

# 動作条件プログラム型スラスト玉軸受寿命評価試験機の 開発と試験評価方法

狩野将矢\* 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  
Masaya KANO\*, 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。そこで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検証を進めてきた。この寿命評価試験機は、軸受の回転方向、回転速度は変化を伴わない等速動作であり、定置型の生産設備の動作を模している。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で用いられている。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ほとんどされていない。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、回転方向などをプログラム可能とした新型の寿命評価試験機を作成したので、その詳細と実験結果について報告する。

**キーワード：エンジン油、ギア油、エステル系添加剤、接触抵抗法、状態監視**

## 1. ま え が き

著者らは、自動車や産業用機械などに用いられる軸受の寿命延長を目的としてポリ  $\alpha$  オレフィンからなる新還元添加剤を開発し、その有効性と、寿命延長のメカニズムについて検証を進めてきた。また、新還元添加剤に限らず様々な潤滑油について、その成分の違い等が軸受寿命やトライボロジー性能に与える影響についても検証をしている。<sup>[1][2]</sup>

潤滑油が軸受の寿命に与える影響については、スラスト玉軸受寿命評価試験機を用いて評価してきた。この試験機は試験体にスラスト玉軸受を、試料油で満たした油槽内に設置し、実際にフレーキング損傷に至るまでの時間を計測し評価している。運転条件は、任意の回転速度で等速運転をしており、化学プラントなどに用いられる定置型装置などの動作条件を模している。しかし、自動車や、産業用ロボット等においては、回転速度、加速度、回転方向等は変動を伴い、そのような複雑な動作条件下における潤滑油が軸受寿命に与える影響については検証できていない。そこで、動作条件をプログラム可能とした新型の寿命評価試験機を新たに作成したので本報にて紹介する。

## 2. 軸受寿命試験機の基本構造

### 2.1 観測理論

スラスト玉軸受寿命評価試験機の詳細について解説する。図 1 は従来型軸受寿命評価試験機の検出部の詳細模式図である。基本構造として、試験片にスラスト玉軸受 51104(外径 35mm, 内径 20mm, 高さ 10mm, 玉径 5.56mm)を、面圧を高めるために転動体数を 13 個から 3 個に減じて使用している。上輪(内輪)を駆動軸に設置し、外部モータによる回転運動を伝達ベルトにて回転させている。下輪(外輪)は油槽内に固定し、転動体及び保持器と共に各同軸を併せて設置し、油槽には試料油を 50ml 投入する。

上輪は寿命試験機基本骨格構造体に固定されている、一方で下輪は輸送内部に固定されているが、油槽自体はワゴン軸に載せてある状態であり、ワゴン軸自体を試験機スラスト方向上方に引っ張り上げる形で荷重を負荷している。

このスラスト荷重加圧部は安定して負荷を掛け、負荷量を調整できるように圧縮ばねを用いて引き上げ構造としている。試験片であるスラスト玉軸受に与えるスラスト荷重は 4.4kN とし、最大ヘルツ接触圧力は 4GPa となる。

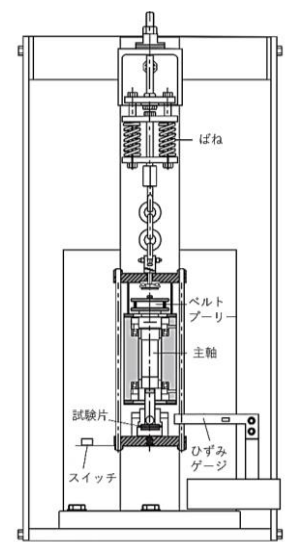


図1 寿命試験機検出器詳細模式図

寿命評価試験機には軸受軌道面と転動体の間に形成される潤滑油膜について、その形成状態を観測するため図2に示す電氣的接触抵抗法（Measurement for Electrical Contact Resistance 以下「ECR」と略す）を搭載している[3]。

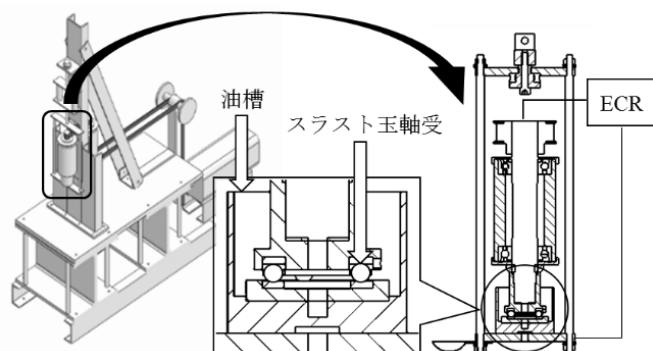


図2 ECR 設置箇所

## 2.2 理論寿命時間に関する理論式

Lundberg-Palmgren<sup>[1]</sup>の寿命理論に基づく、寿命と平均転動体荷重との関係の式(2)から定格寿命  $L$  を求める。

$$L = \left\{ \left( \frac{Q_{ti}}{Q_{ci}} \right)^{\frac{10}{3}} + \left( \frac{Q_{te}}{Q_{ce}} \right)^{\frac{10}{3}} \right\}^{-0.9} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$Q_{ti} = \left[ \frac{1}{Z} \sum_{\psi_0=0}^{\pm\pi} \{Q(\psi)\}^3 \right]^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{1}{3} (P_1^3 + 2P_2^3) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$Q_{te} = \left[ \frac{1}{Z} \sum_{\psi_0=0}^{\pm\pi} \{Q(\psi)\}^3 \right]^{\frac{1}{3}} = \left\{ \frac{1}{3} \left( P_1^{\frac{10}{3}} + 2P_2^{\frac{10}{3}} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$Q_{ci} = A \left[ \frac{f_i}{f_i - 0.5} \right]^{0.41} \frac{(1-r)^{1.39}}{(1+r)^{\frac{1}{3}}} \left[ \frac{D_a}{d_m} \right]^{0.3} D_a^{1.8} Z^{-\frac{1}{3}}$$

$$Q_{ce} = A \left[ \frac{f_e}{f_e - 0.5} \right]^{0.41} \frac{(1+r)^{1.39}}{(1-r)^{\frac{1}{3}}} \left[ \frac{D_a}{d_m} \right]^{0.3} D_a^{1.8} Z^{-\frac{1}{3}}$$

$f_i, f_e$  : 内輪および外輪の転走面曲率半径 - 玉直径比

$P_1, P_2$  : 分担荷重[N]

$r$  :  $D_a \cos \alpha / d_m$

$A$  : 軸受材料によって定まる定数

$d_m$  : 転走面直径[m]

$D_a$  : 転動体ピッチ円径[m]

$Q_{ti}, Q_{te}$  : 内輪および外輪の基本動定格荷重[N]

$Q_{ci}, Q_{ce}$  : 内輪および外輪の動等価ラジアル荷重[N]

そこで、 $Q_{ti}=1487.6[\text{N}]$   $Q_{te}=1490.7[\text{N}]$

$Q_{ci}=1613.2[\text{N}]$   $Q_{ce}=1613.2[\text{N}]$

式(1)は  $L=0.6812$  となり、寿命試験機の回転速度から理論寿命時間  $L_0$  を算出する。

寿命試験において、軸受の破壊による振動が所定の値を超えた場合、もしくは許容のトルク力を超えた場合は安全装置が作動し、モータ電源が停止し試験完了としている。

## 3. 動作条件プログラム型寿命試験機

### 3.1 機体紹介

動作条件をプログラム型とした新型寿命評価試験機について紹介する。試験片であるスラスト玉軸受に対する基本構造は従来型の寿命試験機と同様としている。図3に外観を示す。

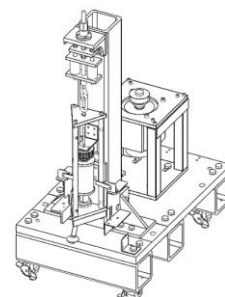
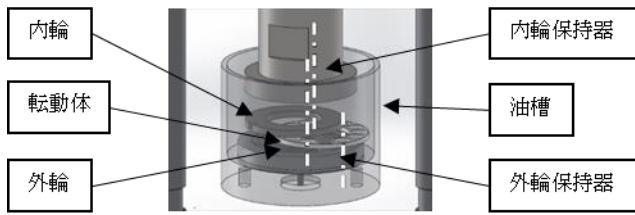


図3 新型寿命試験機外観

寿命試験における信頼性、再現性を向上させるために、試験片でスラスト玉軸受の上輪、転動体及び保持器、下輪それぞれの同芯度と上下輪の軌道面の平行度を正確に合わせる必要がある。そこで新型機には図4に示すような心出しロッド機構を主軸部に新規追加している。これは主軸内部に設けた心出しロッドを試験片設置時のみ突出させ、その先端を油槽に設けた穴に勘合させることで、作業者の習熟度に依存することなく設置不良の防止を図っている。

従来型寿命試験機で発生していた不具合例



新型寿命試験機

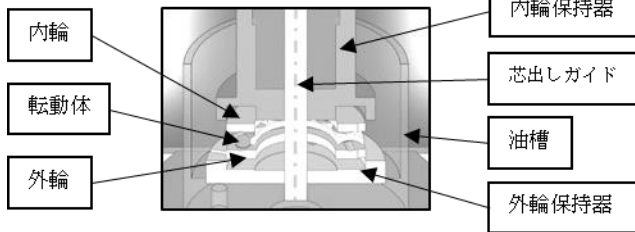


図4 試験片設置時の不具合例と芯出しガイド

### 3.2 駆動源

試験片の駆動源については、従来型のリングコーンモータから産業用ロボットに用いられる AC サーボモータに変更している。これにより、回転速度、回転方向、加減速度、停止時間等がプログラム可能となり、一定回転の等速寿命試験に加えて、自動車や産業用ロボットなどの複雑な動作条件を再現可能となっている。表1に駆動源の仕様比較表を示す。<sup>[4]</sup>

表1 駆動源使用比較

	新型寿命試験機	従来型寿命試験機
	Mitsubishi AC -Servo Motor HG -SR152	RXMK-750
定格出力[kW]	1.5	0.75
定格トルク[Nm]	7.2	5.684
最大トルク[Nm]	21.5	56.84
定格回転速度[rpm]	2000	0~1000
最大回転速度[rpm]	3000	1000

### 3.3 等速動作における潤滑モデル

寿命試験における転がり玉軸受の潤滑油膜形成状態の変遷について解説する。従来型を用いた等速運転条件の寿命試験において、新品の軸受表面は油膜に対して軸受転動面の表面粗さが大きいため、図5に示すトライベック曲線の境界潤滑領域と考えられる。

続いて軸受軌道面の表面が馴染み作用によって混合潤滑領域へ遷移する。軸受寿命末期には、軸受転動面と転動体に疲労が蓄積し転動面にフレーキングが発生し寿命を迎えると考えられる。

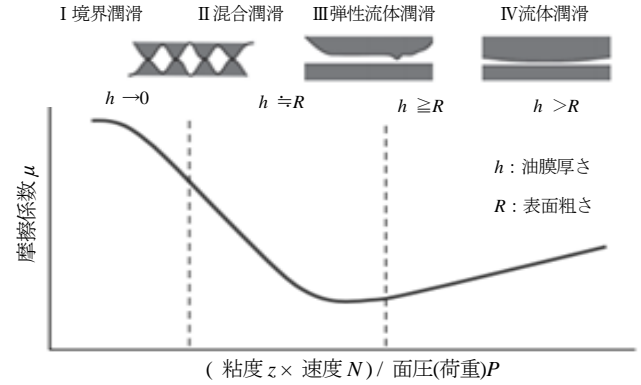


図5 ストライベック曲線

### 3.4 複合動作における潤滑モデル

回転方向が正逆を繰り返し変動する複合動作下における潤滑モデルについて解説する。

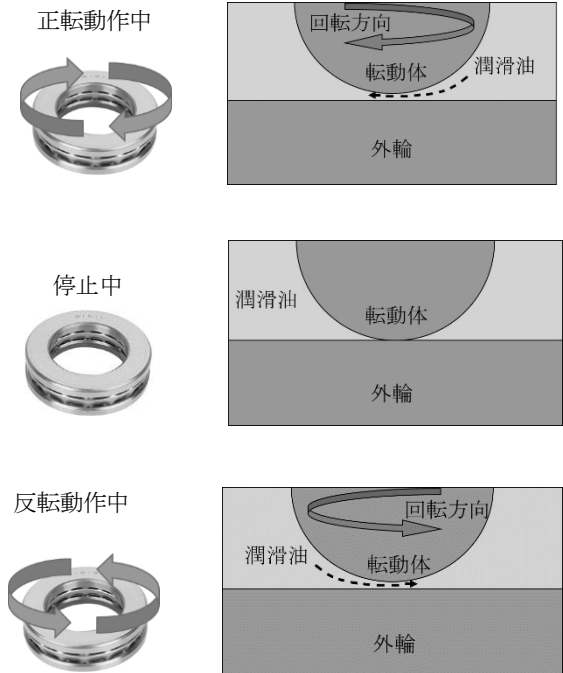


図6 軸受潤滑状態のモデル

図6に示すように回転方向が切り替わる際には回転が停止する。この時、回転による潤滑油の引き込み速度が0となり、軌道面と転動体間に形成された潤滑油膜は欠損する。再び動作すると回転により潤滑油を引き込み、再び油膜が形成されと考えられる。反転動作、間欠動作などの動作条件では、軸受軌道面と転動体間の潤滑状態は境界潤滑と混合潤滑状態を繰り返していると考えられる。その結果、軸受軌道面に繰り返し与える疲労の影響は、等速動作条件に対して増加することで、寿命時間が短くなると仮説を立てている。

### 3.5 実験条件

新型寿命試験機を、従来型と同様に等速動作条件にて寿命試験を行い、従来機にて得られた  $La/Lo$  と比較し寿命試験の再現性を確認する。資料油にはエンジン油 5W-30 を用いた。

続いて動作条件を正逆回転にプログラムを行い、 $La/Lo$  の減少率を確認する。今回は、等速回転 750rpm を 0.86sec として、加減速時間を 0.1sec とし、回転方向の正逆を繰り返すプログラムとしている。なお回転方向切り替え時には 0.5sec の停止時間を設けている。この時の実際の稼働時間を( $La'$ )とし、一定方向等速運転時の( $La$ )と比較する。図 7 に 1 サイクルのタイムチャートを示す。

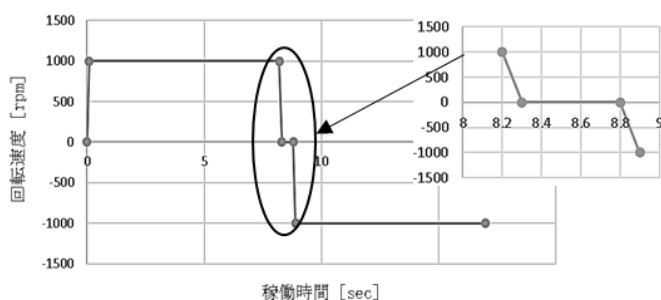


図 7 複合動作条件のタイムチャート

### 4. 実験結果

等速寿命試験結果における寿命試験結果を図 8 に示す。縦軸に累積破損率、横軸に理論寿命時間  $Lo$  に対する理論寿命時間  $La$  としたワイブル線図である。従来型寿命試験機を用いた等速動作条件の結果は  $La/Lo$  が 1.49 から 5.45 の範囲である。新型寿命試験機における等速動作条件による寿命試験結果はフレーキング損傷を起こした 4 点のうち、2 点は  $La/Lo$  は 1.67 と 1.32 であり再現性を確認した。なお、残りの 2 点は  $La/Lo = 10.0$  であり完走しているが、軸受の定格寿命の考え方として、軸受寿命は 90%の軸受が損傷を起こさずに回転できる総回転数を基本定格寿命としているため、フレーキングした試験結果のみで比較している。

正逆回転における複合動作条件における寿命試験結果は、 $La/Lo$  の平均値で 76%に低下していた。

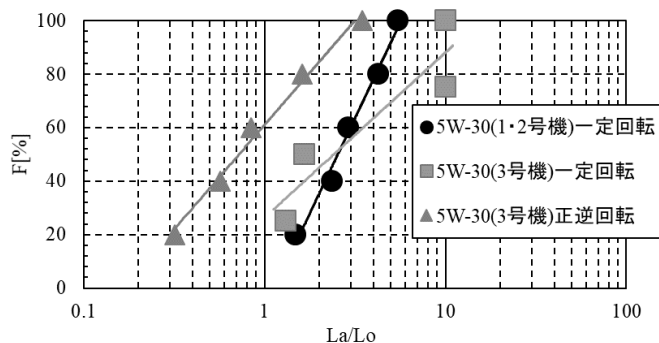


図 8 寿命試験結果

### 5. 結論

スラスト玉軸受に新型の寿命試験機を用いることで複合動作条件における寿命試験を行うことができた。

エンジン油 5W-30 において複合動作条件下による寿命時間  $La/Lo$  の平均は 1.37 であり、同実験機を用いた等速寿命試験での  $La/Lo$  の平均 5.75 に対して 76%減少することを確認した。

これら結果から等速動作条件に対して複合動作条件が軸受寿命に与える影響について仮説を立てることができた。

### 6. あとがき

従来型寿命試験機において、これまで多種にわたる試料油の寿命試験結果を得ている。これに対して新型寿命試験機では現在エンジン油 5W-30 のみの結果であり、他の試料油に対しての実験結果が圧倒的に少ない状態である。今後は試料油の種類を拡大し試験機の信頼性をさらに確認していきたい。また動作条件についても停止頻度が寿命に与える影響を確認できているが、停止頻度を上げた場合、同サイクルで正逆ではなく間欠運動させた場合、これらの動作条件における油膜喪失時間と試料油の粘度の関係など検証を進めていきたいと考える。

### 参考文献

- [1] 竹田雄祐, 里永憲昭, 渡邊孝司, 園田智之: 転がり軸受の損傷に与える自動車と産業機械における潤滑油新還元添加剤 (SOD-1PN) の寿命効果に対する考察, 第 17 回評価・診断に関するシンポジウム, 講演論文集, 116, Paper, pp75-80(2018)
- [2] 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)
- [3] 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)を用いた損傷メカニズムに関する傾向監視, 第 18 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, pp122-127 (2019)
- [4] 「FACTORY AUTOMATION 三菱電機汎用 AC サーボ MELSERVO-J4 いまサーボは人・機械・環境と響き合う。」三菱電機株式会社 pp2-17, pp2-18, 9(2017)