ラジアル玉軸受の玉の運動に及ぼす軌道面損傷の影響* (ラジアル荷重の場合)

今戸啓二**, 宮川浩臣**, 川北和明***

The Influences of Race Failure on Ball Motions in a Radial Ball Bearing under a Radial Load

Keiji IMADO, Hiroomi MIYAGAWA, and Kazuaki KAWAKITA

Many investigations on the problems of ball motion in ball bearings have been reported. However, studies of the influence of race failure on ball motions are few. Recently, utilizing the Hall effect, a new method to measure three-dimensional ball motion was developed. It is now possible to analyze the angular velocity components of ball rotation from experimental data by this method. The authors carried out a series of experiments on ball motion using damaged bearings. In this paper the experimental results obtained under shaft speeds of $N_r=12$ rpm, 1 000 rpm and a radial load $P_r=490$ N are reported. The effect of shaft speed and the influence of damaged race on ball motion are discussed based on the analysis of the experimental data.

Key Words: Bearing, Hall Effect, Three-dimensional Motion, Race Failure

1. 緒 言

従来より玉軸受の玉の運動に関して多くの報告があるものの、玉の三次元運動の計測が困難であったため実験的な研究はまだ不十分な状態にある。近年ホール効果を利用して、玉の三次元運動が検出できるようになり、実際の挙動が明らかにされつつある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。玉軸受の玉の運動解析は、正常な玉軸受、すなわち軌道面等に損傷のない軸受について論じたものが多く、疲労等により軌道面に損傷が生じた軸受における玉の運動については、報告がほとんど見られない。

著者らはこの点に着目して実験的研究に着手したが、前報⁽⁴⁾では軌道面に損傷のある玉軸受の玉の運動について、軸回転数 100 rpm、静モーメント荷重条件のもとでの、玉の運動について報告するとともに、実験データ解析の一手法について述べた。

本報では、ラジアル条件下で、玉の運動に及ぼす軌道面損傷と玉の慣性の影響を調べるために、軸回転数 12 rpm および 1 000 rpm で行った実験結果、およびその後一部検討を加えた解析手法について併せて報告

する。

2. 玉自転角速度成分の理論解析

玉運動検出法については、これまでの報告⁽¹⁾⁽²⁾に詳しいので、ここでは省略する。図1に示すように、磁化玉のまわりに配置されたホール素子は、式(1)で表されるホール電圧 V_{HX} , V_{HY} , V_{HZ} を発生する。これらの電圧は磁軸と各座標軸がなす角度の方向余弦に比例している。

$$\left. \begin{aligned} V_{HX} &= a \cos \alpha_n = V'_{HX} - E_x \\ V_{HY} &= b \cos \beta_n = V'_{HY} - E_y \\ V_{HZ} &= c \cos \gamma_n = V'_{HZ} - E_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

図1 玉の三次元運動検出法

* 昭和61年11月3日 中国四国支部・九州支部合同大分地方講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月24日。

** 正員、大分大学工学部 (〒870-11 大分市旦野原700)。

*** 正員、九州大学教養部 (〒810 福岡市中央区六本松4-2-1)。

ここに a, b, c は x, y, z 方向の最大検出力, $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$ は磁軸と各軸とのなす角, V_{HX}, V_{HY}, V_{HZ} はホール素子から直接得られるホール電圧, E_x, E_y, E_z はホール素子の特性による不平衡電圧である。

ここで図1において, r を玉の半径, i, j, k を x, y, z 方向の単位ベクトルとすれば, 玉の中心 O を原点とし, 玉表面上の磁極 N 点を示す位置ベクトル N は, 式(2)で与えられる。

$$N = r(i \cos \alpha_n + j \cos \beta_n + k \cos \gamma_n) \\ = r \left(i \frac{V_{HX}}{a} + j \frac{V_{HY}}{b} + k \frac{V_{HZ}}{c} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

玉の自転角速度 ω_b は, その x, y, z 方向成分を $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ とすれば式(3)で, 磁極 N 点の速度 V_n は式(4)で表される。

$$\omega_b = i\omega_x + j\omega_y + k\omega_z \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$V_n = \omega_b \times N = r \begin{vmatrix} i & j & k \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ \frac{V_{HX}}{a} & \frac{V_{HY}}{b} & \frac{V_{HZ}}{c} \end{vmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

一方, V_n は式(2)を直接時間 t で微分しても得られる。

$$V_n = \frac{dN}{dt} = r \left(i \frac{dV_{HX}}{dt} + j \frac{dV_{HY}}{dt} + k \frac{dV_{HZ}}{dt} \right) \\ = r \left(i \frac{\dot{V}_{HX}}{a} + j \frac{\dot{V}_{HY}}{b} + k \frac{\dot{V}_{HZ}}{c} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

前報⁽⁴⁾において, 玉自転角速度ベクトル ω_b の方向を決定するために, 求めようとする点を中心とした位置ベクトル N のベクトル軌跡上にある微小ベクトル dN_1, dN_2 をとり, それらのベクトル積により方向を決定したが, dN を小さくとりすぎると解が不安定となる傾向がみられた。そこで本報においては, ベクトル軌跡の接線ベクトルと主法線ベクトルとのベクトル積により方向を決定するように検討を加えた。すなわち図2においてベクトル N の軌跡の線素を ds とすれば, N 点の接線単位ベクトル t および主法線単位ベクトル n は,

図2 ベクトル N の軌跡と単位ベクトル t, n

$$t = \frac{dN}{ds} = \frac{1}{K} \left(i \frac{\dot{V}_{HX}}{a} + j \frac{\dot{V}_{HY}}{b} + k \frac{\dot{V}_{HZ}}{c} \right) \quad (6)$$

ここに

$$K = \sqrt{\left(\frac{\dot{V}_{HX}}{a} \right)^2 + \left(\frac{\dot{V}_{HY}}{b} \right)^2 + \left(\frac{\dot{V}_{HZ}}{c} \right)^2} \\ n = \frac{dt/ds}{|dt/ds|} = \frac{1}{I} \left(i \frac{\dot{V}_{HX}}{a} + j \frac{\dot{V}_{HY}}{b} + k \frac{\dot{V}_{HZ}}{c} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに

$$I = \sqrt{\left(\frac{\dot{V}_{HX}}{a} \right)^2 + \left(\frac{\dot{V}_{HY}}{b} \right)^2 + \left(\frac{\dot{V}_{HZ}}{c} \right)^2}$$

上式(6), (7)より, 玉自転角速度 ω_b 方向の単位ベクトル e は式(8)で得られる。

$$e = t \times n = \frac{1}{KI} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\dot{V}_{HX}}{a} & \frac{\dot{V}_{HY}}{b} & \frac{\dot{V}_{HZ}}{c} \\ \frac{\dot{V}_{HX}}{a} & \frac{\dot{V}_{HY}}{b} & \frac{\dot{V}_{HZ}}{c} \end{vmatrix} \\ = ie_x + je_y + ke_z \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで式(4), (5)の各成分を等置して整理すれば式(9)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_{HX}}{a} &= \omega_b \left(e_y \frac{V_{HZ}}{c} - e_z \frac{V_{HY}}{b} \right) \\ \frac{V_{HY}}{b} &= \omega_b \left(e_z \frac{V_{HX}}{a} - e_x \frac{V_{HZ}}{c} \right) \\ \frac{V_{HZ}}{c} &= \omega_b \left(e_x \frac{V_{HY}}{b} - e_y \frac{V_{HX}}{a} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

図3に示すように, 玉自転軸すなわち ω_b が XZ 平面内にあるとすれば, 接触角 α は次式で表される。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\omega_z}{\omega_x} \quad \dots\dots\dots (10)$$

3. 実験方法

試験軸受は, 深みぞ玉軸受# 6307, 黄銅もみ抜き保持器付で, その主要諸元を表1に示す。試験軸受としては未使用のものと, あらかじめ内輪軌道面の一部に損傷を与えた軸受と軌道面の全周にわたって損傷を与えた軸受を用いた。なお損傷は過酷な潤滑条件下で,

図3 玉の自転軸, 接触角, 公転位置角

基本静定格荷重以上のラジアル荷重で運転して与えた。図4は内輪軌道面に一部分損傷を受けた軸受、および全周にわたって損傷を受けた軸受内輪軌道面の表面写真と断面形状を示したものである。

潤滑油は#1スピンドル油を用い、油温 23°C とし給油量 60 cc/min でノズル給油を行った。

実験は軸回転数 $N_i=12$ rpm および 1000 rpm, ラ

表 1 試験軸受主要諸元

Test bearing	# 6307
Pitch circle dia.	57.981 mm
Number of balls	8
Radial clearance	0.010 mm
Inner race dia.	44.481 mm
Outer race dia.	71.482 mm
Ball diameter	13.494 mm
Cage	Machined brass

図 4 内輪軌道表面および断面形状

図 5 検出出力と玉自転角速度成分の変化 ($N_i=12$ rpm 損傷のない軸受)

ジアル荷重 $P_r=490$ N の条件下で、それぞれの軸受について行った。

4. 実験結果および考察

玉の運動に及ぼす軸受軌道面損傷の影響について実験を行った結果の一例を図5～11に示す。横軸の太線部分は、すきまを無視した場合の負荷域である。

4.1 軸回転数 12 rpm の場合 玉の運動において慣性の影響を無視できるように、軸回転数を $N_i=12$ rpm と低速にして実験を行った結果を図5～8に示す。

図5に示した損傷のない軸受では、一般に規則的な検出力波形を示すが、無負荷域の終端 $\phi_c=230^\circ$ 近辺で急激な V_{HX} の低下がみられ、玉表面の磁極 N 点の位置が急変していることがわかる。無負荷域では、内外輪間の隙間が大きくなり、玉と軌道面、保持器ポケット面との接触は、主に玉自重に影響されると考えられ、とくに $\phi_c=90^\circ, 270^\circ$ 近辺では玉の接触が内輪から外輪、外輪から内輪へ移る中間状態にあり、玉の運動が不安定になりやすいものと推定される。

一公転中における玉自転角速度の変化をみると、無負荷域において ω の変動が次第に大きくなり、玉の運動が次第に不安定になることがわかる。とくに $\phi_c=230^\circ$ 付近における $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ の急変は、 V_{HX} の変化に対応したものである。

一部分損傷を受けた軸受の場合の結果を図6に示す。図中の a, b, c は内輪軌道の傷の位置と運動計測

図 6 検出出力と玉自転角速度成分の変化 ($N_i=12$ rpm 一部損傷のある軸受)

用磁化玉の位置が一致した点である。負荷域と無負荷域の遷移領域の近くで、傷と玉が一致した場合には(a, b箇所)、玉運動の変動が生じているが、負荷域(c箇所)ではこの変動がほとんどない。玉と内外輪の接触が不安定に変化すると考えられる $\varphi_c = 90^\circ$ および 270° 付近では、玉は内輪傷の縁とランダムに接触するため自転が乱れるものと推察される。一方負荷域で内輪損傷点と玉が一致したc箇所においては、玉と内外輪の接触が確保されており、傷と接触してもほとんど内輪軌道半径と同じ半径上を回転するため、玉運動には大きな変化を生じないものと考えられる。

内輪が全周にわたって損傷を受けた軸受の場合の結果を図7に示す。負荷域から無負荷域への遷移領域 $\varphi_c = 90^\circ$ において、著しい自転すべりが生じている。これは低速で玉運動の慣性がほとんどないこと、軌道面損傷が連続しているため転がり抵抗が大きいことによ

り、玉の自転が負荷域出口付近で大きな制動を受けるためと考えられる。

図8に玉自転角速度 ω_x, ω_z をもとに式(10)によって求めた玉一公転中の接触角の変化を示す。玉自転が不安定になりやすい $\varphi_c = 90^\circ, 270^\circ$ 近傍において、軌道面に損傷がある場合もない場合も、ともに接触角の大きな変化が認められる。負荷域ではいずれの場合もそれほど大きな接触角の変動はないが、無負荷領域においては、損傷のない軸受と一部分損傷を受けた軸受は、ほぼ同じ程度の接触角の変動を示すものの、全周損傷を受けた軸受は、かなり変動しており、軌道面の状態が玉の運動に大きく影響を与えていることがわかる。

4.2 軸回転数 $N_i = 1000$ rpm の場合 玉の運動において慣性の影響を大きくするために、回転数を $N_i = 1000$ rpm と高速にして実験を行った結果の一例を図9~11に示す。

図9に示した損傷のない軸受では、玉は全般的に変動の少ない規則的な運動をしているが、無負荷域では ω_x が次第に減少し、その後負荷域近くで急激に自転が回復しており、低速の場合とは明らかに異なった玉の挙動となることがわかる。無負荷域の ω_x のゆるやかな減少と自転すべりは、高速で玉運動の慣性が大きいこと極端なすべりは生じにくく、主に油の粘性抵抗により次第に自転が減速されるためと考えられる。

一部分損傷を受けた軸受の実験結果を図10に示す。図中のa, b, c箇所は図6と同様に、玉と内輪の傷が

図7 検出出力と玉自転角速度成分の変化 ($N_i = 12$ rpm 全周損傷を受けた軸受)

図8 玉と内外輪の接触角の変化

図9 検出出力と玉自転角速度成分の変化 ($N_i = 1000$ rpm 損傷のない軸受)

図 10 検出力と玉自転角速度成分の変化
($N_i=1000$ rpm 一部損傷のある軸受)

一致した所である。低速の場合、負荷と無負荷の遷移領域で大きく ω が変動したのに対し、高速の場合は内輪の傷による ω の大きな変動は認められない。これは玉運動の慣性が大きいため、自転運動を保持しやすくなることと、玉に働く遠心力により玉と無傷の外輪軌道面の接触が確保されやすいため、内輪の影響を受けにくくなったものと考えられる。

全周損傷を受けた軸受の場合の結果を図 11 に示す。検出力波形をみると、低速の場合に比較して無負荷領域での検出力波形の変動が、非常に少なくなっている。これは図 9 において述べた理由によると考えられる。以上により高速になるに従って、玉の運動は内輪軌道面損傷の影響を受けにくくなる傾向があるといえる。

5. 結 論

ラジアル荷重条件下で玉の運動に及ぼす軌道面損傷の影響を、軸回転数 $N_i=12$ rpm と 1000 rpm の場合

図 11 検出力と玉自転角速度成分の変化
($N_i=1000$ rpm 全周損傷を受けた軸受)

について実験的に検討した。

低速条件では、一般に負荷と無負荷の遷移領域近辺で玉運動が不安定になりやすいが、とくに一部損傷の軸受では、この領域で玉が傷に一致するとその影響を大きく受ける。その他の領域では、部分的な傷の顕著な影響は認められない。ただし全周損傷軸受では、玉運動にかなり損傷の影響が認められる。

一方高速の場合は、玉自転運動の慣性の増大と、遠心力による外輪軌道面との接触の確保により、全般的に玉の自転運動が安定し、内輪接触面の影響を受けにくくなる傾向が認められた。

文 献

- (1) Kawakita, K. and Halling, J., *Wear*, 69 (1981), 241.
- (2) Ariyoshi, S., Kawakita, K. and Hirano, F., *Wear*, 92 (1983), 13.
- (3) Kawakita, K., *Wear*, 95 (1984), 231.
- (4) 宮川・ほか 2 名, 機論, 52-476, C (昭 61), 1375.