エンジンにおけるフリクション低減 表面改質技術の動向

加 納 眞*

1. はじめに

昨今の地球規模での異常気象や資源の枯渇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ている。最近のエンジン摺動部品に適用された、もしくは開発されている種々の表面改質技術の事例をあげ、最後に Diamond Like Carbon (DLC) を主とする硬質薄膜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。近年のエ

図1 ガソリンエンジンの各部のフリクションロス。

ンジンでは表1に示すような技術が既に採用されているが、エンジン性能、機能および耐久性の確保やコストといった制約条件も同時に満たす必要がある⁽²⁾。表1中の表面改質技術としては、超仕上げ等の加工技術を用いた表面粗さの徹底的な平滑化と固体潤滑材被膜の形成が採用されている。表1に示すうちの摺動面超仕上げ、ピストンスカートへの固体潤滑焼成膜、FM(摩擦調整剤)入り低粘度エンジンオイル、バルブスプリング荷重低減や摺動面積低減等の技術が採用された新型の3リッタークラスのV6エンジンでは、旧型に比べて図2に示すように使用回転数全域で10~15%のフリクションの低減が実現されている⁽³⁾。

* 日産自動車株式会社 総合研究所第1技術研究所主任研究員(〒237-8523 横須賀市夏島1)

Trend of Surface Coating to Reduce Friction in Automotive Engines; Makoto Kano(Technology Research Laboratory No. 1, Nissan Research Center, Yokosuka)

Keywords: diamond like carbon(DLC), low friction, engine, valve train, physical vapor deposition(PVD), chemical vapor deposition(CVD), coating

2004年6月2日受理

表1 エンジンにおけるフリクション低減技術.

ねらい	部 品	適用技術
境界潤滑発生 の抑制	カムシャフト	カム摺動面の超仕上げ加工
	リフタシム	TiN, CrN イオンプレーティング 硬質薄膜平滑面形成
	クランクシャ フト	クランク軸の超仕上げ加工
	ピストン	スカート部にマイクロディンプル 形成
境界潤滑状態 での摩擦係数 の低減	ピストン	スカート部に二硫化モリブデン・ グラファイト・PTFE 固体潤滑焼成膜コーティング
	エンジンオイ ル	MoDTC FM 剤の添加
摩擦部の荷重 負荷低減	アルミニウム リフタ バルブスプリ ング	軽量化によるスプリング荷重低減
	ピストンリン グ	リング張力低減, 2本リング化, 薄幅化
摺動面積低減	ピストン	スカート面積低減
	クランクシャ フト	ピン, ジャーナル径の細軸化
粘性抵抗低減	エンジンオイ ル	低粘度化
滑りから転が り摩擦への転 換	ロッカアーム	ローラロッカアームの適用

図2 V6 エンジンでのフリクション低減効果.

3. ピストン・リングとボア間のフリクション低減技術

最近の表面処理の適用例を表2に示す⁽²⁾. 固体潤滑剤コーティングは二硫化モリブデン, グラファイトやPTFE等の成分を有機系のバインダーを用いて, ピストンのアルミ合金上に被覆したものである⁽⁴⁾. 固体潤滑効果とともに, 初期のなじみ性の向上とそれに伴う摺動面の平滑化によるフリクション低減を狙ったものである. 図3に示すように, エンジ

表2 ピストン, ピストンリングへの表面処理.

部 位	表面処理	効 果	適用状況
ピストン スカート	固体潤滑剤コーティング(二硫化モリブデン, グラファイト, PTFE 混合有機バインダー焼成膜)	フリクション低減なじみ向上	ガソリンエンジン車載
	CVD-DLC コーティング	フリクション低減耐摩耗性向上	単体摩擦試験レベル
ピストン リング	CrN アークイオンプレーティング	耐摩耗性向上 フリクション低減	ガソリン・ディーゼルエンジン車載

図3 コーティング処理ピストンのフリクション低減効果.

ン・ファイアリング試験において無処理のピストンに対して約10%のフリクション低減が得られている. DLCはDiamond Like Carbon と呼ばれる硬質炭素系被膜で, 優れた摩擦特性を活かし近年, スピーカー振動板, ビデオ摺動部品, ハードディスク駆動装置のヘッド保護膜, 金型工具等への適用が図られている. 表2のDLCはCVD (Chemical Vapor Deposition: 化学蒸着) という方法により, アルミニウム合金上に数ミクロンの厚さで, スープ硬さ2000相当の硬質薄膜を形成させたものである. 上述の固体潤滑剤コーティングとは異なり母材との密着力と膜硬度は高いので, 形成された薄膜を維持しながら摩擦特性を発揮することになる. アルミ合金ボアとのフリクションの低減と耐摩耗性の改善を狙い, 大気中でのピン・オン・ディスク単体摩擦試験を行った結果, A390 ディスクとの組合せで, 従来材の铸铁の摩擦係数 $\mu=0.5$ からDLC材の $\mu=0.4$ とフリクションが低減する効果が報告されている⁽⁵⁾. ピストンリングに採用されているクロムナイトライド: CrNは, PVD (Physical Vapor Deposition: 物理蒸着) で合金鋼のリング上に数ミクロンの硬質薄膜が形成されている. この硬質薄膜は, 一般的なクロム・メッキに比べ耐摩耗性が優れるので, 摺動面の平滑性が維持され, その結果としてフリクション低減効果も期待できる.

4. 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4に示すカムとフォロワー間の転がり/滑りによるものである。カムとフォロワー間の計算上の油膜厚さは低回転域では1.0 μm 以下と表面粗さに比べ非常に小さな値となり、カムとフォロワー間の潤滑状態は境界潤滑が支配的となっている。近年、上記ピストンリングへの適用と同様に、平均表面粗さ R_a 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 表面処理の硬質薄膜 TiN や CrN 等がフォロワーに適用され始めている。これらの硬質薄膜に対して低フリクション特性が期待されている DLC コーティングの動弁系への適用状況と技術課題について述べる。

ダイヤモンドライクカーボン膜は 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 1000-8000 Hv 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5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ー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6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、DLC コーティングは低い摩擦係数を示しており、一般に言われているような低フリクション特性を示している。図7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。比較のため数種類の DLC コーティングを評価し

たが、無潤滑下の結果とは異なり図7に示すように 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 PVD-DLC (アークイオンプレーティング) コーティングは最も低い摩擦係数を示した。図8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

図5 ピンオンディスク試験。

図6 無潤滑下の摩擦特性比較。

図7 潤滑下の摩擦特性比較。

図4 DOHC エンジン直動式動弁系。

図8 各種コーティング材の摩擦特性比較.

図9 DLC 水素含有量と摩擦特性.

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ハイドロカーボン(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 は真空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ないことである. 図9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⁽⁶⁾.

エンジンオイル中にはいろいろな低摩擦性能を得るための添加剤が添加されており, 表面に吸着あるいは反応するように処方されている. 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10に示すように鋼と a-C (アモルファスカーボン) (PVD-DLC) 材料の組合わせで, 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⁽⁷⁾. 一方, 鋼と水素を含むカーボン膜: a-C:H の組合わせでは, 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

図10 DLC と油剤組合せによる摩擦特性.

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.

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. 特に潤滑油中での低摩擦性能の実現が期待されており, DLC 膜への金属元素の添加による改良やオイル添加剤の改良が試みられている. 今後の機械摺動部品のフリクション低減の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・超低フリクションコーティングへと移行して行くものと思われる.

文 献

- (1) 自動車技術会: 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: エンジンフリクション低減表面処理技術の動向, 自動車技術, **53**, 9(1999), 65.
- (3) 松村弘敦, 志村 眞, 宇敷孝幸, 高橋哲哉, 石塚 隆: 日産技報, **35**(1994), 37.
- (4) 加藤博文, 高橋安雄: ユニシア技報, **5**(1991-12), 25.
- (5) X. Qiu, A. Elmoursi, G. Malaczynski, A. Hamdi, P. Wilbur and B. Buchholtz: A Diamond-Like Carbon Coating for Aluminum Alloy Piston/Bore Application, SAE Paper 960014.
- (6) Y. Yasuda, M. Kano *et al.*: "Research on Diamond-like Carbon Coatings for Low-Friction Valve Lifters", SAE Paper 2003-01-1101(2003).
- (7) 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講演予行集, (2004), 295.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
加納 眞

1955年生まれ. 1981年東京工業大学(院)金属工学科卒業. 現在, 日産自動車材料研究所, 工学博士. 主として自動車用エンジンおよびトランスミッション用のトライボロジー材料開発に従事. 代表的な研究に「自動車エンジン・カムフォロワー用耐摩耗材料の設計」など. 現在興味を持っているテーマは, しゅう動部品の摩擦コントロールと DLC コーティング材料. 他に日本トライボロジー学会, 自動車技術会, 日本機械学会に所属.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★