

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656462

研究課題名（和文） 高速クリーンアーク溶接プロセス実現のための熱と力の分離制御技術の創成

研究課題名（英文） Development of control technology for separation of heat and force for achievement of clean arc welding process with high speed

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）：ものづくりにおける国際競争力の向上のため、GTA溶接と同等の溶接部が得られる高速クリーンGMA溶接プロセスの開発が待ち望まれている。その実現を目指して、本研究では、2台の電源と電極ワイヤへの2カ所の給電により、溶接として必要な熱の制御と、アークの安定化として必要な力の制御を分離するための科学を明らかにするとともに、高速クリーンGMA溶接プロセスを実現するための、熱と力の分離制御技術を創成した。

研究成果の概要（英文）：A high speed and clean GMA welding process is strongly demanded by Japanese manufacturing industries due to improvement of global competition. In order to solve this subject, this study developed a control technology for separation of heat and force, for achievement of the high speed and clean GMA welding process which consists of two electric power sources and two contact tubes, through understanding of its scientific mechanism.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

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：接合・溶接

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接プロセスには、主に、タングステンを電極として用いる非消耗電極型のGTA（ガスタングステンアーク）溶接と、スチール等の細線ワイヤを電極として用いる消耗電極型のGMA（ガスマタルアーク）溶接がある。一般に、GTA溶接は純アルゴン雰囲気下で実行するため、高品質でクリーンな溶接部が得られるものの、低速で能率が極めて悪い。一方、GMA溶接は電極ワイヤが充填材となるため高速で能率が高く工業的に有用であるものの、アーク安定化の理由でアルゴンに酸素や炭酸ガスを混合した雰囲気下で実行するため、溶接部の品質が低下し、特に低温での靱性が著しく低下する。このような背景の

下、ものづくりにおける国際競争力の向上のため、GTA溶接と同等の溶接部が得られる高速クリーンGMA溶接プロセスの開発が待ち望まれている。

GMA溶接プロセスのクリーン化に関する研究では、国内外の研究動向として、物質・材料研究機構による同軸複層型の電極ワイヤの提案がある。融点の違う二つの材料を同軸複層化する電極ワイヤの試作によって、ジュール加熱により軟化したワイヤ先端部の揺動が抑制され、純アルゴン雰囲気下での安定したGMA溶接プロセスの達成に成功した。しかし、同軸複層型電極ワイヤの製造という工業的な点で大きな問題を抱えている。一方、申請者は、プラズマGMA溶接プロセスを提案

し、別電源でシールドガスをプラズマ化することにより電極ワイヤを電磁ピンチ力によって拘束することに成功し、純アルゴン雰囲気下でのクリーンGMA溶接プロセスを達成した。しかし、トーチ構造が著しく複雑になると共に、トーチそのものが大型化し、同様に工業的な面で大きな問題を抱えている。そこで、申請者は、この研究成果を踏まえ、高速クリーンGMA溶接プロセスを実現するための、多段給電による熱と力の分離制御技術の着想に至った。

すなわち、純アルゴン雰囲気下でのGMA溶接では、母材表面に形成される複数の陰極点が高速で動き回るためアークプラズマが動的に変動するとともに、それに呼応して、ジュール加熱により高温になって軟化した突出し部での電極ワイヤの不規則な揺動が加わり、アークの不安定性が増幅されて、アーク溶接が不可能になる。このため、工業的には、溶融池表面での酸化物の形成によって実効仕事関数が低減し、陰極点挙動が抑制されるため、アルゴンと酸素あるいは炭酸ガスを混合したシールドガスを使用する。

一方、純アルゴン雰囲気下での安定なGMA溶接の実現には、高温により軟化した突出し部の揺動を抑制することが極めて効果的である。溶接アークには、毎秒数百メートルにも及ぶ高速のプラズマジェットが発生しており、これを巧く利用すれば、電極ワイヤの揺動を抑制する効果が期待できる。しかし、プラズマジェットの発生メカニズムが電極ワイヤ先端とアークプラズマとの界面近傍における電磁ピンチ力（ローレンツ力）にあるため、十分なプラズマジェットを発生させるためにはアーク電流を増加させる必要がある。ところが、アーク電流の増加は、突出し部でのジュール加熱の増加（電流の2乗に比例）を導き、電極ワイヤの溶融速度の極端な増加を導く。結果的に、十分な溶融池が形成されないのに、大量の溶接ビードが形成され、溶接ではなく肉盛り（表面改質）のプロセスとなる。したがって、アーク放電を応用したアーク溶接では、ジュール加熱による熱と電磁ピンチ効果による力は分離することが不可能であり、学術的にも、宿命的に限られた範囲内で最適化が図られてきた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、溶接電源からの電力以外に、別電源である、プラズマジェット誘起電源からの電力を電極ワイヤへ別途供給することにより、溶接として必要な熱の制御と、アークの安定化として必要な電磁ピンチ力の制御を分離することを提案するものである。すなわち、2台の電源と電極ワイヤへの2カ所の通電により、溶接として必要な熱の制御と、アークの安定化として必要な力の制

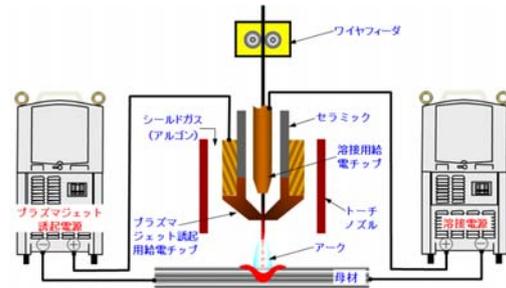


図1 二段給電式 GMA 溶接装置の構成

御を分離するための科学を明らかにするとともに、高速クリーンGMA溶接プロセスを実現するための、熱と力の分離制御技術の創成を目的とする。

3. 研究の方法

構築した実験装置を図1に示す。電源には、熱の発生を担当する溶接電源と、力の発生を担当するプラズマジェット誘起電源の2台から構成されており、両電源とも陰極は母材に接続する。溶接電源の陽極は、溶接用給電チップに接続し、他方、プラズマジェット誘起電源の陽極は、プラズマジェット誘起用給電チップに接続する。溶接電源の外部出力特性は、GMA溶接の安定性を考慮して、定電圧特性とし、逆に、プラズマジェット誘起電源の外部出力特性は、ローレンツ力の安定性を考慮して、定電流特性とした。シールドガスとしては、純アルゴンを選定した。

次に、本研究実施のための必須事項となる二段給電可能なGMA溶接トーチの試作を行った。すなわち、従来の自動機用GMA溶接トーチを改造し、プラズマジェット誘起用給電チップを内蔵させた（図1参照）。具体的には、トーチ本体に絶縁用のセラミックガイドを装備できるように改造を加え、このセラミックガイドを通して、溶接用給電チップの下流域にプラズマジェット誘起用給電チップを装着できるように工夫した。また、プラズマジェット誘起用給電チップは、その先端部のみ取り付け交換できるように工夫した。この理由は、第2段目となる給電点の空間的位置をフレキシブルに変更可能にするためと、消耗品として交換可能にするためである。さらに、プラズマジェット誘起用給電チップの外側に、シールドガスを安定して供給するためのノズルを装着した。

4. 研究成果

まず、母材としては、一般的な軟鋼板を選定し、電極ワイヤとしては、軟鋼用ソリッドワイヤ（YGW11等）を選定した。基本溶接条件としては、電極ワイヤ送給速度を毎分8000mm（溶接電流にして200A程度）とし、溶接速度（トーチ移動速度）を毎分500mmとした。この条件でビード・オン・プレート溶

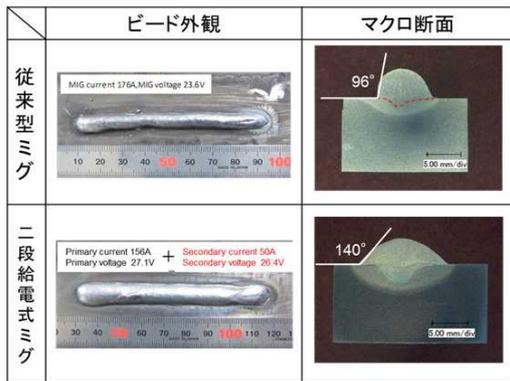


図2 従来式と二段給電式のビード外観および断面の比較

接を行い、プラズマジェット誘起電流を変化させると共に、その給電点の空間位置を変化させた。溶接アーク現象は、現有の高速度デジタルビデオカメラによって観察するとともに、溶接電流、プラズマジェット誘起電流、およびアーク電圧の測定を行った。

図2に従来のGMA溶接（ミグ溶接）と二段給電式GMA溶接（ミグ溶接）のビード外観およびその断面写真を示す。従来のGMA溶接の場合と比較して、二段給電式では溶込みが深く、ぬれ性が格段に向上していることがわかる。従来のGMA溶接ではビード断面のフラック角が96°であるのに対し、二段給電式GMA溶接ではそれが140°に達しており、明確なぬれ性の向上が見られる。図3にそれぞれの場合の電流・電圧波形を示す。これを見ると、双方とも主なアークの発生を担う電流はベース電流約80A、ピーク電流約480Aのパルス波形になっている。この時、従来式GMA溶接では、電流の平均値が176Aであった。一方、二段給電式GMA溶接では、第一電流（溶接電流）の平均値が156A、第二電流（プラズマジェット誘起電流）の平均値が50Aであり、トータル206Aであった。これは、同じ溶接ワイヤの送給速度でありながら、トータルの電流が従来の場合に比べて30A増加していることを示している。

図2で示した、二段給電式におけるぬれ性の向上が溶滴の保有熱量増加に伴う溶滴の温度上昇によるものかを確認するため、溶滴の温度測定を実施した。図4に高速度二色放射温度計測システムを示す。対物レンズから

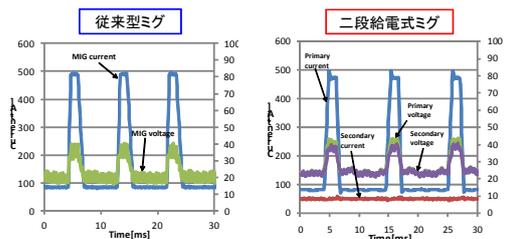


図3 電流・電圧波形

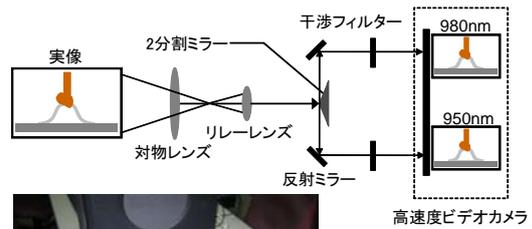


図4 高速度二色放射温度計測システム

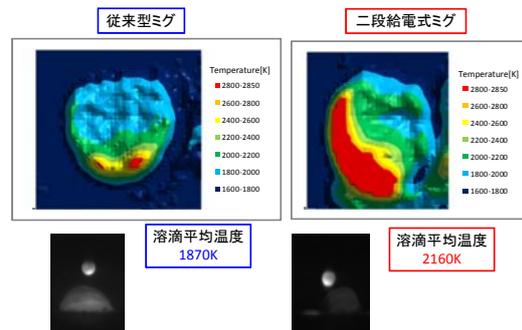


図5 従来式GMA溶接と二段給電式GMA溶接における溶滴の表面温度

取り入れた像を二分割し、それぞれ波長980nmと950nmのバンドパスフィルターを透過させることにより、分光画像としてデジタル高速度ビデオカメラに取り込んだ。二波長、すなわち二色の分光画像が同時に高速度で得られるため、プランクの放射則を通じてそれぞれの強度比から、被写体の表面温度の変化を動的に計測することが可能になる。今回は、毎秒500コマの速度で分光画像を取り込んだ。

図5に従来のGMA溶接と二段給電式GMA溶接における溶滴の表面温度分布を示す。従来のGMA溶接では融点に近い2,000K弱の温度域が広く分布しているのに対し、二段給電式GMA溶接では2,200K以上の高温部が広く分布し、溶滴全体が高温になっていることが明らかになった。この時に溶滴の平均温度は、従来のGMA溶接で1,870K、二段給電式GMA溶接で2,160Kであり、約300Kに達する溶滴の温度上昇が見られた。したがって、図2の二段給電式におけるぬれ性の向上は、溶接ワイヤ送給速度の増加を抑えつつ、溶滴の温度上昇、すなわち、溶滴の保有する熱量が上昇し、その結果、溶融池の幅が広がり、かつ、表面張力が低下したためであると考えられる。他方、図2の二段給電式における溶込み深さの向上は、同じく溶接ワイヤ送給速度の増加を抑えつつ、トータルの電流値の増加により効率

よくプラズマジェットが誘起され、その結果、アーク力の増加に伴い溶融池が深くなったためであると考えられる。

以上の知見を定量的に解明するため、我々の研究グループのオリジナルで実績があるGMAの数値解析モデルに多段給電を考慮に加えるよう拡張した。本モデルは「電極ワイヤ-アークプラズマ-溶融池」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る。電極ワイヤ突出し部でのジュール加熱や高温プラズマの発生など熱に寄与する第一電流（溶接電流）の割合と、電磁ピンチ力に寄与する第二電流（プラズマジェット誘起電流）の割合を定量的に出力した。

その結果、従来のGMA溶接と二段給電式GMA溶接の概略図は図6に示されるように、従来式GMA溶接では単一の突出しの中に単一の電流が流れるのに対し、二段給電式GMA溶接では上流側の突出しの中に第一電流（溶接電流）のみ、下流側の突出しの中に第一電流（溶接電流）と第二電流（プラズマジェット誘起電流）の和が流れることになる。計算上、同じアーク長であると仮定すると、突出し部でのジュール加熱に差が生じる。アークからの熱輸送と合わせた溶滴の保有熱量は、従来式GMA溶接で $9.3\text{J}/\text{mm}^3$ 、二段給電式GMA溶接で $11.6\text{J}/\text{mm}^3$ となり、二段給電式GMA溶接では溶滴の保有する熱量が増加することが定量的に明らかになった。また、これらの保有熱量の差は、実験測定した溶滴の表面温度の差と物理量的にはほぼ一致した。

以上により、2台の電源と電極ワイヤへの2カ所の通電により、溶接として必要な熱の制御と、アークの安定化として必要な力の制御を分離するための科学を明らかにするとともに、高速クリーンGMA溶接プロセスを実現するための、熱と力の分離制御技術を創成した。

今まで、アーク溶接は一つの電源によって構成され、高温プラズマなど熱の発生と電磁ピンチ効果など力の発生は一つの電源によって賄われていた。熱の増加には必ず力の増加も付随し、その結果として、限られた条件範囲においてのみ溶接が可能であった。本研究の成果は、世界で初めて熱と力の分離制御の手法を見出したものである。前にも述べた

とおり、アーク放電を応用したアーク溶接では、熱と力は分離することが不可能であり、学術的にも、宿命的に限られた範囲内で最適化が図られてきた。本研究では、根本からその宿命を打ち破り、新しいアーク溶接制御の可能性を提案するものである。

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）

〔学会発表〕（計1件）

- ① 片山翼、田代真一、田中学、二段給電式ミグ溶接プロセスの開発、溶接学会平成23年度秋季全国大会、2011年9月7日、伊勢市

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

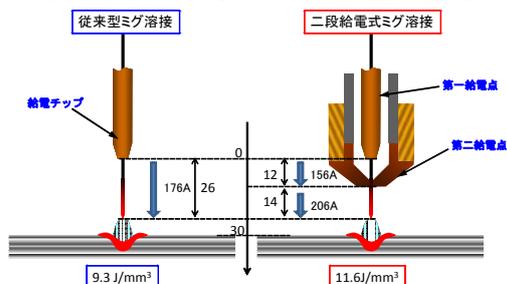


図6 シミュレーションによる溶滴保有熱量の計算結果