ミグ溶接の溶滴移行現象を伴うアークプラズマ状態の挙動解析*

－イメージ分光法による溶接アーク現象の可視化－

辻村 吉寛**, 田中 学***

Analysis of Behavior of Arc Plasma Conditions in MIG Welding with Metal Transfer*

- Visualization of Phenomena of Welding Arc by Imaging Spectroscopy -

by TSUJIMURA Yoshihiro** and TANAKA Manabu***

In present study, a method for measurement and visualization of temperature of plasma and concentration of metal vapor in arc welding with consumable electrode is conducted. Monochromatic images by three high-speed video cameras are utilized in order to clarify behavior of plasma states. The plasmas photographed by the high-speed video cameras during arc welding.

Consequently, visualizations of plasma temperature and iron vapor concentration succeed during welding. The dual structure consisting of a low temperature region by metal vapor plasma near the arc axis and a high temperature region by shielding gas plasma at surrounding of the arc exists because of metal vapor which is vaporized at the tip surface of a consumable electrode and is transported by the plasma jet from the consumable electrode to the weld pool.

Key Words: Arc, MIG welding, Metal vapor, Metal transfer, Spectroscopic analysis, Temperature measurement, Concentration measurement

1. 諸 言

アーク溶接を用いている作業現場では、溶接電流やアーク電圧等の溶接条件による溶接結果の変化については経験的に知られている。学術的にアークプラズマ状態を評価することで、熱・物質輸送等の情報を得ることができ、現場での溶接環境の改善、品質向上、技術革新につながる。アークプラズマ状態の評価方法には、主として、実験による計測があり、最近では、数値解析モデルを用いた予測も行われるようになった。アーク溶接の中でもティグ溶接は非消耗電極式でありシンプルな溶接法であるため、分光分析による温度測定¹⁻¹¹⁾や、完成度の高い数値解析モデル¹²⁻¹⁶⁾によって、アークプラズマ中での熱・物質輸送の理解が進められてきた。非消耗電極式のティグ溶接に対し、消耗電極式のミグ溶接では、溶滴移行現象や大量の金属蒸気の発生といった要因が複雑にアークプラズマ熱源の特性に絡んでくるため、アークプラズマの熱・物質輸送を理解することは困難である^{17, 18)}。

アークプラズマ状態を計測する場合、一般的に、アークプラズマを乱さずに測定することが可能な分光分析法が用いられる¹⁹⁾。しかしながら、分光分析法では計測に必要となる

時間が長いので、溶滴移行現象のような動的な変化を伴う場合の計測は困難であった。そのため、アークプラズマ状態を動的に解析した報告は少ない。近年の計測機器の発展により、動的な変化を伴う計測も可能になってきた^{20, 21)}。S. Zielinska²⁰⁾らは分光分析によって、中心軸近傍の低温領域の存在を確認した。S. Zielinskaの結果では、アークプラズマの温度は中心軸から離れた位置にてピークとなり、最大約13,000 Kとなる。これに対し、中心軸近傍では7,000 K程度にまで温度低下している。ただし、この結果は撮影している間のスペクトル強度の平均であるため、動的な変化を議論できない。同時にアーク中心領域において金属蒸気の確認するものの、定量的な濃度の測定には至っていない。また、M. E. Rouffet²¹⁾らは、Boltzmann plot法により中心軸近傍におけるアークプラズマの温度は約8,000 Kとなり、周辺部で約13,000 Kとなることを示し、中心軸近傍においてアークプラズマの温度が低下しているという推測をより確実なものとした。さらに、同時に金属蒸気の定量的な濃度測定を行い、中心軸近傍において金属蒸気濃度が約70%になることを示した。ただし、この実験は溶接電源と計測装置を同期することによって、アークプラズマ中に溶滴が存在しないタイミングでの計測を行っている。このため、溶滴移行を伴う動的な現象を捉えてはいない。また、これらの実験におけるアークプラズマの温度場や金属蒸気濃度場の測定結果は、アーク柱の特定の高さにおける半径方向の分布であり、未だにアークプラズマの全体像が捉えられていない。ミグ溶接は溶滴移行現象を伴うため、アーク全体を捉え、さらに動的に測定しなければならない。本研究では、高速度ビデオカメラを用いた画

*受付日 平成24年7月20日 受理日 平成24年9月25日 平成23年度秋季全国大会で発表

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

***正員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

像分光法によって、アークプラズマの温度場と金属蒸気の濃度場を動的に測定する手法を提案するとともに、溶滴移行現象を伴うミグ溶接におけるアークプラズマ状態の挙動解析を目的とした。

2. 可視化装置の概略

2.1 実験装置

ミグアークは溶滴移行を伴う消耗電極式の溶接アークプラズマであり、ティグアークに比べて、その形状の時間的変化が大きく、計測を行うには高時間分解能が必要となるため、実験的アプローチによる研究報告の数は少ない。アークプラズマの熱輸送現象を理解するためには温度場を知ることが重要である。物質は、エネルギーを与えられるとその物質固有の励起エネルギーを放出するため、固有の波長をもった光を放出する。この性質を利用して、プラズマを擾乱せずにアークプラズマの温度を測定する方法として分光分析法があり、その中にはFowler-Milne法(Off-axis 最大放射係数法)や二線強度比法などがある⁵⁾。我々の研究グループでは、高速度画像分光システムを使用してティグアークの可視化や温度測定を行ってきた^{10, 22)}。以前の分光システムでは、高速度デジタルビデオカメラが8ビット(256階調)と低いものであり、誤差が生じやすくなっていた。本実験では12ビット(4096階調)のカメラを用いることで、精度の良いデータが得られるようになった。また、Stark 拡がりから温度-金属蒸気濃度-放射強度の関係を求めることで、アークプラズマ中における金属蒸気濃度を定量的に求めた²³⁾。

ミグアークは中心の金属蒸気存在域とその周りのシールドガスプラズマ域とに分かれている²¹⁾。このことから、ミグアークの温度場解析には、ティグアークの温度場解析に用いるような、Ar I の放射強度によるFowler-Milne法だけでは不十分である。また、金属蒸気存在域においても濃度の差があることが考えられる。そのため、Fe I の放射強度による

Fowler-Milne法は100%鉄蒸気雰囲気気を仮定する必要があるが、妥当な測定法ではない。そこで、遷移エネルギーの異なる二種類のFe I の放射強度を用いて、二線強度比法で温度測定を行った。このように、金属蒸気存在域では二線強度比法を、その周りのシールドガスプラズマ域ではFowler-Milne法を用いて、それぞれの温度場を求め、それらを重ね合わせることで全体の温度場とした。このように温度測定を行うため、三種類の線スペクトルを同時に撮影する必要があり、三台のカメラを用意した。

以下に本実験で使用した高速度画像分光システムの説明を行う。高速度画像分光システムの概略図をFig. 1に示す。本システムは、対物レンズ、回折格子分光器(回折格子2,400本/mm, 焦点距離300 mm)、結像レンズ、高速度デジタルビデオカメラならびに画像処理用のパソコンによって構成されている。分光の波長分解能は0.4 nmであり、本実験の撮影速度およびシャッター速度は毎秒2,000コマとした。この装置を用いて、アークによって発せられた光を分光器によって分光し、それを高速度ビデオカメラで撮影した。Fig. 1に示した概略図のように、シールドガスとして用いたアルゴンおよび二種類の鉄のスペクトルの三つの分光画像を同時に得ることができる。本実験では、ワイヤチップから母材までの距離を25 mmとし、簡易化のためワイヤには試作した純鉄ワイヤ(1.2 mm 径)を用いた。溶接電流およびアーク電圧を、グローブ移行では直流220 A および30 V、スプレー移行では直流270 A および37 Vと設定し、直流パルス溶接条件ではFig. 2に示すようにピーク電流を450 A、ピーク期間を1.6 ms、ベース電流を50 A、平均溶接電流を210 A、電圧を28 Vと設定することで1パルス1ドロップ溶滴移行となるようにした。アルゴンシールドガスの流量は20 l/minとした。観察を行う波長として、中性元素のスペクトルであるAr I (696 nm), Fe I (537 nm), Fe I (538 nm)を選定した^{20, 21, 24)}。また、周波数 ν は(c は光速)で表わされる。

本実験で計測されるアークプラズマの放射量は、プラズマ

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

の水平方向で積分された放射量に当たる．その積分された放射量に対してアーベル変換²⁵⁾処理を施すことで，アークプラズマの中心を通る二次元の放射強度分布を得た．

2.2 Fowler-Milne 法

本研究では，Fowler-Milne 法と二線強度比法の二つの温度測定法を用いて全体の温度場を求める．Fowler-Milne 法は一つのカメラから測定ができ，かつ広範囲の温度場を測定することができる^{5, 24)}．励起された x 価イオン粒子の核外電子が， n 番目のエネルギー準位から m 番目の下位準位に遷移する際に，アークプラズマから発せられる放射強度 I は次式で表される．

$$I_{nm} = A_{nm} h \nu_{nm} N \frac{g_n \exp(-E_n / kT)}{\sum_j g_j \exp(-E_j / kT)} \quad (1)$$

ここで， A_{nm} は遷移確率， h はプランク定数， ν_{nm} は周波数， N は局所熱平衡 (LTE) を仮定した場合の粒子密度， g_n は統計的重み， E_n は準位エネルギー， k はボルツマン定数， T は温度である．これらの物性値は NIST²⁷⁾ のデータから引用し，粒子密度 N は A. B. Murphy¹²⁾ の研究データを引用した．Ar I の各温度における放射強度 I_x を放射強度の最大値 I_x^* で正規化した放射強度 I_x/I_x^* と温度の関係を Fig. 3 に示す．この図を見ると，Ar I の放射強度は 15,000 K において最大となる．Ar I の放射強度を用いて温度場を求める際，放射強度が最大となる 15,000 K に相当する放射強度が必要となる．しかしながら，本実験においては，15,000 K を超えることはなく，15,000 K に相当する放射強度が得られなかった^{21, 28)}．そこで，水冷銅板を母材に用いたガスタングステンアークの画像分光を行うことで，15,000 K に相当する最大強度を求め，この強度を用いて正規化することで，温度場を求めていく²⁸⁾．

2.3 二線強度比法

二線強度比法⁹⁾は，一種類の元素から放射される二つの異なる波長を用いて温度を測定する方法である．同状態にある粒子から放出された波長 λ_1 ， λ_2 の二つの放射強度を測定すると，(1) 式は以下のように示される．

$$\ln\left(\frac{I_1 \lambda_1}{A_1 g_1}\right) = -\frac{E_1}{kT} + \ln\left(\frac{Nhc}{Z(T)}\right) \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{I_2 \lambda_2}{A_2 g_2}\right) = -\frac{E_2}{kT} + \ln\left(\frac{Nhc}{Z(T)}\right) \quad (3)$$

ここで， $Z(T)$ は分配関数である．そして，(2) 式と (3) 式を比較して温度 T に関する式に変換すると以下のように表される．

$$T = -\frac{E_1 - E_2}{k} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{A_2 g_2 I_1 \lambda_1}{A_1 g_1 I_2 \lambda_2}\right)} \quad (4)$$

この式は粒子密度 N と分配関数 $Z(T)$ の項を含まない式であ

るため Saha の熱電離平衡式を必要としない．この式において，遷移エネルギーの異なる二種類の鉄のスペクトル (537 nm および 538 nm) についての物性値^{12, 27)} を代入することにより，Fig. 4 に示す，放射強度比 Fe I (537 nm)/Fe I (538 nm) と温度の関係が得られる．このように，撮影によっ

Fig. 2 Current waveform in pulsed MIG welding.

Fig. 3 Dependence of normalized intensities which is that intensity I_x divided by a maximum intensity I_x^* of argon on temperature.

Fig. 4 Dependence of intensity ratio of Fe I (537nm)/Fe I (538nm) on temperature.

て得られたそれぞれの放射強度の比をとることで、温度場が得られる。本実験においては、この二種類の波長の近辺にアルゴン原子・イオンなどの波長が存在しない独立した波長であるためこれらの波長を選定した。さらに、Fe I (537 nm) および Fe I (538 nm) の遷移エネルギーはそれぞれ $3.15 \times 10^5 \text{ J/mol}$ および $6.39 \times 10^5 \text{ J/mol}$ である。このように、これらの波長は遷移エネルギーの差が大きく、今回予測される温度域において輝度比が大きくなるため、安定した温度測定を行うことが可能である。

2.4 鉄蒸気濃度場測定方法

本実験では、アークプラズマ中における鉄蒸気の濃度場の測定を行った。鉄蒸気濃度 N は (1) 式を変換することで表される。

$$N = \frac{I_1 Z(T)}{A_1 g_1 h \nu_1 \exp(-E_1 / kT)} \quad (5)$$

この式によって示されるように、鉄蒸気濃度 N は放射強度 I および温度 T に依存している。つまり、高速度ビデオカメラで計測される放射強度分布および Fowler-Milne 法や二線強度比法によって求められる温度場を用いることで、鉄蒸気の濃度場を得ることができる。しかしながら、高速度ビデオカメラで計測された放射強度は、エネルギー密度として表される真値ではなく、測定装置に依存する測定値であり目安でしかない。つまり、放射強度の真値 I とカメラで撮影された放射強度 I' の関係を式で表現すると、 $I = I' \times F$ となり、測定装置に依存する定数 F という比例定数が含まれている。すなわち、放射強度の真値から鉄蒸気濃度を得るためには、測定装置に依存する定数 F を求めなければならない。そこで、93% アルゴン + 7% 水素の混合シールドガスを用いて、母材に純鉄を用いたティグ溶接を行い、水素原子の H_β 線 (486 nm) による Stark 拡がりから、アークプラズマ中の特定の点における、温度-鉄蒸気濃度-カメラで計測された放射強度の関係を明らかにした²³⁾。この実験によって、測定装置に依存する定数を求めた。この測定装置に依存する定数を用いることで、ミグ溶接中の鉄蒸気濃度場が得られる。

3. 鉄蒸気濃度および温度測定法の妥当性の検討

本実験で行った鉄蒸気濃度および温度測定法の妥当性を検討するため、アークプラズマの中心軸上の特定の高さにおける測定を行った Rouffet²¹⁾らの実験結果との比較をした。溶接条件は同様のものとし、母材から 4 mm 上方の位置について測定を行った。

Rouffet らの結果と本実験による鉄蒸気濃度測定結果の半径方向分布の比較を Fig. 5 に示す。これによると、鉄蒸気濃度がどちらの場合も最大約 70% になり、中心軸から約 1.0 mm の範囲で濃度が高く、それよりも外周側では濃度が急激に低くなるというように傾向が一致していた。

Rouffet らの結果と本実験の結果である温度の半径方向分布の比較を Fig. 6 に示す。中心軸上の温度がどちらの場合も約 8,000 K、最高温度がどちらの場合も約 13,000 K になるなど、これらの結果は一致しており、本研究における温度場測定の妥当性を示している。また、Rouffet らはアルゴンのシュタルク拡がりによって求められた電子密度と鉄蒸気濃度から測定している。アルゴンは電場の影響を受けにくくシュタルク拡がりの測定は困難である。そのため、アークプラズマの周辺部では、電子密度が高く見積もられ、温度が高く見積もられることになる。その結果、本実験で求められる温度よりも高くなっていると推測される。

このように、Rouffet らの結果と比較することで、本実験で得られる温度場および鉄蒸気の濃度場の妥当性が検証された。

4. ミグ溶接中の鉄蒸気濃度場および温度場

4.1 グロビュール移行

溶接電流を直流 220 A、アーク電圧を 30 V と設定すること

Fig. 5 Radial distribution of iron vapor concentration at peak current phase in pulsed MIG welding.

Fig. 6 Radial distribution of plasma temperature at peak current phase in pulsed MIG welding.

Fig. 7 Temperature distributions, distributions of iron vapor concentration and intensity distributions of Ar I (696nm) and that of Fe I (537nm) in MIG welding with globular transfer.

Fig. 8 Time variation of distributions of iron vapor concentration and temperature in MIG welding with globular transfer.

Fig. 9 Temperature distributions, distributions of iron vapor concentration and intensity distributions of Ar I (696nm) and that of Fe I (537nm) in MIG welding with spray transfer.

Fig. 10 Time variation of distributions of iron vapor concentration and temperature in MIG welding with spray transfer.

で、溶滴移行形態をグロービュール移行とした場合の温度場、鉄蒸気濃度場、Ar I および Fe I の分光画像を Fig. 7 に示す。この図に示すように Ar I および Fe I の分光画像から、温度場および鉄蒸気濃度場を得ることができる。そこで、Fig. 8 に溶滴がワイヤ先端から溶融池へ移行する 42.5 ms 間を 2.5 ms 毎に測定した鉄蒸気濃度場および温度場を示す。

温度場を見ると、ワイヤ先端の溶滴が小さい 17.5 ms までは、中心軸近傍で約 7,000 K、アークプラズマ周辺部で最高約 12,000 K となった。時間の経過に伴い、溶滴が成長していくと、周辺部で最高 10,000 K 程度にまで温度が低下した。その後、溶滴がワイヤ先端から離脱すると、再び周辺部で最高約 12,000 K にまで上昇した。また、中心の下部において

Fig. 11 Temperature distributions, distributions of iron vapor concentration and intensity distributions of Ar I (696nm) and that of Fe I (537nm) in pulsed MIG welding.

10,000 K を超える温度を示しているが、これは溶融池によってアークの光が反射されているためである。

一方、鉄蒸気濃度場を見ると、ワイヤ先端近傍で濃度が高く、溶融池に近づくにつれて濃度が低下していく。この結果は、ワイヤ先端から発生した鉄蒸気が溶融池側へ輸送されていることを示している。アークプラズマ中を移行中している溶滴近傍の濃度を見ると、プラズマ気流の下流側である溶滴下部の濃度が、溶滴上部に比べ低くなっていることがわかる。つまり、ワイヤ先端から発生した鉄蒸気はプラズマ気流によって溶融池側へと輸送されるが、溶滴の存在によって流れが妨げられ、溶滴下部での濃度が低くなる。鉄蒸気の輸送に関しては拡散の影響も考えられるが、溶滴下部における濃度が低いため、プラズマ気流による輸送が支配的であると言える。また、溶滴および溶融池近傍における鉄蒸気濃度が低いことから、溶滴および溶融池から発生する鉄蒸気は少なく、溶滴および溶融池の表面温度がワイヤ先端に比べ低いことを示している。また、ワイヤ先端において溶滴が成長するにつれ、最高 100% にまで達していた濃度が約 60% にまで低下している。溶滴がワイヤ先端から離脱すると、ワイヤ先端近傍において濃度が再び 100% に達した。

4.2 スプレー移行

溶接電流を直流 270 A、アーク電圧を 37 V と設定することで、溶滴移行形態をスプレー移行とした場合の温度場、鉄蒸気濃度場、Ar I および Fe I の分光画像を Fig. 9 に示す。グロービュール移行の場合と同様に Ar I および Fe I の分光画像から、温度場および鉄蒸気濃度場を得ることができる。そこで、Fig. 10 に溶滴がワイヤ先端から溶融池へ移行する 4.0 ms 間

を 0.5 ms 毎に測定した鉄蒸気濃度場および温度場を示す。

温度場を見ると、中心軸近傍で約 7,000 K、アークプラズマ周辺部で最高 12,000 K を超える温度となった。溶滴移行形態がグロービュール移行の場合と比べると、溶接電流が高いため、周辺部の温度が高い。また、グロービュール移行の場合とは異なり、ワイヤ先端において溶滴があまり大きくなりません。そのため、溶滴の成長に伴う、アークプラズマ周辺部の温度低下は見られなかった。

一方、鉄蒸気濃度場を見ると、グロービュール移行の場合と同様、ワイヤ先端近傍で濃度が高く、溶融池に近づくにつれて濃度が低下している。ただし、ワイヤ先端より上部のワイヤからも鉄蒸気が発生している。この結果は、ワイヤ上部においても表面温度が十分に高く、鉄蒸気を多く発生していることを示している。また、グロービュール移行の場合と比べ全体的に濃度が高くなっている。特にワイヤ先端近傍では 80 ~ 100% となり、ワイヤ先端における溶滴が成長した際のグロービュール移行の場合に比べ、濃度が高い。また、高濃度域はワイヤから離脱した溶滴を覆うように存在している。溶滴下部において濃度が低くなる傾向は、グロービュール移行の場合と同様である。

4.3 直流パルス溶接

Fig. 2 に示すように、ピーク電流を 450 A、ピーク期間を 1.6 ms、ベース電流を 50 A、平均溶接電流を 210 A、電圧を 28 V という溶接条件で直流パルス溶接を行った場合の温度場、鉄蒸気濃度場、Ar I および Fe I の分光画像を Fig. 11 に示す。グロービュール移行およびスプレー移行の場合と同様に Ar I および Fe I の分光画像から、温度場および鉄蒸気濃度場

を得た。そこで、Fig. 12 に溶滴がワイヤ先端から熔融池へ移行する 6.0 ms 間を 0.5 ms 毎に測定した温度場および鉄蒸気濃度場示す。ここで、1.0 ms においてピーク電流からベース電流に移行していき、5.5 ms において再びピーク電流となる。

温度場を見ると、ピーク期間において中心軸近傍で約 7,000 K、アークプラズマ周辺部で最高 12,500 K。ベース期間においてワイヤ近傍で約 10,000 K、その他の領域で約 6,000 K となった。ピーク期間では、スプレー移行の場合と比べ溶接電流が高いので、周辺部の温度が高くなった。

一方、鉄蒸気濃度場を見ると、ピーク期間では、50% を超える高濃度域が熔融池近傍にまで達している。この結果は、アークプラズマ中に溶滴が存在しないため、プラズマ気流が妨げられることなく、ワイヤ先端から発生した鉄蒸気がアークプラズマ中を輸送されていることを示している。ベース期間においては、溶接電流が非常に低いため鉄蒸気があまり発生せず、全体的に濃度が低く、ほぼ 0% となった。

4.4 ワイヤ先端における溶滴の直径と鉄蒸気濃度およびアークプラズマの温度の関係

溶滴移行形態がグロービュール移行の場合、ワイヤ先端において溶滴が成長するに従い、アークプラズマ中の鉄蒸気濃度およびアークプラズマの温度が低下した。そこで、鉄蒸気の

最高濃度およびアークプラズマの最高温度をワイヤ先端における溶滴の直径で整理したものをそれぞれ Fig. 13 および Fig. 14 に示す。Fig. 13 を見ると、溶滴の直径が 1.2 mm から 4.9 mm と大きくなるにつれ、鉄蒸気濃度が 100% から 73% に低下していることがわかる。ワイヤ先端において溶滴が成長することで、ワイヤ先端における電流密度が減少する²⁹⁾。そして、ワイヤ先端の表面温度が低下し、鉄蒸気の発生量が減少する。このように、ワイヤ先端において溶滴が成長することで、鉄蒸気濃度が低下する。また、Fig. 14 を見ると、ワイヤ先端における溶滴の直径が大きくなるにつれて、アークプラズマの最高温度が 12,210 K から 10,790 K に低下していることがわかる。前述したように、ワイヤ先端における溶滴の成長に伴い、電流密度が減少する。すると、ワイヤ先端近傍のアークプラズマで生じるジュール発熱が減少するので、プラズマ温度が低下したものと考えられる。

一方、スプレー移行の場合、溶滴の直径は 1.2 mm から 1.6 mm とほとんど成長しない。そのため、アークプラズマの最高温度は 12,260 K から 12,540 K というようにほとんど変化しない。ワイヤ先端近傍における鉄蒸気濃度はアークのゆらぎに伴うワイヤ先端の表面温度が微妙に変化するため 80% 程度になることもあるが、ほぼすべての時間において 90% 以上の濃度を保っている。

以上のことから、ワイヤ先端における溶滴の大きさに応じ

Fig. 12 Time variation of distributions of iron vapor concentration and temperature in pulsed MIG welding.

Fig. 13 Dependence of iron vapor concentration on diameter of droplet at the wire tip in MIG welding with globular transfer.

Fig. 14 Dependence of temperature of arc plasma on diameter of droplet at the wire tip in MIG welding with globular transfer.

て、アークプラズマ状態が変化していることがわかる。

5. 結 言

本研究では、高速度ビデオカメラを用いた画像分光法によって、ミグ溶接におけるアークプラズマの温度場および金属蒸気の濃度場について動的解析を行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) すべての溶滴移行形態において、中心軸近傍は約 7,000 K の低温領域となり、アークプラズマの周辺部は 10,000 K を超える高温領域となった。
- (2) すべての溶滴移行形態において、ワイヤ先端近傍の金属蒸気濃度が最も高く、溶融池に近づくにつれ濃度が低下していく。つまり、ワイヤ先端から発生した金属蒸気がプラズマ気流によって輸送され、アークプラズマ中へと混入することが明らかになった。
- (3) アークプラズマ中に溶滴が存在すると、プラズマ気流が妨げられる。そのため、ワイヤ先端から発生する金属蒸気は溶滴下部へはほとんど輸送されず、溶滴下部における金属蒸気濃度は低い。
- (4) ワイヤ先端における溶滴の大きさに応じて、アークプラズマの温度場や金属蒸気の濃度場といったアークプラズマ状態が変化する。

謝 辞

本研究は科研費基礎研究 (A) (22246095) の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) G.N. Haddad and J.D. Farmer: Temperature Measurements in Gas Tungsten Arcs, *Welding Journal*, 64 (1985), 339s-342s.
- 2) A.J.D. Farmer, G.N. Haddad and L.E. Cram: Temperature determinations in a free-burning arc: III. Measurements with molten anodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 19 (1986), 1723-1730.
- 3) J. Haidar and A.J.D. Farmer: Temperature measurements for high-current free-burning arcs in nitrogen, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 21 (1993), 1224-1229.
- 4) K. Hiraoka: Evaluation of Local Plasma Composition and Temperature in Mixed Gas Tungsten Arc Plasma Column by Light Spectroscopy -Study on Characteristics of Gas Tungsten Arc Shielded by Mixed Gases (Report 2)-, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 11-1 (1993), 68-74 (in Japanese).
- 5) K. Hiraoka, T. Shiwaku and T. Ohji: Temperature Distributions of Gas Tungsten Arc Plasma by Spectroscopic Methods, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 14-4 (1996), 641-648. (in Japanese)
- 6) M. Tanaka, T. Shimizu, H. Terasaki, M. Ushio, F. Koshi-ishi and C.-L. Yang: Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 5-6 (2000), 397-402.
- 7) H. Terasaki, M. Tataka and M. Ushio: Effects of metal vapor on plasma state in helium gas tungsten arcs, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 20-2 (2002), 201-206.
- 8) H. Terasaki, M. Tanaka and M. Ushio: Effects of Metal Vapor on Electron Temperature in Helium Gas Tungsten Arcs, *Metallurgical and Materials Transactions*, 33 (2002), 1183-1188.
- 9) Y. Tsujimura, H. Terasaki, K. Yamamoto, S. Tashiro and M. Tanaka: Number Density Distributions of Metal Vapor in Helium Gas Tungsten Arcs, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 35-3 (2010), 593-596.
- 10) H. Sawato, S. Tashiro, K. Nakata, M. Tanaka, E. Yamamoto, K. Yamazaki and K. Suzuki: Measurement of dynamical variation in two-dimensional temperature distribution of TIG pulsed-arcs, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 29-3 (2011), 23s-26s.
- 11) T. Konishi, Y. Hirata, K. Nomura and K. Shirai: Three Dimensional Temperature Measurement of the Gas Tungsten Arc Plasma, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 29-4 (2011), 274-279 (in Japanese).
- 12) 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 vapour, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 42 (2009), 194006.
- 13) M. Tanaka and J.J. Lowke: Predictions of weld pool profiles using plasma physics, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40 (2007), R1-R23.
- 14) K. Yamamoto, M. Tanaka, S. Tashiro, K. Nakata, K. Yamazaki, E. Yamamoto, K. Suzuki and A.B. Murphy: Numerical Analysis of Metal Vapor Behavior with Multi-diffusion System in TIG Welding of Stainless Steel, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 27-2 (2009), 4s-7s.
- 15) M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro, K. Nakata, E. Yamamoto, K.

- Yamazaki, K. Suzuki, A.B. Murphy and J.J. Lowke: Time-dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapor in gas tungsten arc welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43 (2010), 434009.
- 16) Y. Ogino, K. Nomura and Y. Hirata: Numerical Analysis of Arc Plasma Behavior in Groove Welding with 3D TIG Arc Model, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 28-1 (2010), 10-15 (in Japanese).
- 17) M. Schnick, U. Fussel, M. Hertel, A. Spille-Kohoff and A.B. Murphy: Metal Vapour causes a central minimum in arc temperature in gas-metal arc welding through increased radiative emission, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43 (2010), 022001.
- 18) J Haidar: The dynamic effects of metal vapour in gas metal arc welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43 (2010), 165204.
- 19) 溶接アーク物理研究委員会：溶接プロセスの物理，黒木出版(1996) (in Japanese).
- 20) S Zielinska, K Musiol, K Dzierzega, S Pellerin, F Valensi, Ch de Izarra and F Briand: Investigation of GMAW plasma by optical emission spectroscopy, *Plasma Sources Science Technology*, 16 (2007), pp.832-838.
- 21) M.E. Rouffet, M. Wendt, G. Goett, R. Kozakov, H. Schoepp, K.D. Weltmann and D. Uhrlandt: Spectroscopic investigation of the high-current phase of a pulsed GMAW process, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 43 (2010), 434003.
- 22) M. Tanaka and Y. Tsujimura: Visualization of metal vapor in TIG welding -Visualization of phenomena of welding arc by imaging spectroscopy-, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 30-2 (2012), 164-170 (in Japanese).
- 23) H.R. Griem: *Plasma Spectroscopy*, McGraw-Hill, (1964).
- 24) W.L.Wiese, M.W.Smith and B.M.Miles: *Atomic Transition Probabilities*, NSRDS, (1969).
- 25) O H. Nester and H N. Olsen: Numerical Methods for Reducing Line and Surface Probe Data, *SIAM Review*, 2-3 (1960), 200-207.
- 26) H N. Olsen: The electric arc as a light source for quantitative spectroscopy, *J. Quant. Spectrosc. Ra.*, 3 (1963), 305-333.
- 27) NIST: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- 28) Y. Tsujimura, M. Nakatani and M. Tanaka: Analysis of Metal Vapor Behavior in Gas Shielded Arc Welding with Consumable Electrode by Imaging Spectroscopy, *Tetsu-to-Hagane*, 98 (2012), 532-538 (in Japanese).
- 29) K. Kadota, Y. Suzuki, Y. Hirata, T. Kataoka, R. Ikeda and K. Yasuda: Influence of Shielding Gas and Electrode Wire on Metal Transfer Phenomena in GMAW Process, *Quarterly J. Japan Welding Soc.*, 30-1 (2012), 100-106 (in Japanese).
- ~~~~~