

複合動作条件が軸受寿命に与える影響と潤滑状態の観測

林 龍明* 竹田雄祐* 里永憲昭* 渡邊孝司** 園田智之**

*崇城大学, ** (有) D1 ケミカル

Development of an Observing Device for Evaluating the Lubrication Condition of Gears
Using the Electrical Contact Resistance method

Ryumei HAYASHI*, Yusuke TAKEDA*, Noriaki SATONAGA*,
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は、偶発的な故障などを除けば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機械の寿命延長に大きく寄与することになり、その一つの方法として潤滑油の性能向上が求められている。著者らは、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て、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、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、基礎的な評価をしてきた。加えて、実際の自動車や産業用機械で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の検証するために、スラスト玉軸受寿命評価試験機の駆動源に AC サーボモータを使用し、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た発展的な評価観測にも取り組んでいる。また、接触電気抵抗法 (Measurement for Electrical Resistance 以下 ECR と称する)^{[2],[3]}を用いることで寿命試験中の軸受潤滑状態と、ひずみゲージを用いた回転摩擦抵抗についても観測したので、本報にて紹介する。

キーワード: エンジン油, 接触抵抗法, 潤滑, 摩擦力

1. 結論

本研究室では潤滑油の性能向上を図るために、等速動作型寿命試験機を用いて一定方向等速動作における寿命試験を行い、軸受けの寿命を測定することで潤滑油の基礎的な性能評価を行ってきた。

さらに、実際の産業用機械や自動車に用いられる軸受を想定して、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を評価するために、産業用ロボットに用いられるサーボモータを動力源とした複合動作型寿命試験機を用いて往復動作による評価をしている。

これまでの実験では、正逆反転動作が一定方向等速動作に比べて、寿命が低下することを確認した^[4]。

そこで、複合動作時の油膜を ECR で測定し、油膜形成状態が軸受間の摩擦に与える影響を観測するために、回転に伴う摩擦抵抗を測定した。

2. 軸受の潤滑状態についてのメカニズム

軸受の動作に伴う潤滑状態に着目すると、一定方向等速動作に対して正逆反転動作の方が、軸受に与える負荷は高くなる。そのような動作条件における潤滑モデルを図 1 に示す。軸受が回転することで油膜が形成される。停止すると油膜が喪失し、転動体と外輪が接触する。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疲労の頻度が多くなり、寿命が短くなったと考えられる^[5]。

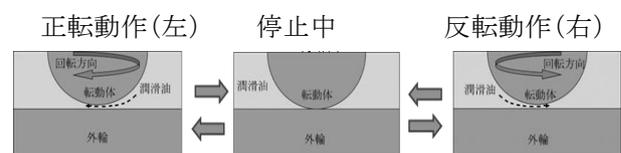


図 1 軸受潤滑状態のモデル

3. 軸受寿命試験機の基本構造

3-1 観測理論

スラスト玉軸受寿命評価試験機を図2に示す。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)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(下輪)を回転させ、内輪(上輪)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、軸回転速度は750rpmとした。軸受の破損による振動、または許容のトルク力を超えた場合には安全装置が作動してモータが停止する。

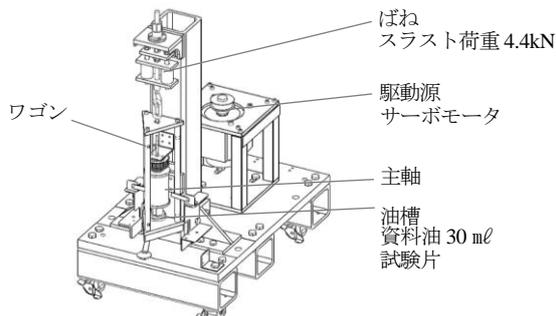


図2 複合動作型寿命試験機外観

3-2 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、寿命と平均回転体荷重との関係式⁶⁾から定格寿命を求める。

$$\text{寿命 } L = \left\{ \left(\frac{Qt_i}{Qc_i} \right)^{\frac{10}{3}} + \left(\frac{Qte}{Qce} \right)^{\frac{10}{3}} \right\} \dots (1)$$

Qt_i, Qte : 内輪及び外輪の基本動定格重量 [N]

Qc_i, Qce : 内輪及び外輪の動等価ラジアル荷重 [N]

求めた寿命 L と実験する際の回転速度 n から、理論寿命時間(L_0)

$$L_0 = \frac{L \times 10^6}{60 \times n} = 15.14 [\text{h}] (\text{at } 750 \text{rpm}) \dots \dots \dots (2)$$

寿命試験機では、理論寿命時間(L_0)と実際の稼働時間 (L_a)の比 L_a/L_0 で評価する。

3-3 電氣的接触抵抗法を用いた油膜形成状態観測

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、摩擦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 ECR で観測した。図3に回路図を示す。この回路が示す電圧値で油膜形成状態を確認する。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ゼロになるため電圧はゼロより大きくなり、油膜が形成されているときは抵抗が無限大になるため電圧値はゼロの値を示す。

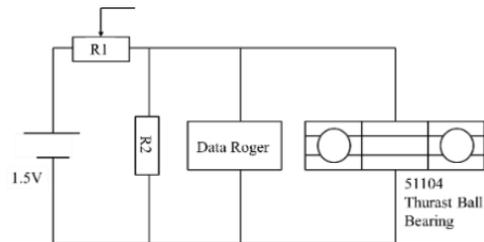


図3 ECR 回路図

この電圧の変化を利用して、最大印加電圧に対する測定電圧の比を百分率で表したものを分離度として潤滑状態を評価する。

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

3-4 摩擦力の観測

3-4-1 ひずみゲージの取り付けについて

寿命試験機は、主軸に上輪が固定されて回転しており、下輪は油槽の底面に設置する。その油槽は固定された主軸の下部に設置し、全体をワゴン上部に接続するバネで吊り上げる構造である。

ワゴンには、一定の自由度を持たせつつ、負荷をかけている。

ここで、軸受(試験片)の軌道面に油膜が形成されて円滑な潤滑状態であれば、ワゴンは大きく振れ廻ることは無い。一方で、油膜が欠損するなどによって潤滑状態が悪化すると、下輪も回転させようとする摩擦抵抗が大きくなって、ワゴンが大きく振れ廻る状態となる。

更に、潤滑状態が悪化してフレーキング損傷に至ると、激しい振れ廻りを起こすことになり、ワゴンに取り付けた安全スイッチの鉄球が落下して試験機が停止する機構である。

すなわち、ワゴンの振れ廻りの量を観測できれば、軸受の回転に生じる摩擦抵抗を求めることが出来る。そこで、ひずみゲージを付けた鉄板を図4に示すように、ワゴンの柱と紐を連結することで振れ具合を観測できる。

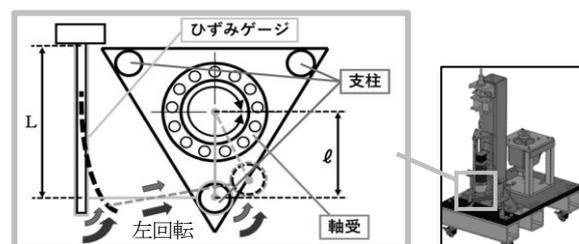


図4 ひずみゲージ取付図

3-4-2 摩擦抵抗の評価について

実験時の軸受には回転方向に対して垂直の試験荷重が 4.41kN 負荷している、その荷重を垂直抗力と考え、摩擦係数はひずみゲージの反応値より式(4)を用いて摩擦抵抗を算出して評価する。

$$\text{摩擦抵抗[N]} = \text{摩擦係数}[\mu] \times \text{垂直抗力[N]} \cdots (4)$$

4. 実験条件

4-1 動作条件

最大回転速度を 750rpm とし、0.86sec 間等で回転させた後に回転方向を反転させている。反転時の加減速度期間は 100ms であり、ドゥエル時間は 0.5s に設定しており、ドゥエル時間とは逆回転させる際の一時停止時間のことであり、完全停止状態になってから 0.5s 停止し逆回転を開始する。動作条件の詳細は表 1 と図 5 に示す。

表 1 動作条件

	回転方向	回転速度	加速度定数	指令値	ドゥエル時間
正逆動作	正逆回転	750rpm	1000ms	5.0×10^7 pulse	0.5s

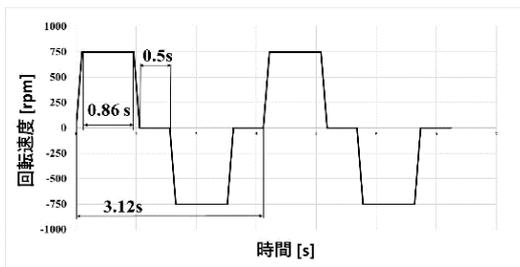


図 5 正逆動作条件

4-2 試料油について

本研究では 5W-30 を基準油として、これまでの研究で一時停止時に油膜の欠損を防いでいると考えられる SOD-1PN を 10% 添加した試料油を使用する。試料油の性状については表 2 に示す。

SOD-1PN とは、エステル系合成潤滑油を主成分とした潤滑油添加剤である。

今回 SOD-1PN を使用するのには、本研究室での過去の研究において SOD-1PN を添加することで油膜の保持と寿命の向上を確認しており、今回の摩擦抵抗の観測と比較のために、基準油の 5W-30 と SOD-1PN を添加した試料油を使用した。

表 2 基準油及び SOD-1PN の性状

	試料油	粘度		粘度指数
		40°C	100°C	
エンジン油	5W-30	57.7	9.85	157
添加剤	SOD-1PN	132.3	19.9	173

5. 実験結果

5-1 分離度の観測結果

基準油 5W-30 と添加剤 SOD-1PN を 10% 添加した試料油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 観測結果を示す。

図 6 と図 7 は運転開始から 5 時間後の波形であり、図 8 は軸受の軌道面と転動体が接触し、軌道面の表面粗さが工場出荷状態から初期摩耗を終えて落ち着いたことで油膜保持した際の波形である(以下なじみ後と称する)。

5W-30 のみの場合(図 6) と SOD-1PN を添加した場合(図 7) を比較すると、5W-30 のみは回転中に分離度が 100% になることは少なく、約 97% であった。SOD-1PN を添加した場合には回転中の分離度は 100% 近傍であった。また、ドゥエル時間の停止中も分離度が 0% に低下せず油膜が保持していることがあった。更に、なじみ後(図 8) では油膜の欠損があまり確認されなかった。これは SOD-1PN の効果で油膜を保持して油膜の欠損を回避しているものと推察する。

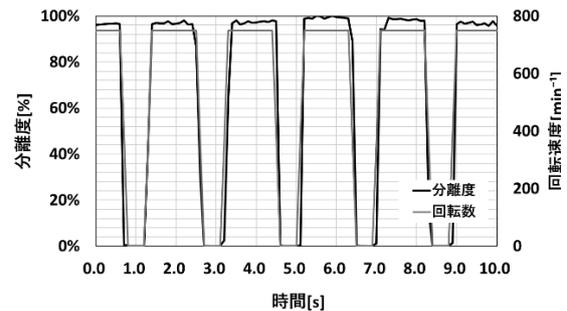


図 6 ECR 観測結果(5W-30)

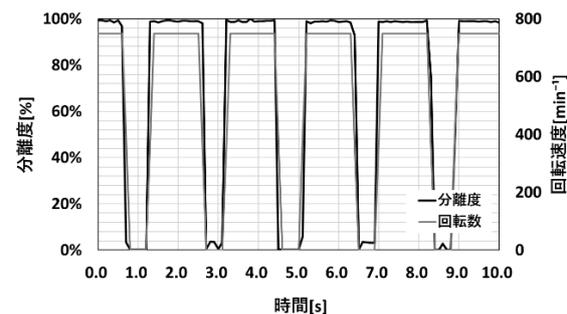


図 7 ECR 観測結果(5W-30 SOD-1PN)

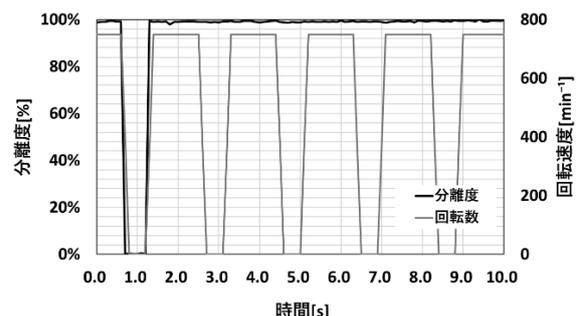


図 8 ECR 観測結果(5W-30 SOD-1PN なじみ後)

5-2 摩擦抵抗の測定結果

基準油 5W-30 と添加剤 SOD-1PN を 10% 添加した試料油における分離度での摩擦抵抗観測結果について示す。摩擦抵抗の観測装置は試作品のため片方向の摩擦抵抗のみ測定しており図 9, 図 10, 図 11 は左回転時 (左) のみの数値で評価している。

5W-30 のみ (図 9) と SOD-1PN を添加した場合 (図 10) を比較すると, SOD-1PN を添加することで摩擦抵抗の最大値が約 0.073N から約 0.045N まで減少しており, 約 39.27%減少している。

更に, SOD-1PN を添加したなじみ後 (図 11) を比較すると, 摩擦抵抗の最大値が約 0.031N となっており 5W-30 と比べると 57.82%減少している。

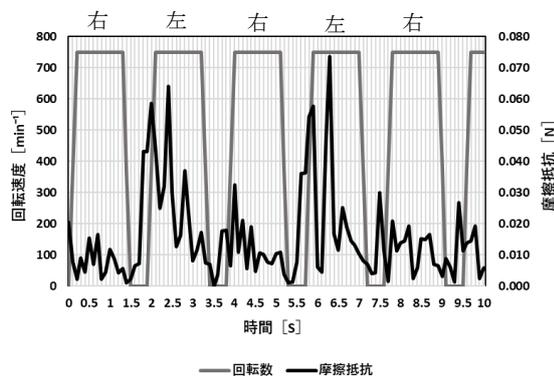


図 9 摩擦抵抗観測結果 (5W-30)

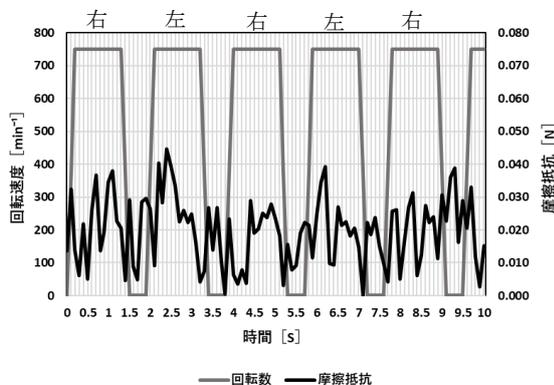


図 10 摩擦抵抗観測結果 (5W-30 SOD-1PN)

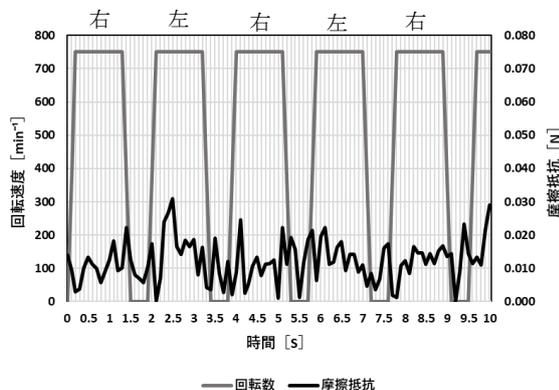


図 11 摩擦抵抗観測結果 (5W-30 SOD-1PN なじみ後)

6. 結論

- 1) 試料油の変化に伴い摩擦抵抗も変化しており, ひずみゲージを使用して摩擦抵抗を観測することができた。
- 2) 5W-30 のみでは回転中の分離度が約 97%であった。それに比べて SOD-1PN を添加した試料油の回転中の分離度は 100%近傍であった。これにより, 5W-30 のみに比べて SOD-1PN を添加した試料油を使用した実験では摩擦抵抗が少なくなったと考えられる。
- 3) SOD-1PN を添加し, 軸受のなじみ後ではドゥエル時間で停止した際も分離度は 100%近傍で留まっていた。これにより回転を停止する際と再開する際の最も摩擦抵抗が大きくなるタイミングで分離度を保持しているため, 全体的にも油膜保持していないときに比べて摩擦抵抗が小さくなる傾向を示した。

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: 電氣的接触抵抗測定法(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, 日本機械学会. pp. 122-127(2019)
- [2] 竹田雄祐, 里永憲昭, 狩野将矢, 渡邊孝司, 園田智之: 直流電源を用いた電氣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)
- [3] 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, pp. 92-94 (2007)
- [4] 狩野将矢, 里永憲昭, 竹田雄祐, 渡邊孝司, 園田智之: 動作条件プログラム型スラスト玉軸受け寿命評価試験機の開発と試験評価方法, 日本設備管理学会. pp.51-54(2021)
- [5] 川内智博, 東力也, 佐藤巧, 和泉直志, 石丸良平, 大津健史: 往復転がり接触における EHL 最小油膜厚さ計算式. 日本設計工学会, 九州支部研究発表講演論文集. pp.19-20(2022)
- [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, pp561-571,56,4(2013)