

特集記事 ● 1 鉄鋼材料への機能性付与

各論 用途別機能性付与(1) 輸送機 1

DLCコーティングによる低フリクション化技術

Technology of DLC Coating to Reduce Friction

加納 眞

Makoto Kanou

保田芳輝

Yoshiteru Yasuda

日産自動車(株) 総合研究所
第一技術研究所 主任研究員

日産自動車(株) 総合研究所
第一技術研究所 主任研究員

1 はじめに

昨今の地球規模での異常気象、資源の枯渇や燃料の高騰という問題の顕在化から、自動車の燃費改善は急務となっている。エンジンの燃費向上にはシリンダ内で燃料を効率よく燃焼させ、そのエネルギーをできるだけ損失なく有効に駆動力として活用する必要がある。フリクション低減技術は、その損失を減少させることに直結しているため非常に重要である。しかしながらフリクションの高い摺動部位は、摩擦条件が苛酷な境界潤滑下に置かれていることが多いので、フリクション低減と同時に高い耐摩耗性を要求される。そのため構造材に多用されている浸炭鋼そのままでは要求特性を満たせず、各種の硬質薄膜コーティングが使われ始めている。ここでは、代表的なTiN、CrNやDiamond Like Carbon (DLC)といったコーティング技術の動向について概説する。

2 エンジンのフリクション低減技術

図1はエンジン各摺動部でのフリクションロスや補機類の

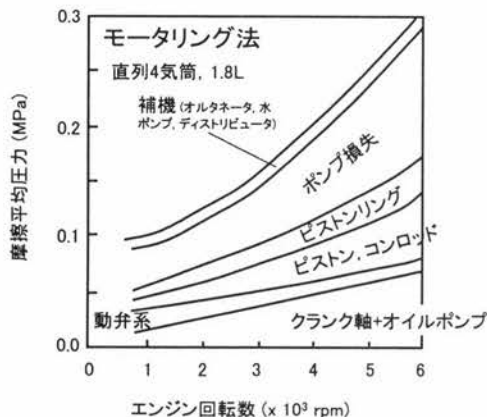


図1 ガソリンエンジン各部のフリクションロス

仕事を、外部の電気モータでエンジンクランク軸を駆動させるモータリング法によって求めた結果である。図1に示すように中・高速回転域ではピストンリング、ピストン、コンロッドでのフリクションロスが全体に占める割合が高く、低速回転域では動弁系(カムフォロワ等)の占める割合が大きくなっている¹⁾。ピストン/ピストンリング部のフリクションはエンジン回転の上昇に従い増加し、エンジンフリクションロス全体の40～50%を占めている。動弁系では使用頻度の高い低回転域において全体の20～30%を占めており、エンジン実用回転数域での燃費に大きく影響している。

3 動弁系の低フリクション化技術

エンジン動弁系・カムフォロワ機構においては他の摺動部位に比べ摩擦条件がはるかに厳しいので、耐摩耗性の改善を狙った種々の材料・表面処理が開発・採用されてきた。動弁系でのフリクションの大部分は図2に示すカムとフォロワ間の転がり/滑りによるものである。カムとフォロワ間の計算上の油膜厚さは低回転域では1.0 μm 以下と非常に小さな値

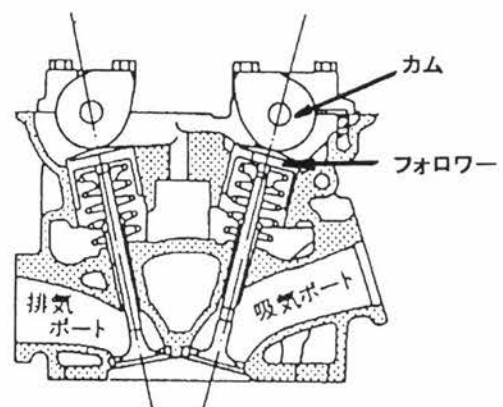


図2 DOHCエンジン直動式動弁系

となり、カムとフォロワ間の潤滑状態は境界潤滑が支配的となっている。近年、平均表面粗さRa 0.1 μm以下となる平滑さの向上によるフリクション低減を狙い、PVD (Physical Vapor Deposition) 表面処理による硬質薄膜TiNやCrN等のコーティングされた浸炭鋼材料がフォロワに適用され始めている。図3に、チルド鋳鉄製のカムと浸炭鋼の円盤状シム上に種々のコーティングを施した一対のカム、フォロワの摩擦トルクを測定した結果を示す。フリクションは、一対の摺動部材の両者の表面粗さに影響されるため、カムとフォロワー両者の合成二乗平均平方根粗さでデータを整理した。エンジン回転数はアイドリング状態 (600 rpm) で一般的なエンジン油を80℃で潤滑した条件となっている²⁾。浸炭鋼シムの従来品に比べ、硬質薄膜TiNやCrNをコーティングしたシムでは、表面粗さの低下とともに、摩擦が低減している。この条件下では、浸炭鋼の初期表面粗さを低く抑えても、試験中にスカッフを形成して粗さが悪化するために摩擦が増加してしまう。

図4に、各種フォロワ (シム) 材料の耐摩耗性を、面圧を約2倍に増加させたアイドリング加速摩耗試験50時間により評価した結果を示す³⁾。P/Mは16 wt %Crの鉄基焼結合金材を、SCMはSCM415浸炭鋼を示す。この条件下においては、浸炭鋼フォロワでは自分自身が摩耗し、焼結合金では相手のチルド鋳鉄カムが摩耗する。硬質コーティングで比較すると、TiNコーティングはCrNコーティングに比べて、相手カムの摩耗量が大きい。そこで、摺動表面を走査電子顕微鏡に比較してみると、図5に示すように、摺動前のTiN表面には、PVD特有の表面に飛来するパーティクル脱落による王冠状のディンプルが残存している。PVD後のバフ研磨仕上げにより、触針式の粗さ計では両者ともに平均表面粗さRa 0.12 ミクロン以下に平滑化したものの、サブミクロンに

おける表面性状の違いで大きく摩耗量が異なる、すなわち摩擦も異なることを示している。従って、硬質コーティングにおいては、単なる表面粗さだけでなく、サブミクロンサイズでの表面性状コントロールも必要となる。

種々の産業において一般的に汎用され始めたCVD (Chemical Vapor Deposition) 法により形成された水素含有のDLC (Diamond Like Carbon) コーティングしたシムは、図3に示すように、摩擦の大幅な低減は認められなかった。

また、固体潤滑剤である二硫化モリブデン焼成膜を浸炭鋼シムに形成させたシムでは、上記材料に見られる相関線よりも低い摩擦を示すが、表面粗さが粗く摩擦絶対値は高い上に、部品の耐久信頼性が得られない。

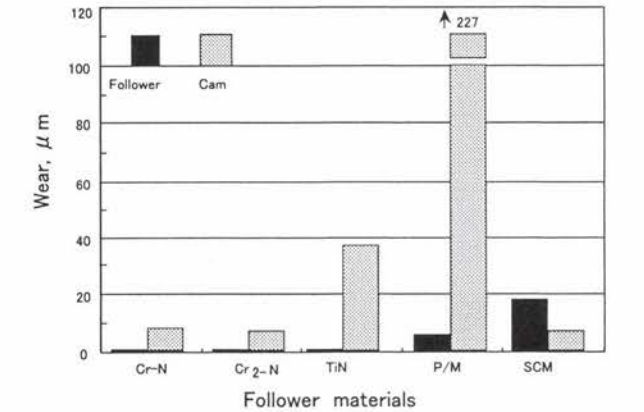


図4 硬質コーティング材料の耐摩耗性

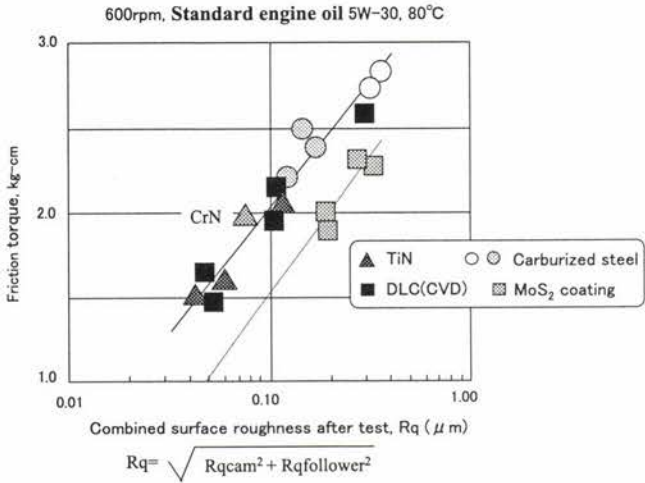


図3 各種フォロワ材料の合成表面粗さとフリクション

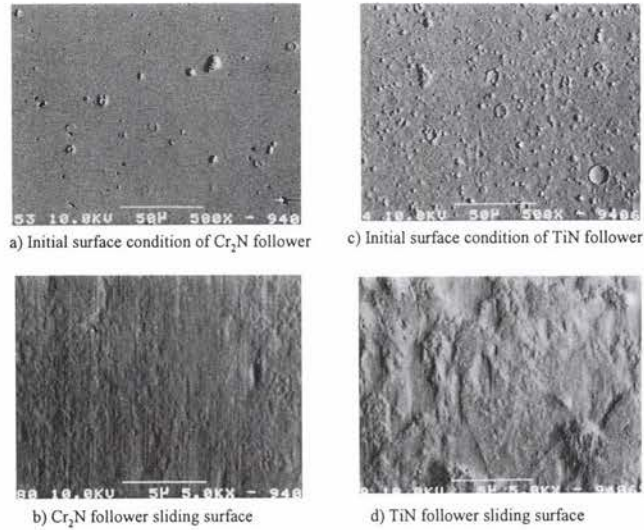


図5 硬質コーティングの表面性状

4 DLCコーティングによる低フリクション化技術

今回、水素を含まないDLC：ta-C (tetrahedral amorphous carbon) がエンジン油中で摩擦低減を発現することを見出したので、その動弁系への適用技術と⁴⁾、エステル系油剤との組合せにより更なる大幅なフリクション低減できる可能性⁵⁻⁷⁾について述べる。

DLC膜はPVD、CVDやスパッタリング法などにより成膜され、純カーボンをはじめ水素を含むa-C：H (水素含有のアモルファスカーボン)、Si、Cr、WやTiのような金属を含有するものなど様々であるが、硬度は1000～8000Hvと高硬度で、非常に平滑で優れた耐摩耗性を有する。また無潤滑下では摩擦係数0.2以下と低摩擦で、様々な摺動部品への適用が期待されている。

図6に示すピンディスク試験機を用いてDLCコーティングの摩擦特性を計測した。固定された軸受鋼ピンにコーティングを施した回転するディスクを押し付けるタイプの試験機でカムフォロワと同様の線接触と接触面圧 (0.7 GPa) となるよう図に示す条件で評価した。まず図7に無潤滑下での摩擦係数計測の結果を示すが、従来のリン酸マンガン塩皮膜、TiNやコーティング無しに比べ、水素含有のDLC (CVD-DLC) コーティングは低い摩擦係数を示しており、一般に言

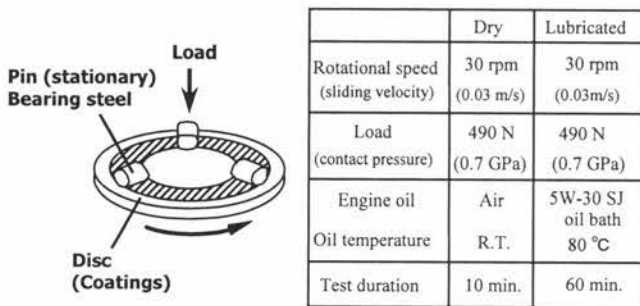


図6 ピンオンディスク試験

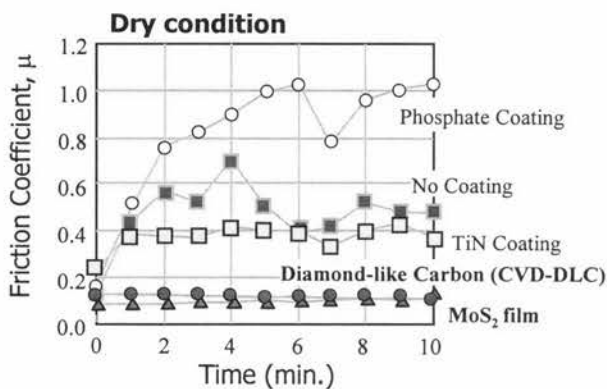


図7 無潤滑下の摩擦特性比較

われているような低フリクション特性を示している。図8にエンジンオイル (5W-30SG) 中での計測結果を示す。硬質薄膜であるCrN、TiNは、優れた耐摩耗性によって摺動表面の平滑性が維持あるいは向上しフリクション低減の効果を発揮している。固体潤滑材である二硫化モリブデンコーティングでは、膜の耐摩耗性は不十分であるものの、固体潤滑性を示し低い摩擦係数を示している。無潤滑下の結果とは異なり図8に示すように水素含有のCVD-DLCコーティングについては期待した効果が得られず、TiN、CrNと同様の摩擦特性であった。これに対して水素を含まないPVD-DLC (アーケイオンプレーティングta-C) コーティングは最も低い摩擦係数を示した。図9にこれらの結果をまとめたものを示す。無潤滑下では同様の摩擦特性であったCVD-DLCとPVD-DLCコーティングがエンジンオイル潤滑下では異なった特性を示すことがわかった。CVD-DLCとPVD-DLCの違いは、CVD-DLCがアセチレンなどの hidrocarbon (HC) 系のガスプラズマから生成され水素を含んだカーボン膜であるのに対して、PVD-DLCはアルゴンガス中でのアーク放電によるカーボンのコーティングで水素をほとんど含んでい

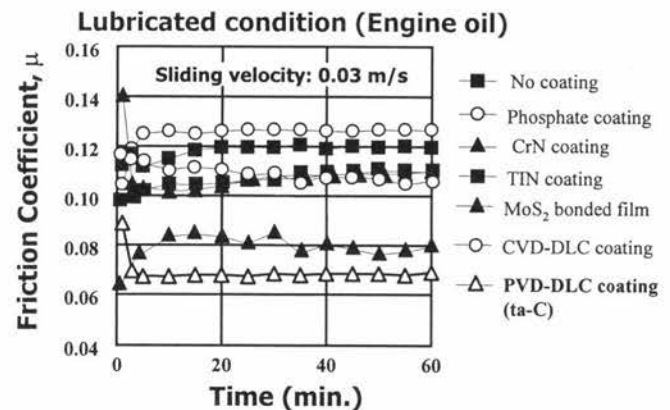


図8 潤滑下の摩擦特性比較

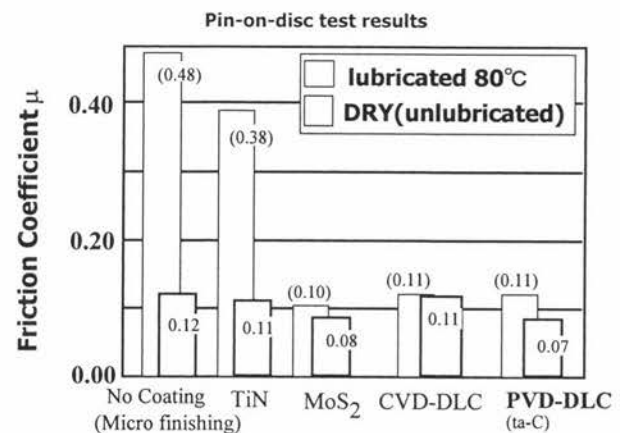


図9 各種コーティング材の摩擦特性比較

ないことである。図10にカーボン膜中の水素含有量と摩擦係数の関係を示すが、水素が少なくなると摩擦係数が小さくなる傾向があることがわかる。

エンジンオイル中には耐酸化性、粘度調整等のいろいろな性能を得るための添加剤が添加されており、フリクションへの影響を単純に評価できない。そこで、添加剤を全く含まないPAO (Poly- α -olefin) を基油とし、それに摩擦調整剤であるエステル (Glycerol-mono-oleate) を1 mass%添加した油中での摩擦試験を行った結果、図11に示すように銅とta-C (アモルファスカーボン) (PVD-DLC) 材料の組合せで、エンジン油潤滑下の $\mu=0.08$ に対して $\mu=0.02$ という劇的なフリクション低減が得られた。一方、銅と水素を含むカーボン膜：a-C：Hの組合せでは、大幅なフリクション低減は見られなかった。このように、DLC材の潤滑下での摺動においては、油添加剤との相互作用がフリクション特性に大きな影響を与えることが見出された。

今回、見出した水素を含まないDLCコーティングによる低フリクション化技術は、図12に示すように鍛造で形成さ

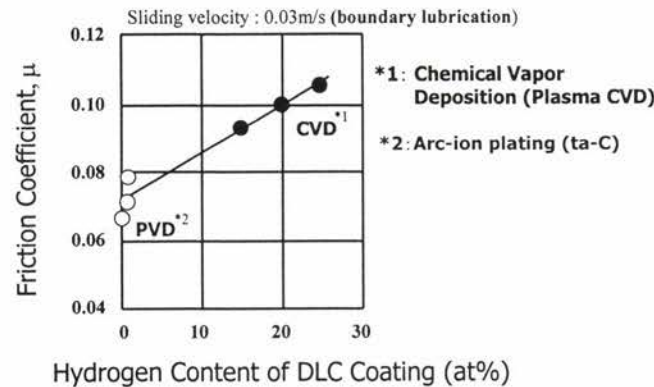


図10 DLC水素含有量と摩擦特性

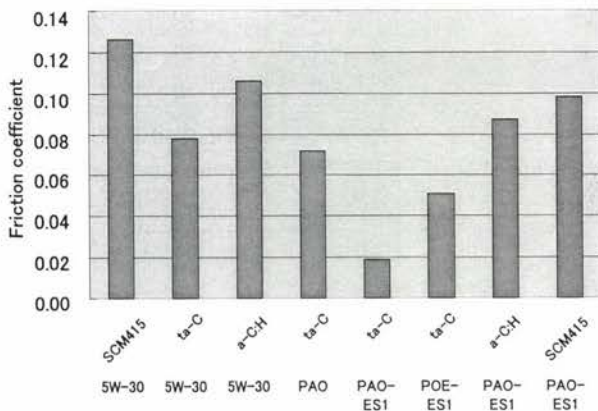


図11 DLCと油剤組合せによる摩擦特性

れた円筒冠面にコーティングされたバルブリフターと通常のエンジン油との組合せでの適用が始まっている。新たに開発されたエンジン油との組合せにより、さらなる摩擦低減技術として実用化されて行く予定である。

5 おわりに

DLC膜はその優れた摩擦特性からエンジン以外の機械要素部品で発生しているフリクション低減のニーズに対しても同様に適用できるものと考えている。今後、機械摺動部品のフリクション低減に向けた表面改質技術の一つの方向として、TiN、CrNといったPVD硬質薄膜からDLC膜をはじめとする超硬質コーティングと適切な油剤を組合わせた超低フリクション化技術が適用されていくものと思われる。

参考文献

- 1) 自動車技術ハンドブック (基礎・理論編), 自動車技術会, (1990), 53.
- 2) 加納 眞, 保田芳輝: 自動車技術, 53, (1999) 9, 65.
- 3) 加納 眞, 坂根時夫, 松浦正晴: トライボロジスト, 42 (1997) 8, 673.
- 4) Yoshiteru Yasuda, Makoto Kano, Yutaka Mabuchi and Sadayuki Abou: SAE Paper 2003-01-1101
- 5) 加納 眞, 保田芳輝, 馬淵 豊, 叶 際平, 小西正三郎: 春季トライボロジー学会, 東京, 講演予行集, (2004), 295.
- 6) Makoto Kano, Yoshiteru Yasuda, Jiping Ye and Shozaburo Konishi: Transient Process in Tribology, (2004), 689.
- 7) Jiping Ye, Kenji Ueoka, Makoto Kano and Yoshiteru Yasuda: Transient Process in Tribology, (2004), 693.

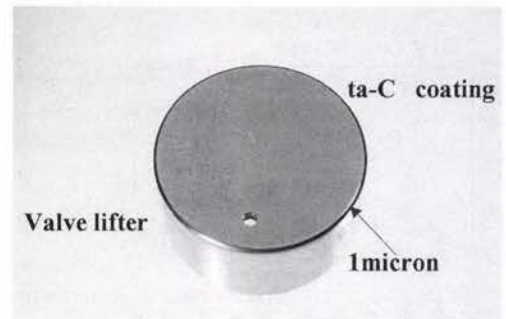


図12 DLCコーティングバルブリフター

(2005年7月27日受付)