

弾性流体潤滑条件下における新還元添加剤の挙動の観察

Observation of the Behavior of a New Reducing Additive

under the Elasto Hydrodynamic Lubrication Condition

○ 清水 秀真^{*1}, 正 里永 憲昭^{*1}渡邊 孝司^{*2}, 竹川 秀男^{*2}Shuuma SHIMIZU^{*1}, Noriaki SATONAGA^{*2}Takashi WATANABE^{*2}, Hideo TAKEGAWA^{*2}^{*1} 崇城大学 Department of Mechanical Engineering, SOJO University, Faculty of Engineering, Japan^{*2} D1 ケミカル D1 Chemical Co., Ltd., Japan

Abstract 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, 弾性流体潤滑 (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観測結果から軸受の寿命評価の解析法を検討した.

Key Words: 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. 結 言

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, まだ十分とは言い難い. 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次の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還元添加剤を開発する. この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法を検討した. このたび弾性流体潤滑 (Elasto Hydrodynamic Lubrication :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考察した内容を紹介する.

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, 潤滑不良を発生するなど逆にリスクを伴う.

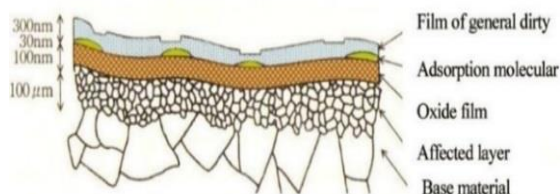


Fig. 1 Components of Solid Surface

よって, 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. 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°C	mm ² /s	610.0
	100°C	mm ² /s	92.4
Viscosity Index			243
Pour Point		°C	-42.5
Flash Point (PM)		°C	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4.4kN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4GPaとなる^[6]。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。

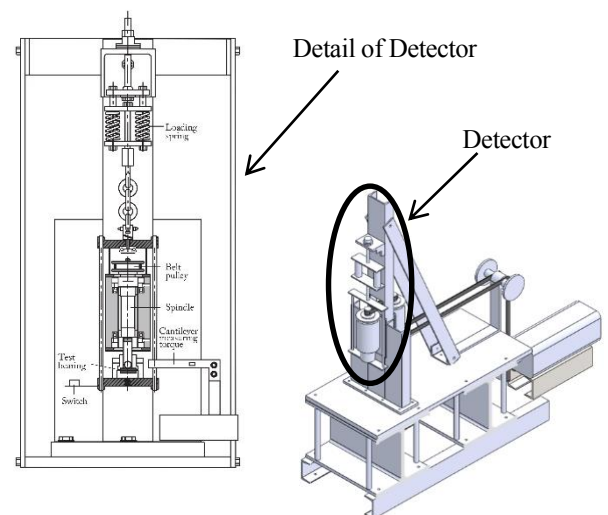


Fig. 2 Detector for Evaluating Fatigue Life of Thrust Ball Bearing

3・2 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に示すが、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。

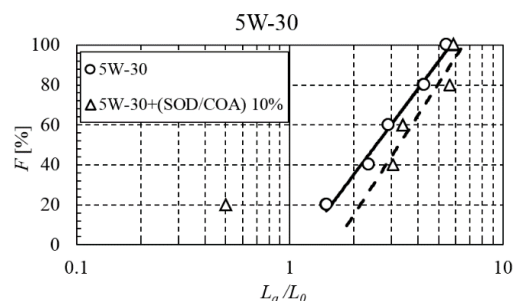


Fig. 3 Weibull Diagram of 5W-30

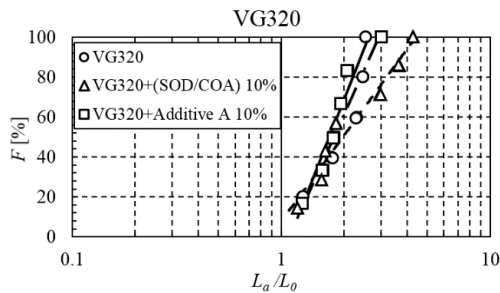


Fig. 4 Weibull Diagram of VG320

3・3 消費電力量の省エネについて

これまで新還元添加剤の寿命性能に関して絞って紹介してきた。設備信頼性を論じる上では大切な項目であるが、さらに経済性を追求する目的として省エネルギーの効果について述べる。試験体の潤滑油の違いによる寿命試験機に使用するモータの動力の変化はまさしく電気量の変化である。また、産業用の生産用実機（減速機）に新還元添加剤を添加した実例についても消費電力量の変化を示して省エネルギー性能に関する実績を紹介する。

仕様としては、寿命試験機は定格動力 0.75kw のリングコーンモータを使用し、生産用実機は冷却塔ファンの減速機（定格動力 22kw, 減速比 1/5.09）にモータを使用している。生産用実機の減速機は基油 VG320 に新還元添加剤の添加率を 10vol%とした。評価の方法としては基油での消費電力量に対する合成油での消費電力量として示し、削減率を求めたものを表2に示す。

Table 2 The Reduction Situation of the Amount of Used Electricity

Base oil	VG-320		
	5W-30 Detector	Detector	Plant Machine for Production
Power Rate SOD-1Addition oil(kW)/Base oil(kW)	96.1%	94.9%	98.0%
Reduction Rate	3.9% reduction	5.1% reduction	2.0% reduction

エンジン油である 5W-30 に関しては基油に対する合成油の消費電力量の割合として、寿命試験機で 96.1%となり 3.9%の削減を確認した。また、ギヤ油である VG-320 に関しては基油に対する合成油の消費電力量の割合として寿命試験機で 94.9%となり 5.1%の削減、さらに同様な視点として生産用実機（減速機）で 98%となり 2.0%の削減を確認した。温度環境、生産負荷などは同一条件であり、このことを言い換えれば、新還元添加剤（SOD-1Plus/COA-Plus）を添加すること

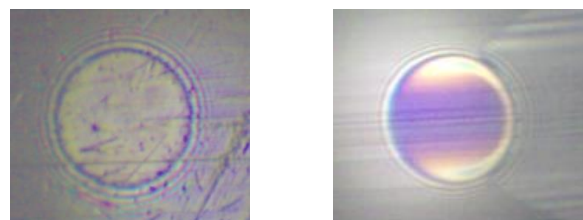
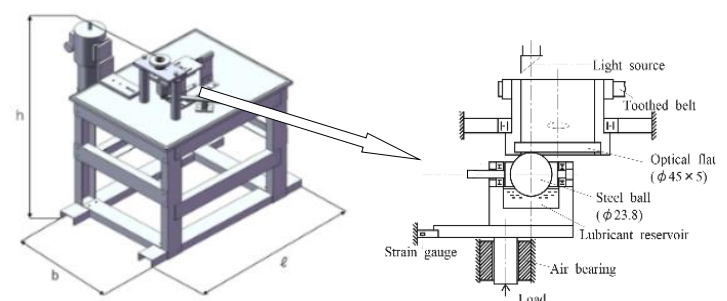
により簡単に省エネルギーを得られるという期待が持てることを示している。

今後、トライボロジー機構のメカニズムや流動状態などの研究においても、キーとなる要因であることを記憶に留めておきたい。

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。



Static State

Rotational State

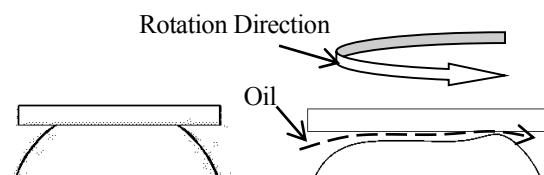
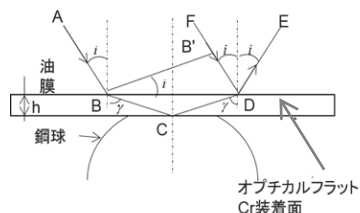


Fig.5 Observation Machine of the Contact Surface in Bearing

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

従って、油膜厚さ h は式 (2) で与えられる。

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

ここで、 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、接触箇所に応じてモータ回転数を約 250~500rpm とする。転動体の接触荷重は 19.6N, 最大ヘルツ圧は 0.421GPa, 接触円直径は 0.30mm, 使用油の屈折率は 1.5 程度である。温度管理に関しては、予め油を温め、ベルトヒーターを油浴槽に巻くことで観測中の温度低下を無くしている。また、今後ひずみ係数はひずみゲージを用いて油浴槽に生じるトルクから検出する予定である。

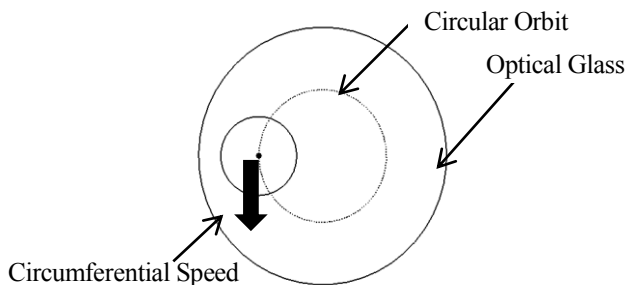
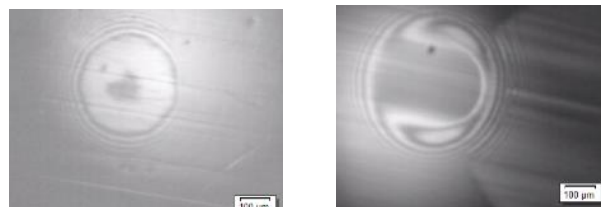


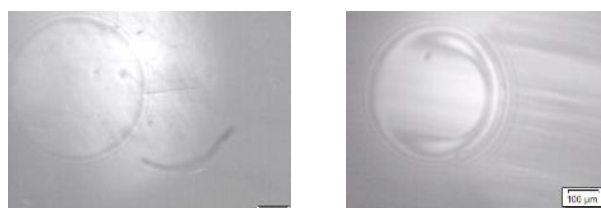
Fig.7 Contact Surface of the Optical Glass

4・4 観測結果

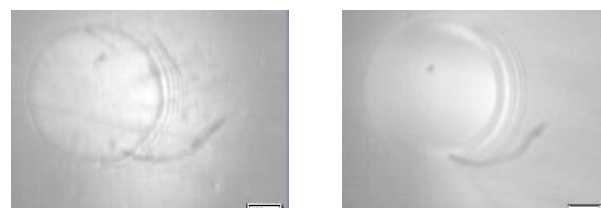
実験は VG320 を基油とし、基油のみと基油に新添加剤 10% 添加したものを比較観察した。図 8, 9, 10 はそれぞれ室温時と 40°C 程度の様子を示している。



Static State Rotational State
Fig.8 VG320 (23.8°C)



Static State Rotational State
Fig.9 VG320+SOD-1 10% (23.8°C)



Static State Rotational State
Fig.10 VG320+SOD-1 10% (41.0°C)

観測条件を設定しながらの実験であることと、高速カメラのグレードの影響により未だ明確な結果とは言えないが油膜厚さの上昇傾向は見出せた。

観測の結果、基油のみでは接触円径が 0.55mm, 油膜厚さが 0.493 μm である。新還元添加剤を添加したものは室温時で接触円径が 0.44mm, 油膜厚さが 0.888 μm である。41°C 時で接触円径が 0.47mm, 油膜厚さが 0.691 μm となり、基油に対して新還元添加剤を添加することで油膜が厚くなる傾向が確認できた。

ただし、この油膜上昇は粘度上昇によるものか、添加剤の成分によって有効に油膜が上昇しているかは今後の研究に併せて解明する予定である。

現時点では、油膜が厚くなることにより接触面における摩擦が低減され、軸受表面の疲労に与える影響が軽減され、軸受の寿命が延長しているのではないかとこのメカニズムの傾向については説明が可能である。本来であれば油膜の中央部分膜厚 h_c , 最小膜厚 h_{min} が

確認できるはずであるが、観測条件を設定しながらの実験であるため、現状では最小部分の確認が困難であった。

理論上の油膜厚さを Hamrock-Dowson の式を用いて求め、実験によって得られた油膜厚さとの比較として表 3 にまとめて示す。

Hamrock-Dowson の式より

$$H_c = \frac{h_c}{R} = 4.31U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-1.23k}) \cdots \cdots (3)$$

$$H_{\min} = \frac{h_{\min}}{R} = 3.68U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-0.67k}) \cdots \cdots (4)$$

以上より、 $h_c = H_c R [\mu m]$ $h_{\min} = H_{\min} R [\mu m]$ で求

める。

R : 等価曲率半径 [μm]

$$H = \frac{h}{R} \quad : \text{無次元膜厚}$$

$$U = \frac{\eta_0 u}{ER} \quad : \text{速度パラメータ}$$

$$G = \alpha E \quad : \text{材料パラメータ}$$

$$W = \frac{w}{ER^2} \quad : \text{荷重パラメータ}$$

Table 3 Film Thickness in the Contact Surface [μm]

	Experimental		Theoretical	
	h_c	h_{\min}	h_c	h_{\min}
VG320 (23.8°C)	0.493	N/A	1.67	0.98
VG320+SOD-1 10% (23.8°C)	0.888	N/A	1.89	1.11
VG320+SOD-1 10% (41.0°C)	0.691	N/A	0.92	0.54

今回の観測では、実験によって得られた膜厚と理論によって算出した膜厚とでは多少の乖離があるものの、およその厚さはほぼ把握できた。20°C で比べると、基油に対して新還元添加剤を添加したものが油膜は厚くなっている。同様の傾向が 40°C の時に生じるか確認する必要がある。今後は観測条件を明確にし、より鮮明な観測を目指し、また摩擦係数はひずみゲージを用いて鋼球部分にかかるトルクから検出して、基油のみと基油に新還元添加剤を添加することで摩擦係数にどの程度の変化が見られるかを確認する。

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や軸受接触面の流動状態を観測した結果、下記の結論が得られた。

- 1) 5W-30 に関しては基油に対する合成油の消費電力量の割合として、寿命試験機で 96.1% となり 3.9% の削減を確認した。また、VG-320 に関しては基油に対する合成油の消費電力量の割合として寿命試験機で 94.9% となり 5.1% の削減、さらに同様な視点として生産用実機 (減速機) で 98% となり 2.0% の削減を確認した。
- 2) 接触面を観測したところ、基油のみでは接触円形が約 0.55mm、油膜厚さが約 0.394 μm を示した。基油に新還元添加剤を添加したものでは室温時で接触円形が約 0.44mm、油膜厚さが約 0.789 μm を示した。40°C 程度で接触円形が約 0.47mm、油膜厚さが約 0.592 μm となった。
- 3) 基油に対して新還元添加剤を添加することで油膜が厚くなる傾向が確認できた。ただし、油膜厚さの上昇は粘度上昇によるものか、添加剤成分によるものかは今後の研究に併せて解明する予定である。現時点では、油膜が厚くなることにより接触面における摩擦が低減され、軸受表面の疲労に与える影響が軽減され、軸受の寿命が延長しているのではないかというメカニズムの傾向は説明が可能である。

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] Noriaki Satonaga, Takashi Watanabe: Effects on Tribology Performance of a Reducing Additive for Automobile Lubricant, SAE-2015-01-2047 (2015)
- [5] 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) pp561-571.
- [6] 杉村丈一: EHL 油膜計算式, トライボロジスト, Vol 49, No.10, pp51-52, (2004)