

えっ、アークも CT スキャンで健康診断!? 進化する可視化技術

大阪大学 大学院 工学研究科
野村 和史

1. はじめに

アーク溶接現象の可視化は、近年のカメラの高性能化や小型化が牽引するところもあり盛んに行われるようになってきた。中でも溶融池現象に着目して溶融部の動きを観察するために、強い光を放つアークの影響を何とかして低減しようとするものが多く見られる^{1,2)}。しかし本稿は、アークの輝きそのものに着目して、溶接現象の入力熱源であるアークプラズマの特性を詳らかにするのが目的である。一般的にはプラズマ診断なる分野であり、特に軸対称とは見做せない、左右に振れているようなアークにも適用可能な三次元発光分光法の開発を進めている。

最初に本研究で用いる実験装置の概略を図 1 に示す。これは、溶接アーク (図ではミグアーク) の周囲に配置した 12 個の検出器 (A~L) を用いてアークを多方向から同時に計測するもので、本稿のタイトルに含まれる「CT」、すなわち断層撮影を行うためのセッティングである。これによりプラズマ内部の発光分布を明らかにすることができる。健康診断よろしく計測対象が人体である場合は、検出器を回転させて色々な方向から得た通過 X 線量を用いて内部の情報を再構成するが、計測対象が溶接アークの場合、人体と異なり自ら光を発していることと、現象が激しく動く非定常状態であるため検出器が回っている暇がないといった違いがある。そのため、図のような複数のカメラを用いた多方向からの同時計測装置となっている。

本稿では、このような装置を用いて果たしてどのような「健康診断」がアークに対して行えるのかを述べる。

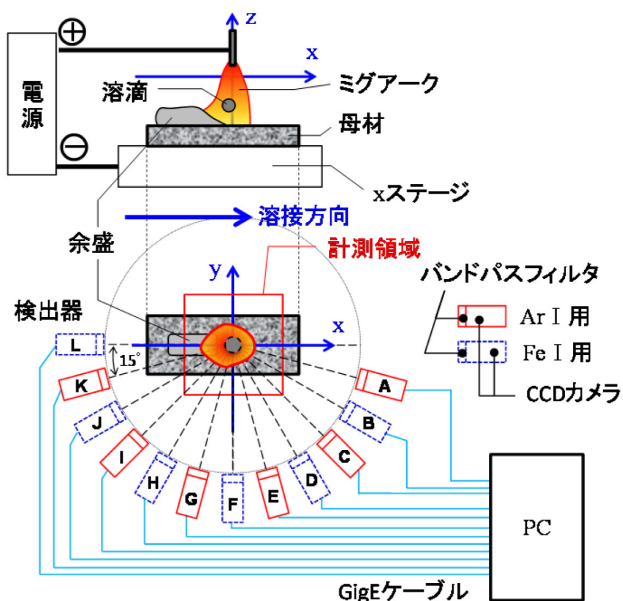


図 1 三次元発光分光法の装置の概略図

2. アークの輝きを持つ情報

アークの実態はプラズマであり、プラズマからは光エネルギーが放射され、これがアークの輝きとなる。この光エネルギーは分光すると特定の線スペクトルや連続スペクトルといった様々な情報を持っている。図2は一般的なArをシールドガスに用いたティグアーク（以降、Ar-TIGアーク）プラズマを分光器で計測した際に見られる発光スペクトルである。様々な発光強度を持った線スペクトル群が見られるが、これはどんな溶接条件か、また同じ溶接条件でもアーク中のどこを見たものなのか、等で結果が異なる。さらに、Ar-TIGアークとHe-TIGアークでは見た目の色が異なるが、これは違うスペクトル分布となることを示している。このように、アークのスペクトル情報はプラズマの種類や温度状態などに依存する。溶接アークに対する「発光分光法」では、プラズマに対してある特定の線スペクトルを選定しその線スペクトルの強度や分布からアークプラズマの温度などを評価することが基本となる。

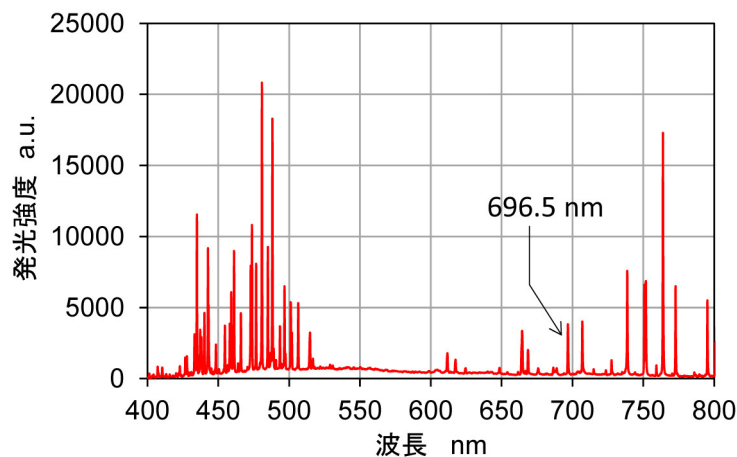


図2 Ar-TIGアークの分光計測例
(Ocean optics 社製 HR4000 にて計測)

ある波長 λ_{nm} の線スペクトル強度 ε_{nm} は、上準位 n 、下準位 m 間のエネルギー遷移により放出されるエネルギーとして一般に次の式で表される³⁾。

$$\varepsilon_{nm} = N_n h \frac{c}{\lambda_{nm}} A_{nm} \quad \text{ただし} \quad N_n = N_0 \frac{g_n}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_n}{k_B T}\right) \quad (1)$$

ここで A_{nm} ：遷移確率、 h ：プランク定数、 c ：光速、 N_n ： n 準位にある粒子の密度、 N_0 ：粒子の全密度、 g_n ：統計的重価、 $Z(T)$ ：分配関数、 E_n ： n 準位のエネルギー、 k_B ：ボルツマン定数、 T ：温度である。各種値は定数であったり、データベースから参照あるいは計算が可能であったりするため、温度と粒子の密度がわかれば線スペクトル強度も一意的に求められる。よって、線スペクトル強度を計測して何かしらの変換作業を施すことでプラズマの温度などが算出されうる。これが溶接アークの重要な熱源情報の一つであり、近年ではミグ（以降、MIG）アークの中心部は実は温度が低いことなどが発光分光法により明らかにされている⁴⁾。

ただし、実際に計測される強度は一般的に計測系に依存する相対強度であるため、そのままでは温度を求めることができない。そこで計測強度間の相対強度比から温度を算出する手法がよく用いられている。代表的な手法として、1原子に着目し最大強度との相対強度から温度を算出するファウラー・ミルン（Fowler-Milne）法、イオンと原子など異なる状態の粒子に着目しその強度比から温度を

算出する二線強度比法、ある原子の様々な線スペクトルから温度を算出するボルツマン・プロット (Boltzmann plot) 法が挙げられる⁵⁾。各手法に物理的な仮定や一長一短の特徴はあるが、その詳細についてはここでは割愛させていただく。

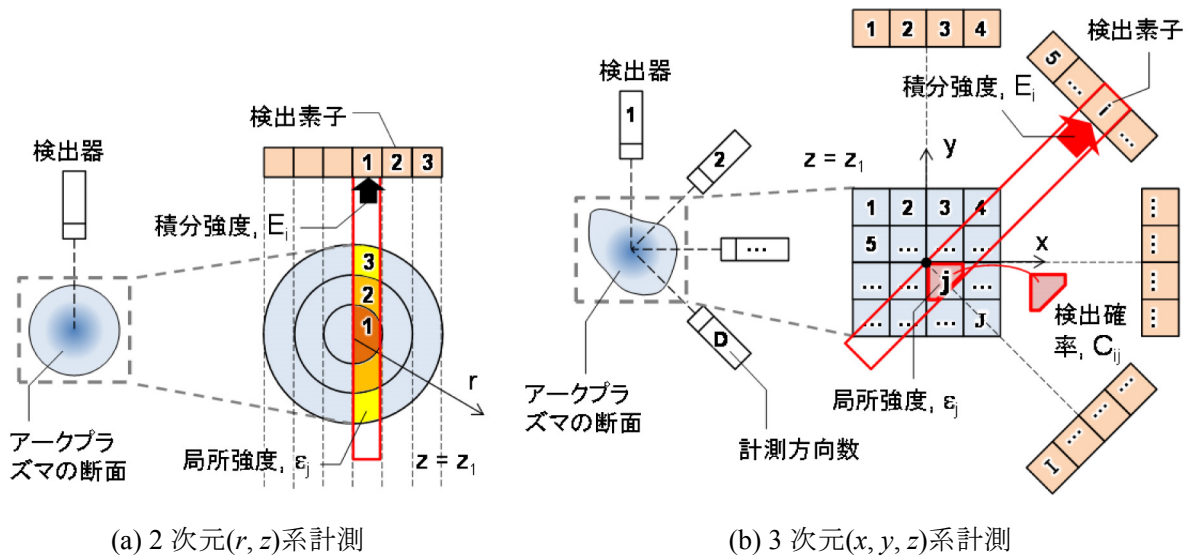


図3 軸対称系と非軸対称系に対する空間分解法

3. 多方向計測による3次元計測手法

発光分光法によってプラズマの温度を知るには、線スペクトル強度分布が必要であるが、これはプラズマ内部の局所的な放射強度分布である。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、空間分解法として2次元(r, z)系の計測手法が適用できる。図3(a)は2次元計測の概略図である。ある高さ z_1 におけるアークプラズマ断面の局所強度を離散化した ϵ_j を求めることが目的である。まず、一側面からのプラズマ計測により、検出器の各素子 i における積分強度 E_i を得る。空間分解法として対象の軸対称性を利用したアーベル逆変換を用い、 r 方向の強度分布 $\epsilon_j(r)$ を求める。アーベル逆変換は、観測領域を区分けし(図3(a)では3つ)、プラズマの外側境界から中心に向かって順に、積分強度 E_i からそれより外側の局所値 $\epsilon_j(j > i)$ を各々の光路に応じて減らすことで局所強度 $\epsilon_j(j = i)$ を得る手法である(このほか関数近似を用いる計算法もある)。そのためこの手法は軸対称なプラズマを対象に限られる。しかしながら、実際に工業的に広く使用されるアーク溶接の挙動は、少なくとも溶接線方向に移動しており、一般的に非軸対称かつ非定常な現象である。また、電極を傾斜させたり複数の電極を用いたり積極的に非軸対称現象となる溶接法を用いることも少なくない。このような非軸対称な三次元アークプラズマ現象を対象とする場合は3次元(x, y, z)系の計測が必要となる。図3(b)に示すように3次元計測法では多方向から積分強度 E_i を求め、それら全てのデータを用いて画像再構成法によって強度の空間分解を行い、 xy 断面の局所強度 $\epsilon_j(x, y)$ を求める。いわゆるCT (Computed Tomography) 計測であり、これを全ての高さに適用することで三次元の局所強度分布 $\epsilon_j(x, y, z)$ が得られる。本稿では最尤推定-期待値最大化法(以下、ML-EM法)という空間分解法を用いた^{6,7)}。これは逐次近似解法の一つで、予め断面の強度分布を仮定し、その断面の強度を線積分して投影データを得て、実際の投影と比

較して断面の強度分布を修正する。この修正を繰り返して真の強度分布に近づけていく方法である。具体的には、**図 3 (b)**の表記に従い、次の計算式で表される。

$$\varepsilon_j^{k+1} = \varepsilon_j^k \frac{\sum_{i=1}^I \frac{C_{ij} E_i}{FP_i^k}}{\sum_{i=1}^I C_{ij}} \quad \text{ただし} \quad FP_i^k = \sum_{j=1}^J C_{ij} \varepsilon_j^k \quad (2)$$

ここで C_{ij} は検出確率で、セル j から素子 i の方向に放出された光のうち素子 i が検出する分を表しており、 $0 \sim 1$ の値をとる。 k は繰り返し数である。

4. 実験装置

以上の計測を実現するために構築したシステムが最初に示した**図 1**の多方向同時計測システムである。本装置では、非軸対称となるアーク現象を捉えるために 12 個の CCD カメラを配置した。計測対象はティグ（以降、TIG）アークや MIG アークとし、主成分である Ar の挙動を捉えるために Ar 原子由来の線スペクトル、696.5 nm の光のみを取り出すことが出来る狭帯域のバンドパスフィルタを用いた。また、MIG アークにおいては溶融ワイヤ等から発生する金属蒸気が熱源形態に大きく影響する。そのため、金属蒸気の主成分と考えられる Fe の挙動を線スペクトル 537.1 nm で代表させ、これを中心波長とするバンドパスフィルタを用いた。実験装置は、これら対応する 2 種類のバンドパスフィルタを取り付けた Ar 用、Fe 用の検出器がそれぞれ 6 台ずつ交互に 15° ごとに設置されたものとなっている。

各検出器はバンドパスフィルタのほか、これを保持する傾斜ジグ、12 bit の 120 万画素 GigE (Gigabit Ethernet) CCD カメラ、レンズ、ND フィルタ等で構成される。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。このうち傾斜ジグはバンドパスフィルタの透過中心波長較正のためである⁸⁾。一般的に複数の狭帯域バンドパスフィルタの中心波長を厳密に一致させることは難しい。しかしその中心波長はフィルタを傾斜させることで短波長側にシフトする。この特性を利用して、各フィルタに傾斜を与え、その透過中心波長を較正した。

このバンドパスフィルタの中心波長較正のほか、実際には検出器間の感度較正、画像処理等、各種の後処理が必要であるが、その詳細は著者らの文献を参照されたい^{7,8)}。

5. TIG アークの計測

まず、Ar 用の検出器 6 台を用いて 2 電極 TIG アークを計測対象としたときの結果を示す⁷⁾。2 電極 TIG 溶接法は、2 本の電極からアークを発生させることでアーク圧力を抑えながら大電流溶接が可能な高能率なプロセスであり⁹⁾、基本的なアーク現象としては各電極から生じたアークプラズマが電磁力によってお互いを引き寄せ合い、連結したプラズマとなるといったものである。

実験条件として、電極径 3.2 mm、先端角度 60 deg の電極 2 本を、電極間距離 10 mm、アーク長 5 mm、各傾斜角 30 deg で向かい合うように配置し、それぞれに電流 150 A を流した。**図 4** は各方向から得られる撮影像である。90 deg 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して、局所的な放射強度分布を得た後、ファウラー・ミルン法によって温度分布に変換すると**図 5**に示す 2 電極 TIG アークの温度分布が求められる。**図 4**に示した 90 deg における撮影像と**図 5**によって明らか

になった xz 面の温度分布を比べると、光学イメージ上の明るい所（2つのアークがぶつかる所）で温度が高いわけではないことがわかる。撮影像は y 方向の積分によって得られたものだからである。また、温度分布の xy 断面図（図5の中図、右図）を見ると、電極配置方向（ x 軸方向）とは逆方向（ y 軸方向）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。

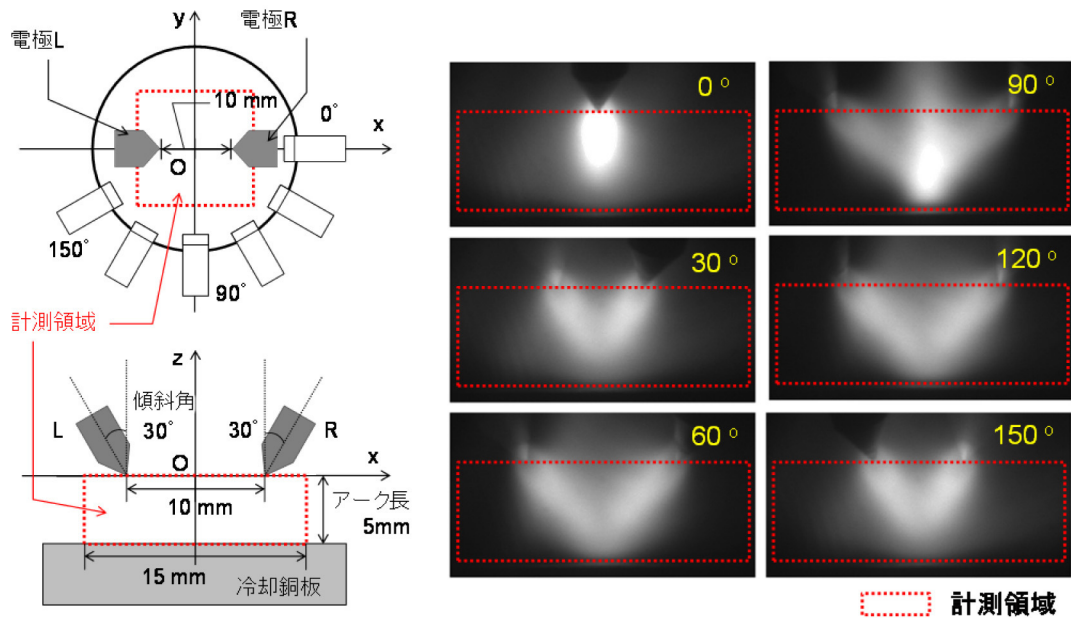


図4 2電極 TIG アーク (150 A+150 A) の光学イメージ

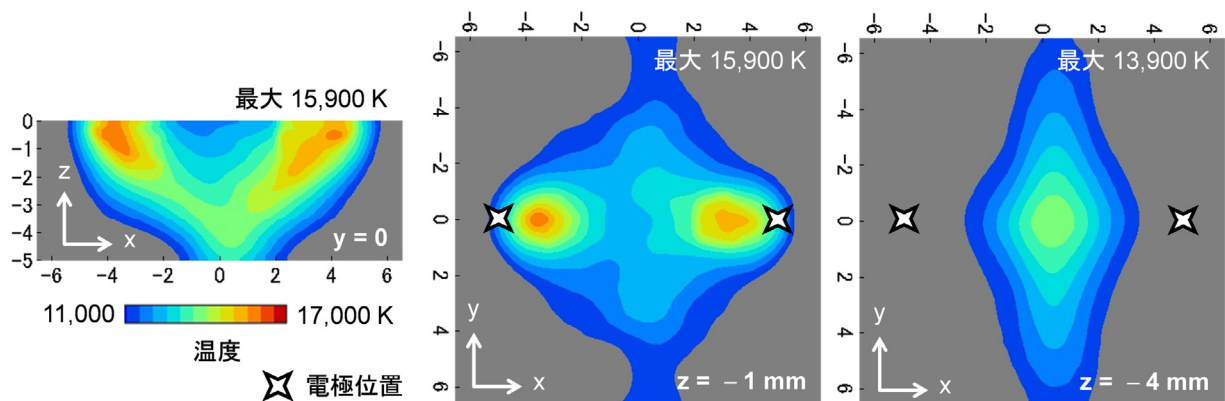


図5 2電極 TIG アーク (150 A+150 A) の温度分布

また、図6は傾斜単電極 150 A 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。また単電極 TIG は総電流量としては2電極の半分であるが最高温度は高くなっている。このことは、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するというを示している。

以上の結果はおおよそ定常と見られた2電極 TIG アークに対し、実際には一つのカメラによる回転光学系により得られたものであるが、採用した方向数は 30 deg ごとの6方向であり、多方向同時計測系でもほぼ同様の結果が得られると考えられる。

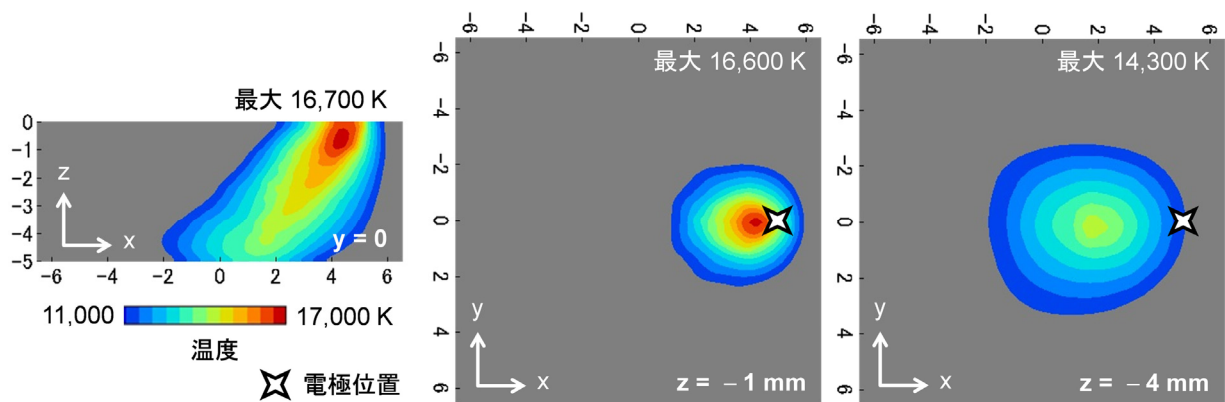


図 6 傾斜 TIG アーク (150 A) の温度分布

6. MIG アークの計測

次に MIG アークを計測対象としたときの結果を示す¹⁰⁾。MIG アーク溶接では周知のとおり電流値、電圧値によって溶滴の移行形態が変化する。一般的には小電流域でグロービュール移行、遷移領域を経て、大電流域でスプレー移行となる。特に溶滴サイズがワイヤ径より大きくなるグロービュール移行では、アークの軸対称性を保つのは難しく、プラズマはあちらこちらに振れてしまう。そうしたアークに対しては、三次元計測による診断が有効である。

ここでは、ワイヤはソリッドワイヤ (YGW-12、 $\phi 1.2$ mm)、母材は軟鋼、Ar シールドガス流量は 25 l/min、溶接速度は 80 cm/min、母材チップ間距離は 25 mm を共通の実験条件とし、溶滴移行形態の違いがプラズマの状態に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とした。

検出器は図 7 のようにアークを囲むように Ar I 用と Fe I 用が交互に並んでいる。このうち、Ar I 用の検出器 E、Fe I 用の検出器 F は溶接方向に対しほぼ真横もしくは真横に位置する。以降で示す結果には、これら E、F で同時に得られた撮影画像も添える。まず、スプレー移行の場合の実験結果を示す (平均電流 300 A、平均電圧 31 V)。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、上から順番に次の結果を示している。

- ・ 検出器 E、F での撮影画像。
- ・ 撮影画像中に示す i (ワイヤ先端 1mm 下) 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 iii、yz 断面 iv での強度分布。溶滴や余盛のある部分は除外。

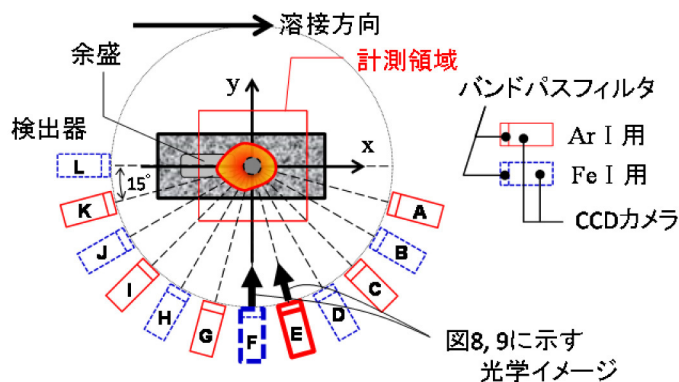
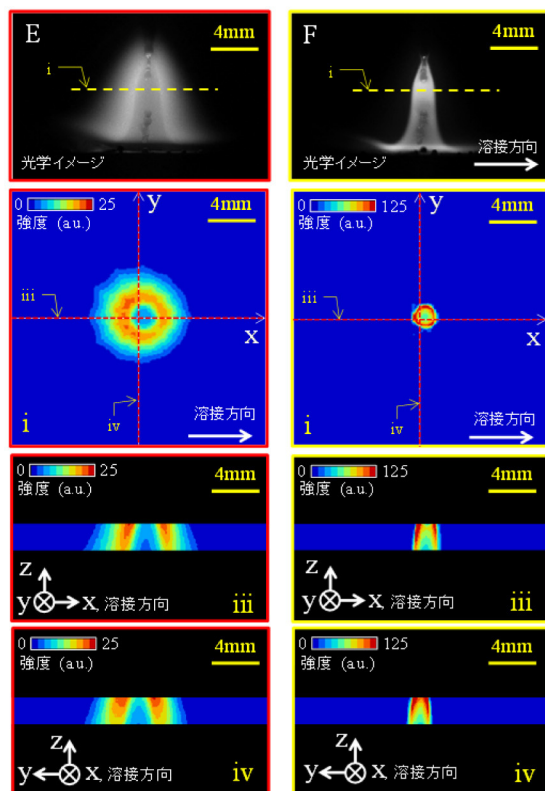
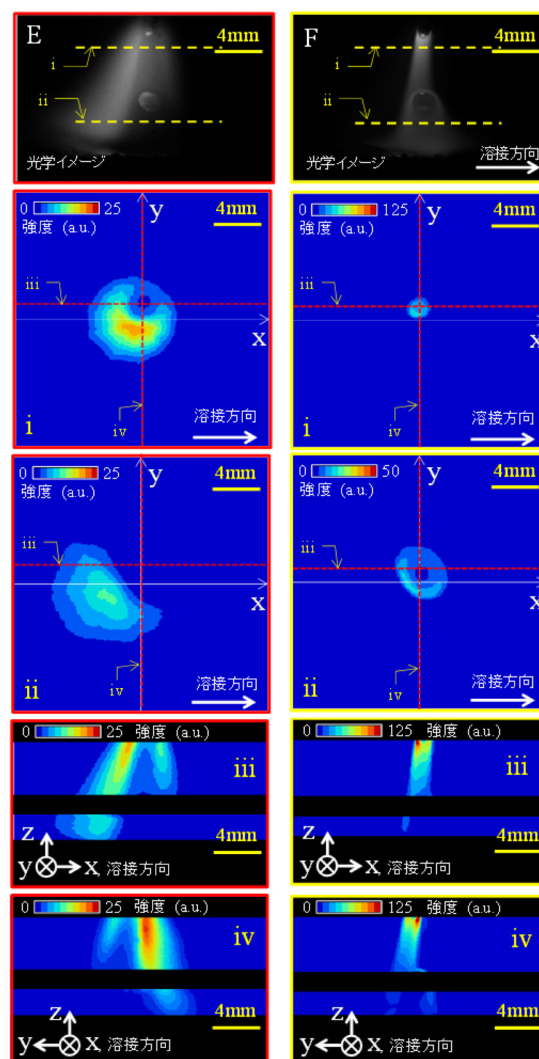


図 7 MIG アーク計測装置の概略図



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

図 8 スプレー移行の発光強度分布



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

図 9 グロビュール移行の発光強度分布

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、それぞれがリング形状を示している。既報にあるとおり⁴⁾、この場合は MIG アークの中心が鉄蒸気由来で温度が低くなり、ドーナツ状の温度分布になっていると予測される。本溶接条件でのスプレー移行では非軸対称性はそれほど見られないが、特にアルゴンでは溶接線後方側 (-x 方向) がわずかながら高強度となっている様もわかる。

次にグロービュール移行での結果を図 9 に示す (平均電流 190 A、平均電圧 27 V)。図 8 と同様の断面に、溶滴下部 ii の高さにおける xy 断面も追加した。スプレー移行時に見られた結果と大きく異なっていることがわかる。図 9 (a) の i や ii によると、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 ii ほど大きい。鉄蒸気の強度分布 (同図 (b)) も溶接方向に対し右後方、すなわち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。この傾向は溶滴上部下部 (同図 i, ii) 問わず同様に見られている。

MIG アーク現象は非定常現象であるため、溶滴移行も含め常に変化する。特にグロービュール移行形態ではその変化が激しい。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。図 10 は、各移行形態においてあるタイミングで得られる再構成強度分布であり、遷移領域（平均電流 230 A、平均電圧 28 V）での結果を含めまとめたものである。グロービュール移行では計測するタイミングによってアークが様々な方向に偏ったため、図 9 と異なる結果のものを複数示した。これによると、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 11 のような考え方で整理できると考えられる。スプレー移行のようなほぼ軸対称状態では、鉄蒸気のリングを囲うようにアルゴンのリングがある。グロービュール移行において非軸対称性が生じると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（例えば図 10 右端）になるが、アルゴン強度が高い側で鉄蒸気強度が高くなるといった分布はどの状態でも共通である。

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うことがわかった。

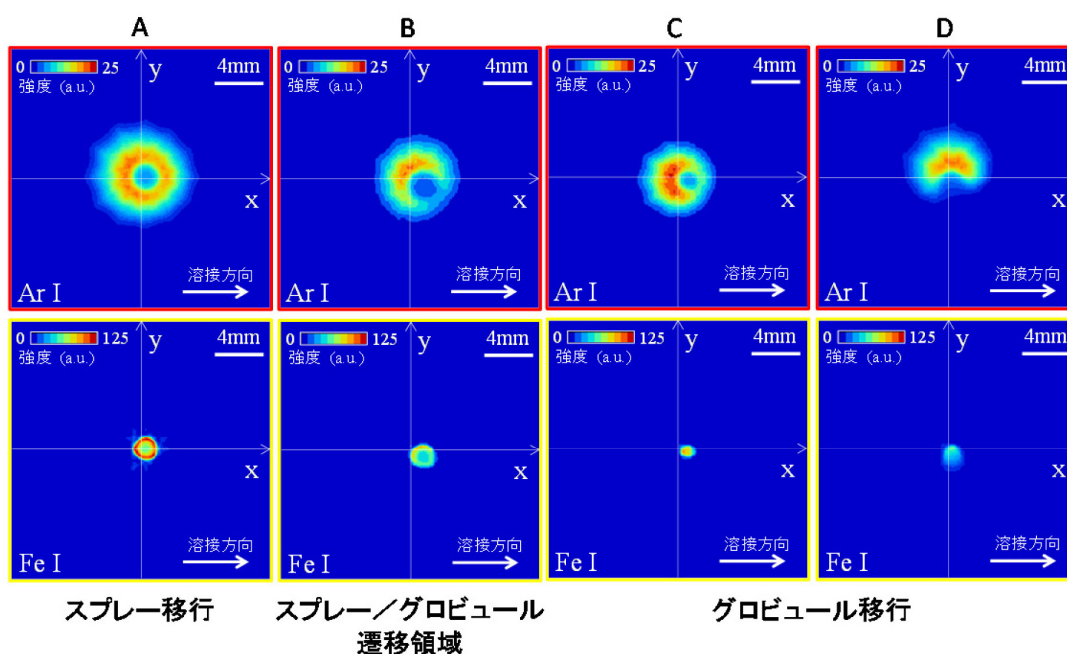


図 10 移行形態による発光強度断面分布の違い

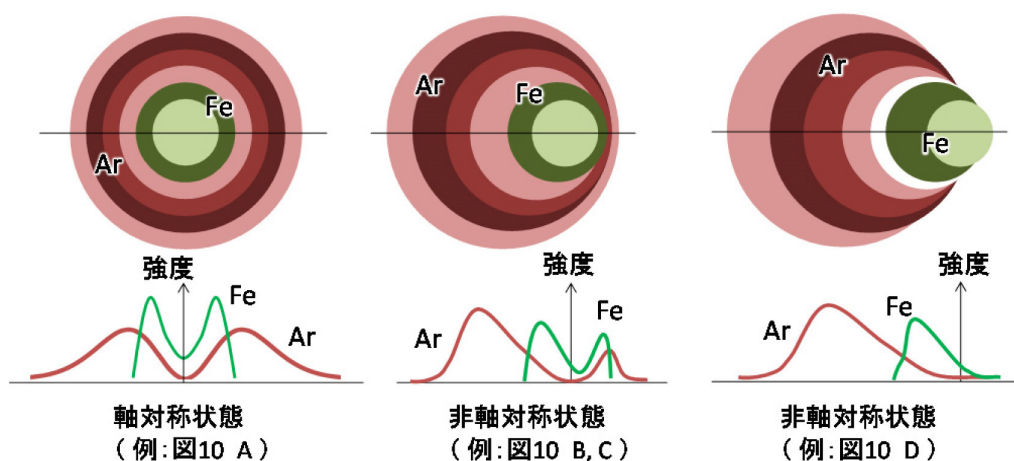


図 11 発光強度分布の模式図

7. おわりに

本稿では、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輝度分布を三次元的に計測することに成功した。

ただし、MIG アークの計測結果については、本稿では単なる輝度分布、すなわち定性的な結果を示したに過ぎず、温度や金属蒸気の濃度分布といった物理量を示せていない。現在、著者らのグループでは定量的な計測を可能とするべくシステムを改良しているところである¹¹⁾。

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、タンデム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に対して新たな知見を与えることができる手法であり、今後の開発、発展に期待されたい。

参考文献

- 1) 水谷正海：アーク溶接のビデオカメラによる可視化の勘どころ－民生用ビデオカメラから高速度ビデオカメラまで－, WE-COM マガジン, 第 6 号 (2012)
- 2) 穂近明：可視化用レーザ照明を用いた溶接現象の可視化手法, WE-COM マガジン, 第 18 号 (2015)
- 3) 山本学, 村山精一：プラズマの分光計測, 日本分光学会 (1995)
- 4) 田中学：ミグ溶接のアークの中心温度は低い!?, WE-COM マガジン, 第 10 号 (2013)
- 5) 平岡和雄, 塩飽孝至, 黄地尚義：各種分光法によるアークプラズマの温度評価, 溶接学会論文集, 第 14 巻, 第 4 号 (1996) pp. 641-648
- 6) 篠原広行, 坂口和也, 橋本雄幸：Excel による画像再構成入門, 医療科学社 (2007)
- 7) 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
- 8) K. Nomura, T. Kishi, K. Shirai, Y. Hirata, K. Kataoka: Temperature measurement of asymmetrical pulsed TIG arc plasma by multidirectional monochromatic imaging method, Welding in the World, Vol. 52, Issue 2 (2015) pp. 283-203
- 9) 小林和行, 松岡孝昭, 牛尾誠夫, 田中学：2 電極 TIG アーク現象の解明, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 73 (2003) pp. 194-195
- 10) 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
- 11) 戸田要, 吉井嘉一郎, 野村和史, 三村晃平, 平田好則：三次元発光分光法によるミグ溶接の温度計測, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 98 (2016) pp. 188-189

<略歴>

野村 和史 (のむら かずふみ)

- 2002年 大阪大学 工学部 応用理工学科 卒業
- 2004年 大阪大学 大学院 工学研究科 生産科学専攻 博士前期課程修了
- 2007年 同 博士後期修了 博士(工学)取得
- 2007年 大阪大学 大学院 工学研究科 コマツ共同研究講座 特任助教
- 2009年 株式会社小松製作所 生産開発技術センタ 研究員,
大阪大学 大学院 工学研究科 コマツ共同研究講座 招へい教員
- 2010年 大阪大学 大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 助教