

自動車用軸受の技術動向と展望

Technological Trends and Outlook of Automotive Bearings

横田邦彦 K. YOKOTA

Global awareness of environmental improvement has been growing in recent years, and therefore it is necessary to continue responding to environmental issues on an industry-wide scale. To achieve this, it is important to understand the evolution and transformation of motor vehicles precisely, as well as assess bearing technological trends that respond to this evolution and transformation, and advance the development of fundamental technology.

This paper presents the trends of automotive bearings and introduces the evolution of technologies for powertrain bearings, drivetrain bearings and chassis bearings which respond to these trends.

Key Words: automotive bearing, trends, bearing technology, tribology

1. はじめに

近年の地球規模での環境保全意識の高まりにより、産業界全体でも今後さらなる環境対応に取り組む必要がある。特に、自動車産業では非常に厳しい環境規制が設定されており、自動車に使用される軸受に対しても、自動車の効率向上によるCO₂削減に大きく貢献できる、低トルク化への要求が増加している。また、各自動車メーカーにより、パワーユニットはHV、EV、FCV、ディーゼル、エンジンダウンサイジング+ターボチャージャーなど多様化しており、その機能や性能を支える軸受とユニット製品の開発が重要となっている(図1)。

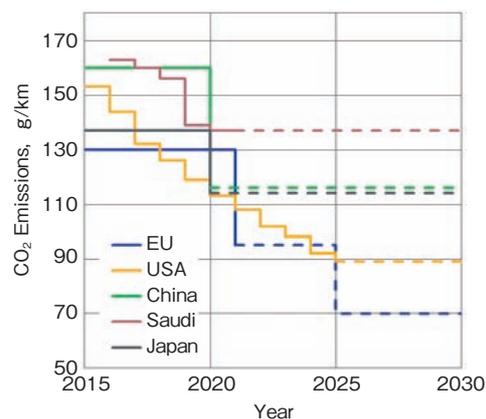


図1 自動車向けCO₂規制の推移
Transition of CO₂ restrictions for cars

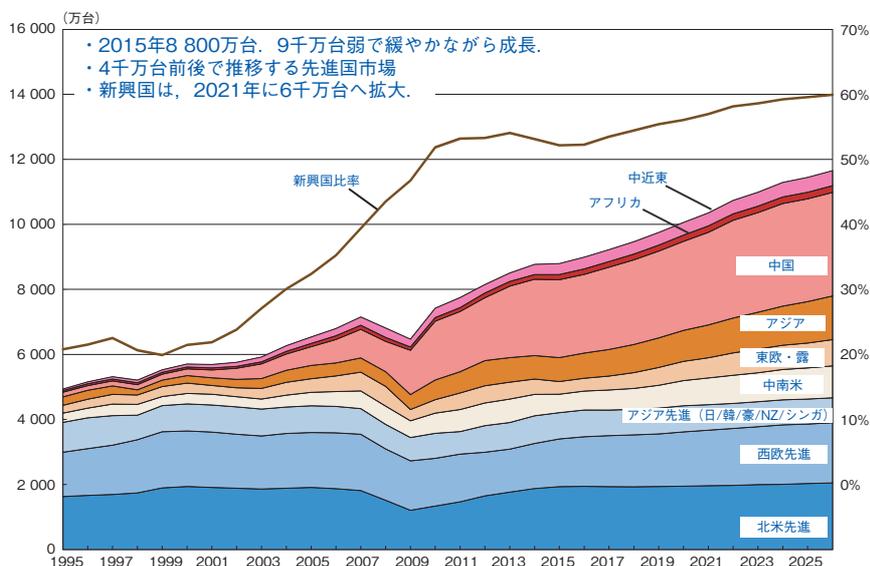


図2 グローバル自動車市場推移¹⁾
Global trend in automobile market

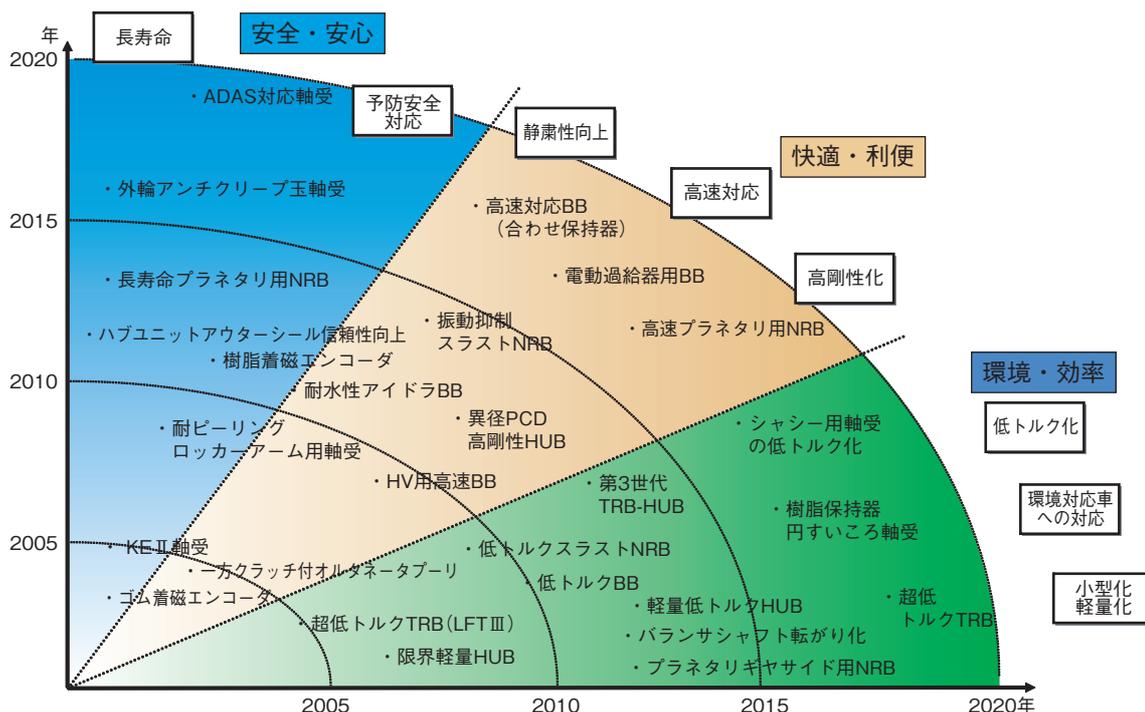


図3 自動車用軸受の開発動向
Technical trends of automotive bearings

一方、自動車のグローバル市場は、新興国での自動車普及に伴う市場拡大により、グローバル自動車販売台数は増加するが、先進国では大きく伸びないことが予想されている。自動車へのニーズは市場により大きく異なり、新興国では厳しい外部環境下での信頼性、また先進国では低燃費、軽量化とともに電動化・統合制御・先進運転支援システム（ADAS）の拡大であり、今後も市場の二極化が進むと考えられる（図2）。

本報では、このような状況下における自動車用軸受の開発動向、要求される機能・性能を満足する当社の軸受製品と評価技術をアプリケーションごとに紹介する。

2. 自動車用軸受およびユニットの動向

自動車に求められる使命は「安全・安心」、「快適・利便」、「環境・効率」に大別されるが、自動車用軸受の技術動向は、アプリケーションごとで異なる。本報では、3章以下で、パワートレイン、ドライブトレイン、シャシのアプリケーションごとに技術動向と対応技術を紹介する（図3）。また、軸受開発時の評価・検証方法においては、近年、シミュレーションの技術革新が進み、詳細かつ多様な検証に使用できるようになった。特に、実測が困難な潤滑剤の流れについては、流体解析により流

れの可視化および形状・流体物性・境界条件などの違いによる効果の数値化を行っており、軸受の低トルク化および長寿命化に寄与している。新たに開発した次世代超低トルク円すいころ軸受（LFT-IV）では、流体解析技術を適用することにより最適形状を決定し、開発期間の短縮と信頼性を向上できるようになった（図4）。

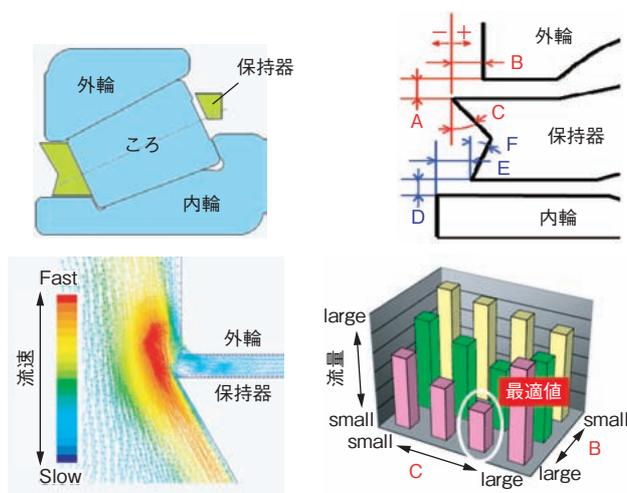


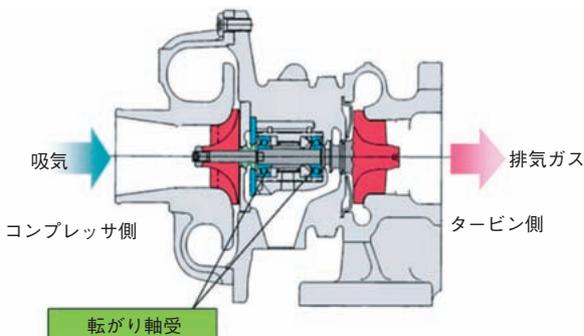
図4 流体解析による形状最適化
Shape optimization using fluid simulation

3. パワートレーン用軸受

燃費規制や排ガス規制に対応するため、自動車メーカーではエンジンのダウンサイジングや高効率化および、HV車の拡大に向けた取り組みがなされている。これに伴いパワートレーン用軸受には、さらなる低トルク化や高速化への対応が必要となっている。

欧州から始まったガソリンエンジンのダウンサイジングは、最近では国内でも進められ、すでに量産化されている。このダウンサイジングには、出力の不足を補うためにターボによる過給機技術が必須である。また、従来からディーゼルエンジンにもターボが使用されているが、燃費規制や排ガス規制対策としてターボ効率の向上が必要となっており、これに対応したタービンシャフト支持部への転がり軸受の採用が拡大している。

従来、ターボにはすべり軸受が使用されていたが、加速時の摩擦抵抗が大きく、過給圧の上昇までにタイムラグ（ターボラグ）が生じるため、運転者が感じるレスポンスの悪さに加え、燃費の悪化を招いていた。このすべり軸受を摩擦抵抗の小さい玉軸受に変更することにより、ターボラグが大幅に短縮され燃費が向上した。ターボ用軸受は、超高速（MAX20万回転）、高温（MAX350℃）の非常に過酷な条件で使用される。当社は、軸受内部の最適設計、軌道輪と保持器材料の耐熱性向上を図り、さらにセラミックボールを採用したターボ用玉軸受を世界で初めて実用化した。現在は、軸受とハウジングや間座をユニット化した玉軸受ユニットも開発しており、組み込み性の向上や性能の安定化も図っている（図5）。また最近では、ターボ効率向上のためにモータ駆動の過給機も開発されており、さらなる急加速高速回転に対応できる軸受の開発を進めている。



※東京モーターショー 2015 出展

図5 転がり軸受を適用したターボ構造例

Example of turbocharger structure with rolling bearing

次に、エンジンの高効率化の取り組みとして、可変バルブシステムが挙げられる。このシステムにはバルブのタイミング可変とリフト量可変の2種類があり、両システムともに電動化が進んでいる。電動アクチュエータの主軸や減速ギヤ部に玉軸受が使用されており、低トルク、耐フレッチング性、および高剛性が必要とされる。当社はこれらに対応して、低トルクで高剛性の軸受内部設計や清浄度を向上させた長寿命材料、耐フレッチング性に優れたグリース、および特殊熱処理などを適用した軸受を開発し量産化している（図6）。

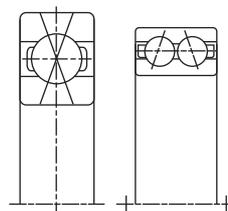


図6 電動可変バルブ用軸受（開発品）

Example of bearings for variable valve controlled by electric motor

補機による高効率化の取り組みとして、始動、発電、動力アシストを目的としたISG（Integrated Starter Generator）が量産化されており、その主軸支持用として玉軸受が使用されている。ここで用いられる軸受への要求性能としては、オルタネータ用軸受に求められる高温高速耐久性や耐振動剥離性、耐水性、低トルク性のほか、アイドルストップでの頻繁な始動や長期耐久性などがあり、これらを考慮した軸受設計が必要となる。当社は、独自の高性能グリースや高密封低トルクシール、低トルク保持器の開発によりISGの高性能化に貢献している（図7）。

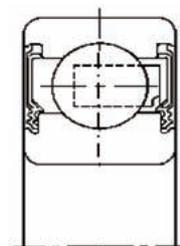


図7 ISG用軸受
Bearing for ISG

HV車では、低燃費、低コスト、高出力、およびコンパクトな駆動ユニットを実現するため、モータの高速化が進められている。それに伴い、軸受に対しても高速化のニーズが増しており、当社は油潤滑下で $d_m n$ 値^{*1} 200万を超える高速回転対応軸受を開発した(図8)。高速回転対応軸受には、新開発の高剛性樹脂保持器を採用している。この保持器は、剛性を上げるため、従来の片抱き形状から両抱き形状としており、高速回転時の遠心力による、保持器の変形に伴う玉との干渉を防止する設計とした。また、生産性を考慮して、同一形状の2部品を組み合わせた保持器とした。

*1 $d_m n$ 値：軸受の P. C. D. (mm) × 回転速度 (min^{-1})



図8 高速回転玉軸受
High rotational speed ball bearing

近年の地球環境問題に対応して、低燃費化対策として、すべり部位の転がり化のニーズはますます高まっている。特に、自動車のエンジンではすべり軸受が比較的多く使用されており、バランスシャフトもこの一例である。すべり軸受を適用していることから、オイルポンプで高い油圧を発生させて軸受部に潤滑油を供給する必要があるが、低速回転の領域では高圧とならない。このため、潤滑油の供給が十分できず、すべり摩擦の抵抗が大きいという問題がある。そこで、当社ではすべり摩擦の抵抗を低減する取り組みを提案している。図9は、回転トルクの測定事例である。

すべり軸受を転がり軸受に変更することで高い油圧が不要となり、オイルポンプの容量の低減が可能となることから、オイルポンプを小型化することができる。また、転がり軸受では低いトルクで起動できるようになるため、アイドルストップ機構を採用しやすくなる。これにより、エンジンがストップ状態となるため、大幅な燃費低減に貢献できる。

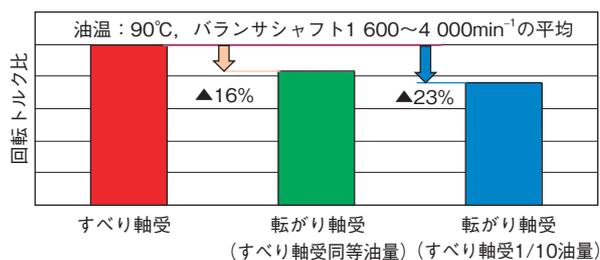


図9 バランスシャフト用軸受の回転トルク測定事例
Example of torque reduction

4. ドライブトレイン用軸受

昨今の電動化の流れにおいて、ドライブトレインで最も影響を受けているのは変速機構である。コンベンショナルなマニュアルトランスミッション (MT) やオートマチックトランスミッション (AT) からHVやFCV用変速機までさまざまな変速機構が使用されており、それぞれ改良が進められている。これらに用いられる軸受に求める性能もさまざまだが、基本はエンジンやモータの回転とトルクを伝える歯車軸を滑らかに支持することであり、回転トルクの低減は従来同様、ドライブトレイン用軸受の最優先課題となっている。

当社の主力製品である円すいころ軸受 (TRB) は変速機構に数多く使用されている。これはギヤのかみあいで発生するラジアルとアキシャルの両荷重に対し高い負荷能力を持ち、高剛性と省スペース化の両立を可能とさせるためである。その一方、損失トルクは比較的大きく、この短所克服のために当社は長期に渡り低トルク化に取り組み、その技術をLFT (Low Friction Torque) シリーズのI, II, IIIとして商品化してきた。

「超低トルク TRB (LFT-III)」は潤滑油によるかはん損失低減に着目して開発したもので、軸受内部に流入する潤滑油量の抑制により軸受損失を大幅に低減し、自動車の燃費向上に貢献してきた。この技術を進化させ、今後さらに厳しくなるCO₂規制に対応するため、徹底的にかはん損失低減を追及した「次世代超低トルク TRB (LFT-IV)」を開発した(図10)。設計自由度の高い樹脂製保持器を採用し、CAEを活用した油流れ解析による保持器形状の最適化で、当社の同サイズの「標準低トルク TRB」と比較して、最大50%以上の損失低減を実現した。



※東京モーターショー 2015 発表

図10 次世代超低トルク円すいころ軸受 (LFT-IV)
Next-generation super-low friction torque tapered roller bearing (LFT-IV)

また、ころ軸受の玉軸受化による低トルク化の方策として、タンデムアンギュラ玉軸受 (図11) や高アキシャル荷重対応玉軸受 (図12) を開発した。タンデムアンギュラ玉軸受は、同方向の接触角に異なるピッチ円直径を有する複列玉軸受構造で、特に低負荷領域での回転トルクを低減させた。この軸受は高い負荷容量と剛性を併せ持つことから、主にデファレンシャルドライブピニオン軸支持用として使用されている。前述の低トルク円すいころ軸受と組み合わせることにより、デファレンシャルの特性に合わせた軸支持構造とすることも可能となる。高アキシャル荷重対応玉軸受は、深溝玉軸受の内外輪の対角方向の肩高さを上げることにより、耐アキシャル負荷能力を向上させた軸受で、トランスミッションで大きなアキシャル荷重を受ける部位に使用できる。

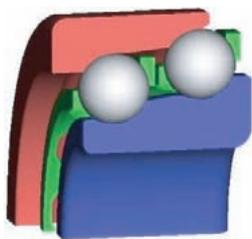


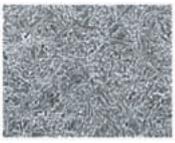
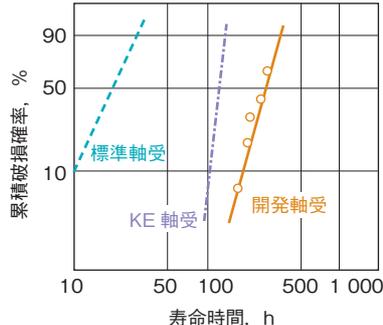
図11 タンデムアンギュラ玉軸受
Tandem angular contact ball bearing



図12 アキシャル荷重対応玉軸受
High axial load-compatible ball bearing

ドライブトレイン用軸受には、もう一つの大きな技術課題として耐異物性向上が挙げられる。これらの軸受は、変速機構におけるギヤのかみあい時の摩耗粉など、硬質異物を含むオイル潤滑下で使用される。このような環境下の軸受損傷モードは、異物のかみ込みによる圧痕の縁の突起部を起点とした表面起点剥離や摩耗を伴った表層剥離となり、標準軸受では清浄油中環境に対して1/2～1/10の短寿命となる。こうした課題に対し、材料と熱処理技術を新たに開発して長寿命円すいころ軸受 (KE, KE- II) を開発した (表1)。この軸受は高い耐異物性能を有し、異物油潤滑条件下での軸受の小型化を可能としている。

表1 標準軸受と長寿命 (KE- II) 軸受
Comparison of standard and long life (KE- II) bearings

		標準軸受	長寿命 (KE- II) 軸受
材料		SAE5120	KCr620 Si・Mn・Cr 適正化
熱処理		浸炭焼入れ・焼き戻し	高濃度浸炭焼入れ・焼き戻し
組織	微細炭化物	なし	平均 0.2 μ m, 面積比率約 10%
	外観		
異物混入油中寿命		 <p>累積破損確率, %</p> <p>寿命時間, h</p> <p>標準軸受 KE 軸受 開発軸受</p> <p>〔 荷 重 : Fr = 20.6 kN, Fa = 13.7 kN 回転速度 : 2 000 min⁻¹ 潤 滑 : ギヤオイル 85 W 90 異 物 : 硬度 830HV 0.06 wt % 硬度 700HV 0.06 wt % 〕</p>	

近年、自動車に求められる搭乗者の快適性のニーズは高まっており、多くの部品の複雑な集合体である自動車は、快適性を妨げるさまざまなノイズや振動 (NV) の発生源を持っている。ドライブトレイン内の転がり軸受は NV に影響を及ぼす部品であり、AT に使用されるスラスト針状ころ軸受 (図13) も含まれる。

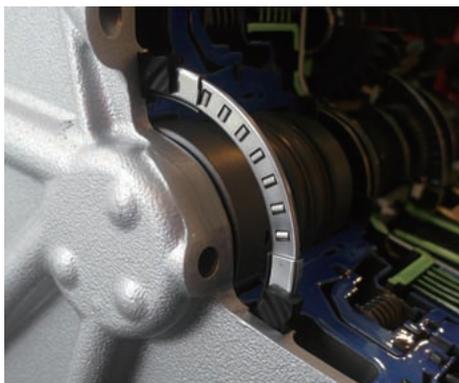


図13 オートマチックトランスミッション用スラスト針状ころ軸受

Thrust needle roller bearing isolator for automatic transmission (AT)

当社では AT 内での振動の伝達に着目し、軸受単体での振動伝達低減による NV 特性の向上を目的として、振動抑制スラスト針状ころ軸受の開発に取り組んだ。軸受のハウジング間に減衰特性に優れた高分子材料を用い、肉厚や振動伝達の減衰効果が大きい溝の形状(図14)を工夫したアイソレータを配置することで、NV 特性を向上(図15)することが可能となり、自動車の搭乗快適性への貢献が可能となった。

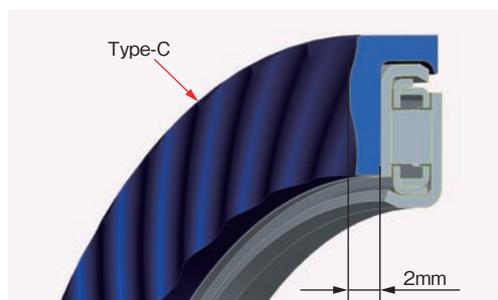


図14 振動抑制スラスト針状ころ軸受
Isolated needle roller bearing

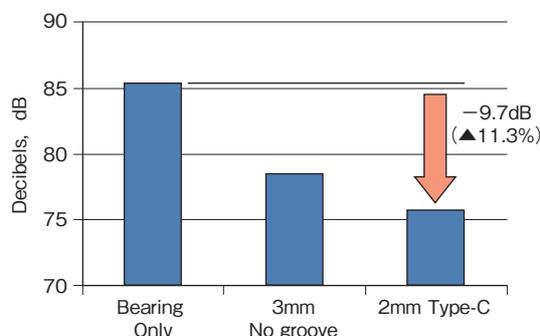


図15 NV 特性の向上効果
NV-related benefits

5. シャシ用軸受

ホイール用軸受は、図16に示すようにアンギュラ軸受を2個合せすることで、ラジアル荷重と両方向のアキシアル荷重を負荷でき、外輪が一体化された第1世代から、取り付けフランジなどの周辺部品を取り込んだ第3世代のハブユニットまで進化している。特に、第3世代ハブユニットは軸端かしめや ABS センサを内蔵することで、自動車メーカーでの組立ラインにおける煩わしい予圧やギャップ調整の手間の省略に貢献できるユニット軸受である。

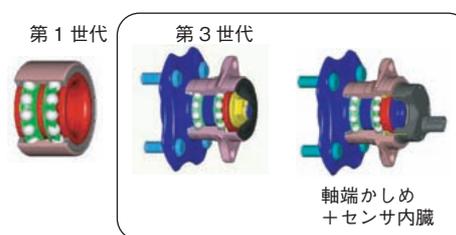


図16 ホイール用軸受の進化
Evolution of wheel bearing

自動車の燃費向上には、自動車の重量の低減が効果的であることが知られており、そのためハブユニットへも小型化や軽量化への要求が依然として厳しい。ハブユニットの軽量化と強度・剛性は相反する設計要素であり、安易な軽量化設計は強度・剛性を低下させてしまう。第3世代ハブユニットは、ナックルとの取り付けフランジ、およびブレーキロータ・ホイールとの取り付けフランジを一体化しており、ナックルやブレーキロータも含めてモデル化し、高精度 CAE による連成解析を行い、強度・剛性・軽量化のあらゆる視点からの最適化設計を進めている。

重量低減と同様に、タイヤの転がり損失低減も自動車の燃費向上のための必須技術であり、その一要因である、ホイール軸受の回転トルク低減も必要となっている。ハブユニットの回転トルクは、クルマの足回りという泥濘・泥水などから、軸受機能を維持するためのシールトルクと、軸受部のトルクに二分される。シール部分については、シールのゴム材質の材料特性を模擬した超弾性解析にて、最適形状を検討し、リップしゅう動トルクを低減したダブルアキシアルシールを開発した(図17)。さらに、自動車需要が著しく増加しているアジア・ロシアでの泥濘路や極寒地などの過酷な環境での信頼性を確保しつつ回転トルクを低減するため、当社の伊賀試験場

を活用して、タイヤからの泥水かき上げによるハブユニットの被水状況を解析し、その結果によりデフレクタ構造を開発した。シール周辺の被水環境の改善を行うことで、リップの簡素化を実現し（図18）、さらなるシールトルクの低減を達成している。

軸受部の損失トルクについては、軸受部の予圧の最適化以外に潤滑にも着目し、グリースの基油として低粘度合成油を使用し極低トルク性能を有するハブユニットを開発した。

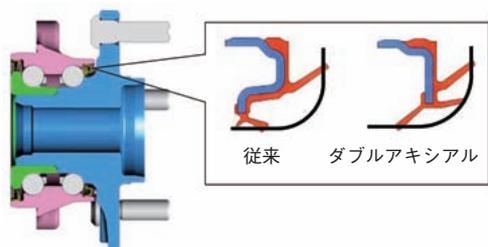


図17 ハブユニット用シール構造
Structure of seal for hub unit

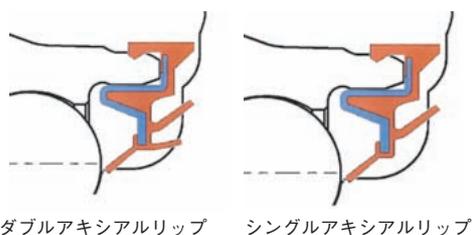


図18 デフレクタ構造
Structure of deflector

以上、述べてきたハブユニットは、主として乗用車用の玉軸受タイプであるが、ピックアップトラック用のホイール軸受にも、従来のTRBの2箇使用から、TRBタイプのハブユニットが採用されている。

SUV やピックアップトラックは未舗装路での走行も多い車両で、乗用車に比べさらに過酷な環境で使用されるため、シール性などを含めて、非常に厳しい寿命・耐久性が要求される。加えて、車両燃費向上のための軽量化・低トルク化は、乗用車向けと同様に強いニーズとなっている。それらのニーズに応えるため、当社の円すいころ軸受で培ってきた軌道クラウニングや内輪つば部のトルク損失を低減できるLFT技術の採用、高密封・長寿命シール、軽量化技術などを採用した、第3世代TRBハブユニットも量産している（図19）。



図19 第3世代 TRB ハブユニット
Third-generation TRB hub unit

また次世代の技術として、運転者が自ら運転環境をモニタリングするレベル1 / レベル2より、運転環境を自動でモニタリングするレベル3 / レベル4へ移行していく自動運転技術の進展が著しい。この分野についてもハブユニットはタイヤの最も近くに配置され回転しない外輪を持つという特徴を生かして、路面環境をモニタリングするセンシングシステムの開発や4輪独立でタイヤの回転速度制御が可能なインホイールモータ開発などにおいて、着実に車両の技術進展動向に対応した新技術の開発を進めている。

6. おわりに

当社は、将来に向けて地球規模での環境保全と、自動車の利便性を両立できるように技術開発を進めてきた。新興国では、一般的なガソリンエンジンやディーゼルエンジンの車両が引続き大部分を占めると考えられており、これらの地域で使用される自動車は排出するCO₂の低減が重要であり、当社もトライボロジー技術をさらに深化させ追求していく。一方、先進国では、HV・EVなどの拡大によるBy Wire化への対応技術が市場に投入され、またADASなどで自動車機能が急速に高度化することも予想されており、軸受技術だけではなく当社が有するステアリング技術や駆動関連技術と融合したNo. 1 & Only Oneの技術を目指して開発に取り組んでいく。全ての利用者を安全に目的地まで移動させ、最新の技術でより快適な運転ができるような自動車社会の未来予想図の一部でも描くことができるように、軸受製品の開発を通じて貢献し続けていく。

* 1 LFT は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 田中八智代：グローバル自動車市場と技術の新潮流，株式会社 FOURIN，(2016)2, 3
- 2) 河村基司：自動車用軸受の最新技術動向，機械設計 第60巻(2016)1
- 3) 耕田寛一：自動車駆動系円すいころ軸受の小型・低トルク化によるCO₂削減技術，月間トライボロジー No. 338(2015)10
- 4) 山海陽一郎他：Achieving Low Torque by Applying Low Viscosity Synthetic Grease to Hub-unit Bearing, International Tribology Conference, Tokyo 2015
- 5) 村上正之, 高橋 譲, 岡本大輔：JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1011(2013)39
- 6) J. BRUBAKER：JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1011(2013)45
- 7) 脇阪照之, 芝田英夫, 中島 雄, 高田淑人：JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1011(2013)49

筆者



横田邦彦*
K. YOKOTA

* 執行役員