

# オートテンショナ用玉軸受の動的挙動可視化計測に関する研究<sup>\*1</sup>

## Study on Measurement of Dynamic Performance of Ball Bearing for Auto-tensioner

中瀬晶詳 A. NAKASE 水野尊広 T. MIZUNO 楼 黎明 L. LOU

In this paper, the authors have developed a method for the measurement of dynamic performance of ball bearings using a high-speed camera and image processing. The dynamic performance of a ball bearing used in a car auto-tensioner have been investigated as an example. The positions of the balls of the bearing have been measured using a ring light reflected on the balls. The positions of the cage and outer ring have been measured using the markers set upon them. The reaction between the balls and cage as well as the deformation of the pocket prongs while the bearing rotated were observed. It was found that bearing oscillation had a significant effect on the ball lead and lag as well as the deformation of the pocket prongs. It was also found that the ball lead and lag as well as the deformation of the pocket prongs varied significantly in the non-load zone. It can be assumed that these factors have a significant effect on the fatigue life of the cage.

**Key Words:** ball bearing, dynamic performance measurement, deformation of cage, ball lead and lag, slip of ball revolution, auto-tensioner bearing

### 1. はじめに

自動車のエンジンにはさまざまな補機が配置されており、補機ベルトを介して、クランク軸の回転を伝達し、補機を駆動させている。図1に補機の配置例を示す。オートテンショナは、急激なベルト張力の変化を吸収する役割を持っており、補機ベルトの信頼性向上および騒音低減のための重要な部品である<sup>1)</sup>。一方、自動車走行性能の改善のためのエンジン出力やトルクの向上は、電装補機を駆動させているクランク軸の回転速度変動の増大につながる。回転速度変動は補機ベルトの張力を変動させ、オートテンショナを揺動させる原因となる<sup>2)</sup>。したがって、オートテンショナ用軸受は揺動と荷重変動（回転変動）の厳しい運動条件に対応した性能が必要になる。

軸受の構成部品は内輪、外輪、玉、保持器の四つと少ないが、その運動メカニズムは非常に複雑である。特に、回転中の玉および保持器の挙動解明は軸受の最適設計のために重要であり、古くから研究が行われている<sup>3)</sup>。たとえば、玉の挙動計測のために、玉を磁化させ、コイルやホール素子を用いた玉の計測<sup>4)~6)</sup>、高速度ビデオカ

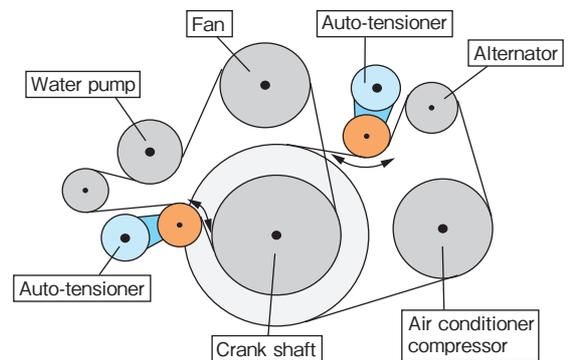


図1 エンジン補機配置例  
Example of engine accessory layout

メラを用いた玉の公転計測<sup>7)</sup>が行われている。保持器に関して、近接センサを用いた方法により挙動の計測<sup>8)~10)</sup>が行われている。しかし、これらの方法はいずれも玉か保持器どちらかの挙動計測に留まり、玉と保持器の相対運動を把握することができない。保持器に作用する力は玉と保持器の相対運動の結果により発生するため、保持器の応力発生原因を考察するためには、玉と保持器の相対運動の把握が重要である。保持器に発生する応力の計測については、内輪と外輪をそれぞれ反対方向に回転させて玉と保持器の回転を止め、保持器にひずみゲージを貼って計測する方法<sup>11)</sup>が紹介されているが、玉に遠心力が作用しないなど、実際に使用される環境と

\*1 本論文は、トライボロジスト 第61巻 第2号 (2016年) 120-126 を基に作成した。

は異なることが想定される。このほか、保持器にひずみゲージを貼り、スリップリングを介してひずみゲージの信号を取り出す方法も古くから紹介されている<sup>12)~14)</sup>。しかし、ノイズの影響が懸念されることや回転速度の制約があり、実際の使用環境の再現が困難であった。本研究では、高速度ビデオカメラと画像処理技術を用いて、回転中の玉軸受の挙動可視化計測技術を確立した。本報では、自動車補機ベルトに使用されるオートテンション用玉軸受を例に、回転中の玉軸受の動的挙動の経時変化を計測し、玉の保持器に対する相対運動(玉の進み遅れ)や保持器に発生する応力の推定に用いる保持器ポケット爪の変形量などを定量的に考察し、軸受揺動による影響も検討した。

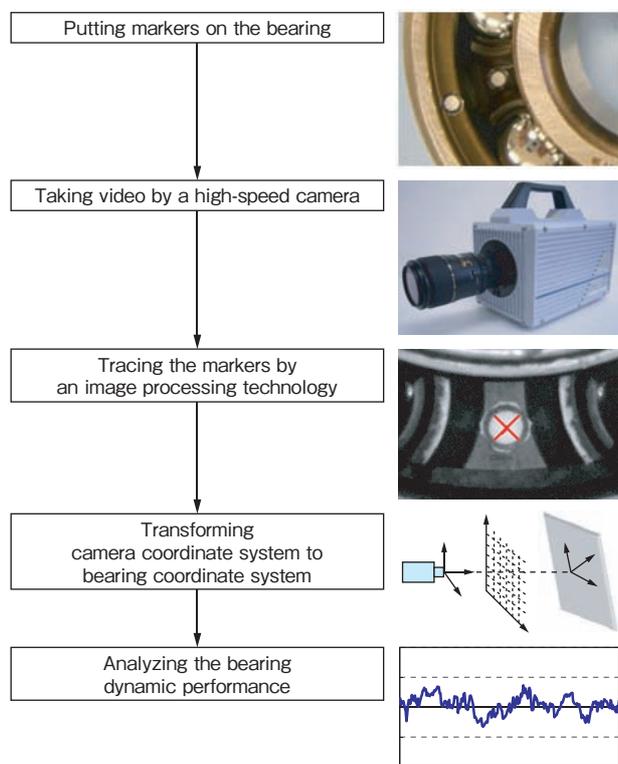


図2 玉軸受の動的挙動計測の流れ

Measurement process of bearing dynamic performance

## 2. 計測方法および計測条件

### 2.1 計測の流れ

玉軸受の動的挙動計測の流れを図2に示す。外輪と保持器にマーカを付与し、高速度ビデオカメラで回転中の軸受挙動を撮影し、画像処理技術を用いて外輪と保持器に付与したマーカを追跡する。追跡により得られたマーカ位置はカメラ座標系(画像の横方向と縦方向をx軸とy軸とした座標系, 単位: pixel)で表される位置で

あるため、軸受ラジアル平面上にx軸とy軸をとった座標系(軸受座標系, 単位: mm)で表す位置へ変換する。軸受座標系は軸受回転によって変化することがなく、固定である。変換後のマーカの相対位置関係から、回転中の玉軸受の動的挙動を考察することにした。

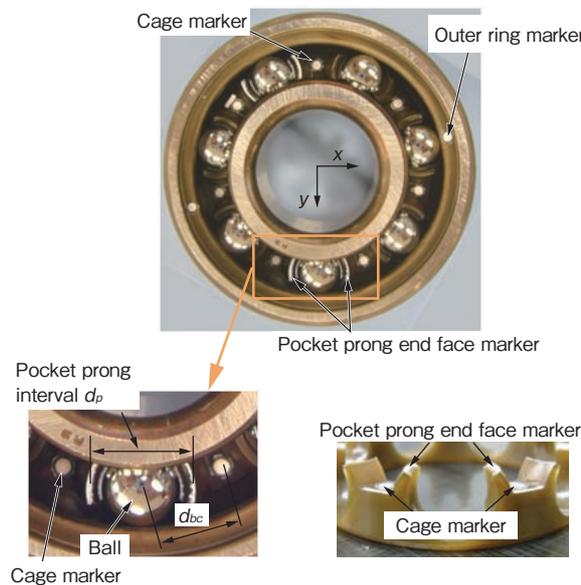


図3 試料軸受

Markers on sample bearing

### 2.2 計測方法

図3に計測に使用した軸受を示す。円形マーカを外輪、保持器に付与し、回転速度の算出に使用した。また、保持器柱部に付与したマーカと玉の間隔 $d_{bc}$ の変化から、玉の保持器に対する相対運動の算出にも使用した。さらに、ポケット爪の変形量は保持器ポケットの爪端面にマーカを付与し、爪端面の間隔 $d_p$ の変化から算出した。外輪や保持器へのマーカ付与は軸受挙動に影響を及ぼさないが、玉に同様のマーカを付与すると玉の挙動に影響を与えることが想定されるため、本研究では、独自にリング状の照明による反射光を用いた計測方法を考案し、玉の位置を算出することにした。図4に示すリング状の照明を用いて、カメラ、照明を軸受の中心軸と同軸方向に設置すると、図5に示すように、すべての玉中心付近にリング状の反射光が現れる。スポット照明では図6(a)に示すように、軸受中心軸に対して対称に配置ができずに玉の反射光はスポット照明を配置した方向に偏って現れる。したがって、玉が公転すると反射光が玉に対して移動し、反射光から玉の位置を算出することが困難となる。図6(b)に示すようにリング状の照明を用いる

ことで、反射光は玉の公転に関係なく軸受中心に対称に出現する。この反射光の位置変動を追跡することで、玉の位置の特定が可能となる。しかし、実際にカメラ、照明、軸受を同軸上に設置して撮影することは困難であり、また、本報で計測対象とするオートテンシヨナ用軸受の場合、揺動もあるため、カメラ、照明の中心軸を軸受の中心軸に合わせ、その状態を維持することは非常に困難である。この問題を解決するために、以下の補正方法を考案した。図7に玉位置特定の処理の流れを、図8に処理の概念図を示す。まず、すべての玉の反射光中心  $R_1, R_2, \dots, R_z$  ( $z$ : 玉数) を円近似した円の中心座標 (反射光中心  $C_1$ ) を算出する。次に軸受 (内輪) の中心  $C_2$  を算出し、その差を算出する。その差は軸受中心に対するリングライト中心のずれ量と考えられるため、ずれ量を補正量として、各玉の補正位置  $B_1, B_2, \dots, B_z$  を求めた。

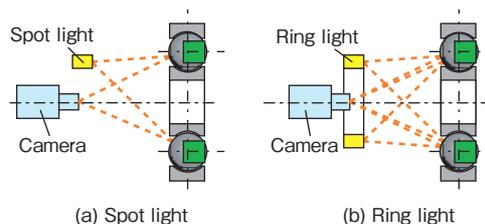


図6 スポット照明とリング照明の相違  
Difference between spot light and ring light

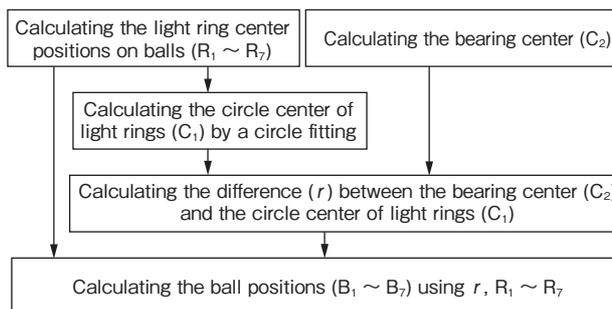


図7 玉位置特定処理の流れ  
Process for determining ball positions

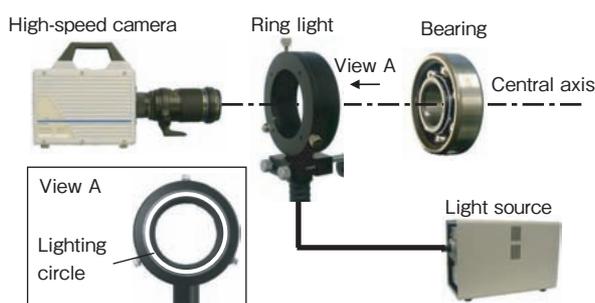


図4 計測システム  
Measurement system

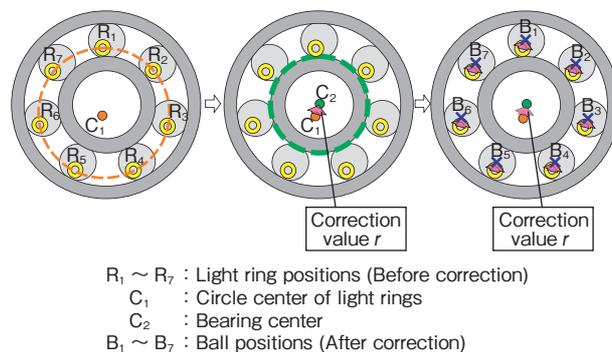


図8 玉位置補正処理の概念図  
Concept of correction of ball positions

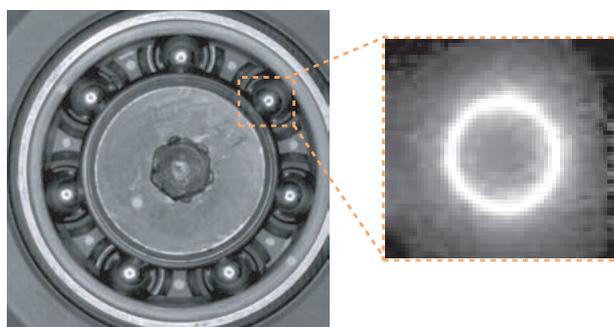


図5 玉表面のリング状反射光  
Ring-shaped light reflected on balls

### 2.3 計測条件

本研究で使用した高速度ビデオカメラは、表1に示すように撮影画像解像度が  $1\,024 \times 1\,024$  pixel のとき、最高撮影速度  $5\,400$  frame / 秒で撮影できる。試料軸受の仕様を表2に示す。軸受の外径  $52$  mm とオートテンシヨナの揺動を考慮して撮影範囲を決定した結果、撮影画像の分解能は約  $0.06$  mm / pixel であった。高速度ビデオカメラのシャッタ速度は、画像素子露光中のマーカ移動量が撮影画像の分解能以下となるように  $1/41\,000$  s に設定した。本研究の装置構成では、軸受回転速度は  $1\,800$  min<sup>-1</sup> まで対応できる。

カメラ、照明、軸受の中心軸が一致しない場合の玉位置補正法の有効性を検証するために、XY軸ステージを用いて、事前に計測精度を確認するための実験を行った。実験の様子を図9に示す。軸受各部品の相対位置は変化しないので、XY軸ステージ移動時における各部品の相対位置変化を計測誤差とした。XY軸ステージの移動量はカメラ、照明、軸受を設置するときの中心軸ずれと揺動による中心軸ずれを考慮し、最大ずれ量より大きくなるように10mm移動させた。オートテンシヨナの実使用環境を模擬した実験装置を用いて、動的挙動計測を行った。実験装置とその主要部であるオートテンシヨナの模式図を図10に示す。ベルトは駆動プーリと従動プーリに掛けてあり、オートテンシヨナプーリがばねによりベルトに押し付けられて、ベルトに一定の張力を付与している。駆動プーリの回転がベルトを通じて、オートテンシヨナプーリと一体である軸受の外輪を回転させる。駆動プーリに回転変動を与えることで、ベルト張力を変動させオートテンシヨナの揺動を再現した。軸受はベルトからプーリを介して荷重を受ける。図10に示すようにベルト荷重を受ける方向を基準（ゼロ度）とし、軸受の回転方向を正とし、玉の公転角度を $\phi$ とした。主な実験条件を表3に示す。駆動プーリへ回転変動を与えずオートテンシヨナが揺動しない状態も計測し、揺動有無による挙動相違を考察した。

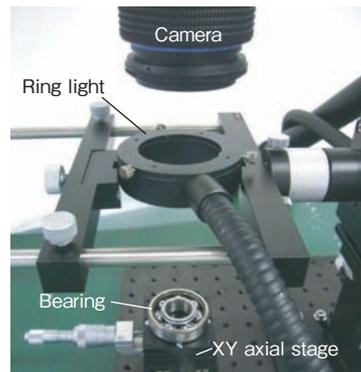


図9 計測精度確認実験の様子  
Appearance of experimental system

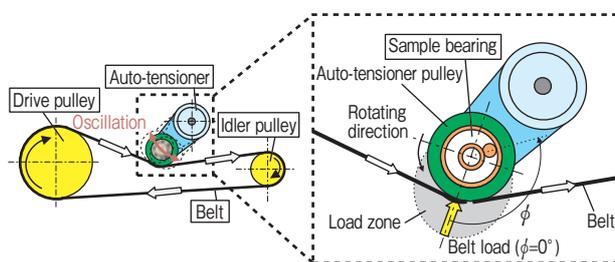


図10 オートテンシヨナ模式図  
Schematic diagram of auto-tensioner

表3 実験条件

Experimental conditions

Drive pulley rotating with oscillation	Yes, No
Initial tension of belt, N	900
Revolution speed of sample bearing, min <sup>-1</sup>	1 800
Photographing speed, frame/s	5 400
Photographing shutter speed, s	1/41 000

表1 撮影条件

Photographing conditions of experiments

High-speed camera	Maximum photographing speed, frame/s	675 000
	Maximum shutter speed, s	1/2 700 000
	Photographing resolution, pixel	1 024 × 1 024
	Image scale, mm/pixel	About 0.06
Ring Light	Output power, W	250

表2 試料軸受の仕様

Specifications of sample bearing

Bearing number	6304
Outer size, mm	52
Cage material	Plastic
Number of balls, z	7

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 計測精度について

保持器ポケット爪の変形量を表すポケット爪の間隔の計測誤差と、玉の保持器に対する進み遅れである玉と保持器マーカの間隔の計測誤差をそれぞれ図11、表4に示す。図11から、軸受を載せたXY軸ステージを10mm移動しても、ポケット爪の間隔の最大計測誤差は約7 $\mu$ mであり、玉と保持器マーカの間隔の最大計測誤差は約21 $\mu$ mであった。これはポケット爪の最大変形量(180 $\mu$ m)の約3.9%に相当する。また、玉とポケットの最大すきま(285 $\mu$ m)の約7.4%に相当する。本研究の計測対象である保持器ポケット爪の変形量、および玉の保持器に対する進み遅れは軸受内部の2点間距離から算出した相対値であるため、軸受全体の揺動、ま

たはカメラの振動による影響は受けない。したがって、回転中の軸受に対する計測誤差も本実験結果と同等と考えられる。これは、本研究の計測法が十分な精度を有することを意味する。

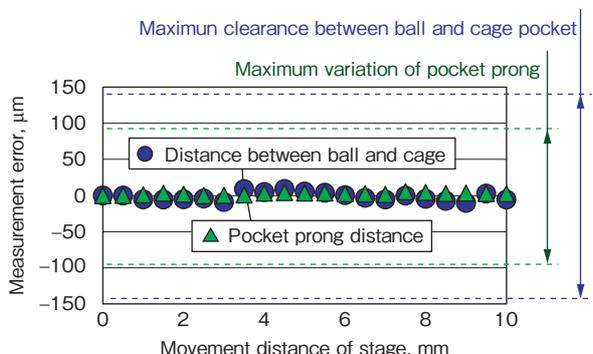


図11 計測誤差確認実験結果  
Confirmation of measurement accuracy

表4 計測誤差  
Results of measurement accuracy

Item	Pocket prong interval	Distance between ball and cage marker
Maximum measurement error, mm	0.007	0.021
Maximum variation of pocket tongue interval, mm	0.18	—
Maximum clearance between ball and cage pocket, mm	—	0.285
Error percentage, %	3.9	7.4

### 3.2 玉の公転すべりについて

図12に駆動プーリの回転変動による外輪、保持器の回転速度と玉の公転速度の一例を示す。図12は玉の公転2周期分を示している。また、玉の公転速度は7個ある内の1個を代表して示しており、保持器の回転速度は等間隔で付与したマーカ7個から算出した回転速度の平均値を示している。図12から外輪回転速度は駆動プーリの回転変動と同期して周期的に変化しているのに対して、保持器の回転速度および玉の公転速度は外輪回転速度と同期で変動しているが、玉の公転速度は等幅変動をしていないことから、玉では外輪に対するすべりが発生していることが推定される。

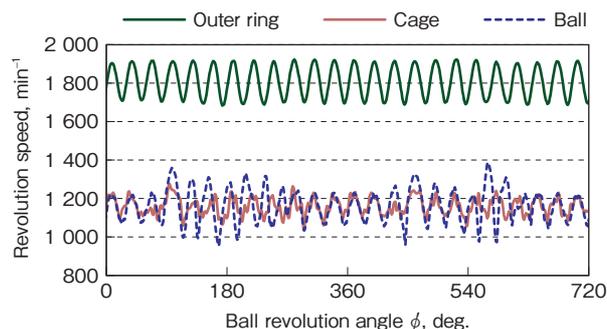


図12 外輪・保持器の回転速度と玉の公転速度  
Rotational speed of outer ring and cage, revolution speed of ball

### 3.3 玉の進み遅れについて

図12から保持器の回転速度と玉の公転速度に差があることが分かる。これは、玉の保持器に対する進み遅れが発生していることを意味する。図13に玉の保持器に対する進み遅れの一例を示す。なお、玉と保持器マーカとの距離の中央値を玉の進み遅れゼロとした。進み遅れがプラスに転じると、玉が保持器に対して回転方向前方に移動、つまり玉が進んでいる状態となる。図13から非負荷圏では玉は進みと遅れを繰り返し、ポケット内で激しい運動をしていることが分かる。これは非負荷圏では玉は内輪・外輪による拘束が弱く、軸受揺動の影響を受けやすいことに起因するものと考えられる。一方、負荷圏では、玉の進み遅れが緩やかに変化していることが分かる。

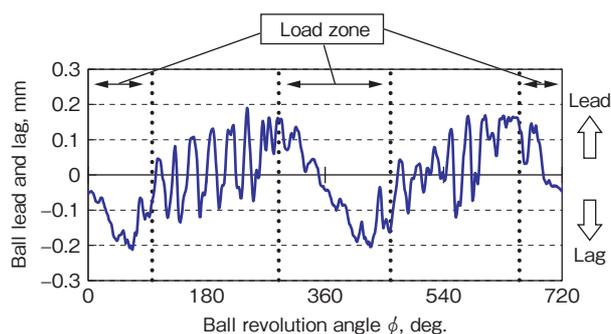


図13 玉の進み遅れ（揺動あり）  
Ball lead and lag (With oscillation)

### 3.4 保持器ポケットの変形について

ポケット爪変形量の計測事例を図14に示す。なお、ポケット爪の間隔の中央値をポケット変形量ゼロとした。プラス方向はポケット爪が開く方向に変形することを意味する。図14からポケット爪の変形量は最大約

0.18mm であることが分かる。そして、非負荷圏でポケット爪が頻繁に変形していることが分かる。これは非負荷圏で玉がポケット壁面に衝突することに起因するものと推察され、保持器の疲労破損に繋がりがやすくなるものと考えられる。負荷圏では非負荷圏ほど頻繁な変化はないが、最大変形量は同等である。ポケットの変形量から、ポケットに作用する応力の推定ができ、保持器の破損メカニズムの解明や最適設計に寄与するものと考えられる。

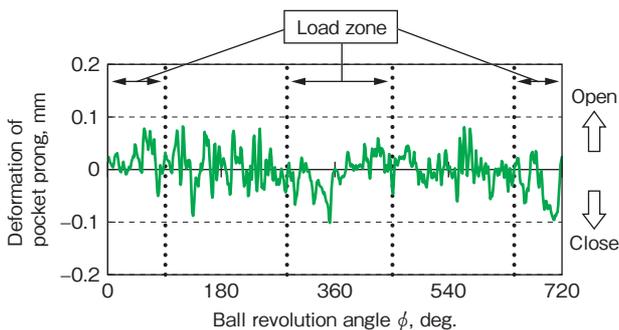


図14 ポケット爪変形量（揺動あり）  
Deformation of pocket prong (With oscillation)

### 3.5 軸受の揺動の影響について

駆動プーリの回転変動はベルトとプーリを介して軸受外輪に伝わり、それにより軸受は揺動しながら回転する。図15に軸受中心（内輪中心）の軌跡計測事例を示す。座標の原点は軸受中心軌跡の平均位置とした。軸受は外輪回転と反対方向に楕円を描きながら、繰り返して揺動している。この運動により、玉と保持器に慣性力が働き、玉の進み遅れや保持器の変形に影響を与えと考えられる。楕円運動の周波数は、駆動プーリの回転変動周波数と一致する。軸受揺動有無による玉の進み遅れの相違を考察するために、図16に回転変動がなく軸受が揺動しない場合の玉の進み遅れを示す。図13に示す軸受揺動がある場合に比べて、軸受揺動がない場合の方が玉の進み遅れの変化は緩やかであることが分かる。これは、軸受揺動が玉の進み遅れに大きく影響を及ぼすことを意味する。図17に軸受揺動がない場合のポケット爪の変形量を示す。図17から図14に示す軸受揺動がある場合に比べて、軸受揺動がない場合の方がポケット爪の変形量は非常に小さく、最大約0.04mm以下であることが分かる。したがって、軸受揺動がポケットの変形に大きく影響することが分かる。

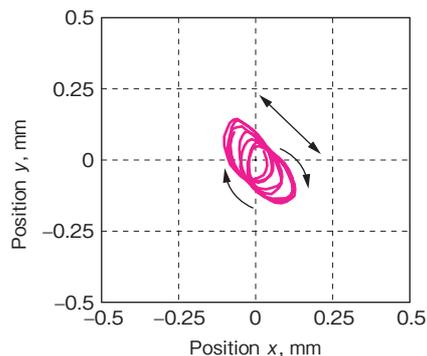


図15 軸受中心の軌跡  
Movement of bearing center

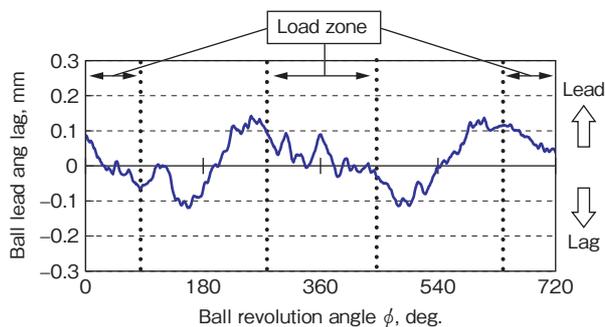


図16 玉の進み遅れ（揺動なし）  
Ball lead and lag (Without oscillation)

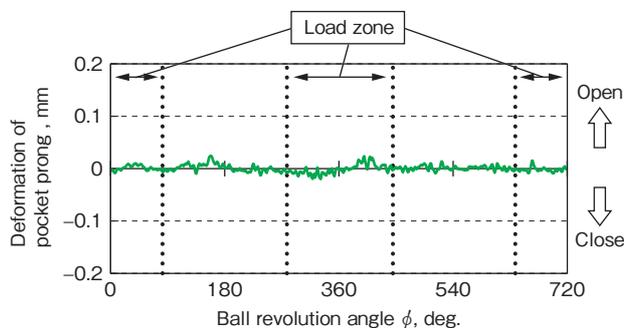


図17 ポケット爪変形量（揺動なし）  
Deformation of pocket prong (Without oscillation)

## 4. おわりに

本研究では、高速度ビデオカメラと画像処理技術を駆使して玉軸受の動的挙動計測方法を確立した。本技術を用いて、自動車の補機ベルトに使用するオートテンシヨナ用玉軸受を例に、軸受の動的挙動の経時変化を考察した結果を下記にまとめる。

- ①玉からの反射光の活用により、従来、計測が困難であった回転中の玉の位置を計測できた。これにより、玉の保持器に対する相対運動や公転速度の定量的計測が可能となった。

- ②玉と外輪付与マーカの位置変動の追跡より、玉の公転速度と外輪の回転速度の経時変化が計測できた。これにより、玉の外輪に対するすべりの定量的な考察が可能となった。本計測方法を内輪回転の場合に適用すれば、玉の内輪に対するすべりの定量的な考察も可能となる。
- ③玉と保持器の相対距離の計測により、玉の保持器に対する相対運動である進み遅れの定量的な考察が可能となった。実験の結果から、負荷圏と非負荷圏では運動傾向の相違が顕著に見られ、非負荷圏では軸受揺動の影響を受けて、進み遅れが頻繁に変化することが分かった。これは、保持器の疲労破損に影響を及ぼすものと考えられる。
- ④保持器ポケット爪の変形量はポケット爪の間隔変化の計測から算出できた。これにより、ポケット爪変形量からポケットに作用する応力を推定できる。これは、保持器の破損メカニズムの解明や最適設計に活用できると考えられる。
- ⑤駆動プーリの回転変動による軸受揺動は、軸受の動的挙動に大きく影響を及ぼす。揺動がある場合は、保持器ポケット爪の変形量が大幅に増加する。そして、玉の保持器に対する進み遅れの変化も激しくなる。
- 9) 楼 黎明, 立石佳男: 玉軸受の保持器運動に及ぼす運動条件の影響, トライボロジー会議予稿集, 11 (1993) 247-250.
- 10) 坂口智也, 上野 馨: 円筒ころ軸受の保持器挙動解析, NTN TECHNICAL REVIEW, 71(2003)8-17.
- 11) 下間頼一, 藤井拓哉: 玉軸受保持器に関する研究 (第1報), 潤滑, 16, 3(1971)185-195.
- 12) 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, 239(1966)1164-1175.
- 13) 広田忠雄: ラジアル玉軸受の波形保持器に生じる応力について, 潤滑, 32, 5(1987)323-330.
- 14) 藤原宏樹, 藤井健次, 中関嗣人: 円筒ころ軸受の保持器に作用する力, NTN TECHNICAL REVIEW, 68 (2000)63-66.

## 参考文献

- 1) 秋吉幸治, 古川 資, 山田政義, 里村愛作: 自動車用オートテンシヨナの技術動向, 月刊トライボロジー, 266 (2009)28-30.
- 2) 山下佳行, 戸郷晴雄, 石田公雄, 藤井伸浩: 非対称ダンピングオートテンシヨナの開発, マツダ技報, 22(2004)92-96.
- 3) 山本精穂: ころがり軸受における転動体の運動, 潤滑, 13, 9(1968)463-475.
- 4) 平野富士夫, 川北和明: アンギュラ玉軸受の玉の運動に及ぼす潤滑条件の影響, 日本機械学会論文集, 33, 253 (1967)1524-1528.
- 5) 川北和明: 玉軸受の玉の三次元運動計測法といくつかの実験的知見, 潤滑, 32, 5(1987)351-355.
- 6) 中島 晃, 張 晨陽, 馬渡俊文, 吉田孝文, 東崎康嘉, 松本 将: アンギュラ玉軸受の玉の三次元運動挙動計測, 日本機械学会論文集(C編), 67, 659(2001)2337-2343.
- 7) 野口昭治, 永田春樹, 藤木直子: 合成荷重条件下における小径玉軸受の転動体公転滑りの観察, 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, 4(2009)95-96.
- 8) 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, 10(1969)643-648.

## 筆者



中瀬晶詳\*  
A. NAKASE



水野尊広\*\*  
T. MIZUNO



楼 黎明\*\*\*  
L. LOU

\* 研究開発本部 解析技術研究部

\*\* 研究開発本部 加工技術研究部

\*\*\* 研究開発本部 解析技術研究部 博士(工学)