

内燃機関用ピストン表面処理技術の開発

Development of Piston Surface Treatment for Internal Combustion Engine

杉 村 健太郎*

Kentaro SUGIMURA

要 旨

内燃機関用ピストンスカート部への適用を目的とし、耐摩耗性の高い低フリクション表面処理技術を開発した。従来の低フリクションコート剤は、含有するモリブデン等の固体潤滑剤が、自己潤滑、摩耗、摩滅することで低フリクションを実現するため、長時間にわたる性能効果の維持は期待できなかった。本技術は、オイル吸着効果を有する高強度被膜により、従来比約5倍に耐摩耗性を向上しつつ、約40%のフリクションを低減するものである。

また生産性においても、ピストンスプレー塗装技術を応用したものであり、特殊な生産設備等を必要とせず、材料置換だけで容易に切り替えが可能である。

ABSTRACT

Low-friction surface treatment technology that provided high wear resistance was developed for the piston skirt of an internal combustion engine. Conventional low-friction coating materials consist of a solid lubricant, such as molybdenum, and the effectiveness of performance was not expected to be maintained for a long time because lower friction was realized by self-lubrication, wear, and abrasion. The newly developed technology uses a high-strength film, which has an oil adsorption effect, enabling friction to be reduced by about 40% while increasing wear resistance about 5-fold as compared to conventional coating materials.

Concerning productivity, because this technology employs piston spray painting technology, the new film can be applied by simply replacing the material without any need for special production equipment.

1. はじめに

自然環境の保護、排出ガス規制、化石燃料の枯渇等、社会的、経済的背景よりエネルギー資源の有効利用が求められている。ガソリン用内燃機関では、全エネルギーの約40%程度が機械損失で失われる⁽¹⁾。そのため燃費、出力の向上のために、機械損失の低減が果たす役割は大きい。

機械損失中のピストンしゅう動抵抗による損失は、機械損失全体の約40%を占めるため⁽²⁾、部品軽量化、低張力ピストンリング、ピストン表面処理等の技術開発が行われ、機械効率の向上がなされてきている。

ピストンに表面処理を施す主目的は、初期性能の向上や、ピストンのあたり、なじみ等の慣らし運転の簡略化⁽³⁾、耐焼付き性の向上である。ピストン表面処理に用いられる代表的処理の模式図を Fig. 1 に示す。

代表的なピストンの表面処理法として、二硫化モリブデン、グラファイト、PTFE等の固体潤滑剤を含む表面処理、乾性被膜潤滑剤が知られている。固体潤滑剤は、へき開(結

晶構造の原子間結合力が弱い面にてすべる現象)等の自己潤滑作用によって、フリクションを低減するため、摩耗が避けられない。このため被膜の長期的な持続性に課題を抱えていた。

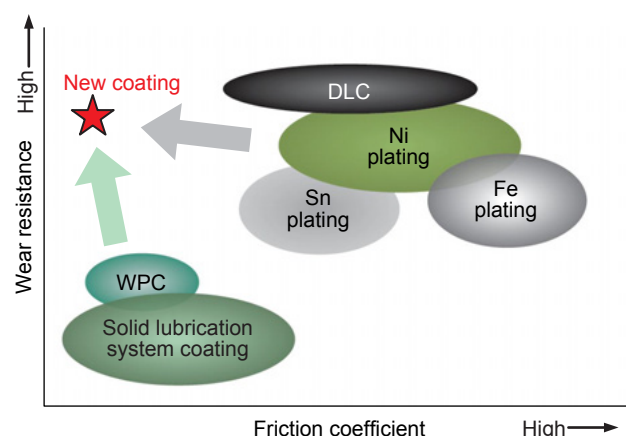


Fig. 1 Piston surface treatment

*汎用開発センター

2. ピストンスカートの潤滑状態

ピストンのトライボロジーにおいて、重要なことはシリンダボアとピストンが流体潤滑を保ち続けることである。Fig. 2 は Stribeck 曲線⁽⁴⁾と呼ばれるしゅう動面部の潤滑状態、摩擦特性を表したものである。

しゅう動速度が低いと、しゅう動面同士が固体接触したまま滑る境界潤滑状態であるため、摩擦係数は大きい。他方、高速では流体潤滑状態となるため、しゅう動面に固体接触はほとんどなく、摩擦係数は低い。その間にある中速域は境界潤滑と流体潤滑の遷移域で、混合潤滑状態と呼ばれる。

ピストンスカートのしゅう動状況、潤滑状態を Stribeck 曲線にあてはめると、シリンダボア内上死点付近でピストンスカート面は境界、もしくは混合潤滑領域にあり、中央部から下死点においては流体潤滑状態にある⁽⁵⁾。

また、ピストンの潤滑状態はエンジン回転数によっても若干異なり、特に低回転域では境界潤滑が支配的で、ピストンスカートのしゅう動損失には、その表面状態が大きく影響する⁽⁶⁾。

よってピストンの低フリクション化は、状況による差異は有るが、境界潤滑領域を持っているために難しい。

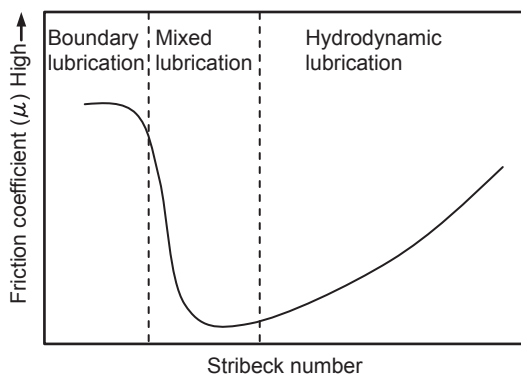


Fig. 2 Stribeck curve

3. 材料設計

当技術はピストンスカート部にオイルの吸着および保持作用を持つ被膜を形成し、従来境界潤滑領域にあった低速しゅう動時にまで流体潤滑領域を拡大することで、しゅう動損失を低減するものである。また、従来の課題であった耐摩耗性を向上するため、被膜の強度向上を行なった。

さらに材料設計にあたっては、以下の生産性および実現性を考慮した。

- (1) 特殊な生産設備を必要としないこと
- (2) 環境負荷物質を有しないこと
- (3) 安価であること

上記の条件を満足する材料として、乾性被膜潤滑剤に着目した。乾性被膜潤滑剤とは、結合樹脂の接着力によって、

二硫化モリブデン、グラファイト、PTFE等の固体潤滑剤をしゅう動面に定着させる機能塗料⁽⁷⁾である。この塗料は、適切な膜厚に塗布し、乾燥または加熱硬化させることで被膜化し、潤滑剤として作用する。

ところが一般的に被膜強度が向上すると、じん性は低下し、これは被膜密着度の低下につながる。つまり、被膜強度と密着力とはトレードオフの関係にあり、これら相反する性質を同時に作りこむため、

- (1) 配合粒子の選定
 - (2) 配合量
 - (3) 樹脂の選定、焼成温度(架橋度)
- を最適化する材料開発を行なった。

4. 材料試験方法

ピストンの往復運動を模擬するため、材料試験機として、Fig. 3 の往復動摩擦摩耗試験機を用いた。

試験片のディスクに表面処理を施し、左右への往復運動を行い、ピンを用いて上部より荷重をかけ、設定した潤滑雰囲気にて試験を行った。

また、表面処理密着力、実機性能についての評価は、エンジン実機での性能測定、および耐久試験にて行った。

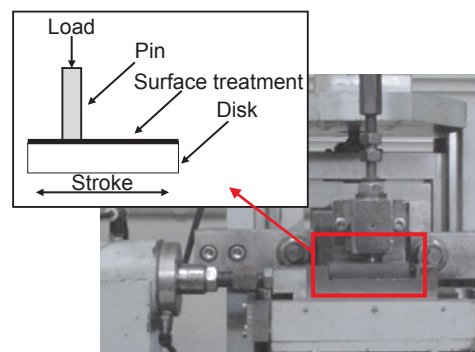


Fig. 3 Dynamic friction abrasion testing machine

5. 試験結果

5.1. オイル吸着効果と対摩耗性

一般的に樹脂材料は濡れ性、親油性が低く⁽⁸⁾、本開発で使用する結合樹脂も例外ではない。本技術は、ピストンスカートの流体潤滑領域を広げる手法に、被膜のオイル保持作用を用いるため、親油性の向上は必要不可欠である。

親油性向上のため、表面処理剤のベース結合樹脂内に微小硬質粒子を配合し、表面特性の改質を行った。この際、配合粒子の大きさによりピストン表面における配合粒子と結合樹脂の面積比が異なるため、表面の摩耗に対する特性が変化する。結合樹脂への粒子配合量を一定とし、粒度を変化させた場合の摩耗量を Fig. 4-(a) に示す。

グラフより、配合粒子の粒度が小さくなるにつれて表面処理部の摩耗量が少なくなることがわかる。これは樹脂表面における配合粒子の比表面積が増え、ピストン表面における摩耗特性の改質効果が大きくなり、オイル潤滑性能が向上したと考えられる。また配合粒子が大きいものは、ピストン表面における比表面積が小さく、表面特性の改質が成されていないのみならず、配合粒子自体によるアブレシブ摩耗を引き起こし、摩耗量が多い。

配合粒子を1 μm 以下にまで分散し配合させることで、樹脂表面における配合粒子の比表面積を増やした場合の、配合量に対する摩耗量の変化を Fig. 4-(b) に、被膜のオイル吸着、保持効果を Fig. 4-(c) に示す。

なお、ここではオイル吸着、保持効果の指標として、オイル併用時の摩耗量 δA_{oil} と無潤滑時の摩耗量 δA_{dry} との比率を使用する。

$$\text{Effect} = 1 - \frac{\delta A_{\text{oil}}}{\delta A_{\text{dry}}} \times 100(\%)$$

グラフによれば、配合粒子量を増すことで、オイル併用時の摩耗量を抑えることができる。しかし、配合重量比が60%を超えると摩耗量が多くなる。これは結合樹脂が配合粒子の許容量を超えると保持できず、ぜい性状態となるためである。

彼我比較として、現在主流の乾性被膜潤滑剤、耐摩耗ピストン表面処理の無電解ニッケルめっき、高強度被膜のDLC(Diamond-like carbon)とのオイル吸着、保持効果の比較結果を Fig. 4-(d) に示す。本開発による被膜のオイル保持効果が高いことがわかる。

5.2. オイル吸着効果と低しゅう動性

微小硬質粒子の配合による表面特性の改質により、耐摩耗性のみならず、しゅう動特性も変化する。結合樹脂への粒子配合量を一定とした場合の、配合粒子平均粒度と動摩擦係数の関係を Fig. 5-(a) に示す。グラフによれば、平均粒度が小さいほどしゅう動抵抗は小さい。また平均粒度の異なる2種類の被膜による表面粗さを Fig. 5-(b) に示す。表面粗さの低減は、しゅう動部の真実接触面積が増えることで面圧が低下し、動摩擦係数の低減に結びつくものと考察される。

総しゅう動距離に対するしゅう動特性の変化を、他の表面処理手法と比較した結果を Fig. 5-(c) に示す。各表面処理は「あたり」「なじみ」の効果により、総しゅう動距離10 000 m 程度で飽和する。本開発表面処理が従来の乾性被膜潤滑剤に対し、初期段階で60%、飽和状態で40%しゅう動抵抗を低減していることがわかる。

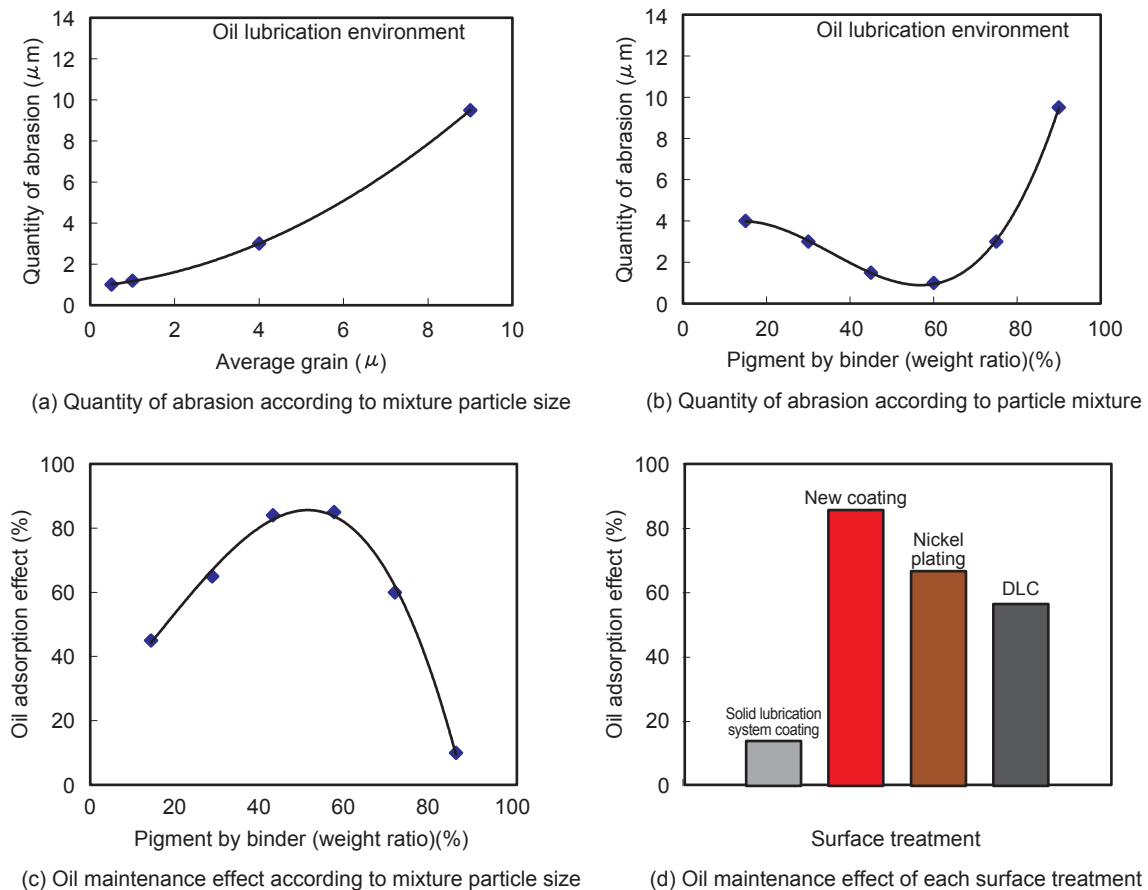


Fig. 4 Oil adsorption effect and anti-abrasivity

5.3. 表面処理の密着性と対摩耗性

結合樹脂は鎖状高分子と呼ばれ、架橋構造を持たせるために焼成し、強度を向上させる⁽⁹⁾。

本技術では、通常トレードオフの関係にある被膜強度と密着力の相反する性質を両立するため、じん性による緩衝を目的とした中間層を用いることにより、高強度被膜から中間層、および中間層からピストンスカートの間の密着性を確保した。電子顕微鏡による断面画像を Fig. 6-(a) に、イメージを -(b) に示す。

密着度を評価するための試験方法として、実機運転試験を行った。実機仕様と試験条件をそれぞれTable 1-(a)、-(b)に示す。

本稿ではピストンのしゅう動に対し、最も厳しい条件を想定し、アルミスリーブ仕様の汎用エンジンを使用し、試験を行った。

Table 1-(a) Engine specifications

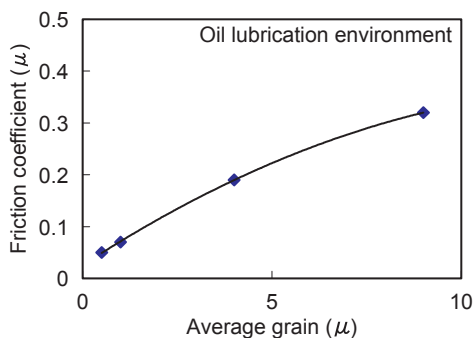
Type	Air-cooled 4-stroke OHC single cylinder
Cylinder	Aluminum cylinder
Bore x stroke	64 x 50 mm
Displacement	160 cm ³
Compression ratio	8.5:1
Lubrication system	Forced splash

Table 1-(b) Test condition

Engine speed	3600 rpm
Throttle	Wide open throttle
Fuel	Regular (Density 0.7304 g/cm ³)
Oil	API SJ SAE 10W-30
Oil maintenance	Upper to lower

試験後のピストン接写写真と摩耗量を Table 2 に示す。20 時間の運転結果より、従来の乾性被膜潤滑剤に比べ、本開発被膜はスカート部の金属素地は見られず、耐摩耗性が向上しているのがわかる。これは従来の乾性被膜潤滑剤が自己潤滑によって低フリクションとなるのに対し、本技術がオイル保持によって低フリクションとなることの違いが明確に表れたものと考えられる。また、150 時間運転後の結果より、被膜の摩耗は、20 時間から 150 時間までの運転にて 2 μ m の定常摩耗を示し、被膜性能の長期性能持続がみられる。

また、中間層を用いたことにより高強度被膜の密着力が向上し、表面層の剥離等は見られない。



(a) Relationship between friction and average grain



(b) Surface coarseness according to grain size

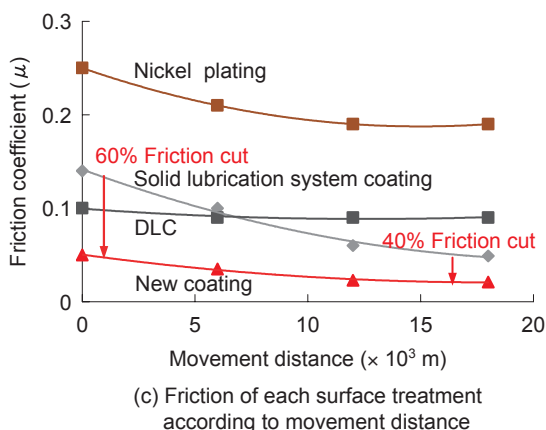
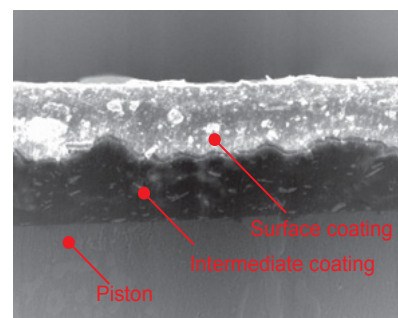
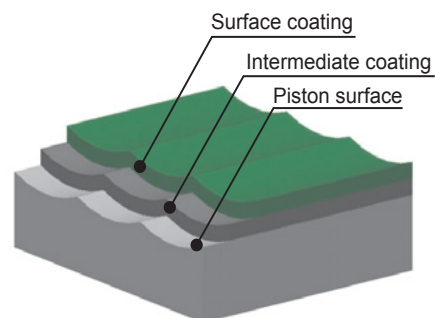


Fig. 5 Oil adsorption effect and friction



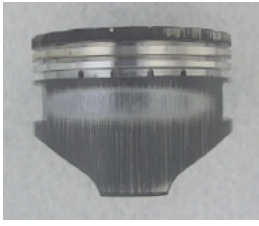
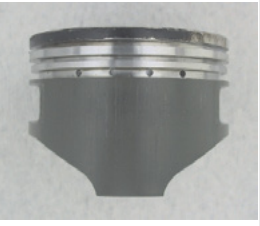
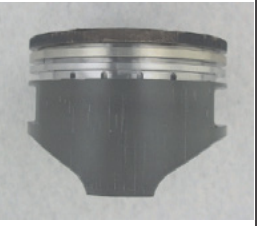
(a) SEM image of piston surface



(b) Cut image of piston surface

Fig. 6 Image of piston surface

Table 2 Engine durability test result

	Conventional coating	New coating	New coating
Piston surface (Thrust side)			
Operation time	20 h	20 h	150 h
Quantity of abrasion	Worn out (Coat 15 μm)	4 μm	6 μm

5.4. 実機性能試験結果

同一の試験エンジンに、ピストンのみを組み換えることで、各表面処理別のエンジンの出力性能を測定した。測定結果の全開出力特性線図を Fig. 7 に示す。

測定データより、全負荷 3600 rpm 時にて、以下の効果が得られる。

- (1) 表面処理無しから、本開発表面処理について
4.9%出力向上
- (2) 表面処理無しから、従来の乾性固体潤滑被膜について
2.4%出力向上
- (3) 従来の乾性固体潤滑被膜から、本開発表面処理について
2.4%出力向上

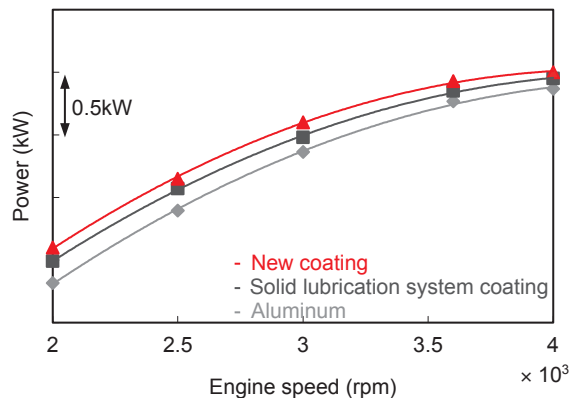


Fig. 7 Power curve

6. まとめ

- (1) ピストンの表面にオイル吸着、保持効果を持たせ、特性を変化させることにより、低フリクションと耐摩耗性を両立させる高強度被膜を開発した。
- (2) 往復動摩擦摩耗試験結果より、従来の乾性固体潤滑被膜と比較し、約5倍の耐摩耗性向上、約40%のフリクション低減が確認できた。
- (3) 実機全開出力測定結果より、本表面処理を施す事にて、約4.9%の出力向上を確認することができた。

7. おわりに

内燃機関は社会環境等の要求に応じるべく開発、改善が成されてきた。ピストンはその一部であり、根幹部品の一つである。高性能の維持、寿命延命は、社会的経済効果、化石燃料の枯渇、環境問題等には必要不可欠な要素であると考え、本研究がその一助になることを切実に願う。

謝 辞

開発にあたり、多大な協力を頂いた住鋳潤滑剤(株)黒田様、山口様、住友金属鋁山(株)佐藤様を始めとする関係者各位に、紙面を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- (1) 鈴木孝：環境のためのエンジン技術動向とトライボロジー，トライボロジスト，Vol.49, No.10, p.750(2004)
- (2) 染谷常雄：エンジンのトライボロジー，ENGINE TECHNOLOGY, Vol.1, No.2, p.24(1999)
- (3) 三宅紀明：ピストンのトライボロジー技術，トライボロジスト，Vol.50, No.9, p.650(2005)
- (4) 木村好次，岡部平八郎：トライボロジー概論，養賢堂，p.120(1982)
- (5) 松谷隆司，中田高義，新保善一，久保田隆：ボア壁温分布改善用ウォータージャケットスパーサ，自動車技術会学術講演会前刷集，No.36-04, p.19-22(2004)
- (6) 村上元一，許斐敏明，野平英隆，前田頼成，中田雅彦：エンジン実動時のピストン摩擦力解析，自動車技術会論文集，Vol.22, No.4, p.70-73(1991)
- (7) 松永正久：固体潤滑ハンドブック，幸書房，p.237(1978)
- (8) 石井淑夫：ぬれ技術ハンドブック，テクノシステムp.89(2001)
- (9) 栗原福次：高分子材料大百科，日刊工業新聞社，p.20(1999)

■著 者■



杉村健太郎