

自動車エンジン摺動面の潤滑技術の動向



河川 健太郎
Kentaro KAWAGUCHI

マツダ(株) 技術研究所 次世代パワーソース研究部門 革新PT構造研究

1. はじめに

近年注目されているグローバルリスクの中で、今後10年間で発生の可能性が高いリスクとして、「異常気象」、「気候変動への適応の失敗」、「人為的な環境災害」などが挙げられており(図1)、地球温暖化の要因とされるCO₂に代表される温室効果ガスの排出量削減が世界の潮流となっている。

その中で、事業活動などで排出されるCO₂量を、ほかの場所での削減活動や吸収活動によりプラスマイナスゼロにする「カーボンニュートラル」を2050年までに実現することを、日本を含む124以上の国と地域が表明している。自動車業界においてもこれらを前提としたCO₂削減目標を掲げており、燃料採掘から走行までを考えたWell-to-Wheel視点および自動車のライフサイクル(原料調達・製造・使用・リサイクル・廃棄)の視点でCO₂削減を進めている。各国の電源構成や環境規制、顧客のニーズに応じたソリューションの提供が求められる中で、内燃機関の熱効率向上は引き続き重要な課題である。内燃機関の損失における機械損失(摩擦損失)は排気損失、冷却損失に次いで大きな損失割合を占めており、機械部

	1位	2位	3位	4位	5位
2021	異常気象	気候変動への適応(あるいは対応)の失敗	人為的な環境災害	感染症	生物多様性の喪失
2020	異常気象	気候変動への適応(あるいは対応)の失敗	自然災害	生物多様性の喪失	人為的な環境災害
2019	異常気象	気候変動への適応(あるいは対応)の失敗	自然災害	データの不正利用または窃盗	サイバー攻撃
2019	異常気象	自然災害	サイバー攻撃	データの不正利用または窃盗	気候変動への適応(あるいは対応)の失敗
2017	異常気象	非自発的移住	自然災害	テロ攻撃	データの不正利用または窃盗

図1 今後10年間で発生の可能性が高い上位グローバルリスク¹⁾

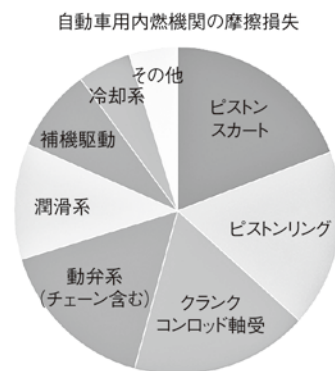
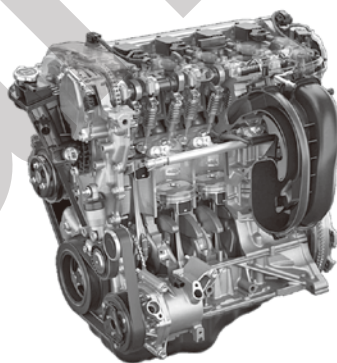


図2 エンジン摺動面における各部品の損失割合

品の故障の多くは摺動面で発生することから、エンジン摺動面のトライボロジー技術は重要な技術課題である。本稿では、エンジン摺動面の技術について開発事例を交えて解説する。

2. エンジントライボロジー

エンジンには摺動部品が多く、各部品

の摩擦抵抗の占める割合はおおむね図2のとおりである。各部品において摩擦抵抗低減を図る場合に重要となるのは、摩擦抵抗低減とトレードオフとなる焼付きや摩耗といったトライボロジー諸問題との両立である。これらを実機で行うには多くの工数を要するため、机上予測技術開発が進められている。そして、開発し

【著者問合せ先】

〒735-0028 広島県安芸郡府中町新地3-1

Tel.082-565-2658

E-mail kawaguchi.kent@mazda.co.jp

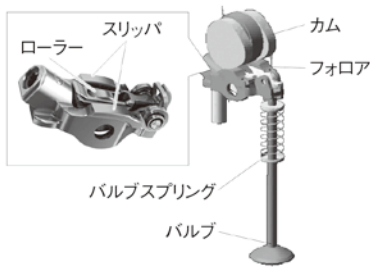


図3 可変バルブリフト機構

たトライボロジー解析技術を用いて、諸問題のメカニズム解明や仮説検証、最適化の適用、方向性の把握などを行い、様々な因子が複雑に作用し最適な設計が困難なエンジンの運動部位の仕様決定に活用している。

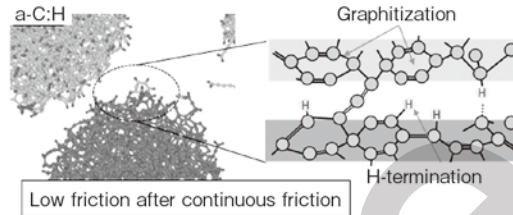
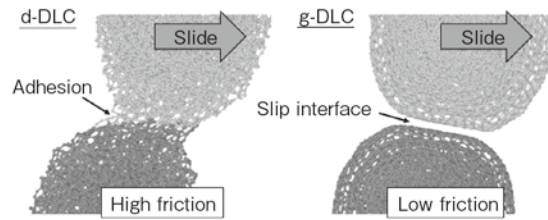
3. 動弁系

動弁系においては、直動式の場合はカムとバルブリフターのすべり摺動、ロッカーアーム式の場合はカムとローラーの転がり摺動によってバルブを駆動させる。ロッカーアーム式の採用により、転がり摺動にすることで摩擦低減が可能である。また近年、燃焼効率を高めるために可変バルブリフト機構が開発されている。図3にSKYACTIV 2.2Lディーゼルエンジンに採用されている構造例を示す。ローラーとスリッパ（すべり接触）の摺動面が存在し、バルブのリフト量を制御している。これら動弁機構の摺動面はすべり速度が小さいために境界潤滑状態が主となることから、低摩擦、耐摩耗性を高めるコーティングが摺動面に施されることがある。この中で、DLC (Diamond-Like Carbon) は低摩擦、耐摩耗性に優れたコーティング材料として適用例が増えている。

3-1 DLCの摩擦メカニズム

DLCはダイヤモンドとグラファイトの中間構造である非晶質炭素膜であり、水素を含む水素化アモルファスカーボン (a-C:H) と水素を含まないアモルファスカーボン (a-C)、水素を含まず結晶構造の割合が大きいテトラヘドラルアモルファスカーボン (ta-C) が存在する。DLCの低摩擦や摩耗抑制のメカニズムとして、DLC表面のグラファイト化や相手材

(a) 分子動力学法によるDLCの摩擦メカニズム検討



(b) 摩擦実験および表面分析によるa-C:Hの摩擦メカニズム検証

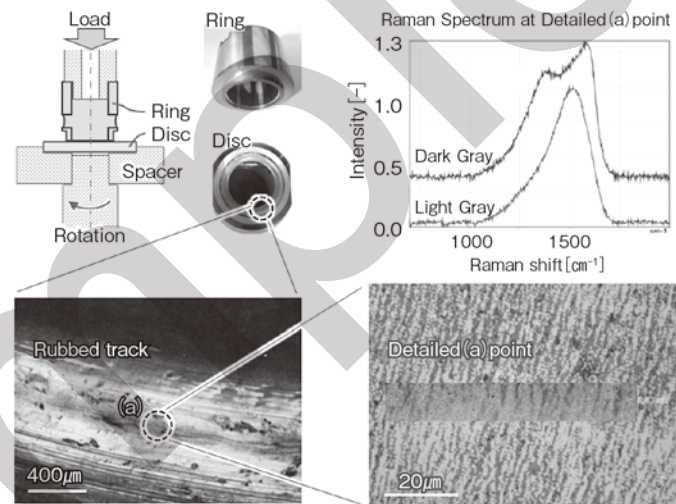


図4 DLCの低摩擦メカニズム検討²⁾

への移着、DLC表面への水素基または水酸基終端などが提言されている。しかし、境界潤滑の摺動面をその場観察することは難易度が高く、原子レベルの構造変化や化学反応を伴う現象解明が困難であるため、詳細な摩擦メカニズムは不明な点も存在する。

そこで、原子同士の相互作用から分子構造の挙動を解く分子動力学法を用いて異なる膜質のDLCモデルの摩擦特性を計算した例を図4(a)に示す。その結果、ダイヤモンドに近いDLC(d-DLC)は摺動面で原子同士の化学結合(共有結合)が発生し高摩擦になるのに対して、グラファイトに近いDLC(g-DLC)は摩擦界面ですべり面を維持し低摩擦を示すことが

明らかとなった。これは表面の未結合手(化学結合の手が余った状態)を持つ炭素がd-DLCでは多く存在し、g-DLCでは最小化されていることに起因する。また、a-C:Hは繰り返し摩擦することでグラファイト状炭素が形成され低摩擦化することが明らかになった。これらの結果の妥当検証のため、リングオンディスク型摩擦試験機でa-C:H同士の摺動試験を実施し、摺動面のラマン分光分析を実施した(図4(b))。その結果、低摩擦を示した表面の一部でグラファイト構造の特徴であるGピークとDピークが観察された。これは、摺動部の一部でグラファイト構造が形成されていることを示しており、DLCの低摩擦化にはグラファイト構造の

◆ CLUSTER_0 ■ CLUSTER_1 ▲ CLUSTER_2 × CLUSTER_3 ✕ CLUSTER_4 ● CLUSTER_5

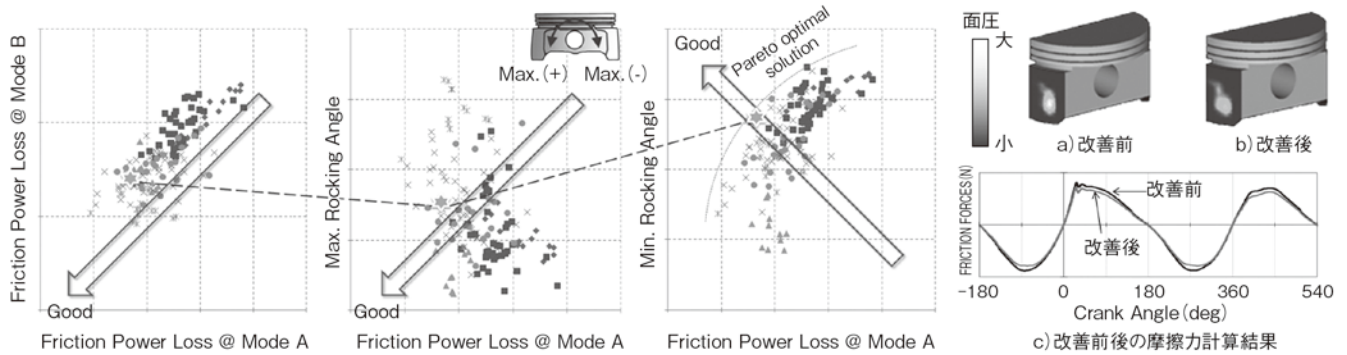


図5 ピストンスカートの摩擦低減⁴⁾

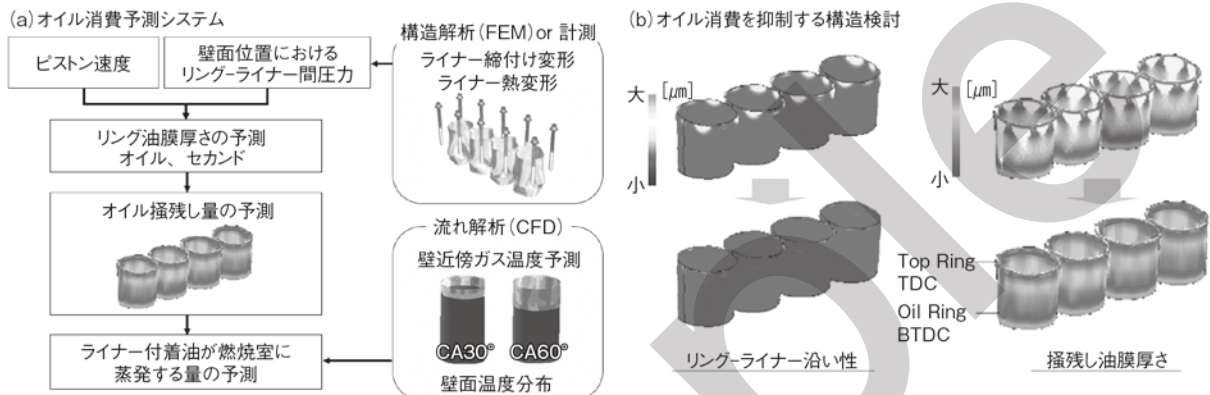


図6 ピストンリングとシリンダライナー間の掻残し油膜厚さ⁵⁾

形成が重要であることが示された²⁾。

オイル潤滑環境下においては、ta-C表面とオイルとの相互作用により低摩擦化することが示唆されており³⁾、コーティングの仕様決定には、これらの原子レベルの解析技術と摺動面の化学的変化を観察可能な実験技術を用いた検討が有効であると考えられる。

4. ピストン

ピストンはエンジンの摩擦抵抗の約3割を占め、その抵抗低減が重要である。ピストンの摺動部は、スカート部とピストンリングがあるが、それらの摩擦抵抗はおおよそ同じ割合となっている。

4-1 ピストンスカート

ピストンスカートはピストンの姿勢制御の機能を持っており、仕様決定にあたって、姿勢制御と摩擦抵抗のバランス取りが重要となる。ピンオフセットによりスラスト/半スラスト側でスカートがシリンダライナーから受ける荷重が変わるため、スカート面積や表面プロファ

イルをそれぞれ変化させた設計がなされている。また、スカートの摩擦係数を低減するためコーティング技術も進化しており、MoS₂などの低摩擦固体潤滑剤を含むコーティングなども提案されている。スカートプロファイルの設計に関して、姿勢制御のためにプロファイルを直線的にすると摩擦抵抗は増加し、反対にたる型にすると摩擦抵抗は小さくなるが二次運動が大きくなり、スラップといった異音問題や焼付きなど、ほかの信頼性諸問題が発生する。このように、摩擦抵抗低減とトレードオフ問題が多く存在する場合に有効な解析技術が最適化検討である。

図5は、設計変数にピストンスカートプロファイルやピン穴オフセット量、目的関数に摩擦抵抗低減、制約条件に首振り角、Wear Load値(それぞれ二次運動/焼付きの代用特性)などを定義した、ピストン挙動最適化検討事例である。結果、ピストンスカートの局所で生じやすい強い当たりを緩和し、境界潤滑状態あるい

は固体接触を防ぐことによって摩擦や焼付きを防止するとともに、摩擦抵抗を低減することに成功した⁴⁾。

4-2 ピストンリング

ピストンリングは一般的にトップリング、セカンドリング、オイルリングの三つで構成され、トップリングは燃焼ガスをシールする機能、オイルリングはライナーに付着したオイルを掻き落とす機能、セカンドリングは両方の機能を受け持つ構成となっている。ピストンリングの摩擦抵抗を図るに当たって重要となるのが、各リング機能との両立である。摩擦低減のためにリングの張り力を低下させるとシール性、オイル掻き性は悪化するため、ピストンリングとシリンダライナー間の沿い性を高めることが重要であり、ライナーを保持するシリンダブロックの構造を適切に制御する必要がある。

図6(a)はリングとライナー間の沿い性からオイル消費を予測するシステムを示す。ライナーはヘッドボルトの締付け

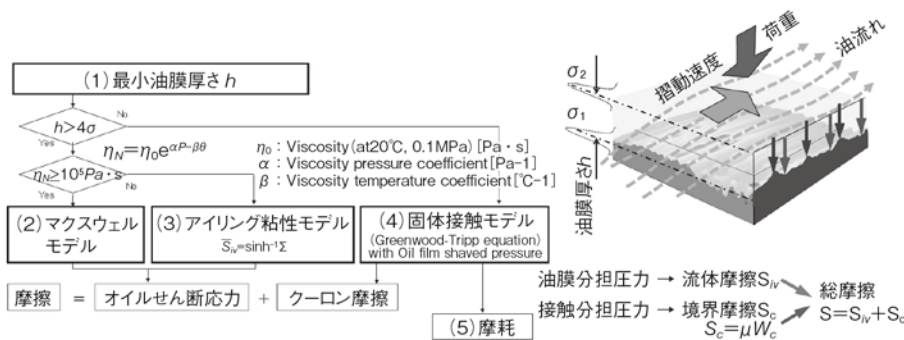


図7 クランクシャフト軸受の摩耗予測計算手法⁶⁾

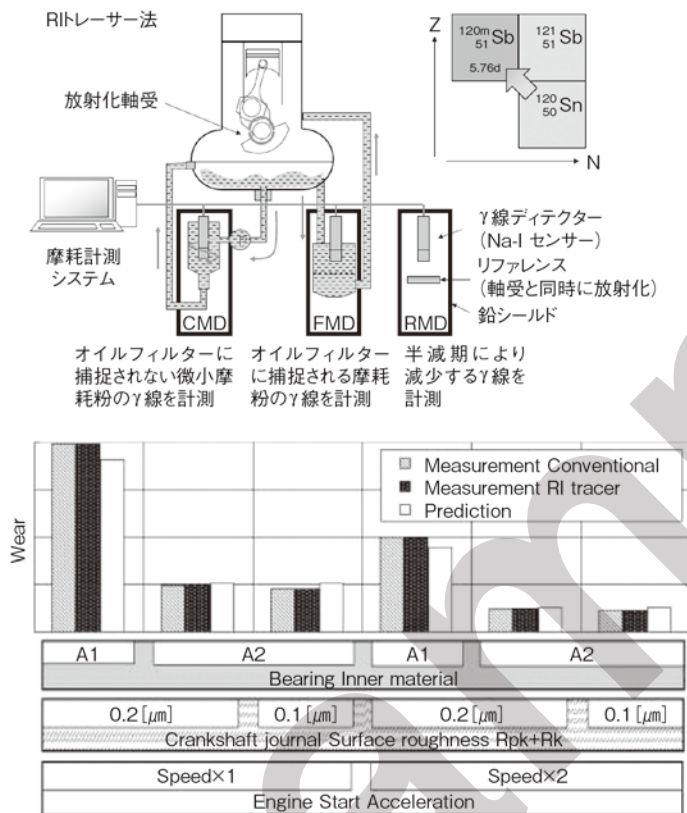


図9 クランクシャフト軸受の摩耗計測⁶⁾

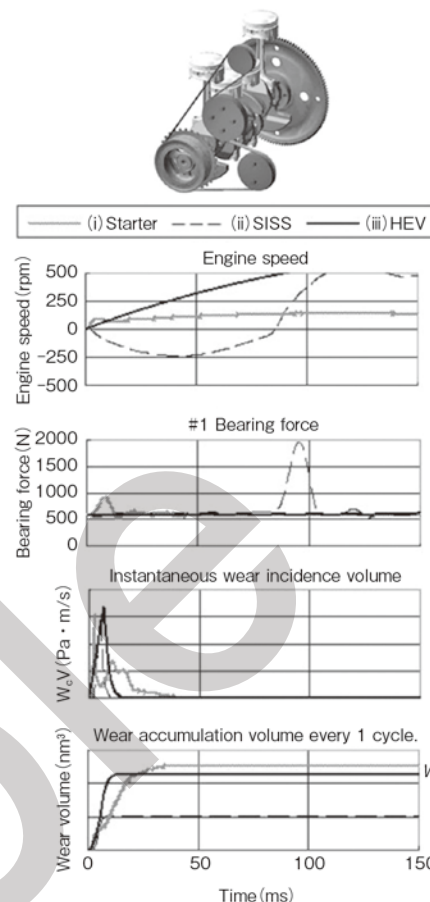


図8 摩耗計算結果⁶⁾

や実働時の熱・応力の影響を受けて変形するため、製造ばらつきや運転条件(使われ方)に対してロバスト性を有するブロック構造検討が必要である。図6(b)に品質工学に基づき構造検討を実施した例を示す。あらゆるノイズに対してシリンダーブロックの構造因子のロバスト性(S/N比)を評価し、ノイズに強い構造因子を抽出する。抽出した因子に対して、リングの沿い性を高める構造制御を行う2段階設計により、低張力リングでもシリンダーライナーに沿わせることができ、オイル消費を抑えることに成功した⁵⁾。

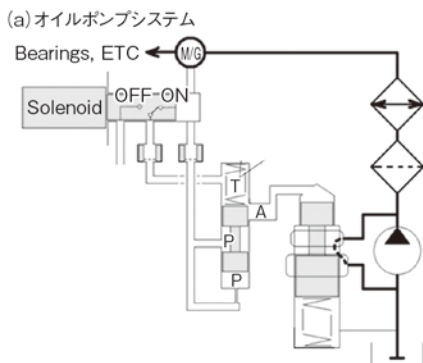
5. クランクシャフト軸受

クランクシャフト軸受にはすべり軸受が使われており、停止・始動時以外は流体潤滑域で使用される。アイドルストップやハイブリッド車(HEV)においては、エンジンの停止・始動回数が大幅に増加し、境界潤滑域で運転される頻度が増加するため、摩耗、摩擦損失増加の懸念がある。

5-1 摩耗予測技術

軸受の摩耗評価には古くから弾性流体潤滑(EHL)計算手法が研究され、この主流はPatir-Chengの修正レイノルズ方程

式を基本にしたものであるが、運転条件や形状など大量の条件を振って計算を行うには計算時間が長く、また境界潤滑が支配的な領域では流体計算が主体ではないので、アイドルストップ、HEVのエンジン停止から始動時の評価には適さない。このため摩耗と摩擦損失の解を求めるに当たり、図7に示す予測計算評価手法を開発した。Pan-Hamrockの中央油膜厚さの式にPatir-Chengの平均流れ係数を取り入れた中原らの研究モデル⁷⁾を適用し油膜厚さを求め、この油膜厚さと表面粗さからGreenwood-Trippの固体接触モデル⁸⁾により瞬時の固体接触荷重を求めた。この瞬時の固体接触荷重、摺動速度、摺動距離から瞬時発生摩耗量を導き、サイクル数を考慮した時間で積分し任意のサイクル数における摩耗量を求めた。図8は一般的なスターターによる始動、スターターを使用しない燃焼エネルギーによる始動、HEV用高出力モーターによる始動の3種類の始動時におけるエンジン



(a) オイルポンプシステム

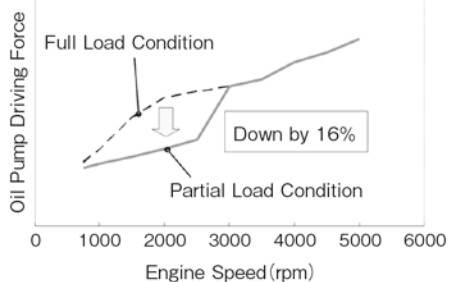


図10 潤滑システム⁴⁾

ンフロント側主軸受の摩耗計算結果を比較した結果である。極低回転時に境界潤滑が発生しており、この期間において摩耗が発生していることが見て取れる⁶⁾。

5-2 摩耗リアルタイム計測技術

エンジン運転中にリアルタイムに潤滑状態や摩耗を観察・計測する手法は、エンジン構造が金属で構成されているために非常に困難である。金属を透過する観察手法として、中性子イメージングは水素などの軽元素を含む物質の可視化が可能であるため、エンジン内の潤滑油や噴霧の挙動の理解に有効であると考え⁹⁾。摩耗量のリアルタイム計測として、薄層放射化によるRIトレーサー法 (Radioisotope Tracer Method using Thin Layer Activation Technique : RTM) を適用した例を図9に示す。今回のRTMでは、軸受表面のアルミ合金層に含まれる¹²⁰Snを放射化した^{120m}Sbをトレーサーとして、摩耗によってオイル内に排出される^{120m}Sbから放射されるガンマ線をディテクターによって計測し、軸受の摩耗量を同定した。軸受材料、クランクシャフトの表面粗さ、エンジン始動時の加速度を変化させ5-1節の摩耗予測計算と比較すると非常に高い相関が見られ、本予測

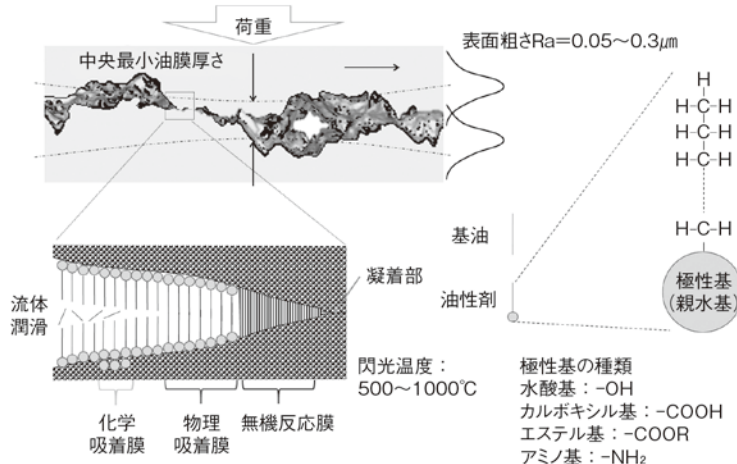


図11 潤滑油による反応膜形成

計算手法、リアルタイム計測手法が有効低減した⁴⁾(図10(b))。であることが示された⁶⁾。

6. 潤滑システム

潤滑システムの抵抗低減には、各摺動部にオイルを供給し、油圧駆動デバイスを動作させるオイルポンプ仕事を低減することが重要である。図10(a)にSKY ACTIVエンジン潤滑システムの例を示す。各油圧デバイスの要求油圧を最少化し、ポンプから各油圧デバイス間の経路をシンプルにすることで圧力損失を低減した。1Dの流路モデルによりオイル供給通路を最適化した上で、オイルポンプには油圧フィードバックと電子制御油圧切替え機構を搭載した。Pilot ValveとHybrid Valveを組み合わせることで、メインギャラリー (M/G) 油圧をフィードバックし、オイルポンプのリリーフ量を制御することで、一定の圧力に保ちポンプ駆動力の低減を実現した。

さらに、ソレノイドバルブのOn/OffによってPilot Valveへの流路を切り替えることで油圧を低油圧と高油圧の2段階に制御することを可能としている。ソレノイドバルブによる油圧制御は運転条件(回転数・負荷・暖機状態)に応じて行われる。低回転・低中負荷域では低油圧に制御し、高回転・高負荷域では信頼性確保のために高油圧に制御する。この制御によって各運転条件に応じた最適な油圧を供給でき、低・中負荷域では油圧制御しない場合に比べてポンプ駆動力を16%

7. 潤滑油の動向

潤滑油には摩擦低減だけでなく冷却、防錆、洗浄、密封(シール)の機能を有している。潤滑油の8割程度は炭化水素系分子の基油成分、残りが各種機能を発現する添加剤成分で構成されている。境界潤滑の摩擦低減に対しては、MoDTCが開発され現在は主流となりつつある。MoDTCは、MoS₂の層状構造を形成することで摩擦を低減することが知られており、ZnDTPとの併用によりMoS₂の形成が促進されることが示唆されている。極性基を有する吸着系の摩擦調整剤も境界潤滑低減に寄与すると示唆されているが、競争吸着によってZnDTPやMoDTCの表面反応を阻害することがあるため、適切な配合が必要である(図11)。

一方、流体潤滑の抵抗低減に対しては、オイルの低粘度化が進んでおり、一部のHEV向けエンジンには0W-8の低粘度オイルが実用化されている。今後、電動化により油水温度が上がりにくい状態となると低温側の粘度を下げつつ、高温での焼付き信頼性を担保する高粘度指数化が重要であるため、粘度指数を高める高VI剤の開発も進んでいる。摩擦以外では燃焼効率の向上のための高圧縮比に伴うLSPI(Low Speed Pre-Ignition)抑制が求められており、LSPIの起点として示唆されている清浄分散剤の金属成分(Caなど)の含有を抑制すること、電動化に伴

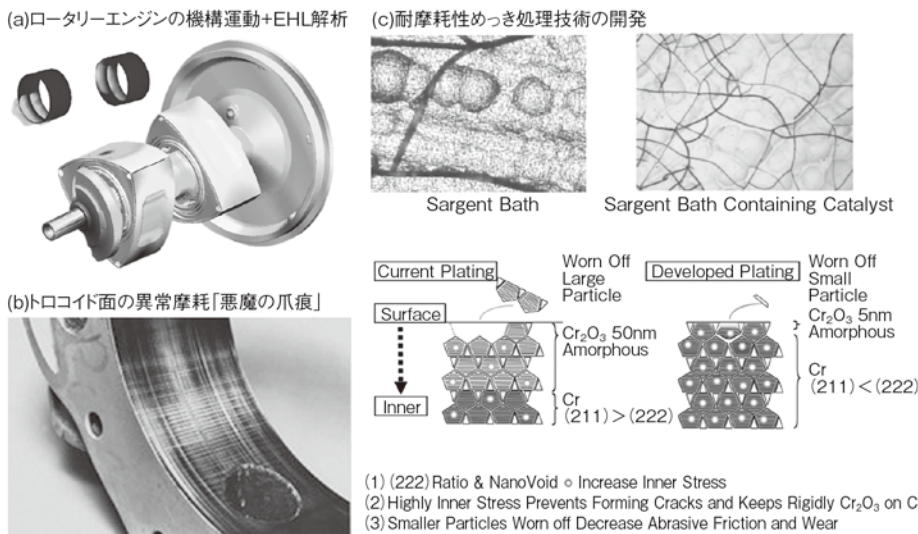


図12 ロータリーエンジンの潤滑技術^{10), 11)}

う低温化で増加する水分を分散させる機能を高めることが進められている。

8. ロータリーエンジンのトライボロジー

ロータリーエンジンはおむすび型のローターとトロコイド曲面を有するハウジングにより燃焼室を形成し、エキセントリックシャフトを介して回転仕事を取り出す機構であり、慣性力の掛かり方や潤滑形態の違いから独自の技術開発が必要である。

図12(a)にロータリーエンジンの機構運動解析と、ローターとエキセントリックシャフト間のEHL解析を実施した例を示す。エキセントリックシャフトのプロファイルを適切に設計することで、摩擦低減、焼付き抑制を実現している¹⁰⁾。

ローターとハウジング間はアベックスシール、サイドシール、コーナーシールの三つ部品でシールしつつ潤滑している。トロコイド面と接触するアベックスシールはメタリングオイルポンプにより供給されるわずかなオイルによって潤滑しており、膨張行程後半では極貧潤滑状態となる。ロータリーエンジンの実用化に向けては、アベックスシールとトロコイド面間で発生する「悪魔の爪痕」と呼ばれる異常摩耗(図12(b))が課題となっていたが、アベックスシールの共振周を分散させるとともにシール材料を開発す

ることで解決した。その後も、摺動面材料の開発が進み、トロコイド面に施される高速クロムめっき処理を改良することで大幅に摩耗を抑制することに成功している¹¹⁾(図12(c))。

9. おわりに

今後のエンジン摺動面の技術動向として、電駆デバイスと組み合わせた際のエンジン使用頻度低下に対して、境界潤滑の低摩擦・耐摩耗技術、油水温が上昇しづらい状態での低摩擦技術や早期暖気を実現するサーマルマネジメント技術、高いCO₂削減目標に向けた摩擦を極限まで小さくする新技術の創出が求められると考える。またEVとなってもモーター軸の摩擦損失などの駆動損失は残り、機械損失が占める割合としては増加するため、トライボロジー技術はますます重要な技術といえる。

本稿では、自動車エンジン摺動面の潤滑技術について当社で実施していることを中心に平易に解説した。エンジン摺動面は材料・添加剤の原子スケールから部品の挙動・潤滑システムまでスケールを横断した現象を制御する必要があり、各スケールのモデルを構築し、スケールの間を埋めるアプローチが重要であると考えられる。また、摺動面の仕様は摩擦だけでは決まらず、NV性能、シール性、製造ばらつき、実運転時の使われ方に対するロ

バスト性など様々な要件を高次元に両立する設計が必要である。そのため、各要素モデルを組み合わせた品質工学的アプローチも有効である。

今後、内燃機関の使われ方や要求が大きく変化する可能性がある中で、これらモデルベースの研究開発が重要であり、多様化するニーズに素早く対応し、次世代のパワーソースにも適用可能なさらなる機械抵抗低減のための研究開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) The Global Risks Report 2021: World Economic Forum(2021).
- 2) 河口、ほか:分子論に基づくエンジン摺動面の境界潤滑解析技術、マツダ技報、No.37(2020).
- 3) 馬淵、ほか: Development of Hydrogenfree DLC-coated Valve-lifter: SAE Papers 2007-01-1752(2007).
- 4) 木村、ほか: SKYACTIVエンジンの開発を支えるトライボロジー解析技術、自動車技術、Vol.69(2015).
- 5) 武重、ほか: 内燃機関燃焼室の機能性向上によるオイル消費抑制、第29回品質工学研究発表大会(2021).
- 6) 宮内、ほか: 軸受け摩耗予測計算と薄層放射化法による予測精度検証、マツダ技報、No.26(2008).
- 7) T. Nakahara, et al.: Approximate oil film thickness formula considering surface roughness effect on line contact EHL and it's application to friction between cam and follower under mixed lubrication condition, The 10th Nordic symposium on tribology(2002).
- 8) J. A. Greenwood, et al.: The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.185(1970).
- 9) 川端: 中性子イメージングの最新技術、RADIOISOTOPES, 57, 199(2008).
- 10) T. Resch, et al.: Numerical Investigation in Rotor Motion and Elasto-Hydrodynamic Rotor Bearing Behavior of a Rotary Engine Using Flexible Multi-Body Dynamics, Proc. SAE 2007-01-1459(2007).
- 11) 谷田、ほか: エンジン摺動部材の低摩擦表面処理の開発、マツダ技報、No.27(2009).

ブローバイガス低減がエンジン燃費性能に与える効果について



一杉 英司
Hideshi HITOSUGI

日本ピストンリング株式会社 技術企画部

1. まえがき

地球温暖化やエネルギーセキュリティの観点から、自動車用ガソリンエンジンのさらなる熱効率向上、低公害化が求められている。機械損失低減のためにあらゆる部品の低摩擦化が進められており、ピストンリングについては低張力化・摺動面形状最適化による流体潤滑摩擦低減、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)被膜による境界摩擦低減での燃費改善を実施してきている。さらに、ピストンリングで高効率、低公害化を実現する技術としてブローバイガス低減が挙げられる。ブローバイとは、筒内ガスがピストン・リング・ライナーのすき間を通過してクランクケースへ吹き抜ける現象である。ブローバイガスを低減することで、漏れ損失低減による熱効率向上効果と、オイル劣化抑制によるスラッジ堆積抑制によるスティック回避効果を得ることができる。しかし、一般的にブローバイによる吹き下げが低下するとオイル消

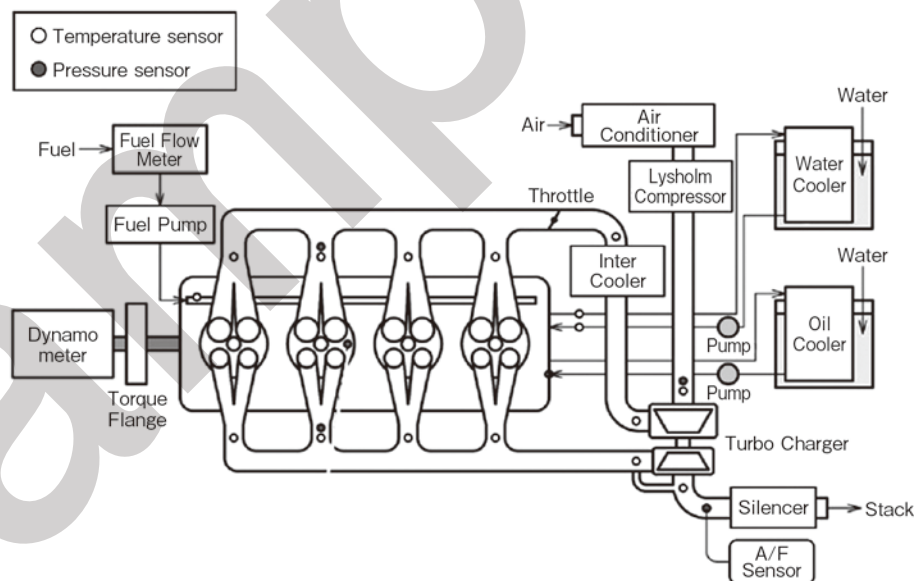


図1 Schematically test cell

費 (Lubricant Oil Consumption : 以下 LOC) が増大すると言われている。

本稿では、ブローバイガスを大きく低減させることによる燃費改善効果および、LOCを抑制できるピストンリング仕様について解説する。

ステム図を示す。本研究では、ボア径79.4mm、ストローク81.1mm、排気量約1.6L、圧縮比9.5の量産直列4気筒直噴過給ガソリンエンジンを用いた。LSPI (Low Speed Pre-Ignition) 実験において高過給条件を実現するために、コンプレッサー上流にリシヨルム式過給機を設け、外部電源モーターにより駆動した。ブローバイガス量は乾式ガスメーターを用いて計測し、LOCは排出ガス中の硫黄化合物を

2. 実験概要

2-1 実験装置

表1にエンジン諸元、図1にベンチシ

【著者問合せ先】

〒329-0114 栃木県下都賀郡野木町野木1111

Tel.0280-57-4432 Fax.0280-54-1048

E-mail hhitosugi@notes.npr.co.jp

表1 Specifications of Engine

Engine Type	4-stroke 4-cylinder
Bore × Stroke	Φ79.4mm × 81.1mm
Connecting Rod Length	139mm
Displacement	1616cc
Compression Ratio	9.5
Fuel Supply	Direct injection
Turbo charger	Single stage with waste gate + Electrically driven lysholm compressor

表2 Test Piston Ring Specification

	1st-ring	2nd-ring	Oil-ring
STD	BF-lb $h_1 \times a_1 = 1.2 \times 2.55\text{mm}$ $F_t = 5.85\text{N}$ $s_1 = 0.23\text{mm}$	Taper Undercut $h_1 \times a_1 = 1.0 \times 2.7\text{mm}$ $F_t = 3.55\text{N}$ $s_1 = 0.37\text{mm}$	$h_1 \times a_1 = 2.0 \times 2.55\text{mm}$ $F_t = 27\text{N}$, $s_1 = 0.25\text{mm}$ Side Rail OD Shape : Barrel
LBB	↑ $s_1 = 0.21\text{mm}$	Taper $s_1 = 0.25\text{mm}$	$h_1 \times a_1 = 2.0 \times 2.13\text{mm}$ $F_t = 16\text{N}$, $s_1 = 0.25\text{mm}$ Side Rail OD Shape : Taper

表3 Experimental conditions of fuel consumption map

Intake temperature	25 deg.C
Ignition timing	MBT or knock limit
Injection timing	90 deg.ATDC
λ	1
Coolant temperature	80 °C
Oil temperature	90 °C

表4 Experimental conditions of LOC

Intake pressure	200 kPa
Intake temperature	35 deg.C
Ignition timing	4 deg.ATDC
Injection timing	150 deg.ATDC
λ	1
Coolant temperature	70°C
Oil temperature	80°C

表5 Experimental conditions of pre-ignition

Intake pressure	200 kPa
Intake temperature	35 deg.C
Ignition timing	4 deg.ATDC
Injection timing	150 deg.ATDC
λ	1
Coolant temperature	70°C
Oil temperature	80°C

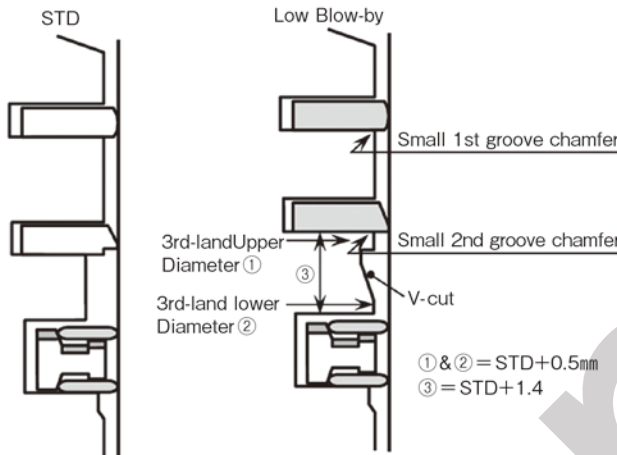


図2 Improvement point of test piston

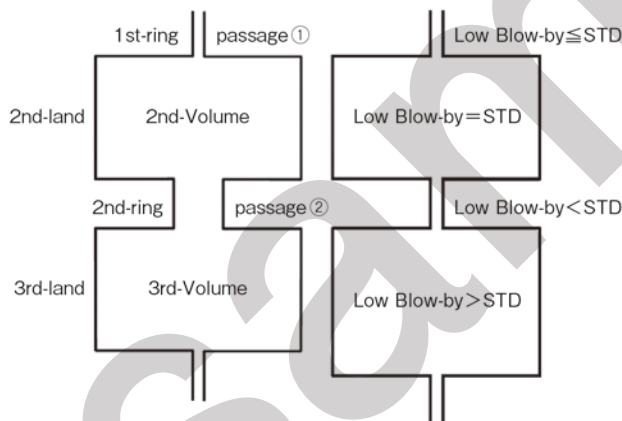


図3 Mechanism of blow-by reduction

計測する分析計 (HORIBA : 1170SX) を用いてLOC量を計測した。

2-2 ピストンリング

表2にピストンリングの諸元を示す。現行仕様のピストンリングをSTD (Standard)、低ブローバイ仕様のものをLBB(Low Blow-by) と表記している。STDとLBBの違いは1st-ringと2nd-ringの合口すき間 (以下 S_1)と2nd-ringの形状である。LBBの方が S_1 が小さく、2nd-ringはアンダーカットがない形状で

ある。ピストンのブローバイガス、LOC低減に寄与する部分を図2に示す。STDに比べ、LBBはトップとセカンドの溝面取りが小さくなっている。また、LBBは3rd-land上部の径を拡大することでガスの流路を狭め、下部の径を縮小し、V-cutを入れている。このV-cutによりブローバイガス低減によるLOC増加を防ぎ、STD以上のLOC性能を実現できる。図3にブローバイガス低減のメカニズムの概略を示す。2nd- S_1 の縮小と3rd-land径の

拡大でPassage②を狭め、ラビリンスシールを強化することでブローバイガスを低減できる。

2-3 実験条件

表3に燃費マップ試験の条件、表4にLOC試験での条件、表5にLSPI試験での条件を示す。

3. 結果と考察

3-1 燃費、ブローバイガス実験

図4にSTD、図5にLBBのブローバイ

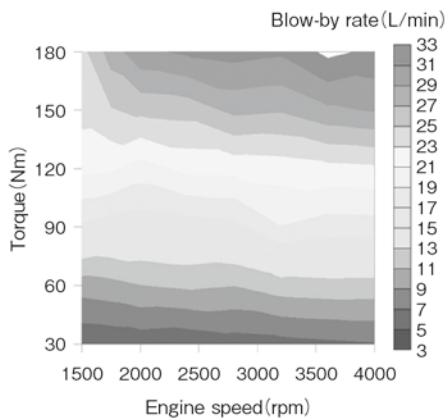


図4 STD blow-by gas map

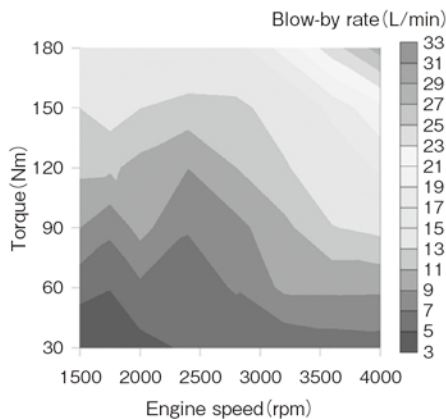


図5 LBB blow-by gas map

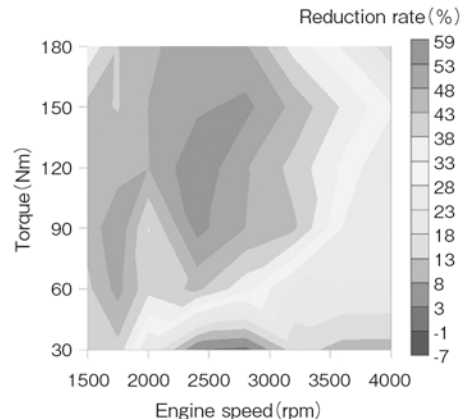


図6 Comparison of STD and LBB blow-by gas

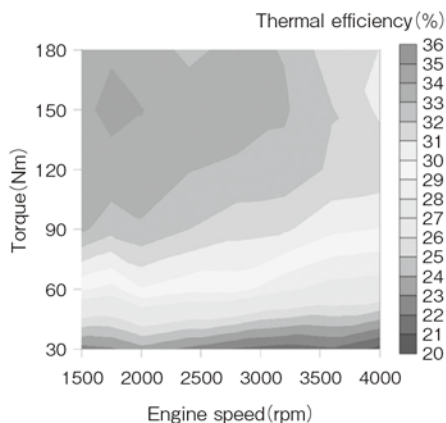


図7 STD fuel thermal efficiency

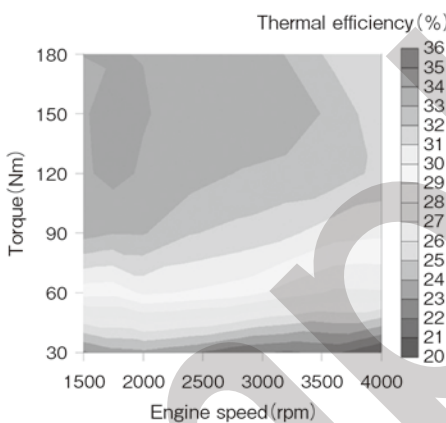


図8 LBB thermal efficiency

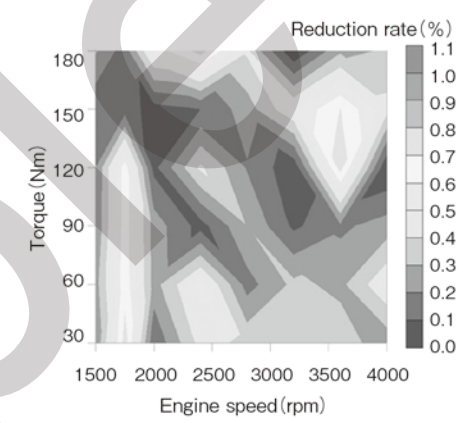


図9 Improvement ratio of thermal efficiency by LBB

ガス量マップ、図6にSTDに対するLBBのブローバイガス量低減率を示す。高回転高負荷になるほどブローバイガス量が増加する傾向は同じであるが、マップ全体でLBBはブローバイガス量が大幅に低減した。STDは3600rpm、180Nmでブローバイガス量が最大である33.6L/minであったのに対し、LBBは4000rpm、180Nmで最大値28L/minであった。また、図6から分かるように、LBBのブローバイガス量低減効果は高回転域、低負荷域で小さかったが、中回転域、中負荷域で大きく2400rpm、120Nmで約58%低減した。

図7にSTD、図8にLBBの正味熱効率マップ、図9にSTDに対するLBBの熱効率の改善量を示す。STDに比べ、LBBは高効率範囲が広く、マップ全体で約0.004~0.7ポイント熱効率が改善している。これは、LBBはラビリンスシールが強化され、筒内の気密性が向上したことで漏れ

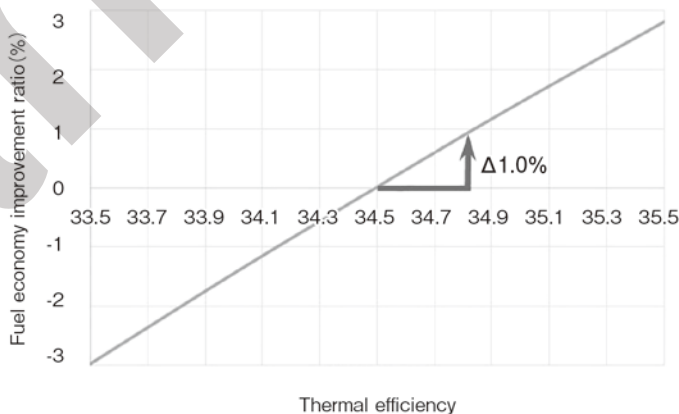


図10 Fuel economy improvement ratio

による損失が低減したからである。平均熱効率改善率は0.32%であったが、図10に示すように燃費効果で約1.0%となる。熱効率改善効果および効果代を把握できた。

3-2 LOC性能

図11に4条件でのLOC結果を示す。ブローバイガス量低減によるLOC増加は

V-cutにより抑えられ、STDよりLBBのLOCは低減している。特に高速加減速Modeと6000rpmF/LでのLOC低減効果が大きくなっている。これは高速域ではブローバイガス量低減効果が小さいので、吹き下げ量によるオイル上がり抑制も寄与していると考えられる。全体的にLOC低減効果を与えるアイテムとしては、①

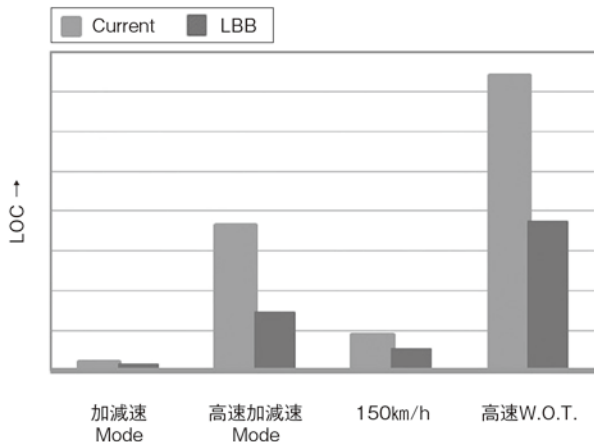


図11 Comparison of STD and LBB on LOC

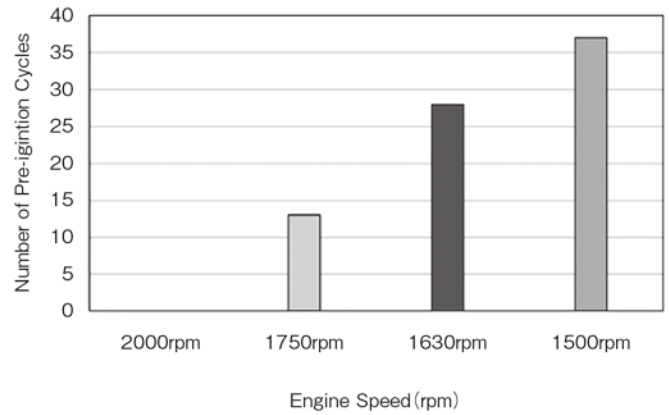


図12 Comparison of pre-ignition frequency of STD for each engine speed

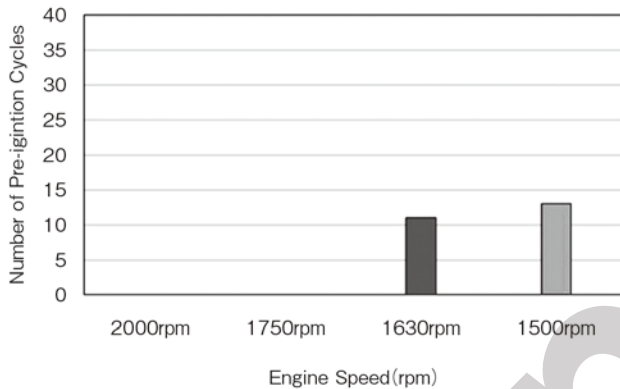


図13 Comparison of pre-ignition frequency of LBB for each engine speed

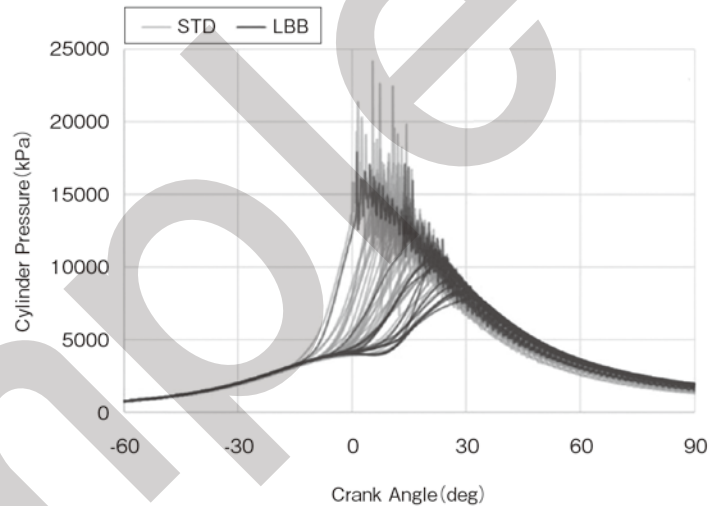


図14 In-cylinder pressure of pre-ignition cycle at 1500rpm and cooling water temperature 65°C

Oil-ringの最適化、②3rd-landへのV-cut設置、③ピストン溝面取りの縮小、と考える。

3-3 LSPI実験

図12にSTDの回転数ごとの1時間でのLSPI発生回数を示す。回転数が低いほどLSPI発生回数は多く、1500rpmでは1時間に37サイクルのLSPIが確認された。それに対し、2000rpmではLSPIが発生しなかった。図13にLBBの回転数ごとの1時間でのLSPI発生回数を示す。回転数が低いほどLSPIの発生回数が増加する傾向はSTDと同じであったが、すべての回転数においてLSPIの発生回数がSTDの半分以下であった。最もLSPI発生回数が多い1500rpmでも13サイクルであり、1750rpmではLSPIが発生しなかった。

LSPIの発生の着火源は、①高温になっ

た点火プラグなどの部品、②カーボンデポジット、③筒内に飛散したオイル、燃料混合液滴と言われている。今回の実験では1時間の中でLSPIが間欠的に発生したため、着火源は③であると考えられる。LOC実験の結果にもあったように、LBBはシリンダーライナーを上がろうとするオイルはV-cut部分により落とされるため、筒内へ飛散するオイル、燃料混合液滴が少ない。着火源が少なければ、LSPIも少なくなるため、LBBでのLSPI発生頻度はSTDの半分以下であったと考えられる。

また、図14に1500rpmでのSTDとLBBのプレイグニッションサイクルのみを抽出したものを示す。LBBのサイクル数が少ないことは明らかだが、LBBはSTDと比較し、着火時期が遅い傾向にあ

ることが分かる。LBBは筒内へのオイル飛散量が少ないだけでなく、オイル上がりが起こる流路が狭いため、飛散時期が遅くなっていることが示唆された。

4. 自然吸気エンジンでの評価

これまでは過給ガソリンエンジンでの評価結果である。過給エンジンは自然吸気エンジンよりブローバイは約1.5倍多いのが相場であり、ゆえに燃費効果が得られたのかについて比較・確認するために、直列4気筒2.5Lの自然吸気エンジンを用いて同様な評価を行った。ピストンの形状は図2とほぼ同様である。各リングの合口すき間を表6のとおりを設定し、ブローバイが多い場合も含めて評価を行った。図15はLBB、STD、高ブローバイ仕様(HBB)の2000r/minにおける

表6 Test piston ring spec

	1st-ring	2nd-ring	Oil-ring
High Blow-by (HBB)	$s_1 = 0.40\text{mm}$ $h_1 \times a_1 = 1.2 \times 2.7\text{mm}$ $F_t = 9\text{N}$	$s_1 = 0.8\text{mm}$ $h_1 \times a_1 = 1.2 \times 2.7\text{mm}$ $F_t = 5\text{N}$	$s_1 = 0.2\text{mm}$ $h_1 \times a_1 = 2.0 \times 2.13\text{mm}$ $F_t = 27\text{N}$
STD	$s_1 = 0.21\text{mm}$	$s_1 = 0.53\text{mm}$	↑
Low Blow-by (LBB)	$s_1 = 0.21\text{mm}$	$s_1 = 0.28\text{mm}$	↑

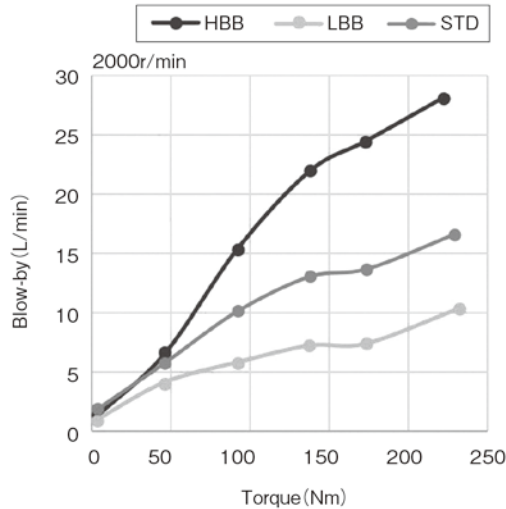


図15 LBB Blow-by effect on NA engine

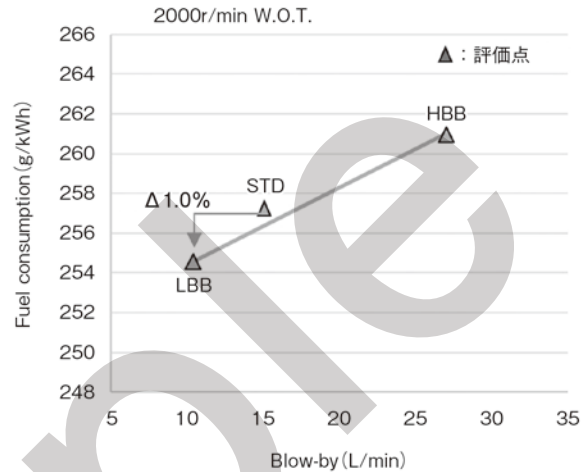


図16 LBB fuel economy effect on NA engine

ブローバイ量を示す。図16はブローバイ量と燃費の関係を示したものである。ブローバイ量は燃費とはほぼ比例関係であり、STDに対して今回の低ブローバイ仕様は約1.0%の燃費効果を確認できた。

5. まとめ

ブローバイガス量、LOCを大きく低減できるピストン&リング仕様を用いて燃費、LOC、そしてLSPIへの影響について実験を行い以下の知見を得た。

1. LBBピストン&リングにより、マップ全域でブローバイガス量が低減し、熱発生量が大きくなることで熱効率が向上する。
2. LBBピストン&リングでは、STDに比べ燃焼変動が小さくなる。これは乱れの影響だと考えられる。
3. ブローバイガス量低減に最適な設計(サイドレールサイズ縮小・摺動面テーパ形状)を施すことで、ブローバイガス量低減下でもLOCを低減できる。特に高回転域でのLOC低減効果が大きい。

4. LOC低減によって筒内へのオイル飛散量が減少し、LSPI発生頻度が半分以下になる。冷却水温度を上昇させることでもLSPIは低減するが、温度上昇による低減効果よりもLBB仕様による上昇効果の方が大きい。
5. STDピストン&リングよりLBBピストン&リングのほうがLSPI発生時の着火時期が遅く、最大筒内圧が低い。
6. 自然吸気エンジンにおいても同様な効果が得られる。ブローバイ約1/2で、燃費は約1.0%向上する。

謝辞

本報告の主要は千葉大学 森吉泰生教授との共同研究によるものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 古浜、ほか：ピストンリングを流れるガスの漏れ 第1報、日本機械学会、63(503)、1686、1960。
- 2) 古浜、ほか：ピストンリングを流れるガスの漏れ 第2報、日本機械学会、63(503)、1686、1960。
- 3) 高木、ほか：ブローバイガス低減がエンジン性能に与える影響について、第30回内燃機関シンポジウム2019。
- 4) Yasuo Moriyoshi, etc : Investigation on Relationship Between LSPI and Lube Oil Consumption and Its Countermeasure, SAE 2021-01-0567.