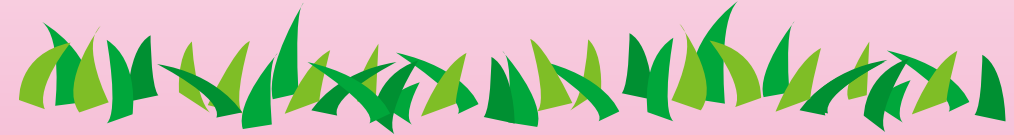


失敗しないコーティング選び

DLC コーティング トライボロジー試験データ集



www.nanocoat-ts.com

 **NANOCOAT** ナノコート・ティーエス 株式会社
member of **HEF** GROUPE

<石川事業所・トライボロジーラボ>
〒923-1211 石川県能美市旭台 2-10
TEL 0761-51-0300 FAX 0761-51-0312

202411

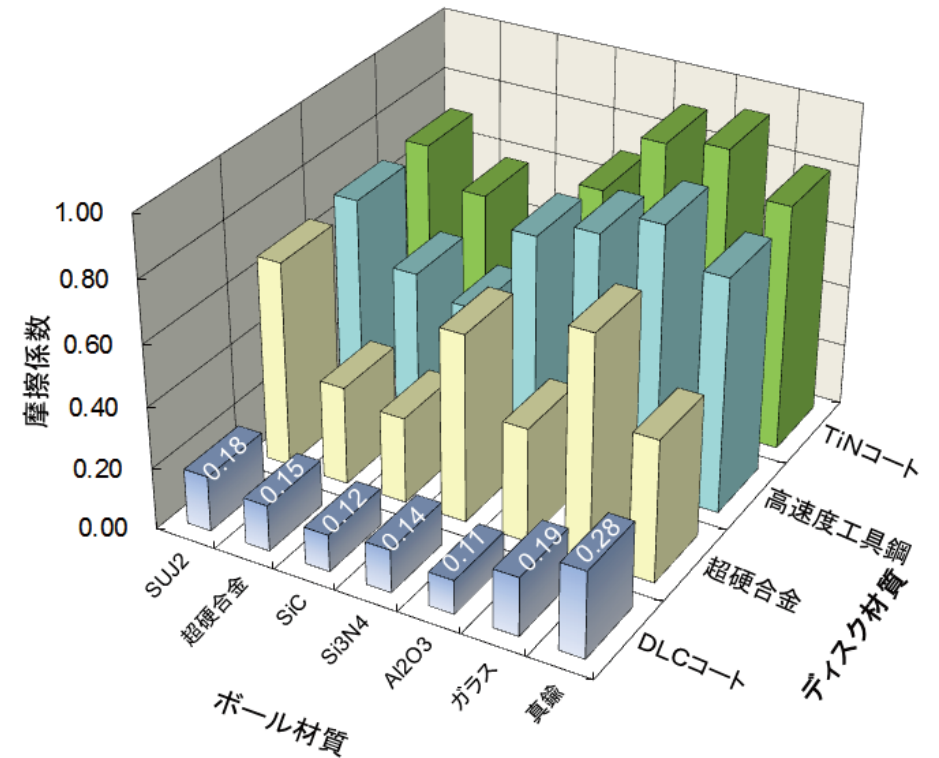
NANOCOAT ハンドブック No.3

各種金属・セラミックと硬質薄膜材料の摩擦係数比較

■結果 DLCは、ドライ条件下で種々の金属・セラミック材料に対して、0.11~0.28の低い摩擦係数を示す。

目次

各種金属と硬質薄膜材料の摩擦係数比較	2
摺動材料の組み合わせによる DLC 摩擦係数の比較	3
水素含有量 (硬さ) の異なる DLC の摩擦係数, 比摩耗量の試験荷重依存性	4
SiC ボールによる各種硬質薄膜のアブレイブ摩耗評価	5
パラフィン基油中における DLC 摩擦係数の摺動速度依存性	6
水素フリー, 水素含有, 金属含有 DLC のトライボロジー特性評価	7
アルミナボールを用いた DLC 被膜の耐久寿命評価	8
水素含有 DLC の加熱環境下でのトライボロジー特性	9
ガラスボールを用いた 185°C加熱環境下での DLC, Cr-N 被膜の耐摩耗性比較	10
水素含有 DLC と Cr-N 被膜のアルミ合金相手材とのトライボロジー特性	11
硬質クロムめっき上の DLC 被膜の真鍮に対する耐凝着性	12
SUJ2 ボールに対する硬質クロムめっきと DLC 被膜の摩擦係数比較と比摩耗量	12
Sn (錫) めっきボールを用いたステップ増加荷重による耐凝着性評価	13
フッ素ゴム, ウレタンゴム上の DLC 被膜の SUS304 に対する摩擦係数	14
ファブリ試験による各種硬質薄膜のパラフィン基油中での耐焼付き性評価	15
ファブリ試験による各種硬質薄膜のドライ環境での耐焼付き性評価	16
ファブリ試験による DLC 被膜のパラフィン基油中での耐焼付き性評価	16
AlCrN, TiAlN 耐熱被膜の加熱環境下でのトライボロジー特性	17
PP ボールによる樹脂成形用撥水被膜の寿命評価	18

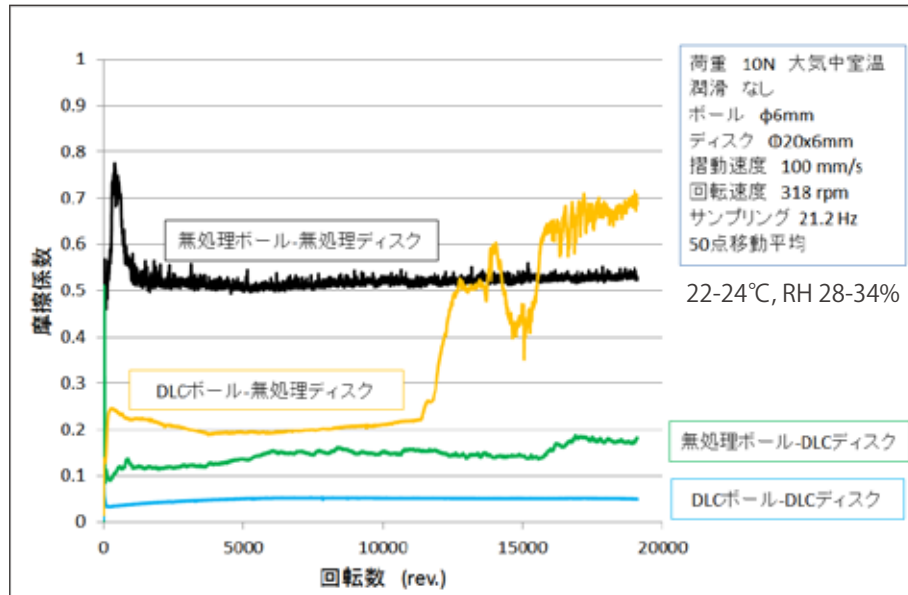
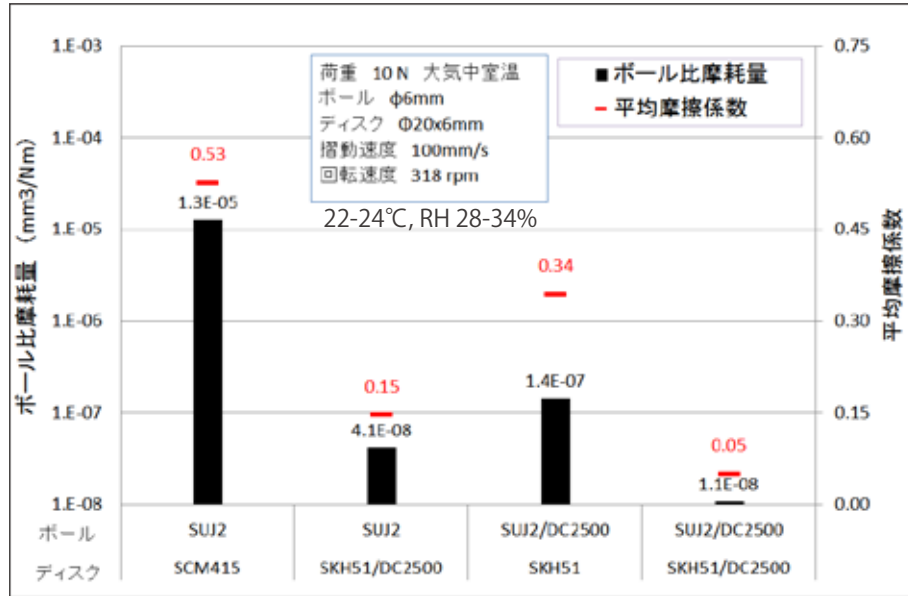


各種ボールとディスクの摩擦係数 (大気中無潤滑, 荷重 5N, 摺動速度 10 mm/s)

DLC の大きな特徴は無潤滑下での低摩擦係数です。上図のように DLC は相手材にかかわらず 0.1 ~ 0.3 の低摩擦係数を示し固体潤滑特性を有します。無処理工具鋼や TiN コートでは相手材によって摩擦係数が大きく変化するのに対して DLC はほぼ同等の摩擦係数を示します。これは摩擦係数が相手材との摺動で DLC 表面に形成される潤滑層によって決まっていることを示唆します。低摩擦係数は、機械部品の摩擦や発熱によるエネルギー損失を低減し省エネルギーに貢献するとともに、潤滑油の使用量を減らし環境への負荷も低減します。DLC はエコな薄膜材料です。

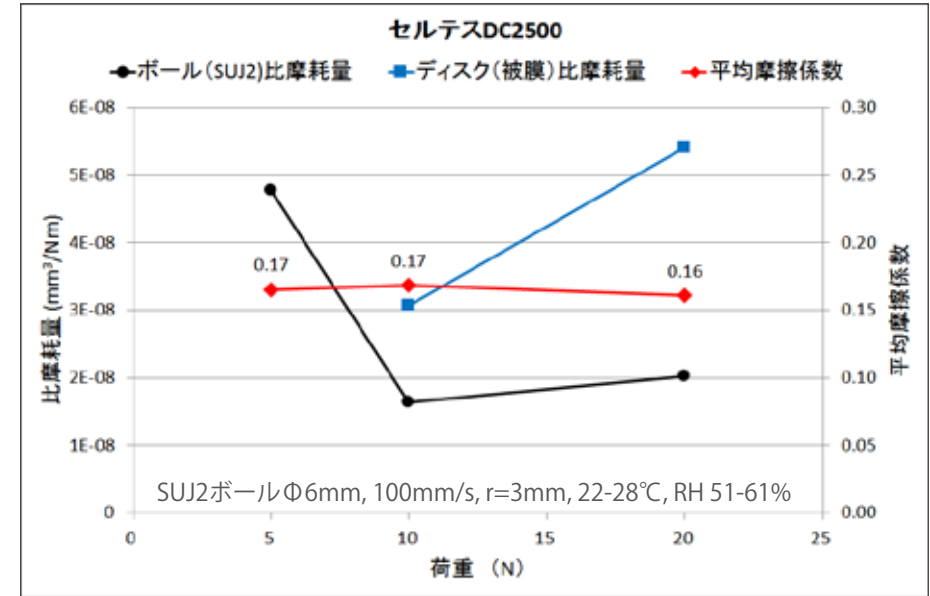
摺動材料組み合わせによるDLC摩擦係数の比較

■結果 DLCとDLCの摺動組み合わせにおいて、もっとも低い摩擦係数 0.05と、もっとも小さいボール比摩耗量 $1.1 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ が得られた。

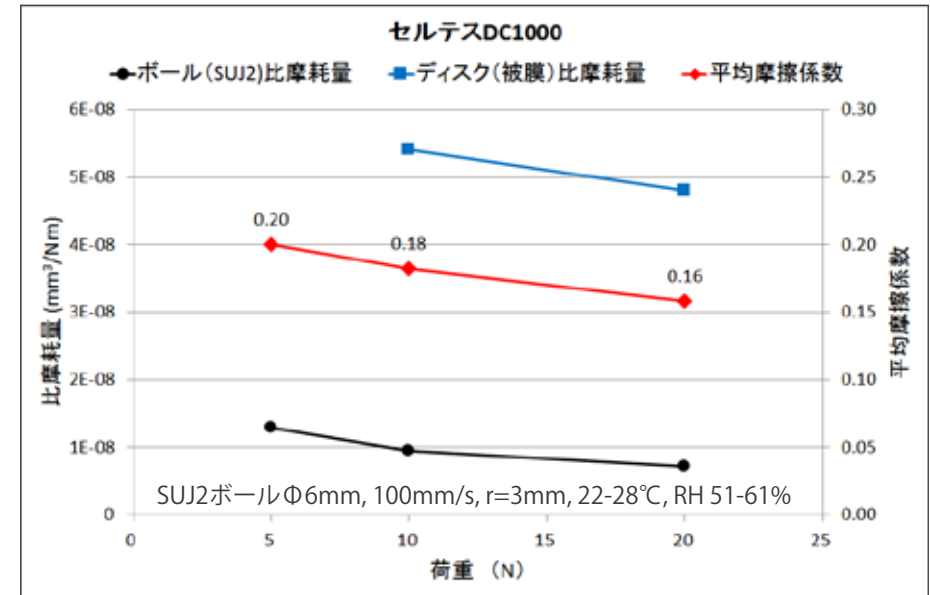


水素含有量(硬さ)の異なるDLCの摩擦係数, 比摩耗量の試験荷重依存性

■結果 DLCでは、硬さと比摩耗量は比例しない。水素含有量の多い硬さの低いDLCでは、荷重が大きいほど摩擦係数が低く、比摩耗量も小さい。



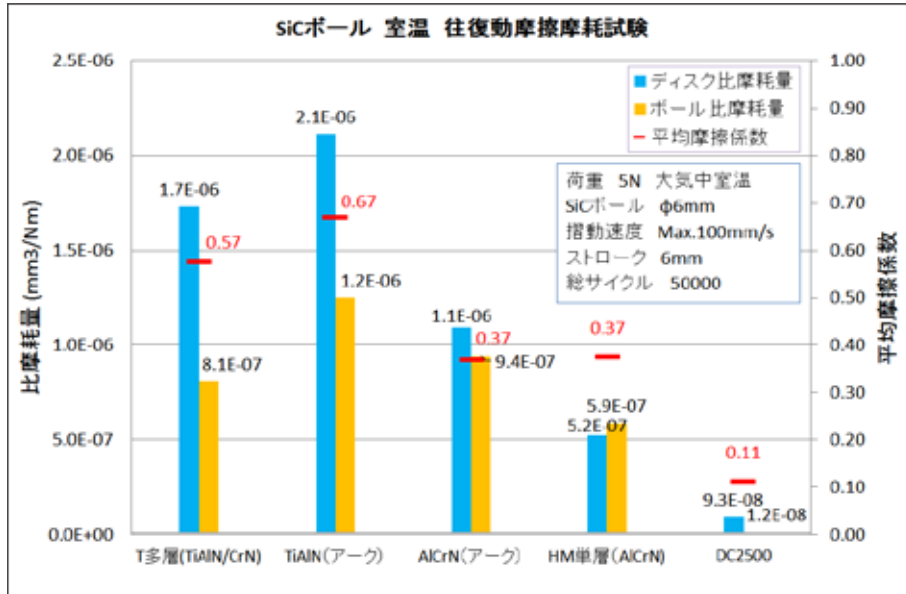
SKD11/セルテスDC2500 3.6 μm, 硬さ 21 GPa, Ra 0.01 μm, 水素含有量 18 atom.%



SKD11/セルテスDC1000 3.8 μm, 硬さ 11 GPa, Ra 0.01 μm, 水素含有量 26 atom.%

SiCボールによる各種硬質薄膜のアブレシブ摩耗評価

■結果 DC2500において、もっとも低い摩擦係数0.11と、もっとも小さいディスク（被膜）比摩耗量 $9.3 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ が得られた。

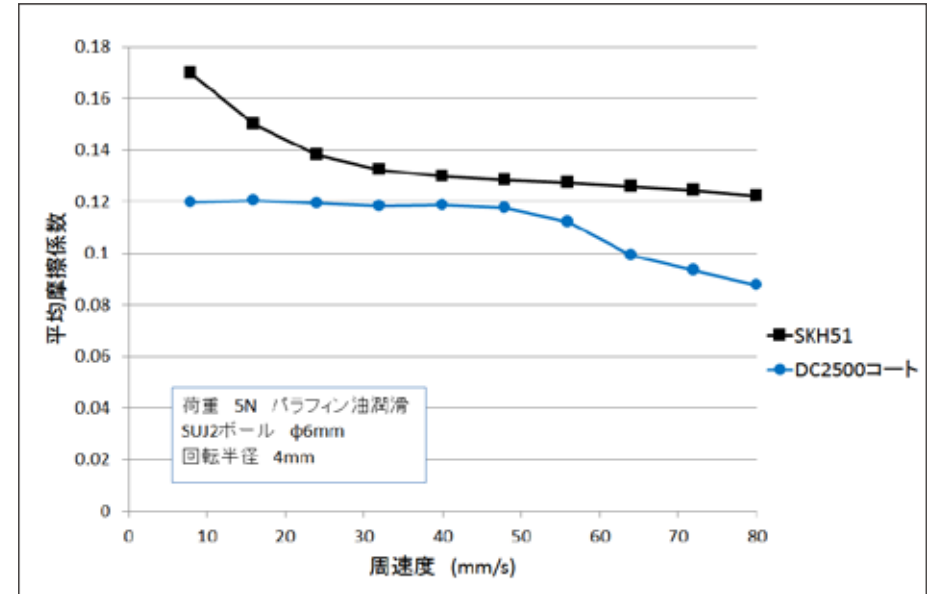


被膜	T多層 TiAlN/CrN	TiAlN (アーク)	AlCrN (アーク)	HM単層 AlCrN	DC2500
膜厚 (μm)	2.9	2.0	2.4	1.6	2.8
硬さ H _{IT} (GPa)	31	39	36	31	25
ディスク摩耗痕 (目盛 500 μm)					
ボール摩耗痕 (目盛 200 μm)					

SiCボールでは、凝着が起きにくくきれいな円形の摩耗痕が得られ、硬さも高いため、アブレシブ摩耗の評価に最適です。DLCの耐摩耗性評価に標準的に用いられます。ここでも、被膜硬さと比摩耗量は比例関係にないことがわかります。

パラフィン基油中におけるDLC摩擦係数の摺動速度依存性

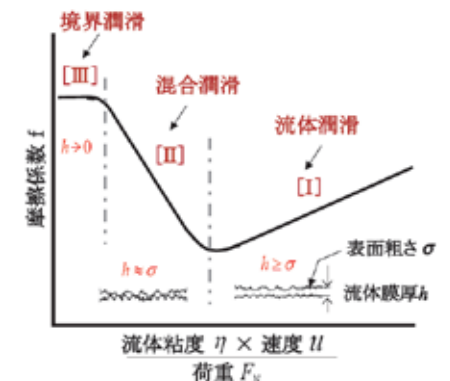
■結果 DLCでは、固体接触の摩擦係数が低いため、境界潤滑下での摩擦係数が低く維持される。



上図はいわゆるストライベック曲線と等価なグラフですが、周速度を80mm/sから8mm/sにステップで下げた時の摩擦係数の推移です。無処理SKH51ディスクでは速度が下がると摩擦係数が上昇していますが、DC2500コートでは50mm/sから8mm/sまでほぼ一定です。これは境界潤滑下のDLCとSUJ2軸受鋼の固体接触の摩擦係数が低いためと考えられます。



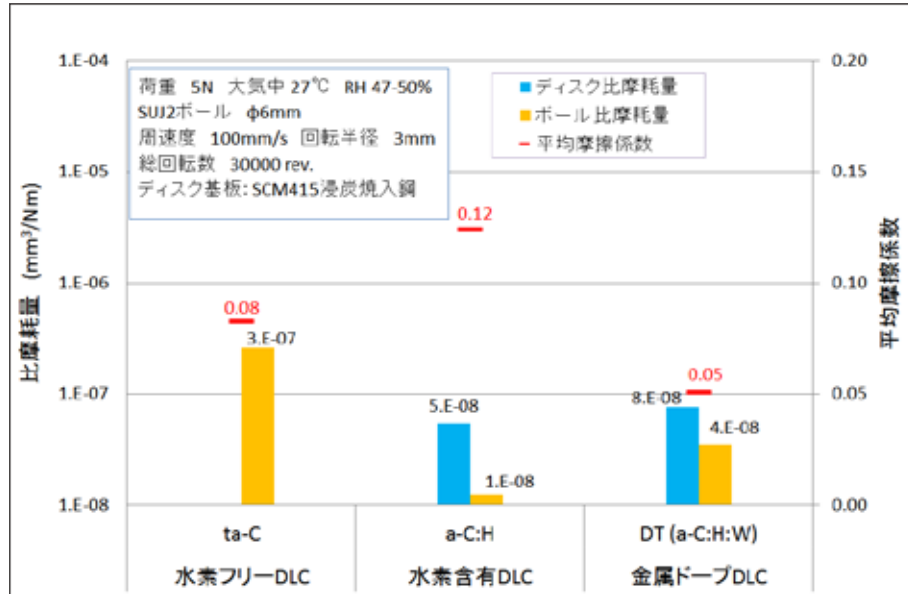
油中回転ボールオンディスク試験



H.チコス（桜井俊男監訳）：「トライボロジー」講談社サイエンティフィック出版,p.102(1980)

水素フリー、水素含有、金属含有DLCのトライボロジー特性比較

■結果 高硬度の水素フリーDLC (ta-C) が、もっとも比摩耗量が小さいが、相手材攻撃性ももっとも高い。

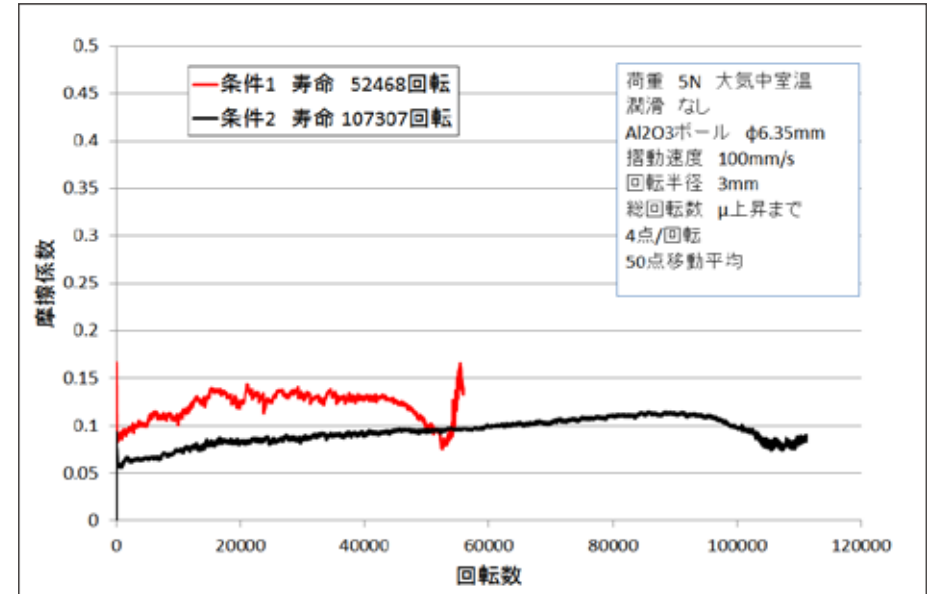


被膜	水素フリーDLC (ta-C)	水素含有DLC (a-C:H)	金属含有DLC (a-C:H:W)
プロセス	真空アーク	イオン化蒸着	スパッタ+P-CVD
膜厚 (μm)	0.4	0.9	3.3
硬さ H _{rr} (GPa)	50	26	17
Ra (μm)	0.017	0.012	0.014
Rz (μm)	0.174	0.100	0.122
ディスク摩耗痕 (目盛 200μm)			
ボール摩耗痕 (目盛 100μm)			

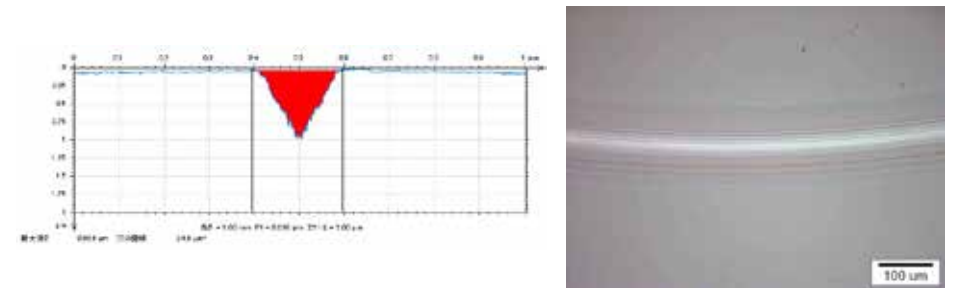
上記の3種類のDLCの摩擦摩耗試験の比較から、水素フリーDLCは膜厚が0.4μmと薄いにもかかわらず極めて優れた耐摩耗性を有することがわかった。これは摺動相手材の摩耗があまり問題にならない切削工具や精密金型などにおいて水素フリーDLCが耐久寿命の向上に寄与しうることを示しています。

アルミナボールを用いたDLC被膜の耐久寿命評価

■結果 摩擦係数上昇までの回転数は、DLC層膜厚と比例しており、耐久寿命の評価がアルミナボールを用いたトライボメータ試験で可能である。



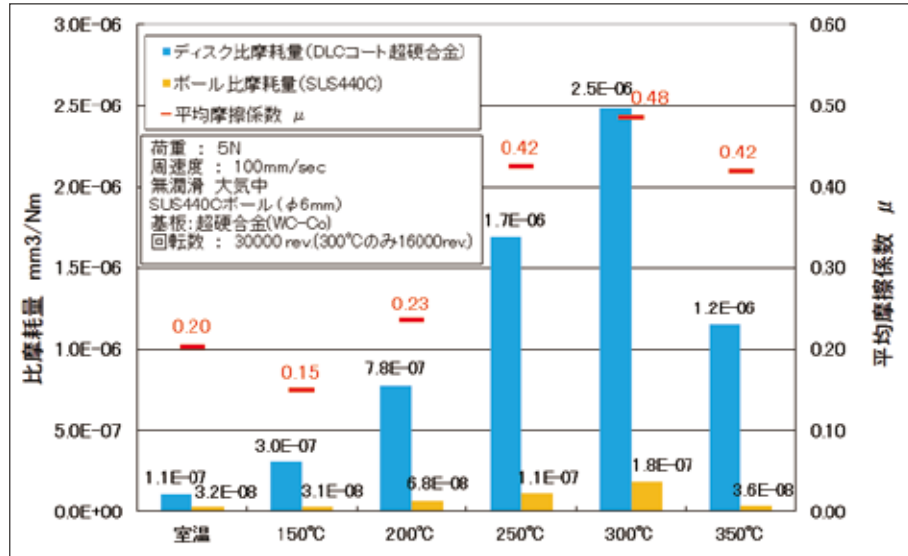
条件1,2は、どちらもSiウエハに成膜されたSi含有DLC層を下地層とするDLC被膜です。総膜厚は条件1で1.5μm、条件2で1.7μmとほぼ同等ですが、表面のSiを含有しないDLC層の厚さは、条件2で条件1の約2倍です。本試験では、試験停止は摩擦係数が徐々に低下し、上昇に転ずる回転数を寿命回転数とし手動で停止をおこないました。摺動痕の分析から、Si含有DLC下地層が直接Al₂O₃ボールと接触しはじめると摩擦係数が上昇することがわかっています。DLC層の比摩耗量は条件1,2どちらも1.5×10⁻⁷mm³/Nmであり同等でした。本試験での約2倍の寿命差異はSiを含有しない表面DLC層の膜厚が約2倍であるためと考えられます。



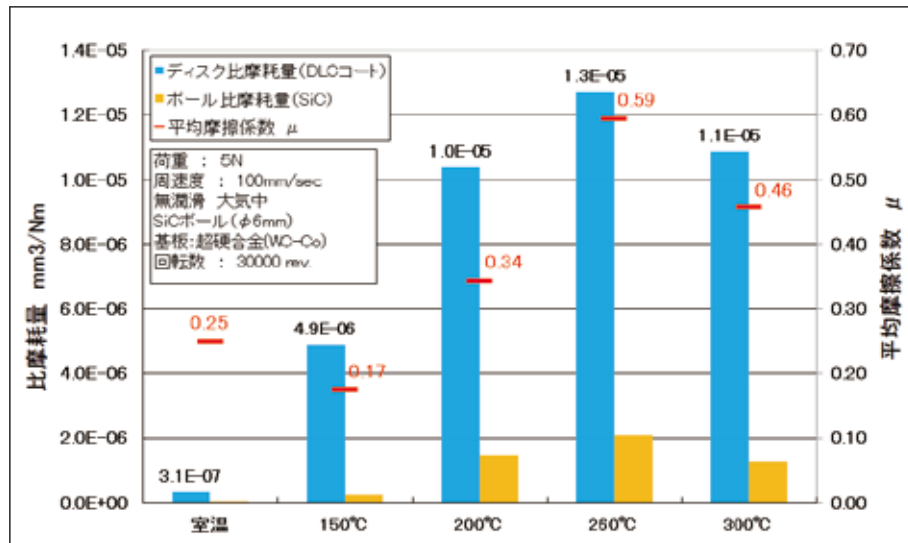
条件2の摩耗痕プロファイルと金属顕微鏡写真

水素含有DLCの加熱環境下でのトライボロジー特性

■結果 摺動相手材 SUS440C, SiCともに、室温から350℃までの加熱により摩擦係数は徐々に上昇し、比摩耗量も増加する。



摺動相手材：SUS440C

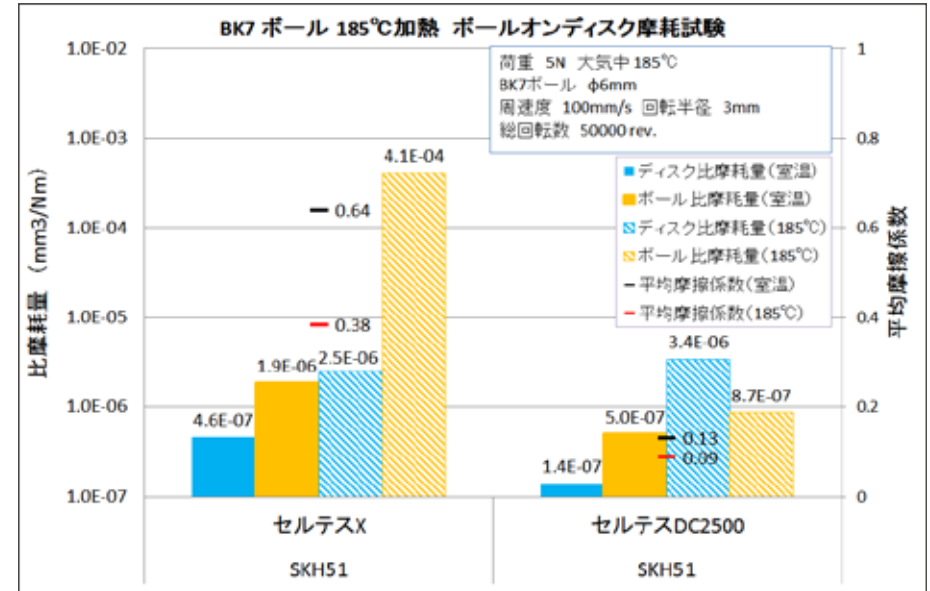


摺動相手材：SiC

DLC被膜自体は、成膜後の350℃までの加熱でも、結晶構造に大きな変化はなく硬さも低下しません。加熱環境下での摩擦係数の上昇と比摩耗量の増加は、DLC被膜の構造の変化によるものではなく、摺動界面の反応生成物の変化によるものと推測されます。

ガラスボールを用いた185℃加熱環境下でのDLC, Cr-N被膜の耐摩耗性比較

■結果 室温ではDLCがCr-Nより摩耗しないが、185℃加熱環境ではDLCの方が摩耗が大きくなる。

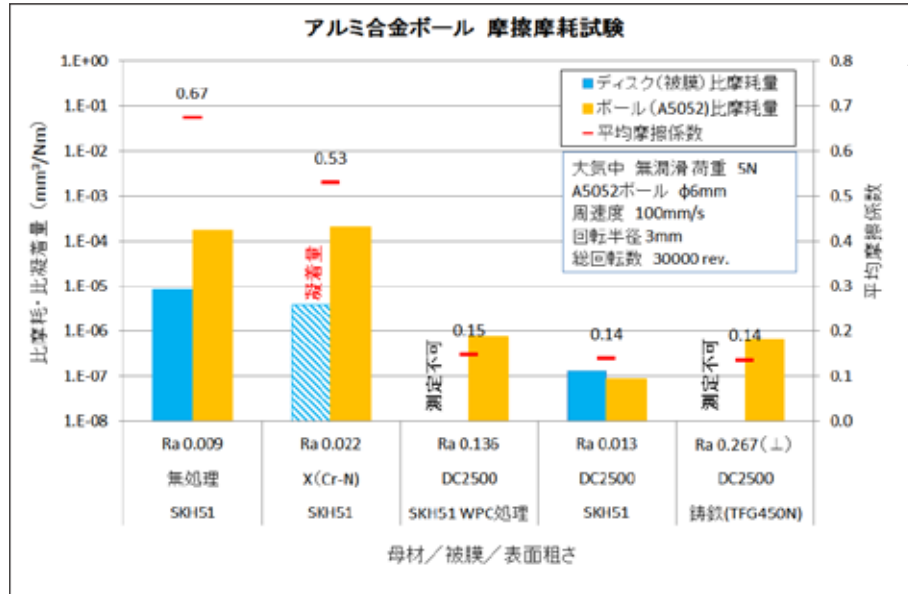


プロセス	セルテスX (CrxNy)		セルテスDC2500	
膜厚 (μm)	5.0		2.5	
硬さ H _r (GPa)	21		30	
試験温度	室温	185℃加熱	室温	185℃加熱
ディスク摩耗痕プロファイル (縦軸 FS 3 μm, 横軸 FS 3 mm)				
ディスク摩耗痕 (目盛 500 μm)				
ボール摩耗痕 (目盛 500 μm)				

室温ではセルテスDC2500の比摩耗量はセルテスXより小さいですが、185℃加熱により摩耗量が大幅に増加しセルテスXの比摩耗量を上回ります。ディスク摩耗痕プロファイルからDC2500の摩耗が、下地Cr-N層に達した時点で止まっていることがわかります。なお、本試験は半導体封止樹脂フィラーによる摩耗を模擬したものです。

水素含有DLCとCr-N被膜のアルミ合金相手材とのトライボロジー特性

■結果 DC2500被膜は、WPC処理や铸铁上に成膜したもので、アルミの凝着をおこさない。無処理工具鋼では凝着摩擦が大きく、X(Cr-N)では凝着のみ発生する。

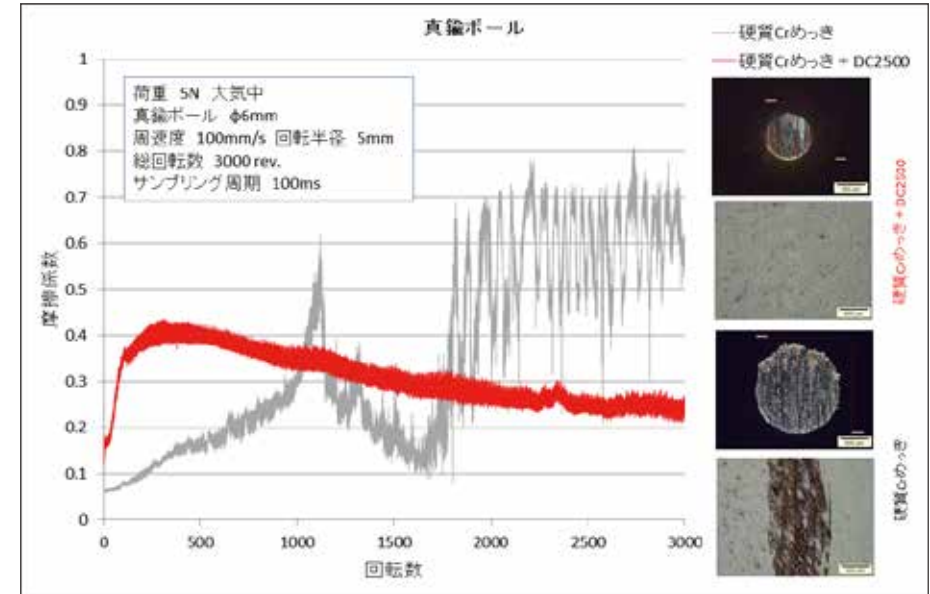


被膜	無処理	セルテス X(CrxNy)	セルテス DC2500	セルテス DC2500	セルテス DC2500
膜厚 (μm)	-	3.1	2.9	3.1	3.0
被膜硬さ HIT (GPa)	-	18	25	25	25
表面粗さ Ra (μm)	0.009	0.022	0.136	0.013	0.267 (条痕に直交)
母材	SKH51	SKH51	SKH51 WPC処理	SKH51	CV 黒鉛铸铁 (TFG450N)
母材硬さ HRC	-	62	62	62	53
ディスク(被膜) 比摩耗量	1.7×10^{-4}	-3.8×10^{-6}	測定不能	1.3×10^{-7}	測定不能
ボール比摩耗量	8.4×10^{-6}	2.1×10^{-4}	7.5×10^{-7}	8.6×10^{-8}	6.7×10^{-7}
平均摩擦係数	0.67	0.53	0.15	0.14	0.14
ディスク(被膜) 摩耗痕プロフィール					
ディスク(被膜) 摩耗痕写真					
ディスク AI 成分 EDS 面分析					
ボール摩耗痕写真					

複合多層 DLC コーティングセルテス DC2500 は、表面粗さの大きい CV 黒鉛铸铁 (友鉄工業殿 TFG450N) にコートしてもアルミの凝着を起こさず、SKH51 鏡面にコートしたものと同等の低い摩擦係数と耐摩耗性を示しました。また WPC 処理上にコートしたのも同様にアルミの凝着を起こさず低い摩擦係数と耐摩耗性を示しました。

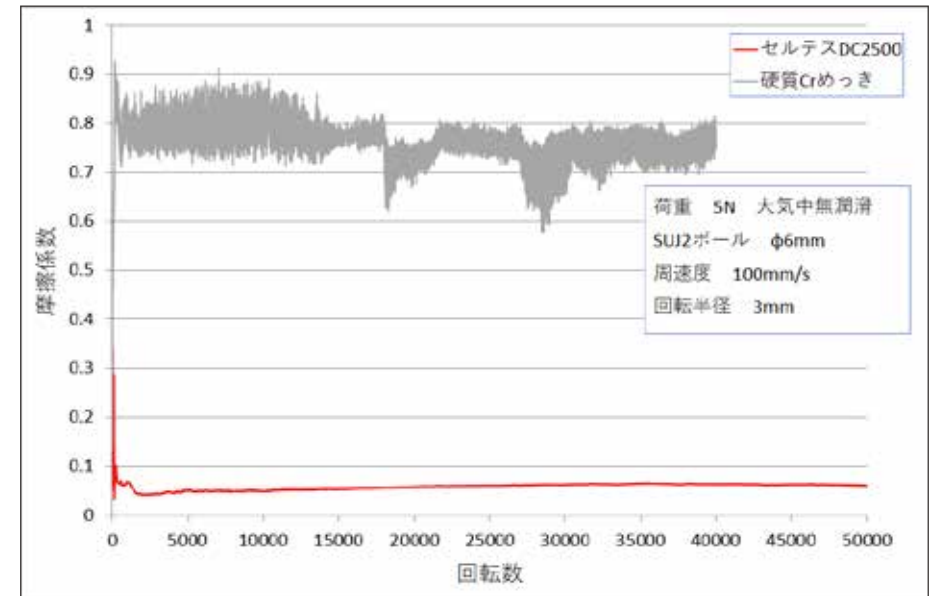
硬質クロムめっき上のDLC被膜の真鍮に対する耐凝着性

■結果 硬質クロムめっきは、早期に真鍮の凝着が生じて摩擦係数が上昇するのに対して、DLCでは凝着がまったく発生せず低い摩擦係数を維持する。



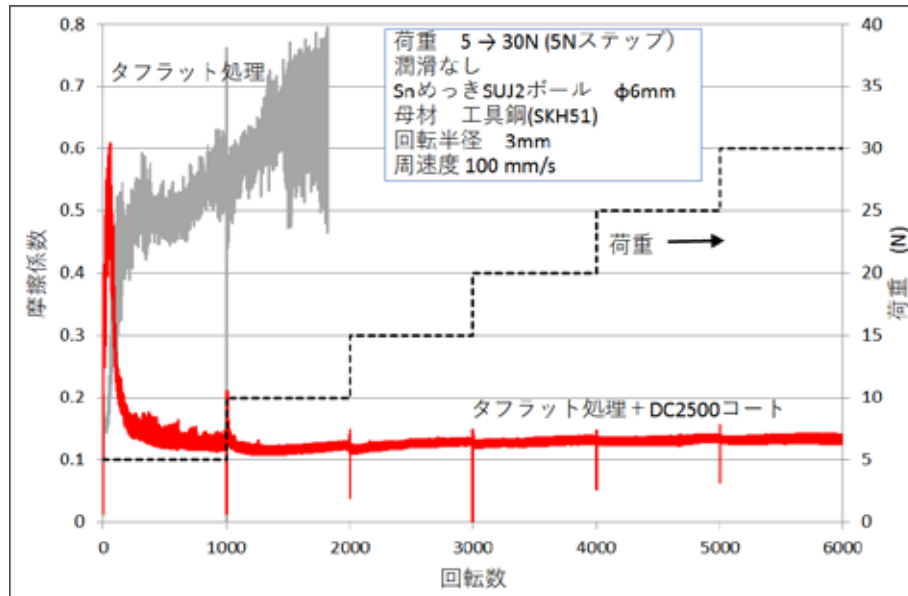
SUJ2ボールに対する硬質クロムめっきとDLC被膜の摩擦係数と比摩耗量比較

■結果 硬質クロムめっきは平均摩擦係数0.76, 比摩耗量 $3.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ であるのに対し、DLCは平均摩擦係数0.06, 比摩耗量は約100分の1の $3.6 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ である。



Sn(錫)めっきボールを用いたステップ増加荷重による耐凝着性評価

■結果 DC2500被膜は30 NまでSnめっきの凝着をおこさず低い摩擦係数を維持する。無処理工具鋼では10 Nで凝着が発生し摩擦係数も0.8まで上昇する。



被膜	無処理	DC2500
ディスク摩耗痕 (目盛 200μm)		
ボール摩耗痕 (目盛 200μm)		

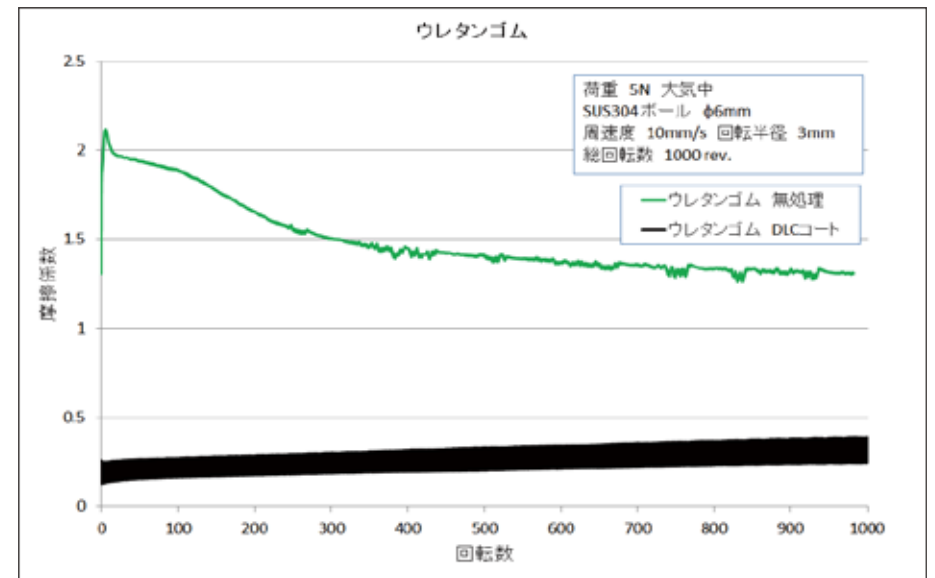
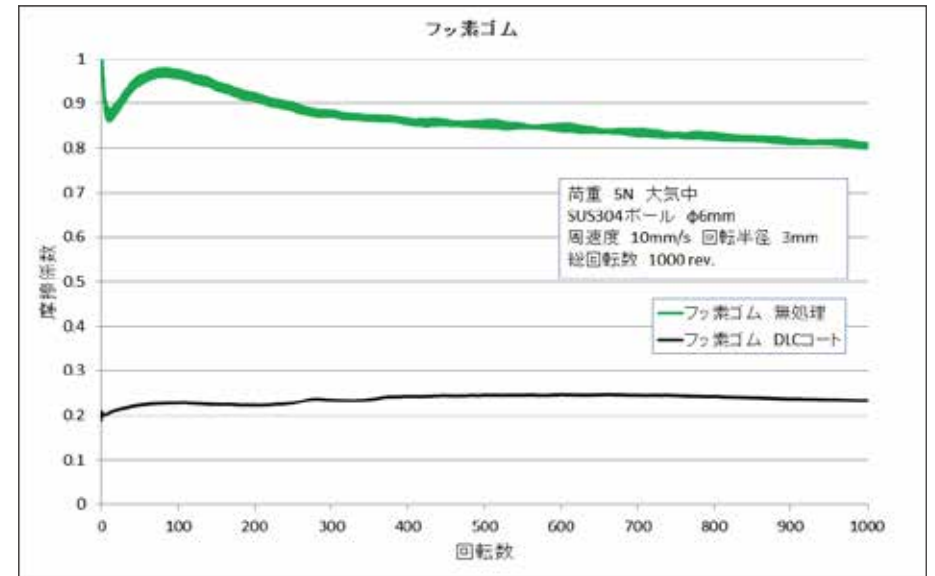
無処理ディスクでは、ボール摺動面のSnめっきがディスク表面に移着(凝着)し、ボール母材が露出しているのに対して、DC2500ディスクでは、ボール表面のSnめっきが塑性変形していますが残存しディスク表面にはSnめっきが観察されません。



回転スピンドルのディスク試料とボールホルダー

フッ素ゴム, ウレタンゴム上のDLC被膜のSUS304に対する摩擦係数

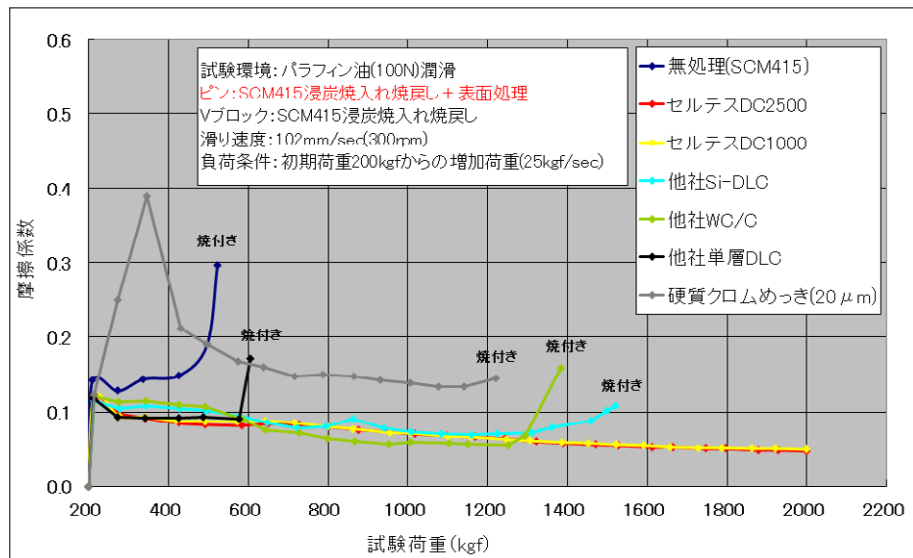
■結果 ゴム材は金属に対してグリップ性があり摩擦係数が高いが、DLCコートすると摩擦係数が下がりゴムの摺動性が向上し固着やよれを防止できる。



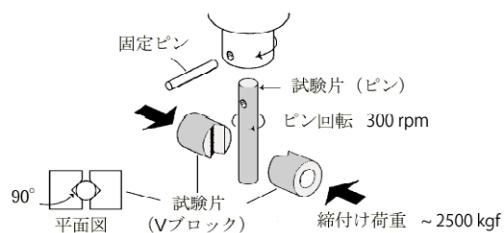
ゴム部品 (Oリング等) に薄く DLC コーティングすると、母材ゴムの特性を維持しながら表面の摺動性が良くなり耐久性向上やすべり性向上・固着防止効果が得られます。セルテス DC-R と SUS304 ボールとの摩擦係数は無処理と比べ飛躍的に低減されます。

ファビリ試験による各種硬質薄膜のパラフィン基油中での耐焼付き性評価

■結果 DC2500およびDC1000被膜はパラフィン基油潤滑下で最大試験荷重2000kgfまで焼付きをおこさない。(相手材 SCM415浸炭鋼)



回転するピンを2個のVブロックではさんで焼付限界荷重を評価するファビリ(ファレックス)試験では、他社DLC被膜や硬質Crめっきは低い荷重で焼付きを起こしますが、セルテスDC2500・DC1000被膜は試験限界荷重の2000kgf(最大ヘルツ接触圧力3.7GPaに相当)まで焼付きをおこしません。ステンレス鋼板加工金型や実装機部品等に利用されています。

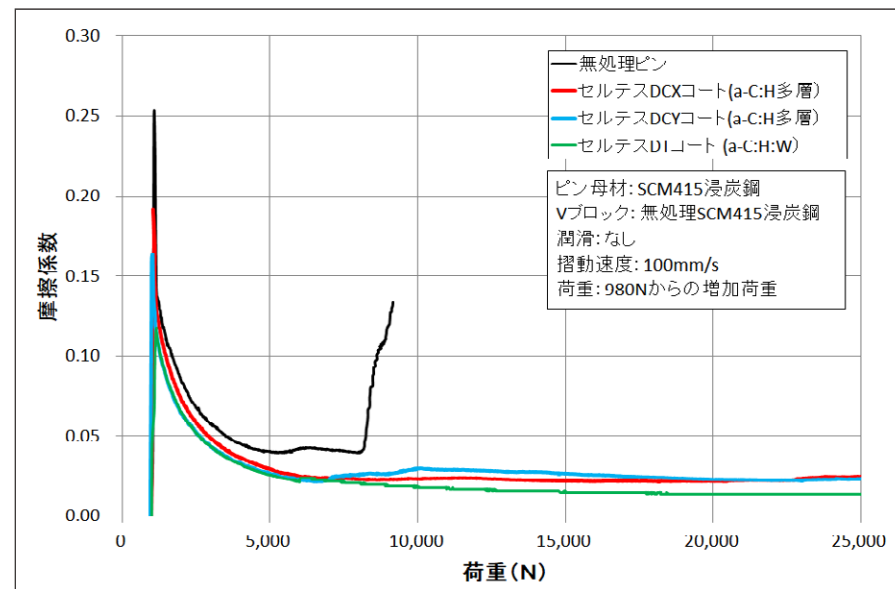


ファビリ試験 原理図



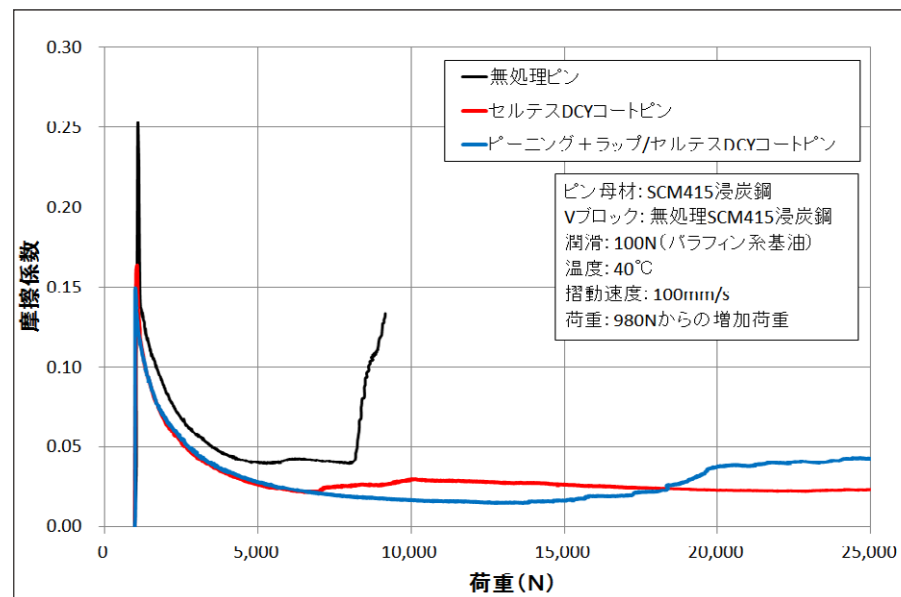
ファビリ試験による各種硬質薄膜のドライ環境での耐焼付き性評価

■結果 DCX,DCY,DT被膜はドライ環境下で最大試験荷重25000Nまで焼付きをおこさない。



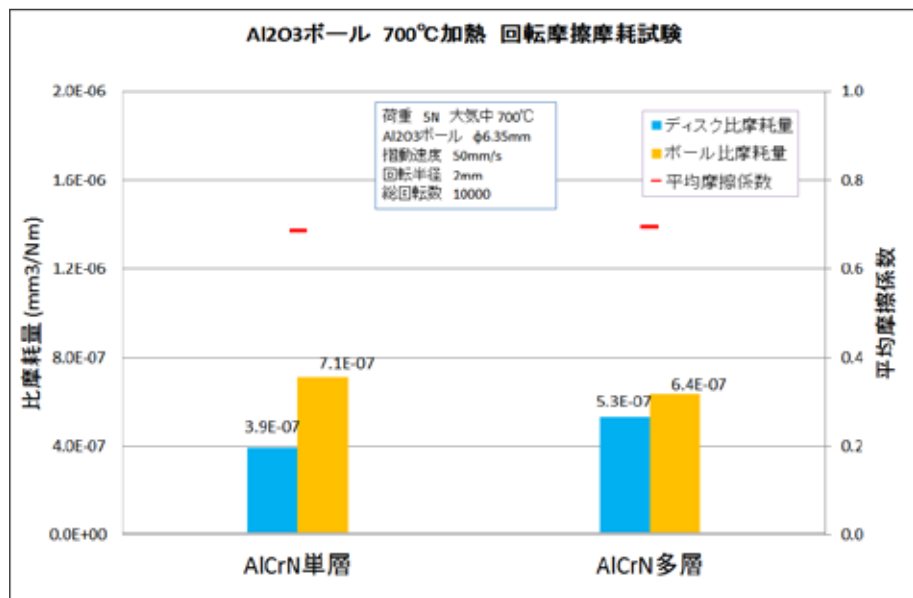
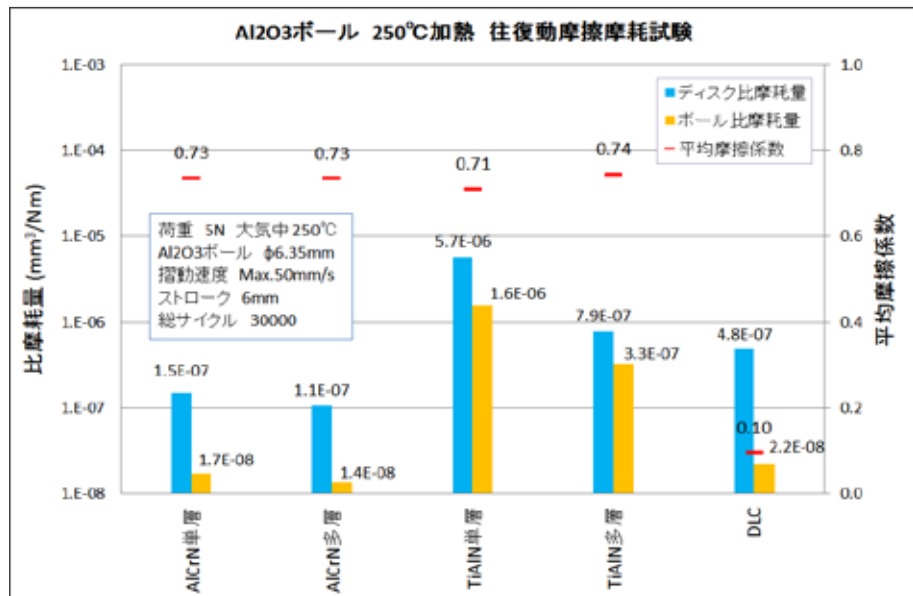
ファビリ試験によるDLC被膜のパラフィン基油中での耐焼付き性評価

■結果 DCY被膜はピーニング+ラップ処理上でもパラフィン基油中40℃で最大試験荷重25000Nまで焼付きをおこさない。(相手材 SCM415浸炭鋼)



AlCrN, TiAlN 耐熱被膜の加熱環境下でのトライボロジー特性

■結果 250℃加熱環境下でのアルミナボールとの往復動試験では、AlCrN被膜がもっとも小さな比摩擦耗量を示した。また多層化により若干の改善が見られた。700℃加熱では、ディスク比摩擦耗量は250℃加熱の2.6倍/4.8倍と増加したが10⁻⁷mm³/Nmオーダーであるのに対して、ボール比摩擦耗量は42倍/46倍と大きく増加した。



PPボールによる樹脂成形用撥水被膜の寿命評価

■結果 セラミック下地層と撥水層を多層化したセルテスN-S被膜は、樹脂離型性にすぐれ、PP(ポリプロピレン)ボールとの摺動で、低い摩擦係数と長い耐久寿命を示した。

