

# 自動車用ベアリング技術の系統化調査

1

Systematized Survey on Rolling Bearing Technologies for Automotive Applications

室谷 周良  
Chikayoshi Murotani

## ■ 要旨

古代からエジプトのピラミッド建設等で巨石の運搬にころを使用してすべり摩擦を転がり摩擦に変えることによって著しく摩擦抵抗を減らすことができる事象が知られていた。また回転軸を支える機構に転がり摩擦を応用するアイデアとしては、15世紀ルネサンス期の天才レオナルド・ダ・ヴィンチが残したスケッチがある。

産業革命期に入り、鉄鋼が大量生産されるようになると、織物を機械的に大量生産するための繊維機械の回転軸や、移動運搬の手段としての自転車、馬車等の車軸に、ダ・ヴィンチが残したアイデアを適用した製品である鋼製のベアリング（転がり軸受）が生み出され、飛躍的な機械効率や耐久性の向上がもたらされた。また、自転車の普及やそれに続く自動車の発明によって大量のベアリング需要が生まれたことで、現在につながるベアリング産業の礎が築かれた。これと平行して19世紀末ごろから欧州を中心にベアリングの耐久性（寿命）に関する理論の体系化、及び寸法系列やベアリング寸法公差の標準化などが行われ、ベアリングは標準化された機械要素部品として広く世の中全ての産業界に普及し、人々の生活を支える存在となっていった。

日本においては第一次世界大戦以降にベアリングの国産化が進められ、1910～1920年代にベアリング製造主要各社が相次いで創業された。そしてその後、第二次世界大戦終結までの間、兵器や兵器製造を支える重工業に使用するベアリングを中心に生産が行われた。

第二次世界大戦後のモータリゼーションの発展期を迎えると、欧米を中心に自動車のエンジン、車軸、トランスミッション等の各用途に適した独自の仕様を持つベアリングが登場した。そのため日本においても自動車メーカーの要請を受け、各ベアリングメーカーが自動車用ベアリングの国産化、独自技術の開発に取り組むことにより、自動車の性能・品質・信頼性の向上に寄与するとともに、日本のみならず世界中の一般大衆への自動車の普及に大きく貢献することとなった。

本報告書では、ベアリングの構造や特長についてまとめ、上記したベアリングの歴史を紐解いた。それとともに、自動車用のエンジン、車軸、サスペンション、動力伝達系などアプリケーションごとの自動車用ベアリングについて、初期の欧米技術のキャッチアップの時代から、日本独自のきめ細かい技術開発の取り組みにより、各種のエンジン補機用ベアリングや車軸用のハブユニット、動力伝達系に使用するベアリングなど、長寿命、高効率、かつ高い信頼性を有するベアリングを生み出すに至った技術開発について調査を行った結果をまとめた。

また最近では、ハイブリッド自動車及び電気自動車の登場や、長年世界の自動車需要を牽引してきた日米欧市場の飽和、そして中国及びインドに代表される新興国市場の拡大により、自動車用ベアリングにおいても新たな対応が求められている。そのため、最後に自動車用ベアリングの将来予測と今後の開発の方向性について考察を行った。

## ■ Abstract

It has been known since ancient times that frictional resistance can be significantly reduced by changing sliding friction into rolling friction by using rollers, such as in the transport of megaliths when constructing the pyramids in Egypt. And sketches by the 15th-century Renaissance genius Leonardo da Vinci illustrate the idea of putting rotational friction to use in a mechanism supporting a rotating axis.

At the time of the industrial revolution, when steel was mass-produced, steel rolling bearings that applied the idea of Da Vinci, and others, were manufactured for the rotating shafts of textile machines, as well as the axles of bicycles, carriages, and the like, for moving and transporting. Those rolling bearings brought dramatic improvements in mechanical efficiency and durability. In addition, the spread of the bicycle and the subsequent invention of the automobile generated widespread demand for rolling bearings, and created the foundation of today's bearing industry. In parallel with this, from the end of the 19th century, theory regarding the durability (bearing life) of rolling bearings came to be studied and systematized, and dimensional series and rolling bearing dimensional tolerances standardized, mainly in Europe. Rolling bearings are now widely used as standardized machine parts in all industries throughout the world, and have thus become an essential element of everyday life.

In Japan, rolling bearing manufacture started after World War I, with major rolling bearing manufacturers being founded one after another in the 1910s and 1920s. After that, until the end of World War II, production of rolling bearings was mainly for weapons, and the heavy industries that supported weapons manufacturing.

In the era of motorization following World War II, rolling bearings with unique specifications for various applications, such as automobile engines, axles, and transmissions, were developed, mainly in Europe and the United States. In Japan, in response to requests from automobile manufacturers, each bearing manufacturer contributed to improving the performance, quality, and reliability of automobiles through domestic production of automobile rolling bearings and the development of original technology. This contributed greatly to the spread of automobiles in general, not only in Japan, but worldwide.

This report summarizes the mechanisms and features of rolling bearings, and explicates the above history of rolling bearings.

It also looks at each type of automotive bearing, for such applications as car engines, axles, suspension and drive-train systems, and reports on the results of a survey carried out on the technological development of bearings in Japan, from the early days of catching up with Western technology, to the development of intricate proprietary technology, leading to the achievement of reliable bearings (engine accessory bearings, automotive axle hub units, bearings used in drive-train systems, etc.) with the required operating life, efficiency and reliability.

Also, recently, with the advent of hybrid and electric vehicles, the saturation of the Japanese, US, and European markets that have been driving global automobile demand for many years, and the expansion of emerging markets such as China and India, new types of automotive bearing are required. For this reason, in conclusion, the future of automotive bearings and the direction of future development are addressed.

## ■ Profile

**室谷 周良** *Chikayoshi Murotani*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1976年	早稲田大学工学部機械工学科卒業
同年	光洋精工株式会社（現 株式会社ジェイテクト）入社 主に自動車用ベアリングの開発、技術サービスに従事
2005年～2008年	株式会社ジェイテクト 東部テクニカルセンター長
2008年～2010年	株式会社ジェイテクト 欧州テクニカルセンター長
2010年～2014年	Koyo Bearing U.S.A, Senior Executive Engineering Advisor
2014年～2019年	ISO/TC4（転がり軸受）、ISO/TC 213（幾何特性仕様）エキスパート、国内委員、 JIS 原案作成審議委員
2019年	株式会社ジェイテクト 退社

## ■ Contents

1. はじめに .....	3
2. ベアリングの構造と形式 .....	4
3. ベアリングの歴史 .....	11
4. 自動車用ベアリングの開発と進化 .....	31
5. 自動車用ベアリングの将来展望 .....	98
6. あとがき .....	103

# 1 | はじめに

人類の歴史において4000年前のエジプトでのピラミッド建設等にあるように、巨石の運搬にころを使用し、すべり摩擦を転がり摩擦に変えることにより著しく摩擦抵抗を減らすことができる事象は古くから知られていた。また回転軸を支える機構に転がり摩擦を応用するアイデアとしては、15世紀ルネサンス期の天才レオナルド・ダ・ヴィンチがマドリッド手稿に残したスケッチがある。その後産業革命期に入り、鉄鋼が大量生産されるようになると、当時急速に発展していた織物を機械的に量産するための繊維機械の回転軸や、移動運搬のための自転車、馬車等の車軸に、ダ・ヴィンチが残したアイデアを適用した製品である鋼製のベアリング（転がり軸受）が生み出され、飛躍的な機械効率や耐久性の向上がもたらされた。同時に19世紀末ごろから欧州を中心にベアリングの耐久性（寿命）に関する理論の体系化、寸法系列の標準化などが行われ、またベアリング専門メーカーが誕生し標準化されたベアリングを大量に生産供給することによって、ベアリングは広く世の中全ての産業界に普及し、人々の生活を支える存在となっていった。

一方で20世紀初めに自動車が登場し、自動車の耐久性向上の必要性から新たにベアリングの大きな需要が生まれ、各ベアリングメーカーは自動車用ベアリングの生産により、その事業規模を大きく拡大することとなった。

日本においては明治期から大正期にかけては海外製ベアリングの輸入に頼る時代が続いたが、第一次世界大戦後に兵器等に使用されるベアリングの国産化の方針により1910年～1920年代に次々にベアリングメーカーが設立され、その後、国策の基に第二次世界大戦終結までの間に軍需を中心に急激な成長を遂げることになった。

第二次大戦後の混乱期を過ぎモータリゼーションの発展期を迎えると、欧米を中心に、それまで使われていた標準ベアリングから、自動車のエンジン、車軸、トランスミッション等の各用途に適した独自の仕様を持つベアリングの開発が進められた。日本においても自動車メーカーからの要請を受け、各ベアリングメーカーが自動車用ベアリングの国産化、日本独自技術の開発に取り組むことにより、自動車の性能・品質・信頼性の向上に寄与するとともに、開発したベアリングを世界各国に供給することによって、日本のみならず世界中の一般大衆への自動車の普及に大きく貢献し、

日本製の自動車及びベアリングの評価を高めることとなった。

自動車は誕生当初から一貫して耐久信頼性と経済性（燃費）の向上が求められてきた。それに伴って使われるベアリングの形式やサイズ、求められる性能も変遷を遂げてきた。最近ではハイブリッド車や電気自動車の登場により、新たな機能性能が求められている。

これを受けてベアリングメーカーは例えば、

- ①エンジン補機や終減速機（デフ）などの各アプリケーションに特化した仕様のベアリングの開発
  - ②車軸用ベアリングとして周囲の部品を取り込んで一体化し信頼性やサービス性を向上させたハブユニットのようなユニットベアリングの開発
  - ③燃費向上や環境問題のニーズに対応する低トルク技術の開発
  - ④手動変速機、終減速機等でのギヤ摩耗粉などの硬質異物が混在する潤滑環境下で高い耐久性を有するベアリングの開発
  - ⑤自動変速機などに使用する専用の針状ころ軸受の開発
- などに精力的に取り組んできた。

本調査では、これらのベアリング技術開発の経緯を、初期の欧米技術のキャッチアップの時代から、その後の日本独自の技術開発により、更なる高性能化、高効率化、高信頼性を実現するに至った技術動向の系統化という形で本報告書をまとめた。

第2章では、基本となるベアリングの形式と構造について簡単に紹介する。

第3章では、古代のベアリングの原形となった転がり運動を利用した運搬や回転機構の紹介から、ルネサンス期のレオナルド・ダ・ヴィンチのベアリングに関する研究、産業革命期から近代のベアリングの基本を形作る理論的研究や寸法系列の標準化、そして専門メーカーの誕生と発展に至るベアリングの歴史について述べる。

第4章では自動車用ベアリングについて、自動車用のアプリケーションごとに、背景となる各アプリケーションの特性や、そこから発生するベアリングに要求される機能性能と、それを実現、向上させるために行われた技術開発の経緯について述べる。

最後に第5章では今後の自動車用ベアリング開発の方向性について考察する。

## 2 | ベアリングの構造と形式

### 2.1 ベアリングの構造

ベアリングは通常、軌道輪（内輪、外輪）又は軌道盤と、その間に配置される転動体（玉、ころ）、及び転動体を等配に保ちお互いが接触しないように配置するための保持器で構成されている（図 2.1）。また周囲の環境（ダスト、水等）からベアリングを守るためにシールド板もしくはゴムシールドを設け、ベアリング内部に潤滑剤（グリース）を封入した形式のものもある（図 2.2）。

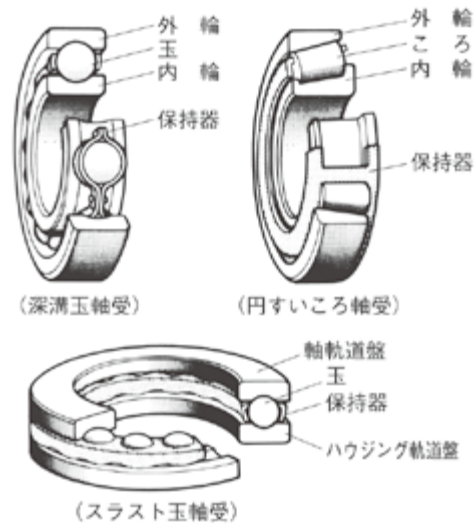


図 2.1 ベアリングの構造例<sup>1)</sup>

#### 深溝玉軸受の組立方法

ベアリングの中で最も一般的な深溝玉軸受は、内外輪に玉が入る軌道溝があるため「どのように組み立てるのか？」との疑問を持つ人が多いようである。

そのためここでは深溝玉軸受の組立方法について紹介しておく。

玉軸受の組立にあたって重要なのは組立後にベアリングの内部すきまが適正になることである（ベアリングの内部すきまについては別コラムを参照）。

そのため、まず内外輪の軌道溝の径と玉径を測定し、それらを組み合わせることで所定の内部すきまになるように選択を行う。

その後、以下のように組立を行う（図 1 参照）。

- ① 外輪の中に配置した内輪を片側に寄せ、広くなった空間に所定の個数の選択された直径の玉を軌道溝上に入れる。
- ② 外輪と内輪の中心が一致するように内輪を動かす。
- ③ 玉を均等な間隔に並べる。
- ④ 最後に保持器を組み立てる。

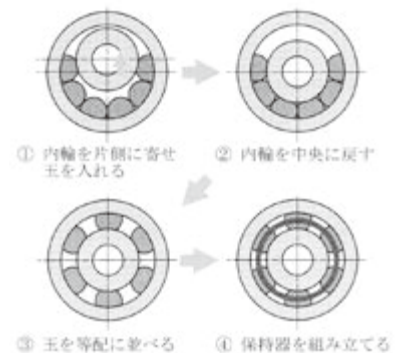


図 1 深溝玉軸受の組立方法<sup>1)</sup>

なお①の状態では軌道溝上に並べた両端の玉の間隔が、内輪の軌道溝直径よりも小さいと、②のように内輪を外輪の中心まで動かすことができない。しかし外輪を弾性変形の範囲内で楕円にひずませることで両端の玉の間隔を広げると組み立てを行うことができる。

そのため、ベアリングの負荷容量をできるだけ大きくすること、及び、一度組み立てたベアリングがバラバラにならないような取り扱い性を考えて②の工程で外輪をひずませて組み立てる方法が一般的に多く用いられている。

#### <参考・引用文献>

図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会（2011年）

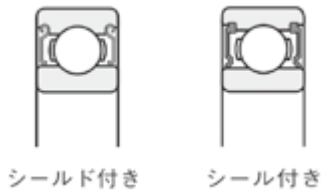


図 2.2 シールド・シール付きベアリングの例<sup>1)</sup>

## 2.2 ベアリングの種類と形式

ベアリングには、大別すると回転軸の軸心に垂直なラジアル方向の荷重を主に支持するラジアル軸受と、軸心に平行なアキシャル方向の荷重を主に支持するスラスト軸受がある。

ベアリングに荷重が加わるとき、軌道輪・軌道盤と転動体との間に働く荷重の向きと軸に垂直な平面とのなす角を接触角  $\alpha$  と呼ぶが (図 2.3)、その接触角  $\alpha$  が  $0\sim 45^\circ$  までのベアリングをラジアル軸受、 $45\sim 90^\circ$  までのベアリングをスラスト軸受として区分している。

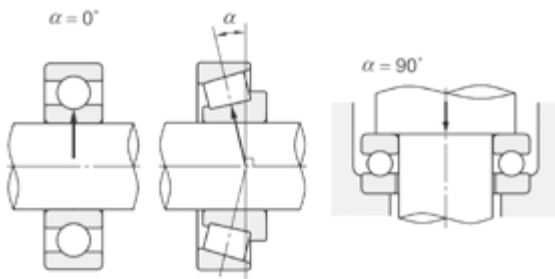


図 2.3 ベアリングの接触角  $\alpha$ <sup>1)</sup>

またベアリングは転動体の種類で、転動体に玉を使用したボールベアリング (玉軸受) と、転動体どころを使用したローラベアリング (ころ軸受) とに分類される。

玉は、転がり軸受用鋼球として JIS や ISO で規定されているが、その中でメートル系とともにインチ系の玉径も記載されている。歴史的な経緯から、JIS や ISO で規定の標準的なベアリングにおいてもインチ系列の玉径が標準的に使用されている。

ころは JIS で長さ  $L_w$  と直径  $D_w$  との比  $L_w / D_w$  が 3 以下のものを円筒ころ、3 以上でかつ直径  $D_w$  が 6mm 以上のものを棒状ころ、6mm 以下のものを針状ころというように規定分類しているが、ころの形状による呼称の区分は国際的にはまちまちである。

この他に、ベアリングには軸のたわみや位置ずれ、傾きを吸収できるように調心構造をもったものや、二列以上の軌道を持つことで方向の異なるアキシャル荷重を支持することができるようにしたものなど、様々な形式がある (図 2.4、図 2.5、図 2.6)。

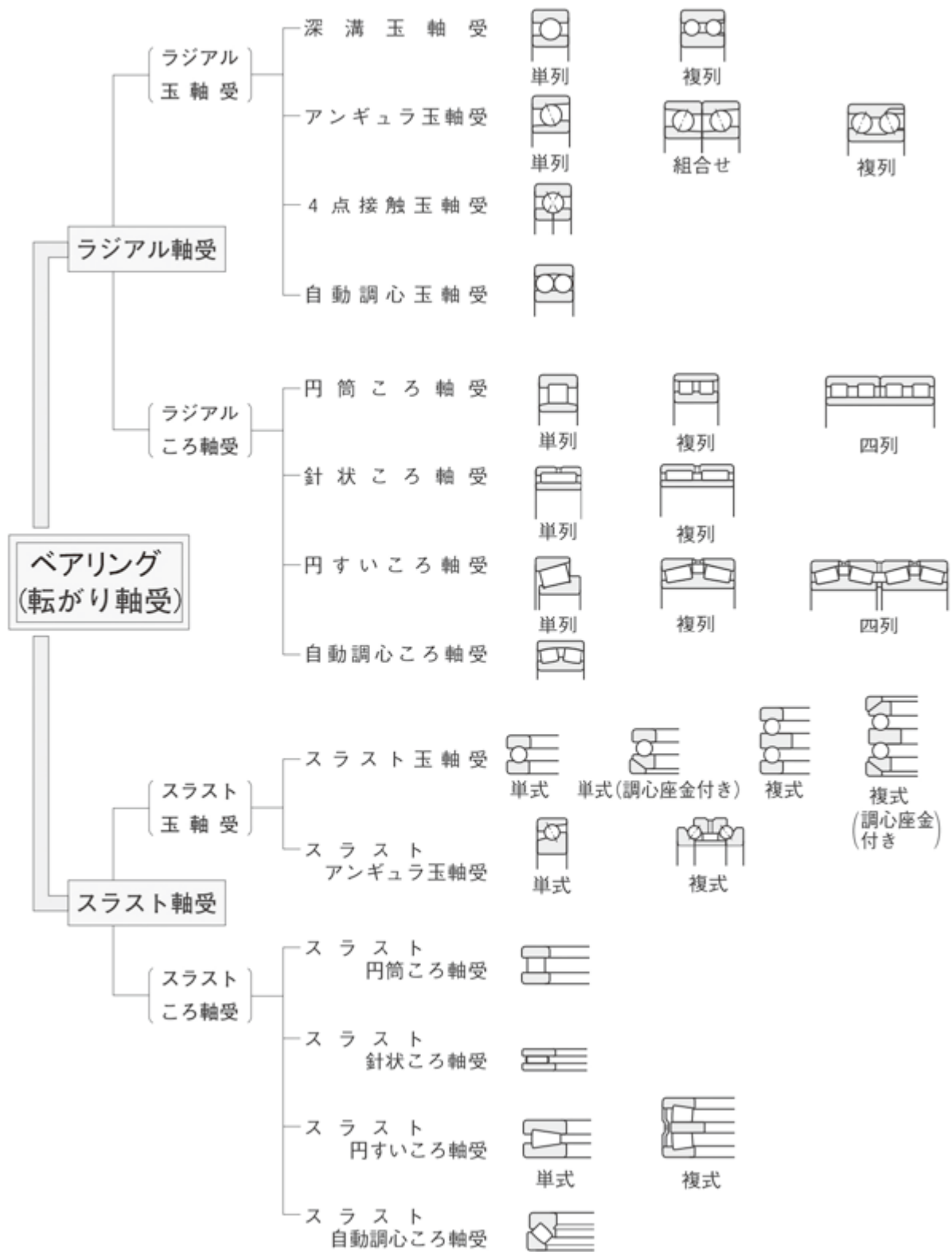
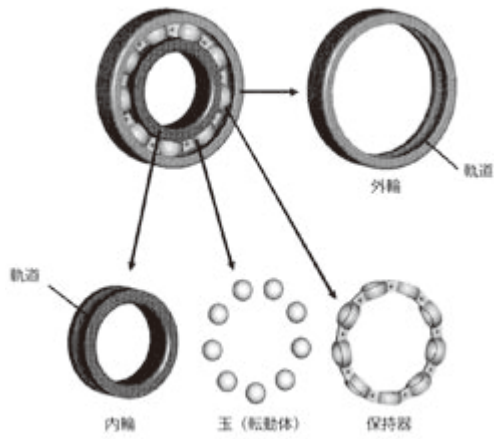
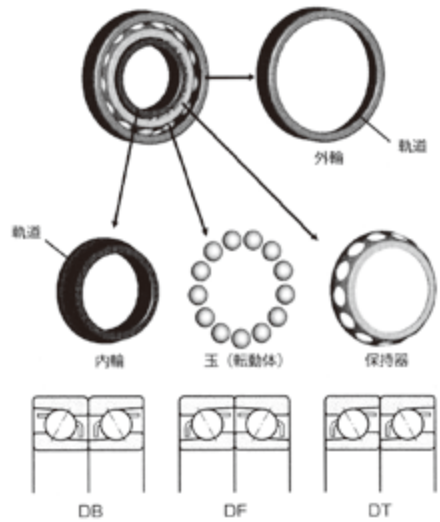


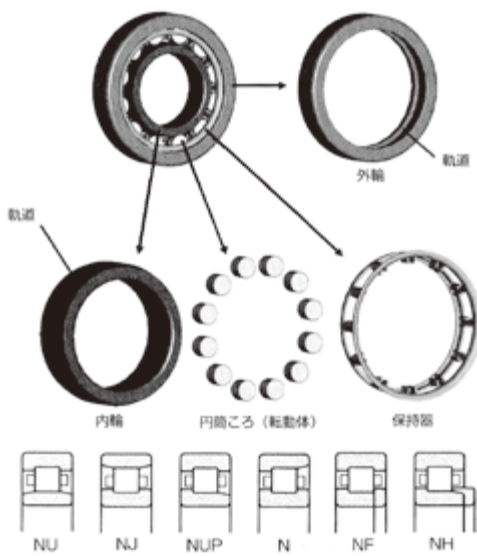
図 2.4 ベアリングの種類と形式<sup>1)</sup>



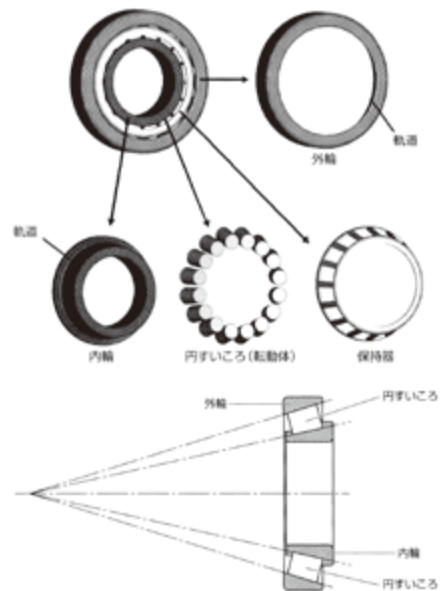
<深溝玉軸受>



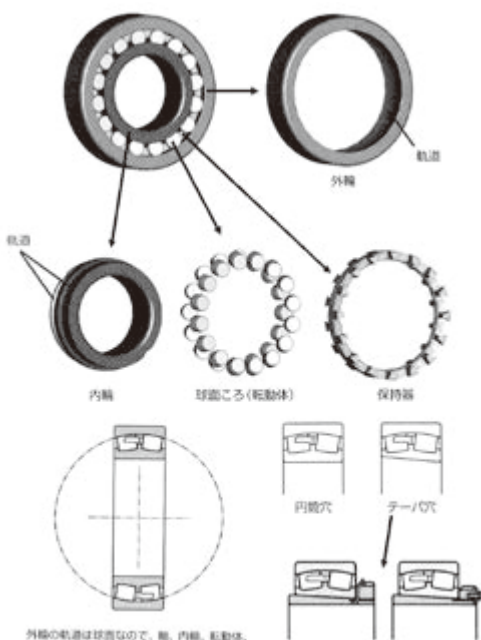
<アンギュラ玉軸受>



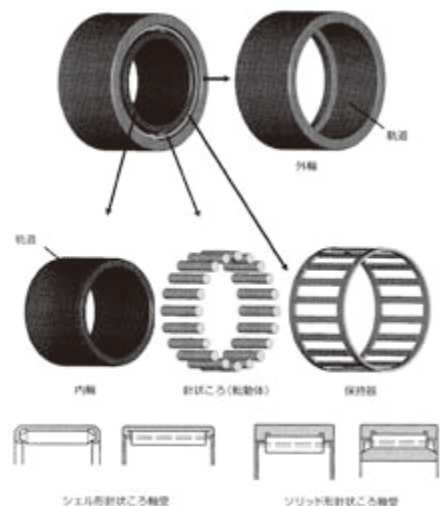
<円筒ころ軸受>



<円すいころ軸受>



<自動調心ころ軸受>



<針状ころ軸受>

外輪の軌道は球面なので、軸、内輪、転動体、保持器は、外輪やハウジングに対して傾いた状態でも軸は回転することができる。

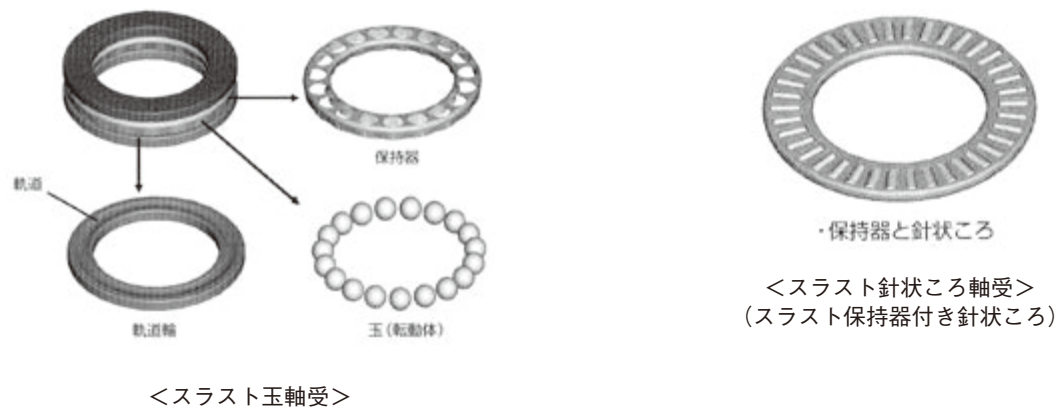


図 2.5 代表的な各種ベアリングの構造<sup>2)</sup>



図 2.6 代表的な各種ベアリングの外観<sup>3)</sup>



## 参考・引用文献

- 1) ジェイテクト 転がり軸受総合カタログ CAT No. B 2001-8
- 2) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会 秀和システム (2011年)
- 3) ジェイテクト ホームページ 商品紹介 ベアリング コラム (2019.4.23 検索)

### ベアリングの保持器

第3章で述べるように、15世紀ルネサンス期の天才レオナルド・ダ・ヴィンチは、彼のベアリングについての考察の中で、転動体（玉、ころ）同士を離して配置するための保持器の重要性について言及している。

保持器がない状態でのベアリングの転がり運動では下の図1のように転動体（玉、ころ）同士が転がり運動中に接触した場合、お互いが逆方向の回転になるため転動体の円滑な転がり運動を阻害することになる。

また針状ころ軸受や円筒ころ軸受において、総ころ形で保持器がない場合には図2のように転動中にころが回転方向に対して傾くスキュー現象が発生する。

これらの現象によってベアリングの回転抵抗が増大し、摩耗が発生するなどの不具合が生じ、最悪の場合、焼き付き・破損などに至る。

限られたスペースで最大の負荷を受けられるように、上記の欠点を承知の上で保持器のない総玉（ころ）形のベアリングを設計し使用することがあるが、通常は適切な形式の保持器を設けることで、ベアリングが機能・性能を十分に発揮できるようにするのが一般的である。

保持器には軟銅板等をプレス成形した「プレス保持器」、黄銅や鉄または樹脂を機械加工で切削して製造する「もみ抜き保持器」、樹脂を射出成型して製造する「樹脂保持器」などがあり、ベアリングの形式や用途によって使い分けている。

ベアリングが加減速を繰り返す用途や、ミスアライメントが生じる用途で使われる場合、転動体（玉、ころ）を介して保持器に力がかかって繰り返し応力が発生し、保持器が疲労破損することがある。そうした用途では柔軟な樹脂保持器を使用するか、樹脂保持器が使用できない環境では保持器の強度を上げるように保持器材質の変更、寸法（厚み等）の変更、熱処理の追加などの対策を施す。

また保持器の挙動は、保持器が転動体（玉、ころ）、内輪、外輪のうちどの部品で案内（ガイド）されているかによっても変わってくるので、高速回転で使われる場合や、前述のような過酷な使用条件においては保持器の形式の選定に注意が必要で、特別な仕様の保持器を採用することがある。

主な形式の軸受における保持器の例を図3に示す。

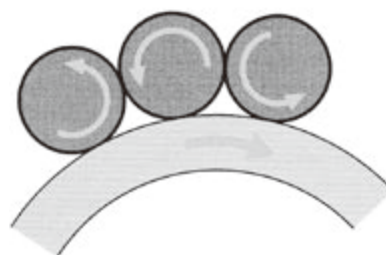


図1 保持器がない場合の回転中の転動体の運動<sup>2)</sup>

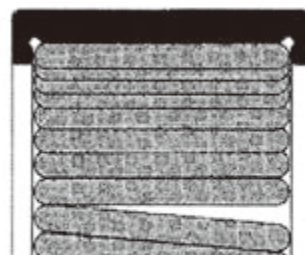


図2 保持器がない場合のころのスキュー<sup>3)</sup>



深溝玉軸受  
プレス保持器



深溝玉軸受  
もみ抜き保持器



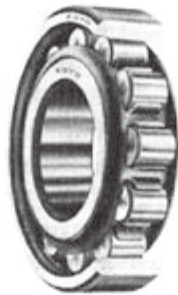
アンギュラ玉軸受  
もみ抜き保持器



自動調心玉軸受  
プレス保持器



複列アンギュラ玉軸受  
プレス保持器



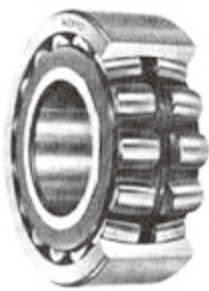
円筒ころ軸受  
プレス保持器



複列円筒ころ軸受  
もみ抜き保持器



円すいころ軸受  
プレス保持器



自動調心ころ軸受  
プレス保持器



針状ころ軸受  
プレス保持器



スラスト玉軸受  
もみ抜き保持器

図3 各種ベアリングと保持器形式の例<sup>2)</sup>

<参考・引用文献>

- 1) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会 (2011年)
- 2) 「ベアリングがわかる本」NTN株式会社編集チーム 工業調査会 (2007年)

# 3 | ベアリングの歴史

## 3.1 ベアリング前史

古代からエジプトのピラミッド建設等どころを使用して摩擦を低減し、巨石の運搬を楽に行う工夫がなされていたことが知られている（図 3.1.1）。このように人類は古くから、すべり摩擦を転がり摩擦に変えることで摩擦力が軽減されることを経験的に学んでいた。



図 3.1.1 古代の運搬方法（想像図）<sup>1)</sup>

また古代ローマ帝国では、さらに進んで現代のベアリング（転がり軸受）の直接の先祖ともいえる構造の回転軸を支える機構が使われていたようである。図 3.1.2 はイタリア・ローマ近郊のネミ湖で発掘されたローマ時代の軍船である。

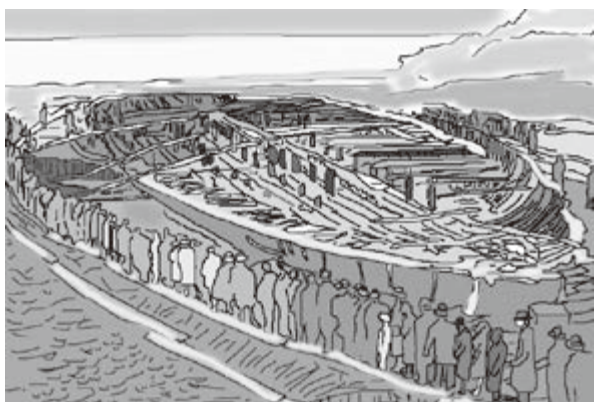


図 3.1.2 ネミ湖で発掘されたローマ時代の船<sup>2)</sup>

発掘された二隻の船からは現代の玉軸受の元祖といふべき青銅製の玉と木製の保持器とを持つスラスト軸受が発掘された（図 3.1.3）。図 3.1.4 はその復元品である。玉には保持器に玉を支持するための軸（トラニオン）が付いている。これはこの時代まだ玉を真球に加工する技術がなかったため、当時の簡易な旋盤で加工が容易な軸付きの形状が選ばれたものと考えられているが、球状の転動体を使用することで軌道盤との接触面を小さくし摩擦を低く抑えようとする工夫があったことがうかがえる。



図 3.1.3 ネミ湖で発見されたローマ時代の玉軸受<sup>2)</sup>



図 3.1.4 ローマ時代の玉軸受の復元品<sup>3)</sup>

またこの船からは玉軸受と同様にトラニオン軸付きではあるが、現代の円筒ころ軸受や円すいころ軸受の先祖といえるベアリングも発掘された（図 3.1.5）。これらの形式のベアリングがどのように使い分けられていたかは、発掘された断片からは知ることができないが、ベアリングが支える重量（受ける荷重）、ベアリングの大きさや周辺構造などで種々の形式が生み出されたものと考えられる。



図 3.1.5 ネミ湖で発見されたローマ時代の円筒ころ軸受<sup>2)</sup>

このような知見と構造は、その後の中世ヨーロッパに受け継がれたはずであるが、中世の主な機械である

粉ひきの水車や、機械式時計などのベアリングは主に金属や木でできたジャーナルに軸をはめ込んで使うすべり軸受であり、中世においては転がり運動を使用することによって摩擦力や摩耗を軽減させる試みはあまり行われていなかったようである。

## 3.2 レオナルド・ダ・ヴィンチの研究

15世紀になりルネサンス期を迎えると、天才レオナルド・ダ・ヴィンチ (Leonardo da Vinci) (図 3.2.1) がベアリングについても重要な研究を行うことになる。



図 3.2.1 レオナルド・ダ・ヴィンチ (ミラノ・スカラ広場の像)<sup>4)</sup>

ダ・ヴィンチは、様々な摩擦とトライボロジーに関する研究を行っているが、ベアリング (転がり軸受) についても重要な研究とアイデアのスケッチを残している。ダ・ヴィンチのマドリッド手稿ではベアリングの転がり運動に関する考察が行われており、玉とところの転がり運動には転がる方向の制約があるだけで同じ考え方で考察できることや、転動体同士が転がり運動中に接触するとお互いが逆方向の回転になるため運動を阻害するので、転動体間を離して配置する必要性、すなわち現在の保持器の概念と機能について触れているなど、ダ・ヴィンチがそれ以前の古代や中世の人々よりもはるかに論理的で正確な知見を持っていたことをうかがい知ることができる。

図 3.2.2 及び図 3.2.3 に再現品の例を示した。



図 3.2.2 ダ・ヴィンチのマドリッド手稿スケッチに基づく玉軸受の再現品<sup>3)</sup>



図 3.2.3 ダ・ヴィンチのマドリッド手稿スケッチに基づくピボット軸受の再現品<sup>3)</sup>

## 3.3 産業革命期のベアリング

17世紀に入ってもベアリング技術には大きな進歩が見られず、依然として転がり運動の利用は一般的ではなく、耐久性を向上させるために軸を受けるジャーナル部の材質に金属を使用することや、金属の材質について工夫改良がなされたようではあるが、中世以来の構造のすべり軸受が主流であった。そのため近代的な転がり軸受の登場は産業革命を待たなければならなかった。

18世紀後半～19世紀の産業革命期を迎えると、ベアリング (転がり軸受) 技術は飛躍的な発展を遂げるようになった。その背景としては加工技術、特に工作機械の発達と、産業革命により鉄鋼が大量生産されるようになり、それらを組み合わせることにより、今までダ・ヴィンチらが頭の中で描いてきた理論やアイデアの工業製品としての具現化が可能になったことが大きく寄与している。

この時代に大きな社会的ニーズがあった機械装置としては、水車・風車と馬車が挙げられる。特に馬車については、当時の道路事情もあって車軸の摩耗や破損が問題であり、耐久性の向上が求められていた。ヴァルロ (C. Varlo) は1772年に馬車の車軸の摩耗を防ぐための機構を発表し、今まで見てきた先駆的な転がり軸受で一般的だったトラニオン軸付きの転動体に代

えて鋼球を使用することのメリットを述べている。また彼はこの機構の有用性の立証のため、実際に馬車による長距離の実証走行を行っている。

ヴァルロのベアリングは保持器のない総玉軸受であったが、1787年にはイギリスのガーネット (John Garnett) が保持器を設けて転動体同士の衝突や摩耗を防止する機構を考案し、特許を取得した。さらにほぼ同時期に、同じくイギリスのジョージ (Watkin George) が小さな径の中間ころを本来の転動体であるころと交互に配置することによって車軸の摩擦をなくすベアリングの特許を取得している。またイギリスのボーン (Philip Vaughn) は車軸と懸架装置を一体とし、車軸に耐久性を向上させるための鋼球が転動する軌道溝を形成した構造の特許を1794年に取得した。

またイギリスのグリーンウェイ (Charles Greenway) は、1840年に現在のもみ抜き保持器に相当する形状の保持器を備えたころ軸受を考案し、大砲の砲架等に使用することを提唱した。

アメリカにおいても18世紀末ごろに製作された教会や公共建築の風見の回転を支持するために銅製のころが青銅製の軌道盤の上を回転するスラスト軸受が使用されていたことが分かっている。

次に風車については、1780年ごろに製作されたイギリス・イングランド東部のノーフォークにあるスプロウストンという村の風車の鑄鉄製の玉を使用したベアリング (スラスト玉軸受) の記録が残っている (図3.3.1)。

このように、現代につながるベアリングの構造と機能に関する技術的アイデアは、そのほとんどが産業革命期に矢継ぎ早に生み出されたものであり、これらの発明をもとに、その後のベアリング形式・寸法の標準化や、寿命理論の確立によって、世の中に広くベアリング (転がり軸受) が普及していく礎が築かれたといえる。



図 3.3.1 イギリス・スプロウストンの風車のスラスト玉軸受<sup>2)</sup>

### 3.4 近代におけるベアリング産業の発達

19世紀になると自転車が発明され19世紀後半に一般大衆に広まると、これに使用するベアリングを大量に生産することでベアリング産業が大きく発展することになる。

自転車は1818年にドイツのドライス (Freiherr Drais) が考案したドライジーネがその元祖といえるが、当初の自転車は地面を足で蹴って走行する単純なものであった。その後1838年にイギリス・スコットランドのマクミラン (K. Macmillan) がペダルを漕いで自転車を駆動する仕組みを発明したが、当初はペダルが直接車軸に装着されていたので、ペダル一回転で効率よく前進するためには車輪 (前輪) を大きくし、その車軸にペダルを設ける形式が一般的であった。1876年にペダルの回転をチェーンと歯車を介して後輪に伝える方式が登場し、さらに1888年にイギリスのダンロップ (John Boyd Dunlop) が自転車用の空気入りタイヤを発明すると、自転車の性能や快適性は飛躍的に向上し、広く世の中に普及することとなった。

ベアリングの観点からみると自転車の車軸は当初すべり軸受であったが、間もなく玉軸受にとって代わり、走行時や発進時の摩擦抵抗を大幅に軽減できるようになった。自転車用ベアリングに数多くの玉が使われるようになると、その品質、特に直径寸法の不ぞろいを小さくするニーズが生まれた。これはベアリングに数多くの玉を用いても、直径寸法に不ぞろいがあると直径の大きな玉に力が集中し、それが破損することで耐久性を損ねるためである。

また玉の材質も当初は鑄鉄であったが、強度と靱性の向上のため炭素鋼にとって代わり、最終的には20世紀の初めに現在の軸受鋼の基となる高炭素クロム鋼が登場して、焼き入れによって鋼球の表面硬さを上げる手法が確立していった。同時に玉の加工についても様々な工夫が行われ、当初の旋削から研削やタンブラー加工が一般的になり、表面性状と粗さの改善によってベアリングの耐久性の向上がもたらされた。

そして、このような技術の進歩がベアリング専業メーカーが登場する下地となっていった。

アメリカではティムケン (Henry Timken) が1898年に馬車の車軸用として耐荷重性や耐久性に優れた円すいころ軸受の特許を取得し、ベアリング製造会社を設立した (図3.4.1)。そして20世紀に入ると新たなベアリングの用途として自動車が登場し、ティムケンの会社を大きく発展させることとなった。



図 3.4.1 ヘンリー・ティムケン<sup>5)</sup>

スウェーデンにおいてはヴィンクヴィスト (Sven Wingquist) (図 3.4.2) がベルト駆動の繊維機械に用いられるベアリングの性能向上に取り組み、その不具合の多くがミスアライメントやたわみで発生していることを突き止め、その解決策として自動調心玉軸受の特許を取得し、1907年にSKF社 (Svenska Kullagerfabriken AB) を設立した。SKF社はその後、ドイツ、アメリカ、フランス等に進出し、国際的な企業へと発展していった。



図 3.4.2 スヴェン・ヴィンクヴィスト<sup>6)</sup>

これらのベアリングメーカーの設立と前後して、ベアリングの構造や用途についての様々な考案がなされることによって、現在の各種ベアリングの仕様や構造が確立されていった。

### 3.5 ベアリング理論の確立

ベアリング (転がり軸受) の転動体と軌道面の間で発生する接触応力理論についてはドイツのヘルツ (Heinrich Hertz) の研究がある。彼は 1881 年に発表した論文で、任意の形状の弾性体同士の接触により発生する楕円領域内の弾性変形と接触応力についての方程式を示した。ストライベック (Richard Stribeck) はヘルツの理論を実験的に検証するとともに接触面の塑性変形が生じる限界を求め、またベアリング内部の荷重分布について研究することで、ベアリングの静的許容荷重 (静的負荷容量) の導出ができるようになった。

またイギリスのレイノルズ (Osborne Reynolds) は 1875 年ごろに円筒間の転がり摩擦の研究を行い、この研究は 20 世紀初頭に溝を転がる玉の挙動の解析に拡張されて、ベアリングの運動理論と摩擦についての理論が確立されることとなった。

イギリスのグッドマン (John Goodman) は 19 世紀末から 20 世紀初頭にかけて、ベアリングの摩擦、摩耗、寿命についての研究を精力的に行い、ベアリングの負荷容量が回転速度によって変化することを導き出した。

ベアリング理論における最大の課題はベアリングの耐久性 (寿命) の体系化である。荷重を受けて回転するベアリングの内部では転動体と軌道面の間で繰り返し大きな接触応力が発生し、これによって軌道面や転動体の表面に剝離現象が発生して疲れ寿命に至る。1923 年に SKF 社のルンドベルグ (Gustaf Lundberg) とパルムグレン (Arvid Palmgren) はベアリング寿命に統計と確率の考え方を導入し、実験を行うことによってベアリングの負荷容量と寿命の関係を示す実験式を発表した。この負荷容量と寿命の関係についてはその後も研究と改良が進められ、今日ではベアリングの寿命  $L$  (一般的には信頼度 90% で転がり疲れによる損傷を起こすことなく回転できる基本定格寿命  $L_{10}$ ) は負荷荷重  $F$  (正確には動等価荷重  $P$ 。ラジアル軸受において、ラジアル荷重  $F_r$  のみが負荷される場合は  $P=F_r$  となる。) の三乗 (ころ軸受の場合は三分の十乗) に反比例する関係が広く認知され使用されている。

基本定格寿命  $L_{10}$  が 100 万回転となる荷重をベアリングの基本定格荷重  $C$  と呼ぶが、例えば、玉軸受に動等価荷重  $P$  が負荷されたときの基本定格寿命  $L_{10}$  は次の式で表される。

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

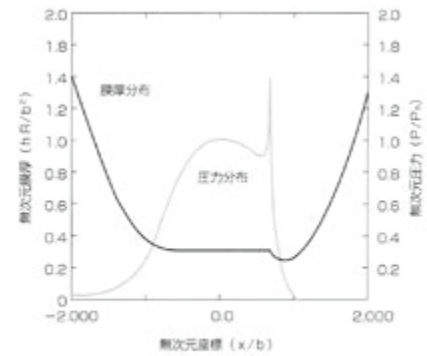
## 弾性流体潤滑理論

1886年にイギリスのレイノルズ (Osborne Reynolds) が導いたレイノルズの方程式は、軸にかかる力を油膜によって支えるすべり軸受の理論と挙動を明らかにした。

この理論をベアリング (転がり軸受) に応用すると、求められる軌道輪 (内輪、外輪) と転動体 (玉、ころ) の接触部の油膜厚さはベアリングの表面粗さよりも非常に薄くなり、軌道輪と転動体の接触面同士が金属接触するという結果が得られる。しかし、実際のベアリングでは運転後の転動面はきれいに初期の状態を保っていて接触面同士が金属接触の兆候は認められず、レイノルズの方程式ではベアリング転動面の潤滑状態をうまく説明することができなかった。

第二次世界大戦後になるとベアリングの軌道輪と転動体の接触部が弾性変形をしている場合の油膜厚さを考えるようになり、コンピューターの発達もあって接触部の圧力上昇による潤滑油の粘度変化や接触圧力による弾性変形を考慮した「弾性流体潤滑 (EHL: elastohydrodynamic lubrication) 理論」がイギリスのダウソン (Duncan Dowson) らによって導き出され、これによって実際のベアリングが負荷を受けて回転している際の油膜厚さと圧力の分布を理論的に説明できるようになった。

図1にころ軸受のような線接触の場合のベアリング接触面の圧力と油膜厚さの分布例を示す。



h: 油膜厚さ, R: 等価半径, b: ヘルツの接触半幅 Ph: ヘルツの接触圧力  
G: 材料パラメータ U: 速度パラメータ W: 荷重パラメータ

図1 線接触面の圧力と油膜厚さの解析例  
( $G=3000$ ,  $U=10^{-11}$ ,  $W=3 \times 10^{-5}$ )<sup>1)</sup>

また図2は玉が転動面と接触している場合のEHL理論による油膜厚さの解析例であるが、こうした油膜厚さ分布は実験的にも確かめることができる。

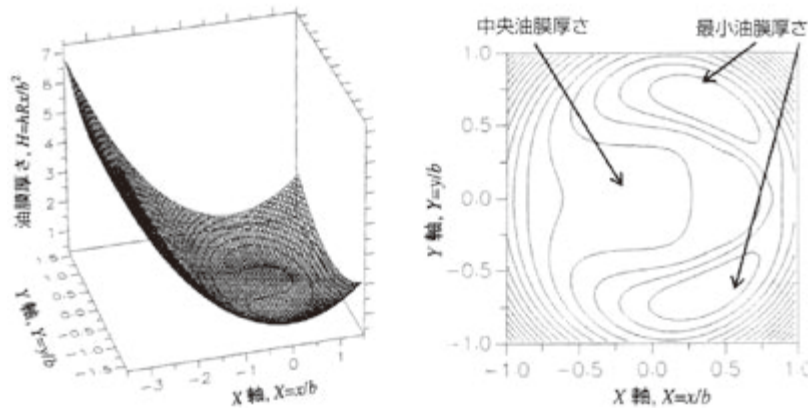


図2 玉の接触面の油膜厚さ分布の解析例 ( $G=6000$ ,  $U=10^{-11}$ ,  $W=1.89 \times 10^{-6}$ )<sup>1)</sup>

その中で「光干渉法」での測定方法について簡単に紹介する。

光干渉法では透明な円盤 (ガラス、サファイア等) をベアリングの軌道輪の代わりに使い、これと鋼球とを接触した状態で回転させて、両者の間に存在する油膜によって発生する光干渉縞を観察する (図3)。



図3 光干渉法の原理<sup>1)</sup>

実際の装置は次の図4のような構造となっている。

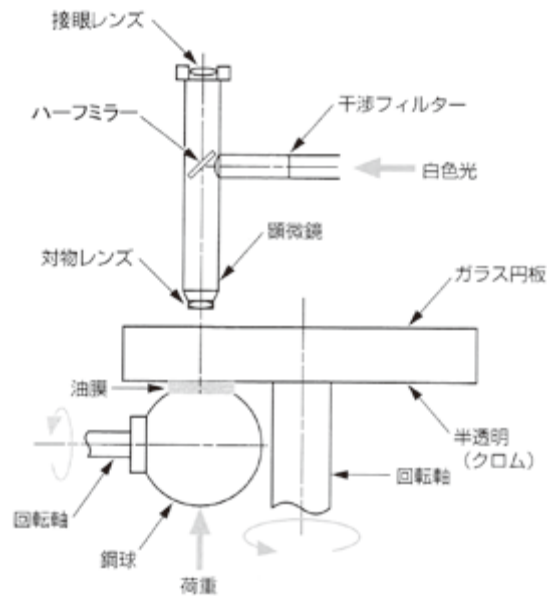


図4 油膜厚さ測定装置の概略図<sup>1)</sup>

下の図5に示す画像のように、回転していない静止状態では油膜厚さは0で古典的なヘルツ理論に基づく接触状態と一致しているが、ガラス円盤と鋼球を回転させると EHL 理論と合致する油膜厚さ分布になることが確認できる。

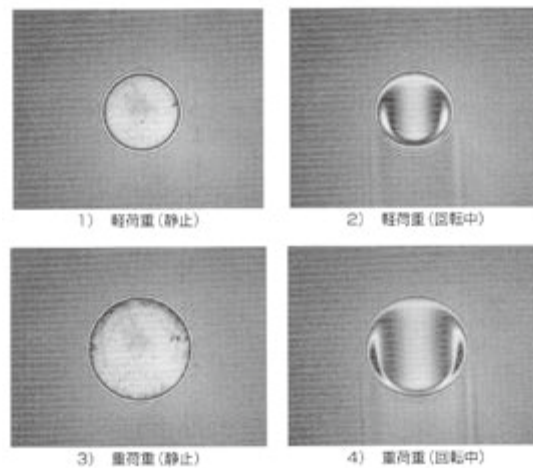


図5 弾性流体潤滑下の油膜厚さ観察結果<sup>1)</sup>

この EHL 理論で導き出される油膜厚さと転動面の表面粗さとの大小関係がベアリングの寿命（耐久性）に大きく影響することや、回転中のベアリングの摩擦トルクが EHL 油膜厚さと深く関係していることもあり、今日ではベアリングの機能・性能を解析し理解する上で最も重要な理論の一つとなっている。

#### <参考・引用文献>

- 1) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会 (2011 年)



### 3.6 ベアリングの寸法系列の標準化

ベアリングの寸法系列について JIS では JIS B 1512 シリーズで、またそれらの標準寸法に対する公差については JIS B 1514 シリーズで規定されているが、この寸法系列と公差は国際的に ISO で定められた標準に基づいている。また寸法系列記号についても体系的に世界共通の記号が定められている。これによってベアリングは世界中で互換性のある標準部品として機械装置に使用できる体系が構築されている。

ベアリングが互換性を持つ機械部品として生産され始めた 19 世紀後半においては、ベアリングの寸法及びその公差はメーカーごとにまちまちであり、使用者の利便を損ねていたため、これらの寸法系列やその公差を標準化する動きが 19 世紀末にドイツで始まった。

当初、1905 年に発行された DWF 社 (Deutsche Waffen und Munitionsfabriken) のカタログでは公差 (許容差) は内外径とも基準寸法に対して上限寸法及び下限寸法が ± で同じ値となっていたが、1915 年ごろから公差の上限を 0 とする動きが生じ、1922 年にドイツ工業規格 DIN で公差の上限を 0 で統一した規格が制定された。

また 1920 年代から第二次世界大戦での中断をはさんで 1950 年代にかけて ISA (万国規格統一協会: International Federation of the National Standardizing Associations) とその活動を引き継いだ ISO (国際標準化機構: International Organization for Standardization) でベアリングの寸法及び公差の標準化の国際会議が繰り返し開かれ、最終的に 1955 年に推奨規格 (Recommendation) R 15 が公布された。

R 15 は以下の 6 つの内容から構成されており、これにより普通品 (0 級) のベアリングの公差が国際規格として制定された。

- ①円すいころ軸受を除くラジアル軸受の主要寸法と寸法精度
- ②円すいころ軸受を除くラジアル軸受の回転精度
- ③テーパー内径の寸法精度
- ④止め輪付き軸受の止め輪溝及び止め輪の寸法とその許容差
- ⑤単式スラスト軸受の主要寸法
- ⑥ラジアル玉軸受の基本定格荷重と寿命の定義

その後、1962 年には精密品である 6、5、4 級のベアリングの公差が ISO/DR 280 として制定され、今日

のベアリングの寸法及び公差の体系がほぼ完成することとなった。

表 3.6.1 に例としてベアリング内径寸法公差の変遷を示す。

R 15 はこの後、①～⑥の項目ごとの国際規格に分割され、現在は ISO 15 としてラジアル軸受の主要寸法のみ規格となっており、ベアリングの精度 (現在の用語では許容差、許容値及び/又は公差値) についてはラジアル軸受が ISO 492、スラスト軸受が ISO 199 として定められている。

また JIS (日本工業規格、2019 年 7 月より日本産業規格: Japanese Industrial Standards) においても 1950 年からベアリングの JIS の審議を開始し 1963 年までに 38 規格を制定していたが、国際規格である ISO、及び国際的に通用している DIN (ドイツ工業規格) との相違点を解消するため 1965 年から再編が行われ、ベアリングの精度 (現在の用語では許容差、許容値及び/又は公差値) については JIS B 1514 として制定された。現在では ISO 規格に準拠してラジアル軸受が JIS B 1514-1、スラスト軸受が JIS B 1514-2 という 2 つの規格に分割されている。

なお、ベアリングの公差値を規定している最新の ISO 492 及び ISO 199 とそれに基づく JIS B 1514-1 及び JIS B 1514-2 では、近年の ISO での考え方に基づき、公差値について幾何特性仕様 (GPS) を用いてより厳密かつ誤解の生じないように表す指示が採用されている。

図 3.6.1 に規格に定められているベアリングの主要寸法を、図 3.6.2 にラジアル軸受の寸法系列を示す。

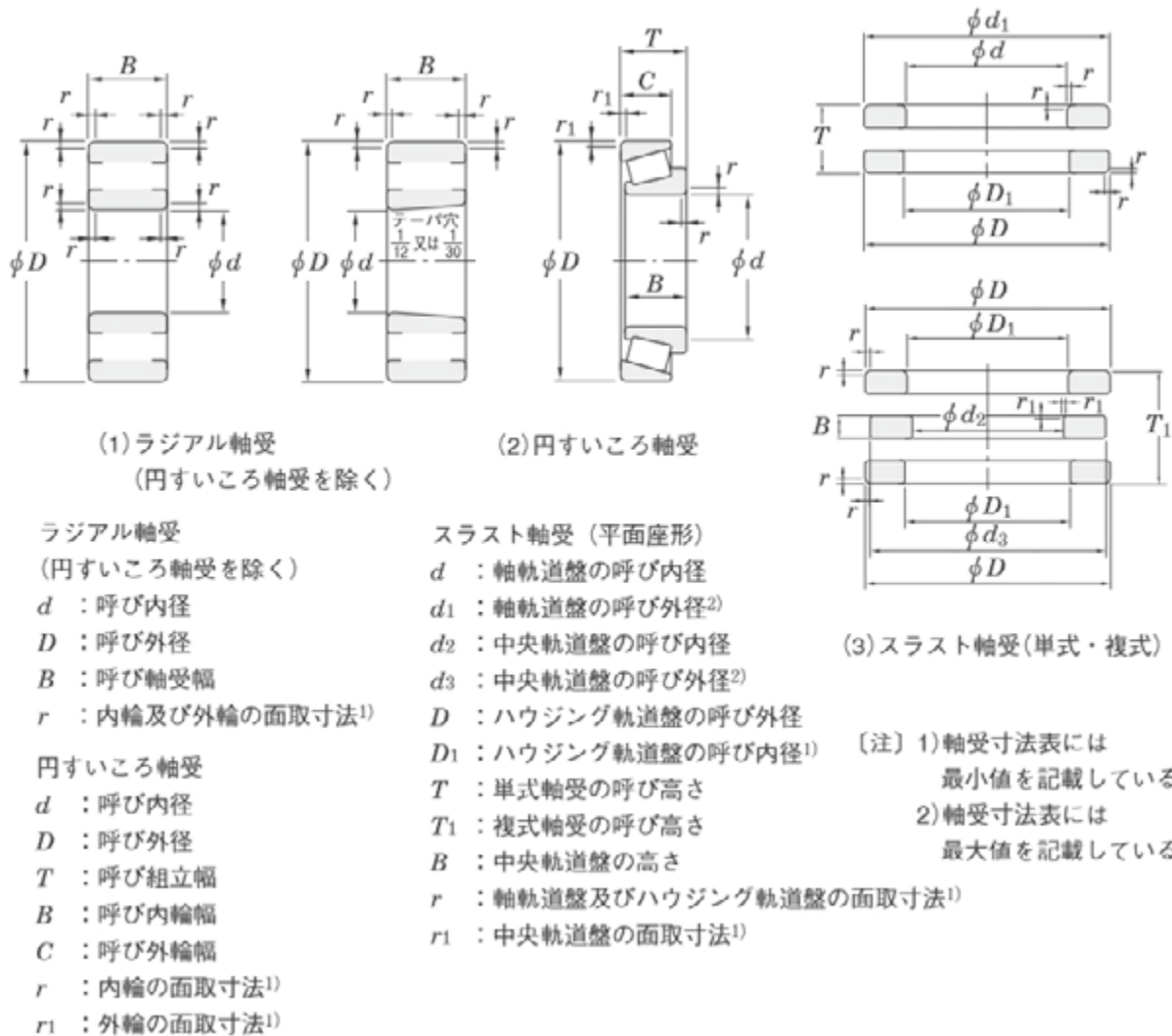


図 3.6.1 ベアリングの主要寸法<sup>7)</sup>

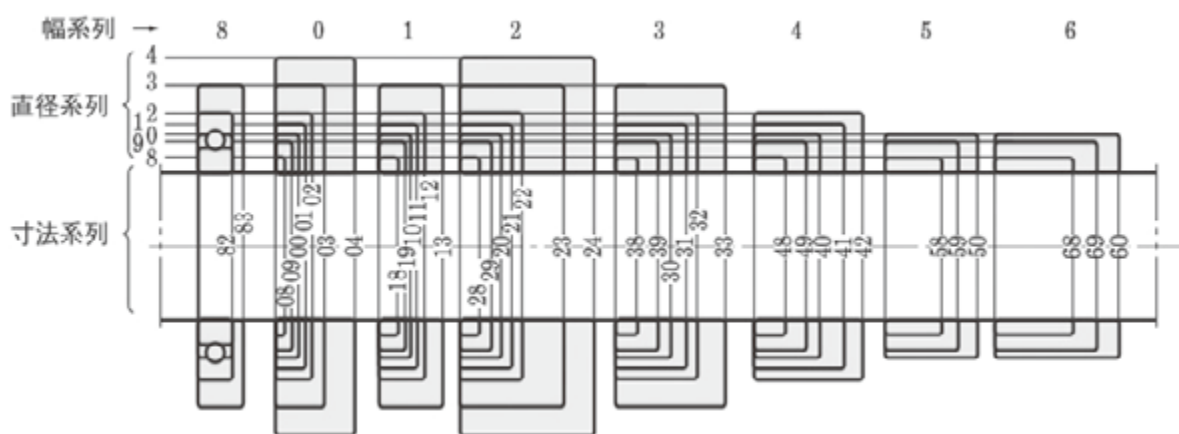


図 3.6.2 ラジアル軸受の寸法系列 (直径系列 7 は省略)<sup>7)</sup>

表 3.6.1 ベアリング内径寸法公差の変遷<sup>8)</sup>

(単位:  $\mu\text{m}$ )

年 代		1905	1907	1915	1923 当時	1922	1929	1954~				
軸受内径の呼び寸法 $d$ (mm)		DWF 社	DWF 社	F & S	SKF	DIN	ISA	ISO				
をこえ	以下							0級 KB				
								$d_m$	$d$			
(0.6)	2.5	( $d=10\sim110$ )	( $d=10\sim110$ )	( $d\sim10$ )	( $d=3\sim27$ )			0~-8	+1~-9			
2.5	10			0~-8				0~-10	0~-8	+2~-10		
10	18			( $d=10\sim20$ )				0~-11	0~-8	+3~-11		
18	30			+5~-5	+5~-10	( $d=20\sim30$ )	( $d=27\sim53$ )	$d\sim30$	( $d\sim30$ )	0~-10	+3~-13	
30	50					0~-12	+5~-10	0~-10	0~-10	0~-10	+3~-15	
50	80					0~-14	( $d=50\sim100$ )	0~-12	0~-12	0~-12	+3~-15	
80	120					0~-16	( $d=53\sim93$ )	0~-14	0~-14	0~-15	+4~-19	
120	150					( $d=100\sim200$ )	+5~-10	0~-18	0~-18	0~-20	0~-20	+5~-25
150	180					0~-18	( $d=93\sim215$ )	0~-22	0~-22	0~-25	0~-25	+6~-31
180	250			( $d=200\sim300$ )	+5~-15	( $d=215\sim400$ )	$d=180\sim$			0~-30	+8~-38	
250	315			0~-20	+5~-20	+5~-20	0~-27			0~-35	+9~-44	
315	400					( $d=400\sim655$ )				0~-40	+10~-50	
400	500					+5~-25				0~-45	+12~-57	
500	630					( $d=655\sim1000$ )				0~-50		
630	800					+5~-30				0~-75		
800	1000									0~-100		
1000	1250									0~-125		
1250	1600									0~-160		
1600	2000							0~-200				

## ISO におけるベアリングの国際標準化活動と日本の関わり

国際的な規格品として全世界で互換性が保証されているベアリング（転がり軸受）にとって国際標準化は非常に重要、かつ根幹をなす活動である。このベアリングの国際標準化作業は 1947 年に設立された ISO（国際標準化機構：International Organization for Standardization）の TC 4（Technical Committee：専門委員会 4）で行われている。TC 4 は基本的にベアリング（転がり軸受）が担当業務範囲であるが、現在は球面滑り軸受もその業務範囲となっている。

表 1 ISO/TC 4 の組織とメンバー国<sup>1)</sup>

国名	S：幹事国 P：Pメンバー O：Oメンバー									
	TC 4 転がり軸受	SC 4 公差、公差の定義及び記号（GRSを含む）	SC 5 針状、円筒及び自動調心ころ軸受	SC 6 インサート軸受	SC 7 球面滑り軸受	SC 8 定格荷重及び寿命	SC 9 円すいころ軸受	SC 11 リニア軸受	SC 12 玉軸受	
アルゼンチン	P	O	O	O	P	P	O	O	O	
オーストリア	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
ベラルーシ	P	—	—	—	—	—	—	—	—	
ベルギー	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
ブルガリア	O	O	O	O	O	O	O	O	—	
中国	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
キューバ	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
チェコ	P	O	O	O	—	P	P	O	P	
デンマーク	P	—	—	—	—	P	P	—	—	
フィンランド	O	—	—	—	—	O	O	—	—	
フランス	P	P	P,S	P	P	P	P	P	P	
ドイツ	P	P	P	P	P,S	P,S	P	P	P	
ギリシャ	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
香港	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
ハンガリー	O	O	O	—	—	O	O	—	—	
インド	O	—	—	—	—	—	P	—	—	
インドネシア	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
イラン	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
イタリア	P	O	O	P	O	O	O	O	—	
日本	P	P	P	P	P	P	P	P	P,S	
北朝鮮	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
韓国	P	O	O	O	O	O	O	P	P	
モロッコ	O	O	O	O	O	O	O	O	—	
オランダ	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
ノルウェー	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
パキスタン	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
フィリピン	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
ポーランド	O	O	O	O	O	O	O	O	O	
ルーマニア	O	O	P	P	P	P	P	P	—	
ロシア	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
セルビア	O	—	—	O	—	—	O	O	—	
スロバキア	O	O	O	O	O	O	O	O	—	
南アフリカ	O	P	O	O	O	O	O	O	—	
スペイン	O	—	O	—	—	P	O	—	—	
スウェーデン	P,S	P,S	P	P	P	P	P	P	P	
スイス	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
タイ	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
チュニジア	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
トルコ	P	P	P	P	P	P	P	P	O	
イギリス	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
アメリカ	P	P	P	P,S	P	P	P,S	P,S	P	
ウクライナ	O	—	—	—	—	—	—	—	—	
Pメンバー合計	20	15	15	16	16	19	18	16	15	
Oメンバー合計	22	10	11	9	7	9	12	9	3	
総合計	42	25	26	25	23	28	30	25	18	

ISO/TC 4は第3章でも述べたように、前身のISA（万国規格統一協会：International Federation of the National Standardizing Associations）での第二次世界大戦前の審議を引き継ぎ、1955年にベアリングの国際標準を推奨規格（Recommendation）R 15として公布した。その後、推奨規格R 15の内容が国際規格として十分に普及し認知されたこと、及び国際間の取引で使用する正式な国際規格が求められるようになったことより、1972年以降に発行されるベアリング規格からは推奨規格ではなくISO国際規格として順次発行されるようになった。

日本はISO/TC 4発足以来、オブザーバーとして推奨規格案等の資料は受け取れるものの投票・発言権がないOメンバー（Observing member：投票義務がなく単にオブザーバーとして情報を得るために会議・業務に参加する国）であったが、ベアリングの国際標準化審議において日本の意見を表明し反映させることは非常に重要であることからTC 4内に働きかけた結果、ようやく1961年からPメンバー（Participating member：国際規格案に対する投票、及び可能な限り会議に出席する義務がある国）に昇格して1961年5月のISO/TC 4第8回トリノ会議から会議に出席し現在に至っている。

現在ISO/TC 4のPメンバーは日本、主要欧米各国や中国、韓国など20か国、Oメンバーは22か国である。

またISO/TC 4は、技術仕様書（TS：Technical Specification）及び技術報告書（TR：Technical Report）を含めて63のベアリング（転がり軸受）関係のISO規格及び文書の制定・改正を担当している。

ISO/TC 4の本会議（Plenary Meeting）は最近ではおよそ2年ごとに開催されており、その間に半年に一度程度TC 4に所属するSC（Sub Committee：分科会）及びWG（Working Group）の会議が必要に応じて行われている。現在TC 4には8つのSCがあり、WGについては検討が必要な国際規格の改正等の課題について適宜WGを設置した上で、国単位の審議ではなく、各国のその分野の専門家（Specialist）が個人の資格で出席し専門的に審議を行っている。

それら全ての活動において、日本は委員または専門家を派遣出席させて活発に意見を提出して活動し、SC 12（玉軸受分科会）では主要欧米各国以外で唯一幹事国（議長及び国際幹事）を務めている。

また、ISO/TC 4本会議も1969年10月東京、1995年10月横浜、2009年6月沖縄、2019年5月千葉と計4回、日本がホスト国となり日本で開催されている。

#### <参考・引用文献>

- 1) 第28回ISO/TC 4アトランタ会議報告書 日本ベアリング工業会（2017年）

### 3.7 ベアリング材料

軸受鋼（高炭素クロム鋼）は炭素約1%、クロム約1.5%を含む鋼材で、20世紀初頭に欧州で開発され、SKF社等で使用が始まった。日本ではベアリングを製造し始めた当初は国内で入手が可能であった炭素工具鋼（現在のSK3相当）が使われていたが、焼き入れの際の不具合が多く品質が安定しなかった。そのためSKF社が使用している高炭素クロム鋼を輸入して使用することで熱処理品質の安定化が図られ、また戦時にはその国産化が行われた。当時の軸受鋼の品質は現在のレベルには遠く及ばないものであったが、原材料に純度の高いものを使用し製鋼条件を見直すことで不純物、含有ガスを減らす努力が行われた。

1950年ごろになると欧州で、高真空中で軸受鋼を溶解する真空溶解処理法によってベアリングの寿命が延びることが明らかにされたが、この処理法はコストが高く通常のベアリングに適用されるには至らなかった。しかし1964年にアメリカで溶鋼を取鍋中または取鍋に移す際に真空の雰囲気として鋼中に含まれるガスを除去し、非金属介在物やガス含有量を大幅に低減させて、ベアリングの転がり寿命を大幅に改善する真空脱ガス処理が開発された。この処理は真空溶解法よりも真空度が低いため効果は限定的であったが量産性が高く、費用も安価であり、従来の大気溶解法による軸受鋼を使用したときに比べて数十倍の転がり寿命を有するため、広く普及することとなった。

これにより従来大気溶解材での鋼中酸素量が30～60ppm程度であったものが1/2程度に低減し、日本では1975年ごろには10ppm以下のレベルとなった。

その後さらに鋼中酸素量を低減させるため、従来の取鍋脱ガス処理に代えて連続鋳造法のベアリング鋼材への適用が図られ、1990年ごろから一般的となった。

一方、アメリカで生産される円すいころ軸受では韌性に富み、衝撃荷重に強い浸炭軸受用鋼（肌焼鋼）が古くから使用されていた。また浸炭軸受用鋼は浸炭熱処理により表面に残留圧縮応力が発生し、転動時の接触応力を緩和するため転がり疲れ寿命を向上させる効果がある。円すいころ軸受に使用する浸炭軸受用鋼においても軸受鋼（高炭素クロム鋼）に準じて真空脱ガス処理が1960年代から採用され、冷間加工の容易さや当初使用されていたニッケルモリブデン鋼（SAE4320等）から、より安価なクロム鋼系（SAE5120等）への移行により、主に円すいころ軸受において日本を含めて広く普及することとなった。

### 3.8 日本でのベアリングの歴史

日本では、明治時代の終わりの1910年ごろからSKF社のベアリングが輸入され主に横須賀や呉の海軍工廠に納入されて使われており、1916年ごろには自動車の交換補修部品としてティムケン社の円すいころ軸受が輸入され始めたが、当時、ベアリング1個の価格は金時計1個と同じと言われたほど非常に高価であり、日本でのベアリングに対する認知度はまだまだ未熟であった。しかし第一次世界大戦以降、主に軍事的な要求を中心にベアリングの国産化の気運が高まったことにより、1914年に日本精工が設立され1917年ごろから本格的にベアリング製造を開始した。また1921年には光洋精工（現ジェイテクト）が設立され、1923年には巴商會が西園鉄工所と提携しNTNブランドによるベアリングの製造を開始した。しかし当時の日本のベアリングメーカーは日本製材料の品質や工作機械の加工精度の問題から、軸受鋼や鋼球などを海外からの輸入に頼らざるを得なかった。日本精工は1916年に最初の製品である自動調心玉軸受を横須賀海軍工廠に納入しているが、当時の日本の技術レベルではベアリングの製造工程一つ一つが手探りの状態であり、使用する工作機械も専用機などは無く汎用の旋盤、工具研磨盤を使用していた。また測定器具も当時はノギスのみで、ようやくその後にはダイヤルゲージやブロックゲージが輸入されて使われたが、それでも1/100mm単位での計測しかできない状態で製作が進められていた。従って日本のベアリングメーカー各社は輸入した鋼球やころと自社で製作した内外輪や保持器を組み立てるにとどまっていた競争力に乏しく、軍需等の限られた用途に販売している状況であった。そのため、第二次世界大戦以前は日本国内のベアリングの需要のほとんどは海外製ベアリングで賄われている状況であったが、そうした中でも日本精工が1926年に政府の助成金を得て鋼球用製造機械を輸入し鋼球の製造を開始するなど、日本の各ベアリングメーカーでの国産化の体制が徐々に整えられた（図3.8.1、図3.8.2、図3.8.3）。

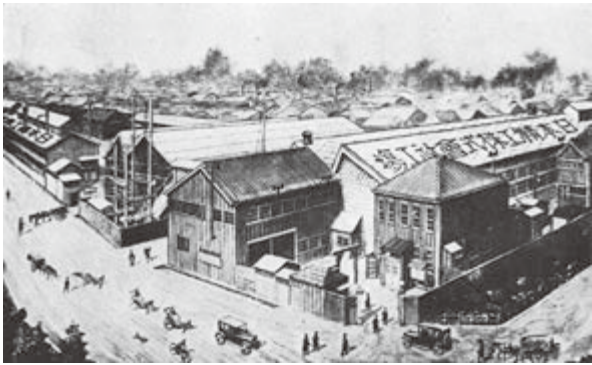


図 3.8.1 日本精工工場（1914年）<sup>9)</sup>

資等が行われた（図 3.8.4、図 3.8.5、図 3.8.6、図 3.8.7、図 3.8.8、図 3.8.9）。



図 3.8.4 光洋精工工場（1933年）<sup>11)</sup>

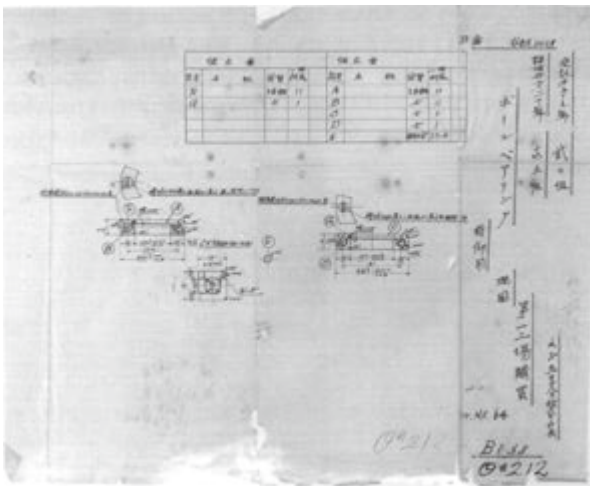


図 3.8.2 転がり軸受第1号設計図 非分離型ラジオラスト玉軸受 日本精工（1916年）<sup>10)</sup>



図 3.8.5 光洋精工定価表（1930年、1935年版）<sup>11)</sup>



図 3.8.3 日本精工カタログ（1918年版）<sup>10)</sup>

軍部の台頭により 1931 年の満州事変を契機にベアリングの輸入が禁止されると、ベアリング並びにそれに使用する軸受鋼の国産化が推し進められた。戦争の気運が高まり、航空機等の兵器に使用するベアリングや、兵器製造を支える鉄鋼・機械・化学等の重工業を中心にベアリング需要が増加したことで、国策としてベアリング産業の育成が図られ、ベアリング各社では次々に株式会社への改組、新工場の建設、資本金の増

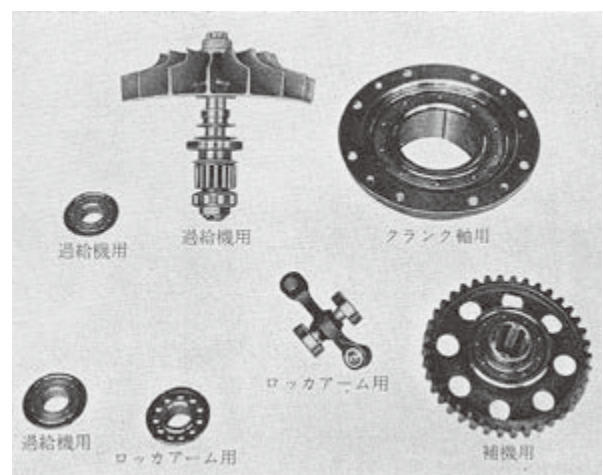


図 3.8.6 航空機用ベアリング 日本精工（1934年）<sup>9)</sup>



図 3.8.7 建設中の光洋精工国分工場（1937 年）<sup>11)</sup>

またこうした国産ベアリング育成の必要性が増す中で、ハクソーやドリル、エンドミル等の工具や工作機械のメーカーであった不二越鋼材工業（現不二越）が1939年にベアリング製造事業に進出した。



図 3.8.8 建設中の日本精工藤沢工場（1938 年）<sup>9)</sup>



図 3.8.9 東洋ベアリング武庫川工場（1939 年）<sup>12)</sup>

ここで本系統化調査の対象である自動車用ベアリングについての歴史と経緯に触れておく。

第二次世界大戦前において、自動車は1924年にフォードが横浜に、1925年にGMが大阪に工場を設立するなどのアメリカの自動車製造会社の日本進出もあって民需については国産自動車が育つ余地がなく、満州事変を契機とした軍事用途において、飛行機とともに自動車産業が育成された。また、その軍事用トラック、装甲自動車等に使用するベアリングについての国産化が図られた。

戦争の気運とともに自動車の国産化の必要性から1936年に自動車製造事業法が制定され、これに基づく輸入の抑制、事業資金・税制優遇等が行われた。これらの動きの中で民間自動車製造会社の合併集中が行われ、1937年ごろには現在の自動車産業につながる体制が構築されていった（図3.8.10）。これに伴いアメリカ自動車会社の日本工場はその活動を弱め1939年ごろにはほぼ活動を休止するに至った。

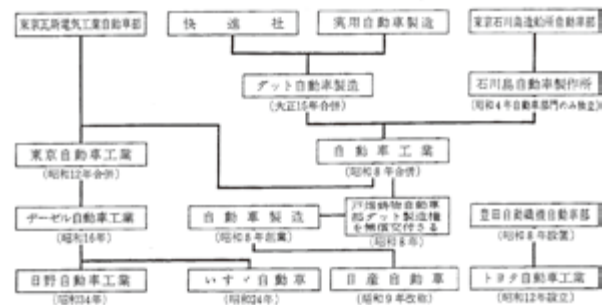


図 3.8.10 日本の自動車製造会社の変遷<sup>9)</sup>

このように第二次世界大戦前においては自動車用ベアリングの生産はそのほとんどが主に中国大陸での軍事作戦用として1941年には4万台にまで急増した軍用トラックに使用されるものであった。

こうした状況を受けて1939年には陸海商工三省が「玉軸受及びコロ軸受工業指導要領」を策定し、日本国内での自給体制の構築が急がれたことにより、その後、第二次世界大戦中の1944年までベアリングメーカーは一貫してその生産規模を拡大することとなった。国内のベアリング総生産額は1937年に1256万円であったものが、1940年には1億円、1944年には3億円に達した。しかしながら1945年になると資材の欠乏や労働力の不足、空襲による工場や設備の焼失が影響してベアリング生産は頭打ちとなり、終戦を迎えた（図3.8.11）。





図 3.8.11 空襲直後の東洋ベアリング  
桑名工場 (1945年)<sup>12)</sup>

終戦直後はベアリング工場がGHQ（連合国軍最高司令部）による日本の物的戦争能力を除去するための政策により、機械設備を賠償支払い対象として賠償指定の制約を受ける苦しい状況であったが、その後1950年の朝鮮戦争による特需、1952年の講和条約発効による賠償指定の解除により老朽設備の更新等が可能となって急速に復興した（図 3.8.12、図 3.8.13、図 3.8.14）。

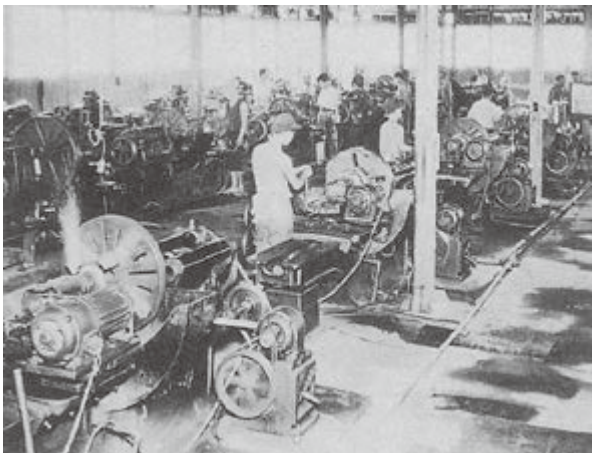


図 3.8.12 光洋精工研削工場 (1950年ごろ)<sup>11)</sup>



図 3.8.13 光洋精工完成品検査場 (1960年ごろ)<sup>11)</sup>



図 3.8.14 不二越大型軸受研削工場<sup>13)</sup>

戦後すぐの日本製ベアリングは老朽化した機械設備や遅れた加工方法から世界的レベルには到底及ばないものであり、例えばモーターや発電機等の電気製品の回転軸に使用するベアリングの騒音が海外製ベアリングと同等と認められたのはようやく昭和20年代の終わり1953年ごろであった。しかし敗戦によって軍需産業に依存するのではなく民生需要に特化したこともあり、繊細な感性を持つ日本人特有の完全主義から、市場が求めるベアリングの静粛性や耐久性向上の要求に応えるべく、玉軸受やころ軸受などのベアリング転動面のうねりや粗さを低減させる超仕上げ技術の開発が行われた。その結果、転動面に油膜（いわゆる弾性流体潤滑油膜）が形成されやすいベアリングが生産できるようになり静粛性や耐久性が著しく向上した。折から昭和30年代（1950年代後半）には機械工業振興臨時措置法等での日本政府の支援によって生産設備の合理化・近代化が進められたことで、低コストで高品質のベアリングを大量に市場に供給できるようになった。また耐久性向上については1960年代に開発された真空脱ガス材のベアリング材料への適用等の努力が行われた（図 3.8.15）。



図 3.8.15 戦後日本でのベアリング開発における  
技術思想<sup>14)</sup>

一方でベアリング各社の生産現場においては1950年代から統計的品質管理（SQC）が導入されベアリングの信頼性と生産効率の向上が図られた。例えば東洋ベアリング製造（現 NTN）は1954年に機械業界で初めてのデミング賞を受賞している。この活動は1960年代以降になるとTQC活動へと進化し、ベアリング各社での全社的品質向上システムが構築されていった。

その後、日本国内の重工業の発展、モータリゼーションの発達によって、ベアリングメーカー各社の生産はさらに飛躍的に増大し、また海外への輸出も始まって日本製ベアリングが国際的にデビューすることとなった。それを受けて1969年には念願であったISO/TC 4（国際標準化機構・転がり軸受専門委員会）の本会議が東京で開催された。

その結果、1955年には年間6.5億円であったベアリングの輸出が1975年には年間1200億円程度へと20年間で約186倍に急増し（日本全体の輸出額は23倍）、欧米との経済摩擦を生じるまでに成長した。

当初の海外進出については、品質の高い日本製ベアリングが安価に提供できる1ドル360円体制での価格競争力が寄与したことは否めないが、後に述べるベアリングの信頼性保証の付加価値を付けること、及び積極的な海外現地工場の設立と生産によって、その後の経済摩擦や円高の時代においても国際的競争力を維持し、現在に至っている。

1970年代ごろになると、日本のベアリングメーカー各社は、それまでに蓄積したベアリングの市場実績から、ベアリングを使用する機械設計技術者がベアリングを選定する際に、その使用条件と過去の市場実績とを照合することで信頼性の高い機械システムの構築を支援することができるようになった。

過去の市場実績が存在しない自動車用、電気製品用等の新たな用途については新しいベアリングを設計～試作し、使用条件をシミュレートした実験条件で試作ベアリングの評価を行うことで性能確認と改良を行い、その結果を量産技術に落とし込んで量産供給する手法が確立され、ベアリング産業のいわゆる2.5次産業化が達成された（図3.8.16）。

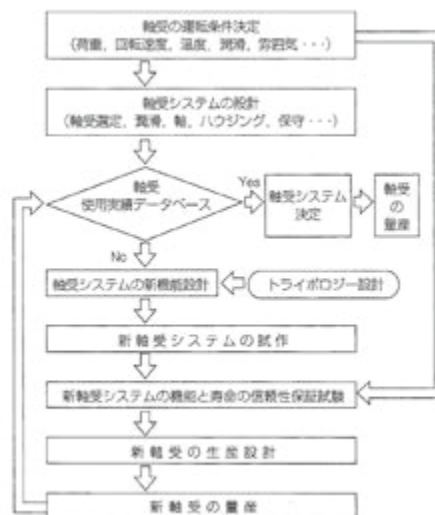


図 3.8.16 ベアリングの設計開発の流れ<sup>14)</sup>

近年ではさらに市場や顧客の動向や技術トレンドを予測し、ニーズを先取りした開発をベアリングメーカーが行う体制の構築が図られている。

図 3.6.17 に終戦直後から2008年までの日本国内のベアリング生産高の推移を示す。

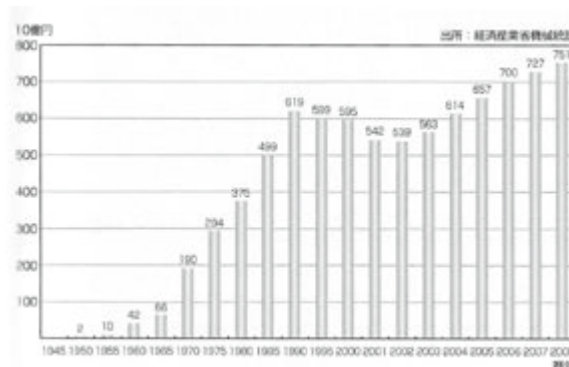


図 3.8.17 ベアリング生産高の推移<sup>15)</sup>

ベアリングは高精度な精密品から単純に回転を支えるだけのさほど精度を要求されないものまで存在するため全体需要の推計が難しいが、今日、ベアリングの世界需要は2.5兆円とも言われる。

その中で日本のベアリングメーカー各社は上述した高品質なベアリングや付加価値の提供によって、その約40～50%を日本企業が占めるまでに成長した。

またベアリングの用途の中で自動車用の占める割合は約40%と言われており、日本国内だけを見ると50%を超える需要があるため、ベアリング産業にとって自動車は非常に重要な需要先となっている。

これは自動車用ベアリングの売上が他の需要分野に比べ非常に大きいこと、日本の自動車工業自体が1960年代から急激な成長を遂げ、世界有数の生産規

模で日本経済を牽引するとともに、広範な産業分野に及んで経済拡大の波及効果をもたらしたことが挙げられる。ベアリングにおいても直接の自動車向けだけでなく、製鉄、工作機械、カーエアコン・オーディオ等の自動車用電気製品に至るまで幅広く需要拡大の効果をもたらした。

そして自動車用に大量にベアリングを生産することによって、ベアリングの大量生産システムを構築することができ、結果としてベアリング全体の生産性の向上やコスト低減に大きな役割を果たすことになった。

このようにベアリング産業は、自動車産業と大きな関わりを持っており、その関係は今後も続いていくと考えられる。

#### 参考・引用文献

- 1) 日本ベアリング工業会 ホームページ「ベアリングの歴史」(2019.11.4 検索)
- 2) トライボロジーの歴史 D.ダウソン著 トライボロジーの歴史編集委員会訳 工業調査会(1997年)の図を基に筆者スケッチ
- 3) ジェイテクト製作保有
- 4) ジェイテクト ホームページ 商品紹介 ベアリングコラム (2019.4.23 検索)
- 5) <https://www.hemmings.com> より (2019.4.23 検索)
- 6) <https://www.tekniskamuseet.se> より (2019.4.23 検索)
- 7) ジェイテクト 転がり軸受総合カタログ CAT No. B 2001-8
- 8) ころがり軸受の精度 精密機械 39巻3号(1972年) 吉田岑男
- 9) 日本精工 50年史(1967年)
- 10) 日本精工 100年史(2018年)
- 11) 光洋精工 70年史(1993年)
- 12) ベアリング(産業フロンティア物語) 東洋ベアリング製造(1967年)
- 13) 不二越五十年史(1978年)
- 14) 「なぜ日本の軸受が世界を動かしたのか?」NSK Technical Journal No.668(1999年)
- 15) 経済産業省機械統計

## ISO/TC 4 東京会議（1969年）

別コラムで ISO/TC 4（転がり軸受）での活動と日本の関わりについて紹介したが、ここでは日本で初めて開催された 1969 年の ISO/TC 4 第 12 回東京会議について紹介する。

ベアリング（転がり軸受）は国際的な規格に基づいて高度に標準化された機械要素部品であり、ISO の中でもねじや締結部品に次ぐ若い専門委員会番号“TC 4”を与えられていることから国際規格におけるベアリングの重要性が見て取れる。また、我が国の JIS（Japanese Industrial Standards：日本産業規格）も国際規格に準じて規定が行われている。

そのためベアリングの国際規格の審議を行う ISO/TC 4 での活動は日本にとっても非常に重要であるが、第二次世界大戦の敗戦国である日本は、戦後に発足した ISO（International Organization for Standardization：国際標準化機構）において、当初は規格案に対する投票権のない O メンバー国（オブザーバー国）としての資格しか与えられず、国際規格の審議への参加もままならない状況であった。しかし、戦後日本の復興のためには工業製品の輸出振興が欠かせず、ベアリング産業はその品質と価格で他の産業分野に先駆けて、いち早く国際競争力のある製品が製造できるようになっていたことから、ISO でのベアリングの国際標準化活動に日本が参画し、ベアリング産業の主要国であると国際的に認められることは、ベアリング産業のみならず、国を挙げての宿願であった。

それを受けて ISO での国際標準化活動に関係する国家機関、学会、ベアリング技術者それぞれが ISO/TC 4 に働きかけを行い、ようやく 1961 年に投票権のある P メンバー国に昇格し、1961 年 5 月の ISO/TC 4 第 8 回トリノ会議から会議に出席することとなった。

P メンバー国への昇格直後から、日本がベアリング主要生産国であるとの認知を得る上で欠かせないとして、ISO/TC 4 本会議（Plenary Meeting）の日本への招致が命題であった。そのため初参加の 1961 年第 8 回トリノ会議で早くも日本から本会議開催の意思があることを伝え、1963 年第 9 回ロンドン会議では、第 10 回本会議を東京で開催する招請を行った。

しかし当時は国際間の交通が時間、費用の両面で大きな障害となっており、欧米から地理的に遠い日本での開催は ISO/TC 4 幹事国であるスウェーデンや欧米主要各国代表の負担が大変大きいことや、会議開催にあたっては公式な英仏語通訳者（2 名）が必要であり、幹事国職員及び通訳者の出張参加費用をホスト国が負担する必要があったことなど、現在の ISO/TC 4 本会議開催ルールとは異なるいくつかの問題があり、投票の結果は立候補した国の中でオランダが過半数を獲得し、1965 年の第 10 回本会議はオランダのハーグで開催されることとなった。

続く 1965 年第 10 回ハーグ会議でも第 11 回本会議開催国として日本は立候補したが、同様に投票の結果、ハンガリーでの開催が決定し、1967 年の第 11 回本会議はブタペストで開催されることとなった。

当時は公差関係の国際規格を審議する専門委員会である ISO/TC 3（現在は廃止）が活動しており、その会議にも各国のベアリング技術者が出席していたため、1965 年～1967 年にかけてイタリアのトリノ他で行われた ISO/TC 3 関係の会議でも ISO/TC 4 本会議の日本招致の働きかけを行ったようである。

これらの活動が実を結び、1967 年 10 月の ISO/TC 4 第 11 回ブタペスト会議において、ようやく開催経験のあるフランス、アメリカと並び日本を有力開催候補地として認める決議がなされ、紆余曲折の後、1968 年 8 月に ISO/TC 4 における投票の結果、多数決で悲願であった第 12 回東京会議開催が決定した。ベアリング関係のみならず日本全体としてみても ISO の専門委員会本会議の日本開催自体が初めての経験であり、国を挙げての受け入れ準備が開始された。

早速、1968 年 8 月には工業技術院長から日本ベアリング工業会会長あてに東京会議開催のために必要な業務の準備を進めるよう正式文書が発行され、それを受けて 1968 年 11 月に工業技術院、日本規格協会、及び日本ベアリング工業会からなる ISO/TC 4 東京会議準備委員会が発足した。そして当時の国際情勢から、共産圏の各国代表の入国に際してビザが下りよう準備委員会委員長（日本ベアリング工業会会長）から外務大臣あてに依頼状が発行されている。

ISOでの日本の代表団体はJISC（日本工業標準調査会：現日本産業標準調査会）であり、その事務局は工業技術院であったので、会場その他の予算を工業技術院が国家予算として確保することとなり、会議場としては経団連会館の国際会議場が充てられることとなった。

前述のように当時は公式な英仏語の通訳者が議長の横に座って通訳を行うこととなっており、その人選は幹事国とホスト国が相談の上決めていた。また日本開催にあたっては通訳者の費用も日本が支払う必要があった。（ちなみに現在のISO/TC 4会議では全ての審議が英語のみで行われており、参加各国が必要に応じて通訳者を同席させることはあるが、公式な通訳者は置いていない。）1969年の東京会議においては、人選もさることながらISO/TC 4幹事国のスウェーデンが推薦する通訳者1名（ドイツ人女性）に関わる費用は1ドル360円のレートで約125万円であり、当時の日本にとっては非常に大きな負担であった。そのため、交代で通訳を行うもう1名は日本在住の外国人として費用を圧縮することとし、在日米軍の英仏語に堪能な夫人に依頼したが、ベアリングの専門用語や技術的な内容が理解できないため実際の会議の場では通訳補助者としてしか役に立たなかったようである。

またホスト国として日本代表団でも日本代表のための通訳者や、英仏語で発行する会議議事録や決議録を清書するタイピストを用意することが必要で、横須賀の米海軍基地に勤務する人に応援を依頼するなど、当時の国際化が遅れている日本で国際会議を開催するための様々な苦労があった。日本代表の発言（日本語）とそれに伴う英語通訳のリハーサルも本会議の前に休日を返上して頻繁に行われた。

日本初のISOのTC（専門委員会）本会議の開催であることから、会議の傍聴者の希望もベアリング産業の枠を超えて非常に多数に上り、日本側で厳選しても最終50名程度となった。これについても会議での発言もなく、専門家でもない傍聴者がそのように多数同席することは、幹事国や主要欧米各国から抵抗もあり、また奇異に見られたそうである。

ISO/TC 4第12回東京会議は1969年10月20日（月）から始まり、各国代表は開業早々の赤坂東急ホテルにまとめて宿泊した。初日の午前中には精度（公差）のワーキンググループであるWG 4会議が開かれ、午後には東京都内観光が設定された。2日目以降、各専門分野のワーキンググループ会議があり、10月25日（土）はテクニカルビジットとして東芝中央研究所と石川島播磨重工業横浜第二造船所の見学が行われた。また、各国代表の同伴家族のためのレディースプログラムの実施、会議終了後の10月31日（金）からは任意参加の新幹線を使っの奈良・京都旅行など、日本文化と技術成果のPRが目白押しで、各国代表団に対して至れり尽くせりの応接であった。

翌週10月27日（月）からはISO/TC 4本会議が行われ、27日夜の通産政務次官主催の椿山荘でのレセプション、28日（火）の箱根・鎌倉観光が実施され、29日（水）夜にはホテルニューオータニでの晩餐会が開催されるなど、国際会議を成功に導くためのまさに国を挙げての歓迎の中、30日（木）の最終日には本会議の決議まとめが行われたが、PCが発達した現在とは異なり、決議内容をその日のうちに行う決議確認に間に合わせるように英文・仏文のタイプを打つことは大変な作業であり、本会議ではないが第1週目のワーキンググループ会議では深夜までかかって間に合わせることもあったようである。

このISO/TC 4東京会議がきっかけとなって、日本の政府関係や研究機関のみならずベアリング産業の中でも国際標準化活動への理解が一層進み、日本に有利な規格制定のための積極的な国際規格の提案や、SC（Sub Committee：分科会）、WG（ワーキンググループ）の幹事国、議長、コンビーナを務めることの重要性が認識されることとなって、現在に至る日本の積極的なISO/TC 4での活動につながっていった。

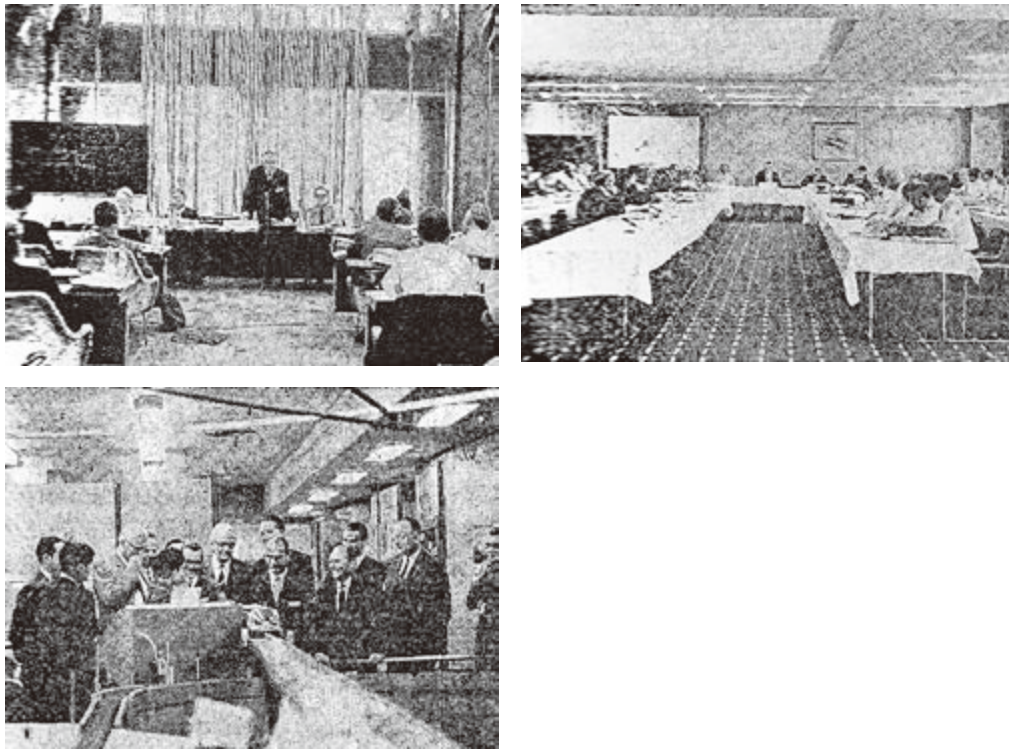


図1 ISO/TC 4 東京会議、及びテクニカルビジット風景<sup>2)</sup>

<参考・引用文献>

- 1) ISO/TC 4 第12回東京会議 (その1) NTN ベアリングエンジニア 第20巻1号 (1971)
- 2) ISO/TC 4 第12回東京会議 (その2) NTN ベアリングエンジニア 第21巻1号 (1972)

## 4 | 自動車用ベアリングの開発と進化

自動車は、その誕生から一貫して、故障することなく長期間使用することができる耐久信頼性、及び航続距離の延長と経済性につながる燃費の向上が求められてきた。そのため回転部の摩擦や摩耗を減らすことに不可欠なベアリング（転がり軸受）は、自動車の発展普及と切っても切れない関係にあるといえる。また、第二次世界大戦後の一般大衆への自動車の急速な普及、すなわちモータリゼーションの進展は大きなベアリングの需要を生み、各ベアリングメーカーがその事業基盤を築き、社業を大きく発展させる礎となった。

それとともに、自動車用のベアリングは国際規格（ISO 規格）や日本産業規格（JIS）等に準拠した標準品だけでなく、自動車のエンジン、車軸、トランスミッション等の各用途に適したオリジナルの仕様を持つベアリングが必要となり、そのニーズに応えたベアリング技術者の間断のない努力と創意工夫により開発が行われていった。

モータリゼーションの発達に伴い、自動車、特に乗用車の構造は、車体では当初のラダーフレームからモノコックボディへ、車軸ではリジッドアクスルから独立懸架へ、駆動方式ではFR（フロントエンジン・リアドライブ）からFF（フロントエンジン・フロントドライブ）へ、そして変速装置では手動変速機（マニュアルトランスミッション）から自動変速機（オー

トマチックトランスミッション）へと進化発展し、それに伴って使われるベアリングの形式やサイズ、求められる機能や性能も時代とともに変化を遂げてきた。また、最近ではハイブリッド車や電気自動車の登場により、高速回転への対応や、より断面形状が小さい薄肉のベアリングのニーズが高まっている。

この章では、これらの自動車の構造の変化や、それに伴うニーズの変化を受けて、ベアリングメーカーが取り組んできた技術開発の経緯を、自動車用のアプリケーションごとに背景となる各アプリケーションの特性や、そこから発生するベアリングに要求される機能・性能とともに述べる。

自動車のニーズから発生するベアリングに要求される機能・性能をまとめると次のページの図4.2のようになる。

図4.2の左側には自動車に求められる機能・性能である「耐久信頼性」、「高馬力」、「軽量・コンパクト」等々を挙げ、中央にはそれを受けて自動車用ベアリングに求められる機能として「長寿命化」、「ユニット化」等を列記した。そしてそれらの機能を実現するためにベアリングメーカーが行ってきた具体的な個々の技術開発を右側に示している。またそれぞれの項目の関係を線で結んでいる。



図 4.1 各種の自動車用ベアリング<sup>1)</sup>

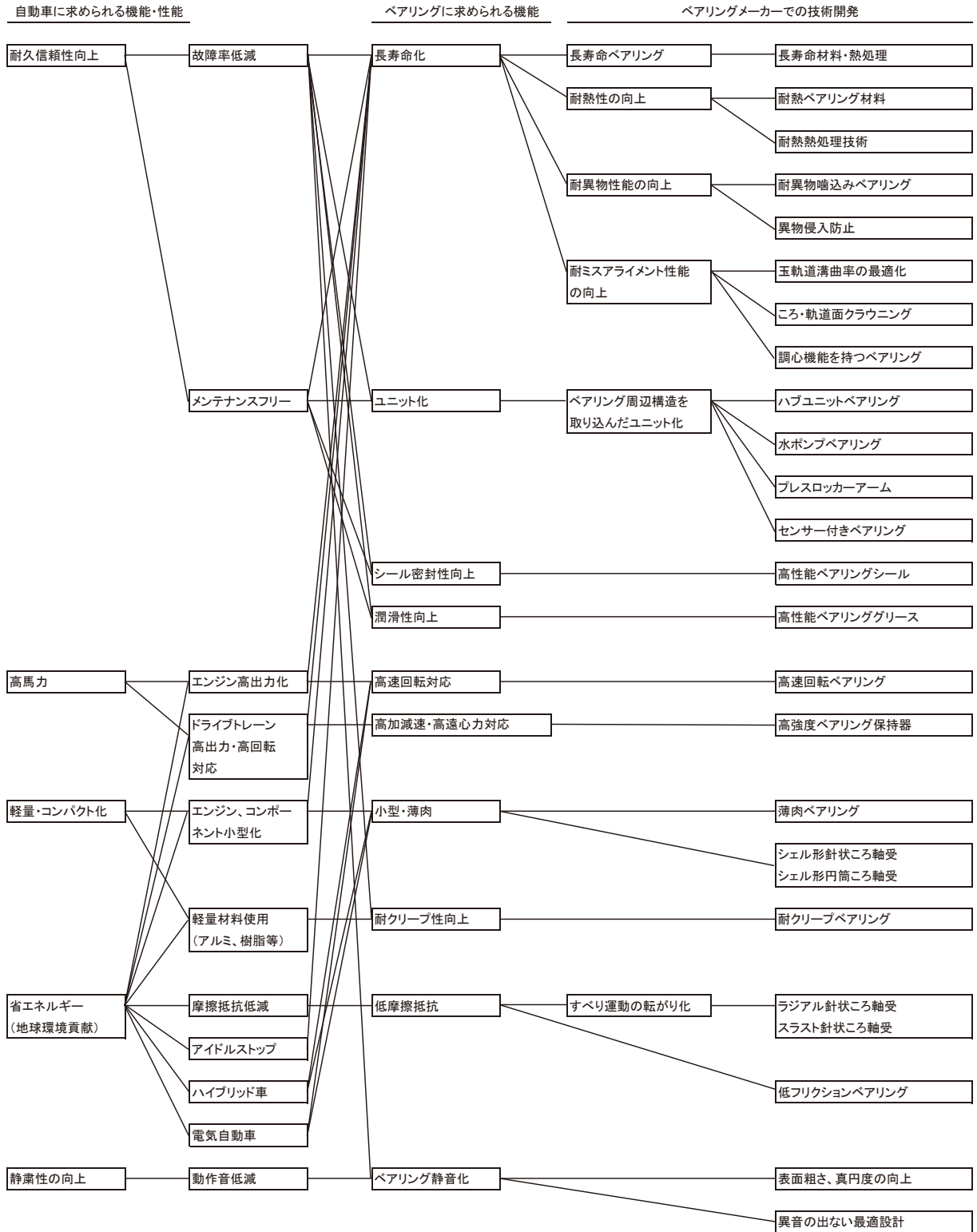


図 4.2 自動車に求められる機能とベアリングの技術開発の関係



## 4.1 エンジン及びエンジン補機用ベアリング

### 4.1.1 クランクシャフト・コネクティングロッド用ベアリング：永遠の課題「転がり化」

自動車には通常レシプロエンジンが動力源として使用されていることが多いが、そのエンジン本体のクランクシャフト、及びコネクティングロッドの大端部、小端部にはすべり軸受（メタル軸受）が使用されている。これは曲がりくねったクランクシャフトの構造上、ベアリング（転がり軸受）を組み付けるのが難しいこと、ピストンを介してリンダー内での点火～爆発による衝撃荷重が負荷されるためベアリングにとって過酷な使用条件であること、特にクランクシャフトの場合、限られた数の転動体で支持されたベアリングから発生する振動や音が問題となるなど、いろいろな理由が挙げられる。

すべり軸受を用いている関係で、自動車用エンジンは常にオイルポンプを駆動させエンジンオイルを圧送して、すべり軸受と軸の間に油膜を形成させる必要が生じるため、動力損失が発生している。また、油膜の形成を妨げるエンジンオイルの劣化には常に注意する必要がある。

カーメーカーやベアリングメーカーの研究レベルでは既存のクランクシャフトとジャーナルを改造し、クランクシャフトに組み付けが可能なように図 4.1.2 の右下の写真にもあるような二つ割り針状ころ軸受を用いて摩擦トルクの低減効果を実測した結果、特にアイドリング等の低速回転域において通常のすべり軸受に比べて  $1\text{ N}\cdot\text{m}$  レベルでのトルク低減があることが分かっている。

これらのことからエンジン本体のクランクシャフト、及びコネクティングロッドにベアリング（転がり軸受）を採用することはカーメーカーとベアリングメーカーにとって永遠の課題であるといえる。

研究レベルにおいては、1970年代～1980年代にかけていすゞ自動車と京セラの共同でピストン、シリンダー、ヘッドプレートなどを全てセラミックとしエンジンの熱効率の向上を目指した断熱ディーゼルエンジンの試作と実験が行われ、そのクランク支持には総セラミック製ベアリング（図 4.1.1）が使用されたが、セラミックでの断熱ディーゼルエンジンの複雑な部品形状の製作や、そのコスト、耐久性などの問題から研究と実証実験にとどまり実用化には至らなかった。

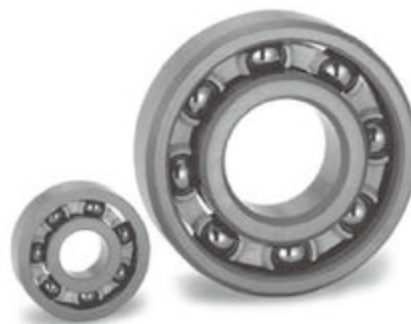


図 4.1.1 総セラミック製ベアリングの例<sup>2)</sup>

また 1970 年ごろまで軽自動車等で、2000 年ごろまで二輪車で使用されていた 2 サイクルエンジンでは、その混合潤滑での貧潤滑雰囲気の特徴からクランクシャフトに深溝玉軸受や円筒ころ軸受、及びコネクティングロッドの大端部、小端部に針状ころ軸受が使用されていた。今日これらは 4 サイクルエンジンに置き換わっているが、二輪車用 4 サイクルエンジンでは引き続き、図 4.1.2 に示すようなクランク軸への組み立ての制約から二つ割り形状を含むベアリング（転がり軸受）が使用されている。

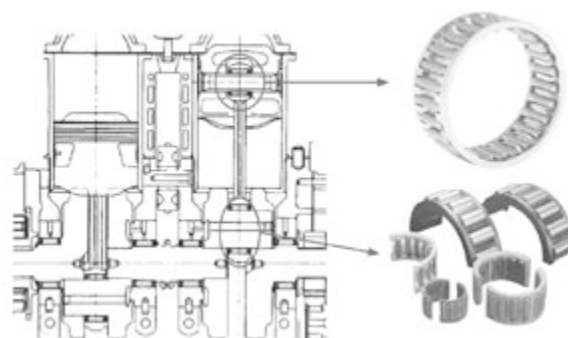


図 4.1.2 二輪車エンジン用軸受の例<sup>3)</sup>

日本が世界の二輪車市場を席巻している状況にあることから、二輪車用ベアリングについては、常に世界トップレベルの性能が日本のベアリングメーカーに求められてきた。特に 2 サイクルエンジン用コネクティングロッド大端のベアリング（針状ころ軸受）については、2 サイクルエンジンの特性からエンジン回転数（クランク軸回転数）が高回転となるため、ベアリングの保持器に大きな遠心力がかかる。そのためベアリングの保持器は、通常のところ案内ではなく、保持器の外径面で位置決めがなされる外径案内とし、保持器外径面を研削加工して形状精度を上げるなどの手法が採られるが、それでも年々高回転・高出力化する二輪車用エンジンの性能向上に伴ってベアリングの焼き付き等が問題となった（図 4.1.3）。

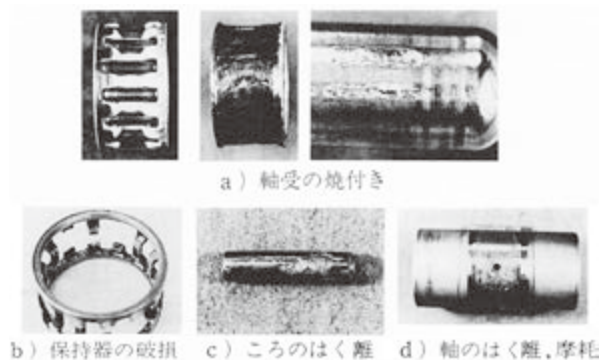


図 4.1.3 二輪車用コネクティングロッド大端ベアリングの損傷例<sup>4)</sup>

この解決のため、ころが入る保持器の窓の回転方向に対する倒れ精度の向上や、窓の隅 R の形状管理、保持器に疲れ強さの高い浸炭鋼を用いて表面に浸炭焼き入れを行うことで強度を上げ、さらに表面に銅メッキや銀メッキを行うなどのあらゆる種類の開発が1970年～1980年代に盛んに行われた。

また、クランク軸の両端を支える深溝玉軸受では二輪車用エンジンの高加減速の特性から玉が保持器に衝突し保持器の破損が起きるため、玉軸受の波型保持器の板厚を厚くし表面に軟窒化処理を施す等の対策が同じく1970年～1980年代に行われた。

これらは2サイクルエンジンの衰退とともに過去の技術となったが、遠心力のかかる用途、及び高速回転や高加減速で使用されるベアリングの基盤技術として、その後に生かされることとなった。

その後、二輪車用エンジンが4サイクル化されると、エンジン内の油路に油圧がかかり、それまで使用されていた標準シール付きベアリングではシールリップの損傷やシールの変形が発生し、エンジンオイル漏れ等の不具合が懸念された。通常の設計的対応としてはベアリングの横に専用の軸シール（オイルシール）を設けることになるが、そのための取り付けスペースの確保やコストアップが発生するため、0.5MPa 程度までの低油圧環境で変形や損傷を発生させることなく使用できる耐圧シール付きベアリングがベアリングメーカーによって発案され、1990年代後半から使用されている（図 4.1.4）。

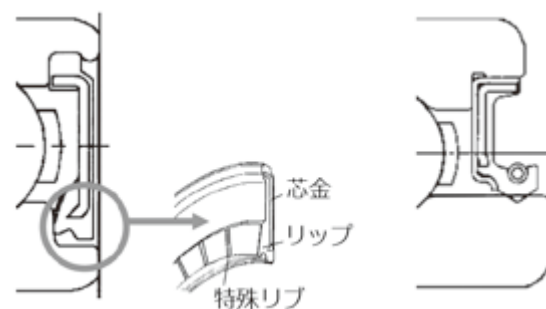


図 4.1.4 二輪車エンジン用耐圧シール付き軸受の外観例<sup>5)</sup>

#### 4.1.2 動弁系ベアリング：「すべり」から「転がり」へ

4サイクルエンジンでは、シリンダー内への吸排気を行うためにバルブ（弁）が設けられており、周囲のシステムを総称して動弁系と呼ばれる。バルブ周りの慣性質量を減らすことでバルブの追従性が改善されエンジン性能が向上することから、動弁系はサイドバルブからオーバーヘッドバルブ（OHV）、そしてオーバーヘッドカムシャフト（OHC）へと進化を遂げてきた。

現在主流であるオーバーヘッドカムシャフト（OHC）には、バルブをカムが直接駆動するダイレクト式（図4.1.6）と、ロッカーアームを介してバルブを駆動するロッカーアーム式（図4.1.7）とがある。ロッカーアーム式にはアームの支点が端にあるスイングアーム形と支点が中央にあるセンターピボット形との2つの形式があり、図4.1.5のようにそれぞれをスイングアーム式、ロッカーアーム式と分類して呼ぶこともある。慣性質量を小さくするためにはダイレクト式が有利であるが、カムとバルブの間がすべり摩擦となる欠点がある。また、エンジン回転数等によって最適なバルブ開閉タイミングを選択する可変バルブタイミング機構が1980年代から採用されるようになると、低速用カムと高速用カムを切り替える機構を持つためにはロッカーアーム式が有利となった。



図 4.1.5 動弁系の種類<sup>6)</sup>

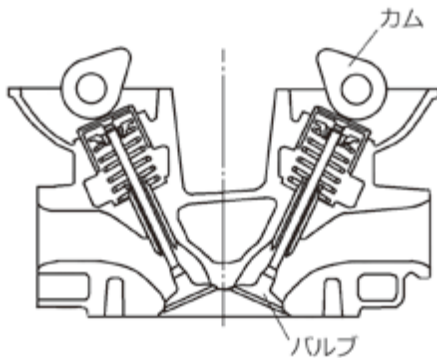
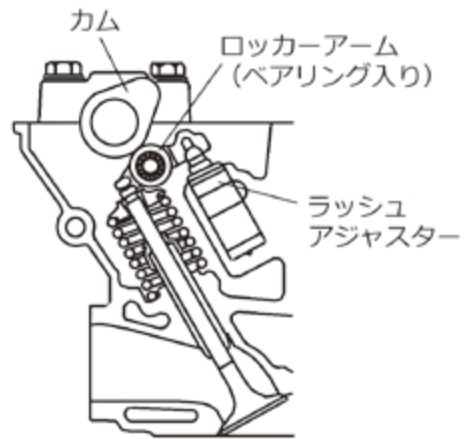
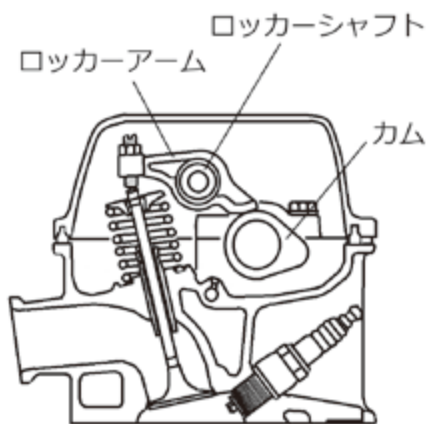


図 4.1.6 ダイレクト式 OHC<sup>7)</sup>



(1) スイングアーム形（ベアリング入り）



(2) センターピボット形

図 4.1.7 ロッカーアーム式 OHC<sup>7)</sup>

ロッカーアーム式では当初、図4.1.7（2）のようにロッカーアームに設けられたスリッパと呼ばれる面とカムが接触し、すべり接触で運動が伝達される形式がとられていたが、可変バルブタイミングの採用と前後してカムとの接触部にベアリング（針状ころ軸受）を使用する図4.1.7（1）のようないわゆるローラーロッカーアームが登場した。このベアリングはサイズに比べて大きな負荷を受け、カムとベアリングの外径面が1点で接触してベアリングの外輪に曲げ応力が発生することから、ころの本数を最大限増やした保持器のない総ころ形が採用されている。また粘度の低いエンジンオイルで潤滑されるため油膜が薄く、高回転かつロッカーアームの揺動運動下で使用されることからベアリング内部のすきま設定やその管理、カムと接触する外輪外径面の傾きや応力集中を避けるためのクラウニング量やその形状、及び表面性状の管理にノウハウがある。またベアリングの製造上では、ベアリング軸をロッカーアーム本体にかしめて固定するため軸の両端を柔らかくし、中央部のころが転動する箇所はベアリング（転がり軸受）に適した硬度 HRC60 以上を確

保することにも困難さが伴った。そのため、1980年代から1990年代にかけて各ベアリングメーカーで製品設計上、及び製造技術上の開発が盛んに行われ、エンジンヘッド実機、もしくはそれを模した台上試験機によって長時間の耐久試験を繰り返し行うことによって設計及び製造ノウハウが確立していった。

NTNは1990年代の初めごろ、転がり接触面の加工仕上げの方向と潤滑流体の流れの方向との関係に着目し、軸方向加工仕上げ面の方が径方向加工仕上げ面に比べて油膜形成能力が高いことを確認して、この結果をベアリングの量産加工技術に応用し、転動面の表面に大きき数10  $\mu\text{m}$  程度の凹部（マイクロオイルポット）を無数にランダムにつけたものをHL（High Lubrication）加工と名付け、カムと転がり接触する外輪外径面にこの加工を施したロッカーアーム用ベアリングを開発した（図4.1.8、図4.1.9、図4.1.10）。

このベアリングの表面加工は、転がり表面の油膜形成が十分でないロッカーアーム用ベアリングにおいて相手カム表面との金属接触を防止し、摩耗や損傷を防止するのに効果的であり、その後広く使用された。

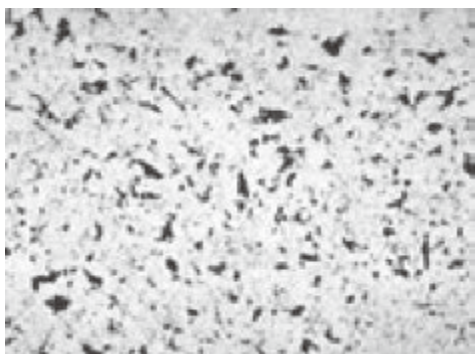


図 4.1.8 HL 加工表面の顕微鏡写真<sup>8)</sup>

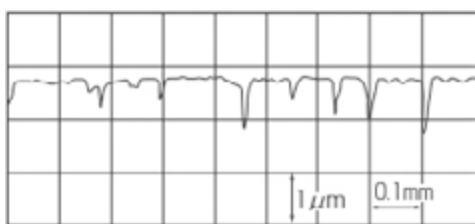


図 4.1.9 HL 表面の粗さ形状<sup>8)</sup>

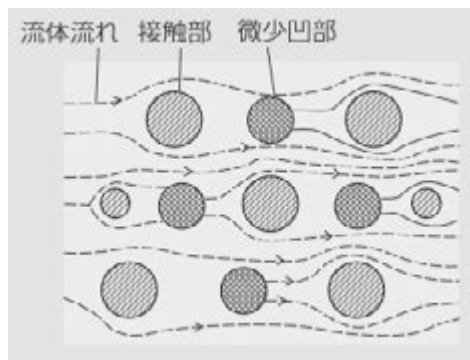


図 4.1.10 HL 表面の接触面内流体流れモデル<sup>8)</sup>

さらに2000年代にはローラーフィンガーフォロア又はプレスロッカーアームと呼ばれる、スイングアーム形のロッカーアーム自体を板金や冷鍛成形で製作しベアリングと一体としたユニットをベアリングメーカーが開発し、欧米の一部のエンジンで採用されている。（図4.1.11、図4.1.12）。

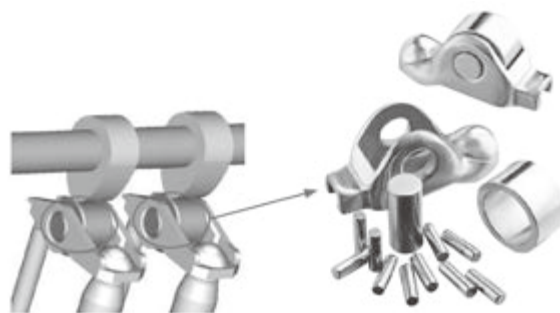


図 4.1.11 ローラーフィンガーフォロアの例<sup>3)</sup>

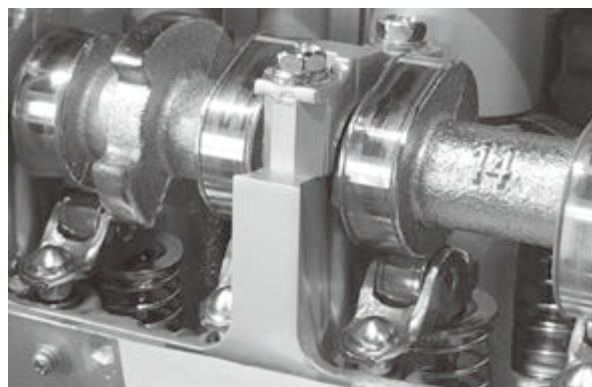


図 4.1.12 カムシャフトとローラーフィンガーフォロアの外觀例<sup>9)</sup>

### 4.1.3 バランサーシャフト用ベアリング

#### ：エンジン振動低減と燃費との両立

レシプロエンジンにおいて、各シリンダーの点火爆発によって生じるクランクシャフトの振動は、特に大排気量のエンジンで無視できず問題となっていた。理論的に直列6気筒エンジンや60°のバンク角を持つV6エンジン以外ではこうした振動を伴い、世の中で最も一般に普及している直列4気筒エンジンではエンジン回転数の2倍の周波数の2次振動が発生する。

この問題の解決策としては、すでに1904年にイギリスのランチェスター (Frederick William Lanchester) が2本のバランサーシャフトを設けてそれぞれ逆方向にエンジン回転数の2倍で回転させるというアイデアで特許を取得している。しかしその実用化は1974年に三菱自動車工業が「サイレントシャフト」の商品名で量産するまで待たねばならなかった。その後、このバランサーシャフトの技術は、2000ccを超える大型4気筒エンジンを中心に広まることとなった。バランサーシャフト軸の支持はバランサーシャフトがエンジン回転数の2倍の回転数で回転することから、クランクシャフトと同様にエンジンのオイルポンプから圧送されたエンジンオイルで潤滑するすべり軸受であったが、動力損失による燃費への影響が無視できず、またエンジンオイルの劣化等があると偏心した重錘の遠心力によって、すべり軸受が摩耗するなどの問題点を抱えている。

その解決のため、2000年代後半から欧州でバランサーシャフト支持にベアリング (針状ころ軸受) を使用する検討が始まった (図4.1.13)。日本においても今後の開発が期待される場所である。



図4.1.13 バランサーシャフト用ベアリングの例<sup>3)</sup>

### 4.1.4 オルタネーター用ベアリング

#### ：破損率低減への挑戦

オルタネーターは自動車用交流発電機で、発電された電流は直流に変換してバッテリーに蓄えられ、自動車に必要な電力を賄う重要な役割を担っている。他の自動車用部品と同様にオルタネーターにおいても小型化、高効率化が図られ、その結果、発電量を確保するため高回転化や、ローターファンやICレギュレーターの内蔵化が進められた。高回転になると自動車の一生あたりの総回転数が増加するため、使用されるベアリングには高い耐久性が要求される (図4.1.14)。

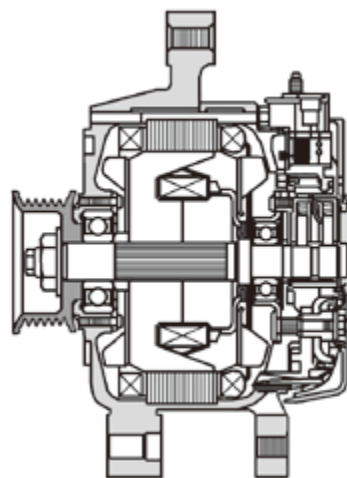
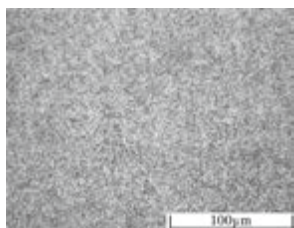


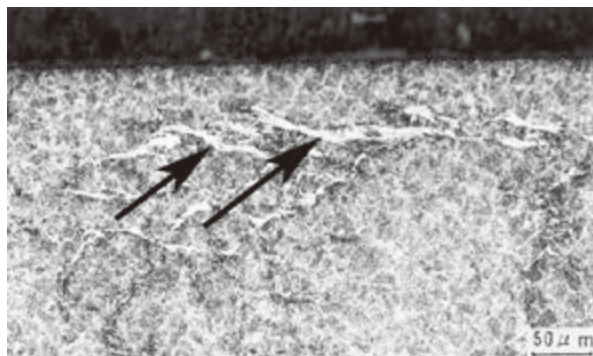
図4.1.14 自動車用オルタネーターの例<sup>10)</sup>

ところが1990年ごろから、エンジンの補機駆動用のベルトが従来のゴム製Vベルトから伸びが小さく耐久性の高い多重山のポリVリブドベルトに変わると、本来期待されるベアリング寿命 (計算寿命) よりも大幅に短時間でオルタネーター用ベアリング (シール付き深溝玉軸受) が破損する事例が起き始めた。

通常、ベアリング材料として使われている軸受鋼 (高炭素クロム鋼) の組織は球状炭化物がマルテンサイトの生地 に均一に分布しているものであるが、破損したベアリングを調査すると、剥離が発生した場所では組織変化が発生し、WEAと呼ばれる炭化物の存在しない個所が発生しているのが特徴である (図4.1.15)。



(1) 通常の軸受鋼の焼き入れ組織



(2) オルタネーター用ベアリングに発生した WEA 組織

図 4.1.15 光学顕微鏡による一般的な軸受鋼の焼き入れ組織と WEA 組織の例<sup>10)</sup>

エンジンの振動やベルトの張力変動が伝達されやすいというポリ V リブドベルトの特性がこの組織変化及び早期剥離と関係していると考えられ、メカニズムについては曲げ応力説、塑性ひずみ局在化説、水素脆性説等が唱えられた。対策としてはこれらのメカニズムによる原因を取り除く配合を加えた軸受鋼やグリースの開発が 1990 年代から 2000 年代の半ばにかけて各ベアリングメーカーで盛んに行われた。これにより早期破損の問題は大きく減少したが、オルタネーターの使用環境は年々過酷になっているため、耐熱性の向上を含めてさらにレベルの高い対策が求められ続けている。

こうした問題への対応は、市場での PPM オーダーの破損率であってもその撲滅を目指そうとする日本の国民性に根差す品質重視の考え方に基づいて行われたため、結果的に日本のベアリングメーカー各社が世界をリードすることとなり、世界中の自動車用オルタネーターで日本製ベアリングが採用される結果となった。

またこれとは別に、最近の動向ではオルタネーターは電圧を加えることでスターターにもなるため、ハイブリッド車やアイドルストップ車等でエンジン停止からのスムーズな再始動を可能とするスターター・ジェネレーターとしての使用が始まっている。この場合、エンジンの始動のためにスターター・ジェネレーターは大きな起動トルクを出す必要があり、その際のベルトとプーリーとの間の滑りを抑制するためにベルト張力が高くなってベアリングに大きな力が加わるため、ベアリングのサイズや負荷容量を大きくする対応が図られている。

## ベアリングの玉の製造方法

ベアリングに使用される玉の直径に不ぞろいがあると、直径の大きな玉に大きな力がかかって均等に負荷が分担されず早く破損してしまう。また玉の真球度が悪いとベアリングが回転しているときのふらつき（振れ）が大きくなり、玉の表面粗さが粗いとベアリング回転時の騒音が大きくなることから、精度の良い玉（鋼球）を製造することはベアリングの性能を左右するキーテクノロジーの一つと言える。そのため19世紀後半にベアリングが自転車用として大量に使われるようになって以来、自動車用を含めてのベアリングの玉の製造には様々な改善工夫が行われ、現在では「もし地球サイズに拡大しても高低差が数十m以下という世の中で最も丸い物体」と言われるまでになっている。

玉の製造方法は、

材料（線材）→成形→粗研削→熱処理→研削→ラッピング→検査

のようになっている。

ベアリングの玉の材料は通常、軸受鋼（高炭素クロム鋼）で、コイル状の線材をヘッダーマシンという機械で球形に成形する。成形された状態では下の図1のようにバリが付いているので、粗研削工（フラッシング）でバリを除去する。



図1 玉の成形体の形状<sup>1)</sup>

その後、所定の硬さと韌性となるように熱処理（焼入れ、焼戻し）を行った後、研削及びラッピング工程として、図2のように玉専用の研削機を用い、2枚の円盤の間に砥粒と多数の玉を入れ加圧回転させることで、直径の大きな部分を削り落として真球に近づけるとともに、徐々に細かな砥粒を使用することで表面粗さを小さくしていく。

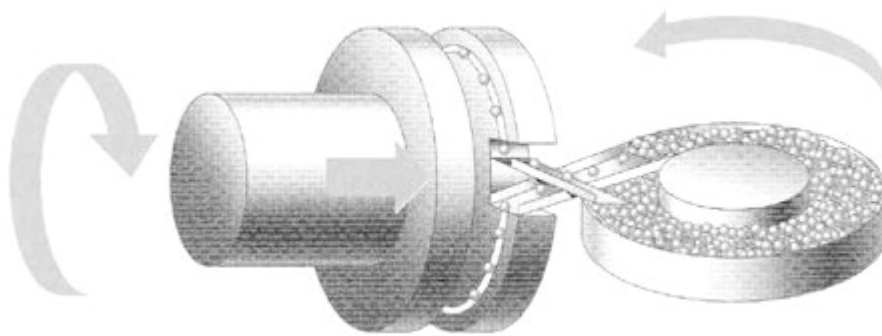


図2 玉専用研削・ラッピング機<sup>1) 2)</sup>

最終的に加工が終わったものを形状精度測定と外観検査を行い完成品となる。

現在では玉の材料としては軸受鋼だけでなく、窒化ケイ素等のセラミックも使用されているが、製造工程は全て同一である。

### <参考・引用文献>

- 1) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会（2011年）
- 2) ここまできている軸受技術 日本ベアリング工業会（1996年）

#### 4.1.5 水ポンプ用ベアリング

##### ：専用ベアリングの開発と水侵入との闘い

レシプロエンジンの誕生初期から、エンジンの冷却は大きな課題であり、欧米では早くから水の対流でエンジンを冷却する原始的な水冷が採用されていた。しかし、水冷式エンジンは冷却水の沸騰や冬季の凍結、水漏れなどの問題があり、日本では第二次世界大戦終結までは構造が簡易で整備の容易な空冷エンジンが主に使用されていた。戦後、ラジエーター式でかつ冷却水の沸騰を抑える加圧システムを備えた欧米の優れた水冷エンジン技術の導入によって、国産自動車のエンジンも水冷が主流となったが、本田は創業者の本田宗一郎の思想により1969年に空冷エンジンを搭載してホンダ1300を発売した。

水冷エンジンの場合、冷却水（正確には低温時の凍結を防止する不凍液 LLC）を循環させるため、エンジンのクランク軸から、エンジン補機用のベルト、又はカムシャフト駆動用の歯付きタイミングベルトを介して駆動力を得る水ポンプが装着されており、その水漏れが最大の構造的な課題であった。水ポンプのベアリングは初期には標準のシール付き深溝玉軸受を2個並べて軸に圧入して使用していたが、1950年代ごろに信頼性や組立性に優れた専用の軸付き複列玉軸受が開発された（図4.1.16）。

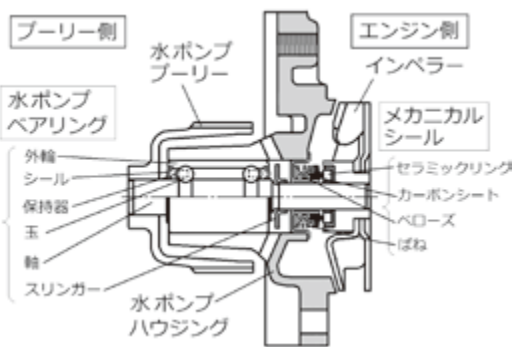


図 4.1.16 水ポンプの構造例<sup>10)</sup>

水ポンプベアリングのシールは初期には図4.1.17のように金属の芯金でフェルト環を挟み、芯金を外輪溝にかしめて固定するフェルトシールが用いられたが、1970年代には密封性と信頼性の向上のためフェルトシールと同様にベアリング外輪にかしめて固定する構造のゴムシールに置き換わった。またゴムシールはフェルト環の代わりに簡便なリップを設けた構造から、芯金にニトリルゴムを加硫接着した二重リップ付きの形式へと進化していった。

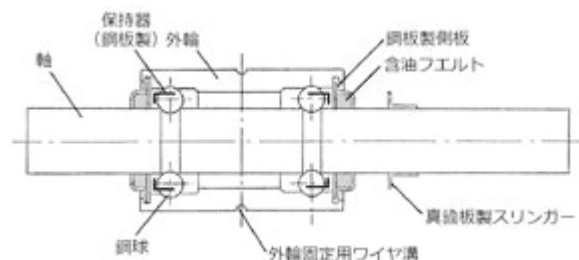


図 4.1.17 フェルトシール付き水ポンプベアリング（1950年代）<sup>11)</sup>

さらに、補機用ベルトで駆動される水ポンプは、レイアウト上の制約からプーリーがベアリングの2つの軌道列の間に配置できず、片寄った位置にプーリーを設けざるを得ないことがあるため、ベアリングの耐荷重性を向上させるためプーリー側の軌道列をころ軸受とした形式も1970年代に開発された（図4.1.18）。

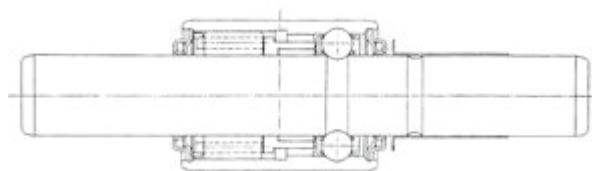


図 4.1.18 ボール&ローラー形水ポンプベアリング（1970年代初め）<sup>12)</sup>

ポンプ内の冷却水はインペラーの背後に設けられたメカニカルシールで遮断する構造であるが、メカニカルシールが破損すると水漏れが生じ、漏れた水がベアリング内に侵入してベアリング内部の潤滑グリースを洗い流して潤滑不良となり、最悪の場合は摩耗や錆が発生してベアリングが破損し、プーリーが脱落してエンジン停止に至る重大な故障につながる可能性があるため、単に漏れた冷却水を補充すればよいという単純な問題では済まない。また当時、ベアリングメーカーは水ポンプベアリングの破損がメカニカルシールからの水漏れが原因であると一貫して主張していたが、市場における実際の破損はベアリングとメカニカルシールとの双方が損傷している例が大多数であり、どちらの破損が先行したのかが突き止めづらいため、1970年代～1980年代にかけてベアリングメーカーは市場で不具合が生じた水ポンプベアリングの調査に多大の労力を費やすこととなった。特に本田宗一郎を説得して水冷エンジンに転じた本田は水冷システムの弱点である水ポンプの水漏れ不具合を強く懸念していたためそれが顕著であった。この問題は1980年代になると、メカニカルシールメーカーによって従来別々の部



品であったインペラー側のセラミックリングとハウジング側のカーボンシート+ベローズを一体とすることで、組立不良やセラミックリングとカーボンシートとの接触面への異物の侵入を防止して信頼性を高めたメカニカルシールが開発されたことによりようやく終息することとなった。

しかしメカニカルシールは、その構造から水漏れを微小水蒸気レベルまでゼロにすることは極めて難しい。そのため漏れ出た水蒸気を排出するためのドレン穴を水ポンプハウジングに、ベアリング軸にはスリッガーを設けるとともに、メカニカルシール側のベアリングシールを特殊な3重リップ構造としてベアリング内部への水侵入を防止する(図4.1.19)などの開発が、その後も2000年代にかけて行われた。

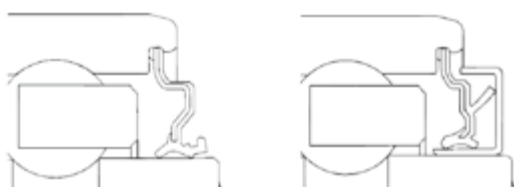


図 4.1.19 水ポンプベアリング用  
2重リップ、3重リップシールの例<sup>10)</sup>

これらの開発はオルタネーター用ベアリングと同様にPPMオーダーの市場での不具合を撲滅するために行われた日本独自の改良技術であり、現在では水ポンプベアリングについても、日本のベアリングメーカーは国際的にも高い競争力を有する状態となっている(図4.1.20)。

近年ハイブリッド自動車で、アイドリングストップ時やモーター走行時などエンジンが止まっている状態でもエンジンを冷却できる電動水ポンプが開発され、2009年ごろから一部で採用されている。エンジン動力からの駆動を必要としない電動水ポンプでは、ベルト張力を支持する必要がないためヘビーデューティな水ポンプ専用ベアリングは不要となるが、電動水ポンプは駆動源のモーターを専用を持たなければならない。従って電動水ポンプは従来のベルト駆動の水ポンプシステムよりもコスト面で不利となるため急速な普及は見込めないが、エンジン動力からベルトを介して駆動する機械式の水ポンプとその専用ベアリングはハイブリッド自動車や電気自動車の普及とともに徐々に電動式に置き換わるものと考えられる。



図 4.1.20 水ポンプ用ベアリングの外観例<sup>1)</sup>

#### 4.1.6 ファンカップリング用ベアリング ：高温に耐えるベアリングの開発

1970年代ごろまでの自動車はFR(フロントエンジン・リヤドライブ)レイアウトが普通であり、その場合、縦置きの水冷エンジンのラジエーター冷却ファンは通常、水ポンプ軸に装着されている。1980年代から乗用車においてFF(フロントエンジン・フロントドライブ)が主流となると、それらの横置きエンジンではレイアウト上、水ポンプ軸に装着したファンでの冷却ができなため、電動ファンが用いられるようになった。しかしピックアップトラック等の商用車や大排気量の乗用車では、現在でもまだFRレイアウトが使用されている。

当初、この縦置きエンジンの冷却ファンは水ポンプ軸に直結されていたが、直結の場合、エンジン回転数とファン回転数が同一となり、エンジンが高回転の時にファン回転数が高くなりすぎるといった問題があった。またエンジン始動時の暖気運転等においてはファンをできるだけ低回転に抑えて過冷却を防止することが望ましい。

これらのことから、流体継手を使用したファンカップリングが開発された。ファンカップリングはシリコンオイルを用いた流体継手によってエンジンが高回転のときに冷却ファンの回転数を抑制するとともに、流体継手の内部に設けられたバイメタルによりエンジンが暖機していない低温～常温時にはシリコンオイルがラビリンスから掻き出されてファン回転を停止する機構となっている。

通常回転軸を支持するベアリングは単列ベアリング2個か複列ベアリングを使用するが、ファンカップリングでは装置の軸方向長さ(厚み)を抑える目的で、1個のシール付き深溝玉軸受だけで軸を支える構造となっている。ベアリングに接してシリコンオイルが充

填された空間があり、シリコンオイルの外気との遮断はベアリングシールで行う（図 4.1.21）。

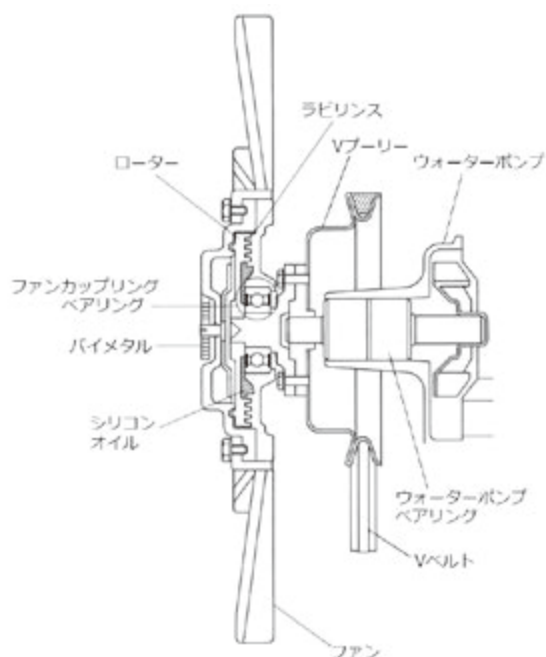


図 4.1.21 ファンカップリングの構造例<sup>13)</sup>

流体継手の剪断抵抗によりファンカップリングの内部に封入されたシリコンオイルは作動中に150～200℃の高温になるため、ベアリングの材料（軸受鋼）には高温焼き戻し等の寸法安定化処理が、ベアリングシールの材質にはフッ素シールが、ベアリングの潤滑にはシリコングリース又はフッ素グリースが用いられている。高温になるとアルミダイキャストのハウジングが膨張し、ベアリング外径面との間のしめしろが無くなって外径面ですべり（クリープ）が発生する。これを防止するため、外輪には切り欠き溝を設けてハウジングをかきつけて固定するなど、高温の雰囲気には耐えられるベアリングの仕様が1980年代に開発されていった。

しかしこのベアリング仕様においても、ファンのアンバランスによってベアリングが傾いて、みそすり運動のように振れ回ることによってベアリングシールのリップが追従できず、シリコンオイル漏れを起こすことがある。その防止のためにはリップの緊迫力を上げることが望ましいが、それによりベアリングの引きずりトルクが増加し流体継手が作動を停止している暖気運転等での連れ周りが大きくなって本来の機能を果たせないという問題があった。

この対策と性能向上のため、1990年ごろに光洋精工（現ジェイテクト）によってベアリングの傾きに追従できるシールの形式が考案され、さらにシールリップが接触摺動する内輪の肩部に研削加工を施すことで、軽接触かつ密封性の高い低回転トルクのベアリングが開発された（図 4.1.22）。

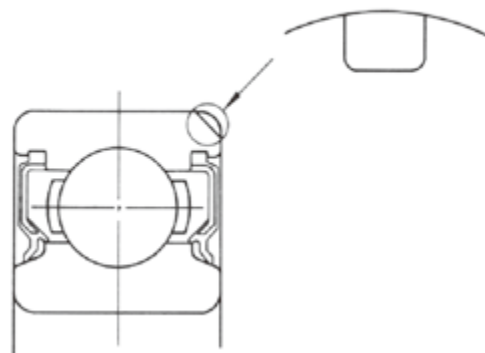


図 4.1.22 ファンカップリング用ベアリングの仕様例<sup>13)</sup>

また、通常の玉軸受では軌道溝の曲率は玉との接触面圧の高い内輪側を小さくして玉の曲率に近付け、接触面圧の低い外輪側の曲率を大きめにすることでミスアライメントを吸収できる設計とするのが一般的である。これに対して、ファンカップリングのように深溝玉軸受1個で軸を支持する場合、傾きを抑える必要性から、軌道溝の曲率を内外輪ともにできるだけ玉の曲率に近付けるのが望ましいとされていたが、そのような設計とするとファンのみそすり振動がベアリングの共振によって減衰しにくくなることや、低温でグリースの潤滑性が悪い時に自励振動による異音が発生する事例があることが開発の過程で判明したことから、あえて自励振動を避けるため外輪側軌道溝の曲率を標準よりさらに大きくして、これらの不具合を防止する対策が行われた。

ファンカップリングは縦置きエンジンのFR車の減少とともに需要のピークを過ぎて衰退に向かったが、このようなファンカップリング用ベアリングで得られた知見は後に補機ベルトやカムシャフト駆動のタイミングベルトで使用するテンショナープーリーやアイドラープーリー的设计仕様に応用されるようになった。

#### 4.1.7 カーエアコンコンプレッサー用ベアリング

##### ：貧潤滑下で使用される針状ころ軸受の開発

カーエアコンの冷媒を圧縮するコンプレッサーには、斜板式、スクロール式などの形式がある。最も多く使われている斜板式コンプレッサーの軸の支持にはラジアル針状ころ軸受が、斜板部にはピストンの反力を受けるためのスラスト針状ころ軸受が使われている。またコンプレッサーはエンジン補機ベルトで駆動されるが、エアコン OFF 時にコンプレッサーが回転しないように、プーリー部は電磁クラッチを内蔵しており、その支持のために薄肉の複列玉軸受が使われている（図 4.1.23）。

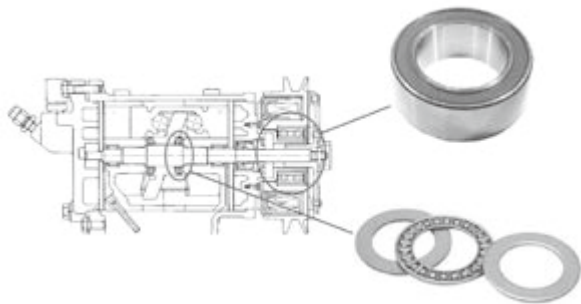


図 4.1.23 斜板式カーエアコンコンプレッサーの構造例<sup>14)</sup>

コンプレッサー本体に使われるスラスト針状ころ軸受は直径が大きく、ベアリングの構造上、回転時にころと相手ワッシャーとの間ですべりが発生し、ころが保持器・ワッシャーの外周に向かう分力が発生するので、摩擦が大きく、エアコン油の潤滑性が低いこともあって摩擦等の問題が発生しやすい。このためベアリングメーカー各社で保持器の形状やころの母線形状（クラウニング）の最適化などの取り組みが継続して行われている（図 4.1.24、図 4.1.25）。

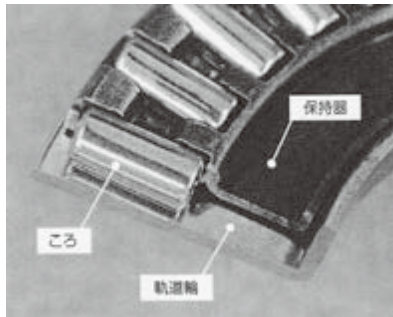


図 4.1.24 斜板用スラスト針状ころ軸受の例<sup>15)</sup>

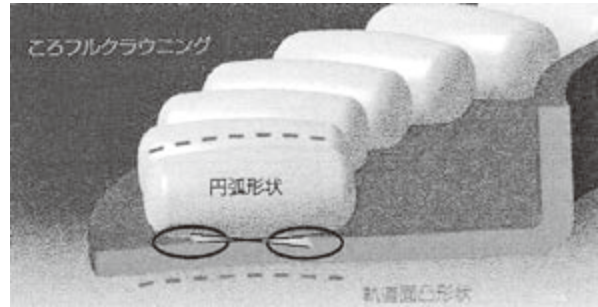
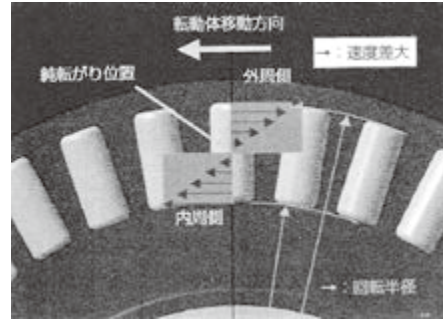


図 4.1.25 スラスト針状ころ軸受のころの動きとクラウニング形状の例<sup>15)</sup>

また、カーエアコンコンプレッサーの電磁クラッチ用ベアリングは当初、標準の薄肉深溝玉軸受を2個並べて使用していたが、1980年代からそれらを一体化した複列深溝玉軸受が、さらに1990年代にはプーリーのレイアウトに自由度を持たせて耐久性を向上させる目的で2つの軌道列間の作用点間距離を広くした複列アンギュラ玉軸受が開発され、現在ではこの形式が一般的となっている。またベアリングシールについても、特に東南アジア等の雨季にプーリーが被水してベアリングに水が侵入する問題があり、シールリップの枚数を増やし、形状を工夫して耐泥水性を向上させる開発が行われている（図 4.1.26）。

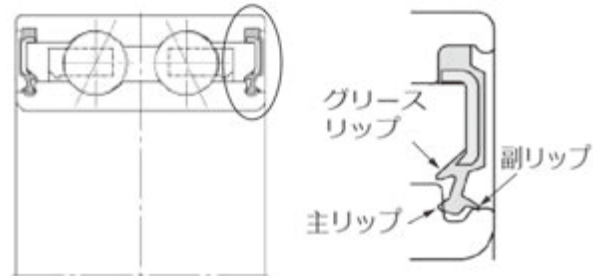


図 4.1.26 カーエアコン電磁クラッチ用ベアリングの例<sup>16)</sup>

#### 4.1.8 ターボチャージャー及びスーパーチャージャー用ベアリング：「転がり化」への挑戦

自動車のエンジンにより多くの空気を送り込んでエンジン出力を向上させる手段として過給機があり、エンジンの排気ガスエネルギーを利用してタービンを回して過給するものをターボチャージャー、エンジンのクランク軸からの動力で機械的に過給するタイプをスーパーチャージャーという。

従来のターボチャージャーは回転速度が最高 20 万 r/min と非常に高回転で、高温の排気ガスで駆動されるタービンを支えるため、エンジンオイルで潤滑されたすべり軸受が使われているが、加速時のターボチャージャー軸の摩擦抵抗により、いわゆるターボラグが発生すること、及び燃費に悪影響を及ぼすことから、ベアリング（転がり軸受）を使用することが検討され、1998 年には光洋精工（現ジェイテクト）によってターボチャージャーの高温・高速に耐えるセラミック球を用いたベアリングが自動車用のセラミック製ベアリングとして世界で初めて実用化された。

その後も各ベアリングメーカーで様々な工夫や知見をもとに開発が進められている（図 4.1.27）。

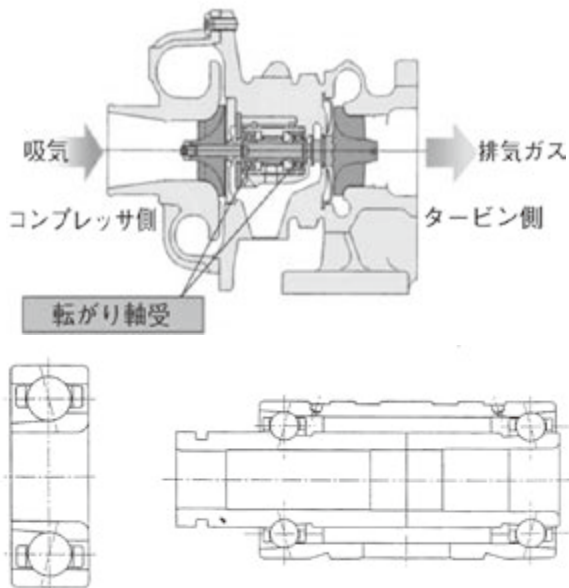


図 4.1.27 ターボチャージャー用ベアリングの例<sup>17) 18)</sup>

一方、スーパーチャージャーにはスクリー式（リショルム式）、ルーツ式等のいくつかの形式がある（図 4.1.28、図 4.1.29、図 4.1.30）。その中でルーツ式スーパーチャージャーは 1980 年代に一部の乗用車で採用された。これに使用するベアリングはスーパーチャージャー内の空気の断熱圧縮により高温にさらされることから、耐熱材料、耐熱熱処理を施したベアリングにフッ素グリースを封入し、フッ素ゴムシールで密封し

た仕様が使われた。またアルミハウジングの熱膨張によってベアリング外輪にハウジングに対して外輪が回転するクリープ現象が発生することを防ぐため、ハウジングとベアリング外輪それぞれに偏心溝を設け、ハウジングにベアリングを圧入後にハウジングの側に設けた注入孔から樹脂を注入して回り止めとする特殊な仕様が開発された（図 4.1.31）。

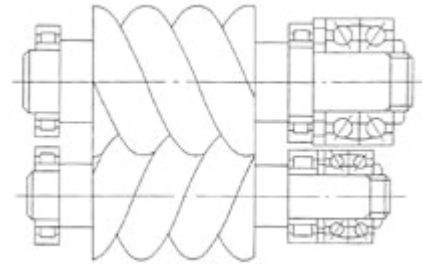


図 4.1.28 スクリー式（リショルム式）スーパーチャージャーの例<sup>19)</sup>

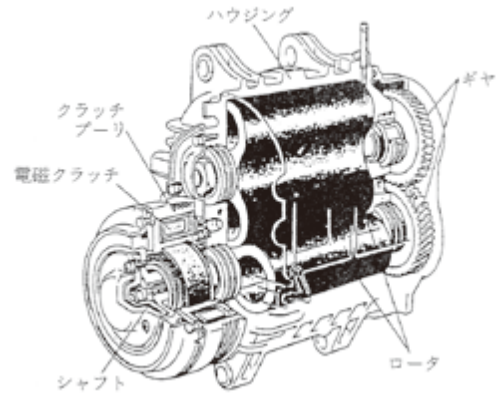


図 4.1.29 ルーツ式スーパーチャージャーの例<sup>20)</sup>

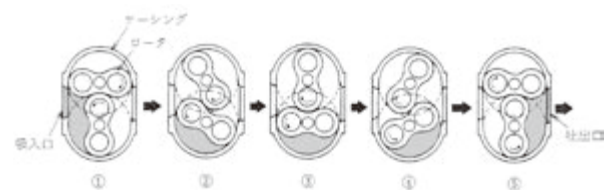


図 4.1.30 ルーツ式スーパーチャージャーの動作<sup>20)</sup>

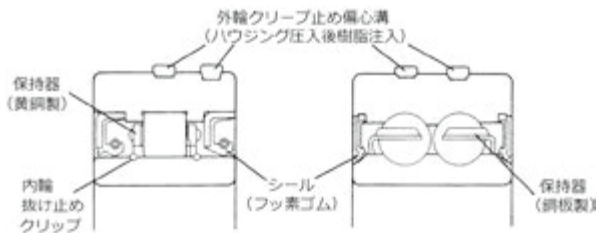


図 4.1.31 ルーツ式スーパーチャージャー用ベアリングの例<sup>21)</sup>

しかし、スーパーチャージャーはエンジンのクランク軸で駆動する関係からエンジンルーム内でのレイアウト上の制約が大きいこともあり、その後、自動車用としては大きな広がりを見せていない。

#### 4.1.9 その他のエンジン・エンジン補機用ベアリング

自動車にとって、エンジンの摩擦抵抗を減らし効率を上げることは永遠のテーマであり、そのためにエンジンのあらゆる箇所の回転又は揺動軸をベアリング（転がり軸受）に置き換えて摩擦トルクを低減する試みが過去 30～40 年間でなされてきた。ここではその中で代表的なものをいくつか紹介する。

クランクシャフトと同様にカムシャフト支持についても転がり化の検討がなされてきた。カムシャフトはクランクシャフトに比べて大きな力を受けないので、その面では転がり化には有利であるが、反面、エンジンヘッドの限られたスペースに軸を通すには断面の小さなすべり（メタル）軸受が有利であり、軸上のいくつものカムの間で軸を支持するためハウジングは半割りボルト止めの構造となっている。そのため転がり化にあたってはできる限り断面積の小さい針状ころ軸受で、かつ外輪を半割りとし、カムシャフトの外径面が直接接触し回転するベアリングを使用せざるを得ない（図 4.1.32）。そのため割り部での損傷や異音、ハウジング半割り部のボルト締め付けによるベアリング真円度の悪化や内部すきま詰まり等の問題の解決が必要となる。また、カムシャフト自身の材質もカムとしての性能が最適となるように選定されていて、ベアリングの軌道面とするには HB550～600 程度とやや硬度が低く、必ずしもベアリング（転がり軸受）の軌道面としては最適ではないことから、カムシャフトの転がり化は各メーカーやベアリングメーカーでの研究レベルの域を出ていない状況である。



図 4.1.32 カムシャフト用シェル形二つ割り針状ころ軸受の例<sup>22)</sup>

次に、誕生初期の自動車ではエンジンのクランク軸を直接に手で回すことで始動していたが、後に始動用の直流電動機であるスターターを設けるようになった。スターターの回転軸はエンジン始動時にマグネットスイッチによってレバーを介して押し出されてフライホイールの外径に設けられた歯車と噛み合い回転が伝えられる構造となっている（図 4.1.33）。スターター用ベアリングはエンジン始動の時にだけ回転するので、常時回転しているベアリングに比べると回転耐久性はあまり要求されないが、機能を満たす範囲でできるだけコンパクトであることが要求される。そのためグリース潤滑の薄型深溝玉軸受や針状ころ軸受が使用されている。

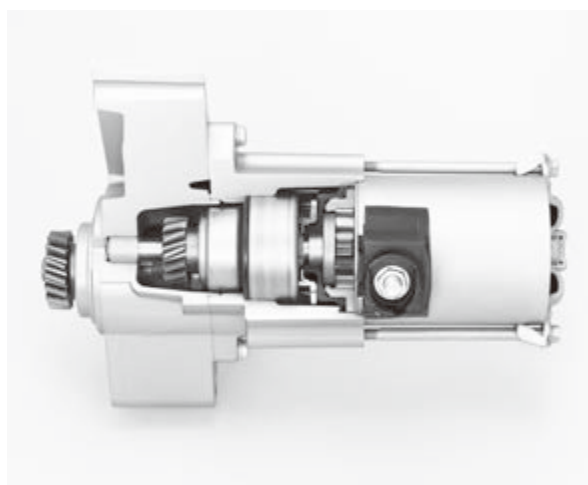


図 4.1.33 スターターの構造例<sup>22)</sup>

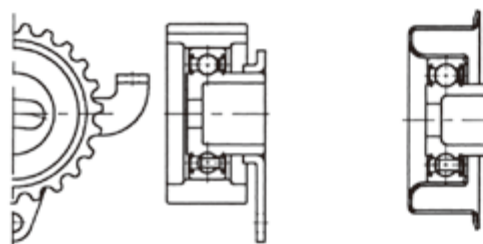
また、エンジンへの吸気に使用するスロットルバルブやアイドルスピードコントロールバルブの揺動軸にもベアリングを使用する試みがなされてきた。これらの使用箇所はベアリングが受ける力は非常に小さいが、高い応答速度と吸気圧を受けてもエアが貫通しない高いシール性能が要求され、またその雰囲気ガソ

リン蒸気が含まれるため通常のゴム製シールや潤滑グリースが使用できないことから、ベアリングにとっては過酷な条件である。これらの部位では日本国内でもエンジンの電子制御化と相まってすべり軸受からの転がり化が進み、フッ素グリースを封入したミニチュア玉軸受が使われているが、シールについては別体の強固なものが使用されている。NTNでは2005年ごろにその小型化と別体シールの廃止を目的として特殊グリース封入のフッ素ゴムシール付き小径シェル形針状ころ軸受を開発した(図4.1.34)。

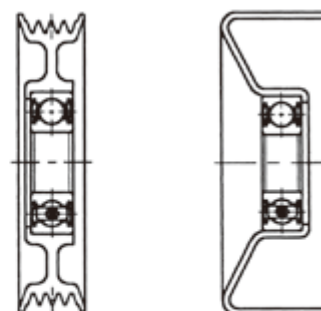


図4.1.34 スロットルバルブ用シェル形針状ころ軸受の例<sup>23)</sup>

またエンジン補機の駆動ベルトやカムシャフト駆動の歯付きタイミングベルトにはプーリーレイアウトから決まるベルト巻き掛け角をベルトすべりや損傷が発生しないように最適化するためのアイドラープーリー、及び、ベルトの伸びによってベルト張力が低下することを補正するためのテンショナープーリーが使用されており、いずれもベアリングが内蔵または一体化されている。その代表的な例を図4.1.35に示す。



タイミングベルトテンショナー (正面用)      タイミングベルトアイドラー (背面用)



補機ベルトアイドラー (正面用)      補機ベルトアイドラー (背面用)

図4.1.35 各種タイミングベルト・補機ベルト用テンショナー・アイドラーの例<sup>24)</sup>

樹脂の自動車用機能部品への活用は、樹脂成形品の製造コストが比較的安価である欧州が先行しているが、近年では日本においても鋳物製や板金プレス製のプーリーに代わって樹脂成形プーリーが多く使用されるようになってきており、ベアリングを型の中央に保持するための樹脂成形技術、及びそれに使用するベアリングの仕様の最適化などの研究開発が各ベアリングメーカーで行われている(図4.1.36)。

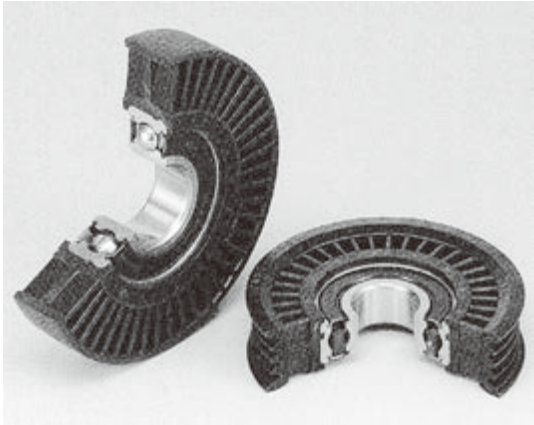


図 4.1.36 ポリアミド樹脂プーリーの例<sup>25)</sup>

また光洋精工（現ジェイテクト）では2002年ごろに、通常のポリアミド樹脂などの熱可塑性樹脂製プーリーが耐熱性や耐摩耗性に劣る欠点を解消するため、熱硬化性のフェノール樹脂製プーリーを実用化した（図4.1.37）。



図 4.1.37 フェノール樹脂プーリーの例<sup>10)</sup>

## ベアリングのはめあいと内部すきま

ベアリングが所定の性能と耐久性を発揮するためには、ベアリングと軸・ハウジングの間のはめあい、及びベアリングの内部すきまを適切に選定する必要がある。

まず、はめあいについては、ベアリングと軸・ハウジングとの間には適切な「しめしろ」を持たせてはめあい面にすきまができないようにするのが基本であり、これを「しまりばめ」という。しかし実際には機械装置の組立上の都合から軸またはハウジングとの間にすきまを持たせてベアリングが容易に挿入できるようにする場合が多い。これを「すきまばめ」という。また、ベアリング及び軸・ハウジングの公差の関係でしめしろができたり、すきまができたりする場合を「中間ばめ」という（図1）。

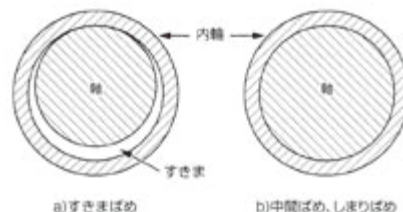


図1 軸とベアリング内輪のはめあい<sup>2)</sup>

しかし下の図2のように特に回転する側のはめあいにはすきまを持たせ「すきまばめ」とするとベアリング側と軸・ハウジング側ではめあい面の円周長さ（道のり）が異なるため、回転するたびにズレが生じる。これをベアリングの「クリープ」と呼ぶが、この現象が発生するとはめあい面に摩耗やかじりなどの不具合が発生することがあるので注意が必要となる。このクリープ現象の防止のために、例えばベアリング側面をねじ等で締め付けるような対策を行うことがあるが、クリープで内輪が回転する力は非常に大きいので、締め付け力と側面の摩擦係数を考えるとクリープの発生防止には役に立たないことが多い。

なお、特にベアリングと軸の間のはめあいでは、過剰なしめしろでベアリング内輪が割れたりしないように注意する必要がある。また、ベアリングと軸・ハウジングとのしめしろによって後に述べるベアリングの内部すきまが変化することも考慮する。

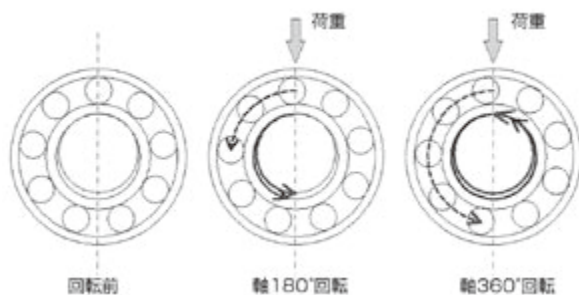


図2 軸とベアリング内輪のクリープ現象のメカニズム<sup>2)</sup>

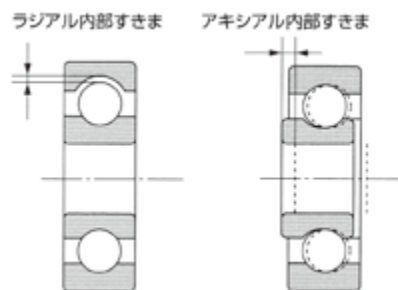


図3 ベアリングの内部すきま<sup>2)</sup>

次にベアリングには玉又はころと内外輪の軌道面との間に内部すきまが存在する。

図3は深溝玉軸受の例で、内部すきまにはラジアル内部すきまとアキシャル内部すきまがあるが、規格上もしくは製造上で直接規定されているのはラジアル軸受の場合、ラジアル内部すきまである。

内部すきまは、ゼロやマイナス（すきまが詰まった状態：負すきま）だと回転時の摩擦トルクや騒音が大きくなり、また内部すきまが大きすぎると軸の回転を正常に支えられない。また内部すきま（正確にはベアリング運転時のベアリングを構成する各種部品の温度上昇による熱膨張を考慮した「運転すきま」）が大きすぎても小さすぎてもベアリングの耐久性が低下する。

図4にベアリングの内部すきまと耐久性（疲れ寿命）の関係を示す。6205は深溝玉軸受、NU205は円筒ころ軸受である。ころ軸受は玉軸受に比べて負荷容量が大きく一般的に耐久性が高いが、このように内部すきまの影響を受けやすい。



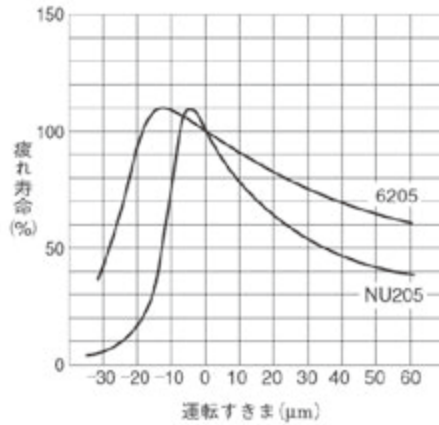


図4 ベアリングの内部すきまと疲れ寿命の関係<sup>1)</sup>

また用途によってはベアリングによる軸のガタつきを防止し、支持剛性を大きくするために、あえて内部すきまをマイナスにすることがあり、これを予圧（プリロード）と呼ぶ。

このようにベアリングは用途や使用条件によって適切な内部すきまが異なるため、何段階かの内部すきまグレードが規格として規定されている。

例として JIS B 1520-1 で規定されている最も一般的な深溝玉軸受（円筒穴）の内部すきま規格を表1に示す。

表1 深溝玉軸受（円筒穴）の内部すきま<sup>1)</sup>

単位:  $\mu m$

呼び内径 d, mm		すきま									
		C2		CN		C3		C4		C5	
を 超え	以 下	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
2.5	6	0	7	2	13	8	23				
6	10	0	7	2	13	8	23	14	29	20	37
10	18	0	9	3	18	11	25	18	33	25	45
18	24	0	10	5	20	13	28	20	36	28	48
24	30	1	11	5	20	13	28	23	41	30	53
30	40	1	11	6	20	15	33	28	46	40	64
40	50	1	11	6	23	18	36	30	51	45	73
50	65	1	15	8	28	23	43	38	61	55	90
65	80	1	15	10	30	25	51	46	71	65	105
80	100	1	18	12	36	30	58	53	84	75	120
100	120	2	20	15	41	36	66	61	97	90	140
120	140	2	23	18	48	41	81	71	114	105	160
140	160	2	23	18	53	46	91	81	130	120	180
160	180	2	25	20	61	53	102	91	147	135	200
180	200	2	30	25	71	63	117	107	163	150	230
200	225	2	35	25	85	75	140	125	195	175	265
225	250	2	40	30	95	85	160	145	225	205	300
250	280	2	45	35	105	90	170	155	245	225	340
280	315	2	55	40	115	100	190	175	270	245	370
315	355	3	60	45	125	110	210	195	300	275	410
355	400	3	70	55	145	130	240	225	340	315	460

例えばベアリングと軸・ハウジングとを「しまりばめ」で使用する場合、しめしろによってベアリングの内輪・外輪が膨張・収縮し、軸・ハウジングを圧入し組み立てた後のベアリング内部すきまが小さくなるので、標準すきま（CN）よりも大きな C3 等の内部すきまを選定するような配慮が必要となる。

<参考・引用文献>

- 1) ジェイテクト 軸受総合カタログ CAT. No. B2001-8
- 2) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会（2011年）

## 4.2 車軸・サスペンション用ベアリング

### 4.2.1 駆動輪用ベアリング：固定車軸から独立懸架へ

自動車は誕生以来、車体の前部にエンジンを置いて、推進軸（プロペラシャフト）を介して後輪を駆動する、いわゆるFR（フロントエンジン・リアドライブ）レイアウトが標準的であった。

その駆動輪である後輪の車軸（アクスル）の形式で最も歴史が古く、自動車誕生当初から続いているのが固定車軸（リジッドアクスル）であり、左右の車輪（通常は後輪）が一本のアクスルハウジングの両端に配置された構造となっている（図4.2.1）。

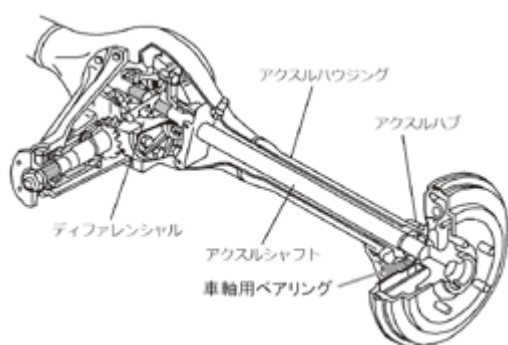


図4.2.1 固定車軸（リジッドアクスル）の例<sup>26)</sup>

固定車軸式は車軸を支えるベアリング周りの構造によって、大きく全浮動式及び半浮動式に分けられる。

全浮動式は中大型トラックの後輪等で用いられる形式で、左右の各車輪が2個ずつのベアリングによって支持されている。通常ベアリングには耐荷重性に優れた円すいころ軸受が使用される（図4.2.2）。

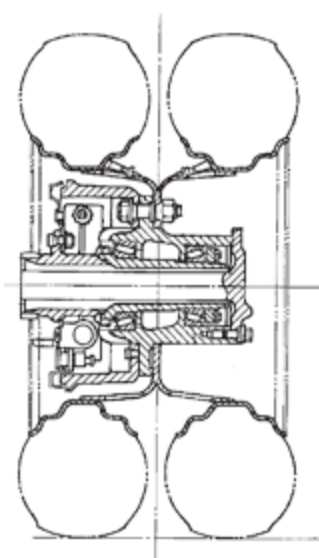


図4.2.2 全浮動式アクスルの例<sup>27)</sup>

半浮動式は小型商用車や一部の乗用車に使用される形式で、左右の各車輪がそれぞれ1個のベアリングによって支持されている。ピックアップトラック等の比較的車軸荷重が大きいものには耐荷重性に優れた円すいころ軸受が（図4.2.3）、乗用車や軽トラックのような比較的車軸荷重が小さいものには取り扱いが容易な深溝玉軸受が使用される（図4.2.4）。また、米国のGM、フォード、クライスラー等が製造するピックアップトラックでは鋼板をプレス加工して製作したシェル形外輪の円筒ころ軸受が用いられている（図4.2.5）。

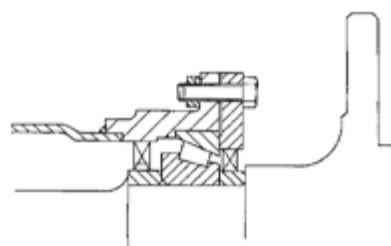


図4.2.3 半浮動式アクスル（円すいころ軸受）<sup>28)</sup>

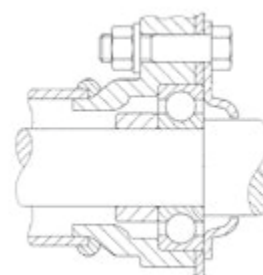


図4.2.4 半浮動式アクスル（深溝玉軸受）<sup>29)</sup>

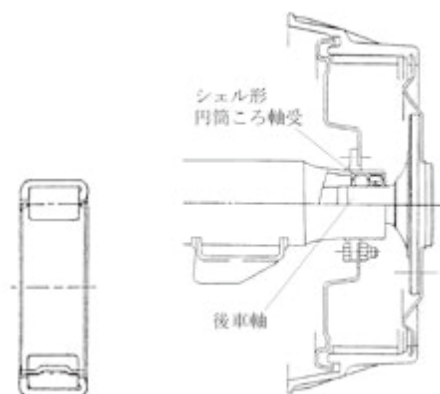


図4.2.5 半浮動式アクスル（シェル形円筒ころ軸受）<sup>30)</sup>

半浮動式の車軸は全浮動式に比べて構造が簡便で整備もしやすくコストも安いですが、自動車がカーブを曲がるコーナリングの時に遠心力で外側の車輪に大きな力がかかって軸がたわみ、ベアリングの内輪と外輪の間に傾きが生じて、所定のベアリングの耐久性（計算寿命）よりも短期間に破損しやすいという問題がある。そのため1960年代ごろから各ベアリングメーカーによって深溝玉軸受の外輪溝曲率を大きくし、軸が傾いたときでも玉と軌道溝のエッジ（肩部）が接触することでの応力集中が発生しないようにする対策が行われた。1983年に光洋精工（現ジェイテクト）は自動車が直進するときには負荷を受ける深溝玉軸受の内輪溝中央部の曲率を小さくして耐荷重性を確保し、車両が旋回するコーナリングの際に軸がたわんだ時に力を受ける内輪溝肩部の曲率を大きくする二重曲率軌道溝のベアリングを開発し実用化した（図4.2.6）。また並行して、円すいころ軸受においても内外輪の軌道面やころのクラウニングを深くするなどの対応が行われた。



図 4.2.6 半浮動式アクスル用二重曲率深溝玉軸受内輪軌道溝の模式図<sup>30)</sup>

固定車軸式（リジッドアクスル）は現在でも中大型トラック、ピックアップトラック、軽トラック等の商用車の後輪駆動輪に広く用いられている。日本ではリジッドアクスルと組み合わせて使用することの多いドラム式ブレーキを車検時に点検することが義務付けられており、リジッドアクスルでは構造上、その際にベアリングを分解することになるため、車検時にベアリングと軸シール、潤滑グリースを交換することが多く、補修用としての大きなベアリング市場を占めている。またこれにより、車検時にベアリングを都度点検することになって、異常を早期に発見できる安心感をトラックユーザーに与えている。そのことが後述する自動車車軸用ベアリングのハブユニット化の流れが日本国内においてトラックに及びにくい原因となっているともいえる。

以上のように長年、自動車の後輪駆動輪は固定車軸が主流であったが、1967年に4輪独立懸架が日産ブルーバードに採用され、その後、スポーツ走行を売

り物にする自動車を中心に拡大していった。4輪独立懸架は車体中央のファイナルドライブギヤボックス（デフ）から駆動軸（ドライブシャフト）を介して駆動される左右の車輪がセミトレーリングアーム式サスペンション等によって左右独立に支持されている。その構造は4.2.2で述べる従動輪用と類似であるが、車軸中央に駆動力伝達用のドライブシャフト軸が接続されるセレーション穴が空けられている。図4.2.7は比較的負荷の小さい軽自動車やコンパクトカーで多く使われていた深溝玉軸受を2個使用した独立懸架式の駆動輪の構造例である。

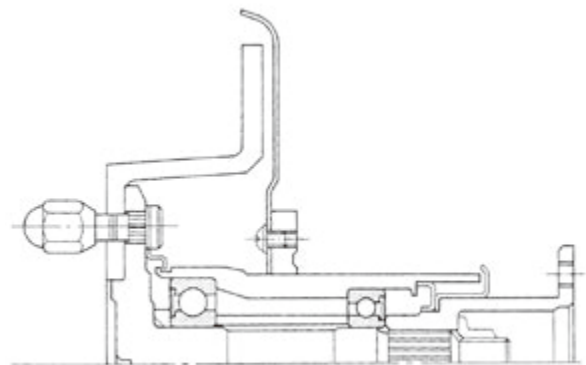


図 4.2.7 独立懸架式の駆動輪の構造例<sup>31)</sup>

また、1960年代から欧州を中心に普及が始まった前輪駆動車（FF車）では、前輪が駆動輪となるが、その場合は同一サイズの円すいころ軸受2個をある程度の間隔をあけて配置し、ベアリング内輪間にスペーサーを設けてその厚みを調整することで適切な予圧（プリロード）を与える形式が一般的であった（図4.2.8）。

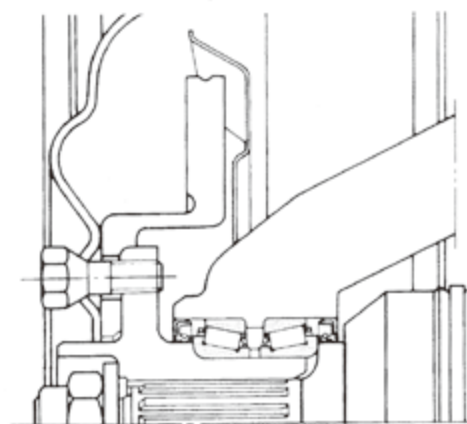


図 4.2.8 FF車の駆動輪の構造例<sup>31)</sup>

## ベアリング用グリース

自動車用ベアリングの中で動力伝達系の変速機（トランスミッション）や終減速機（ファイナルドライブ）に使用されるベアリングはギヤオイル又は ATF などの潤滑油で潤滑されているが、ハブユニット等の車軸用ベアリングやエンジン補機のベアリングなどは、ベアリングに封入したグリースで潤滑されている。また自動車以外の用途でも電動機（モーター）用のベアリングや一般の機械設備のベアリング等ではシールド板もしくはゴムシール付きのグリース封入のベアリングが広く使用されており、世の中で使われているベアリングの約 80% がグリース潤滑であるとも言われている。

このようにベアリングにとってグリースは非常に重要であるため、古くからベアリングメーカーはグリースメーカーと共にベアリング用グリースの開発に取り組んできた。

グリースは増ちょう（稠）剤とよばれる油を保持する役割の物質に、潤滑油（グリースの場合、基油と呼ぶ）を混和したものであり、油潤滑に比べるとベアリングに封じ込みやすく、漏れ出す心配が少ないため取り扱いが容易である。しかし反面、潤滑油のようにベアリングやその周辺の機械設備から発生する熱や摩耗粉等の異物を取り除く効果は期待できない。

増ちょう剤は基油を保持しやすいように数  $\mu\text{m}$  以下の微細な網目状の組織をしており、ベアリングが転動しグリースがせん断を受けると増ちょう剤の組織が転動方向に揃って（配向という）せん断抵抗が小さくなる性質を持っている。ベアリングの回転が止まると増ちょう剤の組織は網目状に戻り、基油が漏れ出さずに保持される。しかし繰り返してグリースがせん断と熱影響を受けると網目状組織が破壊され元に戻らず、軟化して基油が保持できなくなる（図 1 参照）。

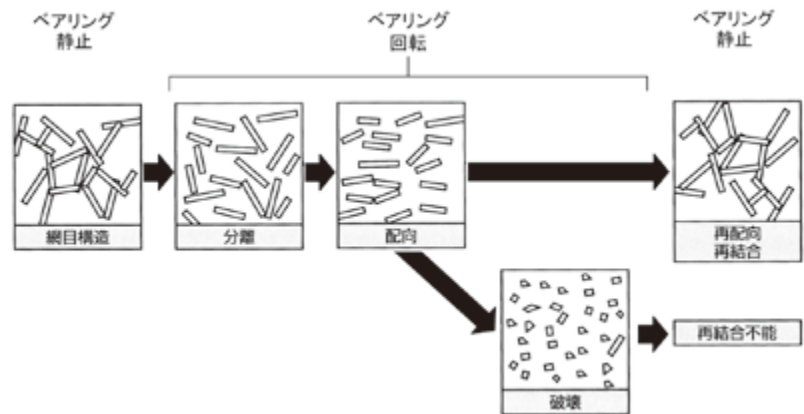


図 1 ベアリングの回転によるグリース組織の変化<sup>2)</sup>

増ちょう剤として最も一般的に使用されるのは金属石けんで、中でもリチウム石けんはせん断を受けたり水分や高温にさらされたりしても網目状組織が壊れにくいいためベアリング用グリースの増ちょう剤として広く使われている。その他に最近では金属石けんよりもより化学的に安定なウレア化合物を用いたグリースも増えている。図 2 は増ちょう剤の顕微鏡写真である。

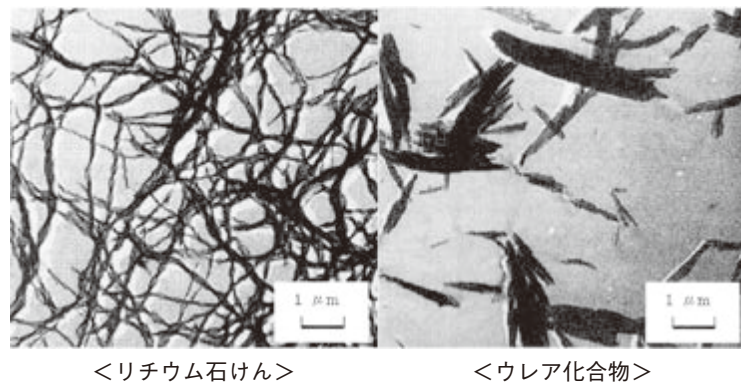


図 2 グリース増ちょう剤の顕微鏡写真<sup>3)</sup>

グリース中の基油は油潤滑に比べれば非常に限られた量であり、使用によって基油の酸化劣化が進むと新鮮な油分の補給は望めない。基油には通常、精製された鉱物油が用いられるが、精製しきれない不純物の影響で高温にさらされると劣化しやすく、低温でも固化しやすい。そのため、より高性能で広い温度範囲で使用するために合成油の基油を用いているグリースもある。

またグリースには増ちょう剤、基油の他に、劣化を防止したり、錆の発生を防止したりすることを目的として各種の添加剤が使われている。

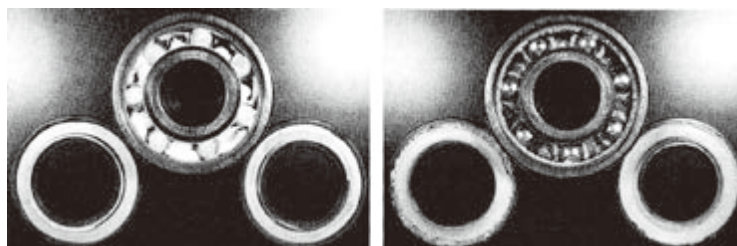
機械設備のベアリングや、ハブユニットが採用されていないトラック等の商用車の車軸用ベアリングでは、グリースの補給装置やグリースガンによって新鮮なグリースを注入補給することで古くて劣化したグリースを押し出したり、定期的に分解点検を行って消耗・劣化したグリースを除去し新しいグリースに入れ替えたりすることが行われている。この場合、グリースはベアリングだけでなくその他の機械装置や部品に悪影響を与えない適切なものが選定される。分解点検時に補充交換するグリースの量はベアリングだけに封入される場合に比べると非常に多いので、グリースのコストも安価なことが求められる。

一般的に自動車では車体や車軸などの足回りに使用するグリースとして、各カーメーカーで「シャシーグリース」が標準化されているが、上記の理由からリチウム石けんの増ちょう剤に鉱物油の基油を用いた銘柄のグリースが指定されていることが多い。

また、高温や水分の影響にさらされやすく、メンテナンスフリーでクルマー生使い続けることができる必要があるエンジン補機用ベアリング等を中心に、1980年代ごろからウレア化合物の増ちょう剤に合成油の基油を用い、さらに各種の添加剤を配合したグリースが各ベアリングメーカーとグリースメーカーによって開発され、今日広く使用されている。

ベアリングに封入したグリースはベアリングの回転によって転動部から押しのけられ、シールド板やゴムシールの内側や保持器の上に移動して安定し、この状態のグリース中から基油だけがにじみ出して転動面に供給されることで潤滑が行われる（図3参照）。これをグリースのチャネリングという。

ベアリング内部の空間一杯にグリースを満たすとグリースが安定的な場所に移動しきれず、常に攪拌・せん断される状態となるため回転トルクの増大、発熱やグリースの劣化、ひいてはベアリングの早期破損につながる。過封入を避け、ベアリング内部の無攪拌容積以下の適正量のグリースを封入することが重要となる。



<ベアリング回転前> <ベアリング回転後>

図3 ベアリング回転によるグリースのチャネリング<sup>3)</sup>

また150℃を超えるような非常に高温の雰囲気で使用されるベアリングの潤滑にはシリコングリースやフッ素グリースが使われることがある。これらのグリースの増ちょう剤に使われているシリコン又はフッ素化合物は一般的な金属石けんやウレア化合物等とは性質が異なり、高温にさらされることで重合して固くなったり、シリコン油やフッ素油でできた基油を保持することができなくなって油分離が起きたりすることがあるので、使用にあたっては注意が必要である。

#### <参考・引用文献>

- 1) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会（2011年）の図を基に筆者作成
- 2) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会（2011年）

## 4.2.2 従動輪用ベアリング

### ：ハブユニット誕生前まで

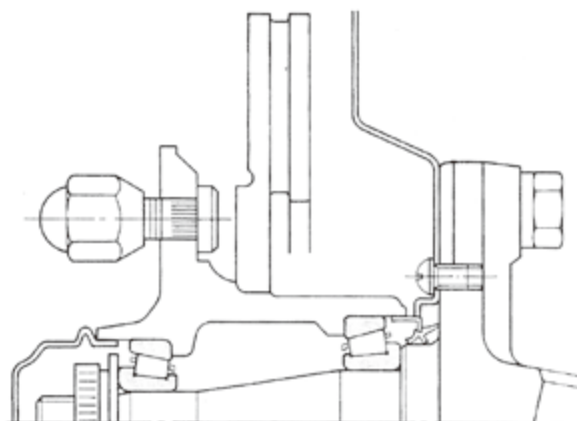
4.2.1 で述べたように、前輪駆動車（FF 車）が登場するまで、通常、自動車は後輪が駆動輪、前輪が従動輪であった。

その後輪駆動車の前輪従動輪のベアリング周りの一般的な構造は、図 4.2.6 のように 2 個の円すいころ軸受をハブ（ハウジング）に間隔をあけて配置し、外側ベアリングの内輪をスピンドルナットで締め付けてがたつきを無くし、適切な予圧（プリロード）を与えるもので、ベアリングの潤滑に使用するグリースはハブ内部のベアリング間の空間に充填する。

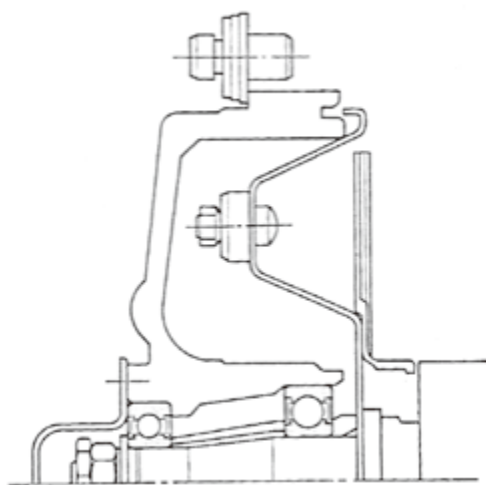
後輪の固定車軸と同様、この構造形式は現在でもトラック等の商用車で使われている。

また比較的車重の軽い自動車では深溝玉軸受も使われている（図 4.2.9）。

1970 年代から日本でも本格的な普及が始まった前輪駆動車（FF 車）では後輪が従動輪となるが、そのベアリング周りの構造は FR 車の前輪と同様に、円すいころ軸受 2 個にナットで予圧を与えて使用するか、軽自動車やコンパクトカーのように軸重が小さな場合は、円すいころ軸受の代わりに深溝玉軸受を 2 個使用する形式であった。



<円すいころ軸受>



<深溝玉軸受>

図 4.2.9 前輪従動輪の構造例<sup>31)</sup>

## 自動車輸送時の車軸用ベアリングの擬似圧痕

自動車の車軸用のベアリングがまだ標準的な玉軸受や円すいころ軸受であった時代から、自動車を輸送する際にベアリングに発生する擬似圧痕（フォールスプリネリング）が問題となっていた。

擬似圧痕は回転していない静止状態のベアリングに繰り返し荷重（力）がかかることによってベアリングの軌道輪（内輪・外輪）と転動体（玉、ころ）の接触部に微小すべりが起きて摩擦を生じ、転動体（玉、ころ）が存在する間隔で圧痕状の凹みができる現象であり、いわゆるフレッチング摩耗の一種である。著しい擬似圧痕が生じたベアリングを使用すると異音、振動などの原因となる。

擬似圧痕は自動車では、操舵輪（通常は前輪）の旋回中心の支持に使われるキングピンベアリングや、装置の停止時間が長いエンジン補機のベアリングでも発生することがあるが、特に問題となったのが車軸用ベアリングである。これは、自動車の現地生産がまだ一般的ではなく完成車輸出が主であった時代において、貨車や船積みでの輸送時に車両が移動しないようワイヤケーブル等で車体を固定することから生じた。貨車や船の揺れや振動によって自動車の自重が変動荷重として静止状態の車軸用ベアリングにかかることで擬似圧痕が発生し、輸送後に自動車を走行させると車軸用ベアリングから異音が出るがあった。



図1 円すいころ軸受の外輪に生じた擬似圧痕の例<sup>1)</sup>

対策として車軸用ベアリングに与える予圧を高めにして接触部の微小すべり量を減少させることが行われたが、過大な予圧はベアリングの耐久性を損ね摩擦や発熱の原因にもなることや、車軸用ベアリングに玉軸受を用いている場合は、ころ軸受に比べ予圧を高くしても防止効果が少ないことから根絶には至らなかった。

擬似圧痕は軌道輪と転動体の接触面に油膜が十分に形成されずに金属接触となって摩擦が生じる現象であるため、潤滑条件を良くすることで対策が可能なことは分かっていた。しかし当時、車軸用ベアリングは自動車を整備するごとに分解点検を行うのが当たり前であり、そのたびにベアリングとその周辺のグリース（カーメーカー指定のシャシーグリース）の交換補充を行っていたため、グリースを高価で潤滑性の高いものに変更するような対策を採ることは困難であった。

1980年代ごろから車軸用ベアリングがユニット化してハブユニットとなると、車軸用ベアリングは分解不要のメンテナンスフリーとなり、車軸用ベアリングのグリースも交換することなしにハブユニット製造時に封入するグリースが車両一生を通じてそのまま使われるようになった。そのため、ベアリングメーカーはグリースメーカーと共同で、基油には軌道輪と転動体の接触面に油膜が形成されやすいように粘度を下げた鉱物油を用い、増ちょう剤には基油の保持性が良く耐水性、耐熱性に優れたウレア化合物を用いたハブユニット専用グリースを開発して標準的に使用するようになった。

このようなベアリング用グリースの開発と、自動車の現地生産により長距離の完成車輸送が減ったこともあって、今日では車軸用ベアリングの擬似圧痕が問題となることは少なくなっている。

### <参考・引用文献>

1) 「キングピン用円すいころ軸受の擬似圧痕」 Koyo Engineering Journal No.131 (1987)

### 4.2.3 車軸用ベアリングのユニット化

#### ：ハブユニットの登場

1970年代の後半になると、欧州の乗用車で駆動輪、従動輪とも車軸用の2個のベアリングを一体とし予めグリースを封入したシール付き複列ベアリング（複列アンギュラコンタクト玉軸受）をハブ（ハウジング）に圧入し側面を止め輪で固定するだけで所定の予圧となる構造が登場した。

これにより面倒なベアリング及びその周辺へのグリースの塗布や、熟練を要する予圧調整のナット締め作業が不要となることから、日本国内でも比較的軸重が軽く、整備も容易な乗用車でこの構造が急速に普及した。車軸用ベアリングにとってこれがユニット化の第一歩であり、「第一世代ハブユニット」と呼ばれている（図4.2.10）。

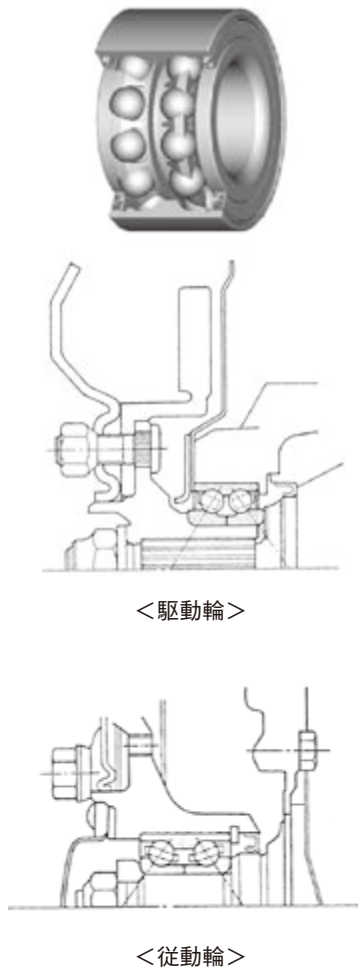


図 4.2.10 第一世代ハブユニットの構造例<sup>31) 32)</sup>

その後、1983年のホンダシビックを皮切りに、相手部品との取付けフランジをベアリング外輪と一体として組立作業の簡素化を図るとともに、第一世代の欠点であったベアリング外輪のハブ（フランジ）への圧入によるベアリング予圧のばらつきを抑えた「第二世代ハブユニット」（図4.2.11）が開発された。

さらに1980年代後半には車軸とベアリング内輪を一体として組立作業を容易とし、ベアリング内輪の軸への圧入によるベアリング予圧のばらつきを抑えた「第三世代ハブユニット」が採用されていた（図4.2.12）。

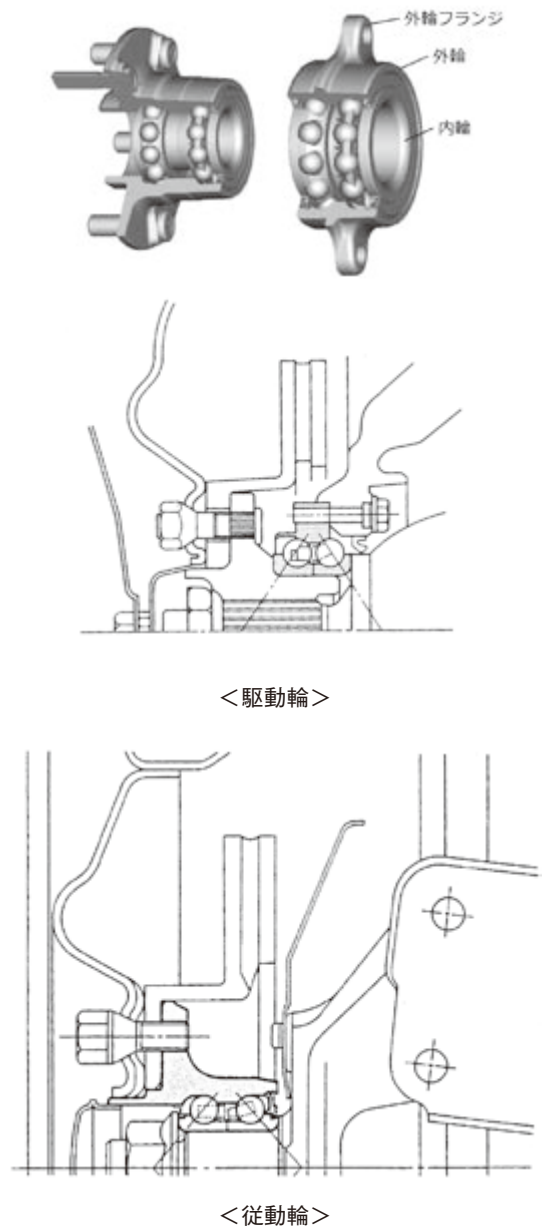
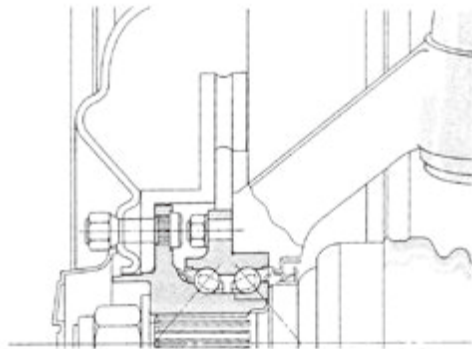
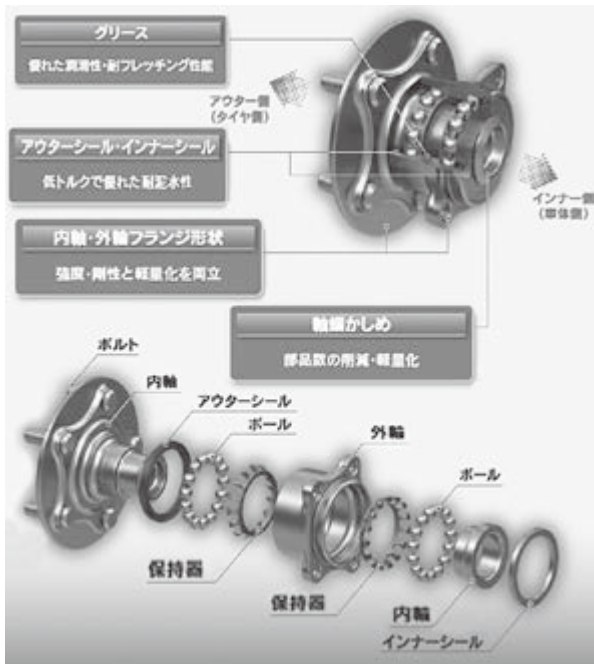
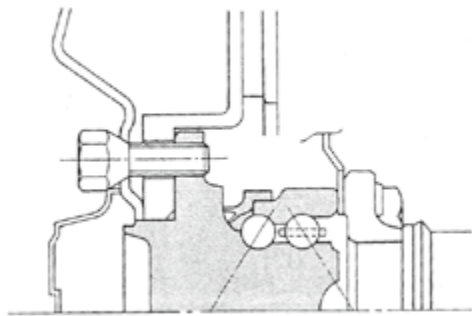


図 4.2.11 第二世代ハブユニットの構造例<sup>31) 32)</sup>





<駆動輪>



<従動輪>

図 4.2.12 第三世代ハブユニットの構造例<sup>31) 33)</sup>

こうしたハブユニットの開発にあたっては、各ベアリングメーカーで有限要素法（FEM）等を用いた強度解析による設計の最適化や軽量化など、ユニット化のメリットを最大限に活用する取り組みが行われ、これは現在でも続けられている。

また当初、従動輪用第三世代ハブユニットの軸はナット止めであったが、1990年代には軸端を揺動かしめによって変形拡張させて内輪を固定する技術が各ベアリングメーカーによって開発され、ハブユニットの構造の簡素化とコストダウンに寄与することとなった。

さらにこれらと平行して、従来、別付けの部品であり車検ごとの分解点検時に交換されていた泥水除けの軸シールがユニット化によってベアリングの付属品となり、ハブユニット自体と同様、クルマー生の耐久性が要求されるようになったため、長寿命・高密封・低トルクのベアリング用シール（シールリップが摺動するスリンガーまでベアリングと一体となったものを、特にパックシールと呼ぶ）の開発が2000年代にかけて継続して行われた（図 4.2.13）。

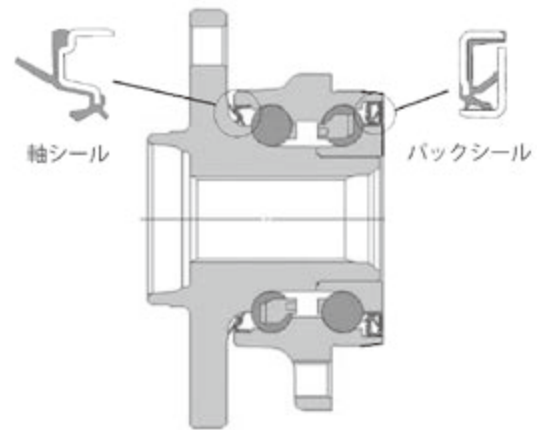


図 4.2.13 ハブユニット用軸シール・パックシールの例<sup>34)</sup>

こうした車軸用ベアリングのユニット化の流れは欧州の自動車が行っていたため、ベアリングの形式は歴史的に欧州のベアリングメーカーが得意とする玉軸受であり、日本国内でも同様に玉軸受ユニットが主体であった。

玉軸受を使用した車軸用ベアリングのユニット化の変遷を図 4.2.14 に示す。

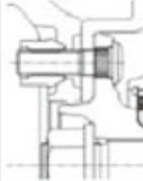
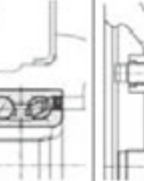
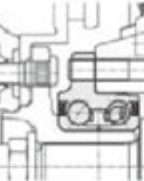
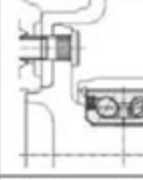
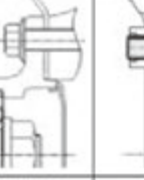
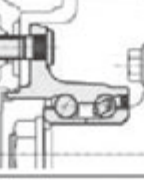
世代	コンベンショナル	第一世代	第二世代	第三世代
量産開始時期	～1970年代	1970年代後半～	1983年～	1980年代半ば～
構造	駆動輪			
	従動輪			
特徴	・2個の単列軸受を使用	・2個の単列軸受を一体化	・相手部品との取り付け用フランジを外輪と一体化	・相手部品との取り付け用フランジを外輪、内輪と一体化 ・相手部品への軸受圧入が不要

図 4.2.14 車軸用ベアリングのユニット化の変遷<sup>35)</sup>

一方で、一部の乗用車やSUVで使用されている円すいころ軸受では、1970年代に米国 Timken 社がセットライト方式という名称で、コンベンショナルなベアリング構造ではあるが、組立後に適正予圧となるように予め  $\mu\text{m}$  オーダーでの寸法調整を行った2個セットのベアリングを推奨した。この方式の利点は従来の周辺部品や構造をほぼ変更せずに使用できることにあったが、反面、ベアリングと嵌めあうハウジングや軸の寸法管理を厳格に行う必要があり、その割には組立作業の簡素化が限定的であったため日本では普及に至らなかった(図 4.2.15)。

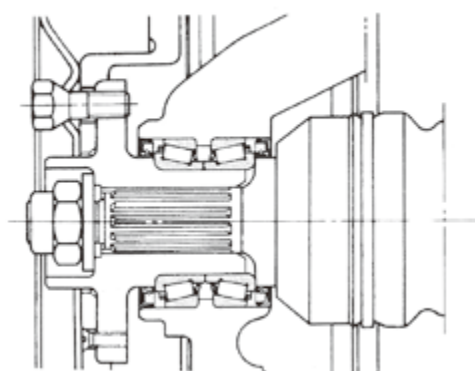


図 4.2.15 セットライト方式円すいころ軸受の構造例<sup>31)</sup>

その後1980年代の半ばから第一世代ハブユニットにあたるシール付き複列円すいころ軸受が各ベアリングメーカーによって開発された(図 4.2.16)。このベアリングは円すいころ軸受の持つ高い支持剛性を生かし、コーナリング時の車軸のたわみを小さくしてドラ

イバビリティや運動性能を向上させることができるため、日産自動車やスバル等の乗用車で2000年代まで長く使われたが、車軸周りの構造が複雑で組み立てに手間がかかることもあって、その後、簡便に装着ができる第三世代の玉軸受ハブユニットに置き換わっていった。

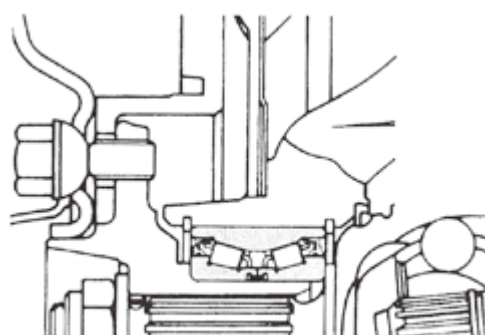


図 4.2.16 第一世代円すいころ軸受ハブユニットの構造例<sup>31) 32)</sup>

また、SUV やピックアップトラックでは長年、図 4.2.9 にあるような旧来からの円すいころ軸受 2 個使いの構造が引き続き使われていたが、玉軸受タイプで第二、第三代ハブユニットが広く世の中に普及して一般的になり、SUV やピックアップトラックだけが従来の円すいころ軸受 2 個使いの構造のままでは市場での適切なグリースアップやシール交換、ベアリングの予圧調整等の整備作業が期待できなくなってきた。

そのため、2000 年代半ばから円すいころ軸受ハブユニットの開発が始まった。このベアリングユニットは第二世代玉軸受ハブユニットと同じく、軸とベアリング内輪が別体であるが、予めベアリングメーカーでハブシャフトの圧入組立（かしめ）を行い、適切な予圧に調整済の状態が提供されるため第 2.5 世代と呼ばれる（図 4.2.17）。玉軸受では玉と軌道溝が点接触であり、軸の圧入やかしめによって多少の変形やたわみが生じてそれらを吸収できるが、円すいころ軸受の場合はころと軌道が線接触であるため軸の変形やたわみによるベアリングの性能低下に敏感である。そのため、円すいころ軸受ハブユニットの開発には困難を伴ったが、これを解決することで海外ベアリングメーカーの製品との品質・耐久信頼性の差別化を図り、日本製の円すいころ軸受ハブユニットが広く世界に普及する結果となった。

なお欧州では、中大型トラックにおいても乗用車や小型トラック同様にベアリングのユニット化（主として第一世代）が進んでいる。しかし、日本では法制化されている車検時にブレーキ点検のためその都度ベアリングを取り外すことになるためハブユニット化によるメンテナンスフリーの恩恵を得にくい。また日本のトラック整備工場は車検等を通じて分解点検作業に習熟していて旧来からの汎用の円すいころ軸受 2 個使いの構造でもあまり不便を感じていない。さらに総じてユニットベアリングの方が標準ベアリングよりも高価であることや、トラックが乗用車に比べて総走行距離が著しく長く、欧州と異なり直進走行が少なくカーブが多いためベアリングへの負荷が大きい日本の道路事情を考えたとき、トラック一生分のベアリングの耐久性を分解点検なしに保証できるのかの見極めが難しいこともあって、日本ではトラックへのハブユニットの採用に慎重な状況となっている。

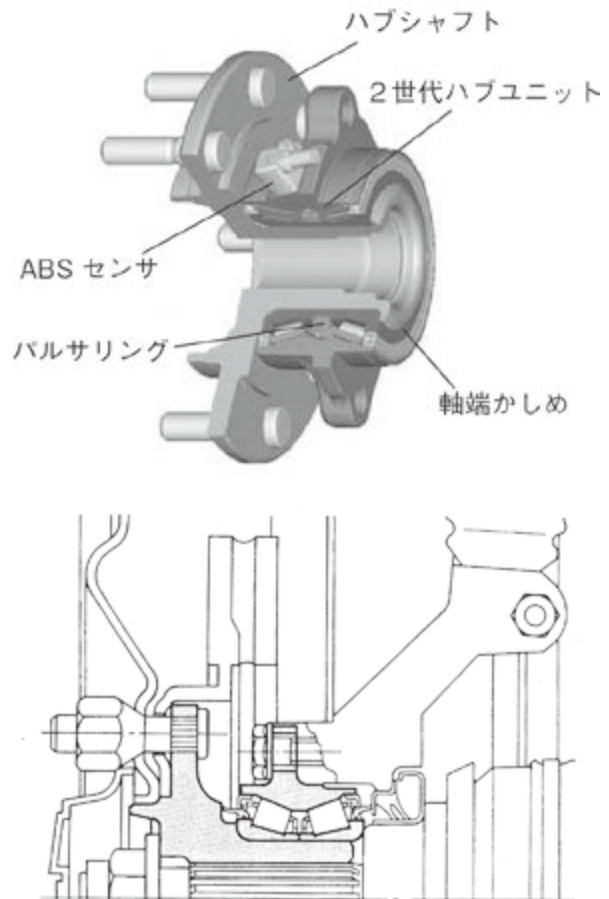


図 4.2.17 第 2.5 世代円すいころ軸受ハブユニットの構造例<sup>31) 36)</sup>

#### 4.2.4 ハブユニットへの車輪回転速度センサーの内蔵：ABS の普及

車軸用ベアリングのユニット化から若干遅れて 1990 年代から乗用車へのアンチロック・ブレーキ・システム（ABS）の装着が急速に増加し始めた。

ABS では車速と車輪回転速度とを比較して車輪がロックシタイヤと路面とがスリップしているのを検出してブレーキの制動力を制御しているが、その車輪回転速度検出のため、車軸の回転角検出のためのセンサーと、その相手のバルサーリングやセンサーローターと呼ばれる歯車状のリングが車軸に取り付けられる。

当初このバルサーリングは車軸用ベアリングとは別の個所に取り付けられていた。しかしその後、自動車に標準的に ABS が装着されるようになるとバルサーリングを直接ハブユニットに装着するようになった。図 4.2.18 はバルサーリング付きハブユニットの例である。

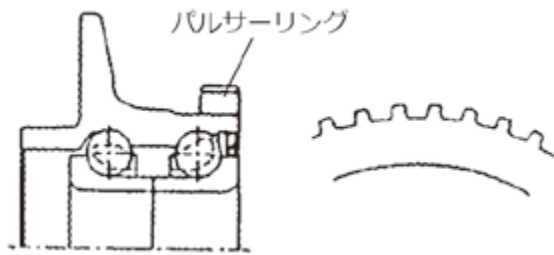


図 4.2.18 パルサーリング付きハブユニットの例<sup>32)</sup>

また 2000 年ごろから、車輪回転速度センサーの低速走行時の信号強度を上げること及び分解能を高めるため、電磁誘導を用いたパッシブセンサーが、ホール素子等を用いたアクティブセンサーへと進化すると、その相手の着磁パルサーリング（磁気エンコーダーリング）がハブユニットに装着されるようになり、ベアリングメーカーではハブユニットのバックシールの側面に着磁パルサーリングの磁気パターンを設けたものの開発が行われた（図 4.2.19）。

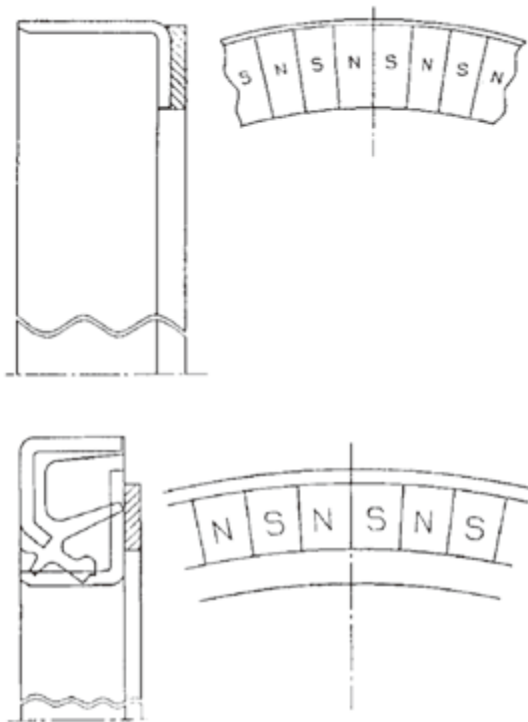
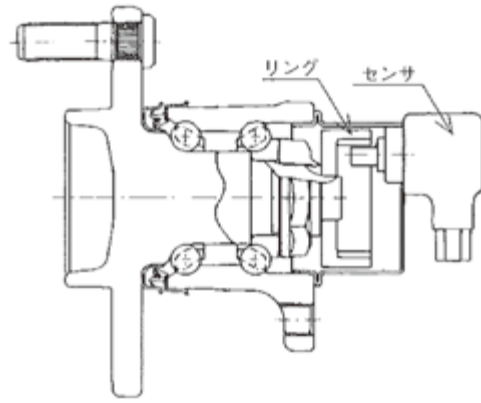


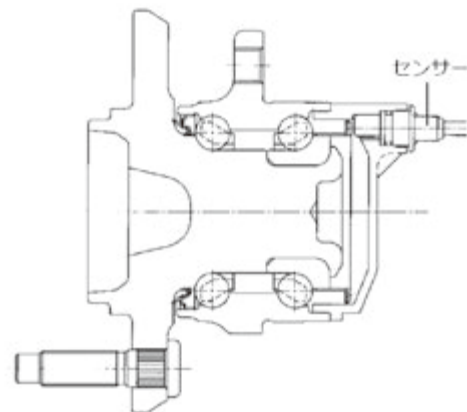
図 4.2.19 着磁パルサーリングとバックシール一体形着磁パルサーリングの例<sup>32)</sup>

以上の形式ではパルサーリングはハブユニット側に、センサーは車体側に取り付けられているため適切な車輪速度信号を取り出すためにはセンサー取付け時にギャップ調整が必要であった。またパルサーリングやセンサーが外部に露出していると、泥塩水の被水や飛び石によるチッピングなどの影響を受けやすい欠点

があった。そのため、ABS の標準装着化が進むとパルサーリングだけでなく回転速度センサー自体を含めてハブユニットに装着し一体化した形式が上記と平行して 1990 年代後半から 2000 年代の初めにかけて各ベアリングメーカーで開発され、カーメーカーに供給されるようになった（図 4.2.20）。



(パッシブセンサー内蔵型)<sup>37)</sup>



(アクティブセンサー内蔵型)<sup>32)</sup>

図 4.2.20 車輪回転速度センサー内蔵ハブユニットの例

#### 4.2.5 第四世代ハブユニット

##### ：等速ジョイントとのユニット化

NTN では、2000 年ごろから自社で開発・製造を行っている駆動輪用ハブユニットと動力伝達用のドライブシャフト（等速ジョイント）を一体とした第四世代ハブユニット（ハブジョイント）の開発を行った（図 4.2.21）。

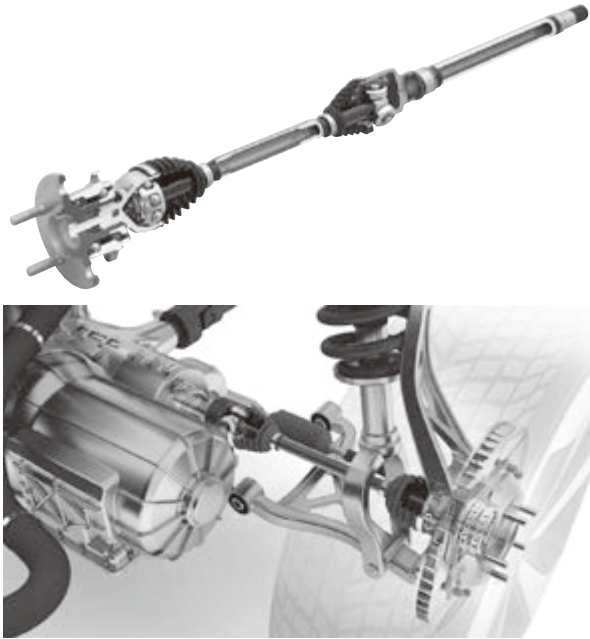


図 4.2.21 第四世代ハブユニットの例 (ハブジョイント)<sup>22)</sup>

これはハブユニットとドライブシャフト（等速ジョイント）を一つのユニットとすることで軽量化を図り、ばね下重量を軽減して操縦安定性の向上と燃費低減と、ハブフランジと等速ジョイント間の軸方向距離を短縮してサスペンション設計の自由度を増すことができる製品である。しかしハブユニットとドライブシャフトが一体となると車体への着脱作業に工夫が要ることや、ドライブシャフトにブーツの破損や軸折れなどの不具合があった場合、健全なハブユニットベアリングを含めて交換することになり費用がかさむことなどから、普及には至っていない。

#### 4.2.6 キングピン・ストラット用ベアリング ：専用ベアリングからユニットへ

自動車の前輪は操舵輪であり、左右に旋回する必要がある。

そのために機構としてトラックの前輪ではキングピン、乗用車の前輪ではショックアブソーバーにコイルスプリングを取り付けたマクファーソン・ストラット式の懸架装置（サスペンション）が使用されているのが一般的である。車輪はキングピン軸、又はショックアブソーバー軸（ストラット軸）を中心として旋回するので、キングピン軸のアキシャル及びラジアル支持、及びストラットのショックアブソーバー軸の上部にはベアリングを取り付けて車輪からの軸重を支えるとともに操舵旋回時の揺動を可能にする構造となっている（図 4.2.22、図 4.2.23、図 4.2.24）。

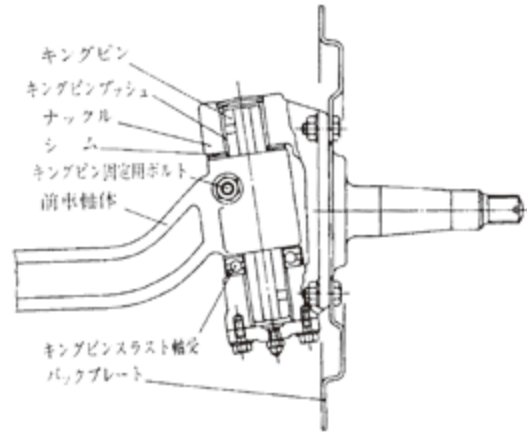


図 4.2.22 小型トラックのキングピンの構造例<sup>13)</sup>

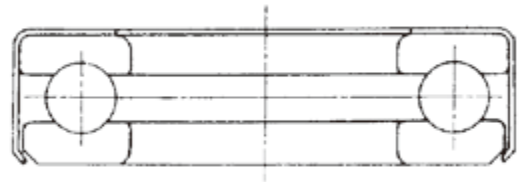


図 4.2.23 キングピン用スラスト玉軸受の例<sup>13)</sup>

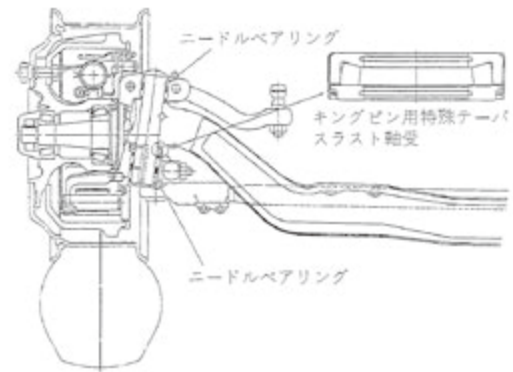


図 4.2.24 大型トラックのキングピンの構造例<sup>38)</sup>

ベアリングにかかる力は主に車輪からの軸重による軸方向の荷重であるため、トラック用キングピン軸では小型トラックでは図 4.2.23 のようなキングピン専用の保持器のないスラスト総玉軸受が、大型トラックでは通常の内径軸受、又は図 4.2.24 のようなスラスト円すいころ軸受と針状ころ軸受の組み合わせが用いられている。

一方、乗用車のストラット用ベアリングは 1970 年代ごろまでキングピン用スラスト玉軸受と同様の保持器のないスラスト総玉軸受が用いられたが（図 4.2.25）、その後、小型乗用車を中心にコストが安い標

準のシール付き深溝玉軸受が多く使用されるようになった（図 4.2.26）。またホンダではスラスト針状ころ軸受が使用され、さらに 1980 年代半ばからは鋼板をプレス成形して製造しゴムシールを加硫接着した内輪・外輪のストラット専用の総玉スラスト玉軸受がベアリングメーカーによって開発されて使用された。（図 4.2.27）

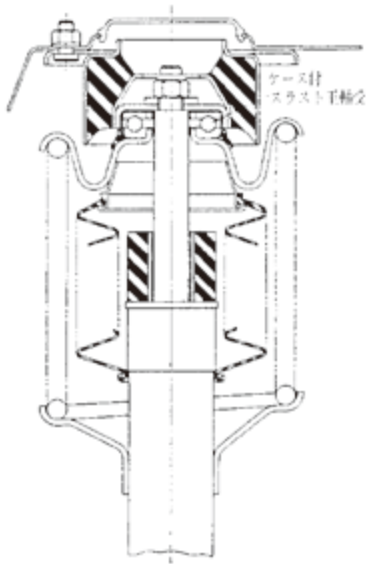


図 4.2.25 ストラット用ベアリングの例  
(1970 年代)<sup>13)</sup>

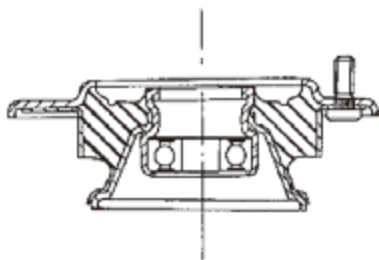


図 4.2.26 深溝玉軸受を使用した  
入力分離型ストラット用ベアリングの例<sup>39)</sup>



図 4.2.27 ストラット用プレス製スラスト玉軸受  
の例<sup>30)</sup>

2000 年代になると比較的車輪軸重の小さい軽自動車やコンパクトカーではコストダウンのため摩擦係数が低い特殊樹脂のワッシャをポリアミド樹脂のケースに収めて摩擦と摩耗を低減させた安価な樹脂製すべり軸受がベアリングの代わりに使われるようになった。

また車輪軸重の大きい乗用車では、2000 年代半ばからコイルスプリングとショックアブソーバーからの荷重の両方をベアリングで支持する入力一体型と呼ばれる方式を採用し、コイルスプリング上部のばね座を樹脂成形として、その中にプレス加工で製作した軌道輪をはめ込んで鋼球と保持器を入れて組み立てた、ストラット専用のユニットベアリングが登場した。

このような樹脂を多用してのユニット化は車軸用ベアリングと同様に欧州での開発が先行したため、欧州と関係が深い日産やマツダがそれを追って採用することとなった。

この入力一体型のストラット用ベアリングは、従来の深溝玉軸受と異なり、コイルスプリングからの荷重をベアリングで受けることによって樹脂成形とプレス加工でできたベアリング全体に不均一な変形が生じるため、変形がベアリング性能に与える影響やベアリングの疲労破損強度の綿密な検討が不可欠となる。そのため、現在でも入力分離型と呼ばれるショックアブソーバー軸からの荷重のみをベアリングで受ける形式の深溝玉軸受（図 4.2.26）や、それを改良したプレス内外輪で構成された玉軸受（図 4.2.27）、又は入力一体型でもベアリングとばね座を別体として、コイルスプリングからの荷重によるベアリングの変形を避ける形式を採用している自動車も多数ある。

## 4.3 動力伝達系用ベアリング

内燃機関は効率が良くパワーが出る運転領域が限られているため、これを動力として用いる自動車ではエンジン出力を車輪に伝える間に速比の変えられるギヤボックスを設ける必要があり、これを変速機（トランスミッション）と呼んでいる。

また、エンジン動力を車軸まで伝える一連のシステムを動力伝達系と呼び、これには変速機の他に、FR車や四輪駆動車（4WD車）で変速機からの出力を後車軸に伝えるための推進軸（プロペラシャフト）や、プロペラシャフトからの入力を90°折り曲げて減速するとともに自動車が旋回するとき（コーナリング時）の内側車輪と外側車輪の回転数差を吸収するための差動装置（ディファレンシャル）を内蔵した終減速機（ファイナルドライブ）等が含まれる（図4.3.1）。

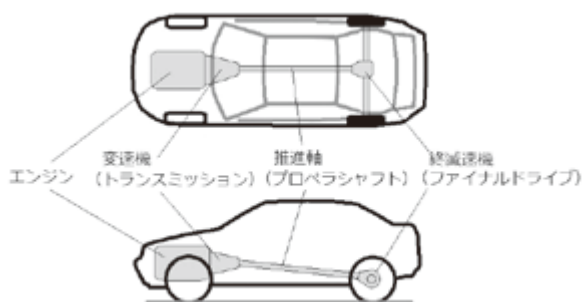


図 4.3.1 FR車のレイアウト略図<sup>40)</sup>

この節では自動車の動力伝達系の各装置の大まかな構造、そしてそれに使用するベアリング形式やベアリングに求められる機能とその進化と開発の経緯について述べる。

### 4.3.1 終減速機用ベアリング

#### ：低摩擦トルクを徹底的に追求

終減速機（ファイナルドライブ）はFR車や四輪駆動車において、エンジンからトランスミッション、プロペラシャフトを介して伝わった動力を90°折り曲げて後車軸に伝える役割を行うギヤボックスで、自動車が旋回するときの外側と内側の車輪の回転差を吸収するための差動装置（ディファレンシャル）を内蔵していることから日本では「デフ」と呼ばれることもある。

自動車の車高を抑えるため、歯車には通常の傘歯車（ベベルギヤ）ではなく、入力側のドライブピニオンギヤと出力側のリングギヤの軸中心が交わらずにオフセットされているハイポイドギヤが使われている（図4.3.2）。

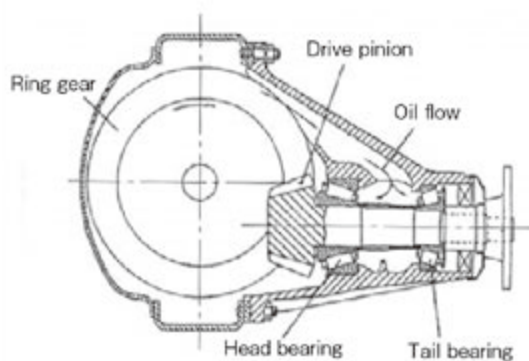


図 4.3.2 終減速機の構造例<sup>41)</sup>

ハイポイドギヤは終減速機的设计自由度が増す大きな利点があるが、反面、噛み合い歯面に生じるすべりが大きく、摩擦発熱が大きいのでギヤボックス内は高温になりやすい。また潤滑油には、すべりの多いハイポイドギヤの歯面を損傷や摩耗から守るために、特殊な極圧添加剤を配合した専用油（ハイポイドギヤオイル）が使用される。極圧添加剤はリン、硫黄等を含んだ化合物で、ハイポイドギヤ表面の金属と化学反応を生じて被膜を形成し、歯面の摩耗やかじり、焼き付き等を防止するものであるが、ハイポイドギヤを支持するベアリングの転動面とも化学反応を起こすので、ベアリングの潤滑には必ずしも適しているとはいえない。

またハイポイドギヤはギヤの噛み合いが所定の位置から外れると異音等の不具合が出やすい。特にドライブピニオンギヤの支持ベアリングの剛性が不足していると動力伝達時の噛み合い反力によってドライブピニオンギヤの位置がずれて問題となる。

これらのことから、終減速機の軸支持には高剛性で負荷容量の大きな円すいころ軸受に、剛性を高めるための予圧（プリロード）を与えて使用するのが一般的である。

反面、円すいころ軸受は予圧を含めたアキシャル荷重の一部を受ける内輪つば面がすべり接触であるため、玉軸受等に比べて特に低速回転時の回転摩擦抵抗が大きい。

図4.3.3に円すいころ軸受のしくみを略図で示す。

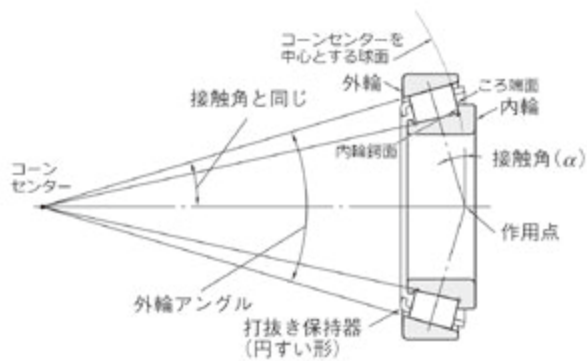


図 4.3.3 円すいころ軸受のしくみ<sup>42)</sup>

円すいころ軸受は内輪、外輪、ころの円すい面の頂点が軸心上の仮想点である「コーンセンター」の1点に集まるように設計されており、ラジアル力の大部分は内輪、外輪と、ころとの転動面で支持するが、アキシャル力の大部分は内輪つば面ところ端面のすべり接触面で支持されていて、運動機構上、内輪つば面ところ端面はコーンセンターを中心とする球面の一部を形成している。

量産加工において、ころ端面はころをこの仮想円すい面に沿って転がしながら研削によって球面に加工するが、内輪つば面は球面加工が難しいので理論上の球面に接する円すい面（母線形状が直線）に加工するのが一般的である。

そのため、円すいころ軸受では新品状態から運転を行うと内輪つば面ところ端面の接触面になじみが生じ接触が安定するまでに時間を要するのと、それによって予圧抜けが発生するのが普通であった（図 4.3.4）。

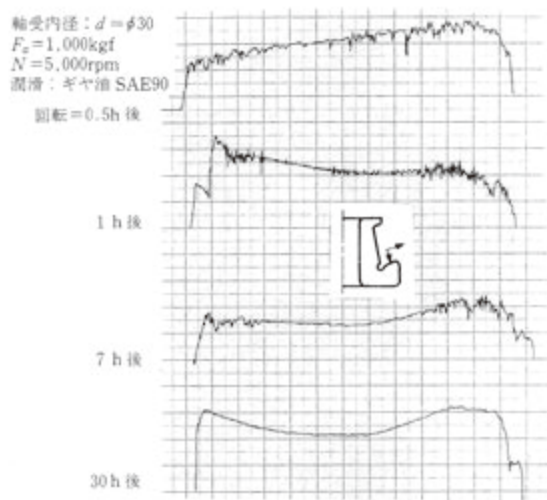


図 4.3.4 円すいころ軸受内輪つば面の運転後の形状変化<sup>43)</sup>

1983年ごろに光洋精工（現ジェイテクト）ではこの現象に着目し、製作時に内輪つば面に特殊加工を行うことによってなじみ後の球面に近似した形状を与えた円すいころ軸受を開発し、このような内輪つば面の加工を行うことで円すいころ軸受の回転摩擦トルクが低減することから、これをLFT軸受（Low Friction Torque Tapered Roller Bearing）と名付けて製品化した。

終減速機のドライブピニオンギヤ支持のベアリングは組み込み後に予圧抜けが生じるとドライブピニオン軸の支持剛性の低下が起きて問題となることや、LFT軸受は予圧抜けが少なく初期に与えるベアリング予圧を小さくできて運転時の摩擦損失を減らせることから、LFT軸受は終減速機用ベアリングを中心に採用され、使用が拡大していった。

図 4.3.5 は円すいころ軸受の未使用状態と使用後（試験後）の内輪つば面形状とLFT軸受の未使用状態の内輪つば面形状を示したものである。

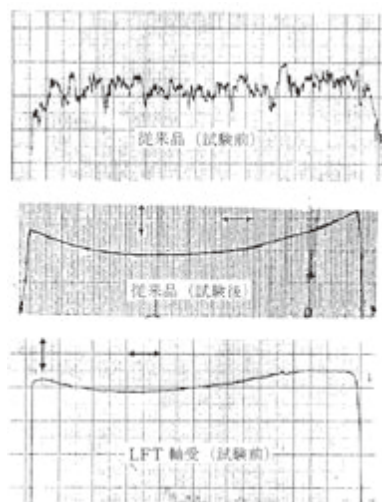


図 4.3.5 従来の円すいころ軸受とLFT軸受の内輪つば形状<sup>43)</sup>

ここでベアリング（円すいころ軸受）が回転しているときの摩擦トルクの発生要因を考えると、以下のようになる。

- ①ころと内外輪軌道との間の転がり粘性抵抗
- ②内輪つば面ところ端面の間のすべり抵抗
- ③潤滑剤の攪拌抵抗
- ④ころと保持器の間のすべり抵抗

上記のLFT軸受はこのうちの②に着目して低減を図ったものであったが、終減速機のように高粘度のハイポイドギヤオイルが封入された閉鎖環境で数千r/minの回転速度でベアリングを使用する場合、①や③の要因が占める割合が大きく、図 4.2.6 に示すように①の転がり粘性抵抗が約 65%、③の攪拌抵抗が約



30%となっている。

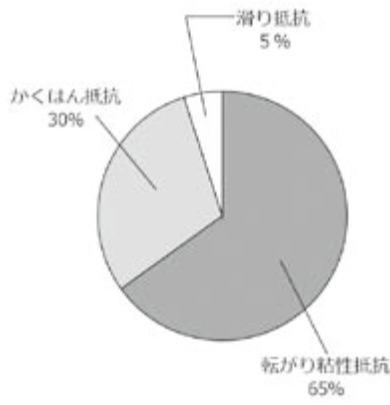


図 4.3.6 終減速機ドライブピニオン用円すいころ軸受のトルク発生寄与率<sup>44)</sup>

また、図 4.3.7 は円すいころ軸受の摩擦トルクと回転速度の関係を模式的に示したものである。

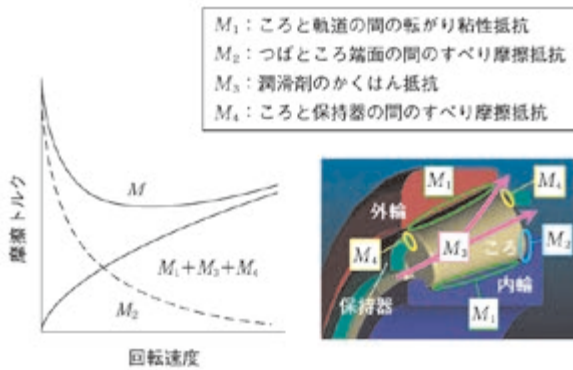


図 4.3.7 円すいころ軸受の摩擦トルク  $M$  と回転速度の関係<sup>45)</sup>

転がり粘性抵抗を減少させるにはころ転動面と内外輪軌道面の接触面積を小さくし、かつ重荷重下での耐久性に影響を与えないような形状で内外輪軌道面にクラウニングを施すことが望ましい。この考え方をういて光洋精工（現ジェイテクト）では1994年にLFT-II軸受を製品化した。

また転がり粘性抵抗を減少させるには、ころの本数を減らすことや、ころの長さを短くすることも効果があるが、これらはベアリングの負荷容量を低下させるという背反事象があるため、バランスを考えた設計が求められる。

次に攪拌抵抗の低減については、終減速機ではドライブピニオンベアリングが潤滑油（ハイポイドギヤオイル）で満たされた状態で運転されていることから、潤滑油のベアリング内部の貫通流量を少なくする工夫で達成できる。円すいころ軸受は回転によってポンプ作用が生じて円すい面の径の小さな方から大きな方

に潤滑油が流れるので、油の入り口である円すい面の径の小さな側（内輪の小端側）の開口面積を小さくすれば油の流入を規制して貫通油量を減らすことができる。

これらの円すいころ軸受の低トルク化技術をまとめたものを図 4.3.8 に示す。

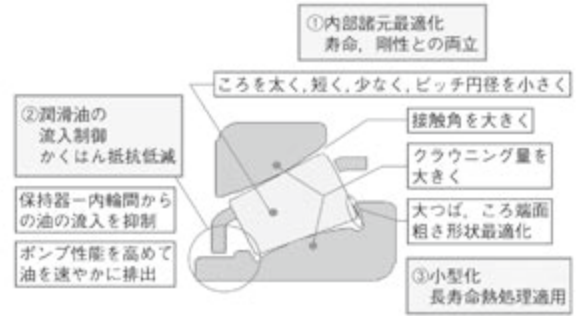


図 4.3.8 円すいころ軸受の低トルク化技術<sup>46)</sup>

光洋精工（現ジェイテクト）では、こうして解明された技術を基に、最適なベアリング設計諸元を適用したものを2004年にLFT-III軸受として発表し、製品化を行った（図 4.3.9）。さらに樹脂保持器を採用し、その形状を工夫することで流入油量制御を進化させたLFT-IV軸受を2015年に発表した（図 4.3.10）。

これらの技術開発によって終減速機ドライブピニオンベアリングの回転摩擦トルクは従来比の50～65%低減し、自動車全体で約2.5%の燃費向上が達成された。



図 4.3.9 低トルク円すいころ軸受を採用した終減速機のカットモデル<sup>47)</sup>

	LFT-I	LFT-II	LFT-III	LFT-IV
TRB-LFTの進化				
特長	つばころ接触部の形状・粗さ最適化	内外輪軌面に特殊クラウニング形状	流入油量制御/内部遊元最適化	樹脂保持部で流入油量を最適制御
トルク低減効果(標準品比)	▲10%	▲20%	▲50%	▲65%
主な低減効果	すべり摩擦低減	転がり粘性低減	かくはん低減	かくはん低減
開発時期	1983年	1984年	2005年	2015年

図 4.3.10 低トルク円すいころ軸受の進化<sup>40)</sup>

終減速機のドライブピニオン用ベアリングとして2個組み合わせで使用される円すいころ軸受で考えた場合、図 4.3.2 にあるように、リングギヤでかき上げられた油は油路を通してドライブピニオンギヤ側のピニオンヘッドベアリングと反対側のピニオンテイルベアリングの間に流れ込む。従って、ベアリングの回転抵抗を減らすには直径が大きく回転摩擦トルクが大きなピニオンヘッドベアリングに上述のようなベアリング内部への潤滑油の流入を制限する対策を行い、直径が小さなピニオンテイルベアリングの側から油を排出することが望ましい(図 4.3.11)。

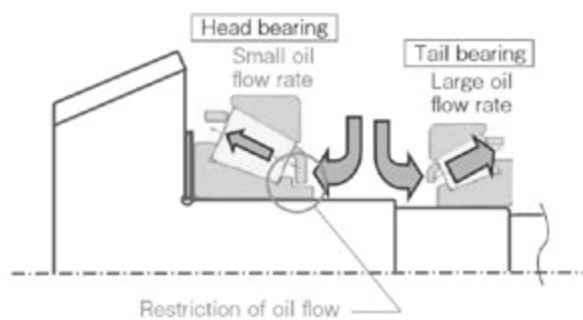


図 4.3.11 ドライブピニオン用ベアリングのトルク低減の考え方<sup>41)</sup>

また、終減速機のリングギヤを支持する円すいころ軸受(デフサイドベアリング)の予圧(プリロード)調整は、軸を垂直に立て手で回転させて組立高さを計測し、適正な予圧となるようにシムを選択して行うのが一般的であるが、この際、2個の円すいころ軸受のうちの片側は外輪が下になる姿勢で測定することになるため、図 4.3.12 のように、ころが重力により内輪のつば面から浮き上がった状態となり、所定のベアリングの組立幅(厚み)よりも大きな寸法になることがある。軸を回転させることによって、ころは転がりながら内輪つば面と接触する所定の位置までせり上がって移動し内輪が沈み込んで正規の状態となり安定するが、手動計測では4~5回転程度しか軸を回さないために内輪が完全に沈み込んで安定する前に計測が行われ、組立後に予圧が抜けて問題となることがある。そ

のため1998年ごろに光洋精工(現ジェイテクト)ではこの内輪軌道面との間の軸方向のすきまを限界まで狭くすることで少ない回転回数で安定した測定が行えるように改良を行ったベアリングをJUST円すいころ軸受と名付けて商品化した。

この円すいころ軸受は終減速機用だけでなく、手動変速機、自動変速機等に使用している円すいころ軸受で組立時に同様な問題が発生する場合にも適用されている。

また日本精工でも2000年ごろに同様の機能向上を図った円すいころ軸受をQAT軸受(Quick Adjustable Tapered Roller Bearing)という名称で商品化を行った。

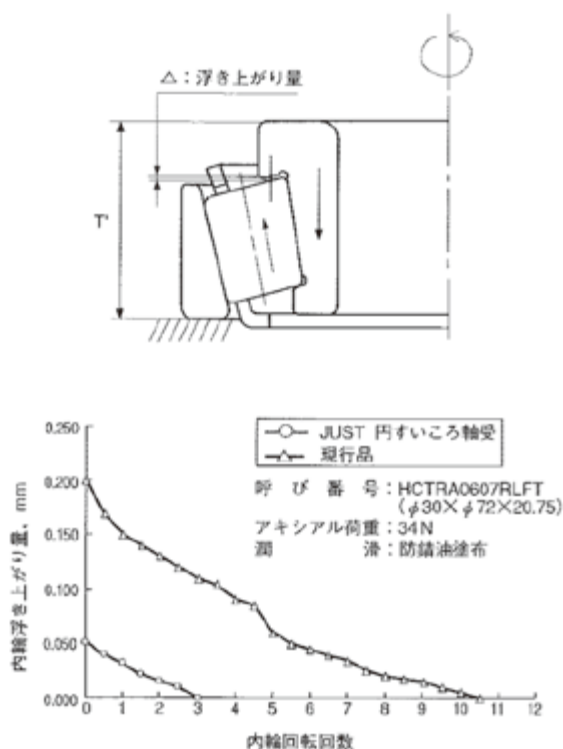


図 4.3.12 JUST円すいころ軸受<sup>49)</sup>

終減速機のドライブピニオン用ベアリングの回転トルクを低減させるにはもう一つ、2000年代半ばから欧州のBMW等が用い始めた円すいころ軸受のようなすべり接触面を持たない玉軸受を使用する方法がある。

ただし、ドライブピニオン用ベアリングは軸方向にも高い支持剛性が求められるので接触角を持ったアンギュラ玉軸受とし、さらに耐久性と剛性の向上のため2列の軌道溝を並列に並べて配置したタンデムアンギュラ玉軸受(図 4.3.13)という特殊なベアリングを採用している。

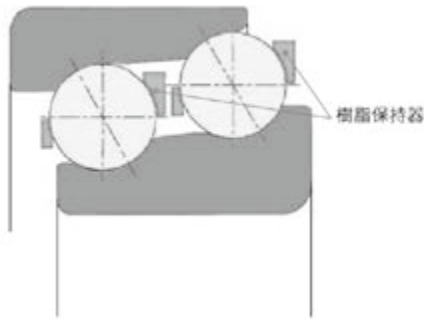


図 4.3.13 タンデムアンギュラ玉軸受<sup>46)</sup>

玉軸受は円すいころ軸受の内輪つば面と外輪端面の間のようなすべり接触面を持たないので、低負荷・低回転速度での摩擦トルクは小さいが、負荷が大きくなると弾性変形によって玉と軌道溝の接触面積が大きくなり、転がり接触面の内部ですべりが発生して摩擦トルクが増大する。また高回転速度になると転がり粘性抵抗や潤滑油の攪拌抵抗で回転トルクが増加することは円すいころ軸受と同様であるので、結果として極低速域は別として、通常の回転速度では、低トルク円すいころ軸受の第二世代（ジェイテクトのLFT-Ⅱ）と第三世代（ジェイテクトのLFT-Ⅲ）の中間程度の回転トルクとなる。

終減速機はハイポイドギヤオイルを封入した閉鎖されたギヤボックスであり、ハウジング（デフケース）等の部品に付着した鋳物砂等やギヤの摩耗粉等の硬質

異物がベアリングの転動面に噛み込むことで転動面に圧痕が発生し、圧痕部で応力集中が起こることによって表面から損傷が発生する。このメカニズムは次の4.3.2で詳しく説明するが、タンデムアンギュラ玉軸受は、硬質異物が存在すると円すいころ軸受に比べて寿命低下が著しいので、硬質異物を円すいころ軸受の場合の1/10程度の量に抑えて管理する必要がある。またベアリング組み込み時のプリロード（予圧）調整は軸を手動又は測定器で50～60r/minで回転させたときの回転摩擦トルクを測定することで行うが、タンデムアンギュラ玉軸受は円すいころ軸受のようにすべり接触面を持たないことから、このような極低速での回転トルクが非常に小さく、プリロード（予圧）調整に非常に困難さを伴う。

これらのタンデムアンギュラ玉軸受の持つ欠点を克服し実用化するには終減速機の組立取り扱いに厳格な工程管理・品質管理が必要である。そのため欧州の一部のカーメーカーのみが使用していて世の中で広く普及するには至っておらず、日本国内ではまだ使用されていない。

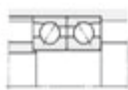
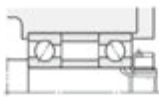
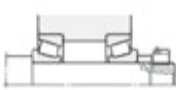
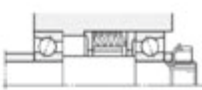

しかし日本のベアリングメーカーでは欧州向けにタンデムアンギュラ玉軸受を量産供給しており、高い製造技術と品質で欧州ベアリングメーカーと対抗して一定の地位を築いている。

## ベアリングの予圧

「ベアリングのはめあいと内部すきま」のコラムで述べたように、ベアリングは通常、適切な内部すきまとなるように軸・ハウジングに組み付けて使用するのが望ましいが、工作機械用ベアリングのようにガタ（軸の遊びや振れ）をきらう場合や、自動車の終減速機（4.3.1 参照）のように歯車の噛み合いを正常に保つためにベアリングの支持剛性を高めたい場合には、ベアリング組み付け時に予圧（プリロード）を与え、負すきま状態で使用することがある。予圧はアンギュラ玉軸受や円すいころ軸受のように2つのベアリングを向き合わせてペアで使用する場合が多い。

予圧を与える方法には定位置予圧と定圧予圧があり、ばね等を用いて常に一定の予圧力を保つ定圧予圧は、例えば運転による昇温でのハウジングの熱膨張等による寸法変化の影響を受けにくいメリットがあるが、反面、大きな予圧をかけることが難しく高い支持剛性が得にくい（表1）。

表1 ベアリングの定位置予圧と定圧予圧<sup>1)</sup>

定位置予圧			定圧予圧
			
<ul style="list-style-type: none"> <li>● あらかじめ差幅調整（下図）した組合せ軸受を用いる方法。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● あらかじめ寸法調整した間座を用いる方法。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 軸方向の予圧を調整できるナット又はボルトを締付けて用いる方法。 （この場合には、適正な予圧量となるように起動摩擦トルクを測定しながら調整する。）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● コイルばね又は皿ばねを用いる方法。</li> </ul>
 $\delta_{ac}$ $\pm \delta_{ao}$			

そのため、自動車の終減速機（ファイナルドライブ）や変速機（トランスミッション）では定位置予圧を採用しており、具体的な予圧調整はベアリングと軸・ハウジングそれぞれの寸法を正確に測定し、そこから求まる適正な予圧となる寸法の間座（スペーサー）やシムを選定して組み付けることで行う。

「ベアリングのはめあいと内部すきま」の運転すきまと疲れ寿命の関係図に示したようにベアリングの寿命は予圧（運転すきまがマイナス）が大きいと急激に低下するのと、予圧が過大だとベアリング内部摩擦による発熱～焼き付きも懸念されるので、間座（スペーサー）やシムの寸法調整は $\mu$  m オーダーで慎重に行う必要がある。

自動車の終減速機では、このような予圧調整のための面倒な寸法測定とスペーサーの選択の手間を省くために、スペーサーの中央に塑性変形する座屈部を設けたコラプシブルスペーサーを使用し、組立時のナットの締め付け力によって座屈部がつぶれ適正な予圧力が負荷される仕組みが使われている例がある（図1 参照）。

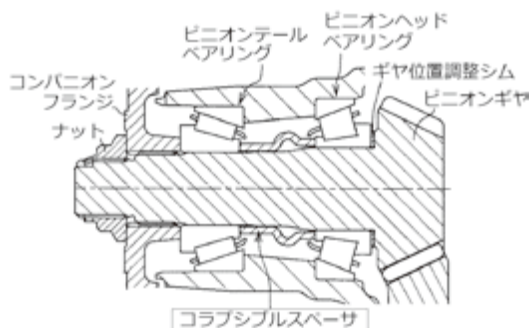


図1 コラプシブルスペーサーを使用した予圧調整構造例<sup>2)</sup>

### <参考・引用文献>

- 1) ジェイテクト 軸受総合カタログ CAT. No. B2001-8
- 2) 特許公開 2017-137005 図1 を基に筆者作成

#### 4.3.2 手動変速機用ベアリング：油中異物との闘いと調心クラッチベアリング開発

手動変速機（マニュアルトランスミッション）は変速機（トランスミッション）の中で最も古い歴史を持ち、自動車の黎明期から使われて来た。

自動車誕生当初の変速機は前後進切り替え程度の簡易なものであったが、その後、エンジン馬力が向上し自動車の走行速度が速くなると、それに対応して発進時や登坂時のように低速で大きな力が必要な状況から、高速で巡航する状況までをカバーするように前進3段から4段の変速機が装着されるようになった。これらは基本的に手動変速機で、エンジンからの動力をクラッチ機構によって切断し、切断している間にシフトレバーからの手動操作で、平行した2軸またはそれ以上の軸上で噛み合っている何対かの歯車の中の、適切な変速比の組み合わせとなるものを選択し切り替えてからクラッチを接続することを繰り返して運転を行う形式である。

現在最も一般的なFF乗用車用の手動変速機模式図と使用されているベアリングの例を図4.3.14に示す。

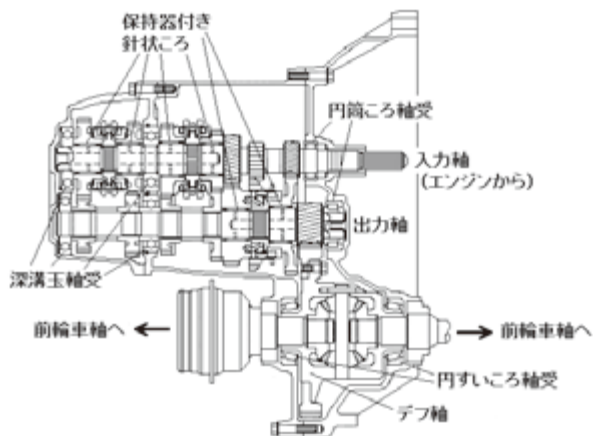


図 4.3.14 FF 車用手動変速機の模式図<sup>50)</sup>

現在、日本では手動変速機（マニュアルトランスミッション）を搭載している乗用車は少なくなったが、構造が簡単で信頼性が高く、燃費も良いことから、欧州や途上国では乗用車においても広く使用され続けており、また日本でも商用車やトラックでまだ一般的である。

歯車列の切り替え（ギヤチェンジ）のためには、それぞれの歯車によって異なる変速機の軸の回転速度を、切り替えたい変速比での回転速度に合わせる必要がある。黎明期の手動変速機では、この回転速度を合わせるためのいわゆる「ダブルクラッチ」操作が変速作業を難しくしていたが、その後、歯車列が常時噛み合い式となり、ドライバーがギヤチェンジのためにシ

フトレバーを操作する力を利用して、トランスミッション軸の回転速度を必要な歯車の速比に合わせる（シンクロさせる）ことでスムーズな噛み合いを実現させる「シンクロメッシュ装置」が考案され、操作性が大幅に向上した。

手動変速機には、図4.3.14に示したような個所に深溝玉軸受、円筒ころ軸受、円すいころ軸受及び保持器付き針状ころが多く使われている（図4.3.15）。

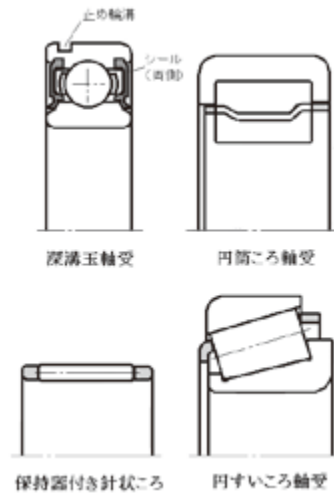


図 4.3.15 手動変速機用ベアリングの例<sup>50)</sup>

深溝玉軸受はラジアル及びアキシャル両方の荷重を支持することが出来るため、変速機の軸の位置決め機能を兼ねることがあり、その場合には止め輪溝付きのものが使われ、ハウジングに固定される。

日本精工は1980年に歯車の噛み合いで発生する潤滑油中の摩耗粉（硬質異物）が、軸受内部の転動面に噛み込んで軸受の耐久性を損なうことを避けるため、「トランスミッション用密封クリーン玉軸受」と名付けたシール付き深溝玉軸受を開発した。これは手動変速機に使用するベアリングが通常の方法で材料内部の疲労ではなく、硬質異物の噛み込みによって生じた転動面の圧痕を起点として破損を生じることに着目した開発であり、本来、潤滑グリースの密封のための部品であるベアリングシール（ゴムシール）を硬質異物のろ過フィルターとして使用し、初期潤滑には玉軸受内に封入したグリースが機能し、ある程度使用されるうちにシールリップでろ過された潤滑油（ギヤオイル）が玉軸受内に侵入し、その後は油浴潤滑で運転されるという製品である（図4.3.16、図4.3.17、図4.3.18）。

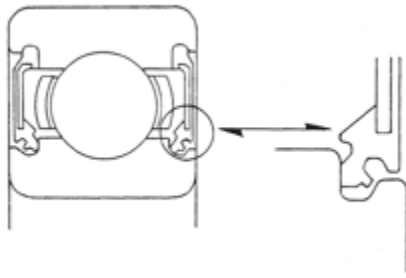


図 4.3.16 密封クリーン玉軸受<sup>51)</sup>



図 4.3.17 開放型玉軸受の異物油中運転後の転動面の状況（圧痕からのクラック）<sup>51)</sup>

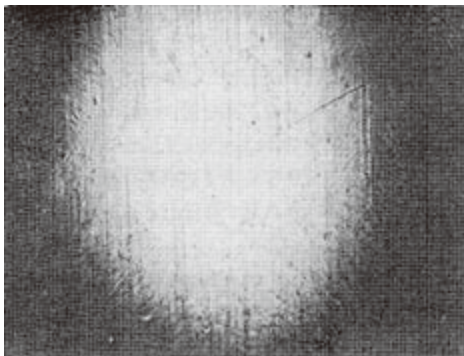


図 4.3.18 シール付き玉軸受の異物油中運転後の転動面の状況<sup>51)</sup>

ただしベアリングにゴムシールを装着すると、変速機で使われる通常の開放型深溝玉軸受に比べてゴムシール及びグリースの分だけ高価となること、シールの摺動抵抗で摩擦損失が大きくなること、手動変速機は潤滑用のオイルポンプを持たない「はねかけ潤滑」でありシール付き軸受を使うと潤滑油が遮断されるので特別に流路の確保が必要になるケースがあることなどから、ベアリングメーカー各社ではシールを用いずにベアリング材料や熱処理の改良による寿命向上のための開発がその後も行われ、手動変速機の中でもベアリングの用途や使用箇所によって使い分けがなされるようになった。

次に円筒ころ軸受は、主に玉軸受では支えられない大きな荷重を受ける箇所に使われるが、基本的にはラジアル荷重のみの支持に使用されるので、同軸上に設けられた深溝玉軸受でアキシャル荷重を支持する構造となっている場合が多い。トラックの変速機ではエンジン出力の向上によって元来深溝玉軸受を使用していた箇所を荷容量の大きな円筒ころ軸受に置き換えた例があり、そのような場合は円筒ころ軸受のつばでアキシャル荷重を支持しているが、円筒ころ軸受の場合、焼き付き等の損傷を生じることなく使用できるつば面の面圧と周速の積（PV 値と呼ぶ）に限界があるので注意が必要となっている。

また、ころ軸受ではベアリングの取り付けスペースが小さい場合、内輪を設けずに、変速機の軸の外径面をベアリングの転動面として用いることがあり、その場合はソリッド形針状ころ軸受やプレス成形で外輪を製作したシェル形針状ころ軸受、又はシェル形の円筒ころ軸受が用いられるので、そうしたベアリングの製造技術を含めた開発が各ベアリングメーカーで行われた。

エンジンからの入力軸には上記の深溝玉軸受又は円筒ころ軸受が多く使用される。1980年代にマツダの手動変速機等で円すいころ軸受が使用されたが、円すいころ軸受はアルミ製のトランスミッションハウジングで使用すると常温～低温時に軸方向のすきまが詰まり回転摩擦が大きくなって、ギヤチェンジ動作中に惰性回転している入力軸の回転にブレーキがかかり回転速度が低下することで、シンクロメッシュ装置の機能を阻害する問題があったため、現在は入力軸に円すいころ軸受はほとんど使われていない。

それに対して、歯車の噛み合い反力が大きい出力軸には、荷容量の大きな円すいころ軸受2個を軸の両端に正面合わせで使用するか、深溝玉軸受と円筒ころ軸受を組み合わせて使用するのが一般的である。

また差動装置（ディファレンシャル）を備えていて車軸に回転力を伝えるデフ軸には、等速ジョイントが接合されるため、出力される回転力（トルク）に耐え得る直径の等速ジョイントの軸がベアリングを支持する軸であるデフケースの中を貫通することができるように、比較的大きな内径寸法を持った深溝玉軸受や円すいころ軸受が使われる。

一般的に清浄な潤滑条件下でのベアリングの破損（剥離）は材料内部の非金属介在物等が起点となって発生するが、手動変速機のように潤滑油中に硬質異物が多く存在する条件下では、硬質異物がベアリング表面に食い込んで作られる圧痕とその周囲の盛り上がり

の個所で応力集中を生じてクラックが発生し、それが起点となって表面から破損（剝離）が進展する（図 4.3.19）。

そのため 1970 年代から、ベアリングの転動面の高硬度化や残留オーステナイトの適正化を図って、圧痕

の減少や表面クラックの進展を抑える開発が各ベアリングメーカーで行われた。特に過酷な重荷重条件で使用されることの多い円すいころ軸受では 1980 年代から 1990 年代にかけて各ベアリングメーカーが開発品を新たな製品シリーズとして提供するようになった。

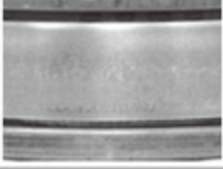
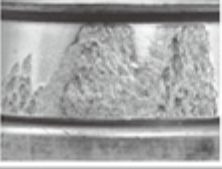
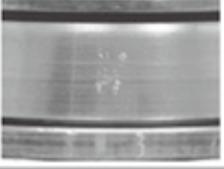

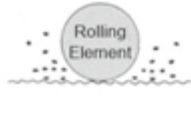



Modes	FLAKING IN CONTAMINATED OIL			FLAKING IN CLEAN OIL
	FLAKING INITIATED FROM SURFACE			FLAKING INITIATED FROM SUB - SURFACE
	PEELING	MIXED FLAKING	FLAKING FROM DENT	
Appearance				
Mechanism	 Abrasive wear by small and hard particles	 Abrasive wear by small hard particles, and plastic deformation by large hard particles	 Plastic deformation caused by outside force or large and hard particles	 Material defect at maximum shear stress

図 4.3.19 ベアリングの剝離モード<sup>52)</sup>

次に、ギヤチェンジで選択され噛み合っ軸と一体で回転している一对の歯車以外の、他の速度段の各歯車と軸は、互いに異なる回転速度で空転している。そのため、空転時の軸の外径面と歯車の内径面との摩擦や摩耗を防ぐ目的でラジアル保持器付き針状ころ（ケージ&ローラー）が使われており、「ギヤインナーニードルベアリング」と呼ばれている。このニードルベアリングの保持器には、変速機に使用する潤滑油（ギヤオイル）との関係もあって、日本国内では後輪駆動車（FR 車）用では鋼製、前輪駆動車（FF 車）用では樹脂製が多く使用されている（図 4.3.20）。

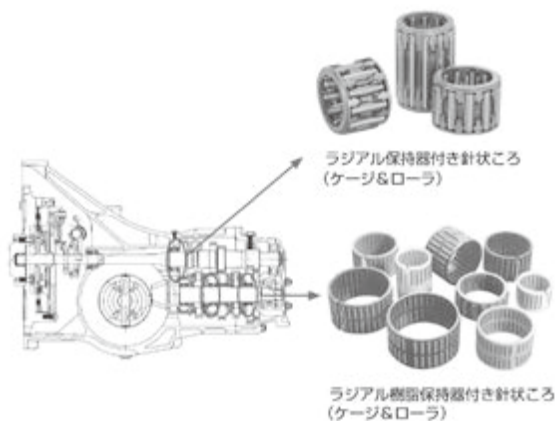


図 4.3.20 手動変速機での針状ころ軸受の使用例<sup>4)</sup>

ギヤチェンジで選択され軸と歯車が一体で回転しているとき、ギヤインナーニードルベアリングが軸に対して完全に同期した状態になると、軸外径面の同じ個所に歯車の噛み合い反力を受けた針状ころが接触し続けるため、軸外径面に針状ころの間隔でフレットイングという摩耗現象が起きて凹みを生じることがある。一度凹みが生じると、その個所に針状ころが留まりやすく凹みが深くなって不具合を生じる。これを防止するため、1980 年代から針状ころが入る保持器の窓の間隔を不等ピッチとする対策が一部で行われたが、不等ピッチ保持器は製作が難しく高価になる欠点があった。そのため保持器を二つ割りとして保持器の窓の間隔を円周上不均一にすることが考案された。二つ割り保持器は保持器の重心が軸中心から外れており、ギヤチェンジのたびに軸と歯車に対して保持器が自重で回転して針状ころが異なる位置（位相）に来ることもフレットイング防止に効果がある。

また樹脂製保持器の場合には、保持器を円周上 1 か所で割って変速機の軸への組み立て時にギヤインナーニードルベアリングが軸をまたいで装着できる構造のものも多く使用されている（図 4.3.21）。

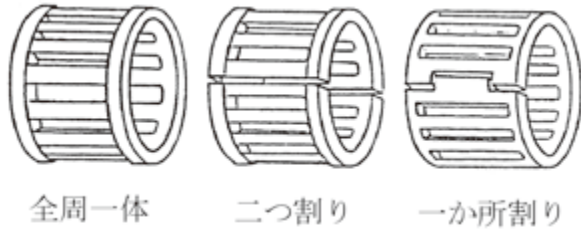


図 4.3.21 樹脂保持器付き針状ころの形式例<sup>30)</sup>

次に、手動変速機とエンジンとの間に装着されるクラッチ機構は、エンジン軸に取り付けられているフライホイールに1組の乾式の摩擦クラッチ板が取り付けられており、摩擦クラッチ板はダイヤフラムばねと呼ばれる皿状の板ばねと接続されている。エンジン側のフライホイールと摩擦クラッチ板及びダイヤフラムばねは常に回転しているが、それを変速機のハウジングに固定されているレバーで押すために、レバー（リリースフォーク）によって軸方向にスライドするスリーブに圧入固定されたクラッチリリースベアリングがダイヤフラムばねとの接触部に使われている（図4.3.22）。

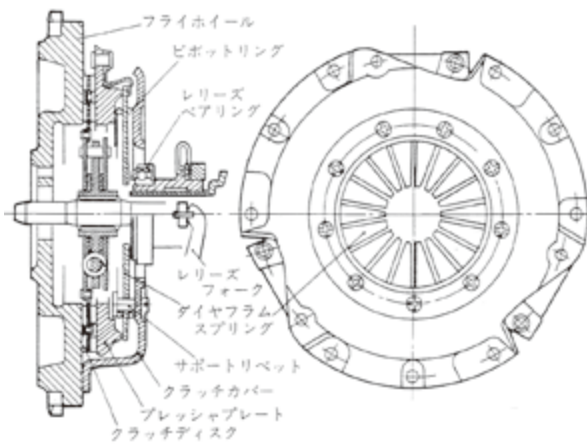


図 4.3.22 ダイヤフラム式クラッチの構造例<sup>53)</sup>

図 4.3.23 にあるように、エンジン側のフライホイール、摩擦クラッチ板及びダイヤフラムばねは、変速機の軸及びその先に取り付けられているクラッチリリースベアリングとは加工誤差や組立誤差によって芯ずれ（偏心）が生じ、それによって生じるみぞすり運動が原因で異音やダイヤフラムばね及びベアリングの摩擦が問題となっていた。そのためベアリングメーカーによって1960年代ごろからベアリングのダイヤフラム接触面に潤滑性のある焼結含油合金を用いる等の改善がなされたが、根本的な解決には至らなかった（図4.3.24）。

当時は、変速操作（ギヤチェンジ）を繰り返すことによってクラッチリリースベアリングとダイヤフラムばねが摩擦することは常識であり、車検等の自動車の整備点検時には毎回クラッチリリースベアリング及びダイヤフラムばねの交換が当たり前に行われており、補修用ベアリングの大きな需要となっていた。

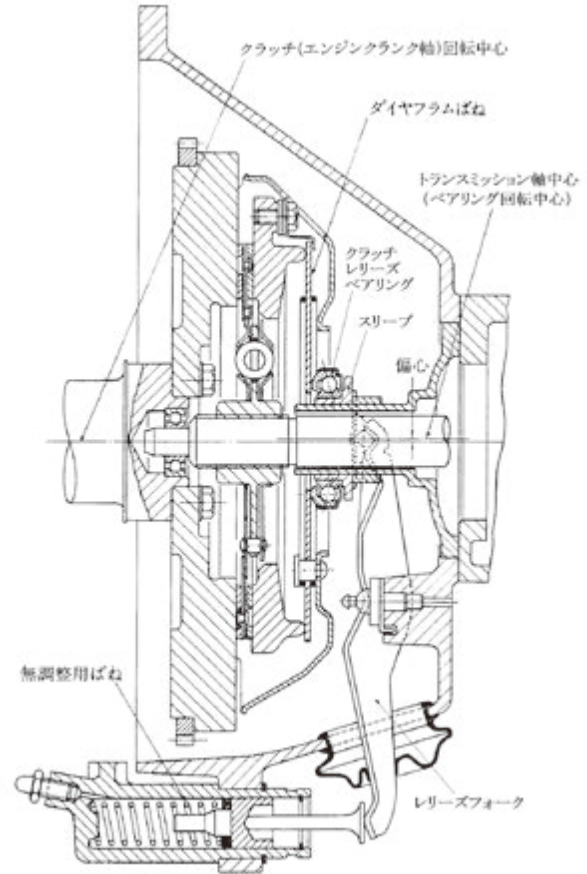


図 4.3.23 クラッチ（ダイヤフラムばね）とリリースベアリングの偏心<sup>54)</sup>

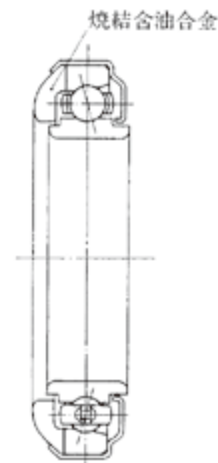


図 4.3.24 焼結含油合金クラッチリリースベアリングの例<sup>54)</sup>



1970年代後半になると、欧州で板金プレス製のケースの中にベアリングを収めて芯ずれを吸収する調心機能を備えた調心式クラッチリリースベアリングが登場した。日本国内での同様のニーズを受けて日本の各ベアリングメーカーでも開発が行われ、当時存在した欧州特許を回避する様々な試みと、クラッチ周りの実機部品を用いた試験評価による効果実証及び耐久性の確認が行われ、1980年には日本で初めての調心式クラッチリリースベアリングが光洋精工（現ジェイテクト）で実用化された（図4.3.25）。これは別部品の鋳物製の摺動スリーブを板金プレス製のケースに圧入して使用する形式であったが、その後、樹脂製スリーブ一体の調心式クラッチリリースベアリング（図4.3.26）もベアリングメーカー各社で開発されて広く普及した。また1980年代の後半から光洋精工（現ジェイテクト）では安価なプレス内外輪と調心ゴムを用いた調心式クラッチリリースベアリングの開発及び量産化も行われた（図4.3.27）。

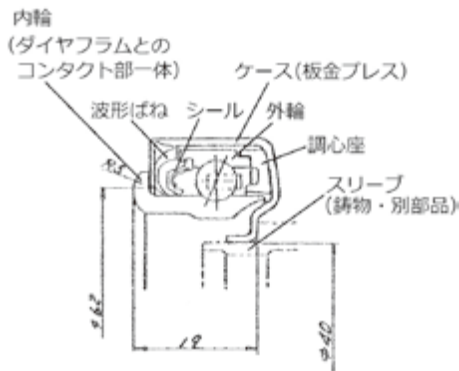


図4.3.25 日本初の調心式クラッチリリースベアリング（ジェイテクト）<sup>1)</sup> 30)

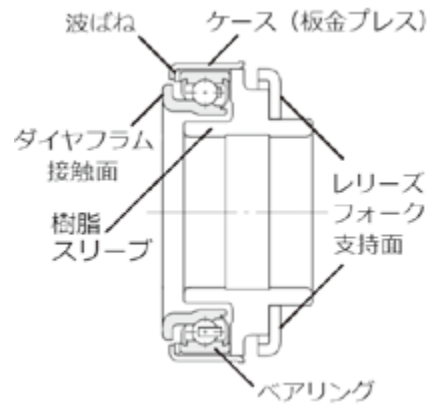


図4.3.26 樹脂スリーブ一体調心式クラッチリリースベアリングの例<sup>55)</sup>

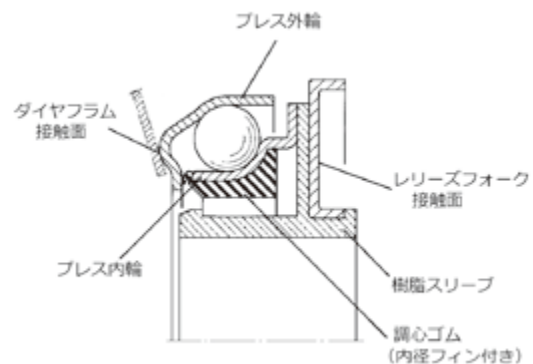


図4.3.27 プレス内外輪の調心式クラッチリリースベアリングの例<sup>56)</sup>

各種の調心式クラッチリリースベアリングの外観を図4.3.28に示す。



図4.3.28 各種調心式クラッチリリースベアリング<sup>1)</sup>

また、各速度段ギヤのシンクロメッシュ機構とシフトレバーをつなぐリンケージ機構のロッド（軸）は通常メタルブッシュで支えられているが、ギヤチェンジの際のシフトレバーを操作する力を軽減し円滑なギヤチェンジを可能にするため、スポーティー走行をうたう自動車ではすべりメタルブッシュの個所を転がり化するため図4.3.29のようなシフトリンケージ用リニアベアリングを使用することがある。

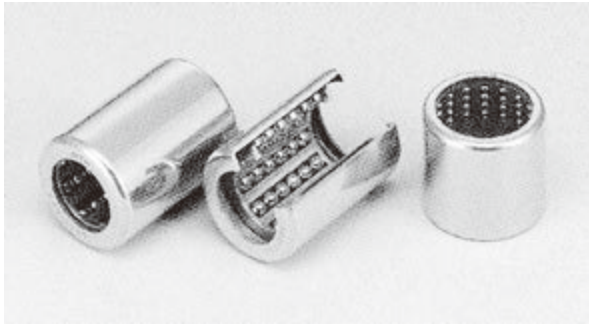


図 4.3.29 シフトリンケージ用リニアベアリングの例<sup>25)</sup>

次に手動変速機の面倒なギヤチェンジ操作を簡略にするための取り組みについて述べる。

ギヤチェンジ操作の簡略化の中で自動車の運転状態によって自動的に変速比を選択してギヤチェンジが行なわれるものを、「自動化された手動変速機」という意味でAMT（オートMT）と呼び、日本では1984年にいすゞからNavi5の名称でアスカに搭載し発売されたのが最初である。

AMTは一般的に、クラッチと変速の各操作を油圧アクチュエーターで行い、アクセル開度、エンジン回転速度、及び自動車の走行速度等から自動制御で最適な変速比を選択するようになっている。そのため変速制御が十分でない、運転者が自分でギヤチェンジ操作をする一般的な手動変速機よりも変速に時間がかかり、また変速ショックが大きくなるなどの問題が出やすい。

これを解決するため、近年考案されたのがDCT（Dual Clutch Transmission）と呼ばれる変速機である。

DCTは手動変速機のクラッチ操作と変速操作を自動化したAMTの一種であるが、図4.3.30の構造概念図に示すように、クラッチ～変速機軸と歯車セットを奇数段と偶数段に分けて2組別々に持つことで、変速動作に必要な時間の短縮と変速ショックの軽減を実現したものである。一対のクラッチ～歯車がエンジンからの動力を伝達している間に、次の速度段へのギヤチェンジの準備がもう一方の軸のクラッチ～歯車でなされ、2つあるクラッチを一方からもう一方に瞬時につなぎ変えることで、素早くスムーズなギヤチェンジが行われるように工夫されている。

実際のDCTでは、限られた自動車のエンジンルーム内のスペースに変速機を搭載しなければならないことから、2組のクラッチ～歯車列の片方を中空軸として、同軸上に配置している。

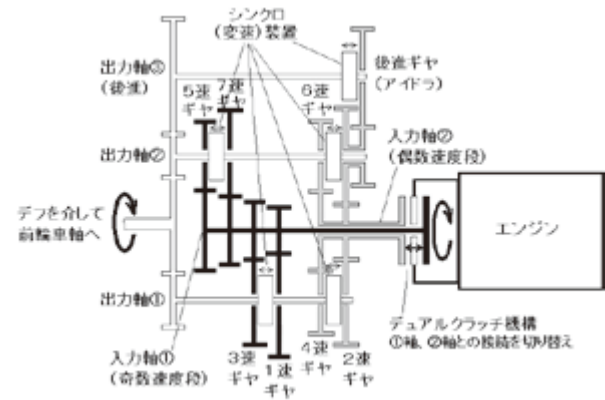


図 4.3.30 DCT 構造概念図<sup>50)</sup>

DCTは手動変速機の軽快さや燃費の良さを好む欧州で最初に開発され、2003年からアウディ・フォルクスワーゲンでDSG（Direct-Shift Gearbox）という名称で発売された。日本でもホンダのフィットハイブリッド等で採用される例が出てきており、今後さらに普及することも予想されるが、限られた変速機の搭載スペースに2軸の歯車や変速機構を配置するために設計上の制約が大きいこと、及びキーとなるデュアルクラッチ機構が現状は特許で1社独占となっていることが問題点である。

DCTに使われるベアリングは、通常の手動変速機と基本的には変わらないが、前述のように限られたスペースの中に、奇数段と偶数段それぞれのトランスミッション軸を持つことで軸の本数が増える分、ベアリングは通常の手動変速機よりコンパクトであることが要求される。そのため、玉軸受に比べて小型で耐久性が高い、円すいころ軸受や円筒ころ軸受が多く使用されている。

## ベアリングの破損メカニズム

ベアリングの破損には剥離や焼き付き、割れ、腐食などいろいろなモードがあるが、その中で最も一般的なのは転動面に発生する剥離である。

通常、ベアリングの定格寿命とは同一条件で使用された一群のベアリングのうち、その90%が剥離を発生することなく回転し続け到達することができる総回転数または回転時間をいう。

剥離は大きく分けて二つに分類される。

一つは清浄な潤滑環境の下で、ベアリングを構成する材料（多くは軸受鋼又は軸受用肌焼鋼）に含まれる酸化物等の非金属介在物が内部欠陥となり、その上を転動体（玉、ころ）が通過するたびに発生する繰り返し応力によって亀裂が発生～進展して転動面表面に現れて剥離となるものである（図1）。ベアリングの定格荷重から求める計算寿命はこのメカニズムでの剥離を想定したものであるが、近年では材料や加工技術の進歩によって、実際のベアリングは計算寿命よりもはるかに長い実際寿命を有するのが普通となっている。

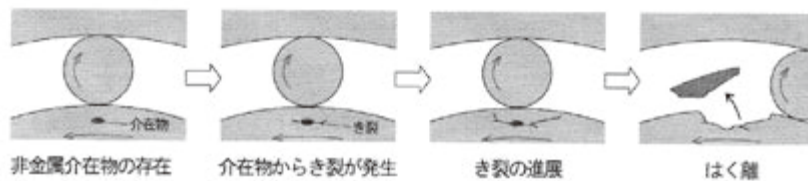


図1 ベアリングの内部起点剥離のメカニズム<sup>1)</sup>

もう一つは自動車の変速機（トランスミッション）や終減速機（ファイナルドライブ）等のように、ベアリングがギヤ摩耗粉や鋳物砂等の硬質異物が混在する潤滑環境下で使用される場合、転動面に硬質異物が噛み込んで生じる圧痕の周囲の盛り上がり応力集中を生じて亀裂が発生し、それが進展して剥離に至るものである（図2）。

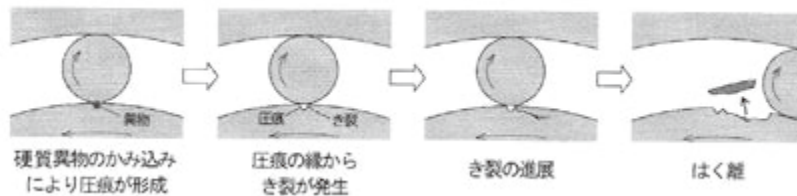


図2 ベアリングの表面起点（圧痕起点）剥離のメカニズム<sup>1)</sup>

これらは右の図3のように剥離が発生している個所の周辺やそれ以外の転動面を観察することによって区別できることが多い。

従って潤滑環境が悪く、潤滑油が異物等で汚染されている場合は、カタログ等に記載されているように汚染係数を乗じて実際寿命を短く見積もることが必要となる。

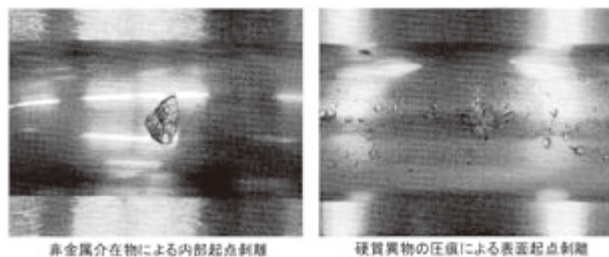


図3 ベアリングの内部起点剥離と表面起点剥離の外観<sup>1)</sup>

### <参考・引用文献>

1) 図解入門 よくわかるベアリングの基本と仕組み ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会（2011年）

## ギヤインナーニードルベアリングのピーリング損傷

ギヤインナーニードルベアリングとして使われている保持器付き針状ころは、その歯車が選択されていないときは負荷を受けずに空転し、選択されてシンクロメッシュ装置により軸と携合したときには歯車の噛み合い反力による負荷を受けながら軸と一体となって同期回転するという特徴がある。針状ころと軸及び歯車の内径面との間にはラジアルすきまがあるため、同期回転中は別コラムで紹介したベアリング内径面等のクリープ現象と同様のメカニズムで針状ころが負荷を受けながら軸の周りを1~2r/min程度の極低速で公転する。

坂道の多い市街地を走行する自動車のように2速、3速などの低速ギヤ速度段の使用頻度が著しく高いと、その速度段のギヤインナーニードルベアリングが軸と同期回転し、高負荷かつ極低速回転という最もEHL油膜厚さが薄くなる条件で長時間使われることとなって、軸の表面と針状ころの表面とが直接金属接触し、針状ころ表面にピーリングという損傷が起きることがある(図1参照)。

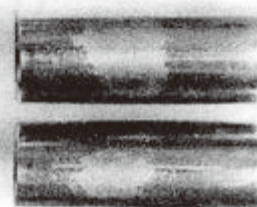


図1 ころのピーリング損傷の例<sup>1)</sup>

ピーリング損傷は表面粗さの粗い面(この場合は変速機の軸の転動面)の凸部が表面粗さの細かな面(この場合は針状ころの転動面)を攻撃し、針状ころの転動面の極表層が数 $\mu\text{m}$ の厚みで細かく疲労脱落を繰り返すことによって起きるため、ピーリングが継続的に発生して針状ころの直径が小さくなると針状ころと軸及び歯車の内径面との間のラジアルすきまが大きくなる。各速度段の歯車には、はす歯歯車(ヘリカルギヤ)が使われているため、ラジアルすきまが大きくなると、はす歯歯車の噛み合い反力によって歯車が軸に対して傾き、シンクロメッシュ機構の動作に不具合が生じて手動変速機のシフトチェンジに支障が出るがあった。

そのため1980年代にベアリングメーカーによって、同期回転中のギヤインナーニードルベアリングの挙動解析や、それをシミュレートした試験装置による再現実験を通じた損傷メカニズムの解明が行われ、針状ころに浸炭窒化等の熱処理を施して表面硬度を上げ組織を緻密にしてピーリング損傷を防止する対策などが行われた。

現在では自動変速機の普及により、このような特殊な走行環境での手動変速機の不具合は過去のものとなっているが、解析手法や対策手法はその後の自動変速機のプラネタリーギヤ用の保持器付き針状ころなどの開発に生かされることとなった。

### <参考・引用文献>

- 1) 「軸受の代表的な破損形態」 NTN Technical Review No.57 (1990年)

### 4.3.3 自動変速機用ベアリング：遊星歯車列用の針状ころ軸受を中心とした開発

自動変速機（オートマチックトランスミッション、略してATとも呼ばれる）は、現在、乗用車用として日本で最も一般的な変速機形式であり、後の4.3.4で説明する無段変速機（CVT/連続可変トランスミッション）との比較でステップATと呼ばれることがある。

原理的には図4.3.31の模式図に示すようなサンギヤ（太陽歯車）、リングギヤ（内歯歯車）及びプラネタリーギヤ（遊星歯車）で構成される歯車のセット（遊星歯車列）を何組か使用し、どの歯車から回転を入力し、どの歯車を固定して、どこから出力するかを選択切り替えることで自動的に変速を行う仕組みになっている。

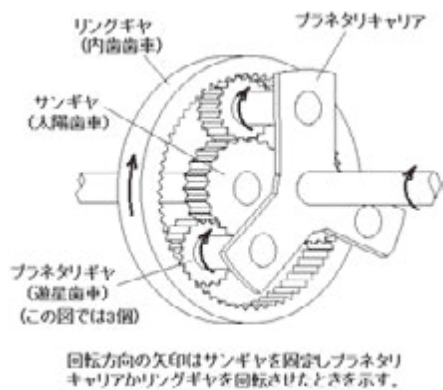


図 4.3.31 遊星歯車列の構造<sup>57)</sup>

エンジンからの動力は、手動変速機のクラッチ機構とは異なり、トルクコンバーターと呼ばれるトルク増幅機能を有した流体継手を介して変速機に伝達される。また前述の遊星歯車列の変速のための歯車の固定や回転の制御は油圧を用いてピストンを動かし、ブレーキ（ブレーキバンド）や、クラッチ（摩擦板を交互に複数枚重ねた多板クラッチ）を締結して接続したり、切断して開放したりすることで行う。

図4.3.32に代表的なシンプソン式遊星歯車列による4速自動変速機での変速の仕組みを模式図として、軸や円筒及び遊星歯車列の中心線から上側だけを半断面図で示した。

エンジンからの回転は図の左側から入力され（赤色）、2組の遊星歯車列とそれに付随するブレーキ及びクラッチの働きによって変速され図の右側に出力される（オレンジ色）。丸印はブレーキ及びクラッチで、赤色が締結し接続されていることを、白抜きは切断し解放されていることを示す。また、青色は回転せずに固定されている部材を、灰色は動力伝達に関係しない部材を、水色は入力及び出力回転速度以外の速度で

回っている部材を表す。

1速ではブレーキBとクラッチCが結合し、右側の遊星歯車列のリングギヤが固定される。エンジン入力は右側の遊星歯車列のサンギヤに伝えられ、固定されたリングギヤ内のプラネタリーギヤの公転速度に減速されてプラネタリーキャリアから出力される。

2速ではブレーキAとクラッチCが結合し、ブレーキAによって左側の遊星歯車列のサンギヤが固定される。クラッチCが左側の遊星歯車列のプラネタリーキャリアと右側の遊星歯車列のリングギヤとを結合しているため、1速に比べて左側の遊星歯車列のプラネタリーキャリアの回転速度の分だけ出力回転速度が速くなる。

3速ではクラッチBとクラッチCが結合し、左右の遊星歯車列の部材が全て一体で回転するため、エンジン入力がそのまま直結状態で出力される。

4速ではブレーキAとクラッチBが結合し、左側の遊星歯車列のサンギヤが固定される。エンジン入力はクラッチBによって左側の遊星歯車列のプラネタリーキャリアに伝えられ、同じく左側の遊星歯車列のリングギヤから増速された回転速度で出力される。（右側の遊星歯車列のプラネタリーキャリアは左側の遊星歯車列のリングギヤと一体で回転しているだけで、変速の役割は果たしていない。）

後進ではブレーキBとクラッチAが結合し、左側の遊星歯車列のプラネタリーキャリアが固定される。エンジン入力はクラッチAによって左側の遊星歯車列のサンギヤに伝えられ、ブレーキBによってプラネタリーキャリアが固定されているのでリングギヤが反対方向に減速されて回転し出力される。（この時も4速と同様に、右側の遊星歯車列のプラネタリーキャリアは左側の遊星歯車列のリングギヤと一体で回転しているだけで、変速の役割は果たさない。）

手動変速機では、変速段数に相当するそれぞれの変速比の歯車列を軸上に並べて配置し、どれを選択するのかを選ぶ構造になっているのに対して、自動変速機ではこのように巧みな仕組みで少ない歯車列を用いていくつもの変速比を作り出すようになっており、後述のように1940～1950年代に米国の技術者によって発明された。

米国では自動車は広い国土で生活する上での必需品であり、運転に習熟していない人でも平易に利用が可能であることが求められた社会的背景がある。それに比べて日本や欧州では生活スタイルや社会的需要が異なるため、自動変速機の普及が遅れたといえる。

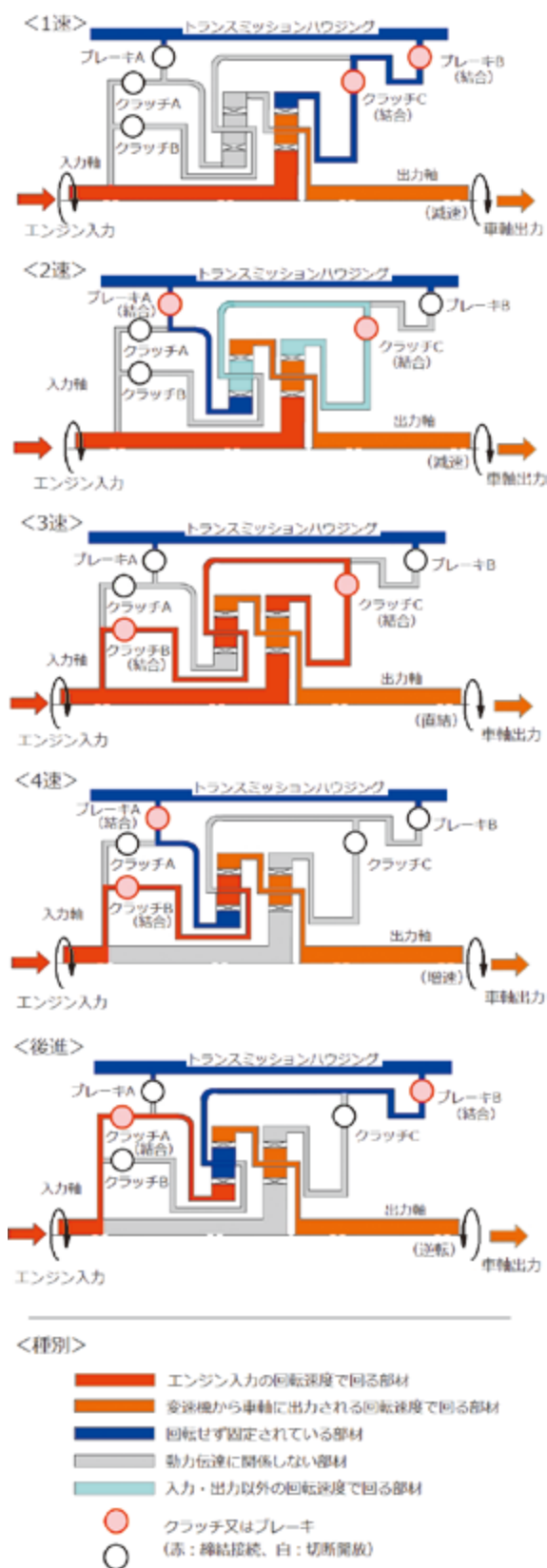


図 4.3.32 自動変速機遊星歯車列での変速の仕組み<sup>40)</sup>

動力の伝達や制御には油圧が使われているため、自動変速機にはオイルポンプが内蔵されており、自動変速機に使用される油は、ベアリングや歯車の潤滑油と

しての機能よりも、トルクコンバーターや多板クラッチの動力伝達に適した特性を優先した仕様になっていて、ATF (Automatic Transmission Fluid) と呼ばれている。ATF は手動変速機に使用されているギヤオイルよりも低粘度で摩擦調整剤等が配合されており、ベアリングの潤滑のためには不利な特性となっている。

遊星歯車列とトルクコンバーターを用いた自動変速機の基本構造はイーゼードライブ化のために1940年代に米国で発明され、1948年に初めてGM ビュイックに前進2段のダイナフロートランスミッションという名称で採用されて以来、自動車の走行性能向上のために変速段数が徐々に増やされ、今日では8段~10段という多段のものも実用化されている。

日本では、1959年にトヨタがトヨグライドという名称でセミオートマチックトランスミッションを搭載した自動車を発売したが、本格的な自動変速機については米国で数多くの特許が成立していたことから日本での独自開発は難しかった。そのため1969年に米国ボルグワーナー社からライセンスを導入して製造を行うアイシン・ワーナー (現アイシン・エイ・ダブリュ)、1970年にフォードと日産・マツダとの合弁で日本自動変速機 (現ジャトコ) が設立され、本格的な自動変速機の歴史が始まった。

またホンダでは日本の他のカーメーカーと異なり、手動変速機と同様な平行する2軸間で歯車が噛み合っている構造に、トルクコンバーターと多板クラッチを組み合わせた自動変速機 (ホンダマチック) を開発することで、米国特許を使わずに商品化を行った。

日本に自動変速機が導入された初期のころは、すべりを伴う流体継手であるトルクコンバーターの伝達効率が悪く、手動変速機に比べて燃費が劣り、ドライブフィーリングにも難があったため、米国に比べて燃料費が高くエンジン排気量の小さな乗用車の多いことや、定常走行が少なくアップダウンやカーブの多い道路事情などから日本では自動変速機の普及が遅れた。しかしながら、1980年代に米国の特許ライセンスが切れると日本の自動変速機メーカー各社は合弁を解消して日本独自の開発が始まり、コンパクト化や燃費・ドライブフィーリングの向上のための改良が進んだ。例えば、定常運転時にトルクコンバーターを介さないで動力を直結で伝えるロックアップ機構などが開発された結果、燃費も手動変速機と遜色がなくなり、道路整備が進んだこともあいまって急速に自動変速機の搭載比率が増加し、現在では日本で販売されている乗用車のほとんどに自動変速機が装着されている。また最

近は、事故率が低いとの理由からデリバリートラックなどの商用車でも自動変速機の採用が増えている。

その結果、現在では小型で燃費が良く信頼性の高い日本製の自動変速機は日本製の自動車だけでなく、世界中の自動車でも広く使用されている。

自動変速機で変速に使用されている遊星歯車列は、それぞれの歯車同士の噛み合いで発生する力が歯車列の内部で打ち消し合う構造になっているため、手動変速機と異なり、遊星歯車列だけが取り付けられている軸では軸そのものを支持して噛み合い反力を受けるベアリング（転がり軸受）を設ける必要がなく、通常は銅合金ブッシュのすべり軸受が使われている。しかし、後述するように近年、自動変速機内部の回転速度が高くなったこともあって摩擦トルクの低減を図る動きから、2000年代になって薄肉のシェル形針状ころ軸受に置き換える例が増えている（図 4.3.33）。

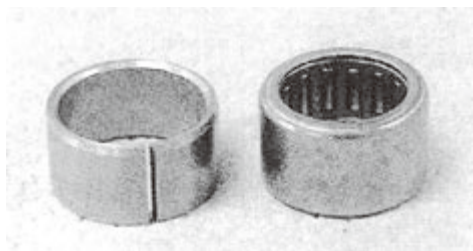


図 4.3.33 銅合金ブッシュと薄肉シェル形針状ころ軸受<sup>58)</sup>

通常、遊星歯車列の中のプラネタリーギヤとプラネタリー軸の間には摩擦や焼き付きを防ぐため、図 4.3.34 のように単体の針状ころが総ころの形で円周上に並べて使われる。



図 4.3.34 プラネタリー用総ころ形針状ころ<sup>40)</sup>

プラネタリーギヤには通常、はす歯歯車（ヘリカルギヤ）が使用されているので、エンジンから駆動トルクが伝わるとプラネタリーギヤ、プラネタリー軸、及びベアリングには図 4.3.35 に示すような複雑な噛み合い反力が内部で発生する。

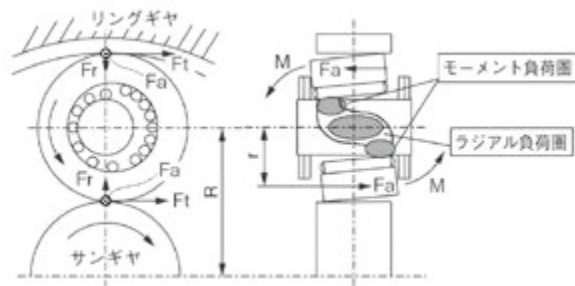


図 4.3.35 プラネタリーギヤとベアリングに発生する力<sup>59)</sup>

そのため総ころ形ではスキュー（針状ころの軸に対する倒れ）やころ同士の接触によって生じるすべりによる摩擦や剥離等の損傷が発生しやすいなど様々な問題があるが、歯車の噛み合い反力による負荷を受けられるだけのベアリングの負荷容量を確保して耐久性を維持するためには総ころ形を使わざるを得ない状態であった。

しかし、2000年代に入って自動変速機の多段化や小型化が進み、遊星歯車列を今までよりもコンパクトに設計する必要性が生じた。さらに最近では、遊星歯車列は図 4.3.31、図 4.3.35 のような基本的な歯車の組合せだけでなく、コンパクトかつ少ない遊星歯車列数で変速機の多段化を図るために工夫された特殊な歯車の組合せ構成を採用する例が多くなった（図 4.3.36）。

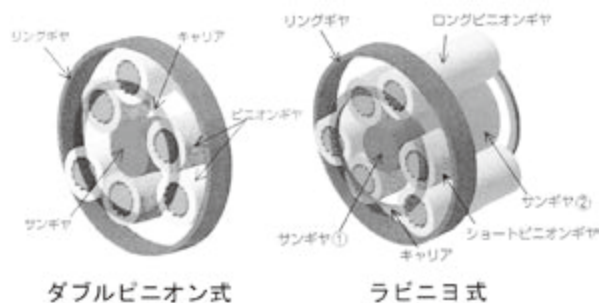


図 4.3.36 複雑な遊星歯車列の例<sup>60)</sup>

それに伴ってプラネタリーギヤが高速回転となり、またプラネタリー軸が長くなる場合には剛性が低下することもあって、総ころ形では焼き付きや摩擦等を防止することができない恐れが出てきた。

その他に組立時の取り扱い性の問題として、総ころ形の針状ころはそれ自体では一体に保持しておくことができないため、専用の針状ころ組立機を用いないと遊星歯車列の組み立てが難しい。

これらの問題点の解決を図るため、2000年代から各ベアリングメーカーではプラネタリー軸や針状ころの転動寿命の向上、プラネタリーギヤ公転によって発生する遠心力に耐えられる保持器の開発が行われた。

その結果、プラネタリーギヤ用ベアリングとしてベアリングメーカーが開発した高耐久信頼性のプラネタリー軸とセットで小径の保持器付き針状ころ（ケージ & ローラー）が採用されていった（図 4.3.37）。

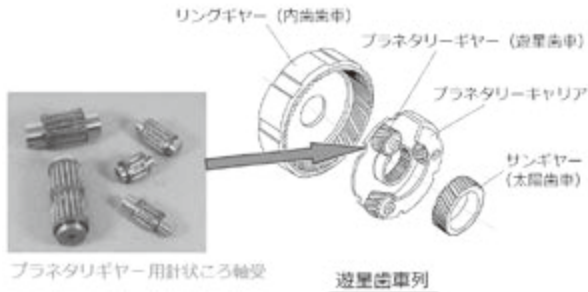


図 4.3.37 プラネタリーギヤ用保持器付き針状ころとプラネタリー軸<sup>59)</sup>

次に、1940 年代に発明された当初の自動変速機では、隣り合う遊星歯車列（セット）の間の側面同士の接触部にはベアリング（転がり軸受）が使われていなかった。

しかし、すべり接触では遊星歯車列間の回転数の違いによる摩擦や摩耗が発生することから、1955 年に米国のベアリングメーカー Torrington 社によって遊星歯車列間の側面に挿入するためにスラスト針状ころ軸受が考案されて、自動変速機の走行寿命が延び、耐久信頼性が格段に向上した（図 4.3.38）。

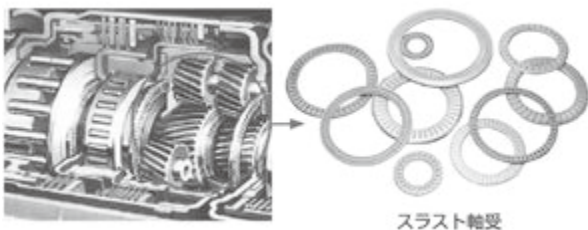


図 4.3.38 自動変速機用スラスト針状ころ軸受<sup>4)</sup>

同様にトルクコンバーターにも、回転差とアキシャル荷重を受けるためにスラスト針状ころ軸受が使用されている（図 4.3.39）。トルクコンバーター用のスラスト針状ころ軸受は、手動変速機のクラッチレリーズベアリングと同様にエンジンのクランク回転軸と自動変速機軸との間の芯ずれ（偏心）による振れ回りの影響を受けるため、自動変速機用のスラスト針状ころ軸受の中で最も厳しい使われ方となっており、それに適した設計開発が 1980 年代から現在に至るまで行われている。

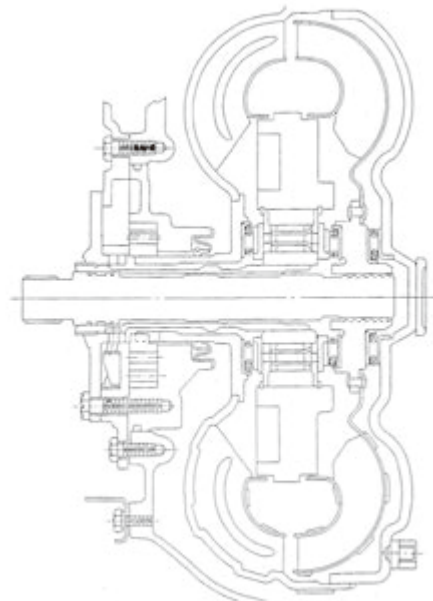


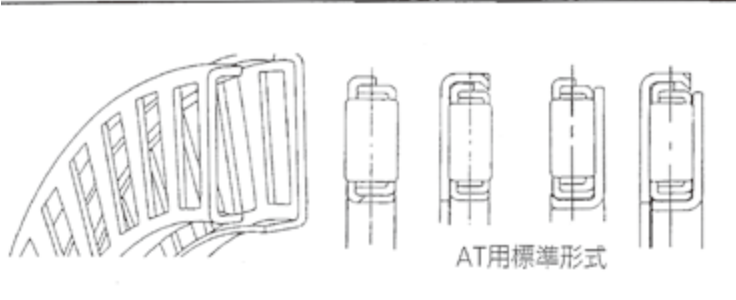
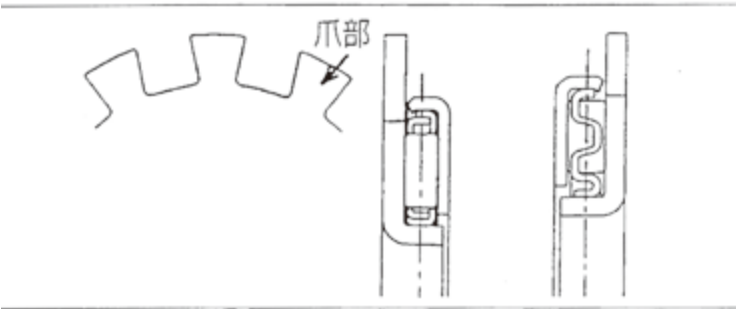
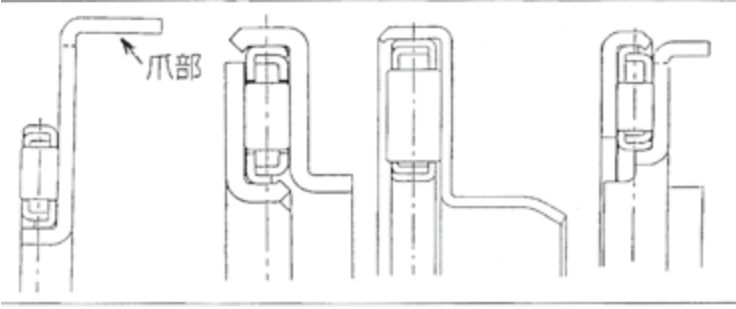
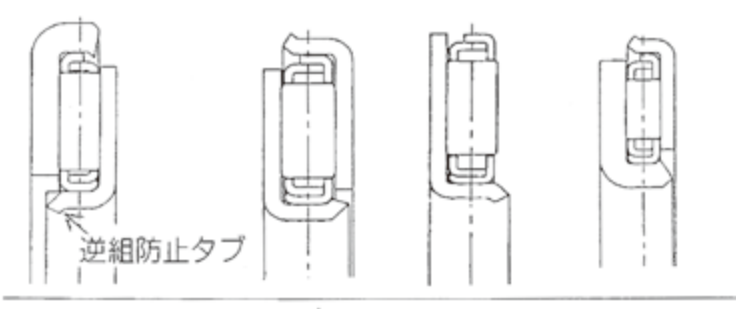
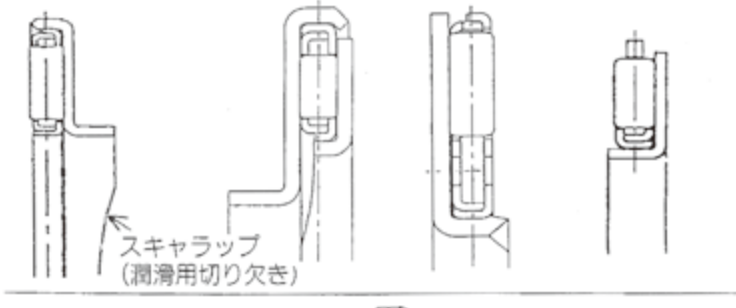
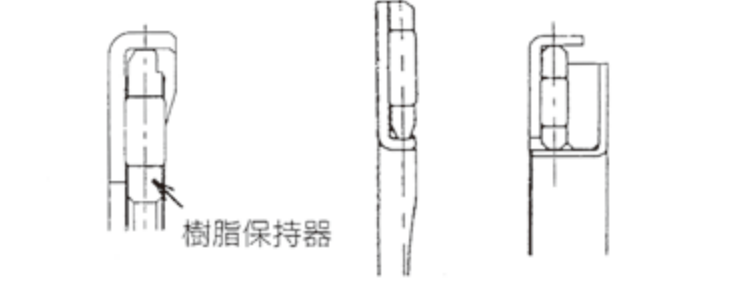
図 4.3.39 トルクコンバーター用スラスト針状ころ軸受の使用例<sup>61)</sup>

このように自動変速機用スラスト針状ころ軸受は耐久性の向上、及び、組付け性の向上のための軌道輪（ワッシャー）の支持方法、保持器の固定方法や案内方法、また軌道輪（ワッシャー）背面の相手部品のバックアップの有無で、自動変速機の機種や使用箇所ごとに専用の設計を行うなど、ベアリングメーカーによるこまめな対応がスラスト針状ころ軸受誕生以来、現在まで継続して行われている。

その一例を表 4.3.1 に示す。



表 4.3.1 自動変速機用スラスト針状ころ軸受の仕様例<sup>61)</sup>

 <p>AT用標準形式</p>	耐久性向上	耐熱性	使用環境変化対応	組付け性向上	軽量化	潤滑性の向上	クリープ防止	薄肉化	低フリクション化
 <p>爪部</p>	○		○	○			○		
 <p>爪部</p>	○			○			○		○
 <p>逆組防止タブ</p>	○		○	○					
 <p>スキヤラップ (潤滑用切り欠き)</p>	○		○			○			○
 <p>樹脂保持器</p>	○	○			○	○		○	

次に、FF（前輪駆動）自動車用の自動変速機では前輪車軸に動力を伝えるため、出力軸・中間軸やデフ軸に平歯車やはす歯歯車を使うので噛み合い反力が発生し、それを受ける箇所に円すいころ軸受や、コンパクトカー用では深溝玉軸受を使用する。横置きエンジンのFF車用自動変速機においては自動車の車幅の制約から、変速機の軸方向寸法をコンパクトに設計する必要があり、2000年代に変速機の多段化が進むと、標準の単列ベアリング2個使いを、複列のアンギュラ玉軸受や円すいころ軸受として一体化したものや、さらにハウジングに固定するためのフランジ、及び多板クラッチとの携合のためのスプラインを一体としたものなどのユニットベアリングの開発が行われた（図4.3.40、図4.3.41）。

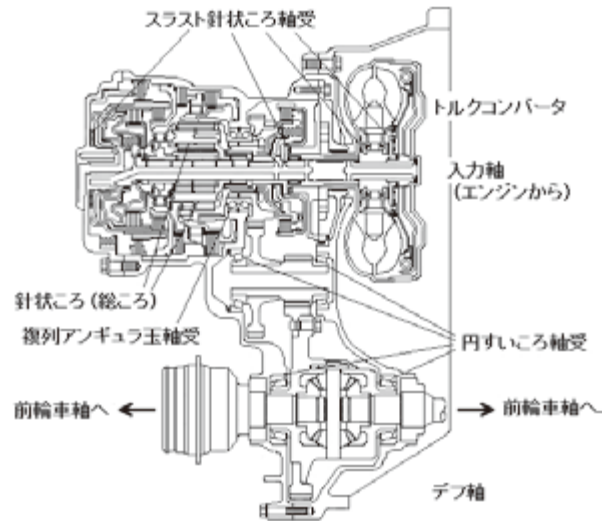


図 4.3.42 FF車用自動変速機の模式図<sup>57)</sup>



図 4.3.40 FF車用自動変速機出力軸ベアリングの変遷<sup>62)</sup>

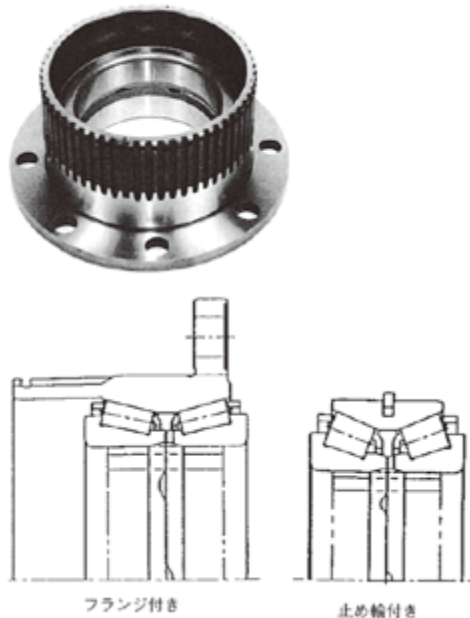


図 4.3.41 自動変速機用複列ユニットベアリングの例<sup>49) 62)</sup>

図 4.3.42 に、現在、小型の乗用車で一般的なFF車用自動変速機の構造模式図と使用されているベアリングの例を示す。

日本における自動変速機用ベアリングは、日本精工が1963年から米国 Torrington 社と合弁で自動変速機用の針状ころ軸受を、また1964年から米国ボルグワーナー社と合弁でクラッチ、ブレーキバンド等の携合部品の製造を行っていて、ほぼ1社で供給する状態が続いた。

しかし、1980年代に自動変速機の米国特許が期限切れとなって日本での独自開発が始まったこと、FF車の普及によって自動変速機に従来のスラスト・ラジアル針状ころ軸受だけでなく、玉軸受や円すいころ軸受のような品種のベアリングも使用されるようになったこと、及び2003年に米国 Torrington 社が米国 Timken 社に買収され、日本精工が Torrington 社との合弁を解消したこともあって、国内の他のベアリングメーカーが次第に参入し、現在に至っている。

また、ジェイテクトは2010年に Torrington 社の事業を Timken 社から買収し、自動変速機用ベアリングについても、Torrington 社の設計開発技術、及び製造技術を活用するとともに、デトロイト3 (GM、フォード、クライスラー) 向けや、日本の自動変速機メーカーの海外現地生産分へのベアリング生産供給体制の強化を図った。

その成果の一例としては、自動変速機の音・振動の低減のためにスラスト針状ころ軸受に減衰特性に優れた高分子材料を用いたアイソレーターを装着した振動抑制スラスト針状ころ軸受が2013年に開発されたことが挙げられる（図4.3.43）。



図 4.3.43 振動抑制スラスト針状ころ軸受<sup>63)</sup>

また、自動変速機の油圧による制御にはリニアソレノイドが使用されることがあり、その際のリニアソレノイドの応答性の向上やヒステリシスの低減のためにソレノイド用リニアベアリングが使用されることがある（図4.3.44）。



図 4.3.44 ソレノイド用リニアベアリングの例<sup>25)</sup>

#### 4.3.4 無段変速機用ベアリング：日本で発展した変速機とそのベアリング

無段変速機（Continuously Variable Transmission、略してCVT）は近年、日本製の乗用車で小型車を中心として採用が多くなっている変速機の形式で、4.3.2、及び4.3.3で述べてきた手動変速機及び自動変速機のように歯車の組合せで決まるいくつかの変速比から運転状態に応じた適当な組合せを選択する形式とは異なり、ベルト又はチェーンとプーリーとの組合せ等を用いた摩擦伝達で、連続的に変速比を変える構造となっているのが特徴である。

スクーター等の二輪車用では、構造が簡便で、変速機用の潤滑油が要らないという特徴を生かして、古くからゴムベルトと遠心式クラッチ付きのプーリーを組合せた乾式の無段変速機が使われているが、この構造ではゴムベルトの信頼耐久性の問題や、大きなエンジン動力を伝達することができない欠点があり、自動車用としてはほとんど使用されていなかった。

しかし1970年代に、オランダのファン・ドールネ（Joseph Josephus Hubert van Doorne）が自動車用トランスミッションに使用できる強度と耐久性を有する鋼製の金属ベルトの開発に成功し、一部の欧州車でこの金属ベルトを使用した無段変速機が採用された。

これを受けて日本では、1980年代に富士重工業（現スバル）がファン・ドールネ金属ベルトを用いた無段変速機を開発を行い、ECVT（Electro Continuously Variable Transmission）という名称で、1987年に軽自動車のレックス、及びコンパクトカーのジャスティに搭載して発売した。

このECVTはエンジン動力と接続するクラッチ機構に電磁パウダークラッチを使用しており、自動変速機で使用されているトルクコンバーターに比べてクリープ現象（停止している状態でブレーキペダルから足を離すと、わずかに動力が伝達されて自動車が動くこと）が無く、燃費に優れていることが特徴であったが、反面、停止～発進時の挙動が自動変速機と異なることから市場で広く受け入れられるには至らなかった。そのため富士重工業（現スバル）では1998年のプレオからi-CVTとの名称で電磁パウダークラッチをロックアップ機構付きトルクコンバーターに変更する改良を行った。

無段変速機は市街地での低速走行や渋滞が多い日本の運転事情、及び変速ショックがなくスムーズに加減速でき無断変速の長所を生かして燃費効率の良い運転が実現できることなどから、ファン・ドールネの特許が期限切れとなった2000年代から日本国内各社の独

自開発が始まり、日産－ジヤトコ、トヨタ－アイシン・エイ・ダブリュやホンダ等で耐久性やドライブフィーリングなどに改良が加えられ、現在では小型乗用車を中心に広く使われる変速機形式として普及している。

また、2009年には従来の金属ベルトよりプーリー巻き掛け径を小さくすることが可能で変速比を大きく取ることができ、プーリーとの接触面でのすべりが金属ベルトより小さくて伝達効率が良いドイツ Schaeffler グループの Luk 社のチェーンを使用した無段変速機がスバルレガシーに搭載され発売された。

一般的な CVT の変速の仕組みを図 4.3.45 の模式図に、ファン・ドールネ式の金属ベルト構造の模式図を図 4.3.46 に示す。

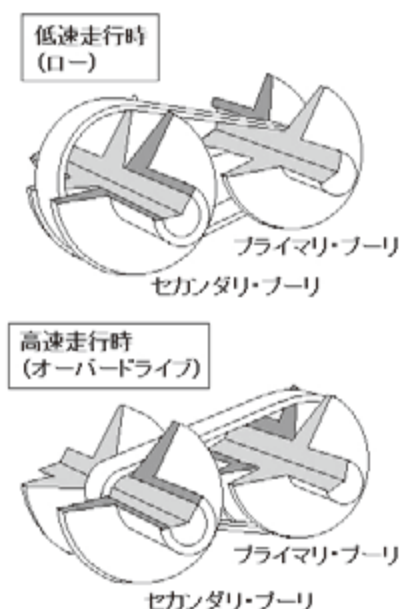


図 4.3.45 無段変速機の変速の仕組み<sup>64)</sup>

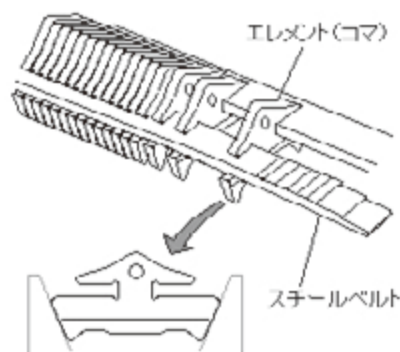


図 4.3.46 無段変速機用ファン・ドールネ式金属ベルト<sup>64)</sup>

ファン・ドールネ式金属ベルトは強度の高い特殊鋼の薄板を何枚か重ね合わせたベルトの全周に金属製のエレメント（コマ）をすきまなく配列した構造になっている。

無段変速機の動力の伝達は V 字形をしたプーリーの斜面（円すい面）と金属ベルトのエレメント（コマ）の側面との摩擦接触で行われ、金属ベルトが巻き掛けられているプーリーを軸方向に移動させ、プーリー上のベルトが接触する径（巻き掛け径）を変化させることで変速を行う。

エンジンからの動力は、前述のように電磁パウダークラッチか、自動変速機に使われていると同様のトルクコンバーターからプライマリプーリー軸に伝えられる。自動車の発進時や低速走行時（ロー状態）では、入力側のベルトとプライマリプーリーの接触径が小さく、出力側のセカンダリプーリーの接触径が大きくなり、高速走行時（オーバードライブ状態）ではその逆に、プライマリプーリーの回転に対してセカンダリプーリーが速く回転するようにプーリーの位置が変化する。

このプーリーの軸方向の位置の移動とそれに伴う変速は油圧によって行われるが、プーリーとベルトの接触面がすべりを生じることなく動力を伝達するにはプーリーの軸方向の押し付け力を大きくするため、無段変速機の油圧圧力は自動変速機よりも大きく設定されている。また、無段変速機に使用される油には、当初、自動変速機に使われる ATF を使用していたが、軸受や歯車のための潤滑油やプーリーを動かす作動油としての機能以外にプーリーとベルトとの間の摩擦伝達力を安定して発揮できることが望ましく、現在はその特性を調整した無段変速機専用油（CVT オイル）が開発され使用されている。

図 4.3.47 は、現在、乗用車で一般的な FF 車用金属ベルト式無段変速機の構造模式図である。

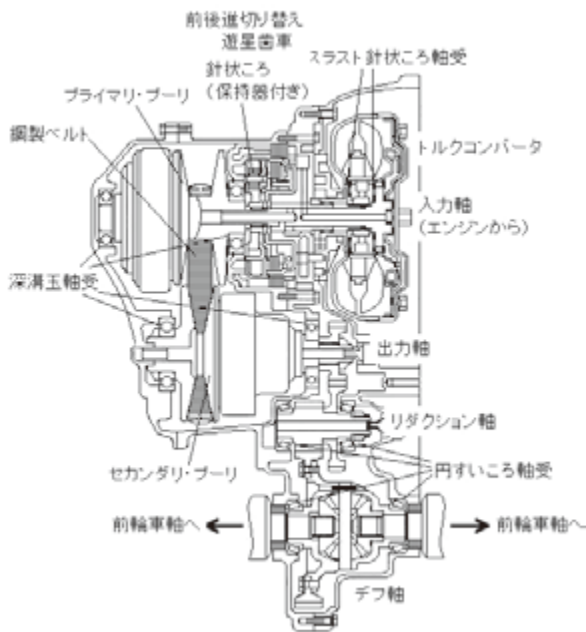


図 4.3.47 FF 車用金属ベルト式無段変速機の模式図<sup>64)</sup>

金属ベルト式無段変速機のプライマリプーリー及びセカンダリプーリーの軸を支えるベアリングには深溝玉軸受または円筒ころ軸受が使用される。金属ベルトの耐久性能を維持するためにはベルトの位置ずれを生じるプーリーの軸方向の変位（ガタ・たわみ）や傾き（倒れ）を一定量以下に抑える必要があり、深溝玉軸受の内部設計や公差を工夫してアキシャルすきまを小さく管理することや、軸方向剛性を高めること等の工夫が行われている。また、プーリー軸支持のベアリングは振動や潤滑環境等の影響によって、金属ベルトの張力から机上計算でベアリングにかかる力として求まる設計上の計算寿命よりも高い寿命安全率を求められるので、1990年代から2000年代にベアリング各社での材料、熱処理による長寿命化の技術開発が行われた。

次に、セカンダリプーリーが装着されている出力軸からはす歯歯車（ヘリカルギヤ）で前輪車軸に動力を伝えるリダクション軸（中間軸）及びデフ軸にはコンパクトで大きなギヤ噛み合い反力を支えることが出来る円すいころ軸受が多く使われることが多い。

金属ベルト式無段変速機はベルト伝達であるため、歯車の噛み合いで動力が伝達される手動変速機や自動変速機とは異なり、プライマリプーリー側の入力軸と、セカンダリプーリー側の出力軸が同一方向に回転するという特徴がある。

そのため自動車のエンジンや車軸との接続において、手動変速機や自動変速機と使用の互換性を持たせるために、出力軸とデフ軸の間にリダクション軸（中間軸）を追加して手動変速機や自動変速機と回転方向

を合わせる工夫がなされている。

また、金属ベルト式無段変速機は手動変速機や自動変速機と異なり、ベルトとプーリーとの組合せの変速機構だけでは自動車を後進させるための出力軸の逆回転を作り出すことが出来ないため、入力軸のプライマリプーリーの前に後進（逆回転）用の遊星歯車列を別に設けており、この遊星歯車列には主に保持器付き針状ころ（ケージ&ローラー）が使われている。特にプラネタリーギヤに使われている保持器付き針状ころ（ケージ&ローラー）は直径が10mm前後と小さくプラネタリーギヤの回転速度が速いため、それに適したベアリングの開発が1990年代から2000年代にかけてベアリング各社で行われた（図 4.3.48）。



図 4.3.48 無段変速機の前后进切り替えプラネタリー用保持器付き針状ころ<sup>1)</sup>

金属ベルトによる動力伝達は、プーリーへのベルトの巻き掛け径が小さいときにベルトに配置されたエレメントの内周側と外周側での巻き掛け径の比が大きくなり、接触面の中でのすべり損失が増えて伝達効率が低下する。そのため特にオーバードライブ状態を維持して高速で巡航するような条件下で燃費が悪くなる欠点がある。

これを改善することを目的として前述のように、近年、金属ベルトに代えて無段変速機専用のチェーンが開発され、チェーンのリンクをつないでいるピンの両側面（端面）とプーリーとの間の摩擦接触を用いて動力を伝えることで、プーリーとの接触面を小さくし、すべり損失を低減する形式の無段変速機が開発され、アウディやスバル等の一部の乗用車で採用されている（図 4.3.49）。

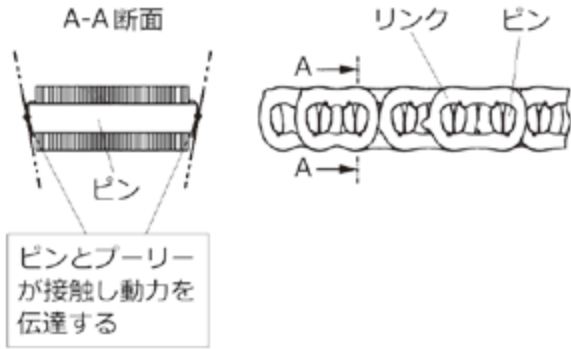


図 4.3.49 無段変速機用チェーンの例<sup>65)</sup>

この形式は伝達効率の向上や変速比を大きくすることに効果があるが、反面動力を伝えるピンとブリーの接触が金属ベルトに比べて断続的になるため動作音が大きき欠点があり、変速機の遮音対策が図られている。

また無段変速機のその他の形式として、ディスクとパワーローラーという円盤を特殊なトラクションオイルで潤滑して動力を伝達し、接触径を無段階に変化させて変速を行うハーフトロイダル式無段変速機が日産、ジャトコ、日本精工、出光興産の共同で開発され、1999年にセドリック・グロリアの一部車種に搭載して発売されたが、価格が高かったこともあり一時的な採用にとどまった (図 4.3.50)。

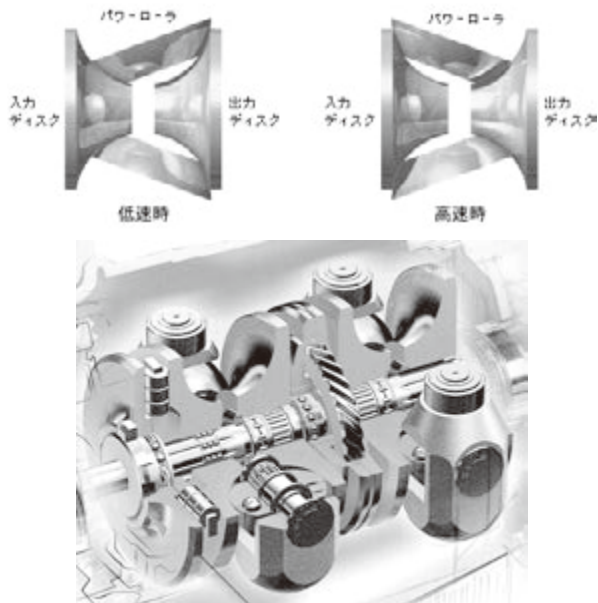


図 4.3.50 ハーフトロイダル式無段変速機のディスク・ローラー<sup>25)</sup>

また、同様に1990年代から光洋精工 (現ジェイテクト) もイギリスの Torotrak 社と共同でフルトロイ

ダル式無段変速機の変速部分のディスク及びローラーの開発を行っている (図 4.3.51)。

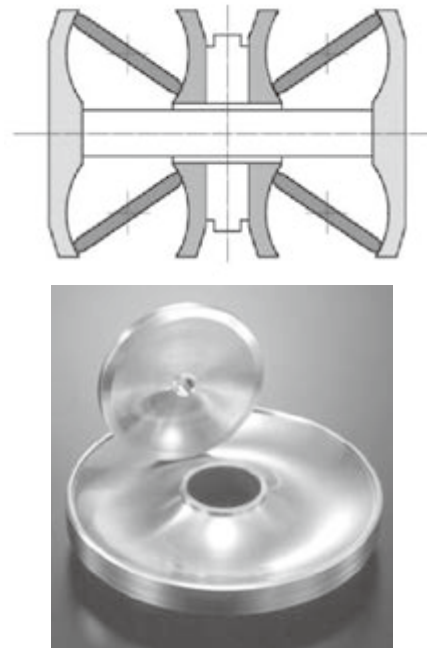


図 4.3.51 フルトロイダル式無段変速機のディスク・ローラー<sup>66)</sup>

これらはベアリング各社が培ったトライボロジー技術や材料・熱処理技術等のコア技術を生かした開発となっている。

#### 4.3.5 推進軸用ベアリング

##### ：専用針状ころ軸受の開発

推進軸（プロペラシャフト）はFR車（後輪駆動車）や4WD車（4輪駆動車）において、変速機（トランスミッション）と終減速機（ファイナルドライブ）をつなぎ、動力を伝達する役割を果たす装置である（図4.3.1参照）。

変速機と終減速機の回転軸中心は一直線になっておらず角度を持っている。さらに4.2.1で述べたような後車軸が終減速機と一体になった古典的な固定車軸（リジッドアクスル）の場合は、懸架装置（サスペンション）の動きによって、変速機を含めた車体に対して後車軸の位置が変動することで変速機と終減速機の回転軸間の角度が変化する。そのため、それらを吸収し円滑に回転して動力が伝達できるように、2組（2ジョイント）ないし3組（3ジョイント）の自在接手が組み込まれている。

推進軸は変速機から出力された回転速度で回転するため、共振による危険速度が使用回転速度域内に存在しないように設計するとともに、不快な音や振動が発生しないように製作上も十分に回転バランスを修正することが求められる。

図4.3.52に2ジョイントの推進軸の構造例を、図4.3.53に3ジョイントの推進軸の構造例を示す。なお各図はプロペラシャフトチューブが長い場合途中で切り縮め、省略して描いている。

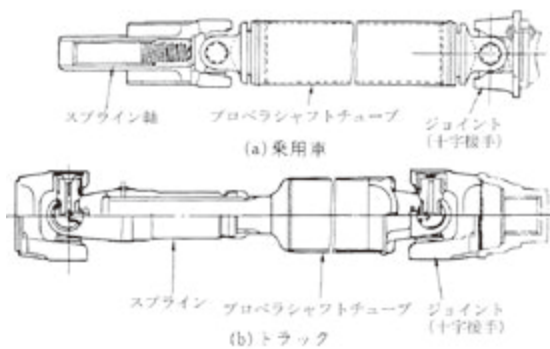


図 4.3.52 推進軸の構造例  
(2ジョイント)<sup>53)</sup>

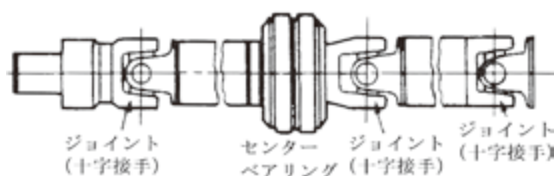


図 4.3.53 推進軸の構造例  
(3ジョイント)<sup>53)</sup>

自在接手は通常、十字接手（ユニバーサルジョイント）と呼ばれる、十字軸（クロスピン）とコの字形をしたヨークとを底付きのベアリング（針状ころ軸受）を介して固定した形式のものが使われ、角度を持った推進軸が回転すると、十字軸が底付き針状ころ軸受に対して揺動する構造となっている。

トラック等の商用車やヘビーデューティーなSUV等では分解点検や交換が可能なようにソリッド形の針状ころ軸受が使用され、止め輪を用いてヨークに固定される（図4.3.54、図4.3.55）。また途中給脂（グリースアップ）が可能なように十字軸やスプライン部にグリースニップルが設けられているものがある。

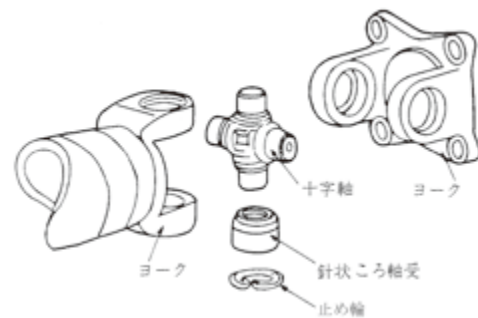


図 4.3.54 ソリッド形針状ころ軸受を使用した十字接手の構造例<sup>53)</sup>

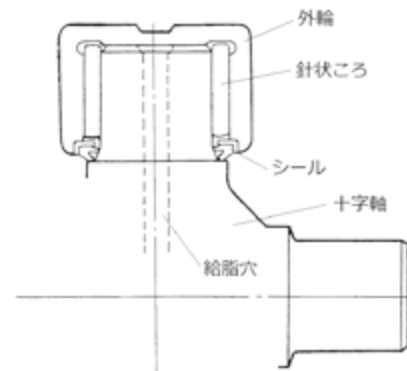


図 4.3.55 十字接手用ソリッド形針状ころ軸受と十字軸の構造例<sup>53)</sup>

乗用車の推進軸は1970年代前半までは、トラック等と同様にソリッド形の針状ころ軸受を止め輪でヨークに固定する形式であった（図4.3.54、図4.3.56）。しかし、乗用車用の推進軸においても車軸におけるハブユニットと同様にメンテナンスフリーの考え方が普及したこと、ベアリングや十字軸の耐久信頼性が向上したことから、点検補修時の分解交換を前提としないシェル形針状ころ軸受が、ドイツSchaefflerグループのINA社によって発明され、日本ではINA社と提携していたエヌ・テー・エヌ東洋ベアリング（現NTN）が製造を行い1970年代後半から使用されるようになった。

シェル形針状ころ軸受は図 4.3.56 の中央の図のように、ヨークのベアリングが入る穴の内径面を部分的に塑性変形させて8か所の爪を形成する「かしめ方式」で固定するので一度ベアリングをヨークに組み込むと分解再使用はできない。この形式の十字接手では板金のプレス加工で製作したシェル形針状ころ軸受の底面の弾力を利用して十字軸の軸方向に予圧を付加することができるため、十字接手全体の剛性が高く、かじりや焼き付きを防止するため軸方向にすきま（エンドプレー）が必要な従来のソリッド形針状ころ軸受に比べて接手内部で十字軸が移動することによる回転バランスの崩れがない長所がある。この「かしめ方式」は、予圧の付加とかしめを行う一連の組立機械装置を含めて INA 社によって独占されていたため、後続の日本国内のベアリング各社は INA 社の特許に抵触しない範囲で、寸法やシェル形針状ころ軸受の内底剛性等の特性について互換性を持たせる開発が必要であったが、1980 年ごろから光洋精工（現ジェイテクト）が、また同じころ日本精工がかしめを使用しない菊座金でヨークのベアリング穴に固定する方式を開発し量産化を行った（図 4.3.56）。



図 4.3.56 十字接手ヨークへのベアリング固定方式<sup>53)</sup>

その後、自動車の高速化や耐久信頼性向上のニーズが高まり、推進軸の性能向上も求められたため、1980 年代から 1990 年代にかけて各ベアリングメーカーで、特にトルクを受けて推進軸が回転する際に十字軸端面と接触して揺動するベアリング内底面のかじり、焼き付き対策品の開発が行われた。それにより、ベアリング内底面の十字軸端面と接触する箇所にグリース溜りのディンプル等を設けた形式が開発された（図 4.3.57）。

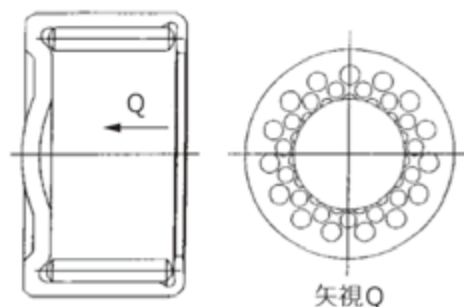


図 4.3.57 内底面にディンプルを設けた推進軸用シェル形針状ころ軸受<sup>67)</sup>

また、シェル形針状ころ軸受を用いた十字接手では組立機械による予圧付加とかしめの後に、適正な予圧（組立後の屈曲トルクで計測）となるように手作業でヨークを銅ハンマー等で打撃してかしめ具合を調整する、いわゆるハンマリング作業を行う必要があったが、1990 年代の終わりごろに、十字軸の内部を貫通している給脂穴（図 4.3.55 参照）を無くし、十字軸端面の中央部をベアリング内底面と接触させることでベアリング底部の剛性を下げ、ハンマリング作業なしに適正な予圧が得られる形式が開発された。この形式は十字軸端面とベアリング内底面が揺動中心に近い中央部で接触し十字軸とベアリング内底面との間の周速が下がるので、かじりや焼き付き性能も向上させることができる（図 4.3.58）。

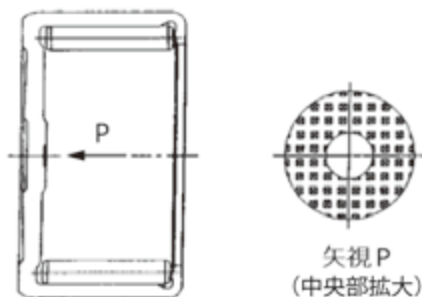


図 4.3.58 内底面中央にワッフルパターンを設けた推進軸用シェル形針状ころ軸受<sup>67)</sup>

十字軸端面と接触するベアリング内底面の中央部分は、グリース溜りの形成のため、当初は図 4.3.58 のようなワッフルと呼ばれる小さな四角いくぼみを格子状に配列した形状であったが、十字接手の作動角度が小さいと、ベアリングと十字軸との間の揺動角度も微小となり、グリースがワッフル状のくぼみから補給されずにかじりが発生することから、2001 年ごろに放射溝のグリース溜りを設ける形式がベアリングメーカーによって開発された（図 4.3.59、図 4.3.60）。



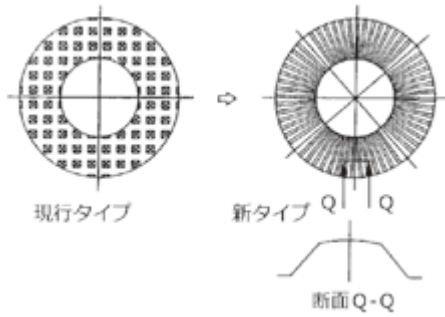


図 4.3.59 推進軸用シェル形針状ころ軸受内底面中央部の形状改良<sup>67)</sup>



図 4.3.60 推進軸用針状ころ軸受の外観例 (右：ソリッド形、左：シェル形)<sup>25)</sup>

十字接手（ユニバーサルジョイント）は構造が簡便で過酷な使用環境にも比較的耐えられる長所があり、推進軸用として広く使われているが、入力回転に対して出力回転が変動する回転速度（角速度）の不等速がある欠点があり、近年は推進軸の取り付け作動角度が比較的小さく、またほとんど作動角度が変動しない使われ方の場合を中心に音・振動や乗り心地の改善を目的として十字接手に代わって入力に対する出力の角速度が常に一定である等速ジョイントが使われることがある。

また類似の用途としては、FF 車の変速機の出力軸（デフ軸）と前車軸、または FR 車の終減速機と独立懸架の後車軸とをつなぐ駆動回転軸（ドライブシャフト）があり、この場合、推進軸（プロペラシャフト）に比べて終減速比だけ回転速度が遅くなり、その分伝達トルクが大きくなる特徴がある。4 輪独立懸架の FR 車（後輪駆動車）の後車軸用駆動回転軸については十字接手を使用している例があるが、FF 車（前輪駆動車）では操舵によって継手の角度が大きく変化することから回転速度が不均一な十字接手が使用できないので等速ジョイントの使用が不可欠である。1960～1970 年代以降に FF 車が急速に普及した背景には各種の等速ジョイントの発明と量産化が大きく寄与しているといえる（図 4.3.61）。



図 4.3.61 各種等速ジョイントの例<sup>2)</sup>

これらの用途の等速ジョイントについては、日本の各ベアリングメーカーが精密研削加工技術、及び鋼球や保持器等の要素部品技術などベアリングメーカーが持つコア技術を生かして、開発と生産を行っているが、機能的にベアリング（転がり軸受）には分類されないので、本稿では詳細な系統化調査は省略する。

なお、正確な用語としてはこれらの自在接手を持った軸の総称が駆動回転軸（ドライブシャフト）であるが、日本では慣用的に上記のように推進軸（プロペラシャフト）と駆動回転軸（ドライブシャフト）の呼称を使い分けている。

次に 3 ジョイントの推進軸（プロペラシャフト）の場合、中間の 1 か所で推進軸を支えて位置決めを行う必要があり、推進軸センターベアリングが使用される（図 4.3.53、図 4.3.64 参照）。

通常、センターベアリングは変速機側から数えて 1 番目と 2 番目の接手の間（2 番目の接手の手前）に配置されることが多い。これは 1 番目の接手の主な役割が変速機出力軸の位置ずれを吸収することであり、設計上の作動角度が 0 に近いためである。

センターベアリングはシール付きの深溝玉軸受を防振ゴム製のマウントの中央に配置し、ブラケットを介して車体下面に取り付けられる。取り付け位置の関係で、泥水等の飛散からベアリングを守るためのラビリンズ構造やベアリングシールの開発が行われている。また、推進軸の回転やそれによる振れ回り等と共振してベアリングから異音が発生することがあるため、その防止対策としてベアリング内部設計の最適化や潤滑グリースの開発が1980年代ごろから継続して行われている（図4.3.64）。



図 4.3.64 推進軸センターベアリングの例<sup>25)</sup>

また同様に、FF車の変速機の出軸（デフ軸）と独立懸架の車軸とをつなぐ駆動回転軸（ドライブシャフト）においても、変速機のレイアウト上で左右の駆動回転軸の長さが等しくないことがあり、その場合、長い側に中間軸を設けるが、中間軸支持のために同様な構造のセンターベアリングが用いられる。

## 4.4 その他の自動車用ベアリング

前節までに自動車での主なアプリケーションである、エンジン・エンジン補機用、車軸・サスペンション用、動力伝達系用でのベアリングの使われ方や、ベアリングの機能・性能を向上させるための開発の取り組み内容及び経緯を述べてきた。ここではそれらのアプリケーション以外のブレーキ、操舵系（ステアリング）、車体等の用途に使われているベアリングについて調査を行った結果を記述する。

### 4.4.1 ABS 用ベアリング

#### ：ABS ポンプ用ベアリングの開発

ABSはアンチロック・ブレーキ・システム（Anti-lock Brake System）の略で、自動車のブレーキ操作において、ステアリング操作が効かなくなり、横滑りや横転等の重大事故につながる車輪のロックを防止するためのシステムである。

ABSが登場する以前から、熟練した運転者は制動

をかける際に車輪がロックしないようポンピングブレーキ（車輪のロックを防止するために間欠的に行うブレーキ操作）を行っていたが、ABSはこれを自動的に効率よく行うシステムで、車速センサーと車輪（車軸）回転センサーの情報を基に車輪のロックを検出してブレーキの液圧を制御する。

現在のABSシステムの原形となる電子制御ABSは1970年代にドイツのボッシュ社（Robert Bosch GmbH）で開発され、1980年代から徐々に普及した。日本では2012年に新型車として発売する乗用車に装着が義務化されたこともあり、現在ABSはほぼ標準装備となっている。

ABSの普及がベアリングの技術開発に与えた影響としては4.2.4で紹介した車軸用ベアリング（ハブユニット）への車輪回転センサーの装着及び内蔵などがあるが、ここではABSそのものに使用するベアリングについて述べる。

ABSでブレーキ液圧を発生させるにはプランジャーポンプが使われており、プランジャーを上下させるためにモーターと偏心した内径面を持つベアリングが使用される。

ABSが開発された当初は小型で負荷容量の大きなソリッド形針状ころ軸受やシールド付き深溝玉軸受に偏心軸または偏心カラーを組み合わせて使用していたが、2000年代にABSが標準装備となりコストダウンが進むと、内径穴を偏心させベアリング自体に偏心カムの機能を持たせたベアリングをベアリングメーカーが製作して納入するようになり、これによりABSポンプの小型化とコストダウンが実現した（図4.4.1）。

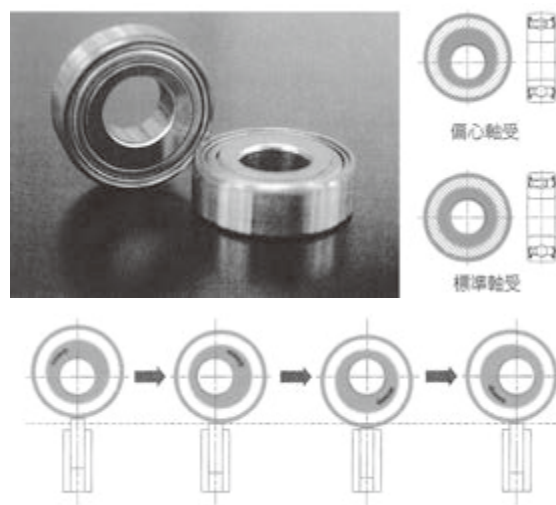


図 4.4.1 ABS ポンプ用偏心ベアリング<sup>68)</sup>

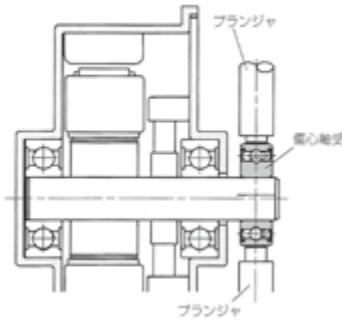


図 4.4.2 ABS ポンプ用ベアリングの使用例<sup>68)</sup>

#### 4.4.2 ステアリングギヤ用ベアリング ：遊び・ガタとの闘い

黎明期の自動車の操舵（舵取り）は1本のレバーで行われていたが、自動車の走行速度が上がり、操舵を行う全てのタイヤが同じ旋回中心を持つためのアッカーマン機構が発明されると、ステアリングホイール（ハンドル）からの力でねじやウォームギヤを回し、それと噛み合うナット、ウォームホイールや扇形のセクタギヤを動かして左右の前輪を動かすウォームホイール式、ウォームローラー式、スクリューナット式、ウォームセクター式、カムアンドレバー式等のステアリングギヤが登場した。

1950年代にはボールねじ式ステアリングギヤが開発され、ステアリングホイールからの回転力をギヤに伝達する箇所に鋼球を入れたボールねじを採用することで、操舵力が著しく軽減されてステアリングギヤの主力となり、現在でもトラック等の商用車で一般的に使用されている。

一方、現在の乗用車で主流となっているラックアンドピニオン式ステアリングギヤの発明は19世紀末ごろに行われたが、パワーアシスト機構（一般的にいうパワーステアリング）が無かった当時としては操舵力が非常に大きく、またラックアンドピニオン式ステアリングギヤは当時の劣悪な道路事情での路面からステアリングギヤへの逆入力（キックバック）を緩和できず、逆入力直接運転者の操作するステアリングホイールに伝わってしまうことから、ほとんど普及しなかった。

しかし1970年代になりFF車が普及すると、エンジンルーム内のスペースを有効に使うことが求められるようになったため、コンパクトで簡便な構造のラックアンドピニオン式ステアリングギヤが採用されるようになっていった。またこのころから油圧式パワーステアリングが一般に普及し始め、操舵力が大きいというラックアンドピニオン式ステアリングギヤの欠点も

解消されることとなった。

現在ではパワーステアリングは油圧ポンプを常時駆動する油圧式に代わり、パワーアシスト時にだけモーターが作動するエネルギー消費が少ない電動式に進化している。

一般的な、ボールねじ式ステアリングギヤ及びラックアンドピニオン式ステアリングギヤ用のベアリングの使用例を図4.4.3、図4.4.4に示す。

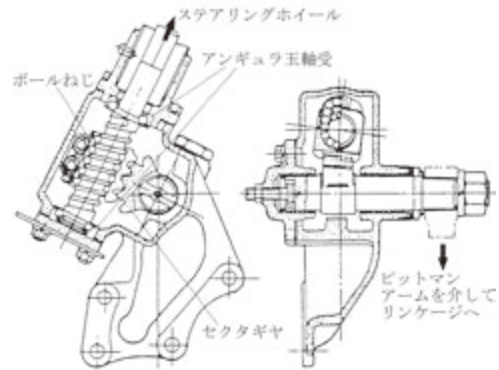


図 4.4.3 ボールねじ式ステアリングギヤ用ベアリングの使用例<sup>69)</sup>

ステアリングギヤでは操舵の際のガタや遊びをきらうため、ボールねじ式ステアリングギヤのボールねじやラックアンドピニオン式ステアリングギヤのピニオンギヤの支持のベアリングにはアンギュラ玉軸受を2個用い、それに予圧を与えて使用することが多い。

また1990年代にはラックアンドピニオン式ステアリングギヤのピニオンギヤの支持部をコンパクトにするため、アンギュラ玉軸受に代えて内部すきまを小さくした内外輪一体型の4点接触玉軸受をベアリングメーカーが開発した。この4点接触玉軸受と針状ころ軸受を組み合わせ、これらのベアリングをハウジングに圧入してベアリング外輪の軌道を取縮させることで、ベアリング組立後の内部すきまをガタや遊びのないゼロ以下のいわゆる「負すきま」として使用する例が増えている（図4.4.5）。

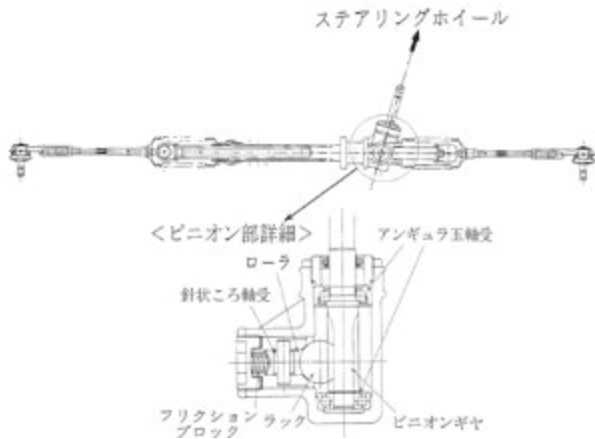


図 4.4.4 ラックアンドピニオン式ステアリングギヤとベアリングの使用例<sup>69)</sup>

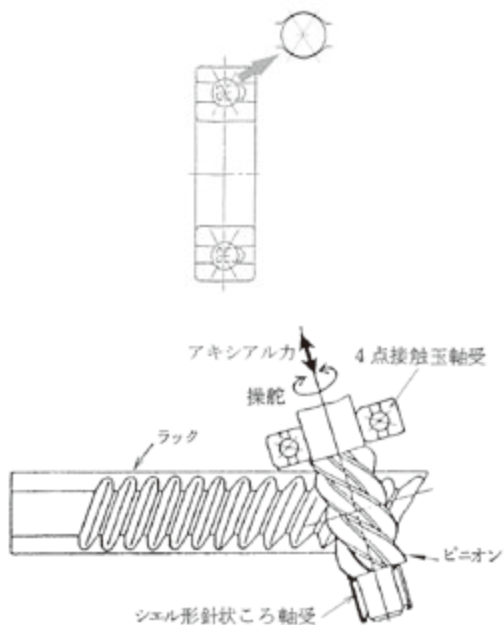


図 4.4.5 ラックアンドピニオン式ステアリングギヤでの4点接触玉軸受の使用例<sup>30)</sup>

このようにステアリングギヤ用のベアリングは、遊びやガタを少なくしてダイレクトな操舵感を持たせることと、ガタ詰めによってベアリングから発生するゴリ感や異音等を押さえることがポイントとなっている。ただし、事故や縁石乗り上げでのタイヤからの逆入力の過大な衝撃荷重によってステアリングギヤ用ベアリングの転動面に圧痕が生じて操舵フィーリングが悪化することがあるが、これは通常の使用ではない異常な使われ方であるため交換修理で対応している。

次に、電動パワーステアリング（図 4.4.6）は光洋精工（現ジェイテクト）が1988年に世界で初めて実用化し、スズキセルボに搭載された。



図 4.4.6 電動パワーステアリングの例（コラム式）<sup>70)</sup>

電動パワーステアリングはパワーアシストが必要なときだけモーターがアシスト力をステアリングギヤに与える仕組みになっており、エンジンで常に油圧ポンプを駆動し続ける油圧パワーステアリングに比べて燃費が向上し省エネルギー性が高いため、小型車を中心に広く普及し、今日では大型車やトラック等の商用車を除く乗用車のパワーステアリングのほとんどを占めるようになっている。

電動パワーステアリングの機構は運転者によるステアリングホイール（ハンドル）からの操舵力を検出するトルクセンサー部とモーターによるパワーアシスト部以外はパワーアシストのないいわゆるマニュアルステアリングとほぼ同じ構造である。

パワーアシスト部は通常、図 4.4.7 のようにウォームとウォームホイールとで構成されており、ウォームホイール及びウォームの支持には深溝玉軸受が使用されている。これらは他のステアリングギヤ用ベアリングと同様に内部すきまや封入グリース等を調整した特別な仕様となっている。

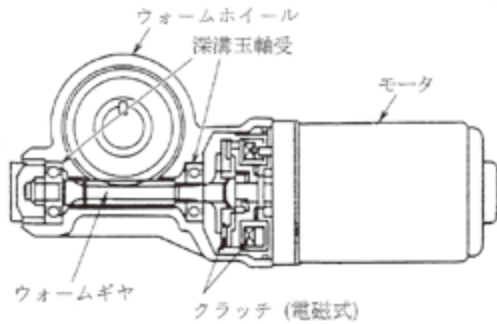


図 4.4.7 電動パワーステアリングのパワーアシスト部の構造例<sup>69) 70)</sup>

#### 4.4.3 ステアリングコラム用ベアリング

##### ：ガタ詰めの工夫

自動車の車室内のステアリングホイール（ハンドル）の下部にはステアリングコラムがあり、ステアリングホイールの回転を伝える軸がコラムの内部を貫通している（図 4.4.6）。

ステアリングコラムには事故等での衝突時に運転者を守るために衝撃吸収機構や、運転者の体格に合わせてステアリングホイールの位置を調整するためのチルト機構、テレスコピック機構が設けられていることが多い。

ステアリングコラムの中を貫通している軸の支持ベアリングには深溝玉軸受や針状ころ軸受が使用されている。

ステアリングコラム軸もステアリングギヤ同様に遊びやガタを極力小さくしたいニーズがあり、ベアリングには内部すきまの小さなものが使用される。

光洋精工（現ジェイテクト）は 1984 年に、ステアリングコラムに圧入することでゴムの弾力によってベアリングの内部すきまを常にゼロに保つように、ばね鋼板を丸めて製作した外輪をゴム製のケースに挿入した針状ころ軸受を開発し、ガタや遊びをきらうステアリングコラムの仕様にマッチして普及した（図 4.4.8）。

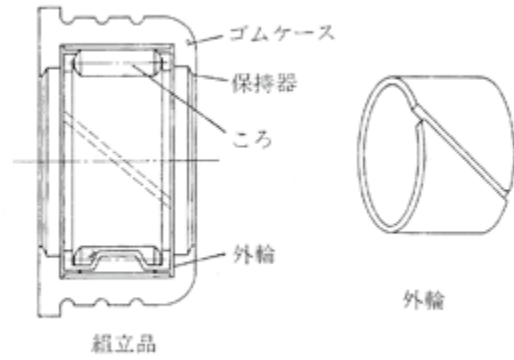


図 4.4.8 ステアリングコラム用針状ころ軸受の例<sup>30)</sup>

#### 4.4.4 ステアリング中間軸用ベアリング

##### ：専用針状ころ軸受の開発

ステアリングコラムとエンジンルーム内に設置されたステアリングギヤとの間は軸心の位置が一致していないため、両者を接続し、運転者によるステアリングホイールの回転操作をステアリングギヤに伝えるためには自在接手が必要となる。しかし推進軸（プロペラシャフト）とは異なり、ステアリング中間軸は運転者が操作するステアリングホイール（ハンドル）のロックトゥーロックである、中立位置から通常片側 2.5～3 回転だけ回ればよく、回転速度が遅い。そのためベアリングの強度も動的な疲労剥離よりも静的な圧痕や破壊強度を考えればよいので、十字接手は推進軸用に比べて小型となっている。

十字接手には推進軸用と同様に底付きシェル形針状ころ軸受が使用され、ヨークに圧入後にヨークのベアリング穴の内径面にかしめ爪を形成してベアリングを固定するが、当初はグリス溜りを考慮して図 4.4.9 の上側のベアリングのように内底面の中央が凹んでおり、その外周で十字軸端面と接触するような構造となっていた。

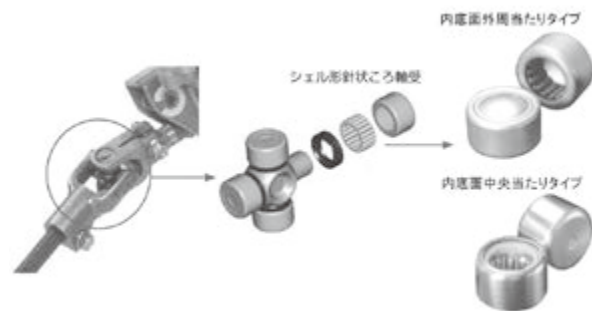


図 4.4.9 ステアリング中間軸用ベアリングの例<sup>3)</sup>

しかしステアリング中間軸の剛性や摩擦トルクは運転者が感じるステアリングフィールに直接的に影響するので、ステアリング中間軸の十字接手はガタや遊びが極力少なく、かつ摩擦トルクが小さいことが求められるようになったため、1980年代ごろから底付きシェル形針状ころ軸受と十字軸端面が内底面中央部のみで接触する、図 4.3.56 と同様の構造のベアリング（図 4.4.9 の内底面中央当たりタイプ）が開発され、十字軸端面との間のすきまを厳密に管理して使用するようになった。

#### 4.4.5 スライドドア用ベアリング

##### ：日本独自の専用ベアリング

日本では 1970 年代から、いわゆるワンボックスカーを中心に、後席ドアをスライドドアとして開口部を大きくし乗降を容易にする車体設計が行われるようになった。

スライドドアは乗降時にドアが邪魔にならないため、駐車スペースが狭い日本の国情に合致して、その後、ミニバンや 2 ボックスタイプの自動車にも採用が広まった。

スライドドアは通常、上下と中央の 3 か所の車体（ボディ）側にレール溝があり、戸車がレールの中を走行して開閉が行われる。

戸車はドアのガタつきを押さえる役割の個所には樹脂製ローラーが、ドアの重量を支える個所にはベアリング（転がり軸受）が使用されている（図 4.4.10）。



図 4.4.10 スライドドア用ベアリングの使用例<sup>30)</sup>

ベアリングは潤滑グリースを密封した深溝玉軸受が用いられることが多いが、まれにローラーフォロアー形の針状ころ軸受が使用されることもある。スライドドアはボディと一緒にカチオン電着塗装が行われる

が、その際にマスキング又はダミーローラーを装着して塗装する場合にはシールド板付き深溝玉軸受が、ベアリングが装着された状態でそのまま電着塗装が行われる場合には塗料の侵入を防ぐため接触ゴムシール付き深溝玉軸受が用いられる。

また特に設計上大きな荷重を受ける部位についてはベアリングの外径面を凸面としてドアの傾きやミスアライメントによってレールやベアリングにかじりや食いつきなどの損傷が発生しないように配慮がなされている（図 4.4.11）。

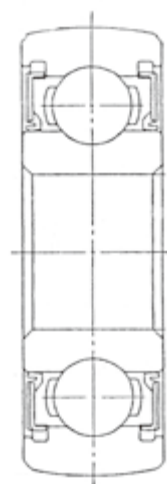


図 4.4.11 スライドドア用ベアリングの例<sup>30)</sup>

これらのベアリング仕様はスライドドアの普及と増加に応じて、1970 年代以降にベアリングメーカーがカーメーカー及び車体架装メーカーの工程や仕様を考慮してきめ細かい設計開発の対応を行った結果として定着したもので、日本車の高い品質を支えている。

#### 4.4.6 その他の用途のベアリング

パワーステアリングの動力源が油圧である油圧パワーステアリングでは、エンジンのクランク回転から動力を取ってパワーステアリング用の油圧ポンプを常時運転しておき、操舵アシストに備える必要がある。

この油圧パワーステアリング用のポンプは 4.1 のエンジン補機に分類してもよいが、電動パワーステアリングが主力となった現状を考慮し、ステアリングシステムの一環としてこの節で述べておく。

油圧パワーステアリングポンプにはベーンポンプ等が使用され、図 4.4.12 に示すようにシール付き深溝玉軸受や針状ころ軸受が使用されることが多い。

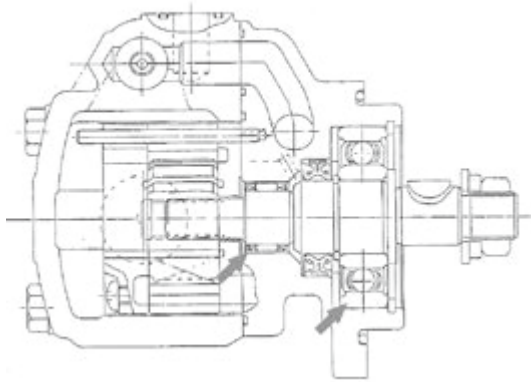


図 4.4.12 油圧パワーステアリング  
ポンプ用ベアリングの例<sup>69)</sup>

油圧パワーステアリングポンプはエンジンクランク軸からVリブドベルトで駆動されるため、深溝玉軸受についてはベルト張力と振動によって、4.1.4 で述べたオルタネーター用ベアリングと同様の早期破損が発生することがあるので、1990年代にオルタネーター用ベアリングでの開発を横展開して軸受材料や潤滑グリースの改良が行われた。しかしその後、電動パワーステアリングが急速に普及したため油圧パワーステアリングポンプ自体の需要が縮小したことにより、現在では脚光を浴びていない。

次にオフロードタイプの4輪駆動自動車で用いられるフリーホイールハブ用ベアリングについて説明する。オフロードタイプの4輪駆動自動車は、ベース車両がFR車で後輪が主駆動輪であるが、1980年代ごろまでのオフロードタイプ4輪駆動自動車は後輪駆動のみでの通常走行時に、駆動系の副変速機（トランスファー）及び前輪用終減速機（フロントデフ）が駆動軸（ドライブシャフト）を介して前輪と結合していると、車両の走行によって回転する前輪からの逆入力でひきずり抵抗が発生し、燃費の悪化が問題であった。そのため前輪のホイールと車軸の間にフリーホイールハブという結合を解除するクラッチ機構を設けることが多かった。

フリーホイールハブには結合⇄解除を手動で行うマニュアル式と4輪駆動時の前輪に伝達される駆動力を検出するカム機構を用いて結合を行うオート式の2種類があるが、これらのフリーホイールハブの回転部分に薄型の深溝玉軸受等のベアリングが使われている（図 4.4.13）。

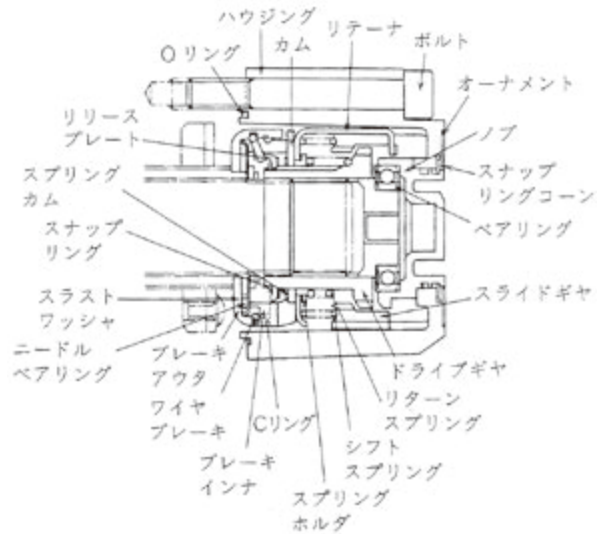


図 4.4.13 フリーホイールハブの構造例<sup>71)</sup>

三菱自動車のパジェロに代表されるオフロードタイプの4輪駆動自動車は、1980年代～1990年代に大きなブームとなり、初期にはマニュアル式フリーホイールハブが、1980年代後半にはオート式フリーホイールハブが前輪に装着されたため、大きな需要が生じた。オート式フリーホイールハブのカム機構では円滑にカムを回転させるためスラスト摺動面に挿入する薄型のスラスト玉軸受（ケージアンドボール）が光洋精工（現ジェイテクト）によって開発された（図 4.4.14）。



図 4.4.14 ケージ&ボールの外観例<sup>40)</sup>

その後、1990年代になると自動車の4輪駆動システムそのもので駆動系のひきずりを遮断し前輪用終減速機が車輪からの逆入力でつれ回らない工夫がなされるようになり、また2000年代以降はブームが去って、オフロードタイプ4輪駆動車は悪路走行を必要とする業務用車両や、一部のマニアだけが乗る自動車となって、4輪駆動車の主流はフルタイムやパートタイムのオンロード4輪駆動自動車に移行したため、現在はフリーホイールハブの需要は減少している。

この他にも自動車用ベアリングとしては、シートのスライド及び回転機構等に針状ころ軸受や小径の深溝玉軸受が使われている。

近年、車載用モーターは自動車1台に120~130個が使用されているとも言われており、本章で調査を行った電動パワーステアリング以外にも電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HV)の普及によって、電動エアコンや各種のパワーアシスト用として車載用モーターはさらに増加の傾向にある。またその中には負荷出力が大きなものや動作頻度が高いものがあるため、車載用電気システムの42V化等の高電圧化が課題となっている状況にある。

そうした負荷出力が大きいの、もしくは動作頻度が高い車載用モーター、例えば車体関係のアクチュエーターとして使用されるモーターや、ワイパーの駆動に使われているワイパーモーター等の回転軸には主に小径の深溝玉軸受が使われている。これらについてもISO・JISで規定されている標準ベアリングでは寸法及び仕様上で対応が難しい場合にはベアリングメーカーが専用設計を行い、必要に応じて試作やシミュレーション実験評価を行うような図3.6.16に示すような日本特有のきめ細かい対応を行ってきた。

#### <参考・引用文献>

- 1) 株式会社ジェイテクト所有画像
- 2) ジェイテクト EXSEV 商品ガイド CAT No. BA 012JA
- 3) ジェイテクトニードルローラーベアリング カタログ CAT No. B 2027
- 4) 「2サイクルエンジン コネクティングロッド大端用針状ころ軸受の開発」Koyo Engineering Journal No.141 (1992年)
- 5) 「耐圧シール付き玉軸受」Koyo Engineering Journal No.168 (2005年)
- 6) 自動車工学便覧 第4編 第1章 エンジン 自動車技術会 (1984年)
- 7) 「板金製ロッカーアームユニットの開発」Koyo Engineering Journal No.157 (2000年) の図を基に筆者作成
- 8) NTN HL 軸受パンフレット CAT.No.3020/J
- 9) JTEKT ROOM GINZA 所有スケルトンカー
- 10) 「自動車パワートレーン系軸受技術の動向」Koyo Engineering Journal No.161 (2002年)
- 11) 「ウォーターポンプ用軸受について」IKF Koyo Engineering Journal No.106 (1958年) の図を基に筆者作成

- 12) 「ころがり軸受の自動車への応用(2)」NSK Bearing Journal No.630 (1972年)
- 13) 「自動車のファンカップリング用軸受」Koyo Engineering Journal No.137 (1990年)
- 14) ジェイテクトニードルローラーベアリング カタログ CAT No. B 2027、及び「耐泥水性向上電磁クラッチ用複列軸受」Koyo Engineering Journal No.165 (2004年) の図を基に筆者作成
- 15) 「自動車用エアコン・コンプレッサ用低トルク・スラストニードルベアリングの開発」NSK Technical Journal No.685 (2012年)
- 16) 「耐泥水性向上電磁クラッチ用複列軸受」Koyo Engineering Journal No.165 (2004年)
- 17) 「自動車用軸受の技術動向と展望」JTEKT Engineering Journal No.1014 (2016年)
- 18) 「ターボチャージャー用転がり軸受」NSK Technical Journal No.659 (1995年)
- 19) 「PPS 保持器付きスクリューコンプレッサ用軸受」NSK Technical Journal No.658 (1994年)
- 20) 自動車工学ハンドブック設計編 第3章 エンジン 自動車技術会 (1991年)
- 21) 「自動車用軸受の市場ニーズと Koyo の取り組み」Koyo Engineering Journal No.131 (1987年)
- 22) NTN 株式会社所有画像
- 23) 「スロットルバルブ用シェル形ラジアル針状ころ軸受」NTN TECHNICAL REVIEW No.73 (2005年)
- 24) 「改良型プーリユニット」NTN TECHNICAL REVIEW No.65 (1996年)
- 25) 日本精工 Automotive Products カタログ CAT. No.4102 (2004年)
- 26) 大車林 (三栄書房) の図を基に筆者作成
- 27) 特許公開 2000-006609 図5 を基に筆者作成
- 28) 特許公開 2003-083338 図1 を基に筆者作成
- 29) 特許公開 2008-222098 図5 を基に筆者作成
- 30) ジェイテクト社内資料を基に筆者作成
- 31) 「ホイール用軸受の変遷」Koyo Engineering Journal No.131 (1987年)
- 32) 「自動車ホイール用軸受の技術動向」Koyo Engineering Journal No.162 (2002年)
- 33) JTEKT 第三世代ボールハブユニットカタログ CAT No.BA009JA-OCH
- 34) 「高分解能回転センサ内蔵ハブベアリング」NTN TECHNICAL REVIEW No.81 (2013年) の図を基に筆者作成
- 35) 「アクスル用軸受の歴史」NTN TECHNICAL



- REVIEW No.85 (2017年)
- 36) 「SUV・ピックアップトラック用第2.5世代円すいころ軸受ハブユニット」JTEKT Engineering Journal No.1009 (2011年)
  - 37) 「ABS車輪速センサ内蔵型ハブユニットの開発」Koyo Engineering Journal No.151 (1997年)
  - 38) 自動車工学ハンドブック設計編 第7章 サスペンション、アクスル、タイヤ、ホイール 自動車技術会 (1991年)
  - 39) 特許公開 1995-280021 図5を基に筆者作成
  - 40) 筆者作成
  - 41) 「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」JTEKT Engineering Journal No.1007 (2009年)
  - 42) ジェイテクト 転がり軸受総合カタログ CAT No. B 2001-8を基に筆者作成
  - 43) 「LFT軸受について」Koyo Engineering Journal No.127 (1985年)
  - 44) 「円すいころ軸受の超低トルク化技術の開発」Koyo Engineering Journal No.167 (2005年)
  - 45) 「ころがり軸受技術の進展と将来展望」JTEKT Engineering Journal No.1015 (2017年)
  - 46) 「ディファレンシャルピニオン用低トルク軸受」JTEKT Engineering Journal No.1009 (2011年)
  - 47) JTEKT ROOM GINZA 所有カットモデル
  - 48) ジェイテクト 低トルク軸受LFTシリーズ カタログ CAT No. B 1023
  - 49) 「自動車駆動系軸受の技術動向」Koyo Engineering Journal No.154 (1998年)
  - 50) 「ベアリング」ベアリング工業会「ベアリングの散歩道」2016年9月号
  - 51) トランスミッション用密封クリーン玉軸受 NSK Bearing Journal No.641 (1981年)
  - 52) 「高容量円すいころ軸受 (KE II円すいころ軸受)の開発」Koyo Engineering Journal No.165 (2004年)
  - 53) 自動車工学便覧 第5編 第1章 動力伝達系・車軸 自動車技術会 (1984年)
  - 54) 「クラッチレリーズ軸受の問題点について」NSK Bearing Journal No.635 (1974年)
  - 55) 不二越カタログ No.0501の図を基に筆者作成
  - 56) 特許公開 1994-213251 図3を基に筆者作成
  - 57) 「ベアリング」ベアリング工業会「ベアリングの散歩道」2017年1月号
  - 58) 「AT用軸受の動向と最新技術」NSK Technical Journal No.677 (2004年)
  - 59) 「オートマチックトランスミッションのプラネタリ用針状ころ軸受の技術動向」Koyo Engineering Journal No.168 (2005年)の図を基に筆者作成
  - 60) 「超高速プラネタリニードル軸受の開発」NSK Technical Journal No.680 (2006年)
  - 61) 「オートマチックトランスミッション用スラストニードル軸受」NSK Technical Journal No.662 (1996年)
  - 62) 「オートマチックトランスアクスル用複列軸受の開発」NSK Technical Journal No.672 (2001年)
  - 63) 「振動抑制軸受の開発」JTEKT Engineering Journal No.1011 (2013年)
  - 64) 「ベアリング」ベアリング工業会「ベアリングの散歩道」2017年5月号
  - 65) 「Dry clutch for automated manual transmissions. Structural analysis and control strategies」Mario Pisaturo; Università degli Studi di Salerno (2009年)の図を基に筆者作成
  - 66) 「フルトロイダル型無段変速機 (IVT) バリエータの伝達効率・伝達容量の解析」Koyo Engineering Journal No.168 (2005年)
  - 67) 「自動車用駆動系軸受および軸受関連製品の最近の動向」Koyo Engineering Journal No.160 (2001年)
  - 68) 「偏心軸受」NSK Technical Journal No.680 (2006年)
  - 69) 自動車工学ハンドブック設計編 第8章 ステアリング 自動車技術会 (1991年)の図を基に筆者作成
  - 70) ジェイテクト 電動パワーステアリングシステム カタログ CAT No. S 1001-2を基に筆者作成
  - 71) 自動車工学ハンドブック設計編 第4章 動力伝達系 自動車技術会 (1991年)

# 5 | 自動車用ベアリングの将来展望

第4章で自動車のアプリケーションごとのベアリングの開発と、それによるベアリングの進化について調査を行った結果を述べてきたが、自動車そのものが内燃機関（エンジン）の発達及びその量産技術の確立によって成り立ってきたことから、自動車用ベアリングの開発も内燃機関に適した車体、車軸、動力伝達系の開発と改良に伴い、内燃機関が持つ長所を伸ばし欠点を補うための創意と工夫の歴史であったともいえる。

ことに日本のベアリング産業は、日本人の国民性に根ざす、自動車の各アプリケーションの特性やニーズに応えたきめ細かい仕様のカスタマイズ及びこまめな改良・改善と、わずかな不具合も見逃さないあくなき品質の追求で、ベアリングのみならず日本の自動車全体の品質や信頼性に対する評価を高めることに貢献してきた。

しかしここに来て、自動車産業は地球環境問題や、中国・インドに代表される新たな巨大市場の登場などで大きな転機を迎えている。

そのため本調査の最後に、今後の自動車産業の推移の予測と、それに伴う自動車用ベアリング開発の方向性について考察を行うこととする。

## 5.1 内燃機関自動車の将来とベアリングの動向

ガソリンや軽油などを動力源とする内燃機関は、地球の有限な化石燃料資源を消費するだけでなく、燃焼によるCO<sub>2</sub>ガスの排出により地球温暖化に影響を及ぼすことが憂慮されている。例えば日本におけるCO<sub>2</sub>排出量の約15%程度が自動車等の輸送機械によるものといわれており、長年にわたって燃費の向上が行われてきた。また燃焼に付随して、排気ガス及びPM2.5（微小粒子状物質）に代表される人体に有害な大気汚染物質等が発生させる問題もあり、それらの有害物質を取り除く努力も行われてきた。

ハイブリッド自動車（HV 又は HEV）は環境問題や燃費向上対策に対する一つの回答であり、1997年にはトヨタ自動車からハイブリッド専用車であるプリウスが発売され、ホンダ等も後に続いた。プリウスに代表されるパラレル式のハイブリッド自動車は、既存の内燃機関を用いた自動車に電動機（モーター）による動力を合成して車軸に伝える構成になっている。そのためベアリングの視点からみると、第4章で調査した各アプリケーションに大きな変更はなく、モーター

回転軸支持のベアリングや、モーターと内燃機関との接続のための機構に使用するベアリングが追加されることから、ベアリング産業にとってはパラダイムの変更を伴うような大幅な変革にはなっていない。

プリウスが発売された1990年代当時は、自動車の環境問題を解決する究極の答えは燃料電池自動車（FCV）であるといわれており、ハイブリッド自動車は燃料電池車が普及するまでの「つなぎ技術」であるとの意見があった。しかし燃料電池自動車は、2019年の現在に至ってもごく一部の限定的な販売にとどまっている。また、水素ステーション等のインフラ整備や、燃料である水素を天然ガスや水から作り出すときのCO<sub>2</sub>排出やエネルギー効率等を考えると必ずしも最もクリーンな自動車ではないという意見もあって、今後も速やかな普及が見込めるとは考えられない状況にある。

図5.1に電気自動車及びハイブリッド自動車の種類を模式図で示す。

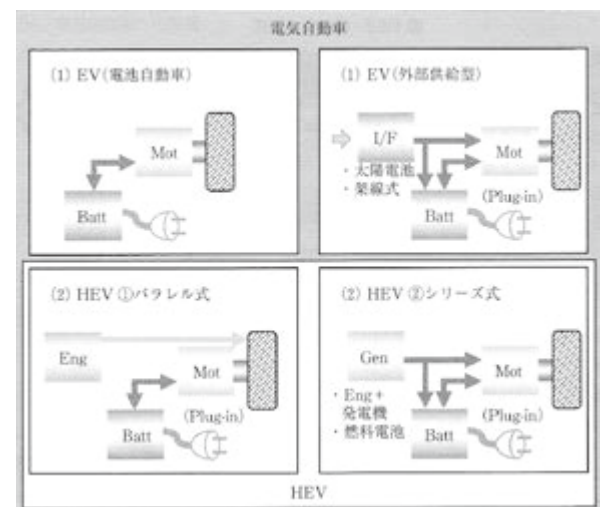


図5.1 電気自動車・ハイブリッド自動車の種類<sup>1)</sup>

こうした中で、バッテリーの充電容量の進歩やコストの低減等によって電気自動車（EV）の性能、特に航続距離が改良され普及の気配を見せている。

電気自動車は充電に時間を要すること、専用の急速充電用ステーションが必要であることなど様々な欠点がいわれているが、補助的な発電用の内燃機関を積んだシリーズ式ハイブリッド自動車とすることでその欠点を補うことも可能である。また、ハイブリッド自動車に外部電源からの充電機能を追加したプラグインハイブリッド自動車（PHV）は電力で自走できる距離

を延ばして電気自動車の機能に近付ける一つの工夫である。

これらのことから、本章ではまず電気自動車（EV）やハイブリッド自動車（HV 又は HEV）の普及がベアリング産業に与える影響について考察してみたい。

電気自動車の主動力源である走行用モーターをどのように配置するかについては、二通りの考え方があ

る。一つは、各車輪にモーターを配置するいわゆるインホイールモーターの考え方である。

駆動輪の各車輪の内部に一つずつモーターを配置するインホイールモーターでは、従来、エンジンから駆動輪まで動力を伝達する役割をしていた変速機（トランスミッション）、推進軸（プロペラシャフト）、終減速機（ファイナルドライブ）、駆動軸（ドライブシャフト）などが不要となる。その結果、蓄電池（バッテリー）・制御回路とモーターとの間は電気配線だけで結合されるため、自動車の車室スペースが最大限に活用できるモーター配置である。

インホイールモーターには、ダイレクトドライブ式とギヤリダクション式の2つの構造形式がある。

ダイレクトドライブ式は、減速歯車機構を介さずモーターが車輪を直接駆動する形式である。運転効率は高いが、モーター自体が低速回転で高トルクを発生するように、モーターの直径を可能な限り大きくできるアウトローター機構を採用するなどの工夫を必要とし、インホイールモーターの設計上の制約条件が多い。限られたホイール内のスペースにモーターを収めるために希土類磁石を使うなどで、後に述べるギヤリダクション式に比べてモーターのコストが高くなる問題がある。

他方、ギヤリダクション式は、減速歯車列を介してモーター出力を車輪に伝える構造であり、インホイールモーターの総合的な効率は落ちる。しかし、モーターが小型化でき、車両への搭載性やコスト面でダイレクトドライブ式より有利といわれている。

ベアリング産業の視点では、ダイレクトドライブ式では基本的にハブベアリング（ハブユニット）とモーター軸支持にのみベアリングが使用されると考えられる。これに対して、ギヤリダクション式では、減速歯車列にも多くのベアリングが使用されることになる。

インホイールモーターでは、限られたモーター装着スペースを有効に使うためと、ベアリングが大きな反力を受けないことから、薄肉のシール付き深溝玉軸受のような形式のベアリングが多く使用されるであ

う。また、ハブユニット部は現在の内燃機関自動車と同等か、モーター装着スペースを確保するためさらに直径の大きな仕様が求められると思われる。ギヤリダクション式を採用する場合には、減速歯車列に数多くのベアリングを使用することになるが、その場合でも現在の変速機（トランスミッション）で使用しているベアリングに比べると比較的小型となり、使用個数も減少するであろう。

しかしインホイールモーターは、各車輪にモーターを配置することから自動車のばね下重量が大きくなり、車両の挙動や操縦安定性の面で難点がある。また、インホイールモーターの耐久性、耐水性、及び耐候性を確保する必要があるため、それらの解決やコストを考えると量産自動車への採用は、当分の間は限定的なものになると予測される。

そのため、自動車のエンジンルーム内にあるエンジンを走行用モーターに置き換えて、そこから駆動輪に動力を伝えるという、もう一つの電気自動車のモーター配置の方式が当面の電気自動車（EV）の本命となると考えられる。実際に現在市販されている電気自動車（EV）である日産リーフでもこの方式が採用されている。

リーフには変速機（トランスミッション）が使用されておらず、モーターから車軸への減速比は 8.1938 で一定である。これはモーターの特性上、

- ①内燃機関と異なり低速から高いトルクを発生できること
- ②内燃機関よりも高速に回転できるため（リーフが使用しているモーターの最高回転数は 10000r/min）実用車速域を変速なしに固定減速比でカバーできること

の二つの理由による（図 5.2 参照）。

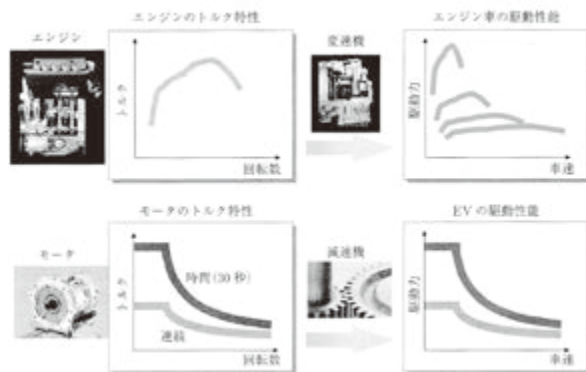


図 5.2 エンジン・モーターのトルク特性及びそれと組み合わせた変速機の駆動性能の比較<sup>1)</sup>

なお、バッテリー性能が向上し充電ステーション等のインフラが整備されるまでの期間に、現在の電気自動車（EV）用蓄電池（バッテリー）の性能、特に航続距離と、充電に要する時間を補う、小排気量の内燃機関（エンジン）を搭載して発電を行うシリーズ型のハイブリッド車の普及が見込まれる。この場合の内燃機関（エンジン）のことを「レンジエクステンダー」と呼ぶことがある。現在、日産自動車から販売されているノート e-POWER はこの形式である。なお、ノート e-POWER でもリーフ同様に変速機（トランスミッション）は使用されていない。

将来的には電気自動車（EV）の性能を高め、航続距離を伸ばして最高速度に余裕を持たせるために、変速機（トランスミッション）がモーターに装着される可能性がある。しかしその場合でも、変速機の数段数は2段程度であり、現在の変速機用ベアリングの使用個数は大きく減少すると見込まれる。

また四輪駆動自動車においては、現在すでにハイブリッド車の一部を中心に後車軸をフロントエンジン・モーターと機械的に結合せず、後車軸専用モーターで駆動する形式が採用されている自動車がある。いわゆる「生活四駆」の自動車での形式が普及すると、推進軸（プロペラシャフト）や終減速機（ファイナルドライブ）が不要となり、それらに使用されるベアリングの個数が減少する。

こうしたことから、今後、電気自動車（EV）が普及すると変速機（トランスミッション）、推進軸（プロペラシャフト）、終減速機（ファイナルドライブ）等が不要になるか、もしくは簡素化され、それらのアプリケーションに使用されているベアリングの需要が減少すると推測される。

そのため本稿でも一部述べてきたように、ベアリングメーカー各社はベアリングで培ったトライボロジー技術や精密加工技術等のコア技術を生かして、ベアリングにとどまらない様々な自動車に関連する製品の開発を行ってきた。

また車軸用ベアリングは、電気自動車においても不可欠である。車軸用ベアリングにおけるハブユニットのような周辺機構・構造を融合した自動車専用部品としてのベアリングの開発は、自動車産業、ベアリング産業の双方に信頼性向上、メンテナンスフリー、部品点数削減によるコストダウンをもたらすメリットがある。そのため、電気自動車においても、そのような周辺機構・構造を融合した製品の開発を進めることが重要と考えられる。

次の5.2でも述べるように、世界規模でみると電気

自動車（EV）の普及は2030年においても全世界の自動車販売の20%以下との予測もある。そのため、現在の内燃機関（エンジン）を用いた自動車に代わり電気自動車（EV）が主流となるまでには、かなりの期間を要するであろう。

自動車のみならず、輸送機械や一般機械、設備機械などに回転軸が存在する限りベアリングが必要とされるため、ベアリングメーカーは社会にベアリングを生産供給する義務がある。しかし一方で前述のように、ベアリング産業の発展は、自転車、馬車、自動車など、それぞれの時代の最先端の輸送機械に使用されるベアリングの大量需要に支えられてきた。自動車の動力が内燃機関（エンジン）から電動機（モーター）に変わり、たとえ自動車用ベアリングの需要構造が変化しても、ベアリング自体の付加価値を高めてベアリング産業を維持発展させていくことは、ベアリングメーカーの社会的責務であるといえる。

また本稿で調査したように、内燃機関を前提とした自動車に使用するベアリングは自動車自体の構造の変化と相まって過去100年以上にわたって改良を続けてきた経緯がある。このため、実用開発が始まったばかりの電気自動車（EV）においても、今後長年にわたって同様の創意工夫と改良が行われると考えられる。

例えば小型軽量化や長寿命化（高信頼性）は、いつの時代にも際限なく求め続けられるので、電気自動車（EV）の特性に合わせた体格、形式、その他の適切な仕様のベアリングが要求されるであろう。ベアリングメーカーはこれに応えるため、ベアリング材料、トライボロジー、精密加工、ユニット化などのコア技術を生かすことが必要となる。

## 5.2 新興国での自動車の普及とベアリング

第二次大戦後のモータリゼーションの発達は、日米欧の世界三極での自動車産業及びそれを支えるベアリングを含む自動車関連産業が牽引してきた。

しかし近年、中国における自動車の普及が目覚ましく、2017年の年間生産台数はすでに飽和しつつある北米市場を抜いて約2840万台、全世界の約30%の販売シェアを占め、2030年には約3500万台程度に増加するとの予測がある。同様にインドは2017年には約390万台の市場であるが、2030年には約1000万台規模まで増加するとの予測もある。

これは今後、新興国での所得が増加することで家用自動車の保有が進むことが主要因と考えられている

が、反面、5.1 で述べた電気自動車 (EV) やハイブリッド自動車 (HV) などが一般的になると車両価格の上昇が予想されるので、市場の伸びが抑制されるとの観測もある。また、自動車を共有するカーシェアリングの運用が進むと自動車の市場規模が減少する方向となる。

一方、日米欧の自動車市場は飽和しつつあり、2017年の約4640万台から大きな増加は期待できない。日本国内では現在の約500万台の市場規模が幾分減少する傾向であり、前述のカーシェアリングの普及等も考慮すると、今後の生産販売の増加はほとんど期待できない。

このように今後の自動車市場の中心が中国・インドなどの新興国に移っていく中で、自動車の構造とそれに伴うベアリングの需要はどのように変わっていくであろうか。

新興国での自動車の普及には、最先端の技術開発投資や生産設備投資が不要なすでに普遍的である技術の組み合わせによる安価な自動車の供給が求められるであろう。それは過去100年以上にわたって改良が加えられ成熟した内燃機関 (エンジン) 自動車の普及を意味する。新興国では電気自動車 (EV) のための充電ステーション等のインフラの整備が遅れるであろうことも、この観測を後押しする。

ただし中国では、政府が2019年から新エネルギー車 (NEV) の生産割当規制 (NEV 規制) を導入し、国の政策によって電気自動車 (EV)、プラグインハイブリッド自動車 (PHV) などの新エネルギー車の振

興を図っているため、その影響に注意することが必要である。

世界全体でみると、2040年の自動車の構成比率は、内燃機関 (エンジン) 自動車が約49%、ハイブリッド自動車 (HV) が約15%、プラグインハイブリッド自動車 (PHV) が約20%、電気自動車 (EV) が約15%、燃料電池自動車 (FCV) が約1%という予測がある (図5.3)。

この予測に基づくと現在の内燃機関 (エンジン) を動力として用いる自動車は、動力伝達装置の基本構成がほとんど変わらないパラレル式ハイブリッド自動車 (HV) を含めると、向こう20年間程度はまだ主流であり続けると考えられる。

ベアリング産業の視点では、5.1 で述べたように、パラレル式のハイブリッド自動車 (HV) 及びパラレル式のプラグインハイブリッド自動車 (PHV) におけるベアリングの用途、使用個数は従来の内燃機関自動車とさほど大きくは変わらない。

そのため、2040年のハイブリッド自動車 (HV) やプラグインハイブリッド自動車 (PHV) の半ば近くがパラレル式であると仮定すると、自動車需要の約70%程度については、長年ベアリングメーカーがノウハウを蓄積してきた自動車の各アプリケーション専用のベアリングの継続した製造販売が期待できる。

現状約9500万台である自動車の世界需要が、2040年には約1億3000万台程度に伸長するとの予測を基にその約70%の需要を考えると、自動車用ベアリン

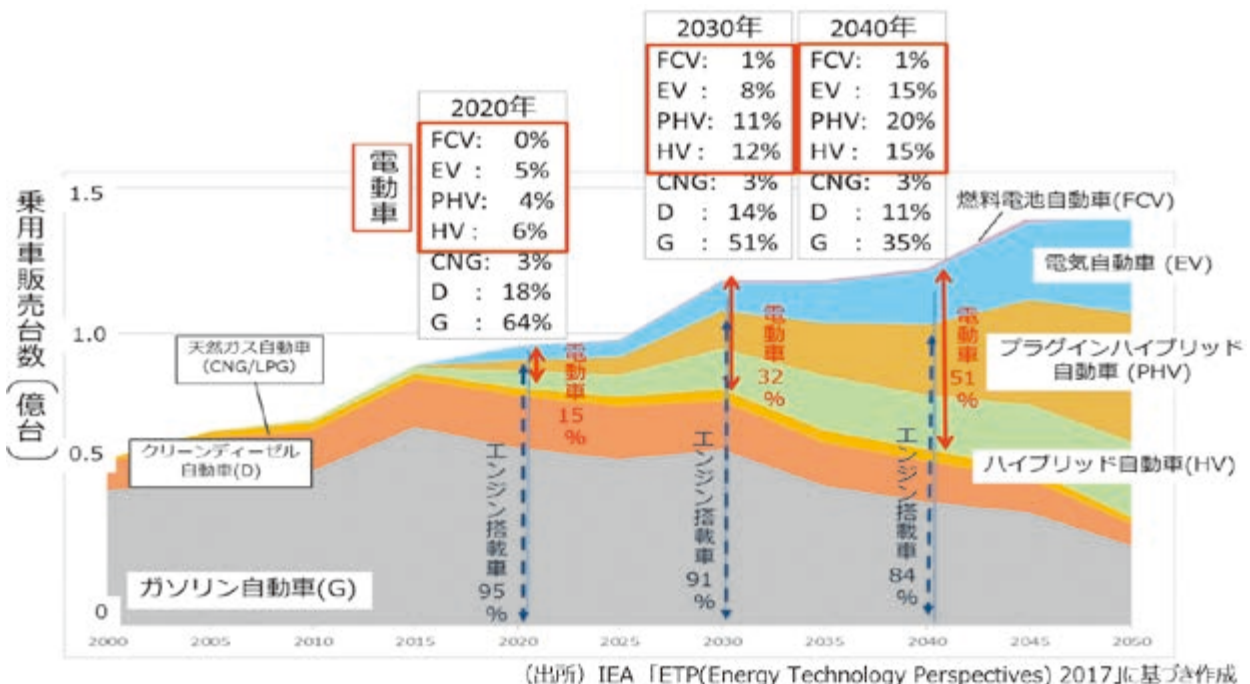


図 5.3 世界自動車需要と電気自動車・ハイブリッド自動車等の普及予測<sup>2)</sup>

グの全世界における総需要は横ばい、もしくは残り約30%のシリーズ式ハイブリッド自動車（HV）、シリーズ式プラグインハイブリッド自動車（PHV）、電気自動車（EV）に使用するベアリングが加わる分だけ増加するといえる。

また電気自動車（EV）やシリーズ式ハイブリッド自動車（HV）、シリーズ式プラグインハイブリッド自動車（PHV）についても、過去に内燃機関自動車の特性に合わせカスタマイズしたベアリングの開発・生産を行ってきたのと同様に、電気自動車やハイブリッド自動車にとって適切な仕様のベアリングの開発・生産が必要となると考えられる。

このように新興国での自動車の普及や電気自動車（EV）、シリーズ式ハイブリッド自動車（HV）の広がりは新たな自動車用ベアリングの需要増加の機会である。

ただし、自動車用ベアリングについても今後、新興国の地場ベアリングメーカーが力をつけ、高機能・高性能やアプリケーションごとのカスタマイズが求めら

れない普遍的な技術を用いた汎用ベアリングを中心に、その生産供給を行うようになると考えられる。そのため日本のベアリング産業は、自動車のニーズをいち早くくみ取り、特長である第3章 図3.8.16のような日本の国民性に根差したきめ細かな設計開発のサイクルを今後も回し続けることで、自動車メーカーや自動車ユーザーが求める性能・品質を具現化する日本独自の技術を用いた最先端のベアリングを開発し生産供給し続けることが求められる。

また、日本のベアリング産業が今まで欧米地域を中心に行ってきた自動車用ベアリングの現地生産（需要地生産）対応を、新興国地域においても拡大することが必要となると考えられる。

#### <参考・引用文献>

- 1) 自動車技術ハンドブック 設計（EV・ハイブリッド）編 自動車技術会（2016年）
- 2) 自動車新時代戦略会議（第1回）資料 経済産業省（2018年）

## 6 | あとがき

ベアリングはあらゆる機械に必ずといってよいほど使用されることから、“機械産業のコメ”と呼ばれるほど現代テクノロジーに無くてはならない機械要素部品である。そして第3章で述べたようにベアリング生産の量的規模が飛躍的に拡大し、産業としての基盤が築かれるにあたっては産業革命以降の移動手段としての自転車、馬車とそれに続く自動車の一般大衆への普及と大量生産が大きな役割を果たしてきた。

本稿では世の中のベアリングの全需要の半ば近くを占める自動車用ベアリングを対象として、ベアリングの技術開発がどのように自動車の性能及び信頼性の向上に寄与してきたかについて調査を行った。

第5章で述べたように現在の内燃機関自動車及びその派生であるパラレル式ハイブリッド自動車は向こう20年間程度まだ主流であり続け、その基本構造も変化が少ないと考えられるので、そこに使われる自動車用ベアリングも基本的には現在の仕様が維持されると考えられる。

電気自動車 (EV) やシリーズ式ハイブリッド自動車 (HV)、シリーズ式プラグインハイブリッド自動車 (PHV) に用いられるベアリングについては、ベアリング産業で過去に行ってきた、新しいベアリングを設計～試作し、使用条件をシミュレートした実験条件で試作ベアリングの評価を行うことで性能確認と改良を行い、その結果を量産技術に落とし込む手法を応用し、電気自動車やハイブリッド自動車用にカスタマイズしたベアリングの開発・生産行っていくことになるであろう。

そうした技術開発の継続のためには、本稿で調査したような過去に行った不断の努力のプロセスや内容を知り、将来の開発に生かすことが有益であると信じて本稿の結びとしたい。なお執筆にあたって、以下の企業・団体から、貴重な資料や写真などのご提供で協力いただいたことを記し、ここに深く感謝する。

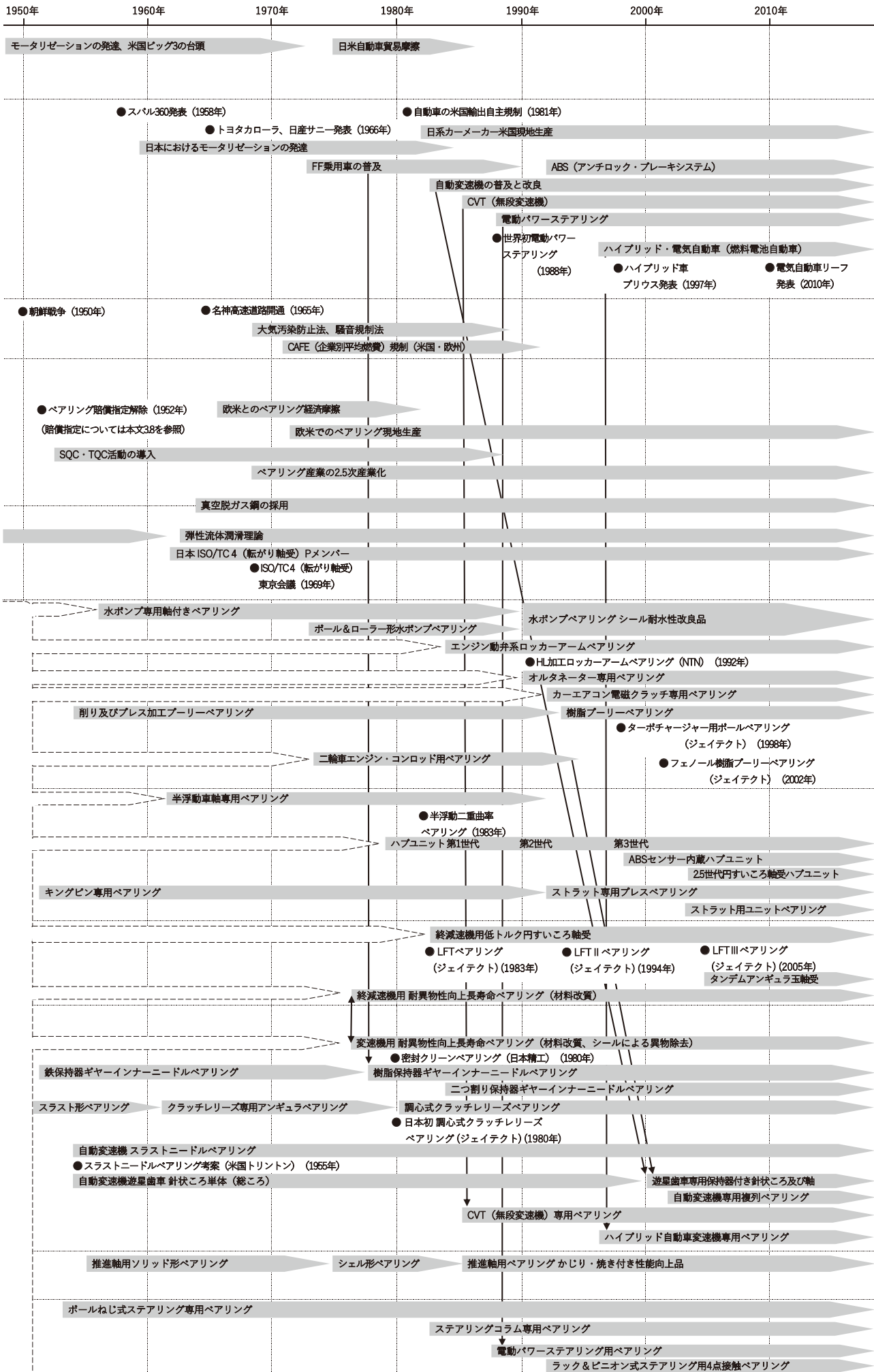
- ・経済産業省
- ・公益社団法人自動車技術会
- ・公益社団法人精密工学会
- ・一般社団法人日本ベアリング工業会
- ・日本精工株式会社
- ・NTN 株式会社
- ・株式会社不二越
- ・株式会社ジェイテクト

加えて、本系統化調査をまとめるにあたって有形無形のご協力をいただいた全ての方々に、この場を借りて深く感謝したい。

		1900年	1910年	1920年	1930年	1940年
自動車産業	世界	● フォール、電気自動車試作 (1880年) ● ダイムラー、世界初4サイクルガソリン車 (1886年)	● フォード社、自動車の大量生産開始 (1913年)	自動車大量生産		
	日本	● 日本に自動車が進来 (1898年) ● 山羽式蒸気自動車 (1904年) ● 国産初ガソリン自動車タクリー号 (1907年)	● 快進社設立 (1911年)	● オートモ号発売 (1924年)	● フォード・GM日本進出 (1924~25年)	
自動車を取り巻く環境			第1次世界大戦	世界恐慌	第2次世界大戦	
ベアリング産業	世界	● ティムケン社設立 (1898年)	● SKF社設立 (1907年)	ベアリング国産化		
	日本		● 日本精工設立 (1914年)	● 光洋精工 (現ジェイテクト) 設立 (1921年)	● 巴商会・西園鉄工所 (現NTN) ベアリング製造開始 (1923年)	● 不二越ベアリング製造開始 (1939年)
ベアリング技術		● ヘルツ、ベアリング接触理論 (1881年)		● ルンドベルグ・バルグムレン、ベアリング寿命理論 (1923年)	ベアリング寸法系列、寸法公差の標準化 (欧州メーカー、ISA/ISO)	
自動車用ベアリング	エンジン系	<div data-bbox="916 1182 1355 1361" style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>一般、汎用ベアリング またはすべり軸受の時代</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>日本では第一次世界大戦後にベアリング（転がり軸受）の国産化の気運が高まり、相次いでベアリング製造会社が設立されたが、軍需用ベアリングが主体であり、自動車用を含む民生用のベアリングは海外からの輸入に頼っていた。また自動車には主に一般的な形式の汎用ベアリングが使用され、ベアリングが高価であったことから用途も特別に耐久性が必要とされる個所に限られていて、簡易な構造のすべり軸受も多く使用されていた。</li> <li>第二次世界大戦後のモータリゼーションの発展によりベアリングが多用されるようになり、それに伴う自動車の性能向上及びFF乗用車や自動変速機の普及、ハイブリッド・電気自動車の登場などによって自動車のエンジン系、車軸・サスペンション、動力伝達系、操舵系などの各アプリケーションに特化した専用ベアリングが生み出され、ベアリングメーカーによってアプリケーション固有の使用条件やニーズに適合した研究開発が行われて、今日のユニット商品を含めた各種の自動車用ベアリングに進化していった。</li> </ul>				
	車軸サスペンション					
	終減速機					
	変速機					
	推進軸					
	操舵系					



# 製品と技術の系統図



自動車用ベアリング技術の系統化調査 産業技術史資料 所在確認

番号	名称	製作年	製造社	所在地	選定理由
1	転がり軸受第1号設計図	1916年	日本精工	日本精工本社 東京都品川区大崎1-6-3 (日精ビル)	日本に現存している最も古いベアリング設計図面。横須賀海軍工廠造機部から受注した非分離型ラジオラスト玉軸受の図面。 本ベアリングの製造経験はその後、民間の紡績機械などへ展開され、戦後の自動車用ベアリングなどを設計・製造する技術へと発展した。
2	トランスミッション用密封クリーニング玉軸受	1980年	日本精工	神奈川県藤沢市 鶴沼神明1-5-50	トランスミッションに使用するベアリングの破損が硬質異物の噛み込みによる転動面の圧痕を起点として生じることに着目し、ベアリング内部への異物の侵入を防ぐため、本来グリース潤滑で用いるシール付軸受をトランスミッションの油中で使用し異物をろ過する発想で開発された、世界で初めてのベアリング。
3	調心式クラッチレリーズベアリング	1980年	光洋精工 (現ジェイテクト)	大阪府柏原市 国分東条町24-1	自動車のエンジンとトランスミッションとの芯ずれにより発生するクラッチ機構のダイヤフラムばね及びレリーズベアリングの摩擦による車検ごとの交換をなくすため、日本独自のアイデアに基づいた偏心を吸収する調心機能を備えた日本初の調心式クラッチレリーズベアリング。
4	HL加工ロッカーアーム用ベアリング	1992年	エス・デー・エス 東洋ベアリング (現NTN)	静岡県磐田市 東貝塚1578	転がり接触面の加工仕上げの方向と潤滑流体の流れの方向との関係に着目し、軸方向加工仕上げ面の方が高い油膜形成能力を有することを確認して、この結果をベアリングの量産加工技術に応用し、転動面の表面に大きき数10 $\mu$ m程度の凹部(マイクロロオイルポット)を無数にランダムにつけたHL (High Lubrication) 加工を外輪外径面に施し、カムやベアリング外径面の摩擦や損傷の防止に大きな効果を発揮するロッカーアーム用ベアリング。
5	ダ・ヴィンチベアリング再現品	1993年	光洋精工 (現ジェイテクト)	大阪府柏原市 国分東条町24-1	ダ・ヴィンチのマドリード手稿の中に、今日のベアリングの原理となるスケッチが残されているが、それを基にした製作例がなかったため、ベアリングの権威である千葉大学岡本純三教授(当時)の指導の下に光洋精工(現ジェイテクト)の技術者が再現品の製作に取り組み、ダ・ヴィンチのアイデアが実現可能であり、いかに先進性に富んだものであったかを世界で初めて実証した。
6	ターボチャージャー用セラミックベアリング	1998年	光洋精工 (現ジェイテクト)	大阪府柏原市 国分東条町24-1	加速時のターボチャージャー軸の摩擦抵抗によるターボラグの発生、及び燃費改善のため、ターボチャージャーの高温・高速に耐えるセラミック球を用いて開発を行った、世界で初めて実用化された自動車用セラミック製ベアリング。
7	超低トルク円すいこ軸受LFT-III	2004年	光洋精工 (現ジェイテクト)	大阪府柏原市 国分東条町24-1	特殊熱処理による小型化、内部諸元の最適化、潤滑油の攪拌抵抗に着目した低トルク設計により、標準ベアリングに比べ80%のトルク低減と40%の軽量化を可能にした超低トルク円すいこ軸受。自動車の終減速機に使用した場合、自動車全体で約2%の燃費改善が期待できることから、優秀省エネルギー機器表彰の経済産業大臣賞を受賞した。

「自動車用ベアリング技術の系統化調査」 正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 共同研究編 第13集 2020年3月 (誤)	全文PDF版 2020年7月 (正)
45	左	下から7	また、カムシャフト自身も材質も	また、カムシャフト自身の材質も
49		下から5	軸・ハウジングの圧入し組み立てた	軸・ハウジングを圧入し組み立てた
50	左	4	駆動軸（プロペラシャフト）	推進軸（プロペラシャフト）
51	右	3	ドライブシャフト	駆動軸（ドライブシャフト）
72	右	1	当時は、運転操作（ギヤチェンジ）を	当時は、変速操作（ギヤチェンジ）を
101	左	16	第一に、新興国での自動車の普及には	新興国での自動車の普及には