

連載記事

水素フリーDLC膜の 自動車用エンジンバルブリフターへの適用

Development of Hydrogen-Free DLC Coated Valve-Lifters for Automotive Engine

保田芳輝

Yoshiteru Yasuda

日産自動車(株) 技術開発本部
材料技術部 主担

1 はじめに

近年におけるCO₂ガス排出による地球温暖化をはじめとする地球環境への関心の高まりと、高騰し続ける石油資源の消費抑制に応えるため、自動車用への燃費向上の要求はますます高まっている。自動車の燃費向上にはパワートレインの効率向上、車両軽量化や走行抵抗の低減等の方策があるが、パワートレインでは直噴化やハイブリットシステム等によりエネルギー効率が飛躍的に高められたシステムが登場した。これらの効率向上の主要因はポンピング損失低減やリーンバーン燃焼領域拡大などであるが、今後さらに極限までパワートレインの効率を向上させるには、これらシステムの改良や燃料電池などの新しいパワーソースシステムの開発に加えて、表面処理技術の観点から見るとパワートレインの摩擦損失(フリクションロス)の低減と小型・軽量化のための耐摩耗性および表面疲労強度の向上が重要な課題と考えられる。ここでは自動車用エンジン部品のフリクション低減技術を取り上げ、表面処理技術が自動車性能向上に寄与する事例として新型V6、3リッターガソリンエンジンに搭載されたダイヤモンド(DLC)膜バルブリフターについて紹介する^{1,2)}。

2 エンジンのフリクション低減技術

自動車用エンジンには図1に示すように様々な形態の摺動部品があり、効率向上のためのフリクション低減を実現するための技術開発が継続的になされている。図2はそれらエンジン主要摺動部でのフリクションロスや補機類の仕事をモータリング法*によって求めた結果である。図2に示すように中・高速回転域では摩擦損失のうちピストンリング、ピスト

ン、コンロッドでのフリクションが全体に占める割合が高く、低速回転域では動弁系(カムフォロワー等)でのフリクションの占める割合が大きくなっている。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

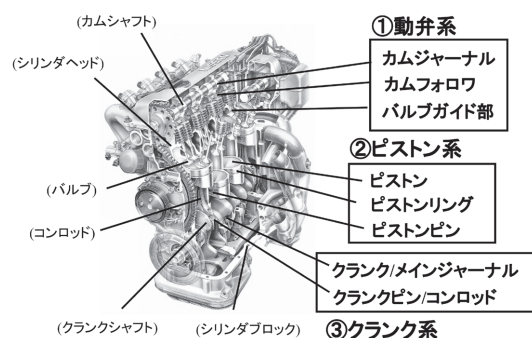


図1 エンジンの主要摺動部位

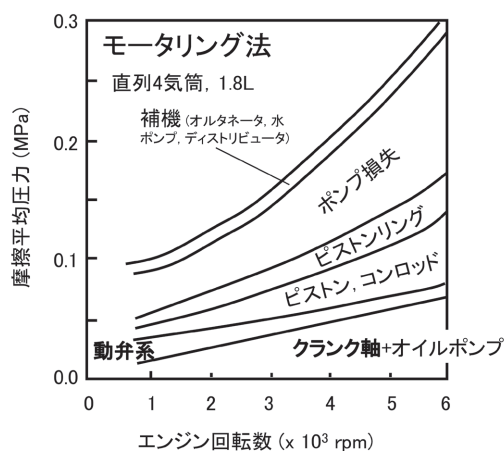


図2 ガソリンエンジンの各部品ごとの摩擦損失³⁾

*エンジンをモーターで回転させ、そのモータートルクから摩擦力を測定する方法。部品を1つ1つ外してゆき、その部品の摩擦力を算出する。

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⁾。

エンジンの燃費向上と爽快な吹け上がりを実現するには運動部品の軽量化に加えて、上述した各部位でのフリクションを低減する必要がある、その方策として大まかにいうと(1)摩擦係数の低減、(2)摺動部面積の低減、(3)粘性抵抗低減のためのオイルの低粘度化、(4)摩擦部の荷重負荷の低減、(5)回転軸の細軸化、(6)滑り摩擦から転がり摩擦への転換等が図られている。

表1に最近のエンジンに適用あるいは検討されているフリクション低減技術例を示す。表1のいくつかの技術が採用された1.5リッタークラスのエンジンでは従来に比べ、図3に示すように仕様回転数全域で20～30%のエンジンフリクションロスの低減が実現されている。

エンジン部品に適用される表面処理は、前述した(2)～(6)の方策達成のための部品の軽量化、摺動面積の低減などを実現する耐摩耗性向上を狙いとするものもあるが、直接的にフ

リクション低減に寄与できる(1)の摩擦係数の低減を狙いとした表面処理技術に対する期待が大きい。次章では新しい表面処理として期待されているダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜の適用事例として新型V6、3リッターガソリンエンジンに搭載されたDLC膜バルブリフターについて紹介する。

3 エンジンバルブリフター

バルブリフターは自動車用ガソリンエンジンの直動型動弁機構において、吸気／排気バルブをカムと連動して開閉させるための伝達機構部品である(図4)。バルブリフターはカムシャフトと摺動するが、この部位における最大面圧は約700MPaにも達し、メタルコンタクトが生じている境界潤滑下で使用されているため、エンジンの中で最も過酷な摺動部位の一つである。最近では、バルブリフター冠面を平滑化した上で、窒化クロム(CrN)等の硬質薄膜をコーティングしたバルブリフターが採用されている。

4 ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜

DLC膜は非晶質の炭素薄膜で、めっき等の表面処理や熱処理等の表面硬化処理に比べて高い表面硬度が得られ、さらには被膜自体に固体潤滑性を有することから、優れた耐摩耗性と低摩擦特性を兼ね備えた新しい表面処理として金型や機械部品用途に技術開発が進められている。エンジン動弁系のカムシャフト／バルブリフター摺動部においても、上述したようにフリクション低減のニーズが高く、DLC膜のエンジンバルブリフターへの適用が期待されていた。次節ではエンジンオイル潤滑下でのDLC膜の摩擦特性と、バルブリフター適用において大きな課題となったDLC膜剥離強度向上について述べる。

表1 エンジンフリクション低減技術

① 動弁系 ② ビストン系 ③ クランク系		
摩擦損失低減の方策	部品・部位	適用技術事例
(1) 摩擦係数の低減 潤滑状態改善	① カムシャフト	カム面のマイクロ仕上げ加工、チェーン背面の平滑化
	バルブリフター	CrN, DLC硬質薄膜コーティング処理
	② ビストン	ビストンスカートのディンプル加工
(1) 摩擦係数の低減 表面処理	③ クランクシャフト	クランク軸のマイクロ表面加工
	② ビストン	ビストンスカートへの二硫化モリブデンコート
	— エンジンオイル	オイル添加剤MoDTCの添加
(2) 摺動面積の低減	② ビストン スカート面積低減	耐高面圧表面処理、表面プロファイル最適化
	③ クランク 軸受幅狭化	耐高面圧軸受材料
(3) 粘性抵抗の低減	— エンジンオイル	低粘度化 (5W-30 → 5W-20 → 0W-20)
(4) 摩擦部の負荷 荷重の低減	リフター 軽量化	軽量リフター
	バルブ 軽量化	Ti合金製バルブ
	スプリング 軽量化	低荷重バルブスプリングの採用
	② ビストンリング 低張力	高強度スプリング
	② ビストン 軽量化	低張力リング 真円ボア加工 CrNコーティング
	③ コンロッド 軽量化	軽量化ピストン
(5) 摺動半径の縮小	③ クランク 細軸化	高強度コンロッド, クラッキングコンロッド
	③ クランク 細軸化	耐高面圧軸受材料, クランク剛性UP, オイルポンプ
(6) 滑りから転がり 摩擦への転換	① ロッカーアーム	転がりフォロワ(ニードルベリング)の適用

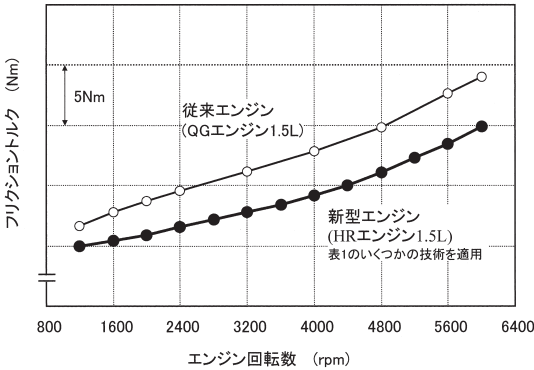


図3 エンジンモーターリングフリクション測定結果

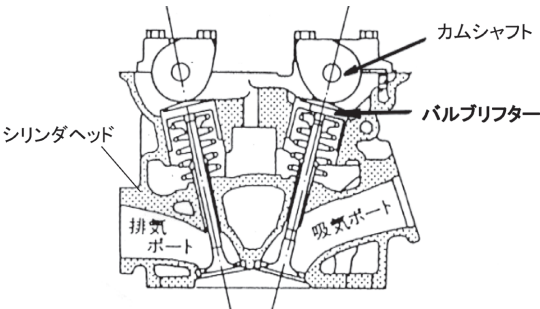


図4 バルブリフター

4.1 エンジンオイル潤滑下での DLC 膜の摩擦特性

DLC 膜の製法にはプラズマ CVD 法、スパッタリング法やイオンガン方式など様々な製造手法があり、また製造条件によってその特性が変化するため、まずどのような製造手法、製造条件の DLC 膜がエンジンバルブリフターに最適か選定する必要がある。部品 (バルブリフター) 側からの要求は平滑でかつ高硬度であることとエンジン油潤滑下で低摩擦特性が発揮されることである。DLC 膜においてはこれまでの TiN や CrN 膜のような表面処理同様にエンジン油およびそのオイル添加剤の摩擦表面における作用が発揮されるかがポイントであると考えられる。

バルブリフター用表面処理の摩擦特性を評価する方法として、図 5 に示すようなピンオンディスク試験によるエンジン油中での摺動試験を実施した。固定された軸受鋼ピンに、回転するコーティングを施したディスクを押し付けるタイプの試験機でカムシャフトとバルブリフターの同様の接触状態 (線接触) と面圧 (700MPa) となるような摺動条件で評価した。評価したコーティングの成膜方法と性質を表 2 に示す。図 6 に無潤滑下での摩擦係数の測定結果を示すが、従来のリン酸マンガン塩皮膜処理、TiN 膜やコーティング無しに比べ、DLC 膜は低い摩擦係数を示しており、MoS₂ コーティング同様に固体潤滑性を有している。

図 7 にエンジンオイル潤滑下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

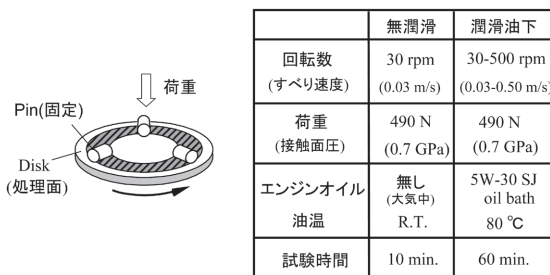


図 5 ピンオンディスク摩擦試験の概要と試験条件

表 2 コーティング試験片

コーティング	成膜方法	膜厚 (μm)	硬度 (Hv) 10g	表面粗さ Ra (μm)
コーティング無し	-	-	720-780	0.03 - 0.05
リン酸塩皮膜	化成処理	10.0 - 15.0	-	0.10 - 0.35
TiN 膜	アーキオン プレーティング	1.0 - 2.0	950 - 1500	0.02 - 0.05
CrN 膜	アーキオン プレーティング	2.0 - 3.0	1300 - 1500	0.05 - 0.07
CVD-DLC膜	プラズマCVD他	1.0 - 2.0	1500 - 1800	0.02 - 0.05
PVD-DLC膜	アーキオン プレーティング	0.8 - 1.2	1800 - 2200	0.04 - 0.06
MoS ₂ 膜	スプレー後焼成	7.0 - 15.0	-	0.40 - 1.00

揮している。二硫化モリブデンコーティングは、固体潤滑性を示し低い摩擦係数を示している。数種類の CVD-DLC 膜を評価したが、図に示すように潤滑下では CVD-DLC 膜については期待した低摩擦の効果が得られず、TiN 膜、CrN 膜と同様の摩擦係数であった。これに対して PVD-DLC 膜 (アーキオンプレーティング法) は最も低い摩擦係数を示し、他の硬質膜と比較すると摩擦係数が約 40% 低減していることがわかった。無潤滑下では同様の摩擦特性であった CVD-DLC 膜と PVD-DLC 膜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 (図 8)。CVD-DLC 膜と PVD-DLC 膜

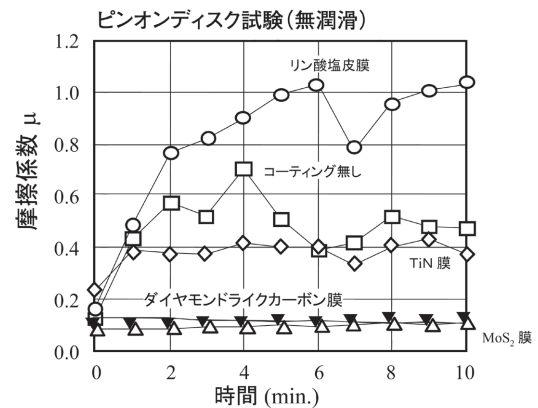


図 6 各コーティングの摩擦係数測定結果 (無潤滑下)

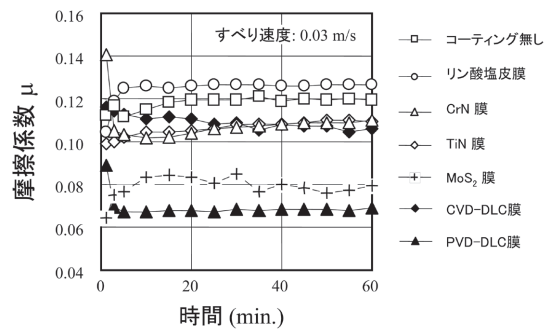


図 7 各コーティングの摩擦係数測定結果 (エンジンオイル潤滑)

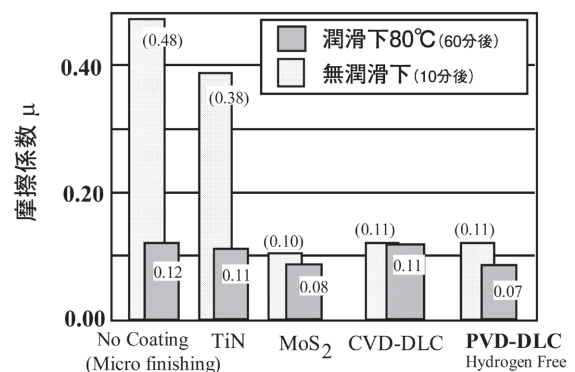


図 8 各コーティング処理の比較

の違いは、CVD-DLC 膜がメタンや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有するカーボン膜であるのに対して、PVD-DLC 膜はアーク放電によりカーボントーゲットをイオン化し基板に堆積させるコーティング法であるため水素をほとんど含有していないことである。プラズマ CVD 法で作製した DLC 膜は水素含有量が 15～30at%であり、アークイオンプレーティング法で作製した PVD-DLC 膜の水素含有量は 1at%以下であった。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、DLC 膜中の水素含有量が少ないほど摩擦係数が減少する傾向を示し、水素をほとんど含まない PVD-DLC 膜が最も低い摩擦係数を示すことがわかった⁴⁾。

エンジンオイル中には酸化安定性、耐摩耗性、清浄性や低摩擦性能などを得るために様々な添加剤が添加されており、表面に吸着あるいは反応し摩擦面に作用するように処方されている。水素を含む CVD-DLC 膜では C-H 結合が安定であるため潤滑油に含まれる摩擦を低減する添加剤の摩擦表面への吸着が生じにくく、水素を含まない PVD-DLC 膜は表面エネルギーが高いため、添加剤の摩擦表面への吸着が多く生じて低摩擦が実現されていると考えられる (図 10)。表 3 に添加剤の影響を明らかにするために、エンジンオイルと同粘度の

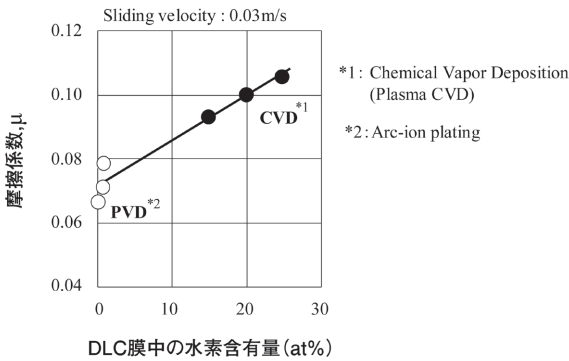


図 9 水素含有量と摩擦係数の関係

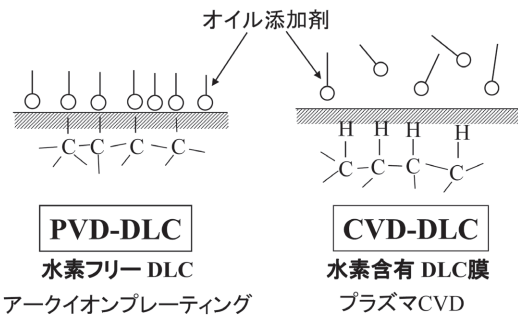


図 10 低摩擦化のメカニズム推定

合成油ポリアルファオレフィン (PAO) に摩擦を低減する添加剤 (油性剤) であるエステル系添加剤のみを加えたオイル潤滑下での DLC 膜の摩擦係数測定結果を示す。PVD-DLC 膜は明らかに添加剤の摩擦係数に対する影響が大きく、低い摩擦係数を示していることがわかる。逆に水素を含む CVD-DLC 膜ではエステル系添加剤の影響をほとんど受けず、上述したオイル添加剤の摩擦表面への吸着性の差によるものと考えられる。このことは水素をほとんど含まない DLC 膜に対して潤滑油添加剤を最適化することでさらなるフリクション低減の効果を得ることができることを示唆している⁵⁾。

次にエンジンモータリング試験装置を用いて、実際のエンジンカムシャフト、バルブリフター間のフリクショントルク測定を実施した。図 11 にその結果を示す。従来バルブリフターの表面処理に使用されている CrN 膜に比べて水素フリー DLC 膜とすることで、エンジン回転数 2000rpm の条件で約 30%の動弁系フリクショントルクが低減でき、さらに添加剤を最適化した省燃費油との組合せでさらなるフリクション低減効果を得ることができた。

4.2 水素フリー DLC 膜の密着強度

摩擦特性評価結果から選定したアーク式イオンプレーティング法で作製した PVD-DLC 膜は、プラズマ CVD 法により作成した DLC 膜よりも、一般的に硬くて脆く、膜内部応力も高く、バルブリフター使用条件下では密着強度に課題があ

表 3 潤滑油添加剤の影響

潤滑油	PAO	PAO +エステル
DLC		
PVD-DLC膜	μ=0.092	μ=0.062
CVD-DLC膜	μ=0.110	μ=0.109

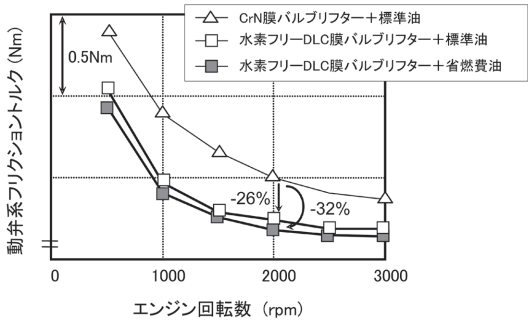


図 11 エンジンモータリング試験でのフリクション評価結果

り、評価する中で膜の仕様によってはカムシャフトとの摺動によって図 12 に示すような剥離が発生することがあった。剥離状況の観察結果から DLC 膜の表面の割れが発端となり、脱落した薄片を引きずることで薄膜の割れが筋状に伝播し、マクロな膜剥離に至ったと推測される。図 13 に示すようにアーク式イオンプレーティング法による DLC 膜では表面にパーティクルが生成するため、摺動時に表面パーティクルが押し込まれることで摺動部の面圧が局所的に高くなり、表面割れの発生に至ったと考えられる。押し込み深さ (= パーティクルのサイズ) と表面割れ発生の関係はダイナミック硬度計を用いてピッカース圧子を押込み荷重/変位線図から DLC 膜に割れの発生する限界変位を図 14 に示すように求めた。図よりパーティクルを起因とする表面割れはパーティクル粒径 (= 押し込み深さ) と DLC 膜厚の比が 0.2-0.4 を超える

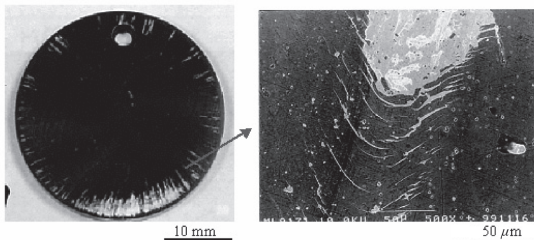


図 12 DLC 膜の剥離

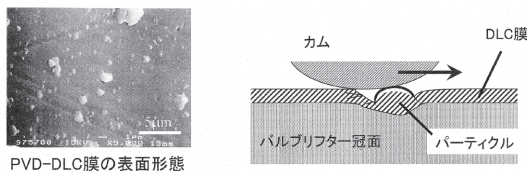


図 13 PVD-DLC 膜の剥離メカニズム

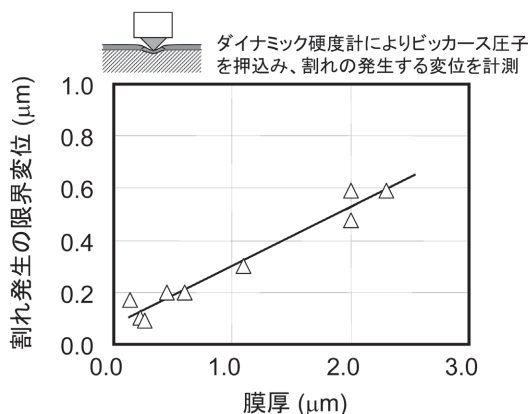


図 14 水素フリー DLC 膜の割れ発生限界変位

と生じると推定され、このメカニズムから DLC 膜の膜厚と表面粗さ (= パーティクル粒径) を制御することによって剥離の発生を抑制できることがわかった。カムシャフトとバルブリフター間の面圧を従来よりも高くした加速試験による剥離試験結果を図 15 に示す。剥離が発生したものを▲印、剥離が発生していないものを△印として図中に示すが、パーティクルを起因とする剥離は図 14 で示した DLC 膜の膜厚とパーティクル粒径 (表面粗さ) と相関があり、これらのパラメータを最適化することによって剥離の発生を抑制することができる。相手 (カムシャフト) 表面粗さと DLC 膜内応力が高くなりすぎないことを考慮すると、ハッチング範囲が、DLC 膜の膜厚と表面粗さの最適値であると考えられる⁶⁾。

5 まとめ

自動車エンジンにおける動弁システムのフリクション低減を目的として、以下の特徴を有する水素フリー DLC バルブリフターを開発した。

(1) イオンプレーティング法で作製した水素フリー DLC 膜バルブリフターは低い摩擦係数を有し、従来の CrN 膜バルブリフターに対して約 30% のフリクション低減を達成した。

(2) DLC 膜の膜厚と表面粗さを最適化することによって、バルブリフターの高面圧環境においても十分な耐剥離性を有する水素フリー DLC 膜バルブリフターを開発することができた。

DLC 膜はその優れた摩擦特性からエンジン動弁系以外にもピストンリング、ギヤなどの摺動部品への適用が検討されており、使用条件や潤滑油種によって金属や元素の添加などの様々な最適化が図られている。今後のエンジン部品の表面処理技術の一つの方向として、これまでの耐摩耗性や高強度化のための表面処理に加えて、固体潤滑性などの高い機能を有する超硬質・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考えられる。

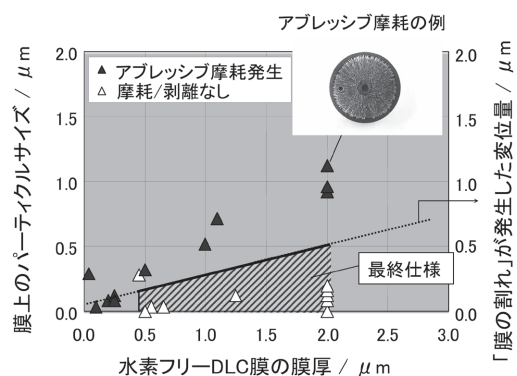


図 15 DLC 膜に割れの発生しない仕様範囲

参考文献

- 1) 馬淵豊, 浜田孝浩, 和泉博之, 保田芳輝, 加納眞: 自技会秋前刷集, 20065817, (2006) 97-06, 15.
- 2) 浜田孝浩, 馬淵豊, 加納眞, 保田芳輝, 早坂宏樹, 和泉博之, 小池智之: 自技会春前刷集, 20055119, (2005) 1-05, 9.
- 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) Y.Yasuda, M.Kano, Y.Mabuchi and S.Abou: SAE Papers 2003-01-1101, (2003)
- 5) 奥田紗知子, 出羽孝洋, 山下彰, 上野貴文, 佐川琢円, 中村清隆: 自技会秋前刷集, 20065911, (2006) 97-06, 19.
- 6) Y.Mabuchi, T.Hamada, H.Izumi, M.Kano and Y.Yasuda: SAE Papers 2007-01-1752, (2007)

(2008年6月23日受付)