

自動車用軸受の技術動向と展望

Technological Trends and Outlook of Automotive Bearing

横田邦彦 K. YOKOTA

The automotive industry is said to be facing a once-in-a-century time of major change, as represented by the key words of CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric). Among these, further enhancement of bearing performances in response to expanding electric motorization and also new mechanisms and sensing technologies for advancing autonomous driving technologies are required.

This paper introduces JTEKT's automotive bearing technologies responding to these needs.

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

1. はじめに

自動車業界は、電動化や自動運転、コネクテッドカー、シェアリングといったキーワードで語られる 100 年に一度の変革期を迎えているといわれており、この変革に対応することが、自動車メーカーや自動車部品メーカーの大きな課題となっている。

このうち特に電動化は構造的な変化をもたらし、当社軸受製品において最も強い影響を受けるキーワードである。この電動化を後押ししているのは言うまでもなく世界規模の環境規制であり、たとえば欧州ではこれまでの

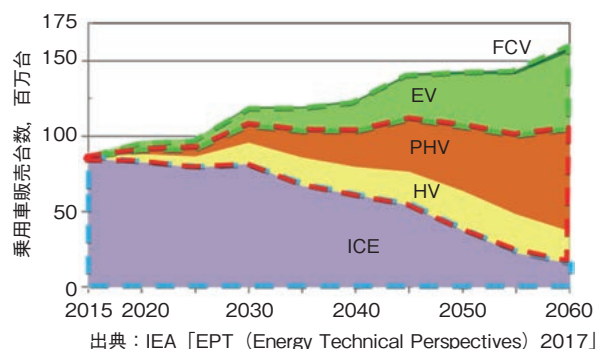


図1 世界の車種別販売台数の将来予測
Global car sales forecasts by car type

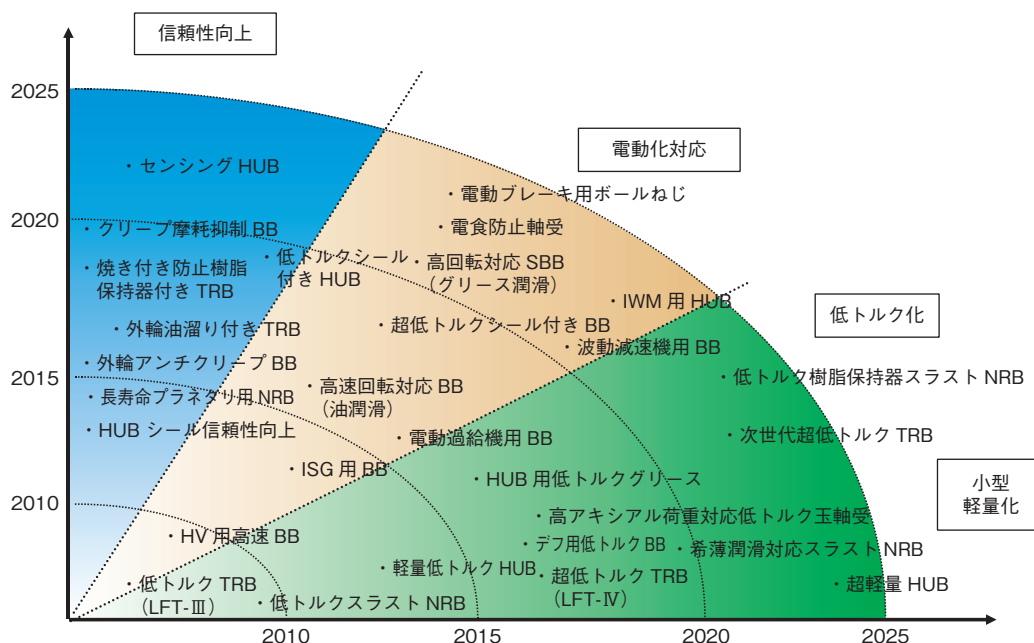


図2 自動車用軸受の開発動向
Development trends of automotive bearings

CO₂ 排出量 130g/km が 2021 年には 95g/km となる。また各国でのゼロエミッション車や新エネルギー車規制、販売奨励策により、EV/PHV/HV といった電動車は 2030 年には世界乗用車販売台数の 35% まで増加すると予想されている (図 1)。

この電動化に伴って軸受に求められる性能も変化している。たとえば EV/PHV/HV の電動化パワートレーンでは従来のエンジン車に比べて格段に高い回転速度への対応や、新たな課題である電食への対応も必要とされる。また軸受構成やプロポーシヨンの変化とともにさらなる低トルク化や小型・軽量化が必要とされる。

一方、今後の伸びが予想される新興国市場でのエンジン車やグローバルで拡大する PHV/HV など、エンジン搭載車も大きな比率を占めている。これらエンジン車用軸受の信頼性や低トルク化への取り組みも欠かすことはできない。さらに広い意味での電動化、すなわちモータによる制御の高度化対応など、従来とは一線を画す製品開発も行っている。

本報ではこのような電動化の流れに対応した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 (図 2)。

2. パワートレーン用軸受

2.1 電動化パワートレーンへの対応

電動化の動きの中で最も大きく変化したのがパワートレーンであろう。PHV/HV のようにエンジンとモータを併用するものや、EV のようにモータ出力のみを駆動力として伝えるものがある。いずれも従来には無かったモータを動力源とした電動化パワートレーンで、今後大

幅に増加していくと予想されている。

この電動化パワートレーンは出力のモータ依存度が高くなるにつれ、高出力化と小型・軽量化のためのモータ高速回転化ニーズが高くなっている。このニーズに対応するため、当社では高速回転対応玉軸受を開発した (図 3)。従来の玉軸受は高速回転になると遠心力によって保持器が変形し、保持器と玉との干渉による発熱から軸受の焼付きに至っていた。これに対し高速回転対応玉軸受は同一形状の樹脂部品を組み合わせた両抱きタイプの保持器とし、高速回転時の遠心力による保持器の変形を抑制し玉との干渉を無くすことで発熱を抑えた。これにより油潤滑下で $d_m n$ 値*1 200 万を超える高速回転への対応を可能とした (図 4, 5)。

※ 1 $d_m n$ 値：軸受の P.C.D. (mm) × 回転速度 (min⁻¹)



図 3 高速回転対応玉軸受
High rotational speed ball bearing

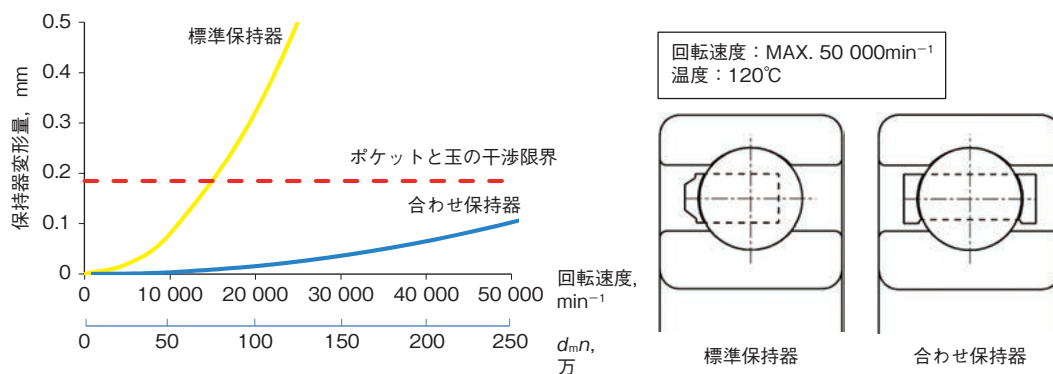


図 4 高速性 (保持器変形) 評価結果
Results of high-speed performance (cage deformation) evaluation

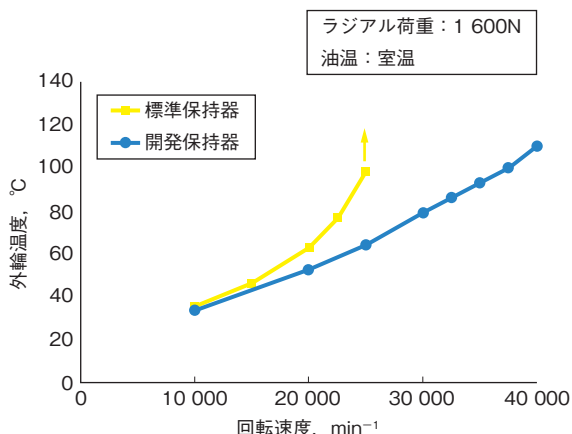


図5 高速性（外輪温度）評価結果
Results of high-speed performance (outer ring temperature) evaluation

また、モータ用軸受は使用環境が従来のギヤ支持軸受と異なり、モータが発生する電位差により内輪と外輪の間に電流が流れることがある。電流が流れた内輪と転動体、転動体と外輪の接触面では電食と呼ばれる損傷が発生し（図6）、損傷が進むと異音や早期破損に至る可能性がある。

産業機械用ではこれまで絶縁によって電気を流さない方策として、樹脂モールドやセラミックのコーティングを施した軸受やセラミック玉軸受などを製品化しているが（図7）、自動車用としてはコストや耐久性、量産性に課題がある。そこで、当社では電動パワートレーン用として従来に無い特殊なコーティングを外径面に施した電食防止特殊コーティング玉軸受の開発も進めている（図8）。

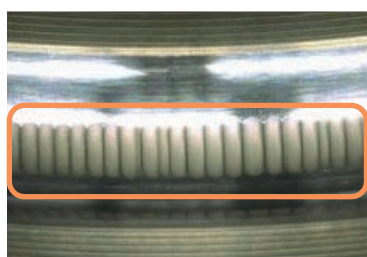


図6 軌道の電食
Electric pitting on raceway

タイプ	樹脂モールド	セラミックコーティング	セラミック玉
形状			
特性	コスト	△	×
	耐久性	△	○
	量産性	△	○

判定 ○:非常に良い, ○:良い, △:普通, ×:悪い

図7 現行の電食防止軸受
Existing electric pitting preventive bearing



図8 特殊コーティング軸受

Ball bearing coated with special coating for preventing electric pitting

2.2 ギヤトレーンへの対応

電動化パワートレーンの減速機構だけではなく、現行のAT/MT/CVTなどのギヤトレーンにはギヤを支えるために多くの軸受が使用されている。これらの軸受はユニットの効率化のために、低トルク化と小型・軽量化が求められる。特に電動化パワートレーンではモータの高速回転化への対応と相まって薄肉タイプ玉軸受のニーズが高いが、寿命やクリープ摩耗と言った耐久性の課題があった。

ギヤトレーンに使われる軸受は通常ユニットに封入されたオイルで潤滑される。そのため長期間にわたる使用に伴い、ギヤなどの摩耗粉が軸受内部に侵入し、軸受寿命が低下する可能性があった。この対策として、軸受サイズをアップしたり、軸受内部への摩耗粉などの侵入を防ぐためにシール付き仕様とすることが考えられる。ただし、サイズアップは小型・軽量化ニーズに、シール付きは低トルクニーズに反する方向となっていた。

この課題に対応するために、高速回転にも対応できる低トルクシール付き玉軸受を開発した。シールリップ形状を最適化することで、シールが軸を締め付ける力を低減し、シールトルクをほぼ半減した（図9、図10、

図11). また、シールによる耐異物寿命向上効果に伴う軸受小型化により、従来の開放型軸受と比べ、約50%の軽量化が可能となった(図12, 13).

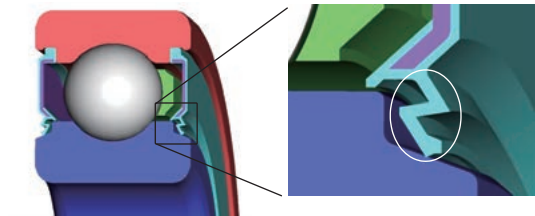


図9 超低トルクシール付き玉軸受
Ball bearing with ultra-low torque seal



図10 CAE 解析結果
Results of CAE analysis

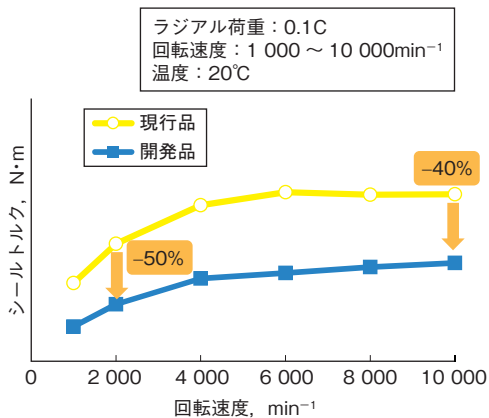


図11 シールトルク評価結果
Results of seal torque evaluation

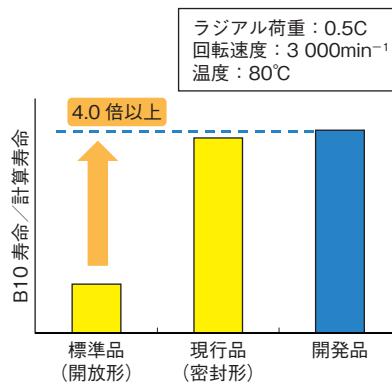


図12 異物寿命試験結果
Life test results in contaminated oil

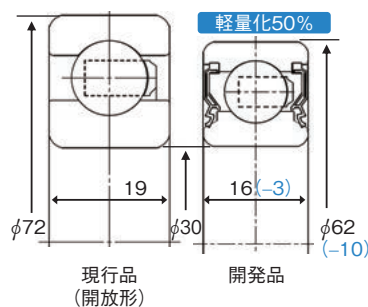


図13 軽量化例
Example of weight reduction

薄肉タイプ玉軸受のもう一つの課題として、大きなラジアル荷重が付加された場合、ひずみクリープが発生しやすいことが挙げられる。ひずみクリープとは一般的な内輪回転の場合、転動体が外輪を通過する際に外輪のひずみとハウジングとの固着が連続的に発生することで、ハウジングに対して軸受回転方向に外輪が回転する現象である(図14)。クリープが発生すると、軸受とハウジングとの間で摩擦が進行し、軸芯のずれや傾き大により異音や早期破損に至る可能性がある。

従来の対策は外輪ひずみを抑えるために外輪の肉厚を厚くしているが、これは小型・軽量化には逆行し、ユニットの大型化や質量増加を伴っている。この課題解決のためにクリープ発生メカニズムをCAEと実験検証により定量的に解析し、外輪の外径中央部に極浅い溝を設ける構造を世界で初めて採用した(図15)。この溝により玉と外輪軌道の接触点から外輪外径とハウジングとの接触部までの距離を従来対策の軌道肉厚アップ品と同等とすることで、ハウジングに及ぼす外輪ひずみの影響を小さくした(図16, 図17)。本開発品により従来のような外輪の厚肉化が不要となり、減速機の小型・軽量化を可能とした。

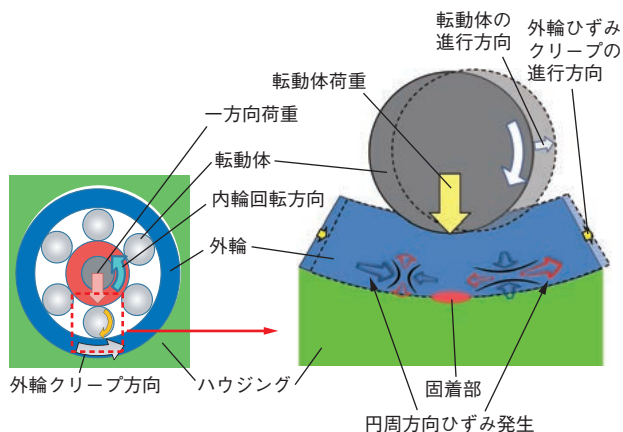


図14 クリープ発生メカニズム
Mechanism of creep occurrence



図15 クリープ防止軸受
Anti-creep bearing

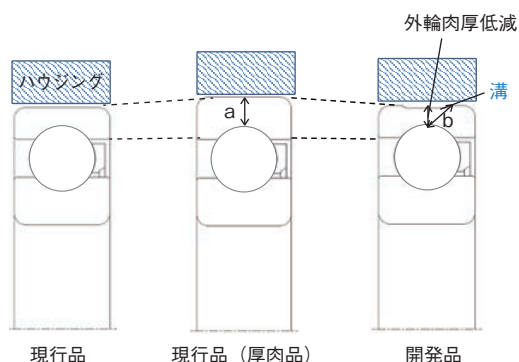


図16 開発品の特長
Characteristics of developed bearing

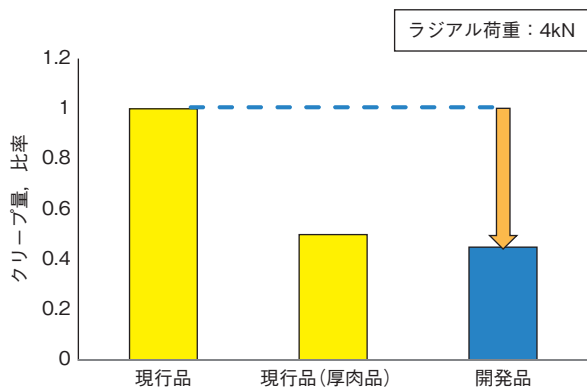


図17 クリープ量比較
Comparison of creep amount

前述の通り、電動化パワートレインは玉軸受が多く使われるが、高出力化された最終ギヤ支持部など、玉軸受ではサイズが大きくなってしまふ場合がある。これに対して円すいころ軸受は高い負荷能力を持つことから、玉軸受の代わりに円すいころ軸受を適用すると大荷重部位では軸受の小型・軽量化が可能となる。ただし玉軸受に対し回転トルクが大きい、耐焼付き性が劣るといった課題があり、当社では以前よりこの課題克服のための技術開発を行ってきた。特に電動化パワートレインの場合、潤滑油はユニット効率向上のため低粘度かつ少量化されており、軸受の潤滑性が課題となる可能性がある。この対応として耐焼付き性も向上した超低トルク円すいころ軸受 LFT-IVを開発した(図18)。

当社円すいころ軸受は低トルク化に取り組み、その技術を LFT (Low Friction Torque) シリーズとして商品化してきた。LFT-IVでは設計自由度の高い樹脂製保持器を採用、軸受内への油流入抑制機能を強化することで回転トルクを標準品比 65% 低減を実現した。加えて保持器に設けた油保持溝により軸受回転停止時に油を溜め、回転開始時に排出することで、従来品と比べて無給油焼付き時間 3 倍を実現した(図19)。

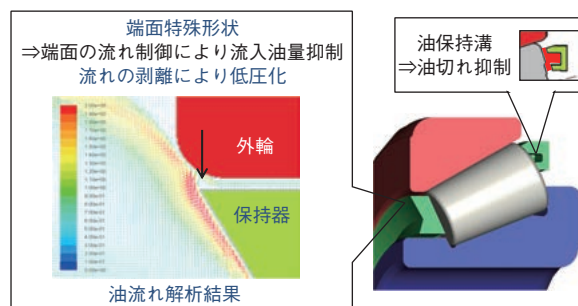


図18 超低トルク円すいころ軸受 LFT-IV
Super-low friction torque tapered roller bearing (LFT-IV)

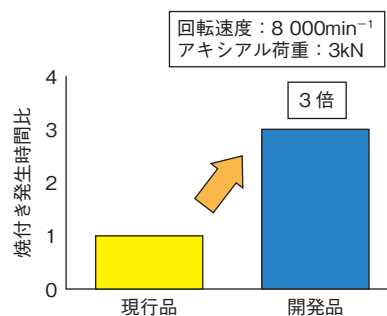


図19 焼付き試験結果
Seizure test result

さらに、大きなギヤ荷重を玉軸受で回転支持する技術として、内外輪の形状を左右非対象とした高アキシャル荷重対応軸受を開発した(図20)。具体的にはアキシャル荷重負荷側の軌道深さを拡大することで、耐アキシャル荷重性として従来品比1.8倍を実現した。また、アキシャル荷重容量同等の場合、現行の深溝玉軸受よりも外径を15%縮小できる(図21)。さらに潤滑油中異物による軸受寿命低下や、油のかくはんによるトルク損失増大という課題に対して、保持器形状の改良で軸受内貫通油量を制御し、軸受内を貫通する異物量と油のかくはん抵抗を低減した(図22)。これにより許容荷重が同等の深溝玉軸受に対し損失トルクを最大48%低減した(図23)。

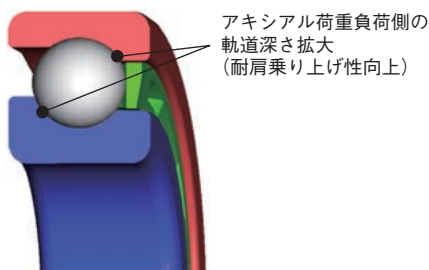


図20 高アキシャル荷重対応玉軸受
High axial load-compatible ball bearing

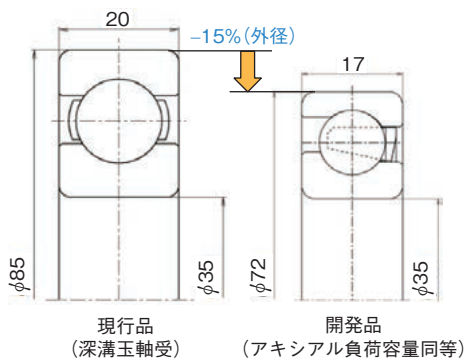


図21 小径化例
Example of downsizing

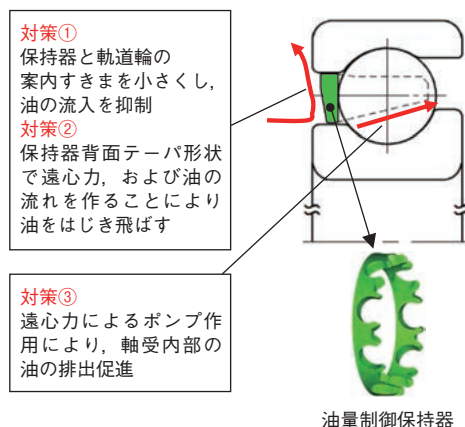


図22 油量制御保持器
Oil quantity controlling cage

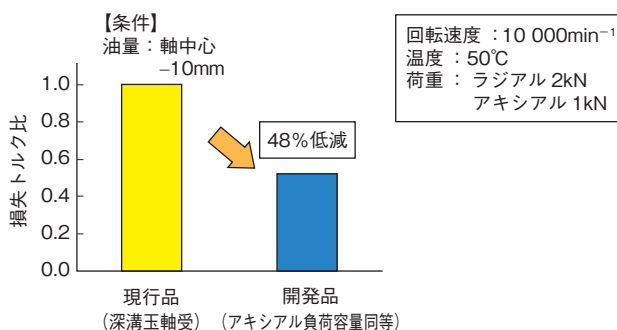


図23 トルク比較
Torque comparison results

プラネタリギヤ用軸受でもユニットの小型・軽量化を可能とする技術開発を進めてきた。プラネタリギヤ機構はエンジンとモータの動力切替部やモータ効率向上のための変速機能を持っており、その内部にはラジアル保持器付き針状ころ軸受とプラネタリシャフトが用いられている。ユニットの軽量化のために軸受部の小型・軽量化ニーズがあるが、軸受の小型化は負荷容量の低下につながり、軸受寿命が不足するといった課題が発生する。当社ではこのような課題に対してプラネタリシャフトに独自の特殊熱処理を施した長寿命軸受を開発しているが、今回さらに表面改質技術を適用させた超長寿命軸受(図24)を開発した。

特殊熱処理により軌道面の高硬度化と残留オーステナイト量の適正化を図り軸受の長寿命化を実現し、さらにプラネタリギヤ機構の小型・軽量化を目的とした、キャリアとのかしめ固定にも対応するため端部の低硬度化も行った。加えて軌道面に表面改質を施すことで軌道面の表面硬度のさらなる向上、および表層部に高残留圧縮層を形成させ、亀裂進展を抑制した。この結果、従来品に比べ5倍の超長寿命効果を実現した(図25)。これに

より最大 40% の軸受幅の小型化やプランナリ機構のピニオン数削減の検討が可能となり、ユニットの小型・軽量化に貢献できる (図 26)。

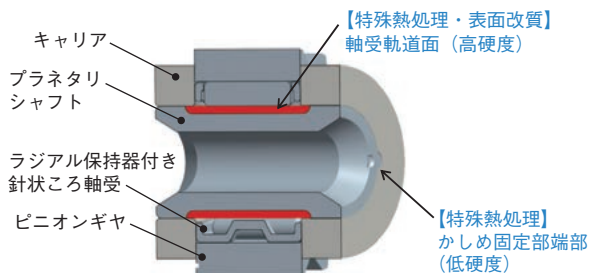


図24 プラナタリギヤ用超長寿命軸受
Super-long life bearing for planetary gear

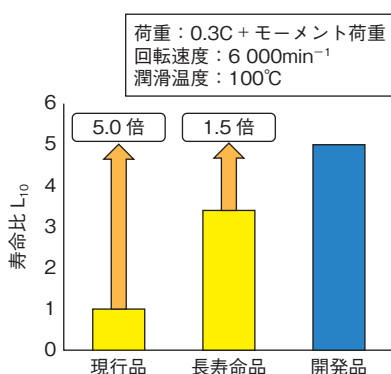


図25 軸受寿命比
Comparison of bearing basic rating lives

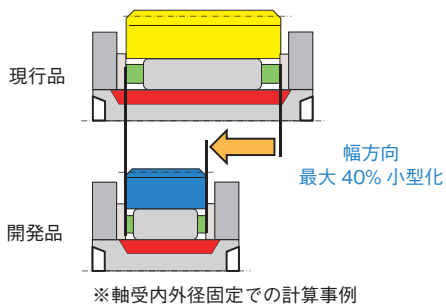


図26 軸受小型化イメージ
Image of bearing downsizing

2.3 エンジンへの対応

新興国市場でのエンジン車や PHV/HV などエンジン搭載車の比率は高く、エンジンの高効率化は引き続き重要課題である。この課題解決の一つとして、エンジンの吸気をよりち密にコントロールする可変バルブタイミング機構が挙げられる。

従来の可変バルブタイミング機構はエンジンの油圧を利用した油圧制御のため、エンジン回転数、温度による応答速度に限界があった。この課題克服のために油圧駆動に代えてモータ駆動とする機構が増加してきている。モータ駆動には応答速度向上によるバルブタイミングの最適制御を可能としたり、エンジンが低温/低回転時でも制御を可能とするなど、高出力化と低燃費化が可能となる。

可動機構には減速比の大きいモータ減速機が採用されているが、その代表事例として薄肉タイプ玉軸受 (図27) を用いた波動減速機構の原理を示す (図28)。内輪はだ円軸に圧入された円に変形しており、玉を介して外輪が変形して軸が回転することで変形位置が変動する。単純な変形解析となる内輪に対し、外輪は繰り返し曲げ疲労強度の検証が必要となるが、当社では CAE (図29) と実験検証により高い信頼性を持つ軸受を提供している。



図27 波動減速機用薄肉タイプ玉軸受
Thin section ball bearing for wave reduction gear

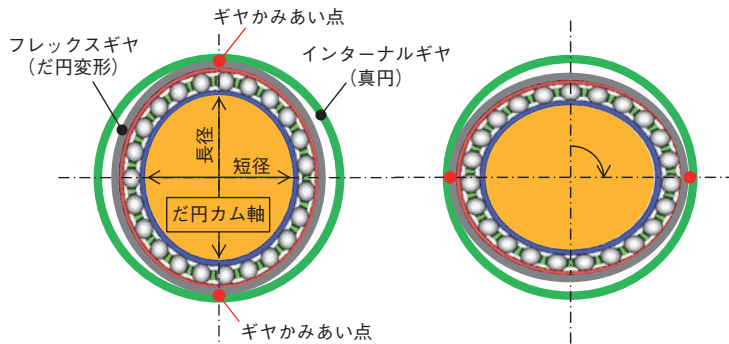


図28 波動減速機の原理
Principle of wave reduction gear



図29 CAE 解析事例
CAE analysis examples

エンジン車の燃費向上技術として知られるエンジンのダウンサイジングは過給システムが必須である。最近ではさらなる燃費向上を目的に、従来の排気を利用するターボチャージャに電動過給機を追加し、ターボラグの解消などによるターボ効率の向上を図った過給システムの高度化が図られている。この電動過給機には、モータ軸を支持する2個の玉軸受が使用されている。この軸受は、グリース潤滑で使用されるが、超高速・急加減速回転の非常に過酷な条件下で使用されるため、従来の軸受では潤滑不良による短時間での焼付きが発生していた。今回、当社が開発した電動過給機用玉軸受（図30）は、高速回転に適した内部設計、保持器やシールリップ形状の改良、当社独自の高速回転用グリースにより、従来品に対して、1.5倍以上の長寿命化を達成している（図31）。



図30 電動過給機用玉軸受
Bearing for electric supercharger

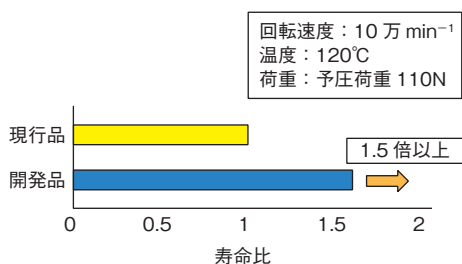


図31 耐久試験結果
Durability test result

エンジンの効率向上として、ここで述べた電動化のみではなく、カムシャフトやバランスシャフト、ターボチャージャなどすべり軸受を転がり軸受に替える‘転がり化’にも取り組んでいる。これにより単なるトルク低減だけではなく、すべり軸受で必要とされてきた油圧発生のためのポンプ削減や油路廃止など副次効果も期待できる。当社としてはエンジンに対する高効率化についても今後も引き続き積極的に取り組んでいく。

3. シャシ用軸受

ハブユニット（図32）は車両のホイール内に配置され、車両重量を支えつつホイールを支持するユニット軸受である。電動化の流れの中でもホイール軸受は必要不可欠であり、燃費だけでなく電費向上のためにもハブユニットの損失トルク低減は強く求められている。ハブユニットは「円滑にタイヤを回転させる機能をもつ軸受」と「タイヤにかきあげられた泥水を軸受内部に浸入させないシール」とで構成されており、トルク損失として「軸受転がり抵抗」と「シールしゅう動抵抗」とがある。各々の損失抵抗低減策として、低トルクグリースと低トルクシールの開発により、ハブユニットのトルクを半減した（図33）。

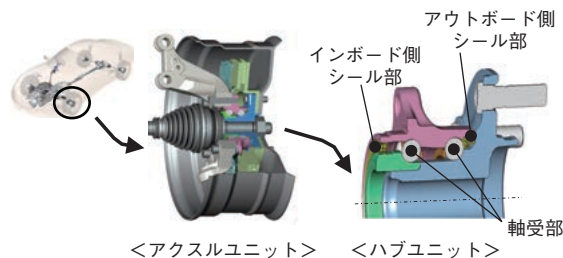


図32 ハブユニット
Hub unit

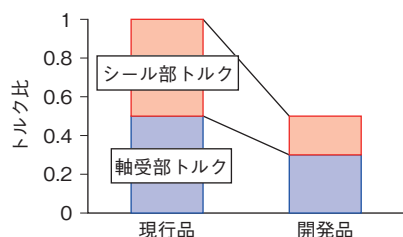


図33 ハブユニットトルク
Hub unit torque

まず、低トルクグリースの開発においては、軸受転がり抵抗は、基油の粘性抵抗、軸受の転がり滑り抵抗、およびグリース自体のかくはん抵抗に大別される。この三つの損失に対し方策を講じることで、低トルク化を実現した。

①基油の粘性抵抗には基油の動粘度が支配的なため、軸受の高面圧下でも油膜厚さが確保できるように考慮しつつ動粘度を極小化した。

②軸受の転がり滑り抵抗については界面の摩擦係数に着目し、摩擦係数低減のため基油の分子構造を見直した。また、摩擦係数が油膜厚さに相関があることから、転がり滑り抵抗の寄与度の高い低速域で厚膜化できる添加剤を処方した。

③グリースのかくはん抵抗を下げるためには、ちょう度を増大（軟化）させればよいが、グリースの流動性が上がることからシール部からのグリース漏れなどの背反がある。そこでちょう度を上げず、グリースのせん断抵抗を下げるができる特殊な増ちょう剤を採用した。

次に、低トルクシールの開発においては、トルク低減にはしゅう動抵抗を低減する必要があるが、これに加えて、極寒冷地市場やインフラ未整備市場で問題となるアウトボード側シールしゅう動面のさび発生を抑制する必要がある。シールしゅう動面にさびが発生するとリップ摩耗から泥水浸入により軸受寿命が低下してしまう。こ

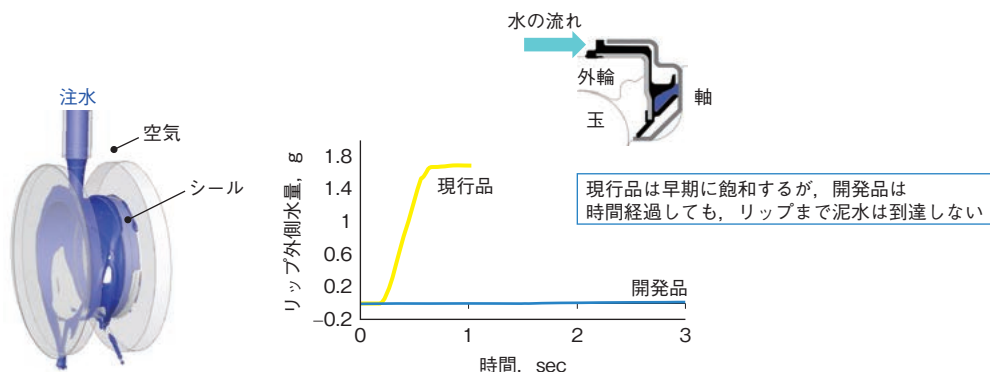


図34 流体解析結果
Results of fluid analysis

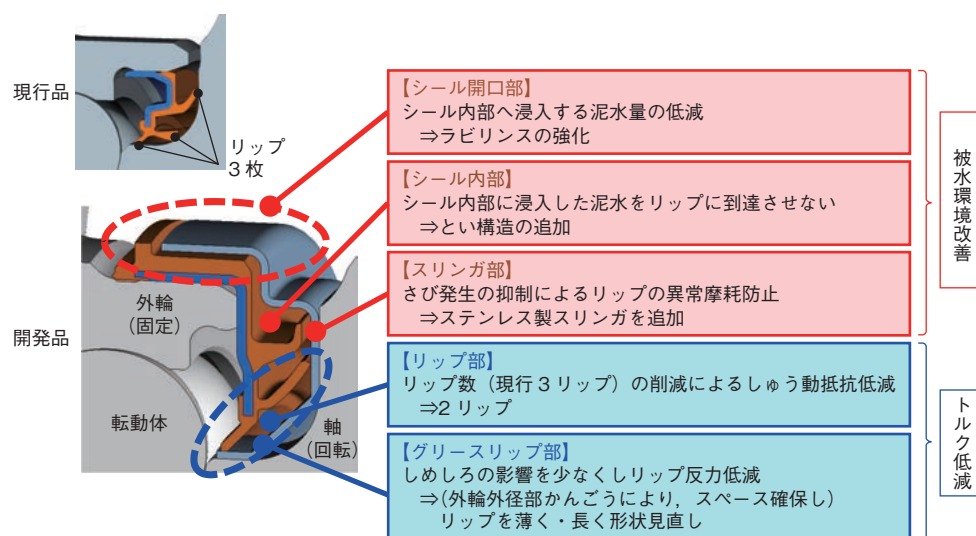


図35 アウトボード側シール 開発ポイント
Development points of seal on the hub unit outboard side

の二つの課題対応として、リップ周辺の被水環境を改善することを目的に流体解析(図34)を行い、これまで確認できなかった水の流れ方向と流量を数値化した。その結果を基にシールの周辺構造も考慮し、五つの改善点(図35)によりアウトボード側シール単体で、現行品と比べて75%の低トルク化と、泥水環境下でのシール寿命の大幅な向上を実現した。

4. 今後の展望

ここまで電動化への対応を中心に、さまざまな低トルク化技術や小型・軽量化技術の開発動向を述べたが、電動化とともに当社軸受製品に大きな影響を及ぼすのが自動運転と考えられる。自動運転については、普及の前提となるインフラ整備や法規制などの課題は残っているものの、技術的進歩は著しく、現在ではSAEレベル2(運転の主体が運転者にある部分的な自動化)まで実用化されている。完全自動化には安全性が最重要課題であり、高度な車両制御技術が必要となる。車両制御の精度向上には、路面情報の把握が重要となることから、当社ではハブユニットを生かした路面情報検出システムの開発を目指している。当社製品で路面に最も近い製品であるハブユニットから素早く情報を得ることで、車両のライントレース性向上やブレーキ制御などへの活用が期待できるものと考えている。

さらにブレーキ部位で自動運転に貢献できる技術としてボールねじの開発も行っている。HVなどではエネルギー回生と協調制御された電動ブレーキブースタ(EHB: Electro Hydraulic Brake)などが市場に投入され始めているが、近い将来、EVなどに適した油圧源不要の電動キャリパ(EMB: Electro Mechanical Brake)なども市場投入されると予想される。ボールねじはモータの回転運動を直線運動に効率よく変換する機構として有望であり、モータの小型化などに貢献できる。

当社ではEMBがブレーキ制動時に必要とするストロークが小さいことに着目し、機能を限定した非循環ボールねじを開発している。通常のボールねじに必要なチューブなどのボール循環機構を廃止し、内部に複数のばねを配置した(図36)。ボール転がり運動を妨げることなく高効率を維持し、メンテナンスフリーのグリース潤滑下において十分な耐久性を確保している(図37)。EVなどでは、電線のみでつながったブレーキ・パイ・ワイヤとなるため、電池搭載スペースや居住スペースの確保

が容易となり、自動運転の実現にも大きく貢献できるものと考えている。

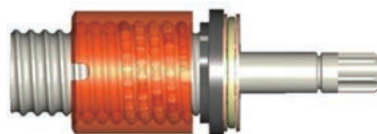


図36 非循環ボールねじ外観
Appearance of non-recirculating type ball screw

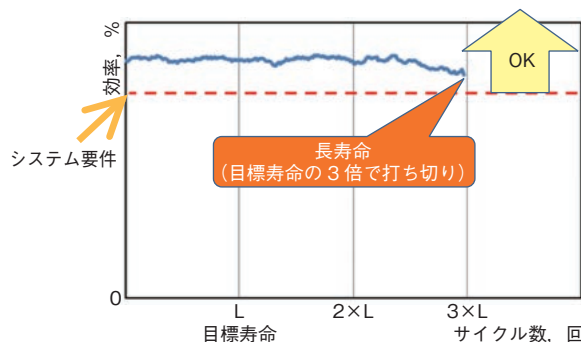


図37 耐久試験結果
Durability test result

5. おわりに

100年に一度の大変革の時代、自動車のあり方は大きく変化しようとしている。本報ではその変化として電動化と自動運転への対応を紹介した。電動化対応技術である高速回転玉軸受やクリープ防止玉軸受などは、いずれもエネルギー低減、ひいては地球環境に貢献するものであり、自動運転対応技術であるセンシングハブユニットなどは暮らしを便利にする技術である。

今後、究極の環境自動車といわれるFCVや完全自動運転車など、ますます高度化した機構やシステムが必要となってくる。当社固有のトライボロジーを深化させ、低トルク化や小型・軽量化技術だけではなく、各種センシング技術やアクチュエータなどを用いたシステム製品開発にも注力していく。

大変革時代の自動車の変化は、人々の暮らしを安全で便利に、そして豊かなものに変えていく。我々軸受メーカーはこの変化にしっかりと対応し豊かな暮らしを支えていきたい。

* LFTは、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 三宅一徳, 津田武志, 吉崎浩二: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1015(2017)25.
- 2) 谷口洋三, 梅野剛: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1015(2017)49.
- 3) 谷山宗久, 小谷一之, 中島義仁, 佐藤崇彦: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1014(2016)54.
- 4) 石井康彦, 神保友彦: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1014(2016)59.
- 5) 山根伸志, 荻本健治: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1014(2016)64.
- 6) 岡本大輔, 鈴木章之, 合田友之, 内藤光一郎: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1014(2016)69.
- 7) 河村基司: 自動車用軸受の最新技術動向, 機械設計, Vol. 60, No. 11(2016)35.
- 8) アビームコンサルティング: EV・自動運転を超えて“日本流”で勝つー2030年の新たな競争軸とはー, 日経BP社(2018)

筆者



横田邦彦*

K. YOKOTA

* 常務執行役員