

令和元年6月21日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06746

研究課題名（和文）三次元発光分光法の開発と非軸対称アークプラズマの熱源特性の解明

研究課題名（英文）Elucidation of non-axisymmetric arc plasma by development of three-dimensional optical emission spectroscopic method

研究代表者

野村 和史（Nomura, Kazufumi）

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：90397729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複雑な溶接プロセスの熱源特性を捉えるための三次元発光分光法を開発した。非軸対称かつ非定常な様相を呈する溶接アークプラズマに対し、その複雑な三次元温度分布や金属蒸気分布を求めるための、トモグラフィに基づく多色多方向同時計測装置を構築した。本研究においては、シールドガスプラズマと金属プラズマ混在するガスメタルアーク溶接（ミグアーク溶接、炭酸ガスアーク溶接、マグ溶接）を対象に、様々な移行形態における溶接アークの特性を実験的に明らかにした。それぞれで計測に用いるプラズマの線スペクトルは異なるものの、温度などの算出理論をそれぞれで構築し、確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶接アークプラズマに関する先行研究では、現象を軸対称と仮定する研究がほとんどであるが、本研究により溶接アークの温度分布や金属蒸気分布を三次元的に計測することが可能となった。産業界においては、施工の高効率化や省力化として、複数の熱源を同時に用いるような、そもそも非軸対称となる施工法も多くある。しかし現象が複合的になるため支配要因の抽出、最適化は非常に困難である。そうした現象の計測手法が求められているのも事実であり、本研究の手法は今後多く応用されていくと期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed three-dimensional optical emission spectroscopic method to diagnose complex heat characteristics in the arc welding. Welding arc plasma often presents non-axisymmetric and non-stationary appearance. Therefore, the temperature and metal vapor concentration distribute three-dimensionally. To measure such a phenomenon, we constructed multicolor, multidirectional, simultaneous measurement system based on tomography. In this study, the welding arc characteristics in various droplet transfer modes was experimentally revealed regarding Gas Metal Arc welding (MIG arc, CO₂ arc, MAG arc). Although the spectral lines required to measure each welding mode are different, we established the methods to convert the measurement values to physical values such as temperature.

研究分野：アーク溶接

キーワード：プラズマ診断 非軸対称プラズマ トモグラフィ 発光分光法 干渉フィルタ GMA溶接

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接法は、数ある接合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、更なる高品質化、高効率化が求められている。アーク溶接プロセスに伴う諸現象については古くから研究が行われており、シミュレーションも数多く報告されているが、溶接結果の予測などは未だ不完全で、プロセスとして完全な制御下におけていないのが現状である。そのため、新しい材料、新しい施工法を適用する際は溶接技術者、熟練工の経験に基づいた条件探索的なアプローチが今も用いられており甚大なコストがかかっている。こうした課題の主たる原因は、アーク溶接における入力である熱源特性が複雑で未だ不明瞭な点が多いためである。軽量化、強靱化、マルチマテリアル化など、常に進化が求められる生産技術の中で、アーク溶接プロセスを更に高度化するために、アークの熱源特性を精度よく把握することが強く求められている。その手法としては近年、理論解析、シミュレーションが行われるようになってきたが、実験的には主に発光分光法が用いられてきた。結果の一例を次に紹介する。図1に示すように非消耗電極を用いるTIG (Tungsten Inert Gas) アークでは、アーク中心部での温度が高く、入熱分布もおよそガウス分布に従うなど、アーク外観に見合うようなアーク特性となることはよく知られている。しかし、溶滴移行を伴うMIG/MAG 溶接においてはアーク中心部が高輝度であるにも関わらず中心温度は低く、アークによる入熱分布も周辺部の方が高いドーナツ形状になることが示唆されている¹⁻³⁾。これは、主にワイヤ端に形成される溶滴から発生する多量の金属蒸気がアークプラズマ中に混入するとプラズマ物性としての放射損失が大きくなることが原因であることがわかってきた。こうした意外な現象は溶接アークの熱源特性を理解し形式化する際に非常に重要である。

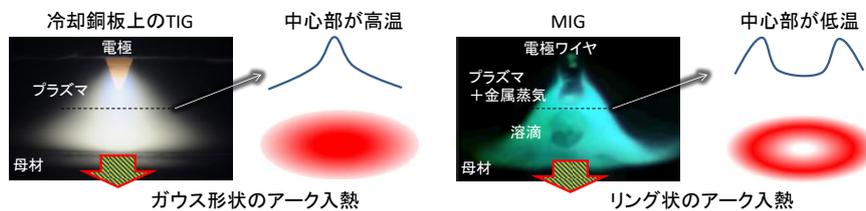
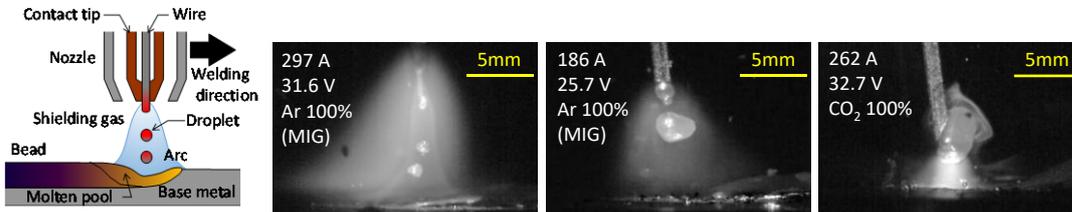


図1 溶接アークの温度分布と入熱形状の概略図



(a) スプレー移行 (b) グロビュール移行 (c) 反発移行

図2 高速度カメラで観察した溶滴移行形態の違い

しかしながらこれらの報告は現象が軸対称であるとした仮定に基づく2次元(r,z)系に限られている。図2に示すように実際のMIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas)現象は、様々な要因により完全な軸対称現象とはならず、溶滴移行形態によってはプラズマが大きく偏向することがほとんどである。また実際の溶接では、複数電極を用いたり母材が非平板であったり、元来軸対称ではない場合が多く存在する。そこで申請者らはそうした非軸対称アークプラズマに適用可能な3次元(x,y,z)系計測の開発を進めてきた。これまでに、金属蒸気がそれほど影響しないTIGアークプラズマの温度分布の計測を目的に、CTスキンの原理に基づいた3次元多方向同時計測装置を作製し、非軸対称アークの計測を可能にした(H24年度採択：若手研究(B)24760600)。さらに、溶滴移行を伴うMIGアーク中の金属蒸気挙動も同時に捉えることができるよう、検出器数の増加とともに3次元多方向同時多色計測へと装置を発展させた(H26年度採択：若手研究(B)26820307)。しかし、結果としてはまだ各種の発光分布のみでありプラズマの温度や鉄蒸気濃度といった定量化が出来ていないことなどが課題として残っていた。また、産業界からは各種溶接材料、溶接法についての3次元アーク挙動を調べたいといった要望も多くあるが、軟鋼MIGにしか適用できていなかったのが実情であった。

2. 研究の目的

本研究は上述の課題を克服し、未踏領域である非軸対称アークの熱源特性を真に明らかにすることを目的とした。具体的には、非軸対称MIGアークに対して発光分布だけでなくその温度分布や金属蒸気濃度分布といった定量的な計測を可能にすること、およびMIGアークだけでなく、ほかのGMA (Gas Metal Arc)溶接、例えば炭酸ガスCO₂溶接における反発移行形態といった強い非軸対称性を呈するアークの熱源特性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

発光分光法は、プラズマに対して非侵襲的で擾乱を与えずに測定することが可能であるという利点から溶接アークに対しても数多くの報告がある。多くは発光の線スペクトルを計測し、プラズマの温度などを算出するものである。その算出方法にはいくつか手法があるが⁴⁾、いずれにせよ線スペクトル強度分布が必要となり、これはプラズマ内部の局所的な放射強度分布を意味する。しかしプラズマ計測では、その放射強度が一側面から検出されるため、得られる強度は局所強度が重畳された積分強度となる。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。

アークプラズマが軸対称現象、すなわち断面が円状であるとみなせるときは、一方向からの計測結果を元に空間分解法としてアーベル逆変換法が用いられ、二次元(r, z)系の分布が求められる。一方、本研究で対象とするような非軸対称な三次元アークプラズマ現象を計測する場合は多方向からの計測結果を元に画像再構成法を用いて三次元(x, y, z)系の分布を求めることになる⁵⁾。また、TIGアークと異なりGMAアークのように金属蒸気がアーク中に多く含まれる場合に定量化を行う際は、数種の波長情報を組み合わせる必要がある。例えばMIGアークの温度分布、金属蒸気の主要素である鉄蒸気の濃度分布を求めるには、本研究においては図3のような定量化手法を用いた。鉄蒸気の温度を求めるために相対強度比法を用いたほか、また、取得発光強度を絶対強度とすることで、サハの熱電離方程式などを經由して、鉄蒸気濃度、シールドガス部分の温度を求められるようにした。

以上の手法を達成するために、図4に示す多色多方向同時計測装置を構築した。取得する線スペクトルとしてAr I (696.5 nm)、Fe I (492.1 nm, 516.7 nm)の3波長を選択し、それぞれ4台ずつの検出器を交互に15 deg 間隔で配置した。各検出器は、CCDカメラにレンズ、およびそれぞれの波長に対応する狭帯域の干渉フィルタを取り付けている。計測強度の絶対強度への換算については、TIGアークの計測と、スペクトル分布が既知のタングステンランプ光源の計測を通して装置全体の較正係数を導き出した。この定量化手法の詳細については既報⁶⁾を参照されたい。

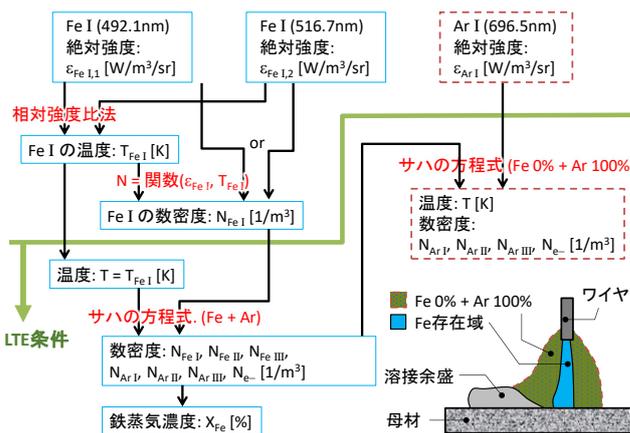


図3 MIGアークの定量化手法

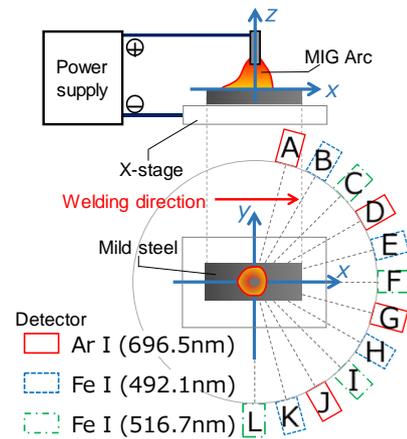
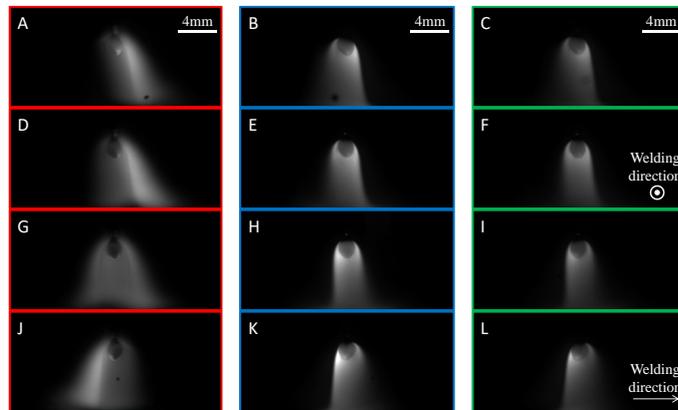


図4 計測装置の概要

4. 研究成果

まず、非軸対称形状を呈するMIGアークプラズマの計測結果を示す。母材、ワイヤともにSS400を用い、溶接速度80 cm/min、電流170 A、電圧27 Vのとき、溶滴移行形態はワイヤ径よりも大きなグロービュール移行となり、プラズマも非軸対称となった。まず各検出器で得られる積分強度を図5に示す。Feの発光がワイヤの延長上にあり、Arシールドガスに偏りがあることがわかる。



(a) Ar I (696.5 nm) (b) Fe I (492.1 nm) (c) Fe I (516.7 nm)

図5 MIGアークにおける各検出器で得られる光学イメージ

これらの情報から温度分布等を算出したのが図6である。計測された温度分布、鉄蒸気分布はいずれも非軸対称性を示した。その断面形状は、軸対称計測で報告されているような、高温部の内側に低温部が存在するといった形¹⁻³⁾ではなく、ワイヤ直下付近に低温域とな

る鉄蒸気が分布し、高温域となる Ar プラズマは半月状に分布するという偏った温度分布となることがわかった。その最高温度は鉄蒸気が存在しない Ar プラズマ領域で見られ、約 13,000 K であった。Ar プラズマ領域での温度は、周辺部へ向かって低くなり、母材へ近づくにつれて最高温度が低下した。鉄蒸気存在領域では、この Ar プラズマ領域よりも低温の約 6,000 K となり、各高さによる温度差は少なかった。また、鉄蒸気濃度分布を見ると、懸垂溶滴直下で最大約 50% に達することなどがわかった。なお、この瞬間について、溶接線前方の検出器 E, F, G により得られた画像 (図 5) は、一見すると軸対称状態に見えることに留意されたい。実際には上述したような三次元分布、特に Ar プラズマ領域が大きく偏った分布であったとしても、一方向計測では軸対称状態に見えることもある、ということが示されている。

次に炭酸ガスアーク溶接を対象とした計測を行った。炭酸ガスアーク溶接においては、中電流域から図 2 (c) に見られるような反発移行形態が見られ、肥大化した溶滴が原因で大きなスパッタが発生する。このときのアークの状態を物理的に把握することは炭酸ガス溶接の理解と改善につながると考えられる。

そこで図 4 に示す Ar 用の検出器を酸素原子 O I (777.3 nm) を捉えるものに入れ換え、同様の計測を行った。ただし、絶対感度への変換に TIG アークの Ar 計測を経ることは同じであるため、更に 1 台のみ Ar を計測できる検出器を追加した。

図 7 は計測結果の一例である。これより、炭酸ガスアーク溶接においては、アークプラズマに高温領域と低温領域が偏在し、溶滴は高温領域とは反対側に成長する傾向にあることがわかった。また、プラズマの最高温度は鉄蒸気の存在しないところでみられ、約 12,000 K であった。また鉄蒸気の存在するところでは一様に 6,000 K から 7,000 K 程度であった。鉄蒸気濃度は最高 90% ほどで、電流が上がると鉄蒸気濃度の高い領域が広がった。別途計算される電気伝導率の温度依存性より、炭酸ガスにおいては温度分布で示した高温部に電流が流れやすいことが推定される。従って、スプレー移行と比較して反発移行では図 8 にまとめたようなアークプラズマの構造になっていると考えられる。

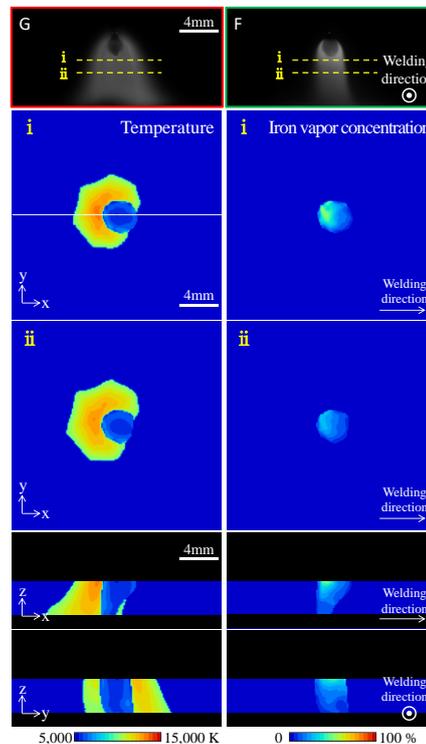


図 6 MIG アークグローブール移行時の温度、鉄蒸気分布

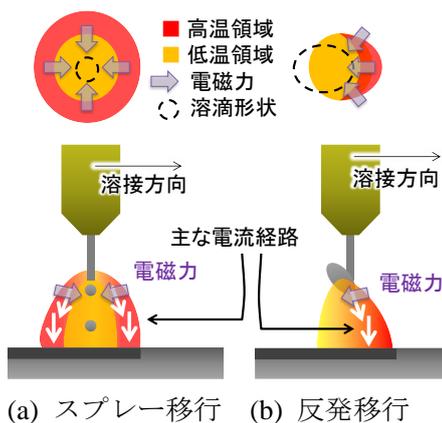


図 8 各移行形態のメカニズム

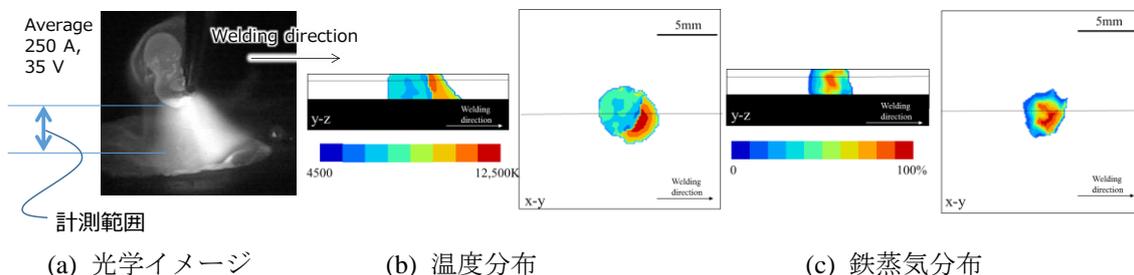


図 7 炭酸ガス溶接アークの反発移行形態時に見られる温度分布、鉄蒸気分布

本研究では、非軸対称な溶接アークプラズマに対し、多方向同時三次元計測装置を用いた発光分光計測を行った。その結果、一側面からの計測ではわからない、プラズマ内部の温度や鉄蒸気濃度分布を三次元的に計測することに成功した。MIG アークのグローブール移行、CO₂ アークの反発移行を含め、そのアークの状態が実験的に解明されたのは世界初である。

現在、高速度カメラをはじめとする計測機器の発達やコンピュータの高速化によって、複雑なアーク溶接現象の実験観察、理論解析が進み、そのメカニズムが明らかにされつつあるが、多電極アーク溶接、レーザアークハイブリッド溶接などに見られる明らかに三次元現象となるようなものに関してはよくわからないことも多い。本手法は、そうした三次元現象の実際を詳しく明らかにすることができるものである。このような高度な計測手法を発展、応用していくことに

より、溶接アーク熱源に関する理解がより深まり、生産プロセスの改善や新たなプロセスの創出につながると考えられる。

参考文献

- 1) M. E. Rouffet, et al.: J. Phys. D: Appl. Phys., 43 (2010) 434003
- 2) S. Zielinska, et al.: Plasma Sources Sci. Technol., 16 (2007) 832-838
- 3) 辻村吉寛, 田中学: 溶接学会論文集, 30, 4 (2012) 288-297.
- 4) 平岡和雄, 塩飽孝至, 黄地尚義: 溶接学会論文集, 14, 4 (1996) 641-648
- 5) K. Nomura, Y. Hirata et al.: Weld. World, 57, 5 (2013) 649-656.
- 6) K. Nomura, Y. Hirata, S. Asai et al.: J. Phys. D: Appl. Phys., 50 (2017) 425205

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- 1) 野村 和史, 浅井 知, 平田 好則: 三次元発光分光法による溶接アークプラズマの可視化, スマートプロセス学会誌, 査読無, Vol. 8, No. 2 (2019) pp.46-51 解説・総説
- 2) 戸田 要, 吉井 嘉一郎, 三村 晃平, 野村 和史, 平田 好則, 浅井 知: 三次元発光分光法を用いたミグアークプラズマの温度・金属蒸気濃度計測, 溶接学会論文集, 査読有, Vol. 36, No. 1 (2018) pp. 39-48
- 3) K. Nomura, K. Yoshii, K. Toda, K. Mimura, Y. Hirata, S. Asai: 3D measurement of temperature and metal vapor concentration in MIG arc plasma using a multidirectional spectroscopic method, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, Vol. 50 (2017) 425205

[学会発表] (計25件)

- 1) 野村 和史, 高見 康平, 奥田 博之, 浅井 知: マグ溶接アークプラズマの温度計測における連続光の影響評価, 溶接学会 H31 年度春季全国大会 (2019)
- 2) 野村 和史: 溶接プロセスの計測・モニタリングにおけるスペクトル情報の活用, 溶接学会 H31 年度春季全国大会 (2019)
- 3) K. Nomura, K. Takami, H. Okuda, S. Asai: Influence of continuous radiation on the temperature measurement of MAG arc plasma, IIW Commissions I, IV, XII, SG 212 Joint intermediate meeting (2019)
- 4) 奥田 博之, 高見 康平, 野村 和史, 浅井 知: Ar-CO2 混合ガス溶接プラズマの温度計測における連続光の影響評価, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第22回支部大会 (2018)
- 5) 相部 篤志, 野村 和史, 浅井 知: 回転式水冷分割銅板を用いた傾斜 TIG アークプラズマに対する電流・入熱密度分布のトモグラフィ計測, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第22回支部大会 (2018)
- 6) 相部 篤志, 野村 和史, 浅井 知: 回転式水冷分割銅板を用いた傾斜 TIG アークのトモグラフィ計測, 溶接学会 H30 年度秋季全国大会 (2018)
- 7) K. Nomura, A. Aibe, S. Asai: Tomographic measurement of the current and heat input densities for the axially asymmetric TIG arc plasma, 71st IIW Annual Assembly & International Conference (IIW2018) (2018)
- 8) 野村 和史, 相部 篤志, 浅井 知: 非軸対称ティグアークの電流・入熱密度分布のトモグラフィ計測, 第242回溶接法研究委員会 (2018)
- 9) 野村 和史: 三次元発光分光法による溶接アークプラズマの可視化, 日本学術振興会第153委員会研究会『高密度プラズマの計測技術～高密度プラズマの物理現象の見える化技術～』(2018)
- 10) 野村 和史: 三次元発光分光法による非軸対称溶接アークの可視化, 第26回 応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会 プラズマ新領域研究会『熱プラズマの電磁熱流体構造を開拓する』(2018)
- 11) 高見 康平, 三村 晃平, 戸田 要, 野村 和史, 浅井 知, 上月 渉平, 早川直哉, 池田倫正: 炭酸ガスアーク溶接における非軸対称プラズマ挙動の発光分光計測, プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部 第21回支部大会 (2017)
- 12) 戸田 要, 野村 和史, 浅井 知: 混合ガスを用いた溶接アークプラズマの分光計測に関する研究, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第21回支部大会 (2017)
- 13) 戸田 要, 三村 晃平, 野村 和史, 浅井 知: マグ溶接アークプラズマの三次元温度計測手法に関する研究, 溶接学会 H29 年度秋季全国大会 (2017)
- 14) 高見 康平, 三村 晃平, 戸田 要, 野村 和史, 浅井 知, 上月 渉平, 早川直哉, 池田倫正: 炭酸ガスアークプラズマの反発移行時の三次元発光分光計測, 溶接学会 H29 年度秋季全国大会 (2017)
- 15) 野村 和史, 高見 康平, 三村 晃平, 戸田 要, 浅井 知, 上月 渉平, 早川直哉, 池田倫正: 炭酸ガスアーク溶接における反発移行アーク挙動の三次元発光分光計測, 第239回溶接法研究委員会 (2017)

- 16) K. Nomura, K. Takami, K. Mimura, K. Toda, S. Asai, S. Kozuki, N. Hayakawa, R. Ikeda: 3D spectroscopic measurement of arc plasma behavior in CO2 arc welding, 70th IIW Annual Assembly & International Conference (IIW2017) (2017)
- 17) 野村 和史, 三村 晃平, 戸田 要, 浅井 知: 溶接アークの多方向同時三次元分光計測 (第3報) - トモグラフィ計測手法の再構成分布への影響 -, 溶接学会 H29 年度春季全国大会 (2017)
- 18) 戸田 要, 吉井 嘉一郎, 野村 和史, 三村 晃平, 平田 好則, 浅井 知: 溶接アークプラズマの三次元温度・金属蒸気濃度分布計測, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第20回支部大会 (2016)
- 19) 三村 晃平, 戸田 要, 野村 和史, 浅井 知: 溶接アークプラズマのトモグラフィ計測手法に関する研究, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第20回支部大会 (2016)
- 20) K. Toda, K. Yoshii, K. Nomura, K. Mimura, Y. Hirata, S. Asai: 3D Spectroscopic Measurement of Temperature Distribution in MIG Welding, Visual-JW 2016 (2016)
- 21) K. Nomura, K. Yoshii, K. Toda, K. Mimura, Y. Hirata, S. Asai: 3D temperature measurement of MIG arc plasma by multidirectional spectroscopic method, 10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS) (2016)
- 22) 野村 和史, 戸田 要, 吉井 嘉一郎, 三村 晃平, 平田 好則, 浅井 知: 三次元発光分光法によるミグ溶接の温度計測, 第114回軽構造接合加工研究委員会 (2016)
- 23) 野村 和史, 戸田 要, 吉井 嘉一郎, 三村 晃平, 平田 好則, 浅井 知: 多方向発光分光法によるミグ溶接の三次元温度・金属蒸気濃度計測, 第235回溶接法研究委員会 (2016)
- 24) K. Nomura, K. Yoshii, K. Toda, K. Mimura, Y. Hirata, S. Asai: 3D measurement of temperature and metal vapor concentration in MIG arc plasma by multidirectional spectroscopic method, 69th IIW Annual Assembly & International Conference (IIW2016) (2016)
- 25) 戸田 要, 吉井 嘉一郎, 野村 和史, 三村 晃平, 平田 好則, 浅井 知: 三次元発光分光法によるミグ溶接の温度計測, 溶接学会 H28 年度春季全国大会 (2016)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。