

特集技術論文

潤滑油の新還元添加剤による自動車と産業機械用における 合成油寿命延長の考察

清水 秀真^{*}，里永 憲昭^{*}，渡邊 孝司^{**}，竹川 秀男^{**}

^{*} 崇城大，^{**} D1 ケミカル

The Study for Evaluating Bearing Fatigue Life of Lubricant and Viscosity
of A New Synthetic Lubricant for Vehicles and Industrial Equipment

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，摩擦，摩耗を改善するために，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実験的に測定した。エンジンやデファレンシャルギアなどの金属表面を覆う汚れを元の金属表面に還元された事例や想定されるメカニズムを示し，自動車と産業機械用における新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。

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，トライボロジー

We developed a new unique reducing additive composed primarily of polyol-ester, di-ester, and vegetable oil-based ester compounds in order to switch from boundary to fluid lubrication and improve tribology performance, and chemically and experimentally investigated its effects on tribology performance. To confirm the lubrication effects of this reducing additive, we added it to oil and chemically investigated the cleaning and dissolving of the ultra-fine particle layer of contaminants, etc., adhering to lubrication pathways and sliding surfaces, and performed commercialization testing using actual vehicles. We showed the example that the dirt which covered the metal surfaces such as engine or differential gear was restored in the original metal surface and assumed mechanism. We inspected the tribological performance of the new additive lubricant to be able to put for a car and industrial equipment by chemical, physical behavior and practical use examination.

KEY WORDS: Heat Engine, Power Transmission, Engine Oil, Gear Oil, Lubricating Oil, Additive Lubrication, Tribology

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，十分とはいえない。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，

自動車用として注目されている。

この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，分散性や生分解性を有するなど多くの特長を有する。しかし，欠点として加水分解をしやすく，吸湿性があり，ゴム，シール材，樹脂や塗料で制限され，またコストが高い点を有するが，合成潤滑油の中でトライボロジー性能，省資源と省エネなどに対して最も機能的に優れている^{[6][7]}とされている。^{[6][7]}

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、摩擦性能などをより改善するため、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化学的作用と実用試験等により確認し、さらに新還元添加剤の添加割合に対する粘性評価や寿命評価の解析方法を検討したので報告する。

2. 新還元添加剤

2.1 新還元添加剤のコンセプト

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^{6), 7)}。

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。

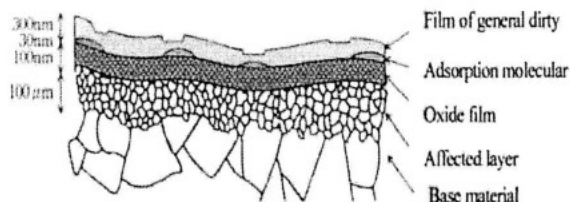


図1 汚れ表面のモデル図

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。新還元添加剤の化学的性状を表1に示す。

表1 新還元添加剤の化学的性状 (SOD-1)

動粘度	40℃	mm ² /s	610.0
	100℃	mm ² /s	92.4
粘度指数			243
流動点		℃	-42.5
発火点 (PM)		℃	170.0
灰分		質量 %	2.305
酸化安定性 (ISOT)			
相対粘度			1.06

2.2 新還元添加剤および参考添加剤 A の添加率に対する潤滑油の粘度変化

新還元添加剤はエンジンオイルやギアオイルに 10 vol% 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2に示す。本実験は潤滑油として 5W-30 (エンジンオイル) と VG320 (ギアオイル) の新たなグレードの潤滑油を使用し、基油から粘度を再測定して混合割合を 3, 5, 7, 10 vol% 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 9.3~12.5 mm²/s) を認められることから、仕様としては満足している。図2に基油に対する動粘度変化の割合を示す。両潤滑油とも測定誤差を含むと考えられる変動幅が見られたが、傾向としては混合割合に対して一定の比例増加傾向が認められる。また、動粘度は基油の粘度が高くなるほど、特に高温時 (100℃) 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。

ここで、他の添加剤で高性能を有し、かつ、効果のメカニズムが明らかとなっている参考添加剤 A を用いて新還元添加剤との性能を評価する。参考添加剤 A の粘度を表3に示し、添加割合に対する粘度変化を測定した結果を表4に示す。また、図3に基油に対する動粘度変化の割合を示す。

5W-30 では添加率に対する粘度上昇率は、100℃ に対して 40℃ は僅かに最大 3% 程度の範囲で上昇が認められるが、100℃ の粘度変化はほとんど認められない。VG320 については基油より参考添加剤 A の粘度が低いことから、添加率の上昇と共に 40℃ と 100℃ とともに粘度の下降傾向が認められ、添加率 10 vol% では 40℃ において 17.3% の低下が確認された。

表 2. 潤滑油の新還元添加割合に対する粘性に与える影響
(5W-30, VG320)

5W-30	基油	基油 (エンジン油)+SOD-1			
添加率 vol%	0	3	5	7	10
動粘度 40℃ mm ² /s	60.4	70.1	65.5	66.3	77.4
100℃ mm ² /s	11.6	14.0	14.0	13.7	16.4
粘度指数	191	208	223	215	229

VG320	基油	基油 (ギヤ油)+SOD-1			
添加率 vol%	0	3	5	7	10
動粘度 40℃ mm ² /s	324	327	330	350	334
100℃ mm ² /s	23.9	26.0	30.0	32.0	33.2
粘度指数	94	104	125	129	140

表 3 参照添加剤 A の物性

動粘度	40℃ mm ² /s	111
	100℃ mm ² /s	12.3
粘度指数		102

表 4. 潤滑油の新還元添加割合に対する粘性に与える影響
(5W-30, VG320)

5W-30	基油	基油(エンジン油)+参考添加剤 A			
添加率 vol%	0	3	5	7	10
動粘度 40℃ mm ² /s	62.5	64.4	64.4	64.5	64.6
100℃ mm ² /s	10.5	10.4	10.4	10.4	10.4
粘度指数	158	149	149	148	148

VG320	基油	基油(ギヤ油)+参考添加剤 A			
添加率 vol%	0	3	5	7	10
動粘度 40℃ mm ² /s	324	297	286	277	268
100℃ mm ² /s	23.9	23.2	23.1	22.6	22.2
粘度指数	94	97	99	100	100

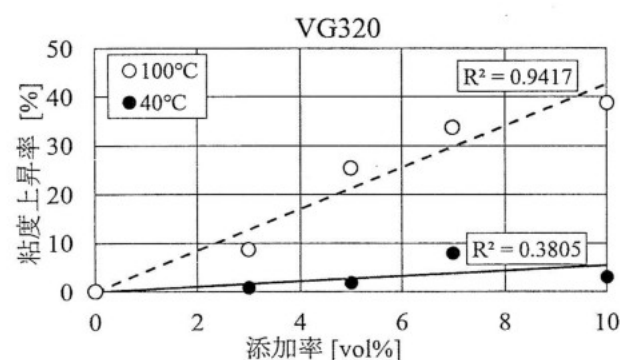
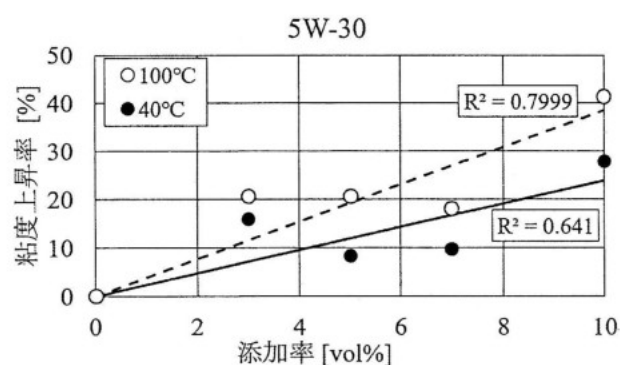


図 2 SOD-1 添加時の粘度上昇率

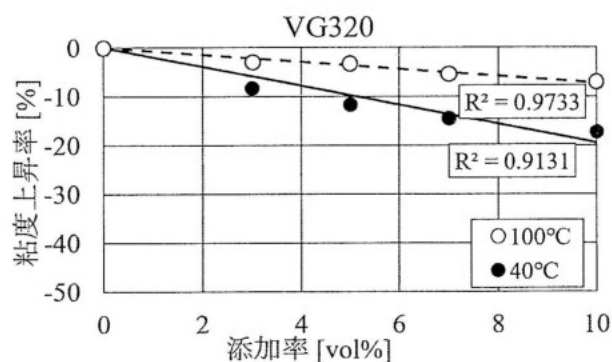
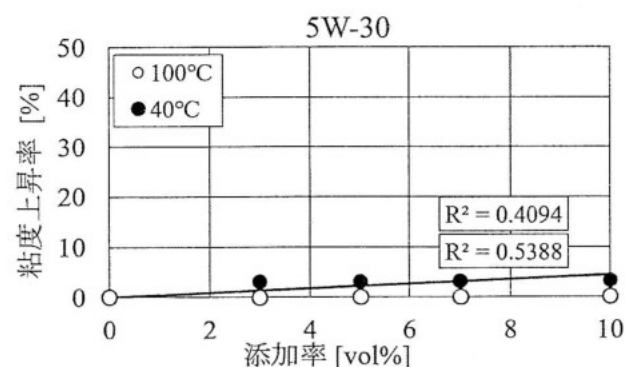


図 3 参考添加剤 A 添加時の粘度上昇率

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^[5]

3.1 軸受寿命評価の方法

評価には図4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。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。

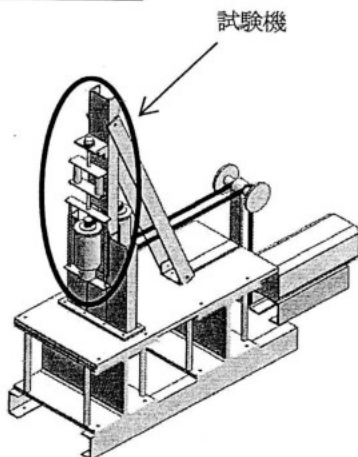
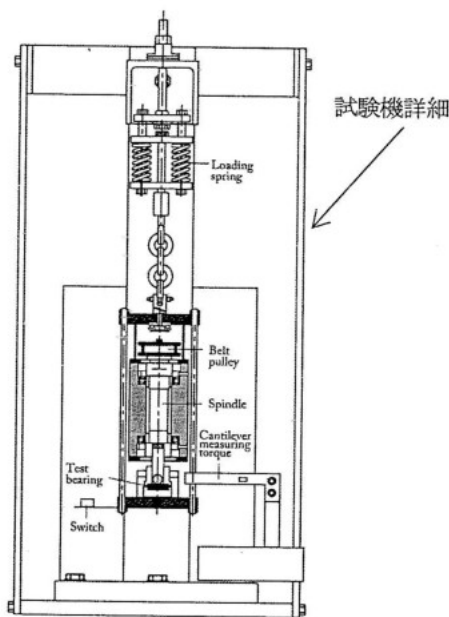


図4 スラスト玉軸受寿命評価試験機の構成

3.2 理論寿命時間に関する理論式^[8]

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。

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

ここで、

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

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

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

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

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、 $Q_{ti}=151.80$ [N] $Q_{te}=152.11$ [N] $Q_{ci}=164.61$ [N]

$Q_{ce}=164.61$ [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 $n=1000$ [rpm] から

理論寿命時間 L_0 は $L_0 = \frac{0.6812 \times 10^6}{60 \times 1000} = 11.38$ [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 5 つのパターンで実施した。各実験結果を図 5 と図 6 に示す。これらの図はワイブル線図であり、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。横軸は 1 より右側で理論寿命時間を超えた運転を示し、グラフ上のプロットは 11.38h に対して各々 2 倍と 3 倍の実験結果を意味している。

基油の性能として 5W-30, VG320 で実験した結果、最大運転時間は理論寿命時間に対して各々 5.45 倍と 2.53 倍の運転が確認できた。

基油の 5W-30 と VG320 に新還元添加剤を 10% 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て 5.87 倍と 4.27 倍の運転が確認できた。

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, 最大運転時間として理論寿命時間に対して 3.01 倍の運転が見られた。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。

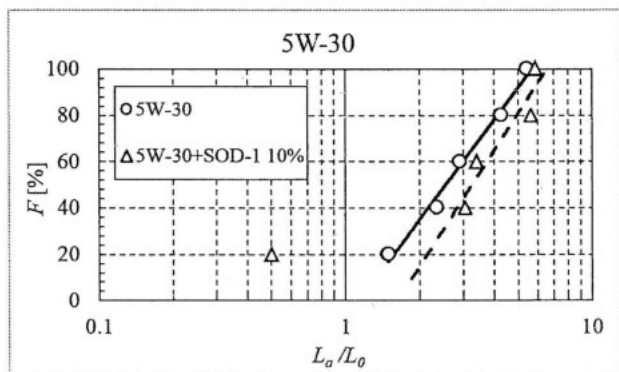


図5 エンジン油のワイプル線図

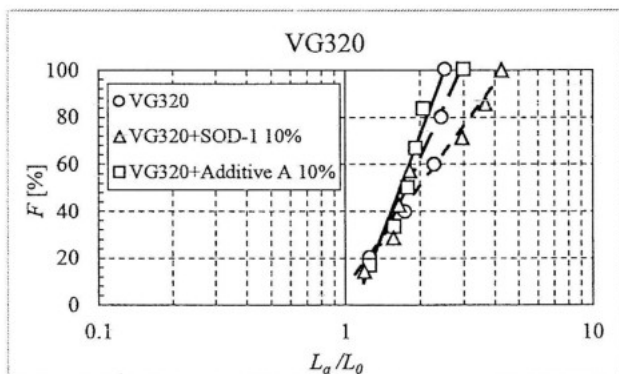


図6 ギヤ油のワイプル線図

3.4 軸受損傷の状況について

寿命の扱いは、実験装置の安全装置（振動、過負荷）が起動した時点を受損傷の限度とした。表5に5W-30とVG320にSOD-1と参考添加剤Aを用いた実験の損傷形態と割合を示す。

表5 実験結果（基油 エンジン油, ギヤ油）

基油	エンジン油		ギヤ油		
添加剤	なし	SOD-1	なし	SOD-1	参考添加剤 A
実験回数	5	5	5	7	6
損傷割合	%	%	%	%	%
外輪	40.0	60.0	60.0	57.0	67.0
内輪	0.0	20.0	20.0	43.0	33.0
転動体	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0
損傷なし	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0

損傷の箇所としては基油の種類にかかわらず、外輪が最も多いことが分かる。図7に典型的な外輪傷の一例を挙げる。1.63×2.08mmの大きさで深さ0.13mmの傷が確認された。

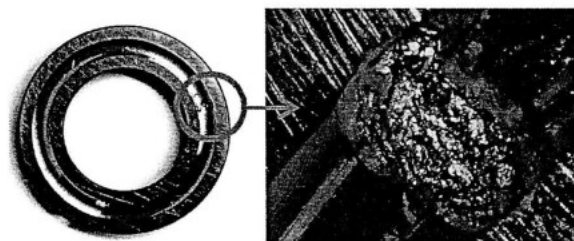


図7 外輪の損傷形状

基油、添加剤の種類の変化による性能の違いや、添加率変更による性能の違いなどについても同一の操作条件で行うことで、潤滑油の性能に特化した評価が可能になると考える。

また、傷の形態について欠陥の詳細を観測することにより破壊メカニズムに関しても究明できるという期待がある。今後の研究を通して取り組む予定である。

4. 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化学的作用と実用寿命評価試験等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。その中で特に添加割合に対する粘度変化については、粘度上昇率は一定の比例関係で上昇し、基油粘度が大きいほど粘度の上昇率に与える影響は小さい傾向が見られた。
- 2) 5W-30に既存の高性能添加剤である参考添加剤Aを添加すると、40℃は100℃と比べて約3%の範囲で粘度上昇が認められたが、100℃についてはほとんど粘度変化が認められなかった。VG320に参考添加剤Aを添加すると、参考添加剤Aの方が低粘度のため基油の粘度は下降する傾向がある。
- 3) 基油の5W-30とVG320の基油のみと基油に対して新還元添加剤を10%添加して比較測定した結果、基油のみの最大運転時間は理論寿命時間に対して各々5.45倍と2.53倍の運転が確認できた。また、基油の5W-30とVG320に新還元添加剤を10%添加した場合の最大運転時間は、理論寿命時間に対して各々約5.87倍、4.27倍の運転が確認できた。
- 4) 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。
- 5) VG320に参考添加剤Aを加えた時は、最大運転時間として

理論寿命時間に対して約 3.01 倍の運転が見られた。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。

- 6) 損傷の発生個所に関しては外輪が最も多く、内輪そして転動体の順に損傷が発生している。

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、測定に協力を得た崇城大学工学部機械工科学部生(当時)中川 凜太郎、淵田恭介、山口航平の諸君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [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, 561-571, (2013)
- [6] 平野二郎：ポリオールエステル系合成潤滑油の動向、潤滑, 第 29 巻第 9 号, pp.627-635 (1980)
- [7] 平野二郎：油化学, 第 22 巻, pp.695(1973)
- [8] 転がり軸受工学編集委員会：転がり軸受工学, 養賢堂, pp.181-197(1976)

著者紹介

清水 秀真 (しみず しゅうま)

2016 年崇城大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程。



里永 憲昭 (さとなが のりあき)

2009 年三重大大学大学院生物資源学研究科博士後期課程修了。崇城大学(旧熊本工業大学)大学院工学研究科機械工学専攻教授。1990 年昭和電工(株)入社。2014 年より准教授、教授。現在に至る。博士(学術)



渡邊 孝司 (わたなべ たかし)

有限会社 D1 ケミカル (最高顧問) 1969 年関東学院大学工学部 2 部機械工学科卒。久留米工業大学名誉教授。瀋陽大学客員教授。自動車技術会フェロー。2014 年より現職。博士(工学)



竹川 秀男 (たけがわ ひでお)

有限会社 D1 ケミカル (〒812-0897 福岡県福岡市博多区半道橋 1-3-45) 営業部長兼技術部長。自動車用オイルの添加剤の研究・開発を通じて壊れない車造りを目指しています。自動車に限らず潤滑をおこなっているすべての機構に添加出来るように日々努力し弊社のテーマである「愛車に長く乗る為に」を推進し、少しでも社会貢献したいと考えています。



(takegawa@d1-chemical.com) TEL 092-292-4439)