

転がり軸受に内在する“制御不能な滑り”

1. はじめに

転がり軸受の転動体が保持器と滑り接触していることは周知と思われるが、転動体は内外輪との間でも滑ることは案外知られていないのではないかな？

弊社ホームページでは、内輪を指で軸方向に押しながら右左に各3回転させた後の保持器位相がずれている動画を紹介、これは玉が内外輪と滑ったことを示している。**※1**

Fig 1は試験前後の写真、試験後の位相ずれは約20°であるが、より大きくずれる場合もある。

本報告では、この現象のメカニズムを解説する。



Fig 1 保持器の位相ずれ試験

2. 転がり軸受の一般的摩擦

Fig 1の現象は摩擦の関与があると思われる。軸受カタログ等に記載の一般的な摩擦をTable 1にまとめた。

Fig2の補足図と共に参照されたい。

- ①ヒステリシスは、軌道と玉の接触点での弾性変位による損失である。機械工学便覧記載の転がり摩擦係数0.00002は、市販軸受の僅か1/50以下。ヒステリシス損失を捉えたもの、と言う事ができる。

- ②作動滑り③スピン滑りは、玉と軌道の接触領域の中央と端で、玉、軌道の接触半径が異なることにより生じるものである。
④ジャイロ滑りは、高速回転する玉の公転軸と自転軸との傾きにより、玉にツイスト方向のジャイロモーメントが働くものである。
⑤⑥の滑り摩擦は、内外輪が保持器を、保持器が玉を、滑り面で支持する軸受構造に拠るものである。
⑦⑧の潤滑抵抗は、玉の周速、潤滑剤の粘度と量、⑤⑥の滑り面の面積、に従い増大する。

これらの内、以下はFig 1現象の要因とは成り得ない。

- ①：摩擦そのものが微小。
②③：極軽荷重に付、接触領域が微小⇒滑りも微小。
④⑦⑧：極低速に付、モーメント、摩擦は微小。
⑤：この保持器は玉案内で、内外輪とは非接触。

⑥について、保持器と玉が押合うことがあるとすれば、それなりの摩擦が生じることより、次項で検討した。

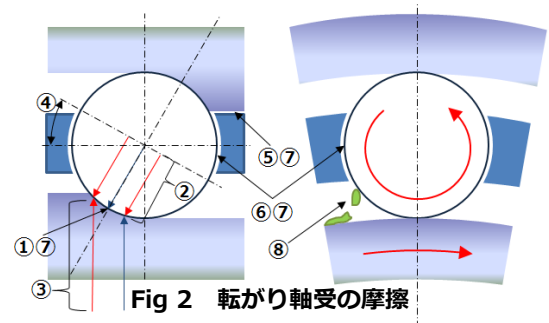


Fig 2 転がり軸受の摩擦

Table 1 ころがり軸受に作用する摩擦

摩擦の種類		No	要因、等
転がり摩擦	ヒステリシス	①	軌道と玉のヒステリシス損失(材料特性)
	差動滑り	②	接触楕円の中心と端部における玉の回転半径の差(接触点の周速差)
	スピン滑り	③	接触楕円の両端部における軌道半径の差(接触点の周速差)
	ジャイロ滑り	④	公転軸と自転軸との傾斜角によって玉に生じるジャイロモーメント
滑り摩擦	内外輪と保持器の滑り	⑤	保持器が内外輪の摺動面に案内(軸方向、径方向)される
	保持器と玉の滑り	⑥	玉が保持器の摺動面に案内(周方向)される
潤滑摩擦	粘性	⑦	①～⑥の滑り面に介在する潤滑剤のせん断摩擦
	攪拌	⑧	速度の異なる内外輪や玉の間で飛散、付着する潤滑剤のおくエネルギー損失

3. 保持器と玉に働く力

⑥が原因ならば、指圧による玉荷重を受けている玉が自転しなくなる程の摩擦を保持器から受けたことになる。

転がり軸受のカタログにこの様な力の説明は見当たらないが、論文¹⁾や公開特許公報²⁾により以下のメカニズムによるものと確認できる。

- A) モーメント等により内輪と外輪が傾斜する。
B) 玉と軌道面との接触角が不均一になる。
C) 玉の公転速度(=公転角度)が不均等になる。**※2**
D) 公転速度大の玉が保持器を介し速度小の玉を押す。

押力が玉荷重(軌道が玉を挟む力)を超えると、玉が軌道を滑り保持器位相がずれ、押合いは解消される。

しかしながら、Fig1で内輪を押す力は僅か数Nであり、この程度では接触角は1°も変化しない。

仮に押圧位置の接触角が40°から41°に増えたとしても、内輪1回転当りの公転角度の差は0.48°←(1)式より往復動作の全てが保持器を右回転させた(復路の接触角が39°に減った)としても、計算ずれ量は僅か2.8°であった。よって、これ以外の要素が作用していると思われる。

※1 軌道面と滑らない保持器位相ずれ

※2で解説の接触角が正/逆転で異なる場合でも、玉の公転角度が正/逆転で変わるので保持器位相のずれが起こる。
但しその場合は、玉と保持器の押合いや玉と軌道面との滑りが生じないので、問題では無い。

※2 接触角と公転角度

内輪1回転当りの玉の公転角度 β_c

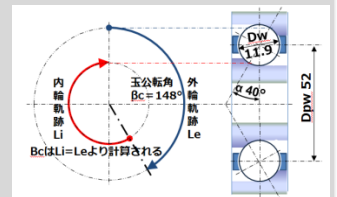
$$\beta_c[\text{deg}] = 360 \times (1 - Dw \times \cos \alpha / Dpw) \div 2 \quad (1)$$

Fig1 の β_c 計算例

$$\alpha = 40^\circ \Rightarrow \beta_c = 148^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow \beta_c = 180^\circ$$

この様に、玉の公転角度は、接触角によって異なる。



※3 玉と軌道面の滑り摩擦係数

質量が小さい軸受の玉は滑り摩擦係数の瞬間的な変動に追従し易い。よって、この目的での摩擦係数の確認は、玉質量に近い測定子であることが必要。

4. 保持器位相ずれの原因は制御不能な滑り

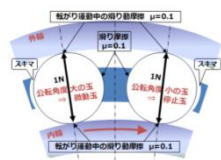
前項の作用、すなわち『公転速度大の玉が保持器を介して公転速度小の玉を押す』ときの力学を検討した。

結果、一旦軌道面で滑った玉は、自転力を失い滑り続けることがあること、この滑りは、玉と軌道面、及び玉と保持器、の滑り摩擦係数のバランスに依存すること、が解った。滑り摩擦係数の変動を抑えることは、現状では無理であることより、この滑りを“制御不能な滑り”と呼ぶ。※3
以下にその内容を説明する。

保持器位相ずれのメカニズム

玉は実際には2個共公転しているが、公転速度の差分のみ検討するため、右の玉の公転を静止とみなす。すなわち、

- ・右：公転速度小の玉 \Rightarrow 停止玉
- ・左：公転速度大の玉 \Rightarrow 微動玉



計算条件

玉荷重 N $N=1\text{N}$ (指周辺の玉3個のみ)

滑り動摩擦係数 μ $\mu=0.1$ (玉と軌道面、玉と保持器)

1) 左の玉(公転を阻止された微動玉)に働く力

微動玉が、内輪軌道面から受ける左回りの接線力 F_L は、

$$F_L = \mu N = 0.1\text{N}$$

F_L に対する抗力 F_R は、

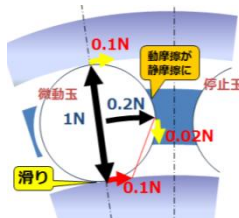
$$F_R = \mu N + \mu N_R = 0.12\text{N}$$

N_R 玉が保持器を押す力 0.02N

$F_L < F_R$ より微動玉は自転せず、内輪軌道面の間で微動分だけ滑り、停止玉との押合いを解消する。

この時点で玉は自転しているが、玉が軌道面と滑り接触となるため、自転の為の駆動力を内輪から受けられなくなり、玉の自転が停止する。

自転停止により、保持器との接触が動摩擦から静摩擦に変わり摩擦係数が増加、玉と軌道面の自転復帰を阻害する。

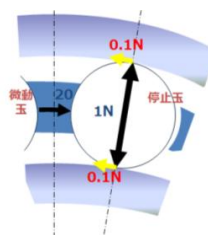


2) 右の玉(保持器から公転力を受ける停止玉)に働く力

現実の摩擦係数の変動は大きく、他の誤差要因もあるの、微動玉と内輪が滑るとは限らない。

図は微動玉が保持器を押す、保持器が停止玉を押した場合を示す。

図から明らかな様に、玉が保持器から受ける力は、玉の自転を阻害させると同時に、上記と同様に玉と軌道間を滑り接触に変える作用をする。



5. まとめ

- 1) 転がり軸受がモーメント等を受けて内外輪が傾くと、玉の公転速度が不均等になり、玉と軌道面とが滑る。
- 2) その際の滑り量は、公転速度の不均等分より遥かに大きい。
その原因は、一旦軌道面と滑った玉は自転の為の駆動力を内輪から受けられなくなり、玉の自転が停止。これにより、玉と保持器との接触面が動摩擦から静摩擦に変わり摩擦係数が増加して、玉の自転復帰を阻害するから、と考えられる。
- 3) 玉と軌道面とは、他に、作動滑り、スピン滑り、ジャイロ滑り、が知られているが、これらとの相違は、滑りの発生/解消要件が、玉と軌道、と、玉と保持器、との滑り摩擦係数のバランスに依存することである。滑り摩擦係数の変動を抑えることは難しいことより、本滑りを“制御不能な滑り”と呼ぶ。

6. おわりに

当社では、負荷を受ける玉が保持器と接触しない、『自律分散式転がり軸受』を開発した。

Fig1の現象は、その比較方法を考へているときに現行品で偶然に発見したもので、“単純であるが故の驚き”があると思ひ、ホームページに掲載した。

この映像の弱点は、現実的な軸受の使い方とかけ離れていることであるが、筆者は Technical report No.2 記載のフライホイールでの試験で、玉ロック（玉の自公転が停止し内輪と滑る）を確認しており、Fig1はそれと同じ現象に思えた。つまり、2度目の玉ロック現象であるが故に、特異な状況での現象では無く、転がり軸受の本質的弱点、と考え、本報告を纏めた。

実際の所、軸受メーカーより発行の不具合事例に、軌道面の滑りに関するものが多数ある一方で、これらを防ぐ為の設計資料（制約条件の提示）が見受けられないので、現行品での対策は困難なのだと思う。

このような症状でお困りの際は、当社の自律分散式転がり軸受を試して頂ければ幸いです。

1) 服部, 日本機械学会誌 Vol 62 No.490 pp1644~1650 「転がり軸受の保持器について」

2) 特開 2002-339979 モーメントにより玉に進み遅れが発生、保持器が引張り圧縮荷重を受けることの記載