

## 軸受保持器の高速ホワールに対する保持器可動領域に基づく考察と対策

An Insight and Countermeasure of a Bearing Cage Whirl Based on Accessible Area of the Cage

NTN (株) (正) \*辻村 奈央 (正) 坂口 智也

Nao Tsujimura\*, Tomoya Sakaguchi\*\*

\*NTN Corporation, \*\*NTN Next Generation Research Alliance Laboratories, Osaka University

### 1. はじめに

転がり軸受において、保持器が高速で振れまわる事象が稀に発生し、トルク変動やトルクの上昇、異音、振動を発生させることがある。この現象は、“ホワール”、“Retainer Instability(RI)”と呼ばれ<sup>1,2)</sup>、保持器と転動体の間、もしくは保持器と軌道輪の間の摩擦により誘起される剛体運動と言われている<sup>1,3)</sup>。本報では、保持器が自転と同期して振れまわる安定的なホワール（以下“同期ホワール”）と区別するため、“高速ホワール”と呼ぶことにする。高速ホワールは、とりわけ工作機械や宇宙機器などの精度を要するアプリケーションで発生しやすく、Kingsbury and Walker<sup>3)</sup>をはじめ、複数の研究<sup>1,2,4)</sup>が行われているが、未だ現象の詳細な理解が十分でなく、本質的な対策が確立されていない。

本研究では、転がり軸受をモデルとした動解析を行って保持器挙動を分析し、高速ホワール発生傾向に対する荷重条件の影響を調査した。また、保持器が転動体や軌道輪と接触せずに移動できる範囲を可動領域として可視化し、発生傾向を考察した。最後に、得られた知見から対策を検討した。以下にそれら結果を報告する。

### 2. 解析手法

動解析には汎用の機構解析ソフト Adams<sup>5)</sup>を用いた。高速ホワールは保持器の剛体運動と考えられるため<sup>1,3)</sup>、計算時間の短縮と解釈の容易化の点から、全ての部品を剛体とした。ただし、軌道輪と転動体の接触部はヘルツ接触に基づく力が生じ、その接線方向には転がり滑りによるトラクションが生じると定義した。保持器と転動体および保持器と軌道輪の間の力を、Adams に搭載されている Contact 機能を利用して計算した。部品同士の干渉量に応じた接触荷重ならびに与えた摩擦係数に基づく摩擦力が計算される。

解析対象はもみ抜き保持器が組み込まれた内径 65 mm のアンギュラ玉軸受である。本報告では、転動体と保持器の間の摩擦力によって駆動される高速ホワールを対象とするため、ポケットすきま（保持器ポケット面と転動体の間のすきま）を 0.2 mm、案内すきま（外輪内径と保持器外径の間のすきま）を 0.7 mm とし、ポケット面で積極的に接触する仕様とした。転動体と軌道輪、保持器と外輪、および保持器と転動体の動摩擦係数を 0.03 と仮定した。布入りフェノール樹脂製保持器（ポケット数 24 個）を仮定し、保持器の質量を約 9 g とした。内輪回転速度は 4 000 min<sup>-1</sup> で一定、荷重はアキシャル荷重  $F_a$  が 500, 1 000, 2 000, 3 000 N の 4 水準に対し、ラジアル荷重  $F_r$  を 0 N またはアキシャル荷重と同一の 2 水準とし、合計 8 条件の解析を行った。

保持器の可動領域を以下の方法で求めた。まず、解析により各時刻における各転動体の位置を取得した。次に、ラジアル平面上で案内すきまを直径とする円内を多数に分割した微小領域ごとに、保持器のポケット面および外径面が転動体や外輪内径面と干渉せずに、保持器中心が存在できるか否かを幾何学的な計算で判定した。存在可と判定された全ての微小領域を合わせ、保持器の可動領域とした。

### 3. 解析結果と考察

解析の結果は、荷重条件によって高速ホワールと同期ホワールが共に発生するケースと、同期ホワールのみ発生するケースに分かれた。Figure 1 に両ケースの保持器の並進変位を示す。グラフ横軸はフルスケールが内輪 2 回転分、すなわち保持器の自転約 1 回転分であり、Fig. 1 (a)においては 1 周期分の同期ホワールの振動に高速ホワールの高周波の振動が重なっていることがわかる。一方、Fig. 1 (b)においては同期ホワールの単一の振動のみが見られる。

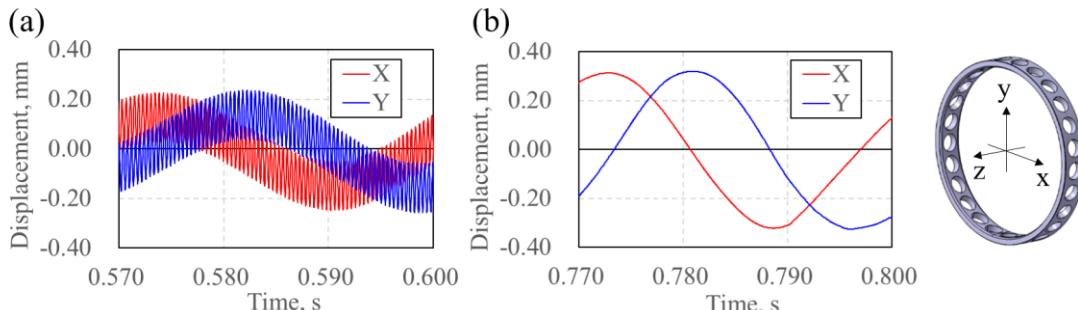


Fig. 1 Displacement of cage center at (a)  $F_a = 3 000 \text{ N}$ ,  $F_r = 0 \text{ N}$ , (b)  $F_a = 3 000 \text{ N}$ ,  $F_r = 3 000 \text{ N}$

Figure 2 に、これら保持器の並進変位 ( $x$  方向) を FFT 解析して得られた、ピークの周波数と振幅を示す。縦軸は周波数、横軸は運転条件で、振幅 0.01 mm 以上のピークが得られた場合のみ、その振幅に比例した大きさの円をプロットした。赤の破線は同期ホワールの周波数レベルを表す。アキシャル荷重のみの条件では、同期ホワールと高速ホワールがともに発生し、荷重が大きくなる程高速ホワールの周波数が高くなる傾向が見られた。一方、複合荷重条件では、全条件で高速ホワールの周波数が低く、中には同期ホワールのみの結果も得られた。

アキシャル荷重のみの条件で荷重に対し高速ホワールの周波数が高くなる傾向は、軌道面における転動体の滑りが要因と考えられる<sup>6)</sup>。一方、複合荷重条件で高速ホワールの周波数が低くなる、もしくは高速ホワールが消失する理由については、保持器の可動領域を用いて以下の通り考察した。

Figure 3 に、各時刻における可動領域の代表例を示す。水色の領域は保持器の可動領域、青色の点は保持器中心、赤色の矢印は保持器の速度、青色の矢印は保持器の加速度を示す。保持器に作用する重力は比較的小さく、この加速度はおよそ保持器に作用する接触力を表す。アキシャル荷重のみの場合の可動領域はほぼ円形 (Fig. 3 (a)) であるのに対し、ラジアル荷重を増加していくと可動領域がいびつな形状に変化する (Fig. 3 (b))。可動領域外縁の境界上は、保持器が案内面もしくはポケット面と接触する部分である。可動領域が円形であれば、保持器中心が外縁部に位置する場合に受ける接触力は、外縁部に沿う保持器の振れまわり運動に対しほぼ直交しており、振れまわり運動を妨げない (摩擦力は運動を加速する方向に働く)。しかし、可動領域がいびつな形状になると、外縁部の不連続な箇所において保持器に作用する接触力は、保持器中心の進行を妨げる方向に作用するため、振れまわり運動を減速させる。

#### 4. 高速ホワール対策

前章において、可動領域の形状がいびつ、すなわち円形から離れると高速ホワールが起きにくくと考察した。そこでここでは、この考え方に基づく対策案の一例を示す。

可動領域の形状をいびつにするため、複数あるポケットの内の一部のポケットの径を変えることとした。一例として、前章の解析対象であるポケット数 24 個の保持器に対し、ポケットすきま 0.4 mm の大ポケットと 0.2 mm の小ポケットを、大 6 個、小 6 個、大 6 個、小 6 個の並びで配置した。Figure 4 (a) に対策保持器における大小ポケットの配置を示す。Figure 4 (b) に転動体が等配の状態で求めた、ポケット径が均等な保持器および対策保持器の可動領域を示す。対策保持器の可動領域は、ひし形のような形状となり、ひし形の凸部は、大ポケットの周方向に伸びている。

動解析を用いて対策効果を確認したところ、Fig. 5 に示す通り、いずれの条件においても高速ホワールは非発生である。

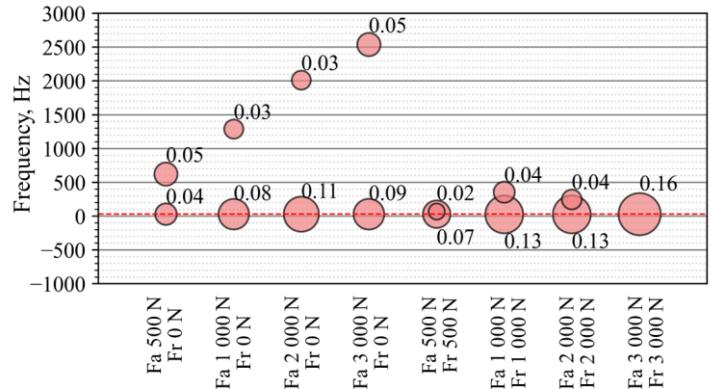


Fig. 2 Frequency and amplitude of the whirl of conventional cage

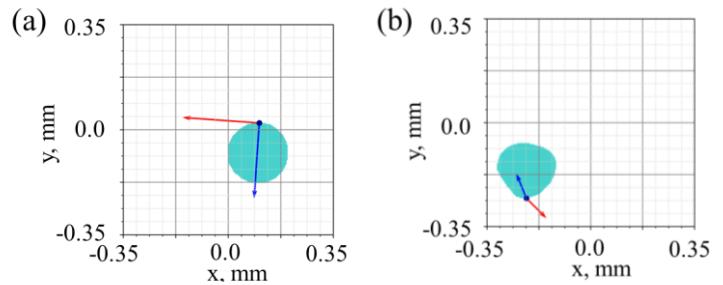


Fig. 3 Cage accessible area at (a)  $F_a = 3\,000\text{ N}$ ,  $F_r = 0\text{ N}$  and  
(b) a transition from  $F_r = 0$  to  $3\,000\text{ N}$ , maintaining  $F_a = 3\,000\text{ N}$

であるのに対し、ラジアル荷重を増加していくと可動領域がいびつな形状に変化する (Fig. 3 (b))。可動領域外縁の境界上は、保持器が案内面もしくはポケット面と接触する部分である。可動領域が円形であれば、保持器中心が外縁部に位置する場合に受ける接触力は、外縁部に沿う保持器の振れまわり運動に対しほぼ直交しており、振れまわり運動を妨げない (摩擦力は運動を加速する方向に働く)。しかし、可動領域がいびつな形状になると、外縁部の不連続な箇所において保持器に作用する接触力は、保持器中心の進行を妨げる方向に作用するため、振れまわり運動を減速させる。

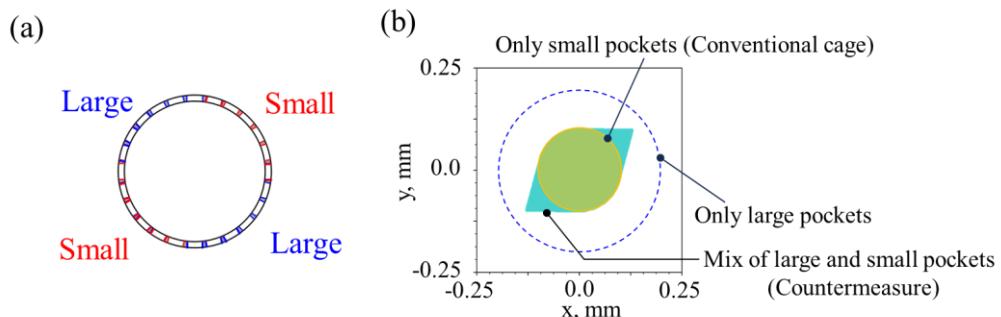


Fig. 4 (a) Cross-section figure of the countermeasure cage and (b) Cage accessible area

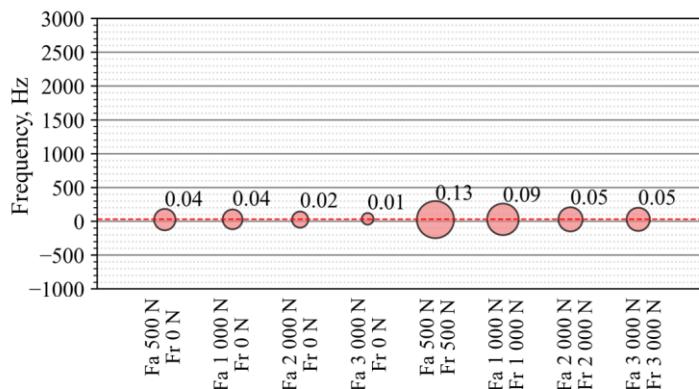


Fig. 5 Frequency and amplitude of countermeasure cage

## 5. まとめ

動解析により、高速ホワール発生傾向への荷重条件の影響を調査した。また、保持器可動領域を算出し発生傾向と比較した。その結果、転動体と保持器の間の摩擦力によって駆動される高速ホワールについて以下のことがわかった。

- 1) 保持器可動領域の形状が円形である程高速ホワールが発生しやすい。可動領域が円形の場合、保持器中心が外縁部に位置する際に受ける接触力は、外縁部に沿う保持器の振れまわり運動を妨げない。しかし可動領域がいびつな形状となると、外縁部の不連続な箇所において保持器に作用する接触力は、保持器中心の進行を妨げる方向に作用し振れまわり運動を減速させる。
- 2) アキシャル荷重のみが負荷される条件ではラジアル荷重とアキシャル荷重の複合荷重条件より高速ホワールが発生しやすい。
- 3) 異なる径のポケットを有する保持器は、保持器の可動領域が円形でなくなるため、高速ホワールを抑制する効果を持つ。

今後、荷重以外の条件や軸受諸元の差などより広範な条件に対する発生傾向の解明に取り組み、予測手法および対策技術の確立を進めたい。

## 文献

- 1) 間庭・野木：人工衛星用機械要素のトライボロジーに関する最近の研究動向、トライボロジスト、第 58 卷、第 12 号（2013） 855.
- 2) 野木：玉軸受における保持器ホワールの動解析、トライボロジーカンファレンス 2016 春東京 予稿集 (2016) 49.
- 3) E. Kingsbury and R. Walker: Motions of an Unstable Retainer in an Instrument Ball Bearing, ASME J. Tribology, 116, 2 (1994) 202.
- 4) S. Schwarz, H. Grillenberger, S. Tremmel & S. Wartzack: Prediction of Rolling Bearing Simulations and Machine Learning Algorithms, Tribol. Trans., 65, 2 (2022) 225.
- 5) Adams, Software Package, Ver. 2022.1.1, MSC Software
- 6) C. Servais, M. Duquenne & J.-L. Bozec,: Influence of Tribology of Cage Material on Ball Bearing Cage Instability, Proceedings of the 15<sup>th</sup> European Space Mechanisms and Tribology Symposium, (2013)