

# 円すいころ軸受の超低トルク化技術による地球環境への負荷低減

## Super-low Friction Torque Technology of Tapered Roller Bearings for Reduction of Environmental Burdens

松山博樹 H. MATSUYAMA 川口幸志 K. KAWAGUCHI  
上村篤司 A. UEMURA 益田直樹 N. MASUDA

We developed a tapered roller bearing having super-low friction torque that is up to 80% less than the friction torque of standard tapered roller bearings. It has been confirmed through application on drive pinion bearings in passenger car rear axle differentials that this technology achieves torque and temperature rise levels as low as those of ball bearings. The developed bearings are expected to contribute to higher axle differential efficiency and improved vehicle fuel efficiency, which will result in reduced load on the global environment.

**Key Words:** tapered roller bearing, low friction torque, high efficiency, axle differential, fuel economy

### 1. はじめに

世界のエネルギー需要は年々増大しており、化石燃料の大量消費などに起因する地球温暖化の問題は、ますます深刻な現実として人類に突きつけられている。地球環境保全に関する国際的な取組みの中でも、自動車関連の環境規制は厳しさの一途をたどっている。特に二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>と称す）の排出量削減を目的とした燃費の改善やエネルギー効率の向上に対する取組みは最重要課題の1つである。このような情勢の中、自動車1台当たりに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。

転がり軸受は自動車をはじめとするさまざまな産業機械の回転軸の支持に用いられ、摩擦によるエネルギー損失や発熱の低減に大きな効果を与えている。当社は自動車に多用される円すいころ軸受に着目し、コンパクトで長寿命、高剛性という円すいころ軸受の特長を保持したまま摩擦トルク（以下、トルクと称す）を画期的に低減する技術<sup>1), 2)</sup>を開発した。超低トルク円すいころ軸受LFT-Ⅲ（3rd Generation Low Friction Torque Tapered Roller Bearing）は標準軸受に対して80%の低トルク化が可能であり、自動車の燃費向上によるCO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与し、地球環境への負荷低減に貢献できる。以下に、開発の着眼点、開発軸受と要素技術の概要、および実機に適用した場合の効果について述べる。

### 2. 円すいころ軸受のトルク発生要因と寄与率

転がり軸受は転動体の種類によって玉軸受ところ軸受に分類される。円すいころ軸受は玉軸受に比べて2～2.5倍程度の大きな負荷容量を有し、かつ剛性が高いことから、玉軸受よりもコンパクトに回転軸を支持することができる。しかし、円すいころ軸受は玉軸受に比べてトルクが大きく、発熱が大きいという欠点を有する。そこで、われわれは軸受のサイズを大きくすることなく、円すいころ軸受のトルクを玉軸受レベルに低減する技術開発に取り組んだ。

当社は20年以上前から低トルク円すいころ軸受（LFT軸受）を市場に提供している<sup>3), 4)</sup>。従来の低トルク化手法は、転がり粘性抵抗とすべり抵抗に着目して軌道形状や内輪つばの表面粗さ形状を最適化するものであるが、そのトルク低減率は20%程度であり、玉軸受のトルクに比べると依然として高い。そこで、われわれは新たに潤滑剤のかくはん抵抗に着目した。代表的な用途である自動車ディファレンシャル（以下、デフと称す）に用いられる円すいころ軸受のトルク発生要因と寄与率を実験と計算で求めた結果<sup>1)</sup>、図1に示すように転がり粘性抵抗の寄与率が最も大きく、次にかくはん抵抗の寄与率が大きいことが分かった。このことから、転がり粘性抵抗のさらなる低減とともに、これまで未検討であったかくはん抵抗の低減にも取り組んだ。

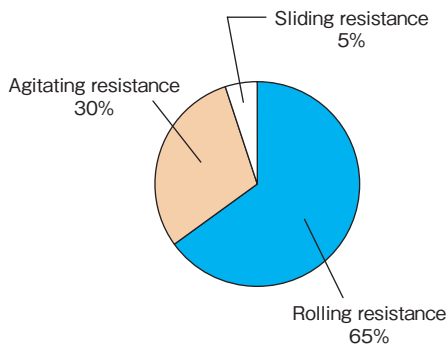


図1 トルク発生要因と寄与率  
Factors contributing to friction torque and each contribution ratio

### 3. 超低トルク円すいころ軸受の特長と性能<sup>1), 2)</sup>

超低トルク円すいころ軸受 LFT- III (以下、開発軸受と称す)の特長を図2に示す。開発軸受は以下に述べる3つの要素技術から成り立っている。

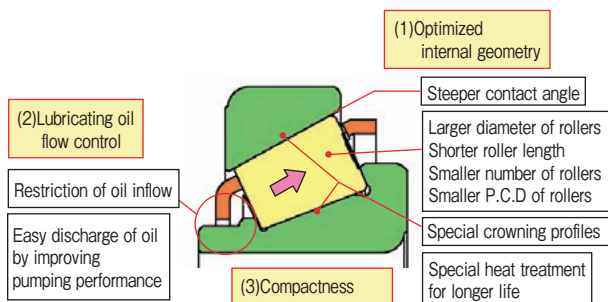


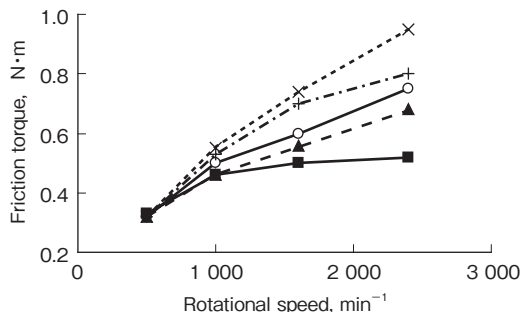
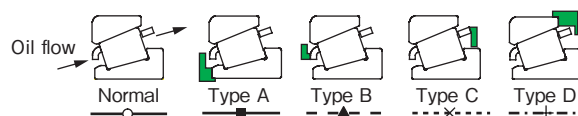
図2 超低トルク円すいころ軸受の特長  
Merits of super-low friction torque tapered roller bearing

#### 3.1 内部諸元の最適化による転がり粘性抵抗の低減

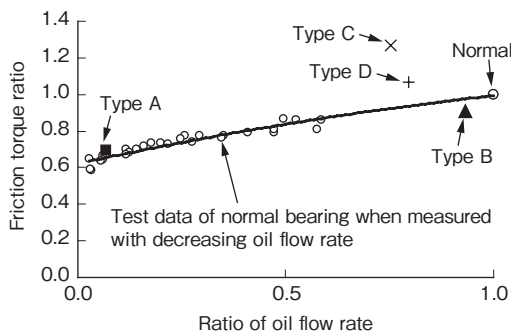
第1の技術は、性能バランスを考慮した内部諸元の最適化である。転がり粘性抵抗を低減するには、ころ数を減らし、ころ有効長さを短くして、ころと軌道の接触面積を減らすことが有効であるが、単なる接触面積の削減は寿命と剛性の低下を招く。そこで、接触面積の削減と同時にころ径を大きく、接触角を大きくすることで寿命と剛性の低下を抑制する。さらに、軌道に特殊クラウニング形状を施すことで低トルク化と長寿命化を両立させる。

#### 3.2 潤滑油の流れ制御によるかくはん抵抗低減

第2の技術は、潤滑油の流れ制御によるかくはん抵抗の低減である。トルクに及ぼす油の流入・流出経路の影響を調べた結果、図3に示すように、流入経路をふさぐと貫通油量が減ってトルクが減少し、逆に流出経路をふさぐとトルクが増加することが明らかとなった。本知見に基づき、潤滑油を軸受構成部品の一つとみなし、油の流れを設計した。すなわち、軸受内部に流入する油量を減らすために、保持器の内径を小さくし、内輪小つばに特殊形状を与えて保持器と内輪小つばの間にラビリンス構造を形成する。さらに、軸受内部に流入した油の滞留を抑制し、速やかに外部に油を排出させるために、接触角を大きく、ころ数を少なく、ころ径を大きくして、軸受のポンプ性能を高める。流入油量制御の有無による軸受内部のかくはん状態の比較を図4に示す。流入油量制御によって気泡の発生が抑制され、油のかくはんが低減されているのが分かる。

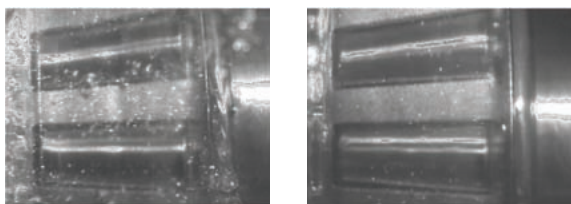


(a) 回転速度とトルクの関係



(b) 貫通油量とトルクの関係

図3 トルクに及ぼす油流れ制御の影響  
Effect of oil flow control on friction torque



(a) 流入油量制御無し (b) 流入油量制御有り

図4 軸受内部のかくはん状態の比較  
Comparison of agitated state in bearing

### 3.3 長寿命熱処理技術の適用による小型化

第3の技術は、長寿命熱処理技術の適用による軸受の小型化である。表面硬さを高め、残留オーステナイト量を適正化して、長寿命化を図る独自の浸炭熱処理技術<sup>5)</sup>をころと軌道輪に適用することで、特にギヤなどの摩擦粉が混入した汚れ油中での軸受寿命を飛躍的に向上させることができる。寿命を保持したまま軸受のサイズを小さくできるので、トルクに及ぼす影響が最も大きいころピッチ円径を小さくすることができ、転がり粘性抵抗とかくはん抵抗の低減に有効である。

### 3.4 開発軸受の性能

これらの要素技術に加え、開発軸受の内輪大つば面には従来のLFT軸受と同様の特殊な表面粗さ形状<sup>3)</sup>が与えられている。これはなじみ運転後の内輪大つば面の表面粗さ形状を近似したものであり、一般形状よりも接触面圧が低く、油膜形成に有利である。耐摩耗、耐焼付き性に優れ、予圧の減少による支持剛性の低下を抑制する。

同じ計算寿命を有するように設計された開発軸受と従来の低トルク円すいころ軸受（以下、従来低トルク軸受と称す）および複列アンギュラ玉軸受（以下、玉軸受と称す）のトルク実測値の比較を図5に示す。開発軸受は従来の低トルク軸受に対して75%の低トルク化を実現し、玉軸受よりもトルクが低い。表1に示すように、標準的な自動車デフ用円すいころ軸受（以下、標準軸受と称す）を基準とした場合、開発軸受は軸受の基本性能を維持したままで80%の低トルク化と40%の軽量化が図られている。

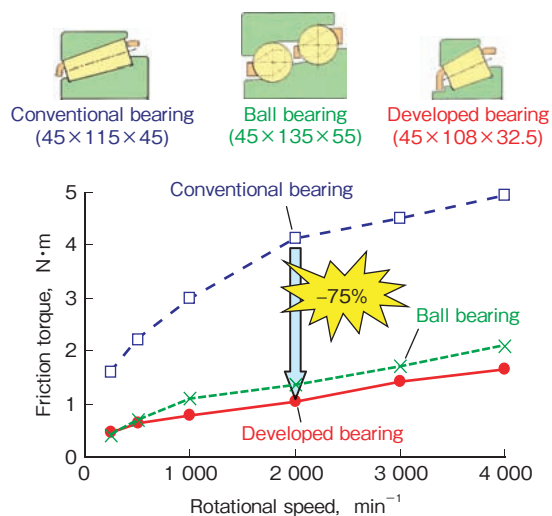


図5 開発軸受と従来低トルク軸受、玉軸受のトルク比較

Friction torque comparison between developed bearing, conventional bearing and ball bearing

表1 開発軸受の性能（標準軸受の性能を1とした場合）

Performance of developed bearing (when standard bearing performance is set as 1)

Bearing type	Standard bearing	Developed bearing	Ball bearing
Structure			
Boundary dimensions (ID × OD × Width, mm)	45 × 115 × 45	45 × 108 × 32.5	45 × 135 × 55
Friction torque	1	0.2	0.3
Life	Clean oil	1	1
	Contaminated oil	1	1
Rigidity	1	1	1
Anti-seizure	1	1	—
Ease of assembly	1	1	0.3
Size	1	0.6	1.8

## 4. 実機への適用<sup>6)</sup>

### 4.1 新しいピニオン軸支持構造

これまでに述べた円すいころ軸受の超低トルク化技術を乗用車リヤデフのドライブピニオン（以下、ピニオンと称す）を支持する軸受に適用した。代表的なリヤデフの構造を図6に示す。ピニオン軸受には、リングギヤの回転に伴うはねかけによって多量の潤滑油が供給され、ヘッド軸受とテール軸受の間は油で満たされた状態となる。NEDC (New European Driving Cycle) のような市街地走行時を想定した燃費測定モードでは、ピニオン軸受の摩擦損失がデフ全体の動力損失の約50%を占める。そのため、ピニオン軸受の摩擦トルクを低減することによってデフの高効率化を図ることができ、自動車の燃費向上に貢献できる。

開発軸受を適用した場合のピニオン軸支持構造を図7に示す。流入油量を制御するラビリンス構造はヘッド軸受のみに設け、テール軸受には設けていない。これによって、従来の軸支持構造では潤滑油量が過多であるヘッド軸受への供給油量を減らしてかくはん抵抗を低減させ、一方で、低温始動時や高速回転時に焼付き発生が懸念されるテール軸受への供給油量を増加させて耐焼付き性の向上を図ることができる。

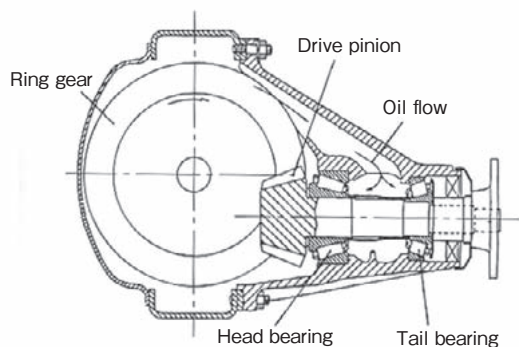


図6 ディファレンシャル Rear axle differential

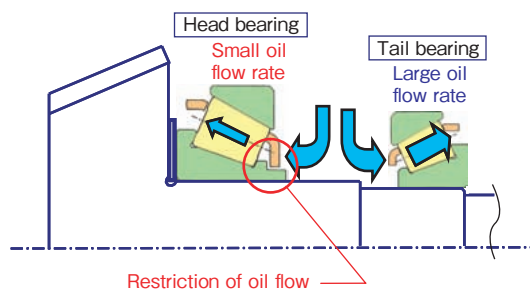


図7 新ピニオン軸支持構造 New concept of drive pinion support

### 4.2 実機想定荷重下の軸受単体トルク

実機運転条件を想定した合成荷重下で軸受単体のトルクを測定し、従来軸受および玉軸受と比較した。試料軸受を表2に示す。これらの軸受は同等の寿命、軸支持剛性および静的強度を有するように設計されている。試験装置の主要部構造を図8に示す。プロペラシャフトからの入力トルクに基づいて計算された合成荷重を軸受に与え、所定の速度で主軸を回転させるのに必要なトルクを測定した。あらかじめ支持軸受だけのトルクを測定し、両者の測定値の差から試料軸受1セットあたりのトルクを得た。潤滑はSAE75W-90ギヤ油の循環給油方式とし、試料軸受の内輪正面側が油で満たされるように供給油量を調整した。油温は50℃で一定にした。

ヘッド軸受とテール軸受のトルク測定値の和をピニオン軸受のトルク測定値とした。入力トルク20N・mにおける摩擦トルクと回転速度の関係を図9(a)に示す。開発軸受のトルクは玉軸受のそれとほぼ同等であり、回転速度2000min<sup>-1</sup>では従来軸受に比べて50%低い。次に、回転速度2000min<sup>-1</sup>における摩擦トルクと入力トルクの関係を図9(b)に示す。負荷が大きくなると玉軸受のトルクは著しく増加して、従来軸受との差がほとんどなくなるが、開発軸受はこのような高負荷条件下においても、低トルク性能を維持できる。これは、点接触である玉軸受の方が線接触である円すいころ軸受よりも、トルクに及ぼす荷重の影響が大きいためであると考えられる。

表2 試料軸受 Test bearings

	Developed bearings	Conventional bearings	Ball bearings
Pinion head			
ID × OD × W (mm)	34.9 × 72.2 × 20.5	34.9 × 72.2 × 25.4	34.9 × 79 × 31
Pinion tail			
ID × OD × W (mm)	30.2 × 64.3 × 21.4	30.2 × 64.3 × 21.4	30.2 × 64.3 × 23

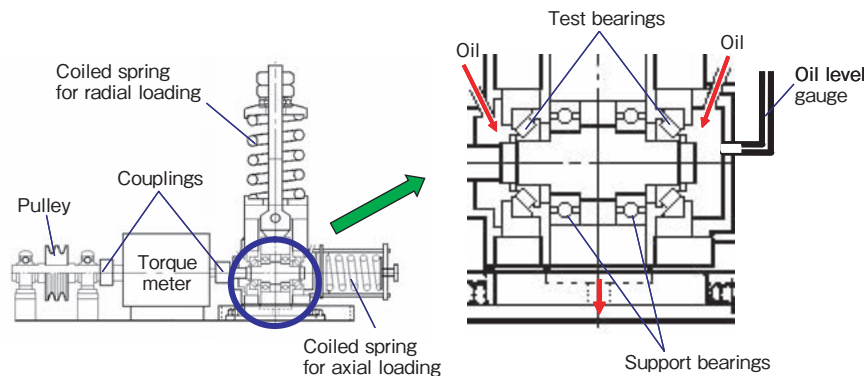


図8 軸受トルク試験装置

Schematic diagram of bearing friction torque test equipment

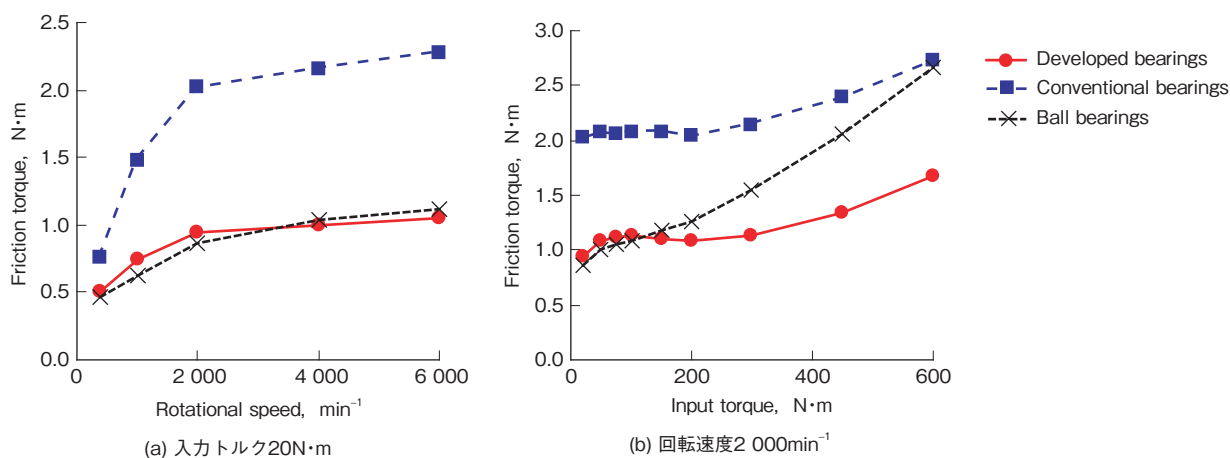


図9 軸受単体トルク測定結果

Friction torque measurement results for pinion bearings under combined load

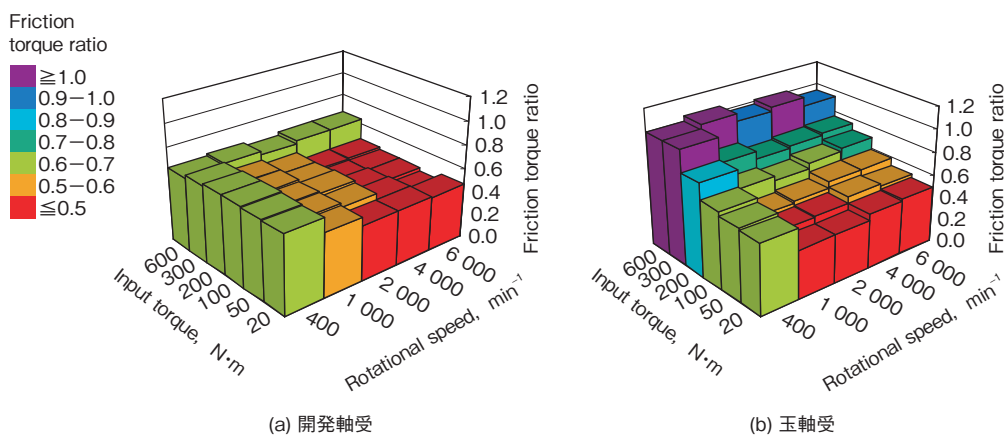


図10 開発軸受と玉軸受のトルク比較

Friction Torque Comparison between developed bearings and ball bearings

さらに、さまざまな入力トルクと回転速度の組合せにおける開発軸受と玉軸受のトルク比較を図10に示す。図10の縦軸は従来軸受のトルクを1としたときのトルク比である。開発軸受のトルク比は、入力トルクが300N・m以下、回転速度が1 000min<sup>-1</sup>以上の条件では0.6以下である。一方、玉軸受のトルク比は、入力トル

クが100N・m以下では開発軸受とほぼ同等であるが、200N・m以上では開発軸受よりも大きく、600N・mのときにはほぼ1である。このように、開発軸受は入力トルクや回転速度に関わらず、玉軸受と同等以上の低トルク性能を発揮する。

### 4.3 実機でのピニオントルクおよび油温

開発軸受を乗用車用リヤデフのピニオン部に組み込み、ピニオン軸を回転させるのに必要なトルクとデフキャリア底部の油温を測定した。表2の試料軸受を同じデフに組み込むため、開発軸受と従来軸受の外径と幅を変更し、最もサイズの大きい玉軸受の外径と組幅に統一した。試験装置の概略構造を図11に示す。試料軸受は、なじみ運転された後にピニオン支持部に5kNの予圧で組み込まれた。リングギヤとピニオンがかみあわないようにピニオン形状を変更することで、ピニオン部のトルクのみを測定した。また、別のモータでピニオンの回転速度に相当する速度でリングギヤを回転させ、デフ内部の油の流れを実際と同じ状態にした。本試験は無負荷で実施したが、NEDCのような低負荷条件下において、軸受に作用する荷重は予圧のみの場合と大差はないと考えられる。潤滑油にはSAE75W-90ギヤ油を用いた。

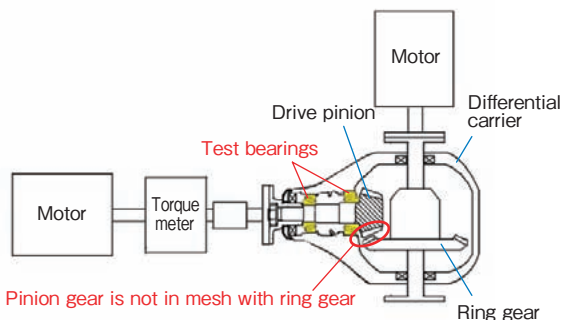


図11 実機デフ試験装置

Schematic diagram of axle differential test equipment

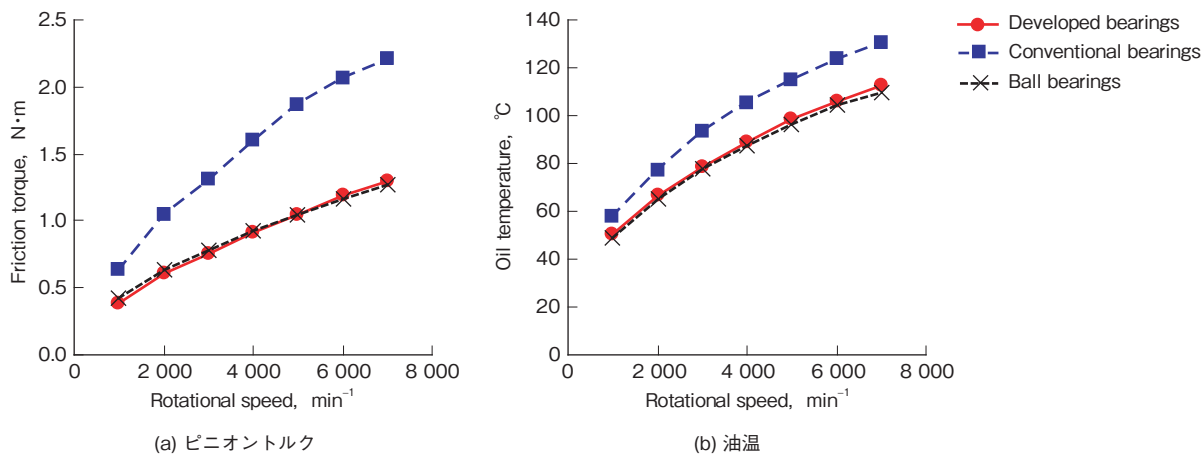


図12 実機ピニオントルクおよび油温測定結果

Pinion torque and oil temperature measurement results

図12(a)に油温80℃におけるピニオン部のトルク測定結果を示す。試験を行った全速度域において開発軸受のトルクは玉軸受と同等であり、従来軸受よりも40%低い。次に、デフ内部の油温測定結果を図12(b)に示す。試験を行った全速度域において開発軸受の油温は玉軸受と同等である。ピニオン回転速度が7000min<sup>-1</sup>(車速約220km/h相当)のとき、開発軸受は従来軸受に比べて油温の上昇を約20℃抑制できる。

### 4.4 環境負荷低減に与える効果

以上のように、開発軸受が玉軸受と同等以上の低トルク、低昇温性能を有することが実機試験で確認できた。開発軸受は標準軸受に対して50%以上の低トルク化が図られているので、デフの動力損失の半分がピニオン軸受に起因すると仮定した場合、開発軸受を適用することによってデフの動力損失を25～35%低減できる。今回開発した軸受の効果を試算すると、1.5～2%の車両燃費向上と3.5～4.5g/kmのCO<sub>2</sub>排出量削減が期待できる。この効果は日本国内だけで年間40万トンのCO<sub>2</sub>削減効果に相当する。このように、普段は目立たない“縁の下の力持ち”的な役割を担う転がり軸受もまた、環境負荷低減に大きく貢献できる。さらに、開発軸受の昇温抑制効果は、潤滑油の劣化防止や高速化対応だけでなく、冷却フィンの廃止など、ユニット側のコスト低減にも貢献できると考える。

5. おわりに

当社が開発した超低トルク円すいころ軸受 LFT-Ⅲは、標準軸受に対して同一サイズで 50%、小型化効果を含めた場合には 80% の低トルク化が可能である。開発軸受の省エネルギー効果は顕著であり、また、その独創性および経済性において優れていることが高く評価され、当社は社団法人日本機械工業連合会から 2006 年「第 27 回優秀省エネルギー機器表彰」で「経済産業大臣賞」を受賞した。円すいころ軸受の高効率化を目的として開発された各要素技術は、性能向上と環境負荷軽減を両立した 21 世紀型環境対応技術として、自動車以外の各種産業機械分野で使われる他の転がり軸受にも幅広く応用できる。

(LFT は株式会社ジェイテクトの登録商標です)

参考文献

- 1) Matsuyama, H., Dodoro, H., Ogino, K., Ohshima, H., Toda, K.: Development of Super-Low Friction Torque Tapered Roller Bearing for Improved Fuel Efficiency, SAE Technical Paper, no. 2004-01-2674 (2004).
- 2) 松山博樹：高効率デフ用超低トルク円すいころ軸受の開発，自動車技術会シンポジウムテキスト，20074875 (2007).
- 3) 竹内正道：LFT 軸受について，Koyo Engineering Journal, no. 127(1985)52.
- 4) 浅井康夫，大島宏之：円すいころ軸受の低トルク化について，Koyo Engineering Journal, no. 143(1993)23.
- 5) Toda, K., Mikami, T., Johns, T. M. : Development of Long Life Bearing in Contaminated Lubrication, SAE Technical Paper, no. 921721(1992).
- 6) Matsuyama, H., Toda, K., Kouda, K., Kawaguchi, K., Uemura, A.: Development of Super-Low Friction Torque Tapered Roller Bearing for High Efficiency Axle Differential, Proc. FISITA 2006 Yokohama Conf., F2006P299(2006).

筆者



松山博樹\*  
H. MATSUYAMA



川口幸志\*\*  
K. KAWAGUCHI



上村篤司\*\*\*  
A. UEMURA



益田直樹\*\*\*\*  
N. MASUDA

\* 研究開発センター 材料技術研究部  
 \*\* 軸受・駆動事業本部 実験解析技術部  
 \*\*\* 軸受・駆動事業本部 中部テクニカルセンター  
 \*\*\*\* 軸受・駆動事業本部 欧州テクニカルセンター