

PTA 溶接制御システム開発 (第一報) -溶接条件に及ぼす溶融池とアークの形状変化について- Development of PTA Welding Control System (Part1) -Relation between PTA Welding Conditions and Shape Variation of Welding Pool and Arc-



技術開発センター
商品・生産技術開発班
主任 博士(工学) 牟用煥
Yong-Hwan Mo

技術開発センター
商品・生産技術開発班
課長 古田 博昭
Hiroaki Furuta

技術開発センター
商品・生産技術開発班
主任 木村 健治
Kenji Kimura

技術開発センター
商品・生産技術開発班
主任 嵩 純孝
Sumitaka Take

技術開発センター
商品・生産技術開発班班長
博士(工学) 姜 孝京
Hyo-Gyoung Kang

要 旨

生産設備の長寿命化やメンテナンスフリーを目的として、高い耐熱性、耐腐食性、耐摩耗性材料の表面処理が行われている。その表理処理法の一つとして、高性能材料を様々な形状に被覆可能な PTA 溶接法がある。しかし、超耐久性の高合金材料の PTA 溶接に限っては、作業者の技量に頼る面が多く溶接技術はまだ確立されていない。フジコーでは、PTA 溶接製品の更なる品質安定性と生産効率を大幅に向上することを最終目的にし、PTA 溶接の監視制御システムの開発を行なっている。本稿では、監視制御システム開発の第一段階として、溶接条件の違いによる溶融池とアークの形状変化に関して画像化及びデータ化に成功したので報告する。

Synopsis:

To increase using life for production facility and to obtain maintenance-free, the surface treatment has been introduced by using the materials with the high temperature resistance, high corrosion resistance, and high wear resistance. One of the surface treatment methods, plasma transferred arc (PTA) welding process can be coated the high characteristic materials on the base metal with various shapes. However, in the case of the PTA welding using of high-alloy materials with the super durability, the quality of welding products had been dependent on an ability of workers, and the PTA welding technology has not been established yet. We are developing the monitoring and control system for the PTA welding process as the final propose to improve the stability in quality and to increase production efficiency. As the first stage in order to develop welding monitoring and control system, we reports that the making to data and imaging for the shape variation of the welding pool and arc on the difference of the welding conditions are successful.

1. 緒言

国内の鉄鋼メーカーでは国際競争力向上を背景に、鋼材の高性能化、高機能化への取組みが展開されて

いる。これに伴い、製造過程で使用される消耗機器も、高機能製品および高性能製品が求められている。ごみ焼却プラントでは、ダイオキシン類排出抑制

のための燃焼温度の高温化(1997年 800℃以上の規制)が義務付けられている。近年では、エネルギー変換効率を高めるため、更に燃焼温度を高温化する傾向があり、これまで以上に、生産設備の高寿命化への要求が強くなっている。

このような状況下で使用される材料には、耐熱性・耐摩耗性・耐腐食性を同時に満足する事が必要不可欠である。このため、上記設備類の金属表面への溶接による表面処理が広く行われているが、一般的な材料の表面処理では十分な耐用が得られていないのが現状である。過酷な使用条件下で十分な耐用を得るために、鉄やニッケルをベースにクロム、モリブデン、タングステンを合金化した材料や、その合金に硬質の炭化物を複合化した材料が使用されている。しかし、高合金になると溶接の難易度が高くなるため、熟練した技能工に頼る面が大きく、生産性の高い溶接技術が確立されていないのが現状である。高特性材料の表面処理において、低コストで高生産性な溶接技術の確立が可能となれば、鉄鋼分野や環境分野における生産設備の表面処理ニーズに十分応えることができる。

当社では、従来は表面処理が非常に困難であった超耐久性の高合金材料の PTA 溶接による表面改質技術及び監視制御システムの開発を実施している。これにより品質や技能面での問題点が解決でき、溶接の困難な材料でも安定した表面処理が可能となる。具体的には、表面処理製品の品質に関係の深い溶融池と溶接アークの状態を動画で監視しながら、各々の状態に影響する溶接電流、電圧、送り速度、予熱温度、シールドガス等の様々な溶接条件を適切な管理範囲内に自動調整するシステムの開発を進めている。この溶接制御システムが確立できれば、PTA 溶接による表面処理製品を効率的に安定した品質で製造することが可能となる。

そこで本報では、第一報として溶融池と溶接アークの形状を観察するための手法と、その形状に及ぼす溶接条件の違いによる影響について調査した。さらに開発中の画像処理システムによるアーク画像解析を実施した。

2. 溶接画像処理の開発

2.1 PTA 溶接法の概要

Fig.1 に PTA 溶接の原理を示す。PTA 溶接の原理はタングステン電極とトーチとの間にパイロットアークを発生させ、その外周にプラズマガスを供

給し、タングステン電極と被加工物の間にプラズマトランスファアークを発生させる。そのアーク中にノズルから溶接材料の粉末を送給し母材表面に融着させる方法である。

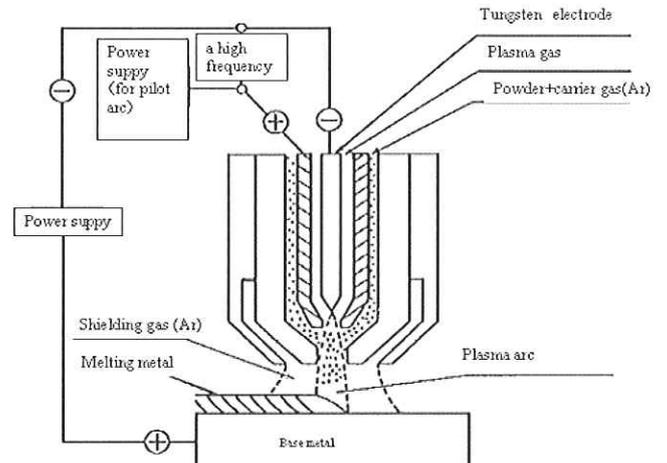


Fig.1 Schematic representation of PTA welding method

2.2 溶接技能者による監視作業

特殊溶接材料の PTA 溶接では、溶接アークと溶融池の状態の変化を作業者が監視し、その微妙な溶接状態の変化を制御している。また、溶接材料に粉末材料を使用しているため、高熱のアークに粉末が投入されるノズル近傍では、時折、溶融粉末の凝集体が発生しノズルが閉塞することがあるため、ノズルが閉塞しないように作業者が溶接アークを監視し、粉末除去工具を使用して、凝集体の除去作業を行っている。Fig.2 に溶融粉末の凝集体の発生状況とその除去の様子を示す。

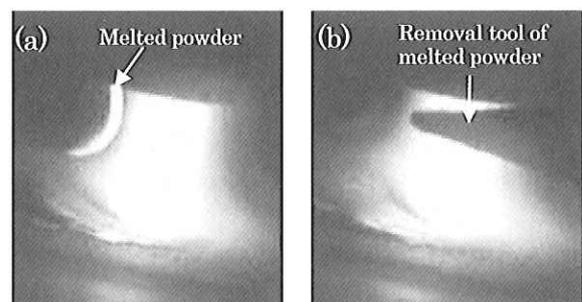


Fig.2 Photos showing welding monitoring tasks:

- (a) monitoring of melted powder,
- (b) removing of melted powder

これらの監視作業を確実に実施できない場合は、溶接欠陥であるブローホールや割れが発生し、その溶接欠陥の発生原因が明確にできないまま、再施工となることが多い。特に、施工が難しい特殊溶接材料の溶接においては、監視作業が重要な役割を果たしている。Fig.3にPTA溶接時に発生する欠陥の例を示す。

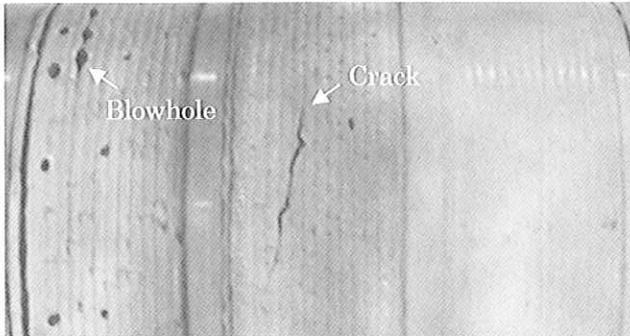


Fig.3 Photo showing example of defects occurred in PTA welding

2.3 溶融池とアークの監視制御システム

溶融池とアークの監視制御システムの概略図をFig.4に示す。カメラで撮影した溶接画像は、ライブサーバーで圧縮処理を行う。溶接条件と溶接データはセンサーからライブサーバーに送られて監視制御される。ライブサーバーにより溶接画像と溶接データの同時処理を行うことで、溶接画像と溶接条件などの時間の同調が可能となり、それらの情報をPC上に映像化する。さらに撮影した溶融池とアークの画像処理を行い、溶接条件を管理する。具体的には、良好なアークの画像を基準にし、その画像とリアルタイムの画像を比較して制御する方法である。

溶融池とアークを画像処理するため、カメラで鮮明な溶接画像を撮ることが重要である。そこで溶融池とアークの分光特性に合ったフィルターを使用して、不必要な波長を遮光する必要がある。今回、下記に示すフィルターを用いて、溶融池と溶接アークの画像を撮影し、適正なフィルターを選定した。

1)可視光透過フィルター

近赤外光以上長い波長の光を透過させないフィルター

2)ローパスフィルター

特定の波長以上に長い光を透過させるフィルター

3)バンドパスフィルター

特定の波長のみ透過させるフィルター

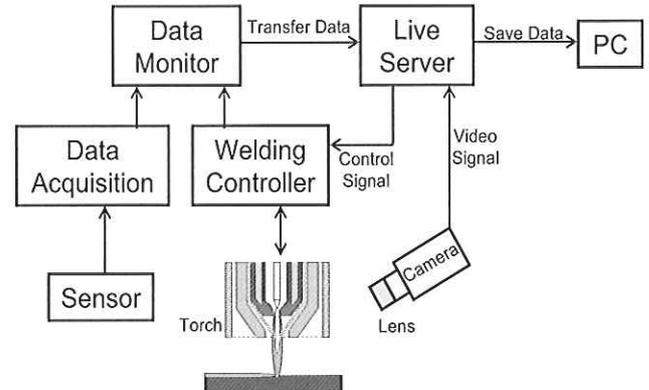


Fig.4 Schematic diagram showing monitoring and control system in PTA welding

2.4 溶接試験

溶接材料には耐摩耗性に優れる特殊高合金鋼を用い、SCM440（クロムモリブデン鋼）丸鋼材（Φ300mm×L600mm）を母材とした。溶接アークと溶融池の形状に及ぼす溶接条件の違いによる影響を調査するため、溶接電流を150A～200A、粉末供給量を7V～21V、アーク長を7mm～11mmに変化させたときの溶接アークと溶融池の形状をそれぞれ撮影し、その画像を解析して各溶接条件との関連性を調査した。溶接条件をTable1に示す。

Table1 Welding conditions for experimental test

Arc current (A)	Powder feed rate (V)	Arc length (mm)
200	7	9
200	14	9
200	21	9
150	14	9
175	14	9
200	14	7
200	14	11

3. 試験結果及び考察

3.1 溶接アークと溶融池の可視化

可視光透過フィルター及びローパスフィルター、バンドパスフィルターを用いて撮影した溶接画像をFig.5とFig.6に示す。

溶接アークは、紫外線から近赤外線の波長域で発光する、一方、溶融池は、近赤外線の波長域で発光する。アークの観察には可視光透過フィルターを用いた。さらにNDフィルターを用いてアークの輝度を減衰させることで、鮮明な画像を得ることが可能となった。NDフィルターとは、分光特性に影響を与えず、光量のみを少なくするものである。溶融池の画像は、ローパスフィルターを用いると、 $\lambda=900\text{nm}$ 以上の近赤外線を透過させることで形状が確認できた。さらに、バンドパスフィルターを用いて $\lambda=900\pm 10\text{nm}$ 範囲の近赤外線を取り入れることで、より鮮明な溶融池の画像を得ることが可能となった。

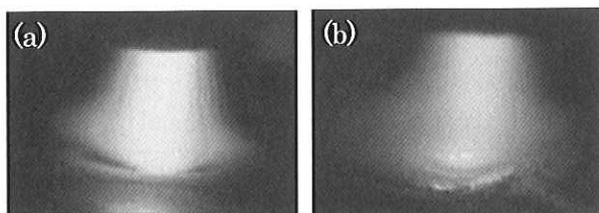


Fig.5 Effect of filter on welding arc image :
(a)visible light pass filter,(b) ND filter and visible light pass filter

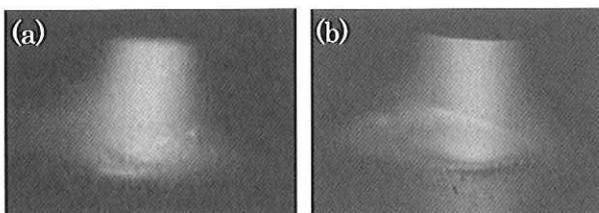


Fig.6 Effect of filter on welding pool image:
(a) low pass filter, (b) band pass filter

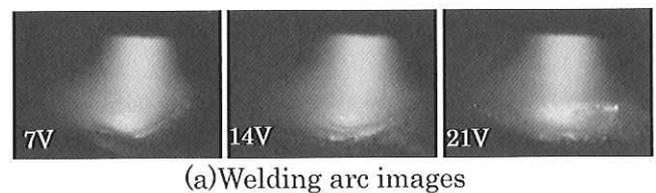
これは、特定波長以上の長い波長を透過するローパスフィルターでは、アーク中の近赤外線領域の波長の光がすべて透過してしまうので、溶融池の画像を鮮明に出来ないと考えられる。一方、特定の波長域の光を透過するバンドパスフィルターを用いた場合は、溶融池から発生する近赤外線領域の波長の光を多く取り込み、アークの近赤外線の波長の光を極力遮蔽することができたため、鮮明な溶融池の画像が観察できたものと思われる。

3.2 溶接アークと溶融池の形状に及ぼす粉末供給量の影響

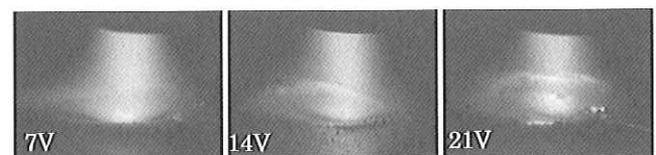
粉末供給量を変化させた場合のアークと溶融池

の形状を Fig.7 に示す。粉末供給量は、電圧調整により設定する。図中の左側から粉末供給量が 7V、14V、21V である。ここで、電圧が高いほど、供給量が多くなる。

粉末供給量を変化させても目視では溶接アークの形状の変化は認められなかった。そこで、溶接アークの画像解析を行った結果、粉末供給量が増加するとアークの面積が僅かではあるが増加する傾向が確認された。粉末供給量とアークの面積比の関係性を調査した結果を Table2 に示す。解析方法は、撮影したアーク画像からアーク光のみを抽出し、各溶接条件のアーク光の面積比を測定した。



(a)Welding arc images



(b)Welding pool images

Fig.7 Effects of powder feed rate on shape of welding arc and welding pool

Table2 Relation between powder feed rate and area ratio for welding arc and pool

Powder feed rate	7V	14V	21V
Welding arc area ratio	1.00	1.03	1.07
Welding pool area ratio	1.00	1.26	1.55

粉末供給量の増加とともに溶融池の面積が増加する傾向を確認した。また、粉末供給量が少ない場合は、母材の溶け込みが深くなり、粉末供給量が多いと一部の粉末が溶融せずに飛散する状況が観察できた。

3.3 溶接アークと溶融池の形状に及ぼす電流値の影響

溶接電流値を 150A、175A 及び 200A に変化させた場合のアークと溶融池の形状を Fig.8 に示す。図中の左側から電流値が 150A、175A、200A である。

溶接電流値の増加とともにアークの輝度が高くなり、発光面積が増加することが確認できた。溶接電流値とアークの面積比の関係性を調査した結果を Table3 に示す。電流値が増加するとともにアークの面積が増加することが確認できた。

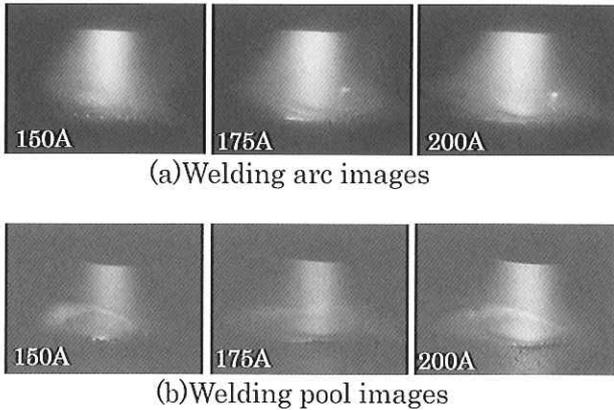


Fig.8 Effects of arc current on shape of welding arc and welding pool

Table3 Relation between arc current and area ratio for welding arc and pool

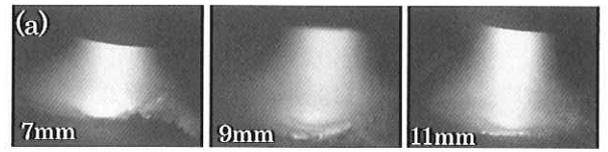
Arc current	150A	175A	200A
Welding arc area ratio	1.00	1.52	1.74
Welding pool area ratio	1.00	1.40	1.46

溶融池の形状は、電流値の低下とともに面積が縮小し、未溶融粉末の飛散が観察された。電流値の低下で未溶融の粉末が発生したのは、アークの熱量が低下したためだと考えられる。

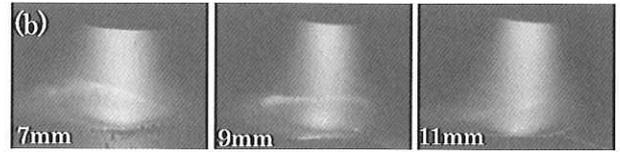
3.4 溶接アークと溶融池の形状に及ぼすアーク長の影響

アーク長を 7mm、9mm 及び 11mm に変化させた場合のアークと溶融池の形状を Fig.9 に示す。アーク長が長くなるとアーク中心部の高輝度域が溶融池付近で細くなることが確認できた。

アーク長とアークの面積比の関係性を調査した結果を Table4 に示す。アークの面積率は、アーク長の増加に伴い増加する。一方、溶融池は、アーク長の増加に伴い面積が縮小することが確認できた。



(a)Welding arc images



(b)Welding pool images

Fig.9 Effects of arc length on shape of welding arc and welding pool

Table4 Relation between arc length and area ratio for welding arc and pool

Arc length	7mm	9mm	11mm
Welding arc area ratio	1.00	1.04	1.35
Welding pool area ratio	1.45	1.33	1.00

4. 溶接アークの画像処理システムの開発

カメラで撮影した溶接画像をライブサーバーで圧縮処理を行いパソコンで画像比較処理を行うソフトを福岡県工業技術センターの協力で開発した。

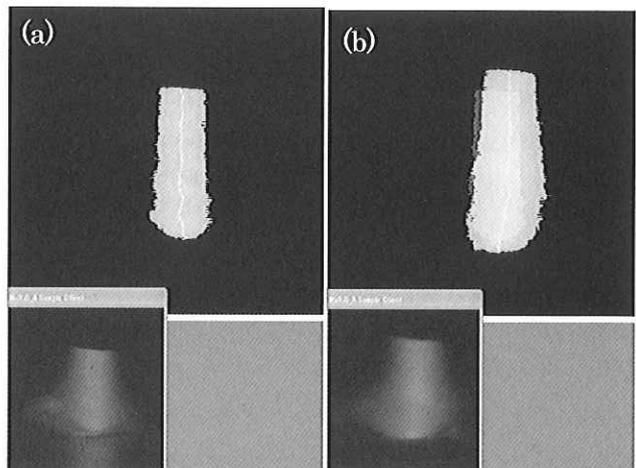


Fig.10 Welding arc images processing:
(a) criterion image, (b)comparison image

撮影した溶接アーク画像データの処理結果を Fig.10 に示す。図中の(a)は、安定した溶接条件のアーク光だけを抽出した画像である。(b)は溶接条件を

変えたときのアーク光と(a)の基準アーク光を重ね合わせて比較したものである。溶接条件を変えることで基準アーク光から形状や重心位置がずれていることがわかる。この画像処理における差異を用いることで、リアルタイムに基準アーク光と実際のアーク光を比較し、アーク異常の検知が可能になる。

5. 結言

PTA 溶接制御システム開発の第一ステップとして、アーク光と溶融池の観察手法の検討と各種溶接条件の変化によるアーク光と溶融池の形状変化の観察を行った結果、溶接状態を監視し管理する手法として、以下の知見を得た。

- 1) 可視光透過フィルターと ND フィルターを用いることで、アーク光形状の監視が可能である。また、干渉フィルターを用いることで、溶融池形状の監視が可能である。
- 2) 溶接条件の粉末供給量、電流値、アーク長の変化によるアーク及び溶融池の形状変化を、ライブサーバーを通じて画像で記録し、そのデータを解析することで、数値化することが可能である。
- 3) 画像処理システムの開発により基準アーク光と実時間のアーク光との比較が可能となり、今後アルゴリズム化が完成すれば溶接異常の検出と制御が可能となる。

今後は、画像処理システムの比較データを数値化する機能等を作り上げて、アークと溶融池を制御することにより、PTA 溶接製品を効率的に安定した品質で製造可能になると考えられる。

6. 謝辞

本研究は、中小企業産学官連携研究開発事業の一環で行ったものです。ここに改めて、御支援と御協力頂いた財団法人北九州産業学術推進機構殿と福岡県工業技術センター機械電子研究所殿へ厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 林 千歳、篠田 剛、加藤 喜久：粉体および粉末冶金 Vol.49 (2002) No.5 360-366
- 2) 小川洋司：溶接学会誌 Vol.72 (2003) No.6 470-473
- 3) 山崎 圭、泉谷 瞬：溶接技術 Vol.58 (2010) 126-130
- 4) 井上 勝敬：溶接学会誌 Vol.50 (1981) 1118-1124
- 5) Patee, H. E.：Welding Journal Vol.52(1973) No.5 297-308