

円筒ころ軸受の潤滑性能評価方法の検討

高橋 研* 鈴木 大輔*
岡村 吉晃* 永友 貴史*

Lubricity Evaluation Method of Cylindrical Roller Bearings

Ken TAKAHASHI Daisuke SUZUKI
Yoshiaki OKAMURA Takafumi NAGATOMO

As one of the causes of damage of a rolling bearing, the poor lubrication between rollers and a cage has been pointed out. Therefore, it is important to improve the lubrication performance between them in order to ensure the reliability of the bearing. In this research, behavior of the bearing in case of the poor lubrication between the rollers and the cage and an evaluation method of lubrication performance have been investigated by sliding friction tests of test pieces of the roller and the cage and rotation tests of the cylindrical roller bearing. As a result, it has been clarified that vibration acceleration of the bearing increases quickly just before seizure of the bearing caused by the breakage of the oil film. Therefore, a method of using changes in vibration acceleration as an index indicating seizure can be considered for evaluating the lubricating performance of the bearings.

キーワード：軸受，転動体，保持器，潤滑性能，温度，振動

1. はじめに

電車主電動機用の転がり軸受の損傷原因の一つとして、保持器と転動体との間のすべり接触部における潤滑不良がある。これを起点とするすべり接触部の異常摩耗にともなう保持器の強度低下や振動増大から保持器が破損し、軸受の発熱や回転不良を経て焼付きに至ることがある。そのため、軸受の信頼性を確保するためには、このすべり接触部の潤滑性能を向上させることが重要である。これまで、軸受鋼や黄銅などの軸受の材料について、ボールオンディスク型摩耗試験機のような基礎的な試験装置を用いて摩擦摩耗特性を調査した例¹⁾はあるが、実際の保持器と転動体との間のすべり接触部に特化して潤滑性能を評価した例はない。

そこで、主電動機用の円筒ころ軸受を対象に、転動体(以下、ころとする)と保持器材料の試験片を用いた要素試験および実物の軸受を用いた軸受回転試験によるすべり接触部の潤滑性能評価方法について検討を行った。要素試験については、軸受の運動特性の一つとして、ころと保持器の接触状態を調べ、その結果に基づいて、両者の摩擦係数や温度上昇値から潤滑性能を評価する方法を検討した。軸受回転試験については、ころと保持器の焼付き時の軸受の挙動を調べ、軸受の振動加速度の変化に着目した潤滑性能評価方法を検討した。

2. 軸受運動特性の測定²⁾

2.1 試験装置および方法

ころと保持器の試験片を用いた要素試験により両者の潤滑性能を評価する方法を検討するためには、転がり軸受の回転中の運動特性、特にころの自転速度(ころと保持器のすべり速度)ところから保持器に作用する荷重(以下、保持器作用荷重とする)を把握する必要がある。そこで、ころ自転速度と保持器作用荷重を同時に測定することができる軸受運動特性試験装置を製作した(図1)。また、ここで用いた測定用軸受を図2に示す。測定用軸受には、一般的な主電動機用円筒ころ軸受である呼び番号 NU214 (外径：125mm, 内径：70mm, ころ数：16個)を使用した。本装置は主電動機を模擬し、モータに

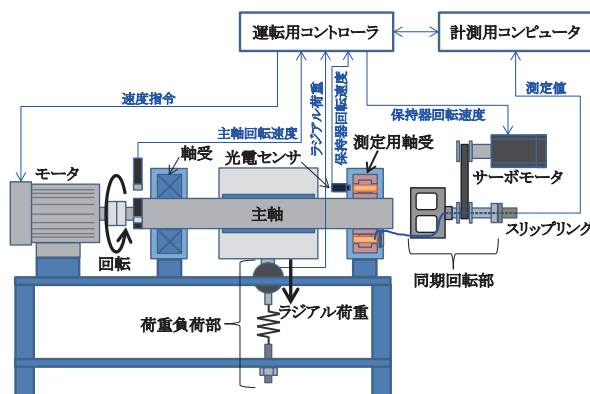


図1 軸受運動特性試験装置

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

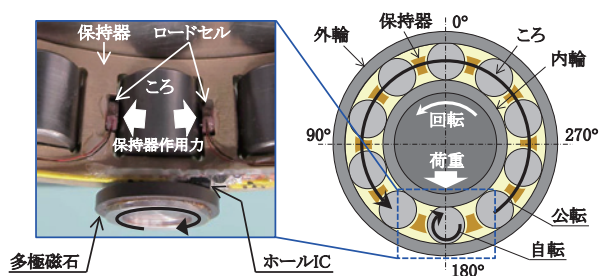


図2 測定用軸受

接続された主軸を支える2個の軸受の中心に垂直方向下向きにラジアル荷重を負荷させながら軸受を回転させる構造である。そのうち主軸軸端側の1個の軸受を測定用軸受とし、図2に示すように、ころ自転速度をころと一体で回転する多極磁石（円周方向16極）が回転することで保持器に固定されたホールICから出力される電圧パルスにより、また保持器作用荷重を保持器に固定された小型の圧縮型ロードセルによりそれぞれ測定する。ころ自転速度と保持器作用荷重の測定値は、測定用軸受の保持器と同期して回転する同期回転部を通して計測用コンピュータに収録する。なお、上記構造より測定用軸受到作用するラジアル荷重は図2の180°の位置を中心に作用し（以下、負荷圏とする）、その大きさは図1の荷重負荷部に与えたラジアル荷重の1/2である。

本測定におけるラジアル荷重は主電動機回転子の重量を考慮し、1940Nとした。すなわち測定用軸受到作用するラジアル荷重は970Nである。主軸回転速度は主電動機の使用範囲を参考に、200～4500min⁻¹とし、連続する10秒間、ころ自転速度と保持器作用荷重を測定する。

2.2 試験結果

図3に主軸回転速度が1000、2000、3000、4000min⁻¹の場合のころ自転速度と保持器作用荷重を示す。なお、ころ自転速度は、軸受の寸法諸元から得られる理論値³⁾（それぞれ、3683、7367、11050、14733min⁻¹）に対する

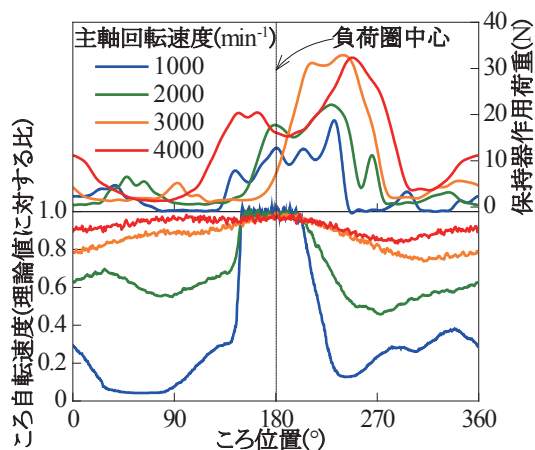


図3 軸受の運動特性

比で示し、保持器作用荷重は10秒間の測定データからころ1公転毎の値を取り出し公転回数で平均した値である。

いずれの主軸回転速度でも、ころ自転速度は負荷圏付近の150°～210°で理論値とほぼ一致し、それ以外の位置では理論値より低くなっている。このことから負荷圏では、ころが内輪や外輪とすべりを伴わずに回転することがわかる。一方、負荷圏以外では、軸受到内部すきまがあるため、ころを回転させる力が内輪からころに伝わりにくくなるとともにグリースの粘性や保持器とのしゅう動がころの回転運動に対する抵抗となり、自転速度が低下したと考えられる。また、負荷圏以外では、主軸回転速度が高いほど軸受全周(0°～360°)に渡って自転速度は理論値に近づく。これは、主軸回転速度の上昇に伴って負荷圏でころが得る回転エネルギーが大きくなるほどには、負荷圏以外での抵抗が増大せず相対的に減速しにくくなるためと考えられる。

保持器作用荷重はころ位置がほぼ90°～300°の範囲で働き、その最大値の位置は負荷圏の中心である180°よりやや後側に偏っている。このことから、ころが1公転する間において、ころがある範囲内に位置するときに保持器に荷重が作用することがわかる。すなわち、保持器作用荷重は公転周期と一致した周期で間欠的に発生する。また、主軸回転速度の増加とともに保持器作用荷重の最大値は増加する傾向にあることがわかる。

3. 要素試験による潤滑性能評価⁴⁾

3.1 試験装置

2章で得られた軸受の運動特性を反映させた条件で、ころ／保持器間の潤滑性能を評価する方法を検討するため、実物のころ（以下、供試ころとする）と保持器を模擬した試験片（以下、供試保持器とする）を単体ですべり接触させることができるすべり摩擦評価試験装置を製作した（図4）。本装置はころと保持器のすべり接触を単体で模擬できる構造である。本装置に取り付けた供試ころおよび供試保持器の外観と主要な寸法を図5に示す。供試ころは、2章で使用した円筒ころ軸受と同じ呼び番号NU214のころ（高炭素クロム軸受鋼製）の中心に試験軸を圧入する貫通穴を加工したものである。供試保持器は供試ころとのすべり接触面をNU214の保持器ポケット面と同等の寸法・形状とした試験片（高力黄銅製）である。供試保持器を供試ころに押し付ける荷重（以下、試験荷重とする）は、ロードセルを介して圧電式の荷重負荷装置によって負荷される。試験軸はトルク変換器を介してモータで回転させる。供試ころの回転速度とトルクはトルク変換器により、試験荷重はロードセルにより、供試保持器の温度は熱電対によりそれぞれ測定される。

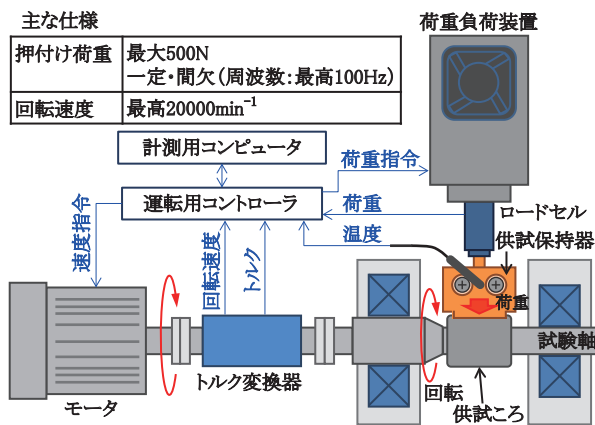


図4 すべり摩擦評価試験装置

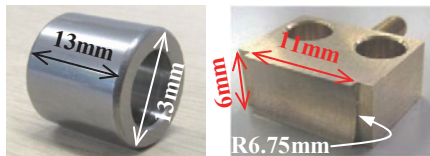


図5 供試ころ（左）および供試保持器（右）

供試ころと供試保持器の摩擦係数 μ は、測定されるトルク T 、供試ころの直径 D_w 、試験荷重 F を用いて、式(1)により算出する。

$$\mu = (2 \cdot T) / (D_w \cdot F) \quad (1)$$

3.2 潤滑性能評価方法の検討

潤滑性能評価に必要な供試ころの回転速度、試験荷重などの条件について検討する。2章に示したように、ころ自転速度は主軸回転速度の増加とともに軸受全周に渡って増加すること、保持器作用荷重は一定の周期で間欠的に発生し、主軸回転速度の増加とともに増加する傾向があることなどがわかった。

そこで、ころ/保持器間のすべり速度と作用荷重がともに大きい（ころと保持器の潤滑状態が比較的悪い）条件として、運動特性測定試験において主軸回転速度が 4000min^{-1} の結果を参考に、潤滑性能評価のための試験条件を表1のように決定した。すなわち、供試ころの回転速度（自転速度）を 15000min^{-1} ($\approx 14733\text{min}^{-1}$)、最大試験荷重を 40N とした。また、NU214の内輪（主軸）回転速度 4000min^{-1} でのころの理論公転速度は 1733min^{-1} であるので、試験荷重の負荷周波数を 30Hz ($\approx 1733/60$) と

表1 潤滑性能評価のための試験条件

慣らし回転	600s, 1000min^{-1}
供試ころ回転速度	15000min^{-1}
最大試験荷重	40N
試験荷重負荷周波数	30Hz

した。上記試験条件の1サイクル（ころ1公転分）の各波形を、図3に示した実測値とともに図6に示す。

試験では、最初に供試ころのすべり接触面全体に 0.008g のグリースを均一に塗布し、その後は給脂しないこととした。また、グリースをなじませるために回転開始から600秒間はころの回転速度を比較的低速の 1000min^{-1} で一定とし（慣らし回転）、その後、表1に示した所定の回転速度まで増加させた。試験終了の条件については、供試保持器の温度上昇値（測定値から初期温度を差し引いた値）が 120K に達したときと定めた。

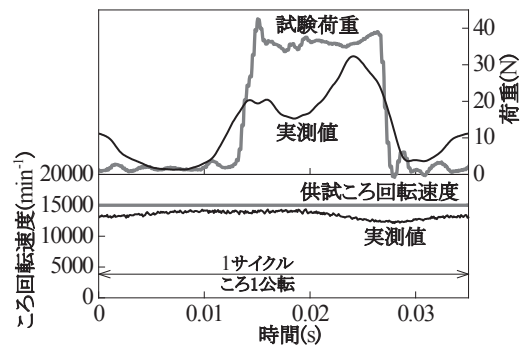


図6 試験荷重および供試ころ回転速度

3.3 試験結果

図7に回転開始から終了までの供試ころと供試保持器の摩擦係数および温度上昇値の測定例を供試ころの回転速度、試験荷重とともに示す。回転開始直後に供試ころの回転速度を 1000min^{-1} まで上昇させると、温度上昇値はわずかに増加したが、その後の慣らし回転中は摩擦係数、温度上昇値ともに安定している。このことから、600秒間の慣らし回転で十分安定した潤滑状態が保たれていると考えられる。図7の下段は慣らし回転中のうち0.5秒間の試験荷重と摩擦係数を示しており、両者の増減が対応していることが確認できる。

慣らし回転後、回転速度を所定の 15000min^{-1} まで増加させると、温度上昇値と摩擦係数は増加している。この間、 $900 \sim 1000\text{s}$ 付近では温度上昇値と摩擦係数が比較的安定しているが、 1000s を超えると両者とも急激に増加している。これは、回転速度の増加による温度上昇にともなふころと保持器の接触部に形成される油膜の厚さが減少し、最終的に供試ころと供試保持器のすべり接触面同士が凝着して⁵⁾ 焼付いたためと考えられる。

図8に試験後の供試ころおよび供試保持器のすべり接触面を示す。供試ころには供試保持器の材料の移着が、供試保持器には焼付きに伴うかじりが認められる。

以上から、本試験装置を用いて実際の接触状態を反映させた条件で供試ころと供試保持器のすべり摩擦試験を行うことによって、温度上昇値と摩擦係数の変化から両者の潤滑性能を評価できることがわかった。

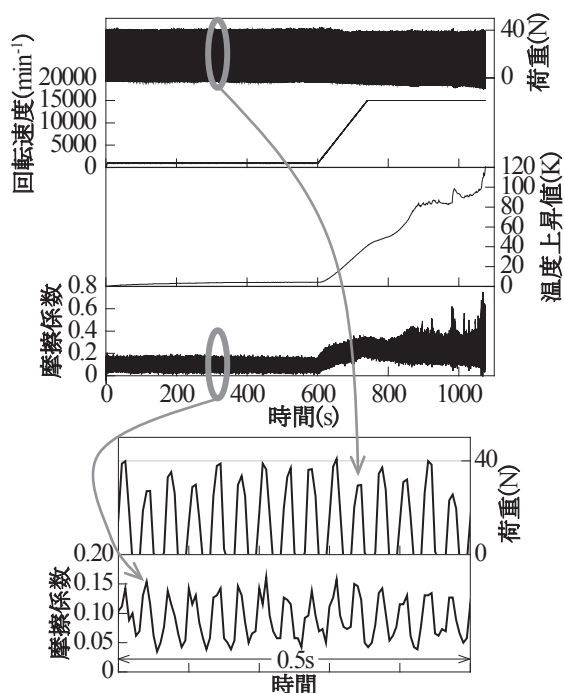


図7 要素試験による潤滑性能評価

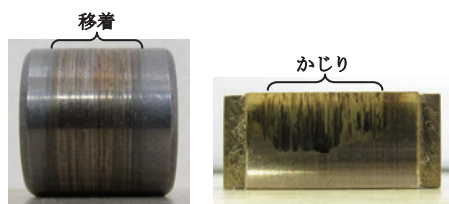


図8 試験後の供試ころ（左）および供試保持器（右）

4. 軸受回転試験による潤滑性能評価⁶⁾

4.1 試験装置

実物の主電動機用円筒ころ軸受の回転試験を行うため、軸受加振回転試験機（図9）を製作した。本試験機は、主軸の両端に取り付けた試験軸受を、軸継手を介してモータで回転させる構造である。試験荷重（試験軸受2個に負荷されるラジアル荷重）は、主軸中央に取り付けた支持軸受から荷重調整用のばねとロードセルを介して下から上向きに試験軸箱に伝える構造である。さらに、モータを除く試験部全体を電磁加振器により上下方向に加振することができる。ラジアル荷重は最大で1250N/試験軸受（回転子質量相当）、主軸回転速度は最高で7060min⁻¹（最高主電動機回転速度相当）である。また、加振時の振動加速度は、JIS E 4207において主電動機等の台車枠横ばりへの取付け部品の振動加速度が3～10G（29.4～98.0m/s²）と想定されている⁷⁾ことを参考に、最大100m/s²とした。主軸の回転速度はモータの回転軸に設置した光電式回転計により、試験軸受の温度 t_{brg} は外輪の外径面に設置した熱電対により、試験軸受の振動

加速度 a_{rms} （0～1000Hzの実効値）は試験軸箱に設置した圧電式の加速度計により、試験荷重 F_v はロードセルによりそれぞれ測定される。試験荷重は軸端側とモータ側の試験軸受に等しく配分されるため、試験軸受1個あたりのラジアル荷重は $F_v/2$ となる。試験軸受は2章と同じくNU214（図10）とした。

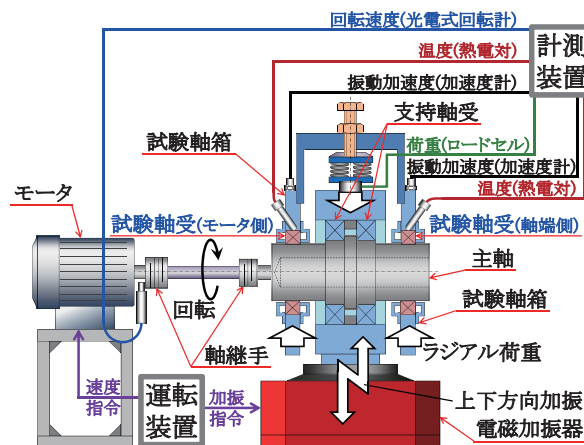


図9 軸受加振回転試験機

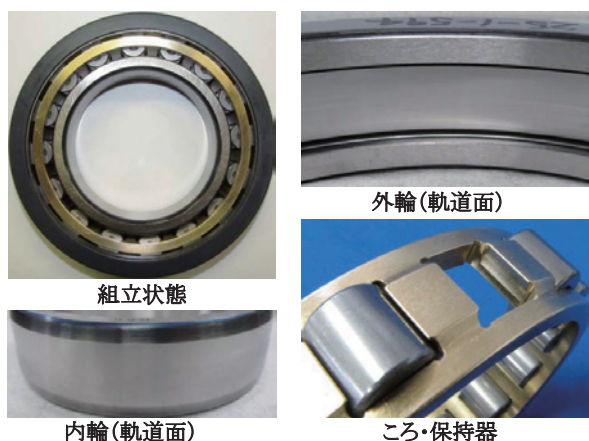


図10 試験軸受

4.2 試験方法

ここでは、主軸の軸端側に取り付けた試験軸受を試験対象とした。試験条件を表2に、主軸の繰り返し回転パターンを図11にそれぞれ示す。主軸の最高回転速度を6000min⁻¹、1サイクルを正・逆回転110minずつとし、それぞれの回転終了後に10minの停止時間を設けた。加減速時の速度勾配は100min⁻¹/sである。ラジアル荷重は922Nとした。振動を与えて試験を行う場合は、回転中のみ、試験部を加速度70m/s²（片振幅）、周波数40Hzで加振した。保持器/ころ間に潤滑不良の状態を発生させるため、予め試験軸受を分解し、全ての部品を脱脂した後に、保持器のころとのすべり接触面の全面に少量（合計で0.1, 0.15, 0.2, 0.3g）のグリースを均等に塗布した。その後、軸受を再度組み立てて試験に使用した。

表2 試験条件

主軸最高回転速度	6000min ⁻¹
ラジアル荷重	922N
加振	加振なし／あり 70m/s ² (40Hz)
潤滑条件	グリース・0.1, 0.15, 0.2, 0.3g

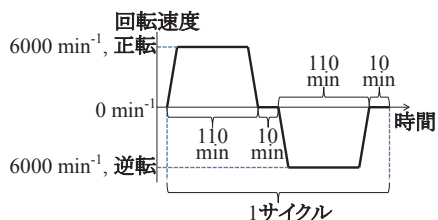


図11 試験における回転パターン

試験は、同一条件で複数回行い、 t_{brg} が 90℃ に達した場合に試験装置を自動で停止し終了とした。また、 a_{rms} が 100m/s² を超過したことを認められた際には t_{brg} が 90℃ に達する前でも試験装置を手動で停止する。軸受の摩耗を定量的に調べるため、試験前後の軸受の部品を洗浄・脱脂して、それぞれの質量を測定し、その差を摩耗量とした。

4.3 焼付き時の軸受温度および振動

全ての試験条件で軸受温度および振動加速度の急激な増加が認められた。例として、図12に加振なし、グリース量 0.1g の条件での t_{brg} と a_{rms} の時間経過を、図13に試験後の軸受の状態をそれぞれ示す。試験開始から約 450min までの間、回転中の t_{brg} は 50℃ 前後でほぼ一定であるが、それ以降は徐々に増加し、約 650min で 90℃ に達した。これは、要素試験結果 (図7および図8) で見られたように、ころと保持器との間で油膜が破断し、金属同士が接触したためと考えられる。一方、 a_{rms} は試験時間が約 550min に達した時に急激に増加した。

試験後の保持器には摩耗粉を含み変色したグリースが付着している。また、保持器のころとのすべり接触面にかえりをともなう著しい摩耗が認められる。ころの軌道面、外輪や内輪の軌道面は面荒れしている。これらは、実際に潤滑不良が原因で損傷した軸受に見られる特徴と一致している。したがって、本試験において焼付き損傷を再現できたと考えられる。

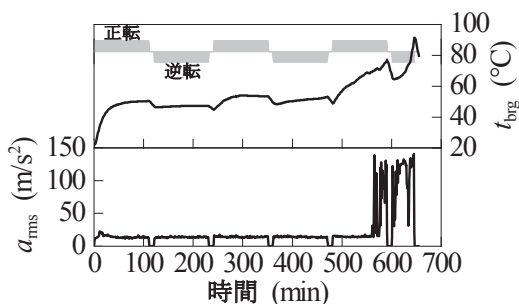


図12 軸受温度および振動加速度の測定例

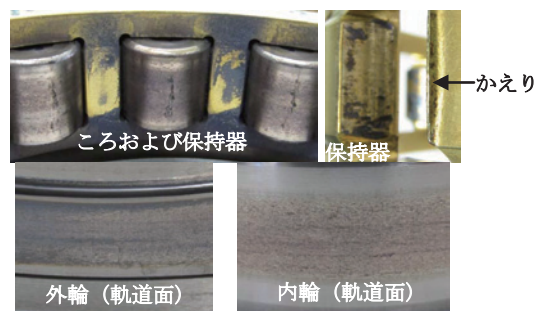


図13 試験後の軸受

軸受の各部品の摩耗量を表3に示す。外輪、保持器およびころに質量の減少が認められる。このうち、保持器はころに比べて硬さが低いため、ころの軌道面とのしゅう動により大きく摩耗したと考えられる。一方、内輪、外輪およびころは硬さがほぼ同じであるが、内輪はほとんど摩耗していないことから、軌道部分での摩耗は少なく、外輪ところでは、主に外輪のつば部ところの端面がしゅう動 (図14) したことにより摩耗したと考えられる。

表3 軸受各部品の摩耗量

外輪	内輪	保持器	ころ (16個の合計)
0.07g	0.00g	0.3304g	0.0886g

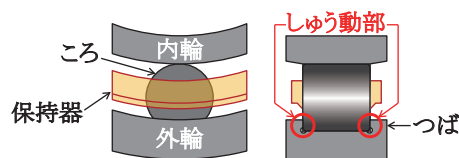


図14 外輪つば部ところ端面のしゅう動部

4.4 振動加速度に着目した潤滑性能評価

潤滑不良から焼付きに至る際に、軸受温度 t_{brg} の上昇と振動加速度 a_{rms} の急激な増加が発生することがわかった。また、図12に示したように、 t_{brg} と比較して a_{rms} の変化はより急激であった。この傾向は、加振の有無やグリース量によらず全ての試験条件において同じであった。

そこで、 a_{rms} に注目し、試験開始から a_{rms} が 100m/s² を超えるまでの総回転数を L_a として、加振およびグリース量が L_a に及ぼす影響を調べた結果を図15に示す。 L_a はグリース量の減少とともに顕著に減少する。また、試験を行ったグリース量の範囲では、加振の有無による L_a への影響は認められない。これは、グリース量が非常に少ないため、焼付きに対する加振の影響と比較してグリース量の影響が大きいためと考えられる。

次に、試験開始から試験終了までの軸受の総回転数を L とし、 a_{rms} が 100m/s² を超えてから試験終了までの総回転数 $L - L_a$ と保持器の摩耗量との関係を図16に示す。いずれのグリース量でも、 $L - L_a$ が最も小さい時の保持器摩耗量はほぼ 0g であり、 $L - L_a$ の増加にともない保

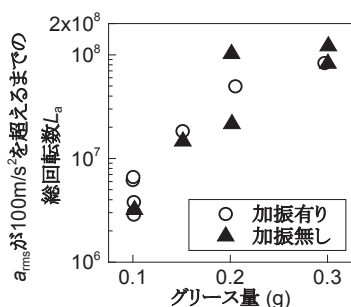


図 15 L_a に対するグリース量と加振の影響

保持器摩耗量が増加している。このことから、保持器の摩耗は a_{mms} が小さい間は進行せず、その急激な増加から試験終了までの比較的短い間に急激に進行すると考えられる。また、同じ $L-L_a$ で比較した場合、グリース量が 0.1g, 0.15g, 0.2g と増加するとともに保持器摩耗量がより少なくなる傾向が認められる。これは、保持器へのグリース付着量が多い方が、保持器/ころ間の油膜破断が起きた後でも部分的に油膜が再形成される機会が多くなるためと考えられる。なお、グリース量 0.3g では、加振有りの条件で保持器摩耗量が多いが、これは、保持器のころとのすべり接触部以外の摩耗も進んだためと考えられる。

以上のように、潤滑不良から焼付きに至る際の軸受の振動加速度の変化に着目すると、グリース量と焼付きまでの寿命の関係や保持器の摩耗現象を合理的に説明することができる。したがって、軸受の潤滑性能を評価する方法の一つとして、焼付き発生時に振動加速度の急激な増加が認められることから、振動加速度の変化を焼付きの指標として用いる方法が考えられる。

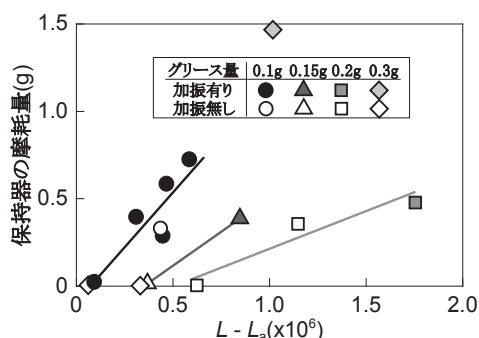


図 16 $L-L_a$ と保持器摩耗量の関係

5. おわりに

主電動機用の円筒ころ軸受を対象に、ころと保持器の試験片を用いた要素試験、および実物の軸受を用いた軸受回転試験によるすべり接触部の潤滑性能評価方法について検討を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) 軸受運動特性を調べた結果、ころ自転速度は負荷圏付近で理論値と一致するが、それ以外では理論値より低下し、その傾向は主軸回転速度が低いほど顕著

なこと、保持器作用荷重は負荷圏付近でころ公転周期と一致して間欠的に作用し、主軸回転速度の増加とともに大きくなることがわかった。

- (2) 保持器/ころ間のすべり接触を模擬できるすべり摩擦評価試験装置を製作し、(1)の運動特性に基づいて、供試ころの回転速度一定で供試保持器の押付け荷重を間欠的に負荷させる試験方法を考案した。この方法により軸受内での実際の接触状態を反映させた条件で供試ころと供試保持器のすべり摩擦試験を行い、温度上昇値と摩擦係数の変化から両者の潤滑性能を評価できることがわかった。
- (3) グリース量を減少させた条件で、軸受回転試験を行った結果、実際の損傷と同様の特徴を有する軸受の焼付き損傷が再現された。また、潤滑不良から損傷に至る際に、軸受の温度上昇と振動加速度の急激な増加が発生することがわかった。
- (4) 軸受回転試験において 0.1 ~ 0.3g のグリース量では、軸受が焼付きまでの総回転数はグリース量の減少とともに顕著に減少し、加振の有無による焼付きまでの総回転数への影響は認められなかった。また、保持器の摩耗は焼付きにともない振動加速度が増加するまではほとんど発生せず、その後急激に進行する。その際、保持器へのグリース付着量が多いほど保持器摩耗の進行が抑制される傾向が認められた。

以上より、軸受の潤滑性能を評価する方法として、要素試験では温度上昇値と摩擦係数の変化を、軸受回転試験では振動加速度の変化（急激な増加）を焼付きの指標として用いる方法が有効であることを確認した。

文献

- 1) 野口昭治, 相原了: すべり接触におけるバレル加工表面の摩擦摩耗特性, トライボロジスト, Vol.38, No.8, pp.759-764, 1993
- 2) 梅原大樹, 高橋研, 岡村吉晃, 永友貴史, 寺田泰也: 円筒ころ軸受におけるころと保持器の相互運動, トライボロジー会議 2013 春予稿集, D1, 2013
- 3) 綿林英一: 転がり軸受マニュアル, 日本規格協会, p.160, 1999
- 4) 高橋研, 梅原大樹, 永友貴史, 寺田泰也: 円筒ころ軸受のころと保持器のすべり摩擦試験, トライボロジー会議 2013 秋予稿集, B18, 2013
- 5) 里吉超, 清水克久, 葉山房夫: 乾燥摩耗と摩擦面の変化, 金属表面技術, Vol.20, No.11, pp.7-12, 1969
- 6) 高橋研, 鈴木大輔, 梅原大樹, 長坂整, 永友貴史: 円筒ころ軸受における保持器ところの焼付き挙動, 機械学会 2015 年度年次大会予稿集, S1160105, 2015
- 7) 鉄道車両-台車-台車枠設計通則, 日本規格協会, JIS E 4207