# • • 小特集 材料プロセッシングを支える熱プラズマの新展開

# 6. 溶接・溶射アークの新展開

田 中 学,渡辺隆行<sup>1)</sup>,伊 佐 太 磨 喜<sup>2)</sup>,西 脇 英 夫<sup>3)</sup> 大阪大学,東京工業大学<sup>1)</sup>,(南レイテック<sup>2)</sup>,シンワ工業(株<sup>3)</sup> (原稿受付日:2006年5月15日)

本稿では、最近の科学技術の進歩に合わせて新展開を見せるアーク放電を利用した溶接および溶射技術に関 する最新動向について述べる。アーク溶接では、電極、アークプラズマ、および溶融金属をトータルシステムと して同時に解く数値解析シミュレーションを用いた複雑な溶融池形成現象を定量的に予測した計算例を紹介する とともに、パルスレーザ照射による光電効果を利用した溶接アーク作動中タングステン電極の実効仕事関数の測 定についても紹介する。また、溶接や切断用の新しいエネルギー源として開発された可搬式スチームプラズマ ジェットを紹介し、作動ガスと熱陰極の冷却を同時に兼ね備えたスチームジェットの有効性を示すとともに鋼板 の切断やフロンの廃棄物処理などその適用例も述べる。一方、溶射プロセスでは、対向2電極(ツインカソード 型もしくはツインアノード型)プラス1電極から構成される新提案のトーチを採用することにより実現された小 型・軽量の可搬式プラズマ溶射装置の開発について紹介する。小型化による消費電力の低減化および小型トラッ クへの装置搭載が可能になった利点とともに、現場での溶射施工の有効性を紹介する。

#### Keywords:

arc, atmospheric pressure, welding, cutting, thermal spraying, water, mobile, twin electrodes

#### 6.1 はじめに

19世紀初頭に英国のデイビー卿が電気アーク放電を発見 してから約200年[1],周知のように,電気アーク放電は熱 源としての安定性および制御性に優れ,また関連装置の安 価なことから様々な工業技術に応用されてきた.その中で も,電気アーク放電を利用した溶接,切断,溶射技術は,素 材から製品の組み立てに至るものづくりの中核を成す熱加 エプロセスとして,自動車,車両,船舶,機械,建築,橋 梁,エネルギープラント等あらゆる製造業分野に浸透し活 用されている.特に,この数十年の間にこれらの技術は急 速に成長してきた.本稿では,最近の科学技術の進歩に合 わせて新展開を見せる溶接,切断,溶射技術に関する最新 動向について紹介する.

## 6.2 溶接の新展開

近年,コンピュータの高速化,高感度 CCD カメラや高速 度デジタルビデオカメラ等の観察・計測機器の進歩によ り,アークプラズマの状態,電極や溶融池の挙動,溶接 ビードの形成など,高温における複雑な現象であるアーク 溶接プロセスのビジュアル(可視)化が目覚ましく進展し た.特に,ここ数年は,このビジュアル化がアーク溶接プ ロセスで生じる現象の定量的な理解に著しく貢献し,また それを基礎にしてアークの安定化やスパッタの低減など新 しい技術の開発,さらには溶接士の有する技能の数値化を 通じた教育システムの開発など,アーク溶接プロセスに関 わる科学,技術,教育の発展に重要な役割を果たすように なってきた[2].また,平成12(2000)年度から5年間にわた り新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託に より実施した「溶接技術の高度化による高効率・高信頼性 溶接技術の開発」プロジェクトは,このビジュアル化の進 展を国家プロジェクトとして強力に後押ししたといえる [3].

目覚ましく進展したアーク溶接プロセスのビジュアル化 の一翼を担うのが数値計算シミュレーションである.幅広 いものづくりの中で金属の接合部を形成するのにアーク溶 接プロセスが最もよく用いられている(Fig. 1). アーク溶 接プロセスは電気アーク放電を接合技術に応用したものだ が,その歴史は1880年代にまでさかのぼり[4],この間,高 能率、高品質、そして自動化・ロボット化をキーワードに 大きく成長を遂げた[5].しかしながら,未だ十分に制御・ 予測し得る技術にまで到達しているとはいい難い. それ は、アーク溶接プロセスが数ミリメートルという空間の中 で「電極-アークプラズマ-溶融金属-金属-母材」とい う固相,液相,気相,プラズマの4つの状態が混相して干 渉し合う複雑な高温プロセスであり、科学的に十分に理解 されていないためである. 例えば,同じ標準規格の素材(ス テンレス鋼SUS304)を用意して同じ条件でアーク溶接を実 行しても, Fig. 2に示すように, その接合部の断面形状が著

6. New Development of Welding and Thermal Spraying

TANAKA Manabu, WATANABE Takayuki, ISA Tamaki and NISHIWAKI Hideo corresponding author's e-mail: tanaka@jwri.osaka-u.ac.jp

Special Topic Article



Fig.1 アーク溶接プロセスの一例.



Fig. 2 アーク溶接によるステンレス鋼の接合部断面形状.

しく異なる場合がある.製品によっては断面形状の違いが 致命的なものとなり、また補修をするにもコストアップと 時間の超過につながる.ものづくりには、設計において求 められた接合部が確実に短時間で経済的に得られることが 非常に重要である.

このように複雑なプロセスにおけるエネルギーのバラン スや物質のバランスを定量的に理解するための一つの解決 方法として、よく知られたように、数値計算シミュレー ションが挙げられる. 最近, アーク溶接プロセスを「電極 - アークプラズマ - 溶融金属 - 母材」からなるトータルシ ステムとして捉えて、各々の領域のエネルギーバランスや 物質のバランスを考慮に入れた電磁熱流体モデルの開発が 取り組まれている. Fig. 3に示すように, 非定常計算により 先程の接合部断面形状の違いをコンピュータ上でシミュ レーションすることができるようになってきた[6].数値 計算による定量的な情報により、断面形状の違いは、最大 速度 200 m/s に達するプラズマ気流(陰極ジェット)によ る溶融池表面のせん断力と硫黄等のマイナーエレメント (微量成分)によって変化する表面張力差を駆動力としたマ ランゴニカ[7]との微妙なバランスにより溶融池内の対流 現象が変化するためであることがわかった. このようなシ ミュレーションは、アーク電流、アーク長(電極間距離)、 電極形状、シールドガス組成という一般的に取り扱われる 溶接プロセスの条件変化が接合部断面形状に及ぼす影響は もちろんのこと、その物理的背景まで教えてくれる、この ようなモデルはまだまだ限られた範囲内でしかシミュレー



Fig.3 ステンレス鋼のアーク溶接シミュレーション.

ションできないが,溶接・接合プロセスのトータル評価シ ステムを構成する一つのツールとして今後の展開が期待さ れる.

一方、計測技術の進歩により、溶接アークにおける作動 中タングステン電極の実効仕事関数が明らかになってき た、タングステン電極は主としてアーク放電の陰極として 機能し, 3,500 K 程度に加熱された電極表面から熱電子を 放出することによりアーク電流の連続性を維持する重要な 働きを担っている.したがって、電極の実効仕事関数は熱 電子放出の安定性、陰極点のサイズ、さらには作動電極の 表面温度など、溶接アーク全体にわたりその安定性や硬直 性に影響を与えるばかりでなくタングステン電極自身の寿 命にも影響を与える重要なファクターとなる. しかしなが ら,長年にわたりその定量的な数値は不明であった.最近, パルスレーザー照射による光電効果を利用し、溶接アーク における陰極作動中タングステン電極の実効仕事関数の測 定が試みられた[8]. その結果, アーク電流 200 A の条件に おいて得られたタングステン電極, 2%W ThO2-W 電極 および2% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - W 電極の各実効仕事関数はそれぞれ 4.6 eV, 2.8 eV, 3.0 eV であった. これらの実験値は, W, ThO<sub>2</sub>および La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の各物質の仕事関数の文献値(W: 4.5 eV, ThO<sub>2</sub>: 2.7 eV, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 3.1 eV) と比較して極めて よく一致した. これより, 200 A という十分にエネルギー 入力が大きく、タングステン電極もアークプラズマも十分 に加熱された条件では、タングステン電極の実効仕事関数 というものは、各々の添加物質の仕事関数に一致すること が明らかになった.特に、ThO2やLa2O3というような電子 エミッタがわずかに2%程度しか添加されていないにもか かわらず、タングステン電極の実効仕事関数が電子エミッ タそれぞれの仕事関数に収束することが明らかになり、大 気圧アークにおける熱陰極現象の物理がより深く理解でき るようになってきたといえる.

#### 6.3 可搬式スチームプラズマ

溶接,切断,溶射に用いるアークの新展開としては, アークの物理現象の解析と並行して,実際の装置をプロセ スの要求に応じて,より使いやすいものへと改善する研究 が行われている.その具体的な例として,以下に可搬式 アーク発生装置を紹介する.

従来の熱プラズマの材料プロセシングでは,移行型でも 非移行型でも通常はAr, He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>などの作動ガスを放電 領域に供給し,それらのガスを電離させることによって1 ~2万度程度のアークを発生し,その高温を利用してい る.つまり溶接や溶射に用いるプラズマ発生装置の付帯設 備としては,電源,トーチ,制御装置の他に,作動ガス供 給装置と冷却水循環装置が必要となるので,据置式装置と して使用することが常識とされていた.しかし最近,作動 ガス供給装置や冷却水循環装置が不要で可搬式のスチーム プラズマジェット発生装置が開発され,切断や溶接へ適用 されている.このスチームプラズマジェットを用いて鋼板 を切断している様子をFig.4に示す.このようにプラズマ 発生装置を可搬式にすることによって,従来よりも幅広い 適用が可能となる.

スチームプラズマジェットを可搬式にすることができた 理由は、外部から作動ガスを供給することを不要にしたか らである.通常の直流放電アークでは電極を保護するため に冷却水を用いているが、この装置の最大の特色は、その 冷却水を直接放電領域に吹き込み、それをプラズマガスと して使用することである.このために作動ガス供給と冷却 水を両方とも不要にすることが可能となる.外部循環冷却 システムが付帯設備として不要となるということだけでな く、冷却水による熱損失が蒸発エネルギーに変換されるの で、90%以上という高い熱効率を得ることも可能となる. また水以外にも、エタノールやメタノールの水溶液を用い ても安定なプラズマジェットを発生することが可能なの で、溶接や切断等のように、プラズマが有する高温を活用 するプロセスだけではなく、プラズマ中に存在する活性種 を活用する材料プロセスへの展開も期待できる.

スチームプラズマジェットの模式図を Fig.5 に示す. トーチ内に密閉保持した水を一定量給水し,直流定電流電



Fig.4 スチームプラズマジェットによる鋼板の切断.



Fig.5 スチームプラズマジェットのトーチ構造[11].

源によって陽極と陰極の間にアークを短絡起動する.この アークによって加熱した電極からの伝導熱と電極のジュー ル発熱によって、蒸発部内の水を気化させる.ここで発生 した水蒸気は、気密されたトーチカバー内で加圧されて、 アークを介してノズル先端口からプラズマジェットとして 噴出する.スチームプラズマの発生原理は、アークからの 熱で水を蒸発させてプラズマガスとすることなので、トー チ内の温度分布や温度履歴を把握して、安定に水を蒸発さ せてアークを定常状態に保つことが重要である.トーチ内 の水を安定に陽極に導くために、蒸発部には保水材を用い ている.アーク発生→蒸発器への伝熱→保水材からの蒸発 →内部圧力上昇→放電領域へのスチーム供給→アーク発生 という一連の機構がバランスしている.

なお、スチームプラズマの場合には、従来のようにプラ ズマ作動ガスとして空気やアルゴンを用いる場合よりも電 流は小さく(10 A 程度)、電圧は高く(200 V 程度)なるこ とが特徴でもある.電流が小さいので、通常の溶接電源よ りも小型化が可能であることから可搬式としての利点があ る.

このようにスチームプラズマには、従来の熱プラズマ発 生装置に比べて各種のプロセッシングに用いる場合の利点 があるが、まだ改良すべき点も残されている.まずプラズ マの安定性である.ここで示したスチームプラズマでの安 定な放電時間は16分程度である.これ以上では蒸発部での 水が不足気味となり、トーチ内部の空焚きを防ぐために、 トーチ先端部に施されているセンサーによってアークが自 動的に止められる.長時間のアーク発生が必要な場合に は、外部から水を強制的に供給することが必要である.

また,電極の長寿命化も解決すべき問題である. 銅製ノ ズルから成る陽極ではアークの陽極点の集中による欠損が 問題となる.一方, Fig.6に示したように,ハフニウムを銅 に埋め込んだ陰極ではスチームによる酸化が原因となる消 耗が問題である[9].この図は水,メタノール水溶液,エタ ノール水溶液を用いてアークを発生した場合の陰極の消耗 量を示している.40分程度までは陰極の消耗はほとんどな いが,それ以降は急に陰極のハフニウムが蒸発し,それ以 上では安定なアークを発生できなくなることを示してい



Fig.6 電極消耗に与えるガス雰囲気の影響.

る.

スチームプラズマは切断や溶接以外にも、フロンやハロ ンの分解への適用が検討されている[10].フロンを分解す るとフッ素や塩素などのハロゲンが発生するので、CF4な どの副生成物を抑制するためには、水素と酸素が分解ガス とともに存在することが望ましい.しかしプラズマ中に水 素と酸素を供給するよりも、水蒸気をプラズマガスとして 用いるほうが経済上および安全上優位であるので、このス チームプラズマを用いることができる.なお、フロン等の 廃棄物処理に関しては7章で述べる.

#### 6.4 可搬式プラズマ溶射装置

ボイラー,大型機械のケーシング,大型ポンプの内部摩 耗個所などといった,取り外し困難または複雑な個所の装 置や部品、工場設備、船舶、タンクなどの施設・部品の表 面が腐食・損耗した場合、この復旧策としては老朽施設・ 部品を廃棄して新設するか、または、必要な防錆/肉盛り による表面加工処置が行われてきた.この際,従来施設を 延命化するために施設・部品の表面に防食性に優れるセラ ミック溶射加工を行うことが多い.この処理は、プラズマ 溶射装置が大型・定置式のため現場における表面改質加工 または表面修復作業を行うことが非常に困難であることか ら、復旧修理を要する施設・部品を一旦取り外して溶射加 工工場へ運び出し,溶射処理加工の後,再び搬入して復旧 させる方法がとられている.しかし,施設・部品の移動コ ストがかかることやそれに伴う休業などが生じるため、効 率的な表面改質加工または表面修復作業法の開発が求めら れてきた. そこで, 現場施工において, セラミックス, 金 属などの粉体をプラズマアークの高熱にて溶融し、吹き付 け耐食性・耐摩耗性を高める溶射皮膜を形成する、小型・ 軽量・高効率な可搬式プラズマ溶射装置であるツイントー チ・プラズマ溶射装置の開発が進められている[11]. 現場 でのプラズマ溶射加工が可能となれば、復旧修理を要する 施設・部品の移動期間が短縮でき休業期間が減り、廃棄さ れる老朽施設・部品も長寿命化が可能なことから、省資源

 ・省エネルギーとなる、本装置は、プラズマ溶射装置を現 場に直接搬入し、現場で装置・設備を溶射加工処理により 修復することが可能である.性能は、耐食性・耐摩耗性に 優れるセラミックス皮膜を形成させることが可能で、溶射 出力:24 kW, セラミックス粉体供給量:20 g/min, 溶射 ガン重量:1.2 kg 以下,溶射装置システム:1.5 トン積みト ラックに搭載可能である.本装置は、溶射ガンの小型、軽 量を満足する必要があり、また、金属より融点が1.5~2倍 高いセラミックス粉体を高効率に溶融するため、従来型の プラズマ溶射トーチのようなカソード(陰極),アノード (陽極) 各1個の電極のみを有するものではなく, Fig.7 に示すような、陰極2個に陽極1個(ツインカソード型)、 もしくは、陰極1個に陽極2個(ツインアノード型)の電 極を配置している.この構造により、プラズマアークは安 定化し消費電力を低減化することが可能となる他、高効率 な溶射が可能となる.また、ツインカソード型の場合、Fig. 7(b)に示すように、粉体供給方法の改善により溶射材料の 溶射効率をさらに高めることが可能である.具体的には, 陽極の中央を貫通する小孔から溶射材料をプラズマアーク の中心へ向けて噴射する構造のため、プラズマ熱源が有効 利用でき溶射効率が高まる。溶射効率が高まる分だけ消費 電力は低減できるのでプラズマ溶射ガンは小型化でき、 Fig.8に示すように片手で保持して溶射作業ができる約1.2 kgの重量とすることができ、また、小型化により直径5 cmのパイプ内側の処理も可能である. さらに Fig.9 に示す ように、電源、冷却装置など付属装置類も小型化が可能と なるので装置1式をパワーゲート付き1.5トン汎用トラッ クに搭載して現場での溶射施工ができる.本装置を利用し た場合における溶射皮膜性能を Fig. 10 に示す. クロミア (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ホワイトアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) およびグレーアルミ



Fig.7 ツイントーチ・プラズマ溶射装置内の電極配置.



Fig.8 ツイントーチ・プラズマ溶射装置概観.



Fig.9 装置一式をトラックに搭載した様子[11].



Fig. 10 ツイントーチ・プラズマ溶射装置による溶射皮膜性能.

ナ (95Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2.5TiO<sub>2</sub>·2SiO<sub>2</sub>)の約 300 μm 厚さの溶射皮膜 に関し、摩耗量とビッカーズ硬度を測定した.また、比較 のため非溶射の SUS304 および SS400 素材の試験結果と共 に示した.本試験方法は JIS-H8503 および JIS-Z2251 に拠っ た. 結果として,本装置で得られた結果は大出力のプラズ マ溶射ガンでの皮膜特性と同等であることから,小型・軽 量・可搬形でありながら実用的にも優れた性能を得ること が可能である.

## 6.5 まとめ

溶接,切断,溶射プロセスは幅広い構造物や製品の「要」 となる加工技術であり、「ものづくり」において欠くことの できない基盤技術である.近年,ものづくりのグローバル 化が進められる中,生産コストの低減のほかに日本ブラン ドの製品の特徴をいかに世界へ提示するかが重要な課題に なってきている.このような中で,溶接,切断,溶射プロ セスのさらなる省力化,無人化,加工品質の安定化,装置 の小型化が今後の重要な課題であるとともに,その一方 で,新しい素材や環境に柔軟に対応できるテーラード熱加 エプロセスへの展開が必要であろう.そのためには,プロ セスで生じる現象に対するより一層の理解が必要であり, 溶接,切断,溶射プロセスに関する益々の精力的で緻密な 研究・開発に期待したい.

#### 参考文献

- [1] H. Ayrton, *The Electric Arc* (The Electrician Printing & Publishing, London, 1902).
- [2] 山根 敏他:溶接学会全国大会講演概要 75, F1 (2004).
- [3] 野城 清他:ふえらむ 10,161 (2005).
- [4] C.E. Jackson, Welding J. 39, 129s, 42 (1960).
- [5] 溶接法研究委員会編:溶接法ガイドブック5「溶接プロ セスの高効率化」(溶接学会,東京,2003).
- [6] M. Tanaka *et al.*, Plasma Chem. Plasma Process. **23**, 585 (2003).
- [7] L.E. Scriven et al, Nature 187, 186 (1960).
- [8] M. Tanaka et al, J. Phys. D: Appl. Phys. 38, 29 (2005).
- [9] T. Watanabe, ASEAN J. Chem. Eng. 5, 30 (2005).
- [10] T. Watanabe and S. Shimbara, High Temp. Material Processes 7, 455 (2003).
- [11] T. Iwao and M. Yumoto, Transaction on Electrical and Electronic Engineering, IEEJ Vol.1, (2006) p.163.