

転がり軸受の損傷に与える潤滑油新還元添加剤(SOD-1PN)の効果に対する考察

河野裕典(崇城大院)* , 里永憲昭* , 竹田雄祐* , 渡邊孝司** , 園田智之**

*崇城大学, ** (有) D1 ケミカル

The Study for damaged Rolling Bearing Effects of A New Synthetic Lubricant
Hironori KAWANO*, Noriaki SATONAGA*, Yuusuke TAKEDA*,
Takashi WATANABE**, Tomoyuki SONODA**

*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。このたび従来添加剤の改良品として新添加剤(SOD-1PN)を開発した。新添加剤は耐摩耗性・潤滑性を高め, せん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, 亜鉛の成分を加えることにより潤滑膜再生の効果を高めたものである。エンジンや変速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。

キーワード: 内燃機関, 動力伝達装置, エンジンオイル, トランスミッションオイル, エステル系添加剤, 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]}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, 分散性や生分解性を有するなど多くの特長を持つ。

これまでエンジン, 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のほか, 産業用機器の変速ギアなどの潤滑, 摩耗, 摩擦性能などをより改善するため, 2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。このたび従来添加剤の改良品として新添加剤を開発した。本報において, 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(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, 摩耗, 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。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とギア・オイルは10 vol%, 自動変速機オイルは7 vol%混合とする。従来品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。

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，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行うことで従来の金属表面の姿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添加剤である。

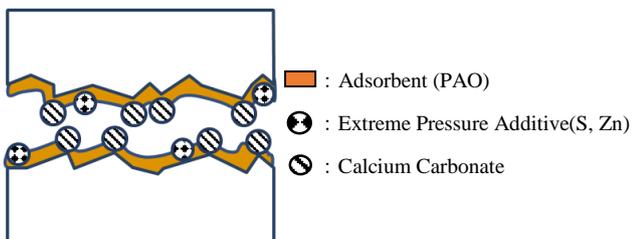


Fig.1 Components of SOD-1PN

図 1 に新添加剤のイメージ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。

さらに，始動時のドライスタートによる摩耗防止を図っており，これは金属表面に吸着したマイクロ粒子が高圧・高負荷時に金属同士の接触を保護し，摩擦・摩耗を低減させる作用である。スーパーオイルフィルムとマイクロ粒子，メタルコーティングのトリプル効果を発揮することになる。

これらのような効果を加えることにより格段の性能改善を得た。新添加剤と従来品の化学的物性を表 1 と表 2 に示す。

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

Kinematic Viscosity	40°C	mm ² /s	132.3
	100°C	mm ² /s	19.9
Viscosity Index			173
Pour Point		°C	-42.5
Flash Point (PM)		°C	232.0
Increased Oxidative		mgKOH/g	3.68

Table 2 Property of the Reference Original Reducing Additives(SOD-1Plus)

Kinematic Viscosity	40°C	mm ² /s	610
	100°C	mm ² /s	92.4
Viscosity Index			243

2.2 新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，ギア・オイルに 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 3 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°C 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。図 2 に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，基油の粘度が高くなるほど，特に高温時（100°C）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。

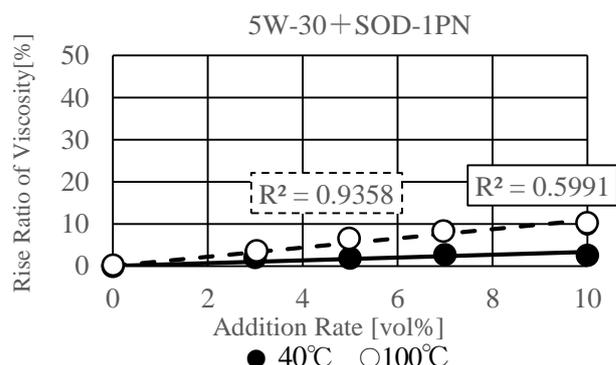
5W-30 の添加率に対する粘度上昇率は，40°C で 2.6%，100°C で 9.64% の上昇が見られた。VG320 の添加率に対する粘度上昇率は，40°C で 11.1%，100°C で 0.4% の下降が見られた。VG320 の粘度測定結果を見ると新添加剤を加えることで低粘度変化が生じていることを確認できる。

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。

Table 3 Effects of New Reducing Additive Ratio Viscosity on Lubricant Oil of 5W-30 and VG320

5W-30	Base Oil	Base Oil (Engine oil) +SOD-1PN					
		Addition Rate vol%	0	3	5	7	10
Kinematic Viscosity							
40°C	mm ² /s	57.7	58.9	58.8	59.3	59.2	
100°C	mm ² /s	9.85	10.2	10.5	10.7	10.8	
Viscosity Index		157	162	170	173	176	

VG320	Base Oil	Base Oil (Gear oil) +SOD-1PN					
		Addition Rate vol%	0	3	5	7	10
Kinematic Viscosity							
40°C	mm ² /s	324					288
100°C	mm ² /s	23.9					23.8
Viscosity Index		94					103



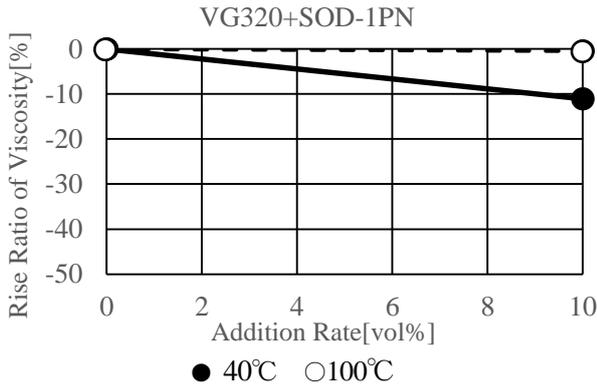


Fig.2 Rise Ratio of Viscosity for Addition Rate

3. 従来品および新添加剤を用いた軸受寿命評価

3.1 軸受寿命評価の方法

試験機としては図3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油浴槽に設置した軸受の外輪(下輪)を回転させ、内輪(上輪)を固定した。スラスト玉軸受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(750rpm)とした。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(15.14h)最大ヘルツ接触圧力は 4GPa 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力を超えるような状況になった時には安全装置が作動し、モータ電源が停止するように安全管理にも配慮した。

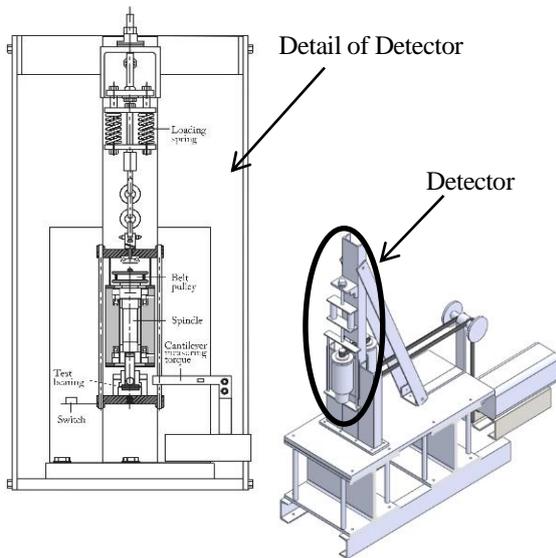


Fig.3 Detector for Evaluating Fatigue Life of Thrust Ball Bearing

3.2 理論寿命時間に関する理論式

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。

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

ここで、

$$Q_{fi} = \left[\frac{1}{Z} \sum_{\psi_0=0}^{\pm\pi} \{Q(\psi)\}^3 \right]^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{1}{3} (P_1^3 + 2P_2^3) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$Q_{fe} = \left[\frac{1}{Z} \sum_{\psi_0=0}^{\pm\pi} \{Q(\psi)\}^3 \right]^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{1}{3} (P_1^{\frac{10}{3}} + 2P_2^{\frac{10}{3}}) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

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

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

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 : $Da \cos \alpha / d_m$

A : 軸受材料によって定まる定数

d_m : 転走面直径[m]

Da : 転動体ピッチ円径[m]

Q_{fi}, Q_{fe} : 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、 $Q_{fi}=1487.6$ [N] $Q_{fe}=1490.7$ [N] $Q_{ci}=1613.2$ [N]

$Q_{ce}=1613.2$ [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],

750[rpm]で 10^6 回転させたとき、

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

$$L_0 = \frac{0.6812 \times 10^6}{60 \times 750} = 15.14[\text{h}] \text{ となる。}$$

3.3 軸受寿命評価試験の結果

本実験は 5W-30 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 4 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、実際の稼働時間 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。横軸は理論寿命時間に対する稼働時間の割合を示す。

基油に対する従来品を加えた合成油としては、5W-30 で 1.08 倍稼働時間が延長した。5W-30 に新添加剤を添加したも

のでは、基油における性能に対して最大稼働時間が4.66倍と更に延長した。

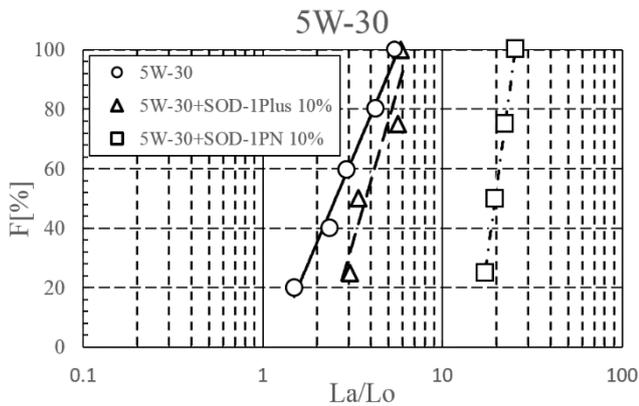


Fig. 4 Weibull Diagram of 5W-30

このことから、新添加剤は顕著な寿命延長効果が確認された。今後は、ギア・オイルなどにも適用し性能を検証する。

3.4 消費電力の省エネルギー効果

これまで、新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軸受寿命試験機に用いるモータの動力の差を評価する。

仕様としては、軸受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ている。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4に示す。

Table 4 Reduction Situation of the Amount of Used Electricity

Base Oil	5W-30
	Detector
Power Rate SOD-1Plus Addition oil (kW)/Base Oil(kW)	96.1%
Power Rate SOD-1PN Addition oil (kW)/Base Oil(kW)	94.6%

エンジン油の5W-30に関しては基油に対する従来品を加えた合成油の消費電力量の割合として、軸受寿命試験機で96.1%となり3.9%の削減を確認した。また、新添加剤を添加した合成油の消費電力量の割合として軸受寿命試験機で94.6%となり5.4%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、新添加剤を添加することにより容易に省エネルギーを得られるという可能性を示している。

4. 結論

新還元添加剤(PN)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試験等により確認した結果、下記の結論が得られた。

- 1) 新添加剤による寿命の延長や省エネルギーに与える効果を期待する低粘度化を達成しながら、カルシウム炭酸塩の構造変更、広範囲の温度に効果のある極圧剤の添加ならびに油膜を継続的に保持できる高粘度PAOの配合など種々の設計変更による新添加剤の機構に関する仮説を確立した。
- 2) 5W-30に対して従来品を加えた合成油としては、1.08倍稼働時間が延長し、新還元添加剤(PN)を添加したものでは、基油に対して最大稼働時間が4.66倍と更に延長していた。このことから、新添加剤は顕著な寿命延長効果を期待できる。
- (3)5W-30に関しては基油に対する従来品を加えた合成油の消費電力量の割合として、軸受寿命試験機で96.1%となり3.9%の削減を確認した。また、基油に対して新添加剤を添加した場合、94.6%となり5.4%の削減を確認した。このことから、新添加剤は顕著な省エネルギー効果を期待できる。

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粘性および寿命評価の手法, 日本設備管理学会誌, Vol.28, No.3, pp.103-109(2016)
- [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自動車と産業機械用における合成油寿命延長の考察, 日本設備管理学会誌, Vol.29, No.2, pp.37-41(2017)
- [3] Noriaki Satonaga, Takashi Watanabe: Effects on Tribology Performance of a Reducing Additive for Automobile Lubricant SAE-2015-01-2047 (2015)
- [4] 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.
- [5] 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)
- [6] 平野二郎: 油化学, 第22巻, pp.695(1973)