

## 転がり軸受技術の動向と展望

### Trends and Future Views on Rolling Bearing Technology

北村昌之 M. KITAMURA

In line with recent trends toward diversified technical development, JTEKT has promoted the development of bearings not only by further developing its fundamental technology in areas such as material, heat treatment, and tribology but also by developing units and modules through combining bearing technology with technology in such other areas as sensing or control. Concerning automotive bearings, new devices and functions for integrated vehicle control and technology for more efficient engine systems and drivetrain systems have been developed. Concerning industrial bearings, compact bearings for windmill power generators, high-speed bearings for machine tools and other bearings have been developed.

JTEKT will continue efforts to contribute to people and industries around the world by further developing bearing fundamental technologies and quickly providing new products that meet the needs of customers in such vital areas as environment, safety, user pleasure, productivity, and maintenance.

**Key Words:** automotive bearing, industrial bearing, trend, bearing technology

#### 1. はじめに

近年、技術開発を取り巻く環境は、省エネルギーや環境負荷物質低減に代表される地球環境対応技術をはじめ独創性のある新技術開発やグローバルで通用する高品質、およびコスト競争力確保のためのモノづくり革新など、ますます多様化している。

このような中において、当社における転がり軸受の技術開発は、材料・熱処理・トライボロジー・精密加工などの基盤技術はいうまでもなく、センシング技術・制御技術など他の技術との融合やユニット化・モジュール化、およびそれらを効率的に開発するCAEなどを対象としている。さらに、将来をより正しく予測し評価できる技術企画の充実、独創性をもちリーダーシップを発揮できる人材の育成やそれを活かせる職場風土の改革にも取り組んでいる。

本報では、自動車とインダストリ（自動車以外の産業分野）について、それぞれの技術動向とそれに対応する当社軸受技術の動向と展望、という視点で述べてみたい。

#### 2. 自動車軸受およびユニットの動向と展望

まず、『安全』、『環境』、『快適』という3つの基本命題に分類して、それぞれについて自動車と軸受の技術動向を図1に示す。

##### 2.1 『安全』への対応

事故を未然に防止する予防安全技術の重要性が高まる中、車両の安全性向上の観点から制動・駆動特性をコントロールするABS、トラクションコントロール、さらに、ステアリングも加え車両運動を統合的に制御する、いわゆる車両運動統合制御など、「走る」「曲がる」「止まる」を統合して制御するシステムが量産化され、ますます進化している。

当社では、その統合制御車両に適用できる各種の技術開発に取り組んでおり、その例を図2に示す。ステアリングホイールの回転量とラックの直線運動の関係（ギヤ比）を変化させることが可能なアクティブステアリング用アクチュエータ、車両前後のトルク配分を制御するITCC<sup>®</sup> (Intelligent Torque Controlled Coupling)、車両左右車輪のトルク配分を制御する左右トルク配分機構、そして、軸受技術としては、タイヤにかかる力やグ

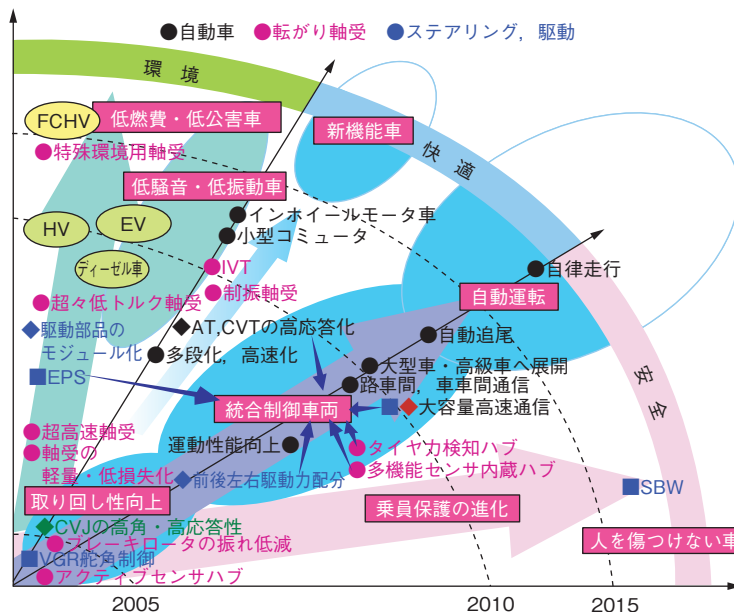


図1 自動車の技術動向  
Automobile technical trends

リップ力をリアルタイムにセンシングするハブユニットがある。これらにより、統合制御車両に必要な要素技術の確保が可能となり、お客様に対して車両ニーズを先取りしたデバイスや機能の提案ができると考えている。

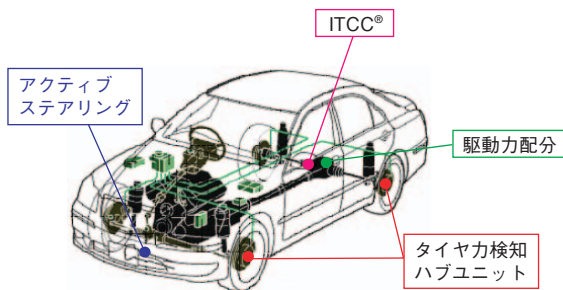


図2 車両統合制御への対応技術例  
Examples of integrated vehicle control technology

2.2 『環境』への対応技術

『環境』という基本命題に対し、燃費改善を目的として、ディーゼル車、HV車、EV車、さらにはFCHV車といった低燃費・低公害車の技術開発が進められている。今後も地球や社会の環境問題への対応から、燃費改善に対するニーズは強まってくると考えられ、それに対する当社の軸受の現状と将来について述べる。

2.2.1 パワートレイン系

まず、CO<sub>2</sub>の排出が少ないディーゼルエンジン用軸受の開発例を述べる。ガソリンエンジンより回転変動が

大きい直噴ディーゼルエンジンでは、補機ベルトのスリップ音やベルト寿命低下が課題である。その対応策として、補機類の中でも慣性モーメントの大きいオルタネータに一方クラッチを内蔵させ回転変動を低減するワンウェイクラッチプーリ(図3)を開発し量産している<sup>1)</sup>。また、小型ディーゼルエンジンの低出力を補うためターボチャージャとの組合せが必須となってきているが、更なる効率化や加速応答性の向上のためにタービンロータ軸支持をすべりから転がりに変更する動きがある。当社ではガソリンエンジンターボ用にセラミック玉軸受(図4)を開発し量産しているが<sup>2)</sup>、より使用環境条件の厳しいディーゼルターボ用にも適用するために改良を続けている。

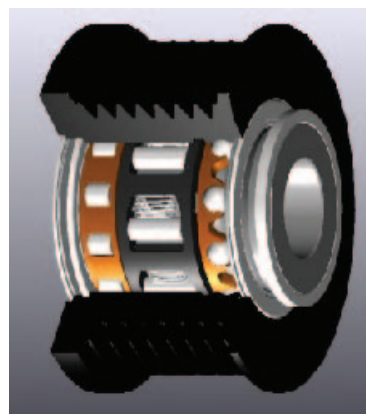


図3 オルタネータ用ワンウェイクラッチプーリ  
One-way clutch pulley for alternators

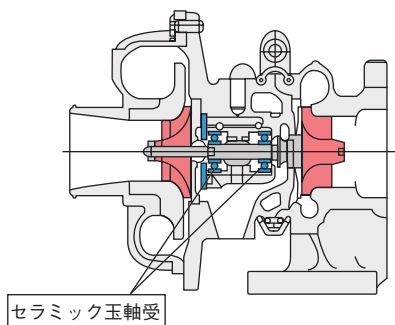


図4 ターボチャージャ用セラミック玉軸受  
Ceramic ball bearings for turbochargers

ガソリンエンジンでは、低燃費、高出力に対応する技術として可変バルブタイミングや可変リフトといったバルブ機構が進化している。その主要部品であるロッカアームの転がり化に対し、針状ころを転動体としたローラフォロア（図5）では、内部諸元の最適化により、特に摩擦損失の大きい低速域での回転トルクを低減させる技術を確認してきた<sup>2)</sup>。今後、エンジン内部における転がり化の実用化に向けた開発を進めていく。

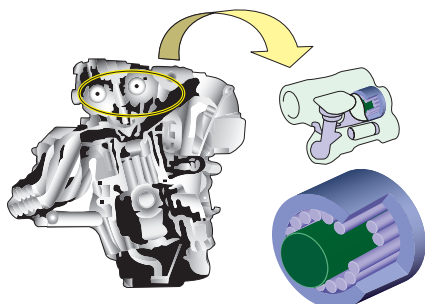


図5 ローラフォロア  
Roller follower

### 2.2.2 ドライブトレーン系

ドライブトレーン系においても、高効率化、小型・軽量化とともに、ハイブリッド車用ドライブトレーンへの軸受の対応も進んでいる。

まず、高効率化においては、当社は円すいころ軸受やスラスト針状ころ軸受などの低トルク化に長年取り組んでいる。

円すいころ軸受は、他の軸受形式と比較し大きなラジアル、アキシアルの両方向荷重を受けることが出来るため、コンパクト化に有効であるが損失トルクが大きいという課題がある。その対応としては、つば~ころ間のすべり接触状態の改良、軌道形状の最適化、転がり粘性抵抗を低減したLFT-I、LFT-IIが量産されているが、

新たに、潤滑油のかくはん抵抗、接触角、ころ構成(径、長さ、数)などに着目し、一般的な玉軸受よりも低トルクの世界トップレベルの円すいころ軸受(LFT®-III、図6)を開発し量産化を開始した。この軸受の燃費向上への効果は、リヤデフに採用した場合、ECモードで約2%が期待できる。

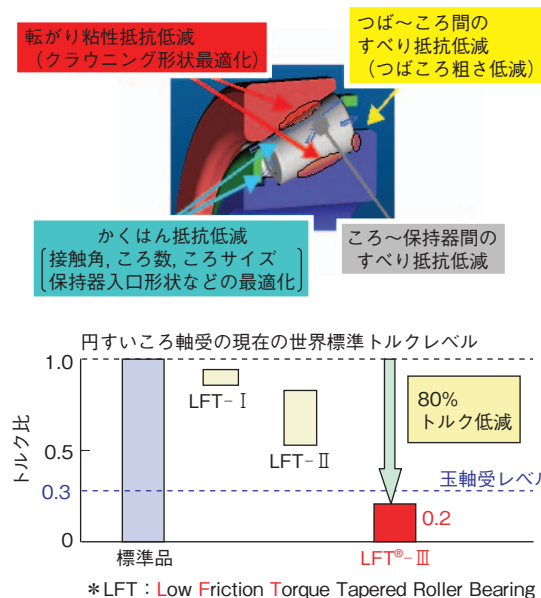


図6 低トルク円すいころ軸受とその効果  
Low-torque tapered roller bearing and its benefits

スラスト針状ころ軸受はその構造上、レース~ころ間ですべりが発生し、回転トルクが比較的大きい。その回転トルクを軸受内の要因で分析すると、ころ~保持器間のしゅう動抵抗が最も大きいことが分かる(図7)。このしゅう動抵抗を低減するため、ころとのすべり量を減少させた保持器形状の採用とこれを可能とするプレス加工技術の開発により、寿命・高速性・耐摩耗性を損なうことなく、低トルクを実現したスラスト針状ころ軸受を開発した(図8)。軸受にかかる荷重は比較的小さいが使用個数が多いATに適用した場合、約0.3%の燃費向上が期待できる。

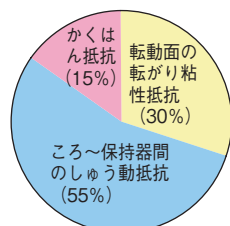


図7 スラスト針状ころ軸受の回転トルクの損失要因比  
Rotational torque loss factors for thrust needle roller bearings

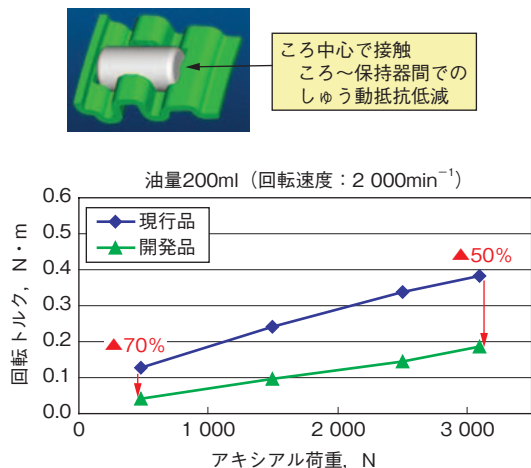


図8 開発品の特長とその回転トルクの低減効果  
Developed bearing's features and rotational torque reduction effect

今後は、これまで述べてきた軸受単体での高効率化のみならず、ユニット視点での高効率化がますます求められていくものと考えられる。たとえば、ハウジングでは軽量化（アルミ化、マグネシウム化）が進行しており、軸受にとってはその温度変化に伴うハウジングの寸法変化が問題となる。寸法変化による軸受予圧変化により予圧過大となり損失トルクが大きくなるといった問題が発生する。この問題への対応例としてピニオン軸支持軸受をユニット化したピニオンユニット軸受（図9）を開発し量産化している。このような軸受のユニット化とともに軸受自身に予圧を一定に保つ機能をもたせた予圧補正軸受などの開発も進めていく。

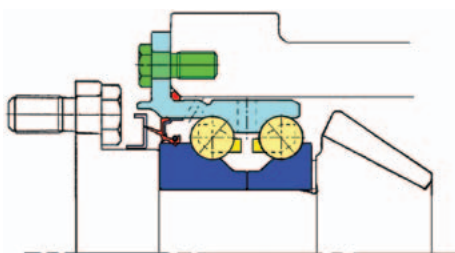


図9 ピニオンユニット軸受  
Pinion unit bearing

小型・軽量化への対応については、軸受単体での長寿命化による小型・軽量化が進んでいるが、今後の動向として、駆動ユニットアセンブリでのCAEを活用した小型・軽量化が進展すると思われる。

当社の取組み事例として、軸受単体や軸受に接する部品だけでなく、軸受周辺の軸やハウジングの剛性を考慮した多軸系の剛性解析事例を紹介する。この解析事例で

は軸受内部の負荷状態（転動体の荷重、接触角、差動すべり、スピンなど）を求め、軸受の寿命や摩擦トルクなどの性能を解析している。

自動車用5速マニュアルトランスミッションを対象とした3軸の解析モデルを図10に、その解析結果の例として、1速負荷時における軸心のたわみ曲線を図11に、軸受の平均寿命を図12に示す。図12などをもとに、最適の軸受仕様と過剰品質にならない適切なサイズの軸受の選定が可能となる。

さらに、この剛性解析結果に、潤滑油粘度、潤滑油量を考慮してトランスミッションケースでの軸受組付け位置の誤差（芯ずれの例：図13）があるときの軸受の摩擦トルクの解析結果を図14に示す。この結果から、軸受のトルク損失を最小にするトランスミッションケース設計や軸受内部設計を提案することが可能となる。

今後は、デザインインを通じて対象ユニットを拡大し、最適な周辺構造や軸受を提案していく。

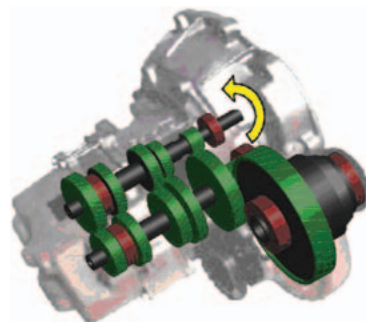


図10 解析モデルのイメージ  
Analysis model

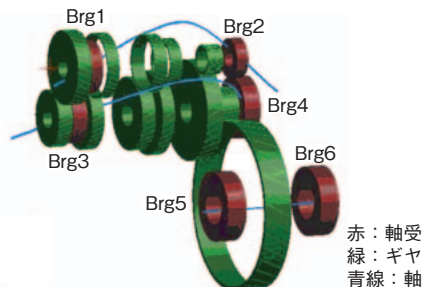


図11 軸心のたわみ曲線  
Deflection curve of shaft center

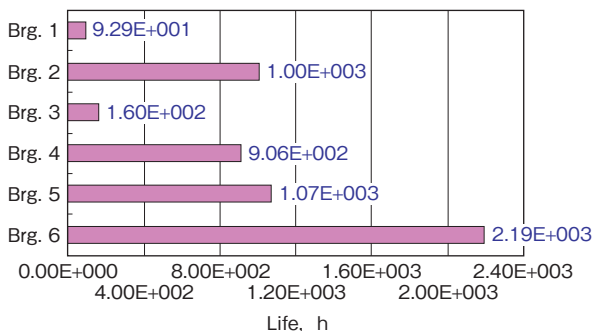


図12 軸受の平均寿命  
Average life of bearing

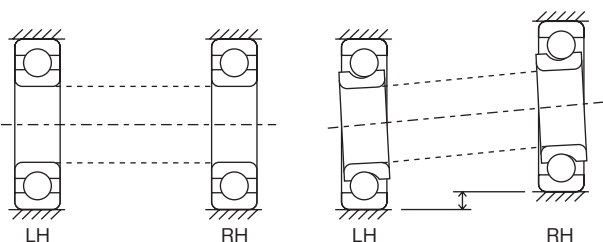
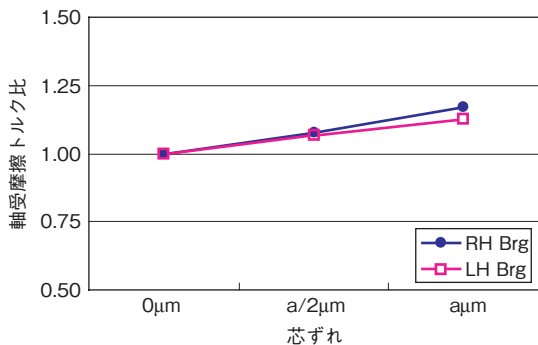


図13 軸受組付け誤差（芯ずれ）の模式図  
Schematic view of bearing assembly error (center dislocation)



(a: 図面公差最大値)

図14 芯ずれと軸受摩擦トルクの関係

Relation between center dislocation and bearing friction torque

最後に、ハイブリッド車 (HV) への軸受の対応を紹介する。ハイブリッド車では、低燃費かつ低コスト、高出力・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おり、それに伴い支持軸受（玉軸受）に対しても高速化へのニーズが増大している。玉軸受を高速で使用すると、その樹脂保持器は高速回転による遠心力と発熱からポケット部の変形がおり、玉との間で焼付きが発生することもある。この対策としてCAEによる高速回転時の変形解析や油流れの実験解析とともに生産性を考慮した全く新しいタイプの組合せ樹脂保持器を開発した。これにより、コスト増加を抑制しつつ、高速化を実現した（図15）。

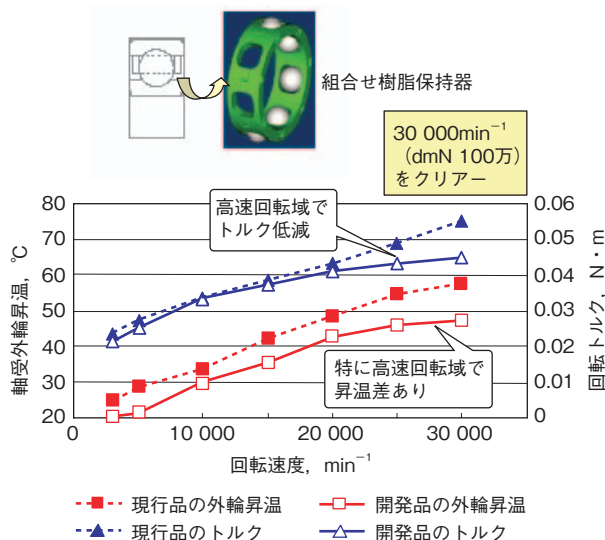


図15 組合せ樹脂保持器とそれを用いた玉軸受の効果  
Matched resin cage and benefit of use in a ball bearing

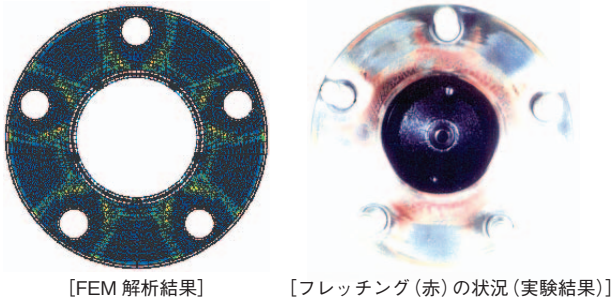
### 2.3 『快適』への対応

振動・騒音については、近年、静粛性向上に加え、音質もますます重要な自動車の商品性のひとつになり、燃費改善技術との両立が求められている。

軸受の対応としては、前述のディーゼルエンジンの補機ベルト異音を低減するオルタネータ用ワンウェイクラッチプーリの他、以下に述べるハブユニットのフランジ接合面で発生するスティックスリップ音を防止する形状設計手法などがある。

スティックスリップ音は、ハブユニットのフランジ面とブレーキロータの接合面での接合部品の剛性分布の違いによる微小相対すべりにより、接合面が摩耗（フレッチング）し、摩擦係数が低下することにより発生する。その領域の仕事量を計算することでフレッチングを防止する設計を行うことが可能となる。この仕事量のFEM解析結果は、実験結果とも一致するため、設計検討段階でスティックスリップ音を防止する有効な手段となった（図16）<sup>3)</sup>。

今後は、軸受単体での異音、快適性向上対策だけではなく、上記のように周辺部品にまで視点を広げた解析による技術を提供していく。



[FEM 解析結果] [フレッチング(赤)の状況(実験結果)]

図16 FEMによるフレッチング解析結果  
Fretting analysis result by FEM

### 3. インダストリー用軸受の動向と展望

ここでは、自動車以外の産業をインダストリーと称し述べてみたい。インダストリーにおける軸受の使用領域は非常に広く、大きさではトンネル掘削機用でφ7mを越えるものからモータ用の内径φ1mm以下まで、回転速度ではdmN値400万を越える高速域まで、さらに通常の生活環境から半導体製造装置のような超クリーン環境や航空機用ジェットエンジンのような高温の環境まで、広範囲にわたっている。

鉄鋼設備、風力発電機、工作機械を中心に、技術動向を図17に示す。

インダストリーにおける基本命題は『環境』、『生産性』、『安全・メンテナンス性』の3つがある。

#### 3.1 『環境』への対応

インダストリーにおいても、風力発電や太陽光発電など自然エネルギーを活用した発電装置や排出ガスが出ない燃料電池、省エネルギータイプの工作機械など、『環境』に対する技術革新は目覚ましい。

軸受は、これらのあらゆるニーズに個々に対応しているが、本報では、近年、急拡大している風力発電機用軸受について紹介する。

地球温暖化防止に貢献する自然エネルギーの利用が高まり、発電効率の優れた風力発電機による発電量がますます増加している。それに伴い2MWを超える大容量大型発電機の開発が進んでいる。

その主軸用軸受には、コンパクト、剛性向上および設置工数の削減が要求され、ハウジングの剛性(図18)を考慮して、コンパクトで動的、静的強度が最大となる超大型軸受(外輪外径:1000mmより大)を開発した。また、発電機用軸受には絶縁性能に優れたセラミック軸受を適用して電食(軸受内の電流通過による転がり接触部の表面が局部的に溶融する現象)を防止し、発電機の信頼性向上を図っている<sup>4)</sup>。

今後は、大型化や海上などの設置場所の多様化に合わせた、コンパクト化・高剛性化軸受の開発を推進していく。

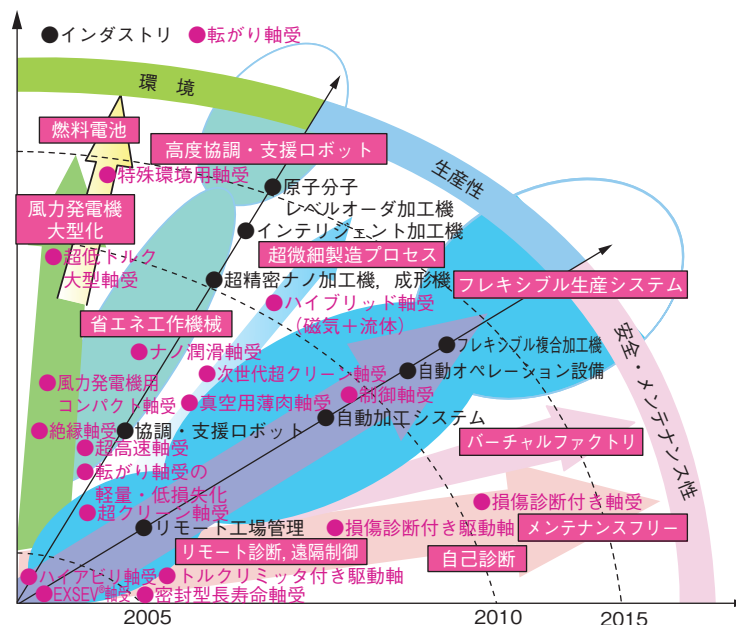


図17 インダストリーの技術動向  
Technical trends of other industries

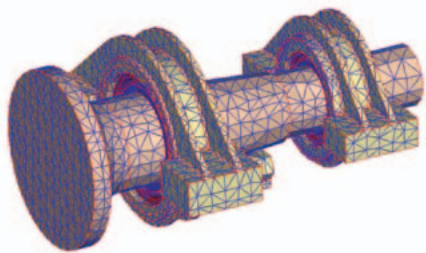


図18 ハウジングの剛性解析  
Stiffness analysis of housing

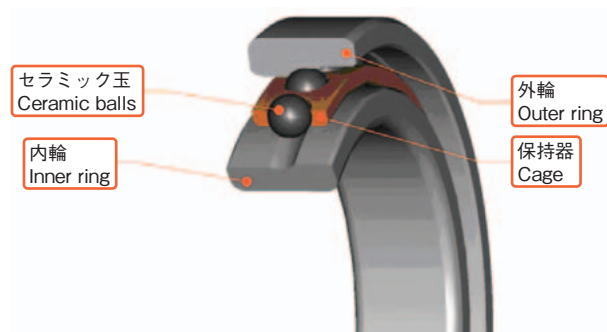


図19 ハイアビリーアングュラ玉軸受  
HIGH ABILITY angular bearing

### 3.2 『生産性』への対応

あらゆる産業の重要な命題である『生産性』の向上は、自動加工システムから自動オペレーションシステムやフレキシブル生産システムへの進化とともに、個々の設備においても、高速化、高精度化、高効率化が進んでいくと思われる。

本報では、軸受の用途が多岐にわたる工作機械における、軸受による対応について述べる。

工作機械の加工精度や加工効率に直接影響を及ぼす主軸用軸受の性能向上は非常に重要である。特に、低速域における重切削から高速域における軽切削に対応するマシニングセンタの主軸用軸受には「高剛性」と「高速性」の両方が不可欠である。また、オイル飛散の抑制・低騒音・省エネルギーなどの環境負荷低減も重要視されている。

これらに対応するため、ハイアビリーアングュラ玉軸受(図19)を開発し、主軸をオイルエア潤滑からグリース潤滑に置き換えることを可能にした。これは潤滑装置の廃止、主軸構造の簡素化による低コスト化にも貢献している。現在、高速対応可能でグリース潤滑軸受と同様な扱いが可能な軸受の要求にこたえるため、潤滑装置一式を軸受部に内蔵し、極微量の潤滑油が必要な時、必要な箇所だけに供給するナノ潤滑軸受(図20)を開発中である<sup>5)</sup>。

また、今後、更なる高速化・高負荷化への対応として、高精度軸受、長寿命軸受の開発を推進していく。

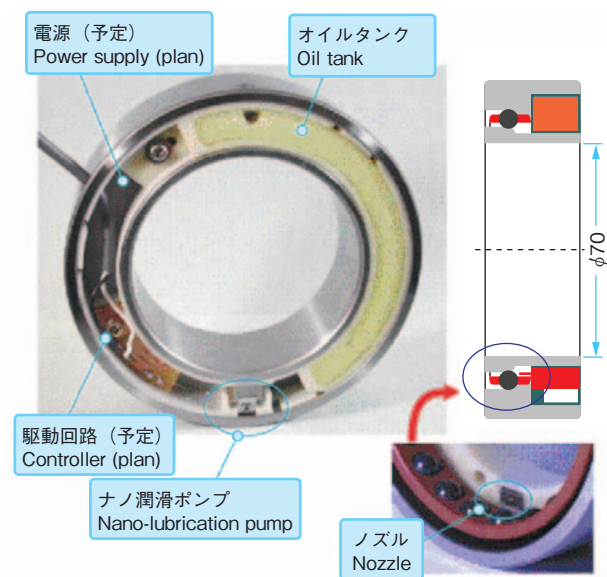


図20 ナノ潤滑軸受  
Nano lubrication bearing

### 3.3 『安全・メンテナンス性』への対応

生産設備の『安全・メンテナンス性』では、リモート診断・遠隔操作から自己診断、さらには、メンテナンスフリーへと進化しつつある。特に、メンテナンスが生産に及ぼす影響が大きい鉄鋼生産設備ではそのニーズは強い。

ここでは、鉄鋼設備について軸受の対応を述べる。

鉄鋼材料はきわめて広い分野に利用されており、現在でもその市場は年数パーセントの成長を遂げている。その鉄鋼設備は、生産性向上のため、使用条件はますます過酷(高速・重荷重)となり、稼働率の向上に向けて、より高い信頼性が要求されてきている。さらに、保守点検の簡素化およびメンテナンスコスト低減の要求も増大してきている。

多量の冷却水が使用される圧延機用軸受では、冷却水の浸入を抑制してさびが起点となる軸受損傷を抑制した

高負荷容量密封型ロールネック用軸受 (図21)<sup>6)</sup> を開発し、メンテナンス周期の延長に貢献している。また、駆動軸のヨークキー溝にタングステンカーバイド (WC) を溶射 (図22) して耐食性を向上させ、腐食によるキー溝部のすきま増加に起因するボルトの損傷を抑制<sup>7)</sup> している実用例もある。

今後も、更なる生産性向上、コストダウンに対する開発を継続していく。

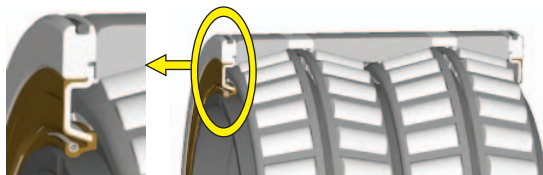


図21 高負荷容量密封型ロールネック用軸受  
High load capacity seal type roll neck bearing

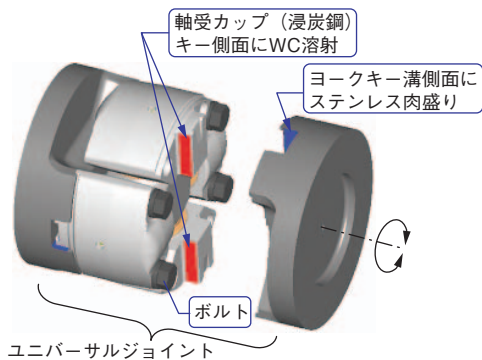


図22 駆動軸のヨークキー溝の耐食性向上  
Improved corrosion resistance of yoke key groove of driveshaft

#### 4. おわりに

転がり軸受は、あらゆる産業に使われ世界のあらゆる人々はその恩恵を受けており、誰でも比較的安価に手に入れることのできるよく知られた製品である。

しかし、そこには、摩擦・摩耗・潤滑を扱う最先端のトライボロジー技術やサブミクロン精度を安価に加工する最先端の生産技術がある。

そして、それらの基盤技術があるがゆえに、これまで述べてきたように、軸受単体だけでなく、周辺技術との融合やユニット化、センサ技術・制御技術などを含む新しい商品を展開している。

我々は、今後も、軸受の基盤技術を真摯に謙虚に深掘りしながら、各産業の将来動向を注視しつつ、お客様にご満足いただける新しい商品をいち早くお届けし世界のあらゆる産業に貢献していきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 北村昌之: Koyo Engineering Journal, no. 161(2002) 7.
- 2) 村尾 悟: 月刊トライボロジー, no. 10(2003)44.
- 3) 梶原一寿: Koyo Engineering Journal, no. 167(2005) 37.
- 4) 蔵下義一: 月刊トライボロジー, vol. 20, no. 4(2006) 28.
- 5) 東本 修: JTEKT Engineering Journal, no. 1001(2006) 97.
- 6) 鮫島喜栄智: Koyo Engineering Journal, no. 163(2003) 16.
- 7) 永山彰英: Koyo Engineering Journal, no. 166(2004)7.

#### 筆者



北村昌之\*  
M. KITAMURA

\* 執行役員 軸受事業本部 技術部門担当