論 文

CONTRIBUTED PAPERS

ラジアル玉軸受の軌道輪案内保持器の運動に関する研究^{*1} Studies on the Motion of Cages Guided by the Bearing Rings in Radial Ball Bearings

矢 沢 信 八^{*2}
Shinpachi YAZAWA

Key words: radial ball bearing; motion of cages; oscillation;
frequency analysis

Abstract

The motion of revolving cages guided by the bearing rings is measured in the three dimensional directions under various experimental conditions by the non-contacting displacement vibrometer and is measured in the revolving direction by the stroboscope. The running cages oscillate in the three dimensional directions and in the revolving direction, especially they have very large amplitude and parallel oscillation in the axial direction. The oscillations of the integral numbers' frequencies, 1, 2, 3, ... times as large as the revolving speed of the cages, are usually contained within the motion. It seems that oscillations of the cages are brought about by contacting conditions between balls and cage pockets in the running. The amplitude of oscillations are not so subjected to the effect of revolving speed, loading directions and magnitude of load.

1. ま え が き

近年、諸機械の高速化、高荷重化のすう勢の中にあつて、それらの機械に使用されているころがり軸受の故障が増加しているが、航空機に使用されているころがり軸受も多分その例外ではないと考える。その故障のなかでも保持器の占める割合が最近多くなつてきている。

回転中における保持器は、転動体や軌道輪とすべり接触しているので、それらによって生じる摩擦力は、ころがり摩擦を阻害したり、高速度回転している軸受においては、温度上昇とともに焼け付きの直接の原因

になっている。また、音響の面からは軸受騒音の一発生源にもなっている。

これまでに保持器の運動に関する研究がいくつか報告^{1)~3)}されている。いずれの研究も主として転動体案内のプレス形保持器を対象とし、運動のピックアップは保持器に鏡を取り付けて光の反射を利用した方法で、ピックアップされたものは光学図形として描かれている。回転速度、潤滑油の種類、そして荷重の大きさ等を変えたときの運動状況を光学図形から調べている。

保持器は玉および軌道輪に対してすきまをもっているため、ほとんど拘束されていない状態にあるから、回転中は3次元方向の運動をしていると考えられる。したがって、2次元の光学図形では保持器の運動の真の姿を知ることはできない。

これまでに、軌道輪案内保持器の運動について研究されたものはまだ見当たらない。しかし、保持器に作用する力の挙動については角田の研究⁴⁾がある。この研究では保持器の運動については何も言及していないが、保持器に作用する力の解析の際に、保持器を等速度回転しているものとして扱っている。しかし、拘束性のない保持器は実際にそのような状態にあるのか、はなはだ疑問である。

本研究は、軌道輪案内のみ抜き形保持器（外輪案内および内輪案内の2種類）を対象としている。運動のピックアップは筆者が開発した非接触形振動計⁵⁾を用いて、3次元方向の運動変位を定量的に測定し、また回転方向の振動はストロボスコープを使用して観測を行っている。

実験から次のような目新しい結果が得られた。すな

^{*1} 昭和58年12月19日原稿受理

^{*2} 信州大学工学部

第1表 試験軸受 #6307 の主要寸法と保持器のすきま

保持器	すきま	案内すきま δ	ポケットすきま ε	備考
外輪案内保持器 G1P1		342 μm	640 μm	1) 6307 に使用の玉 $\phi 13.494 \times 8$ 個
内輪案内保持器 N1P1		346 μm	640 μm	2) 保持器の材質は 高力黄銅

第2表 試験軸受の回転精度, ラジアルすきま, およびはめあい

(単位: μm)

軸受番号	外ラジアル振レ	外アキシャル振レ	内ラジアル振レ	内アキシャル振レ	内輪横振レ	ラジアルすきま	軸とのはめあい	備考
No. 2	1	3	2	4	1	5	しまりばめ1	N1P1 保持器に使用
No. 3	1	3	1	5	4	6	しまりばめ2	G1P1 保持器に使用

わち, 保持器はやはり3次元方向に振動しており, とくに軸方向に非常に大きな並進振動をしていること, 各方向の振動は保持器の回転速度を基調として, その整数倍の周波成分を含んでいること, さらに保持器は回転方向にも振動していること等がわかった. 以上の諸事実は保持器の運動発生機構の究明のための重要な手がかりになりうるものと考え. 以下実験結果と考察について報告する.

2. 試験軸受および実験方法

2.1 試験軸受 試験軸受は単列深みぞ形玉軸受6307 (内径 35 mm, 外径 80 mm, 幅 21 mm) の並級で, 第1表の図に示すように, 検出器がそう入できる切り欠きを外輪片側端面の円周上等分4個所に設けた. 案内すきま δ とポケットすきま ε を第1表に示す. 保持器の幅は検出器先端部の面積と対向する必要から, 軸受幅より 5 mm 大きくした. 試験軸受の回転精度, ラジアルすきま, およびはめあい等については第2表に示す.

2.2 実験条件 第3表に実験条件を, 第4表に潤滑油の粘度測定の結果を示す.

2.3 実験装置 第1図は試験軸受に純ラジアル荷重を負荷する場合, 第2図は純スラスト荷重を負荷する場合の装置の概要を示す. いずれも 10 倍の拡大率

第3表 実験条件

項目	条件
ラジアル荷重 R	49N 98N 343N
スラスト荷重 T	49N 98N 343N
保持器回転速度 n_r	5 Hz 10 Hz 15 Hz
潤滑油	#60 スピンドル油
潤滑法	約 1cc を給油する

第4表 潤滑油の粘度

(単位: $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)

種類	測定温度 $^{\circ}\text{C}$		
	30 $^{\circ}$	50 $^{\circ}$	100 $^{\circ}$
#60 スピンドル油	10	5	1.7

第1図 ラジアル荷重負荷装置

第2図 スラスト荷重負荷装置

をもったレバー式である。軸の回転駆動は整流子電動機により、そのブラシの位置を変えるが、あるいは変圧器からの入力電圧の変化によって保持器が第3表に示す所定の回転速度になるように調整を行う。そして3次元方向の振動変位測定後の実験では750 Wの3相誘導電動機に変えて、Vプーリのプーリ比の変化により変速を行った。保持器の回転速度5~15 Hzのときの軸回転速度は約13~40 Hzで、ラジアル玉軸受においては低速域から中速度域である。

2.4 測定方法

2.4.1 振動変位および周波数分析の測定方法 最初に試験軸受に所定の荷重をかけ、回転駆動に先立って変位校正を行う。第3図に示す位置に設定したピックアップ（軸方向は軸上の位置だけ）はその先端を保持器の測定面から0.5~1.0 mm 離し、ピックアップ後部に取り付けられているマイクロメータによって所定の量だけ移動させると、振動計に接続されている電磁オシログラフ記録紙上の光点はその分だけ移動して、変位校正のマークがオシログラフ記録紙上に記録される。次に試験軸受を低速で回転しながら保持器に潤滑油を約1 cc 注入し、徐々に回転速度を上げ、保持器が所定の回転速度になったところで、3次元方向の振動波形をオシログラフ紙に描かせる。第4図はピックアップスタンドに各方向のピックアップを取り付けた状態を示す。

振動の周波数成分を調べるために、振動計からの信号電圧を連続形周波数分析器に入力し、分析器からの出力電圧を OVER ALL 20 dB にして、各周波数に対応する dB を電磁オシログラフ記録紙上に描かせ

第3図 ピックアップの設定位置

A: ピックアップスタンド, B: ピックアップ, C: マイクロメータ

第4図 ピックアップスタンドに取り付けた各方向のピックアップ

る。

2.4.2 軸方向振動の測定 軸方向の振動を第3図に示す軸上、軸左、そして軸右の3個所で同時測定を行う。測定要領は2.4.1による。

2.4.3 回転方向の振動測定 回転中の保持器の回転方向振動を観測するために、保持器の片側端面を黒に着色し、そこに太さ0.7 mmの白線を円周等分8個所、半径方向に記入する（第11図(A)を参照）。回転方向振動の状態を写すに際して、まずストロボの閃光速度を保持器の回転速度（毎秒回転数）と同期させ、次にその同期速度の8倍の閃光速度（8倍は試験軸受の玉数と同数で、振動の見やすさから選ぶ）で照射すると、保持器が周期的に角速度変動をしていると、白線は円周方向に振動して見える。この状態をシャッター速度を遅くして写真に写すと、白線は静止時の太さより太く写る。

3. 実験結果と考察

3.1 3次元方向の振動変位 第5図は種々実験条件下における外輪案内保持器 G_1P_1 と内輪案内保持器 N_1P_1 の3次元方向の振動変位（全振幅）をプロットしたものである。図から半径方向（水平と鉛直の両方向）の振動変位は両保持器ともに案内すきま量約340 μm に対して、いずれもその1/4~1/9で大変小さい。軸方向の変位量はポケットすきま量640 μm の1/2.5~1/4で、これもすきま量一杯に振れていない。しかし、半径方向と比べると非常に大きく振れている。回転している保持器は半径方向に大きく振れるものと当初予想していたが、それに反して軸方向に大きく現れたことは保持器の運動における大きな特色と考える。第5図を概観すると、種々実験条件に対する各方向の振動変位が散在しないで、ある幅の中に納まっている。振動変位の大きさは軸方向、水平方向、そし

第5図 種々実験条件における各方向の振動変位 (全振幅)

て鉛直方向の順となっている。以上は振動変位を大まかに見た場合であるが、種々実験条件によって振動変位がどのように影響を受けているかを細かく検討すると、

(a) 軸受荷重の大きさや方向に対してはほとんど影響を受けない。これは保持器が直接荷重を受けていないためと考える。

(b) 保持器の回転速度の増加については、わずかに影響を受けている。すなわち、回転速度の増加によって全般的に増加の傾向にあるが、速度に比例して増加していない。角田の研究⁴⁾においても、回転速度の増加に対して、保持器に作用する力はほとんど変わらないことを示しており、このことを裏づけていると考える。

(c) 潤滑状態に対しては、かなり影響を受けている。すなわち、G1P1 保持器、スラスト荷重 98 N と 343 N の場合であるが、この場合は潤滑油を測定中も継続して注入したもので、各方向の振動変位が他のものに比べていちだんと小さい。これは多量の潤滑油の介在によって、すべり摩擦力の減少とともに、保持器の振動に対しての減衰作用が大きく効いたものと考えられる。

(d) 外輪案内と内輪案内の案内の相違による影響は、半径方向の振動変位においてわずかに差が現れている。内輪案内のほうが案内すきま量の約 10% 大きく出ている。これに対して、軸方向では必ずしも同じ傾向ではない。外輪案内が大きく出ているものもある。半径方向の振動変位で内輪案内が大きく出る理由としては、保持器と軌道輪の案内面で保持器の周速度

R=392N, nr=10 Hz

第6図 G1P1 保持器の振動波形の一例

T=392N, nr=10 Hz

第7図 N1P1 保持器の振動波形の一例

の約 2 倍の速度をもつ内輪外径と接触して、円周方向に駆動を受けるためと考える。これに対して外輪案内のほうは逆に静止している外輪内径によって制動を受けるので変位が小さくなると考える。

3.2 振動波形 保持器の回転速度 10 Hz の時の振動波形について、G1P1 保持器、ラジアル荷重負荷と N1P1 保持器、スラスト荷重負荷における 3 次元方向の振動波形の一例を第 6 図と第 7 図に示す。どの波形

第8図 種々実験条件における各方向の周波数成分の例

も大変複雑で、3方向とも波形が異なっているが大体規則性を保っている。

3.3 振動の周波数分析について 複雑な振動波形を周波数分析してみると、スラスト荷重負荷の場合は第8図の(A)と(B)に見られるように周波数成分がはっきりと現れている。すなわち、保持器の回転速度(毎秒回転数:基本周波数)を ω とすると、いずれもその整数倍の成分が各方向の振動の中に含まれている。これに対して周波数成分の崩れた場合のものとして(C)のラジアル荷重負荷がある。 $R=49\text{N}$ で大変小さいために各玉にかかる荷重が非常に小さく、したがって玉の拘束力が弱い。しかも、保持器の回転速度が15 Hzと速いため玉のすべりが容易に発生し、その結果、周波数成分が崩れるものと考えられる。しかし、この場合でも保持器の回転速度が基調となっているのが見られる。図の(A)と(B)において周波数成分がはっきりと現れているのは、スラスト荷重によって全玉が拘束されて玉の自転あるいは公転すべりがないために⁶⁾、保持器ポケット穴における接触状態が毎回転同一状態を保つため、振動も規則性を保っていると考えられる。図の(A)と(B)から、G1P1保持器とNiP1保持器の両者の振動においては差異がないものと考えられる。

保持器に作用する各種外力について考察すると、保持器ポケット穴内においては、玉の自転による摩擦力、保持器の回転速度と玉の公転速度の相対速度によって、玉がポケット穴を通じて保持器を駆動する回転駆動力、あるいは制動する回転制動力、つまり回転力がある。また保持器の案内面において、外輪案内では保持器の外周に作用する制動力、そして内輪案内では保持器の内周に作用する駆動力が上げられる。上記の周波数分析の結果からすれば、保持器の回転速度が基調となっていることから、回転力が各方向の振動の主原因になっていると考える。

3.4 軸方向振動について 3次元方向の振動変位で、軸方向は軸上の1個所で測定したのであるが、1個所の測定だけでは軸方向にどのような振動をしているのか判断できないので、検出器を軸上、軸左、そして軸右の3個所に設置して振動をピックアップした。その測定結果が第9図と第10図である。G1P1保持器、NiP1保持器ともに軸方向に並進振動をしている。変位量は各点ともだいたい等しいが、変位相互差の大きいものもある。しかし、その場合でも変位波形の位相は同じである。並進振動する原因としては、回転している保持器のジャイロ効果によるものと考えられる。回

第9図 G₁P₁ 保持器の軸方向並進振動の一例 第10図 N₁P₁ 保持器の軸方向並進振動の一例

第11図 保持器の回転方向振動の例

転中の保持器の運動において、軸方向に大きな振動変位をもち、かつ並進振動していることは著しい運動特性と考える。

3.5 回転方向振動（回転速度変動）について 保持器は等速度回転しているのか、それとも変速回転しているのか、これまでの実験結果からではわからない。そこでストロボスコープを使用して速度変動している状態を写したものが第11図の(B)と(C)である。図(B)は G₁P₁ 保持器について、図(C)は N₁P₁ 保持器についてのもので、いずれも図(A)の静止時の線よりも太く写されている。実際に保持器の回転をストロボスコープで観測すると、円周方向に振動している状況ははっきりと見ることができる。

回転速度変動をする理由としては、保持器の回転軸（仮想）と玉列の公転軸（仮想）とが一致していないことによると考える。両軸が交差している場合、たとえば自在継手のように駆動側の玉列の等速度公転に対して保持器の従動側は2回速度変動する。そしてその際玉列に対して保持器は軸方向に傾いているため、玉の一公転中におけるポケット穴内の玉との接触位置は刻々と変わっていき、その接触点の変化が保持器の軸方向変位の原因ともなる。それゆえに回転速度変動と軸方向振動とは密接な関係にあると考える。

回転中の保持器の速度変動について測定した文献は見当たらないが、一般に保持器は玉の公転速度に等しい一定速度で回転しているとされている⁷⁾。今回実際に測定された回転速度変動は保持器のもつ著しい運動特性と考える。

4. 結 論

以上の実験結果と考察から次のことが明らかになった。主要な結果としては、

- 1) 保持器は3次元方向に振動しており、とくに軸方向に大きく並進振動している。
- 2) 各方向の振動は保持器の回転速度を基調として、その整数倍の周波数成分が含まれている。
- 3) 回転中の保持器は回転方向にも振動している。つまり、回転速度変動が周期的に行われている。
- 4) 保持器の振動は玉列の公転において、玉と保持器ポケット穴間の接触の挙動に主として起因しているものとする。

実験条件による影響としては、

- 5) 荷重方向（純ラジアル荷重あるいは純スラスト荷重）と荷重の大きさを変えても振動変位は影響を受けない。
- 6) 潤滑状態に対しては、かなり影響を受ける。潤滑油の多量のときは振動変位は小さい。
- 7) 回転速度の増加に対しては、振動変位はあまり影響を受けない。
- 8) 外輪案内と内輪案内の両保持器において、運動特性においては差異がない、ただ半径方向の振動変位で内輪案内のほうがわずかに大きい。

参 考 文 献

- 1) 曾田範宗：高速玉軸受の保持器の運動，機械の研究，1 (1949)，pp. 261-262.
- 2) 井沢 実：転り軸受保持器の運動に関する研究，科学研究所報告，31 (1960)，pp. 203-213.

- 3) 萱場孝雄, 鈴木忠一郎, 野口行雄: 玉軸受の保持器の運動, 精密機械, **35** (1969), pp. 643-648.
- 4) 角田和雄: 玉軸受の保持器に作用する力, 日本機械学会論文集, **32** (1966), pp. 1164-1175.
- 5) 矢沢信八: 自己インダクタンス変化による変位振動計の試作, 信州大学工学部紀要, 第21号 (1966), pp. 67-77.
- 6) 平野富士夫: 玉軸受の玉の三次元運動について, 日本機械学会論文集, **29** (1963), pp. 554-561.
- 7) 萱場孝雄: 玉軸受の保持器について, 潤滑, **16** (1971), pp. 176-184.

— 論 文 —

長方形断面の縮流筒のコーナー流れにおける逆遷移*¹
 Reverse Transition of Turbulent Corner Flow in Contraction of
 Rectangular Section

三 栖 功*²・岡 本 哲 史*³
 Isao MISU, Tetsushi OKAMOTO
 甲 斐 靖 人*⁴
 and Yasuhito KAI

Key words: turbulent boundary layer; reverse transition; corner flow

Abstract

This paper presents an experimental study of reverse transition in a turbulent boundary layer along a corner of contraction of rectangular section. The reverse transition was examined by consideration of the velocity distribution and the contours of axial mean velocity and turbulent intensity. It is found that a turbulent corner flow reverses to laminar in the presence of favourable pressure gradient and the well-known secondary flow of second kind generated in a corner region disappears during the reverse transition process.

1. 緒 言

大きな負の静圧こう配をもつ流れ, すなわち加速流において, はじめ乱流状態にあった境界層が層流状態へ遷移するいわゆる逆遷移現象が起こることが, 多くの実験的研究¹⁻⁷⁾により確かめられている。著者は先に二次元縮流筒の平面壁と縮流壁上の二次元境界層の逆遷移を実験的に調べ^{7,8)}, その結果, 曲率をもつ縮流壁上の逆遷移の開始点は, 平面壁上で得た逆遷移の開始点と大いに異なり, 平面壁上での逆遷移の基準値を使用できないことを示した。ただ境界層の速度分布に対する形状係数(排除厚/運動量厚)が極小となる点を逆遷移の開始とする基準は, 平面壁および曲面壁のいずれに対しても適用しうることが明らかにされた。

このような逆遷移現象は, 従来二次元縮流領域について研究されたものが大部分であるが, 縮流筒におけるコーナー領域については, 現在まだほとんど研究されていないと思われる。

本論文は, 長方形断面の非対称縮流筒のコーナー領域の流れについて, 境界層内の速度分布の対数則, 等速度線, 等乱れ強さ線に基づき, 逆遷移現象を調べたものである。

記 号

- C_f : 局所表面摩擦係数 ($=\tau_w/(\rho U_1^2/2)$)
 C_p : 圧力係数 ($=(p-p_s)/(\rho U_e^2/2)$)
 H : 形状係数 ($=\delta^*/\theta$)
 h_0 : 測定部平行ダクトの高さ
 h_e : 縮流筒出口の高さ
 $K = -(\nu/\rho U_1^3)(dp/dX)$
 p : 壁面静圧
 p_s : 大気圧
 U : 境界層内の速度
 U_e : 縮流筒出口の速度
 U_1 : 境界層外端の速度
 U_τ : 摩擦速度 ($=\sqrt{\tau_w/\rho}$)
 $U^+ = U/U_\tau$
 $\tilde{u}'$: 変動速度 u' の r. m. s 値
 X, Y, Z : 測定部前縁コーナーに原点においた直角座標
 $Y^+ = U_e Y/\nu$
 $\Delta_c = (\nu/\rho U_e^3)(dp/dX)$
 δ^* : 排除厚さ

*¹ 昭和58年12月19日原稿受理*² 青山学院大学理工学部*³ 前青山学院大学教授*⁴ 日本電装(株)