

内燃機関用ピストンについて摩擦発生メカニズム解明

小林 邦彦
Kunihiko Kobayashi

概要

内燃機関の熱効率向上に貢献するピストンスカート部の摺動摩擦抵抗の低減のために、摩擦発生メカニズムの把握が重要となる。本研究では、エンジン実働中の摩擦発生の原理原則となるピストンスカート部の潤滑状態を把握し、発生摩擦力との関係性を明確にした。

1. はじめに

地球温暖化対策が近年世界的に加速しており、2050年までにカーボンニュートラルをコミットした国々は123カ国1地域に及んでいる¹⁾。日本でも2020年12月に政府から「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が打ち出され、CO₂排出量の大きな割合を占める自動車産業では電動化の強力推進が示されている²⁾。これに伴い電動化に即したエネルギー効率の非常に高いエンジン開発が求められている。図1にエンジン熱効率の推移を示す³⁾。熱効率は2010年頃に40%程であったが、SIP(戦略イノベーション創造プログラム)革新的燃焼技術による研究が2014年から5年間取り組まれ、ガソリンエンジンにおいて51.5%を達成した⁴⁾。この高熱効率達成にはエンジンの機械摩擦損失の低減も大きく貢献している。図2にエンジンの摩擦損失割合の例を示す⁵⁾。摩擦損失の中でピストン・リング系の占める割合は約40%に達する。

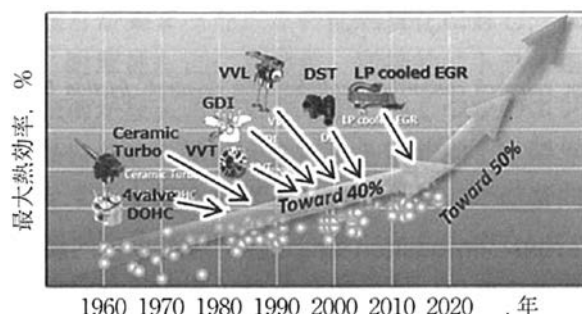


図1 熱効率の推移〔出典:文献3〕

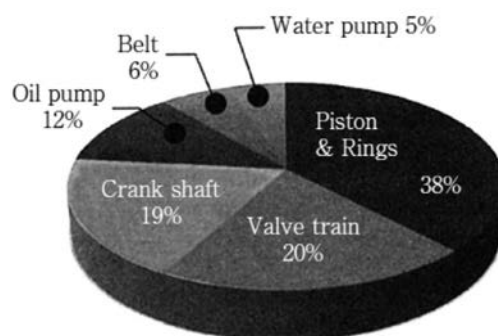


図2 ガソリンエンジンの摩擦損失〔出典:文献5〕

ピストンスカート摩擦低減には摺動状態の把握が重要となるが、以下の3点を考慮する必要がある。第一に摺動速度の変動の大きさである(一般的なガソリンエンジンでは0~約40m/s)。第二に摺動面における垂直荷重の変動が大きく(一般的なガソリンエンジンで0~約8kN)、またピストン挙動が随時変化することによる摺動面の荷重面圧の変化である。最後に摺動面に付与されるエンジンオイル温度が低温(氷点下レベル)から高温(100℃超)となることによる粘度変化の大きさである。この3点の環境を単体試験レベルで再現するのは難しく、実働エンジンを用いた確認が必要になる。

本研究ではエンジン実働中のピストンスカートの潤滑観察、また摩擦計測の計測を行い、ピストンスカートの摩擦発生メカニズムについて報告する。

2. 潤滑観察、摩擦計測方法

エンジン実働中のピストンスカートの潤滑観察、摩擦計測について、簡単に方法を紹介する。

図3にピストンスカート形状(スカートプロファイル)の例を示す。エンジンシリンダ内で摺動するピストンで

は、油膜形成を促進するスカートプロファイルが形成されている。図4にエンジン実働中のピストン傾き角度推移の例を示す。スカートプロファイルによってシリンダ内摺動時のピストンには2次運動が発生する。これにより摺動中にスカートとシリンダ間には様々な接触状態が発生する。また摺動方向に往復動を行っているため、摺動速度も時間的な変化が発生する。

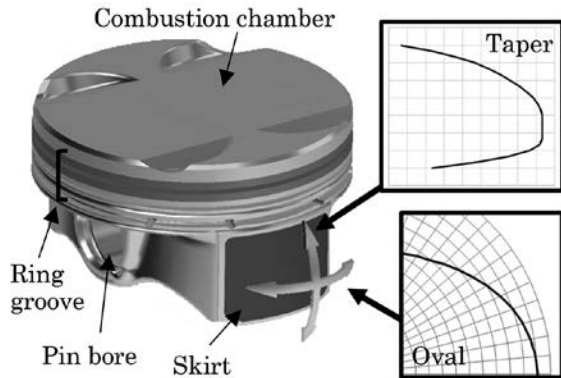


図3 スカートのプロファイル

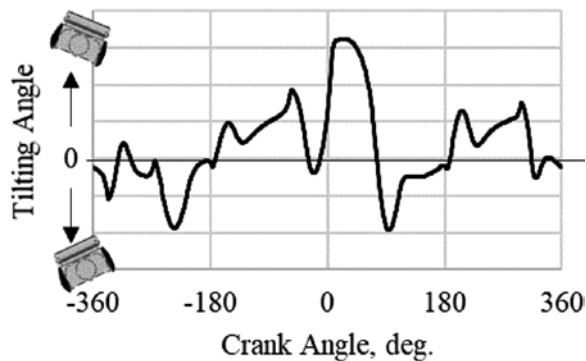


図4 ピストン傾き角度の推移

図5に膨張行程時ピストンスカート部摩擦仕事のEHD(Elastic HydroDynamics,弾性流体力学)解析結果の例を示す。時間的に摩擦仕事の変動だけでなく任意の時間で境界摩擦と流体摩擦が混在し、また混在する割合も随時変化しており空間内で潤滑状態が変化していることがわかる。そのため空間的、時間的な潤滑、摩擦の変化を捉えることが可能な観察、計測方法が必要になる。

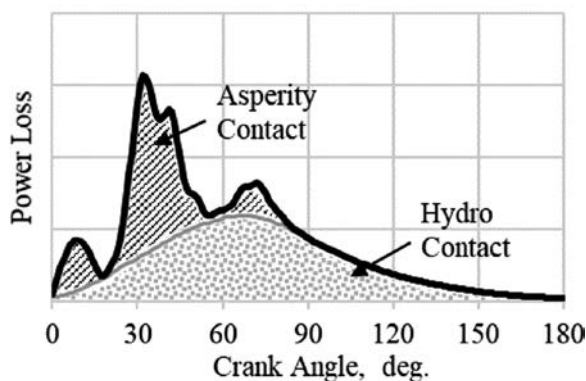


図5 摩擦仕事の推移

2.1 潤滑観察方法

本研究では、LIF(Laser Induced Fluorescence, レーザー誘起蛍光)法を用いたピストンスカート油膜厚さ測定⁶⁾を行った。

計測装置の概要を図6に示す。本計測エンジンではシリンダをサファイア製とし外部からカメラを用いてピストンスカート全体撮影が任意の時間で可能となっている。エンジンオイルには蛍光剤が混合されておりYAGレーザーの照射によりオイルを蛍光させ発光輝度を撮影する。発光輝度と油膜厚さには相関があるので、別途取得したキャリブレーションデータを用いて油膜厚さへ変換を行う。これにより空間的、時間的なピストンスカートの油膜厚さの把握が可能となる。

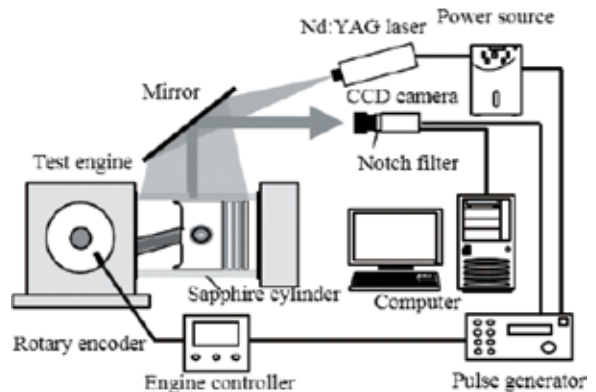


図6 油膜厚さ計測装置概要 (出典:文献6))

2.2 摩擦計測方法

本研究では、浮動ライナー法によるピストンスカート摩擦測定⁷⁻⁹⁾を行った。

計測装置の概要を図7に示す。シリンダブロック下端に設置されたロードワッシャーを介して浮動状態のライナーを締結している。ピストン摺動時の抵抗がライナーを介してロードワッシャーに伝わることでピストンスカートの摩擦力を測定する。これにより時間的なピストンスカートの摩擦の把握が可能となる。

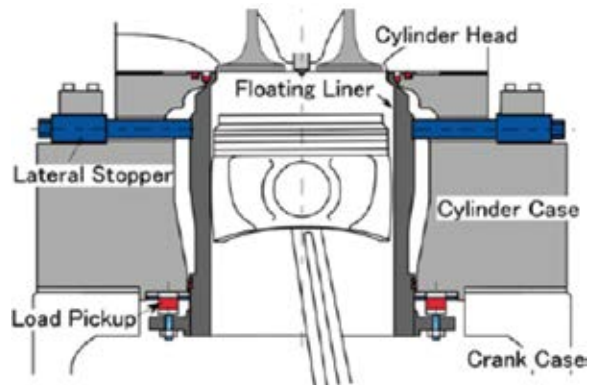


図7 摩擦計測装置概要 (出典:文献9))

3. 潤滑状態と摩擦の関係

3.1 摺動速度,摺動面垂直荷重による影響

図8にエンジン回転1500rpm,モータリング,スロットル全開運転における,ATDC (After Top Dead Center) 0deg.,ATDC60deg.,ATDC120deg.のピストンスカート 油膜厚さ分布を示す⁶⁾.

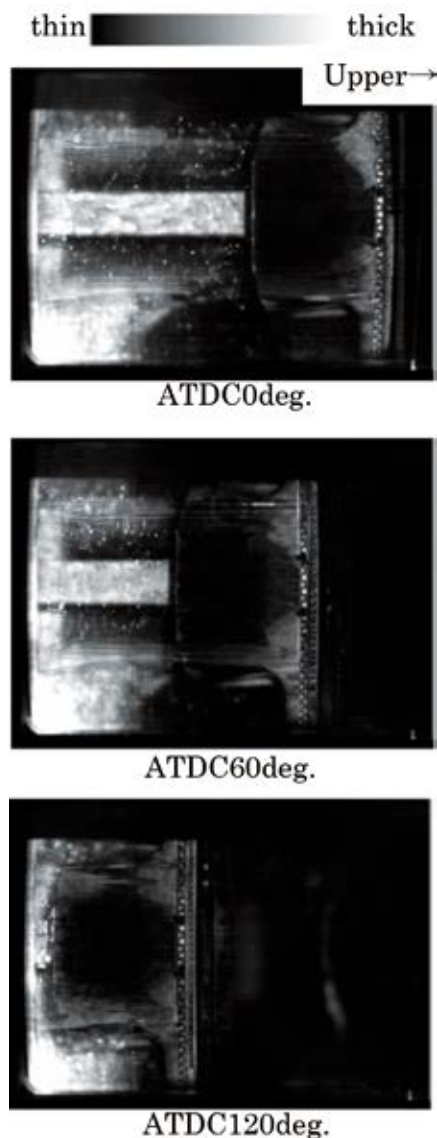


図8 スカート油膜厚さ分布 [出典:文献6)]

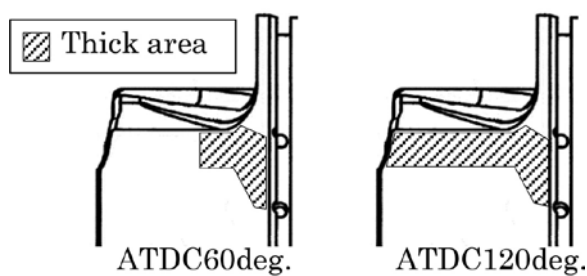


図9 油膜厚さの厚い領域

クランク角度の変化に伴い油膜厚さ分布は変化しており,空間的な潤滑状態の変化が発生していることがわかる.

また図8の結果から,ATDC60deg.とATDC120deg.について相対的に油膜厚さの厚い領域を抽出した結果を図9に示す.ATDC60deg.に比べATDC120deg.は油膜の厚い領域がスカート下部まで広がっていることから,油膜形成が促進されていることがわかる.これは摺動速度と摺動面垂直荷重が影響していると考えられる.図10に今回の運転条件における摺動速度と摺動面垂直荷重の推移を示す.ATDC120deg.では,摺動速度が遅くなるが摺動面垂直荷重も低いいため結果油膜形成が促進される.このようにクランク角度変化,つまり時間的な変化に対し潤滑状態も変化している.

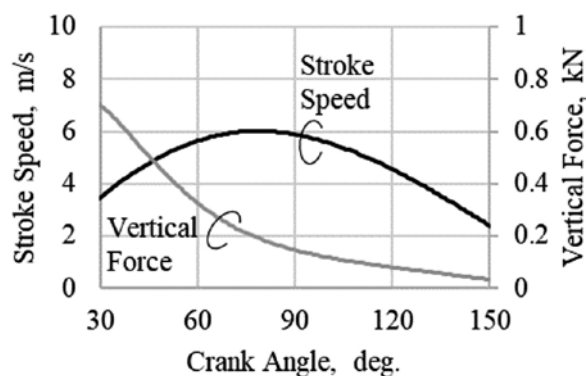


図10 摺動速度,垂直荷重の推移

図11に今回に近い運転条件であるエンジン回転1000rpm,モータリング,スロットル全開における平均摩擦係数(摩擦力から垂直荷重を除いた値)の推移を示す.先ほど時間的に油膜形成に変化が見られたATDC60deg.とATDC120deg.を見ると,より油膜が形成されているATDC120deg.の平均摩擦係数が小さいことがわかる.

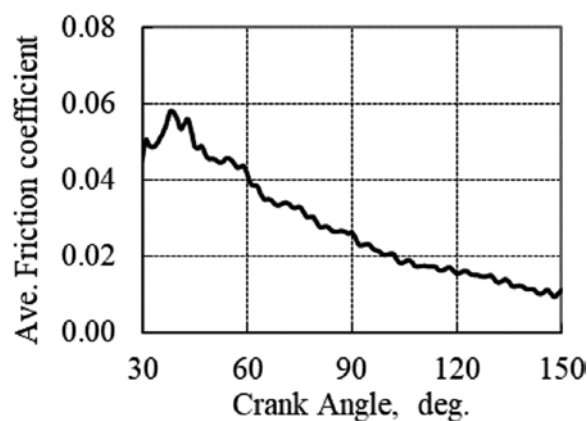


図11 平均摩擦係数の推移

3.2 表面性状による影響

図12にエンジン回転1000rpm,モータリング,スロットル全開運転における,クランク角度ATDC20deg.時の表面性状3種類についてピストンスカート油膜厚さ分布を示す¹⁰⁾.ここで各表面性状仕様は,Standard:量

産ピストンで使用される標準的な条痕仕様,FPB (Fine Particle Bombarding Process,微粒子衝突法) 処理¹¹⁾を施した仕様,Smooth:鏡面加工を施した仕様であり,各仕様の表面粗さはStandard:Ra3.8,FPB:Ra1.6,Smooth:Ra0.5となっている.また図12左側のAは $0\mu\text{m}$ から $40\mu\text{m}$ レンジの油膜厚さ分布,右側のBは $0\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ レンジの油膜厚さ分布を示している.

図12Bから,Standardはピストンスカート中央部に油膜厚さ $0\mu\text{m}$ となる領域が存在し,この領域は境界または混合潤滑状態となり粗さの先端が接触していると考えられる.Standardに対して低粗さとなるFPB及びSmoothは油膜厚さ $0\mu\text{m}$ が発生しておらず,ピストンスカート全体が流体潤滑状態であった.

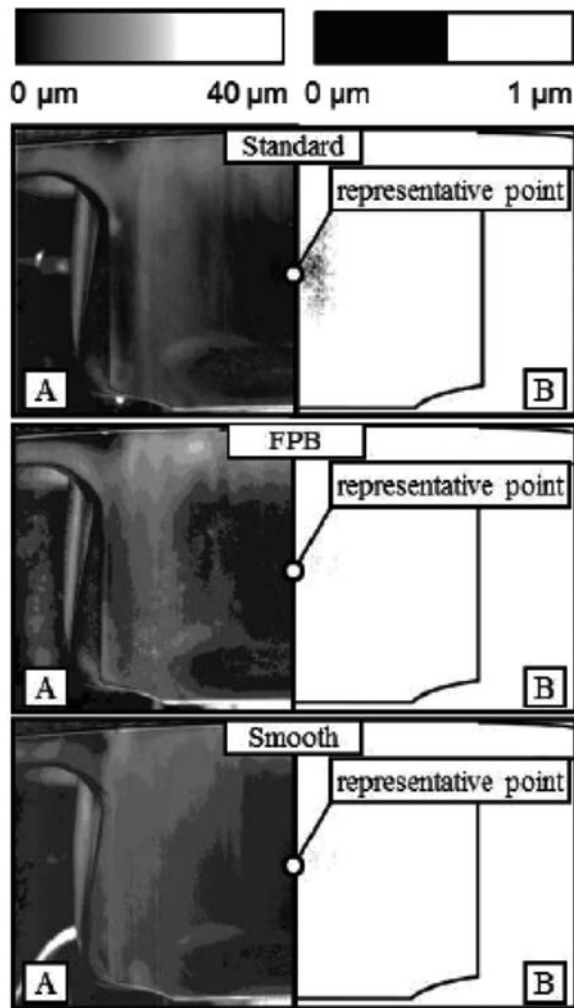


図12 表面性状3種のスカート油膜厚さ分布 (ATDC20deg.) [出典:文献10)]

また図12の結果から,ピストンスカート中央部を代表点としたStandardに対する各仕様の油膜厚さ変化率を図13に示す.ピストンスカート中央部の油膜厚さは,Standardが最も薄く,続いてFPBがStandardに対し24%厚くなり,SmoothがStandardに対し43%厚くなっており,表面粗さが細かくなると油膜厚さが厚くなる傾向が示されている.

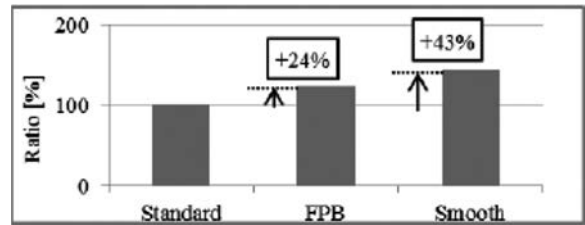


図13 表面性状3種のスカート油膜厚さ変化率 (ATDC20deg.) [出典:文献10)]

更に図14にクランク角度ATDC80deg.におけるピストンスカート中央部を代表点とした Standard に対する各仕様の油膜厚さ変化率を示す.表面粗さが細かくなると油膜厚さが厚くなる傾向はATDC20deg.と同様だが,SmoothではStandardに対し74%油膜厚さが厚くなっており,ATDC20deg.に比べ大幅に増加している.ATDC80deg.ではATDC20deg.に比べ摺動速度が速くなるため,油膜形成にくさび効果の影響が強い状態となっている.本結果から,表面粗さが平滑化された状態ではくさび効果がより促進されていると考える.

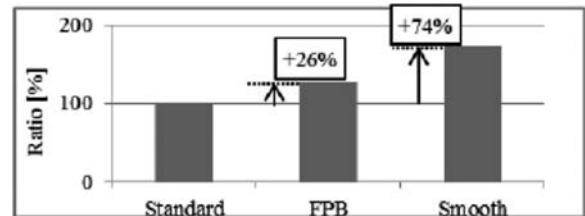


図14 表面性状3種のスカート油膜厚さ変化率 (ATDC80deg.) [出典:文献10)]

また図15にエンジン回転1000rpm,モータリング,スロットル全開におけるStandard,FPB,Smoothの摩擦力の推移を示す.先ほどの油膜厚さを計測したATDC20deg.とATDC80deg.について着目すると,ATDC20deg.では摺動面垂直荷重が大きくなることで摩擦力も大きくなり表面性状3種類の差が大きく表れ,また油膜厚さとの相関も見られる.対してATDC80deg.では摺動面垂直荷重が小さくなることで摩擦力が小さくなり表面性状3種類の差も小さくなった.このことからピストンスカートの潤滑状態の変化は,摺動面垂直荷重が大きい時に摩擦へ大きく影響することがわかる.

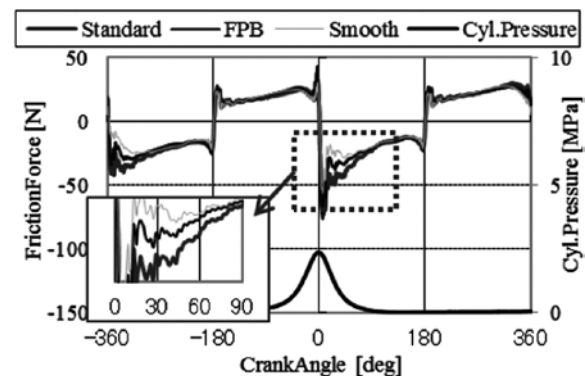


図15 表面性状3種の摩擦力推移 [出典:文献10)]

4. おわりに

エンジン熱効率を上げることが今後のカーボンニュートラルに大きく貢献でき、そのためには個々の要素技術の更なる開発が必要である。本研究では、ピストンスカート部の潤滑現象の観察と観察結果に紐づいた計測結果から摩擦発生メカニズムを明確にしたが、この結果を予測技術へ反映し要素技術開発を加速していくことが重要であり、現在取り組みを進めている。

最後に本研究遂行にあたり、油膜厚さ計測については、群馬大学大学院 理工学府 石間経章教授また鈴木秀和様、摩擦測定については、東京都市大学 理工学部 伊東明美教授に多大なるご協力を頂いた。ここに篤くお礼申し上げます。

なお本稿は、一般社団法人 日本トライボロジー学会発行 トライボロジスト 第67巻 第2号(2022)に掲載された解説記事「エンジン実働中のピストンスカートにおける潤滑状態と摩擦特性」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:2050年カーボンニュートラルを巡る国内外の動き(2020).
- 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:自動車のトライボロジーに関する産学連携研究のこれまでとこれから,トライボロジスト,65,6(2020) 329.
- 4) 科学技術振興機構:SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)革新的燃焼技術成果集(2019).
- 5) 山川:ピストンの摩擦抵抗技術の動向,トライボロジスト,62,12(2017) 754.
- 6) 藤田・加藤・石間・金井・鈴木・小保方:ピストンプロフィールが潤滑油膜挙動に与える影響,自動車技術会論文集,Vol.42,No.1,20174438(2017).
- 7) S.FURUHAMA & M.TAKIGUCHI:Measurement of Piston Frictional Force in Actual Operating Diesel Engine,SAE TRANSACTIONS,790855(1979).
- 8) 伊東:エンジンの低摩擦化を支える計測技術,トライボロジスト,65,7(2020) 431.
- 9) 伊東・山坂・岡本・森本:浮動ライナー法による各種ピストン摩擦力測定装置の比較,自動車技術会論文集,Vol.48,No.3,20174438(2017).
- 10) 垂澤・山口・山川・小田橋・石間・鈴木:ピストンスカート部の可視化による潤滑状態の研究,自動車技術会論文集,Vol.47,No.5,20164530(2016).
- 11) 金井・垂澤・藤原:ガソリンエンジン用ピストンのフリクション低減技術,自動車技術会論文集,Vol.44,No.2,20134192(2013).

筆 者



小林 邦彦

アート金属工業株式会社
研究開発本部 製品技術部
ピストン機能検証技術開発に従事