

弾性流体潤滑条件下における新還元添加剤 (SOD-1PN) の挙動と高圧粘性に関わる考察

○ 城戸 祥成^{*1}, 正 里永 憲昭^{*1}, 正 竹田 雄祐^{*1},
渡邊 孝司^{*2}, 園田 智之^{*2}
^{*1} 崇城大学, ^{*2} D1 ケミカル

Behavior of New Reduction Additive (SOD-1 PN) and Consideration
on High Pressure Viscosity under EHL

Yoshinari KIDO^{*1}, Noriaki SATONAGA^{*1}, Yusuke TAKEDA^{*1},
Takashi WATANABE^{*2}, Tomoyuki SONODA ^{*2}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, SOJO University, Faculty of Engineering, Japan

^{*2} D1 Chemical Co., Ltd., Japan

境界潤滑から流体潤滑への移行と潤滑, 摩擦, 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 (SOD-1Plus) についてトライボロジー性能に及ぼす影響を実験的に究明してきた。今回, 従来添加剤の改良品として新還元添加剤 (SOD-1PN) を開発した。新還元添加剤は耐摩耗性・潤滑性を高め, セン断の影響を受けにくい高粘度ポリ α オレフィン (PAO) 成分を付加して油膜保持性能を向上させ, 極圧剤として硫黄, 亜鉛を加えることにより潤滑油膜再生の効果を高めたものである。性能評価として, 新たな測定法は転がり軸受の接触面を観察することにより, 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。この接触膜厚の観察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。

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, 摩擦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]}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, 自動車用として注目されている。合成潤滑油は鉱物系潤滑油と比べて, 低温流動性, 熱, 酸化安定性に優れ, 高粘度で使用温度範囲が広く, 潤滑性が良好で清浄, 分散性や生分解性など多くの特長を持つ。

各種自動車用潤滑油, 産業用機器の潤滑, 摩擦, 摩擦性能などをより改善するため, 二次的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に開発した還元添加剤 (SOD-1Plus, 以下, 従来品と称す) について究明してきた。本報告は従来添加剤の改良品とした還元添加剤を用いて EHL 条件下における寿命延長に想定されるメカニズムを示し, 合成潤滑油のトライボロジー性能を化学的・物理的作用と実用試験等により検証した。さらに, 新還元添加剤に対する油膜厚さの評価や高圧粘性に関する影響も報告する。

2. 新還元添加剤 (PN)**2.1 従来品と新還元添加剤 (PN) のコンセプト**

自動車エンジン, 変速機, デファレンシャルギア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, 摩擦, 摩擦) に悪影響を与えている。構成としては3層を形成し一般の汚れの膜, 吸着分子層と酸化被膜からなる。その吸着分子層を引き離して汚れが剥離すると考えている^[1]。従来品としては 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ものである。従来品は潤滑作用をしながらコンタミ類を清浄, 分解, 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擦, 摩擦を減少できる独自の作用である。

よって, 従来品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, 当初の潤滑面 (金属加工面) を再生, 還元することにより, 潤滑, 摩擦, 摩擦といったトライボロジー性能の改善を行うことで従来の金属表面に戻すことを主体に考えていた。さて, 従来品の特徴を維持させながら低粘度, 耐摩耗性, 潤滑性の向上を実現させたものが新還元添加剤 (SOD-1PN, 以下, 新還元添加剤と称す) である。

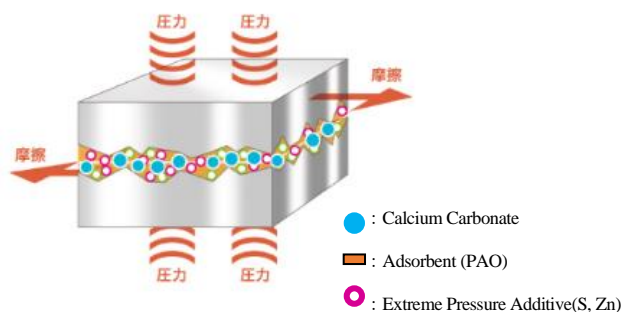


図1 SOD-IPN の構成要素

図1に新添加剤の仮説図を示しており、耐摩耗性・潤滑性を高めるためカルシウム炭酸塩の構造を変更している。また、粘度指数を継続維持させるため剪断の影響を受けにくい高粘度 PAO 成分を加え、金属表面の焼き付き防止と潤滑膜再生を考慮して、極圧剤（硫黄, 亜鉛成分）を加えて常温から高温までの広範囲の温度領域で再生効果を発揮できるように設計を変更した。

2.2 新還元添加剤の添加率に対する潤滑油の粘度変化

従来品はエンジン油, ギア油に 10vol%を添加することを標準としているが, 添加率に対する粘度変化を測定した結果を表1に示す。本実験は基油を潤滑油として 5W-30(エンジンオイル)と VG320(ギア・オイル)を使用し, 基油に加える添加剤の混合割合を 3, 5, 7, 10vol%と変化させて粘度の変化を測定した。合成油の粘度は規格としての範囲(例えば SAE 規格で 100℃においては 9.3~12.5mm²/s)を認められることから, 仕様としては満足している。また, 基油の粘度が高くなるほど, 特に低温時(40℃)の混合割合に対する上昇率は低下する傾向が認められた。

図2に5W-30とVG320の添加率に対する粘度上昇率を示す。5W-30の添加率に対する粘度上昇率は, 40℃で2.6%, 100℃で9.64%の上昇が見られた。

VG320の添加率に対する粘度上昇率は, 40℃で11.1%, 100℃で0.4%の下降が見られた。VG320の粘度測定結果を見ると, 新添加剤を加えることで低粘度変化が生じていることを確認できる。

従来品では添加率に対する粘度上昇率としてエンジンオイルで28~40%, ギアオイルで3~35%の上昇率が確認^[2]されていることから, 今回の測定により確実に低粘度化されたことが明らかとなった。

表1 5W-30とVG320の添加率に対する粘度変化

エンジン油(5W-30)	基油	基油+SOD-1PN			
添加率 vol%	0	3	5	7	10
40℃ mm ² /s	57.7	58.9	58.8	59.3	59.2
	9.85	10.2	10.5	10.7	10.8
動粘度 100℃ mm ² /s					
粘度指数	157	162	170	173	176

ギア油(VG320)	基油	基油+SOD-1PN			
添加率 vol%	0	3	5	7	10
40℃ mm ² /s	324	317	308	298	287
	動粘度 100℃ mm ² /s	23.9	23.9	23.9	23.9
粘度指数	94	96	98	101	103

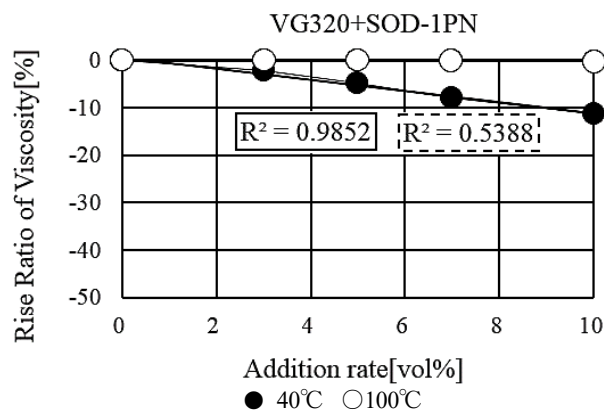
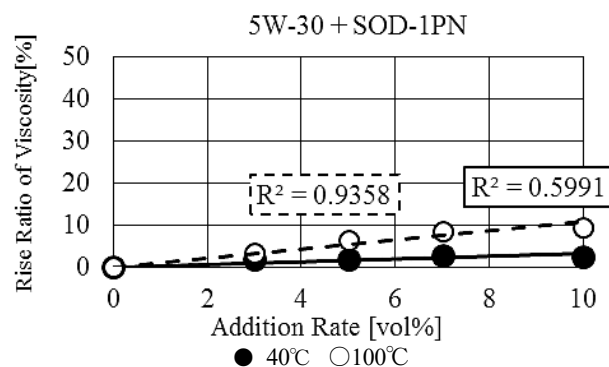


図2 添加率に対する粘度上昇率

3. 従来品および新還元添加剤を用いた軸受寿命評価

3.1 軸受寿命評価試験の結果

本実験は5W-30とVG320を基油とし、基油のみと基油に従来品、新添加剤を10%添加したときの計3つのパターンで実施した。各実験結果を図3に示す。これらはワイブル線図で、全ての実験を100%と考えたとき、累積破損率 $F\%$ を縦軸に、実際の稼働時間 L_a と理論寿命時間 L_0 の無次元比を横軸にとり、対数グラフで表現したものである。したがって、横軸は理論寿命時間に対する稼働時間の割合を示す。

基油の5W-30とVG320に新還元添加剤を10vol%添加したもので実験した結果、最大運転時間は理論寿命時間に対し25.4倍と36.7倍の運転が確認できた。

エンジン油(5W-30)の基油に対して従来品を添加した合成油は稼働時間が1.08倍延長し、新還元添加剤を添加したものでは基油に対して最大稼働時間が4.66倍とさらに延長した。

ギア油(VG320)の基油に対して従来品を添加した合成油は稼働時間が1.69倍延長し、新還元添加剤を添加したものでは基油に対して最大稼働時間が14.5倍と更に延長した。以上の事実から新還元添加剤を添加することで寿命の延長が期待できる。

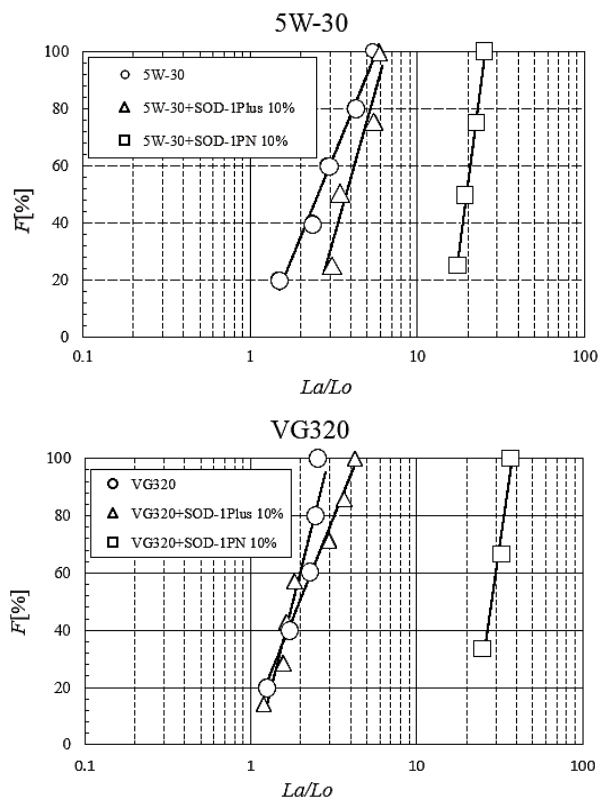


図3 VG320, 5W-30のワイブル線図

4. 軸受接触面における挙動の観察

4.1 軸受接触面における挙動の観察のコンセプト

現在、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。さらに、軸受の転がり面においてどのような膜が形成されているか観察することが出来ない。そこで、接触面における流動状態を観測できる観測装置を製作した。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、鋼球との接触にはパイレックスガラスを用いて、接触面を直接観察することを可能にしている。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潤滑油の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、図4に示すように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。

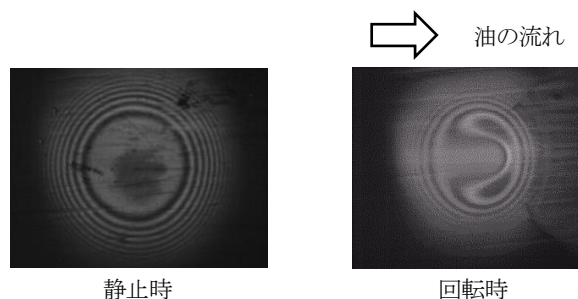


図4 接触面の観察

4.2 観測方法

接触面の観測は、図5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、鋼球とパイレックスガラスの接触面にCrを蒸着させることで、より明瞭に観測することが可能である。

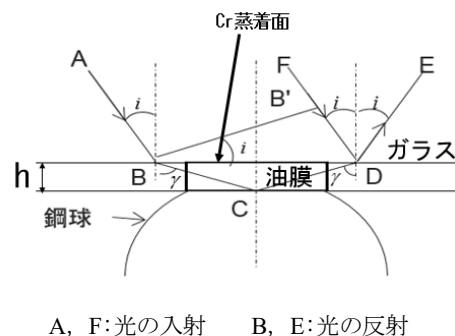


図5 光干渉図

ここで、油膜厚さ h は次の式(1)で算出する。

$$\text{油膜厚さ: } h = \frac{m\lambda}{2n} [\text{m}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

m : 縞次数 λ : ストロボ波長[m] n : 使用油の屈折率

4.3 油膜厚さの理論値算出

油膜厚さの理論値計算には Hamrock-Dowson の式^[6] (2), (3)を用いて算出する。

$$H_c = \frac{h_c}{R} = 4.31U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-1.23k}) \cdots \cdots (2)$$

$$H_{\min} = \frac{h_{\min}}{R} = 3.68U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-0.67k}) \cdots (3)$$

$$H = \frac{h}{R}, \quad U = \frac{\eta_o u}{ER}, \quad G = \alpha E, \quad W = \frac{w}{ER^2}$$

H : 無次元膜厚

U : 速度パラメータ

G : 材料パラメータ

W : 荷重パラメータ

η_o : 大気圧下の粘度 [Pa・s]

u : 周速 [m/s]

E : 縦弾性係数 [Pa]

w : 荷重 [N]

α : 粘度圧力係数 [GPa⁻¹]

R : 等価曲率半径 [mm]

4.4 実験条件

顕微鏡による観測には、直径 $\phi=45\text{mm}$ 、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 $5.6\mu\text{m}$ ）を使用する。鋼球は直径 $\phi=23.8\text{mm}$ （ポアソン比: $\nu=0.3$ 、縦弾性係数: $E=208\text{GPa}$ 、粗さ $6.1\mu\text{m}$ ）である。そこに光源を当てることで干渉縞が現れるので、式 (1) から油膜厚さ: $h[\text{m}]$ の実験値を求める。他に測定項目として油温がある。

本実験では転動体の接触荷重は 19.6N 、試験油の屈折率は 1.5 として計算している。

油温は寿命試験時に用いた試験機と同程度の温度にするために 40°C 近傍まで温度を上げ、実験を行った。温度管理に関しては、予め鋼球支持部と使用油を温め、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補填し、一定の温度を保つようにしている。実験時には熱電対を用いて温度を管理した。

4.5 観測結果

本実験はエンジン、ギアオイルを基油とし、基油に従来品、新還元剤をそれぞれ 10% 添加したものを使用した。油温は 40°C 近傍で実験を行い、周速を変化

させながら式 (1) より油膜厚さを算出し、周速の誤差の影響を除くために式 (3) を用いて無次元化した無次元膜厚にて各々比較評価した。その結果を図 6 に示す。縦軸が無次元膜厚で、横軸は無次元速度パラメータとなっており、油膜厚さと周速との関係を無次元化して示している。

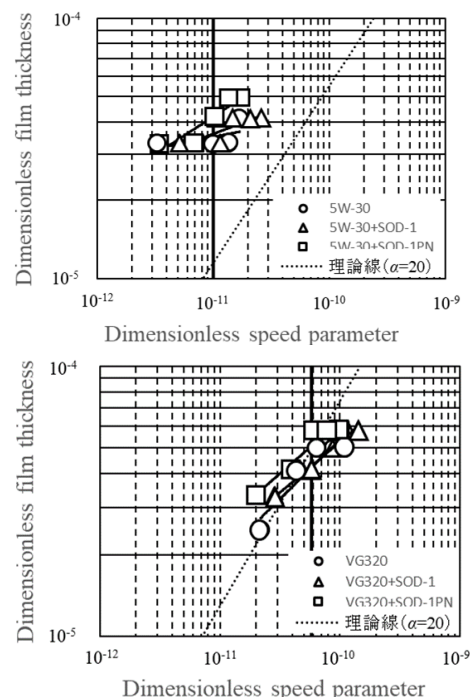


図 6 VG320, 5W-30 の無次元膜厚評価

図 6 の縦軸の太い線で表した速度パラメータの値で無次元膜厚を評価すると、5W-30 では 1.01×10^{-11} 、VG320 では 5.80×10^{-11} である。

無次元膜厚の値は 5W-30 では基油に対して従来品を添加した場合 1.17 倍、新還元添加剤では 1.32 倍となり、VG320 では、基油に対して従来品を添加すると 1.10 倍、新還元添加剤では 1.30 倍となった。

それぞれの試験油について回転時の接触面画像を図 7 に示す。

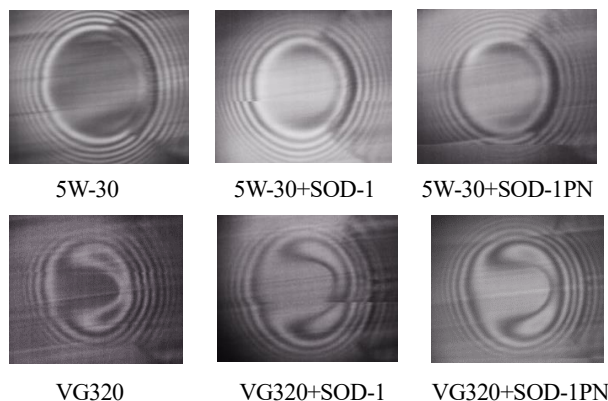


図 7 VG320(40°C), 5W-30(40°C)の回転時

接触面油膜画像に表れる馬蹄形状と干渉縞色から、5W-30 では中央膜厚の干渉縞色が、基油では黒色に対して、従来品、新還元添加剤を添加した場合には白色へと変化している。VG320 においても同様に基油では黒色であり、従来品、新還元添加剤を添加した場合は白色へと変化が観察できる。これらの干渉縞色に表れた変化は、基油に対して従来品、新還元添加剤を添加することで膜厚が上昇したことによるものと考えられる。

5. 高圧粘性

5.1 落球式高圧粘度計の製作

油膜厚さの理論値計算において、粘度圧力係数 α は一般的な既知の値 $\alpha=20$ にて算出している。今後より正確な理論値を算出するために、落球式高圧粘度計を製作し、高圧物性について研究を進める。図 9 に製作した落球式高圧粘度計の試作品を示す。

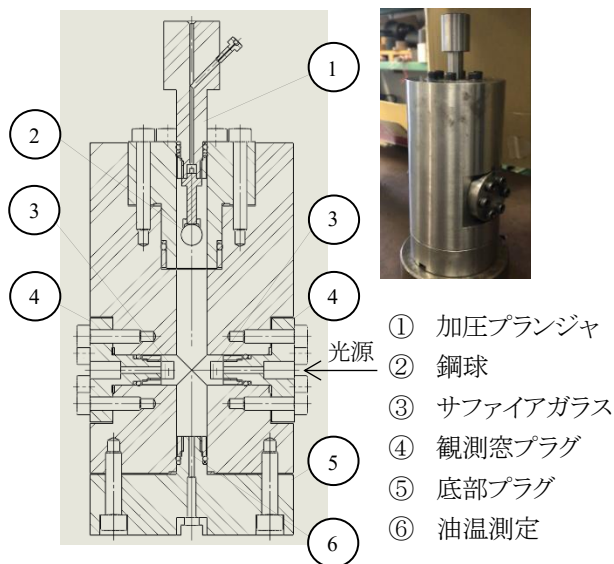


図 9 落球式高圧粘度計

5.2 実験方法

一定温度の高落球式高圧粘度計内に注入し、万能引張圧縮試験機にて加圧し高圧となった容器内に直径 7.94mm の鋼球を落下させ、観測窓を通過する時間を光センサで検出するものである。

圧力容器にサファイア製の観測窓を設けており、そこに絶えず光を通して置き、光センサにユニバーサルカウンタを接続する。鋼球が光を遮ることで光センサが反応し、遮った時間を測定するものである。鋼球の直径から計測した時間のみの関数として遮光時間と球径から粘度を求めることが出来る。

5.3 粘度圧力係数 α の算出

粘度圧力係数 α は試験油の油温を一定に保ち、圧縮圧力を変化させながら実測した高圧粘度の値から Barus の式^[7]を用い最小二乗法で算出する。

$$\eta_p = \eta_0 \exp(\alpha p) \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha p = \ln\left(\frac{\eta_p}{\eta_0}\right) \dots\dots\dots (5)$$

α : 粘度圧力係数	[GPa ⁻¹]
p : 圧力	[Pa]
η_0 : 大気圧下での粘度	[Pa·s]
η_p : 圧力下での粘度	[Pa·s]

式 (5) より粘度圧力係数 α を算出する。

ここで、圧力は万能引張圧縮試験機の荷重により求める。

現時点では本装置は試験運用中であり、今後の研究を通して、それぞれの試験油の粘度圧力係数 α を計測していく予定である。

落球式高圧粘度計の構造上の部品としては、圧力容器、圧力容器内筒、プランジャー、上部コイル、鋼球、観測窓、サファイアガラス、下部プラグ、下部熱電対などとなっている。

設計圧力は短期間での使用として扱い、S45C 降伏点の 345N/mm² とする。その時の容器内設計圧力は 325MPa である。そこで、容器内の許容できる操作圧力は 300MPa と設定した。

6. 結論

新還元添加剤が EHL 下のトライボロジー性能に及ぼす影響を化学的作用と軸受接触面の挙動を観測した結果、下記の結論が得られた。

- 1) 基油に新還元添加剤を添加した場合の粘度上昇率は、5W-30 においては 2.6%(40℃)、9.6%(100℃)、VG320 においては-11.1%(40℃)、-0.4%(100℃)であり、従来品を添加した場合に対して粘度上昇率が低下した。

- 2) 5W-30 と VG320 に新還元添加剤を 10vol%添加した場合の最大運転時間は理論寿命時間に対し 25.4 倍と 36.7 倍となった。それぞれ基油に対して最大稼働時間は 5W-30 に従来品を添加した場合 1.08 倍、新還元添加剤を添加した場合 4.66 倍、VG320 に従来品を添加した場合 1.69 倍、新還元添加剤を添加した場合 14.5 倍延長した。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) 無次元膜厚について 5W-30 では基油に対して従来品を添加した場合 1.17 倍、新還元添加剤では 1.32 倍上昇していた。VG320 では基油に従来品を添加した場合 1.10 倍、新還元添加剤では 1.30 倍上昇していた。
- 4) 5W-30 と VG320 に新還元添加剤を添加した場合では粘度上昇率が従来品に対して抑えられている。この事実から、油膜厚さが上昇するのは粘度上昇の影響よりも、添加剤成分の影響の方が大きいと考えられる。新還元添加剤を添加することにより軸受接触面の油膜が厚くなり、潤滑状態が改善され軸受の寿命延長につながったと考えられる。

7. あとがき

落球式高圧粘度計を用いて試験油の高圧物性を観測し理論値の精度を高め、潤滑面に形成される油膜性状の数値解析モデル構築に今後の研究を通して取り組む予定である。

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)
 - [7] 兼田楨宏: 弾性流体潤滑理論, 日本機械学会論文集(C編), 74 巻 744 号 (2018-8)
- [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

