

# 円すいころ軸受の超低トルク化技術の開発

## Development of Super-Low Friction Torque Technology for Tapered Roller Bearing

松山博樹 H. MATSUYAMA 百々路博文 H. DODORO 荻野 清 K. OGINO  
大島宏之 H. OHSHIMA 千葉博行 H. CHIBA 戸田一寿 K. TODA

To achieve high efficiency in rear axle differentials, the reduction in friction torque of the tapered roller bearings supporting the drive pinion was investigated. As a result, the effects of internal geometry, and oil flow within the bearing, on friction torque were clarified. The friction torque of a newly developed bearing optimized considering various performance characteristics was 75% lower than that of a conventional bearing. This is equivalent to a friction torque reduction of about 80% from that of a standard bearing. This is expected to have a remarkable effect on vehicle fuel efficiency.

**Key Words:** tapered roller bearings, friction torque, rear axle differential, fuel efficiency

### 1. はじめに

自動車は地球環境に与える影響は大きく、燃費向上やCO<sub>2</sub>排出量の削減が急務である。そのため、自動車部品においては、高信頼性や低コストに加えて、小型・軽量化と高効率化のニーズが増加している。本研究ではリヤアクスル・ディファレンシャル(以下ディファレンシャルと称す)のドライブピニオン(以下ピニオンと称す)を支持する軸受に焦点を当て、高効率化のための摩擦トルク(以下トルクと称す)の低減に取り組んだ。

一般に、ディファレンシャルには負荷容量と剛性が大きい円すいころ軸受が使われる。ところが最近、一部の自動車メーカーでは、軸受トルクの低減を目的として玉軸受の使用が検討されている<sup>1)</sup>。しかし、玉軸受の寿命、剛性および静的安全率は円すいころ軸受に比べて劣るため、円すいころ軸受と同じ性能を得るためには大きなサイズの玉軸受を用いる必要がある<sup>2)</sup>。そのため、長寿命かつ高剛性といった従来の円すいころ軸受の特徴を維持したまま、トルクを低減した新しい円すいころ軸受の開発もまた求められている。

本報では、ピニオン支持用円すいころ軸受のトルク発生要因とその寄与率を実験および計算によって示した。また、軸受の内部設計諸元(ころ有効長さ、ころ数、接触角、ころピッチ円径、軌道クラウニング形状)および軸受内部の潤滑油の流れがトルクに及ぼす影響を明らかにし、これらの知見に基づいて円すいころ軸受の超低トルク化技術を開発した。以下にその結果を報告する。

### 2. 円すいころ軸受のトルク発生要因

一般に、円すいころ軸受のトルクの発生要因は以下の4つである。

- (A)ころと軌道との間の転がり粘性抵抗
- (B)つばとところ端面の間の滑り抵抗
- (C)潤滑剤のかくはん抵抗
- (D)ころと保持器の間の滑り抵抗

これまでの研究<sup>3)~6)</sup>では、(C)と(D)は(A)と(B)に比べて相対的に小さいとされ、無視されることが多かった。しかしながら、高粘度のギヤ油を封入したディファレンシャルに使われる軸受の場合、(C)を無視することはできないと考えられる。

そこで、ピニオン支持軸受におけるトルクの発生要因とその要因の寄与率を明確にするために実験を行った。最初に、透明アクリル樹脂で製作したディファレンシャルキャリアを用いて、軸受周りの油の流れを観察した。図1に一般的なディファレンシャルの構造を示す。実際の自動車に搭載される場合と同様に内部にはギヤ油を封入し、リングギヤのはねかけによって、ピニオンを支持する円すいころ軸受に油を供給する。観察の結果、ピニオン回転速度が600~900min<sup>-1</sup>(車速20~30km/h相当)以上でピニオンを支持するヘッド側およびテール側の円すいころ軸受は完全に油で満たされることが判明した。つまり、実用速度域において、(C)に示した油のかくはん抵抗に起因するトルクを定量的に検討する必要があると考えられた。

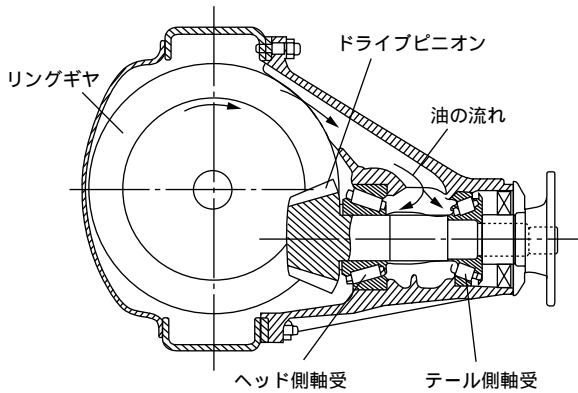


図1 ディファレンシャル  
Rear axle differential

次に、円すいころ軸受内部を貫通する油量がトルクに及ぼす影響を調べた。試料軸受は内径30mm、外径72mmの円すいころ軸受である。欧州モード(93/116/E C)<sup>7)</sup>を代表する表1に示した条件で実験を行った。実験装置の概略を図2に示す。まず、試料軸受にアキシャル荷重を負荷し、内輪を所定の速度で回転させる。油面高さは、試料軸受を貫通する油と同じ流量の油を供給することによって維持される。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モーメントを測定することによって得られる。本実験では、最初に図2に示したFull油量状態(軸受の背面側が油で満たされ、油面高さが40mmで安定した状態)でトルクを測定した後、順次油量を減少させてトルクを測定した。

表1 トルク測定条件  
Test condition

回転速度	2 000min <sup>-1</sup>
アキシャル荷重	4 kN
潤滑油	ギヤ油85W - 90
油温	50
潤滑方法	循環給油(Full油量)

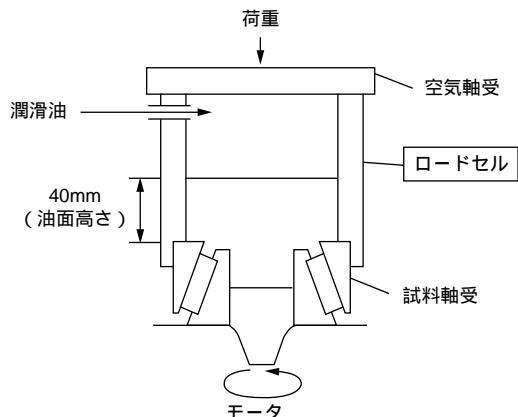


図2 トルク測定装置の概略

Schematic diagram of test equipment

実験結果を図3に示す。図の横軸はFull油量を1とした場合の油量比を示し、縦軸はFull油量時のトルクを1とした場合のトルク比を示す。図3に示すように、貫通油量の減少に伴いトルクは減少する。焼付きを考慮した最小油量比0.1におけるトルク比は約0.7である。油量の減少に伴うトルクの減少がかくはん抵抗に起因するものと仮定すると、本結果はFull油量状態のトルクに占めるかくはん抵抗の割合が約30%であることを示している。

本結果から、欧州モード代表条件におけるピニオン用円すいころ軸受のトルク発生要因の寄与率を推定した。過去の研究<sup>3)・6)</sup>に基づき、トルクは(A)から(D)の合計に等しく、(D)は無視できるものとした。また、前述のとおり、(C)の寄与率は30%と見なした。さらに、(B)に起因するトルクは油膜パラメータから推定されるつばところ端面間の摩擦係数を用いて理論的に求めた<sup>8)</sup>。結果を図4に示す。軌道部の転がり粘性抵抗の寄与率が最も大きく65%であり、次に油のかくはん抵抗の寄与率が30%であることがわかった。さらに、つばところ端面の間の滑り抵抗の寄与率は5%と小さいことが判明した。これは、軸受が高粘度のギヤ油で潤滑され、つばところ端面の間に十分なEHL(弾性流体潤滑)油膜が形成されるためである。

本研究では、図4の結果に基づき、すでに量産中の低トルク軸受(LFT軸受)<sup>9)・10)</sup>のトルクをさらに低減するために、(1)転がり粘性抵抗のさらなる低減を目的とした軸受内部設計諸元(以下内部諸元と称す)の最適化、(2)かくはん抵抗低減を目的とした油の流れ改善に取り組んだ。

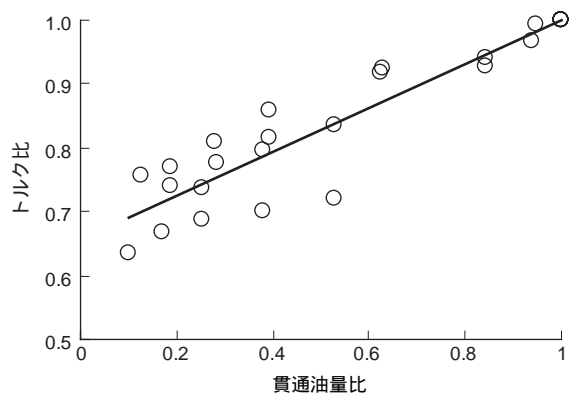


図3 トルクに及ぼす貫通油量の影響  
Effect of oil flow rate on friction torque

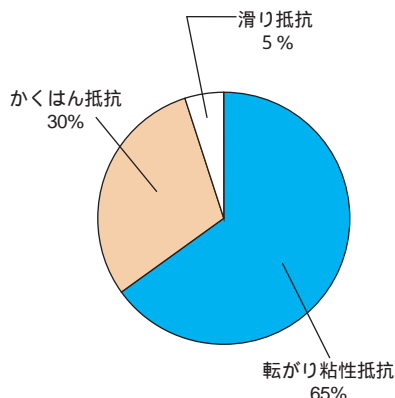


図4 ディファレンシャル・ピニオン用円すいころ軸受のトルク発生要因と寄与率

Factors contributing to friction torque of tapered roller bearing used for pinion shaft support in rear axle differential

### 3. 内部諸元の最適化による 転がり粘性抵抗の低減

転がり粘性抵抗を減らすためには、ころ数やころ長さを減少させて転動面積を減らすことが有効である。しかしながら、これらは負荷容量や剛性の低下を招く恐れがある。そこで、内部諸元が Full油量状態下の円すいころ軸受のトルクに及ぼす影響を実験的に明らかにし、性能バランスを考慮した内部諸元の最適化を行った。本試験では、内径30～55mm、外径72～120mmの単列円すいころ軸受を試料に用いた。評価した内部諸元を表2と図5に示す。実験はアキシアル荷重 6 kN、回転速度 1 000, 2 000, 3 000min<sup>-1</sup>で行い、その他の条件は表1にしたがった。

表2 円すいころ軸受の内部諸元  
Bearing internal design factors

記号	名称
LWR	ころ有効長さ
z	ころ数 接触角(外輪軌道角度)
dm	ころピッチ円径
RCo	外輪軌道クラウニング半径
RCi	内輪軌道クラウニング半径
DW	ころ平均径

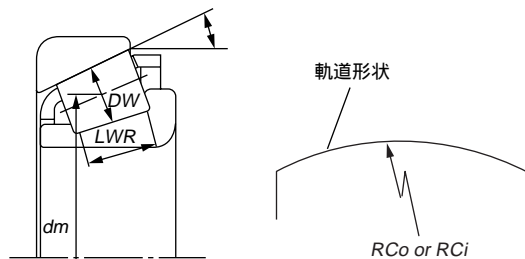


図5 円すいころ軸受の内部諸元  
Bearing internal design factors

実験によって得られた内部諸元とトルクの関係を図6に示す。本図より以下のことが言える。

- 1) ころ有効長さの減少に伴い、トルクは減少する。
- 2) ころ数の減少に伴い、トルクは減少する。
- 3) 接触角の増加に伴い、トルクは減少する。
- 4) ころピッチ円径の減少に伴い、トルクは減少する。
- 5) 軌道クラウニング半径の減少に伴い、トルクは減少する。

ここで、クラウニング半径の減少に伴ってトルクが減少するのはころと軌道の接触長さが短くなるためである。

また、各図に EHL 理論解析および油浴潤滑下の実験解析に基づいて算出された計算値<sup>8)</sup>を点線で追記した。実験で得られたころ長さ、ころ数、ころピッチ円径および内外輪の軌道クラウニング半径の影響は計算結果と良く一致する。しかし、接触角の増加に伴うトルクの減少は計算と一致しない。接触角の増加に伴うトルクの減少は後述する軸受のポンプ性能の向上に起因すると考えられる。

以上の結果を表3にまとめて示す。ここで、ころ平均径 DW の影響は過去の研究<sup>3)</sup>に基づいている。また、基本動定格荷重および弾性変位量の理論式<sup>11)</sup>を用いて求めた負荷容量および剛性に及ぼす内部諸元の影響についても表3に併記した。表中の矢印の方向は軸受性能を向上させるために各内部諸元をどう設計すべきかを表しており、上向きの矢印は増加、下向きの矢印は減少を意味する。低トルク化、すなわち高効率化のためには、接触角 を大きく、ころ数 z ところ有効長さ LWR を小さくすべきである。しかし、 を大きくすることはラジアル負荷容量を低下させ、z および LWR を小さくすることはラジアル負荷容量と剛性の両方を低下させる。また、DW は z や LWR に比べて負荷容量に及ぼす影響が大きい、トルクに及ぼす影響は z や LWR に比べてはるかに小さい。したがって、トルク低減効果の最も大きい z

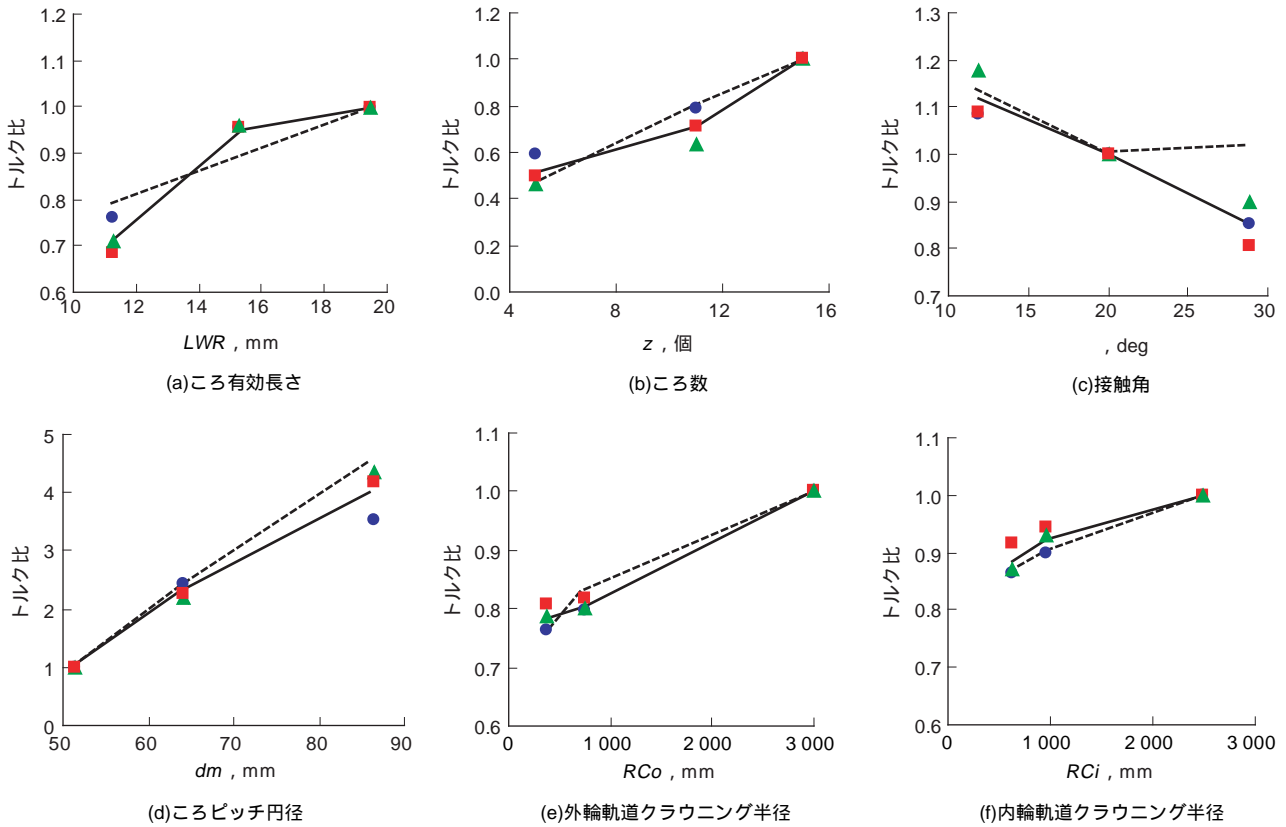


図6 トルクに及ぼす内部諸元の影響

Effects of internal design factors on friction torque

(●: 1 000min<sup>-1</sup>, ▲: 2 000min<sup>-1</sup>, ■: 3 000min<sup>-1</sup>, —: 実験値平均, - - - -: 計算値)

を小さくし、逆にトルクへの影響が小さく、負荷容量への影響が最も大きいDWを大きくして、zの減少に伴う負荷容量の低下を抑えることが最適設計と判断される。

表3 最適設計指針

Optimum design guidelines

軸受性能	LWR	z	dm	RCo	RCi	DW
高効率(低トルク)	↘	↘	↗	↘	↘	↘
高負荷容量	↗	↗	↘	-	-	↗
高剛性	↗	↗	↗	-	-	-
最適設計	↘	↘	↗	↘	↘	↗

#### 4. 油の流れ改善による かくはん抵抗の低減

図3に示したように、貫通油量の低減によってかくはん抵抗を低減することが可能である。そこで、軸受に治具(以下アタッチメントと称す)を取り付けることで貫通油量を変化させ、トルクに及ぼす油の流れ制御の影響を調べた。試料軸受は内径30mm、外径72mmの単列円すいころ軸受で、図7に示す4種類のアタッチメントを取り付け

た。実験はアキシャル荷重4kN、回転速度500、1000、1600、2400min<sup>-1</sup>で行い、その他の条件は表1にしたがった。

回転速度と貫通油量の関係を図8に示す。標準品と比較すると、アタッチメントを取り付けたすべてのタイプにおいて貫通油量の減少が認められた。タイプAが最も大きな効果を示し、2400min<sup>-1</sup>における貫通油量は約0.5L/minであり、標準品に対して90%以上減少した。また、タイプBは最も効果が小さかった。

次に、回転速度とトルクとの関係を図9に示す。入口側油経路を絞ったタイプAとタイプBは標準品に比べてトルクが低かった。特に、タイプAの2400min<sup>-1</sup>におけるトルクは0.52N・mであり、標準品に対して約30%減少した。一方、出口側油経路を絞ったタイプCとタイプDは標準品よりもトルクが増加した。



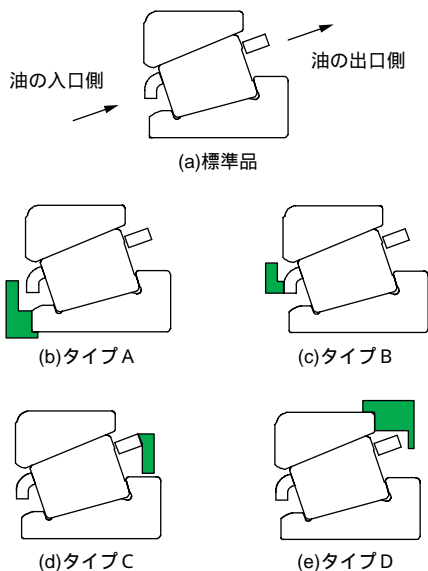


図7 アタッチメントを装着した試料軸受  
Test bearing with attachments restricting oil flow

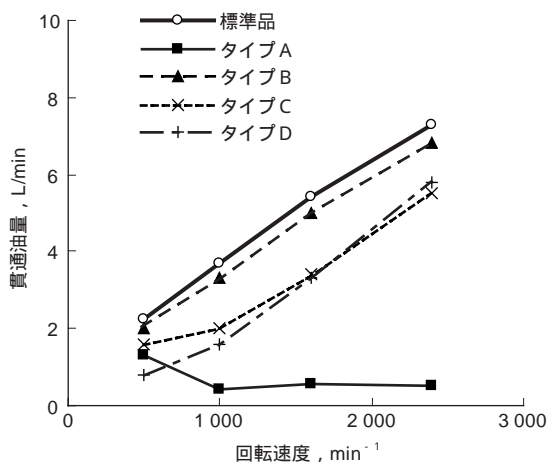


図8 回転速度と貫通油量の関係

Relationship between rotational speed and oil flow rate

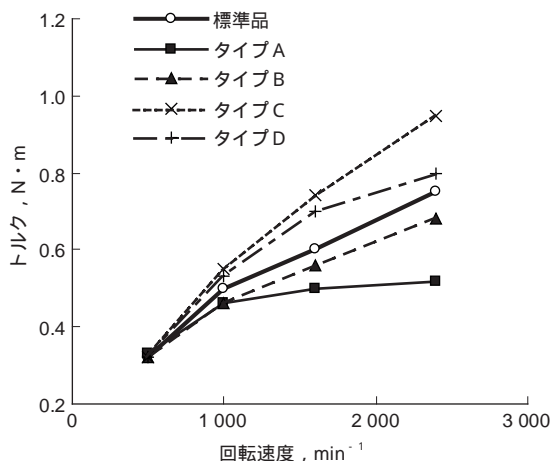


図9 回転速度とトルクの関係

Relationship between rotational speed and friction torque

タイプCとタイプDでは貫通油量が減少したが、逆にトルクは増加した。これははくはん抵抗を増加させたためと考えられる。このことは、はくはん抵抗を低減するためには、軸受内部に入った油を速やかに外部に排出して油の滞留<sup>12)</sup>を抑制することが重要であることを示唆している。

また、同じ入口側油経路を絞ったタイプAとタイプBでは貫通油量やトルクに及ぼす影響に差が認められた。このことから、保持器と内輪小つばの間のすきまが軸受内部への油の流入に対して支配的であり、このすきまを小さくすることがはくはん抵抗の低減に有効と考えられる。

透明アクリル樹脂で外輪を製作し、既報<sup>12)</sup>と類似の方法で軸受内部の油の流れを観察した結果を図10に示す。標準品では気泡が観察され、激しいはくはんが生じているが、保持器と内輪小つばの間のすきまを小さくしたタイプAではそのような気泡は観察されず、標準品のような激しいはくはんが生じていないことがわかる。すなわち、標準品に比べてタイプAのはくはん抵抗が小さいものと推測される。

なお、図6(c)に示した接触角の増加に由来するトルクの減少は、軸受のポンプ作用が改善されたことによって軸受内部の油の滞留が減少したためと考えられる<sup>13)</sup>。

### 5. 超低トルク円すいころ軸受の性能

本報の実験で得られた結果に基づいて超低トルク円すいころ軸受を開発した。開発品と従来品の比較を図11に示す。開発品は従来品に対して接触角が大きく、ころの数が少なく、ころ長さが短く、ころの直径が大きい。また、内輪および外輪の軌道には特殊クラウニング形状を施している。さらに、保持器の内径を従来設計よりも小さくして、保持器と内輪小つば外径のすきまを小さくしている。

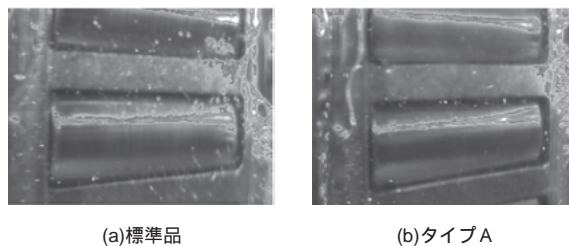


図10 軸受内部の油の流れ観察結果  
Observation of oil flow in bearing

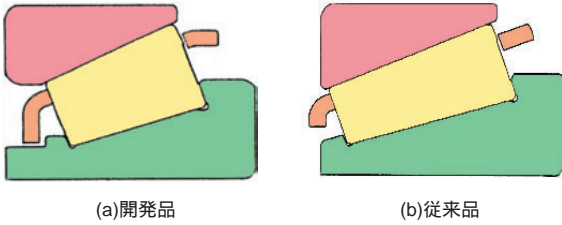


図11 開発品と従来品の比較  
(内径 35mm × 外径 89mm × 組幅38mm)

Comparison of developed bearing with conventional bearing

同一サイズの開発品，従来品(LFT軸受)と標準品のトルクと貫通油量を表1と同じ条件で比較した．回転速度とトルクの関係を図12に，回転速度と貫通油量の関係を図13に示す．図12からわかるように，開発品の2000min<sup>-1</sup>におけるトルクは0.84N・mであり，従来品に対して50%，標準品に対して62%トルクが低い．また，図13からわかるように，開発品の貫通油量は他の軸受に比べて少ないが，3000min<sup>-1</sup>における貫通油量は3.6L/minであり，従来品の30%以上の油量を確保することができる．開発品では貫通油量の減少に伴う軸受外輪温度の上昇が認められたが，その温度上昇は従来品に比べて2倍高いたけであり，焼付きの危険性はない．

次に，本報の開発技術に加えて，Koyo独自の材料・熱処理技術<sup>14)・16)</sup>を適用することによって軸受を小型化し，さらなる低トルク化を図った例を図14に示す．開発品の2000min<sup>-1</sup>におけるトルクは1.04N・mであり，従来品に対して75%の低トルク化を達成した．これは標準品に対して80%の低トルク化に相当する．同図には円すいころ軸受と寿命が同等になるように設計された玉軸受のトルク測定値も示している．開発品のトルクは玉軸受と比べても24%低いことがわかる．

以上のように，本報で示した超低トルク化技術によって，玉軸受を凌ぐ超低トルク円すいころ軸受を市場に提供することが可能である．ディファレンシャルの損失仕事量に占めるピニオン支持軸受の損失割合は，機種によっては1/2程度を占める場合もあることから，新たなピニオン軸受によるトルク低減効果は欧州モードで2%以上の燃費向上に貢献できると予想される．

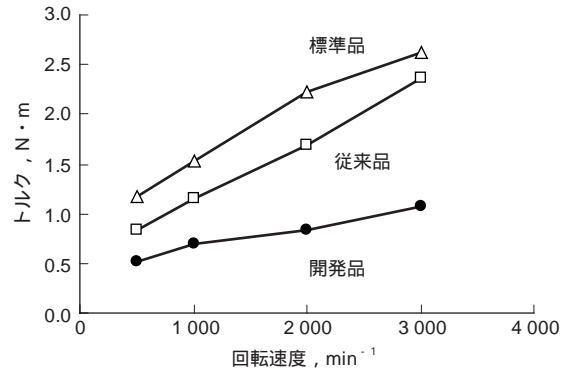


図12 回転速度とトルクの関係

Relationship between rotational speed and friction torque

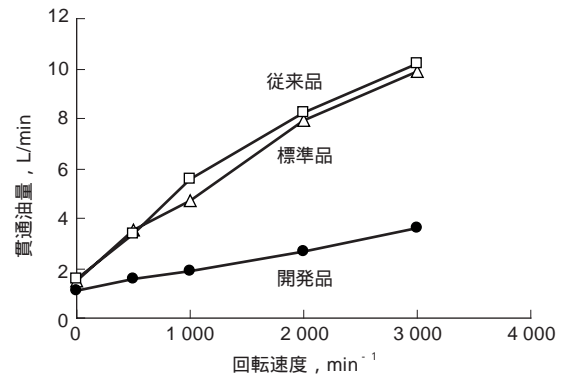


図13 回転速度と貫通油量の関係

Relationship between rotational speed and oil flow rate

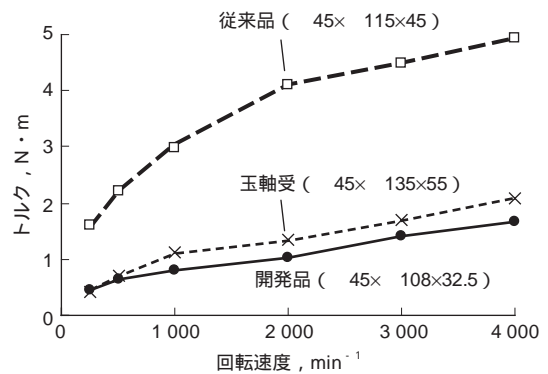


図14 小型化を含んだ開発品の超低トルク性能  
(括弧内の寸法は内径×外径×組幅，単位：mm)

Super-low friction torque performance of developed bearing with downsizing

## 6. おわりに

自動車用ディファレンシャルのピニオン支持用円すいころ軸受のトルクを低減するため、トルクの発生要因を分析し、寄与率の高い転がり粘性抵抗とかくはん抵抗の低減を検討した。具体的には、転がり粘性抵抗に及ぼす内部諸元の影響およびかくはん抵抗に及ぼす油流入出経路の影響を明らかにした。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 欧州モード代表条件における円すいころ軸受のトルクは、その65%がころと軌道との転がり粘性抵抗に起因し、30%が油のかくはん抵抗に起因する。
- 2) 性能バランスを考慮した円すいころ軸受の低トルク設計指針は以下のとおりである。
  - ・ 転がり粘性抵抗を低減するため、ころ数を減らし、ころ有効長さ、軌道クラウニング半径を小さくしてころと軌道の転動面積を減らす。
  - ・ かくはん抵抗を低減するため、保持器と内輪小鋸間のすきまを小さくして軸受内部への油の流入を抑制する。さらに、接触角を大きくすることによって軸受のポンプ性能を高め、軸受内部の油の滞留を減らす。
  - ・ ころ数の減少に伴う負荷容量の低下を補うため、ころ数よりもトルクに及ぼす影響が小さいころ平均径を大きくして負荷容量を向上させる。
- 3) 本研究に基づいて開発された超低トルク円すいころ軸受は、従来の低トルク軸受に対して、同一サイズで50%、材料・熱処理技術を適用した小型化を加えることによって75%の超低トルク性能を示した。本技術は自動車の燃費向上に大きく貢献できると予想される。

## 参考文献

- 1) Spindler, D. and Petery, G. V. : SAE Technical Paper, no. 2003-01-3743 (2003).
- 2) 吉村浩一, 大島啓次郎, 近藤宏一, 芦田敏, 渡邊秀人, 小嶋昌洋 : 自動車技術, vol. 58, no. 9 (2004) 68.
- 3) Witte, D. C. : ASLE Trans., vol. 16, no. 1 (1973) 61.
- 4) Aihara, S. : Trans. ASME, Journal of Tribology, vol. 109, no. 3 (1987) 471.
- 5) Zhou, R. S. and Hoepflich, M. R. : Trans. ASME, Journal of Tribology, vol. 113, no. 3 (1991) 590.
- 6) Matsuyama, H., Kamamoto, S. and Asano, K. : SAE Technical Paper, no. 982029 (1998).
- 7) DCBACK. CO., LTD, Driving Mode System, [http://www.dcbac.com/bbs/data/test2/1067672828/Introduction\\_for\\_Company.doc](http://www.dcbac.com/bbs/data/test2/1067672828/Introduction_for_Company.doc)
- 8) 松山博樹, 鎌本繁夫 : Koyo Engineering Journal, vol. 159 (2001) 52.
- 9) 竹内正道 : Koyo Engineering Journal, vol. 127 (1985) 52.
- 10) 浅井康夫, 大島宏之 : Koyo Engineering Journal, vol. 143 (1993) 23.
- 11) Harris, T. A. : ROLLING BEARING ANALYSIS, 3rd Ed., John Wiley & Sons (1991) 327 & 722.
- 12) 戸田一寿, 柴田正道, 星野照男 : トライボロジスト, vol. 42, no. 4 (1997) 308.
- 13) 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.
- 14) Toda, K., Mikami, T. and Johns, T. M. : SAE Technical Paper, no. 921721 (1992).
- 15) 後藤将夫 : Koyo Engineering Journal, vol. 165 (2004) 32.
- 16) 木澤克彦, 三上 剛 : トライボロジー会議予稿集 (新潟 2003-11) 405.

## 筆者



松山博樹\*  
H. MATSUYAMA



百々路博文\*\*  
H. DODORO



荻野 清\*\*\*  
K. OGINO



大島宏之\*\*\*\*  
H. OHSHIMA



千葉博行\*  
H. CHIBA



戸田一寿\*\*\*\*\*  
K. TODA

\* 総合技術研究所 基礎技術研究部  
 \*\* 軸受事業本部 中部テクニカルセンター  
 \*\*\* 軸受事業本部 解析技術部  
 \*\*\*\* 軸受事業本部 自動車軸受技術部  
 \*\*\*\*\* 総合技術研究所 基礎技術研究部 工学博士