

プラズマ溶射による表面改質に関する研究

—プラズマ溶射法による耐アブレーション性摺動被膜の開発(第2報)—

小石川勝男* 篠塚 正樹** 中島 秀樹*
 志村 洋文*** 佐々木信也*** 岩見 高****
 丸山 敏雄**** 川崎 隆****

1. はじめに

一般の機械要素において、摩耗に関するトラブルの大半は、アブレイブ摩耗に起因するものであると言われている。摩擦面への硬質粒子混入が避けられないような摺動部品では、通常の潤滑下でのトライボロジー性能に加え、耐アブレーション性に優れた摺動表面の作製が要求される。本研究では、表面改質による摺動性能と耐アブレーション性に優れた摺動表面の開発を目的に、プラズマ溶射法を用いて数種類の表面改質被膜を作製し、それらの摺動性能を評価することにより、耐アブレーション性に優れた被膜の選定と耐アブレーション性向上に必要とされる因子を検討した。

前報では、各種粉末材料および各条件でテストピースに耐摩耗性被膜を作製し、被膜の摺動性能を比較評価、検討し、その結果、次のような結論を得た。

- (1) 混合粉末 (FeCr+Ni 自溶性合金+Mo) の被膜は、硬さ、耐摩耗性において優れていた。
- (2) 肉盛溶接鋼、浸炭焼入鋼は、通常の油潤滑下での摩擦試験においては、優れた摩耗特性を示したが、硬質粒子を混入させた土砂摩耗試験に対しては摩耗量が大きくなった。
- (3) ハイブリッド溶射の被膜は、アブレイブ摩耗試験において摩耗量が少なく、耐摩耗性が優れていた。
- (4) ハイブリッド溶射による混合粉末の被膜は、レーザを照射したことにより、被膜と母材との拡散および被膜中の気孔の減少、被膜表面の硬さの向上が見られた。

また現在、一般に高速ガス溶射(HVOF)によるタングステンカーバイド系の被膜が、耐摩耗性被膜として用いられていることが多くなっている。

このようなことから、本年度は、表面改質材料として混合粉末材料、タングステンカーバイド系の材料を選択し、材料の組み合わせによる耐摩耗性の評価を中心に研究を進めたので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置¹⁾

本研究で被膜作製に使用したレーザ・プラズマハイブリッド溶射装置は、6 軸NC制御ロボットと最大出力 80kW のプラズマガンを備えた内径 2.0m × 長さ 2.7m の真空チャンバー内に、ZnSe 製ウィンドウを通してレーザ光を導入できる構造になっている。この装置で、大気プラズマ溶射、減圧プラズマ溶射、ハイブリッド溶射を行うことができる。

2.2 溶射粉末の選定

今年度は、昨年度の研究で優れた耐アブレーション性、摺動性能を示した混合粉末と、高硬度で耐摩耗性に優れていると言われるタングステンカーバイド系のWC-Co を溶射材料として用いた。表1 に使用した溶射材料の成分を示す。

表1 溶射材料の成分表

溶射粉末	Al	B	C	Co	Cr	O	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	W
混合粉末							FeCr+Ni自溶性合金+Mo							
FeCr			7.82			64.7		Bal			0.02	0.02	1.59	
Ni自溶性合金		2.93	0.62		14.9		3.03	0.04		Bal				4.05
Mo	0					0.13	0.07		Bal					
WC-Co			5.45	11.4										Bal

2.3 溶射被膜の作製方法

各試験片の溶射面をサンドブラスト用β-アルミナ(#30)によりブラスト処理した後、アセトンと石油ベンジンの混合溶液にて超音波洗浄を行い、プラズマ溶射による被膜作製を行った。

溶射被膜作製は、試験片を取り付けた試料ホルダーをロボットに取付け、チャンバー内を真空に排気した後、アルゴンガスを導入し、圧力を20Torr にコントロールしてプラズマ炎により予熱を行う。次に100Torrまでアルゴンガスを導入し、プラズマ溶射を行う。表2 に溶射条件を示す。

表2 溶射条件

	減圧雰囲気 (Torr)	溶射距離 (mm)	プラズマガス Ar(psi)	補助ガス He(psi)	キャリアガス Ar(psi)
予熱	20	250	100	100	—
減圧プラズマ溶射	100	250	50	150	30

粉末送り量は、各溶射材料、条件により被膜の付着性や被膜厚さなどを考慮して調整した。

2.4 評価試験

プラズマ溶射被膜の比較材として、肉盛溶接鋼、浸炭焼入鋼および高速ガス溶射(HVOF)で作製したWC-Co被膜も評価試験に用いた。

肉盛溶接鋼とは、SAE8720 材に表3 のような組成の溶接材を溶接したもので、浸炭焼入鋼とは、SAE4815 材に浸炭処理を施したものである。

高速ガス溶射(HVOF)のWC-Co 被膜は、緻密で耐摩耗性に優れていると言われており、一般にも用いられているため今回の評価試験に用いた。各材料の組成を表3に示す。

表3 材料の組成

	C	Mn	Ni	Si	Cr	Mo	W	Co	Fe
SAE8720	0.17~0.23	0.60~0.95	0.15~0.30	0.35~0.75	0.35~0.65	0.20~0.30			Bal
SAE4815	0.12~0.18	0.30~0.70	0.15~0.30	3.20~3.80		0.20~0.30			Bal
溶接材	2.48			1.03	31.22		17.92	45.05	2.3

(1) 往復動摩耗試験およびアブレイブ摩耗試験

往復動摩耗試験は、オイル潤滑下における材料の組み合わせによる摺動性能を評価するものである。今回の試験では、溶射被膜を作製したピンとプレートの平面同士の摩擦における被膜材料の組み合わせ相性を評価した。図3 に往復動摩耗試験の概略を示す。また、表4 に往復動摩耗試験で実施した材料の組合せを示す。

*機械金属部 **いばらきサロン ***機械技術研究所基礎技術部トライボロジー研究室 ****石油鑿井機械製作所(株)

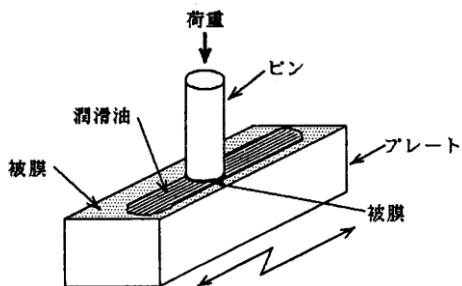


図3 往復動摩耗試験の概略

表4 往復動摩耗試験の材料組み合わせ

		プレート				
		肉盛 溶接鋼	浸炭 焼入鋼	混合 粉末	WC-Co (PS)	WC-Co (HVOF)
ピ	肉盛溶接鋼	○	○	○	○	○
	浸炭焼入鋼	○	○	○	○	—
	混合粉末	○	—	○	○	○
ン	WC-Co(PS)	○	—	○	—	—
	WC-Co(HVOF)	○	—	○	—	—

○：試験を行ったもの -：試験を行わなかったもの
 WC-Co(PS)とは、減圧プラズマ溶射で作製したWC-Co12%の被膜である。
 WC-Co(HVOF)とは、高速ガス溶射で作製したWC-Co12%の被膜である。

往復動摩耗試験はまず、プレート被膜表面を研磨した後、アセトン、石油ベンジンの混合溶液で超音波洗浄する。ピンも同じように洗浄した後、プレート表面とのあたりを出し、天秤で試験前重量を測定する。次に、プレート表面に潤滑油を50μl供給し、100rpmで慣らし運転を10分間行った後、表5のような条件で本試験を行う。試験終了後、ピン、プレートとも洗浄し、ピンは試験後の重量を測定する。

被膜の摩耗量は、摩耗痕の直角方向の断面を表面粗さ計で3点測定し、計算により摩耗量(体積)を求めた。相手材のピンの摩耗量は、試験前の重量と試験後の重量の差より摩耗量(重量)を求めた。

表5 往復動摩耗試験の試験条件

摩擦速度	10 サイクル/秒
摩擦幅	100mm/サイクル
荷重	20kgf (面圧0.4kg/mm ²)
摩擦時間	60min
摩擦距離	3600mm
潤滑油	ポリフェニルエーテル (5P4E)
油量	50μl

アブレシブ摩耗試験は、土砂摩耗を想定し、潤滑油中に硬質粒子が混入した場合の材料の組み合わせの相性を評価する。前述の往復動摩耗試験において、アルミナ粒子を混ぜた潤滑油を、往復運動する試験片の摩擦面に常時供給することで行った。図4にアブレシブ摩耗試験の概略を示す。また、試験材料の組み合わせを表6に、試験条件を表7に示す。

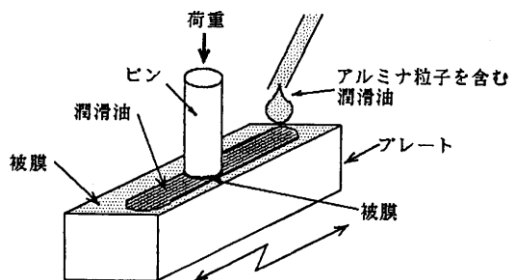


図4 アブレシブ摩耗試験の概略

表6 アブレシブ摩耗試験の材料組み合わせ

		プレート				
		肉盛 溶接鋼	浸炭 焼入鋼	混合 粉末	WC-Co (PS)	WC-Co (HVOF)
ピ	肉盛溶接鋼	—	○	○	○	○
	浸炭焼入鋼	○	—	—	—	—
	混合粉末	○	—	—	○	○
ン	WC-Co(PS)	○	—	○	—	—
	WC-Co(HVOF)	○	—	○	—	—

○：試験を行ったもの -：試験を行わなかったもの
 WC-Co(PS)とは、減圧プラズマ溶射で作製したWC-Co12%の被膜である。
 WC-Co(HVOF)とは、高速ガス溶射で作製したWC-Co12%の被膜である。

表7 アブレシブ摩耗試験の試験条件

摩擦速度	10 サイクル/秒
摩擦幅	100mm/サイクル
荷重	20kgf (面圧0.4kg/mm ²)
摩擦時間	60min
摩擦距離	3600m
潤滑油	ポリフェニルエーテル (5P4E)
混合粒子	プラスト用アルミナ粒子 (#220)
混合量	4wt%
供給量	500μl/min

(2) ファレックス摩耗試験

ファレックス摩耗試験は、比較的高荷重下で回転摺動する場合の材料の組み合わせを評価するもので、今回の試験ではピンとVブロックの表面に作製した被膜材料の組み合わせの相性を評価した。図5にファレックス摩耗試験の概略を示す。表8にピンとVブロックの試験の組み合わせを、表9には試験条件を示す。

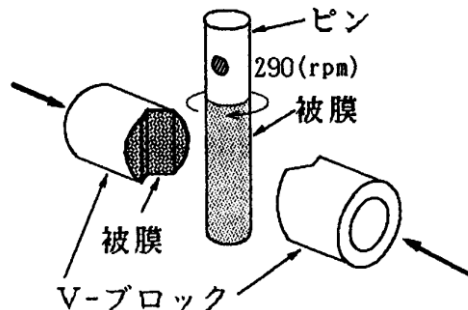


図5 ファレックス摩耗試験の概略

表8 ファレックス摩耗試験の組み合わせ

		プレート				
		肉盛 溶接鋼	浸炭 焼入鋼	混合 粉末	WC-Co (PS)	WC-Co (HVOF)
ピ	肉盛溶接鋼	—	○	○	○	○
	混合粉末	○	—	—	○	○
ン	WC-Co(PS)	○	—	○	—	—
	WC-Co(HVOF)	○	—	○	—	—

○：試験を行ったもの -：試験を行わなかったもの
 WC-Co(PS)とは、減圧プラズマ溶射で作製したWC-Co12%の被膜である。
 WC-Co(HVOF)とは、高速ガス溶射で作製したWC-Co12%の被膜である。

表9 ファレックス摩耗試験の試験条件

ピン回転数	290rpm
荷重	1000lbf
潤滑油	グリース (二硫化モリブデン系)
試験時間	120分

ファレックス摩耗試験はまず、ピンとVブロックの被膜表面を研磨し、アセトンと石油ベンジンの混合溶液で超音波洗浄した後、ピンとVブロックの試験前重量を天秤で測定し、試験機にセットする。

ピンを 290rpm で回転させ、V ブロックを 300lbf(136kgf) の荷重まではさみつけた後、負荷を解除し3 分間ピンを空転させる。次に、500lbf(227kgf) の荷重まで一定速度で負荷して行き、1 分間保持する。同じように750lbf(340kgf)の荷重まで一定速度で負荷して行き、1 分間保持する。更に1000lbf(454kgf) の荷重まで一定速度で負荷を増加する。この負荷を維持し、ピンまたはVブロックが破損するまでトルクを測定する。

試験終了後、ピンおよびVブロックをアセトンと石油ベンジンの混合溶液で超音波洗浄し、ピンとVブロックの試験後の重量を天秤で測定する。

本試験では試験時間を最高2 時間とした。ピンとVブロックの摩耗量は、試験前と後の重量の差より、摩耗量(重量)を求めた。

(3) 砂摩耗試験

砂摩耗試験は、ASTM 規格 G65 に規定された、耐摩耗材料の砂摩耗性能(耐アブレーション性)を評価する試験である。図6 に砂摩耗試験の概略を示す。

今回の試験では表10 に示す5 種類の材料を用い、表11 のような条件で試験を行った。

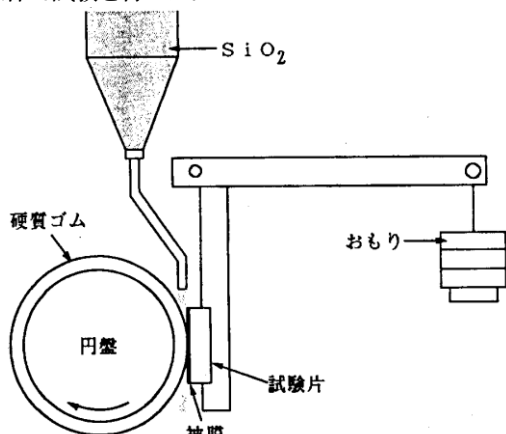


図6 砂摩耗試験の概略

表10 砂摩耗試験材料

試験材料	
1	肉盛溶接鋼
2	浸炭焼入鋼
3	混合粉末(減圧プラズマ溶射)
4	WC-Co(PS)(減圧プラズマ溶射)
5	WC-Co(HVOF)(高速ガス溶射)

表11 砂摩耗試験の試験条件

円盤回転数	200rpm
円盤	径9in.×厚0.5in.(硬質ゴム付)
押付力	30lbf(13.6kgf)
試験時間	10分
スラリー	SiO ₂ #50~70
スラリー量	400g/min

砂摩耗試験はまず、被膜表面を研磨して、アセトンと石油ベンジンの混合溶液で超音波洗浄した試験片を、機器にセットする。次に、円盤回転数を条件に合わせ、所定の押付力になるようにおもりをセットし、円盤と被膜表面の間に上方よりSiO₂の粒子(スラリー)を供給して行う。

摩耗量(体積)は、試験終了後、摩耗痕を摩擦方向に表面粗さ計で形状を測定し、計算で求めた。

(4) SEM像観察

被膜断面および、各試験終了後の摩擦表面の摩耗痕をEPMA 付走査電子顕微鏡により観察した。

3. 実験結果と考察

3.1 往復動摩耗試験およびアブレシブ摩耗試験²⁾

往復動摩耗試験およびアブレシブ摩耗試験の結果を図7に示す。

往復動摩耗試験の場合とアブレシブ摩耗試験の場合を比較すると、摩擦係数(図7(a)(b))はほぼ同じオーダーの大きさである。これに対して、ピン摩耗量(図7(c)(d))、プレート摩耗量(図7(e)(f))は、アブレシブ摩耗試験のほうが1桁、2桁大きいオーダーとなっている。

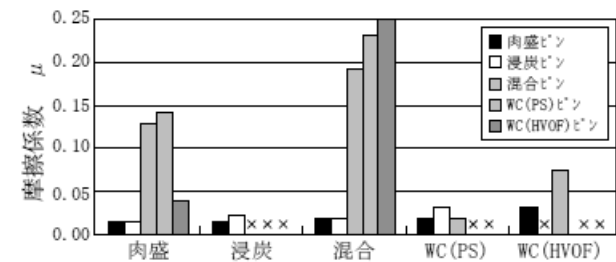
図7(a)(b)より、肉盛溶接鋼プレートと各種ピンの組み合わせでは、アブレシブ摩耗試験のほうが、同じ組み合わせの往復動摩耗試験より摩擦係数は大きい。たとえば、往復動摩耗試験では、肉盛溶接鋼と浸炭焼入鋼の組み合わせが0.014 であるのに対し、アブレシブ摩耗試験では0.191 と約14 倍になっている。これに対し、混合粉末プレートと各種ピンの組み合わせでは、アブレシブ摩耗試験の場合のほうが摩擦係数は小さい値を示した。

アブレシブ摩耗試験においては、WC-Co(HVOF)プレートと肉盛溶接鋼ピンの組み合わせおよび肉盛溶接鋼プレートとWC-Co(HVOF)ピンの組み合わせの場合が最も摩擦係数が小さかった。

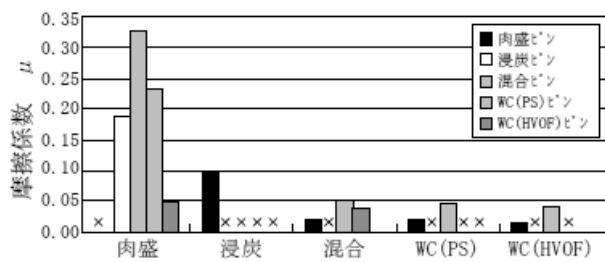
往復動摩耗試験において、一部例外はあるが、ピン摩耗量はほぼ0.003g 以下、プレート摩耗量は、ほぼ0.2mm³ 以下となっている。ピン摩耗量とプレート摩耗量を同じ組み合わせのアブレシブ摩耗試験の摩耗量と比べると、両者ともアブレシブ摩耗試験のほうが摩耗は大きくなっている。

往復動摩耗試験において、肉盛溶接鋼プレートと浸炭焼入鋼ピンの組み合わせは、摩擦係数、ピン摩耗量、プレート摩耗量とも摩耗特性が優れており、摩擦係数、プレート摩耗量は最小であった。ところが、アブレシブ摩耗試験では、逆に、ピン摩耗量、プレート摩耗量は最大となっていた。したがって、肉盛溶接鋼と浸炭焼入鋼の組み合わせ(基準)は、アブレシブ摩耗下では摩耗量が大きく、硬質粒子が混入するような場所での摺動部材としては、適切でないと思われる。

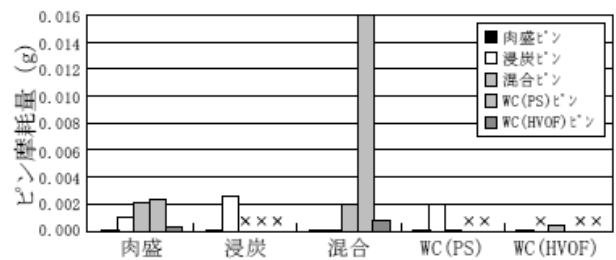
肉盛溶接鋼プレートとWC-Co(HVOF)ピン、肉盛溶接鋼プレートとWC-Co(PS)ピンと比較すると、前者のほうが、摩擦係数、ピン摩耗量、プレート摩耗量ともすべて後者よりも優れていた。WC-Co(HVOF)は、自身も摩耗しない相手材も摩耗させない。一般にアブレシブ摩耗に対しては、硬さがかたいほど有利であると言われているが、このことはWC-Co(HVOF)が硬いことと、被膜組織が緻密であることが影響していると考えられる。



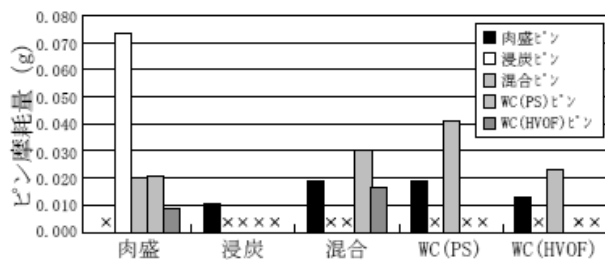
(a) 摩擦係数 (往復動摩耗試験)



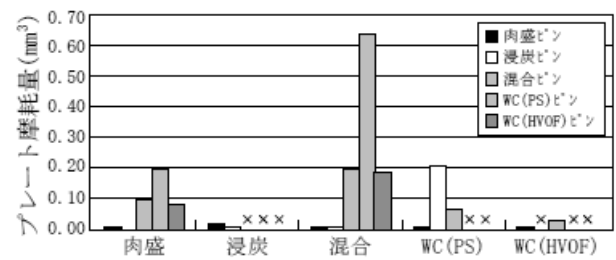
(b) 摩擦係数 (アブレシブ摩耗試験)



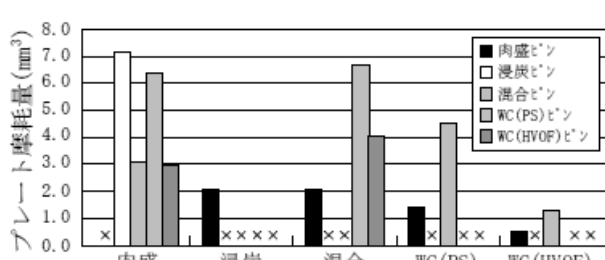
(c) ピン摩耗量 (往復動摩耗試験)



(d) ピン摩耗量 (アブレシブ摩耗試験)



(e) プレート摩耗量 (往復動摩耗試験)



(f) プレート摩耗量 (アブレシブ摩耗試験)

×：試験を行わなかったことを示す。

図7 往復動摩耗試験およびアブレシブ摩耗試験結果

アブレシブ摩耗試験では、WC-Co(HVOF)プレートと肉盛溶接鋼ピンの組み合わせが、摩擦係数およびプレート摩耗量が最小であった。一方、ピン摩耗量において肉盛溶接鋼プレートと混合粉末ピンの組み合わせは、肉盛溶接鋼プレートとWC-Co(PS)ピンの組み合わせとほぼ同じピン摩耗量であるが、プレート摩耗量（相手材の摩耗量）においては、混合粉末ピンとの摩耗量は、WC-Co(PS)ピンとの摩耗量の約1/2と、混合粉末の被膜は、WC-Co(PS)被膜よりも少なかった。

3.2 ファレックス摩耗試験

ファレックス摩耗試験結果を図8に示す。ピンに肉盛溶接鋼、VブロックにWC-Co(PS)およびピンに肉盛溶接鋼、VブロックにWC-Co(HVOF)を用いたものの組み合わせが、ピン、Vブロックとも摩耗量も少なく耐摩耗性に優れていた。

ピンにWC-Co(PS)、Vブロックに肉盛溶接鋼の組み合わせも摩耗量が少なかった。しかし、この組み合わせやWC-Co(HVOF)ピンと肉盛溶接鋼ブロックの組み合わせのように片方ばかり摩耗してしまうと、両方摩耗していくよりも早く被膜が摩耗して母材に達してしまう。

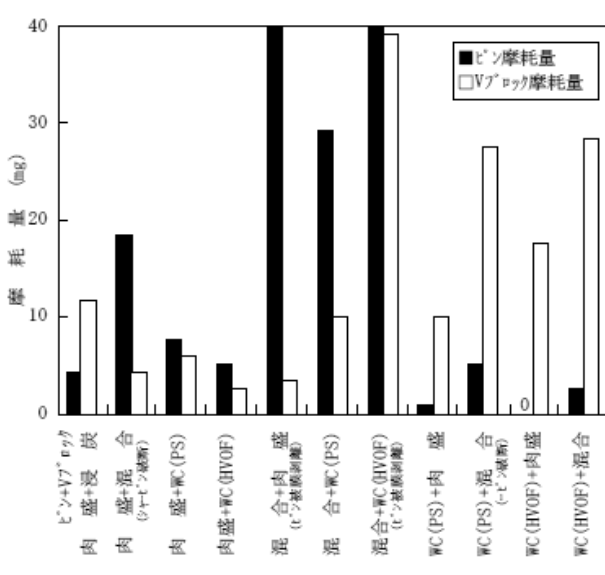


図8 ファレックス摩耗試験結果

3.3 乾式砂摩耗試験

乾式砂摩耗試験結果を図9に示す。

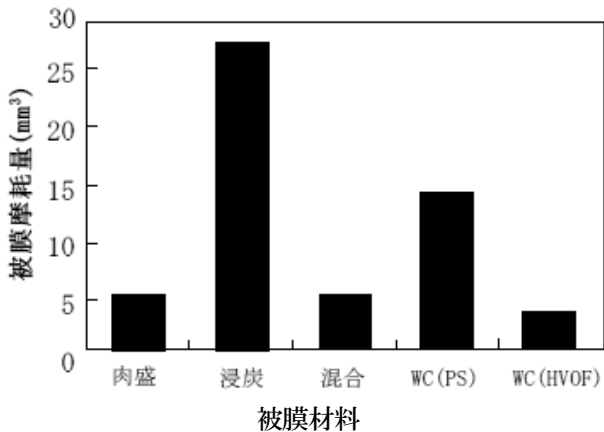
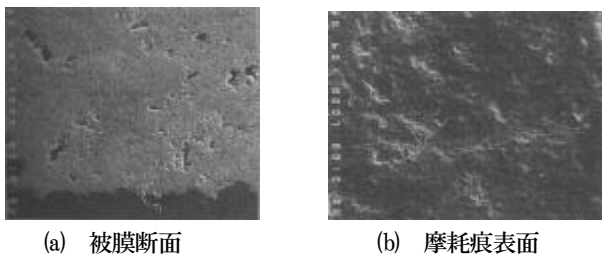


図9 砂摩耗試験結果

WC-Co(HVOF)の被膜が最も摩耗量が少く、次いで肉盛溶接鋼、混合粉末被膜が摩耗量が少なかった。

一般に、表面硬度が高いものは摩耗に強いといわれるが、WC-Co(PS)被膜は被膜表面硬度がHV830と高いが、摩耗は大きかった。図10(a)の減圧プラズマ溶射のWC-Co(PS)被膜断面写真を見ると、被膜中に気孔が多く存在している。また、図10(b)の試験後の摩耗痕表面写真を見ると、被膜表面がむしり取られて摩耗している様子が伺える。被膜中に気孔があると被膜の強度が低くなり、このように被膜表面がむしり取られてしまうため、摩耗が大きくなると考えられる。



(a) 被膜断面 (b) 摩耗痕表面

図10 減圧プラズマ溶射WC-Co(PS)被膜の電子顕微鏡写真

4. 結 論

潤滑性能と耐アブレーション性に優れた摺動表面の開発を目的に研究を進めた。溶射を用いて表面改質被膜を作製し、往復動摩耗試験、アブレシブ摩耗試験、ファレックス摩耗試験により、被膜材料の組合せによる潤滑性能と耐摩耗性を評価した。また、乾式砂摩耗試験により土砂に対する耐摩耗性を評価した。その結果、以下のことが分かった。

(1) 材料の組合せの試験において、次の材料の組合せが耐摩耗性に優れていた。

- 1) 肉盛溶接鋼-減圧プラズマ溶射の混合粉末(FeCr+Ni 自溶性合金+Mo)被膜
- 2) 肉盛溶接鋼-減圧プラズマ溶射のWC-Co(PS)被膜
- 3) 肉盛溶接鋼-高速ガス溶射のWC-Co(HVOF)被膜

(2) 土砂に対する摩耗では、高速ガス溶射のWC-Co 被膜が最も耐摩耗性に優れていた。

この研究は、つくば産学官共同研究として工業技術院機械技術研究所、石油鑿井機製作(株)、茨城県工業技術センターの3者の研究協力により遂行したものである。

参考文献

- 1) 佐々木信也：「レーザ・プラズマハイブリッド溶射」、溶接技術、6 (1992) 87-96
- 2) 志村洋文、他：「耐摩耗合金溶射被膜とその摩擦摩耗機構」、トライボロジスト、38,7 (1993) 613-619
- 3) 岡本純三、他：「トロボロジー入門」、幸書房