

残留応力測定によるWC系溶射皮膜の
転動疲労寿命予測

2008年9月

足利工業大学 戸部研究室

第1部 WCの残留応力測定による転動疲労寿命予測

1. 研究背景および目的

当研究室では一昨年、ハードフェーシング委員会からの委嘱を受け、WC系溶射皮膜と硬質クロムめっきの転動疲労挙動の比較試験を行ってきた。その結果、総合的に見るとWC系溶射皮膜の転動疲労挙動は硬質クロムめっきより優れていることが明らかとなった。また、この研究の過程で転動疲労による皮膜の損傷と残留応力は、ある一定の関係があるのではないかとの知見が得られた。

そこで今回の研究では、残留応力を測定することによって、転動疲労寿命を推定する可能性を検討することとした。

2 実験方法

2. 1 試験片および相手材

試験片形状寸法を図1に示した。材質はSUJ-2で、直径40mm、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に示してある。同図のように円筒部には、0.3mmのアンダーカット加工が施されており、この部分に皮膜を形成した。皮膜を形成後、研削加工を施した。

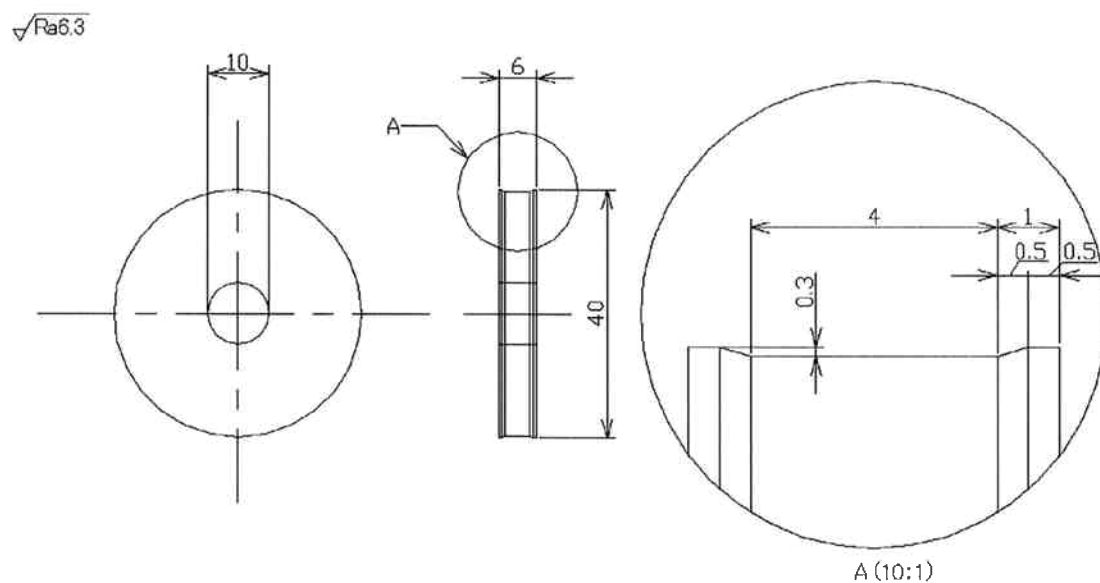


図1 転動疲労試験 試験片形状寸法

相手材の形状寸法を図2に示す。相手材直径は150mmで、材質はSUJ2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幅は3mmとした。

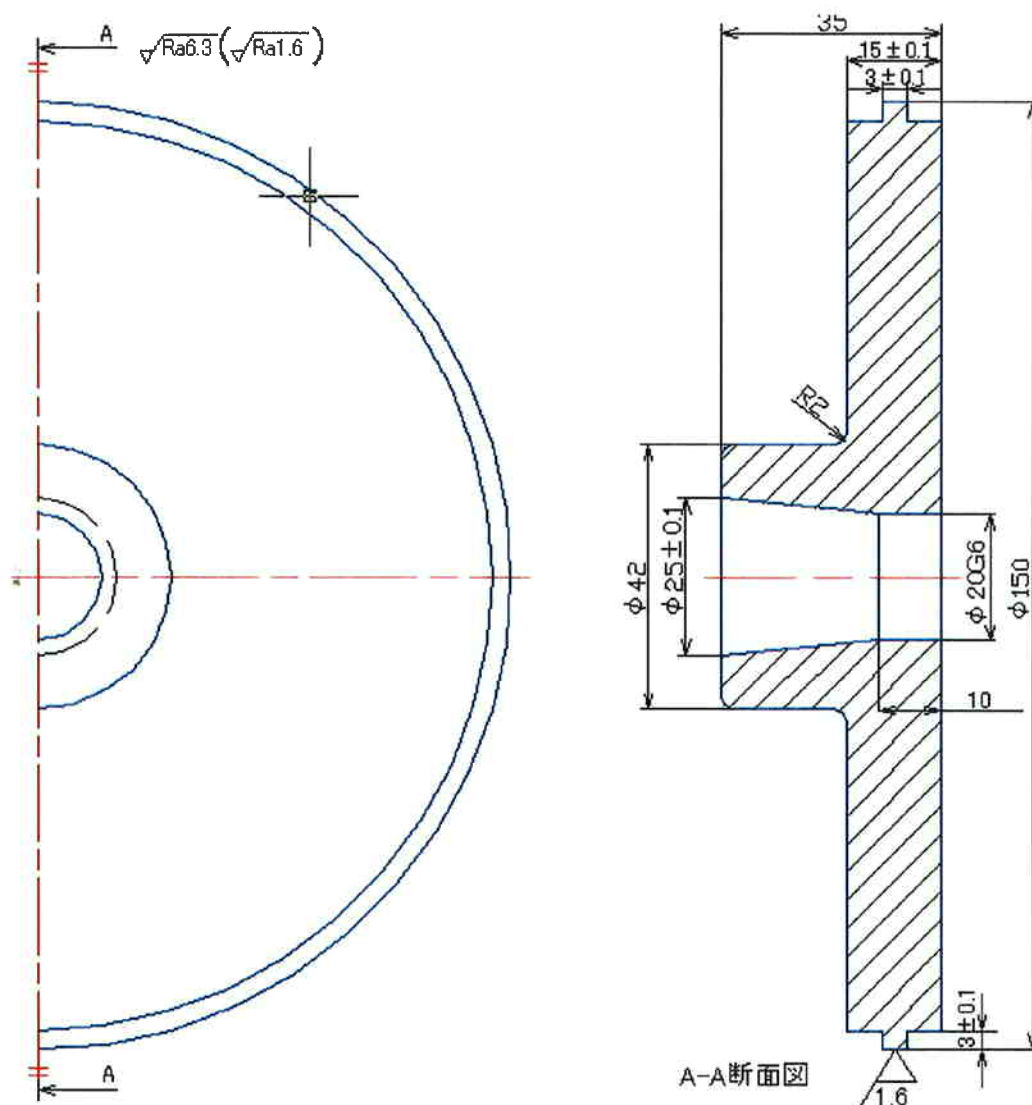


図2 転動疲労試験 相手材形状寸法

2. 2 試験片溶射条件

使用した WC 系溶射材料の化学成分を表1に示す。同表に示すように、3種類の材料を用いた。試験片の成膜は、HVOF 法によって施工した。溶射条件を表2に示す。

表1 WC系溶射皮膜の化学成分表 (mass%)

化学成分	W	Co	Cr	Fe	Ni	C
WC-12%Co	Bal.	12.2	—	0.09	—	5.2
WC-10%Co-4%Cr	Bal.	10.2	4.3	0.25	—	6.0
WC-20%CrC-7%Ni	Bal.	—	17.6	0.20	6.9	7.1

表2 試験片溶射条件

溶射装置	JP-5000
ガンバレル	6 インチ
燃料	灯油
酸素流量[l/min]	890
灯油流量[l/min]	0.3
粉末供給量[g/min]	76

2. 3 転動疲労試験と試験方法

転動疲労試験機の全体写真を図3に示す。また、試験片と相手材の一部の拡大写真を図4に示した。同図に示すように、モータからの駆動を相手材がダイレクトに受け、相手材が駆動側、試験片をそれに従動させるようにした。回転数は相手材が400rpm、試験片が1500rpm、荷重100Nに設定し行った。この場合の試験片と相手材の接触による最大ヘルツ応力は約331N/mm²、平均ヘルツ応力は約260N/mm²である。転動疲労試験は、1.8×10⁶回転（上記回転数の条件で20時間）ごとに停止し、摩耗量測定、顕微鏡観察、X線残留応力測定を行った。顕微鏡観察およびX線残留応力測定は試験片の円周上に等間隔に定めた8点とした。転動摩擦係数では、トルク変換機、動ひずみ測定器によって1.8×10⁶回転ごとにトルクを3600s測定し、計算によって転動摩擦係数を求めた。

試験は条件を揃えるため、1.8×10⁶回転ごとに停止させたとき、相手材を#800および#1000の研磨紙によって研磨、その後アセトンによる洗浄、軸受けのグリスアップを行った。試験片の質量測定前はアセトンで洗浄し十分乾燥させ、電子天秤で質量を測定した。

尚、この試験機は、皮膜はく離を検知し、自動停止が可能なようにリミットスイッチをつけた。

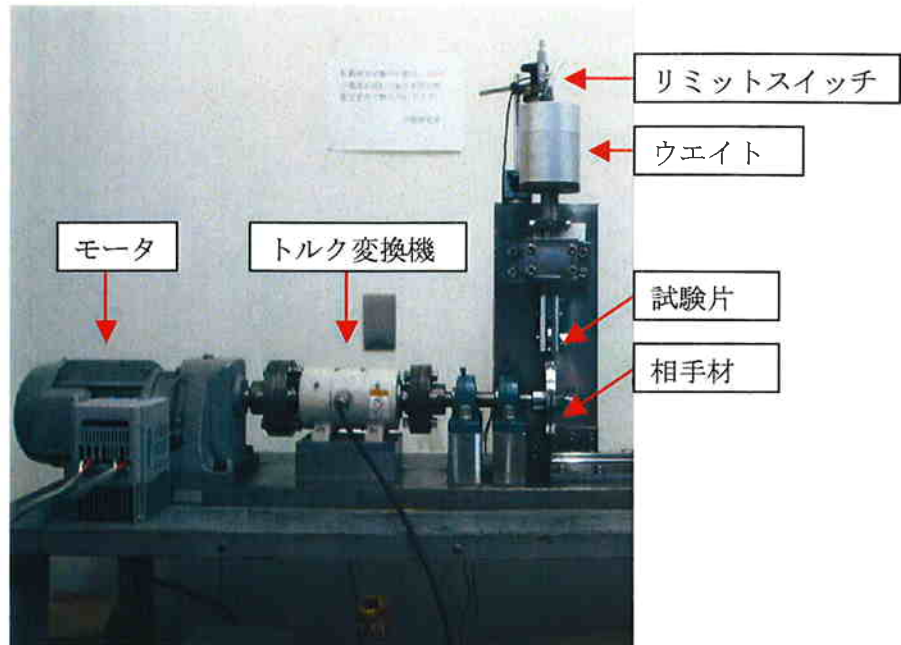


図3 転動疲労試験機の全体

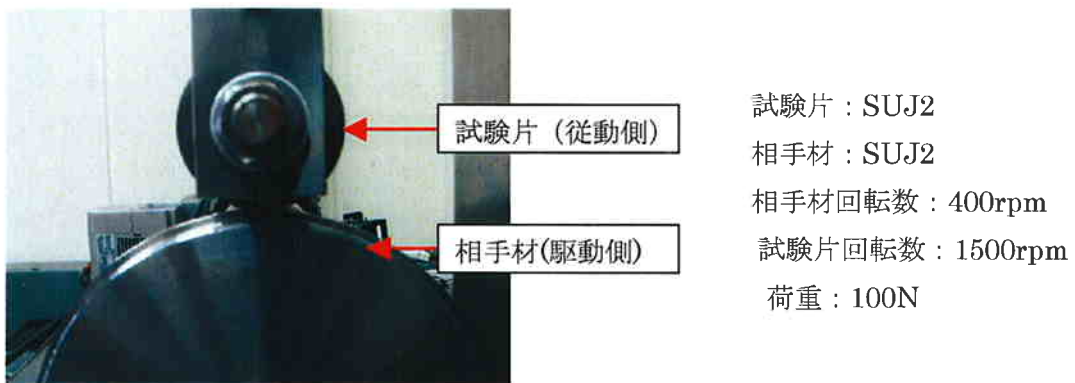


図4 試験片と相手材

2. 4 X線残留応力測定および条件

X線法によって残留応力を測定した。冒頭に述べたように測定の対象はWCである。X線応力測定条件を表3に示す。1.8×10⁶回転ごとにX線残留応力測定を行った。測定は8点(顕微鏡観察と同点)で行い、それぞれの点の残留応力の変化を調査した。使用したX線回折装置の全体図を図5に、応力測定部(ゴニオメータ)を図6に示す。

表3 WC についての X 線応力測定条件

X 線	Cr-k α
Diffraction plane	124.438°
Diffraction angle(h,k,l)	1,1,1
Filter	V
Counter	PSPC
Tube voltage[kV]	40
Tube current[mA]	200
Collimeter[mm]	2.0



図5 X 線回折装置全体



図6 X 線応力測定部 (ゴニオメータ)

3 実験結果および考察

3.1 転動疲労摩耗量

転動疲労によって発生した試験片の摩耗量を測定した。摩耗量の測定方法は、試験前、 1.8×10^6 回転ごとおよび試験終了 (1.8×10^7 回転=200 時間) に行った。前述したように電子天秤を使用して質量を測定し、試験前の試験片との質量差から求めた。質量測定前は条件を一定にするためアセトンで脱脂した。その後、十分に乾燥させた状態で行った。測定結果を図7に示す。

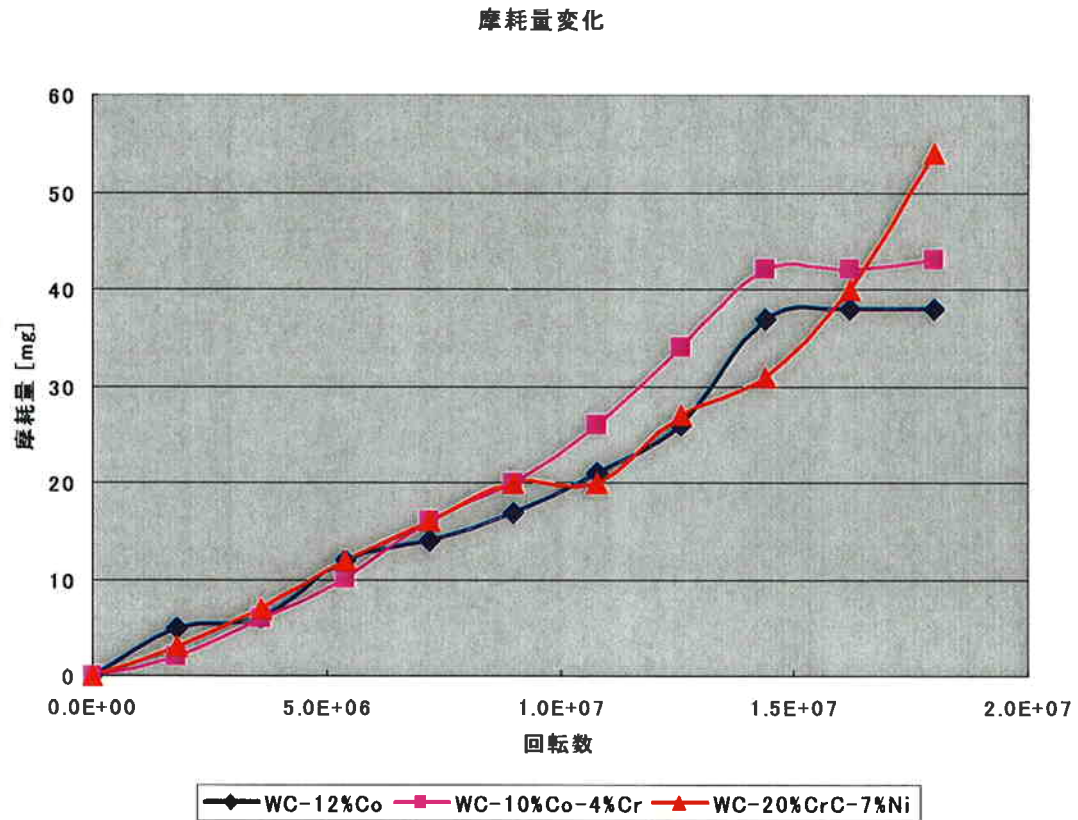


図7 摩耗量測定結果

同図によると3種類のWC系溶射皮膜の摩耗量に大きな差は認められなかった。

3.2 転動摩擦係数

転動摩擦係数は、動ひずみ測定器によって試験前と 1.8×10^6 回転ごとにトルクを 3600s ずつ測定した後、計算によって求めた。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。測定結果を図8に示す。

平均摩擦係数

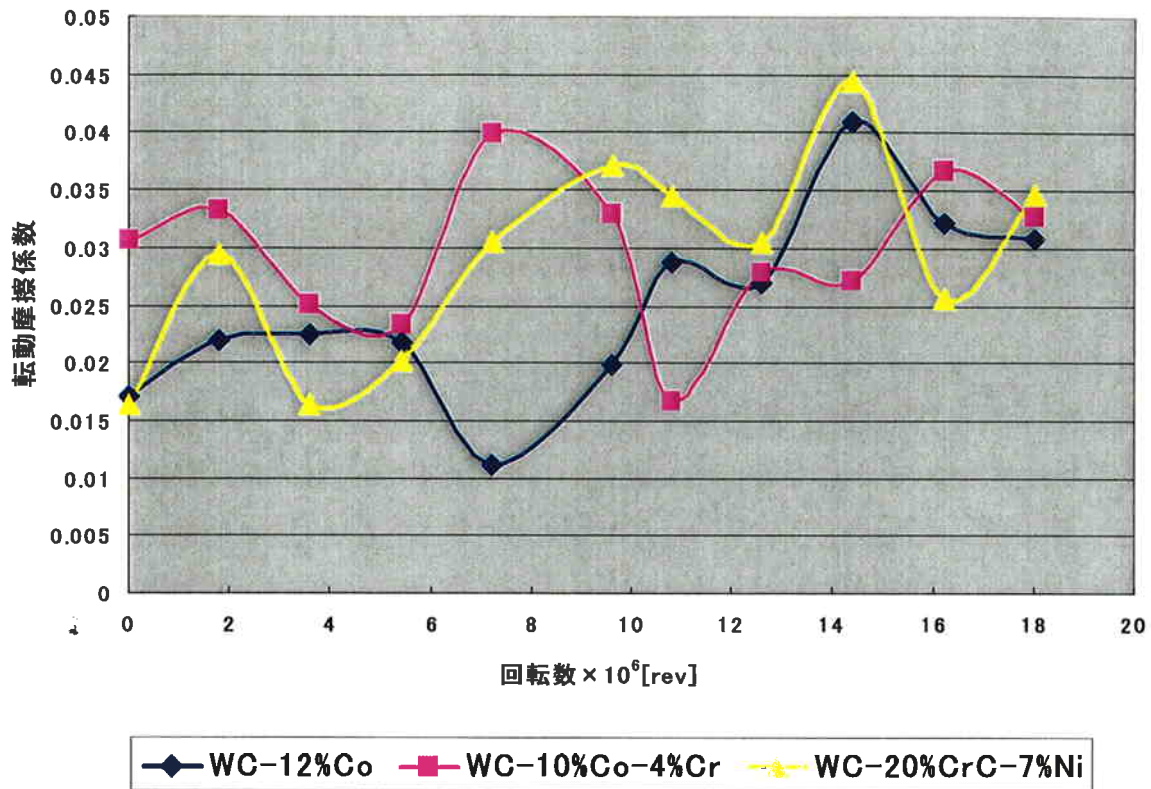


図 8 転動摩擦係数の測定結果

転動摩擦係数はおよそ 0.01 から 0.045 の範囲で激しく変動している。この原因は試験片表面に微細なピットが多数発生することによって、試験片が多角形のような形状になること、および試験片に比べて硬さが低い相手材がやはり多角形状に摩耗することがあげられよう。

また、転動摩擦係数自体もころ軸受けのように完璧に研磨された円筒体に比較すると一桁大きい。

3. 3 残留応力測定結果

残留応力の測定結果を図 9 から図 11 に示した。前述のとおり残留応力は、各試験片の円周上の 8 点で、 1.8×10^6 回転ごとに測定を行った。横軸が累積回転数、縦軸が残留応力値である。同図中赤い線が 8 点の平均値、その他の色の線は各 8 点を示す。

残留応力値は転動疲労試験を行う前から圧縮である。これは HVOF 法による成膜過程で WC 粒子によるピーニング効果が発生しているためであろう。転動疲労試験中は圧縮応力が著しく変動している。この変動は後述する試験片表面のピットの発生状況と照らし合わせると、ピットが多数発生している場合残留応力値は低く、ピットが少ないとき、残留応力値は高くなる傾向があった。

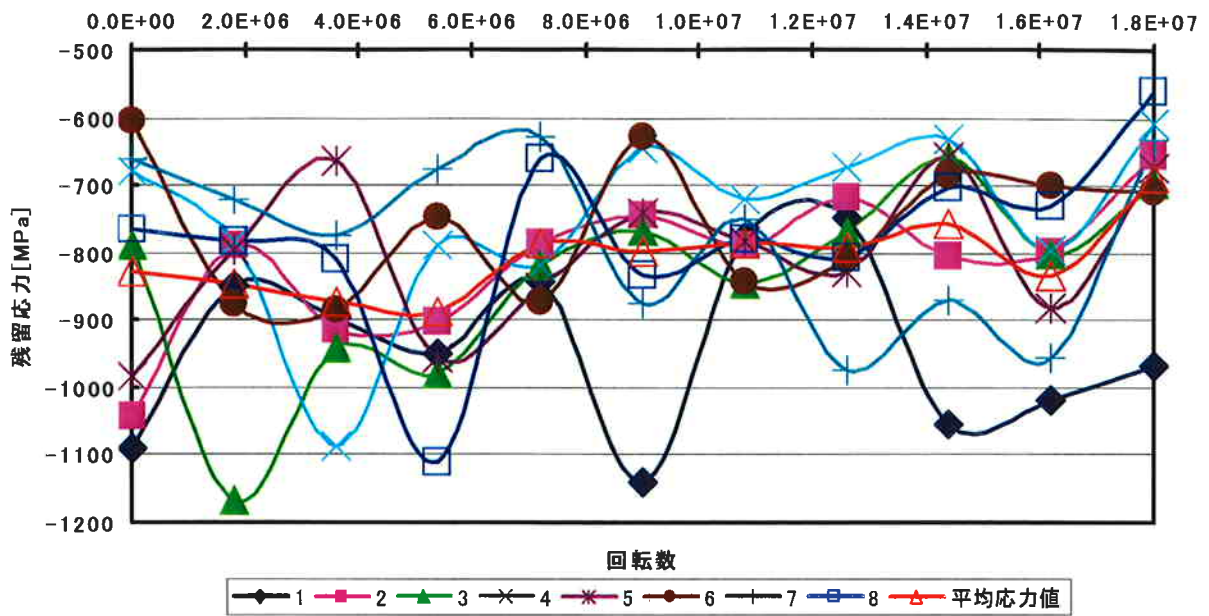


図9 X線残留応力測定結果 (WC-12%Co)

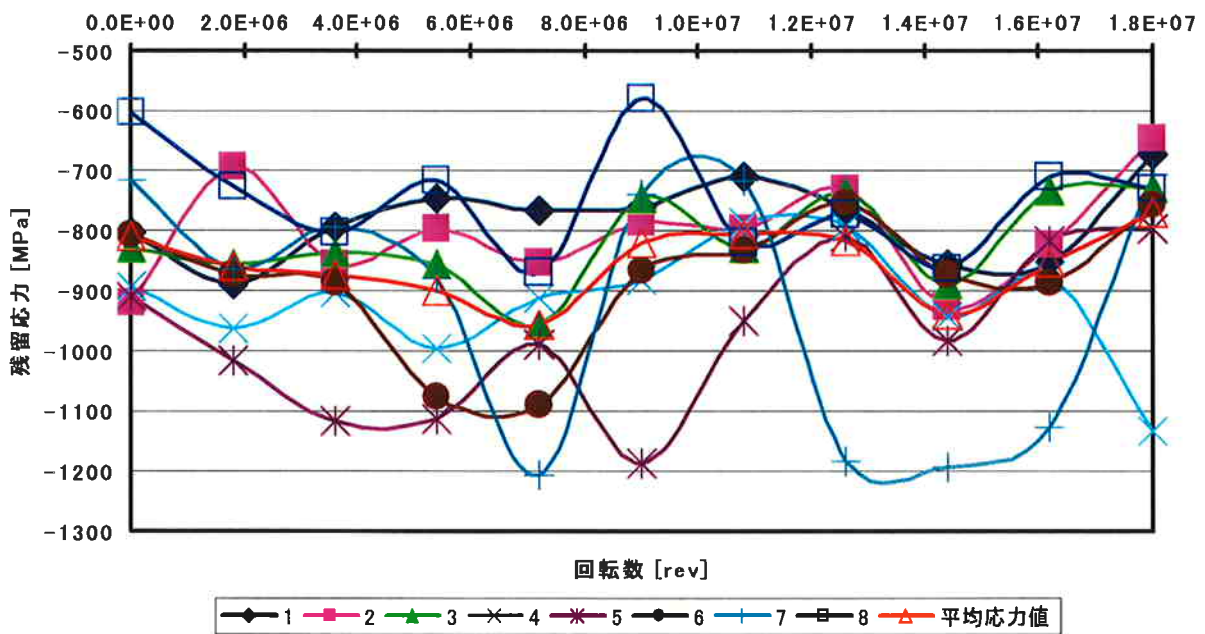


図10 X線残留応力測定結果 (WC-10%Co-4%Cr)

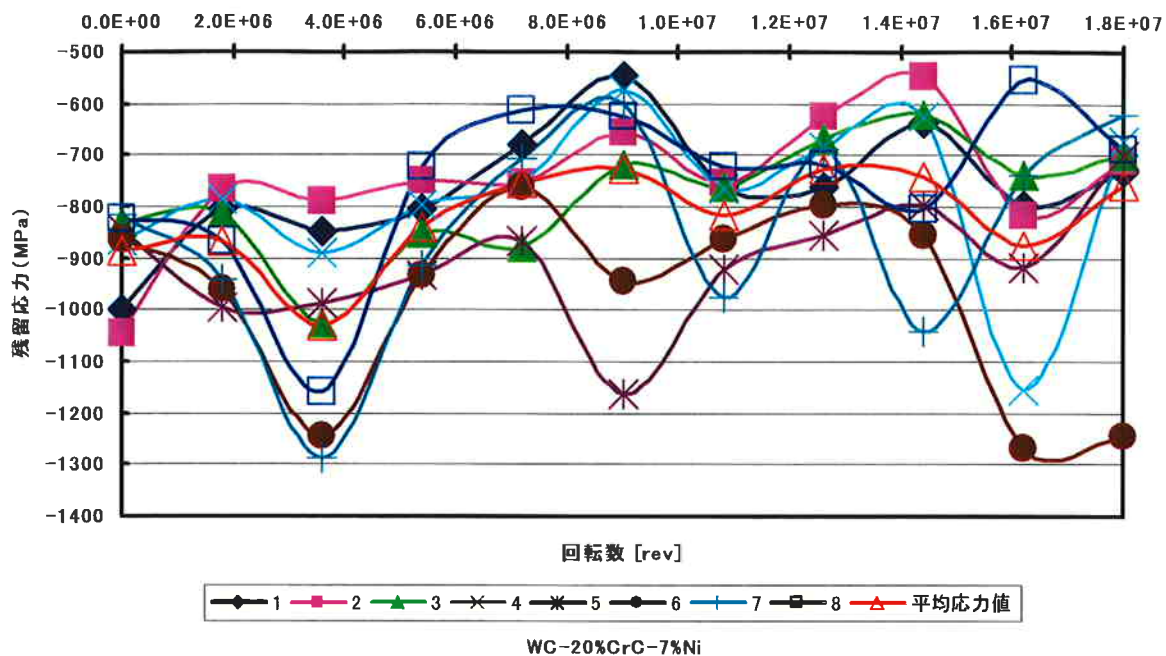


図 1 1 X線残留応力測定結果(WC-20%CrC-7%Ni)

3. 4 顕微鏡観察結果

前述のとおり、試験前および 1.8×10^6 回転ごとに光学顕微鏡での表面観察、試験前、試験後 (1.8×10^7 回転=200 時間) に断面観察を行った。ここではまず、試験後の各試験片の表面写真を図 12 から図 14 に示す。いずれも 450 倍と 1000 倍での写真で、

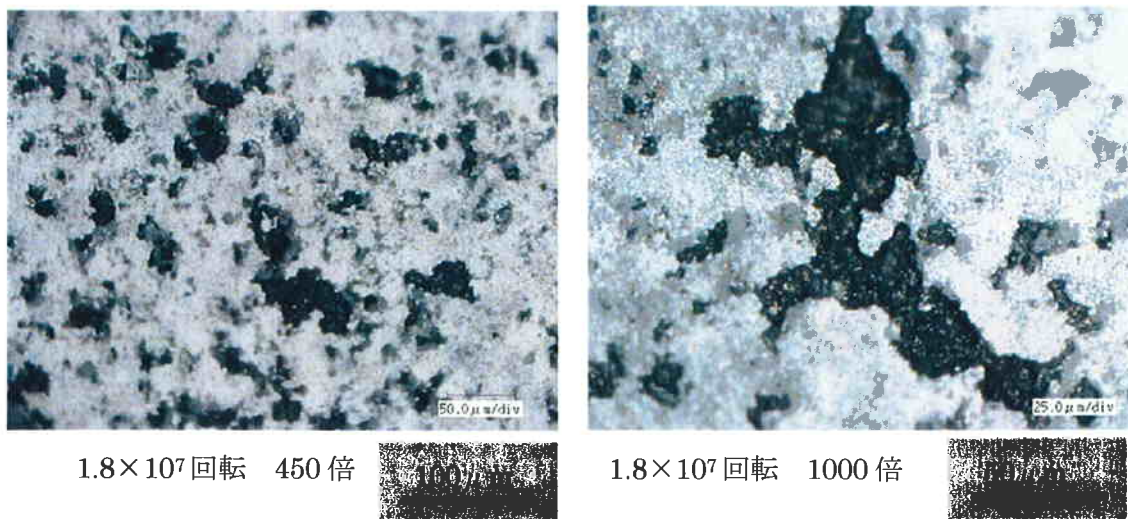


図 1 2 WC-12%Co 表面顕微鏡観察写真

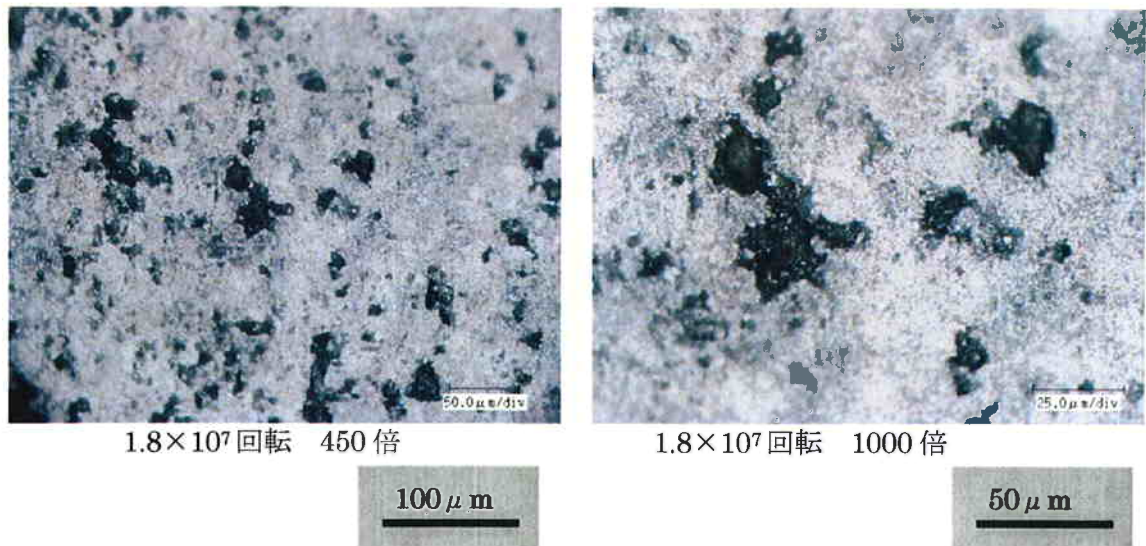


図 1 3 WC-10%Co-4%Cr 表面顕微鏡観察写真

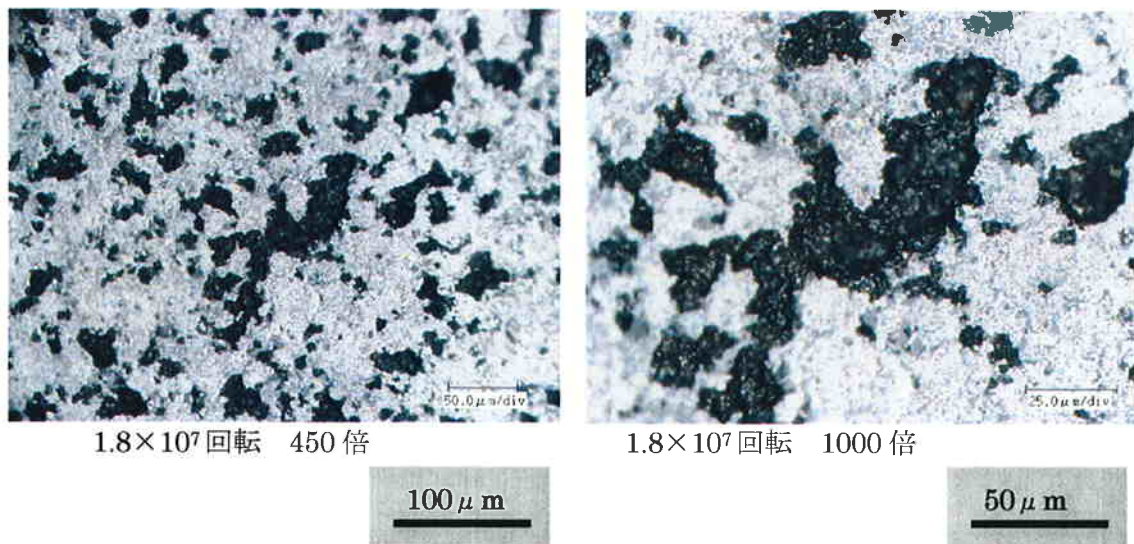


図 1 4 WC-20%CrC-7%Ni 表面顕微鏡観察写真

図 12 から 14 で黒い部分がピット、つまり皮膜の一部がはく離してできた穴である。これは断面の観察結果からも明らかである。

今回の実験条件下では、皮膜のはく離あるいははく離の前段階のき裂の発生は認められなかった。皮膜が損傷する過程としては、ピットの発生>摩耗によるピットの消滅を繰り返しているように見受けられた。前述のように、この過程で残留応力の増減が持ちこたされるのであろう。

第2部 Coの残留応力測定による転動疲労寿命予測

1 実験の目的

第1部ではWCの残留応力を測定し、転動寿命予測の可能性を検討した。ハードフェーシング委員会でのこの報告の折、一委員から硬さの高いWCよりも軟らかい金属の残留応力を測定したほうがより顕著に傾向が出るのではないかとの提案があった。

そこでCoやNiの残留応力測定を試みた。残留応力測定では通常、回折線の波長が最も長いCrのターゲットが用いられる。しかし、CoやNiには高角度側に適当な回折線がなく、Feターゲットを用いることとなった。そのほかの残留応力測定条件を表4に示した。種々の検討の結果、Niの残留応力測定は不可能でCoを最も多く含むWC-12%だけを測定した。また、前回は8点の測定を行ったが、今回は時間の関係で2点の測定を行った。

2 測定条件

表4 Coの残留応力測定条件

X-ray	Fe-k α
Diffraction angle	102.142°
Diffraction plane (h,k,l)	Co(2 2 0)
Filter	Mn
Counter	PSPC
Tube voltage[kV]	40
Tube current[mA]	80
Collimeter[mm]	2.0

3 測定結果

測定結果を図15に示した。同図によると、転動疲労試験前は圧縮であるが、転動疲労試験開始直後に引張に転じ、さらに再び圧縮へと変化している。その後、残留応力が低い状態がしばらく続くが次第に圧縮となっている。

このような変化がどのような力学的要因によるものか判断することは現段階では不可能で、したがって、残留応力の測定の困難さと合わせて、CoやNiを対象とした残留応力測定による転動疲労寿命予測は不可能と判断した。

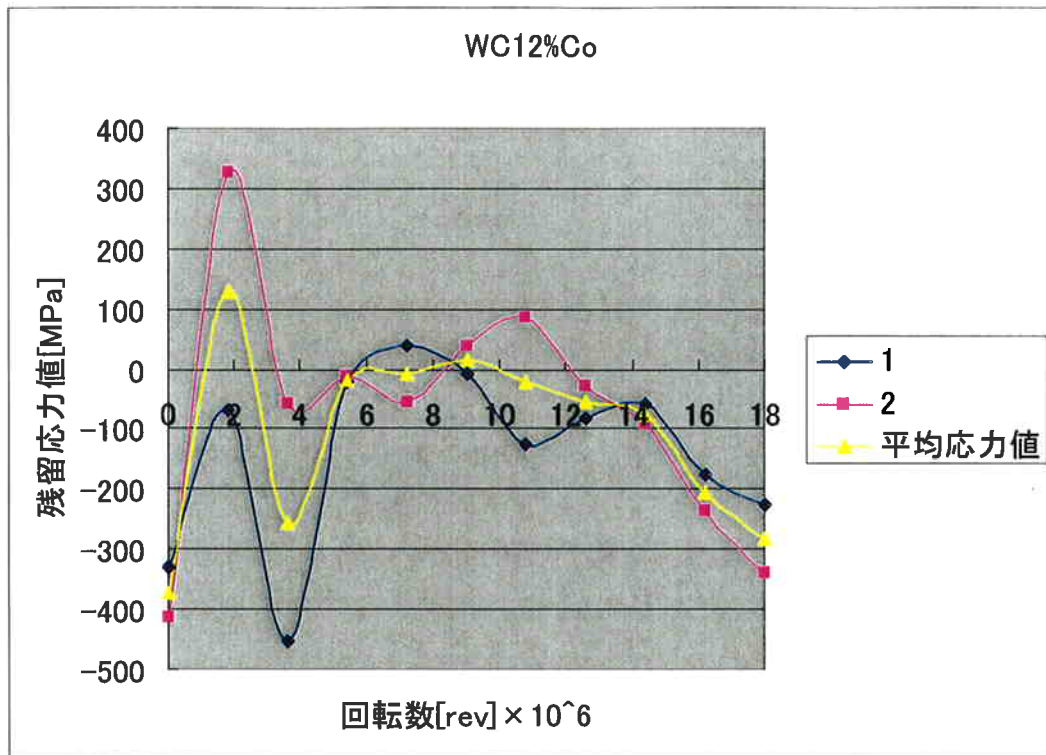


図 15 C o の X 線残留応力測定結果

第 1 部、第 2 部を通じた結論

WC系溶射皮膜の転動疲労時の損傷過程は、本研究の範囲ではピットの発生>摩耗によるピットの現象を繰り返しており、それに伴って残留応力も変化する。したがってその過程をさらに詳細に検討すれば、残留応力測定による寿命予測は可能と思われる。

一方、C o の残留応力測定については測定の困難さや残留応力の変化の力学的な説明が困難なことから、寿命予測は不可能と判断した。