

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820307

研究課題名(和文)アーク溶接における金属蒸気挙動の三次元計測

研究課題名(英文)Three dimensional measurement of metal vapor behavior in welding arc plasma

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、溶接アークの非軸対称かつ時間変化のある三次元的なプラズマ・金属蒸気挙動を実験的に明らかにすることを目的としている。こうした非軸対称プラズマの診断にはプラズマを多方向から計測し断面を再構成するトモグラフィ技術が必要であるが、プロセス中に発生する金属蒸気挙動をも捉える場合は複数の線スペクトルを同時に計測する必要がある。本研究では複数のCCDカメラと2種類の干渉フィルタからなる多色多方向同時計測装置を構築し、ミグアーク現象を対象に本手法を適用した。本計測によって、スプレー移行からグロービュール移行への遷移とともにアルゴン、鉄蒸気の分布に偏りが生じることを明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to reveal the three dimensional behavior of the plasma and metal vapor in the axially asymmetric and non-stationary welding arc plasma. The tomographic technique, which enables to reconstruct the cross sectional intensity distribution by the multi-directional measurement, is required to diagnose an axially asymmetric plasma. The multi-chromatic measurement is also required to capture the plasma and metal vapor behavior generated during the welding process. We constructed the measurement system composed of multi CCD cameras and two types of the interference filter, and measured a metal inert gas welding phenomena. We found that the globular transfer mode that is seemingly chaotic distribution can be regarded as a distribution where the deviation of Ar is larger than Fe from an axially symmetric double ring distribution.

研究分野：アーク溶接，プラズマ診断

キーワード：アーク プラズマ 分光計測 非軸対称 金属蒸気

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。

近年、アーク溶接プロセスにおける金属蒸気の挙動に注目が集まっている。アーク溶接では、一般に熔融池やワイヤ端に形成される溶滴から多量の金属蒸気が発生しており、これがアークプラズマ中に混入するとプラズマの物性が大きく変化し、プラズマの温度分布や母材への入熱分布などが大きく変化することが多々報告されてきている¹⁻³⁾。アークの基本特性を観察するためにしばしば行われる、溶滴移行を伴わない冷却銅板上でのTIGアークでは、金属蒸気の影響がそれほどないため、アーク中心部での温度が高く入熱分布もお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。しかし図1に示すように、溶滴移行を伴う溶接中のMIG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^{1,4)}。これは金属蒸気混入による放射損失の影響であると報告されている。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り、より詳細に金属蒸気挙動を調べることが望まれている。

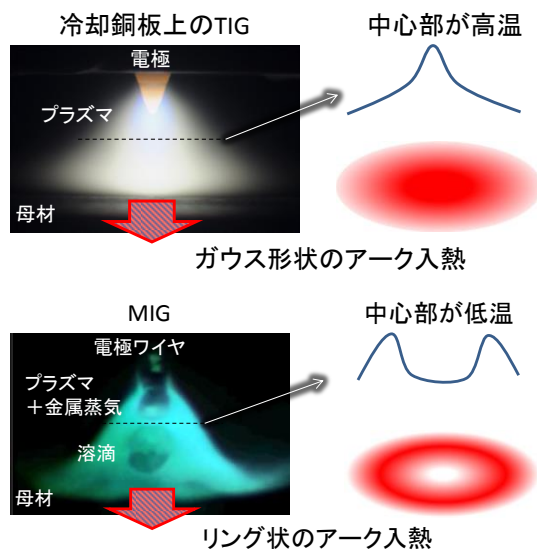


図1 アークの温度分布と入熱の概略図

金属蒸気の挙動については、理論解析によるアプローチのほか、発光分光法を用いた実験観察が行われており、先に示した特性が報告されている。とはいえ、これらは現象が軸対称であるとした仮定に基づく (r,z) 系2次元

解析、観察に限られている。しかしながらMIG/MAG現象は、様々な要因により完全な軸対称現象とはならず、図2のように溶滴の移行も含め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。そのため、真に金属蒸気の挙動を観察するには (x,y,z) 系の3次元計測が必要となる。

我々はそうした非軸対称系に対する3次元計測のアーク計測に着目した。3次元計測では図3に示すようなトモグラフィ理論を用いる。これは多方向からプラズマを計測し、各方向から得られた情報(積分強度)を元に中心部の非軸対称な発光体断面分布(局所強度)を再構成するものである。これに基づき、我々は2012年度に採択された科研費の援助(若手研究(B)24760600)により、図4に示すよう

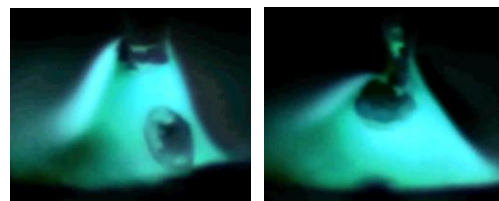


図2 MIG溶接中の溶接アークの時間変化

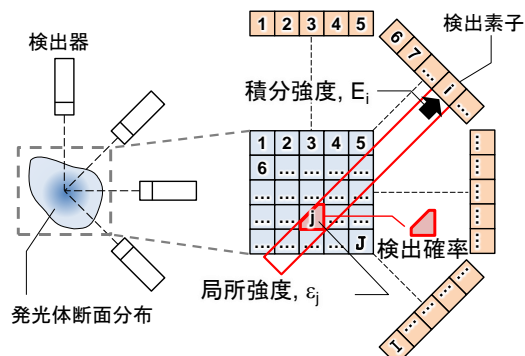


図3 3次元計測のためのトモグラフィ

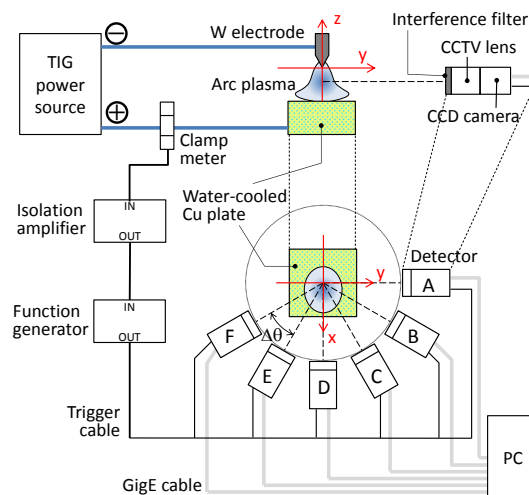


図4 TIGアークと多点同時計測装置

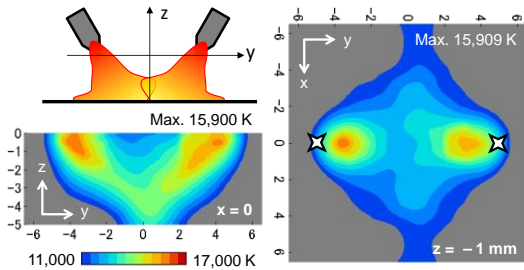


図5 2電極TIGアークの温度分布

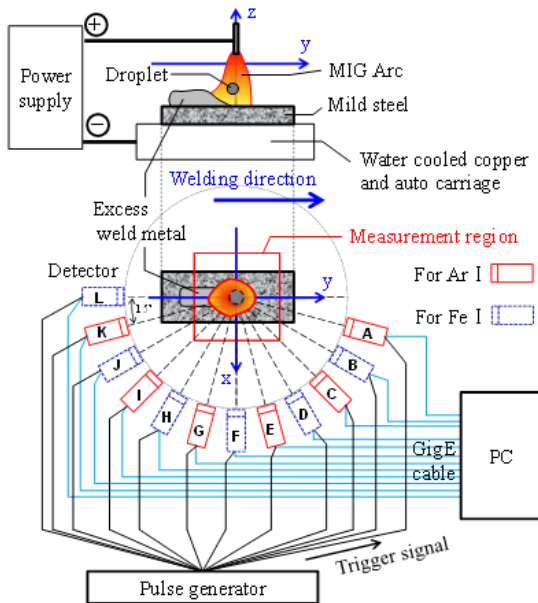


図6 MIGアークと多点二色同時計測装置

に複数の CCD カメラと干渉フィルタを用いた多点同時計測システムを構築した。こうした装置によって、図5の2電極TIGアーク(非軸対称)や傾斜パルスTIGアーク(非軸対称かつ非定常)の温度分布を明らかにしている⁵⁾。しかし本装置では、最初に述べたような金属蒸気を含む溶接アーク現象は計測対象外であり、溶滴移行を含むMIG/MAGアークへの展開は不可能であった。

2. 研究の目的

本研究では、計測対象を金属蒸気挙動をも含む系へと発展させ、これまで議論できなかった溶滴移行を含む溶接アークの非軸対称かつ時間変化のある3次元的なプラズマ・金属蒸気挙動を実験的に明らかにすることを目的とした。まず干渉フィルタの選定や適切な光学系の構築など、本三次元計測手法による金属蒸気の計測を可能にし、その上でMIGアーク現象を対象に、特に溶滴移行形態の違いに着目して本手法を適用した。

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は温度や粒子数密度の関数で表される⁶⁾。よってプラズマの温度、組成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、図3に示したようにこのスペクトル強度はプラズマ内の局所的な放射強度 ϵ である。しかしプラズマの計測は、その放射強度が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。三次元的な空間分解を行うためには多方向からアークプラズマの積分強度を計測する。多方向からアークプラズマの計測を行う手法は検出器を計測対象のまわりで回転させる手法や、計測対象そのものを回転させる方法、検出器の数自体を増やす方法などいくつか考えられるが^{7,8)}、MIGアークプラズマは時間的にかなり短い周期で溶滴移行を繰り返すアークプラズマの状態も不安定である。そのため、本研究では多方向かつ同時に計測を行える複数台の計測器を同時に用いる計測装置を構築した。装置の構成を図6に示す。検出器としてCCDカメラ(12 bit, 120万画素 GigE カメラ)を用いるところは図4と等しいが、2種類の波長を同時計測できるように改良を加えている。それぞれ所望の線スペクトル強度を捉えるため、狭帯域の干渉フィルタをカメラに取り付けた。各フィルタは、MIGアークプラズマを構成する、アルゴン計測用としてアルゴン原子の線スペクトル Ar I: 696.5 nm を、金属蒸気計測用として鉄原子の線スペクトル Fe I: 537.1 nm を捉えるものを採用した。同図に配置を示すように Ar I 用、Fe I 用の検出器をそれぞれ6台ずつ交互に計12台(A~L)を15°ごとに設置した。各検出器は干渉フィルタの透過中心波長較正のため傾斜治具を付けている⁹⁾。一般的に複数の狭帯域干渉フィルタの中心波長を厳密に一致させることは難しく、その中心波長はフィルタが傾斜すると短波長側にシフトしてしまう。この特性を利用して、各干渉フィルタに所定の傾斜を与え、その透過中心波長を較正した。干渉フィルタの半値幅は傾斜後でもおよそ1.5 nmであった。そのほかの構成としては、CCTV レンズ、中間リング、ND フィルタ等である。レンズは焦点距離50 mm、開口径12.5 mmであり、レンズ表面から計測領域中心までの距離は375 mmである。計測時のCCDカメラの露光時間は40 μ sとした。計測画像はノイズ処理や平均化処理を行った。こうして得られたアルゴンと鉄蒸気、6方向ずつの強度分布を用いて、各高さにおいてそれぞれ画像再構成を行う。本研究では画像再構成法として著者らの前報と同じくML-EM(最尤推定-期待値最大化)法を用いた¹⁰⁾。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が、この手法では溶滴やスパッタなどの遮蔽物が存在する断面ではプラズマの積分強度を計測できず空間分解を行うことができないため、本研究で分光計測を行うのは溶滴や余盛の存在しない斜線部となる。

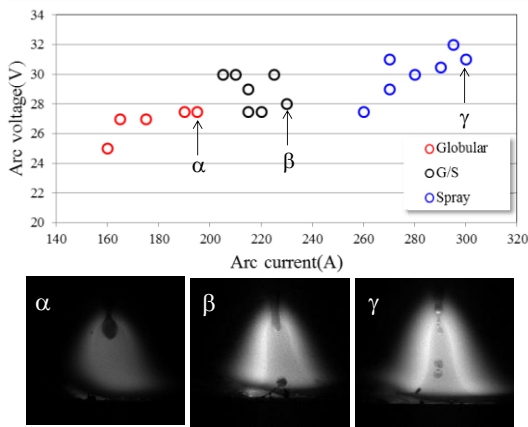


図7 溶接条件

次に溶接条件について記す。MIG アークプラズマは電流値、電圧値によって溶滴の移行形態が変化する。本研究では各移行形態における MIG アークプラズマの計測を行うため、まず標準実験条件の探索を行った。ワイヤにはソリッドワイヤ YGW-12 の $\phi 1.2 \text{ mm}$ を用い、母材は軟鋼、シールドガス流量は 25 l/min とした。溶接速度は 80 cm/min 、母材チップ間距離は 25 mm とした。本実験で行った平均電流電圧条件およびその各移行形態を分類したものを図7に示す。また、各移行形態を代表した3つの操作点での Ar I 撮影画像も同図に示す。電流値の上昇とともにワイヤ先端に懸垂する溶滴のサイズがワイヤ径より大から小と変化しており、それぞれグロービュール移行、スプレー移行という移行形態となっている。本実験では、グロービュール移行形態として $190 \text{ A} - 27 \text{ V}$ 、スプレー移行形態として $300 \text{ A} - 31 \text{ V}$ を、各移行形態を代表する溶接条件として定め、以下の分光計測を行った。

4. 研究成果

まず、スプレー移行の場合の実験結果を示す。ある瞬間に各カメラで計測された Ar I, Fe I の各6枚の撮影画像を用いて強度分布を再構成したものが図8であり、上から

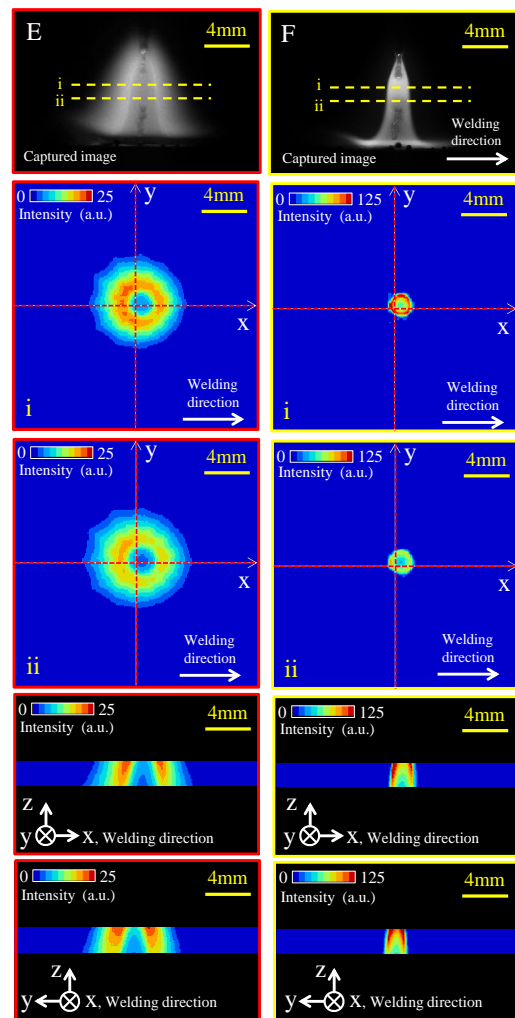
- ・ カメラ E, F での撮影画像。
- ・ 上記の画像中に示す i, ii の高さにおける xy 断面の再構成強度分布。
- ・ xy 断面中、赤色点線で示す軸上の縦断面である xz 断面、yz 断面での強度分布。溶滴や余盛のある部分は除外。

である。この結果からスプレー移行の場合、中心の鉄蒸気存在領域と、その周りに鉄蒸気を囲むようにアルゴンが分布する二重構造となっており、更に、それぞれがリング形状を示していることがわかる。このことは従来知見のとおりであるが、アルゴン、鉄ともに溶接線後方-x 方向および-y 方向にわずかながら傾斜している様子がわかる。

次にグロービュール移行での結果を示す。スプレー移行の場合と同様に、図9にその再構成強度分布を示す。追加で溶滴の 1 mm 下、

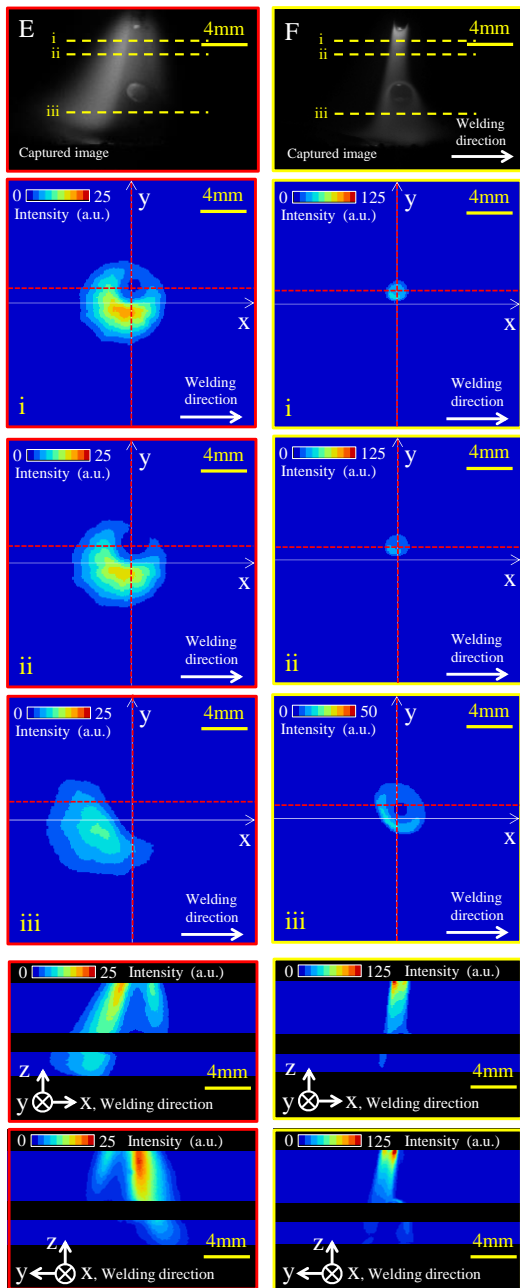
高さ iii での xy 断面強度分布を追記している。ただし iii の Fe I 分布のみ視認性の問題で強度スケールを変更しているので留意されたい。これらの結果をみると、スプレー移行の場合とアルゴン、鉄蒸気の分布が大きく異なる。アルゴンは溶接方向に対し右後方に振れ、その振れは母材側ほど大きくなっている。鉄蒸気は高さ i, ii において一見円状に見えるが、その強度分布は溶接方向に対し右後方、アルゴン強度が高くなる方向で鉄蒸気強度も高くなっている。鉄蒸気の撮影画像を見ると溶滴の上下で広がり方が異なっているが、この傾向は iii に示すように断層強度分布にも表れている。しかし、アルゴンが高強度となる側で鉄蒸気強度も高くなるといった傾向は溶滴下部においても同様に見られている。

MIG アーク現象は非正常現象であるため、溶滴移行も含め外観は常に変化する。先に示した結果はある瞬間を捉えたものであるため、同条件であっても捉えたタイミングによってはアークの状態が大きく異なる。しかし結果的にはスプレー移行では、別タイミングでもアルゴン、鉄蒸気がほぼ同軸上に分布する二重リング構造を示した。電流値の下がったグロービュール移行では、様々な方向に

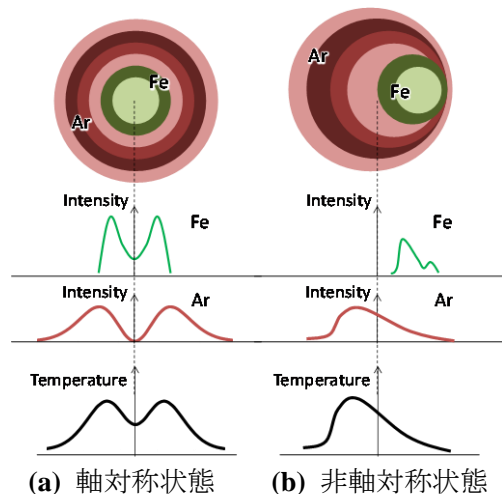


(a) Ar I (696.5 nm) (b) Fe I (538.1 nm)

図8 スプレー移行の再構成結果



(a) Ar I (696.5 nm) (b) Fe I (538.1 nm)
 図9 グロビュール移行の再構成結果



(a) 軸対称状態 (b) 非軸対称状態
 図10 MIG アーク温度分布の推定

振れ、アルゴン、金属蒸気の分布領域が明確に分離するような結果も見られたが、アルゴンは溶接方向に対し後方側に偏りを持ち、鉄蒸気の強度も後方の方がやや高くなるという傾向は等しかった。

従って、MIG アークにおける非軸対称な鉄蒸気、アルゴンの分布は図 10 のような考え方で整理できると考えられる。すなわち、スプレー移行のようなほぼ軸対称状態、同図(a)では、鉄蒸気のリングを囲うようにアルゴンのリングがある。非軸対称性が生じると同図(b)のようにアルゴンの方が大きくずれる。更にずれが大きくなることでリング形状と軸対称性が完全に崩れた状態になるが、アルゴン強度が高い部分で鉄蒸気強度も高くなる。

軸対称状態の MIG アークの温度分布は既に報告にあるとおり、図 12(a)に示すように鉄蒸気が多く見られる中心部で低温、その外周が高温部となっている。一般に発光強度はその温度が高い、もしくは数密度が高いときに高輝度となるため、アルゴン強度が高い部分は外周の高温部に該当していると考えられる。鉄蒸気分布内でも温度勾配があり外周部へ行くほど高温となるため外周部近くの方が鉄の発光は強くなるが、さらに外側では鉄蒸気濃度が小さくなるためその発光がほぼなくなる。非軸対称状態においても、アルゴン強度が高い部分が高温で、鉄蒸気も高温側で強く発光することを考えると同図(b)に示すような温度分布になっていると推測される。以上より、一見規則性がないように見えるグロービュール移行での非軸対称な MIG アークは、軸対称の二重リング状態を基準として鉄蒸気よりもアルゴンが大きくずれ同軸上に分布しなくなった状態であるといえることができる。

このような非軸対称現象は従来の軸対称を仮定する手法では計測できないものであるが、本計測によって、電流値の減少、グロービュール移行への遷移とともにアルゴン、鉄蒸気の分布に偏りが生じることを明らかにすることができた。特にグロービュール移行では従来の MIG アークプラズマに関する報告のようにアルゴン部分の中心に鉄蒸気領域があるわけではないことがわかった。なお、本研究の今後の課題として定量化の問題がある。今回得られた放射強度はカメラの感度や干渉フィルタの透過率に影響をうける相対的な値でしかなく、温度等の物理量としての結果を示せてはいない。そのため、これらを定量的に扱い、更に議論の幅を広げることが必要であると考えられる。

<引用文献>

- 1) M. E. Rouffet, et al.: J. Phys. D: Appl. Phys., 43 (2010) 434003 (9pp)
- 2) S. Zielinska, et al.: Plasma Sources Sci. Technol., 16 (2007) pp. 832-838
- 3) 辻村吉寛, 田中学: 溶接学会論文集, 30, 4 (2012) pp. 288-297.

- 4) 辻村吉寛, 田中学: 溶接学会論文集, 30, 1 (2012) pp. 68-76.
- 5) K. Nomura et al.: IIW Doc.212-135-13 (2013)
- 6) 山本ら: プラズマの分光計測, 日本分光学会 (1995)
- 7) S. Sakiyama ら: Jpn. J. Appl. Phys., 38 (1999) pp. 4567-4570
- 8) X. Wan ら: J. Opt. Soc. Am. A, 21, 7 (2004) 1161-1171
- 9) K. Nomura, et al: Welding in the World, 59, 2 (2015) 283-293
- 10) L. A. Sheep ら: IEEE Trans. Med. Imaging, MI-1, 2 (1982)

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 K. Nomura, K. Kataoka, K. Mimura, Y. Hirata and T. Kishi: Tomographic spectroscopic observation of argon and metal vapor behavior in MIG arc welding, *Welding in the World*, Vol. 60, No. 1 (2015) pp. 117-125. [査読有]
DOI: 10.1007/s40194-015-0267-7
- ② 片岡耕太郎, 野村和史, 三村晃平, 平田好則: 三次元発光分光法を用いたミグ溶接におけるアルゴン・金属蒸気の挙動計測, *溶接学会論文集*, Vol. 33, No. 3 (2015) pp. 233-241. [査読有]
- ③ 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*, Vol. 59, No. 2 (2015) pp. 283-293. [査読有]
DOI: 10.1007/s40194-014-0211-2

[学会発表] (計 12 件)

- ① 野村和史, 吉井嘉一郎, 三村晃平, 戸田要, 片岡耕太郎, 平田好則, 浅井知: 非軸対称溶接アークの三次元分光計測, 溶接学会東海支部・日本溶射学会中部支部共催 第 84 回溶接研究会/第 13 期第 1 回溶射技術研究会「溶接・溶射における可視化技術」, 2015 年 10 月 29 日, 愛知県産業労働センターウィングあいち (愛知) 【招待講演】
- ② 野村和史, 平田好則: 非軸対称溶接アークの三次元分光計測, 第 21 回 応用物理学学会 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, 2015 年 10 月 3 日, 大阪大学岡田メモリアルホール (大阪) 【招待講演】
- ③ 吉井嘉一郎, 野村和史, 三村晃平, 平田好則: 三次元発光分光法を用いたミグ溶接におけるアルゴン・金属蒸気の挙動計測 (第 2 報), 溶接学会 H27 年度秋季全

国大会, 2015 年 9 月 2 日, 北海道科学大学 (北海道)

- ④ 野村和史, 永田純也, 平田好則, 浅井知: 発光分光法による溶接アークの温度計測における干渉フィルタ特性の影響, H27 年度秋季全国大会, 2015 年 9 月 2 日, 北海道科学大学 (北海道)
- ⑤ 三村晃平, 片岡耕太郎, 野村和史, 平田好則, 溶接アークの多方向同時三次元分光計測 (第 2 報), H27 年度春季溶接学会, 2015 年 4 月 24 日, 学術総合センター (東京)
- ⑥ 野村和史, 平田好則: アーク溶接プロセス—発光分光法による熱源特性の可視化—, H26 年度春季全国大会フォーラム「溶接・接合プロセスの先進可視化・シミュレーション技術—次代を拓くデジタル技術の最前線—」, 2015 年 4 月 23 日, 学術総合センター (東京) 【招待講演】
- ⑦ 野村和史, 片岡耕太郎, 三村晃平, 平田好則, 貴志崇, 非軸対称溶接アークの三次元分光計測, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部第 18 回支部大会, 2014 年 12 月 20 日, 九州大学筑紫キャンパス (福岡)
- ⑧ K. Kataoka, K. Mimura, K. Nomura, and Y. Hirata: 3D spectroscopic observation of argon and metal vapor in MIG welding, *Visual-JW2014*, 2014/11/27, Hotel Hankyu Expo Park (Osaka)
- ⑨ K. Yoshii, K. Nomura, and Y. Hirata: Estimation of the current density distribution of TIG arc plasma by spectroscopic method, *Visual-JW2014*, 2014/11/27, Hotel Hankyu Expo Park (Osaka)
- ⑩ 片岡耕太郎, 野村和史, 平田好則, 貴志崇, 三次元発光分光法を用いたミグ溶接におけるアルゴン・金属蒸気の挙動観察, H26 年度秋季溶接学会, 2014 年 9 月 10 日, 学術総合センター (東京)
- ⑪ K. Nomura, K. Kataoka, T. Kishi, K. Yoshii and Y. Hirata: Three dimensional spectroscopic measurement of argon and metal vapor behavior in MIG arc welding, 67th IIW Annual Assembly & International Conference (IIW2014), 2014/7/14, Sheraton Grande Walkerhill & W Seoul Walker hill (Seoul, Korea)
- ⑫ 野村和史, 貴志崇, 平田好則, 吉井嘉一郎: 溶接アークの多方向同時三次元分光計測, H26 年度春季溶接学会, 2014 年 4 月 22 日, 東京ビッグサイト (東京)

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