

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ジョン性摺動被膜の開発-

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

1. はじめに

一般の機械要素において、磨耗に関するトラブルの大半は、アブレッシブ磨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、耐アブレージ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、表面改質による境界潤滑性能と耐アブレージョン性に優れた摺動表面の開発を目的に、減圧プラズマ溶射およびレーザープラズマハイブリッド溶射法により数種類の合金被膜を作製し、それらのトライボロジー特性を評価することにより、被膜の選定と耐アブレージョン性向上に必要とされる因子を検討した。

本年度は、各種粉末材料および条件でテストピースにより耐磨耗性被膜を作成し、被膜性能を比較・検討したので報告する。

2. 実験方法

減圧プラズマ溶射法により、8種類の合金について、溶射雰囲気減圧アルゴン雰囲気(50,100,300Torr)と大気の4通りに設定して被膜を作製した。作製した被膜は往復動摩擦試験により境界潤滑性能に優れた被膜を選定し、ハイブリッド溶射法により被膜を作製した。作製した被膜は、減圧プラズマ溶射被膜および比較試験片(侵炭鋼ならびに肉盛り溶接鋼)とともにアブレージョン試験に供試し、耐アブレージョン性能の比較を行った。

2.1 実験装置

図1にレーザープラズマハイブリッド溶射装置を示す(本装置は、6軸NC制御ロボットと最大出力80KWのプラズマ溶射ガンを備えた内径2.0m×長さ2.7mの真空チャンパー内に、ZnSe製ウィンドウを通して、レーザー光を導入できる構造になっている。レーザーは最大出力4KWのシングルモードCO₂レーザー(川崎重工製AF-5L)を用いた。

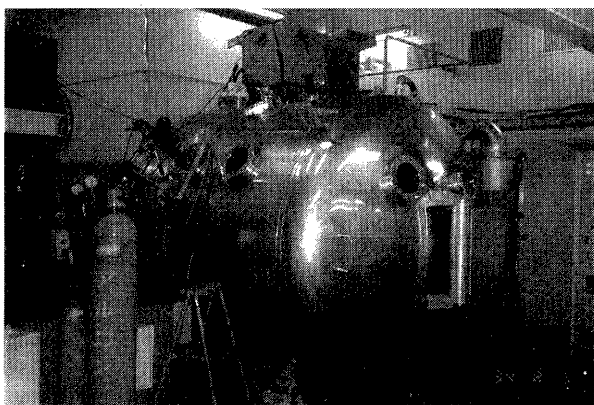


図1 レーザープラズマハイブリッド溶射装置

2.2 溶射粉末

溶射粉末は、表1に示す8種類である。

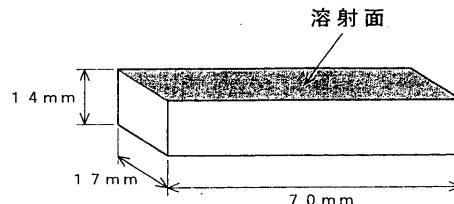
表1 成分表

溶射粉末	Al	B	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	W
1 ステライト6			1.13	Bal	28.8		1.49	0.08		2.50			1.27	5.37
2 トライステル TS-3			3.00	12.0	35.0		Bal	1.00		10.0			4.90	
3 トリパロイ T-700			0.08	1.05	15.5		1.50		32.5	Bal			3.40	
4 トリパロイ T-800			0.04	Bal	17.6		0.65		28.1	0.84			3.50	
5 Fe-Mo	0.03		0.04			0.16	Bal		60.9		0.03	0.04	0.84	
6 Fe-Cr			7.82		64.7		Bal				0.02	0.02	1.59	
7 Ni 自溶性合金	2.93	0.62			14.9		3.03	0.04		Bal			4.05	
8 混合粉末	(Fe-Cr) 60wt%+ (Mo) 20wt%+ (Ni 自溶性合金) 20wt%													

2.3 試験片

試験片は軟鋼SS400、形状及び寸法は、図2の通りである。溶射面をサンドブラスト用 -アルミナ(#30)によりブラスト処理した後、アセトン・ベンジン混合液にて超音波洗浄を行い実験に使用した。

図2 試験片



2.4 溶射被膜の作成方法

(1) 溶射被膜の作成手順

試験片を取り付けた試料ホルダーをロボットアームに固定する(図3)。次に、チャンパー内を真空中に排気した後、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、所定の圧力までアルゴンガスを導入し、プラズマ溶射を行う。

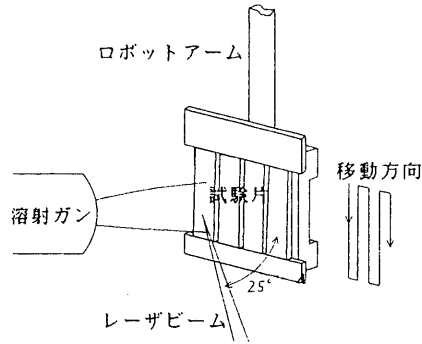
予熱および溶射時は、試験片ホルダーを上下方向に往復させながら、左右方向に2mmピッチで移動させ、ホルダーの端から端まで走差する。アームの移動速度は、2000mm/secである。溶射後は、チャンパー内を真空中に排気して30分間放置した。

大気圧で溶射する場合は、予熱、溶射時とも、チャンパーを開放して行う。

また、レーザーを照射するハイブリッド溶射の場合は、溶射時に図3に示す位置関係でCO₂レーザーを照射した。

図3 プラズマ及びレーザービーム照射の位置関係

*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 ****石油繋井機製作所(株)



(2) 溶射条件

チャンパー内雰囲気は、50, 100, 300Torr, 大気で行い、溶射ガンと試料間距離は、次の通りである(表2)。

表2 溶射条件(雰囲気圧力と溶射距離)

2.5 往復動摩擦試験

	圧力	溶射ガンと試験片距離
予熱時	20Torr	150mmまたは、250mm
溶射時	50Torr	250mm
	100Torr	150mmまたは、250mm
	300Torr	150mm

図4に試験の概要を、表3に摩擦条件を示す。摩擦係数、被膜の摩耗量、摩耗深さ、ボール摩耗量を測定した。

摩擦試験面(溶射面)を鏡面研磨した試験片を、試料台にセットする。摩擦箇所50 μ mの潤滑油を供給した後、100rpmで10分間ならし運転を行ってから、600rpmで60分間、摩擦試験を行う。潤滑油は、VOBIL I (エンジンオイル, SF級)と松村石油(株)製5P4E (フェニールエーテル系合成油)を用いた。

図4 摩耗試験の概略

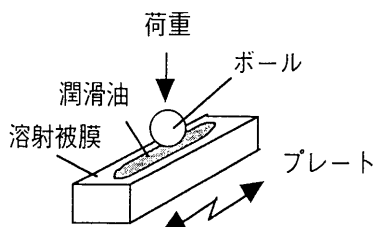


表3 摩擦条件

2.6 土砂摩耗を想定した往復動摩耗試験

試験方法	往復動ボールオンプレート方式
摩擦速度	10サイクル/sec
摩擦幅	100mm/サイクル
荷重	98N
摩擦時間	60min
摩擦距離	3600m
潤滑油	エンジンオイル, 5P4E (フェニールエーテル系合成油)
油量	50 μ l 500 μ l/min
ボール	5/16inch, SUJ2

土砂摩耗を想定し、潤滑油中にアルミナ粒子を混合したものを、往復運動する試験片上に常時供給しながら試験を行った。粒子径は106 μ m, 混合比は4wt%とした。なお、試験中は潤滑油の温度を約50 $^{\circ}$ Cに保ち、供給量は500 μ l/minとした。

2.7 硬さ試験

マイクロピッカース硬さ試験機((株)アカシ製)を用い、荷重500gfで硬さを測定した。

2.8 SEM像観察

溶射被膜の断面、摩耗試験の摩耗痕をEPHA付走査電子顕微鏡(日本電子製SCANNING MICROSCOPE JSM-6400Fs)により観察した。

2.9 比較材料について

選定した8種類の粉末の被膜のほか、比較の対象としている肉盛溶接材、侵炭焼入材についても評価試験を行った。肉盛溶接材とは、SAE8720材にスライト系合金を溶接したもの、侵炭焼入材とは、SAE4815材に侵炭処理をしたものである。それぞれの組成を、表4に示す。

表4 比較材組成

	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	0.20 -3.80	-	0.20 -0.30			Bal
スライト系合金	2.48		1.03	31.22			17.92	5.05	2.30

3. 結果と考察

3.1 往復動摩耗試験結果

図5に各溶射被膜の潤滑下における摩擦摩耗試験結果を示す。作製した被膜の中より、各溶射材料ごとに表面硬さの最も硬かったものを選び出し比較した。

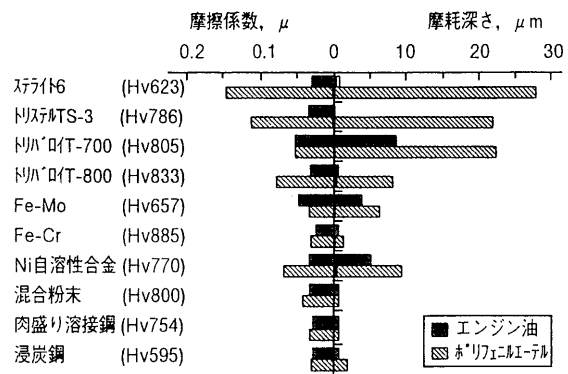
エンジンオイルの場合は、材料によって摩擦係数の差はあまり見られないが、ポリフェニルエーテルの場合では、摩擦係数、摩耗深さとも、被膜によりバラッキが見られた。その中でもFeCrの被膜と混合粉末の被膜が摩擦、摩耗ともに良好な摺動特性を示した。

しかし、FeCrの被膜は、一部で剥離が起こるなど基材との密着性の点で問題があったので、混合粉末を耐アブレージョン性被膜として選定した。

選んだ混合粉末は、レーザー・プラズマ・ハイブリッド溶射により被膜を作製し、アブレージョン試験に用いた。

図5 各溶射被膜の潤滑下における摩擦・摩耗試験結果

3.2 アブレージョン摩耗試験結果



各改質表面のアブレージョン試験結果を図6に示す。被膜表面の硬さは、肉盛溶接鋼でHV754, 侵炭焼入鋼がHV594, 混合粉末の減圧溶射被膜がHV800, ハイブリッド溶射被膜がHV971であった。

混合粉末の減圧溶射被膜、ハイブリッド溶射被膜は、比較材料である肉盛溶接鋼・侵炭焼入鋼よりも優れた摩擦特性を示した。また、被膜の摩耗量、ボールの摩耗量とも比較材料より少なく、優れたアブレージョン性能を示した。

単純に考えれば、表面の硬さが硬い表面の方が耐アブレーション性能は、理論的に優れているはずであるが、肉盛溶接鋼と減圧溶射被膜とでは、硬さにほとんど差が見られないにもかかわらず、耐摩耗性において大きな差が表れた。これは、ここでのアブレーション摩耗が、単に材料表面の平均的な硬さに依存するのではなく、摩擦表面のミクロ組織の状態が大きく関与しているためではないかと推察した。

図6 各改質表面のアブレーション試験結果

3.3 肉盛溶接鋼と減圧溶射被膜の比較

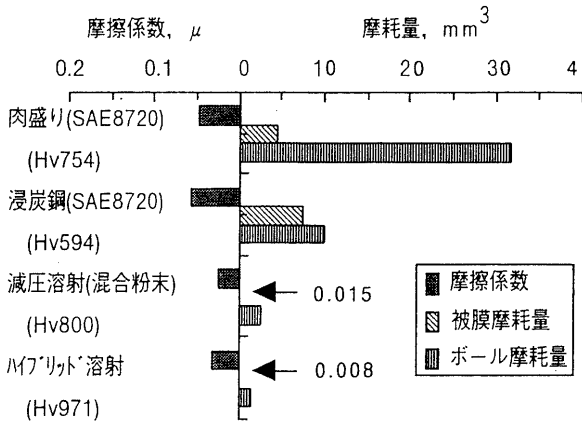


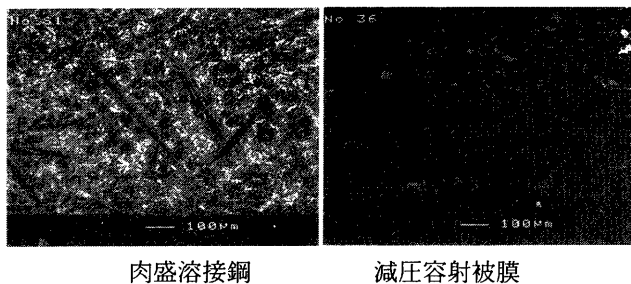
図7は、肉盛溶接鋼と減圧溶射被膜の断面組織の状態を示したものである。

肉盛溶接鋼の組織は、サブミリオーダーの針状組織と、数十ミクロンオーダーの粒状組織からなる不均一な組織になっている。それに対し、減圧溶射被膜の組織は数十ミクロンオーダーで見ると一様な組織になっている。

このように、ミクロ組織が不均一であると、硬さの低い部分などにアブレーション粒子がトラップされ、3次元アブレッシブ摩耗から2次元アブレッシブ摩耗状態へと摩耗機構が変化し、これにより摩耗が増大するものと考えられる。

図7 肉盛溶接鋼と減圧溶射被膜の断面組織

3.4 減圧溶射被膜とハイブリッド溶射被膜の比較



肉盛溶接鋼 減圧容射被膜

減圧溶射被膜とハイブリッド溶射被膜を比較すると、摩擦係数では減圧溶射被膜の方が若干優れた摩擦特性を示しているが、摩耗量では被膜およびボールともハイブリッド溶射被膜の方が摩耗が少なく、耐アブレーション性に優れることが分かった(図6)。

また、硬さも減圧溶射被膜のHV800に対してハイブリッド溶射被膜の方はHV971と高い値を示した。

図8に、減圧溶射被膜とハイブリッド溶射被膜の断面組織を示す。減圧溶射被膜で見られる、このような層構造が、レーザープラズマハイブリッド溶射で、レーザーを同時に照射することにより解消され、被膜中の気孔も減少している。

図9は、減圧溶射被膜とハイブリッド溶射被膜断面の元素分布状態を示したものである。ニッケルと鉄の分布を示す。ハイブリッド溶射被膜では、レーザーを照射しないものにくらべて、全体的に元素の拡散が進んでおり、より

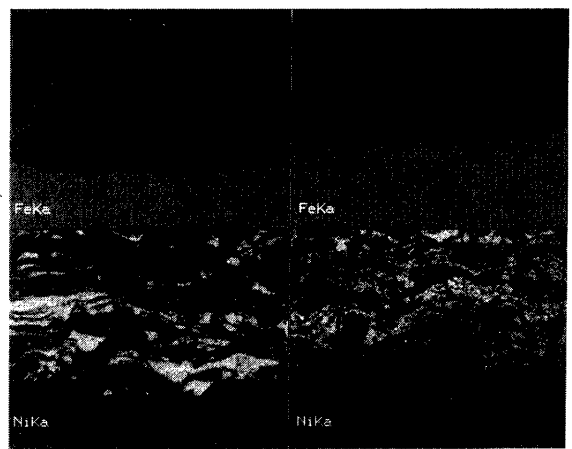
均一な組織になっている。また、特に被膜の界面では、基材と被膜との境界に約数ミクロンの鉄の拡散層ができており、化学結合力による密着性の向上が図られているものと推察される。

図8 減圧溶射被膜とハイブリッド溶射被膜の断面



減圧プラズマ容射 レーザー・プラズマハイブリッド容射

図9 減圧およびハイブリッド溶射被膜の元素分布



減圧プラズマ溶射 レーザー・プラズマハイブリッド溶射

4. まとめ

「境界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」を目的に研究してきたところ、次のことが分かった。

- (1) 8種類の材料について、それぞれ4通りの溶射条件で被膜作製を行い、摺動特性を調べた結果、FeCrとNi自溶性合金、Moを混合した粉末が、境界潤滑性能に優れていることが分かった。
- (2) 混合粉末について、減圧プラズマ溶射とレーザープラズマハイブリッド溶射法によって被膜作製を行い、耐アブレーション試験をした結果、比較材料である肉盛溶接鋼・侵炭焼入鋼よりも優れた耐アブレーション性を示すことが分かった。
- (3) レーザープラズマハイブリッド溶射被膜と減圧プラズマ溶射被膜を比較すると、レーザーを同時照射することにより、元素拡散により組織の均一化が進み、耐アブレーション性が向上することが分かった。

しかし、ミクロ組織と耐アブレーション特性との相関については、今後さらに詳細な検討が必要である。
追記

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、茨城県工業技術センター、石油撃井機製作(株)との共同研究により遂行されたものである。

参考文献

- 1) 佐々木:溶接技術, 「レーザープラズマハイブリッド溶射」, 6 (1992)87-96