

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

竹田雄祐* 里永憲昭* 河野裕典* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学 **D1 ケミカル

Effects of A New Synthetic Lubricant (SOD-1PN)
on Damaged Rolling Bearing

Yusuke TAKEDA*, Noriaki SATONAGA*, Hironori KAWANO*,
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、摩耗、摩擦を低減するために、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これまで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還元添加剤(SOD-1PN)を開発した。新還元添加剤(SOD-1PN)は低温流動性、高粘度指数、加水分解性、熱酸化安定性などにおいて鉱油より優れた高粘度ポリ- α -オレフィン(PAO)を加えることにより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膜再生の効果を高めたものである。本論文では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、ギアオイル、エステル系添加剤、トライボロジー

For the purpose of transition from boundary lubrication to fluid lubrication and in order to reduce wear and abrasion, we investigated the effect of a newly developed reducing additive (SOD-1 Plus) made from polyolester(POE), diester(DOE), and vegetable oil ester(VOE). This additive has been further enhanced into New SOD-1 Plus (SOD-1PN). It provides better wear resistance and higher lubricity by adding high viscosity poly- α -olefin(PAO) to strengthen the oil film it creates, adding sulfur and zinc containing compounds as extreme pressure agents which renew the lubricant film. It has the effect of cleaning the contamination from metal surfaces within an engine or differential/gearbox and prolonging the operating life of these parts. We determined these effects after studying the tribological, chemical and physical properties of this synthetic lubricant.

KEY WORDS: Internal Combustion Engine, Power Transmission, Engine Oil, Gear Oil, Ester Type Additives, 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、十分とは言えない [1],[2],[6]。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],[6] 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いる。最近、自動車の高性能化に伴い、省エネルギーの観点

から自動車用としても注目されている。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有する。著者らはこれまでエンジン、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、産業用機器などの潤滑、摩耗、摩擦性能などをさらに改善するため、独自に開発した還元添加剤(SOD-1, 以下、従来品と称す)について究明してきた^{[1][2]}。

従来品は有機酸とアルコールを原料とするポリオールエステル(POE)、2 塩基酸エステルのジエステル(DST)や植物油系エステル化合物(VOE)などを主成分としており^{[1][2]}、今回従来品の改良品として新還元添加剤(SOD-1PN, 以下、新添加剤と称す)を開発した。

新添加剤はこれらのエステル系合成潤滑油を主成分としており、これらは粘度指数が 230 以上、低温性能は -45~-20℃、揮発性は同粘度の潤滑油と比較してかなり低く、低粘度と低揮発性により摩擦損失を低減させ、熱安定性と酸化安定性が高いので長寿命で鉱油及び合成油との相溶性が良く、添加剤との溶解性と生分解性に優れている。

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ので報告する。

2. 新還元添加剤(SOD-1PN)

2.1 従来品と新還元添加剤のコンセプト

潤滑摺動部表面に固着したデポジット、ワニスやスラッジのコンタミナント類などの汚れの膜は、時間の経過に伴い積層し、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。金属表面の汚れの膜の構成としては、図 1 に示すように汚れの膜、吸着分子層と酸化膜の 3 層のコンタミナントから形成される。新還元添加剤は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]。これらのコンタミナントの内、酸化膜は加工硬化層と同様に非常に硬く、一般の溶剤では除去が困難である。しかしながら、これらの硬い層は金属素地より硬い層であるため、耐摩耗性を向上させることになり好都合である。

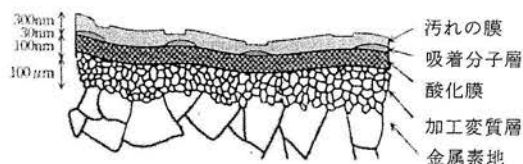


図1 金属表面の汚れの模式図

従来品は 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には 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潤滑摺動部のコンタミナント類を清浄、分解、除去し、最初の潤滑面(金属加工面)を再生、還元し、十分なオイルクリアランスを保持する。これにより摩耗、摩擦損失を大幅に低減し潤滑性を改善できる独自作用である。

さて、従来品の特徴を維持させながら低粘度化を図り、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。図 2 に新添加剤の仮説図を示す。

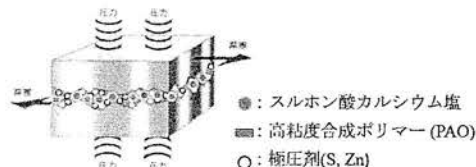


図2 新添加剤のメカニズム仮説図

新添加剤は耐摩耗性・潤滑性を高めるためスルホン酸カルシウム塩に含まれる炭酸カルシウムの構造を変更している(特許申請中)。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 成分を加えている。これにより金属表面にスーパーオイルフィルムと称す PAO 成分の粒子が油膜を保持する。焼付防止と潤滑膜再生を考慮して、極圧剤(硫黄, 亜鉛)を加えて常温から高温まで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。機械の始動時には摺動部の油膜が欠損し境界潤滑となり、高摩擦、高摩耗が生じやすい。上述したスーパーオイルフィルムと再生効果によって境界潤滑から流体潤滑に移行することで、摩擦・摩耗を低減させる作用を発揮すると想定している。これらの効果を加えることにより格段の性能改善を得た。従来品と新添加剤の化学的物性の比較を表 1 に示す。

表 1 従来品(SOD-1)と新添加剤(SOD-1PN)の化学的物性

添加剤		SOD-1	SOD-1PN
動粘度	40℃ mm ² /s	610	132.3
	100℃ mm ² /s	92.4	19.9
粘度指数		243	173
流動点	℃	-42.5	-47.5
発火点	℃	170.0	232.0
酸価	mgKOH/g	1.06	3.68

2.2 新添加剤の添加率に対する粘度変化

近年の自動車の高性能化に伴い、潤滑油においても機械損失低減のため低粘度化が進んでいる。添加剤においても同様であり、添加後の粘度上昇は抑制したい。

潤滑油の低粘度化により寒冷地や厳寒期におけるエンジンの始動性改善、摩擦損失低減による正味出力の向上や燃費低減などの利点があるが、欠点として油膜保持力の低下や耐久性の低下による混合潤滑域の増加などが考えられる。新添加剤はエンジン油、ギア油に10vol%を添加することを標準としている。本実験は基準油として、エンジン油(5W-30)とギア油(VG320)を使用し、基準油に加える新添加剤の混合割合を3, 5, 7, 10 vol%と変化させて粘度の変化を測定した。これらの測定結果を表2に示す。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、VG320 と粘度の高いギア油では、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。

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
(エンジン油 5W-30, ギア油 VG320)

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

ギア油 (VG320)	基準油	基準油+SOD-1PN				
添加率 vol%	0	3	5	7	10	
動粘度 40℃ mm ² /s	324	317	308	298	288	
100℃ mm ² /s	23.9	23.9	23.9	23.9	23.8	
粘度指数	94	96	98	101	103	

図3にエンジン油(5W-30)の添加率10vol%に対する粘度上昇率を示す。40℃で2.6%, 100℃で9.6%の上昇が見られた。図4にギア油(VG320)の添加率10vol%に対する粘度上昇率を示す。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が確認できる。

従来品では添加率に対する粘度上昇率としてエンジン油で28~40%, ギア油で3~35%の上昇率が確認^[2]されていることから、新添加剤は従来品を添加した場合に対して粘度上昇率が低いことを確認した。

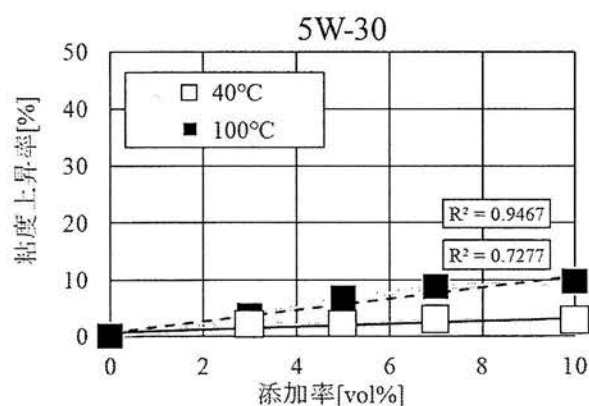


図3 エンジン油 SOD-1PN 添加時の粘度上昇率

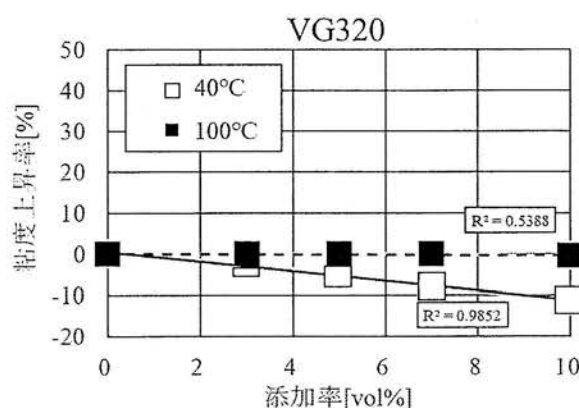


図4 ギア油 SOD-1PN 添加時の粘度上昇率

3. 従来品, 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

試験機は図5に示すスラスト玉軸受寿命評価試験機を用いた。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(上輪)を回転させ、内輪(下輪)を固定した。

軸受には圧縮バネによりスラスト荷重 4.4kN を与え、軸回転数は 1000rpm とした。ただし、試験油の低粘度による飛散が発生することで、実験の継続が困難な場合は 750 rpm に設定した。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。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た場合、もしくは許容のトルク力を超えるような状況になった場合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。

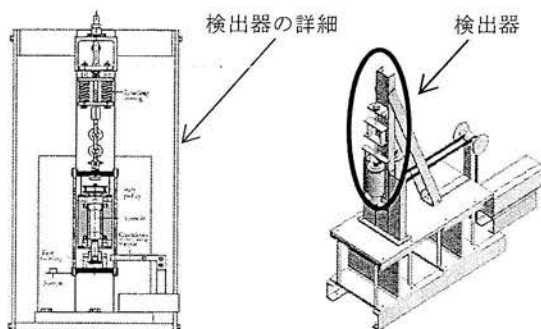


図5 スラスト玉軸受寿命評価試験機の構成

3.2 理論寿命時間に関する理論式

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。

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

ここで、

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

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

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

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

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_{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、 $Q_{ti}=1487.6$ [N] $Q_{te}=1490.7$ [N]

$Q_{ci}=1613.2$ [N] $Q_{ce}=1613.2$ [N]

式(1)は $L=0.6812$ となり、理論寿命時間 L_0 は寿命試験機の回転速度が

1000[rpm]の場合 11.38[h]

750[rpm]の場合 15.14[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 を基準油とし、基準油のみと基準油に従来品、新添加剤を 10vol% 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 6 と図 7 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。

基準油の 5W-30 と VG320 に新添加剤を 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て 25.4 倍と 36.7 倍の運転が確認できた。

基準油の実稼働時間に対する各々の稼働時間は、エンジン油 (5W-30) に従来品を添加した場合は図 6 に示すように 1.08 倍延長し、新添加剤では 4.66 倍と更に延長した。ギア油 (VG320) に従来品を添加した場合は図 7 に示すように 1.69 倍延長し、新添加剤では 14.5 倍と更に延長した。

ギア油 (VG320) に関しては新添加剤を添加することで粘度低下による短寿命化の懸念があったが、逆に長寿命化を表した。この事実から、新還元添加剤を加えることで寿命の大幅な延長が期待できる。

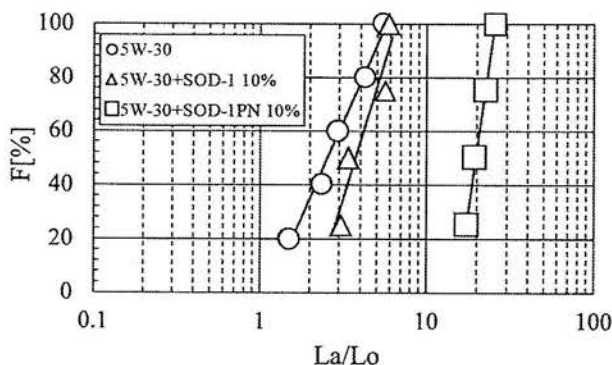


図6 エンジン油のワイブル線図

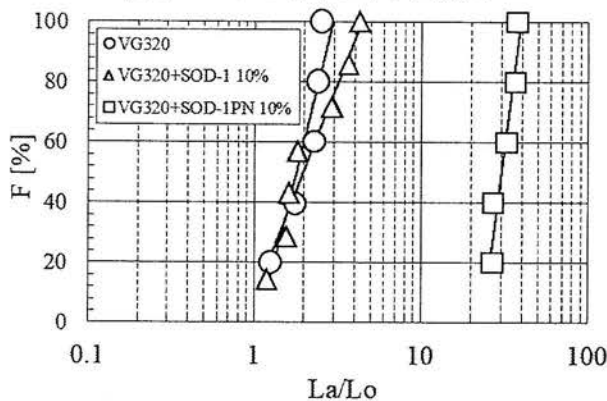


図7 ギア油のワイブル線図

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)が起動した時点と軸受損傷の限度とした。表3にエンジン油とギア油に従来品と新還元添加剤を用いた実験の損傷形態と割合を示す。

表3 実験結果 (基準油 エンジン油, ギア油)

基準油	エンジン油 (5W-30)			ギア油 (VG320)		
	なし	SOD-1	SOD-1PN	なし	SOD-1	SOD-1PN
実験回数	5	4	4	5	7	5
損傷割合	%	%	%	%	%	%
外輪	40.0	25.0	0.0	60.0	57.0	0.0
内輪	0.0	50.0	25.0	20.0	43.0	0.0
転動体	20.0	25.0	25.0	20.0	0.0	20.0
損傷無し	40.0	0.0	50.0	0.0	0.0	80.0

基準油のみ、従来品添加時には、外輪・内輪の損傷割合が高く、その損傷形態は共にフレーキング損傷であった。図8に損傷の一例としてVG320+SOD-1の寿命試験時に内輪に発生した 1.58×2.27 mmのフレーキング損傷を示す^[5]。

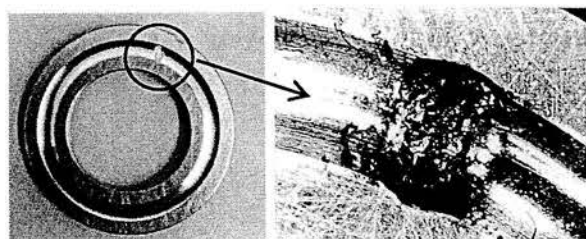


図8 内輪のフレーキング損傷の状況

一方、新添加剤の場合は損傷することなく、従来品と比べて寿命試験を完了する割合が最も高かった。この事実から、新還元添加剤を添加することにより従来品と比較して摺動面の摩擦・摩耗が低減され、損傷発生の割合が低減し、寿命延長の一因になったものと考えられる。

基準油、添加剤の種類、添加率の変化による性能の違いについても、同一の操作条件で実験を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られる。また、損傷個所の詳細を観察すると共に、新添加剤で破損を生じなかった試験片の転走面を詳細に比較検証することにより、破壊メカニズムに関しても究明できると期待している。

3.5 消費電力の省エネルギー効果

新添加剤の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差を評価する。

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。評価方法としては基準油のエンジン油とギア油に従来品と新還元添加剤を 10% 添加した場合の消費電力量の削減率を求めたものを表4に示す。

表4 消費電力の削減率

基準油	エンジン油 (5W-30)		ギア油 (VG320)	
	SOD-1	SOD-1PN	SOD-1	SOD-1PN
添加率 Vol%	10	10	10	10
削減率 %	3.9	5.4	5.1	6.1

各々の基準油に対する軸受寿命試験機の消費電力量の割合として、エンジン油 (5W-30) に従来品を添加した場合 3.9%の削減、新添加剤の場合 5.4%の削減を確認した。同様にギア油 (VG320) に従来品を添加した場合 5.1%の削減、新添加剤の場合 6.1%の削減を確認した。本寿命試験機は温度環境、生産負荷などは同一条件であり、以上の結果から新添加剤を添加することで容易に省エネルギー効果の可能性を示している。

4. 結 論

新還元添加剤(SOD-1PN)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、スルホン酸カルシウム塩に含まれる炭酸カルシウムの構造変更、広範囲の温度に効果のある極圧剤の添加、並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提示した。
- 2) 基準油に新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いことを確認した。

- 3) 5W-30 と VG320 に新添加剤を 10vol% 添加した場合、最大運転時間は理論寿命時間に対して各々 25.4 倍と 36.7 倍の運転が確認できた。運転時間は 5W-30 に従来品を添加した場合 1.08 倍、新添加剤の場合 4.66 倍、VG320 に従来品を添加した場合 1.69 倍、新添加剤の場合 14.5 倍と各々延長していた。さらに VG320 は添加による低粘度化で短寿命化への懸念があったが、長寿命化を示した。この事実から新添加剤は顕著な寿命延長効果を期待できる。
- 4) 軸受寿命試験機において消費電力の削減率は 5W-30 に従来品を添加した場合 3.9%、新添加剤の場合 5.4%、VG320 に従来品を添加した場合 5.1%、新添加剤の場合 6.1%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。

謝 辞

最後に実験の機器調整等にご協力いただいた(有)D1 ケミカル営業部 園田タ喜殿、実験に協力いただいた崇城大学工学部機械工学科生産システム工学研究室の学生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)
- [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 pp. 561-571. (2013)
- [5] 長濱秀紀, 井戸慎一郎, 角谷治彦, 田中直也: 診断技術の応用によるベアリング加速評価技術の検討, 第 16 回評価・診断に関するシンポジウム予稿集, pp. 120-123 (2017)
- [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)

著者紹介



竹田 雄祐 (たけだ ゆうすけ)

崇城大学 (旧熊本工業大学) 工学部機械工学科助教。2008 年久留米工業大学大学院工学研究科修士課程修了。2008 年平田機工 (株) 入社。2018 年より現職。



里永 憲昭 (さとなが のりあき)

崇城大学工学部機械工学科教授。2009 年三重大学大学院生物資源学研究科博士後期課程修了。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)



河野 裕典 (かわの ひろのり)

2018 年崇城大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程 2 年生。



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)



園田 智之 (そのだ ともゆき)

有限会社 D1 ケミカル 代表取締役 (〒812-0897 福岡県福岡市博多区半道橋 1-3-45) (TEL 092-292-4439) 1998 年に福岡県自動車整備振興会教育部の協力のもと「SOD-1」を開発。