

円すいころ軸受のトルクに及ぼす油流れの影響

Effect of Lubricating Oil Behavior on Friction Torque of Tapered Roller Bearings

千葉博行 H. CHIBA 松山博樹 H. MATSUYAMA 戸田一寿 K. TODA

Low friction tapered roller bearings were developed to improve the fuel efficiency of vehicles. Bearing friction torque variation was studied for these bearings with various oil flow rates supplied to the bearings controlled by means of interruption rings. As a result, the effects of oil flow rate and oil behavior on the friction torque of these bearings was clarified.

Agitating resistance and viscous rolling resistance can be reduced by restricting oil flow into the bearing, and the friction torque of tapered roller bearings with interruption rings was lower than that of angular contact ball bearings.

Key Words: tapered roller bearings, friction torque, oil flow rate, lubricating oil behavior, fuel efficiency

1. はじめに

自動車の利用拡大やO A機器の普及に代表されるライフスタイルの変化にともない、世界のエネルギー消費量は年々増加している。そのため、地球環境問題の一つである温暖化問題に関して、ますます深刻な現実が明らかになってきた。このような状況の中で多くの環境保護に対する国際的な取組みが行われており、自動車関連の環境規制は厳しさの一途をたどっている¹⁾。特にCO₂削減を目的とした燃費改善に対応する取組みは各自動車メーカーで最重要テーマの一つとして位置付けられ、いかに早期に目標を達成するかが大きな課題となっている^{2)・4)}。

このような社会情勢の中で、自動車1台当たり100個以上使われている転がり軸受の高効率化に対する期待は大きい。その一つの対応として、軸受の摩擦トルク(以下トルクと称す)の低減を目的として円すいころ軸受から玉軸受への変更が提案された⁵⁾。しかし、玉軸受への変更は、寿命、剛性および静的安全率の低下を招き、サイズアップが必要となる。

一般に円すいころ軸受のトルク発生要因には、軌道輪とこころの間の転がり粘性抵抗、内輪つば面とこころ端面の間の滑り抵抗、潤滑油(以下油と称す)のかくはん抵抗、そして保持器とこころの間の滑り抵抗がある。これまでの低トルク化技術は転がり粘性抵抗と滑り抵抗の低減を主眼においたものであった^{6)・8)}。しかし、この技術によるトルク低減率はせいぜい10~20%であり、玉軸受のトルクと比較するとまだまだ高い値である。そのため、玉軸受と同レベルの低トルクを実現するために

は、これまで検討されていないかくはん抵抗の低減に取り組む必要がある。

そこで本報では、かくはん抵抗に影響を及ぼすと考えられる軸受内部の油の挙動に着目し、油の流れ制御によるトルク低減の可能性について検討した。結果を以下に報告する。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

実験には、図1に示す内径34.9mm、外径72.2mm、組幅25.4mmの単列円すいころ軸受を用いた。内輪、外輪ははだ焼鋼を浸炭焼入れ焼戻したものであり、こころは高炭素クロム軸受鋼を焼入れ焼戻したものである。また、保持器は軟鋼製のプレス保持器である。

円すいころ軸受にはポンプ作用⁹⁾と呼ばれる油の引き込み現象が発生するため、油は内輪の正面側から背面側に貫通する。そこで、軸受内部の貫

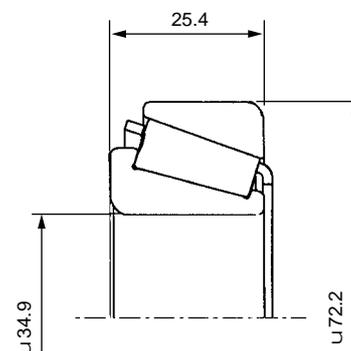


図1 試料軸受
Test bearing

通油量を変化させるために内輪の正面側に油の流入を抑制する鋼製の治具(以下アタッチメントと称す)を取り付け、試料とした。

図2にアタッチメントを装着した試料の状態を模式的に示す。タイプAは、内輪と保持器の間から流入する油を抑制するために内輪と保持器を覆う構造のものである。タイプBは外輪と保持器の間から流入する油を抑制するために外輪と保持器を覆う構造のものである。タイプCは内輪と保持器の間および外輪と保持器の間の両方から流入する油を抑制するために、内輪から外輪内径部分までを覆う構造のものである。各試料軸受の保持器とアタッチメントの間隔を0.9mmとした。

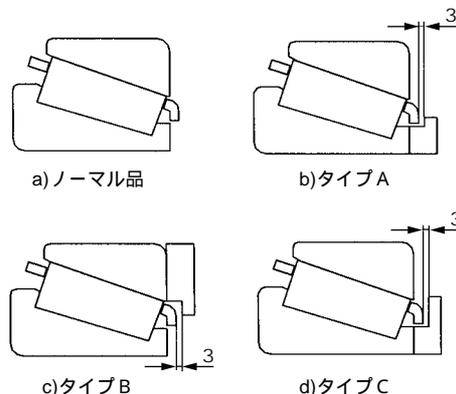


図2 アタッチメントを装着した試料軸受
Test bearings with attachments

2.2 実験方法

2.2.1 貫通油量測定

図3に示す測定装置を用いてアタッチメントを取り付けた軸受の内部を貫通する油量を測定した。

試料軸受の保持器大径側端面に貫通油分離用スリーブを取り付け、内輪と保持器の間の内側空間から流出する油量(以下内側貫通油量と称す)と外輪と保持器の間の外側空間から流出する油量(以下外側貫通油量と称す)を別々に測定した。油はギヤオイル75W - 90(40の動粘度86.8mm²/s)を用い、供給油温は50±1とした。

実験手順を以下に記述する。まず、貫通油分離測定用スリーブを取り付けた試料軸受を測定装置にセットする。次に油面高さが軸中心レベルになるように供給油量を調整する。そして、無負荷の状態では回転速度1000min⁻¹, 2000min⁻¹, 3000min⁻¹で試料軸受内輪を回転させる。このとき、ポンプ作用によって油面高さが低下するので、油面高さを軸中心レベルに維持するように供給油量を再度調整する。各回転速度で油面高さを安定させた後、内側貫通油量および外側貫通油量を各々測定した。測定は各試料軸受において3回実施し、その平均値を測定値とした。

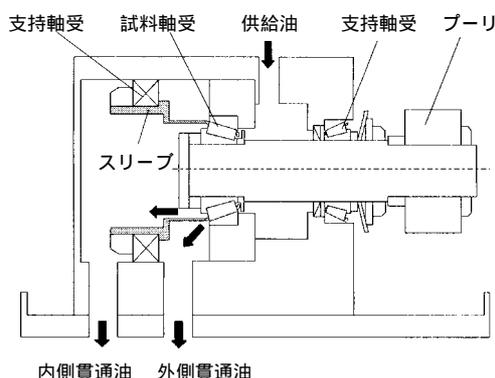


図3 貫通油量測定装置の概略図
Schematic diagram of oil flow rate measuring equipment

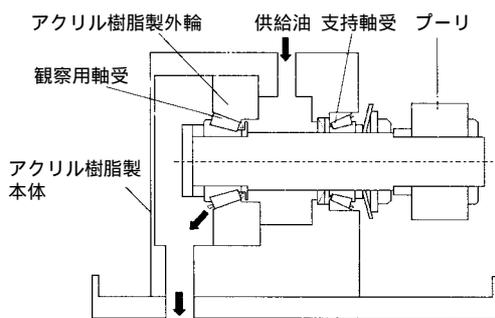


図4 油流れ観察装置の概略図
Schematic diagram of oil flow observation equipment

2.2.2 油の流れ挙動観察

油の流入を抑制した状態での軸受内部の油の挙動を観察するために、高速度ビデオ動作解析装置(1000コマ/秒)を用いて撮影を行った。図4に装置の概略図を示す。装置本体および試料軸受の外輪を透明のアクリル樹脂で製作した。

挙動観察を容易にするために油として白灯油を用い、トレーサとして天然雲母の表面を酸化チタンでコーティングした顔料(粒径20~180μm)を0.12mass%混入させた。装置に試料軸受をセッ

トした後、油を軸中心レベルまで供給した。その後、無負荷の状態では内輪を250min⁻¹で回転させた。この時、ポンプ作用によって油面高さが低下するので、油面高さを軸中心レベルに維持するように供給油量を調整した。この状態で軸受の側面および内輪背面側から油の挙動を観察した。

2.2.3 トルク測定

図5にトルク測定装置の概略図を示す。試料軸受のトルクは空気軸受によって支持された外輪に作用する摩擦モーメントをロードセルで測定する

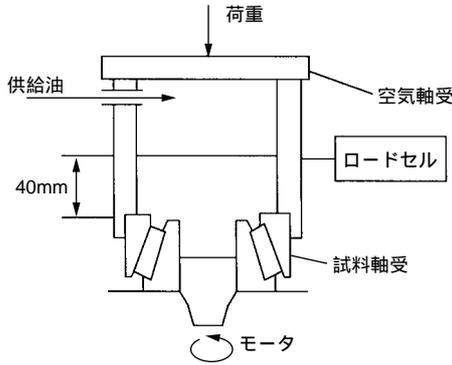


図5 トルク測定装置の概略図

Schematic diagram of friction torque measuring equipment

ことによって得ることができる。油はギヤオイル 85W - 90(40 の動粘度 $178\text{mm}^2/\text{s}$)を使用し、供給油温は 50 ± 1 に設定した。

実験手順を以下に記述する。まず、外輪の外径面に熱電対を取り付けた試料軸受および透明アクリル樹脂製の荷重治具を装置にセットする。次にアキシャル荷重 4 kN を負荷した状態で給油を開始した後、 $1\,000\text{min}^{-1}$ で内輪を回転させる。このとき、荷重治具内の油面高さが外輪端面から 40mm の高さになるよう供給油量を調整する。その後、回転速度を $2\,000\text{min}^{-1}$ 、 $3\,000\text{min}^{-1}$ に増加させる。この時、油面が低下するので、再度油面高さが 40mm となるように供給油量を調整する。それぞれの回転速度でトルクと軸受温度が安定した状態になったときのトルクを測定する。また、かくはん抵抗がトルクに及ぼす影響を明らかにするために、無給油時のトルク測定も行った。無給油時のトルクは前述の 40mm の油面高さを保持するように給油し、トルクと軸受温度が安定した状態になった後に給油を停止して、軸受内の油が無くなった直後のトルクを測定した。測定は 4 回実施し、その平均値を測定値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 貫通油量測定結果

種々のアタッチメントを装着することで、ポンプ作用によって軸受内部に引き込まれる油量を抑制した。図6はアタッチメントの形状と貫通油量の関係性をまとめたものである。

内側貫通油量と外側貫通油量を各々測定し、それらを合計した油量が総貫通油量である。図からわかるように、内輪と保持器の間から流入する油を抑制したタイプ A と内輪と保持器の間および外輪と保持器の間の両方から流入する油を抑制したタイプ C において、著しい貫通油量

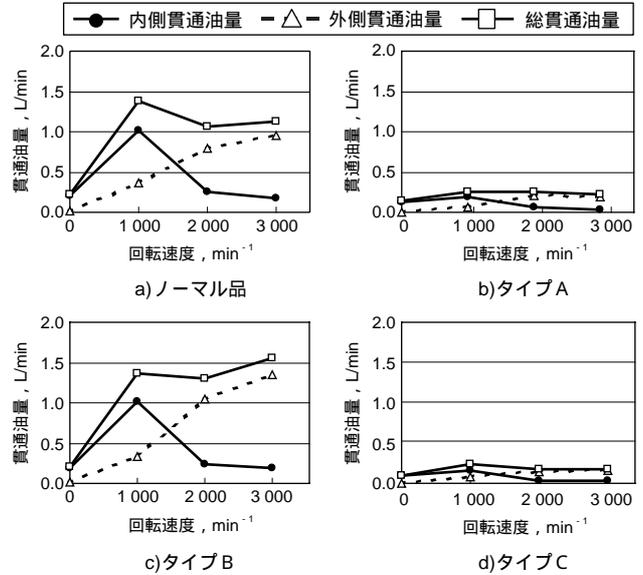


図6 回転速度と貫通油量の関係

Relationship between rotational speed and oil flow rate

の減少が認められた。 $2\,000\text{min}^{-1}$ の総貫通油量比はアタッチメントを装着しないノーマル品に対してタイプ A が 0.25 であり、タイプ C が 0.17 であった。一方、外輪と保持器の間から流入する油を抑制したタイプ B の貫通油量はノーマル品より増加し、 $2\,000\text{min}^{-1}$ の総貫通油量比は 1.22 であった。これらの現象は、ポンプ作用によって軸受内部に引き込まれる油のほとんどが内輪と保持器の間から引き込まれていることを示している。タイプ B の総貫通油量がノーマル品に対して増加した理由は、外輪と保持器の間のすきまを塞いだことによって、内輪と保持器の間の引き込み力が増加したことによるものと推測される。

また、アタッチメントのタイプに関わらず、 $1\,000\text{min}^{-1}$ 以上になると内側貫通油量が減少し、外側貫通油量が急激に増加する現象が認められた。これは遠心力の作用によって内側空間を流れる油が外側空間に移動するためである。すなわち、油は内輪正面側の内輪と保持器の間から引き込まれた後、軸受内部で遠心力の作用によって内側空間から外側空間に移動し、外輪と保持器の間のすきまから流出する。このことから、軸受内部に流入する油を制御するためには、内輪と保持器の間のすきまを制御することが有効であると考えられる。そこで、引き続き、軸受内部の油流れ挙動を実際に観察することを試みた。

3.2 油流れ挙動観察結果

ほとんどの油が内輪と保持器の間のすきまから軸受内部に引き込まれることから、軸受内部の内側空間の油の挙動に着目した。ギヤオイルと白灯油では油の粘度が異なるため、事前に白灯油における回転速度と貫通油量の関係を調査した。その結果に基づき、内側空間に十分な油量を保持するように回転速度を 250min^{-1} とした。観察結果を図7と図8に示す。図7は軸受の側面からの観察結果である。ノーマル品とタイプBにおいて、ころと保持器柱の間から多くの気泡の発生が認められた。このことは、内側空間において激しい油のかくはんが起こっていることを示している。内輪正面側の内輪と保持器の間から軸受の内側空間に引き込まれた油は遠心力の作用でころと保持器柱の間を通過して外側空間に移動する。この時、軸受内部に多量の油を保持しているノーマル品とタイプBでは流れの衝突が発生するものと考えられる。一方、アタッチメントによって軸受内部に流入する油を抑制したタイプAとタイプCは軸受内部に保持される油量が少ないため、油がスムーズに内側空間から外側空間に移動し、流れの衝突が発生しにくいものと考えられる。油のかくはん抵抗にはこのような流れの衝突に起因する要因が含まれていることは明らかであり、この流れの衝突が内側空間から外側空間への移動時に発生するものであるなら、内側空間から外側空間への油の移動をスムーズにすることでかくはん抵抗が減少し、軸受のトルクが低減できるものと推測する。

次に内輪背面側からの観察結果を図8に示す。ノーマル品とタイプBではころ端面が識別できない状態であるのに対し、タイプAとタイプCでは明確にころ端面が識別できる。これは、ノーマル品とタイプBに比べてタイプAとタイプCの油量が少ないことと流れがスムーズであることに起因しているものと推測される。

3.3 トルク測定結果

内輪正面側にアタッチメントを装着し、内輪と保持器の間から引き込まれる油量を減少させることによって、軸受内部の油流れをスムーズにすることがわかった。この流れ制御がトルク低減に大きな影響を与えることが推測されるので、実際にトルクを測定し、アタッチメント形状との関係を調べた。図9に測定結果を示す。予想通り、貫通油量が少なく、かつ流れのスムーズなタイプAとタイプCのトルクが非常に小さくなっていることがわかる。 2000min^{-1} のときのトルクをノーマル品と比較すると、タイプAは36%、タイプCは40%のトルク低減率を示した。このことから、内輪と保持器の間から引き込まれる油を制御することによって、軸受のトルクを大幅に低減できることが明らかになった。

図10は前述の図6と図9のデータから内側貫通油量と外側貫通油量がトルクに与える影響をまとめたものである。内側貫通油量の減少および外側貫通油量の減少に伴いトルクが減少する。さらに両者の回帰直線の傾きの比較から、外側貫通油量の減少よりも内側貫通油量を減少させることがト

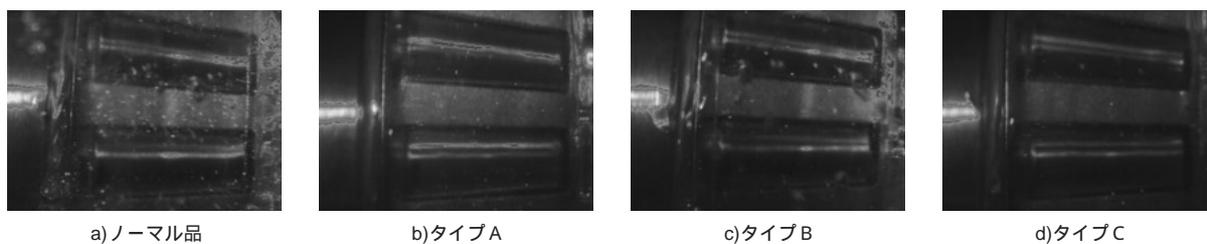


図7 軸受外径面側から見た油の流れ観察結果
Observation of oil flow in bearing from outside view

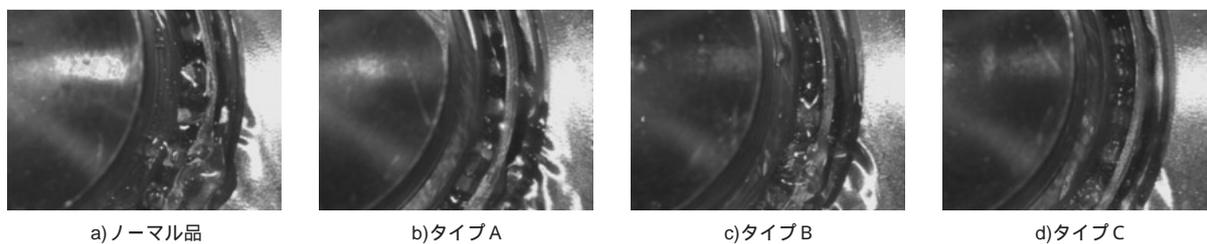


図8 内輪背面側から見た油の流れ観察結果
Observation of oil flow in bearing from inner ring back face side view

トルクの低減に大きな影響を与えることがわかった。このことは、前述した内側空間から外側空間に移動する際に発生する流れの衝突がかくはん抵抗を増加させ、トルクの増加を招くという推測を裏付けている。

以上のように、内輪正面側にアタッチメントを装着し、内輪と保持器の間から引き込まれる油量を減少させることで軸受内部のかくはん抵抗を低減することができ、その結果としてトルクを約40%低減できることが明らかになった。

ところで、軸受内部を流れる油には潤滑以外のもう一つの重要な作用として、各部品の転がりまたは滑り接触によって発生する摩擦熱を奪い去り、軸受を冷却する作用がある。つまり、油量を減少させるということは、この冷却作用を低下させる可能性がある。そこで、ノーマル品とトルクが最小を示したタイプCの試料軸受を用いて、軸受温度の変化について検討した。

図11は、十分な量の油を供給している給油時と油の供給を停止した無給油時の回転速度とトルクの関係を示したものである。図中の温度は2000min⁻¹のときの外輪温度である。給油時のトルクと無給油時のトルクの差はかくはん抵抗によって発生するトルクとみなすことができる。図からわかるように、2000min⁻¹の場合、ノーマル品の外輪温度は55.3℃であり、給油時のトルクは1.25N・m、無給油時のトルクは0.98N・mであった。この差0.27N・mがかくはん抵抗に起因するトルクと考えられる。一方、タイプCの外輪温度は67.8℃であり、給油時のトルクは0.71N・m、無給油時のトルクは0.60N・mであった。タイプCの低トルク化の理由がかくはん抵抗の低減だけであるなら、ノーマル品の無給油時のトルクとタイプCの無給油時のトルクは同等になるはずであるが、実際には0.38N・mの差が生じている。この差が接触部における油の粘度低下に起因する転がり粘性抵抗の減少によるものであると考えられる。すなわち、タイプCの無給油時のトルクはノーマル品に対して0.65N・m低下したが、このうち0.27N・mがかくはん抵抗の低減によるものであり、0.38N・mが温度上昇に起因する転がり粘性抵抗の低減によるものであると推測される。

今回のトルク低減効果を玉軸受と比較するために、同等の動定格荷重を有する単列アンギュラ玉軸受(以下玉軸受と称す)と比較した結果¹⁰⁾を図12に示す。玉軸受のトルクは円すいころ軸受のノーマル品よりも低くなった。しかし、油の流入を抑制したタイプCのトルクは玉軸受よりも低く、2000min⁻¹で25%、3000min⁻¹で36%低下した。

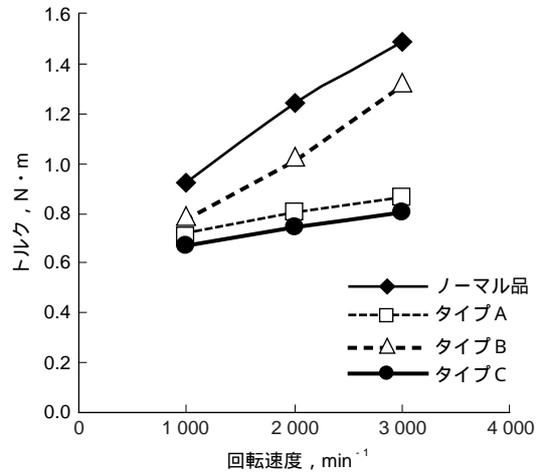


図9 回転速度とトルクの関係

Relationship between rotational speed and friction torque

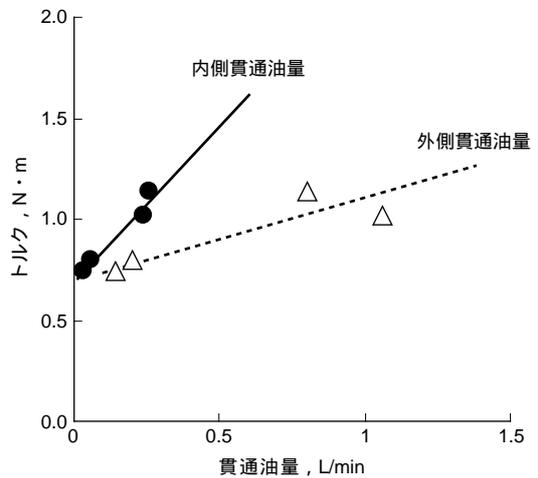


図10 貫通油量とトルクの関係

Relationship between oil flow rate and friction torque

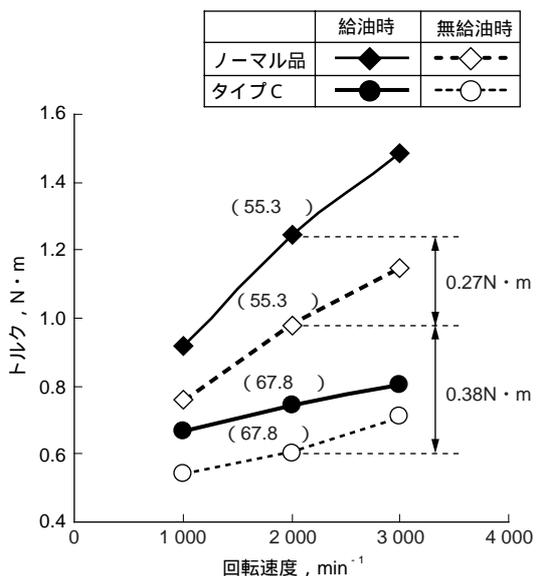


図11 給油時と無給油時のトルクの比較

Friction torque comparison data under oil supply and non-oil supply conditions

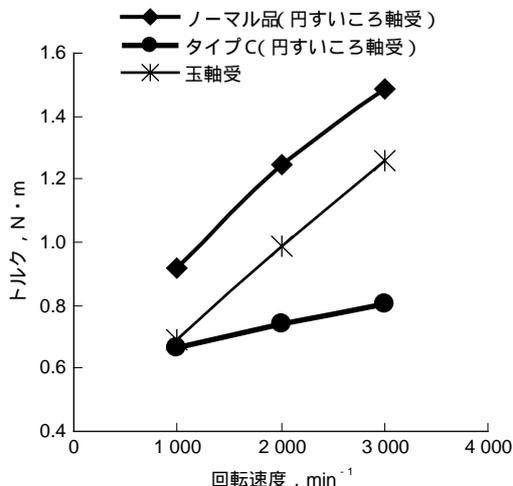


図12 円すいころ軸受と玉軸受のトルクの比較

Friction torque comparison of tapered roller bearing and ball bearing

これは前述した油の流入を抑制したことに起因するかくはん抵抗と転がり粘性抵抗の低減効果によるものと考えられる。

このように、円すいころ軸受の内部に流入する油量を減らすことで、かくはん抵抗と転がり粘性抵抗の両方を低減させ、玉軸受のトルク以下の低トルク化を実現できる可能性が確認できた。

さらに、設計面からの検討を加えることによって、軸受の過度の温度上昇を抑制し、耐焼付き性の確保と低トルク化を両立できる。

4. おわりに

円すいころ軸受のトルクを低減するための手段として、軸受内部に流入する油の量と流れの影響について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 油はポンプ作用によって内輪正面側から軸受内部に流入するが、外輪と保持器の間から流入する油量よりも内輪と保持器の間から流入する油量の方が多い。
- 2) 軸受内部で、油は遠心力の影響で内側空間から外側空間に移動する。その際に発生する流れの衝突によって、トルクが増大する。
- 3) 内輪と保持器の間から軸受内部に流入する油量を減少させることによって、軸受内部の内側空間から外側空間へ油が移動する際に発生する流れの衝突を抑制することができ、かくはん抵抗が減少し、その結果としてトルクが低減する。
- 4) 油量の低減は、油の冷却作用を低下させ、軸受温度を上昇させる。その結果、油の粘度が低下し、転がり粘性抵抗が減少する。

5) 軸受内部の油の流れ挙動を制御することで、かくはん抵抗と転がり粘性抵抗の両方を低減することができ、玉軸受よりもトルクを低減できる可能性がある。

参考文献

- 1) 湊 清之：自動車技術, vol. 59, no. 2 (2005) 4.
- 2) 小竹 忠：自動車技術, vol. 58, no. 3 (2004) 14.
- 3) 北條春夫：自動車技術, vol. 58, no. 9 (2004) 4.
- 4) 大聖泰弘：自動車技術, vol. 59, no. 2 (2005) 10.
- 5) Spindler, D. and Petery, G. V.: SAE Technical Paper, no. 2003-01-3743 (2003).
- 6) Matsuyama, H., Kamamoto, S. and Asano, K.: SAE Technical Paper, no. 982029 (1998).
- 7) Zhou, R. S. and Hoepflich, M. R.: Trans. ASME, Journal of Tribology, vol. 113, no. 3 (1991) 590.
- 8) 浅井康夫, 大島宏之：Koyo Engineering Journal, vol. 143 (1993) 23.
- 9) 大森達夫, 岡本純三, 若林哲史：トライボロジー会議予稿集 (北九州 1996-10) 429.
- 10) 千葉博行, 松山博樹, 川口幸志, 高橋譲：トライボロジー会議予稿集 (鳥取 2004-11) 533.

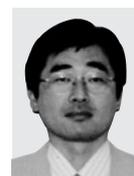
筆者



千葉博行*
H. CHIBA



松山博樹*
H. MATSUYAMA



戸田一寿**
K. TODA

* 総合技術研究所 基礎技術研究部

** 総合技術研究所 基礎技術研究部 工学博士