

# mPAOとCTL潤滑油による環境保護とメンテナンスの低減

崇城大学 工学部 機械工学科  
教授

里永 憲昭\*

助教

竹田 雄祐

■著者連絡先 (\*)

〒860-0082 熊本県熊本市西区池田4-22-1

TEL 096-325-3195 FAX 096-323-1351

E-mail n-satonaga@mec.sojo-u.ac.jp

## はじめに

製造業では設備の自動化・高精度化が年々進出し生産性、信頼性の強化が企業としての体質を高めている。

そのため、設備の状態により製品の品質(Quality)、コスト(Cost)、納期(Delivery)が大きく左右され、設備の突発的な故障が発生してしまうと、事業者としては大きな損失となる。したがって、可能な限り故障を未然に防止し、設備に不具合が発生した場合は、すばやく修復して、本来あるべき姿に戻すなど、設備を常に最高な状態に維持・管理していく設備保全が極めて重要となる。また、地球温暖化対策やエネルギー資源の消費量抑制のために、CO<sub>2</sub>排出削減や燃費規制が強化され、機械設備の省燃費化が強く求められている。特に、自動車のエンジンにおいては、機械損失低減などを目的に、潤滑油の低粘度化が進んでいる。

一方で、摺動部の寿命延長の期待から耐摩耗性を有した優秀な潤滑油が求められている。これらの要求に対応するものとして、化学的に合成して製造する炭化水素系合成油としてポリ $\alpha$ オレフィン(PAO)が多用されている。PAOは化学的に製造されていることから、潤滑油の寿命に影響を与える硫黄分などの不純物を含まないことから、安定的で優秀な潤滑油とされている。

また、再生可能エネルギーの活用として、植物由来の潤滑油や、生分解性を持つ潤滑油

の開発も報告されており、環境性能としても優位性を示しており、社会における環境保全の取り組みと足並みは同様である。

加えて、世界の政情が不安定な中で、潤滑油の原料の多様化について見直されてきている。最近になり市場に紹介され始めた石炭液化油(CTL)の状況なども併せて紹介する。

## 1. ポリ $\alpha$ オレフィン(PAO)の特徴

ここで、一般的に使用されているPAOについて概要を紹介する<sup>1, 2)</sup>。

PAOはエチレンの低重合あるいはワックスの熱分解によって得られた直鎖上の $\alpha$ -オレフィン<sup>1)</sup>を低重合し、末端二重結合を水素添加したものであり、安定性を阻害する不飽和二重結合や硫黄、窒素などの不純物を含まない均一な分子を有する化学物質である。鉱物油と比較して化学的に製造されたPAOは一般的に以下の特徴が述べられる。

<利点>

- 1) 粘度指数が高い
- 2) 流動点が高い
- 3) 蒸発損失が少ない
- 4) せん断安定性に優れる
- 5) 添加剤効果が大きい

<欠点>

- 1) 高価である
- 2) 添加剤の溶解性が小さい
- 3) シール材の収縮を起こす

鉱物油の粘度指数向上剤には、一般的に高分子系成分の合成が用いられている。このた

び、合成油に広く用いられる粘度指数向上剤に替わるものとして、メタロセン触媒由来のポリ $\alpha$ オレフィン系(以下、mPAOと称す)の合成油が開発された。このmPAOは従来の粘度指数向上剤とは違い、せん断力に強い特徴を有している。これまでの著者らの研究で、mPAOを含有する低粘度エンジン油において、機械に用いられる軸受の寿命延長効果や、弾性流体潤滑(EHL)条件下における油膜厚さなどについて観測している。加えて、新油と使用後の双方を観測することで、潤滑油のせん断劣化による挙動の変化や、省エネルギー的観点の評価した結果、mPAOを含有することで、安定的な油膜の形成状況などの優位性を有していることを報告してきた<sup>3,4)</sup>。

## 2. 添加剤である粘度指数向上剤とmPAOの特徴

エンジン油やギア油などの潤滑油は、摩擦を低減して機械を円滑に動かすために欠かせないものである。

摺動部の摩擦を低減し、摩耗から損傷を与えない成分の添加による寿命延長を目的とした理想的な潤滑添加剤が求められてきた。ここでは最近の動向などを紹介する。

まず、潤滑油は低温から高温(約-30～150℃)の広い温度領域で使用される。液体の粘度は一般的に高温で低く、低温で高くなる性質を示すが、潤滑油は粘度変化が小さいことが望まれる。この温度による粘度変化を小さくするために潤滑油に添加されるのが粘度指数向上剤であり、粘度変化が小さいほど燃費向上への効果が高い。粘度指数向上剤は、化学組成からオレフィンコポリマー(OCP)系、ポリメタクリレート(PMA)系に大きく分類される<sup>2,5)</sup>。粘度指数向上剤の働きは、適正な範囲内で潤滑油の粘度を保持させることである。PMA系は温度変化による分子鎖の広がり、収縮の差が大きいことから粘度指数向上性能に優れている。

一方、PAOは鉱物油に近い組成でありながら、不純物である硫黄分を含まず、温度が変化しても粘度を保ち続けるという特長があり、鉱物系基油と同様の添加剤を使用することができ、各種工業用潤滑油に多く利用されている。主な働きとして、粘度指数が高く、高温下でも油膜を保持し、低温での流動性が良好でエンジンの始動性に優れている。しかしながら、従来型のPAOには異性化があり、容積がより大きかったため、メタロセン触媒により、高粘度PAO性能の改善が設計された。これがmPAOである。その結果、異性化がないことによりコンパクトで規則的な分子構造になり、優れた粘度特性を示す。

現在、エンジン油は油膜の形成および維持が非常に重要となっている。mPAOは油膜の薄膜条件下においても強固な油膜維持が可能になっている。

次に、合成油の添加剤である粘度指数向上剤とmPAOの分子構造を図1に示す。粘度指数向上剤は一般的なオレフィンコポリマー(OCP)の構造である直鎖型になっており、一方、mPAOは立体格子状の構造になっている。

粘度指数向上剤の分子構造では、mPAOに比べ分子量が大きく、また平面体に近いためせん断性能が劣るが増粘性に優れている。粘度低下に対する耐性としてせん断安定性があるが、一般的なせん断安定性は分子量が多いほどせん断されやすくなる。ただし、高温では粘度低下は起きにくいといわれている<sup>7)</sup>。反対に分子量が少ないとせん断安定性は高く

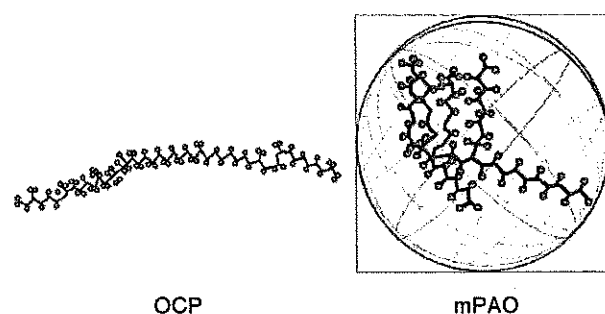


図1 粘度指数向上剤(OCP)とmPAOの分子構造

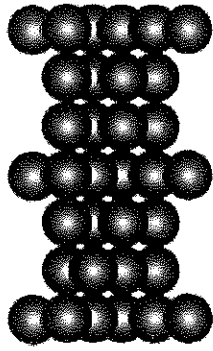


図2 スルホン酸カルシウム塩の構造

なるが粘度指数は低くなってしまふ。粘度指数向上剤の分子量が20,000~50,000に対してmPAOの分子量は1,000~2,000と低分子であるため粘度低下しにくく、立体構造であるためせん断劣化にも強いという特徴がある。

ここで紹介したmPAOを配合する添加剤(SOD-IPN)を紹介<sup>1)</sup>する。主成分としてはスルホン酸カルシウム塩に含まれる炭酸カルシウムの構造を高圧化において分子構造が安定しているカルサイト構造とすることにより摺動面の耐摩耗性と潤滑性を高めている(図2)。

加えて、摺動面の金属面が高温になることで反応し、せん断力の小さい被膜となって摩耗、焼付きを防止する亜鉛と硫黄を採用し極圧作用を調整した。

### 3. 石炭液化油の経緯

近年、潤滑油の原料多様化の要求もあり、石炭由来の潤滑油が見直されてきている。もともと、潤滑油は原油が由来である鉱油と認識を持たれている方が多いと思われる。その固定概念を見直し、広げるきっかけとなることを願い、石炭由来の潤滑油の歴史について紹介する。

2004年以降、原油価格は高騰傾向にあり、近年はさらに高値に拍車がかかっており、今後も続く気配がある。原油に変わる代替原料として石炭を用いた液体燃料を合成する石炭液化の技術は、意外と古くから紹介されている<sup>6)</sup>。

歴史を振り返れば、1913年から第二次世界大戦のころにBergiusの石炭液化法が紹介

され、また、1970年代から1980年代の石油危機のころに数多くの報告が紹介されている。ともに世界的に石油の供給に障害が認められるころに積極的に検討された。1990年以降は中国、インドネシアをはじめとするアジア諸国や欧米で研究成果が報告されている。

### 4. 石炭液化油製法の概要

石油製品をつくる原料として、原油の代わりに石炭を使用する液化油のことをCTL (Coal-to-Liquids) と称される。その製法としては、図3に示すように直接液化法と間接液化法がある<sup>6~8)</sup>。

直接液化法とは高温(450℃)・高圧(15MPa)下で水素を添加し石油製品に転換する製法をいう。また、間接液化法とは石炭を一旦合成ガス(水素と一酸化炭素が主成分のガス)にして、触媒等を利用して低温FT(フィッシャー・トロプッシュ)合成(180~250℃, 1.0~4.5MPa)、高温FT合成(330~350℃, 25MPa)で石油製品に転換する製法をいい、基本的な技術は1960年代に提案された。

直接液化法は反応条件まで加熱することにより、熱的に切れやすい石炭中の架橋部分を切断し、生成した不安定な分子からなる熱分解フラグメントを、高圧の水素や溶剤から供給される水素により安定化させて、低分子量成分である軽質分/液化油を得る方法である。

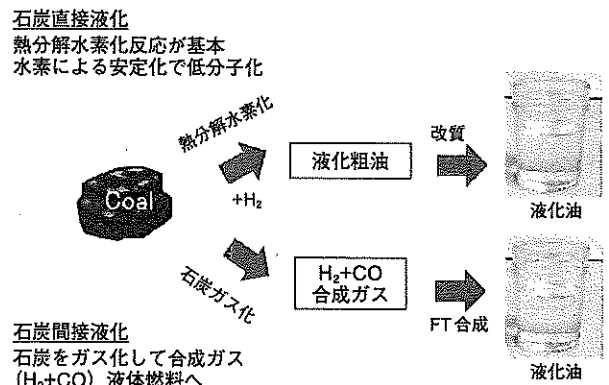


図3 石炭液化油の製法

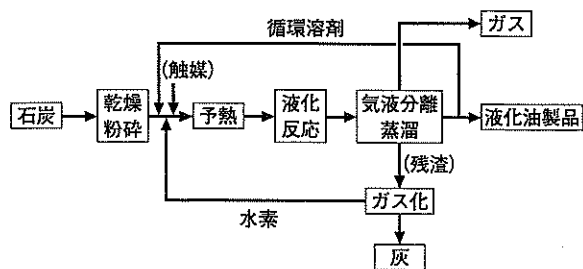


図4 石炭直接液化法のプロセス概要

一方、石炭の間接液化法のうち、FT合成では一酸化炭素が触媒上に吸着・活性化され水素との反応により石油製品相当品が得られる。図4に一般的な石炭液化プロセスフローを示す<sup>6, 8)</sup>。プロセス概要としては、

- ①石炭を油中で脱水するスラリー調製・脱水工程
- ②石炭を水素化分解して液体に転換する液化工程
- ③液化油を水素化処理して精製する水素化処理工程
- ④灰分および残渣を溶剤中で沈降分離する溶剤脱灰工程

の主要4工程で構成される。

現在の原油高騰の傾向のほか、化石資源は枯渇性の資源であり、石油、天然ガスは近い将来の供給逼迫すら懸念されている状態である。今後の中長期的エネルギー需要の増大に対応するには、埋蔵量の豊富な石炭の存在は原料の多様化として重要な存在である。また、昨今の世界政情が不安な環境下における日本国の安全保障としても検討を推進せざるを得ない状況である。

そこで、mPAOの評価として、エンジン油の10W-30 (Group II)、10W-40 (Group III)と10W-30にSOD-IPN (mPAO含有)を10 vol%添加した潤滑油を用いて、鉱油の性能比較をした。また、鉱油とCTLとの比較評価として極低粘度のエンジン油0W-8の鉱油と石炭液化油 (CTL) VG4 (0W-8相当)を用いて実施した。

それぞれの化学的物性を表1に示す。

表1 評価する試料油の化学的物性

油種	10W-30	10W-30 mPAO 10 vol% 添加	10W-40	鉱油 0W-8	CTL VG4 (0W-8 相当)
動粘度 mm <sup>2</sup> /s	40℃	73.91	75.04	93.19	18.31
	100℃	11.32	11.54	14.26	4.21
粘度指数	145	147	158	138	137
流動点 ℃	-12.0	—	-15.0	-15.0	-40.0
蒸発率 mass%	17.0	—	12.9	12.9	11.6

## 5. mPAO を含む添加剤の性能評価

### 5.1 粘度指数向上剤を用いた軸受寿命評価

#### 5.1.1 軸受寿命評価の方法

潤滑油の性能において、機械の寿命に与える影響は一つの指標として評価することができる。産業用機械や自動車のエンジンなど、機械において最も破損に至る部品は軸受であることから、実際に軸受を試験片として資料油中で回転させ、破損に至るまでの寿命時間を観測し評価している。その試験機であるスラスト玉軸受寿命評価試験機 (図5) を紹介<sup>3, 4)</sup>する。試験片はスラスト玉軸受511104 (外径35 mm, 内径20 mm, 高さ10 mm, 玉径5.56 mm)を用い、図6に示すように接触面圧を高めるために転動体の数を13個から3個に減じて使用している。

上輪 (内輪) を駆動軸に設置し、外部モー

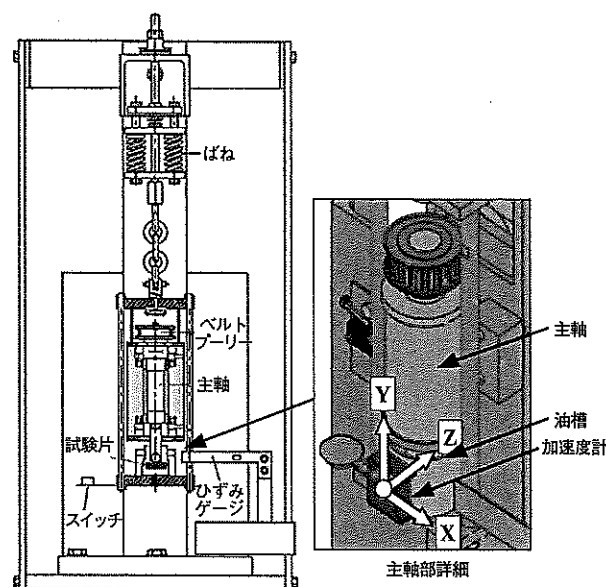


図5 寿命試験機検出器詳細模式図

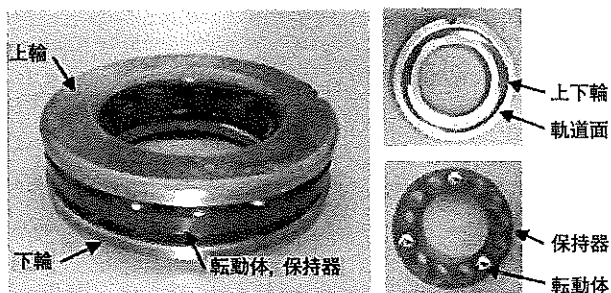


図6 軸受寿命試験の試験体 (51104外観)

タによる回転運動を伝達ベルトにて回転させている。下輪（外輪）は油槽内に固定し、回転体および保持器とともに各同軸を併せて設置し、油槽には試料油を50ml投入する。

油槽はワゴンに載せてある状態であり、ワゴン全体を試験機のスラスト方向上方に圧縮ばねを用いて引き上げる方式で荷重を負荷している。試験片であるスラスト玉軸受に与えるスラスト荷重は4.4kNとし、最大ヘルツ接触圧力は4GPaとなる。

### 5.1.2 軸受寿命評価試験の結果

軸受に与える寿命延長効果についてスラスト玉軸受寿命評価試験機を用いて試験を行った。本実験期間は軸受摺動面の疲労限度の考え方から、 $La/Lo$ （実稼働時間/理論寿命時間）= 10を上限とした。エンジン油10W-30、10W-40そしてmPAOの性能確認として、10W-30にSOD-1PNを10 vol%添加した合

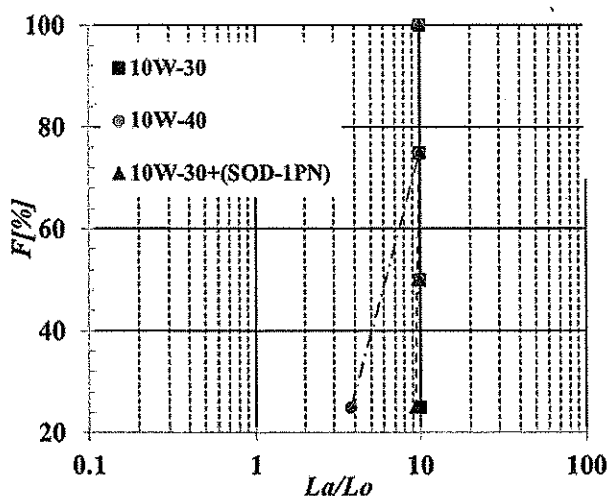


図7 mPAO成分を含む試料油のワイブル線図

成油の3種の試料油を用いて行った。なお、10W-30にSOD-1PNを添加した試料油を以てはPN添加油と称す。寿命試験は再現性を確認するために、各4回ずつ実施し、結果を図7のワイブル線図で示している。10W-40で多少低いデータが認められたが、いずれの結果も理論寿命時間よりも長期間であることから、耐久性としてはすべての試料油において優秀であると評価できる。

また、試験機のモータの消費電力値を確認することによりエネルギー的な評価をした。電力値の評価は、実験開始後で、試験片が安定した早期のタイミングを設定し、今回は $La/Lo = 2.3$ の時点における電力値の変化を求めた。参考として、3種の試料油における電力値の推移を図8に示す。評価としては10W-30のモータ電力値を1.000として、10W-40とPN添加油の変化割合を用いて表2に示す。10W-30に対して10W-40の消費電力値は2.4%の低減、PN添加油は5.1%の低減が認められた。

これまで著者らの研究でも同様な傾向を確認しており、mPAOを含むSOD-1PNの特徴として消費電力の低減を強調できる<sup>3,4)</sup>。

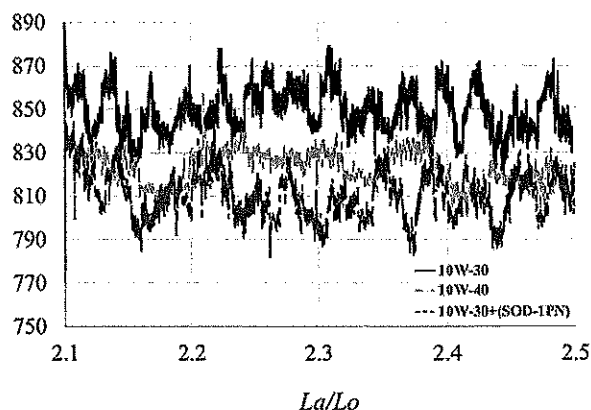


図8 各試料油のモータ電力値の変化

表2 モータ電力値変化率

$La/Lo$	2.3
10W-30	1.000
10W-40	0.976
SOD-1PN 添加油	0.949

## 5.2 軸受接触面における流動状態の観測

### 5.2.1 軸受接触面流動状態観測コンセプト

5.1.1項において、潤滑油の性能評価として軸受の寿命に与える影響を述べ、その結果について解説した。しかしながら、各試料油の構成成分の違いが、どのようなメカニズムで軸受の寿命延長や、消費電力の低減につながったのか不明である。それらには軸受の転動体と軌道面間に形成される潤滑油の油膜性状が大きな影響を与えると考えられる。そこで軸受の接触面における流動状態を図9に示す観測装置により接触面を観察している。

本装置は玉軸受の金属レースとボールを想定して、上輪部を透明なオプティカルガラスに置き換え、この下面に転動体に相当する鋼球と油浴槽を設置し、接触面に形成される油膜を観察する仕組みとなっている。接触面に形成される油膜は、転動体が静止時には同心円形の干渉縞を示し、回転を与えることにより流れの入り口側に開いた形状の馬蹄形を呈する形状に変化する。その時の縞次数を観測することにより油膜厚さを求めることができる。

### 5.2.2 油膜厚さの理論値算出

油膜厚さの理論値算出においては、弾性流体潤滑 (EHL) 理論に基づいて算出する<sup>3, 4, 9, 10)</sup>。観測では、球と平面間の点接触となり、転がり軸に平行な方向に膜厚が変化だけでなく、有効な負荷領域が円形状になる。Hamrock-Dowson が示した中心膜厚の式は以下である。

$$H_c = \frac{h_c}{R} = 4.31U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-1.23k}) \dots \dots (1)$$

式 (1) から理論膜厚を算出した。

### 5.2.3 実験方法

試料油として10W-30, 10W-40そしてPN添加油の3種を使用した。試験油温は40℃近傍に調整し、連続的に周速を変更して油膜厚さの比較観察を実施した。

実験装置は、顕微鏡による観測を行うため

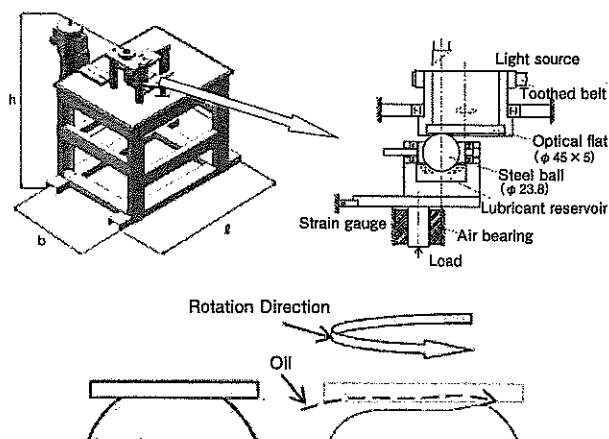


図9 玉軸受接触表面の観察概要

に直径φ=45 mm, 厚さ5 mmのパイレックスガラス (ポアソン比:  $\nu=0.25$ , 縦弾性係数:  $E=63.7$  GPa, 粗さ5.6 mm) を使用する。

鋼球は直径φ=23.8 mm (ポアソン比:  $\nu=0.3$ , 縦弾性係数:  $E=208$  GPa, 粗さ6.1 mm) である。そこに光源を当てることで干渉縞が現れる。現れた干渉縞をハイスピードカメラで撮影して油膜厚さを求めた。

転動体の接触荷重は19.6 N, 最大ヘルツ圧は0.277 GPa, 接触円直径は0.30 mmである。

### 5.2.4 観測結果

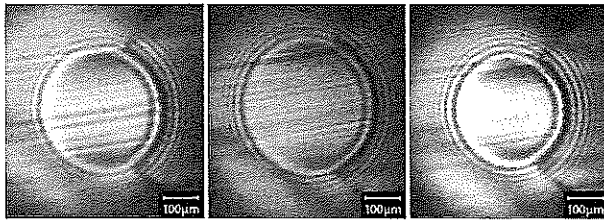
10W-30, 10W-40そしてPN添加油において周速一定時 (0.188 m/s) の観測画像を図10に示す。

また、周速を変化させながら油膜厚さを測定し、測定した油膜厚さを無次元膜厚で評価した。その結果を図11に示す。縦軸は無次元膜厚, 横軸は無次元速度パラメータである。

無次元膜厚で評価したところ10W-40と10W-30を比較すると無次元速度パラメータ  $6.0 \times 10^{-11}$  における油膜厚は20%ほど高い。また、PN添加油も10W-30に対して20%ほどの増加が認められた。10W-40とPN添加油は、ほぼ同等の油膜厚さであった。

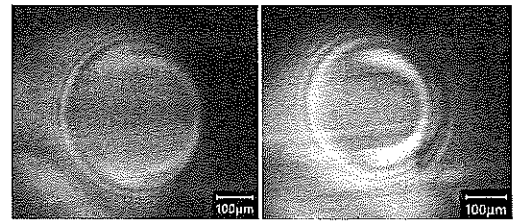
## 5.3 mPAOを含む添加油の評価のまとめ

今回の実験では「軸受寿命」, 「モータ電力値」と「無次元油膜厚さ」の3項目について



a) 10W-30      b) PN添加油      c) 10W-40

図10 光干渉法による油膜観測写真 (mPAO評価)



a) 0W-8      b) CTL VG4

図12 光干渉法による油膜観測写真 (CTL評価)

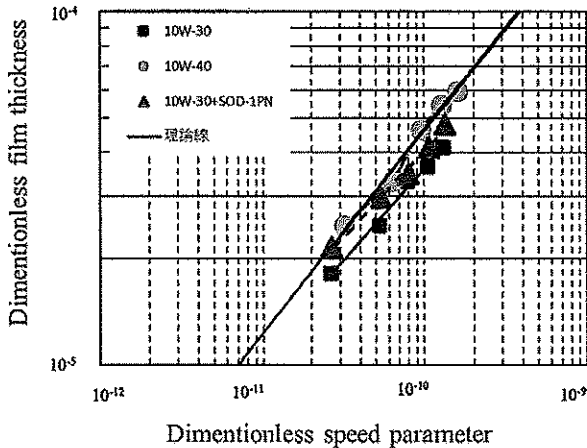


図11 無次元油膜厚さ評価 (mPAO評価)

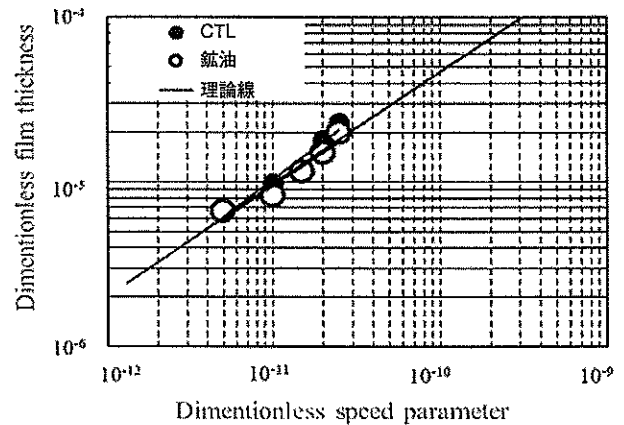


図13 無次元油膜厚さ評価 (CTL評価)

評価をした。

軸受の寿命としては、すべて理論寿命時間を超えており、優秀であると判断できる。モータの消費電力量の低減率は、10W-30に対してPN添加油で5.1%、10W-40で2.4%ほどの削減が期待できることを確認した。油膜の厚さとして、無次元油膜厚さで比較評価した結果、10W-40、PN添加剤は10W-30よりも20%ほど高いことを確認した。

## 6. CTLを主成分とする 潤滑油の性能評価

CTL VG4 (0W-8相当) の潤滑性能を検証することに際して、石油由来である鉱油 (0W-8) との比較について5章で説明した「軸受寿命」「モータ電力値」と「無次元油膜厚さ」の実験手法を用いて紹介する。誌面の関係で、一部は図表を省略し、性能の解説のみとすることをご容赦いただきたい。

軸受寿命とモータ電力量の変化については

mPAOの結果である図7、8を参考としてご覧いただき状況を紹介します。La/Lo = 10を0W-8、CTL VG4の双方で超過しており、ともに優秀な潤滑油であった。また、モータの電力値については0W-8、CTL VG4の双方で同等の値であり、差異は認められなかった。

軸受接触面の油膜厚さを光干渉法で観測した画像 (0.188 m/s) を図12に示す。油膜厚さについて差異は認められなかった。確認の意味で無次元油膜厚さと無次元速度パラメータを評価した結果を図13に示す。光干渉法による油膜厚さの観測結果を裏付けるように、無次元油膜厚さの評価も同等という結果になった。

したがって、石油由来の鉱油 (0W-8) と石炭由来のCTL VG4 (0W-8相当) は潤滑性能としては同等であると評価でき、CTLは石油由来の潤滑油を代替可能な性能を有するといえる。

そのほか、表1に示す化学的物性のデー

タを含めて特徴を解説する。流動点について鉱油が-15℃程度であるのに対し、CTLは-40℃程度と低温流動性に優れている。このことは、低温(地域)での使用時に有利である。また、蒸発率として鉱油は12.9~17.0 mass%程度に対して、CTLは11.8 mass%と低く、蒸発しにくいことが特徴として述べられる。ロス削減に効果がありそうである。

## おわりに

今回の評価でmPAOとCTLの性能について事例を用いて紹介した。メンテナンスに展開する上で有益な面を加えて紹介したい。mPAOは立体的な分子構造であり、分子量が少ないことから、使用による粘度低下などの劣化現象が抑制される特徴がある。

また、PN添加油で紹介したように油膜の形成が良好になることからシール部における気密性が向上し、潤滑油の漏れを抑えるだけでなく、燃焼効率など機械効率の改善にも寄与している。その他、1章で紹介したようにPAOの欠点としてシール(エラストマーなど)材の油分を溶解することで収縮させる欠点を示したが、SOD-1PNにはエステル系成分を配合していることから、シール材の溶解した油分が補充されシール材の劣化を抑制する機能があるなど多種の効果を期待できる。

今回の実験に用いたメタロセン触媒由来の低粘度化した潤滑油の定着により油膜形成の安定性から言えることとして、長寿命の信頼性と省エネルギー効果という、相反する追求の課題をブレイクスルーする可能性が期

待できそうである。

また、CTLに関しては石油原料の鉱油と石炭液化油の性能比較を通して性能の評価を実施したが差異は認められなかった。そのほかの特徴として低温流動性が優れることや蒸発量が低いなどの有利な点を紹介した。

性能として比較した範囲では代替が充分可能であり、普及すれば価格も期待に沿えるものになるのではないかと考える。今回強調したいこととして、原料の多様化が要望される現在の環境下では、古い技術でありながら改めて存在感が見直されたと感じている。

## <参考文献>

- 1) 平田昌邦：潤滑油の粘度特性と粘度指数向上剤，精密工学会（1990）pp.50-53,
- 2) 西田稔：高性能粘度指数向上剤，三洋化成ニュース，2009夏，No. 455（2009）pp.1-4
- 3) 清水秀真，里永憲昭，渡邊孝司，園田智之：転がり軸受の損傷に与える自動車と産業機械における潤滑油新還元添加剤（SOD-1PN）の寿命効果に対する考察，日本設備管理学会誌，Vol. 29, No. 2（2017）pp.37-41
- 4) 里永憲昭，竹田雄祐，渡邊孝司，園田智之：メタロセン触媒を用いたポリ $\alpha$ オレフィン合成油の今後の展望，潤滑経済，No. 671（2021）pp.2-10
- 5) 阪口歩：省燃費型エンジン油用粘度指数向上剤，三洋化成ニュース，No.514（2019）
- 6) 安室元晴ほか：石炭液化技術の概要とその展開：神戸製鋼技報，Vol. 60, No.1（2010）pp.55-61
- 7) 大隈修：豪州褐炭液化（BCL）プロセス高温高压水，反応による輸送用液体燃料の合成，高压力の科学と技術，Vol. 4, No. 2（1995）pp.148-156
- 8) NEDO海外レポート：石油液化のメカニズム，No. 9（1988）32
- 9) 杉村文一：EHL油膜計算式，トライボロジスト，Vol. 49, No. 10（2004）pp.51-52
- 10) 佐々木信也ほか：数値解析と表面分析によるトライボロジーの解明と制御，テクノシステム（2018）pp.81-92