

# DiASil シリンダーに適合した ピストン樹脂コーティングの開発

Development of Piston Resin Coating Suitable for DiASil Cylinders

渡邊 慧太 佐藤 龍彦 青木 哲也 伊藤 文彦 栗田 洋敬

## 要旨

ピストン樹脂コーティングとは、固体潤滑剤を含む樹脂材料でピストンスカートを覆うことにより、シリンダーとの摩擦ロスを低減させる技術である。近年、一層高まる低燃費志向を背景に輸送機器業界での適用が拡大しており、当社でも重要な燃費向上手段として位置づけられている。エンジンの高効率化のため、当社独自技術である DiASil シリンダーに適合可能な樹脂コーティングを開発した。

## Abstract

By covering the piston skirt with a resin material including solid lubricants, a piston resin coating technology acts to reduce friction losses with the cylinder. In recent years, increasing demands for greater fuel economy have led this technology to become more widely used in the automobile industry, and it has become an important tool for improving fuel economy at Yamaha Motor as well. In order to increase engine efficiency, we have developed a resin coating which can be used in DiASil cylinders, a Yamaha Motor proprietary technology.

## 1 はじめに

近年、各国の環境規制やエネルギー資源問題の観点から、輸送機器の低燃費化は業界全体における最重要課題である。内燃機関の低燃費化に向け、機械的損失低減に関わる技術開発が各社で盛んに行われ、中でもピストンスカートへの樹脂コーティング<sup>[1]</sup>は、多くのメーカーで採用が進んでいる。一方、当社製品へのピストン樹脂コーティングの適用範囲は限定的であり、最も低燃費化へのニーズが高いコミュータービークル（以下、CV）では採用実績が無い。これは CV 系の多くが当社独自技術である DiASil シリンダーを採用しており、その適合に課題を抱えているためである。

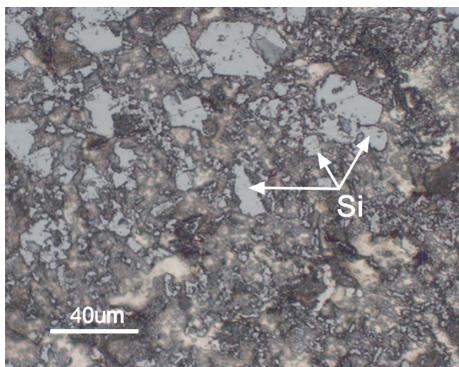


図1 DiASilシリンダーの金属組織

DiASil シリンダーは、高シリコン含有のオールアルミ製シリンダーである。他社で多く採用されている鋳鉄スリーブ内包式に比べ、重量や冷却性能等で大きな優位性をもつ。一方で、図1に示すように硬質なシリコンが多数晶出している

ことで、摺動相手であるピストンスカートへの攻撃性が高くなるという側面をもち、従来はピストンスカートに金属めっきを施すことで耐久性を担保させてきた。

このようなシビアな摺動環境下に汎用的な樹脂コーティングを晒した場合、図2に示すように摩耗および剥離が生じ、焼付きを引き起こす場合がある。焼付き防止や低燃費効果維持の観点から、DiASil シリンダーに適合するピストン樹脂コーティングには、従来の低フリクション効果に加え、高い耐久性が必須となる。

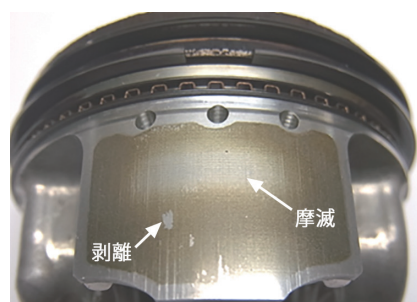


図2 汎用樹脂コーティング品のDiASilエンジン運転後外観

このような背景から、DiASil シリンダーに適合するべく、以下の特性を本開発の樹脂コーティングの狙いとした。

- (1) 低フリクションであること
- (2) 摩滅しないこと
- (3) 剥離しないこと

上記要件を満足させるため、インクだけでなく、下地処理および工法開発による多角的なアプローチを検討し、試行したため、その結果についてここに報告する。

## 2 高耐摩耗性インクの開発

### 2-1. インクの成分設計

通常のピストン樹脂コーティングは、ペースト状のインクをスカート面に塗布した後、200℃程度に加熱して、硬化させる。一般的なインクは、ポリアミドイミド樹脂（以下、PAI）のワニスに、二硫化モリブデンやグラファイトに代表される固体潤滑剤を顔料として添加している。本開発材は、固体潤滑剤に加え、複数種の硬質酸化粒子を添加し、そして均一に分散させることで耐摩耗性の向上を狙った。図3に開発材の断面組織を示す。

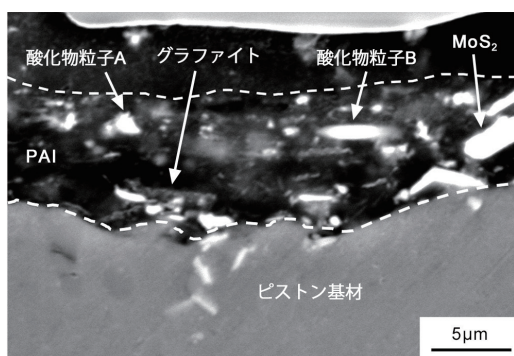


図3 開発材の断面組織

### 2-2. 実験方法

#### 2-2-1. 摩擦係数測定

摩擦係数はリングオンディスク試験で評価した（図4左）。リング側に DiASil 相当材、ディスク側にピストン材を用い、ディスク表面を金属めっきおよび前述の開発材でコーティングした。ディスクへのインク塗布は、スプレーコーティングにて実施した。金属めっきは約 10μm、樹脂コーティングは 15～20μm の厚さに調整した。オイルは二輪車エンジン用 10W-30 を用いた。リング回転速度を 5000rpm 一定とし、荷重を変化させた際の摩擦係数を測定し、ストライベック曲線として表した。

#### 2-2-2. 耐摩耗性評価

耐摩耗性は高面圧下での試験が可能なピンオンディスク試験にて評価した（図4右）。DiASil 相当材からピン形状の試験片を製作し、ディスクは前述の摩擦係数測定と同仕様のものを用いた。また仕様間の差異を明確にするため、摩耗が確実に進行する面圧に設定した。オイルはコスモピューサーフティー 10 を使用し、ピン回転速度は 1500rpm とした。摩耗量はディスク表面の形状を測定し、摺動部と非摺動部との高低差から算出した。適時試験を中断し、試験時間と摩耗量の関係を記録した。

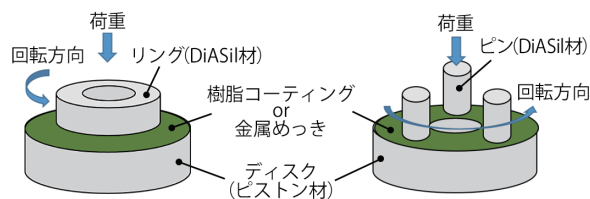


図4 リングオン/ピンオンディスク概略図

### 2-3. 結果

図5にリングオンディスク試験結果を示す。開発材は金属めっきと比較し、ピストン上下死点域の潤滑状態に当たる境界～混合潤滑域下で摩擦係数が低くなることが確認された。

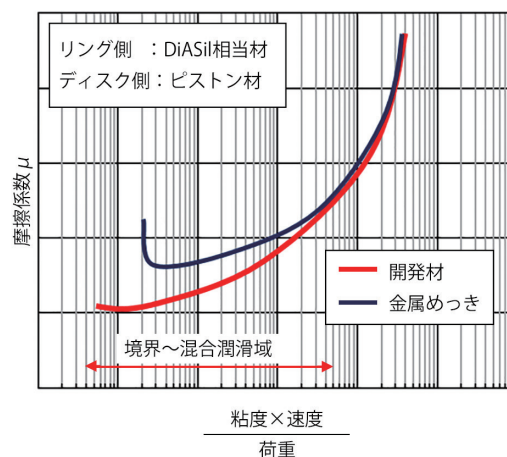


図5 リングオンディスク試験結果

図6にピンオンディスク試験の結果を示す。金属めっき品は、試験開始直後に焼付きが発生したため、その時点で試験終了とした。一方、開発材の摩耗速度は比較的緩やかであった。以上の結果から、開発材は従来の金属めっきよりも低摩擦でありながら、同等以上の耐摩耗性を有していると判断した。

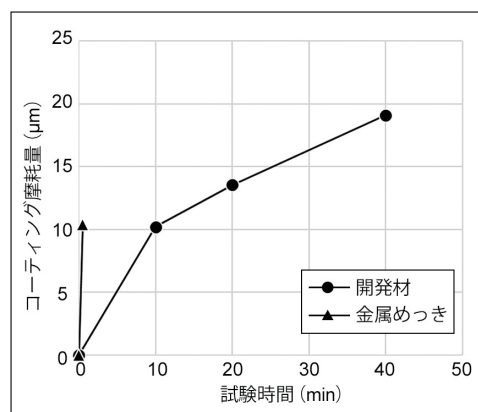


図6 ピンオンディスク試験結果

### 3 厚膜工法開発

#### 3-1. 厚膜化の目的

DiASil シリンダー内での摺動環境が極めて過酷であることは前述のとおりである。したがって、本開発材においても幾ばくかの摩耗は不可避であると予想され、初期に十分な膜厚を与えておくことが、摩滅への対策として有効である。通常、樹脂コーティングの厚さは 5 ~ 10 $\mu\text{m}$  程度であることが多いが、本開発では、より厚いコーティングを付与するための工法開発に取り組んだ。

#### 3-2. 厚膜スクリーン印刷の良品条件開発

ピストンへの樹脂コーティングは、インクの歩留まりや曲面への印刷性を勘案し、スクリーン印刷を用いることが一般的である。スクリーン印刷とは孔版印刷の一種で、電子基盤などの製造プロセスとしてエレクトロニクス分野で広く普及している<sup>[2]</sup>。使用するスクリーンには、ステンレス等のメッシュが張られており、非描画部を感光性の乳剤で覆うことで、所望の印刷パターンが付与されている(図7)。このスクリーンの上にインクを投入し、スキージと呼ばれるヘラで掻き取りながら、被印刷物へインクを転写する。工法の概略を図8に示す。本開発では、印刷の試行を重ね、膜厚に影響を及ぼす印刷パラメーターを体系的に整理することで、厚膜印刷の良品条件を明らかにした。以下に今回調整した主要な印刷パラメーターを列挙する。

- インク粘度
- スキージ材質
- スクリーン仕様
- 印圧
- 版下クリアランス
- 印刷速度

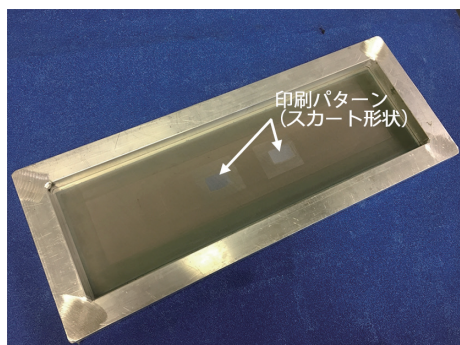


図7 スクリーン外観

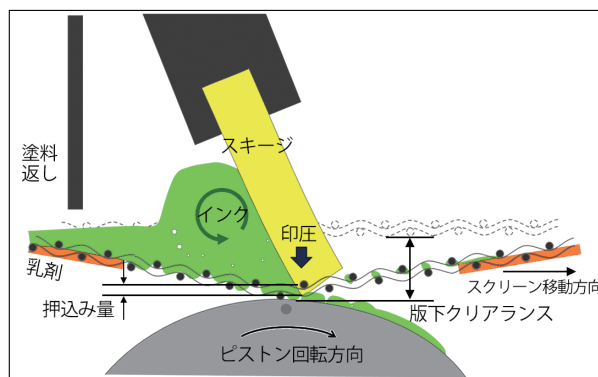


図8 スクリーン印刷概略図

#### 3-3. 検証方法

$\phi$  52.4mm のアルミ合金製ピストンを素材とし、インクは前述の開発材を用いた。また試作数は 100 個とし、狙い膜厚は一般的な樹脂コーティング厚さの 2 倍にあたる 20 $\mu\text{m}$  とした。事前に検討した条件下でスクリーン印刷を実施し、続けて 200 $^{\circ}\text{C}$   $\times$  30min で硬化させた後、室温まで冷却した。試作した 100 個のピストンの中から、試作順の 4 個ごと、合計 25 個を選定し、吸気側、排気側各スカートの面内 9 点をうず電流式膜厚計にて計測した(図9)。

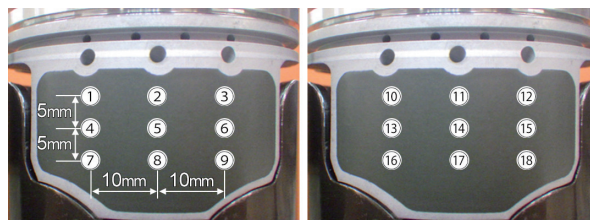


図9 膜厚測定位置(左:吸気側、右:排気側)

#### 3-4. 結果

図10に膜厚測定結果を示す。グラフ横軸の測定位置は、図9中の数字に対応しており、各測定位置 25 個のデータから算出した最大値、最小値および平均値をプロットした。このグラフが示すように、狙い膜厚 20 $\mu\text{m}$  に対し、すべての測定結果が 15 ~ 22 $\mu\text{m}$  内に収まっており、厚く均一なコーティングが達成できていた。

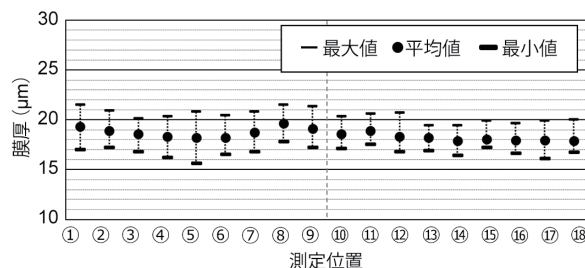


図10 膜厚測定結果

## 4 高密着下地処理の開発

### 4-1. 密着力向上の考え方

コーティングの密着力向上の手法として、基材粗面化による接触面積の増加が有効であることは広く知られている。しかしながら、ピストンにはリング溝やピストンピン孔など、平滑さを求められる部位も存在することから、この方案ではマスキング等で当該部位を保護する必要が生じてしまう。当然、この工程追加によるコストアップは不可避であり、CV モデル織り込みへの大きな足枷となる。そこで本開発では、粗面化以外の手法での密着力向上を試みた。

### 4-2. アルマイト処理

アルマイトとはアルミニウムの陽極酸化皮膜を指し、ポアと呼ばれる微細孔を有した六角柱セルが規則正しく配列した構造をとる(図 11)<sup>[3]</sup>。このポアが、各種皮膜の浸入サイトになることで、密着力を高めるとされており、塗装、めっき、接着剤の下地処理として工業化されている<sup>[3]</sup>。本ピストン樹脂コーティングにおいても、同様の効果を期待し、アルマイトを高密着下地処理の候補として選定し、評価した。なお吸着効果を最大化するために、ポア径がより大きくなる電解浴、処理条件を選択した。

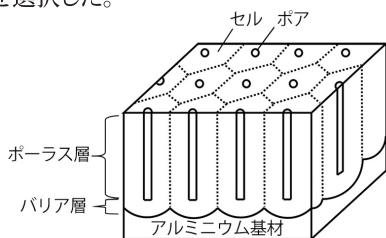


図11 アルマイトの構造(ケラーモデル)

### 4-3. 実験方法

#### 4-3-1. 供試材試作方法

φ 52.4mm のアルミ合金製ピストンの機械加工完了品を素材とし、未処理（洗浄まま）、アルマイト処理、ショットブラスト処理（粗面化）の3種を試作した。それぞれのピストンスカートに、前述の開発材をスクリーン印刷にて塗布した後、200℃×30min で硬化させた。膜厚はすべて約 15μm に統一した。

#### 4-3-2. 表面粗さ測定方法

コーティング印刷前のピストンスカートの粗さを、触針式表面粗さ測定機にて計測した。測定位置はスカート中央、測定方向はピストン上下方向とした。得られた粗さ曲線から算術平均粗さ Ra を算出した。

#### 4-3-3. 密着力評価方法

樹脂コーティングの密着力はウォータージェット試験にて評価した。図 12 に示すように、ウォータージェット試験では、ポンプから圧送された高圧水がノズルから吐出され、その真下を回転したピストンが通過する。これにより、スカート面上をウォータージェットが走査する。噴射圧力を段階的に増加させ、樹脂コーティングの剥離が認められた圧力を密着力として定義した。

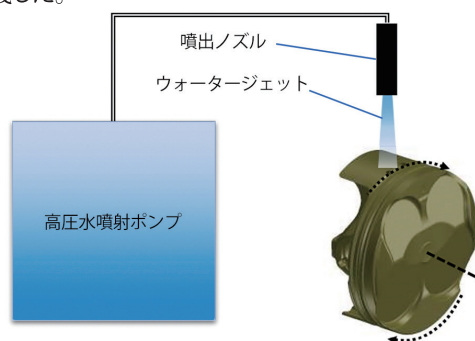


図12 ウォータージェット試験概略図

#### 4-3-4. 密着界面の観察

樹脂コーティングの密着界面を、電界放出型走査電子顕微鏡（以下、FE-SEM）を用いて観察した。観察試料は、コーティングの厚さ方向に切断し、切断面を機械研磨およびイオンミリングを用いて鏡面に仕上げた。

### 4-4. 結果

(a) 未処理品、(b) アルマイト品および (c) ショットブラスト品の粗さ曲線を図 13 に示す。未処理品では、機械加工における規則的な山谷（条痕）が見られるのに対し、ショットブラスト品では、条痕が崩れるほど表面が荒れていることがわかる。一方、アルマイト品は、元々の条痕形状がほぼ維持されており、表 1 に示すとおり算出された Ra 値にも同様の傾向が認められた。

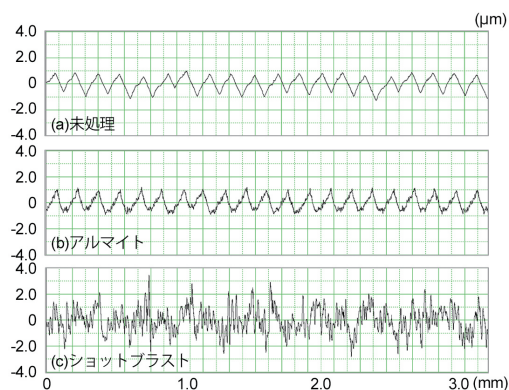


図13 各種処理品の粗さ曲線

表1 各種処理品の算術平均粗さRa

|    | (a) 未処理 | (b) アルマイト | (c) ショットブラスト |
|----|---------|-----------|--------------|
| Ra | 0.41    | 0.43      | 0.77         |

図14はウォータージェット試験で得られた密着力の値を示している。アルマイトを施すことによって、樹脂コーティングの密着力は飛躍的に向上し、これはショットブラストの効果をも上回っていた。

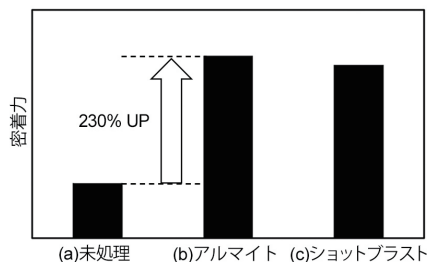


図14 ウォータージェット試験結果

樹脂コーティングの密着界面の観察結果を図15に示す。

この写真から、樹脂コーティングとアルマイトの界面には、明瞭な境界はなく、インクがアルマイトのポラス層内に浸透していることが見える。つまり、ポアに浸入した樹脂がくさびとして作用し、アンカー効果を発現したことが、優れた密着力の起源であると考えられる。以上の結果から、アルマイト処理は本開発の狙いに合致した下地処理であると判断し、採用した。

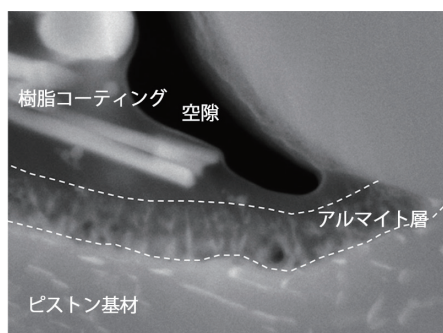


図15 界面のFE-SEM観察写真

## 5 ファイリング評価

### 5-1. フリクションロス

#### 5-1-1. 測定方法

本樹脂コーティングによるフリクションロス低減効果の測定には、図16に示す浮動ライナー装置を用いた。本装置はシリンダーブロックをライナー形状に加工し、ロードワッシャーと締結している。これにより、これまで困難であったアルミ合金製シリンダーでのファイリング環境下におけるピストン/シリンダー間の摩擦力評価を可能とした<sup>15)</sup>。本報では、

樹脂コーティングピストンと金属めっきピストンを浮動ライナーで評価し、比較した。

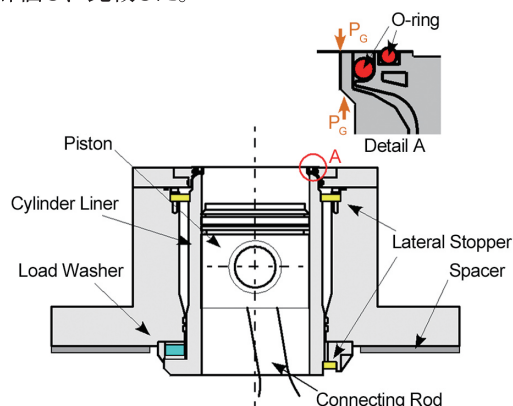


図16 浮動ライナー装置概略図

### 5-1-2. 結果

摩擦波形の例として3000rpm中開度域(BMEP = 500kPa)での結果を図17に示す。従来の金属めっきに対し、樹脂コーティングは上死点近傍の膨張行程初期で摩擦力が低減している。このことから、樹脂コーティングは油膜が切れやすい境界潤滑領域で、大きな効果を発揮することがわかる。この結果は、図5のリングオンディスク試験結果ともよく整合する。

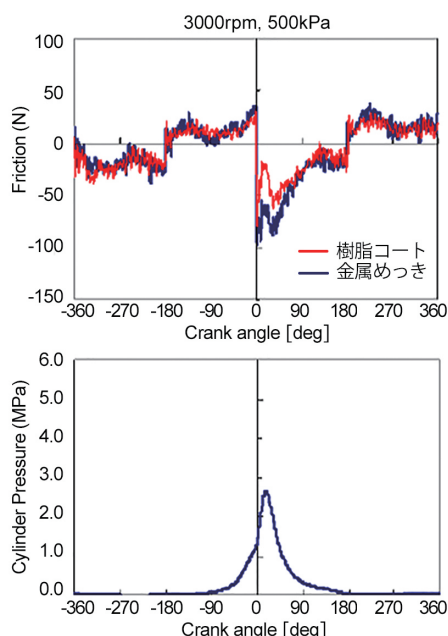


図17 浮動ライナー評価結果

### 5-2. 耐久性

#### 5-2-1. ピストン仕様

φ52.4mmのピストンを素材とし、下地処理として前述のアルマイト処理を施した。その後、開発材をスクリーン印

刷にて塗布し、200℃×30minで硬化させた。膜厚測定の結果、平均膜厚が約19μm程度であることを事前に確認した。

### 5-2-2. 評価方法

DiASil シリンダーと開発ピストンを用いて、長時間のエンジン運転を行った。運転条件や時間は、図2に示した汎用樹脂コーティング評価時と同等とし、運転後の外観観察と電流式膜厚計での膜厚測定を実施した。膜厚測定はコーティング全面を対象とし、上下左右2mmピッチで計測した。

### 5-2-3. 評価結果

図18はエンジン運転後のピストンスカートの外観である。往復運動方向に沿った軽微な疵が見られるものの、コーティングの摩滅や剥離の様相は一切見られず、焼付きも生じていない。また膜厚測定の結果、摩耗量はわずかであり、依然として十分な厚さのコーティングが残存していることが確認された。この結果から、今回開発したピストン樹脂コーティングは、DiASil シリンダーへ適合するに十分な耐久性を有しているものと判断される。

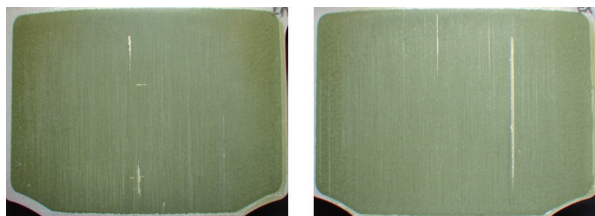


図18 エンジン運転後外観(左:吸気側、右:排気側)

## 6 おわりに

DiASil シリンダーに適する樹脂コーティングピストンの開発を進め、以下の成果を得た。

1. インクに複数種の硬質酸化粒子を含有、分散させることにより、低フリクションかつ金属めっき同等以上の耐摩耗性を発現させた。
2. 大径ポアを有するアルマイト処理を施すことによって、基材表面を荒らすことなく、樹脂コーティングの密着力を飛躍的に向上させた。
3. スクリーン印刷の諸条件を最適化することにより、厚く均一なコーティングを可能にした。
4. ファイアリング環境下で、本開発樹脂コーティングピストンの低摩擦効果が認められた。

5. 本開発ピストンは、DiASil シリンダーのエンジン運転において、焼付きやコーティングの摩滅、剥離を呈することなく、十分な耐久性を有していることが確認された。

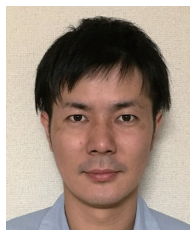
### ■謝辞

本開発にあたり多大なるご協力を頂きました株式会社川邑研究所、日本パーカライジング株式会社に深く感謝の意を表します。

### ■参考文献

- [1]Michael Schuetzら:Solid lubricant coatings for automotive engine pistons Proceedings of World Tribology Congress III(2005)
- [2]佐野 康:プリンテッドエレクトロニクス 印刷学会出版部
- [3]F.Keller,M.S.Hunter,D.L.Robinson:J.Electrochem. Soc.,100,9,411(1953)
- [4]鶴飼ら:表面技術総覧めっき・陽極酸化編 広信社
- [5]伊藤 明美,岩崎 秀之,栗田 洋敬,佐藤 龍彦  
高回転空冷エンジンのピストン摩擦力測定に関する研究  
2014自動車技術会前刷集 344-20145258

### ■著者



**渡邊 慧太**  
Keita Watanabe  
パワートレインユニット  
コンポーネント統括部  
材料技術部



**佐藤 龍彦**  
Tatsuhiko Sato  
パワートレインユニット  
コンポーネント統括部  
材料技術部



**青木 哲也**  
Tetsuya Aoki  
パワートレインユニット  
コンポーネント統括部  
生産技術部



**伊藤 文彦**  
Fumihiko Ito  
パワートレインユニット  
コンポーネント統括部  
生産技術部



**栗田 洋敬**  
Hiroataka Kurita  
先進技術本部  
研究開発統括部  
先進技術研究部