

内燃機関用ピストンスカートの低フリクション技術 - 樹脂コーティングの技術動向 -

宮坂 弘樹
Hiroki Miyasaka

概要

内燃機関の各種損失低減に向けて、ピストンとしてはスカート部のフリクション低減が有効である。今回、方策の1つであるスカート表面性状の最適化技術およびその1つである樹脂コーティング技術に着目し、動向をまとめた。

1. はじめに

近年の環境規制強化に伴い、欧州を中心として自動車のEV化に向けた動きが急速に進んでいる。しかし、EV化に向けては発電時やバッテリー製造段階でのCO₂排出量、バッテリーのエネルギー密度容量や資源問題といった種々の課題があることから、図1に示すように、PHEV、HEVも含め内燃機関(エンジン)搭載車が全車両に対し占める割合は2040年においても84%ほどであると予測されている。したがって2020年10月に政府によって宣言された「2050年カーボンニュートラル」²⁾の達成に向けて内燃機関の熱効率向上は不可欠であり、現在も継続的な課題として取り組まれている。

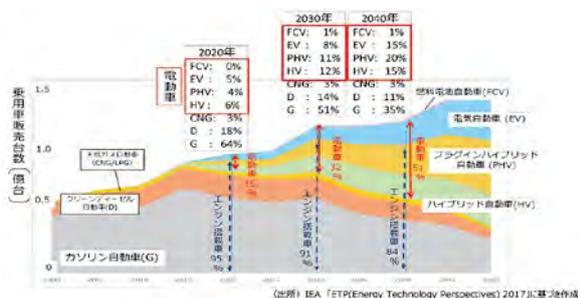


図1 IEA(国際エネルギー機関)が示した技術普及シナリオ¹⁾

内燃機関の熱効率向上のためには各種損失を低減することが有効であるが、図2に示すように特に摩擦損失(以下、フリクション)の約40%を占めるピストン・ピストンリング系において、ピストンスカート部(以下、スカート部)とシリンダーボアの摺動抵抗の低減は重点的に取り組んできた課題である。

エンジン実働時のピストンの運動からスカート部の潤滑状態について述べると、ピストンは燃焼圧およびコ

ンロッドのクランク運動の影響を受けて二次運動をしているため、スカート部とシリンダーボアとの接触面積は随時変化する。更にシリンダーボア内を0~約20m/sの速度間で変化しながら往復運動している。したがって、スカート部とシリンダーボアとの潤滑状態は境界~流体潤滑域の間で変化する。そのようなスカート部のフリクション低減を目的とし、様々な要素技術の開発が行われている。フリクション低減のための要素技術として「スカート面圧の低減」、「表面性状の最適化」の2つに大別される。「スカート面圧の低減」については主にピストン自体の骨格設計によるところが大きく、背反となる信頼性との両立を考慮したうえで最適骨格の技術開発が進められている。一方で「表面性状の最適化」については、ピストン製造工程における鋳造、加工が完了したピストンに対してプラスアルファで施される表面処理によってなされており、前述の最適骨格から更にフリクション低減効果を向上させる方策として技術開発が進められている。

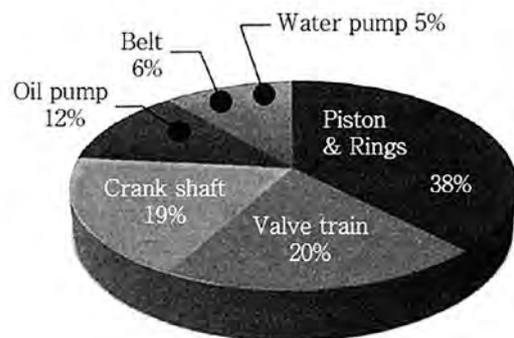


図2 ガソリンエンジンの摩擦損失³⁾⁴⁾

本稿では、まずスカート部のフリクション低減に貢献する表面性状の最適化技術について紹介し、更に表面

性状の最適化に最も用いられている樹脂コーティング技術の変遷と現状、および技術の動向を踏まえた将来の展望について述べる。

2. ピストンスカート部 表面性状最適化技術の紹介

まずスカート部への表面性状最適化技術の中で最も代表的なものが樹脂コーティング技術である。図3に樹脂コーティング技術による摩擦低減メカニズムを示す。摩擦低減メカニズムは2種類あり、1つ目は樹脂の特性である自己潤滑性を活かし、スカート部とシリンダーボアの金属接触による摩擦抵抗を低減することで、摺動速度が遅くなり境界潤滑域が支配的となる上下死点におけるフリクション低減を図っている(図3中①)。2つ目は、コーティング成膜時における樹脂材の流動性によってスカート部表面の切削加工による条痕形状を埋め、表面粗さを低減することで、摺動速度が徐々に速くなる上下死点付近にて境界潤滑から混合・流体潤滑への移行を促しフリクション低減を図っている(図3中②)。

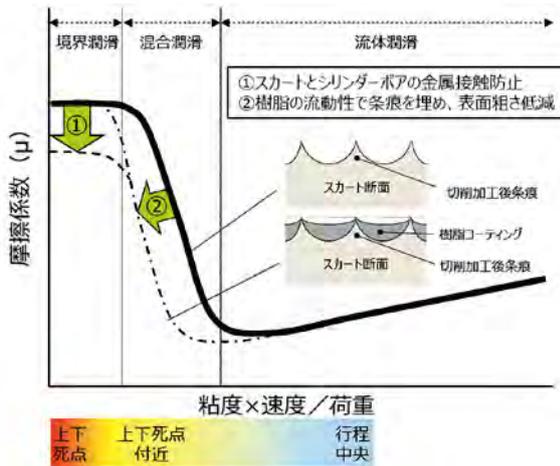


図3 ピストンスカート樹脂コーティングによる摩擦低減(ストライベック線図イメージ)

また樹脂コーティングの他に、前処理によりスカート表面粗さを低減し低フリクションを狙うとともに、低粗さ化の背反となる耐焼き付き性を両立する技術がある。

1つ目は、スカート面に高速で微粒子を投射することで切削加工条痕形状を均して表面粗さを低減し、更に微細な孔を形成し油溜まりを設けることで耐焼き付き性を確保する技術である。用いられている技術はショットピーニング(Fine Particle Bombarding Process; FPB)処理と呼ばれるものであり、目的に応じて選定された材料の粒径数十～数百 μm ほどの微粒子を高速で基材に投射し、表面性状や機械的特性を変化させる技術である。スカート部に適用された投射材としては、基材表面に潤滑層を形成し、境界潤滑時の摩擦低減を狙った二硫化モリブデン粉末と、基材表面への油溜まり形成

を狙った鉄系粉末がある。図4に条痕(Streak)と鉄系粉末投射後(FPB)のスカート部表面の3D形状を示す。切削加工による条痕形状が均されて表面が平滑になるとともに、油溜まりとなる微細な孔が形成されていることが確認できる。この油溜まりにて油膜を保持することで摩擦低減を狙っている。図5に実際のフリクション効果として、スカート部に鉄系のショットピーニングと樹脂コーティングを施したピストンを用い、浮動ライナエンジンでFMEP(Friction Mean Effective Pressure: 摩擦平均有効圧)を計測した結果を示す。浮動ライナエンジンとは、スカート部とシリンダーボアの摺動抵抗を、浮動状態のライナを通じてロードワッシャに伝えることで摩擦力として計測する単気筒エンジンである。スカート部の表面粗さ低減および油溜まりの効果と推測されるが、エンジンの運転条件全域において摩擦低減の効果が確認できる。

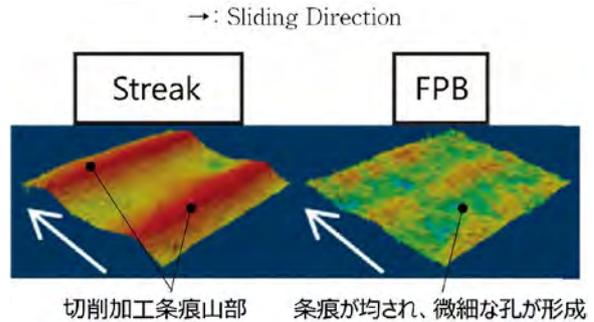


図4 条痕およびショットピーニング処理後の表面形状⁵⁾

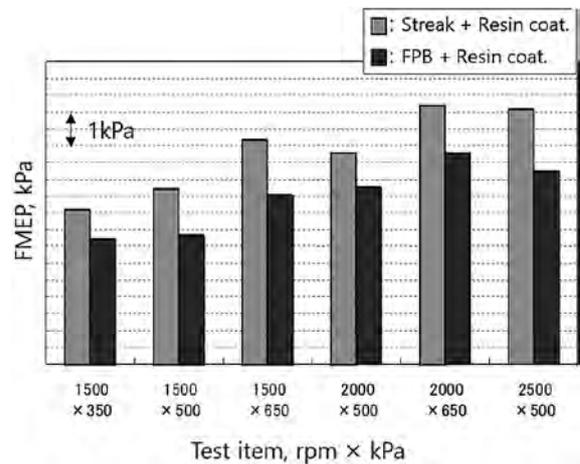


図5 条痕とショットピーニング処理のピストンにおけるFMEP⁵⁾

2つ目は、油の保持を目的とした微細なクロスハッチ形状の溝をパルスレーザーによって形成することで耐焼き付き性を確保する技術である。図6に鏡面化した後にパルスレーザーを照射したスカート部を示す。クロスハッチ形状の溝とそれに囲まれたプラトー面が形成されていることが分かる。図7に実際のフリクション効果として、スカート部にクロスハッチ溝(Crosshatch)を設けたピストンを用い、浮動ライナエンジンでFMEPを計測した結

果を示す。スカート表面の鏡面化によって樹脂コーティング後のスカート部表面粗さが低減した結果、油膜を形成しやすくなり、エンジンの運転条件全域においてフリクションの低減効果が確認できる。

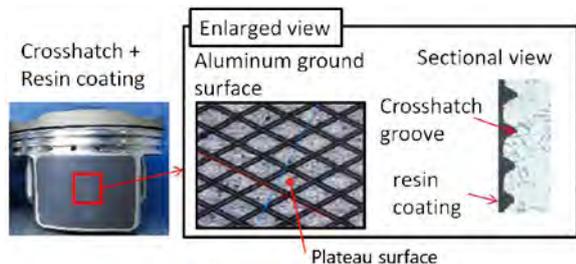


図6 パルスレーザー照射によるクロスハッチ溝⁶⁾

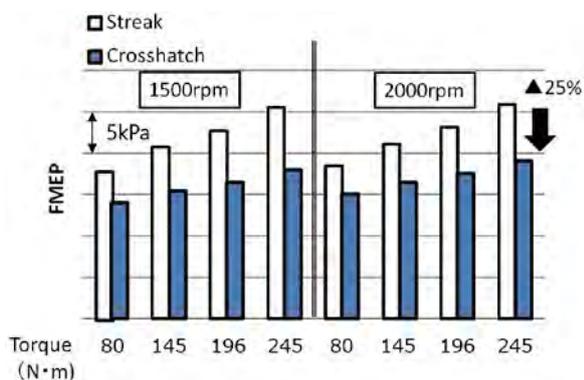


図7 条痕とクロスハッチ溝のピストンにおけるFMEP⁶⁾

3. 樹脂コーティング技術の概要

スカート部に樹脂コーティングが採用される以前は、スズ(Sn)めっき表面処理が主流となっていた。スズは軟質でせん断強度が低く、低摩擦係数を示すことから運転初期のなじみ向上に効果があり、スカート部の焼き付き防止として採用されていた。しかし耐摩耗性が低く、膜厚は1~2 μ m程度であるため、めっき部が摩耗し消失した後は低フリクション効果を持続させることができなかった。それに対し樹脂コーティングは、バインダーとなる樹脂材中に分散された固体潤滑剤によって低フリクションを実現、またスズめっき以上の膜厚(約10 μ m)とすることで低フリクション効果を持続させることに成功した。図8に実際の効果として可動ライナエンジンによる計測結果を示すが、樹脂コーティング(Resin)はスズめっき(Sn)に対し特に低回転域においてフリクションが小さくなっている。以後、スカート部のフリクション低減は、樹脂コーティングが主流となっていった。

スカート部へ施す樹脂コーティングの工法についても紹介する。樹脂コーティングが使われ始めた当初は、図9の左に示すようにスプレー塗装によってコーティングを行っていた。スプレー塗装では多量の溶剤によって溶解させた樹脂材をスプレーノズルから噴射し、スカー

ト部にコーティングする。設備としても塗装装置が1台あればワーク形状を問わずコーティングできることから汎用性の面でメリットがあったが、大きな課題が2つあった。1つ目は材料の歩留まりが悪いことで、スカート以外の必要ない箇所(例:サイドウォールなど)にもコーティングするため、材料の使用量が多くなる。2つ目は必要部位以外へのコーティングを防ぐために施すマスキングが必要となることである。ピストンはピストンリングやピストンピンと組付けるため、適切なクリアランスを設定している。したがって、そのような部位へコーティングすると組付け性や機能を担保できないため、それぞれのピストンごとや部位ごとに専用のマスキングを施す必要がある。

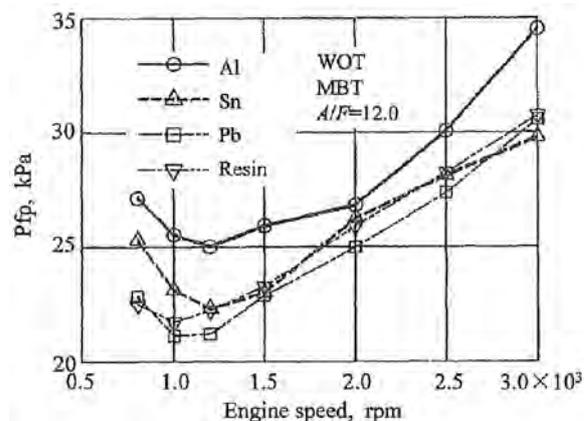


図8 可動ライナエンジンによる摩擦平均有効圧測定結果⁷⁾

この2つの課題を解決する新たな工法として開発されたのが、図9の右に示すスクリーン印刷によるものである。スクリーン印刷は、スクリーンと呼ばれる版にコーティング面を象った穴を空け、そこから樹脂材をスカート部に転写させる方法であり、コーティング形状の自由度が高く、必要な範囲にのみコーティングをすることが可能である。したがってスプレー塗装の課題であった「材料の歩留まり」と「マスキング」を一気に解消することができた。現在、このスクリーン印刷方式を用いることで、骨格形状の変化に伴う様々なスカート部形状に対し、必要な範囲のみに樹脂コーティングを施すことが可能となっている。

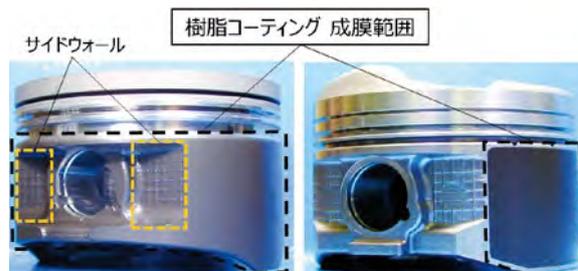


図9 スプレー塗装品(左)とスクリーン印刷品(右)

4. 材料配合の技術変遷

樹脂コーティング技術の低フリクション効果について、近年の発展に寄与する要素には「材料配合」と「パターン形状化」があり、本節と次節にてそれぞれの変遷について述べる。

まず材料配合の変遷について述べる。樹脂コーティングの材料構成は、主成分でありコーティングの信頼性を左右するバインダー樹脂、コーティングの摩擦特性や強度を特徴づける固体潤滑剤を代表とする粒子状添加剤、成膜時のコーティング剤粘度を調整するための溶剤となっている。溶剤は、コーティング後の焼成で揮発し、最終的な塗膜(完成品)にはほとんど含有されないため、本項ではバインダー樹脂及び粒子状添加剤について詳しく述べる。

初めにバインダー樹脂であるが、スカート部に適用するため高温・高面圧に耐えうること、またエンジンオイルや燃料、燃焼によって発生する酸などに対する耐食性が求められる。そのような環境下に耐え、尚且つ量産性を考慮すると適用可能な材料は多くなく、現在量産されている多くの樹脂コーティングにはポリアミドイミド樹脂、エポキシ樹脂、フェノール樹脂が用いられている。これは樹脂コーティングが採用された当初から変わっておらず、開発時に十分に検討がなされたうえで材料が決まったと言える。

次に粒子状添加剤であるが、これが樹脂コーティングのフリクション性能を決めるための最も重要なファクターであり、各メーカーが材料の組み合わせ・配合量の調整に取り組んできた。最も一般的で初期から使用されてきたのが、フリクション低減を目的として添加される固体潤滑剤である。主な材料は二硫化モリブデン、グラファイトの2つに代表される。二硫化モリブデンは結晶構造が-S-Mo-S-の層状となっており、Mo層とS層間の結合力(ファンデル・ワールス力)が弱い⁸⁾ため、その滑りやすさによって低摩擦を発揮する。またエンジンオイルや燃料に含まれる成分に侵されない化学的安定性と、スカート部にかかるスラスト力に耐えうる高荷重耐性をもつことから、多くの量産ピストンに採用されている。グラファイトは六方晶の結晶構造で、層間の結合力(ファンデル・ワールス力)が弱い。この層状構造は二硫化モリブデンと共通しており、同様に滑りを生じて低摩擦を発揮する⁹⁾とともに耐摩耗性に優れる。補助的な潤滑剤として、自己潤滑性をもったPTFE(ポリテトラフルオロエチレン)があるが耐荷重性・耐熱性が低く、多量に添加すると樹脂コーティング自体の耐久性を著しく低下させるため、グラファイトと併用して使用される⁸⁾ことが一般的である。

2010年代序盤までに、上記のような固体潤滑剤の配合最適化が成熟していき、劇的なフリクション低減効果の改善が望まれなくなってきた。また燃費規制の強化により、過給ダウンサイジングエンジンに代表されるような燃焼圧が高くスカート部にかかる面圧が高いエンジンや、HEV、PHEVのようにモーターの運転に合わせ、エンジンを必要に応じて起動停止させるため、スカート部に十分なエンジンオイルが行き渡っていない状態でシリンダーボアと摺動するなど、スカート部の潤滑環境が厳しいエンジンが増えてきた。そこで、これまでの様にフリクション低減の効果代を追い求めるよりも、コーティングの耐久性を向上し、その効果を長く持続させようとする商品開発が始まった。

樹脂コーティングは通常、エンジンの運転時間に伴って徐々に摩耗していき、ある地点で下地面(アルミ)の切削加工条痕山部が露出する。すると部分的にシリンダーボアとの金属接触が生じることから、摩擦抵抗が増加する。したがってフリクション低減効果を持続させるためには、切削加工条痕山部とシリンダーボアの金属接触による摩擦抵抗の増加を防ぐために樹脂コーティングの耐摩耗性を向上する、もしくは厚膜化することが必要である。

耐摩耗性を向上する手法としては、硬質粒子の添加による膜の強化が一般的である。硬質粒子には金属酸化物が用いられ、鉄(Fe)、チタン(Ti)、亜鉛(Zn)、タングステン(W)などが含まれた樹脂コーティングが既に量産化されている。しかしこれらの金属を大量に添加すると摩擦係数を悪化させてしまうため、適切な量を見極め、固体潤滑剤とバランス良く配合することが必要である。厚膜化については、現在主流のスクリーン印刷においては使用する治具や製造条件が重要なファクターとなっており、材料配合の話からは逸れるためここでは割愛する。

5. パターン形状化の技術変遷

次にパターン形状化の技術変遷について述べる。2000年代中盤頃から、スクリーン印刷におけるコーティング形状の自由度が高いことを利用し、スカート部表面の油膜をコントロールするため模様を施した樹脂コーティングが採用され始めた。図10にその一例を示す。水玉模様を千鳥配置したものや、直線、水玉を織り交ぜて配置したものなど様々な形状が採用されている。どの模様においてもスカート部の油の流路や溜まりを設け、油膜を発生させてフリクションを低減することを狙っていると考える。図11には高橋らが提案するパターン形状を示す。このパターン形状では、スカート部両端に斜めの溝が設けられており、溝の先端はスカート部中央に向かって設置されている。設置した溝によって、ピストンの上昇行程

においてスカート部両端にある潤沢なオイルを、摺動が発生し貧潤滑状態であるスカート中央部に供給することを目的としている。図12に、上記パターン形状を施したピストンの、全面塗装(パターン形状無し)に対する浮動ライナエンジンでのFMEP低減効果を示す。パターン形状を施すことによって、狙い通り貧潤滑である領域にオイルを集めることでフリクションを低減する効果が得られた。



図10 パターン形状の量産適用事例⁵⁾

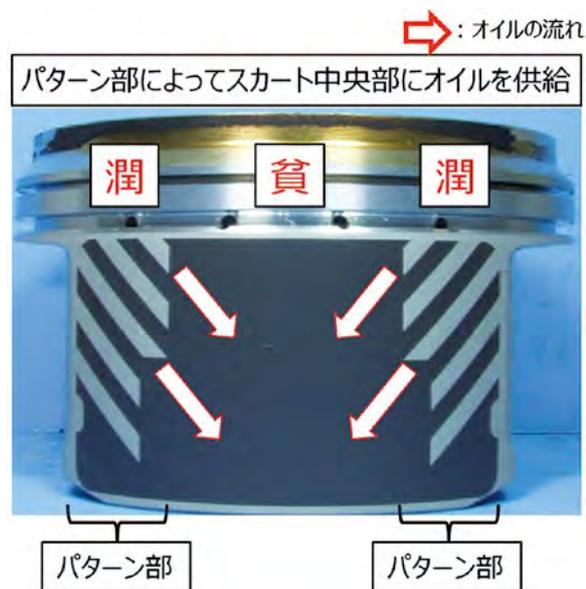


図11 検討したパターン形状(スラスト方向)⁹⁾

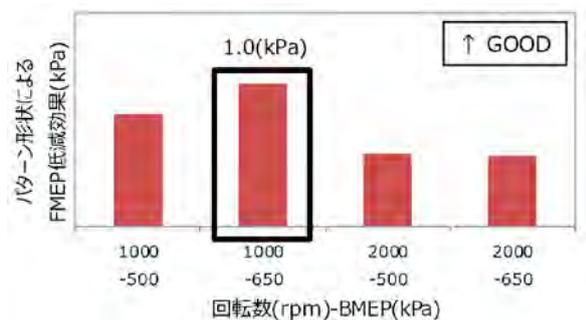


図12 パターン形状によるFMEP低減効果(対 全面塗装)⁹⁾

先にも述べたようにスクリーン印刷はコーティング形状の自由度が高いため、今後も摩擦低減に有効と判断された表面性状(テクスチャリングなど)について、樹脂コーティングのパターン形状化によってスカート部に適用する事例が現れることが期待できる。

6. おわりに

これまでピストンスカートの表面性状の最適化技術及びその1つである樹脂コーティング技術について動向を述べてきた。

内燃機関の摩擦損失低減は、重要な課題であると認識されている一方で、各自動車メーカーとしては開発リソースを電動化にシフトするため、内燃機関開発の効率化を進めている。それを踏まえると従来の知見や予測技術を活用し、開発工数を最小限とすることで表面性状の最適化技術をタイムリーに提供していくことが必要である。一方で、従来の樹脂コーティングは、スカート面の粗さを低減する前処理やパターン形状化などで低フリクション化を検討してきたが、現在も盛んに行われている摩擦現象解明の研究成果を活かすことで、樹脂コーティングによる低フリクション効果を最大限に高めるための最適なアプローチを見出し、それに関する開発に絞っていくことも必要であると考えらる。

本稿は、株式会社新樹社発行 月刊トライボロジー 2022年10月号に掲載された特集記事「内燃機関用ピストンスカートの低フリクション技術 -樹脂コーティングの技術動向-」を著作権者の許可を得て再編集したものです。

参考文献

- 1) 経済産業省:自動車新時代戦略会議(第1回)資料(2018).
- 2) 経済産業省:2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2020).
- 3) 三原:内燃機関摩擦損失低減に向けた研究動向,トライボロジスト,61,2(2016)71-77.
- 4) 内貫 他4名:ハイブリッド自動車用1.8Lガソリンエンジンの開発,自動車技術会学術講演会講演予稿集,79-09(2009)1-6.
- 5) 山川:ピストンの摩擦低減技術の動向,トライボロジスト,62,12(2017)754-759.
- 6) 國安 他3名:クロスハッチ形状を用いたピストンスカート部低フリクション技術の開発,自動車技術会2018年春季大会学術講演会講演予稿集,20185419(2018).
- 7) 金井:エンジンの低燃費化に寄与するピストンスカート部の表面処理技術,トライボロジスト,57,9(2012)619-624.
- 8) 山海堂:自動車工学用シリーズ,自動車用ピストン(1997).
- 9) 高橋 他4名:パターン樹脂コーティングによるピストンスカート摩擦低減技術の開発(第1報),自動車技術会2017年秋季大会学術講演会講演予稿集,20176325(2017).

筆者



宮坂 弘樹

アート金属工業株式会社
研究開発本部 製品技術部
ピストン要素技術開発に従事