

主電動機軸受における転動体と保持器の接触力測定に基づく保持器摩耗の予測

鈴木 大輔* 高橋 研* 糸魚川 文広**
前川 覚** 岡村 吉晃*

Cage Wear Prediction Based on Measurement of Contact Force between Rolling Element and Cage
in Traction Motor Bearings in Railway Vehicles

Daisuke SUZUKI Ken TAKAHASHI Fumihito ITOIGAWA
Satoru MAEGAWA Yoshiaki OKAMURA

Bearings used in traction motors in railway vehicles are used under light loads and at high rotational speeds, so that their life is determined by cage wear due to contact with rolling elements rather than raceway flaking. In this paper, in order to predict the cage wear, we measured the forces of rolling elements which act on cage. As a result, the magnitude, duration of action, and frequency of the forces could be obtained. In addition, the forces were integrated with time to obtain impulses to show the relationship between the impulses and the cage wear.

キーワード：機械要素，トライボロジー，主電動機，転がり軸受，円筒ころ軸受，保持器摩耗

1. はじめに

主電動機軸受は主電動機（鉄道車両の駆動用モータ）の回転子を支持する転がり軸受である。この軸受は、基本動定格荷重の数%程度の軽荷重かつ高回転で使用されるため、転動体が転がり接触する内外輪の軌道面のはく離による寿命（疲労寿命）ではなく、転動体がすべり接触する保持器の摩耗による寿命（摩耗寿命）によって軸受が使用できなくなることが多い。そのため、計算される疲労寿命¹⁾よりもはるかに短い期間での軸受交換を余儀なくされている。また、このような使用条件における保持器摩耗を予測する方法は確立されておらず、適切な軸受の使用期間を定めることが困難である。保持器摩耗は転動体との接触部で発生することから、保持器摩耗を予測するためには、転動体と保持器の運動および接触力の測定とその詳細な解析が必要と考えた。

主電動機は車両の運行により加減速を繰り返すため、軸受の使用される回転数（本報告では単に回転数と記述した場合、内輪回転数を指す）の範囲が広い。軸受を広範囲の回転数で使用した場合、保持器の振れ回り挙動は回転数の増加に伴って変化し、保持器中心の軌跡が下部で揺動している状態から過渡状態を経て円形に振れ回る状態となることが知られている²⁾。転動体と保持器の接触力はこの挙動に影響されると考えられるため、保持器の振れ回りの遷移を含む広い回転速度域においてこれら

を観察する必要がある。これまでに、転がり軸受において転動体と保持器の接触力が測定によって求められた例^{3) 4)}はあるが、保持器の振れ回りを拘束する形態で測定されており、保持器の振れ回りが生じる状態で転動体と保持器の接触力が測定、解析された事例はない。本報告では保持器の振れ回りを拘束しない状態で、転動体と保持器の接触力と保持器挙動の同時測定が可能な測定系を構築し、広範囲の回転数において測定を行った。また、測定結果をもとに、保持器の摩耗量に関する考察を行った⁵⁾。

2. 測定方法

2.1 対象とした軸受

対象とした軸受は主電動機に広く使用されている円筒ころ軸受（呼び番号：NU214）であり、その仕様を表1に示す。内外輪およびころは軸受鋼製、保持器は高力黄銅物製である。保持器は転動体案内のため、ころ以外の部品とは接触しない。対象とした軸受は主電動機用ではあるが、一般の円筒ころ軸受とほぼ同等の仕様である。また、ころ径のばらつきが測定に与える影響を排するため、ころ径相互差が2 μ m以下となるころを使用した。

2.2 ころと保持器の接触力の測定方法

ころと保持器の接触力は図1に示すように16箇所あるポケットのうち1箇所のポケット内に2つの小型のロードセル（株式会社共和電業製、LMA-A-100NM81Z050）を取り付けることで直接測定した。測定対象としたポ

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

** 名古屋工業大学

表 1 対象とした軸受の仕様

軸受の種類	円筒ころ軸受	
内径	70mm	
外径	125mm	
幅	24mm	
ラジアルすきま	0.090-0.125mm	
ころピッチ円径	97.5mm	
ころ数	16	
ころ径	13mm	
ころ丈	13mm	
保持器案内方式	転動体案内	
材料	軌道輪	JIS SUJ2
	ころ	JIS SUJ2
	保持器	JIS CAC301
基本動定格荷重	83500N	

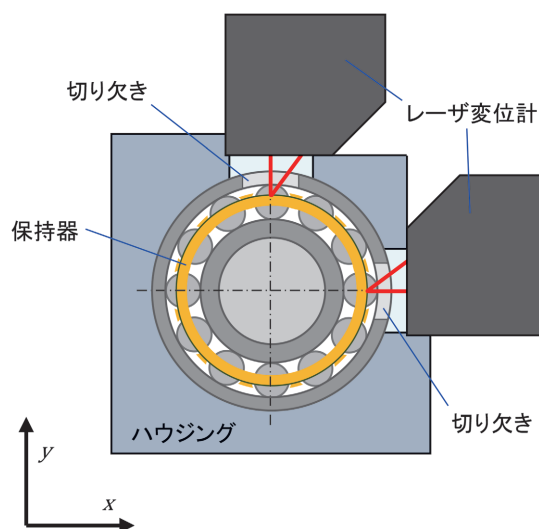


図 2 保持器中心の変位量の測定方法

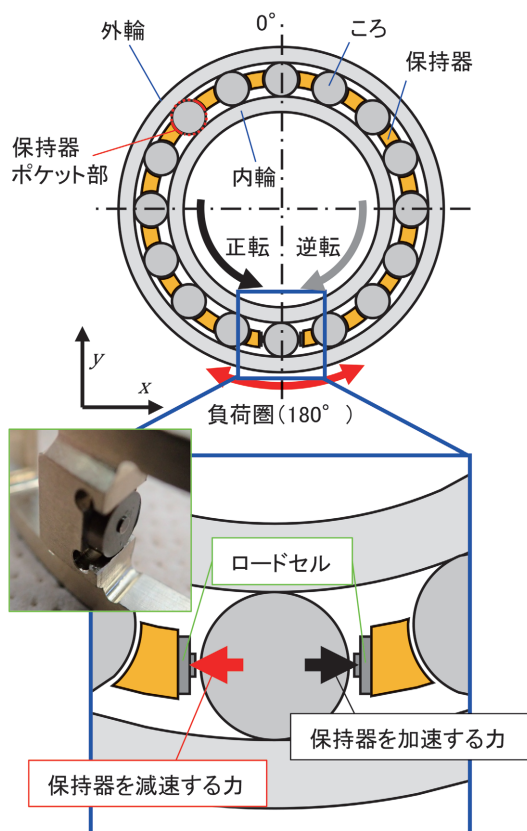


図 1 ころと保持器の接触力の測定方法

ケットの凹面部を平坦面となるよう切削により除去し、ロードセルの中心がころの公転ピッチ円上で平行になるように接着した。2つのロードセルの突起部間の距離はころと保持器ポケットのクリアランスの設計値と変わらないようにした。これにより、ころの転がり方向の前後で2種類の力を測定できる。本報告では保持器の回転方向にころが保持器を押す力を「保持器を加速する力」、保持器の回転とは逆方向にころが保持器を押す力を「保持器を減速する力」と記述する。図1中に内輪の回転方向が正転（反時計回り）の場合に測定されるこれら2つの

力および測定結果を示す際に使用する座標系および角度も示している。角度は非負荷圏の中心（鉛直上）を 0° 、負荷圏の中心（鉛直下）を 180° とし、回転方向に対して増加するものとする。

2.3 保持器中心の変位量の測定

保持器の触れ回りによって生じる保持器中心の並進変位は、図2に示すように2台のレーザ変位計（株式会社キーエンス製、LK-G35A）をそれぞれ水平方向（x方向）変位と鉛直方向（y方向）変位が測定可能な位置に固定して測定した。軸受ハウジングおよび外輪にはレーザ光を妨げない必要最低限の切り欠きを加工した。保持器中心の並進変位測定位置は保持器外周部であるため、それぞれの測定位置において一方の変位が他方に変位を生じさせるが、外周部曲率半径は保持器中心の並進変位に比べて十分大きいので、この変位を無視しても保持器触れ回り挙動計測の精度は十分である。また、この方法で保持器の中心位置の軌跡を求める場合、保持器の変形や真円度の影響も受けるが、これらは並進変位量に比べて小さいこと、およびすべての測定を同じ保持器で行っていることから、測定結果の相対比較には影響をおよぼさない。

2.4 保持器の運動を拘束しない測定系の構成

本研究の特徴である保持器の運動を拘束しない状態でのころの運動、およびころと保持器の接触力の測定を可能とする装置の概略図を図3に示す。本装置では試験軸受の外輪はハウジングに、内輪は回転主軸に取り付けられており、任意の回転数およびラジアル荷重で回転させることができる。主軸は試験軸受および支持軸受（a）で支持され、一端が継手を介してモータに直結されている。

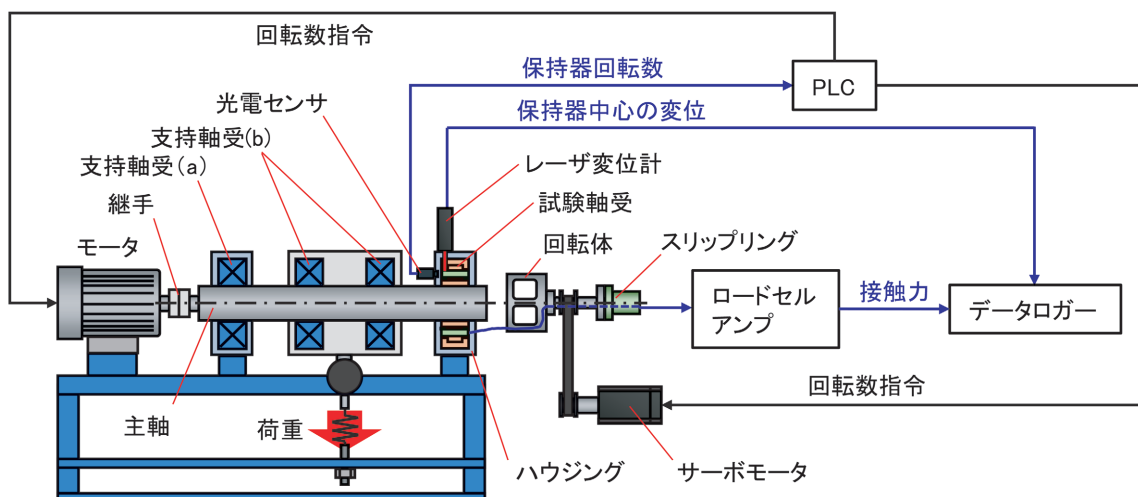


図3 測定装置の概略図

る。回転数はプログラマブルロジックコントローラ（以下、PLC）からモータに回転数指令を与えて制御し、ラジアル荷重は主軸の支持軸受（b）を介してバネによって与えている。ラジアル荷重の負荷方向は鉛直下方であり、試験軸受の負荷圏は鉛直下方（図1における180°前後）となる。

保持器の運動を拘束することなく回転する保持器に取り付けられたロードセルへの給電と信号取得を行うために、保持器の正面に保持器と回転を同期させた回転体を配設し、この回転体からロードセルへ給電線および信号線を結線した。給電線および信号線ともに細線であり十分軽く、張力による拘束力や保持器の不釣り合い荷重は生じない。これらは回転体からスリップリングを介してロードセルアンプへと結線される。保持器と回転体の同期は、保持器回転数を光電センサで測定し、その回転数をPLCに取り込み、PLCから回転体を回転させるためのサーボモータに回転数指令を送ることで実現した。この方法を用いると、ロードセルの給電線および信号線に張力が働かないので、これらが保持器の運動に影響を与えることはない。また、2.3節で示した方法で保持器中心の変位量を測定するために、レーザ変位計がハウジングに取り付けられており、データロガーと接続されている。

2.5 測定条件

測定条件を表2に示す。ラジアル荷重は主電動機において軸受が支持している回転子の重量を参考に970Nとした。この荷重は試験軸受の基本動定格荷重（83500N）に対して約1.2%の軽荷重である。潤滑にはリチウム複合石けんグリースを使用した。グリースは軸受の潤滑に必要な最小限の量とすべく、内輪に薄く塗布した後に軸受を回転させ、軸受全体になじませた。回転方向は正転と逆転の両方向とし、回転数を500、1000、2000、

表2 測定条件

ラジアル荷重	970N
潤滑剤	リチウム複合石けんグリース
回転方向	正転、逆転
回転数	500, 1000, 2000, 3000, 4000/min

3000、4000/minと変化させ、回転数がころと保持器の接触力におよぼす影響を確認することとした。なお、回転方向を正転と逆転の両方向としたのは、軸受の対称性や2つのロードセルの測定値に差異がないことを確認するためである。データ収録はサンプリング周波数を10kHzとして、各条件で保持器が100回転分に達するまで実施した。

3. 測定結果

3.1 ころと保持器の接触力

ころと保持器の接触力の測定結果のうち、回転数が1000/minおよび3000/minの場合を図4に例示する。ここでは、測定対象としたポケットが図1に示した0°に位置した時を0sとし、保持器が1回転するまでの測定結果を回転方向および回転数ごと示している。なお、保持器1回転に要する時間は保持器の理論回転数から求まる周期と一致しているため、公転すべりは発生していない。各グラフでは上段に黒線で「保持器を加速する力」を、下段に赤線で「保持器を減速する力」を示している。また、負荷圏にあたる部分をハッチングしている。なお、各条件で保持器100回転分を測定したが、そのうち10回転分を重ねて示している。「保持器を加速する力」は負荷圏の中央から出口にかけて連続的に発生する傾向を示している。これは、負荷圏内どころが内外輪からのトラクションにより加速され、保持器ポケットの前方に衝突す

ることで発生したと考えられる。一方、「保持器を減速する力」は負荷圏を出た後から断続的に発生する傾向を示している。これは、負荷圏を脱したところが転がり方向の油膜力による減速と、保持器ポケットの後方への衝突による加速を繰り返したために発生したと考えられる。また、回転数が1000/minでは負荷圏の入口から中央にかけても接触力が発生している。これは何らかの影響で負荷圏に侵入しにくいころを保持器が押すために発生したと考えられるが、負荷圏にころが侵入しにくかった原因やほかの回転数で発生しなかった原因は不明である。

次に、ころと保持器の接触力だけでなく、接触時間も考慮した評価を行うため、図4における接触力の測定結果を時間で積分し、力積を求めた。保持器が1回転する間の力積の変化のうち、回転数が1000/minおよび3000/minの場合を図5に例示する。ここでは、各条件で測定した保持器100回転分をすべて重ねて示している。なお、内輪の回転方向によらず傾向は同じであったため、正転時の結果のみを示している。また、積分開始は各力が発生し始める直前からとし、「保持器を加速する力」は負荷圏の入口を通過した時点から、保持器を減速する力」は負荷圏の出口を通過した時点からとした。「保持器を加速する力」から求めた力積は、負荷圏の中央から出口にあたる箇所まで急激に増加し、その後はほぼ一定の値を示している。また、保持器100回転中では力積の増加が顕著なものとならないものがある。これらのことから、「保持器を加速する力」によるころと保持器の

間の運動量交換は大部分が負荷圏でなされており、かつ保持器の回転ごとに顕著に発生するわけではないことが分かる。一方、「保持器を減速する力」から求めた力積は、負荷圏の出口付近以降で徐々に増加している。回転数が低い条件ではある程度保持器が回転すると力積は一定になるのに対して、回転数が高い条件では力積が増加し続けている。また、保持器100回転中では力積がほぼ同様に増加している。回転数が1000/minでは次の負荷圏に突入する後半で力積が急激に増加しているが、前述のとおり何らかの影響で負荷圏に侵入しにくいころを保持器が押すためであると考えられる。以上のことから、特定の回転数の負荷圏突入時を除けば「保持器を減速する力」によるころと保持器の間の運動量交換は、負荷圏を脱出した後にころと保持器が同じ速度になるまで断続的になされ、かつ保持器回転ごとの再現性が高い現象であることが分かる。

上記の結果から、保持器1回転当たりの力積を測定条件ごとに平均した結果を図6に示す。図中のエラーバーは標準偏差を示している（注：負の値は測定されていない）。なお、「保持器を加速する力」は主に負荷圏内で、「保持器を減速する力」は主に負荷圏外で発生していたことから、それぞれこの範囲内の力積を用いて算出した。「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」から求めた保持器1回転当たりの力積はおおむね近い値をとっており、両者とも回転数が2000/minまでは減少し、それ以上ではほぼ一定の値となっている。両者の力

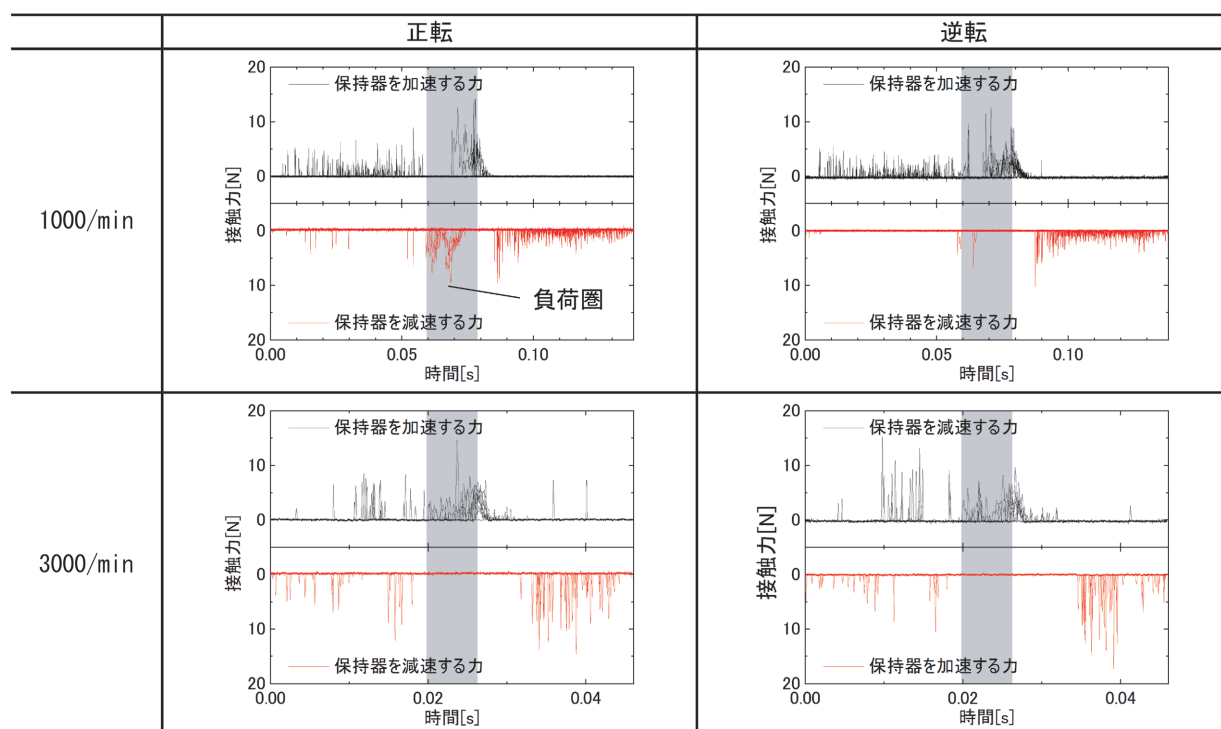


図4 ころと保持器の接触力の測定結果

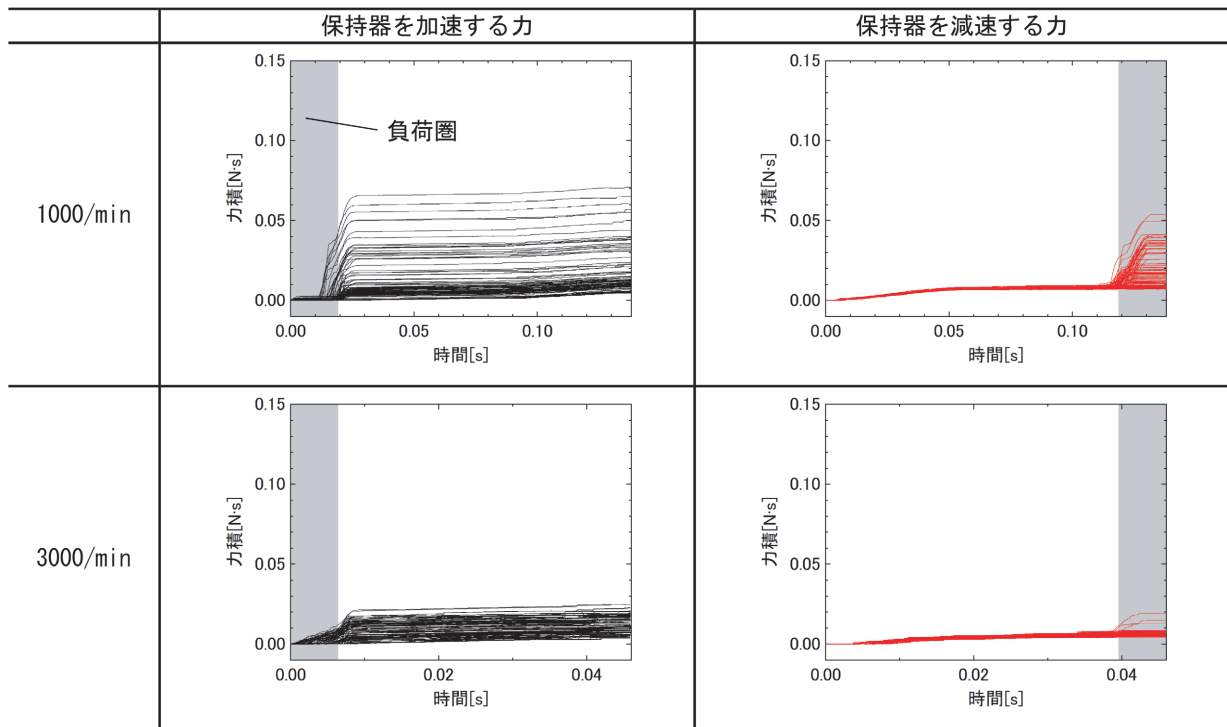
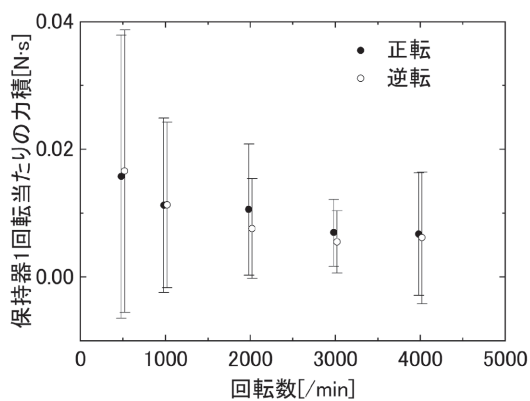
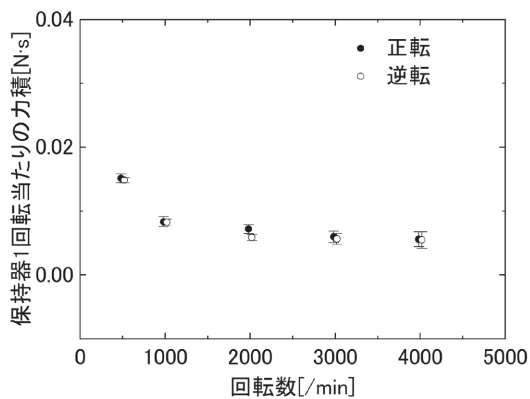


図5 ころと保持器の接触力から求めた力積



(a) 保持器を加速する力



(b) 保持器を減速する力

図6 保持器 1 回転当たりの力積

積がほぼ同じことから、「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」により授受される運動量がほぼ同じであることが分かる。保持器の回転数がほぼ一定であること、保持器はころ以外からの外力を受けないことを考えれば、適切な測定結果と考えられる。また、「保持器を加速する力」から求めた力積の標準偏差が大きいの。これは保持器を加速する仕事は、すべての保持器ポケットで毎回発生するわけではなく、保持器がある回転数以下に減速した際に、負荷圏に位置した保持器ポケットで発生するためと考えられる。

3.2 保持器中心の変位量

保持器の振り回りによる保持器中心の変位量の測定結果を図7に示す。測定結果は図1および図2に示した座標系に従い、保持器の中心位置の軌跡を各条件につき保持器10回転分示している。なお、正転時は紙面に対して反時計回りに、逆転時は紙面に対して時計回りに保持器は回転している。正転と逆転において保持器中心の変位は互いにy軸対称であり、同様の挙動を示している。回転数が1000/min以下の条件では保持器中心は図中の下部で主に左右に変位しており、保持器が0°付近のころを支点に垂下し、左右に揺動している。回転数が増加すると、この揺動の中心が保持器の回転方向に移動し、回転数が3000/minを超えると保持器中心は円形に振れまわっている。また、2000/minでは上記2つの遷移状態となっている。回転数の増加にともない、保持器中心

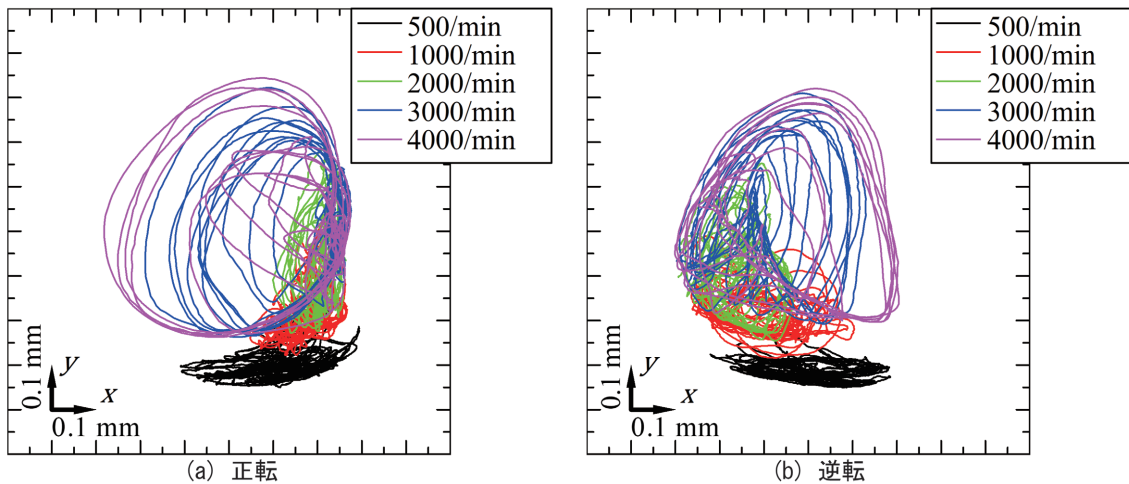


図7 保持器中心の変位量

を並進させる力の主体が重力やころとの接触力から保持器の重量アンバランスによって発生する遠心力に代わるため、保持器中心の軌跡の形状が変化したと考えられる。また、保持器中心の変位が回転数によって変化したことから、保持器の振り回りを拘束しない測定系が構築できたと考えられる。

4. 考察

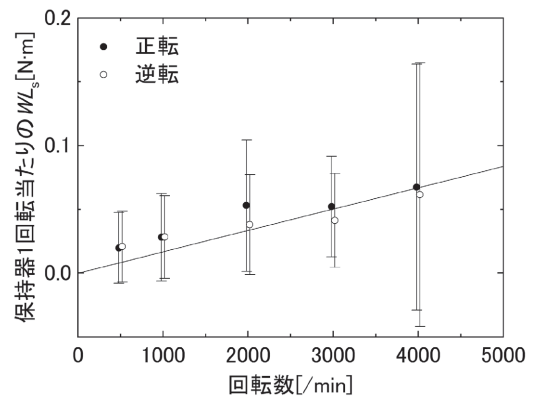
本報告における測定結果から保持器摩耗量について考察する。ここでは、保持器の摩耗形態が凝着摩耗であると仮定し、その摩耗量 V_w は次の Archard の式⁶⁾ に従うものとする。

$$V_w = K \frac{WL_s}{H} \quad (1)$$

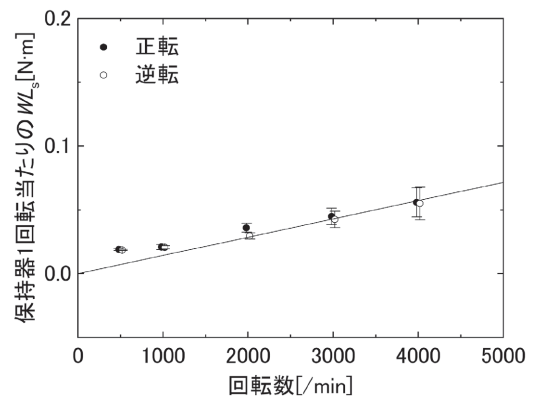
ここで、 K は摩耗定数、 W は荷重、 L_s はすべり距離、 H は軟らかい方の材料の硬さ（本報告の場合、保持器の硬さ）である。摩耗定数 K と軟らかい方の材料の硬さ H は測定条件によって変化しないと考えられるので、 V_w は W と L_s の積 WL_s に比例する。保持器摩耗における W はころと保持器の接触力 F_c であるが時間に対して変化するため、これを L_s で積分することで WL_s を求めた。また、 L_s はころの周速度 ($=r_r \omega_r$, r_r はころの半径、 ω_r はころの角速度) に時間を乗ずることで得られる。よって、 WL_s は次式によって与えられる。

$$WL_s = \int F_c dL_s = \int F_c dt \cdot r_r \omega_r \quad (2)$$

すなわち、ころと保持器の接触力による力積ところの周速度の積となる。ここで、各測定条件間で比較するために、保持器1回転当たりの WL_s を求めた結果を図8に示す。保持器1回転当たりの力積は3.1節の値を用い



(a) 保持器を加速する力



(b) 保持器を減速する力

図8 保持器1回転当たりの WL_s

た。「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」の測定結果から求めた保持器1回転当たりの WL_s は、いずれも回転数に比例して増加する傾向を示している。ただし、500/min および 1000/min の値は図中の直線（原点を通り、2000/min～4000/min の値を近似した線）より上側に位置している。以上のことから、回転数を下げると軸受1回転当たりの保持器摩耗量は減少するが、

その程度は 500/min および 1000/min において鈍化すると考えられる。この原因は不明であるが、1000/min 以下の条件では保持器中心が左右に揺動していたことに関連する可能性が考えられる。

以上のことから、 K が決定すれば、 V_w を定量的に予測することができる。また、 K が決定しない場合においても K を定数とみなせば、使用条件を変更した際に、 V_w が使用条件の変更前の何割程度になるといった予測を行うことができる。

5. まとめ

主電動機軸受の保持器摩耗を予測するための知見を得るため、保持器の振れ回りを拘束しない状態でころと保持器の接触力と保持器挙動の同時測定が可能な測定系を構築し、広範囲の軸受回転数において測定を行った。また、ころと保持器の接触力と保持器摩耗の関係について考察した結果、以下に示す知見を得た。

- (1) ころと保持器の接触力を測定した結果、「保持器を加速する力」は負荷圏の中央から出口にかけて連続的に発生した。これは、負荷圏内でころが内外輪からのトラクションで加速され、保持器ポケットの前方に衝突することで発生したと考えられる。一方、「保持器を減速する力」は負荷圏の出口付近から断続的に発生した。これは、負荷圏を脱したころが転がり方向の油膜力による減速と、保持器ポケットの後方への衝突による加速を繰り返したために発生したと考えられる。
- (2) (1) で測定した力を時間で積分し、保持器 1 回転当たりの力積を求めた結果、「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」から求めた保持器 1 回転当たりの力積はおおむね近い値をとり、両者とも回転数 2000/min までは減少し、

それ以上ではほぼ一定の値となった。

- (3) 保持器中心の変位量を測定した結果、回転数が 1000/min 以下の条件では保持器中心は下部で左右に揺動し、回転数が増加するとこの揺動の中心が保持器の回転方向に移動し、回転数が 3000/min を超えると保持器中心は円形に振れまわった。
- (4) 保持器摩耗量がころと保持器の接触力とすべり距離の積に比例するとし、(2) で得られた力積を用いてこの積を導出した。その結果、軸受 1 回転あたりの摩耗量は回転数の増加にともなって増加すると考えられる。

文 献

- 1) 日本産業規格：転がり軸受—動定格荷重及び定格寿命，JISB1518，2013
- 2) 多田誠二：高速回転下における保持器音および振動・挙動の解析，KOYO エンジニアリングジャーナル，No.160，pp.31-38，2001
- 3) 角田和雄：玉軸受の保持器に作用する力（第 1 報，内外輪が互いに並行変位している軸受荷重を受ける場合），日本機械学会論文集（第 3 部），Vol.32，No.239，pp.1164-1175，1966
- 4) Stacke, L-E., Fritzon, D., "Dynamic behavior of rolling bearings: simulations and experiments," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol.215, No.6, pp.499-508, 2001.
- 5) 鈴木大輔，高橋研，糸魚川文広，前川覚：円筒ころ軸受におけるころと保持器の接触力（ころと保持器のダイナミクスに着目した考察），日本機械学会論文集，Vol.88，No.911，DOI: 10.1299/transjsme.22-00153，2022
- 6) Archard, J.F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," Journal of Applied Physics, Vol.24, No.8, p981. 1953.