

エンジン用水素フリーDLC バルブリフター

日産自動車株式会社
取締役社長 カルロス ゴーン

株式会社 リケン
代表取締役社長 小泉 年永

株式会社 日立製作所
代表執行役 執行役社長 古川 一夫

日本アイ・ティ・エフ株式会社
代表取締役社長 小林 司

日産自動車株式会社

株式会社 リケン 主任技師

株式会社 日立製作所 技師

日本アイ・ティ・エフ株式会社 取締役 前橋工場長

神奈川県産業技術センター

馬 淵 豊

諸 貫 正 樹

石 井 真 一

大 原 久 典

加 納 眞

はじめに

自動車用エンジンにおける機械損失の低減は、燃費向上に直結することからCO₂排出量の軽減に有効である。特にバルブを直接カムで駆動する直動動弁系型のエンジンにおいてはその比率が20%から30%と大きく、ここでの損失の大半を占めるカム/バルブリフター間のフリクション低減は燃費向上に大きく貢献する。

開発のねらい

カム/バルブリフター間の潤滑状態は、その接触部分の圧力の大きさから境界～混合潤滑域となるため、これまで接触部における真実接触面積を減らすためのカム・リフターの平滑化や、

カム側の表面粗さを向上するためのリフターへの硬質薄膜処理 (CrN, TiN) が採用されてきた。また、粗さと独立してフリクションを低減する手法として、二硫化モリブデン (MoS₂) を配合した表面処理や、エンジン油添加剤としてモリブデン系摩擦調整剤 (MoDTC) の適用も行われている。そして今回、更なる大幅なフリクション低減のため、平滑さと硬質表面処理の硬さ、更に固体潤滑性を同時に備えたダイヤモンドライクカーボン膜 (DLC膜) のバルブリフターへの適用開発に着手した (図1)。

装置品の概要

本開発品は水素を含まないDLC膜をアーク式イオンプレーティング法にてバルブリフター冠面に成膜したものである (図2)。原料に黒鉛を

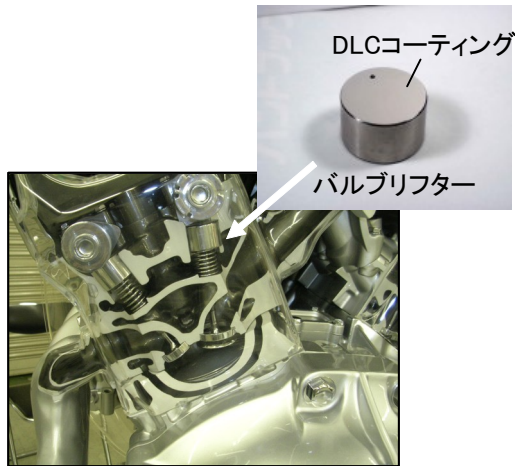


図1 エンジンシリンダーヘッドの断面写真

用いて真空炉内で蒸着処理するため膜内に水素を含まない。また膜厚は約 $1\mu\text{m}$ 程度と非常に薄い、硬さは約 70GPa （ビッカース硬さ換算で約 5000HV ）とダイヤモンドに次ぐ硬さのため、 13万km 走行後の車両においてもほとんど摩耗は生じず、寿命に対し十分な厚みである。

また本開発品と同時採用でDLC対応5W30GF4省燃費油を採用した。従来エンジン油の省燃費化としてMoDTCが広く用いられているが、開発油はDLCとの低摩擦係数（低 μ ）化の相乗効果を得るために、最適な油性剤を選定することでMoDTCの代替とすることができた。MoDTCは触媒被毒の一要因でもあることから、本開発油は将来規制に合致した一つの方向性と言える。

技術上の特徴

今回開発した水素フリーDLCバルブリフターの技術的な特徴として、下記3点が挙げられる。

- [1] 水素を含まないDLC膜
- [2] 潤滑油中の油性剤が膜表面に吸着することで著しい低摩擦係数（低 μ ）効果を得るメカニズム
- [3] 700MPa の高面圧下に耐える硬質薄膜

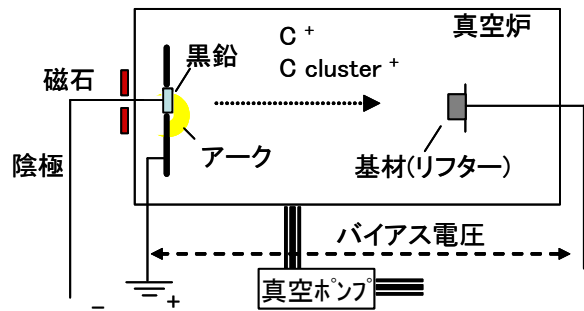


図2 水素フリーDLC膜の成膜装置例（アーク式イオンプレーティング法）

[1] 水素を含まないDLC膜（水素フリーDLC膜）

ここ数年、摩擦/摩耗特性に優れたダイヤモンドライクカーボン（DLC）膜の開発が活発化しており、プラズマCVD法やスパッタリング法による、主に膜内に水素を含むDLC膜の適用開発が主流となっている。一方日産は、90年代後半からDLC膜の開発に着手し、潤滑下においてDLC膜中の水素量と潤滑下の摩擦係数との間に相関関係を見出し、従来の水素含有タイプの膜では必ずしも低摩擦特性の得られないことを突き止め、また水素フリー化により大幅な摩擦低減効果の得られることを明らかにした（図3実線）。

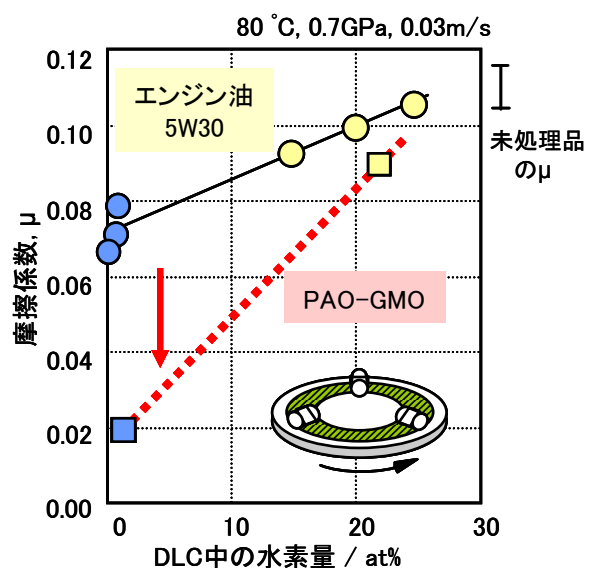


図3 水素含有量の異なるDLC膜の潤滑下におけるPin/Disk試験での摩擦係数

[2] 低摩擦係数（低 μ ）効果を得るメカニズム

水素フリーDLC膜による摩擦係数を低減するメカニズムとして、膜を構成する炭素原子の末端が、水素に終端されることなく潤滑油中の油性剤を吸着し、真実接触を抑えることで低摩擦化する機構を立案した(図4、図5)。これを裏付ける結果として、油性剤と同様に極性基を持つ水の接触角は、水素量が少ないほど小さいことを明らかにした(図6)。

更に、より直接的な検証方法として表面分析の観点から、同位体元素を含む油性剤を用いた摩擦試験とTOF-SIMSの分析結果の比較から、末端にOH基をもつ油性剤構成分子がDLC表面に吸着していることを、またシュミレーション上においても炭素原子の末端（ダングリングボンド）にOH基の配位することを、それぞれ検証してきた。

これらのメカニズム解析の検証として、他の添加剤との競争吸着を抑えるために、基油PAOに油性剤GMOのみ配合した試作油にてフリクションを評価した結果を図3中の点線で示す。水素量の少ないDLC膜で飛躍的なフリクション低減効果が確認され、低フリクションメカニズムの検証ができた。以上の解析結果より、DLC膜の開発のみならず、DLCに適した油性添加剤を含む潤滑油（DLC対応5W30GF4省燃費エンジン油）の開発に着手した。

[3] 高面圧下に耐えるDLC膜

本開発で得た信頼性に関する技術的なポイントとして以下の2点が挙げられる。

① 一般的に硬さが硬いほど内部応力が高いため、高硬度な水素フリーDLC膜は膜/基材間の密着力の点で水素含有DLC膜に比べ不利となる。しかしながら最適な基材研磨方法を選定するこ

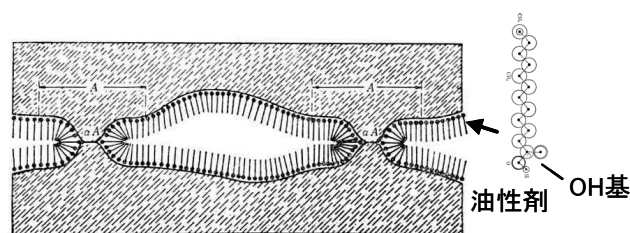


図4 Bowden-Taborらによる潤滑下での摩擦部位における油性剤の働きを示す模式図

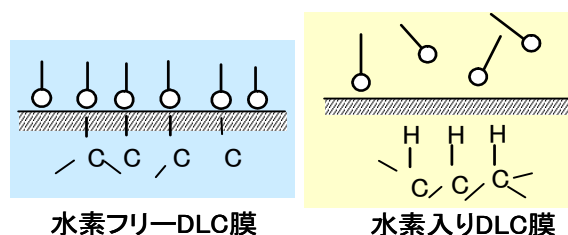


図5 水素フリーDLC膜、水素含有DLC膜の表面における吸着状態を示したモデル図

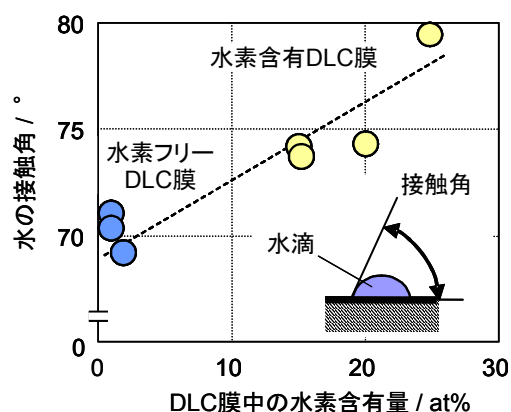


図6 水素量の異なるDLC膜の水の接触角

と、基材表面の徹底的な清浄化を行うこととで、リフターとして十分な界面の密着力を得た。

② 水素フリーDLC膜を得るアーク式イオンプレーティング法では、成膜面にドロップレットと呼ばれる硬質なパーティクルが生成され、摺動の際に応力集中源となり膜の損傷に繋がる場合がある。そこでパーティクルのサイズと膜の割れ発生の関係を明らかにし、仕様範囲（膜厚、パーティクルサイズ）を明確にすることで、耐久信頼性の十分な膜を得た。

実用上の効果

図7に示すように、水素フリーDLC膜をコーティングしたバルブリフターにより、現在市場実績がある中で最もフリクションの低い仕様であるCrN膜に対し、2000rpmで約26%、DLC対応省燃費油との組み合わせでは-32%もの大幅な動弁フリクション低減効果が得られた。それぞれの車両での燃費効果に換算すると、水素フリーDLCバルブリフターのみで燃費約1%の向上、DLC対応省燃費油との組み合わせで約2%の燃費向上が得られた（DLC対応省燃費油の燃費向上効果は動弁系以外の部位の効果も含む）。

DLCバルブリフターは2004年から少量生産、車載を開始し、これまでに日本国内で約10万台に車載され、燃費の向上により燃料消費量で約360kLの削減、CO₂排出量で約840 tonの削減につながった。更に2006年から車載数の拡大と地域の拡大（国内、北米→欧州）、またDLC対応油との組み合わせ採用により効果を拡大することで、2006末時点で毎年約1万ton、2009時点で毎年約3万tonのCO₂量削減の拡大につながる見込みである（新車販売による拡大分のみを計算）。

工業所有権の状況

本開発品に関する登録特許は現在約30件で、主な基本特許3件を下記に示す。

- ① 日本国特許第3555844号
 名称：摺動部材およびその製造方法
 概要：低 μ 化のためDLC膜内の水素量を規定
- ② 日本国特許第3555891号
 名称：低摩擦摺動部材及びこれに用いる潤滑油組成物
 概要：低 μ 化のためにDLCと油性剤（エステル等）の組み合わせを規定
- ③ 日本国特許第3587379号
 名称：自動車動弁系シム及びリフター、並びにこれらとカムシャフトとの組合せ

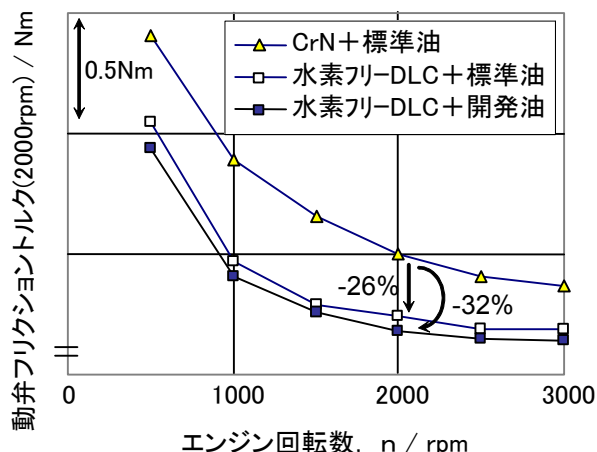


図7 シリンダヘッドモータリング試験での評価結果

概要：信頼性向上のためにDLC膜上のパーティクルサイズ上限を膜厚と関連して規定

むすび

自動車のCO₂排出低減、及びエンジン燃費向上のため、水素フリーDLCバルブリフター及びDLC対応GF4省燃費エンジン油を開発し、約2%の燃費向上効果を得た。今後順次採用車種を拡大していくと共に、DLC対応油の油性剤吸着効果を高めた仕様の改善を進める（図8）。更にピストンリングやピストンピン等の他部品への展開を進め、更なる燃費向上とCO₂排出量の削減に貢献していく。

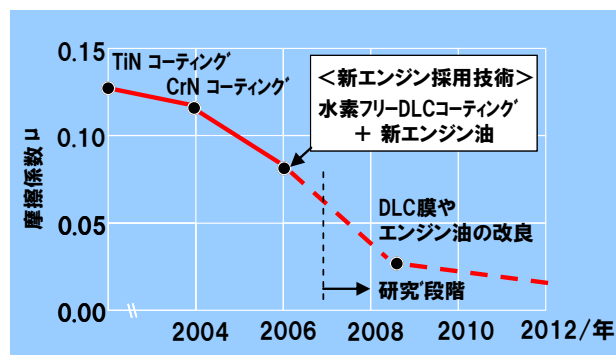


図8 DLC膜と潤滑油組合せの低 μ 化ロードマップ