

# WC系溶射皮膜と硬質Crめっきの転動疲労特性の比較

足利工業大学 機械工学科 戸部研究室

## 1 研究の背景と目的

耐摩耗性に優れている硬質クロムめっきは、多くの機械部品や工具類に適用されている材料の一つである。しかし、硬質クロム用めっき液には、有害な六価クロム、シアン化物、カドミウムなどが用いられその廃液中の排出量は厳しく制限されている。また、めっき作業中には電解液ミストを含む多量の水素ガスが発生するため重大な環境汚染源として指摘されている。欧州連合(EU)では、RoHS(Restriction of Hazardous Substances.)で電子・電気機器における特定有害物質の使用制限によって六価クロムは使用できないため、代替手段として三価クロムを使用している。しかし、三価クロムは六価クロムと比較すると薬品が高い、耐食性が低い、処理液により仕上がりにばらつきがあるなどの問題や物性に違いがあり、すべての六価クロムとの代替技術とはならない可能性がある。このように、ウェットプロセスでは、排水処理等に莫大な費用がかかることもあり、国内企業では取り扱わない傾向にある。

一方、溶射法はドライプロセスに属するため有害な廃液を出さず、集じん装備や防音室によって環境汚染や騒音問題を解決できる有用な表面処理である。そこで、鉄鋼業や製紙工業で多用されているロール類に使われている硬質クロムめっきが、高速フレイム(HVOF)法で成膜したWC系溶射皮膜で代替が可能であるか検討することが本研究の目的である。

## 2 実験方法

### 2.1 試験片

試験片の形状寸法を図1に示した。材質はSUJ-2で、直径は50mm、円筒面に皮膜を形成した。試験片の円筒部の詳細図を右側の円の中に示してある。同図のように円筒部にはアンダーカット加工が施してあり、この部分に皮膜を形成した。皮膜を形成後、研削加工を施してある。

相手材の直径は150mmで、材質は炭素工具鋼のSK3である。円筒部には段付き加工が施してあり、試験片に接触する部分の長さは4mmである。

### 2.2 成膜方法

使用したWC系溶射材料の化学組成を表1に示した。3種類の材料を用いた。

表1 WC系皮膜の化学成分(mass%)

呼び名	化学成分	W	Co	Cr	Ni	Fe	C
WC-CrC-Ni	WC-20%CrC-7%Ni	Bal.	—	17.6	6.9	0.20	7.1

WC-Co-Cr	WC-10%Co-4%Cr	Bal.	10.2	4.3	—	0.25	6.0
WC-Co	WC-12%Co	Bal.	12.2	—	—	0.09	5.2

$\sqrt{Ra6.3}$

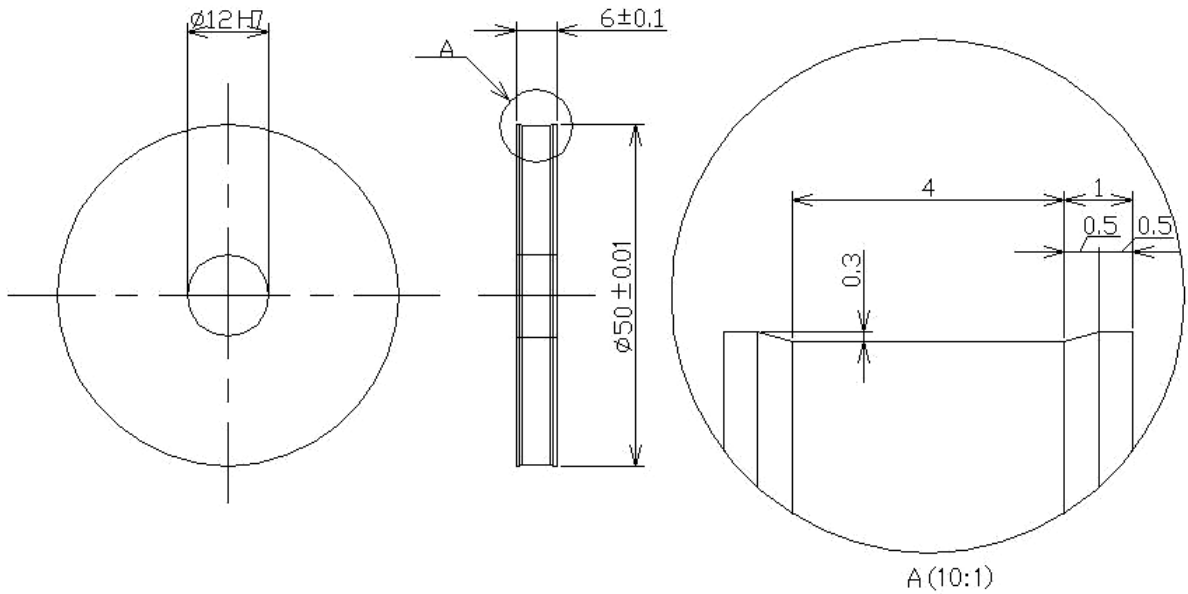


図1 試験片形状寸法

試験片への成膜は高速フレーム溶射法（以下、HVOF 法と略記する）によって行った。溶射条件を表2に示した。

硬質クロムめっきは、サージエント浴を用いて、成膜した。めっき条件を表3に示した。

表2 溶射条件

溶射装置	JP-8000
ガンバレルの長さ	6 インチ
燃料	灯油
酸素流量	890ℓ/min
灯油流量	0.3ℓ/min
粉末供給量	76 g/min

表3 サージエント浴の組成

浴組成(標準浴)	
クロム酸	250g/ℓ
硫酸	2.5g/ℓ
電着条件	

浴温	40～60℃
電流密度	20～60A/dm <sup>2</sup>

### 2.3 転動疲労試験法

転動疲労試験機の全体図を図2に示す。

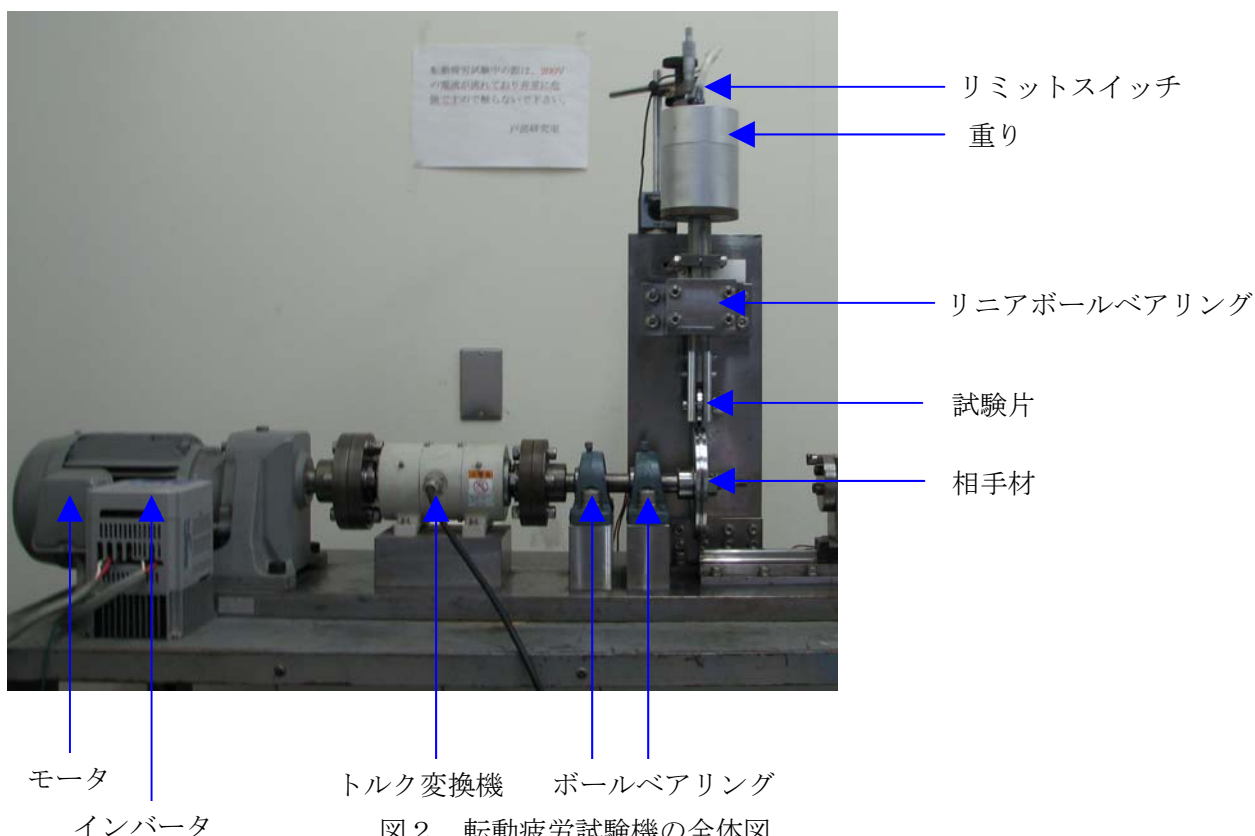


図2 転動疲労試験機の全体図

同図左からインバータ付きモータ、トルク変換機、軸受け、相手材と続き、相手材の上部に試験片がセットされる。試験片にヘルツ応力を負荷させるため、重りがその上に乗るようになっている。

相手材は、直径 150mm、幅 15mm の SUJ-2 で作製した。転動疲労試験は、相手材を駆動側、試験片を従動とし、相手材回転数 500rpm、荷重 100N で試験片表面にピットが発生するまで試験を行った。接触で発生するヘルツ応力は、表 4 に示したとおり硬質クロムめっきは 180N/mm<sup>2</sup>、WC 系は 206 N/mm<sup>2</sup>であった。

表 4 各試験片ヘルツ応力

皮膜の種類	接触幅 b(μm)	ヘルツ応力 $\bar{P}$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 E(N/mm <sup>2</sup> )
硬質クロムめっき	69	180	2.4962×10 <sup>5</sup>

WC-20%CrC-7%Ni	61	205	$3.2412 \times 10^5$
WC-10%Co-4%Cr	91	206	$3.2759 \times 10^5$
WC-12%Co	60	206	$3.2884 \times 10^5$

摩耗量は試験前と  $1.8 \times 10^6$  回転ごとに試験を中断し、試験片を取り外して測定した。転動摩擦係数は、動ひずみ測定器によって  $1.8 \times 10^6$  回転ごとにトルクを 3600 秒測定し、計算によって転動摩擦係数を求めた。また、顕微鏡による表面観察は試験前と  $1.8 \times 10^6$  回転ごとに行った。

摩耗試験後の重量測定はアセトンで試験片を洗浄し十分乾燥させ、電子天秤で重量測定を行った。その手順はすべての試験片で同一とした。転動疲労試験機の試験片と相手材の拡大図を図 3 に示した。



図 3 試験片（上部）と相手材（下部）

なお、この装置には皮膜がはく離した場合、その振動を感知して、モータの回転を止める自動停止装置も装着されている。

### 3 転動疲労試験結果および考察

#### 3.1 摩耗量と転動摩擦係数

摩耗量測定結果を図 4 に示す。摩耗量測定方法は、試験前と  $1.8 \times 10^6$  回転ごと試験終了時まで摩耗量を測定した。摩耗量の測定から、耐摩耗性が最も優れているのは硬質クロムめっきで、次に WC-10%Co4%Cr、WC-12%Co が続き最後に WC-20%CrC-7%Ni となっている。各試験片の中で最も摩耗量が多かった WC-20%CrC-7%Ni では、 $3.6 \times 10^6$  回転までは摩耗量が少ないがそれ以降  $5.4 \times 10^6$  回転の間で急激に摩耗量が増加していることが分かった。しかし、摩耗量と皮膜が受けた損傷は別で、これについては断面顕微鏡観察の結果を基に詳しく述べる。

マイクロビッカース硬さ試験機で皮膜断面の硬さを測定した結果を表 5 に示した。硬質 Cr めっき材は硬さではどの WC 系皮膜より低い、耐摩耗性は優れている。WC 系皮膜でも硬さと摩耗量には特に関係はなさそうである。

転動摩擦係数を測定した結果を図 5 に示した。これらの値はトルク変換機での測定結果

を基に計算した。装置の関係で二つの軸受けの転動摩擦係数も含まれてしまうため、無負荷時の転動摩擦係数を測定し、試験時の値から差し引いて計算した。転動摩擦係数はおおよそ 0.025 から 0.1 の間にある。WC-20%CrC-7%Ni と WC-10%Co-4%Cr では、摩擦係数が

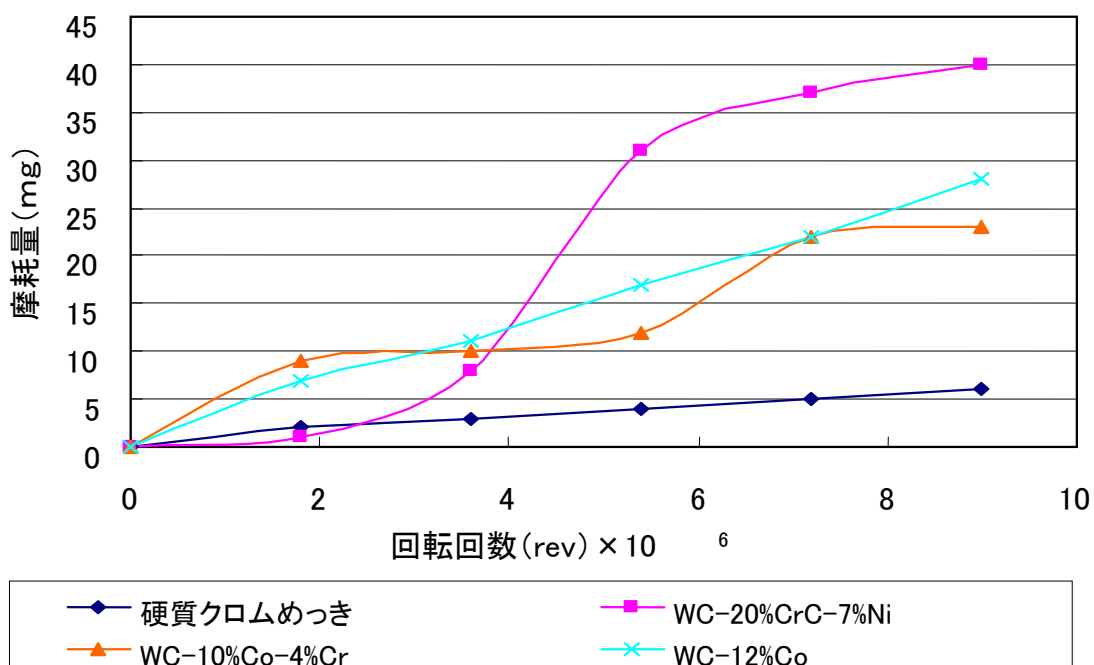


図4 摩耗量測定結果

表5 マイクロビッカース硬さ試験結果 (試験後,5点平均)

材料名	皮膜硬さ (HV0.3)	基材硬さ (HV0.3)
硬質クロムめっき	1174	196
WC-20%CrC-7%Ni	1344	197
WC-10%Co-4%Cr	1297	198
WC-12%Co	1059	189

一旦減少しその後増加して、 $5.4 \times 10^6$ 回で増加しまた減少している。この傾向は WC-12%Co も同じである。硬質 Cr めっき材は  $3.6 \times 10^6$ 回で高い値となっている。これらの原因は相手材を含めて、接触面の荒れが原因となっているようである。相手材は前記のとおり、SUJ-2 という硬い鋼を用いているが、皮膜に比べると硬さが低いために円筒面に直角な縞模様が発生した。つまり円筒面が多角形となってしまったために摩擦係数が増加したと考えられる。

### 3. 2 表面および断面の顕微鏡観察

摩耗量では硬質Crめっき材が優れていたが、表面および断面の観察結果は摩耗量の測定結果と著しく異なる。硬質Crめっき材は転動によって研削条痕は短時間で消え、平坦化されるが、 $1.8 \times 10^6$ 回ですでにき裂が発生している。回転数の増加とともにき裂も増え、き裂の発生によって段差が生じていることもわかる。したがって、表面性状は良くない。

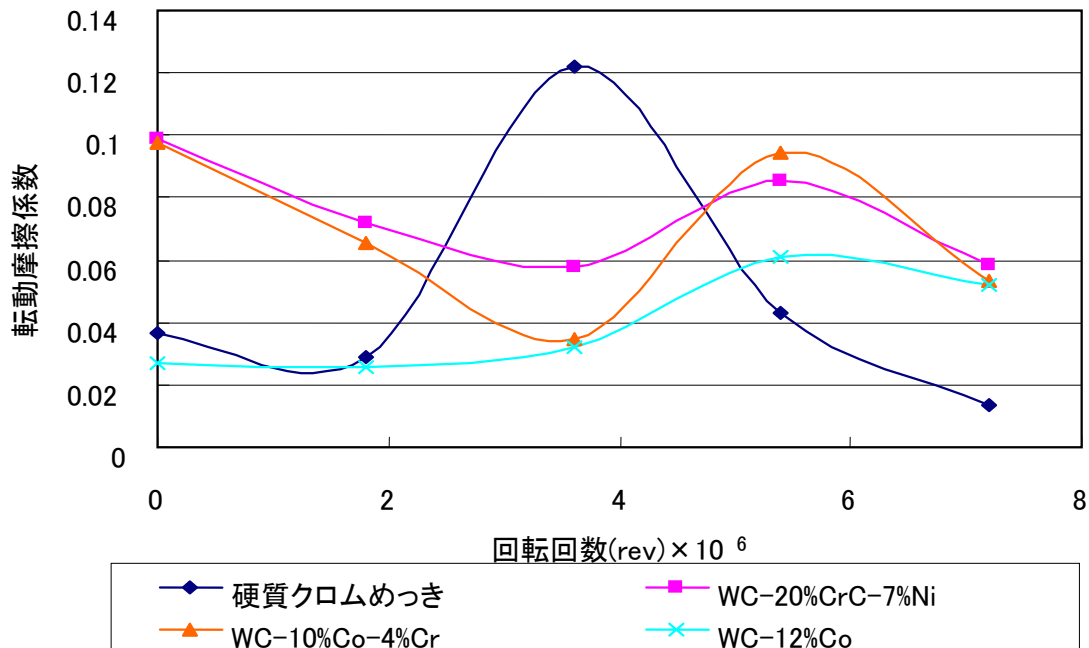


図5 転動摩擦係数測定結果

各皮膜の表面写真を図6, 7に断面写真を図8, 9に示したが、硬質Crめっき材の場合はき裂の発生と基材からのはく離によって皮膜が部分的に浮いた状態となっていることが分かる。WC-20%CrC-7%Niは硬質Crめっきに比べて高い硬さのため、 $1.8 \times 10^6$ 回転でも部分的にしか研削条痕が消えていない。 $1.8 \times 10^6$ 回転ですでにピットが発生している。しかし、 $7.2 \times 10^6$ 回転を過ぎるとピットの数は減少し、 $9.0 \times 10^6$ 回転では良好な表面性状となっている。これは摩耗量が多いことに起因していると考えられる。図9の断面写真を見ても、表面が最も平坦であることが分かる。WC-10%Co-4%Crは $7.2 \times 10^6$ 回転までは最も優れた表面性状を示している。しかし、この回転数からややピットの数が増え、 $9.0 \times 10^6$ 回転でもピットが消滅することはなかった。断面写真からもやや浅いピットが見える。

三つの溶射皮膜を比較すると、WC-12%Co皮膜に最も多くのピットが発生していた。 $1.8 \times 10^6$ 回転ですでにピットが発生し始め、回転回数の増加とともに、ピットの数は増加し、大きく深くなっていく様子が表面および断面写真から分かる。

以上の結果を総合すると、硬質Crめっき皮膜では試験の初期からき裂が発生した。高々、 $180 \text{ N/mm}^2$ 程度のヘルツ応力でこのようなき裂が発生するのではロールとしての用途は

限られるのではないかと考えられる。WC-12%Co 皮膜では最も多くのピットが発生したため、ロールとしての性能は高くはない。ピットの発生の原因は、ラメラ間の粒子結合力の低さにあるのではないだろうか。WC系の中では、WC-20%CrC-7%Ni と WC-10%Co-4%Cr が優れていた。

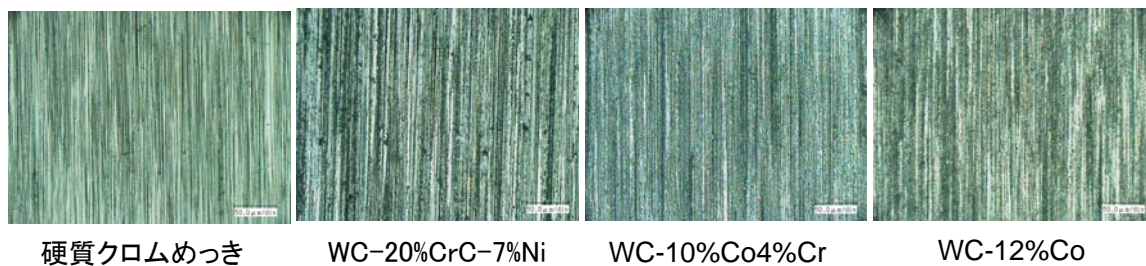


図6 試験前 表面写真

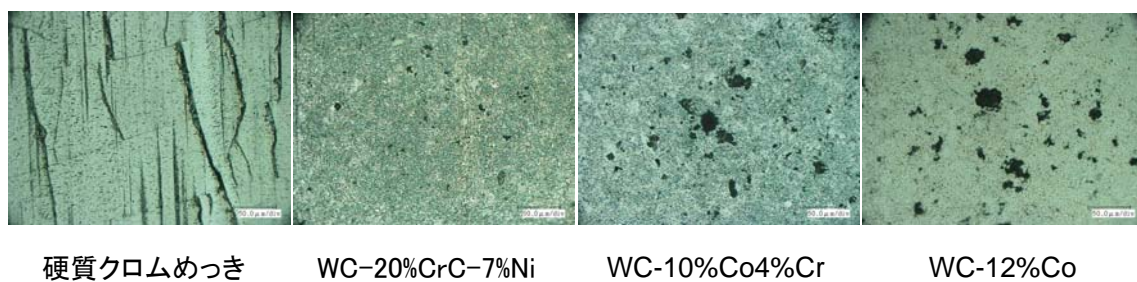


図7 試験後 表面写真

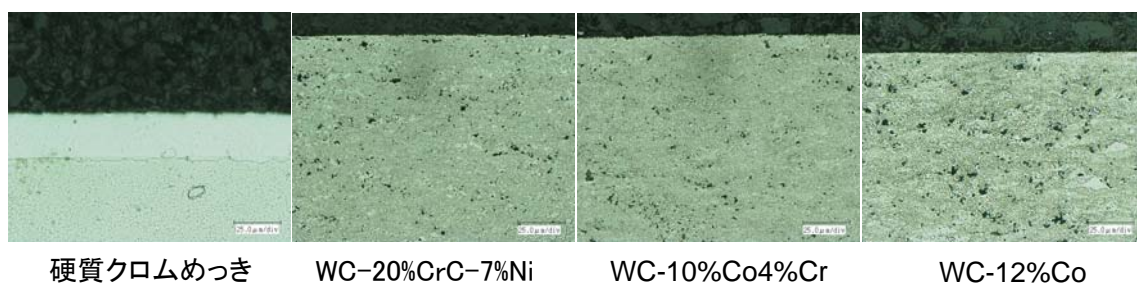


図8 試験前 断面写真

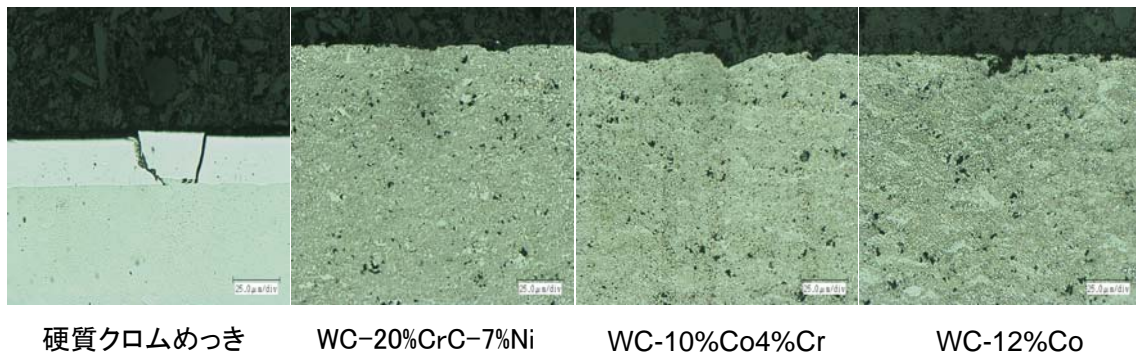


図9 試験後 断面写真

#### 4 結論

(1) 硬質 Cr めっき材は試験の初期段階からき裂が発生し、回転回数が多くなるにしたがって、表面の段差やはく離が生じた。

(2) WC-20%CrC-7%Ni および WC-10%Co-4%Cr はややピットが発生したものの、表面性状は優れており、総合的に見て試験した4種類の皮膜のうち、最も優れていた。

(3) WC-12%Co には試験の初期から多数のピットが発生した。ラメラ間の低い結合力によるものと思われる。

(2007年4月 足利工業大学 機械工学科 戸部研究室)