

SOD-1PN が複合動作下における軸受寿命と潤滑状態に与える影響

東 慎之介* 里永 奕昭* 竹田 雄祐* 渡邊 孝司** 園田 智之**

*崇城大学, **(有) D1 ケミカル

Effect of SOD-1PN on Bearing Life and Lubrication Condition under Complex Motion Conditions

Shinnosuke AZUMA*, Noriaki SATONAGA*, Yusuke TAKEDA*,
Takashi WATANABE**, Tomoyuki SONODA**

*Department of Mechanical Engineering, SOJO University Faculty of Engineering, Japan

**D1 Chemical Co., Ltd., Japan

著者らは、これまで潤滑油を構成する成分の違いが、軸受寿命延長に与える影響とそのメカニズムについて検証してきた。生産設備に用いられる回転機械などの故障原因の多くは、偶発的な故障などを除いて、軸受の損傷に起因することが多いと言われている。すなわち、軸受の寿命を延長させることができが機械の寿命延長に大きく寄与することになる。そのためには潤滑油の性能向上が求められている。そこで、潤滑油の性能を評価するためにスラスト玉軸受を試験片とし、潤滑油中に油浴潤滑させ、軸受がフレーキング損傷に至るまでの寿命時間を観測する軸受寿命評価試験機を用いてその検証を進めてきた^[1]。この寿命評価試験機は、軸受の回転方向と回転速度は変化を伴わない等速動作である。しかしながら、性能検証対象の潤滑油は自動車用エンジン油、ギア油が多く、これらは回転速度や回転方向の変化を伴う動作条件が用いられており、そのような動作条件の違いが軸受寿命に与える影響については回転速度や回転方向などをプログラム可能とした往復動作型寿命評価試験機を用いて検証してきた。加えて、現在では複合動作条件下における軸受の潤滑状態を、電気的接触抵抗法(ECR)を用いて観測を行っている。

著者らは、自動車や生産設備の寿命延長、省エネルギー化を目的として開発された、メタロセン触媒を用いたポリαオレフィンを主体とする添加剤SOD-1PNの効果とその寿命改善のメカニズムについても検証してきた。その結果、同一運転条件下において軸受に形成される油膜が増加し、軸受寿命が延長されることを確認している。今回SOD-1PNを添加することで複合動作条件下における潤滑状態と寿命に与える影響について検証したので報告する。

キーワード：エンジン油、ギア油、接触抵抗法、状態監視、潤滑

1. 緒論

本研究室では、実際の産業用機械や自動車などで用いられている軸受のように、回転速度や回転方向に変化を伴う、複雑な動作条件下での寿命評価を行っている。この評価試験には、回転方向などの条件を任意で設定可能なACサーボモータを動力源とした往復動作型寿命試験機を用いている。これまでの実験では、エンジン油5W-30においては正逆反転動作が一定方向等速動作に比べて、実際の稼働時間(L_a)と理論寿命時間(L_o)との比 L_a/L_o の値が小さくなることが確認できている^[2]。また、どのような動作条件が軸受寿命に悪影響を与えるのかということを、動作パターンのパラメータを変更することで分析している。加えて、その設定した正逆動作条件下

における潤滑状態を電気的接触抵抗法(ECR)^{[3], [4]}で観測して検証した結果、軸受の回転動作パターンと油膜の形成は追従していることと、回転停止時に油膜が喪失することを確認し、軸受軌道面に繰り返し負荷が加わることで軸受け寿命の悪化に影響していることを想定した。

これまで著者らは、寿命延長、性能改善を目的として開発検証してきたSOD-1PNをエンジン油5W-30、ギア油VG320に10Vol%添加することで、等速回転動作における軸受寿命評価試験では、大幅な寿命延長効果を確認した^[3]。また、実際の車両に添加して、燃費改善・省エネなどの効果を得た。そこで、実際の軸のように複合動作下においてSOD-1PNを添加することにより潤滑状態はどのような影響を与えるのかの検証を行った。

2. 軸受の潤滑状態についてのメカニズム

軸受が回転することで油膜が形成され、停止すると油膜は接触面から流出して、転動体と外輪は接触する。この過程を図1(①②③の淡々な説明文を記載)で示す。軸受の回転が停止している状態では油膜が形成されず、2面体間の表面粗さ支配による接触が発生する境界潤滑と呼ばれる潤滑状態になる。軸受が回転して転動体と軸受転送面の間に油膜が形成される過程で、混合潤滑から流体潤滑へと潤滑状態が移行し安定的なクッション作用を發揮する現象を示す。正逆反転動作では、この過程が繰り返されるため一定方向等速動作よりも軸受が受ける2面体間の接触による疲労の頻度が多くなり、寿命が短くなると考えられる。

既報告^[2]で紹介したように、正逆動作の中で等速回転時間を短くした動作条件下での測定が、最もサイクル数が多く、過酷であるということが明らかになつたため、本研究ではその動作条件を設定し、軸受寿命時間の計測および潤滑油膜の電気的観測を行つた。

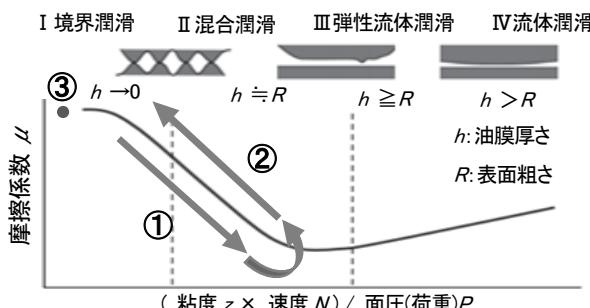


図1 スライベック曲線

3. SOD-1PNについて

SOD-1PNは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耐摩耗性・潤滑性を高め、剪断の影響を受けにくい高粘度のPAO成分を加えることで油膜保持力向上に重要な粘度指数を継続維持させている。さらに、焼付防止と潤滑油膜再生を考慮して、極圧剤（硫黄、亜鉛）を加えることで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されている添加剤である。

機械の始動時にはドライスタートといわれるよう、摺動部の油膜が形成されず境界潤滑となり、高摩擦、高摩耗が生じやすい。油膜保持力向上、潤滑油膜再生効果によって潤滑状態を境界潤滑から流体潤滑に移行することで、摩擦と摩耗を低減させる作用を発揮することをこれまでの研究^[6]で確認している。

4. 軸受寿命試験機の基本構造

4-1 観測理論

スラスト玉軸受寿命評価試験機(往復動作型寿命試験機の名称を統一)を図2に示す。試験片はスラスト玉軸受51104の面圧を高めるために玉数を13個から3個に減じ、圧縮バネによりスラスト荷重4.4kNを与え、軸回転速度は750 rpmとした。

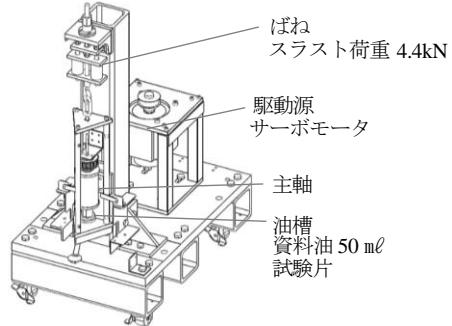


図2 往復動作型寿命試験機

4-2 理論寿命時間に関する理論式

寿命試験機における寿命時間は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式^[4]から定格寿命Lを式(1)で求める。

$$L = \left\{ \left(\frac{Qti}{Qci} \right)^{\frac{10}{3}} + \left(\frac{Qte}{Qce} \right)^{\frac{10}{3}} \right\} \dots \quad (1)$$

Qt_i, Qt_e : 内輪、外輪の基本動定格重量 [N]
 Qc_i, Qc_e : 内輪、外輪の動等価ラジアル荷重 [N]

求めた寿命Lと測定時の回転速度nから、理論寿命時間(L_o)は式(2)となる。

$$L_o = \frac{L \times 10^6}{60 \times n} = 15.14 [h] \text{ (at 750 rpm)} \dots \quad (2)$$

寿命試験機では、理論寿命時間(L_o)と実際の稼働時間(L_a)の比 L_a/L_o で評価する。

4-3 電気的接触抵抗法を用いた油膜形成状態監視

4-3-1 電気的接触抵抗法(ECR)について

軸受は転送面を転動体が荷重を受けて転がり接触する構造から、摩耗や焼付きなどの損傷が発生する。その中で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が繰り返し接触することで、疲労が蓄積され表面が剥離する現象を指す。そこで、金属同士の接触現象と油膜形成状態を図3に示すECR観測回路が示す電圧値で油膜形成状態を確認する。

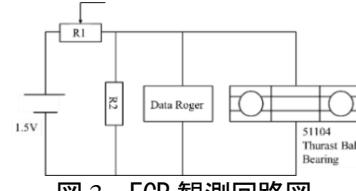


図3 ECR観測回路図

4-3-2 ECR の評価方法について

軸受寿命試験は ECR を用いて油膜の評価を分離度で行った。最大印加電圧に対する測定電圧の比をパーセンテージで表したものと分離度として式(3)で評価している。

$$\text{分離度} = \frac{\text{測定電圧}}{\text{最大印加電圧}} \times 100[\%] \cdots (3)$$

5. 寿命試験の動作条件

今回の実験で設定した動作条件は、既報告^[2]で説明したものの中最も寿命に与える影響が大きかった等速回転時間短縮した条件を採用した。図4と表1の動作条件に示すように最大回転速度を 750rpm とし、0.37sec 間等速で回転させた後に回転方向を反転させている。反転時の加減速時定数は 100ms であり、一時停止時間は 0.5s に設定されている。

破線で示しているものが正逆基本動作であり、等速回転時間を短くすることでサイクル時間も短くなっていることが理解できる。

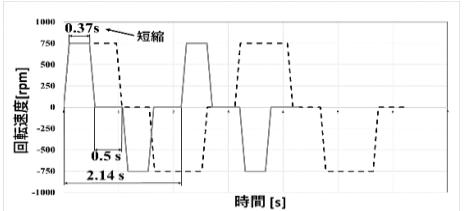


図4 動作条件(等速回転時間短縮パターン)

表1 動作条件一覧表

	回転数 [rpm]	等速回転時間 [s]	一時停止時間 [s]
正逆基本動作	750	0.86	0.5
一時停止時間短縮	750	0.37	0.5

6. 実験結果

6-1 試料油 5W-30 と 5W-30 + SOD-1PN の添加についての正逆反転寿命試験結果

試料油 5W-30 とそれに SOD-1PN を添加した潤滑油を用いた寿命試験の結果を図5の正逆反転寿命試験結果に示す。縦軸は累積破損率、横軸は理論寿命時間(L_o)に対する実稼働時間(L_a)の比(L_a/L_o)である。

往復動作型寿命評価試験機を用いて等速回転時間短縮パターンでの実験を行った。今回の実験において、軸受がフレーキングするまでに寿命試験機の不具合ではなく、寿命試験を完了することができた。それぞれの実験結果のまとめを表2に示すが L_a/L_o の最大値は、5W-30(添加剤無し)が 5.37 であり、5W-30+SOD-1PN が 10 となった。また、それぞれの平均は 5W-30(添加剤無し)が 3.31 であり、5W-30+SOD-1PN が 7.67 となった。

この結果から、SOD-1PN を添加することにより、 L_a/L_o は平均で 132% 増加することが分かった。

6-1節で説明した ECR の波形から、サーボモータの回転速度と分離度の変化が追従していることが読み取れ、油膜が形成されていることが確認できた。

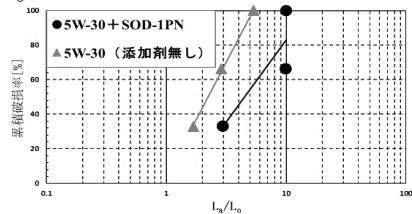


図5 正逆反転寿命試験結果

表2 実験結果まとめ

動作条件	La/Lo 正逆動作	
	添加剤無し	SOD1-PN添加
実験点数 No.1	1.68	2.97
No.2	2.87	10
No.3	5.37	10
平均	3.31	7.67
増加率	—	132%

6-2 試料油 5W-30 と 5W-30+SOD-1PN における ECR 観測結果

正逆動作条件下における軸受軌道面と転動体間に形成される潤滑油膜の ECR 観測結果を図6～図9に示す。ECR の観測波形グラフ内に、同サイクルのサーボモータの回転速度も表示した。

図6からサーボモータ動作時には潤滑油膜が形成されており、停止時には油膜が失われ、動作再開時には再び潤滑油膜が形成されている。このことから、正逆動作条件において、動作切り替え時、一時停止時に潤滑油膜が喪失され、潤滑状態が混合潤滑条件から境界潤滑条件への遷移を繰り返すことが確認できた。その結果、軸受寿命が一定方向等速動作よりも 66.9% 短くなる事を確認した^[2]。

図7に SOD-1PN を 10Vol% 添加した試料油におけるそれぞれの波形を示す。モーターの一時停止時に分離度が 0% に低下することが少なく、油膜を維持し続けていることが読み取れる。図6、7 は添加有、無の違いがあるが寿命試験開始時、軸受表面の馴染みが進んだと考えられる $L_a/L_o=0.13$ の時点の波形を抜き出した。

新品の軸受でも製品の仕様により軌道面の表面粗さが存在し、潤滑油膜では充分にクッション作用は形成されておらず、そのため ECR 観測では、一時停止時の油膜喪失による 2面体間接触の反応が早いという特徴がある。一方、SOD-1PN を添加した際には一時停止時の油膜喪失が見られない。

図8、9はそれぞれ寿命試験において図6、7よりもさらに時間が経過した安定定期($L_a/L_o=5$ 以上)のデータである。無添加の図8に対して SOD-1PN を添加した図9は分離度波形の低下を抑制していることが理解できる。

したがって、SOD-1PN を添加することで軸受の回転停止時でも油膜の喪失を抑制し、転動体と軸受転送面の 2 面体間における接触する時間・回数が短くなったことにより軸受転送面での過大な負担が軽減され、寿命延長に影響を与えたものと推察できる。

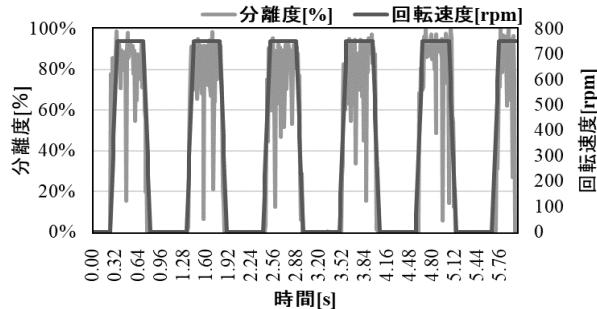


図 6 サーボモータ指令と ECR 波形(添加剤無し)

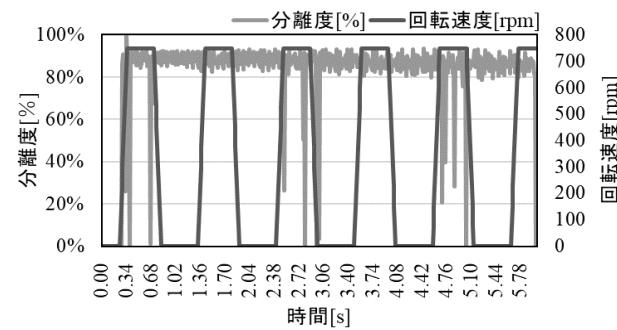


図 7 サーボモータ指令と ECR 波形(添加剤入り)

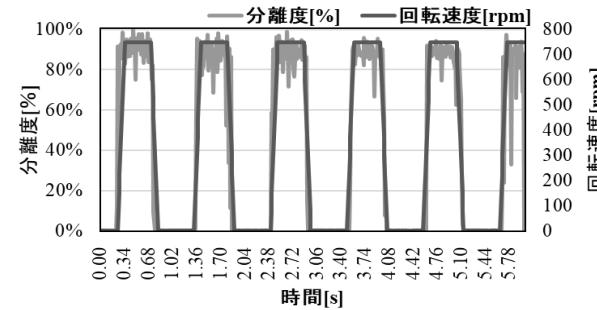


図 8 サーボモータ指令と ECR 波形(添加剤無し)

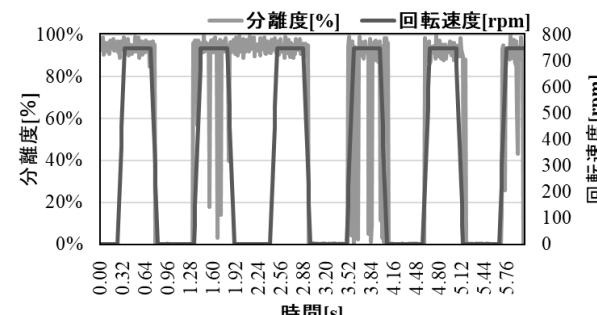


図 9 サーボモータ指令と ECR 波形(添加剤入り)

6. 結論

- 1) 本実験における L_a/L_o の最大値は、5W-30(添加剤無し)が 5.37, 5W-30+SOD-1PN を添加した場合が 10.0 となった。また、それぞれの平均は 5W-30(添加剤無し)が 3.31 であり、5W-30+SOD-1PN が 7.67 となつた。
- 2) L_a/L_o の平均値において、SOD-1PN を添加することで 132% 増加することが確認できた。
- 3) ECR の波形から、早期の波形では SOD-1PN を添加した潤滑油が、添加していないものに比べて油膜が喪失しにくくなっていたことが分かった。
- 4) SOD-1PN を添加することで軸受の回転停止時でも油膜喪失を抑制し、転動体と軸受転送面の 2 面体間での直接接触する時間が短くなつたことにより軸受転送面での過大な負担が軽減され、寿命延長に影響を与えたものと推察される。

参考文献

- [1] 河野裕典, 里永憲昭, 竹田雄祐, 渡邊孝司, 園田智之: 電気的接触抵抗測定法(ECR)を用いた軸受損傷のメカニズムに関する研究, 第 18 回評価・診断に関するシンポジウム, 講演論文集, No19-308, pp. 122-127
- [2] 東慎之介, 里永憲昭, 竹田雄祐, 渡邊孝司, 園田智之: 複合動作が軸受寿命に及ぼす潤滑状態の ECR 觀測, 2022 年度日本設備管理学会春季大会, pp. 77-80
- [3] 竹田雄祐, 里永憲昭, 犬野将矢, 渡邊孝司, 園田智之: 直流電源を用いた電気的接触抵抗法による油膜厚さと油膜形成状態の評価手法, 日本設備管理学会誌. Vol.33, No3, pp. 113-118(2021)
- [4] 村木正芳: 「図解トライボロジー摩擦の化学と潤滑技術」, 日刊工業新聞社, (2007), pp. 91-94
- [5] 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
- [6] 犬野将矢, 里永憲昭, 竹田雄祐, 渡邊孝司, 園田智之: 軸受フレーキング損傷にフラクトグラフィー観察を用いた電気的接触抵抗測定法の状態監視手法に関する考察, pp. 73-78