

電気的接触抵抗測定法(ECR)を用いた 損傷メカニズムに関する傾向監視

○河野裕典(崇城大院)^{*1} , 里永憲昭^{*1} , 竹田雄祐^{*1} , 渡邊孝司^{*2} , 園田智之^{*2}

Trend Monitoring on Bearing Damage Mechanism

Using Measurement for Electrical Contact Resistance

Hironori KAWANO^{*1}, Noriaki SATONAGA^{*1}, Yuusuke TAKEDA¹,
Takashi WATANABE^{*2}, Tomoyuki SONODA^{*2}

^{*1} 崇城大学 Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan

^{*2}(有)D1ケミカル D1 Chemical Co., Ltd., Japan

Abstract 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鉛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。また、地球環境の負荷低減や温暖化抑制などの要求に対し、機械損失低減を達成するため添加剤の低粘度化を行っている。本論文では合成潤滑油のトライボロジー性能を軸受寿命評価試験等を行うことで検証するとともに、電気的接触抵抗測定法(Measurement for Electrical Contact Resistance)を用いて基準油と合成潤滑油の油膜形成状況を比較した。同時に軸受寿命評価試験機に取り付けた加速度センサを用いて、ブレーキングを生じた際の加速度変化の過程を観測し、電気的接触抵抗測定法との相関関係を評価することで油膜形成の過程を調査した。

Key Words : 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

1. 緒言

近年、地球環境の負荷低減や温暖化抑制のために自動車や産業機械の省エネルギー化、エンジンの高効率化などが進められている。特に自動車においてはエンジンの機械損失低減などを目的とした潤滑油の低粘度化が進んでいる。一方で、摺動部の寿命延長、高い耐磨耗性を持った潤滑油が求められている。

これらの要求に答えるため、ポリオールエステル系合成潤滑油が注目されている。著者らは、エンジンや産業機械の潤滑、耐摩耗性能などのトライボロジー性能を改善するため、独自に開発した新還元添加剤(SOD-1PN、以下、新添加剤と称す)について究明してきた。

新添加剤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)、二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いる。これらは粘度指数が230以上、低温性能は-45~-20°C、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。そのため、長寿命で鉛油及

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。軸受寿命評価試験や軸受接触面における流動状態の観測により、新添加剤の成分がトライボロジー性能に与える効果を検証してきたが、立証するまでには至っていない。

軸受の損傷原因の一つとしてブレーキングが挙げられる。接触面に局所的なヘルツ圧力を繰り返し受けることによって疲労し、表面が剥離するメカニズムが想定されている。疲労の原因は接触面が境界潤滑状態になることで生じる軸受転送面と転動体の直接接触だと考えられている。新添加剤を使用することにより、接触面が弾性流体潤滑状態になり転送面と転動体の直接接触が低減されることで軸受寿命が延長していると想定している。そこで、電気的接触抵抗法(Measurement for Electrical Contact Resistance、以下、ECRと称す)を用いて油膜形成状態を観測するとともに、スラスト玉軸受寿命評価試験機に取り付けた加速度センサで測定した加速度の変化との相関関係を評価して、油膜形成過程の推察を実施したので、その結果を本報告で紹介する。

2. 新還元添加剤(SOD-1PN)

2.1 新還元添加剤 (SOD-1PN) のコンセプト

新添加剤の設計には 3 つのポイントがある。1 つは耐摩耗性・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こと。2 つは油膜保持力向上に重要な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と。3 つは焼付防止と潤滑膜再生を考慮して、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極圧剤(硫黄、亜鉛)を加えたことである。図 1 に新添加剤の仮説図を示す。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。上述した油膜保持力向上、潤滑膜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。新添加剤の化学的物性を表 1 に示す。

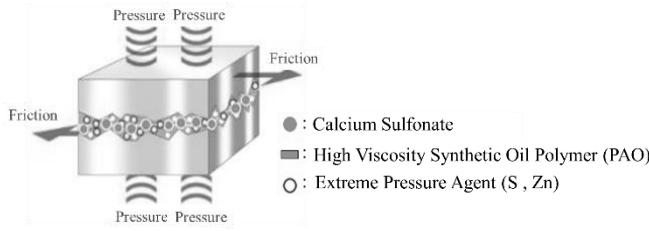


Fig.1 Components of SOD-1PN

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	-47.5
Flash Point (PM)	°C	232
Increased Oxidative	mgKOH/g	3.68

2.2 新添加剤の添加率に対する潤滑油の粘度変化

新添加剤はエンジン油 (5W-30)、ギア油 (VG320) に10 vol %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。

Table 2 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 10 vol%			
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	10.7
Viscosity Index	157	162	170	173	176

VG320	Base Oil	Base Oil (Gear Oil) +SOD-1PN 10 vol%			
		0	3	5	7
Addition Rate vol%		0	3	5	7
Kinematic Viscosity 40°C mm ² /s	324	317	308	298	288
100°C mm ² /s	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9
Viscosity Index	94	96	98	101	103

3. 新添加剤を用いた軸受寿命評価試験

3.1 軸受寿命評価の方法

試験機は図 2 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 1000 rpm 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損による振動、また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。

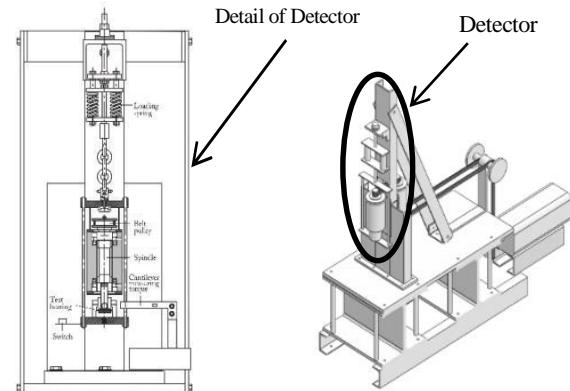


Fig.2 Detector for Evaluating Fatigue Life of Thrust Ball Bearing

3.2 軸受寿命評価試験の結果

本実験はエンジンオイル(5W-30)とギアオイル(VG320)を基準油とし、基準油のみと基準油に新添加剤を 10 vol % 添加したときの計 2 つのパターンで実施した。各実験結果を図 3 と図 4 に示す。これらの図はワイブル線図^[4]である。

基準油のエンジンオイル(5W-30)とギアオイル(VG320)に新添加剤を 10 vol % 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) に新添加剤を添加した場合は図

6に示すように4.66倍延長した。ギア油(VG320)に新添加剤を添加した場合では14.5倍と延長した。このことから、新添加剤は顕著な寿命延長効果があることを確認した。

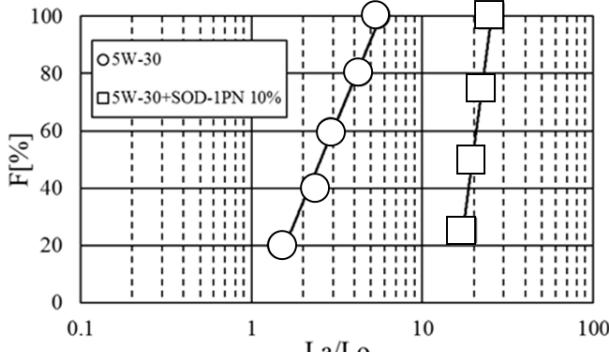


Fig. 3 Weibull Diagram of 5W-30

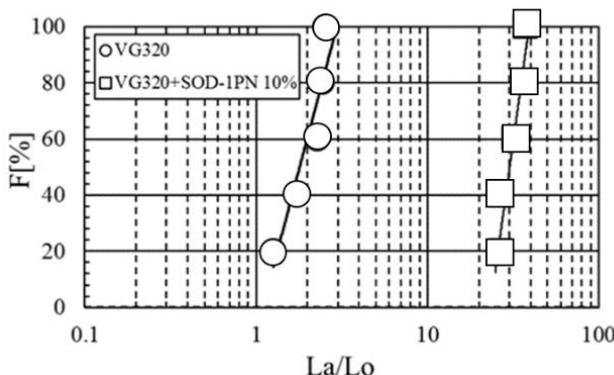


Fig. 4 Weibull Diagram of VG320

4. 電気的接触抵抗法を用いた油膜形成状況の確認

4.1 電気的接触抵抗法について

軸受は内輪や外輪の転走面を転動体が荷重を受けて転がり接触する構造から、摩耗や転がり疲労剥離、圧痕、焼付きなどの損傷が発生することがある。その中でも、代表的なものがフレーキングである。フレーキングは軸受転送面と転動体の接触面にヘルツ圧力で接触することで、転動体との接触面に局所的な繰り返しの力が作用し、疲労が蓄積され軸受転送面が剥離する現象を指す。著者らが行うスラスト玉軸受寿命評価試験でもフレーキングや転動体の剥離といった損傷が発生する。そこで、疲労の原因となる接触面での金属同士の接触現象をECRを用いて、金属の接触現象と油膜形成状況を観測するシステムを構築した。図5に回路図を、図6にECRの取付位置を示す。

この回路が示す電圧値で油膜形成状況を確認する。油膜が形成されていないときはスラスト玉軸受に電気が通り抵抗が無限大になるため、電圧は0Vを示す。油膜が形成されているときは転送面と転動体間で油膜が形成され抵抗が無限大ではなくなるため、電圧値は0より大きくなる。

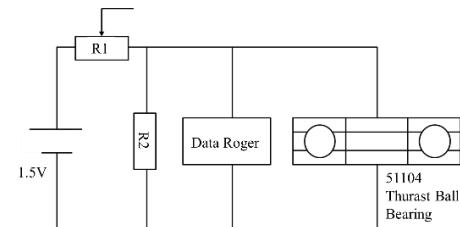


Fig. 5 Circuit Diagram of Measurement for Electrical Contact Resistance (ECR)

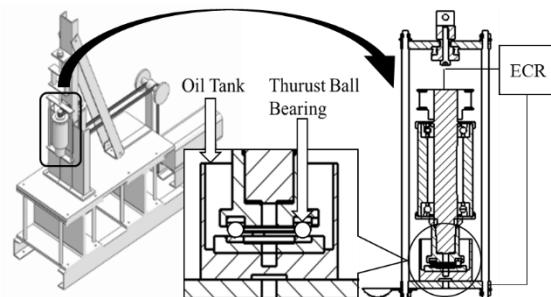


Fig. 6 Mounting Position of Measurement for Electrical Contact Resistance

4.2 軸受転送面と転動体間の油膜形成状況

ECRを用いて、油膜形成状況を観測するにあたり、軸受転送面と転動体間でどのように油膜が形成されていくのか推察した。図7の軸受が稼動してからフレーキングを生じるまでの油膜形成状態を図示したものと、図8のストライベック曲線を用いて油膜形成過程を説明する。

図7の①は稼動開始直後の軸受転送面と転動体間の接触状況を示している。最初は軸受転送面の表面粗さが大きく、油膜が安定して形成されない状態である。軸受転送面と転動体の直接接触が頻繁に繰返されることから、図8の境界潤滑領域にあると考えられる。図7の②は軸受転送面と転動体の直接接触が繰返されたことで転送面と転動体が摩耗し表面粗さが小さくなった状態である。この状態では油膜が安定して形成されるようになり、図8の混合潤滑領域にあると考えられる。図7の③は軸受転送面と転動体が直接接触を繰返したことにより、転送面が疲労し表面にフレーキングが発生した状態である。この時、転送面が剥離を生じたことで再び転送面と転動体の直接接触が生じ、図8の境界潤滑状態へと移行する。これがフレーキングを生じた際の油膜形成の一連の流れを想定したものである。

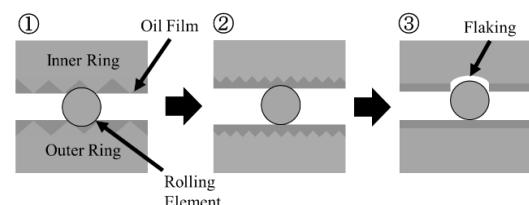


Fig. 7 Oil Film Formation between Bearing Transfer Surface and Rolling Element

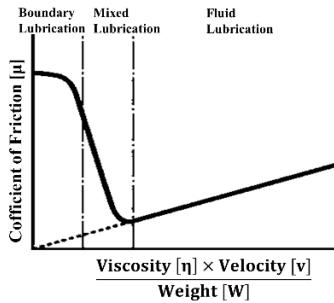


Fig. 8 Stribeck Curve

4.3 ECRを用いたスラスト玉軸受寿命評価試験の状態監視

スラスト玉軸受寿命評価試験を行うとともにECRを用いて油膜形成状態監視を行った。今回はギアオイル (VG320) とギアオイル (VG320)に新添加剤を10 vol% 添加し、試験を行った際に測定した ECR 測定値の変化率をグラフ化したものと図9, 10に示す。グラフの縦軸をECR 測定値の変化率、横軸を時間としている。データは 10s に 1回測定したものを使用し、変化点の比較を容易に行えるように横軸の $4000 \times 10s$ を A, $8000 \times 10s$ を B, $12000 \times 10s$ を Cと区切った。

図9 はギアオイル (VG320) 単体で試験回転数を750rpmに設定し、2018年9月10日から9月12日の期間で 34.8 時間稼動し、軸受転送面にフレーキングを生じ停止するまでの ECR 測定値をグラフ化したものである。稼動開始から A₁ の区間では変化率の変動が大きいことが分かる。前述したように、稼動開始直後は表面粗さが大きいことから軸受転送面と転動体が直接接触を頻繁に繰り返す。このことから安定した油膜形成ができず測定値の変動が大きい波形になったと考えられる。A₁ から C₁ 間では変化率の変動が小さくなっていることが分かる。これは、転送面と転動体間で摩耗が生じ表面粗さが小さくなることで油膜が安定して形成されるようになり、転送面と転動体の直接接触が低減されたことが要因であると考えられる。C₁から停止するまでは急激に変化率が変動していることが分かる。この変動は、前述したフレーキングの特徴と一致する。転送面に微小な剥離が生じ、繰り返しの力が剥離部分に集中することで加速度的に剥離範囲が拡大し、変化率の変動幅が急激に大きくなっていた結果であると推察される。最終的に、許容のトルク力を超えた時点での安全装置が作動し、軸受寿命評価試験を終了した。

図10 はギアオイル (VG320)に新添加剤を10 vol%添加した合成油で試験回転数を750rpmに設定し、2018年10月19日から11月9日の期間で軸受が損傷せずに412.8 時間稼動したものである。図 10の ECR測定値は図 9の稼働時間に合わせて、稼動開始から 34.8 時間後の測定値を抜き出したものをグラフ化している。図9 の稼動開始直後から A₁ 間、図10 の稼動開始から A₂ 間を比較すると同様な変動率の変動を

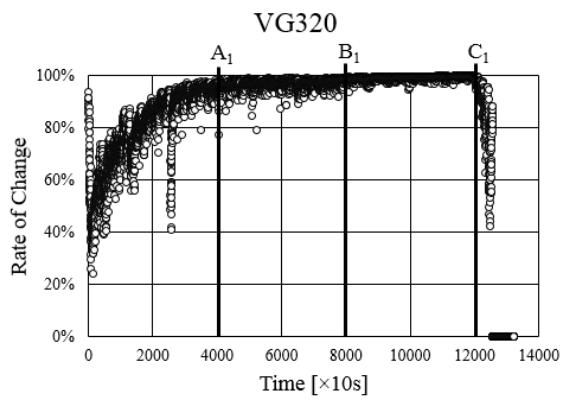


Fig. 9 ECR of VG320

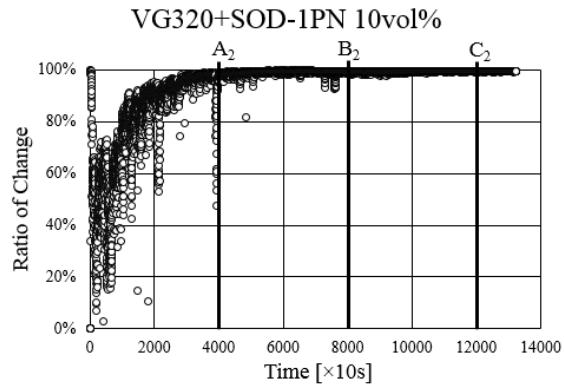


Fig. 10 ECR of VG320+SOD-1PN 10vol%

示していることが確認できる。次に図 9 の B₁ から C₁ 間と図 10 の B₂ から C₂ 間を比較してみると、両者の変化率の変動が小さくなっていることが分かる。図 9 の B₁ から C₁ 間の変化率の最大値と最小値の差は 6.2 % であるのに対し、図 10 の B₂ から C₂ 間の変化率の最大値と最小値の差は 1.8 % である。これは一定の厚さを保った油膜が安定して形成されていることが要因であると考えられる。また、図 10 のグラフは試験機を停止させるまで安定した変化率を保っていた。

ギアオイル (VG320) 単体とギアオイル (VG320) に新添加剤を 10 vol% 添加した合成油の ECR 測定値を比較した結果、新添加剤を添加した合成油の方が軸受転送面と転動体の直接接触が少なくなることが確認できた。また、トレンドとして 34.8 時間以降から停止させるまでの ECR 測定値に大きな変化はなく安定していた。

これらの結果は新添加剤に含まれるスルホン酸炭酸カルシウム、極圧剤、高粘度 PAO などの成分が効果を発揮したことが要因であると考えられる。

5. 加速度センサを用いたスラスト玉軸受寿命評価試験の傾向監視

5.1 加速度センサについて

更なる生産設備の発展を目指す今日において、設備の安全、安心を確保する設備診断技術の重要性はますます高ま

つてきている。異常診断を行う場合、振動や音響信号などを計測し、それらの信号の特徴から設備の状態を推定している。信号の特徴を表すパラメータは特徴パラメータと言い、今回、著者らはスラスト球軸受寿命評価試験の際に測定した加速度データを分析することにより異常信号のデータ収集を行うとともに、ECR 測定値との関連性の有無を評価した。

パラメータは有次元特徴パラメータと呼ばれるものであり、信号の平均値、実行値、ピーク値などのように単位を持ち、信号の振幅の大きさを表すものである。今回加速度センサに、無線タグ TWELITE2525 使用した。これは無線マイコンにコイン電池ホルダと3軸の加速度センサ 25×25mmの小型なワンパッケージにしたものである。スラスト球軸受寿命試験機の油浴槽に取り付け、軸受損傷の起因となる特徴の調査を行った。図 11 に無線タグ TWELITE2525 の仕様を、図12に加速度センサの取り付け位置と三軸方向を示す。

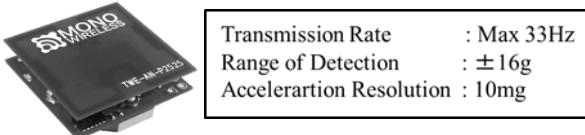


Fig.11 Spec of TWELITE2525

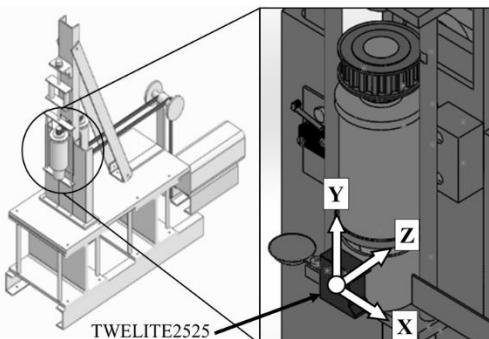


Fig. 12 Spec of TWELITE2525

5. 2 加速度センサによる状態監視

軸受寿命試験時に測定した加速度データを図13、14に示す。図13は図 9 のギアオイル (VG320) 単体の寿命試験で同時に計測していた加速度をグラフ化したものである。図14は図 10 のギアオイルに新添加剤を10 vol % 添加した際に測定した加速度をグラフ化したものである。データはECR を計測した時と同様に、10s に 1 回測定したものを使用し、変化点の比較を容易に行えるように横軸の $4000 \times 10s$ を A、 $8000 \times 10s$ を B、 $12000 \times 10s$ を C と区切り、三軸方向それぞれの加速度をグラフ化している。

図 13 のグラフを見てみると X,Y,Z 軸全てのグラフの C₃ から停止するまでの間に加速度が急激に大きくなっているこ

とが分かる。これはブレーキングを生じた際の加速度を計測したものである。図 9 の ECR 測定値グラフと比較してみると、測定値が急激に変動しているタイミングが同時刻の C₁ から停止するまでの間であった。このことから、ECR 測定値と加速度の相関関係があることを確認することができた。

図 14 のグラフと図 13 のギアオイル(VG320)単体を比較してみると X, Y, Z 軸とともに稼動開始時から B₂, B₃ 間まで加速度の大きさは変わらなかった。しかし、図 14 の X,Y,Z 軸のグラフを見てみると、B₄ から C₄ 間で同時刻に加速度変化が生じていることを確認できる。この変化についてはセンサ周囲に偶発的に力が加わり基準点が移動したものと想定しているが、現時点では詳細を確認できていない。しかしながら、トレンドとして変化した後の加速度値は大きな変化ではなく停止するまで安定していた。

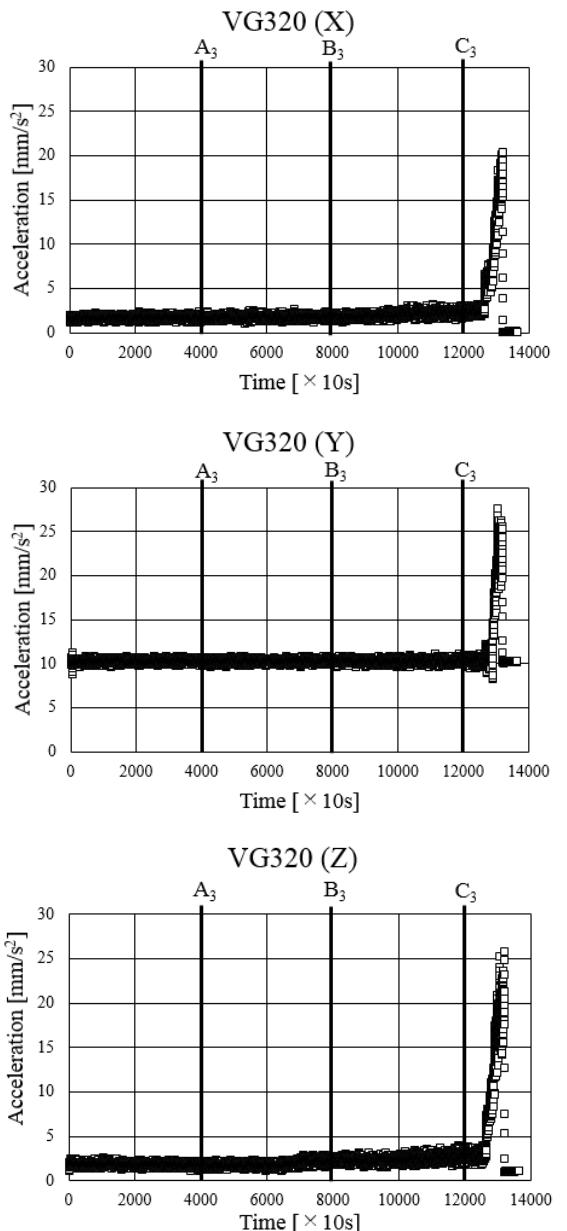


Fig. 13 Acceleration of VG320

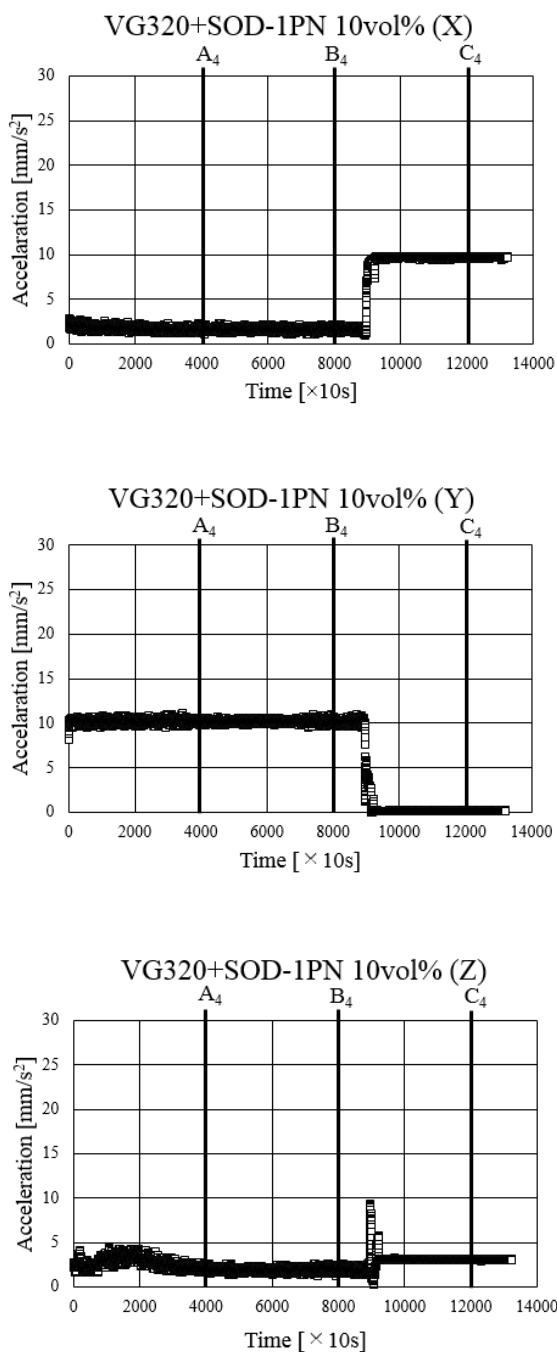


Fig. 14 Acceleration of VG320+SOD-1PN 10vol%

6. 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) スラスト玉軸受寿命評価試験時の油膜形成状況を把握するため、ECRを設置し測定した。これにより、軸受転送面と転動体間での油膜形成状態を確認することができた。

2) ギアオイル (VG320) 単体とギアオイル (VG320) に新添加剤を10 vol%添加した際の寿命試験時にECRを用いて測定し、両者の結果を比較した。その結果、新添加剤を10 vol% 添加した合成油の方が定期のECR測定値の差が 4.4% 小さいことが分かった。これは、ギアオイル (VG320) 単体時よりも軸受転送面と転動体の直接接触が少なくなっていることを表している。このことから、新添加剤を添加したことにより定期して油膜が形成されるようになったと推察される。

3) ギアオイル (VG320) とギアオイル (VG320) に新添加剤を10vol%添加した際の軸受寿命評価試験時に加速度を計測した。ECR 測定値と加速グラフを比較した結果、フレーキングを生じたタイミングで両者ともに値が急激に変化しており、測定結果に相関関係があることを確認できた。このことから、加速度の変化には油膜形成状態が深く関係していると考えられる。

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)
- [2] 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ペ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)
- [3] 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 卷,第 9 号,pp.627-635 (1980)
- [4] 竹田雄祐,里永憲昭,河野裕典,渡邊孝司,園田智之: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,日本設備管理学会誌 第31卷2号 (2019) pp.69-74
- [5] 江本次郎,八若泰弘,三田真也,原田恭平:振動クラウド管理システムの構築,日本設備管理学会,平成30年度春季研究発表大会予稿集, pp81-86(2018)
- [6] 陣山鵬,三苦哲郎,里永憲昭,豊田利夫:時間領域の有・無次元特徴パラメータの統合による回転機械設備の診断法,日本設備管理学会誌, vol.19, No2, pp96-105(2007)