

自動車エンジン用トライボロジー 材料技術の動向

坂手 宣夫*

1. はじめに

地球規模での環境破壊や資源枯渇問題に対応するために、あらゆる分野において、環境負荷低減や省資源のための努力が続けられている。自動車産業界においても、軽量化やエンジン効率向上による燃費向上、エタノール等の非化石燃料対応や電動化による使用エネルギーの多様化等が進められている。この中のエンジン効率向上に着目すると、エンジンは非常に多くのしゅう動部を有するために、摩擦損失低減が重要な技術課題のひとつになっている。近年、この摩擦損失を低減する目的で、低摩擦表面処理を始めとする多くのトライボロジー材料技術が開発され実用に供されている。また、エンジンの小型軽量化を図る上では、しゅう動部の耐摩耗性向上が課題になることが多く、この観点でも新たな表面処理の適用が進められている。本稿では、摩擦低減を目的とした表面処理を中心に自動車エンジン用トライボロジー材料技術の動向を概説する。

2. エンジンの摩擦損失および摩擦低減の考え方

エンジンは、燃料の燃焼エネルギーを動力に変換する際に、排気損失、冷却損失、摩擦損失等の損失を伴う。Holmbergらは、乗用車が60 km/hで走行する際に、燃料の持つ化学エネルギーの11.5%が、エンジンの摩擦損失として消費されると試算している⁽¹⁾。エンジン内部には、図1に示すように、カムシャフト/フォロア、ピストンスカート・ピストンリング/シリンダボア、クランクシャフト/軸受等の主なしゅう動部がある⁽²⁾。これらの部位において発生する摩擦損失は、エンジン全体の摩擦損失の大部分を占めている(図2)⁽³⁾。

これらのしゅう動部は、損傷防止と摩擦低減の目的で、エンジンオイルにより潤滑されている。一般に、オイル潤滑下における摩擦係数は、オイル粘度、しゅう動速度および荷重のしゅう動条件により整理される。この関係を示す図は、ス

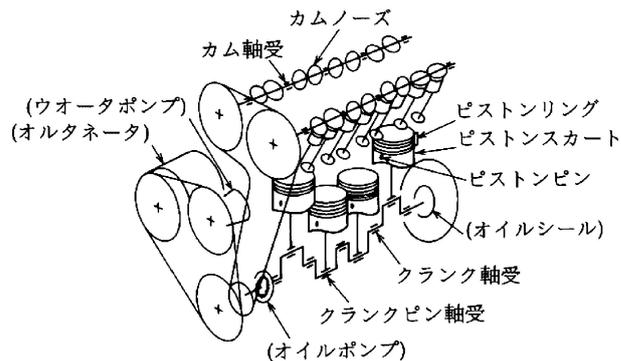


図1 エンジン内部の主なしゅう動部。

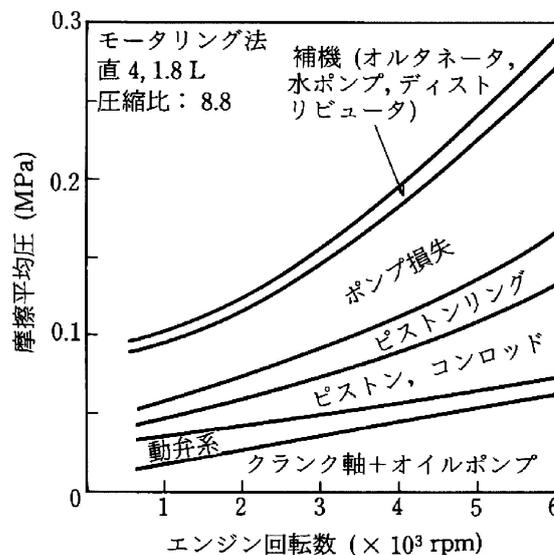


図2 ガソリンエンジン各部の摩擦損失。

トライベック線図と呼ばれ、潤滑状態は、境界潤滑、混合潤滑および流体潤滑領域に分類される(図3)。エンジン各部のしゅう動条件は、大きく異なり、全潤滑領域にわたる。摩擦を低減するための考え方は、各潤滑領域において異なる。

* マツダ株式会社技術研究所; 主幹研究員(〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地3-1)
Trend of Tribology Material in Automotive Engines; Nobuo Sakate(Technical Research Center, Mazda Motor Corporation, Aki-gun, Hiroshima)
Keywords: tribology, low friction, diamond-like carbon(DLC), automotive engine, friction loss, valve train, piston ring, cylinder bore
2014年7月22日受理[doi:10.2320/materia.53.599]

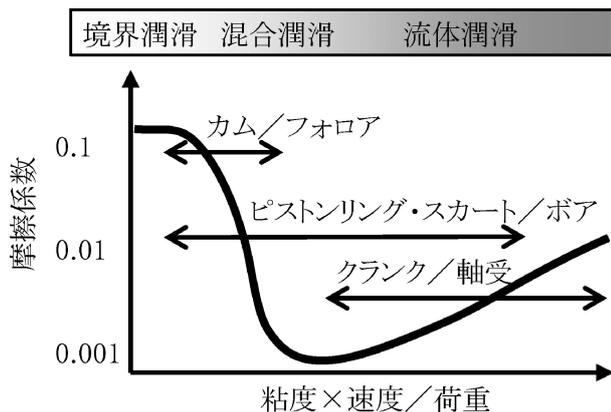


図3 ストライベック線図.

流体潤滑領域では、両部材の接触は無く、油膜を介して相対している。この領域での摩擦低減は、エンジンオイルの粘度低減や摩擦面積の縮小が有効である。混合潤滑領域では、部材表面の一部が接触した状態になる。摩擦面の平滑化や微細形状の工夫により、油膜を効果的に形成する方法が摩擦低減に有効である。境界潤滑領域では、さらに両部材の接触割合が大きくなる。潤滑性の高い表面処理の適用やエンジンオイルへの摩擦調整剤の添加が摩擦低減に有効である。

3. 動弁系

吸気・排気バルブをカム機構により開閉する動弁系の種類には、バルブリフターを用いる直打式やこの原理を応用したロッカーアーム式等があり、エンジンの設計思想により選択されている。近年では、摩擦損失低減を目的として、カムとの接触部にニードルベアリングを内蔵したローラーを配置したローラーロッカーアームの使用が増加している⁽⁴⁾。一方で、カムとのすべりを伴う直打式やロッカーアームは、コンパクト化や高回転化等の利点があり、現在も多用されている。

すべりを伴うカム/バルブリフター、カム/ロッカーアーム間の摩擦は境界潤滑から混合潤滑領域にあたり、摩擦面の平滑化が摩擦低減に有効である。摩擦をさらに減じる手法として、潤滑性の高い表面処理の適用が行われている。この表面処理には、高面圧に耐える優れた耐摩耗性も要求される。代表的なものとして、バルブリフターのカムとのしゅう動面に DLC (diamond-like carbon) コーティングを適用した事例が挙げられる。油性剤吸着効果のある水素フリーの DLC が採用された事例では、無灰系摩擦調整剤を添加したエンジンオイルとの組み合わせにより、40%の摩擦低減効果が得られている。水素フリー DLC の摩擦低減メカニズムを図4に示す⁽⁵⁾。F1 レース用エンジンにおいては、ロッカーアームとカム両部材のしゅう動面に DLC コーティングが施され、摩擦低減と耐久性向上が図られている。両部材の DLC の組み合わせを摩擦低減と焼き付き限界向上の観点で検討を行い、カム側の DLC の硬度は、ロッカーアーム側の1.3倍としている⁽⁶⁾。また、他のレース用エンジンのバルブリフターやカム

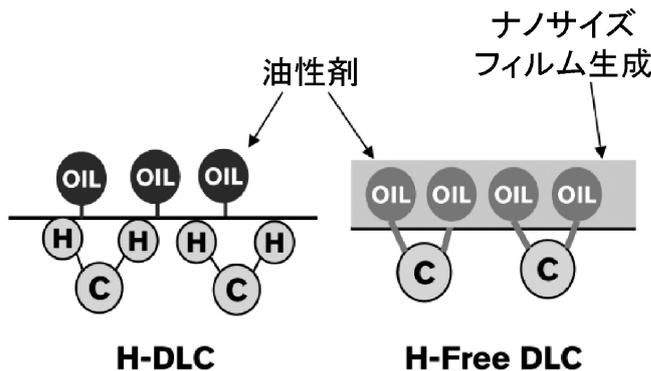


図4 水素フリー DLC の摩擦低減メカニズム.

において、DLC コーティングに直径10から 200 μm 程度の円形のピットをレーザービームにより加工したマイクロテクスチャリング技術が使用されている⁽⁷⁾。

4. ピストン系

(1) ピストンリング

乗用車エンジンのピストンには、通常、3本のピストンリングが装着されている。燃焼室を気密するためのトップリング、セカンドリングと呼ばれるコンプレッションリングおよびシリンダボアに付着した余分なオイルを掻き落とすためのオイルリングである。これらのピストンリングは、ピストンの往復運動に伴い、シリンダボアとしゅう動する。ピストンリングの表面処理は、高質クロムめっきや窒化が用いられることが多い。より高い耐摩耗性が求められるディーゼルエンジンでは、PVDによる CrN コーティングが多用されている。また、CrN コーティングは、摩耗による張力低下が少なく、初期に低い張力設定が可能になり、摩擦低減効果が得られるので、近年、ガソリンエンジンでの採用が増えている⁽⁸⁾。最近では、バルブリフターに採用されていた水素フリー DLC がピストンリングにも適用されている。図5は、ピストンリングの表面処理として、この DLC と従来の硬質クロムめっきを適用した場合のピストン/シリンダボア間の摩擦損失をエンジン試験で比較評価した結果である。図5 縦軸の FMEP は、Friction Mean Effective Pressure (摩擦損失平均有効圧力)の略であり、エンジンの摩擦損失の大きさを示す指標である。DLC 適用による 2000 rpm における摩擦損失低減率は、コンプレッションリングに適用した場合は 12%、オイルリングに適用した場合は 6%となっている⁽⁹⁾。

(2) ピストンスカート

ピストンスカート部には、シリンダボアとの摩擦低減や焼き付き防止の目的で、以前より、二硫化モリブデン等の固体潤滑剤の粒子を樹脂バインダーに配合し塗布するコーティングが用いられている。また、二硫化モリブデン粒子をショットピーニングにより、表面に埋め込む方法も使用されている。最近では、二硫化モリブデンコーティングに円形のくぼ

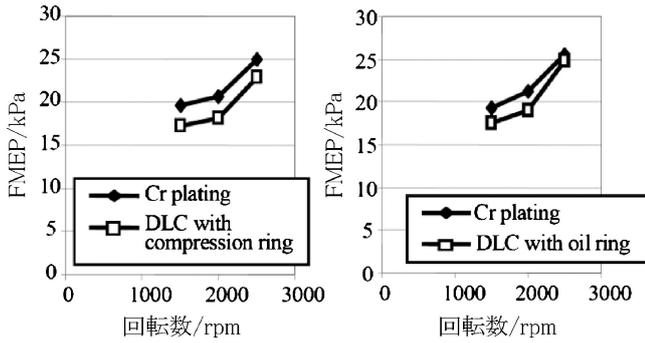


図5 DLCピストンリングの摩擦低減効果。

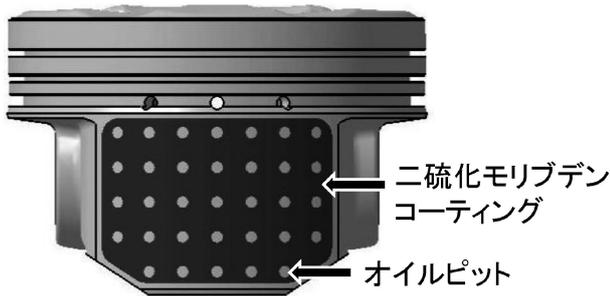


図6 ピストンスカートのパターンコーティング。

みを形成したパターンコーティングが開発され実用されている(図6)。エンジン回転1500rpmにおけるエンジンの摩擦損失は、従来のコーティングに比べて2%、ショットピーニングに比べて1%の低減が図られている⁽¹⁰⁾。

(3) シリンダボア

乗用車用エンジンのシリンダブロックは、アルミニウム合金製で、シリンダボアに鋳鉄製ライナが挿入されているものが一般的である。ピストンリングとの摩擦を低減する目的で、ボア表面の微細形状の工夫による潤滑オイル保持性の改善や油膜厚さの制御等の方法が検討されている。

ピストンは、クランク機構により往復運動するので、その速度は、上・下死点近傍では小さく、両死点中間部では大きくなる。速度の大きい領域では、ボア/ピストンリング間は流体潤滑状態になる。図7に示すディンプルテクスチャリングは、この領域での摩擦低減を狙い検討されたものである。ボア表面に50%の面積率で円形のくぼみを形成したシリンダライナとオイルリングとの摩擦を評価し、30%の摩擦力低減効果が確認されている(図8)⁽¹¹⁾。また、鋳鉄ライナを用いず、シリンダボアに溶射やめっき加工等の表面処理を施す方法も検討されている。これらの方法では、摩擦低減に加えシリンダブロックの軽量小型化メリットも得られる。これらの中で、鉄系材料のアーキ溶射適用により摩擦低減を検討した事例を示す。溶射後にホーニング加工した表面には、ピットと加工傷が形成される(図9)。ピットの面積率と表面粗

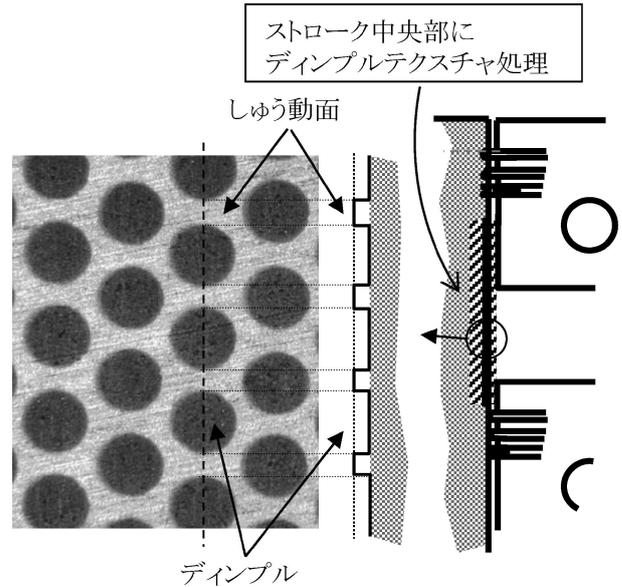


図7 シリンダボアのディンプルテクスチャリング。

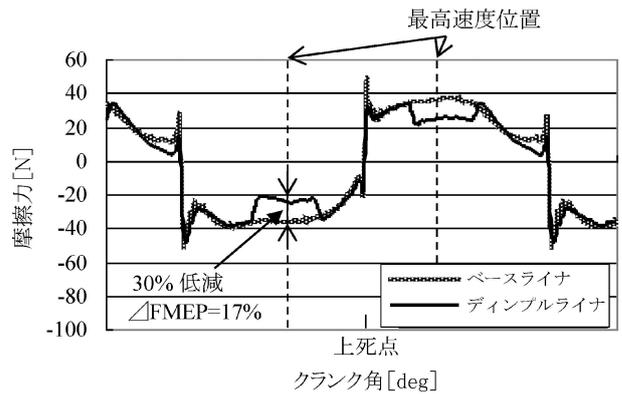


図8 ディンプルテクスチャリングの摩擦低減効果。

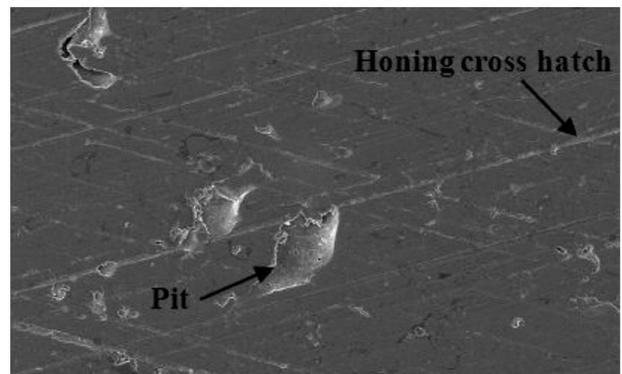
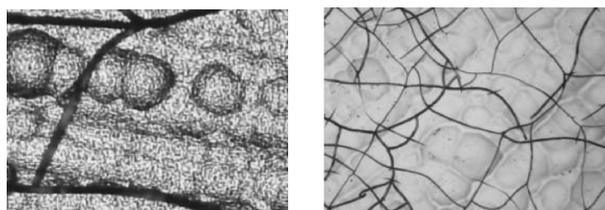


図9 アーク溶射後ホーニング加工した表面のSEM像。

さを最適化した結果、鋳鉄ライナよりも低摩擦で高い耐焼き付き性が確認されている⁽¹²⁾。



サージェント浴 触媒添加サージェント浴

図10 Cr-Mo 合金めっき表面の写真。

グ加工等の摩擦低減に有効なトライボロジー材料技術が開発され、エンジン効率の向上が図られている。しかし、これらの技術は、コストアップを伴うため、未だ、一部の自動車に採用されるに留まっている。今後も、ハイブリッド自動車を含めエンジンを搭載した自動車が主流であり続けると考えられる。従って、地球規模での省資源に対応するためには、より多くのエンジンの効率改善を進めて行く必要があるため、摩擦低減技術には、処理コスト低減や生産性向上の観点における進化も求められる。トライボロジー材料技術のさらなる発展に期待したい。

5. クランク系

クランクシャフトの軸受には、メタルと呼ばれるすべり軸受が用いられている。メタルは、鋼製の裏金の上にアルミニウムや銅製軸受合金がライニングされている。この軸受の摩擦低減には、軸の小径化やメタルの狭幅化が有効であるが、何れも負荷の上昇を伴うので、耐焼き付き性や耐摩耗性の向上が必要になる。また、近年、普及が拡大しているアイドルストップ機構やハイブリッド車では、エンジンの起動/停止回数が大幅に増加するため、この場合もメタルへの負担が増大する。

これらの課題に対応するために、メタル最表面に施すオーバレイと呼ばれる表面処理の改良が進められている。例えば、ポリアミドイミド樹脂に二硫化モリブデン粒子を分散したオーバレイが検討されている。アルミニウム合金製メタルにこのオーバレイを適用することにより、起動停止摩耗試験において、24%の摩擦係数低減と66%の摩耗量低減の効果が得られている⁽¹³⁾。

6. ローターエンジン

ロータリーエンジンの主な摩擦部位として、ロータハウジング/アペックスシール間が挙げられる。これらの部材は、レシプロエンジンにおけるシリンダボア/ピストンリングに相当する。アペックスシールは、鋳鉄製であり、しゅう動面は、電子ビームによる再溶融加工がなされチル化されている。ロータハウジングしゅう動面は、クロム-モリブデン合金めっきが施されている。この部位の摩擦低減方法として、めっきの改良が検討された事例を示す。めっき浴中に触媒として有機スルホン酸を添加することにより、めっきの結晶構造が変化し、摩擦摩耗特性が向上し、エンジン試験により約1.5%の燃費改善が確認されている(図10)⁽¹⁴⁾。

7. おわりに

以上述べたように、DLCコーティングやテクスチャリン

文献

- (1) K. Holmberg, P. Andersson and A. Erdemir: Global energy consumption due to friction in passenger cars, *Tribology International*, **47**(2012), 221-234.
- (2) 自動車技術会：自動車技術ハンドブック基礎・理論編, (1990), 55.
- (3) 自動車技術会：自動車技術ハンドブック基礎・理論編, (1990), 53.
- (4) 長谷川裕一ら：CX-5 SKYACTIV-Gのエンジン技術, *マツダ技報*, No. 30 (2012), 3-8.
- (5) 野原常靖ら：CO₂削減に貢献するエンジンフリクション低減技術の紹介, *日産技報*, No. 68 (2011), 65-68.
- (6) 伊藤直彰ら：カムシャフト, ロッカーアーム DLC コーティングの開発, *Honda R&D Technical Review, F1 Special* (2009), 250-252.
- (7) 山本健二：エンジン部品におけるマイクロテクスチャー DLC の適用, *MECHANICAL SURFACE TECH*, No. 6 (2014), 24-25.
- (8) 原科謙市：ピストンリングとシリンダライナのフリクション低減技術, *トライボロジスト*, **57**, No. 9 (2012), 51-56.
- (9) 樋口毅ら：ピストンリングへの水素フリー DLC 膜の適用開発, *自動車技術会学術講演会前刷集*, No. 154-11 (2011), 13-16.
- (10) 田岸龍太郎ら：新型 FIT 用 SOHCi-VTEC エンジンの開発, *Honda R&D Technical Review*, **20**, No. 1 (2008), 6-13.
- (11) 浦辺満ら：ピストンリング・ボア間の摩擦低減を狙ったシリンダボア用ディンプル状テクスチャ処理によるエンジンの燃費向上, *自動車技術会学術講演会前刷集*, No. 157-13 (2013), 9-12.
- (12) 堀田滋ら：アーク溶射シリンダボア材の摩擦摩耗解析, *自動車技術会学術講演会前刷集*, No. 155-11 (2011), 1-3.
- (13) 壁谷泰典ら：固体潤滑オーバレイ付きすべり軸受の耐摩耗性と低フリクション性能, *自動車技術会学術講演会前刷集*, No. 29-11 (2011), 17-20.
- (14) 谷田芳夫ら：エンジン摺動部材の低摩擦表面処理の開発, *マツダ技報*, No. 27 (2009), 148-152.



坂手宣夫

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1986年 京都大学工学部冶金学科卒業
同年 マツダ株式会社に入社
ロータリーエンジンのハウジング, ガスシール部材およびレシプロエンジンの動弁系の材料/表面処理の研究開発に従事
2011年8月-現職. エンジン, トランスミッション, ボディ, シャシの幅広い材料技術分野で活動中.
当会の他に自動車技術会に所属.
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★