

# 溶射による傾斜機能皮膜作成に関する研究

機械金属室 比嘉 眞嗣・屋良 秀夫\*・棚原 靖\*\*

## 1. 緒言

材料に新たな機能を付与する表面改質技術は材料そのものを使用環境に合わせて製造するよりも、比較的容易かつ安価に行えるという利点がある。しかし、基材と被覆層との間には界面が存在し、その面での物性の変化により不都合を生じる場合がある。そこで皮膜中の組織を連続的に変化させて、皮膜の特性を徐々に変えていき、物性の変化をなだらかにすることで皮膜強度を改善することが、現在の傾斜機能材料開発の主流となっている。<sup>1)</sup>

傾斜機能材料 (Functionally Gradient Materials) は、広い意味では複合材料の範疇に入るが一般的な複合材料の機能の一様性、という点において大きな違いがある。すなわち同一材料の表面側と裏面側において使用環境が異なる場合、従来の貼合わせなどによる複合材料では、必然的に界面の問題により材料間の剥離または材料そのものの破壊につながる恐れがある、したがって、これを防ぐ手段として材料内部の組織を傾斜化し、それにともない機能も傾斜化させようというものである。<sup>2,3)</sup>

本研究は、溶射技術の多目的利用の一環として、溶射技術の更なる活用として、最近注目の高い傾斜機能皮膜の作成を試みた。耐摩耗、耐熱用として利用されているセラミックス溶射は金属との密着性が悪く、機械部品としての長期使用において信頼性を欠くおそれがある。そこで金属基材表面に金属系材料を溶射し、組織を徐々に変化させ最終層にセラミックスを溶射することで皮膜の改善を試みた。溶射は他の被覆法と比べて膜厚を数  $\mu\text{m}$  ~ 数  $\text{mm}$  と膜厚制御範囲が広いのが特徴であり、かつ、現場施工も容易であるという大きな利点がある。現在、高密度の溶射皮膜が得られるという点でプラズマ溶射による傾斜機能皮膜の作成が行われているが設備が高価であり現場施工がしにくい等の欠点がある。それに比較してフレーム溶射は装置の構成も少なく、設備が安価なうえ、現場施工がしやすいという利点があるため、フレーム溶射での傾斜膜作成を検討した。作成した溶射皮膜の評価として、プラストエロージョン試験や、機械的性質および冶金的性質等について調べた。<sup>4,5,6,7)</sup>

## 2. 実験方法

ガス粉末溶射装置を2台用いて溶射を行い、溶射膜の複合化を行い、その膜の諸性質について硬度測定および顕微鏡観察を行い、プラストエロージョン試験での評価を試みた。

### 2. 1 供試材料

溶射材料は、単体溶射として耐食用で一般的な  $\text{Al}$  および  $\text{Zn}$  粉末を、耐熱、耐摩耗用としてセラミックス ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 粉末を用い、傾斜機能溶射膜として、自溶合金 (Self Fluxing Alloy) 粉末とセラミックス、 $\text{Al}$  とセラミックスの2種類をそれぞれ用いた。

$\text{Al}$  との傾斜皮膜は、金属とセラミックスの溶射を目的とし、自溶合金 S.F.A とセラミックスは

\* 琉球大学工学部機械システム工学科

\*\* 琉球大学学生 現 琉球大学大学院

傾斜皮膜後フュージング処理しその効果を検討するために設定した。

溶射皮膜試験片はSS400鋼板(60×50×4.5mm)を用いスチールグリット#100にてブラストで前処理し溶射に供した。

溶射条件は表1の条件で行った。

## 2. 2 皮膜作成方法

溶射方法は種々検討した結果、図1に示すように、回転運動と水平運動ができる装置を作製しその試験片固定治具に向け溶射を行うことで均一な溶射膜を作成した。均一溶射のための駆動条件は次の通りである。

- 回転数(36RPM) : 周速度16.5m/min
- 移動速度100mm/min

傾斜皮膜溶射状況を図2に示す。単体溶射の場合はいづれか一方の溶射装置を利用し傾斜皮膜溶射の時は、図のように左右から同時に溶射する方法を用いた。

傾斜化の方法すなわち組成変化は、各装置の粉末供給量調整バルブであるTバルブの操作で行った。また、連続溶射では、試験片が加熱しすぎるので、適宜空冷を施しながら溶射した。

積層化の手順はAl+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は、まず基材である鋼材にAl単体を溶射したのち同時溶射を行いトップコートにはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>単体溶射をおこなった。S.F.A+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の場合も同様に1層目はS.F.A溶射し以下同様に溶射を行った。

S.F.A溶射の場合は、本実験のねらいであるフュージング効果を検討するために溶射後ガス溶接トーチでフュージングも行い、その効果についても調べた。

## 2. 3 ブラストエロージョン試験方法

ブラストエロージョン試験には、直圧式ブラスト装置(キャビネットタイプ)を利用し図3に示すような溶射試験片取付治具を作製し試験片表面に噴射圧を一定にブラストを行い、ブラスト噴射時間と減摩量を測定した。

また、ブラストエロージョン試験結果の

表1 溶射条件

溶射材 条件	Zn	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	傾斜皮膜溶射		傾斜皮膜溶射	
				Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S.F.A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
酸素	0.343 Mpa (Kg/mm <sup>2</sup> )						
圧	0.343 Mpa (Kg/mm <sup>2</sup> )						
流量	1.61	2.3	(m <sup>3</sup> /hr)		2.5	2.3	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.083	0.083	0.098	0.083	0.098	0.098	0.09
圧	0.64						
流量	1.2						
空気圧(MPa)	0.137	0.412	0.274	0.412	0.274		
粉末供給量(g/hr)	4.5	4.5	0.8	4.5	0.8	10	0.8
溶射距離(mm)	200	150	80	150	80	200	80
膜厚(μm)	500	500	1000	500	500		

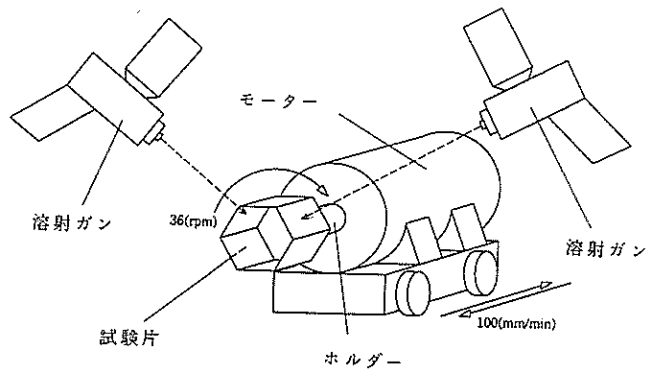


図1 溶射実験装置

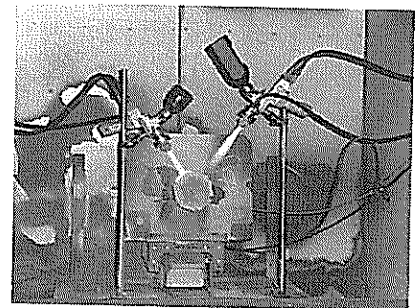


図2 溶射状況

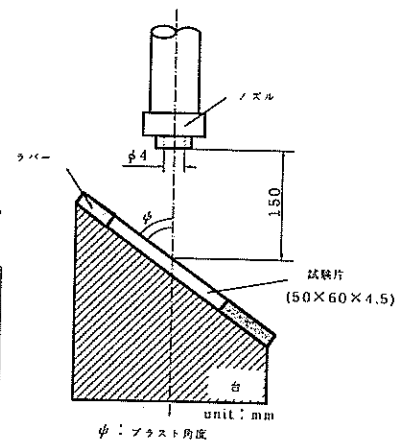


図3 ブラストエロージョン試験方法

表2 ブラストエロージョン試験条件

項目	条件
噴射圧力 (Kpa)	294
噴射量 (g/sec)	31.4
ブラスト距離 (mm)	150
ブラスト材 (スチールグリット (#))	70
ノズル径 (mm)	4
ブラスト角度 (°)	90, 60, 45

確認のため試験終了後のマクロ観察を行った。なおブラストエロージョン試験条件は表2の通りである。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 傾斜機能皮膜の評価

##### 3. 1. 1 ブラストエロージョン試験結果

各単体溶射材のブラストエロージョン試験結果を図4～6に示す。グラフは減摩量に及ぼすブラスト時間の影響をブラスト角度毎に整理したものである。

金属材料であるAl、Znとセラミックス材料であるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ではブラスト角度による影響が逆転

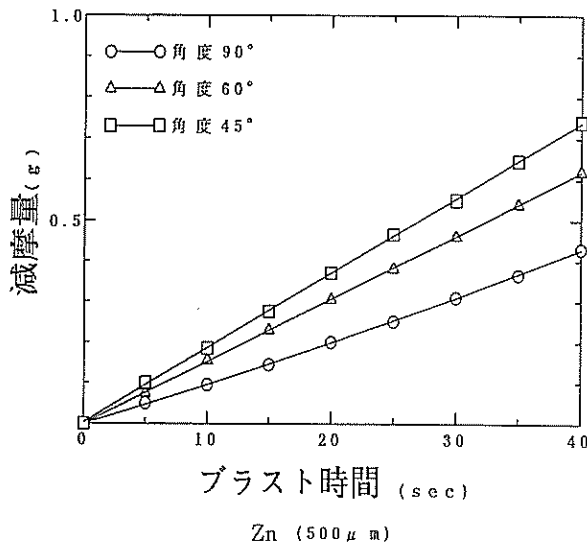


図4 減摩量とブラスト時間

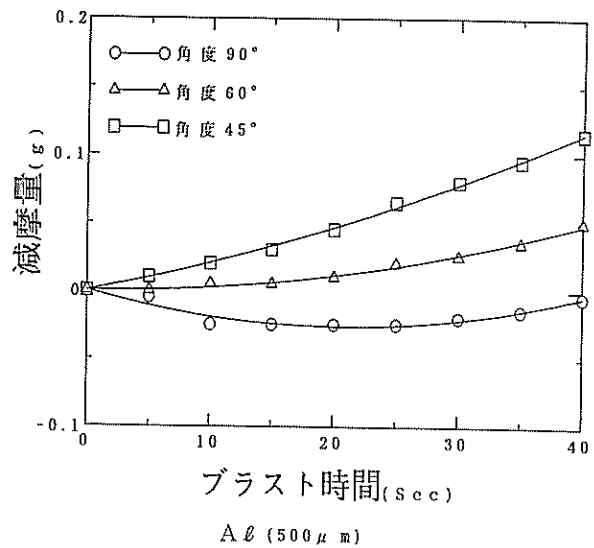


図5 減摩量とブラスト時間

する傾向にある。ブラストエロージョン試験による減摩量はブラスト時間が増せば両者とも減摩量は増加するが、角度による影響がZn、Alではブラスト角度が90°と溶射面に直角に衝突するよりも、斜めの45°の角度で衝突する方が減摩量も増えている。

逆に、セラミックス材料は直角に衝突する方が減摩量が増加する傾向にある。

各材料毎の減摩量の値は、あくまでも重量減であるため、耐エロージョン性については細かく言及できないが、図7のマクロ観察結果からは予想に反して、アルミナの場合が耐エロージョン性は悪い結果となっている。

Al、Znにおいて、衝突角度が45°のときに最も減摩量が多い理由は、ブラスト角度が

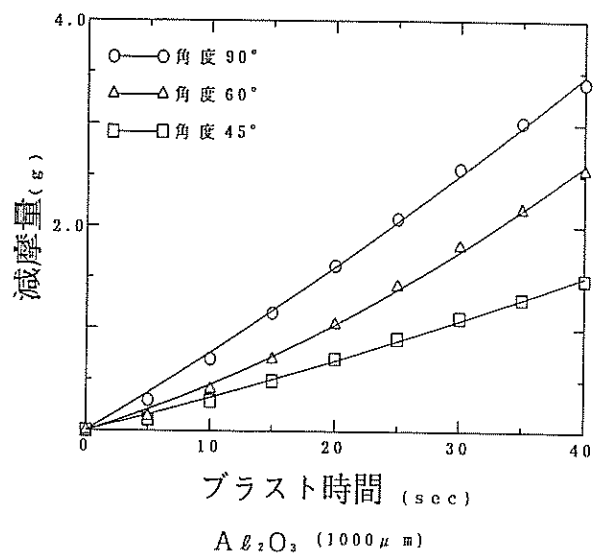


図6 減摩量とブラスト時間

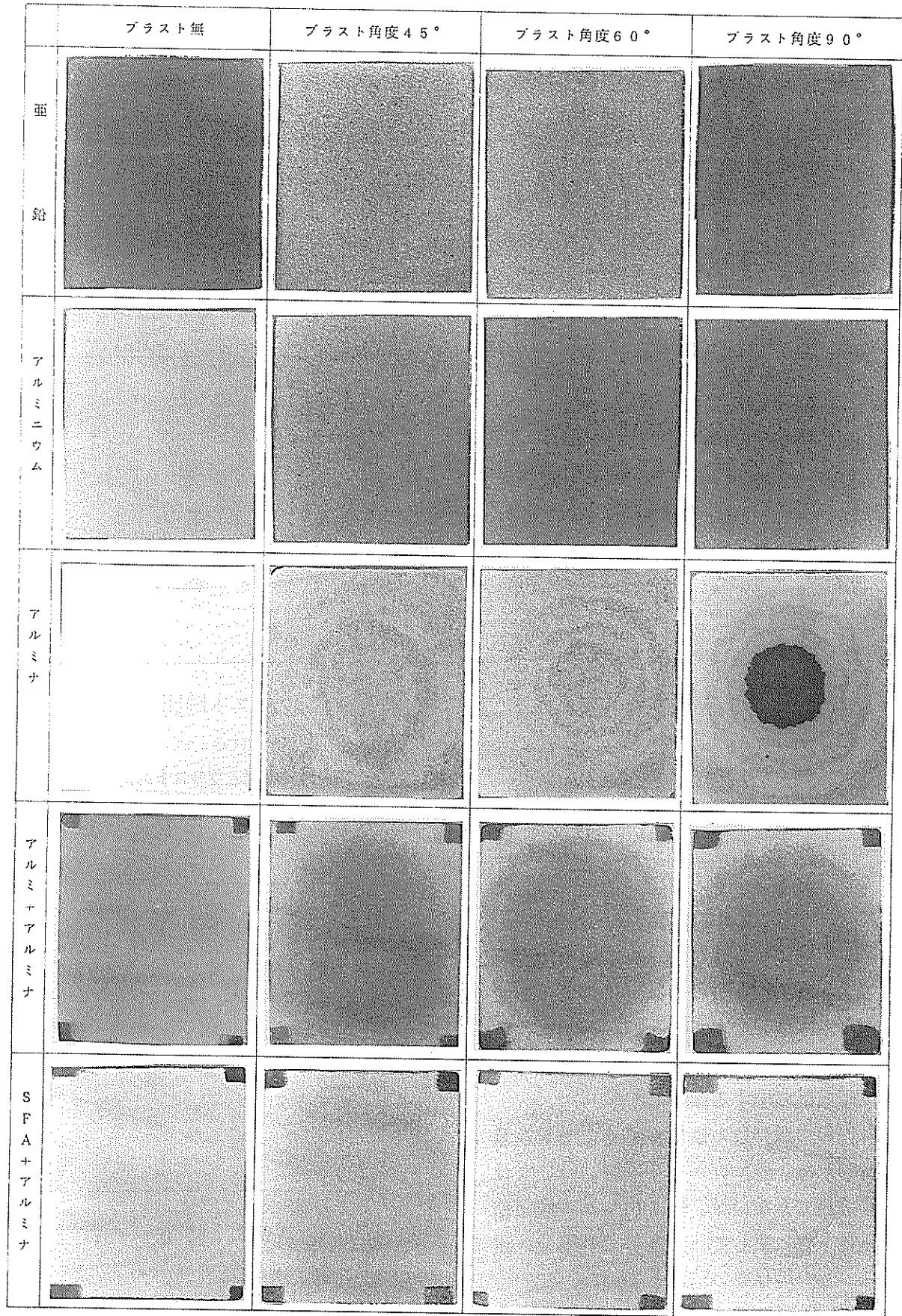


図7 ブラストエロージョン試験後のマクロ観察 (ブラスト時間40Sec)

直角に近い条件では、金属の変形が支配的で、鋭角なブラスト角度では切削が支配的になりそのため減摩量が増えるものと考えられる。

それとは逆にセラミックスの場合は、硬度が高くもろいため、鋭角の場合は、エロージョン損傷されにくい、直角の場合は、衝撃による破壊粉碎での重量減と思われる。マクロ観察からも明らかなように層毎に破碎されている状況が観察される。

次に傾斜皮膜溶射である、 $Al + Al_2O_3$ とS.F.A+ $Al_2O_3$ の試験結果を図8～9に示す。

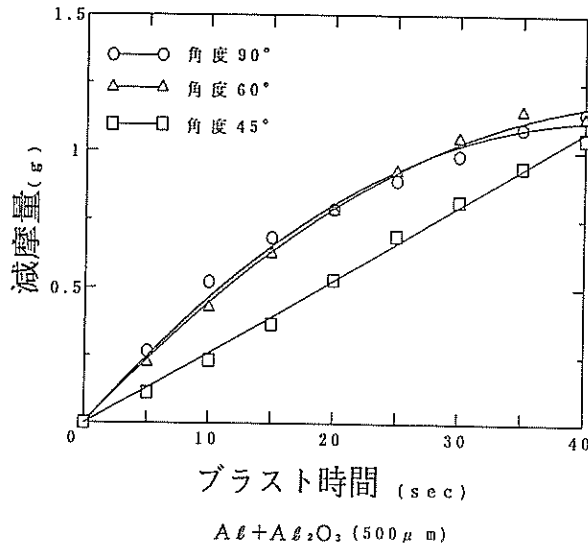


図8 減摩量とブラスト時間

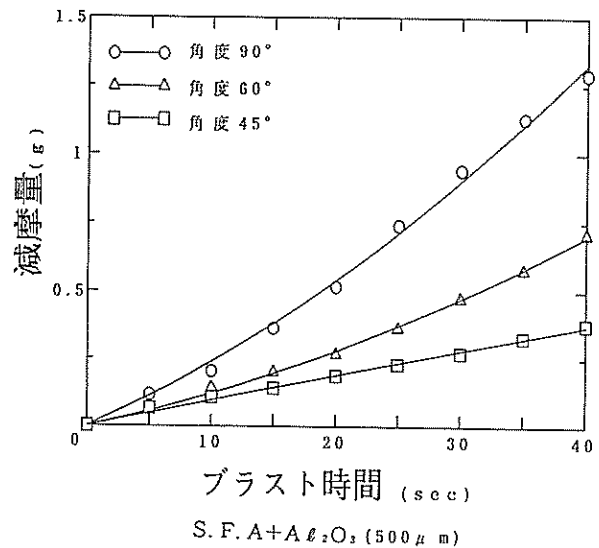


図9 減摩量とブラスト時間

減摩傾向は、 $Al_2O_3$ と同様にブラスト角度90° の場合が減摩量は大きくなっているが、単体と比べて、減摩量は約1/2に減少しており、耐エロージョン性向上に寄与していることがわかる。

S.F.Aと $Al$ を比較するとS.F.Aの場合は、ブラスト角度の影響は顕著であるが、 $Al$ の場合は60°、90° ではほぼ同様で、45°のみ差がでていいる。マクロ結果でも明らかに耐エロージョン性が向上していることを示している。

今回、直圧式ブラスト装置を利用した自作の簡易型ブラストエロージョン試験を検討したが、ブラスト時間と摩耗量との関係が直線的に変化するため、溶射膜の耐エロージョン試験として充分活用できるものと考えられる。

### 3. 1. 2 ミクロ観察

得られた傾斜皮膜溶射の断面組織を図10に示す。また、単体溶射の場合の断面組織も図11～12に示す。

今回の傾斜皮膜溶射では、溶射面が同一カ所ではなく時間的に若干の差があるため、傾斜皮膜溶射は、層状に傾斜化がなされていることが観察される。また傾斜化の状況は写真から解るように、層密度の違いから、傾斜組織となっているものと考えられる。

また、単体の観察結果からは、金属粉末はいずれも、密度の高い密着度のある形態を示しているが、アルミナに関しては、空隙が多いことから優れた溶射組織にはなっていないものと考えられる。

S.F.Aの場合は、熔融前と熔融後の両者を観察したが、フュージング後は、溶射粒子の粒界が完全に消失し、金属組織の形態となった。

同様に、S.F.Aの傾斜皮膜溶射のフュージング前と後を見ると、単体の時と比較してフュージング効果は明瞭ではなかった。当初ねらっていたセラミックス単体溶射での溶射の空隙充填の効果はそれほど期待された効果はなかった。

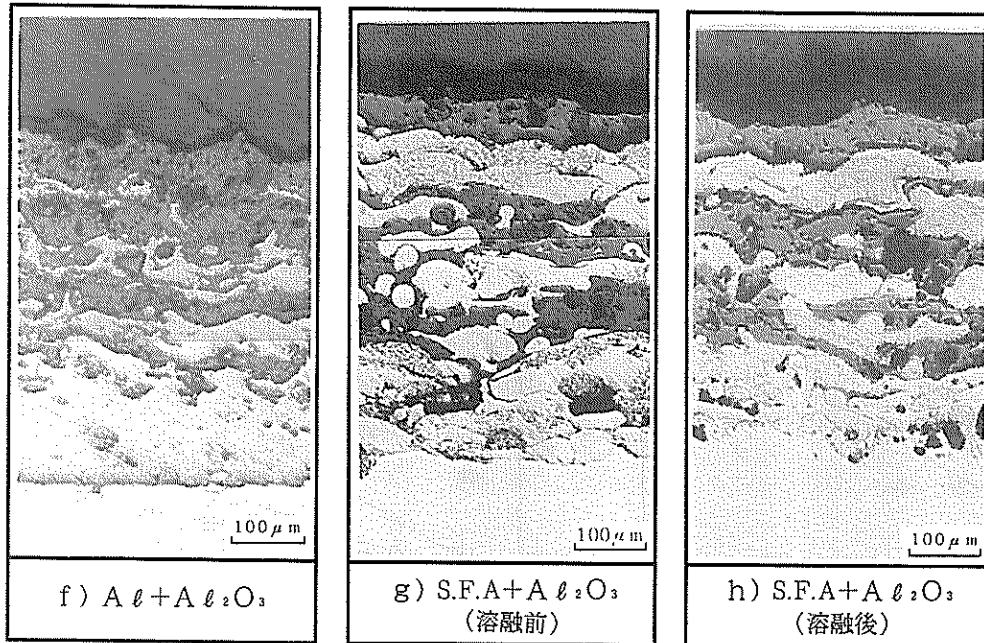


図10 複合溶射皮膜の断面組織

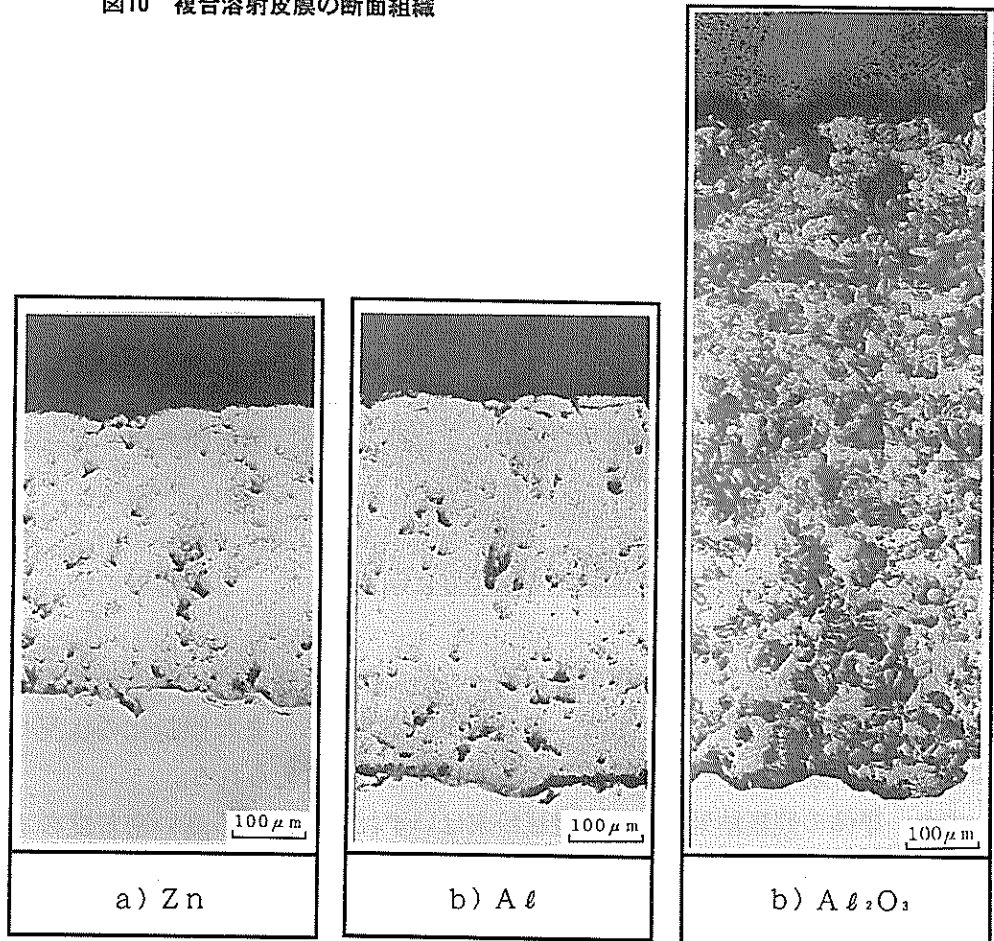


図11 単体溶射皮膜の断面組織



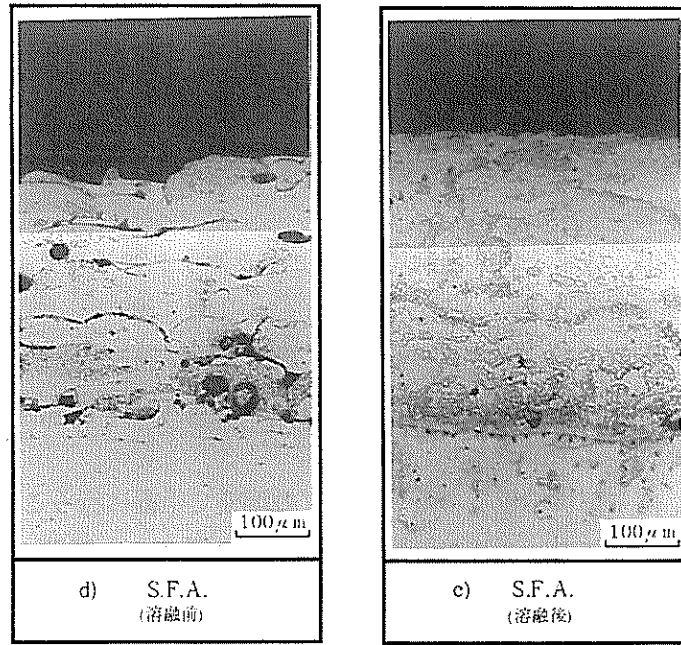


図12 自溶合金溶射の断面組織

### 3. 1. 3 硬度測定

得られた溶射皮膜試験片の断面をマイクロビッカース硬度計 (0.98N) で硬度測定を行った。単体溶射の場合を図13に傾斜皮膜溶射の場合を図14に示す。

特徴的なことは、S.F.A.の場合はフュージングすることにより若干の硬度低下をきたすが、フュージング前では、急速急冷のため、硬化現象が起り、フュージングにより再溶融再結晶による硬度緩和がなされるものと考えられる。

$Al_2O_3$ 単体では、硬度約1000近い硬度を有することから、耐摩耗用としても充分利用価値が高いことを示している。そのため傾斜機能化を検討しているが、傾斜皮膜溶射の硬さ分布をみると、溶射断面の3カ所の測定結果は、積層化の狙い通り傾斜機能を有する硬度分布となっており、傾斜機能化の効果が現れている。

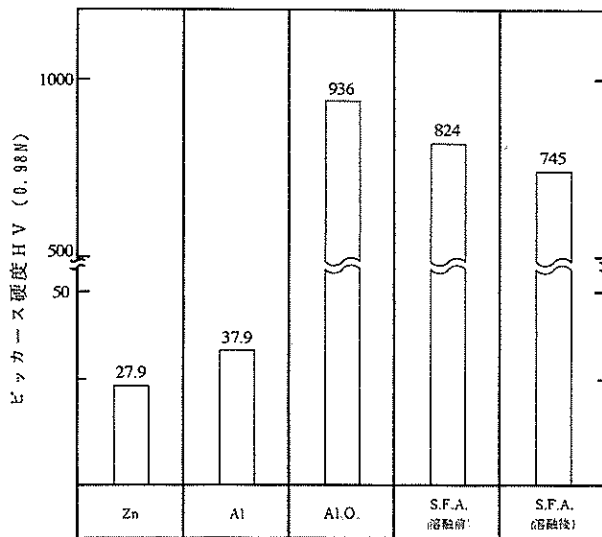


図13 ビッカース硬度 (単体溶射)

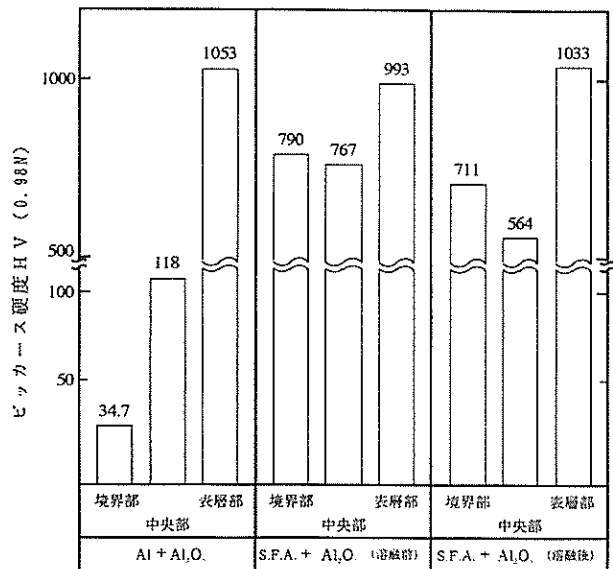


図14 ビッカース硬度 (傾斜皮膜溶射)

#### 4. 結 言

ガス粉末溶射装置を複数台用いての、同時溶射による機能性溶射皮膜作成を試みた。すなわち、溶射材料を種々組み合わせることによって、機能的にも特徴的な溶射皮膜作成が可能か、溶射方法、溶射治具等を検討した。また、作成した溶射片を硬さ試験、溶射断面観察、ブラストエロージョン試験を行い溶射膜を評価した。

使用した溶射材は Zn、Al、自溶合金 (S.F.A) セラミックス ( $Al_2O_3$ ) であり、得られた結果は、以下のとおりである

- ①ガス粉末溶射装置を左右斜めの位置で、回転治具に設置した試験片に溶射を行うように配置し、且つ試験片を設置した回転治具を走行台車に取り付けることにより回転と前後移動を併用することで均一に溶射を施すことができた。
- ②溶射皮膜の傾斜化は、溶射材供給量である Tバルブの調整で手軽に行うことができた。
- ③皮膜評価としてのブラストエロージョン試験は、減摩量とブラスト時間の相関は高く、ブラスト角度の影響も顕著で、皮膜の評価試験として有効である。  
しかし、同方法は、金属材料とセラミックス材料とではその摩耗形態が異なり、ブラスト角度の影響は逆であり、対象材料により区分分けが必要であろう。
- ④溶射断面の観察では、本方式による溶射は、薄い層状の構造であるが硬さ測定結果から傾斜化となっていることが確認できた。
- ⑤S.F.Aを用いた複合化は、セラミックスの溶射断面の空隙を解消する目的で行ったが、S.F.A単体溶射でのフェーシングに比べてセラミックス自体が、耐熱材料であるためフェーシングが難しく今後検討を加える必要がある。

#### 参考文献

- 1) 五十嵐；表面処理方法による傾斜機能材料の研究動向、金属 4 月号 (1992) P 6～7
- 2) 荒田吉明、セラミックス溶射と応用、日刊工業新聞 (1990) P 49～88
- 3) 及川初彦、斉藤亨、百合岡信；材料の複合化はどこまで進か、溶接技術 1 月号 (1994)、P 62～71
- 4) 伊藤善康、斉藤正弘、柏谷英夫、浅井知；金属溶射皮膜のブラスト・エロージョン特性、溶接学会論文集、8-3 (1990)、P 125～132
- 5) 腐食防食協会；エロージョンとコロージョン、裳華房、(1987)、P 152～165
- 6) 日本溶射協会；溶射ハンドブック、(1986)、P 309～328、482～487
- 7) 植野軍二；溶射皮膜技術の魅力を検証する、工業材料、Vol 41、No 11 (1993)、P 48～78



編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。