

(株)フジインコーポレーテッド  
課長 工学博士  
五日市 剛  
Tsuyoshi Itsukaichi



## サーメット溶射の最新技術

New Technologies of High Velocity Flame Spraying and Cermet  
Materials

### 1 はじめに

硬質クロムメッキからサーメット溶射への代替が徐々に進んでいる。<sup>1)</sup> 欧米ではメッキ加工業者が高速フレイム溶射機 (HVOFやHVAF) を購入するケースが増えているそうだが、最近国内でもその傾向が出てきた。これは、サーメット溶射市場の確実な広がりを実感させる、ほんのひとつの例である。

この数年間の高速フレイム溶射機の販売実績を調べてみると、「気体燃料 (プロパン、プロピレン、エチレン、アセチレン、水素など) - 酸素」タイプよりも「液体燃料 (灯油) - 酸素」タイプの方が人気が高いようである。上述の国内メッキ加工業者が選んだ溶射機はいずれも「灯油 - 酸素」タイプである。いろいろな種類のHVOFやHVAFが国内外の市場に出回っており、それぞれ固有の長所、短所を有している。それらを熟知し、特長をフルに活

かしてアプリケーションへ適用するのが重要ではないかと思われる。

本稿では、代表的な高速フレイム溶射機の特徴にまず触れ、私の思うところを率直に述べてみたい。その後、サーメット溶射に関する最近の興味深い話題に触れ、弊社で得られた研究データを中心に紹介させていただく。

### 2 高速フレイム溶射機の比較

各種高速フレイム溶射機の特徴を表1にまとめた。また、表2はヨーロッパにおける高速フレイム溶射機の事情を記したものである。<sup>2)</sup> 各溶射機は、使用する燃料 (気体or液体)、酸素源 (酸素or空気)、燃焼方式 (内部or外部 (DJは外部))、フレイムへの粉末の投入場所 (フレイム軸中心orラジアル方向)、ガンの冷却方式 (水冷or空冷) によって特徴づけることができる。

表1 各種高速フレイム溶射機の特徴

溶射機	メーカー or 商社	溶射粉末 粒度例 ( $\mu\text{m}$ )	スピットイング	特徴 ① (溶射条件)	特徴 ② (皮膜特性その他)
DJ2700	スルザーメテコ	-45+15 -53+20 -63+15	注意を要する	・水冷方式 ・プロピレン-酸素 ・SD=200~250mm	・緻密、高硬度 ・処理能力はDJの2~3倍 ・DJ同様、厚膜が難しい ・粉末調整で皮膜の圧縮残留応力可
JP-5000	日本ユテク	-45+15 -53+15 -53+20	注意を要する	・水冷方式 ・灯油-酸素 ・SD=300~450mm	・付着効率: やや低い ・密着強度が高く、耐摩耗性に優れる ・安全性高い ・Jガン、JPW5は同種。θガン取付可
DJ1000	スルザーメテコ	-45+5 -38+10 -30+10	あまり問題ない	・空冷方式 ・プロピレン-酸素 ・SD=180~250mm	・現場施工の実績多い ・ノズル口径が大きく、処理能力はDJの2倍 ・気孔率はDJより高い
DJ (ダイヤモンドジェット)	スルザーメテコ	-45+5 -38+10 -30+10	あまり問題ない	・空冷方式 ・プロピレン-酸素 ・SD=150~200mm	・気孔率は高く、処理能力低 ・付着効率は高い ・ノズルの工夫で膜質が向上するらしい(各社のノウハウ)
SB-250 (Intelli-Jet)	UniqueCoat Technologies (アメリカ)	-30+5 -25+10 -25+15	あまり問題ない	・空冷方式 ・プロパン-空気 ・SD=120~200mm	・緻密、低硬度 ・処理能力が特大 ・最も「低温-高速」のフレイム ・メタル溶射はスピットイング要注意
θガン	ウイティコジャパン	-30+5 -25 -20	全く問題ない	・水冷方式 ・灯油-酸素 ・SD=200~400mm	・緻密 ・微粉末の溶射に適する ・低融点金属も溶射可能 ・還元フレイム可能 ・処理能力大 ・フレイムパターン大

\*現場施工の際、プロパンを使用することがある

表2 ヨーロッパにおける高速フレーム溶射機の事情

溶射機	メーカー	長所	短所	販売台数 (ヨーロッパ以外含む)
DJ	Sulzer Metco	・低コスト ・構造がシンプル	・気体燃料を使用 ・皮膜の品質が低い	数百
DJ Hybrid (DJ2700 など)	Sulzer Metco	・DJ 皮膜の品質と信頼性を向上 ・品質は他社機並	・気体燃料を使用 ・DJ との整合性に注意	70~120
JP-5000	Praxair/TAFA	・灯油-酸素使用 ・高い皮膜品質 ・業界のスタンダードになるかも	・騒音大 ・Praxair が MillerThermal と TAFA を買収したので混乱	150
Jet Kote Jet Kote II	Deloro Stellite	・最初のシステム (Jet Kote) は貧弱だ が、Jet Kote II は大きく改善された	・気体燃料を使用 ・技術サポートが貧弱	100~200 (JetKote) 30~40 (JetKote II)
HV2000 (Top Gun)	Miller Thermal (現在 Praxair)	・付着効率が低い ・局所溶射が得意 ・セラミックスの溶射可能	・気体燃料を使用 ・処理能力が低い ・スピットングが生じやすい	40~50
C-CJS	Thermico	・灯油-酸素使用 ・JP-5000 に比べて フレキシブルで完成度が高い	・高価 ・企業規模が小さい	20~30
K2	GTV	・灯油-酸素使用 ・低コスト	・企業規模が小さい	10~15
MET-JET III	Metallisation	・灯油-酸素使用 ・低ランニングコスト		6~10

HVOFとして国内で最初に普及したのは「気体燃料-酸素」を使用する Jet Kote であるが、初期型は手動操作が多く、スピットングもかなり問題となり非常に使いにくかった。現在は、大幅に改良された Jet Kote II、Jet Kote III が販売されているが、国内ではそれほど普及していない。

コスト的に有利と言われている「灯油-空気」タイプの HVAF については、現在数社のみ使用している。WC系サーメットの施工実績は多いものの、フレーム温度がかなり低いために CrC系サーメットの溶射が比較的難しい。また、ガンの冷却方式が水冷ではないため、燃焼室の寿命が短いという難点もある。改良型 (HVAF II) においては、ガンのメンテナンスが行いやすくなったばかりでなく、灯油と空気の混合方式を改善したために燃焼効率が向上し、付着効率がアップした。HVAFは大量の圧縮空気を連続的に使用するので、長時間溶射する際には流量の安定に留意しなければならない。

同じ HVAF ではあるが、灯油の代わりにプロパン (またはプロピレン) を使用した Intelli-Jet (例えば SB250) は粉末の処理量 (単位時間当たりの溶射量) が非常に大きく、コストメリットが大きい。<sup>3)</sup> 皮膜の硬度は比較的低い、耐摩耗性は一般に良好で、緻密な皮膜が得られやすい。<sup>4)</sup> ただ、粒度が細かめでシャープな粒度分布の粉末が望ましいため、粉末の選定に注意を要する。いずれの HVAF においても共通することは、設備的に能力の大きな集塵機が必要なことと、オペレーターの技量により皮膜の品質が大きく左右されることが挙げられ、後者に関してはフレームの調整など、きめこまかな標準化が望まれる。

DJ (ダイヤモンドジェット) は HVOF の中では普及台数が最も多い。皮膜の緻密性や機械的特性が他の HVOF 皮膜と比べて低いと言われているが、ノズルを独自に改良することで、より高品質な皮膜の作製に成功している会社が多くある。これは各社のノウハウであり、一般に公開さ

れていない。DJ の欠点を補ったといわれるものがハイブリッドタイプ (例えば DJ2700) である。DJ や DJ2700 の溶射皮膜には、一般に引張の内部応力が生じているといわれるが、DJ2700 においては粉末粒子の強度を調整した比較的粗めのサーメット粉末を溶射することで、皮膜の残留応力をやや圧縮の状態にすることができ、耐熱衝撃性などがより優れた皮膜の作製が可能である。<sup>5)</sup>

JP-5000 は作業性、溶射特性、皮膜特性のいずれをとっても安定した信頼性があり、この数年間に国内外で最も普及した HVOF である。以前は 4 インチと 8 インチのパレルが使用されていたが、最近、6 インチが標準仕様となった。皮膜の密着力や緻密性などの諸特性は (既存パレルの中では) 8 インチパレルを使用した場合が最も優れているが、スピットングの問題が絶えないことから 6 インチの仕様に変更された。4 インチパレルによる皮膜の気孔率は 6 インチのものよりも高く<sup>6)</sup>、腐食環境下での皮膜の適用においては注意を要する。スピットング防止のために、どうしてもパレルを短くする必要がある場合は、溶射距離を短くしたり<sup>6)</sup> 燃焼室圧力を高くする<sup>5)</sup> などして、より緻密な皮膜をつくるような工夫が必要となろう。もちろんこの場合、前者はフレームの熱影響を素材に与えたり、後者はスピットングが生じやすくなるので注意しなくてはならない。そもそも、スピットングを起こしにくい (起こさない) 粉末<sup>7)</sup> を 8 インチパレルで溶射することがベストなのではないかと思われる (3.1 参照)。図 1 は JP-5000 (4 および 8 インチパレル使用) で溶射した場合、飛行粒子の速度と温度が溶射距離によってどのように変化するか測定した結果である。<sup>8)</sup> やはりパレルが長いほど高温、高速となる傾向があり、パレル長さが皮膜の品質に大きな影響を及ぼすことは容易に想像できる。

θガン (図 2) は粉末を外部供給することによりスピットングの問題を解決した興味深い HVOF である。高速の

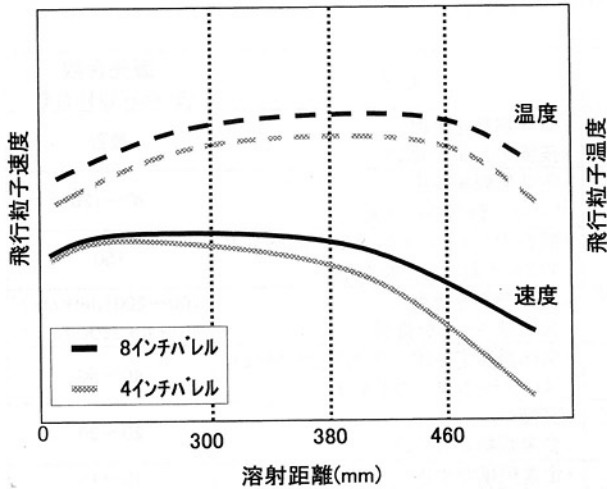


図1 JP-5000における飛行粒子の速度と温度の変化

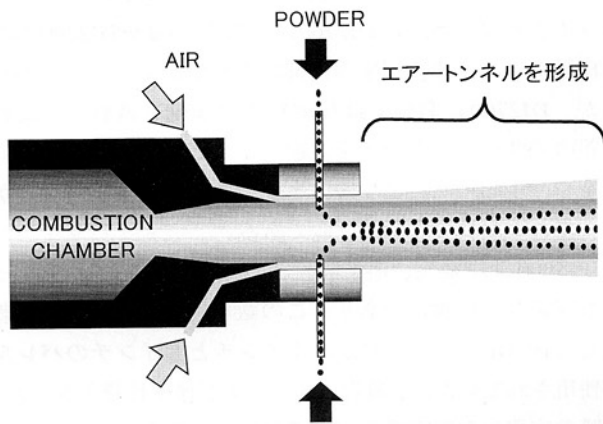


図2  $\theta$  ガンの構造

フレームに粉末を外部供給して、どうしてフレームにうまく乗るのか最初は不思議に思ったが、ノズル出口の周辺部から絶妙なバランスで压缩空气を噴出させてエアートンネルを形成させ、ある程度バレルの役目を果たさせているのである。これによってフレームを取束させ、その中に粉末を滞留、加速させるような状態をつくっている。ただ、粉末が加熱される時間が短いことから、溶けやすい微粉が $\theta$ ガンに適しているようである。(低融点のメタルなどは粗めの粉末でもかまわない。)しかし、これまで市販されていたサーメット粉末に適切な微粉粒度が少なかったことと、流動性の低い微粉を安定的にガンへ送給できる粉末供給機が限られていたことから、 $\theta$ ガンの普及はこれまであまり進んでこなかったように思える。最近では極端に流動性の悪い微粉末を送給できる粉末供給機<sup>3,9)</sup>が簡単に入手できるようになり、さらに $\theta$ ガンに適した粉末が次々と開発<sup>5)</sup>されていることから $\theta$ ガンへの期待は高まるばかりである。また、 $\theta$ ガンに若干改造を加えることでセラミック

スの微粉を溶射できることも分かり<sup>5)</sup>、今後ますます興味深い分野を開拓していくものと思われる。

### 3 スピットング対策

サーメットを溶射する際、オペレーターが現場でしばしば泣かされるトラブルのひとつがスピットングである(図3)。溶射している最中に、ガンのノズル(またはバレル)の内壁先端部付近に溶けた飛行粒子が付着・堆積してしまい、時にはその堆積物が一部脱落して皮膜内に混入してしまう現象である。こうなると、溶射の継続は不可能となり、高価なノズルも交換しなくてはならない。場合によっては、ワークの皮膜をすべて剥がして施工し直すことにもなる。スピットングの主要原因としては、①粉末、②装置、③溶射条件の3点が挙げられる。それぞれの特性がバランスした状態で安定した溶射が行われることを考えると、この3点に関しては常に徹底した管理とチェックが必要である。ここでは粉末にスピットングの原因があると仮定して、その背景や対処法などについてお話をしたい。

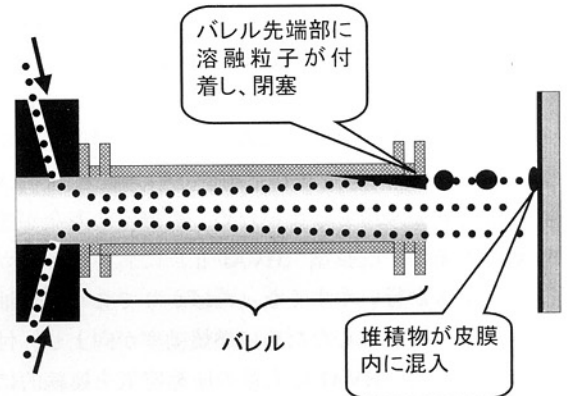


図3 スピットング現象のイメージ図

#### 3.1 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/25NiCr粉末における調査

広汎に使用されるサーメットの中でもWC/12Coは比較的スピットングが起りにくいといわれているが、微粉が多く含まれたり、WC/17CoやWC/25Coのように金属成分(Co)が多くなると、スピットングは起りやすくなる。サーメットの製法別にみると、溶融-粉碎法による粉末が最もスピットングを起しにくく、次いで焼結-粉碎法。現在、最も普及している造粒-焼結粉は、スピットングを起しやすいため注意を要する。

ボイラーチューブやタービンブレードなどに溶射実績の多いCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/25NiCrにおいてはスピットングトラブルの話をよく聞く。最近のサーメットは、粉末コストや付着効率などの点で有利な造粒-焼結法によるものが主流であり、メーカーによって、あるいはロットによってスピットン

グが起きたり起きなかつたりと常にオペレーターを悩まし続けてきた。材種的にも製法的にもCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/25NiCrはスピットティングを起こしやすい。その厄介なCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/25NiCr粉末をどう選んだらよいのか？

サーメットのスピットティングに関しては、使用する粉末の中にフレームに溶けやすい微粉末が多く含まれることが原因と言われてきた。また、一見微粉末を含んでいない粉末の場合でも、粒子自身の強度が極端に低いと仮定すると、粉末供給機からガンへ至るまでに崩壊して微粉末化してしまったり、高速のフレームに突入してすぐに粉々に崩壊してしまい、同様なトラブルが起こり得る。ところで、サーメット粉末の粒子1個1個を押しつぶして直に粒子強度を測定する方法がある。<sup>10)</sup>造粒-焼結粉の場合は粒子と言わずに顆粒と表現する機会が多いので、「顆粒強度」とさせていただく。製造プロセスにおいて、造粒した顆粒を焼結する際、焼結温度を上げれば上げるほど顆粒は焼き締まり、顆粒自体の密度は高くなる。同時に顆粒強度は高くなり、粉末の見掛密度(嵩比重)と流動性も向上する傾向となる。<sup>5)</sup>図4はCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/25NiCr粉末の顆粒強度と微粉末の割合を変化させた場合のJP-5000(8インチバレル使用)における附着効率とスピットティングの傾向を示す。<sup>7,10)</sup>D<sub>3%</sub>とは、細かめ粒子からの3%積算径を表す。顆粒強度が極端に低い粉末では、微粉末を大幅にカットした場合でもスピットティングは発生しやすい。顆粒強度を高めると、微粉末の割合をある程度以下に抑えれば、スピットティングは発生しなくなるが、顆粒強度が高すぎると微粉末の割合が低くなるにつれて附着効率は極端に低下する傾向が認められた。よって、スピットティングを避けるために、過度に顆粒強度を高くし、且つ微粉末の割合を極端に低くすると、大幅に附着効率を低下させることになる。バランス良く両特性を調整することで、附着効率を低下させずにスピットティングを回避できる粉末が作製できる。このような定量的な実測調査をCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/25NiCrだけでなく、すべてのサーメット溶射材について行うことが理想であり、粉末メーカー側の徹底した品

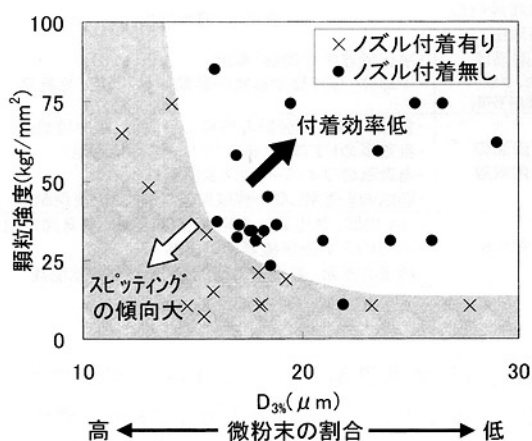


図4 顆粒強度と微粉末の割合とスピットティングの関係

質管理に組み込むことで、溶射現場でのスピットティングのトラブルを大幅に減らすことができると考えている。

### 3.2 バレル長さや粉末特性の相性

上述の通り、粉末の特性をしっかりと管理すれば、長いバレルを用いても附着効率を低下させずにスピットティングを防止できるわけだが、溶射施工する側は各社独自の溶射条件で溶射するケースが多く、粉末メーカーとしては対応が難しいのが実情である。例えば、JP-5000を用い、8インチバレル、灯油-酸素量はTAFEの推奨条件で溶射してもスピットティングが生じないCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/25NiCr粉末があるとすると、この粉末は、通常、顆粒強度(および見掛密度)を高めに設定され、微粉はしっかりとカットされている。しかし、溶射する業者が通常の溶射条件よりも極端に高温、高圧のフレームとなる条件で溶射したとすると、スピットティングが起こるかもしれない。また、この8インチ仕様の粉末を4(または6)インチバレルで溶射したとすると、図1からも分かるようにバレルが短いほど飛行粒子の温度と速度が低くなるので、粉末の溶け(と基材に衝突した時の扁平化)が不十分となり、附着効率は下がり、気孔率の高い皮膜となってしまふ。この場合、過度なピーニングにより、大きな圧縮の内部応力が皮膜内に残留すると思われ、マイクロクラックが多数発生し、厚膜すると剥離しやすくなるかもしれない(表3)。

表3 バレル長さや粉末特性の組み合わせのポイント

	4(or 6)インチバレル仕様の粉末	8インチバレル仕様の粉末
	顆粒強度 微粉割合	低い 少ない
4(or 6)インチバレルで溶射すると?	・適している ・長時間溶射によって、バレル内壁への附着が多少起こる可能性あり*	・粉末の溶けが悪いため、附着効率は低い。皮膜にクラックが生じやすく、気孔率が高くなる。
8インチバレルで溶射すると?	・スピットティング発生 ・附着効率は高い	・適している ・長時間溶射によって、バレル内壁の摩耗が起こり得る

\*6インチバレル使用の場合

逆に、短いバレル用に作製した粉末は、フレームに溶けやすいように設計されており、具体的には顆粒強度(および見掛密度)を低くし、微粉をある程度含ませるようにしている。この粉末をもし8インチバレルで溶射したとすると、当然スピットティングが発生することが予想される。こうしたトラブルを起こさないためにも、粉末メーカーとしっかりコミュニケーションをとり、諸事情の理解を深めることを強くお勧めする。

### 4 微粉末溶射

私が2年ほど前にドイツのある会社を訪ねた際、その会社のトップにこう言われた。「夢のような話で恐縮だが、

サーメットの微粉末をHVOFで溶射したい。粉末は微細であればあるほどよい。するとどうなると思う？表面粗度は極端に低く、as sprayedで使用できるアプリケーションが大幅に増え、高価なダイヤモンド研磨加工が省ける分コストダウンできる。たとえ研磨が必要であっても、通常よりも短時間で研磨することができ、やはりコストダウンとなる。メリットは非常に大きい！」

帰国後、早速そのプロジェクトを社内につくった。

- ・サーメットの微粉末は社内ですべて造れる。粉末の件は問題ない。
- ・微粉末用のHVOFがない。微粉末の溶射となると、どんなガンでもスピittingを起こしてしまう。いや、 $\theta$ ガンがある。
- ・微粉末用の粉末供給機がない。流動性がかなり悪く、普通のフィーダーでは無理だ。いや、テクノサーブのフィーダーがある。

その後、 $\theta$ ガンと微粉末供給機（テクノサーブ製）を購入し、微粉末溶射の研究に取りかかった。使用した微粉末供給機（図5）は「表面倣い式」といわれ、粉末の取り込みに重力は利用せず、粉末表面に接近させたノズルに流入するガスの吸引作用により取り込み、微粉末を送給する機構となっている。<sup>9)</sup>よって、粉末の流動性が極端に悪くても全く問題なく粉末を安定供給することができる。

図6はWC/12Co（WCの一次粒子径： $1.2\mu\text{m}$ ）粉末を $\theta$ ガンで溶射した皮膜の平均粗さRaとWC/12Co粉末の平均粒度（D50）との関係を示している。<sup>11)</sup>粉末の粒度が小さいほど、また溶射距離が短いほどRaは減少し、as sprayedでRaが $1\mu\text{m}$ 以下の皮膜を作製できることが分かった。皮膜は非常に緻密であり、気孔率は0.1%以下であった。皮膜硬度（Hv200g）は850～900であり、スガ摩耗試験、密

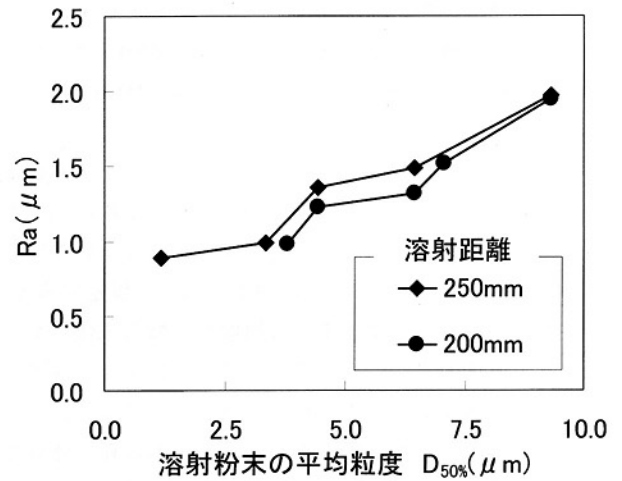


図6 粉末粒度が皮膜のRaに及ぼす影響

着力試験においても、満足のいく結果が得られた。<sup>12)</sup>Raが $1.2\mu\text{m}$ のas sprayed皮膜を通常のダイヤモンド研磨を行った結果、 $Ra \approx 0.008\mu\text{m}$ 、 $R_{max} \approx 0.09\mu\text{m}$ という面粗度を得た。これは、従来のサーメット溶射皮膜の常識を超えた値であり、面粗度においてはCrメッキに匹敵する領域に達している。今後、この微粉末溶射が普及することで、Crメッキからサーメット溶射への代替も加速的に進むものと期待される。

## 5 固体潤滑剤の溶射

固体潤滑剤の適用分野は表4に示すように、日常生活に密着した家電製品から橋梁や建築物の可動部まで多彩である。<sup>13)</sup>「固体潤滑剤を溶射して潤滑皮膜を形成したい」というニーズはかなり以前からあるが、実際には難しそうである。ただ、 $\text{CaF}_2$ 粉末に関してはプラズマ溶射で皮膜形成する実施例がいくつか報告されており、 $900^\circ\text{C}$ 付近まで使用可能といわれている。

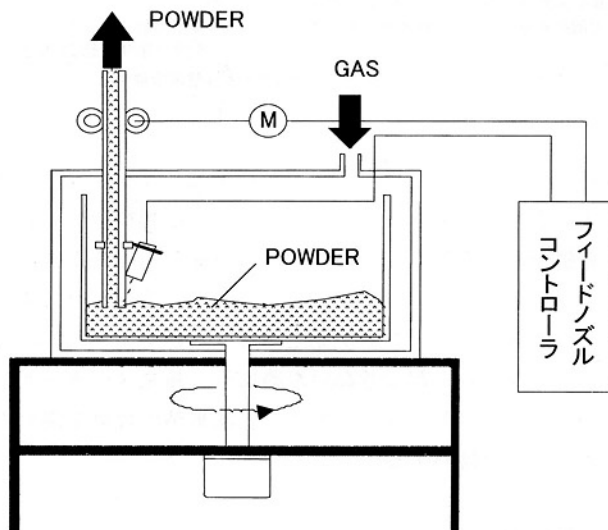


図5 微粉末供給機の模式図

表4  $\text{MoS}_2$ の固体潤滑剤としての適用例

固体潤滑剤の採用理由	適用例(適用理由)
極限環境 (油、グリース 使用不可)	・宇宙機器の可動部(真空) ・半導体、LSI製造装置の駆動部品(真空、低発塵)
潤滑油の 使用制限	・食品、繊維、紙分野の機械の可動部(油汚染回避) ・自動車のドアロック機構(グリース汚染回避) ・自動車のワイパー(油汚染回避) ・切削油を使用しない機械加工(切削油の使用制限)
無保守化	・OA機器、家電製品の可動部(無給油、終身潤滑剤) ・カメラなどの光学機器の可動部 ・橋梁の支承、建築物の可動部(潤滑剤補給困難)

代表的な固体潤滑剤としては $\text{MoS}_2$ 、グラファイト、hBNなどがあるが、これらは層状物質であり、機械的強度に乏しいため、単体での皮膜化は困難である。そこで金属とのサーメット化が考えられるのだが、低温で分解してし

もうMoS<sub>2</sub>に対しては、それ以上の熱を加える通常の製造プロセスは使えない。そこで、無電解メッキ法によるMoS<sub>2</sub>とCuとの複合化を試みた。<sup>14)</sup> 図7のSEM写真は、右側にMoS<sub>2</sub>/50Cuメッキ粉末を示すが、MoS<sub>2</sub>粒子の表面をCuが覆い尽くしているのが分かる。比較のため、造粒-焼結法により作製したWC/12Coの粉末写真を左側に載せた。製法の違いによる粉末形態の特徴差が確認できる。図8<sup>5,14)</sup>の(2)はMoS<sub>2</sub>/50Cuメッキ粉末のXRDパターンである。MoS<sub>2</sub>とCuのピークがはっきりと現れている。その粉末を1000℃まで加熱すると、図8の(1)に示されるようにMoS<sub>2</sub>ピークは完全に消失し、CuMo<sub>2</sub>S<sub>3</sub>相が生成してしまい固体潤滑機能が低下してしまう。よって、このメッキ粉をプラズマ溶射ではなく、フレイム温度が低くて高速なHVOFで溶射してみたらどうかというアイデアが出てきた。表面のCuのみを溶融または軟化させ、コアのMoS<sub>2</sub>に熱影響が及ぶ前に基材に衝突させ、密着性が高く緻密な皮膜にしたいという考えからだ。図8の(3)はJP-5000、(4)はθガンにより形成した皮膜のXRDパターンである。どちらも同じ粒度(-53+20 μm)のMoS<sub>2</sub>/50Cu粉を溶射したわけだが、JP-5000による皮膜は、MoS<sub>2</sub>の分解が顕著に見られ、Cu<sub>2</sub>Oの生成が確認された。それに対し、θガンによる皮膜は溶射粉末のXRDパターンとほとんど同一であり、MoS<sub>2</sub>及び

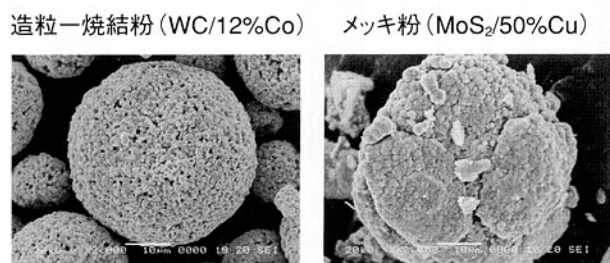


図7 WC/12CoとMoS<sub>2</sub>/50Cu溶射粉末のSEM写真

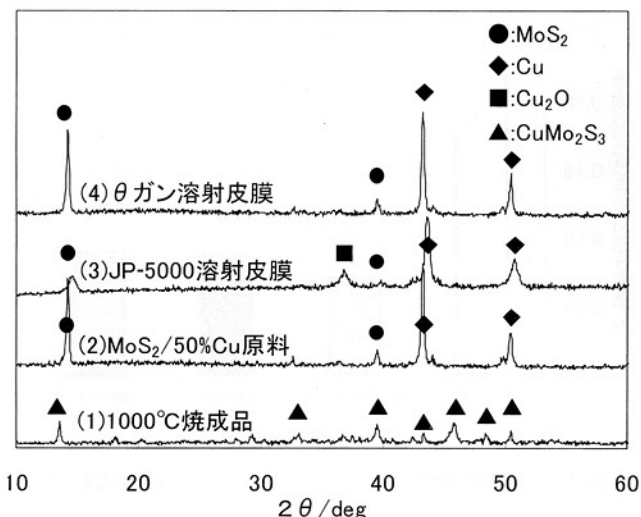


図8 MoS<sub>2</sub>/50Cu粉末およびその皮膜のX線回折測定結果

Cuの変質がほとんど起こっていないことを示している。

JP-5000によるMoS<sub>2</sub>/50Cuの付着効率は13.0%と低かったのに対して、θガンによる付着効率は35.2%と3倍近い高歩留りを示し、溶射粉末を変質させずに厚膜化が可能であることが調査の結果から判明した。<sup>14)</sup>

### 6 耐衝撃溶射材とその皮膜

図9は最も広汎に使用されるWCサーメット皮膜のスラリーエロージョン試験の結果である。<sup>5)</sup> いずれもJP-5000で溶射した皮膜についてである。WC/12Co皮膜は湿式(腐食)環境下ではCoの腐食によるWC粒子の脱落が起こり、優れた耐摩耗性は期待できない。それに対して国内でポピュラーなWC/20CrC/7Niや欧米で最も人気の高いWC/10Co/4Crの耐摩耗性は抜群である。図9によれば、WC/10Co/4Crの耐摩耗性はWC/12Coの4.5倍、基材(STKM12C)の20倍である。

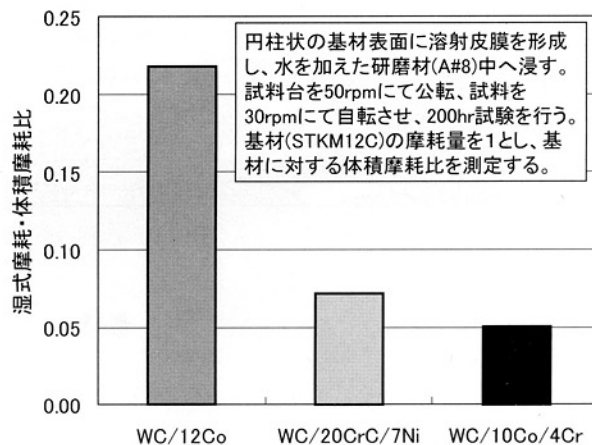


図9 各種WCサーメット皮膜のスラリーエロージョン試験の結果

しかし、皮膜に何らかの強い衝撃が加わる腐食環境下での使用となると、さすがのWC/20CrC/7NiやWC/10Co/4Crでもお手上げとなることが多い。特にWC/20CrC/7Niの耐衝撃性、靱性は他のサーメット皮膜と比べると非常に低いことが知られている。そこで、WC/20CrC/7Niをベースとして耐衝撃性を大幅に向上させることができないか試みることにした。

#### 6.1 耐衝撃溶射材の開発<sup>15-17)</sup>

WC/20CrC/7NiのWC一次粒子は通常0.8~2.0 μmである。これを4~6 μmと大きくするとNiバインダー相の平均自由行路が大きくなり、皮膜の靱性を向上させることができる。また、基本となるWC/20CrC/7Ni中のNi量を10%まで増やし、メタル量を多くすることで更なる靱性の向上が期待できる。さらに、純度を極限まで上げたNiCrまたはNiを10%あるいは20%均一にブレンドすることによって、

皮膜中にメタル相を分散させ、衝撃に対するクッション効果を発揮させることができる。この溶射材を溶射した皮膜の断面模式図が図10である。丸みを帯びたメタル相が皮膜中に均一に分散していることが重要である。メタル相が溶けすぎて細長いラメラとなつては意味がない。適度な丸みを帯びさせるために溶射条件を工夫しなければならない。

図11はJP-5000における酸素と灯油の流量をパラメータとした燃焼室圧力のマップ<sup>5)</sup>である。stoichiometricと書いた直線は理論燃焼比を表しており、フレイムの温度が最も高い状態であると考えられる。この直線から遠ざかるほどフレイム温度は低下する。燃焼室圧力は右上へ行けばいくほど高くなる。耐衝撃サーメット材の溶射に適した灯油-酸素条件を模索した結果、通常のWCサーメット

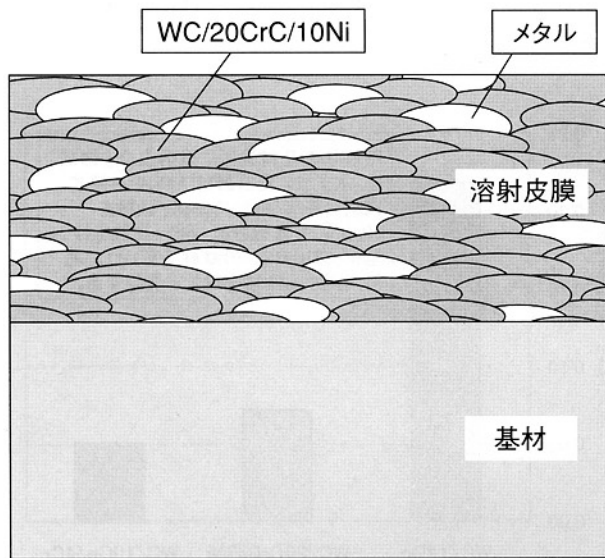


図10 耐衝撃サーメット皮膜断面の模式図

の溶射条件とは対照的に、灯油リッチの領域で見い出された。フレイムが還元炎となるこの条件で、均一にブレンドされた粉末を溶射することにより、図10のようなユニークな皮膜が作製できるのである。

## 6.2 耐衝撃溶射皮膜の性質<sup>5,17)</sup>

図12はJP-5000で溶射した各種WCサーメット皮膜のアブレッシブ摩耗(スガ摩耗)試験結果である。W2010XJとはWC/20CrC/10Niに10%のNiCrをブレンドしたもの、また、W2011XJとは10%のNiをブレンドしたものである。いずれもWC/12Coの耐摩耗性よりも優れており、WC/20CrC/7Niに対してはほぼ倍の耐摩耗性を示している。図13はスラリーエロージョン試験の結果である。W2010XJとW2011XJはいずれもWC/20CrC/7Niとほぼ同等の特性を有し、WC/12Coよりも倍以上の耐摩耗性を示している。図14は落球衝撃試験の結果(基材はS45C)である

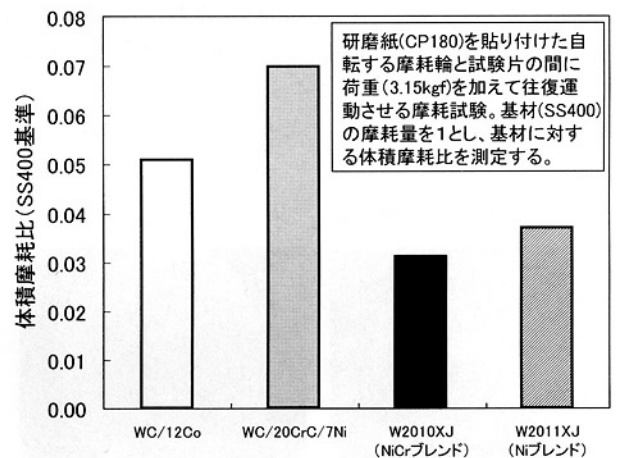


図12 各種皮膜のスガ摩耗試験の結果

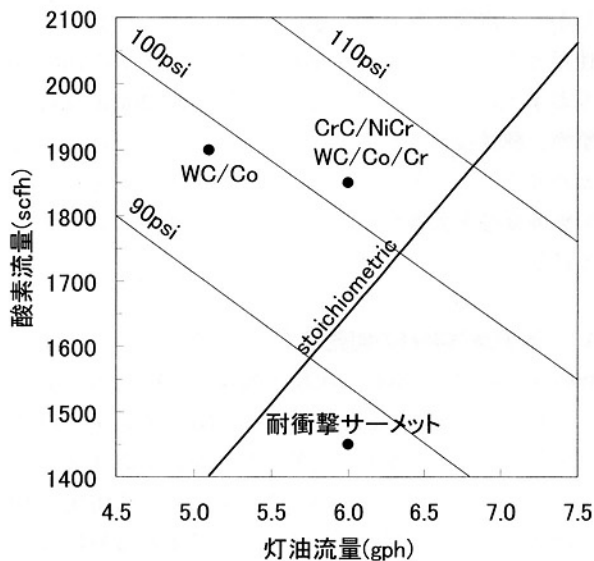


図11 JP-5000における灯油-酸素マップ

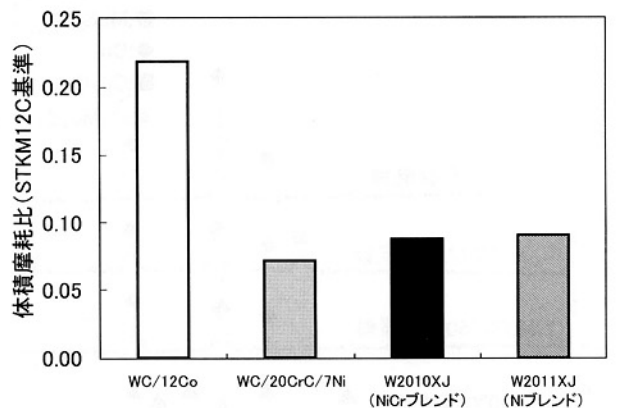


図13 各種皮膜のスラリーエロージョン試験の結果

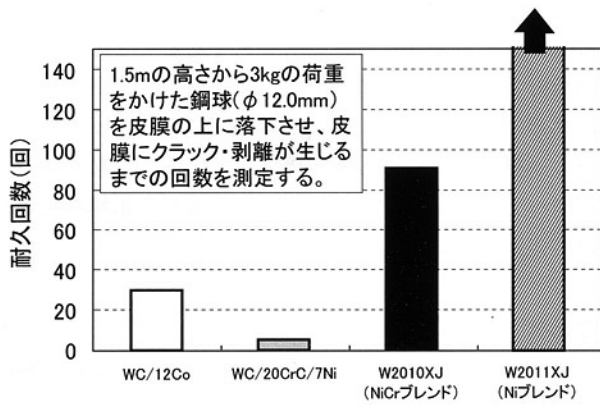


図14 各種皮膜の落球衝撃試験の結果

が、WC/12CoやWC/20CrC/7Niと比べて衝撃に対する耐久性が大幅に向上しており、特にW2011XJにおいては顕著な耐久性が確認された。

図15はJP-5000で溶射したWC/12CoとW2010XJの皮膜内の残留応力を $\sin^2\psi$ 法で測定した結果である。皮膜表面付近はほとんどゼロの値となっているが、表面から深さ方向に向かうにつれ、WC/12Co皮膜の圧縮応力が大きくなっていく様子が認められる。ところが、W2010XJに関しては、やや圧縮側となるものの、ほとんど値に変化はなく、膜厚によらず安定した内部応力状態であることが分かった。これは、皮膜の耐衝撃性が高い一つの証左であると思われる。

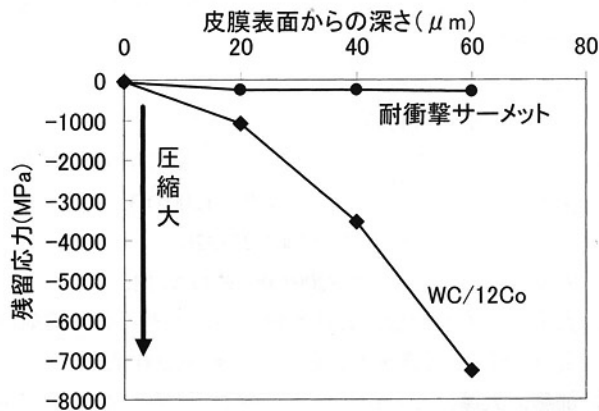


図15 WC/12CoとW2010XJの皮膜内の残留応力

### 6.3 耐衝撃溶射皮膜のアプリケーション例<sup>18,19)</sup>

図16は掘削用ビットの模式図であるが、このビットにW2011XJを溶射し掘削テストを行った。図17は掘削テストを行っている様子を現している。図18は各種ビットで掘削後、重量摩耗率を比較したグラフである。①の「ノーマルビット」とは溶射を行っていないもの。②は超硬チップが埋め込まれていないビットに全面溶射したもの。③は超硬チップ部分を除いて溶射したもの。④と⑤はノーマルピ

ットの中古(ある程度現場で使用して擦り減ったもの)に超硬チップ部分を除いて溶射したもの。膜厚を変えてある。この結果より、溶射した効果は顕著に現れ、①に対して⑤

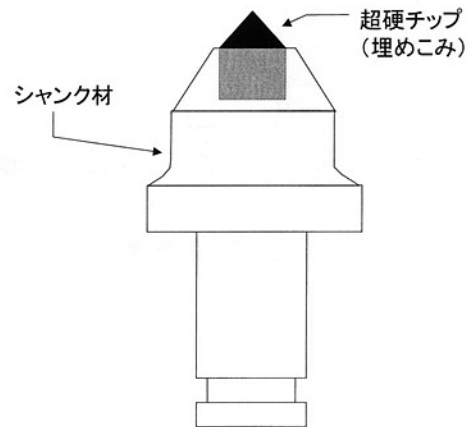


図16 掘削用ビットの模式図



図17 掘削機(ブームヘッダー)で掘削している様子



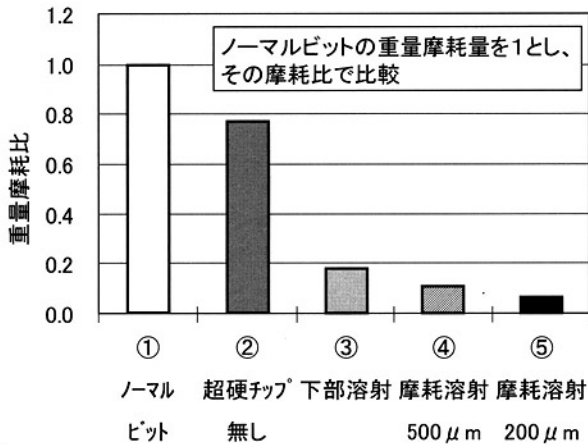


図18 各種ビットで掘削後、重量測定した結果

は約16倍の耐久性を示した。

ところで、現在、この耐衝撃サーメットはパワーショベルのアーム先端部とバケットジョイント部の摺動面にも溶射されており、けた違いの耐久性を実証している。今後、パワーショベルにおいて、他の摩耗個所にも適用されていく予定である。

耐衝撃サーメット皮膜は被溶射物の材質やプラスト後の表面粗度によって寿命が著しく異なることが分かっている。<sup>5)</sup>(サーメット皮膜全般に言えることであるが。)例えば、母材がSUS304や316のようなステンレス鋼の場合、極端に良好な特性を示すが、SS400やSK材においては良好な特性が得られにくい。<sup>5)</sup>よって、溶射する母材の材質とプラスト材の選択には常に注意を払いたい。

## 7 おわりに

今、私がこの原稿を書いているのは平成14年6月であるが、私が弊社で溶射材の事業を立ち上げてから、ちょうど2年が経過した。本稿で紹介させていただいた技術データのほとんどは、弊社における2年間の成果のごく一部である。

この2年の間に、それまで常識と思い込んでいたことが系統的な研究によってひっくり返されたり、新たな発見/発明が次々あったりと、溶射材の研究・開発が溶射技術の発展にいかにか大切か強く実感できた。また、溶射材の開発には溶射機に対する深い知識と経験が不可欠であり、既述

の耐衝撃サーメット皮膜も弊社所有のHVOFを充分使いこなしてようやく完成した典型的な例である。サーメット溶射の分野は、このようにまだまだ発展途上ではあるが、世界的にもニッチであり、これから確実にマーケットが伸びていく屈指の分野であろうと確信している。今後もエンドユーザーとコミュニケーションを密に取り、市場の拡大に向けて邁進していきたい。

## 参考文献

- 1) 例えば：Proceedings, ITSC 2002, Essen (March, 2002) 12-22.
- 2) Peter Chandler：An Overview of the European Thermal Spray Market (May, 2002) 10.
- 3) 榊 和彦, 五日市 剛：溶射技術, 21, 1(2001) 42.
- 4) 水谷健, 大澤悟, 五日市剛：日本溶射協会第74回全国講演大会講演論文集, (2001) 31.
- 5) フジインコーポレーテッド社内技術資料.
- 6) 渡辺崇貢, 太和田聡, 大澤悟, 五日市剛：日本溶射協会 第73回全国講演大会講演論文集, (2001) 39.
- 7) 大澤悟, 加藤伸映, 渡辺崇貢, 五日市剛：日本溶射協会 第73回全国講演大会講演論文集, (2001) 43.
- 8) J.G.Legoux, B. Arsenault, C. Moreau, V. Bouyer and L. Leblanc：Proceedings, ITSC 2000, Montreal (May, 2000) 479.
- 9) テクノサーブ(株)・製品カタログ「AMシリーズ」.
- 10) 五日市 剛：溶射, Vol.38, No.4 (2001) 235.
- 11) 大澤悟, 渡辺崇貢, 五日市剛：日本溶射協会 第74回全国講演大会講演論文集, (2001) 11.
- 12) 大澤悟, 五日市剛：特願2001-317497.
- 13) 鈴木峰男：工業材料, 49 (2000) 72.
- 14) 青木功, 渡辺崇貢, 大澤悟, 五日市剛：日本溶射協会 第75回全国講演大会講演論文集, (2002) 3.
- 15) 大澤悟, 五日市剛：特開2001-234320.
- 16) 大澤悟, 五日市剛：US2001/0019742A1他.
- 17) 大澤悟, 太和田聡, 五日市剛, 戸部省吾：日本溶射協会 第75回全国講演大会講演論文集, (2002) 5.
- 18) 加藤, 大澤, 五日市, 松浦, 岡本, 朝隈：日本溶射協会 第75回全国講演大会講演論文集, (2002) 7.
- 19) 大澤悟, 五日市剛, 朝隈正雄, 巽紘伸：特願2001-224612.