621.822.71.034

玉軸受の玉の三次元運動について*

(続報, スラスト荷重の影響)

平野 富士夫**, 田上 寛 男**

On the Three-Dimensional Motion of Ball in Ball Bearing

(2nd Report, Effect of Thrust Load)

by Fujio HIRANO and Hiroo TANOUÉ

Motion of balls in ball bearings under thrust load was measured by means of flux change caused by magnetization of balls and compared with that under radial load reported in the previous paper. It is found that the observed data of the rotation of a cage are fairly coincident with the theoretical values considering the effect of the contact angle. However, the rotation of a ball about its own axis is appreciably different from the theoretical data, especially in the case of the angular contact ball bearing of the type 7307. It is further noted that the spinning motion of a ball in the deep-grooved ball bearing 6307 is caused by an axial vibration of the bearing. The rotation of a ball in the thrust ball bearing 53307 was also measured.

1. 緒 言

ラジアル荷重の下での玉軸受内の玉の三次元運動を計測し, これに解析を加えて理論的に究明した結果はすでに前報⁽¹⁾で述べたところである。スラスト荷重の場合には玉が異なった運動を行なうことが予想されるので, その後も実験を続行していたが, 玉の自転が従来の理論式に従わないこと, 玉の回転軸の変動がスラスト方向の内外輪の振動と密接に関連していることなど, いくつかの新しい知見をえたので以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 測定原理 前報⁽¹⁾に詳細に記したとおりで, 第1図のように磁化玉を1個軸受内に組みこんで, その回転に伴う磁束変化を外輪にはめたコイルで検出し, 誘起電圧を電磁オシログラフにて記録せしめる。磁軸と玉の自転軸のなす角 α によって磁束変化が異なるが, 第1図(b)のように固定した回転軸を有する玉を所定の α で磁化しこれを組みこんで磁束変化の記録振幅 A を計測してあらかじめ検定しておく。 α を 0° から 90° の間でいくつか選び検定実験を行なった結果 $A \propto \sin \alpha$ であることが確認され, さらに $A/\sin \alpha$ と玉の自転角速度 ω_b との間には

$$A/\sin \alpha = k\omega_b/\sqrt{R^2 + (L\omega_b)^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

* 昭和 37 年 10 月 29 日 第 40 期全国大会講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和 37 年 7 月 25 日。

** 正員, 九州大学工学部(福岡市箱崎町)。

の関係が成立することもわかっている。ここに R, L は測定回路の抵抗およびインダクタンスであり, 定数 k は玉の残留磁束に比例し, さらにコイル巻数, 軸受およびこれに接続される強磁性体の形状寸法に関係する。形番の異なる軸受に対しては $\alpha = 90^\circ$ の場合だけについて検定実験を行なっておけばよい。

第2図はラジアル荷重を受ける深みぞ形玉軸受 #6307 の玉の運動の記録の一例である。玉の自転は細かい周期 T_b の波形で表わされ, 玉の公転すなわち保持器の回転は T_c の周期で行なわれ, おおのこの公転ごとに玉が非負荷域で自転すべりを起す結果 ω_b がその部分で低下し, (1) 式にしたがって A も低下するので, T_c ごとに振幅 A が変動している。 T_b が理論値よりも延長するのは自転すべりの存在することを示

第1図 測定方法

すが、 T_b の最大値を記録上より測り、最大すべり率を求めることもできるが、測定の精度がよくないので、むしろ保持器のある総回転数に対する玉の総自転数を計測し、両者の比から自転、公転比を求めるほうがよい。 n_b 、 n_c を玉の自転および公転（保持器の回転）の数 rev/min とすれば、平均すべり率は n_b/n_c の理論値との差の割合

$$S = \{(n_b/n_c)_{th} - (n_b/n_c)\} / (n_b/n_c)_{th} \dots\dots\dots (2)$$

で計算される〔ただし保持器の公転すべりが實際上実験範囲で無視できるので、計測上便利のように $(n_b, th - n_b)/n_b, th$ の形にできなかった〕。

つぎに第 2 図の記録に現われている長い周期 T_b をもつ振幅変化は、磁化軸と自転軸のなす角 α の変動によるもので、図の A_{max} 、 A_{min} より (1) 式または検定曲線によってこれらに対応する α_{max} 、 α_{min} を求めれば、

$$\Delta\alpha = \alpha_{max} - \alpha_{min} \dots\dots\dots (3)$$

が磁軸に対する玉の瞬間自転軸の変動がわかる。

このようにして玉の二次元的運動のずれ、すなわち自転すべりと三次元的な自転軸変動が同時に求められる。

2.2 測定装置 軸受試験機は前報に示したものと同一であるが、スラスト荷重をかけるために第 3 図の

第 2 図 実験記録の説明

第 3 図 スラスト荷重装置(平面図)

ような荷重装置を取付けた。すなわち外輪に鋼製カップをかぶせ、ばねを圧縮してスラスト荷重を加える。第 1 図に示されている保持器回転マークを取出せるようにカップの一部を切開き、その部分にコイルを巻いた磁石を置き、保持器に接続したブリッジ上の鉄片との間の磁束変化をもって保持器の回転を記録せしめた。軸の回転も同様に軸に植えこんだねじと測定用小磁石との間の磁束変化を利用して測った。ラジアル荷重を加えるのは前同様、コイル巻わくを包む荷重わくをレバーに接続して行なった。

コイルの巻数 (0.3φ エナメル線 200 T) も前回と同一である。玉の残留磁束は 200 G で、軸受中に組み入れて回転して消磁が一部分進行し 140 G の安定した値になってから検定実験や本実験を行なった。

第 4 図は軸受試験機と荷重装置の外観である。

2.3 実験軸受 実験に使用したのは深みぞ形玉軸受 #6307、アンギュラコンタクト玉軸受 #7307 および球面座付スラスト玉軸受 53307U である。その各部寸法を第 1 表に示す。#6307 は保持器をビス止めとし、玉の組み入れ、取りはずしに便ならしめた。

第 1 表 実験軸受数値表

軸	受	# 6 307	# 7 307B	# 53 307U
内径×外径×幅(高さ) mm		35×80×21	35×80×21	35×68×28
ピッチ円直径 D_m mm		58.017	57.616	51.53
保 持 器		黄銅もみ抜き (外輪もたせ)	黄銅もみ抜き	無保持器
玉 数		8	11	13
玉 径 d mm		13.493	13.473	13.493
初期接触角 α_0°		11	18	40
n_c/n_i 接 触 角 $\begin{cases} \beta=0^\circ \\ \beta=\alpha_0^\circ \end{cases}$	$\beta=0^\circ$	0.383 7	0.383 9	0.382 9
	$\beta=\alpha_0^\circ$	0.385 8	0.389 6	0.410 3
n_b/n_c 接 触 角 $\begin{cases} \beta=0^\circ \\ \beta=\alpha_0^\circ \end{cases}$	$\beta=0^\circ$	5.300	5.306	5.270
	$\beta=\alpha_0^\circ$	5.281	5.256	5.036

C : スラスト荷重用カップ
F : ラジアル荷重わく
S : ばね
L : ラジアル荷重レバー

第 4 図 実験装置外観

#53307は無保持器とし玉をできるだけ多く13個つめこんだ。この軸受のみ縦形試験機によることとし、4球式油試験機を用いて油圧でスラスト荷重をかけ、スピンドルで駆動した。

2.4 実験条件 以上の試験機を用い、#6307, #7307ではスラスト荷重 $P_a=0\sim100$ kg, 内輪回転数(軸回転数) $n_i=340\sim5600$ rev/min の範囲で、スピンドル油 10 cc/min の滴下給油で実験した。また#53307では $P_a=17\sim717$ kg, $n_i=220\sim900$ rev/min の範囲で、スピンドル油中に軸受を浸して実験した。

3. 実験結果および考察

3.1 検定実験 #6307, #7307において $\alpha=90^\circ$ の固定軸を有する玉を用いて、記録振幅と軸回転数との関係を検定したのが第5図である。スラスト荷重を

第5図 記録振幅の検定曲線

第6図 深みぞ形玉軸受 #6307 の玉の自転の平均すべり率

$$S = \{(n_b/n_c)_{th} - (n_b/n_c)\} / (n_b/n_c)_{th}$$

かけるための鋼製カップの存在によってコイル中に誘起される電圧が増幅され、記録の感度がよくなっていることがわかる。なおオシログラフ振動子は 30 mm/mA の感度のものであるから、記録振幅 A mm の 1/2 をこの数値で割れば誘起電流の最大値がわかる。

3.2 玉の自転・公転比 この実験に用いた各軸受について軸回転数 n_i , 保持器回転数(玉の公転数) n_c , 玉の自転数 n_b の関係を計算した値も第1表に示しておいた。接触角を β (通常の記号 α は磁軸と自転軸の角度を表すとしたので区別するため β としておく) とすれば、理論式としてよく用いられる関係は

$$\frac{n_c}{n_i} = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \beta \frac{d}{D_m} \right), \quad \frac{n_b}{n_c} = \cos \beta + \frac{D_m}{d} \quad \dots\dots\dots (4)$$

のようになる⁽²⁾。第1表中 #6307 では玉の径 d として普通の寸法のもののほか -20μ だけ小径のものをを用いたので、スラスト荷重が加わった場合の初期接触角が 11° のほかに 18° のものがある。なおこれらの値は $\cos \beta = 1 - \Delta r / 2(r_0 + r_i - d)$ によって求めたものである。ここに r_0, r_i は外輪, 内輪のみぞ半径で、実測の結果 $2r_0/d = 2r_i/d = 1.045$ であった。またラジアルすきま Δr は 20μ および 60μ なので、 β として以上の値がえられた。ラジアル荷重の場合には $\beta = 0$ として(4)式より計算される。#53307では $\beta = 90^\circ$ として計算される。

n_c/n_i はこの実験の範囲では完全に理論値と一致した値をえた。すなわち純ラジアル荷重の場合には #7307 でも 0.383 となった。スラスト荷重を受ける #6307 では $\beta = 11^\circ, 18^\circ$ に対し n_c/n_i の実測値は 0.386, 0.390 となり、明らかに純ラジアル荷重における値 0.384 との有意差が認められた。純スラスト荷重における #7307 では $n_c/n_i = 0.407\sim0.412$ であった。すなわち玉の公転すべりは存在しない。

つぎに n_b/n_c の値であるが、純ラジアル荷重の場合には前報で述べたように n_i が高くなるとともに理論値に近づく。#6307, #7307 ではこの値が 5.30 および 5.27 であった。純スラスト荷重の場合には理論値はそれぞれ 5.28~5.26 および 5.04 のはずであるが、実測結果はこれと異なる。すなわち #6307 では n_i が高くなるとともにむしろラジアル荷重における理論値 5.30 に近づく。この値をもとにして(2)式により平均すべり率を計算した結果を軸回転数 n_i に対しプロットすると第6図のようになる。 $P_a=5\sim10$ kg のスラスト荷重ですでに自転すべりがなくなって、 n_b/n_c が理論値 5.30 (ラジアル荷重に対する)に一致するようになっている。玉のうち1個だけ -20μ 小径のもの

を磁化して入れた場合、この玉の自転すべりは当然大きいわけであるが、 $P_a > 50 \text{ kg}$ で急にすべり率が低下し、このていどの荷重で内外輪との接触が同時に起るようになることを示している。

#7307 では理論値の 5.05 に対し、 $P_a = 10 \text{ kg}$ ですでに n_b/n_c の実測値が 5.78 に達している(第7図)。この理論値は(4)式の後者によったもので、玉の自転軸が接触点を結ぶ直径に直交するものとして、すなわち軸中心線に対し β だけの角度をなすものとして導かれた関係である。もし自転軸が $\beta = 0^\circ$ の場合のように軸中心線に平行とすれば

$$n_b/n_c = 1 + D_m/(d \cos \beta)$$

となり、その数値は 6.57 である。第8図に示す関係のように自転軸が軸中心線に対し γ の角度をなすものとすれば

$$\frac{n_b}{n_c} = \frac{D_m + d \cos \beta}{d \cos (\beta - \gamma)}, \quad \frac{n_b}{n_i - n_c} = \frac{D_m - d \cos \beta}{d \cos (\beta - \gamma)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

が成立することは容易にわかることである。これより n_c/n_i は(4)式と同じであり、これはさきに公転すべりが認められず、 n_c/n_i の実測値が接触角 β に対する理論値と一致したことから裏付けられるとおりである。(5)式の最初の式の左辺に実測値 5.78 を入れ、右辺のうち $\cos \beta + (D_m/d)$ が第1表の計算値 5.036

第7図 アンギュラコンタクト玉軸受の玉の自転・公転比(#7307B)

D_m : 玉のピッチ円直径
 r_o, r_i : 外輪・内輪のみぞ半径
 γ : 玉の自転軸の傾斜角

第8図 接触角 β と玉の自転軸との関係

になることから $\cos (\beta - \gamma)$ を求めると 0.871 となり、これより $\beta - \gamma = 29.5^\circ$, $\beta = 40^\circ$ であるから $\gamma = 10.5^\circ$ をうる。したがって玉の自転軸は $\gamma = 0^\circ$ ($n_b/n_c = 6.57$) と $\gamma = \beta = 40^\circ$ ($n_b/n_c = 0.5036$) との中間の値 $\gamma = 10.5^\circ$ を取っていることが推定される。

第7図ではスラスト荷重が高くなるとともに n_b/n_c の値が増し、(5)式による計算値に近づくことが示されている。また同じラジアル荷重 $P_r = 20 \text{ kg}$ と比較すれば、低回転においてもスラスト荷重の場合のほうがすべりが少ないこともわかる。

3.3 玉の自転軸変化 スラスト荷重の下では玉の瞬間自転軸の変動は、ラジアル荷重の場合に比べてはるかに少ない。したがって多くの記録では振幅 A が一定を保っている。これはスラスト荷重では玉が内外輪ともに接触するため回転軸を変化させる要因が作用しにくいと考えてよい。ラジアル荷重の場合に観測される自転軸変化はその繰返し周波数を $n_s \text{ c/min}$ とすれば、($n_s = 60/T_s$)

$$n_s = |n_b - mn_c| \quad (m: \text{整数}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

の関係にあり、 m の値は n_b/n_c が理論値 5.30 に近い

$P_a = 100 \text{ kg}, n_i = 2500$

$P_a = 10 \text{ kg}, n_i = 3300$

第9図 #6307 の玉の運動記録例

場合には5であり, 自転すべりの結果 n_b/n_c が4またはそれ以下になるにしたがい 4, 3, ……などの値を取る。

スラスト荷重の場合には(6)式の関係満足する自転軸変化も起ることもあるが, 純スラスト荷重の下ではそのひん度はきわめて少ない。スラスト荷重を受ける #6307 で起った自転軸変化のほとんどは(6)式と異なった関係

$$n_s = n_b - 2n_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

をみたすことが見出された。第9図(a)は(6)式の関係にある記録例, (b)は(7)式の関係にある例である。

ラジアル荷重の場合自転軸の移動(磁極位置との相対的移動)は第10図のようにして説明できた。すなわち非負荷域における特定点Aにおいて自転すべりが始まるものとすれば, 玉が1公転ごとにこの位置にくる間に ψ の角度だけ位相がずれる。この ψ は

$$\psi = |2\pi(n_b/n_c) - 2m\pi| = 2\pi n_s/n_c \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わされることは容易にわかる。A点ですべりが始まるさいに玉はB点では接触せず, ポケット穴と転走面と玉との関係位置が対称であるとは限らないので, AB軸のまわりにスピンのモーメントが生じ, このため非負荷域におけるすべりを通じ1公転当り ϵ だけのスピン変位が起る。以上の ψ 変位と ϵ 変位とを合成することにより玉の自転軸変化すなわち(3)式の $\Delta\alpha$ と ϵ との間には

$$\sin(\epsilon/2) = |\sin(\pi n_b/n_c)| \sin(\Delta\alpha/2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

の関係があることを導いた。この ϵ はすべり率Sに比例し, さらにポケット穴と玉の接触点の非対称の程度によって異なる。(9)式からわかるように n_b/n_c が整数値 m に近づくと $\Delta\alpha$ が急に増大することは実験的に確かめられているところである。

スラスト荷重の場合の自転軸変動が(7)式のように内輪回転に関係していることから, 以上のラジアル荷重における考察を内輪側に適用してみるとつぎのよう

ψ : 玉の1公転後の位相ずれ
 ϵ : 玉のスピン変位

第10図 玉の自転とスピン変位

になる。すなわち内輪のみぞ横振れなどのため玉が第10図のB点にきたときスピンモーメントを受けはじめAB軸のまわりに ϵ 変位を生ずるものとする。玉と内輪との相対位置の移動は $n_i - n_c$ であるから以上の推論をこの場合に適用すれば, (6)式のかわりに

$$n_s = |n_b - m(n_i - n_c)| \quad \dots\dots\dots (10)$$

となるはずである。スラスト荷重で自転軸変化が認められるのは n_b/n_c が計算値 5.30 に近い場合であり, また #6307 では $(n_i - n_c)/n_c \approx 1.60$ であるから, (10)式で $m=3$ として $n_s/n_c = 0.50$ といどの値になるはずである。実際には n_s/n_c は 0.2 以下で明らかに

(a)

$P_a = 20 \text{ kg}$, $n_i = 5700 \text{ rpm}$ 付近

(b)

$P_a = 30 \text{ kg}$, $n_i = 1400 \text{ rpm}$ 付近

(c)

$P_a = 30 \text{ kg}$, $n_i = 5000 \text{ rpm}$ 付近

第11図 玉の運動と軸受振動との関係

(10) 式の関係にはしたがっていない。

そこで(7)式を説明するには内輪と玉との相対位置に関係なく、内輪回転すなわち軸回転数の整数倍の周波数の衝撃力がスラスト方向に作用し、そのさい玉にスピン変位を引起すものとする考えるほかない。

3・4 玉の自転軸変化と軸方向振動との関係 以上の推測を確かめるために内輪と軸との間にブシュを設け、これに傾斜を与えて内輪に 0.1 mm の横振れを付加した。予想どおり(7)式の関係のみたす自転軸変動が顕著になり、発生範囲も広くなるとともにその $\Delta\alpha$ も増大し 30° 以上に達したのもある。同時にいうまでもなく振動もはげしくなったので、その測定をも合わせ行なった。測定には対向極板を利用し、容量変化を増幅して記録せしめた。外輪側としては荷重わくのレバー取付ピンの端面、軸側としてはその他端面に極板を対向せしめてその容量変化を測ってそれぞれの軸方向変位を記録した。第 11 図がその数例である。

図からわかるように外輪側の振動と玉の自転軸変化とが対応している。すなわちこの試験機では外輪側に

ばねをかいして荷重を加えており、ばねと軸受とで剛性を受持っており、この振動系のばね定数の非線形特性のため振動が跳躍的に停止する。その発生範囲の軸回転数はスラスト荷重とともに変化し、さらに回転数上昇時と下降時とで異なっているが、第 12 図のようになっている。振幅の最大値は測定部で 1.5 mm で外輪に直すとそのほぼ 1/2 である。図の振動発生範囲は同時に玉の自転軸が変化している範囲である。

このように玉の自転軸変化が軸方向振動によって引起されることが確かめられたが、軸受を取付けた振動系の特性によって影響されることは明らかなので、この点についてはさらに実験を続行中である。また軸自身もかなり複雑な非線形振動を行なうので、それとの関連をも究明しているが、結論は次報にゆずりたい。

以上は #6307 についての結果であり、#7307 では(7)式の形の自転軸変化は認められなかった。これは #6307 と異なり接触角が大きく、軸方向の振動によって玉の接触状態が影響を受けにくいと考えられる。

第 12 図 軸方向振動発生範囲と玉の自転軸変化との関係

第 13 図 合成荷重の方向と公転自転の回転比との関係

(a)

$P_a = 117 \text{ kg}, n_i = 480 \text{ rev/min}$

(b)

$P_a = 517 \text{ kg}, n_i = 480 \text{ rev/min}$

第 14 図 スラスト軸受 #53307U の玉の運動記録

3.5 合成荷重での実験結果 純スラスト荷重のみを加えた実験のほかにラジアル荷重 P_r をも付加した実験を行なった. この場合合成荷重はベクトルの大きさを一定にし, 角度のみが変るようにした. すなわち $P = \sqrt{P_r^2 + P_a^2} = 100 \text{ kg}$ とし, 角度 $\tan^{-1}(P_a/P_r)$ を, $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ と変えた.

その結果 #6307 では純ラジアル荷重の場合を除き自転すべりが認められず, n_b/n_c の値は $\tan^{-1}(P_a/P_r) = 0$ における 5.30 から 90° における 5.28 ままで単調に変化した. また n_c/n_i の値は第1表の理論値の間で変化している. #7307 では第13図のような結果をえた. すなわちこの場合も n_c/n_i は第1表の理論値 0.383 ($P_a=0$), 0.410 ($P_r=0$) の間で変化している. n_b/n_c は低回転ですべりがあるため低めになっているが, 高回転における値は $\tan^{-1}(P_a/P_r) \geq 22.5^\circ$ で一定値 5.78 となっている.

またスラスト荷重が加わると自転軸変化が起りにくくなるが, 純スラスト荷重の場合のほかはすべて (6) 式にしたがう変化であった.

3.6 スラスト玉軸受の実験結果 スラスト玉軸受 #53307U のみは4球式試験機を用い縦形で実験したので別個に結果を述べることにする. この軸受は鋼板プレス保持器の1枚板で玉の取付取りはずしが容易でなかったため, 無保持器とした. したがって n_b/n_i を測ることはできなかったが, 以上の他の場合すべて n_c/n_i が理論値に一致していたことから, この場合も n_c/n_i は理論値 0.500 を取ることは確かであろう. また玉の自転すべりはごく低荷重の場合を除いては少ない. 第14図でわかるようにこの場合にも自転軸変化が起っており, その周波数の関係は第15図(b)のようにスラスト荷重とともに変化している. この試験機に取付けた場合の両転走面間の偏心や平行度不良, さらに軸の振動など確かめにくかったため他の軸受の場合ほど究明できていない. しかし第1表の理論値 $n_b/n_c = 4.328$ より実測値が高いことが多いのは遠心力による玉のかたよりが転走面径を増加せしめたためと考えることができる.

4. 結 論

以上の実験結果およびこれに対する考察を要約すればつぎのようになる.

(1) スラスト荷重を受ける玉軸受の玉の公転すべりはこの実験の範囲内では認められなかった. 玉の公転数はしたがって接触角をもとにして計算した式で求めた理論値とよく一致する.

(2) 単列深みぞ形 #6307 では 10 kg のスラスト

第15図 スラスト玉軸受 #53307U
における玉の運動と荷重, 回転数との関係

荷重を加えると, 玉の自転すべりはなくなる. この場合玉の自転数は接触角 0 の場合の理論値に近い.

(3) アンギュラコンタクト軸受 #7307 では 20 kg 以上のスラスト荷重で自転すべりがなくなり, この場合の玉の自転数は接触角だけ軸中心線と傾斜した回転軸をもつとして計算する従来の理論値よりもはるかに大であって, 玉の自転軸が軸中心線となす角が接触角よりもずっと小さいことを示す.

(4) 玉の自転軸変化 (玉の特定位置たとえば磁軸に対する相対位置) はラジアル荷重の場合と異なり, 軸方向の振動によって玉に加わる衝撃により起されるものと考えれば, 実験事実を説明できる. 軸方向振動がない場合には自転軸は変化しにくい.

(5) 合成荷重の場合の玉の公転, 自転ともに純ラジアル荷重, 純スラスト荷重の場合の中間の性質をもっている. 玉の自転軸変化はラジアル荷重のみの場合と同様である.

(6) スラスト玉軸受では玉の自転すべりは低荷重の場合を除いては少ない. 自転数は遠心力により玉の転走面径が増大するため理論値よりもやや大である. 自転軸変化も起っているが, その原因はいまのところ不明である.

以上のようにスラスト荷重の下での玉の運動は, 従来理論的に考えられていたのとはかなり異なっている面が多く, また軸方向の振動との関連が強いことも明ら

かにすることができた。ただラジアル荷重の場合に玉の運動を理論的に究明しえたほどには、この場合の解析は進んでいない。今後の研究で解明したいと思っている。

終りに本研究に協力された榎藤誠吾、小田芳信、安永昌一の諸君に厚く感謝する。

文 献

- (1) 平野・田上, 機械学会論文集, 27-178 (昭 36-6), 934; 同, *Wear*, 4 (1961), 177.
- (2) たとえば Allan, *Rolling Bearings*, (1946), Pitman & Sons; Eschmann, Hasbargen, & Weigand, *Ball and Roller Bearings*, (1958), Heyden.

討

〔質問〕 (1) 本論文において、公転すべりが存在しないで自転すべりが生ずるというのは、たとえば玉の相互差などの原因で、特定の数個の玉が内外輪と接触し、それ以外の玉は浮いた状態になっていて、その後者の玉の中に磁化玉が含まれていることなのか。

(2) 第 8 図で、玉は内外輪と玉の中心をよぎる一直線上で接し、玉の自転軸が軸受中心軸に平行な軸から角度 γ だけずれることの説明があるが、軸受内の摩擦などを考えると、内外輪と玉は一直線上では接しないのであって(特にスラスト荷重の小さい場合)、そのため内外輪と玉の接触具合いかんにより、玉の自転軸は種々に(1 回転中においても)変動するものとは考えられないか。

(3) 上記の場合、内外輪と玉の接触変形面が軸受中心線上の 1 点に交わらなければ、いずれかの接触面にすべりを生じ、そのため玉はスピン運動を生ずるようになると思うが。(井 沢 実)

〔回答〕 (1), (2) ラジアル荷重の場合、負荷側で玉が理論回転をする際に玉が保持器を駆動し、非負荷側では浮いているため、自転すべりが起っても保持器に対する反力は小さく、保持器の公転は理論どおりになる。

スラスト荷重の場合に、たまたま磁化した玉が相互差のため浮いていて自転すべりを起すと考えるよりも、他の影響たとえば内外輪取付けの直角度のくずれ、振動などの影響を受けるほうが大きく、これがラジアル荷重の場合と同じ結果をきたしたのと考えている。

また岡本氏への回答に示したように、とくに遠心力により内外輪の接触角が異なってくるが、これを考慮した Jones の理論ではかえって実験結果に合わなくなる。その原因は現在究明中である。玉の自転軸が一定せず変化することはよく起っているが、現在のところいちおう平均的な γ の角度を求めたまでである。

(3) ご意見に対しては、もちろんスピン運動を仮定しなければ実験結果は説明できないが、内外輪と玉の接触面でどのようなスピンの起っているかについては、計算の精度 (n_b , n_o , n_i の波数を多くする) を高めた結果より判断すべきであり、次報で明らかにするつもりである。

論

〔質問〕 (1) スラスト荷重が加わった時の自転軸の角度について

a) スラスト荷重が加わった時、玉軸受の玉は一般に外輪との軌道面では純ころがり(接触面内の差動すべりを考えなければ)を行ない、内輪側ではころがりを生じている。したがって、玉と外輪の接触点の接線が軸受の回転軸と交わる点と、玉の中心を結ぶ線が自転軸になるので、接触角 β より γ は小さくなるはずである。ただしこれで概算すると #7307 ($\beta = 40^\circ$) で $\gamma = 32^\circ$ くらいになり、まだ実験値とは一致しないが。

b) スラスト荷重が加わったとき、#7307 ($\beta = 40^\circ$) では、荷重 10 kg とすると、玉と軌道との接触荷重は玉 1 個あたり約 1.2 kg であるが、内輪回転数 3000 rpm (保持器回転数約 1200 rpm) のとき、玉 1 個の遠心力は約 530 g となり、これが外輪側の接触角を減少させる効果があるので、前項と関連して検討する必要があると考える。

c) 荷重による玉の径の変化が n_b に影響すると思うが、接触角の変化とともに御検討を願いたい。

(2) スラスト玉軸受の自転軸変化について

私どもの経験によると、スラスト玉軸受に高荷重を加えて運転したとき、数時間の範囲で玉には一つの大円上に転走こんがることが多く、玉の全面に一般的なあたりを見ることはむしろ珍しい現象である。

この実験装置の精度などの点が明らかでないが、さらに装置の精度をあげ、比較的高荷重を加えたとき、自転軸変化は非常に起りにくいのではないか。

(岡本 純 三)

〔回答〕 外輪と玉との接触部において、純ころがりがおこると考えると御指摘のとおりであるが、これは単なる仮定であり、実験的証明は従来なされてはいない。#7307B の自転・公転比 n_i/n_o が 5.30 (接触角 0 に対する) よりはるかに大きい 5.78 にも達する事実は、外輪との接触部において大きいスピンが生じ、 γ を小ならしめたと考えるべきである。スラスト荷重下の玉の運動を光学的に計測した唯一の例である Shevchenko-Bolan の実験結果でも γ の値は β_0 (遠心力の影響を考慮した外輪との接触角) より小になっている。本論文中の (4) 式はしたがって外輪側ですべり

なしの条件にせず, 最も簡単な形の式を用いたまでである。

つぎに遠心力の影響については本論文には述べなかったが, A. B. Jones の計算に従って考察はしてみた。スラスト荷重が 5 kg, 10 kg のように低い場合, 回転数を高めると, いうまでもなく β_0 は大きく低下することになる。しかし 100 kg になると, 5000 rpm でも遠心力の影響は無視できるが, この場合でも n_0/n_i の値は低荷重の場合とほとんど変わらない。また n_0/n_i の値も $\beta=40^\circ$ とした計算値とあまり差がない。Shevchenko-Bolan の実験値でも, 作動接触角は理論値 β_0 よりずっと大きくむしろ β に近い値になっている。

玉径の弾性変形の影響ももちろん Jones の計算のように遠心力の影響と同時に考慮すべきである。現在の実験のように比較的低い荷重では, この効果よりもほかの影響のほうが大きい。

いずれにしても従来の理論が合わない原因を究明するため, さらに正確な実測値を求める必要があり, 次報でその結果を述べたいと思う。

つぎにスラスト玉軸受 #53307U の実験装置としては, 4球試験機を代用したままであり, 取付精度の計測も困難なので, 御指摘の件は今後明確にさせなければならぬと考えている。なおこのスラスト玉軸受では, 無保持器なので玉どうしの相互干渉がある。現在保持器付のもので実験しているが, これとやや相違し

た結果がえられている。

〔質問〕 アンギュラ形玉軸受の玉の自転に関する結論(3)は, 常識的なところと異なるという点で非常に有意義な発見だと思う。しかし深みぞ形玉軸受の場合の結論(2)もこれに含めて, スラスト荷重をうける玉軸受の玉の自転に関する一般的傾向と考えるほうがよいのではないか。すなわち第8図の關係は深みぞ形ラジアル玉軸受の場合にも適用できると考え, 557ページののと同様の計算をこれについて行なうと, $\alpha_0=11^\circ$ のとき $\gamma=6^\circ$, $\alpha_0=18^\circ$ のとき $\gamma=10.5^\circ$ となり, やはり $0<\gamma<\alpha_0$ であることが知られる。したがって結論(2)の後半「玉の自転数は接触角 0 の場合の理論値に近い」というあいまいな表現よりも, (3)の後半と同様のいいあらわし方にするほうがよいと考える。

(小野 繁)

〔回答〕 貴説のとおり計算になるが, これで結論を出すには #6307 の自転・公転比の実験値 5.30 と計算値 $5.28(\alpha_0=11^\circ)$, $5.26(\alpha_0=18^\circ)$ との差がきわめてわずかであり, γ の角度を求めてもその精度が不足する。

またこの理論値にしても岡本氏への回答に述べたように, 遠心力などの複雑な影響を入れない式を用いているため, どこまで信頼できるかに疑問があったので, ここではわざと断定をさけたまでである。

ニュース

腕時計の内外比較試験 (その 2)

試験は平均日差, 姿勢平均偏差, 第1次温度誤差, 第2次温度誤差, 日差平均偏差, 復元差の6項目でそれぞれの測定値に係数を掛けたものの総計が減点値として表わされている。このため, 減点値の数字が少ないほど精度がいい時計となる。

なお第2回と第3回の試験に使用したのは, 第1回の試験で減点値 500 点以内のものに限られたが, 1機種で3個全部が残されたのはオメガ・シーマスタ, ロンジン, セイコー・ロードマーベル, シチズン・スーパーデラックス, シチズン・デラックスの5機種で, そのうち3個とも前回の成績より悪くならなかったのはセイコー・ロードマーベル1機種だけとなっている。また全体的にみれば, 国産品のほうが分解注油後めだって成績がよくなっており, 中には購入時よりよくなったものもある。

検査の成績つぎのとおり。(各回の順)

▽オメガ 1=285, 316, 328 ▽オメガ 2=351, 393
373 ▽オメガ 3=373, 466, 351, ▽ロンジン 1=360

367, 334 ▽ロンジン 2=233, 374, 305 ▽ロンジン
3=299, 601, 309 ▽シーマ=469, 546, 519 ▽エ
ニカ=318, 338, 215 ▽ローヤル=414, 1136, 286
▽ゼリヤ=407, 682, 1015 ▽グランド・セイコー 1
=止り, 403, 203 ▽グランド・セイコー 2=264,
260, 149 ▽セイコー・ロードマーベル 1=277, 249
118 ▽セイコー・ロードマーベル 2=251, 248, 205
▽セイコー・ロードマーベル 3=189, 203, 129 ▽シ
チズン・スーパーデラックス 1=303, 310, 213 ▽シ
チズン・スーパーデラックス 2=466, 543, 174 ▽シ
チズン・スーパーデラックス 3=365, 570, 235 ▽オ
リエント・グランプリ=340, 775, 578 ▽シチズン・
デラックス 1=422, 366, 362 ▽シチズン・デラッ
クス 2=435, 497, 205 ▽シチズン・デラックス 3=
319, 567, 245 ▽タカノ・シャトー=490, 1614, 1061

〔注〕 セイコーの「止り」は針の単なるつかえで, 本質的な故障でないため第2回以降のテストに参加させた。

(服部敏夫)