

ワイヤアーク溶射の新しい展開

Recent Developments in Wire Arc Spraying

渡辺隆行*, 神沢 淳*, Joachim HEBERLEIN, Emil PFENDER

Takayuki WATANABE*, Atsushi KANZAWA*, Joachim HEBERLEIN, Emil PFENDER

Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, U.S.A.

*〒152 東京都目黒区大岡山 東京工業大学工学部化学工学科

*Department of Chemical Engineering, Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152

1. ワイヤアーク溶射とは

ワイヤアーク溶射は連続的に送給される2本のワイヤを電極とし、その先端間に直流アークを発生させ、ワイヤを溶融させる。溶融したワイヤを圧縮ガスにより吹き飛ばし、溶融液滴を生成し、それを基板に付着および積層させて溶射被膜を形成する溶射方法である（図1）。

ワイヤアーク溶射の長所は、電極そのものが溶融するので、大量溶射が可能なことである。そのために施工時間を大幅に短縮することができる。溶射量はフレーム溶射に比べておよそ3倍程度大きい。またワイヤアーク溶射では、ほとんどの入力エネルギーが電極の溶解に使われる所以、エネルギー効率が各溶射法の中で最高でおよそ90%である。次にワイヤアーク溶射ではノズル等において水冷を必要とせず、電気と圧縮空気のみを必要とするので、運転経費が安いことも長所である。プラズマ溶射に比べてワイヤアーク溶射は初期コストがおよそ5分の1、運転コストはおよそ9分の1であり、経済的に有利な溶射方法である。例えば Sampson [1] は飛行機部品に対するワイヤアーク溶射の経済的な優位性をプラズマ溶射と比較して検討している。また溶射材として2本の異なる材料を用いることにより、それらからなる合金の被膜を作成することができる。

ワイヤアーク溶射の欠点は、騒音レベルが高いこと、およびフュームの発生量が多いことである。この多量のフュームは操作を行う環境を劣化させる問題がある。また溶射材の過度の加熱および酸化が起きること、またアークの高熱によって化学成分が変化することがある。例えば鋼中の炭素、マンガン、けい素の損失、およびステンレス鋼中のクロムの損失が問題になっている。

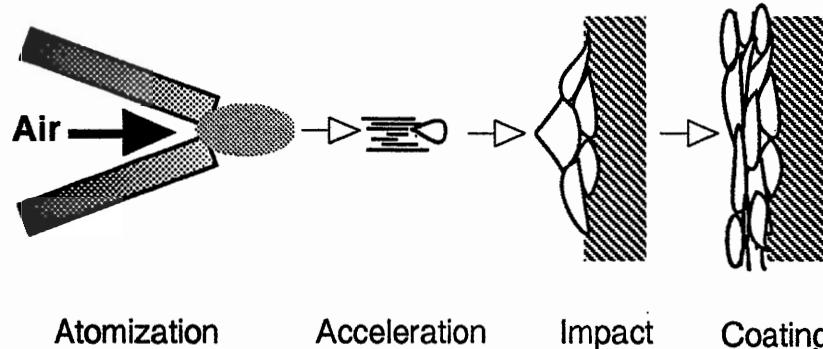


図1 ワイヤアーク溶射現象のモデル

2. ワイヤーク溶射の適用例

ワイヤーク溶射は各種機械、構造物、電気部品等に対して、耐磨耗、耐熱、断熱、耐食、電気絶縁等の改善のために用いられている。ここでは産業界で特に注目されている分野を以下に示す。

a) 自動車への適用

ワイヤーク溶射の技術が現在盛んに研究されている分野のひとつとして自動車業界がある。従来より自動車に対する燃費向上についての検討がされているが、エンジン単体の改善のみではなく、車両全体にわたった軽量化と摩擦抵抗の削減が重要となっている [2]。

ワイヤーク溶射が実際に適用された例として、トヨタのV8エンジンのバルブリフタ外周部への炭素鋼の溶射がある [3]。バルブリフタはエンジン動弁系を形成し、鋼からアルミニウム合金への置換により重量が30%減少し、摩擦も減少した。よって燃費は1%向上し、騒音レベルも低下した。しかしアルミニウムどうしの凝着摩擦の発生が生じたので、アルミニウム製バルブリフタ外周部への炭素鋼の溶射が必要となった。プラズマ溶射は設備コストが高いために、この部品への適用は困難である。低成本のワイヤーク溶射が注目され、実用化が達成された。

ワイヤーク溶射の自動車への他の適用例としては、シリンダボアおよびバルブシートへのアルミニウムの溶射がある。従来はシリンダボアには鋳鉄製ライナが用いられていたが、軽量化等の理由からアルミニウム溶射被膜を適用することが適切であると考えられ、現在研究されている。

b) スペースシャトルへの適用

スペースシャトルの主エンジンにおける低圧燃料ターーポンプから高圧燃料ターーポンプへの液体水素(-253°C)の輸送用ダクトに対してワイヤーク溶射を適用する研究が行われている [4]。極低温における耐食を目的とした場合には、従来はクロメート処理による被膜が最適であると考えられていた。しかし六価クロム等の有害物質による環境汚染により、将来はクロメート処理が規制されることが予想されている。ワイヤーク溶射によるアルミニウム被膜は極低温における物性および付着力等が優れていることから、液体水素用のダクトの耐食に適している。

c) 航空機エンジン部品への適用

航空機ジェットエンジンのオーバホールにおいては磨耗部品の補修にコアワイヤ(core wire)を用いたワイヤーク溶射が用いられている。コアワイヤとは線材の中心に各種の金属やセラミックスの粉体を入れ、その回りを金属で覆ったものである。ワイヤーク溶射では従来は金属線しか使用できなかったが、コアワイヤの開発によりワイヤーク溶射の適用範囲が大きく広がった。航空機エンジンの補修には従来はプラズマ溶射法が用いられていたが、ワイヤーク溶射による被膜のほうが結合力が強いことなどから、Ni-Cr-AlやNi-Al-Moのコアワイヤが最近多く用いられている [5]。

d) 橋への大規模溶射の適用

世界で初のワイヤーク溶射の大規模な適用としては、オレゴン州のCape Creek Bridgeに対する亜鉛被膜処理(1990年)がある [6]。この橋は1930年代初めに構築されたコンクリート製の橋であり、内部の鋼の腐食により補修する必要が生じた。この橋の再構築には1300万ドルが必要とされたが、ワイヤーク溶射の亜鉛被膜による補修にかかった費用は350万ドルであった。このプロジェクトにおいては、ワイヤーク溶射の経済性および高溶射速度が大きな長所となっている。

3. ワイヤーク溶射の研究動向

ワイヤーク溶射は他の溶射方法に比べて経済的に有利であるが、従来はプラズマ溶射やHVOFと比べると被膜の特性がやや悪いと考えられていた。しかし最近は各種の研究(例えば低圧ワイヤーク溶射[7])が行われ、プラズマ溶射被膜よりも品質の良い被膜が得られるようになってきた。

新しい溶射材料の開発も盛んである。コアワイヤにおいては、被膜に期待する特性に応じて材料を自由に組み合わせることも可能である。さらに反応性コアワイヤによるワイヤーク溶射が新しく開発された。これはアーク溶射中にセラミックスを合成し、そのセラミックスを含んだ被膜を生成する

方法である。Dallaire ら [8] はステンレス鋼またはニッケルをシース材とし、中心にチタン鉄およびホウ素の粉体を入れたコアワイヤを用いて TiB₂ を含んだ被膜を生成した。被膜中の TiB₂ はコアワイヤ中のチタン鉄とホウ素が反応して生成されている。

ワイヤアーク溶射がより広く適用されるためには、より高品質の被膜を作成するために、アークの特性と溶射被膜の特性を関連づける研究、さらにワイヤアーク溶射の欠点であるフュームの発生量を抑制する研究が大切である。以下にそれらの研究について紹介する。

3.1 溶射被膜に対するアークの特性の影響

ワイヤアーク溶射では、アークの操作条件（電流、ガス圧力、ノズル形状等）が溶射被膜に大きな影響を与える。特にワイヤアーク溶射の電圧および電流の変動は溶融液滴に大きな影響を与え、その結果溶射被膜の特性に影響を与える。アーク電圧および電流の変動現象の測定により、溶射被膜の特性を予測することを目的とした。

a) 実験方法

ワイヤアーク溶射用電源に Miller Thermal 社の Maxtron 450、コントロール部には同社の BP400 を使用した。ワイヤにはアルミニウム、およびアトマイジングガスには空気を用いた。アトマイジングガスのノズルには図2に示す3種類を用いた。従来のスタンダードノズルは出口において衝撃波が形成されるために、アトマイジングガスが急激に減速してしまう。しかしコンバージングダイバージング（c-d）ノズルは衝撃波の形成を抑制し、乱れの少ない高速ガス流を得ることができる。ここではノズル出口のマッハ数が 1.4 になるようにスロートと出口の直径比を設計した。高速（HV）キャップを用いたノズルは、スタンダードノズルと電極のワイヤの周囲にキャップをかぶせ、アーク領域でアトマイジングガスの流路を絞り、高速ガスが得られるようにしたものである。

アークの特性は図3に示した装置を用いて測定した。高速度CCDカメラおよびレーザストロボにより、アーク電極および液滴の生成を記録し、それに同調させたオシロスコープによりアーク電圧と電流を測定した。溶射被膜の特性としては空隙率と酸化物の割合を測定した。空隙率は走査型電子顕微鏡による像を画像解析して求め、酸化物の割合は波長分散型分光器を用いて求めた。

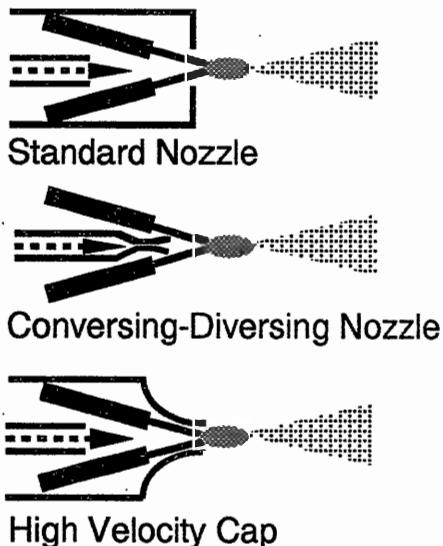


図2 アトマイジングガス用ノズル

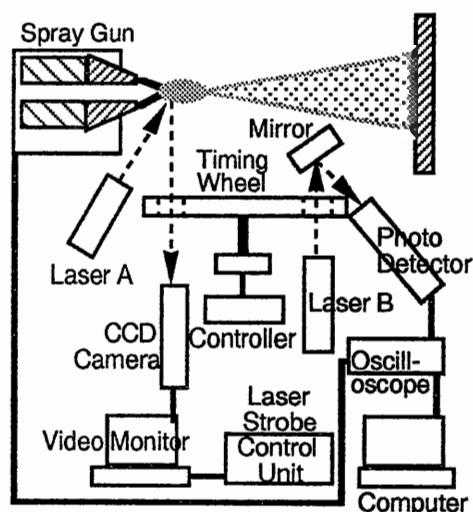


図3 実験装置

b) 実験結果

ワイヤアーク溶射の電極および液滴をCCDカメラで記録した像（上部：陰極；下部：陽極）を図4に示す。陰極と陽極において液滴の生成現象が異なる。陽極では溶融したアルミニウムがアーク中に伸びて、比較的大きな液滴を生成する。一方陰極では細かい液滴が局所的に生成されている。これは陰極における高電流密度のために局所的に過熱されるためである。また使用したノズルの形状により、液滴生成の様子が大きく異なる。高速キャップでは細かい液滴が多く生成し、広く飛び散っている。c-dノズルでは比較的大きな液滴があまり飛び散らずに生成している。これは電極近傍のアトマイジングガスの乱れを示している。c-dノズルでは衝撃波の形成が少なく、乱れが少ないが、高速キャップでは流れが大きく乱れている。

c-dノズルの場合のアーク電圧と電流の測定結果を図5に示す。この測定値に対してフーリエ解析を行って得た周波数分布を図6に示す。電圧は890 Hz、電流は1870 Hzにピークを示す。

ワイヤアーク溶射の操作条件が、変動幅（ここでは変動に対する標準偏差）および周波数に与える影響を図7、8に示す。圧力が大きくなると電圧の変動幅は減少し、周波数は増加する。またc-dノズルを用いた場合に変動幅が最小、周波数が最高になる。つまりアーク電圧の変動幅および周波数は、アーク近傍の乱れを大きく反映している。アーク近傍の乱れが小さい場合には、アーク電圧の変動幅が小さく、周波数が大きくなる。また電極から生成した液滴の写真を図9に示す。アークの操作条件は34 V、200 A、414 kPaである。高速キャップを使用した場合にはアーク近傍のアトマイジングガスの流れが乱れ、その結果生成した液滴は細くなる。アーク電圧や電流の変動の幅および周波数が液滴生成に大きな影響を与

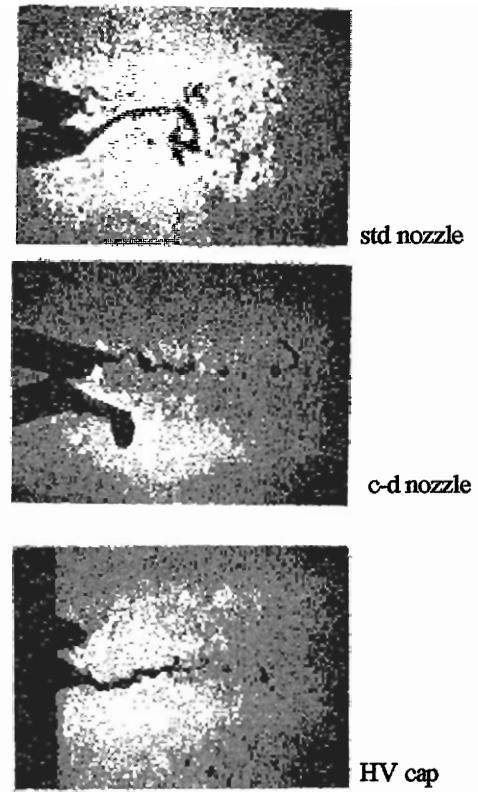


図4 高速度CCDカメラによる液滴生成の写真

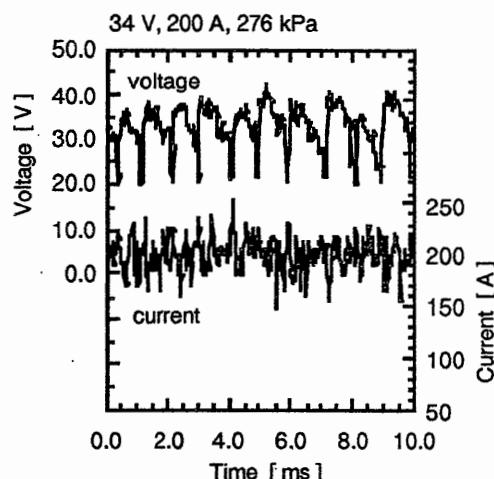


図5 アーク電圧と電流の変動

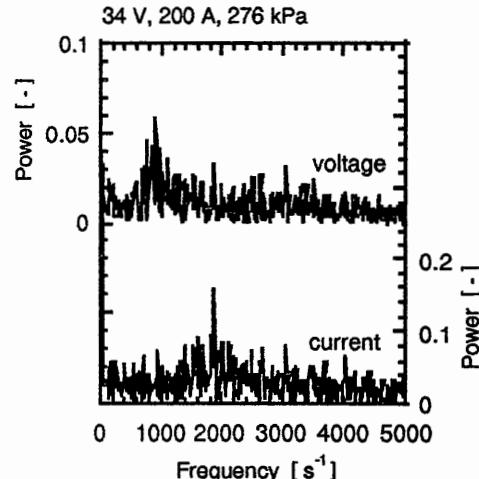


図6 アーク電圧と電流の周波数特性

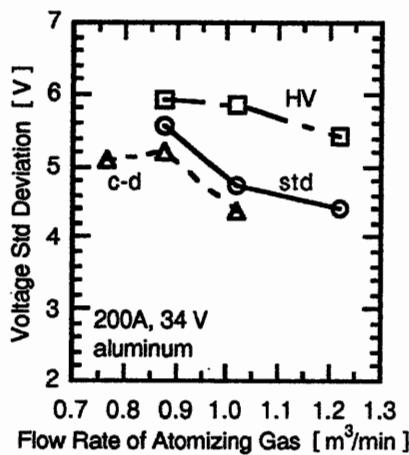


図 7 電圧の変動幅

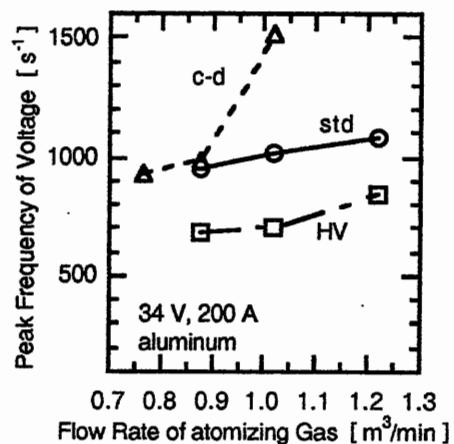


図 8 電圧変動のピーク周波数

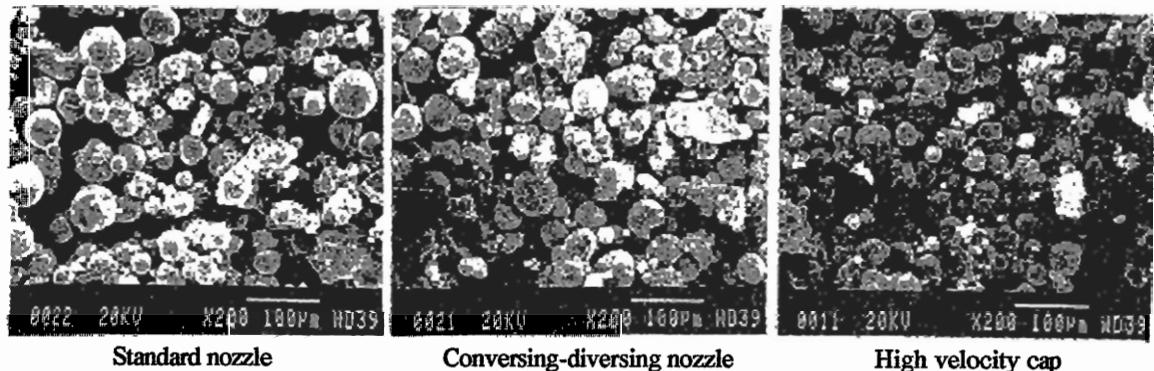


図 9 粒子の SEM 写真

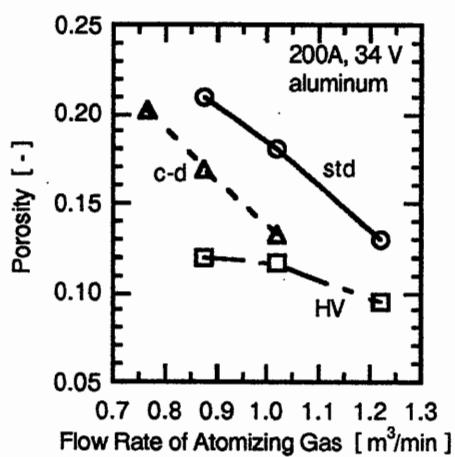


図 10 被膜の空隙率

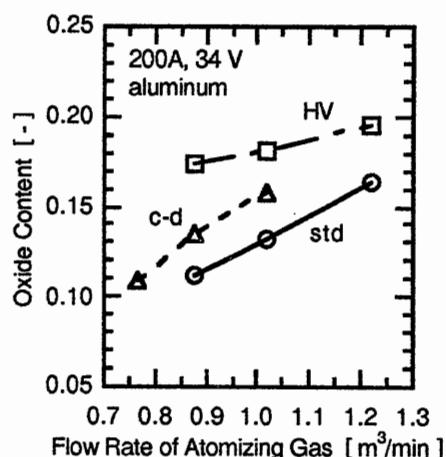


図 11 被膜の酸化物

えていることがわかる。

アトマイジングガス流量が溶射被膜の空隙率に与える影響を図10、および被膜中の酸化物の割合に与える影響を図11に示す。流量を増加することにより、空隙率は減少し、酸化物の割合は多くなる。これはガスの流速が上昇することにより、液滴径が小さくなることが理由のひとつである。高速キャップでは液滴径が小さいために、被膜中の酸化物の割合が最高値を示し、空隙率が最低値を示す。しかし流量が $0.88 \text{ m}^3/\text{min}$ の場合について考えると、c-dノズルは酸化物の割合は高速キャップよりも低く、空隙率は同程度の値を示す。

c) アトマイジングガスが溶射被膜に与える影響

アトマイジングガスは液滴および溶射被膜に対して強い影響を与える。これらを結びつけるのは、アーク近傍のガスの乱れの強度である。この関係を図12に示す。ガスの流速を増加すると、アーク近傍の乱れが強くなり、液滴径は小さくなる。そのために溶射被膜の空隙率は減少するかわりに酸化される割合が大きくなる。c-dノズルを用いることにより、乱れの小さい高速ガスを得ることができる。よってc-dノズルでは高速ガスのために空隙率の少ない被膜を作成できる。さらにアーク近傍の乱れが小さいので液滴径が小さくならず、酸化の割合の小さい被膜を作成できる。

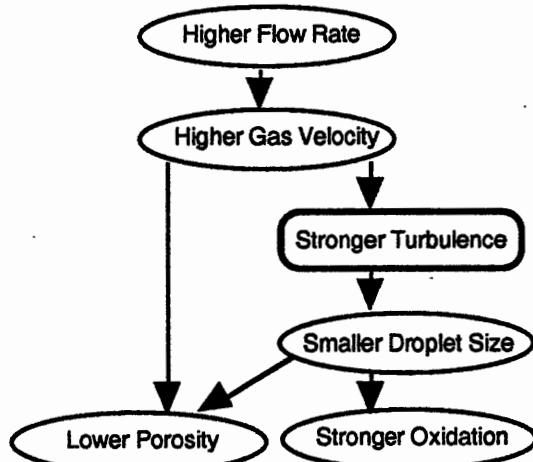


図12 アークの特性が溶射被膜に与える影響

3.2 フュームの発生機構 [9]

ワイヤアーク溶射の欠点のひとつは、フュームの発生量が多いことである。フュームの発生を抑制することができれば、さらにワイヤアーク溶射が広く応用されることが期待できる。

a) 測定方法

ワイヤアーク溶射において、ワイヤにアルミニウム、およびアトマイジングガスには空気または窒素を用いた。アトマイジングガスにはスタンダードノズルとc-dノズルを用いた。ワイヤアーク溶射のフュームの発生量を測定する装置は図3に示したものと同様である。ただしアルミニウム蒸気の強い線スペクトルがある波長(313 nm)を中心としたラインフィルタをCCDカメラの前に設置した。このフィルタを用いることにより、アークの像ではなく、アルミニウム蒸気の像を記録することができる。ワイヤまたは液滴から蒸発した金属蒸気が核生成することによりフュームが発生するとすれば、

この方法によりフュームの発生場所および発生量が測定できる。従来のフィルタを用いてフュームをサンプリングする方法と比べて、この方法はフュームの可視化に基づいた方法であり、より正確なフュームの発生量を求めることができる。CCDカメラで記録されたアルミニウム蒸気の像の面積および強度を画像解析により求め、それをフュームの発生量とした。この方法ではフュームの発生量の相対値が求められるので、以下の実験結果では、スタンダードノズルを用いて、アトマイジングガスに空気（圧力 276 kPa）、アーク電流 200 A の測定値を基準とした相対値を用いる。

b) 実験結果および考察

ワイヤーク溶射におけるアルミニウムフュームの写真を図 13 に示す。この写真からフュームの発生は液滴からではなく、電極の過熱により直接発生することがわかる。

フュームの発生量に対するアトマイジングガスの影響を図 14（スタンダードノズル）、および図 15（c-d ノズル）に示す。フュームの発生量はガス圧力にあまり依存しないが、アトマイジングガスに窒素を用いるとフュームの発生量をおよそ 20 % 抑制することができる。これはフュームの発生の一部が電極の酸化に起因していることを示す。アルミニウムの酸化により電極は局所的に過熱され、フュームの発生が増加する。さらに c-d ノズルを用いた場合のほうが、スタンダードノズルよりフュームの発生量が 20 % 少ない。これは c-d ノズルのほうがアトマイジングガスの乱れが小さいためである。

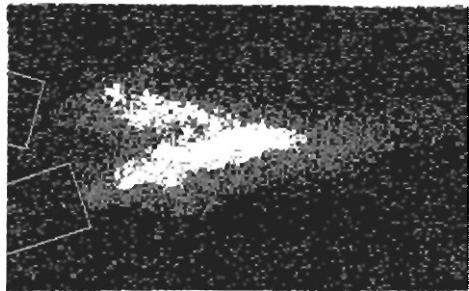


図 13 電極から発生するフューム
(上部：陰極；下部：陽極)

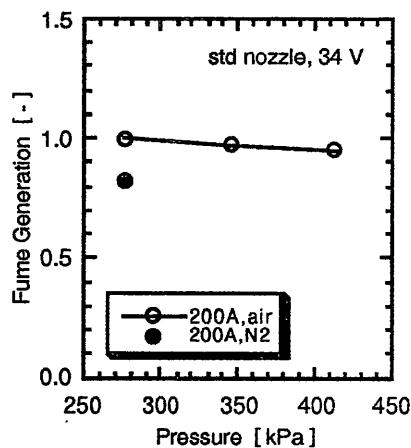


図 14 フュームの発生量に対するアトマイジングガスの影響（スタンダードノズル）

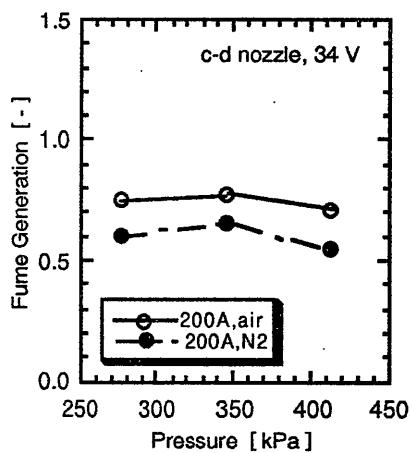


図 15 フュームの発生量に対するアトマイジングガスの影響（コンバージング-ダイバージングノズル）

フュームの発生場所に対するアーク電流の影響を図16に示す。フュームは主に陰極から発生し、陽極から発生するフュームの量はわずかである。これは陰極の電流密度が高く、局所的に電極が過熱されているからである。電流を増加すると、両方の電極から発生するフュームの量が増加する。これらの結果からワイヤアーク溶射のフュームの発生量を抑制するには、陰極の過熱を防止すればよいことがわかる。

4. おわりに

従来のワイヤーアーク溶射はプラズマ溶射に比べて被膜の性能がやや悪いために、日本での普及率は低かった。しかし現在アメリカ合衆国におけるワイヤーアーク溶射は高い普及率を示し、各方面で利用されている。また最近のワイヤーアーク溶射に対する技術開発により、プラズマ溶射以上の高品質の被膜を作成できるようになった。今後のワイヤーアーク溶射の新しい展開が楽しみである。

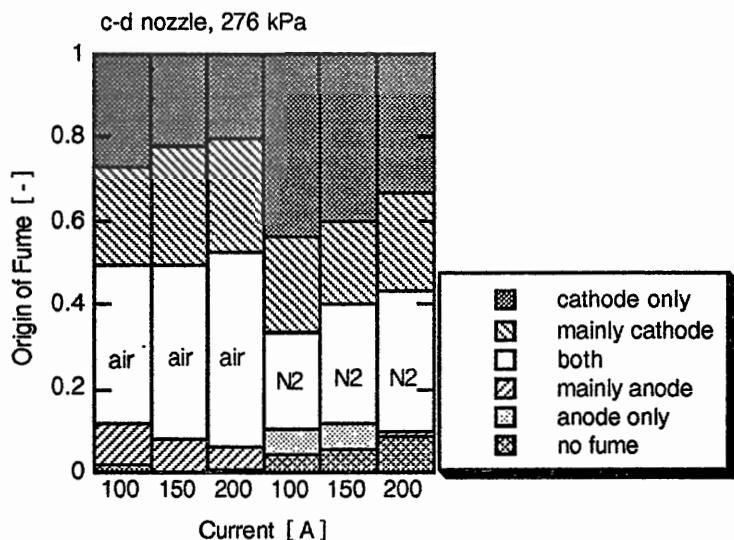


図16 フュームの発生場所（コンバージング-ダイバージングノズル）

参考文献

- [1] E.R.Sampson, *Proc. 5th National Thermal Spray Conference*, p.257 (1993).
- [2] P.M.Nakagawa, et al., *Proc. 7th National Thermal Spray Conference*, p.1 (1994).
- [3] M.Nakagawa, et al., *Proc. 3rd National Thermal Spray Conference*, p.457 (1990).
- [4] R.L.Daniel, et al., *Proc. 7th National Thermal Spray Conference*, p.93 (1994).
- [5] E.Sampson, *Welding J.*, 72 (July), p.39 (1993).
- [6] M.S.Wixson, *Proc. 5th National Thermal Spray Conference*, p.673 (1993).
- [7] H.D. Steffens, et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 18, p.974 (1990).
- [8] S.Dallaire, et al., *Surface and Coatings Technology*, 50, p.241 (1992).
- [9] T.Watanabe, et al., *Proc. 12th Inter. Symp. Plasma Chem.*, to be published.