている。三次元発光分光法では二次元計測に基づく従来の手法では取り扱うことが不可能であった多電極溶接法などのより複雑な溶接アーク現象の可視化に成功した。しかしながら、この手法では対象物に対して複数台のカメラを扇状に設置して計測を行うため、

*受付日 2021年6月30日 受理日 2021年10月18日

**学生員 大阪大学接合科学研究所 Student member, Joining and Welding Research Institute, Osaka Univ.

***正 員 大阪大学接合科学研究所 (現在 東北大学大学院工学研究科) Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka Univ. (Present Address: Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

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

空間的な制約が生じる¹⁸⁾。そのため、空間的制約の少ない画像分光法によって実施工におけるアークプラズマの診断を行うことができれば、より広い溶接条件下のアークプラズマの熱源特性を明らかにすることができ、溶接アーク現象のさらなる理解につながると考えられる。二次元の分光分析法においても非軸対称性を考慮した Abel 逆変換法は適用されてきた¹⁹⁻²¹⁾。しかしながら、これらの手法はトカマクなどのトラスプラズマへの適用を想定しており、水平断面形状が真円以外となる場合のある溶接アークプラズマへの適用事例は見当たらない。

そこで本研究では、傾斜ティグアークプラズマを対象とした画像分光法において、非対称 Abel 逆変換処理がトーチの傾斜による非軸対称性を考慮できるかどうかについて検討を行うことを目的とする。傾斜ティグアークプラズマでは、プラズマの形状が非軸対称であることに加え、水平断面の形状が楕円形となることも考慮する必要がある²²⁾。そのため、上記2つの要素を考慮することが可能な非対称 Abel 逆変換処理システムの構築を行い、その妥当性についても検証する。

2. 計測手法

2.1 非軸対称性を考慮した Abel 逆変換法

ここでは本研究で用いた非軸対称性を考慮した Abel 逆変換法について、Fig.1(a) に示す座標系を用いて述べる。Fig.1(a) に示すスクリーン上には、赤の矢印に沿った積分強度が記録されており、Fig.1(b) は Fig.1(a) のスクリーンの位置で記録された積分強度の例である。安友らは、積分強度が y 方向にのみ非対称である分布において、局所的な線スペクトル強度をアークプラズマが軸対称であると仮定して算出した局所的な線スペクトル強度と、非対称性を表す重み関数に変数分離できることを示している¹⁹⁾。すなわち、軸対称を仮定した場合の半径 r_1 における局所的な線スペクトル強度を $\varepsilon(r_1)$ 、その半径の y 座標 y_1 における非対称性を表す重み関数を $g(y_1)$ とすると、非軸対称な場合の局所的な線ス

ペクトル強度 $n(r_1, y_1)$ は次式のように表される。

$$n(r_1, y_1) = \varepsilon(r_1)g(y_1) \quad (1)$$

ここで、非対称性を表す重み関数 $g(y_1)$ は次式で表される。

$$g(y_1) = 1 + \frac{I''(y_1)}{I'(y_1)} \quad (2)$$

ただし、

$$I'(y_1) = \frac{I(y_1) + I(-y_1)}{2} \quad (3)$$

$$I''(y_1) = \frac{I(y_1) - I(-y_1)}{2} \quad (4)$$

x 方向は対称であるという仮定の下、得られた分光画像に対して式(1)を適用することで、カメラで撮影された積分強度をアークプラズマの中心を通る断面における線スペクトル強度に変換する。そして、この処理を高さ方向 z に繰り返し行うことで、2次元の yz 平面における線スペクトル強度分布が算出できる。

2.2 楕円形断面を考慮した Abel 逆変換法

前節では非軸対称な積分強度から局所的な線スペクトル強度を算出する方法について説明した。安友らは軸対称を仮定した場合の局所的な線スペクトル強度 $\varepsilon(r_1)$ の算出の際には、断面形状について考慮しておらず、先行研究¹⁹⁻²¹⁾では円形断面を想定して適用していた。一方で傾斜ティグアークプラズマでは、プラズマの水平断面の形状が楕円形となるため、Abel 逆変換の際にはこの楕円形状の断面が考慮できる必要がある。本研究では断面形状を仮定できる局所的な線スペクトル強度 ε を取り入れることで、楕円形断面を考慮可能な Abel 逆変換を可能にしている。本節では、その断面形状を仮定できる局所的な線スペクトル強度の概要について説明する。アークプラズマの断面形状が楕円形となる場合、任意の位置 y における線スペクトルの積分強度 $I(y)$ は、Fig.2 に示すような局所的なスペクトル強度 ε と微小面積

Fig. 1 Schematic illustration of asymmetrical Abel inversion

$\Delta x \Delta y$ の積の足し合わせによって表される.

$$I'(y)\Delta y = \sum_{-x_0}^{+x_0} \varepsilon \Delta x \Delta y \quad (5)$$

ここで Fig.3 に示す, x 軸との交点が $(\pm bl, 0)$, y 軸との交点が $(0, \pm al)$ となるような楕円: $x^2/(bl)^2 + y^2/(al)^2 = 1$ ($0 < l \leq 1$) の第1象限における微小面積 S を次式のように定義する²³⁾.

$$S_{nm} = \begin{cases} (P_{n,m} - P_{n+1,m}) - (P_{n,m-1} - P_{n+1,m-1}) & (n \leq m) \\ 0 & (n > m) \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{nm} = \begin{cases} \frac{\pi}{4} a_m b_m - \frac{1}{2} a_m b_m \arctan\left(\frac{b_m \sin \theta_{nm}}{a_m \cos \theta_{nm}}\right) - a_{n-1} x_0 & (n \leq m) \\ 0 & (n > m) \end{cases} \quad (7)$$

$$x_0 = \begin{cases} b_m \sqrt{1 - \frac{a_{n-1}^2}{a_m^2}} & (n \leq m) \\ 0 & (n > m) \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta_{nm} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{a_{n-1}}{x_0}\right) & (n \leq m) \\ 0 & (n > m) \end{cases} \quad (9)$$

Fig. 2 Schematic illustration of integrated intensity

Fig. 3 Illustration of Abel inversion by geometrical relationship

ここで, S_{nk} におけるスペクトル強度を ε_k とすると, 式(5)は次のように書き換えられる²³⁾.

$$\begin{aligned} I'_1 &= 2(S_{11}\varepsilon_1 + S_{12}\varepsilon_2 + \cdots + S_{1k}\varepsilon_k)/d_a \\ I'_2 &= 2(S_{22}\varepsilon_2 + S_{23}\varepsilon_3 + \cdots + S_{2k}\varepsilon_k)/d_a \\ &\vdots \\ I'_k &= 2(S_{kk}\varepsilon_k)/d_a \end{aligned} \quad (10)$$

ここで d_a は空間分解能を表している. さらに, 式(10)を行列形式に書きなおすと

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1k} \\ 0 & S_{22} & \cdots & S_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & S_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} = \frac{d_a}{2} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_k \end{bmatrix} \quad (11)$$

となる. 行列 S_{ij} の逆行列を計算することで, 式(11)は単純な線形行列方程式で表すことができる.

$$[\varepsilon] = \frac{d_a}{2} [S]^{-1} [I'] \quad (12)$$

実験から得られる線スペクトル強度の積分値 I' に対して式(12)を適用することで, 軸対称な線スペクトル強度の積分値を局所的な線スペクトル強度に変換する際において断面形状を考慮することができる.

2.3 温度計測手法

ここでは, 前節で求めた線スペクトル強度分布を温度分布に変換する方法を説明する. 本研究では, プラズマの温度分布計測には Fowler-Milne 法 (Off-Axis 最大放射係数法)²⁴⁾を採用する. Fowler-Milne 法はアーク中心から離れた位置で放射強度の最大値を見出し, その極大値で全ての計測値を正規化する方法である. 最大強度値でスペクトル強度を正規化するため, 遷移確率等のデータが不要となり, 比較的簡単に温度を決定することができる. 励起された粒子の核外電子が, j 番目のエネルギー準位から i 番目の下位準位に遷移するときに放射する線スペクトルの強度 I_{ji} は次式で表される²⁴⁾.

$$I_{ji} = \frac{A_{ji}hc}{4\pi\lambda_{ji}} \cdot \frac{N_0 g_j}{Z(T)} \cdot \exp\left(-\frac{E_j}{kT}\right) \quad (13)$$

A_{ji} は励起粒子の核外電子が j 番目のエネルギー準位から i 番目の準位に遷移する確率, h はプランク定数, c は光速, λ_{ji} は j 番目のエネルギー準位から i 番目の準位に遷移する際のスペクトル波長, N_0 は原子またはイオンの粒子数密度, g_j は統計的重値, $Z(T)$ は温度 T における分配関数, E_j は j 番目のエネルギー準位, k はボルツマン定数である. A_{ji} , g_j , E_j は NIST のデータを用いた²⁵⁾. また, プラズマが局所熱平衡 (LTE: Local Thermodynamic Equilibrium) にあると仮定すると, Saha の熱電離平衡式²⁶⁾から各温度における粒子数密度が求まる. これらの値を式(13)に代入した後, 計算結果を最大放射強度で正規化することによって, 相対強度比と温

度の関係が得られる。一例として、Fig.4 にアルゴン原子の線スペクトル (696.5 nm) における相対強度比と温度の関係を示す²⁷⁾。このような関係を用いることで、傾斜ティグアークプラズマの線スペクトル強度分布から温度分布を求めることができる。

2.4 実験条件および手法

Table 1 に実験条件を示す。本研究では、水冷銅板上での静止ティグアークを計測対象とした。シールドガスには純アルゴンを、陰極にトリア入りタングステン電極 (電極径 3.2 mm, 先端角度 60°) を使い、アーク電流を 150 A, アーク長を 5 mm とした。

Fig.5(a) に本研究における実験装置を、Fig.5(b) に分光器を備えた高速度カメラ側から見たティグトーチおよびアー

Fig.4 Relationship between temperature and normalized intensity ratio of Ar atom (Ar I 696.5 nm)

Table 1 Experimental conditions

Shielding gas	Pure Ar
Gas flow rate	15 L/min
Welding current	150 A
Arc length	5 mm
Electrode (cathode)	W-2wt.%ThO ₂
Electrode extension	3 mm
Electrode diameter	3.2 mm
Tip angle	60°
Base metal (anode)	Water-cooled Cu

クプラズマの模式図を示す。Fig.5(a) 中の黒の破線は光路を示している。本実験では母材上で点弧したアークプラズマからの放射光は対物レンズによって集光され、リレーレンズによって結像される。結像された放射光はハーフミラーによって2つの光路に分岐した。分岐された光はそれぞれ分光器内部で計測対象とした波長に分光した。そして、分光された線スペクトル波長の光を 12 bit(4096 階調) の高速度カメラで撮影することで、高解像度のイメージを得た。

またこの実験装置は2組の分光器と高速度ビデオカメラによって、元素ごとの線スペクトルだけでなく、同時に連続スペクトルが計測可能である。アルゴンアークプラズマの計測の際には、アルゴン原子の線スペクトルに加えて連続スペクトルも同時に捉えてしまう問題があることから⁹⁾、この連続スペクトル強度を線スペクトル強度から差し引くことで高精度の結果を得た。さらに、Fig.5(a) に示すようにイメージ分光システムに対して 90° 横方向からバンドパスフィルタを備えた高速度ビデオカメラでアークプラズマを撮影する。このとき、分光器側の高速度ビデオカメラで撮影した画像から a を、バンドパスフィルタを備えた高速度ビデオカメラで撮影した画像から b の値を求め、アークプラズマの断面形状の推定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 本手法の妥当性の検証

まずは、本手法の妥当性を検証するため、テストデータとして次式を局所値として与えた。

$$n(l, y) = \frac{1}{b} [1 + 0.5 \sin(\pi y)] (1 + 10l^2 - 23l^4 + 12l^6) \quad (14)$$

Fig. 6(a) は局所値の分布である。またこのとき

$$\frac{x^2}{b^2 l^2} + \frac{y^2}{a^2 l^2} = 1 \quad (0 < l \leq 1) \quad (15)$$

において $(a, b) = (1.0, 2.0)$ の場合の楕円を想定して積分値を算出した。Fig.6(b) は Fig.6(a) に示す局所値を想定する楕円

Fig.5 Schematic illustration of experimental setup

(a) Asymmetrical local value given by Eq. (14)

(b) Asymmetrical integrated value given by Eq. (16)

(c) Asymmetrical local value given by Eq. (16) after asymmetric Abel inversion

Fig. 6 Test data and reconstructed result

断面で積算した積分値であり,

$$I(y) = \frac{16}{105} [1 + 0.5 \sin(\pi y)] (19 + 34y^2 - 125y^4 + 72y^6)(1 - y^2)^{0.5} \quad (16)$$

で表される. Fig. 6(c) は式 (16) に対して本手法を適用して得られた結果である. Fig. 6 (a) と比較して精度よく変換されていることがわかる. このことから本手法によって再構成した分布には妥当性があると考えられる.

また, Fig. 7(a) に示すように $(a, b) = (1.0, 0.5), (1.0, 1.0), (1.0, 2.0)$ となる場合においても検証を行った. Fig. 7(b) 中の破線は式 (16) に対して本手法を適用することによって得られた計算値の分布である. その結果, Fig. 7(a) 中に緑の実線で示すような, 計測方向に対して垂直方向に長軸を有する断面形状では局所値の値が大きくなっており, Fig. 7(a) 中に青の実線で示すような計測方向と同方向に長軸を有する断面形状では局所値の値が小さくなる結果が得られた. Fig. 7(b) に示すように, 本手法によって求めた非対称 Abel 逆変換処理後の強度分布はいずれの断面形状においても式 (14) とよく一致していた. Fig. 8 に断面形状ごとの相対誤差の分布を示す. この誤差は, Fig. 7(b) に示した計算値から式 (14) を差し引いた値の絶対値を式 (14) の値で除算したものである. いずれの断面形状においても誤差が大きくなる位置は一致しており, 誤差は中心軸および境界付近において大きくなる傾向がみられた. しかしながら, 境界付近においては局所値の値がかなり小さいため, 相対誤差が大きくとも強度値自体の差は Fig. 7(b) に示すように小さいことから, この強度分布境界付近における誤差は許容できる. また, 境界付近を除いた位置においては中心でやや相対誤差が大きくなっているものの, 5% 以下になっている. 以上のことから, 本手法は楕円形状を有する非軸対称なアークプラズマに適用できるものと考えられる.

(a) Cross-sectional shape

(b) Difference in local value for each cross-sectional shape

Fig. 7 Asymmetrical integrated value and local value considering cross-section shape

3.2 傾斜ティグアークプラズマへの適用に関する検討

Fig.9(a)に電極を30度傾斜させたティグアークプラズマの、電極先端から1 mm 下における線スペクトル強度分布を示す。この傾斜ティグアークプラズマの線スペクトル強度分布を多項式により近似したFig.9(b)に示す強度分布をテスト曲線として用いて本手法の検証を行った。多項式は

$$I(y) = \frac{640}{21} [1 + 0.5\sin(\pi y')] \{1 + \cos[0.5\pi(y' - 1)]\} \\ (19 + 34y'^2 - 125y'^4 + 72y'^6)(1 - y'^2)^{1/2} \quad (17) \\ \text{ただし } y' = \frac{y}{7.5} - 1$$

である。本手法の適用後、それぞれの分布を最大強度で正規化した分布をFig.10に示す。図中の黒の実線は積分値がFig.9(b)となるように逆算して求めた局所値を最大強度で正規化した分布であり、次式で与えられる。なお、楕円断面の長軸と短軸の比 $a:b$ は $0.125:0.0832$ であることを撮影した画像から取得した。

$$n(l, y) = \frac{40}{237} [1 + 0.5\sin(\pi y')] \{1 + \cos[0.5\pi(y' - 1)]\} \\ (1 + 10l^2 - 23l^4 + 12l^6) \quad (18) \\ \text{ただし } y' = \frac{y}{7.5} - 1$$

赤の破線は式(17)に本手法を適用して求めた計算値の分布

Fig. 8 Error distribution in this method

(a) Measured intensity distribution

である。本手法を適用することによって求めた非対称 Abel 逆変換処理後の強度分布は式(18)の分布に比較的近い結果を示した。また、誤差は最大で0.1程度であり、Fowler-Milne法によって温度に換算することで350 K程度の誤差が生じていた。平岡ら²⁾はティグアークプラズマは15000 Kを超える高温となることを示していることから、350 Kの誤差は許容できるものと考えられる。

3.3 傾斜ティグアークプラズマへの適用結果

Fig.11(a)に得られた分光画像に対して本手法を適用した結果を示す。灰色の領域は電極および母材を示している。Fig.11(b)は本手法によって得られた局所的な発光強度のうち、Fig.11(a)に破線で示す電極先端から1 mm 直下における y 軸方向の分布を示している。Fig.11(b)中の破線はアークプラズマの中心軸の位置を示している。Fig.11(b)より、アークプラズマ中心軸付近で発光強度が低下しており、中心から少し離れた位置において発光強度のピークが確認できる。Fig.12(a)にFig.11(a)に対してFowler-Milne法^{2,9,24)}を適用することで算出した傾斜ティグアークプラズマの温度分布を示す。なお、本研究で再構成した発光強度の分布においては、明確な最大強度のラインが出なかったため、各高さごとに正規化を行った。このとき中心軸から離れた位置で最大強度が確認された場合は、ピークのうち低い方の強度(Fig.11(b)では破線右側のピーク強度)で正規化を行った。灰色の領域は電極および母材を示している。計測の結果、アークプラズマの最大温度は16500 K程度となっていた。Fig.12(b)に本実験の結果と野村らの実験結果から得た、電極先端から1 mm 直下における y 軸方向の温度分布の比較を示す²⁸⁾。本実験でのアークプラズマの温度分布は野村らの結果に比べ、 y 方向にわずかに広がっているものの、同程度の最大温度が得られていた。特に14000 Kを超える高温領域においては温度分布がよく一致しており、本手法は妥当であるといえる。またこれは、2方向からの撮影のみで三次元発光分光法と同程度の結果を得られることを示唆している。

(b) Test curve given by Eq. (17)

Fig. 9 Asymmetrical profiles caused by integration

4. 結 言

本研究では、実施工の溶接における非軸対称なアークプラズマを診断する手法を確立するための非対称 Abel 逆変換処理システムを構築した。さらに、傾斜ティグアークプラズマを対象に本手法の溶接アークプラズマへの適用性に関する検討を行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

(1) 本研究で構築した非対称 Abel 逆変換処理システムを非

Fig. 10 Comparison of normalized intensities given by Eq. (17) after asymmetric Abel inversion and Eq. (18)

(a) Intensity distribution in 2D image

(b) Intensity distribution just below 1 mm from the tip of the electrode

Fig. 11 Reconstructed intensity distribution

(a) Temperature distribution

(b) Comparison with previous study

Fig. 12 Temperature distribution and comparison result

軸対称な積分値の強度分布に適用した場合、断面形状の違いに関係なく相対誤差が中心軸近傍および外縁部において大きくなる傾向が確認された。しかしながら、外縁部においては局所値の値が小さいことから、外縁部の誤差は許容できると判断された。また中心軸近傍の誤差も 5% 以下に収まっており、本手法は楕円形断面を有する非軸対称なアークプラズマに適用できるものと考えられた。

(2) 傾斜ティグアークプラズマに対して本手法を適用した後、Fowler-Milne 法によって温度に換算して得られた温度分布には 350 K 程度の誤差が生じることが示されたが、これはティグアークプラズマの温度に比べれば十分小さく、誤差の許容範囲である。

(3) 本実験の結果と先行研究の実験結果を比較すると、本実験でのアークプラズマの温度分布は先行研究に比べてわずかに広がっているものの、同程度の最大温度が得られていた。特に 14000 K を超える高温領域においては温度分布がよく一致していた。このことから、傾斜ティグアークプラズマに対して本手法を適用することで、2 方向からの撮影のみで三次元発光分光法と同程度の結果を得られることが示唆された。

参考文献

- 1) A. B. Murphy, M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro, T. Sato and J. J. Lowke: Modelling of thermal plasma for arc welding: the role of the shielding gas properties and of metal vapor, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 (2009), 194006.
- 2) K. Hiraoka, T. Shiwaku and T. Ohji: Determining temperature distributions of gas tungsten arc (TIG) plasma by spectroscopic method, *Welding International*, 11-9 (1997), 688-696.
- 3) M. Shigeta, S. Nakanishi, M. Tanaka and A. B. Murphy: Analysis of dynamic plasma behaviours in gas metal arc welding by imaging spectroscopy, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 33-2 (2015), 118-125. (in Japanese)
- 4) S. Miki, K. Konishi, M. Shigeta, M. Tanaka, A. Murata, T. Murata: Experimental Measurements of Gas Shielding Characteristics in TIG Welding with Constricted Nozzle, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 36-1 (2018), 21-25. (in Japanese)
- 5) K. Tanaka, M. Shigeta, M. Tanaka and A. B. Murphy: Investigation of the bilayer region of metal vapor in a helium tungsten inert gas arc plasma on stainless steel by imaging spectroscopy, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52-35 (2019), 354003 (9 pages).
- 6) K. Tanaka, M. Shigeta, M. Tanaka and A. B. Murphy: Imaging Spectroscopy for Transient Transport of Chromium Vapor During Helium TIG Welding, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 38-2 (2020), 21s-24s.
- 7) K. Tanaka, M. Shigeta, M. Tanaka and A. B. Murphy: Investigation of transient metal vapour transport processes in helium arc welding by imaging spectroscopy, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53-42 (2020), 425202 (8 pages).
- 8) Y. Hirata, M. Tanaka, M. Shigeta, K. Nomura and Y. Ogino: Measurements and Numerical Simulations in Arc Welding Processes, *Journal of the Japan Welding Society*, 84-1 (2015), 19-24. (in Japanese)
- 9) K. Konishi, M. Shigeta, M. Tanaka, A. Murata, T. Murata and A. B. Murphy: Reliability evaluation of Fowler-Milne method in a temperature measurement of Gas Tungsten Arc, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 33-1 (2015), 42-48. (in Japanese)
- 10) M. Shigeta, S. Nakanishi, M. Tanaka and A. B. Murphy: Analysis of dynamic plasma behaviours in gas metal arc welding by imaging spectroscopy, *Welding international*, 31-9 (2017), 669-680.
- 11) S. Zielinska, K. Musiol, K. Dzierzega, S. Pellerin, F. Valensi, Ch de Izarra and F. Briand: Investigations of GMAW plasma by optical emission spectroscopy, *Plasma Sources Science and Technology*, 16-4 (2007), 832-838.
- 12) M. Shigeta and M. Tanaka: Visualization of electromagnetic-thermal-fluid phenomena in arc welding, *Japanese Journal of Applied Physics*, 59 (2020), SA0805 (12 pages).
- 13) M. Shigeta and M. Tanaka: Diagnostics and Numerical Analysis for Thermal and Flow Phenomena in Arc Welding, *Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, 140-6 (2020), 350-353. (in Japanese)
- 14) S. Asai, M. Tanaka, S. Yamane, F. Miyasaka, M. Shigeta, K. Nomura, Y. Ogino: Recent Progresses of Welding and Joining Engineering, *Journal of the Japan Welding Society*, 89-5 (2020), 38-51. (in Japanese)
- 15) 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.
- 16) T. Methong, T. Yamaguchi, M. Shigeta, M. Tanaka, R. Ikeda, M. Matsushita and B. Poopat: Effect of Rare Earth Metal on Plasma Properties in GMAW using CO₂ Shielding Gas, *Welding in the World*, 61-5 (2017), 1039-1047.
- 17) T. Methong, M. Shigeta, M. Tanaka, R. Ikeda, M. Matsushita, B. Poopat: Visualization of Gas Metal Arc Welding on Globular to Spray Transition Current, *Science and Technology of Welding and Joining*, 23-1 (2018), 87-94.
- 18) K. Nomura, S. Asai and Y. Hirata: Visualization of Welding Arc Plasma by 3D Spectroscopic Measurement, *Journal of Smart Processing*, 8-2 (2019), 46-51. (in Japanese)
- 19) Y. Yasutomo, S. Himeno, T. Enoto and Y. Ozawa: Asymmetrical Abel Inversion and Its Application to Determination of Spatial Distribution of Theta Pinch Plasma Density, *Journal of the Atomic Energy Society*, 23-9 (1981), 58-64. (in Japanese)
- 20) H. K. Park: A new asymmetric Abel-inversion method for plasma interferometry in tokamaks, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 31-13 (1989), 2035-2046.
- 21) H. Ruan, B. Wan: Dealing with Asymmetric Abel Inversion Using Fourier-Bessel Expansion, *Plasma Science and Technology*, 2-4 (2000), 357-361.
- 22) K. Nomura, T. Kishi, K. Shirai, Y. Hirata and K. Kataoka: Temperature measurement of asymmetrical pulsed TIG arc plasma by multidirectional monochromatic imaging method, *Welding in the world*, 59 (2015), 283-293.
- 23) Y. T. Cho and S. J. Na: Application of Abel inversion in real-time calculation for circularly and elliptically symmetric radiation sources, *Measurement Science and Technology*, 16-3 (2005), 878-884.
- 24) 一般社団法人溶接学会溶接法研究委員会編: 新溶接アーク現象, 産報出版株式会社 (2021).
- 25) NIST, Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/>
- 26) 神沢淳: プラズマ伝熱, 信山社サイテック (1992).
- 27) K. Hiraoka, T. Shiwaku and T. Ohji: Temperature Distributions of Gas Tungsten Arc Plasma by Spectroscopic Method, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 14-4 (1996), 641-648. (in Japanese)
- 28) K. Nomura, K. Shirai, T. Kishi and Y. Hirata: Study on temperature measurement of two-electrode TIG arc plasma, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 31-2 (2013), 133-140. (in Japanese)