

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的効果

崇城大学 大学院
工学研究科 機械工学専攻 教授

里永 憲昭

有限会社D1ケミカル
最高顧問

渡邊 孝司

有限会社D1ケミカル
営業部長兼技術部長

竹川 秀男*1

株式会社大川技研
営業主任

古谷 孝夫*2

■著者連絡先

*1 【SOD-1Plus問合せ先】

〒812-0897 福岡市博多区半道橋1-3-45

TEL 092-292-4439

E-mail takegawa@d1-chemical.com

*2 【COA-Plus問合せ先】

〒870-0106 大分県大分市大字鶴崎1810-1

TEL 097-523-3888

E-mail koya_takao@ookawagiken.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、機械設備を最高の状態に維持・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^{1~5)}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いる。

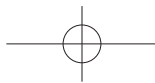
自動車用添加剤（SOD-1Plus）および産業機械用添加剤（COA-Plus）はエンジン、トランスミッション、デファレンシャルギヤな

どの自動車や産業用機械の潤滑、摩耗、摩擦性能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の還元添加剤である。この「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実用試験等により確認したことと、さらに今後の動向について紹介する。

1. 還元添加剤

1.1 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ヤ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はフラッシング洗浄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洗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。還元添加剤はPOE、



■特集 自動車用潤滑油の規格と開発動向

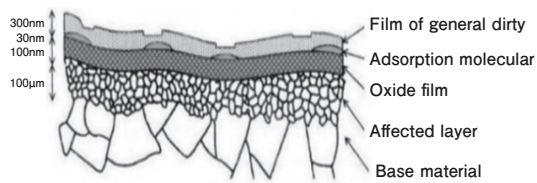


図1 固体表面の想定メカニズム

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り、新還元添加剤の標準的な添加率はエンジン、手動変速機、パワーステアリングオイルとギヤオイルには10 vol%，自動変速機オイルは7 vol%である。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，酸化膜を形成する以前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を特色とする。

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，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を改善することである。そこで，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，分散性や生分解性など多くの特長を有する。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。

この対策方法により膨潤，軟化性の向上などの良好な特性を得ている。

1.2 新還元添加剤と参考添加剤A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

新還元添加剤の動粘度と粘度指数の性状を表1に示す。また，基油をエンジンオイル（5W-30），ギヤオイル（VG320）としたときに添加剤を加えたときの性状の変化と粘度の

表1 新還元添加剤（SOD-1/COA-Plus）と参考添加剤Aの性状

		新還元添加剤 SOD-1	参考添加剤 A
動粘度	40℃ mm ² /s	610.0	111
	100℃ mm ² /s	92.4	12.3
粘度指数		243	102

表2 基油に新還元添加剤と参考添加剤Aを添加したときの性状（5W-30）

基油	5W-30（エンジンオイル）				
	添加なし	SOD-1 (10vol%)	粘度 上昇率 (%)	参考 添加剤 A (10vol%)	粘度 上昇率 (%)
動粘度	mm ² /s	mm ² /s		mm ² /s	
40℃	60.4	77.4	28.4	64.6	7.0
100℃	11.6	16.4	41.3	11.6	0.0
粘度指数	191	229	158	148	—

表3 基油に新還元添加剤と参考添加剤Aを添加したときの性状（VG320）

基油	VG320（ギヤオイル）				
	添加なし	SOD-1 (10vol%)	粘度 上昇率 (%)	参考 添加剤 A (10vol%)	粘度 上昇率 (%)
動粘度	mm ² /s	mm ² /s		mm ² /s	
40℃	324	334	3.0	268	-17.2
100℃	23.9	33.2	38.9	22.2	-7.1
粘度指数	94	140	—	100	—

上昇率を表2，表3に示す。新還元添加剤との比較用の添加剤として参考添加剤Aの性状と変化についても表1～3に示す。

2. 新還元添加剤を用いた実用例

2.1 エンジンオイルによるシェル四球摩耗試験における新還元添加剤の影響

某自動車メーカーの純正オイル5W-30（新油）を用いて新還元添加剤によるシェル四球摩耗試験の摩擦，摩耗の影響を測定した。試験方法は回転数1,200 rpm，負荷400 N，温度75℃，時間60 minで実施した結果，図2に示すように添加剤なしの摩耗痕径は0.46 mmで，添加剤ありは0.33 mmと新還元添加剤の添加が28.3%の減少率を示し，これらの数値から新還元添加剤が摩擦，摩耗に対して有効な特性があり，トライボロジー性能の改善効果を示している。

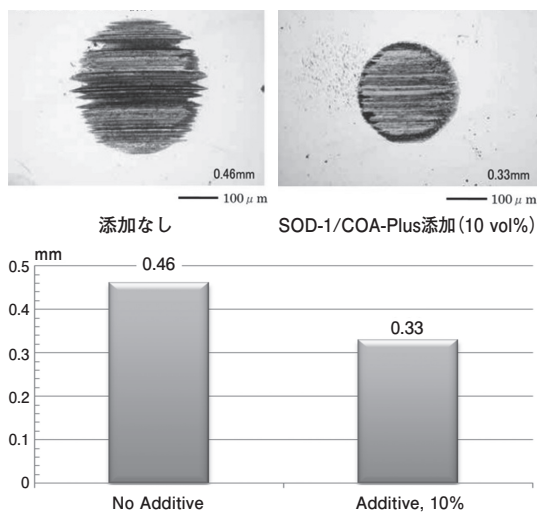
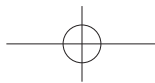
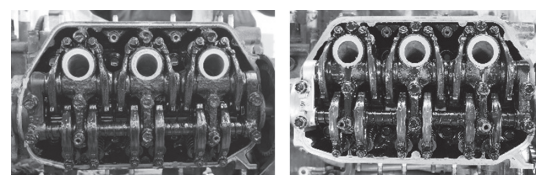


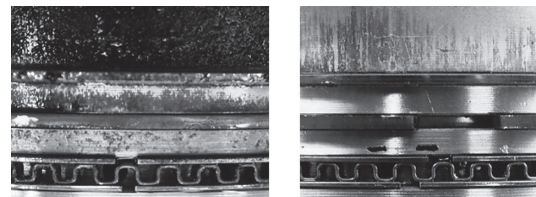
図2 シェル四球摩耗試験機結果 (5W-30)

2.2 新還元添加剤の添加によるガソリンエンジンの内部洗浄の効果

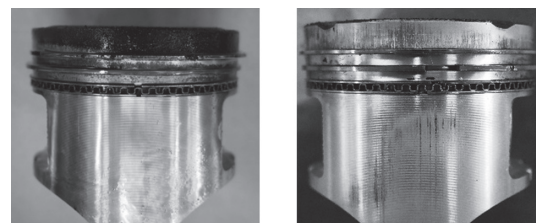
中古軽自動車の車検整備後、純正エンジンオイルに交換して約1,000 km走行後にエンジンを分解して内部点検をした。その後、エンジンを組み立てて新還元添加剤を10 vol%添加して平均50 km/hで10,121 km走行後に開放点検をした。その結果、新還元添加剤の添加後は各所に清浄効果が現れており、特にシリンダボディのオイル通路孔に蓄積していた閉塞気味のヘドロ状のスラッジがほぼ清浄、除去されていた点は注目すべき効果であった。新還元添加剤の添加前後のシリンダヘッド上面内部とピストン側面の比較を図3に示す。シリンダヘッド上面内部はカムシャフトやカム駆動部分の表面に黒く固着していたスラッジ、カーボンのコンタミ類が分解、清浄されて金属面が現れているのが分かる。ピストンについては、図3に示す側面写真からクラウン部はもとよりトップランドのスラッジ類が著しく分解、清浄され、1stと2ndピストンリングの固着解放による復元とオイルリングの清浄が認められる。さらに、ピストンリングとクラウン部を試験前とを比較すると、清浄の状況がより明確である。



試験前 10,121km 走行後
シリンダーヘッドのカムシャフト部



試験前 10,121km 走行後
ピストンリングの側面拡大写真



試験前 10,121km 走行後
ピストンの側面部写真

図3 カムシャフト部とピストンリングにおける新還元添加剤の効果

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

これまで自動車のエンジンとトランスミッション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。まず、実装置における事例を用いるにはまだ事象が少なく信頼性も確立できていないことから、実験室で実施している事例を紹介する。

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35 mm, 内径20 mm, 高さ10 mm, 玉径5.56 mm) を用い、軸受の面圧

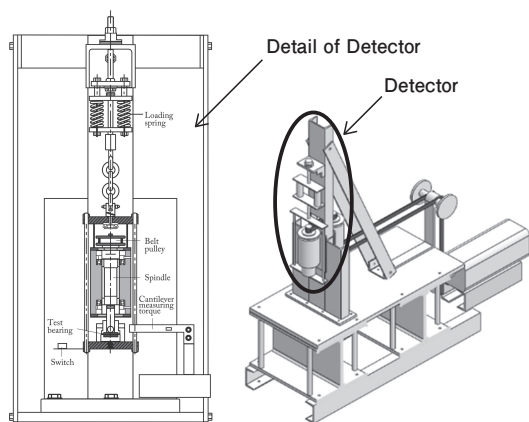
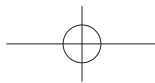


図4 スラスト玉軸受の寿命試験機図

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1,000 rpm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。この条件下での理論定格寿命は11.38 h、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、モータ電源が停止するように安全管理に配慮した。⁶⁾

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5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 L_a 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

■特集 自動車用潤滑油の規格と開発動向

ときに実験回数の割合を縦軸に示す。

Step3：そのときの稼働時間 L_a と理論寿命時間 L_o 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 L_o は11.38 [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5の○である。

Step1：実験データの整理（図5の○を例とする）

実験回数	1	2	3	4	5
稼働時間 L_a [h]	33.5	62.7	18.3	25.0	47.8

Step2：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 L_a [h]	18.3	25.0	33.5	47.8	62.7

Step3：理論寿命時間に対する稼働時間の発生割合分布

$F(\text{割合}) [\%]$	20	40	60	80	100
L_a / L_o	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、両基油のみと両基油に添加剤SOD-1/COA-Plusを10%添加したとき、VG320に参考添加剤Aを10%添加したときの合計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、すべての実験を100%と考えたとき、累積破損率 $F\%$ を縦軸に、実際の運転時間 L_a と理論寿命時間 L_o 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11.38 h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と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

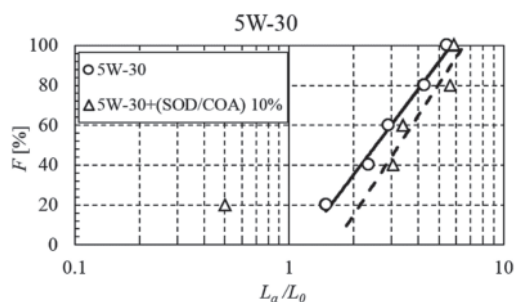
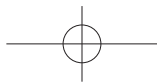


図5 5W-30のワイブル線図結果

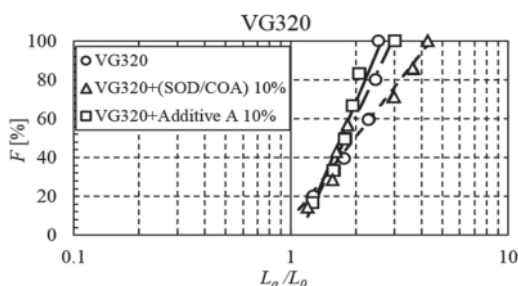


図6 VG320のワイブル線図結果

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を加えたときは、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。

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4に5W-30とVG320に新還元添加剤SOD-1/COA-Plusと参考添加剤Aを用いた実験の損傷形態と割合を示す。

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。1.63×2.08 mmの大きさで深さ0.13 mmの傷が確認された。

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

表4 損傷の状況（基油：5W-30, VG320）

基油	5W-30		VG320		
添加剤	Non	SOD-1	Non	SOD-1	Add.A
実験回数	5	5	5	7	6
損傷の割合	%	%	%	%	%
外輪側	40.0	60.0	60.0	57.0	67.0
内輪側	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

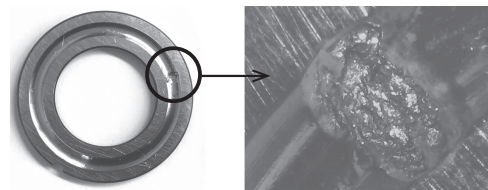


図7 外輪側の欠陥部分と拡大写真

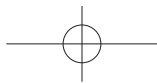
いても同一の操作条件で行うことで、潤滑油の性能に特化した評価が可能になると考える。

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。この件については今後の研究を通して取り組む予定である。

4. 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、経済性を追求する上では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の動力の変化は、まさしく電気量の変化であることから実例を紹介する。また、産業用の生産用実機（減速機）に新還元添加剤を添加した実例についても、消費電力量の変化を紹介して省エネルギー性能に関する実績を紹介する。

仕様としては、寿命試験機は定格動力0.75 kWのモータを使用し、生産用実機は冷却塔ファンの減速機（定格動力22 kW、減速比1/5.09）にモータを使用している。生産用実機の減速機は基油VG320に新還元添加剤の添加率を10 vol%とした。



■特集 自動車用潤滑油の規格と開発動向

表5 消費電力量の削減状況 ($L_a / L_o = 4.0$)

基油	5W-30	VG-320	
	寿命試験機	寿命試験機	生産用実機 (減速機)
消費電力 SOD-1 添加油 (kW) 基油 (kW)	96.1%	94.9%	98.0%
削減率 %	3.9	5.1	2.0

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 $L_a / L_o = 4.0$ に相当する箇所での削減率を求めたものを表5に示す。

エンジン油である5W-30に関しては基油に対する合成油の消費電力量の割合として、寿命試験機で96.1%となり3.9%の削減を確認した。また、ギヤ油であるVG-320に関しては基油に対する合成油の消費電力量の割合として寿命試験機で94.9%となり5.1%の削減、そして同様な視点として生産用実機(減速機)で98%となり2.0%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、この事実を言い換えれば、新還元添加剤(SOD-1Plus/COA-Plus)を添加することにより簡単に省エネルギーを得られるという期待が持てることを示している。

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キー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SOD-1Plus/COA-Plusは、自動車、二輪、船舶整備業界において、オイル消費、白煙、異音低減、酸化物質(スラッジ)洗浄、ATの軽い滑り、変速ショック、ジャダー、MTのギヤ入り、デフの異音等、様々なトラブルについて摩耗と汚れ(酸化物質)の蓄積に着目した改善の実績が多数ある。耐

摩耗防止性能、洗浄性能に優秀な性能を有し、このことは摩耗から機器を守り、汚れを分解洗浄することにより機器本来の性能に戻す特徴を示すものである。これまでの応急処置的な延命用添加剤の位置づけから、予防保全への期待が大きい。さらに寿命延長の観点から産業装置の分野にも展開することにより、設備の予防保全を推進し設備の信頼性向上に加えて経費節減にも確実に貢献するものである。省エネルギーとしても添加による効果が確認されていることから経済性としても有効である。本添加剤のメカニズムの更なる解明は、自動車のみならず工業界の未来を拓くことができることを期待している。

<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自動車と産業機械用における合成油寿命延長の考察, 平成28年度日本機械学会第15回評価・診断に関するシンポジウム論文, No.113, Paper, pp.57-61 (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, No.3, pp.103-109 (2016)
- 4) 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)
- 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, 56, 4 (2013) 561-571.