

## 複合動作が軸受寿命に及ぼす潤滑状態の ECR 観測

東 慎之介\* 里永 憲昭\* 竹田 雄祐\* 渡邊 孝司\*\* 園田 智之\*\*

\*崇城大学, \*\* (有) D1 ケミカル

Operating Conditions Development and Test Evaluation Method of Program Type

Thrust Ball Bearing Life Evaluation Tester

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その検証を進めてきた<sup>[1]</sup>。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、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は殆どされていない。そこで、著者らは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て実験を行った。また、電気的接触抵抗法 (ECR) を用いることで潤滑状態の観測を行った。

**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、軸受の寿命を測定することで潤滑油の性能評価を行っている。

しかし、実際の産業用機械や自動車などで用いられている軸受は、一定方向に回転するものばかりではなく回転速度や回転方向に変化を伴うものもある。そのような、複雑な動作条件下での寿命評価を行うために、回転方向などの条件を任意で設定可能な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往復動作による試験を行った。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、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た。<sup>[2]</sup> そこで、どのような動作条件が軸受寿命に悪影響を与えるのか、動作パターンのパラメータを変更する

ことでということを分析した。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) <sup>[3],[4]</sup> で観測し検証した。

### 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、寿命が短くなると考えられる。過酷な条件を設定するために我々は一時停止時間を短縮した動作パターンと等速回転時間を短縮した動作パターンを検証した。まず、一時停止時間を短くした動作パ

ターンについて、回転方向を変える際に一時停止時間を短縮することにより、短い間隔で正逆回転が行われるため軸受への負担が大きくなるという仮説を立てた。次に等速回転時間を短くした動作パターンについて、1サイクルにかかる時間が短くなることでサイクル回数が増えるため軸受への負担が大きくなると考えた。軸受寿命試験機において正逆動作パターンでは、どのような動作条件下で軸受寿命に与える影響が最も大きくなるかを確認する

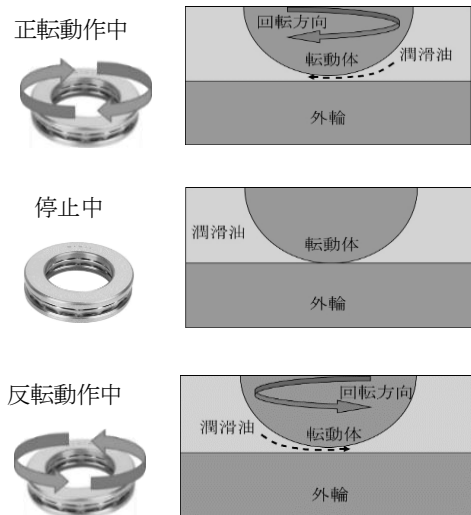


図1 軸受潤滑状態のモデル

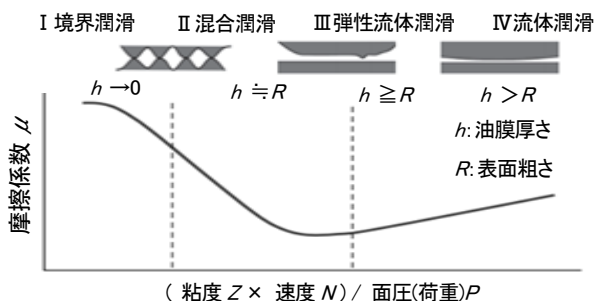


図2 ストライベック曲線

### 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3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、モータが停止する。

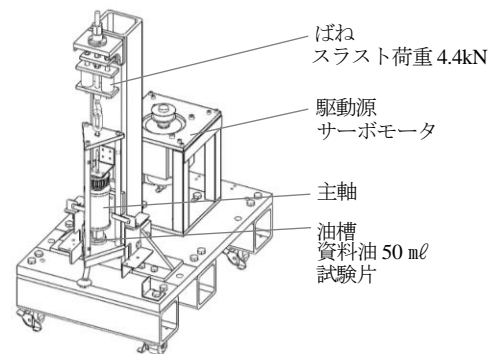


図3 新型寿命試験機外観

#### 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、寿命と平均転動体荷重との関係式<sup>[5]</sup>から定格寿命を求める。

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

$Qt_i, Qte$ : 内輪及び外輪の基本動定格重量 [N]

$Q_{ci}, Q_{ce}$ : 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( $L_o$ )

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

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。

#### 3-3 電気的接触抵抗法を用いた油膜形成状態監視

##### 3-3-1 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4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。

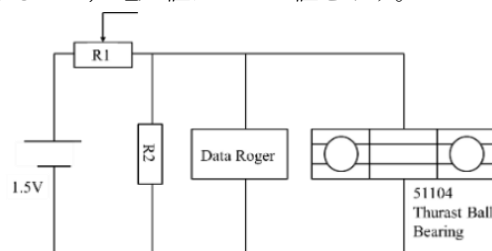


図4 ECR 回路図

### 3-3-2 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百分率で表したものを分離度として評価している。

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

## 4. 寿命試験の動作条件

- ① 最大回転速度を 750rpm とし、0.86sec 間等速で回転させた後に回転方向を反転させている。反転時の加減速度は 100ms であり、一時停止時間は 0.5s に設定されている。この条件を正逆基本動作パターンとする。

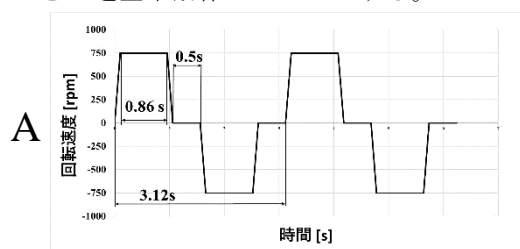


図5 動作条件A(正逆基本動作パターン)

- ② 一時停止時間を短縮したパターンで、最大回転速度を 750rpm とし、0.86sec 間等速で回転させた後に回転方向を反転させている。反転時の加減速度は 100ms であり、一時停止時間は 0.3s に設定されている。

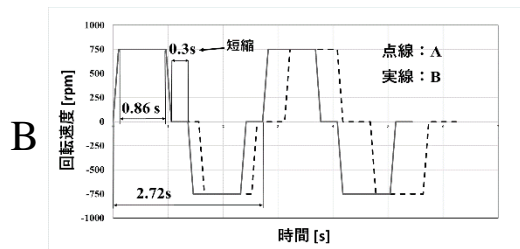


図6 動作条件B(一時停止時間短縮パターン)

- ③ 試験片が等速回転している時間を短縮したパターンで、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。反転時の加減速度は 100ms であり、一時停止時間は 0.5s に設定されている。

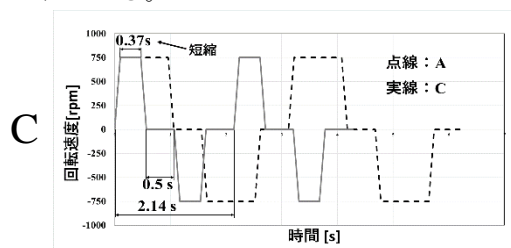


図7 動作条件C(等速回転時間短縮パターン)

## 5. 実験結果

### 5-1 試料油 5W-30 における ECR 観測結果

それぞれの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 観測結果について示す。ECR の観測波形に、同サイクルのサーボモータの回転速度についても追記している。

どの動作条件においても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。

A (図8) と B (図9) のデータを比較すると、B は油膜を喪失している時間が短くなっていることが読み取れた。これにより疲労への影響が減少したため寿命が延びたと考えられる。

また、A (図8) と C (図10) のデータを比較すると、C は油膜喪失の頻度が増えていることが読み取れた。加えて A や B の動作条件よりも油膜形成が安定的ではないため寿命が縮んだと考えられる。

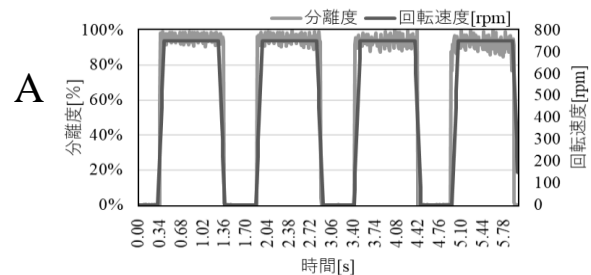


図8 サーボ回転指令と ECR 波形(動作条件 A)

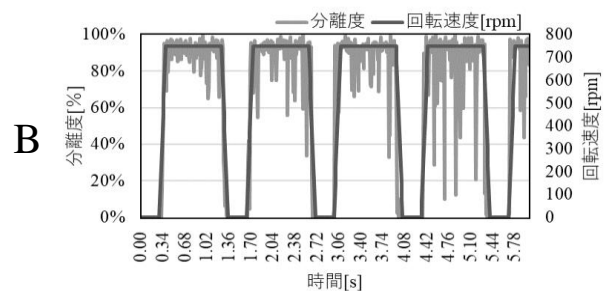


図9 サーボ回転指令と ECR 波形(動作条件 B)

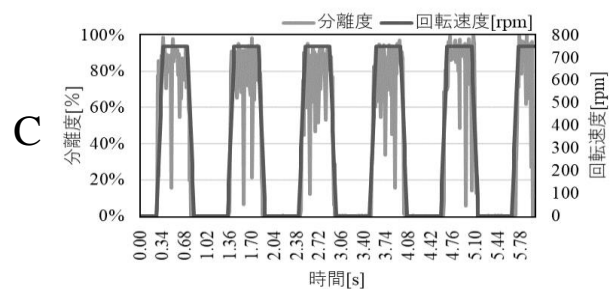


図10 サーボ回転指令と ECR 波形(動作条件 C)

## 5-2 試料油 5W-30 におけるワイブル線図

エンジン油 5W-30 を用いた寿命試験の結果を図 11 のワイブル線図に示す。縦軸は累積破損率，横軸は理論寿命時間 ( $L_0$ ) に対する実稼働時間 ( $L_a$ ) の比 ( $L_a/L_0$ ) である。

往復動作型寿命評価試験機を用いて 3 つの動作パターンでの実験【動作条件 A，動作条件 B，動作条件 C】を行った。正逆回転での試験において，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。

それぞれの実験での  $L_a/L_0$  の最大値は，動作条件 A（基本動作パターン）では 9.38，動作条件 B（一時停止時間短縮パターン）では 10.0，動作条件 C（等速回転時間短縮パターン）では 5.73 となった。

また，それぞれの実験においての  $L_a/L_0$  の平均値は動作条件 A が 7.45 であり，動作条件 B では 9.67，動作条件 C では 3.31 となった。

5-1 節で説明した ECR の波形から，サーボモータの回転と分離度の変化が追従していることが読み取れるので，油膜が形成されていることが確認できた。

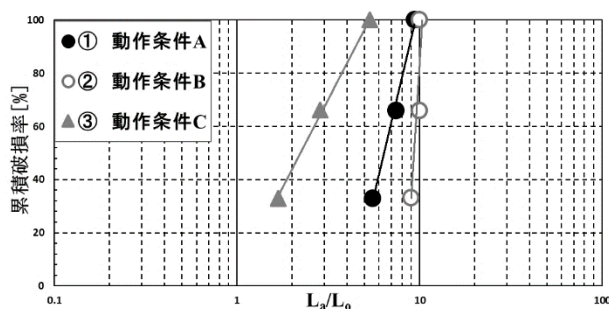


図 11 ワイブル線図

表 1 実験結果まとめ

動作条件		3号機の動作条件による $L_a/L_0$		
		正逆		
実験 点数	No.1	5.53	9.00	1.68
	No.2	7.43	10.0	2.87
	No.3	9.38	10.0	5.37
	平均	7.45	9.67	3.31

## 6.結論

- それぞれの実験での  $L_a/L_0$  の最大値は，動作条件 A（基本動作パターン）では 9.38，動作条件 B（一時停止時間短縮パターン）では 10.0，動作条件 C（等速回転時間短縮パターン）では 5.73 となった。また，それぞれの実験においての  $L_a/L_0$  の平均値は動作条件 A が 7.45 であり，動作条件 B では 9.67，動作条件 C では 3.31 となった。

- 動作条件 B では一時停止時間が短くなったことで流体潤滑から境界潤滑に戻り難くなった。油膜が保持され，軸受接触面に与える疲労への影響が減少したことで動作条件 A よりも軸受けの寿命時間が長くなったと考えられる。
- 動作条件 C では 1 サイクルにかかる時間が短くなり 1 分間当たりの正逆運動の回数が基本動作パターンより約 9 回増加した。これにより，軸受接触面での疲労が動作条件 A の場合よりも大きくなったため軸受け寿命が短くなったと考えられる。
- ECR の波形から，サーボモータの回転と分離度の変化が追従していることが読み取れるので，油膜が形成されていることが確認できた。

## 参考文献

- 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)
- 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)
- 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)
- 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)
- 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)