

論文・解説

36

エンジンの省燃費を支えるトライボロジ解析技術 Tribology Analysis Technology Supports Engine Fuel Economy

栗栖 徹*1 木村 昇平*2 白井 裕久*3
Toru Kurisu Shohei Kimura Hirohisa Shirai

菅近 直範*4
Naonori Kanchika

要 約

エンジンの燃費改善において、機械摩擦抵抗の低減は、重要な課題である。SKYACTIV技術の開発においても、エンジンの燃費改善のために設定した制御因子のうちの一つであり、高い目標をかかげ、その低減に取り組んだ。機械摩擦抵抗低減には、さまざまな運転条件での潤滑状態を把握し、潤滑油消費をはじめ関連する信頼性やNV性能を損なうことなく油膜をコントロールすることが重要である。そのために、マツダでは、トライボロジ領域へのCAE活用を積極的に進めており、流体潤滑理論や弾性流体潤滑理論を基に内製したシミュレーションプログラムをはじめ、高機能の市販アプリケーションソフトなど種々の解析ソフトを駆使して潤滑メカニズムの解明や潤滑状態の最適化に活用している。本稿では、エンジンのさまざまなトライボロジ解析技術を紹介するとともに、それらをどのように活用してエンジンの燃費低減に結びつけたか紹介する。

Summary

Reduction in the friction loss of Internal Combustion Engine (ICE) is a key for fuel efficiency. In the SKYACTIV TECHNOLOGY development, this was one of the seven control factors established for the improvement in fuel efficiency, which was addressed with a high target. To reduce the machine friction loss, recognizing the lubrication status at various driving conditions, and controlling oil films without ruining NVH performance, reliability of lubricant consumption and others is important. For that purpose, Mazda has been promoting the application of CAE to tribology areas. Clarifications of lubrication mechanisms and optimization of lubrication status are performed by various analysis softwares such as high function applications on the markets and internally-made simulation programs based on fluid lubricant theory and elastohydrodynamic lubrication theory. This paper introduces various tribology analysis technologies of engine and how to use them for the reduction in fuel consumption of the SKYACTIV engine.

1. はじめに

近年、省燃費の観点からハイブリッド車や電気自動車など自動車の動力源としてモータの採用が急速に増加してきている。エンジンは、比出力の高さや経済性などその優れた特性から20世紀の初頭から自動車の動力源の大半を占めてきた。2020年時点においてもグローバル市場における主要な動力源として、使われ続けると考えられる。したがって、自動車の燃費を支配するエンジンには、一層の燃費率の向上が必要で、特に実用走行において寄与の大き

い摩擦抵抗損失低減への期待が大である。

自動車のエンジンは、その内部で燃料を燃やし、発生する熱を運動エネルギーに変換する内燃機関である。内燃機関はFig. 1に示すように、燃焼によって発生する熱エネルギーの大部分が排気損失、冷却損失、ポンピング損失、機械抵抗損失として捨てられている。自動車を走らせる仕事として有効に活用できているエネルギーは、これまでは最大でも3割程度であった。

内燃機関の熱効率改善には、これらの損失を低減し、有効仕事の割合を高めることが必要である。そのために制

*1~3 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

4 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

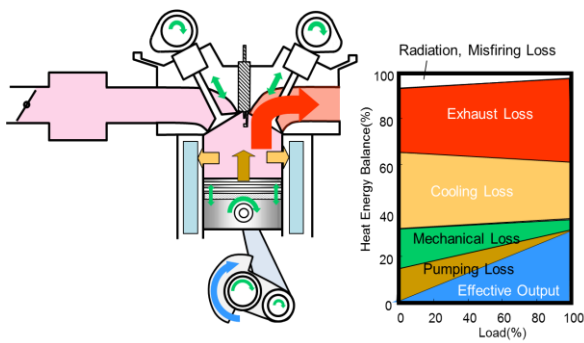


Fig. 1 Status of ICE Efficiency

御できる因子として、膨張比（圧縮比）、比熱比、燃焼期間、燃焼タイミング、壁面熱伝達、ポンピング損失、機械抵抗（摩擦抵抗）の7つに分類できる（Fig. 2）。SKYACTIV-G ガソリンエンジン 及び SKYACTIV-D ディーゼルエンジンの開発においては、これらの制御因子を理想に近づけて究極の熱効率を実現していくことを目指した。

以下、この制御因子のうち摩擦抵抗低減のためのキー技術として、エンジンのSKYACTIV技術の開発で活用したトライボロジ解析技術について紹介する。

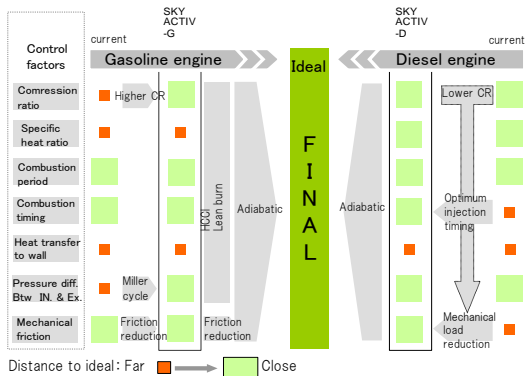


Fig. 2 Ideal Vision of 7 Control Factors

2. トライボロジ解析技術とエンジンへの適用

2.1 トライボロジ解析技術

エンジンには摺動部分が多く、Table 1に示すように機械抵抗をはじめ、焼き付きや摩耗、異音などトライボロジに関連する諸問題が複雑に絡み合っている。これらの問題をバランスさせ、最も低摩擦で異音や信頼性問題を引き起

Table 1 Relation of Engine Sliding Bearings and Its Tribological Problems

| Parts | Portion | Friction Loss | Seizure | Wear | Strength | LOC | BB | Impact Noise |
|------------|----------------------------|---------------|---------|------|----------|-----|----|--------------|
| Piston | Piston Skirt Bearing | S | S | M | M | M | N | S |
| | Piston Ring Bearing | S | M | M | N | S | S | S |
| | Piston Ring Groove | N | N | M | M | M | M | N |
| | Piston Pin Bearing | W | M | S | M | N | N | M |
| Crank | Crankpin Journal Bearing | M | S | S | M | N | N | M |
| | Crank Main Journal Bearing | M | M | M | M | N | N | S |
| Valvetrain | Cam vs. Tappet | S | M | S | M | N | N | S |
| | Camshaft Bearing | W | W | W | M | N | N | W |
| | VVL vs. Cam | N | M | S | M | N | N | N |
| CamDrive | Timing Chain | W | W | S | S | N | N | S |
| Others | Balancer Shaft Bearing | N | W | W | W | N | N | S |
| | Injector Needle | N | S | S | N | N | N | M |
| | Injector Pump Bearing | N | S | S | N | N | N | W |

Relationship S: Strong M: Medium W: Weak N: Nothing

こさない設計が必要である。そのため、マツダのエンジン開発におけるトライボロジ領域でも、シミュレーション解析による予測検討が不可欠になっている。潤滑油膜のEHL（Elasto-Hydrodynamic Lubrication）シミュレーションをはじめ、構造解析、流体解析、機構解析など市販のソフトや開発した内製ソフトを駆使して種々の解析を連成したり組み合わせたりすることによって、要素技術開発から商品開発にいたるまで、さまざまな運転条件での潤滑状態を正確に机上予測し、最適な潤滑状態で運転できる仕様を決定している。

そのために、大学や部品メーカーなどに協力いただいて、精度検証のための先端の実験計測を実施し、予測結果の精度を検証して、どの程度の予測精度が得られるのか把握しながら、実用に供している。Fig. 3は、鳥取大学との共同研究により、ピストンスカート部の油膜をLIF（Laser Induced Fluorescence）で可視化して計測した例である⁽¹⁾⁽²⁾。

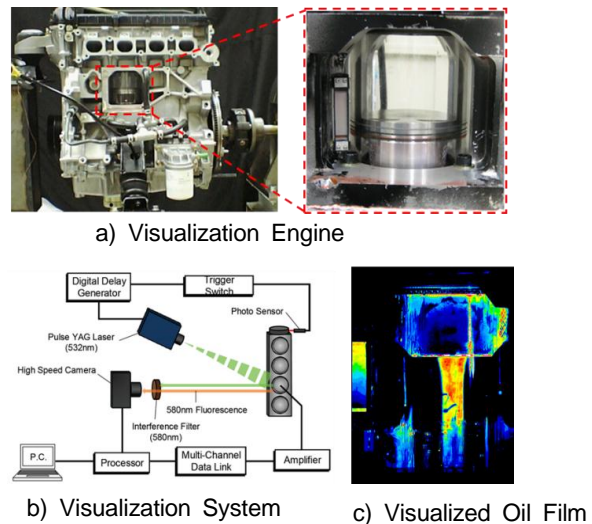


Fig. 3 Visualization of Piston Skirt Oil Film Provided by Tottori University

2.2 ピストン及びピストンリングの最適化

ピストンは、エンジン摩擦損失の約3割を占め、燃費への影響が大きいことから、その摩擦低減が重要である。ピストン摩擦には、スカート部の摩擦とピストンリングの摩擦とがあるが、それらの寄与はおおよそ半々になっている。

(1) ピストンスカート

ピストンスカートは、ピストン往復動における首振り挙動を安定させ、姿勢変化時のライナへの衝突を緩和してピストンスラップと呼ばれる冷間時の衝撃音をはじめ、焼き付きや摩耗を抑止したうえで、摩擦抵抗を最小化するすべり面形状（プロフィール）にすることが必要である。Fig. 4は、最適化プログラムとピストンの潤滑挙動解析プログラムを組み合わせ、それらの特性をバランスさせた最適なスカートプロフィール形状を設定した例である。

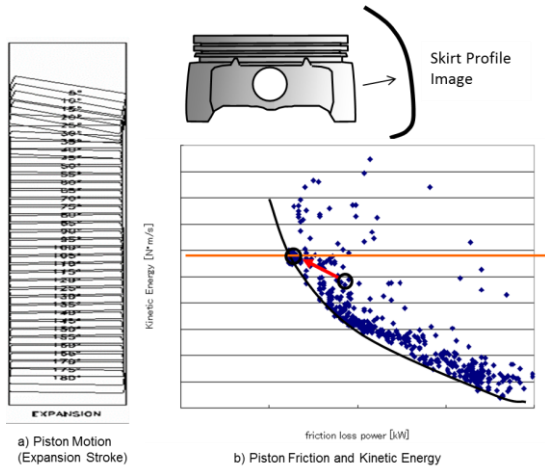


Fig. 4 Optimization of Piston Skirt Profile

この解析では、数百通りのプロフィール形状について摩擦損失や衝突エネルギーを計算し、その中から最もバランスのとれた形状を選択することによって、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金属接触を防ぐことによって、摩擦抵抗や焼き付きを防止するとともに、摩擦損失を低減した (Fig. 5)。

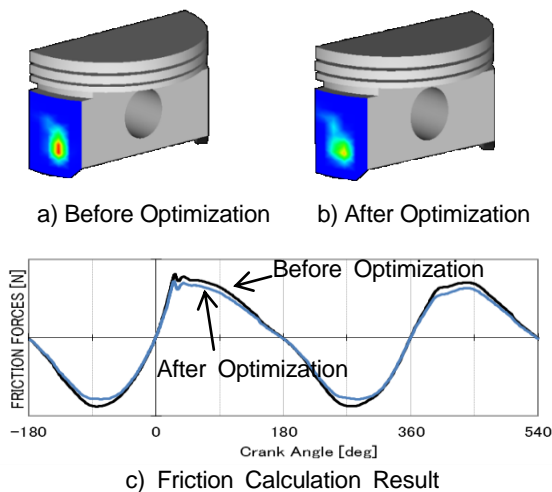


Fig. 5 Improvement of Piston Skirt Profile

(2) ピストンリング

ピストンリングは、摩擦低減の観点から、薄幅化や張力低減が進められてきている。しかしながら、張力を下げると潤滑油消費の増大につながりやすく、個々のエンジンの潤滑油消費メカニズムに適った方法で張力を下げることが必要である。ピストンリングが関係する潤滑油消費のメカニズムには、①トップリングがシリンダライナ表面にかき残した油膜が高温の燃焼ガスにさらされて蒸発するもの、②トップリング合口部から燃焼室への吹き返しガスに乗って運ばれるもの、③トップリング摺動面とライナとの間にできたすきまから燃焼室へのガスの吹き返しに乗って運ばれるもの、④トップリングの背面を通して燃焼室に運ばれるもの、⑤トップリングによってかき上げられるもの、がある。これらを全て切り分けて定量的に予測することは困難であるが、ガスの流れや油膜厚さを計算することによって、ある程度潤滑油消費の良し悪しを予測することが可能である。

Fig. 6は、セカンドランド圧力の計算結果を実測と比較した事例である。この解析に用いたシミュレーションでは、モデルの改良によってそれまで実測と合っていなかったランド圧力の予測精度が大幅に向上し、リング部からのガス流れを精度よく求めることが可能になった。

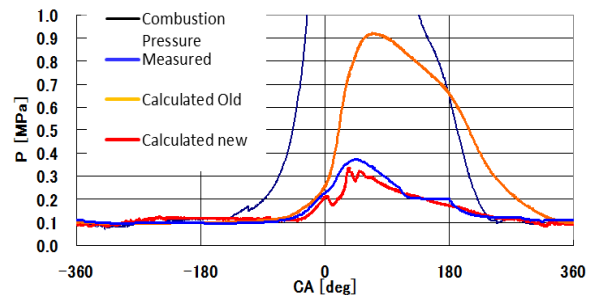


Fig. 6 Comparison of Second Land Pressure

SKYACTIV-G ガソリンエンジン、SKYACTIV-D ディーゼルエンジンでは、このモデルを用いてリングの合口寸法やランド部の形状検討を行い、燃焼室へのガスの吹き返しを抑え、潤滑油消費が少ない仕様を設定することができた。Fig. 7は、先行するリングによる油膜のかき残しを考慮して各リングの油膜厚さMOFT (Minimum Oil Film Thickness) を計算した事例である⁽³⁾。これまでの解析は、先行リングのかき残しの考慮が不十分であり、リングのオイル掻き作用が十分評価できなかった。このようなより実際に近いモデルを使った計算を駆使することによって摩擦抵抗と潤滑油消費の観点から各リングの作用を明らかにし、リング摺動面プロファイルを最適化するとともに張力を最小化した。

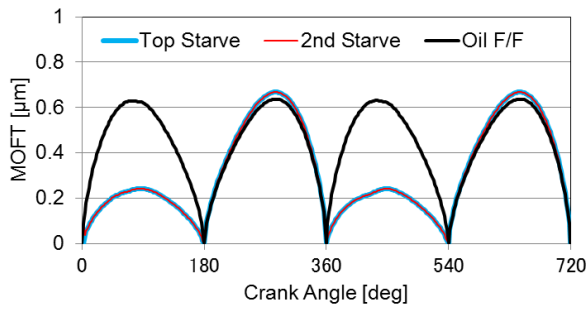


Fig. 7 Piston Ring Oil Film Analysis Example

2.3 シリンダライナ変形の抑制

摩擦抵抗の小さい低張力リングでも、オイル消費を少なくするにはシリンダライナのいびつな変形を抑え、リングをライナに沿いやすくすることが必要である。そこで、ライナ上部の高次変形を抑えやすいオープンデッキ構造を採用した。しかし、冷却の不均一やガスケット面圧の不均一によっていびつな変形を起こすため、シリンダブロックの変形解析を実施し、ライナの高次変形を抑制した。Fig. 8は、ライナ変形を元にリングによるライナ上のかき残し油膜厚さを計算した結果である。この計算結果を元にブロック形状などの見直しを行い、高次のライナ変形を抑制することによって、低張力リングでもオイル消費を抑えることができた。

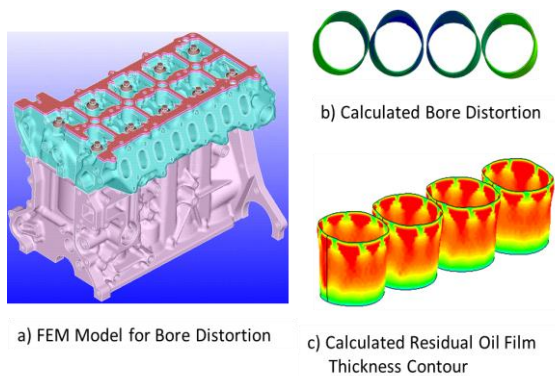


Fig. 8 Cylinder Bore Distortion Analysis

2.4 クランクシャフトの抵抗低減と摩耗防止

(1) クランクシャフトの抵抗低減

エンジンの軸受には、主にすべり軸受が使われており、その代表がクランク軸受である。クランク軸受は、燃焼室圧力やピストンの慣性力などによる変動荷重を受けるため、軸心が軸受すきま内で複雑に動き回り、油膜厚さが絶えず変動している。クランク軸受は、焼き付きなどの問題を起こしやすく、信頼性開発の主要テーマの一つである。そのため、古くから流体潤滑理論による油膜厚さの解析が行われてきている。しかし、軸の曲げ・ねじりによるたわみや軸受ハウジングの弾性変形などの影響が大きく、精度のよ

い設計にはEHLによる解析が不可欠である。マツダでは20年ほど前からEHL解析プログラムを開発し、順次活用を進めてきた。

Fig. 9は、EHLで表面粗さを考慮するための修正レイノルズ方程式と、その式を使って解析したクランクピン軸受の油膜解析結果の1例である。

Modified Reynolds Equation

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{h^3}{12\mu_0 e^{\alpha p}} \frac{\partial p_h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{h^3}{12\mu_0 e^{\alpha p}} \frac{\partial p_h}{\partial y} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial x} (1 + \alpha \phi_x) + \frac{\partial h}{\partial t}$$

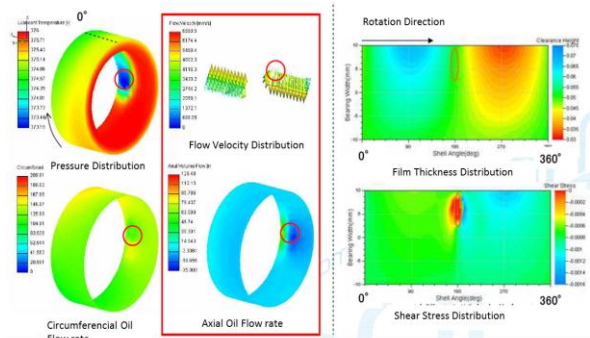


Fig. 9 Calculation Result of Crank-Pin Bearing Lubrication Film

Fig. 10は、精度検証のため、油膜温度の計算結果を実測の軸受温度と比較した結果で、この解析によって2°C程度の誤差で温度を予測できることがわかった。

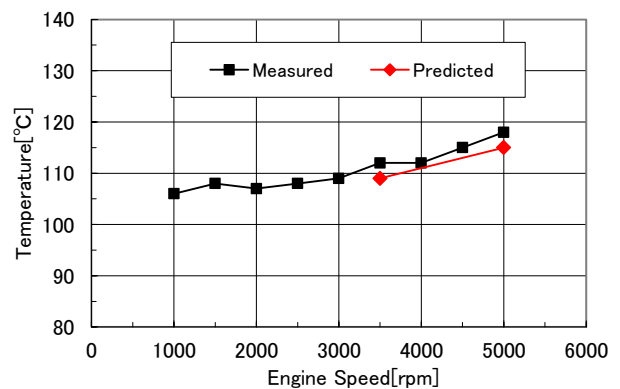


Fig. 10 Comparison of Crank-Pin Bearing Temper

SKYACTIV-D 2.2Lにおいてクランク軸の軸受の摩擦抵抗を減らすため、軸受部の細径化を行っているが、軸受投影面積の減少によって面圧が高くなり、開発初期にピッチングが発生した。また、偏当たりによる摩耗・焼き付きの未然防止も必要のため、軸受油膜の解析を実施して、実働時の面圧分布を均一化し、油膜厚さを確保することによって、ピッチングの発生防止とともに焼き付きや摩耗も防止した。

(2) アイドル停止時のクランク軸受摩耗の防止

燃費改善としてアイドル停止を行うと、停止、起動のくり返しによって、クランク主軸受での金属接触の頻度が増加し、凝着による摩耗が起きやすくなる。そのため、起動時の軸受油膜厚さの予測が必要となるが、速度が非常に遅く金属接触が起きる条件でレイノルズ方程式を解くと、計算時間が非常に長くなるうえ、発散してしまい解が得られない場合が多い。そこで、中原の方法をベースに、油膜厚さと摩耗を予測するプログラムを開発した⁽⁴⁾。このプログラムによって摩耗量の予測が可能となり、摩耗の進行が緩やかな仕様を設定することができた (Fig. 11)。

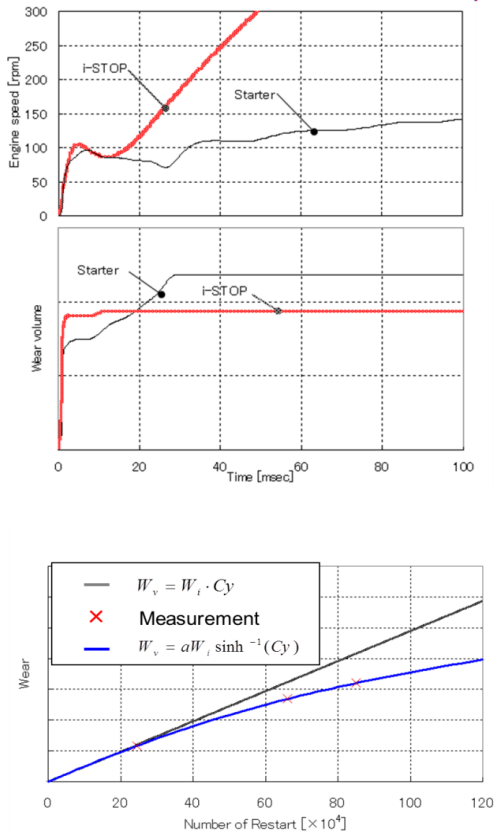


Fig. 11 Calculation Result of Crank Bearing Wear

2.5 動弁系の抵抗低減と摩耗防止

(1) ローラフォロワ式可変動弁機構の抵抗低減

冷間時の失火防止のため、SKYACTIV-D 2.2Lに採用した排気弁二度開きによる吸気行程EGRシステムには二段切り替え式フィンガフォロワを使用している。しかし、スペース上の制約からカム～フォロワ間のすべり面幅が狭く、摩耗に対して厳しくなっている。それゆえ、カムの面圧及びEHL油膜解析を実施して十分な油膜厚さを確保し、金属接触を回避することによって摩耗を防止し、低機械抵抗のローラ&スライディング式の2段切り替えフォロワを実現した (Fig. 12)。

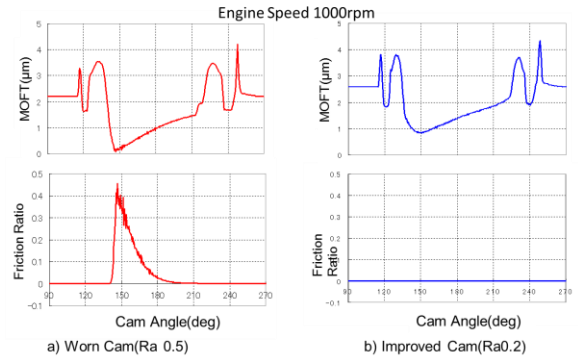
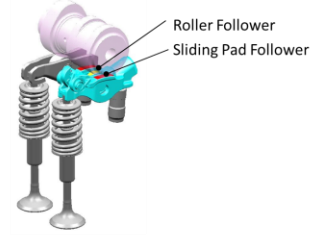


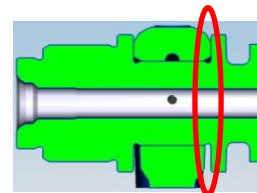
Fig. 12 Calculated Oil Film Thickness at Cam-Follower Contact

(2) カムシャフトスラスト軸受摩耗の防止

同じエンジンで、開発初期にカムシャフトのスラスト軸受の摩耗が発生した。製造誤差や熱変形などわずかなアライメントの狂いによって、カムシャフトにスラスト力が発生し、油膜切れが起きていることが推測された。そこで、非定常レイノルズ方程式による油膜モデルを解き、スラスト軸受の解析を行った。Fig. 13は、スクイーズ効果による油膜形成を検討した結果で、軸受面を油膜形成しやすい形状にすることにより、油膜保持時間を長くして摩耗を防止することができた。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{h^3}{12r\eta} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = \frac{\omega}{2} \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial h}{\partial t}$$

Reynolds Equation in Polar Coordinate System



Cam Shaft Thrust Bearing

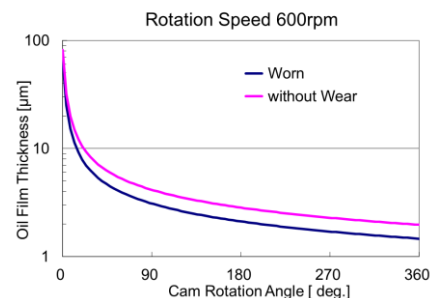


Fig. 13 Camshaft Thrust Bearing Oil Film Thickness

2.6 潤滑システムの抵抗低減

SKYACTIV-G, SKYACTIV-D エンジンでは国内初の技術となるオイルポンプ吐出圧の最適制御を採用した (Fig. 14)。その特徴を以下に示す。

- ・ エンジン回転数/負荷/暖機状態に応じて吐出圧を電子制御で2段階に切り替える
- ・ メインギャラリー油圧を直接検出してフィードバックすることにより吐出圧制御動作の無駄を排除する

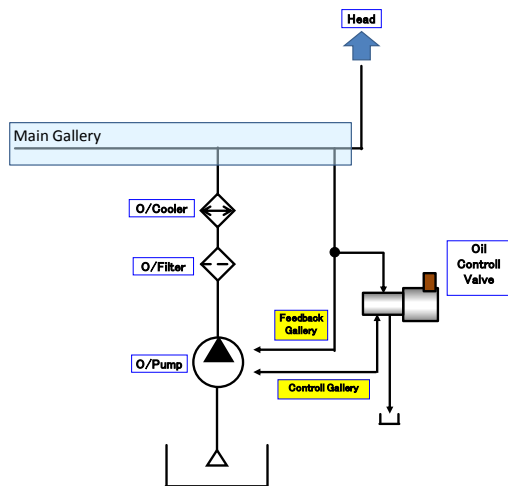


Fig. 14 Oil Supply Circuit Diagram

オイルポンプの吐出圧を設定するために、潤滑油供給回路をモデル化 (Fig. 15) して、実測油圧との合わせ込みを行い、各部への必要油量を供給するための要求油圧の検討を行った。

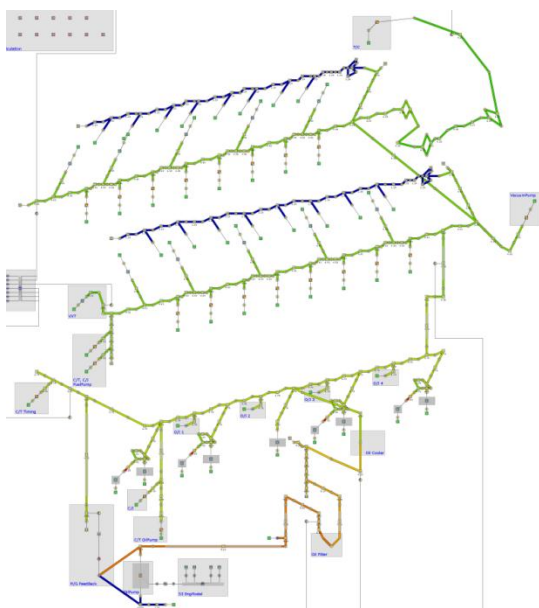


Fig. 15 Oil Supply Circuit Model

この検討により、高回転と低回転でのオイルポンプの吐出仕事をそれぞれ最適化することができ、機械抵抗を改善した。オイルポンプ駆動力を新旧エンジンで比較した結果を Fig. 16 に示す。従来に比べ全回転域で幅広く駆動力が低下している。

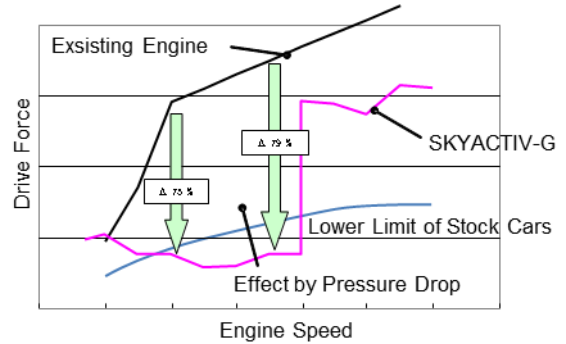


Fig. 16 Comparison of Oil Pump Drive Force

3. おわりに

ここに紹介したように、さまざまなトライボロジ解析を駆逐することによりSKYACTIV-G, SKYACTIV-D エンジンの摩擦損失を低減し、燃費を改善してきた。今後も、究極の高効率なエンジンを目指して更なる機械抵抗低減を行うために、トライボロジ解析技術の活用を進めていく。

参考文献

- (1) 大澤ほか：ピストンスカート部の潤滑油膜挙動の可視化と膜厚測定，自動車技術会 計測・診断部門委員会企画シンポジウム「多様なニーズに対応する計測・診断技術」講演論文集 (2011)
- (2) 中川ほか：ピストンスカート部における潤滑油膜厚さの定量測定精度向上とクロスハッチ加工の有無が油膜に及ぼす影響，日本機械学会中四国支部第50期講演会前刷集 (2012)
- (3) 栗栖ほか：ピストンリング部の油膜可視化と油膜厚さ計算による潤滑油消費メカニズムの考察，日本機械学会年次大会前刷集 (2013)
- (4) 宮内ほか：境界潤滑を考慮した主軸受け弾性流体潤滑計算手法の研究，自動車技術会論文集，298-20075017 (2007)

■ 著 者 ■



栗栖 徹



木村 昇平



白井 裕久



菅近 直範