

溶射皮膜と硬質クロムめっきの耐摩耗性の比較と評価

(潤滑状態での比較と評価)

足利工業大学 工学部機械工学科 戸部 省吾

1. 緒言

高硬度で耐摩耗性に優れている硬質クロムめっきは、従来、多くの機械部品などに適用されているが、電気めっき法ではシアン化物やカドミウムなど、排出量が規制されている化学薬品を使用するため、廃水処理に莫大な投資が必要とされる。そのため電気めっきは国内の企業では取り扱わない傾向にある。そこで化学薬品を一切使わない溶射で、めっきにとって変わる皮膜の開発が進められてきた。

前回は無潤滑下で摩耗試験を行ったが、硬質クロムめっきは、例えば内燃機関のシリンダーなど潤滑状態でも多く使用されるため、今回は潤滑下で鋼球およびシリコンナイトライド (Si_3N_4) 球を相手材として摩耗試験を行い、硬質クロムめっきとWC-CoCr、WC-Cr₃C₂-Ni、クロミア、グレーアルミナ、ハステロイC276の摩耗特性の比較と評価を行った。

2. 実験方法

本研究では、図1のボール・オン・プレート往復摩耗試験機を使用した。試験片のうちWC-CoCr、WC-Cr₃C₂-Ni、ハステロイC276は高速フレーム溶射法(HVOF)で成膜し、グレーアルミナ、クロミアは大気プラズマ溶射法(APS)で、クロムめっきは電気めっき法により形成した。

ボール・オン・プレート往復式摩耗試験機は、相手材に9.525mmの鋼球、10.0mmの Si_3N_4 球を用いて摺動速度0.042m/s(2500mm/min)、荷重を10Nに設定し、摩耗距離(摺動距離)は10000mとした。試験前と2000mごとに試験片と相手材の重量を測定し、試験中に摩擦係数も測定した。光学顕微鏡による表面観察も試験前と試験後に行った。

潤滑装置は、潤滑油を滴下する方式で、図1のように製作した。潤滑油は基油(シェルビトリアオイル, 動粘度68mm²/s)および自動車エンジン用合成油(5W-30)を用いた。滴下量は1往復につき、約1滴とした。したがって、試験片と相手材の接触面には常に新しい潤滑油が供給された。

溶射皮膜を潤滑下で摩耗量を測定するときの問題点は、試験中に潤滑油が皮膜の気孔中に浸透し、重量が増加してしまつて摩耗量を正確に測定できない恐れがあることである。予備実験の結果、本実験で使用した潤滑油の場合、潤滑油中に48時間浸漬すると、潤滑油の気孔への浸透は飽和状態となることが分かったため、摩耗試験では、同じ時間、試験片を油中に浸漬した後、試験を開始した。また、摩耗試験後の重量測定では、アセトンで試験片を十分洗浄してから行った。その手順はすべての試験片で同一とした。

3. 摩耗試験機

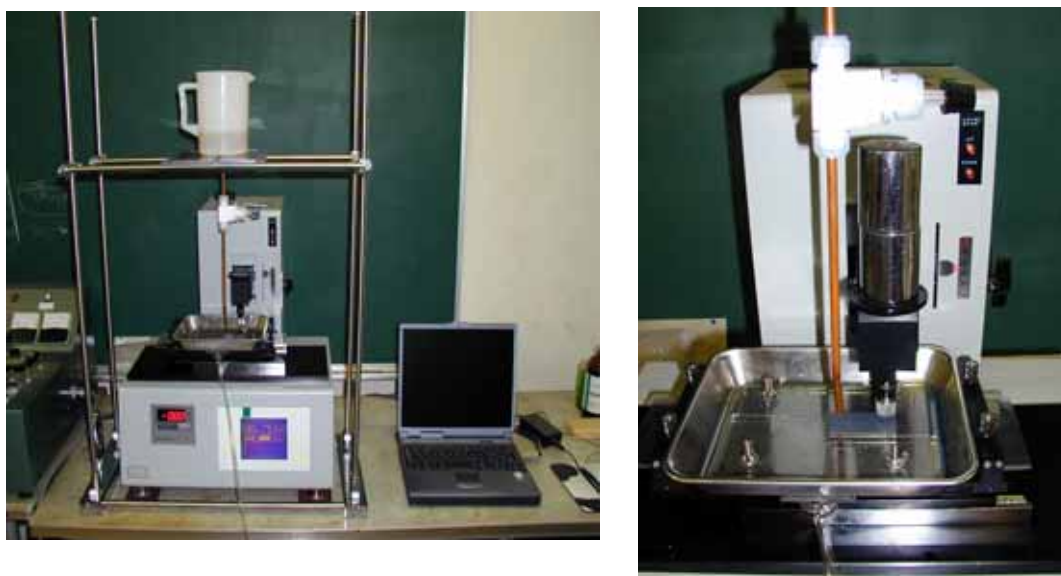


図1 実験装置写真

試験機：HEIDON トライボステーション Type32 (図1)

相手材：鋼球 9.525mm Si₃N₄球 10.0mm

摺動速度：2500mm/min

摺動距離：40mm(1往復 80mm)

荷重：10N

4. 参考資料

参考資料として前で行った各試験片と鋼球、Si₃N₄球のビッカース硬さ試験結果を表1に示した。

表1 ビッカース硬さ試験結果

材料名	ビッカース硬さ (Hv)
クロムめっき	839
WC-CoCr	1322
WC- Cr ₃ C ₂ -Ni	1095
グレーアルミナ	560
クロミア	1155
ハステロイC	471
鋼球	808
Si ₃ N ₄ 球	1361

5. 相手材が鋼球の場合の実験結果および考察

基油を潤滑剤として用い、ボール・オン・プレート往復式摩耗試験機で測定した各皮膜の摩耗距離と摩耗量の関係を図 2 (a)に示した。同図(b)は相手材の摩耗量である。耐摩耗性が最も優れているのは WC-Cr₃C₂-Ni と硬質クロムめっきで 10000mの試験後の摩耗量は最も少なく、両者の差もほとんど認められない。測定値にややばらつきはあるものの、WC-CoCr とグレーアルミナが続き、クロミアの摩耗量はやや多い。クロミアは 6000m から、グレーアルミナは 10000m で摩耗量が急激に多くなっている。これは摩擦面が荒れ始めたためであろう。ハステロイ C276 は摩耗量が最も多い。これは無潤滑状態で行った実験結果と同じである。

相手材の摩耗については、WC 系の 2 種類の皮膜とハステロイ C276 は相手材をほとんど摩耗させないが、硬質クロムめっき材は相手材をやや摩耗させ、アルミナとクロミアの 2 種類の酸化セラミック皮膜は、相手材を激しく摩耗させる。これらの原因については、後で顕微鏡観察結果から詳しく考察する。

合成油を用いた摩耗試験の結果を図 3 に示した。同図(a)が皮膜の摩耗試験結果、(b)が相手材である鋼球の摩耗量である。基油を用いた場合と著しく異なる摩耗傾向を示したのは硬質クロムめっき材で、摩耗量は基油を用いた場合の約 4 倍に増加した。この原因は目下のところ不明であるが、めっき膜自体の品質のばらつきが考えられる。

相手材(鋼球)の摩耗量の傾向は、図 3(b)を見ると、基油を用いた場合と若干異なる。クロミアは鋼球を著しく摩耗させるが、グレーアルミナは基油の場合の約 1/3 に過ぎない。

摩擦係数の測定結果の 1 例を図 4 に示した。摩擦係数の値が反転しているのは、往復運動であるためである。また、摩耗距離 1000m 毎における摩擦係数の測定結果を表 2 に示した。一般に、金属同士の潤滑下でのすべり接触での摩擦係数は約 0.1 と言われているが、本研究の測定結果では皮膜材質を問わずおよそ 0.06 から 0.8 の間の数値となった。これは皮膜と相手材の接触がほぼ流体潤滑状態にあるためであろう。

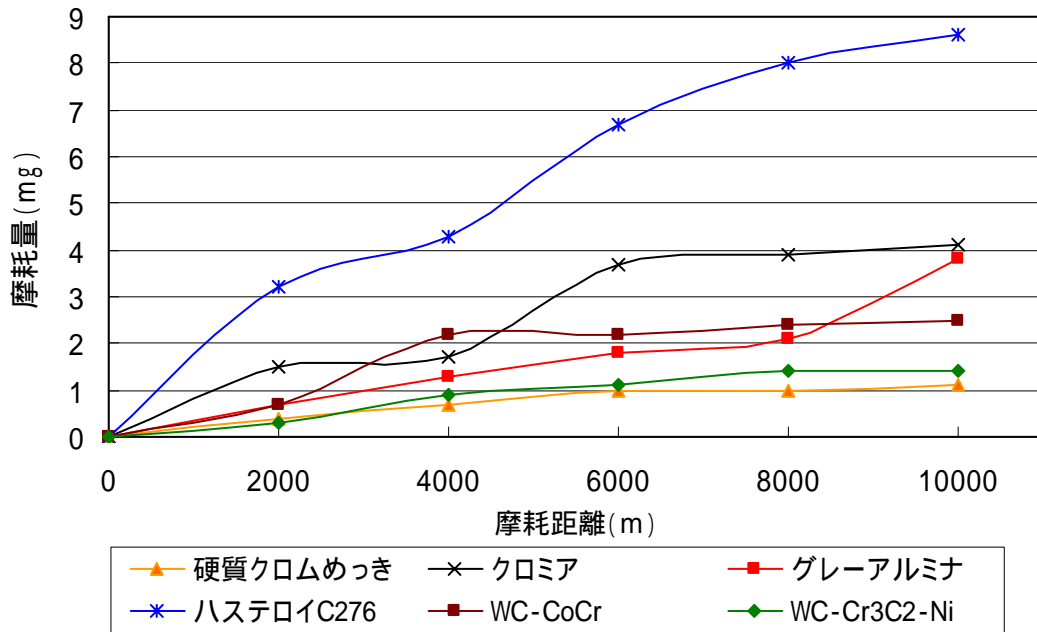
表 2 摩擦係数の測定結果(相手材鋼球)

皮膜の種類	摩擦係数(基油)	摩擦係数(合成油)
硬質クロムめっき	0.082	0.066
クロミア	0.090	0.077
グレーアルミナ	0.084	0.069
ハステロイ C276	0.066	0.071
WC-CoCr	0.078	0.070
WC-Cr ₃ C ₂ -Ni	0.074	0.065

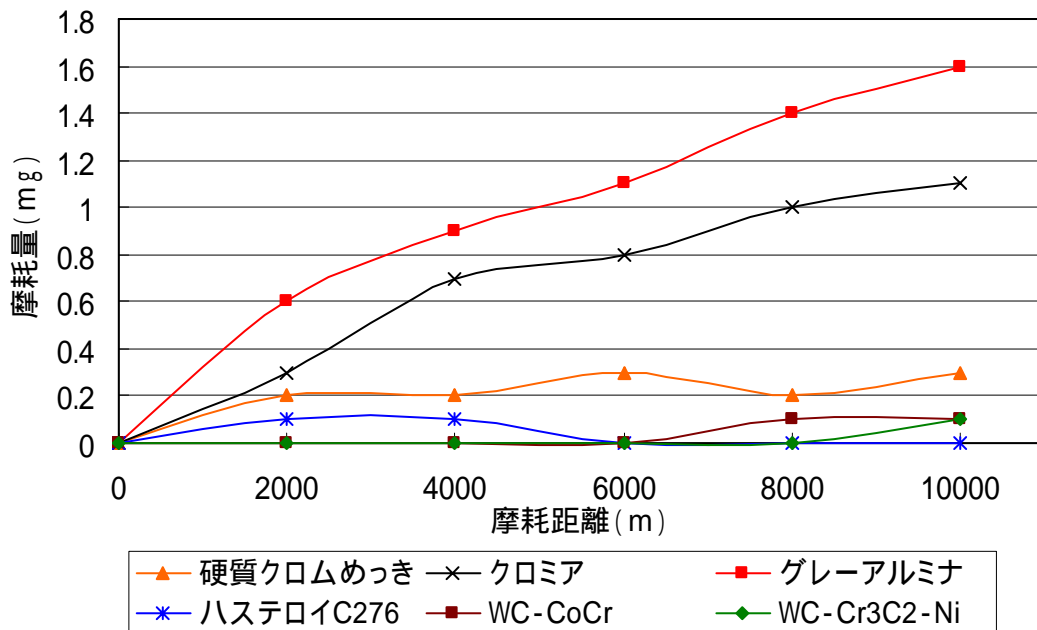
潤滑剤として基油を用いた場合の摩耗試験前後の表面の顕微鏡写真を図 5 に示した。同図 (a) は硬質クロムめっき材である。試験前でも、研削方向と直角なき裂が認められた。

試験後の表面はやや黒ずんでいるほかは著しい変化は認められないが、き裂密度が増加しているようにも見受けられる。硬質クロムめっき材は相手材を摩耗させたが、き裂が原因の可能性もあろう。同図(b)はクロミアである。同図では白い部分が増えているが、これは摩耗試験中、相手材によって研磨され、光沢を持った部分である。(d)はハステロイ C276 である。試験後は皮膜の部分的脱落や深い摩耗痕が認められ、図 2 で示した、摩耗量の多さに符合する。図 5(c)に示したようにグレーアルミナでは、摩耗面がやや黒ずんだ程度で、大きな変化は認められない。試験の前後で表面の状態に何の変化も認められなかったのは 2 種類の WC 系で、試験後も研削加工痕がほぼ変化なく残っている。耐摩耗性の高さが顕微鏡写真からも明らかである。

合成油を用いた場合の試験後の表面の顕微鏡写真を図 6(a)~(f)に示した。表面の状況が著しく変化したのはハステロイ C276 で、基油を使用した場合には、表面は凹凸が激しく焼付きも認められたが、合成油では深い穴があるものの、ほかの部分は平坦であった。これは合成油には極圧剤などが添加されているために、表面の粗さは少なかったものの、粘度が低いために、皮膜の内部に浸透した合成油に相手材によって圧力が負荷され、破壊、はく離したものと考えられる。その他の皮膜では、基油と合成油で大きな差は認められなかった。

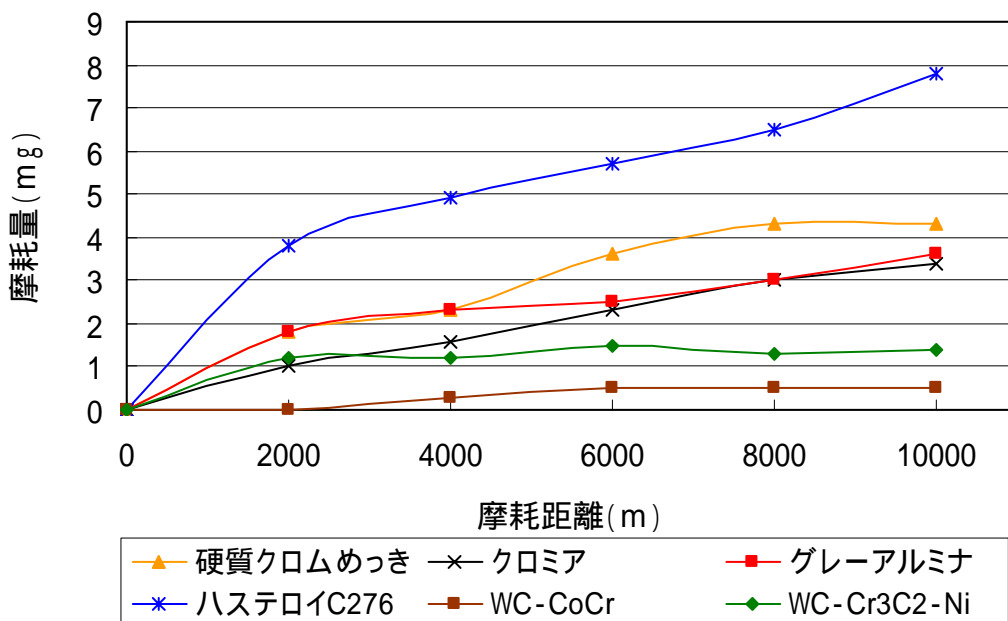


a) 皮膜摩耗量測定結果 (相手材 鋼球)

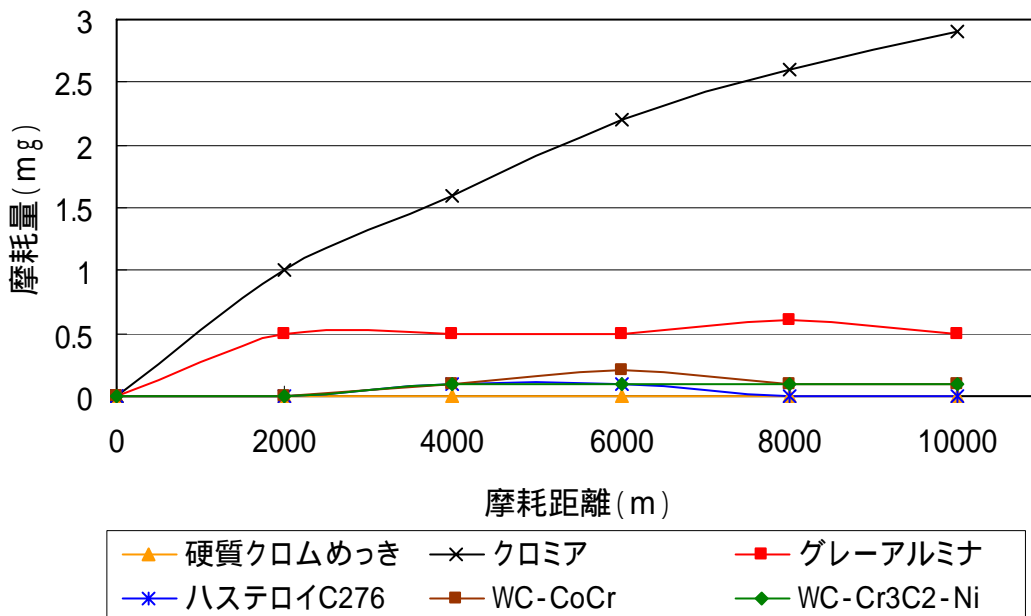


b) 相手材 鋼球 摩耗量測定結果

図2 基油を用いた場合の摩耗量測定結果

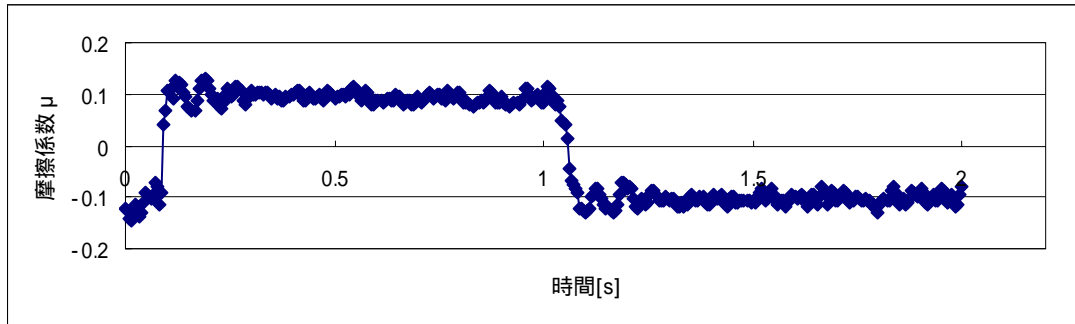


a)皮膜摩耗量測定結果（相手材 鋼球）

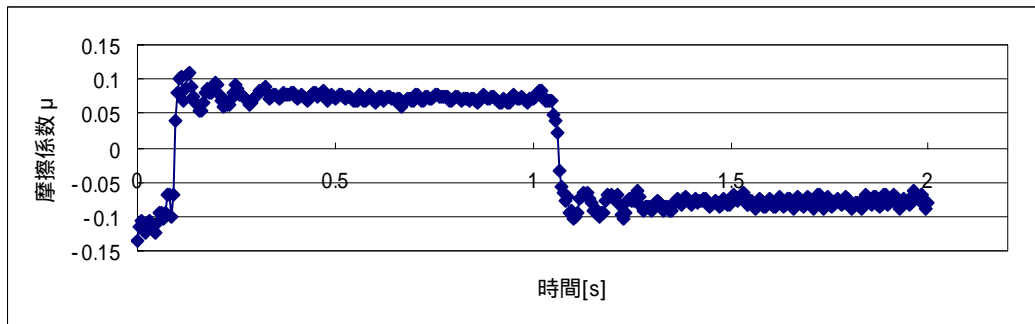


b)相手材 鋼球 摩耗量策定結果

図3 合成油を用いた場合の摩耗量測定結果

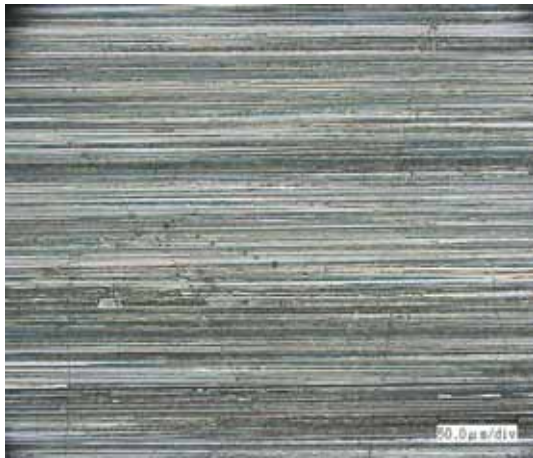


a)WC-CoCr(0m)

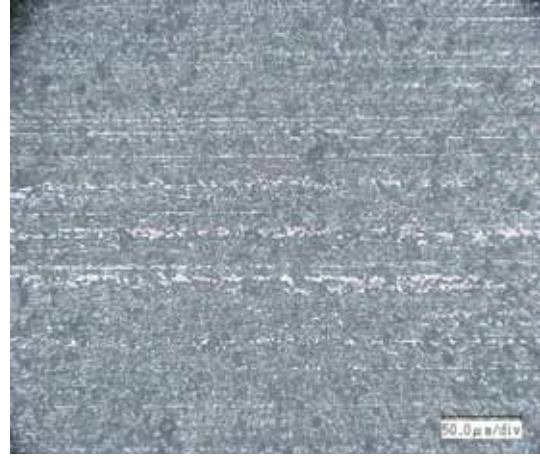


b)WC-CoCr(8000m)

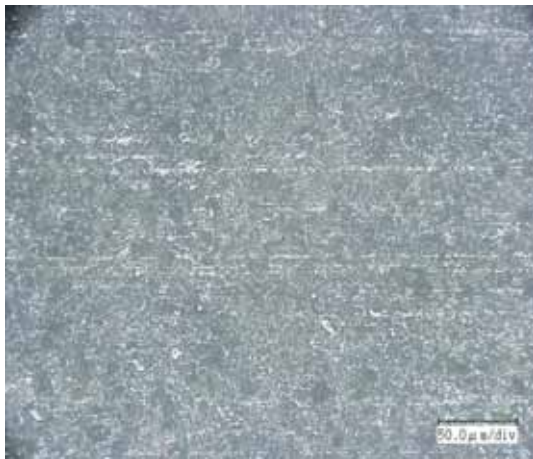
図4 摩擦係数測定結果の例（相手材 鋼球）



a)硬質クロムめっき試験後



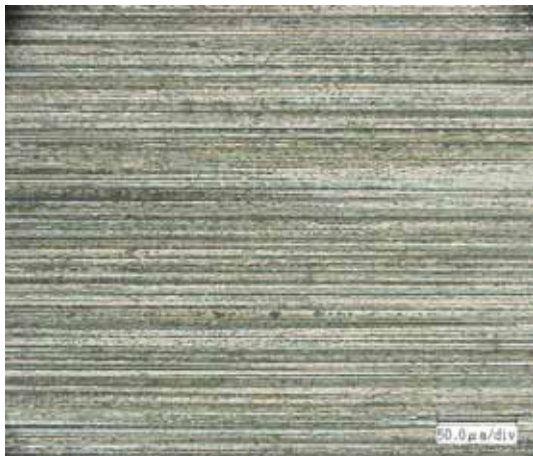
b)クロミア試験後



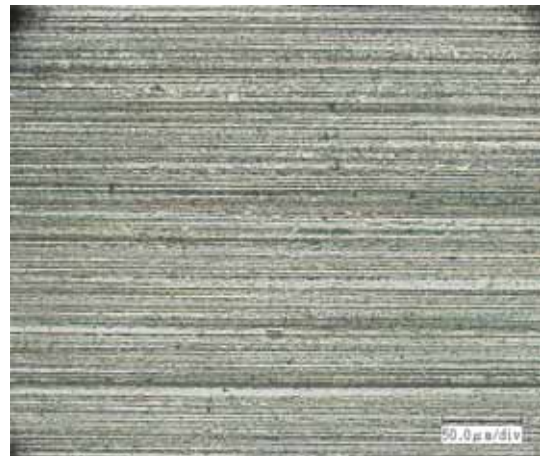
c)グレーアルミナ試験後



d)ハステロイ C276 試験後



e)WC-CoCr 試験後

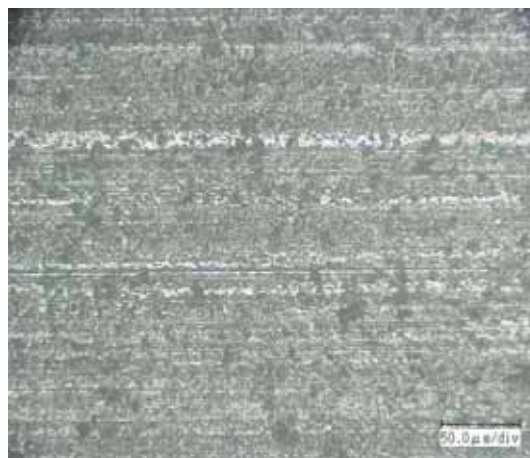


f)WC-Cr₃C₂-Ni試験後

図5 摩耗試験後表面写真(相手材鋼球、基油使用)(倍率450倍)



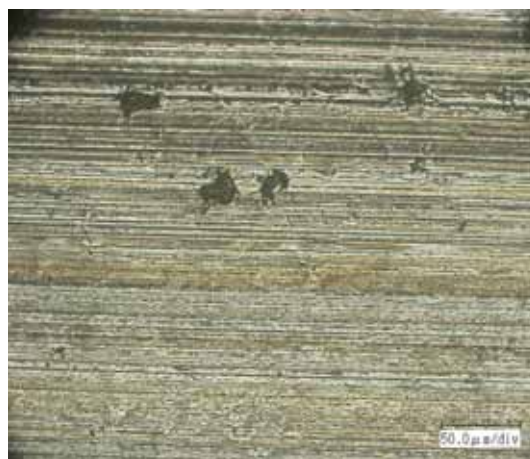
a) 硬質クロムめっき試験後



b) クロミア試験後



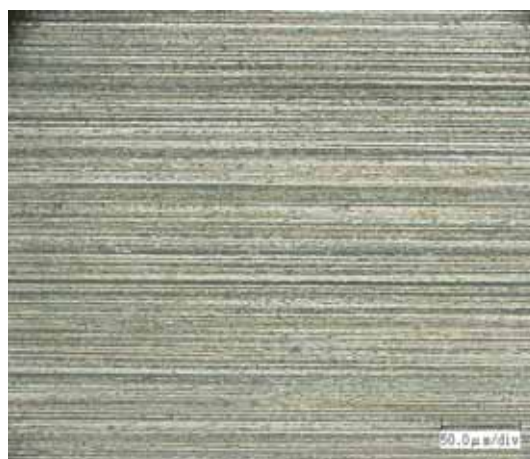
c) グレーアルミナ試験後



d) ハステロイ C276 試験後



e) WC-CoCr 試験後



f) WC-Cr₃C₂-Ni 試験後

図6 摩耗試験後表面写真(相手材鋼球、合成油使用)(倍率450倍)

6 相手材が Si₃N₄ 球の場合の実験結果および考察

相手材が Si₃N₄ 球で基油を用いて摩耗試験を行った場合の摩耗試験結果を図 7 に、合成油を用いて試験を行った結果を図 8 にそれぞれ示した。図 7, 8 でいずれも (a) は皮膜の摩耗試験結果、(b) は相手材の摩耗試験結果である。基油と合成油を用いた両方の試験でも二つの WC 系皮膜と硬質クロムめっき材は摩耗量が少なく、かつばらつきも少ない。優れた耐摩耗性を示している。相手材が鋼球の場合と比較しても、ハステロイ C276 以外の摩耗量はほとんど変わらない。

特異な摩耗特性を示したのはハステロイ C276 で、相手材が Si₃N₄ 球の場合で潤滑油が基油と合成油では摩耗量がほとんど変わらないのだが、相手材が鋼球の場合と比較して摩耗量が約 1 / 3 に減少している。この理由が明らかではないが、ハステロイ C276 は鋼と凝着しやすいためではないかと考えられる。

各種のセラミックスの中でも最も靱性が高く、また今回試験した材料の中では最も硬さの高い Si₃N₄ 球自体の摩耗はほとんど認められなかった。Si₃N₄ 球の摩耗量が 0 となっている場合があるが、これは使用した精密天秤の測定精度が 0.1mg であり、この精度では測定できなかった量の摩耗という意味である。

基油を用いた場合と合成油を用いた場合で、全般的には摩耗量に差は認められなかったが、これは試験条件がさほど過酷ではなかったためと考えられる。接触荷重はヘルツ応力で 1 kN/mm² でやや高いが、潤滑油で常に冷却されているため摩擦による温度の上昇も認められなかった。このような条件化では、高性能な合成油の特性が生かしきれなかった可能性もある。

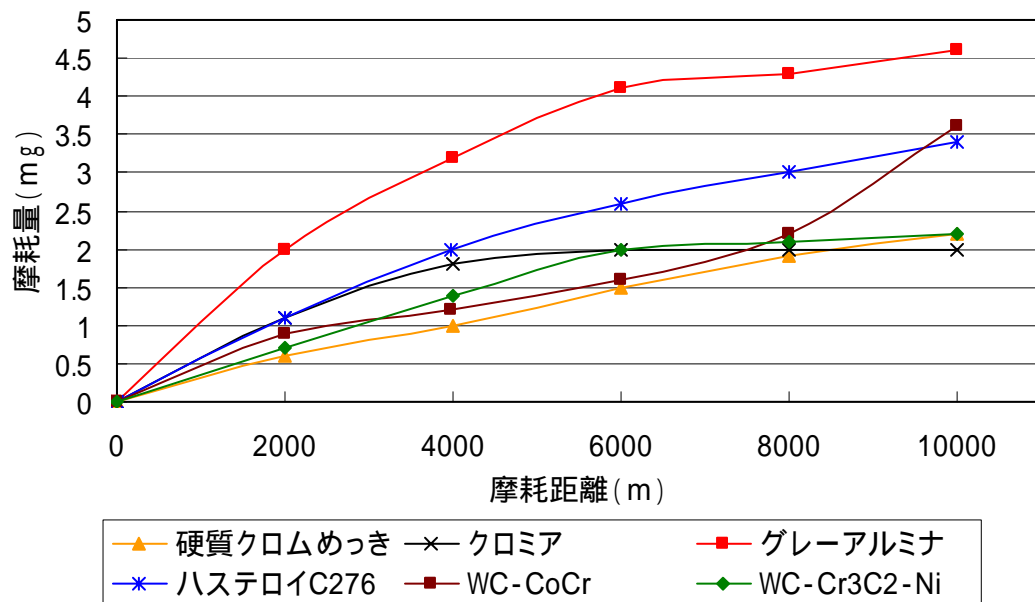
摩擦係数を摩耗距離 1000m おきに測定し平均した値を表 3 に示した。基油による潤滑下では、硬質クロムめっきと二つの酸化物セラミックス皮膜の摩擦係数がやや高い。合成油を用いた場合には硬質クロムめっきの摩擦係数は低くなったが、酸化物セラミックス皮膜の摩擦係数は高いままである。これは酸化物セラミックス皮膜では、摩耗距離が長くなるとともに、表面の粗さが増加するためであろう。

表 3 摩擦係数の測定結果(相手材 Si₃N₄ 球)

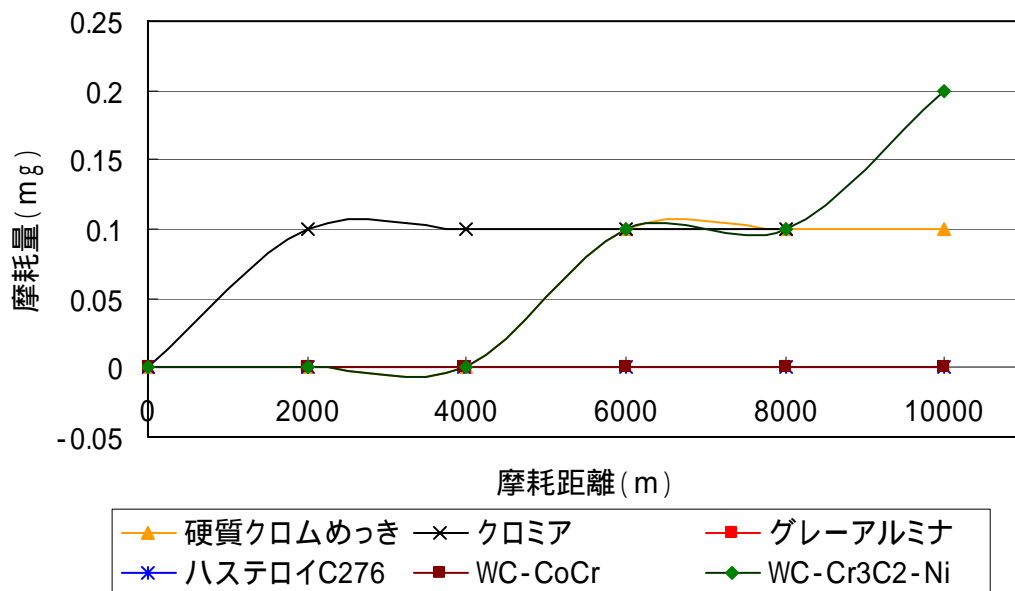
皮膜の種類	摩擦係数(基油)	摩擦係数(合成油)
硬質クロムめっき	0.074	0.066
クロミア	0.076	0.079
グレーアルミナ	0.071	0.079
ハステロイ C276	0.053	0.069
WC-CoCr	0.062	0.067
WC-Cr ₃ C ₂ -Ni	0.065	0.067

摩耗試験後の表面の顕微鏡写真を図 9、図 10 に示した。図 9 基油を使用した場合、図 10

は合成油を使用した場合である。ここでは試験前の表面写真は示していないが、基油、合成油を使用した場合とも、表面が全く変わっていないのは、二つの WC 系皮膜である。硬質クロム皮膜も研削条痕が残っているが、とくに合成油を使用した場合大きなき裂が発生している。ハステロイ C276 は Si_3N_4 と相性がよいのか、試験後もとくに合成油を使用した場合、表面は荒れていない。鋼球が相手材のときに比べて摩耗量が激減しているのも、顕微鏡写真から納得できる。はるかに硬い酸化物セラミックスよりもハステロイ C276 のほうが優れた耐摩耗性を示すことを明らかにできたのは新しい知見と言えよう。

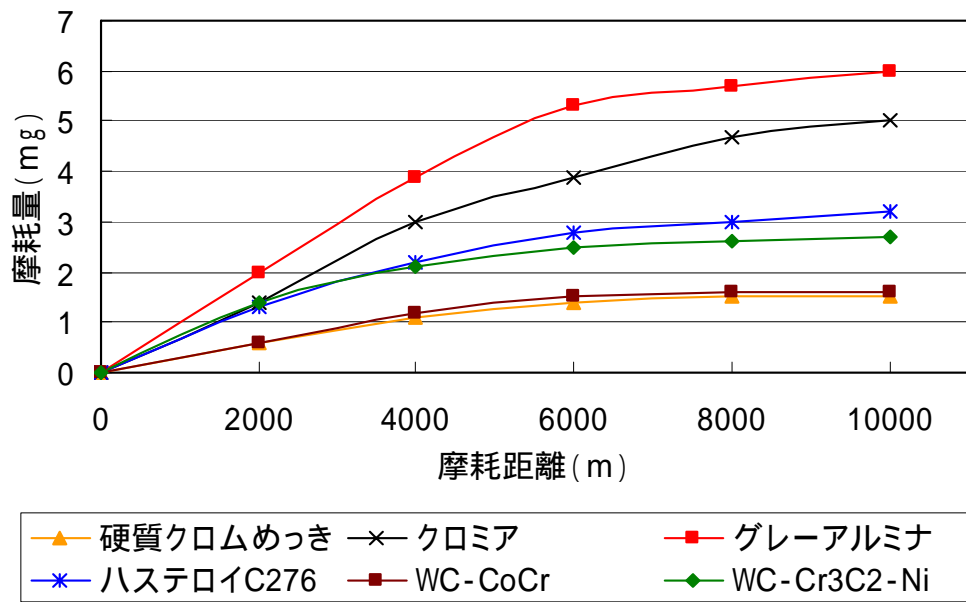


a)皮膜摩耗量測定結果 (相手材 Si₃N₄ 球)

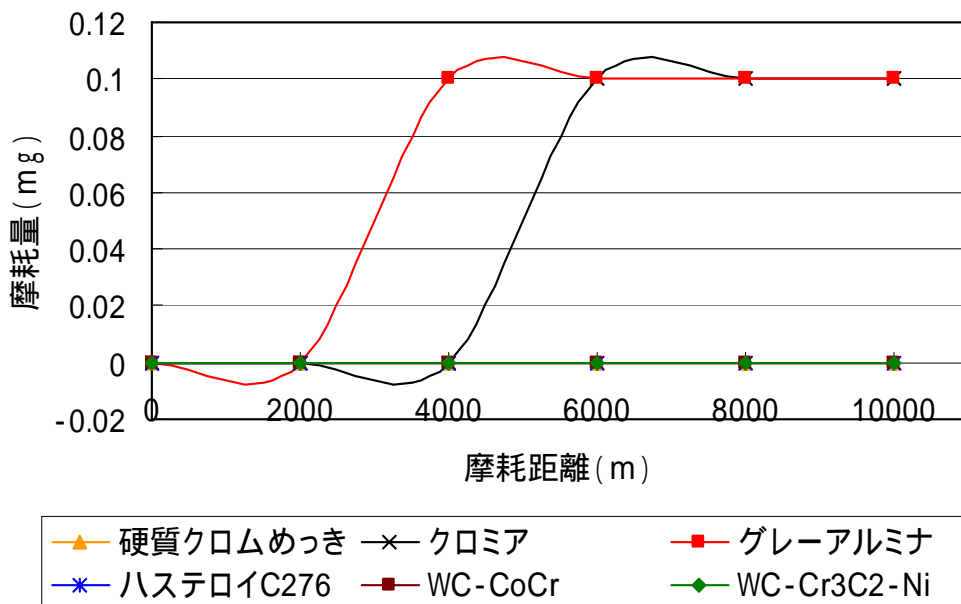


b)相手材 Si₃N₄ 球 摩耗量測定結果

図7 基油を用いた場合の摩耗量測定結果

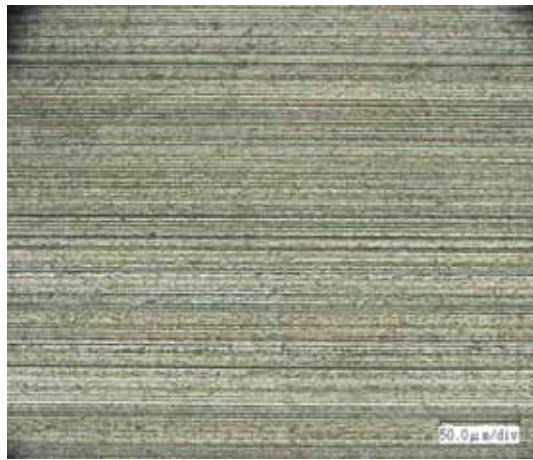


a)皮膜摩耗量測定結果 (相手材 Si₃N₄ 球)

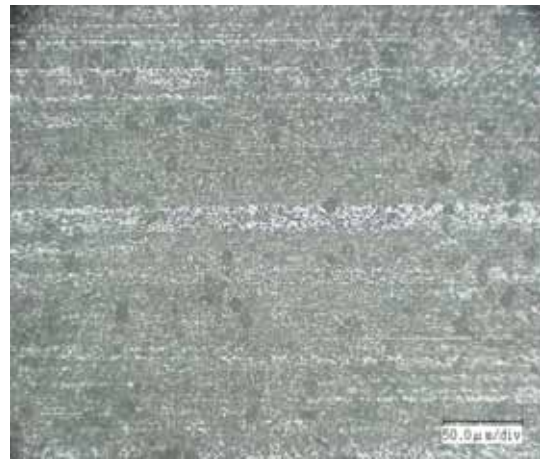


b)相手材 Si₃N₄ 球 摩耗量測定結果

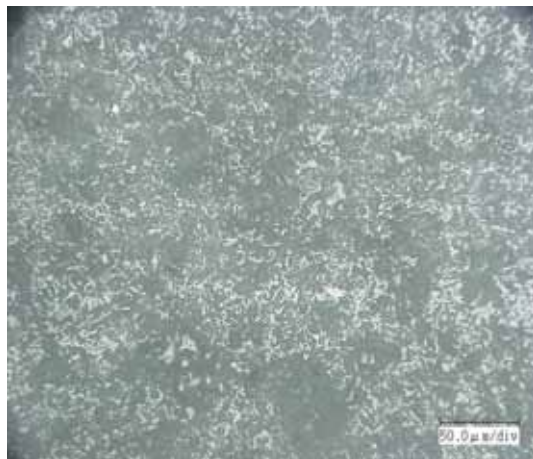
図 8 合成油を用いた場合の摩耗量測定結果



a)硬質クロムめっき試験後



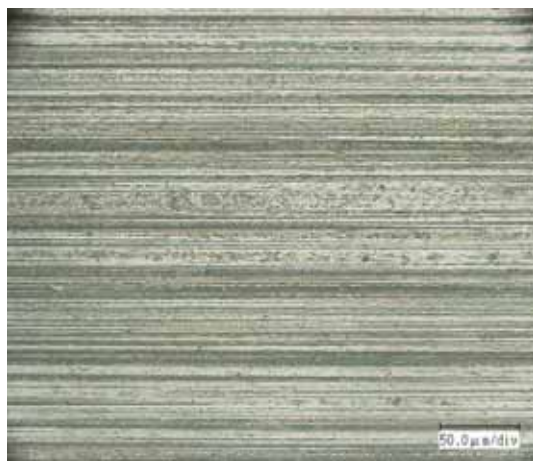
b)クロミア試験後



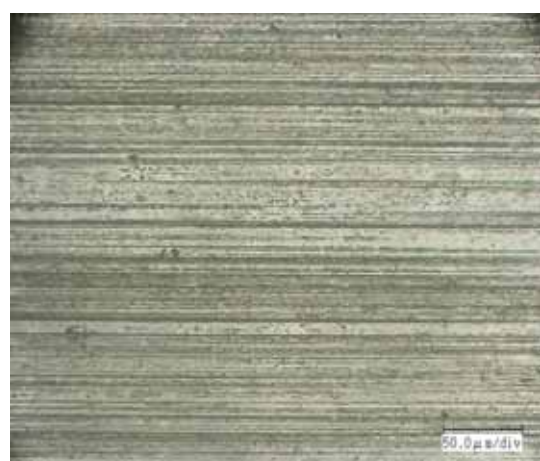
c)グレーアルミナ試験後



d)ハステロイ C 276 試験後

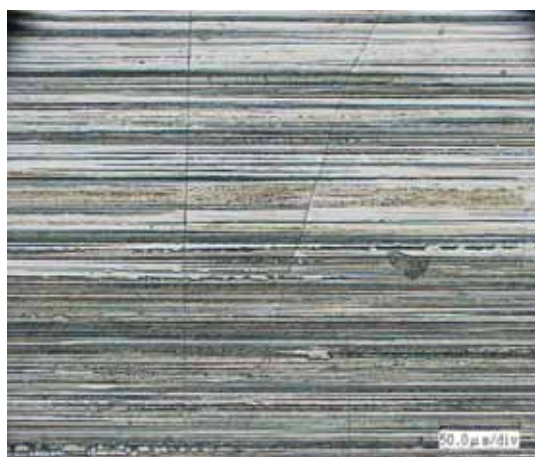


e)WC-CoCr 試験後

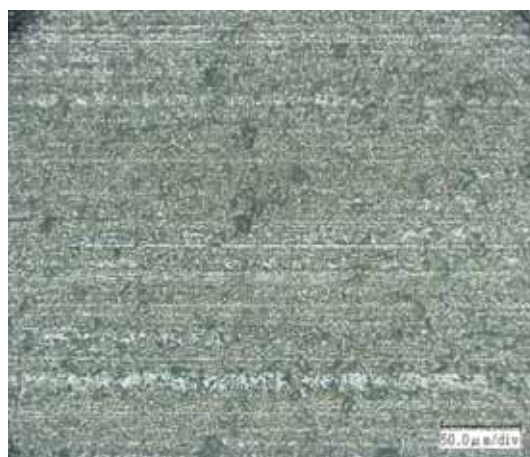


f)WC-Cr₃C₂-Ni試験後

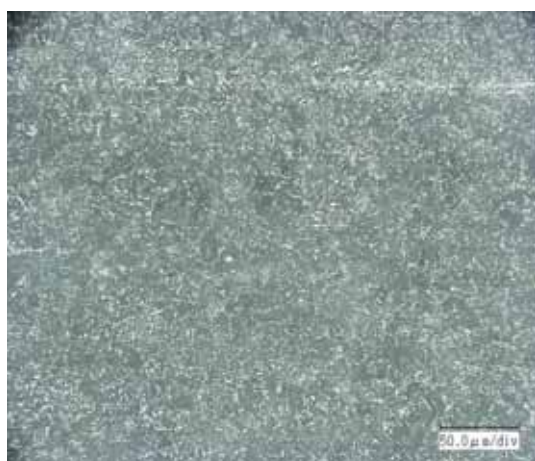
図9 摩耗試験後表面写真(相手材 Si₃N₄ 球、基油使用) (倍率 450 倍)



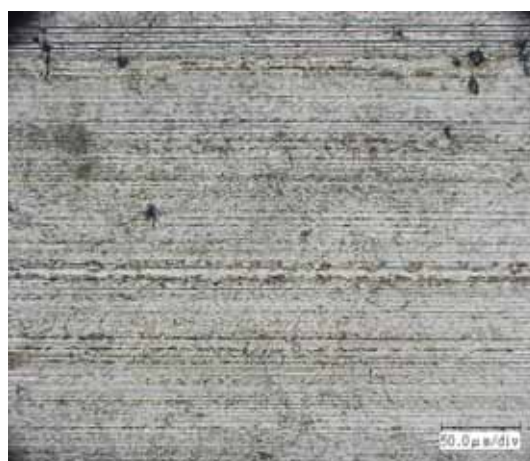
a)硬質クロムめっき試験後



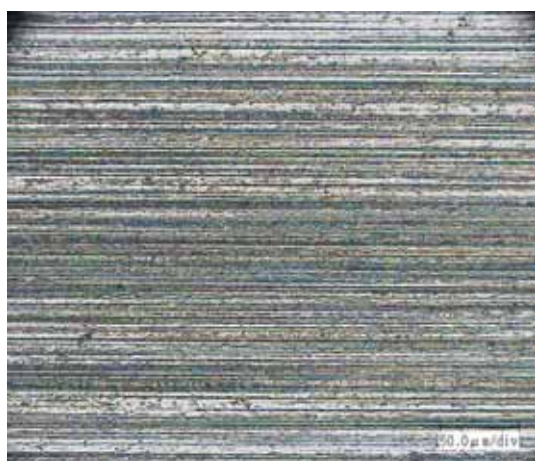
b)クロミア試験後



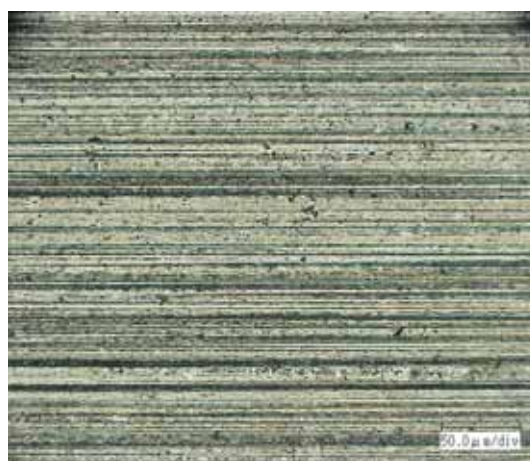
c)グレーアルミナ試験後



d)ハステロイ C 276 試験後



e)WC-CoCr 試験後



f)WC-Cr₃C₂-Ni試験後

図 1 0 摩耗試験後表面写真 (相手材 Si₃N₄ 球、合成油使用) (倍率 450 倍)

7. まとめ

潤滑油として基油と合成油を用い、相手材としてほぼ同寸法の鋼球と Si₃N₄ 球を用いて摩耗試験を行った。どのような条件下でも安定して高い耐摩耗性を示したのは二つの WC 系皮膜である。またこの皮膜は相手材も摩耗させない。硬質クロムめっき皮膜は、相手材が鋼球で合成油を用いたとき、摩耗量が増加した。二つの酸化物セラミックス皮膜は、耐摩耗性は WC 系に比べて劣り、さらに相手材を摩耗させる。摩耗の形態は、ラメラーのはく離のようである。ハステロイ C276 は相手材が鋼球では耐摩耗性は悪いが、相手材が Si₃N₄ の場合、酸化物セラミックス皮膜よりも優れた耐摩耗性を示した。

(2005 年 9 月 足利工業大学 工学部 機械工学科 戸部省吾)