

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249101

研究課題名(和文) プラズマジェットによる金属蒸気輸送ダイナミクスと溶接アーク熱輸送現象の可視化

研究課題名(英文) DYNAMIC TRANSPORTATION OF METAL VAPOR BY PLASMA JET AND VISUALIZATION OF HEAT TRANSPORTATION IN WELDING ARCS

研究代表者

田中 学 (TANAKA, MANABU)

大阪大学・接合科学研究所・教授

研究者番号：20243272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,300,000円

研究成果の概要(和文)：ものづくりに必須の基盤技術でありながら、未だ「巧みの世界」と言われるアーク溶接技術を科学に立脚した技術に発展させるため、アーク溶接プロセス中の動的なプラズマ温度分布ならびに金属蒸気密度分布を実験的に把握すると共に、アーク溶接プロセスの数値シミュレーションを通じて実験結果と比較検討することにより、プラズマジェットによる金属蒸気輸送に起因したアーク溶接の熱輸送現象を定量的に可視化し、それらが溶接技術にとって重要な溶融プール形成に及ぼす影響について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to evolve arc welding process from a skilled technique into a technology based on the science, this study aims at experimental understandings of dynamic plasma temperature and metal vapor density during arc welding process. Furthermore, this study focuses on visualizations of quantitative heat transportation phenomena together with metal vapor transportation by the plasma jet, through numerical simulations. The above experimental and numerical analyses have revealed the effect of arc plasma dynamics on the weld pool formation which is important for welding technology.

研究分野：溶接工学

キーワード：可視化 計算工学 シミュレーション工学 溶接 アーク

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接プロセスでは、アークプラズマによる局所的な加熱・溶融・凝固・冷却という一連の過程をたどり材料の接合部が形成される。しかし、その過程には、電極加熱と電子放出、高温プラズマと溶融金属との相互作用、溶融金属の流動による熱輸送と溶融プール形成など、高々1 cm³の世界で、数秒の時間に、固体、液体、気体、プラズマの4つの状態が混相する複雑なシステムが成り立っている。また、溶融電極や溶融プールとなっている溶鋼からは鉄などの金属蒸気が発生し、アークプラズマの状態をいっそう複雑なものとしている。未だ「巧みの世界」と言われるように、アーク溶接プロセスで生じる現象は科学的に未踏領域のままである。すなわち、溶接技術は、ものづくりのプロセスに必須の基盤技術でありながら、ノウハウや生産現場の知恵に支えられた技術であり、熟練を必要とする技術である。これが溶接技術における最大の課題である。グローバルな国際競争の中で、いま日本のものづくりにとって必要なのは、ものづくりの一つ一つのプロセスを科学的に十分に理解し、高度な信頼性を維持しながら、科学に基づく徹底した高能率化、省エネルギー化、高機能化をはかり、ものづくりプロセス技術の高度化を絶え間なく推し進めることである。したがって、新興工業国の労働力を退け、他の先進工業国の技術を打破するには、科学に立脚した高度な溶接技術として溶接技能を伝承することが必要である。

一方、近年の目覚ましい数値シミュレーション技術や観察・計測技術の進歩により、アーク溶接プロセスで生じる現象が定量的に把握できるようになってきた。世界的には、アーク溶接の非定常数値シミュレーションの計算例が報告され、非常に複雑で高度な計算に成功している。しかし、雰囲気ガスが純アルゴンのままであり、金属蒸気の影響を考慮していない。また、プラズマ分光の従来手法により、ある特定の位置と時間におけるアーク溶接中のプラズマ温度が測定されている。しかし、100Hz程度の溶滴移行現象を伴う動的なアーク溶接の全体像をまったく捉えていない。「溶融電極-アークプラズマ-溶融プール」が複雑に相互干渉する中で金属蒸気輸送ダイナミクスを考慮することがアーク溶接プロセスの正確な理解にとって重要なのである。

2. 研究の目的

そこで本研究では、(1)アーク溶接プロセス中の動的なプラズマ温度分布ならびに金属蒸気密度分布を実験的に把握すると共に、(2)高速プラズマジェットの流れおよび流れ場を可視化することにより金属蒸気の導入ダイナミクスを実験的に把握する。さらに、(3)アーク溶接プロセスの数値シミュレーションを通じて、(4)実験結果と比較検討すること

により、プラズマジェットによる金属蒸気輸送に起因したアーク溶接の熱輸送現象を定量的に可視化し、それらが溶接技術にとって重要な溶融プール形成に及ぼす影響について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

高感度・高速度イメージ分光可視化システムを構築し、4つの線スペクトルイメージを高速度で同時に計測できることを可能にした。具体的には、実験装置および当該可視化システムは、溶接電源、溶接ワイヤ送給装置、ガスマタルアーク溶接トーチ、可動式ステージ、対物レンズ、ビームスプリッタ、直角プリズム、回折格子分光器4台、高速度ビデオカメラ4台、制御用パソコンから構成されている。実験では、溶接トーチを固定し、母材を可動式ステージに載せることにより、対物レンズとアークプラズマ間の距離を一定に保つように工夫した。アークプラズマからの光は対物レンズによって集光され、ビームスプリッタによって二つの光に分けられる。ビームスプリッタに用いたダイクロイックシヨートパスフィルターは600 nm以上の波長は上段へ、600 nm未満の波長は下段へほぼ減衰なく分けることができる。その後、アークプラズマからの光は直角プリズムによってさらに二つの光に分けられ、それぞれの光が回折格子分光器によって特定の波長に分光される。分光器は1200本/mmのブレースタイプの回折格子を用いており、その波長分解能は0.4 nmである。分光により得られた線スペクトルイメージの輝度分布を4台の高速度ビデオカメラで同期撮影し、得られたデータはパソコンに取り込まれる。

本研究では、プラズマ分光分析法を用いて、まず、アークプラズマの温度計測を行った。アルゴンあるいは炭酸ガスのプラズマ領域には分光分析法の一つであるFowler-Milne法を、鉄蒸気が存在するプラズマ領域には二線強度比法を用いた。Fowler-Milne法にはアルゴン原子あるいは酸素原子の線スペクトルを選定した。他方、二線強度比法には鉄原子の二つの線スペクトルを選定した。なお、アークプラズマの温度分布が決まれば、鉄原子の線スペクトル強度から局所熱平衡(LTE: Local Thermodynamic Equilibrium)を仮定することにより鉄蒸気密度分布が計算により見積もることが可能となる。ここで、溶接ワイヤ(溶融電極)と母材からは、それぞれの圧倒的な主成分である鉄のみがアークプラズマ中に蒸発するものと仮定した。これにより、鉄蒸気を金属蒸気として表現する。

以上により、適切な撮影速度と露光時間を選択することにより、プラズマ温度と金属蒸気密度の動的変化を実験的に捉えることが可能である。加えて、我々の研究グループのオリジナルで実績があるガスタングステンアーク溶接の数値解析モデルを動的なガスマタルアーク溶接の数値解析モデルに拡張

する。本モデルは「溶融電極-アークプラズマ-溶融プール」を同時に一体化して計算する軸対称 2次元の電磁熱流体モデルであり、アークプラズマ中の金属蒸気は、対流項と拡散項からなる物質保存式を連立して解くことにより、任意の空間における金属蒸気密度と組成が計算されるように工夫している。これにより、金属蒸気密度の動的な空間分布変化、プラズマ温度分布の動的変化、溶融プールの動的変化などを時間ごとの数値シミュレーションとして出力する。

4. 研究成果

(1) 純アルゴン雰囲気でのアーク現象

図1は、高感度・高速度イメージ分光可視化システムを用いて、ガスメタルアーク溶接における動的なアークを可視化したものである。(a)は溶接ワイヤ端で溶滴形成が始まったタイミングを 0 ms としたものであり、その後、(b)は 20 ms 後、(c)は 40 ms 後の状態を示している。各図の左側からプラズマ温度分布、金属蒸気密度分布、アルゴン (Ar I) の線スペクトルイメージ、鉄 (Fe I) の線スペクトルイメージを示している。なお、実験条件は、溶接電流が 220 A、アーク電圧が 33 V、シールドガスが純アルゴンである。この実験では、アルゴンの線スペクトル 696.5 nm と、鉄原子の線スペクトル 537.1 nm ならびに 538.3 nm を選定した。イメージ分光の撮影速度は毎秒 2,000 コマである。

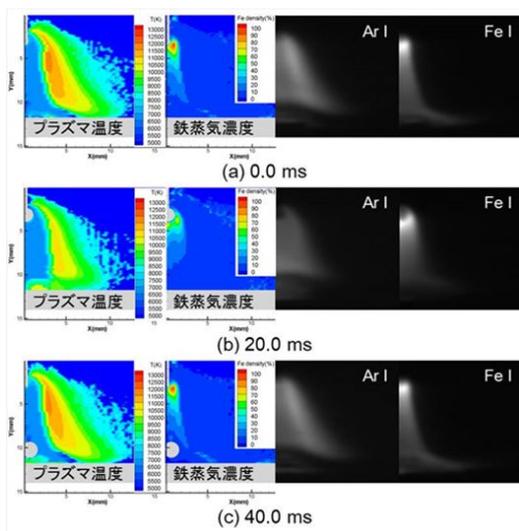


図1 アルゴン雰囲気でのガスメタルアークの可視化

ここで着目すべきポイントは、アーク中心部のプラズマ温度が周囲のプラズマ温度に比べて 5,000 K ほど低下している点である。すなわち、視覚的には最も輝度の高い中心部で温度が低く、輝度が明らかに低い周囲で温度が高くなっていることを意味している。

人類がアーク放電を発見して約 200 年になるが、当然ながらアークの中心が最も温度の高い部分であると考えられてきた。実際、従

来の静的なアーク放電、すなわちガスタングステンアークに対するプラズマ診断の結果は、中心部にピークを有する正規分布状の温度分布になっている。

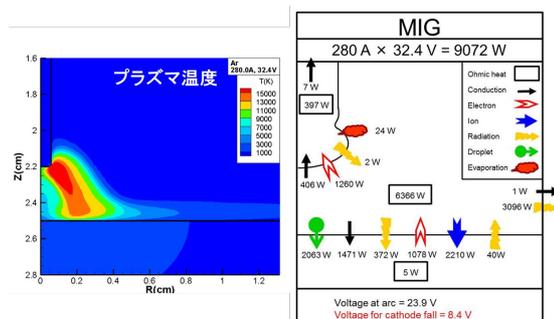


図2 アルゴン雰囲気でのガスメタルアークの数値計算シミュレーション

ガスタングステンアーク溶接の数値解析モデルを動的なガスメタルアーク溶接の数値解析モデルに拡張して数値計算シミュレーションした結果を図2に示す。この図はアーク中心部の温度が低下する理由を明快に示している。すなわち、電極ワイヤ端に形成される溶滴から蒸発する鉄蒸気が高速のプラズマ気流によってアーク中心部に輸送される結果、鉄原子やイオンからの光の放射損失が多くなり、プラズマ温度が低下するのである。図2にみるように、アークの電力 9,072 W に対してアークプラズマからの放射損失は実に 3,096 W に達している。アークが眩しく光を放つということは、その分だけ投入した電力が光のエネルギーとして散逸しているということを意味しているのである。

(2) 炭酸ガス雰囲気でのアーク現象

さて、前節は純アルゴンシールドガスのガスメタルアーク溶接の場合である。純アルゴンでは、高電流域においてスプレー移行となり、スパッタの少ないスムーズな溶滴移行が達成される。一方、純 CO₂ シールドガスを使用する炭酸ガスアーク溶接の場合では、熱的ピンチ効果によってアークが緊縮し、アークルートが溶滴下面に形成されるため溶滴移行が妨げられる。この結果、高電流域においてもスプレー移行形態に遷移せずにグロービュール移行 (反発移行) 形態のままになる。スパッタが多くなる要因の一つである。この炭酸ガスアークの状態は純アルゴンアークに比べて違うのであろうか。

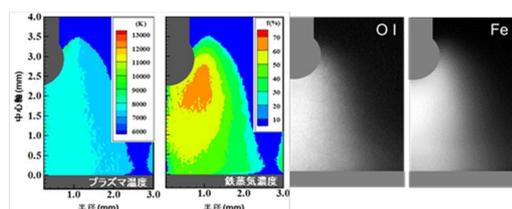


図3 炭酸ガス雰囲気でのガスメタルアークの可視化

図3は、純アルゴンの場合と同様に、炭酸ガスアークにおける動的なアークを可視化したものである。図の左側からプラズマ温度分布、金属蒸気密度分布、酸素(0 I, 777.3 nm)の線スペクトルイメージ、鉄(Fe I, 537.1 nm)の線スペクトルイメージである。実験条件は、溶接電流が300 A、アーク電圧が38 V、シールドガスが100% CO₂である。

ここで着目すべきポイントは、酸素の線スペクトルイメージと鉄の線スペクトルイメージがほとんど同じで差のないことである。純アルゴン(図1)では、アルゴンと鉄のそれぞれの線スペクトルイメージに明らかな差があり、金属蒸気とアルゴンガスとの分離がなされていることが一目瞭然であった。逆に、炭酸ガスアーク(図3)では、酸素と鉄のそれぞれの線スペクトルイメージに差が見られないということは、炭酸ガスと金属蒸気が分離されることなく十分に混ざり合っている明らかな証拠と言える。プラズマ温度は7,000 K~8,000 Kでほぼ均一した緩やかな温度分布であり、同様に金属蒸気密度も局所的に高密度化することなく緩やかな密度分布を示している。この主因は、炭酸ガスの熱的ピンチ効果によって緊縮したアークからワイヤ先端へのエネルギー輸送の増加に伴い溶滴表面温度が上昇し、金属蒸気が多量に発生するため、かえってアークルートが広がることになる。その結果、緊縮したアーク柱と相まってプラズマ気流の流速が抑制され、金属蒸気がアーク中心部に局所的に運ばれるメカニズムが弱まるため、と推察される。

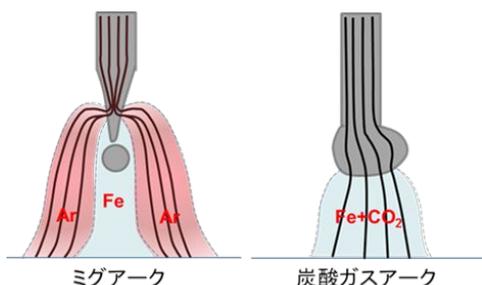


図4 アルゴン雰囲気(ミグ)と炭酸ガス雰囲気のアーク現象と電流経路の違い

以上の実験結果より、図4に示すような溶接電流の分布が推測された。これは、プラズマ温度と金属蒸気密度からプラズマ物理学的にアーク柱の電気伝導率分布を見積もった結果に基づくものである。純アルゴアーク(ミグアーク)では、低温化したアーク中心部よりも高温の周辺部に電流が流れやすくなる。その結果、高電流域において、ワイヤ先端での電磁ピンチ力が働くとともに溶滴下部での電磁ピンチ力が弱まるためスプレー移行となる。逆に、炭酸ガスアーク溶接では、アーク中心部にも電流経路が存在するため溶滴下部での電磁ピンチ力が大きくなり、スムーズな溶滴移行が妨げられる。その結果、

スプレー移行形態に遷移せずにグロービュール移行形態のままになるものと考えられた。スプレー移行のようなスムーズな溶滴移行形態の発生には、アーク中心部における電流経路の出現を抑制することが必要であることを意味している。従来の知見では考えたこともないような結論である。

(3) 混合ガス雰囲気でのアーク現象

上述のとおり、純アルゴン雰囲気と純CO₂雰囲気でのガスマタルアーク現象の相違と、それに伴う溶滴移行現象の違いが明らかにされた。そこで、最終ステップとして、それぞれの混合ガス雰囲気の場合に生じるアーク現象について検討を行った。なお、アルゴンと炭酸ガスの混合ガスはシールドガスとして工業的にも幅広く利用されており、そのアーク現象の解明は工学的意義も高い。そこで、次のような混合ガスを選定した。80%CO₂+20%Ar, 60%CO₂+40%Ar, 40%CO₂+60%Ar, 20%CO₂+80%Arである。これらに加えて、比較のために、100%CO₂と100%Arも実験に加えた。

溶接電流は300 Aとした。この理由は、100%Arと20%CO₂+80%Arの雰囲気ではスプレー移行形態を示すものの、それより炭酸ガスの混合比率が高くなる40%CO₂+60%Ar, 60%CO₂+40%Ar, 80%CO₂+20%Ar, 100%CO₂の雰囲気ではグロービュール移行形態を示す、溶接電流域となるためである。

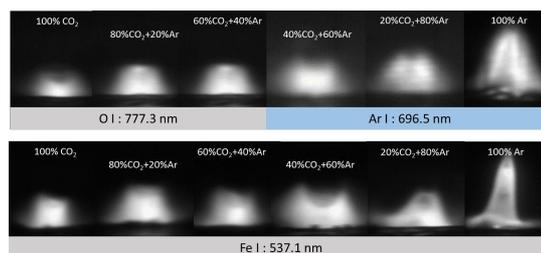


図5 分光イメージとシールドガス組成の関係

図5に高感度・高速度イメージ分光可視化システムによる線スペクトルイメージをシールドガス組成ごとに示す。シールドガス組成が100%CO₂, 80%CO₂+20%Ar, 60%CO₂+40%Arのときは酸素原子の線スペクトル(O I: 777.3 nm), 40%CO₂+60%Ar, 20%CO₂+80%Ar, 100%Arのときはアルゴン原子の線スペクトル(Ar I: 696.5 nm)を対象とした。グロービュール移行が出現するシールドガス組成では、酸素原子あるいはアルゴン原子の線スペクトルイメージと鉄原子の線スペクトルイメージがほとんど同じで差異がないことがわかる。しかしながら、スプレー移行が出現する100%Arと20%CO₂+80%Arのときはアルゴン原子の線スペクトルイメージの中心部は輝度が明らかに低く、逆に鉄原子の線スペクトルイメージの輝度が高くなっている。このように、スプレー移行となる条件ではアルゴン原子と鉄原子の線スペクトルイメージに明

らかに差異があり、アルゴンガスと鉄蒸気との分離がなされていることが必要条件であることがわかる。

図6に線スペクトルイメージから求められたプラズマ温度分布を示す。スプレー移行形態となる100%Arと20%CO₂+80%Arの場合においてプラズマ温度分布はアークプラズマ外縁部において高温となることわかる。なお、20%CO₂+80%Arの場合は、スプレー移行形態といってもグロービュール移行形態との遷移領域的な状態であり、溶滴径が100%Arに比べると大粒である。そのような観点でみると、100%Arの場合には明瞭に外縁部において高温となり、アーク中心部では低温となっていることがわかる。

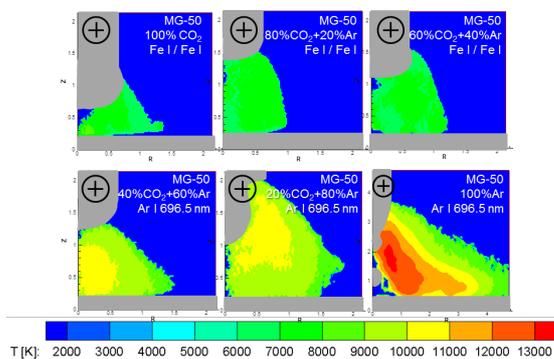


図6 プラズマ温度に及ぼすシールドガス組成の影響

他方、グロービュール移行が出現するシールドガス組成では、100%CO₂の雰囲気の場合と同様に、プラズマ温度は7,000 K~8,000 Kでほぼ均一した緩やかな温度分布であることが明らかになった。

(4) 総括

以上、本研究において得られた実験と計算の双方による成果を総合的に比較検討し、プラズマジェットによる金属蒸気輸送ダイナミクスに起因したアーク溶接の熱輸送現象を定量的に可視化した。その結果、以下の世界初の新しい知見が得られた。

熱的ピンチ効果の弱いシールドガス(アルゴン主流系)を使用するガスメタルアークでは、高速のプラズマジェットが誘起され、溶融電極から蒸発した金属蒸気がアーク中心部に輸送される。その結果、シールドガスと金属蒸気が分離され、金属蒸気プラズマからの強い光の放射損失によってアーク中心部の温度が低下する。低温化したアーク中心部よりも高温の周辺部に溶接電流が流れる。

熱的ピンチ効果の強いシールドガス(炭酸ガス主流系)を使用するガスメタルアークでは、プラズマジェットが弱まり、溶融電極から蒸発した金属蒸気が拡散によってシールドガスと十分に混合する。その結果、溶接電流はアーク中心部を流れる。

スプレー移行のようなスムーズな溶滴移行形態の発生には、アーク中心部における電流経路の出現を抑制することが必要である。

ワインカップ状の深溶込みの溶融プール形成には、高速のプラズマジェットが誘起されることが必要である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

1) Titinan Methong, Masaya Shigeta, Manabu Tanaka, Rinsei Ikeda, Muneo Matsushita and Tokihiko Kataoka: Diagnostic of Heat Source Properties in Gas Metal Arc Welding using CO₂ Shielding Gas, The Int. Symp. Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW2016), 2016.10.17, ホテル阪急エキスポパーク(大阪府).

2) Titinan Methong, Tasuku Yamaguchi, Masaya Shigeta, Manabu Tanaka, Rinsei Ikeda, Muneo Matsushita and Tokihiko Kataoka: Effects of rare earth metal on plasma properties in GMAW using CO₂ shielding gas, 69th Annual Assembly of Int. Inst. Welding, 2016.7.13,メルボルン(オーストラリア).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 学 (TANAKA, Manabu)
大阪大学・接合科学研究所・教授
研究者番号: 20243272

(2) 研究分担者

茂田 正哉 (SHIGETA, Masaya)
大阪大学・接合科学研究所・准教授
研究者番号: 30431521

田代 真一 (TASHIRO, Shinichi)
大阪大学・接合科学研究所・助教
研究者番号: 70432424