

金 属

5

KINZOKU MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY

Vol.86 No.5(2016)

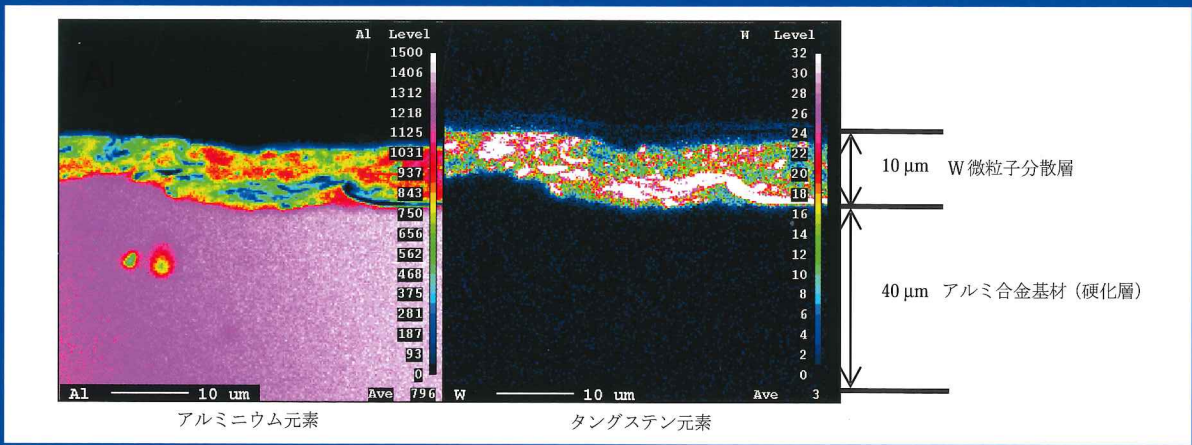
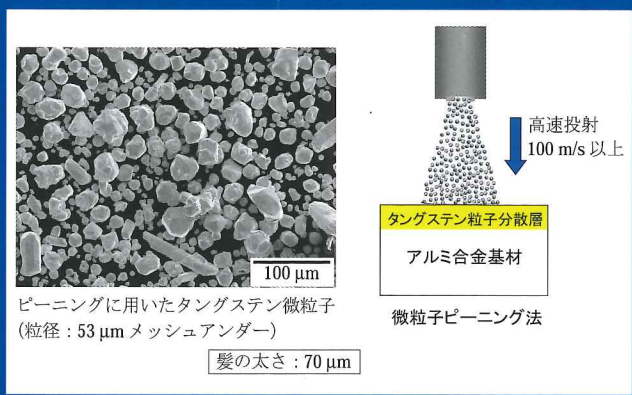
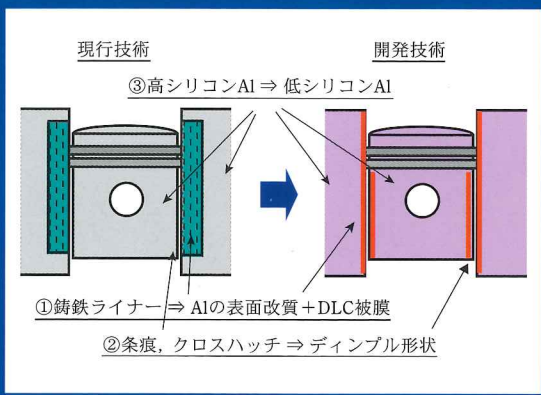
特集

ダイヤモンドライクカーボン (DLC) 最前線

日本の製鉄産業遺産の世界遺産リスト登載

1年記念(続)

トピック 超高温用熱膨張計測装置の開発



左上: 究極のピストン・シリンダ構成コンセプト, 右上: 微粒子ピーニングを用いたアルミニウム基材の改質, 下: タングステン微粒子分散状況 (本文 15 ページ参照)

DLC コーティングの エンジン摺動部品適用技術の最前線

加納 眞

自動車の摩擦低減による燃費改善を目的として、エンジン摺動部品へのDLCコーティング適用が急激に増加している。この技術進展の経緯に加え、最近開発されたガソリンエンジン用のアルミニウム合金製ピストンおよびシリンダへのDLCコーティング技術について、実データを用いて概要を紹介する。最後にこれらの適用技術の将来展望について述べる。

はじめに

最近日本で発売される乗用車においては、1リットルのガソリンで20km以上走行できる省燃費車が増加している。このような自動車の中に摩擦低減による燃費改善を目的として、エンジン摺動部品へのDLC(Diamond-like carbon)コーティング適用が急激に増加している。約20年前にドイツを主とする欧州でDLCコーティングの装置およびコーティング適用開発が実施され、種々の部品に使われ始めたものの、現在では日本が自動車エンジン摺動部への量産適用において世界のトップを走っ

ている。この大きな要因として、日本のコーティング会社、潤滑油メーカ、自動車会社の優れた研究開発技術力、特に表面処理技術とトライボロジー技術の強みが挙げられる。実データを用いてこの技術進展の経緯に加え、最近のエンジンアルミニウム製ピストンへの適用に関する研究成果を基にしたDLCコーティング適用の将来展望について報告する。

エンジン摺動部品への適用の歴史

DLCコーティングの成膜技術の歴史は浅く、図1¹⁾に示すように、AisenbergがDLCという用語を

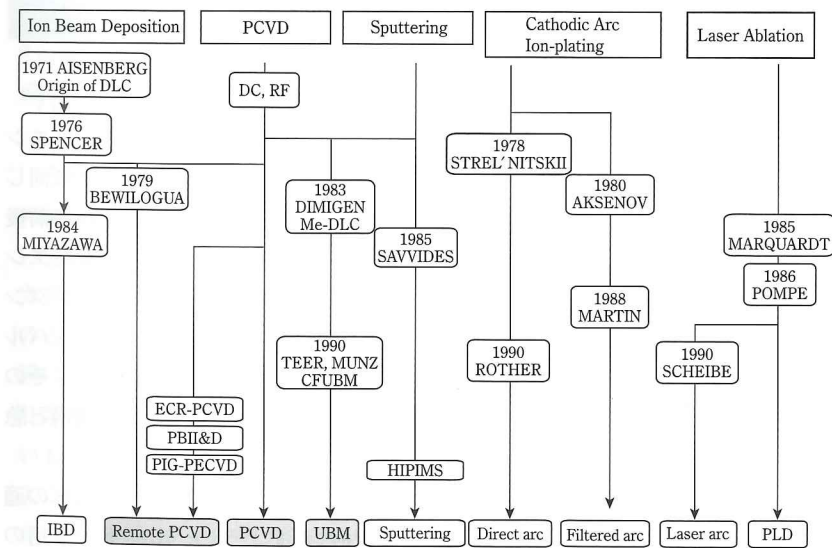


図1 DLCの製法に関する研究開発の経緯¹⁾

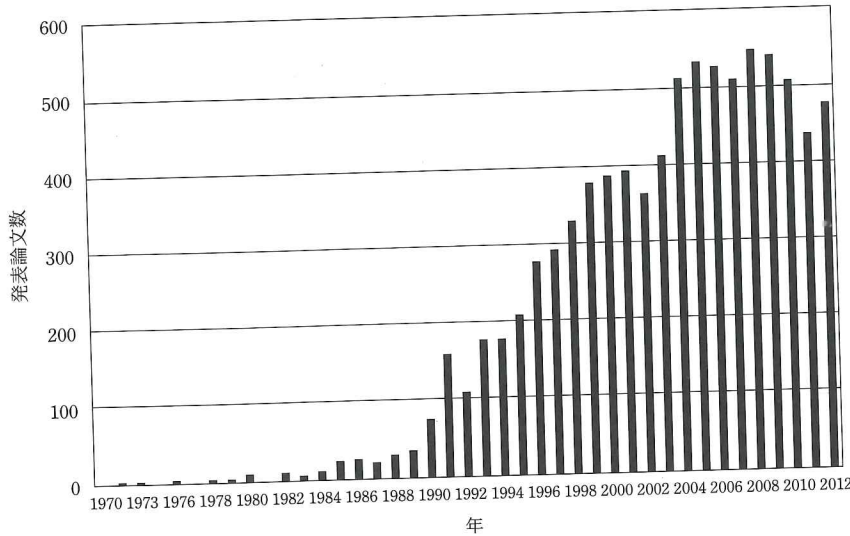


図2 DLCコーティング 発表論文数の推移²⁾

用いた1971年の論文を発表してからまだ40年強しかたっていないものの、様々な成膜装置が改善、開発が進められ、現在においては、種々の特性や特徴を有するDLC膜を得ることができる。図1のPCVD(Plasma Chemical Vapor Deposition)に大きく分類される成膜法では、原料にアセチレン等の炭化水素ガスを用いるためDLC膜は、水素を20at%前後含んだ炭素から構成され、a-C:Hと表記される。一方、Cathodic arc ion-plating depositionやLaser arc法では、原料に黒鉛を用いて真空雰囲気中で蒸着させるために、水素を実質的に含まない炭素からなり、ta-Cと表記される高密度の硬いDLC膜が形成される。

次に、最初のAisenbergらの論文から最近までの論文掲載件数の推移²⁾を、図2に示す。最初の20年程度までの論文数は少なく、主にDLC膜の製造方法の開発や形成された膜特性にかかわる発表であったが、ドイツの研究機関であるFraunhoferを中心に開発されたタングステンドープの水素化DLC(WC:a-C:H)の成膜技術、成膜装置の実用化が1990年以降に始まり、このタイミングにはほぼ同調して論文数が急増している。この技術の進歩に合わせて、DLC膜の優れた耐摩耗性、耐食性、低摩擦特性等を活かし、腕時計、シェーバ替刃、ハードディスクやF1等のレースエンジン

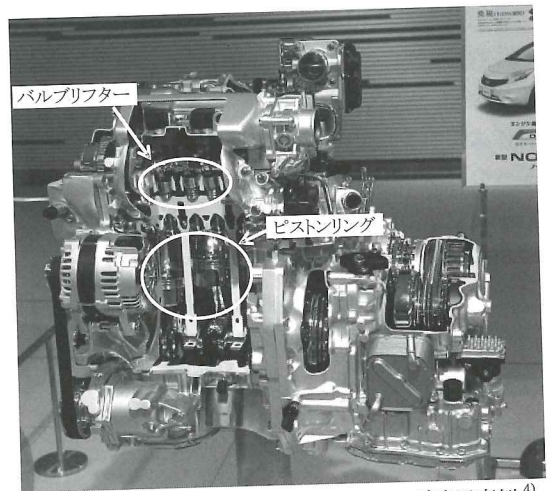


図3 エンジン部品へのDLCコーティング適用事例⁴⁾

摺動部品に適用されていった³⁾。量産自動車エンジン部品への適用開発に向けた研究も、ほぼ同じ時期に開始され、本格的な適用開発は2000年前後から始められたものと思われる。実際の量産エンジン部品への適用としては、ディーゼルエンジンの燃料ポンプ摺動部品やガソリンエンジン・バルブリフタ等への実用が2000年頃から始まり、その後は生産量のみならず、新たな部品への適用と急速に拡大し続けている。

近年、DLCコーティングのエンジン部品への適用としては、図3に示すように、小型乗用車用の

ガソリンエンジンのバルブリフターおよびピストンリングにまで実用化され、実際の燃費向上に貢献している⁴⁾。これに適用されているDLCは、エンジン油潤滑下で大きな摩擦低減が得られるta-C膜が使われている⁵⁾⁶⁾。燃費向上効果としては、エンジンの運転条件によって異なるが、2~3%程度と見積もられ改善は小さいものの、どんなガソリンエンジンにも大きな設計変更なしで適用ができることから、地球規模での燃料消費低減やそれに伴う環境改善に貢献できる技術である。この事例のように、DLCの膜質による諸特性の違いを十分把握したうえで、部品へ適用することが重要である。

以前ではこのような最新の材料技術の適用は、一般的にコストが高くなるため高級車から採用が広がるのが通例であったが、自動車会社間での燃費向上や環境改善の技術競争の激化に伴うものづくり技術の著しい改善により、それらの要求が強い小型車に、初期から量産適用されている。今やDLCコーティング技術は日本の強み技術の一つになっている。この状況から、DLCコーティング製造における品質向上やコストダウン技術も大きく進歩していることが分かる。また、摩擦条件が最も過酷な動弁系バルブリフターと熱的に厳しいピストンリングにも量産適用されたことは、今後のエンジン摺動部品のみならず種々の機械摺動部品への適用拡大が期待される。

今後のエンジン摺動部品への適用技術

今後のエンジン摺動部品へのDLCコーティングの適用として、先に紹介したピストンリングについては、国内のメーカーだけではなく海外の大手メーカーでも採用が始まっており、生産量が急増するものと思われる。注目する点は、このメーカーのDLC膜は当初水素を含んだa-C:H膜であったが⁷⁾、より摩擦低減効果が得られる実質的に水素を含まないta-C膜へ移行してきていることにある⁸⁾。このように、DLCの膜種による摩擦摩耗特性、生産性やコストパフォーマンスの違いを考慮した適用

が進んでゆくものと思われる。

次に、さらなるエンジンの摩擦低減を図るうえで、摺動部としてまだ量産適用されていないアルミニウム合金製ピストンのスカート部が魅力的となる。この部位にDLCコーティング膜を成膜することで耐久性を補償できるようになれば、シリンダと接触するピストンリングとピストンの全ての摺動部がDLC膜で凝着や焼き付きが防げるようになるため、さらなる摩擦低減に向けた大きな改善につなげられるポテンシャルを有している。DLCはアルミニウム材料との凝着性、焼き付き性に優れ、すでにアルミニウム材料の切削加工等の工具摺動部位への適用が広がっていることから、アルミニウム合金製シリンダの相手のピストン、ピストンリングへのDLC適用は最適と思われる。

そこで、微粒子ピーニング処理技術を有する株式会社WPCと共同で、都市エリア事業およびNEDO事業を活用して、究極のDLCコーティングピストン・シリンダを創出するための技術開発を実施した⁹⁾。図4に、現行汎用されているピストン・シリンダ仕様に対するコンセプトを示す。現行のガソリンエンジンの多くには、アルミ合金製のピストンとシリンダの摺動時の凝着摩耗を抑制するために、鋳鉄製の円筒状のライナーがシリンダに鋳込まれている。その構成は、シリンダの軽量化とコンパクト化、冷却性の改善および大幅な摩擦低減の阻害要因となっており、DLCコーティング適用によりライナーを取り除くことができれば著しいエンジン性能向上効果が期待できる。また、

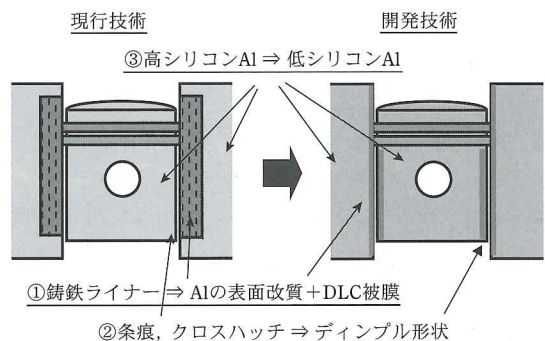


図4 究極のピストン・シリンダ構成コンセプト

コーティング膜の高い密着・耐摩耗性を得るための表面改質処理を開発すると同時に、摩擦を顕著に低減できる表面テクスチャの形成も狙った。具体的には、汎用エンジンに形成されているピストンスカート部の平行グループおよびシリンダ内周面のクロスハッチと呼ばれる交叉状のグループを廃止し、平滑状の面に微粒子ピーニングによるディンプルと鋭利な凸部を研磨したプラトー形状への変更を行った。図5に示すアルミニウム合金基材の表面改質のキー技術となる微粒子ピーニング処理においては、アルミニウム表層にDLC主成分の炭素との結びつきが強く、微粒子でも基材に打ち込まれ、均一に混合できる重い質量を有するタングステン微粒子を用いた。図6に、ピーニング処理実施後のアルミニウム合金(A5052)試験片断面のEPMAによる元素分布を示す。打ち込まれたタ

ングステン粒子が細かく破碎され、約10ミクロンの厚さで分散している様子が観察される。

次に、DLC膜のアルミニウム基材への密着・耐摩耗性の改善効果を見極めるために、ディスク状平板試験片を用い、以下の3種類の基材仕様にPCVD法によりa-C:H膜を形成した。前述のta-C膜についてはa-C:H膜に比べ、基材表面粗さの多少の増加によっても密着・耐摩耗性が著しく低下したため、まずはa-C:H膜を用いた開発だけに集中して取り組んだ。

一つ目は一般的なディスクを研磨した平滑面、二つ目は微粒子ピーニングしたままの凹凸の大きな基材、三つ目は微粒子ピーニングで形成された鋭利な凸部を研磨した基材となる。こうして得られた3仕様のDLC膜表面の粗さ曲線を図7に示す。

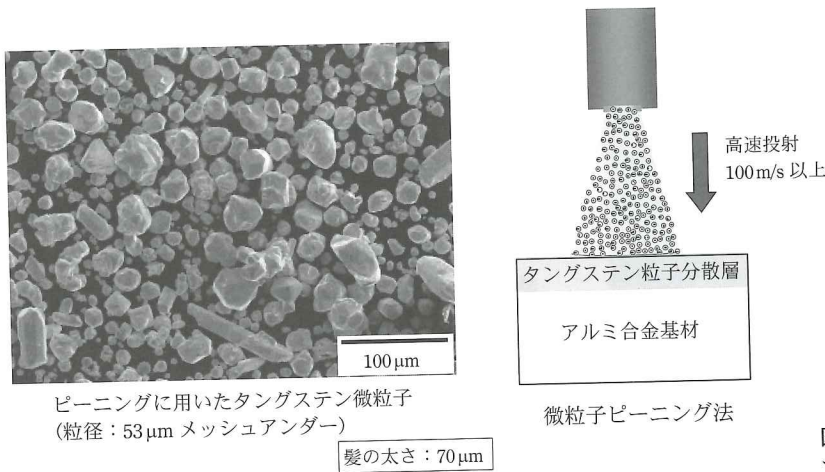


図5 微粒子ピーニングを用いたアルミニウム基材の改質

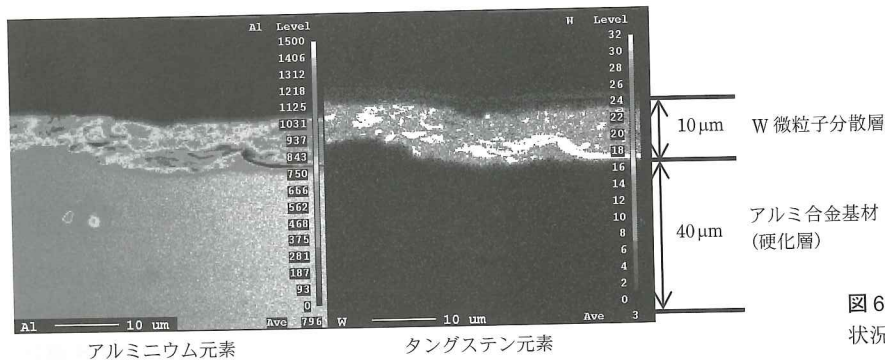


図6 タングステン微粒子分散状況

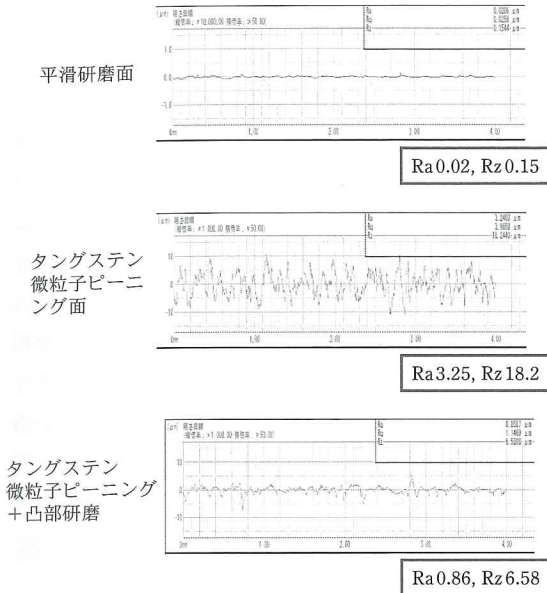


図7 3種の基材にDLCコートした表面粗さの違い

中小企業との開発においては、大企業で実施しているような実部品を用いた種々の評価試験や実機エンジンを用いた耐久試験を行うことは困難であるため、実エンジンに試作ピストンを組み込む前に何らかの耐久性を判断できる評価が必要となる。そこで汎用の単体摩擦試験機を用いて、開発したDLCコート法による耐久性向上効果を定量的に把握する試験方法の創出に取り組んだ。従来のDLC膜の密着性評価試験法である、スクラッチ試験、ロックウェル試験は、ダイヤモンド圧子を用いたひっかきもしくは座屈変形による破壊試験のため、繰り返し摺動を伴う摩耗によるフェールモードと異なるため、実際の摺動環境でのDLC膜の耐久性との相関性は低い。

そこで図8に示すように、ボールオンディスク摩擦試験機を用いて、固定したアルミナボールを回転するDLCコートした円板ディスクに押し付け、負荷荷重を連続的に増加させてゆくすべり試験法を開発した¹⁰⁾。DLC膜の密着・耐摩耗性は、荷重の増大に伴うDLC膜の破壊現象としてアコースティックエミッションAE信号を測定し、皮膜破壊後の基材露出による摩擦係数の急増時点の

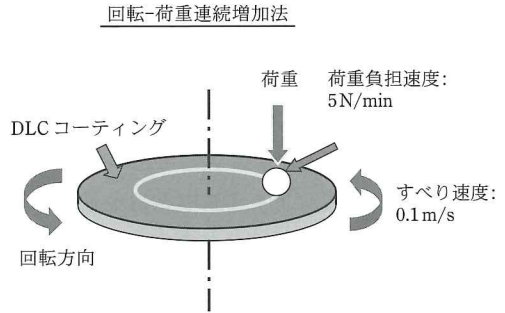


図8 密着・耐摩耗性評価試験法

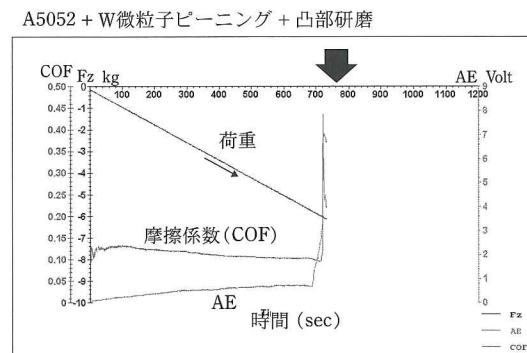
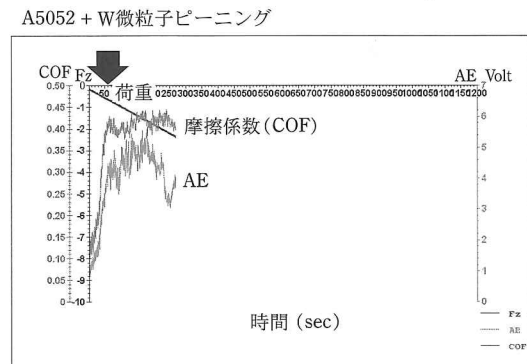
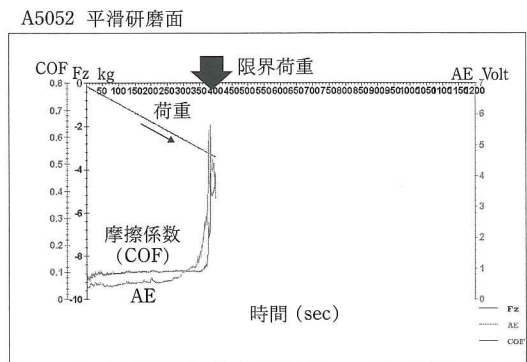


図9 連続荷重増加試験法による限界荷重測定

荷重を限界荷重として計測することにより、優劣を判断する評価方法である。

図9に示す試験結果から、A5052の平滑基材にa-C:H膜を形成した試験片では、AE信号が増加した後に摩擦係数が急増していることから、DLC膜の破壊が生じた後、アルミニウム合金基材が露出しアルミナボールに凝着したものと判断でき、その時点の荷重を限界荷重として用いることとした。タングステン微粒子ピーニングしたままの基材にDLCコーティングした基材では、限界荷重は平板よりも著しく劣る結果となった。一方、ピーニングの後、凸部を研磨してDLCコーティングした試験片では、平板よりも明らかに限界荷重が増加している結果が得られた。この開発技術の向上効果

の妥当性を確かめるために、さらにA2017基材でも同様の実験を行った。

その結果を、図10に示す。これらの結果から、タングステン微粒子をピーニングし、鋭利な凸部を研磨した後、DLCコーティングしたアルミニウム基材は、平滑面にコーティングした場合に比べ、明らかに限界荷重が向上できることが分かった。さらには、粒径5ミクロン以下の細かいタングステン微粒子を用いて、アルミニウム基材の表面粗さ増加を抑制させることにより、凸部研磨しなくても同様のDLC膜の密着・耐摩耗性向上効果が得られることを見出している。従って、簡単な工程でピストンやシリンダへのDLCコーティングが実施できる。

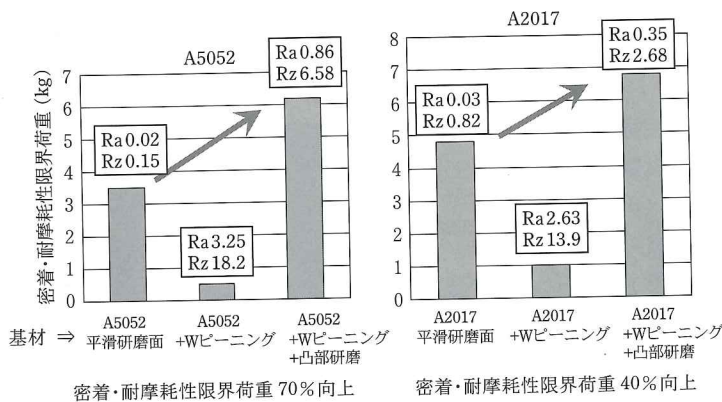


図10 3種の基材による限界荷重の違い



エンジン性能評価：約10分間、回転数1000~1300rpm以下



低シリコン A2618 耐熱アルミ合金製 シリンダーボア：Ni-P メッキ



A2618 ⇒ W ピーニング + 凸部研磨 + P-CVD, DLC シリンダーボア：P-CVD, DLC

図11 DLCコートピストンの耐摩耗性の向上

最後に、本開発技術を用いて DLC コーティングしたピストンとシリンダをモータバイク用エンジンに組み込み、短時間の全開ファイアリング試験を実施した。その結果、図 11 に示すように、DLC コーティングしたピストンスカート部には、未コートピストンに形成される厳しいスカuffing 摺動痕は観察されず、明確な耐摩耗性向上効果が認められた。また開発を先送りにした ta-C 膜においても、前述の表面改質処理後に凸部を徹底的に平坦化する加工を追加することにより a-C:H 膜と同様の密着・耐摩耗性向上効果が得られることも見出ししている。

おわりに

DLC コーティングのエンジン部品への適用による燃費等の改善は、部品単体では小さいものの、他の摺動部品に拡大適用することにより大きな効果が期待できる。今後、さらなる DLC 関連技術の進展とともに、エンジン摺動部品へ DLC コーティングが汎用されるものと思われる。今回紹介したアルミニウム合金ピストン摺動面への DLC コーティング技術では、従来のアルミニウム摺動面の耐摩耗性向上対策に汎用されている硬質アルマイト処理や硬質メッキに比べ、耐摩耗性のみならず

大幅な摩擦低減のポテンシャルも高いため、今後のアルミニウム合金摺動面への新たな表面処理技術として発展することが期待される。

参考文献

- 1) 大原久則：トライボロジスト, **58** No.8 (2013), 545.
- 2) K. Bewilogua and D. Hofmann: Surface & Coatings Technology, **242** (2014), 214.
- 3) 宮崎忠男：NEW DIAMOND, **26** No.1 (2010), 16.
- 4) ja.wikipedia.org/wiki/日産・HR エンジン.
- 5) Y. Mabuchi, T. Hamada, H. Izumi, Y. Yasuda and M. Kano: SAE Paper 2007-01-1752.
- 6) S. Okuda, T. Dewa and T. Sagawa: JSAE20077162, SAE2007-01-1979.
- 7) M. Kennedy, S. Hoppe and J. Esser: MTZ worldwide, **73** Issue5, (2012), 40.
- 8) M. Kennedy, S. Hoppe and J. Esser, MTZ worldwide, **75** Issue4 (2014), 24.
- 9) 加納眞, NEW DIAMOND, **26** No.1 (2010), 59.
- 10) T. Horiuchi, K. Yoshida, M. Kano, M. Kumagai and T. Suzuki: Tribology Online, **5** No. 3 (2010), 129.

かのう・まこと KANO Makoto

1981 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了(金属工学)、日産自動車材料研究所主任研究員、神奈川県産業技術センター機械材料技術部副部长を経て、2016.4 より DLC トライボロジー技術コンサルタント。東京工業大学大学院工学研究科産官学連携研究員、明治大学工学部兼任講師等。工学博士。

E-mail: mkdlc@88.catv-yokohama.ne.jp