

## 技術解説

## 溶射技術に関する二三の研究

Some Study of Thermal Spraying Process

日本溶射協会 前会長  
慶応義塾大学 名誉教授

蓮井 淳

Atsushi Hasui



## 1 緒言

溶射は、溶融あるいはそれに近い状態にまで加熱した微粒子を基材表面に高速度で衝突—堆積させて皮膜を形成する技術で、表面被覆による材料の表面改質法の一つである。溶射は、スイスのM.U.Schoop博士によって発明された技術である。この技術が導入されたのは1919年であるから、わが国における溶射は80年余の歴史をもっている。この技術導入の目的は美術工芸品、建築装飾品などに鍍金をすることであったので、当初は、その分野の用途に利用されていた。その後、数年経つと、一部で防食用に亜鉛や亜鉛・すずの溶射が行われるようになった。戦時中には、一部で生産設備への耐熱・耐食溶射、自動車、戦車などの部品への肉盛溶射、その他特殊な補修溶射が行われた記録がある。戦後、溶射の主なる用途は、各種容器類、土木建造物などへの防錆、防食溶射であった。昭和30年代に入ってから、それまでのフレーム溶射、アーク溶射に加えて、プラズマ溶射、爆発溶射など新しい技術が導入され、一方、人工衛星の本体、ロケットノズルなどへのセラミック溶射の応用が紹介され、この技術への関心が高まり始めた。

高度成長期の1960年代後半に入ると、各種産業の活動が活発になり、各種の機械、装置の部品、部材は次第に過酷な使用条件に対応することが求められるようになり、広い産業分野において表面改質技術に対する関心が急激に高まった。それに応じて、溶射技術においても、溶射法と装置の開発と高性能化、各種溶射材料の改良と開発、また溶射施工法の進歩と管理などが着実に進んで、皮膜の種類が増加し、かつ、その品質が著しく向上した。その結果、現在、この技術は広く諸産業において有効に利用され、極めて重要な加工技術になっている。

2 現在の溶射法<sup>1)</sup>

現在、一般に実用されている溶射法は、溶射材料を加熱する熱源の種類によってガス式溶射と電気式溶射とに大別されている。

## 2.1 ガス式溶射

## 2.1.1 フレーム溶射

通常、フレーム溶射といわれているのは、酸素と可燃性ガスの燃焼炎のエネルギーを用いるもので、溶射材料の形態によって溶線式、溶棒式および粉末式に分類される。燃焼炎は安定な熱源であるが、その温度の最高は3300～3400K程度である。従って、ほとんどの実用金属の溶射が可能であるが、一般に、その皮膜には気孔が多く存在し、また、セラミックスの溶射では融点の関係からその種類が限定される。

(1) 溶線式(図-1)では、各種の金属と合金の線材を溶射材料とするもので、燃焼炎の中に溶射材料を送給して、その溶融粒子を空気ジェットで基材に吹付けて、皮膜を形成する。

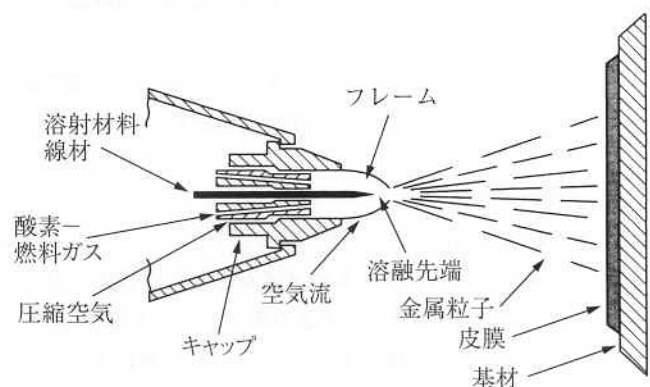


図-1 溶線式フレーム溶射の原理

(2) 溶棒式は、原理は、溶線式と全く同じで、低融点のセラミックスの焼結棒を溶射材料とする方式である。

(3) 粉末式は、2形式に分類される。一つは従来からのもので、大気圧下での燃焼炎を用い、線材にできない合金、低融点のセラミックスあるいはプラスチックの粉末を燃焼炎の中に送給して溶射する。この方式で用いる自溶合金(JISH8303-1997)は、Ni基およびCo基の超合金で、2～

5%程度のSiとBを含有させたもので、溶射後、フェーシングを行って、無気孔で基材表面に完全に融着した皮膜として用いる。この合金には、さらに耐摩耗性を高めるためにWC粉末を混入したものもある。

粉末式のもう一つの形式は、近年急速に発展した高速フレイム溶射（HVOF溶射、図-2）である。この溶射ガンでは、酸素と燃料の混合ガスを燃焼室で高圧下で燃焼を開始させ、超音速の燃焼炎をバレル出口から噴出させる。溶射材料は粉末で、図に示すガンではバレル入口の中心に送給される。高速フレイム溶射の特色として、粉末粒子の飛行速度が高く、高速度で基材に衝突するので、緻密で密着性の高い皮膜が得られることがあげられる。

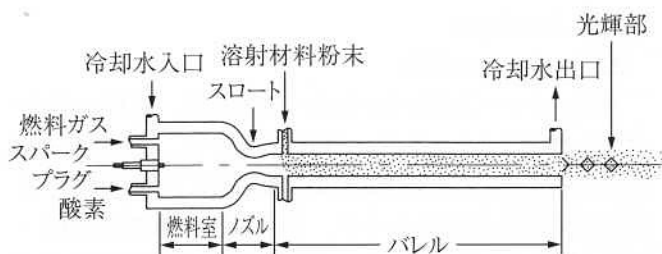


図-2 高速フレイム溶射の原理

### 2.1.2 爆発溶射

基材に向けた水冷のガンの燃焼部へ酸素と燃料ガスを厳密に定量して送り込んで、そこへ溶射材料粉末を送給し、それが浮遊している間に点火、爆発させる。爆発による熱と圧力波によって加熱し、加速した粉末を数百～1000m/sの速度で基材に衝突させて、皮膜を形成する。このサイクルを数回/s繰返して行う方法である。本法では、密度が高く、基材への密着性にすぐれた皮膜が得られる。

## 2.2 電気式溶射

### 2.2.1 アーク溶射

アーク溶射は、ガンの2本のノズルを通して送給される溶射材料（導電性の線材）の先端の間にアークを発生させ、それによって生じた溶融部を空気ジェットで微粒子として基材に吹付けて、皮膜を形成する方法である。本法の利点は、アークは極めて効率の高い加熱源であるので、溶射速度（単位時間における溶射量）が非常に高く、皮膜の基材への密着性がかなりすぐれていることである。

### 2.2.2 プラズマ溶射（図-3）

溶射ガンの陰極と陽極ノズルの間の極めて高い電流密度の直流アークによって加熱した作動ガスをノズルから超高温、超高速のプラズマジェットとして噴出させ、その中へ送給する溶射材料の粉末を加熱、加速して基材に衝突させ皮膜を形成する方法である。この方法では、粉末状で入手

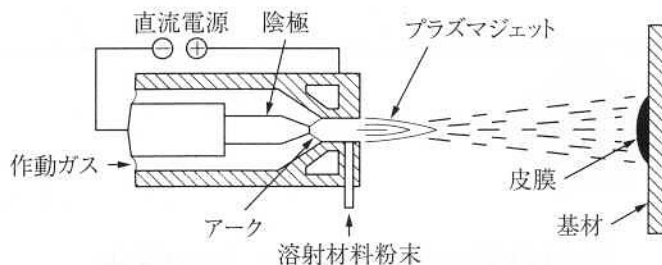


図-3 プラズマ溶射の原理

さえできれば、金属、セラミックス、サーメット、プラスチックなどほとんどの材料の良好な皮膜を作製することができる。減圧（制御雰囲気）プラズマ溶射（LPPS）は、通常2.7～27.7kPa程度の雰囲気（成分は作動ガスと同一）で行われる。この方法は、皮膜に気孔がほとんどなく、基材を適切に予熱した場合には、皮膜の基材への密着性が格段に向上すること。溶射前後における溶射材料の化学的あるいは金属的变化が少ないことなどの利点もっている。

### 2.2.3 線爆溶射

コンデンサーに充電した電気を導電性の溶射材料の線に衝撃的に通電して爆発的溶融を行わせ、高速度に飛散する溶融粒子を基材（円筒内面が有利）に受けて皮膜とする方法である。

これらの溶射法を比較すると、それぞれに長所と短所もっている。従って、溶射を計画するときには、皮膜に期待する性能あるいは機能、経済性、施工場所（工場あるいは現場など）などを勘案して溶射法を選択しなければならない。

## 3 溶射現象と皮膜の性質

溶射の過程を追跡すると、いずれの方法を用いるにしても、溶射材料が種々の熱源によって溶融あるいはそれに近い状態にまで加熱された微粒子となって飛行し、基材面に衝突して皮膜となる。従って、皮膜の性質は、その間における粒子の温度と飛行速度の変化、また飛行空間における雰囲気との反応、さらに、基材面への衝突時における粒子の変形と密着の状態と冷却速度および基材との化学的・金属的反応と密着部の構造、そして次々と堆積していく粒子間の結合の状態などに大きく影響される。

ここでは、筆者のこれまでの溶射現象に関する研究における知見を基に、溶射過程の一端について解説することにする。実験に用いたのはプラズマ溶射であるが、他の溶射法においても共通する問題である。

### 3.1 溶射雰囲気と飛行粒子

#### 3.1.1 ジェットの温度と粒子の飛行速度

溶射材料の加熱源であるプラズマジェットの温度とその

分布の状態は、作動ガスの種類によって甚だしく異なってくる。作動ガスに用いるアルゴンやヘリウムは単原子ガスであるが、窒素、酸素は2原子ガスである。これらのガスにエネルギーを投入していくと、前者は直接に電離してプラズマになっていくが、後者は先ず解離して単原子になってから電離しプラズマになる。従って、同一の電気入力で運転する場合、後者では電離するまでに解離エネルギーを要するので、そのプラズマジェットの温度は前者のそれよりも低くなる。また、ジェットのノズルからの噴出速度もそれに対応する。しかし、噴出後のジェットの温度が低下していくとき、後者では原子が再結合して2原子ガスに戻るときに、可逆的にエネルギーを放出するので温度低下が緩められることになる。

その一例として、4種類の作動ガス（括弧内は混合率を示す）を全流量40ℓ/minとして、40kWの電気入力で発生したプラズマジェットについての検討結果<sup>2)</sup>について述べる。表-1は、ノズル出口における平均の温度と流速を、作動ガスへの正味の電気入力を測定し、ガスの物性値を用いて、推測したもので、アルゴンによるジェットの温度と流速が

表-1 各種作動ガスによるプラズマジェットのノズル出口における平均の温度と流速

作 動 ガ ス	温度 (K)	流速 (m/s)
Ar (100)	13700	1620
Ar (75) -H <sub>2</sub> (25)	11800	1240
Ar (50) -H <sub>2</sub> (50)	10500	1010
Ar (75) -N <sub>2</sub> (25)	11500	1230
Ar (50) -N <sub>2</sub> (50)	10100	1170

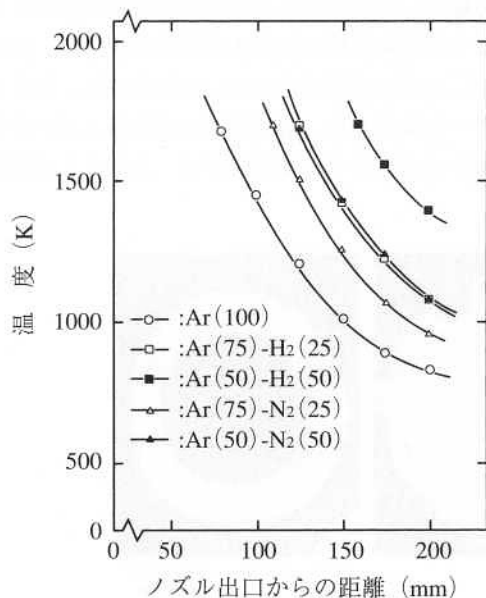


図-4 各種作動ガスによるプラズマジェットの温度分布

ともに最も高くなっている。しかし、ノズルから遠ざかった位置の中心軸に沿って、極細のPt-PtRh熱電対を挿入して測定した結果を示す図-4によると、2原子ガスを混合したガスによるジェットがアルゴンによるものに対して逆転して、高温となり、その領域も延長している。

また、この条件下における溶射粒子（粒径10～44μmのニクロム合金）の飛行速度を測定した結果は、図-5に見られるように、アルゴンによるジェットにおける粒子の速度が最も高くなっている。従って、作動ガスの違いによって、溶射粒子はノズルへ送給されてから急激に変化する温度分布の雰囲気の中を、また変化する速度で飛行していくので、それぞれの温度における滞留時間を異にして通過するのである。さらに、各作動ガスによるプラズマジェットから、その中におかれた物体への熱伝達効果もかなり異なる。しかも、以上に述べてきたことはジェットの中心軸に沿っての事象であり、溶射粒子は、それに沿ってはいるが、ノズル出口から円錐状に広がって、それぞれに異なった経路をとって基材へ向かった飛行をする。

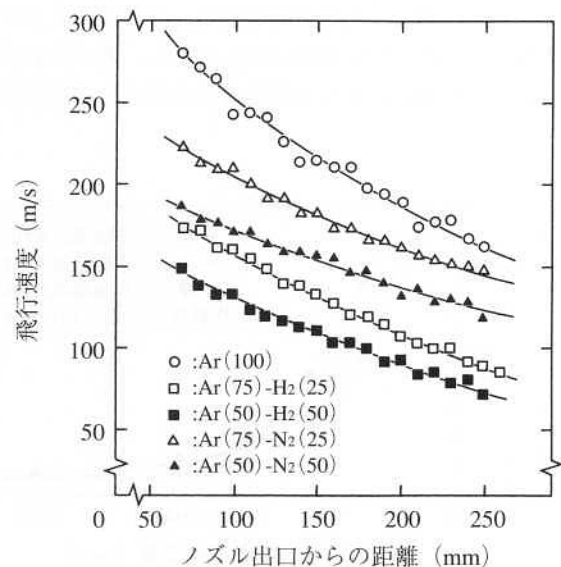


図-5 各種作動ガスによるプラズマジェット溶射における溶射粒子の飛行速度

以上のことから、作動ガスを変えるだけで、溶射粒子の加熱履歴は大きく異なり、その表面から中心までの温度分布は、それがプラズマジェットの中へ送給されてから基材に衝突する瞬間まで極めて複雑に変化することがわかる。

### 3.1.2 溶射雰囲気の成分

一方、プラズマ溶射法の導入の頃、その特徴の一つは作動ガスに不活性ガスを用いるので、そのプラズマジェットによって加熱される溶射材料は溶射雰囲気の成分による変

質が少ないといわれた。しかし、一般に、溶射は大気中において行なわれるので、プラズマジェットはノズルから噴出した瞬間から大気を巻き込むことになり、その雰囲気の中を溶射材料の粒子が飛行することになる。

そこで、水冷の細いガス捕集管（捕集口の直径：1mm）を試作し、それをプラズマジェットの中へ挿入し、種々の位置で捕集したガスの酸素量を測定した<sup>3)</sup>。図-6は、プラズマジェットのノズル出口から種々の距離における空気混入量を示したもので、ジェットはノズル出口を噴出した後、急激に大気を巻き込んでいるのがわかる。これはジェットの中心軸上でのデータであるので、それを外れた部分ではさらに多くの大気の混入がある筈で、粒子はノズルを出ると、作動ガス、窒素、酸素の混合ガスの中を飛行しており、それが基材に衝突する領域での雰囲気はほとんど大気である。従って、通常の溶射皮膜では、雰囲気成分との反応生成物を介在している。

### 3.1.3 溶射雰囲気と飛行粒子

上記の溶射雰囲気へ大気の巻き込みを直接観察できるのはモリブデンのプラズマ溶射のときで、ジェット中を飛行している粒子から激しく白煙を発生する。これは、モリブデンは1000K程度以上では非常に活性となり、飛行粒子の表面は雰囲気中の酸素によって酸化物を生じるが、その蒸気

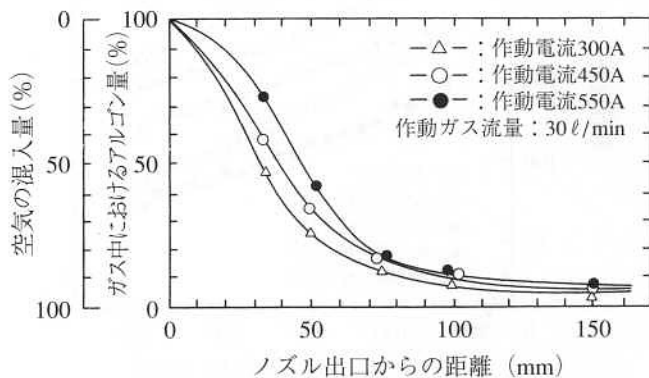


図-6 プラズマジェットへの大気の混入

圧は甚だしく高いので、酸化と同時にそれが急速に昇華するのが見られるのである。その皮膜をX線回折および電子線回折によって解析したところ、酸化物 ( $\text{MoO}_3$ ) の層が介在するが、その厚さは極めて薄く小さくなっていることがわかった<sup>4)</sup>。

溶射では、溶射材料の加熱が始まってから基材に衝突するまでの時間は極く短く、1ms程度であるが、溶射粒子と雰囲気ガスとの反応は極めて激しい。このことを次に述べる実験<sup>5)</sup> が示している。

図-7(a), (b), (c)は、プラズマジェット（作動ガス：アルゴン）のノズル出口に細いニッケル線を送給して、溶融させ、大気、アルゴンおよび減圧アルゴンの3種類の雰囲気中に吹込んで捕集した粒子の断面を示したものである。全く同じ条件で溶融したものであるが、大気中に吹込まれた粒子には多くの気孔が存在し、その表面および気孔の内面は酸化物で覆われている。アルゴン中へ吹込まれた粒子は、大きさは大気中における粒子と同等であるが、気孔の発生は認められない。また、減圧アルゴン雰囲気中に吹込まれた粒子は大粒になる傾向があり、その外周部に気孔が僅かに存在するが、全体的には発生していない。さらに、作動ガスとしてアルゴンに水素を10%加えたものを用い、アルゴン雰囲気中に吹込んだ粒子(d)では、その内部に水素の拡散によって大きな空洞が発生しているのが認められた。これらの事実は、溶射粒子は極く短時間の溶融と飛行中に雰囲気成分と活発に反応し、またガスは溶融粒子中を速やかに拡散することを示している。

例えば、作動ガスにアルゴン、アルゴン-窒素およびアルゴン-水素の混合ガスを用いて、プラズマ溶射によって作製したニクロム合金の皮膜においても、堆積粒子の間にクロムの酸化物を多く介在している。図-8は、アルゴン-水素 (50%) による皮膜を示したものであるが、薄黒い中間色の組織として観察される層状の相は酸化物である<sup>2)</sup>。

このような溶射材料の溶射雰囲気との反応は、程度の差はあるが、いずれの溶射法においても生じる。例えば、炭素鋼のアーキ溶射では、溶射粒子の炭素量とけい素量が甚だしく減少する<sup>6)</sup> ので、実作業では、このことを勘定に入

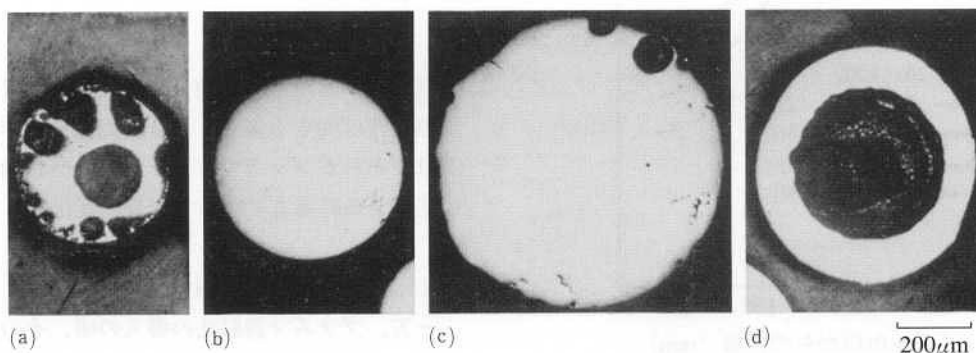


図-7 種々の条件で作られた粒子の断面

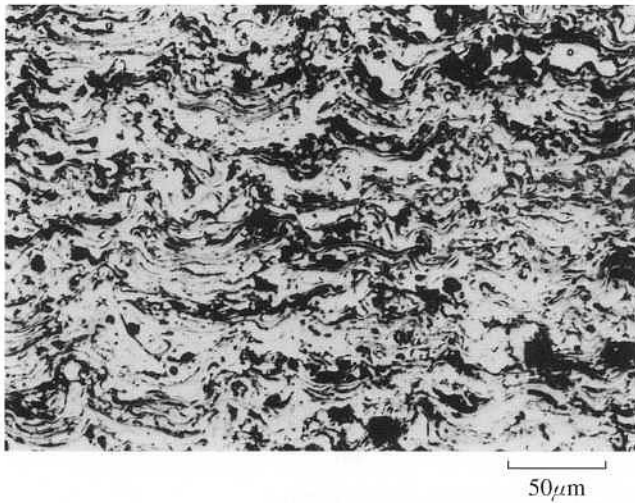


図-8 ニクロム合金のプラズマ溶射皮膜断面の組織

れて、溶射材料を選定している。

セラミックスの溶射でも皮膜の組成は溶射材料のそれとは異なっている場合が多い。例えば、アルミナおよびアルミナ・チタニアのプラズマ溶射において原材料とそれによる皮膜の組成を比較すると、溶射では、熔融状態から急冷されるので、 $Al_2O_3$ でない準安定型の $Al_2O_3$ や $Al_2O_3$ が生成される<sup>7)</sup>。

また、多く利用されている金属炭化物は、大気中で溶射すると、溶射中に分解と酸化を生じる。例えば、WCの溶射では、WCは3000K程度で $W_2C$ とCに分解し、次いでCはOと反応してCOあるいは $CO_2$ を生じて、粒子から脱出する。また、 $W_2C$ はOと反応して、オキシ炭化物 $W_2(C,O)$ を生じ、さらにこれはWとCOに分解する<sup>8)</sup>。さらに、サーメットWC-Coの溶射では、Coが炭化物相の中へ拡散して、Coを含む次炭化物 $Co_x W_y C$ を生じて脱炭する。そして、この反応速度は、CoとWCが溶融すると、甚だしく高くなるといわれる<sup>9)</sup>。これらの材料の溶射では、必然的に上記の反応を伴うことになるので、溶射中、粉末粒子を過熱しないように注意することが肝要である。この点、高速フレイム溶射では、熱源の最高温度が3000K程度であり、通常基材が置かれる位置におけるフレイムへの大気の混入率は約70%と比較的に少なく<sup>9)</sup>、しかも粒子の飛行速度が高いため、フレイム中での滞留時間が短くなり、このため粒子が過熱されないため、溶射材料の変質が少ない皮膜が得られる。また、プラズマ溶射を用いる場合には、減圧溶射によると、この問題を軽減できる。

一般には、溶射によって材料の化学的組成に多少の変化があっても、その皮膜の性能は所期のものであるから、多くの場合、このことは問題にならない。

### 3.1.4 水中プラズマ溶射

溶射材料の雰囲気成分との反応に起因する問題の打開法

の一つとして、大気を完全に遮断する水中プラズマ溶射を開発した<sup>10)</sup>。水中鉄鋼構造物の防食を目的としてアルミニウムの水中プラズマ溶射を試みたところ、意外にも、良質の皮膜が得られたので、その利用対象を機械、器具類の部品に切り替えて、行った研究である。

まず、大気中で用いているガンのノズル出口を水深150mmに位置させ横向き溶射を行った。溶射材料にはニクロム合金を用いた（この材料は、溶射中に酸化すると、皮膜に介在する酸化物を薄黒い相として顕微鏡で簡単に観察できる<sup>2)</sup>ので、この種の開発実験を行う場合に便利である）。溶射距離は20mmとしたが、基材との間にはプラズマジェットによる空洞が形成され、その空間で作製された皮膜は大気中で作製されたものより緻密であり、しかも酸化物が全く認められない（皮膜内に酸化物がないので、硬さは低くなっている）。このとき、溶射空間は作動ガスのアルゴンから成り、水の分解による酸素は全く存在しなかった。しかし、この溶射では溶射効率が低いという難点があった。

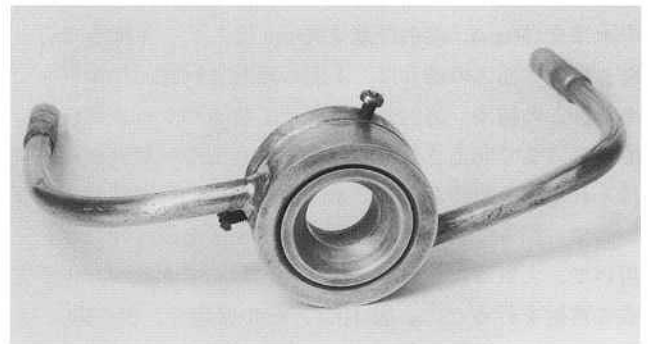


図-9 シールドキャップの外観

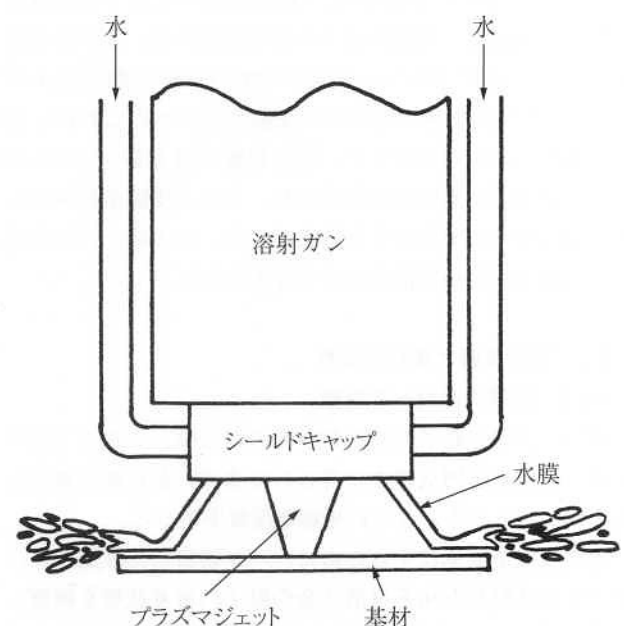
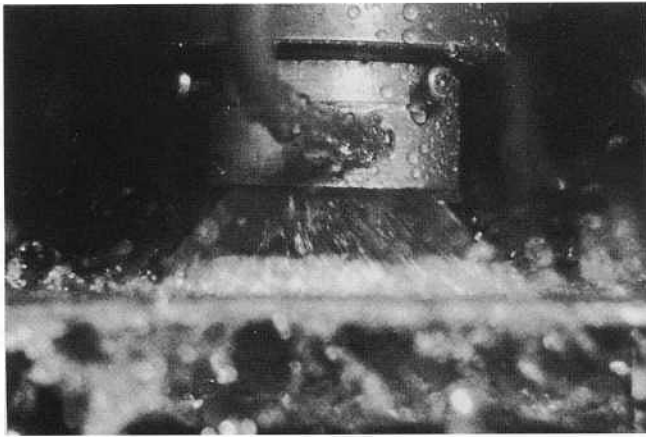
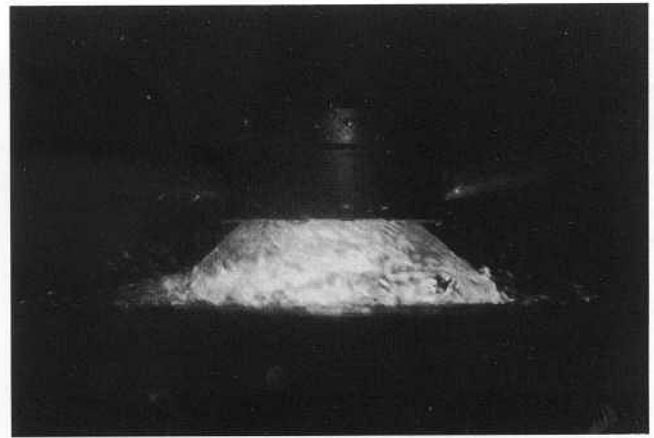


図-10 水シールドプラズマ溶射の原理



(a)



(b)

図-11 水膜シールド(a)とその中でプラズマジェットを発生している状態(b)

そこで、溶射ガンの前面に円錐状のスリットをもつシールドキャップ(図-9)を取付け、スリットからアルゴンガスあるいは水を噴出させてガンと基材の間に形成される円錐状空間を安定にする方式を試みた<sup>11)</sup>。実験は、ガンの前面の水深を150mm、溶射距離を30mmとして、下向きで行った。溶射雰囲気成分は、上記の場合と同様、アルゴンである。この結果、溶射効率は、とくに水のシールドによって75%にまで向上され、酸化物を介在しない緻密な皮膜が得られた。上記の2方式の水中溶射では、作業性がよくないので、図-9に示したシールドキャップを取付けたガンを用いて、大気中において基材平面に対して水膜シールド方式の溶射を行った<sup>12)</sup>。図-10は、その原理を、図-11(a)、(b)はそれぞれ、円錐状水膜シールドを行っている状態とその中にプラズマジェットを発生させた状態を示したものである。この方式では、溶射点領域の雰囲気酸素濃度は溶射距離45mmにおいてほぼ0%、60mmにおいても5%未満であり、大気混入の問題はほとんど解消された。これによるWC-Coの溶射において、前述のWCの分解と酸化およびWCとCoの反応を殆ど伴わない皮膜が得られたこれは、溶射雰囲気に酸素が含まれず、溶射距離が短くなっているため溶射粒子の加熱時間が短縮され、その上皮膜が効果的に水冷されるためであろうと考えている。さらに、この方式では溶射効率が80%程度にまで改善された。

## 3.2 溶射皮膜と基材の境界

### 3.2.1 皮膜の基材への密着

溶射ガンに送給された溶射材料の粒子は、これまで述べたような溶射雰囲気の中を飛行してきて、基材面に衝突して皮膜となると、さらに複雑な現象を生じる。

衝突現象を簡単にするために、バフ研磨した軟鋼基材にプラズマ溶射したNi系自溶合金の粒子の密着状態を観察した<sup>13)</sup>。図-12(a)は室温の基材に衝突し、密着した粒子を示したもので、粒子の中心部は小さな円形に基材面にぬれて

いるが、周辺部は飛散して密着している。(b)は基材を573Kに予熱した場合で、粒子は大きく円形に広がり、基材面によくぬれて、全面的に密着している。(c)は673Kの予熱を行った場合で、粒子は基材面に複雑に散らばった状態で密着し、粒子の基材面へのぬれ性がかなり低下していることを示している。さらに(d)は基材を一旦673Kに加熱した後、その温度が573Kに低下した瞬間に溶射した粒子であるが、(b)と同じ温度であるのに拘らず、基材面へのぬれ性は回復しないで、その密着状態は(c)の場合に似ている。これらの予熱状態で作製した4種類の皮膜の引張密着強さの中、573Kの予熱による皮膜が最高であった。このように溶射粒子の基材への密着は微妙な状態の違いに大きく影響を受けるのである。この研究では、この密着状態の違いの原因の一つは基材面における鉄酸化物の性状によると簡単に結論したが、これは複雑な問題で、さらに多くの深い研究を要するものと思われる。

また、化学研磨したアルミニウムおよび軟鋼の基材に融点のかなり異なった材料、すなわちニッケル、クロム、モリブデン、タンタルおよびタングステンプラズマ溶射して、皮膜と基材の境界の構造について研究した<sup>14)</sup>。

基材がアルミニウムの場合、いずれの皮膜においても、皮膜と基材の境界には、結合層が形成されている部分、さらに粒子が基材に衝突した際に基材を溶融して細かく侵入している部分が観察された。軟鋼基材の場合には、ニッケルおよびクロム皮膜と基材の境界には部分的に結合層が認められるが、大部分は機械的噛付きによって密着していた。一方、高融点をもつモリブデン、タンタルおよびタングステン皮膜では基材が溶融して形成されたとみられる結合層が多く生じていた。これらの結合層には、表-2に示すように、皮膜と基材の主要元素からなる金属間化合物の生成が認められた。それら化合物の二三の融点を註に示してあるが、いずれも基材のそれ以上となっている。従って、このことは溶射材料と基材の融点の関係も皮膜の密着性に影響

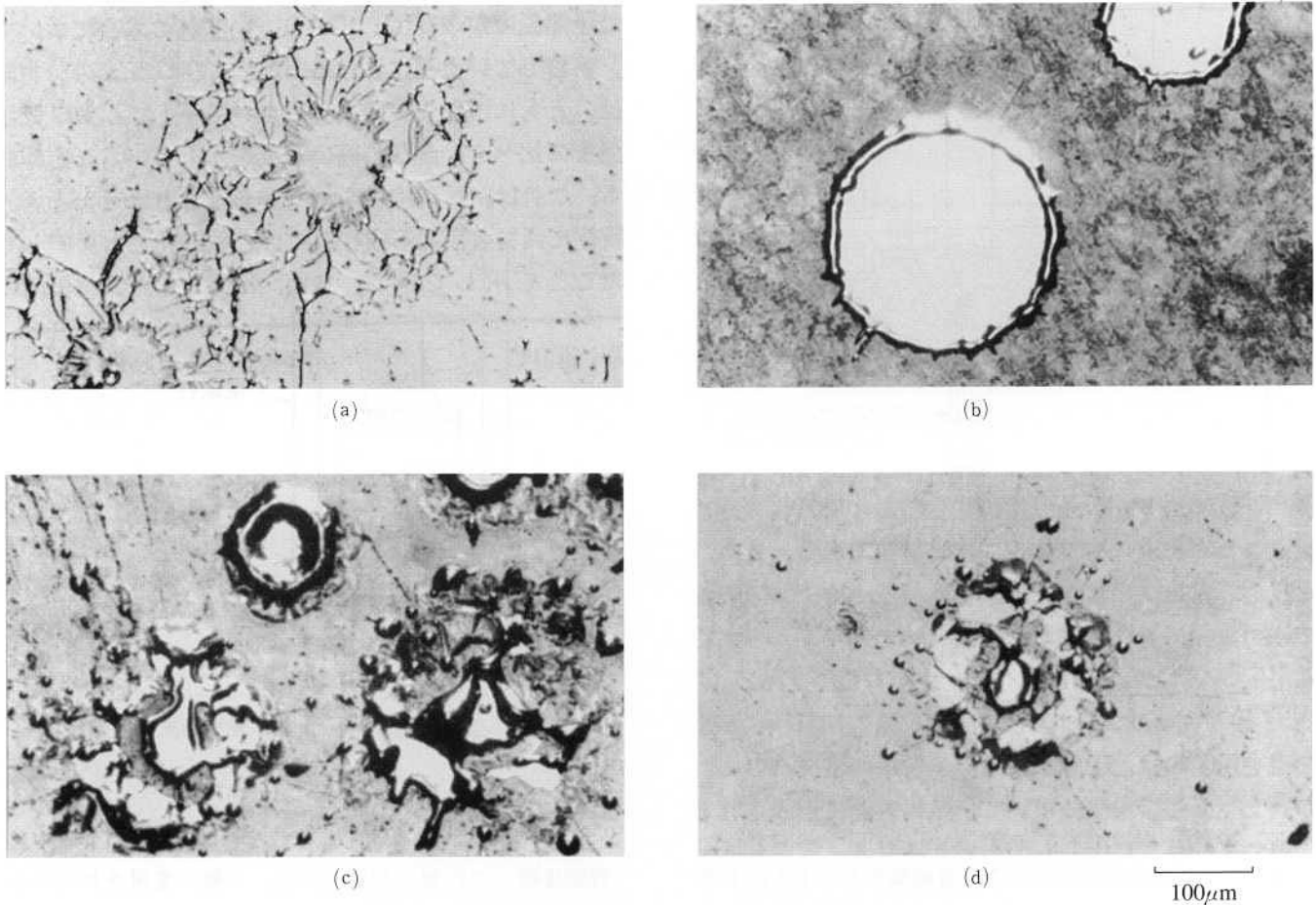


図-12 Ni基自溶合金粒子の軟鋼基材面への密着

表-2 皮膜と基材の境界部に生成された金属間化合物

皮膜 基材	ニッケル	クロム	モリブデン	タンタル	タングステン
アルミニウム	Al <sub>3</sub> Ni*	Al <sub>5</sub> Cr	Al <sub>3</sub> Mo	Al <sub>3</sub> Ta	WAl <sub>12</sub>
軟鋼	—	—	σ-FeMo** Fe <sub>2</sub> Mo	Fe <sub>7</sub> Ta <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> W Fe <sub>7</sub> W <sub>6</sub> ***

〈註〉\*Al<sub>3</sub>Ni生成温度：1115K, 1127K

\*\*σ-FeMo生成温度：1813K

\*\*\*Fe<sub>7</sub>W<sub>6</sub>生成温度：1913K

(Hansen: Constitution of Binary Alloys)

することを示している。

なお、このような金属間化合物の熱膨脹率などの物理的性質、化学的性質および力学的性質は、基材および皮膜のそれらと本質的に異なっているので、この化合物の皮膜の諸性質、とくに密着性への影響などは重要な研究課題である。

### 3.2.2 プラズマ肉盛溶接

一般に、皮膜の基材への密着は、主として粗面化した基材表面への粒子の機械的噛付き（投錨効果）によっており、これに加えて、皮膜と基材間の融着層、相互拡散層の部分

的生成およびファン・デル・ワールス力によっているとされ、このため、皮膜の基材への密着強さが低い。また、皮膜には多くの気孔が存在するという欠点をもっている。

このことについて、自溶合金の溶射では、前述のように、通常の溶射を行った後、その皮膜をフェージングして、基材と完全に融合させ、しかも酸化物などを含まない無気孔のすぐれた皮膜を作製している。

プラズマ溶射の研究を始めて、暫くすると、筆者にはこの問題が気にかかった。初期に行ったプラズマジェットの基本性質についての研究<sup>15)</sup>によって、プラズマジェットに比較してプラズマアークは加工材料への加熱効果が格段に大きいというデータを得ていたので、これらの熱源を併用して、低電力によるプラズマアークで基材表面を極く浅く必要最小限だけ溶融し、そこへ溶射材料粉末をプラズマジェットで軽く吹付ける方法（半移送アーク型プラズマジェットによる肉盛溶接法、図-13）を開発した<sup>16)</sup>。この方法は、現在、プラズマ粉体肉盛溶接と呼ばれているものである。実験は、基材に軟鋼板、溶接材料にCo基自溶合金ならびに50%WC混合のNi基自溶合金を用いて行い、通常のアーク溶接によるよりも希釈率の遙かに小さな良好な肉盛金属を得ることができた。

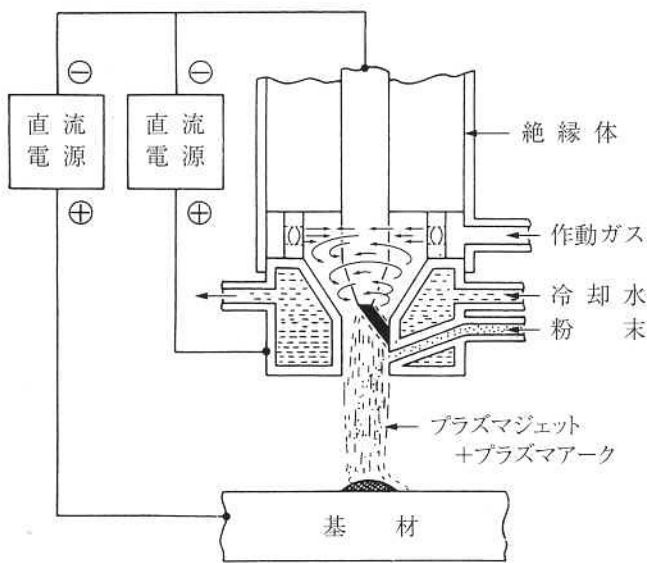


図-13 半移送アーク型プラズマ肉盛溶接（プラズマ粉末肉盛溶接）の原理

さらに、用途によっては、通常の方法によるよりも1パスで幅の大きい肉盛金属が要求される場合が想定される。このため、図-14に示すように、半移送型プラズマジェット基材の進行方向と平行になる交番磁場を与える方法を考案した<sup>17)</sup>。すなわち、このジェットでは、電流の通っているプラズマアークを併発させてあるので、これは交番磁場において左右に電磁力（ローレンツ力）を受けて、その基材面の陽極点（加熱点）を基材の進行方向に垂直に振動させて、基材面の溶融幅を拡大し、そこへ溶融粉末を吹付けて、幅の広い溶接金属を得ることができた。

#### 4 応用

溶射は、他の表面改質法と比較して、多くの利点をもっているため、各種産業において極めて重要な技術となっている。

従来からのアルミニウム、亜鉛あるいはアルミニウム-亜鉛合金による鉄鋼構造物の防錆、防食溶射は、依然として溶射の重要な用途で、橋梁、各種建造物、プラント、船舶や輸送機械、交通や通信設備など多方面で用いられている<sup>18)</sup>。

また、各種産業の発展と共に、溶射は航空、自動車、鉄道、鉄鋼、電力、化学などの諸工業、各種の産業機械（製紙、印刷、繊維など）から電気、電子機器、家電製品に至るまで広範な産業に拡大している。この場合、溶射は、部材、部品基材よりも高度の性能、すなわち耐食性、耐摩耗性、耐熱性、断熱性など、高温、高圧そして化学的に過酷な雰囲気を含めて、稼働条件において要求される性能をもつ皮膜（保護皮膜）の作製と基材表面に導電性、電気絶縁性、高い熱放射性、イオン導電性、触媒作用あるいは特殊

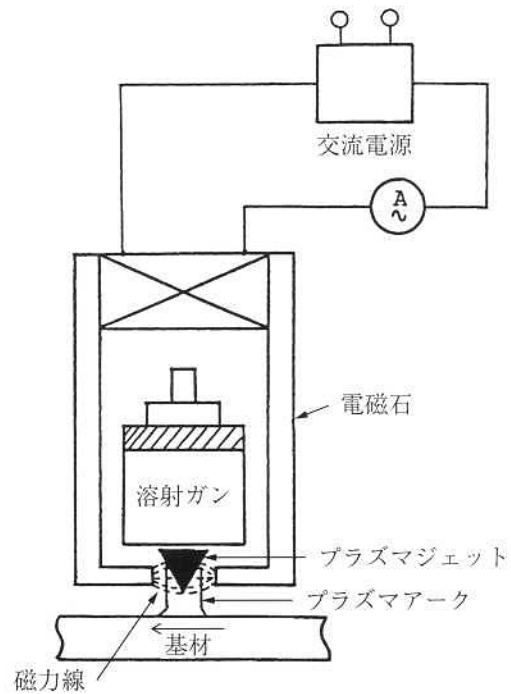


図-14 交番磁場を用いるプラズマ粉末肉盛溶接

な生体機能など、基材のもっていない機能を付与する皮膜（機能皮膜）の作製に利用される。一般に実用されているほとんどの金属、合金が溶射材料として用いられ、それぞれの特長をもつ皮膜が利用されている。例えば、軽量化を目的としてアルミニウム合金化した自動車エンジンのバルブリフタへの炭素鋼溶射、またアルミニウム合金エンジンのシリンダ内面への鋳鉄系材料の溶射などは非常に効果的の利用である。

セラミックスの皮膜は耐摩耗性、耐熱性、断熱性、耐食性、熱放射性などに対して用いられるが、その性能は次第に向上している。皮膜には、必然的に気孔が内在するという性質があり、この性質を活用している例も見られるが、それを浸透する使用雰囲気中のガスや液体から基材を保護する必要のある場合には、封孔処理を行ったり、緻密で耐食性をもつアンダーコートを用いる。例えば、ガスタービンの部品の断熱には、NiCrAlY合金、CoCrAlY合金などのアンダーコートとZrO<sub>2</sub>-MgOなどの皮膜が利用されている。また、セラミックス皮膜は機能付与に活用されている。自動車用、製鋼用の酸素センサ、燃料電池などへの固体電解質としてのジルコニア皮膜、多孔質で表面積が大きいという適性を利用しての医用インプラント（人工歯根、金属義肢など）へのハイドロキシアパタイト皮膜などである。さらに、チタニアは、環境浄化のためのNO<sub>x</sub>などの分解における光触媒作用をもつもので、それを目的とした皮膜、また、大腸菌などに対する抗菌効果もあるといわれ、このような機能をもつ皮膜の利用が期待される。

サーメット皮膜の利用は盛んであり、各種の炭化物サー



メットは種々の厳しい環境下における耐摩耗用には独特の利用価値を有し、これが不可欠の技術となっている。

#### 参考文献

- 1) 蓮井：新版溶射工学（平成8），産報出版
- 2) 蓮井、菅、小鳥井：日本溶射協会誌，27(1990)，1，1
- 3) 蓮井、北原、福島：溶接学会誌，36(1967)，5，571
- 4) 蓮井、北原：金材研報告，7(1964)，2，117
- 5) S.Kitahara, V.A.Petrunichev and A.Hasui：Trans.NRIM,14 (1972)，6，261
- 6) 日本溶射協会：溶射便覧(昭和39)，日刊工業新聞社
- 7) 岩本：溶射技術，9(1990)，3，43
- 8) M.E.Vinayo, F.Kassabji, J.Guyonnet and P.Fauchais：J.Vac.Scj.Tech., A3(6), Nov/Dec(1985)，2483
- 9) J.R.Fincke, W.D.Swank and D.C.Haggard：Proc. 7th NTSC(1994)，325
- 10) 蓮井、河本他：日本溶射協会誌，30(1993)，1，1
- 11) 蓮井、渡部：日本溶射協会誌，32(1995)，4，227
- 12) 蓮井、池田、横田、横田、渡辺：未発表
- 13) 蓮井、小宮：日本溶射協会誌，15(1978)，2，508
- 14) 北原、蓮井：溶接学会誌，42(1973)，2，91
- 15) 蓮井、笠原、江森、飯吉：金材研研究報告，8(1965)，1，54
- 16) 蓮井：金材研研究報告，7(1964)，3，208
- 17) 蓮井、菅、森：日本溶射協会誌，28(1991) 2，70
- 18) 日本溶射工業会：溶射-防錆防食(1995)