

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760600

研究課題名(和文) 画像再構成法による非軸対称溶接アークの三次元温度計測

研究課題名(英文) 3D temperature measurement of axially asymmetrical welding arc plasma by image reconstruction method

研究代表者

野村 和史 (Nomura, Kazufumi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90397729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、非軸対称アークプラズマの三次元的な温度分布測定を目的としている。これには発光分光法を用いるが、さらに多方向計測と画像再構成法によるトモグラフィ技術が必要である。まず、1つのCCDカメラによる回転光学系を採用し、適切な検出方向の検討など、装置や再構成手法の改良を行い、2電極TIGアークの計測に適用した。さらに本手法を非定常アークに対して適用させるため、CCDカメラを複数台用いた多点同時計測装置を構築した。各カメラの感度較正、干渉フィルタの中心波長較正を行い、傾斜パルスTIGアークを計測対象とした。ピークからベース電流に移行する間での温度分布変化を計測することができた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is measure the 3D temperature distribution of axially asymmetrical welding arc plasma. This requires spectroscopic method, multidirectional measurement and tomographic technique with image reconstruction. First, we employed the optical rotational system by one CCD camera and improved the equipment through the evaluation of the appropriate detection directions and numbers. Two TIG electrode arc was measured by this system. Second, we constructed the simultaneous and multidirectional measurement system was constructed to measure the axially asymmetric and non-steady state plasma. To ensure the correct measurement using multi detectors and the interference filters, the calibrations were conducted involving the adjustment of the central wavelength through the filter. We could perform the temperature measurement of the transient and asymmetrical TIG arc plasma such as in the transition period between the peak and base current of the pulsed TIG arc with tilted torch.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，材料加工・処理

キーワード：アークプラズマ 溶接 分光計測 非軸対称 非定常 干渉フィルタ CCDカメラ

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接法は、数ある溶接プロセスの中でも、簡便性やエネルギー効率の高さなどの理由から製造業の各分野における不可欠な技術となっており、さらなる高品質・高効率化が強く求められている。しかし、アークプラズマを介して生じる溶接現象は極めて複雑であり、完全な制御下におくことができていないのが現状である。そのため、現象をより深く理解し、解明することが望まれている。

その取り組みの一つとして、アークの温度計測実験が行われている。その手法としては非接触でアークに擾乱を与えない分光法を用いたものであり、二次元軸対称を仮定とした空間分解処理 (Abel 変換) を施すことで、平板上の静止 TIG アークの温度分布を計測している (Ref. K. Hiraoka: J. Japan Welding Soc., 67-8 (1998) など多数)。しかし実際の生産現場における溶接は、T 字継手や V 開先など様々な母材形状に対して行われたり、高効率化を目指し複数の電極による溶接が適用されたりすることから、アークの形状が非軸対称となるものが数多く存在する。そうした非軸対称な発光体に対する分光法として、図 1 に示すような CT (computed tomography) スキャンの原理に基づいた画像再構成法による方法がある。しかし溶接アークプラズマを対象としたものでは、先述の軸対称アークを想定した測定がほとんどであり、非軸対称となるような溶接アークについては、その熱源特性がよくわかっていないのが現状である。

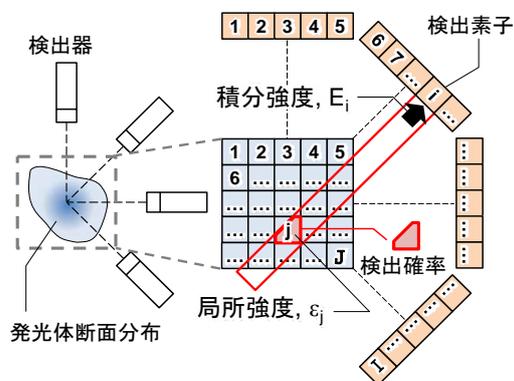


図 1 非軸対称アークと CT

2. 研究の目的

本研究では、画像再構成法を用いた三次元計測法を溶接アークに適用した温度計測手法を確立し、これまで議論されなかった非軸対称な溶接アークの特性、特に温度について実験的に明らかにすることを目的とする。

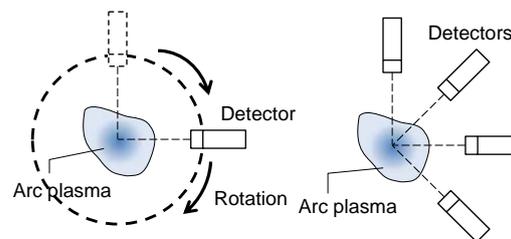
具体的には、申請者が既に構築済みであった 1 つの CCD カメラによる回転光学系を用いて、適切な投影数や投影角度の選定など、本三次元計測手法の確立を目指す。計測対象としては 2 電極 TIG アークに対する分光計測を行う。また、本手法の更なる高度化として、多点同時計測を試みる。回転光学系は

計測に時間がかかるため、計測対象は定常状態である必要がある。そのためパルスアークのような非定常な溶接アークについては適用できない。これを解決するためには複数の検出器を用いた多点同時計測装置が必要となる。しかし、検出器や特定波長を透過させる干渉フィルタを多数用いる装置となることから、同期処理や透過波長較正を含めた感度統一較正が必須となる。これらを考慮した多点同時計測装置を構成し、非軸対称かつ非定常なアークの分光計測を行う。

3. 研究の方法

一般に、ある原子もしくはイオンの発光スペクトル強度  $\epsilon$  は温度  $T$  の関数  $\epsilon(T)$  で表される (Ref. 山本ら: プラズマの分光計測, 日本分光学会 (1995) など)。よってプラズマの温度はスペクトル強度を計測して、これを変換することで求めることができ、発光分光法として広く用いられている。

さて、このスペクトル強度はある点の局所的な放射強度  $\epsilon$  である。しかしプラズマの計測は、その放射強度が一側面から検出されるため、実験的に得られる強度は局所強度が重畳された積分強度  $E$  となる。よって、積分強度から局所強度を求めるための空間分解法が必要である。図 1 はある高さにおけるアークプラズマ断面の局所強度を離散化したマトリクス  $\epsilon_j$  を表しており、これを積分強度  $E_i$  から求めることが必要となる。このとき、積分強度  $E_i$  は局所強度  $\epsilon_j$  のラドン変換であり、逆ラドン変換を行うことで解、すなわち局所強度分布を求めることができる。



(a) 回転型 (b) 複数型  
図 2 投影積分強度取得方法

本研究では多方向からの積分強度を得る際、検出器が回転する図 2(a) のような計測系と、複数の検出器を用いた図 2(b) のような計測系を採用した。前者では、1 つの CCD カメラが現象の周囲を積分強度を取得しながら移動する。これによって、ほぼ無制限に検出方向が取れること、検出器毎の統一較正というのが不要であることなどの利点が生まれる。後者は、先述したように計測が瞬時に行われるため非定常なアークにも適用できる手法となる。

また、積分強度から局所強度を求める際の空間分解法として、ML-EM (最尤推定-期待値最大化) 法を用いた (L. A. Sheep ら: IEEE Trans. Med. Imaging, MI-1, 2 (1982)). こ

これは逐次近似法の一つで、ノイズの影響が小さく精度も良いとされている。

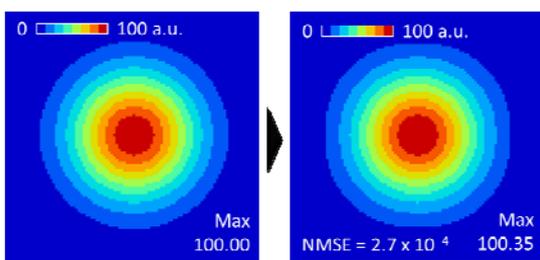
こうして求めた放射強度分布から温度分布への変換にはいくつか手法があるが、本研究では単一の波長を用いる Fowler-Milne 法を採用した (H. N. Olsen: J. Quant. Spectrosc. Ra., 3 (1963)).

#### 4. 研究成果

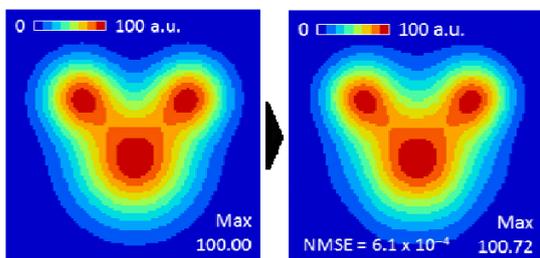
##### (1) 再構成精度の検証

画像再構成をする場合、測定方向数が多ければ多いほど積分強度の情報が多くなるため、再構成の精度は高くなる。回転光学系を用いれば測定方向数を比較的容易に多くすることができる。しかし、複数検出器を用いる場合、その検出器の数がこの方向数となるため、適切な方向数を求めておく必要がある。また、ML-EM 法は反復手法であるためその繰り返し数によっても再構成の精度が変わる。そこで、適当に与えた仮想強度分布  $\varepsilon_G(x, y)$  に対して仮想的に D 方向から得た積分データを用いて k 回繰り返した ML-EM 法による再構成を行った結果を  $\varepsilon_R(x, y)$  とし、これらと比較することで再構成精度を検証した。方向間隔は  $180^\circ / D$  となる。比較結果は次の Normalized Mean Square Error (NMSE) で評価した。

$$NMSE = \frac{\sum_{x=0}^{x_{max}} \sum_{y=0}^{y_{max}} [\varepsilon_R(x, y) - \varepsilon_G(x, y)]^2}{\sum_{x=0}^{x_{max}} \sum_{y=0}^{y_{max}} \varepsilon_G(x, y)^2}$$



(a) 軸対称分布

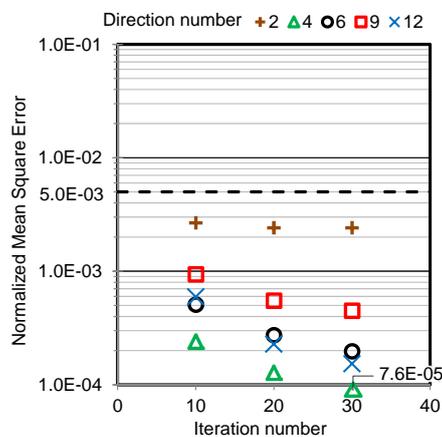


(b) 非軸対称分布

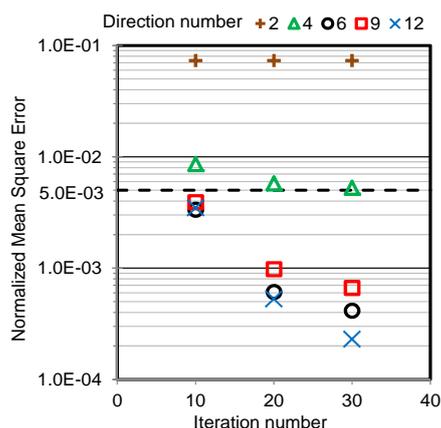
図3 仮想分布 (左側) と、方向数 6, ML-EM 繰り返し数 20 での再構成分布 (右側)

図3の左側は対象とした仮想分布データを示している。分解能は  $100 \times 100$  である。結果として、 $D=6$ ,  $k=20$  であれば、NMSE での精度  $5 \times 10^{-3}$  以下が達成できることがわかった。

図3の右側はその条件での再構成画像である。その他の条件で再構成したときの NMSE を図4にまとめた。これによると軸対称分布では 2 方向からの検出であっても再構成精度は十分であるが、非軸対称となると誤差が大きくなる生じることがわかる。対象とする分布によって精度評価は異なるが、本研究では検出方向数として 6 を選択することとした。



(a) 軸対称分布



(b) 非軸対称分布

図4 検出方向数と繰り返し数の NMSE に及ぼす影響

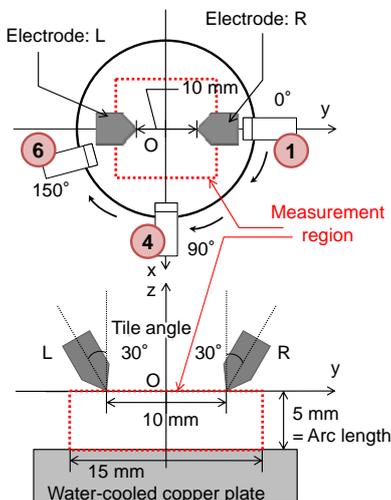


図5 2電極アーク計測装置

(2) 回転光学系を用いた2電極 TIG アークの計測

図5は2電極 TIG アークの実験装置である。2電極 TIG は、電極径 3.2 mm, 先端角度  $60^\circ$  の電極 2 本を用い、電極間距離 10 mm, アーク長 5 mm, 各傾斜角  $30^\circ$  で向かい合うように配置した。片方の電極(R)は 150 A で固定し、もう一方(L)を 0~200 A とした(0 A は単電極の傾いた TIG となる)。母材は水冷銅を用いた。検出器は z 軸を中心に y 軸方向の  $0^\circ$  から  $30^\circ$  毎に  $150^\circ$  まで 6 方向分積分強度を取りながら回転する。検出器の光学系には焦点距離 700 mm のレンズを用いて、被計測対象が十分に平行投影内にあるとした。また、中心波長 696.5 nm (FWHM : 1.4 nm) の干渉フィルタを装着し、Ar I の線スペクトル画像を得た。計測範囲は図中の回転中心軸に平行な面に対し切り出した  $15 \times 5 \text{ mm}^2$ , 解像度  $1200 \times 400 \text{ pixel}$  の範囲であるが、ノイズ除去のためのメディアンフィルタを適用した後、 $1200 \times 400$  のデータを  $100 \times 40$  のデータに圧縮しノイズを除去した。以上の操作によって空間分解能は  $0.15 \times 0.125 \text{ mm}^2$  となる。再構成対象の xy 断面は正方形で、その領域は  $15 \times 15 \text{ mm}^2$ , 空間分解能は  $0.15 \times 0.15 \text{ mm}^2$ ,  $100 \times 100$  の分割数となる。

まず、150 A+150 A の 2 電極 TIG について、計測結果を示す。図6は各方向から得られる撮影像である。 $90^\circ$  からの観察より、2つの電極から発生したアークが電磁力によって引き寄せ合い、一つになっている様子がわかる。これらの輝度情報から各断面での分布を再構成することにより、放射強度分布が図7のように得られる。図は2つの電極先端を通る yz 断面での強度, xy 断面のうち電極から 1 mm 下での強度である。白印は電極先端位置を示している。これらを Fowler-Milne 法によって温度分布に変換することで図8に示す2電極 TIG アークの温度分布が求められる。図6に示した  $90^\circ$  における撮影像と図8によって明らかになった yz 面の温度分布を比べると、撮影像上の明るい所で温度が高いわけではないことがわかる。撮影像は強度分布を x 方向に積分して得られるからである。また、温度分布の xy 断面図を見ると、電極配置方向とは逆方向にアークが伸びている。これは、各電極からのプラズマ気流が衝突して、衝突方向とは垂直方向に拡散するためであると考えられる。

図9は傾斜単電極での温度分布である。傾斜の影響で非軸対称アークとなっている。2電極の場合と比較すると、2電極では一方のアークからの引き合う電磁力があるため、温度分布の傾斜が少し大きくなっていることがわかる。図10は電流比の影響を見たものであるが、電流の大きい電極からのアークが母材側に達するように見え、アーク全体としては電流が小さい電極側に振れているようである。

各温度分布計測結果における yz 面での最

大温度に注目してみると、2電極 TIG では総電流量が変わってもどれもほぼ同じである。むしろ単電極 TIG が電流量としては最も小さいが最高温度が最も高くなっている。このことから、総電流が大きくても導電領域が広いと電流密度が下がりプラズマ温度が低下していることが考えられる。

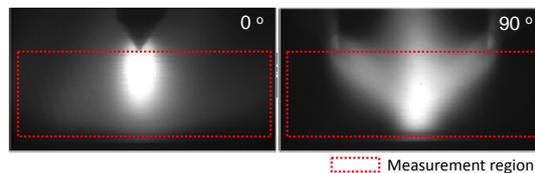


図6 計測した撮影像 (150A+150A)

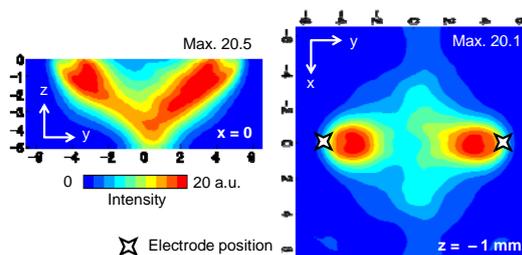


図7 強度分布 (150A+150A)

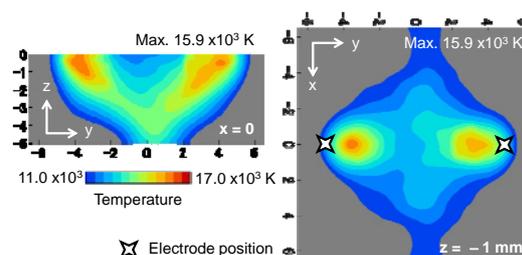


図8 温度分布 (150A+150A)

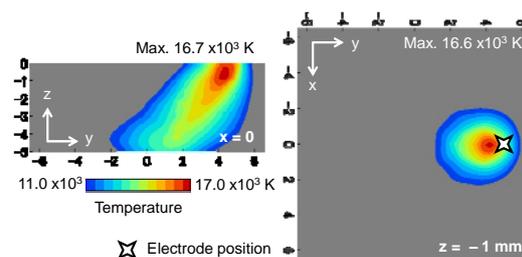


図9 温度分布 (150A)

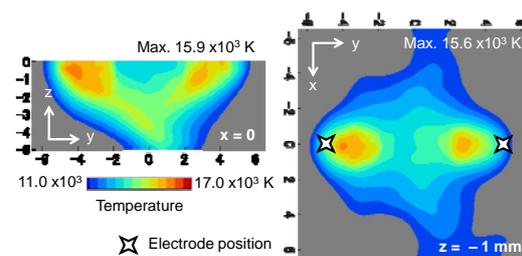


図10 温度分布 (200A+150A)

(3) 多点同時光学系を用いた傾斜パルス TIG アークの計測

図 11 は本研究で構築した多点同時計測装置である。12bit GigE CCD カメラと 696.5nm の Ar I 線スペクトルを透過する干渉フィルタのセットを 6 つ用いた。TIG アークは、電極傾斜角  $30^\circ$ 、ピーク電流 150A、ベース電流 10A、周波数 50Hz、デューティ比 50%の傾斜パルスアーク、すなわち非軸対称で非定常現象とした。カメラの投影面が  $13.3\text{mm} \times 5\text{mm}$  を切り出し計測範囲とした。再構成対象の xy 断面は正方形で、 $13.3\text{mm}$  四方を  $0.067 \times 0.067 \text{mm}^2$ 、 $200 \times 200$  で分割した。縦方向 5mm は 50 分割、分解能  $0.1\text{mm}$  とした。

用いた CCD カメラは高速カメラではなく比較的安価なものである。パルス現象中の取得データを各カメラで同期するため、図 12 に示すパルス電流の立ち上がり反応するトリガをファンクションジェネレータで作成し、これを全カメラのトリガ入力とした。カメラはトリガ入力から画像取得までの遅延時間を設定できるため、これを調整することで周期現象であれば任意の時間位置での現象を同期取得できる。

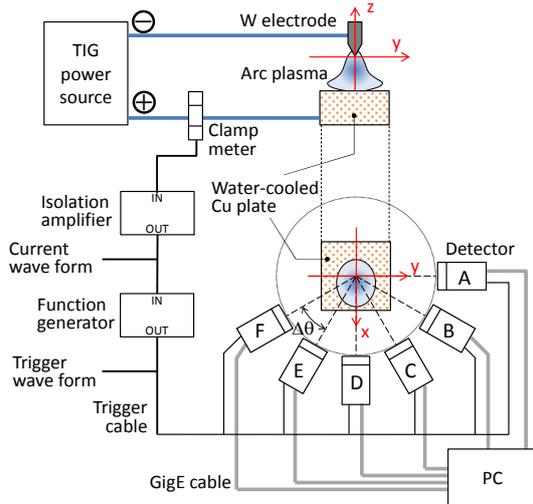


図 11 傾斜パルス TIG 計測装置

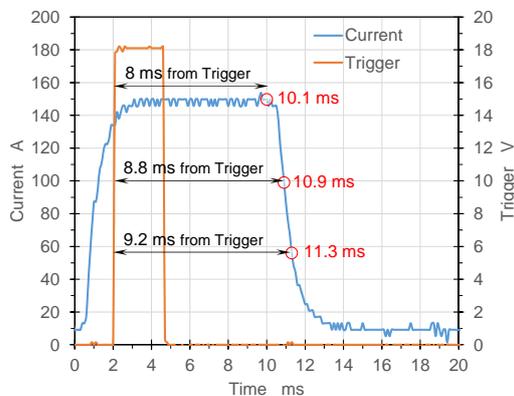


図 12 パルス波形と画像取得タイミング

本装置は 6 つの干渉フィルタを用いるが、干渉フィルタの透過特性は厳密には等しくなく、中心透過波長にバラつきがあるのが一般的である。今回用いた 6 つのフィルタの中心波長を分光器を用いて調べると  $697.3\text{nm}$  から  $697.8\text{nm}$  のずれがあった。しかしこの中心波長はフィルタを傾けることによって短波長側にシフトする。図 13 はあるフィルタの傾斜の有無による透過特性の違いを表している。このフィルタの場合、 $4.7^\circ$  傾斜をつけることで求める中心波長  $696.5\text{nm}$  を得ることができる。同様の結果が他のフィルタでも得られている。この傾斜操作によって感度の違いが誘発されるが、そもそも CCD のセンサに個別の感度差がある。本研究では、軸対称の定常 TIG アークを観察することで、干渉フィルタの傾斜操作による感度差、センサの個別の感度差を含めて感度校正を行った。

図 14 はこれまでに説明した装置、手法を用いて傾斜パルス TIG アークの計測結果で、電極下  $1\text{mm}$  および  $4\text{mm}$  での xy 断面、xz 断面での温度分布である。

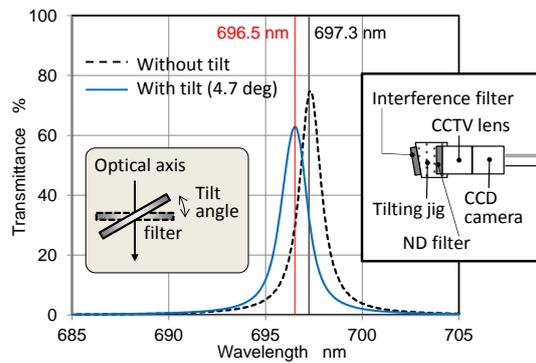


図 13 干渉フィルタの透過特性と傾斜による中心波長シフト

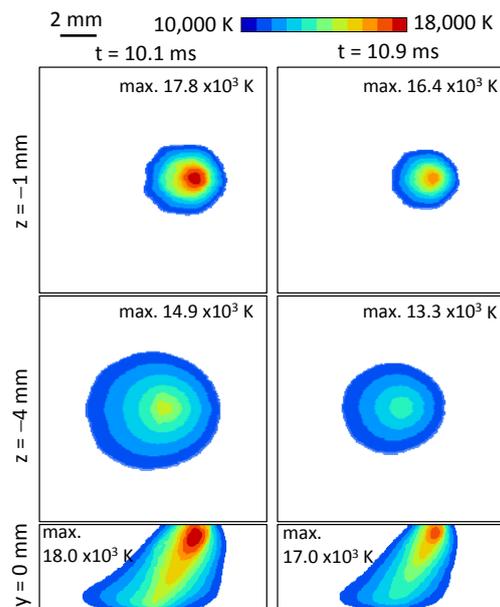


図 14 傾斜パルス TIG アークの温度分布

図はピーク時 150A, ピークからベースへの移行時のおよそ 100A に相当する際の時刻での温度を表している. 最大温度が減り, 高温部分が小さくなっていくことが示されている. また, 別途 150A, 100A での定常ティグアークを計測したが, ほとんど結果は変わらなかった. ここでの電流値移行速度はおよそ  $-47\text{A/ms}$  であるが, この程度であればプラズマの温度変化は電流変化に追従するといったことがわかった.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 野村 和史, 白井 健太郎, 貴志 崇, 平田 好則: 2 電極 TIG アークの温度計測に関する研究, 溶接学会論文集, Vol. 31, No. 2 (2013) pp. 133-140 [査読有]
- ② K. Nomura, T. Kishi, K. Shirai, Y. Hirata: 3D temperature measurement of tandem TIG arc plasma, *Welding in the World*, 57, 5 (2013) pp. 649-656, DOI: 10.1007/s40194-013-0062-2 [査読有]
- ③ Y. Ogino, Y. Hirata, J. Kawata, K. Nomura: Numerical analysis of arc plasma and weld pool formation by a tandem TIG arc, *Welding in the World*, 57, 3 (2013) pp. 411-423, DOI: 10.1007/s40194-013-0040-8 [査読有]

[学会発表] (計 6 件)

- ① K. Nomura, T. Kishi, K. Shirai and Y. Hirata: Temperature Measurement of Asymmetrical Pulsed TIG Arc Plasma by Multidirectional Monochromatic Imaging Method, 66th IIW Annual Assembly & International Conference (IIW2013), 2013/9/14, Essen にて
- ② 野村 和史, 白井 健太郎, 貴志 崇, 荻野 陽輔, 平田 好則: 2 電極 TIG アークの温度計測に関する研究, 第 220 回溶接法研究委員会, 2012/11/2, 奈良にて
- ③ K. Nomura, T. Kishi, K. Shirai and Y. Hirata: Temperature Measurement of a Tandem TIG Arc Plasma by Using Computed Tomography Method, The 2nd East Asia Symposium on Technology of Welding & Joining (EAST-WJ), 2012/9/27, 奈良にて
- ④ 白井 健太郎, 貴志 崇, 野村 和史, 平田 好則: 2 電極アークの温度計測, 溶接学会 H24 年度秋季溶接学会, 2012/9/27, 奈良にて
- ⑤ Y. Ogino, J. Kawata, Y. Hirata and K. Nomura: Numerical analysis of arc plasma to weld pool formation by a tandem TIG arc, 65th IIW Annual Assembly & International Conference

(IIW2012), 2012/7/9, Denver にて

- ⑥ K. Nomura, T. Kishi, K. Shirai and Y. Hirata: 3D temperature measurement of a tandem TIG arc plasma, 65th IIW Annual Assembly & International Conference (IIW2012), 2012/7/11, Denver にて

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

野村 和史 (NOMURA, Kazufumi)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90397729