

低粘度化した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の寿命延長と省エネルギー効果

崇城大学 大学院

工学研究科 機械工学専攻 教授 有限会社D1ケミカル

里永 憲昭

渡邊 孝司, 園田 智之*

■著者連絡先 (*)

〒812-0897 福岡市博多区半道橋1-3-45

TEL 092-292-4439

E-mail sonoda@d1-chemical.com

はじめに

近年の製造業では、設備の自動化・高精度化が進化している。そのため、設備の状態により製品の品質 (Quality)、コスト (Cost)、納期 (Delivery) が大きく左右される。その状況下において、設備の突発的な故障が発生してしまうと、事業者としては大きな損失となる。したがって、可能な限り故障を未然に防止し、設備が故障した場合、すばやく修復して設備を本来あるべき姿に戻すなど、機械設備を最高な状態に維持・管理していく設備保全活動が重要となる。また、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^{1~4)}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いる。

本誌2018年1月号¹⁾に掲載した自動車用添加剤 (SOD-1Plus) および産業機械用添加剤 (COA-Plus) の新製品として2018年に新還元添加剤 (SOD-1PN) を開発した。新製品はこれまでの機能性能は維持しながら、従来品と比較して低粘度化、長寿命化を追求して、省エネルギー性能を意識したものであ

る。添加剤の構成としては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である。この「新還元添加剤」は自動車用添加剤のみならず、産業機械用添加剤としても用いられている。今回、この添加剤のもつトライボロジー性能に及ぼす影響を化学的作用と自動車性能実用試験、さらに、軸受の寿命評価などによる添加剤の効果を確認した結果と、さらに今後の動向について紹介する。

1. 新還元添加剤 (PN)

1.1 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⁴⁾。

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、ギアオイルには10 vol%, 自動変速機オイルには7 vol%混合とする。従来品の特徴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還元添加剤（SOD-1PN：以下，新添加剤と称す）である。

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ポリ α オレフィン（PAO）成分を加え，金属表面の焼付き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ミクロ粒子が高压・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，ミクロ粒子と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。

1.2 従来品と新還元添加剤の性状ならびに基油に添加したときの性状変化について

従来品と新添加剤の化学的物性の比較を

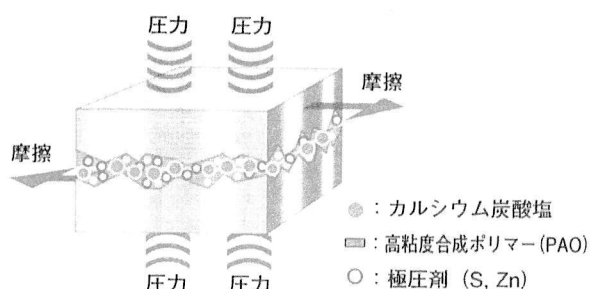


図1 新添加剤のメカニズム仮説図

表1に示す。また，基油をエンジンオイル（5W-30），ギアオイル（VG320）としたときに従来品と新添加剤を加えたときの性状の変化と粘度の上昇率を表2，表3に示す。

2. 新還元添加剤を用いた自動車性能に及ぼす事例

新還元添加剤の自動車性能に及ぼす事例を紹介する。

2.1 ATFへの新還元添加剤の添加による出力の影響

供試車両（ランドローバー，CBA-LV2A，1.99L，ガソリン普通乗用車）を用い，新添加剤を自動変速機フルード（ATF）に7vol%添加してシャシーダイナモ（日産アルティア（株）製），空冷渦電流式300 PS電気動力計により，添加剤の有無における出力比較試験を実施した。

出力試験の前にATFは純正フルードを全量交換し，添加剤無しで出力試験の後，ATFに添加剤を7vol%添加して同試験をす

表1 従来品と新添加剤の化学的物性の比較

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

表2 基油に従来品と新添加剤を添加したときの性状（5W-30）

基油	5W-30（エンジン油）				
	添加なし	SOD-1（10vol%）	動粘度上昇率	SOD-1PN（10vol%）	動粘度上昇率
動粘度 mm ² /s	mm ² /s	mm ² /s	(%)	mm ² /s	(%)
40℃	57.7	77.4	34.1	59.2	2.5
100℃	9.85	16.4	66.5	10.8	9.6
粘度指数	157	229	—	176	—

表3 基油に従来品と新添加剤を添加したときの性状（VG320）

基油	VG320（ギア油）				
	添加なし	SOD-1（10vol%）	動粘度上昇率	SOD-1PN（10vol%）	動粘度上昇率
動粘度 mm ² /s	mm ² /s	mm ² /s	(%)	mm ² /s	(%)
40℃	324	334	3.0	288	-11.1
100℃	23.9	33.2	38.9	23.8	0.0
粘度指数	94	140	—	103	—

る。測定はエンジン始動時に2速ギアでアクセル開度を15%とし、8速ギアまで同開度を20%一定とした。

シャシーダイナモの出力比較試験の結果を図2に示す。縦軸は出力(PS)を横軸は車両速度(km/h)を表しており、図中の①は添加剤無し、②は添加剤7vol%添加を示す。

出力比較試験は同一日に加速度を一定に保持して実施した。スタート時の区間速度0~30 km/hは、②の添加剤の出力上昇効果が明確に認められる。

したがって、①と②の添加剤の有無の比較を区間速度について明確にするため、図2のアナログデータを区間速度ごとにデジタル値に変換したものを表4に示す。ここで速度区間ごとに出力を比較しやすくするために、同区間の面積値(PS・km/h)の等価から求めた平均有効出力 P_m (PS)の概念を図3のように定義する。

結果として、添加剤無し①と有り②の平均

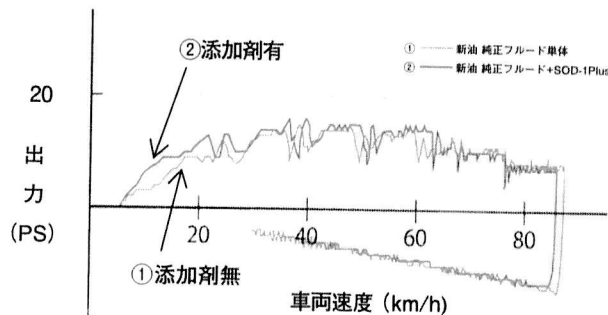


図2 シャシーダイナモの出力比較試験結果

表4 アナログ値を区間速度ごとにデジタル値に変換

速度区間 (km/h)	0-20	20-40	40-60	60-80	0-80
① (PS・km/h)	69.8	223.4	262.6	205.8	761.6
P_m (PS)	3.49	11.17	13.13	10.29	9.52
② (PS・km/h)	101.0	247.2	275.6	209.7	833.4
P_m (PS)	5.05	12.36	13.78	10.49	10.4
上昇率 (%)	44.7	10.7	5.0	1.9	9.2

①：添加剤無し ②：添加剤有 P_m ：平均有効出力

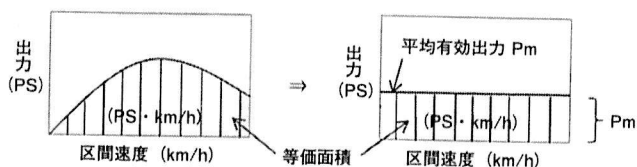


図3 平均有効出力 P_m の定義

有効出力 P_m は区間速度全域において②の添加剤有りが大きく、新添加剤の効果を示している。その平均有効出力 P_m の①に対する②の上昇率は、区間速度の上昇に対して反比例で小さくなり、0-20 km/hで44.7%，次いで10.7%，5.0%と1.9%を示し、0-80 km/hの平均では9.2%であった。新添加剤の添加による加速時の出力向上が確認できたが、その上昇率は低速から高速の加速時において低速になるほど大きい効果が認められた。この理由として低速になると金属清浄剤（金属石鹸）による清浄作用の向上、およびPAOによるトラクション係数の上昇が、自動変速機(AT)のクラッチ摩擦板のすべりを抑制しているためと推察される。

2.2 ATのノンドレイン化とジャダーの不具合対策

ATに用いるATFの技術の進歩はGM(1947)とFord(1959)が世界の規格を変遷しており、日本も当初、GMとFordの規格承認油のDEXRON® II EやNEW MERCON®を工場充填用およびサービス用として使用していた。しかし、1973年のオイルショック以来、変速段数の多段化、ロックアップクラッチ、トランスファークラッチの導入に加えて各社とも独自のATを開発した。このATに対応したATFが1985年以降に各社専用油として開発され、1988年頃から欧米国市場に輸出された日本車が更油や補給のサービスを受けた場合に、GMやFordの承認油では性能的に対応不可能となるため、ATFの交換・充填を不要とするためのドレインプラグを無くしたノンドレイン化が必須となった。

よって、国内の乗用車もATF専用油化となったものの走行80,000km以上になると変速ショック、滑り、不連続変速や発進時の車体異常振動を伴うジャダーなどのAT不具合が数多く発生している。これらの対策としてATFを新油に交換しても、逆に清浄分散性が高いため壁面に付着したスラッジがバル

ブボディなどの狭い通路に詰まり、逆にATの不具合が顕著に表れて結果的にはATを仕方なく新品に交換せざるを得ない状況であった。このようなAT不具合に対して新添加剤を7vol% ATFに混入して対応したところ、全国でAT不具合はほとんど改善されて不具合対応の唯一の添加剤として口コミで広まり現在に至っている。ATのバルブボディの新添加剤の添加前後の状態の写真を図4に示す。図4左に示すようにわずかな汚れがあってもATの不具合発生を及ぼす。

したがって、国産車メーカーが欧米のATFサービスの対応不可能を察知してノンドレイン化を進めたことが、最近では逆に裏目に出ていると言っても過言でない。AT不具合のユーザーは新添加剤に対しての評価は高く、最近では韓国をはじめ台湾、中国など海外にも評価されつつある。

2.3 CVTのジャダー不具合対策

最近、同一メーカーの普通乗用車のCVT式オートマチックトランスミッションにおいて、発進時にジャダーを発生するクレームがあり、その対策として新添加剤を7vol%添加したところ、ジャダーが改善できることを確認した。その後、同社の複数の車種についても同様な事例として報告された概要を表5に示す。走行距離は約47,000～122,000 kmで発生しており、特に2002年式が最も多く発生している。この対策として添加剤の効用が

ディーラーに認められ、現在ではジャダー対策のディーラー指定部品として認められている。

この改善理由はCVTのクラッチ表面に積層した金属の微細摩耗粉を含むコンタミ類が添加剤により分解、洗浄されて、最初の金属表面に復元して滑りが減少し、摩擦力が回復した新添加剤の特徴のためと考察される。このように添加剤はCVTのジャダー対策に対しても有効であることが立証された。

2.4 DPFの再生インターバル時間の延長

添加剤の添加によるガソリンエンジンの内部洗浄例については、本誌2018年1月号¹⁾で記述したように燃焼室内の清浄化により、ピストンリングの張力回復や吸排気バルブの密閉度の向上により、圧縮比が復元して燃費や排気ガス性能が大幅に改善された。ディーゼルエンジンにおいても同様に燃焼室の清浄化により、燃焼が改善されて排気ガス中のCO、HCはもとより黒煙、PMの減少によってDPFの再生インターバル時間が従来より約30～40分以上延長した効果が認められた。特にその効果が顕著であったのは、搬入時間が勝負の鮮魚運搬トラックで、通常は高速道路のサービスエリアで一度はDPFの再生のため停車していたが、新添加剤を添加後はDPFの再生、停車なしに搬送でき、時間的に余裕ができたとのことである。

また、最近、年間稼働率の低い北海道の大農場における大型ディーゼルトラクターのDPFの再生インターバル時間の延長が話題になっている。添加剤を添加したトラクターにおいてDPFの目詰まりの再生インターバル時間の大幅延長によりトラクターの稼働率が著しく伸びて、農産物の生産効率が上昇し

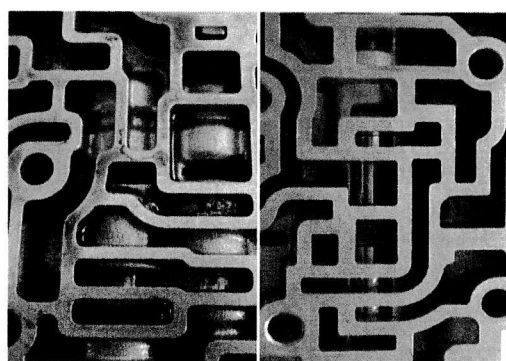


図4 ATのバルブボディの状態

表5 CVTのジャダー対策例

車両形式	A	B	B	C	D
年式	2001	2002	2002	2002	2004
走行距離 × 10 ³ km	122	47	113	72	57
添加前	CVT 始動時にジャダー発生				
添加後	CVT 始動後にジャダー消失				

たとの実績もある。このように、新添加剤はディーゼルエンジンにおいても、燃焼室の清浄化によりDPFの目詰まり防止をはじめ排気ガスや燃費の改善効果が認められている。

その他の改善例として過去10年間にわたり、ドライスタート時の異音発生、変速ショック、エンジン異音、白煙、青煙、PMなどの排気ガス対策、オイル消費、パワーステアリングの異音、ATクレーム、オイルの更油インターバルの延長や再生インターバルの延長などの対策として新還元添加剤の添加により、解決できた実績を有する。

3. 従来添加剤および新還元添加剤を用いた軸受の寿命評価

これまで自動車のエンジン、トランスミッション、ATFに関する効果を紹介してきた。ここで、産業装置などで一般的に用いられる軸受や摺動部におけるトライボロジー特性について言及する。

3.1 軸受寿命評価の方法

評価には図5に示すスラスト玉軸受寿命評価試験機⁶⁾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、モーターによる回転をベルトに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。スラスト玉軸受に

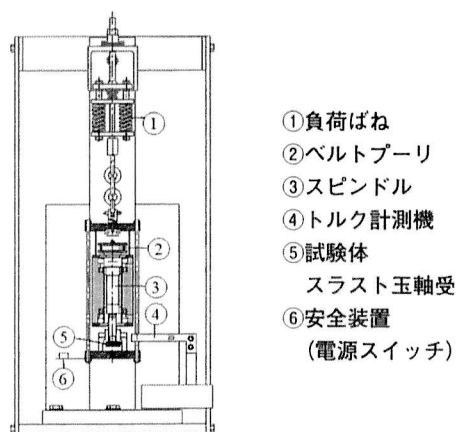


図5 スラスト玉軸受寿命評価試験機

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、オイルの飛散を考慮して1000rpm（750rpm）を粘度に適合した軸回転数を設定した。摩擦力は回転によるトルクを計測することで把握することができる。この条件下での理論定格寿命は11.38h（15.14h）、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損による振動が所定の値を超えるようになったとき、もしくは許容のトルクを超えるような状況になったときに安全装置が作動し、モーター電源が停止するように安全管理に配慮した。

3.2 ワイブル線図の作成方法

信頼性工学の視点から設備の故障などを確率論により表現するときにワイブル分布に基づく累積破損率 $F\%$ を示す手法がある。学術的には説明が複雑なので、図6のエンジンオイル（5W-30）実験データ（○）を用いてワイブル線図の作成手順を紹介する。

《ワイブル線図を作成するときの手順》

Step1：寿命試験のすべての実験データを稼働時間 La の短いデータ順に整理する。

Step2：すべての実験データを母集団としたときに実験回数の割合を縦軸に示す。

Step3：理論寿命時間 Lo に対する稼働時間 La の比を横軸にとり、対数目盛りで表現したものである。なお、今回の実験では Lo は15.14[h]である。

Step4：Step2の縦軸とStep3の横軸をプロットしたものが図6の○である。

データ：実験データの整理（図6の○を例とする）

実験回数	1	2	3	4	5
稼働時間 La [h]	43.9	83.4	24.3	33.3	63.6

Step1：実験データの稼働時間順による再整理

実験回数(修正)	1	2	3	4	5
稼働時間 La [h]	24.3	33.3	43.9	63.6	83.4

Step3：理論寿命時間に対する稼働時間の発生割合分布

F (割合) [%]	20	40	60	80	100
La / Lo	1.61	2.20	2.90	4.20	5.51

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、基油のみ、基油に従来品（SOD-1/COA-Plus）と新還元添加剤（SOD-1PN）を各々10vol%添加した場合の3条件で実施した。各実験結果を図6と図7に示す。これらはワイブル線図で、すべての実験を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_o の無次元比を横軸とする発生割合分布を表し、対数グラフで表現したものである。

基油の5W-30とVG320に新添加剤を10vol%添加した結果、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。

エンジン油（5W-30）の基油に対する従来品を加えた合成油としては図6に示すように稼働時間が1.08倍延長し、新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）の基油に対する従来品を加えた合成油としては図

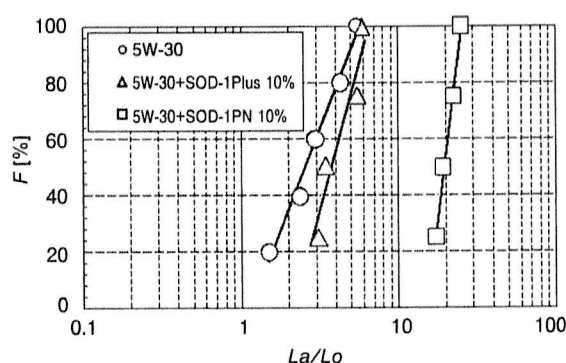


図6 5W-30のワイブル線図結果

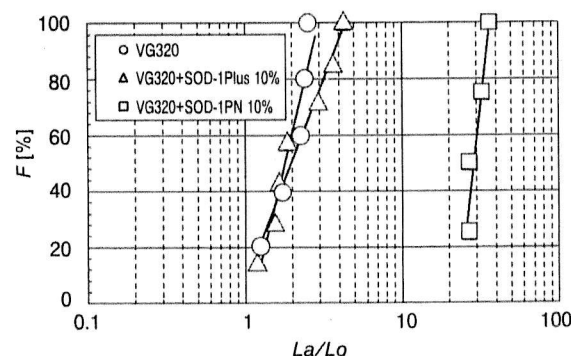


図7 VG320のワイブル線図結果

7に示すように稼働時間が1.69倍延長し、新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倍とさらに延長した。

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、逆に寿命延長を表した。上述の二つの事実から、新添加剤を添加することで寿命の大幅な延長が期待できることを実証した。

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）が起動した時点を軸受損傷の限度とした。表6に本実験の損傷形態と割合を示す。

損傷箇所としては外輪が最も多く、次いで内輪、転動体の順であることが分かる。図8に損傷の一例としてVG320 + SOD-1PNの寿命試験時に内輪に発生した $1.58 \times 2.27\text{mm}$ のフレーキング損傷を示す⁴⁾。

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観測の方法

前項で示したように新添加剤の寿命性能の延長が認められたことから、新添加剤のトライボロジカルなメカニズムについて接触面における流動状態として図9に示す観測装置⁶⁾を用いて顕微鏡により観測した。

表6 損傷の状況（基油：5W-30, VG320）

基油	5W-30			VG320		
添加剤	Non	SOD-1	SOD-1PN	Non	SOD-1	SOD-1PN
実験回数	5	4	4	5	7	4
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	25.0
損傷なし	40.0	0.0	50.0	0.0	0.0	75.0

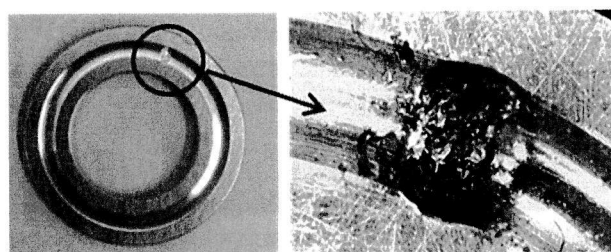


図8 外輪側の欠陥部分と拡大写真

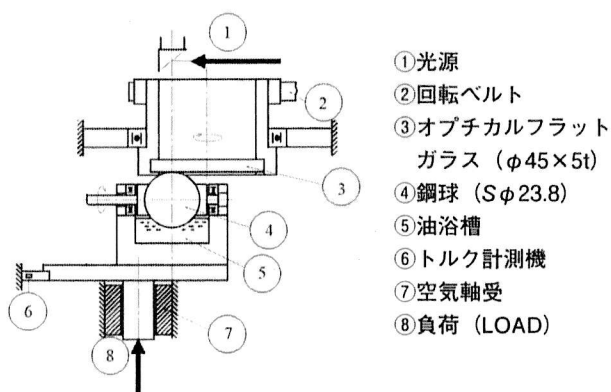


図9 接触油膜観測装置

本装置は光学ガラス下面に転動体となる直径23.8mm鋼球と油浴槽を設置し、そこに光源を当てると顕微鏡では図10のように縞模様を現す。その静止時の同心円形の接触面から、鋼球に回転を与えることにより流れの入り口側に開いた形の馬蹄形を示す接触面に変化し、油膜を示す縞次数を数えることにより油膜厚さを求める。

4.2 観測結果

実験では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10vol%添加し、それぞれの試験油温40℃において比較観察した。図10に観測写真を示す。また周速を変化させながら油膜厚さを測定し、油膜厚さを無次元膜厚で評価した。その結果を図11と図12に示す。学術的な詳細は省略し、傾向を紹介する。油膜厚さが大きいと良好な潤滑状態であるとみなす。座標の縦軸が無次元膜厚で、横軸はHamrock-Dowson^{7,8)}

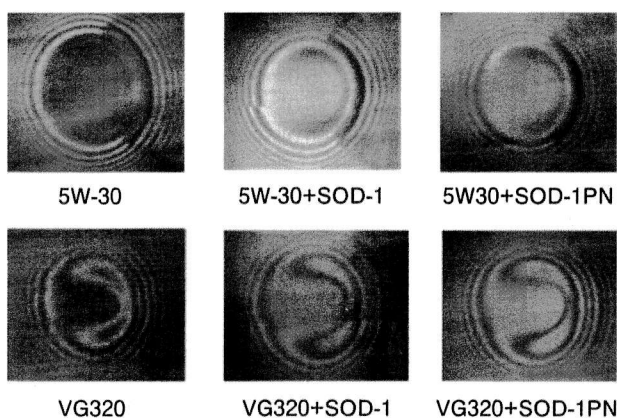


図10 回転状態の油膜厚さ (40℃)

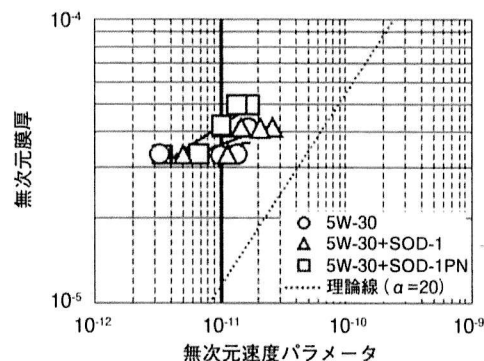


図11 無次元膜厚の評価 (5W-30)

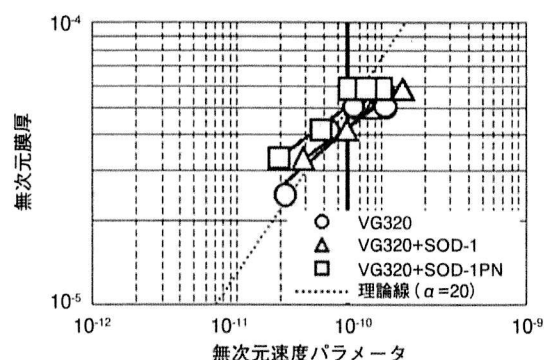


図12 無次元膜厚の評価 (VG320)

の無次元速度パラメータである。

エンジン油 (5W-30) における無次元膜厚は図11に示すように、無次元速度パラメータ 1.01×10^{-11} において基油に対して従来品を添加した場合1.17倍、新添加剤の場合1.32倍を示した。

ギア油 (VG320) における無次元膜厚は図12に示すように、無次元速度パラメータ 5.80×10^{-11} において基油に対して従来品を添加した場合1.10倍、新添加剤の場合1.30倍を示した。

エンジン油 (5W-30)、ギア油 (VG320) とも新添加剤の油膜が厚いことを示した。特に、ギア油に関しては新添加剤を添加したことによる粘度低下が起きているにもかかわらず、有効な油膜厚さが向上していることが分かる。したがって、新添加剤は寿命延長に顕著な効果を示していることが推察される。

5. 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、油膜形成状況に関して絞って紹介してきた。設備信

頼性を論じる上で大切な項目であるが、経済性を追求する上でさらに省エネルギーの効果について興味があるのは当然である。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ーの動力の変化は、まさしく電力量の変化であることから実例を紹介する。

仕様としては、寿命試験機は定格動力0.75kWのモーターを使用している。新添加剤は省エネルギー化を目指して低粘度化を達成した製品であり、その効果についても比較する。

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、ワイブル線図上の $La/Lo=4.0$ に相当する箇所での削減率を求めたものを表7に示す。

各々の基油に対する軸受寿命試験機の消費電力量の削減率は、エンジン油（5W-30）に従来品を添加した場合で3.9%の削減、新添加剤の場合で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は5.1%の削減、新添加剤は6.1%の削減を確認した。本寿命試験機は温度環境、稼働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により従来品以上の性能を有し、かつ、容易に省エネルギー効果の可能性を示している。

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根幹となる要因であることを記憶に留めておきたい。

おわりに

新還元添加剤は、自動車、二輪車、船舶や農業用トラクターのエンジン等の内部清浄化、オイル消費や白煙、青煙、黒煙対策、

ATの滑り、MTギアの異音発生、変速ショック、ジャダー発生などの潤滑油劣化やスラッジ発生に起因するトラブルにおいて多くの改善実績を有する。これらに加えて、洗浄作用、油性向上や耐摩耗性などに関して効果を発揮させ、特に洗浄作用においては摩擦摺動面を初期の摺動面に還元することによって、トライボロジー性能を向上させることを目標としている。また、従来のパーツ個別対応の添加剤に見られる不具合の応急処置的なポジショニングから、一歩進んで産業機器に初期段階で添加を行うことにより、予防保全と機器のロングライフ化ならびに製造コスト削減に貢献可能と考えられる。よって、今後も新還元添加剤メカニズムのさらなる解明に努力していきたい。

<参考文献>

- 1) 里永憲昭, 渡邊孝司, 竹川秀男, 古谷孝夫: 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の寿命延長による経済効果, 潤滑経済, 2018年1月号, No.633 (2018) p.28-33
- 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 (2017) p.5
- 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, No.3 (2016) p.103-109
- 4) 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 (2017) p.37-41
- 5) Noriaki Satonaga, Takashi Watanabe: Effects on Tribology Performance of a Reducing Additive for Automobile Lubricant, SAE-2015-01-2047 (2015)
- 6) 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, Vol.56, No.4 (2013) p.561-571
- 7) 杉村丈一: EHL油膜計算式, トライボロジスト, Vol.49, No.10 (2004) p.51-52
- 8) 兼田植宏: 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)

表7 消費電力量の削減状況 ($La/Lo=4.0$)

基油 添加剤	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