

ボールブッシュの転動体循環機構の観察

転動体挙動と軌道面の応力変動との関係

千葉工業大学 ○小山拓人, 千葉工業大学 ◎大関浩, 古津大地, 久保みなみ

ボールブッシュに代表される直動転がり機械要素の疲労は軌道面両端部に集中することが知られているが、原因は明らかでない。本研究では、運転中のボールブッシュ軌道面両端及び中央のひずみを計測、また転動体の挙動を観察することにより、軌道面両端部では中央部と比して接触面圧が大きいこと、同所で転動体が不安定な挙動を示すことを確認したので報告する。

1. 緒言

近年、転がり案内はその低い転がり抵抗による優位性から、工作機械の案内面など従来すべり案内が用いられた要素を置き換えつつあり、更なる高精度長寿命化が求められている。一般的に転がり機械要素の寿命計算にはLundberg-Palmgrenの理論を基に多くのパラメータを追加した寿命式が使用されるが、直動転がり案内は転がり軸受と比して歴史が浅く、構造上内部観察が容易でないことから解明されていない現象が多い。

直動転がり案内装置として代表的なボールブッシュは、実際の運用から寿命に至る際、特に軌道面両端部に集中的に転がり疲れによる離が発生する事例が多いことが知られているものの、原因は不明である。そこで本研究ではこの解明のため、運転中のボールブッシュ軌道面両端及び中央にてひずみを計測（実験1）、また同所での転動体の挙動を観察（実験2）し、これらの関係を調査する。なお本稿の内容のうち、登壇者は実験2の実施及び総合的な実験結果の解析を担当した。

2. 実験装置

2.1 実験装置概観

実験装置の概観を図1に示す。2つのシャフト支持用ボールブッシュが支柱により実験台上に固定されており、この間にケースを装着した試験用ボールブッシュが配置されこれらをシャフトが貫通する。シャフトはスライダユニットとワイヤで接続され、ステッピングモータによりスライダユニットを駆動させることで、任意の速度、範囲でシャフトを左右に移動させることができる。試験用ボールブッシュ直下にはエアシリンダが設置され、ケースを介して試験用ボールブッシュ底面に上向きの一様な負荷をかけることができる。

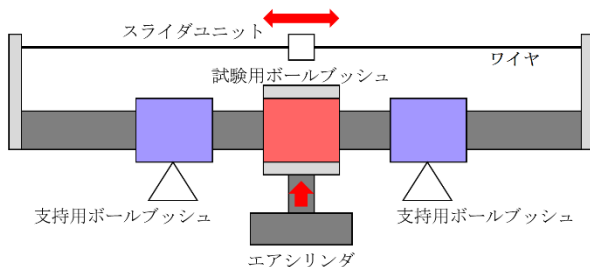


図1 試験装置概観

2.2 試験用ボールブッシュ

本実験では総ボール型標準リニアベアリング (ML40型リテーナなし (株) オザック精工製, 表1参照) に、以下の追加工を施したものを使用する。

(実験1) 底面に4mmの平面加工を施す。図2.a参照

(実験2) アウタースリーブを65度の開き角で切斷。図2.b参照

表1 試験用ボールブッシュ仕様

項目	仕様
転動体直径	4.763mm
軌道面長さ	49mm
軌道面列数	6列
作用転動体個数	10個
潤滑剤	グリース (ちょう度 250)

3. 実験方法

エアシリンダで負荷をかけた状態で、シャフトを左端からストローク225mmで往復運動させ、表2に示す条件で実験1、実験2それぞれ以下の測定を行う。

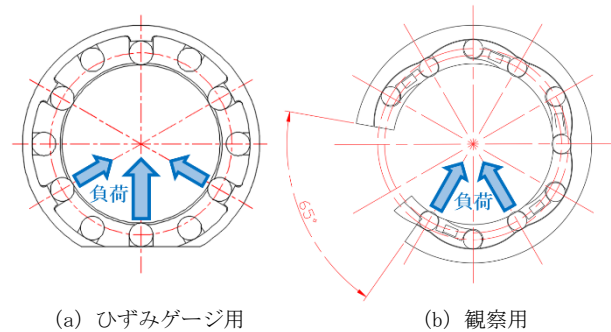


図2 試験用ボールブッシュ

3.1 実験1

平面加工を施したボールブッシュ底面の両端および中央に、計3枚のひずみゲージをシャフトと垂直方向に貼り、負荷6条件でひずみの測定を行う。ボールブッシュ取付角度は転動体がひずみゲージ直上を通過する3列支持とする。

3.2 実験2

レーザ変位計および高速度カメラを、ボールブッシュ軌道面の転動体移動方向と垂直に設置し、速度5条件で転動体挙動の観察を行う。ボールブッシュ取付角度は軌道面の転動体観察が容易な2列支持とする。

表2 実験条件

	実験1	実験2
負荷 (N)	503	503, 1005, 1508, 2011, 2513, 3016
速度 (mm/s)	36, 72, 108, 144, 180	90
往復回数	1回	10回
ストローク	225mm	225mm
取付角度	3列支持	2列支持

4. 実験結果

4.1 実験 1-ひずみ測定

図 3 に、一例として負荷 3016N, 2 往復目の各動作時に測定されたひずみの変化量を示す。左端からの動き出し時のみ軌道面左端のひずみ変化量が最小だが、その他の動作では軌道面両端のひずみ変化量は中央の 3 倍以上大きい。ほか、各負荷条件において各所のひずみ変化量は負荷に応じて増減したが、いずれの条件下でも軌道面両端のひずみ変化量は中央と比べて大きくなる傾向にあった。

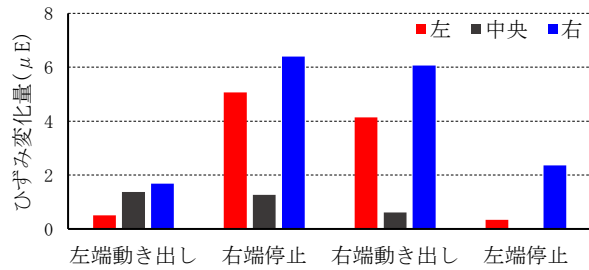


図 3 ひずみ変化量

4.2.1 実験 2-高速度カメラによる観察

図 4 に、高速度カメラにて撮影された転動体挙動の一例として速度 72mm/s 軌道面端部の観測結果を示す。転動体は軌道面では安定して直線運動したが、転動体中心が軌道面から外れると図 4 のように図上方に移動し軌道が乱れていることが確認できる。また軌道面端部においても、転動体が負荷領域から無負荷領域へ進入する場合、その逆の場合では異なる挙動を示すことが観察され、前者ではほぼ全ての転動体が不安定挙動を示したが、後者では保持器の溝に沿って動く転動体と不安定挙動を示す転動体が半々であった。

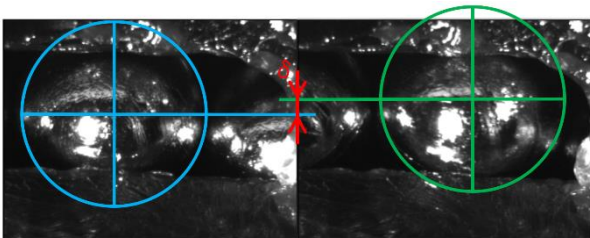


図 4 軌道面を外れ不安定挙動を示す転動体 (72mm/s)

4.2.2 実験 2-レーザ変位計による測定

本実験では連続して移動する複数の転動体表面に、移動方向から垂直にレーザ変位計による測距を行ったため、理論上転動体が等速直線運動をしている場合、測定波形は複数の連続した二次曲線となり、その極値は一定で転動体表面とレーザ変位計との最接近距離を示す。しかしながら各条件下で実際の測定波形は綺麗な二次曲線を描かなかつたため、測定波形を測距した転動体毎に分割、各々を二次曲線で近似し、刻み時間 1ms 毎の近似曲線と測定波形との乖離値の標準偏差を算出した。この値は各転動体の不安定挙動の大きさを意味する。一例として速度 20mm/s で 1 往復時の軌道面中央、右端での計算結果を往路、復路に分け図 5 に示す。なお実際にセンサを通過した転動体は 23 個であったが、本実験は運転中のボールブッシュを前提としたものであるため、実験装置の急加速による影響を受けた 1-5 個目の転動体測定結果を除き、6-23 個目の計 18 個の転動体観測結果を示す。図 5 のように、全体的に乖離値標準偏差すなわち転動体不安定挙動は中央より右端で大きくなる傾向を示した。

また特に右端では、往路では乖離値標準偏差は 0.017 ± 0.003 付近に収束するものの、復路では乖離値標準偏差は最小 0.014 から最大 0.024 とばらつきが大きい。これは往路では全ての転動体が一樣な挙動を示すのに対し、復路では不安定挙動の小さい転動体と大きな転動体が混在していることを表している。

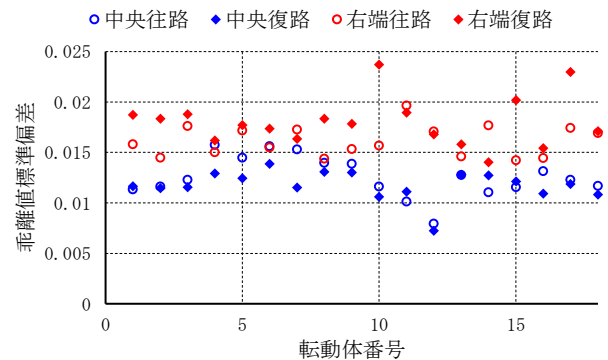


図 5 20mm/s での各転動体乖離値標準偏差

5. 考察

実験 1 および 2 の結果より、転動体の不安定挙動により軌道面端部に応力が生じ、これが作用することで軌道面端部にひずみの変化が生じたと予想される。

まず往路の場合を考える。転動体は負荷領域では両軌道面から推力を受け拘束された状態で公転するが、無負荷領域では負荷領域にある転動体からのみ推力を受け公転するため、無負荷領域にある転動体は軌道面からの推力を失い、加えて公転方向が変化し摺動抵抗も受けるため減速し負荷領域にある転動体との間に速度差が生じる。負荷領域を抜けた転動体は無負荷領域にある低速の転動体と衝突することにより図 6 に示すように持ち上がり、負荷領域にある転動体はその反力により軌道面端部に応力を加えると考えられる。

次に復路の場合を考える。無負荷領域にある転動体は前述のように摺動抵抗を受けながら後方の負荷領域にある転動体から推力を受け公転するが、無負荷領域には隙間が存在するため転動体は隙間を埋めるように千鳥状に並び保持器通路外周に押し付けられる。この状態から負荷領域に進入することにより転動体は急加速し、加えて軌道面や保持器から拘束を受けるため、千鳥状の並び方や保持器通路外周に押し付けられた向きに応じて転動体の一部が不安定挙動を生じ、軌道面端部に応力が加わ

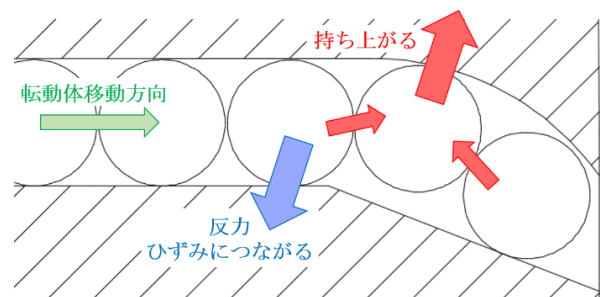


図 6 軌道面を外れる転動体の動き

ったものと考えられる。

6. 結言

本実験によりボールブッシュ軌道面端部にて転動体が不安定な挙動を示し、軌道面に疲労破壊の原因と推察される繰り返し応力を加えることが確認された。