

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 6 No. 3 2016

JSAE エンジンレビュー

## 特集：進化するエンジントライボロジー

・進化するエンジントライボロジー – 摩擦低減の秘密 –

Evolving Tribology & Lubrication Technologies for Engines – Ingenious Mechanisms of Friction Reduction –

・エンジントライボロジーの最近の研究動向

Research Trend and Latest Approach for Engine Tribology

・ピストンリングーシリンダ間の摩擦損失低減と油膜挙動

Reduction of Friction Loss between Piston Rings and Cylinder Bore based on the Analysis of Oil Film Behavior

・エンジンの燃費向上技術とすべり軸受の対応

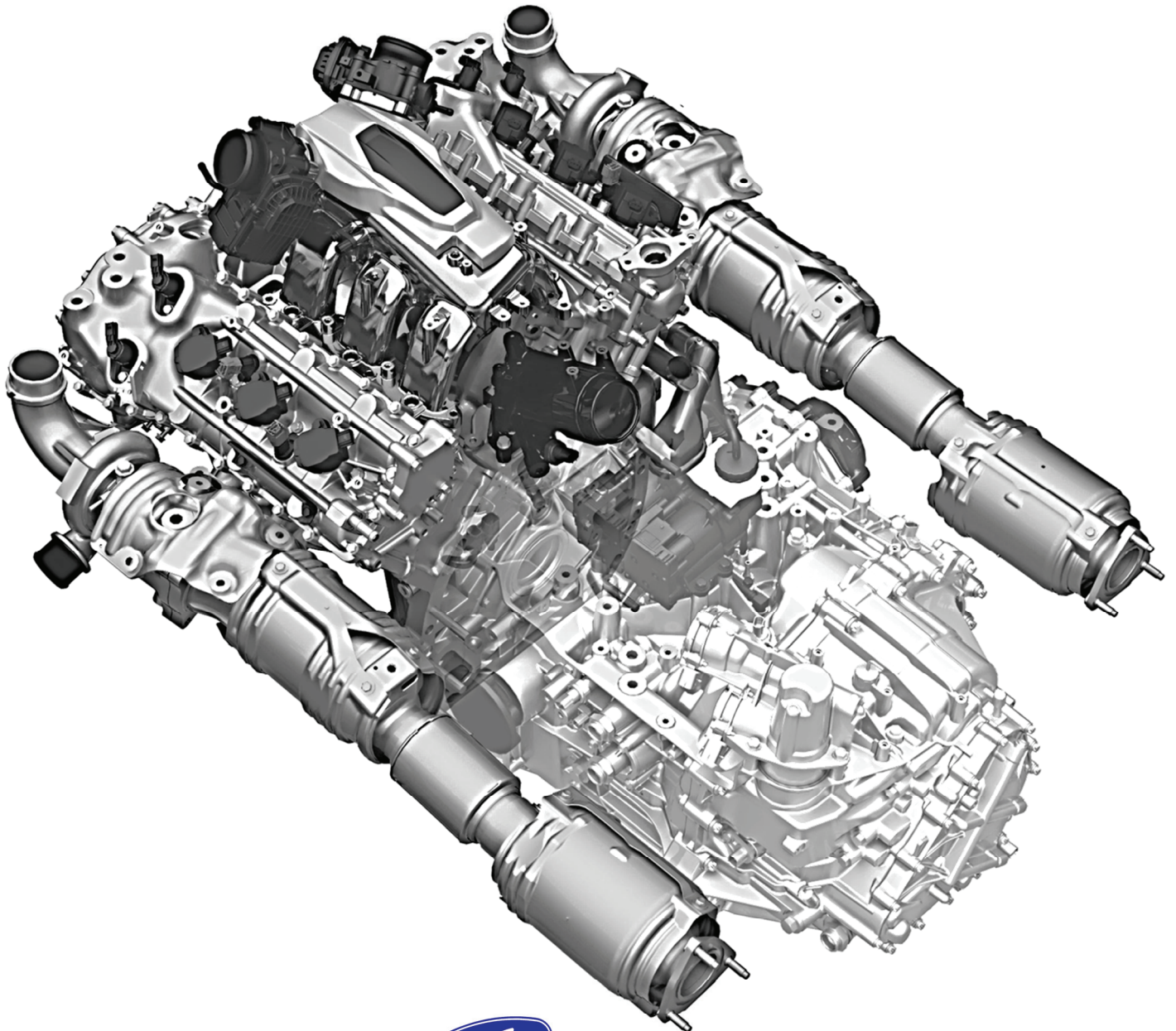
Technology of Engine Bearings for Improvement of Fuel Consumption

・革新的な表面処理技術によるエンジンフリクションの大幅な低減

The Innovative Surface Coating Technology for Remarkable Engine Friction Reduction

・エンジンオイルによる省燃費へのアプローチ

Contribution of Engine Oils to Fuel Efficiency



公益社団法人 自動車技術会

コラム：● 自動車の排出ガス規制と計測法： 1	
Measurement method and exhaust gas regulation of automotive	
西川 雅浩（株式会社堀場製作所）	
特集：進化するエンジントライボロジー	
・進化するエンジントライボロジー – 摩擦低減の秘密 – 3	
Evolving Tribology & Lubrication Technologies for Engines	
– Ingenious Mechanisms of Friction Reduction –	
小池 誠（JSAE エンジンレビュー編集委員）	
Makoto KOIKE	
・エンジントライボロジーの最近の研究動向 4	
Research Trend and Latest Approach for Engine Tribology	
三原 雄司（東京都市大学）	
Yuji MIHARA (Tokyo City University)	
・ピストンリングーシリンダ間の摩擦損失低減と油膜挙動 8	
Reduction of Friction Loss between Piston Rings and Cylinder Bore based on the	
Analysis of Oil Film Behavior	
三田 修三（株式会社豊田中央研究所）	
Shuzo SANDA (TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.)	
・エンジンの燃費向上技術とすべり軸受の対応 11	
Technology of Engine Bearings for Improvement of Fuel Consumption	
児玉 勇人，神谷 周（大豊工業株式会社）	
Hayato KODAMA, Shu KAMIYA (TAIHO KOGYO CO., LTD.)	
・革新的な表面処理技術によるエンジンフリクションの大幅な低減 15	
The innovative surface coating technology for remarkable engine friction reduction	
馬淵 豊（日産自動車株式会社）	
Yutaka MABUCHI (NISSAN MOTOR CORPORATION)	
・エンジンオイルによる省燃費へのアプローチ 19	
Contribution of Engine Oils to Fuel Efficiency	
小宮 健一（JX エネルギー株式会社）	
Kenichi KOMIYA (JX Nippon Oil & Energy)	

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)  
副委員長: 村中 重夫 (元日産自動車)  
幹事: 飯島 晃良 (日本大学)  
委員: 遠藤 浩之 (三菱重工業)  
大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)  
金子 タカシ (JX エネルギー)  
菊池 勉 (日産自動車)  
小池 誠 (豊田中央研究所)  
小酒 英範 (東京工業大学)  
清水 健一 (元産業技術総合研究所)  
下田 正敏 (日野自動車)  
西川 雅浩 (堀場製作所)  
野口 勝三 (本田技術研究所)  
平井 洋 (日本自動車研究所)  
山口 恭平 (自動車技術総合機構)  
山崎 敏司 (編集)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会  
発行日: 2016 年 11 月 14 日  
発行人: 石山 拓二 (京都大学)  
〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2  
電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW  
SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN  
Vol. 6 No. 3 2016

●コラム

## 自動車の排出ガス規制と計測法

*Measurement method and exhaust gas regulation of automotive*



西川 雅浩  
Masahiro NISHIKAWA  
株式会社 堀場製作所  
HORIBA, Ltd.

みなさんは、自動車の排出ガス規制で使用される計測法について、どの程度ご存じであろうか。2015年9月、ディーゼル乗用車で認証試験時のみ排出ガスを低く抑えていた不正が米国で明らかになり、「自動車が本当に出している排出ガス」に対する関心がにわかに高まった。この不正事件をきっかけに国内においても新しい排出ガス試験方法の検討が進められるなど、約一年が過ぎた今でもその影響は続いている。筆者は、排出ガス計測機器の開発に20年以上たずさわってきたが、現在が一番、規制における排出ガス計測法に関心が集まっているように感じる。当コラムでは、排出ガスの規制と計測法について、筆者が日頃思っていることを文章にしてみたい。

20世紀初頭からモータリゼーションが急速に進み、欧米で自動車が急速に普及した結果、1940年代には早くも、ロサンゼルスで自動車排出ガスを原因とする光化学スモッグが頻繁に発生する状況になっていた。カリフォルニア州で世界に先駆けて排出ガス規制が開始されたのは、このためである。その後、米国のみならず、欧州や日本においても自動車からのCO・NOx・HC排出量が規制されるようになった。さらにその規制値が年々強化されるのに対応すべく、エンジンや後処理装置などにさまざまな排ガス低減技術が投入されて今日に至っている。

このような規制に関連して自動車排出ガスを計測する場合は、車輪を試験室のローラ(シャシダイナモメータ)に乗せ、その場で規定の走行パターンを運転する。この際、路上走行をシミュレーションするため、シャシダイナモメータには走行抵抗に応じた負荷を設定する。さらに、走行中の排出ガスをサンプリングバッグに採取しておき、試験終了後にその濃度を測定する。規制においては、走行距離当たりの排出質量で基準値が定められているので、排出ガス体積の情報を用いて濃度を質量に変換する。ただし、排出ガスの体積は直接測定せず、排出ガスを一定(既知)の流量に希釈してしまう手法を用いる。

1991年に堀場に入社して、この排出ガス計測法を知ったとき、非常に驚いたことを覚えている。排出ガスは普通に路上を走行して測っているものと、なんとなく思い込んでいたためである。しかし、その後、計測機器の開発を担当するうち、規制における排出ガス計測が試験室内で実施されるのには、それなりの理由があることに自ずと気付いた。たとえば、外部環境条件(気温、湿度、気圧)・走行条件の統一、分析計や流量計の精度管理などである。そして、いつの間にか私の中では、試験室内での排出ガス試験が当たり前になっていた。

ところが、最近、この排出ガス計測を巡る「当たり前」がふたたび揺らぎ始めた。欧州連合(EU)圏で、新車(乗用車)の認証試験に、路上を走行しながらの排出ガス計測(RDE試験)も追加することが決まった。排出ガス基準値をいくら低く抑えても大気質(NOx)が一向に改善しない、というジレンマがその背景の一つとなっている。2017年9月からは、このRDE試験に排ガス基準値が設けられ、排ガス認証における実路走行試験が本格的にスタートする。さらに冒頭に述べた排ガス不正事件の影響で、日本でも、新車型式認証の要件として実路走行を追加する方針が決まり、詳細な試験条件の議論が始まっている。排ガス規制は、試験室内での試験結果にのみ基づくやり方から、実路走行のデータも考慮するやり方へと大きく方向転換したといえる。

そして、この方向転換は、排出ガスの計測法にも大きく影響する。HORIBA は、自動車分析計の国産一号機を 50 年以上前にリリースして以来、試験室内用の排出ガス計測機器を中心に技術開発を進めてきた。その間、装置を使ったださる技術者の方々からのフィードバックやアドバイスに支えられてきた面が大きい。新しい考え方である実路走行試験でも、同じようなプロセスを繰り返していくのだろうと思う。そして、少しでも早く、実路走行試験を当たり前を実施できるだけの技術や環境を整えていきたいと思っている。

## 進化するエンジントライボロジー — 摩擦低減の秘密 —

*Evolving Tribology & Lubrication Technologies for Engines – Ingenious Mechanisms of Friction Reduction –*

小池 誠

Makoto KOIKE

JSAE エンジンレビュー編集委員

トライボロジーは“擦る”を表すギリシャ語“Tribos”と学問を意味する“ology”をつなぎ合わせた造語で、1966年に英国の報告書に初めて使われたと聞く<sup>1)</sup>。報告書には英国における潤滑に起因する経済的損失の調査と産業界への対処の必要性が提案されていた。(社)日本トライボロジー学会では、トライボロジーを潤滑、摩擦、摩耗、焼付き、軸受設計を含めた「相対運動しながら互いに影響を及ぼしあう二つの表面の間におこるすべての現象を対象とする科学と技術」と位置付け、その役割を、機械や部品の低摩擦、低摩耗、表面損傷の低減の実現による、社会の省エネルギーおよび省資源への貢献としており<sup>1)</sup>、現在まで提唱時の意義が引き継がれている。

回転するカム軸でバルブを開閉し、ピストン・クランク機構で動力を取り出すエンジンは、そもそも耐久性・信頼性確保の観点でトライボロジー研究が極めて重要である。同時に、燃費改善のために摩擦低減の努力が続けられており、ここ20年に限ってもガソリンエンジンの摩擦は約30%低減されたことが報告されている<sup>2)</sup>。トライボロジーはエンジンのベース技術に位置付けられ、一台毎の低減割合もさることながら、技術の普及に伴う総量の効果を考えるべきである。自動車走行時の摩擦損失は投入エネルギーの5-10%と言われており、摩擦損失の10%低減は走行時の損失を0.5-1%低減する効果がある。仮に2013年の乗用車世界販売台数約6600万台<sup>3)</sup>に相当するエンジンの摩擦損失を10%低減できたとすると、33-66万台に相当するゼロCO<sub>2</sub>車投入と同じ価値があり、これは同年の電気自動車の世界販売台数11万台<sup>4)</sup>より多い。

ところで、エンジンの摩擦損失はどのようにして減らしているのだろうか。エンジンは排気量当たりの出力が年々高くなっており、特に過給ダウンサイジング以降はピストンに加わる大きな荷重への対応も必要となっている。ハイブリッドはエンジンの起動、停止回数が増えるため、耐久性を確保しながらの摩擦低減はよりチャレンジングな課題になっているであろうことは想像に難くない。

本特集は、何故摩擦損失を年々下げることができるのか、という素朴な疑問を持つ人を対象に企画した。トライボロジーを専門としない読者も多いであろうことを承知で、敢えてこの分野を代表する専門家の方々に執筆をお願いした。複雑な現象が絡み合うトライボロジーの本質を分かり易く伝えることは当分野に精通していなければできないと考えたからである。

特集は次の5つの内容で構成される。①エンジントライボロジーの研究動向; SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)におけるトライボロジー研究、②ピストンリング潤滑; オイル消費と摩擦低減の両立、③滑り軸受; ハイブリッドやアイドリングストップシステムなどへの対応、④表面処理; DLC(ダイヤモンドライクカーボン)の摩擦低減メカニズム、⑤潤滑オイル; 低粘度オイル実用化へのアプローチ。

執筆者の方々には、日々の仕事で忙しいところを本企画のために貴重な時間を割いて執筆頂いた。感謝の言葉もない。読まれた方にはトライボロジーの面白さと将来の可能性を感じて頂ければ幸いです。

### 【文献】

- 1) <http://www.tribology.jp/outline/tribroot.html>
- 2) M. Schwaderlapp, et.al, Friction Reduction – The Contribution of Engine Mechanics to Fuel Consumption Reduction of Powertrains, 22nd Aachen Colloquium, 2013.
- 3) [http://www.jama.or.jp/world/world/world\\_t2.html](http://www.jama.or.jp/world/world/world_t2.html)
- 4) <http://evobsession.com/world-electrified-vehicle-sales-2013/>

# エンジントライボロジーの最近の研究動向

Research Trend and Latest Approach for Engine Tribology

三原 雄司

Yuji MIHARA

東京都市大学

Tokyo City University

## 1 はじめに

自動車産業は日本の経済において主力の産業であり、環境汚染低減のための排出ガスの浄化や温室効果ガスの排出抑制および石油エネルギーの枯渇を見据えた省エネルギー化など、社会的に求められる多くの課題に対応するために様々な先進的な技術の開発とその応用を実現してきた。自動車の環境性能の一層の向上は、2020年の新燃費基準等の直近の施策のみならず、2030年以降も見据えた技術開発が求められ、その解決に貢献していくことが期待されている。一方で、その動力源は電気や燃料電池等に大きくシフトする(大きなシェアを有する)印象を様々なニュースから受けるが、世界全体を見据えた状況予測を見ると、2035年におけるエンジン(内燃機関)単体およびエンジンと電動モータの組み合わせによるハイブリッド化による乗用車用動力源は80%を超えることが予想されている。即ち、エンジンはその性能の向上を進め、世界最高レベルの水準を維持することが希求されている<sup>1),2)</sup>。このような背景を受けて国家的に重要な課題に対して科学技術イノベーションの創造を推進するSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)が創設され、エンジンの研究は、この重要なプログラムの一つの課題として特定された。プログラム名「革新的燃焼技術」は、乗用車用ガソリンおよびディーゼルエンジンの熱効率50%を早期に実現する野心的な目標を掲げ、この目標は大学の研究成果に留まらず、製品化や社会実装を出口として見据えている<sup>3)</sup>。

この革新的燃焼技術は4つのチームで構成され、革新的な燃焼法の研究/開発をはじめ、エンジンの高効率化を支える制御技術の開発、バーチャル(ペーパー)エンジン開発実現をも見据えた革新的解析モデルの構築が推進されている。表題に掲げた「エンジントライボロジー」は、このSIP研究の目指す熱効率50%にどのように貢献できるか。流体潤滑域での摩擦低減に有効な潤滑油の低粘度化に加え、エンジンのしゅう動面の表面性状、形状、狭面積化、固体潤滑剤コーティング、表面テクスチャリングやディンプルなどの更なる最適化の推進も摩擦低減技術の対象となる。一方で、益々高度化するエンジン性能の要求に対して、面圧や速度の条件が異なるエンジン要素部品を同じエンジン油で潤滑させるなど、各しゅう動部での理想的な環境は常に整わない。オイル消費や焼付きリスク低減等の課題に目を向ければ、各自動車開発企業や部品製造メーカーの研究や経験値によって対応されているが、設計に反映できる有効な解析モデルは未だ存在しない。ここでは、このようなエンジントライボロジーの課題に関して、先に述べたプログラムによる研究推進の概要やその現状について紹介する。

## 2 エンジンの将来動向予測からわかること

乗用車用の動力源予測は、国の省庁や民間のシンクタンク等でも公開されているが、ここでは主にIEAの世界エネルギー展望(World Energy Outlook, WEO)<sup>4)</sup>に基づいて紹介したい。図1はその将来予測で、New Policies Scenario(政府が今後対応するはずであろう施策を盛り込んだシナリオ。BAU(Business as usual)が前提と思われる)の場合、2050年でも自動車は①エンジンのみで約47%、②HEVと③PHVが約43%で、合計すると約90%となり、EVやFCEVは10%程度に過ぎない。一方、地球温暖化抑制策を重視するBlue Map Scenario(世界全体のCO<sub>2</sub>排出量を2050年に2005年比で半減するシナリオ)では、2030年では①②③の割合が80%を占め、2050年でも①②③で70%、④⑤は30%程度との予測である。即ち、高い熱効率とクリーンな排ガスを両立したエンジンを使用するHEVやPHVが今後大幅に増加することがわかる。これらの予測は表1のように自動車産業戦略<sup>1)</sup>や、超長期エネルギー技術ビジョン<sup>2)</sup>でも明記され、電動化や燃料電池の推進が益々加速する一方で、エネルギー密度が高く、取扱いが容易で、新たなインフラ整備の必要が無いガソリン等を使用する内燃機関自動車は、主要国のみならず、新興国では今後も大規模な需要が見込まれ、その技術力の強化と国際競争力の維持が必要とされている。

表1 2020~2030年の乗用車用車種別普及目標<sup>1)</sup>

	2020年	2030年
(1)従来車	50~80%	30~50%
(2)次世代自動車	20~50%	50~70%
①ハイブリッド自動車	20~30%	30~40%
②電気自動車/プラグインハイブリッド自動車	15~20%	20~30%
③燃料電池車	~1%	~3%
④クリーンディーゼル自動車	~5%	5~10%

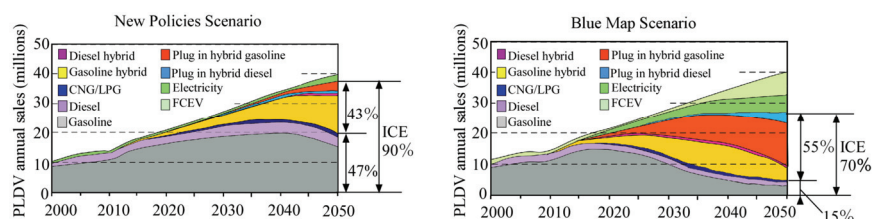


図1 乗用車用動力の将来動向(IEA World Energy Outlook 2012)

## 3 熱効率向上(燃費の向上)に向けた損失低減研究の役割

### 3.1 熱効率向上の目標

エンジンの熱効率を向上させるためには燃焼システムの最適化も重要であるが、排気エネルギー、冷却および摩擦の各種損失の低減のバランスを考慮することが40%を大幅に超える熱効率を実現するエンジンアプローチとなる。図2はエンジンのヒートバランスの一例<sup>5)</sup>で、多用される部分負荷条件(0.2MPa)では排気損失で35%、冷却損失26%と大きく、摩擦損失も8%にもなる、これらの損失低減に関してSIP研究が目標とする事例を挙げれば、図3に示すように現状の熱効率の38%から50%を目指しており、この実現に向けた各種損失の低減が研究課題の多くを占める。摩擦損失は熱効率換算でΔ2%がその達成目標となっており、実現のために後述する様々な摩擦低減研究の導入が要求されている。一方で、図4に示すような潤滑油消費や焼付きおよび音振動のリスク増加等の背反事象が大きな壁となり、容易には低減案を導入できないのが実情である。

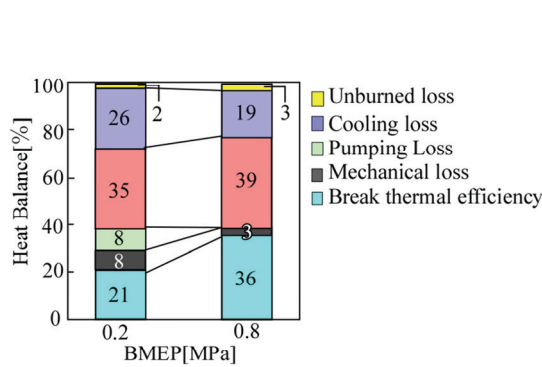


図2 一般的なエンジンのヒートバランス

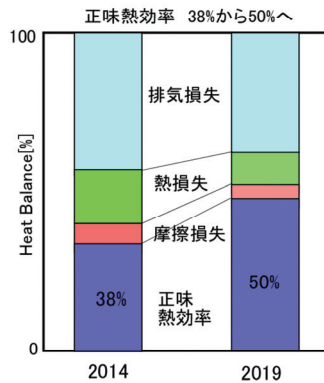


図3 革新的燃焼技術での正味熱効率向上とその内訳 (摩擦損失低減による+2%の熱効率向上を目指す)

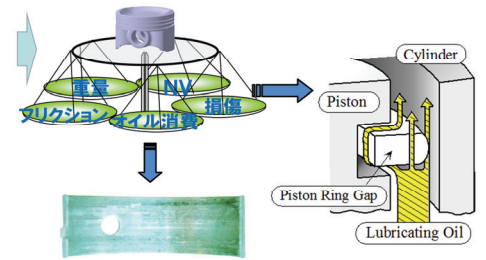


図4 オイル消費や損傷等の背反

### 3.2 摩擦損失低減による熱効率の向上

SIP研究における各種の損失低減手法のうち、摩擦損失の低減に関しては図5(a)に示すようにピストン・ピストンリング-シリンダ系とクランクシャフト-軸受系を主に推進し、低摩擦を発現するしゅう動面材料や形状および潤滑油との相乗効果などから摩擦損失50%低減達成を目指している。同時に、低摩擦を実現する上で課題となる焼付き/なじみの現象解明や潤滑油消費のメカニズムをモデル化することも本課題の重要な内容である。実現のためには、エンジンでは前例のないサイエンスレベルの大学間連携と企業技術者(研究者)の支援による研究体制が必要となった。図5(b)は上述したSIPにおける摩擦損失低減研究の俯瞰図であるが、例えば大学の基礎研究から得られる耐焼付き性の向上メカニズムや油膜生成のメカニズムが解析モデルの開発に繋がり、更に最適な材料開発や表面性状開発および潤滑油の適正化に繋がれば、内燃機関の開発が経験則から脱却して現象を普遍化でき、解析モデルに繋がるスキームにできる可能性がある。一方でトライボロジーの現象は複雑であり、実験によって現象把握を行っている研究者は多く存在しており、解析モデルを作ることの難しさもしっかりと理解をしなければならない。内燃機関のようなコンタミネーション(異物)の考慮も必要な場合は尚更である。

**損失低減によるエンジンの正味熱効率向上の手段**

- 図示熱効率の向上
- 燃焼自体の改善(ガソリン燃焼チーム、ディーゼル燃焼チーム)
- 各種損失の低減
- 冷却損失(同上チーム)
- 排気損失→排気エネルギーの有効利用
  - ・ターボ過給システムの性能向上(排気タービンとコップレッサの各効率の80%目標)
  - ・燃料改質ガス生成
  - ・燃料改質ガスの利用技術(新燃焼法の研究開発)
- 摩擦損失 機械摩擦損失の低減(現在の損失の50%低減)
  - ・ピストン-シリンダ系の低摩擦化
  - ・クランク-軸受系の低摩擦化
  - ・摩擦・摩耗の低減
  - ・解析・予測モデル・潤滑剤との相乗効果研究
  - ・背反事象(LOC, 焼付きリスク低減)
- エンジンシステムのトータルモデリング
  - ・数値モデルによる排気エネルギーの有効利用と
  - ・機械摩擦損失を考慮した性能評価法の開発

図5(a) 損失低減を実現するための主要項目

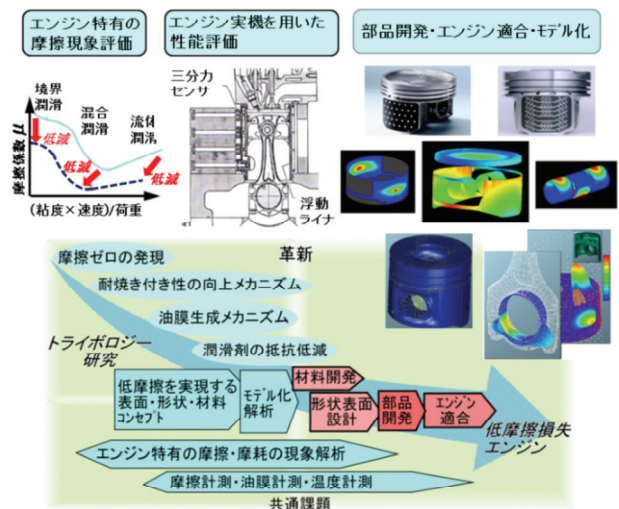


図5(b) 摩擦損失低減のための革新的アプローチの推進 (サイエンスレベルの研究を低摩擦エンジンに繋げる)

図5 損失低減による熱効率向上のアプローチ



## 4 摩擦損失低減とそのモデル化

### 4.1 低減実証の手法と焼付き・なじみ現象解明

図 6 にエンジンの摩擦損失低減の手法とそのモデル化の俯瞰図を示す。前提としてエンジンの潤滑状態は主に流体潤滑下にあり、摩擦損失低減のためには潤滑油の粘度やしゅう動面積を減少させることが有効な手段となる。低粘度化と高面圧化はそのトレードオフとして焼付きや摩耗のリスクを増加させるが、耐焼付き性と耐摩耗性を向上させること、即ち境界潤滑領域でのトライボロジーの性能向上がエンジン各部のしゅう動部環境の開発課題となる。この領域では直接接触を想定したしゅう動面の低摩擦化に向けた表面改質やこれを支える潤滑油添加剤の最適化、及びこれら相互の相乗効果が非常に重要になる。これらの基礎研究における試験結果から有力と判断できるものをエンジン部品として開発する。一方、焼付き/なじみは、エンジン潤滑において経験的な理解と対応はできるものの(例えば慣らし運転)、これらの現象に至るメカニズムの理解は乏しい。このため、エンジンしゅう動部の荷重・速度および温度を模した基礎試験によってしゅう動面に発生したトライボ現象の観察とその分析からスタートせざるを得ない。更に潤滑油の添加剤としゅう動面の原子分子レベルの表面反応モデルも必要となる。これらの基礎研究から最適な摩耗モデルの理解や、なじみ現象から摩耗/焼付きに至る遷移臨界条件の策定を経てエンジンに適用できるトライボシミュレータを作り、エンジンを模した試験機やエンジン実機試験での検証によってその有用性を探る。サイエンスをエンジン設計のテクノロジーに繋げるにはいくつもの高いハードルがあり越えることは容易では無いが、実現に向けた挑戦は始まっている。

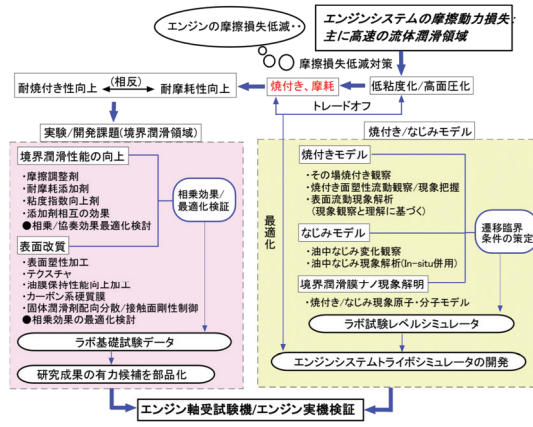


図 6 摩擦損失低減モデルへのアプローチ

### 4.2 低摩擦要素部品の開発

エンジンの摩擦損失の低減に向けたエンジン実証の取り組みを紹介する。4 気筒ガソリンエンジンを対象とした場合、図 7 に示すようにエンジンオイル、動弁系、ピストン・ボア、クランク/軸受系、オイルシール等を合わせた摩擦平均有効圧力(FMEP)を、現行の 35.6kPa から 20kPa 以下にする野心的な目標を掲げて研究を進めている。実現のために、潤滑油は 0w-20 から 0w-8 の低粘度グレードとし、この潤滑油を前提とした境界摩擦低減、低張力リング、ピストンスカートやクランクおよび軸受など主要しゅう動部の表面改質や面積縮小、オイルシールの低緊迫化を主な対象として部品の製作を進め、これら以外にも低摩擦効果の高い要素を施した部品の投入を進めている。これらの目指すところは、図 8(a)に示すようにしゅう動部荷重および  $\eta$  U/Pm ( $\eta$ :潤滑油粘度, U:回転(しゅう動)速度, Pm:軸受平均面圧)値の低減、流体潤滑領域の積極的な拡大、境界摩擦領域に至った際の摩擦係数の低減など多岐に渡る。図 8(b)には、これらの摩擦低減手法をエンジン各部に応用した際の熱効率向上効果(%)の予測値を示した。これらの効果は 4 気筒エンジンでの正味平均有効圧力の増減だけでなく、浮動ライナー式ピストン系摩擦計測用単気筒エンジンやエンジン軸受試験機で個々の摩擦低減効果のメカニズムの現象解明に繋げ、図 6 に示したトライボシミュレータの課題の明確化や精度向上に役立てる。

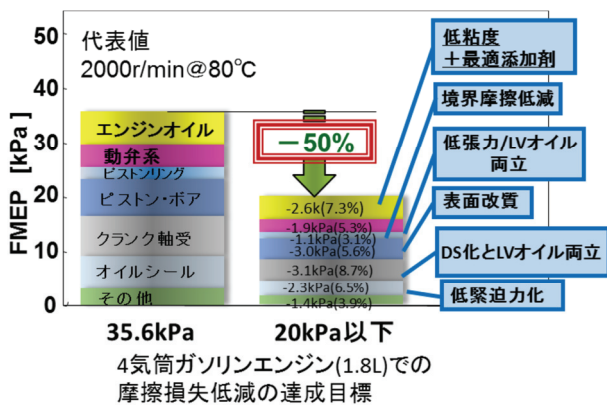


図 7(a) 摩擦損失 50%低減の主要項目



図 7(b) 開発された低摩擦部品の例

図 7 エンジンの機械摩擦低減に向けた具体的な取り組み

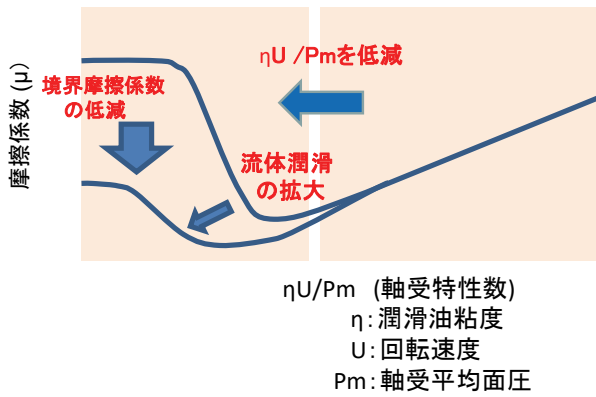


図 8(a) 各潤滑領域での摩擦係数の低減の狙い

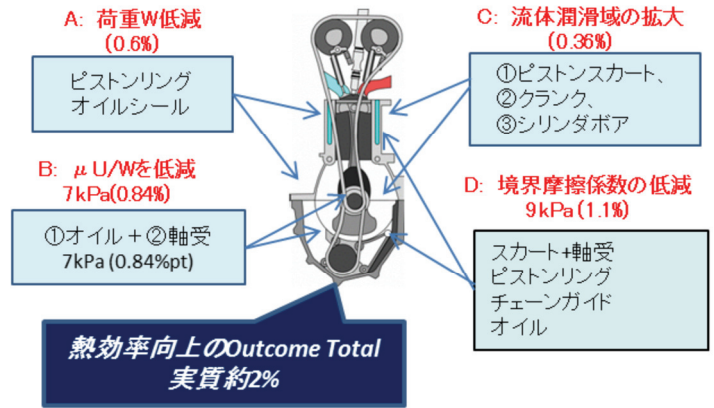


図 8(b) 摩擦損失低減手法の熱効率向上の見込み値

図 8 対象としたエンジンしゅう動部と期待する低摩擦エンジンのストライベックカーブ

### 4.3 熱効率向上に寄与できるエンジントライボロジー研究の在り方

一口に革新的なエンジントライボロジー研究といっても、簡単に良案が生まれてその応用でエンジンの熱効率向上にすぐに繋がるわけではない。自動車エンジンを開発する企業や関連の研究機関およびエンジン部品を開発する企業エンジニアにより、課題を地道に改良して最適化されてきたのが現状と考える。本学の例で行けば、エンジン用として様々な計測手法を開発し、これらをエンジンに適用することでエンジントライボロジーのメカニズム解明に貢献してきたとは思ふものの、エンジン全体としての熱効率向上を前提とした課題を本学のみで解明した事例はない。熱効率向上を目指す故の課題、例えば小型高過給のガソリンエンジンでの偶発的なノッキング現象や燃料の直接噴射による潤滑油の希釈、冷却損失を低減する燃焼室壁面性状の最適化と潤滑性能の両立、急速な燃焼スピードによる瞬時の荷重変化が軸受を初めとするしゅう動部に与える摩耗量の増加の懸念など、進化するエンジンには常に新しい課題が生まれる。熱効率向上のためのエンジンサイズ、燃焼システム、排熱回収システム、そしてエンジンの信頼性を左右するトライボロジーが一体となってこそ 50%の熱効率に近づくことができると考える。

### 5 おわりに

摩擦損失低減によってエンジンの更なる熱効率向上に寄与するには、ピストン/クランク/動弁系を初めとする多くのしゅう動部に対して、表面性状や形状およびオイルの最適化による実験検証だけでは無く、トライボロジーの基礎研究に基づくメカニズムの理解や、焼付きに代表されるリスク低減の基礎研究の導入が 2030 年も見据えたエンジン研究には必要と考える。また、産業を支える技術者の多くの知見と基盤研究を推進する研究者が出口を見据えて一体となって課題に向かうことが、大学および研究機関のエンジントライボロジーの研究体制を再興させ、冒頭で述べた世界最高水準のエンジン開発に寄与できると考える。

### 【文献】

- 1) 経済産業省製造産業局:自動車産業戦略 2014(2014年11月)
- 2) 経済産業省:超長期エネルギービジョン 2006
- 3) 科学技術振興機構(JST):戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)革新的燃焼技術
- 4) International Energy Agency /ETP2012 445
- 5) 内貫 潔, 河合 利浩, 川本 信樹, 竹田 直樹, 林 憲示:ハイブリッド自動車用 1.8L ガソリンエンジンの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.79-09 pp1-6 (2009)

# ピストンリングーシリンダ間の摩擦損失低減と油膜挙動

Reduction of Friction Loss between Piston Rings and Cylinder Bore based on the Analysis of Oil Film Behavior

三田 修三  
 Shuzo SANDA  
 株式会社豊田中央研究所  
 TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.

## 1 はじめに

自動車用内燃機関において、ピストンーシリンダ間の摩擦損失は各摺動要素の中で最大割合を占めており<sup>1)</sup>、その低減は内燃機関の効率向上に極めて重要なキー技術である。ただしピストンおよびピストンリング(以下リングと略記)には図1に示す多様な機能が期待されており、摩擦低減設計にはこれらの機能を損なわないことが求められる。本稿では、主にピストンリングを対象とし、摩擦発現機構に基づいた摩擦低減設計と背反性能の確保について最近の事例をもとに解説する。

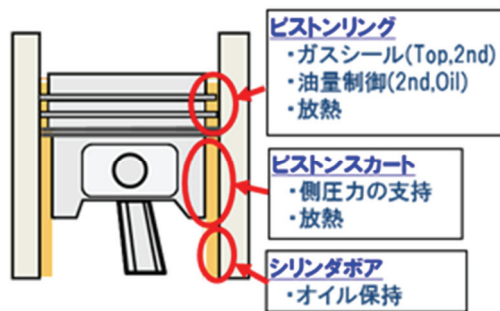


図1 ピストンおよびピストンリングに期待される機能

## 2 エンジンの将来動向予測からわかること

リングーボア間の摩擦形態は、ピストン速度が高い行程中央近傍では流体潤滑、ピストン速度が低く燃焼ガス圧やピストン側圧力の作用する上下死点近傍では固体接触・境界潤滑がそれぞれ支配的であり、摩擦損失エネルギーには前者の寄与が大きい(図2)。流体潤滑下の摩擦はオイルの粘性せん断抵抗(図3)であり、その低減には①粘度( $\eta$ )の低減、②油膜厚さ( $h$ )の増大および③摺動面積( $A$ )の削減が有効である。

①オイル粘度低減は近年急速に進んでいる。ただし、油膜厚さの低下を伴うため、圧縮上死点近傍において厳しい固体接触による摩耗・焼付きのリスクが高まる。これを抑制する手段として、近年 DLC 等の硬質皮膜による耐摩耗性向上が図られている。

②油膜厚さの増大策には、リング張力削減、摺動面形状による油膜形成促進の2通りが考えられる。ただし、エンジン実働時にはシリンダブロック変形に伴ってボア内周も真円筒形状から歪んでおり、張力削減は追従性の悪化、ひいてはオイル消費・ブローバイ増大の原因となる。実働時ボア変形の実態は今日でも不明な点が多いが、近年、大規模 CAE によるボア変形の詳細解析・推定、およびリング材質の改良に基づき、断面積を縮小して追従性を上げつつ張力を削減したリングが開発されつつある。

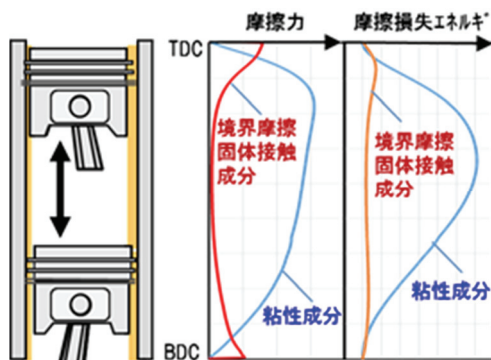


図2 ピストン行程と粘性・境界摩擦成分の変化  
 (中速・中負荷, 膨張行程の例)

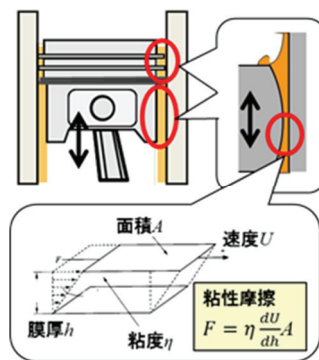


図3 流体潤滑域の摩擦発生機構

これに対して、リングの外周形状(プロフィール)、ボア表面の微細形状等により流体潤滑効果(Wedge/Squeeze 効果)による油膜形成を促進させることができれば、オイル消費・ブローバイ増大のリスクを伴わない。流体潤滑解析から、摺動条件に応じて油膜厚さを最大とするプロフィールを求めることができ

る。飯島ら<sup>2)</sup>はオイルリング摺動面バレル高さの適正化により行程中央近傍でのWedge効果が促進され、摩擦低減できることを示した。筆者ら<sup>3)</sup>は、ボア面クロスハッチ形状を考慮できるリング列の潤滑計算法(図4)を開発、ハッチ角の縮小により微細凹凸の油膜形成効果が促進されて摩擦低減に有効であることを推定し、実験検証した(図5)。飯島ら<sup>4)</sup>も同様の効果を報告している。リングプロフィール、ボア面テクスチャの設計は従来経験と勘に頼っていたが、近年普及してきたリングの潤滑 CAE ツールによる油膜厚さや摩擦特性の計算推定に基づいた設計が可能になってきた。

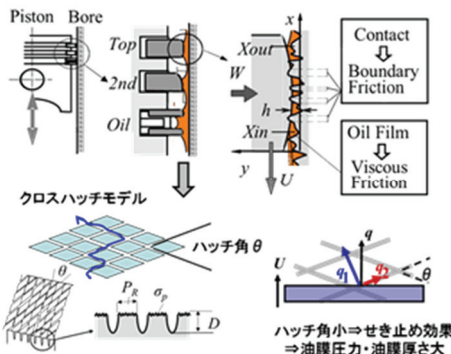


図4 クロスハッチ形状を考慮したピストンリング列の潤滑解析  
-文献<sup>5)</sup>より許可を得て転載-

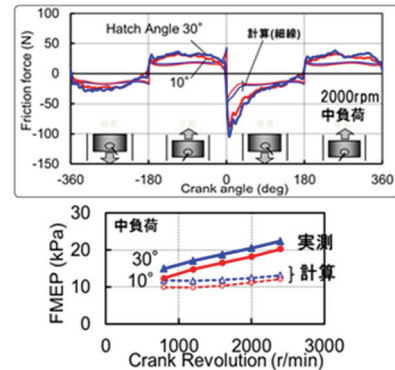


図5 クロスハッチ角度縮小による摩擦低減効果  
-文献<sup>5)</sup>より許可を得て転載-

③摺動面積の削減により摩擦低減を図った例として、最近浦辺らにより報告されたディンプルボア<sup>5)</sup>がある。これは、ピストン行程中央近傍のボア内面に径数百 $\mu\text{m}$ 、深さ数 $\mu\text{m}$ の規則的な凹み(ディンプル)を形成したもので、摩擦低減のメカニズムは、凹み部のWedge効果ではなく、ディンプル分だけ有効摺動面積が削減された効果であると報告されている。

一方、混合・境界潤滑域の摩擦低減には、表面あらしを油膜厚さに対して十分小さくし、固体接触を回避することが有効である。持田ら<sup>6)</sup>は、ボア表面あらしを極限まで低減したミラーボアコーティングにより摩擦低減を実現した。従来、過度なあらし低減はボア面の油膜保持を困難にし、スカッフや異常摩耗の原因と言われていたが、ミラーボアでは溶射技術により適度な凹部(ピット)がボア面に形成され、オイル保持機能を持たせている。ディンプル、溶射(ミラーボア)共に、トライボロジー特性を支配する $\mu\text{m}$ レベルの微細形状形成技術としてここ数年ほどで発達し、ボアへの適用が可能となった。DLC等の表面被膜・改質技術と合わせてさらに今後の発展が期待される。

関連して、ピストンリングの挙動・潤滑を連成させた3D-CAE技術の開発により、変形ボアではリングとリング溝間の摩擦がリング挙動を拘束してリング-ボア間の摩擦に影響を及ぼすことが近年明らかにされており<sup>7)</sup>、摩擦低減設計に新たなヒントを与えると思われる。

### 3 オイル消費のメカニズム解析とリング摩擦低減への貢献

前述の通りリング張力削減はオイル消費性能悪化を招くとされてきた。しかし、クランクケースからピストン-シリンダ間を通過して燃焼室内に至るオイル挙動(オイル上り)のルートには①リング外周-ボア摺動面の他、②リング背面、③リング合口(リングをシリンダに組み込んだときのリング端部同士の隙間)があり(図6黒矢印で示す)、背面と合口からのオイル上がりはリング張力のみで支配されるものではないことが近年の実験解析によりわかりつつある。

野沢ら<sup>8)</sup>、稲垣ら<sup>9)</sup>は、蛍光法によるピストン油膜可視化、データロガーを用いたランド圧力およびリング挙動の測定技術(図7)を用いてエンジン実働時の油膜挙動、ランド圧、リング挙動を同時計測した。その結果、吸気管負圧状態ではトップリング合口の大きさによってランド間のガス流れ、ランド圧およびリング挙動が変化し、背面・合口からのオイル上りに影響を及ぼすことを明らかにした(図8)。また、伊東ら<sup>10)</sup>は、小型ひずみゲージを用いてエンジン実働時にオイルリング直下で0.25MPa程度の圧力発生を観測し、上方へのオイル圧送の要因となりうること、オイルリング溝近傍のピストン形状(ドレンホール有無)がこの圧力発生に影響することを明らかにした。

以上の解析結果は、ピストン形状、リング合口等の設計によりランド圧力、オイルリング直下の圧力をコントロールすればオイル消費を削減できることを示唆しており、こうした設計がリング張力削減による摩擦低減を可能にすると考えられる。

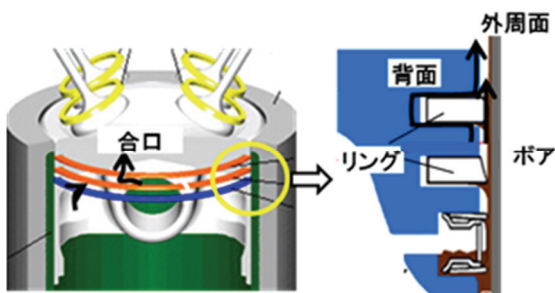


図6 オイル上がりの3ルート

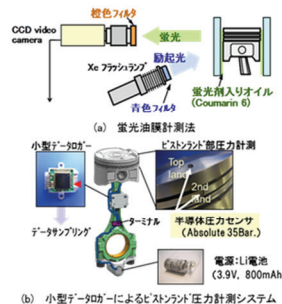


図7 エンジン実働時の油膜挙動およびランド圧力測定システム  
-文献<sup>8)</sup>より許可を得て転載-

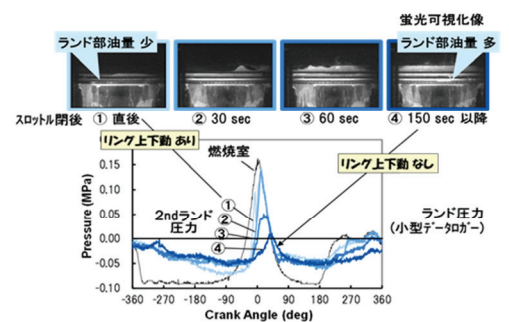


図8 エンジン実働時の油膜挙動およびランド圧力測定の関係  
-文献<sup>8)</sup>より許可を得て転載-

#### 4 ピストンスカートの摩擦低減と背反事象

最後にピストンスカート摺動部の摩擦低減について簡単に述べる。スカートはリングに比べて面積が広く面圧が小さいため、行程全体を通じて概ね流体潤滑状態にあると考えられ、図3より①粘度の低減、②ボア-スカート間のクリアランス拡大および③摺動面積の削減が有効である。背反性能として、②クリアランス拡大にはピストン2次運動(スラップ)およびそれに伴う異音発生、③摺動面積削減には面圧増大によるスカート部の破損・塑性変形がある。これらの抑制と摩擦低減を両立させるため、スカート部の形状、剛性、材質をバランスよく適正化させた検討例が報告されている<sup>11),12),13)</sup>。

#### 5 まとめ

主にピストンリングの摩擦低減技術について、背反となる性能確保との両立という観点に着目して最近の事例を紹介した。これらをまとめて表1に示す。エンジンの基本設計(大きさ、出力、ガソリン/ディーゼル 他)に応じてどの技術が最も有効か、また摩擦損失を最小とする最適解は当然異なってくる。しかしながら、ピストン-シリンダ間に形成される潤滑膜の複雑な挙動を明らかにし、摩擦および背反事象の支配要因を明確にすることが最適設計指針を求める際の共通した課題であることは確かである。

表1 ピストンリングの摩擦低減アイテムと背反性能

	摩擦低減アイテム		背反性能	背反性能の対策
流体潤滑	粘度低減		焼付き・摩耗増(TDC近傍)	材料・表面改質(耐摩耗性確保)
	膜厚増	張力低減	シール性悪化 (オイル消費・フローハイ増大)	・ボア変形抑制 ・リング追従性向上 (断面積縮小、高強度材料) ・ピストン設計によるランド圧制御
		外周プロフィール最適化		
		ホテクスチャ最適化		
	面積削減	ディンプルボアなど	オイル消費増大	ディンプル形状・領域の適正化
境界潤滑	ボア鏡面化(溶射など)		焼付き・スカッフ	ボア油膜保持性確保(ビットなど)
	低摩擦材料・表面改質(DLCなど)			

#### 【文献】

- 1) 例えば 中村:自動車技術 Vol.69 No.10 (2015) p10
- 2) 飯島他:自動車技術会 2014 春季大会学術講演会前刷集 20145343
- 3) 三田他:自動車技術会論文集 20144650
- 4) 飯島他:自動車技術会 2006 春季大会学術講演会前刷集 20065169
- 5) 浦辺他:自動車技術会 2013 秋季大会学術講演会前刷集 20135625
- 6) 持田他:自動車技術会 2015 春季大会学術講演会前刷集 20145765
- 7) 山田他:自動車技術会 2011 秋季大会学術講演会前刷集 20115651
- 8) 野沢他:自動車技術会 2012 秋季大会学術講演会前刷集 20125623
- 9) 稲垣他:自動車技術会論文集 20134194
- 10) 伊東他:自動車技術会 2007 春季大会学術講演会前刷集 20075267
- 11) 金井他:自動車技術会 2007 春季大会学術講演会前刷集 20075101
- 12) 黒石他:日本機械学会論文集(C編) 77 巻 782 号(2011-10) p3861
- 13) 金子他:自動車技術会 2013 春季大会学術講演会前刷集 20135118

# エンジンの燃費向上技術とすべり軸受の対応

Technology of Engine Bearings for Improvement of Fuel Consumption

児玉 勇人, 神谷 周

Hayato KODAMA, Shu KAMIYA

大豊工業株式会社

TAIHO KOGYO CO., LTD.

## 1 はじめに

近年、環境保護と省資源化の観点から、自動車の燃費向上が強く求められている。自動車の燃費向上に対して、ハイブリッドシステム、アイドリングストップシステムといった新たなシステムの適用やオイルポンプのサイズダウンによる摩擦トルク低減といった各 부품の機械損失低減などの技術開発が進められている。クランクシャフトを支えるすべり軸受(以下、エンジン軸受)では、軸受自身の低フリクション化と新たなシステムの適用への対応が同時に求められている。本稿では、新たなシステムに対するエンジン軸受への要求と、その要求に応える低フリクション化技術を紹介する。

## 2 エンジン軸受に対する要求

本項では、エンジン軸受に対するフリクション低減の要求とその対応方法について述べる。エンジン軸受では、通常運転時のフリクション低減に注目した取組みが実施されてきた。通常運転時には、エンジン軸受はクランクシャフトと接触しない流体潤滑下で使用され、軸受しゅう動面積の縮小など、油のせん断力を低減する直接的なフリクション低減が取り組まれてきた。さらに、軸受自身のフリクションを低減するのみならず、軸受からの漏れ油量を減らし、オイルポンプのサイズダウンをすることで、その駆動トルクを低減して、エンジン全体のフリクション低減に寄与する取組みも実施されている。

ハイブリッドシステムやアイドリングストップシステムを適用したエンジンの採用が増加するにつれ、エンジン軸受には、その対応としてのフリクション低減が求められるようになった。ハイブリッドシステムやアイドリングストップシステムを適用したエンジンにおいては、車両運転時にもエンジンが停止するため、通常のエンジンに対し、エンジンの起動・停止回数が非常に多い。エンジンの起動・停止時には、エンジン軸受はクランクシャフトと軸受間で接触が生じるような混合潤滑状態になる。このような場合、摩耗量および摩擦トルクの増加が懸念され、これに対応する技術開発が行われてきた。

また、ハイブリッドシステムを適用したエンジンでは、図1に示したように、800秒後でも水温が80°C以下であり、通常のエンジンに比べ低い冷却水温度で走行している。図2は、45°Cと80°Cでの各エンジン部品の摩擦トルクの割合を示した例である。45°Cにおける摩擦トルクは、80°Cに対して1.4倍程度大きく、エンジン軸受が関与するクランクシャフト系の摩擦トルクは、全体の25%を占めている。このため、ハイブリッドシステムを適用したエンジンでは、冷間時の摩擦トルク低減が求められるようになってきた。

上述した、軸受からの漏れ油量少減、起動時の耐摩耗性向上と摩擦係数の低減、冷間時のフリクション低減というエンジン軸受への要求に対応する技術として、偏心溝軸受、固体潤滑オーバーレイ、PTG軸受について紹介する。

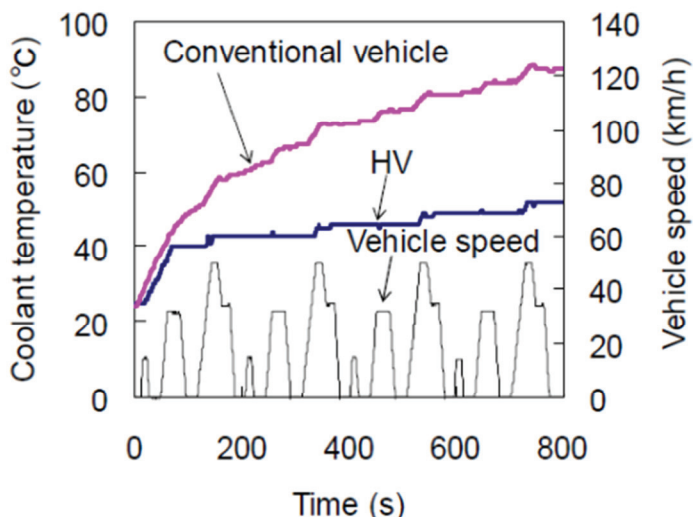


図1 NEDCモード冷却水の温度推移  
(出典:文献<sup>1)</sup>)

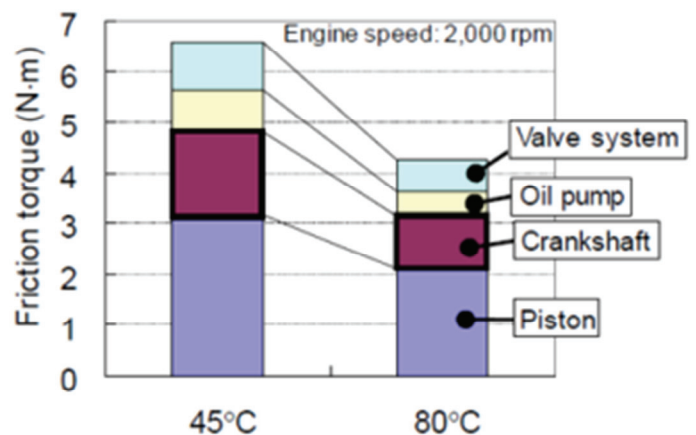


図2 エンジン部品の摩擦トルクの割合  
(出典:文献<sup>1)</sup>)

## 3 エンジン軸受の低フリクション化

### 3.1 偏心溝軸受

クランクシャフトを支える主軸受のしゅう動面には、アッパ側軸受背面のシリンダブロック油穴を通り、軸受の油溝を通して、油が供給される。合わせ面付近ではクリアランスが広いいため油が漏れやすく、軸受の漏れ油量の大半を占める。偏心溝とは図3に示されるように、主軸受アッパ側の油溝深さは円周方向の中央で従来の主軸受と同じであるが、両端の合わせ面に向けて漸減し、合わせ面付近のクリアランスの広い領域で油溝の断面積を減少させたものである。図4には偏心溝の漸減度合を示している。軸受内面もしくはそれを延長した仮想線上で油溝深さが0となる位置を溝終端位置とし、この位置を、軸受合わせ面を含む平面からの距離で定義している。また、溝終端位置が軸受内面にある場合を正、軸受内面を延長した仮想線上にある場合を負とし、負の場合には油溝が合わせ面に連通している。

図5は直列4気筒、1.8Lのダミーのシリンダヘッド付きエンジンでクランクシャフトへの油量と摩擦トルクを測定した結果を示している。油温 80°C、2000rpm でメインギヤリの油圧は 450kPa に設定している。偏心溝軸受は、摩擦トルクを増加させないで油量を削減できている。

表1は従来形状の軸受に対する油量削減量およびトータルの損失トルク低減量を示している。油量削減量は 25~63%、油量削減量と摩擦トルクから換算したトータルの損失トルクの低減量は 0.13~0.46Nm となっており、軸受の漏れ油量低減とトータルの損失トルク低減が両立できている。

以上のように、軸受の漏れ油量低減とトータルの損失トルク低減が両立できるため、オイルポンプのサイズダウンが可能になり、エンジン全体のフリクション低減に寄与することができる。

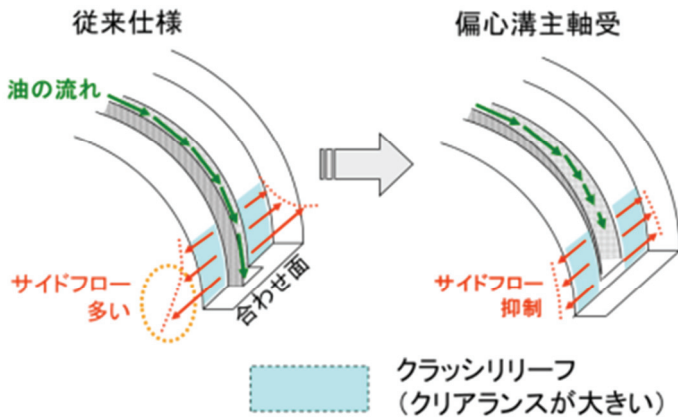


図3 偏心溝軸受の構造 (出典:文献<sup>2)</sup>)

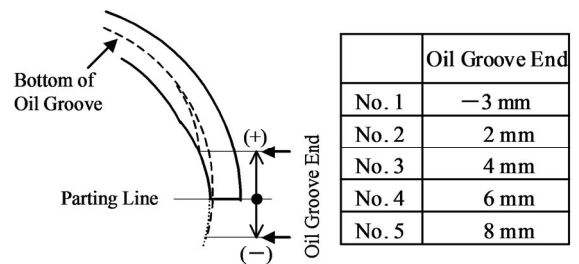


図4 偏心溝軸受の漸減度合 (出典:文献<sup>2)</sup>)

表1 偏心溝軸受の油量削減量およびトータルの損失トルク低減量 (出典:文献<sup>2)</sup>)

	Oil Groove End	Reducing Oil Flow Rate to Standard	Decreasing Total Torque Difference to Standard
No.1	-3 mm	25%	0.13Nm
No.2	2 mm	33%	0.25Nm
No.3	4 mm	—	—
No.4	6 mm	56%	0.41Nm
No.5	8 mm	63%	0.46Nm

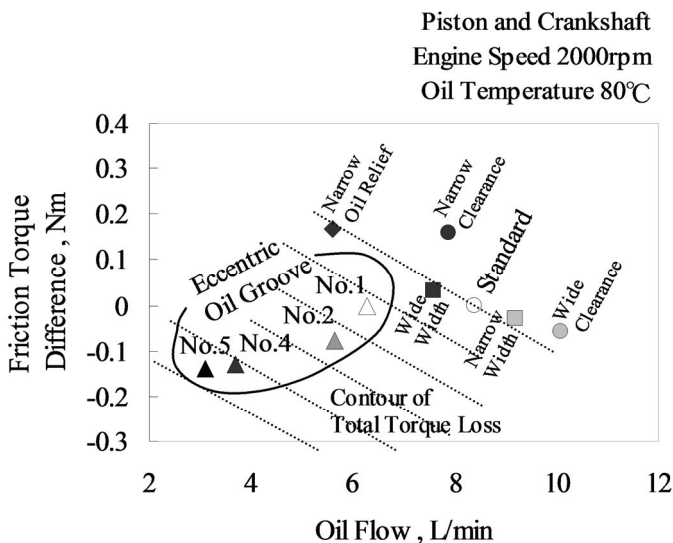


図5 クランクシャフトへの油量と摩擦トルクの測定結果 (出典:文献<sup>2)</sup>)

### 3.2 固体潤滑オーバーレイ

エンジンの停止時は軸と軸受が接触している。起動・停止を繰り返すことにより、軸と軸受が接触する頻度は増加し、軸受が摩耗するほか、摩擦も高い。摩耗や摩擦を低減する技術として、固体潤滑オーバーレイを紹介する。

図6に固体潤滑オーバーレイを施したエンジン軸受の構造を示す。一般的にエンジン軸受は裏金の上にアルミニウムや青銅系の軸合金を施したバイメタル構造(二層構造)をしており、固体潤滑オーバーレイはその表面に施される。図7はアルミニウム合金軸受上に施された固体潤滑オーバーレイの断面写真を示している。固体潤滑剤であるMoS<sub>2</sub>をポリアミドイミド樹脂でバインドした構造となっており、膜厚は約6μmである。

固体潤滑オーバーレイの耐摩耗性評価結果を図8に示している。試験はジャーナル型試験機を用いて静荷重下で起動・停止を繰り返して行い、軸受の摩耗量は試験前後の肉厚差から求めている。固体潤滑オーバーレイの摩耗量は、アルミニウム合金の1/3程度であり、耐摩耗性に優れている。この理由として、アルミニウム合金に比べて固体潤滑オーバーレイは相手への凝着が少なく、摩擦係数が小さいためとされている。

図9にはジャーナル型静荷重試験機を用いて、混合潤滑領域での摩擦を測定した試験結果を示す。試験は面圧を10MPaから50MPaまで漸増させて、その時の摩擦トルクから摩擦係数を算出している。潤滑油は5W-30のエンジン油で給油温度は80℃、周速は2.9m/s一定としている。摩擦係数の変化をストライベック線図としてまとめており、試験は右側から左側に進行させている。図の右側の流体潤滑領域では両者にほとんど差が見られないが、左側の混合潤滑領域では、固体潤滑オーバーレイの摩擦係数はアルミニウム合金よりも低いことがわかる。

また、さらなる低フリクションを目指して、新固体潤滑オーバーレイの検討がされている。MoS<sub>2</sub>に代わってグラファイトを採用し、耐摩耗性向上のために硬質物であるSiCを添加している。表2はMoS<sub>2</sub>を添加した従来の固体潤滑オーバーレイとグラファイトを添加した新固体潤滑オーバーレイの特性を示している。新固体潤滑オーバーレイの摩擦係数は0.09であり、従来の固体潤滑オーバーレイの0.13と比較して、より低フリクションであることがわかる。

図10には静荷重軸受単体試験機を用いた新固体潤滑オーバーレイの耐摩耗性評価結果を示している。試験軸は焼入れ処理のない構造用炭素鋼と球状黒鉛鋳鉄の二種類を使用している。どちらの材質においても、従来品に対して90%少ない摩耗量となっている。

以上のように、固体潤滑オーバーレイによって、起動・停止時の耐摩耗性向上と摩擦係数の低減が可能となっている。

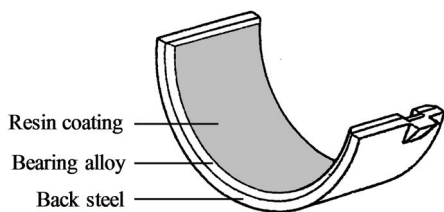


図6 エンジン軸受の構造 (出典:文献<sup>3)</sup>)

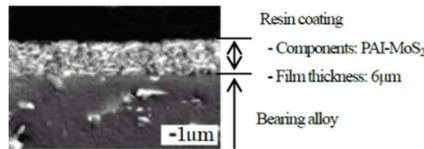


図7 固体潤滑オーバーレイの断面構造 (出典:文献<sup>3)</sup>)

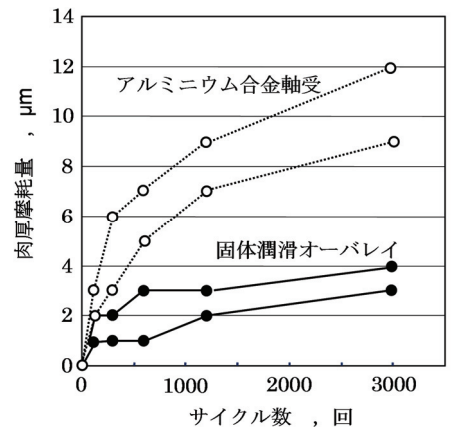


図8 起動-停止摩耗試験結果 (出典:文献<sup>4)</sup>)

表2 固体潤滑オーバーレイの成分と特性 (出典:文献<sup>3)</sup>)

Item	Developed	Current
Component	Graphite+SiC+PAI resin	MoS <sub>2</sub> +PAI resin
Coefficient of friction under non-lubrication	0.09	0.13
Surface roughness	1.04μmRzJIS	0.98μmRzJIS
Coating hardness, MPa	460MPa	394MPa

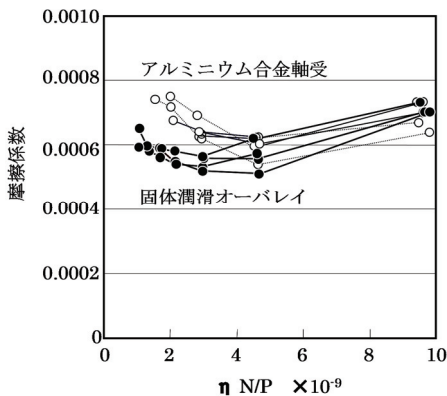


図9 混合潤滑下の摩擦係数比較 (出典:文献<sup>4)</sup>)

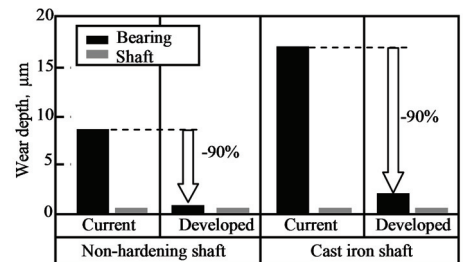


図10 新固体潤滑オーバーレイの耐摩耗性評価結果 (出典:文献<sup>3)</sup>)



### 3. 3 PTG 軸受(Partial Twin Groove Bearing)

通常、エンジン軸受は、流体潤滑状態で使用されるが、低温下では潤滑油の粘度が高く、流体潤滑であっても比較的摩擦力は高くなる。そのため、潤滑油を早期に昇温させて潤滑油の粘度を下げるのが有効となる。潤滑油の早期昇温をねらい、軸受からの漏れ油量を低減させて、潤滑油による加熱を抑制することにより、軸受近傍の温度を高くする。この観点から開発され、冷間時のフリクション低減を可能にした PTG 軸受を紹介する。

図 11 に PTG 軸受の構造を示す。PTG 軸受は主軸受のキャップ側の軸受に、二つの溝 (PTG) を設置した構造をしている。溝を設置した領域は逆さび形状になっており、負圧が発生しやすくなるため、一度軸受表面から外に出た潤滑油を引き戻すことで、潤滑油の漏れ油量を低減することができる。

図 12 に軸受単体試験機での油量削減効果を示す。給油温度は 40°C、回転速度は 1000rpm である。PTG 軸受は従来の軸受に対して少ない油量を示しており、油量削減効果は従来の軸受と比較して 8.4%であった。

図 13 はエンジンファイアリング試験で、JC08 (COLD) モードを運転させたときの軸受表面近傍の潤滑油温度を測定し、PTG 軸受の昇温効果を示した結果である。PTG 軸受は従来の軸受に対して早期に昇温していることがわかる。50°C に到達する時間を比較すると、従来に比べて約 10%速く、これを燃費に換算すると約 0.14%に相当する。

以上のように、PTG 軸受によって、漏れ油量の削減による潤滑油の早期昇温が可能になり、燃費低減に寄与できる。

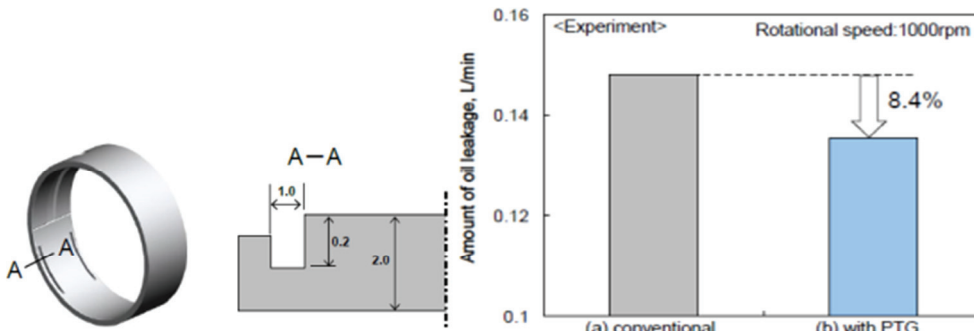


図 11 PTG 軸受の構造  
(出典:文献<sup>5)</sup>)

図 12 PTG 軸受の油量削減効果  
(出典:文献<sup>5)</sup>)

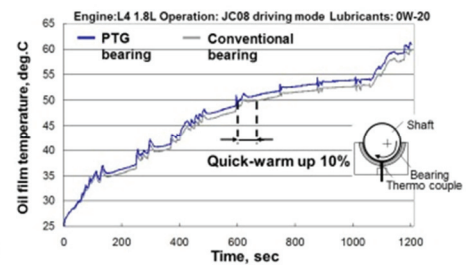


図 13 PTG 軸受の油量削減効果  
(出典:文献<sup>5)</sup>)

### 4 まとめ

本稿ではエンジン軸受の低フリクション化技術について紹介した。今後も自動車の低燃費追求に伴い、すべり軸受にはより優れた性能が求められると予想される。摩擦損失を低減するには、すべり軸受の設計面・材料面からの新たな技術開発のほかに、エンジンシステム全体で考えた低フリクション化技術が進展していくものと思われる。

### 【文献】

- 1) A. HONDA, M. MURAKAMI, Y. KIMURA, K. ASHIHARA, S. KATO, Y. KAJIKI: Research into Engine Friction Reduction under Cold Condition – Effect of Reducing Oil Leakage on Bearing Friction, SAE Int. J. Fuels. Lubr., 7(2), 616–622, 2014.
- 2) 疋田 他: “偏心油溝付き主軸受の開発”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.27-04(2004), 7.
- 3) 神谷・千年・出崎: エンジン軸受用低フリクション樹脂コーティングの開発, No.12-14「ディーゼルエンジンのさらなる高効率化を目指すコンポーネントの革新」前刷集, 自動車技術会, 28–33, (2015).
- 4) 壁谷 他: “固体潤滑オーバーレイ付きすべり軸受の耐磨耗性と低フリクション性能”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.29-11(2011), 17.
- 5) Y. KAJIKI, H. TAKATA, K. ASHIHARA, A. HONDA, K. TAKENAKA, H. MICHIOKA: Friction Reduction effect of the New Concept Bearing with Partial Twin Groove Bearings, SAE Int. SAE Technical Papers, 2015-01-2038, 2015.

# 革新的な表面処理技術によるエンジンフリクションの大幅な低減

The Innovative Surface Coating Technology for Remarkable Engine Friction Reduction

馬淵 豊

Yutaka MABUCHI

日産自動車株式会社

NISSAN MOTOR CORPORATION

## 1 はじめに

昨今の自動車の省燃費性向上への強い期待に対し、エンジンでは可変動弁機構や電動化による新システムを採用する一方で、部品間の摩擦低減に有効な表面性状/表面処理を開発して地道に機械損失を減らしていく作業も重要である。従来エンジン部品向けの表面処理として、摩擦や焼付きの防止にリン酸マンガンを代表とする化成処理や、Cr メッキなどの安価な表面処理が用いられてきた。しかし上記の強いニーズから、ここ 10 年間で、非常に高価な処理方法であった真空蒸着による硬質薄膜が、部品間の摩擦を減らす目的で採用が進んできた。とりわけエンジン油の添加剤との反応で摩擦を大幅に減らす特徴を持つ、炭素からなるダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜の採用は、省燃費化の技術開発における一つのエポックであり、以下その内容について紹介する。

## 2 エンジン軸受に対する要求

DLC 膜は、炭化水素系ガスや黒鉛を原料に用いて真空中で成膜される。図1に示すように、同じ炭素からなるダイヤモンドや黒鉛と異なり、長範囲的な周期構造を持たないアモルファス構造であるが、原子間同士はダイヤモンドまたは黒鉛と同様な結合形式をとり、その比率により最大 3000HV を超える表面硬さの膜が得られ、従来のメッキ等の膜に比べて著しく硬い<sup>1)</sup>。その結果として内部応力も非常に高く、また成膜時間がかかることから、膜厚はわずか数  $\mu\text{m}$ 、多くは  $1\mu\text{m}$  前後の薄膜である。無潤滑下での摩擦特性は、黒鉛や二硫化モリブデンと同様の固体潤滑効果を示し、良好な摩擦/摩耗特性をもつ。このような特性から、90 年代後半より主として耐摩耗性/耐焼付き性の必要な部品に、例えばエンジン用燃料噴射弁、ビデオレコーダーで用いる磁気テープ用ガイド、温水栓バルブ等に使われてきた。これらの部品の多くは、炭化水素系ガスを用いたプラズマ CVD 法による水素含有 DLC 膜である。一方、エンジン油潤滑下においては、水素を含まない、黒鉛を原料としたアークイオンプレーティング法による水素フリーDLC 膜が、摩擦低減に有効であることがわかってきた。

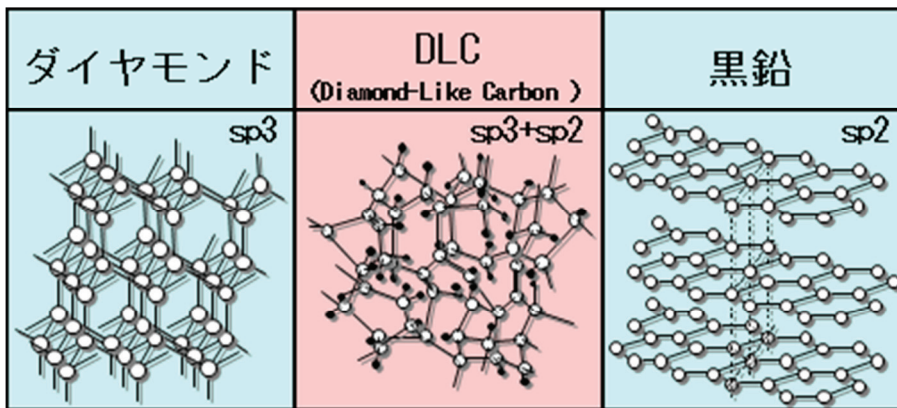


図1 ダイヤモンドとDLCと黒鉛(グラファイト)の構造の比較<sup>1)</sup>

## 3 水素フリーDLC 膜と油性剤による超低フリクション化技術

水素量の異なる DLC 膜の、エンジン油潤滑下での摩擦係数を Pin/Disk 摩擦試験機にて評価した結果を図2に示す。水素含有 DLC 膜の摩擦係数は、DLC を処理しない場合の鋼同士の摩擦係数 0.12 と大きく変わらないが、水素フリーDLC 膜とすることで、約 40%ものフリクション低減効果が見出された<sup>2)</sup>。この著しい低フリクション化効果を得る機構として、膜を構成する炭素原子の末端が、水素に終端されることなくエンジン油中の油性剤を吸着し、nm オーダーの被膜を形成することで2面間の真実接触を抑え、低フリクション化する機構を立案した(図3)。油性剤吸着による最大効果を確認する方法として、エンジン油に含まれる油性剤以外の添加剤との競争吸着を抑えるために、合成油ポリアルファオレフィン(PAO)を基油として用い、そこに油性剤グリセリンモノオレート(GMO)を1wt%配合した油を準備し、摩擦係数を測定した結果を図2中の点線で示す。エンジン油と同様に、水素フリーDLC 膜で顕著なフリクション低減効果を示し、かつエンジン油に対し更に  $1/3 \sim 1/4$  となる、超低フリクション化現象が認められた。

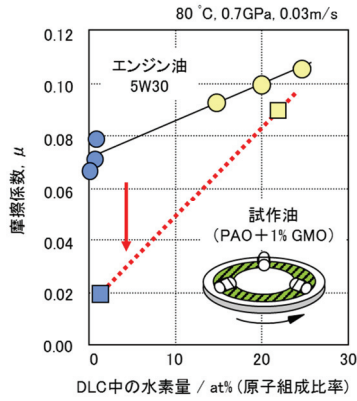


図2 水素含有量の異なるDLC膜の潤滑下におけるPin/Disk試験での摩擦係数

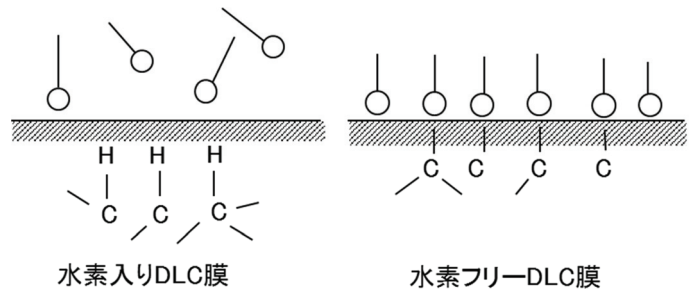


図3 水素含有DLC膜、および水素フリーDLC膜の表面における油性剤の吸着状態を示した模式図

次に、この現象が発現する機構を詳細に調べるために、表面の吸着状態の調査と、その表面自体の摩擦特性を調べた。表面の構造分析手法の一つである飛行時間型二次イオン質量分析(TOF-SIMS)によるGMO単体の分析結果と、PAOにGMOを添加した試作油で摩擦評価した水素フリーDLC膜の摺動部及び未摺動部でのGMO( $m/z^*=339$ のフラグメントで代表、\* 質量を電荷で割った値に相当する量)の吸着量を比較した結果を図4に示す<sup>3)</sup>。未摺動部に対して摺動部で明らかにGMO構成要素の吸着が加速し、この吸着現象が摩擦係数に影響することを示している。一方、原子間力顕微鏡(AFM)による摺動部、および未摺動部でのナノスクラッチの評価結果を図5に示す<sup>4)</sup>。試験後のDLC膜表面の洗浄の有無に関わらず、摺動部での摩擦係数は未摺動部に比べて低い傾向を示し、摺動部に低摩擦な表面が形成されたことを示唆している。特に最表層5nm未満の範囲で摩擦係数が著しく低い点が特徴的である。

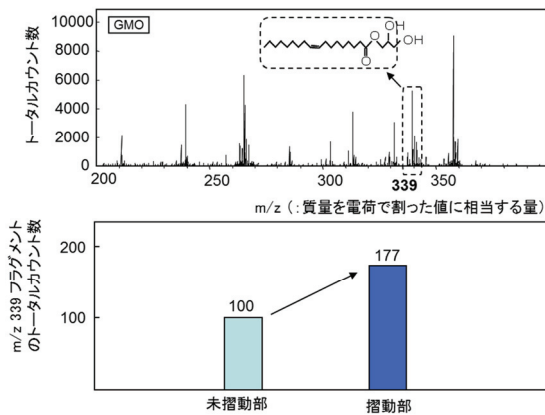


図4 TOF-SIMS分析によるGMOの分析結果(上図)、及び摩擦試験後のDLC膜の未摺動部・摺動部におけるGMO( $m/z=339$ のフラグメントで代表)の付着状況の違い(下図)<sup>3)</sup>

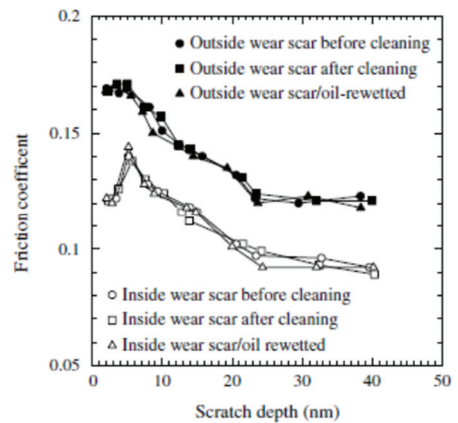


図5 摩擦試験後のDLC膜の未摺動部(Outside wear scar)・摺動部(Inside wear scar)でのAFMを用いたナノスクラッチ試験による各押し込み深さでの摩擦係数を測定した結果<sup>4)</sup>

DLC膜表面へのGMOの影響については、当初はGMOそのものの分子吸着により、相対する2表面の突起間の直接接触を妨げる機構を想定していたが、その後の研究成果より、図6に示すように、GMOが高温で極圧状態での摩擦下で分解して末端のOH基が遊離し、DLC表面の不安定電子(ダングリングボンド)に比較的強い力で結合して、2表面の接触が末端の水素-水素間の低せん断により摩擦が大幅に低減する機構へと修正を行った。この機構を裏付ける実験事例として、真空下で過酸化水素水( $H_2O_2$ )をガス化した雰囲気にて水素フリーDLC膜を摩擦した際の低摩擦係数が挙げられ<sup>6)</sup>、OH基の吸着が、この超低フリクション化機構を実現する最小コンポーネントであると言える。

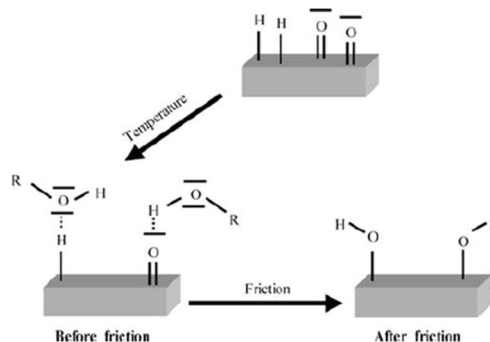
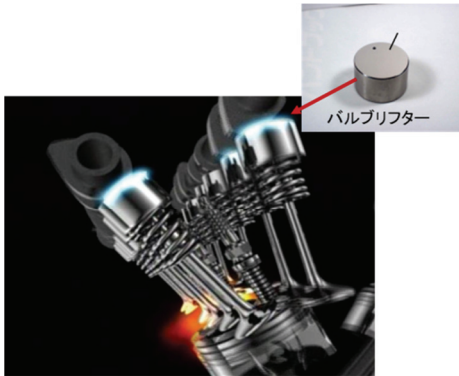


図6 摺動により炭素膜表面に結合した水酸基の模式図<sup>4)</sup>

## 4 エンジン部品への実用化とDLC 対応省燃費エンジン油の開発

水素フリーDLC 膜(PVD-DLC)を含む各表面処理のエンジンバルブリフターと市販エンジン油を用いたエンジンモータリング試験結果を図 8 に示す<sup>7)</sup>。リン酸マンガン塩(Phosphate coating)に対して水素フリーDLC 膜とした場合、エンジン回転数 2000rpm での動弁フリクションの低減率は約 45%に達し約 1%の燃費向上に繋がった。



動弁系部品の構成

図 7 動弁系部品の構成とバルブリフター

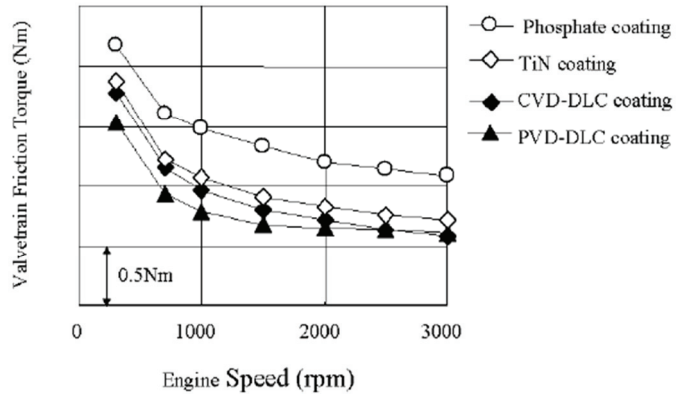


図 8 各種表面処理のバルブリフターを用いた動弁系フリクションの計測結果<sup>7)</sup>

水素フリーDLC 膜による低フリクション化機構より、DLC 膜の開発のみならず、DLC 膜に適した油性剤を含むエンジン油(DLC 対応省燃費エンジン油)の開発に着手した。実用性能を満足するために、エンジン油には摩耗防止剤や清浄分散剤を用いているが、これらの添加剤は競争吸着により油性剤の効果を阻害する要因となる。そこで最適な油性剤の選択の他、他の添加剤についても種類の変更、量的な最適化を行うことで、水素フリーDLC 膜を適用したバルブリフターとの組み合わせにおいて、従来仕様を大きく上回るトータルで約 2%の燃費向上効果を得た<sup>8)</sup>。また低フリクション化効果の持続性においても、図 9 の SRV 摩擦試験結果が示すように、現在の多くの省燃費エンジン油に用いられている摩擦調整剤モリブデンチオカルバメート (MoDTC) と、DLC 膜無し (=鋼) の組み合わせの効果が、摩耗防止剤ジチオリン酸亜鉛 (ZnDTP) の熱分解に伴い (∞ 走行距離) 徐々に低フリクション化効果が消滅していくのに対し、水素フリーDLC 膜と油性剤の効果は、エンジンオイル推奨交換距離 15000km を越えてもなおその効果が持続することを示している。

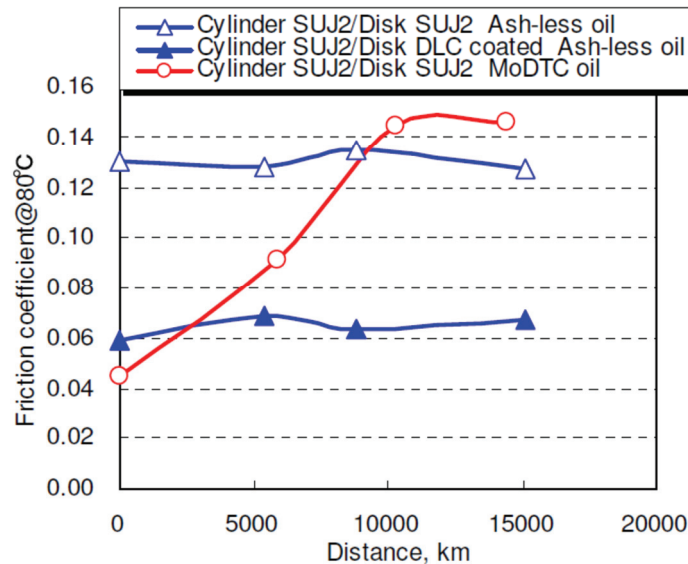


図 9 各エンジンオイルと SUJ2 鋼、及び DLC 膜の組み合わせでの、走行距離に対する SRV 摩擦試験でのフリクションの推移<sup>8)</sup>

## 5 まとめ

エンジンフリクションを表面処理により大幅に低減した事例として、水素フリーDLC 膜とエンジン油の組合せによる低フリクション化技術について紹介した。本技術の重要な点は、DLC 膜の開発のみでなく、DLC に適したエンジン油との組合せで開発を行ったことである。水素フリーDLC 膜は動弁系部品のバルブリフター、主運動系部品のピストンリングに既に採用が進んでいる。

## 【引用文献】

- 1) 日本アイティエフ HP, <http://www.nippon-itf.co.jp/technology/about-dlc02.shtml>
- 2) Y. Mabuchi, T. Hamada, H. Izumi, Y. Yasuda, M. Kano, The Development of Hydrogen-free DLC-coated Valve-lifter, SAE Papers 2007-01-1752.

- 3) I. Minami, T. Kubo, H. Nanao, S. Mori, S. Okuda, T. Sagawa, Investigation of Tribo-Chemistry by Means of Stable Isotopic Tracers, Part 2: Lubrication Mechanism of Friction Modifiers on Diamond-Like Carbon, Tribology Transactions, 50 (2007) p477-487.
- 4) M. Kano, Y. Yasuda, Y. Okamoto, Y. Mabuchi, T. Hamada, T. Ueno, J. Ye, S. Konishi, S. Takeshima, J. M. Martin, M. I. De Barros Bouchet and T. Le Mogne, Ultralow friction of DLC in presence of glycerol mono-oleate (GMO), Tribology Letters, Vol. 18, No. 2, (2005).
- 5) Julien Fontaine, Michel Belin, Thierry Le Mogne, Alfred Grill, How to restore superlow friction of DLC: the healing effect of hydrogen gas, Tribology International 37 (2004) p869-877.
- 6) Jean-Michel Martin, Maria-Isabel De Barros Bouchet, Christine Matta, Qing Zhang, William A. Goddard III, Sachiko Okuda and Takumaru Sagawa, Gas-Phase Lubrication of ta-C by Glycerol and Hydrogen Peroxide. Experimental and Computer Modeling, J. Phys. Chem. C 2010, 114, p5003-5011.
- 7) Y. Yasuda, M. Kano, Y. Mabuchi, S. Abou, Research on Diamond-Like Carbon Coatings for Low-Friction Valve Lifters, SAE Paper 2003-01-1101.
- 8) S. Okuda, T. Dewa, T. Sagawa, Development of 5W30 GF-4 Fuel-saving Engine Oil for DLC-coated Valve Lifters, SAE Papers 2007-01-7162.

# エンジンオイルによる省燃費へのアプローチ

*Contribution of Engine Oils to Fuel Efficiency*

小宮 健一

Kenichi KOMIYA

JX エネルギー株式会社

JX Nippon Oil & Energy

## 1 はじめに

地球温暖化対策の観点から、自動車の省燃費化は継続的な課題であり、エンジンオイルにも省燃費化への寄与が強く求められている。エンジンオイルは、過給器を含むエンジンの潤滑、清浄分散作用、密封作用、さび止め作用、冷却作用といったさまざまな機能を有するが、これらの機能を十分に確保しつつ、摩擦低減によってエンジンの効率を高め、省燃費化に貢献することがエンジンオイル開発の課題となっている。本稿ではエンジンオイルによる摩擦低減手法を解説する。

## 2 エンジンオイルの分類および規格

### 2.1 エンジンオイルの粘度分類

エンジンオイルのように見た目からはその品質を予測し得ない商品では、それがどのような規格に適合し、どのような分類に属しているかを知ることが商品選択の一助となる。エンジンオイルの粘度グレードの表記にはSAE(Society of Automotive Engineers)が制定する粘度分類(SAE J300)が使用されている。SAE J300はエンジンオイルの低粘度化トレンドを受け、2013年4月にSAE16が、2015年1月にSAE12、SAE8が新たに制定され、現在は表1に示す粘度分類が運用されている。SAE J300は低温始動性に関わる低温粘度(数字の後ろにWが付くもの;ウインターグレード)と高温粘度のそれぞれが規定されている。両者の規定を同時に満たすものをマルチグレードと呼び、0W-16のように表記する。

### 2.2 エンジンオイルの品質規格

国内においてエンジンオイルの品質規格としては、API(American Petroleum Institute)やILSAC(International Lubricant Standardization and Approval Committee)で制定されたAPIサービス分類あるいはILSAC規格が広く普及している。ILSACは日米の自動車工業会が作った委員会であり、1990年からエンジンオイルの規格運用を開始した。ILSAC規格には省燃費性に関する要求値もあり、Seq.VIと呼ばれるエンジン試験で評価が行われる。Seq.VIでは供試エンジンオイルの燃費を基準油の燃費と比較して燃費向上率を算出する。省燃費性に関する規格値(基準油に対する向上率)は粘度グレードごとに設定されている。

ILSAC規格はエンジンの進化、エンジンオイルへの要求の高度化から、数年ごとに試験法、規格値が見直され、現在では5代目となるGF-5規格が運用されている。省燃費性はILSAC規格の重要要件であり、規格改定ごとにエンジンオイルへの要求が厳しくなっている。試験に供されるエンジンや試験法も見直されてきたため直接の比較は難しいが、規格改定ごとに概ね0.3%以上、前規格に対して省燃費性に対する要求が厳しくなってきた。ただし、省燃費性にはエンジンとエンジンオイルのマッチングも極めて強く影響し、エンジンオイルの変更によって燃費向上効果がさらに大きく現れるエンジンもある。また、規格には市場で入手可能な製品の最低品質を担保することが目的という一面もあり、同じ規格であっても省燃費性をより強く指向するエンジンオイルが存在する。そのため、前述の概ね0.3%という数値はあくまでも参考としてご理解いただきたい。これからもエンジンオイルに対する省燃費性向上の要求はますます強くなると予想されるが、どれだけの向上が期待できるかはエンジンデザインと共に語られるべきであろう。

## 3 エンジン各部の潤滑状態と摩擦低減手法

エンジンに限らず、相対運動する部品間の潤滑状態は油膜の形成状態によって異なり、それぞれの潤滑状態に有効な摩擦低減手法もまた異なる。図1にエンジン各部の潤滑状態を示す。クランク系ではすべり軸受が主な潤滑対象となるが、すべり軸受では油膜が十分に形成されており、油膜をせん断する際に生じる抵抗、すなわち粘性抵抗を低減すること(低粘度化)が摩擦低減に有効である。エンジンオイルの低粘度化はクランクシャフトがオイルパン内のエンジンオイルを掻き上げる際に発生する抵抗を減じることにも有効である。一方、動弁系のように極めて高い荷重が加わる部位では、部分的に油膜を介さずに部品同士が直接接触する。こうした部位の摩擦低減には、エンジンオイルに含まれる添加剤によって部品表面に低摩擦な潤滑膜を形成することが必要となる。

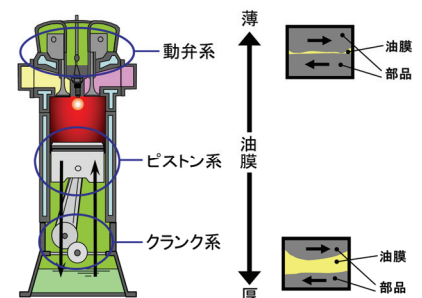


図1 エンジン各部位の潤滑状態

油膜の形成には粘度が強く影響する。粘度が高ければ油膜は厚く、粘度が低ければ油膜は薄くなる。油膜が薄くなると部品同士が直接接触する頻度が多くなる。図2に示すように、油膜切れが発生しない領域においては低粘度化が摩擦低減に有効であるが、さらに粘度を下げると部品と部品が直接接触する割合が増え、摩擦は大きくなる。エンジンの中には様々な潤滑部位があり、さらに温度や回転数などの条件も一定ではない。部位別、条件別に最適粘度が存在するため、部分最適ではなく、全体最適を考えて粘度を設定する必要がある。

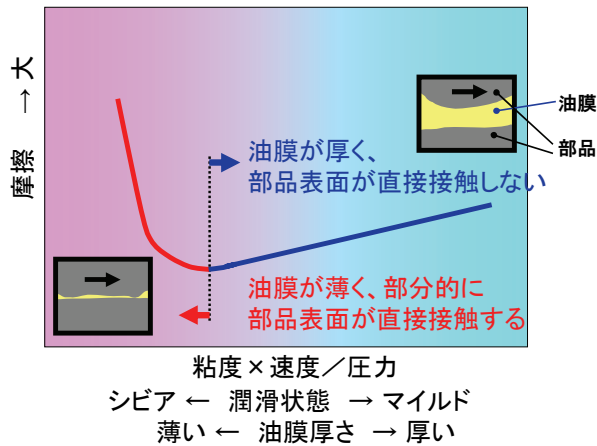


図2 エンジン各部位の潤滑状態

## 4 低粘度化による摩擦低減

### 4.1 省燃費エンジンオイルの粘度設計

エンジンオイルに限らず、潤滑油には温度が高くなると粘度が低くなるという特徴がある。そのため、潤滑油の粘度を設計する際に最初に考慮すべきは、高温でも十分な油膜が形成されるように粘度を確保するということである。表1に示す通り、エンジンオイルの粘度グレード(高温)は動粘度(100°C)とHTHS粘度(150°C)によって区分されている。それぞれのエンジンには適用できる粘度グレードが設定されており、その粘度グレードの最低粘度を確保しておけばエンジンの潤滑には(粘度に関しては)問題がないということの意味している。では、燃費への影響はいかかであるうか。粘度グレードはエンジン保護を第一義に設定されており、HTHS粘度の測定温度は150°Cとなっているが、通常の走行ではそこまで油温が上がることは稀である。燃費に影響するのは常用域での温度であり、同じ粘度グレードであってもエンジンオイルの粘度特性によって燃費は変わってくる。すなわち、高温粘度が同じであっても、より低い温度での粘度が低いほど燃費が良いということになる。ここで考慮すべきは粘度指数というパラメータである。粘度指数は粘度の温度依存性を示し、粘度指数が高いほど温度変化に対する粘度変化が小さい。よって、同じ粘度グレードであっても、粘度指数が高いほど常用域での粘度が低くなり、燃費が良いということになる。図3に省燃費エンジンオイルの粘度設計の概念を示す。

それでは、ウィンターグレードが低いほど燃費は良いだろうか。概ねその傾向にはあるが、全てがそういう訳ではない。表1に示す通り、ウィンターグレードは極低温での粘度で区分されており、主に極低温での始動性(クランクの軽さ)および流動性(オイルポンプでの吸い込み易さ)を示す尺度とされている。エンジンオイルの粘度は温度が低いほど高くなるが、極低温になると流動性を悪化させる(粘度を高くする)因子がさらに現れる。エンジンオイルの大部分を占めるのは基材となる基油であり、一般には炭化水素系基油が用いられる。炭化水素の中には飽和直鎖状化合物であるノルマルパラフィンがあり、これが低温で結晶化し、その結晶が成長すると極低温での流動性は悪化する。結晶化するノルマルパラフィンが多いほど極低温での流動性が悪くなるわけであるが、これは前述の粘度指数とは直接関係しない。すなわち、低粘度指数(燃費は良くない)だが極低温での流動性は良いエンジンオイル、高粘度指数(燃費は良い)だが極低温での流動性は良くないエンジンオイルというもあり得る。マーケットに存在するかどうかはさておき、5W-30よりも燃費の良い10W-30があっても不思議ではないのである。

表1 エンジンオイルの粘度分類(SAE J300)

SAE粘度グレード	低温粘度		高温粘度	
	CCS粘度 最大値 mPa·s	MRV粘度 最大値 mPa·s	動粘度 100°C mm <sup>2</sup> /s	HTHS粘度 150°C, 10 <sup>6</sup> s <sup>-1</sup> mPa·s
0W	6200(-35°C)	60,000(-40°C)	3.8以上	
5W	6600(-30°C)	60,000(-35°C)	3.8以上	
10W	7000(-25°C)	60,000(-30°C)	4.1以上	
15W	7000(-25°C)	60,000(-25°C)	5.6以上	
20W	9500(-15°C)	60,000(-20°C)	5.6以上	
25W	13000(-10°C)	60,000(-15°C)	9.3以上	
8			4.0 ≦ <6.1	1.7
12			5.0 ≦ <7.1	2.0
16			6.1 ≦ <8.2	2.3
20			6.9 ≦ <9.3	2.6
30			9.3 ≦ <12.5	2.9
40			12.5 ≦ <16.3	3.5 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
40			12.5 ≦ <16.3	3.7 (15W-40, 20W-40, 25W-40, 40)
50			16.3 ≦ <21.9	3.7
60			21.9 ≦ <26.1	3.7

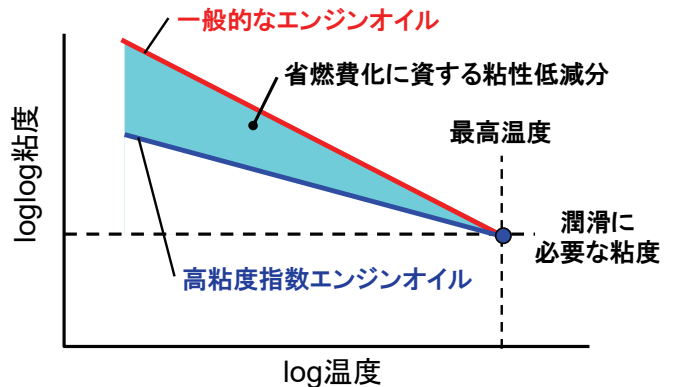


図3 省燃費エンジンオイルの粘度設計

## 4.2 高粘度指数化の手法

エンジンオイルは、①基材となる基油、②粘度特性を改善するための粘度指数向上剤、③清浄剤、酸化防止剤などの機能添加剤、から構成される。エンジンオイルの高粘度指数化には、粘度指数の高い基油を用いること、高性能な粘度指数向上剤を活用することの2つの方法がある。潤滑油基油の分類には表2に示すAPI基油分類が用いられる。API基油分類は基油を5つのグループに区分しており、グループ1～3が鉱油系基油、グループ4が合成油としてよく用いられるポリアルファオレフィン、グループ5がグループ1～4に該当しないもの(エステル系基油など)となっている。

粘度指数向上剤には油溶性ポリマーが用いられる。油溶性ポリマーは、糸まりのような形で基油に溶解しており、温度によって溶解性が変化するという特徴がある。図4に油溶性ポリマーの溶存状態を模式的に示す。

温度が高いときには溶解性が高く、ポリマーのサイズが大きくなって増粘性が高くなる。一方、温度が低い時には溶解性が低く、ポリマーのサイズが小さくなって増粘性が低くなる。粘度指数向上剤を用いて粘度指数を高めるには、まず基油の粘度を下げ、高温での粘度が設計値となる分の粘度指数向上剤を配合する。低温における粘度指数向上剤の増粘効果は高温における効果よりも小さくなるため、図5に示す通り、温度に対する粘度の変化が緩やかになって粘度指数が向上する。

表2 API基油分類

Group	S分, mass%		飽和分, vol%	粘度指数
I	> 0.03	and / or	< 90	80 - 119
II	≤ 0.03	and	≥ 90	80 - 119
III	≤ 0.03	and	≥ 90	≥ 120
IV	ポリアルファオレフィン (PAO)			
V	Gp I ~ IVに属さないもの			

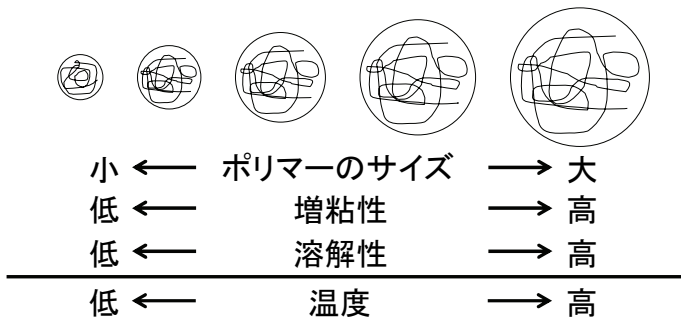


図4 油溶性ポリマーの溶存状態と増粘性

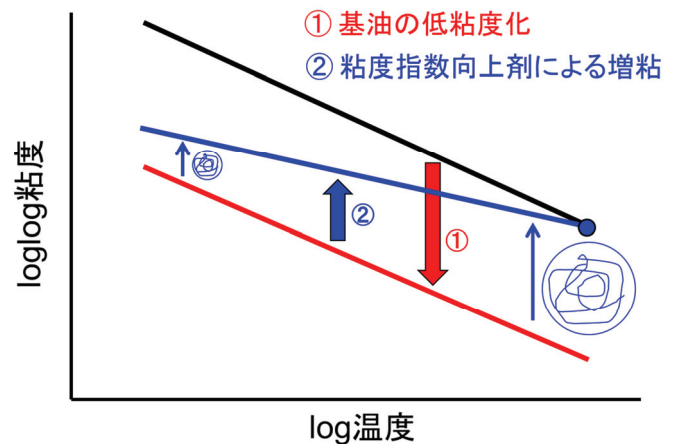


図5 粘度指数向上剤の活用手法

## 4.3 低粘度化、高粘度指数化で注意すべきこと

低粘度化、高粘度指数化のいずれでも基油の粘度を下げることになるが、やみくもに下げればよいというわけではない。基油の粘度を下げるということは基油を軽質化するという他に他ならず、蒸発性が高くなる。基油の蒸発性はオイル消費にも強く影響するため、注意が必要である。

油溶性ポリマーは高分子化合物であり、強いせん断力を受けると分子が機械的に切断されて増粘性が低下する。新油時に十分な粘度があると思っていたものが、使用しているうちに粘度が低くなっていたということもあり得る。エンジンオイルの粘度設計では、新油時のみならず、使用時間(走行距離)が延びても十分な粘度を確保していることを念頭に置く必要がある。エンジンオイルの粘度が下がるとオイルポンプの内部リークが増え、十分な油圧を確保できないということも起こり得る。油圧デバイスを装備する近年のエンジンでは、油圧確保は従来以上に重要な要素であり、十分な注意が必要である。

## 5 添加剤による摩擦低減

### 5.1 エンジンオイルの添加剤

表3にエンジンオイルに用いられる添加剤を示す。エンジンオイルには要求される機能を発現させるために様々な添加剤が用いられているが、摩擦低減に最も影響するのが摩擦調整剤である。摩擦調整剤にはアミン、アミド、エステルのように吸着によって低摩擦な潤滑膜を形成する化合物と、Mo系化合物のように反応によって低摩擦な潤滑膜を形成する化合物とがある。本稿では日本の省燃費エンジンオイルに広く用いられているMo系化合物による摩擦低減を紹介する。

表3 エンジンオイルの添加剤

種類	機能	主な化合物
粘度指数向上剤	温度による粘度変化の低減	ODP、PMA、SDC
流動点降下剤	低温流動性の向上	PMA
無灰分散剤	異物の分散・可溶化	コハク酸イミド
金属系清浄剤	部品表面への異物付着抑制 酸性成分の中和	Ca系化合物
摩擦防止剤	部品の摩擦・焼付き抑制	ZDDP
酸化防止剤	エンジン油の劣化抑制	ZDDP、Mo系化合物 S系化合物 アミン、フェノール
摩擦調整剤	摺動部位の摩擦損失低減	Mo系化合物 アミン、アミド、エステル
腐食防止剤	非鉄金属の腐食抑制	N系化合物、S系化合物
消泡剤	あわ立ち防止	シリコーン系化合物



## 5.2 Mo系化合物による摩擦低減

摩擦調整剤として用いられる Mo 系化合物としては、MoDTC(ジアルキルジチオカルバミン酸モリブデン)、MoDTP(ジアルキルジチオリン酸モリブデン)が挙げられるが、現在エンジンオイルに主として用いられているのは図6に示す MoDTC である。MoDTC は摺動部に低摩擦な MoS<sub>2</sub> を形成し、これが摩擦低減に寄与することが様々な研究成果として報告されている<sup>1), 2)</sup>。遠山らは MoDTC 配合油を用いて試験を行った摺動面の摩擦係数を乾燥条件下で測定し、摺動面に形成された反応膜が MoS<sub>2</sub> 単結晶のへき開面に近い摩擦特性を示したと報告している<sup>3)</sup>。前述の通り、エンジンオイルには種々の添加剤が配合されており、MoDTC と他添加剤との相互作用に関する研究も多い。多くは、摩耗防止剤および酸化防止剤として機能する ZDDP(ジアルキルジチオリン酸亜鉛)との併用に関するものであるが、金属系清浄剤との相互作用に関する研究例もある<sup>4)</sup>。

MoDTC は省燃費ガソリンエンジンオイルには広く使われているが、ディーゼルエンジンオイルに本格的に使用されることはなかった。ディーゼルエンジンでは燃焼によって発生するすすがオイルに混入し、MoDTC の摩擦低減効果を阻害するという問題があったことが主な理由であった。しかし、近年ますます厳しくなった排出ガス規制に対応するためにエンジンの燃焼行程が改善され、最新のエンジンではすすの発生量が大幅に減少する傾向となっている。最近の大型トラックを用いた実車試験では、MoDTC を用いることで 2% の燃費改善効果が認められたという報告もある<sup>4)</sup>。

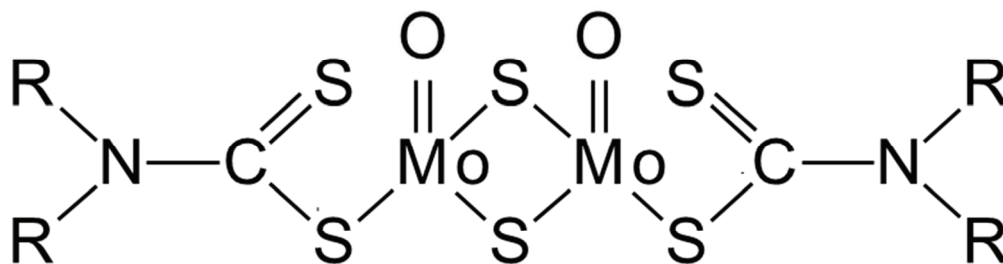


図 6 MoDTC

## 6 おわりに

ガソリンエンジンオイルの次期国際規格として、ILSAC GF-6 が検討されている。現在運用されている ILSAC GF-5 では、低粘度グレードは 0W-20 までしかサポートされていないが、ILSAC GF-6 では 0W-16 もサポートされる予定である。エンジンオイルの低粘度化は今後もさらに進むであろうが、潤滑性や油圧確保という観点から、エンジンとのマッチングも大変重要である。ILSAC GF-6 では、過給ダウンサイジングエンジンで発生しやすくなる LSPI (Low Speed Pre-Ignition) 防止性を新たな要求として加えることが検討されている。LSPI 防止性にはエンジンオイルの添加剤が強く影響することが報告されており<sup>5)</sup>、エンジンオイルの組成も従来とは大きく変わるであろうことが予想される。省燃費性能を含む各種性能を高次元でバランスさせるために、現在も鋭意検討が進められており、エンジンオイルには今後ますますの技術開発が望まれている。

## 【参考文献】

- 1) C. Grossiord et al.: Tribology Int., 31, 12(1998), 737
- 2) 叶際平: トライボロジスト, 51, 9(2006), 627
- 3) M. Tohyama, et al.: Proc. of Int. Tribology Conf. Yokohama, (1995), 739
- 4) K. Yamamoto, et al.: SAE 2015-01-2032
- 5) K. Fujimoto, et al.: SAE 2014-01-2785