

デファレンシャルピニオン用低トルク軸受

Low Friction Torque Bearings for Differential Pinion

大島宏之 H. OOSHIMA

JTEKT has succeeded in the practical application of two types of low friction torque bearings have 40 to 50% less friction torque than that of the conventional low friction torque tapered roller bearing (LFT-Ⅱ) in vehicle differential pinion. One is the super-low friction torque tapered roller bearing (LFT-Ⅲ), which has achieved lower friction torque with an optimized internal geometry and lubrication oil inflow control. The other is the tandem angular contact ball bearing, which has achieved lower friction torque by changing bearing types from tapered roller bearings to ball bearings. These bearings are expected to reduce CO₂ emissions by improving vehicle fuel efficiency.

Key Words: tapered roller bearing, tandem ac, low friction torque, high efficiency, differential pinion

1. はじめに

デファレンシャル（以下、デフ）は動力伝達装置の一部で、エンジンから伝達された動力を駆動輪に伝えるとともに、左右の駆動輪の回転差を吸収するための部品である。一般に、ドライブピニオン（以下、ピニオン）とリングギヤの支持には、高負荷容量で高剛性という特長を持つ円すいころ軸受が使用される。しかし、一方で玉軸受に比べて摩擦トルクが大きく、発熱も大きいという一面を持つ。

自動車の燃費改善による CO₂ 排出量削減を達成するため、デフをはじめとする動力伝達系においても高効率化の動きが加速しており、その手段の1つとして軸受の摩擦トルク（以下、トルク）の低減が検討されている。

本報では、デフピニオン用に実用化した2つの低トルク軸受について紹介する。1つはLFT (Low friction torque tapered roller bearing)-Ⅰ¹⁾とLFT-Ⅱ²⁾の低トルク化技術に加えて内部諸元の最適化と潤滑油の流入制御によりさらなる低トルク化を実現した超低トルク円すいころ軸受（以下、LFT-Ⅲ）であり、もう1つは円すいころ軸受から玉軸受へと軸受タイプの変更により低トルク化を実現したタンデムアンギュラ玉軸受（以下、タンデム AC）である。これらの低トルク軸受の実用化により従来のLFT-Ⅱに対し、40～50%の低トルク化が可能となった。また、当社ではお客様のニーズに応じ

てLFT-Ⅲとタンデム ACの組合せでの供給も可能である。

2. LFT-Ⅲ^{3), 4)}

2.1 円すいころ軸受のトルク発生要因と寄与率

一般的なリヤデフの構造を図1に示す。ピニオンを支持するヘッド側とテール側の2つの円すいころ軸受には、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る。透明樹脂製のデフキャリアを用いて、軸受周りの油の流れを観察した結果、ピニオン回転速度が600～900min⁻¹（車速20～30km/h相当）でヘッド側およびテール側の円すいころ軸受は油で完全に満たされていることが分かった。つまり、実用速度域においてピニオン用軸受は油量過多の状態であり、油のかくはん抵抗に起因するトルクを無視できないと考えた。

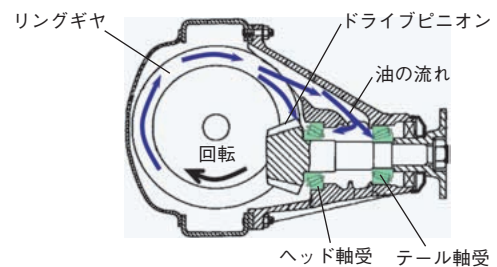


図1 一般的なリヤデフ構造
Structure of a typical rear axle differential

NEDC (New European Driving Cycle, 欧州の燃費測定モード) を代表する運転条件 (アキシャル荷重換算 4kN, 回転速度 2 000min⁻¹, ギヤ油, 油温 50℃) におけるピニオン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結果を基に計算し求めた結果を図2に示す。ころと軌道との転がり粘性抵抗の寄与率が最も大きく、次いで潤滑油のかくはん抵抗の寄与率が大きいたことが分かる。一方、内輪大つばところ大端面の間のすべり抵抗の寄与率は小さい。これは、軸受が高粘度のギヤ油で潤滑され、内輪大つばところ大端面の間に十分なEHL (弾性流体潤滑) 油膜が形成されているためであると考えられる。

上記の結果に基づき、従来の低トルク円すいころ軸受 (LFT- I, LFT- II) のトルクをさらに低減するために、転がり粘性抵抗のさらなる低減を目的とした内部諸元の最適化、およびかくはん抵抗の低減を目的とした潤滑油の流入制御に取り組んだ。

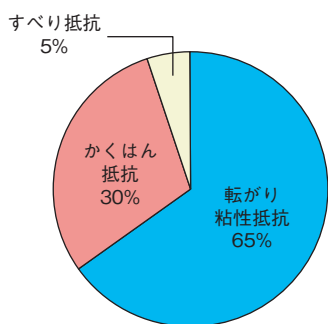


図2 トルク発生要因と寄与率
Causes of friction torque and their contribution ratio

2.2 LFT- IIIの特長

LFT- IIIの特長を図3に示す。

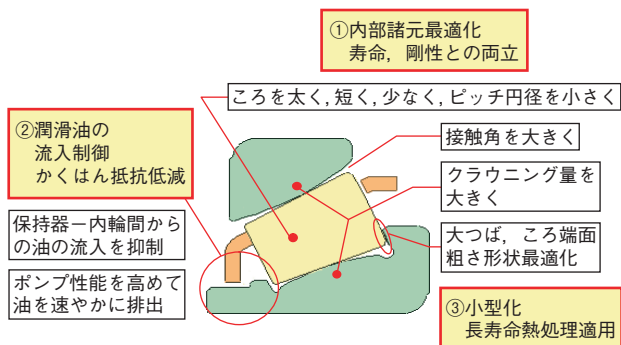


図3 LFT-IIIの特長
LFT-III features

第1の技術は、軸受に求められる性能のバランスを考慮した内部諸元の最適化である。ころ数を減らし、ころ長さを短くしてころと軌道の接触面積を小さくすると同時に、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している。さらに、軌道に特殊クラウニング形状を施して、低トルク化と長寿命化を両立させている。

第2の技術は、潤滑油の流入制御によるかくはん抵抗の低減である。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、保持器と内輪小つばの間にラビリンスを形成している。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ている。

上記2つの要素技術に加えて、長寿命熱処理技術の適用による軸受の小型化により、低トルク化の実現が可能である。軸受の表面硬度を高め、残留オーステナイト量を適正化して軸受の長寿命化を図る特殊な浸炭熱処理技術⁵⁾をころと軌道輪に適用することによって、特にギヤなどの摩耗粉が混入した汚れ油中の軸受寿命を飛躍的に向上させることができる。軸受の負荷容量と静的強度を向上させることができるので、軸受寿命を維持したまま軸受を小型化でき、これにより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るので、転がり粘性抵抗とかくはん抵抗の低減が可能となる。

さらに、これらの技術に加えてLFT- Iと同様、LFT- IIIの内輪大つば面には特殊な表面粗さ形状¹⁾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なり、油膜形成に有利である。この結果、LFT- IIIは耐摩耗・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できる。

参考として当社製低トルク円すいころ軸受のラインアップを表1に示す。

表1 低トルク円すいころ軸受のラインアップ
Low friction torque tapered roller bearings

適用技術	標準品	LFT- I	LFT- II	LFT- III
内輪大つば, ころ端面粗さ形状最適化	-	○	○	○
軌道クラウニング	-	-	○	○
内部諸元最適化	-	-	-	○
潤滑油の流入制御	-	-	-	○

○: 適用

3. タンデムAC

3.1 タンデム AC の特長

従来、ピニオン用軸受は高負荷容量で高剛性である円すいころ軸受が使用されていたが、以下の仕様することで玉軸受に置き換えることが可能となった。それにより標準の円すいころ軸受より有利な玉軸受の低トルク性能を活かすことが可能となった。

タンデム AC の特長を図4に示す。

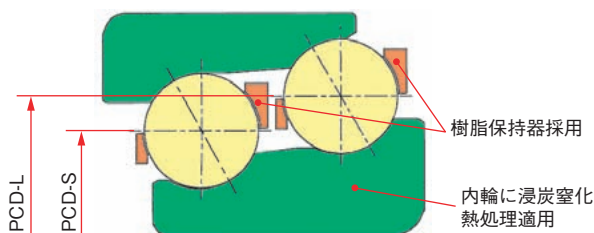


図4 タンデム AC の特長
Tandem AC features

- (1)同接触角方向に玉を2列並べることで、従来の円すいころ軸受より劣る寿命と剛性の向上を実現
- (2)同接触角方向、異 PCD に玉を配列することにより、従来の円すいころ軸受と同様の外輪と内輪組立て品が分離タイプになり、デフへの組立てが容易
- (3)内輪に浸炭窒化熱処理を適用することで軌道表面の高硬度化、圧縮応力層の形成、および残留オーステナイト量の最適化を図り、長寿命化を実現
- (4)耐油性に優れた樹脂保持器の採用

3.2 タンデム AC の適用上の留意点

タンデム AC の適用にあたり下記の留意が必要である。

3.2.1 耐異物性低下

タンデム AC は、従来の円すいころ軸受に比べ耐異物性が低下する。図5に異物濃度のパラメータスタディをした異物濃度と軸受寿命の関係を示す。異物中での寿命が円すいころ軸受に比べ1/10以下となるため、デフ内の異物濃度の削減が必要不可欠である。短寿命となる要因の1つとしては、軸受内部の形状の違いで貫通油量に差がで、軸受内部のかくはんによる異物のかみ込みの影響が大きくなるためであると考えられる。

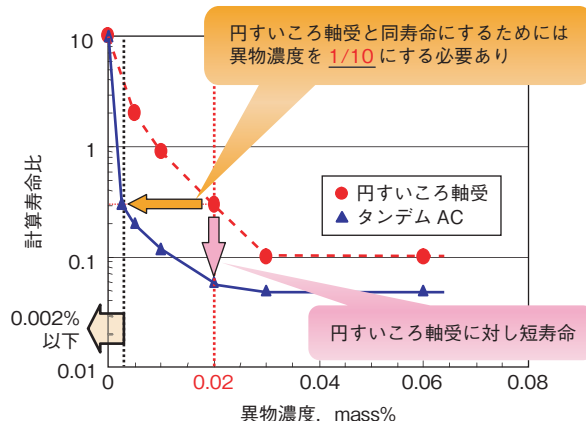


図5 異物濃度と軸受寿命の関係（軸受単体試験）
Relationship between contaminant concentration and bearing life (bearing test)

3.2.2 組立て予圧管理の見直し

デフピニオンの組立工程での予圧は、一般的に回転速度 $50 \sim 60 \text{min}^{-1}$ 時のトルク値で管理されている。従来の円すいころ軸受と同一の予圧レンジ $4 \sim 6 \text{kN}$ に設定しようとする、タンデム AC の回転トルクは従来の円すいころ軸受に比べ1/5のトルクレンジで管理が必要となるため、予圧管理が難しくなる。図6に組立て予圧管理の比較事例を示す。

回転速度： 50min^{-1}
さび止め油塗布状態
トルク管理レンジ
円すいころ軸受 ※1 0.78N·m
タンデムAC ※2 0.16N·m

回転トルク保証値
円すいころ軸受の1/5

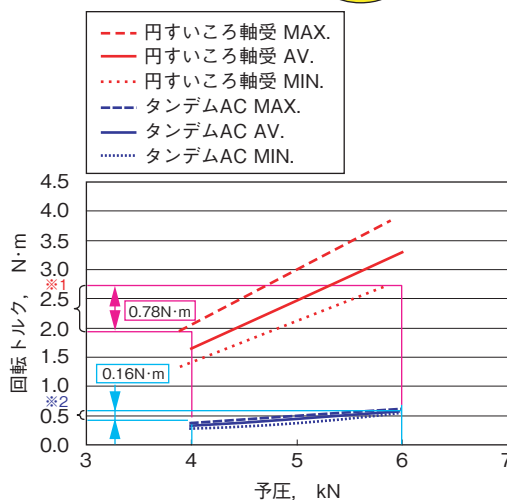


図6 組立て予圧管理の比較事例
Comparative example of assembling preload control

4. LFT-ⅢとタンデムACの性能⁶⁾

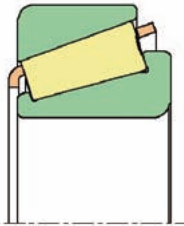
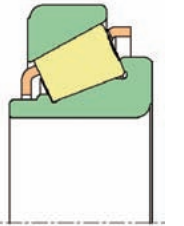
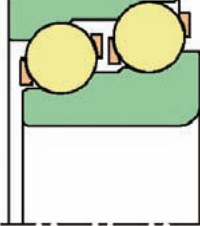
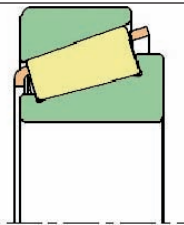
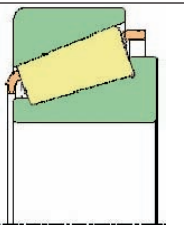
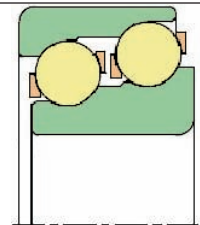
4.1 実機想定荷重下の軸受単体トルク

実機運転条件を想定した合成荷重下で軸受単体トルクを測定し、従来のLFT-Ⅱと開発したLFT-Ⅲおよび実用化したタンデムACを比較した。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7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。あらかじめサポート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セット当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℃で一定とした。

入力トルク20N・mにおける回転トルクと回転速度の関係を図8(a)に示す。LFT-Ⅲのトルクは、タンデムACのトルクとほぼ同等であり、回転速度2000min⁻¹では、従来のLFT-Ⅱに比べて50%低い。次に、回転速度2000min⁻¹における回転トルクと入力トルクとの関係を図8(b)に示す。負荷が大きくなるとタンデムACのトルクは増加して、従来のLFT-Ⅱとの差がほとんどなくなるが、LFT-Ⅲ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。しかし、図8(b)の走行中の各トルクの割合との関

表2 試料軸受
Test bearings

	LFT-Ⅱ (従来品)	LFT-Ⅲ	タンデムAC
ヘッド側軸受			
内径×外径×組幅 (mm)	34.9 × 72.2 × 25.4	34.9 × 72.2 × 20.5	34.9 × 79 × 31
※3 テール側軸受			
内径×外径×組幅 (mm)	30.2 × 64.3 × 21.4	30.2 × 64.3 × 21.4	30.2 × 64.3 × 23

※3 テール軸受 (LFT-Ⅲ) は、流入油量を制御するラビリンス構造は設けていない
低温始動時や高速回転時に焼付き発生の懸念を考慮

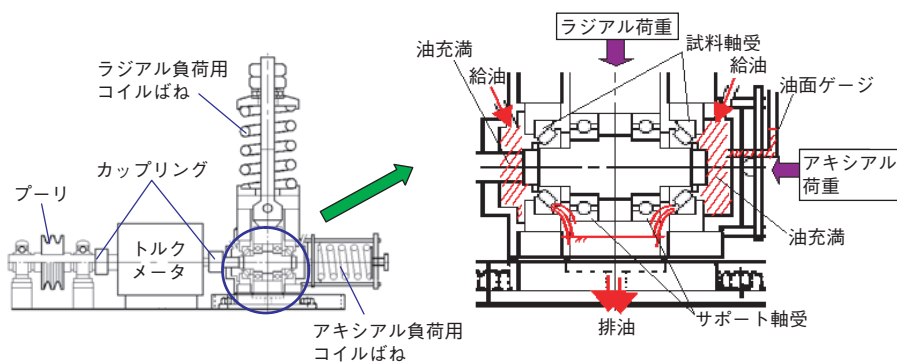
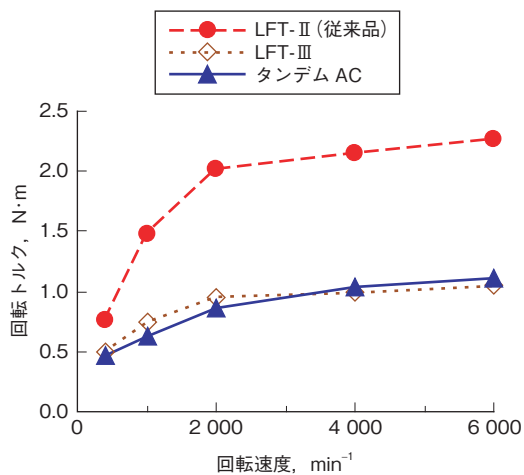


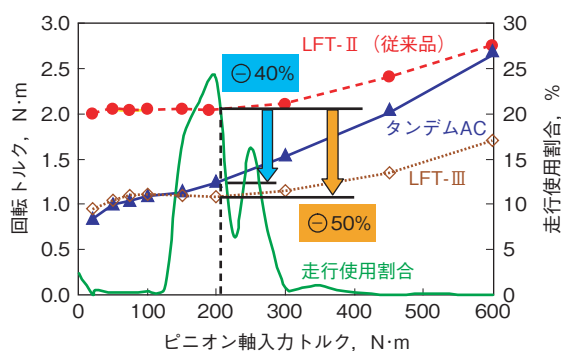
図7 軸受トルク試験装置

Schematic diagram of bearing friction torque test equipment

係をみると、入力トルク 200N・m では従来の LFT- II に比べて LFT- III は 50%，タンデム AC は 40% 低く、通常走行領域では両軸受とも高効率化に貢献できる。



(a) 入力トルク 20N・m



(b) 回転速度 2 000min⁻¹

図8 軸受単体トルク測定結果

Friction torque measurement results of bearings alone

4.2 実機でのピニオントルクおよび油温

実用化した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の各種の試料軸受を同じデフに組み込めるように、開発・実用化した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タンデム AC の外径と組幅に統一した。試験装置の概略構造を図9に示す。試料軸受は、なじみ運転させた後にピニオン支持部に 5kN の予圧で組み込んだ。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。

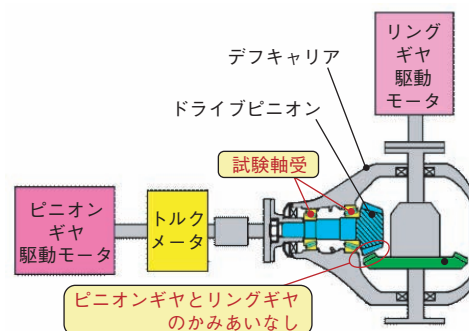
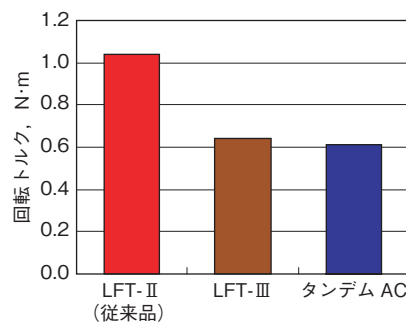


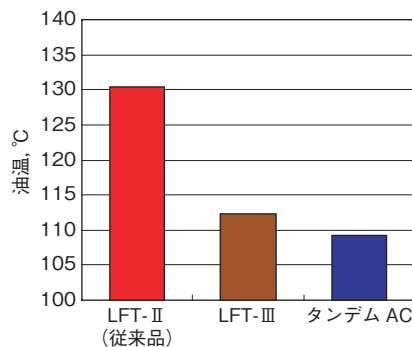
図9 実機デフ試験装置

Schematic diagram of axle differential test equipment

図10(a)に油温 80℃、回転速度 2 000min⁻¹におけるピニオン部のトルク測定結果を示す。LFT- III とタンデム AC のトルクは、従来の LFT- II よりも約 40% 低い。次に、回転速度 7 000min⁻¹(車速約 220km/h 相当)におけるデフ内部の油温測定結果を図10(b)に示す。LFT- III とタンデム AC の油温は、従来の LFT- II よりも油温の上昇を約 20℃ 抑制できる。以上のように、LFT- III とタンデム AC は、従来の LFT- II に比べ低トルク・低昇温性能を有することが実機試験で確認できた。



(a) ピニオントルク (油温 80℃、回転速度 2 000min⁻¹)



(b) 油温 (回転速度 7 000min⁻¹)

図10 実機ピニオントルクおよび油温測定結果

Measurement results of pinion torque and oil temperature

4.3 環境負荷低減への効果

図8(b)のピニオン軸入力トルク 200N・m 時の環境貢献度の試算例を示す。LFT-Ⅲを例に挙げると、従来のLFT-Ⅱに対して50%の低トルク化が図られているので、デフの動力損失の1/2がピニオン軸受に起因すると仮定した場合、LFT-Ⅲを適用することによって、デフの動力損失を25%低減できる。今回評価した軸受の効果を試算すると、1.5%の車両燃費向上と3.4g/kmのCO₂排出量削減が期待できる。図11にピニオン軸受の組合せによる環境貢献度の試算結果を示す〔乗用車の分類:Cセグメント(1.5~2Lクラスのコンパクトカー)〕。

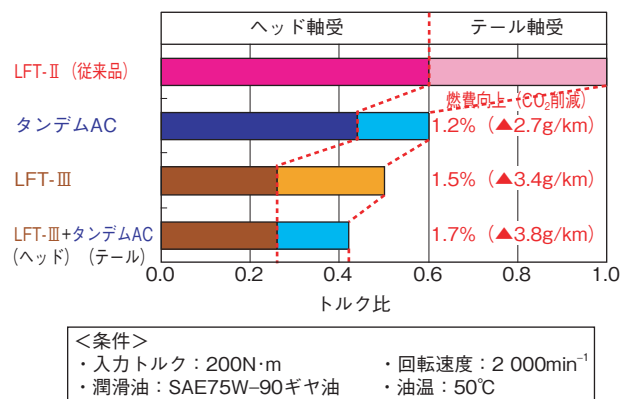


図11 環境貢献度
Contribution ratio to environment

4.4 デフピニオン用低トルク軸受の適用例

NEDCの燃費測定条件のような低負荷条件下での低トルク性能は、タンデムACの方がやや有利であるが、低負荷から高負荷までの全領域での低トルク性能は、LFT-Ⅲの方が有利である。上記より、高負荷が掛かるヘッド側にはLFT-Ⅲを適用し、焼付き発生の懸念があるテール側にはタンデムACを適用することで、デフ内の油量を減少させることができ、さらなる低トルク化が実現できる。今後、LFT-Ⅲ+タンデムACの組合せが増加していくと考える。

4.5 デフピニオン用低トルク軸受のラインアップ

表3にデフピニオン用低トルク軸受のラインアップを示す。当社ではお客様からの要求性能、使用条件およびデフキャリア構造に適したピニオン軸受の組合せを提案できる。

5. おわりに

円すいころ軸受の超低トルク化技術と玉軸受への置換え技術を、乗用車デフのピニオン軸受に適用した。その結果、従来の低トルク円すいころ軸受に対して、十分な低トルク・低昇温性能を発揮できることを確認した。これらの軸受を構成する各要素技術は、トランスミッションなどデフ以外の自動車用途にも幅広く応用でき、地球環境負荷低減に貢献できる。

* 1 LFTは株式会社ジェイテクトの登録商標です。

表3 デフピニオン用低トルク軸受のラインアップ
Lineup of low torque bearing for differential pinion

種類	LFT-Ⅱ	LFT-Ⅲ	タンデムAC	LFT-Ⅲ+タンデムAC
ヘッド側				
テール側				

参考文献

- 1) 竹内正道：LFT 軸受について，Koyo Engineering Journal, no. 127(1985)52.
- 2) 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.
- 3) 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).
- 4) 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).
- 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



大島宏之*

H. OOSHIMA

* 軸受・駆動事業本部 西部テクニカルセンター