

平成 22 年 5 月 12 日現在

研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2007～2009  
 課題番号：19360333  
 研究課題名(和文) 溶接プロセスにおけるアークプラズマ中の金属蒸気挙動と溶融プール形成過程の総合解析

研究課題名(英文) General Analyses of Metal Vapor Behavior in Plasma and Weld Pool Formation during Arc Welding Process

## 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

研究成果の概要(和文)：本研究は、アーク溶接プロセスの十分な理解と正確な予測の実現を目指し、その動的挙動を数値計算シミュレーションとイメージング分光器による実験観察の双方から総合的に解析した。その結果、溶接熱源となるアーク放電プラズマ中の金属蒸気の種類および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、材料への入熱密度分布の動的変化、溶融池形成の時間変化を定量的に明らかにすることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The aim of the present study was understanding and precise prediction of arc welding process, and then its dynamic behavior was analyzed from numerical simulations and experimental observations using an imaging spectroscopy. The present study revealed contents of metal vapor in the arc plasma and their concentrations, dynamic changes of plasma temperature and heat intensity into the base metal, and also time dependence of weld pool formation during the arc welding process.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 ・ 材料加工・処理

キーワード：アーク、プラズマ、シミュレーション、溶融池、金属蒸気、計測、診断、分光

## 1. 研究開始当初の背景

アーク溶接プロセスを代表とする溶接技術は「成熟した技術」とよく言われる。この理由は、主として、既製品に類似した製品を一般的な構造用鋼材を使用してアセンブリする場合の溶接技術が今まで培われたノウ

ハウと経験に基づく施工法によって十分にカバーできるからである。しかしながら、技術はその時代を反映して必ず進歩しなければならない。いまこの瞬間は「成熟した技術」として捉えられていたとしても時間とともに退歩していくからである。日本を取り巻く

環境の変化に柔軟に対応するためには、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ておかなければならない。残念ながら、ものづくりの基盤技術でありながら、溶接プロセスはいまだノウハウと経験に頼る技術である。それにも関わらず熟練技術者が減少し、ものづくりの現場では60歳を越える熟練技術者を再雇用する状態である。いま日本のものづくりにとって必要なのは、溶接技能の伝承よりも科学に基づく溶接技術である。もちろん、溶接以外の周辺技術の進歩に対しても、それを阻害せず、むしろ活かすためには科学に基づく溶接技術が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、アーク溶接プロセスで生じる動的な金属蒸気の挙動とそれに伴うアークプラズマ温度の時間変化、及びそれらと溶融池形状の関係を実験的に把握するとともに、本研究グループによるアーク溶接プロセスの非定常数値解析モデルに金属蒸気の混入を考慮に加えて拡張し、実験結果と比較検討することにより、アーク溶接プロセスにおけるプラズマ中の金属蒸気の種類および密度の動的な空間分布変化、アークプラズマ温度分布の動的変化、材料への入熱密度分布の動的変化、溶融池形成の時間変化を定量的に明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、アーク溶接プロセスの中でも生じる現象が比較的単純で取り扱いやすいガスタングステンアーク (Gas Tungsten Arc = GTA) 溶接法を取り上げ、静止 GTA 溶接プロセスで生じる現象の時間的変遷を実験的ならびに数値的に解析する。

(1) 静止 GTA 溶接プロセスで生じる動的な金属蒸気の挙動とそれに伴うアークプラズマ温度の時間変化を実験的に把握するため、高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを構築する。本システムは、イメージング分光器と高速度デジタルビデオカメラから構成され、選定する線スペクトルの2次元画像の高速動画によりアークプラズマ中の原子やイオンの空間密度分布およびプラズマ温度分布の時間変化を測定することが可能になる。

(2) 構築した高分解能・高速度アークプラズマ診断システムの測定精度を確認するため、十分に水冷された銅板を陽極として GTA を発生させ、金属蒸気の混入のない静的な (時間的に定常な) アークプラズマの温度分布を測定する。

(3) 高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いて静止溶接現象の動的変化を観察する。溶融池から発生する金属蒸気を含めて原子やイオンの線スペクトルの2次元強度分布の時間変化を解析し、アークを発生させてから十分に溶融池が形成されるまでのプラズマ中の金属蒸気の種類および密度の動的な空間分布変化、アークプラズマ温度分布の動的変化を測定する。さらに、時間ごとの溶込み形状を測定する。

(4) 我々の研究グループで実績があり、また世界的に独創性が認められているGTAの数値解析モデルに金属蒸気の混入を考慮に加えるよう拡張する。GTAの数値解析モデルは「タングステン電極-アークプラズマ-溶融池-母材」を同時に一体化して計算するモデルであり、各領域相互のエネルギーバランス、運動量バランス、およびアーク電流の保存が十分に反映された結果を知ることができる。

アークスタート時の母材 (陽極) の温度は室温とし、スタートの瞬間に安定したアークプラズマが発生するものと仮定する。アークによって加熱される母材は時間とともに温度上昇し、融点以上で溶融池が形成される。さらに加熱されると、金属蒸気が発生する。

これらを時間ステップごとに繰返し計算し (SIMPLEC法)、アーク発生から溶融池が十分に形成されるまで、金属蒸気の種類及び密度の動的な空間分布変化、アークプラズマ温度分布の動的変化、材料への入熱密度分布の動的変化、溶融池の動的変化を時間ごとの数値計算シミュレーションとして出力する。

(5) 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、プラズマ中の金属蒸気の種類および密度の動的な空間分布変化、アークプラズマ温度分布の動的変化、材料への入熱密度分布の動的変化、溶融池形成の時間変化を定量的に明らかにし、静止GTA溶接プロセスにおける熱源としてのアークプラズマの役割とそれに及ぼす金属蒸気の影響の明確化、ならびに溶融池の形成を支配する諸因子の抽出と整理を行う。

## 4. 研究成果

(1) 静止 GTA 溶接プロセスで生じる動的な金属蒸気の挙動とそれに伴うアークプラズマ温度の時間変化を実験的に把握するため、図1に示す高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを構築した。対物光学系、イメージング分光器、高速度デジタルビデオカメラから構成される。時々刻々と変化する静止 GTA 溶接プロセスの2次元イメージを分光器によって波長分光した後、2次元分光イメージを高速度デジタルビデオカメラで記録し、それらのデジタル画像をコンピュータで解

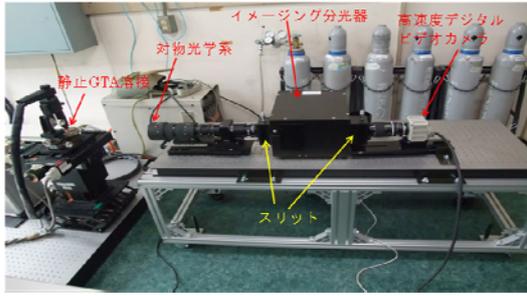


図1 高分解能・高速度アークプラズマ診断システム

析した。

(2) 構築した高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いて、静止GTA溶接プロセス中に発生する金属蒸気の動的な密度分布測定を実施するため、まずは、解析時に必要とされるプラズマ温度分布計測手法を検討した。計測対象は、水冷銅陽極を用いたアルゴン静止GTAプラズマとし、金属蒸気の発生のない単純な場を選定した。プラズマ中の原子あるいはイオンが放射する線スペクトルからプラズマ温度を測定する手法として、Fowler-Milne法、ArII/ArI二線強度比法、ArI/ArI相対強度比法の3種類を選定した。個々について計測・解析した結果、ArII/ArI二線強度比法は高精度な温度測定が実行できるもののイオンが十分に存在する高温領域のみに限定され、一方、ArI/ArI相対強度比法は温度測定の誤差が極めて大きく、金属蒸気の密度分布解析には不適切であることが明らかになった(図2参照)。したがって、広範囲な温度領域において比較的精度よく安定して温度測定が実行できるFowler-Milne法が最も本研究の目的に適していることが明らかになった。

図3(b)は、Fowler-Milne法によって測定したGTAプラズマの温度場イメージングの結果

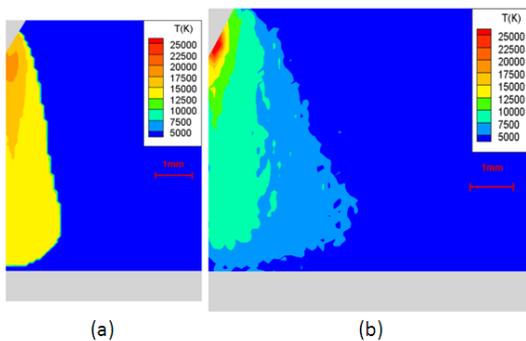


図2 高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いたアルゴンGTAプラズマの温度場イメージング

(a) ArII/ArI二線強度比法, (b) ArI/ArI相対強度比法

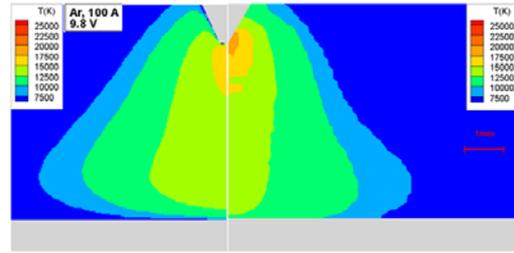


図3 高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いたアルゴンGTAプラズマの温度場イメージングと数値計算シミュレーションの比較

(a) 数値計算シミュレーション結果, (b) Fowler-Milne法

果であるが、同図(a)の数値計算シミュレーション結果(M. Tanaka and J.J. Lowke: J. Phys. D: Appl. Phys., 40, 2007, R1-R23)と極めてよく一致していることがわかる。

(3) 高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いて、ヘリウム静止GTA溶接プロセスにおける溶接アーク現象を分光デジタル動画として取り込むことにより、熔融池表面から蒸発してアークプラズマ中に混入する金属原子および金属イオンの動的変化を観察することに成功した。特に、ステンレス鋼を溶接した場合には、合金元素である鉄、クロム、マンガン等が熔融池表面から同時に蒸発してプラズマ中に混入するが、そのダイナミックな挙動をそれぞれの元素ごと、かつ、原子とイオンを分離して観察することに成功した。この結果、図4に示すように、ステンレス鋼の静止溶接においては、熔融池表面から主として鉄、クロム、マンガンが蒸発するが、クロムとマンガンはプラズマの巡回流動によってアーク柱を迂回しながらタングステン電極まで到達し、その後、陰極ジェットに乗ってプラズマ中心部に輸送されることが明らかになった。一方、鉄は、ほとんどが陰極ジェットによってアーク外周辺へ吐き出され、プラズマの巡回流動によってタングステン電極の方へ輸送されないことが明らかになった。

以上により、シールドガスに純ヘリウムを用いた場合では、ステンレス鋼をGTA溶接した際に発生する金属蒸気がアークプラズマ内に侵入するものの、元素の種類によってア

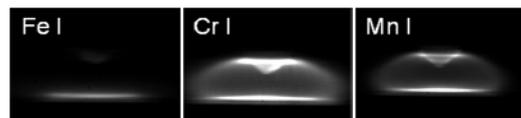


図4 ヘリウム静止GTA溶接プロセスにおけるアークプラズマ中の金属蒸気の分光デジタル動画

ークプラズマ中で分離されることが世界で初めて発見された。鉄、クロム、マンガンは、ほぼ同じ質量の元素でありながら、アークプ

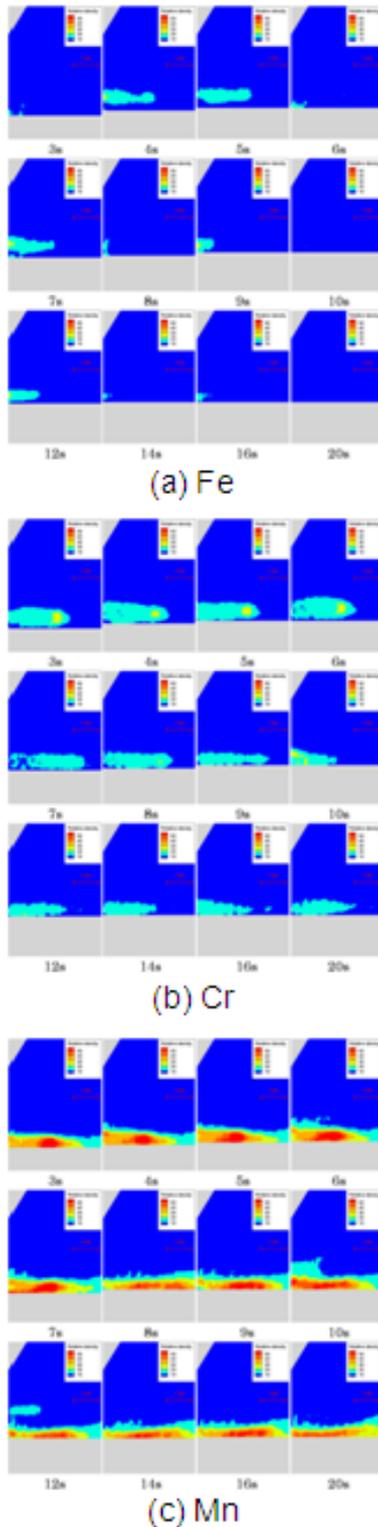


図5 高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いた Ar+50%He 混合静止 GTA 溶接におけるプラズマの鉄、クロム、マンガンの金属蒸気密度場イメージング(アーク点弧 3 秒後から 20 秒後までの時間変化)

ラズマ中での挙動の違いは劇的である。

さらに、プラズマ温度と金属線スペクトルの動的变化を総合的に解析することにより、ステンレス鋼の静止 GTA 溶接プロセス中に溶融池表面から発生する鉄、クロム、マンガンの空間密度分布の時間変化を測定することに成功した。プラズマ温度の測定と金属蒸気密度の測定を同時に実施するため、シールドガスにはアルゴンとヘリウムが 1 対 1 となる混合ガスを選定した。

Ar+50%He 混合 GTA プラズマでは、前述のような元素分離は観察されなかったが、図 5 に示すように、マンガン、クロム、鉄の順にプラズマ中での蒸気濃度が高くなることが明らかになった。また、図 6 に示すように、金属蒸気の濃度上昇に伴い、プラズマ温度が徐々に低下することが実験的に初めて明らかにされた。

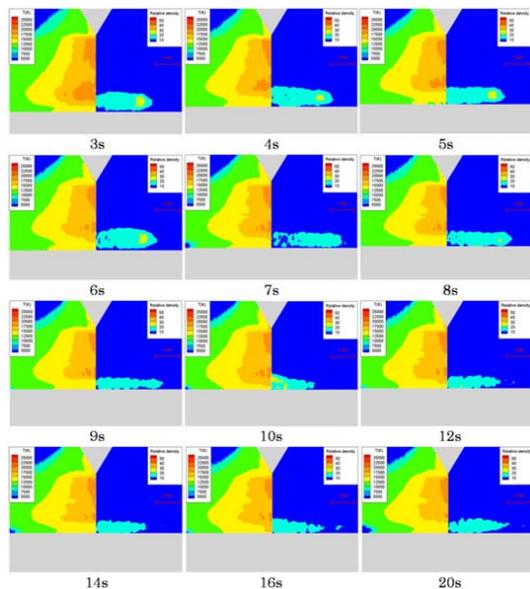


図6 高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いた Ar+50%He 混合静止 GTA 溶接におけるプラズマの温度場とクロム蒸気密度場のイメージング(アーク点弧 3 秒後から 20 秒後までの時間変化)

(4) 金属蒸気の混入を考慮に入れた、「タンダステン電極-アークプラズマ-溶融池-母材」を同時に一体化して計算する静止 GTA 溶接プロセスの非定常数値解析モデルを構築した。その結果、アーク発生から溶融池が十分に形成される 20 秒間、金属蒸気密度の動的な空間分布変化、アークプラズマ温度分布の動的变化、材料への入熱密度分布の動的变化、溶融池の動的变化を時間ごとの数値計算シミュレーションとして出力することに成功した。また、本シミュレーション結果と溶融池の溶込み形状(実験結果)を比較した結果、極めてよい一致を示した。

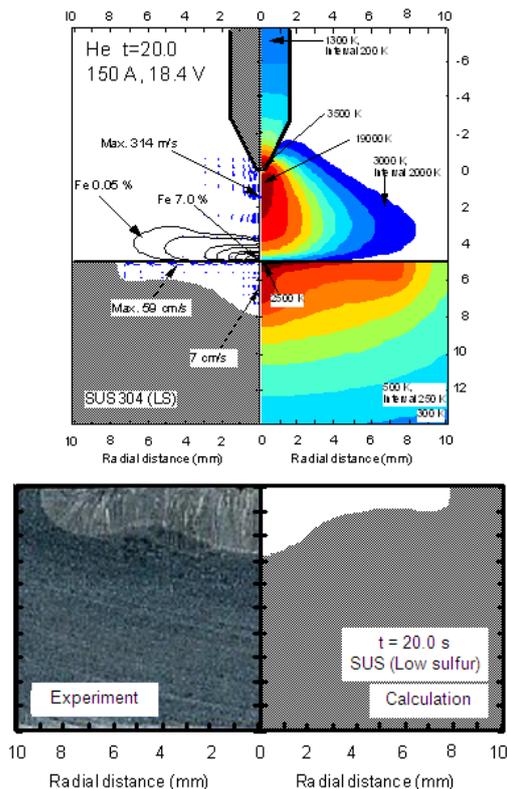


図7 「タングステン電極-アークプラズマ-溶融池-母材」を同時に一体化して計算するヘリウム静止 GTA 溶接プロセスの数値計算シミュレーション結果と実験結果（溶融池溶込み形状）との比較

図7は、ヘリウム静止 GTA 溶接プロセスの数値計算シミュレーション結果である。高速の陰極ジェットによって鉄蒸気がアーク外周辺へ吹き出されていることがわかる。前述の高分解能・高速度アークプラズマ診断システムを用いた実験観察でも鉄がアーク外周辺へ吹き出される結果が得られていたが、本数値計算シミュレーション結果と極めて良い一致を示した。

また、溶融池からの金属蒸気の発生のない場合を想定してシミュレーションした結果、金属蒸気の発生によってアークプラズマ温度が3千度程度低下することが明らかになり、前述の実験結果と良い一致を示した。

(5) 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、プラズマ中の金属蒸気の種類および密度の動的な空間分布変化、アークプラズマ温度分布の動的変化、材料への入熱密度分布の動的変化、溶融池形成の時間変化を定量的に明らかにした。

また、静止 GTA 溶接プロセスにおける熱源としてのアークプラズマの役割とそれに及ぼす金属蒸気の影響の明確化、ならびに溶融池の形成を支配する諸因子について次のよ

うに整理を行った。

①GTA 溶接現象は「タングステン電極-アークプラズマ-溶融池-母材」がエネルギー的にも力的にも密接に相互作用し合って形成されている。

②母材はそれ自身がアーク放電の一方の「電極」として機能している。アーク放電はガス中の電子やイオンといった荷電粒子の流れによって形成されているため、アーク溶接プロセスの熱効率の高さは、まさにこの荷電粒子を介した電極特有のエネルギー輸送にある。

③GTA 溶接における溶融池形成は、「プラズマ気流によるせん断力」、「浮力」、「アーク電流に起因する電磁気力」、「表面張力勾配によるマランゴニ力」の4つの微妙な力のバランスによって溶融池内のマクロな対流が決定され、その対流による熱輸送によって支配されている。

④GTA 溶接中の金属蒸気の発生には溶融池の表面温度が深く関与している。したがって、発生する金属蒸気の種類および密度は金属蒸気分圧に大きく依存する。また、金属蒸気の発生によってプラズマ温度が低下するとともに、溶融池近傍の電流密度が低下し、入熱密度分布がブロードになる。

⑤プラズマ中の金属蒸気は、原則、高速の陰極ジェットによってアーク外周辺へ吹き出される。ただし、シールドガス等の溶接条件の設定によっては、プラズマ旋回流が発生し、その流動に乗ってアーク柱を迂回しながらタングステン電極まで到達する元素分離現象が見られる。

## 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10件)

① Kentaro Yamamoto, Manabu Tanaka, Shinichi Tashiro, Kazuhiro Nakata and Anthony B. Murphy, Metal Vapor Behavior in GTA Welding of a Stainless Steel Considering the Marangoni Effect, IEEJ Trans., 査読有, 4巻, 2009, 497-503.

② Manabu Tanaka, Kentaro Yamamoto, Shinichi Tashiro, Kazuhiro Nakata, Masao Ushio, Kei Yamazaki, Eri Yamamoto, Keiichi Suzuki, Anthony B. Murphy and John J. Lowke Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding, Welding in the World, 査読有, 52巻, 2008, 82-88.

③ Kentaro Yamamoto, Manabu Tanaka, Shinichi Tashiro, Kazuhiro Nakata, Kei Yamazaki, Eri Yamamoto, Keiichi Suzuki and Anthony B. Murphy, Numerical simulation of metal vapor behavior in arc plasma,

Surface & Coatings Tech., 査読有, 202 巻,  
2008, 5302-5305.

〔学会発表〕(計 7 件)

①Manabu Tanaka, Influence of Metal Vapour on Arc Welding, オーストラリア溶接技術協会(WTIA), 2009 年 7 月 21 日, アデレード大学, アデレード, オーストラリア.

②山本健太郎, ステンレス鋼の静止ティグ溶接における多元金属蒸気挙動の数値解析, 溶接学会平成20年度秋季全国大会, 2008年9月10日, 北九州国際会議場, 北九州市.

③Kentaro Yamamoto, Numerical Simulation of Metal Vapor Behavior in Arc Plasma, 6<sup>th</sup> Asian-European Int. Conf. Plasma Surface Eng. (AEPSE2007), 2007 年 9 月 27 日, やすらぎ伊王島, 長崎.

## 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

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

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

ANTHONY B. MURPHY

オーストラリア連邦科学産業研究機構  
(CSIRO)・産業物理部門・主席研究員