

転がり軸受の接触面における潤滑状態の観測法

清水秀真 (崇城大院)* 里永憲昭 (崇城大)*

渡邊孝司 (D1 ケミカル)** 竹川秀男 (D1 ケミカル)**

Observation Method of Lubrication State on Contact Surface in Rolling Bearings

Shuuma SHIMIZU*, Noriaki SATONAGA*,
Takashi WATANABE**, Hideo TAKEGAWA**

*Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan

**D1 Chemical Co., Ltd., Japan

境界潤滑から流体潤滑への移行と潤滑、摩耗、摩擦を改善するために、ポリオールエステル、ジエステル系と植物油系エステル化合物などを主成分とした独自の新還元添加剤を開発し、潤滑面に固着したコンタミ、スラッジやワニスなどの吸着分子層の除去・溶解により、オイルクリアランスを再生し、トライボロジー性能に及ぼす影響を独自の観測法により実験的に測定した。この測定法は転がり軸受の接触面を観測することにより、EHL 条件下における潤滑油の特性や性状による流動状態の違いを把握することが可能である。この接触角の観測装置の紹介とともに、実験条件などを設定して軸受の寿命評価の解析法を検討した。
キーワード：内燃機関、動力伝達装置、エンジンオイル、ギアオイル、潤滑油、添加剤、EHL、トライボロジー

1. ま え が き

近年の自動車の高性能化に加えて、省資源と環境負荷低減のため潤滑油のトライボロジー性能向上に対する要求が一段と増してきている。これらの要求に応える手段として潤滑性能の向上、摩擦、摩耗の低減のためエステル系合成潤滑油が開発されてきたが、まだ、十分とは言えない。このエステル系合成潤滑油は有機（脂肪）酸とアルコールを原料としているが、特にポリオールエステル系合成潤滑油^{[1],[2],[3],[4],[5]}は元来、ジェットエンジンの潤滑油として広く使用されており、最近、自動車用としても注目されている。

本研究はエンジン、トランスミッション、デファレンシャルギアなどの自動車用潤滑油や産業用機械の潤滑、摩耗、摩擦性能などをさらに改善するため、2次合成添加剤としてポリオールエステル（POE）、ジエステル（DST）や植物油系エステル（VOE）化合物などを主成分とした独自の新還元添加剤を開発する。この新還元添加剤は自動車用添加剤（SOD-1Plus）のみならず、産業機械用添加剤（COAPlus）のトライボロジー性能に及ぼす影響を実用試験により確認し、さらに寿命評価の解析方法を検討した。また、潤滑向上に関するトライボロジカルなメカニズム解明方法を考案したので報告する。

2. 新還元添加剤

自動車エンジン、変速機、デファレンシャルギアや産業用機械などの潤滑摺動部表面に固着したデポジット、ワニスやスラッジなどのコンタミ類は、時間の経過とともに積層して、トライボロジー性能（潤滑、摩耗、摩擦）に悪影響を与えている。これらを改善するために通常、オイル交換時に灯油系清浄剤でフラッシングを実施する方法があるが、図1に示すように上から3層の一般の汚れの膜、吸着分子層と酸化膜からなるコンタミの完全除去は困難で、除去されたコンタミ類が潤滑油経路に詰まったりして清浄効果は少なくなり、潤滑不良を発生するなど逆にリスクを伴う。

したがって、新還元添加剤はPOE、DSTやVOE系化合物等を主成分に各種添加剤をブレンドした新還元添加剤を標準的な添加率としてエンジン、手動変速機、パワーステアリングオイルとギアオイルは10 vol%、自動変速機オイルは7 vol%の混合比とする。新還元添加剤は潤滑作用をしながらコンタミ類を清浄、除去し、最初の金属加工面に戻す還元作用により、摩擦損失を大幅に低減し十分なオイルクリアランスを保持することで潤滑性を改善して摩耗、摩擦を減少できる独自の作用である。

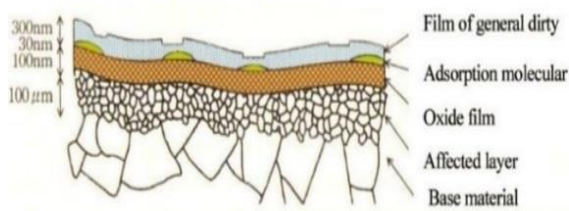


Fig. 1 Components of Solid Surface

よって、新還元添加剤のコンセプトは潤滑摺動部のコンタミ類を清浄、分解、除去して、最初の潤滑面(金属加工面)を再生、還元することにより、潤滑、摩耗、摩擦といったトライボロジー性能の改善を示唆している。新還元添加剤の最大の欠点は加水分解のしやすさと吸湿性であり、またゴム、シール材を膨潤、硬化する特性があるが、この対策として石油系油脂のグリース成分等を添加することによって対応しているが、逆に湿潤、軟化性の向上などの良好な結果が得られている。

Table 1 Oxidation Stability Test of Reducing Additives (SOD-1)

Kinematic Viscosity	40℃ mm ² /s	610.0
	100℃ mm ² /s	92.4
Viscosity Index		243
Pour Point	℃	-42.5
Flash Point (PM)	℃	170.0
Ash	mass %	2.305
Oxidation Stability (ISOT)		
Viscosity Ratio		1.06
Increased Oxidative	mgKOH/g	-0.80
Lacquer Rating		No Deposits

3. 新還元添加剤および参考添加剤 A を用いた軸受寿命評価

3.1 軸受寿命評価の方法

評価には図2に示すスラスト玉軸受寿命評価試験機を用いる。試験片はスラスト玉軸受 51104 (外径 35mm, 内径 20mm, 高さ 10mm, 玉径 5.56mm) を用い、軸受の面圧を高めるために玉数を 13 個から 3 個に減じ、モータによる回転をベルトにて伝達して油浴槽に設置した軸受の内輪(上輪)を回転させ、外輪(下輪)を固定した。スラスト玉軸受けに与えられる荷重は圧縮バネを締付けることにより、スラスト荷重を 4.4 kN とし、軸回転数は 1000rpm と固定した。摩擦力は回転によるトルクを計測することにより把握することができる。この条件下での定格寿命は 11.38h、最大ヘルツ接触圧力は 4 GPa となる¹⁶⁾。実験上の安全を確保するために軸受の破壊による振動が所定の値を超えるようになった時、もしくは許容のトルクを超えるような状況になった時に安全装置が作動し、モータ電源が停止するように安全管理にも配慮した。

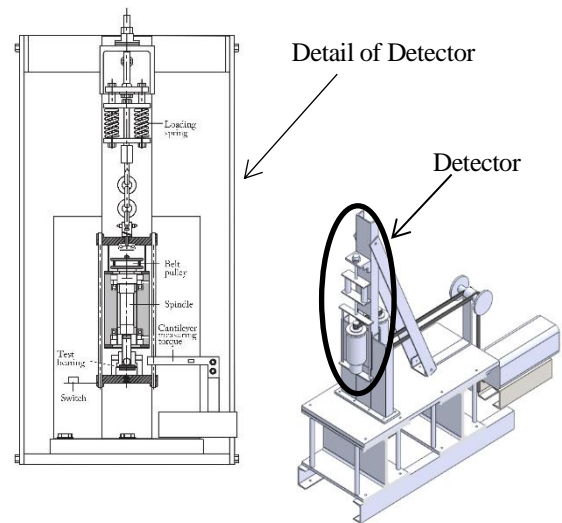


Fig. 2 Detector for Evaluating Fatigue Life of Thrust Ball Bearing

3.2 理論寿命時間に関する理論式⁷⁾

Lundberg-Palmgren の寿命理論に基づく、寿命と平均転動体荷重との関係の式 (1) から定格寿命 L を求める。

$$L = \left\{ \left(\frac{Q_{ti}}{Q_{ci}} \right)^{\frac{10}{3}} + \left(\frac{Q_{te}}{Q_{ce}} \right)^{\frac{10}{3}} \right\}^{-0.9} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$Q_{ti} = \left[\frac{1}{Z} \sum_{\psi=0}^{\pm\pi} \{Q(\psi)\}^3 \right]^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{1}{3} (P_1^3 + 2P_2^3) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$Q_{te} = \left[\frac{1}{Z} \sum_{\psi=0}^{\pm\pi} \{Q(\psi)\}^3 \right]^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{1}{3} \left(P_1^{\frac{10}{3}} + 2P_2^{\frac{10}{3}} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$Q_{ci} = A \left[\frac{f_i}{f_i - 0.5} \right]^{0.41} \frac{(1-r)^{1.39}}{(1+r)^{\frac{1}{3}}} \left[\frac{D_a}{d_m} \right]^{0.3} D_a^{1.8} Z^{-\frac{1}{3}}$$

$$Q_{ce} = A \left[\frac{f_e}{f_e - 0.5} \right]^{0.41} \frac{(1+r)^{1.39}}{(1-r)^{\frac{1}{3}}} \left[\frac{D_a}{d_m} \right]^{0.3} D_a^{1.8} Z^{-\frac{1}{3}}$$

f_i, f_e : 内輪および外輪の転走面曲率半径 - 玉直径比

P_1, P_2 : 分担荷重[N]

$r = D_a \cos \alpha / d_m$

A : 軸受材料によって定まる定数

d_m : 転走面直径[m]

D_a : 転動体ピッチ円径[m]

Q_{ti}, Q_{te} : 内輪および外輪の基本動定格荷重[N]

Q_{ci}, Q_{ce} : 内輪および外輪の動等価ラジアル荷重[N]

そこで, $Q_{ti}=151.80[\text{N}]$ $Q_{te}=152.11[\text{N}]$ $Q_{ci}=164.61[\text{N}]$
 $Q_{ce}=164.61[\text{N}]$ となり,

式 (1) は $L=0.6812$ となる。

さらに, 求めた $L=0.6812$ と実験の回転数 $n=1000[\text{rpm}]$ で 10^6 回転させたとき,

理論寿命時間 L_0 は $L_0 = \frac{0.6812 \times 10^6}{60 \times 1000} = 11.38[\text{h}]$ となる。

3.3 軸受寿命評価試験の結果

本実験は 5W-30 と VG320 を基油とし, 両基油のみと両基油に添加剤 SOD-1 を 10% 添加したときと, VG320 に参考添加剤 A を 10% 添加したときの計 5 つのパターンで実施した。各実験結果を図 3 と図 4 に示し, これらの図は累積破損率 $F\%$ を縦軸に, 実際の運転時間 L_a と理論寿命時間 L_0 の比を横軸にとり, 対数グラフで表現したものである。

基油に対する新還元添加剤を加えた合成油としては, 5W-30 で 1.08 倍, VG320 で 1.69 倍の運転時間が長くなった。この事実から新還元添加剤を加えることで寿命の延長が期待できる。

また, VG320 に参考添加剤 A を加えた時は, 基油に対する参考添加剤 A を加えた合成油としては 1.19 倍の運転時間の延長が認められた。

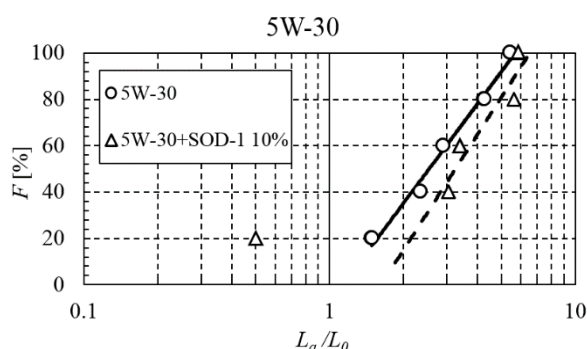


Fig. 3 Weibull Diagram of 5W-30

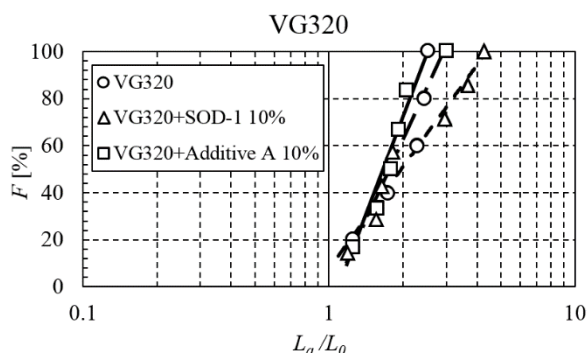


Fig. 4 Weibull Diagram of VG320

4. 軸受接触面における流動状態の観測

4.1 軸受接触面における流動状態の観測

潤滑油や添加剤の持つ寿命性能評価として, これまでスラスト玉軸受寿命評価試験機を用いて述べてきたが, 性能向上に関するトライボロジカルなメカニズムが不明であるので,

接触面における流動状態を図 5 に示す観測装置により観察する。接触面圧力は本装置の下部より荷重をかけることで調整し, 鋼球との接触にはオプティカルガラスを用いて接触面を直接観察することが可能である。速報レベルであるが, 静止時のヘルツ接触面と回転時の流動状態を比較観測することにより, 静止時の同心円形の接触面から, 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接触面に変化し, あとに示す縞字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ことを理解できた。今後は画像をさらに鮮明にすることにより挙動を評価する。

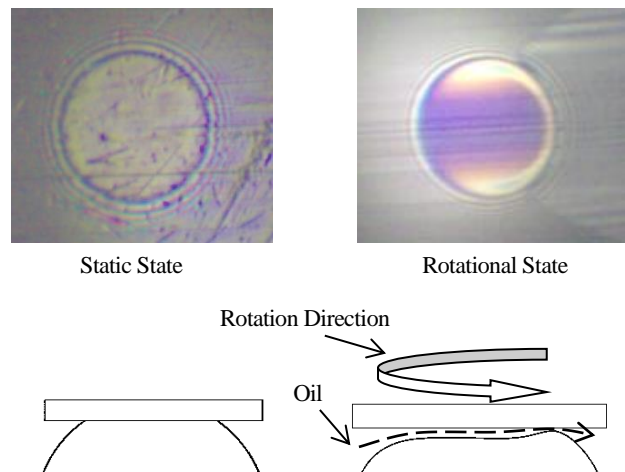
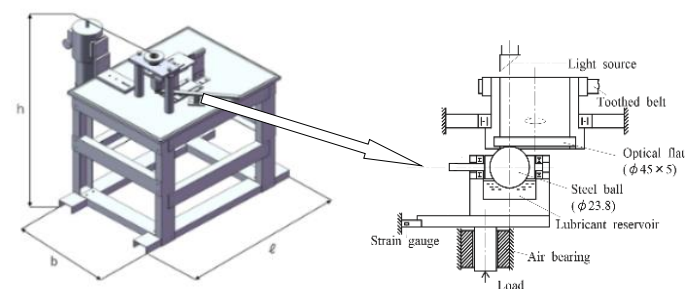
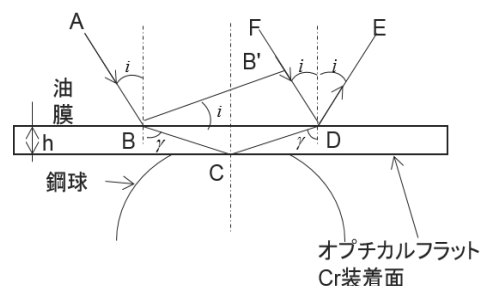


Fig. 5 Observation Machine of the Contact Surface in Bearing

4.2 観測方法

接触面の観測は, 図 6 に示すような光干渉法を用いることで直接観察することができる。また, 鋼球との接触面に Cr を蒸着させることで, より明瞭に観測することができる。



A, F: 光の入射 B, E: 光の反射

Fig. 6 Optical interference diagram

ここで、油膜厚さ h は式 (2) で与えられる。

$$\text{油膜厚さ: } h = \frac{m\lambda}{2n} [\text{m}] \quad \dots\dots\dots(2)$$

m : 縞次数 λ : ストロボ波長[m] n : 使用油の屈折率

4.3 実験条件

顕微鏡による観測をするために $\phi=45\text{mm}$ 、厚さ 5mm のパイレックスガラス(ポアソン比: $\nu=0.25$ 、縦弾性係数: $E=63.7\text{GPa}$ 、粗さ 5.6mm)を使用する。鋼球は $\phi=23.8\text{mm}$ (ポアソン比: $\nu=0.3$ 、縦弾性係数: $E=208\text{GPa}$ 、粗さ 6.1mm)。そこに光源を当てることで干渉縞が現れるので、式 (2) から油膜厚さ: $h[\text{m}]$ を求める。測定項目として油温と SM 値を考えている。

本実験ではディスク周速を 0.52m/s に固定し、モータ回転数を約 100rpm とする。転動体の接触荷重は 24.5N 、最大ヘルツ圧は 0.45GPa 、接触円直径は 0.321mm である。温度管理に関してはベルトヒーターを油浴槽に巻いて保温し、ひずみゲージを用いて、油浴槽に生じるトルクから摩擦係数を導出する。

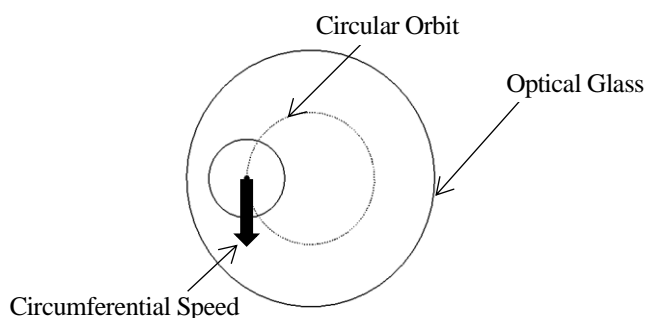


Fig.7 Contact Surface of the Optical Glass

5. 結 論

新還元添加剤がトライボロジー性能に及ぼす影響を実用寿命評価試験により確認した結果、下記の結論が得られた。

- 1) 新還元添加剤の化学的、物理的特性からトライボロジー性能の改善に寄与できることが確認できた。
- 2) 基油に対する新還元添加剤を加えた合成油としては、 $5W-30$ で 1.08 倍、 $VG320$ で 1.69 倍の運転時間が長くなった。この事実から新還元添加剤を加えることで寿命の延長が期待できる。
- 3) $VG320$ に参考添加剤 A を加えた時は、基油に対参考添加剤を加えた合成油としては、 1.19 倍の運転時間が長くなった。
- 4) 今後は接触面状態を確認し、潤滑向上のメカニズムを解明していく。

謝 辞

最後に実験の機器調整にご協力いただいた(有)D1 ケミカル園田智之取締役社長、実験資材の調整にご協力をいただいた(株)大川技研 平岡常務取締役、古谷主任、および実験、測定、装置製作に協力を得た、崇城大学工学部機械工学科 中川凜太郎、淵田恭介、山口航平、荒木勝伍、上村承吾、川崎勝也の諸君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 里永憲昭, 渡邊孝司, 竹川秀男: 潤滑油の新還元添加剤による自動車と産業装置における合成油寿命延長の考察, 日本トライボロジー学会メンテナンス・トライボロジー研究会, 創立 30 周年記念シンポジウム予稿集, Paper, p5 (2017)
- [2] 清水秀真, 里永憲昭, 渡邊孝司, 竹川秀男: 潤滑油の新還元添加剤による粘性および合成油寿命評価の考察, 平成 28 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会, 論文集, B2.1, Paper, pp.79-83(2016)
- [3] 里永憲昭, 渡邊孝司, 竹川秀男: 潤滑油の新還元添加剤による粘性および寿命評価の手法, 日本設備管理学会誌, Vol.28, No3, pp.103-109(2016)
- [4] 里永憲昭, 渡邊孝司: 自動車用潤滑油の還元添加剤によるトライボロジー性能に及ぼす影響, 自動車技術会春季大会予稿集 No.316 (2015)
- [5] Noriaki Satonaga, Takashi Watanabe: Effects on Tribology Performance of a Reducing Additive for Automobile Lubricant SAE-2015-01-2047 (2015)
- [6] T. Mawatari, T. Harada, M. Yano, H. Shiomi, S. Obara, N. Ohno: Rolling Bearing Performance and Film Formation Behavior of Four Multiply-Alkylated Cyclopentane (MAC) Base Greases for Space Applications Tribology Transactions, 56, 4 (2013) 561-571.
- [7] 転がり軸受工学編集委員会: 転がり軸受工学, 養賢堂, pp181-197(1976)