アンギュラ玉軸受の玉の三次元運動挙動計測* (静止斜交座標軸配置のホール素子による計測)

中島 晃^{*1}, 張 晨 陽^{*2}, 馬 渡 俊 文^{*1}
吉田 孝文^{*3}, 東 崎 康 嘉^{*3}, 松 本 将^{*3}

Measurement of Three Dimensional Ball Motion in Angular Contact Ball Bearing (Measurement with Hall Elements Arranged on Fixed Oblique Coordinates)

Akira NAKAJIMA^{*4}, Chenyang ZHANG, Toshifumi MAWATARI,
Takafumi YOSHIDA, Yasuyoshi TOZAKI and Susumu MATSUMOTO

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Saga University,
1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga, 840-8502 Japan

In order to make clear the causes of heat generation, friction loss and tribo-failures such as smearing in high speed ball bearings, it is indispensable to grasp the contact conditions between ball and races or between ball and separator, and the development of measuring method of the actual ball motion has been desired. In the present paper, using hall elements arranged on the fixed oblique coordinates, the authors measured the behavior of the three dimensional ball motion in the angular contact ball bearing 7 209 A under various running conditions. The results were compared with those of the conventional method with a moving orthogonal coordinate system and it was confirmed that the measured values such as the rotational speed of the ball and the separator almost agree by two different methods. It was recognized that the propositional method is practical use and useful.

Key Words : Angular Contact Ball Bearing, Ball Motion, Hall Element, Oblique Coordinates

1. 結 言

アンギュラ玉軸受は、15°～40°の呼び接触角を有し、玉と内・外輪の接触点を結ぶ玉荷重の方向線が傾いているため、ラジアル荷重と一方向のアキシアル荷重を同時に支持することができる。また、ラジアル荷重だけが作用しても、アキシアル方向の分力が生じるため、通常、同じ形式の軸受を2個対向させて、または2個以上組合せて使用される。中でも背面組合せ形は、モーメント荷重の支持にも適し、予圧を加えることにより軸受剛性をコントロールすることができるため工作機械の主軸を支持する軸受などとして利用が多い。ところで近年、NC旋盤やマシニングセンターに代表される工作機械主軸の高速化が急速に進み、軸受内部の発熱による温度上昇や焼付きの発生、摩擦損失の増大

などが問題となっている⁽¹⁾。このような発熱現象や摩擦損失発生の原因を解明するためには、熱源である玉と軌道輪間の転がり-滑り現象の把握が必要であり、特に玉のスピンドルとジャイロ運動の比率の解明や玉の運動におよぼす保持器の影響の究明などが不可欠な課題となっている⁽²⁾。

玉軸受の玉の運動に関しては、機構学的に公転速度や自転速度など求めることが可能であるが⁽³⁾、実際には、荷重や回転数、潤滑条件などの運転条件の影響を大きく受けるため、幾何学的条件から計算される理論値とは必ずしも一致しない場合が多く、これらを考慮した理論的研究が展開されている⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。従って、これらを確認するためにも実験的に玉の運動挙動を計測することが必要となるが、三次元運動する複雑な玉の挙動を計測することは非常に難しい。平野らは磁化玉の運動をサーチコイルにより検出する方法を考案し、種々の玉軸受の玉の運動計測を行っている^{(6)~(8)}。構造がシンプルで簡便な方法であるが、出力電圧に速度依存性があること、二次元的情報から玉の三次元的運動を解析・推定する困難さがあった。川北らはホール素子を保持器と軸受ハウジングに配置し、深溝玉軸受に

* 原稿受付 2000年9月11日。

^{*1} 正員, 佐賀大学理工学部(☎ 840-8502 佐賀市本庄町1)。

^{*2} 正員, 佐賀大学大学院。

^{*3} 正員, 三菱重工業(株)長崎研究所(☎ 851-0392 長崎市深堀町5-717-1)。

E-mail: nakajima@me.saga-u.ac.jp

組込んだ磁化玉の三次元的な運動解析を行った^{(9)~(11)}. また、浦らは同様な手法でスラスト玉軸受の玉の運動計測を行っている⁽¹²⁾. いずれも、ホール素子を軸受の保持器内に埋め込むことで、磁化玉磁軸の公転方向および軸方向運動の検出がなされているが、接触角によるホール電圧の変化⁽¹³⁾や、負荷に伴う保持器の変形による検出電圧の変動など解決すべき課題も残っている. また、ホール素子を保持器に埋め込むこの方法は、精密な加工技術が要求されるばかりでなく、高速回転における信頼性の問題、そして何より回転部分から信号を取り出す難しさなど実機に適用するには支障が多い.

そこで本研究では、実機への適用を視野に入れ、アングュラ玉軸受における玉の三次元的な運動挙動を、静止側の軸受の外輪と保持器側面部に固定のリング端面に配置したホール素子を用いる静止斜交座標系での計測を新たに試みるとともに、従来のホール素子を保持器に埋め込む回転直交座標系での計測結果との比較を行い、その有効性を検討する.

2. 静止斜交座標系での玉の運動検出

図1に磁化玉の中心が原点になる斜交座標 X , Y' , Z 軸に配置されたホール素子を示す. ホール素子の検出電圧は各素子に対する磁軸ベクトルの方向余弦に比例した値となるので、ホール素子を直交座標 X , Y , Z 軸上に配置すれば、検出電圧より各軸に対する方向余弦が求められ、磁軸ベクトルの方向が定まる. 今戸らは、従来の直交座標系での計測・解析⁽¹¹⁾に対し、 Z 軸をラジアル方向から接触点方向に傾けた斜交座標系での計測を行うことで接触角の変化によるホール電圧の変化が押えられ、玉の自転角速度などの計算誤差が小さくなることを理論的に明らかにしている⁽¹³⁾. 本静止斜交座標系での玉の運動検出においても、ホール素子を静止側の X , Y' , Z 軸上に配置した点を除けば

同様の解析手法が適用できる. なお、斜交座標軸上にホール素子を配置した場合、検出電圧は磁軸ベクトルの共変成分に比例した値となることから⁽¹³⁾, 斜交座標系で得られた検出電圧は直交座標系に変換しておく必要がある. すなわち、直交座標系および斜交座標系でのホール検出電圧をそれぞれ V , V' としその成分を、

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, \quad V' = \begin{bmatrix} V_{x'} \\ V_{y'} \\ V_{z'} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

で表わせば、

Fig.2 Arrangement of hall elements

Fig.1 Hall elements arranged on oblique coordinate axis

Fig.3 Location of Y' hall element

Fig.4 Size of hall element

$$V = A^{-1}V' \dots\dots\dots (2)$$

となる。(2)式の A は変換マトリクスであり、

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos\theta_{XY'} & \cos\theta_{YY'} & \cos\theta_{ZY'} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。ここに $\theta_{XY'}$, $\theta_{YY'}$, $\theta_{ZY'}$ はそれぞれ Y' 軸が X , Y , Z 軸となす角度である。

図2, 図3に静止斜交座標系での測定における試験軸受とホール素子の配置を示す。試験軸受は、アンギュラ玉軸受 7209A (内径: 45mm, 外径: 85mm, 幅: 19mm, 玉数: 13 個, 呼び接触角: 30°, 精度 JIS 5 級) であり, 保持器には高力黄銅のもみ抜き保持器が用いられている。今回用いたホール素子は, 小型高感度のA社製 HW-105A であり, 外観と寸法を図4に示す。入力電圧を 1.5V として計測した。

座標軸は, 玉の中心を原点としてアキシアル方向に X 軸, ラジアル方向に Z 軸をとり, Y 軸は玉の公転方向, Y' 軸は図3に示す方向にとる。すなわち, Y' 軸ホール素子は, 外輪外周面の一部をカップ形研削といしにより 30° の角度で面取りし, 端面から 3.68mm, 外輪中央部の Z 軸ホール素子とは円周方向に 4.5° ずれる位置に貼付された。磁化玉の中心を原点とした場合の Y' 軸ホール素子の位置は, $(X_d, Y_d, Z_d) \approx (5.819 \text{ mm}, 3.168 \text{ mm}, 7.793 \text{ mm})$ であり, Y' 軸が直交座標軸となす角は $(\theta_{XY'}, \theta_{YY'}, \theta_{ZY'}) \approx (54.6^\circ, 71.6^\circ, 89.1^\circ)$ となる。なお, Y' , Z 軸の素子は円周方向に 9° 間隔でそれぞれ 3 個, 合計 6 個貼付してある。

X 軸ホール素子は, 図2に示すように, 軸受側面に配置した硬質プラスチック製リングの端面の転動体ピッチ円に相当する円周上に 9° 間隔で 3 個貼付された。

この静止斜交座標系での計測においては, 磁束密度 $B \approx 3.3 \text{ mT}$ の磁化玉 2 個を, お互い最も離れたおよそ 166° (または 194°) の位置に配置した (玉数が奇数のため 180° はできない)。磁化玉の運動は, 9° 間隔に配置された X , Y' , Z 軸上それぞれの素子によりホール電圧として検出され, 磁化玉が各座標軸の原点にある

(a) Measurement with a fixed oblique coordinate system

(b) Measurement with a moving orthogonal coordinate system

Fig.5 Measuring systems

ときの磁軸ベクトル, および各位置における磁軸ベクトルの変化と玉の公転速度より, 磁化玉の自転軸の方向ならびに角速度ベクトル ω が求められる。ホール電圧から角速度 ω を計算する手法についてはいくつか報告されているが, 本研究では面積速度法⁽¹³⁾により ω の値を求めた。この手法は, 磁軸ベクトル X の軌跡を含む平面 Ω の法線ベクトル $n = (l, m, n)$ が角速度ベクトル ω の方向に一致することから, 自転軸と平面 Ω : $lx + my + nz = d$ の交点 $P = (dl, dm, dn)$ から磁軸ベクトル先端までのベクトルを回転ベクトル r とし, このベクトル r が描く面積速度の大きさにより角速度ベクトル ω を求める方法である。すなわち, 磁軸ベクトルにより平面の法線ベクトル n を求めた後, 平面 Ω の式を決定すれば, 交点 P の座標を得る。時刻 t の間の磁軸ベクトル

Fig.6 Testing machine

Fig.7 Main part of testing machine

の変化により回転ベクトルは r_1 , r_2 , r_3 と変化するが、回転ベクトルが描く 3 個の扇形の面積 S は、 t が十分小さい場合、各回転ベクトルのベクトル積により得られる三角形の面積の総和として近似される。一方、同時刻間に大きさ $r_{av} = (|r_1| + |r_2| + |r_3|) / 3$ の回転ベクトル r_{av} が角速度 ω で回転した場合の扇形の面積を S' とし、 S と S' を等置とすれば、角速度 ω が求まり、角速度ベクトル ω が得られる。以上のようにこの方法では、計算上微分を含まないために、検出電圧のノイズによる計算精度劣化の影響が小さい。

なお本研究は、静止斜交座標系での計測の有効性確認に主眼を置いており、今回磁化玉の運動検出は円周上 9° 間隔 3 箇所で行い、その間の磁軸ベクトルの変化から玉の自転速度などを求めるに留めたが、1 回転中の挙動追跡あるいは局所的非常運動検出のためには、素子を全周面に配置したりその間隔を狭めるなどの工夫が必要と思われる。

3. 回転直交座標系での玉の運動検出

図 5 にアンギュラ玉軸受の玉の運動挙動を計測するための構成図を示す。(a) は上述の静止斜交座標系

Table1 Test conditions

Axial load, N	98, 490, 980
Rotational speed, rpm	1794, 3580, 10135

Table2 Properties of lubricating oil

Specific gravity 288/277K	0.878
Viscosity at 313K	62.9
$\nu, \text{mm}^2/\text{s}$ at 373K	8.50
Viscosity index V.I	82
Pressure viscosity exponent α, GPa^{-1} at 313K	13.3

での計測、(b) は回転直交座標系での計測である。回転直交座標系での計測の場合には磁化玉は 1 個とし、X, Y 方向運動計測用として保持器に埋め込んだホール素子の検出電圧を中間軸を介して、スリップリングにより取り出した。また、Z 方向の運動は、試験軸受ハウジングの軸受押え用カバーに 120° 毎に磁気通路を設け、そこに各 1 個、合計 3 個のホール素子を配置して計測を行った。なお、静止斜交座標系での計測の場合、軸受外輪に配置したホール素子がハウジングと干渉しないように、ハウジングの一部にぬすみを入れた。また、計測に際しては、中間軸やスリップリング

Fig.8 Changes in hall voltage (oblique coordinates, $F_a=98\text{N}$, $N=3580\text{rpm}$)

Fig.9 Changes in hall voltage (oblique coordinates, $F_a=980\text{N}$)

Fig.10 Changes in hall voltage (orthogonal coordinates, $F_a=980\text{N}$)

Fig.11 Changes in hall voltage ($N=10135\text{rpm}$)

は必要がないので、保持器と中間軸を接続するロッドは取り外している。

ホール素子の検出電圧は、アンプにより増幅され、コンピュータに取付けられた A/D 変換器によってデジタル数値化・処理された。サンプリング周波数は 10kHz または 40kHz で計測を行った。

4. 試験方法

用いた転がり軸受試験機⁽¹⁴⁾は独自に設計製作されたもので、図 6 にその外観を、図 7 に主要部平面図を示す。回転直交座標系の計測においては、試験軸受保持器内に埋め込まれたホール素子の検出電圧を外部に取り出すために中間軸を追加し、その軸端にスリッピングを配置した。試験軸受は外輪固定、内輪回転とし

た。軸回転速度はモータ側と試験機主軸側のプーリを交換することによって変更が可能であり、今回は、表 1 に示すように $N=1794\text{rpm}$, 3580rpm , 10135rpm の 3 条件で計測を行った。荷重は外輪を固定するハウジングをラジアル方向およびアキシャル方向から圧縮コイルばねで押し、最大でラジアル荷重 $F_r=23.5\text{kN}$, アキシャル荷重 $F_a=13.7\text{kN}$ までの負荷をかけることができる。ただし、今回は表 1 に示す 3 通りのアキシャル荷重 $F_a=98\text{N}$, 490N , 980N だけを負荷し、ラジアル荷重 F_r は 0 とした。

使用した潤滑剤は極圧添加剤無添加のパラフィン系鉱油であり、その代表性状を表 2 に示す。油温を 318K 一定に保ち、ノズルにより毎秒 7.5cm^3 の割合で試験軸受の転送面に強制給油した。

Fig.12 Ball and separator rotational speed

試験に際しては、15 分間の無負荷運転を行い、所定の負荷をかけた後、ホール電圧の計測を行った。主軸回転速度と保持器公転速度はそれぞれ電磁式回転検出器によって同時に実測された。

5. 試験結果と考察

図 8 はアキシアル荷重 $F_a=98\text{N}$ 、主軸回転速度 $N=3580\text{rpm}$ において、静止斜交座標軸配置のホール素子により磁化玉の運動を計測した結果の一例である。矢印で示した波形のピークの位置は磁化玉が各座標軸のホール素子に最も接近した状態にあることを示している。また、試験軸受には磁化玉が 2 個組み込まれて

いるので、あるピークから 2 つ先のピークまでの時間間隔が保持器の 1 回転（玉の公転周期）となる。図中の $X1$, $Y'1$, $Z1$ などの記号は図 2 に示したホール素子の番号に一致させている。 $X1$ と $Z1$, $X2$ と $Z2$, $X3$ と $Z3$ は同時刻にピークが観察されているが、 Y' 軸ホール素子はずらして貼ってあるため、 $Y'1$, $Y'2$, $Y'3$ のピークはそれぞれ $X1$, $X2$, $X3$ より 4.5° に相当する時間、約 0.7msec だけ早く検出されている。ホール素子の検出電圧は磁化玉の磁軸の方向に応じて変化するため、各ホール素子で検出されたピーク電圧は素子の位置および検出の時刻に応じて異なっている。

図 9 はアキシアル荷重 $F_a=980\text{N}$ のときの斜交座標 $X3$, $Y'3$, $Z3$ 軸上に配置したホール素子の検出電圧の変化を示したものである。主軸の回転速度が上昇するにしたがって、波形のピークの間隔が短くなり、形状も徐々に先鋭化しているのがわかる。主軸回転速度 $N=1794\text{rpm}$ のとき、軸受外輪のホール素子 $Y'3$, $Z3$ の電圧波形は、ピーク以外にも比較的周期が短く、振幅が小さい変動成分が観察されるが、速度を $N=3580\text{rpm}$ まで上げると、変動成分はよりはっきりした形で顕在化している。さらに速度を上げた $N=10135\text{rpm}$ の実験では、変動成分が $N=1794\text{rpm}$ の場合よりも小さくなるとともに、 $X3$ の電圧波形も含め、非常に再現性の高い波形を示すようになり玉の運動が安定していることがわかる。また、 Y' 軸上の電圧波形上で観察されるピークの値は、 Z 軸に比較して大きくなる傾向が見られた。

図 10 はアキシアル荷重 $F_a=980\text{N}$ のときの回転直交座標 X , Y 軸上に配置したホール素子の検出電圧の変化を示したものである。 Y 方向に配置されたホール素子の検出電圧波形は、大きな振幅の正弦波形を示している。主軸回転速度 $N=1794\text{rpm}$, 3580rpm のとき、電圧値は正負の間で変化しており、振幅の大きさも常に変動していた。一方、 $N=10135\text{rpm}$ の実験では、電圧値は負の値のみを示しており、振幅の変動が小さく、再現性の高い波形となっていることがわかる。また、 X 方向のホール素子にも Y 方向と同様に正弦波状の波形が観測されたが、波形の振幅は Y 方向と比較して小さく、電圧値は正もしくは負の値のみを示す傾向にあった。

図 11 は主軸回転速度 $N=10135\text{rpm}$ のときの静止斜交座標 $Y'1$ 軸と回転直交座標 Y 軸のホール素子の検出電圧波形である。 $Y'1$ の波形上観察されるピークの数 はアキシアル荷重 $F_a=98\text{N}$ のとき 0.1 秒間に 5 個、 $F_a=490\text{N}$ では 10 個、 $F_a=980\text{N}$ では 14 個と負荷が増加するにつれピーク数も増加しており、特に $F_a=98\text{N}$ と

490N の間で2倍になっている。直交座標 Y 軸の波形も同様に $F_a=98\text{N}$ と 490N の間で大きく変化しているのがわかる。

図 1 2 は静止斜交座標系および回転直交座標系の両測定において求められた玉の自転速度と保持器の回転速度（玉の公転速度）を比較したものである。また、高速転がり軸受における Jones の玉の運動理論⁽¹⁵⁾を実験的に検証し、潤滑条件や玉のスピン・ジャイロ運動の影響を考慮して理論の修正を行った山本の研究⁽⁴⁾と同様の解析手法を用い玉の運動解析を行ったが、その際、スキッピング（高速転がり軸受における転動体の激しい公転滑り）の影響をも考慮するために、転動体と内・外軌道輪の接触部に作用する摩擦力について弾性流体潤滑理論を適用し転動体の運動を評価した Harris の手法^{(16),(17)}を取入れ、独自に理論計算を行った。図 1 2 にはその解析結果も合せてプロットしている。

$N=10135\text{ rpm}$ の場合、 $F_a=490\text{N}$ での自転速度の 1 点を除けば、両座標系での計測結果はよく一致しており、理論計算値ともほぼ同じ値を示していた。また、 $F_a=490\text{N}$ の場合、 $F_a=98\text{N}$ に比べ、玉の自転速度、保持器の回転速度ともに増加したが、さらに荷重を増やした $F_a=980\text{N}$ の場合には、速度の増加は見られずほぼ一定であった。 $N=1794\text{rpm}$, 3580rpm の実験でも玉の自転速度に若干の差異は認められるものの、両計測結果および理論値はほぼ近い値を示していた。ただし、軽荷重の $F_a=98\text{N}$ における玉の自転速度は実測値が理論値よりかなり小さくなっており、実際には玉が十分に転がっていないことがわかる。

このように、静止斜交座標系と回転直交座標系での計測結果が、同一ロットの軸受ではあるが同時計測でないにもかかわらずかなりよく一致しており、今回提案の計測法の妥当性が確認される。

6. 結 言

アングュラ玉軸受の玉の三次元運動挙動を、静止斜交座標系に配置したホール素子により計測する方法を新たに提案するとともに、保持器にホール素子を組み込んで計測する従来の回転直交座標系による計測法との比較を、同一ロットの 7209A 軸受と同じ転がり軸受試験機を用いて行った。その結果、次のような知見を得た。

（1）静止斜交座標系での計測により玉の三次元運動が十分捕えられ、玉の自転速度や公転速度は、従来の回転直交座標系での計測結果とほぼ一致し、本計測法の妥当性が裏付けられた。

（2）特に軽荷重・高速回転の場合、玉の自転速度の

著しい低下が計測され、玉の自転滑り発生が確認された。

（3）玉の公転速度は、機構学的条件により計算される理論値に近い値が得られたが、ホール素子による自転速度の実測値は理論値と必ずしも一致せず、かなりはずれる場合もあった。

（4）本計測法は静止側からの計測であるため構造が簡単で実機への適用が有望と思われるが、さらに測定精度を向上させるためには、磁化玉の運動による磁場の形成状態や素子の配置などに関し詳細な検討・考察が必要である。

最後に、試験軸受をご提供頂くとともに計測のための精密加工につき便宜をお計り頂いた日本精工(株)の関係各位に厚く御礼申し上げます。また、大分大学講師今戸啓二先生には、種々有益なご助言ならびにご討議を頂いた。合せて謝意を表します。

文 献

- (1) 相原, 機械の研究, **44-5** (1992), 121-128.
- (2) Aramaki, H., Shoda, Y., Morishita, Y. and Sawamoto, T., Trans. ASME, JOT, **110-4** (1988), 693-698.
- (3) 岡本・角田, 転がり軸受, (1981), 168-174, 幸書房.
- (4) 山本, 潤滑, **13-9** (1968), 505-515.
- (5) Harris, T. A., and Mindel, M. H., Wear, **23** (1973), 311-337.
- (6) 平野, 日本機械学会論文集, **30-211** (1964), 427-436.
- (7) 平野・川北, 日本機械学会論文集, **33-253** (1967), 1524-1528.
- (8) 平野・川北・浦・権藤, 日本機械学会論文集, **37-302** (1971), 2009-2015.
- (9) Ariyoshi, S., Kawakita K. and Hirano, F., Wear, **92** (1983), 13-23.
- (10) Kawakita K., Ariyoshi, S. and Hirano, F., Wear, **95** (1984), 9-17.
- (11) 川北・有吉, 潤滑, **31-5** (1986), 343-348.
- (12) 浦・中嶋・木須, 日本機械学会論文集, **53-490**, C (1987) 1254-1258.
- (13) 今戸・宮川・佐々木・平野, 日本機械学会論文集, **63-612**, C (1997) 2826-2831.
- (14) 中島・阿知波・馬渡, トライボロジー会議予稿集 福岡 (1991-10), 791-794.
- (15) Jones, A. B., Trans. ASME, J. Basic Eng., **81-3** (1959), 1-12.
- (16) Harris, T.A., Trans. ASME, J. Lub. Tech., **93-1** (1971), 17-24.
- (17) Harris, T. A., ASLE Trans., **9** (1966), 229-241.